JAEA-Research
2013-037

JAEA-Research

概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化（その2）

—NUMO-JAEA 共同研究報告書（2012 年度）—

（共同研究）

Enhancement of the Methodology of Repository Design and Post-closure Performance Assessment for Preliminary Investigation Stage (2)
-Progress Report on NUMO-JAEA Collaborative Research in FY2012-
(Joint Research)

柴田 雅博　澤田 淳　舘 幸男　早野 明　牧野 仁史
若杉 圭一郎　三ツ井 誠一郎　小田 治恵　北村 暁　大澤 英昭
仙波 毅　日置 一雅　亀井 玄人　黒澤 進　後藤 淳一
澁谷 早苗　後藤 考裕　江橋 健　窪田 茂　稲垣 学
守屋 俊文　鈴木 覚　大井 貴夫　石田 圭輔　西尾 光
市原 貴之　石黒 勝彦　出口 朗　藤原 啓司

Masahiro SHIBATA, Atsushi SAWADA, Yukio TACHI, Akira HAYANO
Hitoshi MAKINO, Keiichiro WAKASUGI, Seiichiro MITSUI, Chie ODA
Akira KITAMURA, Hideaki OSAWA, Takeshi SENBA, Kazumasa HIOKI
Gento KAMEI, Susumu KUROSAWA, Junichi GOTO, Sanae SHIBUTANI
Takahiro GOTO, Takeshi EBASHI, Shigeru KUBOTA, Manabu INAGAKI
Toshifumi MORIYA, Satoru SUZUKI, Takao OHI, Keisuke ISHIDA
Hikaru NISHIO, Takayuki ICHIHARA, Katsuhiko ISHIGURO, Akira DEGUCHI
and Hiroshi FUJIHARA

地層処分研究開発部門
Geological Isolation Research and Development Directorate

December 2013
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency / Nuclear Waste Management Organization of Japan, 2013

概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化（その２）
―NUMO-JAEA 共同研究報告書（2012 年度）―
（共同研究）

日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門

柴田 雅博，澤田 淳，舘 幸男，早野 明，牧野 仁史，若杉 圭一郎，三ツ井 誠一郎，小田 治恵，
北村 暁，大澤 英昭，仙波 毅，日置 一雅[+]，亀井 玄人，黒澤 進[*1]，後藤 淳一[*1]，澁谷 早苗[*1]，
後藤 考裕[*1]，江橋 健[*2]，窪田 茂[*1]，稲垣 学[*1]，守屋 俊文[*1]，鈴木 覚[*1]，大井 貴夫[*2]，
石田 圭輔[*1]，西尾 光[*1]，市原 貴之[*3]，石黒 勝彦[*1]，出口 朗[*1]，藤原 啓司[*1]

（2013 年 10 月 9 日 受理）

JAEA および NUMO は，概要調査段階における処分場の設計・性能評価に関連する主要な技術テーマを対象に 2011 年度から共同研究を進めている。本共同研究は，JAEA がこれまで蓄積してきた技術やノウハウを，NUMO が今後行う精密調査地区の選定等の処分事業に適用できるよう，実施主体の視点に沿って実用化を図っていくための具体的な考え方と進め方を策定するとともに，必要な開発課題と今後の計画を明らかにすることを目的としている。

対象とした技術テーマは，(1)水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討，(2)シナリオ構築手法に関する検討，(3)核種移行パラメータの設定方法に関する検討 であり，それぞれの方法論について検討を進めた。(1)については，母岩の選定に関する考え方や手順を構築することを目的に，処分事業が先行しているスウェーデン（SKB）と国内の既往研究を例に，母岩としての適性を評価するための項目と評価方法を調査した。その調査の結果を踏まえ，母岩特性のうち主に水理特性（地下水移行時間）に着目し，結晶質岩および堆積岩に対して，概要調査で得られる情報量の違いを考慮に入れた，様々なモデル構築方法，解析方法を整理し，母岩の適性評価のための手法の整備を進めた。(2)については，シナリオ構築に関する基本的な考え方や手順を整備することを目的に，状態設定の手順を実務的観点から具体化するとともに，緩衝材を対象として状態設定を試行した。また，シナリオ構築や解析ケースの設定への反映を前提として，安全機能に影響を及ぼすプロセスについての知見の整理と解析による影響の程度の把握について検討を進めた。(3)については，概要調査段階での予備的安全評価における核種移行パラメータ設定の基本的な考え方や手順の整備を目的に，母岩の分配係数および溶解度を対象に，国内外の事例調査をもとに設定手法を整理・改良するとともに，主要核種への適用を通じ妥当性や課題を確認した。

本研究は，日本原子力研究開発機構と原子力発電環境整備機構の協力協定に基づいて実施した共同研究の成果である。本報告書は，原子力発電環境整備機構 技術報告書 NUMO-TR-13-06 の内容と同じものである。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松 4-33

+ 現 国際部

*1 原子力発電環境整備機構 技術部

*2 原子力発電環境整備機構 技術部（現　日本原子力研究開発機構　地層処分研究開発部門）

*3 原子力発電環境整備機構 技術部（現　関西電力株式会社）

Enhancement of the Methodology of Repository Design and Post-closure Performance Assessment for Preliminary Investigation Stage (2) - Progress Report on NUMO-JAEA Collaborative Research in FY2012-

(Joint Research)

Masahiro SHIBATA, Atsushi SAWADA, Yukio TACHI, Akira HAYANO, Hitoshi MAKINO, Keiichiro WAKASUGI, Seiichiro MITSUI, Chie ODA, Akira KITAMURA, Hideaki OSAWA, Takeshi SENBA, Kazumasa HIOKI[+], Gento KAMEI, Susumu KUROSAWA[*1], Junichi GOTO[*1], Sanae SHIBUTANI[*1], Takahiro GOTO[*1], Takeshi EBASHI[*2], Shigeru KUBOTA[*1], Manabu INAGAKI[*1], Toshifumi MORIYA[*1], Satoru SUZUKI[*1], Takao OHI[*2] Keisuke ISHIDA[*1], Hikaru NISHIO[*1], Takayuki ICHIHARA[*3], Katsuhiko ISHIGURO[*1], Akira DEGUCHI[*1] and Hiroshi FUJIHARA[*1]

Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 9, 2013)

JAEA and NUMO have conducted a joint research since FY2011, which is designed to enhance the methodology of repository design and performance assessment in preliminary investigation stage. This joint research intend to develop detailed concept and procedure, based on the accumulated knowledge and technology in JAEA, for practical application in the NUMO's implementation, as well as identifying challenges for further development. The topics of such joint research are (1) study on methodology to evaluate the suitability of host rock in terms of hydrology, (2) study on scenario development methodology, and (3) study on setting radionuclide migration parameters.

Regarding the topic (1), for the purpose of establishing the procedure to select suitable host rock, literature survey of safety assessment in Sweden (SKB) and domestic research were conducted. Then the travel time of groundwater was mainly focused as an index, various model development methods, analytical methods were examined based on the flow chart which compiles the index evaluation methods for both crystalline and sedimentary rocks considering the variation of availability of information at the preliminary investigation stage. Regarding the topic (2), for the purpose of developing the procedure of scenario development, the arrangement of work procedure for describing system evolution (definition of condition) was refined from practical view points, and the procedure was illustrated by an example for buffer material. In addition, to provide basic information for scenario development, knowledge arrangement and analytical investigations for some important processes, which may affect the safety functions, were conducted. Regarding the topic (3), for the purpose of developing the procedure for

---

This work has been performed based on the cooperation agreement. This report is equivalent to NUMO Technical report, NUMO-TR-13-06.

+ Present position : International Affairs Department
*1 Science and Technology Department, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)
*2 Science and Technology Department, NUMO (Present position: Geological Isolation Research and Development Directorate, JAEA)
*3 Science and Technology Department, NUMO (Present position: The Kansai Electric Power Co., Inc.)

parameter setting for radionuclide migration, the approaches for the parameter setting have been improved for sorption on rocks and solubility in bentonite porewater, and applied and tested through parameter setting exercises for key radionuclides.

Keywords:
High-level Radioactive Waste, Geological Disposal, Preliminary Investigation, Repository Design, Post-closure Performance Assessment

目　　次

1. はじめに 1
参考文献（1 章） 2
2. 概要調査段階と共同研究テーマとの関係 3
2.1 わが国の地層処分事業の特徴 3
2.2 概要調査段階の特徴 3
2.3 概要調査段階の設計・性能評価における主要な実施事項 7
2.3.1 候補母岩の選定 7
2.3.2 処分場の概念設計 7
2.3.3 予備的な安全評価 7
2.4 本共同研究で取扱う技術テーマと進め方 8
2.4.1 水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討 8
2.4.2 シナリオ構築手法に関する検討 9
2.4.3 核種移行パラメータの設定方法に関する検討 9
2.5 2011 年度の成果概略と 2012 年度の実施内容 10
参考文献（2 章） 12
3. 水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討 13
3.1 はじめに 13
3.2 評価ツリーの整備・拡充 14
3.2.1 SR-Site における水理地質構造モデル構築手法の整理 14
3.2.2 SR-Site の水理地質構造モデル構築手法の試行とその不確実性の検討 45
3.2.3 結晶質岩を対象とした評価ツリーの拡充 97
3.2.4 堆積岩を対象とした評価ツリーの整備 132
3.3 評価ツリーの適用方法に関する検討 167
3.3.1 第２次取りまとめの設定を用いた検討 167
3.3.2 SR-Site の情報を用いた検討 177
3.4 まとめと今後の課題 195
3.4.1 まとめ 195
3.4.2 課題と今後の計画 196
参考文献（3 章） 197
4. シナリオ構築手法に関する検討 200
4.1 はじめに 200
4.2 シナリオ構築の方法論の検討 200
4.3 状態設定の試行 206
4.4 知見の体系化と方法論 235
4.5 シナリオ構築の背景となる知見の整理 237
4.5.1 鉄－ベントナイト相互作用 237
4.5.2 緩衝材の流失 242
4.5.3 セメント－ベントナイト相互作用とアルカリプルームのオーバーパックへの影響 252
4.5.4 溶存ケイ酸濃度変化の影響等を考慮したガラス溶解挙動 269

4.6 まとめと今後の課題 310
4.6.1 まとめ 310
4.6.2 今後の課題 310
参考文献（4 章） 312
5. 核種移行パラメータ設定に関する検討 318
5.1 検討の目的とアプローチ 318
5.1.1 背景と目的 318
5.1.2 本研究の進め方と 2012 年度の実施内容 318
5.2 岩石の分配係数の設定手法に関する調査検討 320
5.2.1 岩石に対する分配係数設定手法に関する調査 320
5.2.2 岩石に対する分配係数設定フローの検討 323
5.2.3 堆積岩を対象とした分配係数設定の試行事例 331
5.2.4 花崗岩を対象とした分配係数設定の試行 342
5.3 溶解度の設定手法に関する調査検討 349
5.3.1 溶解度設定手法に関する調査 349
5.3.2 溶解度の設定作業フローの検討 353
5.3.3 溶解度設定作業フローに基づいた溶解度制限固相設定の試行 357
5.4 パラメータ設定の作業経緯と判断根拠の整理 361
5.4.1 調査検討の目的とアプローチ 361
5.4.2 収着データベースによるデータ抽出・分析・評価の概要 361
5.4.3 分配係数の設定プロセス 365
5.5 まとめと今後の課題 366
5.5.1 岩石の分配係数の設定手法に関する調査検討 366
5.5.2 溶解度の設定手法に関する調査検討 367
5.5.3 パラメータ設定の作業経緯と判断根拠の整理 368
参考文献（5 章） 369
6. おわりに 375
6.1 2012 年度の成果 375
6.2 今後の課題 375

付録 A　ボーリング孔沿いの割れ目特性データ 377
付録 B　各ボーリング孔で実測された水理試験（PSS，PFL）データ 411
付録 C　SR-Site の情報に基づく三次元モデルを用いた解析結果 421

CONTENTS

1. Introduction 1
References（Chapter 1） 2
2. Relation between the preliminary investigation stage and the subjects of this joint research 3
2.1 Features of the implementation of final disposal in Japan 3
2.2 Features of the preliminary investigation stage 3
2.3 Major activities for repository design and performance assessment at the preliminary investigation stage 7
2.3.1 Selection of hostrock 7
2.3.2 Conceptual design of the repository 7
2.3.3 Preliminary safety assessment 7
2.4 Subjects of this joint research and approch 8
2.4.1 Host rock suitability evaluation methodology development in terms of hydrogeological model 8
2.4.2 Scenario development methodology 9
2.4.3 Procedure for radionuclide migration parameters setting. 9
2.5 Summary of FY2011and overview of FY2012 10
References（Chapter 2） 12
3. Host rock suitability evaluation methodology development in terms of hydrogeological model 13
3.1 Introduction 13
3.2 Development of a tree diagram 14
3.2.1 SR-Site hydrogeological modeling methodologies 14
3.2.2 Uncertainty evaluation of SR-Site hydrogeological modeling by try run examinations 45
3.2.3 Tree diagram for crystalline rock 97
3.2.4 Tree diagram for sedimentary rock 132
3.3 Application examples of the tree diagram 167
3.3.1 Study based on H12 reference case model 167
3.3.2 Study based on SR-Site hydrogeological model 177
3.4 Conclusion 195
3.4.1 Summary 195
3.4.2 Remaining issues and future plan 196
References（Chapter 3） 197
4. Scenario development methodology 200
4.1 Introduction 200
4.2 Approach for scenario development 200
4.3 Try run of procedure for describing conditions 206
4.4 Examination of framework for knowledge management 235
4.5 Phenomenological understanding in the Near-Field 237
4.5.1 Iron-bentonite interaction 237
4.5.2 Errosion of bentonite 242

4.5.3 Cement bentonite interaction 252
4.5.4 Glass dissolution considering evolution of Si concentrations 269
4.6 Conclusion 310
4.6.1 Summary 310
4.6.2 Remaining issues and future plan 310
References（Chapter 4） 312
5. Procedure for radionuclide migration parameters setting 318
5.1 Introduction 318
5.1.1 Background and objectives 318
5.1.2 Approach and overview of FY2012 318
5.2 Distribution coefficienct for rock 320
5.2.1 Review of the procedures 320
5.2.2 Development of flow chart 323
5.2.3 Try run of distribution coefficienct setting for sedimentary rock 331
5.2.4 Try run of distribution coefficienct setting for granitic rock 342
5.3 Procedure for solubility limit setting 349
5.3.1 Review of the procedures 349
5.3.2 Development of flow chart 353
5.3.3 Selection of solubility limitting solid phase 357
5.4 Infomation arrangement for keeping traceablity and reasoning 361
5.4.1 Objectives and approach 361
5.4.2 Overview of data extraction, analysis and evaluation based on sorption database 361
5.4.3 Processes of distribution coefficienct setting 365
5.5 Conclusion 366
5.5.1 Distribution coefficienct for rock 366
5.5.2 Solubility 367
5.5.3 Infomarion arrangement for keeping traceablity and reasoning 368
References（Chapter 5） 369
6. Conclusion 375
6.1 Summary 375
6.2 Remaining issues and future plan 375

Appendix A Fracture data along the boreholes 377
Appendix B Hydraulic test (PSS, PFL) data conducted at the boreholes 411
Appendix C Numerical simulation results by three dimensional model based on SR-Site data 421

表 リ ス ト

表 2.2-1　精密調査地区選定段階における目標や要件 4
表 3.2.1-1　FFM01 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧：TCM 33
表 3.2.1-2　FFM01 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧：TCMF 33
表 3.2.1-3　FFM01 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧：OSM+TFM 33
表 3.2.1-4　FFM01 と FFM06 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧：r_0 固定モデル 33
表 3.2.1-5　GeoDFN ver1.2 に用いられた割れ目セットの割れ目方位の範囲 36
表 3.2.1-6　破砕帯と FFM01 内の割れ目密度（$P_{10,all,corr}$）密度の関係から求めたべき乗数 k_r の値 39
表 3.2.1-7　FFM01 を対象に推定した HydroDFN モデルのパラメータ値 40
表 3.2.1-8　調査フェーズ 2.2 のデータにより更新された FFM01 と FFM02 を対象とした HydroDFM モデルのパラメータ値 41
表 3.2.2-1　ボーリング孔別の PSS 試験および PFL-f 試験のデータのリスト 50
表 3.2.2-2　各ボーリング孔における岩盤領域（FFM02，FFM01m）および破砕帯の分布深度 51
表 3.2.2-3　FFM02 の開口割れ目の本数および一次元割れ目密度(P_{10})の実測値（ボーリング 4 孔合計） 51
表 3.2.2-4　FFM01m の開口割れ目の本数および一次元割れ目密度(P_{10})の実測値（ボーリング 4 孔合計） 52
表 3.2.2-5　FFM02 を対象に作成したデータセットの割れ目卓越方位セット 61
表 3.2.2-6　FFM01m を対象に作成したデータセットの割れ目卓越方位セット 61
表 3.2.2-7　水理地質構造モデルのうち地質構造モデルのパラメータ値のまとめ 62
表 3.2.2-8　SR-Site の透水量係数分布（準相関，無相関のケース）を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較 65
表 3.2.2-9　ケース A の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較 68
表 3.2.2-10　ケース A 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較 69
表 3.2.2-11　ケース B②で設定した透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量の総和（青）と実測値（赤）の比較（FFM02） 73
表 3.2.2-12　ケース B②で設定した透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量の総和（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m） 73
表 3.2.2-13　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる PFL 検出割れ目本数の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM02） 79
表 3.2.2-14　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる PFL 検出割れ目本数の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m） 79

表 3.2.2-15　ケース C の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験のシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較 89
表 3.2.2-16　本検討で例示した透水量係数分布の推定手法のまとめ 94
表 3.2.2-17　本検討で例示した透水量係数分布の推定手法のまとめ（FFM02 領域） 95
表 3.2.2-18　本検討で例示した透水量係数分布の推定手法のまとめ（FFM01m 領域） 96
表 3.2.3-1　ConnectFlow による「閉鎖後初期（間氷期）」の地下水流動解析の諸条件 114
表 3.2.3-2　地下水流動解析で適用されたモデル化方法と解析条件 その１ 115
表 3.2.3-3　地下水流動解析で適用されたモデル化方法と解析条件 その２ 115
表 3.2.3-4　粒子追跡法による解析の条件 116
表 3.2.3-5　解析で適用されたグラウチィング効果のレベル 129
表 3.3.1-1　亀裂ネットワークモデル構築に用いたパラメータ値 172
表 3.3.1-2　測線に交差している透水性割れ目の分類 175
表 3.3.2-1　SR-Site における無相関ケースと代替ケース C の透水量係数分布 179
表 3.3.2-2　FFM02 領域に用いられた HydroDFN モデルのパラメータ値 181
表 3.3.2-3　FFM01m 領域に用いられた HydroDFN モデルのパラメータ値 181
表 4.3-1　安全機能と多重バリアシステム構成要素との関係 208
表 4.3-2　緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保） 209
表 4.3-3　緩衝材の技術要件（長期健全性の維持） 209
表 4.3-4　緩衝材の安全機能を支えるバリア性能 210
表 4.3-5　SR-Site における緩衝材の安全機能リスト 211
表 4.3-6　既存の FEP リストの相互比較と本研究で利用する FEP リスト 215
表 4.3-7　“安全機能を支えるバリア性能”を支配する特性と安全機能を担保するための基準の検討例 224
表 4.3-8　特性を変化させる影響要因の発生可能性に関する指標と基準の検討例 225
表 4.5.1-1　既往文献における試験条件および同定された反応生成物の例 241
表 4.5.2-1　流出試験結果から得られた流出条件 249
表 4.5.3-1　緩衝材仕様 254
表 4.5.3-2　ベントナイトの鉱物組成 254
表 4.5.3-3　セメントの鉱物組成と間隙率 255
表 4.5.3-4　コンクリートおよびベントナイト中の物質移動特性の変質程度依存性（25℃） 257
表 4.5.3-5　解析ケース一覧 258
表 4.5.4-1　レファレンスケースにおける設定 273
表 4.5.4-2　ガラス固化体の幾何学的表面積に対する比に関する解析ケース 274
表 4.5.4-3　スメクタイト析出速度に関する解析ケース 275
表 4.5.4-4　Mg ケイ酸塩鉱物析出速度に関する解析ケース 275
表 4.5.4-5　オーバーパックの腐食速度に関する解析ケース 275
表 4.5.4-6　Fe ケイ酸塩鉱物として消費される Fe の割合に関する解析ケース 275
表 4.5.4-7　Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比に関する解析ケース 275
表 4.5.4-8　腐食生成物への Si の分配係数に関する解析ケース 275
表 4.5.4-9　オーバーパック開口断面積に関する解析ケース 276

表 4.5.4-10　緩衝材中の Si の実効拡散係数に関する解析ケース 276
表 4.5.4-11　掘削影響領域通過流量に関する解析ケース 276
表 4.5.4-12　オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しないための入力条件（開口部内の移行を無視） 277
表 4.5.4-13　オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケース 277
表 4.5.4-14　オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しないための入力条件（開口部内の移行を考慮） 278
表 4.5.4-15　オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケース 278
表 4.5.4-16　各解析結果のまとめ 281
表 5.2.3-1　堆積岩系での分配係数の設定試行の想定条件 332
表 5.2.4-1　Th(IV)，Np(IV)，Pu(IV)，U(IV)データの抽出条件 345
表 5.2.4-2　An(IV)の花崗岩に対する分配係数（降水系）設定の試行結果 346
表 5.2.4-3　U(VI)の花崗岩に対する分配係数（降水系）設定の試行結果 348
表 5.3.3-1　第 2 次取りまとめにおける対象間隙水組成 358
表 5.3.3-2　Np の溶解度制限固相候補に対する溶解度計算値（FRHP 間隙水） 359
表 5.3.3-3　Np の溶解度制限固相候補に対する溶解度計算値（SRHP 間隙水） 359
表 5.3.3-4　Np の溶解度制限固相候補に対する溶解度計算値（FOHP 間隙水） 360
表 5.4.2-1　収着データベースの信頼度情報テーブル 363
表 5.4.3-1　実測データに基づく分配係数設定作業に対応した SDB 情報と補完情報 365

図　リ　ス　ト

図 2.2-1　三つの専門分野間の連携 4
図 2.2-2　サイト選定プロセスにおける精密調査地区選定の位置づけ 5
図 2.2-3　精密調査地区選定段階における実施事項フロー図 6
図 3.2.1-1　2011 年度に取りまとめた Forsmark サイトにおける地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの構築の流れ 15
図 3.2.1-2　割れ目特性に関連するデータの解釈フロー 18
図 3.2.1-3　Forsmark サイトにおける割れ目の露頭観察データの例 19
図 3.2.1-4　Forsmark サイト周辺のボーリング調査サイト 20
図 3.2.1-5　ボーリング地質柱状図の例 21
図 3.2.1-6　ボーリングで確認された割れ目分布図 22
図 3.2.1-7　Forsmark サイトで使用された PFL 装置の概念図 24
図 3.2.1-8　PSS 試験の概念図 26
図 3.2.1-9　PSS 試験(5m 区間，20 区間）から得られた透水量係数と PFL-f 試験から得られた透水量係数の比較 27
図 3.2.1-10　PSS 試験から求めた比湧水量と PFL-f 試験から求めた比湧水量の比較 27
図 3.2.1-11　割れ目セット分析の例 29

図 3.2.1-12　割れ目の大きさ分布モデルの概念図（左：TCM，右：OSM+TFM 31
図 3.2.1-13　Forsmark サイトの地質環境モデルで検討された水理地質構造の概念図 34
図 3.2.1-14　ボーリング孔と交差する割れ目の概念的な分類図 36
図 3.2.1-15　割れ目トレース長の異なるスケール間の相関の概念図 37
図 3.2.1-16　ボーリング孔における割れ目の連結性と地下水流動の概念図 38
図 3.2.1-17　FFM01 領域を対象に構築した HydroDFN モデルを対象とした PFL-f 試験の比湧水量（Q/s）分布の解析値（赤）と実測値（緑）の比較結果の例（準相関モデル） 42
図 3.2.1-18　FFM01 領域を対象に構築した HydroDFN モデルを対象とした PFL-f 試験の比湧水量（Q/s）分布の解析値（赤）と実測値（緑）の比較結果の例（相関モデル） 43
図 3.2.1-19　FFM01 領域を対象に構築した HydroDFN モデルを対象とした PFL-f 試験の比湧水量（Q/s）分布の解析値（赤）と実測値（緑）の比較結果の例（非相関モデル） 44
図 3.2.2-1　Forsmark サイトで設定された処分場の候補領域（図中の緑の線） 46
図 3.2.2-2　処分場の候補領域に分布する岩盤領域の設定 47
図 3.2.2-3　Forsmark サイトにおけるボーリング調査サイト（再掲） 49
図 3.2.2-4　ボーリング孔の孔跡と岩盤領域，破砕帯との位置関係 50
図 3.2.2-5　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM01A 孔）の分布 52
図 3.2.2-6　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM01D 孔）の分布 53
図 3.2.2-7　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM06A 孔）の分布 53
図 3.2.2-8　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM08A 孔）の分布 54
図 3.2.2-9　KFM01A 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ 55
図 3.2.2-10　KFM01D 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ 56
図 3.2.2-11　KFM06A 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ 57
図 3.2.2-12　KFM08A 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ 58
図 3.2.2-13　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した FFM02 領域の割れ目の方位分布（左）とコンター図（右） 59
図 3.2.2-14　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した FFM01m 領域の割れ目の方位分布（左）とコンター図（右） 60
図 3.2.2-15　PFL-f 試験を模擬したシミュレーションの解析領域 64
図 3.2.2-16　SR-Site の透水量係数分布（準相関，無相関のケース）を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較 64
図 3.2.2-17　ケース A で推定した割れ目の透水量係数分布 66

図 3.2.2-18　ケース A の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較 68
図 3.2.2-19　ケース A 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較 69
図 3.2.2-20　ケース B②で推定した透水量係数分布 71
図 3.2.2-21　ケース B③補正後の透水量係数分布 74
図 3.2.2-22　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM02）その（１） 75
図 3.2.2-23　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM02）その（２） 76
図 3.2.2-24　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m）その（１） 77
図 3.2.2-25　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m）その（２） 78
図 3.2.2-26　PSS 試験で取得された試験区間（5m，20m，100m）ごとの透水量係数分布 81
図 3.2.2-27　PSS 試験で取得された試験区間（5m，20m，100m）ごとの透水量係数分布のヒストグラム 82
図 3.2.2-28　シミュレーションに基づく透水量係数分布と実測値の比較（FFM02 領域） 84
図 3.2.2-29　シミュレーションに基づく透水量係数分布と実測値の比較（FFM01m 領域） 85
図 3.2.2-30　再シミュレーション結果と計測データの比較（FFM02 領域） 87
図 3.2.2-31　再シミュレーション結果と計測データの比較（FFM01m 領域） 88
図 3.2.2-32　PFL-f シミュレーション結果と計測データの比較（FFM02 領域） 90
図 3.2.2-33　PFL-f シミュレーション結果と計測データの比較（FFM01m 領域） 91
図 3.2.3-1　亀裂性媒体を対象とした地下水移行時間の評価ツリー 99
図 3.2.3-2　割れ目の透水量係数分布に関する評価ツリー 101
図 3.2.3-3　地下水移行時間および F 値に関する評価ツリー 107
図 3.2.3-4　地下水移行時間および F 値に関する評価ツリー（サイトスケールの水理地質構造モデル部分） 109
図 3.2.3-5　地下水移行時間および F 値に関する評価ツリー（リージョナルスケールの水理地質構造モデル部分） 111
図 3.2.3-6　SR-Site で適用された水理地質構造モデルの空間スケール 112
図 3.2.3-7　水理地質構造モデルの空間スケールと適用されたモデル概念 113
図 3.2.3-8　SR-Site で適用された時間スケールと解析コード（ConnectFlow:CT および DarcyTool: DT） 114
図 3.2.3-9　SR-Site における Qeq 値（Q1，Q2，Q3）の経路と概念 121
図 3.2.3-10　Qeq 値に関する評価ツリー 123

図 3.2.3-11　Qeq 値（Q1 経路）算出における処分孔に交差する割れ目の概念図 125
図 3.2.3-12　Qeq 値（Q2 経路）算出における処分孔に交差する EDZ 内の割れ目の概念図..... 125
図 3.2.3-13　Qeq 値（Q3 経路）算出における坑道に交差する割れ目の概念図 126
図 3.2.3-14　モデル領域を対象にしたグリッド（標高-465m の水平面） 127
図 3.2.3-15　DarcyTool を用いた水理地質構造モデルの例..... 128
図 3.2.3-16　処分孔への湧水量の評価結果の例 130
図 3.2.3-17　処分孔への湧水量に関する評価ツリー..... 131
図 3.2.4-1　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリーの概略図..... 133
図 3.2.4-2　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（冒頭部分） 134
図 3.2.4-3　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（一次元モデルの場合における流速） 135
図 3.2.4-4　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（三次元水理地質構造モデルの場合分け部分） 141
図 3.2.4-5　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（CPM モデル） 145
図 3.2.4-6　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（深度依存性を考慮した CPM モデル） 147
図 3.2.4-7　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（DFN モデル） 151
図 3.2.4-8　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（水理試験の再現性を考慮した DFN モデル） 153
図 3.2.4-9　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（二重透水モデル） 155
図 3.2.4-10　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（境界条件） 159
図 3.2.4-11　堆積岩中の亀裂が地下水流動に及ぼす影響の有無を検討した事例（舟木ほか, 2009 の場合） 163
図 3.2.4-12　堆積岩中の亀裂が地下水流動に及ぼす影響の有無を検討した事例（Ishii et al., 2011 の場合） 165
図 3.3.1-1　第２次取りまとめレファレンスケースで用いられた透水量係数の累積分布 168
図 3.3.1-2　第２次取りまとめレファレンスケースで用いられた透水量係数分布を用いて算出した地下水移行時間の累積分布 169
図 3.3.1-3　定常解析解を用いた Cs-135 の核種移行率比（ϕ_{out}/ϕ_{in}）と地下水移行時間　第２次取りまとめレファレンスケースで用いられたパラメータ値の場合..... 169
図 3.3.1-4　解析対象領域と亀裂ネットワークモデルの例..... 171
図 3.3.1-5　定常浸透流解析結果と粒子追跡法解析結果の例..... 171
図 3.3.1-6　地下水移行距離と移行時間の相関図　１リアライゼーションの結果の例..... 174
図 3.3.1-7　地下水移行時間の累積分布　三次元亀裂ネットワークモデルを用いた結果と一次元モデルによる結果の比較..... 174
図 3.3.1-8　測線に交差する透水性割れ目の位置と透水量係数..... 175
図 3.3.1-9　測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた地下水移行時間の累積分布の変化..... 176
図 3.3.1-10　測線に交差する割れ目の透水性分類ごとの移行距離と移行時間の分布..... 176
図 3.3.2-1　PFL-f 試験により検出された割れ目の比湧水量(Q/s)の頻度分布..... 178

図 3.3.2-2　SR-Site の事例のデータセットを用いた一次元モデルによる地下水移行時間の累積分布 178
図 3.3.2-3　SR-Site における無相関ケースと代替ケースの透水量係数分布を用いた一次元モデルによる地下水移行時間の累積分布 179
図 3.3.2-4　地下水移行距離と移行時間の相関図（FFM02, 1 リアライゼーションの結果の例） 183
図 3.3.2-5　地下水移行距離と移行時間の相関図（FFM01m, 1 リアライゼーションの結果の例） 184
図 3.3.2-6　地下水移行時間の累積分布（FFM02，一つのリアライゼーションの結果例） 185
図 3.3.2-7　地下水移行時間の累積分布（FFM01m，一つのリアライゼーションの結果例） 185
図 3.3.2-8　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 準相関, FFM02 : 10 個のリアライゼーションの結果の比較） 187
図 3.3.2-9　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 準相関, FFM01m : 10 個のリアライゼーションの結果の比較） 187
図 3.3.2-10　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 無相関，FFM02 : 10 個のリアライゼーションの結果の比較） 188
図 3.3.2-11　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 無相関, FFM01m : 10 個のリアライゼーションの結果の比較） 188
図 3.3.2-12　地下水移行時間の累積分布（ケース C, FFM02 : 10 個のリアライゼーションの結果の比較） 189
図 3.3.2-13　地下水移行時間の累積分布（ケース C，FFM01m : 9 個のリアライゼーションの結果の比較） 189
図 3.3.2-14　測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた地下水移行時間の累積分布の変化（ケース C，FFM02，リアライゼーション RE10 の例） 192
図 3.3.2-15　測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた地下水移行時間の累積分布の変化（ケース C，FFM01m，リアライゼーション RE03 の例） 192
図 3.3.2-16　測線に交差する割れ目の透水性分類ごとの移行距離と移行時間の分布（ケース C, FFM02，リアライゼーション RE10 の例） 193
図 3.3.2-17　測線に交差する割れ目の透水性分類ごとの移行距離と移行時間の分布（ケース C, FFM02，リアライゼーション RE03 の例） 193
図 3.3.2-18　測線に交差する割れ目の位置と透水量係数（ケース C，FFM02，リアライゼーション RE10 の例） 194
図 3.3.2-19　測線に交差する割れ目の位置と透水量係数（ケース C，FFM01m，リアライゼーション RE03 の例） 194
図 4.2-1　状態設定の基本手順 203
図 4.2-2　状態設定の各段階での作業内容や具体的な情報の流れ（作業・情報フロー） 204
図 4.2-3　ストーリボードのイメージ 205
図 4.3-1　“安全機能”から“安全機能を支えるバリア性能”の抽出 210
図 4.3-2　緩衝材の安全機能“移流による移行の抑制”に対する要因分析図の例 212
図 4.3-3　緩衝材の安全機能“コロイド移行の防止・抑制”に対する要因分析図の例 213
図 4.3-4　緩衝材の安全機能“収着による放射性物質の移行遅延”に対する要因分析図の例 213

図 4.3-5　相関関係のマトリックス形式での整理のイメージ 217
図 4.3-6　FEP の相関関係のマトリックス形式での整理例 218
図 4.3-7　FEP の相関関係マトリックス上での FEP 情報の整理 219
図 4.3-8　FEP の相関関係マトリックスを用いた安全機能と影響要因との関係整理 221
図 4.3-9　FEP チャートの例 226
図 4.3-10　現象理解情報に基づく発生可能性を考慮した FEP チャートに基づく安全機能への影響検討例 227
図 4.3-11　主張“パイピングにより緩衝材の安全機能の低下が生じる可能性は低い”に対する討論モデルの例 227
図 4.3-12　人工バリアスケールを対象としたストーリボードの例 231
図 4.4-1　品質情報の管理体系のイメージ 235
図 4.5.2-1　パイピング試験結果 243
図 4.5.2-2　様々な条件でのペレット充填パイピング試験から得られた流入水量と流出粘土量の関係 245
図 4.5.2-3　緩衝材の侵入・流出現象に関する概念図 246
図 4.5.2-4　流出試験装置概念図 249
図 4.5.2-5　流出試験結果の例 249
図 4.5.3-1　体系の概念図とセルの配置図 253
図 4.5.3-2　複数の鉱物変遷シナリオ 255
図 4.5.3-3　緩衝材内側（Cx）および緩衝材外側（Dx）における温度の変遷 258
図 4.5.3-4　解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.1～4） 260
図 4.5.3-5　解析結果（pH の時間空間変化，No.1～4） 261
図 4.5.3-6　解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.5～8） 262
図 4.5.3-7　解析結果（pH の時間空間変化，No.5～8） 263
図 4.5.3-8　解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.9～12） 265
図 4.5.3-9　解析結果（pH の時間空間変化，No.9～12） 266
図 4.5.3-10　解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.13） 267
図 4.5.3-11　解析結果（pH の時間空間変化，No.9～13） 267
図 4.5.4-1　ガラス固化体近傍の溶存ケイ酸濃度に影響すると考えられる現象等 269
図 4.5.4-2　ガラス溶解挙動解析の概念モデル 271
図 4.5.4-3　ガラス固化体溶解速度の経時変化（RC） 279
図 4.5.4-4　各領域における溶存ケイ酸濃度の経時変化（RC） 280
図 4.5.4-5　ガラス固化体溶解速度の経時変化（B：ガラス固化体表面積をパラメータとした解析結果） 282
図 4.5.4-6　ガラス固化体溶解速度の経時変化（B-1：固化体表面積増加を幾何学的表面積の 1 倍とした場合の解析結果） 282
図 4.5.4-7　ガラス固化体溶解速度の経時変化（B-3：固化体表面積増加を幾何学的表面積の 100 倍とした場合の解析結果） 283
図 4.5.4-8　ガラス固化体溶解速度の経時変化（B-4：固化体表面積増加を幾何学的表面積の 1,000 倍とした場合の解析結果） 283

図 4.5.4-9　ガラス固化体溶解速度の経時変化（C：スメクタイト析出速度をパラメータとした解析結果）……284
図 4.5.4-10　ガラス固化体溶解速度の経時変化（C-2：スメクタイト析出速度を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）……285
図 4.5.4-11　ガラス固化体溶解速度の経時変化（C-3：スメクタイト析出速度を 0 とした場合の解析結果）……285
図 4.5.4-12　ガラス固化体溶解速度の経時変化（D：Mg ケイ酸塩鉱物析出速度をパラメータとした解析結果）……286
図 4.5.4-13　ガラス固化体溶解速度の経時変化（D-2：Mg ケイ酸塩鉱物析出速度を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）……286
図 4.5.4-14　ガラス固化体溶解速度の経時変化（D-3：Mg ケイ酸塩鉱物析出速度を 0 とした場合の解析結果）……287
図 4.5.4-15　ガラス固化体溶解速度の経時変化（E：オーバーパック腐食速度をパラメータとした解析結果）……288
図 4.5.4-16　ガラス固化体溶解速度の経時変化（E-2：オーバーパック腐食速度を RC の 10 倍とした場合の解析結果）……288
図 4.5.4-17　ガラス固化体溶解速度の経時変化（E-3：オーバーパック腐食速度を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）……289
図 4.5.4-18　ガラス固化体溶解速度の経時変化（F：Fe ケイ酸塩に消費される Fe 割合をパラメータとした解析結果）……290
図 4.5.4-19　ガラス固化体溶解速度の経時変化（F-1：Fe ケイ酸塩に消費される Fe 割合を 0 とした場合の解析結果）……290
図 4.5.4-20　ガラス固化体溶解速度の経時変化（G：Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比をパラメータとした解析結果）……291
図 4.5.4-21　ガラス固化体溶解速度の経時変化（G-2：Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比を 1 とした場合の解析結果）……292
図 4.5.4-22　ガラス固化体溶解速度の経時変化（H：腐食生成物への Si の分配係数をパラメータとした解析結果）……293
図 4.5.4-23　ガラス固化体溶解速度の経時変化（H-1：腐食生成物への Si の分配係数を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）……293
図 4.5.4-24　ガラス固化体溶解速度の経時変化（H-3：腐食生成物への Si の分配係数を RC の 10 倍とした場合の解析結果）……294
図 4.5.4-25　ガラス固化体溶解速度の経時変化（I：オーバーパック開口断面積をパラメータとした解析結果）……295
図 4.5.4-26　ガラス固化体溶解速度の経時変化（I-2：オーバーパック開口断面積を RC の 10 倍とした場合の解析結果）……295
図 4.5.4-27　ガラス固化体溶解速度の経時変化（I-3：オーバーパック開口断面積を RC の 100 倍とした場合の解析結果）……296
図 4.5.4-28　ガラス固化体溶解速度の経時変化（I-4：オーバーパックが全面開口した場合の解析結果）……296

図 4.5.4-29　ガラス固化体溶解速度の経時変化（J : 緩衝材中の Si の実効拡散係数をパラメータとした解析結果）……297
図 4.5.4-30　ガラス固化体溶解速度の経時変化（J-2 : 緩衝材中の Si の実効拡散係数を RC の 10 倍とした場合の解析結果）……298
図 4.5.4-31　ガラス固化体溶解速度の経時変化（K : 掘削影響領域通過流量をパラメータとした解析結果）……299
図 4.5.4-32　ガラス固化体溶解速度の経時変化（K-1 : 掘削影響領域通過流量を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）……299
図 4.5.4-33　ガラス固化体溶解速度の経時変化（K-3 : 掘削影響領域通過流量を RC の 10 倍とした場合の解析結果）……300
図 4.5.4-34　ガラス固化体溶解速度の経時変化（K-4 : 掘削影響領域通過流量を RC の 100 倍とした場合の解析結果）……300
図 4.5.4-35　ガラス固化体溶解速度の経時変化（K-5 : 掘削影響領域通過流量を RC の 1,000 倍とした場合の解析結果）……301
図 4.5.4-36　ガラス固化体溶解速度の経時変化（L : 緩衝材中の Si の分配係数をパラメータとした解析結果）……302
図 4.5.4-37　ガラス固化体溶解速度の経時変化（L-1 : 緩衝材中の Si の分配係数を 0m^3/kg とした場合の解析結果）……302
図 4.5.4-38　ガラス固化体溶解速度の経時変化（L-2 : 緩衝材中の Si の分配係数を 0.01m^3/kg とした場合の解析結果）……303
図 4.5.4-39　ガラス固化体溶解速度の経時変化（L-3 : 緩衝材中の Si の分配係数を 0.1m^3/kg とした場合の解析結果）……303
図 4.5.4-40　ガラス固化体溶解速度の経時変化（L-4 : 緩衝材中の Si の分配係数を 0.5m^3/kg とした場合の解析結果）……304
図 4.5.4-41　ガラス固化体溶解速度の経時変化（L-5 : 緩衝材中の Si の分配係数を 1m^3/kg とした場合の解析結果）……304
図 4.5.4-42　ガラス固化体溶解速度の経時変化（M : オーバーパック開口断面積をパラメータとした解析結果）……305
図 4.5.4-43　ガラス固化体溶解速度の経時変化（M-1 : オーバーパック開口断面積を 1.35E-3m^2 とした場合の解析結果）……305
図 4.5.4-44　ガラス固化体溶解速度の経時変化（M-2 : オーバーパック開口断面積を 2.17m^2 とした場合の解析結果）……306
図 4.5.4-45　RC を基準とした各解析結果におけるガラス固化体寿命の比較……307
図 4.5.4-46　Cs-135 の人工バリアからの移行率の比較……308
図 5.1.2-1　本研究における核種移行パラメータ設定手法検討のアプローチ……319
図 5.2.1-1　Opalinus 粘土岩の分配係数設定における半定量的条件変換手法と pH 条件変換に関する概念図……321
図 5.2.1-2　幌延泥岩に対する Cs の分配係数（a）と Cs/I/HTO の実効拡散係数（b）のモデル化結果……322
図 5.2.2-1　性能評価のための分配係数設定と不確実性評価のアプローチ……324

図 5.2.2-2　包括的な収着パラメータの設定フロー……325
図 5.2.2-3　条件の違いを補正して K_d を設定する半定量的条件変換手法の概要……328
図 5.2.2-4　熱力学的収着モデルの開発の基本的フローとモデル概念の選定フロー ……329
図 5.2.2-5　モンモリロナイトに対する Am/Eu の収着モデルの開発事例……331
図 5.2.3-1　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Cs の収着データの(a)pH 及び(b)Cs 濃度依存性 ……333
図 5.2.3-2　半定量的条件変換手法による堆積岩への Cs の分配係数評価例（Case B） ……334
図 5.2.3-3　複数の手法と条件下での堆積岩への Cs の分配係数比較 ……335
図 5.2.3-4　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Ni の収着データの pH 依存性……335
図 5.2.3-5　半定量的条件変換手法による堆積岩への Ni の分配係数評価例（Cases A/B） ……336
図 5.2.3-6　複数の手法と条件下での堆積岩への Ni の分配係数比較……337
図 5.2.3-7　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Am の収着データの pH 依存性 ……339
図 5.2.3-8　半定量的条件変換手法による堆積岩への Am の分配係数評価例（Cases A/B） ……339
図 5.2.3-9　複数の手法と条件下での堆積岩への Am の分配係数比較 ……340
図 5.2.3-10　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Th の収着データの pH 依存性……341
図 5.2.3-11　半定量的条件変換手法による堆積岩への Th の分配係数評価例（Case B） ……341
図 5.2.3-12　複数の手法と条件下での堆積岩への Th の分配係数比較……342
図 5.2.4-1　U(IV)の花崗岩(降水系) に対する分配係数の pH と試験期間依存性（$0.0001 \leqq I \leqq 0.1$） ……344
図 5.2.4-2　U(IV)，Th(IV)，Np(IV)，Pu(IV)の花崗岩(降水系) に対する分配係数の pH 依存性……345
図 5.2.4-3　U(IV)の花崗岩(降水系)に対する分配係数の分布状況……346
図 5.2.4-4　U(VI)の花崗岩(降水系)における分配係数の pH 依存性（$0.0001 \leqq I \leqq 0.1$） ……347
図 5.2.4-5　U(VI)の花崗岩(降水系)に対する分配係数の分布状況……348
図 5.3.2-1　本研究で提案する溶解度設定フロー……354
図 5.4.2-1　個別データの信頼度情報（Am／Bentonite 系の例） ……364

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下，「JAEA」という）は，「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性―地層処分研究開発第２次取りまとめ―」（JNC，1999）（以下，「第２次取りまとめ」という）を作成し，処分事業や安全基準等の整備に向けた技術的拠り所を示した。その後，この成果を踏まえ，事業主体による処分事業と国による安全規制を支える技術基盤を整備し，提供するために，深地層の研究施設，地層処分放射化学研究施設等を活用して，地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた基盤的な研究開発を進めている。

原子力発電環境整備機構（以下，「NUMO」という）は，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（平成12 年6 月法律第117 号，以下，「最終処分法」という）で定められた特定放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物）の最終処分の事業主体として設立された。その後，2007 年の最終処分法改正に伴い，長半減期低発熱放射性廃棄物の一部も地層処分の対象とされ，これもNUMO の事業の対象に加えられた。NUMOは，これらの放射性廃棄物を対象として，処分事業の安全な実施，経済性および効率性の向上等を計画的に実施していくことを目的とした技術開発を行っている。

NUMOは，概要調査段階における安全確保に関し，自然事象の著しい影響の回避，長期安全性確保の見通し，事業期間中の安全性確保の見通しを目標として設定している（NUMO，2011）。このうち，長期安全性確保の見通しに関しては，限られた地質環境の情報に基づき，熱・水理・力学・化学などの複数の視点から処分場設置の候補となる母岩を選定した上で，それを対象として処分場の概念設計や長期安全性に関する予備的な安全評価を行う。概念設計では，母岩の有する熱環境，力学場，水理場などを考慮して，処分場の空間的な配置についての検討を進めることが重要である。予備的な安全評価では，考えられた処分設計概念に対して長期の安全性に関する見通し，および残された課題とその対策の方向性を示すことが肝要となる。NUMOにおいてこれらの作業を効率的に実施するためには，設計・性能評価手法について，JAEAのこれまでの研究成果を活用しつつ高度化を図ることが有効である。

このため，JAEAとNUMOは，2001年6月に締結した「特定放射性廃棄物の地層処分技術に関する協力協定」（以下，「協力協定」という）に基づき，概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化に関する共同研究を2011年度から開始した。

2012年度は，2011年度の成果を踏まえ，実施主体の視点に沿った設計・性能評価手法の方法論をより具体化することを目的とする。なお，本共同研究を通して，技術開発に関するニーズが認識され，国の基盤研究開発やNUMOの技術開発へフィードバックされることが期待される。

なお，JAEAおよびNUMOは，協力協定に基づき，上記双方の目的を実現させるため，国民の理解と協力を得ることが極めて重要であるとの認識のもとに双方の技術開発の成果を積極的に公開しながら情報交換の透明性を確保した上で，情報交換や技術者の交流などの技術協力を進めてきている。本共同研究は，協力協定第4条（3）の規定に基づき、双方が必要と認めたテーマについて実施するものである。また，本共同研究は，従来から進めてきた情報交換などの交流などに加え，JAEAからNUMOへの技術移転の一端を担うことが期待される。

本報告書では，まず，第2章において，概要調査段階と共同研究テーマとの関係について記述する。そして，第3章～第5章では，各テーマに関する背景，目的，成果，今後の課題についてそれ

ぞれ記述する。具体的に, 第3章では水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討, 第4章ではシナリオの構築に関する検討，第5章では核種移行パラメータの設定に関する検討について述べる。さらに，第6章では，本共同研究で得られた成果等について概括する。

参考文献（1章）

JNC（核燃料サイクル開発機構）（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－，総論レポート，JNC TN1400 99-020.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2011）：地層処分事業の安全確保（2010 年度版），－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－, NUMO-TR-11-01.

2. 概要調査段階と共同研究テーマとの関係

本章では，わが国の地層処分事業の特徴，概要調査段階の特徴，概要調査段階の設計・性能評価における主要な実施事項について概説した上で，本共同研究で取り扱う主要な技術テーマの位置付けについて述べる。

2.1 わが国の地層処分事業の特徴

わが国は，変動帯に位置し，安定大陸に比べてプレート運動に起因する地震・断層活動，火山・火成活動，隆起・侵食などの自然現象が活発である。わが国の地層処分における長期的な安全性を確保するためには，まず，将来にわたりこれらの自然現象の著しい影響が見込まれる場所を回避する必要がある。また，地質環境特性としては，山がちで海に囲まれた地形・地理条件，変動帯に特有な複雑な地質構造や多種多様な岩種，豊富な地下水や高い地下水位などの特徴を有する。したがって，それらの長期的な変遷も考慮した上で，地層処分にとってより好ましい条件を有する場所を選定することが重要である。

高レベル放射性廃棄物の処分事業は，「最終処分法」に定められたところに従って，「概要調査地区，精密調査地区及び最終処分施設建設地の選定」，「最終処分施設の建設」，「最終処分（最終処分施設の操業）」，「最終処分施設の閉鎖」，「閉鎖後管理」と順次進められる（NUMO，2004）。なお，NUMO は，最終処分法および原子炉等規制法に基づく手続きを勘案し，処分事業を以下の 10 段階に分けて進めることを考えている（NUMO，2011）。

① 概要調査地区選定段階（文献調査の段階）
② 精密調査地区選定段階（概要調査の段階）
③ 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち，地上からの調査段階）
④ 処分施設建設地選定段階（精密調査の段階のうち，地下調査施設での調査段階）
⑤ 安全審査の段階（事業許可申請）
⑥ 処分施設の建設段階
⑦ 操業段階（操業期間中）
⑧ 閉鎖措置計画認可申請の段階
⑨ 閉鎖段階
⑩ 閉鎖後の管理を経て事業廃止に至る段階

2.2 概要調査段階の特徴

地層処分を事業として安全に行うための最初の取り組みとしては，国民の理解を得て，最終処分法に基づき，3 段階の選定過程を踏まえ，適切な処分施設の建設地を選定することである。ここで，3 段階の選定過程は，前述の①～④に対応する。

このうち，精密調査地区選定段階における安全確保に係わる目標，具体的な目標達成にかかわる要件と成果として公表する安全確保にかかわる主要文書を

表 2.2-1 に示す。安全確保に関わる目標のうち，長期安全性確保の見通しは，当該段階の設計・性能評価が密接に関係するものである。

表 2.2-1　精密調査地区選定段階における目標や要件（NUMO，2011）

・本段階における事業目標	：精密調査地区選定
・安全確保にかかわる目標	：自然現象の著しい影響の回避 長期安全性確保の見通し 事業期間中の安全性確保の見通し
・目標達成にかかわる要件	：法定要件への適合性 精密調査地区選定の環境要件への適合性 安全審査基本指針への適合性 自主基準（考慮事項含む）への適合性
・安全確保にかかわる主要文書	：概要調査に関する法定報告書 概要調査に基づく概念設計と予備的安全評価に関する報告書

安全確保に関わる目標や要件を事業の中で実現していくためには，「サイト調査・評価」，「工学的対策」，「安全評価」という三つの専門分野を連携させ，情報を統合化することによって，各段階における意思決定につなげていくことが重要である（図 2.2-1）。

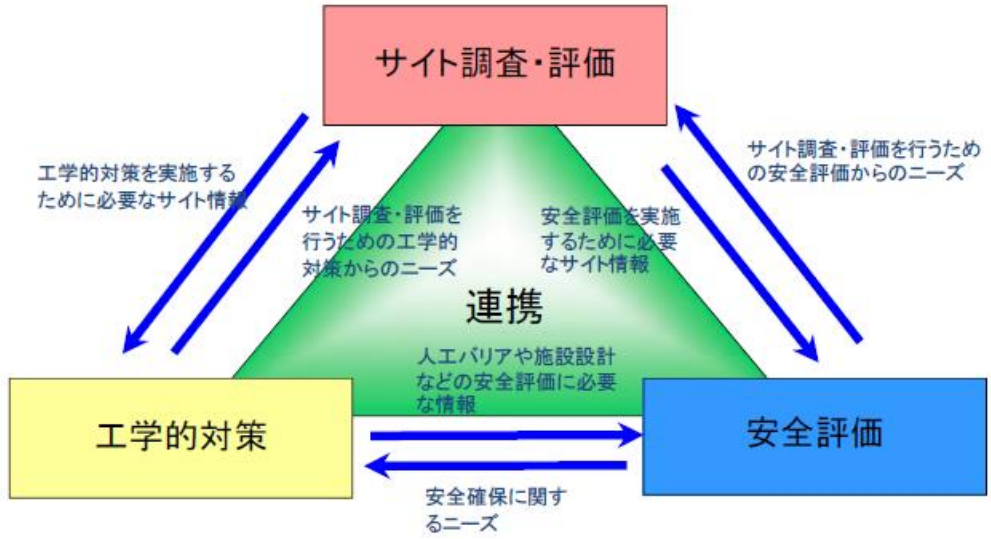


図 2.2-1　三つの専門分野間の連携（NUMO，2011）

概要調査段階では，調査結果に基づき安全性確保の見通しを得て，関係者の合意も得たうえで精密調査地区の選定を行い，次のサイト選定段階である精密調査の段階へと移行する。精密調査の段階では，地上からのより詳細な調査（精密調査段階〔前半〕）の結果に基づき，処分施設の基本レイアウトを決定する。また，次段階の地下調査施設における建設・操業技術の実証に備え，人工バリアの仕様の決定も行う。地下調査施設を用いての調査（精密調査段階〔後半〕）では，地下調査施設での調査や

実証試験の結果に基づき，事業期間中および閉鎖後長期の安全性が確実に確保できることを確認した上で，処分施設建設地を選定し，その後，事業許可申請を行うことになる（図 2.2-2）。したがって，精密調査の段階における時間的にも経済的にも大きな投資を考慮すると，精密調査地区選定時までにその地点における地質環境の長期的な安定性と地層処分場の技術的成立性について，NUMO が一定の自信を持って判断できることが重要である。これらの点から，NUMO は，精密調査地区選定段階における実施事項を，三つの専門分野と意思決定の観点から整理している（図 2.2-3）。このうち，当該段階における設計・性能評価に関する主要な実施事項を図 2.2-3 において赤枠で示す。

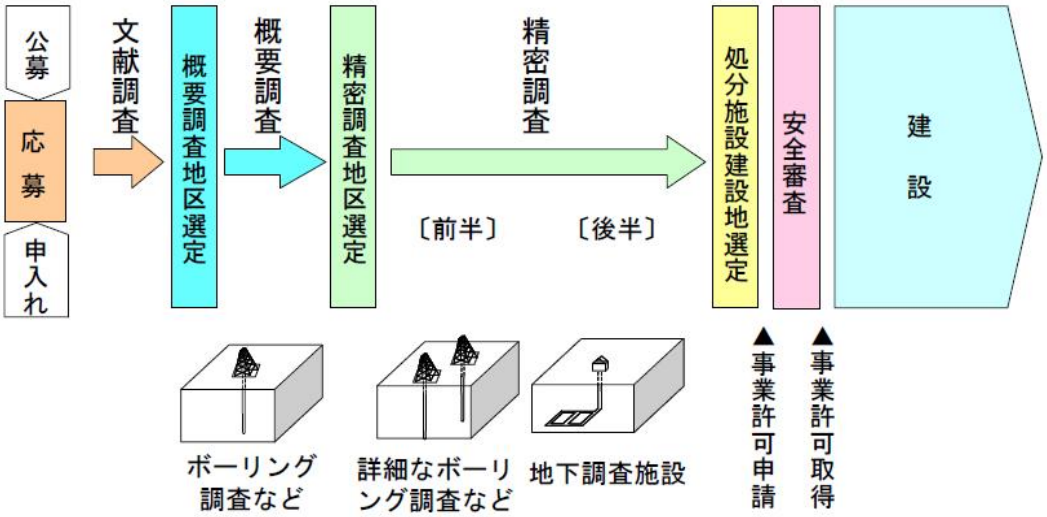


図 2.2-2　サイト選定プロセスにおける精密調査地区選定の位置づけ（NUMO，2013）

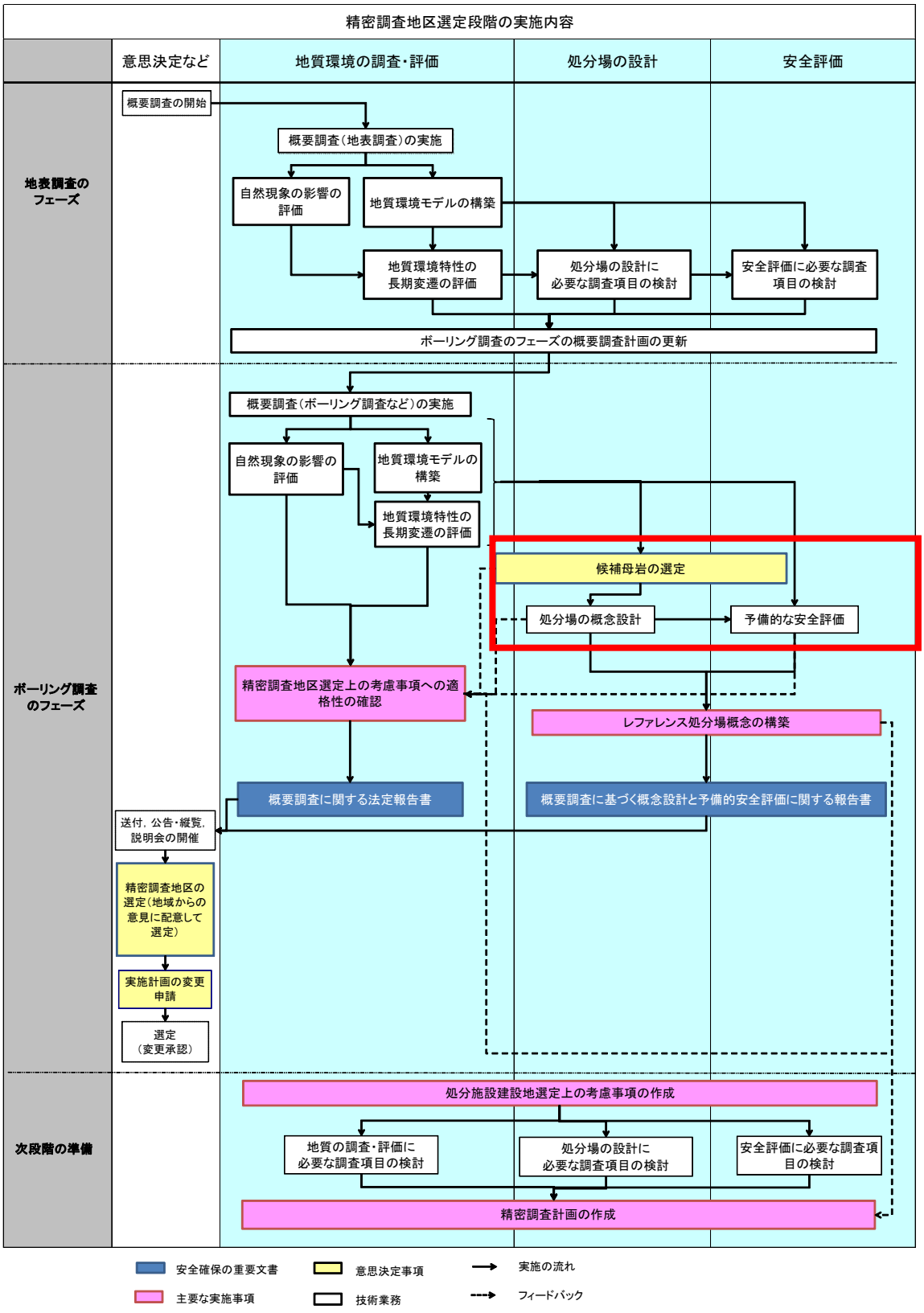


図 2.2-3　精密調査地区選定段階における実施事項フロー図（NUMO，2011）

2.3 概要調査段階の設計・性能評価における主要な実施事項

本節では，概要調査段階における設計・性能評価における主要な実施事項として，候補母岩の選定，処分場の概念設計，予備的な安全評価について記述する。

2.3.1 候補母岩の選定

母岩としての適性を有する地層（または岩体）を候補母岩として選定する。候補母岩は，地質環境モデルや地質環境特性の長期変遷に関する検討などから得られる情報に基づいて，熱や力学などの複数の項目について評価し，さらに天然バリアとして求められる安全機能，廃棄体および人工バリアの設置環境として好ましい処分環境の条件，ならびに所定量の廃棄体を収容できる岩体の広がり（処分場の収容性），工程・経済性などの処分事業の成立性の観点から評価を行い選定する。その際には，地下深部の地質や断層の空間的な分布などの地質環境特性データが持つ不確実性について考慮する必要がある。なお，候補母岩は上述の条件を満たすのであれば，複数の地層や岩体を選択する可能性もある。これらの評価は，処分場の設計のみで行うものではなく，地質環境の調査・評価および安全評価と連携して，ニーズの提示や結果のフィードバックを反復的に実施しながら進める。

2.3.2 処分場の概念設計

処分場の概念設計では，地質環境の調査・評価から得られる地質環境モデルと候補母岩の特性に基づき，人工バリアの設計，地下坑道の設計，地下施設の基本レイアウトの設定などを実施する。この段階での人工バリアの設計では，サイトの地質環境特性，人工バリアの施工技術開発の成果や後述の予備的な安全評価などに基づいて，材料設計および形状，寸法などの仕様を設定する。この際には，材料の長期挙動の評価結果などを反映した人工バリアの長期健全性の評価を行う。地下坑道の設計では，概要調査で得られた地下深部の岩盤の応力状態や力学特性などに基づき，合理的な掘削方法や施工手順を設定し，力学的安定解析を実施して坑道の仕様を決定する。処分場の地下施設の位置，深度，処分パネルやアクセス坑道などの基本レイアウトの設定は，候補母岩の評価・選定の結果，および主要な地下水流動方向などを踏まえた天然バリア中の放射性物質の移行抑制の観点に基づいて設定する。これらの結果は，後述の予備的な安全評価の結果と統合化して包括的にサイトの地質環境特性への適合性を評価し，必要に応じて人工バリアの仕様や基本レイアウトの設定にフィードバックし，事業者として地層処分の安全性が確保できることの見通しを得るとともに，次段階の精密調査の計画立案に反映させる。

2.3.3 予備的な安全評価

概要調査段階では，地質環境特性や地質環境モデル，人工バリアの基本仕様や処分施設の基本レイアウトに基づき，予備的な安全評価を行う。この結果は，処分場の概念設計にフィードバックし，人工バリアの仕様や基本レイアウトの設定に反映して，事業者として長期の安全性が確保できることの見通しを得るとともに，次段階の精密調査の計画立案に反映させる。予備的な安全評価を行うにあたっては，サイトの地質環境特性の変遷やそれを考慮した人工バリアの長期挙動を踏まえたシナリオの作成，モデルの設定や，核種の拡散・収着などのパラメータ設定が必要である。シナリオの構築においては，地層処分システム全体と各要素の長期的な変遷，人工バリアおよび天然バリア中での核種移行に関する現象などを状態設定として記述した上で，それに基づいて安全評価シナリオを作成する。安全評価に用いるモデルは，ソースタームモデル，人工バリア中の核種移行モデル，天然バリア中の

核種移行モデルなどで構成され，シナリオを作成した後は，シナリオから導かれる解析ケースに対応するようにモデルを設定する。パラメータ設定に関しては，現地の試料を利用して取得したデータ，または既存のデータベースとを比較して，地下水条件への依存性などの分析評価を通じて設定を行う。安全評価は，上述したシナリオの作成，モデル，パラメータの設定に基づいて実施する。

なお，地層処分の安全評価では，原子炉などの通常の原子力施設に対する評価期間と比べて対象とする期間が非常に長いこと，天然の地層という不均質で大きな空間領域を対象とすることを考慮する必要がある。これらに起因する不確実性に対しては，地質環境の調査・評価により低減するが，完全に取り除くことはできないため，安全評価では，残された不確実性を，シナリオ，モデル，パラメータの不確実性として考慮する必要がある。

2.4　本共同研究で取扱う技術テーマと進め方

上述したように，NUMO は概要調査段階における主要な実施事項として，この段階での調査結果に基づき，候補母岩の選定，処分場の概念設計および予備的な安全評価を実施する。本共同研究では，これらの作業を実際の事業において効率的に実施するため，とくに候補母岩の選定方法，予備的な安全評価に用いるシナリオやパラメータの設定方法の具体化に着眼し，次の三つの技術テーマを取り上げた。

(1) 水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討
(2) シナリオ構築手法に関する検討
(3) 核種移行パラメータの設定方法に関する検討

本節では，これらのテーマに関して，概要調査段階に必要となる技術と照らし合わせ，本共同研究でカバーする実施内容とその進め方について述べる。

2.4.1　水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討

本検討は，精密調査地区選定段階における候補母岩の選定に資するために，水理の観点から母岩としての適性を評価するための項目や評価方法に関する検討を行う。なお，本検討においては，地下施設を建設し廃棄体を埋設する対象となる地層や岩体を「母岩」と呼ぶ。

母岩としての適性を評価するための具体的な評価項目の検討に際しては，安全評価や処分場の概念設計にとって重要な項目と，調査で取得し評価できる情報を関連づけて整理することが重要である（Vomvoris et al., 1996; Ström et al., 1999; Andersson et al., 2000）。しかしながら，概要調査などの初期段階の調査で得られる情報量は，項目，数量ともに限られるため，地質環境モデルには比較的大きな不確実性が存在する。特に，水理場については，断層や割れ目などの岩盤の透水性に影響を与える構造が不均質に分布し，その透水性の分布も数桁にわたってばらつく可能性があることから，力学場，熱環境，化学環境などの評価に比べて不確実性を伴いやすい。そのため，調査の進展に伴って変化する地質環境の理解の度合いや地質環境モデルの不確実性を考慮して，母岩の適性を評価するための方法論を整備しておくことが望ましい。

以上のことから，本共同研究では，水理の観点から母岩の適性を評価するための項目とそれを評価するための方法論を整備する。そのために，既存文献に基づく事例調査や文献データに基づく解析・評価の試行を行い，得られた知見を「評価ツリー」を用いて整理する。評価ツリーには，評価の対象となる項目を起点に，複数のモデル化・解析手法，パラメータ，データセット，調査データ，調査手

法の選択肢とそれらの関連性が示される。また，データの解釈やモデルの設定における複数の仮定（場合分け）から生じる代替ケースや，代替モデルの選択肢も示される。このような評価ツリーを整備し，母岩の適性評価に資する知見を取りまとめることが，本検討の最終的な目標である。

2.4.2　シナリオ構築手法に関する検討

安全評価におけるシナリオは，地層処分システムの将来挙動を考慮して記述したものであり，安全評価の基盤となるものである。NUMO は，シナリオ構築の考え方として，FEP に基づくシナリオ構築手法と安全機能を軸としたシナリオ構築手法とを組み合せたアプローチにより，シナリオの作成・分類を行うことを示した（NUMO，2011）。この考え方は，国際的に確認されている合理的なアプローチ（OECD/NEA，2012）であり，サイト選定の各段階で大きく変わるものでない。したがって，上記の作業を実際の事業において効率的に実施するためには，シナリオ構築の考え方・手順を具体化しておく必要がある。また，NUMO としては遅滞なく安全規制に係る国の議論に対応できるよう，安全評価におけるシナリオ作成における基本的な考え方を取りまとめることが必要である。

このため，本共同研究では，信頼性や透明性，追跡性をもって安全評価におけるシナリオを作成するための手順の確立に反映することを目的に，まずは地層処分システムの各要素の長期的な変遷を考慮した状態設定を，その根拠と関連付けて構築していくための枠組みを整理する。具体的には，ガラス固化体，オーバーパック，緩衝材に着目して，最新の知見を踏まえ，FEP の再整理を行う作業や，各人工バリアに期待する安全機能が材料の劣化などによって時間とともにどのように変化するかを記述する状態設定の作業を，上述した NUMO のシナリオ作成のアプローチとして具体的に利用できるよう，手順や方法について形式化する。あわせて，状態設定の作業内容や判断根拠についての透明性と追跡性を確保するための手段として，その状態設定作業において記録しておくべき情報の明確化と記録手段についても検討する。また，シナリオの作成に必要な個別現象に関する情報を，最新の知見を含めて整理するとともに，個別現象が安全機能に及ぼす影響について不確実性を考慮した解析を通した検討を進める。

2.4.3　核種移行パラメータの設定方法に関する検討

前述したように，概要調査段階での予備的な安全評価は，限られた情報に基づいて実施していく必要がある。核種移行パラメータを設定するにあたっては，概要調査段階で得られる情報の持つ不確実性を考慮しつつ，適切にパラメータを導出し，設定することが重要であり，これらの作業の手順を具体化しておくことが求められる。そのためには，

- 概要調査段階で得られる情報とその不確実性の明確化
- 核種移行パラメータ設定作業の明確化
- 設定作業と設定値に含まれる不確実性要因の抽出
- 抽出された不確実性の影響範囲と影響度を考慮した重要度分類
- 不確実性を考慮した核種パラメータ設定手法の明確化
- 構築したパラメータ設定手法の妥当性確認と安全評価上の不確実性の明確化

が為されることが望ましい。

これらを踏まえ，本共同研究では，核種移行挙動の中でも地質環境情報に大きく影響を受ける岩石への収着分配係数を重点的な検討対象とし，あわせて，核種移行解析上重要なパラメータである緩衝材の拡散係数と収着分配係数，及び溶解度の設定手法について検討する。検討の進め方として，既存

の研究成果やパラメータ設定の先行事例の調査・分析を行い，それらをもとに核種移行パラメータ設定の方法論を明示する。次に，その設定手法に基づいた試行を通じて設定作業や設定値に含まれる不確実性の種類と要因を明確にした上で，安全評価上の影響度を踏まえて重要度を検討する。さらに，不確実性低減のための対策を検討する。これらの検討により，概要調査段階において採用すべき，不確実性を考慮したパラメータ設定手法を提示することとする。

また，既往の安全評価では，これら核種移行挙動評価上重要となるパラメータの設定について，その作業内容や判断根拠が専門家の判断に委ねられる部分が多く，十分な透明性や追跡性を確保するための検討も重要である。そこで，本検討では，安全評価の品質保証のために，パラメータ設定作業における記録しておくべき情報の明確化と記録手段の検討も実施する。

2.5　2011 年度の成果概略と 2012 年度の実施内容

(1)　水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討

2011 年度は，母岩としての適性を評価するための項目のうち，水理場に関する「評価項目」を一覧表として整理するとともに，母岩の特性を表す重要な項目のひとつとして地下水移行時間を例に花崗岩などの亀裂性の岩盤を対象とした評価手法を整理し，「評価ツリー」にとりまとめた。その際，核種の移行遅延に与える影響が大きい透水量係数の分布に着目し，データ解釈上の複数の考え方を系統的に整理した。

2012 年度は, 2011 年度に引き続き母岩の水理特性の評価手法の体系化に向けた検討を進めた。まず，結晶質岩地域の評価事例としてスウェーデンの SR-Site 報告書（SKB, 2011）を対象に，水理地質構造モデルの構築に関する具体的な方法について調査した。調査に基づき水理地質構造モデルを試行的に構築するとともに，透水量係数設定の不確実性に着目して，複数の代替ケースを設定して検討した。これらの主に結晶質岩を対象とした検討による知見をとりまとめ，「評価ツリー」として体系的に整理した。また，地下水移行時間以外の評価項目を対象とした評価方法についても評価手法の整理を進めた。さらに，堆積岩を対象とした評価手法に関する知見を新たに整理し，評価ツリーの整備を進めた。最後に，評価ツリーの適用方法を具体的な事例として示し，評価手順の具体化に向けた課題を整理した。

(2)　シナリオ構築手法に関する検討

2011 年度の共同研究では，概要調査に基づき設定するシナリオに関して，NUMO が検討を進めてきたシナリオ構築の考えを前提として，国内外の動向を踏まえ，シナリオ構築に関する基本的な考え方や手順を整備することを目的とした検討を進めた。はじめに，シナリオ構築に関する事業の視点からの要件と考え方を整理した上で，NUMO の既存のアプローチ（NUMO，2011）を具体化するための視点を整理した。次に，シナリオ構築において行われる作業の整理として，国内外のシナリオ構築に関する動向調査の結果から「シナリオ構築で検討すべきこと（検討事項）」を抽出し構造的に整理した。これらの整理に基づいて，シナリオ構築において実施される複数の並行した作業間の関係を明確にするために，状態設定を行うための基本的な作業の流れを整理した。

2012 年度の共同研究では，2011 年度に検討した状態設定の基本的流れを踏まえつつ，より実用性の高いものに改良することとし，状態設定の各段階での作業内容，作業の成果として作成すべきもの，具体的な情報の流れなどを改めて確認しながら，緩衝材を対象とした状態設定を試行した。試行を通じて，状態設定の基本手順の見直しと，状態設定の各段階での作業内容や具体的な情報の流れ（作業・

情報フロー）の提案を行った。また，シナリオの蓋然性やシナリオ分岐の検討に有効となる現象解析の例示を含め，シナリオ作成の前提となる状態設定の背景となる関連する知見の体系的な整理を行った。

また，シナリオの作成に必要な個別現象に関する情報を，最新の知見を含めて整理するとともに，ガラスの溶解挙動，およびセメント系材料によりもたらされる高アルカリ環境が緩衝材に及ぼす影響の二つの現象について解析を行い，これらの現象が有する不確実性がバリアに期待している性能に及ぼすの影響の可能性について検討を行った。

(3) 核種移行パラメータの設定に関する検討

2011 年度の共同研究では，性能評価の信頼性を向上させるため，評価に用いるシナリオやモデルとともに高い品質が確保されたパラメータを設定することが不可欠であることから，概要調査段階の特徴を考慮した核種移行パラメータの設定方法を検討した。具体的には，緩衝材の拡散係数や分配係数，また花崗岩の分配係数に関して，国内外の最新事例を調査し，概要調査段階での情報の種類と量を考慮し，その設定方法について基本的な考え方と手順を検討した。

2012 年度の共同研究では，2011 年度に検討した分配係数の設定方法についてより実用的観点から改良するとともに，結晶質岩系の分配係数設定の試行を通じて潜在的な不確実性の要因について検討した。また，パラメータ設定に関する不確実性の取り扱いを含めた最新の知見を，海外事例（特に堆積岩系）を中心として調査・分析した。これらに基づいて，2011 年度に結晶質岩系を対象に検討した方法論も踏まえつつ，半定量的条件変換手法や収着モデルといった複数のアプローチの比較や選択の視点を含む分配係数パラメータの設定フローを整理した。さらに，このフローと関連付けて堆積岩に対する設定事例を提示するとともに，そのプロセスや根拠情報を追跡可能な形で記録するための手法についての検討に着手した。一方，核種移行解析のソースタームの一つとなる溶解度設定については，国内外の知見を整理しつつ，パラメータを設定するための方法論を具体的な設定事例とともに検討した。

参考文献（2 章）

Andersson, J., Ström, A., Svemar, C., Almén, K.-E. and Ericsson, L. O (2000): “What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation”, SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性 －「処分場の概要」の説明資料－，NUMO-TR-04-01.

NUMO （原子力発電環境整備機構）（2010）：地層処分技術開発ニーズの整理, ～精密調査地区選定に向けて～, NUMO-TR-10-02.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2011）：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）, －確かな技術による安全な地層処分の実現のために－, NUMO-TR-11-01.

NUMO（原子力発電環境整備機構）（2013）：地層処分事業の技術開発計画 －概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発－, NUMO-TR-13-02.

OECD/NEA(2012) : Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative-, NEA No. 6923.

SKB (2011): “Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project”, SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ström, A., Almén, K.-E., Andersson, J., Ericsson, L. O and Svemar, C. (1999): “Geoscientific evaluation factors and criteria for siting and site evaluation. Progress report”, SKB R-99-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Vomvoris, S., Andrews, R.W., Lanyon, G.W., Voborny, O., Wilson, W. (1996): “Methodology for Deriving Hydrogelogical Input Parameters for Safety-Analysis Models - Application to Fractured Crystalline Rocks of Northern Switzerland, Nagra Technical Report 93-14.

3. 水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討

3.1 はじめに

本章では，精密調査地区選定段階における母岩の選定に関する基本的な考え方や手順の整備に資することを目的に，水理の観点からみた母岩としての適性を評価するための項目と評価方法について検討した結果を述べる。

本検討では，地下施設を建設し廃棄体を埋設する対象となる岩体（または地層）を「母岩」と呼ぶ。精密調査地区選定段階では，法定要件等に照らして不適格な場所を避けた上で，その適性を評価して母岩を選定する。母岩としての適性は，地質環境の調査による地質環境モデル等の情報に基づき，熱環境，水理場，力学場，化学環境等の処分場の設置環境の観点，および，岩体の広がりや工程・経済性等，事業の成立性の観点から評価する（NUMO，2011）。その適性を評価するための具体的な項目の検討に際しては,安全評価や処分場の概念設計にとって重要な項目と，調査等で取得する情報に基づき評価可能な情報を関連づけた整理が重要である（Vomvoris et al., 1996; Ström et al., 1999; Andersson et al., 2000）。しかしながら，概要調査等の調査の初期の段階で得られる地質環境に関する情報は，項目，数量ともに限られるため，地質環境モデルには比較的大きな不確実性が存在すると考えられる。特に，水理場については，断層や割れ目等の岩盤の透水性に影響を与える構造が不均質に分布し，その透水性の分布も数桁にわたってばらつく可能性があることから，力学場，熱環境，化学環境等に比べて不確実性を伴いやすいと考えられる。そのため，調査の進展に伴って変化する地質環境の理解の度合いや地質環境モデルの不確実性を考慮して，母岩の適性を評価する方法論を整備しておくことが望ましい。以上のことから，本検討では，水理の観点から母岩の適性を評価するための項目と，それを評価するための方法論を整理することとした。

2011 年度は，母岩としての適性を評価するための項目のうち，水理場に関する「評価項目」を一覧表として整理するとともに，母岩の特性を表す重要な項目の一つとして地下水移行時間を例に評価方法を整理し，「評価ツリー」としてとりまとめた（江橋ほか，2012）。本ツリーは，以下に挙げる特徴をもつ。

- 評価の対象となる項目を起点としてトップダウン的に，モデル化・解析手法，パラメータ，データセット，調査データ，調査手法の選択肢とそれらの関連性が示されている。
- データの解釈やモデルの設定における複数の仮定（場合分け）から生じる代替ケースや，代替モデルの選択肢が系統的に示されている。

さらに，花崗岩等の亀裂性の岩盤を対象に評価手法を整理した。その際，核種の移行遅延に与える影響が大きい透水量係数の分布に着目し,データ解釈上の複数の考え方を系統的に整理した。

2012 年度は，2011 年度に引き続き母岩の水理特性の評価手法の体系化に向けた検討を進めた（3.2 節）。まず，結晶質岩地域の最新の評価事例として，スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下，「SKB」という）が 2011 年に公開した SR-Site（SKB, 2011）を対象に，水理地質構造モデルの構築に関する具体的な方法について調査した（3.2.1 項）。調査に基づき水理地質構造モデルを試行的に構築するとともに，透水量係数の不確実性について数ケース想定して検討した（3.2.2 項）。これらの検討により結晶質岩を対象とした得られた知見を，「評価ツリー」を活用し

て体系的に整理した（3.2.3 項）。また，これまでに主たる項目としていた地下水移行時間以外の評価項目を対象とした評価方法についても評価手法の整理を進めた（3.2.3 項）。2012 年度は，新たに堆積岩を対象とした評価手法に関する知見を整理した評価ツリーの整備を進めた（3.2.4 項）。さらに，3.2 節でまとめた評価ツリーの適用方法を具体的な事例として示した（3.3 節）。これらの検討により，水理の観点から母岩としての適性を評価するための手順の具体化や評価手法の高度化に向けた課題を整理した。

3.2　評価ツリーの整備・拡充

本節では，母岩の適性を評価する方法の体系化に向けて，母岩の水理特性の評価手法に関する知見の整理として，2011 年度に引き続き，SKB の Forsmark サイトの水理地質構造モデルの構築と解析の具体的な方法についてより詳細な調査を実施した（3.2.1 項）。そして，Forsmark サイトのデータに基づき水理地質構造モデル構築を試行し不確実性の取り扱いについて検討した（3.2.2 項）。これらの調査検討により得られた知見を加えて，結晶質岩を対象とした評価ツリーを拡充した（3.2.3 項）。また，幌延深地層研究計画における水理地質構造モデルの構築に係る研究成果に基づき，堆積岩地域を対象とした評価ツリーを新たに整備した（3.2.3 項）。

3.2.1　SR-Site における水理地質構造モデル構築手法の整理

本項では，2011 年度に引き続き，SKB の Forsmark サイトを対象とした安全評価報告書 SR-Site（SKB, 2011）における水理地質構造モデルの構築と解析に係る手法について取りまとめた。2011 年度は地質構造モデル（GeoDFN モデル）と水理地質構造モデル（HydroDFN モデル）の構築の流れをとりまとめた（図 3.2.1-1：江橋ほか，2012）。2012 年度は，同図に示された三次元水理地質構造モデルの構築および解析に関する具体的な方法について，以下の項目ごとに整理した。

(1) モデル構築に活用された地質環境調査データ（図 3.2.1-1 の緑字参照）
(2) GeoDFN モデル構築手法（図 3.2.1-1 の赤字参照）
(3) HydroDFN モデル構築手法（図 3.2.1-1 の青字参照）

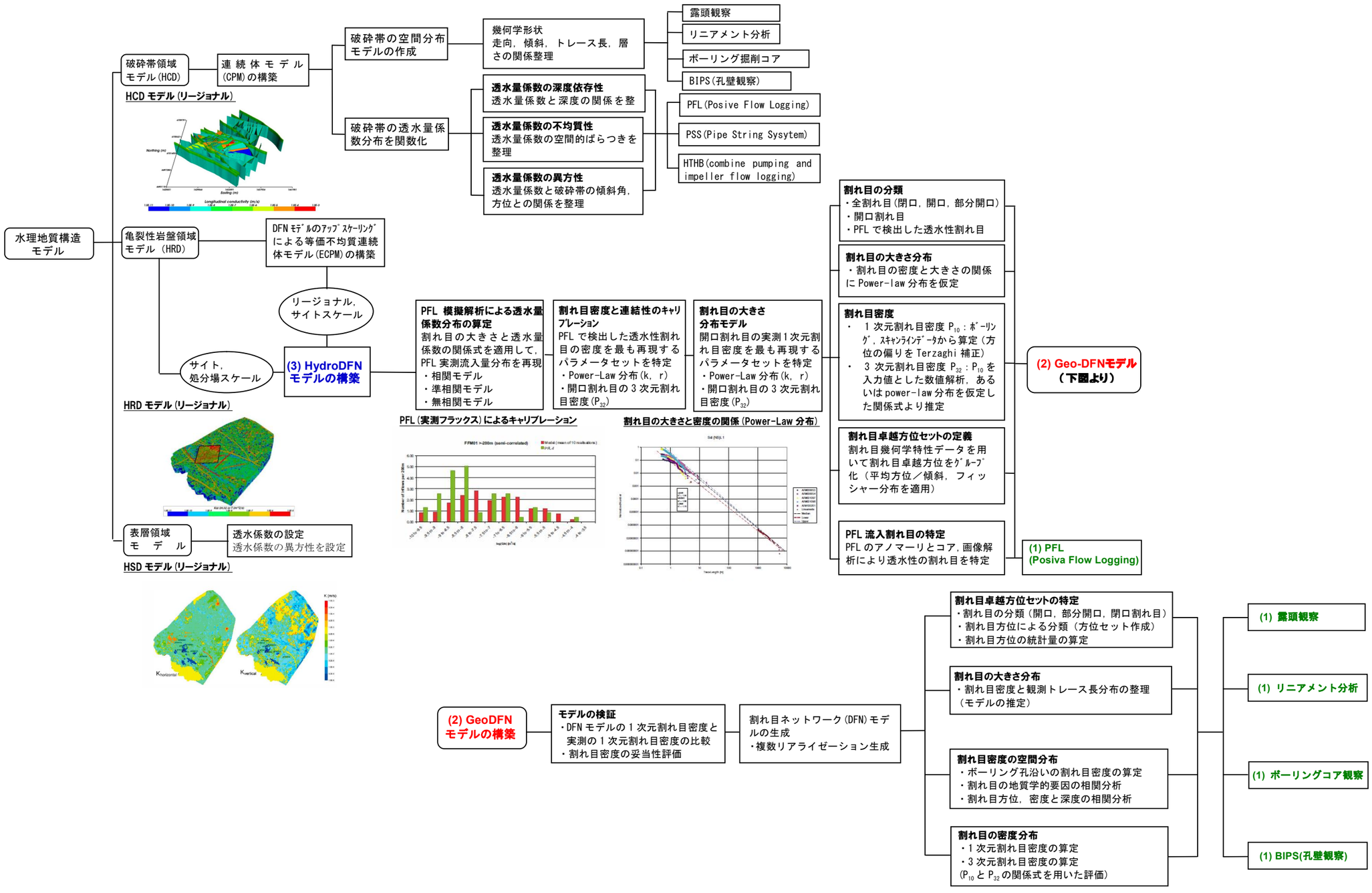


図 3.2.1-1　2011 年度に取りまとめた Forsmark サイトにおける地質構造モデルおよび水理地質構造モデルの構築の流れ（江橋ほか，2012；図 3.2.2-8 より）

(1) モデル構築に活用された調査データ

GeoDFN モデル(GeoDFN ver. 2.2）の構築に活用された調査データは，以下の三つに大別できる(La Pointe et al., 2005, p. 11, Fox et al., 2007)。

・リニアメントデータ
・露頭観察データ
・ボーリング調査データ（コア観察，BIPS 孔壁観察を含む）

リニアメントデータは, 図 3.2.1-2 に示すように割れ目の卓越方位に基づく割れ目セットの定義や割れ目や破砕帯の大きさ（トレース長）と頻度の関係を求めるためのデータとして活用される。図 3.2.1-3 に示すような露頭観察データも同様に割れ目セットを定義するためのデータの一つであるが，割れ目方位の統計量を算定するためのデータとしても活用されている。ボーリング調査は, Forsmark サイトにおける処分場の候補エリアとその周辺の複数の地点で実施された（図 3.2.1-4 参照)。ボーリング調査で取得されたデータは，図 3.2.1-5 に示す柱状図等を活用して，ボーリング孔ごとにコア観察や BTV 観察により確認された地質構造（岩盤区分，岩盤領域，破砕帯）に関する整理が行われている。また，割れ目の種類，方位，頻度等の割れ目特性に関しても同様にボーリング孔ごとに整理されている（図 3.2.1-6 参照)。これらの割れ目の地質学的特性を表すデータは，岩盤領域や深度ごとの割れ目の密度や方位の特徴を分析するためのデータであり，GeoDFN モデル構築の入力パラメータ（方位分布，大きさ分布，密度分布）の統計量を算定するためのデータとして活用されている。

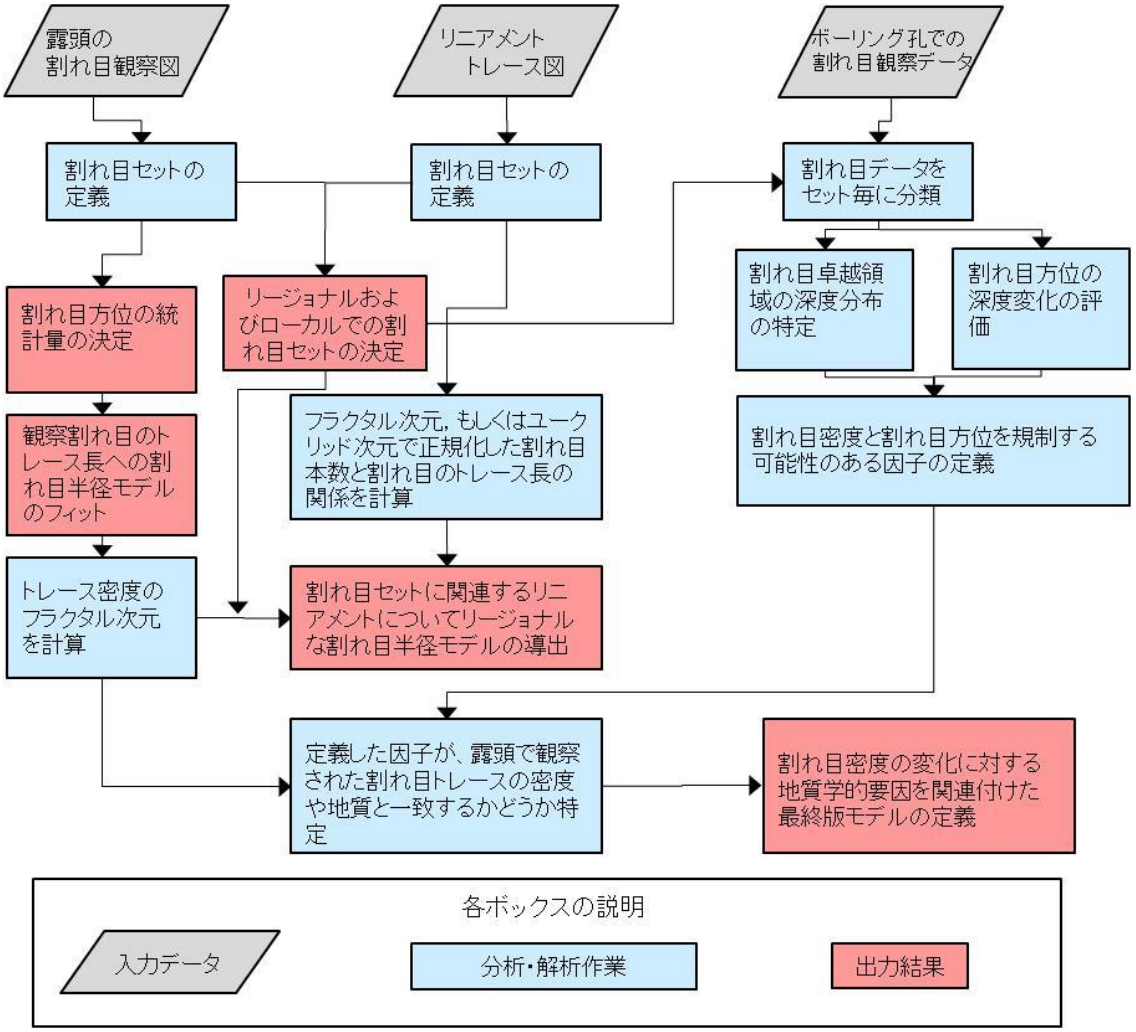


図 3.2.1-2　割れ目特性に関連するデータの解釈フロー

(LaPointe et al., 2005, p.19 を和訳)

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

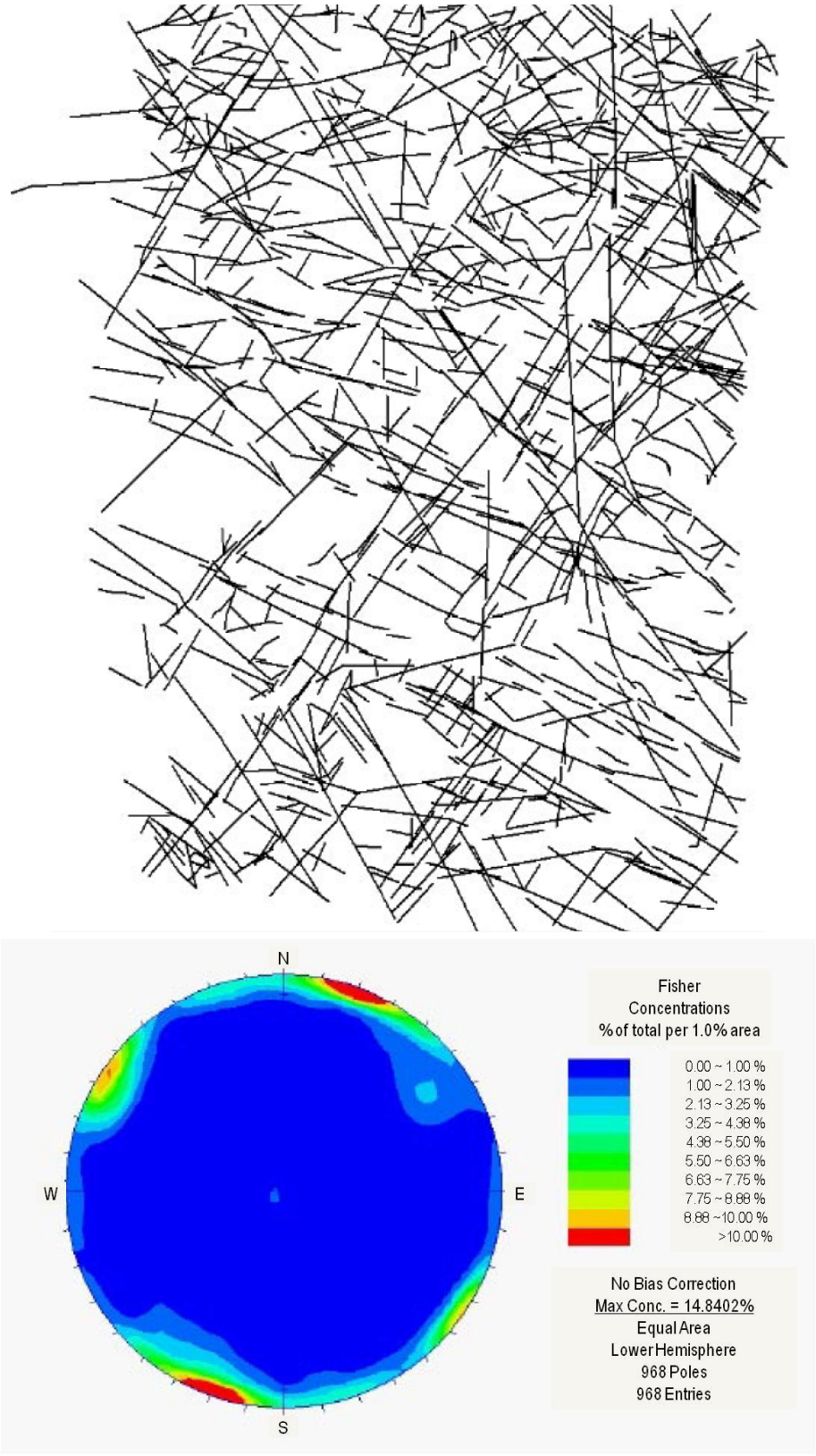


図 3.2.1-3　Forsmark サイトにおける割れ目の露頭観察データの例

(LaPointe et al., 2005, p.20)

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

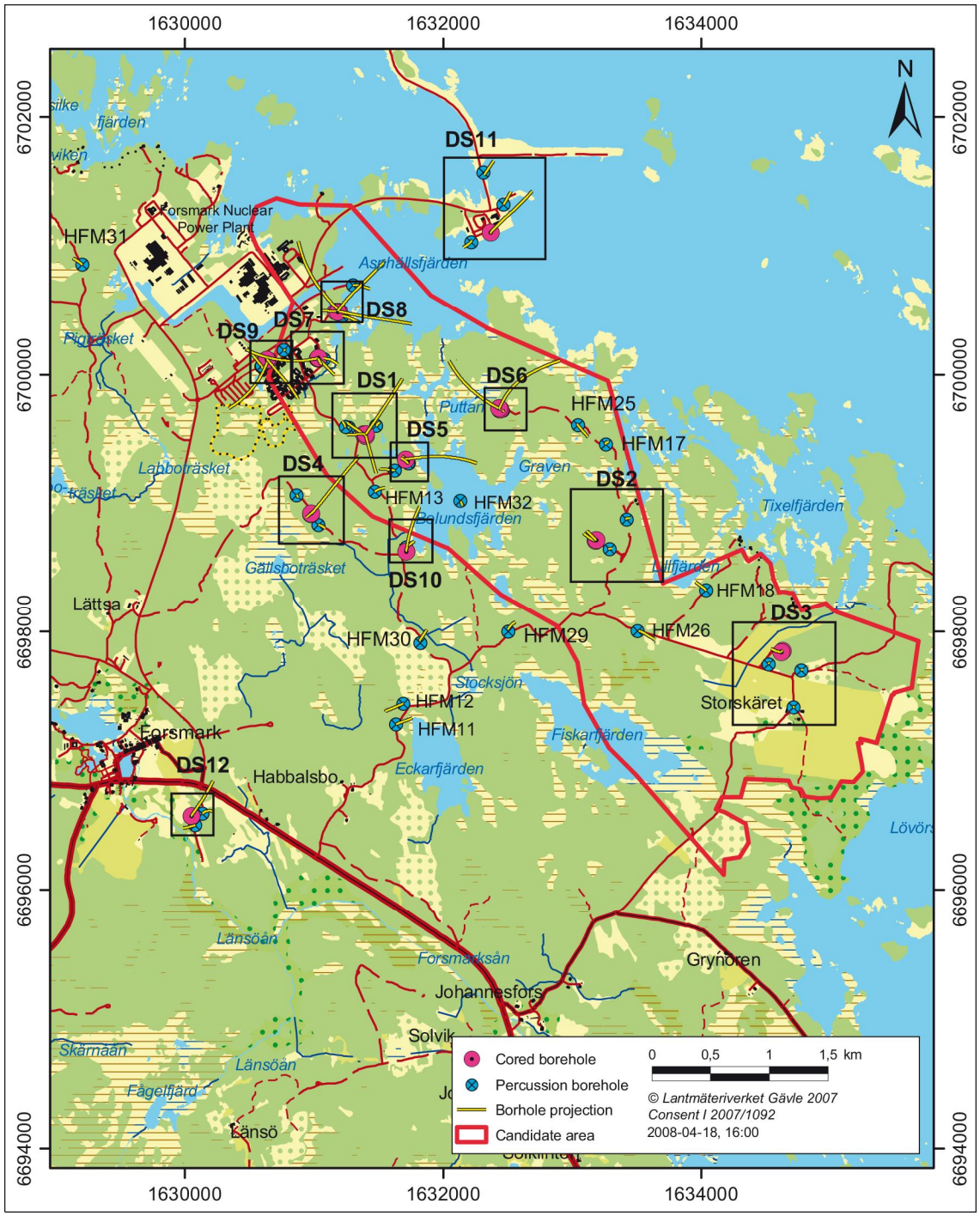


図 3.2.1-4　Forsmark サイト周辺のボーリング調査サイト（Selroos and Follin, 2010, p.15）

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

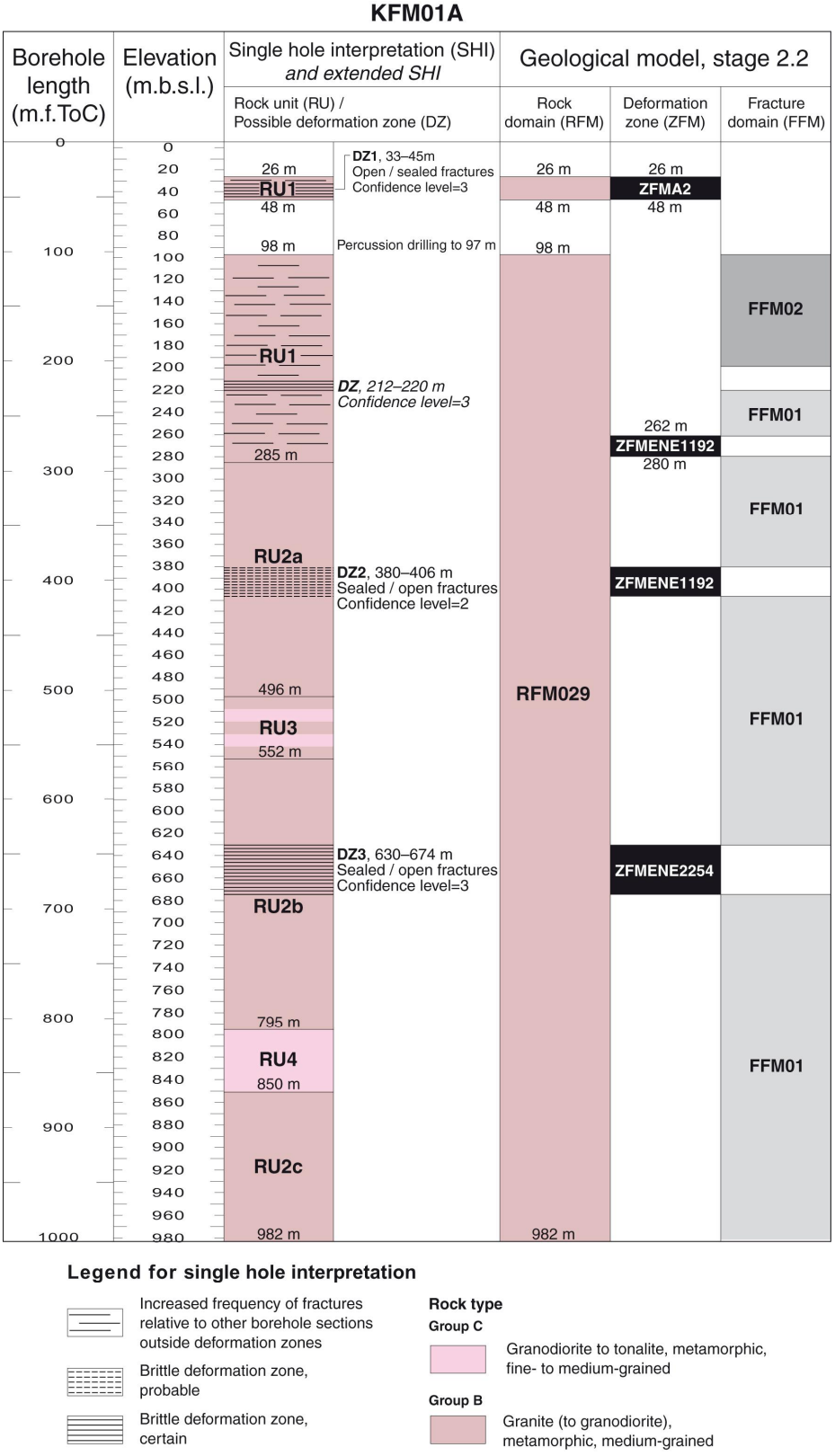


図 3.2.1-5　ボーリング地質柱状図の例（Olofsson et al., 2007, p.196）

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

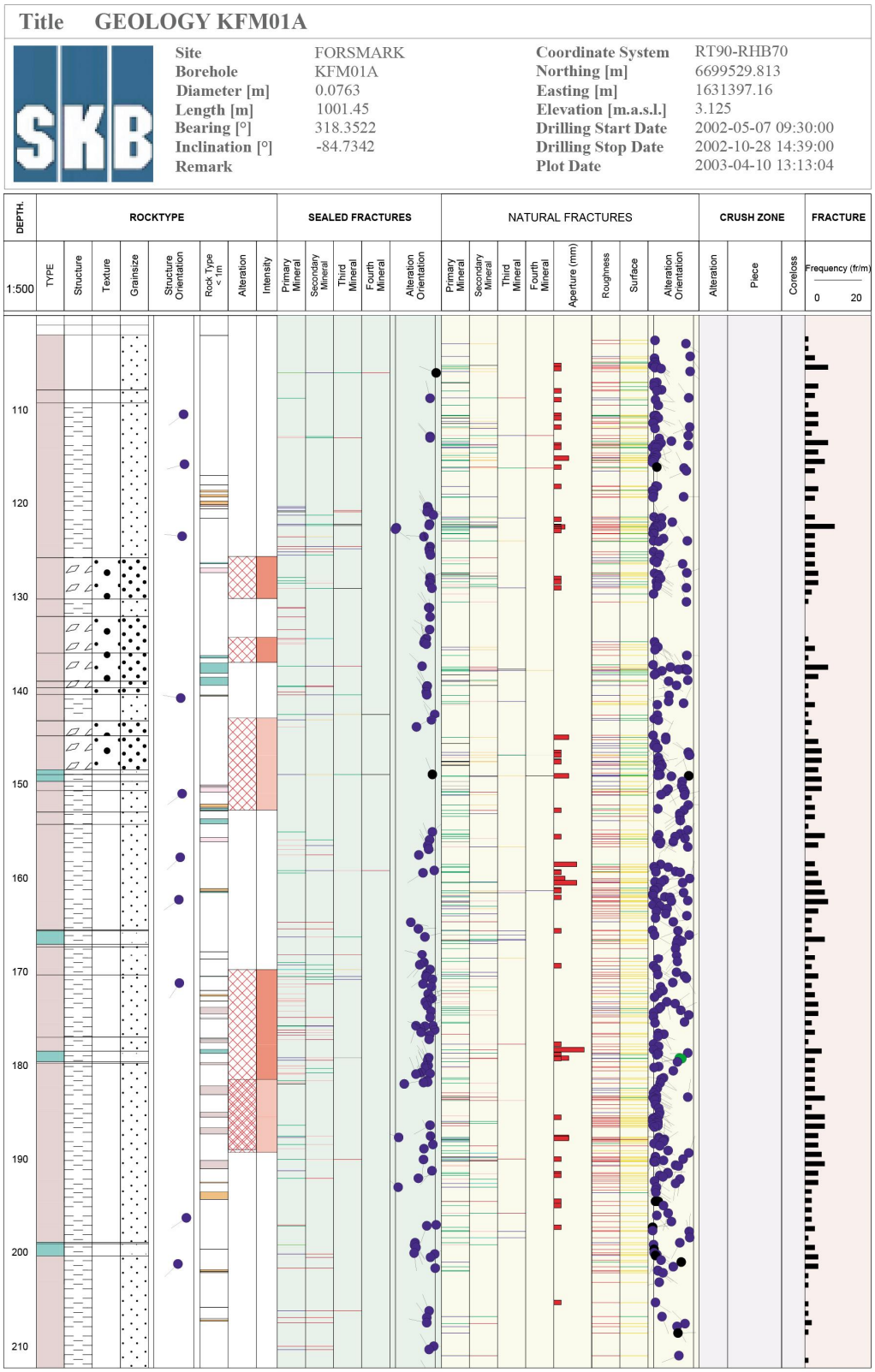


図 3.2.1-6　ボーリングで確認された割れ目分布図

（Petersson and Wängnerud., 2003, p.78）

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

水理特性に関する調査データは，主にボーリング孔内で行われた PFL（Posiva Flow Logging；図 3.2.1-7 参照)により取得されたデータと，PSS(Pipe String System；図 3.2.1-8 参照)により取得されたデータで，HydroDFN モデル（HydroDFN ver 2.2）は PFL のデータを重視してモデルの構築がなされている(Follin et al., 2007, p.31)。

PFL は，割れ目系の結晶質岩中でボーリング孔から水理的に一定の連続性を有した割れ目を検出するために開発された検層技術である。PFL-f と呼ばれる試験方法では，孔全体から長時間（約１週間）揚水を行うため，ボーリング孔全体を線状の揚水部と見なした評価が可能となる。PFL-f 試験はボーリング孔に交差する地下水流動に寄与する個々の割れ目を，ボーリング孔に沿って高い分解能で検出可能な試験である。Forsmark サイトで実施した PFL-f 試験では 0.1m の分解能で検層が実施され，検出限界が 30mL/h のフローメーターが使用された(Follin et al., 2007, p.37)。検出された透水部の透水特性は定常状態における放射状流れを想定した評価がなされる。PFL-f 試験には以下のような特徴があるとされている(Follin et al., 2007, pp.37-38)。

- 各試験区間の周辺には定常-放射状流が生じている。ラバーディスクで区切られた試験区間（最小 0.5m）を 0.1m ずつ移動させて測定するため，PSS 試験に比べて流動に寄与している割れ目の場所を特定しやすい。孔壁観察（BIPS）データと組み合わせることで，地下水が流動する割れ目の位置と方位を特定することができる。ボーリング孔沿いの位置（深度）判定の不確実性の最大値は±0.2m である。
- ボーリング孔全体から揚水され，ボーリング孔全体が線状のシンクとみなせるため，ラバーディスクの上下でボーリング孔による流動割れ目との短絡は生じない。しかし，ボーリング孔で孔径拡大が生じている場合や試験区間の下で軸方向の流れが生じている場合にはラバーディスクに対する問題が生じる。
- ボーリング孔から一定の連結性が無い割れ目や揚水するボーリング孔と連結しない割れ目群に対しては調査で検出できない。すなわち，十分な流量で一定の連結性がある開口割れ目についてのみ検出でき，評価が可能である。
- 割れ目の透水量係数は，流量が測定された 0.1m の区間長に対する値で定義される。流量が検出されない区間に対して流量下限値を割り当てることはしない。
- PFL-f 試験で求められる透水量係数 $T_{PFL\text{-}f}$ は影響半径が既知で定常-放射状流を仮定した Thiem の式から計算される。この値は，実際には流動形状やスキン効果，あるいは影響半径は未知であるため，透水量係数の大きさのオーダーを示す値として取り扱うべきである。実際の透水量係数の閾値は，サイトにより異なるが，Forsmark サイトでは 1×10^{-9} m^2/s を閾値としている。

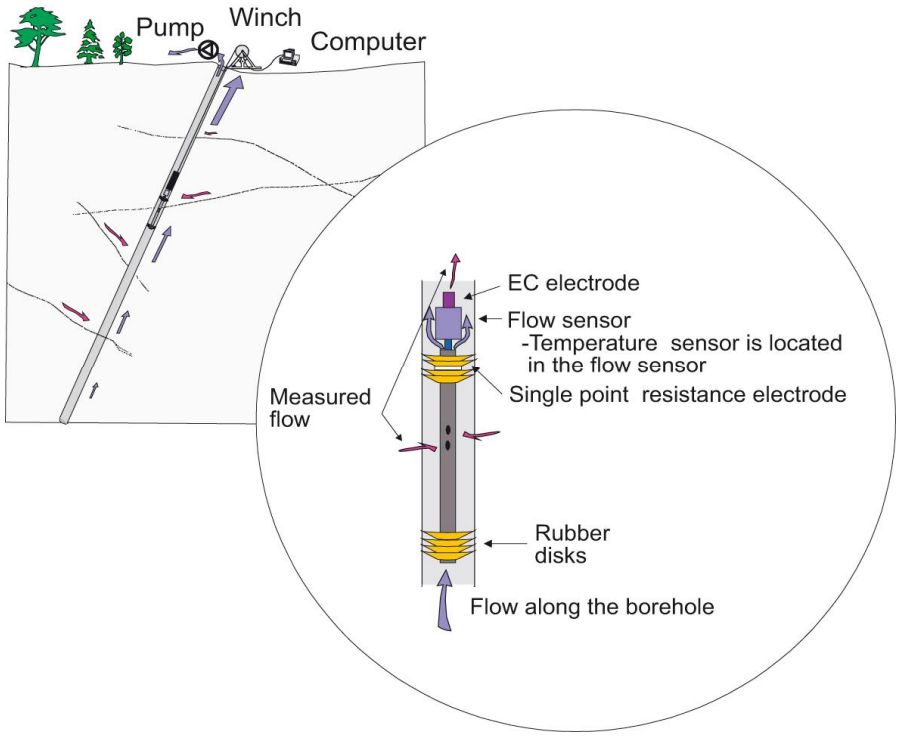


図 3.2.1-7　Forsmark サイトで使用された PFL 装置の概念図
(Follin et al., 2007, p. 37)
Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

PSS による測定は，複数の異なる試験区間長を設定したダブルパッカーシステム（図 3.2.1-8 参照）を用いた定圧注水試験で行われた。Forsmark サイトで行われた最も短い試験区間長は 5m である。定圧注水は 20 分間と短い。PSS を用いた試験には以下のような特徴がある(Follin et al., 2007, pp. 38-39)。

- 試験区間は一般に長く，そこには複数の割れ目が存在するため，個々の割れ目を区別することなく同時に調査される。個々の割れ目の透水性に対する寄与度や幾何学形状は，統計学的な性質について追加の仮定がなければ推定することはできない。
- 流動形態（線形，放射状，球状）および流動状態（定常，非定常）は，試験区間が一時的な点状のソースとしてしか作用しないため，信頼性をもって想定することはできない。そのためには，全ての時間領域を含めて流動形態や流動状態を分析，評価しなければならない。
- ボーリング孔近傍で割れ目密度が高い場合，パッカー区間の上下では，ボーリング孔と短絡する局所的な連結割れ目が存在する可能性がある。
- 試験方法によっては，試験区間と連結性が無い孤立した割れ目や割れ目群の透水量係数が測定される可能性がある。割れ目のネットワーク構造によるコンパートメント構造の水頭拡散率も計測に含まれる可能性がある。連結性の問題を解決するためには，境界の影響を評価するか，あるいは別の方法を適用しなければならない。
- 試験区間の透水量係数の値は，注水期間中に流量が検出されたかどうかに関係なく常に算定される。PSS に使用されるフローメーターの検出限界は 60mL/h であり，これは定常流を仮定した Moye の式により 6.7×10^{-10} m^2/s の透水量係数に相当する。

・ 取得されるデータは，原位置の流動状態に関係なく，各試験区間について単孔式透水試験の試験方法に従って算定した二つの透水量係数（定常：T_{s-s}，非定常：T_{tr}）が含まれる。T_{s-s} は Moye の式を使用し，シャットイン時間（20 分）の流速に基づいて算定される。T_{tr} は複数の方法で算定される。理想的には，最初の放射状流が生じる時間に対するタイプカーブ法により評価されるべきである。もし，放射状流が認められない場合には，線形，あるいは球状の流動モデルによって算定される。もし，明確な境界の影響が確認された場合には，追加情報として記録される。記録された情報には，各試験区間の最適な透水量係数の値（推奨値）が同時に提示されている。推奨値は T_{BC}（BC は Best Choice）として示される。

PSS 試験(5m 区間，20m 区間)から算定した透水量係数（定常 Ts-s）と各 PSS の試験区間で PFL-f 試験により検出された透水箇所の透水量係数（T_{PFL-f}）の合計値の関係の一例を図 3.2.1-9 に示す。また，PSS 試験(5m 区間）と PFL-f 試験の比湧水量の合計値の関係の一例を図 3.2.1-10 に示す。両図ともに PSS 試験から算定した試験区間の透水量係数と PFL-f 試験から算定した透水量係数（試験区間の合計値）に一定の相関があるが，PSS 試験から算定した透水量係数が大きい傾向を示すことが分かる。この差異は，試験期間の違いが主要な要因と考えられる。PSS 試験では定圧注入試験開始 20 分間と短く，ボーリング孔から一定の範囲の透水構造だけが測定対象となっている可能性があり，非定常な流動状態の測定結果を評価したものである。これに対して，PFL-f 試験では 1 週間程度の連続揚水によりボーリング孔から水理的に連続している構造中の流動状態を，ほぼ定常状態に近い状態で測定している。これらの違いが透水量係数や比湧水量の評価結果の違いを生じさせたと考えられ(Follin et al., 2007, p.40), SR-Site の HydroDFN モデルの構築に際しては，ボーリング孔から水理的に連続している構造中の流動状態を測定できている可能性の高い PFL-f 試験のデータを重視した解析が行われている。

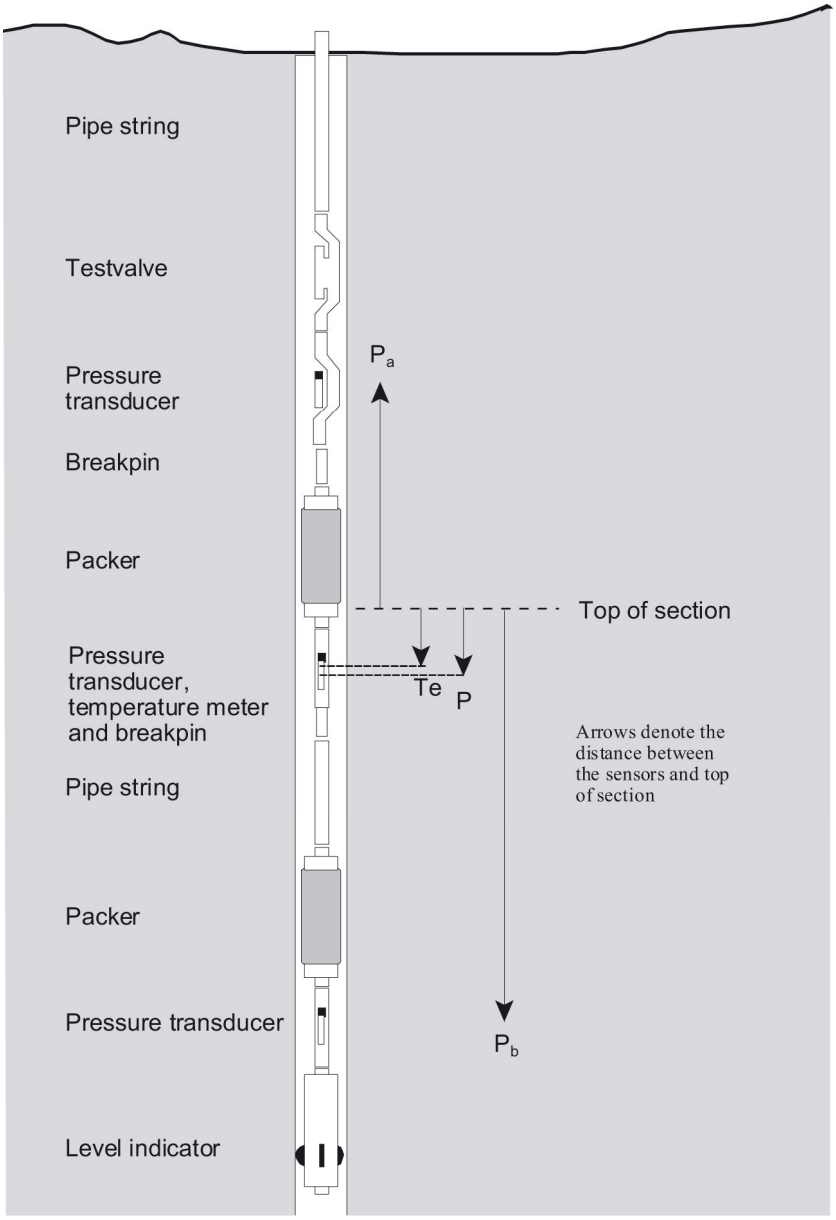


図 3.2.1-8　PSS 試験の概念図(Follin et al., 2007, p.39)

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

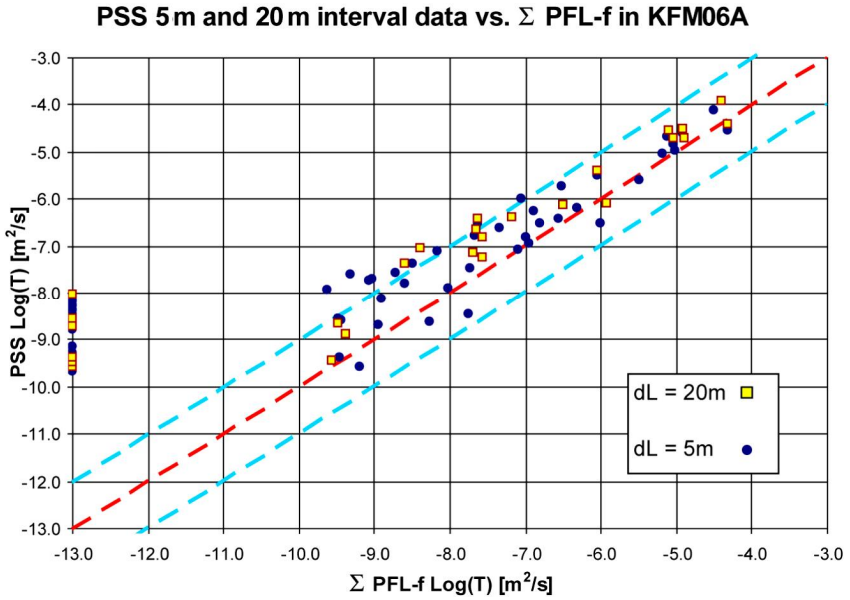


図 3.2.1-9　PSS 試験(5m 区間，20 区間）から得られた透水量係数と PFL-f 試験から得られた透水量係数の比較(Follin et al., 2007, p.41)

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

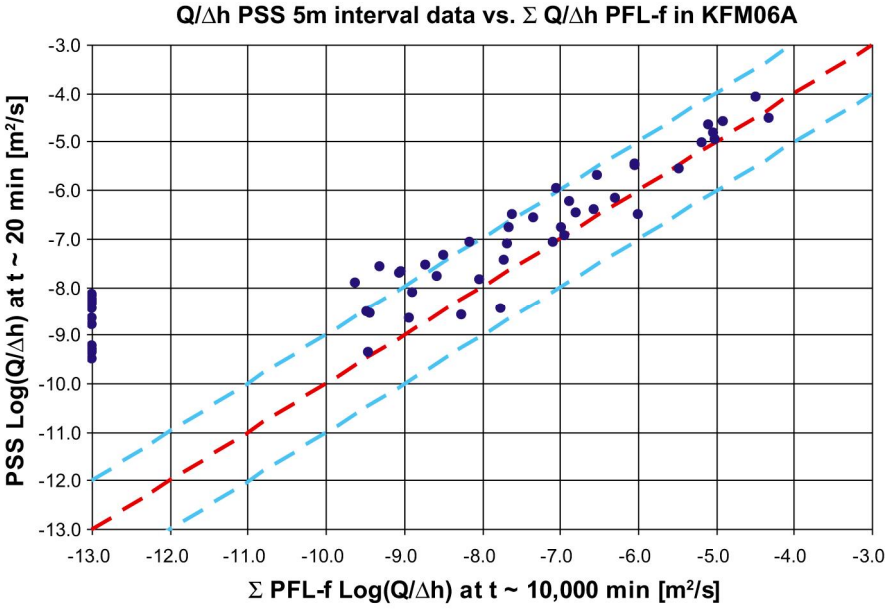


図 3.2.1-10　PSS 試験から求めた比湧水量と PFL-f 試験から求めた比湧水量の比較(Follin et al., 2007, p. 42)

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

(2) GeoDFN モデルの構築

GeoDFN モデルの構築には，以下の仮定が用いられた(SKB, 2008, p.158)。

- 割れ目は，開口幅で表現される厚さと半径（位置とは独立）を持った平板，または円板として近似する。
- 主要な DFN モデル（割れ目の大きさ分布モデルに露頭観察データとリニアメントデータを使用したモデル）では，円盤形状の割れ目の面積と等価な半径として 0.5m（露頭観察データの範囲の下限値）から 564m（破砕帯としてモデル化している構造の下限値）までの大きさを考慮している。追加の代替モデル（割れ目の大きさ分布に露頭観察データとリニアメントデータに加えてボーリングデータを使用したモデル）では，円盤形状の割れ目の面積と等価な半径として 0.039m から 564m までの大きさを考慮している。
- ボーリングコアで確認される割れ目の方位には不確実性があるため，孔壁観察（BIPS）で検出された割れ目を方位解析に使用する。さらに，KFM02A および KFM09B 孔の割れ目の方位データは，方位の不確実性が 10°以上あるため，割れ目セットの方位モデリングからは除外されている。
- DFN モデルの統計量は，モデル化の対象とした岩盤領域内でのみ有効である。空間的な分析の結果から，モデル化の対象として設定されている岩盤領域の境界設定は，バックグラウンド割れ目の DFN モデルを区別する境界としても適切である。
- ボーリングで特定される破砕帯と小規模な破砕帯は，岩盤領域中のバックグラント割れ目とは明らかに異なる分布を呈する。
- FFM01 および FFM06 の岩盤領域は，処分施設を収容できる体積を有するが地表には露出しない。そのため，これらの領域のモデルに用いられる割れ目の大きさ分布の特性は，地表に露出している FFM02 岩盤領域の特性と同じであることを仮定した。
- Forsmark サイトのリニアメントデータや破砕帯の地表トレースには “クラスタリング”と呼ばれる割れ目密度の分布の粗密が確認されている。しかしながら，それを明確に記述することができないため，領域の中の構造的な異方性を考慮せずに，リニアメントデータや破砕帯の地表トレースは空間的に均質に分布するものと仮定した。また，トレース長については，各岩盤領域で観察された割れ目の個々のトレースは，観察対象とした岩盤領域の境界線を越えることはないと仮定した。この分析方法は，トレース長分布の分析に関して深刻な切り捨て効果の影響を招き，結果的に割れ目の大きさと密度のモデルに重大なバイアスが生じる原因となっている。

GeoDFN モデルは主に以下のパラメータにより構築される。

- 割れ目の方位：特定された割れ目セットの平均方位とその分布モデル（分散を含む）
- 割れ目の大きさ：割れ目セットごとの割れ目の大きさ分布
- 密度：割れ目セットごとの割れ目密度（三次元割れ目密度 P_{32} m^2/m^3）

(i) 割れ目の方位

Forsmark サイトの周辺の 9 か所の露頭観察で記録された割れ目の方位，地質学的特性，幾何学特性の関係のデータから割れ目方位区分（セット）が推定された。その推定作業の流れは下記の通りである(SKB, 2008, p. 159)。

- 露頭観察データに基づき割れ目方位区分（セット）を同定し，ステレオネットにより各割れ目セットの地質学的な特徴を考察する（図 3.2.1-11 参照）。
- 露頭観察データに基づいて決定された割れ目方位区分に基づいて，各岩盤領域の BTV 観察割れ目データを分類する。
- ボーリングデータと露頭観察データに対する各岩盤領域の各割れ目セットに適合する方位分布を一つのデータセットとして統合化し，割れ目の卓越方位（走向傾斜）と統計量（フィッシャー係数）を算定する。

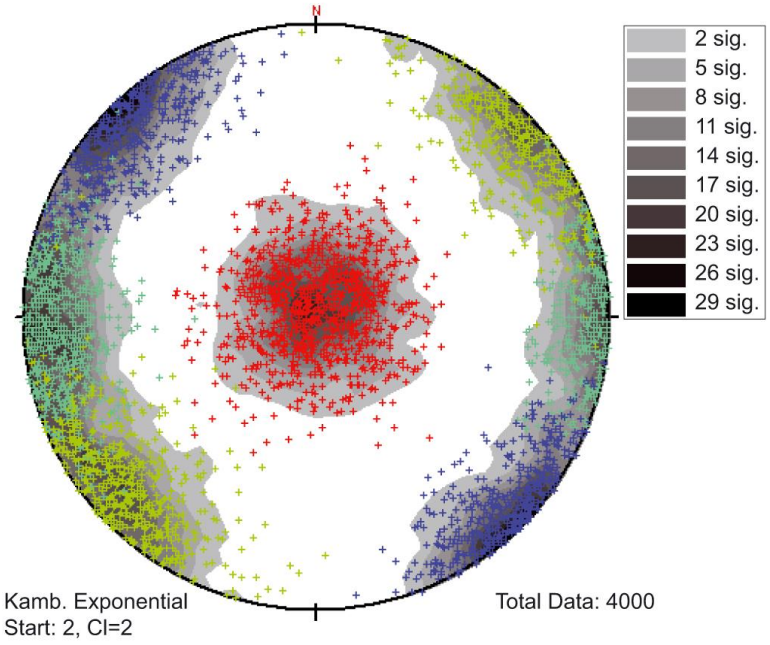


図 3.2.1-11　割れ目セット分析の例(SKB, 2008, p. 161)
色の違いはそれぞれ同定された割れ目セットを表す
Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

(ii) 割れ目の大きさ

割れ目の大きさは，割れ目の面積を数学的に表すために用いられる。Forsmark サイトにおける過去の分析では，割れ目セットごとに異なる大きさモデルを適用すべきであると考えられた。しかしその後，岩盤領域はそれぞれ異なる地質学的な特性により区分されているため，岩盤領域ごとに異なる割れ目の大きさモデルを設定する方が合理的であると考えられた。このため，各岩盤領域の個々の割れ目セットごとに異なる大きさモデルが設定された (SKB, 2008, p. 161)。

ここでは，露頭観察データとリニアメントデータを用いた割れ目の大きさ分布モデル「主要 DFN モデル」として，べき乗分布を仮定した三つのモデルが示された（図 3.2.1-12 参照）。

- 構造連続体モデル（TCM：Tectonic continuum model）

  このモデルは，割れ目の母集団が極めて大きい範囲まで拡張されることを想定したモデルである。このモデルでは，露頭で確認される割れ目（メートルスケールのトレース）は，リニアメントや破砕帯と同じ割れ目（キロメートルスケールのトレース）の母集団の一部であ

る。このモデルでは，複数の異なるスケールのデータセットの組合せが適用される。

TCM は割れ目の大きさと密度の相関関係を示したモデルで，割れ目の半径と密度 P_{32} の分布で表わされる。べき乗数 k_r は FFM02 岩盤領域の露頭のトレース長分布データを用いてキャリブレーションされた。その一方で，割れ目の最小半径 r_0 は，FFM02 岩盤領域の露頭のトレースに基づく場合と，各岩盤領域（FFM01，FFM02，FFM03 および FFM06）におけるボーリングデータに基づく場合でそれぞれ値が設定されている。

・ 構造連続体フラクタルモデル（TCMF：TCM に亀裂密度のフラクタルを考慮したモデル）

Fox et al.(2007)は，異なるスケールのデータの相関関係を分析する方法である TCM のオプションとして，TCMF を提示している。ここで，TCM は各スケールの面積比で亀裂密度を補正する方法，TCMF は割れ目トレースの密度のフラクタル次元（Fractal mass dimension: Fox et al., 2007, p. 39）を用いて亀裂密度を補正する方法である。

・ 露頭スケールモデル（OSM: Outcrop scale model）＋テクトニック断層モデル（TFM: Tectonic fault model）結合モデル：

このモデルは，割れ目大きさと密度の関係について唯一のモデルを想定せず，複数のモデルによって構成されている。割れ目は異なるスケールで異なる密度を有する異なる母集団（節理や断層）に属することを仮定して，各モデルについて個別にパラメータを設定する。このモデルは，以下の二つで構成されている。

- OSM：露頭スケールモデルは，露頭でのトレースとして記録される割れ目の大きさと密度とボーリングデータの密度のデータ用いて設定される。基本的には，露頭に表れる割れ目のトレースは，節理としてみなされる。
- TFM：構造断層モデルは，OSM と結合して使用するために考えられた割れ目の大きさモデルである。TFM はリージョナルモデル，ローカルモデル（図 3.2.3-6 参照）内の破砕帯のトレース長さの分布とトレース長の密度 P_{21} を用いて設定される。これらの構造は，節理よりも大きな断層として表現されると仮定している。TFM では，リージョナル，ローカルモデル内の破砕帯のトレース長さの範囲（50m～100m）の水平面におけるトレース長 50m を最も再現しやすい割れ目（円盤を仮定）の半径である 28m（Fox et al., 2007, p. 35 参照）を割れ目最小長さ r_{min} に使用している。ただし，この割れ目の最小長さの設定には大きな不確実性が含まれている。OSM，TFM の両者ともに，割れ目最大長さ 564m まで有効である。

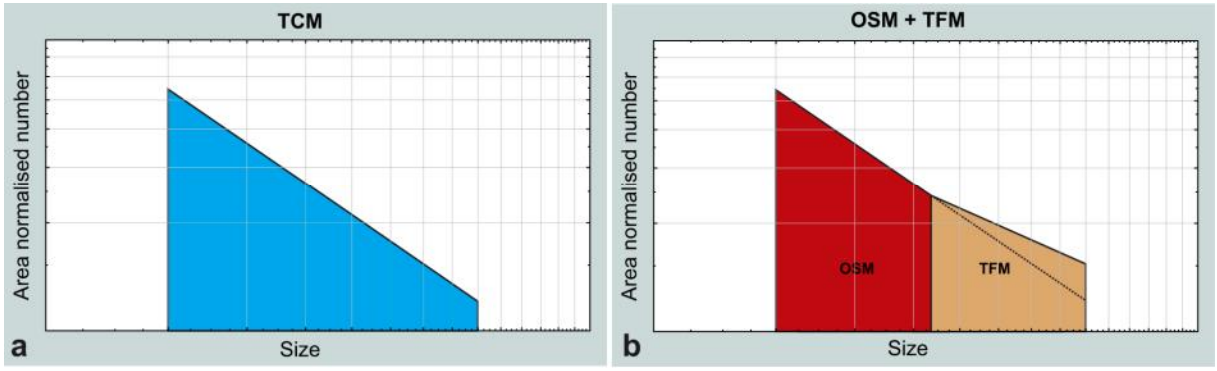


図 3.2.1-12　割れ目の大きさ分布モデルの概念図（左：TCM，右：OSM+TFM）
(SKB, 2008, p. 162)
Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

(iii) 割れ目密度

割れ目の密度の設定には，以下の複数の手法が用いられた (SKB, 2008, p. 163)。

- 大きさと密度の相関関係を表すモデルの中で密度にマッチングさせる方法。これは，ある岩盤領域の割れ目セットに対して，ボーリングデータ中の三次元割れ目密度の算術平均に基づいたモデルである。
- 岩盤領域ごとに，各割れ目セットの統計量を整理する方法。統計量には，算術平均，標準偏差，中央値，四分位数及び割合を含む。分布形状に関する仮定はない。
- ガンマ分布モデルを仮定した方法
- 岩盤の岩石学的な特徴に基づいた岩石相関係数を用いた方法。

Wang (2005)は，コアボーリングで収集される一次元割れ目密度(P_{10}）の値から，三次元の割れ目密度（P_{32}）を求めるための解析解を示している。Wang (2005)の手法では，ボーリング孔の方向とボーリングに交差している割れ目の方向，その割れ目が属する割れ目セットの平均方向との関係から換算係数 C_{13} を求めることで P_{10} から P_{32} を算定することができる。そのため Forsmark サイトでは，ボーリング孔の軌跡が測定されいてる 3m 間隔（Munier and Stigsson, 2007）の倍数である 6m，15m，30m の複数の間隔で P_{10} を整理し，Wang（2005）の解析解により P_{32} を求めた。そして，割れ目の大きさと密度の関係を表すモデルの入力値として適用し，破砕帯の影響ゾーンを含めた場合と含めない場合の影響について検討した（Fox et al., 2007, p. 174）。

また，露頭観察データから求められる割れ目密度（二次元割れ目密度 P_{21}）は，大きさと密度の相関性を表すモデルを拘束するために使用し，最終的なモデルのパラメータに対する検証ツールとしても活用した。

(iv) GeoDFN モデルのパラメータ値のまとめ

岩盤領域 FFM01 を対象として構築された GeoDFN のうち，(ii)で示した割れ目の大きさの三つのモデル（TCM，TCMF，OSM+TFM）および代替モデル（r_0 固定モデル）の各パラメータ値を表 3.2.1-1～表 3.2.1-3 に表す（SKB, 2008, p. 165）。

代替モデルは，割れ目の大きさ分布に露頭観察データとリニアメントデータに加えてボーリン

グデータを使用したもので，割れ目の最小長さ r_0 をボーリング孔半径に固定している（表 3.2.1-4 参照）。

これらのパラメータ値の不確実性については，下記の議論が報告書に記されている（SKB, 2008, p. 176)。

- ボーリング孔，露頭観察，地表リニアメントおよび破砕帯のデータを包含する単一のモデルの設定を可能にする構造的な連続性は存在するか？
- もし構造的な連続性が存在せず，かつ割れ目に関連する断層や破砕帯とは異なる節理や再活動した節理の母集団がある場合，節理の大きさの上限値，あるいは割れ目に関連する断層の大きさの下限値は？
- 岩盤の種類による割れ目密度の違いの影響は？岩盤の種類ごとの密度は統合できるか？もし可能な場合，その不確実性の程度は？
- 割れ目セットの方位（平均値）は岩盤領域の中で空間的に変化するか？　その場合，一定の平均方位を各岩盤領域内の各割れ目セットに使用した場合の不確実性は？

表 3.2.1-1　FFM01 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧 : TCM（SKB, 2008, p. 165）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Set ID	Trend	Plunge	Kappa	r_0	k_r	P_{32} [r_0-∞]	P_{32} [1-564]
NE	314.9	1.3	20.94	0.6592	3.02	1.7350	1.1324
NS	270.1	5.3	21.34	0.0593	2.78	1.2931	0.1427
NW	230.1	4.6	15.70	0.5937	2.85	0.9506	0.6075
SH	0.8	87.3	17.42	0.8163	2.85	0.6263	0.5246

表 3.2.1-2　FFM01 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧 : TCMF（SKB, 2008, p. 165）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Set ID	Trend	Plunge	Kappa	r_0	k_r	P_{32} [r_0-∞]	P_{32} [1-564]
NE	314.9	1.3	20.94	0.7179	3.01	1.7350	1.2393
NS	270.1	5.3	21.34	0.0621	2.76	1.2931	0.1552
NW	230.1	4.6	15.70	0.6256	2.85	0.9506	0.6351
SH	0.8	87.3	17.42	0.7224	2.83	0.6263	0.4757

表 3.2.1-3　FFM01 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧 : OSM+TFM（SKB, 2008, p. 165）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Component	Set ID	Trend	Plunge	Kappa	r_0	k_r	P_{32} [r_0-∞]	P_{32} [1-564]
OSM	NE	314.9	1.3	20.94	0.0385	2.64	1.7350	1.9470
OSM	NS	270.1	5.3	21.34	0.0385	2.90	1.2931	1.3618
OSM	NW	230.1	4.6	15.70	0.0385	2.44	0.9506	1.1635
OSM	SH	0.8	87.3	17.42	0.0385	2.61	0.6263	0.7103
TFM	NE	314.9	1.3	20.94	28	3.00	2.8511E–02	
TFM	NS	270.1	5.3	21.34	28	2.20	3.3863E–04	
TFM	NW	230.1	4.6	15.70	28	2.06	2.5555E–04	
TFM	SH	0.8	87.3	17.42	28	2.83	2.8612E–02	
TFM	ENE	157.5	3.1	34.11	28	3.14	8.7065E–02	
TFM	EW	0.4	11.9	13.89	28	2.85	1.3832E–03	

表 3.2.1-4　FFM01 と FFM06 岩盤領域を対象とした GeoDFN モデルのパラメータ値一覧：r_0 固定モデル（SKB, 2008, p. 166）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Domain	Set ID	Trend	Plunge	Kappa	r_0	k_r	P_{32} [r_0-∞]*	P_{32} [1-564]*
FFM01	NE	314.9	1.3	20.94	0.039	2.72	1.74	0.17
	NS	270.1	5.3	21.34	0.039	2.75	1.29	0.11
	NW	230.1	4.6	15.70	0.039	2.61	0.95	0.13
	SH	0.8	87.3	17.42	0.039	2.58	0.63	0.09
FFM06	NE	314.9	1.3	20.94	0.039	2.79	3.30	0.26
	NS	270.1	5.6	21.34	0.039	2.78	2.15	0.17
	NW	230.1	4.6	15.70	0.039	2.66	1.61	0.18
	SH	0.8	87.3	17.42	0.039	2.58	0.64	0.09

* Match P_{32} represents the correlated size-intensity at which both the outcrop trace data and the borehole intensity data are matched, i.e. the size-intensity model will simultaneously fit the outcrop and the borehole data. The match P_{32} is valid from the minimum radius of the distribution (r_0) to infinity. Note that in all calculations for Forsmark stage 2.2, infinity is assumed to be equal to $1 \cdot 10^{31}$ m. Match P_{32} is equivalent to the arithmetic mean value of P_{32} for a given fracture domain, calculated from 6 m length intervals, outside all deformation zones, and excluding intervals marked as 'Affected By DZ'.

(3) HydroDFN モデルの構築

Forsmark サイトを対象とした水理地質構造モデルの構築に際して，下記の概念的な分類（図 3.2.1-13 参照）に基づきそれぞれの領域（domain）ごとのデータの分析と検討がなされている（Joyce et al., 2010, p. 13）。

- HCD (Hydraulic Conductor Domain)：透水性の破砕帯
- HRD (Hydraulic Rock mass Domain)：破砕帯(HCD)間の亀裂が少ない健岩部
- HSD (Hydraulic Soil Domain)：表土（第四紀堆積物）

本項では，DFN モデルとして取り扱われた HRD を対象とした HydroDFN モデルのモデル化手法について概略を記す。

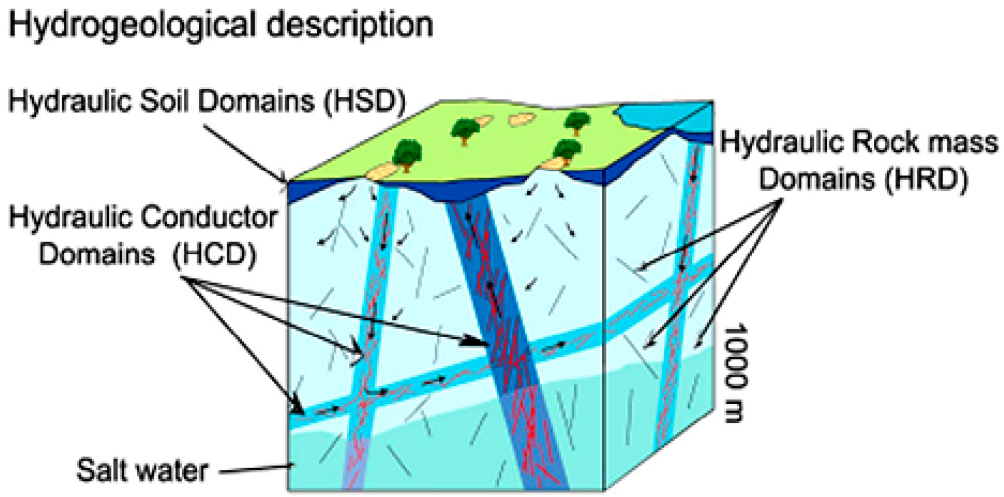


図 3.2.1-13　Forsmark サイトの地質環境モデルで検討された水理地質構造の概念図
（Joyce et al., 2010, p. 14）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

HRD を対象とした割れ目の特性データおよび水理特性データの整理・解釈の手順を以下に記す（Follin et al., 2007, p. 125）。

- ボーリングコア観察結果に基づいた割れ目の判定（地質学的解釈により特定された HCD 内，あるいは Forsmark に分布する HRD 内）と割れ目のグループ化
- 割れ目セットに基づいた各ボーリング孔の一次元割れ目密度（P_{10}）を算定
- 割れ目セットに基づいた各ボーリング孔の Terzaghi 補正（後述）後の一次元割れ目密度（$P_{10,corr}$）を算定
- 全割れ目，開口，部分開口割れ目，及び PFL-f 試験で検出された湧水箇所と関連する割れ目データを，それぞれ割れ目セットごとに分類
- HRD 内部，外部，また深度ごとに割れ目密度と岩盤領域の相関関係を検討
- 加重平均化したボーリング掘削長と Terzaghi 補正後の割れ目密度を用いて，ボーリング孔と交差する割れ目の平均密度を算定
- ボーリング孔ごとの割れ目方位のばらつきを調べ，深度による割れ目方位のばらつきを考慮するために各ボーリング孔について下半球ステレオネット（等面積）を作成
- GeoDFN モデルに適用する主要割れ目セットを特定するために，各ボーリング孔について

Terzaghi 補正後のステレオネット，密度プロットを作成
- 水理地質学的に最も重要な割れ目の方位を特定するために，PFL により検出された湧水箇所に相当する割れ目の方位を，PFL データから解釈された透水量係数ごとに分類してステレオネットにプロット
- 各断層帯内部の割れ目密度を算定

なお，データの整理，解釈において下記の仮定を設けている。
- 割れ目卓越方位セットは，方位についてのみ分類され，フェーズ 1.2 の GeoDFN で定義された方位分割方法（Hard sector 分類，表 3.2.1-5 参照）を適用する。
- 傾斜 50°以上の割れ目は Sub-vertical の分類に属し，50°未満の割れ目は Sub-horizontal の分類に属する。
- Terzaghi 補正は，ボーリング方位による偏りのない割れ目密度を推定するために適用する。各ボーリング孔の補正後の一次元割れ目密度 $P_{10,corr}$ は，三次元割れ目密度 P_{32} を推定するために，ボーリング孔の軌跡が変化するボーリング間で統合化することができる。
- Terzaghi 補正の過程で適用される最大補正係数は 7 であり，ボーリングと割れ目面の交差角度が 8.2° に等しい。
- ステレオネットには，Terzaghi 補正後の等面積下半球としてプロットされる。
- 各ボーリング孔で特定される PFL 流入点は比較可能である。すなわち，検出限界値は等しい。
- 開口割れ目は全割れ目の中の一部であり，PFL 流入点は開口割れ目の中の一部である。

HydroDFN モデル構築フェーズ 2.2 の作業は GeoDFN モデル構築フェーズ 2.2 の構築と併行して進められたため，GeoDFN ver.2.2 のモデルを HydroDFN モデル構築フェーズ 2.2 に活用することができなかった。そのため，GeoDFN フェーズ 1.2 の一部で特定された割れ目セットの割れ目方位の範囲（表 3.2.1-5 参照）を用いて，割れ目セットの分類が行われた。割れ目の大きさ分布の検討に関しても，GeoDFN のモデルと独立して開口割れ目や透水性割れ目の大きさ分布をべき乗分布の概念に基づいて導いている。そのために使用された主要なデータは，ボーリング孔で観察される開口割れ目の密度である。また，PFL-f 試験により検出される湧水箇所の頻度の実測と，シミュレーションにより抽出されるボーリング孔から水理的に連続した割れ目の頻度の比較に基づき，割れ目の大きさ，密度と透水量係数の分布の各パラメータ値がキャリブレーションされた。

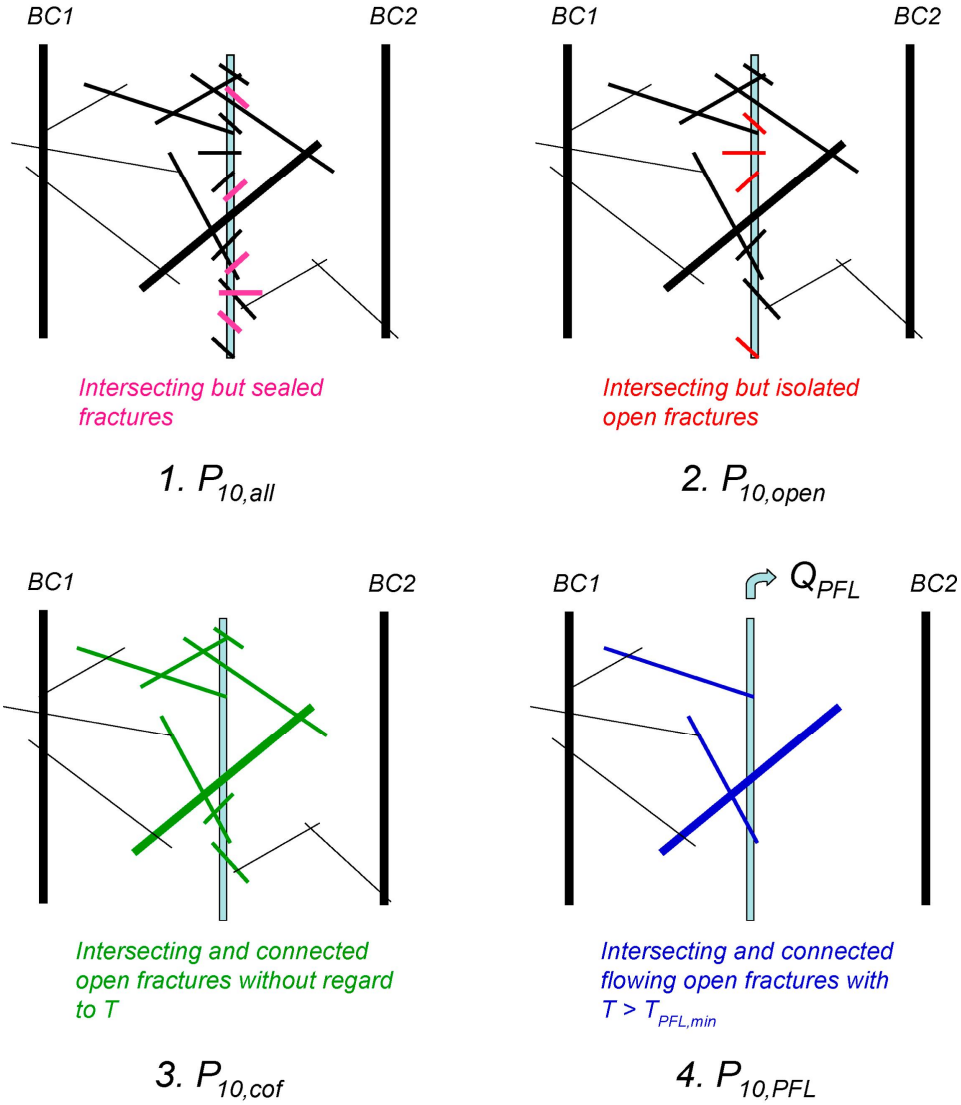
ボーリング孔で観察される割れ目区分ごとの密度の関係を以下に示す。

$$P_{10,all} > P_{10,open} > P_{10,cof} > P_{10,PFL}$$

ここで， $P_{10,all}$ はボーリング孔で観察される全ての割れ目の一次元密度， $P_{10,open}$ は開口（一部開口を含む）性の割れ目の一次元密度， $P_{10,cof}$ は一定の連結性を有する開口性の割れ目（connected open fractures）の一次元密度， $P_{10,PFL}$ は PFL-f 試験で検出されるボーリング孔から水理的に連続した割れ目の一次元密度を表す(図 3.2.1-14 参照)。

表 3.2.1-5　GeoDFN ver1.2 に用いられた割れ目セットの割れ目方位の範囲
（Follin et al. 2007, p. 163）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Set	Trend	Plunge	Dip	Strike	Orientation Fisher distribution (trend, plunge), concentration
1 NS	65–110, 245–290	0–40	50–90	335–20, 155–200	(87, 2) 21.7
2 NE	110–170, 290–350	0–40	50–90	20–80, 200–260	(135, 3) 21.5
3 NW	25–65, 205–245	0–40	50–90	115–155, 295–335	(41, 2) 23.9
4 EW	350–25, 170–205	0–40	50–90	80–115, 260–295	(190, 1) 30.6
5 HZ	0–360	40–90	0–50	0–360	(343, 80) 8.2



$P_{10,all}$：ボーリング孔に交差する全ての割れ目，$P_{10,open}$ 全ての開口割れ目，$P_{10,cof}$ ：全ての連結する開口割れ目，$P_{10,PFL}$ ：1×10^{-9} m^2/s 以上の透水量係数の全ての連結-開口割れ目
図 3.2.1-14　ボーリング孔と交差する割れ目の概念的な分類図
（Follin et al., 2007, p. 156) Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

割れ目の大きさ分布は，GeoDFN 同様にべき乗分布が適用された。この分布は，全ての割れ目のスケールを連続的に表現できることができるとする仮定によるものである。円盤の半径 r として表現される割れ目の大きさに対するべき乗分布 f(r)は，分布の傾きを表す k_r と最小割れ目の大きさを表す r_0 により以下の式で表わされる。なお，モデルで表現する割れ目の最小長さ(r_{min})と最大長さ(r_{max})の範囲を切り出した範囲で定義して用いられることもある。

$$f(r) = \frac{k_r r_0^{k_r}}{r^{k_r+1}}$$

ここで，$r_{max} \geq r \geq r_{min} \geq r_0, r_0 > 0, k_r > 0$ である

露頭とリニアメントの割れ目の大きさのデータは，異なるスケールでのデータを統合化するために面積により正規化した割れ目の頻度を算定し，大きさ分布を選定するためのデータとして使用された。割れ目頻度は，コア掘削によるボーリング孔で測定できる。小さいスケールの割れ目は，一般的に円柱上のコアの表面に現れ，ボーリング孔の直径 0.076m のスケールで観測される割れ目である。図 3.2.1-15 は，SKB の調査で適用された割れ目特性の調査技術の違いによる観測割れ目の大きさを概念的に示したものである。

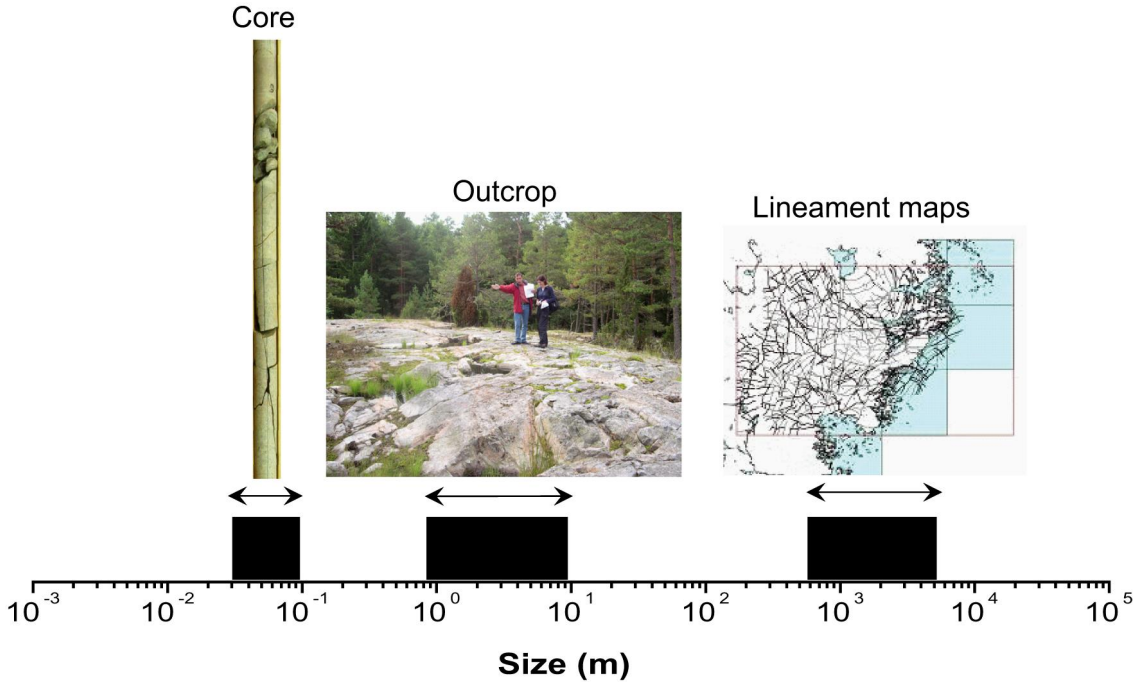


図 3.2.1-15　割れ目トレース長の異なるスケール間の相関の概念図
（Follin et al. 2007, p.159）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

三次元の割れ目密度を表す P_{32} を原位置で直接的に計測することは困難である。P_{32} は上記の Wang (2005)の手法を用いて $P_{10,corr}$ から推定することができ，また必要に応じて数値シミュレーションによるキャリブレーションによっても算定することができる。また，割れ目の大きさがべき

乗分布に従う場合，以下の式を用いて任意の大きさ以上の範囲の割れ目密度 P_{32} を計算することができる。

$$P_{32}[r > r_1] = P_{32}[r > r_0]\left(\frac{r_0}{r_1}\right)^{(k_r - 2)}$$

ここで，$P_{32}[r > r_1]$は半径 r_1 より大きな全ての割れ目の密度である。数値モデル構築の観点から，数値シミュレーションで使用する大きさの範囲[r_{max}, r_{min}] を決定する必要があり，同時に基本的なデータセットの最小値に一致する密度 $P_{32}[r > r_0]$は重要である。ある大きさの範囲[r_{min}, r_{max}]に分布する割れ目密度の総和は次式で求めることができる。

$$P_{32}[r_{min}, r_{max}] = P_{32}[r > r_0]\left(\frac{(r_{min})^{(2-k_r)} - (r_{max})^{2-k_r}}{(r_0)^{(2-k_r)}}\right)$$

HydroDFN モデルの構築では，地下水が流動する割れ目の幾何学的な連結性と分布を定量化することが重要となる。このようなボーリング孔における割れ目の連結性と地下水流動の概念図を図 3.2.1-16 に示す。

べき乗分布の傾き k_r と最小割れ目の半径 r_0 を算定するための方法の一つとして，ボーリング孔半径（0.038m）を r_0 と仮定した上で，ボーリング孔で観察される全ての割れ目と，ローカル及びリージョナルスケールの破砕帯の長さと割れ目密度の分布に一致するよう k_r を求める方法が考えられる。r_0 をボーリング孔の半径 0.038m と仮定して求めた k_r の値を表 3.2.1-6 に示す。

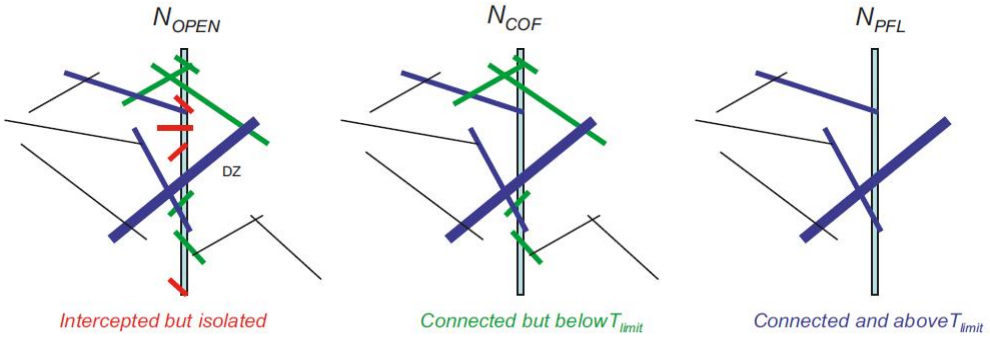


図 3.2.1-16　ボーリング孔における割れ目の連結性と地下水流動の概念図
（Follin et al. 2007, p.160）

N_{OPEN}：ボーリング孔と交差する全ての開口割れ目

N_{COF}：連結する開口割れ目

N_{PFL}：PFL 検出限界（通常，1×10^{-9} m^2/s 程度）以上の流入割れ目

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

表 3.2.1-6　破砕帯と FFM01 内の割れ目密度（$P_{10,all,corr}$）密度の関係から求めたべき乗数 k_r の値（Follin et al. 2007, p. 162）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

k_r					r_0 [m]
NS	NE	NW	EW	HZ	
2.82	2.64	2.60	2.66	2.70	0.038

GeoDFN モデルの構築では，割れ目の大きさパラメータを破砕帯，露頭観察，ボーリングコアの割れ目頻度データを組み合わせることで決定する。その際，割れ目の地下水流動特性の解釈結果については考慮せず，コアや露頭で記載されるすべての割れ目に基づいて構築する。一方，HydroDFN モデルの構築では，地下水の流動に寄与する割れ目（例えば，開口割れ目や PFL 流入割れ目）のみが対象となる。そのような割れ目は，全ての割れ目の一部であるが，このパラメータ分布は, GeoDFN モデルで対象とされる全ての割れ目のパラメータ分布と単純な関係にはない。そのため，開口割れ目や PFL 流入割れ目の大きさの分布は直接的に測定できない。そこで，PFL 流入割れ目の実測頻度に基づいて，開口割れ目の大きさ分布，割れ目密度と透水量係数の分布をキャリブレーションする手法が開発された。その概要を以下に記す。

- 割れ目の大きさに関する複数のべき乗分布を用いた複数の DFN モデルを構築して仮想的に設定したボーリング孔に交差する割れ目の密度とべき乗数の関係を整理する。この作業は，表 3.2.1-6 に記した割れ目の卓越方位セットごとに行う。
- 上記 DFN モデルを用いて，仮想的に設定したボーリング孔に交差する割れ目のうち，一定の範囲で連結する割れ目（図 3.2.1-16 の N_{COF} に相当）の密度を解析し，PFL-f 試験で実測された透水性割れ目の頻度と比較し，PFL 試験の透水性割れ目の頻度に一致するべき乗分布のパラメータの最適値を選定する。
- 各割れ目の透水量係数分布に複数の設定を仮定して，上記 DFN モデルに適用する。それらのモデルを用いて定常状態の PFL-f 試験を想定した地下水流動解析を行い，PFL-f 試験で得られた比湧水量分布に最も近いパラメータ組み合わせを求める。この作業は，表 3.2.1-6 に記した割れ目の卓越方位セットごとに，また深度で区別された領域ごと（例えば, FFM01 では-200m より浅い領域，-200m～-400m の領域，-400m よる深い領域）に行う。割れ目の大きさと透水量係数の相関関係を考慮しない“無相関”ケース，1 対 1 の相関関係を持つ“相関”ケース, 相関ケースに一定の幅のバラツキを有する“準相関”ケースの３ケースが用いられた。

相関ケースと準相関のケースは以下の式により定義される。

相関ケース：$\log(T) = \log(a \times r^b)$

準相関ケース：$\log(T) = \log(a \times r^b) + \sigma_{\log(T)} N(0,1)$

ここで，a と b はそれぞれ定数を，$\sigma_{log(T)}$は透水量係数の対数の標準偏差を，N(0,1)は平均値 0，標

準偏差 1 の正規分布を表す。

割れ目の大きさ分布モデルのべき乗数と亀裂の三次元密度のパラメータ値は，N_{COF} に相当する連結性の評価から求められた。定常状態の PFL-f 試験を想定した地下水流動解析の結果は，PFL-f 試験時のボーリング孔への流量の総和（ボーリング区間長で正規化），各湧水箇所の湧水量 Q を水頭差 s で除した比湧水量（Q/s）のヒストグラム（高透水側の分布），PFL-f 試験で確認された流入割れ目の本数等を指標に実測値との比較がなされた。無相関，準相関，相関の 3 ケースについて，それぞれ実測値を再現している可能性の高いパラメータ値の組み合わせが示されている（表 3.2.1-7 参照）ものの，その複数パラメータを対象とした最適化の具体的方法の詳細は明らかとなっていない。これらのパラメータ値のうち，準相関ケースの値を用いて構築した HydroDFN モデルを対象とした PFL-f 試験の比湧水量（Q/s）分布の解析値と実測値の比較結果の例を図 3.2.1-17～19 に示す。-400m 以深では PFL-f 試験で確認された流入割れ目の頻度が低くデータ数が極端に少ないため比湧水量の分布の解析値を実測値と比較することは困難である。一方で，-400m 以浅は相対的に流入割れ目の頻度が高く比湧水量の実測値が一定の分布形を示しており，解析結果は実測値に近い分布形状を示している。前述のように複数パラメータを対象とした最適化の具体的方法は示されていないが，図 3.2.1-17 の比較により亀裂モデルのパラメータ値を推定している。なお，Follin et al.（2007）は，HydroDFN モデル ver 2.2 の検討として，表 3.2.1-5 に示した GeoDFN ver1.2 に用いられた卓越方位分類に基づいた検討結果を報告するとともに，調査フェーズ 2.2 のデータに基づいた卓越方位も整理してこれを推奨値としている。その後，SR-Site に向けた Site Descriptive Model の検討に際して，Follin et al.(2007)の推奨値に基づいてパラメータ値が更新されている（SKB, 2008; Selroos and Follin, 2010）。FFM01 の領域における更新値を表 3.2.1-8 に示す。

表 3.2.1-7　FFM01 を対象に推定した HydroDFN モデルのパラメータ値
（Follin et al. 2007, p.181）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Fracture domain	Fracture set name	Orientation set pole: (trend, plunge), conc.	Size model, power-law (r_0, k_r) (m, –)	Intensity, (P_{32}), valid size interval: (r_0, 560 m) (m^2/m^3)	Transmissivity model Eq. no, constants T (m^2s^{-1})
FFM01 > –400 m	NS	(87, 2) 21.7	(0.04, 2.60)	0.125	Semi-correlated: (a,b,σ) ($2.0\cdot10^{-9}$, 1.2, 1.0); Correlated: (a,b) ($1.5\cdot10^{-9}$, 1.6); Uncorrelated: (μ, σ) (–7.0, 1.7)
	NE	(135, 3) 21.5	(0.04, 2.75)	0.339	
	NW	(41, 2) 23.9	(0.04, 3.10)	0.126	
	EW	(190, 1) 30.6	(0.04, 3.10)	0.083	
	HZ	(343, 80) 8.2	(0.04, 2.45)	0.374	
FFM01 < –400 m	NS	(87, 2) 21.7	(0.04, 2.60)	0.094	Semi-correlated: (a,b,σ) ($2.0\cdot10^{-12}$, 1.2, 1.0); Correlated: (a,b) ($1.5\cdot10^{-12}$, 1.6); Uncorrelated: (μ, σ) (–10.0, 1.7)
	NE	(135, 3) 21.5	(0.04, 2.75)	0.163	
	NW	(41, 2) 23.9	(0.04, 3.10)	0.098	
	EW	(190, 1) 30.6	(0.04, 3.10)	0.039	
	HZ	(343, 80) 8.2	(0.04, 2.45)	0.141	

表3.2.1-8　調査フェーズ2.2のデータにより更新されたFFM01とFFM02を対象としたHydroDFMモデルのパラメータ値（Selroos and Follin, 2010, p. 25）

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

(a) FFM01 領域

Elevation (m RHB 70)	Fracture set name	Orientation poles: Fisher (trend, plunge), conc. κ (°,°, –)	Size model, power-law (r_0, k_r) (m, –)	Intensity, ($P_{32,open}$), valid size interval: (r_0, 564 m) (m^2/m^3)	Transmissivity model (cf. Table 2-5)
> –200	NS	(292, 1) 17.8	(0.038, 2.55)	0.098	Semi-correlated: $(a,b,\sigma_{logT}) = (6.3 \cdot 10^{-9}, 1.3, 1.0)$;
	NE	(326, 2) 14.3	(0.038, 2.75)	0.391	
	NW	(60, 6) 12.9	(0.038, 3.10)	0.101	Correlated: $(a,b) = (6.7 \cdot 10^{-9}, 1.4)$;
	EW	(15, 2) 14.0	(0.038, 3.10)	0.099	
	HZ	(5, 86) 15.2	(0.038, 2.42)	0.619	Uncorrelated: $(\mu_{logT}, \sigma_{logT}) = (-7.0, 1.2)$
–200 to –400	NS	As above	As above	0.229	Semi-correlated: $(a,b,\sigma_{logT}) = (1.3 \cdot 10^{-9}, 0.5, 1.0)$;
	NE	As above	As above	0.432	
	NW	As above	As above	0.135	Correlated: $(a,b) = (1.6 \cdot 10^{-9}, 0.8)$;
	EW	As above	As above	0.105	
	HZ	As above	As above	0.331	Uncorrelated: $(\mu_{logT}, \sigma_{logT}) = (-7.5, 0.8)$
< –400	NS	As above	As above	0.122	Semi-correlated: $(a,b,\sigma_{logT}) = (5.3 \cdot 10^{-11}, 0.5, 1.0)$;
	NE	As above	As above	0.193	
	NW	As above	As above	0.100	Correlated: $(a,b) = (1.8 \cdot 10^{-10}, 1.0)$;
	EW	As above	As above	0.056	
	HZ	As above	As above	0.158	Uncorrelated: $(\mu_{logT}, \sigma_{logT}) = (-8.8, 1.0)$

(b) FFM02 領域

Elevation (m RHB 70)	Fracture set name	Orientation poles: Fisher (trend, plunge), conc. κ (°,°, –)	Size model, power-law (r_0, k_r) (m, –)	Intensity, ($P_{32,open}$), valid size interval: (r_0, 564 m) (m^2/m^3)	Transmissivity model (cf. Table 2-5)
> –200	NS	(292, 1) 17.8	(0.038, 2.75)	0.497	Semi-correlated: $(a,b,\sigma_{logT}) = (9.0 \cdot 10^{-9}, 0.7, 1.0)$;
	NE	(326, 2) 14.3	(0.038, 2.62)	0.533	
	NW	(60, 6) 12.9	(0.038, 3.20)	0.326	Correlated: $(a,b) = (5.0 \cdot 10^{-9}, 1.2)$;
	EW	(15, 2) 14.0	(0.038, 3.40)	0.116	
	HZ	(5, 86) 15.2	(0.038, 2.58)	1.609	Uncorrelated: $(\mu_{logT}, \sigma_{logT}) = (-7.1, 1.1)$

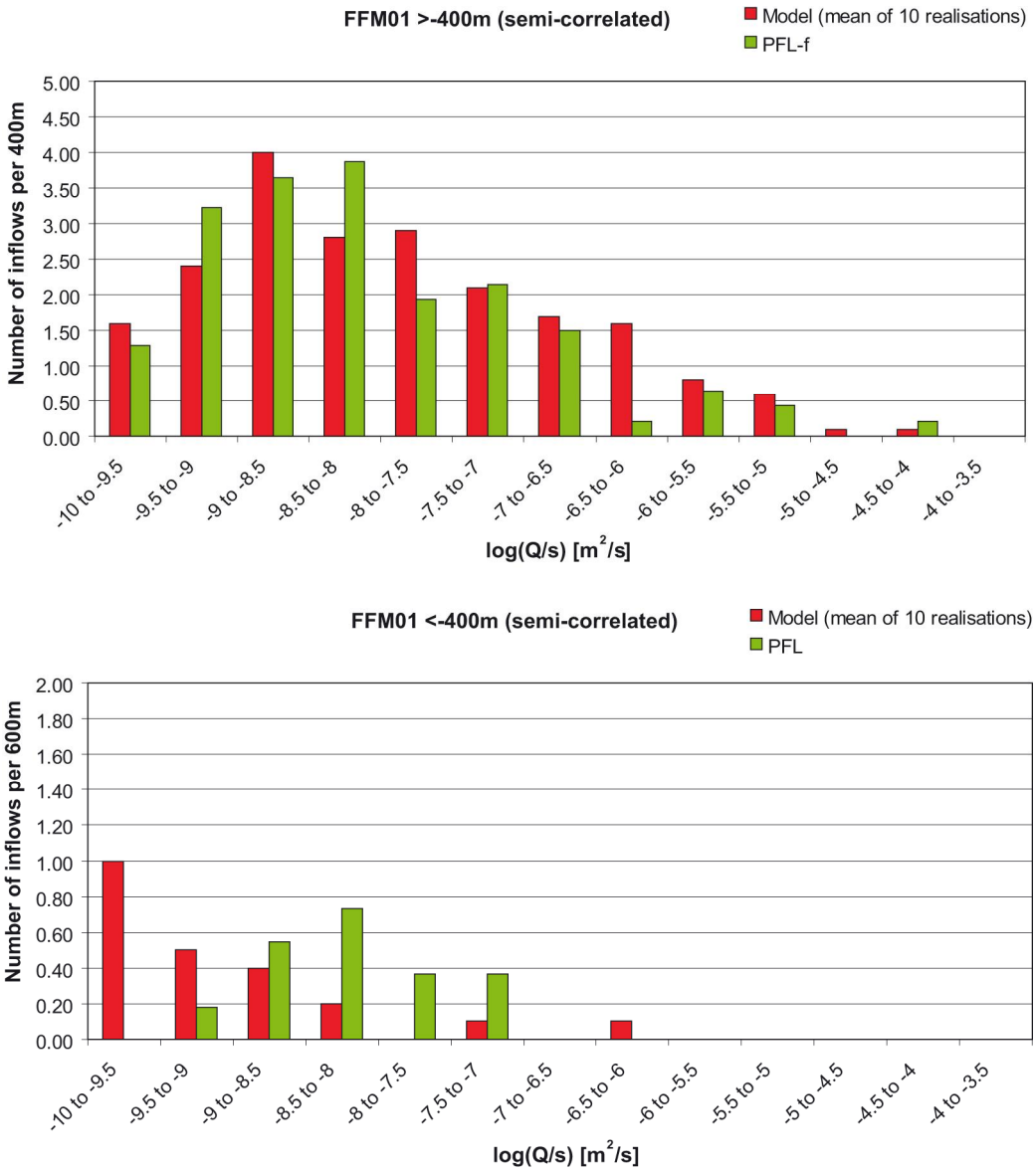


図 3.2.1-17　FFM01 領域を対象に構築した HydroDFN モデルを対象とした PFL-f 試験の比湧水量（Q/s）分布の解析値（赤）と実測値（緑）の比較結果の例（準相関モデル）（Follin et al., 2007, p. 220）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

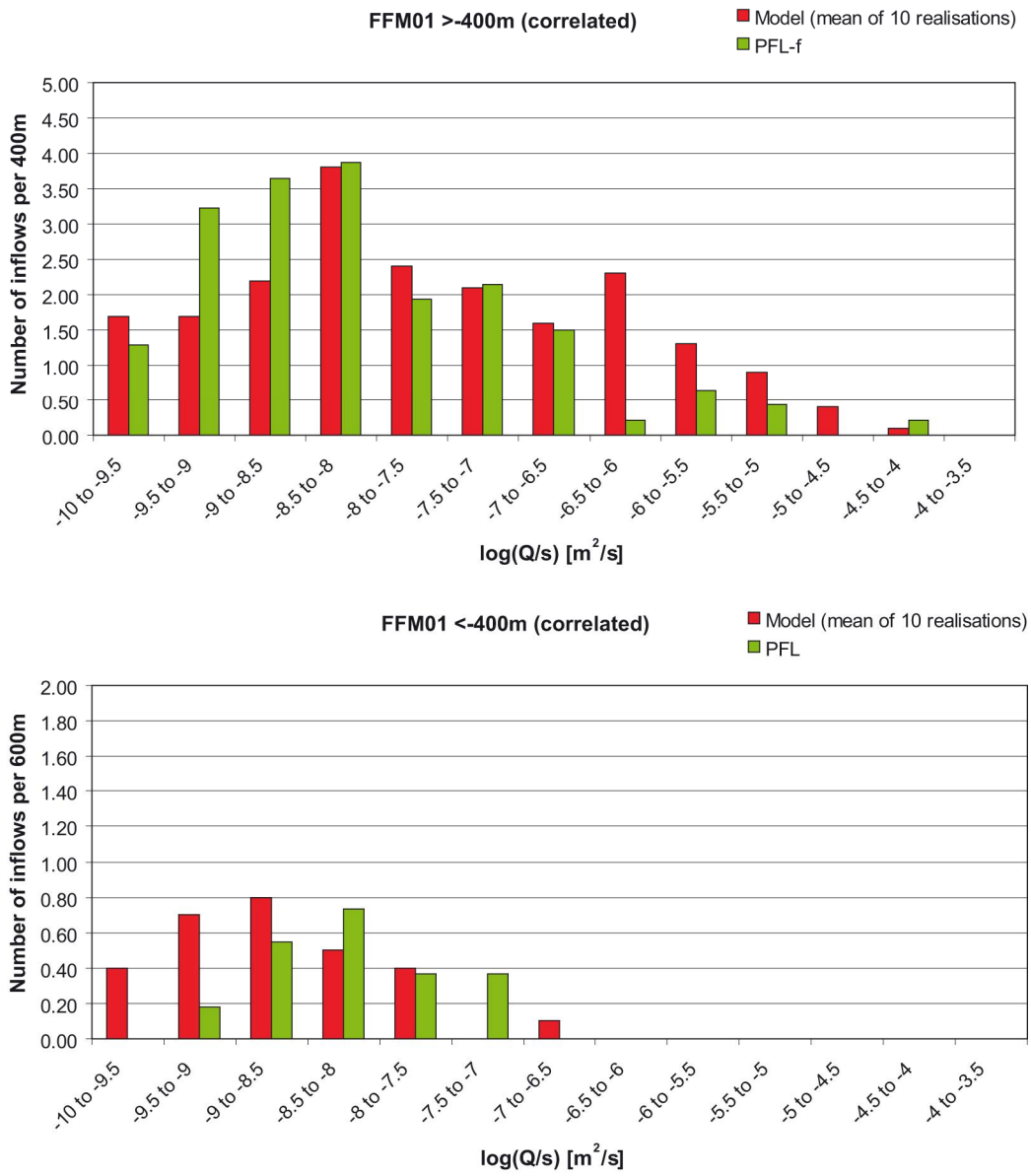


図 3.2.1-18 FFM01 領域を対象に構築した HydroDFN モデルを対象とした
PFL-f 試験の比湧水量（Q/s）分布の解析値（赤）と実測値（緑）の比較結果の例（相関モデル）
（Follin et al., 2007, p. 222）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

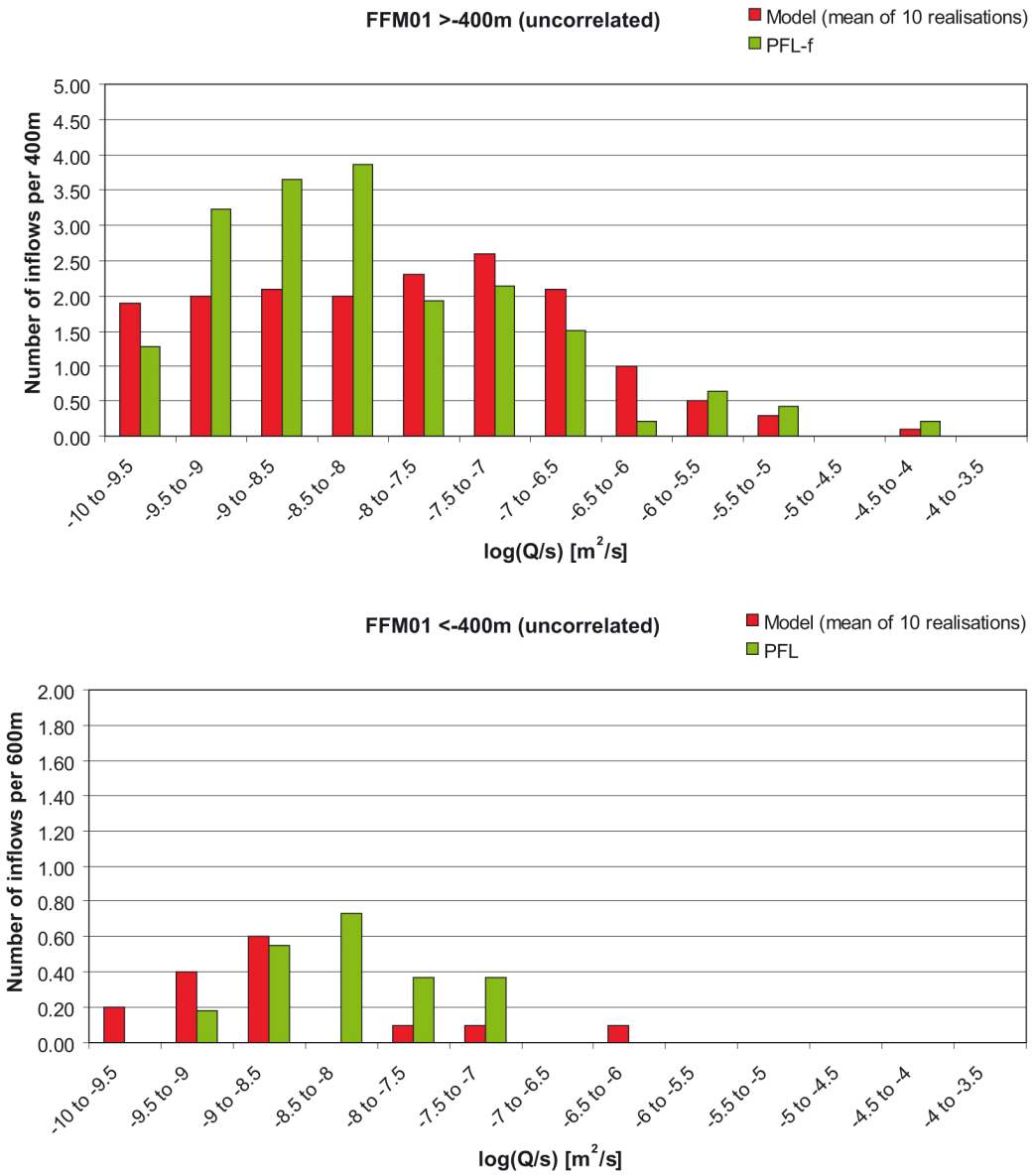


図 3.2.1-19 FFM01 領域を対象に構築した HydroDFN モデルを対象とした
PFL-f 試験の比湧水量（Q/s）分布の解析値（赤）と実測値（緑）の比較結果の例（非相関モデル）
（Follin et al., 2007, p. 224）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

3.2.2　SR-Site の水理地質構造モデル構築手法の試行とその不確実性の検討

母岩の適性を評価する手法に関する調査検討として，前項までに整理した SR-Site における水理地質構造モデルの構築手法に基づき，Forsmark サイトの任意の岩盤領域を対象に水理地質構造モデルの構築を試行した。検討の対象とする領域は Forsmark サイト全域ではなく，母岩と想定できる岩盤領域の割れ目等の情報に基づき設定可能なパラメータ値を用いて，任意の数百メートル程度の岩盤領域とした。割れ目等の情報は，限られた数の地表からのボーリング調査で取得されたデータに基づいた。

割れ目の透水量係数の設定には水理試験等の試験手法に起因するデータの不確実性に加えて，データを評価する概念モデルに起因する不確実性やモデル上の仮定に基づく不確実性が含まれる。SR-Site では透水性割れ目の分布と水理特性を高精度で検出できる PFL-f 試験を重視し，その実測結果を再現可能なパラメータ組み合わせを求めている（3.2.1 項(1)参照）。一方，Forsmark サイトでは，数多くの区間で PSS 試験と呼ばれるダブルパッカーを使った透水試験が行われている。本検討では，割れ目透水量係数分布の設定手法の選択に伴う不確実性について検討するために，この PSS 試験データを用いた透水量係数設定手法を代替的な方法として取り入れた。

本項の水理地質構造モデル構築の試行によって得られた知見は，3.2.1 項の調査結果とともに評価ツリーに反映した。また，3.3 節では本項で構築した水理地質構造モデルを用いて地下水移行時間の評価を試行し，評価ツリーの適用方法について検討した。

(1) データセットの作成

Forsmark サイトでは，図 3.2.2-1 に示すように候補領域の中で北西側の領域が処分場の候補領域として設定された。この領域には，上部に FFM02（深度：>-200m 程度），下部には FFM01 および FFM06 の岩盤領域が設定されている（図 3.2.2-2 参照）。

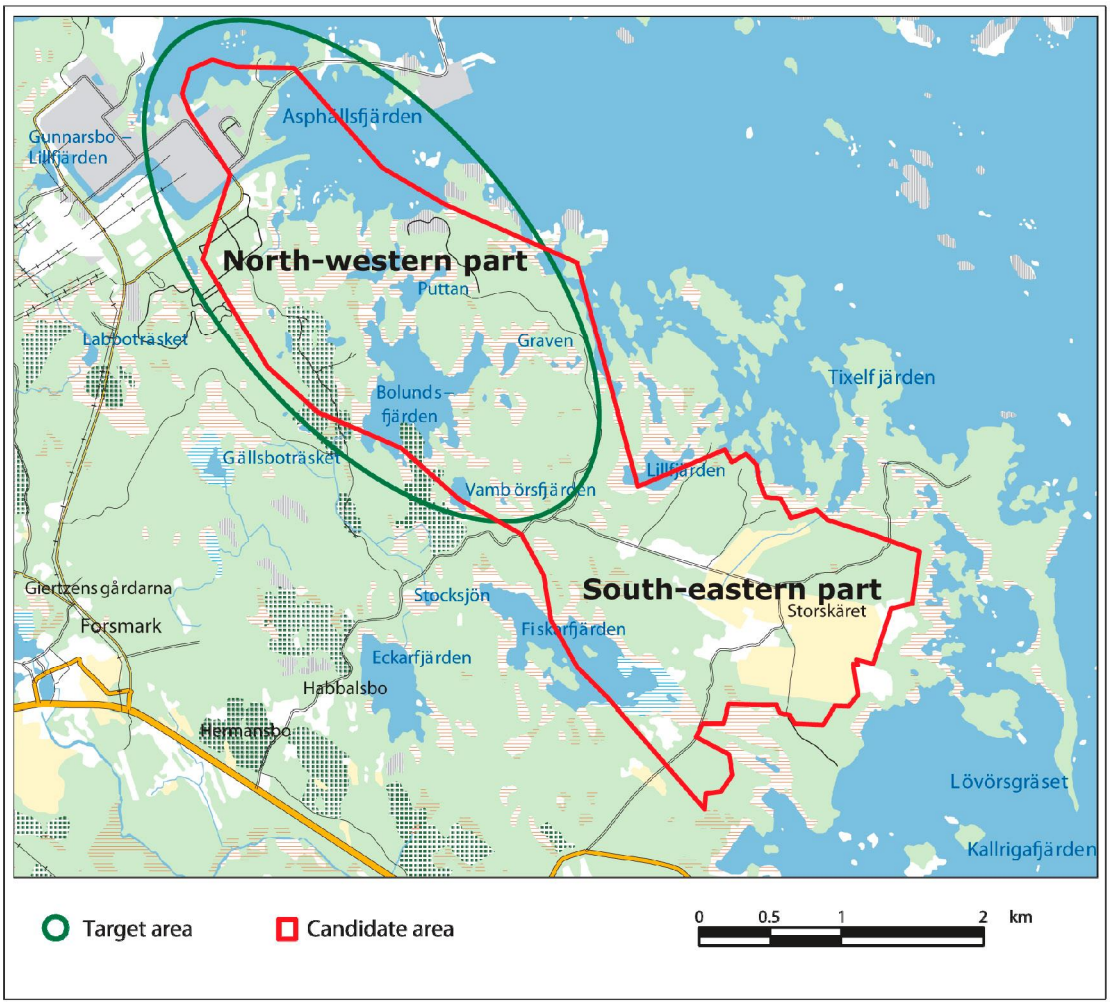
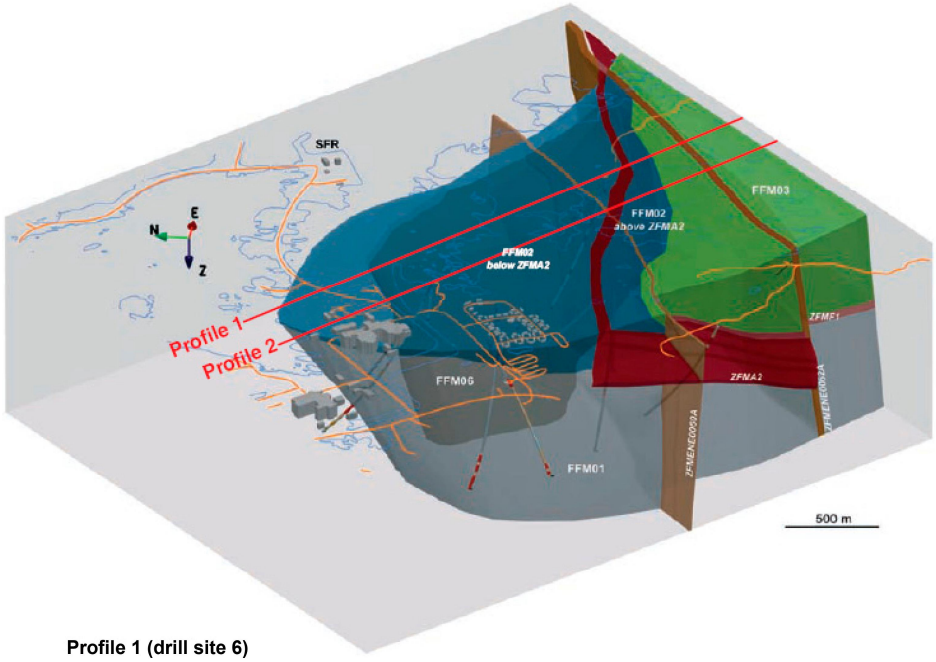
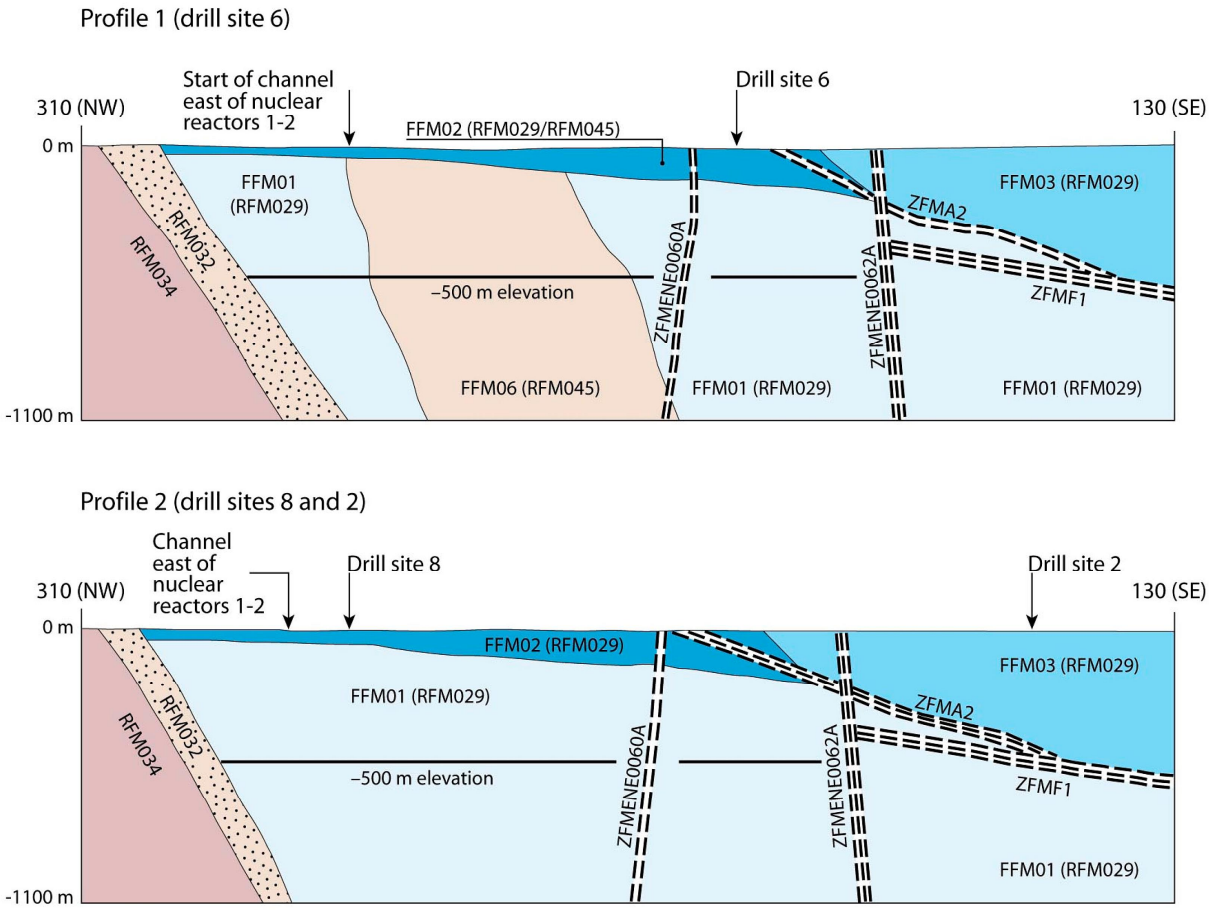


図 3.2.2-1　Forsmark サイトで設定された処分場の候補領域（図中の緑の線）
（Joyce et al., 2010, p. 10）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co



(a) 地質構造モデルの鳥瞰図



(b) 図(a)の鉛直断面における岩盤領域設定の概念図

図 3.2.2-2　処分場の候補領域に分布する岩盤領域の設定

（Joyce et al., 2010, pp. 19-20）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

本検討では，これらの中で最も空間的な広がりが大きい FFM01 とその上部に位置する FFM02 の岩盤領域を検討の対象領域とした。なお，FFM01 は深さが-200m より浅い上部層（以下では，“FFM01u”と記す），深度-200m から-400m の範囲の中間層（以下では，“FFM01m”と記す），-400m より深い下部層（以下では，“FFM01l”と記す）に細区分される（表 3.2.1-8 参照）が，本検討では PSS 試験や PFL-f 試験のデータが多く取得されている中間層（FFM01m）を対象とした。リニアメント解析および露頭観察データに関しては, SR-Site における分析や解釈結果を対象としている岩盤領域（FFM01 と FFM02）で区別せずに用いることとした。ボーリング調査データに関しては, FFM01 と FFM02 を対象としたデータを公開情報（報告書）から入手することとした。図 3.2.2-3 に示す Forsmark サイトで行われたボーリングサイトからの中から処分場の対象領域近傍のボーリング掘削サイト（DS1，DS2，DS5，DS6，DS7，DS8）を抽出した。そして，図 3.2.2-4 に示す NE0060A の破砕帯よりも北側の岩盤領域のボーリングサイトを対象とし，DS2 と DS5 を除外した。さらに，表 3.2.2-1 のうち，PSS 試験および PFL-f 試験のデータがともに得られているボーリング孔（KFM01A，KFM01D，KFM06A，KFM06B，KFM08A）を抽出した。また，KFM06B は調査深度が浅いことから本検討の対象外とし，最終的に KFM01A，KFM01D，KFM06A，KFM08A の 4 孔のデータを用いた。各ボーリング孔で確認された FFM02，FFM01m および破砕帯（Deformation Zone）の分布深度を表 3.2.2-2 に整理した。

選定した 4 孔のボーリングの，コア観察，孔壁観察で取得された割れ目特性データ（地質総合柱状図）を確認した結果，コア観察や BIPS 観察による割れ目の頻度のデータ（表 3.2.2-3 および表 3.2.2-4 参照）については報告書から入手できるが，個々の割れ目の位置と方位等のデータを入手することは困難であった。そのため，SR-Site で示された HydroDFN モデルのパラメータ値（例えば，表 3.2.1-8）を用いたシミュレーションによりデータセットを作成することとした。具体的には，FFM01m 領域の場合には，表 3.2.1-8(a)を用いて FFM01m 領域を想定したモデル領域に確率論的に割れ目を発生させ，割れ目のネットワーク構造の数値モデルを作成した。そして，上記の調査対象とした各ボーリング孔をモデル上に設定して，これらのボーリング孔と交差する割れ目を抽出し，割れ目の方位，分布深度を特定した。特定した割れ目の分布深度は，各ボーリング孔の地質柱状図から読み取った分布深度に置換した。以上の方法により作成した各ボーリング孔における割れ目の方位と深度のデータを，本検討で活用する割れ目特性に関するデータセットとした。なお，当該データセットは，後述の一次元モデルによる地下水移行時間の評価に用いるデータセットとして用いた。各ボーリング孔沿いの割れ目の傾斜方位および傾斜角の分布を図 3.2.2-5～図 3.2.2-8 に示す。本項で作成した各ボーリング孔の割れ目の深度と方位（傾斜方位，傾斜角）データを付録Ａに記す。

各ボーリング孔で実施された PSS 試験データ（5m, 20m, 100m 区間）と PFL 試験データを SKB の報告書から抽出し，図 3.2.2-9～図 3.2.2-12 に示すように整理した。そのデータを付録Ｂにまとめて記す。

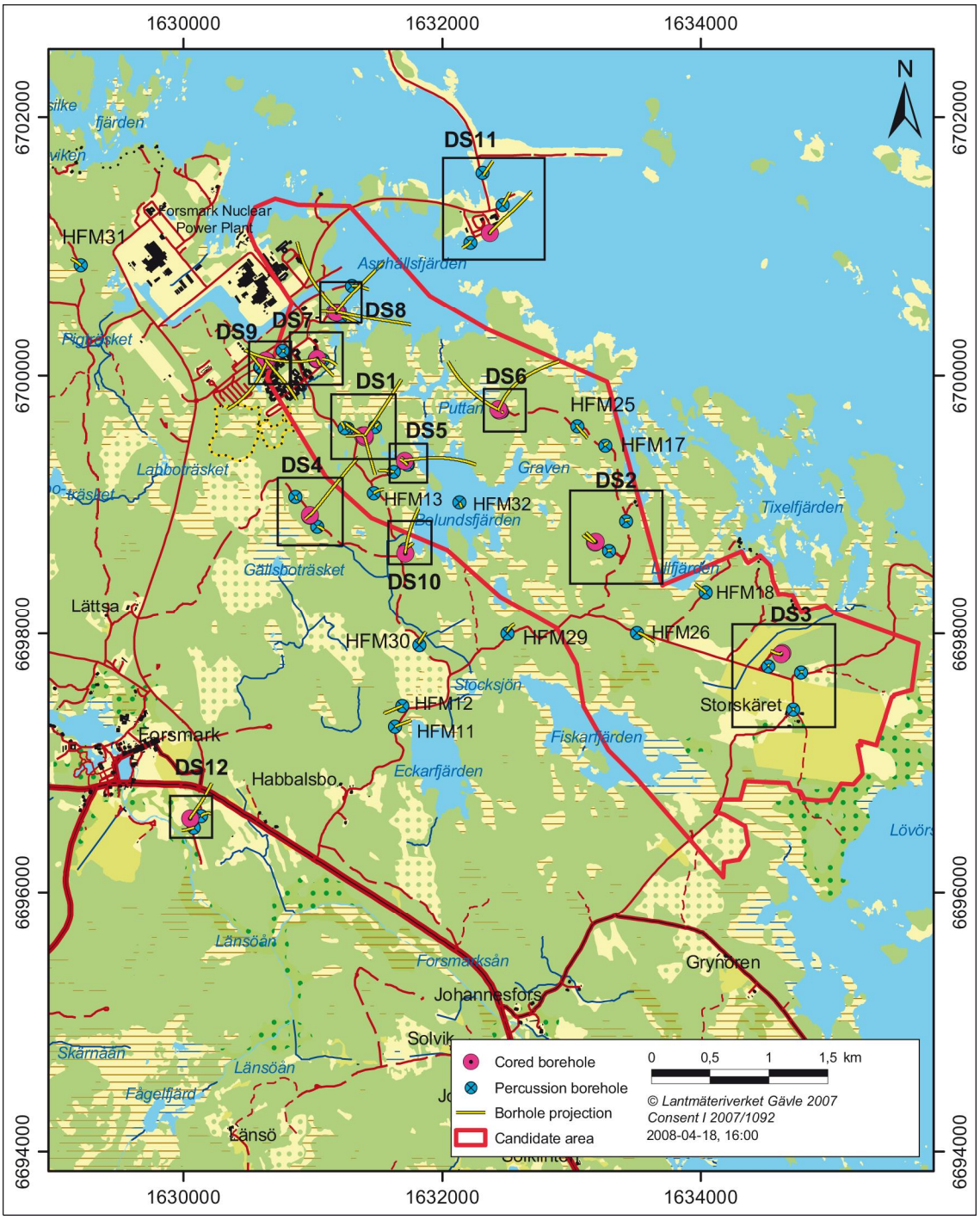


図 3.2.2-3　Forsmark サイトにおけるボーリング調査サイト（再掲）（Selroos and Follin, 2010,p. 15）

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

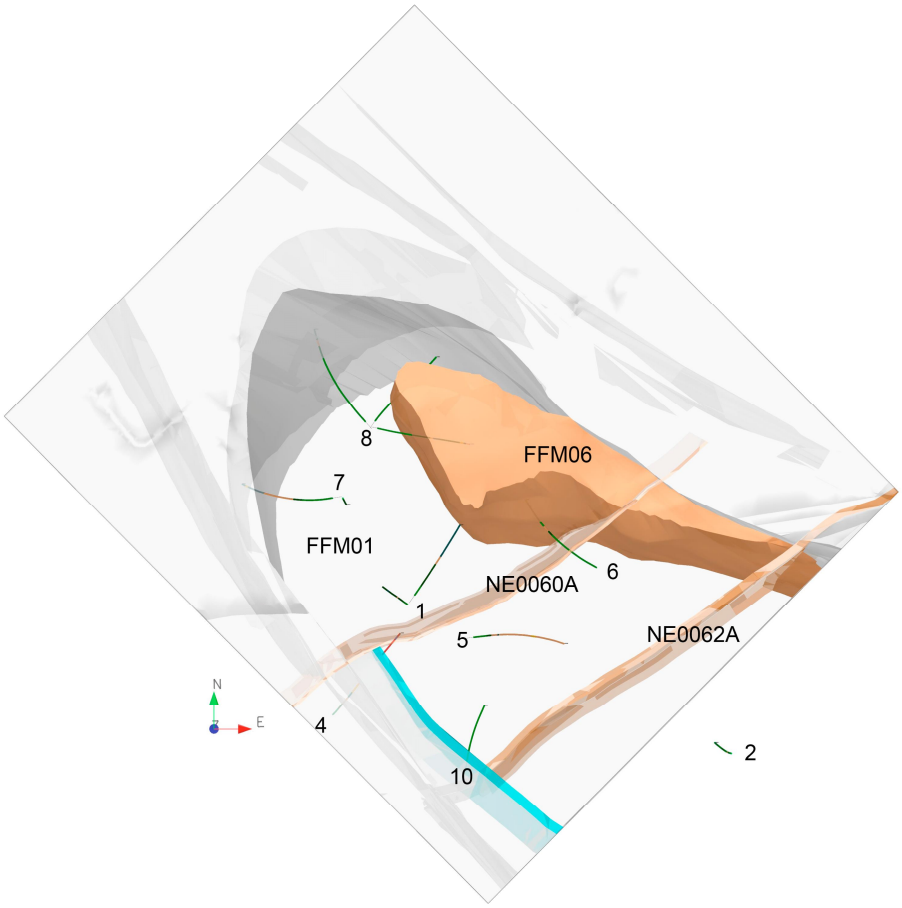


図 3.2.2-4　ボーリング孔の孔跡と岩盤領域，破砕帯との位置関係
（Selroos and Follin, 2010, p. 18) Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

表 3.2.2-1　ボーリング孔別の PSS 試験および PFL-f 試験のデータのリスト
(Selroos and Follin, 2010, p. 16) Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Borehole	PFL	PSS	Bottom elevation of borehole (m)	Borehole	PFL	PSS	Bottom elevation of borehole (m)
KFM01A	X	X	–982	KFM07A	X		–819
KFM01B		X	–479	KFM07B		X	–238
KFM01C		X	–333	KFM07C	X		–494
KFM01D	X	X	–612	KFM08A	X	X	–759
KFM02A	X	X	–987	KFM08B		X	–166
KFM02B	X	X	–565	KFM08C	X		–781
KFM03A	X	X	–987	KFM08D	X		–751
KFM03B		X	–88	KFM09A		X	–621
KFM04A	X	X	–796	KFM09B		X	–472
KFM05A	X	X	–825	KFM10A	X	X	–338
KFM06A	X	X	–826	KFM11A	X	X	–716
KFM06B	X	X	–93	KFM12A		X	–511
KFM06C		X	–781				

表 3.2.2-2　各ボーリング孔における岩盤領域（FFM02，FFM01m）および破砕帯の分布深度
（Petersson and Wangnerud,2003; Petersson et al., 2005a; Petersson et al., 2006 を基に作成)

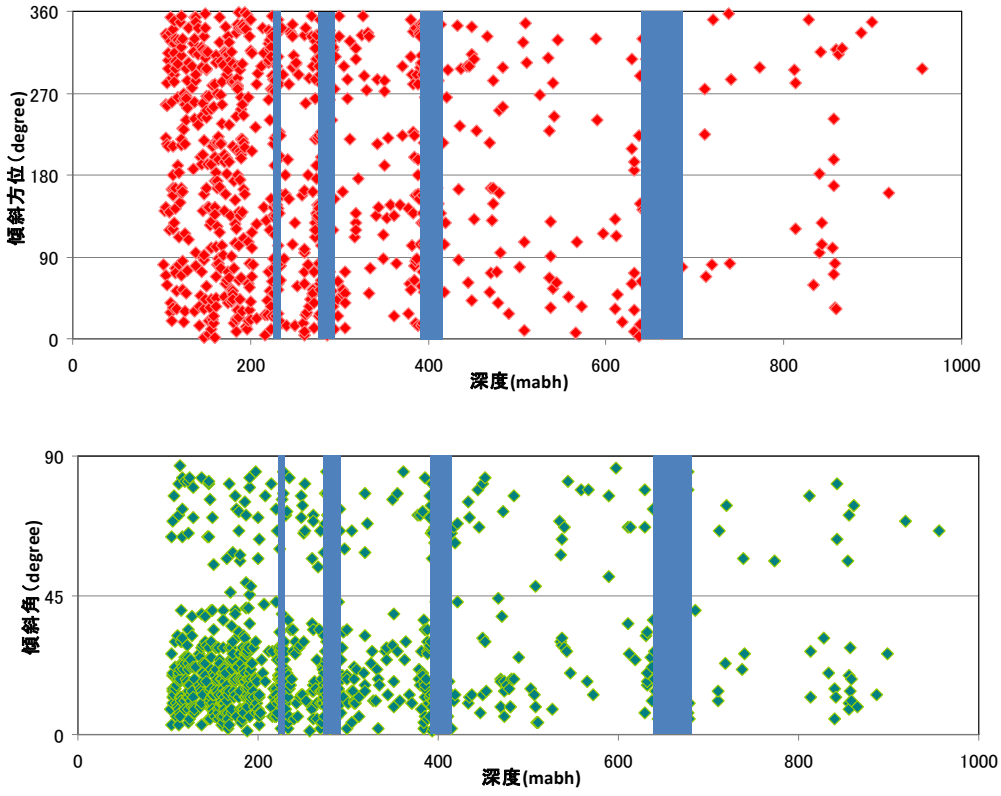
	FFM02		FFM01m		Deformation Zone	
	区間深度（mabh）	区間長 (m)	区間深度（mabh）	区間長 (m)	区間深度（mabh）	区間長 (m)
KFM01A	102～203	101				
			203～216	13		
					216～224	8
			224～267	43		
					267～285	18
			285～386	101		
					380～400	20
KFM01D	100～176	76				
					176～184	8
	184～191	7				
			251～411	160		
					411～421	10
			421～488	67		
					488～496	8
			496～510	14		
KFM06A	102～128	26				
					195～278	83
			278～318	40		
					318～358	40
			358～474	116		
KFM08A					244～315	71
			315～479	164		
					479～495	16
区間長計（m）		210		718		282

表 3.2.2-3　FFM02 の開口割れ目の本数および一次元割れ目密度(P_{10})の実測値
（ボーリング 4 孔合計）
（Petersson and Wangnerud,2003; Petersson et al., 2005a; Petersson et al., 2006 を基に作成)

ボーリング孔	全長[m]	開口割れ目本数[本]	P_{10}（実測）
KFM01A	101	318	3.15
KFM01D	82	157	1.91
KFM06A	26	51	1.96
KFM08A	-	-	-
合計	209	526	2.52

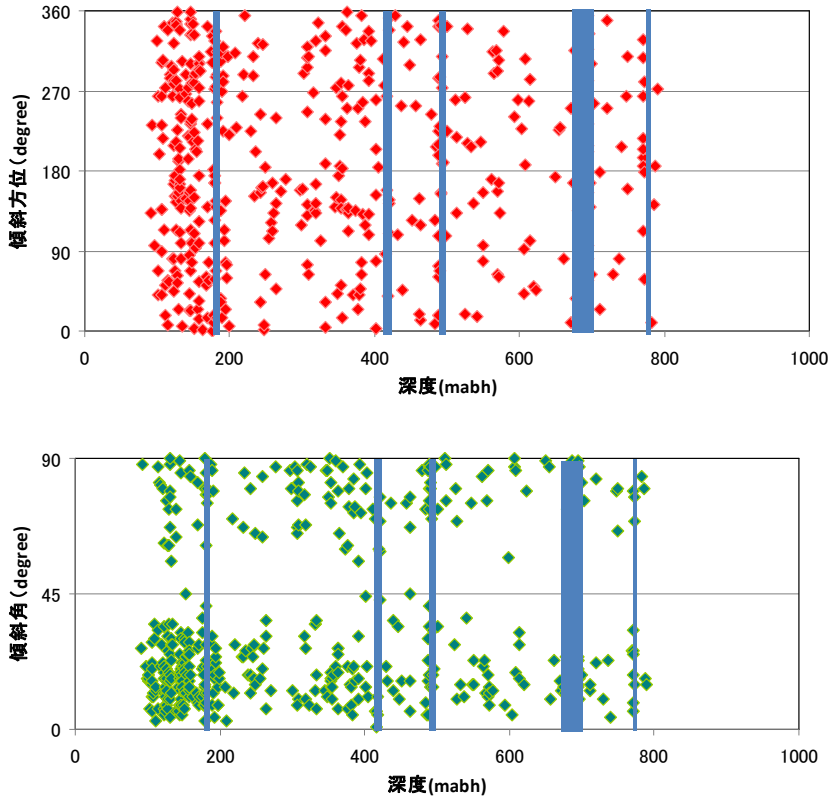
表 3.2.2-4　FFM01m の開口割れ目の本数および一次元割れ目密度(P_{10})の実測値
（ボーリング 4 孔合計）
（Petersson and Wangnerud,2003; Petersson et al., 2005a; Petersson et al.,2005b; Petersson et al., 2006 を基に作成)

ボーリング孔	全長[m]	開口割れ目本数[本]	P_{10}（実測）
KFM01A	157	186	1.18
KFM01D	241	115	0.48
KFM06A	157	87	0.55
KFM08A	164	120	0.73
合計	719	508	0.71



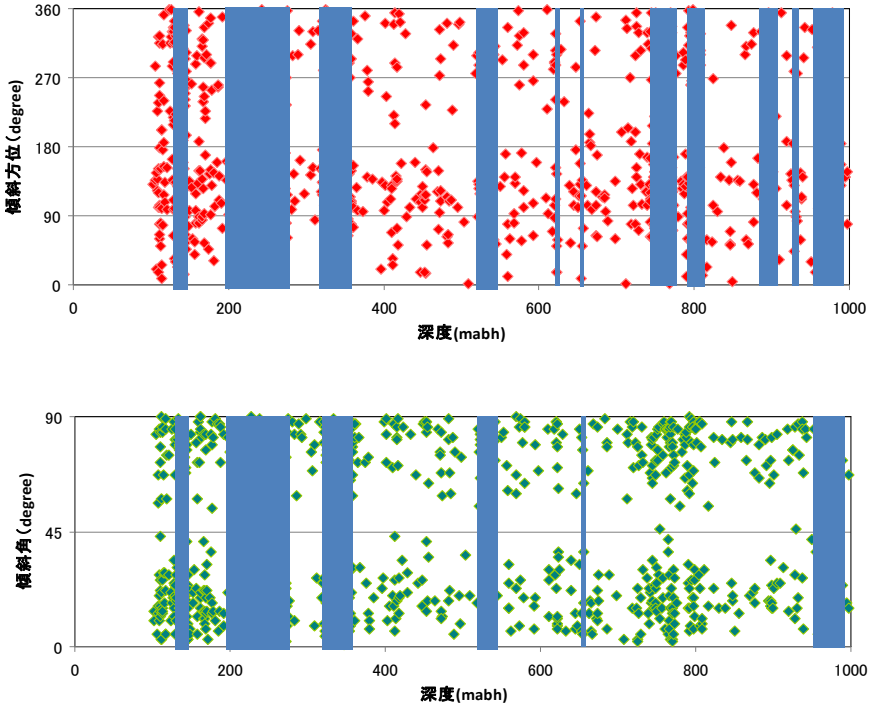
※ 図中：青枠は破砕帯を表す

図 3.2.2-5　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM01A 孔）の分布



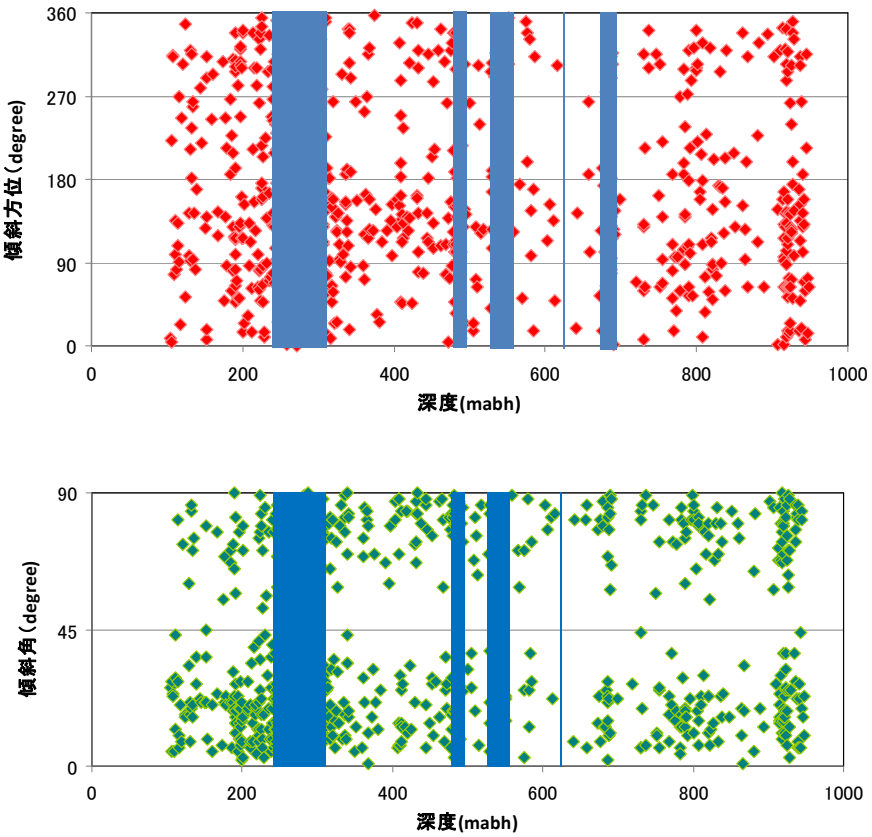
※ 図中：青枠は破砕帯を表す

図 3.2.2-6　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM01D 孔）の分布



※ 図中：青枠は破砕帯を表す

図 3.2.2-7　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM06A 孔）の分布



※ 図中：青枠は破砕帯を表す

図 3.2.2-8　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した割れ目の傾斜方位／傾斜角のボーリング孔沿い（KFM08A 孔）の分布

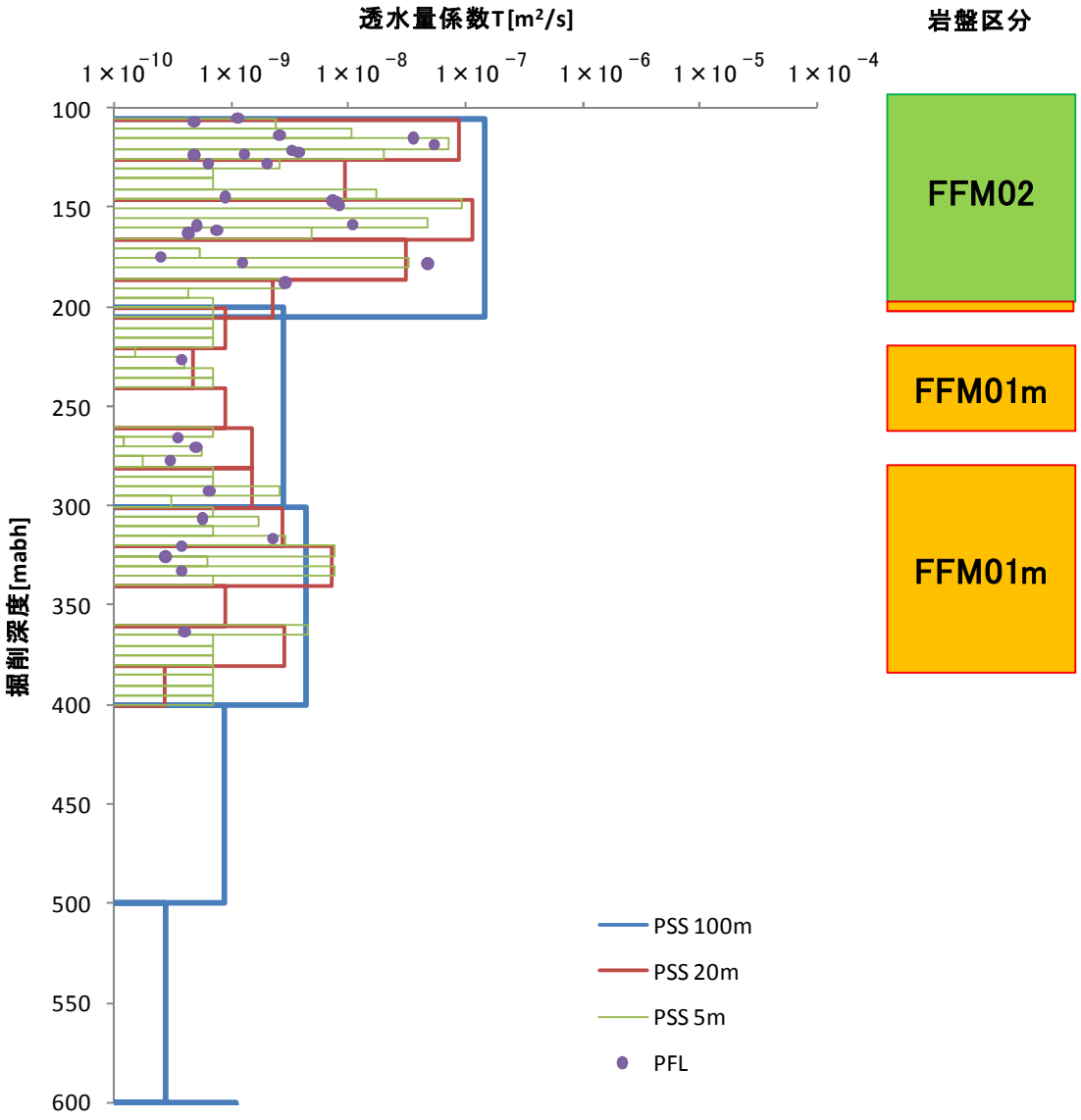


図 3.2.2-9　KFM01A 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ（Rouhiainen and Pollanen,2003; Ludvigson et al., 2004; Olofsson et al., 2007 を基に作成）

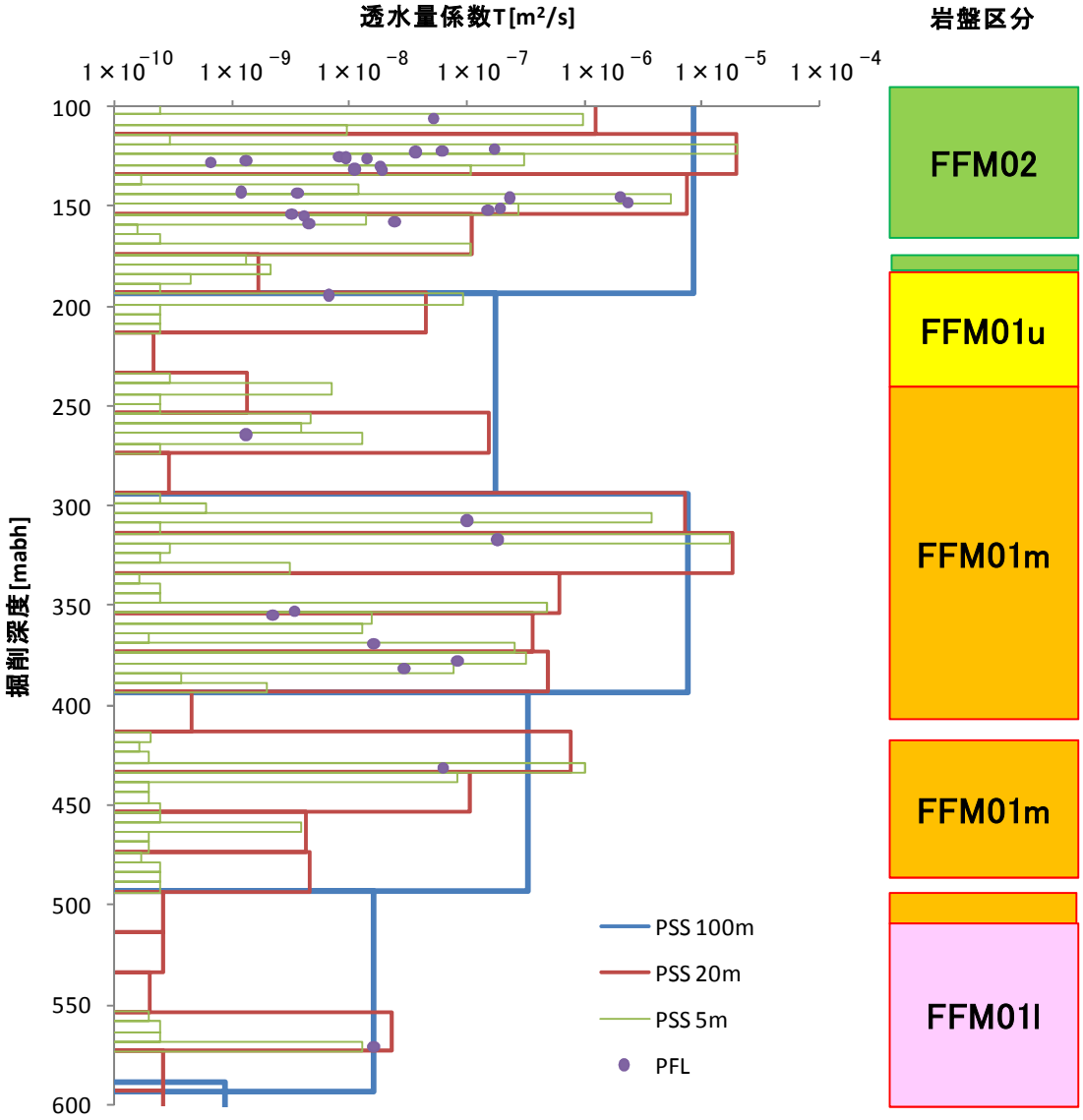


図 3.2.2-10　KFM01D 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ（Florberger et al.,2006; Vaisasvaara et al.,2006; Olofsson et al., 2007 を基に作成）

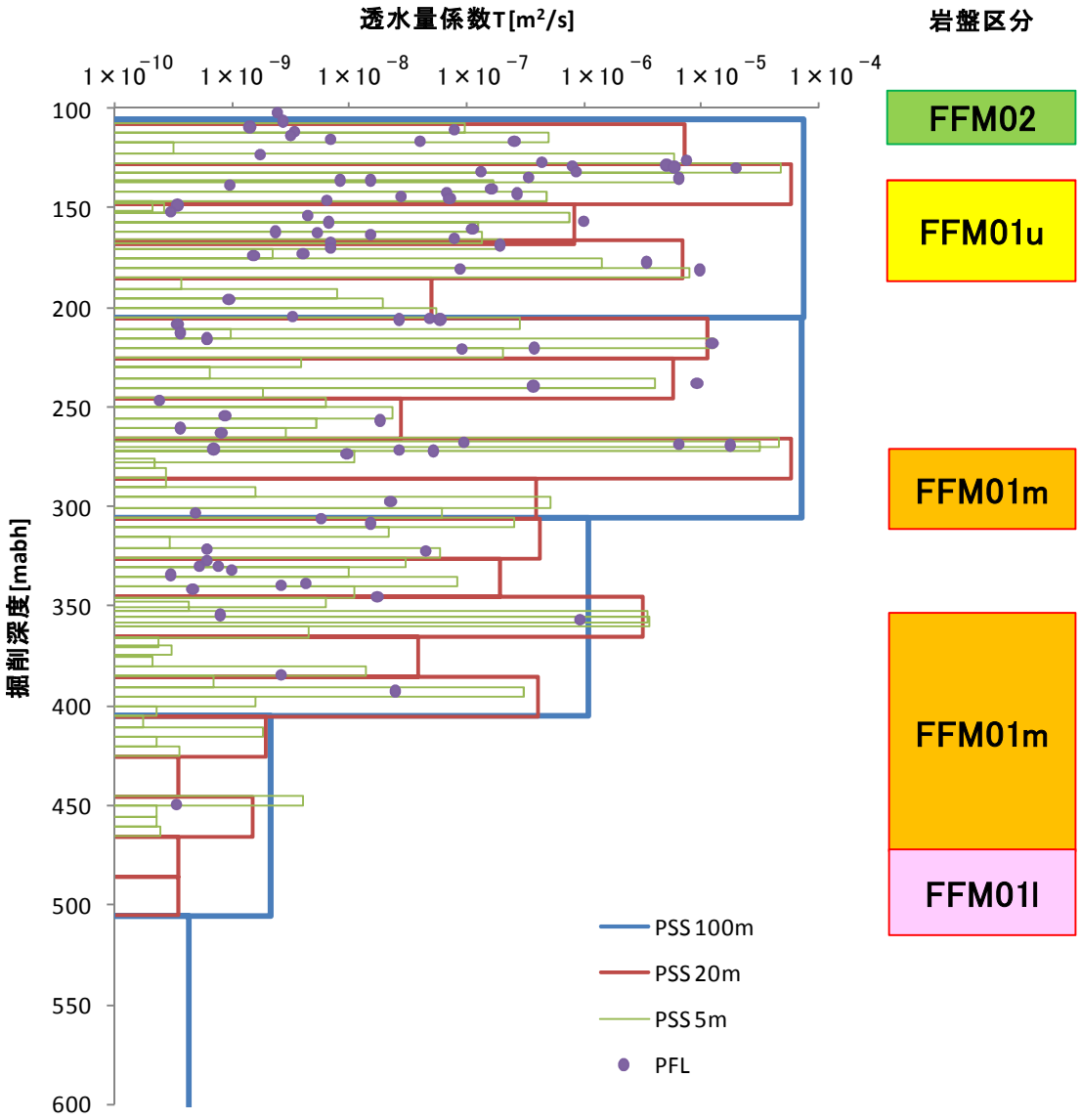


図 3.2.2-11　KFM06A 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ（Hjerne et al.,2005; Rouhiainen and Sokolnicki, 2005; Olofsson et al., 2007 を基に作成）

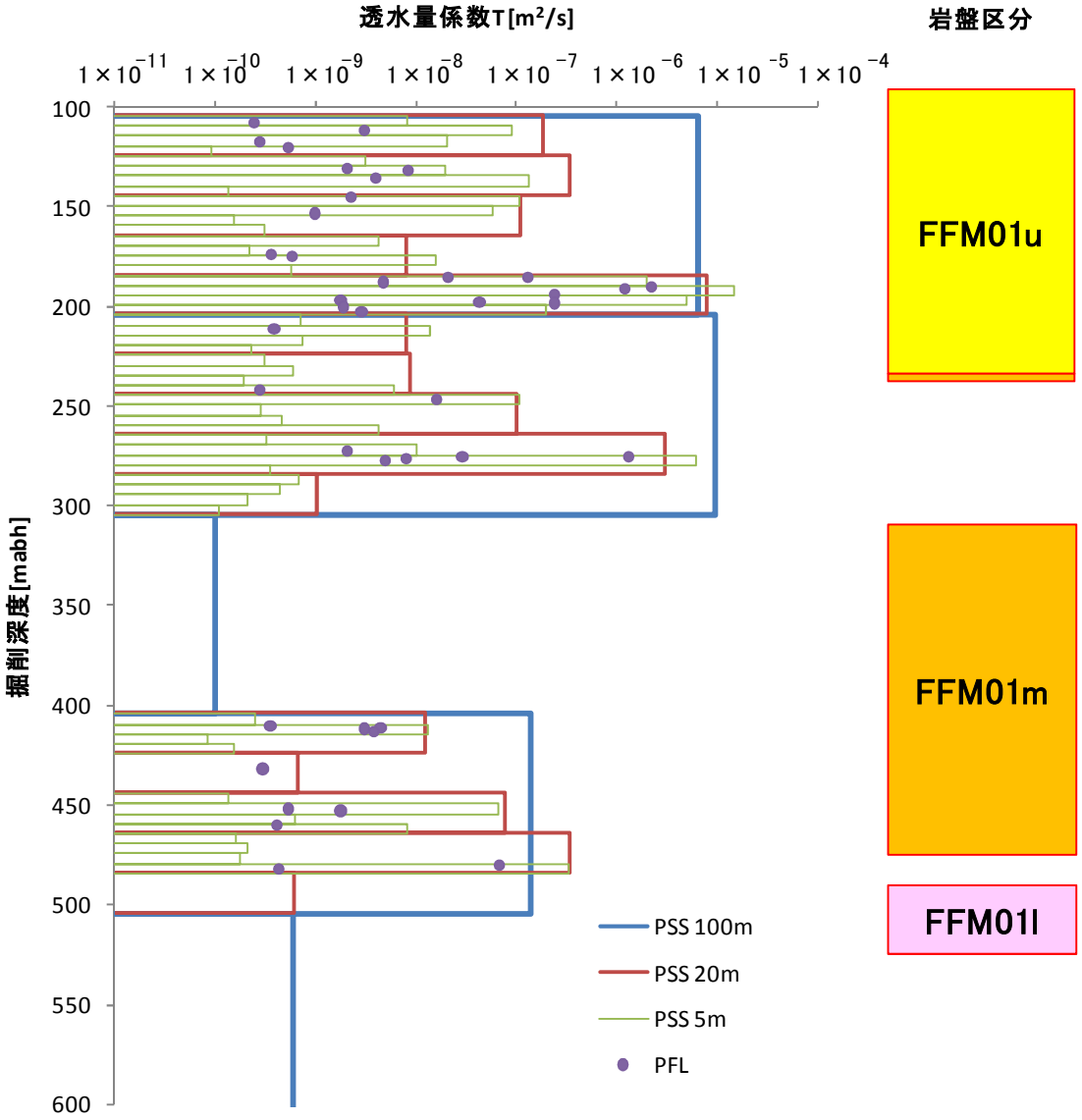
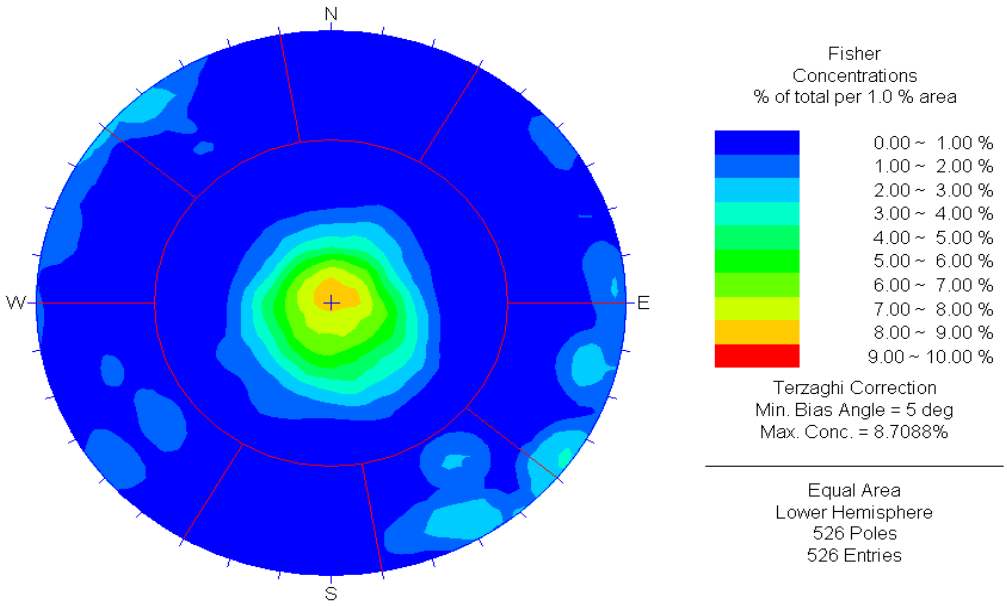


図 3.2.2-12　KFM08A 孔の PSS 試験で取得された透水量係数と PFL-f 試験で求められた透水箇所の透水量係数データ（Sokolnicki and Rouhiainen, 2005, Walger et al.,2006, Olofsson et al., 2007 を基に作成）

(2) 水理地質構造モデルの構築

(i) 割れ目の卓越方位，一次元密度

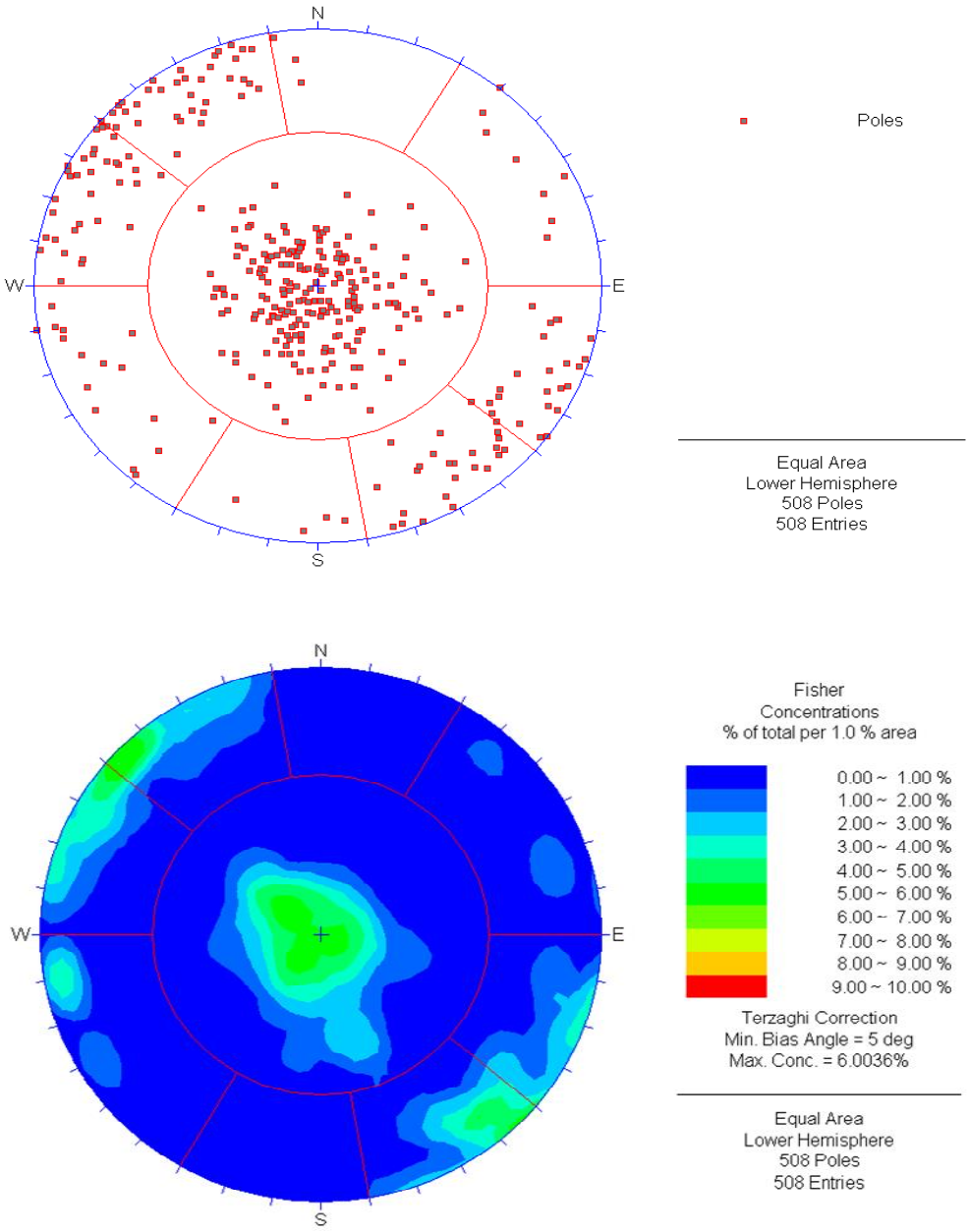
上記で作成したデータセットのうち，各岩盤領域の割れ目の方位分布（4 孔合計）について，ステレオネット（pole：面の法線ベクトルの下半球投影）とそのコンター図を図 3.2.2-13 および図 3.2.2-14 に示す。これらの割れ目の方位のデータを SR-Site の GeoDFN ver1.2 モデルで用いられた Hard sector 区分（表 3.2.1-5 参照）を適用して，割れ目の卓越方位セットとセットごとの割れ目密度（P_{10}）を求めた。得られた FFM02 領域と FFM01m 領域の卓越方位と一次元密度を，表 3.2.2-5 と表 3.2.2-6 にそれぞれ表す。



※Terzaghi 補正済み

図 3.2.2-13　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した FFM02 領域の割れ目の方位分布（左）とコンター図（右）

図中の赤線は割れ目の卓越方位分類に用いた Hard sector 区分（表 3.2.1-5 参照）



※Terzaghi 補正済み

図 3.2.2-14　シミュレーションにより DFN モデルから抽出した FFM01m 領域の割れ目の方位分布（左）とコンター図（右）

図中の赤線は割れ目の卓越方位分類に用いた Hard sector 区分（表 3.2.1-5 参照）

表 3.2.2-5　FFM02 を対象に作成したデータセットの割れ目卓越方位セット

割れ目セット	傾斜方位/傾斜角 (度)	フィッシャー係数	開口割れ目本数	P_{10} (計測値)	P_{32} (解釈値)
NS	293/86	24.6	22	0.11	0.49
NE	328/86	15.2	35	0.17	0.59
NW	63/82	15.2	24	0.11	0.42
EW	12/87	18.3	3	0.01	0.07
HZ	349/3	15.8	442	2.11	2.50

表 3.2.2-6　FFM01m を対象に作成したデータセットの割れ目卓越方位セット

割れ目セット	傾斜方位/傾斜角 (度)	フィッシャー係数	開口割れ目本数	P_{10} (計測値)	P_{32} (解釈値)
NS	113/89	22.2	67	0.09	0.24
NE	324/88	21.5	75	0.10	0.32
NW	65/87	16.3	31	0.04	0.14
EW	0/88	25.7	7	0.01	0.03
HZ	18/5	14.4	328	0.46	0.56

(ii) 割れ目の大きさ

割れ目の大きさ r の分布は，SR-Site の HydroDFN モデル構築と同様に，全てのスケールにおいて同一のべき乗分布が適用できるとして，次式からべき乗数 k_r を求めた。本検討では，ボーリング 4 孔で確認した FFM02 岩盤，FFM01 岩盤の両岩盤を対象として，共通で一つの割れ目の大きさ分布を設定した。

$$P_{32}[r > r_1] = P_{32}[r > r_0] \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{(k_r - 2)}$$

ここで，r_1 として半径 560m 以上の割れ目の三次元割れ目密度 P_{32} に Forsmark サイトにおける破砕帯の三次元割れ目密度 0.0071m^2/m^3（Follin et al., 2007, p162）を仮定した。また，r_0 としてボーリング孔の半径 0.038m 以上の割れ目の三次元割れ目密度にボーリング 4 孔の FFM02 領域，FFM01 領域および破砕帯で確認された全ての開口割れ目（図 3.2.2-5～図 3.2.2-8，付録 A の全割れ目データを利用）の一次元割れ目密度から換算した三次元割れ目密度 1.8 m^2/m^3 を仮定した。その結果から，$k_r = 2.58$ を算定した。

以上までに整理した水理地質構造モデルのパラメータ値を，表 3.2.2-7 にまとめて示す。

表 3.2.2-7　水理地質構造モデルのうち地質構造モデルのパラメータ値のまとめ

岩盤領域	割れ目セット	卓越方位(傾斜方位/傾斜角)(deg.)	フィッシャー係数	大きさモデル(べき乗分布)(r_0,k_r),(m,-)	密度 (P_{32}),大きさ分布モデルの有効範囲 (r_0, 564m),(m^2/m^3)
FFM02 (0-200m)	NS	(293/86)	24.6	(0.038, 2.58)	0.49
	NE	(328/86)	15.2	(0.038, 2.58)	0.59
	NW	(63/82)	15.2	(0.038, 2.58)	0.42
	EW	(12/87)	18.3	(0.038, 2.58)	0.07
	HZ	(349/3)	15.8	(0.038, 2.58)	2.50
FFM01 m (200-400m)	NS	(113/89)	22.2	(0.038, 2.58)	0.24
	NE	(324/88)	21.5	(0.038, 2.58)	0.32
	NW	(65/87)	25.7	(0.038, 2.58)	0.14
	EW	(0/88)	25.7	(0.038, 2.58)	0.03
	HZ	(18/5)	14.4	(0.038, 2.58)	0.56

(iii) 透水量係数分布の設定

割れ目の透水量係数は，個々の亀裂の透水量係数を原位置で測定することが困難である。そのため，透水量係数分布の設定には，水理試験等の試験手法に起因するデータの不確実性だけではなく,データを評価する概念モデルに起因する不確実性やモデル化上の仮定に基づく不確実性等，多くの不確実性の因子が含まれる。SR-Site では，この割れ目の透水量係数の設定の不確実性を定量的に検討するために，割れ目の大きさとの相関関係を有する相関モデル，準相関モデル，無相関モデルの３ケースを適用するとともに，PFL-f 試験を再現できるパラメータの組み合わせを数値シミュレーションにより求めている。

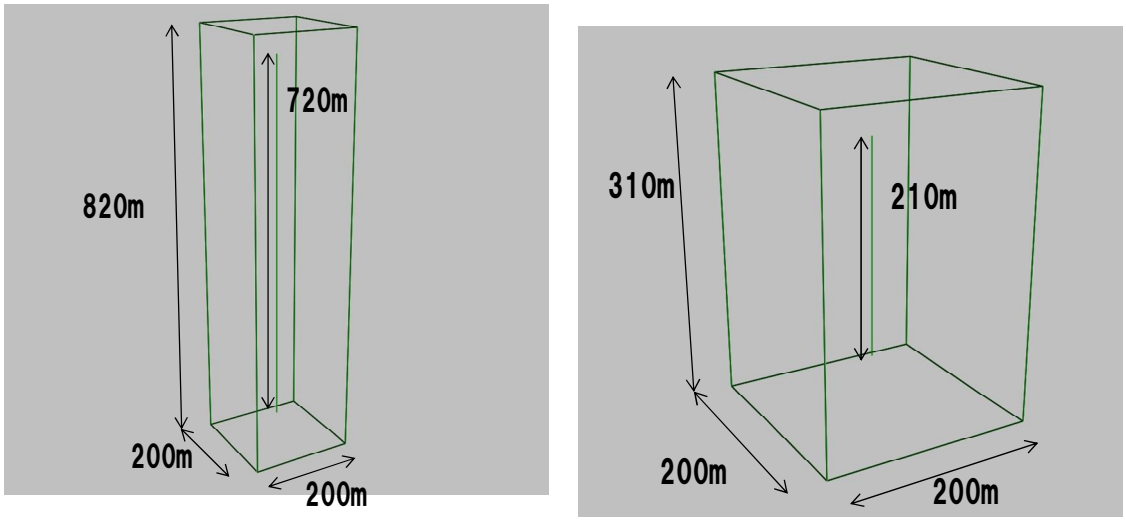
本検討でも，SR-Site で用いられている 3 ケースの透水量係数の設定のうち，準相関モデル，無相関モデルの二つのケースについて，PFL-f 試験を対象とした数値シミュレーションを行い，その再現性を確認する。

PFL-f 試験を模擬した数値シミュレーションの諸条件と手順を以下に示す。

- 解析対象領域：それぞれの岩盤領域について，水平面方向 200m×200m を，深度方向はボーリング 4 孔で確認された岩盤領域の厚さの合計値に上下それぞれ 50m を加えた長さの四角柱領域を設定した（図 3.2.2-15 参照)。モデル中央に鉛直のボーリング孔を設定した。
- 境界条件：側方境界を全水頭 0m で固定，上部と下部境界を不透水境界に設定した。モデル中心位置に設定したボーリング孔内は全水頭-10m 固定とした。
- 表 3.2.2-7 に整理した割れ目の方位，大きさ分布，密度等のパラメータに，適用する透水量係数分布を組み合わせて，それぞれの岩盤領域を対象に割れ目のネットワークモデルを作成した。
- ダルシー則に基づく定常の浸透流解析により，ボーリング孔に交差する割れ目への湧水量を算出し，PFL-f 試験のデータと比較した。

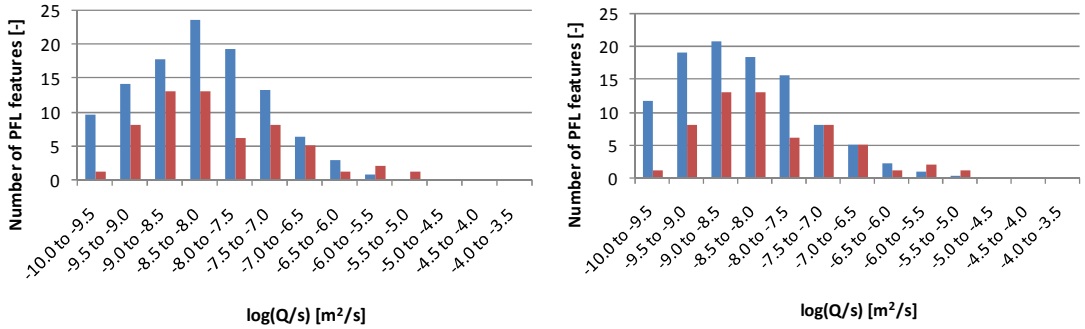
SR-Site で適用された準相関と無相関のケースの透水量係数分布を用いた亀裂ネットワークモデルによる比湧水量（Q/s）の解析結果と実測値の比較を図 3.2.2-16 に示す。また，比湧水量の合計値と PFL-f 試験で検出可能な割れ目（1×10^{-9} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目）の本数の比較結果を表 3.2.2-8 に示す。これらの比較結果から以下のことが分かる。

- FFM02 では，準相関モデル，無相関モデルともに実測の高透水側の頻度分布と調和的な分布を示す。比湧水量の総和の実測値は，解析値に対して 1.8 倍程度大きい。PFL-f 試験で検出可能な割れ目本数は解析値の方が 1.6～1.8 倍程度多い。
- FFM01m では，準相関モデル，無相関モデルともに実測の高透水側の頻度分布と調和的な分布を示す。湧水量の総和の実測値は，解析値に対して 2.4 倍程度大きい。PFL-f 試験で検出可能な割れ目本数は実測値の方が 1.3～2.4 倍程度多い。
- より低透水性の割れ目の頻度については，FFM02 では実測の PFL-f 試験で検出可能な割れ目より多くの割れ目がモデル解析で示されているが，FFM01m では実測の PFL 検出割れ目とほぼ同数か少ない傾向を示している。

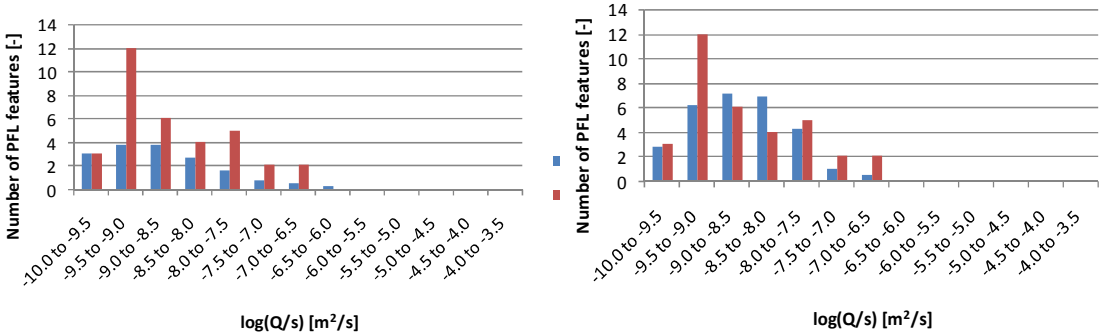


(a) FFM02 領域　　(b) FFM01m 領域

図 3.2.2-15　PFL-f 試験を模擬したシミュレーションの解析領域



(a) FFM02 領域（左図：SR-Site 準相関モデル，右図：SR-Site 無相関モデル）



(b) FFM01m 領域（左図：SR-Site 準相関モデル，右図：SR-Site 無相関モデル）

図 3.2.2-16　SR-Site の透水量係数分布（準相関，無相関のケース）を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較

表 3.2.2-8　SR-Site の透水量係数分布（準相関，無相関のケース）を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

		PFL 比湧水量合計(m^2/s)	PFL 割れ目本数
実測値(FFM02)		1.3×10^{-5}	58
解析値	準相関モデル	7.3×10^{-6}	93.4
	無相関モデル	7.0×10^{-6}	100.1
実測値(FFM01m)		6.2×10^{-7}	34
解析値	準相関モデル	2.6×10^{-7}	14.1
	無相関モデル	2.6×10^{-7}	26.5

(3) 透水量係数分布設定の代替ケースの検討

前項（透水量係数分布の設定）で述べたように，割れ目の透水量係数の設定には水理試験等の試験手法に起因するデータの不確実性に加えて，データを評価する概念モデルに起因する不確実性や定量化，モデル化上の仮定に基づく不確実性が含まれる。SR-Site では PFL-f 試験を重視し，その実測結果を再現できるパラメータの組み合わせを求めている。その一方で，Forsmark サイトでは，数多くの区間で PSS 試験と呼ばれるダブルパッカーを使った透水試験が行われており，この PSS 試験データに着目した透水量係数設定手法を代替的な方法として提案できると考えられる。本検討では，それらの透水量係数分布の代替ケースとして，以下の三つの異なる方法で透水量係数分布の推定を試みるとともに，SR-Site と同様に PFL-f 試験を模擬した数値シミュレーションにより透水量係数分布のパラメータ値（対数平均値，標準偏差等）を求めた。

ケース A：　5m 区間の PSS データから求めた透水量係数と開口割れ目の頻度から 5m 区間ごとの透水性割れ目の透水量係数を算出

ケース B：　5m 区間の PSS データから求めた透水量係数の総和と開口割れ目の総和から求めた透水量係数の算術平均値を再現できるような透水量係数の対数平均値と標準偏差の組み合わせを複数設定して，PFL-f 試験の実測値との比較により最適な組み合わせを選定。

ケース C：　透水量係数の対数平均値と標準偏差の組み合わせを複数設定して，5m 区間，20m 区間，100m 区間の区間長のそれぞれの PSS 試験を模擬したシミュレーションと，PFL-f 試験を模擬したシミュレーションを行い，それぞれの実測値との比較により最適な組み合わせを選定。

(a) ケース A

ケース A では PSS 試験のデータのうち，5m 区間で実施されたパッカー試験のデータから得られた透水量係数のデータを用いて，以下の方法により個々の割れ目の透水量係数分布を推定した。ここでは，確認された全ての開口割れ目が透水に寄与するとし，各パッカー試験区間で観察され

る割れ目の透水性の差異を判断できないため，各パッカー試験区間で観察される個々の開口割れ目の透水量係数は互いに等しいと仮定した（JNC, 1999, p. V-60）。

- 試験区間 i の透水量係数 L_i を試験区間内で観察される開口割れ目の本数 n_i で除し，個々の割れ目の平均的な透水量係数 T_i を算定する。

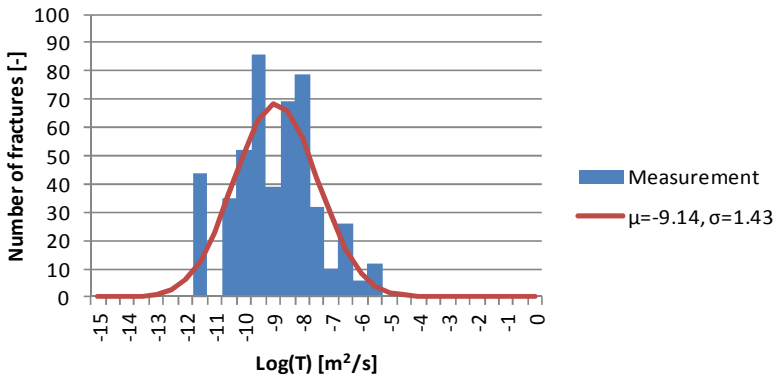
$$T_i = \frac{L_i}{n_i}$$

- 全てのパッカー試験区間で算出した開口割れ目の透水量係数から頻度分布を分析し，対数正規分布を仮定した対数値の平均値(μ)と標準偏差(σ)を算定する。

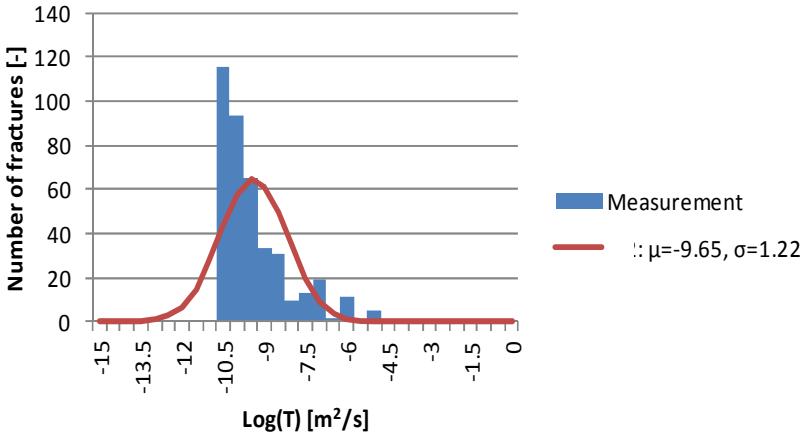
本ケースで求めた FFM02 および FFM01m の領域の透水量係数分布を図 3.2.2-17 に示す。各岩盤領域の透水量係数分布の対数平均値と標準偏差は以下の値となった。

FFM02　　：対数平均値 μ(log) -9.14，標準偏差 σ(log) 1.43

FFM01m：対数平均値 μ(log) -9.65，標準偏差 σ(log) 1.22



(a) FFM02 領域



(b) FFM01m 領域

図 3.2.2-17　ケース A で推定した割れ目の透水量係数分布

上記で整理した割れ目の方位，大きさ分布，密度等のパラメータ（表 3.2.2-7 参照）に，ケース A で推定した透水量係数分布を組み合わせて，それぞれの岩盤領域を対象にネットワークモデルを作成し，PFL-f 試験を模擬したシミュレーションを行った。PFL-f 試験時の比湧水量(Q/s)の頻度分布（解析値）と実測値の頻度分布の比較結果を図 3.2.2-18 に示す。また，比湧水量の総和および PFL-f 試験で検出可能な割れ目本数（PFL 検出割れ目）の比較結果を表 3.2.2-9 に示す。これらの比較結果から以下のことが分かる。

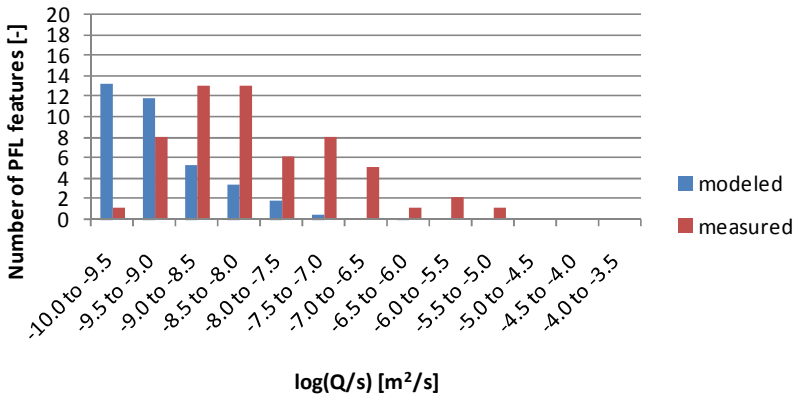
- ケース A で推定した透水量係数分布は，FFM02，FFM01m の岩盤領域ともに，実測された比湧水量(Q/s)の頻度分布にみられる 10^{-7} m^2/s 程度の高透水性側の値を再現できていない。
- 比湧水量(Q/s)の合計値についても，解析値は実測値より二桁程度小さな値になっている。
- ボーリング孔と交差する PFL 検出割れ目の本数も，解析値は実測値に比べて少ない。

10^{-7} m^2/s 程度の高透水性側の値を再現できない理由は，本ケースで設定した透水量係数分布が対数平均値で 10^{-9} m^2/s オーダーと相対的に小さく，標準偏差も小さいためと考えられる。その一方で，実測値の比湧水量は 10^{-7} m^2/s から 10^{-10} m^2/s オーダーに幅広く分布し，対数正規分布に比べて若干いびつな分布となっている。これらの違いは比湧水量の合計値の違いにも大きく影響を与えていると考えられる。また，ボーリング孔と交差する PFL 検出割れ目の本数についても，本ケースで設定した透水量係数分布の平均値と PFL 検出下限値が同じ 10^{-9} m^2/s オーダーと同等であるため，モデル化した割れ目の一部が PFL 検出下限値以下となることが理由の一つと考えられる。

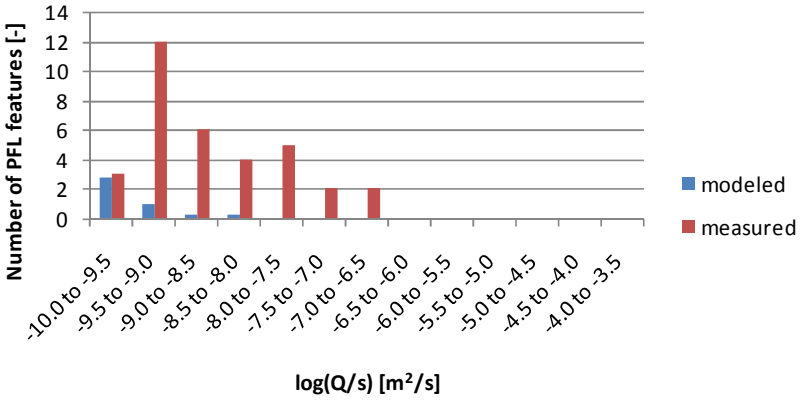
上記のように，本ケースで設定した透水量係数分布は，実測値との差異が大きい結果になった。そこで，実測の比湧水量の合計値に合うように透水量係数分布の対数平均値を補正した。具体的には，実測の比湧水量の合計値を解析値で割ることで補正係数を求め，透水量係数分布モデルの対数平均値を補正した。それぞれの岩盤領域の補正後の透水量係数分布を以下に記す。

FFM02　　：対数平均値 μ(log) -7.17　標準偏差 σ(log) 1.43
FFM01m：対数平均値 μ(log) -7.34　標準偏差 σ(log) 1.22

これらの補正後の透水量係数の分布用いて，再度 PFL-f 試験の再現シミュレーションを行った。その再解析の結果を，図 3.2.2-19 および表 3.2.2-10 に示す。比湧水量の総和を合わせるように補正することで，モデル化した割れ目の透水量係数が高くなる方向へ変化したため，高透水側の分布が実測値に近づく結果となった。しかし，より低透水性の割れ目の透水量係数は高透水側に比べて数桁小さいため，その頻度は比湧水量の総和に与える影響が小さい。そのため，比湧水量の総和だけでは低透水性の割れ目の頻度まで補正するのは困難であった。FFM02 領域は実測値に比べてボーリング孔に交差する透水性割れ目の頻度が特に低透水側で高い結果となっている。



(a) FFM02 領域

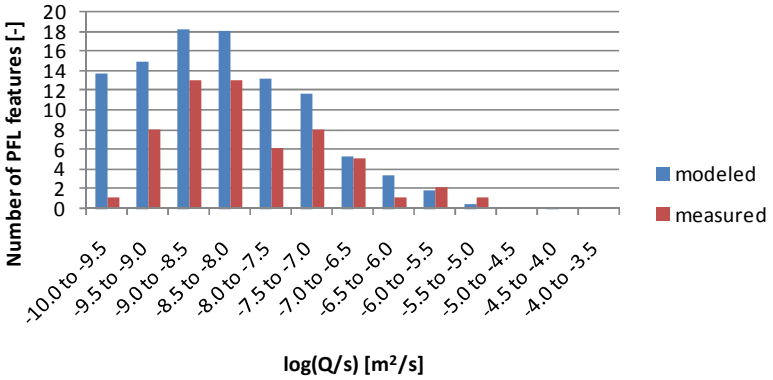


(b) FFM01m 領域

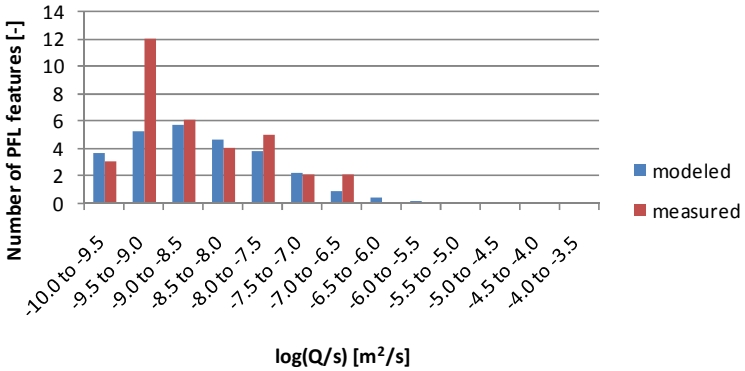
図 3.2.2-18　ケース A の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較

表 3.2.2-9　ケース A の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較
（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

	PFL-f 比湧水量合計(m^2/s)	PFL-f 割れ目本数
実測値(FFM02)	1.3×10^{-5}	58
解析値(FFM02)	1.3×10^{-7}	25.8
実測値(FFM01m)	6.2×10^{-7}	34
解析値(FFM01m)	3.1×10^{-9}	2.2



(a) FFM02 領域



(b) FFM01m 領域

図 3.2.2-19　ケース A 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較

表 3.2.2-10　ケース A 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較
（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

	PFL-f 比湧水量合計(m^2/s)	PFL-f 割れ目本数
実測値(FFM02)	1.3×10^{-5}	58
解析値(FFM02)	1.3×10^{-5}	89
実測値(FFM01m)	6.2×10^{-7}	34
解析値(FFM01m)	6.2×10^{-7}	22.9

(b) ケース B

ケース B では，PSS 試験のデータのうち 5m 区間で実施されたパッカー試験のデータから得られた透水量係数のデータを用いて, 以下の方法により個々の割れ目の透水量係数分布を推定した。

① 全ての試験区間の透水量係数の総和を開口割れ目本数の総和で除し，割れ目の透水量係数の平均値（mean）を算定する。

② 透水量係数は対数正規分布に従うと仮定し，mean と対数正規分布の標準偏差 σ から次式を用いて対数平均値 μ を求める。この時, mean は一定と仮定し, σ を一定の範囲で変えて（0.3，0.5，1.0，1.5 等）μ と σ の組み合わせを複数設定する。

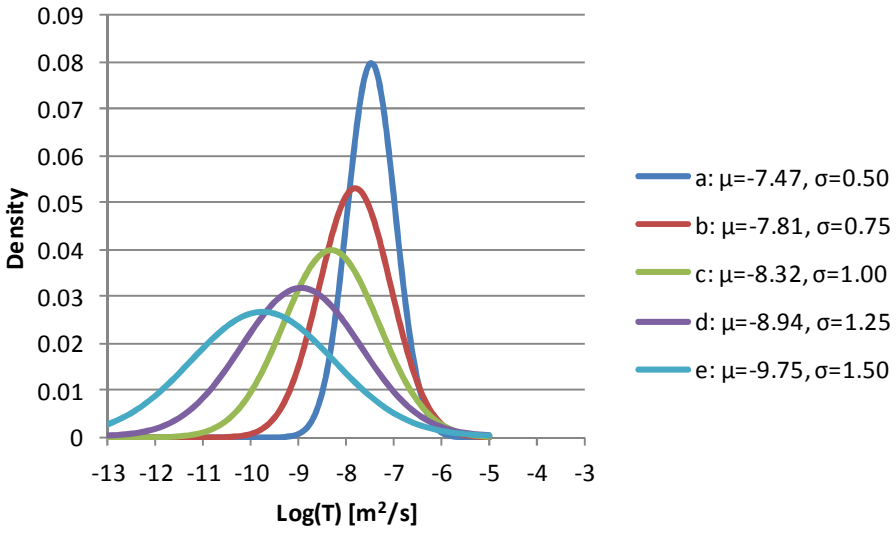
$$\mu = \ln(mean) - \frac{\sigma^2}{2}$$

③ ケース A と同様に PFL-f 試験を模擬したシミュレーションを実施し，比湧水量の総和が実測値に合うよう透水量係数分布の対数平均値 μ を補正する。

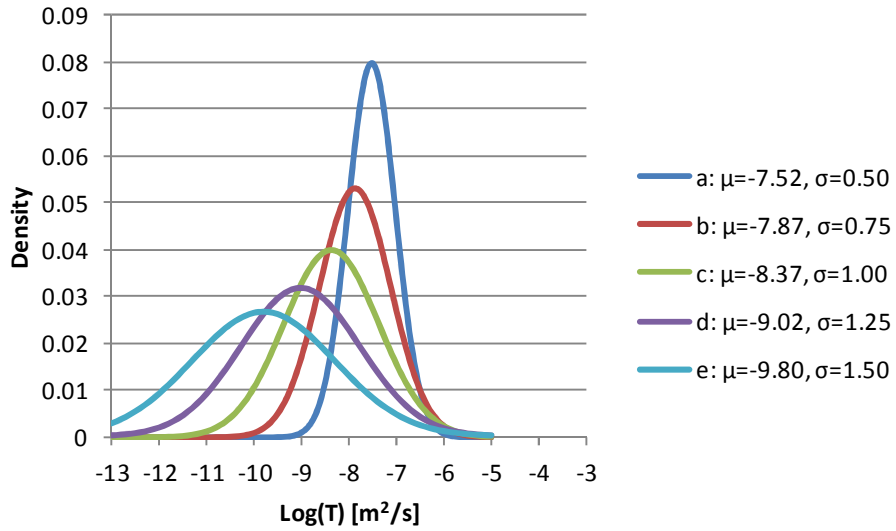
④ 補正後の μ と σ の複数の組み合わせを用いて PFL-f 試験を模擬したシミュレーションを実施して，実測された比湧水量の分布に最も一致する組み合わせを選定する。

①は，観測された全ての開口割れ目（FFM02：778 本，FFM01m：894 本）が地下水の流動経路（水みち）として作用することを仮定しており，①で求めた mean を使って割れ目の透水量係数の総和が PSS 試験で測定された透水量係数の総和に等しくなるように，対数正規分布を仮定した透水量係数分布の平均値 μ と分散 σ の組み合わせを推定した。すなわち，②は①で求めた mean を拘束条件とするために，対数正規分布の平均値と標準偏差と正規分布の平均値（mean）の関係式を用いた。

上記②で推定した，FFM02 および FFM01m の透水量係数分布の例を図 3.2.2-20 に示す。ここでは，透水量係数の総和を拘束条件とすることで，任意の標準偏差 σ と対数平均値 μ の組合せで，複数の透水量係数の分布を設定することが可能となる。拘束条件により，標準偏差 σ を 0.5 から 1.5 に増加するにつれて取り得る透水量係数の分布範囲が広がるが, 対数平均値 μ が小さくなり，相対的に透水量係数が大きな値の確率が高くならない。



(a) FFM02



(b) FFM01m

図 3.2.2-20　ケース B②で推定した透水量係数分布

上記②で設定した複数の透水量係数分布と表 3.2.2-7 に整理した割れ目の方位，大きさ分布，密度等のパラメータを用いて，それぞれの岩盤領域を対象にネットワークモデルを作成し，PFL-f 試験を模擬したシミュレーションを行った。シミュレーションにより求めた比湧水量の総和と実測値の比較を表 3.2.2-11，表 3.2.2-12 に示す。これらの表には上記③の補正により算定した透水量係数の対数平均値を併せて示している。具体的には，シミュレーションにより求めた比湧水量の総和が実測値に合うように，ケース A と同様に透水量係数分布の対数平均値 μ の値を補正した。

補正後の透水量係数分布を図 3.2.2-21 に示す。これらの分布を用いて，再度 PFL-f 試験を模擬したシミュレーションを行った。シミュレーションの結果から求めた比湧水量の頻度分布と実測値の比較を図 3.2.2-22～図 3.2.2-25 に示す。また，PFL-f 試験で検出可能な透水性の高い割れ目（PFL 検出割れ目）の本数の比較結果を表 3.2.2-13 および表 3.2.2-14 に示す。FFM02 のケースでは，比

湧水量が実測値に近い分布を示しているのは標準偏差の大きなケースで，特に対数値が-9.0 より大きな値の分布が実測値に近いのは FFM02_e のケース（μ : -7.18, σ : 1.50）と考えられる。また，PFL 検出割れ目の本数においても標準偏差が大きなケースが実測値に近い値を示している。FFM01m のケースでは，比湧水量の分布のうち対数値が-9.0 より大きな値の分布が実測値に近いのはFFM01m_c, もしくはFFM01m_dのケースと考えられる。PFL検出割れ目の本数は, FFM01m_a, FFM01m_b，FFM01m_c のケースが実測値に近い値を示しており，これらの比較から，FFM01m では FFM01m_c（μ : -7.35, σ : 1.00）のケースが実測値に近い比湧水量分布と PFL 検出割れ目の本数を表していると考えられる。

以上の結果から, ケース B による FFM02 および FFM01m の透水量係数分布モデルの推奨値を，下記の組み合わせとした。

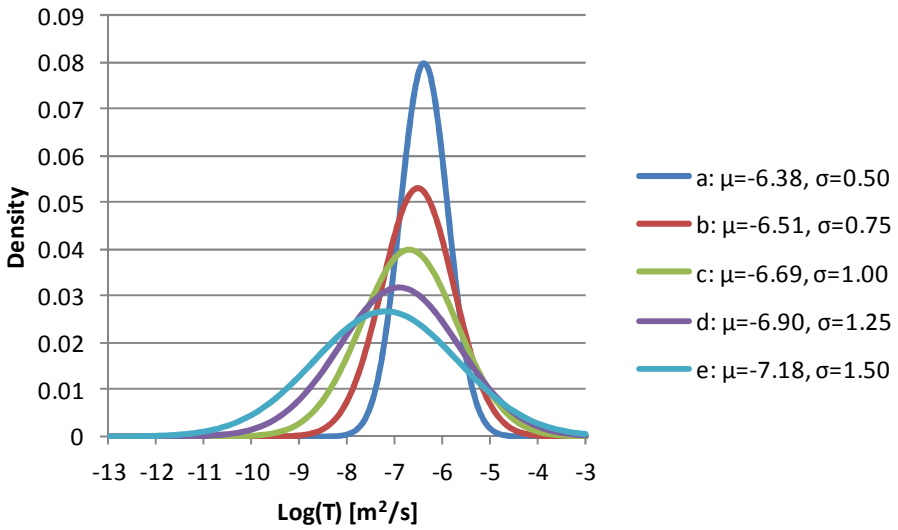
FFM02　：μ=-7.18, σ=1.50
FFM01m：μ＝-7.35, σ＝1.00

表 3.2.2-11　ケース B②で設定した透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量の総和（青）と実測値（赤）の比較（FFM02）
（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

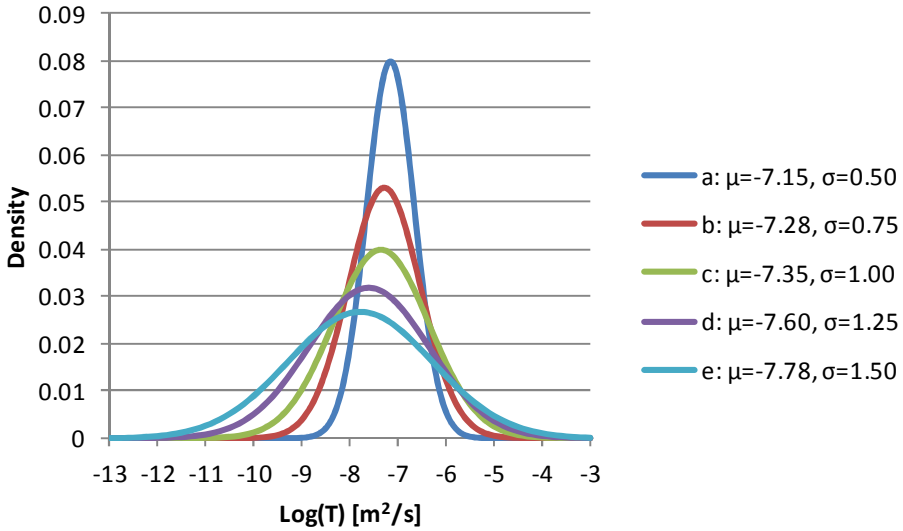
		透水量係数分布		PFL-f 比湧水量総和(m^2/s)	補正後の対数平均値
		対数平均値 μ	対数標準偏差 σ		
解析値	FFM02_a	-7.47	0.50	1.1×10^{-6}	-6.38
	FFM02_b	-7.99	0.75	6.5×10^{-7}	-6.51
	FFM02_c	-8.31	1.00	3.1×10^{-7}	-6.69
	FFM02_d	-8.94	1.25	1.2×10^{-7}	-6.9
	FFM02_e	-9.75	1.50	3.6×10^{-8}	-7.18
実測値(FFM02)				1.3×10^{-5}	

表 3.2.2-12　ケース B②で設定した透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量の総和（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m）
（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

		透水量係数分布		PFL-f 比湧水量総和(m^2/s)	補正後の対数平均値
		対数平均値 μ	対数標準偏差 σ		
解析値	FFM01m_a	-7.52	0.50	3.0×10^{-7}	-7.15
	FFM01m_b	-7.87	0.75	1.6×10^{-7}	-7.28
	FFM01m_c	-8.37	1.00	6.8×10^{-8}	-7.35
	FFM01m_d	-9.02	1.25	2.4×10^{-8}	-7.6
	FFM01m_e	-9.80	1.50	6.7×10^{-9}	-7.78
実測値(FFM01)				6.2×10^{-7}	

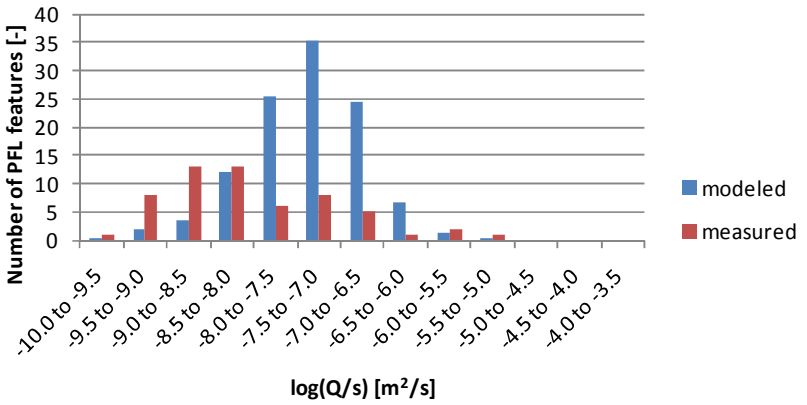


(a) FFM02

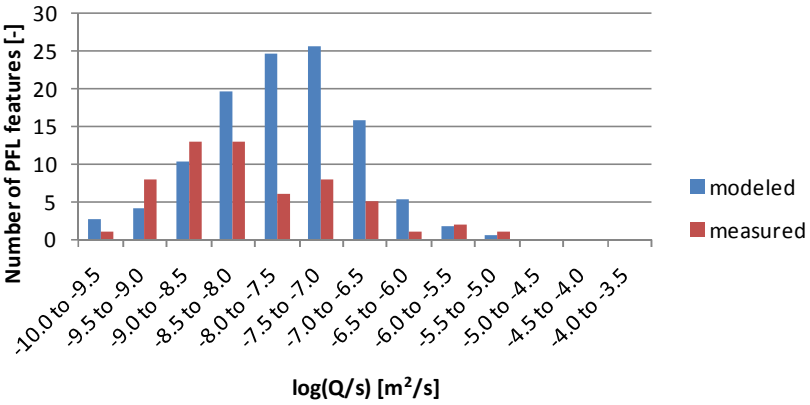


(b) FFM01m

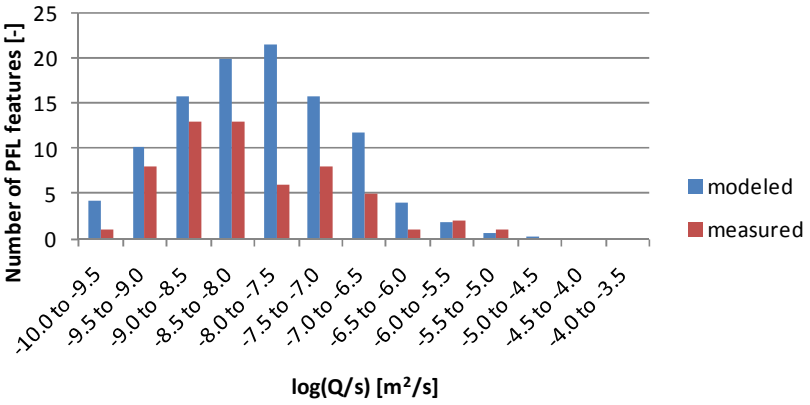
図 3.2.2-21　ケース B③補正後の透水量係数分布



(a) ケース FFM02_a（σ=0.5）

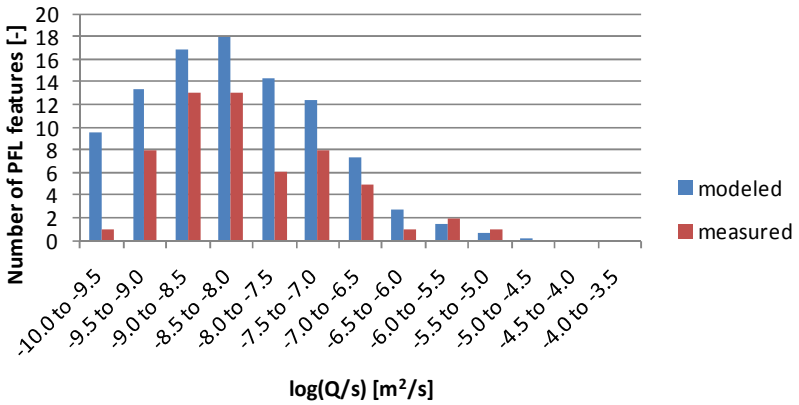


(b) ケース FFM02_b（σ=0.75）

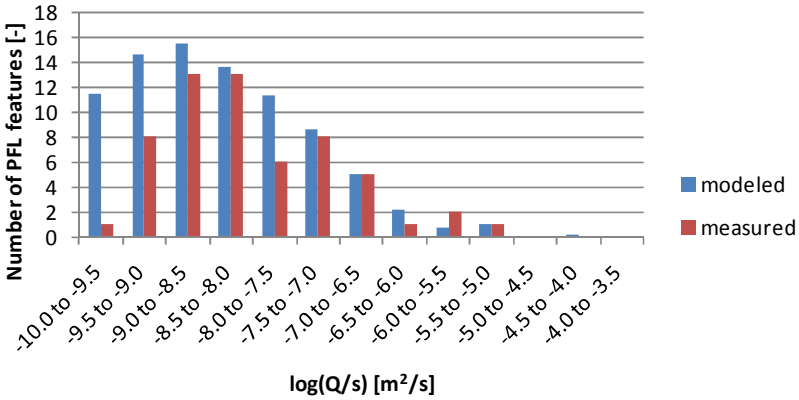


(c) ケース FFM02_c（σ=1.0）

図 3.2.2-22　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM02）その（1）

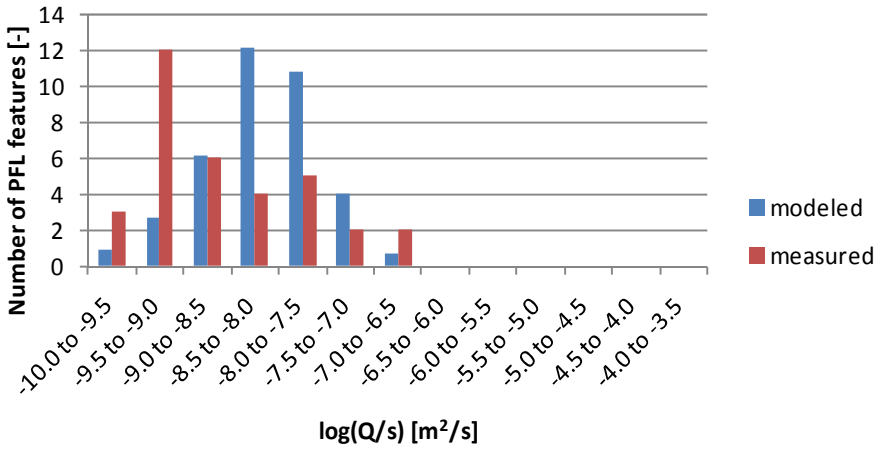


(d) ケース FFM02_d（σ=1.0）

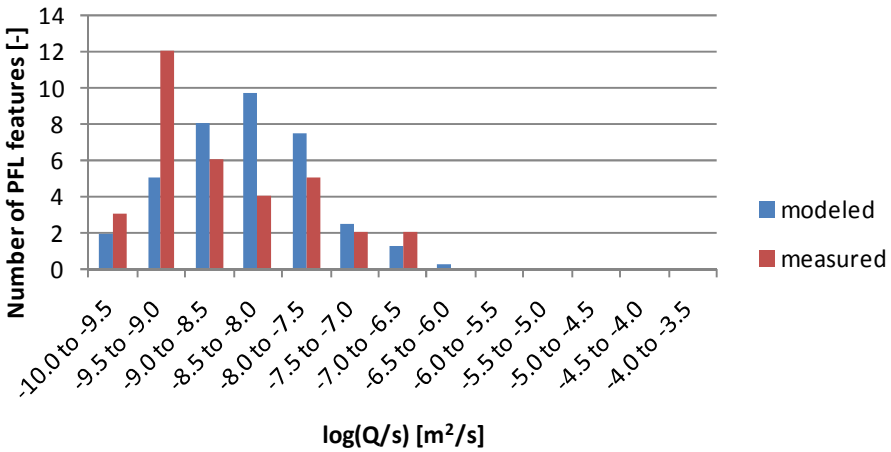


(e) ケース FFM02_e（σ=1.5）

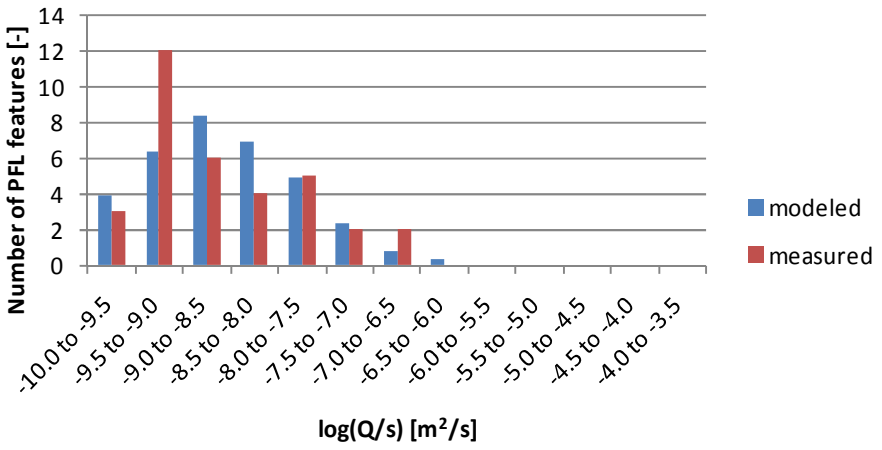
図 3.2.2-23　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM02）　その（２）



(a) ケース FFM01m_a（σ=0.5）

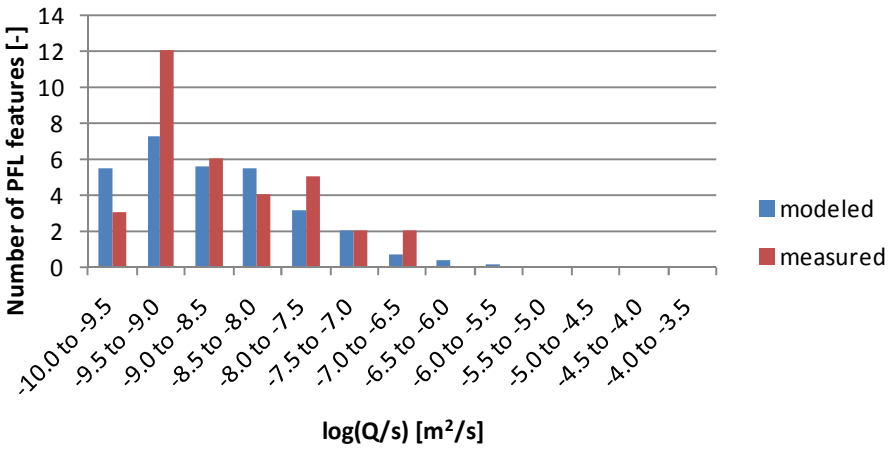


(b) ケース FFM01m_b（σ=0.75）

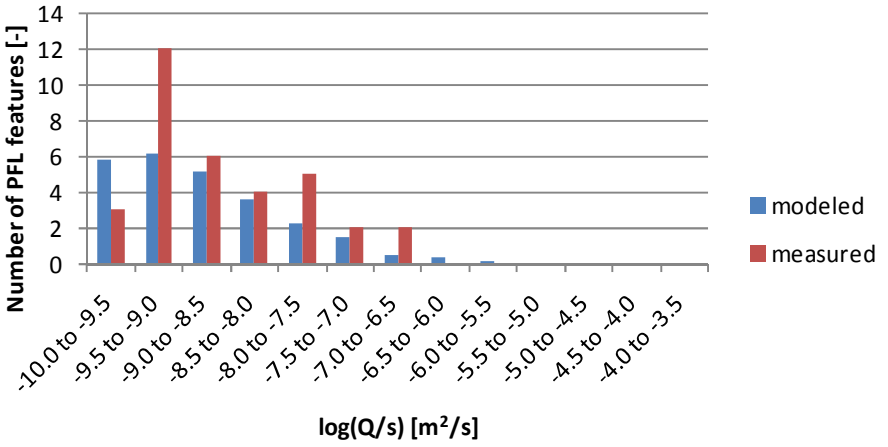


(c) ケース FFM01m_c（σ=1.0）

図 3.2.2-24　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m）その（１）



(d) ケース FFM01m_d（σ=1.25）



(e) ケース FFM01m_e（σ=1.5）

図 3.2.2-25　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m）　その（２）

表 3.2.2-13　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる PFL 検出割れ目本数の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM02）
（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

		補正前②	補正後③
解析値	FFM02_a	106	111
	FFM02_b	86	108
	FFM02_c	54	102
	FFM02_d	26	90
	FFM02_e	9	74
実測値(FFM02)		58	

表 3.2.2-14　ケース B 補正後の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験を模擬したシミュレーションから求められる PFL 検出割れ目本数の解析値（青）と実測値（赤）の比較（FFM01m）
（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

		補正前②	補正後③
解析値	FFM01m_a	36	36
	FFM01m_b	29	35
	FFM01m_c	18	31
	FFM01m_d	8	26
	FFM01m_e	3	21
実測値(FFM01m)		34	

(c) ケース C

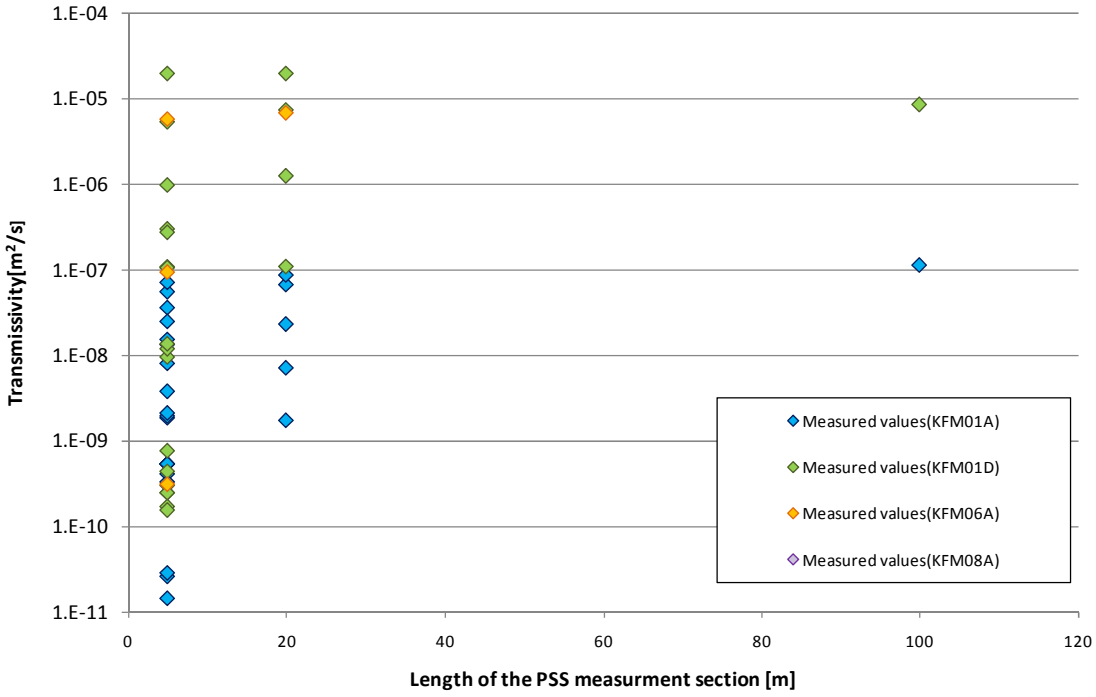
ケース C では，まず PSS 試験データによる 5m 区間，20m 区間，100m 区間で取得された透水量係数分布を利用し，個々の割れ目の透水量係数分布を推定するためのシミュレーションを実施した。具体的には，開口割れ目の方位，密度，大きさを考慮した割れ目ネットワークモデルを作成し，個々の割れ目の透水量係数分布（対数平均値と標準偏差の組合せ）を複数適用して，HydroDFN モデルを構築した。そして，モデル内にボーリング（鉛直ボーリング）を模擬し，水頭差 1m の条件で比湧水量（5m 区間，20m 区間，100m 区間）をシミュレーションにより算定した。湧水量Qから，5m，20m，100m の各区間で得られる透水量係数Tを次式の Thiem の式により算定した。

$$T = \frac{Q}{\Delta h}\frac{\ln(R/r)}{2\pi}$$

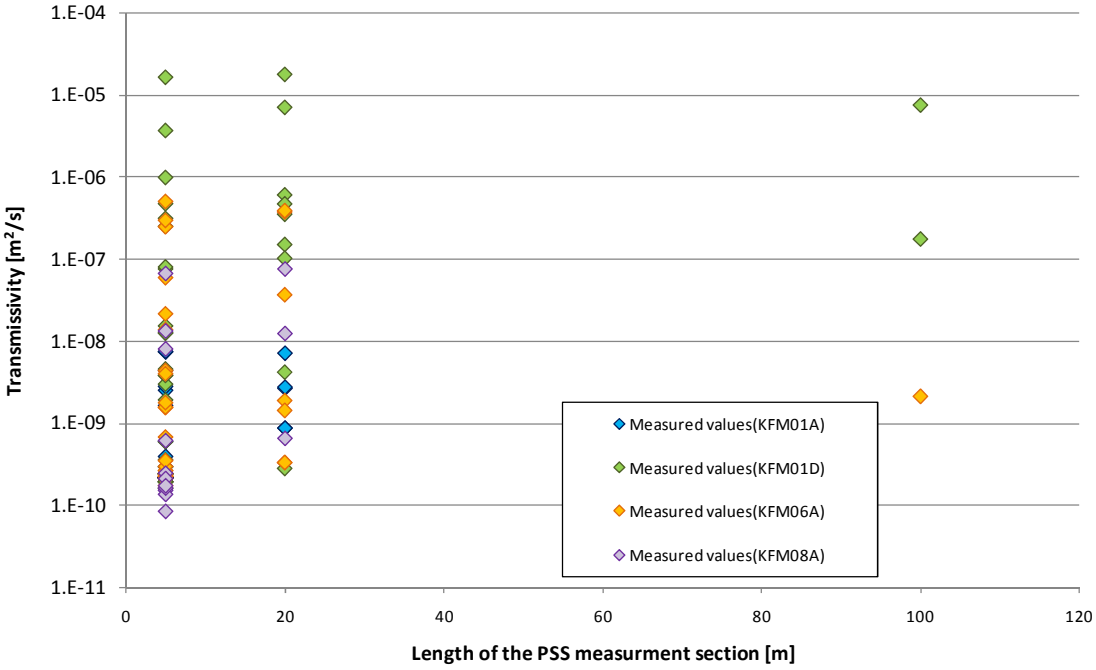
ここで，影響半径Rは 30m，ボーリング孔径rは 0.05m を仮定するとすると ln(R/r)/2π≒1 が得られ，比湧水量 Q/Δh が透水量係数 T に近似できると仮定した（Sawada et al., 2000）。そして，算定した透水量係数分布と PSS 試験による実測の透水量係数分布と比較することで，原位置の条件を良好に再現できる透水量係数分布を推定した。

さらに，上記の手順により推定した透水量係数分布を用いて亀裂ネットワークモデルを作成して，PFL-f 試験の再現シミュレーションを実施し，同試験で確認した PFL 検出割れ目の本数の再現性について確認するとともに，同試験の実測の比湧水量の合計値に合うように透水量係数分布の対数平均値を補正した。

PSS 試験で取得された透水量係数の分布を図 3.2.2-26 と図 3.2.2-27 に示す。PSS 試験の適用区間長（5m 区間，20m 区間，100m 区間）ごとの透水量係数の分布を確認すると，5m 区間では 5～6 オーダーの範囲にわたって分布するが，20m，100m 区間と区間長が大きくなるに従い，その範囲が狭くなることが確認できる。また，100m 区間については，PSS 試験の数が少なく透水量係数の分布特性についての考察は困難であるが，5m 区間および 20m 区間については，そのヒストグラムより透水量係数分布の最大値から中間値にかけて（対数）正規分布的に分布することが推察される。ここで，PSS 試験の計測下限値は，透水量係数（m^2/s）の対数で-9.1 の値が報告されている（Ludvigson, et al., 2004, p.23）ことから，同ヒストグラムにおいて透水量係数値の対数値が-9 以下の範囲を比較対象とするには注意が必要である。

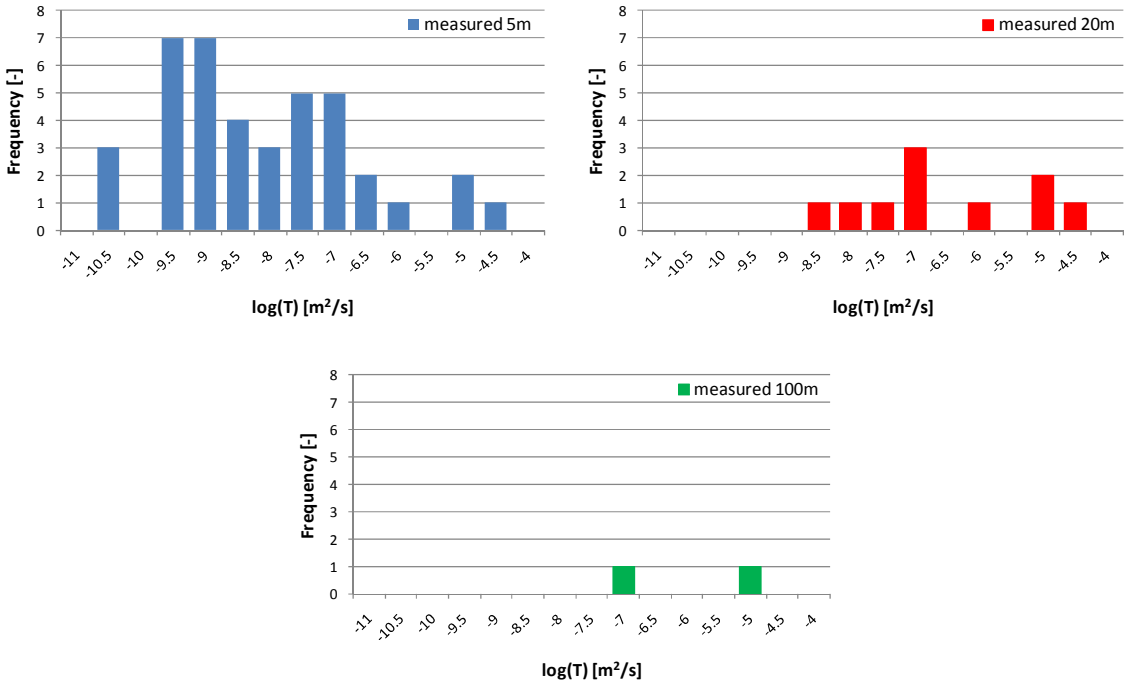


(a) FFM02 領域

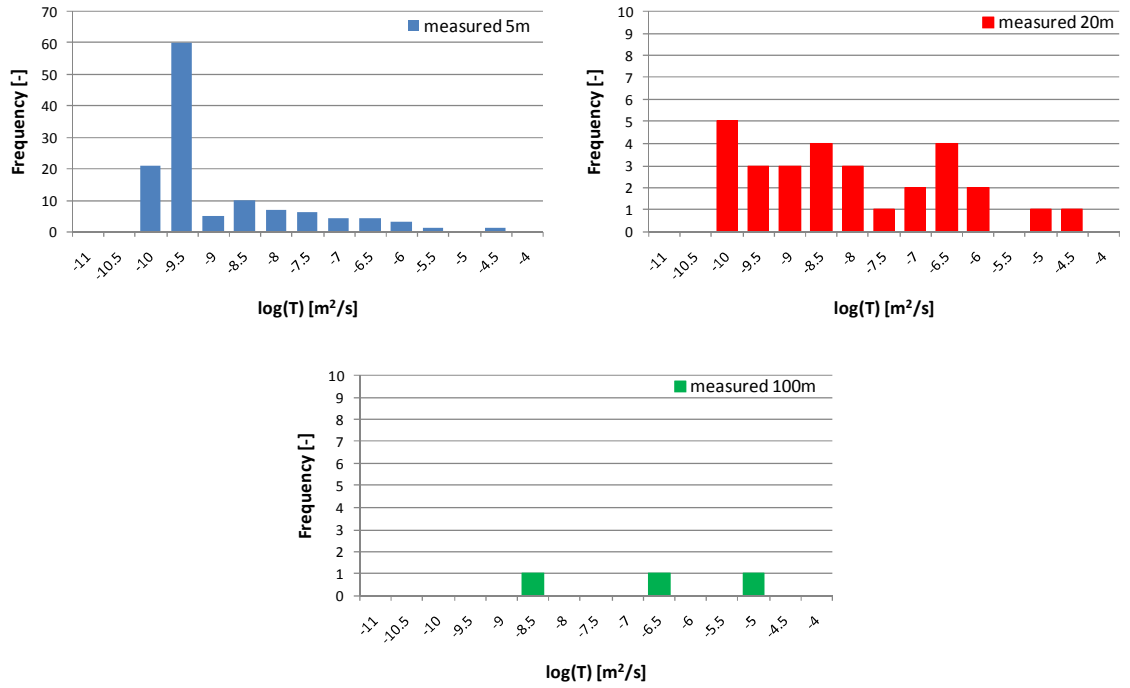


(b) FFM01m 領域

図 3.2.2-26　PSS 試験で取得された試験区間（5m，20m，100m）ごとの透水量係数分布



(a) FFM02 領域

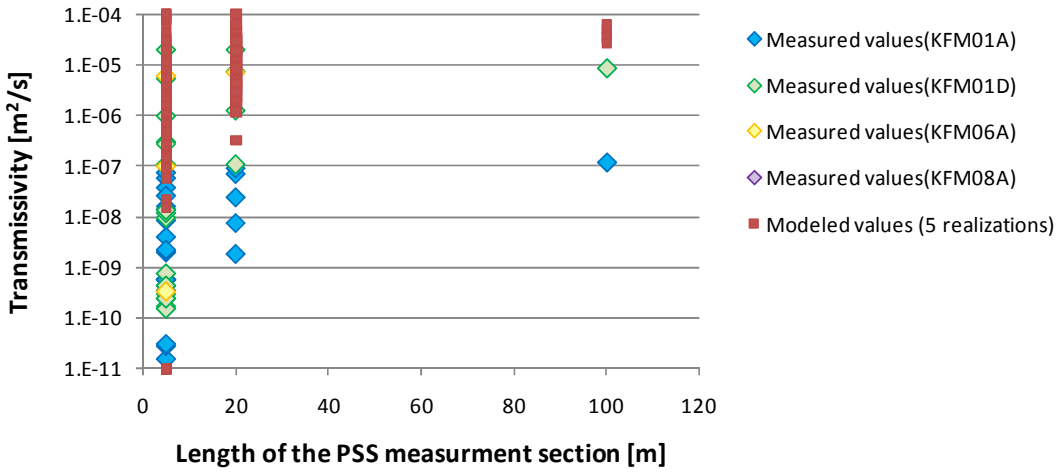


(b) FFM01m 領域

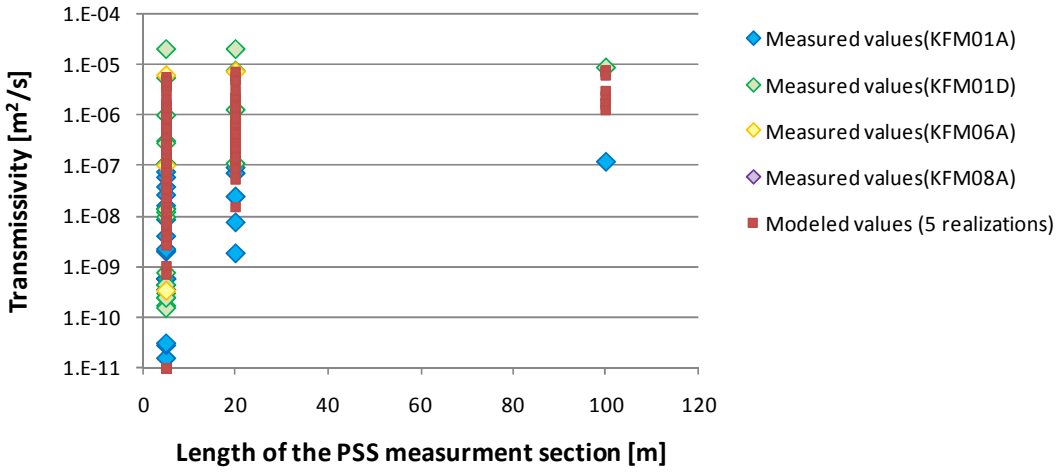
図 3.2.2-27　PSS 試験で取得された試験区間（5m，20m，100m）ごとの透水量係数分布のヒストグラム

FFM02 領域に対して個々の割れ目の透水量係数分布の対数平均値（μ）を-6.0，-7.0，-8.0 と設定して標準偏差（σ）を 1.0 で固定した場合，また FFM01m 領域に対して個々の割れ目の透水量係数分布の対数平均値（μ）を-6.0，-7.0 と設定して標準偏差（σ）を 1.0 で固定した場合の各区間のを対象としたシミュレーションを実施した。各区間の透水量係数の分布をシミュレーション結果と計測データで比較して図 3.2.2-28 と図 3.2.2-29 にそれぞれ示す。

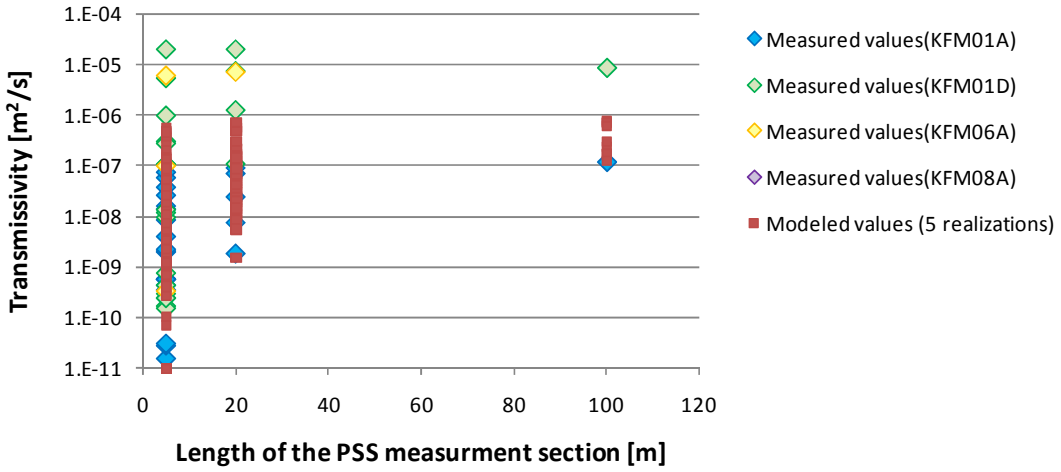
両図より，個々の割れ目の透水量係数分布の対数平均値（μ）を-6.0，-7.0，-8.0 と小さくするに従い，シミュレーションにより算定された各区間長の透水量係数の分布（図中の■の中央値）が小さくなっていくことが確認できる。計測データの透水量係数分布のうち，20m 区間の分布は試験点数が多く，その分布範囲が PSS 試験の計測下限値を上回っている。両図の結果から，主に 20m 区間の透水量係数の分布（主に中央値）に着目し，計測データを良好に再現する観点から，シミュレーションにおいて適用する個々の割れ目の透水量係数分布の対数平均値（μ）として，FFM02 で-7.0～-7.5，FFM01m で-7.0 を選定した。



(a) 対数平均値（μ）：-6.0, 標準偏差（σ）：1.0

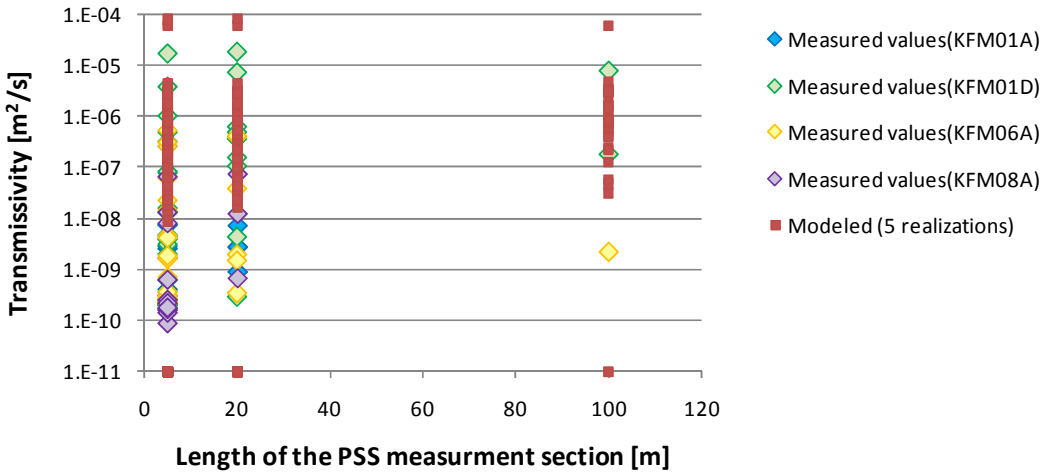


(b) 対数平均値（μ）：-7.0, 標準偏差（σ）：1.0

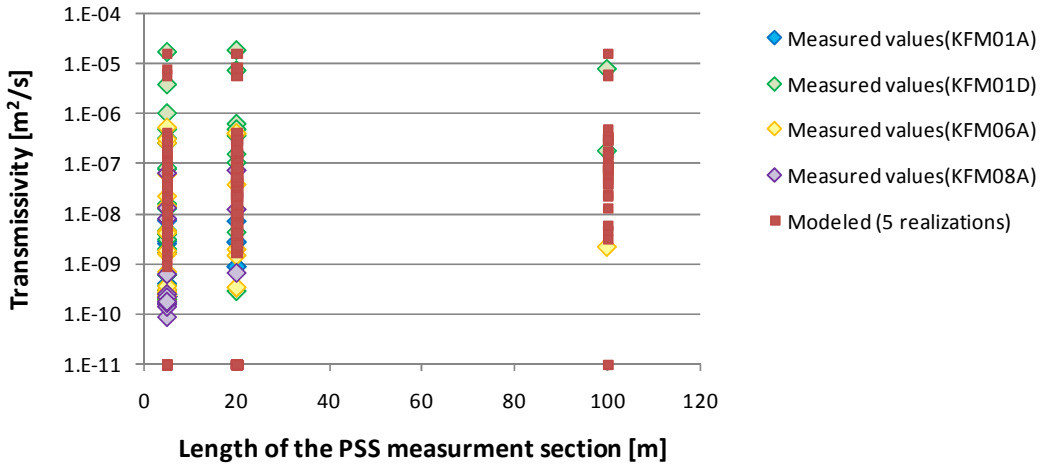


(c) 対数平均値（μ）：-8.0, 標準偏差（σ）：1.0

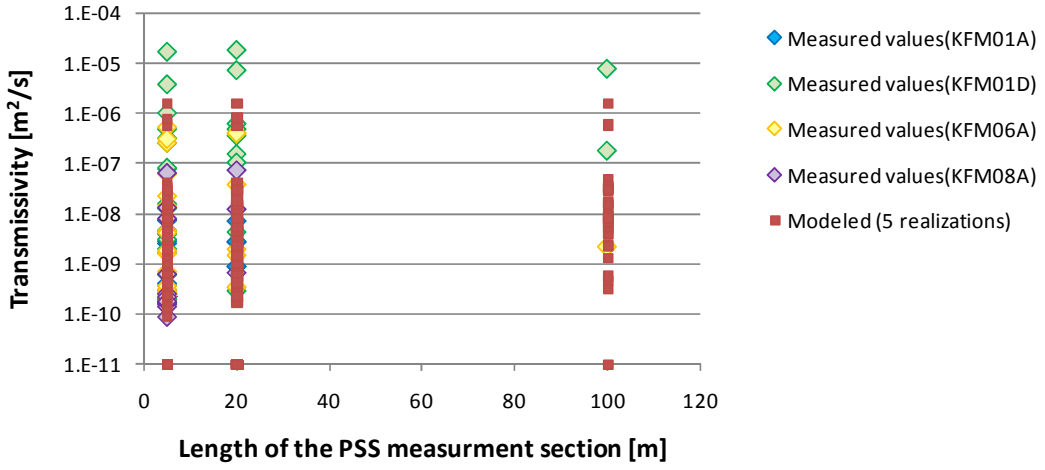
図 3.2.2-28　シミュレーションに基づく透水量係数分布と実測値の比較（FFM02 領域）



(a) 対数平均値（μ）：-6.0, 標準偏差（σ）：1.0



(b) 対数平均値（μ）：-7.0, 標準偏差（σ）：1.0



(c) 対数平均値（μ）：-8.0, 標準偏差（σ）：1.0

図 3.2.2-29　シミュレーションに基づく透水量係数分布と実測値の比較（FFM01m 領域）

FFM02 領域に対して透水量係数分布の対数平均値（μ）を-7.0 および-7.5，標準偏差（σ）について 1.5 とした場合，また，FFM01m 領域に対して透水量係数分布の対数平均値（μ）を-7.0，標準偏差（σ）について 0.8 とした場合を選定し，標準偏差（σ）による透水量係数分布への影響を確認するために，再度シミュレーションを実施した（図 3.2.2-30～図 3.2.2-31 参照）。FFM02 領域を対象に対数平均値（μ）を-7.0 とした結果では，-7.5 と比較して透水量係数の最大値がやや大きい傾向がある。一方，FFM01m 領域を対象に標準偏差（σ）を 1.0 とした結果では，0.8 と比較して，20m 区間長において計測で確認された大きな透水量係数の値（対数で-4.5～-5.0 の範囲）を良好に再現していると考えられる。

これらの再シミュレーション結果と計測データの比較結果に基づき，計測データを良好に再現する観点から，FFM02 領域および FFM01m 領域について個々の割れ目の透水量係数分布の推定値を整理すると，下記のとおりとなる。

FFM02　　：対数平均値 μ(log) = -7.5，標準偏差 σ(log) = 1.5

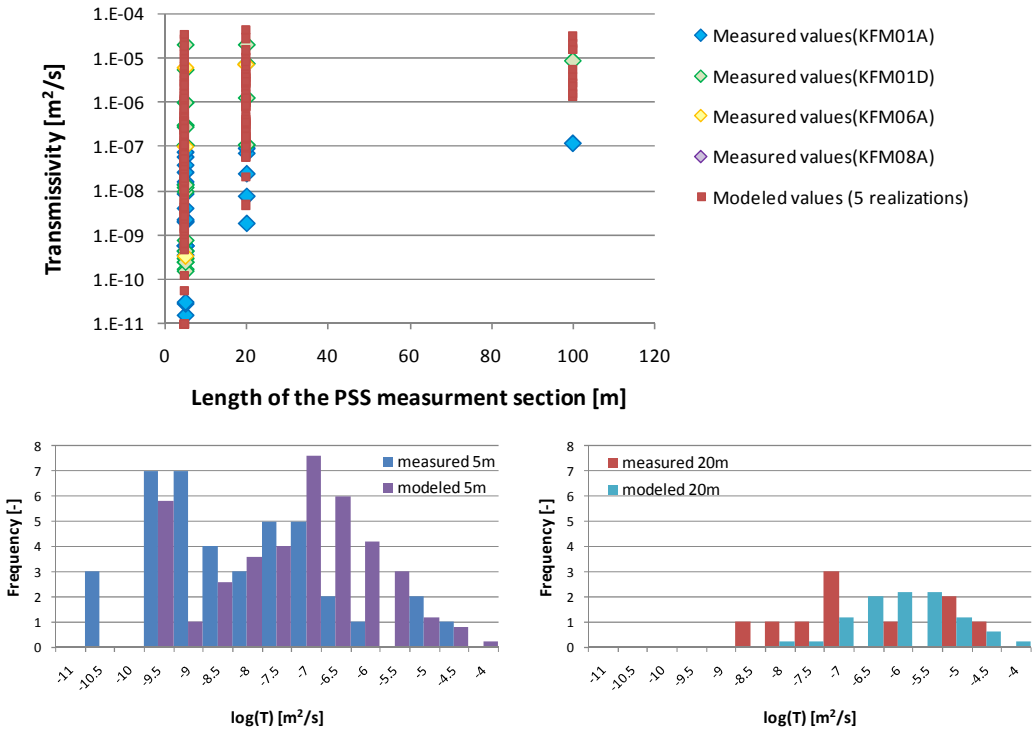
FFM01m　：対数平均値 μ(log) = -7.0，標準偏差 σ(log) = 1.0

また，これら PSS 試験データを利用して推定した透水量係数分布の適用性を確認するため，PFL-f 試験の再現シミュレーションを実施した。そのシミュレーションの結果を表 3.2.2-15，図 3.2.2-32 および図 3.2.2-33 にとりまとめる。表中には，PFL-f 試験にて取得した比湧水量の合計値を用いて，透水量係数分布の対数平均値を補正した結果も併せて示している。

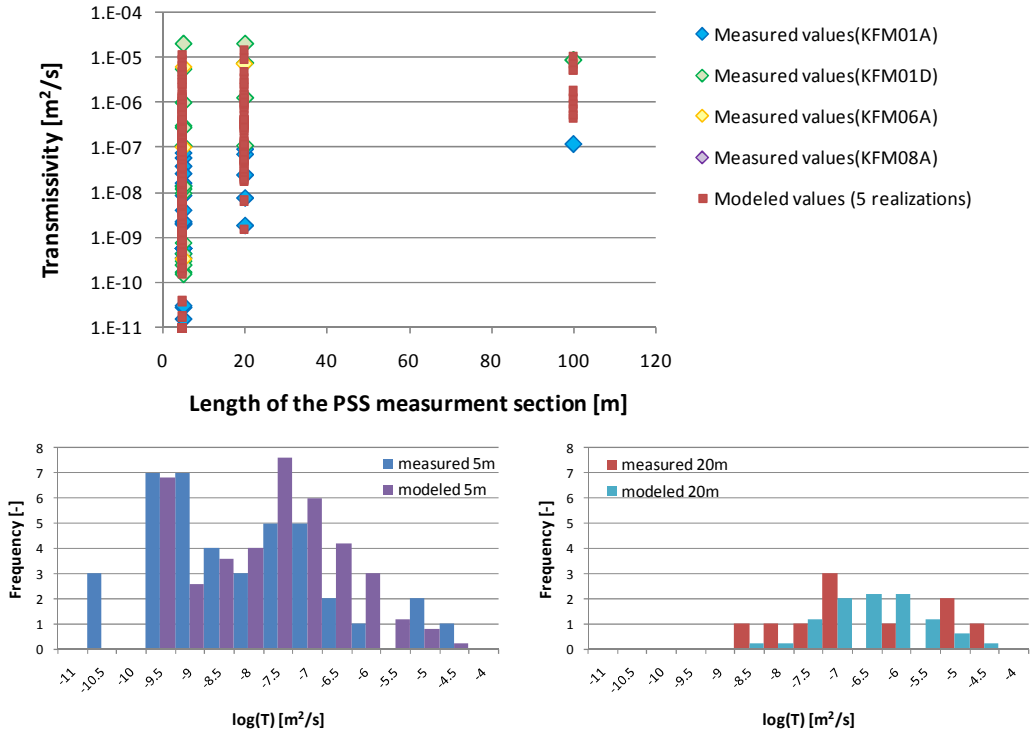
PFL-f 試験にて取得した比湧水量の合計値を用いて補正した透水量係数分布の推定値を整理すると，下記のとおりとなる。

FFM02　　：対数平均値 μ(log) = -7.2，標準偏差 σ(log) = 1.5

FFM01m　：対数平均値 μ(log) = -7.4，標準偏差 σ(log) = 1.0

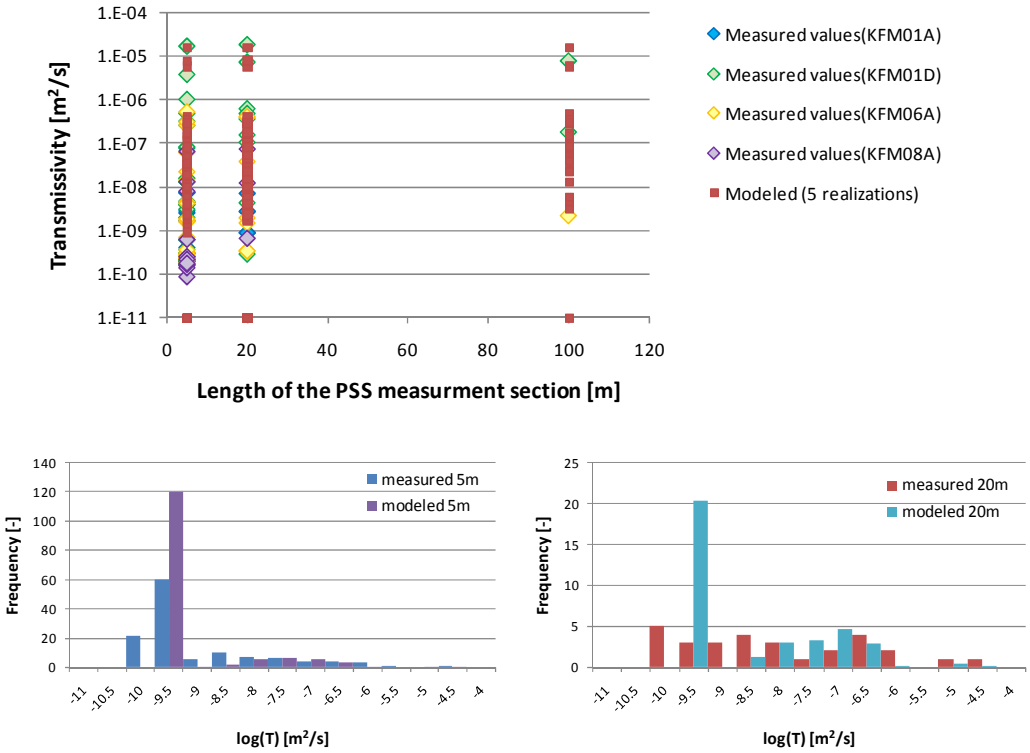


(a) 対数平均値（μ）：-7.0, 標準偏差（σ）：1.5

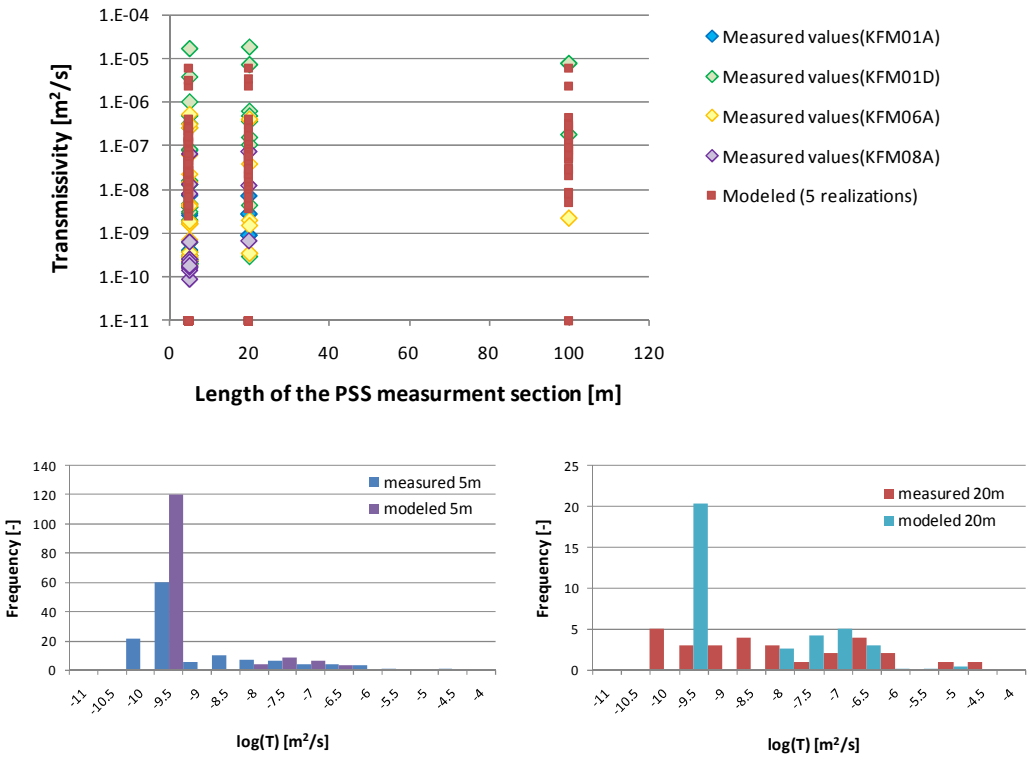


(b) 対数平均値（μ）：-7.5, 標準偏差（σ）：1.5

図 3.2.2-30　再シミュレーション結果と計測データの比較（FFM02 領域）



(a) 対数平均値（μ）：-7.0, 標準偏差（σ）：1.0

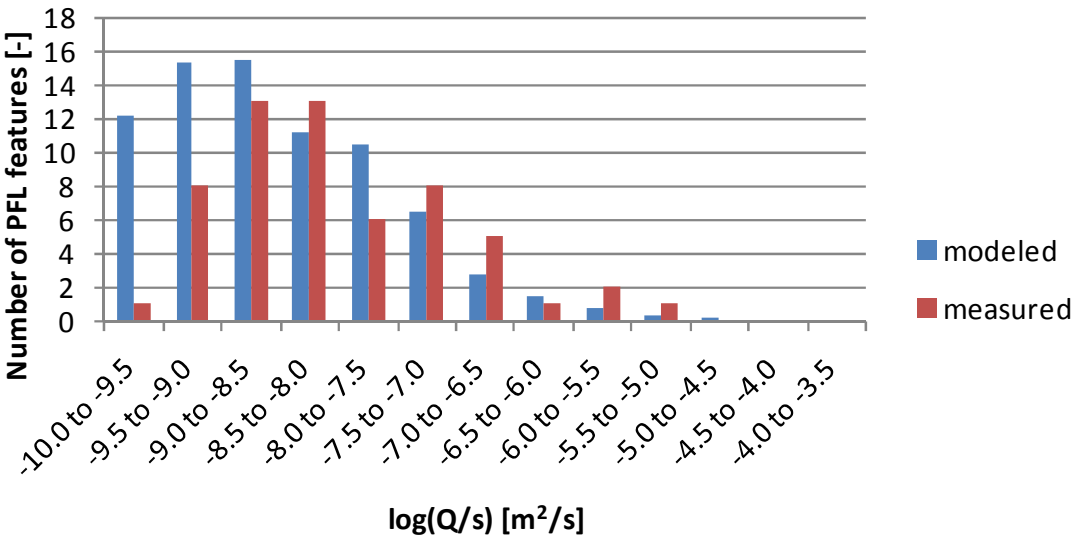


(b) 対数平均値（μ）：-7.0, 標準偏差（σ）：0.8

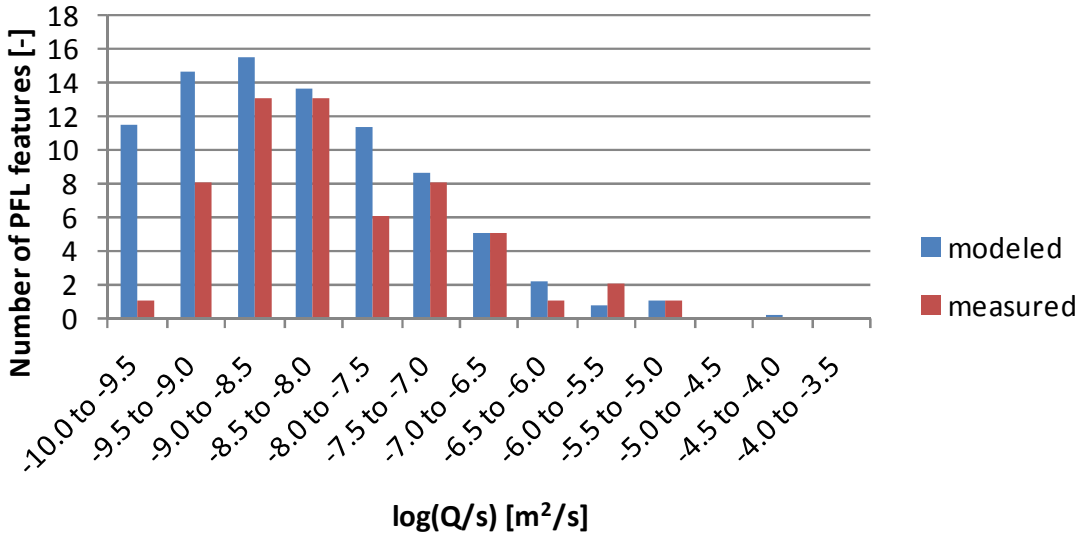
図 3.2.2-31　再シミュレーション結果と計測データの比較（FFM01m 領域）

表 3.2.2-15　ケース C の透水量係数分布を用いた PFL-f 試験のシミュレーションから求められる比湧水量分布の解析値（青）と実測値（赤）の比較
（解析値は 10 リアライゼーションの平均）

	対数平均値 (μ)	標準偏差 (σ)	PFL-f 比湧水量合計(m^2/s)	PFL-f 割れ目本数
実測値(FFM02)	―	―	1.3×10^{-5}	58
解析値(FFM02) PSS データ利用	-7.5	1.5	6.4×10^{-6}	67
解析値(FFM02) PFL データによる補正後	-7.2	1.5	1.3×10^{-5}	74
実測値(FFM01)	―	―	6.2×10^{-7}	34
解析値(FFM01m) PSS データ利用	-7.0	1.0	1.6×10^{-6}	34
解析値(FFM01m) PFL データによる補正後	-7.4	1.0	6.2×10^{-7}	31

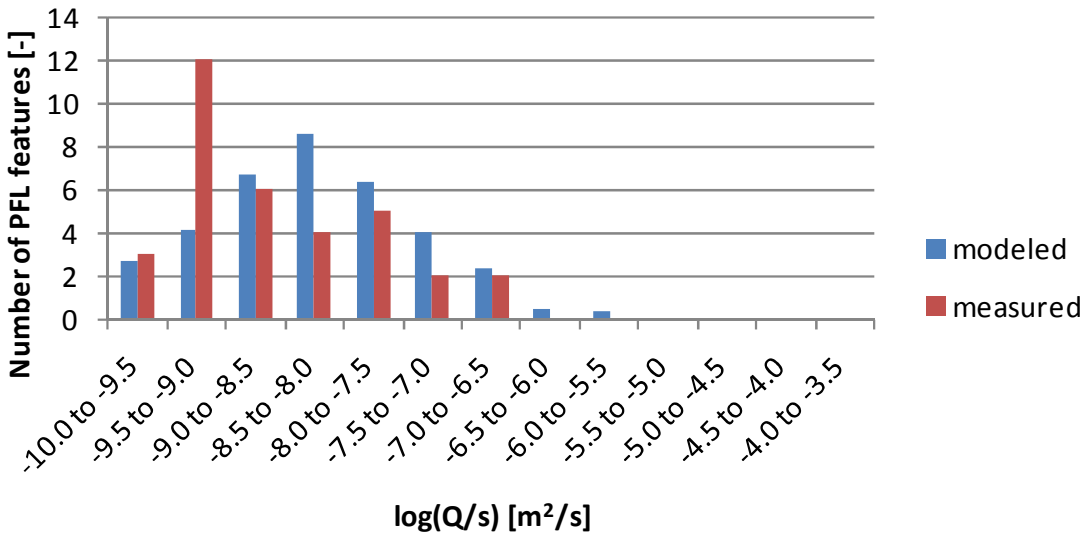


(a) 対数平均値（μ）：-7.5，標準偏差（σ）：1.5
PFL-f 割れ目数：実測 58，モデル 67
比湧水量の総和：実測 $1.3\times10^{-5}m^2/s$，モデル $6.4\times10^{-6}m^2/s$

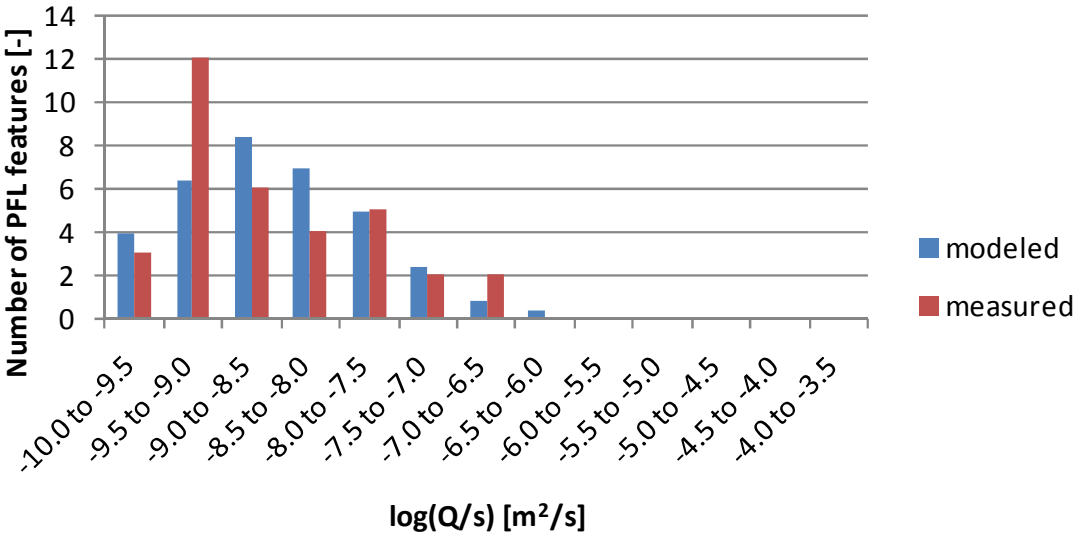


(b) 対数平均値（μ）：-7.2，標準偏差（σ）：1.5
PFL-f 割れ目数：実測 58，モデル 74
比湧水量の総和：実測 $1.3\times10^{-5}m^2/s$，モデル $1.3\times10^{-5}m^2/s$

図 3.2.2-32　PFL-f シミュレーション結果と計測データの比較（FFM02 領域）



(a) 対数平均値（μ）：-7.0, 標準偏差（σ）：1.0
PFL-f 割れ目数：実測 34, モデル 34
比湧水量の総和：実測 $6.2\times10^{-7}m^2/s$, モデル $1.6\times10^{-6}m^2/s$



(b) 対数平均値（μ）：-7.4, 標準偏差（σ）：1.0
PFL-f 割れ目数：実測 34, モデル 31
比湧水量の総和：実測 $6.2\times10^{-7}m^2/s$, モデル $6.2\times10^{-7}m^2/s$

図 3.2.2-33　PFL-f シミュレーション結果と計測データの比較（FFM01m 領域）

(d) 代替手法を用いた透水量係数分布の推定結果のまとめ

SR-Site で用いられている透水量係数分布の設定の代替ケースとして，ケース A～C の三つの異なる手法で透水量係数の推定を試みた。ケース A～C の推定手法の概要を表 3.2.2-16 に整理した。表 3.2.2-16 のうち，①と②はそれぞれのケースの推定過程の段階を表す。また，各手法により同定した透水量係数分布の推定値を整理して表 3.2.2-17 および表 3.2.2-18 にとりまとめる。

ケース A～C のいずれの手法においても，透水量係数分布の平均値と標準偏差の推定結果は FFM02 領域および FFM01m 領域でそれぞれ同様の値となり，かつ SR-Site で用いられている透水量係数分布の設定値とも近い結果となった。これは，三つのケースともに最終的に PFL-f 試験による実測の比湧水量の合計値を用いて透水量係数分布を補正したためで，異なるデータや仮定に基づいて透水量係数分布を推定したとしても，PFL-f 試験による実測値との比較により同じ透水量係数分布を得ることができた。すなわち，PFL-f 試験データを重視した場合には，他のデータや推定に必要な種々の仮定の不確実性の影響は相対的に小さいためと考えられる。なお，本試行では，一定の割れ目の密度や割れ目の大きさ分布モデルを仮定しており，これらのパラメータ値の不確かさが透水量係数分布の推定結果に与える影響について，今後検討を進めていく必要がある。

表 3.2.2-17 と表 3.2.2-18 に，各手法で利用した情報や適用した推定手法の流れから，利用する情報や解釈手法の組合せにより，推定した透水量係数分布の違いを整理した。これらの表に基づいて，SR-Site 用いられた手法や，本検討で試行した三つの代替ケースの違いや特徴を考察した結果を以下に記す。

- SR-Site では，PFL-f 試験データ（PFL-f 割れ目数，PFL-f 比湧水量の合計，PFL-f 割れ目からの比湧水量の分布：ヒストグラム）を重視し，それらを良好に再現する割れ目の透水量係数分布を推定している。
- 代替手法のケース A～C では，PSS 試験の情報を割れ目の透水量係数分布推定に利用した。具体的には，ケース A および B では試験区間長が最も短く，対象岩盤の水理的な不均質性を最も小さい評価スケールで取得した 5m 区間の透水量係数の計測データを利用した。FFM02 領域では合計 40 点，FFM01m 領域では合計 102 点の透水量係数のデータを用い，その分布は FFM02 領域で 6 桁，FFM01m 領域で 5 桁の幅広い範囲に分布している。
- ケース A および B では，PSS 試験 5m 区間の透水量係数の計測データを利用し，同試験区間において確認された全ての開口割れ目に透水量を割り当てる考え方で，検討初期の透水量係数分布を推定している（表 3.2.2-16 の①）。しかしながら，推定した透水量係数分布を用いた PFL-f 比湧水量の合計値は計測データの 1%（FFM02）および 0.5%（FFM01m）と小さな値となった。開口割れ目の本数は FFM02 で 526 本（ボーリング総延長 209m，P_{10}=2.52 本/m），FFM01m で 508 本（ボーリング総延長 719m，P_{10}=0.71 本/m）である。また，透水性の高い割れ目の目安となる PFL-f 割れ目の本数は FFM02 で 58 本（P_{10}=0.28 本/m），FFM01m で 34 本（P_{10}=0.05 本/m）であり，開口割れ目の本数に対して FFM02 で 11%，FFM01m で 7%となる。透水量係数分布の推定結果が PFL-f 試験の比湧水量の総和より小さくなった原因としては，水みちとして寄与する割れ目の本数が開口割れ目の本数と乖離していることが考えられる。これは，開口割れ目の中から，ボーリング孔から一定の連結性を有してかつ水みちとして機能する割れ目の本数を推定することが困難であること示している。
- ケース A でとりまとめた（表 3.2.2-16 の②に該当）透水量係数分布の標準偏差（σ）は，PSS

試験の解釈に基づくものであり，PFL-f 試験のシミュレーションによりその適用性を確認している。一方，ケース B でとりまとめた（表 3.2.1-26 の②に該当）透水量係数分布の標準偏差（σ）は，PFL-f 試験のシミュレーションから，計測データを良好に再現する標準偏差（σ）と対数平均値（μ）の組合せを選定しており，ケース B の検討手順は SR-Site の設定手法と最も近いものとなっている。

・ ケース C では，PSS 試験 5m 区間の透水係数の計測データに加えて，20m 区間，100m 区間の計測データを用いることで，PSS 試験の区間長を評価スケールとした水理特性（透水量係数分布）の分布を利用した検討を実施した。また，主に試験実施点数が多い 5m 区間および 20m 区間の透水量係数分布（ヒストグラム）を利用し，PSS 試験のシミュレーション結果と計測データを比較することで，割れ目の透水量係数分布の対数平均値（μ）と標準偏差（σ）の推奨値を整理した。複数の区間長さで実施された PSS 試験のデータから推定される複数のスケールの透水性のバラツキに着目して，割れ目の透水量係数分布を推定する手法を示した。

表 3.2.2-16　本検討で例示した透水量係数分布の推定手法のまとめ

	利用した情報①	推定手法と結果①	利用した情報②	推定手法と結果②
SR-Site 無相関 ケース	・PFL-f 試験の比湧水量合計値 ・PFL-f 割れ目の本数 ・PFL-f 割れ目からの比湧水量の分布（ヒストグラム）	〔考え方〕 ・開口割れ目の連結性を考慮 ・左記情報のシミュレーションと計測結果の比較から最適値を推定 〔推定手法〕 ・PFL-f 試験の数値シミュレーション 〔結果①〕 ・透水量係数分布（μ, σ）	－	－
ケース A	・PSS　5m 区間の計測データ（透水量係数） ・PSS　5m 区間内の開口割れ目の本数	〔考え方〕 ・全開口割れ目が水みちとして寄与すると仮定 ・同じ試験区間（5m 区間）に分布する割れ目の透水量係数は等しいと仮定 〔推定手法〕 ・理論式 〔結果①〕 ・一つの透水量係数分布（μ，σ）	・PFL-f 試験の比湧水量合計値	〔考え方〕 ・PFL-f 試験の比湧水量の合計値から透水量係数分布の対数平均値を補正 〔推定手法〕 ・理論式 〔結果②〕 ・透水量係数分布（μ, σ） 〔適用性確認〕 ・PFL-f 試験の数値シミュレーション
ケース B	・PSS　5m 区間の計測データ（透水量係数） ・PSS　5m 区間内の開口割れ目の本数	〔考え方〕 ・全開口割れ目が水みちとして寄与すると仮定 ・同じ試験区間（5m 区間）に分布する割れ目の透水量係数も対数正規分布でばらつくと仮定 〔推定手法〕 ・理論式 〔結果①〕 ・複数の透水量係数分布 （複数の μ，σ）	・PFL-f 試験の比湧水量合計値 ・PFL-f 割れ目の本数 ・PFL-f 割れ目からの比湧水量の分布（ヒストグラム）	〔考え方〕 ・PFL-f 試験の比湧水量の合計値から透水量係数分布の対数平均値を補正 ・PFL-f 割れ目本数，比湧水量の分布（ヒストグラム）との比較から最適値を推定 〔推定手法〕 ・PFL-f 試験の数値シミュレーション 〔結果②〕 ・透水量係数分布 （μ, σ）
ケース C	・PSS　5m，20m，100m 区間の計測データ（透水量係数のヒストグラム）	〔考え方〕 ・開口割れ目の連結性を考慮 ・左記情報のシミュレーションと計測結果の比較から最適値を推定 〔推定手法〕 ・PSS 試験の数値シミュレーション 〔結果①〕 ・一つの透水量係数分布（μ，σ）	・PFL-f 試験の比湧水量合計値	〔考え方〕 ・PFL-f 試験の比湧水量の合計値から透水量係数分布の対数平均値を補正 〔推定手法〕 ・理論式 〔結果②〕 ・透水量係数分布（μ, σ） 〔適用性確認〕 ・PFL-f 試験の数値シミュレーション

表 3.2.2-17　本検討で例示した透水量係数分布の推定手法のまとめ（FFM02 領域）

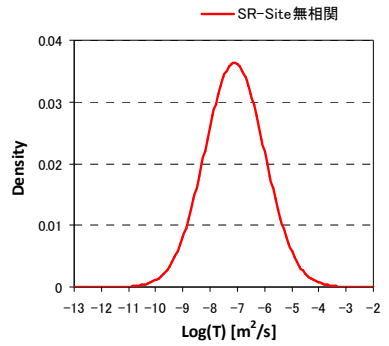
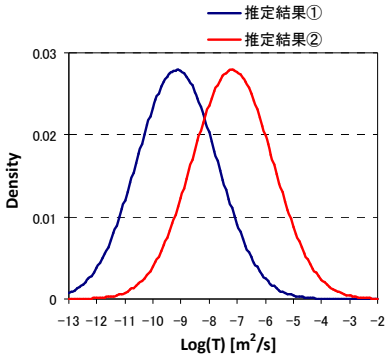
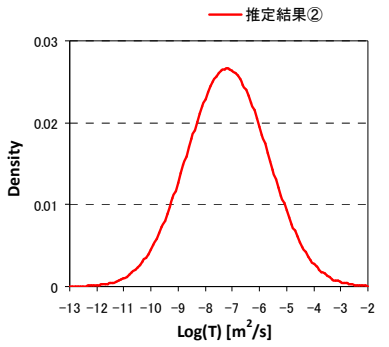
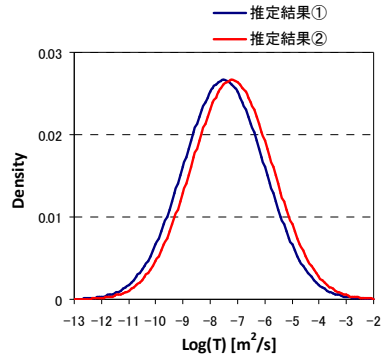
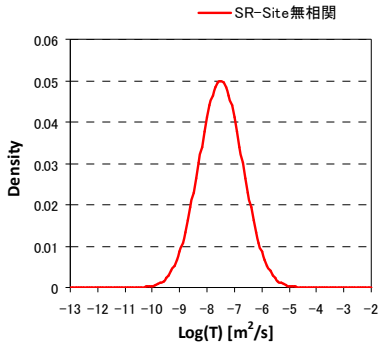
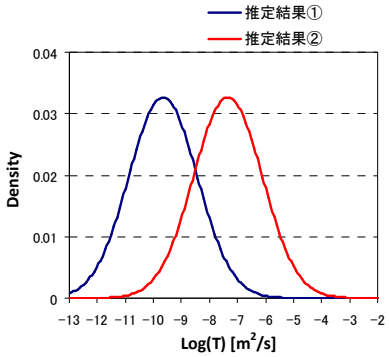
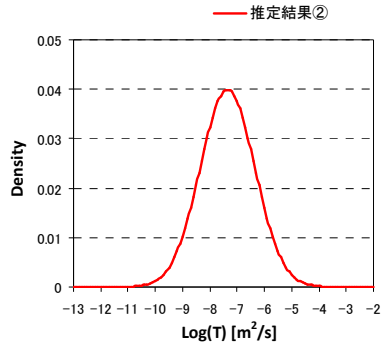
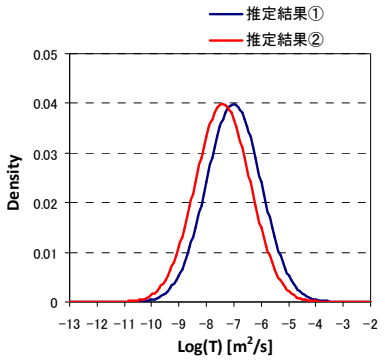
	推定結果①	推定結果②	透水量係数分布
SR-Site 無相関 ケース	・対数平均値（μ） -7.1 ・標準偏差（σ） 1.1	―	
ケース A	・対数平均値（μ） -9.14 ・標準偏差（σ） 1.43	・対数平均値（μ） -7.17 ・標準偏差（σ） 1.43	
ケース B	対数平均値・標準偏差の組合せが異なる複数の透水量係数分布を推定	・対数平均値（μ） -7.18 ・標準偏差（σ） 1.50	
ケース C	・対数平均値（μ） -7.5 ・標準偏差（σ） 1.5	・対数平均値（μ） -7.2 ・標準偏差（σ） 1.5	

表 3.2.2-18　本検討で例示した透水量係数分布の推定手法のまとめ（FFM01m 領域）

	推定結果①	推定結果②	透水量係数分布
SR-Site	・対数平均値（μ） -7.5 ・標準偏差（σ） 0.8	―	
ケース A	・対数平均値（μ） -9.65 ・標準偏差（σ） 1.22	・対数平均値（μ） -7.34 ・標準偏差（σ） 1.22	
ケース B	対数平均値・標準偏差の組合せが異なる複数の透水量係数分布を推定	・対数平均値（μ） -7.35 ・標準偏差（σ） 1.00	
ケース C	・対数平均値（μ） -7.0 ・標準偏差（σ） 1.0	・対数平均値（μ） -7.4 ・標準偏差（σ） 1.0	

3.2.3 結晶質岩を対象とした評価ツリーの拡充

2011 年度の検討では，結晶質岩等の亀裂性岩盤を対象に母岩の特性を表す項目の一つである「地下水移行時間」を例に評価方法を整理し，「評価ツリー」に取りまとめた。本年度は，結晶質岩を対象とした評価ツリーの拡充として，3.2.1 項の SR-Site の事例調査の結果と，3.2.2 項の水理地質構造モデル構築の試行結果に基づき，(1)地下水移行時間と，(2)地下水移行時間以外の項目について評価手法をまとめた。

地下水移行時間を対象とした評価ツリーの整備については，地下水移行時間の評価結果に影響を与える項目の一つとして透水量係数の設定の不確実性に着目し，3.2.1 項で調査した SR-Site の透水量係数設定手法に加えて，3.2.2 項で検討した複数の透水量係数設定手法を評価ツリーに整理した。また，地下水移行時間を対象とした評価ツリーとしては，地下水移行時間に関連する項目として 2011 年度の SR-Site を対象に調査した評価項目のうち亀裂中の移行抑制機能（F 値）を評価する手法を，評価対象とする水理地質構造モデルのスケールやモデルの違いに応じて分類した。

地下水移行時間以外の項目を対象とした評価ツリーについても，2011 年度の SR-Site を対象に調査した評価項目のうち緩衝材と岩盤の接触面における等価流量（Q_{eq} 値）と処分孔への許容湧水量について，水理地質構造モデルを用いた評価手法について整理した。

F 値や Qeq 値は，岩種や核種移行評価の概念モデルを確定して評価検討が進められている SR-Site の独自のパラメータだが，それぞれ核種移行遅延性能や人工バリアの外側境界条件設定に密接に関連するものである。そのため， SR-Site の事例に基づいてこれらのパラメータ値を評価する方法を整理して評価ツリーとして整備することにより，核種移行遅延性能や人工バリアの外側境界条件設定に関連するパラメータ値を評価する具体的な事例を整理できる。これらの知見は，今後 NUMO の概要調査等の事業の進展に応じて，その事例検討を参照し，母岩としての適性評価およびそれに必要な調査の計画立案に資することができると考えられる。

(1) 地下水移行時間の評価ツリー

(i) 割れ目の透水量係数分布の設定

2011 年度の検討では，結晶質岩等の亀裂性岩盤を対象として地下水移行時間の評価方法を整理し，図 3.2.3-1 に示す「評価ツリー」に取りまとめた（江橋ほか，2012）。その際，核種移行の評価に与える影響が大きい割れ目の透水量係数分布に着目し，データ解釈上の複数の考え方を踏まえ，モデル化・解析手法から調査方法に至る関係を系統的に整理した。図 3.2.3-1 の評価ツリーの中で，割れ目の透水量係数分布の設定に関する箇所を赤い四角で囲った。割れ目の透水量係数分布に関する部分では，超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第一段階）における調査項目を基に，それらの調査項目の組合せから想定される複数の割れ目の透水量係数分布の推定手法を整理した。一次元モデルに基づく解析の場合，例えば，第２次取りまとめでは，割れ目の透水量係数の不均質性に着目して一次元平行平板モデルの重ね合わせモデルに基づき核種移行解析が行われた。その知見に基づけば，透水量係数のバラツキは数桁の範囲にわたり，また他のパラメータのバラツキの範囲に比べて核種移行遅延効果に与える影響が大きいことが分かっている（澤田ほか，1999，付録 B）。また，三次元モデルに基づく場合の割れ目の透水量係数分布は，評価ツリーにおける三つの三次元水理地質構造モデルのうち，亀裂ネットワーク（DFN）モデルを構築する際に必要なパラメータである。

本年度においても，割れ目の透水量係数分布の設定に関する評価ツリーに着目し，この部分の

評価ツリーの拡充として, 3.2.1 項と 3.2.2 項で述べた SR-Site の事例調査の結果とそこでの調査データを用いた代替のモデル構築の結果に基づき，割れ目の透水量係数分布の推定手法を評価ツリーとして整理した。その評価ツリーを図 3.2.3-2 に示す。

SR-Site における HydroDFN モデルの構築では, 割れ目の透水量係数分布の設定の不確実性を定量化するために，以下の三つの透水量係数分布モデルを適用し，PFL-f 試験を模擬したシミュレーションにより算出される比湧水量（Q/s）の合計値，頻度分布，連結性のある割れ目（PFL 流入割れ目）を実測値と比較することで割れ目の大きさのべき乗数，三次元割れ目密度，透水量係数分布等のパラメータ値が推定されている。

- 割れ目の大きさと完全相関モデル(Correlated Model)
- 割れ目の大きさと準相関モデル(Semi-correlated Model)
- 割れ目の大きさと無相関モデル(Uncorrelated Model：対数正規分布モデル)

また，本検討では，SR-Site の事例調査によって抽出したデータセットを活用して，以下の三つの代替的な透水量係数分布を設定した（3.2.2(3)参照）。

ケース A: 5m 区間の PSS データから求めた透水量係数と開口割れ目の頻度から 5m 区間ごとの透水性割れ目の透水量係数を算出

ケース B： 5m 区間の PSS データから求めた透水量係数の総和と開口割れ目の総和から求めた透水量係数の算術平均値を再現できるような透水量係数の対数平均値と標準偏差の組み合わせを複数設定して, PFL-f 試験の実測値との比較により最適な組み合わせを選定。

ケース C： 透水量係数の対数平均値と標準偏差の組み合わせを複数設定して，5m 区間，20m 区間, 100m 区間の区間長のそれぞれの PSS 試験を模擬したシミュレーションと, PFL-f 試験を模擬したシミュレーションを行い，それぞれの実測値との比較により最適な組み合わせを選定。

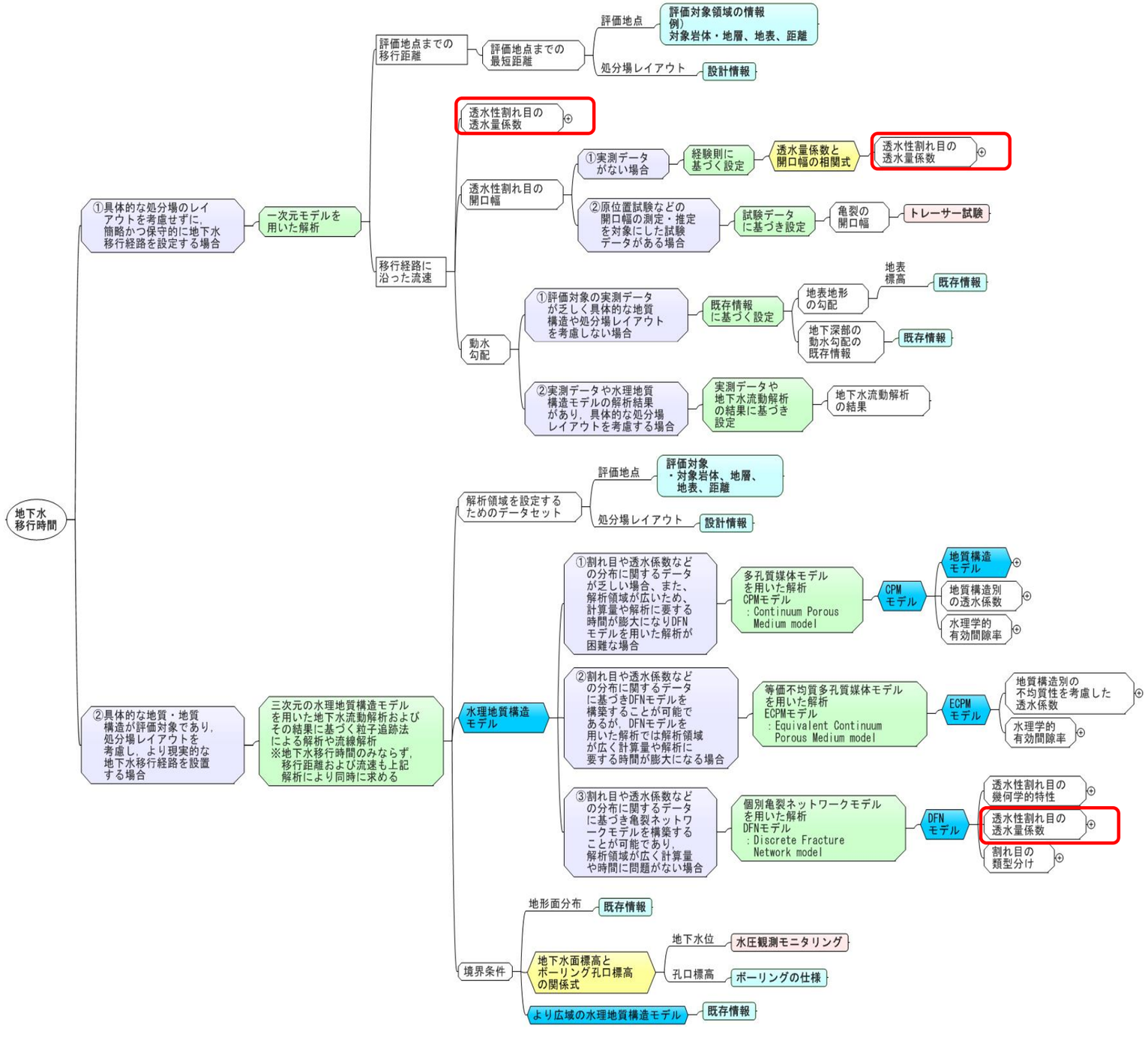


図 3.2.3-1　亀裂性媒体を対象とした地下水移行時間の評価ツリー（江橋ほか，2012）

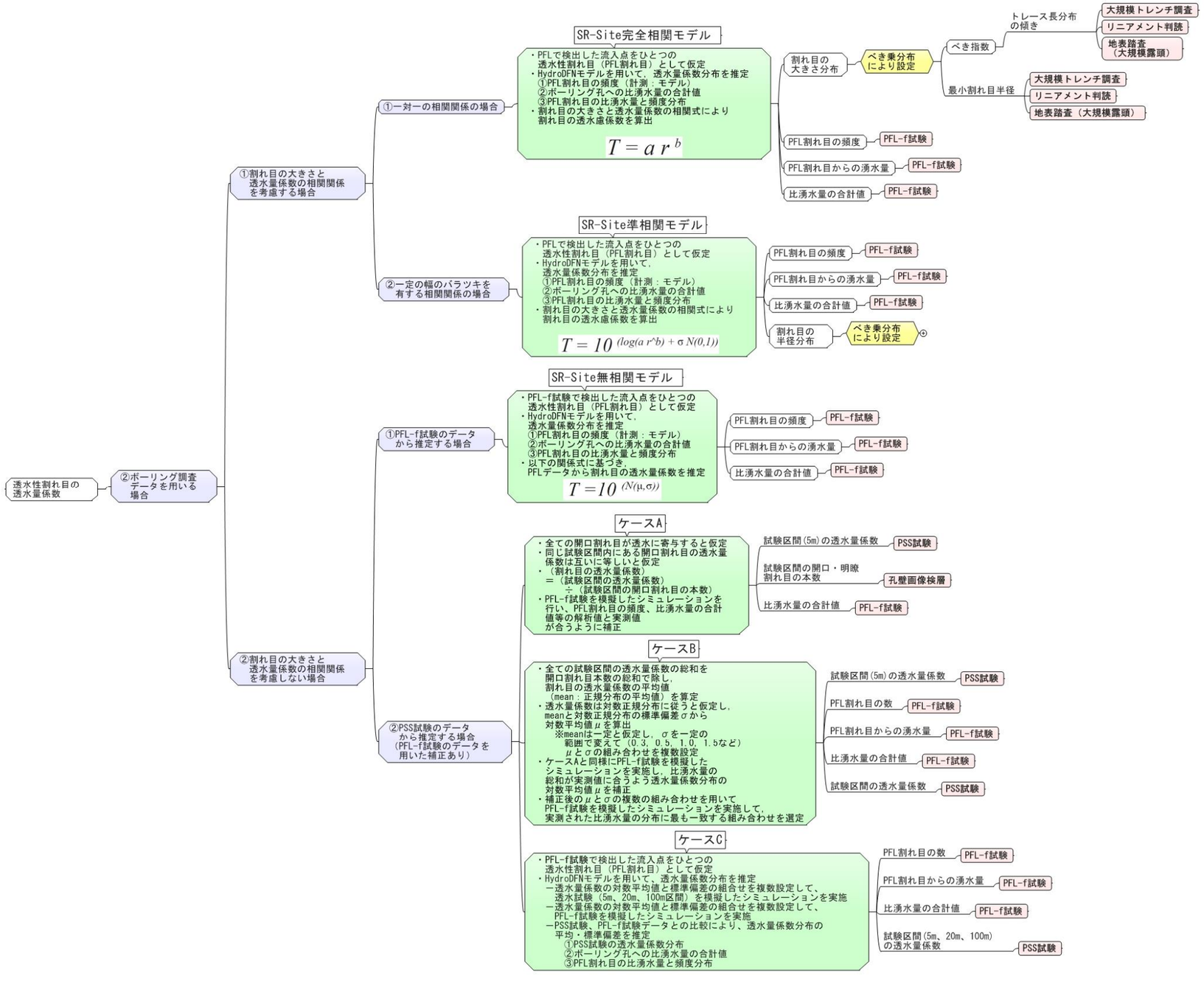


図 3.2.3-2　割れ目の透水量係数分布に関する評価ツリー

(ii) 地下水移行時間およびF値の算定

SR-Site では，F 値を母岩の遅延機能の指標の一つに設定している。F 値とは，亀裂媒体中を移行する溶質がマトリクス拡散による遅延効果を考慮した核種の保持能力に関係する特性を移行経路に沿って整理したものであり，地下水移行時間と関連する指標である。F 値を求めるために用いる水理地質構造モデル，地下水流動解析とそれに必要な境界条件設定，粒子追跡法による移行経路の抽出等の手法は基本的に地下水移行時間と同様の手法を用いている。地下水移行時間およびF値に関する評価ツリーを図 3.2.3-3 に示す。また，サイトスケールの水理地質構造モデルの構築部分を図 3.2.3-4 に示す。リージョナルスケールを対象とした地下水移行時間およびF値に関する評価ツリーを図3.2.3-5 に示す

Forsmark サイトを対象とした三次元水理地質構造モデルに基づく地下水流動解析は，図 3.2.3-6 に示すように「リージョナルスケール」，「サイトスケール」，「処分場スケール」という三つの空間スケールを設定し，スケールに応じて DFN（亀裂ネットワーク）モデル，ECPM（等価不均質連続体モデル），CPM（連続多孔質媒体モデル）を組み合わせて適用している（図 3.2.3-7 参照）。時間スケールについては，「建設・操業段階」，「閉鎖後初期（間氷期）」，「閉鎖後長期（氷期）」に区別され，「閉鎖後初期（間氷期）」に対して ConnectFlow (CF)を，「建設・操業段階」および「閉鎖後長期（氷期）」に対して DarcyTool（DT）を適用した地下水流動解析を実施しており，それぞれ異なるモデル解析のツールにより水理地質構造モデルを構築している（図 3.2.3-7 および図 3.2.3-8 参照；江橋ほか，2012，p.26 参照）。「閉鎖後初期（間氷期）」の地下水流動解析に適用された ConnectFlow は，亀裂ネットワークモデル，等価不均質連続体モデル，連続多孔質媒体モデル，またそれらの入れ子によりモデルを構築でき，地下水の密度流を考慮した地下水流動解析が可能な解析ツールである。SR-Site では，表 3.2.3-1 に示すように各空間スケールに対して，それぞれの条件で地下水流動解析が行われている。本項の評価ツリーの整備では，この「閉鎖後初期（間氷期）」を対象とした F 値と地下水移行時間を評価するための地下水流動解析と粒子追跡法による解析に着目した。

地下水移行時間およびF値は，サイトスケールと処分場スケールのモデルを組み合わせた水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析および粒子追跡法による解析により算定される。具体的には，DFN モデルとしてモデル化された処分場スケールモデル内の処分場から出発した粒子が CPM あるいは ECPM モデルとしてモデル化されたサイトスケールモデルへ移行し，モデル境界に到達するまでを評価対象としている。したがって，F 値および移行時間を算定する方法に関しては，解析に用いる水理地質構造モデルの前提条件に応じて異なるツールが適用されている。

処分場スケールの領域における HydroDFN モデルを用いた地下水移行時間 t_r [y]は，次式で求められる（Joyce et al., 2010, p.46）。

$$t_r = \sum_f \frac{e_{tf} w_f \delta l}{Q_f}$$

ここで，Q_fは地下水流動解析と粒子追跡法により求められる粒子が通過する移行経路の亀裂間の流量[m^3/y]，e_{tf}は亀裂の開口幅[m]，w_fは亀裂が交差する交線の長さ（すなわち，亀裂の幅）[m]，δl は粒跡線のステップ長（解析上の単位時間あたりの移行距離）[m]である。

また，F 値 F_r [y/m]は，次式で求められる。

$$F_r = \sum_f \frac{2w_f \delta l}{Q_f} = \sum_f \frac{2t_{rf}}{e_{tf}}$$

ここで，t_{rf}は移行経路上の亀裂間の移行時間[y]である。

一方，サイトスケールモデルの領域における CPM モデル，ECPM モデルを用いた地下水移行時間 t_r [y]は，次式で求められる（Joyce et al., 2010, pp. 45-46）。

$$t_r = \sum_l \frac{\phi \delta l}{q}$$

ここで，ϕは有効間隙率（ECPM モデルでは亀裂の物質移行開口幅から各要素内の有効空隙率を算定）[-]，q はダルシー流速[m/y]である。一方，F 値 F_r [y/m]は次式で求められる。

$$F_r = \sum_l \frac{a_r \delta l}{q}$$

ここで，a_rは単位体積当たりの流動寄与面積（HydroDFN モデルの三次元割れ目密度 P_{32} の 2 倍：亀裂の上下面）である。

SR-Site で実施された地下水流動解析および粒子追跡法による解析の詳細について以下に示す。

(a) リージョナルスケールモデルによる地下水流動解析（Joyce et al., 2010, pp. 52-66）

リージョナルスケールでは, 8,000 年前～12,000 年後の間の長期的な地下水流動および地下水の濃度分布（異なる化学成分を持つ地下水）の変化を評価することを目的として解析が行われた。また，サイトスケールや処分場スケールに適用する境界条件として，圧力や濃度（地下水の密度）を算定することもリージョナルスケールを対象とした地下水流動解析の目的であった。水理地質構造モデルは，処分場の候補領域の外側については，割れ目特性に関する利用可能なデータが限定的であり，処分場の候補領域から離れた岩盤であることから連続体モデル（CPM）により構築された。処分場の候補領域の内側は，利用可能なデータが十分取得されているが，解析モデルの大きさと計算要領の実務的な制約から DFN モデルから変換された等価不均質連続体モデル（ECPM）が用いられた。この DFN モデルから ECPM モデルを構築する手法として，立方体の各面からそれぞれ異なる方向で DFN を通過する流量を計算し，各要素の透水テンソル，割れ目の流動間隙率や単位体積当たりの割れ目面積を算定する方法（Joyce et al., 2010, pp. 30-31）が適用された。

地下水流動解析は，非定常，飽和条件の密度流を考慮した移流分散解析（岩盤のマトリックス拡散を考慮）により行われた。なお，Forsmark サイトは地形勾配に起因した地下水流動の駆動力（動水勾配）より，複数の異なる組成の地下水の密度差による浮力が地下水流動を支配していると考えられて

おり，全ての地下水流動評価において複数の異なる組成の地下水の移流分散，マトリクス拡散と密度差による地下水流動を連成した解析が適用されている。流出条件を，モデル側面は不透水と濃度フラックスゼロ条件を，底面は不透水と濃度固定条件を適用している。地下水の濃度（密度）の初期条件は，SDM-Site で示された地下水化学概念モデル（SKB, 2008）に基づいて設定された。

(b) サイトスケールモデルによる地下水流動解析（Joyce et al., 2010, pp. 57-61）

サイトスケールモデルでは，安全機能に関する指標（F 値，地下水移行時間，処分孔への湧水量，Qeq 値：緩衝材と岩盤の接触面における等価流量）を評価することを目的に地下水流動解析が行われた。地下水流動解析の対象時間は，現在から 12,000 年後である。サイトスケールモデルの水理地質構造モデルでは，リージョナルスケールモデルの ECPM で構築された処分場の候補領域の内側の処分場領域を DFN モデルにより構築された。

地下水流動解析は，定常，飽和条件の密度流を考慮した移流分散解析により行われた。放射性核種が異なる時間から放出されることによる影響を定量的に評価するため，また，海岸線の移動による F 値等の放射性核種の移行経路情報への感度を確認するため，現在～12,000 年後の期間を 1,000 年ごとに定常解析による評価が行われた。地下水流動解析に得られた流速場を使用した粒子追跡法による解析では，流速場に大きな変化が生じる時間や相対的に安定している時間を対象に粒子を放出する時間が選定された。

モデルの上面（陸域，海域）にはリージョナルスケールの地下水流動解析から出力される圧力による固定条件，モデル側面と底面には不透水条件が設定された。圧力と濃度（密度）の初期条件（反復解法に適用する初期条件）は，リージョナルスケールの地下水流動解析からの出力データが使用された。

(c) 処分場スケールモデルによる地下水流動解析（Joyce et al., 2010, pp. 61-65）

処分場スケールモデルによる地下水流動解析の目的はサイトスケールモデルと同じである。処分場スケールでは，岩盤領域の水理地質構造モデルが DFN モデルで構築され，処分坑道や処分孔といった地下構造物は CPM モデルで構築された。

地下水流動解析は，定常，飽和条件の移流分散解析により行われた。モデル全面には，境界条件としてリージョナルスケールモデルを用いた地下水流動解析から出力された圧力値による圧力固定条件が適用された。圧力，地下水濃度の初期条件に関しては，リージョナルスケールモデルによる地下水流動解析の結果が適用された。

(d) 粒子追跡法による解析による評価指標の算定

粒子追跡法による解析は，放射性核種の移流による移行の経路を抽出して評価するための解析方法である。CPM モデルでは，空間的に離散化された各限要素の局所的な流速場により決定論的に導かれる粒子の移行経路が算出されている。DFN モデルでは，粒子は交差する割れ目の中を移行し，複数の割れ目が交差する場合には複数の移行経路が生じる可能性がある。その場合には，フラックスによる重み付けにより粒子が移行する経路が選択される。粒子の移行時間，移行距離，移行抵抗値（F 値）

は，移行経路に沿った地下水流量と移行経路の幾何学的形状に基づき算出する（Joyce et al., 2010, p.34）。

SR-Site で行われた粒子追跡法の解析では，異なるスケールのモデルを用いて評価する方法と非定常な流速場を取り扱う方法に関して問題が生じた。前者については，処分場スケール内の粒子の出発点からモデル境界まで移行する粒子を計算し，その後，処分場スケールモデルから放出された粒子は，サイトスケールモデル内において再計算する方法が開発された。移行時間は，両方のモデルでの移行経路に沿った累積移行時間として計算された。後者については，粒子の移行経路が海水準の変動（繰り返し）による影響を定量的に評価するために，前述のように複数の時間断面における定常流速場による評価が行われた（Joyce et al., 2010, p.44）。

各スケールの地下水流動解析に適用された水理地質構造モデルや地下構造物等のモデル化方法と地下水流動解析の解析条件を表 3.2.3-2 に，各スケールの地下水流動解析に適用された境界条件を表 3.2.3-3 に整理した。また，粒子跡線法による解析の方法を表 3.2.3-4 整理した。

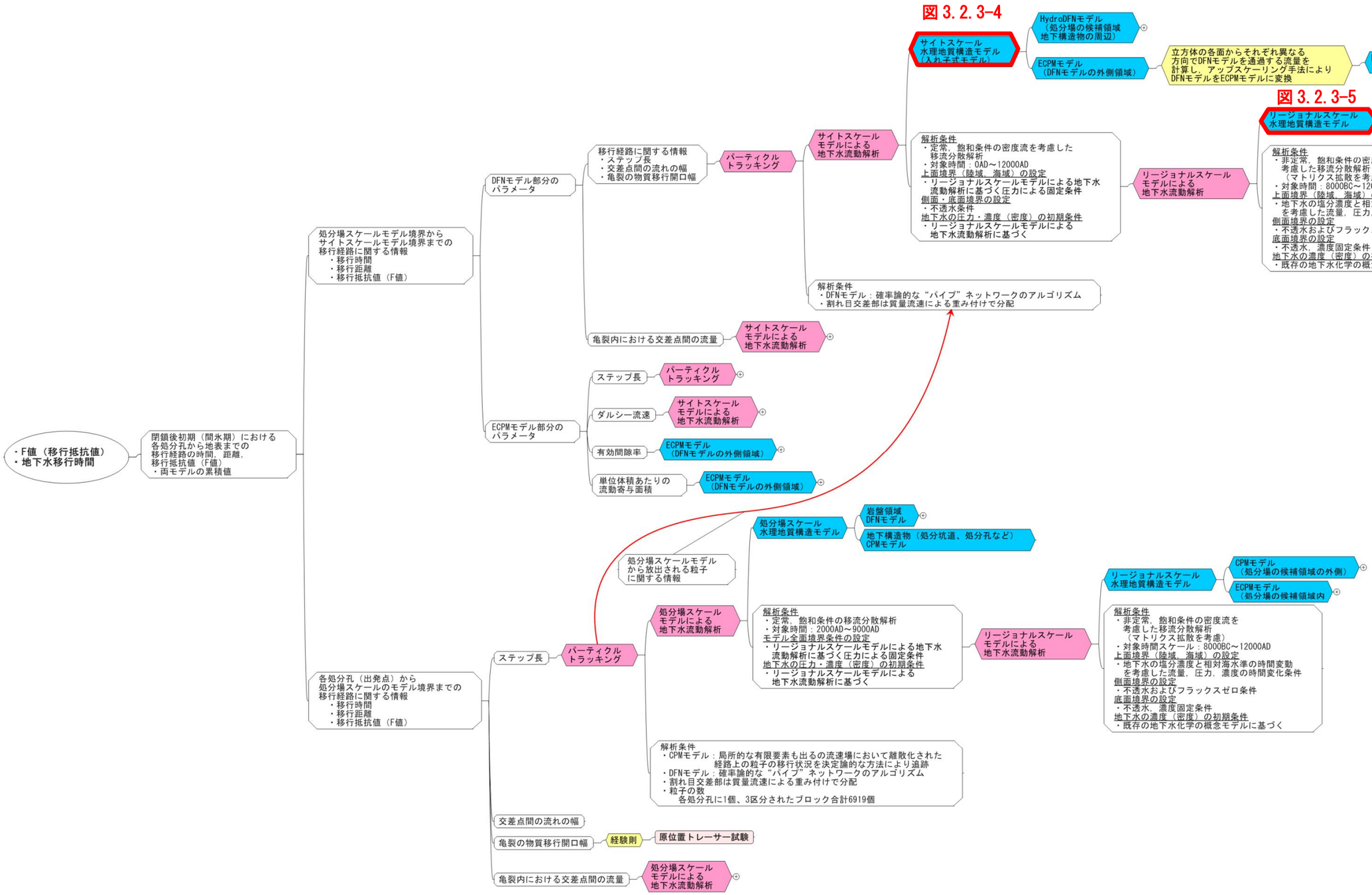


図 3.2.3-3　地下水移行時間および F 値に関する評価ツリー

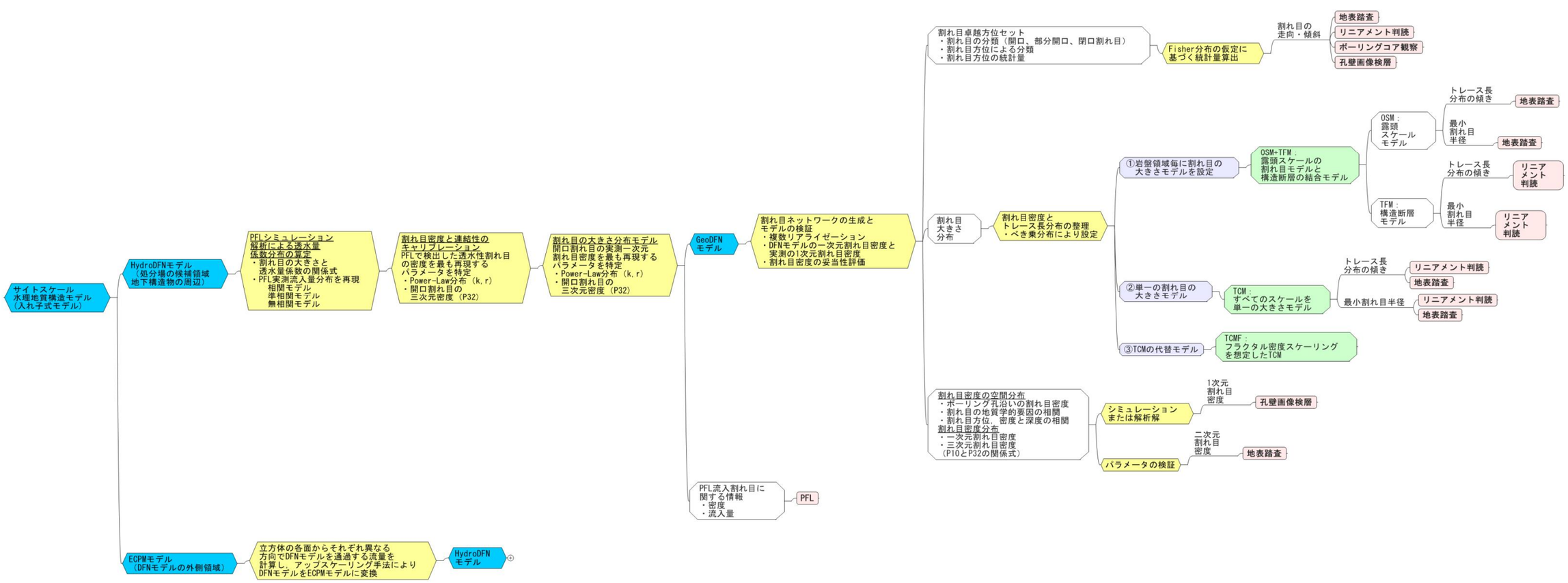


図 3.2.3-4　地下水移行時間および F 値に関する評価ツリー（サイトスケールの水理地質構造モデル部分）

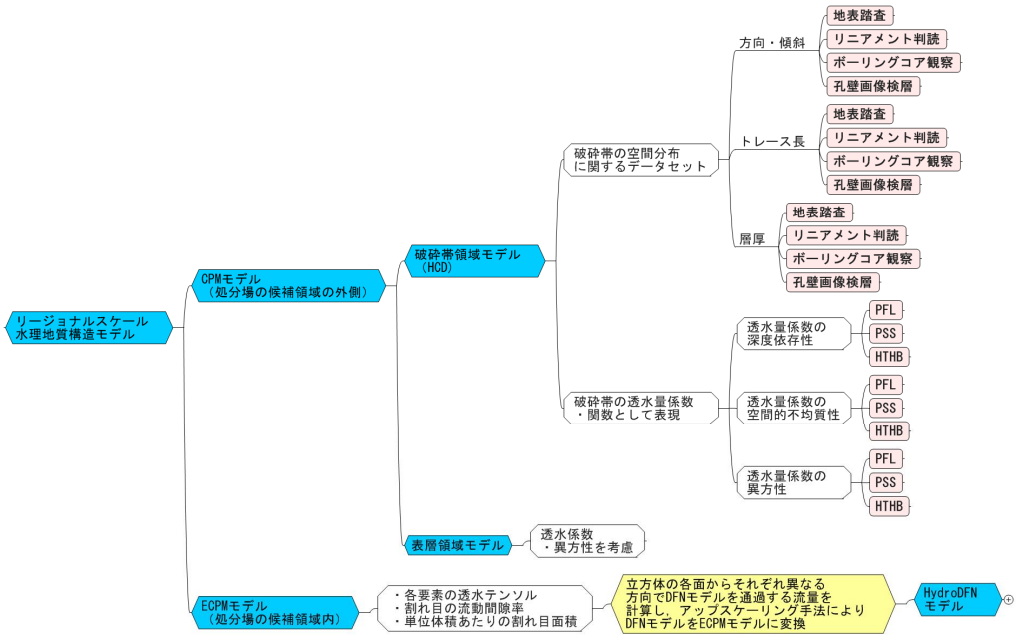


図 3.2.3-5　地下水移行時間および F 値に関する評価ツリー（リージョナルスケールの水理地質構造モデル部分）

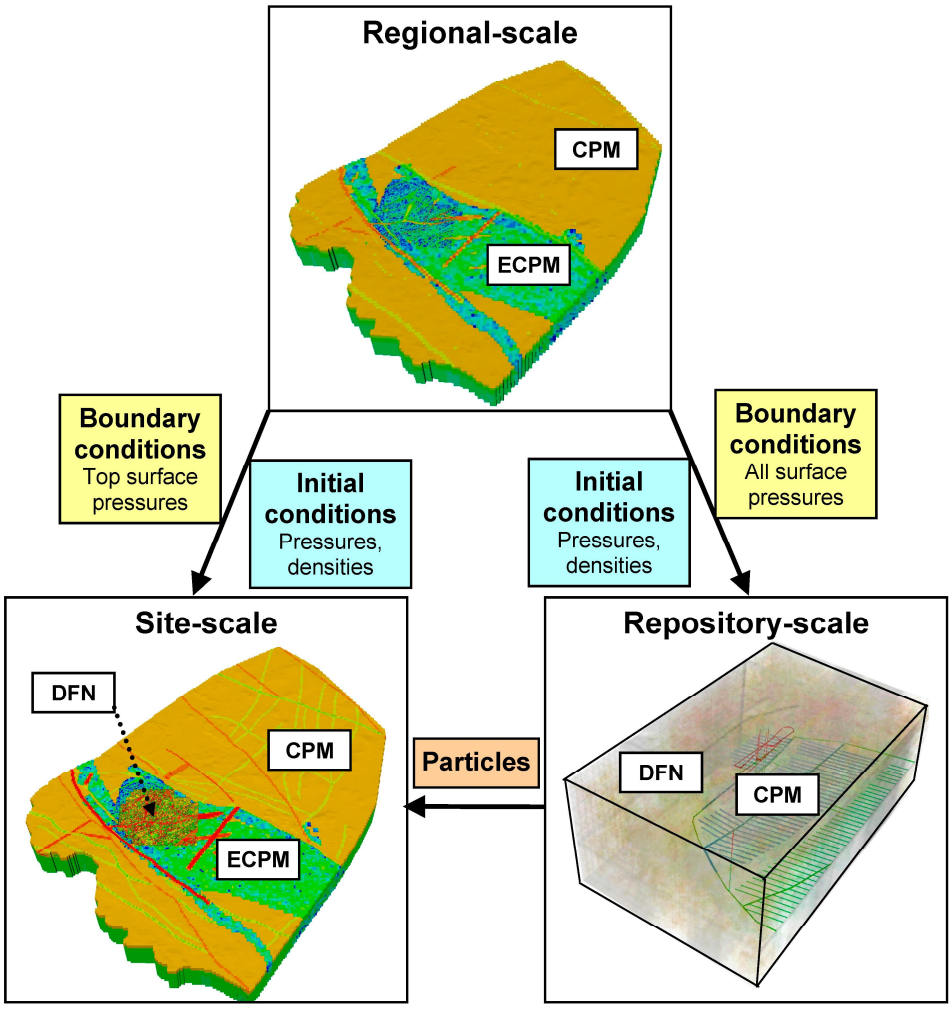
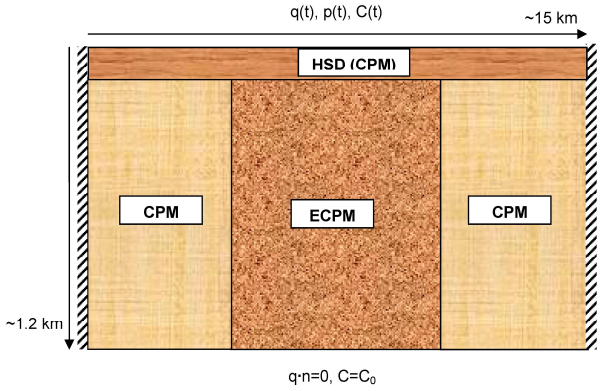
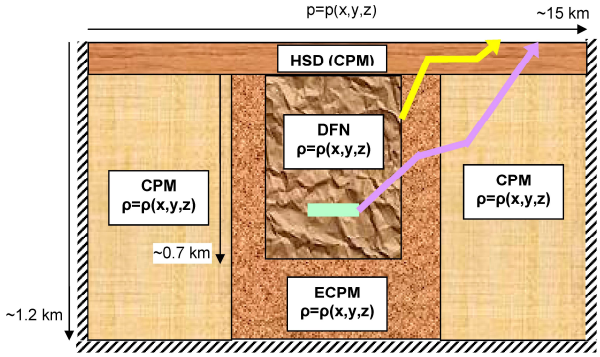


図 3.2.3-6　SR-Site で適用された水理地質構造モデルの空間スケール

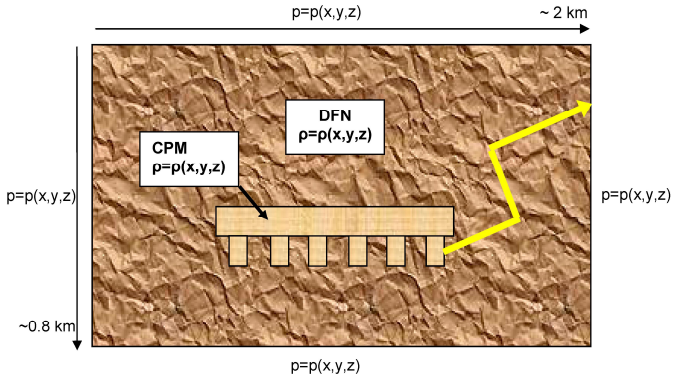
(Joyce et al., 2010, p.35) Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co



(a) リージョナルスケール



(b) サイトスケール



(c) 処分場スケール

図 3.2.3-7　水理地質構造モデルの空間スケールと適用されたモデル概念

(Joyce et al., 2010, pp.39-40) Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

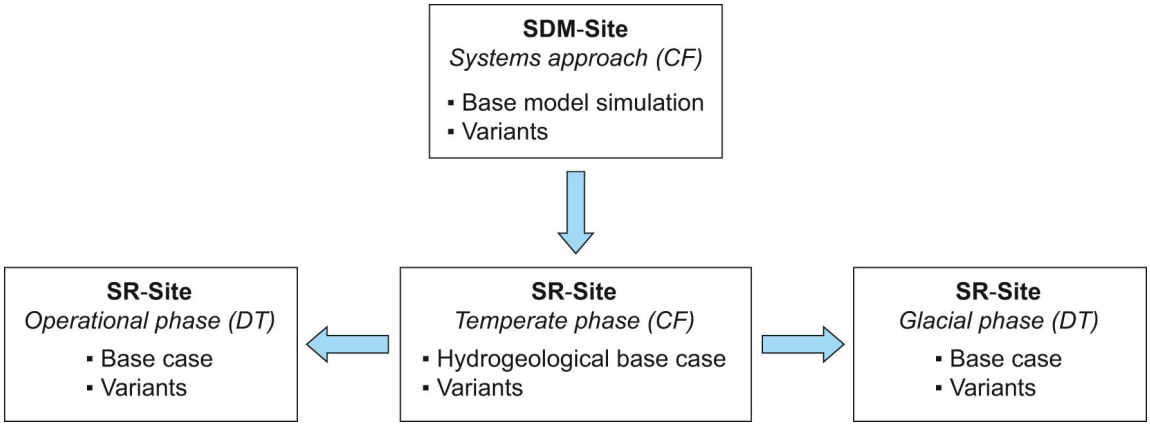


図 3.2.3-8　SR-Site で適用された時間スケールと解析コード（ConnectFlow:CT および DarcyTool: DT）(Selroos and Follin,2010,p.34) Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

表 3.2.3-1　ConnectFlow による「閉鎖後初期（間氷期）」の地下水流動解析の諸条件(Joyce et al., 2010, p.36) Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

	Regional-scale	Site-scale	Repository-scale
Earliest time simulated	8000 BC	0 AD	2000 AD
Latest tme simulated	12,000 AD	12,000 AD	9000 AD
Flow model	Saturated flow in a porous medium (ECPM/CPM)	Saturated flow at fixed time slices in a porous medium (ECPM/CPM) with an embedded discrete feature network (DFN)	Saturated flow at fixed time slices in a discrete fracture network (DFN) with an embedded CPM representation of the tunnels
Transport model	Dual porosity	Single porosity	Single porosity
Fluid properties	Salinity S(x,y,z,t) Temperature T(z) Density ρ(S, T) Viscosity μ(T)	Salinity S(x,y,z|t) Temperature T(const.) Density ρ(S) Viscosity μ(const.)	Salinity S(x,y,z|t) Temperature T(const.) Density ρ(S) Viscosity μ(const.)
Modelling procedure	1. Multiple heterogeneous realisations 2. Transient boundary conditions 3. Solve for flow and transport of reference waters at each time step	1. Multiple heterogeneous realisations 2. Fixed boundary conditions at different time slices 3. Converging flow at each time slice 4. Fixed flow particle tracking at each time slice	1. Multiple heterogeneous realisations 2. Fixed boundary conditions at different time slices 3. Converging flow at each time slice 4. Fixed flow particle tracking at each time slice
Primary output	Fluid pressure and density at different time slices	Flow and particle tracking performance measures	Flow and particle tracking performance measures
Secondary output	Hydrochemistry at different time slices	Particle exit locations at different time slices	Particle exit locations at different time slices

表 3.2.3-2　地下水流動解析で適用されたモデル化方法と解析条件　その 1 (Joyce et al., 2010, pp.52-65)

	水理地質構造モデル		地下構造物および EDZ	解析条件
リージョナルスケール (Joyce et al., 2010, p.55)	HSD	均質連続体（CPM）モデル	－	密度流を考慮した非定常移流分散解析（岩盤のマトリックス拡散を考慮）
	HRD	処分場候補領域： 等価不均質連続体（ECPM）モデル 処分場候補領域の外側： 均質連続体（CPM）モデル		
サイトスケール	HSD	均質連続体（CPM）モデル	トンネル，坑道，EDZ：亀裂としてモデル化 (処分孔はモデル化されないため)	定常浸透流解析（反復解法のための圧力，地下水密度の初期条件は，リージョナルスケールモデルによる解析結果を適用） 地下水密度は固定
	HRD	処分場領域： 亀裂ネットワーク（DFN）モデル 処分場領域外側： 等価不均質連続体（ECPM）モデル		
処分場スケール	HRD	亀裂ネットワーク（DFN）モデル	地下構造物：均質連続体モデル EDZ:亀裂としてモデル化	同上

表 3.2.3-3　地下水流動解析で適用されたモデル化方法と解析条件　その２

	圧力／流量条件	濃度条件
リージョナルスケール (Joyce et al., 2010, p39, p.55)	地表面： 流入-流出境界（相対海水準変動を考慮した時間変動条件） 側面，底面：不透水境界	地表面： 濃度フラックス境界（相対海水準変動とバルト海の塩分濃度の時間変化を考慮した時間変動条件） 側面：濃度フラックスゼロ境界 底面：濃度固定境界
サイトスケール (Joyce et al., 2010, p39, p.61)	地表面： 圧力固定（リージョナルスケールモデルによる地下水流動解析結果） 側面，底面：不透水境界	－
処分場スケール (Joyce et al., 2010, pp. 39-40)	全面： 圧力固定（リージョナルスケールモデルによる地下水流動解析結果）	－

表 3.2.3-4　粒子追跡法による解析の条件

	粒子の出発点	粒子数	粒子の移行
サイトスケール	Q1，Q2，Q3 の出発点に最も近い処分トンネルと交差する割れ目から出発する。（処分孔はモデル化されない）(Joyce et al., 2010, p.61)	一つの処分孔に対して 1 個の粒子を設定 3 区分されたブロック合計で 6916 個の粒子を設定（ブロック 1：1994 個,ブロック 2：2769 個,ブロック 3：2153 個）(Joyce et al., 2010, p.46)	フラックスによる重み付け(Joyce et al., 2010, p.61)
処分場スケール	処分孔位置に配置 (Selroos. and Follin, 2010, p.39)	一つの処分孔に対して 3 個の粒子を設定(Selroos. and Follin, 2010, p.39) ・処分孔と交差する割れ目(Q1) ・処分トンネル底盤下の EDZ 内（Q2) ・処分トンネルと交差する割れ目(Q3)	―
		各出発点に対して 10 個の粒子を設定(Joyce et al., 2010, p.63)	フラックスによる重み付け(Joyce et al., 2010, p.63)

(2) 地下水移行時間以外の評価項目を対象とした評価ツリー

前項までに整理した評価ツリーは，岩種やサイトが特定されていない段階における移行経路に関する評価項目として一般的な項目である地下水移行時間に着目したものである。本項では，SR-Site における事例を参考に地下水移行時間以外の項目を対象とした場合の評価ツリーの整理について述べる。SR-Site における処分場の安全機能および施設の設計要件の確保において重要となる評価指標は，2011 年度の検討において整理された（江橋ほか，2012）。本項では F 値および地下水移行時間以外の評価項目である Qeq 値および処分孔への湧水量に関する評価ツリーについて述べる。

(a) Qeq 値

Qeq 値は，人工バリア中を対象とした核種移行評価コード（COMP23）の外側境界条件に用いられる（SKB, 2010）。処分孔に交差する割れ目に拡散して割れ目中の地下水の流れに沿って移行する経路と，処分坑道に拡散した核種が処分坑道内の埋め戻し材中を移流と拡散により移行して坑道に交差する割れ目に拡散する経路が想定されている。

緩衝材（や埋め戻し材）と割れ目の境界部における核種の流束 F_r は，定常状態を仮定した場合には，緩衝材外側での核種濃度 c_0 と Q_{eq} (m^3/y)を用いて以下のように表すことができる（Joyce et al., 2010, pp. 153-155）。

$$F_r = Q_{eq} c_0$$

ここで Q_{eq} は，緩衝材と割れ目の境界面に平行な割れ目内の地下水流速 u (m/y)と，緩衝材と割れ目の境界面に垂直な方向の拡散係数 D_w (m^2/y)，緩衝材と割れ目の境界面の長さ（すなわち，処分孔と交差する割れ目の処分孔壁でのトレース長）L_f(m), 割れ目の開口幅 e_f(m)を用いて次式のように表される。

$$Q_{eq} = u e_f \sqrt{\frac{4 D_w L_f / u}{\pi}}$$

この式は，緩衝材と割れ目の境界面において，境界層理論に基づいて導かれる緩衝材表面に沿った流れと，その流れに直交する方向への緩衝材表面からの核種の拡散に基づいて導かれている（SKB, 2010, p.304）。低透水性の緩衝材で満たされた円柱状の処分孔の周辺に沿って地下水の流速は変化していると考えられるが，ここではその変化の影響は小さいと仮定して一定の流速 u を用いている。

SR-Site で想定された，処分孔からの核種の移行経路の概念を以下に示す（図 3.2.3-9 参照）。

Q1 経路：処分孔と交差する割れ目への拡散（Q1 経路）
Q2 経路：掘削影響領域(EDZ：処分孔の上部の坑道の底面)中の処分孔と交差する割れ目への拡散（Q2 経路）
Q3 経路：処分トンネルを交差する割れ目への拡散（Q3 経路）

処分場スケールの水理地質構造モデルを用いた場合には，それぞれの経路の Q_{eq} 値（Q_{eq1}, Q_{eq1}, Q_{eq3}）は以下のように求められている。これらの Qeq 値の評価に関する流れを整理した評価ツリーを図 3.2.3-10 に示す。

(i) Q1 経路

Q1 経路は，ベントナイトで充填された処分孔と交差する複数の割れ目（図 3.2.3-11 参照）を通じた岩盤への放射性核種の放出を表す経路である。等価な地下水流量 Q_{eq1} は次式を用いて求められる（Joyce et al., 2010, p. 157）。

$$Q_{eq1} = \sum_f \frac{Q_f}{\sqrt{a_f}} \sqrt{\frac{4 D_w t_f}{\pi}}$$

ここで，Q_fは割れ目内の流量（m^3/y），a_fは四角形状（ここでは正方形を仮定）の割れ目の面積（$\sqrt{a_f}$ は割れ目の 1 辺の長さ）（m^2），t_fは割れ目内で処分孔と水が接触する時間（y）で，次式により求められる。

$$t_f = \frac{L_f e_f}{Q_f \sqrt{a_f}}$$

処分孔を複数の割れ目が交差する場合，処分孔に交わる全ての割れ目に対する等価なダルシー流速 U_{r1} は次式で表わされる。

$$U_{r1} = \frac{1}{w_c} \sum_f \frac{Q_f}{\sqrt{a_f}}$$

ここで，w_cは処分孔の高さ（m）である。

SR-Site では，D_wには 0.0316 m^2/y，w_cには 5m の値が入力値として使用され，それ以外のパラメータは HydroDFN モデルを用いた地下水流動解析および粒子追跡法による解析により求められた（Joyce et al., 2010, p. 47）。具体的には，粒子追跡法による解析により処分孔から粒子が拡散により移行する割れ目を特定し，各割れ目の Q_fを地下水流動解析結果に基づいて算定する。また，a_fは HydroDFN モデルから処分孔と交差する割れ目の幾何学情報を取得する。割れ目の物質移行開口幅 e_fは，割れ目の透水量係数との関係式から求められる。なお，Q_{eq1} を算定するための処分場スケールの地下水流動解析および粒子追跡法による解析の解析条件は，地下水移行時間および F 値の評価で示した条件と同じで

ある。

(ii) Q2 経路

Q2 経路は，処分孔上部の EDZ 中の割れ目（図 3.2.3-12 参照）への放射性核種の放出を考慮したものである。Q_{eq2}は，$Q_{eq\,1}$の処分孔と交差する割れ目を EDZ 内の割れ目に置き換えたものと同様と見なせるため，$Q_{eq\,1}$と同じ算定方法（算定式）を用いる（Joyce et al., 2010, p. 157）。

$$Q_{eq2} = \sum_E \frac{Q_E}{\sqrt{a_E}} \sqrt{\frac{4 D_w t_E}{\pi}}$$

ここで，Q_Eは EDZ 中の割れ目内の流量（m^3/y），a_Eは割れ目の面積（m^2）である。ここで，割れ目内で処分孔と水が接触する時間 t_Eは次式で表わされる。

$$t_E = \frac{L_E e_E}{Q_E \sqrt{a_E}}$$

ここで，L_Eは EDZ 中の処分孔と交差する割れ目の長さ（m），であり，e_Eは割れ目の物質移行開口幅（m）である。処分孔近傍の EDZ 中の等価なダルシー流速 U_{r2}は次式で表わされる。

$$U_{r2} = \frac{1}{w_E} \sum_E \frac{Q_E}{\sqrt{a_E}}$$

ここで，w_E（m）は EDZ の厚さであるである。SR-Site では，D_wには 0.0316 m^2/y，w_Eには 0.3m の値が入力値として使用され，それ以外のパラメータは $Q_{eq\,1}$と同様に HydroDFN モデルを用いた地下水流動解析および粒子追跡法による解析により求められた（Joyce et al., 2010, p. 48）。

(iii) Q3 経路

Q3 経路は緩衝材中を拡散して坑道の埋め戻し材に至った核種が，埋め戻し材中の移流と拡散を経由して坑道に交わる割れ目（図 3.2.3-13 参照）へ拡散していく経路を考慮している。Q3 経路では，割れ目は坑道の直径よりも大きく，割れ目内の流動は坑道との交差面で坑道を迂回するように分かれて流動する。そのため，溶質は坑道を迂回する両側に移行することができる。Q_{eq3} は以下の算定式により求められる（Joyce et al., 2010, p. 158）。

$$Q_{eq3} = 2\frac{Q_{f3}}{\sqrt{a_{f3}}}\sqrt{\frac{4D_w t_{f3}}{\pi}}$$

ここで，Q_{f3} は坑道と交差する割れ目内の流量（m^3/y），Q_{f3} は割れ目の面積（m^2）である。割れ目内で坑道と水が接触する時間 t_{f3} は次式で表わされる。

$$t_{f3} = \frac{L_{f3} e_{f3}}{Q_{f3}\sqrt{a_{f3}}}$$

ここで，L_{f3} は割れ目は坑道と垂直に交差することを想定し，坑道全周長の半分の長さ（m）である。坑道近傍の等価なダルシー流速 U_{r3} は次式で表わされる。

$$U_{r3} = \frac{1}{w_{f3}}\frac{Q_{f3}}{\sqrt{a_{f3}}}$$

ここで，w_{f3}（m）は坑道と交差する割れ目の幅（間隔），である。SR-Site では，D_w には 0.0316 m^2/y, L には 7m, w_{f3} は 2.5m の値が入力値として使用され，それ以外のパラメータは Q1，Q2 と同様に HydroDFN モデルを用いた地下水流動解析により求められた（Joyce et al., 2010, p. 49）。

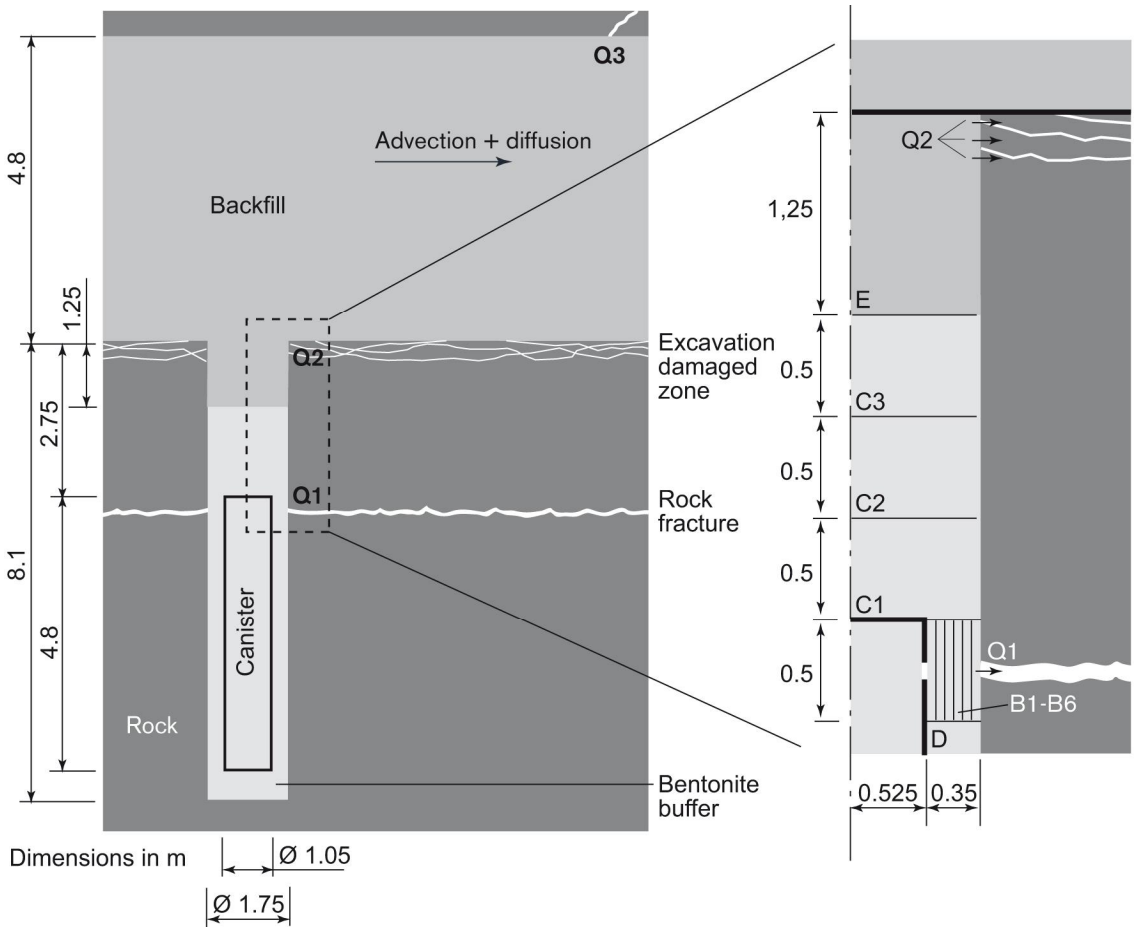
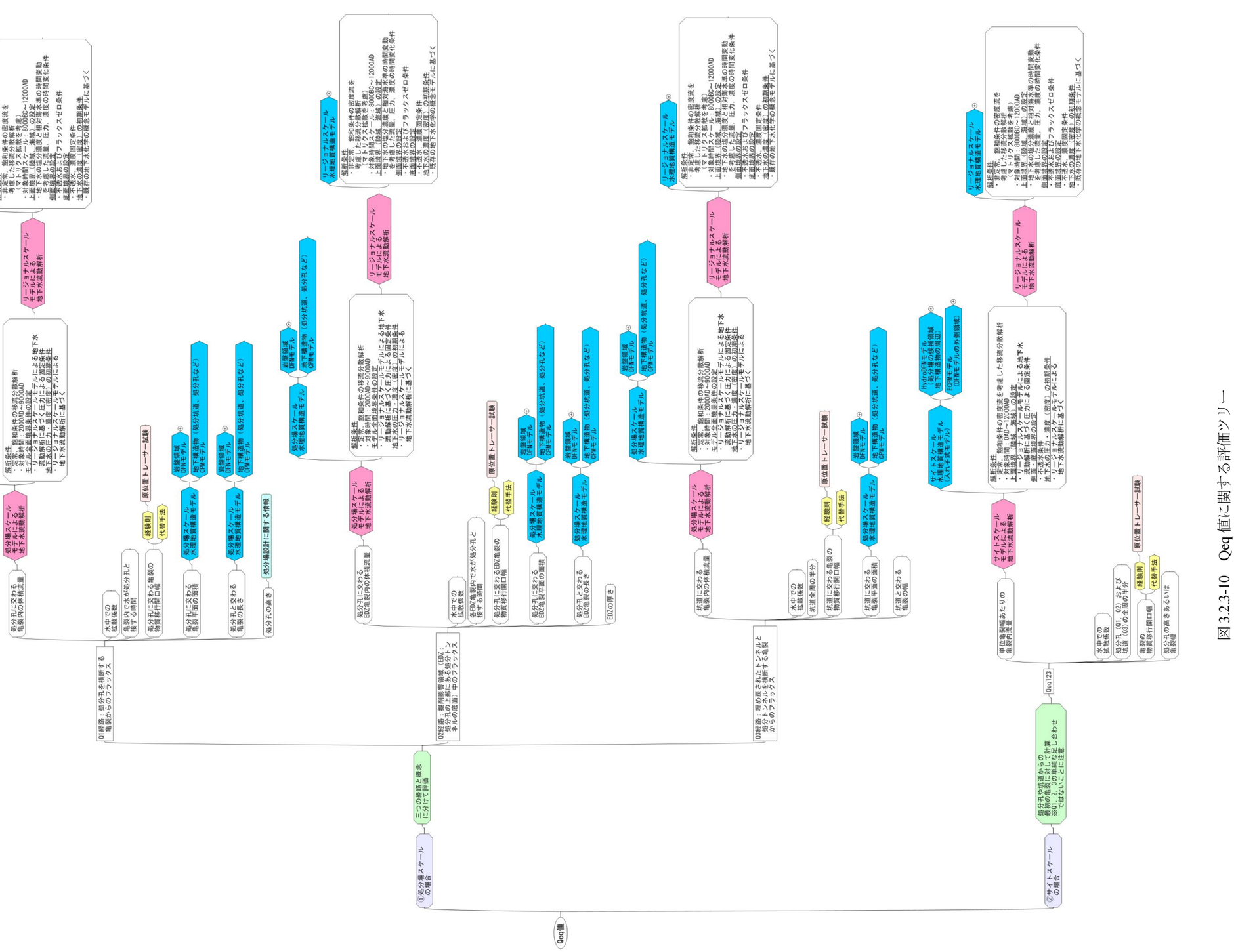


図 3.2.3-9　SR-Site における Qeq 値（Q1，Q2，Q3）の経路と概念

（Selroos and Follin, 2010, p.39）　Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

This is a blank page.


Qeq値
①処分場スケールの場合
②サイトスケールの場合
三つの経路と概念に分けて評価
01経路：処分孔を横断する亀裂からのフラックス
02経路：掘削影響領域（EDZ：処分孔の上部断面）中のフラックス
03経路：埋め戻されたトンネルと横断する亀裂からのフラックス
処分孔に交わる亀裂内の体積流量
水中での拡散係数
亀裂内で水が処分孔と接する時間
処分孔に交わる亀裂の物質移行開口幅
処分孔に交わる亀裂平面の面積
処分孔と交わる亀裂の長さ
処分孔の高さ
経験則
代替手法
原位置トレーサー試験
処分場設計に関する情報
処分孔に交わるEDZ亀裂の物質移行開口幅
処分孔に交わるEDZ亀裂の面積
処分孔と交わるEDZ亀裂の長さ
EDZの厚さ
坑道に交わる亀裂内の体積流量
坑道全面の半分
坑道に交わる亀裂の物質移行開口幅
坑道に交わる亀裂平面の面積
坑道と交わる亀裂の幅
単位亀裂幅あたりの亀裂内流量
Qeq123
処分孔や坑道からの亀裂の特定には、3つの経路なし足し合わせではないことに注意
処分孔（01，02）および坑道（03）の全周の半分
亀裂の物質移行開口幅
処分孔の高さあるいは亀裂幅
処分場スケール水理地質構造モデル
岩盤領域DFNモデル
地下構造物CPNモデル
処分場スケールモデルによる地下水流動解析
リージョナルスケールモデルによる地下水流動解析
サイトスケール水理地質構造モデル（入れ子式モデル）
Hydro DFNモデル
地下構造物の外側領域
EDFNモデル
（DFNモデルの外側領域）
サイトスケールモデルによる地下水流動解析
リージョナルスケール水理地質構造モデル
解析条件
・定常、飽和条件の密度流を考慮した移流分散解析
・対象時間：0AD～12000AD
・上面境界：陸域、海域とも涵養量
・流動解析に基づく圧力による固定条件
・側面：非移流境界
・地下水の密度：圧力、濃度の時間変化条件
・リージョナルスケールモデルによる
・地下水流動解析に基づく
・既存の地下水化学の概念モデルに基づく
・処分場設計に関する情報
・定常、飽和条件の移流分散解析
・対象時間：0AD～9000AD
・リージョナルスケールモデルによる地下水流動解析に基づく圧力による固定条件
・地下水の圧力、濃度：一部モデルによる
・地下水流動解析に基づく
・定常、飽和条件の密度流を考慮した移流分散解析
・対象時間：0AD～12000AD
・上面境界：陸域、海域とも涵養量
・地下水の圧力、濃度：相対濃度の時間変動
・流動解析に基づく圧力による固定条件
・側面：非移流境界
・地下水の圧力、濃度：相対濃度の時間変化条件
・リージョナルスケールモ

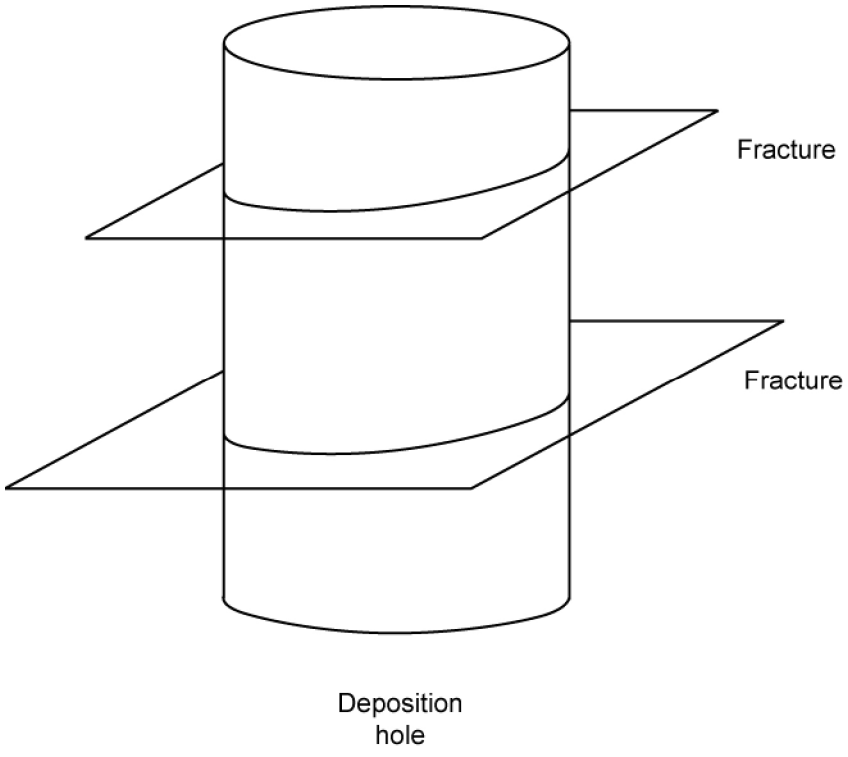


図 3.2.3-11　Qeq 値（Q1 経路）算出における処分孔に交差する割れ目の概念図（Joyce et al., 2010, p.156）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

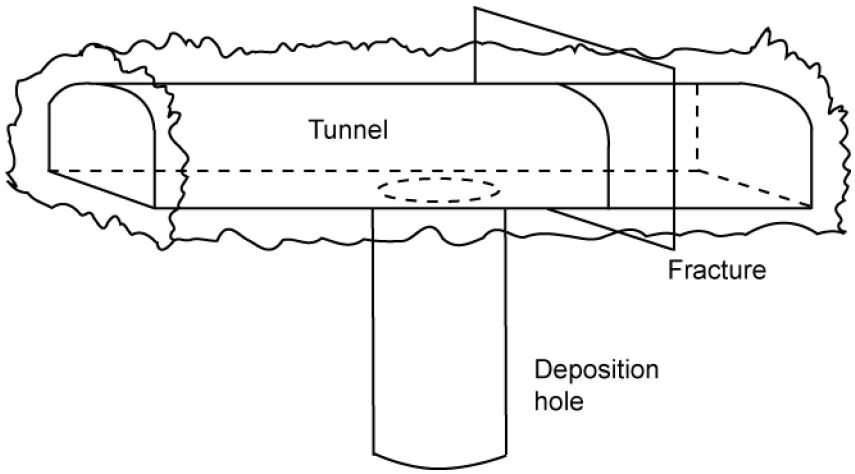


図 3.2.3-12　Qeq 値（Q2 経路）算出における処分孔に交差する EDZ 内の割れ目の概念図（Joyce et al., 2010, p.158）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

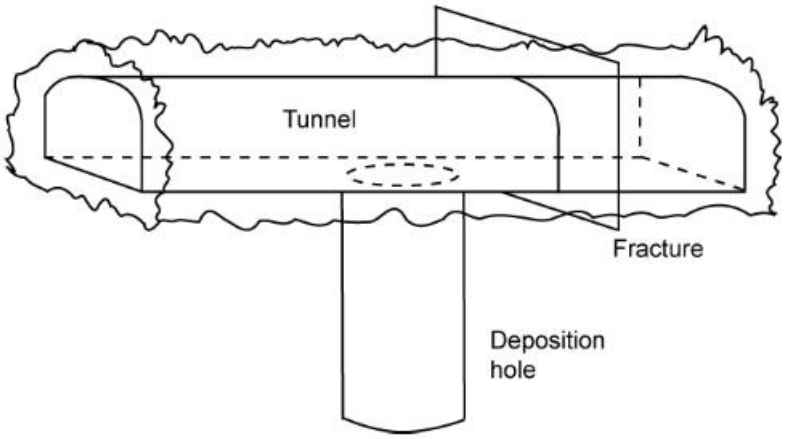
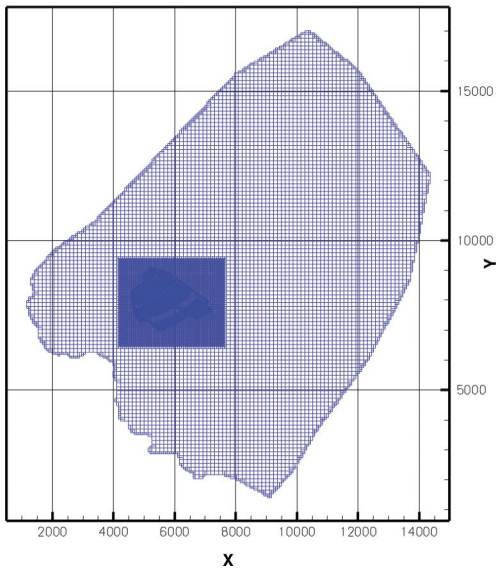


図 3.2.3-13　Qeq 値（Q3 経路）算出における坑道に交差する割れ目の概念図
（Joyce et al., 2010, p.159）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

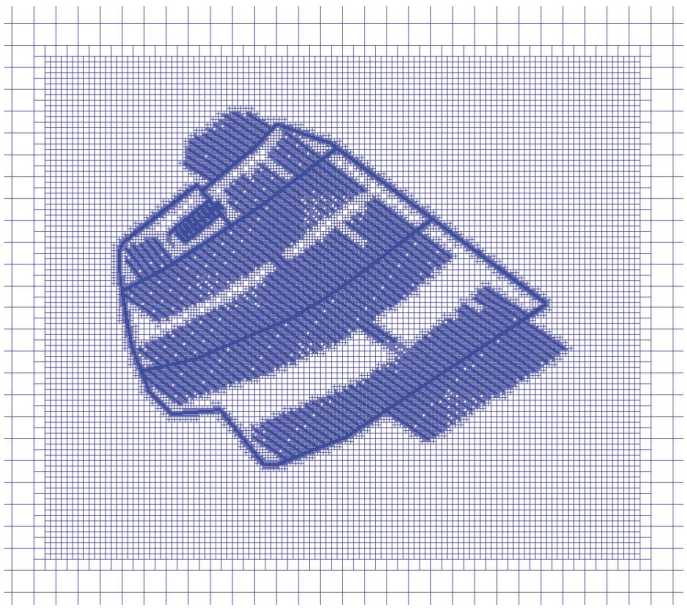
(b)　処分孔への湧水量

SR-Site では，解析コード Darcy Tool（有限体積法）を用いた地下水流動解析により処分孔への湧水量が算出された。Darcy Tool が使用された主な理由は下記のとおりである（Selroos and Follin, 2010, p.35）。

- 地下水流動解析に適用する数値モデルでは，リージョナルスケールのモデルにキャニスターの処分孔をモデル化する必要がある。そのため，空間的に異なる分解能（分割サイズ）により不規則なグリッド形状のモデルを構築することができること（図 3.2.3-14 参照）。
- グラウトの効果やキャニスターの破損に関する評価を含めた処分孔への湧水量の詳細な評価が可能なこと。
- 地下水面（地下水位低下）の変化や深部の高い塩分濃度の地下水の上昇に関し，グラウトの効果を考慮して評価ができること。
- 初期の不飽和状態にある埋め戻し材の飽和過程を単純化した評価ができること。



(a) モデル全体（最大グリッド長 128m）



(b) 処分場周辺の不規則なグリッド

図 3.2.3-14　モデル領域を対象にしたグリッド（標高-465m の水平面）
（Svensson and Follin, 2010, p.49）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

(i) 水理地質構造モデル

処分孔への湧水量を評価するためのサイトスケールの水理地質構造モデルには，Forsmark サイトを対象とした SDM（Follin, 2008）に示された岩盤中の破砕帯，節理，割れ目ネットワーク等の不連続構造の幾何学形状や水理特性の値が用いられている。具体的には，モデルを構成する各グリッドセルの体積に占める不連続構造の体積（長さ，幅，厚さもしくは開口幅）からグリッドセルの等価透水係数や有効間隙率を算定し，DarcyTool を用いた等価不均質連続体モデルが構築された（Svensson and Follin, 2010, p.35）。水理地質構造モデルの例を図 3.2.3-15 に示す。

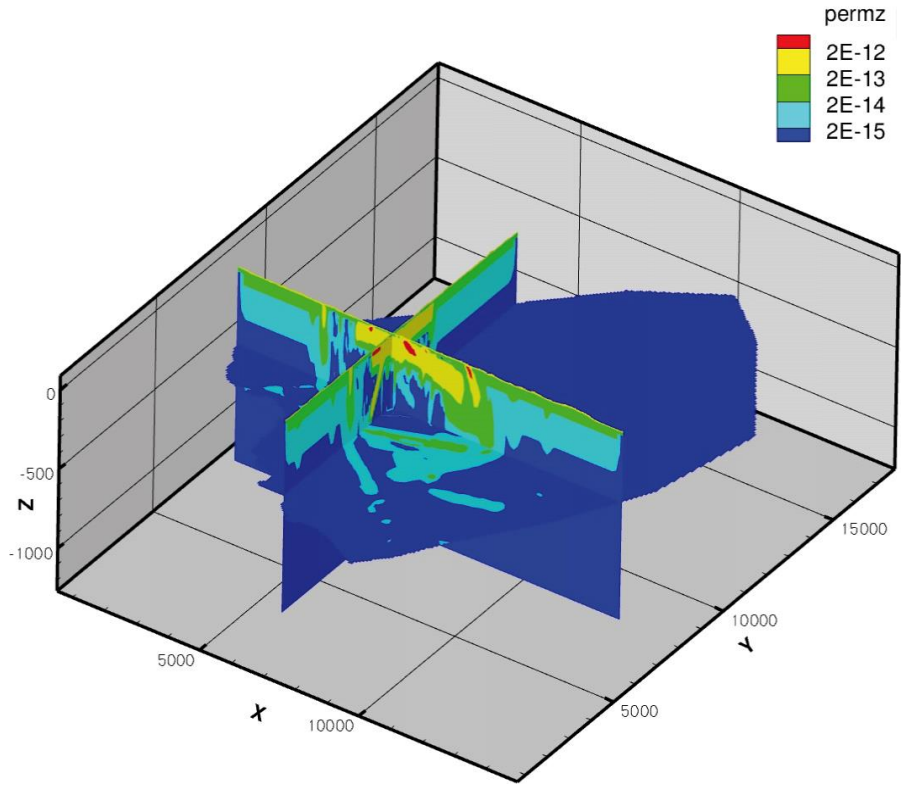


図 3.2.3-15　DarcyTool を用いた水理地質構造モデルの例
東西断面，南北断面，水平断面（-465m）における鉛直方向の浸透率（m^2）
（Svensson and Follin, 2010, p.51）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

(ii) 境界条件の設定

モデル側面の境界はモデル化された処分場から数キロメートル離れており，側面の境界条件は定常状態における処分場近傍の圧力と塩分濃度に影響が及ばないと考えられるため固定条件が設定されている。その圧力と塩分濃度の値は，海水準変動とバルト海の塩分濃度の時間変動を考慮したリージョナルスケールを対象とした，非定常，飽和条件による移流分散解析の結果が用いられた。モデルの地表面は最大 130mm/y の降雨量を用いた降雨浸透条件が設定され，モデル底面（標高-1200m）は不透水条件，塩分濃度固定条件が適用された（Svensson and Follin, 2010, pp.35-36）。

(iii) 解析条件および解析方法

段階的な建設，操業を考慮して，以下の三つの期間に分けたシナリオが設定されている。

- ステージ A；0～15 年後（15 年間）
- ステージ B：15～30 年後（15 年間）
- ステージ C：30～50 年後（20 年間）

それぞれの操業段階において湧水量や地下水位低下，深部の塩水の上昇に対するグラウトの効果を評価するために，表 3.2.3-5 に示す 3 段階のグラウトの効果レベルが設定された（Svensson and Follin, 2010, p.8, p. 36）。

DarcyTool を用いた地下水流動解析は，定温条件の地下水の密度変化による密度差を考慮したダルシー則による浸透解析と，亀裂内の移流分散と亀裂マトリクスへの拡散を考慮した塩分の移動を連成した解析により行われている（Svensson and Follin, 2010, pp.31-32）。また，建設，操業，閉鎖後の飽和過程に生じる物理現象に対して貯留効果の影響は重要でないと考えられたことから，定常状態に準じて解析が実施されている（Svensson and Follin, 2010, p.9）。　地下水流動解析により定量的に評価された，処分孔への湧水量の算定結果の例を図 3.2.3-16 に示す。この例では，0.1L/min.以上の地下水の湧水が算出された処分孔（157 孔）の位置を黒丸で示している。

以上に示した SR-Site の処分孔への湧水量の評価事例について, 図 3.2.3-17 に示すように評価ツリーを作成した。

表 3.2.3-5　解析で適用されたグラウチィング効果のレベル
（Svensson and Follin, 2010, p.43）Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

Level	Definition
I	The hydraulic conductivity of all cells in contact with the repository has a maximum value of $1 \cdot 10^{-7}$ m/s.
II	The hydraulic conductivity of all cells in contact with the repository has a maximum value of $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.
III	The hydraulic conductivity of all cells in contact with the repository has a maximum value of $1 \cdot 10^{-9}$ m/s except where the modelled ungrouted hydraulic conductivity is 10^{-6} m/s or greater. At these positions the hydraulic conductivity has a maximum value of $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

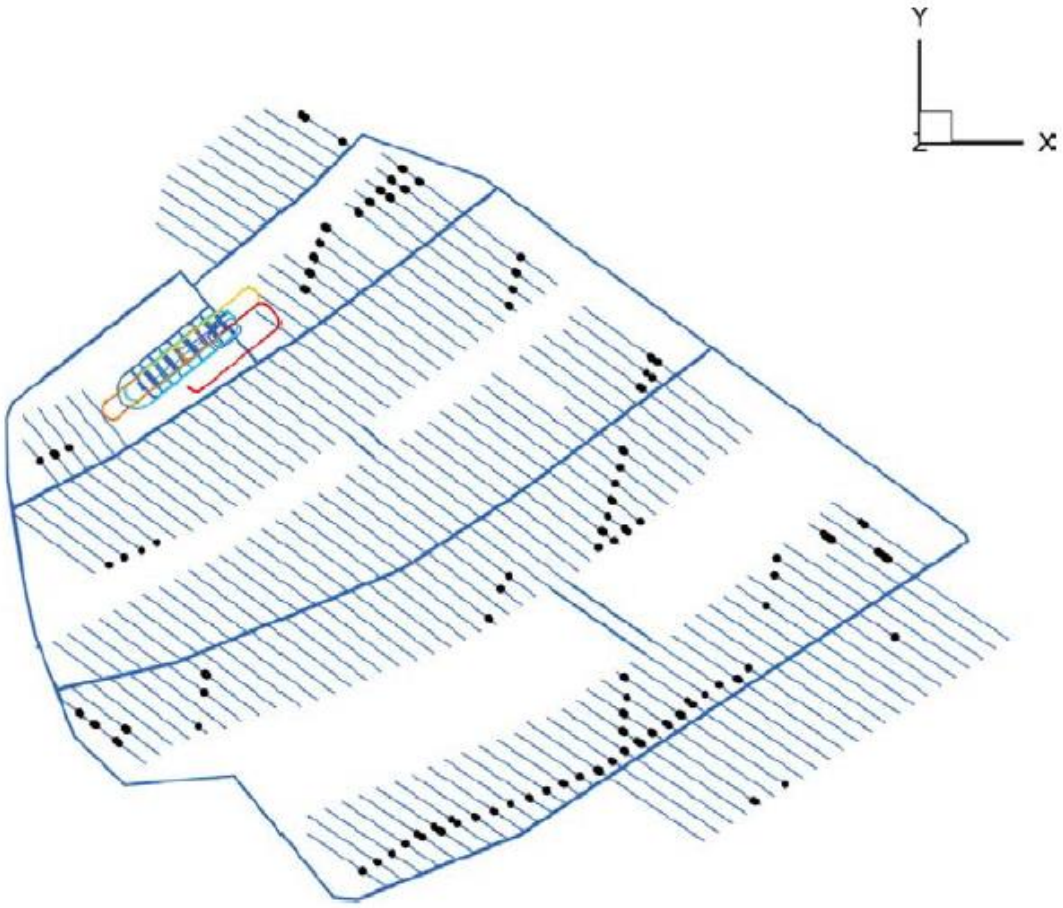


図 3.2.3-16　処分孔への湧水量の評価結果の例（Svensson and Follin, 2010, p.78）
●：　0.1L/min.を超える地下水湧水が計算された処分孔（157 孔）

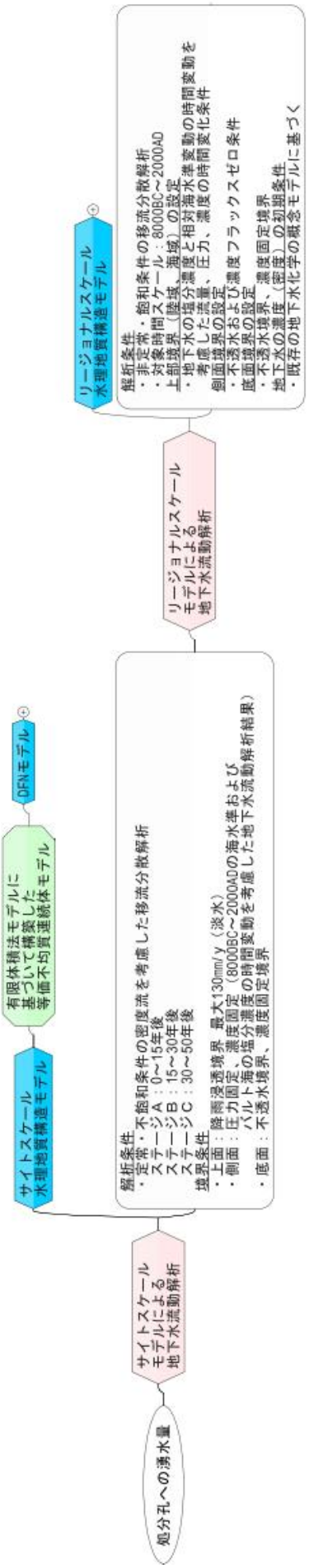


図 3.2.3-17　処分孔への湧水量に関する評価ツリー

3.2.4　堆積岩を対象とした評価ツリーの整備

本項では，評価ツリーの拡充に対する取り組みの一つとして，より多様な岩種に対応した評価ツリーを整備するために，堆積岩を対象にして地下水移行時間に関する評価ツリーを整備した。評価ツリーの作成方法については，2011 年度整備した花崗岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリーの場合（江橋ほか，2012，p41～44）に準拠し，評価項目である地下水移行時間を起点として，解析手法，パラメータの設定手法，データセット，調査データと調査手法の関係をツリー図に示すこととした。また，堆積岩を対象とした調査の事例として幌延深地層研究計画における地上からの調査予測研究段階（第 1 段階）の統合化データフロー（例えば，太田ほか，2007）を参照し，調査項目や調査データを設定した。評価ツリーには，評価項目である地下水移行時間とそれを求めるために実施される調査項目の関係の整理として，それらの間を取り持つモデル構築や解析等の手法を記述するとともに，代替のパラメータ設定や代替のモデル構築といった複数の手法を場合分けとして記述した。

堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリーの概略図を図 3.2.4-1 に示す。この図は，本検討で作成した評価ツリー（図 3.2.4-2～10）の骨格となっているツリー構造を概略的に示したものである。2011 年度整備した花崗岩を対象とした評価ツリーと同様に，母岩を選定する際の留意点として「簡略かつ保守的な評価手法の併用」が有効である点を踏まえ，三次元の水理地質構造モデルに基づいて評価する手法のみならず，第２次取りまとめにおける母岩を対象とした核種移行評価の経験に基づき一次元モデルを用いた解析の場合を併記した。第２次取りまとめによると，亀裂が支配的な移行経路として考えることができる岩盤，特に花崗岩のような岩石マトリクスの透水性が非常に小さな特徴を有する岩盤は，亀裂性岩盤として分類される。一方，新第三紀の堆積岩類のうち砂岩や凝灰岩等では，岩石マトリクス部における粒子間隙間の地下水の流れも有意であり多孔質岩盤として分類される（JNC, 1999）。このことから，堆積岩を対象とする場合，多孔質媒体としての特徴に着目するとともに，三次元水理地質構造モデルを用いた解析の場合においては，亀裂性岩盤としての特徴も考慮して，三次元水理地質構造モデルの構築に関して場合分けを設定した。以下に，一次元モデルを用いた解析の場合と三次元モデルを用いた解析の場合の評価ツリーについて説明する。

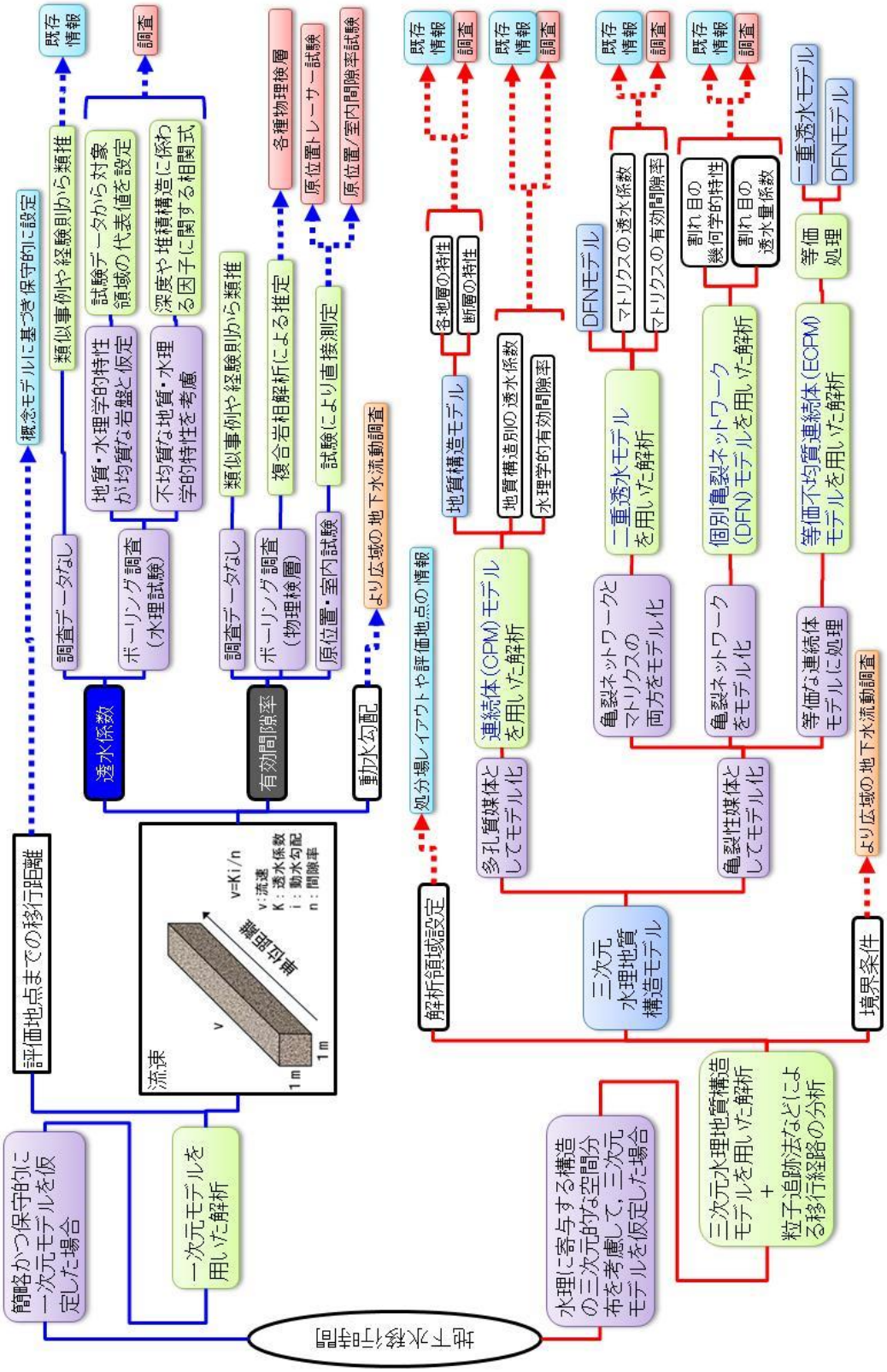


図 3.2.4-1　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリーの概略図

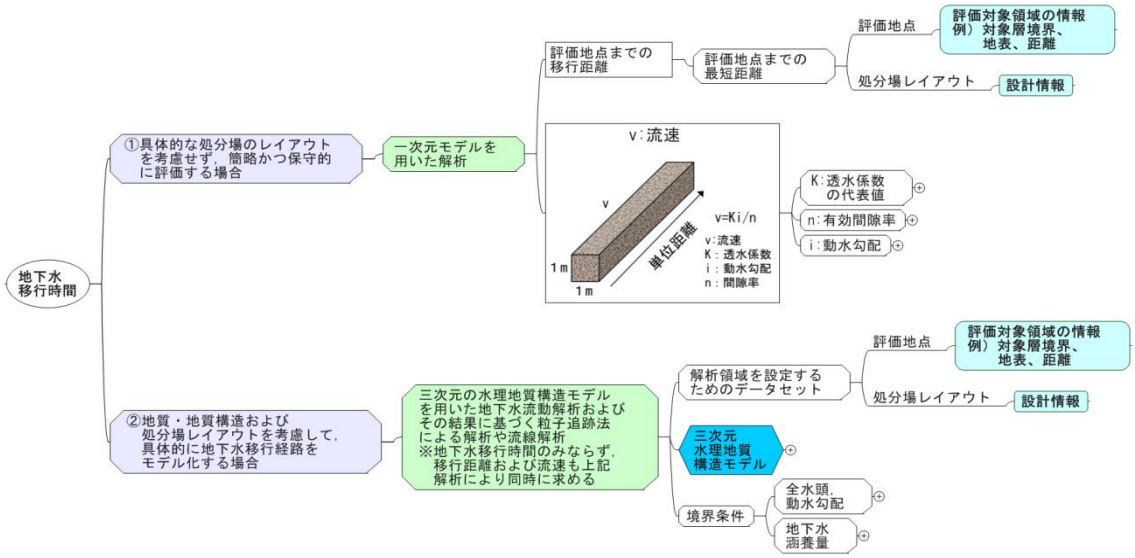


図 3.2.4-2　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（冒頭部分）

(1) 一次元モデルの場合

一次元モデルを用いた評価では，評価点までの距離や対象となる地層に応じた移行経路のモデルが構築されるものと考えられ，評価対象領域の地下水移行時間は，「評価点までの移行距離」を「流速」で除することにより求めることができる（図 3.2.4-2）。

「評価点までの移行距離」については，特定のサイトを対象としない第２次取りまとめの考え方が参考となる。移行距離の設定においては，複雑な地質構造は考慮せず，処分場から 100m 下流側に仮定した透水性の高い大規模な破砕帯を伴う断層までの母岩の核種移行を対象とし，最短距離の 100m として設定した（JNC，1999）。調査の初期段階であって，なおかつ具体的な処分場レイアウトを設定できない場合には，母岩として期待する領域として地層境界または大規模な破砕帯を伴う断層までに至る経路や，数十メートルから百メートル程度の保守的な値を設定した評価を行うことが有効である。

一次元モデルにおける移行経路の「流速」は，最も単純な設定として，図 3.2.4-3 に示すような単位長さの均質な地質学的･水理学的特徴を有する多孔質媒体モデルに代表させて設定することが可能であり，流速を求めるためのパラメータは，評価対象箇所の代表値として設定される。この場合，流速 v(m/s)は，透水係数 K(m/s)，動水勾配 i，有効間隙率 n を用いて以下の式により算出できる。

$$v = \frac{K \times i}{n}$$

透水係数 K(m/s)，有効間隙率 n および動水勾配 i の設定について以下に記述する。

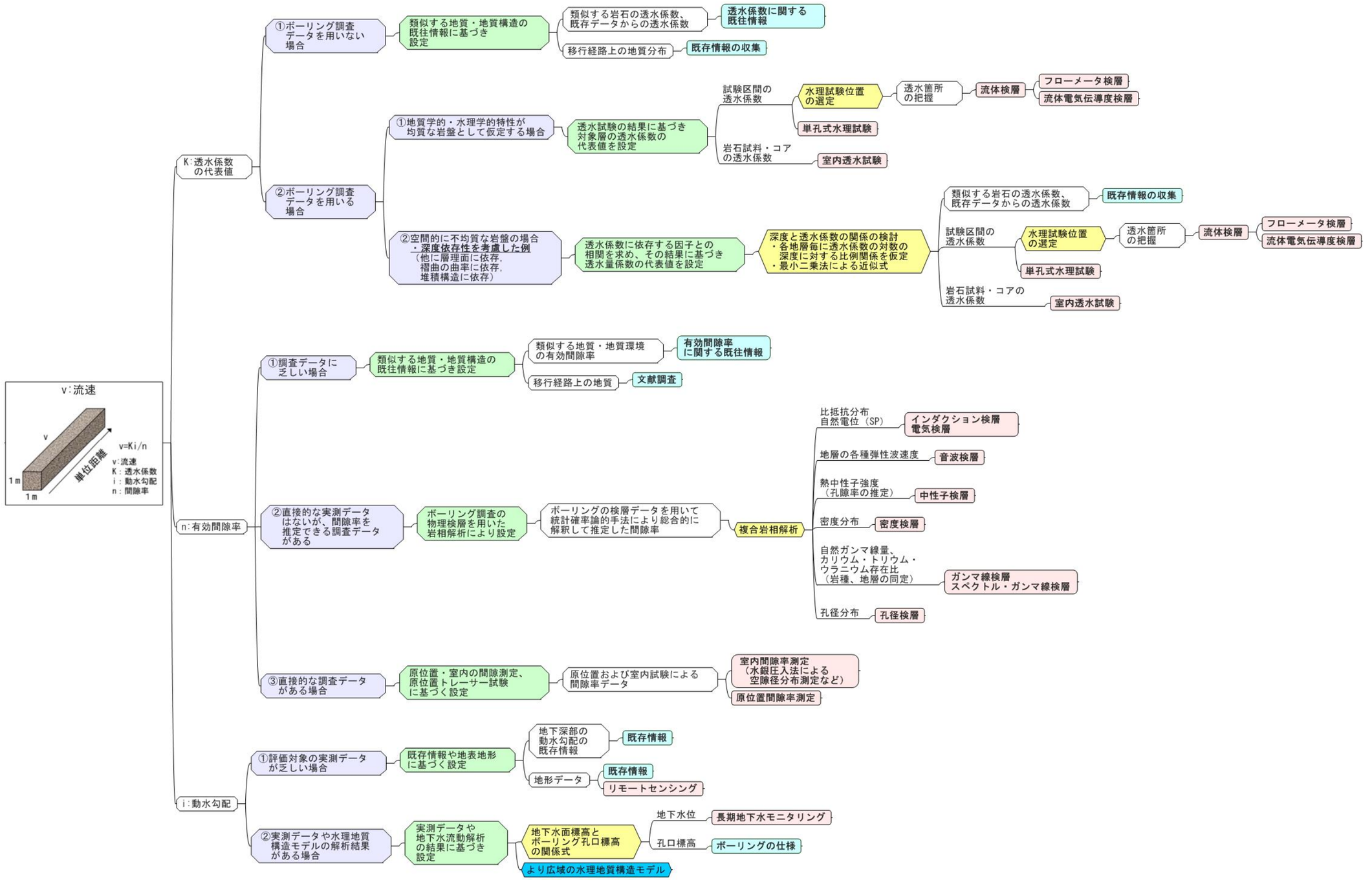


図 3.2.4-3　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（一次元モデルの場合における流速）

(i) 透水係数の代表値の設定

透水係数の代表値を設定する方法は，ボーリング調査における水理試験等のデータを用いない場合と用いる場合に分けた。ボーリング調査が実施される前段階やボーリング調査のプログラムに水理試験が設定されていない場合等，ボーリング調査における水理試験データを用いない場合には，評価対象領域と類似する地質・地質構造の透水性に関する既存情報を参照して透水係数の代表値を設定すると考えられる。

一方，概要調査段階では複数のボーリング調査が実施され，水理試験等の調査データを用いることが可能になると想定される。ボーリング調査データを用いる場合については，「地質学的・水理学的特性が均質な岩盤として仮定する場合」と「空間的に不均質な岩盤の場合」の二通りを設定した。

「地質学的・水理学的特性が均質な岩盤として仮定する場合」には，実施された水理試験により取得された試験区間の透水係数をそのまま用いて評価対象領域の代表値を設定する。複数データがある場合には，対数平均や最大値等の代表値を設定する。また，岩石試料やボーリングコアを用いた室内透水試験を用いることも可能である。

「空間的に不均質な岩盤の場合」には，深度依存や堆積岩の特徴に対する依存等がある場合，評価対象領域と試験が実施された位置関係や地質学的な特徴の違いを考慮して，透水試験のデータからそのまま設定した透水係数を補正する必要がある。例えば，幌延深地層研究計画において実施された地下水流動解析では，透水性の深度に対する依存を考慮した透水係数を設定した（例えば，操上ほか，2008）。

(ii) 有効間隙率の代表値の設定

有効間隙率の代表値を設定する方法については，透水係数の代表値の設定の場合と同様に，ボーリング調査や室内試験等の調査データの有無に着目して，「調査データに乏しい場合」，「直接的な実測データはないが，間隙率を推定できるデータがある場合」および「直接的な調査データがある場合」の三つの場合分けを設定した。

ボーリング調査における水理試験のデータが取得されている段階のような「調査データに乏しい場合」においては，評価対象領域と類似する地質・地質構造の岩石の間隙特性に関する既存情報に基づいて，評価対象領域の代表的な有効間隙率を設定すると考えられる。

「直接的な実測データはないが，間隙率を推定できるデータがある場合」に関しては，ボーリング調査において実施する複数の物理検層のデータを用いて，総合的に解釈して間隙率を推定する手法がある。例えば，幌延深地層研究計画において実施したボーリング調査では，音波，中性子，密度，自然ガンマ線，XY キャリパー等の複数の物理検層結果を利用して代表的な間隙率を求めている（例えば，山本ほか，2005，pp.5-76～5-102）。

「直接的な調査データがある場合」に関しては，直接的に調査データから間隙率を測定する手法としては，岩石試料やボーリングコアを用いた水銀圧入法等による室内の間隙率測定，原位置におけるレジン等の注入による間隙率測定，原位置トレーサー試験による間隙率の推定が考えられる。

(iii) 動水勾配の設定

動水勾配を設定については，「評価対象の実測データが乏しい場合」と「実測データや水理地質

構造モデルの解析結果がある場合」に分けた。

「評価対象の実測データが乏しい場合」に関しては，既存情報に基づき動水勾配を設定する。第２次取りまとめでは，既往文献に基づき地下水面の勾配の頻度分布において，最も頻度の高い値を参考に設定した。本検討において整理した評価ツリーでは，評価対象の地形の勾配や既存の文献により得られた地下水位から算定された地下水面の勾配や第２次取りまとめの設定等を参考に設定する。

「実測データや水理地質構造モデルの解析結果がある場合」に関しては，評価対象領域を十分に評価できる地下水圧モニタリングのデータがある場合が想定され，測定された地下水圧とそこの地表標高との関係を参考にして評価対象領域の動水勾配が設定される。

(2) 三次元モデルの場合

実際の地質環境を対象とした核種移行解析においては，処分場を含む領域を通過する地下水の涵養域までの比較的大きなスケール地下水流動解析に基づく，より具体的な地下水移行経路，地下水流動特性，物質移行特性等のより具体的な情報が求められる。そのために，地質環境データに基づき地質構造モデルと三次元水理地質構造モデルを構築する。そして，地下水流動解析と粒子追跡法による解析を実施する（例えば，牧野ほか，2005）。粒子追跡法に基づく解析や流線解析では，地下水の移行経路の情報として，地下水移行時間のみならず，移行距離および流速を同時に取得することができる。地下水移行時間をはじめとした移行経路情報を解析により導くためには，「解析領域を設定するためのデータセット」，「三次元水理地質構造モデル」および「境界条件」が必要である（図 3.2.4-2）。ここでは，三次元水理地質構造モデルの構築方法および境界条件の設定方法について記述する。

(i) 三次元水理地質構造モデルの構築

三次元水理地質構造モデルについては，データ量や評価領域のスケールが場合分けの条件となり，その状況に応じて適切な水理地質構造モデルを選択する必要がある。また，亀裂性岩盤としてモデル化される花崗岩を対象とした場合とは異なり，堆積岩からなる岩盤を対象にする場合，岩石マトリクス部における地下水の流れを考慮した多孔質岩盤としてモデル化される。また，堆積岩を対象にする場合，多孔質岩盤としての特徴のみならず，亀裂が地下水の移行経路としてどの程度寄与しているのかを考慮し，その程度に応じて亀裂性岩盤としての特徴も考慮しながら適切な三次元水理地質構造モデルを選択する必要がある。三次元水理地質構造モデルの場合分けに関する評価ツリーを図 3.2.4-4 に示す。水理地質構造モデルの第一の場合分けとして，「亀裂の透水に対する寄与を考慮しない場合」と「亀裂の透水に対する寄与を考慮する場合」を設定した。

亀裂の透水に対する寄与を考慮しない場合，岩石マトリクスにおける地下水の流れを考慮する，すなわち多孔質媒体としてモデル化することになる。多孔質媒体としてモデル化する場合には，岩盤が均質な特性を有するもの仮定して「均質多孔質媒体（連続体）モデル（CPM モデル: Continuum Porous Media model）」を構築する場合と，岩盤の透水性に関する不均質性を考慮した CPM モデルを構築する場合に分けられる。岩盤の透水性は，深度や堆積岩特有の因子に依存する場合があり，これを考慮した CPM モデルを構築することが可能である。評価ツリーには，深度依存性を考慮した CPM モデルの場合を示した。

一方，亀裂の透水に対する寄与を考慮する場合は，岩石マトリクスと亀裂の双方が透水に寄与するのか，亀裂のみが透水に寄与するのかに分けられる。前者の場合には二重透水モデルが，後者の場合には亀裂ネットワークモデル（DFN モデル: Discrete Fracture Network model）が構築される。二重透水モデルや DFN モデルを用いて岩盤中の不均質性を考慮したモデルを構築する場合には，それらのモデルのある一定のスケールごとあるいは地質構造あるいは岩相区分ごとに等価な多孔質媒体モデルと置き換えてもモデル化される等価不均質多孔質媒体モデル（ECPM モデル: Equivalent Continuum Porous Media model）が構築される。CPM モデル，二重透水モデルおよび DFN モデルに関して，以下に記述する。なお，幌延深地層研究計画における調査研究の事例では，亀裂が透水に寄与するのか否かを検討している（例えば，舟木ほか，2009；Ishii et al., 2011）。これら事例については「(ⅲ)堆積岩中の亀裂が地下水流動に及ぼす影響の有無の検討」で詳述する。

This is a blank page.

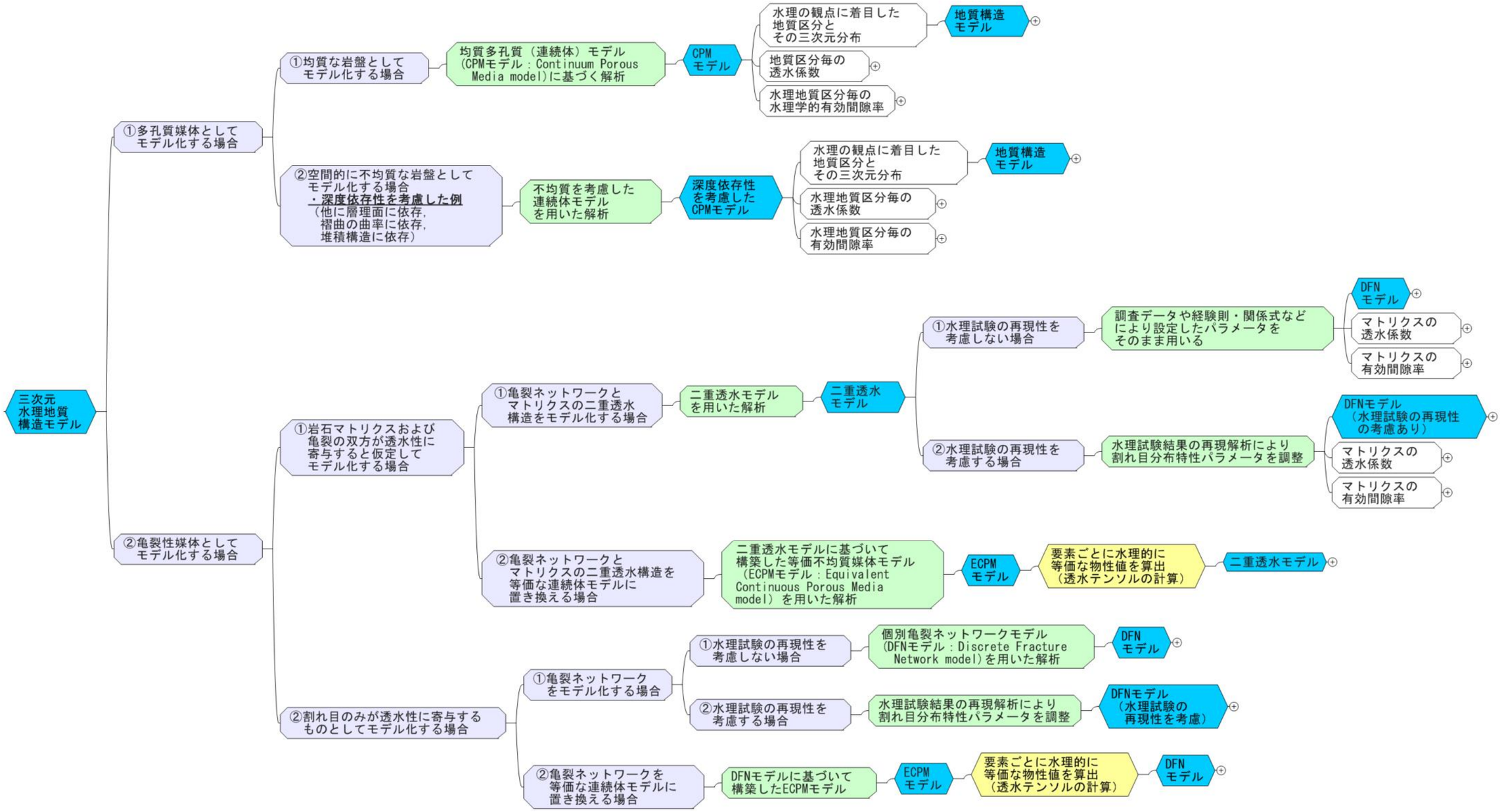


図 3.2.4-4　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（三次元水理地質構造モデルの場合分け部分）

(a) CPM モデル（深度依存性を考慮したモデルも含む）

CPM モデルの構築に関する評価ツリーを図 3.2.4-5 に示す。CPM モデルは，岩石マトリクス中の空隙が透水に寄与し，その透水性に関して均質な特性を有する岩盤に対してモデル化する場合に適用できる。しかしながら，亀裂が透水に寄与する場合であっても，亀裂の分布や岩石マトリクス部における透水性の不均質な分布に関する情報が少なく，二重透水モデルや DFN モデルを構築することが適切でない場合や，より広域的な領域を対象とした地下水流動解析のように，解析モデルにおける情報量や解析時間が膨大になり，実用的な範囲で解析を実施することが困難な場合にも CPM モデルは用いられる。この場合のモデル化の考え方については，地下水の流動経路となる亀裂や岩石マトリクスの間隙の不均質な分布を巨視的に取り入れた地質構造モデルに基づき，その地層区分ごとに代表的な透水性を与える方法でモデル化を行う。その際，岩盤の透水性や間隙に関する不均質な特性が何らかの因子に依存する場合には，それを考慮したパラメータの設定を行う。例えば，幌延深地層研究計画における水理地質構造モデルの構築では，透水係数の深度依存性を考慮した設定が行われた（例えば，操上ほか，2008）。CPM モデルを用いて地下水流動解析および粒子追跡法による解析を行う場合，CPM モデルにおいて設定する必要がある情報は，「水理の観点に着目した地質区分とその三次元分布」，「水理地質構造区分ごとの透水係数の代表値」および「水理地質構造区分ごとの水理学的有効間隙率」である（牧野ほか，2005）。

「水理の観点に着目した地質区分とその三次元分布」は地質構造モデルに基づき設定される。地質構造の構築に関する部分の評価ツリーの整理にあたっては，幌延深地層研究計画の地表からの調査予測研究段階における統合化データフローを参照した（太田ほか，2007）。

「水理地質構造区分ごとの透水係数の代表値」の設定では，地質構造モデルに基づき代表値を設定する単位領域である水理地質構造区分を設定する。その値は，単孔式透水試験データやボーリングコア等の試料を用いた室内透水試験に基づき設定する。深度依存性を考慮した場合における CPM モデルの評価ツリーを図 3.2.4-6 に示す。透水係数が深度の増加に応じて小さくなる等の相関性がある場合には，可能な限り多くの深度に対して透水係数を取得し，深度と透水係数の相関性を最小二乗法による近似式として求め，評価対象領域の深度に応じた補正を行う（例えば，操上ほか，2008）。

「水理学的有効間隙率」は，最終的には原位置トレーサー試験や間隙率測定等の実測データに基づいて設定するが，概要調査段階といった地上からの調査段階では，ボーリングを利用した調査・解析での物理検層結果やコア試料を用いた間隙率測定等の実測データから設定される。ボーリング調査では，各種の物理検層を総合的に解釈するために複合岩相解析を実施し，音波，中性子，密度，自然ガンマ線，XY キャリパー等の物理検層結果を利用して代表的な間隙率を求めている（例えば，山本ほか，2005）。また，間隙率の代表値についても透水係数の場合と同様の方法により，深度依存性に対する補正を行う場合がある。

This is a blank page.

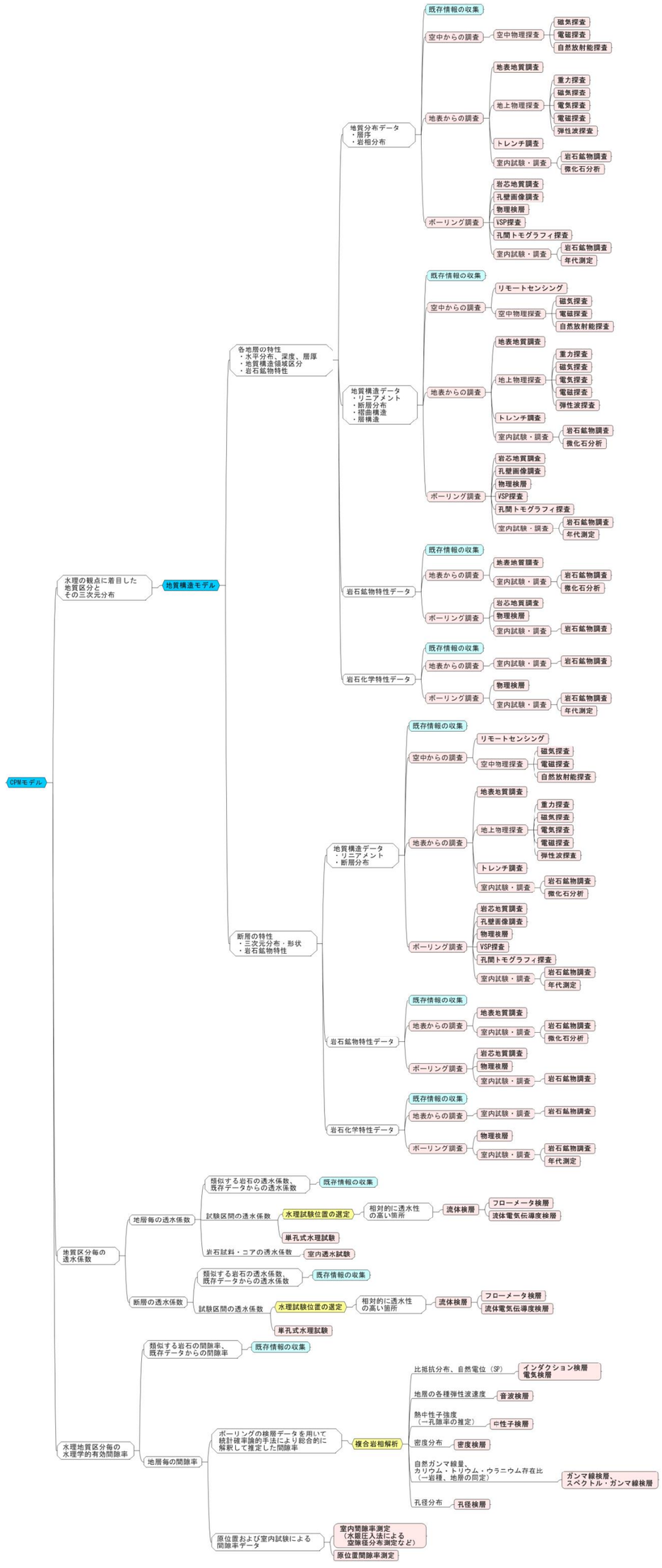


図 3.2.4-5　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（CPM モデル）

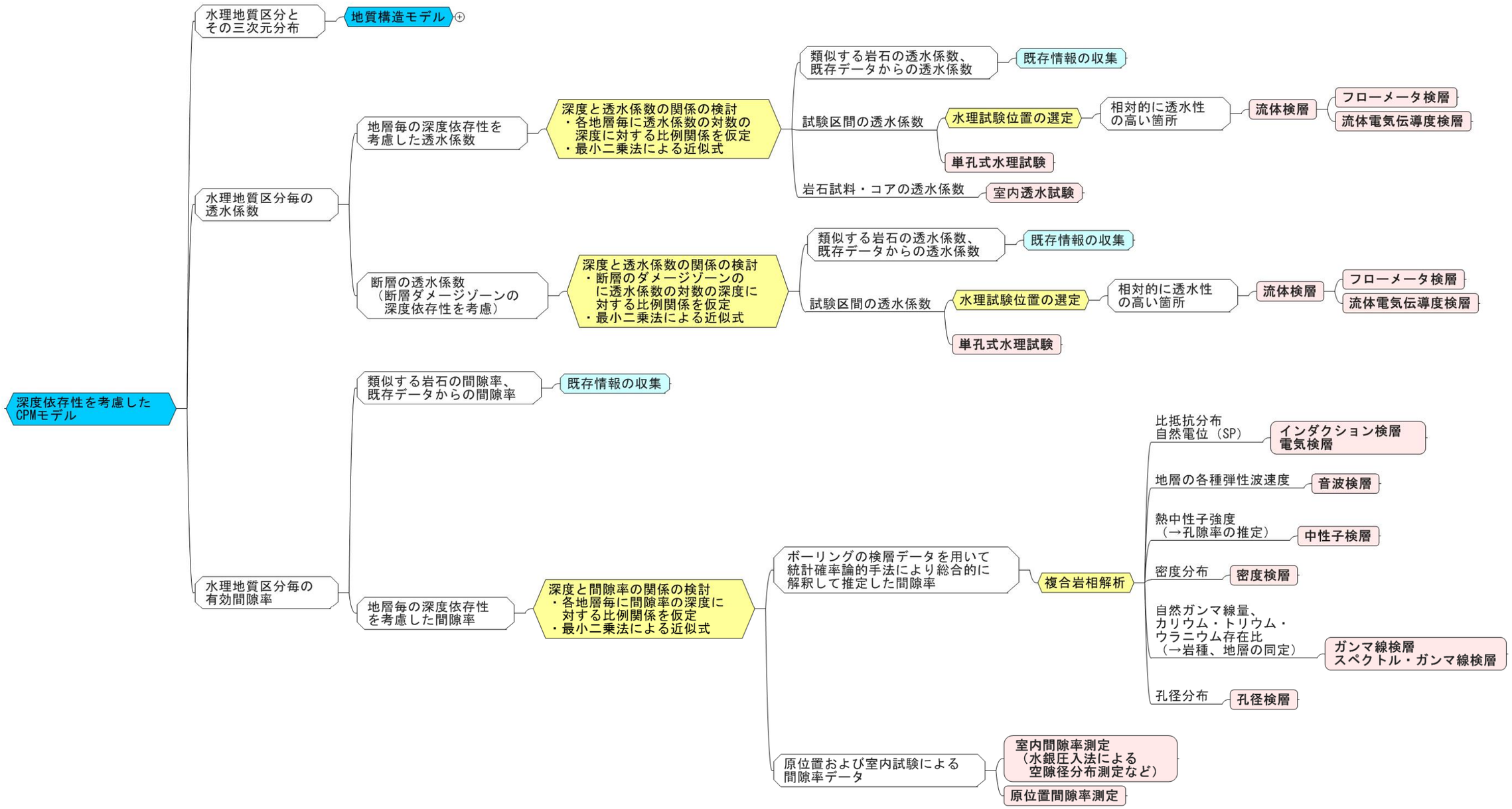


図 3.2.4-6　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（深度依存性を考慮した CPM モデル）

(b) 亀裂ネットワークモデル（DFN モデル）

DFN モデルの構築に関する評価ツリーを図 3.2.4-7 に示す。DFN モデルの構築およびそれを用いた解析には，結晶質岩のケース（江橋ほか，2012）と同様に，透水性割れ目の幾何学的特性，透水量係数分布および割れ目の類型分けの情報が必要となる。DFN モデルの構築に用いる透水性割れ目の幾何学的特徴は，割れ目の方向分布，形状，半径分布，割れ目密度，割れ目の空間分布，割れ目の幅である。これらのデータセットは，大規模トレンチ調査，リニアメント判読の調査により得られる割れ目のトレース長や，坑壁画像検層により取得される割れ目の方向分布や割れ目密度等を用いるが，それぞれのデータセットに対してモデル構築上の仮定や経験式等を設けることで整備される。割れ目の透水量係数分布の設定についても，江橋ほか（2012）に示された算出方法と同様に考えることができる。透水性割れ目の幾何学的特徴や水理学的特徴に関するパラメータは，水理試験結果の再現解析により割れ目の開口幅および大きさを設定する方法を採用することも可能である（下茂ほか，2012）。水理試験の再現性を考慮した DFN モデルの場合における評価ツリーを図 3.2.4-8 に示す。

割れ目の類型分けに関する情報は，DFN のモデル化に必須となる情報ではないが，割れ目の類型と透水性の関係が評価できる段階では，割れ目の類型ごとに透水性割れ目の幾何学的特性や透水量係数にいて整理し，そのデータを用いて確率論的割れ目のモデルを構築することにより，地質学的情報や水理学的情報等の情報をより合理的に説明可能なモデルを構築できる。

This is a blank page.

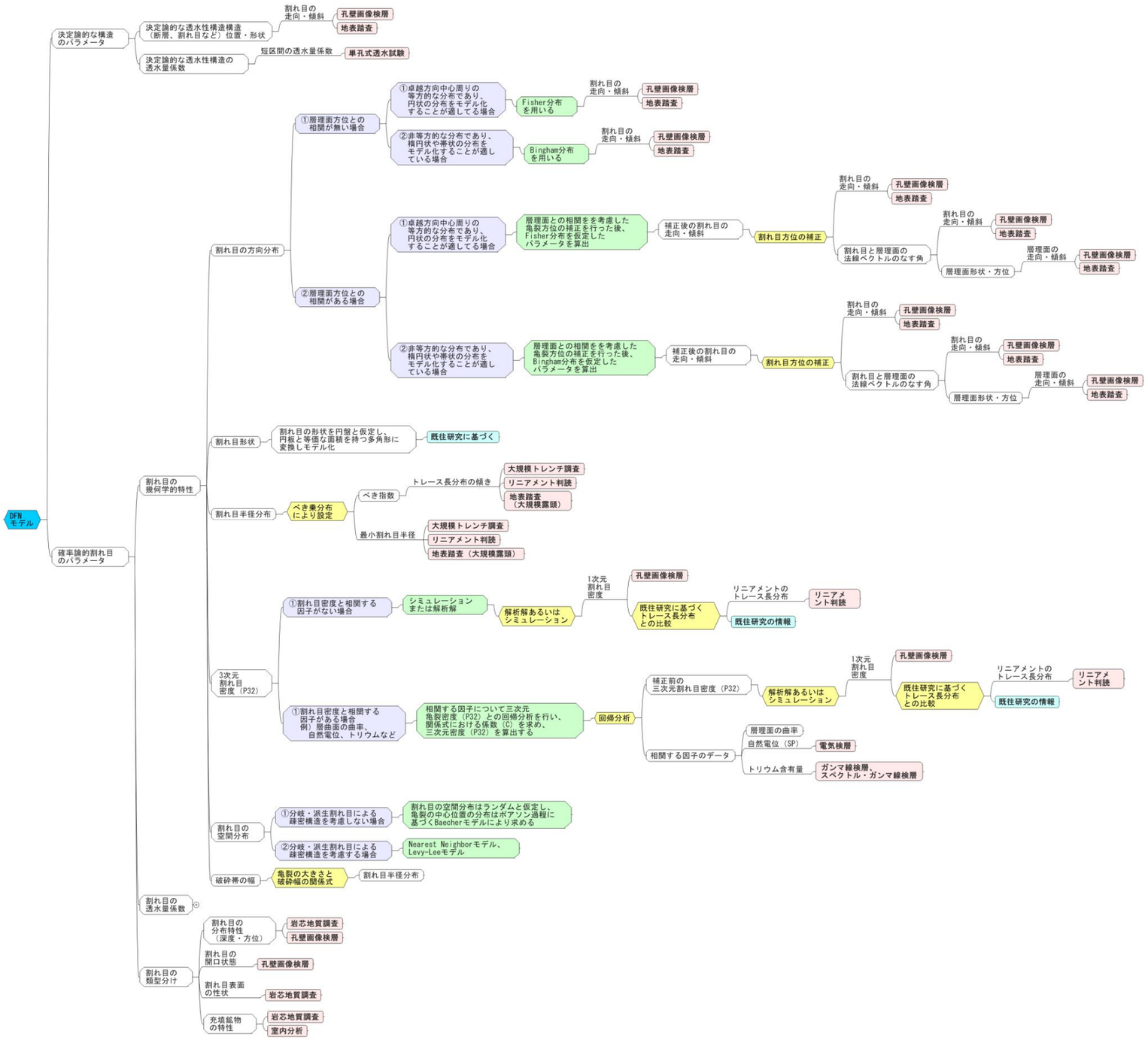


図 3.2.4-7　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（DFN モデル）

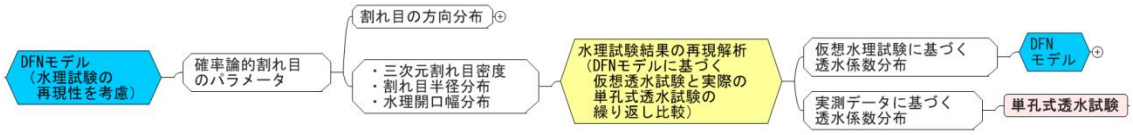


図 3.2.4-8　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（水理試験の再現性を考慮した DFN モデル）

(c) 二重透水モデル

二重透水モデルの構築に関する評価ツリーを図 3.2.4-9 に示す。二重透水モデルを構築する場合には，亀裂のネットワーク構造をモデル化した DFN モデルに加えて，マトリクスの透水についてモデル化する必要がある。その方法は，DFN モデルにマトリクスにおける透水係数の情報を付加することが考えられる。マトリクスの透水係数は，CPM モデルのケース同様に，岩石試料またはコア試料を用いた室内透水試験あるいは原位置水理試験の実測データに基づいて代表値を設定する。この場合，特に原位置透水試験では亀裂を含まない区間を対象とした実測データを用いる必要がある。

This is a blank page.

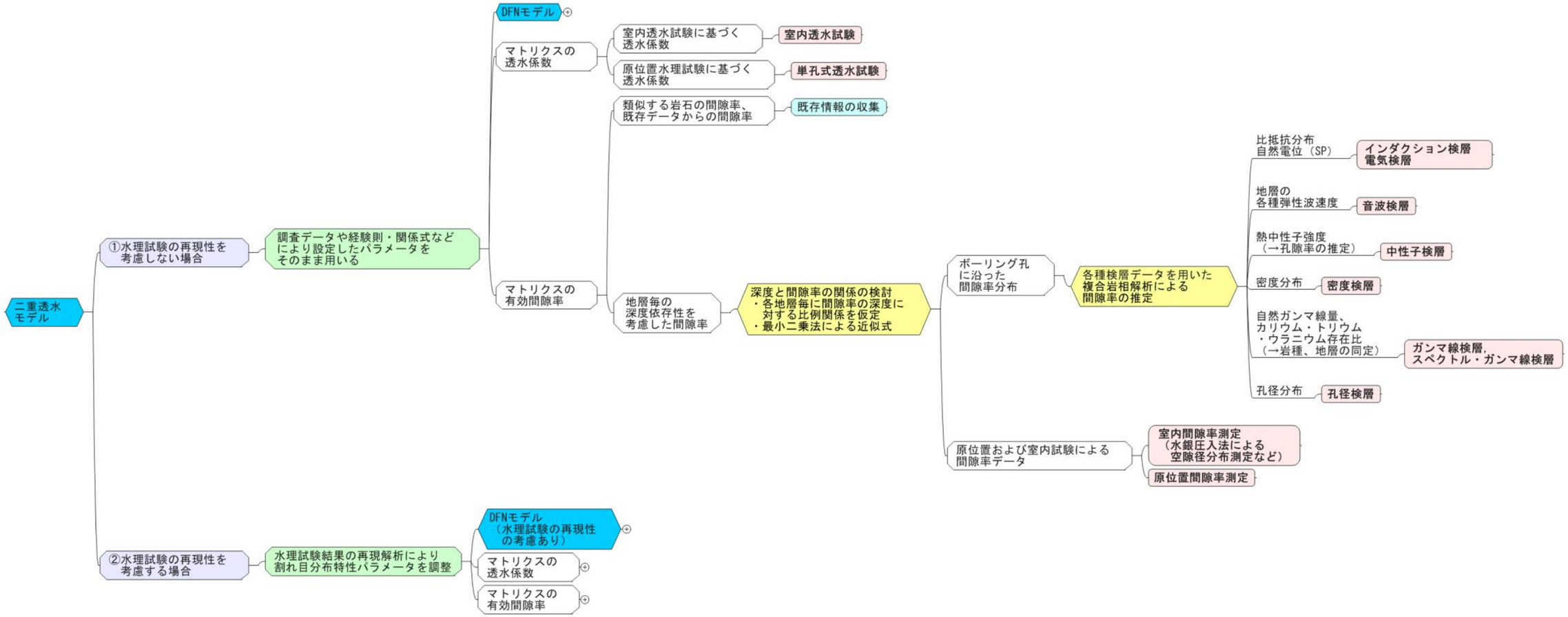


図 3.2.4-9　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（二重透水モデル）

(ii) 境界条件の設定

三次元モデルにおける境界条件の設定に関する評価ツリーを図 3.2.4-10 に示す。水理地質構造モデルにおける境界条件は，評価対象領域における地表地形，河川，海岸等の水理に関連する地理的条件，より広域の領域を対象とした地下水流動解析の結果等に基づき設定される。また，上部境界条件は，涵養量の調査結果から設定される（例えば，操上ほか，2008）。「地下水涵養量」に関する評価ツリーは，山本ほか（2012）を参照した。地下水涵養量を求める手法は水文学的手法，地下水工学的手法および直接測定法がある。地下水工学的手法および直接測定法は測定地点での局所的な地下水涵養量を算出する手法であるため，ある一定のスケールを対象とした解析では，流域単位で地下水涵養量を設定できる水文学的手法が基本となる。

作成した境界条件に関する評価ツリーは，幌延深地層研究計画を対象とした検討事例に基づき作成したものであるが，結晶質岩を対象とした場合にも適用可能と考えられる。

This is a blank page.

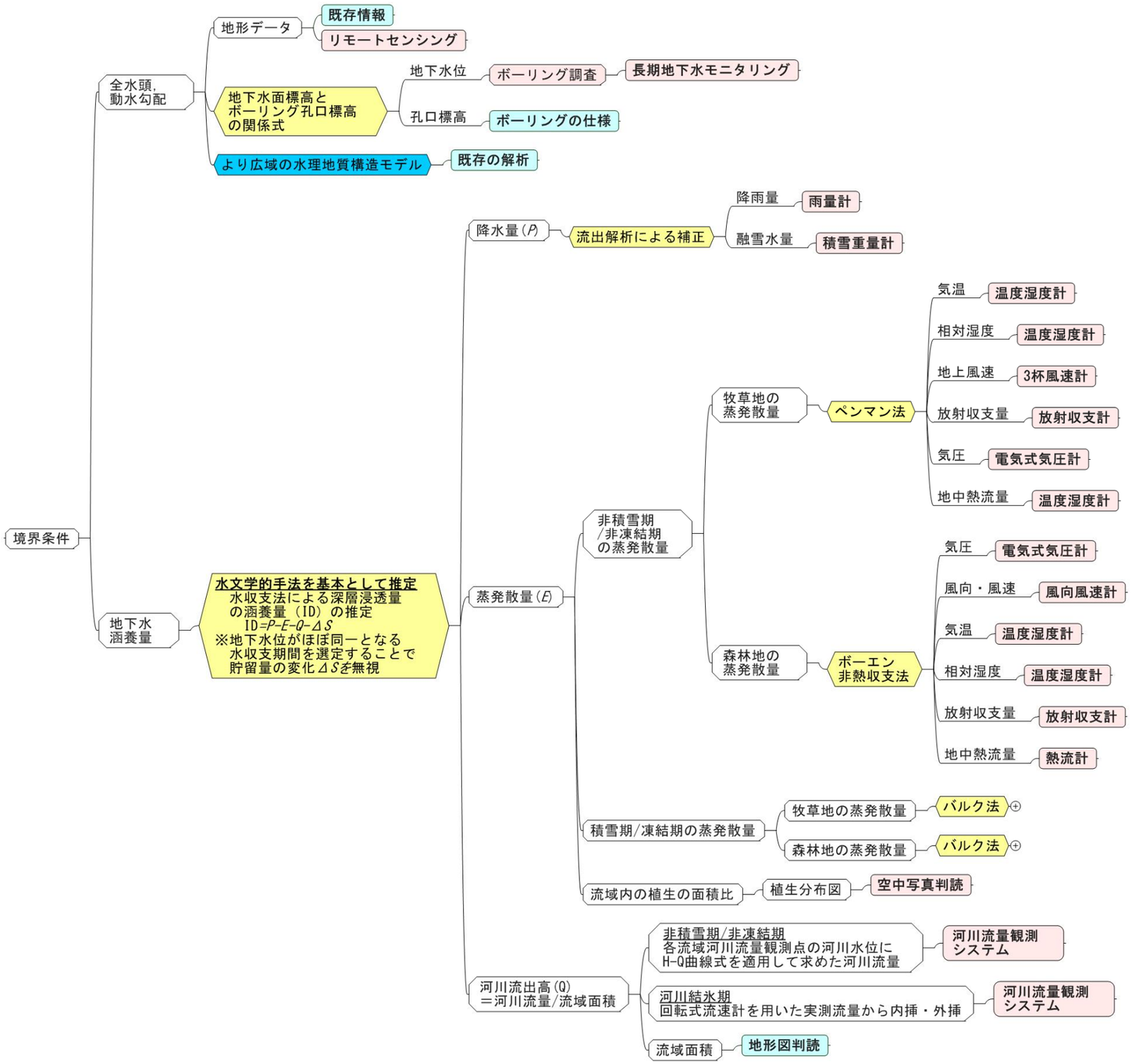


図 3.2.4-10　堆積岩を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリー（境界条件）

(iii) 堆積岩中の亀裂が地下水流動に及ぼす影響の有無の検討

堆積岩中の亀裂が地下水流動に及ぼす影響の有無を検討した事例に関しては，幌延深地層研究計画を対象とした検討事例である舟木ほか（2009）および Ishii et al.(2011)を参考に，ツリーとして整理した。その結果を図 3.2.4-11，図 3.2.4-12 に示す。幌延深地層研究計画における主な対象地層は，新第三紀の堆積岩からなる声問層と稚内層である。これらの地層中に分布する割れ目は，水みちとして機能する程度が異なる。

舟木ほか（2009）では，コア観察により認められた割れ目と超音波型孔壁画像検層により検出した割れ目を比較し，対比できた割れ目の割合から割れ目の開口性を評価し，また，流体電気伝導度検層により検出した流出入箇所と割れ目との対応関係から割れ目の連続性・連結性を評価した。その結果，声問層は多孔質媒体として，稚内層は声問層と比べて亀裂性媒体としての性質が強いことを示した。

Ishii et al.(2011)では，泥岩の脆性度,変形挙動の観点から割れ目が水みちとして機能するか否かを検討した。具体的には，岩石の脆性度，変形挙動を判断する指標として，BRI（Brittleness index）という概念を適用するとともに，BRI と水理的な性質との関係を検討した。その結果，BRI が概ね 8 以上の場合は，亀裂性媒体として，概ね 8 以下の場合は，多孔質媒体として取り扱いができることを示した。

This is a blank page.

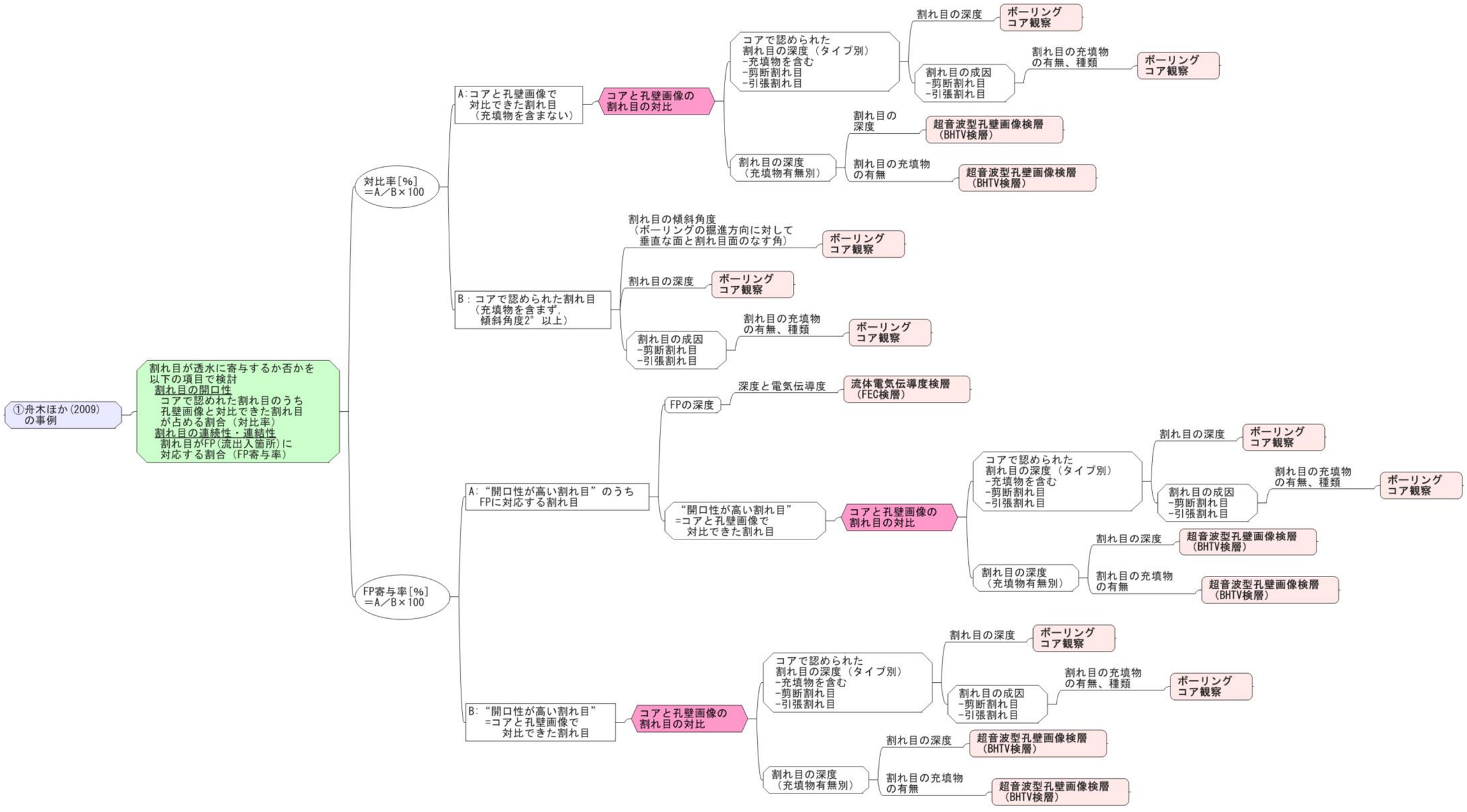


図 3.2.4-11　堆積岩中の亀裂が地下水流動に及ぼす影響の有無を検討した事例（舟木ほか，2009 の場合）

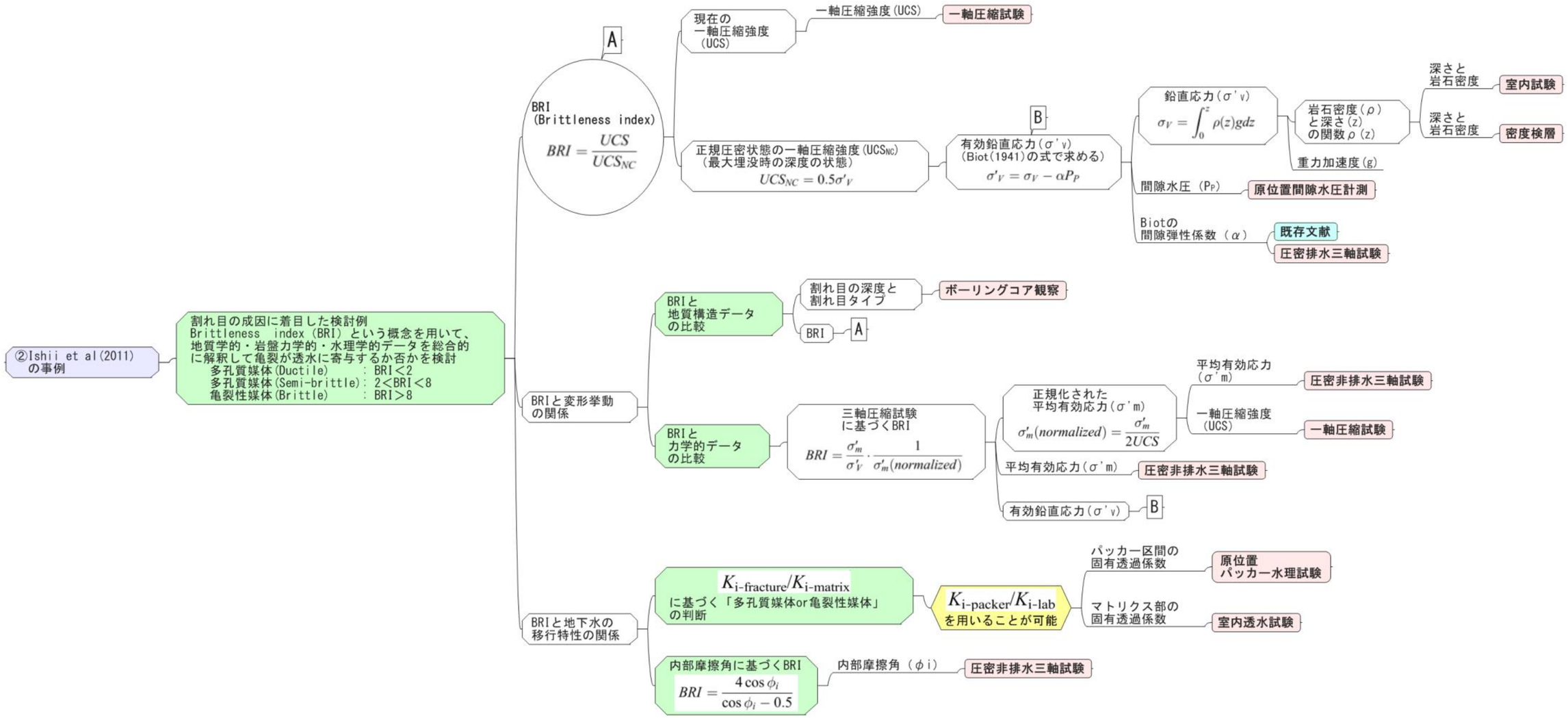


図 3.2.4-12　堆積岩中の亀裂が地下水流動に及ぼす影響の有無を検討した事例（Ishii et al., 2011 の場合）

3.3　評価ツリーの適用方法に関する検討

3.2.3 項と 3.2.4 項で整理した評価ツリーは，母岩と想定できる岩盤領域の割れ目等の情報に基づいて，ニアフィールド周辺の数十メートルから百メートル程度の任意の規模の岩盤の特性として，地下水移行時間等の水理の観点から設定した評価項目を起点としたツリー構造で評価方法を整理したものである。これまでに整理してきた評価手法は，第２次取りまとめ（JNC, 1999）や深地層の研究所計画等で実施してきた様々な評価の経験に基づいて，比較的重要と考えられるケースに着目したものである。評価ツリーに整理された手法の中から，必要に応じて複数のオプションを選択することにより，対象となる場の理解やデータの不確実性，サイトが特定されていない段階における安全確保策の不確実性等に柔軟に対応していくことが可能になると考えられる。

本項では，亀裂性媒体を対象とした地下水移行時間の評価ツリーの適用方法に関する検討として，第２次取りまとめのレファレンスケースのモデルやパラメータ値等の情報を活用して，評価を試行した（3.3.1 項）。一次元モデルと三次元モデルのそれぞれについて百メートル程度の任意の規模の岩盤の特性として地下水移行時間を評価した。三次元モデルについては処分坑道を模擬した測線と交差する割れ目の頻度，透水性ならびに地下水移行時間の関係について検討した。また，具体的な地質環境データを用いた検討として，3.2.2 項で SR-Site のデータを活用して構築した水理地質構造モデルと透水量係数分布の代替ケースについて，亀裂性媒体を対象とした地下水移行時間の評価ツリーに従い，上記と同様な評価の試行および考察を行った（3.3.2 項）。

3.3.1　第２次取りまとめの設定を用いた検討

(1) 一次元モデルを用いた方法

第２次取りまとめの天然バリアを対象とした遅延性能評価のレファレンスケースでは，一次元平行平板モデルの重ね合わせ手法が用いられている（JNC, 1999）。これは，母岩中の核種移行経路の不均質性を表す水理地質構造の特徴のうち，亀裂の透水量係数の分布に着目した手法である。第２次取りまとめでは，透水量係数は移行距離等の他の因子に比べて数桁に及ぶバラツキを有するとともに，そのバラツキが核種の遅延性能の評価結果に大きな影響を及ぼすと考えられた。第２次取りまとめレファレンスケースで用いられた透水量係数の累積分布を図 3.3.1-1 に表す。この透水量係数の分布から，一次元平行平板モデルと 100m の移行距離を仮定して算出した地下水移行時間の累積分布を図 3.3.1-2 に示す。動水勾配（0.01）と開口幅（透水量係数の平方根に比例）は第２次取りまとめの設定を用いた。透水量係数の対数平均値（-9.99）に相当する地下水移行時間は約 63 年となる。この例では，亀裂の透水量係数分布が得られる場合，岩盤の数十メートルから百メートル程度の任意の距離の岩盤の地下水移行時間という項目を簡便的に評価できることを示している。このようにして得られた地下水移行時間の分布は，複数の場所の岩盤の性能の相対比較や，母岩に期待している性能との比較等に用いることができると考えられる。その際，評価に用いる透水量係数分布の設定にかかわる不確実性に注意する必要がある。透水試験や PFL 検層のような水理学的な調査にはそれぞれ検出下限値があり，例えば PFL 検層では 10^{-9} m^2/s 以下の透水性を有する割れ目を検出することができず，相対的に低透水側の分布の推定には大きな不確実性が含まれる。また，透水性割れ目の頻度に応じた空間分解能を有する水理学的調査手法の選択も透水量係数分布の設定の不確実性に影響を及ぼす。これらの不確実性は地下水移行時間の評価結果にも影響を及ぼす。第２次取りまとめレファレンスケースで設定されたパラメータ値を用いて，100m の移行距離における地下水移行時間と核種移行の遅延効果の関係を図 3.3.1-3 に表す。

この図では，核種移行の遅延効果として定常状態を仮定した解析解から算出される核種移行率比を用いた（澤田ほか，1999）。岩盤中の核種移行の遅延効果を評価するためには，人工バリアからの核種移行率（人工バリア中核種移行解析に必要な諸条件の設定を含む）の時間変化，人工バリアとの境界条件（例えば，処分坑道の掘削影響領域で核種が瞬時混合するとの仮定），割れ目表面への収着やマトリクスへの拡散と収着等，様々な条件を具体的に設定する必要がある。しかしながら，第２次取りまとめ等の既存の検討結果に基づき，かつ一定濃度の核種をソースとした定常状態を仮定する等の簡便的な評価のための仮定を追加することで，図 3.3.1-3 を母岩の性能の目安として活用することができる。つまり，評価項目に処分場の安全性を評価する視点から，例えば核種移行の遅延性能に関連する項目を適切に選択することで，岩盤の水理学的な特性値と遅延性能との相対的な比較が可能になると考えられる。

同様の視点で，早野・澤田（2013）はより具体的な地質環境調査で取得されたデータを用いた評価手法の整備を目的として，超深地層研究所計画で取得されたデータを活用し，亀裂の透水量係数の分布に着目した一次元モデルによる評価手法の検討を行っている。その際，図 3.3.1-3 と同様に簡便的な評価のための仮定を追加することで，評価項目として地下水移行時間に変えて核種移行率を採用している。その結果，一次元モデルによる評価手法は，地上からの調査段階等のデータ量が乏しい段階において，岩盤の有する核種移行の遅延性能を概略的に評価できる有効な手法の一つとなりうることを示した。また，検討の対象とした核種（例えば Cs-135）の核種移行率が低下する透水量係数の範囲（10^{-9} m^2/s より小さい範囲）が FEC 検層等の水理試験の検出限界より小さい範囲となることから，より低透水性の割れ目の定量的なデータの取得が核種移行率の評価結果の信頼性の確保に資することも示した。さらに，例えば高透水性の割れ目が分布するような「廃棄体を定置するのに相対的に好ましくない場所」に対して工学的に対策が施されることを想定した場合に，核種移行率がどのように変化するか簡略的に検討した。その結果，このような検討に際しては，高透水性の割れ目の検出とその透水量係数の定量的なデータが必要であるとともに，工学的対策後の遅延性能の評価を高い信頼性をもって行うためには，より低透水性の割れ目の定量的なデータも不可欠である点が示された。

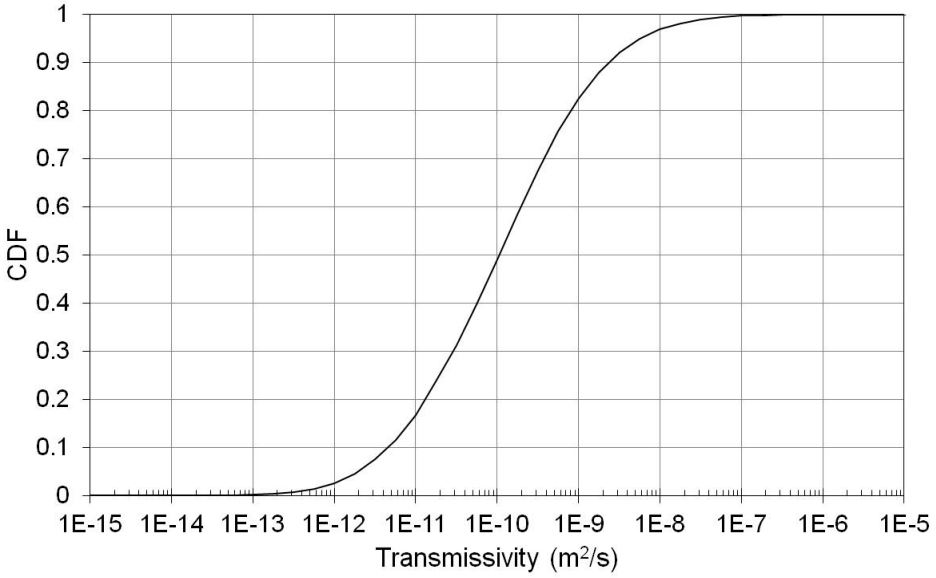


図 3.3.1-1　第２次取りまとめレファレンスケースで用いられた透水量係数の累積分布

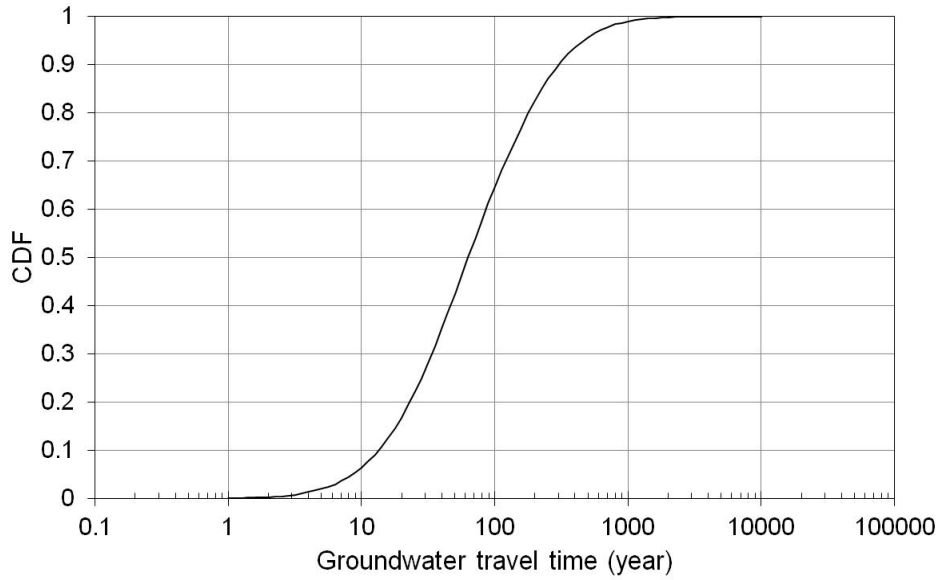


図 3.3.1-2　第２次取りまとめレファレンスケースで用いられた透水量係数分布を用いて算出した地下水移行時間の累積分布

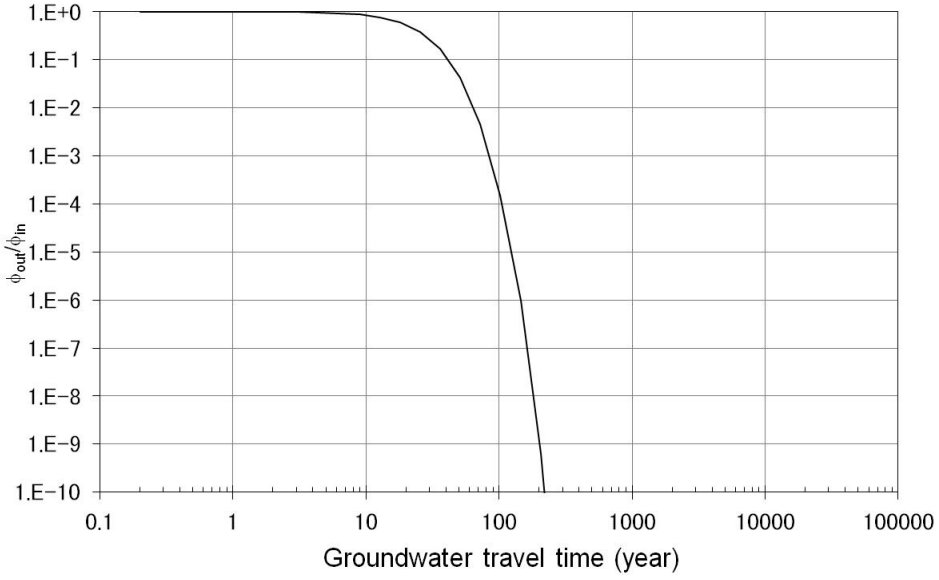
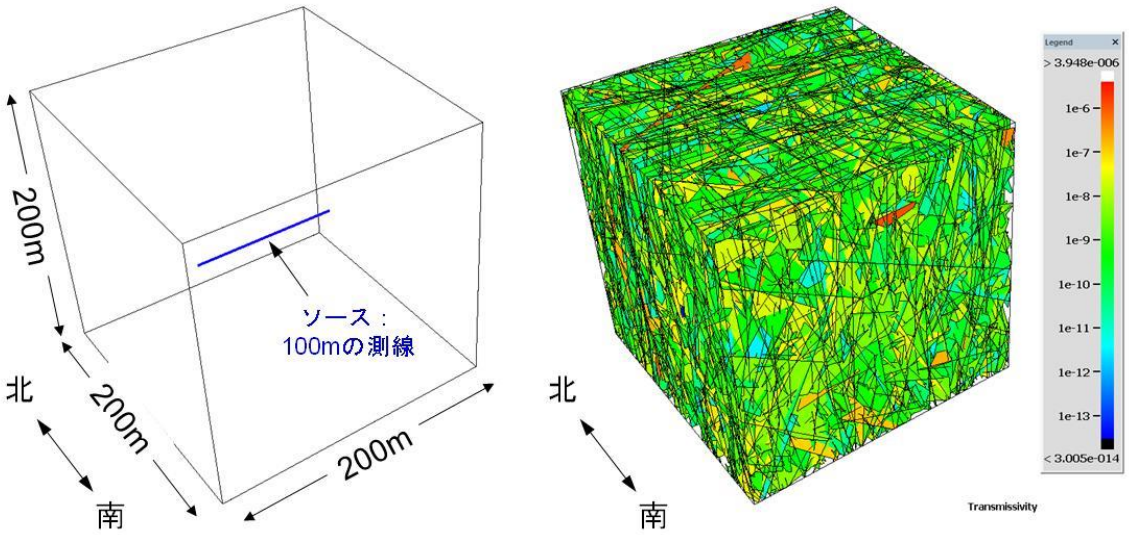


図 3.3.1-3　定常解析解を用いた Cs-135 の核種移行率比（ϕ_{out}/ϕ_{in}）と地下水移行時間
第２次取りまとめレファレンスケースで用いられたパラメータ値の場合

(2) 三次元モデルを用いた方法

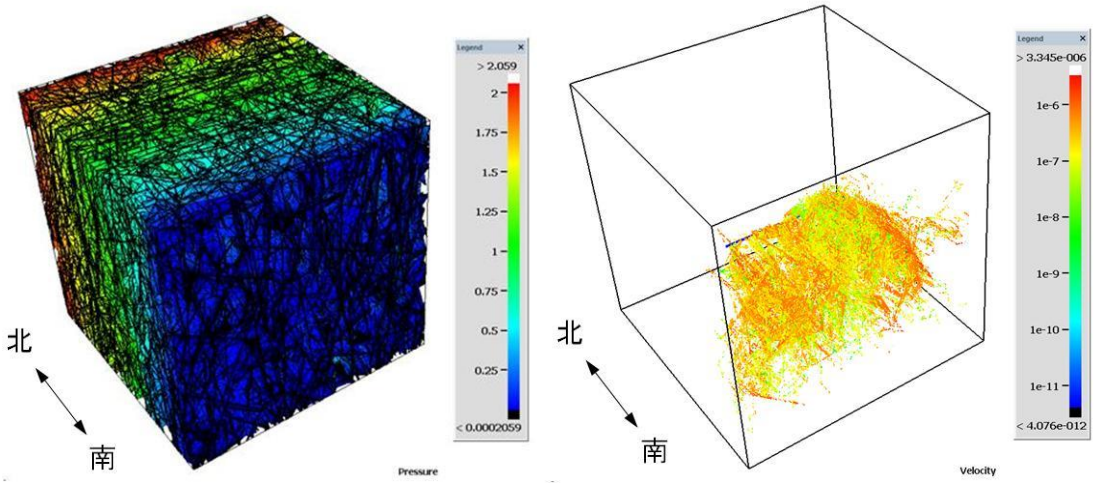
第２次取りまとめのレファレンスケースにおける一次元平行平板モデルの重ね合わせ手法は，100m の長さの処分坑道を中央に配置した 200m×200m×200m のブロック状領域を対象とした三次元亀裂ネットワークモデルの検討により構築されている（JNC, 1999, 付録 C; 澤田ほか，1999）。本項では，三次元モデルを用いた事例として，第２次取りまとめのレファレンスケースで検討した三次元亀裂ネットワークモデルを用いた評価の試行を行った。

図 3.3.1-4 に解析対象領域と構築した亀裂ネットワークモデルの一例を示す。モデルの中央部には処分坑道を模擬した 100m の測線（以下，「測線」とよぶ）を配置した。亀裂ネットワークモデルの構築に用いたパラメータ値を表 3.3.1-1 に表す。本検討では透水量係数の平均値が第２次取りまとめに比べて一桁大きなケース（対数平均値-8.99: 澤田ほか，1999）を設定した。透水量係数の分布を第２次取りまとめに比べて一桁大きく設定することで，より高透水性の亀裂が存在することが核種移行率比に及ぼす影響を検討できると考えられる。例えば、図 3.3.1-3 に示した Cs-135 の場合，第２次取りまとめの透水量係数の平均値に相当する地下水移行時間は約 63 年で，対応する移行率比は約 0,013 である。これに対して，第２次取りまとめの平均値より一桁大きい透水量係数に相当する地下水移行時間は約 20 年で，対応する移行率比は約 0.56 と遅延効果がより小さくなる。第２次取りまとめのレファレンスケースで検討した三次元亀裂ネットワークモデルは，表 3.3.1-1 に示されるようにお互いに直交する二つの鉛直方向の亀裂セットで構成され，一方の亀裂セットに平行な方向に一定の動水勾配を設定している。本検討も同様に，亀裂セット２に平行な方向に一定の動水勾配（図 3.3.1-4 の北から南への方向）を設定し，他の側面は不透水境界とした。そして，ダルシー則に基づく定常の浸透流解析（図 3.3.1-5(a)参照）の後に，粒子追跡法を用いて移行経路を抽出した（図 3.3.1-5(b)参照）。モデルの中央に設定した測線に 10,000 個の粒子を配置し，測線に交差する割れ目の流量に比例して粒子を配分した。この仮定は，ごく短時間の間に一定濃度の溶質を 100m の線要素に配置（瞬時混合を仮定）したことを意味している。また，測線に交差する割れ目の透水性が数桁にわたって分布し，粒子数が地下水の流量比で分配されるため，より低透水性の割れ目からの移行経路を抽出できるように多くの粒子（10,000 個）を用いることとした。経路の途中で亀裂の交差部において流路が分岐した場合，粒子は地下水の流量に比例して配分される。これは，亀裂交差部における溶質の完全混合を仮定している。このような仮定に基づき抽出される移行経路の集合は，より多くの粒子が通過する確率の高い経路の特徴を表すことになる。なお，分散長は縦方向，横方向ともに一律に小さな値（0.01m）を設定した。



(a) 解析対象領域と坑道を模擬した測線（青）　(b) 亀裂ネットワークモデルの例 透水量係数 m^2/s の分布

図 3.3.1-4　解析対象領域と亀裂ネットワークモデルの例



(a) 定常浸透流解析結果例（水頭分布）　(b) 粒子追跡法解析結果例（流速 m/s 分布）

図 3.3.1-5　定常浸透流解析結果と粒子追跡法解析結果の例

表 3.3.1-1　亀裂ネットワークモデル構築に用いたパラメータ値

パラメータ	値	備考
亀裂セット	２セット	
亀裂方位分布	フィッシャー分布 セット１：(tr, pl)= (0, 0), フィッシャー係数κ=10 セット２：(tr, pl)= (90, 0), フィッシャー係数κ=10	方位は亀裂面の法線方向（pole）の北からの時計回り角度（tr）と水平面からの傾き（pl）で表す
亀裂半径分布	べき乗分布 べき乗数: 3 ，最小半径: 1m	半径 7m～300m の範囲をモデル化
亀裂密度	P_{32} = 0.8	二つの亀裂セットの総和
透水量係数	対数正規分布 対数平均：-8.99，対数標準偏差：1.07	
亀裂開口幅	透水量係数 T に相関 開口幅=$2\times T^{0.5}$	

粒子追跡法により抽出した移行経路の地下水移行時間と移行距離の相関関係を図 3.3.1-6 に示す。同図は，統計的に構築する亀裂ネットワークモデルの一つのリアライゼーションの結果を示している。移行距離は主に 100m から 300m の範囲に分布するものの，地下水移行時間は数年から千年の数桁の範囲に分布していることがわかる。地下水移行時間の累積分布を図 3.3.1-7 に示す。同図には，一次元モデルを用いた地下水移行時間の分布（図 3.3.1-2）を比較のために示している。一次元モデルは移行距離として 100m を仮定しているため，亀裂ネットワーク構造の経路の分散効果を有する三次元モデルに対して，相対的に移行時間が短く保守的な値を示すことがわかる。

図 3.3.1-6 や図 3.3.1-7 に示した移行経路の情報は，測線に交差する割れ目の地下水流量に比例して 10,000 個の粒子を配分して求めたものである。測線に交差する透水性割れ目の位置と透水量係数分布を図 3.3.1-8 に示す。測線をボーリング孔と想定した一定の水頭差による模擬的な水理試験から，透水位置と透水量係数を求めた。具体的には，亀裂ネットワークモデルの外側境界条件として 1m の水頭を，ボーリング孔と想定した 100m の側線を 0m の水頭を設定して，定常状態の浸透流解析を行った。ボーリング孔と想定した 100m の側線に亀裂が交差する i 番目の点への湧水量 Q_i と水頭差 Δh から，次式の Thiem の式を仮定して， i 番目の点の透水量係数 T_i を求めた。

$$T_i = \frac{Q_i}{\Delta h}\frac{\ln(R/r)}{2\pi}$$

ここで，R は影響半径，r はボーリング孔の半径を表す。ここで，影響半径 R=30m とボーリング孔半径 r=0.05 と設定すると $\ln(R/r)/2\pi \fallingdotseq 1$ が得られ，比湧水量 Q/Δh が透水量係数 T に近似できると仮定した（Sawada et al., 2000）。図 3.3.1-8 の各点は，透水量数の値の大きさにより表 3.3.1-2 に示す四つに分類して色分けした。この模擬的な水理試験により 100m の側線に 27 ヶ所の透水性割れ目が抽出され，その透水量係数は 10^{-9} m^2/s 前後に分布していることがわかる。10^{-10} m^2/s より低

透水性や 10^{-8} m^2/s より高透水性のものも分布しているが,その頻度は相対的に低いことがわかる。

表 3.3.1-2 の分類ごとに，相対的に透水性が高い割れ目から段階的に移行経路の情報を無視（母集団から除外）して地下水移行時間の分布を整理したものを図 3.3.1-9 に示す。赤色の線は図 3.3.1-7 と同じで全移行経路の地下水移行時間の分布を示す。これに対して，青の線は 1×10^{-7} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（1 ヶ所）からの移行経路を無視したケースで，黒は 1×10^{-8} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（6 ヶ所）からの移行経路を無視したケース，黄は 1×10^{-9} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（16 ヶ所）からの移行経路を無視したケースである。また，図 3.3.1-10 に測線に交差する割れ目の透水性分類ごとの移行距離と移行時間の分布を表す。これらの図から，地下水移行時間はその起点となる測線に交差する割れ目の透水性と相関性を有し，その透水性が高いと地下水移行時間が短くなる可能性があることを示している。また，本ケースの場合，高い透水性を有する亀裂の頻度は相対的に小さい。

本検討は第２次取りまとめにおいて設定されたケースに基づいた試行で，遅延性能に関連する評価項目である地下水移行時間と，その評価項目に影響を及ぼす構造の頻度分布の関係を検討するための一つの方法論を示していると考えられる。また，その検討にあたっては，坑道掘削に先行して掘削するボーリング孔を対象とした PFL 検層等による透水箇所と，水理試験による透水性に関する情報が必要であることを示している。その際，先行ボーリング孔内でできるだけ空間解像度が高く，高透水部から低透水部の幅広い範囲の透水量係数を定量的に測定できることが望ましい。このような，三次元モデルを用いて遅延性能に影響を及ぼす構造が坑道等と遭遇する頻度について検討することは,「廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所」（NUMO, 2011, p.6-4）を考慮したレイアウトの検討と地質環境の調査に求められる項目（方法，仕様や性能等）の議論や検討に資すると考えられる

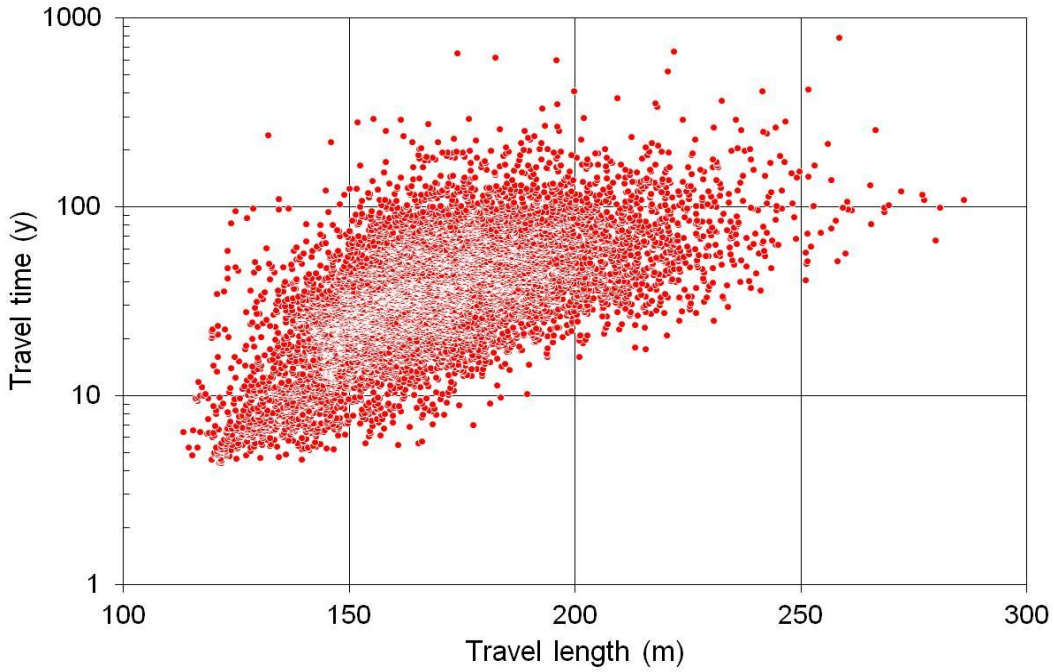


図 3.3.1-6　地下水移行距離と移行時間の相関図
1 リアライゼーションの結果の例

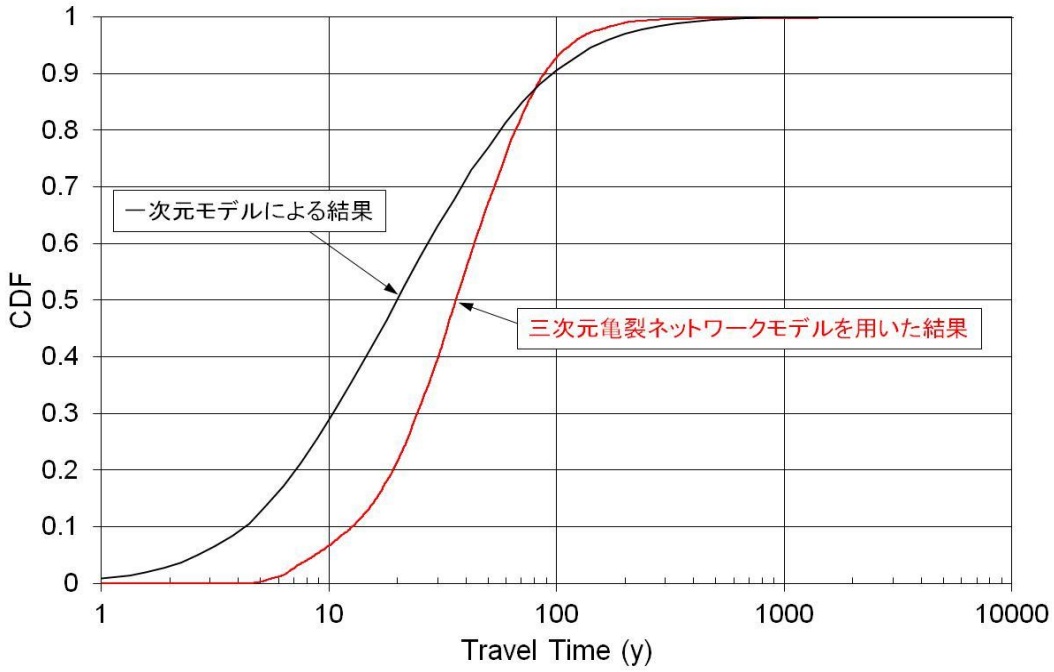


図 3.3.1-7　地下水移行時間の累積分布
三次元亀裂ネットワークモデルを用いた結果と一次元モデルによる結果の比較

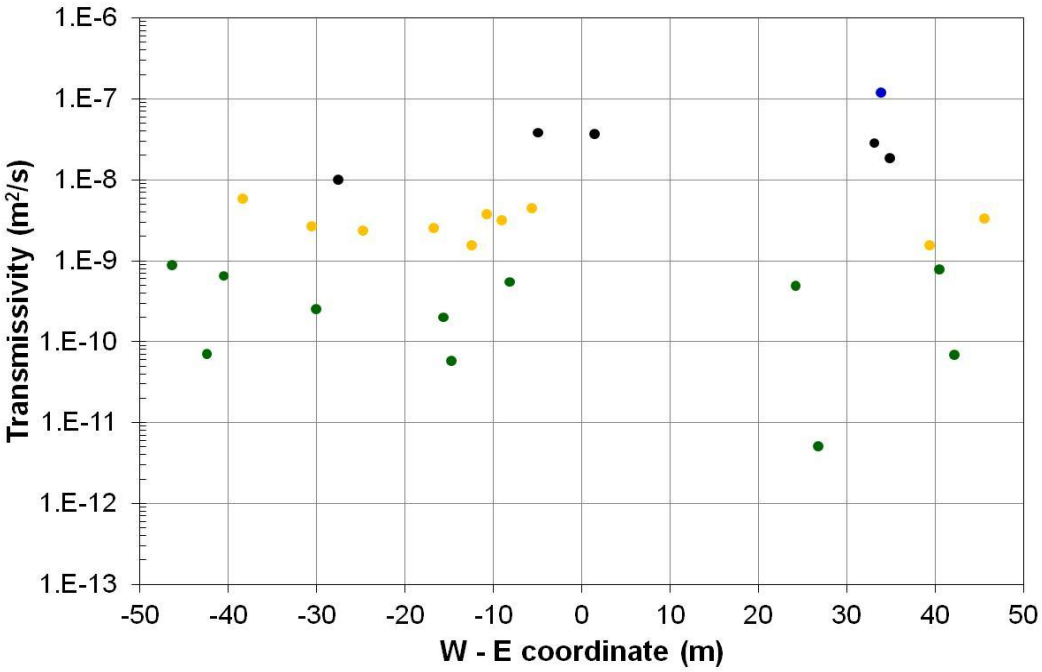


図 3.3.1-8　測線に交差する透水性割れ目の位置と透水量係数

表 3.3.1-2　測線に交差している透水性割れ目の分類

色	透水量係数の範囲	個数	累積個数
青	1×10^{-7} m^2/s 以上	1	1
黒	1×10^{-8} m^2/s 以上，1×10^{-7} m^2/s 未満	5	6
黄色	1×10^{-9} m^2/s 以上，1×10^{-8} m^2/s 未満	10	16
緑色	1×10^{-9} m^2/s 未満	11	27

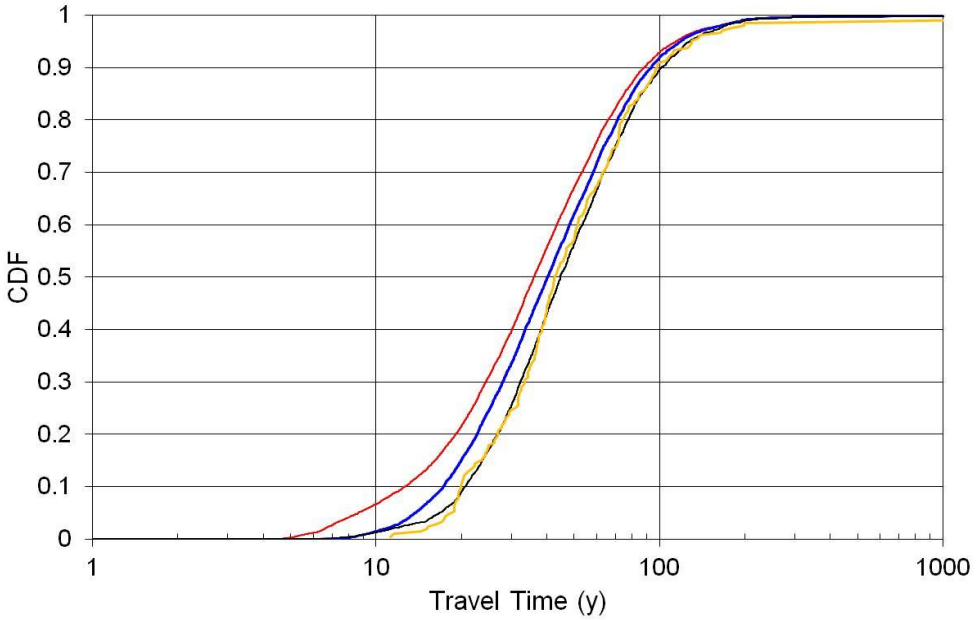


図 3.3.1-9　測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた地下水移行時間の累積分布の変化
赤：全移行経路
青：1×10^{-7} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（1 ヶ所）からの移行経路を除外
黒：1×10^{-8} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（6 ヶ所）からの移行経路を除外
黄：1×10^{-9} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（16 ヶ所）からの移行経路を除外

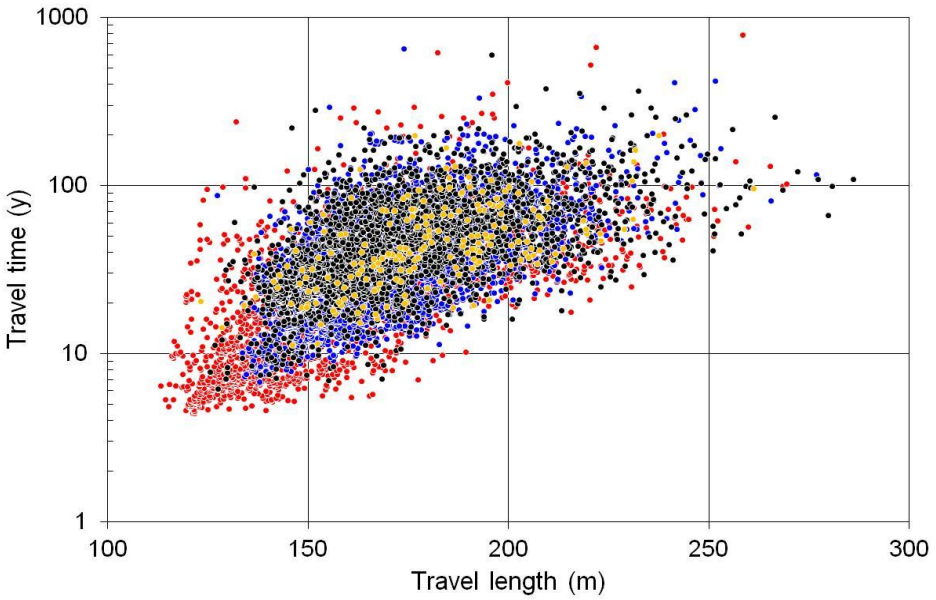


図 3.3.1-10　測線に交差する割れ目の透水性分類ごとの移行距離と移行時間の分布
赤：1×10^{-7} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（1 ヶ所）からの移行経路
青：1×10^{-8} m^2/s 以上 1×10^{-7} m^2/s 未満の透水性を有する割れ目（5 ヶ所）からの移行経路
黒：1×10^{-9} m^2/s 以上 1×10^{-8} m^2/s 未満の透水性を有する割れ目（10 ヶ所）からの移行経路
黄：1×10^{-9} m^2/s 未満の透水性を有する割れ目（11 ヶ所）からの移行経路

3.3.2　SR-Site の情報を用いた検討

3.2.1 項では，SR-Site の事例調査に基づき，特定の岩盤領域（FFM02，FFM01m）を対象に水理地質構造モデル構築に必要なデータセットを整理するとともに，水理地質構造モデルの構築に必要なパラメータ値を整理した。その際，透水量係数分布の設定方法の選択にかかわる不確実性を考慮するために，複数の代替ケースを設定した。本項では，まず一次元モデルの適用例として，SR-Site のデータセットを直接用いた場合（無相関ケース）と，3.2.1 項で設定した透水量係数分布を用いた場合（ケース C）について，地下水移行時間の評価の試行を行った。さらに，三次元モデルの適用例として，それぞれの代替ケースで構築した三次元亀裂ネットワークモデルを用いて地下水移行時間の試行を行った。透水量係数分布の設定については，SR-Site で示されている準相関モデル，無相関モデル，そして 3.2 節で提示した三つの代替的な設定方法の合計５ケースを対象にそれぞれ評価の試行を行った。ここでは，準相関モデル，無相関モデル，ケース C の結果について述べる。なお, 三次元モデルを用いた全てのケースの解析結果をまとめて付録Ｃに示す。

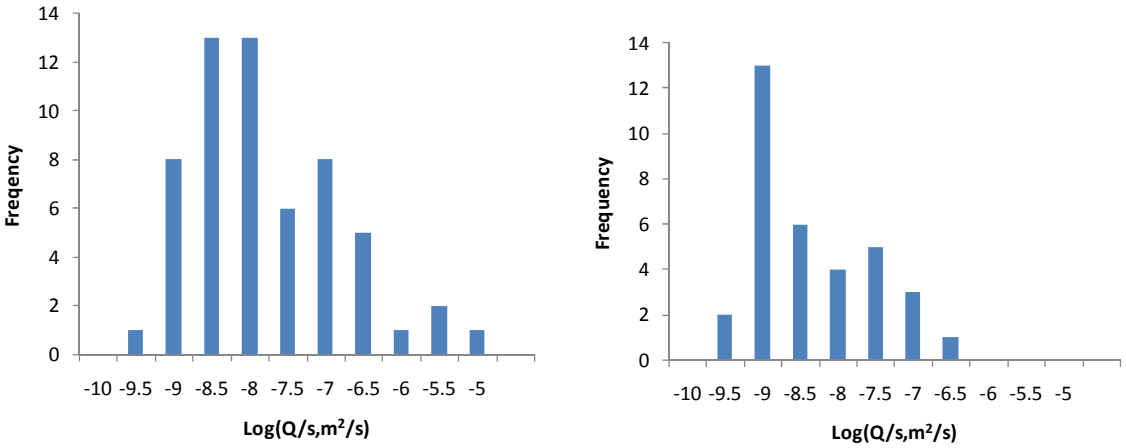
(1) 一次元モデルを用いた場合

SR-Site の事例に基づき作成したデータセットの一例として，PFL-f 試験から求められた比湧水量の分布を図 3.3.2-1 に示す。これらの比湧水量が透水量係数に等しいと仮定して透水量係数の値に換算する。3.3.1(1)項で例示したようにそれぞれ 100m の独立した移行経路を仮定して，地下水移行時間を求めた。割れ目の開口幅 2b は，SR-Site の設定に準拠して，次式のように透水量係数 T の平方根に比例していると仮定した。

$$2b = 0.5T^{0.5}$$

算出した地下水移行時間の累積頻度を図 3.3.2-2 に示す。透水量係数分布の分布として SR-Site の無相関ケース, 3.2.1 項で検討したケース C の透水量係数分布の対数平均値と標準偏差の値を表 3.3.2-1 に示す。これらの透水量係数の分布を用いて，図 3.3.1-2 と同様の方法で地下水移行時間の累積頻度を求めた（図 3.3.2-3 参照）。図 3.3.2-1 によれば FFM01m 領域より FFM02 領域の方が相対的に湧水箇所が多く，高い透水性を有する湧水箇所が多い。一次元モデルによる地下水移行時間の評価結果では，SR-Site の無相関ケースとケース C の透水量係数分布の対数平均値と標準偏差の差を反映して，FFM02 領域では SR-Site の無相関ケースの方が地下水移行時間の平均値が相対的に短くばらつきは小さい。一方，FFM01m 領域ではケース C の方が地下水移行時間の平均値が相対的に短くばらつきは大きい。

以上のように，一次元モデルによる評価の場合には，得られた地下水移行時間のバラツキは，データセットや推定した透水量係数の分布のバラツキの影響を直接受けることがわかる。これは，一次元モデルによる評価手法は移行経路としてそれぞれ独立した均一の長さ（ここでは 100m を仮定）を仮定していることに起因している。



(a) FFM02 領域　　(b) FFM01m 領域

図 3.3.2-1　PFL-f 試験により検出された割れ目の比湧水量(Q/s)の頻度分布

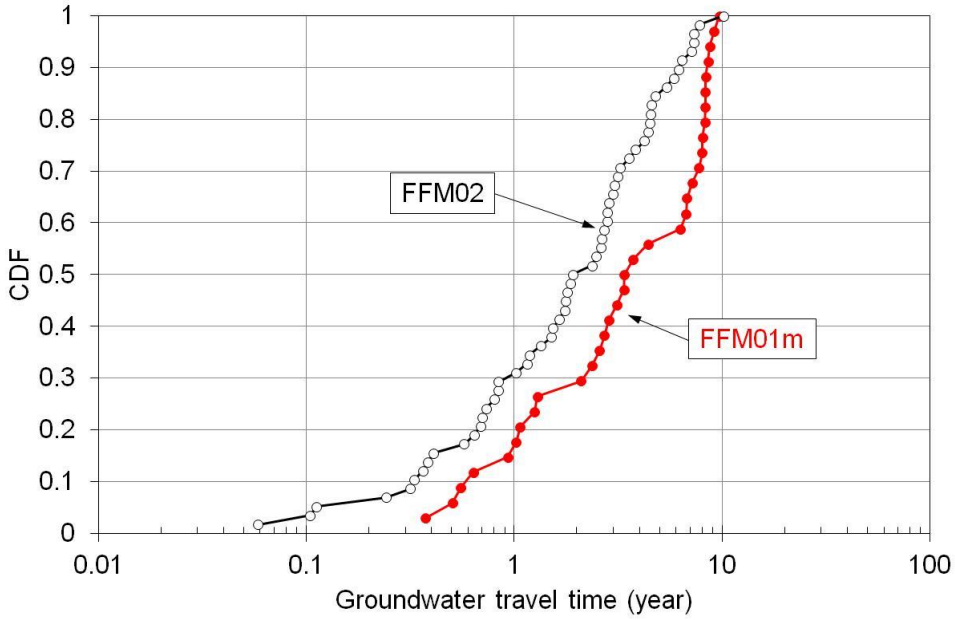
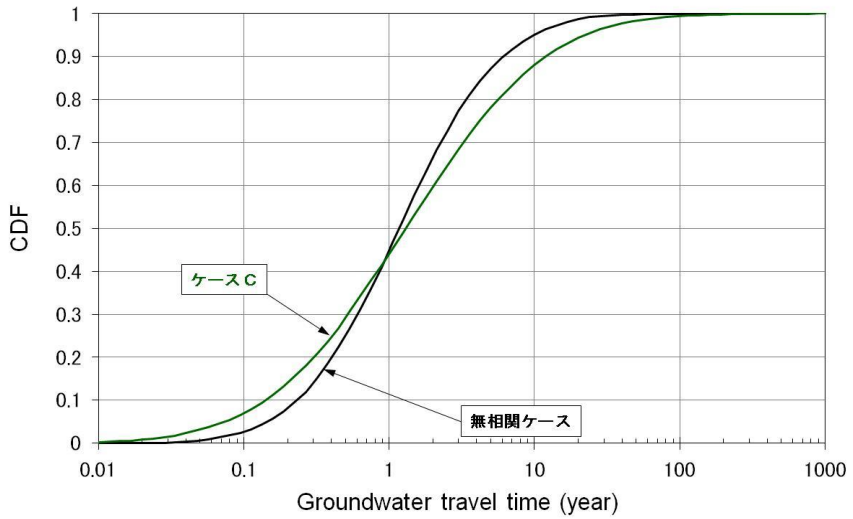


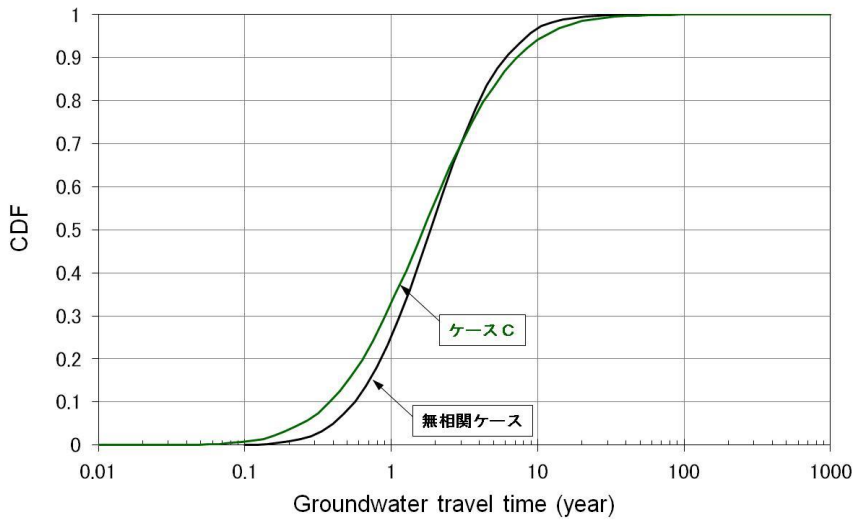
図 3.3.2-2　SR-Site の事例のデータセットを用いた一次元モデルによる地下水移行時間の累積分布

表 3.3.2-1　SR-Site における無相関ケースと代替ケースＣの透水量係数分布

ケース	岩盤領域	対数値の平均値	対数値の標準偏差
無相関ケース	FFM02	-7.1	1.1
	FFM01m	-7.5	0.8
ケースＣ	FFM02	-7.20	1.50
	FFM01m	-7.40	1.00



(a) FFM02 領域



(b) FFM01m 領域

図 3.3.2-3　SR-Site における無相関ケースと代替ケースの透水量係数分布を用いた一次元モデルによる地下水移行時間の累積分布

(2) 三次元モデルを用いた場合

本項では，FFM02，FFM01m の二つの領域について，3.3.1 項で実施した三次元モデルを用いた方法と同様の方法を適用して地下水移行時間を求めた。ここでは，SR-Site で用いられた透水量係数の分布のうち，“準相関モデル”と“無相関モデル”のケースと 3.2.1(4)で検討した三つの代替的な透水量係数分布のケースＣを用いた検討結果について述べる。なお，全てのケースの解析結果を付録Ｃにまとめて示す。

解析条件は，3.3.1 (2)と同様に，それぞれのケースについて 10 個のリアライゼーションを対象にシミュレーションを実施した。HydroDFN モデルのうち，割れ目のネットワーク構造に関するパラメータ（割れ目方位，半径分布，密度等）を表 3.3.2-2 および表 3.3.2-3 に示す。

解析結果については，以下の視点で考察を行った。

・透水量係数分布モデルが地下水移行時間の算定結果に与える影響
・複数のリアライゼーション間の地下水移行時間のばらつき
・測線に交差する割れ目の透水性が地下水移行時間に与える影響

表 3.3.2-2　FFM02 領域に用いられた HydroDFN モデルのパラメータ値

セット	卓越方位 (傾斜方位, 傾斜) Fisher 係数	割れ目半径分布 べき乗数 (r_0=0.038)	密度 P_{32}	透水量係数分布 T
NS	(293, 86) 24.6	2.58	0.49	SR-Site 準相関モデル： $(a, b, \sigma_{log(T)})$ $=(9.0\times10^{-9}, 0.7, 1.0)$ SR-Site 無相関モデル： $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) = (-7.1, 1.1)$ ケース A モデル $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) =$ $(-7.17, 1.43)$ ケース B モデル $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) =$ $(-7.18, 1.50)$ ケース C モデル $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) =$ $(-7.20, 1.50)$
NE	(328, 86) 15.2	2.58	0.59	
NW	(63, 82) 15.2	2.58	0.42	
EW	(12, 87) 18.3	2.58	0.07	
HZ	(349, 3) 15.8	2.58	2.50	

表 3.3.2-3　FFM01m 領域に用いられた HydroDFN モデルのパラメータ値

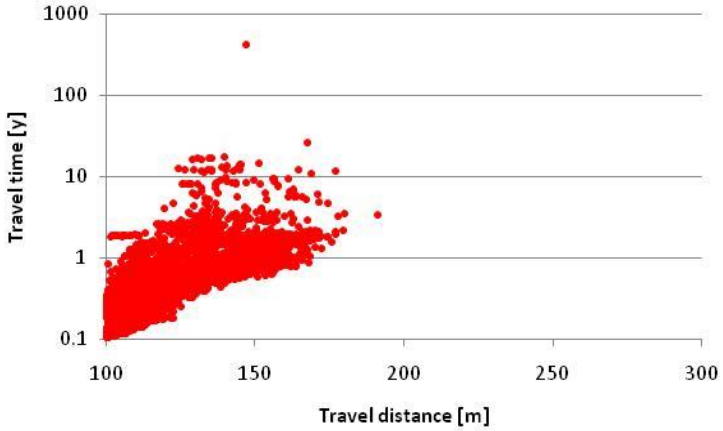
セット	卓越方位 (傾斜方位, 傾斜) Fisher 係数	割れ目半径分布 べき乗数 (r_0=0.038)	密度 P_{32}	透水量係数分布 T
NS	(113, 89) 22.2	2.58	0.24	SR-Site 準相関モデル： $(a, b, \sigma_{log(T)})$ $=(1.3\times10^{-9}, 0.5, 1.0)$ SR-Site 無相関モデル： $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) = (-7.5, 0.8)$ ケース A モデル $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) =$ $(-7.34, 1.22)$ ケース B モデル $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) =$ $(-7.35, 1.00)$ ケース C モデル $(\mu_{log(T)}, \sigma_{log(T)}) =$ $(-7.40, 1.00)$
NE	(324, 88) 21.5	2.58	0.32	
NW	(65, 87) 25.7	2.58	0.14	
EW	(0, 88) 25.7	2.58	0.03	
HZ	(18, 5) 15.2	2.58	0.56	

(i)　透水量係数分布モデルが地下水移行時間の算定結果に与える影響

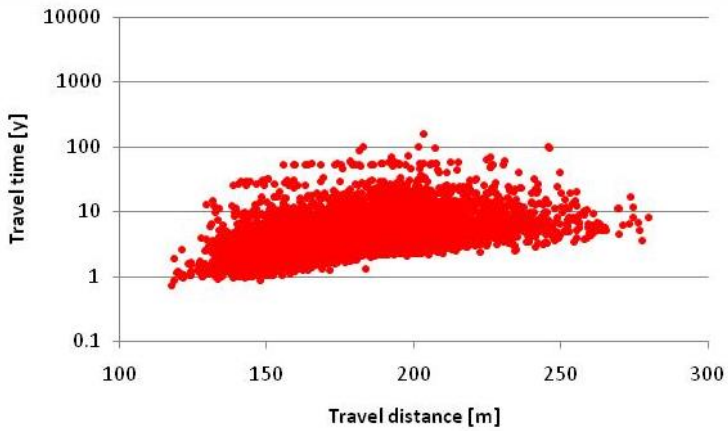
三つのケースの割れ目の透水量係数分布を用いて，FFM02 領域と FFM01m 領域を対象にした粒子追跡法により算定した地下水移行時間と移行距離の相関関係をそれぞれ図 3.3.2-4 および図 3.3.2-5 に示す。これらの図は，10 個のリアライゼーションのうちの一つのリアライゼーションの解析結果の例を示したものである。これらの図は割れ目のネットワーク構造は同じだが，割れ目の透水量係数分布（個々の割れ目の透水量係数の設定値）の異なるケースによる解析結果を示している。

FFM02 領域を対象とした解析では，SR-Site 準相関のケースが他のケースに比べて地下水移行距離，移行時間ともに短く，正の相関を示している。準相関のケースは大きな割れ目が高い透水量係数を有する確率が高いために，測線から下流側境界へ至る経路を形成しやすい大きな割れ目が高い透水量係数を有し，移行距離と移行時間ともに短くなるためと考えられる。一方，無相関ケースは移行距離のバラツキが大きくなっている。これは，割れ目の大きさに無相関に透水量係数が設定されるために，割れ目が交差した場合，交差している割れ目の透水量係数に応じて移行経路が迂回する確率が相対的に高くなるためと考えられる。この無相関ケースに比べて，代替的な透水量係数分布のケースＣは移行時間がさらにばらつく傾向がある。これは，透水量係数のバラツキ（対数標準偏差）が無相関ケースに比べて大きいためと考えられる。

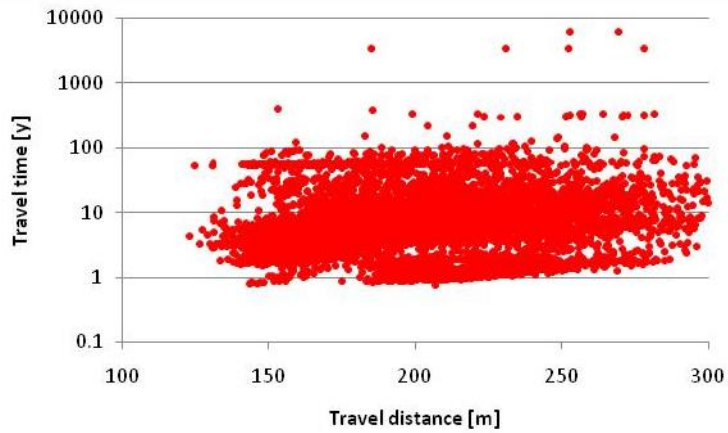
FFM01m 領域を対象としたケースでは，準相関ケースが他のケースや FFM02 の準相関ケースに比べて，移行距離の最小値が若干長く，移行時間も他のケースに比べて長い傾向を示している。これは，FFM01m 領域は割れ目の頻度が FFM02 領域に比べて相対的に小さいために，測線に交差する割れ目が少ないためと考えられる。このリアライゼーションの例では，測線に交差する割れ目がら下流側境界へ至る経路を形成する割れ目が相対的に小さく，結果として移行距離と移行時間が長くなったと考えられる。無相関ケース等の他のケースでは，測線から下流側境界へ至る経路を形成する割れ目の透水量係数が割れ目の大きさに依存せずに設定されたため，短い移行距離と移行時間の組み合わせを含めて相対的に大きくばらつく結果が示されたと考えられる。



(a) SR-Site 準相関

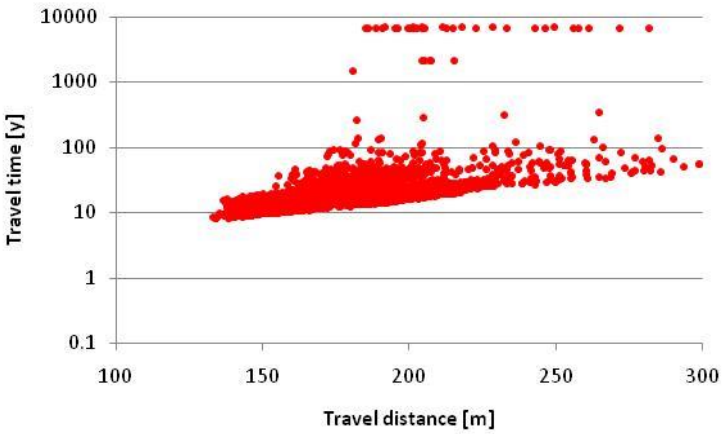


(b) SR-Site 無相関

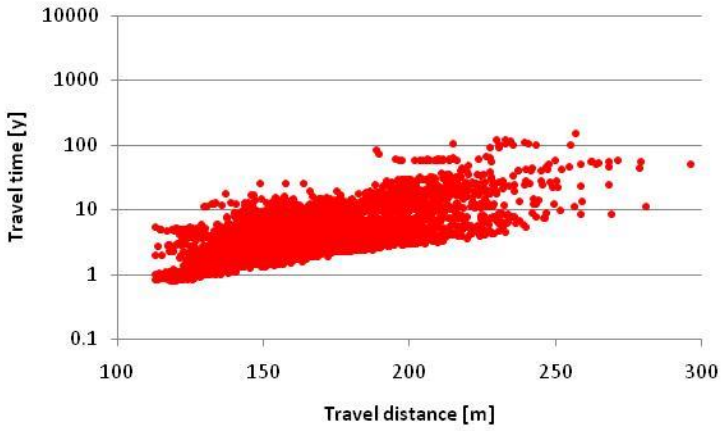


(c) ケース C

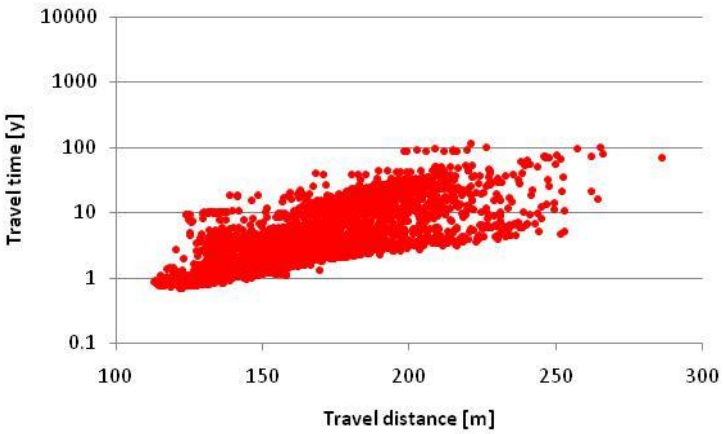
図 3.3.2-4　地下水移行距離と移行時間の相関図
（FFM02, 1 リアライゼーションの結果の例）



(a) SR-Site 準相関



(b) SR-Site 無相関



(c) ケース C

図 3.3.2-5　地下水移行距離と移行時間の相関図
（FFM01m, 1 リアライゼーションの結果の例）

FFM02 領域および FFM01m 領域を対象とした地下水移行時間の累積分布図をそれぞれ図 3.3.2-6 および図 3.3.2-7 に示す。FFM02 領域では，無相関ケースと代替ケースＣがほぼ同様の結果で，SR-Site 無相関ケースの方がバラツキが若干小さい。それらに対して，SR-Site 準相関ケースは極端に地下水移行時間が短いことがわかる。

FFM01m 領域を対象とした場合には，SR-Site 無相関ケースと代替ケースＣがほぼ同様の地下水移行時間分布を示しており，それに対して準相関ケースは地下水移行時間が極端に長いことがわかる。

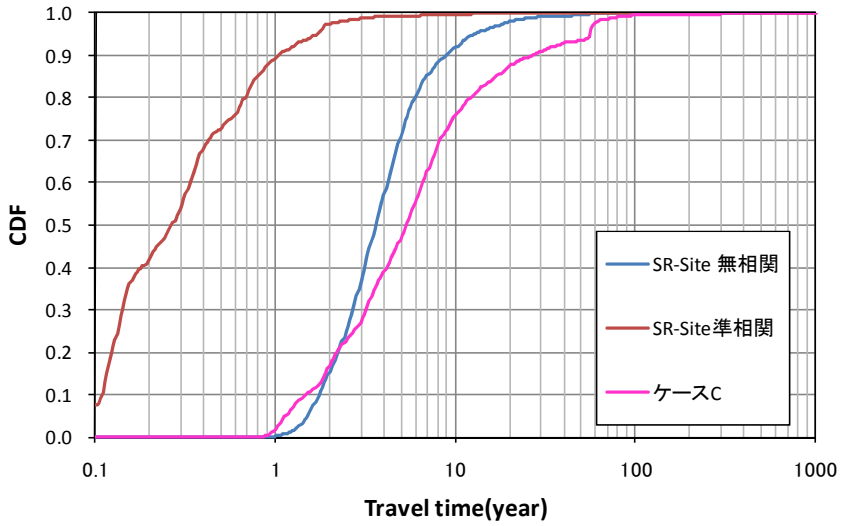


図 3.3.2-6　地下水移行時間の累積分布（FFM02,一つのリアライゼーションの結果例）

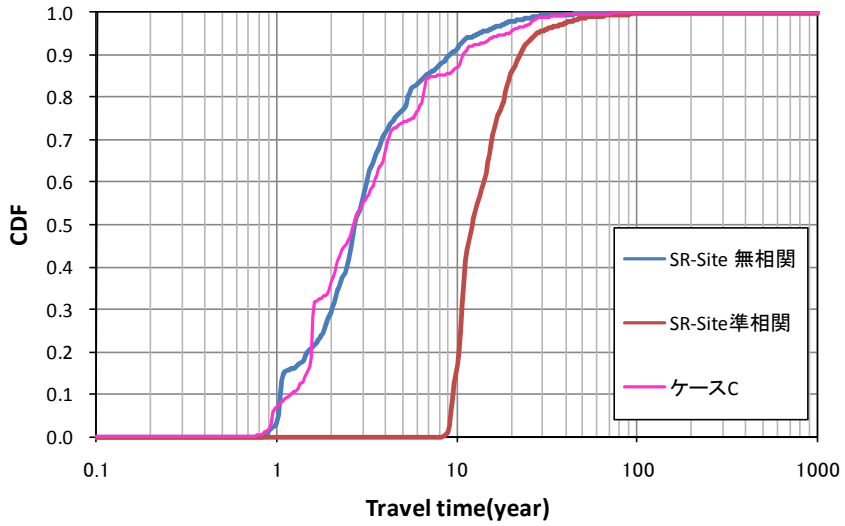


図 3.3.2-7　地下水移行時間の累積分布
（FFM01m,一つのリアライゼーションの結果例）

(ii)　複数のリアライゼーションによる地下水移行時間の評価

FFM02 領域および FFM01m 領域を対象に三つの透水量係数設定ケース（SR-Site 準相関, SR-Site 無相関，ケース C）の地下水移行時間の累積分布をそれぞれ図 3.3.2-8～図 3.3.2-13 に示す。これらの図では 10 個のリアライゼーションの結果を示している（ケース C の FFM01m 領域を対象としたケースは 9 個のリアライゼーション）。

全てのケースに共通して，FFM02 領域を対象としたケースが FFM01m 領域よりもリアライゼーション間の地下水移行時間の差異が小さい。FFM02 領域を対象としたケースのバラツキは中央値で一桁強の範囲に分布しているのに対して，FFM01m を対象としたケースでは中央値で３桁程度のバラツキが示されている。これは，FFM01m 領域では相対的に割れ目密度が小さいために，測線から下流側境界に至る経路を形成する確率が小さく，その経路の平均的な透水性に地下水移行時間の評価結果が大きく影響を受けるためと考えられる。対して，FFM02 領域は割れ目の密度が相対的に大きく，測線から下流側境界に至る経路を形成する数が多く，相対的にリアライゼーション間のバラツキが小さくなると考えられる。このような地下水移行時間のリアライゼーション間の差は，測線から下流側境界に至る経路と透水量係数の統計的な組み合わせのバラツキの影響を受けていると考えられる。その場合には，検討の対象とするリアライゼーションの数と評価対象とした値（ここでは地下水移行時間）の信頼区間の関係を適切に評価する必要がある（澤田ほか，1999，付録 H 参照）。

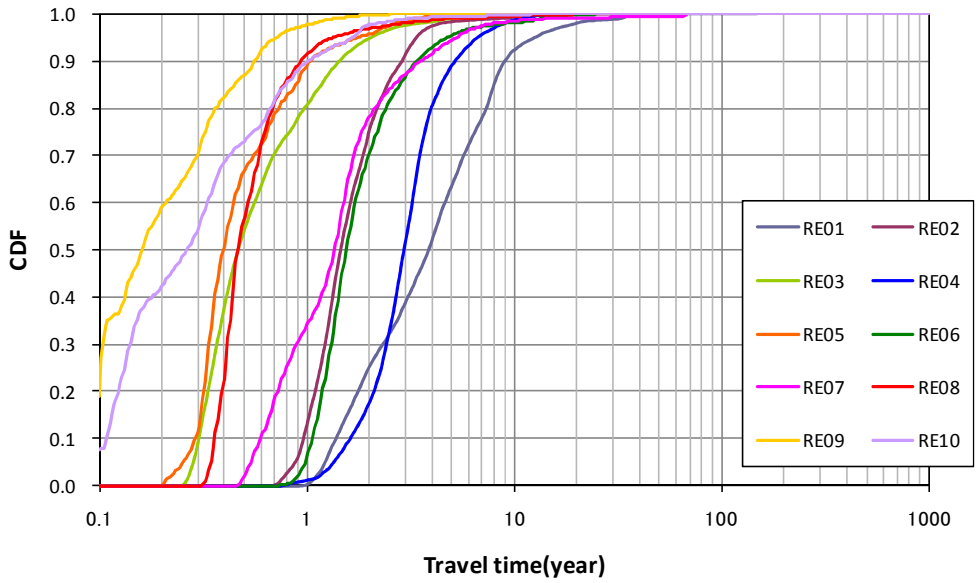
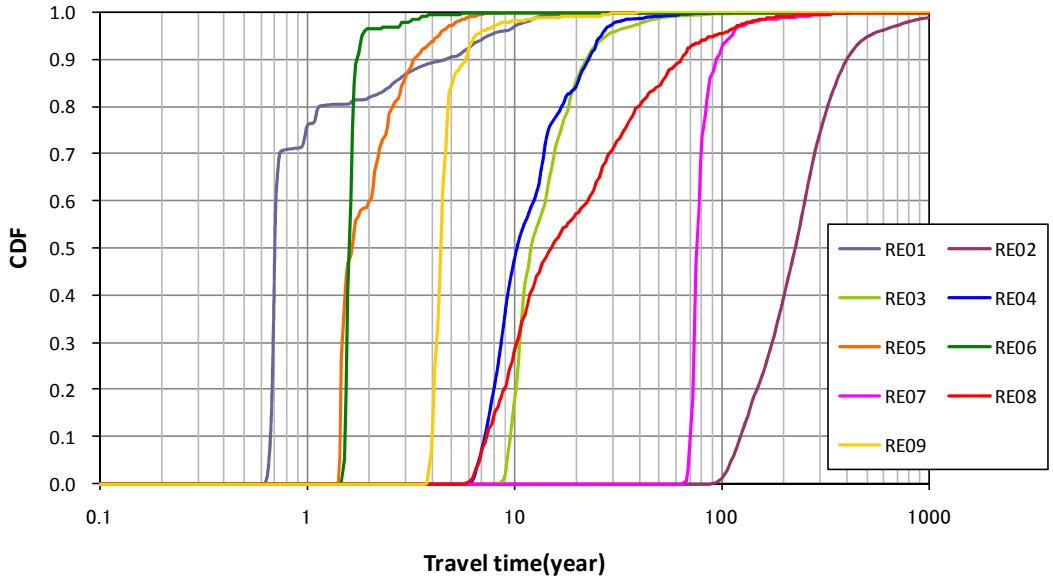


図 3.3.2-8　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 準相関, FFM02：10 個のリアライゼーションの結果の比較）



※　RE10 は下流側に連結する割れ目が存在しないため，同図にプロットされていない。

図 3.3.2-9　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 準相関, FFM01m：10 個のリアライゼーションの結果の比較）

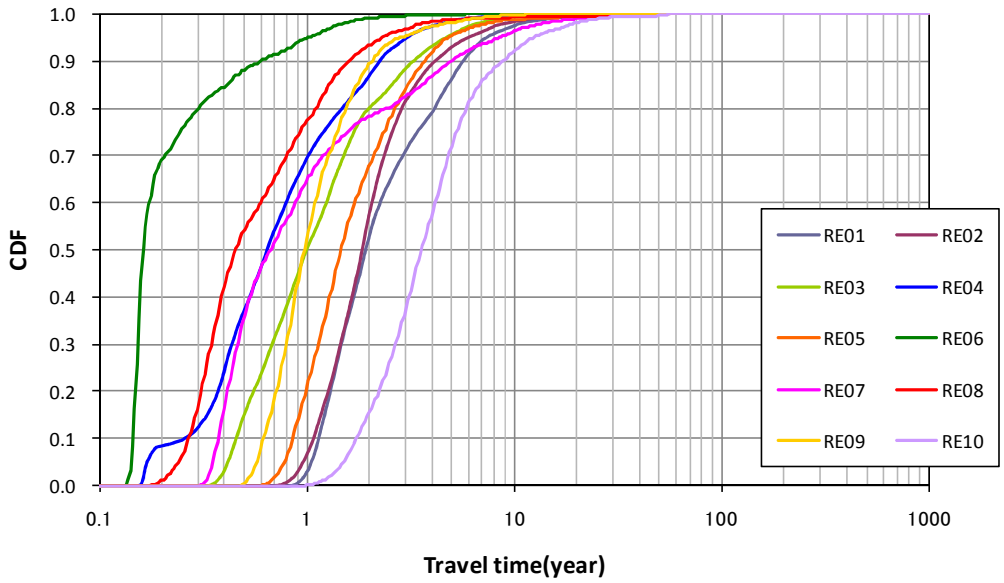
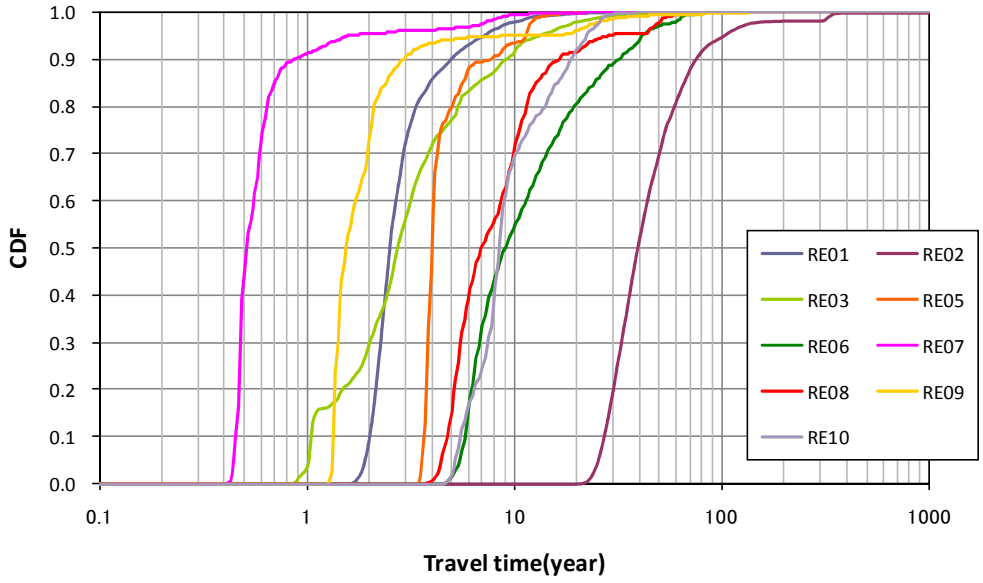


図 3.3.2-10　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 無相関, FFM02：10 個のリアライゼーションの結果の比較）



※　RE04 は下流側に連結する割れ目が存在しないため，同図にプロットされていない。

図 3.3.2-11　地下水移行時間の累積分布（SR-Site 無相関, FFM01m : 10 個のリアライゼーションの結果の比較）

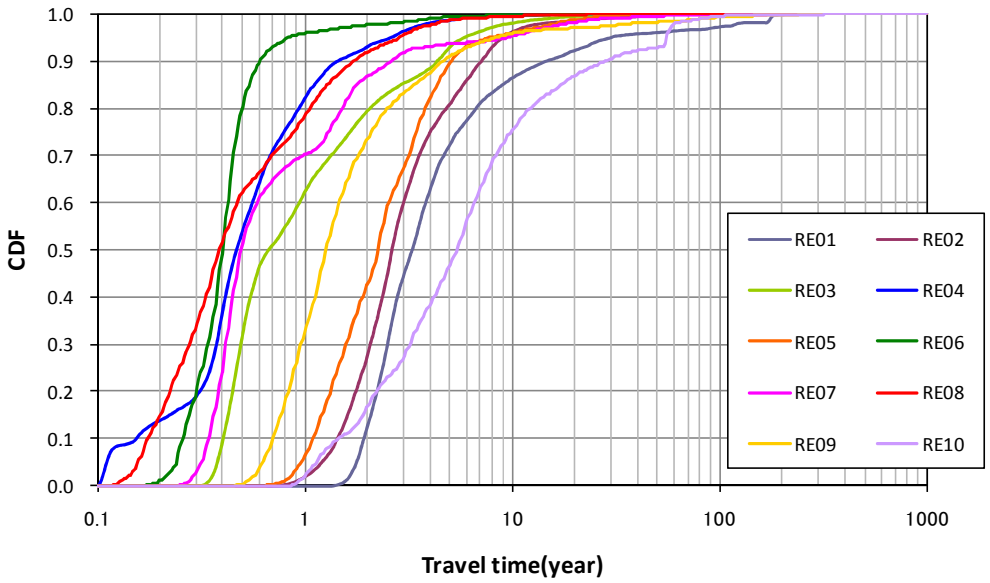
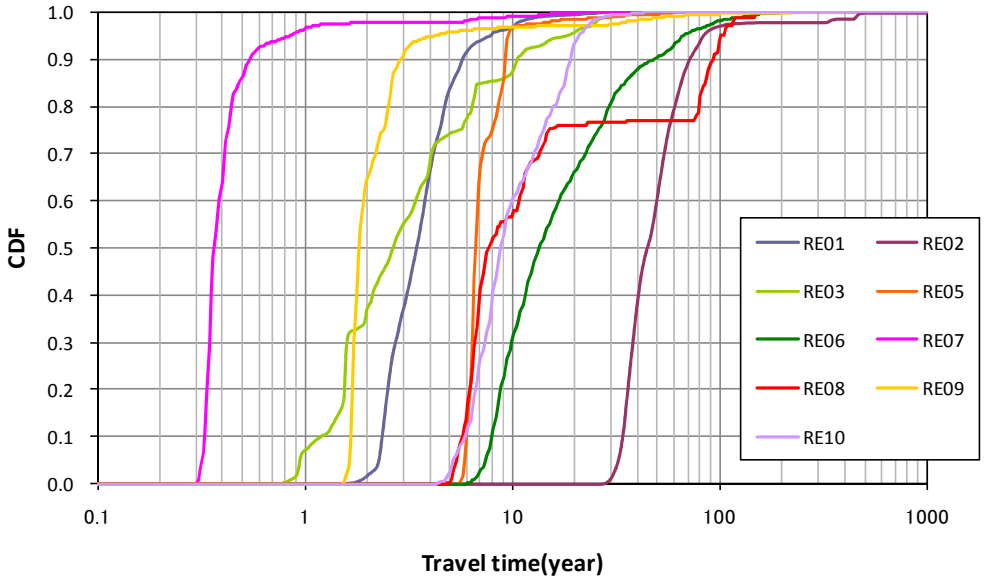


図 3.3.2-12　地下水移行時間の累積分布（ケース C, FFM02：10 個のリアライゼーションの結果の比較）



※　RE04 は下流側に連結する割れ目が存在しないため，同図にプロットされていない。

図 3.3.2-13　地下水移行時間の累積分布（ケース C, FFM01m：9 個のリアライゼーションの結果の比較）

(iii) 割れ目の透水性分類による地下水移行時間の評価

3.3.1 (2)で示した割れ目の透水性に応じた分類方法と同様に，測線をボーリング孔と想定し，一定の水頭差を設定した模擬的な水理試験から測線から外側境界へ連続した構造の透水量係数を求め，その透水量係数に応じて移行経路を分類した。FFM02 領域および FFM01m 領域を対象とした地下水移行時間の累積分布（ケースC，一つのリアライゼーションの例）を図 3.3.2-14 および図 3.3.2-15 に，地下水移行距離と移行時間の関係図を図 3.3.2-16 および図 3.3.2-17 に示す。FFM02 領域，FFM01m 領域ともに $1\times10^{-7}m^2/s$ や $1\times10^{-8}m^2/s$ 以上の透水量係数を有する割れ目からの移行経路を評価対象から除外することにより，地下水移行時間が短い経路の数が相対的に少なくなり，地下水移行時間の中央値が長くなる傾向を示している。図 3.3.2-14 に示した FFM02 領域のケースでは，測線に交差する割れ目のうち，1×10^{-7} m^2/s 以上のものが５か所，1×10^{-8} m^2/s 以上のものが 14 か所（1×10^{-7} m^2/s 以上５か所を含む，図 3.3.2-18 参照）と高い透水性を有する割れ目が測線に交差する確率が高いことがわかる。一方，FFM01m 領域のケースでは，高い透水性を有する割れ目が測線に交差する確率が小さく，図 3.3.2-15 の場合には 1×10^{-9} m^2/s 以上のものが２か所（図 3.3.2-19 参照）であった。

FFM02 領域の場合は FFM01m に比べて亀裂密度が高いために，測線から下流側境界へ連続した経路が多く，1×10^{-8} m^2/s 以上の高い透水量係数を有する経路が多数交差する確率が高い。この場合には，これらの高い透水性を示す経路が測線（例えば処分坑道）と交差する頻度，間隔およびそれらをどのように避けるかといった工学的対策について総合的に検討することにより，岩盤がより高い性能を有していること(ここでは地下水移行時間がより長い)を示せると考えられる。FFM01m の場合は相対的に亀裂密度が低く，側線から下流側境界へ連続した経路の透水量係数の高低が地下水移行時間の評価結果に直接影響し，そのためにリアライゼーション間のバラツキが相対的に大きくなっている。しかしながら，FFM02 に比べて高い透水量係数を有する経路が交差する頻度が低いことから，その影響への工学的な対策が比較的容易な（より少なくて済む）領域であると考えられる。

以上の SR-Site の情報を用いた検討により，3.3.1 項での検討と同様に，一次元モデルによる評価手法は，地上からの調査段階等のデータ量が乏しい段階において，亀裂の透水量係数分布に着目することで，母岩の適性として地下水移行時間を概略的に評価できることを示した。一方、三次元モデルを用いた検討において，亀裂ネットワークモデルを構築する際に種々の仮定が，地下水移行時間の評価結果に大きな影響を及ぼすことを示した。例えば，透水量係数と亀裂サイズの相関性がある場合（準相関ケース）と無い場合（無相関ケース，ケースC）の違いが，一桁以上の地下水移行時間の違いを生じさせる結果が得られた（図 3.3.2-6 参照)。また，透水性割れ目の密度が小さくなると，測線（処分坑道を模擬した 100m の測線）から下流側境界へ至る透水経路が側線に交差する確率が小さくなり，評価対象としている 100m 程度のスケールで透水経路のサンプリング数が相対的に少なくなる。そのため，透水性割れ目の密度が小さくなると，亀裂ネットワークモデルのリアライゼーション間のバラツキが相対的に大きくなることがわかった（図 3.3.2-8～図 3.3.2-11 参照)。このような透水性割れ目の密度の大小は，割れ目の透水性分類による地下水移行時間の評価結果にも影響を及ぼすことを示した。透水性割れ目の密度が大きい場合には，3.3.1 項と同様に，高い透水性を示す経路が測線と交差する頻度と，およびそれらをどのように避けるかといった工学的対策が地下水移行時間の評価結果に及ぼす影響を示すことができた（図 3.3.2-14, 図 3.3.2-15 参照)。透水性割れ目の密度が小さい場合には，評価対象としている 100m

程度のスケールで高い透水量係数を有する経路が交差する頻度が相対的に低くなり，その影響への工学的な対策が比較的容易な（より少なくて済む）領域になると考えられる。

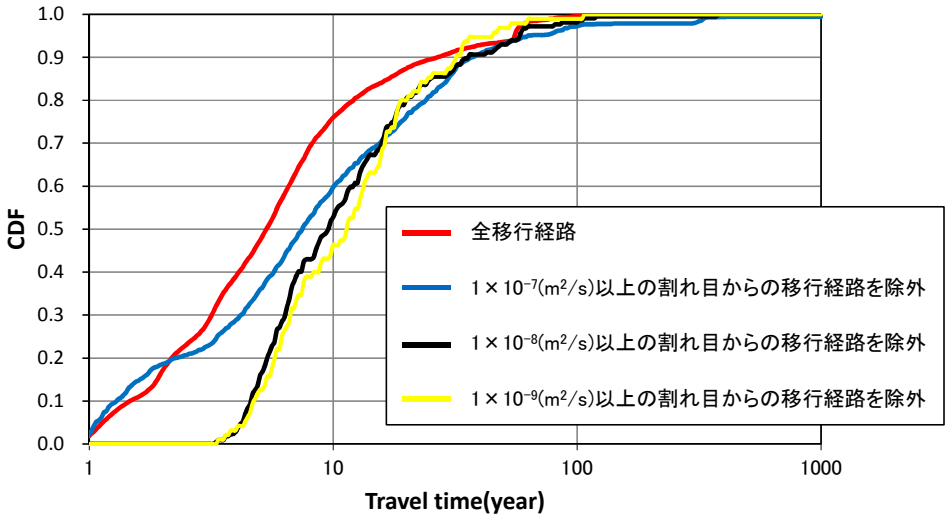


図 3.3.2-14　測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた地下水移行時間の累積分布の変化
（ケース C，FFM02，リアライゼーション RE10 の例）
赤：全移行経路
青：1×10^{-7} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（5 ヶ所）からの移行経路を除外
黒：1×10^{-8} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（14 ヶ所）からの移行経路を除外
黄：1×10^{-9} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（25 ヶ所）からの移行経路を除外

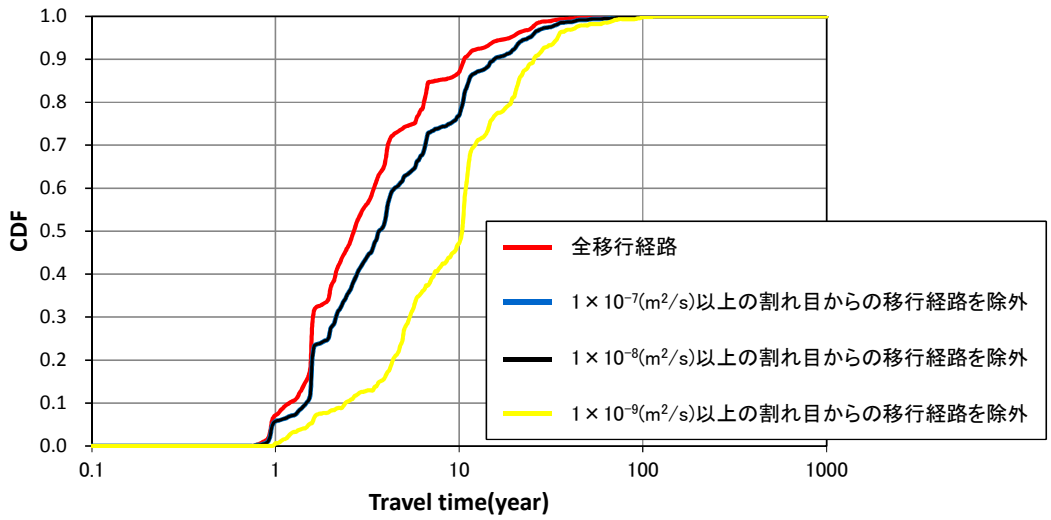


図 3.3.2-15　測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた地下水移行時間の累積分布の変化
（ケース C，FFM01m，リアライゼーション RE03 の例）
赤：全移行経路
青：1×10^{-7} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（1 ヶ所）からの移行経路を除外
黒：1×10^{-8} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（1 ヶ所）からの移行経路を除外
黄：1×10^{-9} m^2/s 以上の透水性を有する割れ目（2 ヶ所）からの移行経路を除外
（青と黒はほぼ同じ線で示されている）

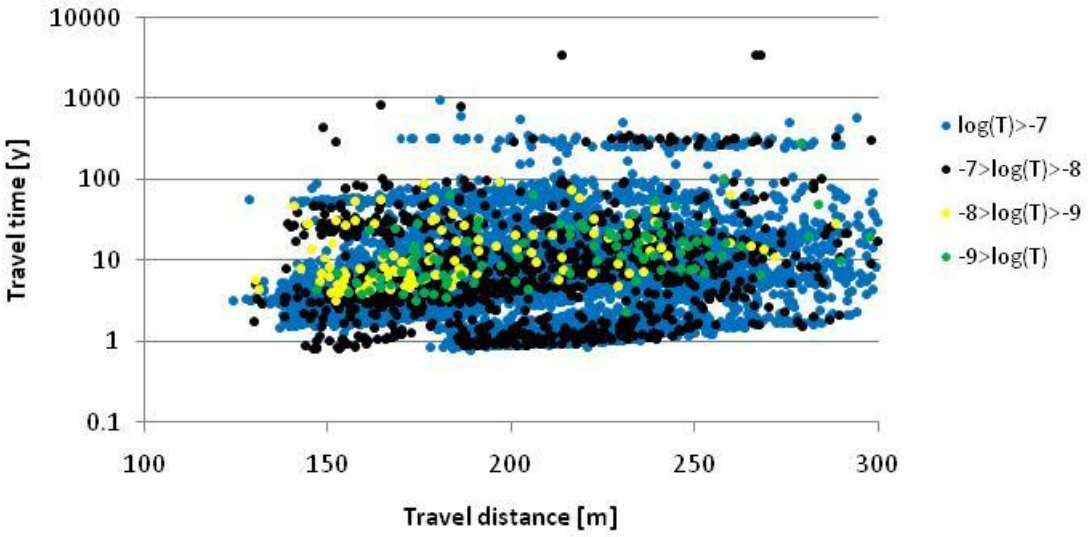


図 3.3.2-16　測線に交差する割れ目の透水性分類ごとの移行距離と移行時間の分布（ケース C, FFM02, リアライゼーション RE10 の例）

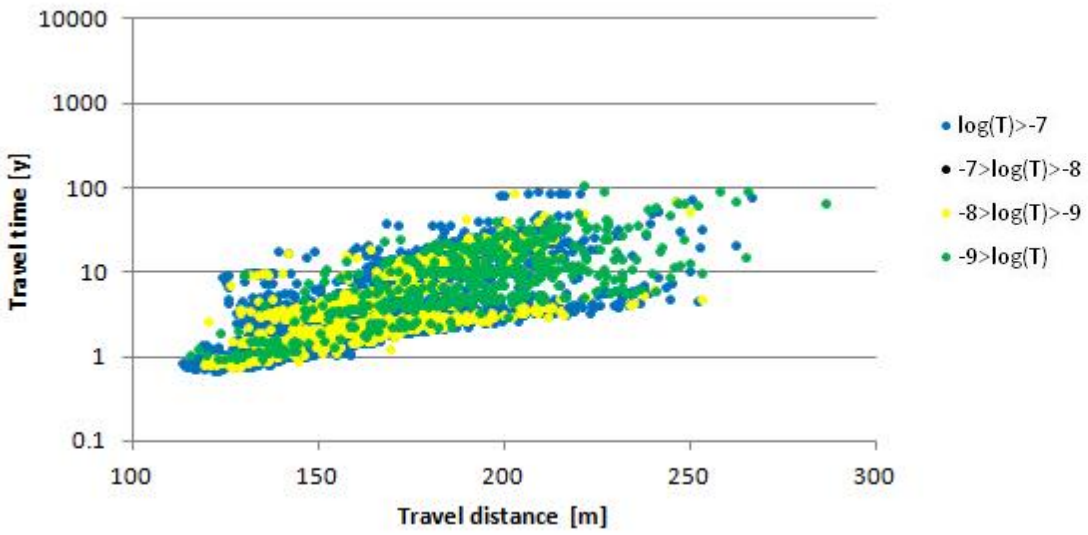


図 3.3.2-17　測線に交差する割れ目の透水性分類ごとの移行距離と移行時間の分布（ケース C, FFM02, リアライゼーション RE03 の例）

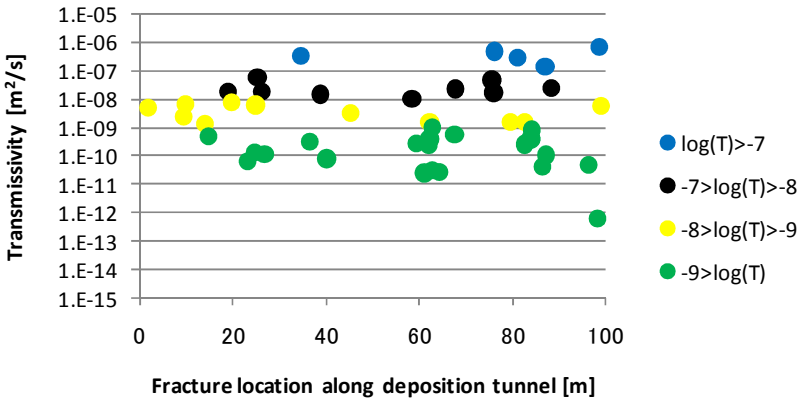


図 3.3.2-18　測線に交差する割れ目の位置と透水量係数
（ケース C，FFM02，リアライゼーション RE10 の例）

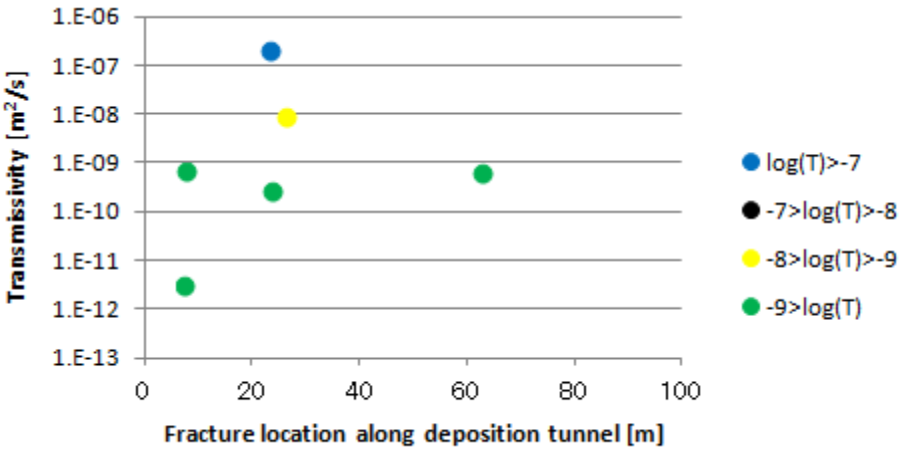


図 3.3.2-19　測線に交差する割れ目の位置と透水量係数
（ケース C，FFM01m，リアライゼーション RE03 の例）

3.4　まとめと今後の課題

3.4.1　まとめ

本検討では，母岩としての適性を評価するための項目のうち，母岩の水理特性の評価手法に関する知見の整理を進めた。

まず，スウェーデン SKB の SR-Site の情報に基づき，結晶質岩を対象とした水理地質構造モデルの構築手法や不確実性の取り扱いに関する調査を行った。具体的には，(1)モデル構築に活用された地質環境調査データ，(2)GeoDFN モデル化手法，(3)HydroDFN モデル化手法に関する情報を整理した。さらに，それらの情報に基づき水理地質構造モデルの構築を試行し，透水量係数の設定手法の違いによる不確実性について検討した。SR-Site では「水理的に連続している割れ目」を水理地質構造モデルに取り込むために PFL-f 試験のデータを重視し，これを再現できる割れ目の大きさ，密度，透水量係数の各パラメータの組み合わせを推定している。これは，透水性に寄与する構造の空間的広がり，頻度，およびその透水性を推定するための一つの方法であるが，求められたパラメータ値の不確実性は大きい。本検討では，代替的な方法として透水試験（PSS）のデータを用いた複数の異なる方法に基づき透水量係数分布のパラメータを推定し，PFL-f 試験による実測の比湧水量の合計値を用いてそれらを補正した。その結果，SR-Site に示されたものとほぼ同様な透水量係数分布が得られた。このことから，PFL-f 試験のデータを活用することにより，その他のデータやパラメータ推定手法の選択に起因する不確実性の影響を相対的に小さくできることが明らかになった。

評価ツリーの整備拡充については，SR-Site の事例調査と水理地質構造モデル構築の試行結果に基づき，結晶質岩を対象とした地下水移行時間に関する評価手法を取りまとめた。また，地下水移行時間以外の評価項目を対象とした場合の検討として SR-Site で用いられている緩衝材と岩盤の接触面における等価流量（Q_{eq} 値）と処分孔への許容湧水量の二つの項目に関する評価手法を整理して評価ツリーにまとめた。これらの検討により，様々な評価項目に対して，評価ツリーに基づき適切に評価を行うことができる見通しが得られた。また，堆積岩地域を対象とした場合については，幌延深地層研究計画の研究成果等に基づき，地下水移行時間に関する評価ツリーの整備を進めた。その際，結晶質岩地域と同様に一次元モデルを用いた方法と三次元モデルを用いた方法に大別して整理するとともに，評価対象となる堆積岩の物質移行モデル上の扱いとして多孔質媒体モデル，亀裂性媒体モデル，二重透水モデルの複数の扱い方に区別した整理を試みた。その結果，堆積岩を対象とした基本的な評価ツリーを初めて整備することができた。

さらに，評価ツリーに整理した一次元モデルを用いた方法と三次元モデルを用いた評価手法の適用事例として，第２次取りまとめのレファレンスケースに基づいた検討を行った。また，SR-Site のデータに基づき構築した水理地質構造モデルを用いた評価の試行を行った。その結果，一次元モデルを用いた方法は透水量係数の分布に基づき簡便かつ保守的に母岩の性能を評価できる可能性が示された。また，三次元モデルを用いた方法により，高透水性の構造が坑道等に遭遇する頻度やその地下水移行時間等の遅延性能に関する指標について評価できる可能性が示された。実際の概要調査にあたっては，以上のような検討を行うことにより，「廃棄体を定置するのが相対的に好ましくない場所」を考慮した岩盤規模の検討や，調査計画（手法，仕様，性能等）の立案における，地質環境の調査，処分場の設計・施工，安全評価の各分野の有機的な連携の議論に資することができると考えられる。

3.4.2　課題と今後の計画

本検討により，わが国における代表的な岩種である結晶質岩および堆積岩における地下水移行時間を評価項目とした場合の評価ツリーを整備し，結晶質岩については，具体的なデータに基づく評価の試行を通じてその有用性を確認することができた。 しかしながら，これらの評価ツリーは，第２次取りまとめや深地層の研究所計画等における様々な知見や SR-Site の事例調査に基づき整理したものであり，十分に網羅的とはいえない。また，評価ツリーはツリー構造を利用した複数の評価手法を整理したものであるが，いわゆる「決定木」ではない。決定木として利用するためには，より網羅的に評価手法を整理するとともに，それらの手法はより一般化されたものとする必要がある。今後，評価ツリーをより実用的なものとするためにも，より幅広い事例調査による拡充を進めつつ，手法の一般化について検討する。また，その「使用方法の例示」として，2012 年度に引き続き SR-Site の情報を活用し，代替モデルの適用や地下水移行時間以外の項目の評価に関する試行をより幅広く行う。

2012 年度新たに構築した堆積岩地域を対象とした評価ツリーについては，具体的なデータに基づいた適用方法に関する検討を進める。

さらに，現在 NUMO で検討している概要調査の各段階（フェーズ）で適用される調査手法と，調査により得られる情報に対する見通し等，具体的な調査プログラムと連携した評価手法の検討を進めることが重要である。

参考文献（3 章）

Andersson, J., Ström, A., Svemar, C., Almén, K.-E. and Ericsson, L. O (2000): “What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation”, SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

江橋健，窪田茂，黒澤進，後藤淳一，後藤考裕，石井英一，稲垣学，守屋俊文，鈴木覚，大井貴夫，市原貴之，石田圭輔，石黒勝彦，土宏之，柴田雅博，澤田淳，舘幸男，牧野仁史，早野明，三ツ井誠一郎，谷口直樹，小田治恵，北村暁，大澤英昭，仙波毅，日置一雅，亀井玄人（2012）：概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化 ― NUMO-JAEA 共同研究報告書（2011 年度）―，NUMO-TR-12-03, 原子力発電環境整備機構（JAEA-Research 2012-032，日本原子力研究開発機構）.

Florberger J., Hjerne C. Ludvigson Jan E. Walger E. (2006): Single-hole injection tests in borehole KFM01D. Forsmark site investigation, SKB P-06-195, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin S. (2008):Bedrock hydrogeology Frsmark. Site descriptive modeling. SDM-Site Forsmark., SKB R-08-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin, S., Levén, J., Hartley, L., Jackson, P., Joyce, S., Roberts, D., Swift, B., (2007): Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modeling stage 2.2., SKB R-07-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也（2009）：新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか？，応用地質，Vol.50 No.4, pp.238-247.

Fox, A., La Pointe, P., Hermanson, J., Öhman, J. (2007): Statistical geological discrete fracture network model Forsmark modelling stage 2.2, SKB R-07-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.

早野明，澤田淳（2013）：ニアフィールド岩盤を対象とした核種移行遅延性能の評価手法に関する検討，JAEA-Research 2012-038.

Hjerne C., Ludvigson Jan E., Lindquist A. (2005): Single-hole injection tests in boreholes KFM06A and KFM06B. Forsmark site investigation, SKB P-05-165, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ishii, E., H. Sanada, H. Funaki, Y. Sugita, and H. Kurikami (2011), The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: An example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, J. Geophys. Res., 116, B09206, doi:10.1029/2011JB008279.

JNC (1999) : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－ 分冊 3 地層処分システムの安全評価”， JNC TN1400 99-23，核燃料サイクル開発機構.

Joyce, S., Applegate, D., Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Marsic, N., Follin, S. (2010): Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark., SKB R-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

操上広志，竹内竜史，薮内聡，瀬尾昭治，戸村豪治，柴野一則，原稔，國丸貴紀（2008）：幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究，土木学会論文集 C，Vol.64 No.3, pp.680-695.

La Pointe, P., R, Olofsson, I, Hermanson, J (2005): Statistical model of fractures and deformation zones for Forsmark: Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-26, Svensk

Kärnbränslehantering AB.

Ludvigson, Jan-E., Leven, J., Jonsson S. (2004): Single-hole injection tests in borehole KFM01A. Forsmark site investigation., SKB P-04-95, Svensk Kärnbränslehantering AB.

牧野仁史，澤田 淳，前川恵輔，柴田雅博，笹本 広，吉川英樹，若杉圭一郎，小尾 繁，濱 克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，三枝博光，竹内真司，岩月輝希，太田久仁雄，瀬尾俊弘 (2005) : “地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術□2 つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階（第 1 段階）における地質環境情報に基づく検討”，JNC TN1400 2005-021，核燃料サイクル開発機構.

Munier, R., Stigsson, M. (2007): Implementation of uncertainties in borehole geometries and geological orientation data in Sicada, SKB R-07-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

NUMO (2011) : “地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－”， NUMO-TR-11-01，原子力発電環境整備機構.

Olofsson, I., Simeonov, A., Stephens, M., Follin, S., Nilsson, A., Röshoff, K., Lindberg., K., Lanaro, F., Fredriksson, A., Persson, L. (2007): Site descriptive modeling Forsmark, stage 2.2, A fracture domain concept as a basis for the statistical modelling of fractures and minor deformation zones, and interdisciplinary coordination, SKB R-07-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

太田久仁雄，阿部寛信，山口雄大，國丸貴紀，石井英一，操上広志，戸村豪治，柴野一則， 濱克宏，松井裕哉，新里忠史，高橋一晴，丹生屋純夫，大原英史，浅森浩一，森岡宏之，舟木泰智，茂田直孝，福島龍朗（2007）: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第 1 段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」，JAEA-Research 2007-044.

Petersson, J., Wängnerud, A. (2003): Forsmark site investigation, Boremap mapping of telescopic drilled borehole KFM01A, SKB P-03-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Petersson, J., Skogsmo, G.,Berglund, J., Wangnerud, A., Strahle, A. (2005a): Boremap mapping of telescopic drilled borehole KFM06A and core drilled borehole KFM06B. Forsmark site investigation., SKB P-05-101. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Petersson, J., Skogsmo, G.,Berglund, J., Wangnerud, A., Danielsson, P.,Strahle, A.(2005b): Boremap mapping of telescopic drilled borehole KFM08A and core drilled borehole KFM08B. Forsmark site investigation., SKB P-05-203, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Petersson, J., Skogsmo, G., von Dalwigk, I., Wängnerud, A., Berglund, J. (2006): Boremap mapping of telescopic drilled borehole KFM01D. Forsmark site investigation., SKB P-06-132, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rouhiainen P., Pollanen J. (2003): Difference flow logging of borehole KFM01A. Forsmark site investigation., SKB P-03-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Rouhiainen P., Sokolnicki M. (2005): Difference flow logging in borehole KFM06A. Forsmark site investigation., SKB P-05-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

澤田淳，井尻裕二，坂本和彦，亘真吾 (1999) : “亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析”，JNC-TN8400 99-093，核燃料サイクル開発機構.

Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W.(2000): “Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi, Northeast Japan”, Engineering Geology, Volume 56, Issues 1–2, pp.75–96.

Selroos, J. and Follin, S. (2010): “SR-Site groundwater flow modeling methodology, setup and results”, SKB R-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

下茂道人，熊本創，小坂寛，尾上博則，三枝博光，水野崇，大山卓也（2012）：超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究); 研究坑道掘削に伴う地下水流動場及び地下水水質の変化を考慮した地下水流動のモデル化・解析（2008 年度），JAEA-Research 2012-004.

SKB (2008): “Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark”, SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010): “Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site”, SKB TR-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2011): “Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project”, SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sokolnicki M., Rouhiainen P. (2005): Difference flow logging in borehole KFM08A. Forsmark site investigation., SKB P-05-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ström, A., Almén, K.-E., Andersson, J., Ericsson, L. O and Svemar, C. (1999): “Geoscientific evaluation factors and criteria for siting and site evaluation. Progress report”, SKB R-99-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensson, U., Follin S. (2010):Groundwater flow modelling of the excavation and operation phases -Forsmark. SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Vaisasvaara J., Leppanen H., Pekkanen J. (2006): Difference flow logging in borehole KFM01D. Forsmark site investigation., SKB P-06-161, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Vomvoris, S., Andrews, R.W., Lanyon, G.W., Voborny, O., Wilson, W. (1996): “Methodology for Deriving Hydrogelogical Input Parameters for Safety-Analysis Models - Application to Fractured Crystalline Rocks of Northern Switzerland, Nagra Technical Report 93-14.

Walger E., Hjerne C., Ludvigson Jan E., Harrstrom J. (2006): Single-hole injection tests and pressure pulse tests in borehole KFM08A. Forsmark site investigation, SKB P-06-194, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wang, X., (2005): Stereological Interpretation of Rock Fracture Traces on Borehole Walls and Other Cylindrical Surfaces, Ph. D Dissertation Virginia Polytechnic Institute and State University.

山本卓也，下茂道人，藤原靖，服部弘通，名合牧人，田所照夫，中垣真一（2005）：幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6,7,8)のうち HDB-8 孔，JNC-TJ5400 2005-006，核燃料サイクル開発機構.

山本陽一，前川恵輔，横田秀晴，山崎雅則（2012）：幌延深地層研究計画における表層水理調査流域の水文諸量の空間分布及び地下水涵養量の推定;―2004 年 12 月～2009 年 11 月―，JAEA-Research 2011-042.

4. シナリオ構築手法に関する検討

4.1 はじめに

安全評価におけるシナリオは，地層処分システムの将来の挙動を記述し，その定量的な評価に必要なモデルの開発やデータ収集の枠組みを与えるものであり，安全評価の基盤となるものである。したがって，処分事業を進めるにあたっては，安全規制の動向，国際的な動向，わが国の地層処分事業の特徴を考慮しつつ，シナリオを効率的に構築できるよう継続して技術開発を進めて行くことが重要となる。

また,安全評価におけるシナリオは,地層処分システム全体の長期的な変遷を対象とするため，システムを構成する各要素が時間とともにどのように変化し，どのような状態となるかを記述する必要がある。本検討における議論では，地層処分システムがある評価時点（あるいは評価期間）において想定される熱的，化学的，物理的，水理学的な状態（初期状態とその変遷）を安全評価の観点から描いたものを“状態設定”と定義する。

本検討においては，2011 年度の共同研究（江橋ほか，2012）において検討した状態設定の基本的流れを出発点として，状態設定の具体的な試行を通じて，基本的流れの改良を行った。試行においては事例として緩衝材を対象として，FEP[1]に関する情報等も利用しながら，安全機能に影響を及ぼす要因の分析，要因となるプロセスの発生可能性の検討や不確実性等についても具体的に例示した。

安全評価においては，状態設定の検討によって得られる，安全機能の劣化や喪失の可能性，その環境条件への依存性等の分析に基づいて，安全評価シナリオの選択や類型化，あるいはパラメータの設定値の検討が行われる。本検討においては，このような一連のシナリオ構築作業を念頭におきつつ，シナリオ構築の重要な部分と考えられる，安全機能を基軸とした状態設定について検討を進めた。

また，これらの状態設定の試行の結果や知見について，透明性と追跡性の確保のための，作業経緯と使用した情報等の電子化について検討を行った。

さらに，シナリオ構築において必要となる個別現象に関する情報を，最新の知見を含めて整理した。本検討においては，人工バリアに関して，近年新しい知見が得られている，あるいは最近の諸外国の性能評価において議論されているという観点から，鉄ーベントナイト相互作用と緩衝材流出現象について文献調査による情報の整理を実施するとともに，2011 年度の共同研究において実施した調査結果から課題として抽出された，セメントーベントナイト相互作用とアルカリプルームのオーバーパックへの影響，およびガラス固化体近傍における溶存ケイ酸濃度変化の影響等を考慮したガラス溶解挙動について,モデルやパラメータの不確実性を考慮した解析を実施し，不確実性がそれぞれのバリアに期待されている性能に与える影響の程度を調べ，現象理解に関する情報の一部として整理するとともに課題の抽出を行った。

4.2 シナリオ構築の方法論の検討

シナリオ構築においては，国際機関で議論されている留意点（OECD/NEA，2001）に基づき，以下の点が重要と考えられている（NUMO，2011a)。

[1] 特性（Features)，イベント（Events)，プロセス（Processes）をそれぞれの頭文字をとって FEP と呼ぶ。

[1] 可能性のある全てのシナリオを列挙することは不可能であることから，重大な抜け落ちがないように合理的な十分性を有すること
[2] 評価に必要な情報を取りまとめることに加え，不足している知見の内容を明確化すること
[3] シナリオの構築過程や判断過程について透明性があり，方法や結果を追跡できること
[4] シナリオは，ステークホルダーとの対話におけるインターフェースとなりうること（ステークホルダーが理解しやすい表現や説明）
[5] 研究開発の優先度，データ取得，資金の配分に関わる意思決定に資すること

NUMO は，これらの留意点を踏まえ，FEP の整理に基づく既存のシナリオ構築手法（ボトムアップアプローチ）と，安全機能を基軸とした状態設定に基づくシナリオ構築手法（トップダウンアプローチ）とを組み合わせたアプローチにより，重大な抜け落ちがないように配慮し，合理的にシナリオを構築することとしている（NUMO，2011a）。また，NUMO は，分野の異なる専門家が議論する際の共通の枠組みとして，処分システムの状態変遷をシステム要素ごとに時間軸に沿って記述する“ストーリボード”を提案し，シナリオ構築プロセスにおける専門家の合意形成の支援やわかりやすさの向上を図っている。

一方，わが国における規制機関により，基本となる規制の考え方（原子力安全委員会，2004）や余裕深度処分を対象とした安全評価の考え方（原子力安全委員会，2010）が示されている。したがって，それらの報告書で示されたリスク論的な考え方を踏まえたシナリオ分類や，時間段階に応じた状態設定の考え方を考慮して，時間変遷を考慮すれば，どのようなシステムの状態が「発生可能性が高いシナリオ」に相当するのか，あるいは，どのようなシステムの状態が「発生可能性が低いシナリオ」に対応するのかについて，最新の科学的知見等を踏まえつつ，それらの論拠とともに把握しておく必要がある。

これらを前提として，2011 年度の共同研究（江橋ほか，2012）においては，① シナリオ構築では，例えばトップダウンアプローチとボトムダウンアップローチといった複数の作業が並行して進められることから，それらの関係をより明確にすること，② シナリオの不確実性の表現に適した方法をより明確にすること，③ 発生可能性の観点からのシナリオ分類について，その判断過程をより明確にすること，を念頭に置き，シナリオ構築のアプローチの具体化を試み，状態設定の基本的な流れが検討されている。

本検討では，具体的な情報を用いた試行を行うにあたり，以下の点に留意して，手順や情報の流れについて改めて検討を行った。

・作業の流れは複雑で，その手順は一意に決まるものではなく，相互に関連しながら繰り返し実施される作業であることから，作業項目を細分化して示すことは，必ずしも全体の作業の流れを分かりやすくすることにはならない。
・類似の作業が異なる視点で実施されたり，基本となる現象理解の情報が異なる視点や詳細度でいくつかの作業で利用されることがある。
・一方，実際の作業を行うにあたっては，利用する情報，作業の結果として創出する成果（例えば，図表等に整理された情報），成果の反映先等を明らかにしておくことが必要である。

検討の結果として，ある程度の作業のかたまりを一つのボックスとして示し，おおよその流れ

を示す“状態設定の基本手順”（図 4.2-1）と，この基本手順の各段階での作業内容と具体的な情報の流れを示す“作業・情報フロー”（図 4.2-2）の二つを提案することとした。

“状態設定の基本手順”において，Ⓐ“システムの初期状態”は，前提となる現在の地質環境条件，処分システムの構成，人工バリアの仕様等について記述する。“システムの初期状態”は，作業の前提となるものであるが，シナリオの検討やそれに基づく予備的な性能評価解析の結果のフィードバックによって，必要に応じて見直されることとなる。Ⓑは安全機能を出発点とするトップダウンアプローチの観点からの実施項目であり，地層処分システムにおいて確保すべき安全機能，バリア性能との対応についての一般的な整理に基づいて，検討対象とする処分システムに対して，安全機能とバリア性能との対応付けを進める。ⒸはFEPの整理を出発点とするボトムアップアプローチの観点からの実施項目であり，一般的なFEPカタログ，各FEPについての現象理解，FEPの相関に関する情報に基づいて，対象とする処分システムに対応したFEPリストおよびそれらの相関関係についての整理を行い，安全機能との対応についての検討を進める。そして，これら二つのアプローチを融合することで，検討の網羅性や十分性に留意しつつ，安全機能を支えるバリア性能とプロセスの関係，プロセスの発生に影響を及ぼす環境条件の整理，発生の確からしさに関する情報の整理等を進める。“作業・情報フロー”（図 4.2-2）では，“状態設定の基本手順”（図 4.2-1）との関係，およびこれらの作業を実施するにあたって利用する情報，作業の結果として創出する成果（例えば，図表等に整理された情報），成果の反映先等を示している。

本検討で提案するこれらの手順やフローは，定められた唯一の方法ということではない。適宜見直しを行いながら作業を進めて行くことが必要である。

なお，本検討の範囲は状態設定までとしているが，このような安全機能と対応付けた情報の整理を行うことにより，安全機能の喪失や劣化に基づいた，性能評価のためのシナリオの分類や設定に資する論拠が準備されることになる。

図 4.2-2 中の青字で示されている各段階での成果は，状態設定の根拠情報となる重要なコンテンツであり，4.4 項で議論する，品質管理のための情報の体系化において，管理対象の要素となるものである。

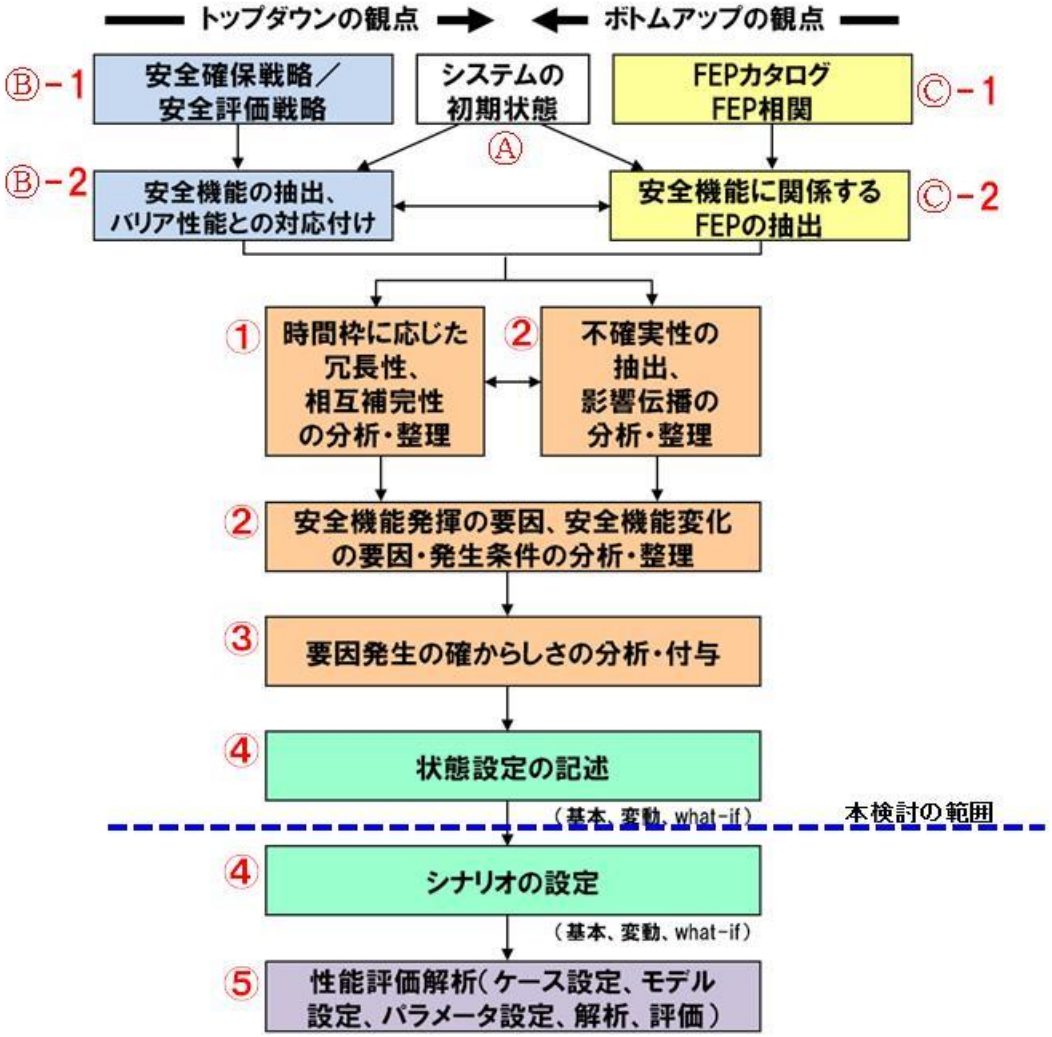


図 4.2-1 状態設定の基本手順

シナリオの構築において検討すべき対象は，地下深部の処分場から生物圏に到るまでのプロセスである。また評価対象期間についてカットオフが定められていない状況においては，地下水シナリオによる線量の最大値が現れる時期等を考慮して，少なくとも数十万年から数百万年程度の時間までを対象とした検討をしておくことが求められる。このような時間スケールにおいては，気候変動や隆起・侵食等の地質環境の長期的変動が考えられるため，これらの外的要因が処分システムに与える影響をシナリオ構築において考慮する必要がある。このためには，処分システム全体の時間的な変遷を俯瞰できるようなストーリボード（図 4.2-3）を用意し，シナリオに関する議論のスタートとすることが有効である。その上で，システム構成要素に着目した状態設定を行うためには，システム全体の場の変遷との関係に留意しつつ，着目するスケールに特化し，より詳細化したストーリボードを用いた検討が有効となる。

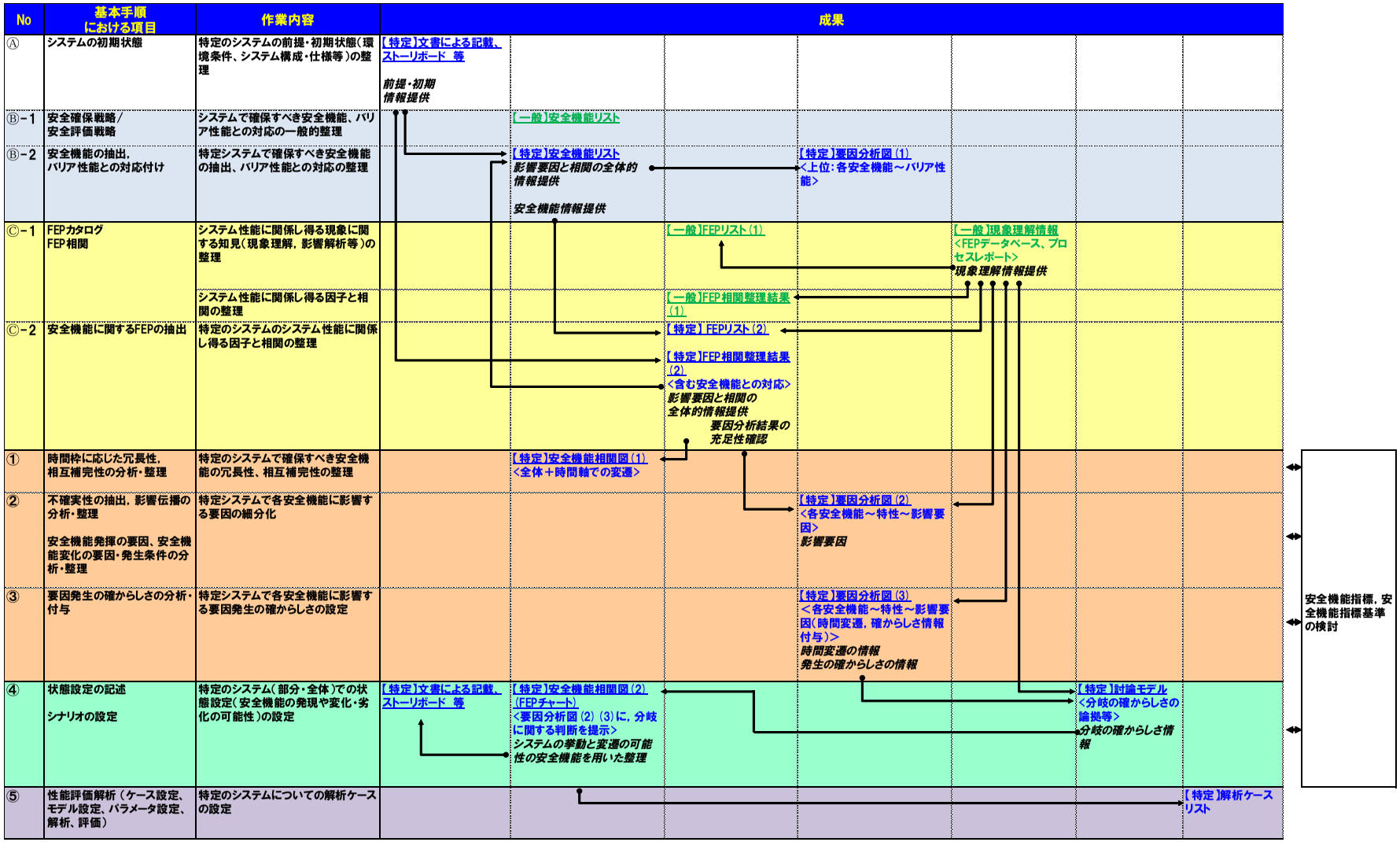
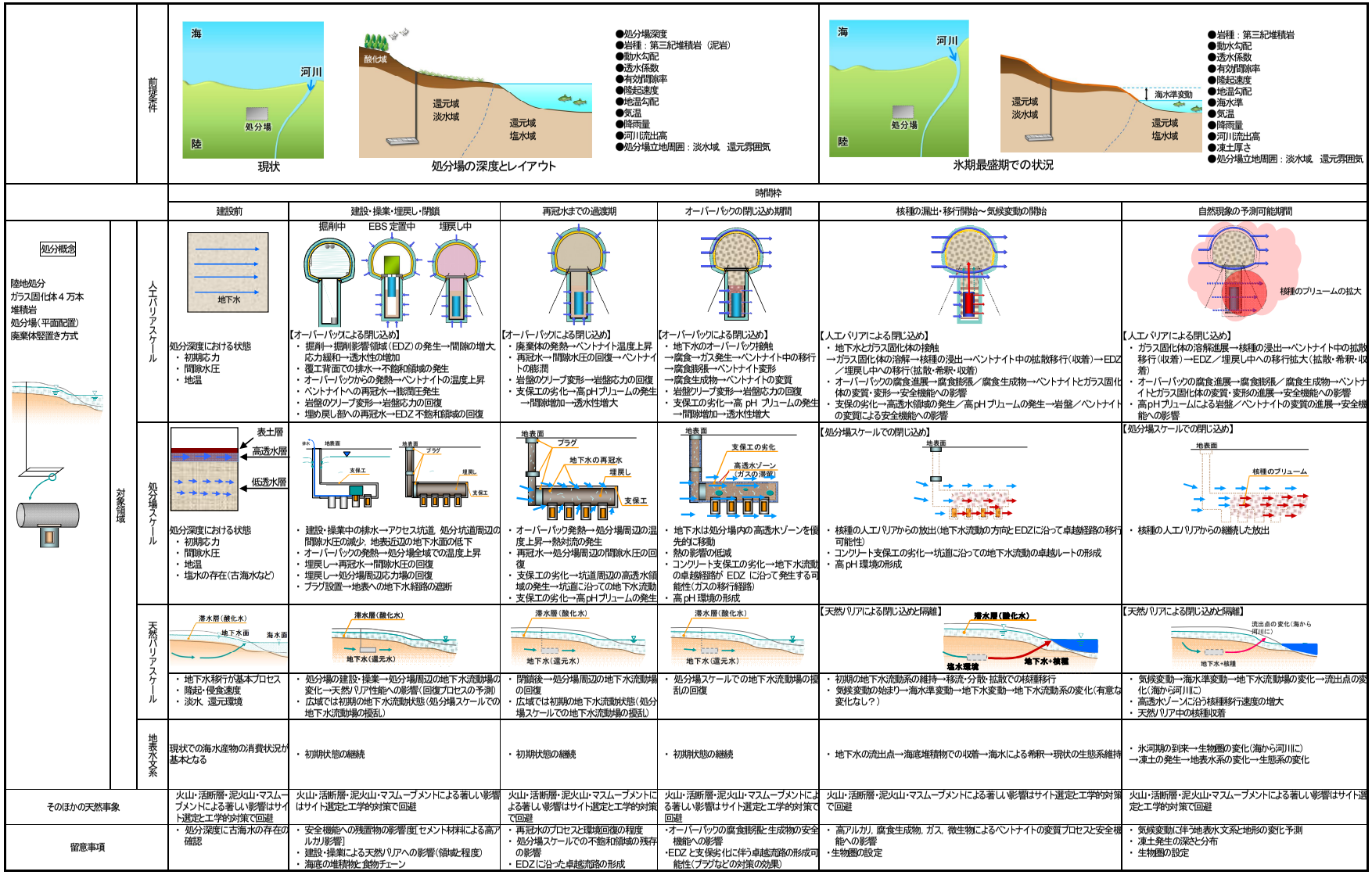


図 4.2-2 状態設定の各段階での作業内容や具体的な情報の流れ（作業・情報フロー）

【一般】：特定のプロジェクトに依存しないもの。一般的な地層処分概念を対象とした考え方や科学的知識（安全機能，FEP 関連情報）。
【特定】：特定のプロジェクトを対象としたもの。プロジェクトの安全確保の考え方，地質環境条件，システム構成要素等を反映した検討



EDZ：Excavated Disturbed Zone（掘削影響領域），EBS：Engineered Barrier System（人工バリアシステム），高 pH プルーム：岩盤中に形成される高アルカリ性の地下水領域

図 4.2-3 ストーリボードのイメージ（NUMO, 2011b）

これまでストーリボードは，シナリオ構築に関連する様々な段階（例えば，現象理解の分析，システムの状態設定等）で多くの活用事例があり，知識の統合化やわかりやすさの観点から有効なツールであることが認識されている（OECD/NEA, 2012）。その様式の標準的なフォーマットはないものの，既往のストーリボードの共通的な特徴として，目的に即して取り扱うプロセスや安全機能との関係がわかりやすく整理あるいは図示されていることが挙げられる。また，多くの場合，時空間的な連続性に配慮し区分されたフレームとなっており，処分システムの振る舞いについて関連する諸分野の知見を統合し，多角的な検討を支援することが期待できる。さらに，シナリオ検討の出発点としてシステムの変遷の理解を記述し，分野の異なる専門家が議論する際の共通の枠組みとして有効に利用できる。一方，ストーリボードに記載できる事項は限られているため，詳細な情報を記載することは，ストーリボードの利点の一つである分かりやすさを犠牲にすることになる。したがって，図 4.2-2 に示した作業において利用される情報や，作業の成果として作成される図表等を相互補完的に用いることとなる。このため，これらの図表等の整備にあたっては，相互の関係を明らかにして整合性をとっておくことが重要となる。このことは，シナリオ構築作業および作成した安全評価シナリオそのものの透明性，追跡性という観点での品質保証を確保するために重要である。

さらに，これらの一連の作業経緯や結果，および利用情報について，それらを電子化するとともに，相互の関係についてハイパーリンク等を用いて関連付けることで体系的な情報の管理を行うことが有効である。電子化による情報管理の考え方については，4.4 項に示す。

4.3 状態設定の試行

本項では，緩衝材を対象として状態設定を試行する。検討の対象期間は現在の地質環境条件の外挿が可能な期間とし，自然事象等の外的要因は検討の対象外とする。したがって，今回の試行においては処分システム全体にわたる，時間・空間的な状態変遷の検討やそれに基づく安全評価シナリオの設定という作業は行わない。しかしながら，処分システムの構成要素を対象として，その構成要素に期待されている安全機能への影響を考慮した状態設定の検討を行う手法を構築しておくことは，処分システム全体のシナリオ構築の基盤となるものである。

具体的には，図 4.2-2 に示した作業内容と各作業から得られる成果（図表を含む），受け渡す情報を念頭に置きながら例示的に一連の作業を記述する。しかしながら，前述のとおり，状態設定の手順は一意には定まらない。図 4.2-1 の流れや図 4.2-2 に示された作業が，順番どおり実施されるものではなく，同時並行的な作業の実施，同一作業の複数の観点での利用，作業の繰り返し等があることに留意が必要である。

試行の前提条件となる処分システム，および安全機能の定義とその設定は NUMO（2011a）に従うこととする。

実際に作業を進めるにあたっては，作業を支えるための FEP や FEP の相関の整理が，最新の知見に基づいて行われていることが前提である。これらについては，関連する様々な分野の専門家による議論やレビューを繰り返すことで，品質を確保するのが一般的なアプローチである。また，具体的なサイトが明らかになれば，地質環境条件を考慮した状態設定が必要となるとともに，調査の進展に応じてそれらを適宜見直すことになる。この際，4.2 項で説明したストーリボードを活用し，図 4.2-2 に示した各作業において，処分システムの長期的変遷を時空間的な連続性に配慮

しながら，状態設定の精度を高めていくことが有効である。

本試行においては，具体的な地質環境条件の想定，様々な専門家を交えた状態設定に関する繰り返しの議論は行わなかった。本試行では既往の FEP リスト，FEP 辞書やプロセスを記述した報告書を参照しつつ，一部の現象（プロセス）については，4.5 項に記述した個別現象に関する知見を参照することによって，4.2 項で検討をした方法論の妥当性を確認することとする。なお，ストーリボードは，本検討で試行する状態設定の最終的なプロダクトを表現するためのプレゼンテーションツールとして用いることとする。

(1) 初期状態の設定

はじめに，状態設定の検討の前提となる初期状態として，現在の表層環境や地質環境，処分システムの構成，各人工バリアの仕様，処分施設，建設・操業・閉鎖工程 等について整理する。試行では緩衝材を対象とすることから，緩衝材の仕様（材料(鉱物組成，化学組成等の特性を含む)，密度等），施工方法，地質環境条件等を整理する。試行では，第２次取りまとめにおける緩衝材仕様を前提とする。ストーリボードを用いた検討では，初期状態の整理結果についてもストーリボードに記述しておき，以降の検討の前提として参照できるようにしておくことが考えられる。

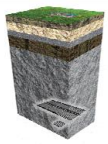
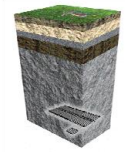
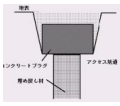
本作業は，図 4.2-2 中の No.Ⓐにある“A【特定】文書による記載，ストーリボード　等”に相当する。

(2) 安全機能の設定

処分システム全体としてどのように安全を確保するかという考え方に基づいて，処分システムの各構成要素に期待される安全機能が割り当てられる。

NUMO（2011a）では，“隔離”と“閉鎖後閉じ込め”という閉鎖後長期の安全確保の基本概念に基づいて，多重バリアシステム構成要素に対して安全機能を設定している（表 4.3-1）。緩衝材については，放射性物質の移行抑制に寄与する，①移流による移行の抑制，②コロイド移行の防止・抑制，③収着による放射性物質の移行遅延の三つの安全機能が設定されている。

表 4.3-1 安全機能と多重バリアシステム構成要素との関係（NUMO，2011a）

<table>
<tr><th>基本概念</th><th colspan="2">安 全 機 能</th><th colspan="2">構 成 要 素</th></tr>
<tr><td rowspan="2">隔
離</td><td colspan="2">地質の長期的な変動からの防護</td><td rowspan="2">天然バリア</td><td rowspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">人の接近の抑制</td></tr>
<tr><td rowspan="8">閉鎖後閉じ込め</td><td rowspan="2">放射性物質の
浸出抑制</td><td>ガラスマトリクスによる浸出抑制</td><td>廃棄体</td><td>  </td></tr>
<tr><td>発熱が著しい期間の地下水接触の防止</td><td>オーバー
パック</td><td>  </td></tr>
<tr><td rowspan="6">放射性物質の
移行抑制</td><td>放射性物質の溶解度制限</td><td colspan="2">還元環境を保つことなどにより機能として発現</td></tr>
<tr><td>移流による移行の抑制</td><td rowspan="3">緩衝材</td><td rowspan="3">  </td></tr>
<tr><td>コロイド移行の防止・抑制</td></tr>
<tr><td>収着による放射性物質の移行遅延</td></tr>
<tr><td>分散による移行率の低減</td><td rowspan="2">天然バリア</td><td rowspan="2">  </td></tr>
<tr><td>アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</td><td>埋め戻し材
プラグ</td><td>  </td></tr>
</table>

トップダウンアプローチでは，これらの安全機能に影響を及ぼすプロセスを抽出することが重要となる。このためには，まず，これらの安全機能を支えるバリア機能を抽出する。NUMO（2011a）では，各構成要素に対していくつかの観点から技術要件を定めている。これらは，安全機能に直接対応する技術要件，基本的なバリア性能の確保のための技術要件，長期健全性の維持のための技術要件，および工学的実現性の確保のための技術要件に分類されている。ここで抽出する“安全機能を支えるバリア機能”は，これらの技術要件の一部に対応する。表 4.3-2 および表 4.3-3 に NUMO（2011a）で定義されている技術要件を示す。

表 4.3-2 緩衝材の技術要件（基本的なバリア性能の確保）（NUMO，2011a）

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物質の移行抑制	移流による移行の抑制	低透水性	緩衝材中の地下水の動き（移流）を抑制し，結果的に放射性物質の移行を抑制すること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
	コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過能	放射性物質がコロイドとして移行することを抑制すること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
	収着による放射性物質の移行遅延	収着性	ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延すること	緩衝材の設計（材料設計）

表 4.3-3 緩衝材の技術要件（長期健全性の維持） （NUMO，2011a）

技術要件	技術要件の説明	設計項目
自己修復性	施工後変形などにより隙間が生じたとしても，自己修復できること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
耐熱性	廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	地下施設の設計（坑道離間距離，廃棄体ピッチ）
耐放射線性	廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計（材料設計）
緩衝材流出の抑制	地下水流による緩衝材の流出が著しくないこと	地下施設の設計
残置物との相互作用の影響の低減	コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	坑道の支保，プラグ，グラウト設計（材料設計）
バリア材料間の相互作用の影響の低減	人工バリア材料間の相互作用により安全機能が著しく低下しないこと	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
ガラス固化体の過熱の防止	良好な熱伝導性を有すること	緩衝材の設計（材料設計）
オーバーパックの保護（物理的緩衝性）	オーバーパックの腐食膨張，岩盤の変形を緩和し，オーバーパックを機械的な破壊から保護するよう，物理的緩衝性を有すること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計）
オーバーパックの沈下の防止	廃棄体オーバーパックを力学的に支持すること	緩衝材の設計（材料設計）
施工時の隙間の充填（自己シール性）	施工時の隙間を充填するよう，膨潤性を有すること	緩衝材の設計（材料設計，形状・厚さの設計） 操業システムの設計（施工技術）

なお，SR-Site 等では，主要な安全機能として，“閉じ込め”と“遅延”を掲げているが，それらを維持するための各構成要素に設定されている機能を“下位の安全機能”としている。ここで抽出する“安全機能を支えるバリア性能”は，SR-Site における“下位の安全機能”に相当するものである。SR-Site との比較については後述する。

ここでは， NUMO（2011a）の技術要件とされている項目を前提として，これら三つの安全機能を出発点として，安全機能を支えるバリア性能（技術要件）を抽出した。NUMO（2011a）の技術要件は，どちらかというと設計への反映の観点で整理されていると考えられ，表 4.3-3 におい

ても設計項目との対応が整理されている。一方，安全機能への影響という観点では，これらの技術要件には，いくつかの階層がある。例えば，“耐熱性”，“耐放射線性”といった技術要件は，“低透水性”や“自己修復性”といった他の技術要件の変化を抑制するための要件であり，安全機能への影響の伝播という観点では異なる階層の技術要件であると言える。本検討においては，このような安全機能への影響に対する要件の階層構造を意識して，再整理を行った。

図 4.3-1 に，“移流による移行の抑制”について，検討の結果を示す。人工バリアとしての緩衝材に求められている低透水性は，緩衝材領域全体に対する低透水性であることから，“材料自身の低透水性”と“緩衝材領域に短絡経路が無いこと”の両方が求められる。このような考え方に基づいて，“安全機能に直接対応する技術要件”に対して，いくつかの“安全機能を支えるバリア性能”を抽出した。

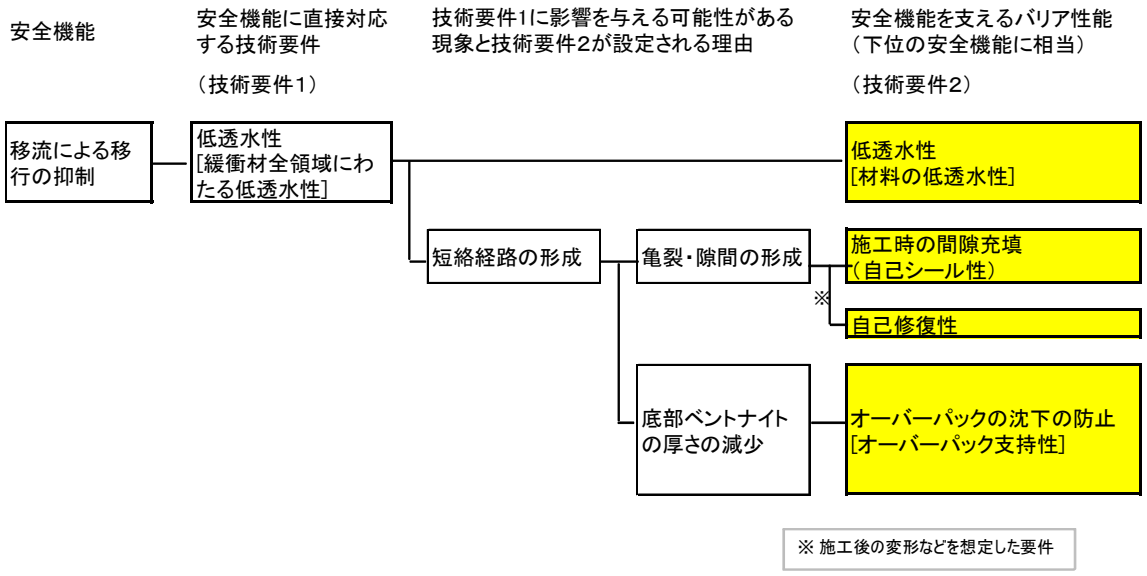


図 4.3-1 “安全機能”から“安全機能を支えるバリア性能”の抽出

緩衝材に期待されている他の二つの安全機能の発現においても，“短絡経路の形成”の防止は共通であるため，緩衝材に期待する“安全機能を支える技術要件”（下位の安全機能）としては，表 4.3-4 に示す 6 項目が抽出される。

表 4.3-4 緩衝材の安全機能を支えるバリア性能

低透水性
コロイドろ過性
収着性
施工時の施工時の間隙充填（自己シール性）
自己修復性（施工後の変形等による隙間の修復）
オーバーパックの沈下の防止（オーバーパック支持性）

表 4.3-5 には，参考として，SR-Site（SKB，2011）における緩衝材の安全機能（下位の安全機能）を示す。

表 4.3-5 SR-Site における緩衝材の安全機能リスト

安全機能	閉じ込め	遅延
Buff1. 移流による移動の制限	○	○
Buff2. 微生物活動の低下	○	
Buff3. 岩盤のせん断変形による影響の軽減	○	
Buff4. 変質抵抗	○	○
Buff5. キャニスターの沈降抑制	○	○
Buff6. キャニスター，岩盤の限界圧力	○	
Buff7. コロイドのろ過		○
Buff8. 放射性核種の吸着		○
Buff9. ガス流動の許容		○

SR-Site において処分システムに期待している“閉じ込め”は，長期のキャニスターの健全性であることから，“閉じ込め”に対して緩衝材に求められている機能は，キャニスターの腐食防止と保護の観点から選ばれていることに留意する必要がある。また，これらの中には，主要な安全機能に直結しているもの（例えば，Buff1. 移流による移動の制限）と，他の安全機能を担保するために求められる機能（例えば，Buff4. 変質抵抗）とが混在している。本検討では，上述の NUMO（2011a）における技術要件の階層化の議論においても記述したように，これらを区別して取り扱うこととする。

このような，下位の安全機能については，全てをはじめから設定することが必須ではなく，システム全体の検討において，必要に応じて追加，修正されるものである。特に，他のバリアの性能を担保するために求められる機能や，ある状態が発生した場合に限って求められる機能等については，シナリオの検討や安全評価を進めて行く中で，適宜見直しや追加を行うことが重要である。

本作業は，図 4.2-2 中の No. Ⓑ-2 にある“【特定】安全機能リスト”および“【特定】要因分析図(1) ＜上位：各安全機能～バリア性能＞”に相当する。

(3) 安全機能を支えるバリア性能に対する影響要因の抽出

次に，トップダウン的に抽出された“安全機能を支えるバリア性能”のそれぞれに対し，“バリア性能を支配する特性”，およびその特性に対して“特性を変化させる影響要因”の分析を行う。この作業の結果は，要因分析図のような形式で整理される。このような整理は，低レベル放射性廃棄物を対象とした原子力学会標準（日本原子力学会，2009）においても，参考事例として，その付属書に記載されている。また，このような作業は，整理の方法が異なるものの，NUMO（2011a）で述べられている状態設定の手順とも整合する。図 4.3-2～4 に，緩衝材の三つの安全機能を出発点とした要因分析図を示す。

“バリア性能を支配する特性”は，多くの場合，“安全機能を支えるバリア性能”と直接的に対応する特性（例えば，“低透水性”に対する“透水性/透水係数”）が，さらに，その特性を支配する他の特性（“低透水性”の例では“モンモリロナイト密度”等）に分解される。バリア性能の発現のメカニズムそのものや，その科学的な理解や定式化の現状に応じて，これらの特性の階層化の程度は異なる。また，抽出される特性が測定可能で比較的単純な特性にまで分解される場合もあれば，定性的な特性の記述に留まらざるお得ない場合もある。

このような，要因分析の作業は，関連する専門家間での議論等を通じて進められることとなるが，抽出される“バリア性能を支配する特性”および“特性を変化させる影響要因”の適切性，十分性を，透明性と追跡性をもって確認できるようにするためには，この作業プロセスを FEP 情報等と関連付けて整理しておくことが必要である。影響要因の抽出における FEP 利用についての検討は後述の(4)で議論する。

なお，“バリア性能を支配する特性”が，測定可能な特性に分解されている場合には，それらを安全機能指標とすることが可能となる。安全機能指標については後述の(6)で議論する。

本作業は，図 4.2-2 中の No. ②にある“【特定】要因分析図(2) ＜各安全機能～特性～影響因子＞”に相当する。

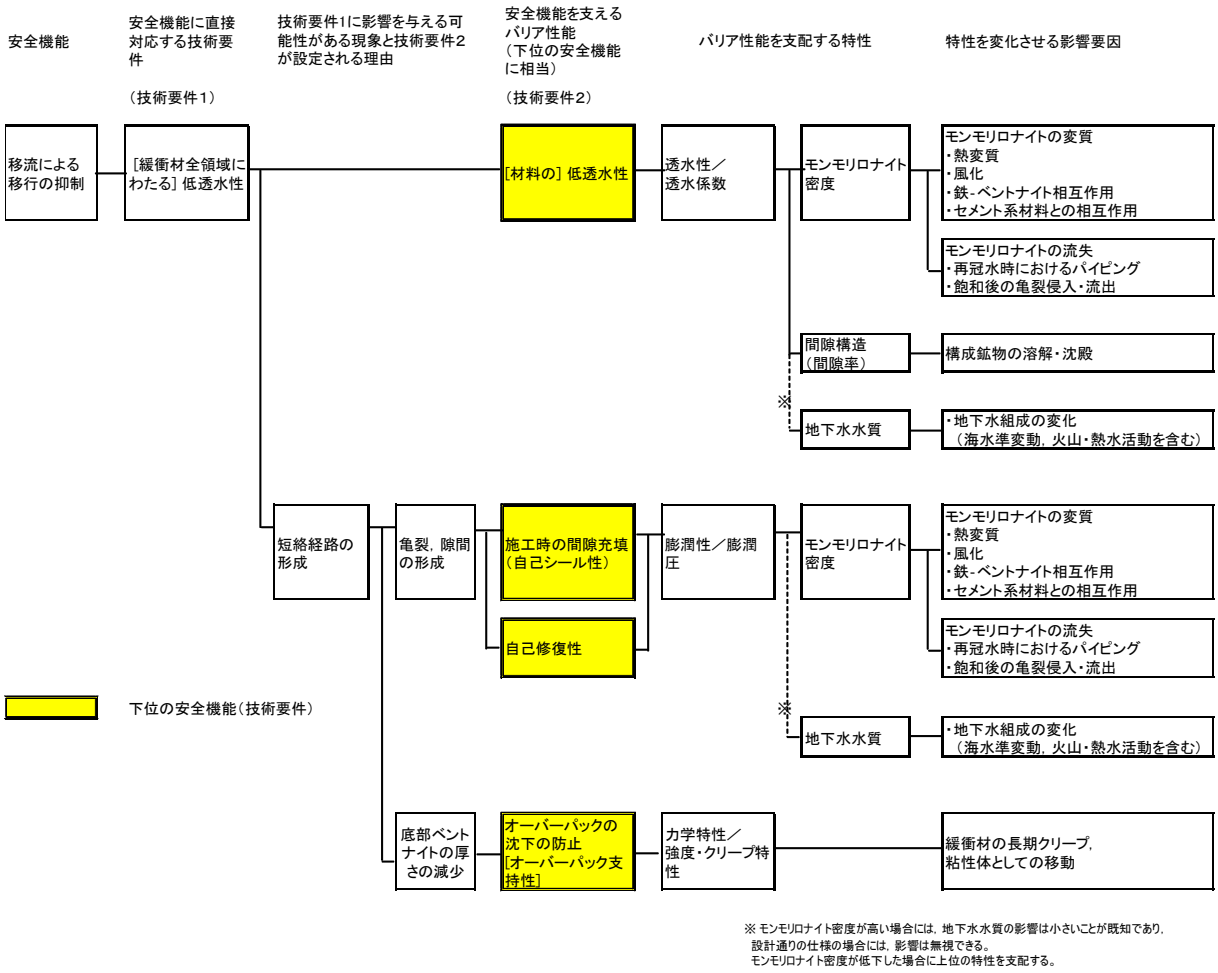


図 4.3-2 緩衝材の安全機能“移流による移行の抑制”に対する要因分析図の例

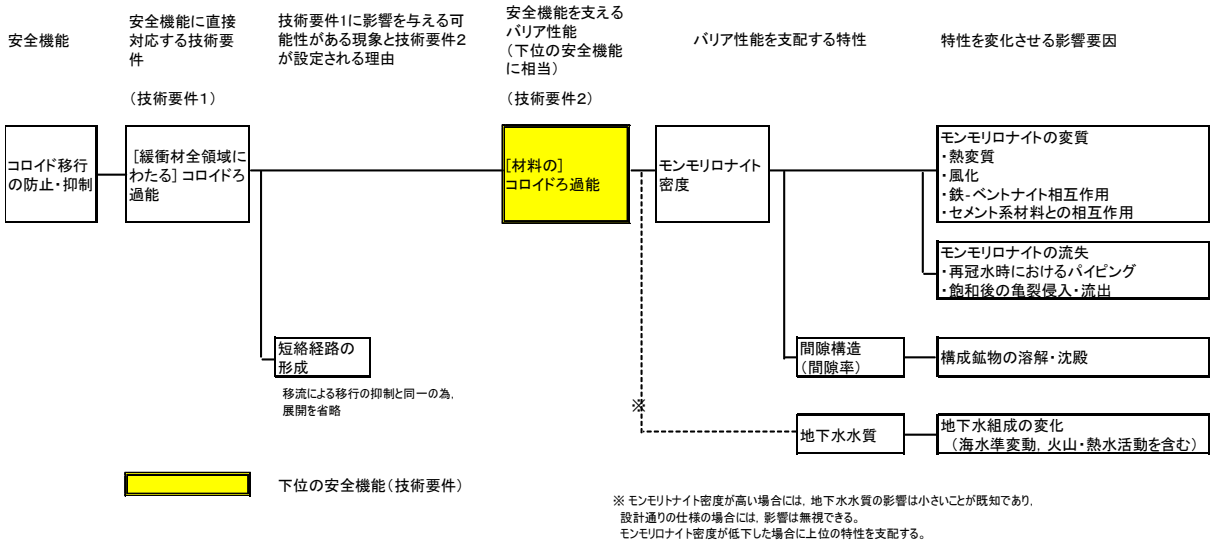


図 4.3-3 緩衝材の安全機能“コロイド移行の防止・抑制”に対する要因分析図の例

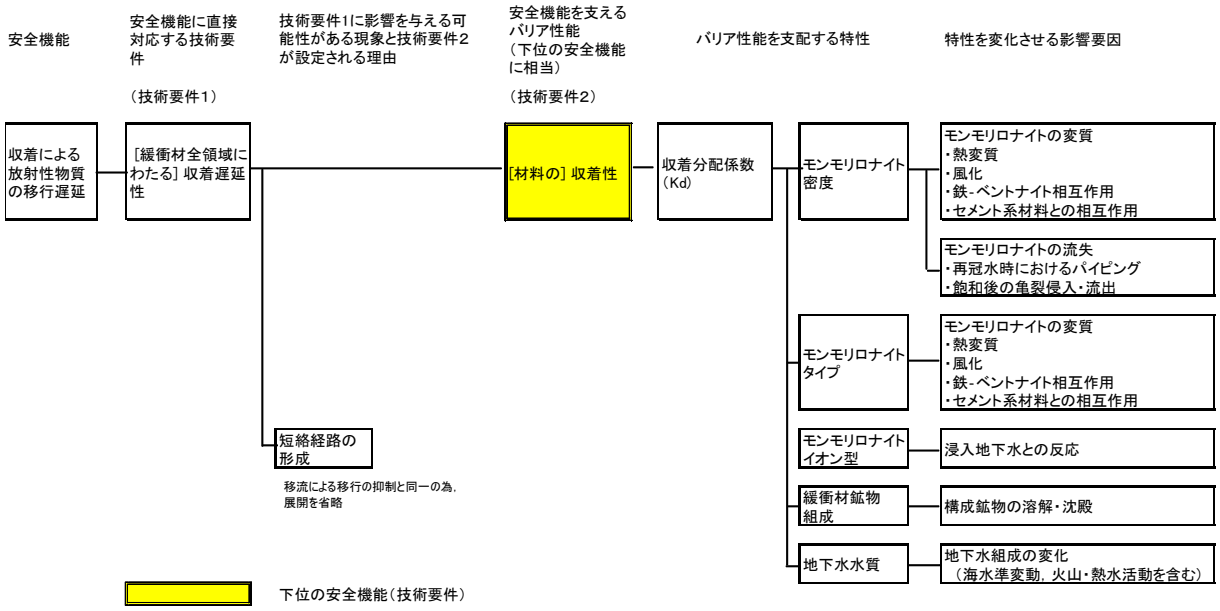


図 4.3-4 緩衝材の安全機能“収着による放射性物質の移行遅延”に対する要因分析図の例

(4) 影響要因の抽出と FEP の対応付け

前述のように，(3) において，安全機能に影響を及ぼす要因の抽出を行うためには，関連する現象についての知識や情報が必要であり，また，検討の網羅性が求められる。このためには，FEP リスト（FEP 項目の整理），各 FEP についての理解の現状（FEP 辞書），FEP の相関関係の整理がなされていることが前提である。影響要因の抽出においては，これらを参照しつつ，専門家による判断やレビューを繰り返すことで，重要な要因の抜け落ちがないことを確認する。

まず，前提となる FEP の検討を行う。FEP の整備においては，生物圏を含む処分システムの各構成要素に加え，初期状態に係る FEP（初期欠陥の取り扱い等），外的要因に係る FEP（地質学的イベントとプロセス，気候関連のイベントとプロセス，将来の人間活動） 等に分類がなされる場合が多い（例えば，JNC,1999a：SKB, 2010a：Nagra, 2002a）

ここでは, 緩衝材に関する FEP に限って具体的な検討を進めた。検討にあたっては, OECD/NEA により取りまとめられた国際 FEP リスト（OECD/NEA, 1999），他国の性能評価報告書における FEP として, SR-Site（SKB, 2011）の FEP リスト（SKB, 2010a）およびスイス Nagra の Project Opalinus Clay Safety Report（Nagra, 2002a）（通称 EN2002）の FEP リスト（Nagra, 2002b）を参考としつつ，わが国において過去に整備された，第２次取りまとめ（JNC, 1999a）および神崎ほか（2009）を参照した。

なお，SKB においては，SR-Site で用いた FEP リストは，SR-Can（SKB, 2006a）の FEP リスト（SKB, 2006b）を見直し修正して作成されており，事業の進展に応じて実施される安全評価において，継続的に FEP の見直し，更新を行っていくことが重要である。

さらに, SR-Site や EN2002 の FEP に関する報告書（SKB, 2010a : Nagra, 2002b）においては， FEP リストの品質保証（QA）あるいは監査という観点から，プロジェクト用に作成した FEP リストを，OECD/NEA の国際 FEP リストや，OECD/NEA の FEP データベースに格納されている他の性能評価報告書の FEP（プロジェクト FEP）等との比較を行い，自分たちが整備したプロジェクト用の FEP の妥当性を示している。

表 4.3-6 に，緩衝材に関する FEP の検討結果を示す。

表 4.3-6 既存の FEP リストの相互比較と本研究で利用する FEP リスト

：特性

：状態

特性關係	NEA国際FEPリスト	OPA FEPリスト （Features and characteristics） (Bentonite buffer, Bentonite-hostRock(HR) interface(一部))	SR-Siteでの状態変数（Variables）：緩衝材関係	H12 FEPリスト（特性）：緩衝材	本共同研究での設定案 【特性】と【状態】
熱的	熱的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.11			緩衝材の熱物性	熱物性
			温度	緩衝材の温度	温度
水理	水理学/水理地質学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.08	B1.04 Buffer permeability		緩衝材の水理特性	水理特性
		BH1.03 Effective hydraulic properties BH1.08 Hydraulic gradient BH1.09 Water flow at bentonite – host rock interfac	水理条件（圧力と流れ）		水理条件（圧力と流れ）
		（プロセスとしてSaturationはアリ）	水分含有率		水分飽和度
力学	力学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.07 （水理プロセス 2.1.08 OPA B1.02）			緩衝材の力学特性	力学特性
		B1.02 Bentonite swelling pressure	応力条件	緩衝材の応力	応力
		B1.03 Bentonite plasticity			
					（下記の「幾何形状／間隙構造」で対応）
化学	（緩衝材/埋め戻し材と特性 2.1.04）	B1.01 Bentonite emplacement and composition（再）	ベントナイト組成， モンモリロナイト組成	緩衝材の化学特性	化学特性
	化学/地球化学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.09				
			構造材，残置物		
		B1.05 Bentonite porewater chemistry	間隙水質	緩衝材中の地下水化学	地下水化学
			ガス含有率		
放射線			放射線強度		放射線強度
物質移動・幾何形状	処分場設計 1.1.07	B1.01 Bentonite emplacement and composition B1.01.1 Pellets B1.01.2 Corrosion of structural elements in HCB blocks SR5	緩衝材形状	幾何形状／間隙構造	幾何形状／間隙構造
			間隙構造		
				緩衝材の物質移行特性	緩衝材の物質移行特性
					核種移行率
	ガス源のその影響（廃棄体と工学バリア内） 2.1.12	B1.06 Gas permeability			
その他	緩衝材/埋め戻し材と特性 2.1.04 （全体に対応）				
		B1.07 Inhomogeneities (properties and evolution)			

現象關係	NEA国際FEPリスト	OPA FEPリスト （Environmental / Radionuclide Process） (Bentonite buffer)	SR-Siteでのプロセスに関するリスト：緩衝材関係	H12 FEPリスト（現象）：緩衝材 （JAEA-Data/code 2009-011での取り扱いを付記）	本共同研究での設定案【現象】
熱	熱的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.11	B2.01 Thermal evolution	Bu2 熱の移動		熱の移動
			Bu3 凍結		
				緩衝材の熱膨張 （JAEA-D/C 2009-011 では無視できると判断）	
水理	水理学/水理地質学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.08	B2.02 Bentonite saturation	Bu4 不飽和状態での水の移動	緩衝材の飽和	飽和
			Bu5 飽和状態での水の移動	緩衝材中での地下水流動	地下水流動
		B2.09 Bentonite erosion NA	Bu7 パイピング及び浸食 Bu18 モンモリロナイト起源のコロイド生成	緩衝材の流出	パイピング及び浸食
力学	力学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.07		Bu8 膨潤及びこれに伴う移動・変形	緩衝材の膨潤	膨潤／変形
			Bu15 浸透現象(Osmosis)（膨潤のメカニズムとして）	緩衝材の変形	
			Bu9 液状化		
化学	化学/地球化学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.09 （処分場設計 1.1.07 OPA B2..10） （力学プロセス 2.1.01 OPA B2.05.2.06,2.11） （水理プロセス 2.1.08 OPA B2.05.2.06）		Bu14 液相でのスペシエーション及び液相反応 Bu10 溶質の移流 Bu11 溶質の拡散 Bu12 吸着及びイオン交換	緩衝材と地下水の反応	緩衝材と地下水の反応
		B2.03 Mineralogical alteration – short term B2.04 Mineralogical alteration – long term B2.10 Interaction with cement components	Bu16 モンモリロナイトの変質	緩衝材の化学的変質	化学的変質 ・モンモリロナイトの変質 （熱変質，風化等） ・鉄-ベントナイト反応 ・セメント系材料との反応
		B2.06 Bentonite-iron interactions (canister) B2.06.1 Bentonite – Cu interactions	Bu17 鉄ーベントナイト相互作用		
		B2.05 Bentonite cementation	Bu22 セメンテーション		
			Bu13 不純物の変質		
				塩の蓄積	塩の蓄積
	ガス源のその影響（廃棄体と工学バリア内） 2.1.12	B2.11 Gas fracturing	Bu6 ガスの移動及び溶解	ガスの発生／影響	ガスの発生／移動／溶解
	生物学/生化学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.10 微生物学的/生物学的/植物が媒介するプロセスによる汚染物質の影響 3.2.06	B2.07 Microbial activity SR5	Bu20 微生物活動	微生物の影響	微生物の影響
	有機物と有機形態を取る可能性 3.1.05 （OPAではBには対応なしBHにはあり） 化学薬剤/錯化剤による汚染物質の化学種/移行への影響 3.2.05	B4.03 Organics / contamination of bentonite		有機物の影響	有機物の影響
	コロイドと汚染物質の相互作用と移行 3.2.04	BH2.10 Colloid production and effects		コロイドの形成	コロイドの形成／移動
放射線	放射線影響（廃棄体と工学バリア内） 2.1.13 （汚染物質の化学種と溶解度 3.2.02 OPA B2.08） （汚染物質の収着/脱着プロセス 3.2.03 OPA B2.08）		Bu1 放射線通過／発熱		
			Bu19 放射線による変質	緩衝材の放射線損傷 （JAEA-D/C 2009-011 では無視できると判断）	放射線損傷
		B2.08 Radiolysis	Bu20 間隙水の放射線分解	緩衝材中での間隙水の放射線分解	放射線分解
	放射性核種の化崩壊と連鎖生成 3.1.01	Common 1.01 Radioactive decay		緩衝材中での放射性崩壊	放射性崩壊
物質移動・幾何形状	汚染物質の収着/脱着プロセス 3.2.03	B3.02 Radionuclide retardation	吸着及びイオン交換（再）	緩衝材中での核種の移行：収着	核種の収着
	化学/地球化学的プロセスとその状態（廃棄体と工学バリア内） 2.1.09 汚染物質の溶解，沈殿と結晶化 3.2.01（OPAではBには対応なし廃棄体領域のみ） 汚染物質の化学種と溶解度 3.2.02	B3.03 Elemental solubility / precipitation	Bu24 放射性核種のスペシエーション	緩衝材中での核種の移行：沈殿／溶解	核種の沈殿／溶解
	水を媒体とする汚染物質の移行 3.2.07 （汚染物質の収着/脱着プロセス 3.2.03 OPA B3.01） 無機固体/溶質 3.1.03（OPAでは対応なし）	B3.01 Radionuclide transport through buffer	Bu25 液相中の核種移行 Bu10 溶質の移流（再） Bu11 溶質の拡散（再）	緩衝材中での核種の移行：移流／分散	核種の移流／分散
				緩衝材中での核種の移行：拡散	核種の拡散
		B3.05 Interaction and diffusion between canisters （複数廃棄体を考慮した核種移行）			
	コロイドと汚染物質の相互作用と移行 3.2.04	B3.04 Colloid filtration	Bu25 液相中の核種移行（再） Bu23 コロイドの移動	緩衝材中での核種の移行：コロイドによる移行	核種のコロイドによる移行
	揮発性物質と揮発の可能性 3.1.04		Bu26 気相中の核種移行	緩衝材中での核種の移行：ガスによる移行	核種のガスによる移行
その他		B4. SPECIAL ISSUES			
	品質管理 1.1.08	B4.01 Quality Control			
		B4.03 Organics / contamination of bentonite			
		B4.04 Canister sinking			
		BH1.01 Excavation-disturbed zone (EDZ) BH1.01.1 Rock bolts and mesh SR5 BH1.02 Open contact joints			
				緩衝材成分の物質移行（H12ではなし） （JAEA-Data/code 2009-011 で追加されている）	

“NEA 国際 FEP ﾘｽﾄ”のカラム中にカッコ書きで記載されている項目は，Nagra(2002b)（Appendix 3）において，“OPA FEP”に対応する“NEA 国際 FEP ﾘｽﾄ”ﾘｽﾄとして抽出されているもの。現象の分類とは一致しないが，対応する“OPA FEP”と同じ位置の“NEA 国際 FEP ﾘｽﾄ”のカラムに参考として記載した。

FEP の整理においては，Features（特性 FEP）と， Processes および Events（プロセス FEP）を区分して整理する。このような整理は，Nagra（2002b），SKB（2010a）においても行われており，マトリクス形式で FEP の相関関係の整理を行う際にも有効である（JNC，2005）。さらに，特性 FEP については，材料固有の“特性”と，結果としての“状態”に区分することが可能である。例えば，熱に関する特性 FEP では，前者が“熱伝導率”“熱容量”であるのに対し，後者が“温度”となる。

表 4.3-6 に示したとおり，第２次取りまとめの FEP は，OECD/NEA の国際 FEP，EN2002 および SR-Site の FEP との比較においても，十分な網羅性を有していると判断できる。ただし，EN2002 および SR-Site の FEP および神崎ほか（2009）の検討を踏まえ，分かりやすさと FEP の定義の明確化の観点から若干の修正を行うこととした。

ここまでの FEP の整理に関する作業は，図 4.2-2 中の No. Ⓒ-1“【一般】FEP リスト(1)”および Ⓒ-2“【特定】FEP リスト(2)”に相当する。なお，ここで，“【一般】FEP リスト”とは，OECD/NEA の国際 FEP リストのように，特定の処分プロジェクトに依存しない FEP リストを意味し，“【特定】FEP リスト”とは，一般 FEP リストから，個別の性能評価において対象とすべきものを取捨選択したプロジェクト FEP を意味する。

次に，(3) で行う，安全機能に影響を及ぼす要因の抽出における，FEP の利用の一例を示す。まず，FEP の相関関係をマトリックス形式で整理を行う。マトリクスの構成は JNC（2005）に従って，以下のとおりとする（図 4.3-5）。

- 対角要素に“特性 FEP”を配列する。この際，“特性 FEP”を“特性”と“状態”に区分する。
- 非対角要素に“プロセス FEP”を配置する。
- 特段の“プロセス FEP”の介在がなくても，“特性 FEP”同士に相関があり，状態が伝播されるものにはその旨記述する。
- FEP 間の相関は時計回りとする（図 4.3-5 右図参照）。



図 4.3-5 相関関係のマトリックス形式での整理のイメージ

表 4.3-6 で整理した緩衝材の FEP について，相関関係をマトリックス形式で整理した例を図 4.3-6 に示す。非対角要素には FEP として抽出されたプロセスと○印が記載されているが，○印はプロセスを介さないで，特性あるいは状態間の連関があることを示している。例えば，表左上の“熱物性値”の下，“温度”と交差する非対角要素の○は“熱物性値は温度の影響を受ける”こ

とを示している。図 4.3-7 には，各要素に対応する利用可能な情報が，既存の FEP 辞書等のどこに掲載されているかを参考として示したものである。

鉱物性（比熱，熱伝導率）	熱の移動	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
○	**温度**	○	飽和	○	○	○	化学的変質	○	×	×	○	×
×	×	**水理特性（浸水係数，水分拡散係数等（不飽和状態を含む））**	飽和 地下水流動	飽和	×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	**水理条件(外側・緩衝材中)（動水勾配，地下水流速）**	飽和	×	×	×	○	×	パイピング及び浸食	地下水流動	地下水流動 核種の移流／分散
○	×	○	×	**水分飽和度**	○	膨潤／変形	×	○	×	膨潤／変形	○	×
×	×	×	×	×	**力学特性（膨潤性能，可塑性等）**	膨潤／変形	×	×	×	膨潤／変形	×	×
×	×	×	×	×	○	**応力**	×	×	×	膨潤／変形	×	×
○	×	○	×	×	○	×	**化学特性（鉱物組成）**	緩衝材と地下水の反応	×	化学的変質	○	×
×	×	○	×	×	○	×	化学的変質	**地下水化学**	×	化学的変質 塩の蓄積	○	核種の収着 核種の沈殿／溶解 核種の拡散 核種のコロイドによる移行 核種のガスによる移行
×	×	放射線損傷	×	×	放射線損傷	×	放射線損傷	放射線分解	**放射線強度**	放射線損傷	×	×
○	×	○	×	×	○	×	×	×	×	**幾何形状／間隙構造**（密度）	○	核種のコロイドによる移行 核種のガスによる移行
×	×	×	×	×	×	×	化学的変質	○	×	×	**緩衝材の物質移行特性（収着性能，拡散特性等）**	核種の収着 核種の沈殿／溶解 核種の拡散 核種のコロイドによる移行 核種のガスによる移行
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	**核種移行率**

特性　状態　現象

図 4.3-6 FEP の相関関係のマトリックス形式での整理例

熱物性（比熱，熱伝導率） TRUFEP_BT-01 SRCFEP B1.1 SR-PR_3.2.1	熱の移動 SR-PR_3.2.1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
比熱，熱伝導率の温度依存性 TRUFEP_BT-01 SRCFEP B1.1 SR-PR_3.2.1	**温度** SRCFEP B.1.2	水理特性の温度依存 TRUFEP_BH-01	飽和（温度勾配による緩衝材中の地下水の移動） TRUFEP_BH-02 SRCFEP B2.3 SR-PR_3.3.1	水分飽和度（サクション等の関連パラメータを含む）の温度依存性 SR-PR_3.3.1	力学特性の温度依存 TRUFEP_BM-01, SRCFEP B3.2 SR-PR_3.4.1	応力状態の温度依存 TRUFEP_BM-02, SRCFEP B3.2 SR-PR_3.4.1	化学的変質 TRUFEP_BC-04 SRCFEP B4.4 SR-PR_3.5.6, 3.5.9, 3.5.10	地下水（間隙水）化学の温度依存 TRUFEP_BC-3, 11 SRCFEP B4.9 SR-PR_3.5.7	×	×	物質移動特性の温度依存 TRUFEP_BN-03,04 SRCFEP B.6.3.1~3 SR-PR_3.6.2	×
×	×	**水理特性（透水係数，水分拡散係数等（不飽和状態を含む））**	飽和（省略 上欄参照） 地下水流動(飽和条件) TRUFEP_BH-03 SRCFEP B.2.2 SR-PR_3.3.2	飽和 TRUFEP_BH-02 SRCFEP B2.3 SR-PR_3.3.1	×	×	×	×	×	×	×	×
×	×	×	**水理条件(外側・緩衝材中)（動水勾配，地下水流速）**	飽和 TRUFEP_BH-02 SRCFEP B2.3 SR-PR_3.3.1	×	×	×	地下水（間隙水）化学の水理条件依存 TRUFEP_BC-02 SRCFEP B6.1 SR-PR_3.5.2~3	×	パイピング及び浸食 TRUFEP_BM-05 SRCFEP B3.5 SR-PR_3.3.4	地下水流動（飽和条件） TRUFEP_BH-03 SRCFEP B.2.2 SR-PR_3.3.2	地下水流動TRUFEP_BH-03, SRCFEP B2.2, SR-PR_3.3.2 核種の移流／分散TRUFEP_BN-02, SRCFEP B6.3.1, SR-PR_3.5.2~3
比熱，熱伝導率の含水比依存性 TRUFEP_BT-01 SRCFEP B1.1 SR-PR_3.2.1	×	水理特性の含水率依存（不飽和状態） TRUFEP_BH-02 SR-PR_3.3.1	×	**水分飽和度**	力学特性の水分飽和度（含水比）依存 TRUFEP_BM-01, SRCFEP B3.2 SR-PR_3.4.1	膨潤／変形 TRUFEP_BM-02,03 SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	×	地下水（間隙水）化学の水分飽和度依存 TRUFEP_BC-02 SRCFEP B6.1 SR-PR_3.5.2~3	×	膨潤／変形 TRUFEP_BM-02,03 SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	物質移動特性の水分飽和度依存 TRUFEP_BH-02 SRCFEP B2.2~3 SR-PR_3.3.1	×
×	×	×	×	×	**力学特性（膨潤性能，可塑性等）** TRUFEP_BM-01,02,03 SRCFEP B3.1 SR-PR_3.4.1	膨潤／変形 TRUFEP_BM-02,03 SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	×	×	×	膨潤／変形 TRUFEP_BM-02,03 SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	×	×
×	×	×	×	×	力学特性の応力依存 TRUFEP_BM-01	**応力** TRUFEP_BM-02,03 SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	×	×	×	膨潤／変形 TRUFEP_BM-02,03 SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	×	×
比熱，熱伝導率のケイ砂混合率依存性 TRUFEP_BT-01 SRCFEP B1.1 SR-PR_3.2.1	×	水理特性の化学特性（ベントナイトイオン型），鉱物組成依存 TRUFEP_BH-01 SR-PR_3.3.2	×	×	力学特性の化学特性（ベントナイトイオン型），鉱物組成依存 TRUFEP_BM-01, SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	×	**化学特性（鉱物組成）**	緩衝材と地下水の反応 TRUFEP_BC-03 SRCFEP B4.3 SR-PR_3.5.7	×	化学的変質 TRUFEP_BC-04 SRCFEP B4.4 SR-PR_3.5.6, 3.5.9~10	物質移動特性の化学特性依存 TRUFEP_BN-03,04 SRCFEP B6.1, B.6.3.1~3 SR-PR_3.6.2	×
×	×	水理特性の水質依存 TRUFEP_BH-01 SRCFEP B2.1 SR-PR_3.3.2	×	×	力学特性の水質依存 TRUFEP_BM-01, SRCFEP B3.1,3.2,3.3 SR-PR_3.4.1	×	化学的変質 TRUFEP_BC-04 SRCFEP B4.4 SR-PR_3.5.6, 3.5.9, 3.5.10	**地下水化学**	×	化学的変質（省略 上欄参照） 塩の蓄積 TRUFEP_BC-11 SRCFEP B4.9 SR-PR_3.5.6,3.5.9~10	物質移動特性の地下水化学依存 TRUFEP_BN-03,04 SRCFEP B6.1, B6.3.1~3 SR-PR_3.6.2	核種の収着 TRUFEP_BN-04, SRCFEP B6.3.3, SR-PR_3.5.5 核種の沈殿／溶解 TRUFEP_BN-05, SRCFEP B6.3.4, SR-PR_3.6.1 核種の拡散 TRUFEP_BN-03, SRCFEP B6.3.2, SR-PR_3.5.3 核種のコロイドによる移行 TRUFEP_BN-06, SRCFEP B6.3.5, SR-PR_3.5.4 核種のガスによる移行 TRUFEP_BN-07, SRCFEP B6.3.6, SR-PR_3.6.3
×	×	放射線損傷 TRUFEP_BR-03 SRCFEP B5.3× SR-PR_3.5.12	×	×	放射線損傷 TRUFEP_BR-03 SRCFEP B5.3× SR-PR_3.5.12	×	放射線損傷 TRUFEP_BR-03 SRCFEP B5.3× SR-PR_3.5.12	放射線分解 TRUFEP_BR-02 SRCFEP B5.2 SR-PR_3.5.13	**放射線強度**	放射線損傷 TRUFEP_BR-03 SRCFEP B5.3× SR-PR_3.5.12	×	×
比熱，熱伝導率の密度依存性 TRUFEP_BT-01 SRCFEP B1.1 SR-PR_3.2.1	×	水理特性の幾何形状／間隙構造（密度）依存 TRUFEP_BH-01 SRCFEP B2.1 SR-PR_3.3.2	×	×	力学特性の幾何形状／間隙構造（密度）依存 TRUFEP_BM-01, SRCFEP B3.1,3.2 SR-PR_3.4.1	×	×	×	×	**幾何形状／間隙構造**（密度）	物質移動特性の幾何／間隙構造依存 TRUFEP_BN-03,04 SRCFEP B6.1, B.6.3.1~3 SR-PR_3.6.2	核種のコロイドによる移行 TRUFEP_BN-06, SRCFEP B6.3.5, SR-PR_3.5.4 核種のガスによる移行 TRUFEP_BN-07, SRCFEP B6.3.6, SR-PR_3.6.3
×	×	×	×	×	×	×	化学的変質 TRUFEP_BC-04 SRCFEP B4.4 SR-PR_3.5.6, 3.5.9, 3.5.10	地下水（間隙水）化学の物質移行特性依存 TRUFEP_BC-02 SRCFEP B6.4 SR-PR_3.5.2~5	×	×	**緩衝材の物質移行特性（収着性能，拡散特性等）** TRUFEP_BN-01, SRCFEP B6.4,	核種の収着 TRUFEP_BN-04, SRCFEP B6.3.3, SR-PR_3.5.5 核種の沈殿／溶解 TRUFEP_BN-05, SRCFEP B6.3.4, SR-PR_3.6.1 核種の拡散 TRUFEP_BN-03, SRCFEP B6.3.2, SR-PR_3.5.3 核種のコロイドによる移行 TRUFEP_BN-06, SRCFEP B6.3.5, SR-PR_3.5.4 核種のガスによる移行 TRUFEP_BN-07, SRCFEP B6.3.6, SR-PR_3.6.3
×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	**核種移行率** TRUFEP_BN-01~7, SRCFEP B6.3., SR-PR_3.6.2~3

TRUFEP：TRU-2根拠資料集（電事連・JNC, 2005）
SRCFEP：安全研究センターFEPデータベース（神埼ほか2009）
SR-PR：SR-site Process Report（SKB TR 10-47）（SKB, 2010b）

特性　状態　現象

図 4.3-7　FEP の相関関係マトリックス上での FEP 情報の整理

このようなFEPの相関の整理が，(3) で行う安全機能に影響を及ぼす要因の抽出作業においてどのように利用可能で，網羅性の検討に役立つかについて，安全機能“移流による移行の抑制”を例に，図4.3-8で示す。図4.3.8は，図4.3-6と同一のFEP相関関係のマトリックス上に，要因の抽出作業の過程を上書きしたものである。

はじめに，安全機能に直接関係するプロセスを特定する。安全機能である“移流による移行の抑制”は，図の右側，“核種移行率”に影響を及ぼすプロセスFEPとして抽出されている“核種の移流／分散”（赤線の囲み）に対応する。このプロセスが配置されているマトリックス中の要素を出発点として，マトリックスを用いて，それに影響を及ぼすFEPを探す。

“核種の移流／分散”は，特性FEP“水理条件”の影響を受ける。次に“水理条件”から上下方向にマトリックスを確認する。核種移行が発生するのは，緩衝材の飽和後であるという前提とすると，“水理条件”から“地下水流動”というプロセスを経て“水理特性”の影響を受けることがわかる。なお，“飽和”というプロセスは，不飽和から飽和に到るプロセスなので，今回の検討では対象外となる。緩衝材以外のFEPからも影響を受けるが，本試行では緩衝材領域に限って作業を例示する。同様に“水理特性”から上下方向にマトリックスを追うことで，“温度”，“水分飽和度”，“化学特性（鉱物組成）”，“地下水化学”，“放射線強度”，“幾何形状／間隙構造（密度）”が抽出される（図中の赤線）。これらに到る特性間の相関やプロセスについて，その影響の程度について，FEP辞書等の現象理解についての情報を参考にして個別に判断を行い，特性を変化させる影響要因となるプロセスの抽出を行う。図の例では，“化学特性（鉱物組成）”と“幾何形状／間隙構造（密度）”が抽出される（図中の赤の実線）。さらにこの特性に影響を及ぼすプロセスとして，“化学的変質”および“パイピング及び浸食”が抽出される（図中の青の実線）。

これらのプロセスは，(3) の要因分析図（図4.3-2）において，“低透水性”への影響要因として抽出された“モンモリロナイトの変質”，“モンモリロナイトの流出”，“構成鉱物の溶解・沈殿”と用語が異なるものの，着目すべき要因（プロセス）として一致する。すなわち，要因分析図によって抽出された影響要因の見落としがないことを，FEPの相関関係の整理，および各FEPに関する理解の整理（FEP辞書）を用いた網羅的な確認により担保することができる。

ただし，マトリックス形式でのFEPの利用は，トップダウン的な検討により安全機能に影響する要因を抽出するにあたって，網羅的な確認が行われていること，見落としがないことを示す手法の一つの例としての提案である。SR-Site（SKB, 2011）を支えるプロセスレポート（SKB, 2010b）においては，緩衝材に関するFEPとして取り上げた26のプロセス（表4.3-6のSR-Siteでのプロセスに関するリスト（Bu1～26））について，全ての状態変数（表4.3-6のSR-Siteでの状態変数(Variables)）との相互依存関係を整理した表を1枚ずつ作成し，FEPの相関についての網羅的な検討を行っている。

これらの作業は，図4.2-2中のNo. Ⓒ-1“【一般】FEP相関整理結果”およびⒸ-2“【特定】FEP相関整理結果 ＜含む安全機能との対応＞”に相当する。なお，ここで，“【一般】FEP相関整理結果”とは，特定のプロジェクトに依存しない，一般的な地層処分概念を対象とした考え方や科学的知識を整理したものであり，“【特定】FEP相関整理結果”とは，【一般】の情報や整理結果に基づいて，特定のプロジェクトFEPを対象として整理したものである。

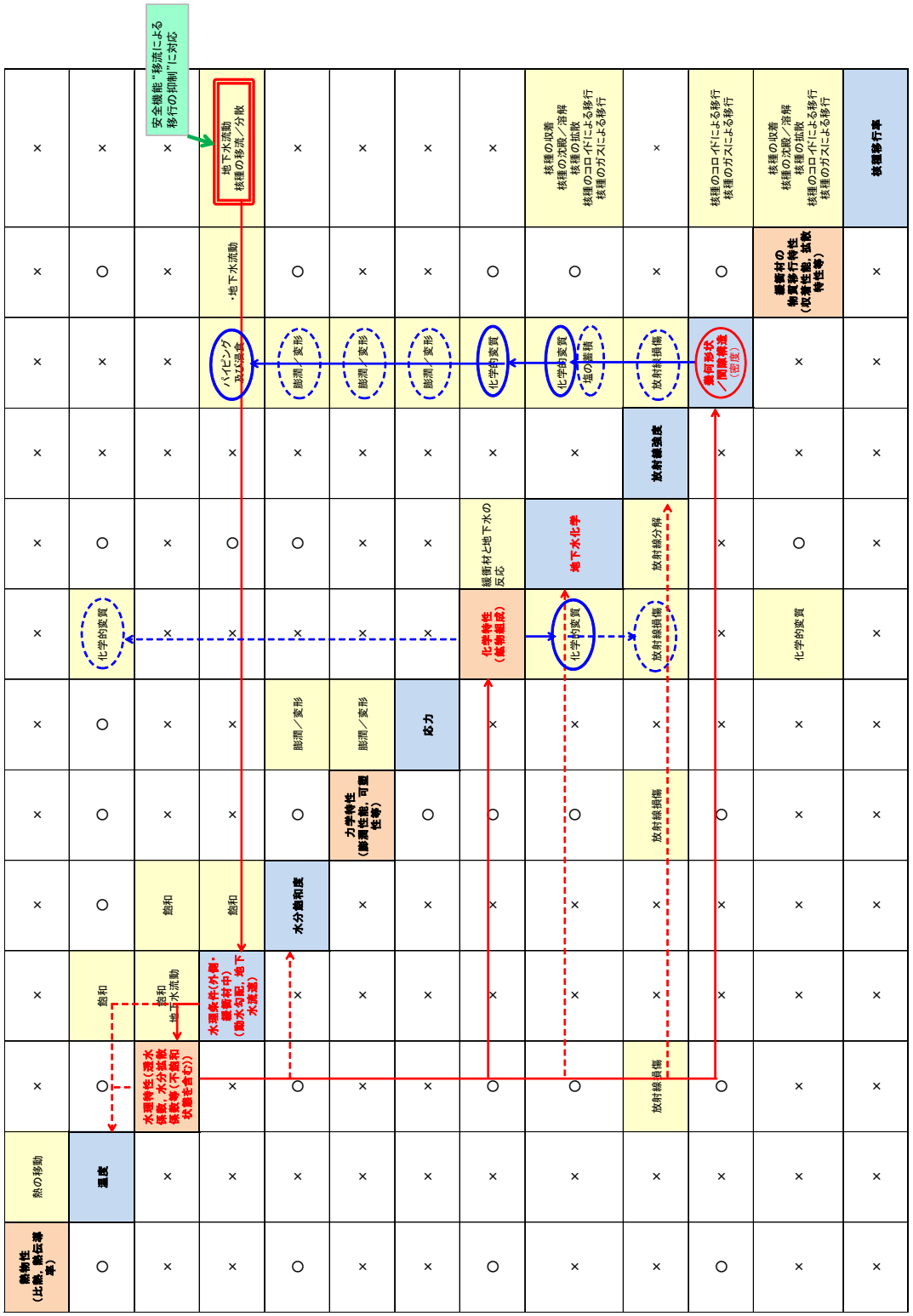


図 4.3-8　FEP の相関関係マトリックスを用いた安全機能と影響要因との関係整理

(5) 抽出された影響要因についての検討

次に，安全機能を出発点として，抽出された影響要因（図 4.3-2～4 の特性要因図の右端のカラム）について，現象の発生の可能性，現象の発生可能性の環境条件等への依存性，発生時期等について，個別に情報を整理し，評価における取り扱い方法を記述する。

検討対象となる全ての影響要因について，最新の現象理解についての情報が整理されている状況ではないために，第２次取りまとめ（JNC, 1999a）における記述，第２次 TRU レポートの FEP 辞書（電事連・JNC, 2005），神崎ほか（2009），SR-Site におけるプロセスレポート（SKB, 2010b）等を参考にするとともに，4.5 項で取りまとめた現象理解に関する情報や，個別の知見を基に簡単に記述する。ここでは，一部の項目について例として示す。

●モンモリロナイトの変質

熱変質

モンモリロナイトは，天然における埋没続成作用等を受けて，高温では非膨張性のイライトに変化することが知られている。しかしながら，この変質反応は 100℃を下回る条件では顕著ではないことが知られている。各国の性能評価においても，緩衝材の最高温度を 100℃とする場合には，緩衝材の諸性能を損なうことはないと考えられている。緩衝材の温度変化は，廃棄体の発熱特性や地質環境特性に依存するものの，第２次取りまとめの設計（JNC,1999b）では，閉鎖後数十年で緩衝材の温度が最高となり，その後は徐々に低下する。したがって，温度という点では閉鎖後初期に留意すべき対象である。

なお，熱変質として考慮すべき現象をイライト化として捉えると，溶液中のカリウム濃度や pH 等に依存して，100℃以下の温度においても長期の間には変質をする可能性も否定できない。これについては，セメント系材料との相互作用の中で取り扱う。

風化

モンモリロナイトは，地表付近において Ca 型化，H 型化（酸性白土化）等のイオン型の変化や，カオリナイト化等の風化変質を起こすことが知られている。しかしながら，風化現象は地表近傍において発生する現象であることから，今回の検討においては検討の対象外とすることができる。超長期の後に隆起・侵食作用によって，緩衝材が地表近傍に接近することを想定する時間帯においては，検討対象とすることも必要である。

鉄－ベントナイト相互作用

特定の実験条件において，鉄との相互作用によってモンモリロナイトが非膨張性の粘土鉱物に変質することが認められている。しかしながら，これは鉄／ベントナイト比が大きく，鉄の腐食により緩衝材空隙水の pH が上昇するような試験条件に特有の現象と考えられる。また，緩衝材中の物質移行と，鉱物の溶解／沈殿反応等を連成させた解析による評価では，鉄との相互作用による鉱物変質が想定される領域は鉄近傍の一部に限られている。したがって，緩衝材全体の性能に与える影響は小さいと考えられる。ただし，この現象については，現象理解の不足，解析評価におけるモデルパラメータの不確実があることから，感度解析的にシステム全体の性能に及ぼす影響を確認しておくことが望ましい（4.5.1 項参照）。

セメント系材料との相互作用

坑道支保等にセメント系材料を利用した場合に，セメント系材料と地下水との接触により形成される高アルカリ性の地下水が緩衝材領域に移行し，モンモリロナイトが溶解し，高アルカリ性の条件で安定な二次鉱物が沈殿することが考えられる。しかしながら，この相互作用は複雑であり，現象を表現するには，スメクタイトの溶解速度式，スメクタイトや二次鉱物の熱力学データ，生成二次鉱物の選定，物質移行パラメータの設定等多くの不確実性が存在する。緩衝材中の物質移行と，鉱物の溶解／沈殿反応等を連成させた解析による評価では，用いる熱力学データ等の計算条件によっては，時間が経つと，緩衝材の中の有効モンモリロナイト密度が顕著に低下する場合が認められている。（4.5.3 項参照）

SR-Site(SKB, 2011)では地圏（Geosphere）に求める安全機能“化学的に好ましい条件の提供”に対する安全機能指標として，緩衝材および埋め戻し材の安定性の観点から，地下水の pH を抽出し，指標基準　pH^{GW}＜11　を選定し，コンクリート接触水はこれを上回る可能性を指摘している。

●モンモリロナイトの流出

再冠水時におけるパイピング

この現象は，緩衝材密度，岩とベントナイトブロックの隙間や，ペレット状ベントナイト充填部分の隙間構造等の緩衝材の初期状態と，周辺母岩からの地下水の流入状況に強く依存する。現象の発生は，局所的に流入する地下水の水圧が粘土の圧力を上回る場合に限定される。また，流入地下水量の上限が推定できる場合には，実験式により流出粘土総量が推定できる。

緩衝材施工方法の検討，適切な処分孔位置の設定，処分孔への地下水浸入を抑制する工学的対策等の適切な対策を行うことを考え合わせると，この現象により，緩衝材の安全機能に影響を及ぼす緩衝材密度の低下は考えにくい（4.5.2 項参照）。

飽和後の亀裂侵入・流出

亀裂への侵入については，処分孔壁の亀裂の存在状態に強く依存する。現在までに実施されている予備的解析においては，評価モデルや解析条件に依存して，長期間経過後には緩衝材密度の低下も想定され得る。希薄地下水の浸入による，ベントナイトコロイドによるベントナイトの散逸については，ベントナイト材料の特性および地質環境条件の変遷から推定される地下水条件に依存する（4.5.2 項参照）。

SR-Site（SKB, 2011）では地圏に求める安全機能“化学的に好ましい条件の提供”に対する安全機能指標の一つとして，ベントナイトコロイド発生の観点から，地下水のイオン強度を挙げており，この指標基準としてイオン強度の下限値を 4mM としている。なお，第２次取りまとめにおける FRHP 地下水のイオン強度は 4.2mM であり，これを上回っている。

したがって，環境条件に応じて評価すべき項目として明示し，モンモリロナイト密度や緩衝材密度に影響を及ぼす可能性がある不確実性要因としておく。

ここでは，本文中に文章で記述したが，これらの文章を図 4.3-2～4 の右にカラムを設けて表中に記述する，あるいは要因分析図中の影響要因の記載からハイパーリンク等で情報をリンクしておくことで，安全機能を出発点とした要因分析と連結した情報として整理しておくことができる。

これらの作業は，図 4.2-2 中の No.③“【特定】要因分析図(3) ＜各安全機能～特性～影響因子（時

間変遷，確からしさ情報付与）＞”に相当する。

(6) 安全機能指標の検討

(3) において“安全機能を支えるバリア性能”のそれぞれについて，“バリア性能を支配する特性”を整理した。この特性は，外的要因による安全機能への影響や，安全機能の時間変化を検討する際に，安全機能の発揮の程度（例えば，当初の機能を維持，機能の劣化，機能の喪失）を検討する際の目安として利用することができる。さらに，この安全機能が担保される指標を定量的に取り扱うことが可能であれば，その値を基準として，より具体的なシナリオ分岐の検討や，基準を共通の尺度とした処分システムの設計との連携が容易になる。

また，“安全機能を支えるバリア性能”を直接的に支配する特性ではないが，(5) で示した影響要因の検討において，影響要因となるプロセスの発生に係る条件（例えば，「緩衝材変質」における“温度”）を抽出し，定量的な検討を加え，整理しておくことは，シナリオ分岐の検討や，処分システムの設計との連携の観点から有効となる。

これらの指標は，SR-Site（SKB, 2011）における安全評価指標および安全評価指標基準に相当するものであり，NUMO（2011a）における“様相区分”と類似の考え方である。

表 4.3-7 に表 4.3-4 のバリア性能に対応する指標と，指標基準の考え方を整理する。本検討においては，定量的な指標基準を設定することはせず，NUMO（2011a）における“様相区分”で行われているような定性的な記述とする。すなわち，指標としている特性値の大小によって，バリア性能の観点から，状態がどのように変化するかを整理したものである。この表の整理では，“オーバーパック支持性”を支配する特性である“強度”については，具体的に測定可能な特性値を定義できていない。これについては，実験的研究やそれに基づく現象理解に基づいて，適切な特性値を設定することが望まれる。この際，SR-Site（SKB，2011）のように“膨潤圧”といった代用特性を用いることも考えられる。表 4.3-7 中には，参考として SR-Site（SKB，2011）における指標および指標基準を記載した。表 4.3-8 には，影響要因となるプロセスの発生に係る条件の整理例を示す。

表 4.3-7“安全機能を支えるバリア性能”を支配する特性と
安全機能を担保するための基準の検討例

安全機能を支えるバリア性能	性能を支配する特性（指標）	指標基準（様相区分）		参考：SR-Site の安全機能指標および指標基準
		当初のバリア性能が担保されている状態	当初のバリア性能が劣化するあるいは担保されない可能性のある状態	
低透水性	透水係数	小：拡散支配*	大：移流支配の可能性	透水係数＜10^{-12} m/s
自己シール性 自己修復性	膨潤圧	大	小：短絡経路の存在	膨潤圧 ＞1MPa
オーバーパック支持性	強度**	大	中：一部領域の緩衝材厚さ減少 小：一部領域の緩衝材喪失	膨潤圧 ＞0.2MPa
コロイドろ過能	モンモリロナイト密度	大：コロイドろ過 （第２次取りまとめでは，緩衝材乾燥密度 ＞1.0 Mg/m^3	小：コロイド透過の可能性	飽和密度 ＞ 1.65Mg/m^3
収着性	分配係数	大：初期状態，	小：初期状態からの低下	大(high)

＊ 第２次取りまとめ（JNC, 1999b）においては，ペクレ数により拡散支配を判断している。ペクレ数は，地下水流速，緩衝材中の物質の実効拡散係数等の関数でもあるが，透水係数が十分に小さければ拡散支配となる。

** クリープ等の考慮も必要であり，測定可能な単一の特性値を定量的な指標として代表させることは困難である。

表 4.3-8 特性を変化させる影響要因の発生可能性に関する指標と基準の検討例

特性を変化させる影響要因		要因発生に係る特性（指標）	指標基準（様相区分）		参考：SR-Site の安全機能指標および指標基準
			発生可能性が排除できる条件	発生可能性の検討が必要な条件	
モンモリロナイトの変質	熱変質	緩衝材最高温度	＜100℃	＞100℃	＜100℃
	セメント系材料との相互作用	浸入地下水 pH	中性付近	高アルカリ性	pH ＜ 11 Geosphere への指標基準
モンモリロナイトの流出	パイピング	局所的に浸入する地下水の水圧	小 （膨潤圧＞地下水圧）	大 （膨潤圧＜地下水圧）	
	流出(コロイドによる散逸)	浸入地下水イオン強度	大	小	$\Sigma q[M^{q+}]^{GW}$ ＞ 4mM Geosphere への指標基準

安全機能指標は，基本的には“バリア性能を支配する特性”と同一であることが望ましいが，前述のように，“バリア性能を支配する特性”を直接的に測定可能な状態の値として表現することが困難な場合もある。その場合には，比較的測定が容易な特性で代用されることもある。また，指標基準は，その基準を満足していると安全機能が担保されるという値であるが，その値から逸脱したからといって直ちに安全機能が損なわれるというものではない，その場合にはさらに注意深い検討が必要になるという値である。したがって，シナリオ解析においては，シナリオ分岐を議論する際の参考となるが，その値が絶対的な意味を持つものではないことに留意が必要である。一方，特定の特性に数値基準を設定することは，例えば，その値を目標値として設計を進めることでシステムの設計者と安全評価を行う者が，システムの最適化の議論を行うことができる等，地質環境条件や設計との連携等の全体的な議論を行う際には重要な役割を持つことが期待される。

これらのことを考慮して，安全機能指標および安全機能指標基準の検討は，図 4.2-2 においては，右の欄外に記載した。

(7) FEP チャートによる安全機能への影響と分岐の分析

次に，ここまでに検討し整理した情報を FEP チャートとして整理する（図 4.3-9）。緩衝材の三つの安全機能（図 4.3-9 左側）に対し，(3) で分析・整理した（図 4.3-2～4）“バリア性能を支配する特性”を結び付ける。この特性の変化によって，安全機能の喪失あるいは劣化という分岐が発生する可能性がある。一方，“バリア性能を支配する特性”は，他の特性を介して（あるいは直接），なんらかの影響要因（プロセス）によって変化する。これらの特性およびプロセスの抽出は (3) , (4) で行われ，図 4.3-2～4 に示されている。これらのプロセスを図 4.3-9 の右に配置している。図 4.3-9 では，図を見やすくするために，一部を抽出して例示した。これらのプロセスに対する，環境条件等の影響因子，発生時期，発生可能性については，(5) に記述されている。発生可能性の分岐（発生可能性が排除できる条件）については，表 4.3-7 および表 4.3-8 で整理した指標基準の考え方を参考とすることができる。これらの情報に基づいて，図 4.3-9 の FEP のチャートの各プロセスに対して，与えられている環境条件（地質環境条件および設計の結果として与えられる条件を含む）とその不確実性，および各プロセスに対する現象理解等に起因する不確実性を検討する。ただし，このプロセス発生の判断は，定量的な閾値によって，明瞭に判断できるものは限られていることに留意する必要がある。また，鉄との相互作用や，セメント系材料との相互作用のように，影響の空間的な広がりについての検討が必要な事象もある。したがって，この FEP チ

ャートは検討の論理構造を示したものであり，判断の前提とした条件や論拠については，個別に記録を行う等，追跡性と透明性を担保することが必要である。

図 4.3-10 には，第２次取りまとめのレファレンスで設定された地質環境条件と処分システムの設定に対して，緩衝材と直接接触する支保材料を変更し，普通ポルトランドセメント（OPC）を利用するとした場合に想定される安全機能への影響を示した。OPC によりもたらされる高 pH 環境を発端としての影響の伝播を太線で示した。この例では，安全機能への影響という判断では，いずれも安全機能の喪失は起こらないが，物質移行特性に係る機能の低下（パラメータの変更）を考慮すべきことを示している。

本作業は，図 4.2-2 中の No. ④にある“【特定】安全機能相関図(2)（FEP チャート）＜要因分析図(2)(3)に，分岐に関する判断を提示＞”に相当する。

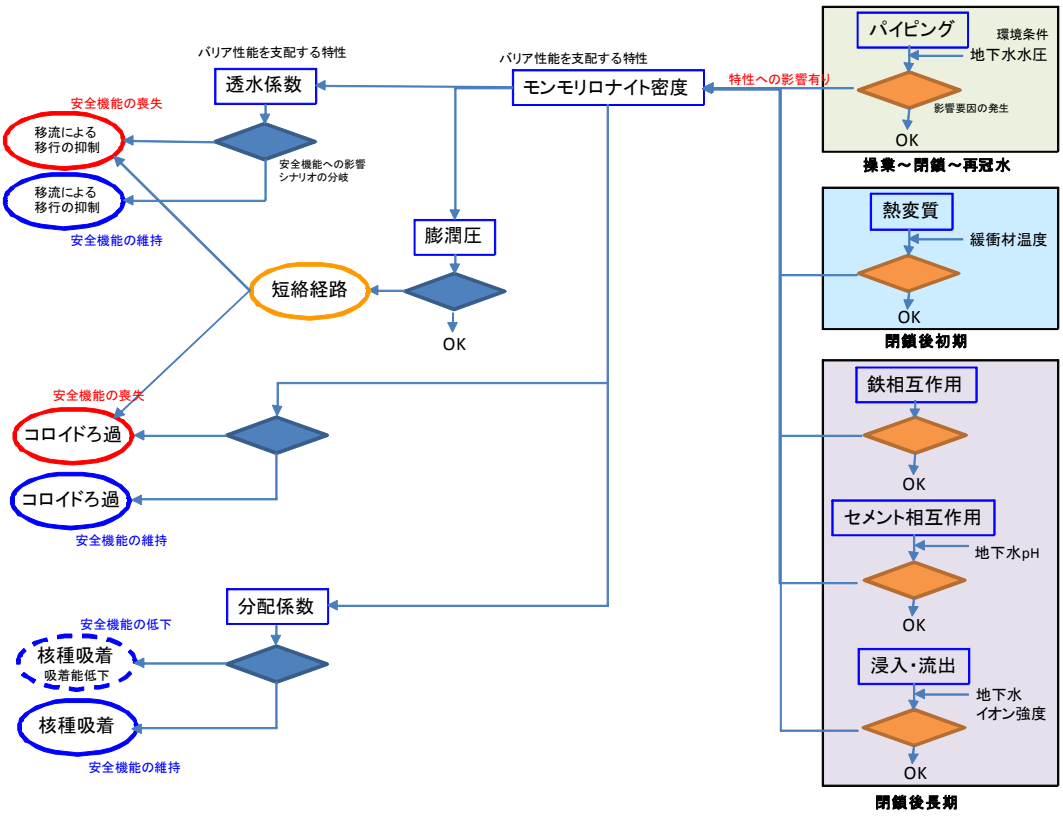


図 4.3-9 FEP チャートの例

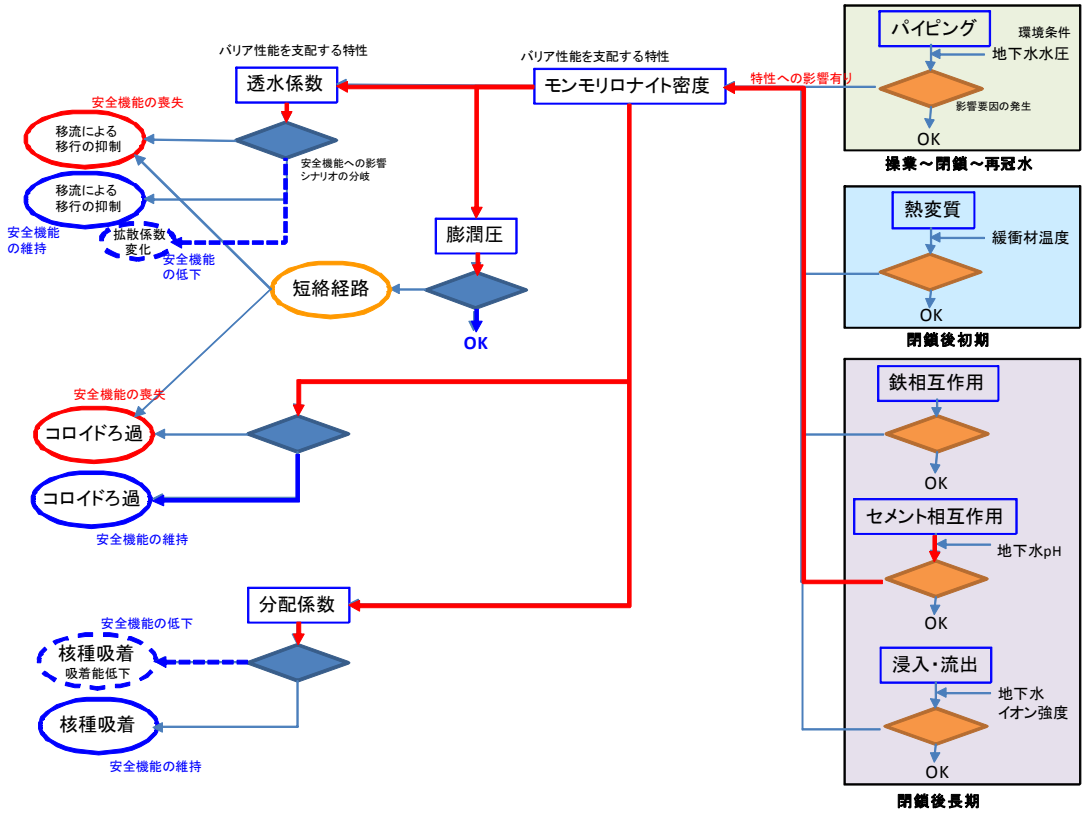


図 4.3-10 現象理解情報に基づく発生可能性を考慮した
FEP チャートに基づく安全機能への影響検討例

(8) プロセスの発生可能性に関する討論モデルを用いた情報整理

(7) における FEP チャートでは，プロセスの発生可能性，プロセス発生の結果としての安全機能への影響について，判断を行っている。これらの判断根拠の概要は，(5) に記載されているが，この背景には，FEP カタログや個別の研究報告等に記載されている科学的知見に基づいた専門家の思考や専門家間の議論による判断がある。

そのような判断過程の追跡性を向上させる一つの試みとして，討論モデルの形式での情報の整理が有効と考えられる。図 4.3-11 に，主張“パイピングにより緩衝材の安全機能の低下が生じる可能性は低い”に対する討論モデルを示す。

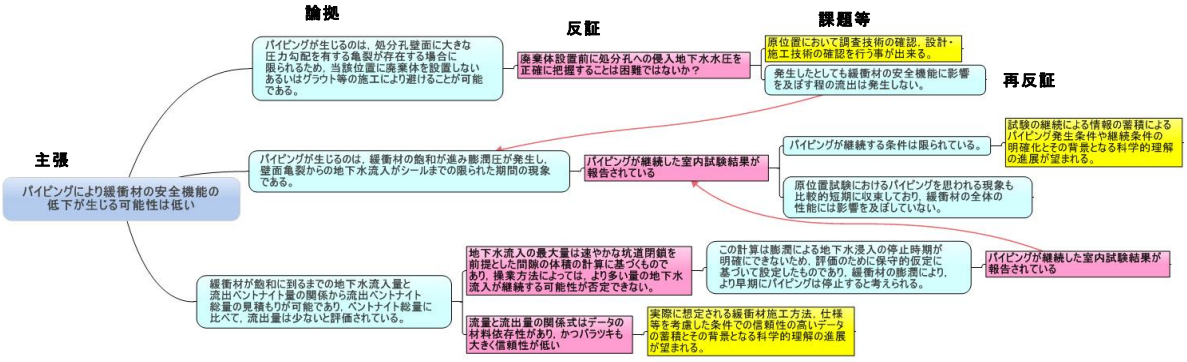


図 4.3-11 主張“パイピングにより緩衝材の安全機能の低下が生じる可能性は低い”
に対する討論モデルの例

水色は，主張を支持する論拠や再反証であり，桃色は前段の主張を支持する論拠等に対する反証である。黄色は，論証・反証の結果として抽出された課題，あるいは処分場の地質環境等が明示されていない現時点では判断できない項目である。

このような，討論モデルを用いた，知見と論点の整理の結果として，パイピングによる緩衝材の安全機能の低下については，以下のように結論できる。

処分施設を設置する場所の地質環境条件や施工方法等に依存するものの，パイピングが発生する条件は限られており，適切な設置位置の選択と工学的対策により回避可能と考えられる。また，仮に発生したとしても長期に継続し，安全機能に影響を及ぼすほどの量の緩衝材が流出することの蓋然性は低い。さらに，実施の施工までの期間に，関連する知識を拡充し，原位置の条件での発生可能性の検討や施工対策を行うことで，より確からしい主張が可能になる。

これらのことから，パイピングは通常考えるべき状態から排除可能な現象である。ただし，システムの頑健性を示すことを目的として実施する，再冠水期間のモンモリロナイト密度（あるいは緩衝材密度）を低下させる不確実性解析においては，その原因となり得る一つの可能性として言及しておくことが望ましい。

本作業は，図 4.2-2 中の No. ④にある“【特定】討論モデル”＜分岐の確からしさの論拠等＞”に相当する。

(9) 状態設定および関連する不確実性の記述

ここでは，安全機能とそれに影響する可能性のある影響因子を整理するために実施した上記 (1) ～(8) の検討に基づき，対象とする処分システムの状態変遷を安全評価の時間軸に即して整理する。本検討では，人工バリア領域に特化し，地質環境の長期的安定性が見込まれる 10 万年程度を対象としているため，隆起侵食や海水準変動等の天然現象が処分システムに与える影響は考慮していない。しかし，実際のシナリオ解析においては，サイト調査・評価から得られる情報をもとに作成される地質環境モデルや長期変遷予測モデルを参照し，サイトの長期変遷を考慮する必要があるため，状態設定において時間軸を導入することは極めて重要である。ここでは，評価の時間軸に沿って処分システムの状態変遷をわかりやすく示し，複数の異なる分野の専門家による知識の統合化や合意形成を支援するために有効なツールであるストーリボードを用いる。

なお，本検討ではシナリオ開発の手法の検討に重点を置いており，評価対象としている時空間領域も限定的である。処分概念や期待する安全機能，具体的なサイト条件等が明らかとなった際には，シナリオの検討の初期の段階から，ストーリボードを導入し，処分システムの長期的変遷を時空間的な連続性に配慮しながら検討することが有効である。

本試行におけるストーリボードは，人工バリア領域を対象としていることから，以下の三つの要素から構成することとした。作成したストーリボードの例を図 4.3-12 に示す。

・システムの状態設定の図（状態設定の図）
・基本状態設定における 熱（T）－水理（H）－力学（M）－化学（C）および核種移行（R）に係るプロセスと状態（基本状態設定 THMCR）
・安全機能を支えるバリア性能と影響要因（バリア性能と影響要因）

以下では，(8) までのステップと関係付けながら，上記三つの構成要素に対する役割について記述する。

まず，状態設定の図は，時空間的な整合性の確認および専門家の議論において用いる共通の枠組みとして，情報を分かりやすく提供することを目的として，THMCR に関する状態やプロセスおよびバリア性能と影響要因に関する記述を，概念図を用いて描写したものである。この概念図では，上記の目的を踏まえ，下の基本状態設定の THMCR 欄に記述する状態に加え，検討過程で抽出された安全機能を阻害する可能性のあるプロセス（例えば，モンモリロナイトの熱変質や鉄―ベントナイト相互作用）について網羅的に記述する。

次に，基本状態設定 THMCR では，ステップ(4), (5), (7) および(8) の検討を踏まえ，種々の現象を考慮した上で，確からしいプロセスと状態を基本状態設定として記載する。ステップ (7) で整理される FEP チャート（図 4.3-10）は，ステップ (5) で整理された影響要因に関する発生可能性や発生時期等に基づき，いくつかの分岐を示したうえで，安全機能に影響をおよぼすことが確からしいと判断した内容を表現したものである。このような分析に基づいて，ここでは，確からしいと判断したプロセスを中心に，時間軸に即して THMCR の観点から記述する。

次に，バリア性能と影響要因については，まず，ステップ (2) において定義した安全機能を支えるバリア性能（表 4.3-4 参照）を時間軸に即して設定し，安全機能を支えるバリア性能欄に記述する。そのうえで，ステップ (3) において要因分析図に基づき抽出された影響要因を，影響要因（阻害するプロセス）の欄に記述する。さらに，ステップ (5) で整理した結果に基づき，ステップ (7) において FEP チャートを用いて安全機能への伝播と分岐の可能性の検討を行い，影響要因ごとに，評価上の取り扱いを“取り扱い”の欄に記述する。同じプロセスを発端とした場合であっても，バリア性能への影響は異なり，結果として取り扱いも異なる場合がある。評価上の取り扱いとしては，影響要因が安全機能に与える影響について，以下の三つのパターンに大別することができる。ストーリボード中では，【A】【B】【C】の記号で記述する。

- 既存の知見より，安全機能へ影響を及ぼす蓋然性が高いと考えられ，安全機能の喪失，劣化を基本として考えるべき状態として取り扱う。【A】
- 既存の知見より，安全機能へ影響が及ぶ蓋然性は高くないと判断されるものの，影響が発生する不確実性が存在するとして，不確実性解析ケースとして取り扱う。【B】
- 既存の知見から，安全機能への影響が十分に小さいと判断されるもの。【C】

なお，ステップ (5) において現象理解の情報に基づいて記述を行った項目は一部に限られているが，図 4.3-12 の影響要因のカラムは，既往の知見等を参照しつつ，網羅的に項目を記載した。

This is a blank page.

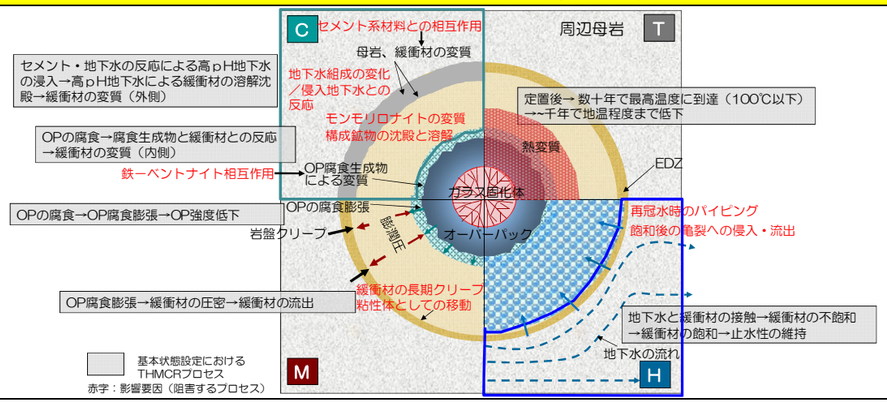
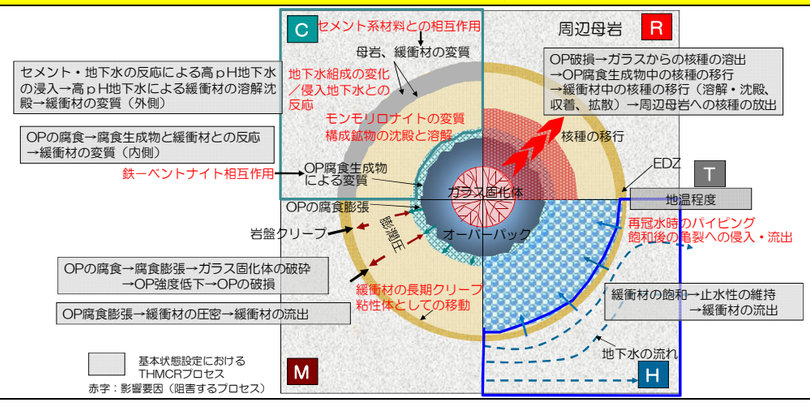
<table>
<tr><th></th><th colspan="2">オーバーパックが密封性を保持している期間（～数千年）</th><th colspan="3">オーバーパックが密封性を喪失した期間（～10 万年）</th></tr>
<tr><td>システムの状態設定の図</td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="5">基本状態設定</td><td>T</td><td>・定置後＝＞数十年で最高温度に到達（100℃以下）＝＞～千年で地温程度まで低下</td><td colspan="3">・地温程度</td></tr>
<tr><td>H</td><td>・地下水と緩衝材の接触＝＞不飽和＝＞緩衝材は飽和＝＞止水性の維持</td><td colspan="3">・緩衝材は飽和＝＞止水性の維持</td></tr>
<tr><td>M</td><td>・OP の腐食＝＞OP 厚み減＝＞OP 強度低下
・OP 腐食膨張＝＞緩衝材の圧密</td><td colspan="3">・OP の腐食＝＞OP 腐食膨張＝＞ガラス固化体の破砕
＝＞OP 強度低下＝＞OP の破損
・OP 腐食膨張＝＞緩衝材の圧密</td></tr>
<tr><td>C</td><td>・OP の腐食＝＞腐食生成物と緩衝材との反応＝＞緩衝材の変質（内側）
・セメントと地下水の反応による高ｐH 地下水の浸入＝＞緩衝材の溶解沈殿＝＞緩衝材の変質（外側）</td><td colspan="3">・OP の腐食＝＞腐食生成物と緩衝材との反応＝＞緩衝材の変質（内側）
・セメントと地下水の反応による高ｐH 地下水の浸入＝＞緩衝材の溶解沈殿＝＞緩衝材の変質（外側）⇒ 緩衝材の収着・拡散特性の変化</td></tr>
<tr><td>R</td><td>・OP 内の密封性により核種移行は生じない</td><td colspan="3">・OP 破損＝＞ガラスからの核種の溶出＝＞OP 腐食生成物中の核種の移行＝＞緩衝材中の核種の移行（溶解・沈殿、収着、拡散）＝＞周辺母岩への核種の放出</td></tr>
<tr><td rowspan="8">安全機能を支えるバリア性能と影響要因（緩衝材のみ）</td><td>バリア性能</td><td>影響要因（阻害するプロセス）</td><td>取り扱い</td><td>バリア機能</td><td>影響要因（阻害するプロセス）</td><td>取り扱い</td></tr>
<tr><td>低透水性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・再冠水時におけるパイピング
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・100℃以下では熱変質は顕在化しない：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【B】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【A】（拡散特性の変化）
・環境条件等に依存，発生可能性は低い：【B】
・処分後数千年では有意な流出は生じない：【C】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】
・密度が高い場合には顕在化しない：【C】</td><td>低透水性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・再冠水時におけるパイピング*
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・長期のイライト化は環境条件に依存，発生可能性低：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【B】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【A】（拡散特性の変化）
・環境条件等に依存，発生可能性は低い：【B】
・我が国の地下水水質では発生可能性は低い：【B】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】
・密度が高い場合には顕在化しない：【C】</td></tr>
<tr><td>収着性
（性能発揮はオーバーパック破損後）</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・再冠水時におけるパイピング
・飽和後の亀裂侵入・流出
・侵入地下水との反応（イオン型の変化）
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・100℃以下では熱変質は顕在化しない：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【B】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【A】（吸着特性の変化）
・環境条件等に依存，発生可能性は低い：【B】
・処分後数千年では有意な流出は生じない：【C】
・環境条件等に依存して発生：【B】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】
・環境条件等に依存して発生：【B】</td><td>収着性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・再冠水時におけるパイピング*
・飽和後の亀裂侵入・流出
・侵入地下水との反応（イオン型の変化）
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・長期のイライト化は環境条件に依存，発生可能性低：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【B】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【A】（吸着特性の変化）
・環境条件等に依存，発生可能性は低い：【B】
・我が国の地下水水質では発生可能性は低い：【B】
・環境条件等に依存して発生：【B】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】
・環境条件等に依存して発生：【B】</td></tr>
<tr><td>コロイドろ過性
（性能発揮はオーバーパック破損後）</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・再冠水時におけるパイピング
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・100℃以下では熱変質は顕在化しない：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【C】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【C】
・環境条件等に依存，発生可能性は低い：【C】
・処分後数千年では有意な流出は生じない：【C】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】
・密度が高い場合には顕在化しない：【C】</td><td>コロイドろ過性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・長期のイライト化は環境条件に依存，発生可能性低：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【C】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【C】
・我が国の地下水水質では有意な流出は生じない：【C】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】
・密度が高い場合には顕在化しない：【C】</td></tr>
<tr><td>自己シール性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・再冠水時におけるパイピング
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・100℃以下では熱変質は顕在化しない：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【C】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【C】
・環境条件等に依存，発生可能性は低い：【C】
・処分後数千年では有意な流出は生じない：【C】
・セメント系材料との相互作用において考慮【
・密度が高い場合には顕在化しない：【C】</td><td>自己シール性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・長期のイライト化は環境条件に依存，発生可能性低：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【C】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【C】
・我が国の地下水水質では有意な流出は生じない：【C】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】
・密度が高い場合には顕在化しない：【C】</td></tr>
<tr><td>オーバーパック支持性</td><td>・緩衝材の長期クリープ
・粘性体としての移動</td><td>・現象は発生するが影響は限定的，設計で対応：【C】
・発生可能性は低くかつ影響は限定的，設計で対応：【C】</td><td>オーバーパック支持性</td><td>・緩衝材の長期クリープ
・粘性体としての移動</td><td>・現象は発生するが影響は限定的，設計で対応：【C】
・発生可能性は低くかつ影響は限定的，設計で対応：C</td></tr>
<tr><td>自己修復性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・再冠水時におけるパイピング
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解
・地下水組成の変化</td><td>・100℃以下では熱変質は顕在化しない：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【C】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【C】
・環境条件等に依存，発生可能性は低い：【C】
・処分後数千年では有意な流出は生じない：【C】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】</td><td>自己修復性</td><td>・熱変質（内側）
・風化
・鉄―ベントナイト相互作用
・セメント系材料との相互作用
・飽和後の亀裂侵入・流出
・構成鉱物の沈殿・溶解</td><td>・長期のイライト化は環境条件に依存，発生可能性低：【C】
・地表近傍に接近しないため顕在化しない：【C】
・緩衝材内側近傍に限定される：【C】
・緩衝材全体は及ばないが組成変化が起こる：【C】
・我が国の地下水水質では有意な流出は生じない：【C】
・セメント系材料との相互作用において考慮：【C】</td></tr>
<tr><td>安全機能の状況</td><td colspan="2"></td><td colspan="3">移流による移行の抑制：機能発揮，　コロイド移行の防止・抑制，機能発揮，
収着による放射性物質の移行遅延：遅延性能の変化</td></tr>
</table>

図 4.3-12 人工バリアスケールを対象としたストーリボードの例

図 4.3-12 においてストーリボードを用いて表現した“状態設定”は，確からしいと考えられる処分システムの状態の変遷と，考慮すべきその状態からの逸脱の可能性についての記述である。今回の試行では，前述のとおり，作業段階のプラットホームとしても利用可能であること等の有効性に着目し，状態設定の記述のツールとしてストーリボードを用いた。

一方，第２次取りまとめ（JNC，1999a）においては，その 4.3 項に“地下水シナリオの記述”として，着目する期間およびバリアごとに，その状態を文章で記述している。そこで，本検討では，“状態設定”の表現方法として，文章での記述についても試行した。表現方法として，複数の選択肢を視野に入れ検討しておくことで，それぞれの手法の特徴を踏まえ，目的に応じた柔軟な状態設定の記述が可能となると考える。

以下に，図 4.3-12 と同様の内容を文章として表現した例を示す。

◎オーバーパックが密封性を保持している期間

人工バリアの温度は，廃棄体定置後上昇し，10～50 年後に最大となる。廃棄体は，緩衝材の最高温度が 100 ℃を超えないように，適切な間隔をもって定置されるため，緩衝材中の温度は最大でも 100℃以下となる。その後温度は下降し，1,000 年後には地温と同程度となる。

緩衝材定置後，地下水による浸潤が始まる。処分孔の設置位置の適切な選定等により，パイピングの発生は防止される。地下水の浸潤に伴って緩衝材が膨潤し，施工上生じたベントナイト内およびベントナイト／母岩間の隙間等が埋められ，均質な微細間隙構造を有するようになる。緩衝材はやがて地下水で飽和し，緩衝材の低透水性により，緩衝材中での物質の移動は拡散支配となる。

緩衝材の飽和に伴い緩衝材の膨潤圧と岩盤の地圧により，処分場内の応力の再配分が生じるとともに，オーバーパックは緩衝材中で定置された位置に保持される。また，オーバーパックは，埋め戻し後，操業期間中に持ち込まれた緩衝材の間隙等に残る酸素を消費して腐食し，その後還元条件下で水素発生型の腐食がゆっくりと進む。この結果，オーバーパックの強度は数千年という時間スケールで徐々に弱まる。また，オーバーパックの腐食に伴う腐食膨張により，緩衝材に力学的影響を及ぼす。

支保工としてセメント系材料を使用する場合,セメント中の高アルカリ成分が地下水に溶出し，pH が上昇する。この高アルカリ地下水と緩衝材との反応により，外側から緩衝材中のモンモリロナイトの溶解と二次鉱物の沈殿が進行する。ただし，緩衝材全領域にわたって，モンモリロナイトが著しく喪失する可能性は低い。

オーバーパックの腐食生成物と緩衝材との相互作用により，内側の緩衝材の一部が変質する可能性がある。ただし，その領域は限定的であり，全体として緩衝材性能が顕著に低下することはない。また，設計によって人工バリア内の最高温度が 100℃未満となるように廃棄体の定置間隔が設定されるため，緩衝材の熱変質は生じない。

◎オーバーパックが密封性を喪失した期間

この時期，ガラス固化体からの発熱は低く，緩衝材中の温度は地温と同程度となる。緩衝材は地下水で飽和し，均質な微細間隙構造を維持している。

オーバーパックは，腐食の進行に伴い，その強度が周囲からの応力を下回った段階で機械的に破損する。さらに腐食が進むと，腐食膨張によりガラス固化体や緩衝材に力学的影響を及ぼす。

このときガラス固化体については，その応力によりガラス固化体の破砕が生じると考えられる。緩衝材については，周辺母岩の亀裂への緩衝材の侵入が起こる。ただし，処分孔の設置位置の適切な選定や工学的対策により，亀裂の開口幅や周辺母岩中の流速が浸食を促進する状態となることを避けることが可能であり，その流出量は制限される。また，緩衝材の侵入は時間の経過とともに収束することから緩衝材密度の顕著な低下を生じることはない。緩衝材中のモンモリロナイトのコロイドとしての散逸は，わが国の一般的な地下水水質においては発生することは考えにくい。また，オーバーパックの腐食膨張や沈下については，緩衝材の厚さや密度を変化させる可能性があるものの，設計において考慮されており，人工バリアの機能を損なうことはない。

オーバーパック破損後，地下水がガラス固化体に接触し，ガラスマトリクスの溶解に伴い放射性核種がゆっくりと地下水中に溶出する。主要な放射性元素の多くは還元条件で難溶性であるため，ガラス固化体からの溶出あるいは親核種からの崩壊により溶解度を超えると沈澱を生じる。その際，同位体が存在する場合には，それぞれの核種の濃度は，同位体存在比に応じて元素の溶解度よりも小さくなる。核種は，このように溶解度により制限される濃度を上限として濃度勾配に従って緩衝材中を溶質として拡散移行し,その過程で緩衝材の構成鉱物に収着することにより，移行が遅延される。核種は，人工バリア中を移行する間にも放射性崩壊により減衰／生成する。緩衝材外側周辺を通過する地下水の流れは一般的に遅く，緩衝材中の濃度勾配はゆるやかなものとなる。また，緩衝材が有する微細間隙構造によるフィルター効果により，コロイド，微生物あるいは高分子量の天然有機物の移行は抑制される。

支保工としてセメント系材料を使用する場合，セメント系材料によりもたらされる高アルカリ地下水と緩衝材との反応により，外側から緩衝材中のモンモリロナイトの溶解と二次鉱物の沈殿が進行する。ただし，緩衝材全領域にわたって，モンモリロナイトが著しく喪失する可能性は低い。したがって，緩衝材に係る三つの安全機能は担保されるものの，“収着による放射性物質の移行遅延”性能は変化し，“移流による移行の抑制”に関連する緩衝材中の物質移行特性（拡散挙動）も変化する。

本項目の作業は，図 4.2-2 中の No. ④にある“【特定】文書による記述，ストーリボード等”に相当する。

以上，4.2 項で示した状態設定の基本手順（図 4.2-１）に沿った一連の作業体系の各段階での作業内容や具体的な情報の流れ（作業・情報フロー）（図 4.2-2）に従って，緩衝材を例として，各作業の具体例を示しながら，状態設定を試行した。今回の試行では，安全機能を出発点として，安全機能に影響を与える可能性のあるプロセスを抽出し，その発生可能性の議論を含めて，状態設定として提示した。最新の詳細な現象理解の情報に基づいた議論を行った項目は限定的であったが，全体的な作業の流れの一例を示すことができた。

今後，個別現象についての情報整理を継続するとともに，それぞれの影響要因が安全機能に与える影響についての検討を進め，検討過程を論拠とともに整備していくことが重要であると考える。

なお，本検討は，緩衝材という一つのシステム構成要素にのみ着目して進めたため，バリア相互の影響についての十分な検討を示すことができなかった。また，図 4.2-2 中に記載のある“安全機能の相関図”についても示していない。今後，複数のバリアを対象とした検討を進めて行くことが必要である。

4.4 知見の体系化と方法論

状態設定基本手順（図 4.2-１）に沿った一連の作業の内容とそれら作業で表出化されるべき情報・知見の流れ（作業・情報フロー）（図 4.2-2）の中では，作業の進展に伴い種々の情報・知見が新規作成あるいは更新されていくことになる。そのため，品質管理の観点からは，作業内容と成果（表出化された情報・知見）およびその根拠を品質情報として一元的に管理し，透明性と追跡性を確保することが重要になる。これら品質情報は，利用者の利便性や管理の容易性を考えると，電子化し一連の作業と関連付けることが有効である。これらを踏まえ，品質情報の電子化による管理体系の基本構成を提案した。そのイメージを図 4.4-1 に示す。

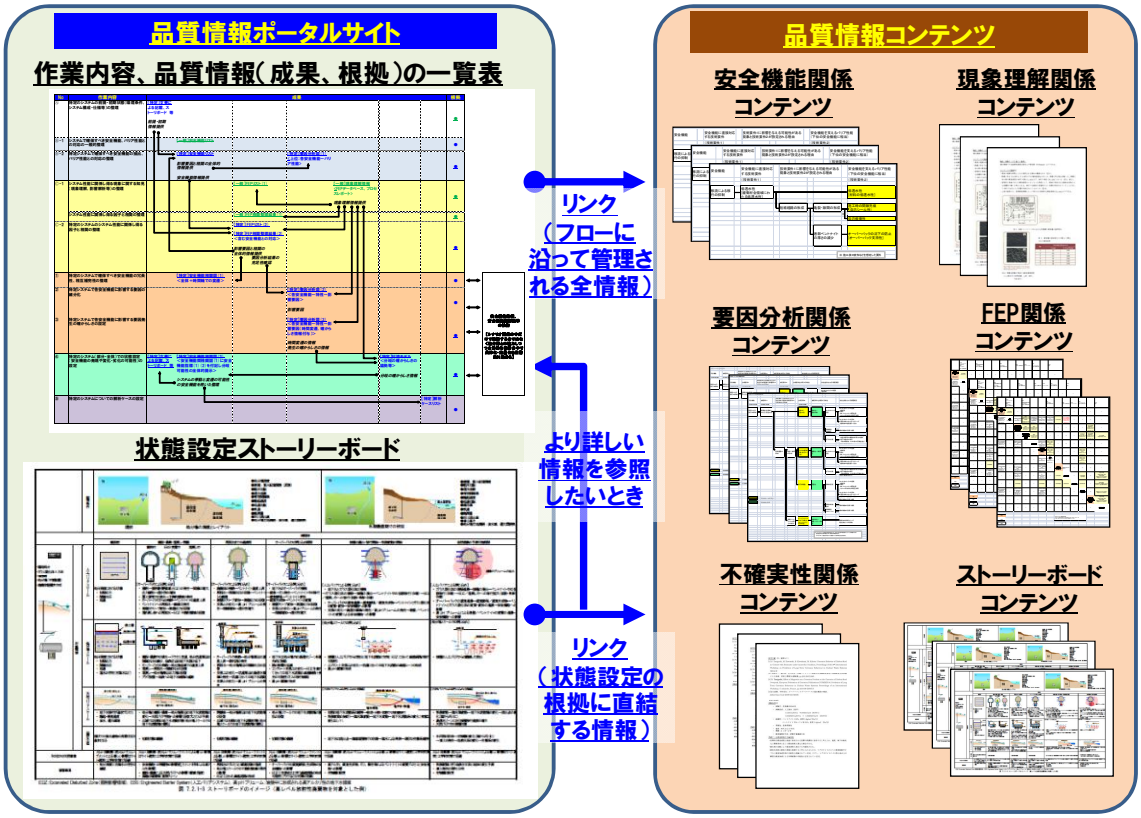


図 4.4-1　品質情報の管理体系のイメージ

ここで，品質情報の管理体系は以下のような考え方で設定している（図 4.4-1）。

・品質情報にアクセスするための中核的なポータルサイト（品質情報ポータルサイト）として，一連の作業の各段階での作業内容や具体的な情報・知見の流れを示す作業・情報フロー（図 4.2-2）を用いる。

・一方，品質情報コンテンツ（作業・情報フローの作業内容と成果およびその根拠等）については，その電子ファイルをコンテンツの種類ごと（例えば，安全機能関係コンテンツ，FEP 関係コンテンツ等）にグループ化して所定の場所（個人 PC の場合はフォルダ，インターネット／イントラネットの場合はサーバー上）に管理する。

・上記の品質情報コンテンツを，品質情報ポータルサイトの作業・情報フローの該当箇所とハイパーリンクさせる。なお，品質情報コンテンツについては，同じ種類のものでも，作業の

どの段階に作成されたか，いつ更新されたか等で具体的な内容が異なる。そのため，ハイパーリンクにおいては，作成・更新された段階・時期を区別できるようにすることも重要となる。

・その後，作業・情報フローを HTML 化することにより，品質情報ポータルサイトをブラウザ上で表示できるようにする。

・これにより，作業の進展に伴い作成・更新される全ての種類の品質情報コンテンツへの共通手順でのアクセスが可能となり，例えば同種類の情報・知見等が作業の進展に伴い更新されていく様子をフローに沿って確認することも容易となる。

・また，作業・情報フロー（図 4.2-2）の中で最終的な状態設定の結果とすることが考えられている状態設定ストーリボード（図 4.2-3）も同様に品質情報ポータルサイト化する。ここで，状態設定ストーリボードをポータルとする品質情報コンテンツへのアクセスは，状態設定ストーリボードの作成に直接的に利用された品質情報コンテンツ（例えば，安全機能相関図）に限定することで，どのような品質情報コンテンツが状態設定の直接的な根拠となっているかを明確にするとともに，その内容を確認しやすくする。また，状態設定ストーリボードをポータルとしてその直接的な根拠を確認しながら，さらにその背景となるより詳しい情報・知見を参照したい場合にも対応できるように，状態設定ストーリボードのポータルサイト上に，一旦作業・情報フローのポータルに移動しそこから品質情報コンテンツにアクセスできるルートを設定する。

4.5　シナリオ構築の背景となる知見の整理

本項では，シナリオ構築（状態設定）の検討や，その後に実施する解析ケースの設定において利用することを前提として，システムの安全機能に影響を及ぼす個別の現象（プロセス）についての知見の整理を行った。

本検討においては，1) 鉄－ベントナイト相互作用，2) 緩衝材流出現象，3) セメント－ベントナイト相互作用とアルカリプルームのオーバーパックへの影響, 4) ガラス固化体近傍における溶存ケイ酸濃度変化の影響等を考慮したガラス溶解挙動　の四つの項目に着目することとした。

これらの項目は，第２次取りまとめや第２次 TRU レポートが公開された時点から，新しい知見が得られている，あるいは最近の諸外国の性能評価において議論されているという観点で選択した。1) ～3) は，前項で展開した緩衝材の状態設定においても利用可能な知見である。なお，これら 4 項目のうち 1)，2)は，文献調査による情報の整理を実施し，3)，4)については解析を実施し，環境条件の安全機能への影響，モデルやデータの選択による結果へ影響等についての検討を行った。

4.5.1　鉄－ベントナイト相互作用

<u>安全機能との関係</u>

鉄－ベントナイト相互作用は，4.3 項における安全機能に関する要因分析で整理したように，いくつかの“安全機能を支えるバリア性能を支配する特性”を変化させ，その結果として緩衝材の安全機能に影響を与える可能性がある現象（プロセス）である。

ベントナイトの主成分鉱物であるモンモリロナイトが，オーバーパック材料である鉄や，鉄の腐食生成物との相互作用によって，モンモリロナイト以外の鉱物に変化することにより，“モンモリロナイト密度”が低下する。また，相互作用の結果としてモンモリロナイト以外の初期鉱物の溶解や新たな二次鉱物の沈殿が起こることにより，“緩衝材鉱物組成”，“間隙構造（間隙率，セメンテーション）”に影響を及ぼす。

これらの影響は，“透水性”や“可塑性”への影響を介して，安全機能である“移流による移行の抑制”に影響を及ぼす可能性や，“コロイド移行の防止・抑制”および“収着による放射性物質の移行遅延”にも影響を及ぼす可能性がある。

<u>現象の理解</u>

緩衝材はオーバーパック材料である金属鉄や鉄腐食生成物との接触により，還元的で鉄濃度の高い化学環境に曝される。また，鉄の腐食反応が緩衝材間隙水の pH 等に影響を及ぼす可能性もある。このような環境条件の変化によって，緩衝材中の主成分鉱物であるモンモリロナイトが変質する可能性がある。

緩衝材の長期にわたる化学的安定性を考慮する際の変質現象についての取り扱いについては，鉄との相互作用に限らず，FEP の一つとして，第２次取りまとめ分冊２（JNC，1999b）（4.1.2.1.11 経年挙動）および分冊３（JNC，1999a）（4.2.3.5 緩衝材の変質），第２次 TRU レポートにおける FEP 辞書（BM-04：緩衝材の化学的変質），神崎ほか（2009）における FEP シート（B4.4 緩衝材，埋め戻し材の化学的変質）に，それぞれ記載がある。これらにおける，鉄－ベントナイト相互作用に関する記述は，2005 年頃までのわが国における実験的研究等に基づいて，イオン交換による Fe 型化は発生し得るものの，モンモリロナイトが非膨張性の粘土鉱物に変化する可能性に

ついては，積極的に支持する知見は認められないとしながら，さらなる検討の必要性を指摘している。

一方，2002 年頃から仏国を中心とした欧州の研究者によって，鉄共存下では，比較的低温（＜100℃）においても，モンモリロナイトの一部がバーチェリン等の非膨潤性の粘土鉱物に変化することが報告され（例えば，Lantenois et al., 2005;Perronet et al., 2008），緩衝材の長期性能の観点から，鉄―ベントナイト相互作用についての研究が注目されるようになった。

欧州では，EU プロジェクト（NF-Pro）のタスク（Smart et al. 2006）としての試験や解析も進められており，ワークショップを通じた知見の集約（例えば，Kumpulainen et al., 2010）等も進められている。わが国においては，上記の欧州の動向等も含めた，鉄－ベントナイト相互作用に関する調査研究が，2008 年より実施されている（JAEA, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012）。ここでは，その調査内容を中心に知見を整理する。

2007 年時点における鉄－ベントナイト反応の試験に関する調査･整理結果を表 4.5.1-1 に示す。既往の研究に基づけば，ベントナイトの変質現象は粘土材料，温度，pH，鉄／粘土比，液／粘土比等の実験条件により異なり，以下のようにまとめることができるとしている（JAEA, 2008）。

・鉄共存下でのベントナイトは，250℃以上の高温で変質する報告例が多い。
・100℃以下の比較的低温で変質する事例も報告されるが，これに関しては，試験条件が，アルカリ性，還元的（低 Eh），鉄／粘土（Iron/Clay：I/C）比が大きい場合である。
・変質し易いベントナイトは，2-八面体スメクタイトからなるものであり，特に Fe^{3+}の含有量が多いノントロナイトは変質し易い傾向がある。

JAEA（2008，2009）のモンモリロナイト（クニピア P）を用いたバッチ試験においては，鉄／ベントナイト比が比較的大きい場合（鉄／ベントナイト比＝1）のみ，150℃で，鉄型化に加え，蛇紋石族および緑泥石族の鉱物が生成する可能性があることが示唆されている。ただし，この条件では，試験後の pH が 10～11 と上昇していたことから，鉄の溶解反応に伴う pH の上昇がスメクタイトの不安定化に寄与していると推定されている。また，高精度位相シフト干渉計（PSI）を用いたスメクタイト変質挙動のその場観察結果等から，金属鉄共存系よりも磁鉄鉱共存系のほうが変質速度が遅いことが確認されている（JAEA，2010）。

さらに，高温の熱影響を受けた緩衝材の特性（透水性，膨潤性）について， 150℃程度の温度履歴を受けた試料では，室温の場合と比較すると，透水係数は 2 桁程度増加し，膨潤圧は 50%程度減少することが示されている（Wersin et al.，2007）。

JAEA（2010，2011）では，前述の試験結果等の整理に基づく現象理解から，鉄－ベントナイト相互作用に関わる概念モデルを検討し，それに基づいて緩衝材の長期的な変質評価解析モデルの検討を行っている。解析では，以下の四つのプロセスを取り扱い，処分システムの体系を対象とした化学反応と物質移行の連成解析が実施されている。

①炭素鋼の腐食（腐食速度），腐食生成物の沈殿
②圧縮ベントナイト中での鉄の拡散
③スメクタイトの鉄の収着（結晶端への収着，イオン交換）とスメクタイトの組成変化
④スメクタイトの溶解と二次鉱物の生成

現在までの解析では，オーバーパック近傍でグリーナライト等の緑泥石族の鉱物やバーチェリン，Fe サポナイトの生成が認められるが，二次鉱物の生成により数百年程度でオーバーパック近

傍の緩衝材の間隙が閉塞する結果が得られている。上記のプロセスを取り扱うモデル，パラメータ，熱力学データ等については，引き続きの妥当性の確認が必要である。

また，類似の解析事例として，Wersin et al. (2008)，Marty et al.(2010)等がある。これらの検討では，データ等の不確実性に留意が必要としつつも，解析結果からは緩衝材中に供給される鉄のフラックスは小さいことから，影響を受ける緩衝材領域は制限されるとしている。Marty et al.(2010)の解析例では，10 万後においても，鉄から 10cm 程度離れた部分ではほとんどのモンモリロナイトが残存しており，接触面近傍においてのみ磁鉄鉱，緑泥石，鉄サポナイトの生成が認められる結果となっている。

現象の発生時期

鉄とベントナイトの接触面に地下水が浸潤し，鉄の腐食が始まった時点から，腐食により供給される Fe イオンの移動等が起こり，鉄とベントナイトの相互作用による反応が始まる。オーバーパック破損後もしばらくの期間は金属鉄が存在し，全ての鉄が腐食した後も腐食生成物は存在し続ける。したがって，鉄ーベントナイト相互作用は，オーバーパック表面に地下水が到達した時点以降，継続的に発生し続ける可能性がある現象である。

評価での取り扱い

第２次取りまとめにおいては，当時得られていた知見に基づき，緩衝材性能の低下は生じにくいと判断している。その後の各国の性能評価報告書における取り扱いは以下のとおりである。

SR-Site においては，キャニスター材料は銅であり，“閉じ込め”の安全機能を考える段階においては，鉄の存在はわずかであることからその影響が顕著となることはないとしている。キャニスターが破損した段階ではインサートとして鋳鉄が存在するため，緩衝材のある部分が鉄と相互作用を起こすことは排除することはできないとしつつも，鉄ーベントナイト相互作用が緩衝材の重要な特性を変化させることはないと推定している。しかしながら，このプロセスについては不確実性が大きいため，モンモリロナイト変質については，その感度についての議論が行われるべきであるとしている（SKB, 2010b）。

仏国 Andra の Dosseier 2005（Andra, 2005a：Andra, 2005b）においても，鉄との相互作用による鉱物変質が想定される領域は限られており，緩衝材全体の性能に与える影響は小さいとしている。その一方で，鉄の粘土への収着が緩衝材の核種の収着能を低下させる可能性があるとしている。これらを踏まえて，評価においては，Dossier において通常変遷シナリオ（Scénario d’évolutioin normal）の枠組（domaine d’évolutioin normal）で実施する保守的な分配係数の設定といった感度解析によってこれらの影響を確認するとしている。

現在までの知見では，現象理解において既述したように，特定の実験条件においては，鉄との相互作用によってモンモリロナイトが非膨張性の粘土鉱物に変質することが認められているが，処分システムにおいて，広範囲にわたり緩衝材性能が劣化することを示唆する論拠は見あたらない。したがって，鉄との相互作用による性能劣化は生じないという取り扱いを評価の基本とすることができるものと考えられる。ただし，他国の評価報告書においても言及されているように，不確実性への対応として，緩衝材性能が低下するという状態について，感度解析的にシステム全体性能に及ぼす影響を確認しておくことが必要と考えられる。

不確実性・課題

物質移行と化学反応の連成解析結果が一つの参考情報となっているが，鉱物の熱力学データ，溶解・沈殿の反応速度式やそこでの定数，二次鉱物の選定，鉱物組成や空隙率の変化の物質移行パラメータへのフィードバック等のそれぞれに，知識の不足に基づく不確実性が残っている。したがって，JAEA（2010，2011）での検討のように，モデル，パラメータの精緻化と並行して，モデルの不確実性のそれぞれが，解析結果にどのように影響を及ぼすかといった検討を進め，不確実性の影響の程度を把握し，評価に反映することが有効かつ必要不可欠な対応と考えられる。

表 4.5.1-1　既往文献における試験条件および同定された反応生成物の例（JAEA, 2008）

No.	文献	温度(℃)	粘土(岩石)	鉄の供給形態	鉄／粘土比	溶液	液固比	共存物	試験期間	反応生成物
1	Wilson et al (2006)	250	クニピアーF	Fe(0)	443/750=0.59	NaCl:36mM	100	・共存物無し ・$CaCO_3$(37.5mg)を添加	93日，114日	磁鉄鉱，変質したモンモリロナイト
2	Wilson et al (2006)	250	クニピアーF	Fe(0)＋Fe_3O_4	443/750=0.59	NaCl:36mM	100	・共存物無し ・$CaCO_3$(37.5mg)を添加		磁鉄鉱，赤鉄鉱，方沸石
3	Wilson et al (2006)	80,150,250	クニピアーF	Fe(0)	443/750=0.59	$FeCl_2$:18.0mM，4.5mM	100	－	90日	－
4	Lantenois　et al(2005)	80	精製スメクタイト	Fe(0)	1	dis.H_2O	25	－	1.5ヶ月	磁鉄鉱，クロンステダイト
5	Habert (2000)	200	スメクタイト	Fe(0)	1/30=0.03	$CaCl_2$, $MgCl_2$	16.7	－	1ヶ月，2ヶ月	－
6	Guillaume et al (2003)	80	MX-80	Fe_3O_4＋Fe_2O_3(1:1)	1/10=0.1	NaCl+$CaCl_2$	10	－	3ヶ月，9ヶ月	－
7		300		Fe_3O_4＋Fe_2O_3(1:1)				－	1，3ヶ月，9ヶ月	－
8		300		Fe(0)＋Fe_3O_4				－	3ヶ月，9ヶ月	緑泥石，サポナイト
9		300		Fe(0)＋Fe_3O_4＋鉄板				－	1，3ヶ月，9ヶ月	－
10	Papillon et al (2003)	80	FoCa7	Steel　plate	－	Granitic water	0.4	－	8ヶ月	－
11	Latrille et al (2001)	最高170	FoCa7	Steel　cylinder	－	Granitic groundwater	0.3	－	6ヶ月，48ヶ月	－
12	Perronnet et al (2008)	80	FoCa7(Ca型)	Fe(0)	0～1/3=0.33	Evian	16.7	－	1.5ヶ月	－
13	Cathelineau et al (2005)	80,150,300	MX-80	Fe(0),Fe_3O_4,Fe_2O_3鉄板	－	NaCl,$CaCl_2$ 溶液	5 to 50	－	1年	バーチェリン
14	Carlson et al (2007)	30，50	MX-80(圧縮)	Fe(coupon, wire)	1		1/3.6	－	10ヶ月	磁鉄鉱，針鉄鉱
15	Combarieu et al (2007)	90	Callovo-Oxfordian	Fe(0)	1	ultra pure.H_2O	4/10	－	6ヶ月	－
16				Fe(0)+iron foil				－		－
17	Chapentiera (2006)	80,150,300	ベントナイト	Fe(0)＋Fe_3O_4＋鉄板	1/10＝0.1	アルカリ溶液	10	－	3，6，9ヶ月	鉄に富むバーミキュライト
18	Kamei et al (1999)	23	Na-スメクタイト	－	－	NaCl＋$FeCl_2$(1.8mmol/l)	50 to 500	－	10日	Fe型スメクタイト
19	産業創造研究所 (2007)	90	クニゲルV1	－	－	蒸留水＋$FeCl_2$ ($15mmol/dm^3$)	－	－	1,10,20,44日	鉄水酸化物
20	藤島ほか(2000)	常温	クニゲルV1(圧縮)	炭素鋼	－	海水	－	－	4年	－
21	笹本ほか(2003)	常温	クニゲルV1	Fe(0)	1	dis.H_2O	5	－	6年	Fe型スメクタイト
22	大場(2003)	250,300,400	クニピア-F	Fe_3O_4	0～1	dis.H_2O	0.5	－	8ヶ月	緑泥石/スメクタイト混合層
23	陶山ほか(2006)	250	Fe型化ベントナイト	なし	－	dis.H_2O	20	－	1ヶ月，6ヶ月	バーチェリン
24	陶山ほか(2007)	150	Fe型化ベントナイト	なし	－	dis.H_2O	20	－	1年，1年8ヶ月	（顕著な変化なし）

4.5.2　緩衝材の流失

安全機能との関係

4.3 項における安全機能に関する要因分析で整理したように，“安全機能を支えるバリア性能を支配する特性”である“モンモリロナイト密度”に影響を及ぼす要因として，緩衝材（特に機能を支配する主成分鉱物であるモンモリロナイト）が地下水によって持ち去られるという現象について検討を行う必要がある。4.3 項における FEP の検討においては，“パイピング及び浸食”に相当する。

なお，この現象は，緩衝材が地下水で飽和する前の再冠水の際に特有な現象であるパイピング（およびそれに伴う浸食）と，緩衝材の飽和後においても継続して発生する可能性がある母岩の亀裂への緩衝材の侵入と流出に区分して整理する。

(1) パイピング

現象の理解

パイピングは緩衝材の設置後初期に，地下水が緩衝材に浸潤する過程において，局所的な地下水の流れによって発生する現象である。すなわち，ベントナイトが十分に膨潤して止水機能を発揮する以前に，母岩から処分孔へ局所的に高い圧力で緩衝材の内部への浸潤速度を超えて地下水が流入する場合に，局部的な緩衝材の膨張により生成されるゲル状の緩衝材（主として，主成分鉱物であるモンモリロナイト）が，地下水によって持ち去られ，緩衝材内にパイプ状の地下水の流路が形成される現象である。また，パイピングの形成に伴って，地下水流路近傍のモンモリロナイトが地下水によって持ち去られる現象が継続して浸食が進行する場合もある。

これまで，いくつかの原位置試験において，緩衝材の再冠水の初期段階に，ベントナイトゲルの流出が認められており，この原因としてパイピングが推定されている。1996 年にスウェーデン Åspo 地下研究所において実施された“Long term test of buffer material”（LOT 試験）（Karnland et al., 2000）において，ブロック状ベントナイトを試験孔に設置した後，初期の数日間にわたって，地下水の流入によって観測用ケーブルのために設置された上部のパイプからゲル状のベントナイトの流出が認められた。また，Large scale gas injection test（Lasgit 試験）においても，初期の地下水浸入の際にパイピングと推定される緩衝材設置後のベントナイトゲルの流出現象が認められている（Cuss et al., 2010）。

このような結果を受けて, 2000 年以降, スウェーデンを中心に, パイピング現象に着目した様々な室内試験が実施されており（例えば，Börgesson et al., 2005：Sandén and Börgesson, 2008：Sandén et al., 2008），図 4.5.2-1 のような現象が確認されている。わが国においても，ブロック緩衝材の側面に隙間がある条件や，ペレットを充填した条件でのカラム試験が行われ，パイピングとそれに伴う浸食の発生が確認されている（原子力環境整備促進・資金管理センター，2012）。

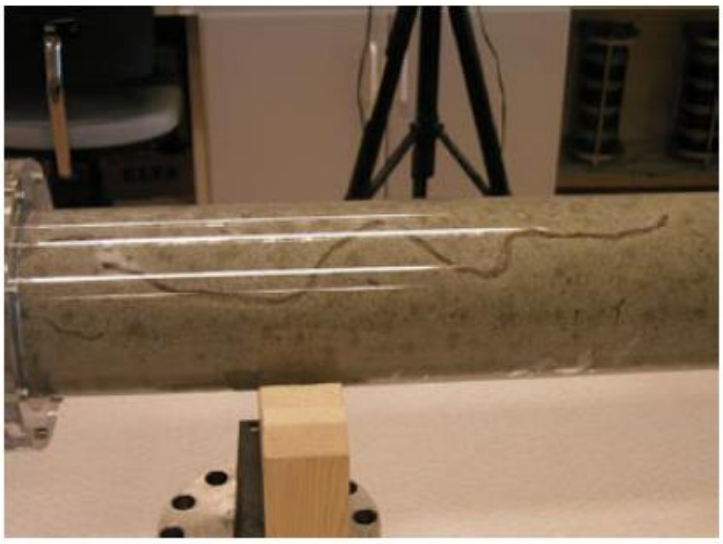


図 4.5.2-1 パイピング試験結果（Sandén and Börgesson 2008）
Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

これらの試験結果からパイピングの発生条件についての知見が蓄積されてきており，以下の条件が満たされる場合にパイピングが発生するとされている（Börgesson and Sandén, 2006：SKB, 2010b）。

① 地下水の流れが止められている状態での亀裂中の水圧が，それに対抗する緩衝材の全圧力およびせん断抵抗よりも大きい。

② 緩衝材の透水係数が非常に小さく，水が緩衝材中に浸入しにくいため，流入する地下水の圧力が高い状態で維持される。

③ 流路が形成され，そこに水が流れて周囲の粘土を持ち去るためには，水が流れていく先の空間が存在する必要がある。

また，パイピングに伴って発生する粘土の浸食は，水の移動によって粘土粒子に働く掃流力が，粘土粒子間あるいは粘土の構造の中で働く引力や摩擦力を上回る場合に発生する。

様々な試験結果等から，パイピングの発生とそれに伴う浸食は，以下の要因に影響を受けることが知られている。

・緩衝材材料

パイピングの発生は緩衝材の持つ膨潤特性，不飽和での透水（浸潤）特性に依存するため，緩衝材としてケイ砂混合ベントナイトを用いる場合にはケイ砂混合率，ベントナイト材料の種類，緩衝材密度，初期含水比等の影響を受ける。

・緩衝材および緩衝材空隙の幾何学構造

この現象は，緩衝材と処分孔壁面との間に隙間が存在する場合や，ペレット状に加工したベントナイトが充填されている場合等，卓越した流路となり得るような連続した空隙があらかじめ存在する場合に発生しやすくなる。また，これらの隙間の形状やペレットの充填の状況に影響を受ける。

・地下水圧，流入速度

上述のとおり，この現象には高い地下水圧と速い地下水流速が必要である。

・地下水水質

地下水水質は，緩衝材の膨潤性能や粘土の分散性に影響を与える。

このように，パイピングの現象が発生する理由に関して定性的な理解は進んできているが，実際の処分環境下ではいくつもの要因が複雑に影響を及ぼし合うと考えられるため，これらの要因の影響を定量的に評価に取り込むには到っていない。

現象の発生時期

パイピングは緩衝材の設置後の初期に，地下水が緩衝材に浸潤する過程で，局所的な地下水の流れによって発生する現象である。地下水圧に対抗できる膨潤圧の発生，あるいは処分孔の冠水による処分孔壁面の動水勾配の低下等によって，現象は収束する。

評価での取り扱い

パイピングの発生の可能性が懸念され始めたのは 2000 年頃からであり，例えば，SKB の一連の性能評価報告書の前提となる FEP の検討やプロセス理解に関する報告書において, SR-97（SKB, 1999）においては特段の言及は認められないが，その後の報告として，SR-Can（SKB, 2006c）ではパイピングが議論されている。SR-Site では，SR-Can 以降の試験研究成果等も踏まえ，SR-Can とは若干異なる検討を行っているが，基本的な考え方は，この現象が緩衝材への地下水流入初期の限られた期間の現象であることから，この期間に持ち去られるベントナイトの総量を見積もることで，緩衝材性能への影響を検討するというものである。

流出するベントナイトの総量は，実験結果をもとに導出された，緩衝材へ流入する水の総量とベントナイト流出総量の関係式を用いて導出している。SR-Can（SKB, 2006a）および SR-Site（SKB, 2011）における，この現象の評価上の検討を以下に整理する。

SR-Can（SKB, 2006a）では，Åspo 地下研究所や Forsmark サイトで認められる地下水流入量の中で高めの値である 0.1L/min に対して，100 日を仮定してベントナイト流出量の見積もりを行った。試験結果から，地下水流入量とベントナイト流出量の関係を保守的に 10g/L であると設定すると，100 日間のベントナイト流出量は 150kg と計算される。処分孔一つあたりに充填される初期のベントナイト量（乾燥重量）は，約 20,000kg であるので，流出量は 0.75％にすぎないとしている。

SR-Site（SKB, 2011）においては，流出が継続する期間を仮定するのではなく，流入可能な地下水の最大量を処分トンネル内の全間隙との体積収支の検討で行っている。両端がプラグで閉鎖された 300m の処分トンネルを想定し, この処分トンネルの底部に 50 本の処分孔を有するとして，処分トンネル全体での間隙の体積を計算する。さらに，両端のプラグからリークの可能性も考慮し，トンネル内の全間隙の 1.2 倍を流入可能な地下水体積として，1,250m^3 という値を設定した。また，緩衝材への水の流入総量とベントナイト流出総量の関係については，室内試験結果（図 4.5.2-2）からの関係式（式 4.5.2-1）を導出し，この式を用いて求めている。

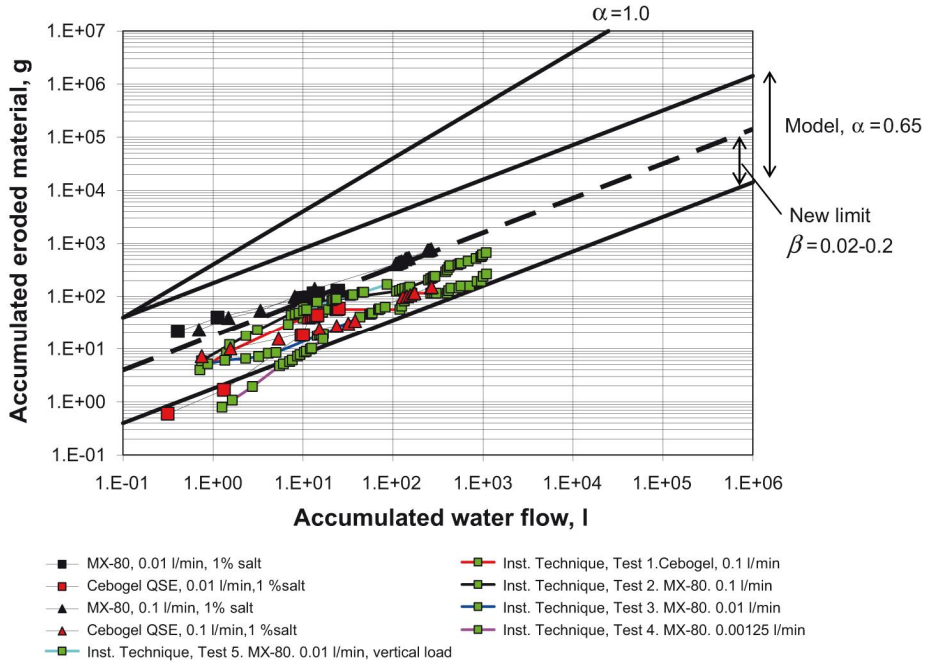


図 4.5.2-2　様々な条件でのペレット充填パイピング試験から得られた流入水量と流出粘土量の関係（Åkesson et al., 2010）
Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

$$m_s = \beta \times (m_w)^{\alpha} \qquad (4.5.2\text{-}1)$$

ここで,

m_s：累積流出ベントナイト量(g)

m_w：累積流出水量(g)

β：ある累積流出水量に対して流出の程度を規定するパラメータ

α：累積流出水量と累積流出ベントナイト量の比例関係(線の傾き)を決めるパラメータ

結果として，1,250m^3 の地下水量に対応する流出ベントナイト量は，16～164 kg と計算される。

一方，緩衝材の一部が喪失した場合の均質化の解析結果（Åkesson et al., 2010）では，1 カ所から乾燥重量 100kg の緩衝材が喪失することは許容可能であるとされている。100kg のベントナイト流出量に対応する水の流入量を式 4.5.2-1 により計算すると，586m^3 と計算され，上で設定した 1 トンネルあたりの想定最大流入用の約 47%となる。ただし，300m の処分トンネルの全間隙が，一つの処分孔の 1 カ所の亀裂から流入する地下水で満たされるという仮定は現実的ではなく非常に保守的な仮定である。

また，SKB（2009）では，緩衝材の飽和過程のパイピングと浸食による緩衝材の喪失量を 100kg 以下に抑えるためには，処分孔への地下水流入量を 150m^3 以下にすべきとしている。

SR-Site では，安全機能に基づいて，追加的シナリオの設定を行っており，緩衝材については，緩衝材中の物質移動の移流支配（Buffer advection）が設定されている。関連プロセス（緩衝材密度を低下させる可能性のあるプロセス）として，パイピングによる浸食も記述されている。しか

しながら，上述の検討を超えて，パイピングによる浸食が著しく発生することは考えにくい（unlikely）として，詳細な検討は行っていない。すなわち，Buffer advection シナリオの発生要因としてパイピングは選定されておらず，他のプロセスに起因する影響の検討に包含されるとの判断をしている。

不確実性・課題

これらの評価の前提となっている地下水流入量とベントナイト流出量の関係式は，実験結果に基づき導出されたものである。実験結果は実験条件に依存してバラツキを見せている。また，評価結果は式中の係数の値に大きく依存するため，この関係式には不確実性が残る。今後，現象のより詳細な理解，発生条件の明確化，ベントナイト流出量の定式化等を目的として，実験を含めた研究により不確実性の低減を図る必要がある。

また，この現象は，緩衝材密度，岩とベントナイトブロックの隙間や，ペレット状ベントナイト充填部分の隙間構造等の緩衝材の初期状態と，周辺母岩からの地下水の流入状況に強く依存する。また，前述の発生条件にあるように，局所的に流入する地下水の水圧が粘土の圧力を上回り，緩衝材中に浸潤していく以上の量の地下水が供給され続ける場合に発生する懸念がある。したがって，緩衝材施工方法の検討と併せて，パイピングの発生が想定されるような処分孔には廃棄体を設置しない，あるいは水圧に耐えることができるプラグの設置等の工学的対策が有効であり，その対策を採るためには，原位置の地下水流動に関する測定，評価技術および工学的対策について検討する必要がある。

(2) 母岩中の亀裂への緩衝材の侵入，地下水による浸食およびコロイドとしての散逸

前項で議論した，パイピングおよびそれに伴う浸食が緩衝材の再冠水の初期の現象であるのに対し，ここで着目する現象は，緩衝材が十分に含水，膨潤した後に発生する現象である。

亀裂への緩衝材の侵入とその先での流出あるいはコロイドとしてのモンモリロナイト粒子の散逸についての概念を図 4.5.2-3 に示す。

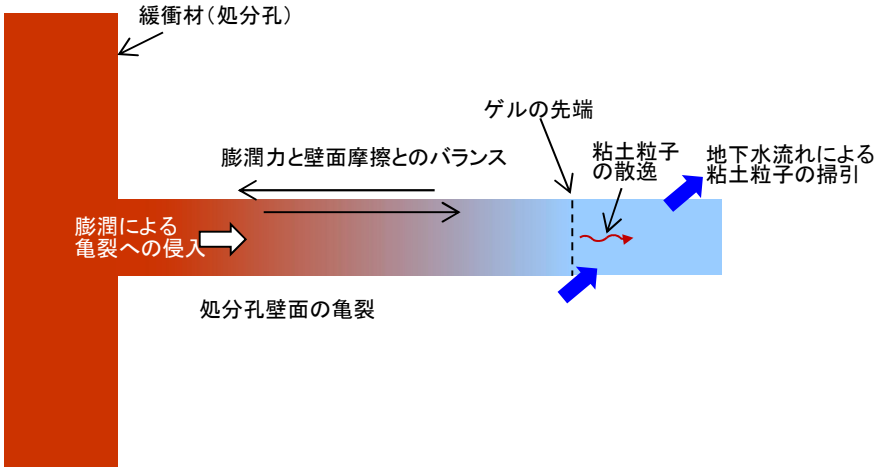


図 4.5.2-3　緩衝材の侵入・流出現象に関する概念図
(Apted et al.(2010)等をもとに作成)

現象の理解

緩衝材は地下水の浸潤に伴って膨潤することにより，施工により生じる処分孔内の隙間や，処分孔壁面の母岩中の亀裂をシールすることが期待されている。一方，この膨潤性能により，緩衝材の一部は処分孔壁面の母岩中の亀裂内に侵入する。また，亀裂に侵入したベントナイトの先端がゲル化し，地下水流れによって浸食される，あるいはベントナイトコロイドとして散逸することが想定される。このような現象が継続することによって，緩衝材設置部分の緩衝材密度が低下することが懸念される。

緩衝材の亀裂中への侵入およびそれに伴う流出については，第２次取りまとめ分冊２（JNC, 1999b）(4.1.2.1.11 経年挙動, 4.3.5 緩衝材の岩盤内侵入の評価) および分冊３（JNC, 1999a）(4.2.3.6 亀裂への緩衝材の侵入）のほか，第２次 TRU レポートにおける FEP 辞書（BM-05：緩衝材の流出），神埼ほか（2009）における FEP シート（B3.5 緩衝材，埋め戻し材の流出）に，安全評価に係る影響について記載がある。これらにおいては，第２次取りまとめに加え，JNC の地層処分研究に関する平成 17 年取りまとめ（JNC, 2005）の現象理解についての記述が整理されている。

(i) 侵入現象

緩衝材が周囲の亀裂に侵入する現象については，緩衝材流出挙動試験装置（BENTFLOW）による試験をはじめ，多くの試験が報告されている。試験結果については JAEA 緩衝材基本特性データベース（https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/index.jsp）においても公開されている。

緩衝材の亀裂への侵入距離は時間の平方根とほぼ比例関係にあり，その比例係数は，割れ目の開口幅，緩衝材の有効粘土密度に依存するとして，実験結果から関係式を導出している。また，水質については，塩水系の実地下水を用いた試験や人工海水を用いた試験からイオン強度が大きくなるほど，侵入距離が抑制されることがわかっている（例えば，JNC, 2005）。ただし，長期間の試験では，ベントナイトの亀裂内への侵入は，試験条件に依らず時間経過に伴い収束することが確認されており（松本・藤田，2011），地層処分の閉鎖後長期の予測においては上述の比例関係は成立しない。

一方，侵入現象に関する理論モデルも検討されており，侵入試験結果の解析等から，粘土粒子拡散モデルによって説明が可能であるとして，固体拡散係数を緩衝材の膨潤応力，粘性抵抗の関数として与えることで現象を記述している（JNC，1999b）。固体拡散係数導出に用いられている緩衝材物性については，その後の試験研究によるデータの蓄積等に基づいて見直しが行われている（松本ほか，2005）。その後，拡散モデルの見直しが行われ，膨潤による粘土粒子の変形（体積膨張）に伴う粒子の移動の現象を移流とみなすことで，移流拡散方程式を用いたモデルの改良と実験結果のシミュレーションが行われている（JAEA，2011）。さらに，長期の侵入試験で確認された, 時間経過後の侵入変位の収束についてのモデル化の検討が進められている（JAEA, 2012）。

(ii) 浸食（流出）現象

亀裂に侵入したベントナイトの先端（ゲルフロント）で起こる，地下水流れによるベントナイト粒子の持ち去りは，上述のパイピングと同様に，水の移動によって粘土粒子に働く掃流力が，粘土粒子間あるいは粘土の構造の中で働く引力や摩擦力を上回る場合に発生すると考えられる（例えば，Pusch, 1983）。

第２次取りまとめにおいては，BENTFLOW を用いた流水試験において，亀裂に侵入したベントナイトの形状変化の観察結果から，1.7×10^{-5}m/s を下回る流速ではベントナイトの流出は顕著ではないとしている（JNC，1999b）。その後の BENTFLOW を用いた流水試験において，排水中のベントナイト成分の濃度分析結果から，蒸留水を用いた試験では 7.2×10^{-7}m/s の流速において約 1ppm の濃度のベントナイトコロイドが観測されている（松本ほか，2008）。一方，海水を模擬した NaCl 溶液（0.2mol/l および 0.64mol/l）では，蒸留水系と比較して一桁高い 8×10^{-6} m/s の流れ場においても，ベントナイトコロイドの散逸はいずれも認められていない（松本・棚井, 2005）。

ベントナイトの流出については，スウェーデンにおいても緩衝材の性能に影響を与える可能性の現象の一つとして研究が進められており，Neretnieks et al.（2009）および Birgersson et al.（2009）に現象のメカニズムに関連する理論，様々な実験的研究の成果，評価モデル，安全評価での取り扱いの考え方等がまとめられている。

ベントナイトの流出における重要な現象の一つとして，亀裂に侵入したベントナイトの先端（ゲルフロント）において，わずかづつではあるがモンモリロナイトの粒子がコロイドとして地下水中に散逸することが懸念される。一方，モンモリロナイトのコロイドは，溶液のイオン強度が高い場合には凝集することが知られている。この凝集を起こす溶液の濃度は“臨界凝集濃度（Critical Coagulation concentration, CCC）”と呼ばれている。CCC については，コロイド粒子の持つ表面電荷と溶液中の電解質濃度から DLVO 理論によって予測することが可能である。しかしながら，モンモリロナイト粒子のコロイドは単一層や積層体で散逸するが，DLVO 理論ではそれらの散逸粒子の表面電荷を一様にしか取扱うことができないことから，必ずしも実験結果を十分に説明することができず，理論の適用には限界がある。また，緩衝材を施工する場合には，天然の粘土材料を化学処理しないで用いる可能性もある。この場合にはモンモリロナイトの陽イオン交換サイトには，１価のイオン（主として Na）と２価のイオン（主として Ca）が多様に吸着しており，モンモリロナイトのコロイド粒子の表面電荷を容易に設定することが難しく，DLVO 理論による体系的な予測は難しいと考えられる。

これらのことを考慮し，Birgersson et al.（2009）では，複数のモンモリロナイトに対して，様々な溶液条件でけん濁液を作製し，その系におけるモンモリロナイトのコロイド粒子の安定性を測定している。さらに，図 4.5.2-4 に示す膨潤圧測定装置を用い，コロイドが透過可能なフィルター（孔径 10μm）を設け，様々な溶液（Na/Ca 混合溶液等）を通水し，膨潤圧や溶液のけん濁状態の測定を行っている。図 4.5.2-5 に結果の一例と表 4.5.2-1 に結果の一覧を示す。

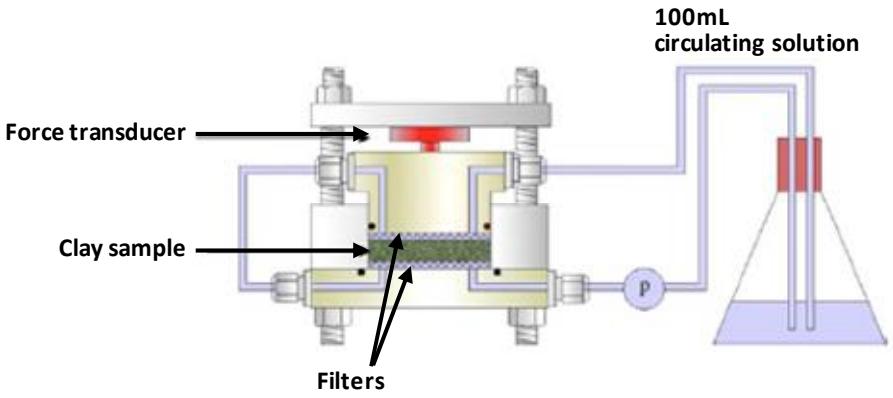


図 4.5.2-4　流出試験装置概念図（Birgersson et al., 2009）

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

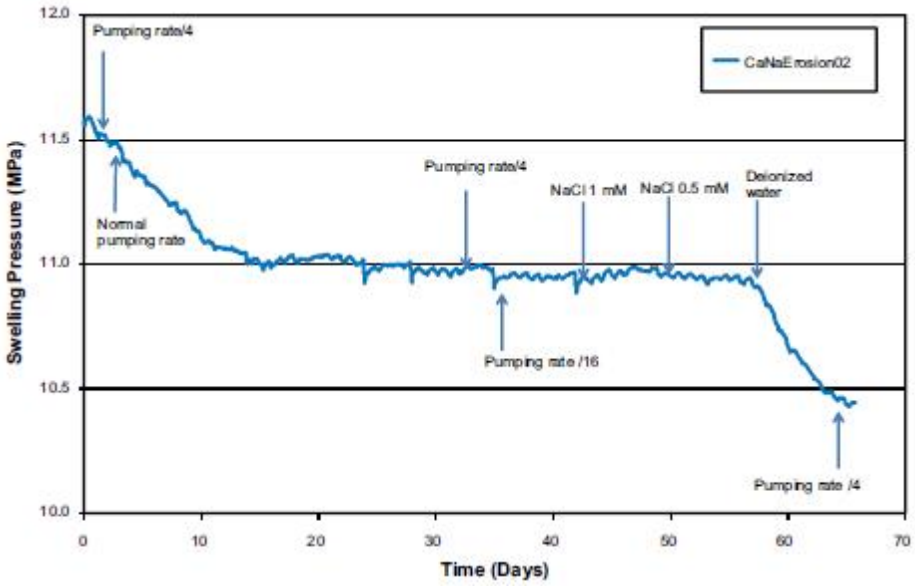


図 4.5.2-5　流出試験結果の例（Birgersson et al., 2009）

Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

表 4.5.2-1　流出試験結果から得られた流出条件（Birgersson et al.,（2009）をもとに作成）

試料番号	粘土タイプ	Ca 割合	浸食が発生しない最も低い NaCl 濃度
1	Milos	0.5	2 mM
2*	Milos	0.5	0.5 mM
3	Milos	0.25	1 mM
4	Milos	0.75	3 mM
5	Wyoming	0.5	4 mM
6	Kutch	0.5	1 mM

* 図 4.5.2-5 の試験で用いられた試料

これらの結果から，交換性陽イオンの 20～80%が Ca であるモンモリロナイトでは，イオン強度が 2～4mM を下回る場合にのみ，モンモリロナイトのコロイドが安定に存在するとすることが妥当であるとしている。

現象の発生時期

緩衝材の再冠水に伴って緩衝材の膨潤が進んだ状況で，処分坑道壁面に開口部を有する亀裂が存在する場合に，亀裂への緩衝材の侵入挙動が開始される。亀裂内での緩衝材の侵入の継続およびその先端での緩衝材の流出や散逸は，それ以降の全ての時間帯において潜在的に発生する可能性のある現象である。ただし，現象の発生は地下水流速，地下水質等に依存する。

諸外国での考え方の一例として，SR-Site のプロセスレポート（SKB，2010b）においては，コロイドはイオン強度が希薄な地下水条件の下で形成される現象であり，長期の評価において，希薄な地下水が地下深部に浸入する可能性がある氷河期のみ関連すると考えられる現象であるとしている。

評価での取り扱い

(i) 侵入現象

第２次取りまとめでは，亀裂への侵入挙動を緩衝材の膨潤圧と粘性抵抗をもとに拡散係数を設定し，拡散モデルとして取り扱う方法で評価を行った。レファレンスとされた緩衝材仕様（乾燥密度 1.6 Mg/m^3）に対し，亀裂の頻度，開口幅を仮定した条件において，侵入による緩衝材部分の平均的な密度低下は顕著ではなく，緩衝材密度は 10 万年後で初期値の約 92%程度（乾燥密度 1.5 Mg/m^3 程度），100 万年後で約 80%程度（乾燥密度 1.3 Mg/m^3 程度）と計算された（JNC, 1999b）。

その後，既述のように，室内試験結果から様々な評価式の検討が行われているが，長期の浸入挙動を適切に表現するには到っていない。実験的には，時間経過後の侵入変位の収束が認められており，侵入の駆動力となる膨潤圧と，亀裂壁面とベントナイトとの接触面でのせん断抵抗とのバランスによって侵入は収束するという理解が一般的である（例えば，Birgersson et al., 2009）。したがって，長期にわたって緩衝材の喪失を支配するプロセスは，この侵入の先端で発生するモンモリロナイトのゲル化であるとして，例えば，SR-Site においては，コロイドによる緩衝材の喪失（後述の浸食現象）のみを議論している（SKB，2010b）。

(ii) 浸食（流出）現象

SR-Site（SKB，2011）では，Birgersson et al.（2009）での議論に基づいて，ベントナイトコロイド発生のイオン強度の閾値を 4mM として，それを下回る希薄な地下水が浸入する可能性について検討している。このため，第２次取りまとめ等で示されている代表的な地下水の条件では，ベントナイトがコロイドとして散逸することによる緩衝材の浸食は起こり難いと考えられる。しかしながら，氷期／間氷期サイクルで発生する希薄な地下水が地下深部に浸入した場合には，コロイドの発生により緩衝材が浸食される懸念があることから，発生可能性について検討が行われている。対象とするサイトに対して，氷期／間氷期サイクル等を考慮して想定される環境条件の将来変遷を前提に，対象としているサイトの水理学的な割れ目のネットワークモデル（HydroDFN: Hydro-geological DFN）に基づく水理解析の結果から，将来 100 万年までの間に希薄地下水が浸入し，その結果として，緩衝材に期待されている安全機能である“移流による移行の抑制”が損な

われる処分孔の割合を設定し，評価に用いている。

不確実性・課題

(i) 侵入現象

実験的研究とそれを説明するモデルの開発が進められているが，長期挙動の予測に有効なモデルの提案には到っておらず，現象理解の不足による不確実性が残っている。また，従来の実験や解析が並行平板亀裂モデルに基づいているのに対し，天然の亀裂は亀裂形状や亀裂表面の状態が異なること，天然の場の不均質性に影響を受けることも不確実性として挙げられる。

評価の観点からは，長期における侵入の収束（均衡状態の維持）現象についての理解と，過剰な保守性を排したモデル構築のための研究が必要と考えられる。

(ii) 浸食（流出）現象

緩衝材の浸食（ベントナイトの流出）は，ベントナイトの主成分鉱物であるモンモリロナイトの粒子がコロイドとして散逸するため，その散逸性に関して理論的検討や実験的検討が進められてきているが，詳細なメカニズムの把握には到っていない。したがって，この現象を定量的に評価するためには,モンモリロナイト粒子のコロイドとしての安定性に関する理論的検討と併せて，評価対象とする試料を用いた実験データの蓄積が必要である。

また，評価にあたっては，対象となる地質環境条件の地下水水質およびその将来変遷についての情報が必要となるため，地質環境調査から得られる情報等に基づいた，地下水水質の設定方法の検討も必要である。

4.5.3　セメントーベントナイト相互作用とアルカリプルームのオーバーパックへの影響

処分システムにおいて，セメント系材料が利用される場合には，セメント系材料と地下水の接触によりもたらされる高アルカリ性の環境が，緩衝材や周辺岩盤の化学的変質，炭素鋼の腐食形態の変化など，ニアフィールドの性能に影響を及ぼすことが考えられる。このため，第２次取りまとめにおいては，坑道の支保工材料には低アルカリ性セメントを用いることとしている。一方，第２次 TRU レポートにおいては，廃棄体パッケージ間の空隙部の充填，構造躯体，坑道支保で利用されるセメント系材料として，現在，広く工業的に利用されている普通ポルトランドセメント（OPC）を利用することを前提として，緩衝材との相互作用についての検討が行われている。第２次 TRU レポートにおける，セメント系材料とベントナイトとの相互作用によるベントナイトの変質の性能評価上の取り扱いは，様々な不確実性が存在するものの，緩衝材の止水性は保持されるものとしている。ただし，不確実性のへの対応として，“人工バリア変質影響ケース”の設定において，1,000 年以降の緩衝材の止水性の喪失や分配係数の変動を考慮した解析を実施し，その影響が検討されている。

また，2011 年度の共同研究（江橋ほか，2012）において，個別現象理解の整理として，緩衝材とセメント系材料との相互作用について情報整理を行った。その中では，第２次 TRU レポート以降に報告されている，モンモリロナイトの溶解速度に関する知見等を整理するとともに，現象の不確実性を確認するために，高レベル放射性廃棄物処分の体系での，化学・物質移動連成解析の必要性を指摘した。

安全機能との関係

ベントナイトーセメント系材料相互作用は，4.5.1 項で整理した，鉄ーベントナイト相互作用と同様に，ベントナイトの構成鉱物が溶解・変質し，新たな鉱物の生成が起こることにより，安全機能を支える“バリア性能を支配する特性”を変化させ，その結果として緩衝材の安全機能に影響を与える可能性がある現象（プロセス）である。

具体的には，主成分鉱物であるモンモリロナイトがセメント起源の高アルカリ性の溶液と反応し，モンモリロナイト以外の鉱物に変化することにより，“モンモリロナイト密度”が低下する。また，相互作用の結果としてモンモリロナイト以外の初期鉱物の溶解や新たな二次鉱物の沈殿が起こることにより，“緩衝材鉱物組成”，“間隙構造（間隙率，セメンテーション）”に影響を及ぼす。

これらの影響は，“透水性”や“膨潤性”への影響を介して，安全機能である“移流による移行の抑制”に影響を及ぼす可能性や，“コロイド移行の防止・抑制”および“収着による放射性物質の移行遅延”にも影響を及ぼす可能性がある。

さらに，セメント系材料によりもたらされる高アルカリ性の環境が，オーバーパックに到達する場合には，オーバーパックの腐食挙動に影響することが考えられる。条件によってはオーバーパックの早期破壊に到るなど，オーバーパックに期待されている安全機能である“放射性物質の浸出抑制”，“発熱が著しい期間の地下水の接触防止”の維持時間に影響を及ぼす。さらに，緩衝材とオーバーパック接触部分における pH 等の化学環境変化は，緩衝材と鉄腐食生成物の相互作用による緩衝材の変質にも影響を及ぼすことに加え，オーバーパック破損後は，ガラス固化体の溶解挙動や，放射性核種の溶解度や収着などの核種移行挙動にも影響を及ぼすことも考えられる。

解析の実施

本解析においては，第 2 次 TRU レポートにおける解析事例を前提として，高レベル放射性廃棄物の処分体系を対象として，最新の知見を取り込んだ解析を実施する。具体的には，モンモリロナイト溶

解速度式の変更，新しく提案されている温度補正が可能な熱力学データの導入を行い，緩衝材の鉱物組成の変化や緩衝材中の pH の時間空間的変遷に対する，これらの影響を確認する。

地下水条件として，第 2 次取りまとめにおける降水系地下水（FRHP）を基本とするが，比較のために海水系地下水（SRHP）についても一部の解析を実施する。また，セメント系材料として OPC を主として検討するが，代表的な解析ケースに対して低アルカリ性セメント（HFSC）を用いた解析を実施し，結果の比較を行う。以下に，解析条件等を示す。

(1) 解析体系

第２次取りまとめの水平坑道横置きの処分概念に準拠する。坑道支保としてセメント系材料が利用される想定とする。図 4.5.3-1 に解析体系を示す。緩衝材厚さは 70cm，支保厚さは 10cm とした。

境界条件は，緩衝材内側（オーバーパックとの接触面）は，ゼロフラックス境界とし，支保の岩盤側は，常に地下水と接触している条件を基本としたが，比較のために岩盤側をゼロフラックス境界とした解析も一部実施した。

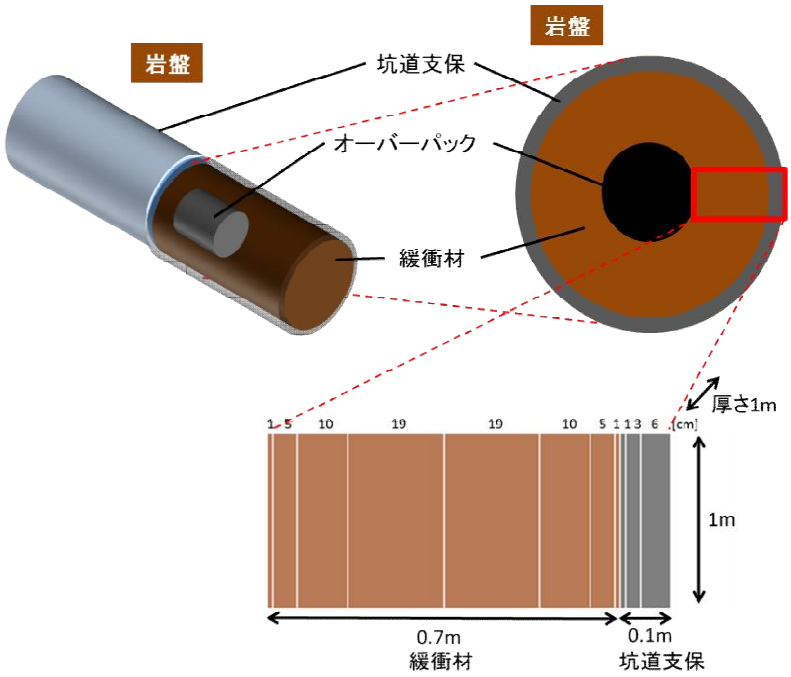


図 4.5.3-1　体系の概念図とセルの配置図

(2) 解析条件

緩衝材，普通ポルトランドセメントを用いた支保の仕様，これらの材料に関する初期条件の設定，イオン交換反応の取り扱い等，後述するスメクタイト溶解速度式，熱力学データベース以外の諸条件については，第 2 次 TRU レポートにおけるセメント系材料ー緩衝材複合系の処分施設における変質挙動の解析（電事連・JNC，2005）と同様の条件で実施した。解析による評価期間は 10 万年までとした。

(i) 各材料の仕様

(a) 緩衝材（ベントナイト）

緩衝材の仕様を表 4.5.3-1 に示す。ベントナイト組成はクニゲル V1 を参照した（表 4.5.3-2）。ただし，

反応モデルにおいては，初期の構成鉱物のうち，モンモリロナイト，方解石，玉髄のみが反応することとし，他の随伴鉱物については反応に与らないものとして取り扱うこととした。また，混合するケイ砂については，全て玉髄として取り扱うものとする。なお，モンモリロナイトについては，Na 型，Ca 型，Mg 型および K 型の間のイオン型の変化を考慮した。

表 4.5.3-1　緩衝材仕様

パラメータ	設定値
乾燥密度	1.6 Mg/m^3
ベントナイト/ケイ砂 混合率	70 / 30 wt%
初期間隙率	0.40

表 4.5.3-2　ベントナイトの鉱物組成

鉱物名	分子式	含有量（wt%）	
		文献値*	設定値
モンモリロナイト	－	46～49	48.0
石英	SiO_2	0.5～0.7	0.6
玉髄	SiO_2	37～38	38.0
斜長石	$NaAlSi_3O_8$	2.7～5.5	4.7
方解石	$CaCO_3$	2.1～2.6	2.4
苦灰石	$MgCO_3$	2.0～2.8	2.4
方沸石	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	3.0～3.5	3.3
黄鉄鉱	FeS_2	0.5～0.7	0.6

*伊藤ほか（1993）

(b) 坑道支保

坑道支保のセメント系材料は，OPC を基本としたが，比較のために一部 HFSC（Owada et al.,1999）を用いた解析を実施した。セメント系材料の主要成分であるカルシウムシリケート水和物（以下，CSH とする）熱力学計算における取り扱いは，材料の劣化による組成変化を含めて，Sugiyama and Fujita (2006)により提案されている固溶体モデルに従うこととした。

解析で設定したセメントの初期鉱物組成と間隙率を表 4.5.3-3 にまとめる。骨材は未反応物として取り扱った。

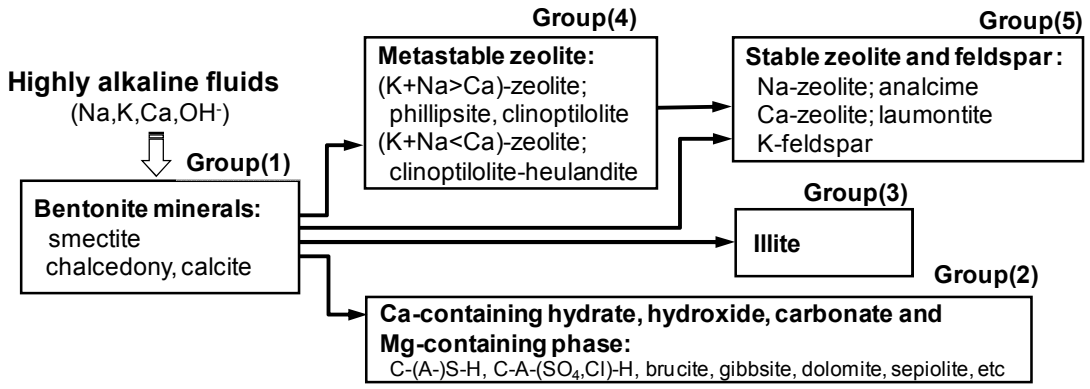
表 4.5.3-3 セメントの鉱物組成と間隙率

	OPC*2	HFSC*3
$Ca(OH)_2$ (CSH) (mol/m^3) *1	2817	2600
SiO_2 (CSH) (mol/m^3) *1	1078	3130
ハイドロガーネット (mol/m^3)	134	0
ブルーサイト(mol/m^3)	147	0
エトリンガイト (mol/m^3)	25	0.351
石英 (mol/m^3)	0	486
未反応物（体積含有率）(－)	0.7194	0.6822
間隙率 (－)	0.13	0.13

*1 Sugiyama and Fujita (2006)
*2 コンクリート(W/C=55%)のモデル配合
*3 HFSC424 (配合 OPC:シリカフューム:フライアッシュ=4:2:4 (重量比))

(ii) 考慮する二次鉱物の選定

第 2 次 TRU レポートで検討されている鉱物変遷シナリオ(図 4.5.3-2)の検討と, 解析結果を参考に, 図 4.5.3-2 中に示されている Analytical Cases から, Case4 (イライトおよび準安定沸石の生成), Case5 (イライトおよび安定相の生成) および Case7 (熱力学的平衡の系) の 3 ケースを選択した。なお, 一部の比較解析は, Case7 についてのみ実施した。



Analytical cases	Scenarios	Primary minerals and potential secondary minerals
1	Illitization	Groups (1), (2) and (3)
2	Metastable zeolite formation	Groups (1), (2) and (4)
3	Stable solid phase formation	Groups (1), (2) and (5)
4	Illite/metastable zeolite formation	Groups (1), (2), (3) and (4)
5	Illite/stable phases formation	Groups (1), (2), (3) and (5)
6	Metastable zeolite/stable phases formation	Groups (1), (2), (4) and (5)
7	Thermodynamically equilibrium system	Groups (1), (2), (3), (4) and (5)
8	Cement crystallization*	Groups (1), (2), (3) and (5)

* Tobermorite, jennite and afwillite are assumed as potential products instead of C-S-H gel

図 4.5.3-2 複数の鉱物変遷シナリオ（小田ほか, 2013）

(iii) 熱力学データベース

第 2 次 TRU レポートで用いた熱力学データベース“JNC-TDB.TRU”(Arther et al., 2005)（http://migrationdb.jaea.go.jp/）（以下，TRU2 データベースと呼ぶ）に加え，熱力学データベースの違いによる結果への影響を調べるために，フランス BRGM の熱力学データベース“Thermoddem”（http://thermoddem.brgm.fr/index.asp?langue=GB）を使用する。Thermoddem データベースは，Thermoddem_V1.07 を使用した。Thermoddem は，温度影響に関する情報が充実されており，温度を変えた解析が可能である。

(iv) 鉱物の溶解速度式

鉱物の溶解および沈殿については瞬時平衡にあるものと仮定したが，モンモリロナイトおよび玉髄については，以下に示す溶解・生成速度式を設定した。

(a) モンモリロナイトの溶解・生成速度式

モンモリロナイトについては，第２次 TRU レポートで用いられた，Sato et al.(2004)の溶解速度式と Cama et al.(2000)の飽和度依存性の経験式をあわせた式（以降，Sato-Cama 式と呼ぶ）と，既往の知見の整理に基づいて，小田ほか（2013）によって新たに提案された速度式（以下，小田式と呼ぶ）の二つの溶解速度式を用いた解析を行う。

・Sato-Cama 式

$$Rate = A_{min} \cdot \left(4.74 \times 10^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{3957}{RT}\right) \cdot \frac{177 \cdot \exp\left(\frac{2037}{RT}\right) \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot \exp\left(\frac{2037}{RT}\right) \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot \exp\left(-\frac{6967}{RT}\right) \cdot \frac{0.0297 \cdot \exp\left(\frac{2353}{RT}\right) \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot \exp\left(\frac{2353}{RT}\right) \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-6 \times 10^{-10} \cdot \left(2 \cdot \frac{\Delta G_r}{RT} \right)^6 \right) \right\} \quad (4.5.3\text{-}1)$$

ここで，$Rate$ はモンモリロナイトの溶解速度(mol/s)，A_{min}は鉱物の反応表面積(m^2)，
Tは絶対温度(K)，Rは気体定数(kJ/K/mol)，ΔG_rは反応のギブス自由エネルギー(J/mol) である。

・小田式（小田ほか，2013）

小田ほか（2013）では，既往の溶解実験データに基づく分析結果から二つの溶解速度式を提案している。一つは，溶解速度を温度と飽和度のみの関数として記述し，pH 依存の項を含まない式である。速度式に pH 依存性が表れていないのは，導出に用いた実験データの実験条件においては，pH 依存性と飽和度依存性を厳密に区別することが困難であり，分析の過程において飽和度依存性として pH 依存性が置き換えられているためとしている。この際，経験的パラメータｍは一定として取り扱っている。一方，経験的パラメータｍを温度および pH の関数として分析した場合には，溶解速度定数の pH 依存性を表現することが可能であるとしている。本解析では，後者の pH 依存を含む下式を用いることとした。なお，本検討の解析において，これらの二つの式で解析結果に大きな差がないことを確認している。

$$\mathrm{r}_{esa} = k_0 \cdot q(a_{H+}) \cdot e^{-\frac{E_{app}}{RT}} \left(1 - exp\left[m\left\{\frac{\Delta G_r}{RT}\right\}^p\right]\right)$$
$$\log\{-k_0 \cdot q(a_{H+})\} = 0.212pH - 6.40$$
$$\mathrm{E_{app}} = 38.731 \times 10^3 \qquad (4.5.3\text{-}2)$$
$$\log(m) = 4.75\log(\mathrm{T}) - 0.27\mathrm{pH} - 13.39$$
$$p = 3$$

ここで，r_{esa} は単位表面積あたりの溶解速度(mol/m^2/s)，k_0は速度定数(mol/m^2/s)，m と p は実験で得られたデータへのフィッティングパラメータ(-)，E_{app}はアレニウスの活性化エネルギー(J/mol)とする。

なお，モンモリロナイト 1mol は，いずれも単位セルの半分（$M_{0.33}Mg_{0.33}Al_{1.67}Si_4O_{10}(OH)_2$ ，M は交換性陽イオン）と定義する。モンモリロナイトの比表面積は式に依らず 7 m^2/g とした。

(b) 玉髄の溶解・生成速度式（25℃）

玉髄の溶解・生成速度式は Plettinck et al.(1994)の以下の式に従うこととした。

$$r = \mathrm{A} \cdot 10^{-14.5}(a_{\mathrm{H^+}})^{-0.52}\left(\frac{Q}{K} - 1\right) \qquad (4.5.3\text{-}3)$$

ここで，A は比表面積 (m^2/g)，Q は反応の化学量論に応じた活量積，K は反応平衡定数である。なお，玉髄は直径 10 μm の球状結晶であると仮定し，比表面積は 0.226 m^2/g とした。$r > 0$は沈殿，$r < 0$は溶解を表すこととする。

(v) 物質移動に関するパラメータ

コンクリートおよびベントナイトは，構成鉱物組成の変化によって間隙率も変化するため物質移動特性も変化するものと考えられる。各メッシュにおける各時刻での間隙率は，初期鉱物および二次鉱物それぞれの濃度（mol/m^3）とモル体積(m^3/mol)から算出することとし，間隙率と実効拡散係数の関係については，Mihara and Sasaki (2005)の関係式（表 4.5.3-4）に従うこととした。

表 4.5.3-4　コンクリートおよびベントナイト中の物質移動特性の変質程度依存性（25℃）

実効拡散係数（m^2/s）	コンクリート	$2.27\times10^{-9} \times \varepsilon^{3.05}$，　ε：間隙率
	ベントナイト	$2.27\times10^{-9} \times \varepsilon^{n}$，n=$2.22\mathrm{fs}^{0.13}$ +1， fs：スメクタイト含有率

(vi) 温度

温度は 25℃で一定のケースに加え，第 2 次取りまとめの熱解析で得られた緩衝材の温度変化を使用するケースを実施した。温度が変化するケースでは，熱力学データベースの平衡定数と，上記のモンモリロナイトおよび玉髄の溶解生成速度については温度の変化を考慮することとし，その他のパラメータは温度に依存しないこととした。図 4.5.3-3 に緩衝材の熱解析結果を示す。Cx がオーバーパックと隣接する緩衝材内側のセルの温度に相当することとし，Dx を坑道支保の温度として設定した。緩衝材の温度は，緩衝材内部で Cx（内側）から Dx（外側）へ直線的に変化することとして内挿して設定した。

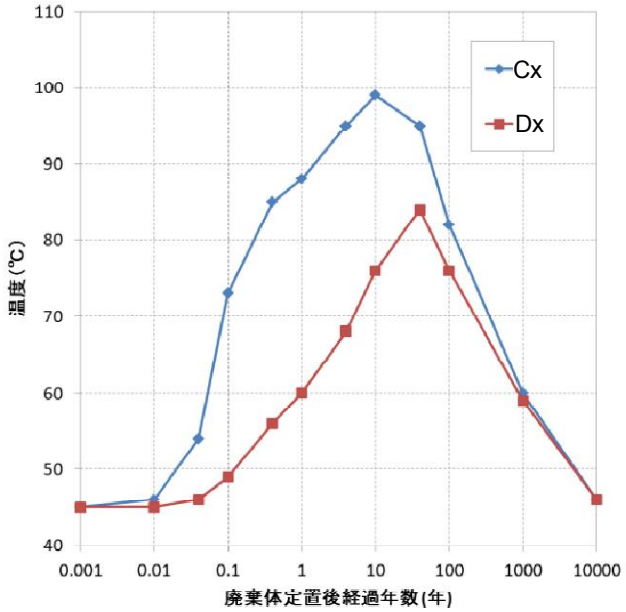


図 4.5.3-3 緩衝材内側（Cx）および緩衝材外側（Dx）における温度の変遷（JNC, 1999b）

(3)解析ケース一覧

表 4.5.3-5 に解析ケースを一覧する。

表 4.5.3-5　解析ケース一覧

No.	鉱物変遷シナリオ	モンモリロナイト溶解速度式	TDB	セメント種類	温度	地下水*	岩盤側境界
1	Case 4	Sato-Cama	TRU2	OPC	25℃一定	F	地下水
2	Case 4	小田	TRU2	OPC	25℃一定	F	地下水
3	Case 5	Sato-Cama	TRU2	OPC	25℃一定	F	地下水
4	Case 5	小田	TRU2	OPC	25℃一定	F	地下水
5	Case 7	Sato-Cama	TRU2	OPC	25℃一定	F	地下水
6	Case 7	小田	TRU2	OPC	25℃一定	F	地下水
7	Case 7	小田	TRU2	OPC	25℃一定	F	ｾﾞﾛﾌﾗｯｸｽ
8	Case 7	小田	TRU2	OPC	25℃一定	S	地下水
9	Case 4	小田	Thermoddem	OPC	25℃一定	F	地下水
10	Case 5	小田	Thermoddem	OPC	25℃一定	F	地下水
11	Case 7	小田	Thermoddem	OPC	25℃一定	F	地下水
12	Case 5	小田	Thermoddem	OPC	変化あり	F	地下水
13	Case 7	小田	TRU2	HFSC	25℃一定	F	地下水

*　F:FRHP 地下水，S:SRHP 地下水

(4) 解析結果

図 4.5.3-4～図 4.5.3-11 に解析結果の一部を示す。図は，10,000 年時点での鉱物組成（体積比率）分布と pH の空間分布の時間変化を示している。

図 4.5.3-4～図 4.5.3-7 では，OPC に対し，熱力学データベースとして TRU-2 データベースを用い，モンモリロナイト溶解速度式，二次鉱物の設定，岩盤側境界条件，地下水水質を変化させた結果を示

す。はじめに，モンモリロナイト速度式と二次鉱物の設定を変化させた結果（No.1～6）について検討する。これらの解析条件では，いずれの場合も，10 万年後において緩衝材領域全体では 90%以上の量のモンモリロナイトが残存している。ただし，小田式による解析結果では，二次鉱物の設定を Case4 および Case7 とした場合には, Sato-Cama 式を用いた解析結果よりもセメント系材料との接触面でのモンモリロナイトの溶解が進み，緩衝材の最も外側のメッシュのスメクタイト存在量は，1,000 年時点で初期の約 60%程度となっている。この際，二次鉱物として灰輝沸石（凡例 : Heulandite）の生成が認められる。Sato-Cama 式と小田式での pH の時間空間的な変化を比較すると，小田式の方がセメント系材料との接触面近傍での反応がより進むことによりセメント領域から供給されるアルカリ成分が消費されやすいため，Sato-Cama 式に比べ，緩衝材内側方向への高アルカリ性の進展が遅くなる傾向が認められる。これらの六つの解析ケースにおけるオーバーパック近接領域での pH の最大値は，10.3～11.1 の範囲であり, pH が最も高く計算されたのは, 解析ケース No.3（Sato-Cama 式, 二次鉱物の設定 : Case5）で，100 年後に pH=10.8，1000 年後に pH=11.1 となる。既往研究によれば，酸化性条件において，pH が約 10.5 を超えると炭素鋼が不動態化する可能性があり（谷口ほか，2002），地下水の環境条件によって不動態の破壊による局部腐食が進行する可能性がある。したがって，本解析では，解析の初期条件として緩衝材が飽和状態である設定としているが，オーバーパックの腐食形態への影響を評価するためには，処分環境が掘削影響を受けた酸化性の状態から再冠水により還元性の状態に到るタイミングと，セメント系材料と反応した高アルカリ性の地下水がオーバーパック表面に到達する時期について，より詳細な検討が必要である。

次に，支保の岩盤側の境界条件の影響について考察する。支保厚さ 10cm で外側境界条件を地下水組成で一定とした場合には，多くの解析ケースにおいて，支保領域の岩盤に近い側では，およそ 1 万年までの間に CSH が消失し，緩衝材近傍領域でも 5 万年程度で CSH はほぼ枯渇する結果となる。一方，岩盤側をゼロフラックス境界とした解析ケース（No.7）では，10 万年経過時点でも，支保領域の CSH は残存している（10,000 年時点での鉱物組成については，図 4.5.3-6 参照）。また，後者の解析結果に認められる特徴的な点として，緩衝材近傍での CSH の存在と方解石の沈殿等によって，間隙率が非常に小さな値となっていることが挙げられる。その結果として，外側境界を地下水とした場合よりも，緩衝材側へ拡散で移動する物質のフラックスが制限される。そのため，岩盤側をゼロフラックス境界とした方が，セメント系材料を起源とする物質の岩盤側への散逸がないにもかかわらず，緩衝材の変質や二次鉱物の生成が抑制される結果となっている。

地下水条件を海水系地下水（SRHP）とした解析は，小田式を用いて，二次鉱物の設定を Case 7 とした解析結果（No.8）について実施した。図 4.5.3-6 および図 4.5.3-7 に結果を示す。FRHP のケースに比べ，モンモリロナイトの溶解と二次鉱物の生成が促進される傾向が認められる。緩衝材領域では，二次鉱物として，初期に灰輝沸石（凡例 : Heulandite）や方沸石（凡例 : analcime）が生成し，それらが時間の経過とともにカリ長石（凡例 : K-feldspar）に遷移していくのが認められる。また，モンモリロナイトの Ca 型成分（凡例 : Mont-Ca）が見られない。さらに，本解析ケースで特徴的なこととして，緩衝材領域での方沸石およびカリ長石の卓越した生成等に加え，支保工全域においてもカリ長石が生成している。緩衝材中の pH の変遷については，初期に外側の支保近傍で pH=10 程度まで上昇するものの，内側のオーバーパック近傍では，1,000～2,000 年の時点で pH=8.6 が最大値となっている。これは，初期条件として設定した地下水の pH が FRHP（pH=8.4）に対して，SRHP（pH=7.8）の pH が低いこと，セメント領域の CSH が比較的短期（約 5,000 年迄）に枯渇すること等が影響を及ぼしていると考えられる。

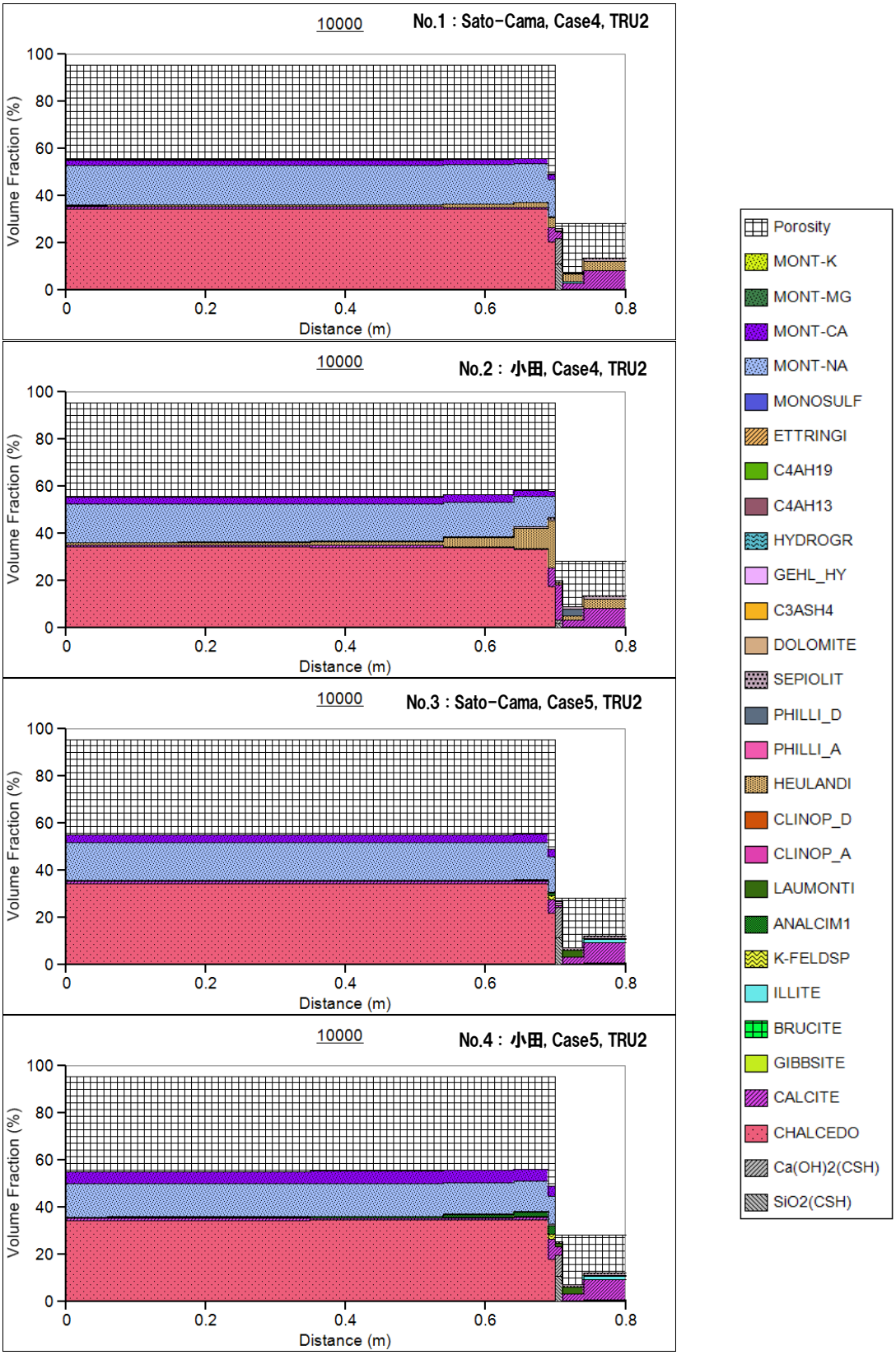
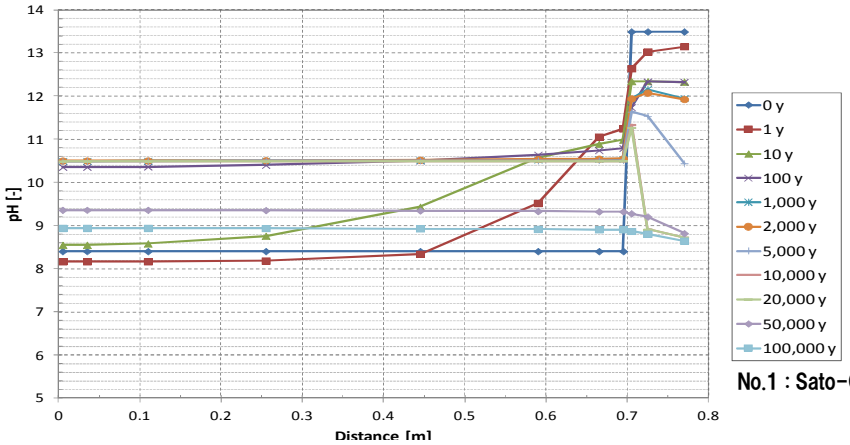
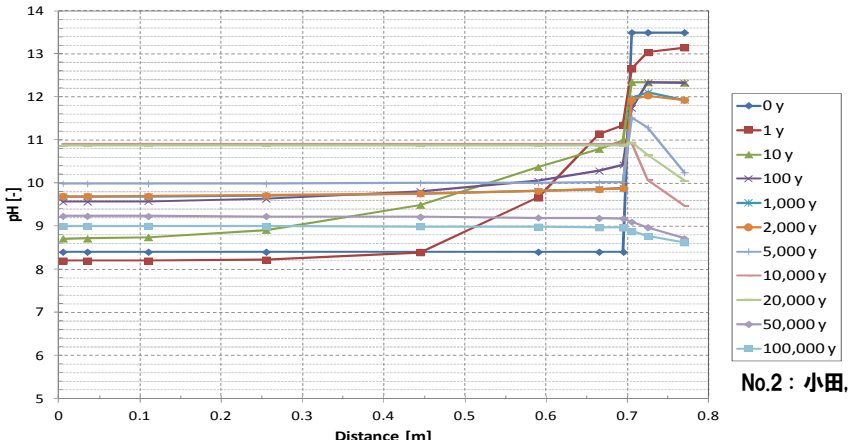


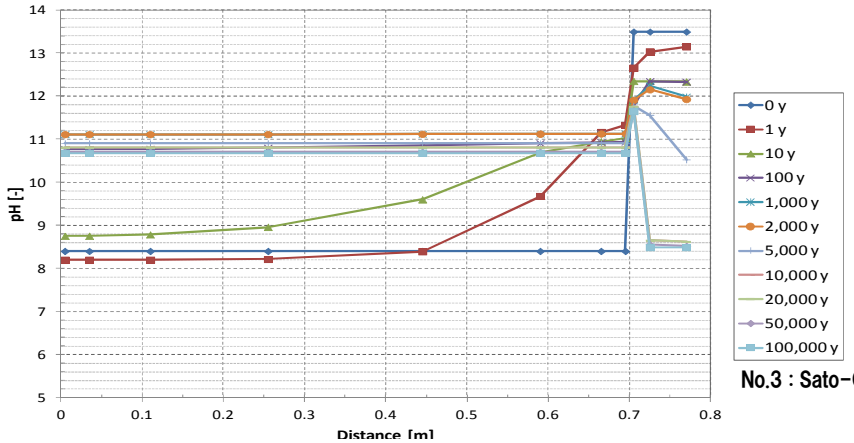
図 4.5.3-4 解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.1～4）



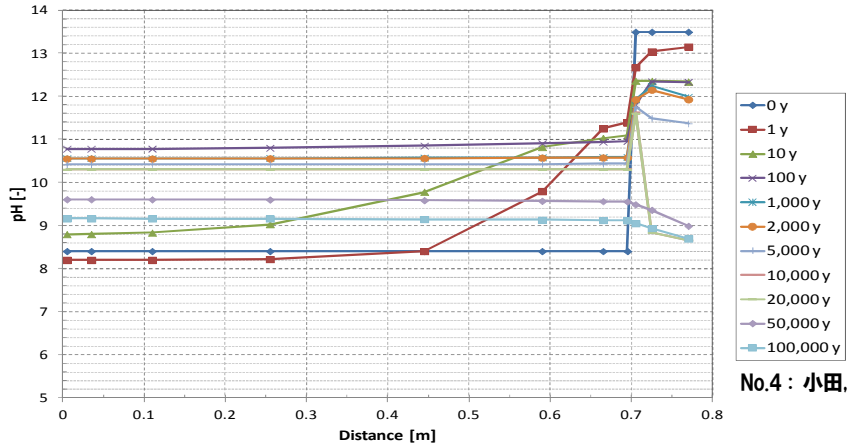
No.1 : Sato-Cama, Case4, TRU2



No.2 : 小田, Case4, TRU2



No.3 : Sato-Cama, Case5, TRU2



No.4 : 小田, Case5, TRU2

図 4.5.3-5 解析結果（pH の時間空間変化，No.1～4）

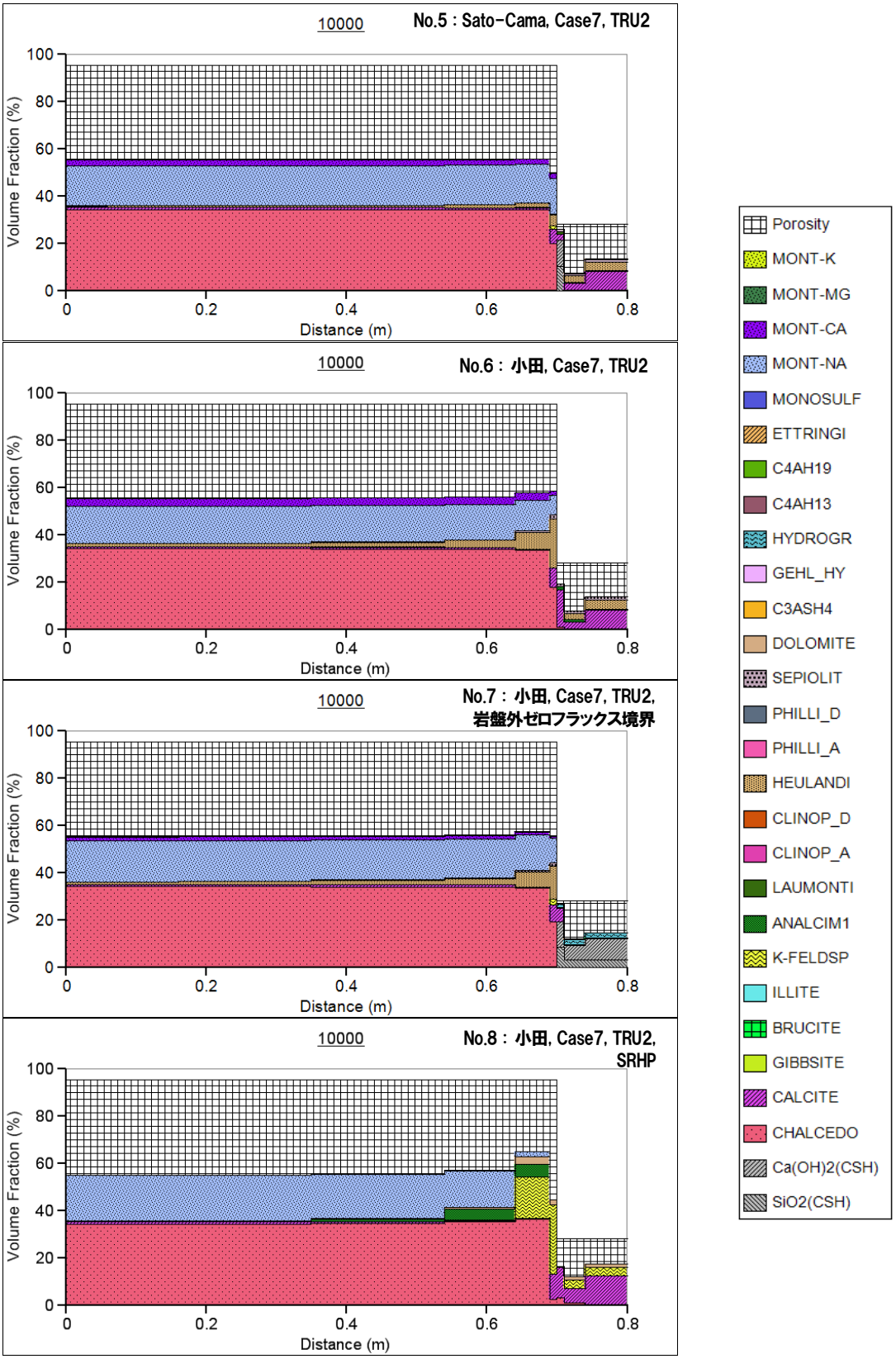
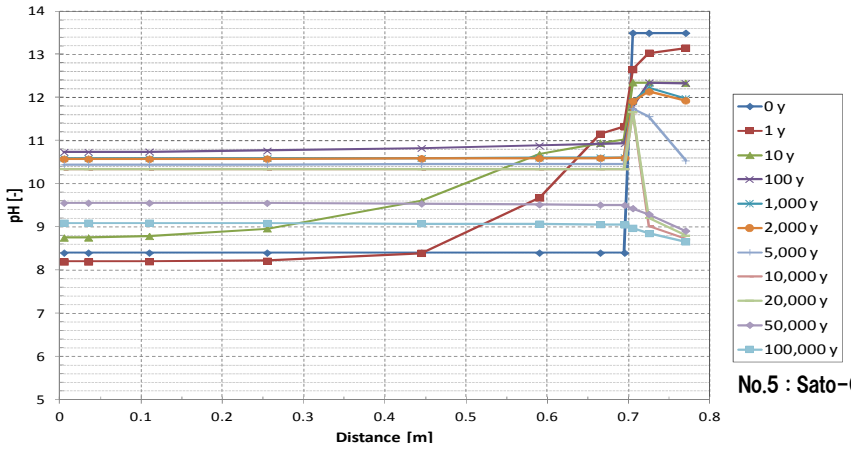
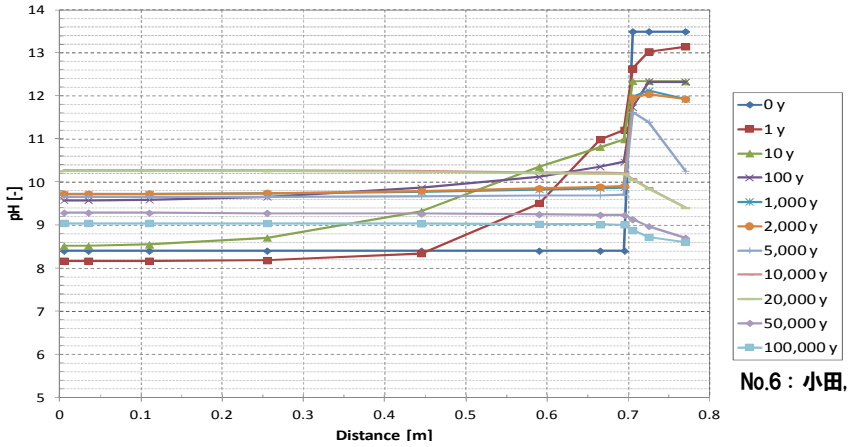


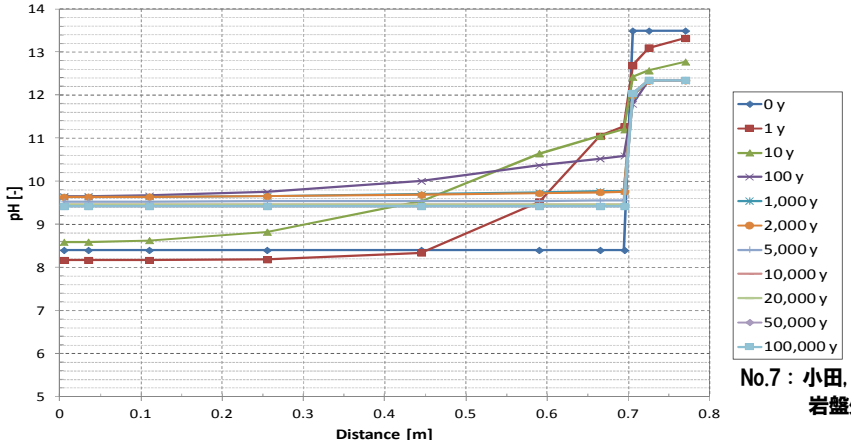
図 4.5.3-6 解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.5～8）



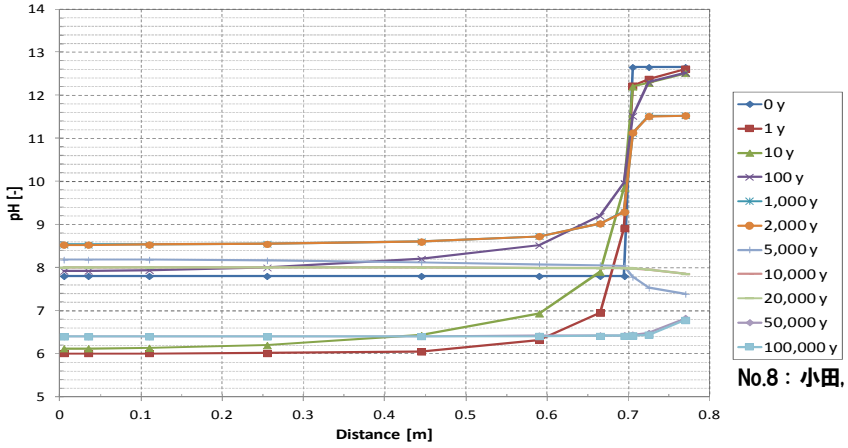
No.5：Sato-Cama, Case7, TRU2



No.6：小田, Case7, TRU2



No.7：小田, Case7, TRU2,
岩盤外ゼロフラックス境界



No.8：小田, Case7, TRU2, SRHP

図 4.5.3-7 解析結果（pH の時間空間変化，No.5～8）

次に熱力学データベースとして，Thermoddem を利用した解析ケース（No.9～12）を図 4.5.3-8 および図 4.5.3-9 に示す。このうち，No.12 は，緩衝材領域の温度変化を反映した解析である。

いずれの解析ケースにおいても，顕著なモンモリロナイトの溶解が認められる。二次鉱物としては，二次鉱物の設定を Case4,7 とした場合（No.9,11）では十字沸石（凡例：Phillipsite(Na)），Case5 とした場合（No.10）では，濁沸石（凡例：Laumontite）の生成が特徴的である。Thermoddem で特徴的なことは，緩衝材領域においてセメント境界近傍で沸石類等の生成により顕著な間隙率低下が生じることや，Case4, 7 ではモンモリトナイトのイオン型が Mg 型になること等である。また，pH の変遷については，No.9,11 では反応初期から緩衝材内側で pH の低下が認められており，No.10 においても pH の上昇は大きくない。以上の現象は，TRU2 データベースを用いた解析ではみられなかったものである。これは，Themoddem では，TRU2 データベースに比べて，沸石類に対するモンモリロナイトの相対的な熱力学的安定性が低いため，モンモリロナイトの溶解と沸石類の生成が進みやすいことによると考えられる。すなわち，真密度がより低く，Na, K, Ca を含むが Mg を含まない沸石類が幅広い化学条件下（弱アルカリ性条件を含む）でモンモリロナイトに置き換わることにより，

- 緩衝材領域セメント境界近傍での間隙率が低下する
- Na, K, Ca 型のモンモリロナイトは溶解するか，イオン交換して Mg 型モンモリロナイトとして残存する
- これらの反応が緩衝材内側の pH を支配しているものと推定される。

温度を変化させた解析ケース（No.12）では，同条件で温度一定とした解析（No.10）に比べると反応が促進され，緩衝材領域セメント境界近傍における間隙率低下が顕著となる。また，もう一つの特徴として，SRHP を条件とした No.8 および後述する HFSC を条件とした No.13 を除く全ケースでみられた支保工領域における緩衝材境界近傍での間隙率低下が抑制されている。支保工領域全体としての間隙率は本解析ケースが最も大きい。なお，温度を変化させた解析は，二次鉱物を Case5 とした以外の解析条件では，計算が途中で異常終了するなどの不具合があったため，Case5 で比較することとした。

図 4.5.3-10 および図 4.5.3-11 には， HFSC を用いた解析ケース（No.13）の結果を示す。熱力学データは TRU2 データベース，モンモリロナイトの溶解速度式は小田式，二次鉱物の設定は Case7 としている。OPC に対する解析ケース No.6 と同条件である。これらの解析結果の比較では，OPC と比べ，HFSC の方が緩衝材の変質や緩衝材中の pH の上昇が速く進む結果となっている。これは，高 pH の影響から想定される結果と逆の結果となっているが，HFSC では支保領域での二次鉱物の沈殿による間隙率の低下が起きておらず，結果としてアルカリ性成分の緩衝材への拡散による移動量が多くなっているためである。

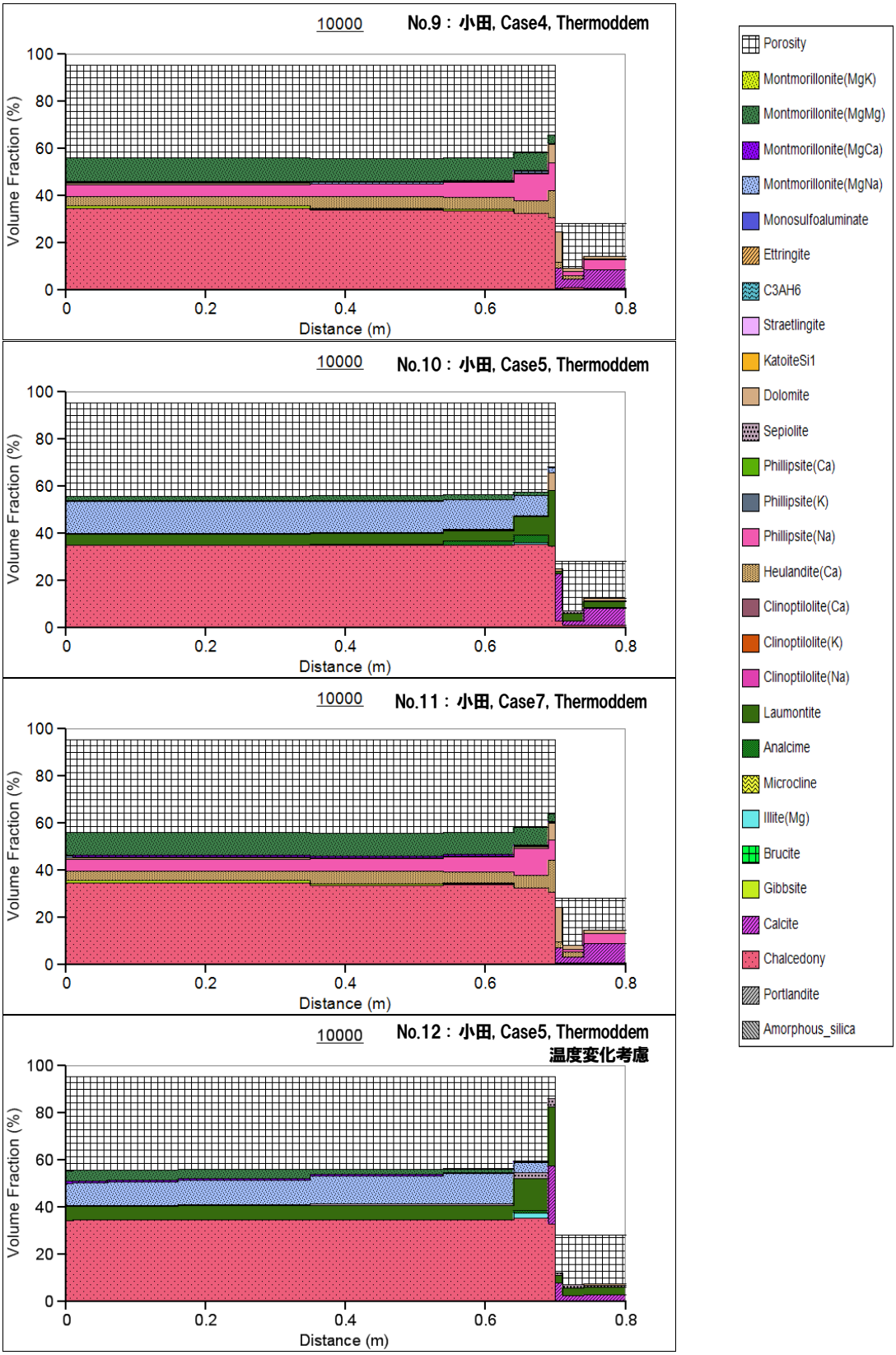
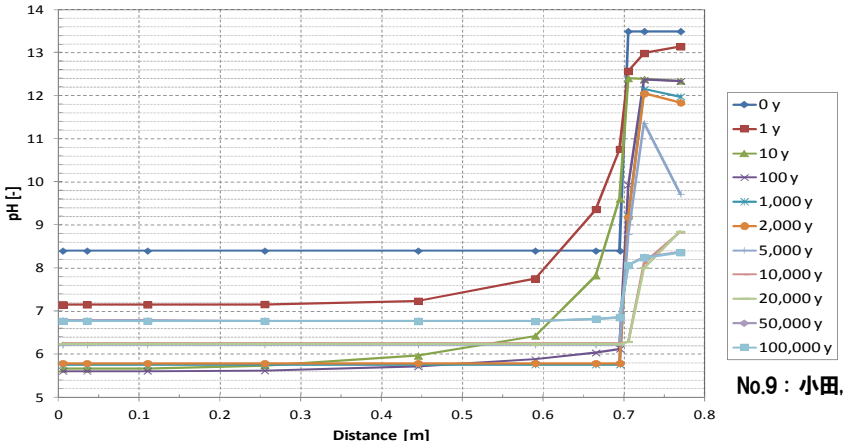
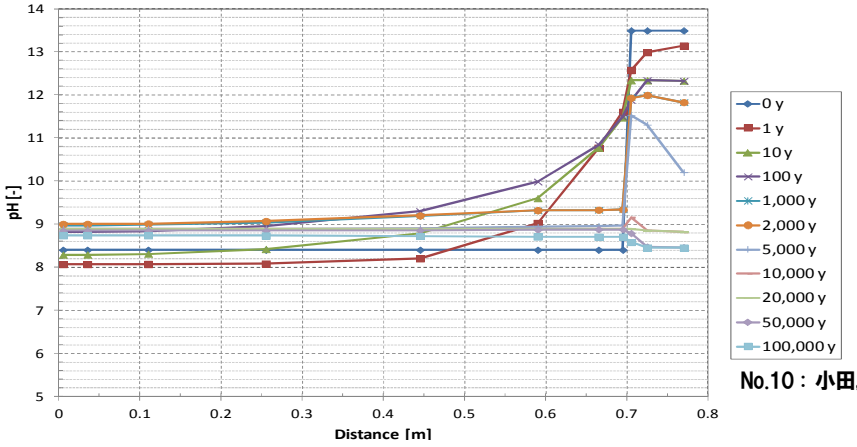


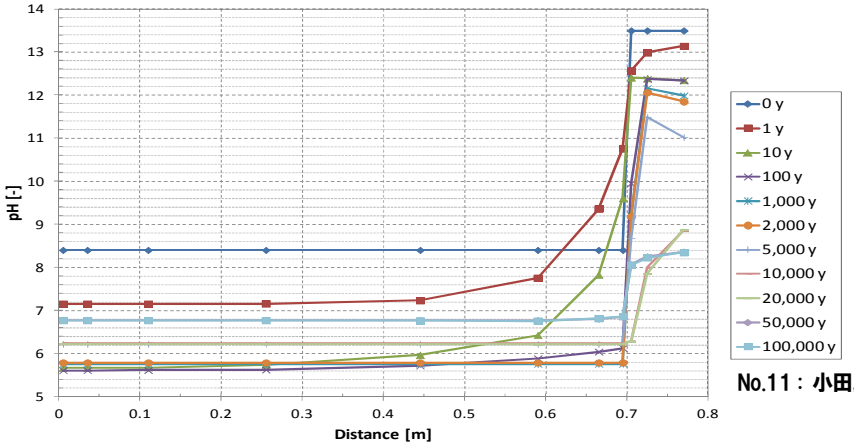
図 4.5.3-8 解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.9～12）



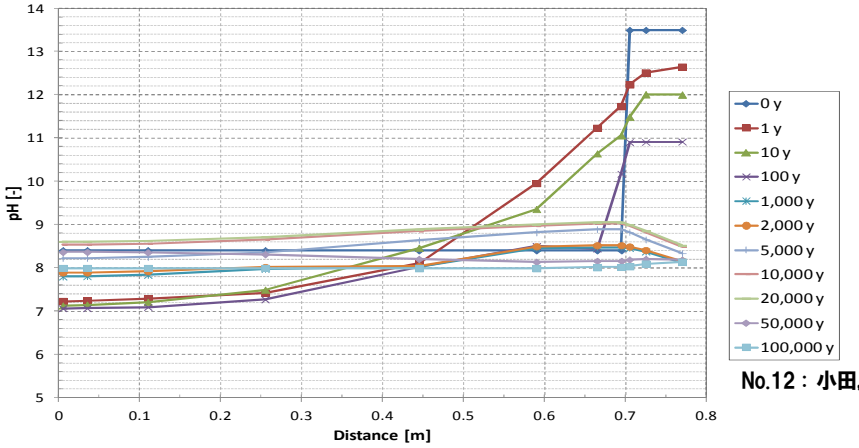
No.9：小田, Case4, Thermoddem



No.10：小田, Case5, Thermoddem



No.11：小田, Case7, Thermoddem



No.12：小田, Case5, Thermoddem
温度変化考慮

図 4.5.3-9 解析結果（pH の時間空間変化，No.9～12）

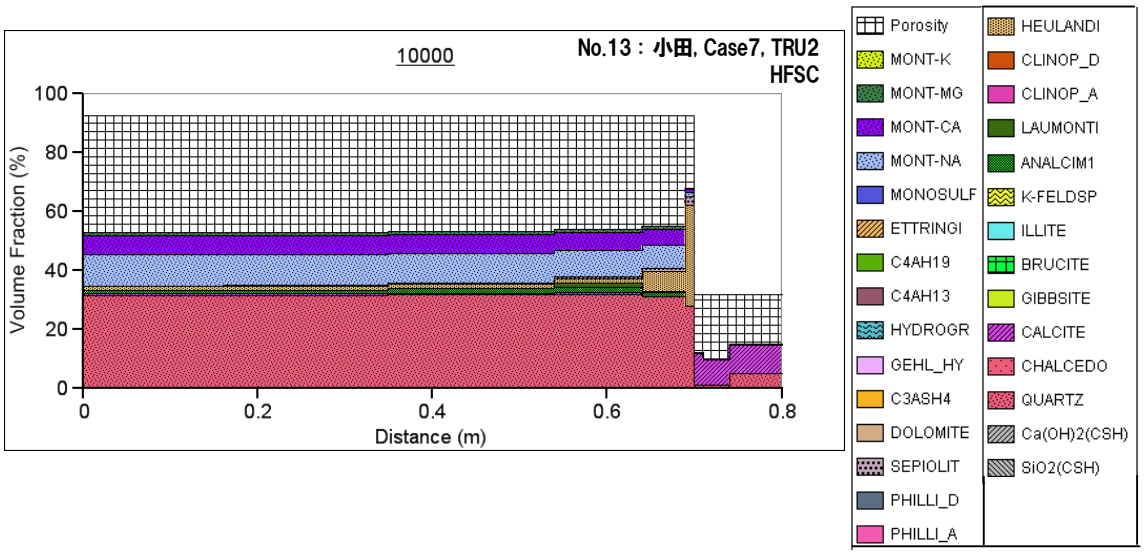


図 4.5.3-10 解析結果（鉱物組成分布：10,000 年後，No.13）

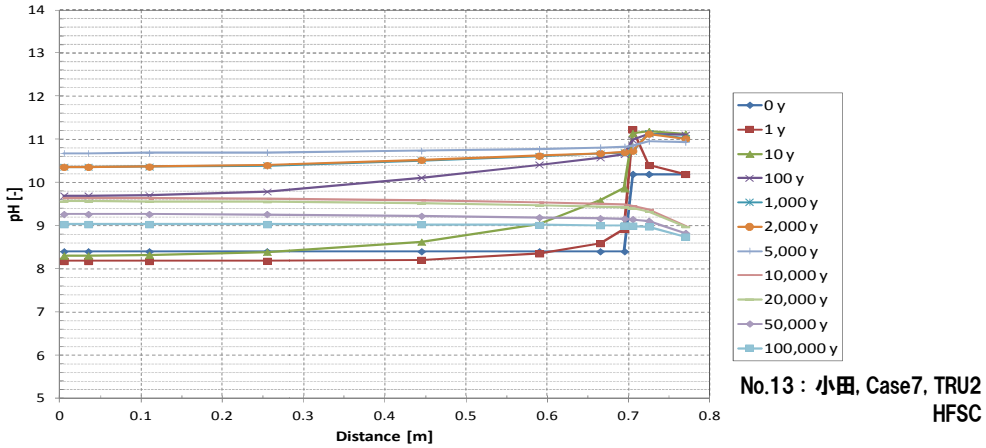


図 4.5.3-11 解析結果（pH の時間空間変化，No.9～13）

(5)考察およびまとめ

ベントナイトーセメント系材料相互作用に関する，物質移行－化学反応連成解析の不確実性を明らかにし，その結果を踏まえて，想定すべき緩衝材安全機能への影響の程度を把握するとともに，状態設定における取り扱いを検討することを目的として物質移行-化学反応連成解析解析を実施した。

解析では，第 2 次 TRU レポートにおける解析事例を前提として，モンモリロナイト溶解速度式の変更，熱力学データの変更等を行い，それらの影響を確認した。反応速度式については，Sato-Cama 式に比べて，小田式の方が支保近傍のモンモリロナイトの変質が促進される傾向を示した。小田式は，Sato-Cama 式の導出に利用されている実験条件（pH9, 80℃）に加え，それ以降に報告されている実験値もあわせて幅広い化学的条件（pH7～13, 25℃～80℃）に適用することが可能な経験式である。したがって，時間的空間的に幅広い化学的条件を取り得るセメント-ベントナイトシステムへの適用性を考慮し，小田式を基本として評価に利用していくこととし，速度式の有する不確実性として他の式との違いとその影響を認識しておくことが好ましいと考えられる。

熱力学データベースについては，近年新しく整備され，温度の変化も取り扱えることから，フランス BRGM によって整備された“Thermoddem”を用いた計算も行った。解析の結果，“Thermoddem”を使用した場合には，TRU2 データベースに比べ，モンモリロナイトの変質が促進された。また，OP 近傍における pH の時間的変化にも違いがみられた。これは，“Thermoddem”におけるモンモリロナイトの溶解反応の平衡定数が，TRU2 データベースに比べ大きな値（モンモリロナイトが不安定で溶解しやすい値）となっていることが一因と考えられる。モンモリロナイトの熱力学データには，いくつかの導出方法が提案されており，導出方法に依存して平衡定数で 4 桁以上異なることが知られている（上野・柴田，2007）。これらの一部のデータについては，天然で観察されているモンモリロナイトの産状などと矛盾するとの指摘もある（電事連・JNC，2005）。“Thermoddem”に収録されている個別のデータの導出過程については完全には把握できておらず，熱力学データの値についての評価は行われていない。今回の解析は，影響の程度を把握することを意図した予備的検討であり，今後，“Thermoddem”のデータについては，データ設定の手法や根拠について，詳細に調査を行うとともに，天然において観察される現象との整合性等について確認を行い，データベースの信頼性と解析評価への適用性を評価していく必要がある。また，モンモリロナイトの溶解速度式中の定数の導出において，実験条件における ΔGr の算出にモンモリロナイトの熱力学データが利用されている。今回の解析においては，熱力学データの変更による速度式の補正は行っていないが，解析の内部整合性の観点からは，データベースを変更する場合には留意すべきである。

また，今回の解析結果のいくつかの比較において，化学反応に係る条件よりも，その結果として生じる間隙率の変化により規定される物質移行量の変化のほうが，系全体の変遷挙動を支配している事例が確認された。本解析で用いたセメント系材料の間隙率と拡散係数の関係式（Mihara and Sasaki, 2005)は，間隙率が約 0.1 から 0.6 のセメントモルタル試料を用い，実効拡散係数の値として 10^{-12} m/s のオーダーよりも大きな値の実測値をもとに導出されたものである。一方，本解析では，二次鉱物の沈殿の状況に依存して，0.1 以下の間隙率に対し，10^{-14} m/s を下回る小さな拡散係数を与える解析となっている場合がある。このような非常に小さな拡散係数の設定が，現象の進展に大きな影響を与えている一方，この領域の拡散係数の設定の信頼性は十分とは言えない。また，セメントのひび割れの発生といった現象が発生する可能性も否定できず，その様な現象を考慮すると，単純な間隙率の関数としての拡散係数の設定は適切ではない可能性がある。したがって，第 2 次 TRU レポートにおいても議論されているように，二次鉱物による間隙充填の取り扱いを一
つの不確実性として捉え，拡散係数を低減させない条件での解析を併せて実施するなど，その不確実性の影響についてさらなる検討を行うことも必要である。

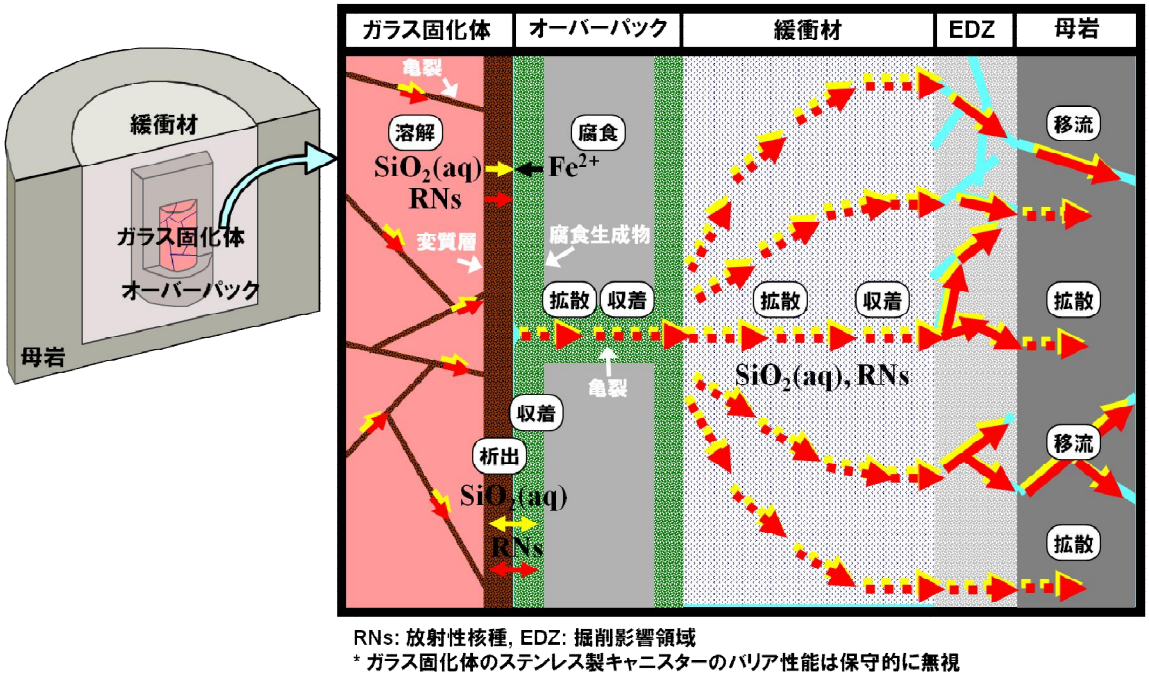
さらに，今回の解析では，地下水条件を SRHP に変更したケースでは，支保近傍で緩衝材の顕著な変質が示唆されたことから，従来 FRHP を中心に検討が行われてきているが，地下水組成の影響についてのさらなる検討が必要であることが確認された。

今回の解析結果からは，熱力学データベースとして TRU-2 データベースに基づく限り，緩衝材領域全体にわたってモンモリロナイト量が著しく減少することはなく，緩衝材に期待されている“移流による移行の抑制”，“コロイド移行の防止・抑制”といった安全機能は維持されるものと考えられる。

しかしながら，上述のとおり，熱力学データの信頼性をはじめ，環境条件の変更や解析上の取り扱いなどのいくつかの点について，さらなる検討が必要である。

4.5.4　溶存ケイ酸濃度変化の影響等を考慮したガラス溶解挙動

第 2 次取りまとめ（JNC, 1999a）におけるガラス固化体の溶解の取り扱いは，ガラス固化体近傍の間隙水中の溶存ケイ酸濃度が長期的にはほぼ飽和に達し，ガラス固化体の溶解は残存溶解速度で進行するものと考え，溶存ケイ酸濃度飽和条件での浸出試験データに基づいて設定された。ガラス固化体からの核種の浸出挙動については，2011 年度の共同研究（江橋ほか，2012）において，第 2 次取りまとめ以降の知見にも着目し，ガラスの溶解と核種の浸出挙動に影響を及ぼす要因を樹形図を用いて整理し，関連する情報と対応づける試みを行った。その中で，ガラスの溶解挙動に影響を及ぼす要因の一つとして，ガラス固化体近傍での溶存ケイ酸濃度があり，さらに，これを支配する要因にはいくつかの不確実性が残されていることが示された。すなわち，ガラス固化体近傍での溶存ケイ酸濃度は，二次鉱物の析出，オーバーパック腐食生成物や緩衝材との相互作用，溶存ケイ酸の移行等の影響を受ける（図 4.5.4-1）。これらの影響の程度によっては，ガラス固化体近傍の溶存ケイ酸濃度が長期的に低く維持され，第 2 次取りまとめの設定よりも速い速度でガラス固化体の溶解が進行する可能性がある。さらに，溶存ケイ酸濃度の時空間的な変化には，貫通した腐食孔や亀裂などの開口部が溶存ケイ酸の移行経路となることから，破損したオーバーパックの形状等も影響を及ぼすことが考えられるが，これらにはいずれも不確実性が伴う。したがって，これらの不確実性要因が，ガラス固化体の溶解挙動にどの程度影響を及ぼすかについて解析的な検討を実施することは，ガラス固化体からの核種の浸出挙動に関する状態設定，性能評価解析におけるモデルやパラメータ設定にむけた課題を抽出する観点からも重要である。本検討では，二次鉱物の析出速度などを変動させた感度解析的な評価を行い，ガラス固化体の溶解速度に寄与する支配的なプロセスを特定するとともに，各不確実性要因の影響の程度を把握することとした。なお本検討における解析では，現時点で得られているデータ等の不確実性が大きいために解析ケースによっては過度に保守的な設定となっている可能性があることに留意が必要である。



RNs: 放射性核種, EDZ: 掘削影響領域
* ガラス固化体のステンレス製キャニスターのバリア性能は保守的に無視

図 4.5.4-1　ガラス固化体近傍の溶存ケイ酸濃度に影響すると考えられる現象等

安全機能との関係

ガラス固化体は，NUMO が実施する地層処分事業の設計項目には含まれないが，ガラス固化体には安全機能として「ガラスマトリクスによる浸出の抑制」を期待している（NUMO，2011a)。本検討で着目する，ガラス固化体近傍での溶存ケイ酸濃度の変化は，長期にわたるガラス溶解速度を規定する可能性があり，この安全機能に直接影響を及ぼすことが考えられる。

解析の実施

(1) ガラス固化体の溶解挙動解析モデル

(i) ガラス溶解挙動解析モデルにて考慮するプロセス等

(a) ガラス固化体の溶解反応

オーバーパック破損後，地下水がガラス固化体に接触し，ガラスマトリクスの溶解および変質に伴い放射性核種がゆっくりと地下水中に溶出する。ガラスの溶解および変質挙動は，ガラス固化体の組成，温度および接触する溶液の組成や pH により影響されるが，長期的にはガラス固化体周辺の溶存ケイ酸濃度がその挙動を決定する重要なパラメータとなると考えられている。ガラスマトリクスの溶解速度は，ガラス表面近傍での溶存ケイ酸濃度に対する一次溶解反応で表現され，ケイ酸濃度の増加に伴って減少することが試験から確認されている（Advocat et al., 1990）。このようにガラスの溶解速度がその主成分である SiO_2 の溶解反応に律速されるとする一次溶解反応モデル（Grambow, 1985）が，ガラス固化体の溶解変質モデルとして広く受け入れられている。本検討では，SiO_2 の溶解反応に着目し，ガラス固化体の溶解を一次溶解反応で表現する。

(b) ガラス固化体の割れによる表面積の増加

ガラス固化体の溶解はガラス表面から徐々に進むが，ガラス固化体製造時の冷却による割れやオーバーパックの腐食膨張などによる応力に起因する割れが生じ，ガラス固化体本来の幾何形状（円柱形）の表面積よりも実際の表面積は増加すると考えられている。しかし，そのような割れのうち，溶解量の増加に寄与するのはその一部であることが，大型ガラス固化体の浸出試験によって確認されている（園部・石黒，1990）。このため，第２次取りまとめ（JNC, 1999a）では，溶解量から推定した溶解に寄与する表面積の実質的な増加は 4 から 5 倍程度と見積り，幾何学的表面積の 10 倍をガラス固化体の表面積とした。本検討においても，割れによるガラス固化体の表面積の増加を考慮する。

(c) 二次鉱物の析出による溶存ケイ酸の消費

Mg ケイ酸塩鉱物など，ケイ酸を含む二次鉱物の析出によって，ガラス固化体近傍の液相中の溶存ケイ酸が消費され，溶存ケイ酸濃度の低下に起因してガラスの溶解が促進されることが想定される（例えば，Jollivet et al., 2012, Maeda et al., 2011, McVay and Buckwaler, 1983, McGrail, 1986, Michelin et al., 2012）。本検討では，スメクタイトや Mg ケイ酸塩鉱物，Fe ケイ酸塩鉱物の析出を考慮する。

(d) オーバーパックの開口と鉄腐食生成物の影響

オーバーパックの外側表面の腐食が進み，力学的強度が低下すると，やがて周囲の応力によってオーバーパックが破損し，亀裂等の形成により開口すると考えられる。オーバーパックが破損して開口すると，開口部を通じて地下水が徐々にオーバーパック内部へ侵入し，地下水がガラス固化体に接触することでガラスマトリクスの溶解および変質が始まる。オーバーパック破損の後も，オーバーパックを構成する鉄の腐食は進み，オーバーパック内側表面および開口部表面も鉄腐食生成物で覆われる

と考えられる。菱鉄鉱（$FeCO_3$）や磁鉄鉱（Fe_3O_4）といった鉄腐食生成物には溶存ケイ酸が収着することが実験的に確認されており（Phillipini et al. 2006, Mayant et al., 2008），Andra が 2005 年に公表した安全評価報告書（Andra, 2005c）において用いられている“V0.S→Vr モデル”と呼ばれているガラス溶解モデルで考慮されている。本検討においてもこれらを参考に，ガラス固化体から放出された溶存ケイ酸は，オーバーパック内側表面に存在する鉄腐食生成物に収着するものとする。また，オーバーパック開口部は，オーバーパック内側と外側をつなぐ溶存ケイ酸の移行経路とし，鉄腐食生成物で満たされたその移行経路を溶存ケイ酸が腐食生成物に一部収着しながら拡散し，オーバーパック外側の緩衝材に散逸していくものとする。

(e)　緩衝材中の溶存ケイ酸の拡散と収着

ガラス固化体近傍の溶存ケイ酸濃度は，溶存ケイ酸の緩衝材中への拡散散逸の影響も受ける（Curti et al., 1993, Pescatore, 1994）。既往の評価（例えば，牧野・吉田，1996，Mitsui et al., 2009）では，ガラス固化体の一次反応溶解と溶存ケイ酸の緩衝材中への拡散散逸を連成したモデルが用いられており，本検討においても，同様な考え方で溶存ケイ酸の緩衝材中への拡散散逸を考慮することとする。

(f)　掘削影響領域における地下水との混合，流出

第 2 次取りまとめでは，緩衝材の外側に到達した核種は，掘削影響領域を通過する地下水と瞬時に混合し，その全量が母岩中の亀裂に流入するものと仮定された。本検討では，緩衝材外側に到達した溶存ケイ酸の取り扱いについてこの仮定を採用した。

(ii)　解析モデル

(i)で述べた種々のプロセスを考慮して，ガラス溶解挙動解析のためのモデルを構築した。その概念モデルを図 4.5.4-2 に示す。ここでは，概念モデルについて説明する。

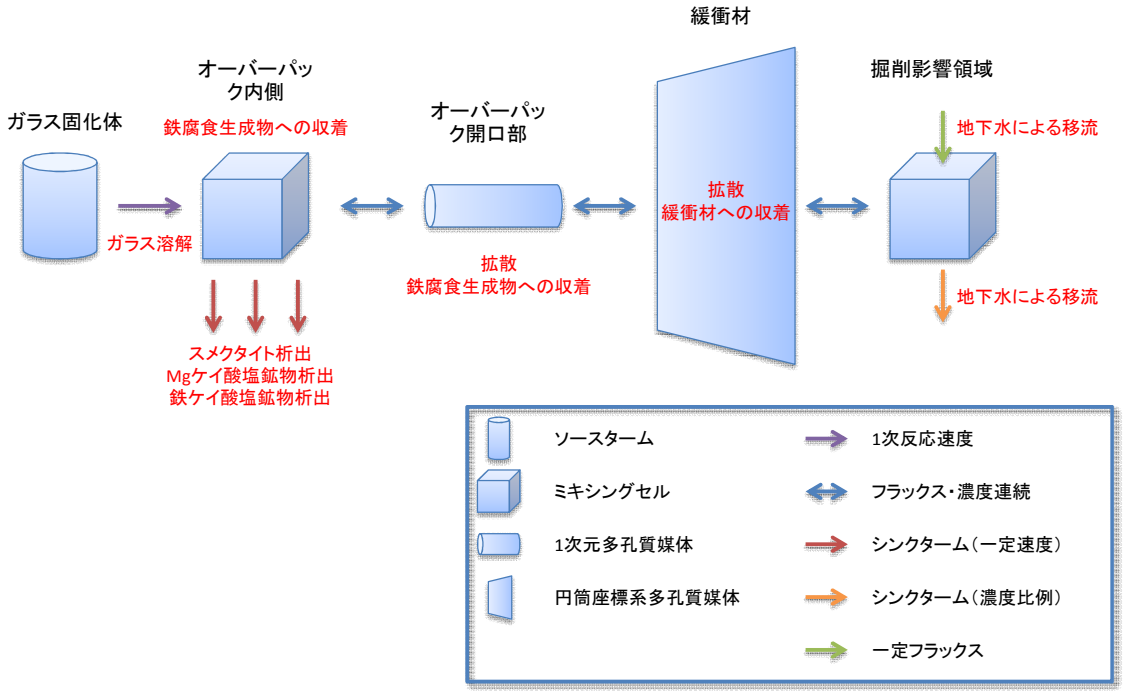


図 4.5.4-2　ガラス溶解挙動解析の概念モデル

前述のとおり，ガラスの溶解には一次溶解反応モデルを適用することとした。その一次溶解反応速度は次式で表される。

$$R(t) = R_0 \cdot \frac{C_0 - C(t)}{C_0} \qquad (4.5.4\text{-}1)$$

ここで,

$R(t)$： 時刻 t における SiO_2 の溶解速度 （mol/m^{2}y）
R_0： SiO_2 の初期溶解速度 （mol/m^{2}y）
$C(t)$： オーバーパック内側領域の液相中の溶存ケイ酸濃度（mol/m^3）
C_0： ケイ酸の溶解度 （mol/m^3）

である。オーバーパック内側領域の液相中の溶存ケイ酸濃度$C(t)$は，上記ガラスの溶解に加えて，二次鉱物の析出とオーバーパック開口部への拡散，鉄腐食生成物への収着（瞬時・可逆・線形）によって規定される。すなわち，オーバーパック内側のミキシングセルにおけるケイ酸の質量収支に関しては，以下の支配方程式が適用される。

$$\frac{d}{dt}(VC(t) + C(t)m_{CP}(t)K_d) = R(t)S - P_{smectite} - P_{MgSilicate} - P_{FeSilicate} - J(t) \quad (4.5.4\text{-}2)$$

ここで,

V： オーバーパック内側の液相体積 （m^3）
$m_{CP}(t)$： 時刻 t におけるオーバーパック内側の鉄腐食生成物の質量 （kg）
K_d： 鉄腐食生成物に対するケイ酸の収着分配係数 （m^3/kg）
S： 溶解に寄与するガラス固化体表面積 （m^2）
$P_{smectite}$： スメクタイト析出速度（mol(Si)/y）
$P_{MgSilicate}$： Mg ケイ酸塩鉱物析出速度（mol(Si)/y）
$P_{FeSilicate}$： Fe ケイ酸塩鉱物析出速度 （mol(Si)/y）
$J(t)$： 腐食生成物間隙中の拡散によるオーバーパック開口部への溶存ケイ酸の移行率 （mol/y）

である。ただし，数値計算の安定性の観点から，ガラス固化体の溶解が完了した後($t > t_{dep}$)は，ケイ酸を含む二次鉱物の析出も止まることとした。

$$R(t)S = P_{smectite} = P_{MgSilicate} = P_{FeSilicate} = 0 \text{ mol/y},\ t > t_{dep} \qquad (4.5.4\text{-}3)$$

また，Fe ケイ酸塩鉱物の析出速度$P_{FeSilicate}$については，オーバーパックが完全に腐食した後は，鉄の供給が止まるため 0 mol/y となることを想定する。

オーバーパックの腐食は一定速度で進行するものと仮定し，そのうち一定の割合の Fe が Fe ケイ酸塩鉱物の析出に消費され, 残りの Fe はケイ酸を含まない鉄腐食生成物の析出に消費されるものと仮定した。したがって，Fe ケイ酸塩鉱物の析出速度はオーバーパックの腐食速度とその析出割合に依存する。なお，オーバーパック外側表面にも腐食生成物が形成されるが，本検討では外側表面の鉄腐食生成物に対する Fe の消費や溶存ケイ酸の移行挙動への影響を無視することとした。

オーバーパックの開口部は Fe 腐食生成物で満たされていることを想定して多孔質媒体モデルとし，溶存ケイ酸はその間隙中を拡散して緩衝材に移行するとともに，ケイ酸の腐食生成物への収着（瞬時・可逆・線形）を考慮した。

緩衝材中での溶存ケイ酸の移行については，その円筒形状を考慮した上で，多孔質媒体中の拡散・収着（瞬時・可逆・線形）を考慮した。

掘削影響領域では，地下水の移流によって溶存ケイ酸が下流側の母岩へ移行することを考慮する。また，ガラス固化体起源のケイ酸ではなく地下水環境にもともと存在する溶存ケイ酸の濃度を想定し，掘削影響領域には上流から常に一定濃度の溶存ケイ酸が流入することを考慮した。また，緩衝材間隙中やオーバーパック内側および開口部の間隙の初期の溶存ケイ酸濃度もこの地下水環境の溶存ケイ酸濃度であることを仮定した。

(2) 解析条件

ガラス溶解挙動解析においては，種々の不確実性要因がガラス固化体の溶解挙動にどの程度影響を及ぼすかについて検討するために，それらの不確実性要因を表すパラメータについての感度解析を行う。この目的のために，まず，代表的な解析ケース（レファレンスケース）を設定し，それに対してパラメータを個別に変動させることによって，個々の不確実性要因の影響を把握することとした。以下にレファレンスケースおよびその他のケースでの解析条件を順に説明する。

(i) レファレンスケースの解析条件

表 4.5.4-1 にレファレンスケースにおける入力パラメータの設定条件を示す。

表 4.5.4-1 レファレンスケースにおける設定（1/2）

パラメータ記述	値	備考
ガラス固化体幾何学的表面積	1.7 m^2	第 2 次取りまとめ（以下，H12 と呼ぶ）の寸法に基づく
割れも含めたガラスの溶解に寄与する全表面積の幾何学表面積に対する比	10	H12 核種移行解析設定値
オーバーパック内側の隙間体積	1.07E-2 m^3	H12 の寸法に基づき，OP 容積とガラス固化体体積の差分として計算
オーバーパック内側表面積（腐食面積）	2.170 m^2	OP 内側寸法より計算（側面+2×底面）
オーバーパック初期重量	5568 kg	体積と密度から計算（H12 分冊 2：図 4.1.1-25 および表 4.2.2-29）
ガラス中の初期 Si モル数	3090 mol	ガラス固化体重量 412kg として設定
Si の溶解度	3.87 mol/m^3	Mitsui et al.(2009)を参考に設定
地下水および緩衝材間隙水中の初期 Si 濃度	0.71 mol/m^3	Mitsui et al.(2009)を参考に設定
ガラス初期溶解速度	0.96 mol(Si)/m^2y	牧野・吉田（1996）を参考に設定
Mg ケイ酸塩鉱物析出速度	1.00E-03 mol(Si)/m^2y	Abdelouas et al.（1997)を参考に設定
スメクタイト析出速度	1.00E-03 mol(Si)/m^2y	Mg ケイ酸塩鉱物と同じ値とした。
オーバーパックの腐食速度	1 μm/y	谷口ほか(2010)を参考に設定
オーバーパックの密度	7.86 Mg/m^3	H12 参照
オーバーパック腐食生成物のうちケイ酸塩鉱物に費やされる Fe の割合	0.5 mol(Fe)/mol(Fe)	谷口ほか(2009)，Schlegel et al.(2008)を参考に設定

表 4.5.4-1　レファレンスケースにおける設定（2/2）

パラメータ記述	値	備考
鉄ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 組成比	0.5	Schlegel et al. (2008), Burger et al.(2013)を参考に設定
腐食生成物への Si の分配係数	0.025 m^3/kg	Philippini et al. (2006)を参考に設定
腐食生成物の真密度	3.4 Mg/m^3	Fe(OH)2 の真密度
腐食生成物中の Si の実効拡散係数	2.87E-10 m^2/s	緩衝材と同じ設定（仮設定）
腐食生成物の間隙率	0.41	緩衝材と同じ設定（仮設定）
オーバーパック開口断面積	1.35E-03 m^2	オーバーパック内側高さ（1.35m）×開口幅（1mm）
オーバーパックの厚さ	0.19 m	H12 参照
緩衝材間隙率	0.41	H12 核種移行解析設定値
緩衝材の乾燥密度	1.6 Mg/m^3	H12 核種移行解析設定値
緩衝材中の Si の実効拡散係数	4.1E-11 m^2/s	De= ε Dp （ε=間隙率, Dp = 1E-10 m2/s）
緩衝材中の Si の分配係数	0.5 m^3/kg	Tan(1982)を参考に設定
緩衝材内側半径	0.41 m	H12 核種移行解析設定値
緩衝材外側半径	1.11 m	H12 核種移行解析設定値
緩衝材の高さ	2.14 m	H12 核種移行解析設定値
掘削影響領域体積	1E-03 m^3	H12 核種移行解析設定値
掘削影響領域通過流量	1E-03 m^3/yr	H12 核種移行解析設定値

(ii)　不確実性要因とその影響評価のための解析ケース

表 4.5.4-2～表 4.5.4-15 に，各々の不確実性要因に着目した解析ケースについて変動させたパラメータの設定条件を示す。レファレンスケースに挙げた入力パラメータのうち，ガラスの溶解挙動に影響を及ぼし得ると考えられる不確実性を含むパラメータについてはその変動を考慮した。レファレンスケースと同じ条件の解析ケースについては備考欄に RC と記載した。

(a)　ガラス固化体表面積の不確実性

表 4.5.4-2　ガラス固化体の幾何学的表面積に対する比に関する解析ケース

ケース番号	幾何学的表面積に対する比（-）	備考
B-1	1	
B-2	10	RC
B-3	100	
B-4	1000	

(b) スメクタイト析出速度および Mg ケイ酸塩鉱物析出速度の不確実性

表 4.5.4-3 スメクタイト析出速度に関する解析ケース

ケース番号	スメクタイト析出速度（mol(Si)/m^2/y）	備考
C-1	1E-3	RC
C-2	1E-4	
C-3	0	析出なし

表 4.5.4-4 Mg ケイ酸塩鉱物析出速度に関する解析ケース

ケース番号	Mg ケイ酸塩鉱物析出速度（mol(Si)/m^2/y）	備考
D-1	1E-3	RC
D-2	1E-4	
D-3	0	析出なし

(c) オーバーパックの腐食に関する不確実性

表 4.5.4-5 オーバーパックの腐食速度に関する解析ケース

ケース番号	オーバーパックの腐食速度（μm/y）	備考
E-1	1	RC
E-2	10	
E-3	0.1	

表 4.5.4-6 Fe ケイ酸塩鉱物として消費される Fe の割合に関する解析ケース

ケース番号	Fe ケイ酸塩鉱物として消費される Fe の割合（mol(Fe)/mol(Fe)）	備考
F-1	0	析出なし
F-2	0.5	RC

表 4.5.4-7 Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比に関する解析ケース

ケース番号	Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 組成比（-）	備考
G-1	0.5	RC
G-2	1.0	

表 4.5.4-8 腐食生成物への Si の分配係数に関する解析ケース

ケース番号	腐食生成物への Si の分配係数（m^3/kg）	備考
H-1	0.0025	
H-2	0.025	RC
H-3	0.25	

(d) オーバーパック開口断面積の不確実性

表 4.5.4-9 オーバーパック開口断面積に関する解析ケース

ケース番号	オーバーパック開口断面積（m^2）	備考
I-1	1.35E-3	RC: 開口幅（1mm）
I-2	1.35E-2	開口幅（10mm）
I-3	1.35E-1	開口幅（100mm）
I-4	2.17E+0	オーバーパック内側表面積（2.170m^2）

(e) 緩衝材中の Si の実効拡散係数の不確実性

表 4.5.4-10 緩衝材中の Si の実効拡散係数に関する解析ケース

ケース番号	緩衝材中の Si の実効拡散係数（m^2/s）	備考
J-1	4.1E-11	RC
J-2	4.1E-10	

(f) 掘削影響領域通過流量の不確実性

表 4.5.4-11 掘削影響領域通過流量に関する解析ケース

ケース番号	掘削影響領域通過流量（m^3/y）	備考
K-1	1E-4	
K-2	1E-3	RC
K-3	1E-2	
K-4	1E-1	
K-5	1E+0	

(g) オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケース

この解析ケースではオーバーパック開口部内の溶存ケイ酸の移行を無視するケース（L）と考慮するケース（M）を実施した。

表 4.5.4-12 オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しないための入力条件
（開口部内の移行を無視）

パラメータ記述	単位	値				
		L-1	L-2	L-3	L-4	L-5
ガラス固化体幾何学的表面積	m^2	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
割れも含めたガラスの全表面積の幾何学表面積に対する比	-	10	10	10	10	10
オーバーパック内側の隙間体積	m^3	1.07E-2	1.07E-2	1.07E-2	1.07E-2	1.07E-2
オーバーパック内側表面積(腐食面積)	m^2	2.170	2.170	2.170	2.170	2.170
オーバーパック初期重量	kg	5568	5568	5568	5568	5568
ガラス中の初期Siモル数	mol	3090	3090	3090	3090	3090
Siの溶解度	mol/m^3	3.87	3.87	3.87	3.87	3.87
地下水及び緩衝材間隙水中の初期Si濃度	mol/m^3	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
ガラス初期溶解速度	$mol(Si)/m^2y$	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
スメクタイト析出速度	$mol(Si)/m^2y$	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Mgケイ酸塩鉱物析出速度	$mol(Si)/m^2y$	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
オーバーパックの腐食速度	μm/y	0	0	0	0	0
オーバーパックの密度	kg/m^3	7860	7860	7860	7860	7860
オーバーパック腐食生成物のうちケイ酸塩鉱物に費やされるFeの割合	mol(Fe)/mol(Fe)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
鉄ケイ酸塩鉱物中のSi/Fe組成比	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
腐食生成物へのSiの分配係数	m^3/kg	0	0	0	0	0
腐食生成物の真密度	kg/m^3	3400	3400	3400	3400	3400
腐食生成物中のSiの実効拡散係数	m^2/s	4.00E-09	4.00E-09	4.00E-09	4.00E-09	4.00E-09
腐食生成物の間隙率	-	1	1	1	1	1
オーバーパック開口断面積	m^2	2.17E+00	2.17E+00	2.17E+00	2.17E+00	2.17E+00
オーバーパックの厚さ	m	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
緩衝材間隙率	-	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
緩衝材の乾燥密度	kg/m^3	1600	1600	1600	1600	1600
緩衝材中のSiの実効拡散係数	m^2/s	4.1E-11	4.1E-11	4.1E-11	4.1E-11	4.1E-11
緩衝材中のSiの分配係数	m^3/kg	0	0.01	0.1	0.5	1
緩衝材内側半径	m	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
緩衝材外側半径	m	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
緩衝材の高さ	m	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
掘削影響領域体積	m^3	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
掘削影響領域通過流量	m^3/yr	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03

表 4.5.4-13 オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケース

ケース番号	緩衝材中の Si の分配係数（m3/kg）
L-1	0
L-2	0.01
L-3	0.1
L-4	0.5
L-5	1

表 4.5.4-14　オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しないための入力条件
（開口部内の移行を考慮）

パラメータ記述	単位	値	
		M-1	M-2
ガラス固化体幾何学的表面積	m^2	1.7	1.7
割れも含めたガラスの全表面積の幾何学表面積に対する比	-	10	10
オーバーパック内側の隙間体積	m^3	1.07E-2	1.07E-2
オーバーパック内側表面積（腐食面積）	m^2	2.170	2.170
オーバーパック初期重量	kg	5568	5568
ガラス中の初期Siモル数	mol	3090	3090
Siの溶解度	mol/m^3	3.87	3.87
地下水及び緩衝材間隙水中の初期Si濃度	mol/m^3	0.71	0.71
ガラス初期溶解速度	$mol(Si)/m^2y$	0.96	0.96
スメクタイト析出速度	$mol(Si)/m^2y$	0.00E+00	0.00E+00
Mgケイ酸塩鉱物析出速度	$mol(Si)/m^2y$	0.00E+00	0.00E+00
オーバーパックの腐食速度	μm/y	0	0
オーバーパックの密度	kg/m^3	7860	7860
オーバーパック腐食生成物のうちケイ酸塩鉱物に費やされるFeの割合	mol(Fe)/mol(Fe)	0.5	0.5
鉄ケイ酸塩鉱物中のSi/Fe組成比	-	0.5	0.5
腐食生成物へのSiの分配係数	m^3/kg	0	0
腐食生成物の真密度	kg/m^3	3400	3400
腐食生成物中のSiの実効拡散係数	m^2/s	2.87E-10	2.87E-10
腐食生成物の間隙率	-	0.41	0.41
オーバーパック開口断面積	m^2	1.35E-03	2.17E+00
オーバーパックの厚さ	m	0.19	0.19
緩衝材間隙率	-	0.41	0.41
緩衝材の乾燥密度	kg/m^3	1600	1600
緩衝材中のSiの実効拡散係数	m^2/s	4.1E-11	4.1E-11
緩衝材中のSiの分配係数	m^3/kg	0.5	0.5
緩衝材内側半径	m	0.41	0.41
緩衝材外側半径	m	1.11	1.11
緩衝材の高さ	m	2.14	2.14
掘削影響領域体積	m^3	0.001	0.001
掘削影響領域通過流量	m^3/yr	1.00E-03	1.00E-03

表 4.5.4-15　オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケース

ケース番号	オーバーパック開口断面積（m^2）
M-1	1.35E-3
M-2	2.17E+0

(3)　解析結果

(i)　レファレンスケースの解析結果

図 4.5.4-3～図 4.5.4-4 にレファレンスケースの解析結果を示す。図の横軸は，オーバーパック破損後の経過時間を表す。また，図 4.5.4-3 の縦軸のガラス溶解速度は，単位時間あたりにガラス固化体の溶解に伴って放出される Si の量で表現したものであり，単位として mol/y を用いている。図 4.5.4-5 以降についても同様である。

図 4.5.4-3 に示すように，ガラス固化体の溶解速度は，ガラス固化体の溶解が完了する 28,000 年後までほぼ一定の値（1.1E-1mol/y）を保っている。この溶解速度に寄与する支配プロセスは Fe ケイ酸塩鉱物の析出である。また，この値は 2.4E-3g/m^2/d に相当し，H12 のレファレンスケースの溶解速度（1E-3g/m^2/d）よりもやや大きい。

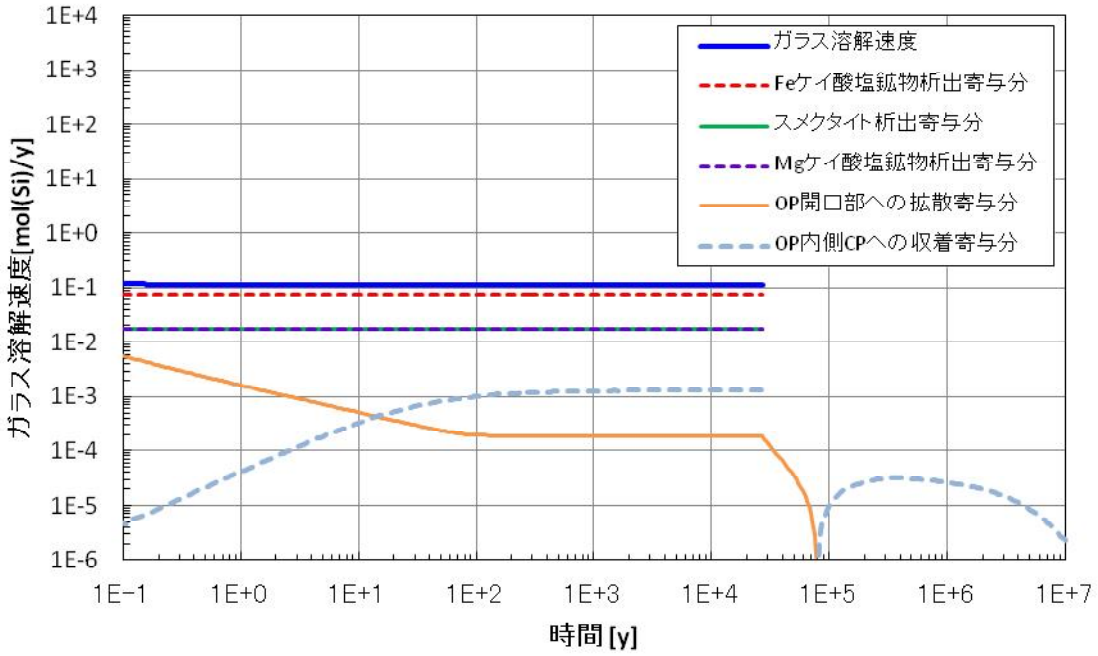


図 4.5.4-3　ガラス固化体溶解速度の経時変化（RC）

図 4.5.4-4 には，各領域における溶存ケイ酸濃度を示している。オーバーパック破損後の短期間にガラス固化体近傍（オーバーパック内側）の溶存ケイ酸濃度は Si の溶解度の設定値（3.87mol/m^3）近くに到達しているが，溶解度とわずかに差があるため，溶解反応は停止していない。

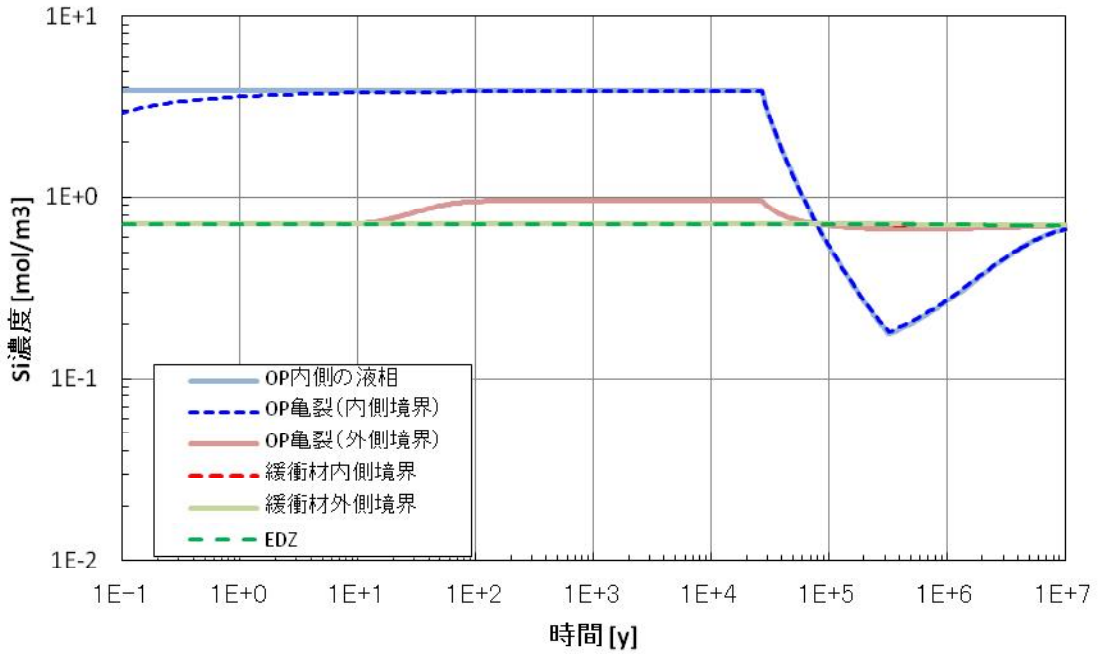


図 4.5.4-4　各領域における溶存ケイ酸濃度の経時変化（RC）

(ii)　不確実性要因の影響評価のための解析結果

表 4.5.4-16 には，各解析結果のまとめを示した。表には，溶解速度に寄与する支配プロセス，溶解開始後 1,000 年時点での溶解速度（H12 のレファレンスケースの溶解速度 1E-3g/m^2/d との比較を容易にするため，単位を合わせた。），本検討におけるレファレンスケースとの速度の比，第２次取りまとめのレファレンスケースとの速度の比，ガラス固化体の寿命を示している。

(a)　ガラス固化体表面積の不確実性

図 4.5.4-5～図 4.5.4-8 にガラス固化体表面積の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-5 から表面積の増加に伴い溶解速度が増加することがわかる。また，いずれのケースも第２次取りまとめのレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）よりも大きくなった。表面積が幾何学的表面積と同じケース（B-1）では，レファレンスケース（RC）と同様に Fe ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった（図 4.5.4-6）。幾何学的表面積の 100 倍（B-3）および 1,000 倍（B-4）のケースでは，スメクタイトおよび Mg ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった（図 4.5.4-7，図 4.5.4-8）。これはこれらのケイ酸塩鉱物がガラス表面に析出するため，表面積に応じて析出量が増加することによる。1,000 倍（B-4）のケースの固化体寿命は 900 年であり，今回の解析結果の中では最も短い。

表 4.5.4-16　各解析結果のまとめ

ケース	変動パラメータ	支配プロセス	1000年後の溶解速度 [g/m^2/d]	RCとの比	H12との比	固化体寿命[y]
RC	レファレンスケース	Feケイ酸塩鉱物析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
B-1	固化体面積:1	Feケイ酸塩鉱物析出	1.7.E-03	0.7	1.7	40,000
B-3	固化体面積:100	ケイ酸塩鉱物析出	9.0.E-03	3.7	9.0	7,500
B-4	固化体面積:1000	ケイ酸塩鉱物析出	7.5.E-02	31.1	74.8	900
C-2	スメクタイト析出速度:1/10	Feケイ酸塩鉱物析出	2.1.E-03	0.9	2.1	32,500
C-3	スメクタイト析出速度:0	Feケイ酸塩鉱物析出	2.0.E-03	0.8	2.0	35,000
D-2	Mgケイ酸塩鉱物析出速度:1/10	Feケイ酸塩鉱物析出	2.1.E-03	0.9	2.1	32,500
D-3	Mgケイ酸塩鉱物析出速度:0	Feケイ酸塩鉱物析出	2.0.E-03	0.8	2.0	35,000
E-2	OP腐食速度:10	Feケイ酸塩鉱物析出	1.7.E-02	7.2	17.4	4,000
E-3	OP腐食速度:1/10	ケイ酸塩鉱物析出	9.0.E-04	0.4	0.9	75,000
F-1	Feケイ酸塩鉱物析出割合:0	ケイ酸塩鉱物析出	8.0.E-04	0.3	0.8	85,000
G-2	Si/Fe:1.0	Feケイ酸塩鉱物析出	4.0.E-03	1.7	4.0	17,000
H-1	CPKd:1/10	Feケイ酸塩鉱物析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
H-3	CPKd:10	Feケイ酸塩鉱物析出	2.7.E-03	1.1	2.7	26,000
I-2	開口断面積:10	OP開口部への拡散 / Feケイ酸塩析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
I-3	開口断面積:100	OP開口部への拡散 / Feケイ酸塩析出	2.8.E-03	1.2	2.8	25,000
I-4	全面開口	OP開口部への拡散	6.6.E-03	2.8	6.6	13,000
J-2	緩衝材Dp:10	Feケイ酸塩鉱物析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
K-1	EDZ:1/10	Feケイ酸塩鉱物析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
K-3	EDZ:10	Feケイ酸塩鉱物析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
K-4	EDZ:100	Feケイ酸塩鉱物析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
K-5	EDZ:1000	Feケイ酸塩鉱物析出	2.4.E-03	1.0	2.4	28,000
L-1	析出&CP収着無視:Kd=0	OP開口部への拡散	6.4.E-05	0.0	0.1	1,100,000
L-2	析出&CP収着無視:Kd=0.01	OP開口部への拡散	1.5.E-03	0.6	1.5	925,000
L-3	析出&CP収着無視:Kd=0.1	OP開口部への拡散	3.7.E-03	1.5	3.7	65,000
L-4	析出&CP収着無視:Kd=0.5	OP開口部への拡散	7.5.E-03	3.1	7.5	17,000
L-5	析出&CP収着無視:Kd=1.0	OP開口部への拡散	1.0.E-02	4.3	10.3	9,000
M-1	析出&CP収着無視:開口断面積RCと同じ	OP開口部への拡散	4.1.E-06	0.0	0.0	18,000,000
M-2	析出&CP収着無視:全面開口	OP開口部への拡散	4.1.E-03	1.7	4.1	32,500

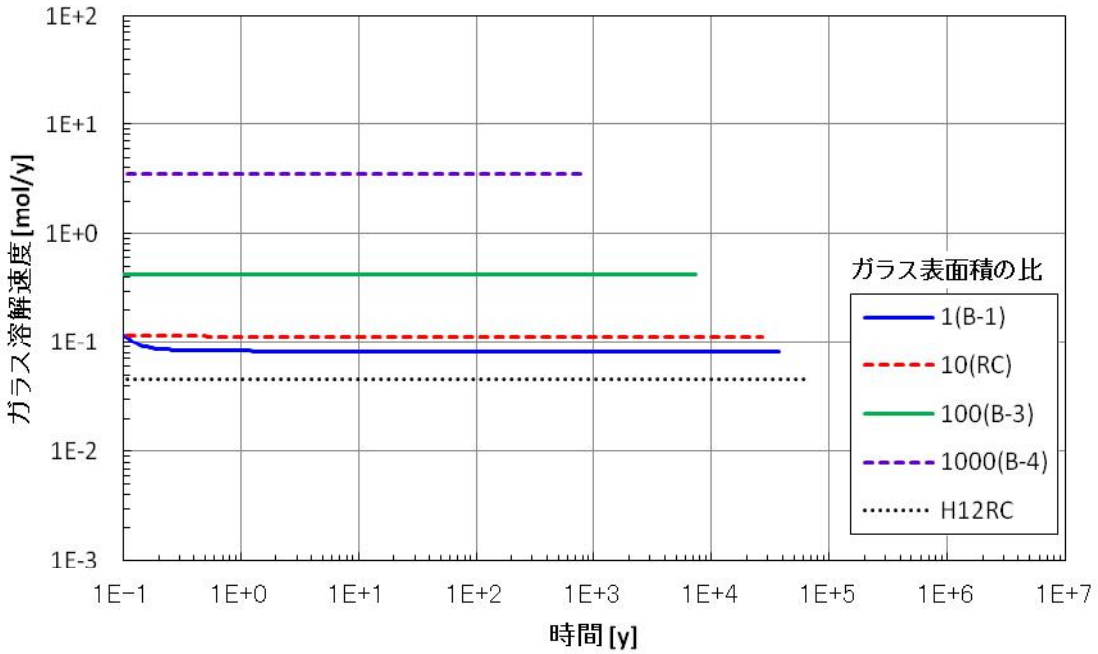


図 4.5.4-5　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（B：ガラス固化体表面積をパラメータとした解析結果）

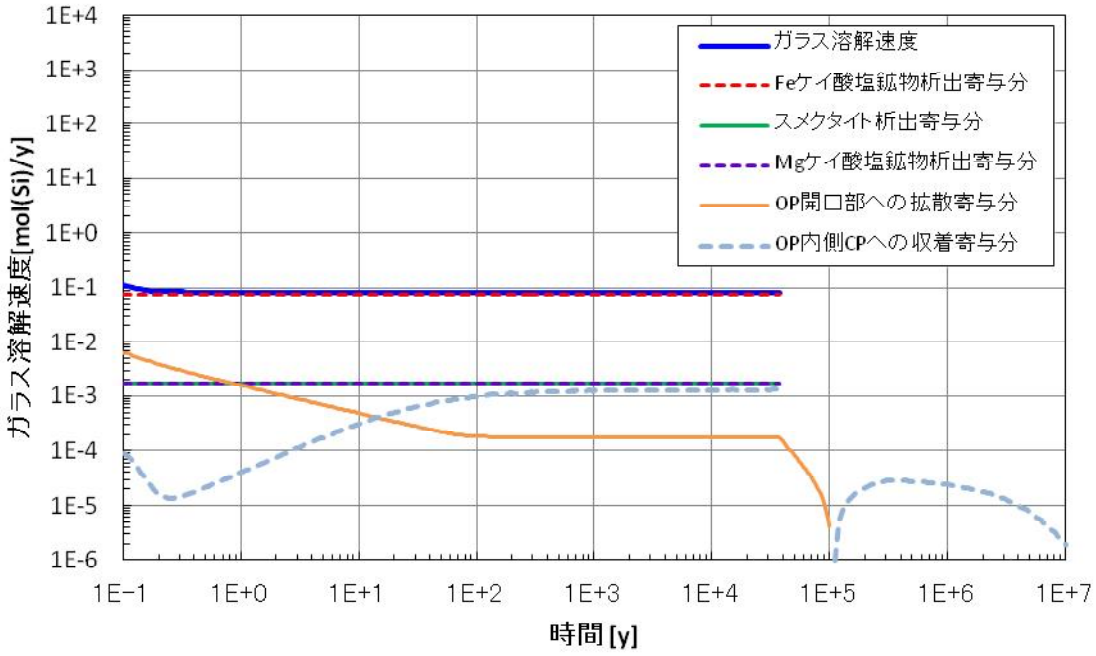


図 4.5.4-6　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（B-1：固化体表面積増加を幾何学的表面積の 1 倍とした場合の解析結果）

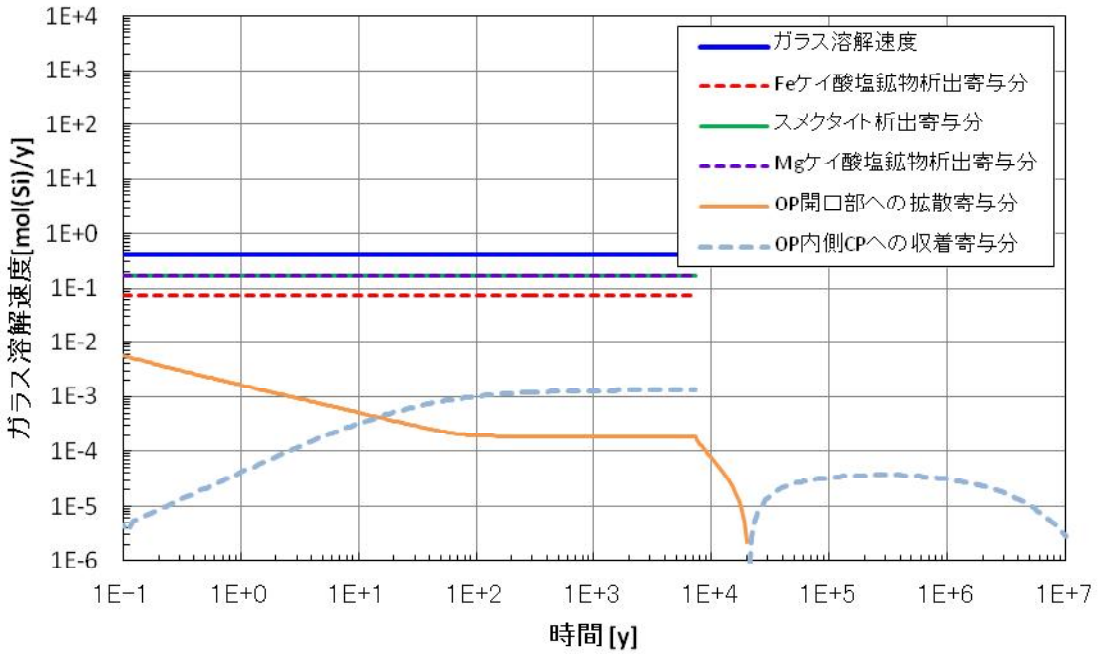


図 4.5.4-7　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（B-3：固化体表面積増加を幾何学的表面積の 100 倍とした場合の解析結果）

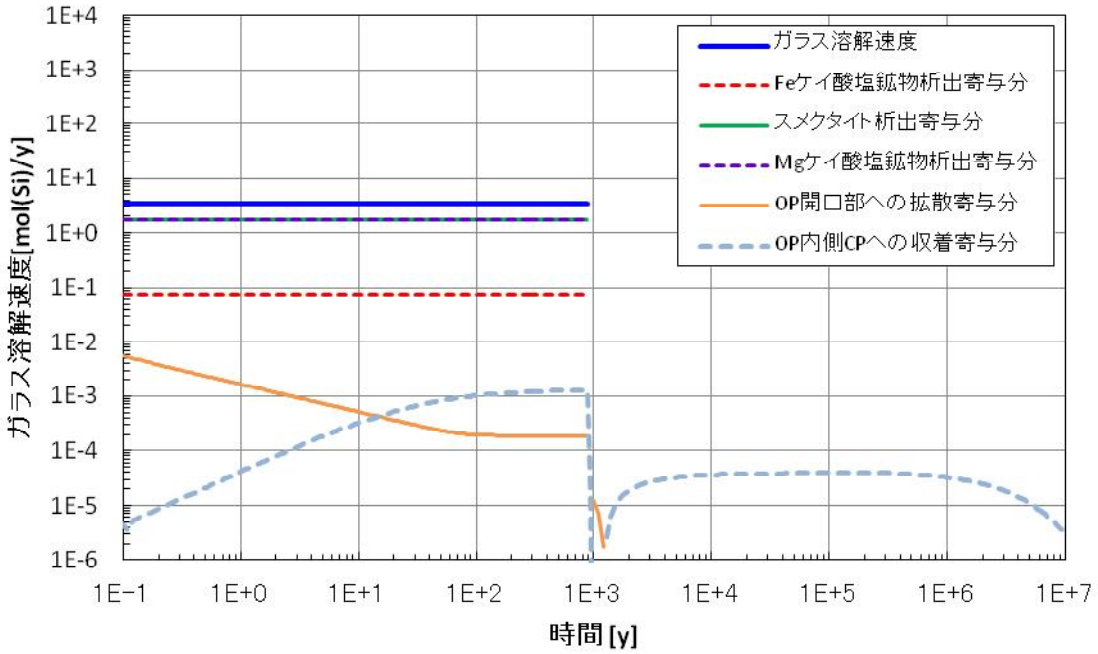


図 4.5.4-8　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（B-4：固化体表面積増加を幾何学的表面積の 1,000 倍とした場合の解析結果）

(b)　スメクタイト析出速度および Mg ケイ酸塩鉱物析出速度の不確実性

図 4.5.4-9～図 4.5.4-11 にスメクタイト鉱物析出速度，図 4.5.4-12～図 4.5.4-14 に Mg ケイ酸塩鉱物析出速度の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-9 および図 4.5.4-12 から，今回の範囲でのスメクタイトおよび Mg ケイ酸塩鉱物の析出速度の変動に伴う溶解速度の変化は認められない。また，いずれのケースも第２次取りまとめのレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）よりも大きくなった。いずれもレファレンスケース（RC）と同様に Fe ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなっている。これは，スメクタイトおよび Mg ケイ酸塩鉱物の析出速度についてレファレンスケースよりも小さな値を用いたことによる。これらのプロセスによる溶解速度への寄与が減少した分，ガラス固化体の寿命が延びている。

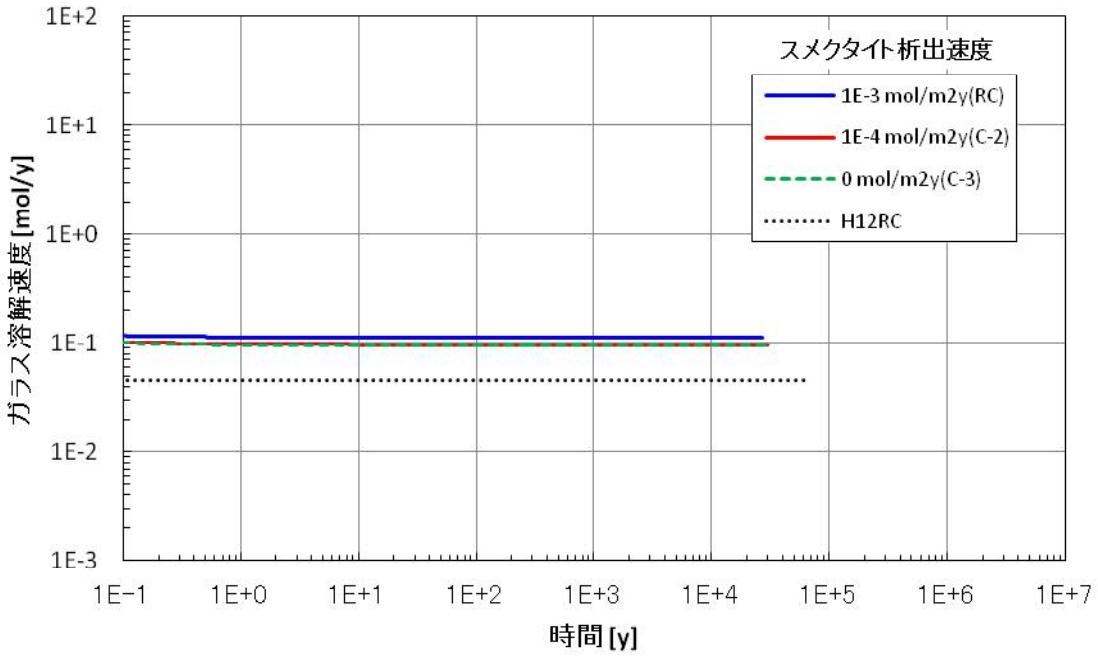


図 4.5.4-9　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（C：スメクタイト析出速度をパラメータとした解析結果）

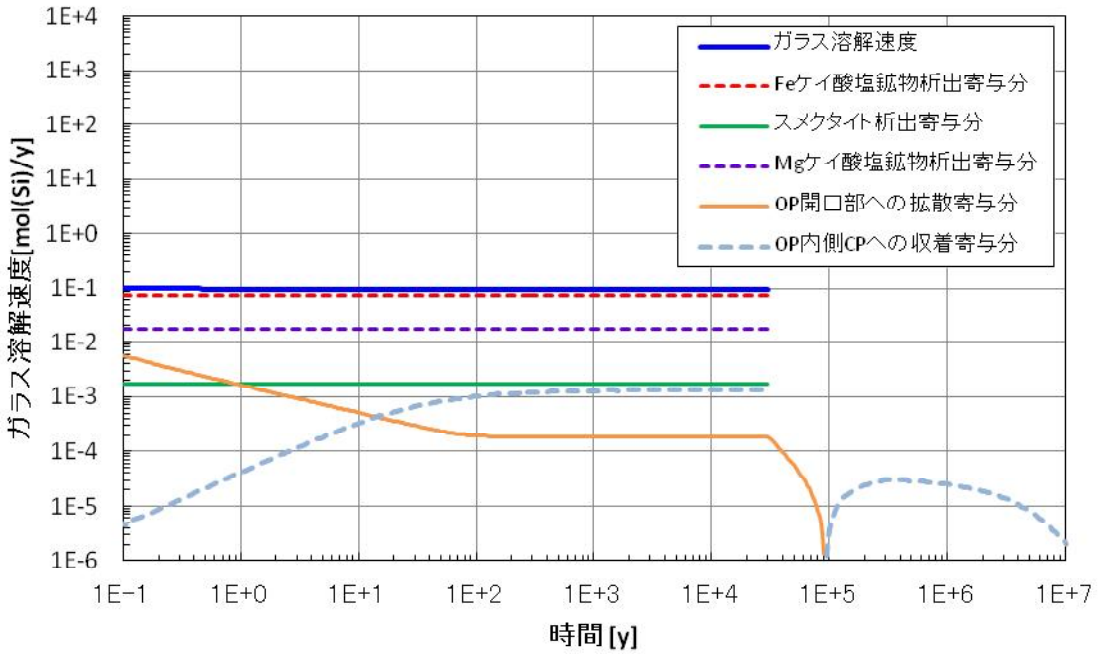


図 4.5.4-10　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（C-2：スメクタイト析出速度を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）

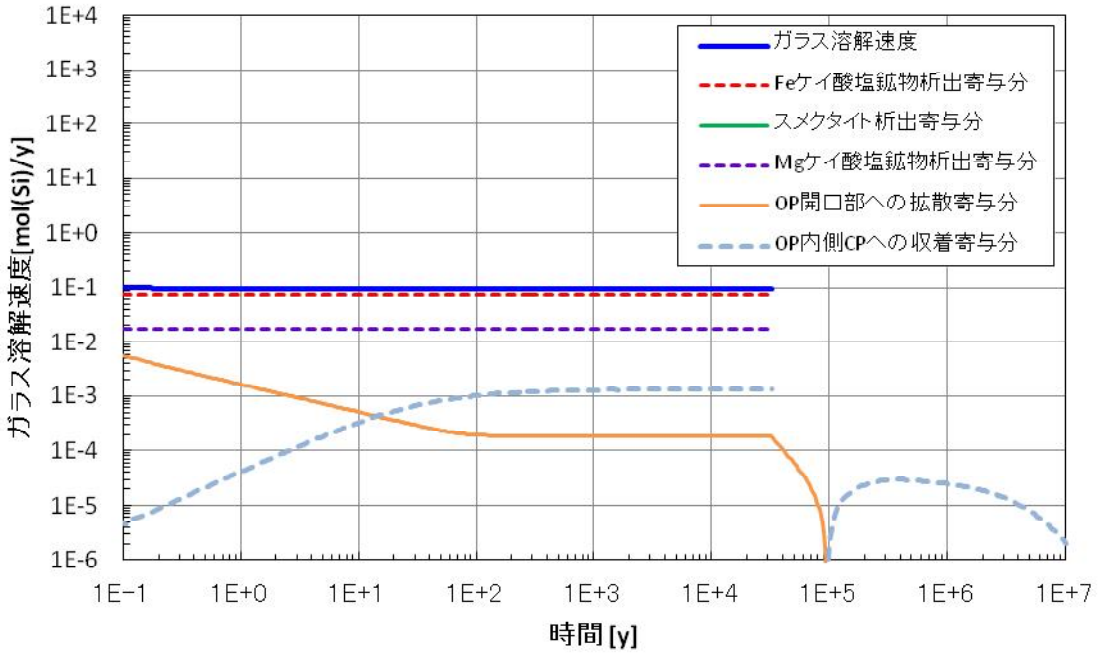


図 4.5.4-11　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（C-3：スメクタイト析出速度を 0 とした場合の解析結果）

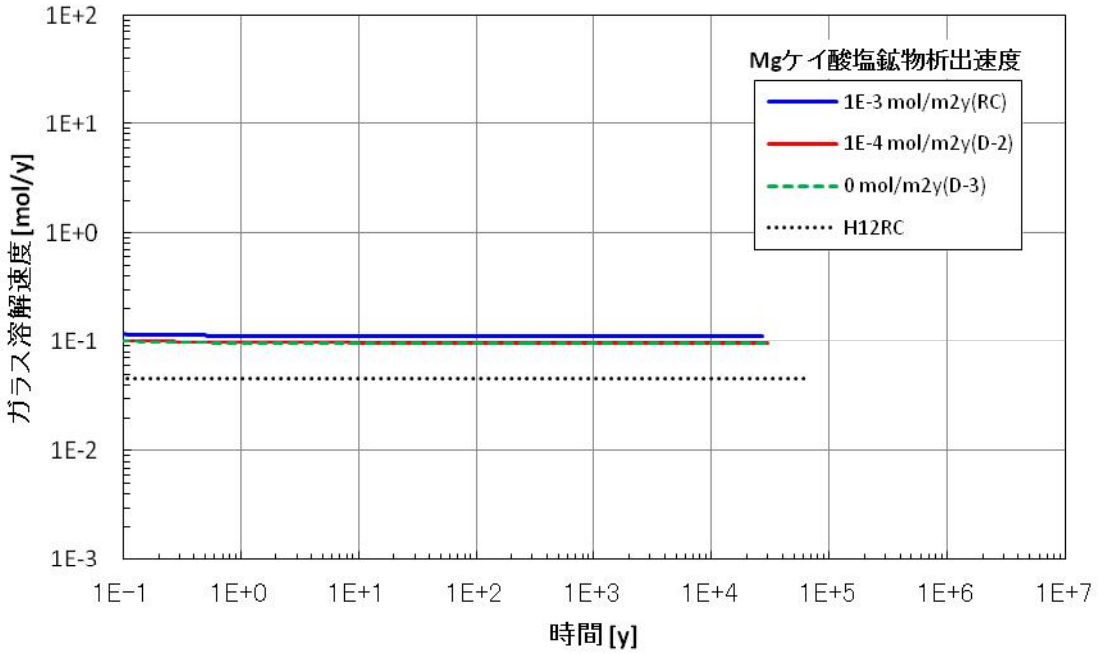


図 4.5.4-12　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（D：Mg ケイ酸塩鉱物析出速度をパラメータとした解析結果）

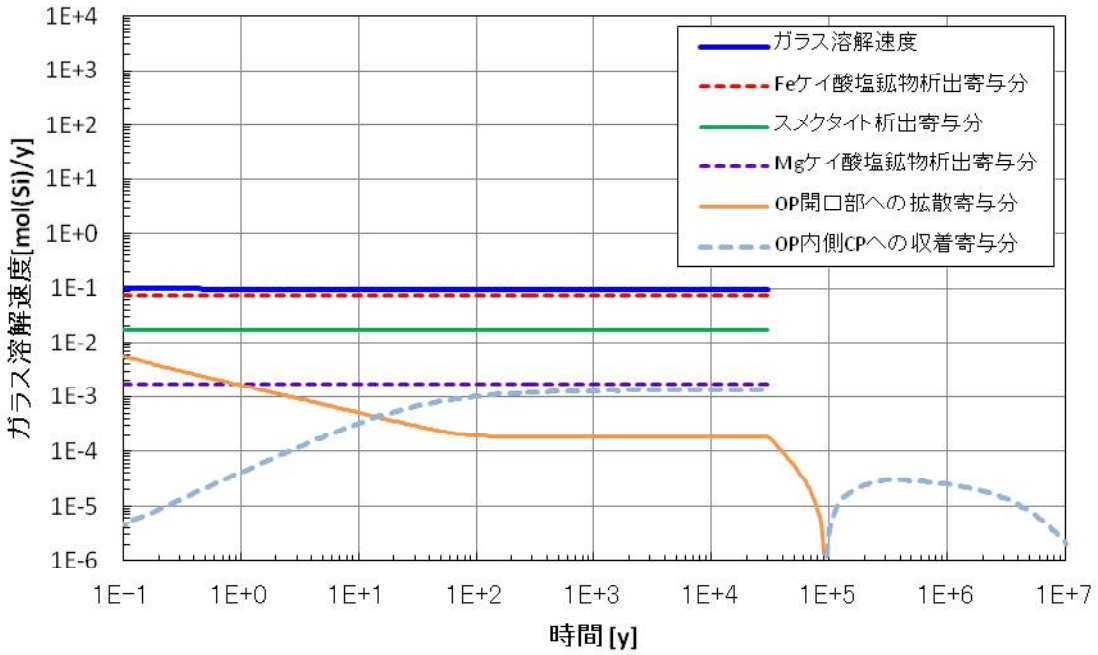


図 4.5.4-13　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（D-2：Mg ケイ酸塩鉱物析出速度を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）

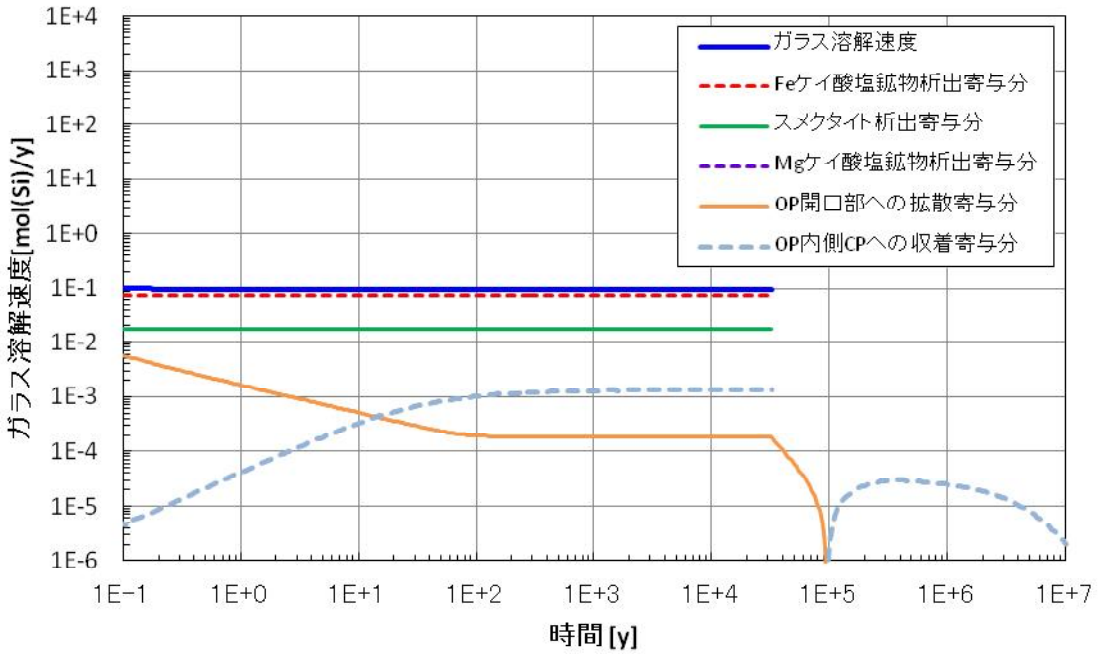


図 4.5.4-14　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（D-3：Mg ケイ酸塩鉱物析出速度を 0 とした場合の解析結果）

(c)　オーバーパックの腐食に関する不確実性

・オーバーパック腐食速度

図 4.5.4-15～図 4.5.4-17 にオーバーパック腐食速度の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-15 からオーバーパック腐食速度の増加に伴い溶解速度が増加することがわかる。また，腐食速度を 0.1μm/y としたケース（E-3）を除き，溶解速度は H12 のレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）よりも大きくなった。腐食速度を 10μm/y としたケース（E-2）については，レファレンスケース（RC）と同様に Fe ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった（図 4.5.4-16）。腐食速度がレファレンスケースの 10 倍であるため，Fe ケイ酸塩鉱物の析出速度も 10 倍となり，その分ガラス固化体の寿命が減少している。一方，腐食速度を 0.1μm/y としたケース（E-3）については，Fe ケイ酸塩鉱物の析出速度がスメクタイト等の析出速度を下回ったことにより，スメクタイトおよび Mg ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった（図 4.5.4-17）。

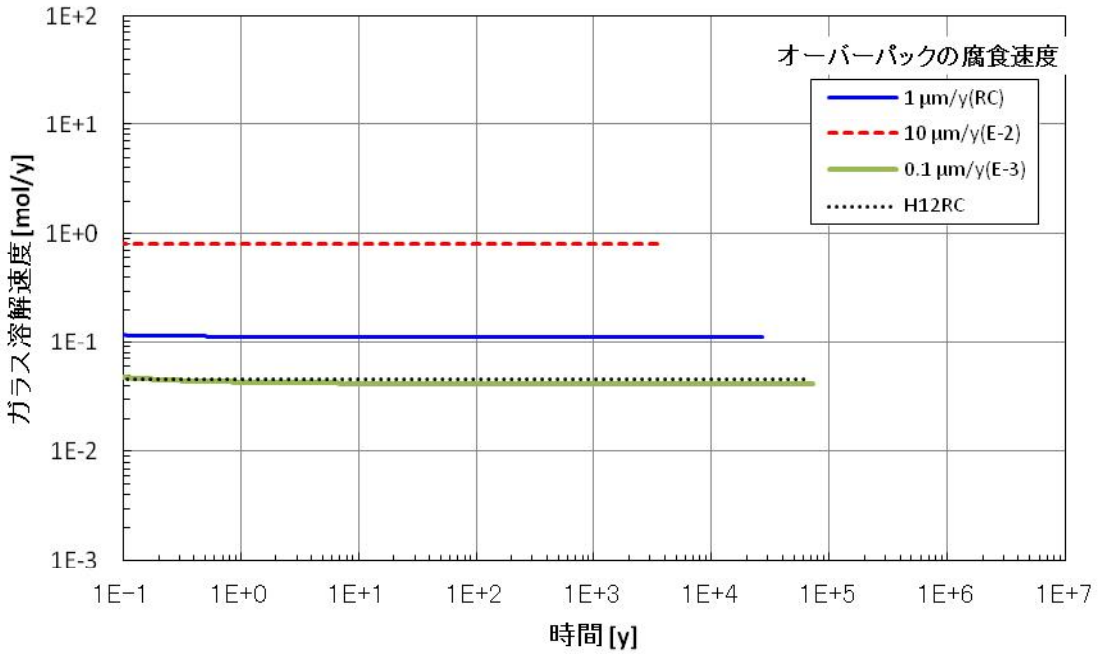


図 4.5.4-15　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（E：オーバーパック腐食速度をパラメータとした解析結果）

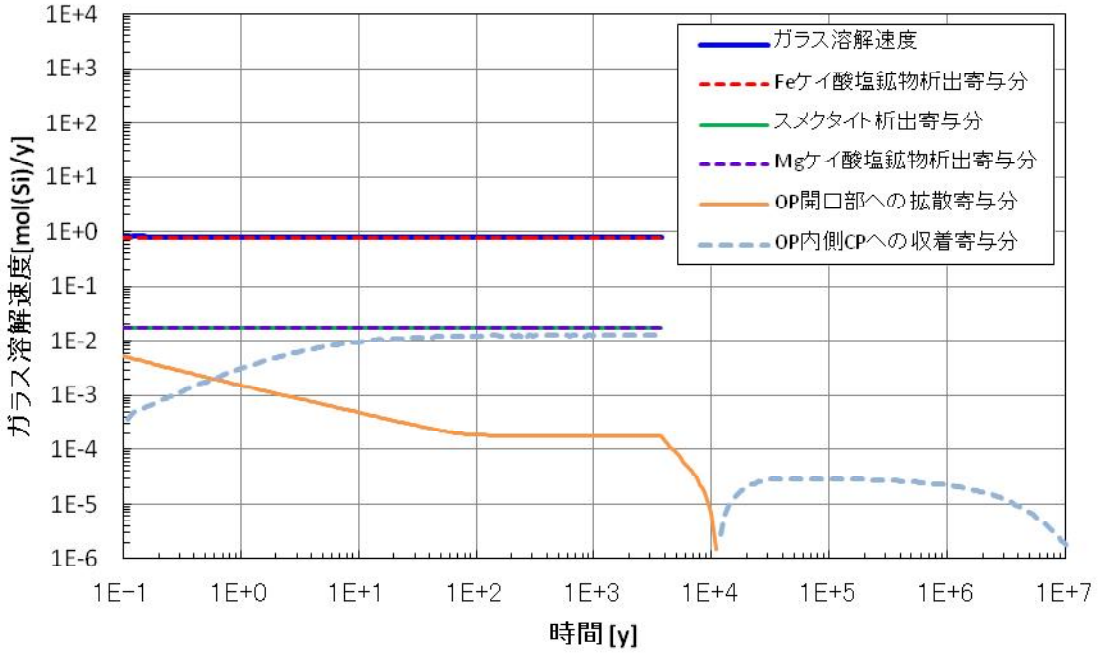


図 4.5.4-16　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（E-2：オーバーパック腐食速度を RC の 10 倍とした場合の解析結果）

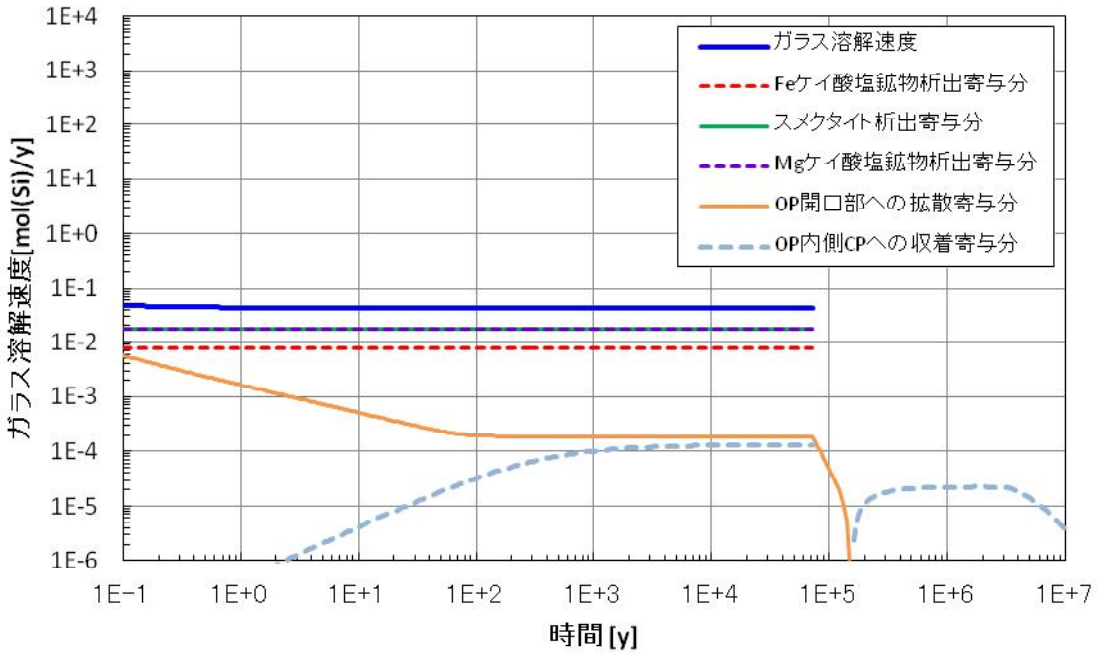


図 4.5.4-17　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（E-3：オーバーパック腐食速度を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）

・Fe ケイ酸塩鉱物として消費される Fe の割合

図 4.5.4-18～図 4.5.4-19 に Fe ケイ酸塩鉱物として消費される Fe の割合の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-18 から，Fe ケイ酸塩鉱物として消費される Fe の割合が 0 になると，溶解速度が減少することがわかる。また，消費される Fe の割合を 0 としたケース（F-1）では H12 のレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）を下回った。このケースでは，スメクタイトおよび Mg ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった（図 4.5.4-19）。

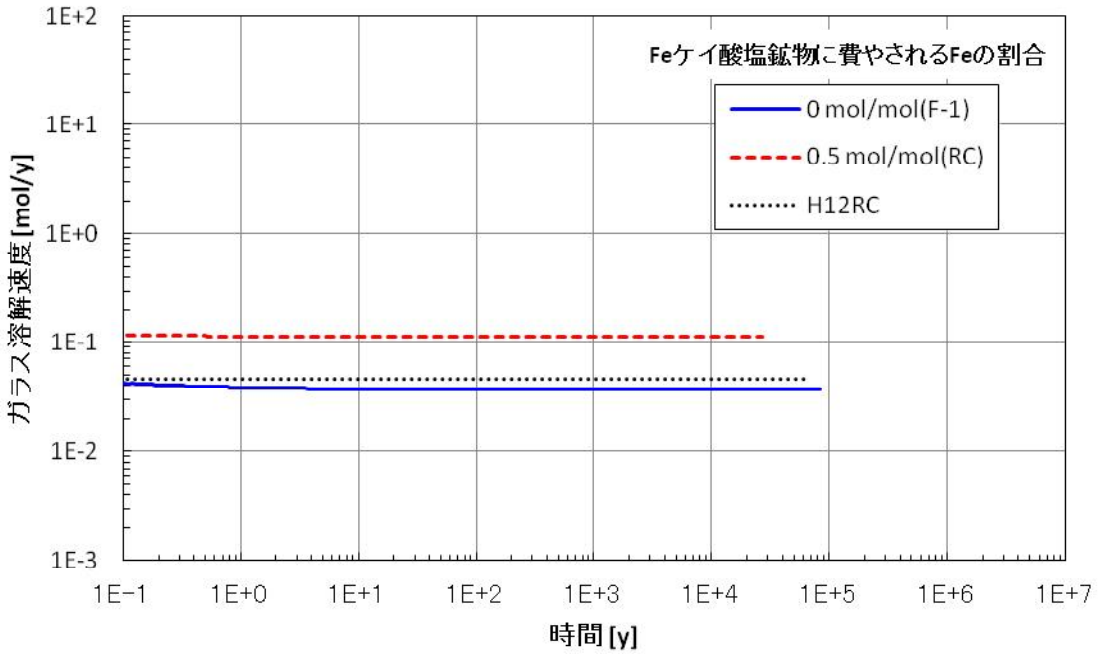


図 4.5.4-18　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（F：Fe ケイ酸塩に消費される Fe 割合をパラメータとした解析結果）

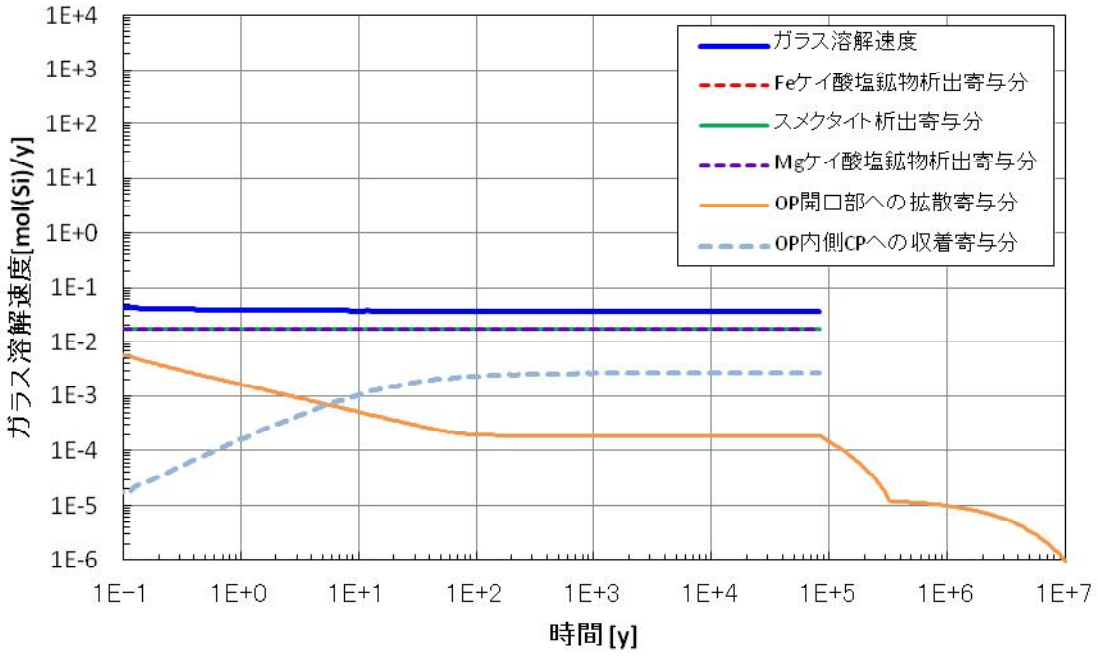


図 4.5.4-19　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（F-1：Fe ケイ酸塩に消費される Fe 割合を 0 とした場合の解析結果）

・Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比

図 4.5.4-20～図 4.5.4-21 に Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-20 から，Si/Fe 比が増加すると，溶解速度が増加することがわかる。また，いずれのケースでも H12 のレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）を上回った。Si/Fe 比を 1 としたケース（G-2）では，Fe ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった（図 4.5.4-21）。Fe ケイ酸塩鉱物析出に伴う Si 消費量が増えるため，ガラス固化体の溶解速度は増加し，ガラス固化体の寿命は減少している。

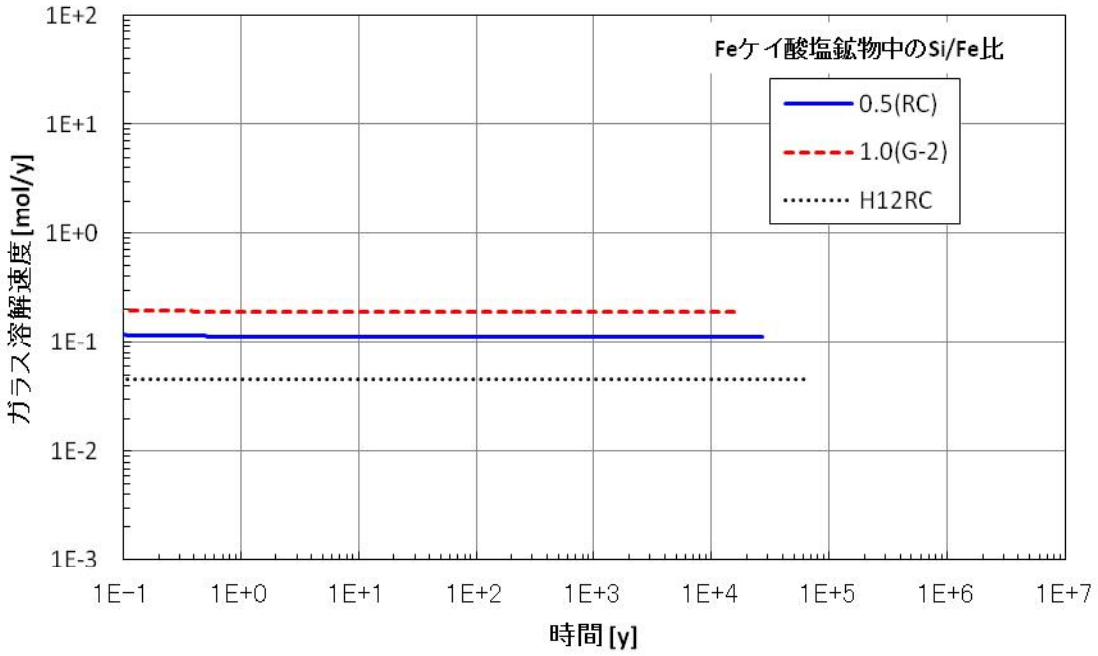


図 4.5.4-20　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（G：Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比をパラメータとした解析結果）

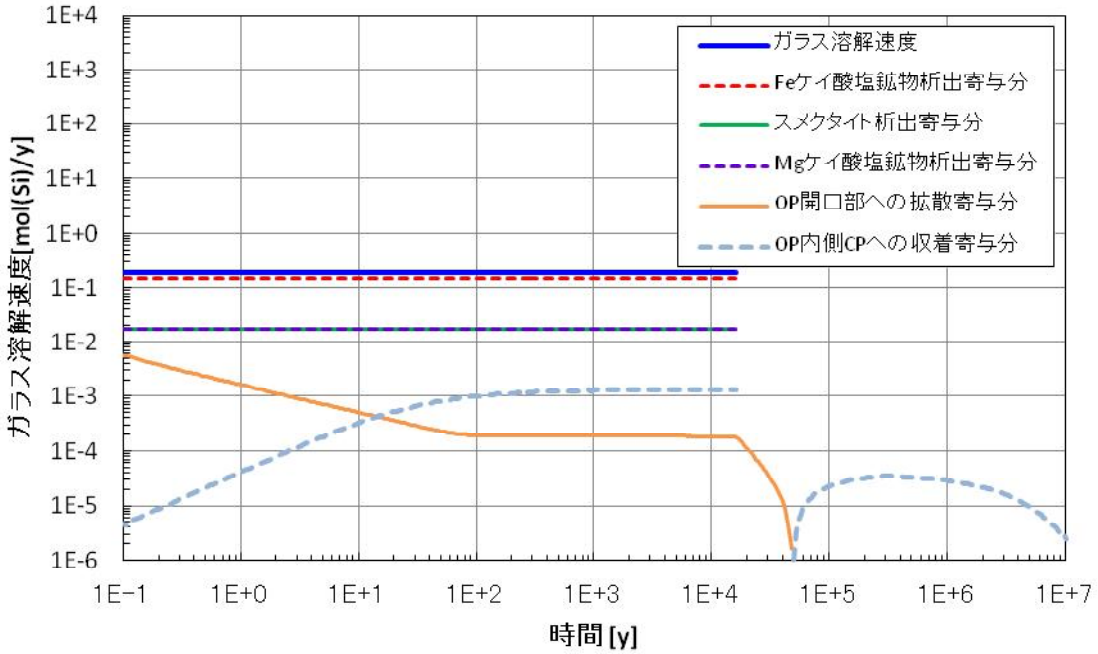


図 4.5.4-21　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（G-2：Fe ケイ酸塩鉱物中の Si/Fe 比を 1 とした場合の解析結果）

・腐食生成物への Si の分配係数

図 4.5.4-22～図 4.5.4-24 に腐食生成物への Si の分配係数の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-20 からは，今回の範囲での Si の分配係数の変動による溶解速度の変化はほとんど認められない。また，いずれのケースでも H12 のレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）を上回った。腐食生成物への Si の分配係数を変動させたケースでは，いずれも Fe ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった。

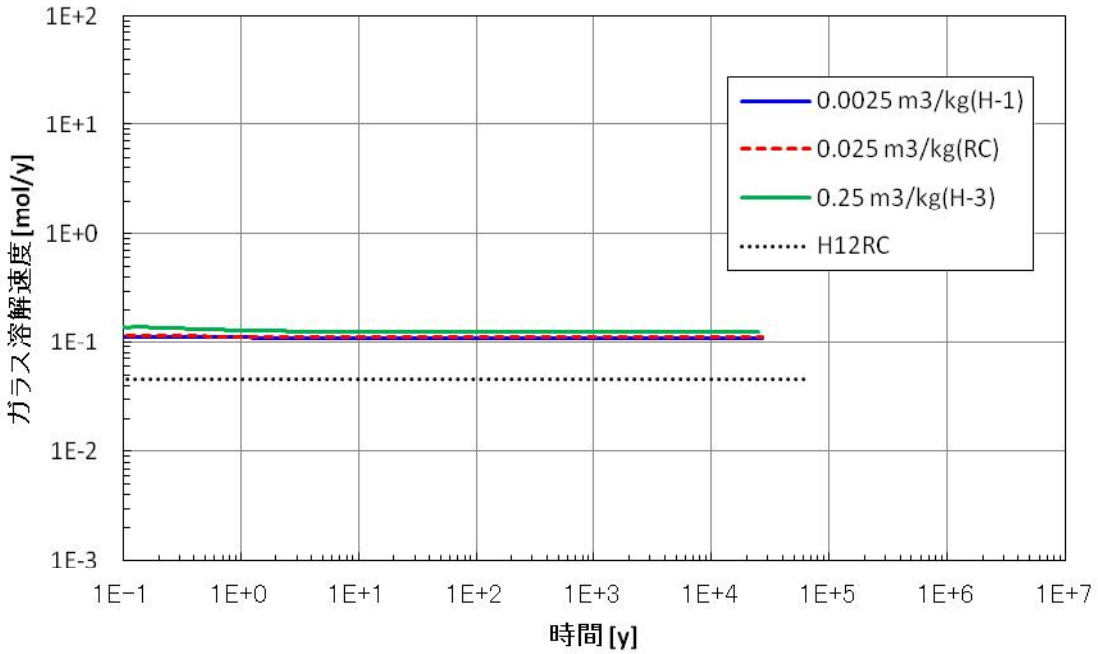


図 4.5.4-22　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（H：腐食生成物への Si の分配係数をパラメータとした解析結果）

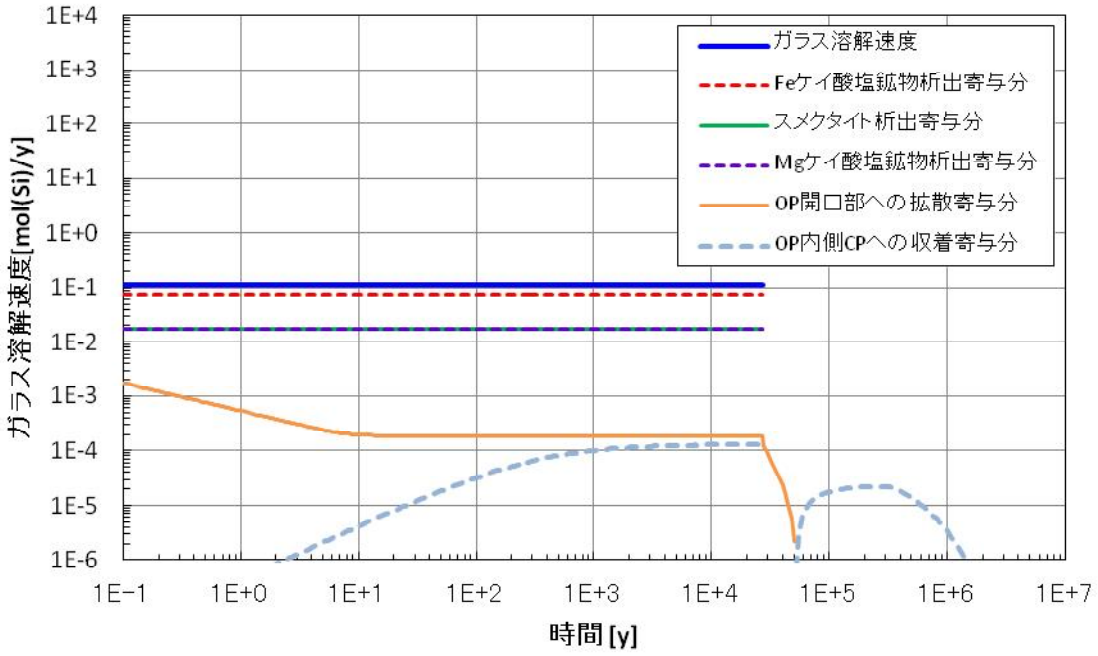


図 4.5.4-23　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（H-1：腐食生成物への Si の分配係数を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）

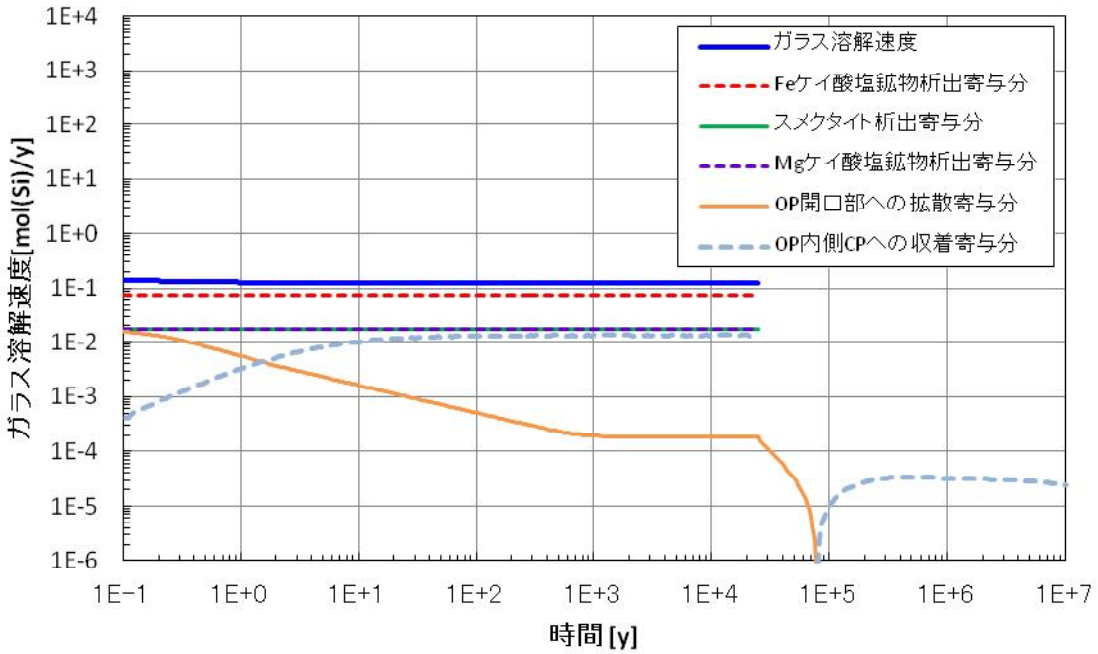


図 4.5.4-24　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（H-3：腐食生成物への Si の分配係数を RC の 10 倍とした場合の解析結果）

(d)　オーバーパック開口断面積の不確実性

図 4.5.4-25～図 4.5.4-28 にオーバーパック開口断面積の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-25 から開口断面積の増加に伴い溶解速度が増加することがわかる。また, いずれのケースの溶解速度も H12 のレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）よりも大きくなった。開口断面積を変動させたケースでは，いずれのケースでも開口部への拡散の寄与が認められ，増加に伴い寄与の期間が長くなる（図 4.5.4-26～図 4.5.4-28）。全面開口のケース（I-4）では，ガラス固化体の溶解が完了するまで持続している。

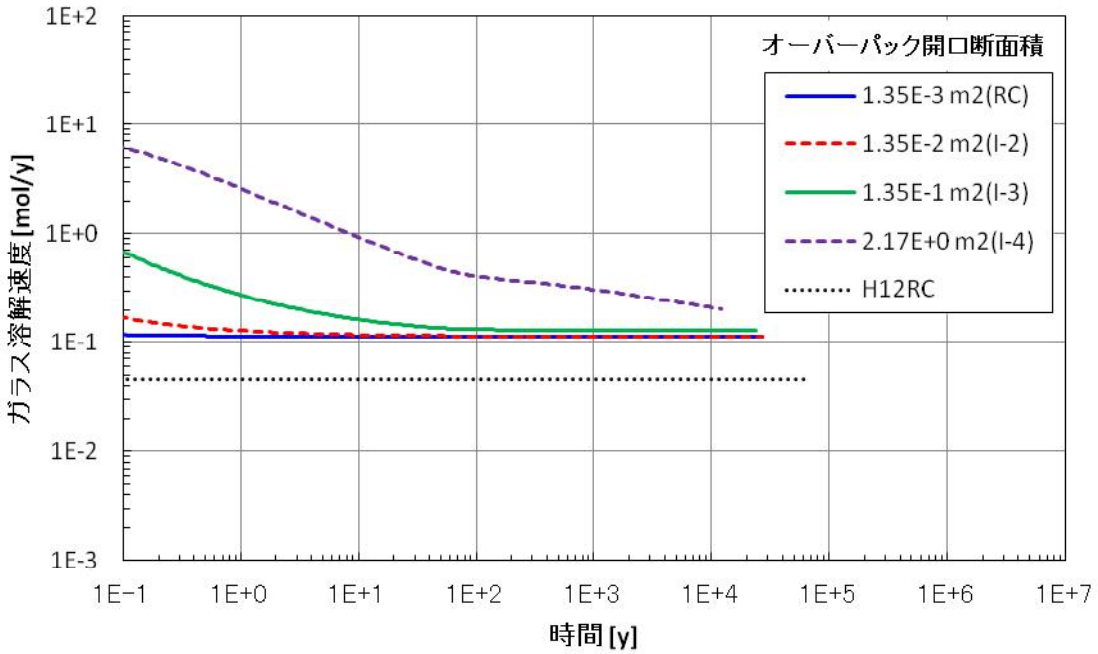


図 4.5.4-25　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（I：オーバーパック開口断面積をパラメータとした解析結果）

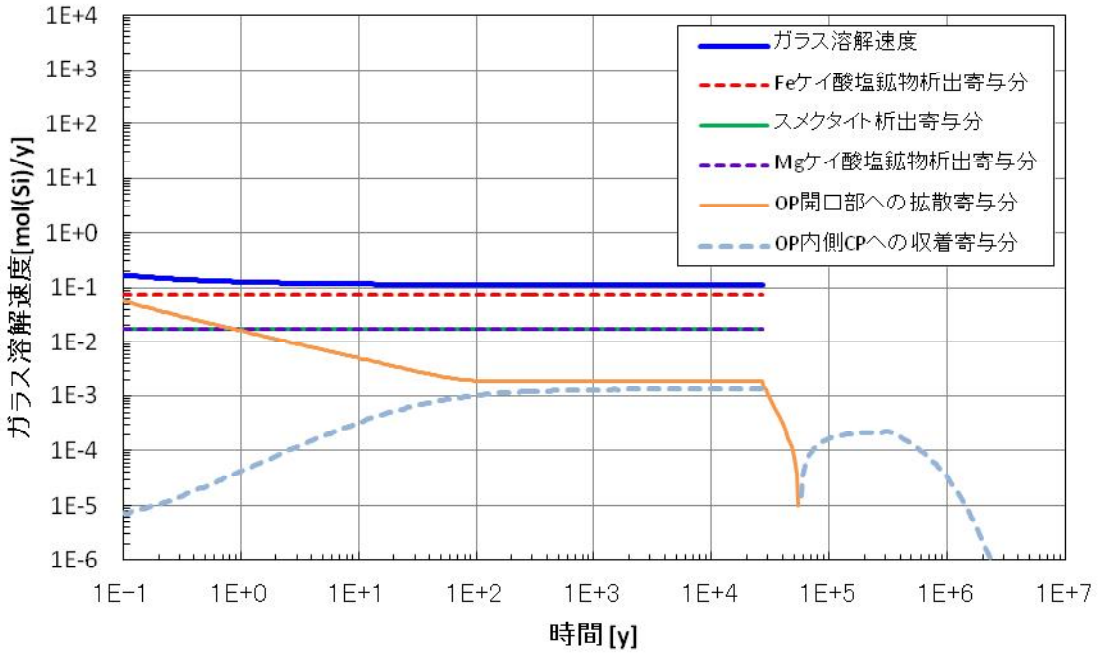


図 4.5.4-26　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（I-2：オーバーパック開口断面積を RC の 10 倍とした場合の解析結果）

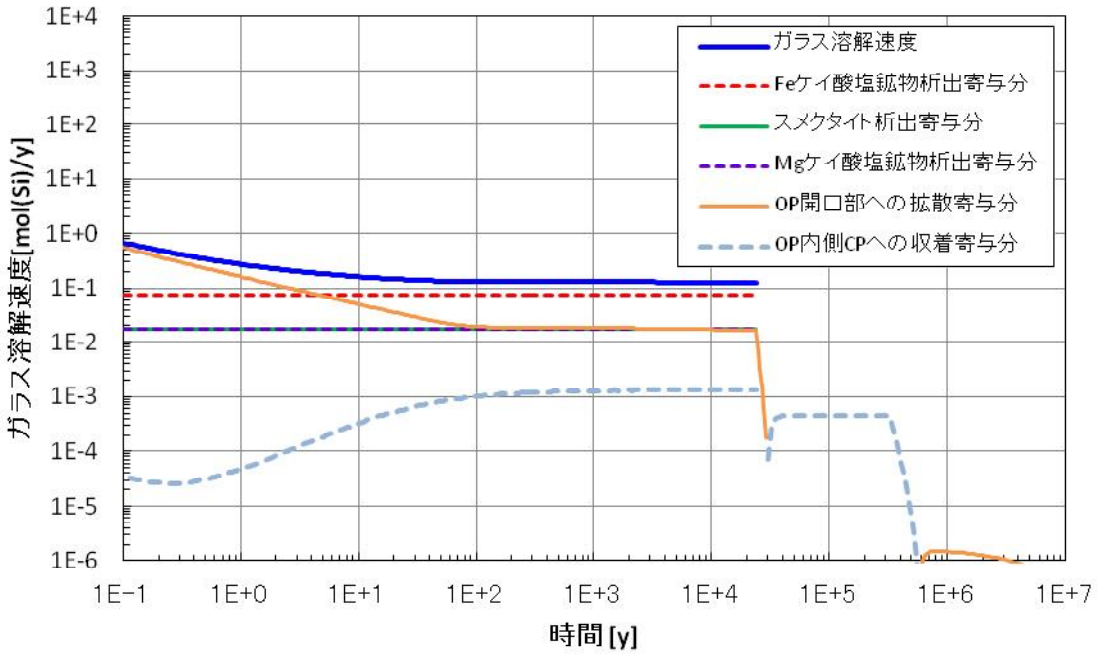


図 4.5.4-27　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（I-3：オーバーパック開口断面積を RC の 100 倍とした場合の解析結果）

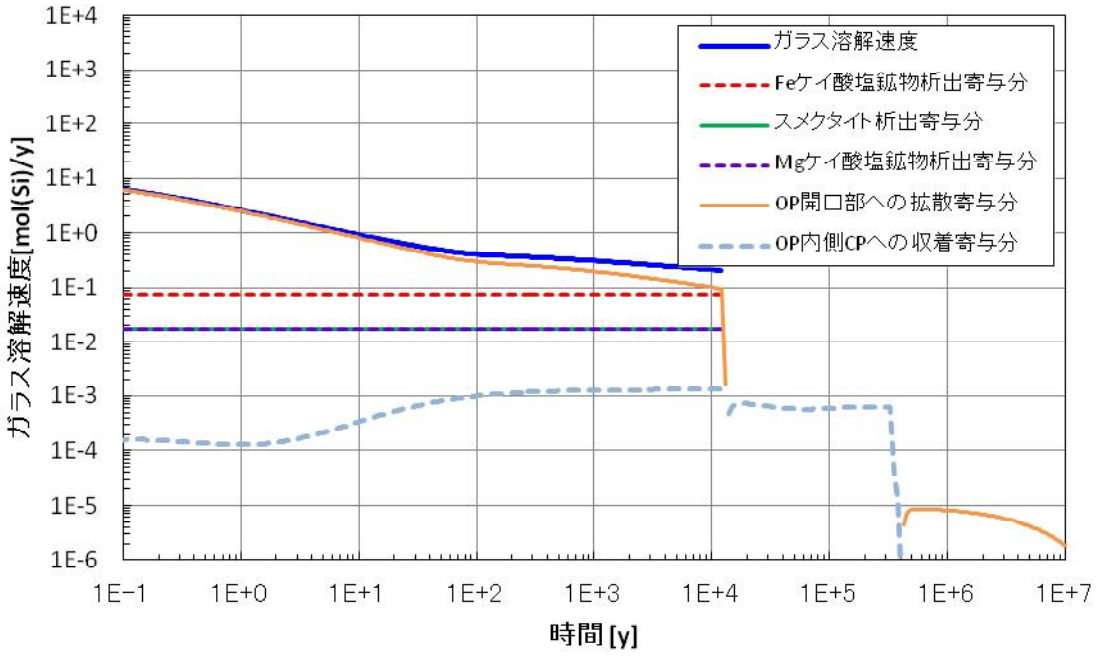


図 4.5.4-28　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（I-4：オーバーパックが全面開口した場合の解析結果）

(e)　緩衝材中の Si の実効拡散係数の不確実性

図 4.5.4-29～図 4.5.4-30 に緩衝材中の Si の実効拡散係数の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-29 からは，今回の範囲での Si の実効拡散係数の変動による溶解速度の変化はほとんど認められない。また，いずれのケースでも H12 のレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）を上回った。緩衝材中の Si の実効拡散係数を変動させたケース（J-2）は，レファレンスケース（RC）と同様に，Fe ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった。これはオーバーパックの開口断面積が小さく，ボトルネックとなっているためと考えられる。このことは，後述するオーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケースのうち，M-1 の結果で溶解速度が非常に小さくなっていることからも支持される。

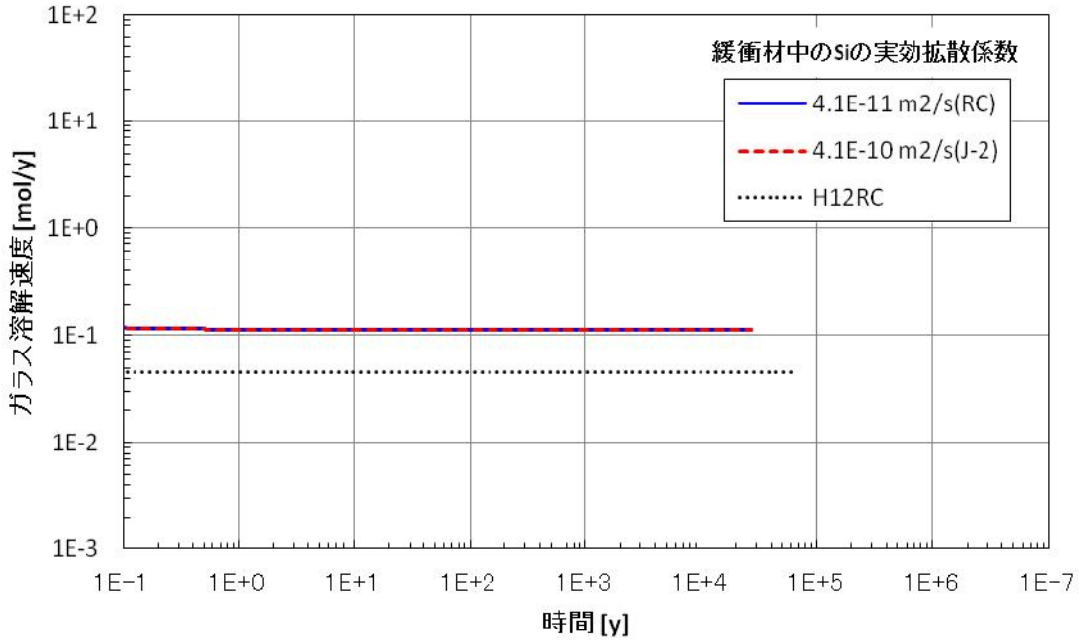


図 4.5.4-29　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（J：緩衝材中の Si の実効拡散係数をパラメータとした解析結果）

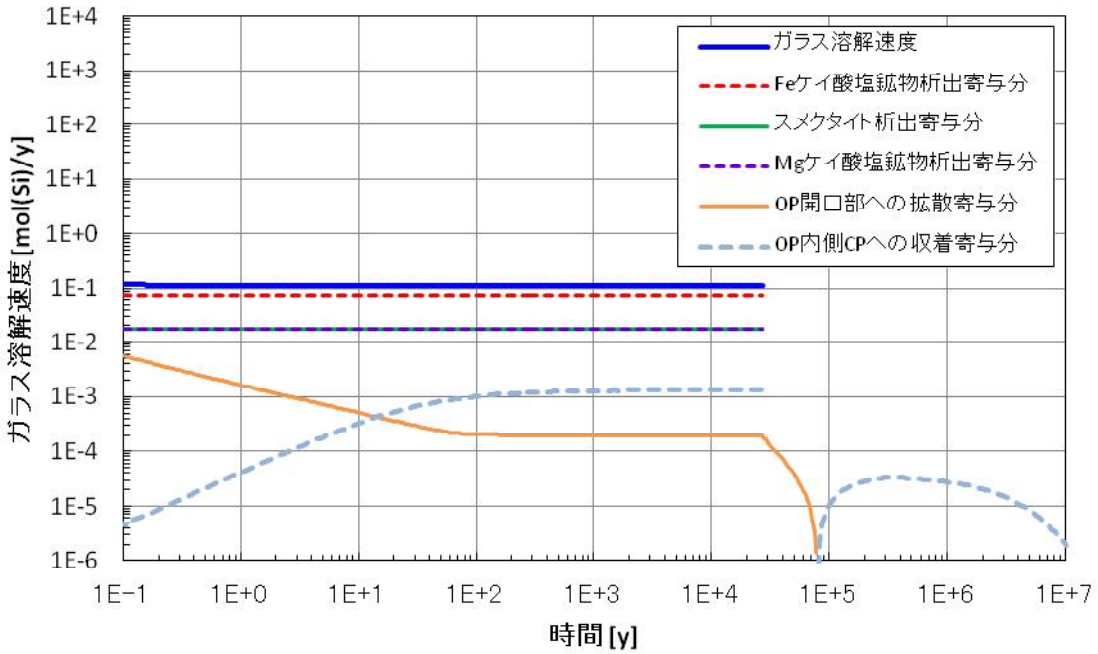


図 4.5.4-30　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（J-2：緩衝材中の Si の実効拡散係数を RC の 10 倍とした場合の解析結果）

(f)　掘削影響領域通過流量の不確実性

図 4.5.4-31～図 4.5.4-35 に掘削影響領域の地下水通過流量の影響に関する解析結果を示す。図 4.5.4-31 からは，今回の範囲での掘削影響領域の地下水通過流量の変動による溶解速度の変化はほとんど認められない。また，いずれのケースでも第２次取りまとめのレファレンスケースの溶解速度（4.7E-2 mol/y に相当）を上回った。掘削影響領域の地下水通過流量を変動させたケースは，いずれもレファレンスケース（RC）と同様に，Fe ケイ酸塩鉱物の析出が溶解速度に寄与する支配プロセスとなった。緩衝材中の Si の実効拡散係数を変動させたケースと同様，オーバーパックの開口断面積が小さくボトルネックとなっているためと考えられる。

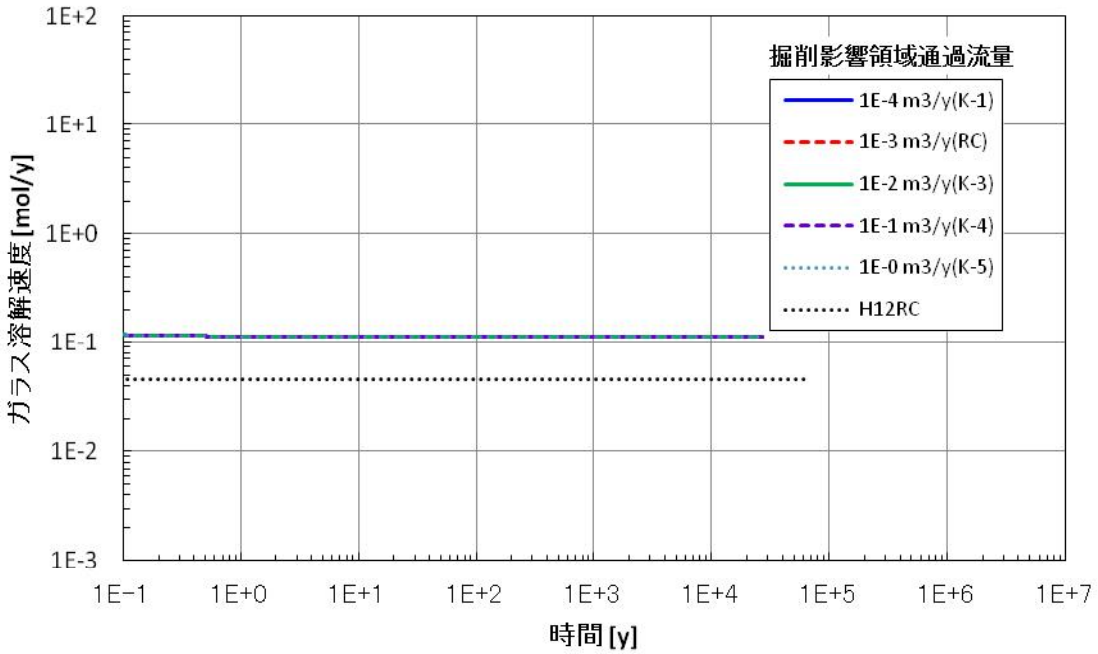


図 4.5.4-31　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（K：掘削影響領域通過流量をパラメータとした解析結果）

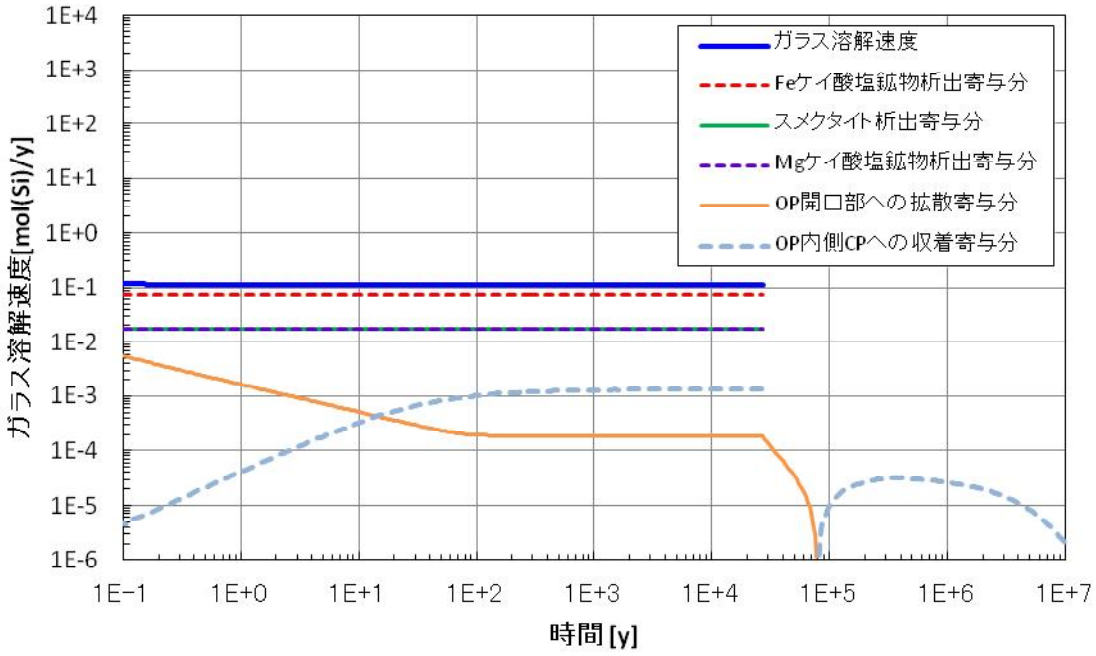


図 4.5.4-32　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（K-1：掘削影響領域通過流量を RC の 1/10 倍とした場合の解析結果）

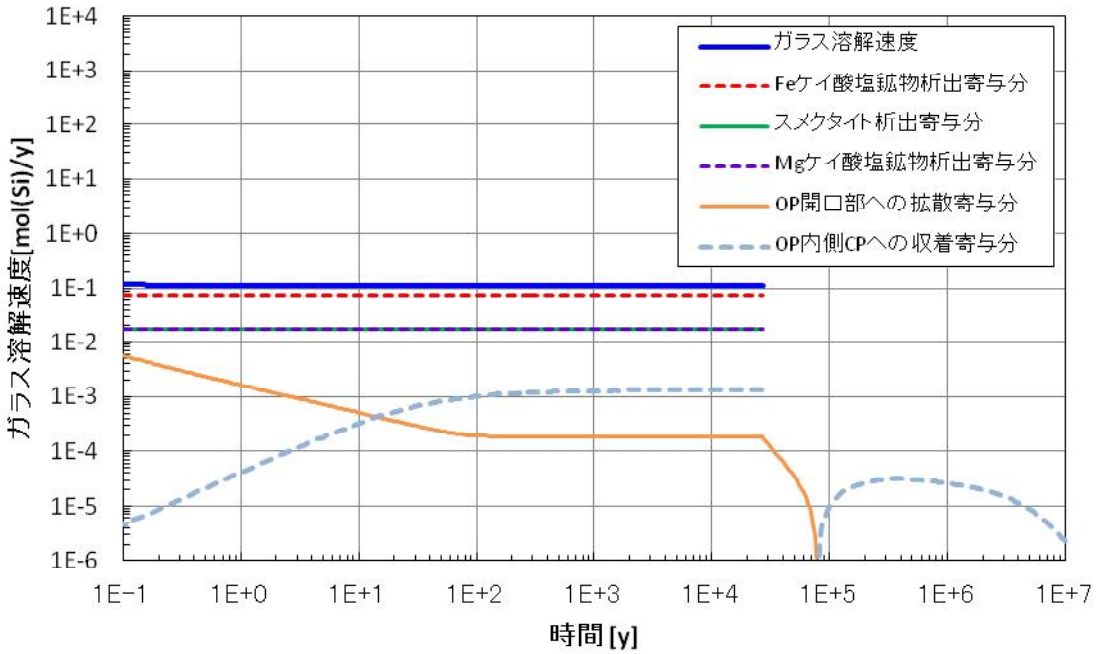


図 4.5.4-33　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（K-3：掘削影響領域通過流量を RC の 10 倍とした場合の解析結果）

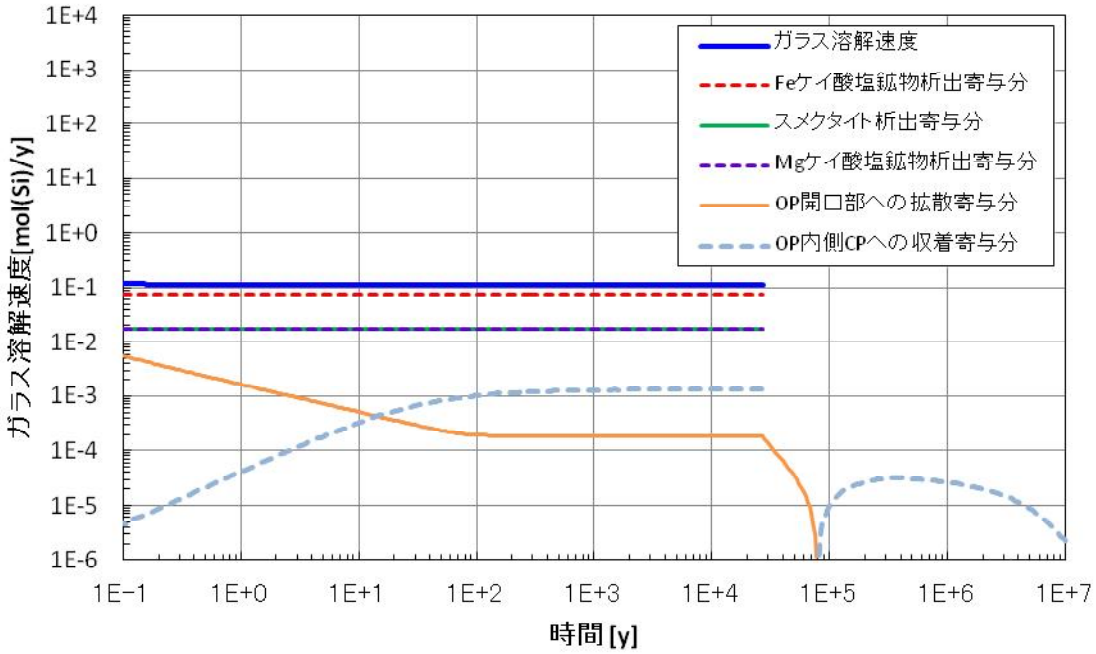


図 4.5.4-34　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（K-4：掘削影響領域通過流量を RC の 100 倍とした場合の解析結果）

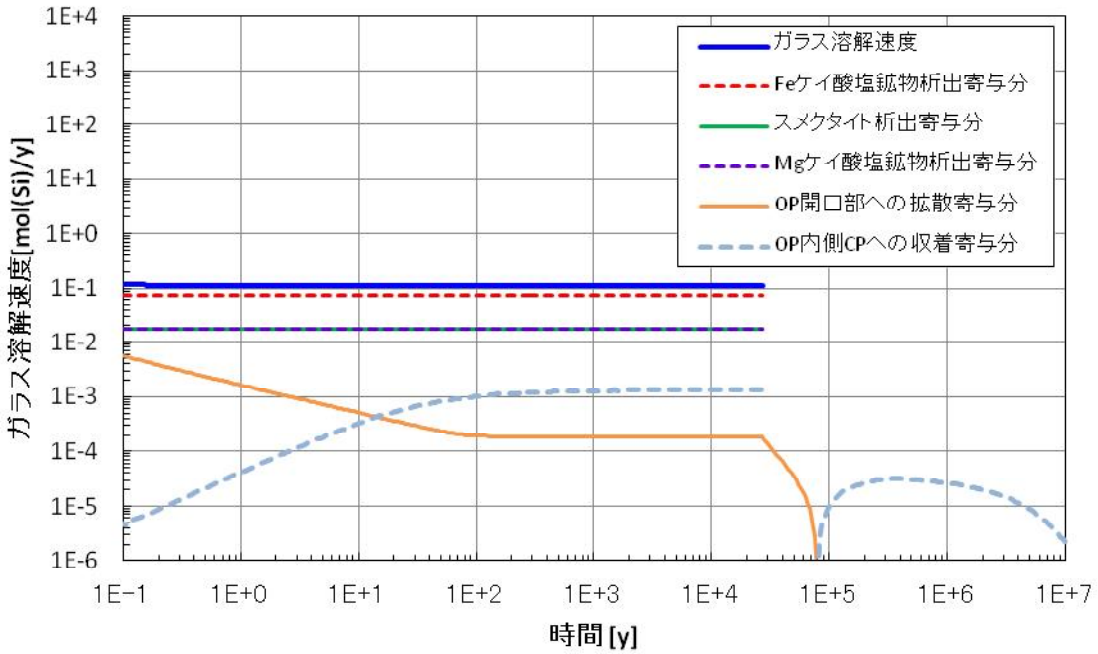


図 4.5.4-35　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（K-5：掘削影響領域通過流量を RC の 1,000 倍とした場合の解析結果）

(g)　オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケース

オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しないケースの解析結果のうち，オーバーパック開口部内の移行を無視するケース（L）を図 4.5.4-36～図 4.5.4-41，オーバーパック開口部内の移行を考慮するケース（M）を図 4.5.4-42～図 4.5.4-44 に示す。図 4.5.4-36 から開口部内の移行を無視するケース（L）では，緩衝材への Si の分配係数の増加に伴い溶解速度が増加することがわかる。図 4.5.4-42 から開口部内の移行を考慮するケース（M）では，開口断面積によって溶解速度が大きく異なることがわかる。オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケースは，必然的にいずれのケースについても開口部への拡散が支配プロセスとなる（図 4.5.4-37～図 4.5.4-41，図 4.5.4-43～図 4.5.4-44）。

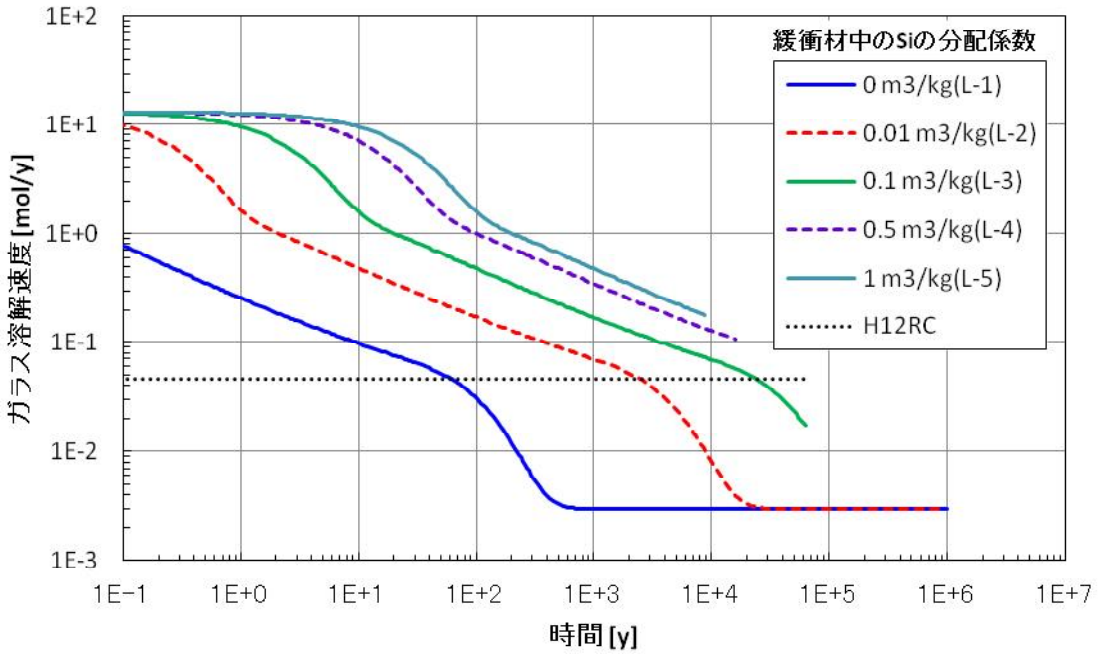


図 4.5.4-36　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（L：緩衝材中の Si の分配係数をパラメータとした解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行，腐食生成物および析出物の影響を無視

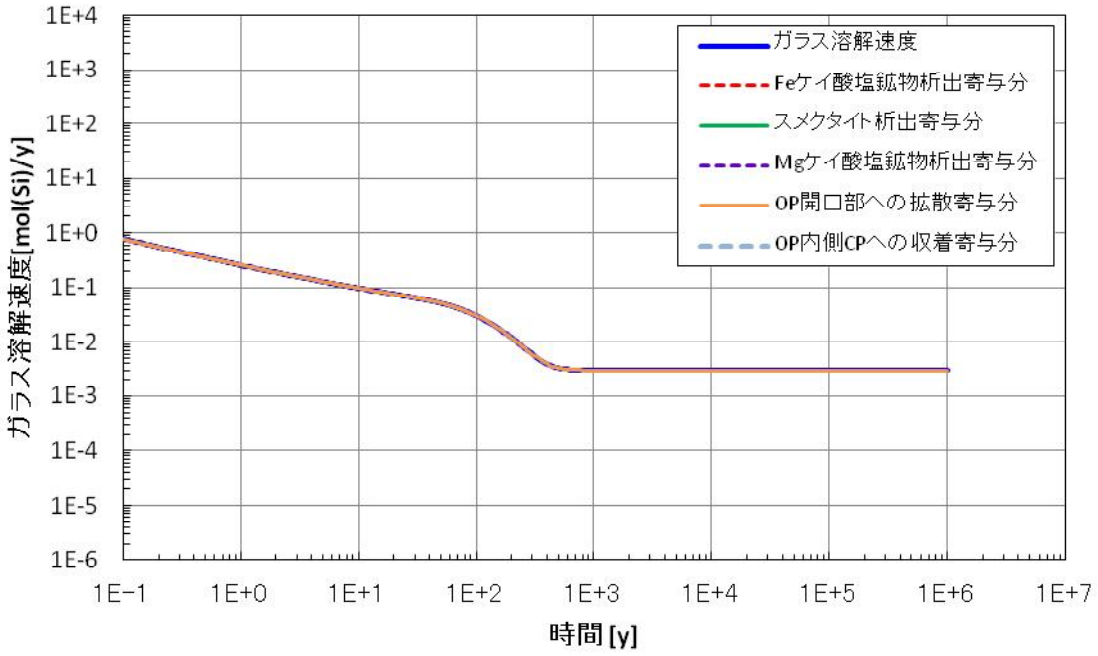


図 4.5.4-37　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（L-1：緩衝材中の Si の分配係数を $0m^3/kg$ とした場合の解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行，腐食生成物および析出物の影響を無視

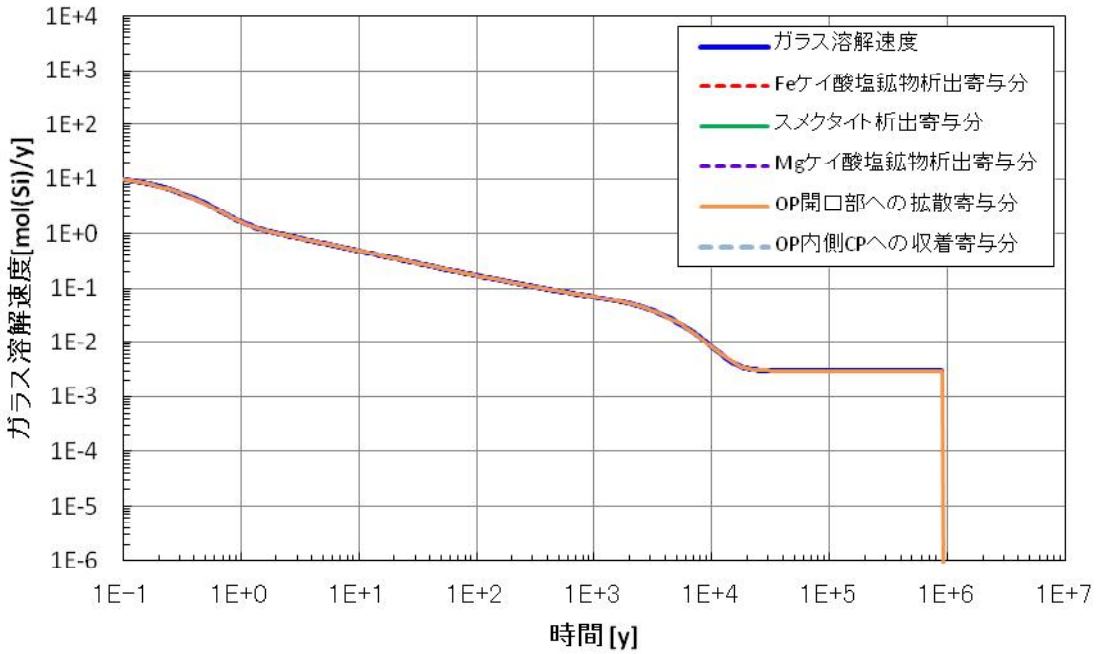


図 4.5.4-38　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（L-2：緩衝材中の Si の分配係数を 0.01m^3/kg とした場合の解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行，腐食生成物および析出物の影響を無視

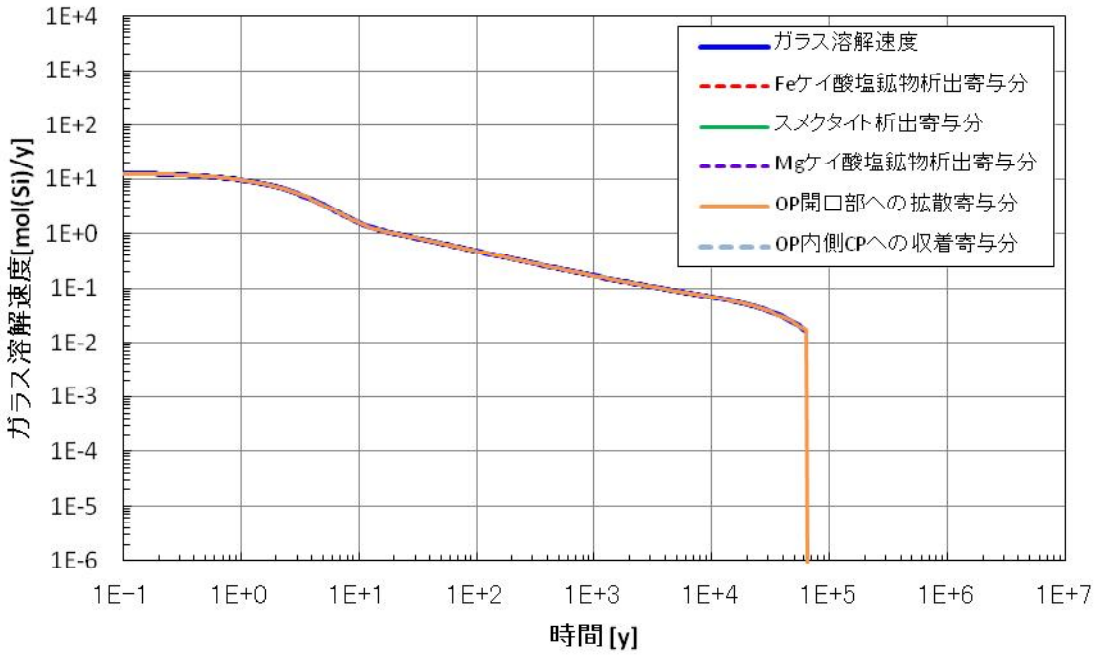


図 4.5.4-39　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（L-3：緩衝材中の Si の分配係数を 0.1m^3/kg とした場合の解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行，腐食生成物および析出物の影響を無視

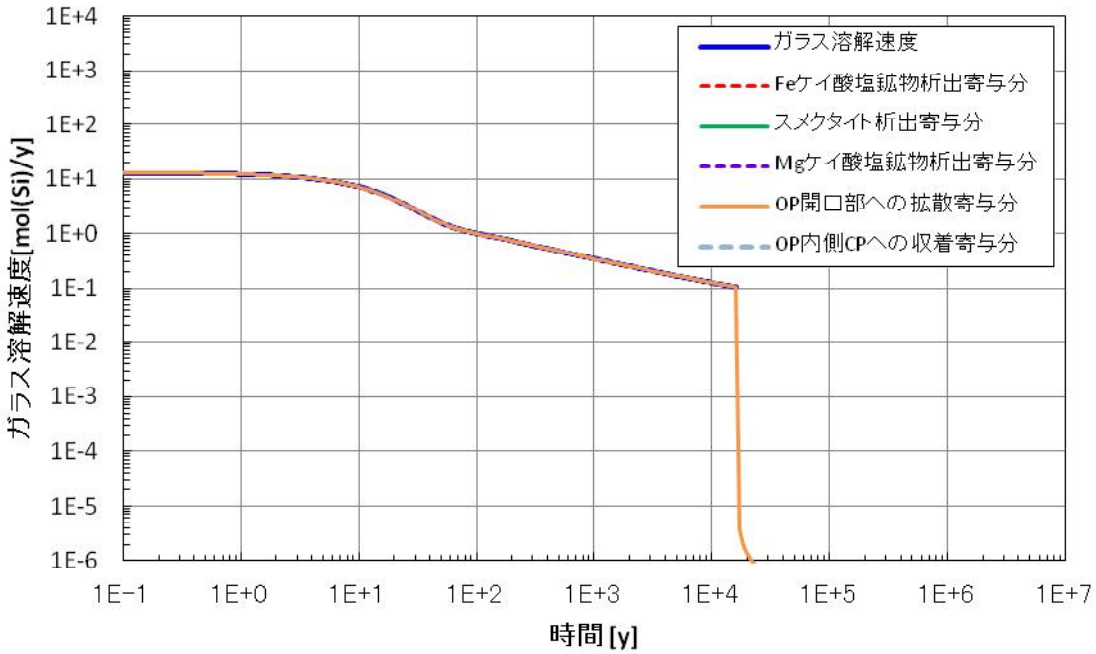


図 4.5.4-40　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（L-4：緩衝材中の Si の分配係数を 0.5m^3/kg とした場合の解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行，腐食生成物および析出物の影響を無視

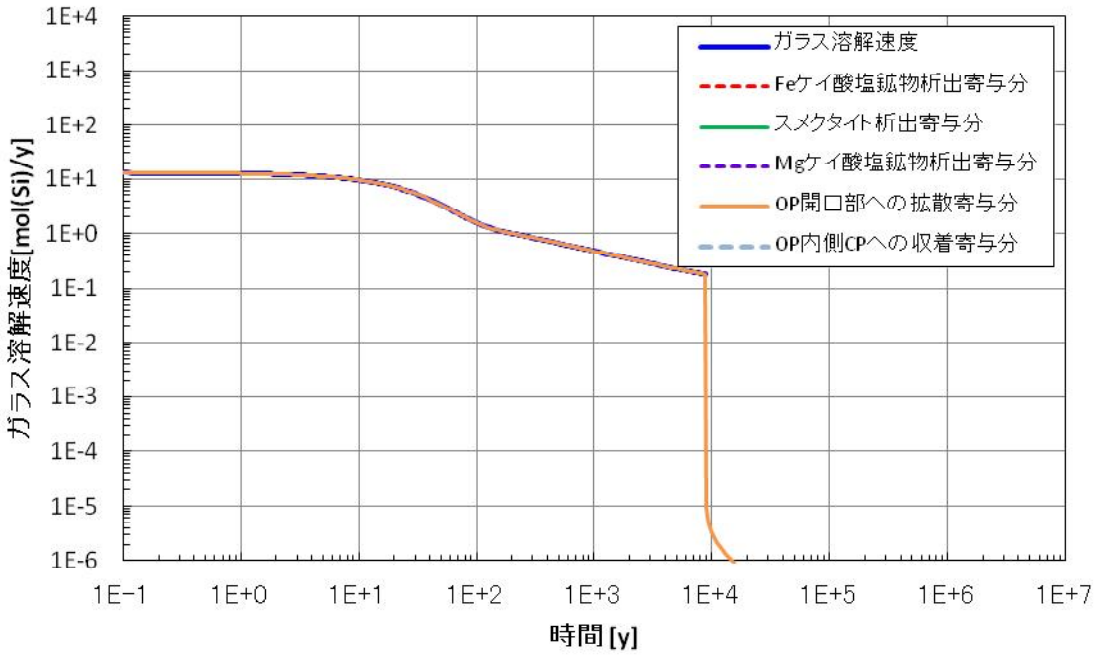


図 4.5.4-41　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（L-5：緩衝材中の Si の分配係数を 1m^3/kg とした場合の解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行，腐食生成物および析出物の影響を無視

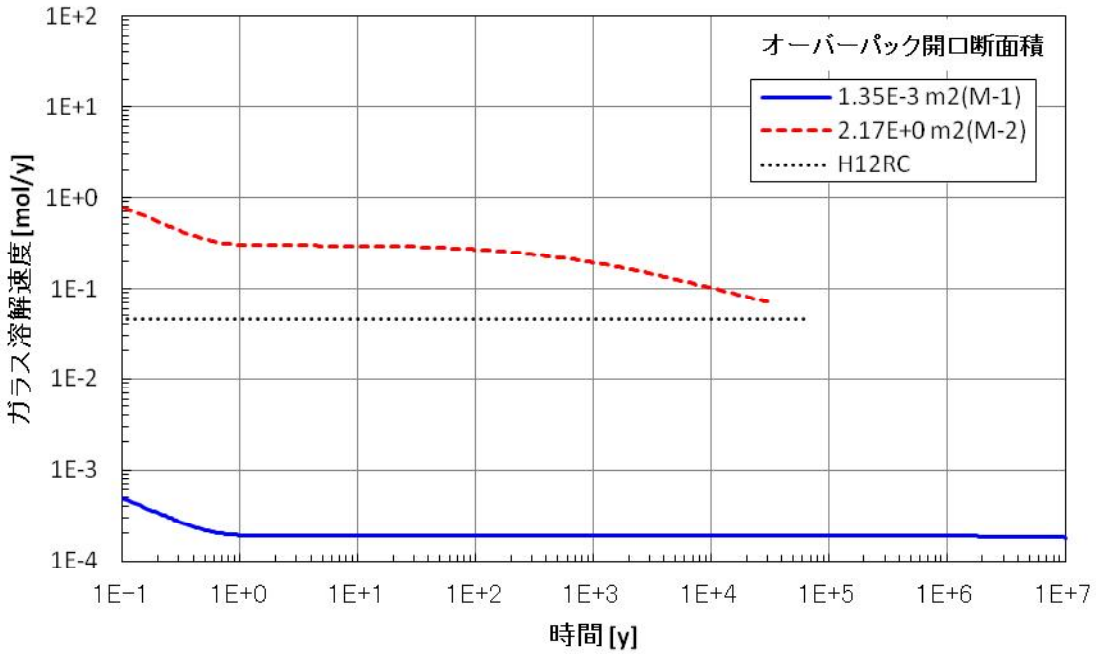


図 4.5.4-42　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（M：オーバーパック開口断面積をパラメータとした解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行を考慮，腐食生成物および析出物の影響を無視

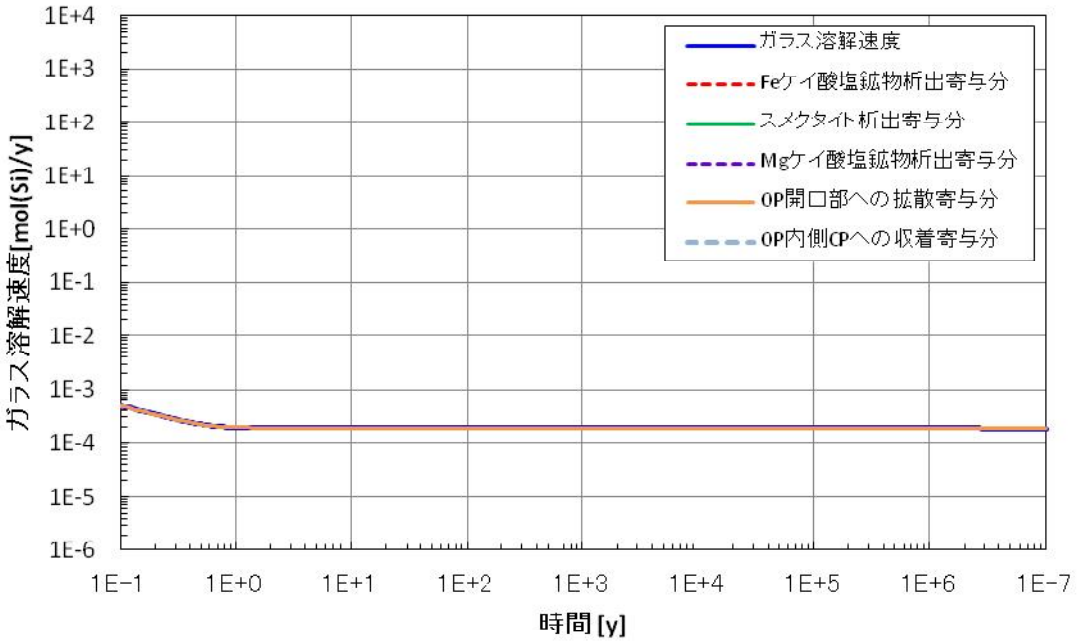


図 4.5.4-43　ガラス固化体溶解速度の経時変化

（M-1：オーバーパック開口断面積を 1.35E-3m^2 とした場合の解析結果）

※オーバーパック開口部内の移行を考慮，腐食生成物および析出物の影響を無視

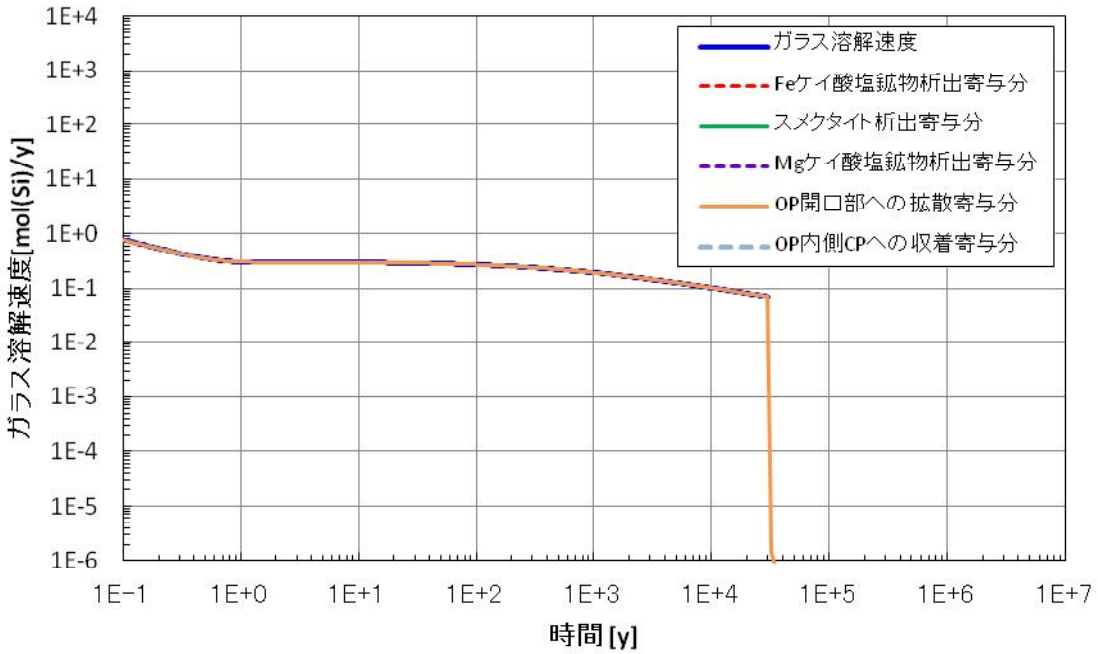


図 4.5.4-44　ガラス固化体溶解速度の経時変化
（M-2：オーバーパック開口断面積を 2.17m^2 とした場合の解析結果）
※オーバーパック開口部内の移行を考慮，腐食生成物および析出物の影響を無視

(iii)　ガラス固化体寿命の比較

図 4.5.4-45 には本検討におけるレファレンスケースを基準とした各解析結果におけるガラス固化体寿命を示した。ガラス固化体寿命が最も短いケースはガラス固化体の表面積を幾何学的表面積の 1,000 倍としたケース（B-4）であり，その次に寿命が短いケースはオーバーパックの腐食速度を 10μm/y としたケース（E-2）である。オーバーパック腐食生成物および析出物を考慮しない解析ケースのうち，緩衝材中の Si の分配係数が 0 m^3/kg のケース（L-1），0.01 m^3/kg のケース（L-2），およびレファレンスケースと同じ開口断面積を用いたケース（M-1）では，ガラス固化体寿命が大きくなった。

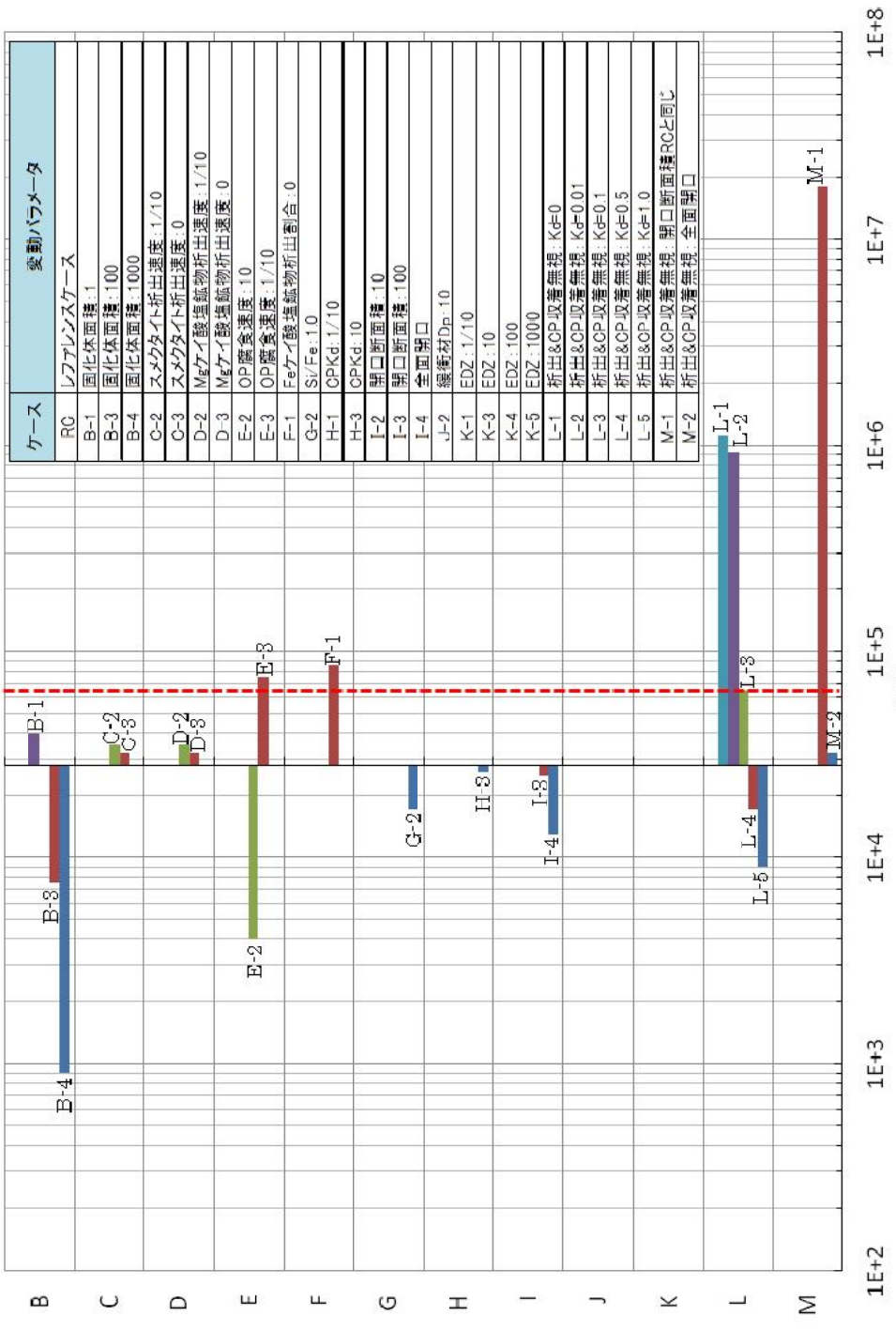


図 4.5.4-45　RC を基準とした各解析結果におけるガラス固化体寿命の比較
(H12 のガラス固化体寿命は赤破線で示した。ケース番号を付していないものは RC と同じ寿命である。)

(iv)　核種移行解析への影響

前述のように，ガラスの表面積の不確実性を考慮した場合には，ガラス固化体の幾何学的表面積の1,000 倍のケース（B-4）において，ガラス溶解時間が 900 年まで短くなった。ここでは，第 2 次取りまとめのレファレンスケースで使用された人工バリアモデルと同等の核種移行モデルを用いて，Cs-135 の人工バリアからの移行率にガラス溶解期間が及ぼす影響について確認する。Cs は想定する地下水では可溶性元素のため，溶解度制限による律速を受けず，ガラスの溶解速度に応じて溶出する元素である。また，Cs-135 は第 2 次取りまとめレファレンスケースにおいて最大被ばく線量に支配的に貢献する支配核種であるため，地層処分の安全性への影響を確認するには適切な核種であると考える。この核種移行モデルでは，オーバーパック開口部中での核種移行や腐食生成物への収着を保守的に無視している。第 2 次取りまとめレファレンスでの設定（ガラス固化体寿命約 65,000 年）と，本検討におけるレファレンスケース RC（28,000 年），ケース B-3（7,500 年），ケース B-4（900 年）の四つの条件で比較することとした。その結果を図 4.5.4-46 に示す。

各ケースとも移行率のピーク値は大きな違いがないが，ピーク値に到達するまでの時間に大きな影響が現れた。この違いが安全評価上有意なものであるかどうかについては，今後，天然バリアでの核種移行も含めて議論する必要があると考える。

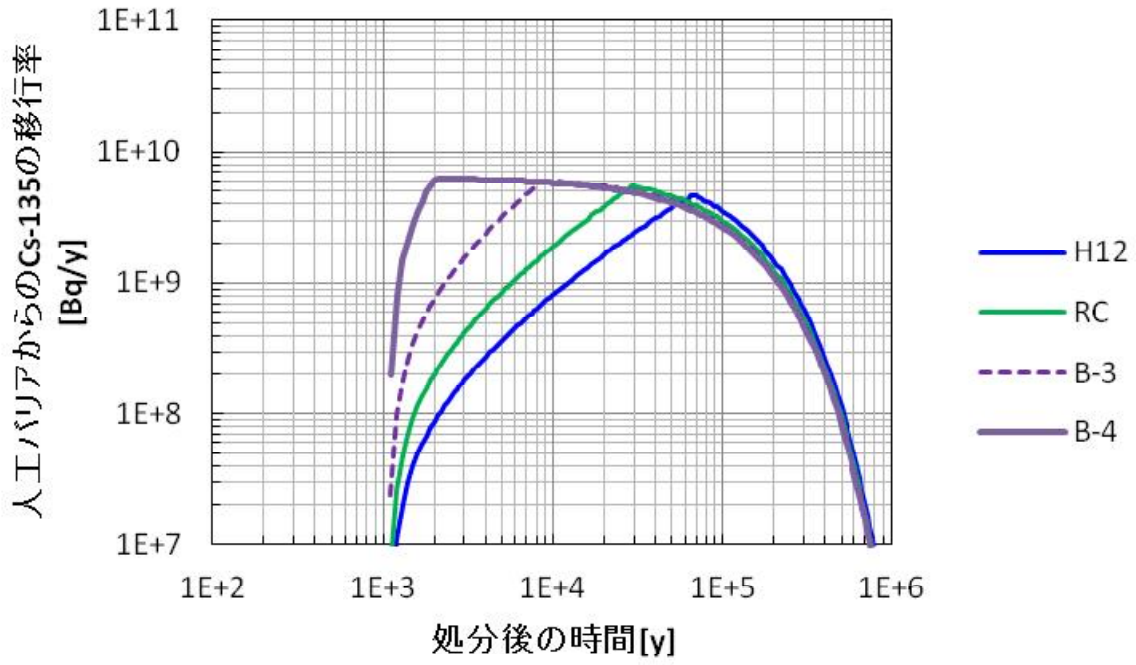


図 4.5.4-46　Cs-135 の人工バリアからの移行率の比較

(4)　まとめと考察

ガラス固化体の溶解速度に寄与する支配的なプロセスを特定するとともに，各不確実性要因の影響の程度を把握するために，それらの不確実性要因を表すパラメータについての感度解析を行った。その結果，パラメータの変動により，Fe ケイ酸塩鉱物の析出，スメクタイト等の析出，オーバーパック

開口部への拡散のいずれか，もしくはその組み合わせ（例えばケース I-2 および I-3）がガラス固化体の溶解速度に寄与する支配的なプロセスとなることが分かった。

ガラス固化体の表面積を変動させたケースでは，表面積を 100 倍，1,000 倍としたケースでスメクタイト等の析出の寄与により，ガラス固化体の溶解速度が増大した。一方，既往の知見として，割れの存在する実規模ガラス固化体の浸出試験（園部・石黒，1990）では，表面積と浸出量が必ずしも比例しないことが確認されている。また, 古代ガラスのナチュラルアナログ研究（Verney-Carron et al., 2008）においても，割れ内部のガラスの変質量が表層部のガラスの変質量と較べて小さいことが確認されている。以上の知見は，ガラス固化体外表面と内部の割れの表面が溶解に対して等価ではないことを示唆する。今後，これらの知見等を参考にガラス固化体の表面積の影響に関する解析手法の妥当性を確認し，設定の方針や解析モデル等の改善を図る必要があると考える。

スメクタイト等の析出速度を変動させたケースでは，析出速度の変動に伴うガラス固化体の溶解速度の変化は認められなかった。これは前述のとおりレファレンスケースよりも小さな析出速度を用いたため，ガラス溶解速度への寄与が減少したことによる。今回 Abdelouas et al. (1997)を参考にレファレンスケースの析出速度を設定したが，これは Mg ケイ酸塩鉱物を含む変質層厚から推定するなどの方法で求めたものであり，今後設定値の妥当性を改めて確認する必要がある。

オーバーパックの腐食速度を変動させたケースでは, 腐食速度を 10μm/y としたケースでは腐食速度がレファレンスケースの腐食速度（1μm/y）の 10 倍であるため，Fe ケイ酸塩鉱物の析出速度も 10 倍となり，その分ガラス固化体の溶解速度が増加した。Fe ケイ酸塩鉱物の析出が支配プロセスとなる場合，ガラス固化体の溶解速度はオーバーパックの腐食速度に比例して増加することとなる。今回，谷口ほか（2010）が示した圧縮ベントナイト中のオーバーパック腐食速度を参考にレファレンスケースの腐食速度を設定したが，オーバーパック内側の腐食速度は外側の腐食速度と異なる可能性があり，どのような条件の腐食速度を採用するか，今後検討が必要である。

開口断面積を変動させたケースでは，開口断面積の増加に伴い，オーバーパック開口部への拡散の寄与が増大することが確認された。開口断面積は, オーバーパックの破損状態に依存するものであり，その設定には大きな不確実性を伴う。今回，全面開口のケースについて解析を行っているが，評価の保守性維持という観点では，このような設定が必要となる可能性がある。

緩衝材中の Si の実効拡散係数，掘削影響領域通過流量を変動させたケースでは，いずれもガラス固化体の溶解速度への寄与は小さく，溶解速度の変化はほとんど認められない。これはオーバーパックの開口断面積が小さくボトルネックとなっているためと考えられる。オーバーパックの開口断面積を増加させた条件ではこれらの不確実性要因の変動がガラス固化体の溶解速度に寄与する可能性はある。

また，今回の解析ではガラス変質層の保護的効果については考慮していない。最近実施されたガラスと鉄共存系の考古学アナログ研究（Michelin et al., 2012）の結果，鉄共存下では変質層の保護的効果が抑制され，Fe ケイ酸塩鉱物析出の影響が長期間持続する可能性が示唆されている。これら最新の知見を踏まえつつ，解析における変質層の保護的効果の取り扱いを今後検討する必要がある。

このほか，今回の解析で採用した設定値には，上述の Mg ケイ酸塩鉱物の析出速度など，現時点で参照できるデータが限られており，その妥当性を改めて確認する必要がある。

4.6 まとめと今後の課題

4.6.1 まとめ

本検討では，2011 年度に検討した状態設定の基本的流れを踏まえつつ，状態設定の各段階での作業内容，作業の成果として作成すべきもの，具体的な情報の流れなどを改めて確認しながら，緩衝材を対象とした状態設定を試行した。試行を通じて，状態設定の基本手順の見直しと，状態設定の各段階での作業内容や具体的な情報の流れ（作業・情報フロー）の提案を行った。

状態設定の試行においては，NUMO が提案しているストーリボードの活用を念頭に置くとともに，安全機能を軸としたシナリオ構築手法（トップダウンアプローチ）とシステムの FEP の整理に基づくシナリオ構築手法（ボトムアップアプローチ）を融合させ，重大な抜け落ちがないような検討を進めるための具体的な手法について検討した。

具体的には，緩衝材に期待される“安全機能”を出発点として，“安全機能を支えるバリア性能”，“バリア性能を支配する特性”，“特性を変化させる影響要因”の抽出を行うとともに，影響要因の抽出の妥当性について，マトリックス形式に整理した FEP の相関関係を利用することで確認を行った。さらに，既往の現象理解に関する情報に基づいて，抽出された“影響要因”についての発生可能性や発生時期を整理し，いくつかの分岐を FEP チャートとして示した。また，発生可能性の判断における論拠，環境条件依存性や課題を明らかにするために，“影響要因”の発生可能性について，主張とそれを支える論証と反証を階層的に整理する討論モデルの形式での情報整理を試みた。

これらの検討に基づいて，対象とする処分システムの状態変遷を安全評価の時間軸に即して整理することとし，人工バリアスケールを対象として

・システムの状態設定の図（状態設定の図）
・基本状態設定における THMCR に係るプロセスと状態（基本状態設定 THMCR）
・安全機能を支えるバリア性能と影響要因（バリア性能と影響要因）

を記載したストーリボードを作成した。

これらの一連の作業については，品質管理の観点から，電子化によって体系的に管理する方法について検討した。

また，シナリオ構築の背景となる知見の整理として，鉄ーベントナイト相互作用および緩衝材流失現象について文献調査による情報整理を行うとともに，2011 年度に調査を行った“ガラスの溶解挙動”および“セメント系材料によりもたらされる高アルカリ環境が緩衝材に及ぼす影響”の二つの現象について，モデルやパラメータの不確実性を考慮した解析を実施し，不確実性がそれぞれのバリアに期待している性能への影響の程度について検討を行った。

4.6.2 今後の課題

本検討で試行した状態設定は，作業の前提として，緩衝材という一つのシステム構成要素にのみ着目したため，地質環境条件の長期的な変遷や，バリア相互の影響については取り扱っていない。一方，対象を緩衝材に限定した場合であっても，実際に状態設定の検討を行うためには，多くの現象についての科学的理解に加え，安全機能との関係や，その影響の程度など多くの背景情報が必要となることから，それら情報を体系的に整理しておくことも重要である。したがって，個別現象についての体系的な情報整理を継続するとともに，限定的であった今回の検討の内容や対象を，着実に拡大していくことが望ましい。これらを進めるにあたって，本検討で提案した手法の妥当性について，外部の専門

家等にも意見を伺いながら適宜見直しを行うとともに，本検討で利用した個別現象の理解についても，関連する専門家の知見を反映し更新を行うなど，情報の整備を進めて行くことが望まれる。また，個別現象に関する情報整備に関連して，本検討で実施した，不確実性要因の影響の程度を把握するための解析的な検討については，結果に与える不確実性の影響について現象論的な観点からの考察を深めるとともに，評価上の取り扱いについても，さらに検討を継続していく必要がある。

参考文献（4 章）

Abdelouas, A., Crovisier, J.L., Lutze,W., Grambow, B., Dran, J.C. and Müller, R. (1997): Surface layers on a borosilicate nuclear waste glass corroded in MgCl2 solution. Journal of Nuclear Materials 240, pp.100–111.

Advocat, T., Crovisier, J.L., Fritz, B. and Vernaz, E. (1990) : Thermokinetic Model of Borosilicate Glass Dissolution : Contextual Affinity, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XIII, pp.241-248, Oversby, V.M. and Brown, P.W. (ed.), Material Research Society.

Andra (2005a): Dossier 2005 Argile, Tome Phenomenological evolution of the geological repository

Andra (2005b): Dossier 2005 Argile, Tome Safety evaluation of a geological repository.

ANDRA (2005c): Dossier 2005 Argile Tome Architecture and management of a geological repository.

Apted, M. J., Arthur, R., Bennett, D., Savage, D., Sällfors, G. and Wennerström, H. (2010) : Buffer erosion : An overview of concepts and potential safety consequences, Swedish Radiation Safty Authority, Report number 2010:31

Arthur, R.，笹本 広，小田 治恵，本田 明，柴田 雅博，吉田 泰，油井 三和（2005）： Development of Thermodynamic Database for Hyperalkaline, Argillaceous System, JNC TN8400 2005-010.

Birgersson, M., Börgesson, L., Hedström, M., Karnland, O., Nilsson, U.(2009) : Bentonite erosion. Final report SKB TR-09-34

Börgesson L, Sandén T, Fälth B, Åkesson M, Lindgren E (2005) : Studies of buffers behaviour in KBS-3H concept. Work during 2002–2004. SKB R-05-50,

Börgesson, L. and Sandén, T. (2006): Piping and erosion in buffer and backfill materials. Current knowledge SKB R-06-80.

Burger, E., Rebiscoul, D., Bruguier, F., Jublot, M., Lartigue, J.E. and Gin, S. (2013): Impact of iron on nuclear glass alteration in geological repository conditions: A multiscale approach, Applied Geochem., 13, pp.159-170.

Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000) : Smectite dissolution kinetics at 80℃ and pH8.8, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.64, No.15, pp.2701-2717.

Carlson, L., Karnland, O., Oversby, V. M., Rance, A. P., Smart, N. R., Snellman, M., Vahanen, M. and Werme, L.O. (2007): Experimental studies of the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite, Physics and Chemistry of the Earth, 32, pp.334-345.

Cathelineau, M., Gullaume, D., Mosser-Ruck, R., Dubessy, J., Charpentier, D., Villieras, F. and Michau, N.(2005): Dissolution-crystallization processes affecting dioctahedral smectite in the presence of iron:implication of mineral distribution in clay barriers, ANDRA International Conference, 14-18 March2005, Tours, France, p.35.

Cathelinau, M., MOsser-Ruck, R., Rousser, D., Gillaume, D., Charpentier, D., Devineau, K., Villieras, F.and Michau, N. (2007) : Effects of temperature, pH, iron/clay ratio and liquild/clay ratio on the conversion of di-octahedral smectite into iron-rich clays : A review of experimental studies, ANDRA International Conference, 17-20 September 2007, Lille, France, pp.103-104.

Charpentier, D., Devineau, K., Mosser-Ruck, R., Cathelineau, M. and Villieras, F. (2006): Bentonite-iron interactions under alkaline condition : An experimental approach, Applied Clay Science, 32, pp.1-13.

Combarieu, C. D., Barboux, P. and Minet, Y. (2007) : Iron corrosion in Callovo-Oxfordian argilite : From experiments to thermodynamic/kinetic modeling, Physics and Chemitrsy of the Earth, 32, pp.346-358.

Curti, E., Godon, N. and Vernaz, E.Y. (1993) : Enhancement of the Glass Corrosion in the Presence of Clay Minerals: Testing Experimental Results with an Integrated Glass Dissolution Model, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVI, pp.163-170, Interrante, C.G. and Pabalan, R.T. (ed.), Material Research Society.

Cuss, R. J., Harringtong, J. F., Noy, D. J. (2010): Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report 2008. SKB TR-10-38.

電事連（電気事業連合会）・JNC（核燃料サイクル開発機構）(2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書−第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ− , JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02. 根拠資料集 4-1 別添 FEP 辞書

江橋 健，窪田 茂，黒澤 進，後藤淳一，後藤考裕，石井英一，稲垣 学，守屋俊文， 鈴木 覚，大井貴夫，市原貴之，石田圭輔，石黒勝彦，土 宏之，柴田雅博，澤田 淳，舘 幸男，牧野仁史，早野 明，三ツ井誠一郎，谷口直樹，小田治恵，北村 暁，大澤英昭，仙波 毅，日置一雅，亀井玄人(2012)：概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化―NUMO-JAEA 共同研究報告書（2011 年度）―（共同研究），NUMO-TR-12-03.

藤島 敦，久保田満，金 善永，根本一昭，柴田雅博，佐藤 努（2000）：低酸素条件で鉄と接触していたベントナイトの特性評価，第 44 回粘土科学討論会講演要旨，pp.68-69.

原子力安全委員会（2004）：放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について.

原子力安全委員会（2010）：余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方.

原子力環境整備促進・資金管理センター(2012)：平成23 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第２分冊）―人工バリア品質評価技術の開発―（2/2）

Grambow, B. (1985)：A General Rate Equation for Nuclear waste Glass Corrosion, Scientific Basis for Nuclear Waste Management VIII, pp.15-27, Jantzen, C.M., Stone, J.A. and Ewing, R.C. (eds.), Material Research Society.

Guillaume, D., Neaman, A., Cathelineau, M., Mosser-Ruck, R., Pfeiffert, C., Abdeloula, M., Dubessy, J.,Villieras, F. and Michau, N. (2003): Experimental study of the transformation of smectite at 80 and 300℃ in the presence of Fe oxides, Clay Minerals, 39, pp.17-34.

Harbet, B. (2000): Reactivite du fer dans les gels et les smectites, PhD Dissertation, Universite Paris 6, 227p.

伊藤雅和，岡本真由美，柴田雅博，佐々木康雄，檀原 徹，鈴木啓三，渡辺 隆（1993）：ベントナイトの鉱物組成分析，PNC TN8430 93-003.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2008）：平成22 年度地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2009）：平成22 年度地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2010）：平成22 年度地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2011）：平成22 年度地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JAEA（日本原子力研究開発機構）（2012）：平成23 年度地層処分技術調査等委託費，高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(1999a)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－, 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(1999b)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－, 分冊2 地層処分の工学技術， JNC TN1400 99-022.

JNC（核燃料サイクル開発機構）(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめ-分冊2 工学技術の開発JNC-TN1400 2005-015.

Jollivet, P., Frugier, P., Parisot, G., Mestre, J. P., Brackx, E., Gin, S.and Schumacher, S. (2012): Effect of clayey groundwater on the dissolution rate of the simulated nuclear waste glass SON68. J. Nucl. Mater., 420, pp.508−518.

Karnland, O., Sandén, T., Johannesson, L-E., Eriksen, T. E., Jansson, M., Wold, S., Pedersen, K., Motamedi, M., Rosborg, B. (2000): Long term test of buffer material. Final report on the pilot parcels, SKB TR-00-22.

Kamei,G., Oda, C., Mitsui, S., Shibata, M. and Shinozaki, T. (1999): Fe(II)-Na ion exchange at interlayer of smectite: adsorption-desorption experiments and a natural analogue, Engineering Geology, 54,pp.15-20.

Kumpulainen, S., Kiviranta, L., Carlsson, T., Muurinen, A., Svensson, D., Sasamoto, H., Yui, M., Wersin, P. and Rosch, D. (2010), Long-term alteration of bentonite in the presence of metallic iron, SKB-R-10-52.

神崎 裕; 武田 聖司; 木村 英雄（2009），高レベル放射性廃棄物処分における地下水移行にかかわる安全評価のシナリオ構築のための FEP データベース(受託研究)，JAEA-Data/Code 2009-011.

Lantenois, S., Lanson, B., Muller, F., Bauer, A., Jullien, M., Plancon, A.(2005)： Experimental study of smectite interaction with metal Fe at low temperature: 1. smectite destabilization, Clays and Clay Minerals, 53, pp.597-612.

Mayant, C. Grambow, B. Abdelouas, A. Ribet, S. Leclercq, S. (2008): Surface site density, silicic acid retention and transport properties of compacted magnetite powder, Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C, vol. 33, pp.991-999.

McVay, G.L. and Buckwalter, C.Q. (1983)：Effect of Iron on Waste-Glass Leaching, Journal of the American Ceramic Society, 66, pp.170-174.

McGrail, B.P. (1986)：Waste Package Component Interactions with Savannah River Defense Waste Glass in a Low-magnesium Salt Brine, Nuclear Technology, 75, pp.168-186.

Maeda, T., Ohmori, H., Mitsui, S. and Banba, T. (2011): Corrosion Behavior of Simulated HLW Glass in the Presence of Magnesium Ion, International Journal of Corrosion, vol. 2011, Article ID 796457.

Marty, N.C.M., Fritz, B., Clément, A., Michau, N. (2010): Modelling the long term alteration of the engineered bentonite barrier in an underground radioactive waste repository, Applied Clay Science 47, pp.82–90.

Michelin, A. Burger, E., Rebiscoul, D. Neff, D., Bruguier, F., Drouet, E., Dillmann, P. and Gin, S. (2012): Silicate Glass Alteration Enhanced by Iron: Origin and Long-Term Implications, Environ. Sci. Technol. 2013, 47, pp.750−756.

Mihara, M. and Sasaki, R. (2005)： RAMDA;Radio-nuclides Migration Datasets(RAMDA) on cement, bentonite and rock for TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027.

Mitsui, S., Makino, H., Inagaki, M and Ebina, T (2009): Impact of Silicon Migration through Buffer Material on the Lifetime of Vitrified Waste, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1193, pp.397-404.

牧野仁史・吉田隆史(1996)：ガラス固化体の溶解及びそれに伴う緩衝材中の核種移行に関する感度解析，動燃事業団技術資料，PNC TN8410 96-093.

松本 一浩; 藤田 朝雄，2011，緩衝材の流出/侵入特性,3，JAEA-Research 2011-014,

松本 一浩，棚井 憲治（2005）緩衝材の流出/侵入特性(Ⅱ) － 幌延地下水(HDB-6 号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価 － JNC-TN8400 2004-026.

松本 一浩, 棚井 憲治, 菅野 毅, 岩田 裕美子 (2005): "拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2005-009.

松本 一浩, 飯島 和毅, 棚井 憲治 (2008) 緩衝材の浸食現象評価; ベントナイトコロイドの生成挙動, JAEA-Research 2008-097.

Nagra (2002a): Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra TECHNICAL REPORT 02-05.

Nagra (2002b): Project Opalinus Clay, FEP Management for Safety Assessment, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra TECHNICAL REPORT 02-23.

日本原子力学会（2009）：日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法：2008，AESJ-SC-F012:2008.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011a)：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）-確かな技術による安全な地層処分の実現のために-, NUMO-TR-11-01.

NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011b)：地層処分事業のための安全評価技術の開発（Ⅰ）-シナリオ構築技術の高度化-, NUMO-TR-10-09.

Neretnieks, Ivars; Liu, Longcheng; Moreno, Luis，2009 Mechanisms and models for bentonite erosion，SKB TR-09-35.

小田 治恵，本田 明，高瀬 博康，小曽根 健嗣，佐々木 良一，山口 耕平，佐藤 努（2013）：セメント系材料由来のアルカリ性条件における緩衝材の鉱物学的変遷シナリオに基づく化学反応・物質移動連成解析，粘土科学 第 51 巻 第 2 号，pp.34-49.

OECD/NEA (1999), Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories: An International Database of Features, Events and Processes,OECD/NEA.

OECD/NEA（2001）: Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, May 1999, OECD/Nuclear Energy Agency.

OECD/NEA（2012）: Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative-, NEA No. 6923.

Owada, H., Mihara, M., Mine, T., Neyama, A., Iriya, K., and Arimoto, T. (1999): The geochemical modeling study on leaching behavior of HFSC for cementitious radioactive waste disposal, in Radioactive Waste Management and Environmental Remediation - ASME 1999, Nagoya, Japan.

Perronnet, M., Jullien, M., Villieras, F., Raynal, J., Bonnin, D. and Bruno, G.(2008): Evidence of a critical content in Fe(0) on FoCa7 bentonite reactivity at 80℃, Applied Clay Science, 38, pp.187-202.

Pescatore, C. (1994) : The Dependence of Waste Form Dissolution on Migration Phenomena in the Host Medium, Radiochimica Acta, 66/67, pp.389-394.

Philippini, V., Naveaub, A., Catalette, A. and Leclercq., S (2006): Sorption of silicon on magnetite and other corrosion products of iron, Journal of Nuclear Materials 348 pp.60–69.

Plettinck, S., Chou, L. and Wollast, R. (1994): Kinetics and mechanisms of dissolution of silica at room temperature and pressure, V.M. Goldschmidt Abstracts, Edinburgh, Mineralogical Magazine, Vol.58A, pp. 728-729.

Pusch,R 1983 Stability of bentonite gels in crystalline rock –physical aspects, SKBF/KBS TEKNISK RAPPORT 83-04.

Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S.(2004)： Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions,NUMO-TR-04-05.

Sandén T, Börgesson L, 2008. Deep repository – engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill. Laboratory tests to understand the processes during early water uptake. SKB R-06-72.

Sandén T, Börgesson L, Dueck A, Goudarzi R, Lönnqvist M, 2008. Deep repository – engineered barrier system. Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory. SKB R-08-135.

Schlegel, M.L., Bataillon, C., Benhamida, K., Blanc, C., Menut, D., Lacour, J.L., (2008): Metal corrosion and argillite transformation at the water-saturated high-temperature iron-clay interface: a microscopicscale study, Applied Geochem., 23, pp.2619-2633.

SKB (1999): SR 97 - Processes in the repository evolution. Background report to SR 97, SKB TR-99-07.

SKB (2006a): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. Main report of the SR-Can project, SKB TR-06-09.

SKB (2006b):FEP report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-20.

SKB (2006c): Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-18.

SKB (2009):Design premises for a KBS-3V repository based on the results from the safety assessment, SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22.

SKB (2010a), FEP report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-45.

SKB (2010b):Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-47.

SKB（2011）: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, TR-11-01.

Smart, N. R., Carlson, L., Hunter, F.M.I., Karnland, O., Pritchard, A.M., Rance, A.P. and Werme, L.O. (2006):Interactions between iron corrosion products and bentonite. Serco Assurance Report, SA/EIG/12156/C001.

園部一志，石黒勝彦 (1990)：実規模ガラス固化体の浸出試験，PNC TN8410 90-068.

Sugiyama, D. and Fujita, T. (2006): A thermodynamic model of dissolution and precipitation of calcium silicate hydrates, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 2, pp. 227–237.

Tan, K. H. (1982): The effect of interaction and adsorption of silica on structural changes in clay minerals, Soil Sci. 134, pp. 300-307.

谷口直樹，川上進，森田光男（2002）：ベントナイト/ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件，JNC TN8400 2001-025.

谷口直樹，川崎学，内藤守正（2010）：低酸素濃度下での模擬地下水の飽和した圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食挙動，材料と環境，Vol. 59，No. 11，pp.418-429.

谷口 直樹，川崎 学，内藤 守正（2009）：緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討-II：10 年間浸漬試料の腐食生成物分析結果，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2008-108.

上野健一，柴田雅博（2007）：スメクタイトと２:１型粘土鉱物の標準生成自由エネルギーの推定方法による誤差について，JAEA-Research 2007-069.

Verney-Carron, A., Gin, S. and Libourel, G. (2008): A fractured roman glass block altered for 1800 years in seawater: Analogy with nuclear waste glass in a deep geological repository et al. / Geochimica et Cosmochimica Acta 72, pp.5372–5385.

Wersin, P., Johnson, L.H. and McKinley, I.G. (2007): Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100℃: A critical review. Phys. Chem. Earth, 32, pp.780-788.

Wersin, P., Birgersson, M., Olsson, S., Karnland, O., Snellman, M., Oy, S. and Oy, R. (2008): Impact of corrosion-derived iron on the bentonite buffer within the KBS-3H disposal concept. The Olkiluoto site as case study. SKB report R 08-34.

Åkesson, M., Kristensson, O., Börgesson, L., Dueck, A. and Hernelind, J. (2010). THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11.

5. 核種移行パラメータ設定に関する検討

5.1 検討の目的とアプローチ

5.1.1 背景と目的

安全評価における重要な核種移行パラメータは，「放射性物質の溶解度制限」，緩衝材中の「収着・拡散」，周辺岩盤中の「収着・拡散」，等に係るものである（NUMO，2011）。核種の溶解・沈殿現象および緩衝材中の収着･拡散現象は, 地下水組成や緩衝材特性などの化学的環境条件に大きく依存する。また，岩盤中の収着・拡散現象は上記の条件に加え，岩種や亀裂，水理条件など物理的環境条件にも大きく影響を受ける。安全評価においては，対象とするサイトの地質環境条件，さらには，将来の海水準変動や隆起・侵食活動といった地質環境の変遷を考慮し，評価モデルに使用する溶解度，分配係数および拡散係数といった核種移行パラメータを適切に設定することが重要である。しかし，天然の地質環境が有する不均質性や超長期にわたる変遷に起因する不確実性のために，核種移行パラメータにも不確実性が含まれることとなる。そこで，様々な既存の実測データ，メカニズムやモデルに関する知見を持って，不確実性の要因と変動範囲，および影響範囲を踏まえながら，安全評価に用いる最適なパラメータを設定することが必要である。

概要調査段階では，地上からの調査（地表踏査，ボーリング調査など）が進めば，地質環境特性に関する情報が増加し，ボーリング調査によって調査地区の岩石ボーリングコアや地下水が試料として得られる。これら岩石試料や地下水試料を用いて，あるいは地下水に関しては模擬した条件で，緩衝材や岩石中の核種移行に関わるデータを取得することができる。パラメータ設定に関しては，実測値と既存のデータベースからの類推やモデルによる推定とを比較して，地下水化学条件への依存性（例えば分配係数の pH 依存性）などを確認することでパラメータの変動範囲を設定する。この際，この段階では詳細には把握できない地質環境特性の不均質性，システムの長期的変遷を念頭に，パラメータの不確実性を考慮する必要がある。

概要調査段階でパラメータ設定を効率的に実施するためには，調査の進展に伴い増加する情報の種類と量に加え，情報に必然的に伴う不確実性を考慮したパラメータ設定の基本的な方針と手順を準備しておくことが重要である。本研究では, 事業の視点からの要件とパラメータ設定の考え方を整理し，不確実性の取り扱いを考慮に入れたパラメータ設定の方法論を検討することを目的とする。

5.1.2 本研究の進め方と 2012 年度の実施内容

本研究では，図 5.1.2-1 に示すアプローチに沿って，核種移行パラメータ設定の方法論を検討する。

まずは，これまでの JAEA における基盤研究成果（データ取得手法，実測値データベース，現象論モデル等）の整理，海外における先行事例の調査・分析を行い，それらをもとに核種移行パラメータ設定の方法論を検討する。次段階として，提案されたパラメータ設定手法に基づいた試行を実施することにより, 設定のための具体的作業と設定値に含まれる不確実性の種類と要因を明確にする。また，それぞれの不確実性について安全評価上の影響度を踏まえて重要度を検討し，それに対応した不確実性低減のための対策を検討する。これらの検討により，事業の進捗に応じて採用すべき，不確実性を考慮したパラメータ設定手法を提示する。

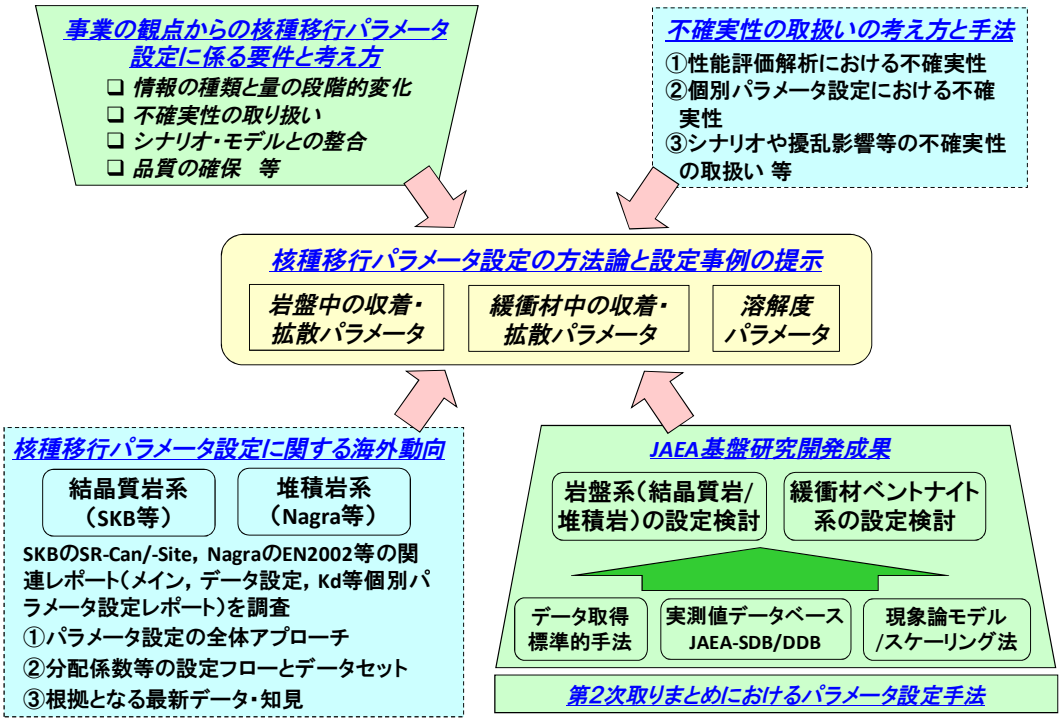


図 5.1.2-1　本研究における核種移行パラメータ設定手法検討のアプローチ

2011 年度は，岩石の分配係数パラメータについて，結晶質岩を対象とし，スウェーデン SKB のパラメータ設定手法の調査，国内基盤研究開発成果をもとに，実測データに基づくパラメータの設定フローを整理するとともに，第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999）のジェネリックな環境条件を対象に，主要核種のパラメータ設定について事例的に検討した。また，緩衝材中の収着・拡散については，基盤研究開発の成果をもとに，圧縮ベントナイト中の収着と拡散に関するパラメータを関連付けつつ，実測データとモデルを組合せた設定フローを検討するとともに，主要核種に対して事例的に適用した。さらに，溶解度設定については，第 2 次取りまとめ以降の JAEA における熱力学データの更新と溶解度評価についての情報を整理した（江橋ほか，2012）。

これら 2011 年度の成果も踏まえ，2012 年度は以下の検討を共同研究として進めた。

・岩石の分配係数パラメータについて，堆積岩を対象とし，スイス Nagra/PSI のパラメータ設定手法の詳細調査および国内の関連基盤研究開発の成果をもとに，半定量的条件変換手法や収着モデルといった複数のアプローチの比較や選択の視点を含む分配係数パラメータの設定フローを整理し，このフローと関連付けて幌延の堆積岩に対する設定事例を提示した。また，結晶質岩を対象とした分配係数設定の試行を通じて，設定作業において留意すべき不確実性を抽出し，その取扱いについて検討した。（5.2 節）

・溶解度パラメータについて，第 2 次取りまとめおよび諸外国の溶解度評価手法を整理した上で，溶解度設定手法の検討を行うとともに，並行して代表的な元素の溶解度制限固相の設定を試行した。また，溶解度制限固相選定段階での検討に資することを目的として，天然地下水中のウランの溶存濃度の解釈に関する事例について調査を行った。（5.3 節）

・さらに，パラメータ設定の作業経緯や判断根拠等の整理方法については，分配係数設定フローを例に，品質管理の観点から重要な要素や要件を抽出するための予察的検討を行った。（5.4 節）

5.2 岩石の分配係数の設定手法に関する調査検討

5.2.1 岩石に対する分配係数設定手法に関する調査

核種移行パラメータ設定に関わる最近の海外動向のうち，本研究との関連で注目すべきものとして，OECD/NEA の収着プロジェクト，スウェーデン SKB のプロジェクト，スイス Nagra/PSI のプロジェクトが挙げられる。2011 年度の調査では，特に SKB の花崗岩（結晶質岩）系における許認可申請に係る安全評価書（SR-Site；SKB, 2011 他）を対象に，分配係数を中心としたパラメータ設定手法（Crawford, 2010）の詳細を調査・分析した。2012 年度は，特に堆積岩系の検討事例に着目して，OECD/NEA の収着プロジェクトの Phase III 報告書（OECD/NEA，2012；Payne et al., 2013），Nagra/PSI の粘土岩（堆積岩）に対する分配係数設定手法（EN2002; Nagra, 2002 他）の詳細を調査・分析した。また，基盤研究開発として実施している幌延堆積岩を対象とした検討事例を紹介する。

(1) OECD/NEA の収着プロジェクト

OECD/NEA の収着プロジェクトでは，従来の実験データに基づく分配係数パラメータの設定に対し，熱力学的収着モデル（TSM; Thermodynamic Sorption Model）の適用可能性が検討されている。TSM は収着現象に影響を及ぼし得る種々の物理化学的事象を統一的な理論体系のもとに表現し得るものである。性能評価パラメータ設定においては，多様な環境条件を考慮する必要があるものの，あらゆる条件で実測データを取得することは現実的ではなく，このようなモデルの活用が期待されている。この収着プロジェクトは，1997 年から開始され，Phase I（1997-1998）で TSM の国際的な開発状況を整理した（OECD/NEA, 2001）。そのうえで，Phase II（2000-2005）で複数のテストケースに対し参加機関がモデル化した結果を比較分析し，多様な環境条件での収着挙動の傾向性を説明可能なことが確認された（OECD/NEA, 2005）。

その後，Phase III（2007-2012）として収着モデルパラメータの導出と不確実性の取り扱い，実際の処分環境などへの適用性評価を含め，TSM 活用に関するガイドラインの検討が進められ，最終報告書が昨年公開された（OECD/NEA，2012；Payne et al., 2013）。この Phase III では，これまでに各国で進められてきた TSM の構築や適用に関する取り組みを集約しつつ，粘土鉱物などの単純系から，実際の安全評価などで考慮される複合鉱物系あるいは圧縮系といった実際の処分環境に対するモデルの適用性が検討された。

鉱物複合系の岩石に対する収着モデルの適用アプローチとして，構成鉱物毎の収着モデルを組み合わせる CA（Component Additivity）モデルと，構成鉱物毎ではなく鉱物複合体の岩石全体に対する仮想的な表面サイトを仮定する GC（Generalized Composite）モデルが比較評価されている。GC モデルは複雑な媒体に対しても適用性が高いとされるが，その適用範囲は評価対象の地質媒体（地下水条件も含む）に限定される。一方で，CA モデルは，主要な鉱物によって収着が支配されることを前提に，それらのモデルの単純な加性則により評価するものであり，既存のモデルの活用や多様な媒体への拡張性の面で有利である。

圧縮系までを含む適用性評価についても，Phase III の主要な論点として議論がなされた。ベントナイトに関しては，適用事例は十分ではないが，圧縮系も含めて TSM の適用可能性が確認された。さらに，岩石についても，堆積岩（特に粘土岩）系については，スイスの Opalinus 粘土岩，フランスの Callovo Oxfordian 粘土岩，幌延の泥岩などにおけるモデル化の検討事例をもとに，まだ適用事例は少ないものの，数種類の粘土鉱物が岩石全体の収着を支配すると仮定したモデルで説明可能であることが示された。一方，花崗岩については亀裂部の取り扱いやデータ取得時の粉砕の効果などに課題があり，モデ

ル化の検討を進めるためには，これらの課題の解決が必要と評価された（OECD/NEA，2012）。このように，TSM はパラメータ設定支援に活用できる状況になりつつあるものの，対象とする岩種や核種における収着メカニズムの理解や既存データの存在状況を踏まえて，モデルの活用方針を検討することが重要である。

(2) Nagar/PSI の分配係数の設定手法の調査・分析

Nagra/PSIでは，2002年にOpalinus粘土岩層における処分実現可能性実証プロジェクト（EN2002）報告書において，安全評価結果を取りまとめている（Nagra, 2002）。このEN2002では，Opalinus粘土岩層の実際の鉱物や地下水組成などの地質環境条件を設定しており，当該岩盤の低透水性/拡散支配という特徴を踏まえて，従来からの人工バリア/圧縮ベントナイト系のアプローチを踏襲し，特に粘土岩の間隙水化学，収着，拡散の整合性に力点をおいた検討を進めている。分配係数などの核種移行パラメータについては，地下研究施設の試料などを用いた室内試験や原位置トレーサー試験を通じて原位置条件への適用性の確認も検討されている。

Nagra/PSIの核種移行パラメータ設定における最大の特徴は，データが取得された条件と安全評価などでの評価対象条件の違いを変換係数によって補正するアプローチを採用している点である。この半定量的条件変換手法は，スイスの中低レベル廃棄物処分プロジェクトにおいて，WellenbergのPalfris泥灰岩に対する分配係数パラメータ設定のために考案された手法（Bradbury and Baeyens, 1997a）であり，EN2002では，その手法をベースにベントナイトおよびOpalinus粘土岩の収着パラメータが設定された（Bradbury and Baeyens, 2003a; 2003b）。この背景になっているのは，Bradbury and Baeyens (1997b)に代表されるような，粘土鉱物（モンモリロナイト）に対する核種の膨大な収着データ（pH依存性や核種濃度依存性）の蓄積，それらデータに基づくメカニズム理解と熱力学的収着モデル開発である。この条件変換手法は，図5.2.1-1に示すように，分配係数K_dに影響を及ぼす主要因子である，鉱物組成，pH，溶存化学種の各々の条件の差異を変換係数（CF; Conversion Factor）として設定し，それらを考慮して半定量的にK_dを推定評価する手法である（詳細は5.2.2(3)参照）。また，個々の変換ファクターに付随する不確実性の要因について検討することで，条件変換に伴う不確実性を定量化する手法についても提案され，性能評価パラメータ設定に反映されている。

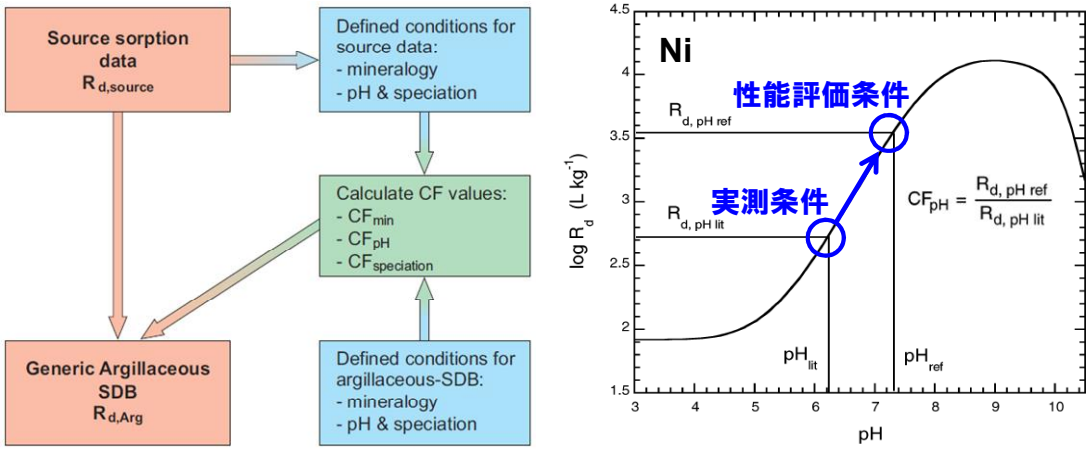


図 5.2.1-1　Opalinus 粘土岩の分配係数設定における半定量的条件変換手法（左図；Bradbury and Baeyens, 2009）と pH 条件変換の概念図（右図; Bradbury and Baeyens, 2003b）
（図中の R_d は K_d と同じく分配係数を意味する）

現在スイスでは，2008年に定められた特別計画“地層処分場”に従って，段階的なサイト選定のための地質学的な調査や予備的な安全評価が進められている。この予備的な安全評価の収着パラメータ設定（Bradbury and Baeyens, 2009；Mibus et al., 2012）においても，上記の条件変換手法を適用しつつ検討が進められており，Opalinus粘土岩の鉱物や地下水組成のバリエーションを踏まえた地質環境条件設定やその不確実性の取り扱いなどを含めて参考となる。また，中低レベル廃棄物も含めた候補サイトには，Opalinus粘土岩以外の岩種も含まれ，Bradbury and Baeyens (2009)では泥灰岩，石灰岩なども含めた収着パラメータ設定についても議論を行っており，岩種のバリエーションへの対応の観点からも有益な情報となると考えられる。

(3) 幌延の堆積岩を対象とした分配係数の設定手法の検討状況

JAEA では，幌延深地層研究計画の堆積岩を対象として，多様な核種の収着・拡散データを取得するとともに，現象論的収着・拡散モデルを検討してきた。主に対象としたのは幌延深地層研究計画のHDB-6 孔の深度 500-600 m の稚内層から採取した，Opal-CT，石英，長石，粘土鉱物（スメクタイト，イライト）を主成分とする珪質泥岩である。最初のステップとして，この岩石の収着・拡散メカニズムの理解を目的として，Cs，I，HTO の拡散・収着挙動について，地下水のイオン強度影響に着目し，透過拡散法とバッチ収着試験によってデータを取得した（図 5.2.1-2；Tachi et al., 2009b, 2011b）。これら試験によって得られた Cs の分配係数は，粉砕岩石を用いたバッチ法とコア試料を用いた拡散法で整合的な値を示すとともに，イオン強度や核種濃度に対する依存性が確認された。

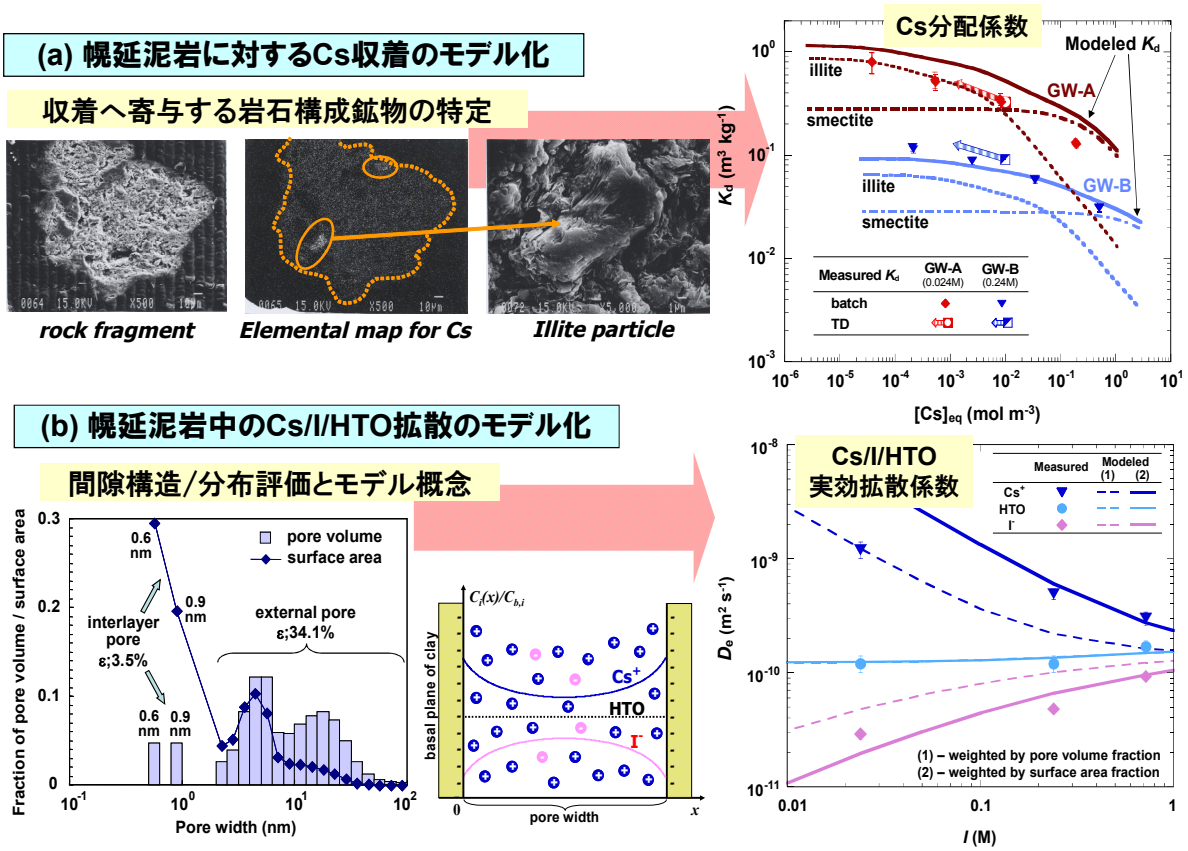


図 5.2.1-2　幌延泥岩に対する Cs の分配係数(a)と Cs/I/HTO の実効拡散係数(b)のモデル化結果
（Tachi et al., 2011b; TD: through-diffusion, GW: groundwater）

一方で，実効拡散係数は Cs > HTO > I の順で，その差は塩濃度が低いほど拡がる傾向を示し，圧縮ベントナイトと同様に粘土鉱物表面での静電的な相互作用が寄与していることが確認された。これらの実験結果をもとに，幌延の堆積岩中の収着・拡散現象が，イライトとスメクタイトの粘土成分によって支配されると仮定し，粘土鉱物を主体としたモデル化アプローチを検討した。Cs の収着については，これら粘土鉱物の含有量とそれぞれの既存のイオン交換モデルとを組み合わせた加性則（CA）モデルによって，分配係数のイオン強度および核種濃度依存性を再現することができた。一方，拡散モデルは，圧縮ベントナイトを対象に開発された電気二重層理論に基づく拡散モデル，分析情報等から推定された間隙のサイズ分布を組み合わせることによって，拡散データの傾向性が概ね説明可能であることを示した（Tachi et al., 2011b）。

さらに，性能評価上の主要な核種をカバーし，表面錯体反応も含む高収着性核種として，Ni，Am，Th などを対象に，上記と同様の手法で収着・拡散データを取得し，いずれの核種においても分配係数についてはバッチ法と拡散法で概ね整合することを確認した（JAEA, 2011）。上記 Cs の場合と同様に，粘土を主体とした CA モデルが，表面錯体系の核種へも適用可能かを検討するため，Ni を例に収着モデルを検討してきた（JAEA，2012）。ベントナイト系への適用を念頭に開発してきたモンモリロナイトの収着モデル（舘ほか，2010 ; JAEA，2012）と，それと同様の手法で構築したイライトの収着モデル（JAEA，2012）を組み合わせた加成則モデルによって，表面錯体反応が支配的になる Ni の収着データが説明可能であることを確認した。

上記の実測データやモデル化の成果をもとに，上記(2)に示した Nagra/PSI の半定量的な条件変換手法を活用した収着パラメータ設定手法も適用しつつ，実際の地質環境条件が与えられた際の収着パラメータの設定手法を検討してきた（JAEA，2011，2012 ; Ochs et al., 2013）。この検討結果をもとに，次項の収着パラメータの設定手法および設定事例を記載していく。

5.2.2　岩石に対する分配係数設定フローの検討

(1) 分配係数設定に関する全体フロー

実際の処分環境を対象とした性能評価において，地質環境条件並びに関連する不確実性要因も考慮して，信頼性の高い収着パラメータを設定することが求められる。性能評価で想定される多様な条件でのデータを全て実測することは現実的に不可能であり，環境条件に対するパラメータ変化および不確実性を評価する条件変換手法が重要な役割を担う。このような条件変換手法の役割については，OECD/NEA の収着プロジェクトでも議論がなされ，図 5.2.2-1 のような整理がなされている（OECD/NEA, 2005）。この条件変換の手法としては，現象論的収着モデル（図中③）が最も有力な手法となるが，モデルの開発状況や適用上の制約を考慮すれば，従来から国際的にも検討されている半定量的な条件変換手法（Semi-quantitative scaling：図中②）等とも組み合わせることが重要となる（OECD/NEA, 2005）。この半定量的条件変換の手法は，上記 5.2.1(2)に記載したように，Nagra/PSI による検討をもとにした，固相や液相の条件と分配係数との相関性に基づき半定量的に条件変換を行う手法であり，例えば，スウェーデンの安全評価においても採用されてきている（Ochs and Talerico, 2004; Crawford, 2010）。また，実測データと専門家判断による条件変換（図中①）は，例えば第 2 次取りまとめにおける分配係数設定（核燃料サイクル開発機構，1999）が相当する。2011 年度は，結晶質岩を対象とし，スウェーデン SKB のパラメータ設定手法の調査，国内基盤研究開発成果をもとに，この実測データに基づくパラメータの設定フローについて検討した（江橋ほか，2012）。これらの条件変換を含めたパラメータ設定において，実測データの不確実性，評価対象である環境条件に係る不確実

性，最終的にそれらも考慮した条件変換手法を通じて導出される分配係数の不確実性を評価することが重要となる。

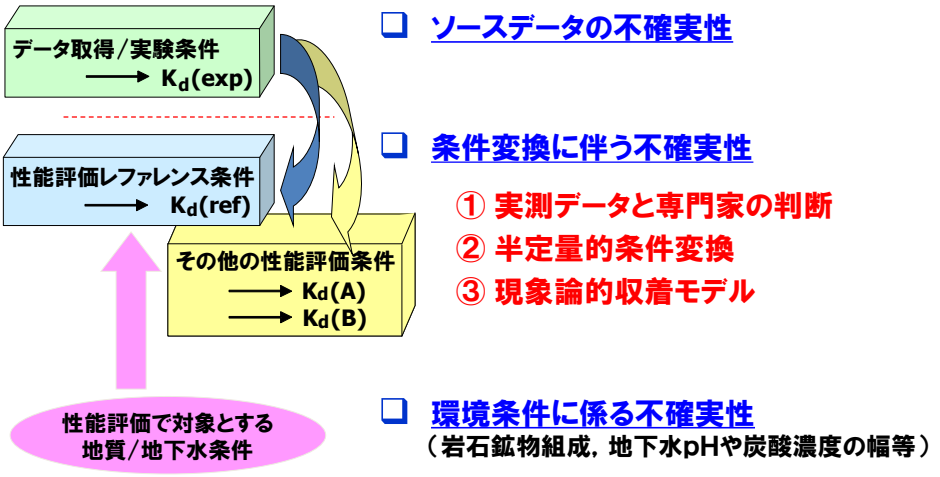


図 5.2.2-1　性能評価のための分配係数設定と不確実性評価のアプローチ(OECD/NEA, 2005 より改定)

これらの複数の設定手法の比較や選択に関する議論は，実際の候補サイト条件や段階的な情報の充実に応じたパラメータ設定の方法や品質の確保にも密接に関連する。地質環境条件が十分に特定されておらず，また，情報量が非常に限られている状況では，既存の実測データと専門家判断に基づく手法を採らざるを得ないが，情報量が充実するに従って，半定量的条件変換手法や現象論的収着モデルを活用することが可能な状況となる。これら 3 つのアプローチを常に念頭におき，現時点で与えられた条件や情報に対してどのアプローチを採用すべきか，複数の手法の比較評価によって信頼性を高めるべきか，現状の情報量に照らしてどのアプローチを適用することを目指してデータ取得を進めるべきか，などを検討することは，パラメータ設定の基本的戦略を決める最重要の部分である。このことを念頭に，これら 3 つのアプローチの組合せや選択を中心とした収着パラメータの設定の全体の流れを示す包括的なフローを検討し，そのうえで，必要に応じて個々の分配係数設定アプローチの詳細フローを検討することとした。

収着パラメータ設定の包括的なフローは，図 5.2.2-2 に示すように，性能評価からのニーズをもとに，分配係数パラメータセットの要件と目標を設定する検討が最初の作業ステップであり，性能評価で対象とする地質環境条件（鉱物組成や地下水組成など），考慮されるシナリオ，パラメータセットに求められる精度などの前提条件を明確化することが重要となる。この要件と目標に対して，利用可能な分配係数データの情報量，対象とする岩種や液性条件における収着メカニズムなどに係る基礎情報を把握したうえで，「①実測データによる設定」，「②半定量的条件変換による設定」，「③収着モデルによる設定」のいずれのアプローチに重点をおくかを決定することとなる。これら 3 つの分配係数の設定/条件変換アプローチの詳細については後述するが，それぞれの手法で設定された分配係数と不確実性について，手法間の相互比較，元素間の整合性などを総合的に評価したうえで，最終的な分配係数パラメータセットが構築される。

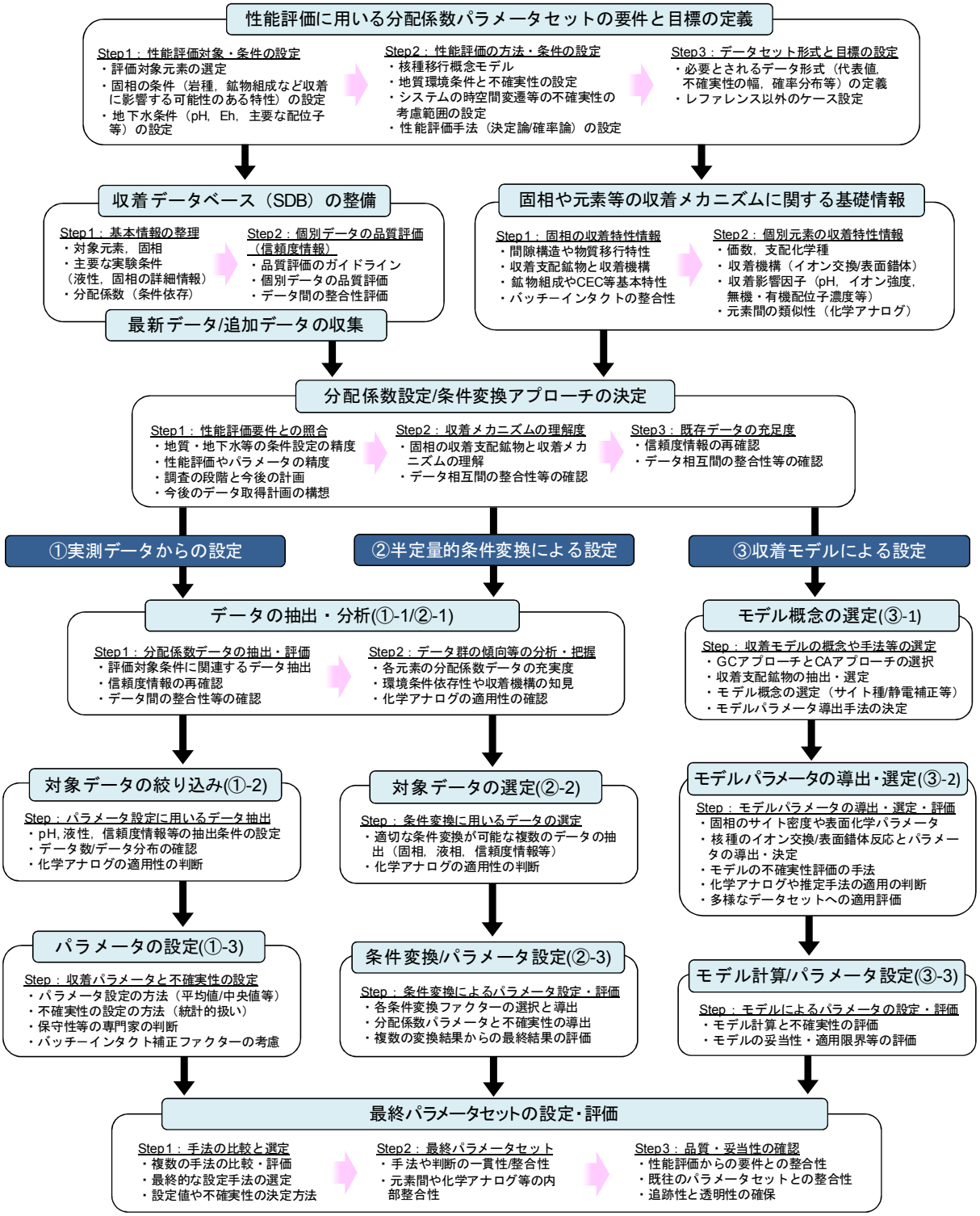


図 5.2.2-2　包括的な収着パラメータの設定フロー

この包括的な設定フローは，いずれの調査段階でも有効であり，調査の進展に応じて，複数のフローの選択の幅，パラメータ設定の精度や不確実性の評価が充実していくと考えられる。なお，サイト調査段階で，実際に採取した岩石や地下水を用いたデータ取得がなされるが，その位置付けや重みは，地質環境条件によって大きく変わりうる。例えば，花崗岩のように利用可能な既存データが十分存在

する場合には，それらの既存データによる設定の妥当性を，実際のサイトの取得データで確認する位置付けとなり，一方で，既存のデータがあまり存在しないような岩種の場合には，実際のサイト条件でのデータを系統的に取得し，それらをもとに設定の手法等を検討することとなる。

(2) 既存の実測データに基づく設定アプローチ（図 5.2.2-2 の①）

地質環境条件が十分に特定されておらず，また，情報量が限られている状況においては，既存の実測データに基づく専門家判断によってパラメータを設定するアプローチが採用されることとなる。第 2 次取りまとめのようなジェネリックな段階での設定，あるいは，地質環境情報がほとんど得られていないサイト選定の初期段階では，このアプローチが採られる可能性が高いと考えられる。このアプローチは, 2011 年度に, 第 2 次取りまとめの経験や SKB の SR-Can 報告書の調査結果をもとに, 図 5.2.2-2 の①として示したようなフローを作成するとともに，このフローに沿って，Cs, Am, Np の 3 核種を対象に設定を試行した（江橋ほか，2012）。さらに，2012 年度もその試行を継続し（5.2.4 参照），設定フローの妥当性の確認と留意点や課題の抽出を実施した。これらの 2011 年度と 2012 年度の検討結果をもとに，以下に，フローに沿った設定の流れ，留意点や課題について要点を整理する。

i) データの抽出・分析（図 5.2.2-2 の①-1）

最初の作業として，収着データベース（JAEA-SDB; 舘ほか，2009）および最新のデータ調査をもとに，評価対象条件に関連するデータを抽出し，SDB の信頼度情報も活用しつつ，信頼性の高いデータを抽出する。そのうえで，収着メカニズムに関する知見も踏まえつつ，主要な環境条件影響を分析する。また，データの充足度を踏まえ，傾向性の分析あるいはデータそのものに対して，化学アナログの適用を検討する。この作業においては，まず，JAEA-SDB に含まれない最新データの拡充や信頼度が評価されていないデータの信頼度評価が重要となり，その作業におけるデータ抽出と評価プロセスの追跡性にも留意する必要がある。また，JAEA-SDB の抽出データのみでは，十分にデータが存在しない岩種，傾向性が明瞭に読み取れない元素など，情報が不足するケースが想定され，岩種の特性，収着メカニズムや化学アナログに関する知見，分配係数パラメータ設定事例などの既往の知見を参照可能としておくことが重要である。

ii) 対象データの絞り込み（図 5.2.2-2 の①-2）

上記 i)の抽出データと分析結果をもとに，パラメータ設定に用いるデータ群の絞り込みを行う。性能評価で想定する岩種や地下水条件を中心として，特に地下水の pH，イオン強度，核種初期濃度等の絞り込みの条件の決定が重要となる。この際，上記の傾向性の分析やメカニズムに関する知見をもとに，一貫性をもった判断根拠によることが重要となるが，データ数が限られるようなケースでは許容できる範囲でデータ絞り込みの条件を変更・緩和することも必要となる。また，データ数の制約がある場合には，元素間での整合的なパラメータ設定の実現なども考慮して，化学アナログの適用を判断することになる。

iii) パラメータの設定（図 5.2.2-2 の①-3）

上記 ii)で絞り込まれたデータ群に対し，分配係数の値と不確実性の幅を設定する。この際の値や幅の決定方法には，2011 年度の報告書（江橋ほか，2012）に記載したように複数の方法が考えられる。データの分布からおおよその分配係数値と不確実性の幅を専門家判断により決定する方法（第 2 次取

りまとめに相当），分配係数値に平均値や中央値，不確実性の幅に標準偏差やパーセンタイルを適用するといった統計的な方法などから選択する必要がある。統計的な方法は，個人の判断によらず手法の一貫性の確保の観点で有効ではあるが，十分なデータ数と適切なデータ分布形状となっていることを要件とする。統計的取り扱いの検討にあたっては，このような点を十分に確認する必要があり，また，多様な評価対象核種に対して一貫した手法が適用可能かどうかも重要な判断根拠となる。また，パラメータ設定にあたっては，保守性や現実性の視点，2011 年度の共同研究（江橋ほか，2012）の中で議論したような粉砕試料を用いたバッチ系データを未粉砕岩に適用可能かの視点も重要な検討要素である。

(3) 半定量的条件変換手法に基づく設定アプローチ（図 5.2.2-2 の②）

分配係数の実測データから環境条件の違いを補正して分配係数を設定する半定量的条件変換手法は，上述したように Nagra/PSI によって提案・検討されてきたアプローチである（例えば，Bradbury and Baeyens, 2003b）。この手法は，上記(2)に記載した既存の実測データに基づくアプローチが非常に限られた少数のデータに対しても適用可能であるのに対し，条件変換を可能とする十分な実測データの存在とメカニズムの理解を前提とする。同時に，実測データの質と量が熱力学的収着モデルを構築するまでには至っていないような系，あるいは，岩石の特性の面からモデルの適用が困難なケースなどにおいて，有効なアプローチと考えられており，図 5.2.2-1 の OECD/NEA の収着プロジェクト（OECD/NEA, 2005）でもオプションとして位置づけられているほか，SKB などの諸外国の核種移行パラメータ設定でも活用されてきている（例えば，Ochs and Talerico, 2004; Crawford et al., 2010）。このような状況を踏まえ，JAEA においても，上述したように，幌延の堆積岩を事例とした収着パラメータ設定を対象に，半定量的条件変換手法の適用を検討してきた（Ochs et al., 2008, 2013）。ここでは，Ochs et al. (2013)をもとに，半定量的条件変換手法の概略の流れを示す。

この手法は，その概要を図 5.2.2-3 に示すように，K_d に影響を及ぼす主要因子である，鉱物組成，表面特性，溶存化学種，共存イオン濃度，バッチーインタクトの各々の条件の差異を変換係数(CF)として設定し，それらを考慮して半定量的に K_d を推定評価する手法である。どの変換係数を考慮するかは，収着メカニズムや利用可能な情報源によっても異なり，例えば，Nagra/PSI（Bradbury and Baeyens, 2003b）や SKB（Crawford, 2010）でも異なっている。本手法の基本的な流れ（図 5.2.2-2 参照）は，まず，実際の評価対象条件の固相，液相に近い系での分配係数データを，条件変換に必要となる条件依存性やメカニズムに関する知見とあわせ，抽出・選択することが必要となる（図 5.2.2-2 の②-1,2）。そのうえで，その系で考慮すべき変換係数を検討しながら，具体的な変換係数を設定する（図 5.2.2-2 の②-3）。各変換係数の概要や留意点は下記の通りである。

i) 鉱物組成に関する変換係数（CF-min）：収着支配鉱物の含有量，あるいは陽イオン交換容量（CEC）や表面錯体のサイト密度などといった固相の収着容量に関する変換係数

ii) pH に関する変換係数（CF-pH）：表面錯体が支配的な収着メカニズムである場合，pH 依存性の傾きなどを考慮して pH 条件の差異を補正する変換係数。イオン交換が支配的な元素の場合，一般的には中性から弱アルカリ性の pH 領域での K_d 変化は小さく，この変換係数は考慮されない。

iii) スペシエーションに関する変換係数（CF-spec）：CF-pH には含まれないスペシエーションの効果を補正する変換係数。加水分解種の効果は CF-pH に含まれるが，例えば，炭酸錯体の効果はこの CF-spec で考慮され，取り扱い方については複数検討されている。例えば，Nagra/PSI では

保守性の観点から炭酸錯体は収着に寄与しないと評価しており，一方で，Ochs et al. (2013)では，近年の炭酸系表面化学種の分析的確認などを踏まえて，この炭酸系化学種の収着への寄与を考慮した補正も比較検討している。

iv) 競合イオンに関する変換係数（CF-cmp）：イオン交換が支配的な収着メカニズムである場合，Na^{+}やCa^{2+}などの競合陽イオンの濃度条件を補正する変換係数。ただし，粘土鉱物の Frayed Edge Site（例えば，Bradbury and Baeyens, 2000）に対する Cs の収着のように，特定のイオンとのみ強く競合する場合には，その点を考慮した条件変換を検討する必要がある。

v) バッチーインタクトに関する変換係数（CF-batch→intact）：粉砕岩石を用いて取得された分配係数を，原位置のインタクト条件に適用するための変換係数。岩種によって，その重要性は大きく変わると考えられ，例えば，Opalinus 粘土岩のような場合には 1 と仮定されるが（Bradbury and Baeyens, 2003b），花崗岩のような場合には，上述したように粉砕による K_d への影響が大きく，その係数は 1/10~1/100 と非常に大きな幅を持つ値が設定される（Crawford, 2010）。

これらの個々の変換係数を組合せた全体としての変換係数を決定し分配係数を導出する。また，この半定量的条件変換に伴う不確実性については，鉱物組成やイオン濃度といったデータに含まれる誤差などを考慮することによって，個々の条件変換係数に付随する不確実性を定量化する手法が検討されている（Bradbury and Baeyens, 2003b; Ochs et al., 2013）。

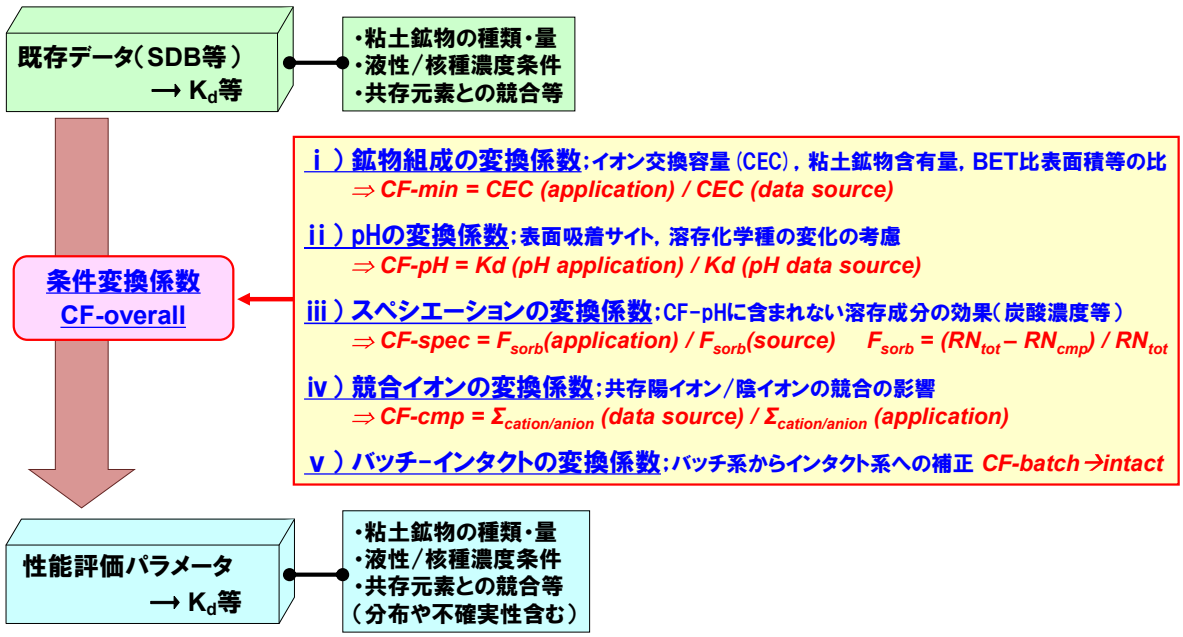


図 5.2.2-3　条件の違いを補正して K_d を設定する半定量的条件変換手法の概要

(4) 収着モデルに基づく設定アプローチ（図 5.2.2-2 の③）

現象論的収着モデルについては，図 5.2.2-2 に概略の流れを記載したように，モデル概念の選定（図 5.2.2-2 の③-1）とモデルパラメータの導出・選定（同図の③-2）が中核をなす作業であり，膨大な作業量を要するものの，それらが構築されていれば，地球化学計算コードなどによって，対象条件下での分配係数や不確実性を評価することが可能となる。ここで，既存のモデル化事例を参照することが

考えられ，例えば，様々な鉱物と元素間の表面錯体反応定数をコンパイルした RES^{3}T データベース（Brendler et al., 2003）も利用可能である。しかしながら，既存のモデルパラメータ値は，固相の表面特性，モデルタイプ，熱力学データなどの各種前提条件のもとで導出されたパラメータであり，単純に他の系に適用したり組み合わせたりすることは整合性の観点から適切ではないこと（OECD/NEA, 2005）に留意する必要がある。鉱物の表面特性の差異を考慮して表面錯体反応定数を補正する試みもなされているが（例えば，Richter et al., 2005），その適用範囲には限界もあることから，一貫した考え方のもとパラメータを再導出するアプローチも多数行われている（Dzombak and Morel, 1990 ; Bradbury and Baeyens, 2005；Zavarin and Bruton, 2004；舘ほか，2010）。

現象論的収着モデル概念とパラメータの導出には，実験データの選定，モデルの比較，パラメータ導出・計算，誤差評価や検証計算といった様々なプロセスと判断を必要とする。このような観点から，上述したように，OECD/NEA の収着プロジェクトでは，性能評価のための収着モデル開発のためのガイドラインを整備している（OECD/NEA, 2012; Payne et al., 2013）。このような OECD/NEA のガイドラインも踏襲しつつ，JAEA でも収着モデル開発を進めており，そこで検討した収着モデル開発の全体フローを，OECD/NEA が提案したモデル概念の選定フローとともに，図 5.2.2-4 に示す（舘ほか, 2010）。

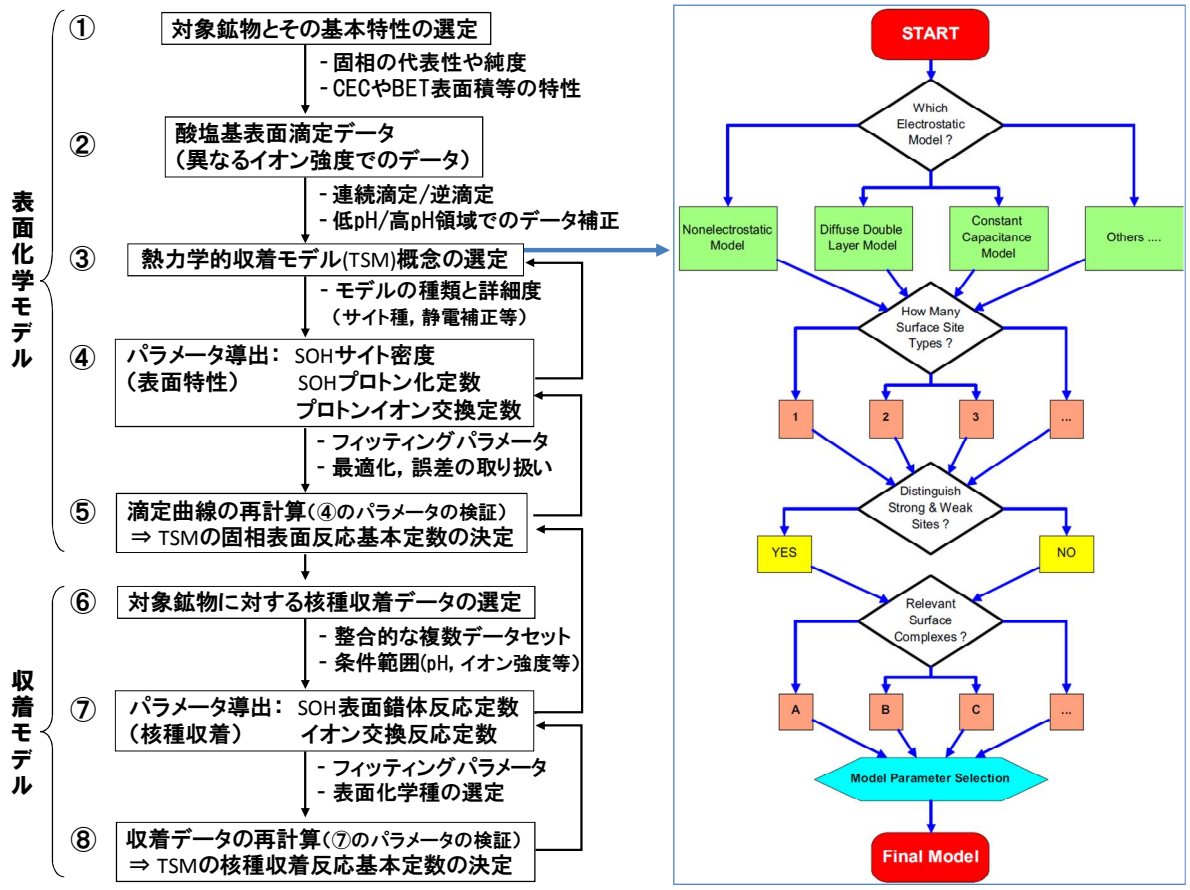


図 5.2.2-4　熱力学的収着モデルの開発の基本的フロー（左図：舘ほか，2010）とモデル概念の選定フロー（右図：OECD/NEA，2012）

最初の段階は，評価対象鉱物の基本特性などの決定であり，②～⑤の流れで，酸塩基滴定データなどから，核種収着モデルの前提となるモデル概念と表面化学パラメータを決定する。次に，⑥～⑧の流れに沿って，pH や塩濃度などの条件をカバーする品質の高い収着データセットを抽出したうえで，表面化学モデルパラメータを固定した条件で，核種の収着モデルパラメータを導出する。ここで，モデル概念の選定やパラメータ導出にあたっては，対象とする環境条件において生じうる収着反応が，分析的確認等の裏付けも含めて，適切かつ網羅的に考慮されることが重要である。なお，モデル概念については，同図右に示すような多様な選択肢の組合せから選定されるが，ここで重要なのはモデルの精緻さよりもむしろ，モデルパラメータの整合性に対する留意であるとされている（OECD/NEA, 2012）。また，モデル化にあたっては，できる限り幅広い環境条件下の複数のデータセットに対し，モデルパラメータの適用性を確認するとともに，必要に応じてフローの前段階へとフィードバックすることが，十分な信頼性と適用性を有するモデル構築の観点から重要となる。

モデル化の具体的な事例として，5.2.3 のパラメータ設定の試行で活用するモンモリロナイトへの Am/Eu の収着のモデル化の例を図 5.2.2-5 に示す。これは，2011 年度のパラメータ設定でも活用した緩衝材/ベントナイト系の収着モデル/データベース開発（JAEA，2012）として進めているものの一例であり，既往のデータをもとに，一貫したモデル概念（1 サイトイオン交換＋1 サイト表面錯体モデル/静電補正無）とモデル化手法でパラメータの導出を行った例である。

核種収着データの選定については，pH，イオン強度，炭酸濃度などの主要パラメータをカバーする信頼性の高い複数のデータセットを抽出する。Am の収着データセットの選定にあたっては，3 価のアクチニドとランタニドの化学アナログの適用性（例えば，Rabung et al., 2005）を念頭に，Gorgeon(1994) の Am のデータと，Marques Fernandes et al.(2008)の Eu データをもとにモデル化を検討した。モデル化/パラメータ導出（図 5.2.2-5a）においては，TRLFS（時間分解レーザー誘起蛍光分析法）による分析データから，pH の上昇とともに外圏型の層間でのイオン交換から内圏型のエッジでの表面錯体へと支配的な収着機構が変化することを確認しつつ，データセットへのフィッティングから収着反応パラメータを導出する。さらに，既往の分析などの知見をもとに，炭酸を含む 3 元系表面化学種を考慮している。各データセットへのフィッティング結果の平均化により得られたモデルパラメータを，一連のデータセットに適用し，pH，イオン強度，炭酸濃度の影響の再現性を確認した（図 5.2.2-5b）。また，収着モデルに付随する不確実性についても，モデルの開発と適用において考慮すべき不確実性要因の抽出，複数の手法による不確実性の評価検討を実施しているほか（舘ほか，2010 ; OECD/NEA, 2012），独立したデータセットへの適用によるモデル検証を実施している。

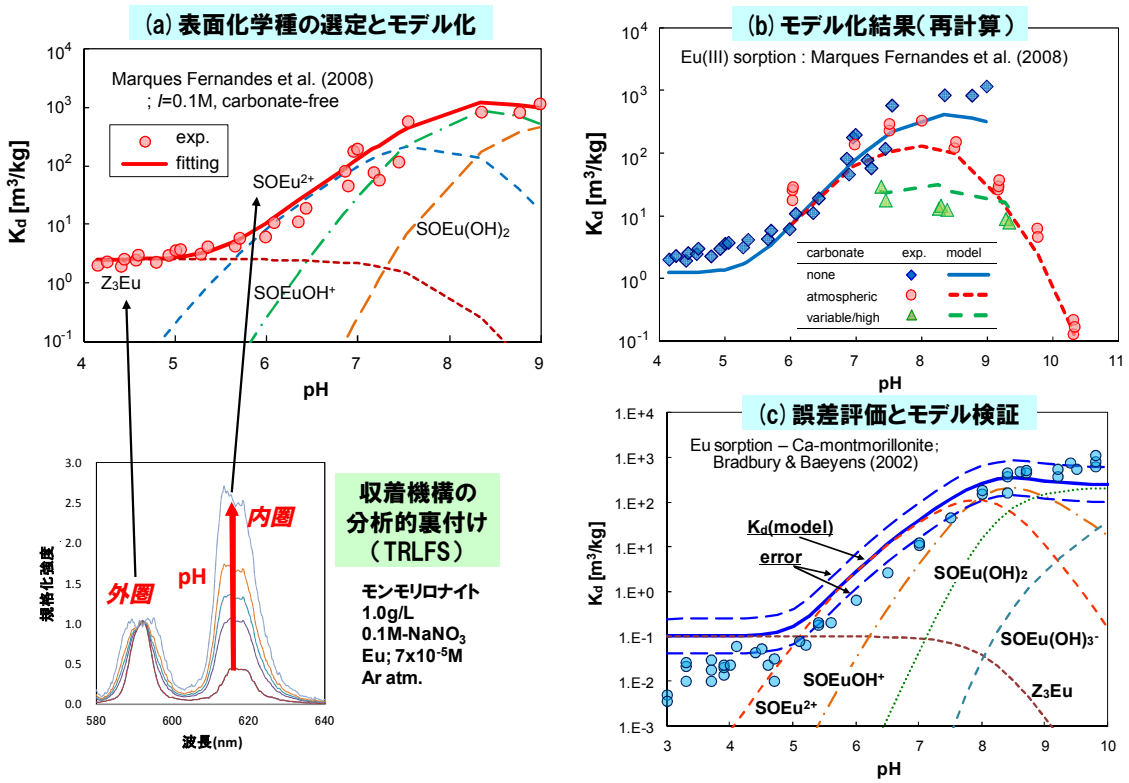


図 5.2.2-5　モンモリロナイトに対する Am/Eu の収着モデルの開発事例（JAEA，2012）

なお，収着モデルの信頼性や適用性は，そのモデルパラメータ導出に用いられたデータセットの信頼性や環境条件範囲に大きく依存する（例えば，OECD/NEA，2005）。このため，主要な環境条件をカバーする信頼性の高いデータセットの抽出とあわせ，幅広い環境条件下でのデータセットへの適用性の確認が重要となる。モデルの活用にあたっては，これらの点に十分な留意が必要である。

5.2.3　堆積岩を対象とした分配係数設定の試行事例

(1) 幌延の堆積岩系を対象とした分配係数の設定の試行方法

上記 5.2.2 に示した分配係数設定のフローに沿った分配係数の設定試行例として，幌延深地層研究計画の泥岩系における複数の鉱物組成と地下水条件を対象に，Cs, Ni, Am, Th の 4 核種の分配係数設定を試みた事例（Ochs et al., 2013）をもとに整理を行う。この設定事例では，上記で示した 3 つのアプローチのうち，半定量的条件変換手法（図 5.2.2-2 の②）と収着モデル（同図の③）による 2 つの手法による設定を検討している。5.2.1(3)に記載したように，幌延の堆積岩に対する収着は，イライトとスメクタイトの粘土成分に支配されると仮定した加性則（CA）モデルによって表現できることが確認されており，ここでの試行も同様の仮定に基づくものである。半定量的条件変換手法は，JAEA-SDB（Tachi et al., 2011a）から抽出されるデータを用い，上記 5.2.2(3)に示した方法に従って検討した（詳細は，Ochs et al., 2013 参照）。また，収着モデルについては，これまでベントナイト/モンモリロナイト系を対象に開発してきた収着モデル（舘ほか，2010；JAEA，2012）をもとに検討した。この試行では，地質環境条件の不確実性の考慮も念頭に，これまでの幌延深地層研究計画における稚内層の鉱物組成や地下水組成のいくつかの報告データをもとに，複数の想定条件を対象に評価を行っており，ここでは，表 5.2.3-1 に示す 2 条件についての設定結果（Case A, B）を提示する。なお，Case A および B は，Ochs et

al. (2013)における Case I 及び III に相当する。また，設定結果に加えて，Case B に相当する実験条件で取得してきた実測データとの対比をあわせて示す。

表 5.2.3-1　堆積岩系での分配係数の設定試行の想定条件

	鉱物組成（粘土成分）	地下水組成	参考とした出典
Case A	スメクタイト 11%，イライト 7%，クロライト 1%	pH6.8，イオン強度 0.26	JAEA (2007)
Case B	スメクタイト 16%，イライト 10%，クロライト 1%	pH8.5，イオン強度 0.26	Hama et al.(2007)，Tachi et al. (2011)

(2) Cs の設定事例

i) 半定量的条件変換による評価

最初に，JAEA-SDB から抽出されるスメクタイトやイライトなどの粘土鉱物に対する Cs の収着データを確認した。これらのデータは，信頼性の観点に加え，イオン強度，pH，核種濃度などに対する依存性に着目して抽出した。抽出されたデータ群は，図 5.2.3-1(a)に示すように，Cs の収着メカニズムはイオン交換であるため明瞭なイオン強度依存性が確認されるほか，一部 H^+との競合によるものと思われる依存性が認められるものの pH にはあまり影響されない（図 5.2.2-2 の②-1）。一方で，図 5.2.3-1(b)に示すように，スメクタイトへの Cs 収着においては Cs 濃度依存性がほとんど認められないのに対し，イライトの収着には顕著な Cs 濃度依存性が認められる。Cs のイライトへの収着の核種濃度依存性と，低濃度領域での Cs のイライトへの非常に高い分配係数は，イライトや雲母鉱物に特有な Frayed Edge Site の寄与によって説明されている（例えば，Bradbury and Baeyens, 2000）。幌延の堆積岩中の粘土成分の組成（表 5.2.3-1 に示した想定範囲は，イライトが 7-10%，スメクタイトが 11-16%）を考慮すれば，イライトとスメクタイトの中間的な値をとると考えられるが，ここでは，核種濃度が低い領域を対象としている観点から，よりイライトの寄与が大きいと想定される。そこで，液性条件が適用条件(0.26M)に比較的近く，核種濃度が低い条件（10^{-8}M 程度）で取得された Gorgeon(1994)と Poinssot et al.(1999)の 2 つのイライトへの Cs 収着データをソースデータとして抽出した（図 5.2.2-2 の②-2）。

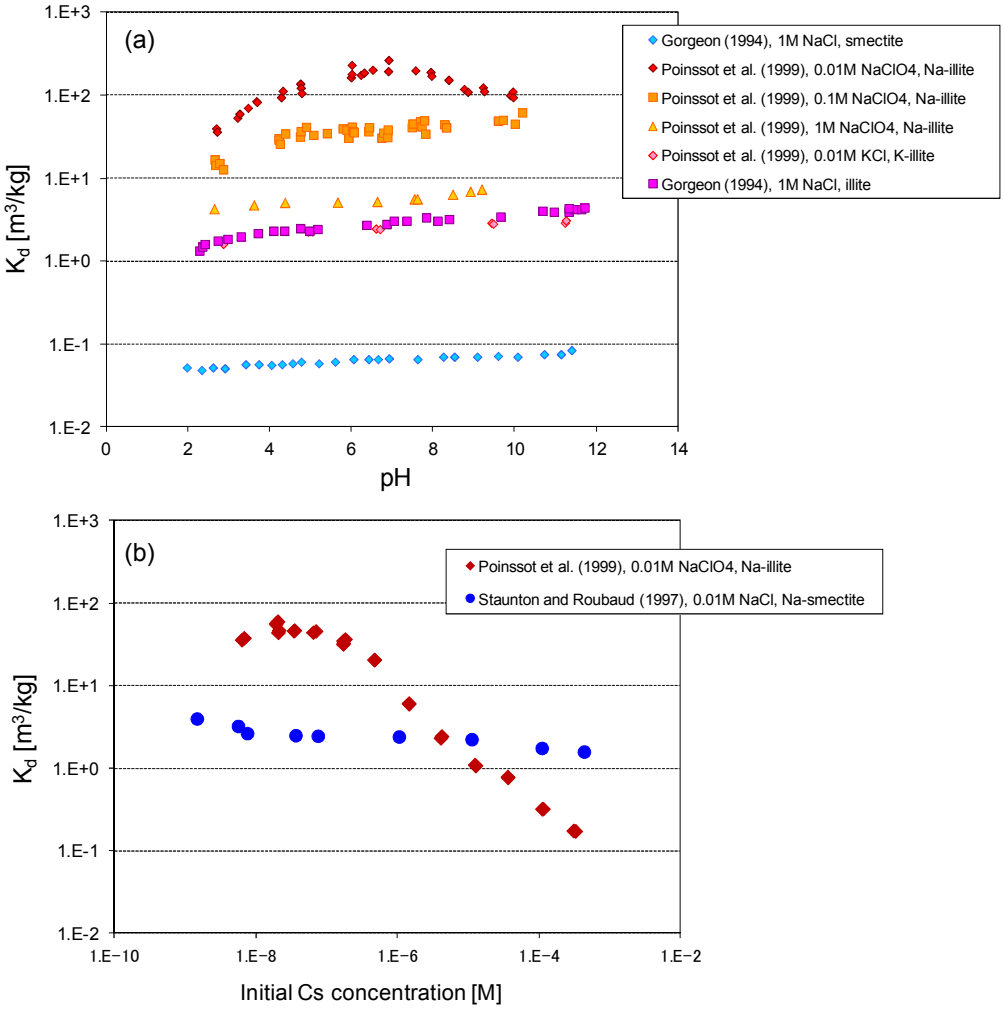


図 5.2.3-1　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Cs の収着データの(a)pH 及び(b)Cs 濃度依存性

変換係数については，上述した Cs の収着メカニズムを踏まえ，5.2.2(3)に記載した変換係数のうち，鉱物組成と競合イオンに関する変換係数（CF-min，CF-cmp）を設定して，条件変換を行った（図 5.2.2-2 の②-3）。Case B を例に，それぞれの変換ファクターの効果を含めた評価結果を，図 5.2.3-2 に示す。CF-min については，全ての粘土鉱物をイライトとみなして変換しており，Case B の場合，約 4 分の 1 の値に変換される(図 5.2.2-3 参照：CF-min ＝ 粘土鉱物含有量（評価条件）/ 粘土鉱物含有量（データソース条件）＝ 26%/100% = 0.26)。CF-cmp は陽イオンの総濃度により変換しており，高イオン強度から低イオン強度へ変換される場合（図中の Gorgeon のケース），K_d は増加する方向に変換がなされる(図 5.2.2-3 参照：Gorgeon のケースでは，CF-min＝ 陽イオン濃度（データソース条件）/ 陽イオン濃度（評価条件）＝ 1M/0.28M = 3.58)。図中の結果は順次補正を追加していった結果を表している。2 つのデータソースは液性などの違いにより K_d 値は大きく異なるが，鉱物組成と競合イオンに関する条件変化を行った結果，両者は概ね整合的な 10^0 m^3/kg オーダーと評価された。なお，個々の条件変換係数に付随する不確実性を，実測の分配係数，粘土鉱物含有量，pH や陽イオン濃度などのデータが有する一般的な不確実性を考慮する手法が検討されており（Bradbury and Baeyens, 2003b; Ochs et al., 2013），ここでもこの手法の適用により分配係数の不確実性の幅を評価した。

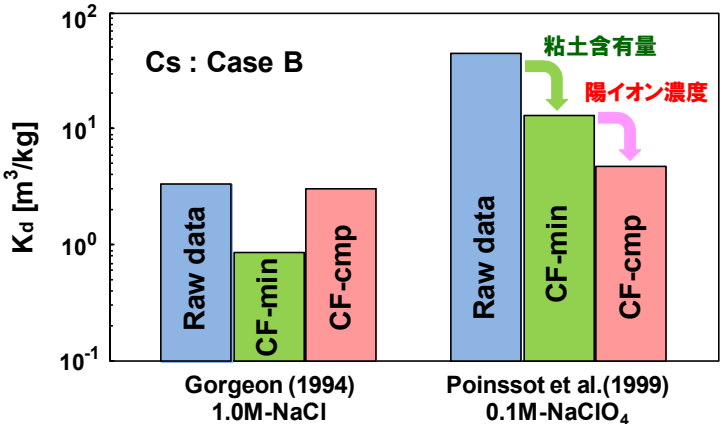


図 5.2.3-2　半定量的条件変換手法による堆積岩への Cs の分配係数評価例(Case B)

ii) 収着モデルによる評価

Cs の収着モデルについては，イライト，スメクタイトに対するイオン交換モデルが複数報告されており，i)に記載したようなイオン強度や核種濃度依存性を含む Cs 収着の傾向性を定量的に再現可能であるとされている（例えば，Wanner et al., 1996；Bradbury and Baeyens, 2000）。また，5.2.1(3)に示したように，幌延の堆積岩への Cs の収着データが，これら粘土鉱物の含有量とそれぞれのイオン交換モデルの加性則（CA）モデルによって，イオン強度および核種濃度依存性を含め再現可能なことを確認している（Tachi et al., 2011b）。ここでは，この際に用いたスメクタイトの 1 サイトイオン交換モデル（Wanner et al., 1996），イライトの 3 サイトイオン交換モデル（Bradbury and Baeyens, 2000）をそのまま利用し，地球化学コード PHREEQC（Parkhurst and Appelo, 1999）により計算を行った（図 5.2.2-2 の③-3）。幌延の堆積岩と模擬地下水とを一度平衡にさせた系を初期条件として，低濃度（10^{-8}M）の Cs とを反応させた。なお，全てのケースにおいて，クロライトの収着特性を考慮してスメクタイトと同様に取り扱った。

iii) 評価結果のまとめ

Case A と Case B の条件で，半定量的条件変換手法と収着モデルによって評価された Cs の分配係数を，Case B に相当する実験条件で取得された実測データ（Tachi et al., 2011b）とともに，図 5.2.3-3 に示す。ここで，半定量的条件変化手法の結果は，複数のデータソースからの評価結果を平均化した値と誤差を示している。なお，Cs の収着モデルについては，既存の誤差を考慮していないモデルパラメータを活用しているため，分配係数の不確実性については評価していない。半定量的条件変換手法で得られた値は，収着モデルによる計算結果より 1 桁以上高い結果となった。この原因として，半定量的条件変換においては，ソースデータの陽イオンが Na であり，低濃度領域で重要となるイライトの Frayed Edge Site における競合反応が補正できていないためと考えられる。例えば，K^+, NH_4^+といった，Cs と Frayed Edge Site で競合するイオン濃度のバランスが実際の系に近いデータを用いるか，これらの特異な競合効果までを補正因子に組み込んだ検討が，より現実的な条件変換のためには必要となる。一方，5.2.1(3)の結果同様，収着モデルによる評価結果は実測データに近い値となった。このような信頼性の高いモデルが存在し，条件変換が困難な系では，収着モデルによる評価を利用することが推奨される。

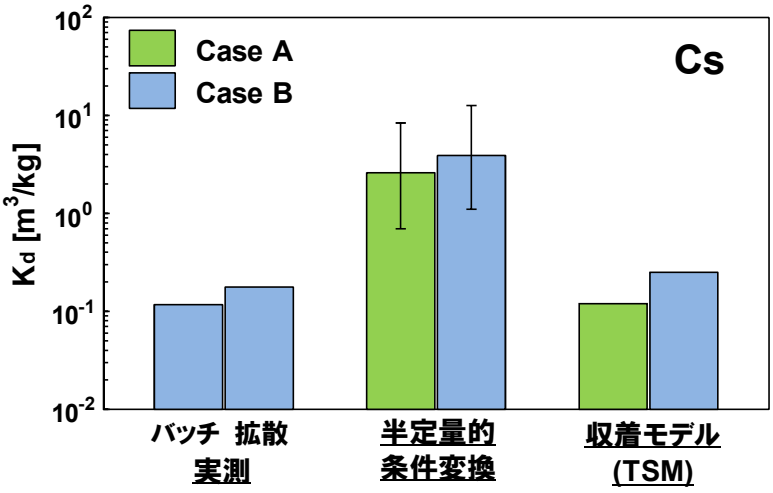


図 5.2.3-3　複数の手法と条件下での堆積岩への Cs の分配係数比較

(3) Ni の設定事例

i) 半定量的条件変換による評価

スメクタイト，ベントナイト，Opalinus 粘土岩に対する Ni の収着データを，JAEA-SDB から抽出した（図 5.2.3-4）。

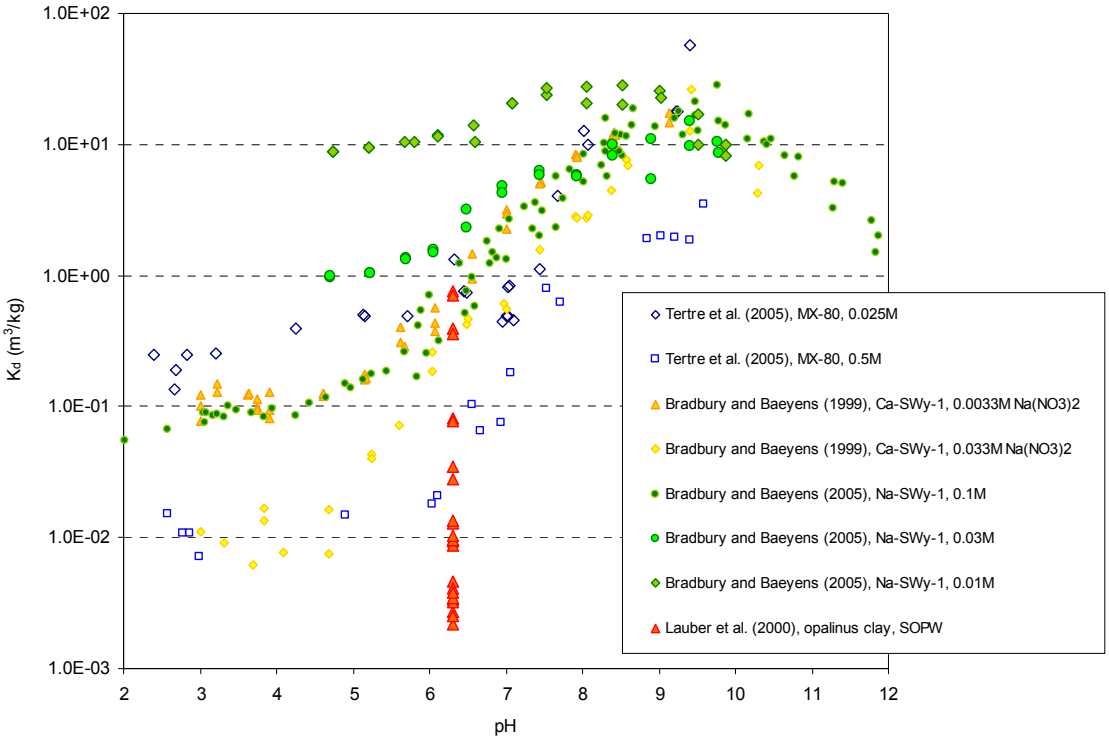


図 5.2.3-4　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Ni の収着データの pH 依存性

Ni の収着メカニズムは，低 pH 領域ではイオン交換が支配的であり，イオン強度に対する明瞭な依存性が認められる。一方で，pH の上昇とともに，粘土鉱物のエッジ面での表面錯体反応が卓越することによる急激な分配係数の増加, 逆にイオン強度にはあまり依存しない傾向が確認できる。ここには，イライトのデータが含まれていないが，例えば，Bradbury and Baeyens (2009)と比較した場合，分配係数の pH 依存性がスメクタイトとは若干異なるものの，それほど顕著な差ではない。幌延の堆積岩中の粘土成分の組成を考慮すれば，イライトとスメクタイトの双方が関与すると考えられるが，ここでは，Tertre et al. (2005)の MX-80 ベントナイト，Bradbury and Baeyens (1999)の Ca 型スメクタイト，Lauber et al.(2000)のイライトとスメクタイトを含む Opalinus 粘土岩をデータソースとして条件変換を検討した。なお，図中の Lauber et al.(2000)の K_d データが幅広い分布を示しているのは，Ni 濃度のパラメータとしているためであり，Ni の場合にも核種濃度依存性を考慮する必要性を示唆している。ここで，核種濃度については，それぞれ Tertre et al. (2005)が 10^{-5}M，Bradbury and Baeyens (1999)が 10^{-8}M でのデータであり，一方，Lauber et al.(2000)では濃度依存性を取得しており，適切な濃度での K_d データを抽出することが可能である。

変換係数については, 上述した Ni の収着メカニズムを踏まえ, 鉱物組成に関する変換係数（CF-min），pH に関する変換変換（CF-pH），スペシエーションに関する変換係数（CF-spec）を設定して，条件変換を行った。なお，低 pH，低イオン強度の系ではイオン交換反応の寄与が卓越し，その場合にはイオン競合（CF-cmp）の効果も含めて評価は複雑になる。上図より，イオン強度が低い条件では低 pH 領域でのイオン交換の寄与が大きいものの，ここで対象とする Case A の条件（pH 6.8，イオン強度 0.26）では表面錯体が卓越すると判断し，イオン競合（CF-cmp）の効果は考慮していない。Case A と B の評価結果を, それぞれの変換ファクターの効果を含め, 図 5.2.3-5 に示す。Tertre et al. (2005)と Bradbury and Baeyens (1999)のデータについては，設定条件に近いデータを抽出したため pH の変換係数を考慮していない。データソース間で若干の差異はあるものの，それぞれのケースで最終的に変換された K_d は概ね近い値となった。また，pH 6.8 の Case A から pH 8.5 の Case B へ，分配係数の明瞭な上昇が確認できた。なお，ここでも，条件変換係数に付随する不確実性評価手法（Bradbury and Baeyens, 2003b; Ochs et al., 2013）をもとに，分配係数の不確実性の幅を評価した。

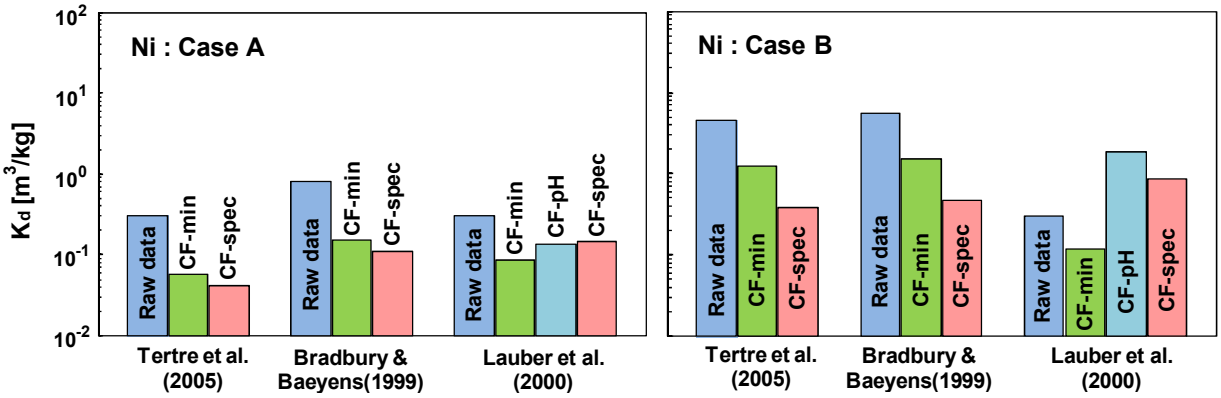


図 5.2.3-5　半定量的条件変換手法による堆積岩への Ni の分配係数評価例(Cases A / B)

ii) 収着モデルによる評価

Ni の収着モデルについては，ベントナイト/モンモリロナイト系を対象に開発してきた収着モデル（JAEA，2012）を適用する。このモデルは Bradbury and Baeyens(1997b)および Tertre et al.(2005)のデータセットに基づいている。既述のように，スメクタイトとイライトの収着挙動は若干異なるものの，その差異はそれほど顕著ではないことから，ここではスメクタイトのモデルが，スメクタイトとイライトの双方の収着を表現できるという仮定に基づき，モデル計算を行った。計算は地球化学コード PHREEQC（Parkhurst and Appelo, 1999）により行った。なお，収着モデル開発において，十分な信頼性を有するデータセットとそれらをもとに構築されたモデルによる計算結果との直接的な比較によって，分配係数の不確実性を評価する手法を検討してきており（JAEA，2012），ここでは，この情報をもとに不確実性を評価した。

iii) 評価結果のまとめ

Case A と Case B の条件で，半定量的条件変換手法と収着モデルによって評価された Ni の分配係数を，Case B に相当する実験条件で取得された実測データ（JAEA, 2011）とともに，図 5.2.3-6 に示す。半定量的条件変換手法で得られた値と収着モデルによる計算結果は概ね整合的であり，Case A から Case B への pH 上昇に伴い，分配係数も増加する傾向となった。また，不確実性の評価結果は，条件変換手法の方が，より広い幅を与える結果となった。一方で，Case B 相当の実測データは，全体の不確実性の範囲の中にあるが，条件変換手法と収着モデルによる評価結果より数倍高い傾向を示した。今回の評価では，条件変換手法と収着モデルの双方において，スメクタイトの収着データをもとにしており，この点が過小評価につながっている可能性がある。上述の通り，イライトとスメクタイトに対する Ni の収着の pH 依存性を比較した場合,イライトの方が若干高い分配係数を示しており（JAEA, 2012），イライトとスメクタイトのそれぞれの寄与を定量化し，CA モデルによって評価することによって，実測との差異が改善される可能性がある。

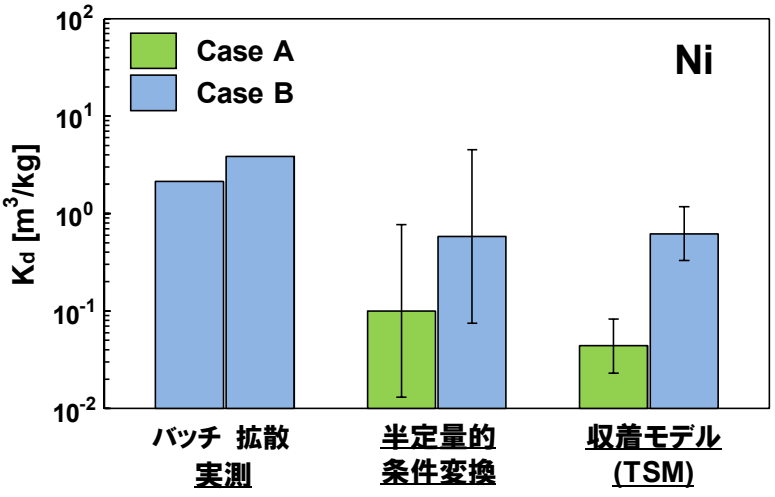


図 5.2.3-6　複数の手法と条件下での堆積岩への Ni の分配係数比較

(4) Am の設定事例

i) 半定量的条件変換による評価

スメクタイト, イライト等の粘土鉱物に対する Am/Eu の収着データを, JAEA-SDB から抽出した（図 5.2.3-7）。5.2.2(4)のモデル化手法で述べたように，3 価のアクチニドとランタニドの化学アナログの適用性（例えば，Rabung et al., 2005）を考慮し，Am に加えて，Eu のデータもあわせて抽出している。Am/Eu の収着メカニズムは，Ni と同様であり，低 pH 領域ではイオン交換が支配的であり，イオン強度に対する明瞭な依存性が認められる。一方で，pH の上昇とともに，粘土鉱物のエッジ面での表面錯体反応が卓越することによる急激な分配係数の増加，逆にイオン強度にはあまり依存しなくなる傾向が確認できる。ここでの抽出データには，スメクタイトとイライトの双方のデータが含まれ，類似する条件でのデータはかなり整合的である。例えば，イオン強度 0.1M のデータに着目すると，Gorgeon(1994)と Marques Fernandes et al.(2008)のスメクタイト，Gorgeon (1994)と Wang et al.(1998)のイライトと，それぞれ 2 つの pH 依存性データ，全部で 4 つの pH 依存性データが概ね整合的であり，スメクタイトとイライトへの Am/Eu の収着はほぼ同程度と考えることができる。一方で，5.2.2(4)で例示したように，Am/Eu の場合には，炭酸を含む 3 元系の表面錯体モデルの考慮が重要となる。炭酸影響を含むデータとしては Marques Fernandes et al.(2008)の一部のデータが該当するが，ここでは，Gorgeon (1994)のイライトのデータを採用し，炭酸共存の影響をスペシエーションに関する変換係数（CF-spec）として考慮することとした（なお，Ochs et al. (2013)では，Lauber et al.(2000)の Opalinus 粘土岩への分配係数をデータソースとした検討も試みているが，pH 依存性の補正が困難であるとされた）。

変換係数については，Am/Eu の収着メカニズムを踏まえ，鉱物組成に関する変換係数（CF-min），スペシエーションに関する変換係数（CF-spec）を設定して，条件変換を行った。なお，pH が同程度のデータを抽出したため，pH の補正（CF-pH）は不要であり，また，図 5.2.3-7 に示すように，pH が低い Case A においても表面錯体が支配的であるため，イオン競合（CF-cmp）の補正は不要と判断された。Case A と Case B の評価結果を，それぞれの変換ファクターの効果を含め，図 5.2.3-8 に示す。ここで，スペシエーションに関する変換係数（CF-spec）については，炭酸錯体が収着に寄与しないとする補正（CF-spec/a）と，寄与すると仮定する補正（CF-spec/b）を比較検討している。図 5.2.3-8 に示すように，この炭酸錯体の収着への寄与を考慮するかどうかは，分配係数の評価に大きく影響し，その影響は pH が高いほど顕著となり, 両者の差は 4 桁にも及ぶ。5.2.2(4)の図 5.2.2-5 で議論したように，粘土鉱物のエッジへの Am や Eu の収着において炭酸系の表面化学種が確認されていることから（Marques Fernandes et al., 2008; 2011）, ここでは CF-spec/b の評価結果を採用することとした。ただし，CF-spec/b は過大評価になる可能性もあり，この点は今後さらに検討が必要となる。

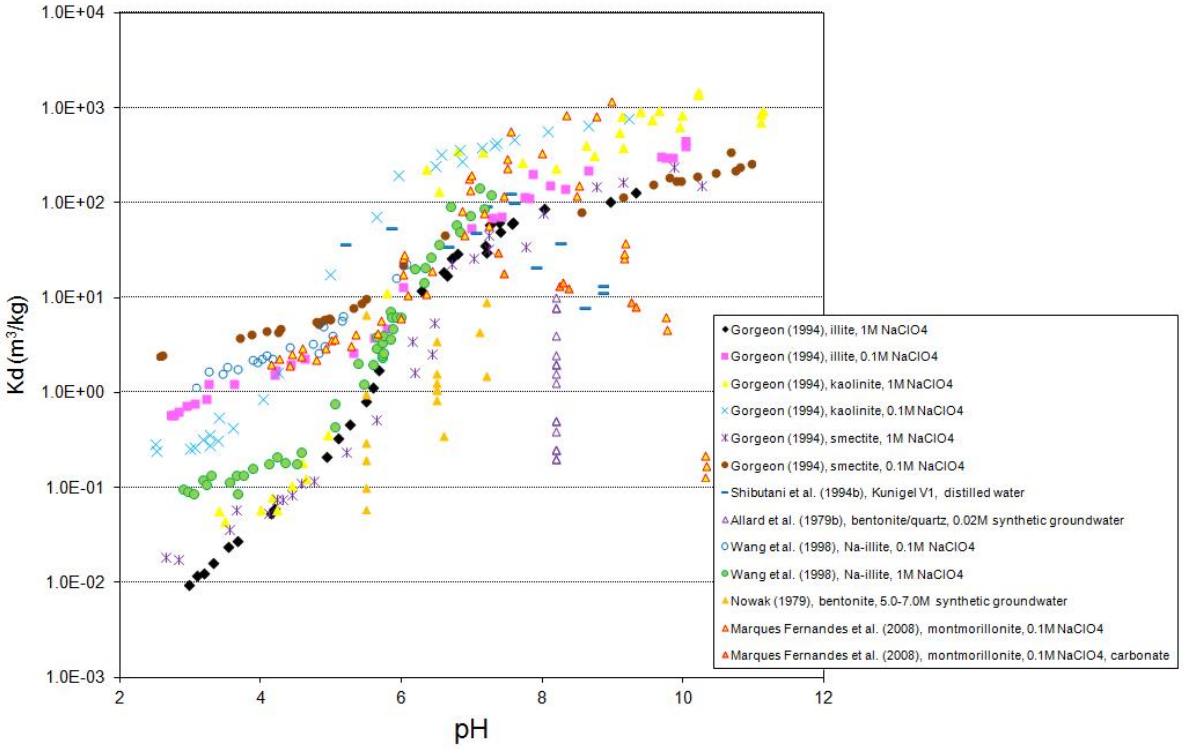


図 5.2.3-7　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Am の収着データの pH 依存性

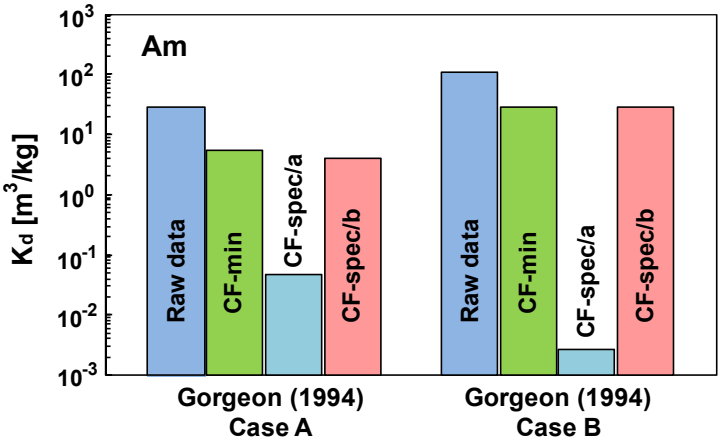


図 5.2.3-8　半定量的条件変換手法による堆積岩への Am の分配係数評価例(Cases A / B)

ii) 収着モデルによる評価

Am/Eu の収着モデルについては，ベントナイト/モンモリロナイト系を対象に開発してきた収着モデル（JAEA, 2012）を適用する。このモデルは 5.2.2(4)で示したように，Gorgeon(1994)と Marques Fernandes et al.(2008)のデータセットに基づいている。また，幌延の地下水環境で重要となる炭酸錯体の収着への寄与についても，炭酸系の表面化学種のモデルパラメータを含んでおり，定量的に表現可能である。図 5.2.3-7 において，Am と Eu のスメクタイトとイライトの収着挙動は概ね整合的であることが確認できた。ここではスメクタイトのモデルが，スメクタイトとイライトの双方の収着を表現できるという仮定に基づき，PHREEQC によりモデル計算を行った。

iii) 評価結果のまとめ

Case A と Case B の条件で，半定量的条件変換手法と収着モデルによって評価された Am の分配係数を，Case B に相当する実験条件で取得された実測データ（JAEA, 2011）とともに，図 5.2.3-9 に示す。双方の手法において，Ni の場合と同様の方法に基づき，分配係数の不確実性の幅を評価した。半定量的条件変換手法で得られた値は，収着モデルによる計算結果よりも数倍高い値を示した。Case A から Case B への pH 上昇に伴う分配係数の増加傾向は，条件変換手法も収着モデルも整合的に表現できている。Case B 相当の実測データは，半定量的条件変換手法による評価結果と概ね整合する結果となった。一方，収着モデルによって計算された分配係数は保守的な値を与え，不確実性の幅も考慮すれば，実測データも概ねカバーする結果となる。上記の通り，スメクタイトとイライトで pH 依存性は概ね一致しているものの，炭酸系の表面化学種の効果も含めて，イライトの信頼性の高い収着データに基づくモデル化についても今後検討する必要がある。

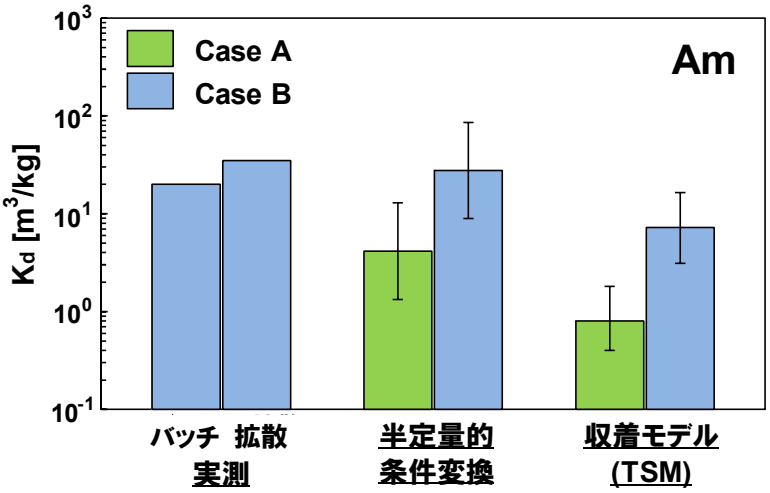


図 5.2.3-9　複数の手法と条件下での堆積岩への Am の分配係数比較

(5) Th の設定事例

i) 半定量的条件変換による評価

JAEA-SDB から抽出したスメクタイトなどの粘土鉱物，ベントナイトや粘土岩に対する Th の収着データは，図 5.2.3-10 に示すように，Ni や Am/Eu と比較して利用可能なデータが限られる。Bradbury and Baeyens (2003a, 2005)のモンモリロナイトへの Th の分配係数は非常に高い K_d 値を示している。一方で，Bradbury and Baeyens (2003a, 2003b)による核種濃度をパラメータとした収着試験では，Opalinus 粘土と MX-80 に対して，スメクタイトより 1 桁程度低い分配係数を報告している。なお，Baston et al.(1992)のデータ群は，London 粘土とセメント平衡水の系を対象としたもので，幌延の環境条件への条件変換のためのデータソースとしては適切ではない。

Th の収着データについては，粘土鉱物のバリエーションや環境条件の依存性に対する傾向性が確認できず，ここでは，イライトとスメクタイトの双方を含み，炭酸を含む地下水組成の類似性も考慮して，Bradbury and Baeyens (2003b)の Opalinus 粘土岩への分配係数をデータソースとして選択した。あわせて Bradbury and Baeyens (2003a)の MX-80 ベントナイトのデータも比較検討の対象に加えた。

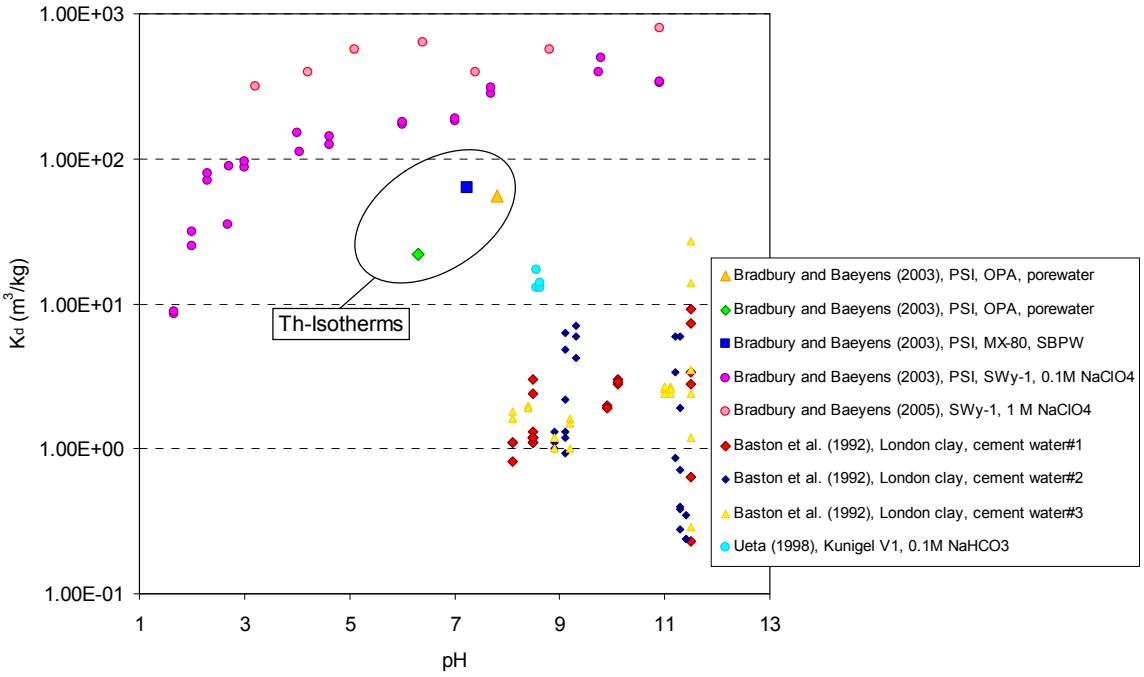


図 5.2.3-10　JAEA-SDB から抽出された粘土鉱物への Th の収着データの pH 依存性

変換係数については，上記 Am と同様の収着メカニズムを踏まえ，鉱物組成に関する変換係数（CF-min），pH に関する変換係数（CF-pH），スペシエーションに関する変換係数（CF-spec）を設定して，条件変換を行った。なお，Am と同様の理由で，イオン競合（CF-cmp）の補正は不要と判断した。Case B の評価結果を，それぞれの変換ファクターの効果を含め，図 5.2.3-11 に示す。ここで，スペシエーションに関する変換係数（CF-spec）については，上記 Am での議論を踏まえて，炭酸錯体が収着に寄与すると仮定する補正（CF-spec/b）を採用した。固相，液相条件が異なる 3 つのデータソースから最終的に変換された K_d は概ね整合的であり，また，Case A から Case B への pH 上昇に伴う分配係数の増加も確認できた。

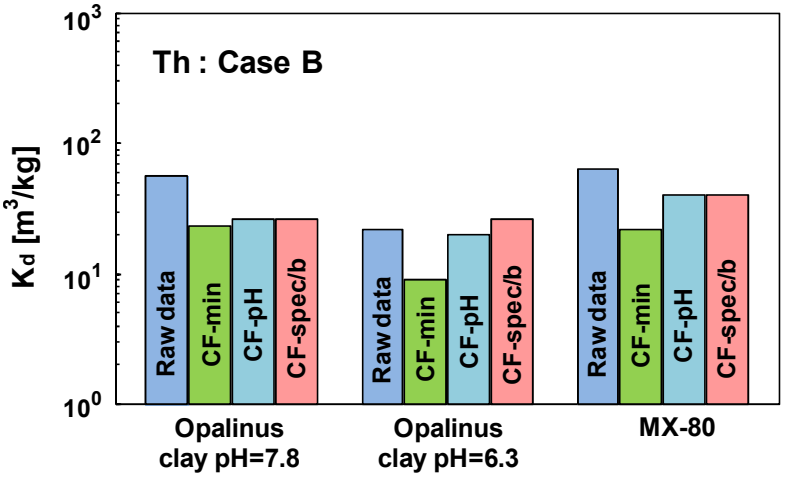


図 5.2.3-11　半定量的条件変換手法による堆積岩への Th の分配係数評価例(Case B)

ii) 収着モデルによる評価

Th の収着モデルについては，ベントナイト/モンモリロナイト系を対象に開発してきた収着モデル（JAEA，2012）を適用する。このモデルは，Bradbury and Baeyens (2003a)のデータセットに基づいている。このデータセットは，イオン強度と pH をパラメータにしているものの，炭酸の影響を含んでおらず，炭酸系の表面錯体の寄与が考慮できていないモデルである。幌延の堆積岩環境のような炭酸錯体が重要となる系での適用性は不十分なモデルと考えられるが，ここではその適用性の限界と課題を確認するため，そのまま適用を試みた。

iii) 評価結果のまとめ

Case A と Case B の条件で，半定量的条件変換手法と収着モデルによって評価された Th の分配係数を，Case B に相当する実験条件で取得された実測データ（JAEA, 2011）とともに，図 5.2.3-12 に示す。収着モデルによる計算結果は，半定量的条件変換手法で得られた値よりも 2 桁程度低い値を示した。Case A から Case B への pH 上昇に伴う分配係数の変化は，条件変換手法も収着モデルのいずれでも顕著ではない。Case B 相当の実測データは，不確実性の範囲を考慮すれば半定量的条件変換手法による評価結果の範囲に対応する結果となった。一方，収着モデルによって計算された分配係数は，上述したように炭酸系の表面化学種の寄与を考慮しておらず，予想通り大幅な過小評価となった。このように収着モデルの適用範囲には留意が必要であり，このような場合には，限られたデータをもとに半定量的条件変換手法を採用する必要がある。

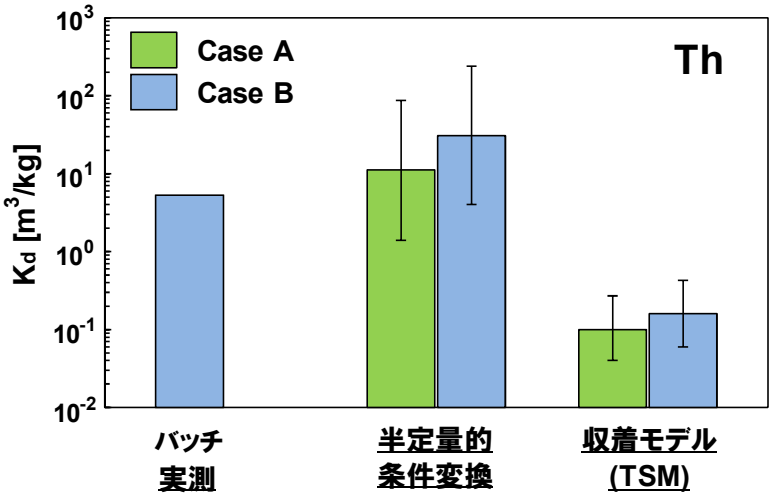


図 5.2.3-12　複数の手法と条件下での堆積岩への Th の分配係数比較

5.2.4　花崗岩を対象とした分配係数設定の試行

5.2.2 に示した複数の分配係数設定アプローチのうち，既存の実測データに基づく設定アプローチ（図 5.2.2-2 の①）について，2011 年度の共同研究においては，第 2 次取りまとめの経験や SKB の SR-Can 報告書の調査結果をもとに，フローを作成するとともに，Cs, Am, Np の 3 核種を対象に設定を試行した（江橋ほか，2012）。2012 年度は，より多様な核種の設定を試行しつつ，図 5.2.2-2 に示した設定フローの妥当性の確認と留意点や課題の抽出を行った。ここでは，試行例のうち，設定作業上の特徴的な判断ポイントが多く含まれていた U を挙げてその結果を概括的に整理する。

(1) 前提条件の確認

パラメータを設定するに際しては，まず，性能評価からのニーズをもとに，分配係数パラメータセットの要件と目標を設定する必要がある。本報では, 作業フローの妥当性検討を目的としているため, 第 2 次取りまとめでの方針に倣って設定する。また，作業フローにある SDB の整備は JAEA で継続的に実施されている状況であるため，本検討では最新の JAEA-SDB を使用することとし，データベースの整備作業自体は実施しないこととする。

パラメータ設定作業に入る前に，固相や元素などの収着メカニズムに関する基礎情報を確認し，その情報に基づいて分配係数設定と条件アプローチ手法を決定する。ここでは，対象とする岩石の鉱物学的性質と収着挙動に影響する特性を把握した上でバッチーインタクトの整合性を検討して補正ファクターなどを設定しておく必要がある。

本研究で検討対象とする花崗岩は構成鉱物の不均質性や亀裂部の取扱いなど変動要因が多いため，収着モデルによるパラメータの設定や条件変換係数の設定が難しい岩石の一つである。5.2.1(1)でも記述したように，花崗岩については亀裂部の取り扱いやデータ取得時の粉砕の効果などのモデル化に課題が残っているため，概要調査においてサンプリングした実岩石試料を用いた収着試験を実施したとしても，その不確実性は低減できない。また，調査時間が限られているため，多くの元素についての十分な量の実測データを得ることは難しい。そこで，現実的な対応として，既存の実測分配係数データベースを用いて，多様な花崗岩系岩石に対する実測データを基にして一般的な分配係数と変動幅を設定する（図 5.2.2-2①の「実測データに基づく設定アプローチ」）こととする。次に，バッチーインタクトに関する変換係数（CF-intact）を考慮し，実サイトでの収着分配係数を設定する。本検討では実サイトの試料を用いた設定作業では無いため，変換係数の設定まではしないが，環境条件の違いを補正して分配係数を設定する手法についての検討作業は，想定サイトを用いた予備的検討の際には優先的に実施すべき重要な作業項目となる。

一方，元素側の基礎情報としては，収着挙動に影響の大きい価数や支配化学種を確認する必要がある。対象とする U は酸化還元電位に鋭敏であり，降水系還元性高 pH 型（FRHP）地下水の条件においては U(IV)，降水系酸化性高 pH 型（FOHP）地下水の条件においては U(VI)で存在すると考えられる。母岩領域における核種移行に関与する液相化学種については，原則として瞬時平衡をとると想定し，周辺環境の酸化還元電位によって IV 価/VI 価が決められるものとする。ただし，母岩領域の地下水の酸化還元条件は，深度や水理によっても大きく変動するため，本検討においては，U(IV)，U(VI)両方の分配係数を設定することとする。考慮する地下水組成の変動や熱力学データの不確実性のために支配化学種の種類や存在割合にも不確実性が存在する。なおかつ複数の化学種が競合していることも合わせて考慮すると，考慮する収着メカニズムは複雑となる。

本検討においては，第 2 次取りまとめにおける化学種設定を踏襲し，還元性の FRHP 地下水条件における支配化学種を $U(OH)_2(CO_3)_2^{2-}$, $U(OH)_4(aq)$, 酸化性の FOHP 地下水条件においては $UO_2(CO_3)_3^{4-}$, $UO_2(CO_3)_2^{2-}$とする。U のスペシエーションには， pH と炭酸濃度に対する依存性があるので，収着挙動にもその影響が現れると推測できる。既存の実測データに基づく設定アプローチに則って分配係数パラメータを設定する際には，pH，炭酸濃度や酸化還元電位で対象データを絞り込む必要がある。

(2) 還元性地下水条件での U(IV)の分配係数設定

i) SDB を用いたデータの抽出・分析，対象データの絞り込み

既存データを用いた最初の作業として，検討対象とするデータの収集および収集したデータの信頼性評価が挙げられる。本検討では作業フローの留意点や課題の抽出を目的としているため SDB 整備までは対象としていないが，事業段階での作業であれば SDB 構築の際に収蔵されるデータについての信頼度評価が必要となる。分配係数設定作業内で用いるデータの適切性については，オリジナルの試験条件まで遡って確認する必要がある。本検討で用いた最新の JAEA-SDB（例えば，Tachi et al., 2011a；陶山・舘，2012）では，信頼度が未評価のデータが多数含まれており，これらの評価の進捗が望まれる状況である。

本検討では，JAEA-SDB 収録データから unreliable と評価されたものを除いたデータを対象とした。イオン強度（I）を $0.0001 \leqq I \leqq 0.1$ として海水系を除外し，次に U の価数で分別して U(IV)-花崗岩系データを抽出した。SDB 上で U(IV)/U(VI)を明記してないデータも多いことから，Eh < 0 mV であるもの，雰囲気制御してあるもの，雰囲気制御しつつ還元剤を用いているものを U(IV)のデータとして扱い，他は U(VI)である可能性が高いものとして本検討からは除外した。データの詳細を検討し，酸化還元条件の不確実さから 1 データを除外した。ここで除外したデータは U(VI)のデータとして扱う。

残ったデータを用いて，pH，温度，初期添加核種濃度，平衡期間などに対する依存性を SDB の機能を用いてグラフ化してチェックし，FRHP 地下水についての妥当と考えられるデータを抽出した。

pH 依存性を確認した後に試験期間を重ねて検討してみたが（図 5.2-4-1 参照），試験期間は 5 日未満の短期データと 120 日以上の長期データが存在するのみで，分布域についての傾向性は見て取れない。pH 領域を分けてみれば，pH8 付近と pH10 付近では多少分布域に差がある様にも見えるが，どちらもある程度の幅を持ってばらついていて傾向性を議論できないため，この段階で特定のデータを除外することは考えられない。

他に pH－温度，pH－初期核種濃度の傾向性を確認してみたが，明確な偏向は見られなかったため，この段階でのデータ除外はしないものとする。ここまでの作業の結果，対象データは pH8.2-10.1 の範囲に絞りこめた。

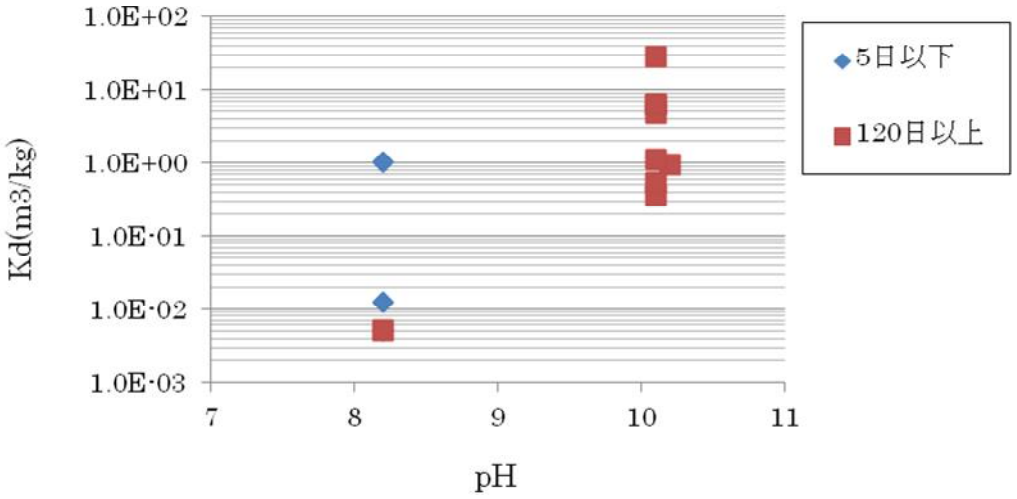


図 5.2.4-1　U(IV)の花崗岩(降水系) に対する分配係数の pH と試験期間依存性($0.0001 \leqq I \leqq 0.1$)

ii) 化学アナログの適用性の検討

アクチノイド(IV)の化学アナログの適用を検討するため，Th(IV)，Np(IV)，Pu(IV)のデータと比較した。これらはいずれも還元性降水系地下水条件で水酸化炭酸錯体の化学種を形成すると考えられている。そこで信頼度が unreliable 以外の条件で，0.0001≦*I*≦0.1，pH7～11 の範囲のデータを抽出し，U(IV)データと合わせて比較した。Np，Pu については価数を表 5.2.4-1 に示す条件で区切り，IV 価のデータを抽出した。また，Np データにはイオン強度が調整されないまま SDB 上で *I*=0 と記載されているが，信頼度評価されて利用可となっているものがある。これらを本検討で用いるため，イオン強度範囲を 0～0.1 として抽出した。抽出されたデータの実際の pH 範囲は 7.6～10.1 となり，計 120 件となった。pH 依存性を図 5.2.4-2，ヒストグラムを図 5.2.4-3 として示す。

表 5.2.4-1　Th(IV)，Np(IV)，Pu(IV)，U(IV)データの抽出条件

元素	SDB からの分配係数データ抽出条件
Th	0.0001≦*I*≦0.1，pH 7～11，信頼度が unreliable 以外
Np	0≦*I*≦0.1，pH 7～11，信頼度が unreliable 以外，SDB 上で IV 価と判定されているものおよび酸化還元電位が負であったもの
Pu	0.0001≦*I*≦0.1，pH 7～11，信頼度が unreliable 以外，SDB 上で IV 価と判定されているものおよび酸化還元電位が 0～-400mV であったもの（低すぎると III 価まで還元されてしまうため）
U	0.0001≦*I*≦0.1，pH 7～11，信頼度が unreliable 以外

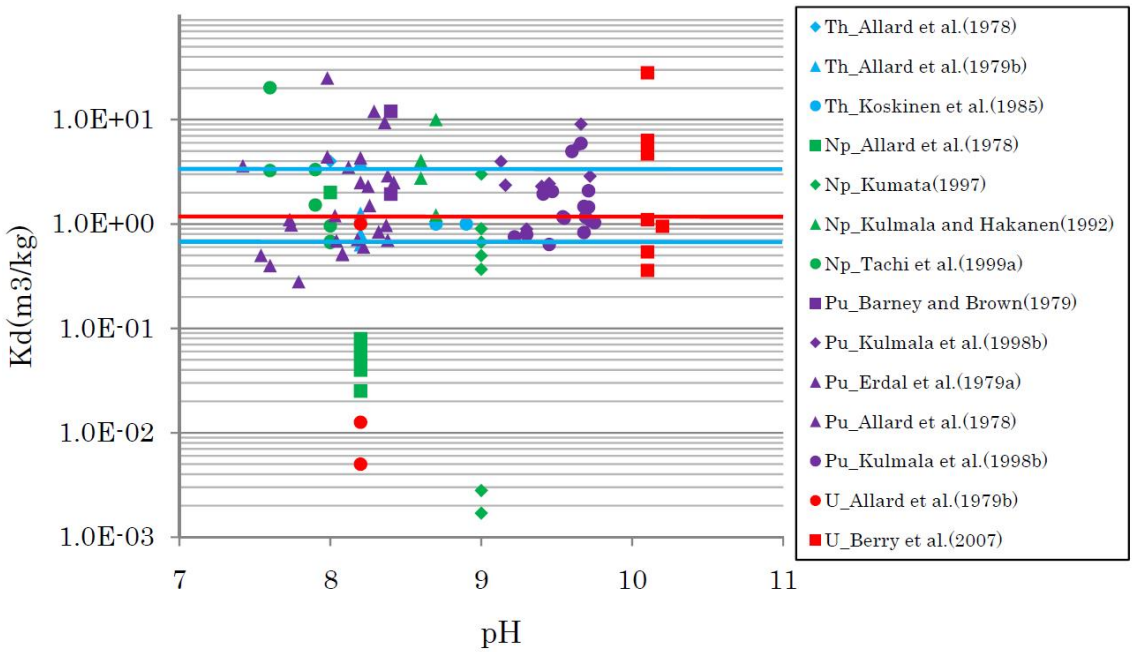


図 5.2.4-2　U(IV)，Th(IV)，Np(IV)，Pu(IV)の花崗岩(降水系) に対する分配係数の pH 依存性

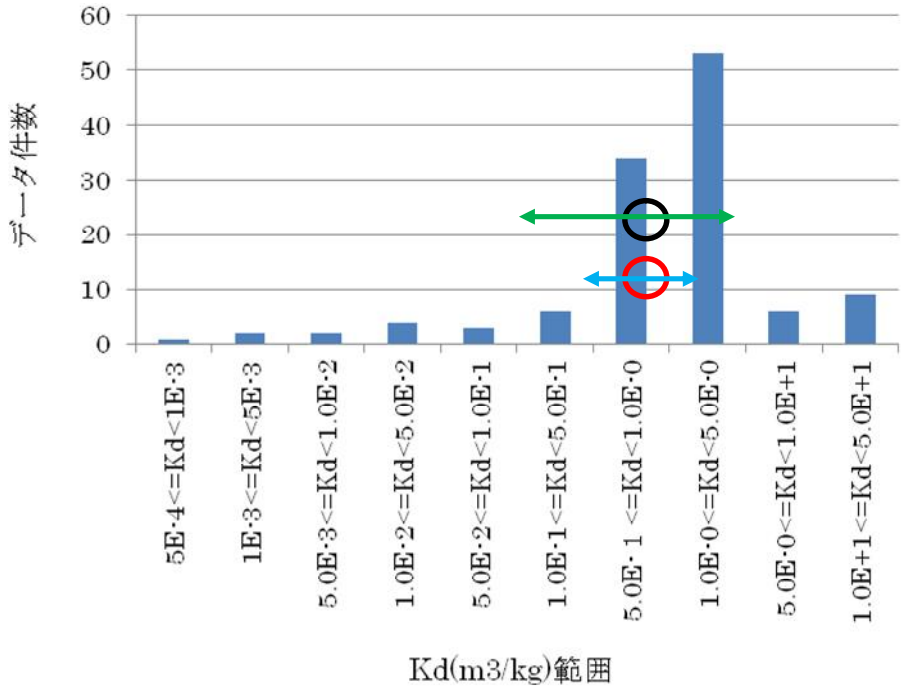


図 5.2.4-3　U(IV)の花崗岩(降水系)に対する分配係数の分布状況

図 5.2.4-2 を見ると，U(IV)，Th(IV)，Np(IV)，Pu(IV)の花崗岩(降水系) に対する分配係数はよく一致しているように見える。そこで，これらデータをすべて総括して An(IV)の分配係数として SR-Can 方式(Crawford, et al., 2006)を参照して設定してみると表 5.2.4-2 のようになった。比較のために，U(IV)のデータのみを用いて算出した値も掲載する。3 つの中央値と平均値，データ分布の傾向は食い違うものではなく An(IV)の値を U(IV)の値として用いることは類似性から問題ないものであると考えられる。

表 5.2.4-2　　An(IV)の花崗岩に対する分配係数（降水系）設定の試行結果

算出方法	設定値	不確実性
JAEA-SDB+SR-Can 方式	中央値(赤線，赤丸)：1.10	25/75 パーセンタイル(青線,青矢印)：6.80×10^{-1} ― 3.25
JAEA-SDB_An(IV)+ヒストグラムから統計学的に算出	平均値(黒丸)：1.05	1σの変動幅(緑矢印)：1.66×10^{-1} ― 6.68
参考）U(IV)のみのデータから SR-Can 方式で算出した値	中央値：9.75×10^{-1}	25/75 パーセンタイル：1.26×10^{-2} ― 6.3

An(IV)については化学アナログを用いることが適切と考えられたが，分配係数を設定する場合や現象論的収着モデルに基づくアプローチにおける化学アナログの適用にあたっては，詳細に実験条件を比較しながら化学的アナログ性の適用範囲を慎重に検討する必要がある。

(3)　酸化性地下水条件での U(VI)の分配係数設定

U(IV)設定作業においてイオン強度範囲を $0.0001 \leqq I \leqq 0.1$ として海水系を除外したものから U(IV)データを抽出後の残りのデータ群を対象として検討を実施した。

次に，pH，温度，初期添加核種濃度，平衡期間などに対する依存性を図 5.2.4-4 に示すようにグラフ化してチェックし，FOHP 地下水についての適切と考えられるデータを抽出した。検討対象となるデータのうち，Erdal et al.(1979a)のデータは pH の実測値がないため図 5.2.4-4 上に記載してないが，実験条件から見ると pH 7-8 程度の地下水と考えられた。取得された分配係数の値は 4×10^{-4} m^3/kg から 1×10^{-2} m^3/kg までばらついているが，他データと比べて極端に外れた値ではない。しかし，本検討では，明確な実験条件のデータから分配係数を設定することを重視してこれらのデータを検討から除外した。pH については，pH 5.5 および pH 10 以上のデータを検討から除外し，pH 領域を 7.5～9.5 の範囲に絞る。

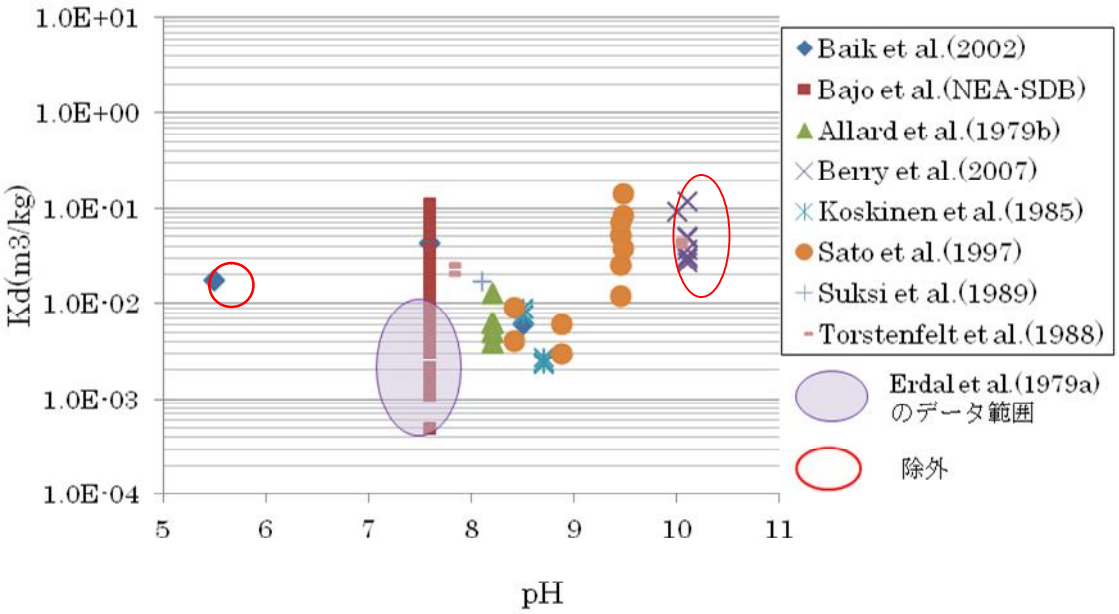


図 5.2.4-4　U(VI)の花崗岩(降水系)における分配係数の pH 依存性(0.0001≦*I*≦0.1)

その他，温度，初期添加核種濃度，反応期間については大きな偏りや目立った傾向，バラツキは見られなかったため，以上の絞り込み作業の結果残ったデータを分配係数設定の対象としヒストグラムに示した（図 5.2.4-5)。1×10^{-3} m^3/kg 以下のデータ件数に 0 m^3/kg のデータも含めたため視覚的な評価には必ずしも適切なものでは無いが，極端に外れている値はなく，分布状況も正規分布に近い形となっているため，ある程度の信頼性を保っていると考えられる。

SR-Can 方式で中央値，25/75 パーセンタイルを求め，表 5.2.4-3 に示す。

今回は検討対象に分配係数 0 のデータが含まれているため，SR-Can 方式で用いたものと同じデータを使っての平均値の算出は不可能であるが，参考のために分配係数 0 のデータを除いて正規分布を仮定して統計学的に平均値と分散を試算し，表 5.2.4-3 に示す。

データの件数が多いため，分配係数 0 のデータを除外して実施した統計学的な手法による設定値とも概ね一致しており，妥当な設定値と考えられる。

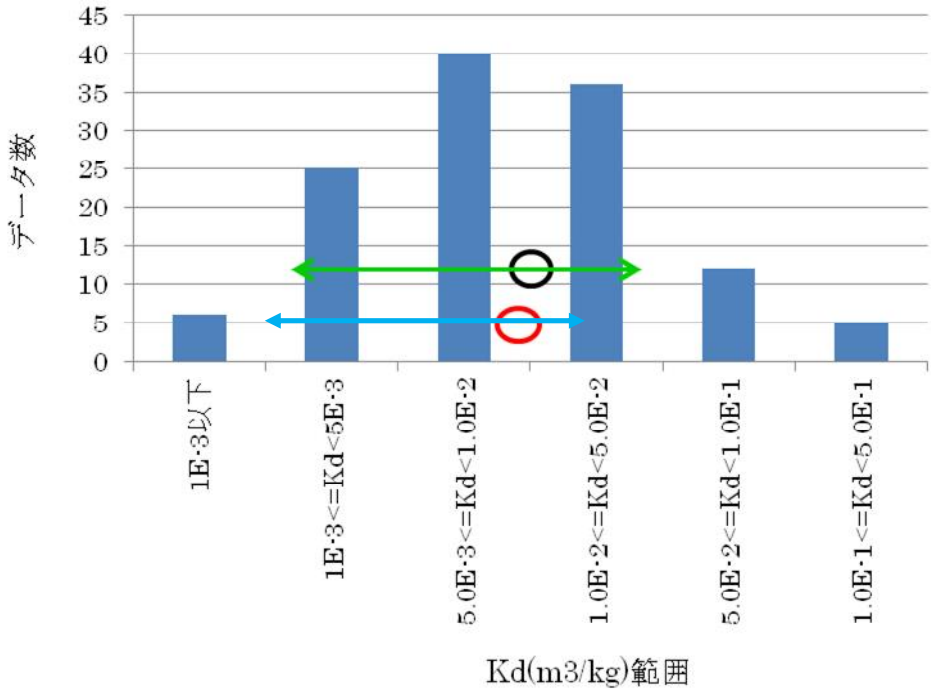


図 5.2.4-5　U(VI)の花崗岩(降水系)に対する分配係数の分布状況

表 5.2.4-3　U(VI)の花崗岩に対する分配係数（降水系）設定の試行結果

算出方法	設定値	不確実性
JAEA-SDB+SR-Can 方式	中央値(赤丸)：8.25×10^{-3}	25/75 パーセンタイル(青矢印)：4.40×10^{-3} － 2.48×10^{-2}
JAEA-SDB+ヒストグラムから統計学的に算出	平均値(黒丸)：1.07×10^{-2}	1σの変動幅(緑矢印)：3.18×10^{-3} － 3.58×10^{-2}

U(IV)のようにデータ数が少なくそもそも正規分布とは言い難いばらつきのあるもの，対数換算しての平均値算出ができない分配係数 0 を含むもの等，統計学的に分配係数を設定する手法を全てのケースに当てはめることはできない。本手法を適用するには，平均値を用いる際に分配係数が 0 でないこと，分散から変動幅を算出する際に統計学的に意味のあるデータ件数が存在すること，が必須条件となる。これに対し，SR-Can 方式では分配係数の設定値を中央値で与えており，分配係数が 0 であっても問題とはならない。ただし，SR-Can 方式では不確実性の幅を 25/75 パーセンタイルで与えているため，データ件数が少ない時はデータの偏向に大きく影響を受けるので注意が必要である。

今回はＵの花崗岩（降水系）に対する分配係数設定において，データの取扱い手法を２種類試したが，設定された値は変動幅もあわせてそれほど大きな違いは生じなかった。しかし，データ件数や抽出条件によって設定結果に大きな影響を与えるという不確実性の要因が潜在的にみられた。今後の設定作業ではこれらの項目に十分留意する必要がある。

5.3 溶解度の設定手法に関する調査検討

5.3.1 溶解度設定手法に関する調査

溶解度設定については，わが国のみならず諸外国における性能評価でも必要とされている。このことから，第 2 次取りまとめを含め，諸外国の溶解度評価手法について調査を行った。諸外国の調査対象としては，スイス（Project Opalinus Clay; EN2002），スウェーデン（SR-Can）および米国 TSPA とした。いずれの国においても，対象元素およびレファレンスケースにおける地下水（もしくは緩衝材間隙水）の組成が与えられたうえで，熱力学データベースを用いた溶解度計算結果を基に設定値を定める手法が中心的であることがわかった。ただし，熱力学データベースの整備方法や一部元素の溶解度設定手法に差異があることも明らかになった。以下，熱力学データベースの整備方法や溶解度に及ぼす不確実性評価を中心に概括する。

(1) 第 2 次取りまとめにおける溶解度設定手法

第 2 次取りまとめにおける溶解度評価は， JNC-TDB（Yui et al, 1999a）を用いた熱力学計算を中心に行っている（東ほか，1999)。計算ツールには，米国地質調査所（USGS）が公開していた地球化学計算コード PHREEQE (Parkhurst et al., 1980) を使用している。この計算コードは公開が終了しており，後継プログラム PHREEQC（U. S. Geological Survey, 2013）が公開されている。設定対象の地下水組成は，わが国の地下水情報を集約したうえで，代表的と思われる仮想的な地下水を数種類設定しており（Yui, et al., 1999b)，この地下水と緩衝材（ケイ砂混合ベントナイト）との熱力学反応を PHREEQC で計算させて得られた組成を緩衝材間隙水組成としている（小田ほか，1999)。

JNC-TDB の整備にあたっては， OECD/NEA が整備している熱力学データベース (以下, NEA-TDB) のうち，U（Grenthe et al., 1992）と Am（Silva et al, 1995）の公開版と，Tc のドラフト版（当時はまだ正式版（Rard et al., 1999）の公開前であった）の選定値を採用している。その他の元素については，国際的な専門家によるチームを編成したうえで，文献調査およびレビューを実施し，信頼できると思われる熱力学データ（298.15 K（= 25 ℃)），イオン強度 0 における平衡定数）を選定している。この際，化学的類似性を利用して選定された熱力学データも多く，Sm，Ac，Cm および Pu（III）では Am の選定値を，Pu（VI）の一部では U（VI）の選定値を利用している。なお，298.15 K 以外の温度における熱力学データは整備されておらず，363.15 K（= 90 ℃）程度までであれば溶解度に及ぼす温度影響が顕著ではないことを定性的に示している。なお，JNC-TDB は，PHREEQE および PHREEQC のみならず，EQ3/6（Wolery, 1992）および Geochemist's Workbench(Bethke and Yeakel, 2011)でも利用できるよう，各計算コード用フォーマットが整備されている。

熱力学計算に必要な溶解度制限固相を設定する際は，熱力学的安定性や溶解度実験結果などに基づき，主に非晶質水和酸化物を仮定している。水和酸化物を形成しにくいと考えられる元素については，間隙水に含まれる他の配位子や化学的類似性を考慮して，水和酸化物以外の固相を仮定している。また，一部の条件においては，溶解度測定実験で現実に観察された固相を基に溶解度制限固相を設定している。たとえば，酸化性条件におけるネプツニウムの溶解度制限固相は，非晶質水和酸化物 $NpO_2OH(am)$ではなくナトリウム炭酸塩（$NaNpO_2CO_3(cr)$）としている。

熱力学計算における活量補正方法としては，Davies モデルを基本に，イオン強度 0.3 mol kg^{-1} 以上ではイオン強度 0.3 mol kg^{-1} における活量補正式を使用するという近似を適用している。この方法を用いる際には，対象とするイオン強度領域において，活量補正モデルの差異による溶解度計算値への影響が顕著ではないことを確認している。

熱力学計算による溶解度に比べて実験で測定された溶解度が高い場合は，性能評価上の保守性を勘案し，実験で測定された溶解度を採用している。特に熱力学データの信頼性がやや低いと考えられた，Zr，Nb，Pd，Sn が該当している。逆に，Ra については，他のアルカリ土類金属元素の炭酸塩との簡易な共沈モデルを用いた評価を，また U については IV 価のみを対象とした評価を実施しており，いずれも熱力学計算値より低い値を設定している。

溶解度の不確実性については，間隙水組成の不確実性と溶解度制限固相の不確実性の 2 種類を考慮している。間隙水の pH の不確実性については，レファレンスケースでは pH = 8.4 の FRHP だが，これに pH = 7.2 の Lower-pH FRHP，pH = 9.7 の Higher-pH FRHP，および降水系還元性低 pH 型（FRLP）（pH = 7.6）の 4 条件における溶解度計算を実施している。また，溶解度制限固相の不確実性評価については，Se と Th のみを対象としており，複数の溶解度制限固相を想定して熱力学計算を実施している。以上の計算値と関連する実測値の 6 条件より最大値と最小値を選択し，設定値を広くかつ単純にするために，最大値の 1 桁目の繰り上げ（$A\times10^{B}$ であれば $1\times10^{B+1}$ に設定），最小値の 1 桁目の繰り下げ（$A\times10^{B}$ であれば 1×10^{B} に設定）を実施している。

(2) スイスにおける溶解度設定手法

スイスでは 2002 年に総合的な安全評価（Project Opalinus Clay; EN2002）(Nagra,2002)を実施しており，この中で溶解度（濃度最大値）の設定を行っている（Berner, 2002）。この安全評価のために，独自の熱力学データベース（以下，Nagra/PSI-TDB）を整備している（Hummel et al., 2002）。Nagra/PSI-TDB の公開時期が JNC-TDB より 3 年ほど遅いことから，JNC-TDB 整備時点で公開されていなかった Tc，Np および Pu の NEA-TDB データ（Rard et al., 1999; Lemire et al., 2001）が採用されている。また，化学的類似性を用いた熱力学データの選定は行っておらず，すべて実測値のレビューに基づいて熱力学データを選定している。なお，Nagra/PSI-TDB は，PHREEQC および MINEQL で利用可能なテキストファイルが提供されている。

溶解度評価の際には，熱力学計算が可能なものについては，Nagra/PSI-TDB（Hummel et al., 2002）を使用して溶解度を設定しており，これを計算値（“calculated”）としている。この熱力学計算においては，Nagra/PSI-TDB（Hummel et al., 2002）に整備されていない一部の熱力学データ（アクチニド（IV）のヒドロキソ炭酸錯体や，アクチニド（III）の加水分解種および炭酸錯体）については，化学的類似性を用いて熱力学データを推定したうえで熱力学計算を行っている。他方，熱力学計算が行えないものについては，実測値もしくは化学的類似性を基に設定しており，これを推奨値（“recommended”）としている。Nagra/PSI-TDB（Hummel et al., 2002）の整備対象元素においても，推奨値が設定されている例は多く，結果的に大半の元素では推奨値が設定されている。Ra については，第 2 次取りまとめと同様に共沈モデルを利用した溶解度設定を行っている。また，298.15 K 以外の熱力学データは必ずしも整備されていないが，323.15 K（＝50 ℃）における溶解度が 25 ℃における値の不確実性の範囲内に収まっていることを確認している。

溶解度の不確実性については，炭酸ガス分圧（pCO_2）変動の不確実性，熱力学データの不確実性の 2 種類を評価している。pCO_2 の不確実性については，log (pCO_2)の変動範囲を-3.5～-1.5（レファレンスケースでは-2.2）に設定し，この範囲における溶解度の最大値と最小値を導出している（ちなみに，第 2 次取りまとめでは pCO_2 を各地下水設定で考慮しているものの，不確実性としては取り扱っていない）。また，熱力学データの不確実性については，選定値の熱力学データの誤差を伝播させ，レファレンスケースの設定値に乗ずることで最大値を，除することで最小値を導出している。両者の不確実

性を比較し，より大きな最大値とより小さな最小値を採用している。

(3) スウェーデンにおける溶解度設定手法

スウェーデンでは，SR-Can において総合的な安全評価が実施されており，この安全評価のために熱力学データベースの整備と溶解度設定が行われている（Duro et al., 2006a）。SR-Can で用いられた熱力学データベース（以下，SKB-TDB）は，前述の Nagra/PSI-TDB（Hummel et al, 2002）を基本として改訂作業を実施したものである（Duro et al., 2006b）。SR-Can では使用済燃料の直接処分が予定されていることから，SKB-TDB では溶解度の温度影響を評価するために，溶解および錯生成に関する反応の平衡定数のみならず，反応のエンタルピーも積極的に収集していることが特徴的である。

溶解度制限固相の設定の基本は「専門家判断」であり，使用済燃料からの見かけの溶解度の実測値，および天然事象における実測値の情報を基に実施している。溶解度制限固相の決定にあたっては，感度解析を行っており，その計算ツールに，pH-Eh 線図や化学種寄与率のグラフなどの作成機能がある MEDUSA（Puigdomènech, 1983, 2002）を使用している。ただし，U の溶解度制限固相については，還元条件に限っても $UO_2{\cdot}2H_2O$, uranophane ($Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2{\cdot}5H_2O$), becquerelite ($CaU_6O_{19}{\cdot}11H_2O$) の 3 種の値を提示しており，一義的には決定されていない。

レファレンスケースの温度設定は 15 ℃ としている。溶解度に及ぼす温度の影響について，25 ℃ と 15 ℃ の差は顕著ではないと言えるが, 100 ℃ の溶解度を評価するにはエンタルピーが必要であるとしている。ただし，100 ℃ データの導出が難しい場合は 15 ℃ データのみ導出している。

溶解度計算には，PHREEQC Ver. 2.4.6 を使用している。活量補正モデルには，拡張 Davies モデルを用いている。なお，MEDUSA では活量補正モデルに拡張 Debye-Hückel 式を用いている。

溶解度の不確実性としては，酸化還元状態が考慮されている。キャニスターに含まれる鉄の腐食によって磁鉄鉱（Fe_3O_4）および赤鉄鉱（α-Fe_2O_3）が生成する際に発生する水素ガスを考慮して，水素ガス分圧 2 条件（$pH_2(g) = 10^{-7}, 10^2$ atm）および酸素ガス分圧 1 条件（$pO_2(g) = 0.2$ atm）の計 3 条件における溶解度を提示している。Ra の溶解度設定には，第 2 次取りまとめや EN2002 と同じく共沈モデルを利用している。

(4) 米国における溶解度設定手法

米国のヤッカマウンテン計画の性能評価においては，処分システム全体としての性能を評価するという Total System Performance Assessment（TSPA）モデルを採用している。この TSPA においては，FEP の設定から人間への予想被ばく線量までを一貫した前提条件，方法論で取扱い，最終的に処分場全体の性能を個人防護基準と比較して評価するものである。総合的な性能評価を実施するための計算コードとして，TSPA モデルとリンクした GoldSim（GoldSim Technology Group, 2013）を用いている。この性能評価シナリオにおいて，廃棄体から放出された放射性核種は，他国のシナリオと同様に水中に水溶性化学種となって溶存する。このときの溶解度およびスペシエーションは，原則として熱力学平衡論モデルにより算出される。

ヤッカマウンテン計画で用いられるために整備された熱力学データベース（以下，YMP-TDB）data0.ymp.R4 は，熱力学計算コード EQ3/6（Wolery, 1992）とともに提供されている熱力学データベース（data0.com.R2）を改訂，改善，拡張して使用している。この品質管理作業の大きな特徴は，Data0.com.R2 自体はハンドブック的なデータであり，それ自体を品質管理する必要はないという点である。化学熱力学データの品質については，ローレンスリバモア国立研究所が管理している。

Data0.com.R2 は，すでに広い範囲の問題を解くために必要な基本的な熱力学的データのすべてを含んでいるが，ヤッカマウンテン計画ではさらにアクチニド化学種に関する熱力学データを追加し，温度範囲についても 0～100 ℃ を対象にするためデータベースを拡張した。追加されたデータとしては，NEA-TDB の U データ（Grenthe et al., 1992），Am データ（Silva et al., 1995），Tc データ（Rard et al., 1999）および Critical Stability Constant Series（Smith and Martell, 1976）などがある。さらに，活量係数の導出に拡張 Debye-Hückel を使用可能とするための品質管理も対象範囲としている。ただし，data0.ymp.R2 も data0.ymp.R4 も非公開である。

初期溶液として用いられる水の化学組成入力データはサイト内の井戸水組成である。これがドリップシールドと相互作用した後に廃棄体に接するものと想定して，モデル化して地下水化学を予測している。地下水中に放出された放射性核種は，次に，廃棄体腐食生成物や鉄が共存する系におけるバッチ式熱力学計算により，変質層中での沈殿，腐食生成物への吸着などが考慮された。相互作用する水の体積は，廃棄体変質層と腐食生成物に依存する。処分坑道の埋め戻しがないため，酸素濃度は大気条件の 0.2 atm である。二酸化炭素濃度も大気条件の $10^{-3.5}$ bar であるが，人工バリア中では $f_{CO2} = 10^{-1.7}$ ～10^{-5} bar を感度解析範囲としている。Pu, Np, U, Th, Am, Pa, Sn の溶解度計算では，炭酸濃度依存性を考慮するため，$f_{CO2} = 10^{-1.5}$～10^{-5} bar を感度解析範囲としている。

熱力学平衡計算における地下水の pH 範囲は，使用済燃料と反応した後で pH 4.99～9.07，他の一緒に処分された廃棄物との反応後で pH 4.98～9.06，蒸発濃縮した浸出水が人工バリア材と反応した後で pH 6.9～9.7 である。モデル計算上は pH 3～11 をカバーする。温度は，廃棄体からの発熱により最大 100 ℃ までを考慮するが，Pu, Np, U, Th, Am, Pa の計算の際は 25 ℃ での計算値の方が高溶解度となるため，25 ℃ の値が用いられる。Ra については，100 ℃ での計算値の方が高いため，これが 25 ℃ の値として用いられる。TSPA 上の温度条件は一貫して 25 ℃ とされる。EQ3/6（Wolery, 1992）で適用されている活量補正方法は，B-dot equation（Helgeson, 1969）である。これは Davies 式と類似した方式で，イオンサイズパラメータや温度依存の複合パラメータを利用している。イオン強度 1 M まで有効とされている。

溶解度制限固相は，実験室レベルでの確証データやナチュラルアナログからの知見により設定されており，熱力学的に最も安定な固相を設定しているわけではない。例えば結晶性の酸化物は，水溶液中では表面が水和して非晶質もしくは水和物になっていることを想定して，表面を覆っている二次的生成物である固相が溶解度を制限するというモデル（bearing model）を採用している。表面を覆っている固相の安定性は，実験室での実験やナチュラルアナログデータから評価するものとし，10 年程度安定に存在するならば溶解度制限固相として設定される。現実的かつ保守的であることを原則として，環境条件により，複数の安定固相が存在できる重複（複数）制限固相が設定された。熱力学データが存在しなかったり，信頼性が低かったりした元素については，化学アナログにより溶解度が計算された。

溶解度制限を設けない可溶性元素やヨウ素，炭素などの陰イオン性元素については，廃棄体からの浸出律速の速度論モデルが用いられた。

(5) U の溶解度設定の参考となるナチュラルアナログ研究

前項で述べたスウェーデン SKB による SR-Can の溶解度評価でもわかるとおり，環境によっては U の溶解度制限固相の設定はかなり不確実である。したがって，天然における U の存在形態を調査し，溶解度制限固相の設定につながるような情報を収集しておくことが重要である。このことから，いく

つかのウラン鉱床におけるUの存在形態について調査を行った。

ウラン鉱床は，放射性廃棄物処分システムにとって明確なナチュラルアナログである。放射性廃棄物処分システムにおけるウランその他の放射性核種の挙動を予測するために，過去25年間に多数のナチュラルアナログ研究が実施されている。この中には，ブラジルのポソス・デ・カルダス，カナダのシガーレイク，ヨルダンのマカリン，スペインのミナ・フェイ，ガボンのオクロ，日本の東濃，メキシコのペナ・ブランカが含まれる。

Uは，自然界においてはU(IV)およびU(VI)種として存在する可能性が最も高い。Uは酸化数VIで最も安定しており，Uは還元条件下でのみ存在することができる。炭酸イオンを含まない溶液中での可溶性U(VI)種としては，UO_2^{2+}，UO_2OH^+，$(UO_2)_3(OH)_5^+$，$(UO_2)_3(OH)_7^-$などがある。溶液中の炭酸イオンは，水酸基含有U^{VI}種を溶解U^{VI}炭酸錯体種（UO_2CO_3，$UO_2(CO_3)_2^-$，$UO_2(CO_3)_3^{4-}$など）に変換する傾向がある。炭酸錯体に加えて，可溶性ウラン種には，硫酸錯体，フッ化物錯体およびリン酸錯体が含まれる。

嫌気的条件下では，高い濃度の炭酸イオンが溶液中に存在する（水溶性ウラン炭酸錯体の形成が溶液中のU(VI)を安定化させる傾向にある）場合には，U(VI)は引き続き重要であると考えられる。しかし，還元剤が存在する場合には，U(IV)が優勢となるであろう。ウラニルイオンと溶解した炭酸イオンの錯体形成，錯体の安定性を，高pH（> 10）の還元的状況に拡大するが，セメント由来の高pH孔げき流体はpCO_2が非常に低く，これらの炭酸錯体を安定化させることはないであろう。形成される可能性のあるウラン含有固体は，共存する地下水の組成に強く依存する。

ポソス・デ・カルダスで採取した地下水は多くが酸化的で，水溶性ウランスペシエーションを占める主要な錯体は，U(VI)のフッ化物，炭酸錯体および水酸化物錯体である。Uを想定した条件付きの溶解度定数に基づいた共沈モデルは，現場で観察された酸化還元フロントで最適にモデリングされた水和Schoepite（$(UO_2)(OH)_2{\cdot}xH_2O$）の形態でオキシ水酸化鉄(III)とともに共沈すると考えられる。

東濃地方の比較的酸化的な地下水と還元的な地下水を代表する溶液中でのUの水性スペシエーションは，還元条件下では$U(OH)_{4(aq)}$が優勢であり，比較的酸化的な条件下では一カルボナトウラニル錯体，二カルボナトウラニル錯体，三カルボナトウラニル錯体および／または$UO_2(OH)_3^-$が優勢である。東濃の還元地下水の大半は事実上，UO_2(am)と平衡状態にあり，コフィン石(am)に関しては不飽和である。比較的酸化的な地下水は，閃ウラン鉱，コフィン石，UO_2(am)および非晶質コフィン石に関しては強度の不飽和となっている。

マカリンの高アルカリ性地下水中の溶存ウランの予測されたスペシエーションは，他のアナログサイトとは異なり，$UO_2(OH)_4^{2-}$および／または$UO_2(OH)_3^-$などのヒドロキソ錯体が優勢である。離散ウラン含有固体（discrete U-bearing solid）はこれまで確認されておらず，Uは，ゼオライト，ジェンニ石，ポルトランダイト，ブルース石およびC-S-Hジェルなどのいくつかの固体中に微量成分として存在する。

5.3.2　溶解度の設定作業フローの検討

5.3.1項で調査したとおり，調査したいずれの国においても，地層処分性能評価のための溶解度設定では，熱力学データベースを整備したうえで熱力学計算を実施している。第2次取りまとめにおける溶解度評価（東ほか，1999）では，溶解度設定作業フローを作成しておらず，対象となる核種（元素）や水質の設定，熱力学データベースの整備，熱力学計算の実施，溶解度制限固相の設定，活量補正および不確実性について概略的に述べるとともに，設定の詳細は元素ごとに記述されている。これは，

第 2 次取りまとめがサイトジェネリックな評価であり，また，対象元素がアルカリ金属からカルコゲン族まで多岐にわたっていることから，評価手法を完全に統一することは困難であったためと考えられる。しかしながら，処分場候補地が公募されている現段階においては，可能な限り評価手法の統一を目指すことが，評価に一貫性や透明性を持たせるうえでも重要であると考えられる。その反面，評価手法をどこまで統一できるかについては，データの整備状況にも大きく依存するので，実際にいくつか（なるべく異種）の元素で溶解度設定を試みつつ，設定作業フローを構築していく必要がある。このことから，後述の溶解度設定の試行と並行して，溶解度の設定作業フローを構築することとした。

本研究で提案する溶解度設定作業フローを図 5.3.2-1 に示す。以下，溶解度設定に関する留意点を述べる。

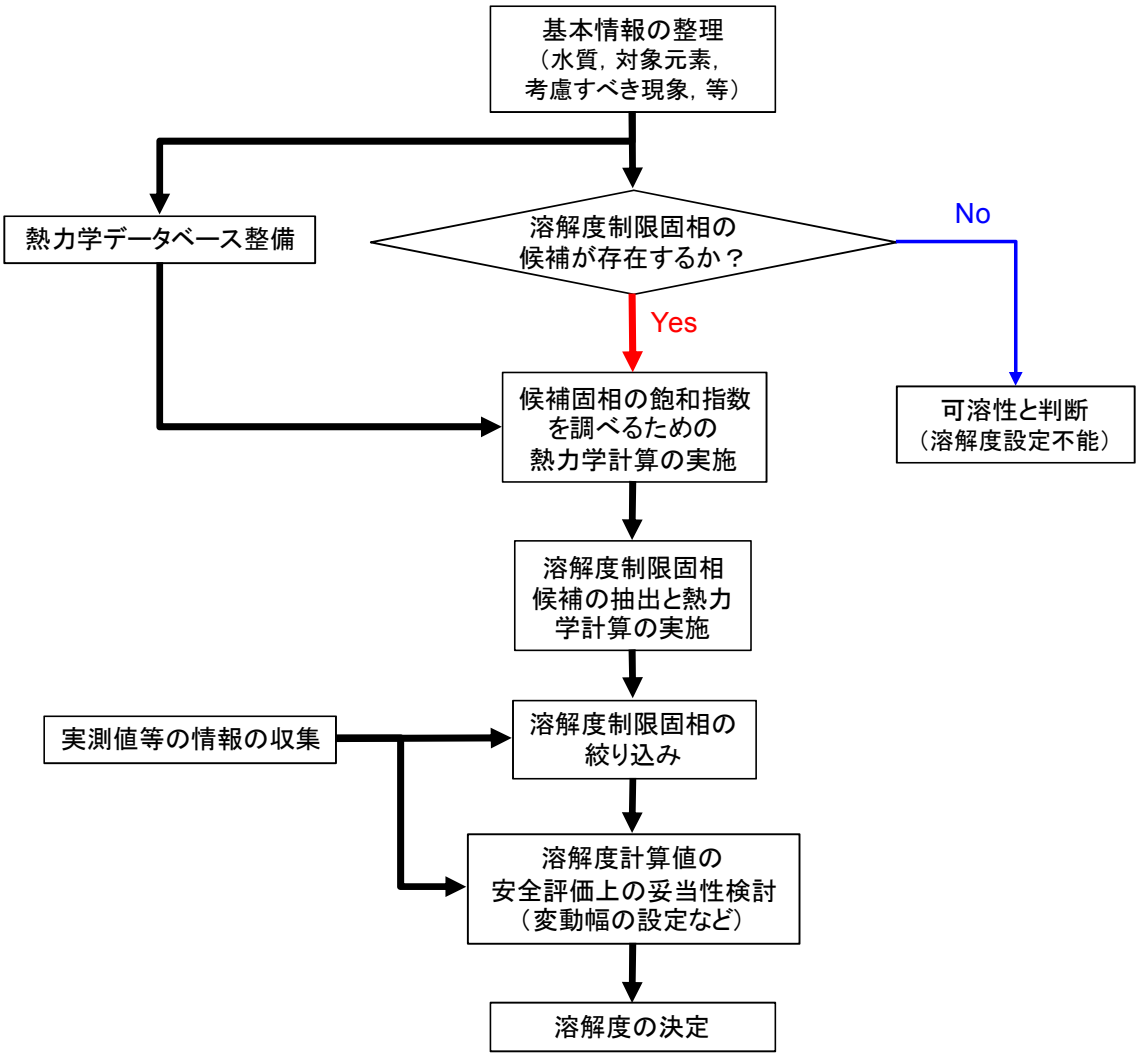


図 5.3.2-1　本研究で提案する溶解度設定フロー

1) 基本情報の整理

溶解度を設定するにあたり，関連する基本情報を整理する。対象となる水質および核種（元素）の設定を行うだけでなく，以下のように，手法の成立性や蓋然性についても整理しておく必要がある。

a. 熱力学平衡論の成立性の確認

対象とする反応系，時間スケールを設定するために，反応場である人工バリア中平衡水と地下水について，水理学的性質と化学組成を把握する必要がある。水理学的性質の面では，移流・分散挙動にならないよう流速が十分遅いことを確認し，また，溶質の溶解/沈殿という化学反応を熱力学平衡論で扱えるよう，十分な量の自由水（拘束されていない水）が系内に存在することを確認する必要がある。それらを踏まえた上で，処分システムにおける移行プロセスと移行シナリオの概念モデルを設定する。移流・分散挙動を考慮する反応系となる場合には，濃度最大値は溶解度制限とせず，廃棄体からの全量溶出として溶出率に依存することになる。また，反応系に十分な量の自由水が存在しない場合には，そもそも希薄系を前提にした熱力学平衡論が成り立たないため，濃度最大値設定には別のアプローチが必要となる。

b. 考慮すべき現象

溶解度設定を行う上で考慮すべき現象について，メカニズムまで把握できていることが望ましい。しかしながら，起こる可能性や定量的な扱いなど不確実な場合が多いので，ここでは「性能評価上の取り扱いのため」，安全評価のための保守性やシナリオとの整合性を鑑みて仮定した「取り決め」も含むものとする。例えば以下のようなものが挙げられる。

・化学的類似性のある元素が共存する影響（共沈や固溶体）の取り扱い
・有機物錯体生成などの可能性の取り扱い
・高温条件の取り扱い
・活量補正モデルの取り扱い
・圧力影響の取り扱い，など

また，検討対象とする元素の一般的な化学的性質として，水への溶存可能性，酸化還元条件に鋭敏で価数状態により化学的性質が異なる，などの情報をまとめておく必要がある。Cs や酸化性条件下での Se（VI），Tc（VII）など，一般的に可溶性とされる元素については濃度最大値を設定せず，廃棄体に含まれる全量が地下水に溶出するものと仮定して，熱力学計算により支配的な溶存化学種を推定することになる。

2) 熱力学データベースの整備

熱力学データベースとは，対象とする元素について，対象とする系で必要となる化学反応の熱力学データ（平衡定数，標準自由エネルギー，など）を集約したものである。地層処分の性能評価を行う際には，熱力学データベースを溶解度（固液の平衡反応）と支配溶存化学種の同定に用いることから，特に固相（化合物）および液相（溶存化学種）の熱力学データが必要となる。熱力学データベースの構築にあたっては，個々の熱力学データの信頼性を評価する必要があるだけでなく，データベースとしての内部整合性を満たしている必要がある。図 5.3.2-1 に示したフローでは，溶解度設定作業にあたって熱力学データベースが重要な役割を果たすことから，信頼性の高い溶解度評価を行うためには信頼性の高い熱力学データベースの構築が必要である。JAEA-TDB では，熱力学データベースの核となる熱力学データの選定についてガイドラインを定めている（Kitamura et al., 2010）。本調査では，実施主体が既存の熱力学データベースを活用することも念頭に置いて，溶解度設定作業とは独立させるこ

ととした。ただし，既存の熱力学データベースを活用する場合は，その信頼性を確認するとともに，必要に応じて修正すべきである。

3) 溶解度制限固相の候補の調査

元素によっては，熱力学計算を行う前に，一般的に易溶性であると判断できる場合がある。地層処分性能評価の対象元素の中では，Cs がそのひとつであり，比較的容易に可溶性と判断される。また，酸化性条件における Se（セレン酸および亜セレン酸イオン）および Tc（過テクネチウム酸イオン）についても，比較的容易に可溶性と判断される。ただし，明らかに可溶性とわかるもの以外は，念のため後述の熱力学計算を実施するのが適切である。

4) 溶解度制限固相候補の抽出と熱力学計算の実施

想定される処分場環境において熱力学的に安定に存在しうる固相を，溶解度制限固相の候補として抽出する。過飽和条件で対象元素を前段で決定した水溶液に加え，地球化学計算コードなどで平衡計算を実施して，沈殿する可能性のある固相種を抽出する。たとえば，PHREEQC（U. S. Geological Survey, 2013）では，計算結果において飽和指数が正となる固相種が，溶解度制限固相の候補となる。JAEA-TDB のように，固相の熱力学データについても網羅的に収集されている場合には，溶解度制限固相の設定に活用することができる。使用した地球化学計算コードと熱力学データベース（データセット含む）については，バージョンも併せて記録しておく必要がある。

ここで，候補固相となる可能性のある固相種と溶解度計算やスペシエーション解析に使用する固相種・液相化学種の熱力学データの有無とその信頼性について，データ取得手法（溶解度測定，滴定，溶媒抽出，電気化学的手法，等）を含めて十分に評価されているか確認する。また，対象とする系で考慮する化学反応のうち，沈殿反応速度が遅い，その反応条件（温度や水の存在等）では沈殿生成が考え難い，など，熱力学平衡論による反応の競合に不適当と考えられる化学反応については，敢えて熱力学データベースから排除し，その沈殿生成反応が寄与しない系を模擬して計算するための熱力学データセットを編集することもある。溶解度を決定するための熱力学計算においても，同様に本操作を実施することがある。

この熱力学平衡計算において，与えられた環境条件（人工バリア内溶液組成，共存する固相，温度等）における，設定した溶解度制限固相の溶解度とスペシエーションが導出される。

5) 実測値などの情報の収集

熱力学平衡計算で沈殿する可能性のある固相種を抽出する一方で，天然に存在する鉱物，沈殿物の固相状態について，分布状態，周辺環境条件，生成／変質の履歴などを調査し，溶解度制限固相の候補となる固相を抽出するための参考情報を収集する。この際，常温常圧かつ水溶液中で生成した鉱物を優先し，高温高圧を生成条件とする鉱物は除外する可能性もある。天然環境中では，温度や共存イオンの影響によって生成する化合物の種類や結晶形が変化することもあるので，サンプリング地点の環境情報は貴重である。

6) 溶解度制限固相の絞り込み

前項で抽出された固相について，ガラス浸出試験，使用済燃料浸漬試験などデータとの整合性を考慮に入れて，固相の妥当性を検討する。

長期的な固相の変遷の可能性，複雑系における複数固相の競合，不純物の存在により固溶体が生成する可能性について，熱力学的／速度論的安定性の観点から十分に検討する。

以上の検討に基づき，処分環境下における「最も現実的と考えられる溶解度制限固相」を設定する。設定される溶解度制限固相は 1 種類であることが望ましいが，1 種類に絞り込むことが困難な場合は溶解度の不確実性として取り扱う。

7) 溶解度計算値の安全評価上の妥当性検討

安全評価上の保守性と統計上の揺らぎに対応するために，作業段階ごと，元素ごとの潜在的な不確実性を抽出し，その影響の程度を検討する。研究の進展によって不確実性低減に役立ちそうな知見が得られた際には，上記の作業を繰り返し，より現実的と考えられる濃度最大値を設定する。

8) 可溶性と判断された場合の取り扱い

可溶性とされた元素については，熱力学計算で水溶液中の支配溶存化学種とその寄与率のみを導出する。

5.3.3 溶解度設定作業フローに基づいた溶解度制限固相設定の試行

前項で述べた溶解度設定作業フローの検証とフローへのフィードバックを目的として，代表的な元素について溶解度制限固相設定の試行を行うこととした。試行の対象とする元素は，酸化還元に鋭敏な元素であり，地層処分の性能評価上重要な元素の一つである Np とした。

(1) 基本情報の整理

水質として，第 2 次取りまとめで設定されたモデル間隙水のうち，特に重要と思われる降水系還元性高 pH 型（FRHP）間隙水，海水系還元性高 pH 型（SRHP）間隙水，降水系酸化性高 pH 型（FOHP）間隙水の 3 種を採用した。各モデル間隙水の組成を表 5.3.3-1 に示す。

基本情報の整理では考慮すべき事項をいくつか挙げているものの，いずれの項目についても本作業では特に考慮しなかった。その理由は以下のとおりである。

- 共沈や固溶体については，生成の可能性はあるものの，詳細なメカニズムが不明であり，定量的解析手法が確立されていない。
- 有機物錯体についても生成の可能性はあるものの，モデル間隙水において有機物濃度が与えられていないために計算不能である。
- 高温条件については，第 2 次取りまとめにおいて，その影響が顕著でないことが確認されている。
- 活量補正モデルについては，JAEA-TDB では未対応である（今後の課題）。
- 圧力については，気相中炭酸ガスの液相への溶け込み反応に影響が出ると考えられる。地下水組成設定の段階でカルサイトとの平衡で液相中炭酸化学種濃度を設定しているので，その方針と整合を取って，本試行では影響を考慮に入れなかった。

表 5.3.3-1　第 2 次取りまとめにおける対象間隙水組成（小田ほか，1999）

	FRHP 間隙水	SRHP 間隙水	FOHP 間隙水
pH	8.4	7.8	8.4
pe	-4.7	-5.2	8.1
Ionic strengh	0.026	0.615	0.0223
[Na](total)	2.8×10^{-2}	5.7×10^{-1}	2.8×10^{-2}
[Ca](total)	5.3×10^{-5}	1.4×10^{-2}	5.1×10^{-5}
[K](total)	1.2×10^{-4}	3.4×10^{-3}	1.2×10^{-4}
[Mg](total)	4.2×10^{-6}	1.5×10^{-3}	4.1×10^{-6}
[Fe](total)	2.0×10^{-9}	2.2×10^{-7}	1.9×10^{-15}
[Al](total)	3.4×10^{-7}	3.2×10^{-9}	3.6×10^{-7}
[C](total)	1.6×10^{-2}	2.2×10^{-2}	1.6×10^{-2}
[S](total)	1.1×10^{-4}	7.2×10^{-9}	1.0×10^{-6}
[B](total)	2.9×10^{-4}	1.7×10^{-3}	2.9×10^{-4}
[P](total)	2.9×10^{-6}	2.6×10^{-7}	2.9×10^{-6}
[F](total)	5.4×10^{-5}	1.0×10^{-4}	5.4×10^{-5}
[Br](total)	—	5.3×10^{-4}	—
[I](total)	—	2.0×10^{-4}	—
[N](total)	2.3×10^{-5}	5.1×10^{-3}	1.5×10^{-5}
[Cl](total)	1.5×10^{-5}	5.9×10^{-1}	4.4×10^{-6}
[Si](total)	3.4×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1.0×10^{-6}

(2) 熱力学データベースの整備

JAEA-TDB は，5.3.2 2)項における熱力学データベースの要件を概ね満たしていると考えられることから，本作業では JAEA-TDB の最新版の PHREEQC フォーマット（ファイル名 130331c2.tdb）（Kitamura et al., 2012）を用いることとした。

(3) Np の溶解度設定の試行

i) 溶解度制限固相の候補が存在するか

Np については水溶液中で III～VI の酸化数を取ることが知られているが，いずれの酸化状態においても難溶性と考えられる。FRHP 間隙水，SRHP 間隙水，FOHP 間隙水のいずれの間隙水に対しても溶解度制限固相の候補となる固相が存在すると判断し，PHREEQC を用いた熱力学計算により溶解度の計算値を求めることとした。

ii) 候補固相の飽和指数を調べるための熱力学計算の実施

溶解度制限固相の候補となる固相を抽出するため，PHREEQC を用いた熱力学平衡計算を実施した。

iii) 溶解度制限固相候補の抽出と溶解度計算の実施

上記 ii)の熱力学計算の結果をもとに，飽和指数が正となる固相を抽出した。その結果，Np の溶解度

制限固相の候補として Np_2O_5(cr)，NpO_2(am)，NpO_2(cr)（FRHP 間隙水），NpO_2(am)，NpO_2(cr)（SRHP 間隙水），$NaNpO_2CO_3 \cdot 3.5H_2O$(cr), Np_2O_5(cr), NpO_2(am), NpO_2(cr), NpO_2OH(am, aged), NpO_2OH(am, fresh)（FOHP 間隙水）が抽出された。次に，抽出された候補固相に対する溶解度を，PHREEQC を用いて導出した。結果を表 5.3.3-2～5.3.3-4 に示す。

表 5.3.3-2　Np の溶解度制限固相候補に対する溶解度計算値（FRHP 間隙水）

溶解度制限固相の候補	pH 収束値	pe 収束値	全 Np 濃度(M)	支配溶存化学種とその濃度（M）	
Np_2O_5(cr)	8.36	1.301	9.25×10^{-6}	$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$	4.14×10^{-6}
				$NpO_2CO_3^-$	4.60×10^{-6}
				NpO_2^+	3.56×10^{-7}
				$NpO_2(CO_3)_2^{3-}$	7.72×10^{-8}
				$Np(OH)_4$(aq)	6.26×10^{-8}
				$Np(CO_3)_4^{4-}$	1.50×10^{-8}
NpO_2(am)	8.361	-4.662	6.76×10^{-8}	$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$	6.64×10^{-8}
				$Np(OH)_4$(aq)	1.00×10^{-9}
				$Np(CO_3)_4^{4-}$	2.41×10^{-10}
NpO_2(cr)	8.361	-4.662	2.97×10^{-18}	$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$	2.91×10^{-18}
				$Np(OH)_4$(aq)	4.40×10^{-20}
				$Np(CO_3)_4^{4-}$	1.06×10^{-20}

表 5.3.3-3　Np の溶解度制限固相候補に対する溶解度計算値（SRHP 間隙水）

溶解度制限固相の候補	pH 収束値	pe 収束値	全 Np 濃度(M)	支配溶存化学種とその濃度（M）	
NpO_2(am)	7.83	-5.215	8.86×10^{-10}	$Np(OH)_4$(aq)	8.40×10^{-10}
				$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$	4.16×10^{-11}
NpO_2(cr)	7.83	-5.215	3.89×10^{-20}	$Np(OH)_4$(aq)	3.69×10^{-20}
				$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$	1.82×10^{-21}

表 5.3.3-4　Np の溶解度制限固相候補に対する溶解度計算値（FOHP 間隙水）

溶解度制限固相の候補	pH 収束値	pe 収束値	全 Np 濃度（M）	支配溶存化学種とその濃度（M）
Np_2O_5(cr)	8.37	7.751	5.02×10^{-6}	$NpO_2CO_3^-$ 4.59×10^{-6} NpO_2^+ 3.47×10^{-7} $NpO_2(CO_3)_2^{3-}$ 7.87×10^{-8}
$NaNpO_2CO_3\cdot3.5H_2O$(cr)	8.372	7.445	4.81×10^{-5}	$NpO_2CO_3^-$ 4.40×10^{-5} NpO_2^+ 3.32×10^{-6} $NpO_2(CO_3)_2^{3-}$ 7.58×10^{-7}
NpO_2(am)	8.383	4.28	8.04×10^{-5}	$NpO_2CO_3^-$ 7.36×10^{-5} NpO_2^+ 5.43×10^{-6} $NpO_2(CO_3)_2^{3-}$ 1.29×10^{-6}
NpO_2(cr)	8.37	8.095	2.25×10^{-11}	$NpO_2CO_3^-$ 2.06×10^{-11} NpO_2^+ 1.56×10^{-12} $NpO_2(CO_3)_2^{3-}$ 3.52×10^{-13}
NpO_2OH (am,aged)	8.52	6.744	2.91×10^{-3}	$NpO_2CO_3^-$ 2.68×10^{-3} NpO_2^+ 1.76×10^{-4} $NpO_2(CO_3)_2^{3-}$ 5.31×10^{-5}
NpO_2OH (am,fresh)	8.752	6.433	7.47×10^{-3}	$NpO_2CO_3^-$ 6.90×10^{-3} NpO_2^+ 4.10×10^{-4} $NpO_2(CO_3)_2^{3-}$ 1.54×10^{-4}

iv)　溶解度制限固相の絞り込み

FRHP 間隙水について，Np は酸化還元に鋭敏な元素であり，FRHP 間隙水のように酸化還元電位が低い条件では IV 価で安定であると考えられている。そのため，V 価の固相である Np_2O_5 は優先順位を落とすこととした。NpO_2(am) と NpO_2(cr)の安定性を比較した時，熱力学的に準安定状態である非晶質の NpO_2(am)より結晶質の NpO_2(cr)の方が安定であると考えられる。8 日程度の短期の溶解度測定試験では NpO_2(am)の沈殿が報告されており(Rai and Ryan，1985)，その後，より安定な NpO_2(cr)へ変遷すると考えられる。ガラス固化体が溶解する時，難溶性である Np は徐々にガラス固化体から溶出し，ガラス固化体の全量溶解後も，沈殿した溶解度制限固相により間隙水中の濃度を制限されつつ，徐々に溶解していく事が予想される。このような長期間であれば，先に沈殿した NpO_2(am)がより安定である NpO_2(cr)へと変遷する事は十分に考えられる。しかし，NpO_2(am)が NpO_2(cr)に変遷する速度が明確でないために，NpO_2(am)として溶解度を制限する期間も核種移行シナリオ上有意な程度に長期になる可能性が残る。そのため，安全評価上の保守性を鑑みて，より高い溶解度を導く NpO_2(am)の溶解度制限固相としての優先度を高く設定した。

SRHP 間隙水についても同様に，NpO_2(am) を 最有力の固相とした。

一方，FOHP 間隙水について，酸化雰囲気では IV 価の存在は考えにくいため，NpO_2(am) ，NpO_2(cr)の優先度を下げることとした。NpO_2OH(am，aged)および NpO_2OH(am，fresh)は熱力学データ取得時の試験期間による区別を示したものである。長期的には NpO_2OH(am，aged)の溶解度に制限されること

が予想される事から，NpO_2OH(am，fresh)の優先順位を下げることとした。$NaNpO_2CO_3{\cdot}3.5H_2O$(cr)，$Np_2O_5$(cr)，$NpO_2OH$(am, aged)はそれぞれ水溶液中での沈殿が報告されている固相である（それぞれNeck et al., 1995，Efurd et al., 1998，Itagaki et al.,1992）。第 2 次取りまとめではNeck et al.（1995）の報告をもとに $NaNpO_2CO_3{\cdot}3.5H_2O$(cr)を FOHP 間隙水に対する溶解度制限固相と設定している（東ほか, 1999）。しかし, この試験は全て0.1~5.0M $NaClO_4$の比較的高いイオン強度条件で実施されており, FOHP 間隙水のようなアルカリ度の低い水溶液中でアルカリ炭酸ネプツニウム酸錯塩である固相が生成・沈殿する点については議論の余地があると考えられる。低イオン強度条件下での試験データの拡充が望まれるが，現段階においては，現実性と保守性の観点から FOHP 間隙水の溶解度を制限する有力な候補を $NaNpO_2CO_3{\cdot}3.5H_2O$(cr)，$Np_2O_5$(cr)，$NpO_2OH$(am, aged)とした。

5.4　パラメータ設定の作業経緯と判断根拠の整理

5.4.1　調査検討の目的とアプローチ

5.2 の分配係数の設定手法，5.3 の溶解度の設定手法で検討したように，核種移行パラメータの設定作業は，膨大な実測データの収集から，データの分析・評価によるデータ群の抽出，メカニズム理解に基づくモデルやデータベースの構築，これらに基づくパラメータと不確実性の設定等の多様な情報を用いた複雑な作業・判断を必要とする。そのため，パラメータ設定の一連の作業フローに沿って，作業の結果やその根拠となる情報を記録し一元的に管理することで，透明性と追跡性を確保することが品質確保の観点から重要になる。このような観点から，ここでは，5.2 で検討した分配係数の作業フローを例に，品質管理の観点から重要な情報を抽出するための予察的検討を行った。

5.2.2(1)に示した包括的な分配係数設定フロー（図 5.2.2-2）は，大きく以下の 5 つの作業ステップに分割される。

i) 性能評価に用いる分配係数パラメータセットの要件と目標の定義
ii) 収着データベースの整備と収着メカニズムに関する基礎情報収集
iii) 分配係数設定/条件変換アプローチの決定
iv) 分配係数パラメータの設定（実測データ，半定量的条件変換，収着モデル）
v) 最終パラメータセットの設定評価

ここでは，分配係数設定フローにおける中核的な作業であり，情報量の多さや作業の複雑さの観点から，ii)の収着データベースを中心としたデータの抽出・分析・評価の作業，iv)のパラメータ設定作業に関して，作業プロセスの記録と管理に関する具体的な検討を行った。

5.4.2 収着データベースによるデータ抽出・分析・評価の概要

分配係数設定の作業過程において，分配係数設定/条件変換アプローチの決定，それぞれのアプローチでの設定など，あらゆる作業においてベースとなるのは実測された分配係数データであり，膨大な既存データから信頼性が高く，設定条件に対応したデータを抽出する作業が最も重要である。このような作業を支援する観点から，データの信頼度評価，データの環境条件の依存性評価など，パラメータ設定における効果的なデータ選定を可能とする収着データベースシステム（JAEA-SDB）の整備を進めてきた（例えば，舘ほか，2009；Tachi et al., 2011a）。

データの信頼度評価手法としては，分配係数の測定方法に関する日本原子力学会標準（日本原子力学会，2006a; 2006b）なども参考に，分配係数の測定や評価上の重要因子に着目し，表 5.4.2-1 に示す

ように，大きく 3 つのクライテリアから構成される信頼度評価ガイドラインを策定している。

クライテリアⅠは記載情報の網羅性の確認であり，pH，酸化還元，初期濃度，固液分離といった重要項目（表中の*）に関する情報が把握できなければ，信頼度不十分（unreliable）と評価される。クライテリアⅡの評価として，実験の条件や方法など個々の評価項目に対して判定基準を設けて評価が行われ，重要な基準（表中の*）を満たさない場合には，信頼度不十分（unreliable）として判断される。クライテリアⅡの個々の基準についての評価結果をもとに，クラス 1～6 へのクラス分けを行う。

さらに，クライテリアⅢでは，類似データ間でのデータや傾向性の整合性評価を行う。このような比較分析は，5.2.2 および 5.2.3 で示したような半定量的条件変換手法や収着モデルの検討にも関連する重要な評価の視点である。

JAEA-SDB では，このようなガイドラインに従った信頼度評価の結果は，図 5.4.2-1 に示すように，データベース上で管理可能であり，JAEA-SDB に含まれる一部のデータについては実際に信頼度評価がなされ，その結果をもとに，信頼度情報で検索・絞り込みを行うことが可能である。

表 5.4.2-1　収着データベースの信頼度情報テーブル（舘ほか，2009）

クライテリア分類/項目		内容	SDB 関連項目	Rating	
【クライテリアⅠ：情報の網羅性】					
I-a.1	情報の網羅性	Kd と取得条件に係る基本情報の有無	表 3-2 の 1 次情報	Yes/No	
I-a.2	単位の記載	分配係数等の単位情報の有無	同上	Yes/No	
I-b	Kd の表示形式	図，表，数値，対数値	type of information	class 1-6	
【クライテリア II：各情報の記述の適切性】				Rating	重要度
II-a	固相	構成鉱物の組成，不純物，表面特性	solid phase, specific surface area, CEC	A, B, C/D	×2
II-b	pH の調整と制御*	pH の制御，pH の測定値，pH 緩衝液	pH init, pH end	A, B, C, D	×8
II-c	酸化還元状態*	酸化還元状態の制御，還元剤	atm/redox condition, redox	A/B, C/D	×8
II-d	最終の溶液組成*	最終試験液組成の分析結果の有無 データ毎の計算評価が必要な場合有	solution composition	A/B, C/D	×8
II-e	温度	温度の制御，室温での試験	temperature	A/B, C/D	×1
II-f	固液比と粒子サイズ	固相の表面積，固相重量	solution/solid, specific surface area	A/B, C/D	×2
II-g	収着率	収着率の計算	Kd, solution/solid	A, B, C/D	×2
II-h	核種の初期濃度*	溶解度の以下での初期濃度設定の確認（計算の実施，類似条件での試験結果も利用）	C init, Solution Composition, pH など	A, B, C/D	×8
II-i	固液分離方法*	固液分離方法，複数の種類での確認	separation	A, B, C/D	×8
II-j	反応時間*	平衡状態の確認，収着反応速度（時間依存）データの取得	contact time	A/B, C/D	×2
II-k	攪拌方法	攪拌の有無と方法		A/B, C/D	×1
II-l	核種の添加量	核種添加量の妥当性，収着等温線の有無	solution/solid, C init,	A, B, C/D	×2
II-m	反応容器	容器材質，容器壁への収着量の補正		A, B, C/D	×1
II-n	不確実性の評価	繰り返し試験数，不確実性の幅(誤差)	error, replicates (n)	A, B, C, D	×2
II-o	パラメータ変化	主要パラメータの変動による影響確認	C init, pH init, pH end, solution/solid	A, B, C, D	×8
【クライテリアⅡⅠ：データ相互間の整合性】					
III	データ間の整合性の観点から Kd の信頼度を評価* 別の類似した試験条件の Kd と明らかに不整合があり，その理由が説明されていない場合は unreliable と分類		Kd	reliable, unreliable	

* unreliable の評価がある項目

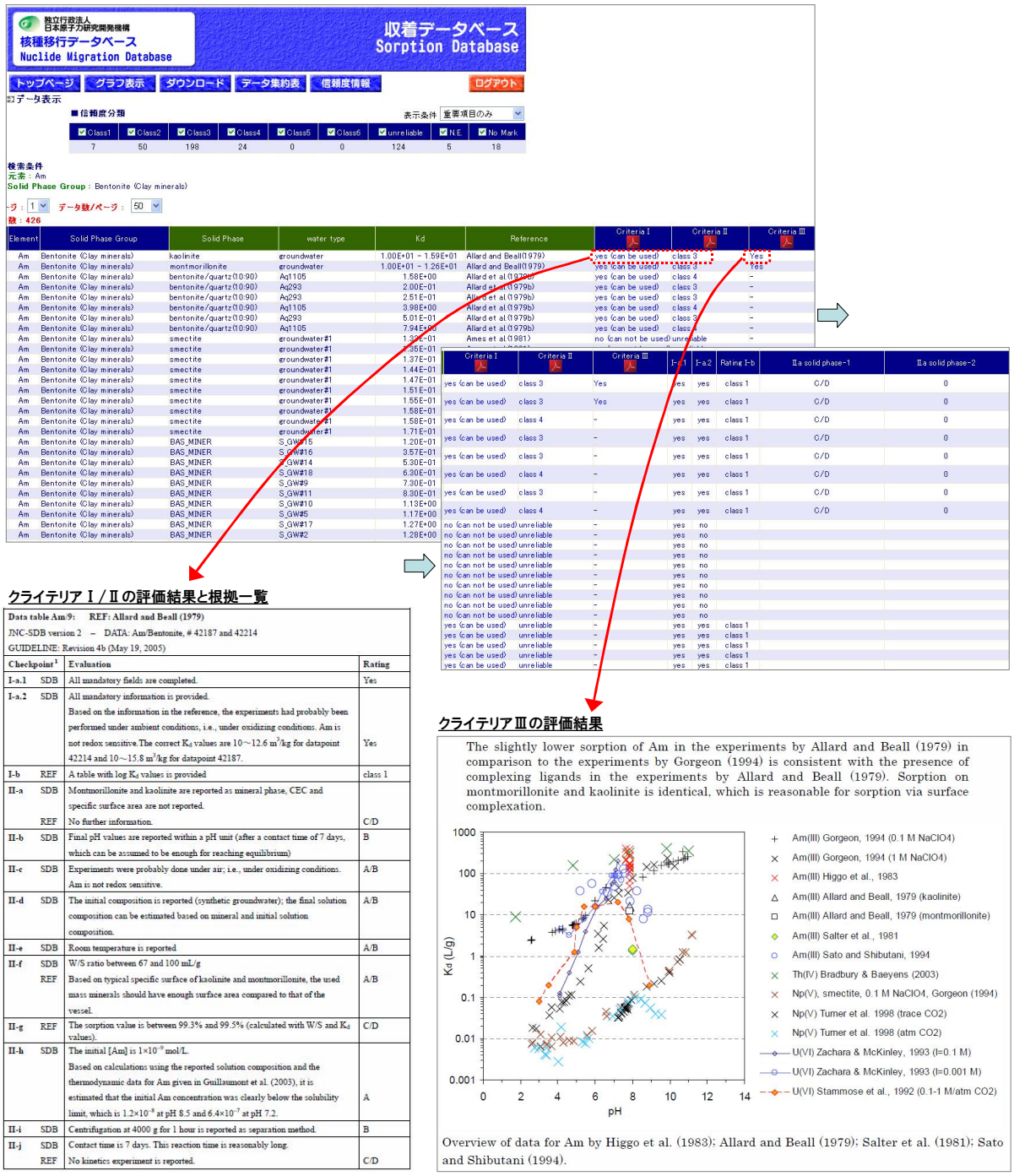


図 5.4.2-1　個別データの信頼度情報（Am/Bentonite 系の例）（舘ほか，2009）

また，図 5.4.2-1 に示すように，クライテリアⅠおよびⅡの評価根拠は，信頼度評価の追跡性の観点からデータシートおよびPDF 情報として参照可能であり，クライテリアⅢの評価検討についても，PDF 情報として参照可能となっている。

以上のことから，データの抽出・分析・評価の作業を JAEA-SDB を活用して実施することによって，上記の ii)や iv)の既存データの集約，データの抽出・分析・評価を効率的に実施可能であり，また，環境条件や信頼度情報などに基づくデータ選定過程も，JAEA-SDB 上での検索条件などの履歴や抽出結果などを記録・管理することで，作業プロセスに係る情報管理が効果的に実現できると期待される。

5.4.3 分配係数の設定プロセス

5.2.2 に示した 3 つのパラメータ設定手法のうち，実測データに基づく設定手法については，5.2.4 の設定試行に示したように，かなりの作業は JAEA-SDB を使って効率的に実施することが可能と考えられる。表 5.4.3-1 では，図 5.2.2-2 のうちの実測データに基づく設定手法に焦点をあて，作業フローに沿って，それぞれの作業ステップにおいて活用される JAEA-SDB の機能・情報，判断や基準を含む補完情報を列記した。これらの判断や情報のうち，表中に下線を付すことで重要情報の抽出を試みた。

表 5.4.3-1　実測データに基づく分配係数設定作業に対応した SDB 情報と補完情報

作業項目	作業内容	SDB の機能・情報	補完情報（判断・基準）
データの抽出・評価	対象条件に関連するデータ抽出	検索機能（検索条件）	追加データの判断(SDB への導入)
	信頼度情報の確認	信頼度情報・検索機能（選別基準）	信頼度情報以外の判断
	データ間の整合性確認	信頼度情報：クライテリアⅢ（採用の判断）	SDB 情報以外の判断
データの傾向性分析	分配係数の充足度評価	検索機能（検索条件・グラフ）	検索条件等の緩和の判断と条件
	環境条件依存性	グラフ機能（検索条件・グラフ）	収着メカニズムに関する知見（判断根拠）
対象データの絞り込み	データ絞り込み	検索・グラフ機構（検索条件・グラフ）	検索条件等の緩和の判断
	データ数/データ分布の確認	グラフ機能（ヒストグラムデータ）	データ分布形状の評価判断
	化学アナログの適用判断	グラフ機能（比較グラフデータ）	化学アナログの適用基準と根拠文献情報
パラメータの設定	パラメータの設定	上記の絞り込みデータセット	設定方法：平均値，中央値
	不確実性の設定	上記の絞り込みデータセット	統計的取り扱いを含む設定方法
	保守性等の評価		判断基準
	バッチーインタクト補正		補正ファクターと設定根拠

なお，半定量的条件変換手法については，データソース，適用する条件変化係数，それぞれの変換係数の値や設定根拠等などが追跡可能なデータシートとして管理されている（Ochs et al., 2013 参照）。また，収着モデルに関しては，モデルパラメータ導出のプロセスや根拠を追跡可能な形で管理する方法が舘ほか（2010）において検討されている。これらの方法をベースとして，上記と同様の検討を進めることで，図 5.2.2-2 に示した 3 つの設定手法を対象として，それぞれに共通する要素と要件などについて検討していくことも有益と考えられる。

このような重要情報を抽出したうえで，その重要度も評価しつつ，記録に残すべき情報と判断根拠を選定することが重要であり，その他の設定アプローチや，上記の i), iii), v)の作業プロセスについても，さらに検討していく必要がある。

そのうえで，現状では主に報告書などのドキュメントとして記録されている情報を作業プロセスに沿った形で再構成し，その閲覧や再利用が容易な形に電子化することにより，品質情報の集約・管理が容易になる。さらに，作業プロセスに沿った品質情報の管理項目やその基本的なフォーマットを設

定し適用することで，より効率的かつ実務的な品質情報の一元化と管理が可能になると考えられる。

これら品質情報の一元化と管理に関する方法については，先行して検討がなされているシナリオ構築における成果も踏まえつつ検討・具体化していくこととする。

5.5 まとめと今後の課題

5.5.1 岩石の分配係数の設定手法に関する調査検討

岩石中の分配係数パラメータの設定について，特に堆積岩系に着目して，OECD/NEA の収着モデルの開発と適用に関する検討状況，スイス Nagra/PSI の Opalinus 粘土岩を対象としたパラメータ設定手法を詳細に調査するとともに，国内基盤研究開発成果として幌延堆積岩を対象とした関連研究を整理した。これらの調査結果に加え，2011 年度のスウェーデン SKB の花崗岩（結晶質岩）系のパラメータ設定手法の調査およびそれを踏まえたパラメータ設定フローの成果（江橋ほか，2012）も踏まえつつ，複数の設定アプローチの選択と組み合わせを主眼とした包括的な視点での分配係数設定フローを検討した。また，それぞれのアプローチの具体的な方法論や留意点などを整理しつつ，堆積岩（泥岩）と結晶質岩（花崗岩）を対象とした分配係数設定の試行を通じて，その妥当性や留意点，今後の課題などを確認した。以下に包括的設定フロー，個々の 3 つの設定アプローチに関する現状の評価と今後の課題をまとめる。

（分配係数設定フロー）

- 国内外の動向を踏まえれば，分配係数設定アプローチとしては，実測データからの設定，半定量的条件変換手法による設定，収着モデルによる設定があり，性能評価からの要件への対応やアプローチの選択・組合せを含む包括的な分配係数設定フローを作成した。
- 複数の設定手法の比較や選択の視点は，実際のサイト調査の進展に応じた段階的なパラメータ設定手法の変遷や不確実性の取り扱いとも密接に関連し，与えられたサイト条件や活用可能な情報量を踏まえて，現時点で採用すべきアプローチ，手法間の比較評価による信頼性向上，次段階で目指すべきアプローチとデータ取得計画などパラメータ設定の基本的戦略を決めるうえで有効である。
- 実際の幌延堆積岩の試行において，データとメカニズムに関する知見が充実している場合には，複数のアプローチの比較検討が，設定の信頼性の向上や不確実性の定量化の観点で有効であることを確認した。

（既存の実測データからの設定手法）

- 従来からジェネリックな安全評価において採用されてきたアプローチであり，地質環境条件が十分に特定されておらず，また，情報量が限られているサイト選定の初期段階では，このアプローチの採用が最も有力となる。
- 第 2 次取りまとめで想定した花崗岩系の条件を対象として，2011 年度に作成したフローの試行・評価を継続し，その有効性を確認するとともに，多様な核種での試行を通じて，実際のパラメータ設定を行う上での留意点や課題を抽出した。
- このアプローチでは，データベースから想定条件に対応する信頼性の高いデータ群を抽出する作業が最も重要となる。この際，データが多数存在するケースから非常に限られるケースまでの多

様な状況に対して，整合性のある考え方でデータを絞り込み，統計的処理の適用性を含め分配係数と不確実性の幅を決定する手法の選択が重要な課題である。

（半定量的条件変換による設定手法）

・実測データから環境条件の違いを補正して分配係数を設定する半定量的条件変換手法は，地質環境条件が特定されていて，データ蓄積とメカニズム理解がある程度なされているものの，熱力学的収着モデルを構築するまでには至っていない状況下で有効なアプローチとなる。実際の諸外国のサイト調査に基づく予備的安全評価では，このアプローチが活用されているケースが多い。
・スイス Nagra/PSI やスウェーデン SKB で採用されている条件変換手法を参考に検討された方法論を，フローとして整理するとともに，幌延の堆積岩を対象とした既存の試行事例の確認を通じて，その有効性を確認した。
・このアプローチにおいても，条件変換に用いる信頼性の高いデータソースを選定するステップが重要であり，一貫性のある考え方で適切なデータ選択がなされることが重要である。また，適用する変換係数の選択と，それぞれの変換係数の設定の方法や根拠が重要となる。これらの適切な選択判断，また，複雑なプロセスを追跡性のある形で残すことも重要な課題である。

（収着モデルによる設定手法）

・収着モデルの構築と適用の方法に関しては，OECD/NEA の収着プロジェクトでガイドラインとして取りまとめられており，それらを参考にフローが構築されている。
・粘土質の岩石などの粘土鉱物が主に収着反応を支配する系では，粘土鉱物の収着モデルの組合せなどにより評価可能と考えられており，幌延の堆積岩への適用を通じて，信頼性の高いモデルが利用可能であればモデル化が有効な手法となることが確認された。
・一方で，モデルの適用にあたっては，モデルの適用範囲や限界を注意深く確認する必要があり，モデルがカバーできない領域に適用すると大きな過大・過小評価となる点に留意が必要である。

なお，複数の手法を組み合わせることは，比較評価を通じた妥当性確認，相互補完の観点からも有効であり，利用可能な情報量等に応じて検討することが望ましい。

5.5.2　溶解度の設定手法に関する調査検討

溶解度評価手法の再検討を目的として，諸外国における溶解度設定手法の調査を行った。調査したいずれの国においても平衡論を仮定し，熱力学データベースを整備したうえで，熱力学計算を行っていることを確認した。また，溶解度設定作業フローの検討および構築を行うとともに，並行して代表的な元素の溶解度制限固相設定の試行を行い，その過程を溶解度設定作業フローに反映した。本検討では，設定された溶解度制限固相に基づいた溶解度計算値の安全評価上の妥当性検討作業の実施までは至らなかった。今後は安全評価上の保守性や統計上の揺らぎに対応するために，作業フロー中の潜在的な不確実性を抽出し，その影響の程度を検討する必要がある。

本検討では，溶解度制限固相設定手法の検討に資することを目的として，諸外国における溶解度設定手法や，天然地下水中のウランの溶存濃度の解釈に関する事例について調査を行い，ウランの溶存化学種や溶解度制限固相の参考になるような情報が得られた。

5.5.3　パラメータ設定の作業経緯と判断根拠の整理

本検討では，核種移行パラメータのうち，分配係数設定フローにおける中核的な作業であり，情報量の多さや作業の複雑さの観点から，収着データベースを中心としたデータの抽出・分析・評価の作業，パラメータ設定作業を対象として，作業プロセスの記録と管理に関する具体的な検討を行った。

収着データベースを中心としたデータの抽出・分析・評価の作業で必要とする収着データベースについては，収蔵される個々のデータの信頼性評価手法とクライテリアを明確にし，データの品質を担保するよう整備が進められている。

分配係数の設定プロセスにおいては，フローの作業項目毎に必要とされる判断事項，判断根拠，利用するデータや機能などを例示し，設定作業の追跡性と透明性を担保するための要件を検討した。

今後は，検討した品質管理手法に則って設定作業の明文化を進めるとともに，その閲覧や再利用が容易な形に電子化することにより，品質情報管理を高度化していくことが望まれる。

参考文献（5 章）

Allard, B., Kipatsi, H. and Torstenfelt, B. (1978) : Sorption of Long-lived Radionuclides on Clays and Rocks, part 2, KBS Technical Report 98.

Allard, B., Rydberg, J., Kipatsi, H. and Torstenfelt, B. (1979b) : Disposal of Radioactive Waste in Granitic Bedrock, American Chemical Society, No.4, pp.47-73.

東侍郎，柴田雅博，油井三和，澁谷朝紀，能登屋信，吉田泰 (1999) : 地層処分研究開発第 2 次とりまとめにおける放射性元素の溶解度評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-071.

Baik, M.H., Hyun, S.P. and Hahn, P.S. (2002) : Surface and bulk sorption of uranium(VI) onto granite rock, Jounal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol.256, pp11-18. Korea atomic energy research institute.

Bajo, C., Montovani, M. et al (from NEA-SDB).

Barney, G.S. and Brown, G.E. (1979) : The Kinetics and Reversiblity of Radionuclide Sorption Reactions with Rocks, Progress Report for Fiscal Year 1979." RHO-ST-29, Rockwell Hanford Operations, Richland, Washington, pp. 261-315.

Baston, G.M.N., Berry, J.A., Bond, K.A., Brownsword, M. and Linklater, C.M. (1992) : Effects of organic degradation products on the sorption of actinides. Radiochimica Acta 58/59, pp.349-356.

Berner, U. (2002) : Project Opalinus Clay – Radionuclide concentration limits in the near-field of a repository for spent fuel and vitrified high-level waste, Nagra Technical Report 02-10.

Berry, J.A., Yui, M. and Kitamura, A. (2007) : Sorption Studies of Radioelements on Geological Materials, JAEA Technical Report, JAEA-Research 2007-074.

Bethke, C.M. and Yeakel, S. (2011) : The Geochemist's Workbench User's Guides, Version 9.0. Aqueous Solutions LLC, Champaign.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (1997a) : Far-field sorption data bases for performance assessment of a L/ILW repository in an undisturbed palfris marl host rock. PSI Bericht Nr. 97-15.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (1997b) : A mechamistic description of Ni and Zn sorption on Na-montmorillonite PartII: modelling. J. Contam. Hydrol. 27, pp.223-248.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (1999) : Modelling the sorption of Zn and Ni on Ca-montmorillonite. Geochim. Cosmochim. Acta, 63, pp.325-336.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2000) : A generalised sorption model for the concentration dependent uptake of Cs by argillaceous rocks. J. Contam. Hydrol. 42, pp.141-163.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2003a) : Near-field sorption data bases for compacted MX-80 bentonite for performance assessment of high-level radioactive waste repository in Opalinus Clay host rock. Technical Report 02-18. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2003b) : Far-field sorption data bases for performance assessment of high-level radioactive waste repository in an undisturbed Opalinus Clay host rock. Technical Report 02-19. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2005) : Modelling the sorption of Mn(II), Co(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Eu(II), Am(III), Sn(IV), Th(IV), Np(V) and U(VI) on montmorillonite: Linear free energy relationships and estimates of surface binding constants for some selected heavy metals and actinides. Geochim. Cosmochim. Acta, 69, pp.875-892.

Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2009) : Comparison of the reference Opalinus clay and MX-80 bentonite

sorption data bases used in the Entsorgungsnachweis with sorption data bases predicted from sorption measurements on illite and montmorillonite. Nagra technical report, 09-07.

Brendler, V., Vahle, A., Arnold, T., Bernhard, G. and Fanhhänel, T. (2003) : RES^{3}T – Rossendorf expert system for surface and sorption thermodynamics, J. Contam. Hydrol., 61, pp.281-291.

Crawford, J., Neretnieks, I. and Malmström, M. (2006) : Data and Uncertainty Assessment for Radionuclide Kd Partitioning Coefficients in Granitic Rock for Use in SR-Can Calculations, SKB Technical Report, R-06-75.

Crawford, J. (2010) : Bedrock Kd data and uncertainty assessment for application in SR-site geosphere transport calculation. SKB Technical Report R-10-48.

Duro, L., Grivé, M., Cera, E., Gaona, X., Domènech, C. and Bruno, J. (2006a) : Determination and assessment of the concentration limits to be used in SR-Can, SKB Technical Report TR-06-32.

Duro, L., Grivé, M., Cera, E., Domènech, C. and Bruno, J. (2006b) : Update of a thermodynamic database for radionuclides to assist solubility limits calculation for performance assessment, SKB Technical Report TR-06-17.

Dzombak, D.A. and Morel, F.M.M. (1990) : Surface complexation modelling: Hydrous ferric oxides, John Wiley & Sons, New York.

江橋健，窪田茂，黒澤進，後藤淳一，後藤考裕，石井英一，稲垣学，守屋俊文，鈴木覚，大井貴夫，市原貴之，石田圭輔，石黒勝彦，土宏之，柴田雅博，澤田淳，舘幸男，牧野仁史，早野明，三ツ井誠一郎，谷口直樹，小田治恵，北村暁，大澤英昭，仙波毅，日置一雅，亀井玄人（2012）：概要調査段階における設計・性能評価手法の高度化 ― NUMO-JAEA 共同研究報告書（2011 年度）―，NUMO-TR-12-03，原子力発電環境整備機構（JAEA-Research 2012-032，日本原子力研究開発機構）.

Efurd, D.W., Runde, W., Banar, J.C., Janecky, D.R., Kaszuba, J.P., Palmer, P.D., Roensch, F.R. and Tait, C.D. (1998) : Neptunium and Plutonium Solubilities in a Yucca Mountain Groundwater, Environ. Sci. Technol. 32, pp.3893- 3900.

Erdal, B.R., Aguilar, R.D., Bayhurst, B.P., Daniels, W.R., Duffy, C.J., Lawrence, F.O., Maestas, S., Oliver, P.Q. and Wolfsberg, K. (1979a) : Sorption-Desorption Studies on Granite. LA-7456-MS.

GoldSim Technology Group (2013): GoldSim – Monte Carlo simulation software for decision and risk analysis, http://www.goldsim.com/.

Gorgeon, L. (1994) : Contribution à la modelisation physico-chimique de la retention de radioéléments à vie longue par des materiaux argileux. Ph.D. thesis. Université Paris 6.

Grenthe, I., Fuger, J., Konings, R.J.M., Lemire, R.J., Muller, A.B., Nguyen-Trung, C. and Wanner, H. (1992) : Chemical thermodynamics of uranium, Elsevier, Amsterdam.

Hama, K., Kunimaru, T., Metcalfe, R. and Martin, A.J. (2007) : The hydrogeochemstry of argillaceous rock formations at the Horonobe URL site, Japan. Phys. Chem. Earth 32, pp. 170–180.

Helgeson, H.C. (1969) : Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures, Am. J. Sci., 267, pp. 729-804.

Hummel, W., Berner, U., Curti, E., Pearson, F.J. and Thoenen, T. (2002) : Nagra / PSI chemical thermodynamic data base 01/01, Nagra Technical Report 02-16.

Itagaki, H., Nakayama, S., Tanaka, S. and Yamawaki, M. (1992) : Effect of Ionic Strength on the Solubility of Neptunium(V) Hydroxide. Radiochim. Acta. 58/59, pp.61-66

JAEA（日本原子力研究開発機構） (2007) : Horonobe underground research laboratory project. Synthesis of

phase I investigation 2001–2005. Volume “Geological disposal research”. JAEA-Research 2007-045.

JAEA（日本原子力研究開発機構）(2011)：平成 22 年度処分システム化学影響評価高度化開発報告書.

JAEA（日本原子力研究開発機構）(2012) : 平成 23 年度 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書.

核燃料サイクル開発機構 (1999)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分開発第 2 次取りまとめ－分冊 3　地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-023.

Kawaguchi, M., Kaminoyama, M., Takase, H. and Suzuki, K. (1989) : Study of Cation Adsorption Model on Sodium Bentonite, High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel Management, 2, pp.313-317.

Kitamura, A., Fujiwara, K., Doi, R., Yoshida, Y., Mihara, M., Terashima M. and Yui, M. (2010) : JAEA thermodynamic database for performance assessment of geological disposal of high-level radioactive and TRU wastes, JAEA-Data/Code 2009-024.

Kitamura, A., Fujiwara, K., Doi, R. and Yoshida, Y. (2012) : Update of JAEA-TDB : Additional Selection of Thermodynamic Data for Solid and Gaseous Phase on Nickel, Selenium, Zirconium, Technetium, Thorium, Uranium, Neptunium, Plutonium and Americium, Update of Thermodynamic Data on Iodine, and some Modifications, Japan Atomic Energy Agency Technical Report, JAEA-Data/Code 2012-006.

Koskinen, A., Alaluusa, M., Pinnioja, S., Jaakola, T. and Lindberg, A. (1985) : Sorption of Iodine, Neptunium, Technetium, Thorium and Uranium on Rocks and Minerals, YJT Report, YJT-85-36.

Kulmala, S. and Hakanen, M. (1992) : Review of the sorption of radionuclides on the bedrock of Haestholmen and on construction and backfill materials of a final repository for reactor wastes., POSIVA Report YJT-92-21.

Kulmala, S., Hakanen, M. and Lindberg, A. (1998b) : Sorption of Plutonium on Rocks in Groundwaters from Posiva Investigation Sites, Report POSIVA 98-12, 55p.

Kumata, M. (1997) : Experimental Study on Neptunium Migration under in Situ Geochemical Conditions, Migration 97, Sendai, 同題名論文を Kumata, M and Vandegraaf, T. T. 著として J. Contam. Hydrology, vol.35, No.1-3, pp.31-40. (1998)にて公開

Lauber, M., Baeyens, B. and Bradbury M.H. (2000) : Physico-chemical characterisation and sorption measurements of Cs, Sr, Ni, Eu, Th, Sn and Se on Opalinus Clay from Mont Terri. PSI Bericht Nr. 00-10, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland.

Lemire, R.J., Fuger, J., Nitsche, H., Potter, P., Rand, M.H., Rydberg, J., Spahiu, K., Sullivan, J.C., Ullman, W.J., Vitorge, P. and Wanner, H. (2001) : Chemical thermodynamics of neptunium and plutonium, Elsevier, Amsterdam.

Marques Fernandes, M., Baeyens, B. and Bradbury, M.H. (2008) : The influence of carbonate complexation on lanthanide/actinide sorption on montmorillonite, Radiochim. Acta, 96, pp.691-697.

Marques Fernandes M., Baeyens B. and Bradbury M.H. (2011) : First structural insight into the sorption of Am(III) on montmorillonite in the presence and absence of carbonate. MIGATION 2011 Conference Abstracts, PA5-15.

Mibus, J., Baeyens, B., Marques Fernandes, M. and Traber, D. (2012) : Derivation of sorption parameters for argillaceous host rocks in Switzerland. Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. 5th International meeting. Abstract O/02B/4.

Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: safety report – demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste. Nagra technical report NTB-02-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.

Neck, V., Runde, W., and Kim, J.I. (1995) : Solid-liquid equilibria of neptunium(V) in carbonate solutions of different ionic strengths: II. Stability of the solid phases, J.Alloys Compd., 225, pp295-302.

Nowak, E.J. (1979) : Backfill as an Engineered Barrier for Nuclear Waste Management. Sandia National Laboratories Rep. SAND79- 0990C, Albuquerque, New Mexico. 128.

日本原子力学会（2006a）：収着分配係数の測定方法－深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順：2006，日本原子力学会標準，AESJ-SC-F008:2006.

日本原子力学会（2006b）：収着分配係数の測定方法－浅地中処分のバリア材を対象としたバッチ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順－，標準委員会　技術レポート，AESJ-SC-TR001:2006.

NUMO(原子力発電環境整備機構)(2011) : 地層処分事業の安全確保（2010 年度版）– 確かな技術による安全な地層処分の実現のために –, NUMO-TR-11-01.

Ochs, M. and Talerico, C. (2004) : SR-Can. Data and uncertainty assessment. Migration parameters for the bentonite buffer in the KBS-3 concept. SKB TR-04-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Ochs, M., Kunze, S., Saito, Y., Kitamura, A., Tachi, Y. and Yui, M. (2008) : Application of the sorption database to K_d-setting for Horonobe rocks, JAEA technical report, JAEA-Reasearch 2008-017.

Ochs, M., Tachi, Y., Trudel, D. and Suyama, T. (2013) : K_d setting approaches for Horonobe mudstone systems: Applications of TSMs and semi-quantitative estimation procedures, JAEA Technical report, JAEA-Research 2012-044.

小田治恵，柴田雅博，油井三和 (1999) : 地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける緩衝材間隙水化学の評価，JNC TN8400 99-078.

OECD/NEA (2001) : Using Thermodynamic Sorption Models for Guiding Radioelement Distribution Coefficient (K_d) Investigations, OECD-NEA, Paris.

OECD/NEA (2005) : NEA Sorption Project. Phase II: Interpretation and Prediction of Radionuclide Sorption onto Substrates Relevant for Radioactive Waste Disposal Using Thermodynamic Sorption Models, OECD/NEA, Paris.

OECD/NEA (2012) : NEA Sorption Project. Phase III: Thermodynamic sorption modeling in support of radioactive waste disposal safety cases. OECD-NEA, Paris.

Parkhurst, D.L., Thorstnsen, D.C. and Plumer, L.H. (1980) : PHREEQE – a computer program for geochemical calculations, U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report: 80-96.

Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. (1999) : User's guide to PHREEQC (ver.2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259.

Payne, T.E., Brendler, V., Ochs, M., Baeyens, B., Brown, P.L., Davis, J.A., Ekberg, C., Kulik, D., Lutzenkirchen, J., Missana, T., Tachi, Y., Van Loon, L.R. and Altmann, S. (2013) : Guidelines for thermodynamic sorption modelling in the context of radioactive waste disposal, Environmental Modelling & Software, 42, pp.143-156.

Poinssot, C., Baeyens, B. and Bradbury, M. H. (1999) : Experimental studies of Cs, Sr, Ni, and Eu sorption on Na-illite and the modeling of Cs sorption. PSI Bericht Nr. 99-06, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland.

Puigdomenech, I. (1983) : "INPUT, SED, and PREDOM: Computer programs drawing equilibrium diagrams", Technical report TRITA-OOK-3010 (ISSN 0348-825X), 12 pp., Royal Institute of Technology (KTH), Dept. Inorg. Chemistry, SE-100 44 Stockholm. Version 2009/08/18, Latest database update 2013/02/14.

Puigdomènech, I. (2002) : MEDUSA (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms) Windows interface to the MS-DOS versions of INPUT, SED and PREDOM (FORTRAN programs drawing chemical equilibrium diagrams) Vers. 31 July 2002, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Rabung, Th., Pierret, M.C., Bauer, A., Geckeis, H., Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2005) : Sorption of Eu(III)/Cm(III) on Ca-montmorillonite and Na-illite Part 1: Batch sorption and time resolved laser fluorescence spectroscopy experiments. Geochim. Cosmochim. Acta 69, pp.5393–5402.

Rai, D. and Ryan, J.L. (1985) : Neptunium(IV) Hydrous Oxide Solubility Under Reducing and Carbonate Conditions, Inorg. Chem., 24, pp.247-251.

Rai, D., Felmy, A.R., Moore, D.A. and Mason, M.J. (1995) : The Solubility of Th(IV) and U(IV) hydorous oxides in concentrated $NaHCO_3$ and Na_2CO_3 solutions. Materials Research Society Symposium Proceedings 353, pp.1143-1150.

Rard, J.A., Rand, M.H., Anderegg, G. and Wanner, H. (1999) : Chemical thermodynamics of technetium, Elsevier, Amsterdam.

Richter, A., Brendler, V., and Nebelung, C. (2005): Blind prediction of Cu(II) sorption onto goethite: Current capabilities of diffuse double layer model, Geochim. Cosmochim. Acta, 69, pp.2725-2734.

Sato, H. and Shibutani, T. (1994) : Study on adsorption and diffusion mechanism of nuclides in buffer material and geosphere. PNC technical review 91, pp.71-89.

Sato, H., Shibutani, T., Tachi, Y., Ota, K., Amano, K. and Yui, M. (1997) : Diffusion Behavior of Nuclides Considering Pathways in Fractured Crystalline Rocks, PNC Technical Report, PNC TN8410 97-127.

Shibutani, T., Yui, M. and Yoshikawa, H. (1994b) : Sorption mechanism of Pu, Am and Se on sodium-bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol.333, pp.725-730.

Silva, R.J., Bidoglio, G., Rand, M.H., Robouch, P.B., Wanner, H. and Puigdomènech, I. (1995) : Chemical thermodynamics of americium, Elsevier, Amsterdam, 374p.

SKB (2011) : Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Volume I., SKB Technical Report, SKB TR-11-01.

Smith, R.M. and Martell, A.E. (1976) : Critical stability constants, Vol.4 : Inorganic complexes, Plenum Press, New York, 257p.

Staunton, S. and Roubaud, M. (1997) : Adsorption of ^{137}Cs on montmorillonite and illite: effect of charge compensating cation, ionic strength, concentration of Cs and fulvic acid, Clays and Clay Minerals, vol.45, pp.251-260.

Suksi, S., Siitari-Kauppi, M., Holtta, P., Jaakola, T. and Lindberg A. (1989) : Sorption and Diffusion of Radionuclides (C, Tc, U, Pu, Np) in Rock Samples underOxic and Anioxic Conditions, YJT Report, No.YJT-89-13.

陶山忠宏，舘幸男 (2012) : 収着データベース(JAEA-SDB)の開発：土壌系及びセメント系を含む収着データの拡充，JAEA-Data/Code 2011-022.

Tachi, Y., Shibutani, T. and Yoshikawa, H. (1999a) : Sorption Behavior of Neptunium on Rocks under Reducing Conditions, JNC Technical Report.

Tachi, Y., Suyama, T., Ochs, M. and Ganter, C. (2011a) : Development of JAEA sorption database(JAEA-SDB): Update of data evaluation functions and sorption/QA data, JAEA-Data/Code 2010-031.

舘幸男，栃木善克，陶山忠宏，齋藤好彦，Ochs, M.，油井三和 (2009)：地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発，JAEA-Data/Code 2008-034.

Tachi, Y., Yotsuji, K., Seida, Y. and Yui, M. (2009b) : Diffusion of cesium and iodine in compacted sodium montmorillonite under different saline conditions. In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXXIII, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol.1193, pp.545–552.

Tachi Y., Yotsuji K., Seida Y. and Yui M. (2011b) : Diffusion and sorption of Cs^+, I^- and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling, Geochim. Cosmochim. Acta, 75, pp.6742–6759.

舘幸男，四辻健治，陶山忠宏，Ochs, M. ，油井三和 (2010)：地層処分安全評価のための現象論的収着・拡散モデル／データベースの開発；ベントナイト系プロトタイプモデル／データベースの構築，JAEA-Research 2009-069.

Tertre, E., Berger, G., Castet, S., Loubet, M. and Giffaut, E. (2005) : Experimental sorption of Ni^{2+}, Cs^+ and Ln^{3+} onto a montmorillonite up to 150 °C, Geochim. Cosmochim. Acta, vol.69, pp.4937-4948.

Torstenfelt, B., Rundberg, R.S. and Mitchell, A.J. (1988) : Actinide Sorption on Granites and Minerals as a Function of pH and Colloids/ Pseudocolloids, Radiochim. Acta, 44/45, pp.111-117.

Ueta, S. (1998) : Development of database system for performance assessment (II), PNC technical report, PNC TJ1211 98-001.

U. S. Geological Survey (2013) : PHREEQC – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/.

Wang, L., Maes, A., De Canniere, P. and Van der Lee, J. (1998) : Sorption of europium on illite (Silver Hill Montana). Radiochim. Acta, 82, pp.233-237.

Wanner, H., Albinsson, Y., Karnland, O., Wieland, E., Wersin, P. and Charlet L. (1994) : The acid/base chemistry of Montmorillonite, Radiochim. Acta, 66/67, pp.157-162.

Wanner, H., Albinsson, Y. and Wieland, E. (1996) : A thermodynamic surface model for caesium sorption on bentonite, Fresenius J. Anal. Chem., 354, pp.763-769.

Wolery, T.J. (1992) : EQ3/6, A Software Package for Geochemical Modeling of Aqueous Systems: Package Overview and Installation Guide (version 7.0), UCRL-MA-110662 PT I. Livermore, California: Lawrence Livermore National Laboratory. TIC: 205087.

Yamamura, T., Kitamura, A., Fukui, A., Nshikawa, S., Yamamoto, T. and Moriyama, H. (1995) : Solubility of U(VI) in highly basic solutions, Radiochim. Acta, 83, pp.139-146.

Yui, M., Azuma, J. and Shibata, M. (1999a) : JNC thermodynamic database for performance assessment of high-level radioactive waste disposal system, JNC TN8400 99-070.

Yui, M., Sasamoto, H. and Arthur, R.C. (1999b) : Groundwater evolution modelling for the second progress performance assessment (PA) report, JNC TN8400 99-030.

Zavarin, M. and Bruton, C.J. (2004) : A non-electrostatic surface complexation approach to modeling radionuclide migration at the Nevada Test Site : II. Alminosilicates, U.S. DOE, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-TR-208672.

6. おわりに

6.1 2012年度の成果

JAEA およびNUMO は，2011年度に引き続き共同研究を実施し，JAEA がこれまで蓄積してきた技術やノウハウを，NUMO が今後行う精密調査地区の選定等の処分事業に直接適用できるよう，事業主体の視点に沿って実用化を図っていくことを目的として，概要調査段階における処分場の設計・性能評価に関連する主要な以下の技術テーマについて検討した。

(1) 水理の観点からみた母岩の適性を評価する方法に関する検討（3章）
(2) シナリオ構築手法に関する検討（4章）
(3) 核種移行パラメータの設定に関する検討（5章）

(1)については，母岩特性の評価する手法のうち水理に着目し，2011年度に引き続き，SR-Siteにおける水理地質構造モデルの構築手法を調査し,結晶質岩を対象とした評価ツリーを拡充した。また，新たに堆積岩地域を対象とした地下水移行時間に関する評価ツリーを作成するとともに、評価ツリーの適用方法について検討した。

(2)については，2011年度作成した状態設定手順を実務的な観点から改良するとともに，緩衝材を対象として，具体的な情報を用いた試行を行った。また，状態設定に係る多様なプロセス情報を体系的に整理する方法について検討した。さらに，基盤的な知見の拡充としてパイピング等の緩衝材に関する知見を整理するとともに，緩衝材へのセメント影響と，溶存ケイ酸濃度の変化がガラス溶解挙動に及ぼす影響について，不確実性要因の影響を検討するための解析を実施した。

(3)については，母岩の分配係数を対象として，堆積岩に対する国内外の事例調査を実施した上で，半定量的条件変換手法や収着モデルの活用を含む分配係数パラメータ設定手法を整理し，幌延の堆積岩への適用事例（Cs, Ni, Am, Th）及び花崗岩への適用評価（U）を通じて，構築した設定フローの妥当性や課題を確認した。また，溶解度について，諸外国における溶解度設定方法や天然地下水中の溶存濃度の解釈に関する調査を踏まえて，とくに溶解度制限固相の決定に着目した包括的な設定方法を検討するとともに，Npを対象とした試行を行い，設定方法の妥当性や課題を確認した。さらに，分配係数設定フローを例に，品質管理の観点から重要な作業プロセスの記録と管理に関する検討を行った。

本共同研究の成果は，概要調査段階における設計・性能評価において必要な技術に係る方法論の具体化に資するものである。また，本共同研究を通じて，事業の観点から必要な課題と今後の計画（基盤研究開発へフィードバックを含む）を明らかにした。

また，本共同研究では，従来から進めてきた情報交換に加え，ワーキンググループ形式等によりJAEAとNUMOが協働で作業を行い，JAEAからNUMOへ技術移転も図れている。

6.2 今後の課題

本共同研究は2011年度より３カ年の計画で開始し，2013年度はその最終年度である。また，NUMOは中期技術開発計画において，2013年度までに概要調査段階に向けたジェネリックな技術

開発を終了させることを目標としている。このため，概要調査段階における処分場概念設計に係る母岩の適正評価，および予備的な安全評価に係るシナリオ構築や核種移行パラメータ設定の方法論について，その有効性を外部有識者からの意見聴取を行いながら確認し，実際の事業に効率的に反映できるよう体系的に取りまとめる。

付　録　A
ボーリング孔沿いの割れ目特性データ

This is a blank page.

付録 A

ボーリング孔沿いの割れ目特性データ

KFM01A 孔

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
1	102.42	81	8	FFM02
2	103.6	141	64	FFM02
3	104.32	335	26	FFM02
4	104.37	145	3	FFM02
5	104.86	221	19	FFM02
6	105	258	14	FFM02
7	105.12	69	15	FFM02
8	105.66	256	12	FFM02
9	105.66	281	19	FFM02
10	105.71	59	20	FFM02
11	105.74	332	69	FFM02
12	105.89	214	10	FFM02
13	107.03	211	13	FFM02
14	107.14	306	77	FFM02
15	107.39	314	22	FFM02
16	107.88	297	30	FFM02
17	108.53	119	15	FFM02
18	108.85	139	10	FFM02
19	108.85	139	6	FFM02
20	109.96	40	16	FFM02
21	110.08	337	18	FFM02
22	110.18	29	32	FFM02
23	110.3	353	9	FFM02
24	110.61	327	18	FFM02
25	111.43	260	3	FFM02
26	111.59	286	81	FFM02
27	111.81	20	19	FFM02
28	111.93	164	20	FFM02
29	112.36	166	71	FFM02
30	112.48	212	8	FFM02
31	113.03	121	87	FFM02
32	113.05	158	7	FFM02
33	113.08	180	6	FFM02
34	113.31	340	17	FFM02
35	113.48	34	18	FFM02
36	113.77	290	12	FFM02
37	113.8	350	21	FFM02
38	114.11	283	12	FFM02
39	114.36	325	40	FFM02
40	114.6	314	30	FFM02
41	114.76	127	11	FFM02
42	115.15	77	11	FFM02
43	115.27	166	23	FFM02
44	115.34	330	31	FFM02
45	115.36	143	64	FFM02
46	115.48	297	23	FFM02
47	115.82	305	83	FFM02
48	116.22	72	73	FFM02
49	116.56	52	22	FFM02
50	116.94	33	21	FFM02

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
51	118.19	190	25	FFM02
52	118.22	265	82	FFM02
53	118.34	302	11	FFM02
54	118.55	329	23	FFM02
55	119.07	81	8	FFM02
56	119.5	112	18	FFM02
57	119.96	182	25	FFM02
58	121.04	150	12	FFM02
59	121.05	348	17	FFM02
60	121.84	213	29	FFM02
61	122.14	312	21	FFM02
62	122.34	70	65	FFM02
63	122.5	327	82	FFM02
64	122.72	219	8	FFM02
65	122.72	165	12	FFM02
66	122.83	320	16	FFM02
67	122.92	355	25	FFM02
68	122.95	160	23	FFM02
69	122.99	86	34	FFM02
70	123.08	54	4	FFM02
71	123.19	330	14	FFM02
72	123.49	231	16	FFM02
73	124.32	161	5	FFM02
74	124.66	230	83	FFM02
75	124.92	19	13	FFM02
76	125.36	264	22	FFM02
77	125.55	270	11	FFM02
78	125.98	116	24	FFM02
79	126.29	214	32	FFM02
80	126.4	30	38	FFM02
81	126.81	258	14	FFM02
82	127.27	297	9	FFM02
83	127.47	267	7	FFM02
84	127.54	241	12	FFM02
85	127.97	264	22	FFM02
86	128.24	50	80	FFM02
87	128.4	284	70	FFM02
88	128.7	253	9	FFM02
89	128.7	75	18	FFM02
90	129.9	342	7	FFM02
91	129.96	109	8	FFM02
92	130.14	303	22	FFM02
93	134.6	276	16	FFM02
94	135.05	299	26	FFM02
95	135.48	324	25	FFM02
96	135.6	315	9	FFM02
97	136.26	187	15	FFM02
98	137.07	30	10	FFM02
99	137.18	260	3	FFM02
100	137.26	330	83	FFM02

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
101	137.39	354	28	FFM02
102	137.75	242	39	FFM02
103	137.97	80	14	FFM02
104	138.43	354	29	FFM02
105	138.58	348	13	FFM02
106	138.96	94	17	FFM02
107	139	284	23	FFM02
108	139.1	290	20	FFM02
109	140.97	313	23	FFM02
110	141.04	342	30	FFM02
111	141.69	235	19	FFM02
112	141.81	14	38	FFM02
113	142.44	36	29	FFM02
114	143.31	200	17	FFM02
115	143.37	47	64	FFM02
116	144.78	73	64	FFM02
117	145.03	244	81	FFM02
118	145.45	321	28	FFM02
119	145.54	192	82	FFM02
120	145.79	298	5	FFM02
121	146.03	317	10	FFM02
122	146.18	318	14	FFM02
123	146.51	259	11	FFM02
124	146.78	202	25	FFM02
125	146.98	141	76	FFM02
126	147.12	90	5	FFM02
127	147.41	333	12	FFM02
128	147.69	218	25	FFM02
129	147.93	87	25	FFM02
130	147.96	159	8	FFM02
131	148.21	92	15	FFM02
132	148.22	33	40	FFM02
133	148.46	1	21	FFM02
134	148.66	358	30	FFM02
135	149.08	342	40	FFM02
136	149.2	309	10	FFM02
137	149.36	43	8	FFM02
138	149.38	315	70	FFM02
139	149.96	267	13	FFM02
140	150.07	296	7	FFM02
141	150.14	297	55	FFM02
142	150.15	243	13	FFM02
143	150.61	251	13	FFM02
144	150.66	165	20	FFM02
145	151.17	58	34	FFM02
146	151.73	192	6	FFM02
147	152.32	144	19	FFM02
148	152.35	315	14	FFM02
149	152.84	5	14	FFM02
150	153.11	145	15	FFM02

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
151	153.41	20	21	FFM02
152	153.52	267	28	FFM02
153	154.78	125	17	FFM02
154	155.18	34	14	FFM02
155	155.28	192	18	FFM02
156	155.76	100	5	FFM02
157	155.78	10	28	FFM02
158	155.82	129	8	FFM02
159	155.88	43	7	FFM02
160	156.23	252	13	FFM02
161	156.9	212	24	FFM02
162	156.91	279	23	FFM02
163	157	21	9	FFM02
164	158.14	17	18	FFM02
165	158.66	25	6	FFM02
166	158.94	255	10	FFM02
167	159.56	145	10	FFM02
168	159.64	136	13	FFM02
169	159.79	200	11	FFM02
170	159.92	174	3	FFM02
171	160.1	216	20	FFM02
172	160.14	1	3	FFM02
173	160.6	280	18	FFM02
174	160.69	182	20	FFM02
175	160.94	312	4	FFM02
176	161.13	68	40	FFM02
177	161.18	45	15	FFM02
178	161.56	311	6	FFM02
179	161.77	303	28	FFM02
180	161.86	101	37	FFM02
181	161.9	35	10	FFM02
182	162.06	217	22	FFM02
183	162.27	269	10	FFM02
184	162.44	174	8	FFM02
185	162.54	124	17	FFM02
186	162.61	82	21	FFM02
187	162.68	215	21	FFM02
188	162.91	166	12	FFM02
189	163.39	197	7	FFM02
190	163.79	222	19	FFM02
191	163.92	88	14	FFM02
192	163.98	83	20	FFM02
193	164.71	353	16	FFM02
194	164.73	117	14	FFM02
195	165.05	167	57	FFM02
196	165.54	326	11	FFM02
197	166.16	216	7	FFM02
198	166.43	268	2	FFM02
199	166.43	78	7	FFM02
200	166.8	305	13	FFM02

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
201	166.91	214	5	FFM02
202	167.98	237	28	FFM02
203	168	283	81	FFM02
204	168.24	258	14	FFM02
205	168.51	103	3	FFM02
206	169.47	92	24	FFM02
207	169.8	301	46	FFM02
208	170.11	194	28	FFM02
209	170.19	202	7	FFM02
210	170.22	315	35	FFM02
211	170.32	140	21	FFM02
212	171.04	46	8	FFM02
213	171.68	343	24	FFM02
214	172.1	159	59	FFM02
215	172.43	314	26	FFM02
216	172.46	60	30	FFM02
217	173.7	181	17	FFM02
218	173.94	198	12	FFM02
219	173.95	291	14	FFM02
220	174	65	40	FFM02
221	174.23	40	39	FFM02
222	174.27	332	77	FFM02
223	174.53	74	17	FFM02
224	174.77	295	13	FFM02
225	175.32	313	18	FFM02
226	175.69	67	22	FFM02
227	176.05	235	22	FFM02
228	176.24	326	73	FFM02
229	176.25	194	6	FFM02
230	177.65	306	22	FFM02
231	178.05	135	18	FFM02
232	178.18	315	66	FFM02
233	178.49	282	72	FFM02
234	178.9	54	32	FFM02
235	178.93	91	12	FFM02
236	179.04	41	33	FFM02
237	179.48	212	8	FFM02
238	179.95	53	26	FFM02
239	180.24	302	56	FFM02
240	180.26	49	58	FFM02
241	180.44	43	14	FFM02
242	181.03	174	4	FFM02
243	181.12	282	23	FFM02
244	181.46	17	18	FFM02
245	182.1	77	5	FFM02
246	182.18	126	8	FFM02
247	182.53	153	28	FFM02
248	183.43	105	8	FFM02
249	183.54	22	21	FFM02
250	183.65	8	7	FFM02

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
251	183.86	208	8	FFM02
252	183.88	121	7	FFM02
253	183.95	21	18	FFM02
254	184.08	245	32	FFM02
255	184.71	337	26	FFM02
256	185.07	286	75	FFM02
257	185.16	300	20	FFM02
258	185.43	278	25	FFM02
259	185.51	345	12	FFM02
260	185.56	32	31	FFM02
261	185.9	277	17	FFM02
262	186.04	180	49	FFM02
263	186.04	275	41	FFM02
264	186.23	23	15	FFM02
265	186.62	341	71	FFM02
266	186.73	359	26	FFM02
267	186.79	65	12	FFM02
268	187.17	139	28	FFM02
269	187.38	103	26	FFM02
270	187.85	43	18	FFM02
271	187.89	206	13	FFM02
272	188.09	135	9	FFM02
273	188.25	175	1	FFM02
274	188.49	175	27	FFM02
275	188.74	295	28	FFM02
276	189	219	15	FFM02
277	189.12	202	18	FFM02
278	189.45	342	41	FFM02
279	189.64	67	16	FFM02
280	189.95	252	12	FFM02
281	190.09	266	36	FFM02
282	190.17	198	20	FFM02
283	190.49	345	6	FFM02
284	190.55	257	80	FFM02
285	190.62	139	83	FFM02
286	190.77	219	45	FFM02
287	191.31	30	6	FFM02
288	191.43	302	11	FFM02
289	191.62	111	18	FFM02
290	191.94	342	48	FFM02
291	192.05	164	12	FFM02
292	192.36	215	23	FFM02
293	192.46	246	21	FFM02
294	192.85	343	23	FFM02
295	193.65	359	23	FFM02
296	193.91	210	16	FFM02
297	194.17	159	14	FFM02
298	194.4	13	28	FFM02
299	195.36	340	9	FFM02
300	195.62	356	12	FFM02

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
301	196.33	10	18	FFM02
302	196.96	266	18	FFM02
303	197.35	20	30	FFM02
304	197.61	106	85	FFM02
305	197.66	61	7	FFM02
306	198.42	83	10	FFM02
307	199.1	57	17	FFM02
308	199.52	333	57	FFM02
309	199.58	31	8	FFM02
310	200.13	41	70	FFM02
311	200.61	21	8	FFM02
312	200.71	351	12	FFM02
313	200.82	316	7	FFM02
314	201.08	206	3	FFM02
315	201.09	68	63	FFM02
316	201.82	100	13	FFM02
317	201.95	314	6	FFM02
318	202.12	117	7	FFM02
319	203.49	81	24	FFM01m
320	205.79	233	20	FFM01m
321	206.39	126	42	FFM01m
322	207.25	280	42	FFM01m
323	207.66	22	17	FFM01m
324	208.36	292	77	FFM01m
325	211.7	300	27	FFM01m
326	214.31	342	9	FFM01m
327	214.62	314	81	FFM01m
328	215.36	144	6	FFM01m
329	216.01	4	27	DZ
330	216.95	26	12	DZ
331	217.76	130	15	DZ
332	219.26	26	6	DZ
333	219.65	42	6	DZ
334	219.82	263	14	DZ
335	219.83	73	15	DZ
336	219.87	339	43	DZ
337	219.93	304	13	DZ
338	220.56	325	73	DZ
339	220.58	306	11	DZ
340	221.11	328	66	DZ
341	221.17	241	7	DZ
342	221.53	53	10	DZ
343	221.75	120	24	DZ
344	222.13	318	19	DZ
345	222.91	321	19	DZ
346	223.1	36	18	DZ
347	223.13	10	28	DZ
348	223.68	274	33	DZ
349	223.69	154	12	DZ
350	223.73	310	60	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
351	223.84	25	19	DZ
352	223.96	63	18	DZ
353	224.08	355	27	FFM01m
354	224.63	289	11	FFM01m
355	224.75	273	11	FFM01m
356	224.88	336	21	FFM01m
357	225.05	333	2	FFM01m
358	225.2	50	18	FFM01m
359	225.32	78	16	FFM01m
360	225.43	135	27	FFM01m
361	225.47	285	24	FFM01m
362	225.54	214	28	FFM01m
363	226.29	144	13	FFM01m
364	226.47	88	29	FFM01m
365	226.74	114	76	FFM01m
366	226.78	284	39	FFM01m
367	226.78	272	17	FFM01m
368	227.28	191	9	FFM01m
369	227.42	133	27	FFM01m
370	227.68	221	78	FFM01m
371	228.3	147	11	FFM01m
372	228.6	135	85	FFM01m
373	228.99	25	24	FFM01m
374	229.4	83	30	FFM01m
375	230.02	147	13	FFM01m
376	230.09	299	10	FFM01m
377	230.27	224	10	FFM01m
378	230.63	143	71	FFM01m
379	230.71	28	18	FFM01m
380	230.72	60	21	FFM01m
381	230.75	310	71	FFM01m
382	231.04	54	16	FFM01m
383	231.17	351	8	FFM01m
384	231.2	290	27	FFM01m
385	231.5	103	20	FFM01m
386	232.52	280	72	FFM01m
387	232.69	138	19	FFM01m
388	233.07	227	37	FFM01m
389	233.09	338	17	FFM01m
390	233.2	65	2	FFM01m
391	233.39	200	4	FFM01m
392	233.54	224	12	FFM01m
393	234.1	80	83	FFM01m
394	234.63	86	6	FFM01m
395	234.9	158	15	FFM01m
396	235.43	17	16	FFM01m
397	235.6	342	34	FFM01m
398	236.87	291	18	FFM01m
399	238.42	88	27	FFM01m
400	239.17	159	34	FFM01m

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
401	239.91	180	5	FFM01m
402	240.88	15	26	FFM01m
403	241.48	197	30	FFM01m
404	242.9	280	10	FFM01m
405	243.53	154	6	FFM01m
406	245.19	338	28	FFM01m
407	246.29	335	29	FFM01m
408	246.97	298	12	FFM01m
409	247.4	104	77	FFM01m
410	247.64	345	70	FFM01m
411	247.65	332	13	FFM01m
412	248.79	312	74	FFM01m
413	249.36	15	13	FFM01m
414	250.09	127	30	FFM01m
415	250.76	302	65	FFM01m
416	251.69	304	66	FFM01m
417	252.55	58	81	FFM01m
418	253.81	290	11	FFM01m
419	257.73	158	1	FFM01m
420	259.86	17	9	FFM01m
421	260.27	74	57	FFM01m
422	260.29	61	14	FFM01m
423	260.37	95	8	FFM01m
424	260.66	4	36	FFM01m
425	260.7	163	71	FFM01m
426	260.94	99	16	FFM01m
427	261.05	8	5	FFM01m
428	261.41	334	69	FFM01m
429	261.7	26	14	FFM01m
430	261.97	342	34	FFM01m
431	262.43	259	17	FFM01m
432	263.73	29	15	FFM01m
433	265.28	180	5	FFM01m
434	265.31	82	10	FFM01m
435	265.65	287	24	FFM01m
436	266.33	35	54	FFM01m
437	268.01	44	34	DZ
438	269.22	333	2	DZ
439	269.24	355	10	DZ
440	269.6	48	66	DZ
441	269.85	162	14	DZ
442	270.25	54	4	DZ
443	270.29	300	14	DZ
444	270.61	50	18	DZ
445	271.55	39	11	DZ
446	271.77	12	22	DZ
447	271.93	73	10	DZ
448	272.31	264	10	DZ
449	272.49	285	21	DZ
450	272.73	327	6	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
451	273.01	220	12	DZ
452	273.19	112	20	DZ
453	273.28	128	59	DZ
454	273.33	119	16	DZ
455	273.46	319	14	DZ
456	273.92	138	32	DZ
457	274.6	307	78	DZ
458	274.67	176	68	DZ
459	274.69	334	23	DZ
460	274.77	191	9	DZ
461	275.23	133	27	DZ
462	275.54	221	78	DZ
463	275.84	147	11	DZ
464	276.1	135	85	DZ
465	276.28	25	24	DZ
466	276.57	83	30	DZ
467	276.6	147	13	DZ
468	277.01	299	10	DZ
469	277.49	224	10	DZ
470	277.52	143	71	DZ
471	277.7	28	18	DZ
472	277.76	60	21	DZ
473	277.79	310	71	DZ
474	277.87	54	16	DZ
475	278.04	351	8	DZ
476	278.61	290	27	DZ
477	279.27	103	20	DZ
478	279.61	280	72	DZ
479	279.94	138	19	DZ
480	280.04	227	37	DZ
481	280.15	338	17	DZ
482	280.2	65	2	DZ
483	280.24	200	4	DZ
484	281.09	224	12	DZ
485	281.76	80	83	DZ
486	281.76	86	6	DZ
487	282.2	158	15	DZ
488	282.33	17	16	DZ
489	284.35	342	34	DZ
490	286.06	4	27	FFM01m
491	286.91	26	12	FFM01m
492	287.17	130	15	FFM01m
493	287.47	26	6	FFM01m
494	288.52	42	6	FFM01m
495	289.01	263	14	FFM01m
496	289.28	73	15	FFM01m
497	289.63	339	43	FFM01m
498	289.81	304	13	FFM01m
499	290.68	325	73	FFM01m
500	290.9	306	11	FFM01m

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
501	291.31	328	66	FFM01m
502	292.19	241	7	FFM01m
503	292.22	53	10	FFM01m
504	292.45	120	24	FFM01m
505	292.96	318	19	FFM01m
506	293.33	321	19	FFM01m
507	293.42	36	18	FFM01m
508	293.84	10	28	FFM01m
509	294.42	274	33	FFM01m
510	294.8	154	12	FFM01m
511	295.91	310	60	FFM01m
512	298.33	25	19	FFM01m
513	298.4	63	18	FFM01m
514	298.59	44	34	FFM01m
515	299.22	333	2	FFM01m
516	300.12	355	10	FFM01m
517	303.4	48	66	FFM01m
518	303.52	162	14	FFM01m
519	303.94	54	4	FFM01m
520	305.02	300	14	FFM01m
521	306	50	18	FFM01m
522	306.47	39	11	FFM01m
523	306.72	12	22	FFM01m
524	306.93	73	10	FFM01m
525	308.66	264	10	FFM01m
526	309.68	285	21	FFM01m
527	311.67	327	6	FFM01m
528	312.04	220	12	FFM01m
529	316.73	112	20	FFM01m
530	318.18	128	59	FFM01m
531	318.29	119	16	FFM01m
532	318.86	319	14	FFM01m
533	318.96	138	32	FFM01m
534	319.17	307	78	FFM01m
535	320.88	176	68	FFM01m
536	325.42	334	23	FFM01m
537	327.02	355	27	FFM01m
538	327.74	289	11	FFM01m
539	331.25	273	11	FFM01m
540	332.1	336	21	FFM01m
541	333.78	333	2	FFM01m
542	333.93	50	18	FFM01m
543	335.11	78	16	FFM01m
544	341.24	135	27	FFM01m
545	342.65	285	24	FFM01m
546	342.73	214	28	FFM01m
547	344.45	144	13	FFM01m
548	349.15	88	29	FFM01m
549	349.45	114	76	FFM01m
550	350.75	284	39	FFM01m

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
551	351.21	272	17	FFM01m
552	351.24	191	9	FFM01m
553	354.08	133	27	FFM01m
554	354.51	221	78	FFM01m
555	357.15	147	11	FFM01m
556	361.15	135	85	FFM01m
557	362.02	25	24	FFM01m
558	363.75	83	30	FFM01m
559	367.85	147	13	FFM01m
560	370.38	299	10	FFM01m
561	370.52	224	10	FFM01m
562	377.1	143	71	FFM01m
563	378.36	28	18	FFM01m
564	378.65	60	21	FFM01m
565	379.79	310	71	FFM01m
566	380.26	54	16	FFM01m
567	380.71	351	8	FFM01m
568	381.85	290	27	FFM01m
569	382.12	103	20	FFM01m
570	382.99	280	72	FFM01m
571	383.3	138	19	FFM01m
572	383.47	227	37	FFM01m
573	383.56	338	17	FFM01m
574	383.92	65	2	FFM01m
575	384.47	200	4	FFM01m
576	384.84	224	12	FFM01m
577	384.87	80	83	FFM01m
578	385.33	86	6	FFM01m
579	385.35	158	15	FFM01m
580	385.39	17	16	FFM01m
581	385.47	342	34	FFM01m
582	386.77	291	18	DZ
583	387.74	88	27	DZ
584	388	159	34	DZ
585	388.32	180	5	DZ
586	388.46	15	26	DZ
587	388.58	197	30	DZ
588	388.92	280	10	DZ
589	390.07	154	6	DZ
590	390.14	338	28	DZ
591	390.36	335	29	DZ
592	390.7	298	12	DZ
593	390.83	104	77	DZ
594	391.17	345	70	DZ
595	391.73	332	13	DZ
596	392.03	312	74	DZ
597	392.11	15	13	DZ
598	392.21	127	30	DZ
599	392.48	302	65	DZ
600	392.71	304	66	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
601	392.81	58	81	DZ
602	393.22	290	11	DZ
603	393.43	158	1	DZ
604	393.48	17	9	DZ
605	393.51	74	57	DZ
606	393.77	138	65	DZ
607	394.21	345	2	DZ
608	394.49	215	11	DZ
609	395.35	51	67	DZ
610	395.48	104	13	DZ
611	395.76	128	62	DZ
612	396.74	266	43	DZ
613	396.74	295	68	DZ
614	397.03	344	10	DZ
615	397.17	164	75	DZ
616	397.59	87	70	DZ
617	399.29	234	12	DZ
618	399.76	297	13	DZ
619	399.87	300	79	DZ
620	400.45	62	67	DZ
621	400.54	300	7	DZ
622	400.74	42	31	DZ
623	400.91	343	81	DZ
624	401.46	313	13	DZ
625	401.59	131	30	DZ
626	402.05	307	83	DZ
627	404.89	229	14	DZ
628	405.36	333	44	DZ
629	405.84	51	18	DZ
630	405.99	215	17	DZ
631	407.13	166	9	DZ
632	407.2	72	38	DZ
633	408.02	130	72	DZ
634	410.35	166	14	DZ
635	410.87	284	6	DZ
636	411.74	149	17	DZ
637	414.01	138	65	FFM01l
638	414.62	345	2	FFM01l
639	417.18	215	11	FFM01l
640	417.88	51	67	FFM01l
641	418.56	104	13	FFM01l
642	419.25	128	62	FFM01l
643	420.82	266	43	FFM01l
644	421.44	295	68	FFM01l
645	433.4	344	10	FFM01l
646	433.55	164	75	FFM01l
647	434.28	87	70	FFM01l
648	434.85	234	12	FFM01l
649	437.4	297	13	FFM01l
650	444.04	300	79	FFM01l

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
651	444.77	62	67	FFM01l
652	446.16	300	7	FFM01l
653	449.08	42	31	FFM01l
654	449.43	343	81	FFM01l
655	449.58	313	13	FFM01l
656	452.06	131	30	FFM01l
657	452.16	307	83	FFM01l
658	453.75	229	14	FFM01l
659	466.2	333	44	FFM01l
660	469.18	51	18	FFM01l
661	469.3	215	17	FFM01l
662	469.87	166	9	FFM01l
663	470.9	72	38	FFM01l
664	471.64	130	72	FFM01l
665	473.12	166	14	FFM01l
666	473.31	284	6	FFM01l
667	473.33	149	17	FFM01l
668	476.53	73	16	FFM01l
669	478.91	40	15	FFM01l
670	480.24	251	9	FFM01l
671	480.46	160	9	FFM01l
672	481.14	94	18	FFM01l
673	483.61	255	18	FFM01l
674	484.52	298	77	FFM01l
675	489.93	28	25	FFM01l
676	503.27	79	15	FFM01l
677	507.01	326	13	FFM01l
678	507.59	107	9	FFM01l
679	508.64	9	48	FFM01l
680	509.87	347	4	FFM01l
681	510.32	303	4	FFM01l
682	526.12	268	8	FFM01l
683	534.69	309	69	FFM01l
684	536.21	229	30	FFM01l
685	536.66	67	58	FFM01l
686	537.12	34	63	FFM01l
687	537.24	129	29	FFM01l
688	537.49	91	31	FFM01l
689	539.84	55	67	FFM01l
690	540.08	281	28	FFM01l
691	542.02	245	27	FFM01l
692	543.79	62	82	FFM01l
693	546.31	328	20	FFM01l
694	558.13	46	79	FFM01l
695	565.81	7	17	FFM01l
696	566.87	106	79	FFM01l
697	572.56	36	13	FFM01l
698	589.03	330	77	FFM01l
699	589.9	240	51	FFM01l
700	597.3	116	86	FFM01l

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
701	610.13	33	36	FFM01I
702	610.55	132	67	FFM01I
703	612.15	113	26	FFM01I
704	612.7	49	67	FFM01I
705	618.66	18	24	FFM01I
706	628.7	307	79	FFM01I
707	628.9	209	7	FFM01I
708	628.97	60	67	FFM01I
709	631.33	8	32	FFM01I
710	631.68	31	16	FFM01I
711	631.87	185	17	FFM01I
712	631.91	72	20	FFM01I
713	632.07	195	33	FFM01I
714	636.44	223	25	FFM01I
715	637.39	2	11	FFM01I
716	637.82	289	22	FFM01I
717	638.47	148	73	FFM01I
718	638.95	16	37	FFM01I
719	639.86	63	18	DZ
720	640.57	330	27	DZ
721	641.7	142	14	DZ
722	644.09	141	5	DZ
723	645.29	307	16	DZ
724	645.91	12	85	DZ
725	646.5	291	22	DZ
726	646.57	90	64	DZ
727	647.56	42	23	DZ
728	648.48	313	21	DZ
729	648.8	349	71	DZ
730	649.82	158	77	DZ
731	649.84	125	36	DZ
732	649.96	64	10	DZ
733	650.54	346	11	DZ
734	650.65	105	82	DZ
735	650.82	267	31	DZ
736	651.03	147	7	DZ
737	651.04	177	31	DZ
738	651.1	310	6	DZ
739	651.25	120	68	DZ
740	651.48	216	6	DZ
741	651.98	287	75	DZ
742	652.13	102	3	DZ
743	652.35	328	69	DZ
744	652.82	308	6	DZ
745	653.86	267	36	DZ
746	654.19	93	26	DZ
747	655.09	59	85	DZ
748	656.16	130	69	DZ
749	657	305	11	DZ
750	657.18	11	17	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
751	657.56	10	13	DZ
752	659.38	288	4	DZ
753	659.52	101	24	DZ
754	660.43	96	15	DZ
755	661.45	129	41	DZ
756	661.75	174	14	DZ
757	661.99	5	13	DZ
758	663.05	338	15	DZ
759	663.42	220	25	DZ
760	664.57	55	52	DZ
761	664.65	330	22	DZ
762	666.62	319	74	DZ
763	667.32	49	18	DZ
764	667.69	265	70	DZ
765	669.12	94	13	DZ
766	669.16	282	16	DZ
767	669.37	161	82	DZ
768	670.1	76	6	DZ
769	671.34	19	29	DZ
770	671.5	221	17	DZ
771	671.87	118	18	DZ
772	671.98	328	10	DZ
773	672.51	116	85	DZ
774	672.68	311	75	DZ
775	674.03	199	13	DZ
776	675.09	256	12	DZ
777	677.09	353	85	DZ
778	677.38	264	79	DZ
779	677.83	347	7	DZ
780	678.86	326	5	DZ
781	679.04	83	10	DZ
782	685.14	79	40	FFM01I
783	710.73	275	11	FFM01I
784	710.95	225	14	FFM01I
785	712.44	68	66	FFM01I
786	718.66	81	23	FFM01I
787	720.48	351	74	FFM01I
788	737.65	357	21	FFM01I
789	738.72	83	57	FFM01I
790	739.99	285	26	FFM01I
791	773.32	298	56	FFM01I
792	812.08	296	77	FFM01I
793	813.44	281	12	FFM01I
794	813.47	121	27	FFM01I
795	828.18	351	31	FFM01I
796	832.91	59	20	FFM01I
797	839.83	181	5	FFM01I
798	840.03	95	15	FFM01I
799	841.94	315	12	FFM01I
800	842.57	104	81	FFM01I

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
801	842.77	128	63	FFM01l
802	854.8	100	56	FFM01l
803	856.03	197	71	FFM01l
804	856.06	242	10	FFM01l
805	856.11	71	19	FFM01l
806	856.53	168	8	FFM01l
807	856.92	34	14	FFM01l
808	857.69	83	28	FFM01l
809	858.56	33	18	FFM01l
810	858.73	318	11	FFM01l
811	860.93	313	74	FFM01l
812	865.9	319	9	FFM01l
813	886.54	337	13	FFM01l
814	898.57	348	26	FFM01l
815	918.67	160	69	FFM01l
816	955.73	297	66	FFM01l

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分

付録 A

KFM01D 孔

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
1	91.74	133	27	FFM02
2	93.24	231	88	FFM02
3	97.03	96	21	FFM02
4	100.93	264	16	FFM02
5	100.2	326	17	FFM02
6	100.72	40	17	FFM02
7	101.83	67	18	FFM02
8	103.22	199	7	FFM02
9	105.52	137	6	FFM02
10	106.1	302	11	FFM02
11	106.81	264	22	FFM02
12	106.64	89	20	FFM02
13	106.48	231	15	FFM02
14	106.93	137	29	FFM02
15	106.77	41	16	FFM02
16	108.39	216	11	FFM02
17	108.9	342	30	FFM02
18	108.6	305	12	FFM02
19	109.58	114	35	FFM02
20	110.57	17	13	FFM02
21	111.08	274	3	FFM02
22	111.57	52	14	FFM02
23	114.54	338	33	FFM02
24	115.04	7	7	FFM02
25	115.24	57	87	FFM02
26	116.75	56	82	FFM02
27	117.4	288	81	FFM02
28	118.13	284	21	FFM02
29	119.3	298	28	FFM02
30	120.55	264	22	FFM02
31	121.71	347	80	FFM02
32	122.39	165	12	FFM02
33	122.08	81	21	FFM02
34	122.21	294	7	FFM02
35	122.79	44	5	FFM02
36	122.6	324	62	FFM02
37	122.94	281	19	FFM02
38	123.54	277	17	FFM02
39	123.36	208	34	FFM02
40	123.7	81	8	FFM02
41	125.16	169	6	FFM02
42	125.5	345	12	FFM02
43	125.01	151	14	FFM02
44	125.67	145	76	FFM02
45	125.61	212	8	FFM02
46	125.28	68	16	FFM02
47	125.09	175	11	FFM02
48	126.91	114	31	FFM02
49	126.51	348	17	FFM02
50	126.68	344	20	FFM02

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
51	126.46	281	13	FFM02
52	127.19	151	61	FFM02
53	127.31	359	26	FFM02
54	128.08	62	7	FFM02
55	128.22	226	10	FFM02
56	128.61	54	61	FFM02
57	129.8	156	19	FFM02
58	129.27	25	35	FFM02
59	129.44	191	73	FFM02
60	130.5	272	88	FFM02
61	130.73	111	67	FFM02
62	130.96	165	16	FFM02
63	130.19	193	4	FFM02
64	131.83	161	79	FFM02
65	131.22	263	90	FFM02
66	131.62	182	25	FFM02
67	131.23	339	77	FFM02
68	131.7	206	18	FFM02
69	131.03	171	10	FFM02
70	132.74	99	12	FFM02
71	132.11	244	17	FFM02
72	132.84	81	23	FFM02
73	132.41	146	30	FFM02
74	133.87	6	35	FFM02
75	133.32	138	56	FFM02
76	133.2	239	28	FFM02
77	134.69	303	28	FFM02
78	139.67	149	64	FFM02
79	139.16	267	73	FFM02
80	139.58	288	6	FFM02
81	142.83	258	14	FFM02
82	143.66	219	8	FFM02
83	143.59	274	5	FFM02
84	143.84	156	19	FFM02
85	143.31	194	6	FFM02
86	144.16	146	89	FFM02
87	144.63	218	25	FFM02
88	144.36	42	8	FFM02
89	144.75	135	18	FFM02
90	145.83	114	10	FFM02
91	145.68	300	20	FFM02
92	145.96	138	10	FFM02
93	145.01	23	17	FFM02
94	145.35	67	32	FFM02
95	145.85	23	16	FFM02
96	145.04	85	18	FFM02
97	145.64	233	8	FFM02
98	145.49	345	85	FFM02
99	145.47	350	13	FFM02
100	145.39	333	30	FFM02

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
101	146.86	358	21	FFM02
102	146.47	236	19	FFM02
103	146.69	159	16	FFM02
104	147.09	77	5	FFM02
105	147.02	256	16	FFM02
106	147.26	100	18	FFM02
107	147.42	279	22	FFM02
108	147.45	334	16	FFM02
109	147.8	99	14	FFM02
110	148.53	238	8	FFM02
111	148.75	345	21	FFM02
112	150.93	150	7	FFM02
113	150.68	287	12	FFM02
114	150.64	279	22	FFM02
115	150.74	333	30	FFM02
116	150.46	110	20	FFM02
117	150.27	213	29	FFM02
118	151.1	223	13	FFM02
119	151.54	3	19	FFM02
120	152.54	204	12	FFM02
121	152	93	45	FFM02
122	153.26	289	24	FFM02
123	154.91	202	18	FFM02
124	155.61	24	25	FFM02
125	156.03	214	32	FFM02
126	157.91	302	11	FFM02
127	157.57	123	29	FFM02
128	157.17	13	13	FFM02
129	158	174	21	FFM02
130	157.9	301	16	FFM02
131	157.44	258	14	FFM02
132	157.04	99	14	FFM02
133	157.61	273	86	FFM02
134	157.62	56	26	FFM02
135	157.68	294	14	FFM02
136	158.39	308	84	FFM02
137	158.04	34	25	FFM02
138	159.96	293	18	FFM02
139	162.15	1	11	FFM02
140	167.36	61	12	FFM02
141	168.95	15	68	FFM02
142	168.54	52	82	FFM02
143	169.72	139	9	FFM02
144	169.32	343	27	FFM02
145	170.17	233	8	FFM02
146	171.26	57	28	FFM02
147	171.27	77	11	FFM02
148	175.15	314	32	FFM02
149	176.03	0	20	DZ
150	176.99	181	21	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
151	176.14	302	11	DZ
152	176.11	331	37	DZ
153	177.59	9	8	DZ
154	177.87	17	18	DZ
155	178.89	166	12	DZ
156	178.98	174	3	DZ
157	179.64	326	14	DZ
158	179.6	166	8	DZ
159	179.39	58	90	DZ
160	179.32	124	15	DZ
161	179.11	99	80	DZ
162	180.93	68	23	DZ
163	180.06	272	85	DZ
164	180.74	337	28	DZ
165	181.44	139	9	DZ
166	181.07	275	41	DZ
167	181.32	285	61	DZ
168	181.51	146	78	DZ
169	182.05	314	75	DZ
170	182.55	257	80	DZ
171	182.62	15	21	DZ
172	183.1	239	12	DZ
173	183.2	288	78	DZ
174	187.39	135	88	FFM02
175	187.13	37	20	FFM02
176	188.68	279	22	FFM02
177	188.91	15	8	FFM02
178	188.52	33	21	FFM02
179	188.3	303	28	FFM02
180	189.65	270	86	FFM02
181	189.84	313	31	FFM02
182	190.82	320	20	FFM02
183	191.61	287	4	FFM01u
184	191.47	280	12	FFM01u
185	191.4	225	79	FFM01u
186	191.97	102	17	FFM01u
187	192.7	114	18	FFM01u
188	194.4	24	22	FFM01u
189	194.25	146	24	FFM01u
190	194.56	77	27	FFM01u
191	196.62	59	8	FFM01u
192	196.83	74	8	FFM01u
193	197.73	308	14	FFM01u
194	199.07	6	17	FFM01u
195	199.11	221	19	FFM01u
196	207.64	312	14	FFM01u
197	208.57	229	3	FFM01u
198	217.2	264	70	FFM01u
199	219.14	288	12	FFM01u
200	220.48	354	28	FFM01u

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
201	229.9	225	24	FFM01u
202	232.97	287	24	FFM01u
203	232.03	309	67	FFM01u
204	234.51	151	85	FFM01u
205	235.27	201	26	FFM01u
206	238.92	323	18	FFM01u
207	242.72	33	80	FFM01u
208	242.82	244	12	FFM01u
209	242.12	156	18	FFM01u
210	244.26	161	27	FFM01u
211	245.18	163	17	FFM01u
212	245.1	322	24	FFM01u
213	246.9	1	17	FFM01u
214	247.59	7	28	FFM01u
215	248.61	63	15	FFM01u
216	249.39	184	65	FFM01u
217	254.77	104	17	FFM01m
218	258.99	166	84	FFM01m
219	258	122	64	FFM01m
220	259.07	112	20	FFM01m
221	261.01	133	27	FFM01m
222	264.33	143	31	FFM01m
223	264.12	239	36	FFM01m
224	264.01	47	7	FFM01m
225	270.2	157	13	FFM01m
226	277.46	171	87	FFM01m
227	296.53	158	86	FFM01m
228	299.17	119	80	FFM01m
229	300.96	160	13	FFM01m
230	303.15	289	87	FFM01m
231	306.91	296	67	FFM01m
232	307.36	307	65	FFM01m
233	307.01	246	76	FFM01m
234	307.43	130	86	FFM01m
235	307.94	75	10	FFM01m
236	307.88	320	82	FFM01m
237	307.04	142	8	FFM01m
238	308.46	309	68	FFM01m
239	308.6	64	79	FFM01m
240	316.9	135	78	FFM01m
241	316.37	268	31	FFM01m
242	318.85	133	27	FFM01m
243	318.75	326	10	FFM01m
244	318.14	165	68	FFM01m
245	319.58	144	88	FFM01m
246	323.03	347	8	FFM01m
247	325.28	101	87	FFM01m
248	331.69	315	35	FFM01m
249	332.16	33	35	FFM01m
250	332.93	238	7	FFM01m

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
251	332.98	188	18	FFM01m
252	332.18	332	13	FFM01m
253	332.98	4	36	FFM01m
254	345.73	140	13	FFM01m
255	347.26	150	86	FFM01m
256	347.92	273	11	FFM01m
257	348.61	42	86	FFM01m
258	350.52	175	77	FFM01m
259	351.6	220	90	FFM01m
260	352.84	186	17	FFM01m
261	353.79	279	75	FFM01m
262	353.87	52	16	FFM01m
263	353.4	148	82	FFM01m
264	353.13	138	19	FFM01m
265	353.11	235	14	FFM01m
266	354.79	342	17	FFM01m
267	355.43	264	10	FFM01m
268	355.58	183	14	FFM01m
269	356.25	15	18	FFM01m
270	360.66	338	89	FFM01m
271	360.28	137	21	FFM01m
272	362.58	358	79	FFM01m
273	362.54	251	27	FFM01m
274	362.76	137	7	FFM01m
275	363.81	133	27	FFM01m
276	363.51	112	25	FFM01m
277	363.99	138	19	FFM01m
278	364.37	276	65	FFM01m
279	369.88	41	87	FFM01m
280	373.86	136	60	FFM01m
281	375.96	323	61	FFM01m
282	376.48	251	7	FFM01m
283	377.05	25	21	FFM01m
284	378.81	297	80	FFM01m
285	378.01	41	74	FFM01m
286	379.78	48	15	FFM01m
287	381.06	305	14	FFM01m
288	382.01	77	8	FFM01m
289	382.64	354	5	FFM01m
290	382.36	63	20	FFM01m
291	383.95	257	72	FFM01m
292	384.61	327	21	FFM01m
293	384.07	131	83	FFM01m
294	386.82	235	74	FFM01m
295	386.45	119	16	FFM01m
296	391.3	131	10	FFM01m
297	391.94	108	17	FFM01m
298	391.7	337	56	FFM01m
299	392.04	290	31	FFM01m
300	392.34	282	88	FFM01m

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
301	394.69	326	72	FFM01m
302	401.32	260	44	FFM01m
303	401.5	79	80	FFM01m
304	401.99	204	14	FFM01m
305	402.57	153	21	FFM01m
306	402.42	3	85	FFM01m
307	404.55	184	11	FFM01m
308	412	306	73	DZ
309	414.31	276	70	DZ
310	415.1	86	6	DZ
311	416.04	86	6	DZ
312	416.85	158	1	DZ
313	417.17	264	5	DZ
314	418	39	11	DZ
315	420.69	109	59	DZ
316	420.45	352	77	DZ
317	420.89	143	69	DZ
318	420.4	339	43	DZ
319	420.19	147	60	DZ
320	428.77	355	21	FFM01m
321	431.5	108	16	FFM01m
322	436.43	253	75	FFM01m
323	438.74	46	13	FFM01m
324	439.87	325	36	FFM01m
325	445.65	342	34	FFM01m
326	448.16	299	10	FFM01m
327	451.61	125	16	FFM01m
328	457.54	253	75	FFM01m
329	461.96	149	67	FFM01m
330	462.74	12	45	FFM01m
331	462.47	19	77	FFM01m
332	463.07	327	6	FFM01m
333	463.44	119	16	FFM01m
334	478.87	244	86	FFM01m
335	483.62	8	9	FFM01m
336	484.1	124	73	FFM01m
337	485.82	207	5	FFM01m
338	487.99	349	5	FFM01m
339	487.88	284	23	FFM01m
340	487.68	17	16	FFM01m
341	488.77	107	87	DZ
342	488.57	225	73	DZ
343	488.48	342	34	DZ
344	488.95	61	80	DZ
345	488.01	73	86	DZ
346	488.46	17	41	DZ
347	488.74	210	18	DZ
348	488.01	197	30	DZ
349	489.38	286	88	DZ
350	489.82	230	76	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
351	490.57	68	14	DZ
352	491.34	343	80	DZ
353	491.47	156	82	DZ
354	491.62	344	87	DZ
355	492.33	154	70	DZ
356	493.78	188	18	DZ
357	493.53	308	14	DZ
358	494.03	274	33	DZ
359	495.69	189	20	DZ
360	497.92	107	87	FFM01m
361	500.31	225	73	FFM01m
362	500.29	342	34	FFM01m
363	511.18	260	90	FFM01l
364	512.85	218	76	FFM01l
365	513	133	88	FFM01l
366	524.48	19	28	FFM01l
367	525.14	262	80	FFM01l
368	527.83	340	69	FFM01l
369	528.05	211	10	FFM01l
370	532.92	207	15	FFM01l
371	537.28	144	11	FFM01l
372	540.96	16	37	FFM01l
373	546.91	213	75	FFM01l
374	549.48	79	15	FFM01l
375	550.52	96	15	FFM01l
376	550.34	155	23	FFM01l
377	561.78	171	84	FFM01l
378	563.23	314	21	FFM01l
379	564.95	290	23	FFM01l
380	567.79	315	12	FFM01l
381	569.12	157	76	FFM01l
382	570.18	63	18	FFM01l
383	570.3	292	86	FFM01l
384	570.72	305	11	FFM01l
385	571.48	166	14	FFM01l
386	571.52	61	8	FFM01l
387	572.77	132	12	FFM01l
388	577.28	337	13	FFM01l
389	593.75	241	8	FFM01l
390	598.35	260	57	FFM01l
391	603.13	228	5	FFM01l
392	606.79	92	87	FFM01l
393	606.19	42	90	FFM01l
394	608.77	187	86	FFM01l
395	608.13	306	19	FFM01l
396	612.95	258	17	FFM01l
397	614.16	283	28	FFM01l
398	614.08	101	32	FFM01l
399	620.09	50	15	FFM01l
400	623.07	46	79	FFM01l

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
401	649.8	173	89	FFM01l
402	654.45	226	87	FFM01l
403	656.91	229	10	FFM01l
404	661.15	81	23	FFM01l
405	670.78	251	16	DZ
406	671.76	10	13	DZ
407	674.21	166	14	DZ
408	676.51	315	12	DZ
409	677.99	37	24	DZ
410	679.26	13	12	DZ
411	680.4	135	73	DZ
412	682.34	87	8	DZ
413	683.5	64	10	DZ
414	684.11	333	32	DZ
415	685.75	148	89	DZ
416	688.43	263	32	DZ
417	688.36	287	10	DZ
418	688.94	237	20	DZ
419	690.54	10	84	DZ
420	690.33	195	83	DZ
421	691.98	284	21	DZ
422	691.02	140	17	DZ
423	693.18	94	13	DZ
424	694.71	209	87	DZ
425	694.1	281	76	DZ
426	694.23	233	89	DZ
427	694.24	57	19	DZ
428	694.29	317	20	DZ
429	694.46	354	23	DZ
430	694.58	202	83	DZ
431	694.6	81	23	DZ
432	694.99	156	24	DZ
433	694.92	96	15	DZ
434	695.79	334	87	DZ
435	695.46	166	14	DZ
436	697.31	167	10	DZ
437	697.1	140	17	DZ
438	700	301	82	DZ
439	699.84	63	18	DZ
440	703.47	256	76	FFM01l
441	710.76	24	13	FFM01l
442	711.04	179	15	FFM01l
443	720.35	251	83	FFM01l
444	720.46	349	22	FFM01l
445	729.78	64	10	FFM01l
446	736.92	81	23	FFM01l
447	740.23	207	4	FFM01l
448	748.14	264	79	FFM01l
449	749.89	308	66	FFM01l
450	749.48	160	80	FFM01l

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
451	770.21	113	26	FFM01l
452	770.48	307	18	FFM01l
453	771.13	217	26	DZ
454	771.52	195	33	DZ
455	771.28	264	79	DZ
456	771.05	186	6	DZ
457	771.55	205	25	DZ
458	771.05	327	9	DZ
459	772.19	179	15	DZ
460	772.45	58	77	DZ
461	772.15	280	69	DZ
462	782.84	9	84	FFM01l
463	786.4	142	80	FFM01l
464	787.51	185	17	FFM01l
465	790.15	272	15	FFM01l

付録 A

KFM06A 孔

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
1	102.39	131	14	FFM02
2	102.7	131	10	FFM02
3	105.22	136	83	FFM02
4	106.19	285	5	FFM02
5	107.82	123	67	FFM02
6	107.69	138	56	FFM02
7	107.36	146	13	FFM02
8	107.61	21	16	FFM02
9	108.67	226	10	FFM02
10	109.41	323	20	FFM02
11	109.39	237	28	FFM02
12	109.36	151	85	FFM02
13	110.63	179	16	FFM02
14	110.23	120	72	FFM02
15	110.86	315	14	FFM02
16	110.29	101	84	FFM02
17	110.66	60	22	FFM02
18	110.26	16	12	FFM02
19	110.97	324	58	FFM02
20	110.83	65	78	FFM02
21	110.87	79	43	FFM02
22	110.48	247	26	FFM02
23	111.93	81	21	FFM02
24	111.63	263	90	FFM02
25	111.61	103	3	FFM02
26	111.68	101	3	FFM02
27	112.82	51	84	FFM02
28	112.46	151	86	FFM02
29	113.32	26	13	FFM02
30	113.18	8	26	FFM02
31	113.35	202	15	FFM02
32	113.3	99	14	FFM02
33	114.08	202	29	FFM02
34	114.66	78	67	FFM02
35	115.56	176	17	FFM02
36	115.38	313	29	FFM02
37	116.45	240	5	FFM02
38	116.66	154	85	FFM02
39	116.87	186	22	FFM02
40	116.41	352	5	FFM02
41	116.62	117	89	FFM02
42	118.15	108	75	FFM02
43	118.15	134	58	FFM02
44	120.62	153	28	FFM02
45	120.99	98	75	FFM02
46	123.29	358	21	FFM02
47	124.44	226	10	FFM02
48	125.29	315	85	FFM02
49	125.59	323	17	FFM02
50	126.01	358	19	FFM02

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
51	127.89	137	15	FFM02
52	128.06	330	25	DZ
53	128.87	98	88	DZ
54	128.39	64	34	DZ
55	128.92	336	81	DZ
56	128.23	285	88	DZ
57	128.71	209	24	DZ
58	128.65	111	67	DZ
59	128.06	164	12	DZ
60	129.61	218	24	DZ
61	129.66	34	19	DZ
62	129.37	330	20	DZ
63	129.17	315	85	DZ
64	129.5	291	79	DZ
65	129.78	99	5	DZ
66	130.93	214	10	DZ
67	130.13	317	28	DZ
68	130.3	344	10	DZ
69	130.5	336	18	DZ
70	131.26	222	28	DZ
71	131.01	133	19	DZ
72	131.95	30	31	DZ
73	131.35	325	81	DZ
74	133.83	276	89	DZ
75	134.91	326	87	DZ
76	134.17	283	79	DZ
77	135.07	128	82	DZ
78	135.11	152	78	DZ
79	135.43	263	23	DZ
80	135.87	102	24	DZ
81	135.2	122	77	DZ
82	135.46	313	20	DZ
83	135.1	23	15	DZ
84	135.57	150	18	DZ
85	135.87	95	35	DZ
86	135.26	37	21	DZ
87	136.44	106	4	DZ
88	136.16	192	18	DZ
89	136.28	55	15	DZ
90	136.01	123	78	DZ
91	136.91	57	87	DZ
92	138.57	129	45	DZ
93	139.43	156	22	DZ
94	140.92	188	17	DZ
95	140.19	181	21	DZ
96	140.24	8	10	DZ
97	141.44	159	16	DZ
98	141.63	129	16	DZ
99	141.19	308	11	DZ
100	141.39	127	21	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
101	142.34	338	70	DZ
102	142.92	124	15	DZ
103	142.01	306	74	DZ
104	143.34	151	84	DZ
105	143.62	89	79	DZ
106	143.02	300	68	DZ
107	143.14	14	5	DZ
108	144.38	241	12	DZ
109	144.07	249	18	DZ
110	144.59	294	83	DZ
111	144.8	332	77	DZ
112	144.2	47	9	DZ
113	144.47	65	82	DZ
114	144.38	54	28	DZ
115	144.99	134	15	DZ
116	144.45	73	41	DZ
117	144.2	233	8	DZ
118	145.42	258	9	DZ
119	145.15	278	24	DZ
120	145.72	46	3	DZ
121	145.22	303	28	DZ
122	145.39	195	28	DZ
123	146.18	260	3	FFM01u
124	146.45	96	21	FFM01u
125	147.82	264	22	FFM01u
126	148.96	97	7	FFM01u
127	148.31	77	5	FFM01u
128	149.68	135	83	FFM01u
129	152.46	127	21	FFM01u
130	152.79	262	17	FFM01u
131	154.14	60	30	FFM01u
132	156.78	39	23	FFM01u
133	156.27	56	80	FFM01u
134	157.87	81	58	FFM01u
135	157.48	118	72	FFM01u
136	157.54	97	5	FFM01u
137	157.44	288	12	FFM01u
138	158.72	298	88	FFM01u
139	160.03	132	72	FFM01u
140	161.62	356	19	FFM01u
141	161.54	88	84	FFM01u
142	161.83	187	15	FFM01u
143	162.36	82	90	FFM01u
144	162.24	149	85	FFM01u
145	162.38	81	21	FFM01u
146	162.16	89	90	FFM01u
147	163.64	148	82	FFM01u
148	165.68	311	11	FFM01u
149	165.66	138	83	FFM01u
150	165.68	85	22	FFM01u

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
151	166.45	320	14	FFM01u
152	166.05	88	41	FFM01u
153	166.77	258	14	FFM01u
154	167.96	319	22	FFM01u
155	167.67	126	11	FFM01u
156	167.4	238	9	FFM01u
157	167.51	239	28	FFM01u
158	168.41	296	13	FFM01u
159	168.79	93	83	FFM01u
160	168.28	55	19	FFM01u
161	169.34	246	7	FFM01u
162	169.06	335	77	FFM01u
163	170.94	300	3	FFM01u
164	170.39	217	22	FFM01u
165	170.4	226	32	FFM01u
166	170.47	169	14	FFM01u
167	173.77	47	19	FFM01u
168	174.88	341	37	FFM01u
169	175.78	144	83	FFM01u
170	177.16	348	17	FFM01u
171	177.07	289	13	FFM01u
172	177.77	253	14	FFM01u
173	177.19	150	88	FFM01u
174	177.13	289	79	FFM01u
175	177.53	92	54	FFM01u
176	177.91	130	82	FFM01u
177	180.94	146	89	FFM01u
178	181.57	32	10	FFM01u
179	183.01	102	87	FFM01u
180	185.54	160	6	FFM01u
181	186.29	258	14	FFM01u
182	186.33	261	87	FFM01u
183	187.88	111	72	FFM01u
184	187.9	142	86	FFM01u
185	191.21	106	83	FFM01u
186	191.62	73	8	FFM01u
187	192.11	349	13	FFM01u
188	197.69	137	82	DZ
189	197.53	161	21	DZ
190	199.73	91	76	DZ
191	201.84	159	14	DZ
192	204.96	102	16	DZ
193	204.2	258	14	DZ
194	205.76	172	75	DZ
195	205.48	102	82	DZ
196	205.47	323	82	DZ
197	205.1	226	12	DZ
198	206.9	313	88	DZ
199	208.45	88	13	DZ
200	212.4	104	6	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
201	213.95	281	19	DZ
202	214.14	123	20	DZ
203	214.02	106	84	DZ
204	215.6	293	86	DZ
205	216.29	130	81	DZ
206	216.51	79	16	DZ
207	218.86	283	20	DZ
208	218.3	78	72	DZ
209	218.75	110	56	DZ
210	218.54	52	22	DZ
211	220.14	222	2	DZ
212	220.02	116	21	DZ
213	220.69	274	88	DZ
214	220.96	296	7	DZ
215	224.06	245	79	DZ
216	225.35	44	15	DZ
217	226.8	85	14	DZ
218	226.85	112	18	DZ
219	227.33	263	90	DZ
220	228.93	112	6	DZ
221	231.09	133	74	DZ
222	232.26	159	23	DZ
223	232.67	8	23	DZ
224	234.83	151	61	DZ
225	237.33	194	12	DZ
226	237.92	310	89	DZ
227	237	105	53	DZ
228	237.11	87	23	DZ
229	238.36	226	16	DZ
230	239.78	136	14	DZ
231	239.1	11	7	DZ
232	239.01	97	77	DZ
233	240.27	316	19	DZ
234	241.55	124	82	DZ
235	241.73	351	17	DZ
236	241.11	282	72	DZ
237	242.2	358	5	DZ
238	243.99	198	20	DZ
239	244.69	287	86	DZ
240	246.56	140	65	DZ
241	246.77	133	85	DZ
242	246.72	241	24	DZ
243	246.54	74	28	DZ
244	251.78	126	18	DZ
245	252.59	142	78	DZ
246	254.82	324	76	DZ
247	254.9	155	19	DZ
248	256.3	52	14	DZ
249	256.84	50	17	DZ
250	256.09	299	71	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
251	260.56	317	10	DZ
252	260.19	41	16	DZ
253	262.35	277	88	DZ
254	262.79	169	6	DZ
255	264.84	142	80	DZ
256	264.38	135	77	DZ
257	266.96	125	83	DZ
258	267.6	95	12	DZ
259	268.6	45	76	DZ
260	268.26	43	76	DZ
261	268.49	66	9	DZ
262	268.36	255	88	DZ
263	268.03	121	83	DZ
264	268.1	320	17	DZ
265	268.05	283	12	DZ
266	268.29	331	11	DZ
267	268.71	220	4	DZ
268	268.64	205	8	DZ
269	271.43	71	23	DZ
270	271.45	202	25	DZ
271	272.03	338	2	DZ
272	272.05	321	18	DZ
273	272.68	172	74	DZ
274	272.98	126	8	DZ
275	273.71	235	16	DZ
276	273.89	270	84	DZ
277	274.59	80	11	DZ
278	275.32	61	12	DZ
279	275.99	357	18	DZ
280	275.23	117	89	DZ
281	280.81	98	88	FFM01m
282	282.65	299	10	FFM01m
283	283.43	144	83	FFM01m
284	285.63	109	59	FFM01m
285	289.05	300	87	FFM01m
286	291.49	331	83	FFM01m
287	292.27	162	82	FFM01m
288	297.44	118	89	FFM01m
289	305.3	313	76	FFM01m
290	306.02	143	69	FFM01m
291	308.67	153	79	FFM01m
292	308.47	330	8	FFM01m
293	311.76	84	27	FFM01m
294	315.65	331	88	FFM01m
295	317.95	152	19	FFM01m
296	320.05	122	25	DZ
297	321.18	133	27	DZ
298	321.17	343	80	DZ
299	321.78	150	86	DZ
300	321.63	117	88	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
301	321.16	133	84	DZ
302	321.59	176	9	DZ
303	322.61	86	6	DZ
304	322.58	280	4	DZ
305	323.73	142	8	DZ
306	324.18	314	79	DZ
307	324.38	104	75	DZ
308	324.36	161	72	DZ
309	324.59	175	77	DZ
310	324.46	358	17	DZ
311	326.49	136	83	DZ
312	326.38	357	79	DZ
313	326.41	109	59	DZ
314	326.18	204	14	DZ
315	327.51	347	68	DZ
316	328.78	112	68	DZ
317	329.49	133	27	DZ
318	330.61	307	88	DZ
319	331.94	315	78	DZ
320	332.17	279	74	DZ
321	333.39	252	89	DZ
322	334.86	312	70	DZ
323	335.61	63	20	DZ
324	336.53	109	29	DZ
325	336.37	159	87	DZ
326	339.99	133	85	DZ
327	341.81	143	31	DZ
328	341.82	138	19	DZ
329	341.1	272	85	DZ
330	341.81	334	78	DZ
331	346.58	158	1	DZ
332	346.7	8	9	DZ
333	346.93	79	69	DZ
334	347.91	151	70	DZ
335	348.61	156	82	DZ
336	350.53	123	83	DZ
337	350.67	41	74	DZ
338	350.23	284	80	DZ
339	350.12	124	74	DZ
340	353.21	117	88	DZ
341	354.44	64	79	DZ
342	354.2	154	73	DZ
343	354.38	323	19	DZ
344	354.08	86	6	DZ
345	355.84	323	30	DZ
346	355.4	147	65	DZ
347	355.31	144	88	DZ
348	355.59	289	8	DZ
349	355.03	160	13	DZ
350	356.57	148	82	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
351	356.14	270	21	DZ
352	356.88	114	76	DZ
353	357.97	327	78	DZ
354	357.04	154	88	DZ
355	357.97	73	31	DZ
356	357.7	109	59	DZ
357	357.76	294	86	DZ
358	357.93	149	67	DZ
359	357.88	106	76	DZ
360	358.33	79	80	FFM01m
361	360.74	75	10	FFM01m
362	360.87	156	82	FFM01m
363	361.32	101	87	FFM01m
364	361.09	344	87	FFM01m
365	364.33	127	72	FFM01m
366	366.79	97	31	FFM01m
367	366.11	320	82	FFM01m
368	373.61	96	72	FFM01m
369	375.8	350	25	FFM01m
370	378.51	279	74	FFM01m
371	378.38	140	13	FFM01m
372	379.42	264	10	FFM01m
373	379.84	252	7	FFM01m
374	384.93	138	19	FFM01m
375	396.37	20	23	FFM01m
376	397.64	133	27	FFM01m
377	398.24	133	88	FFM01m
378	400.79	97	72	FFM01m
379	401.24	130	89	FFM01m
380	401.24	341	83	FFM01m
381	402.97	245	10	FFM01m
382	405.21	108	16	FFM01m
383	409.18	112	20	FFM01m
384	409.6	68	70	FFM01m
385	410.59	129	87	FFM01m
386	410.42	125	16	FFM01m
387	412.01	34	26	FFM01m
388	412.59	339	43	FFM01m
389	412.12	26	6	FFM01m
390	413.18	221	11	FFM01m
391	414.42	210	18	FFM01m
392	414.53	289	82	FFM01m
393	414.47	354	81	FFM01m
394	415.06	142	86	FFM01m
395	416.71	135	89	FFM01m
396	416.81	284	71	FFM01m
397	417.22	73	27	FFM01m
398	417.36	138	19	FFM01m
399	417.83	52	13	FFM01m
400	419.28	353	20	FFM01m

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
401	421.09	342	34	FFM01m
402	422.66	158	86	FFM01m
403	428.05	327	21	FFM01m
404	428.9	88	29	FFM01m
405	433.24	101	83	FFM01m
406	440.01	160	67	FFM01m
407	441.59	112	25	FFM01m
408	447.76	17	16	FFM01m
409	447.74	108	16	FFM01m
410	448.29	119	26	FFM01m
411	449.6	101	87	FFM01m
412	449.78	128	88	FFM01m
413	452.54	110	88	FFM01m
414	453.69	235	14	FFM01m
415	453.09	117	88	FFM01m
416	453.96	15	18	FFM01m
417	453.5	117	84	FFM01m
418	453.01	17	41	FFM01m
419	454.54	150	86	FFM01m
420	455.6	52	35	FFM01m
421	455.7	147	64	FFM01m
422	463.73	179	18	FFM01m
423	468.51	121	85	FFM01m
424	470.77	72	76	FFM01m
425	470.13	149	75	FFM01m
426	472.99	123	12	FFM01m
427	472.62	295	84	FFM01m
428	472.09	333	68	FFM01m
429	472.31	94	14	FFM01m
430	472.99	109	59	FFM01m
431	472.12	273	11	FFM01m
432	481.13	341	89	FFM01l
433	482.16	115	81	FFM01l
434	482.1	63	18	FFM01l
435	482.5	54	22	FFM01l
436	483.96	109	60	FFM01l
437	483.51	65	68	FFM01l
438	486.5	110	82	FFM01l
439	488.85	228	5	FFM01l
440	489.55	312	76	FFM01l
441	494.77	101	20	FFM01l
442	497.16	339	9	FFM01l
443	497.72	342	74	FFM01l
444	503.84	82	36	FFM01l
445	508.29	1	20	FFM01l
446	518.99	276	17	DZ
447	519.96	299	85	DZ
448	520.93	88	55	DZ
449	520.81	135	76	DZ
450	522.5	125	81	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
451	522.43	131	79	DZ
452	522.58	303	83	DZ
453	522.56	286	66	DZ
454	524.68	118	83	DZ
455	526.09	12	30	DZ
456	526.21	59	55	DZ
457	526.28	23	16	DZ
458	526.11	269	72	DZ
459	527.69	103	82	DZ
460	532.85	56	23	DZ
461	532.15	96	15	DZ
462	532.93	140	81	DZ
463	534	179	15	DZ
464	534.47	53	88	DZ
465	536.03	137	80	DZ
466	536.39	69	25	DZ
467	537.36	52	81	DZ
468	537.7	159	18	DZ
469	537.05	338	20	DZ
470	537.72	4	6	DZ
471	537.97	137	13	DZ
472	539.01	135	82	DZ
473	541.87	300	73	DZ
474	541.41	58	88	DZ
475	542.67	311	81	DZ
476	544.09	53	20	DZ
477	549.54	128	82	FFM01l
478	552.85	293	84	FFM01l
479	555.92	140	71	FFM01l
480	557.57	170	61	FFM01l
481	558.83	39	32	FFM01l
482	559.32	11	25	FFM01l
483	559.44	336	15	FFM01l
484	559.09	79	15	FFM01l
485	562.05	60	6	FFM01l
486	568.33	93	90	FFM01l
487	568.67	132	67	FFM01l
488	568.67	141	60	FFM01l
489	568.33	81	23	FFM01l
490	572.18	312	86	FFM01l
491	573.31	357	8	FFM01l
492	574.39	325	89	FFM01l
493	574.23	261	26	FFM01l
494	577.53	172	80	FFM01l
495	577.65	57	19	FFM01l
496	579.97	329	86	FFM01l
497	579.67	123	64	FFM01l
498	579.94	286	88	FFM01l
499	579.75	101	86	FFM01l
500	592.02	300	7	FFM01l

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
501	592.83	64	19	FFM01l
502	592.83	106	79	FFM01l
503	592.29	266	16	FFM01l
504	597.08	160	69	FFM01l
505	609.27	113	85	FFM01l
506	610.72	359	12	FFM01l
507	610.72	229	30	FFM01l
508	611.19	93	26	FFM01l
509	617.16	69	85	FFM01l
510	619.84	103	80	DZ
511	619.15	281	28	DZ
512	620.51	87	88	DZ
513	620.69	289	23	DZ
514	620.25	291	88	DZ
515	621.56	241	8	DZ
516	621.79	153	78	DZ
517	621.1	286	87	DZ
518	621.89	327	9	DZ
519	621.75	305	11	DZ
520	622.28	300	7	DZ
521	622.61	16	37	DZ
522	622.33	50	70	DZ
523	622.08	112	12	DZ
524	622.96	144	62	DZ
525	622.77	17	35	DZ
526	624.35	58	30	FFM01l
527	628.38	307	83	FFM01l
528	632.01	239	6	FFM01l
529	639.17	129	34	FFM01l
530	639.96	54	22	FFM01l
531	644.94	122	7	FFM01l
532	645.13	104	13	FFM01l
533	646.93	176	60	FFM01l
534	647.41	283	8	FFM01l
535	650.98	116	85	FFM01l
536	650.79	101	32	FFM01l
537	653.83	116	77	DZ
538	653.42	131	6	DZ
539	653.36	343	13	DZ
540	653.04	158	82	DZ
541	654.12	8	5	DZ
542	655.6	137	64	DZ
543	655.94	51	17	DZ
544	656.46	74	37	FFM01l
545	660.89	130	69	FFM01l
546	662.55	104	13	FFM01l
547	664.31	224	18	FFM01l
548	665.32	186	6	FFM01l
549	665.71	196	17	FFM01l
550	666.77	181	5	FFM01l

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
551	668	98	87	FFM01l
552	672.11	305	11	FFM01l
553	673.28	349	22	FFM01l
554	673.45	64	10	FFM01l
555	673.89	121	86	FFM01l
556	673.78	104	13	FFM01l
557	674.48	63	18	FFM01l
558	674.45	169	28	FFM01l
559	682.35	115	89	FFM01l
560	685.08	117	80	FFM01l
561	685.09	113	7	FFM01l
562	686.31	96	78	FFM01l
563	688.42	83	28	FFM01l
564	698.73	135	85	FFM01l
565	698.48	60	20	FFM01l
566	707.09	199	3	FFM01l
567	711.37	1	58	FFM01l
568	711.38	345	83	FFM01l
569	712.78	334	80	FFM01l
570	715.16	205	88	FFM01l
571	718.05	270	86	FFM01l
572	718.56	79	15	FFM01l
573	719.62	126	70	FFM01l
574	719.1	187	88	FFM01l
575	721.81	103	80	FFM01l
576	723.87	79	15	FFM01l
577	724.58	199	3	FFM01l
578	724.63	298	2	FFM01l
579	725.64	354	23	FFM01l
580	725.09	153	78	FFM01l
581	726.11	337	13	FFM01l
582	726.05	140	71	FFM01l
583	728.82	71	19	FFM01l
584	728.93	329	5	FFM01l
585	730.78	305	86	FFM01l
586	730.28	171	75	FFM01l
587	731.46	131	30	FFM01l
588	732.36	105	72	FFM01l
589	737.41	121	27	FFM01l
590	738.87	104	13	FFM01l
591	739.63	166	9	FFM01l
592	740.96	313	21	DZ
593	740.04	328	23	DZ
594	741.47	131	68	DZ
595	743.32	82	17	DZ
596	743.67	120	66	DZ
597	743.02	165	79	DZ
598	743.32	330	82	DZ
599	743.89	112	81	DZ
600	743.82	109	71	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
601	743.54	63	18	DZ
602	744.61	308	64	DZ
603	744.76	63	18	DZ
604	744.88	354	34	DZ
605	745.66	207	15	DZ
606	745.51	267	82	DZ
607	746.86	184	24	DZ
608	747.91	157	73	DZ
609	747.54	129	16	DZ
610	747.64	140	17	DZ
611	747.92	79	15	DZ
612	748.43	147	67	DZ
613	748.35	74	23	DZ
614	749.22	126	83	DZ
615	749.21	220	25	DZ
616	749.95	33	25	DZ
617	749.78	354	31	DZ
618	750.89	299	85	DZ
619	750.72	103	73	DZ
620	750.17	187	14	DZ
621	750.58	144	77	DZ
622	751.69	136	77	DZ
623	751.89	184	28	DZ
624	751.76	130	86	DZ
625	754.26	278	11	DZ
626	754.35	44	46	DZ
627	756.96	96	15	DZ
628	757.96	83	19	DZ
629	757.47	89	87	DZ
630	757.8	276	75	DZ
631	758.01	59	27	DZ
632	759.62	146	88	DZ
633	760.65	112	85	DZ
634	760.53	115	7	DZ
635	761.28	140	68	DZ
636	762.61	296	85	DZ
637	763.7	336	82	DZ
638	764.18	30	42	DZ
639	764.33	333	85	DZ
640	764.21	16	37	DZ
641	764.69	310	5	DZ
642	765.86	100	85	DZ
643	765.7	270	10	DZ
644	765.81	113	7	DZ
645	766.07	96	78	DZ
646	766.45	83	28	DZ
647	766.19	135	85	DZ
648	766.31	60	20	DZ
649	766.87	199	3	DZ
650	767.78	1	58	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
651	767.06	345	83	DZ
652	767.27	334	80	DZ
653	767.42	205	88	DZ
654	767.35	270	86	DZ
655	767.65	79	15	DZ
656	768.46	126	70	DZ
657	768.28	187	88	DZ
658	769.95	103	80	DZ
659	769.45	79	15	DZ
660	769.98	199	3	DZ
661	769.59	298	2	DZ
662	769.19	354	23	DZ
663	770.38	153	78	DZ
664	770.59	337	13	DZ
665	771.39	140	71	DZ
666	771.74	71	19	DZ
667	771.19	329	5	DZ
668	771.11	305	86	DZ
669	771.42	171	75	DZ
670	771.48	131	30	DZ
671	772.45	105	72	DZ
672	772.64	121	27	DZ
673	773.18	104	13	DZ
674	773.23	166	9	DZ
675	775.85	276	17	FFM06(I)
676	776.57	299	85	FFM06(I)
677	778.94	88	55	FFM06(I)
678	782.94	135	76	FFM06(I)
679	784.26	125	81	FFM06(I)
680	786.31	131	79	FFM06(I)
681	786.07	303	83	FFM06(I)
682	786.31	286	66	FFM06(I)
683	786.96	118	83	FFM06(I)
684	788.19	128	82	DZ
685	788.27	293	84	DZ
686	789.73	140	71	DZ
687	789.36	170	61	DZ
688	789.83	39	32	DZ
689	790.02	11	25	DZ
690	791.03	336	15	DZ
691	791.97	79	15	DZ
692	791.23	60	6	DZ
693	791.23	93	90	DZ
694	792.27	132	67	DZ
695	792.05	141	60	DZ
696	792.27	81	23	DZ
697	792.38	312	86	DZ
698	793.12	357	8	DZ
699	794.03	325	89	DZ
700	794.99	261	26	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
701	795.07	172	80	DZ
702	795.48	57	19	DZ
703	795.9	329	86	DZ
704	795.31	123	64	DZ
705	796.71	286	88	DZ
706	796.05	101	86	DZ
707	797.17	300	7	DZ
708	797.21	64	19	DZ
709	797.95	106	79	DZ
710	797.45	266	16	DZ
711	797.83	160	69	DZ
712	798.42	113	85	DZ
713	798.34	359	12	DZ
714	799.13	229	30	DZ
715	799.16	93	26	DZ
716	800.58	69	85	DZ
717	801.91	103	80	DZ
718	803.84	281	28	DZ
719	803.5	87	88	DZ
720	805	289	23	DZ
721	805.95	291	88	DZ
722	805.84	241	8	DZ
723	806.33	153	78	DZ
724	807.57	286	87	DZ
725	807.68	327	9	DZ
726	808.24	305	11	DZ
727	808.51	300	7	DZ
728	811.01	12	30	FFM06(I)
729	816.74	59	55	FFM06(I)
730	816.75	23	16	FFM06(I)
731	823.87	269	72	FFM06(I)
732	823.77	103	82	FFM06(I)
733	823.24	56	23	FFM06(I)
734	830.16	96	15	FFM06(I)
735	834	140	81	FFM06(I)
736	838.01	179	15	FFM06(I)
737	845.8	53	88	FFM06(I)
738	845.49	137	80	FFM06(I)
739	846.14	69	25	FFM06(I)
740	847.01	52	81	FFM06(I)
741	847.21	159	18	FFM06(I)
742	847.99	338	20	FFM06(I)
743	849.71	4	6	FFM06(I)
744	855.29	137	13	FFM06(I)
745	858.07	135	82	FFM06(I)
746	865.57	300	73	FFM06(I)
747	866.83	58	88	FFM06(I)
748	867.25	311	81	FFM06(I)
749	869.1	53	20	FFM06(I)
750	873.77	313	21	FFM06(I)

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
751	876.29	328	23	FFM06(I)
752	876.52	131	68	FFM06(I)
753	876.26	82	17	FFM06(I)
754	881.11	120	66	FFM06(I)
755	881.45	165	79	FFM06(I)
756	885.97	330	82	DZ
757	889.44	112	81	DZ
758	891.4	109	71	DZ
759	894.11	63	18	DZ
760	895.02	308	64	DZ
761	896.09	63	18	DZ
762	896.29	354	34	DZ
763	897.81	207	15	DZ
764	897.3	267	82	DZ
765	897.59	184	24	DZ
766	897.13	157	73	DZ
767	897.1	129	16	DZ
768	898.62	140	17	DZ
769	898.81	79	15	DZ
770	900.7	147	67	DZ
771	900.54	74	23	DZ
772	904.71	126	83	DZ
773	904.74	220	25	DZ
774	909.38	33	25	FFM06(I)
775	912.42	354	31	FFM06(I)
776	918.54	299	85	FFM06(I)
777	919.33	103	73	FFM06(I)
778	919.13	187	14	FFM06(I)
779	924.7	144	77	FFM06(I)
780	925.58	136	77	DZ
781	927.83	184	28	DZ
782	928.08	130	86	DZ
783	928.4	278	11	DZ
784	929.02	44	46	DZ
785	930.1	96	15	DZ
786	932.38	83	19	DZ
787	932.07	89	87	DZ
788	933.44	276	75	FFM06(I)
789	936.82	59	27	FFM06(I)
790	937.06	146	88	FFM06(I)
791	938.03	112	85	FFM06(I)
792	938.81	115	7	FFM06(I)
793	939.14	140	68	FFM06(I)
794	941.27	296	85	FFM06(I)
795	942.23	336	82	FFM06(I)
796	950.17	30	42	DZ
797	951.76	333	85	DZ
798	955.69	16	37	DZ
799	958.2	310	5	DZ
800	960.45	100	85	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
801	962.17	270	10	DZ
802	963.75	330	82	DZ
803	963.7	112	81	DZ
804	965.16	109	71	DZ
805	967.72	63	18	DZ
806	969.66	308	64	DZ
807	971.86	63	18	DZ
808	978.51	354	34	DZ
809	979.21	207	15	DZ
810	984.66	267	82	DZ
811	989.12	184	24	DZ
812	989.33	157	73	DZ
813	989.6	129	16	DZ
814	994.73	140	17	FFM06(I)
815	997.16	79	15	FFM06(I)
816	997.51	147	67	FFM06(I)

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分

付録 A

KFM08A 孔

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
1	104.96	8	26	FFM01u
2	105.81	4	5	FFM01u
3	106.37	222	28	FFM01u
4	107.07	314	24	FFM01u
5	107.85	313	23	FFM01u
6	110.04	77	5	FFM01u
7	111.32	99	12	FFM01u
8	111.85	82	43	FFM01u
9	111.39	136	29	FFM01u
10	114.86	108	81	FFM01u
11	114.61	132	28	FFM01u
12	116.36	91	6	FFM01u
13	116.21	269	10	FFM01u
14	117.28	23	20	FFM01u
15	119.8	246	8	FFM01u
16	120.34	305	73	FFM01u
17	124.63	348	17	FFM01u
18	124.09	53	16	FFM01u
19	129.77	98	33	FFM01u
20	129.46	143	60	FFM01u
21	130.26	320	17	FFM01u
22	130.95	213	8	FFM01u
23	131.04	92	21	FFM01u
24	131.9	181	84	FFM01u
25	132.38	315	86	FFM01u
26	132.14	236	19	FFM01u
27	134.49	258	20	FFM01u
28	134.64	94	71	FFM01u
29	134.73	264	16	FFM01u
30	135.53	144	75	FFM01u
31	138.09	82	36	FFM01u
32	139.42	169	27	FFM01u
33	144.6	279	22	FFM01u
34	145.71	219	21	FFM01u
35	151.97	313	36	FFM01u
36	151.68	7	45	FFM01u
37	151.06	127	21	FFM01u
38	152.62	289	79	FFM01u
39	152.1	17	21	FFM01u
40	153.07	139	9	FFM01u
41	159.6	245	20	FFM01u
42	160.69	294	5	FFM01u
43	167.27	145	24	FFM01u
44	167.25	119	77	FFM01u
45	173.3	307	7	FFM01u
46	174.85	49	55	FFM01u
47	176.66	246	21	FFM01u
48	176.62	139	69	FFM01u
49	178.42	87	23	FFM01u
50	178.52	214	20	FFM01u

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
51	184.32	186	21	FFM01u
52	184.22	266	67	FFM01u
53	185.99	228	6	FFM01u
54	185.02	60	71	FFM01u
55	187.77	310	18	FFM01u
56	187.46	81	21	FFM01u
57	187.56	209	31	FFM01u
58	187.7	128	73	FFM01u
59	189.65	297	23	FFM01u
60	189.25	118	65	FFM01u
61	190.02	308	90	FFM01u
62	190.46	83	16	FFM01u
63	190.46	65	82	FFM01u
64	190.12	47	19	FFM01u
65	190.48	302	11	FFM01u
66	190.65	99	14	FFM01u
67	190.96	192	18	FFM01u
68	190.43	115	14	FFM01u
69	190.72	117	27	FFM01u
70	191.19	338	11	FFM01u
71	191.61	70	57	FFM01u
72	193.79	51	5	FFM01u
73	194	282	23	FFM01u
74	195.28	128	9	FFM01u
75	196.72	132	77	FFM01u
76	196.4	321	14	FFM01u
77	196.15	52	19	FFM01u
78	197.19	307	9	FFM01u
79	197.06	303	28	FFM01u
80	197.43	324	19	FFM01u
81	197.57	247	13	FFM01u
82	197.98	117	7	FFM01u
83	198.56	301	8	FFM01u
84	199.75	338	2	FFM01u
85	199.95	341	15	FFM01u
86	199.26	161	21	FFM01u
87	200.36	116	71	FFM01u
88	201.06	15	16	FFM01u
89	201.19	153	79	FFM01u
90	201.65	25	3	FFM01u
91	207.84	86	18	FFM01u
92	207.63	33	28	FFM01u
93	208.06	133	19	FFM01u
94	210.27	113	6	FFM01u
95	211.15	62	8	FFM01u
96	211.45	15	20	FFM01u
97	213.57	212	8	FFM01u
98	213.1	338	34	FFM01u
99	214.45	300	14	FFM01u
100	215.44	155	39	FFM01u

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
101	216.67	124	17	FFM01u
102	218.3	281	19	FFM01u
103	218.04	300	20	FFM01u
104	219.63	64	4	FFM01u
105	220.6	99	12	FFM01u
106	221.49	332	75	FFM01u
107	222.66	61	12	FFM01u
108	222.62	262	10	FFM01u
109	222.09	81	21	FFM01u
110	222.96	83	41	FFM01u
111	222.69	321	8	FFM01u
112	223.7	49	35	FFM01u
113	223.42	338	89	FFM01u
114	224.53	170	77	FFM01u
115	224.5	355	25	FFM01u
116	224.84	345	12	FFM01u
117	225.13	159	79	FFM01u
118	225.12	217	22	FFM01u
119	225.04	176	17	FFM01u
120	226.82	87	71	FFM01u
121	226.62	47	9	FFM01u
122	226.25	161	83	FFM01u
123	227.54	66	52	FFM01u
124	227.07	205	6	FFM01u
125	228.76	9	3	FFM01u
126	228.01	15	17	FFM01u
127	229.88	224	43	FFM01u
128	231.06	90	85	FFM01u
129	231.49	138	56	FFM01u
130	234.78	70	19	FFM01u
131	234.26	297	30	FFM01u
132	234.67	165	12	FFM01u
133	235.92	335	77	FFM01u
134	237.05	74	9	FFM01u
135	238.06	247	36	FFM01u
136	238.48	299	26	FFM01u
137	239.78	280	9	FFM01u
138	239.42	79	40	FFM01u
139	239.74	130	81	FFM01u
140	239.37	266	5	FFM01u
141	240.27	144	19	FFM01u
142	240.42	244	14	FFM01u
143	241.78	67	6	FFM01u
144	241.22	307	77	FFM01u
145	242.23	209	6	FFM01u
146	242.14	129	22	FFM01u
147	242.93	105	37	FFM01u
148	243.53	239	12	FFM01u
149	244.73	133	27	DZ
150	244.51	94	25	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
151	244.49	230	83	DZ
152	245.05	176	22	DZ
153	245.35	352	7	DZ
154	245.02	168	15	DZ
155	245.92	66	59	DZ
156	245.28	241	12	DZ
157	245.27	212	8	DZ
158	246.64	316	69	DZ
159	246.94	239	5	DZ
160	246.07	26	20	DZ
161	246.44	138	10	DZ
162	246.17	330	14	DZ
163	246.3	142	78	DZ
164	247.7	217	23	DZ
165	247.28	140	86	DZ
166	250.48	41	25	DZ
167	250.78	192	18	DZ
168	252.95	140	88	DZ
169	253.26	197	7	DZ
170	253.23	292	26	DZ
171	253.43	169	14	DZ
172	254.44	258	14	DZ
173	254.7	335	78	DZ
174	255.37	154	84	DZ
175	256.07	321	14	DZ
176	256.23	20	16	DZ
177	256.69	101	8	DZ
178	257.27	162	66	DZ
179	257.68	30	31	DZ
180	258.76	277	9	DZ
181	258.62	2	11	DZ
182	259.68	331	33	DZ
183	260.71	33	21	DZ
184	260.98	255	22	DZ
185	261.89	319	22	DZ
186	261.64	317	85	DZ
187	262.64	121	83	DZ
188	263.17	302	11	DZ
189	263.6	52	22	DZ
190	264.23	353	23	DZ
191	264.64	111	20	DZ
192	264.03	57	10	DZ
193	265.86	199	28	DZ
194	265.2	106	75	DZ
195	265.51	74	22	DZ
196	265.82	311	15	DZ
197	266.15	141	88	DZ
198	266.19	97	73	DZ
199	267.65	256	16	DZ
200	267.32	337	20	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
201	267.3	305	9	DZ
202	268.93	190	25	DZ
203	270.83	261	16	DZ
204	271.7	280	12	DZ
205	271.56	0	17	DZ
206	271.09	258	14	DZ
207	271.66	25	16	DZ
208	271.28	169	14	DZ
209	271.1	19	13	DZ
210	272.89	338	8	DZ
211	272.11	30	38	DZ
212	272.39	264	22	DZ
213	273.68	6	38	DZ
214	273.09	334	16	DZ
215	274.08	305	86	DZ
216	274.3	334	16	DZ
217	274.34	247	87	DZ
218	274.28	138	7	DZ
219	275.57	112	78	DZ
220	275.97	64	23	DZ
221	276.15	44	19	DZ
222	276.18	129	22	DZ
223	276.46	285	88	DZ
224	276.45	211	13	DZ
225	276.97	355	16	DZ
226	276.62	66	74	DZ
227	276.36	107	68	DZ
228	276.93	263	23	DZ
229	277.34	321	28	DZ
230	277.85	102	64	DZ
231	277.34	30	10	DZ
232	278.91	73	72	DZ
233	278.61	131	48	DZ
234	278.25	230	32	DZ
235	278.33	308	23	DZ
236	278.63	224	21	DZ
237	278.54	113	77	DZ
238	278.57	50	75	DZ
239	278.76	159	16	DZ
240	280.53	166	79	DZ
241	281.53	114	18	DZ
242	281.52	333	30	DZ
243	282.26	127	88	DZ
244	282.02	69	89	DZ
245	282.4	288	88	DZ
246	282.87	335	22	DZ
247	283.57	15	19	DZ
248	283.73	215	31	DZ
249	284.88	322	81	DZ
250	285.89	112	18	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
251	285.16	345	7	DZ
252	285.6	122	71	DZ
253	286.12	81	21	DZ
254	287.36	329	90	DZ
255	287.52	133	27	DZ
256	287.05	206	16	DZ
257	287.99	118	69	DZ
258	287.02	138	80	DZ
259	288.81	86	56	DZ
260	288.58	247	26	DZ
261	288.96	239	28	DZ
262	289.98	336	81	DZ
263	289.84	269	85	DZ
264	289.69	287	4	DZ
265	290.56	233	25	DZ
266	290.64	153	28	DZ
267	290.33	95	35	DZ
268	291.33	139	9	DZ
269	291.37	25	13	DZ
270	291.1	329	23	DZ
271	292.45	276	79	DZ
272	292.65	187	15	DZ
273	292.72	156	9	DZ
274	292.88	100	20	DZ
275	293.42	203	29	DZ
276	293.66	282	82	DZ
277	293.89	50	22	DZ
278	294.56	112	28	DZ
279	295.46	113	77	DZ
280	297.54	134	11	DZ
281	298.23	347	80	DZ
282	298.48	113	11	DZ
283	300.88	103	88	DZ
284	300.57	152	78	DZ
285	300.84	161	60	DZ
286	300.71	120	72	DZ
287	301.49	246	3	DZ
288	301.28	152	5	DZ
289	302.98	27	24	DZ
290	302.79	332	69	DZ
291	302.29	261	46	DZ
292	302.27	117	12	DZ
293	304.26	179	16	DZ
294	304.43	222	19	DZ
295	304.21	278	24	DZ
296	306.51	109	88	DZ
297	306.8	131	88	DZ
298	306.2	225	17	DZ
299	306.46	112	18	DZ
300	307.02	128	77	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
301	308.24	167	65	DZ
302	308.62	156	18	DZ
303	308.34	55	15	DZ
304	309.44	77	33	DZ
305	309.75	226	10	DZ
306	309.79	146	79	DZ
307	309.41	78	30	DZ
308	309.26	13	15	DZ
309	309.9	350	13	DZ
310	309.23	187	8	DZ
311	310.06	354	28	DZ
312	311.93	192	9	DZ
313	311.35	76	75	DZ
314	312.16	182	25	DZ
315	314.79	151	80	DZ
316	314.35	92	26	DZ
317	315.26	182	16	FFM01m
318	316.65	63	20	FFM01m
319	316.91	8	9	FFM01m
320	317.86	47	32	FFM01m
321	317.79	65	65	FFM01m
322	317.33	150	82	FFM01m
323	318.12	160	13	FFM01m
324	319.39	159	75	FFM01m
325	319.51	58	81	FFM01m
326	319.71	264	10	FFM01m
327	321.74	24	35	FFM01m
328	323.39	139	15	FFM01m
329	324.43	124	74	FFM01m
330	324.98	123	18	FFM01m
331	324.31	26	6	FFM01m
332	326.44	143	31	FFM01m
333	327.73	94	14	FFM01m
334	327.25	109	59	FFM01m
335	329.86	91	79	FFM01m
336	331.67	294	86	FFM01m
337	333.25	99	9	FFM01m
338	335.65	153	21	FFM01m
339	335.9	75	10	FFM01m
340	336.12	186	17	FFM01m
341	336.41	156	82	FFM01m
342	337.15	123	77	FFM01m
343	337.2	136	89	FFM01m
344	338.18	191	9	FFM01m
345	339.75	108	70	FFM01m
346	339.13	342	34	FFM01m
347	340.65	342	34	FFM01m
348	340.77	17	16	FFM01m
349	340.28	339	43	FFM01m
350	340.44	306	90	FFM01m

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
351	342.11	85	83	FFM01m
352	342.19	289	82	FFM01m
353	342.28	188	18	FFM01m
354	349.27	264	5	FFM01m
355	351.06	157	13	FFM01m
356	359.16	86	6	FFM01m
357	361.49	72	29	FFM01m
358	361.54	253	75	FFM01m
359	361.17	120	69	FFM01m
360	362.07	164	85	FFM01m
361	363.42	270	21	FFM01m
362	365.24	316	81	FFM01m
363	366.96	158	1	FFM01m
364	366.53	117	84	FFM01m
365	367.56	126	11	FFM01m
366	368.09	322	79	FFM01m
367	372.89	125	16	FFM01m
368	373.51	357	32	FFM01m
369	375.48	147	70	FFM01m
370	377.91	34	21	FFM01m
371	380.33	26	12	FFM01m
372	384.8	112	25	FFM01m
373	390.47	125	67	FFM01m
374	395.57	136	60	FFM01m
375	396.61	98	79	FFM01m
376	397.31	153	79	FFM01m
377	404.08	129	81	FFM01m
378	404.29	159	87	FFM01m
379	407.13	327	6	FFM01m
380	407.7	151	70	FFM01m
381	408.74	183	14	FFM01m
382	408.56	249	14	FFM01m
383	408.2	287	88	FFM01m
384	408.18	162	88	FFM01m
385	408.68	47	7	FFM01m
386	409.32	197	30	FFM01m
387	409.87	137	7	FFM01m
388	411.03	142	8	FFM01m
389	411.45	235	14	FFM01m
390	411.24	46	13	FFM01m
391	411.94	117	84	FFM01m
392	411.07	112	25	FFM01m
393	412.66	133	27	FFM01m
394	417.46	140	13	FFM01m
395	419.81	306	11	FFM01m
396	419.74	138	84	FFM01m
397	419.04	124	84	FFM01m
398	423.04	349	33	FFM01m
399	424.28	46	12	FFM01m
400	429.68	162	73	FFM01m

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
401	430.28	349	21	FFM01m
402	431.48	320	74	FFM01m
403	431.57	144	83	FFM01m
404	431.7	101	87	FFM01m
405	431.23	160	67	FFM01m
406	432.53	300	83	FFM01m
407	432.63	80	90	FFM01m
408	437.92	79	80	FFM01m
409	443.63	116	86	FFM01m
410	445	182	6	FFM01m
411	444.07	144	88	FFM01m
412	445.91	315	78	FFM01m
413	445.23	112	20	FFM01m
414	449.7	204	14	FFM01m
415	451.94	106	76	FFM01m
416	452.32	285	29	FFM01m
417	452.47	133	27	FFM01m
418	454.03	213	10	FFM01m
419	457.81	319	28	FFM01m
420	461.99	108	16	FFM01m
421	462.17	342	87	FFM01m
422	466.19	307	88	FFM01m
423	467.98	77	81	FFM01m
424	467.99	109	59	FFM01m
425	469.24	77	8	FFM01m
426	470.23	263	25	FFM01m
427	471.47	138	19	FFM01m
428	471.12	4	36	FFM01m
429	472.78	73	27	FFM01m
430	475.43	156	82	FFM01m
431	475.83	320	82	FFM01m
432	477.03	86	6	FFM01m
433	477.96	211	12	FFM01m
434	477.64	327	78	FFM01m
435	478.89	123	83	FFM01m
436	478.38	338	17	FFM01m
437	479.25	109	29	DZ
438	479.65	47	18	DZ
439	480.52	150	86	DZ
440	480.71	188	18	DZ
441	480.86	102	82	DZ
442	481.28	35	18	DZ
443	481.61	338	89	DZ
444	481.04	114	76	DZ
445	481.78	299	18	DZ
446	481.5	110	3	DZ
447	481.58	101	83	DZ
448	483.96	152	19	DZ
449	483.67	182	79	DZ
450	484.06	140	13	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
451	488.74	101	87	DZ
452	489.79	217	9	DZ
453	489.23	8	9	DZ
454	489.74	143	86	DZ
455	492.79	304	85	DZ
456	492.29	129	80	DZ
457	493.78	148	74	DZ
458	493.91	25	25	DZ
459	495.38	142	25	FFM01l
460	499.35	263	32	FFM01l
461	504.69	16	37	FFM01l
462	504.83	24	26	FFM01l
463	508.99	128	82	FFM01l
464	508.27	72	68	FFM01l
465	509.89	63	18	FFM01l
466	511.12	303	76	FFM01l
467	513.54	240	63	FFM01l
468	515.5	122	7	FFM01l
469	517.85	126	86	FFM01l
470	528.7	40	70	DZ
471	528.23	297	70	DZ
472	529.33	105	5	DZ
473	529.13	166	14	DZ
474	529.57	190	38	DZ
475	529.37	183	86	DZ
476	529.21	126	83	DZ
477	529.61	306	21	DZ
478	533.89	291	22	DZ
479	534.45	317	15	DZ
480	541.82	153	10	DZ
481	543.81	79	15	DZ
482	543.26	215	17	DZ
483	550.57	354	23	DZ
484	550.29	54	22	DZ
485	550.67	305	15	DZ
486	558.24	123	89	FFM01l
487	566.89	174	71	FFM01l
488	568.79	52	59	FFM01l
489	574.85	350	25	FFM01l
490	575.89	199	3	FFM01l
491	575.74	339	71	FFM01l
492	579.74	332	88	FFM01l
493	581.46	146	13	FFM01l
494	581.35	98	25	FFM01l
495	584.15	16	37	FFM01l
496	585.02	169	28	FFM01l
497	585.69	312	74	FFM01l
498	602.29	114	86	FFM01l
499	605.93	153	78	FFM01l
500	610.43	135	82	FFM01l

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
501	612	49	22	FFM01l
502	615.92	303	83	FFM01l
503	640.34	19	8	FFM01l
504	642.06	143	81	FFM01l
505	657.12	264	81	FFM01l
506	657.86	186	6	FFM01l
507	658.24	101	86	FFM01l
508	672.99	54	14	DZ
509	673.15	124	78	DZ
510	675.26	192	23	DZ
511	676.51	173	81	DZ
512	676.23	16	8	DZ
513	679.09	101	79	DZ
514	680.04	65	87	DZ
515	681.22	275	13	DZ
516	682.31	104	13	DZ
517	685.1	310	25	DZ
518	686.94	79	15	DZ
519	686.67	289	23	DZ
520	686.94	182	2	DZ
521	686.52	4	85	DZ
522	686.96	139	82	DZ
523	686.58	130	69	DZ
524	687	152	82	DZ
525	686.47	313	21	DZ
526	687.85	95	78	DZ
527	687.04	83	28	DZ
528	688.65	117	10	DZ
529	688.73	317	89	DZ
530	688.64	143	22	DZ
531	689.82	126	83	DZ
532	689.11	305	11	DZ
533	690.07	1	58	DZ
534	691.95	120	66	DZ
535	691.91	146	88	DZ
536	698.98	158	22	FFM01l
537	719.38	69	27	FFM01l
538	729.77	128	6	FFM01l
539	729.74	131	6	FFM01l
540	729.97	7	44	FFM01l
541	730.08	316	84	FFM01l
542	730.86	60	81	FFM01l
543	731.49	214	19	FFM01l
544	731.4	64	86	FFM01l
545	736.16	341	89	FFM01l
546	736.54	300	7	FFM01l
547	746.82	315	86	FFM01l
548	750.75	163	57	FFM01l
549	751.01	305	11	FFM01l
550	752.14	64	10	FFM01l

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
551	754.42	220	25	FFM01l
552	754.46	140	74	FFM01l
553	755.53	93	26	FFM01l
554	755.69	67	6	FFM01l
555	767.68	81	23	FFM01l
556	767.46	185	81	FFM01l
557	768.02	110	8	FFM01l
558	768.45	51	17	FFM01l
559	770.59	16	37	FFM01l
560	771.21	96	20	FFM01l
561	772.73	38	74	FFM01l
562	775.64	96	15	DZ
563	777.91	60	73	DZ
564	778.4	270	18	DZ
565	782.32	186	6	DZ
566	782.52	104	13	DZ
567	783.5	299	85	DZ
568	783.43	198	4	DZ
569	784.63	140	17	DZ
570	784.44	237	81	DZ
571	784.69	88	13	DZ
572	785.23	142	29	DZ
573	787.56	107	80	DZ
574	788.4	272	13	DZ
575	789.47	54	75	DZ
576	789.79	109	60	DZ
577	789.24	178	19	DZ
578	789.06	63	18	DZ
579	789.5	320	16	DZ
580	790.73	214	16	DZ
581	791.51	100	77	DZ
582	793.3	287	10	DZ
583	795.17	54	22	DZ
584	797.15	322	81	DZ
585	799.9	300	84	DZ
586	799.54	341	89	DZ
587	800.46	298	86	DZ
588	800.88	305	81	DZ
589	801.14	220	11	DZ
590	804.16	166	65	DZ
591	805.27	159	18	DZ
592	806.48	207	7	DZ
593	807.93	328	79	DZ
594	807.72	10	82	DZ
595	807.15	110	80	DZ
596	807.35	179	15	DZ
597	811.06	74	23	DZ
598	811.26	36	20	DZ
599	813.54	229	30	DZ
600	815.45	58	77	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
601	817.35	322	70	DZ
602	819.85	117	80	DZ
603	820.62	82	76	DZ
604	820.81	88	23	DZ
605	820.59	148	11	DZ
606	820.21	113	23	DZ
607	821.13	88	55	DZ
608	821.84	50	7	DZ
609	823.59	201	12	DZ
610	826.12	76	14	DZ
611	828.65	173	68	DZ
612	830.53	172	80	DZ
613	831.03	296	85	DZ
614	833.92	170	8	DZ
615	833.27	89	70	DZ
616	835.98	122	80	DZ
617	836.99	155	23	DZ
618	837.64	60	74	DZ
619	838.53	203	16	DZ
620	839.46	319	24	DZ
621	848.72	209	16	FFM05I
622	851.79	129	84	FFM05I
623	860.19	338	80	FFM05I
624	861.13	152	75	FFM05I
625	864.7	126	19	FFM05I
626	864.57	93	10	FFM05I
627	865.62	199	1	FFM05I
628	868.03	312	33	FFM05I
629	868.06	63	18	FFM05I
630	880.77	113	64	FFM05I
631	881.38	228	5	FFM05I
632	883.16	328	83	FFM05I
633	889.43	64	19	FFM05I
634	893.82	337	13	FFM05I
635	901.85	313	87	FFM05I
636	906.8	1	58	FFM05I
637	907.36	147	85	FFM05I
638	909.86	319	27	FFM05I
639	913.35	344	72	FFM05I
640	913.17	159	68	FFM05I
641	915.64	116	24	DZ
642	915.46	64	16	DZ
643	915.55	96	15	DZ
644	915.99	131	30	DZ
645	915.13	166	14	DZ
646	915.26	92	85	DZ
647	915.79	1	20	DZ
648	916.74	321	15	DZ
649	916.92	129	68	DZ
650	917.41	143	80	DZ

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
651	918.87	145	77	DZ
652	918.71	9	9	DZ
653	918.76	132	67	DZ
654	918.6	305	11	DZ
655	918.78	63	74	DZ
656	918.21	343	90	DZ
657	919.51	88	19	DZ
658	919.52	287	84	DZ
659	919.7	103	15	DZ
660	919.77	109	70	DZ
661	920.37	53	79	DZ
662	920.31	117	80	DZ
663	920.66	318	16	DZ
664	920.98	63	18	DZ
665	920.63	16	37	DZ
666	920.24	158	79	DZ
667	921.49	144	88	DZ
668	921.16	297	11	DZ
669	921.41	73	16	DZ
670	922.35	13	23	DZ
671	922.44	64	10	DZ
672	923.12	142	25	DZ
673	923.36	263	32	DZ
674	923.02	16	37	DZ
675	923.85	24	26	DZ
676	923.15	128	82	DZ
677	924.75	72	68	DZ
678	924.42	63	18	DZ
679	924.8	303	76	DZ
680	925.99	240	63	DZ
681	925.22	122	7	DZ
682	925.53	126	86	DZ
683	926.09	123	89	DZ
684	926.69	174	71	DZ
685	926.88	52	59	DZ
686	926.88	350	25	DZ
687	927.93	199	3	DZ
688	927.56	339	71	DZ
689	928.28	332	88	DZ
690	928.37	146	13	DZ
691	929.36	98	25	DZ
692	934.81	16	37	DZ
693	935.93	169	28	DZ
694	936.37	312	74	DZ
695	936.93	114	86	DZ
696	936.78	153	78	DZ
697	937.26	135	82	DZ
698	937.19	49	22	DZ
699	937.85	303	83	DZ
700	939.47	19	8	DZ

付録 A

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分
701	939.64	143	81	DZ
702	939.17	264	81	DZ
703	940.32	186	6	DZ
704	940.24	101	86	DZ
705	941.64	158	22	DZ
706	941.82	69	27	DZ
707	941.14	128	6	DZ
708	942.08	131	6	DZ
709	943.45	7	44	DZ
710	944.97	316	84	DZ
711	944.48	60	81	DZ
712	945.13	214	19	DZ
713	946.71	73	16	FFM01l
714	947.55	13	23	FFM01l
715	948.28	64	10	FFM01l

No.	掘削深度 (mabh)	傾斜方位 (°)	傾斜角度 (°)	岩盤区分

This is a blank page.

付　録　B
各ボーリング孔で実施された
水理試験（PSS, PFL）データ

This is a blank page.

付録 B

岩盤領域 FFM02

PSS 試験　5m区間

ボーリング孔	試験区間(mabh)		割れ目本数	透水量係数(m2/s)
	上端深度	下端深度		
KFM01A	100.45	105.45	5	6.88E-10
KFM01A	105.45	110.45	15	2.38E-09
KFM01A	110.45	115.45	21	1.03E-08
KFM01A	115.45	120.45	16	7.07E-08
KFM01A	120.45	125.45	18	1.95E-08
KFM01A	125.45	130.45	16	2.50E-09
KFM01A	130.45	135.45	2	6.88E-10
KFM01A	135.45	140.45	15	6.88E-10
KFM01A	140.45	145.45	8	1.70E-08
KFM01A	145.45	150.45	23	9.10E-08
KFM01A	150.45	155.45	14	1.84E-11
KFM01A	155.45	160.45	17	4.61E-08
KFM01A	160.45	165.45	24	4.85E-09
KFM01A	165.45	170.45	13	3.33E-11
KFM01A	170.45	175.45	17	5.26E-10
KFM01A	175.45	180.45	14	3.18E-08
KFM01A	180.45	185.45	17	3.65E-11
KFM01A	185.45	190.45	25	2.71E-09
KFM01A	190.45	195.45	18	4.22E-10
KFM01A	195.45	200.45	11	6.88E-10
KFM01D	93.6	98.6	1	7.60E-10
KFM01D	98.6	103.6	5	2.46E-10
KFM01D	103.6	108.6	10	9.70E-07
KFM01D	108.6	113.6	4	9.49E-09
KFM01D	113.6	118.6	6	2.98E-10
KFM01D	118.6	123.6	12	1.95E-05
KFM01D	123.6	128.6	16	2.98E-07
KFM01D	128.6	133.6	20	1.07E-07
KFM01D	133.6	138.6	1	1.70E-10
KFM01D	138.6	143.6	8	1.18E-08
KFM01D	143.6	148.6	26	5.32E-06
KFM01D	148.6	153.6	11	2.72E-07
KFM01D	153.6	158.6	15	1.35E-08
KFM01D	158.6	163.6	2	1.54E-10
KFM01D	163.6	168.6	3	2.46E-10
KFM01D	168.6	173.6	5	1.05E-07
KFM01D	183.6	188.6	6	4.36E-10
KFM06A	107.5	112.5	20	9.55E-08
KFM06A	117.5	122.5	4	3.19E-10
KFM06A	122.5	127.5	6	5.82E-06

付録 B

PSS 試験　20m区間

ボーリング孔	試験区間(mabh)		割れ目本数	透水量係数(m2/s)
	上端深度	下端深度		
KFM01A	100	120	57	8.58E-08
KFM01A	120	140	51	9.12E-09
KFM01A	140	160	62	1.11E-07
KFM01A	160	180	68	2.96E-08
KFM01A	180	200	71	2.22E-09
KFM01D	93.6	113.6	20	1.24E-06
KFM01D	113.6	133.6	54	1.95E-05
KFM01D	133.6	153.6	46	7.30E-06
KFM01D	153.6	173.6	25	1.08E-07
KFM06A	107.5	127.5	43	6.88E-06

PSS 試験　100m区間

ボーリング孔	試験区間(mabh)		割れ目本数	透水量係数(m2/s)
	上端深度	下端深度		
KFM01A	100	200	309	1.45E-07

付録 B

PFL 試験

ボーリング孔	検出深度 (m)	透水量係数(fresh water) (m2/s)	湧水量(m3/s)
KFM01A	105.3	1.11E-09	1.25E-08
KFM01A	106.9	4.68E-10	5.28E-09
KFM01A	113.8	2.53E-09	2.86E-08
KFM01A	115.2	3.57E-08	4.17E-07
KFM01A	118.3	5.31E-08	6.11E-07
KFM01A	121.7	3.20E-09	3.61E-08
KFM01A	122.6	3.69E-09	4.17E-08
KFM01A	123.3	1.25E-09	1.42E-08
KFM01A	123.8	4.67E-10	5.28E-09
KFM01A	128.1	1.97E-09	2.22E-08
KFM01A	128.4	6.15E-10	6.94E-09
KFM01A	145	8.59E-10	9.72E-09
KFM01A	146.8	7.24E-09	7.78E-08
KFM01A	147.7	7.73E-09	8.33E-08
KFM01A	149.1	8.22E-09	8.89E-08
KFM01A	158.6	1.06E-08	1.19E-07
KFM01A	159.3	4.91E-10	5.56E-09
KFM01A	161.9	7.36E-10	8.33E-09
KFM01A	162.9	4.17E-10	4.72E-09
KFM01A	174.8	2.45E-10	2.78E-09
KFM01A	178	1.22E-09	1.39E-08
KFM01A	178.3	4.70E-08	5.69E-07
KFM01A	187.8	2.82E-09	3.47E-08
KFM01D	106	5.10E-08	6.94E-07
KFM01D	120.9	1.70E-07	1.71E-06
KFM01D	121.9	6.10E-08	6.28E-07
KFM01D	122.7	3.60E-08	3.64E-07
KFM01D	125	8.10E-09	8.22E-08
KFM01D	125.5	9.20E-09	9.33E-08
KFM01D	125.7	1.40E-08	1.37E-07
KFM01D	126.7	1.30E-09	1.36E-08
KFM01D	128	6.60E-10	6.67E-09
KFM01D	129.5	1.80E-08	1.79E-07
KFM01D	131.2	1.10E-08	1.14E-07
KFM01D	131.4	1.90E-08	1.91E-07
KFM01D	142.8	1.20E-09	1.19E-08
KFM01D	143.4	3.60E-09	3.61E-08
KFM01D	144.9	2.00E-06	2.04E-05
KFM01D	145.5	2.30E-07	2.34E-06
KFM01D	148	2.30E-06	2.32E-05
KFM01D	150.8	1.90E-07	1.93E-06
KFM01D	151.9	1.50E-07	1.49E-06
KFM01D	153.9	3.20E-09	3.25E-08
KFM01D	154.9	4.10E-09	4.11E-08
KFM01D	157.4	2.40E-08	2.39E-07
KFM01D	158.4	4.50E-09	4.53E-08
KFM06A	102.4	2.40E-09	2.22E-08
KFM06A	106.4	2.70E-09	2.50E-08
KFM06A	109.3	1.40E-09	1.25E-08
KFM06A	110.6	7.60E-08	6.94E-07
KFM06A	111.5	3.40E-09	3.14E-08
KFM06A	113.6	3.10E-09	2.94E-08
KFM06A	115.4	6.90E-09	6.39E-08
KFM06A	116.4	3.90E-08	3.61E-07
KFM06A	116.9	2.50E-07	2.41E-06
KFM06A	123.1	1.70E-09	1.56E-08
KFM06A	126	7.30E-06	6.67E-05
KFM06A	126.9	4.30E-07	3.89E-06

付録 B

岩盤領域 FFM01m

PSS 試験　5m区間（1）

ボーリング孔	試験区間(mabh)		割れ目本数	透水量係数(m2/s)
	上端深度	下端深度		
KFM01A	200.45	205.45	10	2.19E-10
KFM01A	205.45	210.45	5	2.19E-10
KFM01A	210.45	215.45	3	2.19E-10
KFM01A	225.45	230.45	18	3.96E-10
KFM01A	230.45	235.45	21	2.19E-10
KFM01A	235.45	240.45	6	2.19E-10
KFM01A	260.45	265.45	4	2.19E-10
KFM01A	245.45	250.45	8	2.19E-10
KFM01A	250.45	255.45	5	2.19E-10
KFM01A	255.45	260.45	2	2.19E-10
KFM01A	260.45	265.45	12	2.19E-10
KFM01A	285.45	290.45	9	2.19E-10
KFM01A	290.45	295.45	12	2.53E-09
KFM01A	295.45	300.45	5	2.98E-10
KFM01A	300.45	305.45	4	2.19E-10
KFM01A	305.45	310.45	7	1.65E-09
KFM01A	310.45	315.45	2	2.19E-10
KFM01A	315.45	320.45	6	2.82E-09
KFM01A	320.45	325.45	1	7.40E-09
KFM01A	325.45	330.45	3	6.05E-10
KFM01A	330.45	335.45	4	7.51E-09
KFM01A	335.45	340.45	1	2.19E-10
KFM01A	340.45	345.45	4	2.19E-10
KFM01A	345.45	350.45	2	2.19E-10
KFM01A	350.45	355.45	5	2.19E-10
KFM01A	355.45	360.45	1	2.19E-10
KFM01A	360.45	365.45	3	4.42E-09
KFM01A	365.45	370.45	1	2.19E-10
KFM01A	370.45	375.45	2	2.19E-10
KFM01A	375.45	380.45	4	2.19E-10
KFM01A	380.45	385.45	12	2.19E-10
KFM01D	253.6	258.6	3	4.63E-09
KFM01D	258.6	263.6	2	3.89E-09
KFM01D	263.6	268.6	3	1.27E-08
KFM01D	268.6	273.6	1	2.46E-10
KFM01D	293.6	298.6	1	2.46E-10
KFM01D	298.6	303.6	3	6.03E-10
KFM01D	303.6	308.6	9	3.71E-06
KFM01D	308.6	313.6	0	2.46E-10
KFM01D	313.6	318.6	5	1.65E-05
KFM01D	318.6	323.6	2	2.98E-10
KFM01D	323.6	328.6	1	2.46E-10
KFM01D	328.6	333.6	6	3.04E-09
KFM01D	333.6	338.6	0	1.63E-10
KFM01D	338.6	343.6	0	2.46E-10
KFM01D	343.6	348.6	4	2.46E-10
KFM01D	348.6	353.6	8	4.77E-07
KFM01D	353.6	358.6	4	1.55E-08
KFM01D	358.6	363.6	8	1.27E-08
KFM01D	363.6	368.6	1	1.96E-10

付録 B

PSS 試験　5m区間（２）

ボーリング孔	試験区間(mabh)		割れ目本数	透水量係数(m2/s)
	上端深度	下端深度		
KFM01D	368.6	373.6	2	2.53E-07
KFM01D	373.6	378.6	5	3.15E-07
KFM01D	378.6	383.6	6	7.63E-08
KFM01D	383.6	388.6	4	3.63E-10
KFM01D	388.6	393.6	5	1.95E-09
KFM01D	423.6	428.6	1	1.96E-10
KFM01D	428.6	433.6	1	9.95E-07
KFM01D	433.6	438.6	2	8.09E-08
KFM01D	438.6	443.6	1	1.96E-10
KFM01D	443.6	448.6	2	1.96E-10
KFM01D	448.6	453.6	1	2.46E-10
KFM01D	453.6	458.6	1	2.46E-10
KFM01D	458.6	463.6	5	3.87E-09
KFM01D	463.6	468.6	0	1.96E-10
KFM01D	468.6	473.6	0	1.96E-10
KFM01D	473.6	478.6	1	1.66E-10
KFM01D	478.6	483.6	1	2.46E-10
KFM06A	280.5	285.5	3	2.69E-10
KFM06A	285.5	290.5	1	2.69E-10
KFM06A	290.5	295.5	2	1.57E-09
KFM06A	295.5	300.5	1	5.05E-07
KFM06A	300.5	305.5	1	5.96E-08
KFM06A	305.5	310.5	3	2.49E-07
KFM06A	310.5	315.5	2	2.17E-08
KFM06A	360.5	365.5	3	4.42E-09
KFM06A	365.5	370.5	2	2.36E-10
KFM06A	370	375	1	3.01E-10
KFM06A	375.5	380.5	4	2.14E-10
KFM06A	380.5	385.5	1	1.39E-08
KFM06A	385.5	390.5	0	6.86E-10
KFM06A	390.5	395.5	0	2.97E-07
KFM06A	395.5	400.5	4	1.59E-09
KFM06A	400.5	405.5	4	2.28E-10
KFM06A	405.5	410.5	4	1.76E-10
KFM06A	410.5	415.5	8	1.80E-09
KFM06A	415.5	420.5	6	2.28E-10
KFM06A	420.5	425.5	2	3.56E-10
KFM06A	445.5	450.5	5	4.05E-09
KFM06A	450.5	455.5	9	2.26E-10
KFM06A	455.5	460.5	0	2.26E-10
KFM06A	460.5	465.5	1	2.46E-10
KFM08A	404	409	9	2.48E-10
KFM08A	409	414	8	1.32E-08
KFM08A	414	419	1	8.56E-11
KFM08A	419	424	4	1.54E-10
KFM08A	444	449	4	1.38E-10
KFM08A	449	454	4	6.58E-08
KFM08A	454	459	2	6.18E-10
KFM08A	459	464	2	7.99E-09
KFM08A	464	469	3	1.64E-10
KFM08A	469	474	5	2.14E-10
KFM08A	474	479	7	1.75E-10

付録 B

PSS 試験　20m区間

ボーリング孔	試験区間(mabh)		割れ目本数	透水量係数(m2/s)
	上端深度	下端深度		
KFM01A	240	260	19	8.75E-10
KFM01A	300	320	19	2.68E-09
KFM01A	320	340	9	7.14E-09
KFM01A	340	360	12	8.75E-10
KFM01A	360	380	10	2.76E-09
KFM01D	253.6	273.6	9	1.52E-07
KFM01D	273.6	293.6	1	2.85E-10
KFM01D	293.6	313.6	13	7.09E-06
KFM01D	313.6	333.6	14	1.79E-05
KFM01D	333.6	353.6	12	6.11E-07
KFM01D	353.6	373.6	15	3.54E-07
KFM01D	373.6	393.6	20	4.75E-07
KFM01D	433.6	453.6	6	1.03E-07
KFM01D	453.6	473.6	6	4.24E-09
KFM06A	285.5	305.5	5	3.77E-07
KFM06A	365.5	385.5	9	3.70E-08
KFM06A	385.5	405.5	8	3.90E-07
KFM06A	405.5	425.5	20	1.91E-09
KFM06A	425.5	445.5	5	3.37E-10
KFM06A	445.5	465.5	15	1.45E-09
KFM06A	465.5	485.5	15	3.37E-10
KFM08A	404	424	22	1.23E-08
KFM08A	424	444	11	6.58E-10
KFM08A	444	464	12	7.45E-08

PSS 試験　100m区間

ボーリング孔	試験区間(mabh)		割れ目本数	透水量係数(m2/s)
	上端深度	下端深度		
KFM01D	193.6	293.6	39	1.77E-07
KFM01D	293.6	393.6	74	7.57E-06
KFM06A	405.5	505.5	62	2.15E-09

付録 B

PFL 試験

ボーリング孔	検出深度 (m)	透水量係数(fresh water) (m2/s)	湧水量(m3/s)
KFM01A	227	3.68E-10	4.17E-09
KFM01A	265.8	3.41E-10	3.89E-09
KFM01A	292.6	6.33E-10	7.22E-09
KFM01A	306.6	5.59E-10	6.39E-09
KFM01A	316.6	2.19E-09	2.50E-08
KFM01A	320.6	3.64E-10	4.17E-09
KFM01A	325.9	2.67E-10	3.06E-09
KFM01A	332.9	3.64E-10	4.17E-09
KFM01A	363.4	3.88E-10	4.44E-09
KFM01D	264.3	1.30E-09	1.39E-08
KFM01D	307.4	9.90E-08	1.14E-06
KFM01D	316.9	1.80E-07	2.04E-06
KFM01D	353.2	3.40E-09	3.69E-08
KFM01D	355.2	2.20E-09	2.39E-08
KFM01D	369.5	1.60E-08	1.72E-07
KFM01D	377.9	8.20E-08	8.61E-07
KFM01D	382	2.90E-08	3.03E-07
KFM01D	431.5	6.20E-08	8.92E-07
KFM06A	297.3	2.20E-08	1.39E-07
KFM06A	303	4.90E-10	4.44E-09
KFM06A	306.2	5.70E-09	5.28E-08
KFM06A	308.4	1.50E-08	1.39E-07
KFM06A	384.6	2.60E-09	2.39E-08
KFM06A	392.7	2.40E-08	1.56E-07
KFM06A	449.4	3.30E-10	3.06E-09
KFM08A	210.7	3.90E-10	3.89E-09
KFM08A	410.1	3.60E-10	3.61E-09
KFM08A	411.2	4.50E-09	4.50E-08
KFM08A	411.6	3.10E-09	3.11E-08
KFM08A	413.1	3.80E-09	3.81E-08
KFM08A	431.7	3.00E-10	3.06E-09
KFM08A	452	5.50E-10	5.56E-09
KFM08A	452.8	1.80E-09	1.75E-08
KFM08A	459.9	4.20E-10	4.17E-09

This is a blank page.

付　録　C
SR-Site の情報に基づく
三次元モデルを用いた解析結果

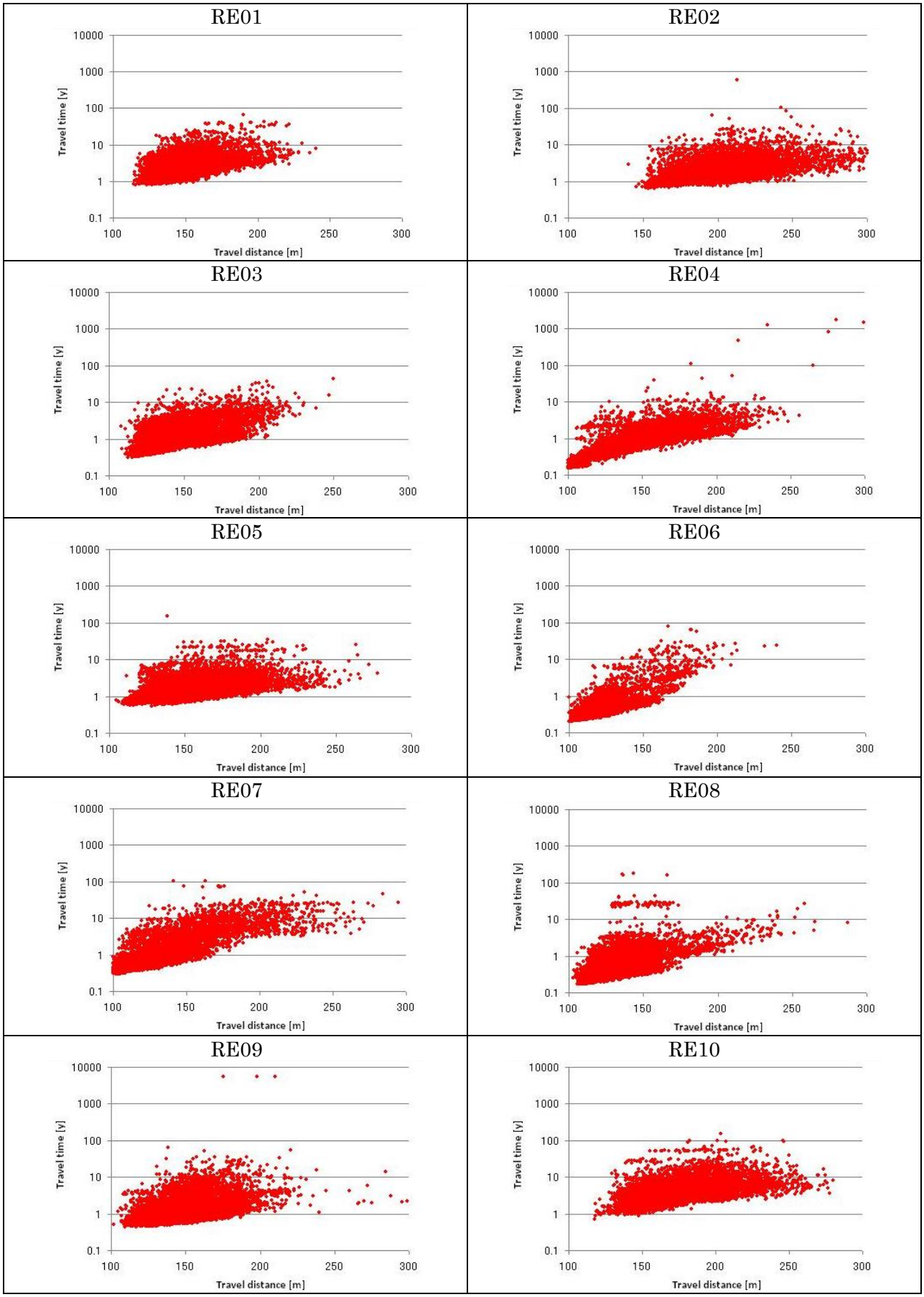
This is a blank page.

付録 C

地下水移行時間の算定結果

【SKB 無相関】

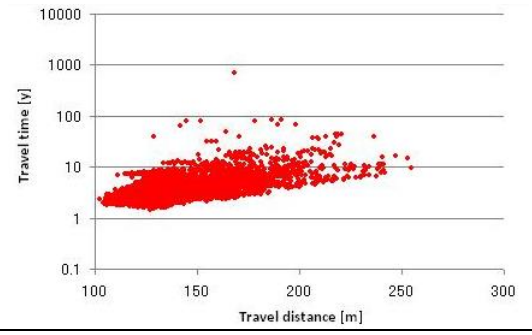
【SKB 無相関：FFM02】 付録 C



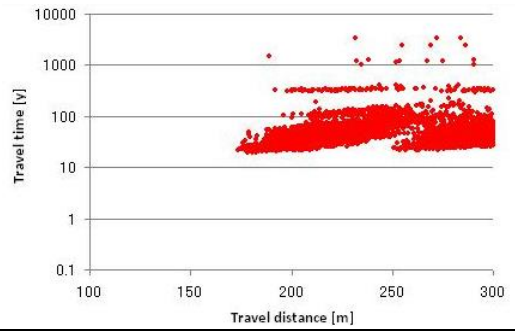
移行距離と移行時間の相関図

【SKB 無相関：FFM01m】 付録 C

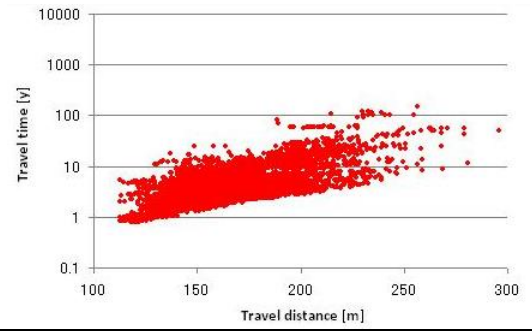
RE01



RE02



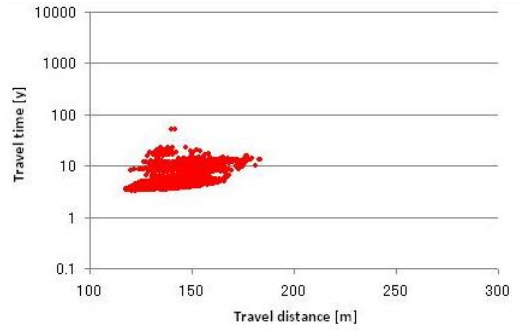
RE03



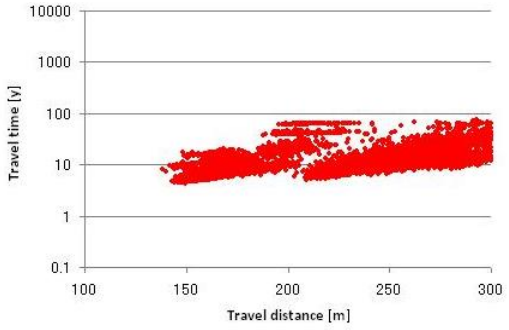
RE04

下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，
粒子が外側境界まで到達しないケース

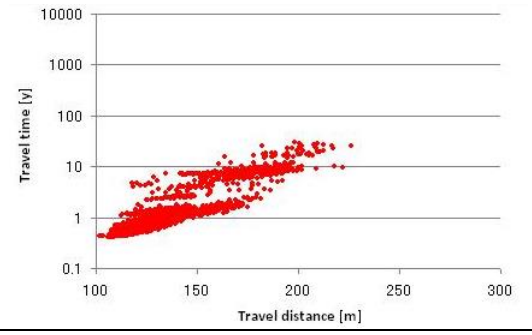
RE05



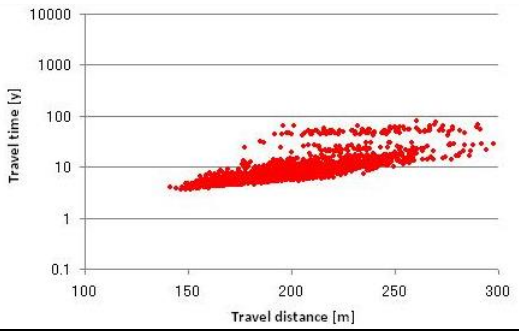
RE06



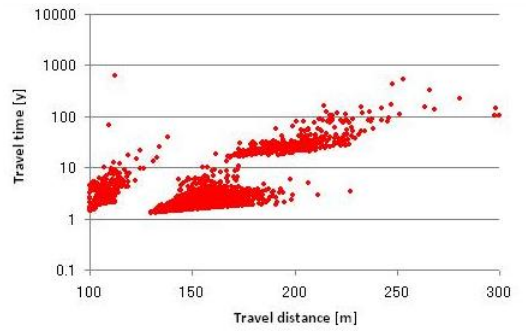
RE07



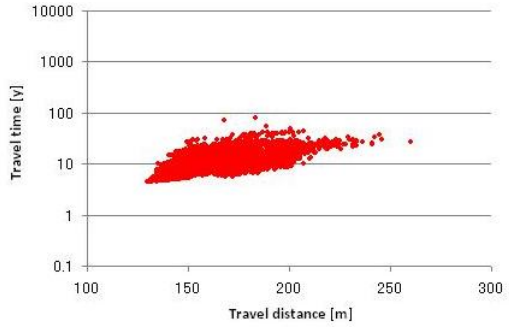
RE08



RE09

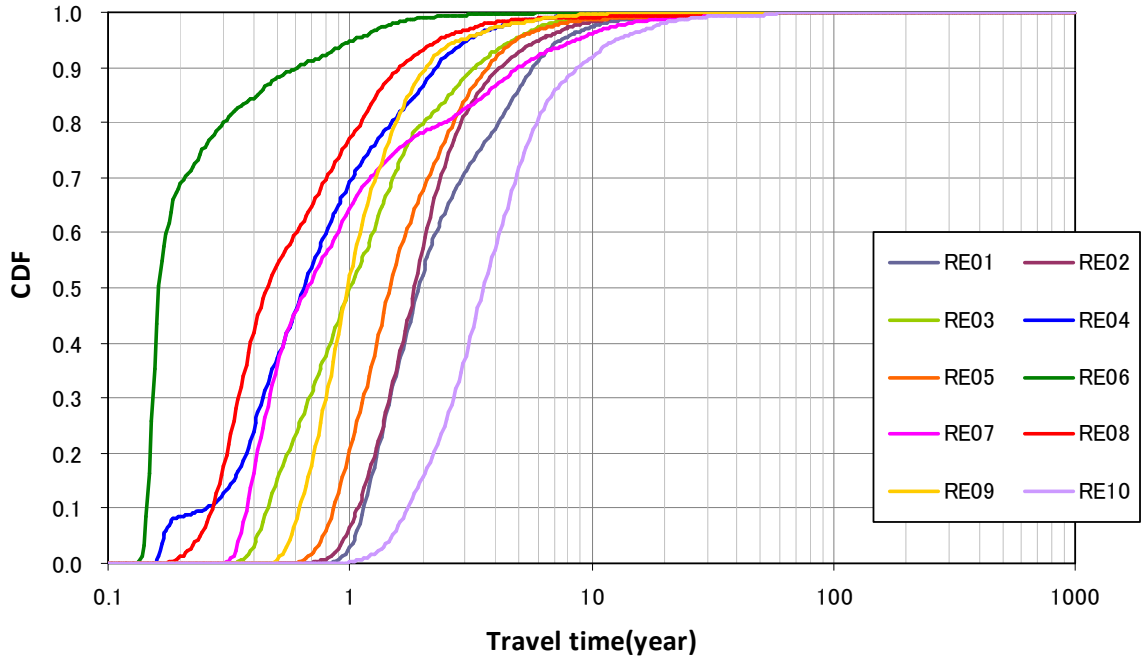


RE10

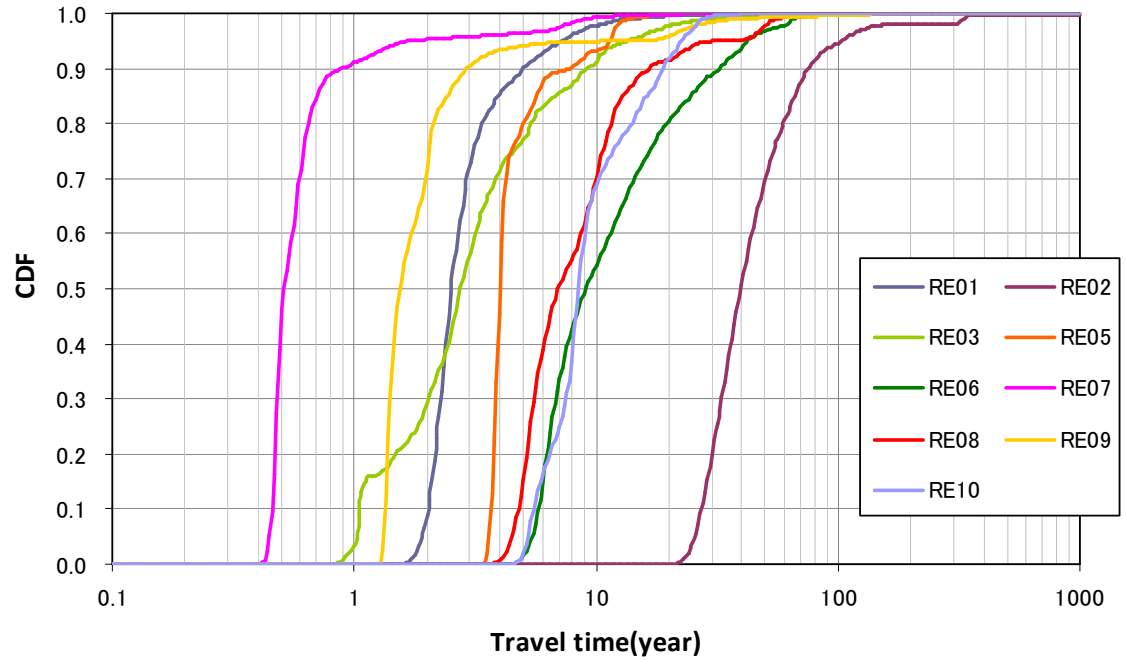


移行距離と移行時間の相関図

【SKB 無相関】 付録 C

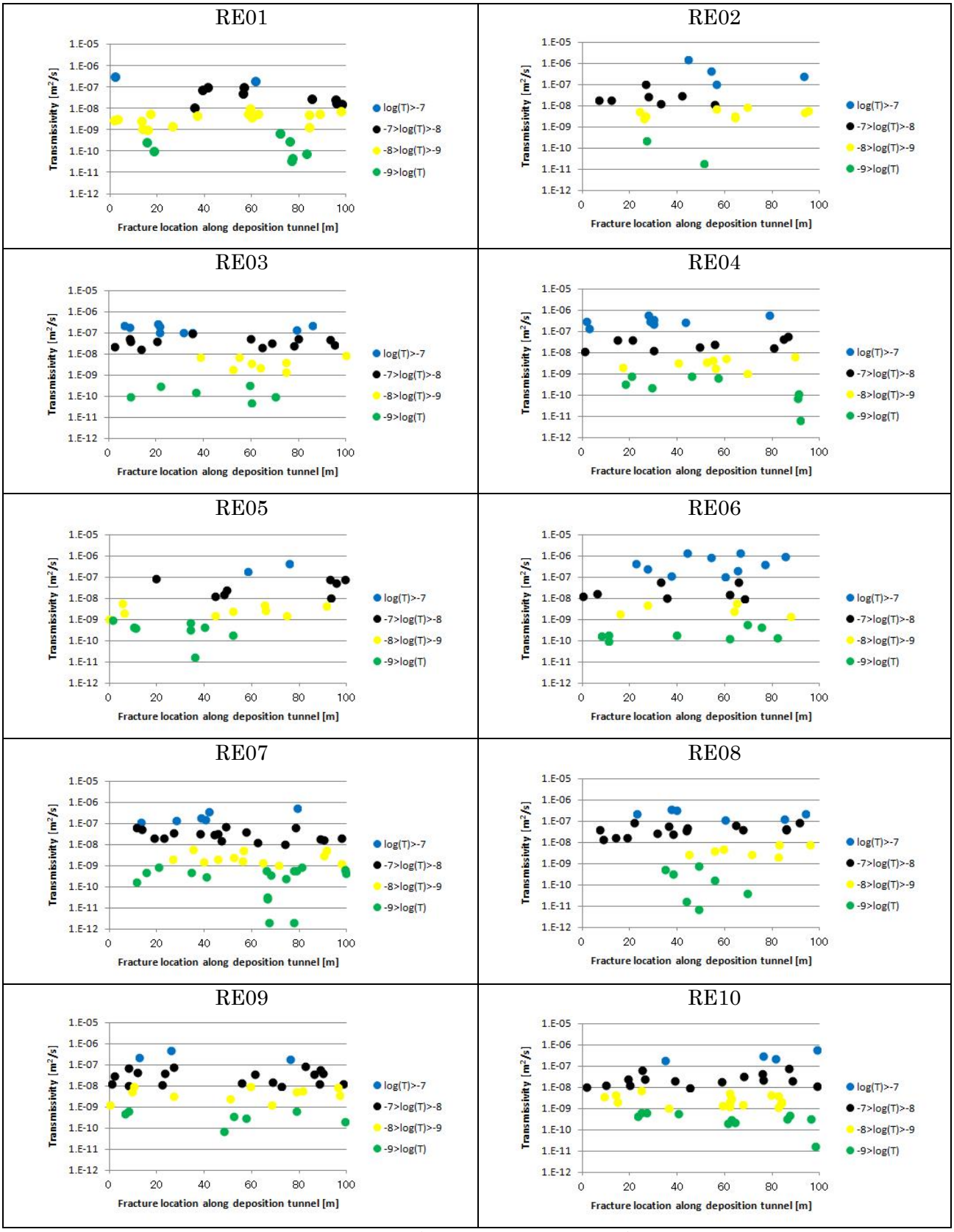


移行時間の累積分布（FFM02）



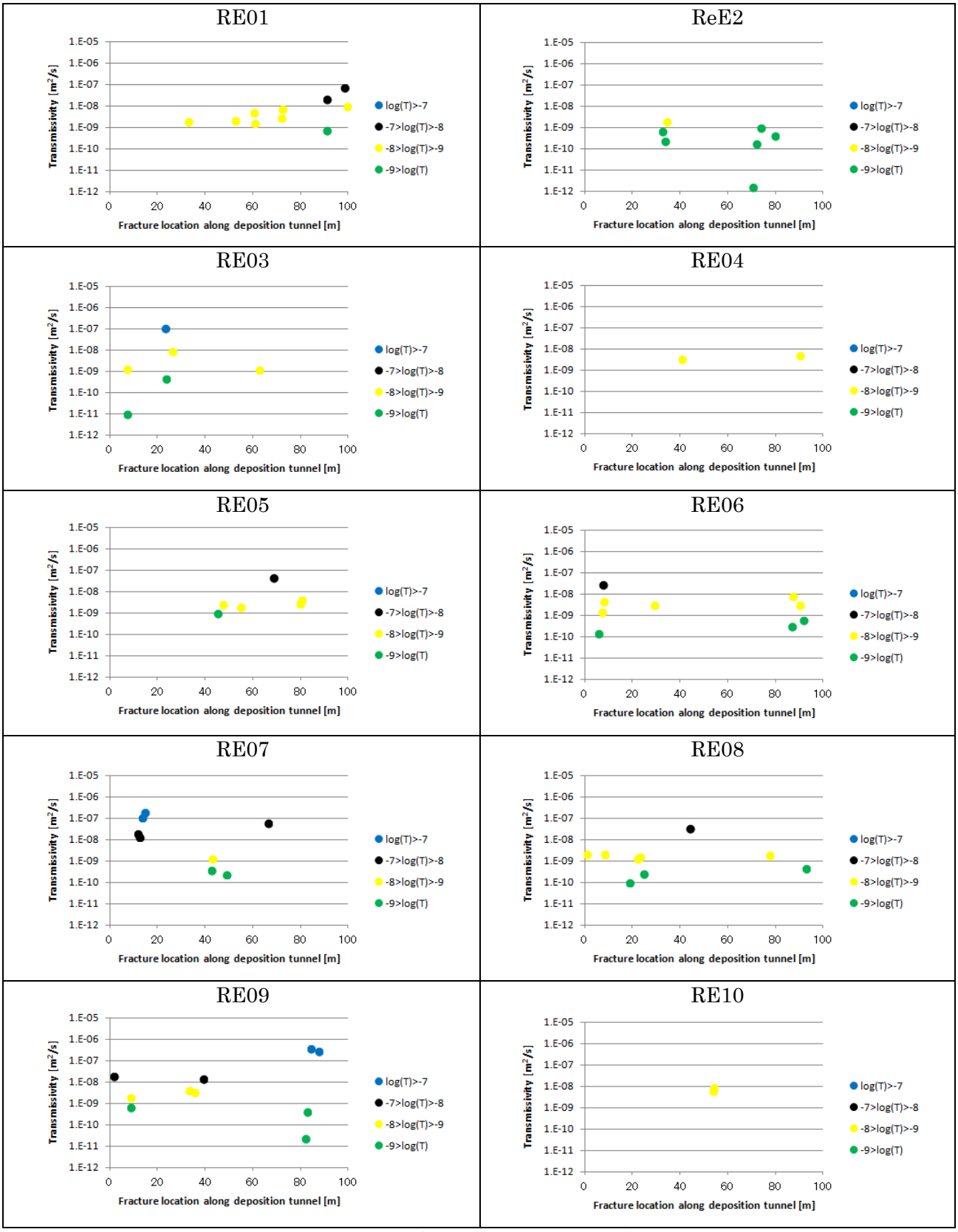
移行時間の累積分布（FFM01m）

【SKB 無相関：FFM02】 付録 C



ソースに交差する透水性割れ目の位置と透水量係数

【SKB 無相関：FFM01m】 付録 C



ソースに交差する透水性割れ目の位置と透水量係数

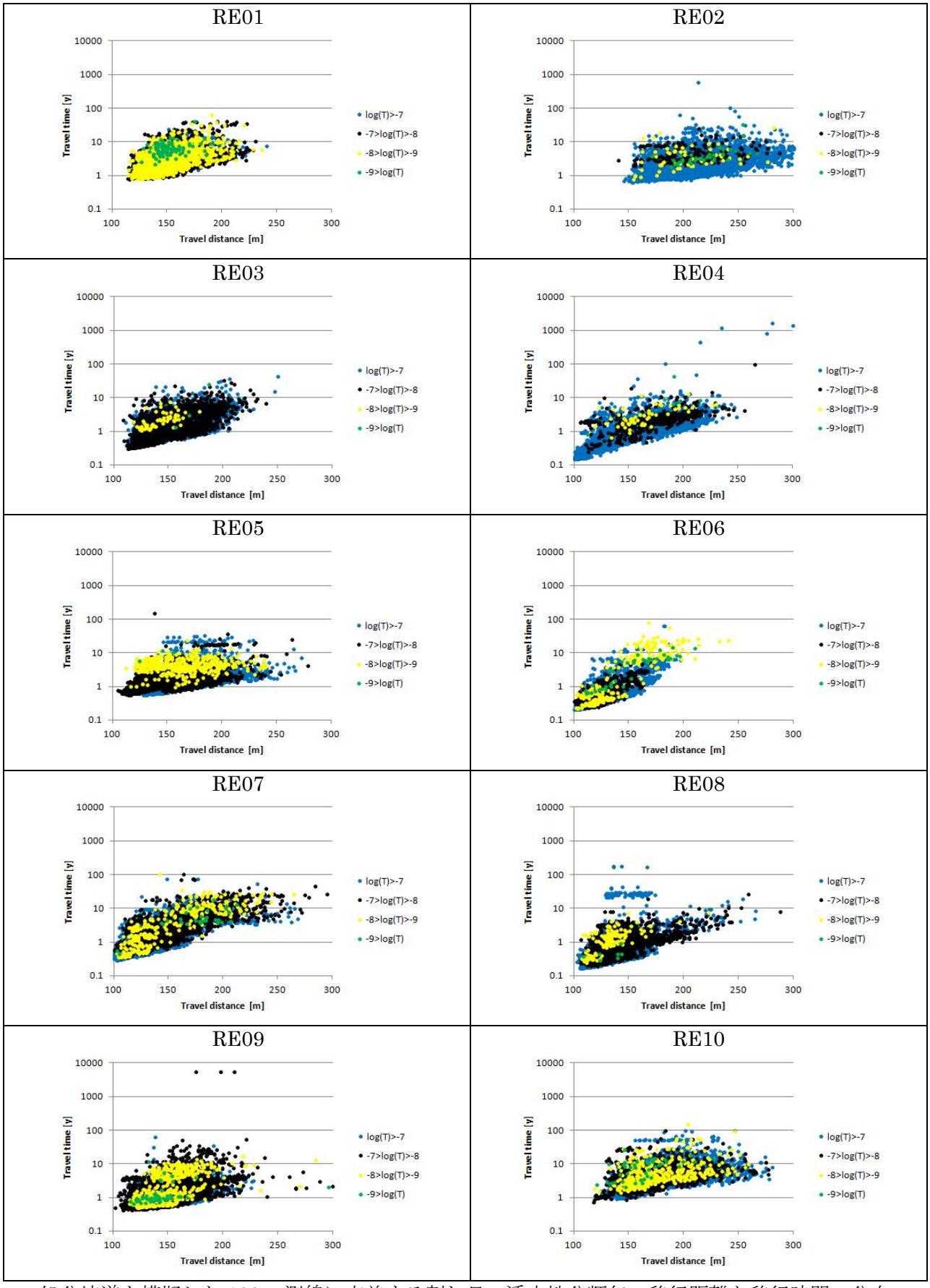
100m 測線に交差している透水性割れ目の分類【SKB 無相関：FFM02】

透水量係数(m2/s)の範囲		Re01		Re02		Re03		Re04		Re05		Re06		Re07		Re08		Re09		Re10	
		個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積
青	1×10^{-7} 以上	2	2	4	4	9	9	8	8	2	2	10	10	6	6	6	6	3	3	4	4
黒	1×10^{-7} 以上 1×10^{-8} 未満	9	11	7	11	13	22	9	17	8	10	7	17	17	23	15	21	18	21	15	19
黄	1×10^{-8} 以上 1×10^{-9} 未満	16	27	9	20	8	30	8	25	9	19	5	22	12	35	7	28	11	32	16	35
緑	1×10^{-9} 以上	8	35	2	22	6	36	8	33	8	27	8	30	18	53	8	36	7	39	11	46

100m 測線に交差している透水性割れ目の分類【SKB 無相関：FFM01m】

透水量係数(m2/s)の範囲		Re01		Re02		Re03		Re04		Re05		Re06		Re07		Re08		Re09		Re10	
		個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積
青	1×10^{-7} 以上	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0
黒	1×10^{-7} 以上 1×10^{-8} 未満	2	2	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	3	5	1	1	2	4	0	0
黄	1×10^{-8} 以上 1×10^{-9} 未満	7	9	1	1	5	6	2	2	4	5	5	6	1	6	5	6	3	7	2	2
緑	1×10^{-9} 以上	1	10	6	7	2	8	0	2	1	6	3	9	2	8	3	9	3	10	0	2

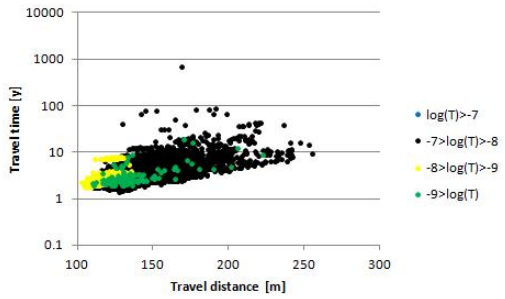
【SKB 無相関：FFM02】 付録 C



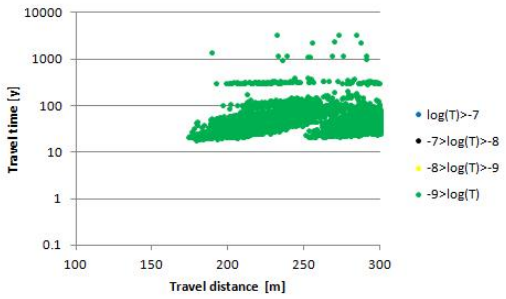
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類毎の移行距離と移行時間の分布

【SKB 無相関：FFM01m】 付録 C

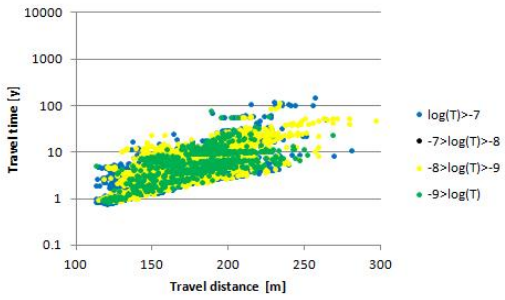
RE01



RE02



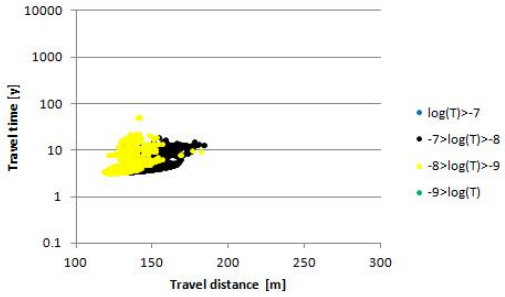
RE03



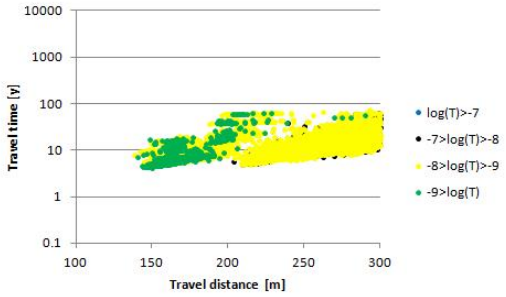
RE04

下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，
粒子が外側境界まで到達しないケース

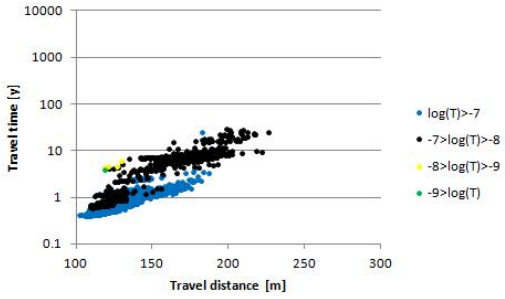
RE05



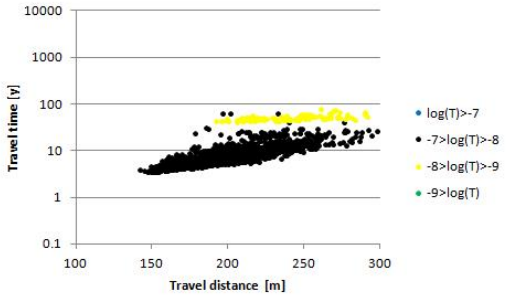
RE06



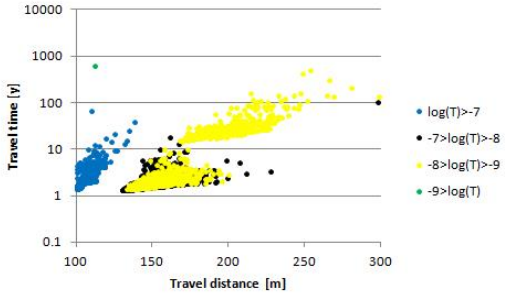
RE07



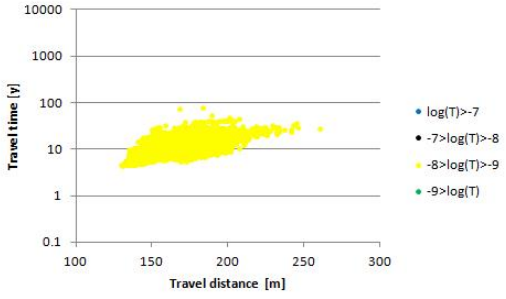
RE08



RE09

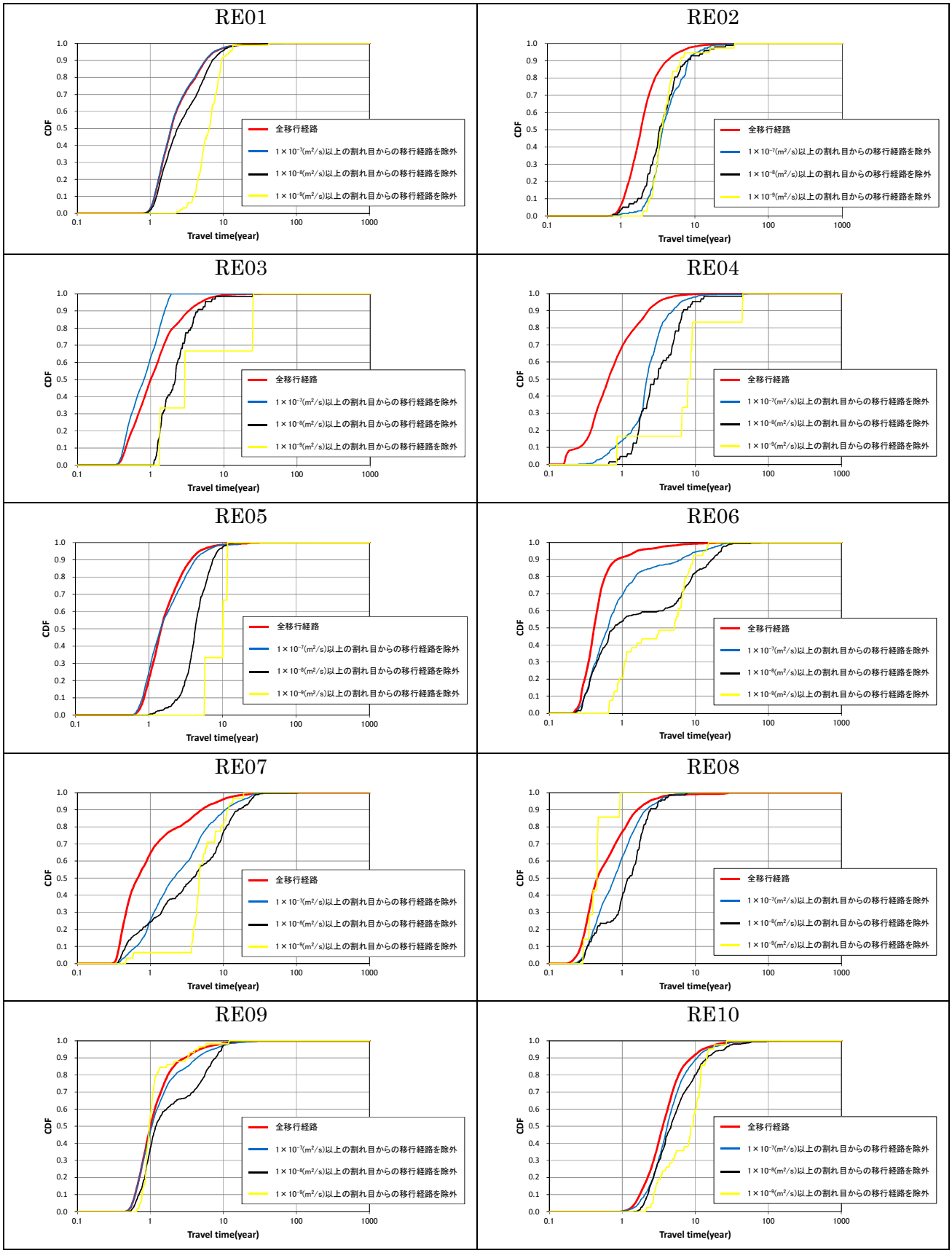


RE10



処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類毎の移行距離と移行時間の分布

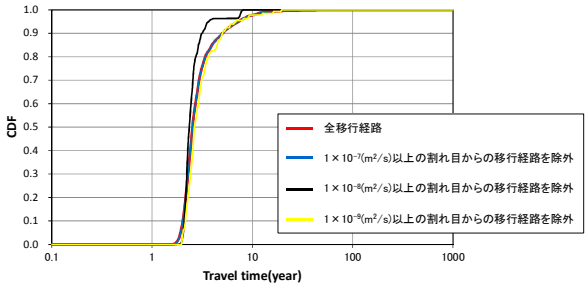
【SKB 無相関：FFM02】 付録 C



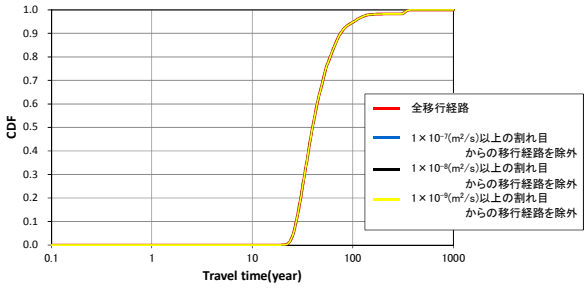
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた移行時間の累積分布の変化

【SKB 無相関：FFM01m】 付録 C

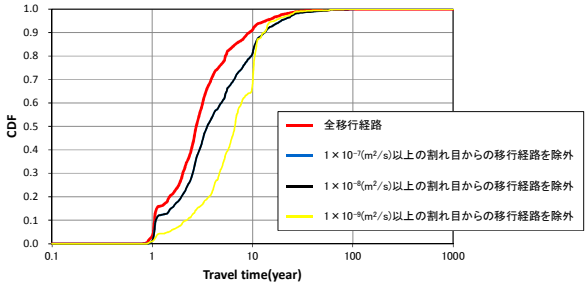
RE01



RE02



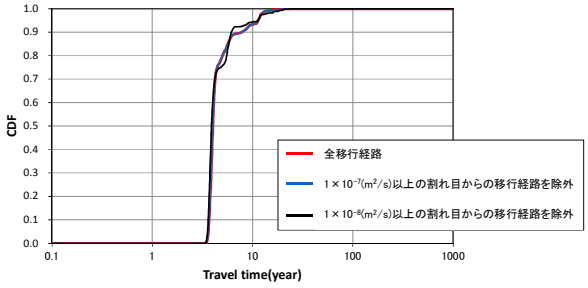
RE03



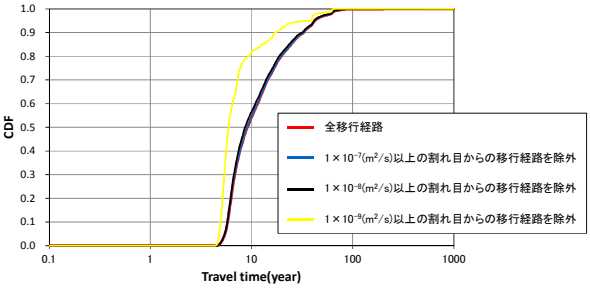
RE04

下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，
粒子が外側境界まで到達しないケース

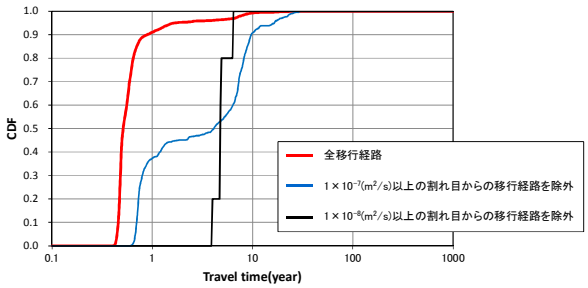
RE05



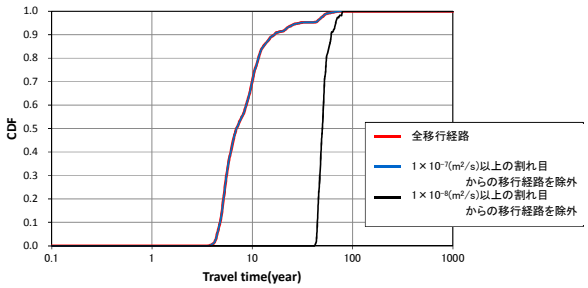
RE06



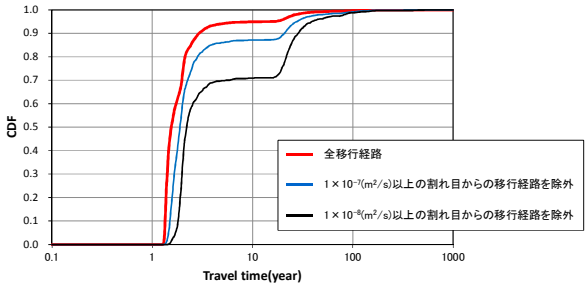
RE07



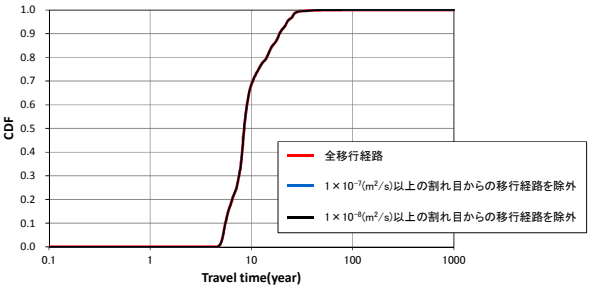
RE08



RE09



RE10



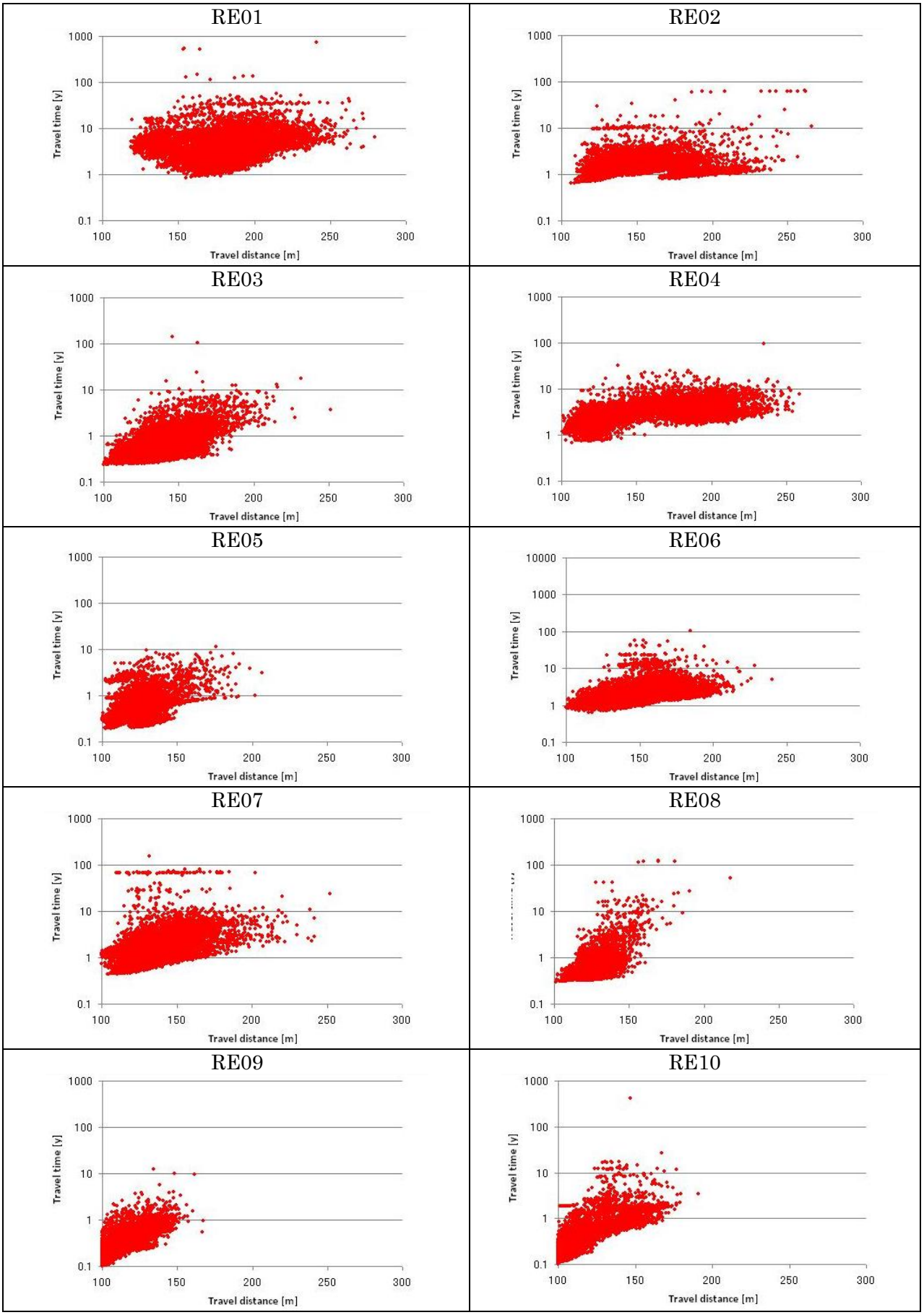
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた移行時間の累積分布の変化

付録 C

地下水移行時間の算定結果

【SKB 準相関】

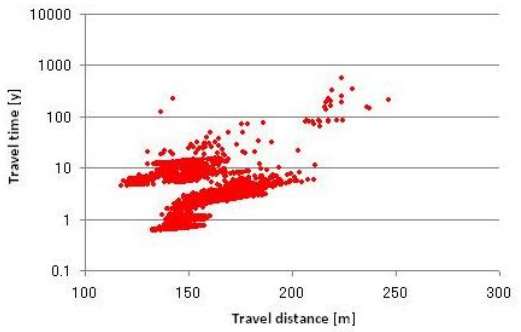
【SKB 準相関：FFM02】 付録 C



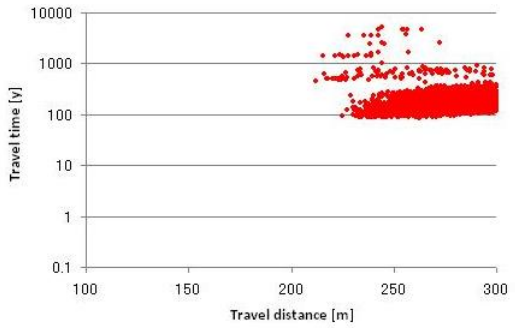
移行距離と移行時間の相関図

【SKB 準相関：FFM01m】 付録 C

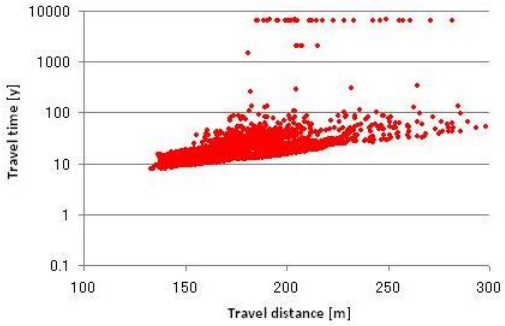
RE01



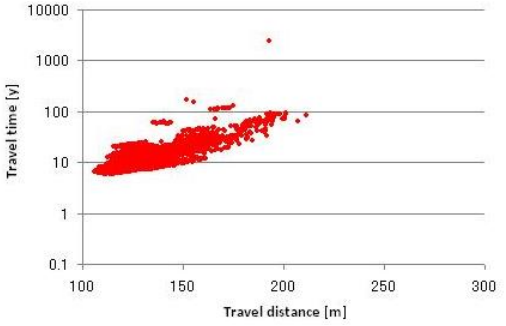
RE02



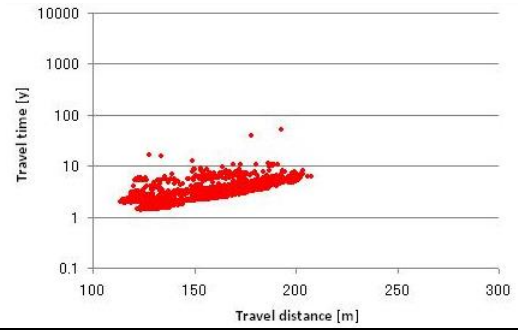
RE03



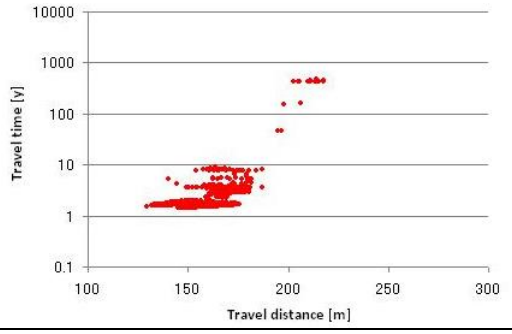
RE04



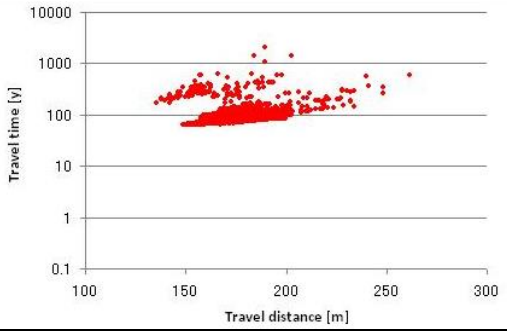
RE05



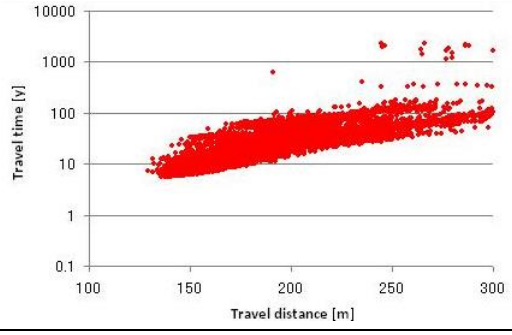
RE06



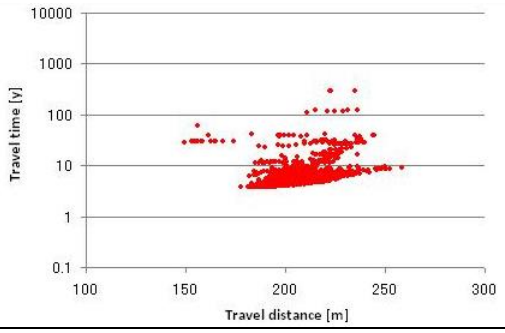
RE07



RE08



RE09

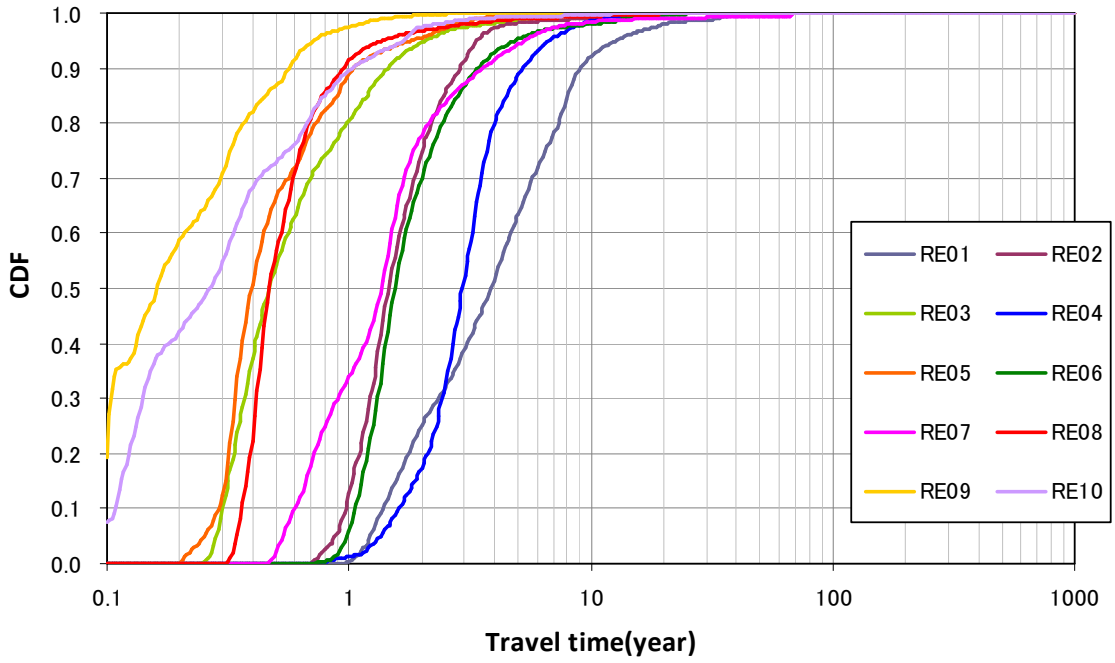


RE10

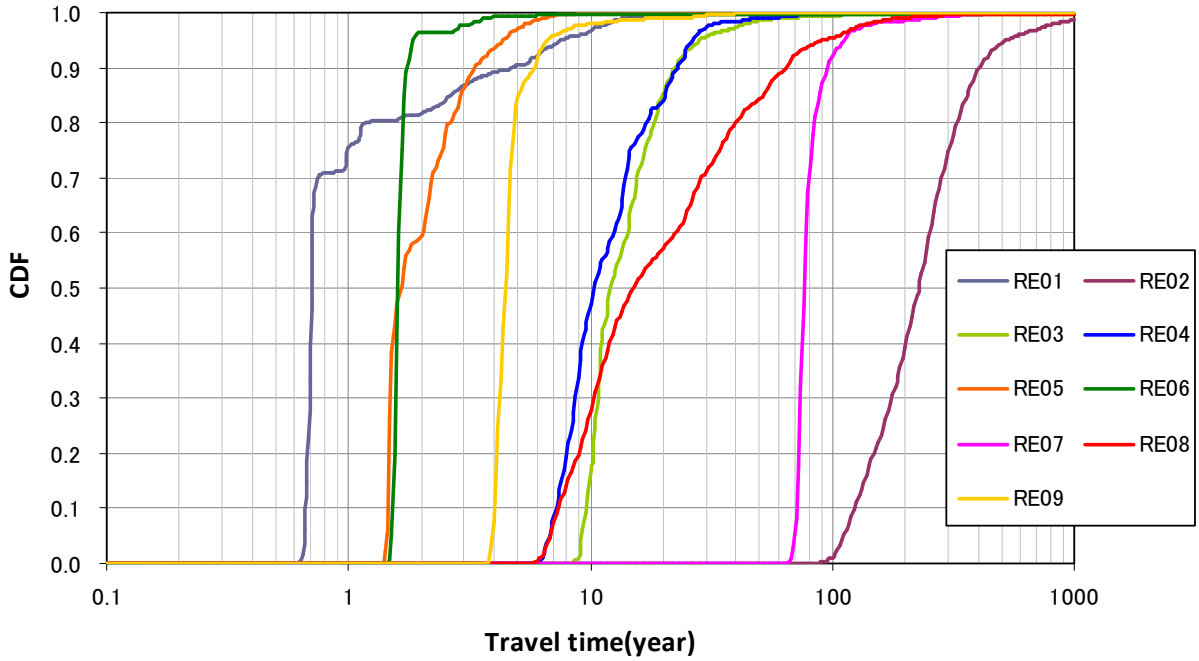
下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，粒子が外側境界まで到達しないケース

移行距離と移行時間の相関図

【SKB 準相関】 付録 C

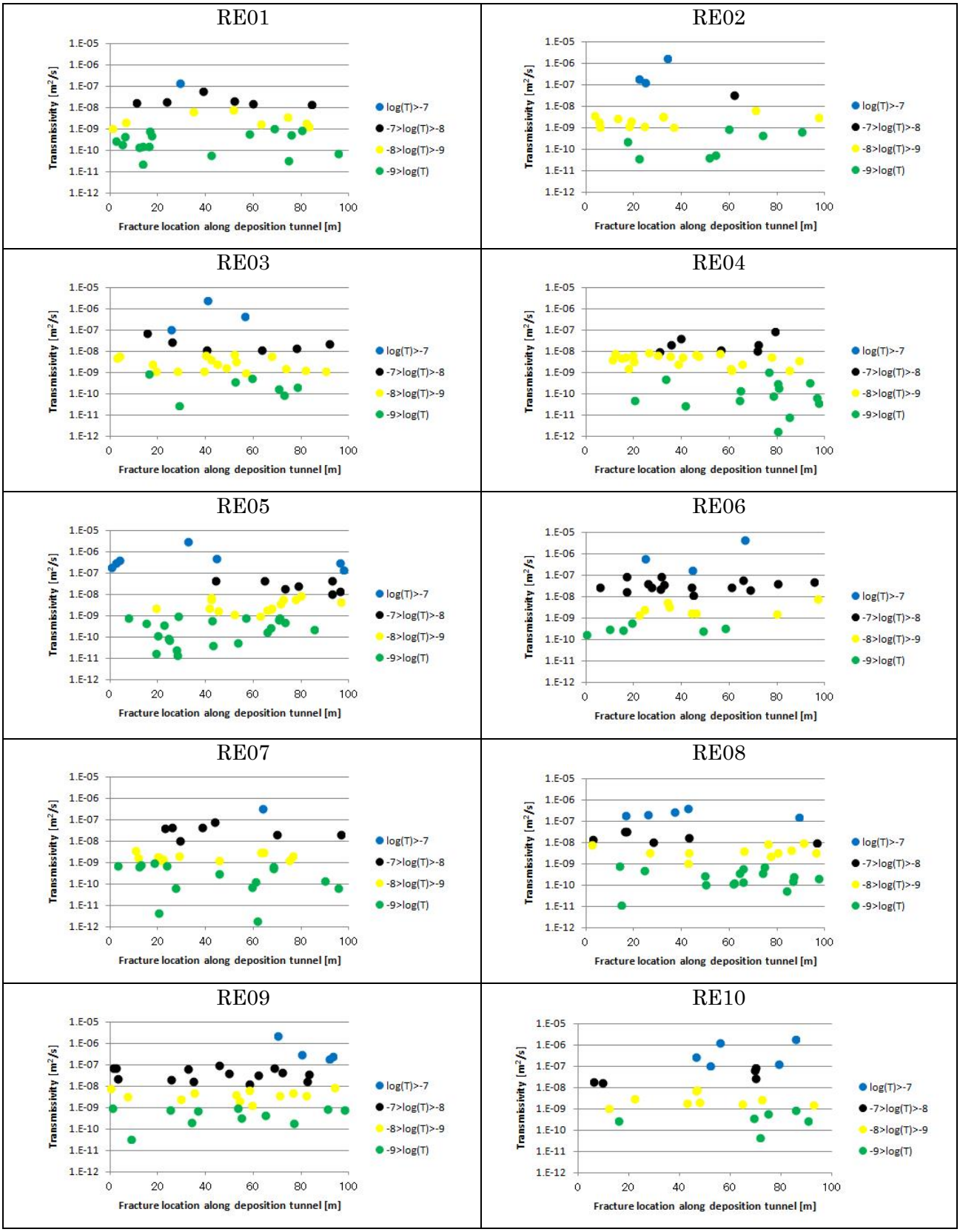


移行時間の累積分布（FFM02）



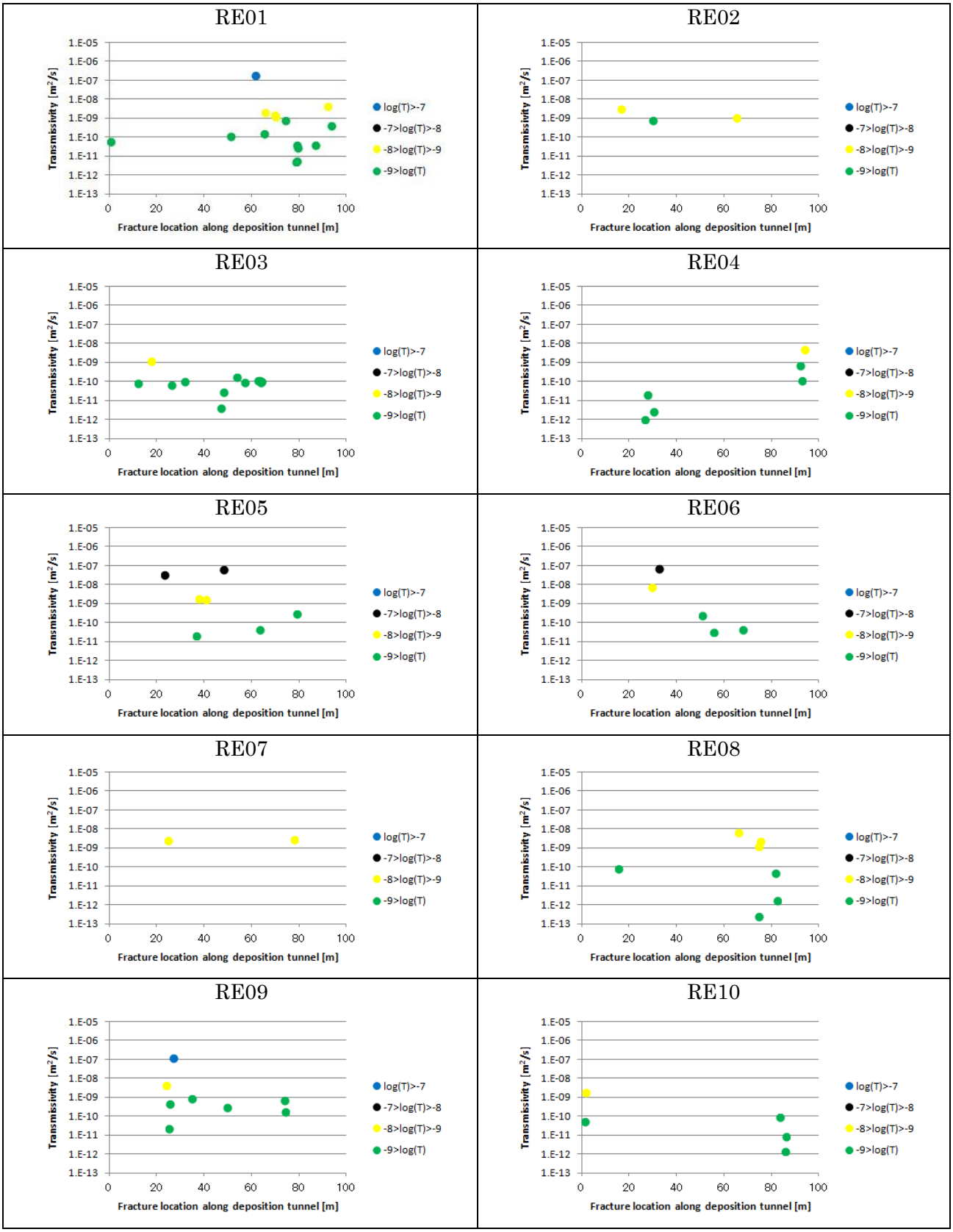
移行時間の累積分布（FFM01m）

【SKB 準相関：FFM02】 付録 C



ソースに交差する透水性割れ目の位置と透水量係数

【SKB 準相関：FFM01m】 付録 C



ソースに交差する透水性割れ目の位置と透水量係数

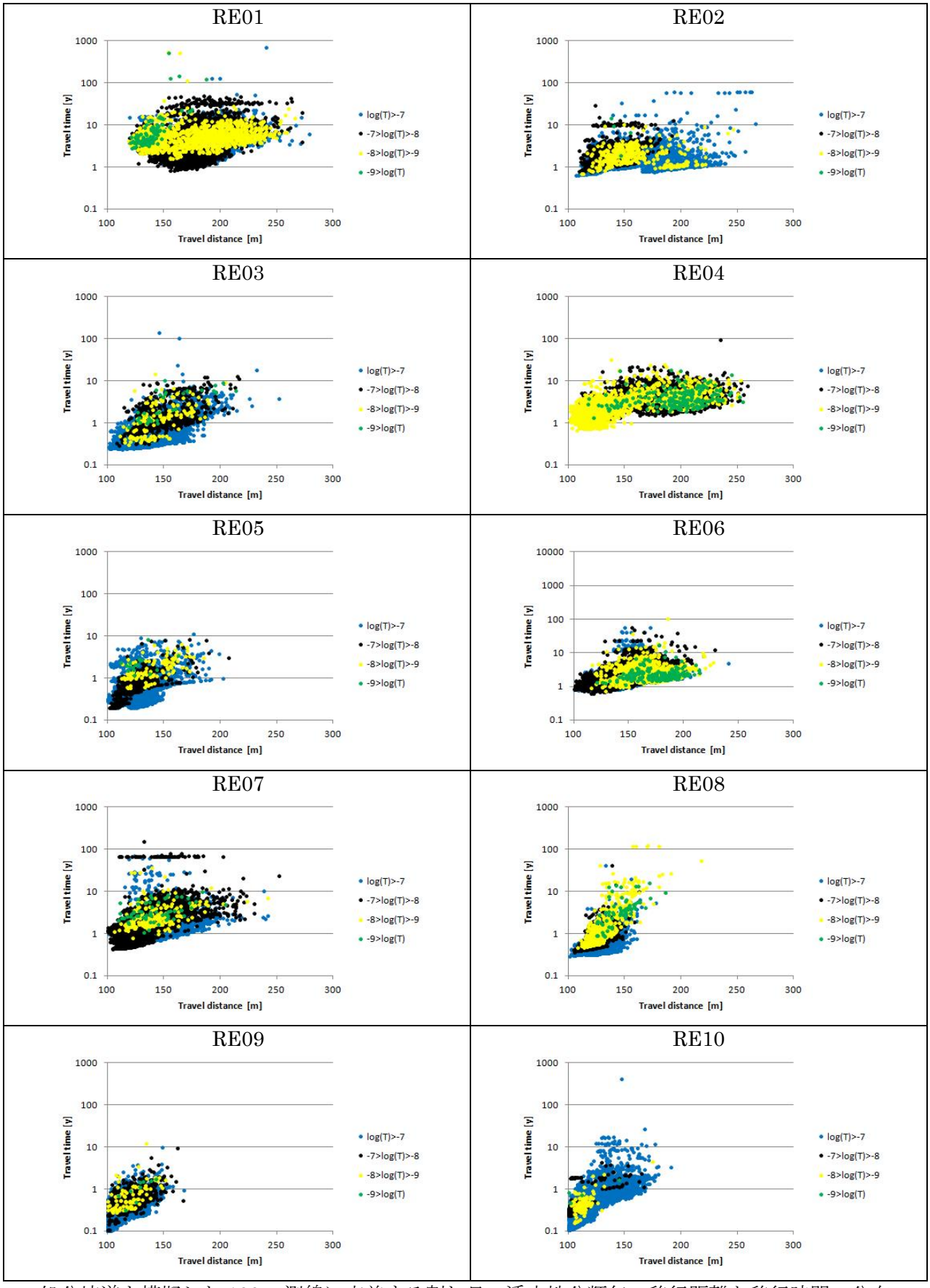
100m 測線に交差している透水性割れ目の分類【SKB 準相関：FFM02】

透水量係数(m2/s)の範囲		Re01		Re02		Re03		Re04		Re05		Re06		Re07		Re08		Re09		Re10	
		個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積
青	1×10^{-7}以上	1	1	3	3	3	3	0	0	7	7	3	3	1	1	5	5	4	4	5	5
黒	1×10^{-7}以上 1×10^{-8}未満	6	7	1	4	6	9	7	7	7	14	15	18	7	8	6	11	14	18	5	10
黄	1×10^{-8}以上 1×10^{-9}未満	8	15	12	16	17	26	21	28	15	29	8	26	12	20	11	22	12	30	9	19
緑	1×10^{-9}以上	16	31	7	23	7	33	14	42	20	49	6	32	15	35	16	38	11	41	6	25

100m 測線に交差している透水性割れ目の分類【SKB 準相関：FFM01m】

透水量係数(m2/s)の範囲		Re01		Re02		Re03		Re04		Re05		Re06		Re07		Re08		Re09		Re10	
		個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積
青	1×10^{-7}以上	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
黒	1×10^{-7}以上 1×10^{-8}未満	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
黄	1×10^{-8}以上 1×10^{-9}未満	4	5	2	2	1	1	1	1	2	4	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1
緑	1×10^{-9}以上	10	15	1	3	11	12	5	6	3	7	3	5	0	2	1	3	6	8	4	5

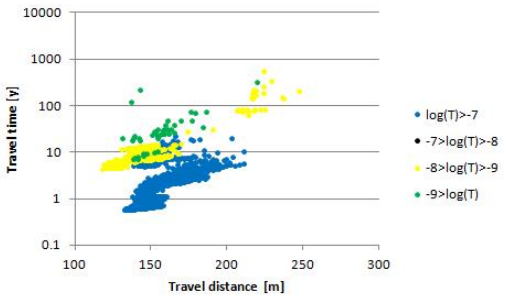
【SKB 準相関：FFM02】 付録 C



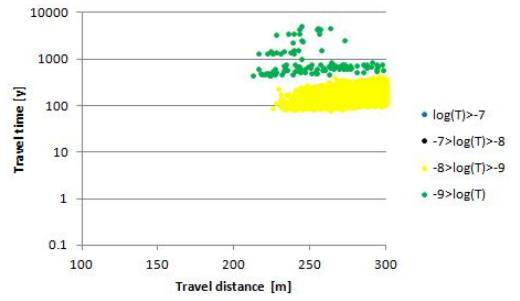
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類毎の移行距離と移行時間の分布

【SKB 準相関：FFM01m】 付録 C

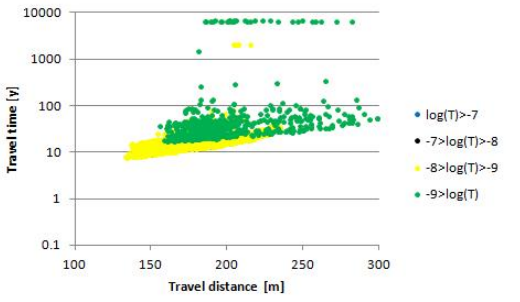
RE01



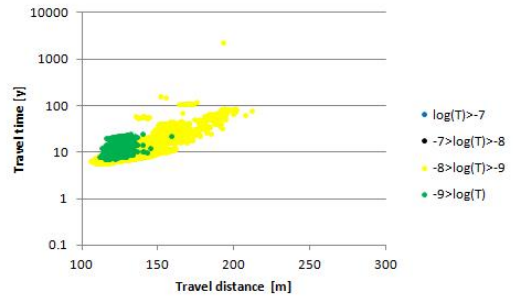
RE02



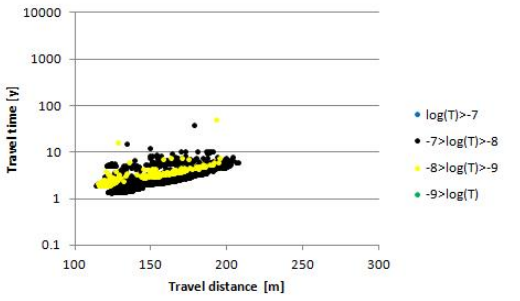
RE03



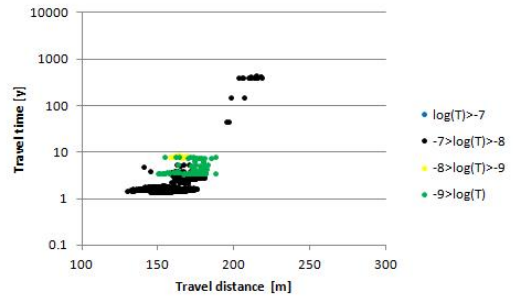
RE04



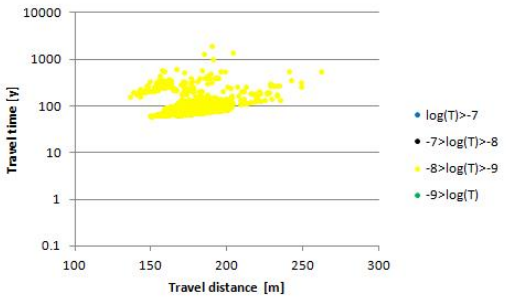
RE05



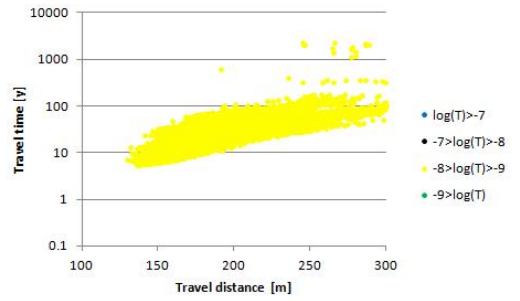
RE06



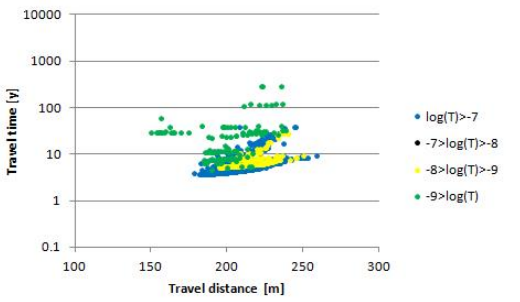
RE07



RE08



RE09

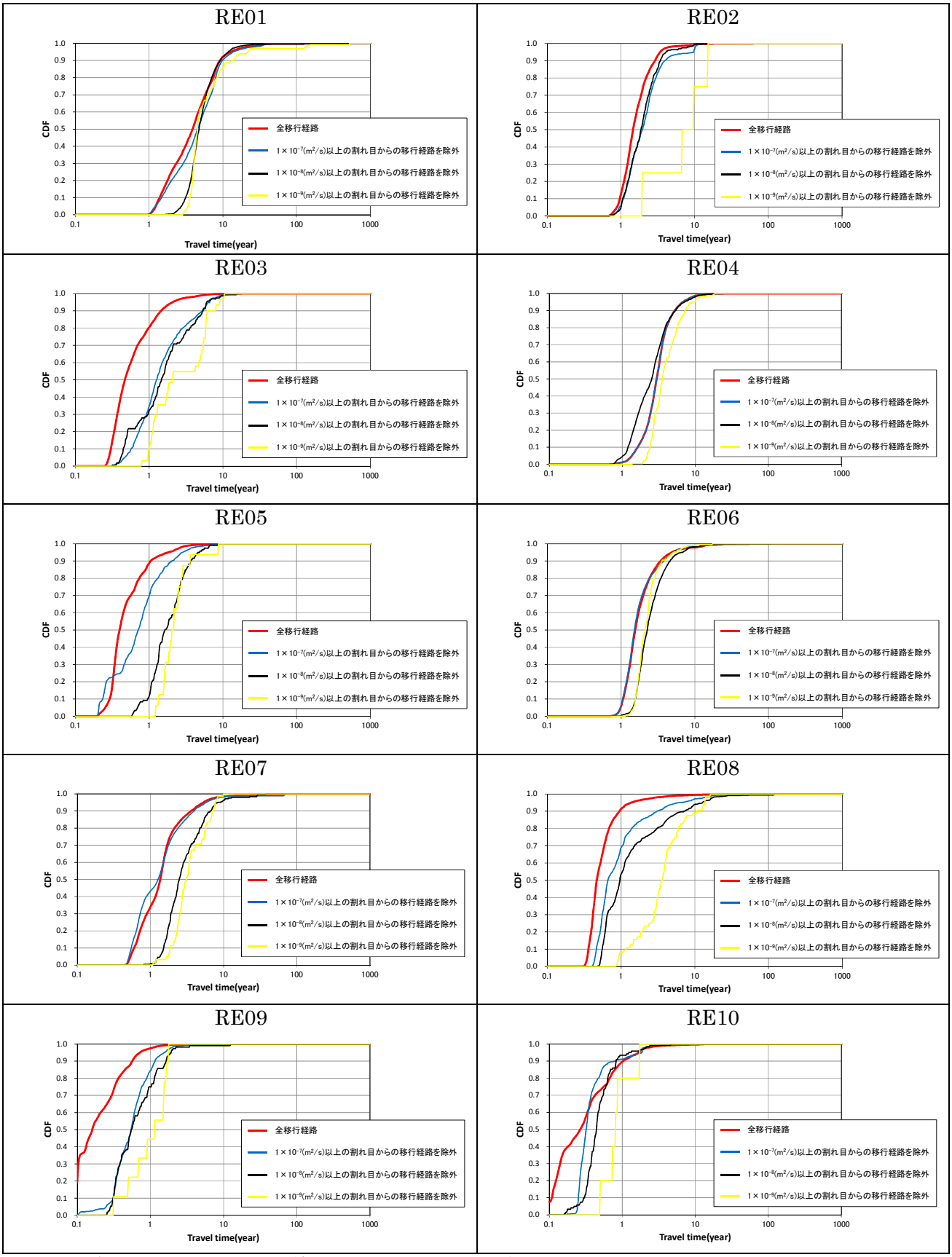


RE10

下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，粒子が外側境界まで到達しないケース

処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類毎の移行距離と移行時間の分布

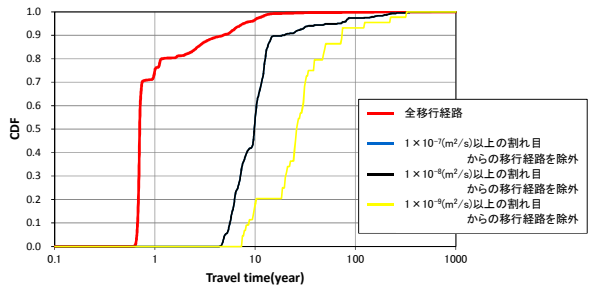
【SKB 準相関：FFM02】 付録 C



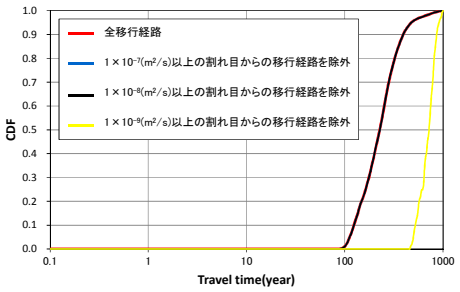
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた移行時間の累積分布の変化

【SKB 準相関：FFM01m】 付録 C

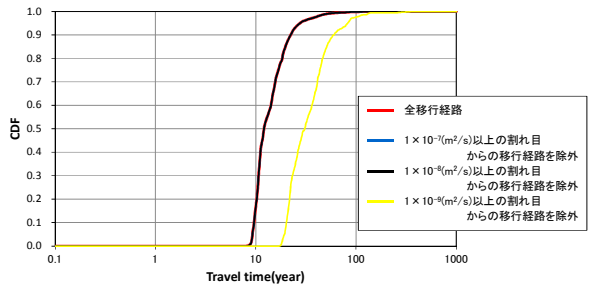
RE01



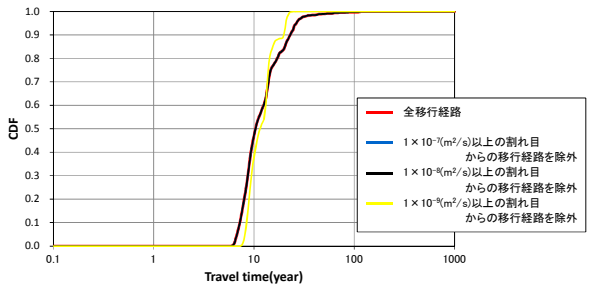
RE02



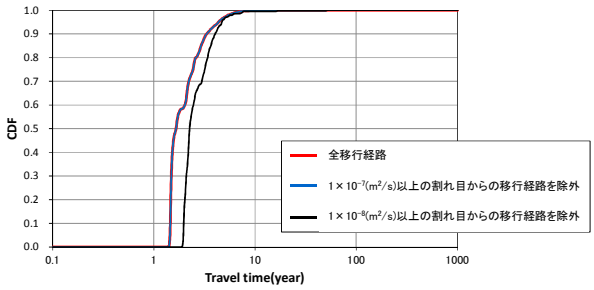
RE03



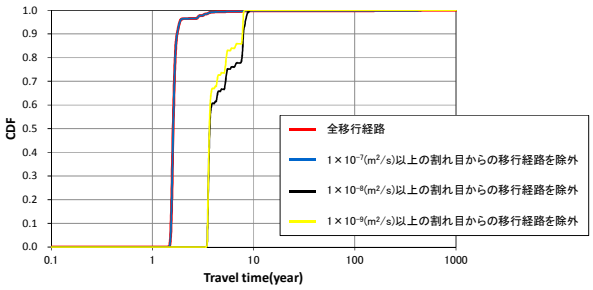
RE04



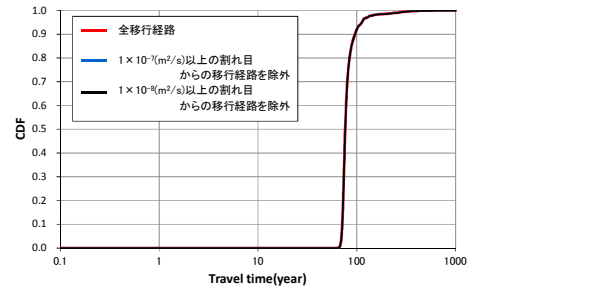
RE05



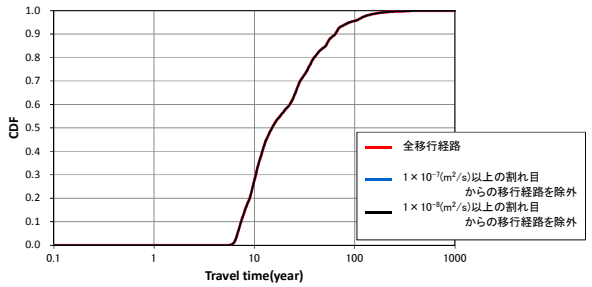
RE06



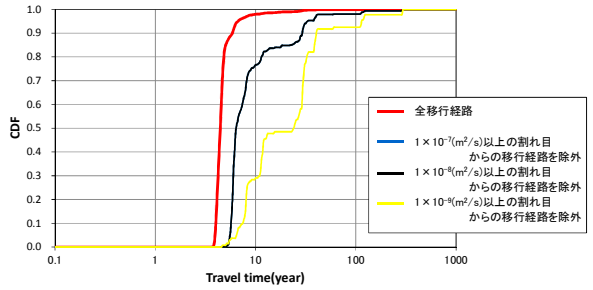
RE07



RE08



RE09



RE10

下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，粒子が外側境界まで到達しないケース

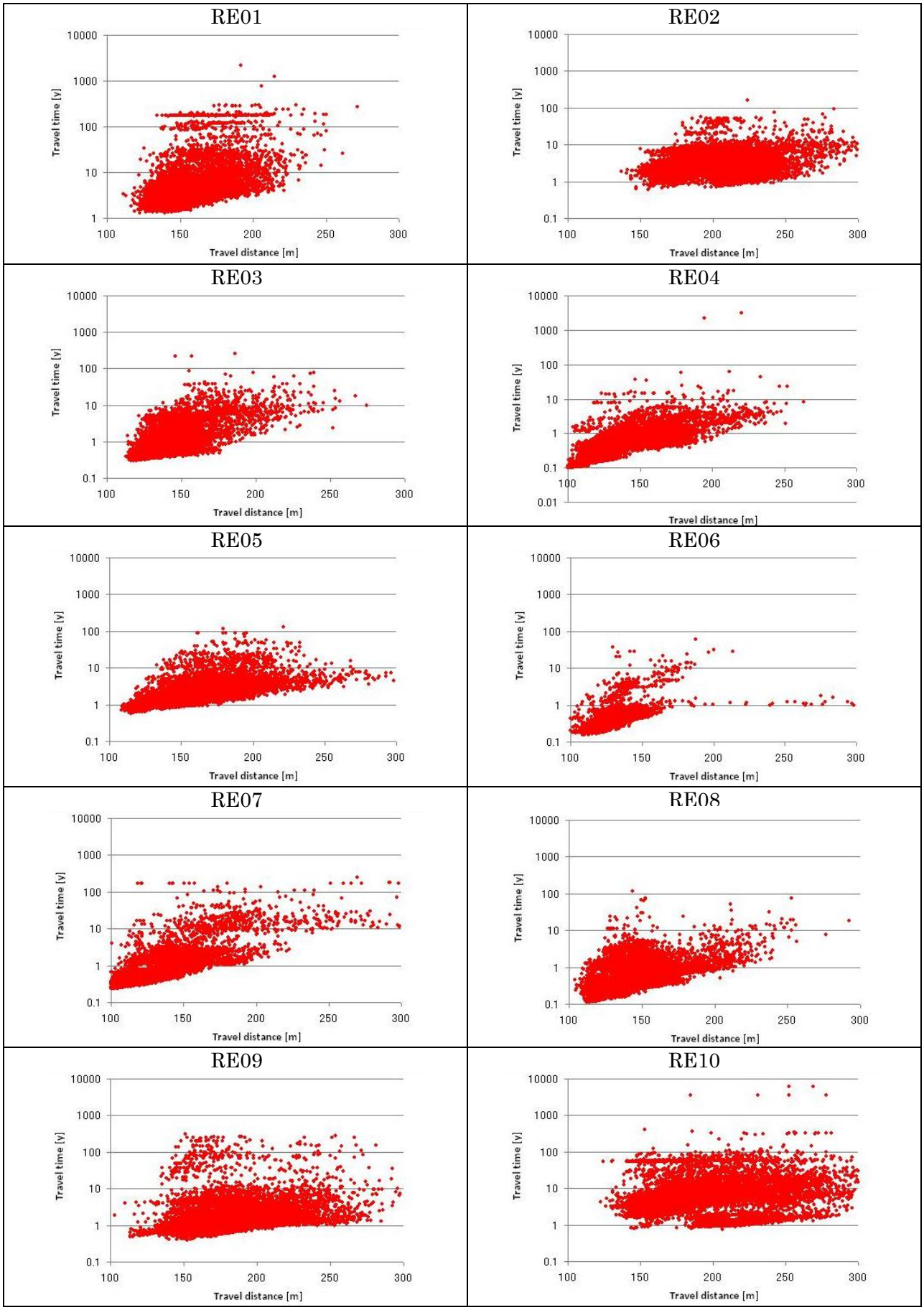
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた移行時間の累積分布の変化

付録 C

地下水移行時間の算定結果

【ケース C】

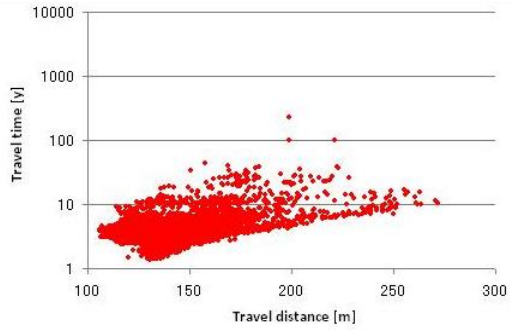
【ケース C：FFM02】 付録 C



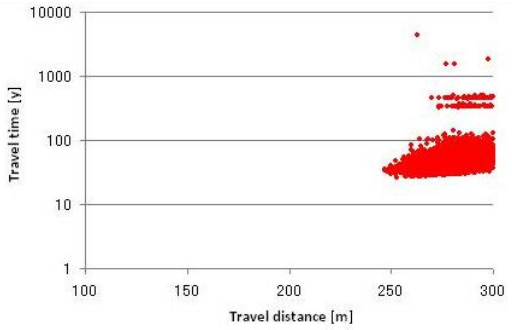
移行距離と移行時間の相関図

【ケース C：FFM01m】 付録 C

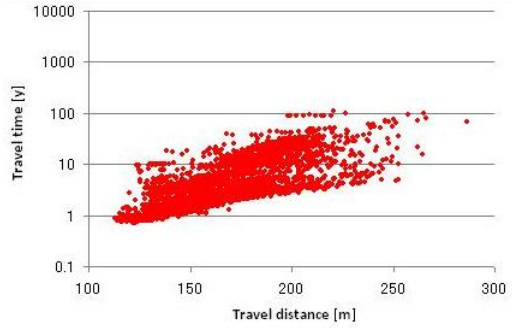
RE01



RE02



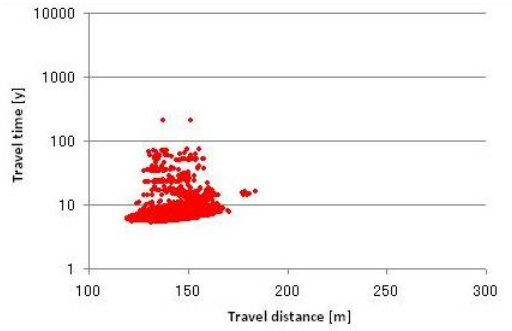
RE03



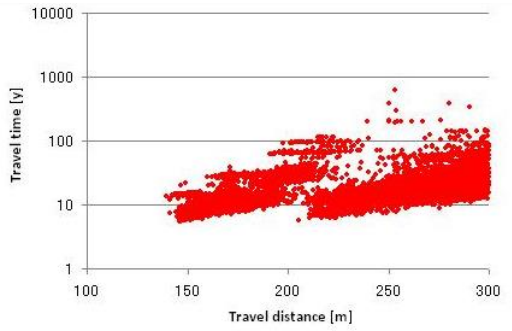
RE04

下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，粒子が外側境界まで到達しないケース

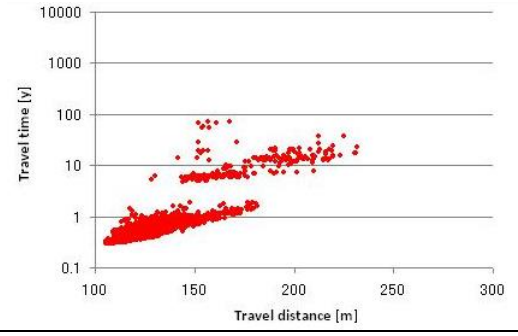
RE05



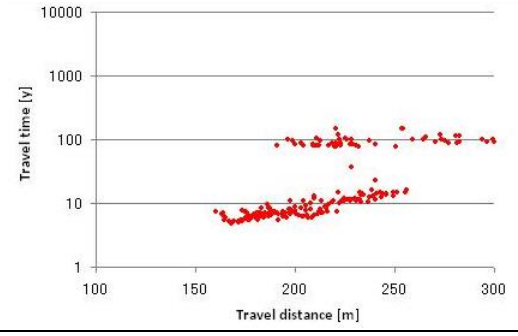
RE06



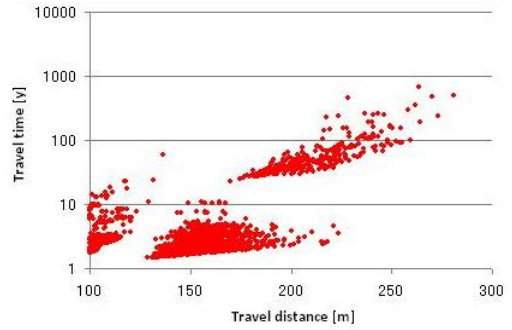
RE07



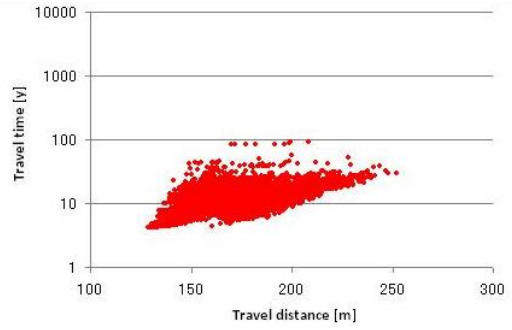
RE08



RE09

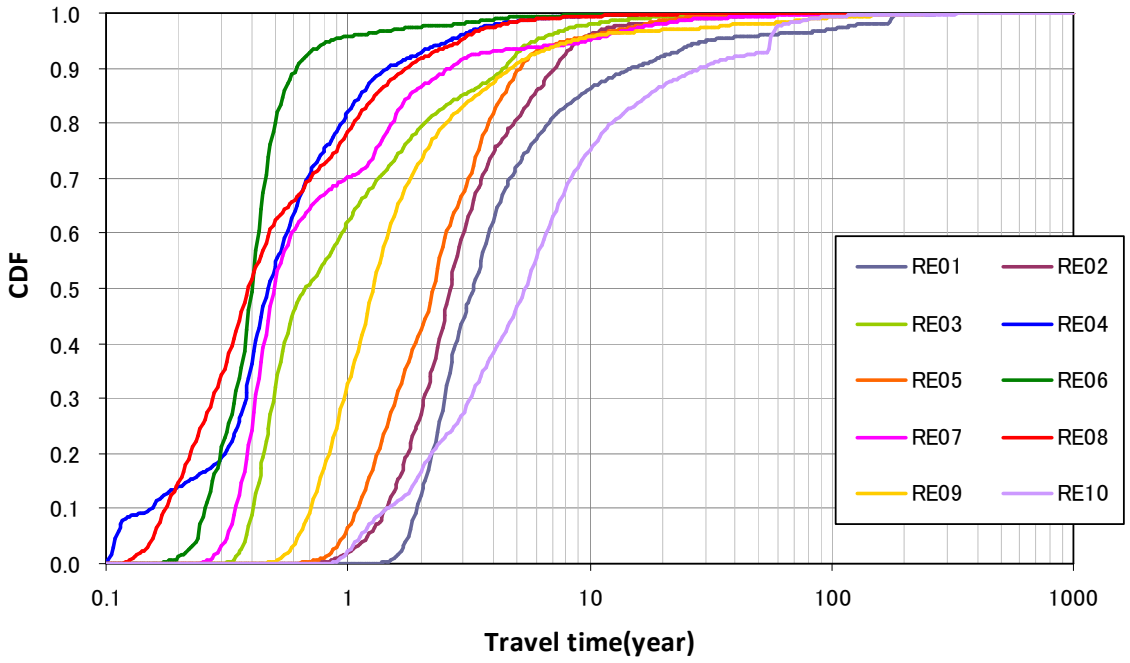


RE10

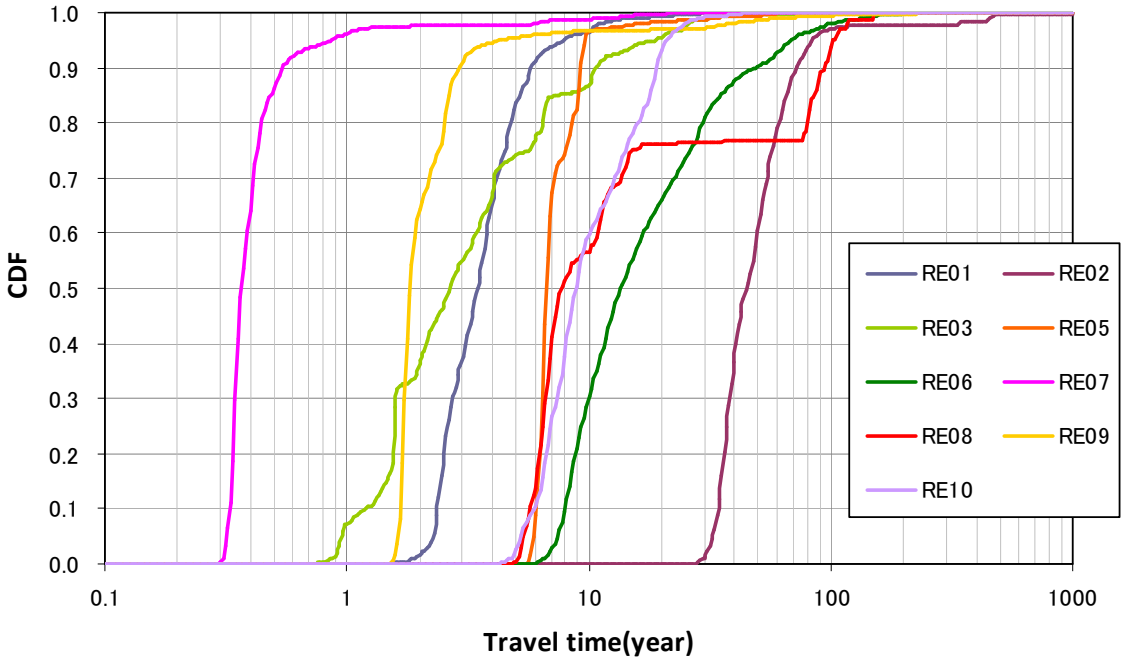


移行距離と移行時間の相関図

【ケース C】 付録 C

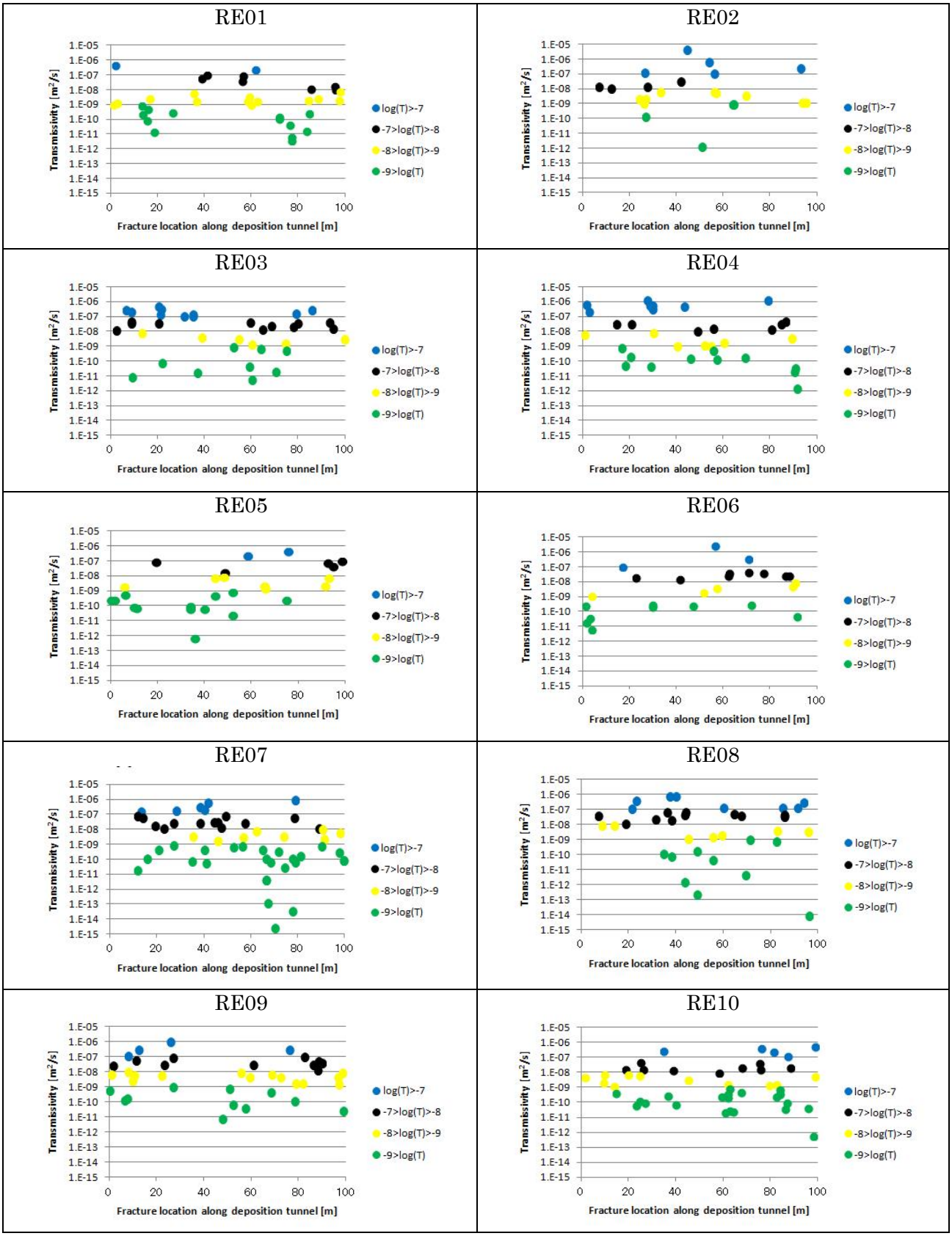


移行時間の累積分布（FFM02）



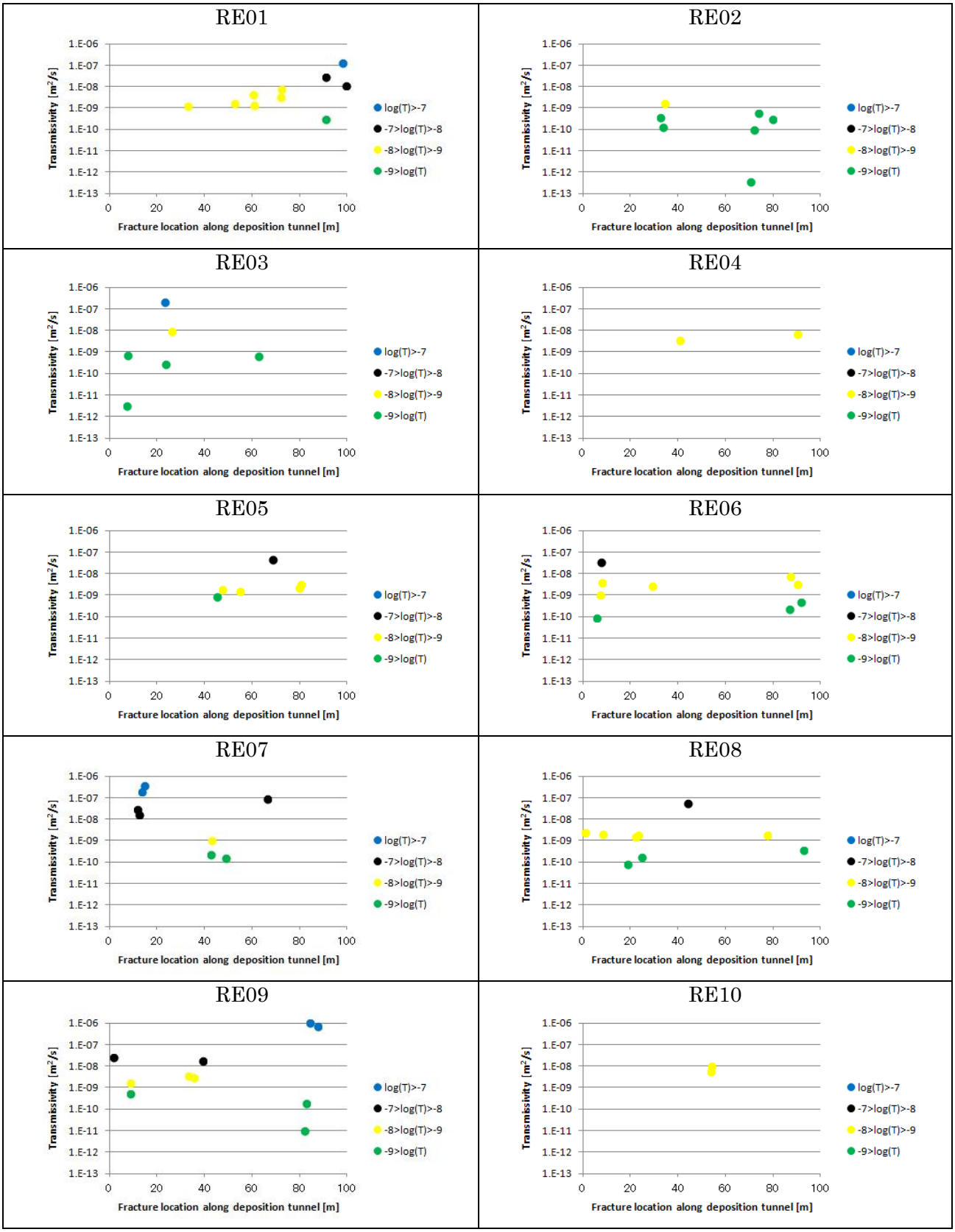
移行時間の累積分布（FFM01m）

【ケース C：FFM02】 付録 C



ソースに交差する透水性割れ目の位置と透水量係数

【ケース C：FFM01m】 付録 C



ソースに交差する透水性割れ目の位置と透水量係数

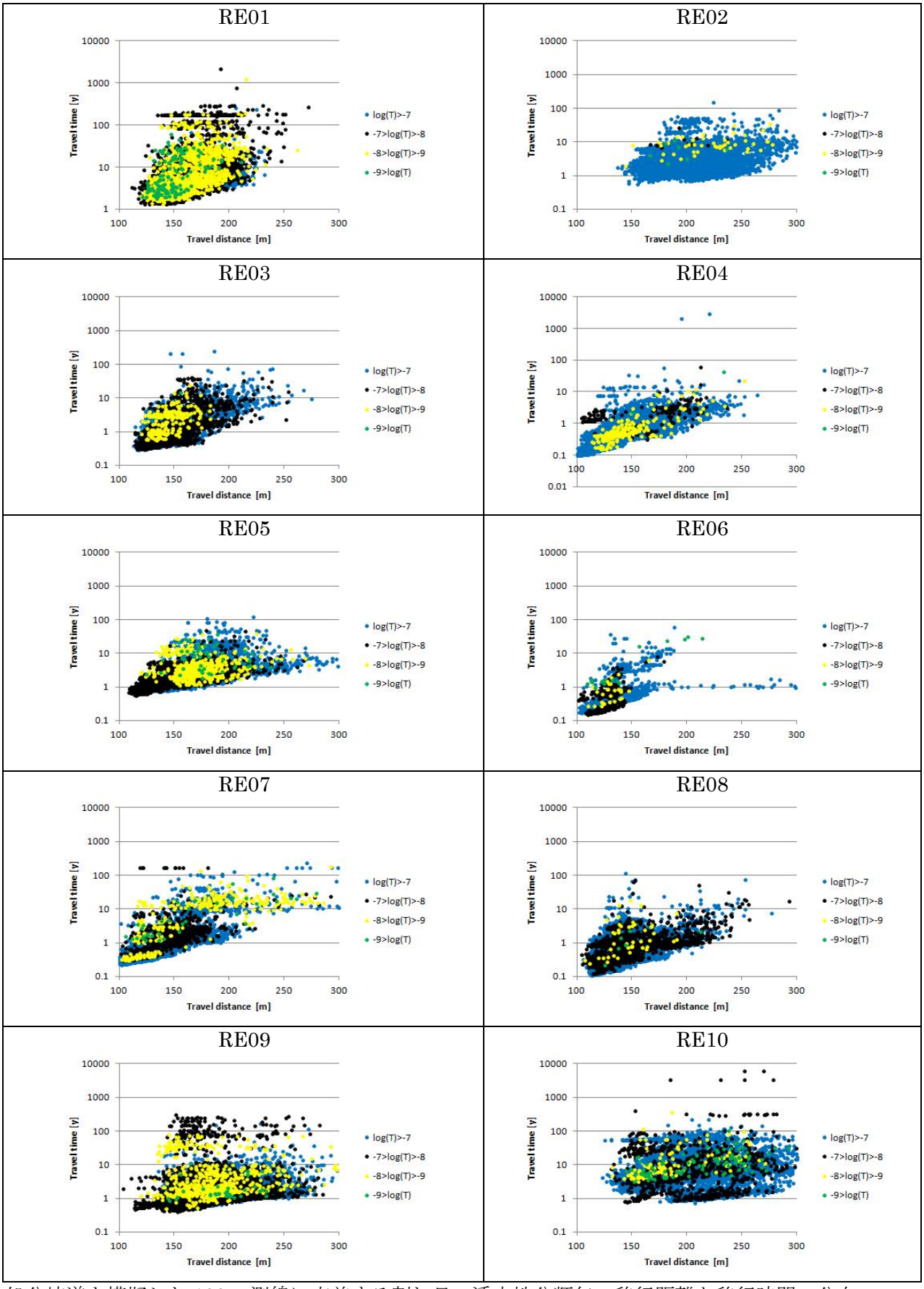
100m 測線に交差している透水性割れ目の分類【ケース C：FFM02】

透水量係数(m2/s)の範囲		Re01		Re02		Re03		Re04		Re05		Re06		Re07		Re08		Re09		Re10	
		個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積
青	1×10^{-7}以上	2	2	5	5	10	10	8	8	2	2	3	3	6	6	8	8	4	4	5	5
黒	1×10^{-7}以上 1×10^{-8}未満	7	9	4	9	11	21	7	15	5	7	8	11	13	19	11	19	10	14	9	14
黄	1×10^{-8}以上 1×10^{-9}未満	13	22	9	18	6	27	7	22	7	14	5	16	8	27	7	26	14	28	11	25
緑	1×10^{-9}以上	13	35	4	22	9	36	11	33	13	27	9	25	26	53	10	36	11	39	21	46

100m 測線に交差している透水性割れ目の分類【ケース C：FFM01m】

透水量係数(m2/s)の範囲		Re01		Re02		Re03		Re04		Re05		Re06		Re07		Re08		Re09		Re10	
		個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積	個数	累積
青	1×10^{-7}以上	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0
黒	1×10^{-7}以上 1×10^{-8}未満	2	3	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	3	5	1	1	2	4	0	0
黄	1×10^{-8}以上 1×10^{-9}未満	6	9	1	1	1	2	2	2	4	5	5	6	1	6	5	6	3	7	2	2
緑	1×10^{-9}以上	1	10	6	7	4	6	0	2	1	6	3	9	2	8	3	9	3	10	0	2

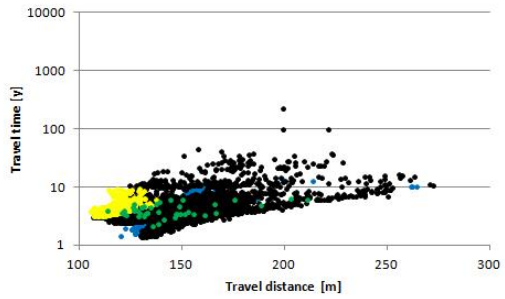
【ケース C : FFM02】 付録 C



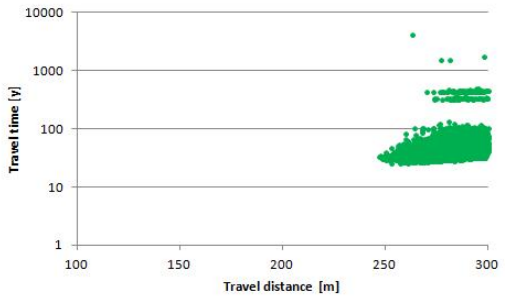
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類毎の移行距離と移行時間の分布

【ケース C : FFM01m】 付録 C

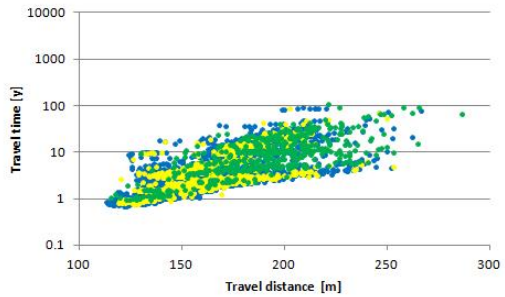
RE01



RE02



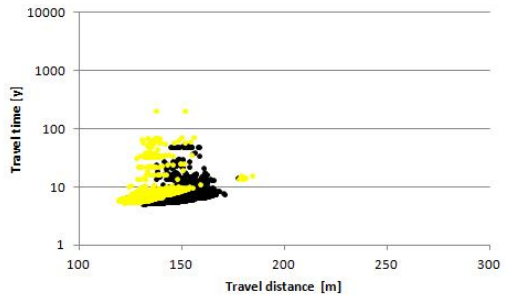
RE03



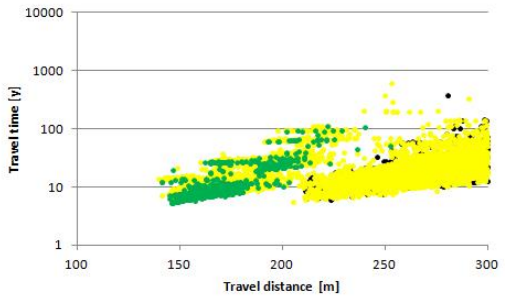
RE04

下流側領域に連結する割れ目が存在しないため，粒子が外側境界まで到達しないケース

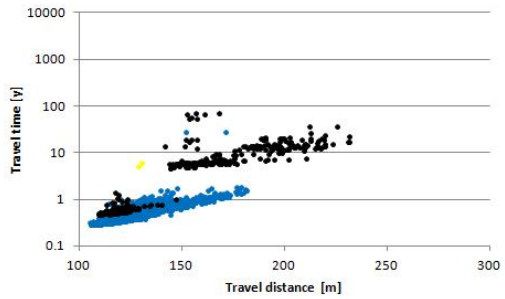
RE05



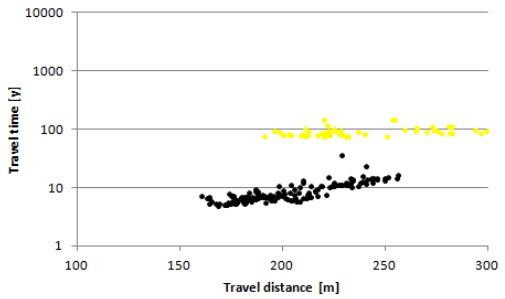
RE06



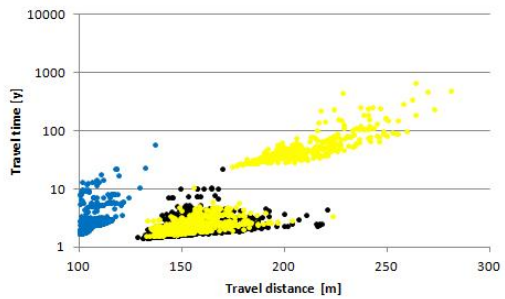
RE07



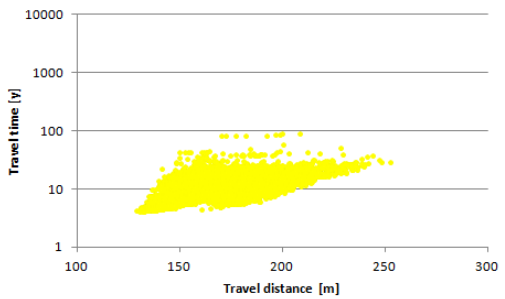
RE08



RE09

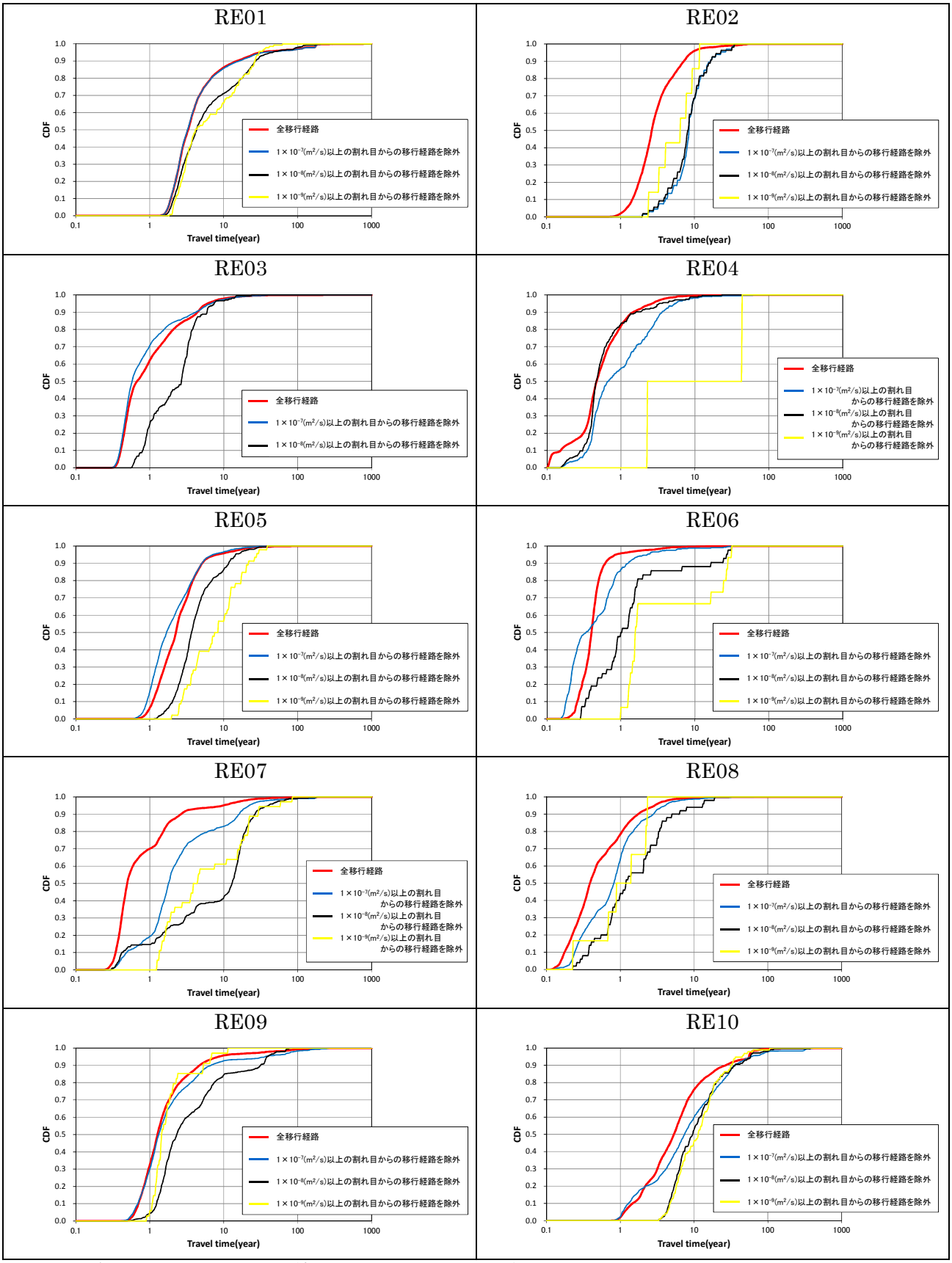


RE10



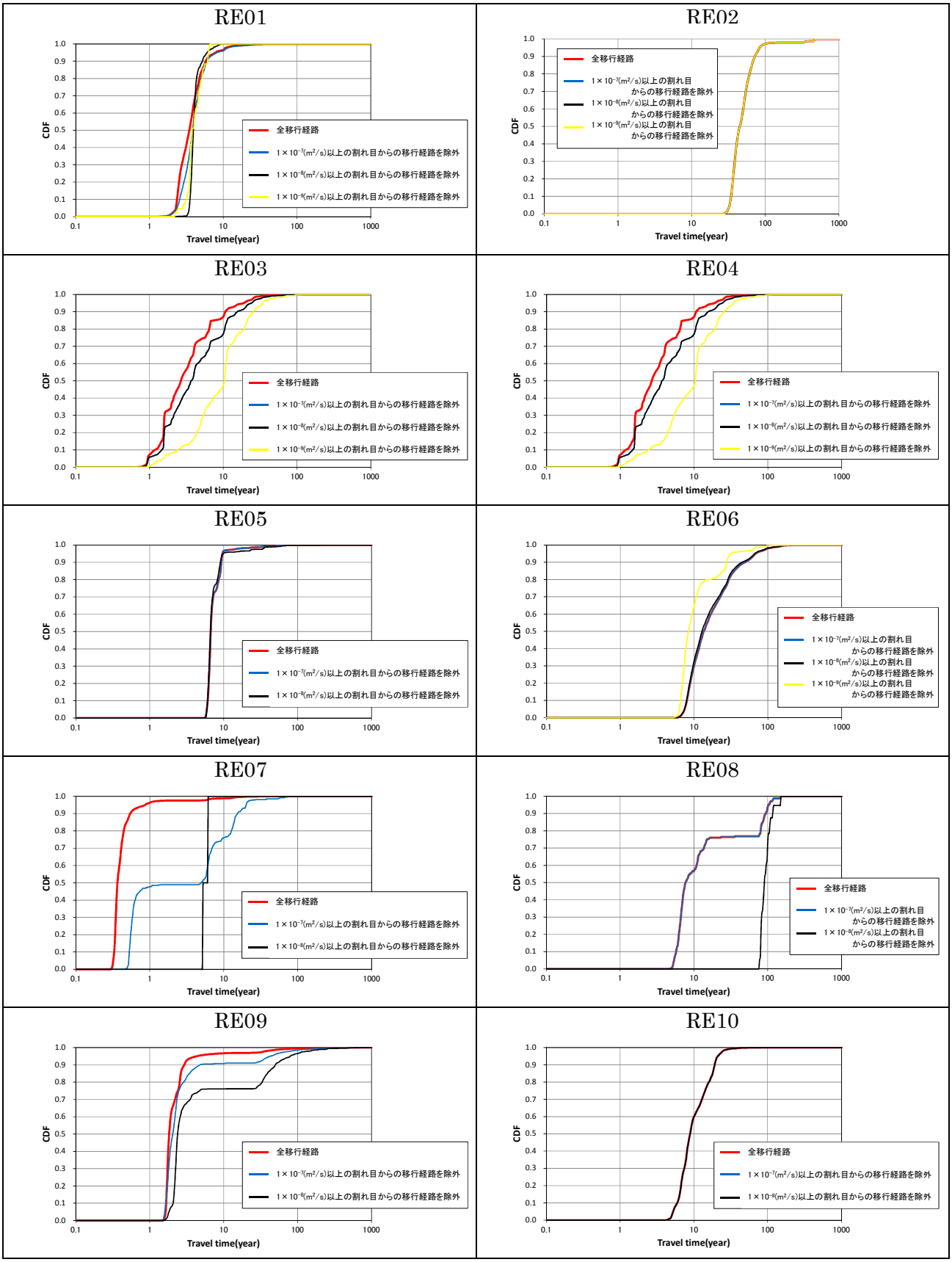
処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類毎の移行距離と移行時間の分布

【ケース C : FFM02】 付録 C



処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた移行時間の累積分布の変化

【ケース C：FFM01m】 付録 C



処分坑道を模擬した 100m 測線に交差する割れ目の透水性分類に応じた移行時間の累積分布の変化

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1 (b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1 (b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg s^{-3} A^{-1}
静電容量	ファラド	F	C/V	m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m^2 kg s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号radおよびsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m^{-1} s^{-2}=s^{-2}
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m^2 kg s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s^{-3} K^{-1}
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2 s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg s^{-3}
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2$ sr)	m^2 m^{-2} kg s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}$ J
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}$N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2$ s^{-1}=$10^{-4}m^2$ s^{-1}
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} 10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド(c)	Oe	1 Oe≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています