



JAEA-Research

2006-091

RWMC-JRJ-06002



JP0750120

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する
性能評価技術高度化研究
(共同研究)

Research on Advanced Technology of Performance Assessment
for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste
(Joint Research)

地層処分研究開発部門
原子力環境整備促進・資金管理センター
事業環境調査研究プロジェクト

Geological Isolation Research and Development Directorate
Advanced Waste System Research Project
Radioactive Waste Management Funding and Research Center

December 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構と(財)原子力環境整備促進・資金管理センターが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、日本原子力研究開発機構¹⁾、もしくは(財)原子力環境整備促進・資金管理センター²⁾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/index.shtml>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター³⁾では実費による複写頒布を行っております。

1) 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

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

電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

2) 〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-8-10 (第 15 森ビル 4 階)

(財)原子力環境整備促進・資金管理センター

電話 03-3504-1081, Fax 03-3504-1297

3) 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued by Japan Atomic Energy Agency and Radioactive Waste Management Funding and Research Center. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Japan Atomic Energy Agency¹⁾, or Radioactive Waste Management Funding and Research Center²⁾:

1) 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

2) Radioactive Waste Management Funding and Research Center

No.15. Mori Bldg. 2-8-10, Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001 Japan

Tel +81-3-3504-1081, Fax +81-3-3504-1297

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

© Radioactive Waste Management Funding and Research Center, 2006

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する性能評価技術高度化研究
(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
原子力環境整備促進・資金管理センター 事業環境調査研究プロジェクト

(2006年12月26日受理)

原子力機構と原環センターは、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究及び技術開発に関する多くの技術やノウハウを提供しあうことにより、地層処分における性能評価技術の高度化を図った。本共同研究では、以下の5項目について検討を行った。

- 1) 多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本戦略の立案
- 2) ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発
- 3) 処分場スケールを対象とした解析技術の開発
- 4) 地球化学情報の統合化技術の開発
- 5) 安全性を説明するための論理構造に関する理解促進技術の開発

上記の研究項目に対し、両機関における技術や情報の提供あるいは共有のもと、共同研究としての方針や方向性を議論・検討した。またそれに基づいて、適切な役割分担のもと、実務的な調査や個別の評価技術の開発を効率的に実施した。調査や技術開発の過程で、新たな技術的な課題も抽出され、それらについては共同研究の中での議論や検討により、各研究項目における全体的な研究計画や戦略の策定にフィードバックした。今後、本年度策定した全体計画に基づき、課題解決のための具体的な研究開発を継続して実施していくことが重要である。

本研究は、日本原子力研究開発機構と（財）原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究契約に基づいて実施したものである。

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

原子力環境整備促進・資金管理センター：〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目8番10号

Research on Advanced Technology of Performance Assessment for Geological Disposal of
High-level Radioactive Waste
(Joint Research)

Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken
and
Advanced Waste System Research Project
Radioactive Waste Management Funding and Research Center
Toranomon, Minato-ku, Tokyo

(Received December 26, 2006)

JAEA and RWMC have carried out a joint research program on advanced technologies that could be used to support performance assessments of geological disposal concepts for high-level radioactive waste. The following 5 items were considered in the program:

- 1) planning of a basic strategy for the development of analysis technologies on nuclide migration over various spatial and temporal scales;
- 2) development of analysis technologies for vitrified waste scale;
- 3) development of analysis technologies for repository scale;
- 4) development of integration technologies for geochemical information; and
- 5) development of technologies to promote the logical understanding of repository performance and safety.

The above items were discussed in the context of technological experiences gained by JAEA and RWMC in previous repository-related studies. According to the results of these discussions, development strategies for each of the technology areas identified above were efficiently formulated by appropriate task allocations. Specific technical subjects requiring further investigation were also identified using this approach, and potential feed-backs from the results of these investigations into the overall research plan and strategy were considered. These specific research and development subjects in the overall strategy defined by this project should be implemented in the future.

Keywords: Performance Assessment, Vitrified Waste Scale, Repository Scale, Geochemical Information, Logical Understanding of Repository Performance and Safety

This work has been performed by JAEA as a joint research project with RWMC based on a joint research contract.

目 次

1.はじめに.....	1
2.多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本戦略の立案.....	3
2. 1 共同研究における議論の概要	3
2. 1. 1 実施計画の策定	3
2. 1. 2 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理	3
2. 1. 3 基本戦略の立案	4
2. 2 調査や個別技術の開発の概要	5
2. 2. 1 評価技術に関する調査の進め方	5
2. 2. 2 調査結果	6
2. 3 今後の課題	7
参考文献	10
3.ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発.....	12
3. 1 共同研究における議論の概要	12
3. 1. 1 実施計画の策定	12
3. 1. 2 ガラス溶解モデルの高度化	13
3. 1. 3 オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動の解析検討	13
3. 1. 4 ガラスの変質・変形に関わる実証試験の可能性評価	14
3. 1. 5 ガラス固化体スケールを対象とした解析技術開発のための計画立案	14
3. 2 調査や個別技術の開発の概要	15
3. 2. 1 ガラス溶解モデルの高度化	15
3. 2. 2 オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動の研究	21
3. 2. 3 ガラスの変質・変形に関わる実証試験の可能性評価	27
3. 3 今後の課題	28
参考文献	30
4.処分場スケールを対象とした解析技術の開発	31
4. 1 共同研究における議論の概要	31
4. 1. 1 実施計画の策定	31
4. 1. 2 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理	32
4. 1. 3 処分場スケールを対象とした評価のためのマルチスケールモデルの適用性 の検討	33
4. 1. 4 処分場スケールを対象とした評価技術開発のための計画立案	33
4. 2 調査や個別技術の開発の概要	34
4. 2. 1 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理	34
4. 2. 2 処分場スケールを対象とした評価のためのマルチスケールモデルの適用性 の検討	36
4. 3 今後の課題	46
参考文献	48

5. 地球化学情報の統合化技術の開発	50
5. 1 共同研究における議論の概要	50
5. 1. 1 実施計画の策定	50
5. 1. 2 地球化学モデリングの戦略検討	51
5. 1. 3 地球化学モデリングに関する実用的な解析技術の開発	52
5. 1. 4 地球化学モデリングに必要な解析コードやデータベース開発	53
5. 2 調査や個別技術の開発の概要	53
5. 2. 1 国内外の既往調査サイトの岩種および水理地質学的条件の違いに基づいた分類	53
5. 2. 2 調査段階に応じたデータの体系的収集／評価例の整理	53
5. 2. 3 地球化学モデリングに必要な解析コードやデータベース	55
5. 2. 4 幌延を例にした補正手法の適用	56
5. 3 今後の課題	58
参考文献	60
6. 安全性を説明するための論理構造に関する理解促進技術の開発	63
6. 1 共同研究における議論の概要	63
6. 1. 1 実施計画の策定	63
6. 1. 2 理解促進のために説明すべき安全性の論理構造の抽出	64
6. 1. 3 安全性の論理構造の説明技術の開発	65
6. 1. 4 理解促進技術開発のための全体計画の策定	65
6. 2 調査や個別技術の開発の概要	68
6. 2. 1 説明のメッセージとポイントの設定	68
6. 2. 2 説明方法および説明ツールの設計・試作	69
6. 3 今後の課題	70
参考文献	72
7. おわりに	73
謝辞	74
付録 1 解析の目的に応じたサイズとその設定根拠の関係付けの例	75
付録 2 評価技術に関する調査結果の詳細表	79
付録 3 各国の性能評価書で示されている開発課題	125
付録 4 諸外国における処分場スケールを対象とした核種移行解析技術に関する調査結果 ..	129
付録 5 本共同研究の議論を通じての技術的用語の見直し	133
付録 6 マルチスケールモデルを適用した場合の核種移行解析の全体的な流れ	137

CONTENTS

1. Introduction.....	1
2. Planning of a basic strategy for the development of analysis technologies on nuclide migration over various spatial and temporal scales.....	3
2. 1 Summary of discussion in a joint research	3
2. 1. 1 Consideration of execution.....	3
2. 1. 2 Investigation of important phenomena and evaluation technologies	3
2. 1. 3 Planning of a basic strategy	4
2. 2 Overview of investigation and development of specific technical subjects ..	5
2. 2. 1 Course of investigation for evaluation technologies	5
2. 2. 2 Results of investigation.....	6
2. 3 Future subjects.....	7
References	10
3. Development of analysis technologies for vitrified waste scale.....	12
3. 1 Summary of discussion in a joint research	12
3. 1. 1 Consideration of execution.....	12
3. 1. 2 Advanced technology of glass dissolution model	13
3. 1. 3 Consideration of analysis for destruction phenomena in overpack/vitrified waste system	13
3. 1. 4 Possibility evaluation of verification experiments for alteration and deformation of glass	14
3. 1. 5 Planning of development analysis technologies for vitrified waste .	14
3. 2 Overview of investigation and development of specific technical subjects .	15
3. 2. 1 Advanced technology of glass dissolution model	15
3. 2. 2 Research on destruction phenomena in overpack/vitrified waste system	21
3. 2. 3 Possibility evaluation of verification experiments for alteration and deformation of glass	27
3. 3 Future subjects	28
References	30
4. Development of analysis technologies for a repository scale.....	31
4. 1 Summary of discussion in a joint research	31
4. 1. 1 Consideration of execution.....	31
4. 1. 2 Investigation of important phenomena and evaluation technologies ...	32
4. 1. 3 Consideration of multi-scale model applicability for evaluation of repository scale	33
4. 1. 4 Planning of development of evaluation technologies for a repository scale	33
4. 2 Overview of investigation and development of specific technical subjects .	34
4. 2. 1 Investigation of important phenomena and evaluation technologies ...	34

4. 2. 2 Consideration of multi-scale model applicability for evaluation of repository scale	36
4. 3 Future subjects.....	46
References	48
5. Development of integration technologies for geochemical information.....	50
5. 1 Summary of discussion in a joint research.....	50
5. 1. 1 Consideration of execution.....	50
5. 1. 2 Consideration of strategy for geochemical modeling.....	51
5. 1. 3 Development of analysis technology for geochemical modeling	52
5. 1. 4 Development of geochemical codes and databases	53
5. 2 Overview of investigation and development of specific technical subjects .	53
5. 2. 1 Categorization based on difference of rock types and hydrogeological condition.....	53
5. 2. 2 Example of a systematic data collection and evaluation depending on site investigation stages	53
5. 2. 3 Geochemical codes and databases for geochemical modeling.....	55
5. 2. 4 Application of estimation method as a test case using Horonobe data	56
5. 3 Futurte subjects	58
References	60
6. Development of technologies to promote the logical understanding of repository performance and safety.....	63
6. 1 Summary of discussion in a joint research.....	63
6. 1. 1 Consideration of execution.....	63
6. 1. 2 Identification of the logical structure for satety to promote the understanding	64
6. 1. 3 Development of instruction technology indicating the logical structure for safety	65
6. 1. 4 Planning of overall strategy for developmnet of technologies to promote thelogical understanding	65
6. 2 Overview of investigation and development of specific technical subjects .	68
6.. 2. 1 Setting of instruction message and point	68
6.. 2. 2 Testing of instruction methods and tools	69
6. 3 Future subjects.....	70
References	72
7. Concluding remarks.....	73
Acknowledgements.....	74

Appendix-1 Example of relation between the size set for analysis and its reason ...	75
Appendix-2 Detail table for investigation results of evaluation technologies	79
Appendix-3 Future subjects indicated in the several performance assessment reports	125
Appendix-4 Results of investigation for analysis technologies on nuclide migration for repository scale in the overseas countries.....	129
Appendix-5 Reconsideration of technical terms through discussion in a joint research	133
Appendix-6 Overall scheme of nuclide migration for multi-scale mode analysis	137

図表一覧

表 4.2-1 : 米国における処分場スケールの物質移行解析の調査結果	36
表 4.2-2 : マルチスケールモデルの構成	37
表 4.2-3 : 解析ケース	45
表 5.2-1 : 文献調査および概要調査段階で収集されるデータの種類や特性	54

図 1.1 : 本共同研究のテーマ間の関係	1
図 1.2 : 本共同研究の手順	2
図 2.2-1 : スケールの観点から整理した全体図	8
図 2.2-2 : モデルの接続の観点から整理した全体図	9
図 3.2-1 : ガラス表面の変質の模式図	15
図 3.2-2 : ガラス溶解のモデル化のアプローチと対象とする現象のスケールとの関係	16
図 3.2-3 : ガラス溶解モデル高度化のための研究のフレームワーク	17
図 3.2-4 : 火山ガラスの長期溶解速度とメソスケールモデルによる計算結果との比較	18
図 3.2-5 : ナノスケールでの知見と整合的な格子モデルの概念	19
図 3.2-6 : ガラスに含まれる諸元素の初期配置の概念	20
図 3.2-7 : ガラスネットワークの溶解挙動の表現	20
図 3.2-8 : シリカの再沈殿による変質層の成長	20
図 3.2-9 : 本研究で作成したメソスケールモデルによる試解析の結果	21
図 3.2-10 : メソスケールモデルによる解析結果と室内浸出試験結果との比較	22
図 3.2-11 : オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動評価フロー	22
図 3.2-12 : 衝突実験における亀裂の成長（左）と FDEM 法による解析結果（右）の比較	23
図 3.2-13 : オーバーパック内応力分布（3 次元モデル；腐食量 114.4 mm）	24
図 3.2-14 : 腐食量 114.4 mm における割れ目の生成と伝播	24
図 3.2-15 : 腐食量 114.4 mm における割れ目の生成と伝播	24
図 3.2-16 : ガラス冷却時の主応力分布（左）割れ目の伝播（中央）および温度分布（右） 解析例	25
図 3.2-17 : 実規模固化体における割れ目パターンの例	26
図 3.2-18 : ガラス内部の割れ目の分布（応力 60 MPa；拡大図）	27
図 3.2-19 : 最大応力が作用している時点でのガラス中の開口割れ目の幅	27
図 3.2-20 : ガラス破片サイズ頻度分布の応力依存性	27
図 4.2-1 : 地下水の流れと 3 次元でのマルチスケールモデルのイメージ	38
図 4.2-2 : 解析階層 I の解析（3 次元でのマルチスケールモデル）	39
図 4.2-3 : 解析階層 II の解析（3 次元でのマルチスケールモデル）	39
図 4.2-4 : 地下水の流れと簡易 3 次元でのマルチスケールモデルのイメージ	40
図 4.2-5 : 解析階層 I の解析（簡易 3 次元でのマルチスケールモデル）	40
図 4.2-6 : 解析階層 II の解析（簡易 3 次元でのマルチスケールモデル）	42

図 4.2-7 : 解析階層Ⅱにおける重ね合わせのイメージ	42
図 4.2-8 : VR コードの 3 次元化に関する開発	44
図 4.2-9 : 濃度分布 (100 万年後) (地下水流向が坑道と平行; ケース 01)	45
図 4.2-10 : VR コードの計算モデル	45
図 5.1-1 : 地球化学情報の統合化技術の開発における各研究項目での概要や研究項目間での 関係	51
図 5.2-1 : 方解石との平衡を仮定した補正前後でのイオン強度と pH の関係 (解析コードには PHREEQC を利用, データベースは 990900c1 を利用)	57
図 5.2-2 : 解析コードの違いによる補正結果の違い (データベースは 990900g1 を使用)	57
図 5.2-3 : データベースの違いによる補正結果の違い (解析コードは PHREEQC を使用)	58
図 5.2-4 : 地球化学情報の統合化のための体系的情報整理の進め方の例	59
図 6.1-1 : 具体的な作業項目レベルでの役割分担	64
図 6.1-2 : 第 2 次取りまとめで示した安全機能の有機的な関係の示し方の例	67
図 6.2-1 : 理解促進に利用できると考えられる説明素材の整理例	68
図 6.2-2 : ガラス固化体の溶解挙動についての説明内容の構造と画面構成	69
図 6.2-3 : Window 1 におけるガラス固化体の冷却による亀裂進展の評価結果の提示	71
図 6.2-4 : Window 1 におけるオーバーパック変形とガラス固化体の亀裂進展の評価結果 の提示	71
図 6.2-5 : Window 4 と 5 におけるガラスの溶解速度及び残存率の比較例 (OP 開口後 50000 年) の提示	71
図 6.2-6 : Window 2 と 3 におけるガラス分子の挙動イメージとゲル層形成のシミュレーション 結果の提示	71
図 6.2-7 : Window 6 におけるナチュラルアナログ (火山ガラス) での溶解速度の評価事例 の提示	71

執筆者リスト

日本原子力研究開発機構

牧野仁史, 笹本 広, 油井三和, 梅木博之, 宮原 要, 吉川英樹

原子力環境整備促進・資金管理センター

久野義夫¹⁾, 橋本 學²⁾, 虎田真一郎¹⁾

-
- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター（当時），日本原子力研究開発機構（現在）
 - 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター（当時），三菱マテリアル株式会社（現在）

1. はじめに

(独) 日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という）と、(財) 原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、「原環センター」という）は、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究並びに技術開発を実施してきており、地層処分に関する多くの技術、ノウハウを保有している。これら両機関で保有している地層処分に関する技術や情報を提供しあうことにより、地層処分における性能評価手法の高度化を図るために、「高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する性能評価技術高度化研究」の共同研究（以下「共同研究」という）の契約を締結し、平成 17 年 9 月より共同研究を実施してきている。

本共同研究の対象とするテーマは以下の通りである。

- ・ 多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本戦略の立案（2章参照）
- ・ ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発（3章参照）
- ・ 処分場スケールを対象とした解析技術の開発（4章参照）
- ・ 地球化学情報の統合化技術の開発（5章参照）
- ・ 安全性を説明するための論理構造に関する理解促進技術の開発（6章参照）

また、これらテーマ間の関係を図 1-1 に示す。ここで、「多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本戦略の立案」では、例えば、広域スケール、処分場スケール、パネルスケール、坑道スケール、人工バリアスケール、ガラススケールなどの幅広い領域を対象に解析技術を俯瞰することとし、一方、それらスケールの特定の領域に着目したより詳細な検討として「処分場スケールを対象とした解析技術の開発」および「ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発」、多様なスケールに関わる情報の統合に着目した検討として「地球化学情報の統合化技術の開発」を進め、それらの成果を適宜多様なスケールの検討に反映することとする。

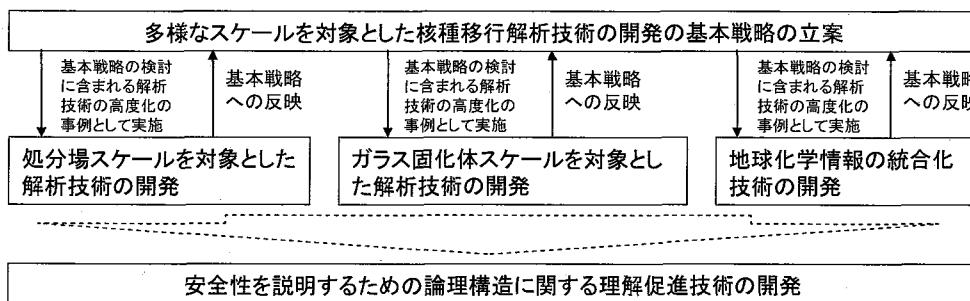


図 1-1 本共同研究のテーマ間の関係

平成 17 年度の本共同研究は、以下の①～④の手順で行った。ここで、本共同研究において、両機関で保有している技術や情報およびリソースの効果的な活用を図るために、両機関の有する技術や情報の提供・共有に加えて、原環センターが資源エネルギー庁調査等事業の性能評価技術高度化のうち現実的性能評価技術の開発（以下、「現実的性能評価技術の開発」という）として実施する内容との密接な連携を図った（図 1-2 参照）。

- ① 各テーマに関する課題、検討範囲、進め方、および役割分担に関する議論・調整と合意、その結果の実施計画としての整理
- ② 調査や個別技術の開発の方向性等に関する議論・調整
- ③ 上記方向性等の「現実的性能評価技術の開発」で行う調査や個別技術の開発への反映
- ④ 調査や個別技術の開発の成果や課題の共有・確認、それらを踏まえた今後の戦略や計画に関する議論・調整

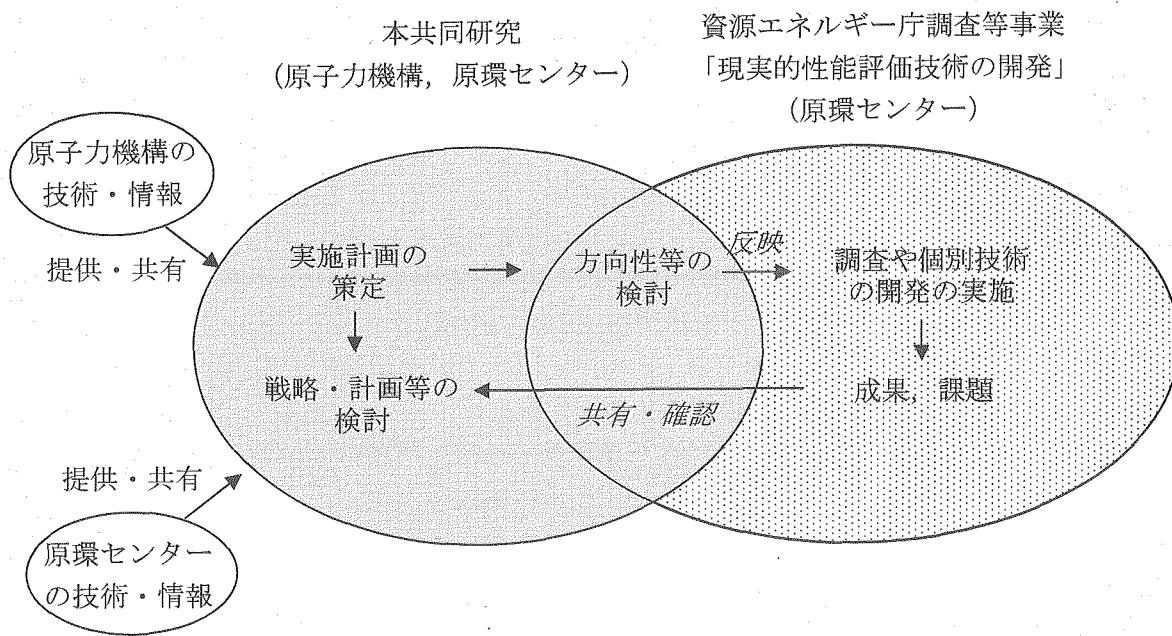


図 1-2 本共同研究の手順

以下、2章～6章において、本共同研究の中核となる上記①②④の内容と成果を「共同研究における議論の概要」の項目において、また、上記③を介して本共同研究との密接な連携のもとに実施された「現実的性能評価技術の開発」¹⁾の内容と成果を「調査や個別技術の開発の概要」の項目において示す。

参考文献

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成 17 年度 地層処分技術調査等 性能評価技術高度化 報告書（第 2 分冊） 第 II 編 現実的性能評価技術の開発”，2006.

2. 多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本戦略の立案

2. 1 共同研究における議論の概要

2. 1. 1 実施計画の策定

まず、本研究で目的とする多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本的な進め方を協議し、多様なスケールを考える上で特に重要となる事項として、スケール区分、適用するモデルの種類、モデルの接続およびその階層的な体系化などを抽出した。また、これまでに例のない検討であることから、既存の評価技術に関する調査を優先的に実施したうえで、開発の基本戦略を検討するとの進め方をとることとした。さらに調査においては、記載内容の単なる抜粋・整理ではなく、多様なスケールを考える上で特に重要となるスケール区分、適用するモデルの種類、モデルの接続を中心に、さらに解析の手法や詳細度、その適用性や限界などの実際の解析作業で重要となる事項を中心に進めることとした。

上記の検討を踏まえて設定した実施内容と役割分担を以下に示す（「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する内容を含む）。

これら実施計画に沿って、共同研究として実施した議論や検討の内容と成果を本節の2.1.2項と2.1.3項に、「現実的性能評価技術の開発」において実施した検討の内容と成果を次節2.2に示す。

実施内容

地層処分の安全評価で考慮すべき多様なスケール（たとえば、広域スケール、処分場スケール、パネルスケール、坑道スケール、人工バリアスケール、ガラススケール、ミクロスケール）に対して、整合的に核種移行解析を行うため、それぞれのスケールにおいて求められる詳細度や不確実性に応じた保守的簡略化など、意味と目的を明確にしつつ、モデル概念の構築、数学モデルの構築、利用可能な知識や数学的な手法の限界、データの利用可能性について総合的に検討を行い、階層的評価モデル体系として整備していくための基本戦略を検討する。この検討にあたっては、核種移行の場を規定する種々の環境条件（たとえば、水理、地球化学など）に関して、核種移行解析の目的や詳細度に対応してどのように把握しておく必要があるか、またその技術的可能性や限界はどうか、といった点について併せて議論する。

このような検討と並行して、これまでの解析技術を具体的に高度化する作業を行う。この作業は、後述の3章～5章で示す「ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発」、「処分場スケールを対象とした解析技術の開発」、「地球化学情報の統合化技術の開発」に該当する。

役割分担

本共同研究の実施にあたっての主な役割分担は以下の通りである。

研究項目	原子力機構	原環センター
① 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理	○ (方針提案)	○ (調査・整理) *
② 基本戦略の立案	○	○

* : 主に「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施。

2. 1. 2 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理

調査は、日本を含めた諸外国（スウェーデン、フィンランド、米国、スイス）の最近の安全評価報告書を対象にすることとした。

調査の対象とするスケールについては、地層処分の安全評価において解析の目的に応じて対象となり得る多様なスケール（たとえば、広域スケール、処分場スケール、パネルスケール、坑道スケール、人工バリアスケール、ガラススケール）を対象とした。

調査の対象とする要素やプロセスについては、天然バリアにおける水理および物質移行を中心とすることとした。

調査の項目については、原子力機構が提示した案を、天然バリアにおける水理および物質移行についてスケールの観点で体系的な検討を行っている POSIVA 98-02 報告書¹⁾を参考に改良することにより、以下のように設定した。

- ・各スケールにおける評価の目的や求められる詳細度
- ・各スケールで注目すべき現象（プロセス）
- ・現象の特徴、不均質性
- ・サイト調査データなどの利用可能性
- ・不確実性の取り扱い
- ・モデル概念および数学モデルの構築における考え方
- ・解析ツールの適用限界
- ・他のスケールとの接続方法

調査結果の整理においては、各国の報告書でのスケールに対するモデルの使い分けやモデル間の接続などの情報を比較した例はないことから、類似点・相違点を見出しやすくするための適切な整理の仕方を事前に設定しておくことが必要と考え、スケール区分、各スケールで用いられる解析モデル、および解析の流れ（スケール間でのモデルの接続）を視軸とした共通のフォーマットにより図化することを考案した。このとき、報告書ごとにスケールの大きさの設定が異なると考えられることから、その設定の根拠等を可能な範囲で調査・把握するとともに、モデルの使い分けやモデル間の接続の関係を整理しやすい共通的なスケール区分の設定が重要となる。また、図に示しきれない境界条件等の設定や手法のオプションおよび技術的な課題などに関する情報については、別途表形式等による方法を用いて、上記の図とあわせて情報を階層的に整理することとした。

上記検討で設定された方向性は、「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施した調査に反映した（2.2節参照）。

2. 1. 3 基本戦略の立案

基本戦略の立案に資する知見を整理するために、複数のスケールを対象とした評価技術に関する特徴（類似点、相違点）を、前述の2.1.2項で設定した方針に基づき実施した調査の結果（特に後述の2.2.2(2)項で示す「モデルの接続の観点から整理した全体図」（図2.2-2））を活用しつつ分析した。

その結果、水理解析において主に用いられているモデルの種類は、今回の調査範囲では、2次元等価多孔質媒体モデル（2D EP）、3次元等価多孔質媒体モデル（3D EP）、3次元確率論的連続体モデル（3D SC）、3次元亀裂ネットワークモデル（3D DFN）の4種類に分類できることがわかった。また、スケールと解析の流れの関係で見ると、1~10km以上の領域を対象とするLocalスケールでは3次元等価多孔質媒体モデル（3D EP）や3次元確率論的連続体モデル（3D SC）を用い、それより小さなスケールでは3次元亀裂ネットワークモデル（3D DFN）を用いる場合が多い。一方、解析の詳細度については、同じ解析モデルを用いる場合でも、亀裂など地質環境のモデリングの方法などに関連してバリエーションがある。

また、物質移行解析に関しては、水理解析よりも国ごとの違いは少なく、ほとんどが1次元の

モデルを用いている。対象とするスケールと解析の流れ（スケール間でのモデルの接続）についても、ほとんどの国が人工バリア（EBS）、EBS 周辺岩盤、処分場、Local を対象としている。一方、解析の詳細度は、スケール間での接続のモデル化の方法、水理解析から得られた 3 次元あるいは 2 次元の情報の 1 次元の物質移行解析モデルへの取り込みの方法、および 1 次元の物質移行モデルの概念や解法などに関連してバリエーションがある。

このように現状の評価技術に関する特徴を分析することにより、水理解析および物質移行解析について、各スケールに適用する解析モデルの種類、モデルの接続のパターンに類似性があることとともに、解析の詳細度のバリエーションが何に関係して生じるかについての予備的な知見を整理することができた。

以上の分析結果を踏まえ、多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発に向けての基本戦略に含めておくべきこととして、以下の事項が挙げられた。これらは、整備された技術および関連する情報をユーザに適切に提供できるようにするために特に重要な事項と考える。

- ・ 現段階ではスケールに対するモデルの使い分けやモデル間の接続などに関する既存の評価技術の全てが調査しきれたわけではないため、最新の情報に関する調査の継続と調査結果の追加・更新を図る。
- ・ あわせて、解析の詳細度のバリエーションに関する調査・分析を、モデルに用いる定量的情報の導出の方法論と関係付けながら進めていく。これらにより、複数のスケールを対象とした評価技術に関する最新の情報を使いやすいかたちで提供できるようにする。
- ・ 調査結果として示された複数の評価技術について、ユーザが客観的に比較し目的に応じて選択できるようにするために、適切な共通問題を設定し解析した結果などにより、共通点や相違点に関する定量的な情報を整備する。
- ・ 調査結果として示されたスケールに応じた評価の例と対比させるために、国内外での地下研での実際の地質環境を対象とした場合の評価の実施例を整理することなどを通じて、実際の地質環境を対象とした場合の課題や対応策を具体化する。
- ・ 上記調査および検討の継続を踏まえて、階層的評価モデル体系の構築、評価技術や手法のバリエーションの整備などを含む、多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の具体化を段階的に進める。

2. 2 調査や個別技術の開発の概要

以下に、2.1.2 項に示した共同研究での議論を反映して「現実的性能評価技術の開発」で実施した調査について、その進め方および調査結果²⁹⁾の概要を示す。

2. 2. 1 評価技術に関する調査の進め方

(1) 調査の対象、調査の項目

調査は、日本を含めた諸外国の安全評価報告書を対象に、スウェーデン（SR-97 および SR-Can）^{2) -11)}、フィンランド（TILA-99）^{12) -15)}、米国（TSPA-LA）^{16) -23)}、スイス（Project Opalinus Clay）^{24) -26)}、日本（第 2 次取りまとめおよび平成 17 年取りまとめ）^{27) , 28)} の 5カ国、7 報告書を対象とした。調査は 2.1.2 項で設定した 8 項目について実施した。

(2) 調査結果のまとめ方

調査結果のまとめ方としては、2.1.2 項で定めた方針にのっとり、各調査項目に関する情報を表形式で整理したうえで（詳細表）、特にスケールに対するモデルの使い分けやモデル間の接続な

どの情報を比較して整理するために、スケール区分、各スケールで用いられる解析モデル、および解析の流れ（スケール間でのモデルの接続）を視軸としたフォーマットで図化した（全体図）。以下に全体図と詳細表のそれぞれのまとめ方の特徴を示す。

全体図としては、「スケールの観点から整理した全体図」と「モデルの接続の観点から整理した全体図」の2種類を作成した。

・スケールの観点から整理した全体図

まず各国の報告書ごとのスケールに対するモデルの使い分けやモデル間の接続などの情報の整理として、縦方向に各国の報告書、横方向にスケール区分の軸を設定し、用いられた解析モデルの名称、実際の解析対象領域のサイズ、およびモデル間での接続情報などを整理した。なお、横方向のスケール区分の設定については、後述の2.2.2(1)項で述べる。

・モデルの接続の観点から整理した全体図

各国の報告書では、同種の解析モデルが利用されている例が見られた。そこで、共通した解析モデルが用いられているあるいは異なる解析モデルが用いられているなどの状況を俯瞰し比較できるようにすることを目的に、性能評価書で利用されているモデルとその接続の関係を1枚の図に集約することを試みた。

この図では、縦方向を水理解析と物質移行解析で区分し、横方向には領域のサイズの大きさの順にモデルを並べた（左側ほどサイズが大きい）。なお、同じ種類のモデルが複数の国で評価書で利用されている場合には、解析モデルをひとつだけ表示し、モデルの接続記号の部分に該当する評価書の名称および具体的な領域のサイズを示した。

一方、詳細表では、全体図では示しきれないモデルの目的、解析モデルと境界条件、解析モデルの設定根拠、プロセス、イベント、特徴、不均質性、不確実性、開発課題などの項目についての詳しい情報を報告書ごとに整理した。

2. 2. 2 調査結果

(1) 全体図作成時のスケール区分の設定の考え方

解析のスケール区分および解析対象領域のサイズは、各国の報告書ごとに異なっているため、共通に適用可能な一義的なスケール区分およびサイズを設定することは難しい。しかしながら、報告書ごとの異なるスケール区分の名称をそのまま用いて解析の内容やその流れを整理すると、全体像の把握・比較がしにくくなり、全体図を作成する目的が達成されない。そこで、調査結果を整理するために、共通的なスケール区分の名称を設定するとともに、各スケール区分への解析モデルの当てはめを検討する際に参考となる領域のサイズを幅で設定した。スケール区分の名称は、第2次取りまとめ²⁷⁾において利用してきた概念とその名称を基本に、各国の報告書で用いられている名称との大きな不整合がないことを確認しつつ、以下の7つを設定した。また、領域のサイズの幅については、POSIVA98-02 報告書での解析の目的に応じたサイズの設定根拠の記述（付録1参照）を参考とし、各報告書で設定されているサイズのバリエーションをおおよそ包含できるように設定した。

- ・ 広域スケール (10km以上)
- ・ Local スケール (1~10km)
- ・ 処分場スケール (10m~1km)
- ・ パネルスケール (10m~1km)
- ・ 坑道スケール (10m~1km)
- ・ EBS 周辺岩盤スケール (1~10m)
- ・ EBS スケール (0.1~1m)

なお、各報告書の解析で実際に考慮されている領域のサイズも参照できるように、スケールの観点から整理した全体図において、解析モデルの名称に解析対象領域のサイズの正確な値を併記した。

(2) 全体図と詳細表の作成

「スケールの観点から整理した全体図」を図 2.2-1、「モデルの接続の観点から整理した全体図」を図 2.2-2、および詳細表を付録 2 に示す。

(3) 各国の報告書で提示されている課題の整理

上記の既存の評価技術の調査とあわせて、各国の報告書で示されている性能評価モデルの開発課題を抽出し、スケール区分ごとに整理した（付録 3）。その結果、調査した範囲では、各スケールあるいは個別現象に関する課題は挙げられているものの、本研究で特に着目する多様なスケールに対して整合的な解析を行うことに関する特段の課題が示されている例はなかった。また、水理における「気候変動、氷河期の取り扱い」が、複数のスケールに重複する課題として複数の報告書で挙げられていたことは、多様なスケールを対象とする際に考慮すべきプロセスを検討するうえで参考になる可能性がある。

2. 3 今後の課題

今後は 2.1.3 項において挙げた基本戦略に含めておくべき事項のそれぞれに対応していくことが必要である。

その中で、既存の評価技術の調査に関しては、以下の観点に着目した調査の継続による 2.2.2 項で示した調査結果の追加・更新を行うことが重要と考えられる。

- ・調査対象を広げる観点から、最新の報告書^{30), 31)} や既存の報告書に関する情報の更新に対する調査を継続して、調査結果の追加・更新を図る。
- ・多様なスケールを対象とした核種移行解析を検討する上で重要なと考えられる情報、たとえばスケールの区分やその解析対象領域のサイズあるいは境界条件などを決める際の考え方、理由、専門家の判断等について、サブレポートにさかのぼった調査や実施機関へのヒアリング等によって、より詳細な情報収集を実施する。
- ・調査対象とするプロセスを水理と物質移行から他のプロセス（たとえば、熱、応力等に関わるプロセス）にも段階的に拡張していく。

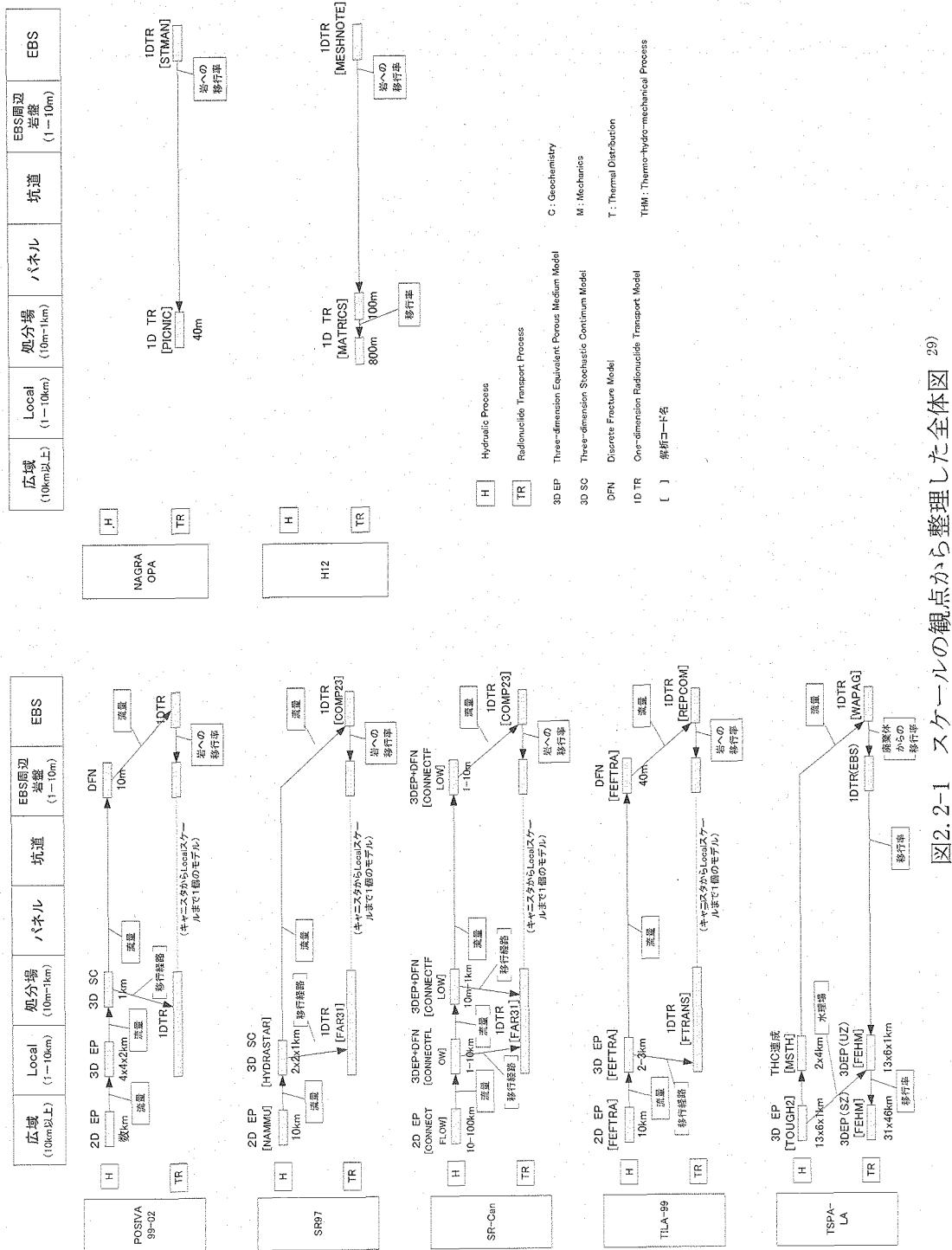
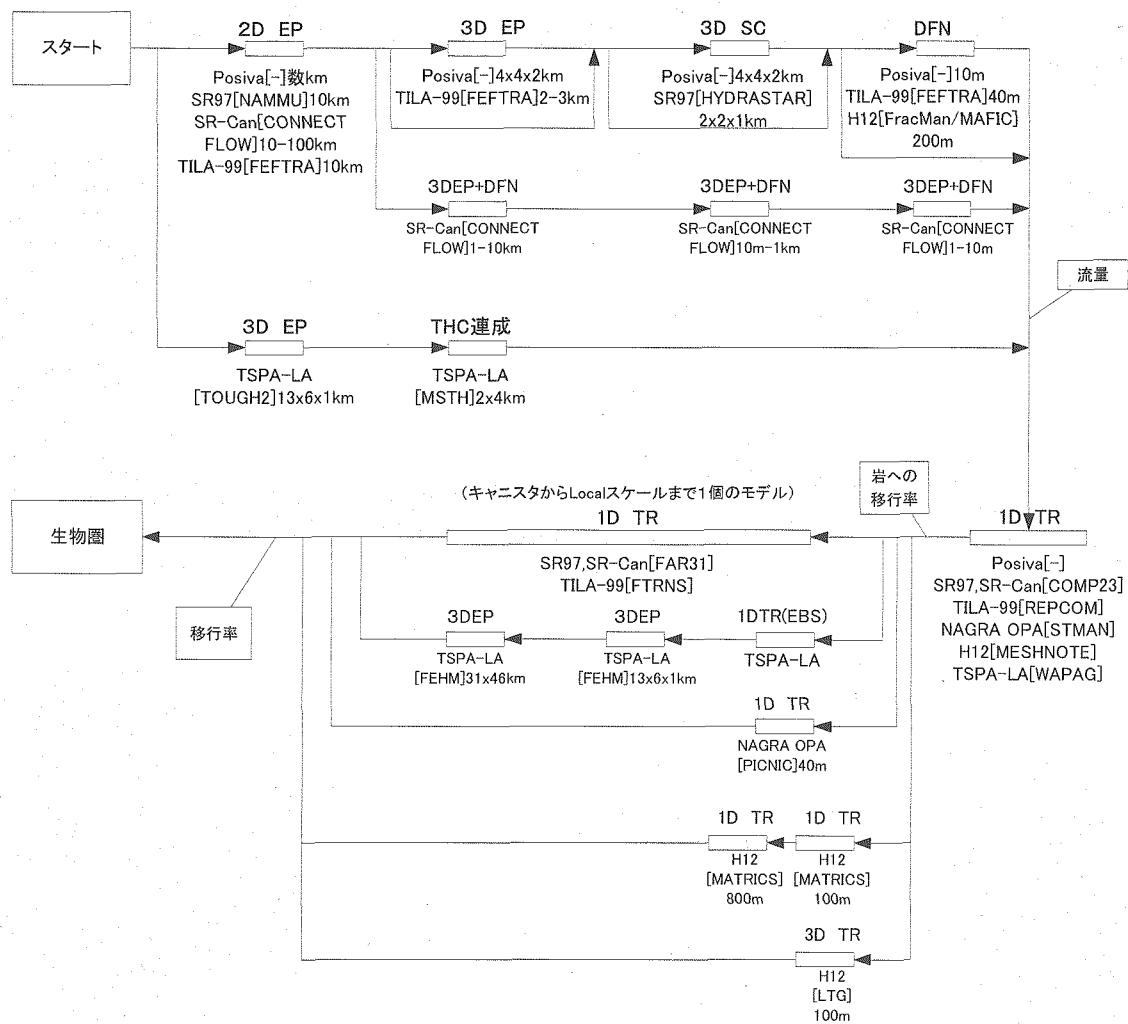


図2.2-1 スケールの観点から整理した全体図 29)

図 2.2-2 モデルの接続の観点から整理した全体図²⁹⁾

参考文献

- 1) J. Andersson et al : "A working group's conclusions on site specific flow and transport modeling" , POSIVA 98-02, 1998.
- 2) SKB : "Deep Repository for spent nuclear fuel, SR97 - Post closure safety, Main Report Vol. I, II - Main Report summary" , SKB TR-99-06, 1999.
- 3) SKB: "Background report to SR97, SR97 Processes in the repository evolution" , TR-99-07, 1999.
- 4) SKB : "Background report to SR97, SR97 Waste, repository design and sites" , TR-99-08, 1999.
- 5) SKB : "SR97 Data and data uncertainties" , TR-99-09, 1999.
- 6) SKB : "Summary to hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg" , TR-97-23, 1997.
- 7) SKB : "Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/5" , TR-97-06, 1997.
- 8) SKB : "Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/2" , TR-97-03, 1997.
- 9) SKB : "Planning report for the safety assessment SR-Can" , TR-03-08, 2003.
- 10) SKB : "Interim main report of the safety assessment SR-Can" , SKB TR-04-11, 2004.
- 11) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成 15 年度 性能評価技術高度化報告書” , 2003.
- 12) Posiva : "Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara - TILA-99" , POSIVA 99-07, 1999.
- 13) Posiva : "Site-to-Canister scale flow and transport in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara" , POSIVA99-15, 1999.
- 14) Posiva : "Site scale groundwater flow at Olkiluoto" , POSIVA99-03, 1999.
- 15) Posiva : "Regional-to-Site scale groundwater flow in Kivetty" , POSIVA 99-13, 1999.
- 16) BECHTEL SAIC COMPANY : "Total System Performance Assessment - License Application Methods and Approach" , TDR-WIS-PA-000006, REV 00, ICN 01, Las Vegas, Nevada, 2003.
- 17) BECHTEL SAIC COMPANY : "UZ Flow Models and Submodels" , MDL-NBS-HS-000006, REV 02, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 18) BECHTEL SAIC COMPANY: "Multiscale Thermohydrologic Model" , ANL-EBS-MD-000049, Rev01, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 19) K. MacNeil : "EBS Radionuclide Transport Model" , ANL-EBS-MD-000034, REV00, OCRWM, Las Vegas, Nevada, 2000.
- 20) B. A. Robinson : "Particle Tracking Model and Abstraction of Transport Processes" , MDL-NBS-HS-000020, REV00, OCRWM, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 21) B. W. Arnold, and S. P. Kuzio : "SZ Flow and Transport Model Abstraction" , MDL-NBS-HS-000021, Rev00, OCRWM, Las Vegas, Nevada, 2003.
- 22) BECHTEL SAIC COMPANY, "WAPDEG Analysis of Waste Package and Drip Shield Degradation" , ANL-EBS-PA-000001, REV02, Las Vegas, Nevada, (2004)
- 23) BECHTEL SAIC COMPANY : "CSNF Waste Form Degradation: Summary Abstraction" , ANL-EBS-MD-000015, REV02, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 24) NAGRA : "Project Opalinus Clay Safety Report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste" ,

- NTB-02-05, 2002.
- 25) NAGRA : "Project Opalinus Clay Models, Codes and Data for Safety Assessment" , NTB 02-06, 2002.
 - 26) NAGRA : "Projekt Opalinuston Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse" , NTB 02-03, 2002.
 - 27) 核燃料サイクル開発機構：“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, 1999.
 - 28) 核燃料サイクル開発機構：“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” , JNCTN1400 2005-003, 2005.
 - 29) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成17年度 地層処分技術調査等 性能評価技術高度化 報告書(第2分冊) 第II編 現実的性能評価技術の開発”, 2006.
 - 30) ANDRA : Dossier 2005 Granite, 2005.
 - 31) ANDRA : Dossier 2005 Argile, 2005.

3. ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発

3. 1 共同研究における議論の概要

3. 1. 1 実施計画の策定

従来の安全評価では、評価の保守性を確保できそうなパラメータの設定やモデル化のための仮定が行われている。このことは、2章で検討した多様なスケールの一部であり、また核種移行解析のソースタームとなる、ガラス固化体近傍の領域（以下、「ガラス固化体スケール」という）を対象とした評価においても同様である。たとえば第2次取りまとめ¹⁾では、ガラスの溶解速度として数年間における浸出試験で導出された値を用いた一定溶解のモデルを仮定しており、また、オーバーパックは保守的な腐食寿命を経過した後消失し、核種移行等に関与しないとしている。しかしながら、実現象としては、ガラスの溶解とそれに伴う核種の溶出には種々のプロセスが関与しその挙動は時間的に変遷する。またオーバーパックさらにはガラス固化体については腐食寿命後の破壊の進展により複雑な形状を有することが想定され、このような場の性状がガラス溶解やこのスケールでの核種移行に影響をあたえることが考えられる。

実施計画の策定にあたっては、上記観点に加え、これまでに「現実的性能評価技術の開発」の中で実施されてきた研究内容を共有するとともに、その必要性と研究の基本的方向性の妥当性などを確認しつつ、具体的実施内容と役割分担を設定した。

上記の検討を踏まえて設定した実施内容と役割分担を以下に示す（「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する内容を含む）。

これら実施計画に沿って、共同研究として実施した議論や検討の内容と成果を本節の3.1.2～3.1.5項に、「現実的性能評価技術の開発」²⁾において実施した検討の内容を次節3.2に示す。

実施内容

ガラス固化体近傍での化学的挙動（ガラスの溶解挙動、核種放出挙動等）や力学的挙動（破壊・変形）を対象とし、より現実的な解析手法の開発を目的とし、以下の研究を実施した。

① ガラス溶解モデルの高度化

性能評価上着目すべき巨視的スケールのモデル¹⁾に対する現象論的モデルとして、原子レベルでのガラス溶解・変質をシミュレーションするモデルの検討を行う。そのためのモデルの候補のひとつとしてランダム格子モデルを取り上げ、溶解・変質評価手法について、改良を実施するとともに、種々の条件で実施された溶解試験結果との比較検討を行う手法を検討し、解析を通じてその適用性の評価を行う。

② オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動の解析検討

処分場で想定される環境でのオーバーパックやガラス固化体の力学的な破壊や変形挙動を予測するための解析手法について検討する。

③ ガラスの変質・変形に関わる実証試験の可能性評価

開発する解析ツールを実証するための試験に関し、その実現可能性について検討を行う。

④ ガラス固化体スケールを対象とした解析技術開発のための計画立案

ガラス固化体近傍での変質、変形を扱う既存の解析技術等を整理・分析する。国内外で提案されているガラス溶解・変質層形成に関する種々のスケール（ナノ、メゾ、巨視的など）のモデルを比較・検討することにより、それぞれの適用範囲を明確にし、今後のモデル開発を進めていく

¹⁾ 巨視的スケールモデルの定義については、3.2.1項を参照。

ための計画を策定する。

役割分担

本研究の実施にあたっての主な役割分担は以下の通りである。

研究項目	原子力機構	原環センター
① ガラス溶解モデルの高度化	○ (方針提案, 情報提供)*	○ (調査・解析) **
② オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動の解析検討	○ (方針提案, 情報提供)*	○ (調査・解析) **
③ ガラスの変質・変形に関わる実証試験の可能性評価	○ (整理結果 確認) *	○ (調査・整理) **
④ ガラス固化体スケールを対象とした解析技術開発のための計画立案	○ (共同)	○ (共同)

* : 実施計画書では原子力機構の分担にはなっていなかったが、実際に共同研究を進めいく中で、情報提供や結果の確認という形で役割を果たした。

** : 主に「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施。

3. 1. 2 ガラス溶解モデルの高度化

本研究項目については、まず、これまでに「現実的性能評価技術の開発」の中で実施されてきた内容の詳細を共有した。そのうえで、本項目の位置づけをより明確にするために、ガラス固化体近傍での変質を扱う既存の解析技術等の整理と現状分析を行った。特に、ガラス溶解のモデル化にあたって適用されている異なるアプローチについて、各アプローチの適用の利点、適用範囲などを明確にしていくことが重要と認識された。また、アプローチ間の相互の関係をよりわかりやすく説明するための工夫として、いずれかのアプローチを基軸とした整理と説明にすることが提案された（たとえば、決定論的なアプローチである速度論に基づいた巨視的スケールモデルを基軸とし、確率論的なアプローチであるモンテカルロ法に基づいたメゾスケールモデル²については、巨視的スケールモデルとの関係や違いを示す；3.2.1 項の図 3.2-2 を参照）。

また、原子力機構で進めてきた、ガラスの溶解に関わる現象の科学的理解とそれらの成果を反映した浸出モデル構築の成果³⁾およびガラスの溶解に関するデータベース（プロトタイプ）の開発⁴⁾の内容を共有するとともに、前述の既存の解析技術等の整理と現状分析あるいは後述する解析で用いる情報の検索・収集などに活用することとした。

研究の具体的な内容としては、上記検討を適切に進めるとともに、わが国における検討事例が少ないメゾスケールモデルによるガラスの溶解・変質評価手法を対象とし、同様に検討事例が少ないナノスケールでの知見も反映しモデルの高度化を図ることおよび解析結果と溶解試験結果との比較によるメゾスケールモデルの適用性の確認を進めることなど、これまでの「現実的性能評価技術の開発」で挙げられていた検討の方向性を基本的に継続することとした。

上記検討で設定された方向性は、「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する調査や個別技術の開発に反映した（3.2.1 項参照）。

3. 1. 3 オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動の解析検討

² メゾスケールモデルの定義については、3.2.1 項を参照。

本研究項目についても、まず、これまでに「現実的性能評価技術の開発」の中で実施されてきた内容の詳細を共有した。そのうえで、本項目に含まれる複数の研究要素の相互関係について、オーバーパックの破壊挙動の解析に関する研究の要素およびその影響を受けたガラス固化体の破壊挙動の解析に関する研究の要素の関係を整理することにより、より一層の明確化を図ることの必要性が指摘され、これに対応することとした。

また、原子力機構が実績を有するガラス固化体の物性等に関する特性や割れに関する情報について、解析の実施に利用できるように提供した。

研究の具体的な内容としては、上記検討を適切に進めるとともに、破壊挙動の解析手法を対象に、特にオーバーパックとガラス固化体が共存する系での解析を可能とするための高度化を図ること、ガラス固化体の破壊挙動の解析の初期条件となる冷却時の割れの設定と解析におけるその取り扱いに関する予備的検討と課題の抽出を行うことおよび解析結果と既存の試験結果との比較によるモデルの適用性の確認を進めることなど、これまでの「現実的性能評価技術の開発」で挙げられていた検討の方向性を基本的に継続することとした。

上記検討で設定された方向性は、「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する個別技術の開発に反映した（3.2.2項参照）。

3.1.4 ガラスの変質・変形に関わる実証試験の可能性評価

ガラス固化体スケールでの現象の理解を深めるため、また解析に用いる情報の整備あるいは解析結果の検証に用いる情報を整備するための課題を、化学的挙動、力学的挙動および物質移行挙動の観点から列挙するとともに、重要性および実現可能性の観点から、実証的な試験による解決を検討すべき課題を抽出することとした。この方向性は、「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する個別技術の開発に反映した（3.2.3項参照）。また、研究項目②と③に関する検討の経緯や進捗と密接に関連付けつつ実施することとした。

抽出された課題については、共同研究の場において、特に原子力機構が有する試験研究の実績と経験および所有する施設のスペックや利用可能性等と照らし合わせながら、その実施の可能性を再評価した。その結果、抽出された課題に対する試験研究の実施は基本的に可能と考えられるものの、試験実施の優先度および現実的な達成目標の設定については今後継続的な検討を行うこととした。

3.1.5 ガラス固化体スケールを対象とした解析技術開発のための計画立案

本項では、上記3.1.2～3.1.4項での研究の方向性に関する検討および3.2節で示す「現実的性能評価技術の開発」を活用した研究の実施を踏まえた、今後の研究開発での課題や留意点の検討と整理を行った。主な課題や留意点を以下に示す。

- ・ ガラス固化体スケールを対象とした解析技術を体系的に整備するためには、ガラスの溶解と破壊挙動に関する解析技術を相互に関連させた技術開発を進めていくとともに、核種移行解析におけるソースタームの現実的な評価への展開の具体化を加速する必要がある。なお、破壊挙動に関しては、より現実的な評価としていくための課題のひとつとして、不均質な応力場を想定した解析手法の検討も重要となる。
- ・ また、現状の研究は、初期の状態からの経時変化に対し、人工的なバリアの性能の劣化が徐々に進むという見方をしているが、長期的な経時変化によって人工的なバリアが環境にじみ、その結果異質の安全機能が成長していくという見方からの研究のアプローチを検討することも、システムの自立性を例示していく観点から今後重要となる可能性がある。
- ・ ガラスの溶解と破壊挙動の連成については、これまで破壊形状を場として与えてガラスの溶

解を評価するという形のいわゆる弱連成を考えてきたが、現実的な連成を考えた場合に新たな現象の考慮が必要になることはないかどうかについても検討し、必要に応じて課題の抽出、整理を行うことが肝要である（たとえば、ガラス固化体の破壊に伴い生じた微小割れ目中のガラス溶解・沈殿反応による溶解速度の変化など）。

3. 2 調査や個別技術の開発の概要

以下に、3.1節に示した共同研究での議論を反映した調査や個別技術の開発の結果の概要を示す。なお、本節には、「現実的性能評価技術の開発」²⁾において実施された内容を含む。

3. 2. 1 ガラス溶解モデルの高度化

(1) ガラス溶解モデルの高度化にあたっての研究の背景

これまでの研究を通じて、ガラス固化体からの核種浸出に関する基本的事象が理解され、いくつかの浸出モデルが提案されている。ここでは、ガラス溶解モデルに関して、稻垣ら⁵⁾のレビューをもとに整理と現状分析を行う。

ガラス固化体は、水との接触による溶解、変質に伴い、その表面に変質層を形成する。変質層は、通常、図3.2-1に示すように、①拡散層（反応層または水和層）、②ゲル層、③析出層から構成される。

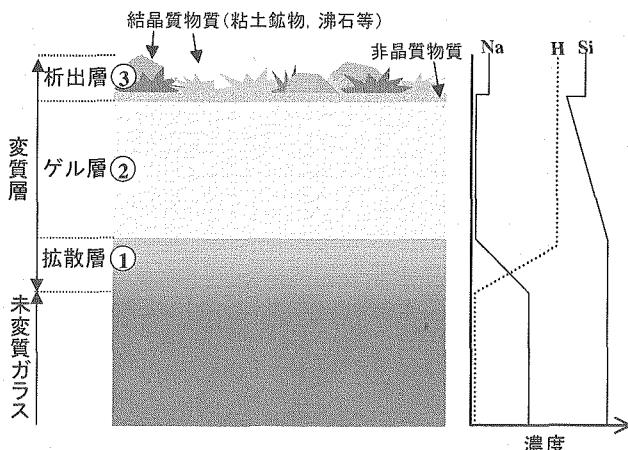


図3.2-1 ガラス表面の変質の模式図⁵⁾

拡散層は、ガラスマトリクスへの水分子の拡散に伴う水素イオンとガラス中の Na^+ などのイオン交換反応、いわゆるガラスマトリクスの水和変質が起こる領域である。この水和変質は、ガラスと水が接した直後に卓越するが、化学親和力が大きい条件（溶存ケイ酸濃度が溶解平衡から見て充分低い）では、ガラスマトリクスの溶解が支配的になる。マトリクス溶解は、水和した拡散層における加水分解反応による $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 結合の破壊、加水分解反応で生成したシラノール基の縮合、ケイ酸の脱離により生じ、これらの反応により多孔質構造のゲル層が形成される。ここで、ゲル層とは、シラノール基の縮合により $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 結合の緩やかなネットワークを形成したコロイド状物質である。マトリクス溶解は、ケイ酸の脱離反応によって律速されると考えられ、溶存ケイ酸濃度が増加し、化学親和力が減少すると抑制される。析出層は、溶液からガラス表面に二次鉱物などが析出して生成するものであり、析出層を構成する固相は溶液組成に依存する。拡散層、ゲル層、析出層の厚さは、溶液条件、変質期間により異なる。

このようにガラスの溶解、変質に伴い変質層が形成されるため、長期溶解、変質メカニズムに

に関するモデルとしては、以下のような表面変質層の役割が考慮されたものが提案されている。

- ・ ガラスマトリクスの水和変質モデル
- ・ 保護的なゲル層による溶解反応の抑制モデル
- ・ 二次鉱物生成による溶存ケイ酸消費モデル

これらのモデル（考え方）を取り込み、ガラスの溶解挙動を評価するための手法としては、従来から用いられている Grambow モデル^⑥に代表されるような溶解速度論に基づく決定論的なアプローチ、近年の計算科学の発達に伴い進展してきたモンテカルロ法を用いた確率論的なアプローチが挙げられる。前者は、実験などで得られたマクロ量をもとに決定論的に評価する手法であり、後者は原子間の相互作用力といった理論的な値をもとに確率論的に評価する手法である。後者は、前者に比べると、より微細なスケールでの現象も考慮したアプローチであることから、ここでは、便宜的に前者を「巨視的スケールモデル」、後者を「メソスケールモデル」と呼ぶ。図 3.2-2 には、ガラス溶解のモデル化のアプローチと対象とする現象のスケールとの関係を図式化して示した。

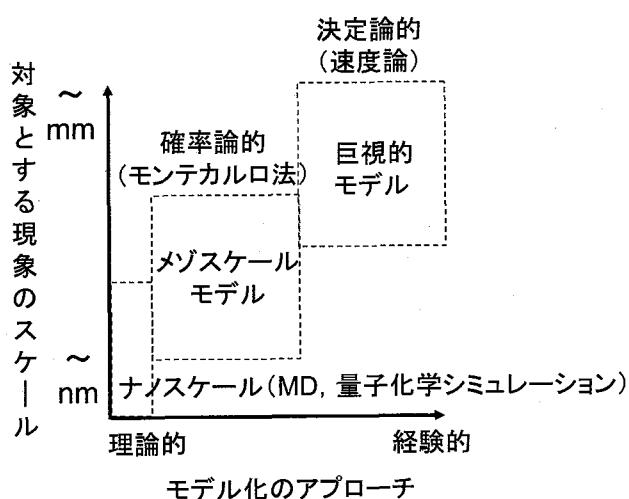


図 3.2-2 ガラス溶解のモデル化のアプローチと対象とする現象のスケールとの関係

ガラスの溶解において変質層の影響を考慮する上では、拡散層中の水の拡散、シリカの加水分解反応、ゲル層中の Si の拡散／遅延などのプロセスを取り込むことが必要である。両アプローチでは、これらのプロセスを取り込んだ数学モデル（数式）を構築することが可能である。変質層の影響を考慮した場合、たとえば、拡散層の厚さ、拡散層中の水の拡散係数、ゲル層の厚さ、ゲル層中の Si の拡散係数などがパラメータとして含まれる。巨視的スケールモデルでは、これらのパラメータを溶解試験結果に対するフィッティングに基づき算出し、定数として取り扱う。一方、メソスケールモデルでは、反応の進行に伴い変化するこれらのパラメータの変化を理論的に考慮しながら計算することができる。またメソスケールモデルでは、分子動力学法（Molecular Dynamics Method : MD）によるナノスケールでのガラスネットワーク中の原子配置、量子化学シミュレーションによるナノスケールでの元素（Si や B）の浸出挙動が考慮され、ガラスの溶解、変質に伴う構造的な特徴の変化（拡散層、ゲル層、空隙の形成など）の可視化も可能である。このように、メソスケールモデルは、巨視的スケールモデルでは考慮できない（或いは表現できない）状態も取り扱うことができるが、現状では、ガラスの網目構造を格子状で模擬しており実際の構造を忠実に表現できていない、単純な組成のガラスへの適用に留まっているなど、実際の試験系への適用限界があるのも事実である。したがって、当面は、従来から用いられている速度論モデルに基づ

いた巨視的スケールモデルを基軸とし、巨視的スケールモデルによる評価を補完するための手法としてメゾスケールモデルを開発していくことが適当であると考えられる。また、両手法による評価結果を統合して解釈することでガラスの溶解、変質に関する現象理解がより深まり、ガラス溶解モデルの高度化が図られる。さらに、このような研究により得られた成果を性能評価（ガラス固化体性能の評価）における信頼性向上に反映していくことが必要である（図 3.2-3）。

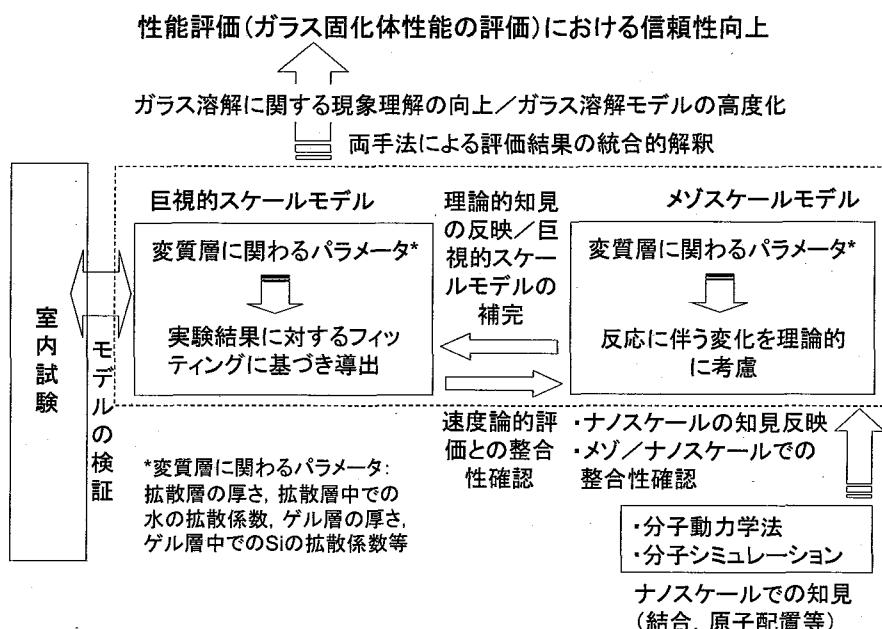


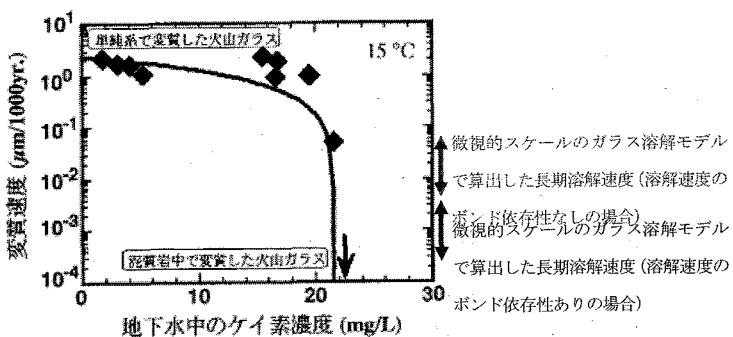
図 3.2-3 ガラス溶解モデル高度化のための研究のフレームワーク

このような研究の方向性は、これまでの「現実的性能評価技術の開発」で挙げられていた検討の方向性を継承するものである。本共同研究では、ガラス溶解モデルの高度化として、わが国における検討事例が少ないメゾスケールモデルによるガラスの溶解・変質評価手法を対象に、ナノスケールでの挙動と整合的なメゾスケールモデルを開発するため、モデルの改良、高度化を図った。

(2) メゾスケールモデルの開発

従来の巨視的なガラス溶解モデルは、時間の経過に伴う溶解速度の低下を経験的に表現したものであり、比較的短期の室内試験と長期に及ぶ天然ガラスの溶解挙動を整合的に説明することが困難であった。このため、既往の安全評価においては、数年間における浸出試験で導出された溶解速度をもとに、保守的な仮定が採用されていた¹⁾。

一方、メゾスケールでのガラス溶解モデルは、ガラス中のSiの加水分解反応、Siの再沈殿による表面変質層の成長、表面変質層中の水素イオンの拡散による水和変質反応の律速を考慮することができ、天然ガラスの長期的な溶解挙動と比較的短期の室内浸出試験結果とを整合的に説明可能である（図 3.2-4）。

図 3.2-4 火山ガラスの長期溶解速度とメゾスケールモデルによる計算結果との比較²⁾

しかしながら、メゾスケールモデルには、原子レベル（ナノスケール）でのモデルで改良の余地がある（たとえば、B の溶解挙動が適切にモデル化されていない）ため、この課題について検討した。検討にあたっては、ナノスケールでのガラスの構造、溶解反応に関する知見を整理し、メゾスケールモデルとの整合を調べた。また、室内浸出試験結果との比較により、モデルの検証も行った。

1) ナノスケールにおける知見の整理

ガラスは微視的にみると、Si と B の間を O が結合し、環状の連鎖を構成するネットワーク構造からなる。ネットワーク中の B には、結合数 3 と 4 のものが存在する。O は、Si と Si, Si と B, B と B の間を橋渡しする BO(Bridging Oxygen), 1つの Si 或いは B のみと結合する NBO(Non Bridging Oxygen) に分けられる。Na は、NBO および結合数 4 の B と電気的に結合し、電荷不均衡を解消している。

アルカリ金属を含むホウケイ酸ガラスの構造は、K 比($[SiO_2]/[B_2O_3]$) および R 比($[Na_2O]/[B_2O_3]$) に依存し、Si のネットワークへの B の取り込みは、これらをパラメータとして異なる。

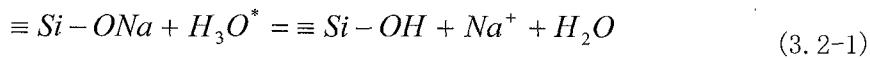
ガラスの溶解において主要な反応である水和反応、イオン交換反応及び加水分解反応について、以下に簡単に説明する。

a) 水和反応

水和反応には固相中への水分子の侵入から構造の破壊まで多岐にわたる現象が含まれており、その程度を規定する要因としては、空隙の大きさ、ポリマー構造中の共有結合の連続性およびポリマー構造にイオン結合している陽イオンの水和エネルギーが挙げられる。ポリマー同士が共有結合でクロスリンクすることなく単にイオン結合によってゆるやかに統合されているような物質の場合、水和反応によってこのイオン結合が分離されると、極端な場合には全体の構造が小さなポリマーの「破片」に分解されてしまうこととなる。しかしながら、通常、ガラス中の水分子の移動は極めて遅く、適切な組成を選択する限り、水和反応は他のプロセスと並行する状況でしか進展しないものと考えられる。

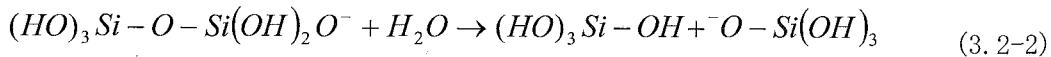
b) イオン交換反応

水和反応の進展した相では、non-bridging な酸素に配位したアルカリ金属のヒドロニウムイオンによる置換が生じる。non-bridging な酸素に配位した Na は、処分環境で通常想定される弱アルカリ性～酸性の条件では速やかにヒドロニウムイオンによって交換されることとなる（式 3.2-1）。また、イオン交換は速い反応であり、関連する液相化学種の物質移動が継続的に生ずる限りは速やかに進展するものと考えられる。ただし、結合数 4 のホウ素に配位した Na は中性以上の pH では安定であり、ヒドロニウムイオンによるイオン交換はほとんど生じない。



c) 加水分解

ガラスの溶解における最終段階は、シリカやホウ素といったポリマー中の network former の共有結合の加水分解である。この反応は、たとえばシリカの場合、次式のように書かれる。



量子化学シミュレーションによってこの加水分解の素過程が明らかになっており、特に、処分環境で重要と考えられる中性～弱アルカリ性の条件では、水酸基の収着によって触媒されることによって加水分解が促進される。

2) ナノスケールでの知見と整合的なメソスケールモデルの開発

前節で述べたナノスケールにおける知見と整合的なメソスケールでの格子モデルを構築した。

a) ナノスケールでの知見と整合的な格子モデルの作成

以下の手順により、図 3.2-5 に示すようなナノスケールでの知見と整合性の高い格子モデルを作成した。

- 各格子点において 4 つの辺が存在するような変則的立方格子を定義し、格子点には Si ないしは B が配置する
- 0 は辺として表現され単位長さのものが B0、その半分の長さのものが NBO となる
- Na は格子外 (NBO もしくは B4 の近傍) に位置する

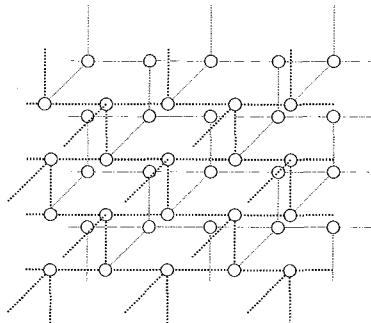
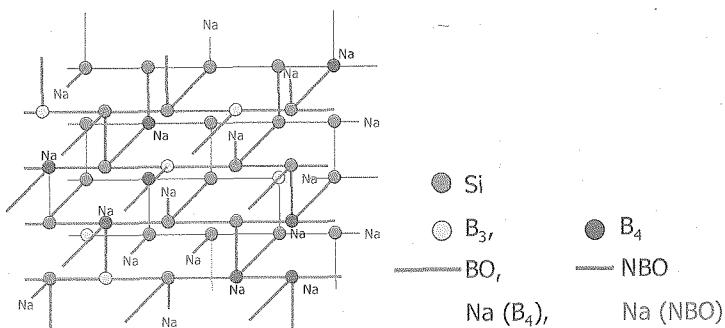


図 3.2-5 ナノスケールでの知見と整合的な格子モデルの概念²⁾

b) ガラスに含まれる諸元素の初期配置

a) で作成した格子上に以下の手順で種々の原子を配置した (図 3.2-6)。この際、MD 法によるシミュレーション結果及びラマン法や NMR による観察によって明らかとなった結合状況の異なる原子の割合と整合的となるようにそれぞれの比率を管理した。

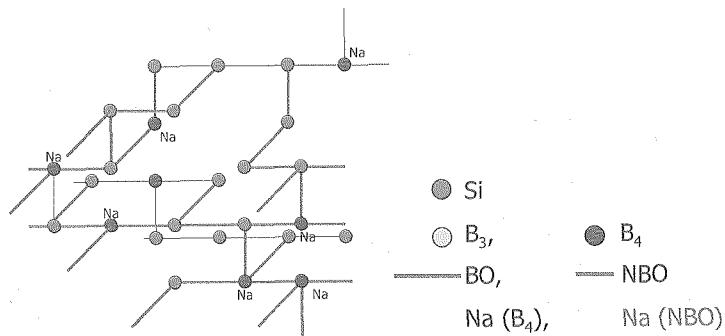
- 所定の割合で Si と B をランダムに配置する
- B を所定の比率で B3 と B4 にランダムに配分する
- Si を所定の比率で Q3 (B0 が 3 つで NBO を一つ含むもの) と Q4 (B0 が 4 つで NBO を含まない) にランダムに配分する
- NBO 及び B4 にそれぞれ Na を配置することによって電気的中性を確保する

図 3.2-6 ガラスに含まれる諸元素の初期配置の概念²⁾

c) 溶解反応（水和及び加水分解）モデル

ガラスネットワーク中の諸元素は、以下に示す手順で水和あるいは加水分解によって液相中に溶出する（図 3.2-7）。

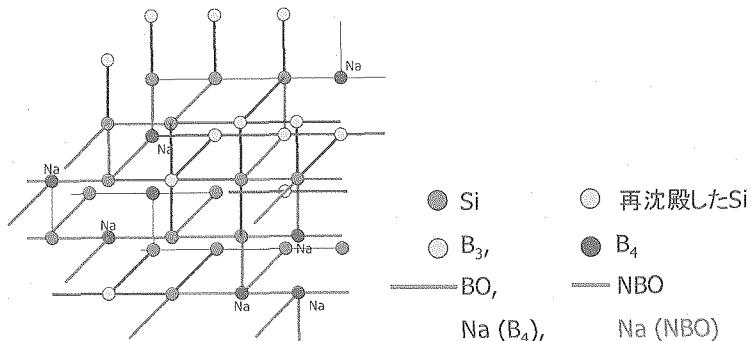
- NBO の近傍にある Na は瞬時に水素イオンによって置換される（水和反応）
- B_4 近傍の Na は加水分解によって溶出するまでイオン交換されない
- B_3-O , B_4-O および $Si-O$ 間の結合はそれぞれ一定の確率で加水分解によって解離する
- 全ての結合が解離すると格子点の原子は液相に溶出する

図 3.2-7 ガラスネットワークの溶解挙動の表現²⁾

d) Si の再沈殿による変質層の成長

c) で述べた溶解によりネットワークが溶出した後、液相中の Si が濃度に応じて再沈殿し、ネットワークの一部分が再構成される（図 3.2-8）。この再沈殿の過程は以下の手順で表現される。

- 液相中の Si は一次反応速度式に従って沈殿する（表面変質層形成）
- 沈殿した Si は徐々に結合数を増加して安定な状態へと変遷する

図 3.2-8 シリカの再沈殿による変質層の成長²⁾

上述した a)～d)を考慮した数学モデルを作成し、ナノスケールにおける知見と整合的なメゾスケールでの格子モデルに基づく計算モデルを開発した。

(3) メゾスケールモデルによる事例解析

本研究で開発したメゾスケールモデルの検証とし、既存のメゾスケールモデルとの比較および室内浸出試験結果との比較を行った。

既存のメゾスケールモデルとしては、本研究と同様なモンテカルロシミュレーションによるモデル⁷⁾を選定した。このモデルでは、元素の違いによる溶解性の違いは考慮されていないため、これらを一括して可溶性成分として取り扱うこととした。解析の対象としたガラスは、原子数で可溶性成分 (Na および B など) が 25%, Si が 75%という組成のものであり、通常のホウケイ酸ガラスに比べて Si 含有率の高いことが特徴である。試解析の結果得られた表面変質層（ゲル層）の生成過程を図 3.2-9 に示す。ここでは、Si 含有率の顕著に高い緻密な表面層が形成されており、B および Na の選択的な浸出が生じている。また、ゲル層には比較的大きな空隙が成長しており、その周囲には Si に富んだ緻密な二次鉱物が分布している。このように、ガラスの溶解に伴い生じる不均質な表面層について、定性的ではあるがモデル化が可能であることが示された。

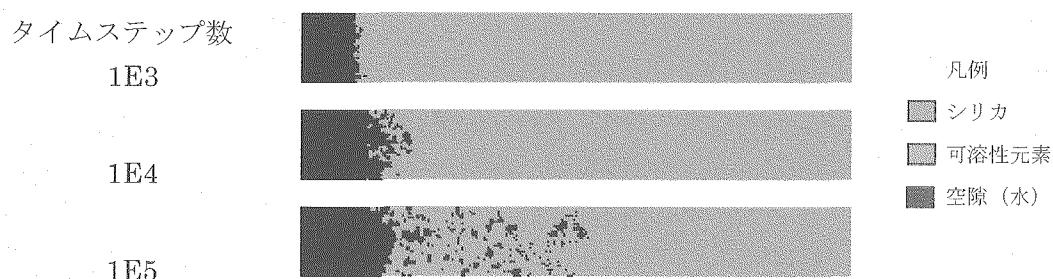


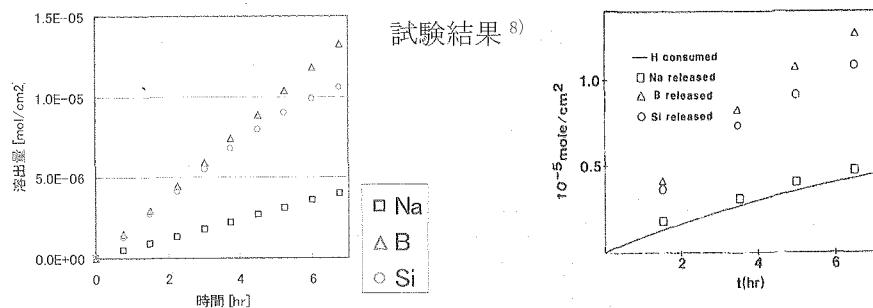
図 3.2-9 本研究で作成したメゾスケールモデルによる試解析の結果²⁾

室内浸出試験結果との比較では、原子力機構が整備を進めているガラス溶解速度データベース⁴⁾に含まれている種々の組成のホウケイ酸ガラスについて行われた浸出試験に対し、本研究で開発したメゾスケールモデルを適用し、モデルの検証を試みた。ガラス組成 ($40-x$) $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 60\text{SiO}_2$ において、 $x=30\%$ とした場合の試験結果 (pH 7, 70°C, SA/V= 26/m)⁸⁾ およびこれと対応する解析結果を図 3.2-10 に示す。本研究で作成したモデルにより、Si, B および Na のそれぞれの元素の累積浸出率が適切に再現されており、試験結果との比較からもモデルの適用性が示された。

3. 2. 2 オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動の研究

処分環境でのオーバーパックやガラス固化体の力学的な破壊や変形挙動評価にあたっては、岩盤の力学特性等といった地質環境条件に関わる情報、緩衝材／オーバーパック／ガラス固化体の力学特性などといった人工バリア材に関わる情報が必要となる。オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動評価のフローを図 3.2-11 に示す。評価では、まず、岩盤の力学特性に基づき、坑道掘削後の残留応力が解析される。この結果をもとに、対象とする人工バリア仕様における緩衝材の応力分布が解析される。また、緩衝材応力分布の解析結果は、オーバーパックの腐食膨張による変形破壊評価に用いられる。さらに、この評価結果と冷却時の熱応力によるガラス固化体破

解析結果



メソスケールモデルにおける変質層の形成状況

図 3.2-10 メソスケールモデルによる解析結果と室内浸出試験結果との比較²⁾

壞の解析結果とを考慮し、オーバーパック変形に伴うガラスの破壊挙動について評価を行う。ただし、今回は、オーバーパック変形に伴うガラスの破壊挙動評価にあたり、冷却時の熱応力によるガラス固化体破壊の解析結果は考慮していないため、図 3.2-11 の破線で示される解析になっている。

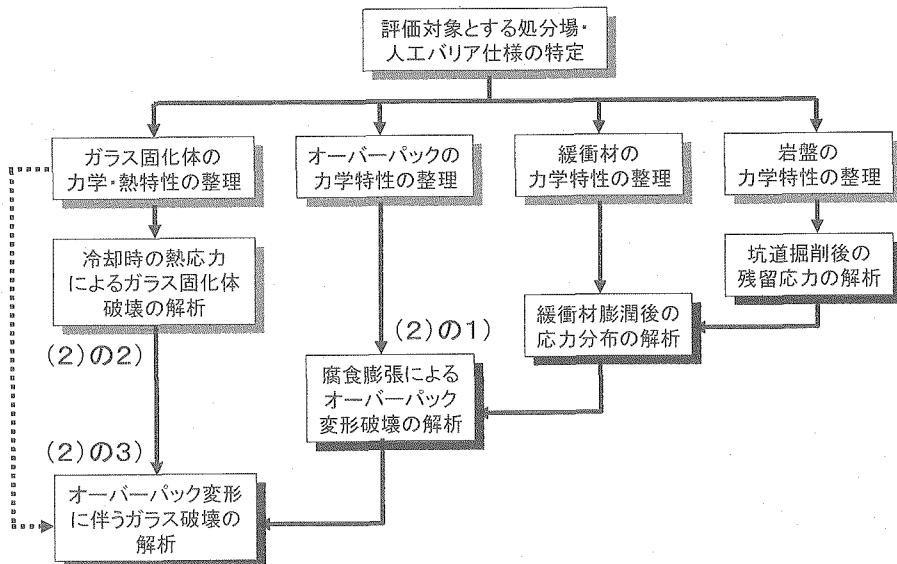


図 3.2-11 オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動評価フロー²⁾

本項目では、まず、上記のような評価を行うにあたり、これまでの「現実的性能評価技術の開発」の中で検討、開発された手法をもとに、適切な手法として選定された解析手法について述べる。次に、これらの手法を用いて実施した、図 3.2-11 中の腐食膨張によるオーバーパックの変形破壊{(2)の1)}, 冷却時の熱応力によるガラス固化体破壊{(2)の2)}, オーバーパック変形に伴うガラス破壊{(2)の3)}に関わる各個別の事例解析についてまとめる。なお、前述した通り、今回は、図 3.2-11 中の波線で示される解析になっているため、(2)の3)の解析にあたり、(2)の2)の解析結果は反映されていない。

(1) ガラスの溶解挙動評価における割れの影響評価のための解析手法

従来の安全評価においては、保守的な腐食寿命を経過した後のオーバーパックの影響については考慮されていない。また、ガラスの割れによる表面積の増大については、破碎片の幾何学的表面積の総和ではなく、試験結果から得られた割れ係数を導入して実効的な表面積の増大を見込んでいる。

そこで、オーバーパック／ガラス固化体系での破壊挙動を現実的に評価することの必要性を重視し、有限要素法と個別要素法とを動的に統合した新たな解析手法である FDEM 法 (Finite and Discrete Element Method) を採用することとした²⁾。

このような FDEM 法による解析手法について、以下に実験結果との比較による検証事例をもとに、その適用性について述べる。

セラミックあるいはガラス製の板の側面からの衝撃による破壊は、防衛関係の分野において高い重要性を有している。ここでは、当該分野で有名な Strassburger and Senf による実験結果⁹⁾と FDEM 法の解析結果との比較による検証結果について紹介する（図 3.2-12）。この実験は、100 m 四方で厚さ 10 mm のセラミック製の板の側面にミサイルを模擬した鉄の円筒を速度 85 m s^{-1} で衝突させ、その後のセラミック板の破壊挙動を高速カメラで撮影したものである。実験で生じた亀裂の成長に関する高速撮影においては衝突部分を含む何箇所かの領域に黒い影が見られるがこれは写真の精度の問題であり、実際には陥没は見られず、亀裂の生成パターンは解析結果と良く一致している。衝突後 $10 \mu\text{s}$ までの間は、亀裂は衝突箇所から放射状に広がる傾向を示しているが、それ以降は、右側の端部近くに鉛直方向の亀裂群が多数発生している。これは、FDEM 法による解析結果における圧力分布の時間変化から、圧力波の端部への到達によるものと解釈することができる。

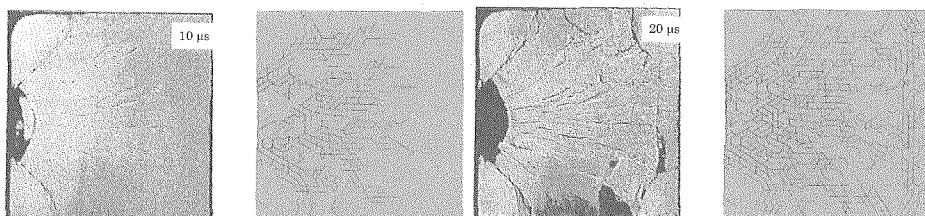


図 3.2-12 衝突実験における亀裂の成長（左）と FDEM 法による解析結果（右）の比較²⁾

(2) 事例解析

1) オーバーパックの腐食による変形・破壊についての解析

a) オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の圧密に関する解析

緩衝材の冠水後、長期間にわたるオーバーパック腐食において、主要な腐食生成物であるマグネタイトの体積が炭素鋼よりも大きいために、オーバーパックの膨張と緩衝材の圧密とが生じることとなる。本研究では、オーバーパックの有限要素メッシュ (layer) を外側から一つずつ腐食させた計算を行った。ここで、オーバーパックの腐食膨張によって緩衝材の圧密が生じ、オーバーパックへの応力も時間とともに増加する傾向を示した。

b) オーバーパック変形・破壊についての有限要素法による 3 次元数値解析

本研究では、まず前項で述べた一連のモデルを用いて応力場の時間変動を算出し、次にこの計算結果を境界条件として、代表的な時間点において有限要素法による 3 次元応力解析を行うことにより、腐食の進展に伴うオーバーパックの変形挙動をシミュレートし、さらに、FDEM 法により

どの時点とどのモードによってどこに開口部が生じるかを明らかにした。

三次元モデルを用いて算出した各腐食量におけるオーバーパック中応力分布の例を図 3.2-13 に示す。なお、ここで負値は圧縮応力を、正値は引張応力を示す。オーバーパックは初期には全域において圧縮場にあり、破壊は生じない。ただし、腐食の進展によって徐々に応力場が変化して、腐食量 60 mm 程度において底部中央の内側に引っ張り応力が生じこととなる。さらに腐食が進むと、腐食量が 114 mm 程度となった時点で側面の引張応力が限界に達して挫屈が始まる（図 3.2-13 の側面及び底部の赤い領域）。また、この時点では、オーバーパック側面に凹みが生じていることがわかる。

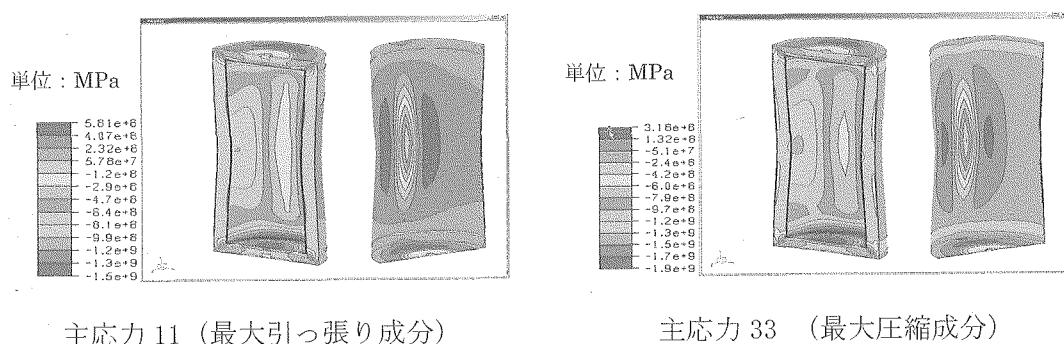


図 3.2-13 オーバーパック内応力分布 (3 次元モデル ; 腐食量 114.4 mm)²⁾

c) オーバーパック変形に伴う割れ目の生成と伝播に関する解析

前項において述べた三次元解析の結果、腐食量 114.4 mm において側面の引っ張り応力が顕著となり、挫屈が開始することが予想された。この時点における状況を仮定し、FDEM 法により割れ目が生じる様子をシミュレーションした（図 3.2-14 および図 3.2-15）。ここでは、腐食量 114.4 mm の時点で予想されるオーバーパックの応力分布よりも若干小さい数値から出発し、徐々にこれを増していくことによってどのように割れ目が進展するかを示している。解析の結果、オーバーパックは全体的には圧縮場の中にあるために、挫屈後に生じる割れ目の開口幅も制限されており、1 mm～5 mm 程度に留まるものであることが示唆された。

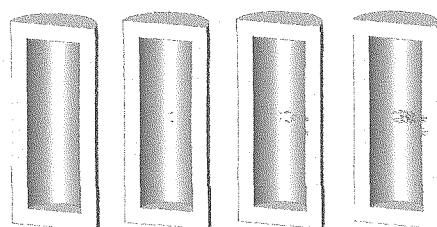


図 3.2-14 腐食量 114.4 mm における割れ目の生成と伝播²⁾



図 3.2-15 腐食量 114.4 mm における割れ目の生成と伝播²⁾

2) 冷却時のガラスの割れについての解析

溶融された高温のガラスをキャニスターに注入した直後から冷却・固化が開始され、この際のガラス内外の温度差によって生じる熱応力はガラス固化体の割れを生じることが予想される。そして、このような冷却時の割れは、後述する長期のオーバーパック腐食膨張に伴うガラス破壊現象の初期条件となるものと考えられることから、本研究では以下に示すように熱・応力連成解析とFDEM法による破壊力学シミュレーションを実施した。

a) 解析条件

予察解析において、ガラスの熱特性および力学特性は温度に依存して変化することから、各タイムステップにおいて熱解析の結果を反映しつつ応力解析を実施することが必要である（割れ目形成後は、応力解析結果を熱解析にフィードバックする）。ガラスおよびステンレス鋼の熱特性と力学特性の温度依存性はそれぞれガラス固化体とキャニスターの特性を参考としつつ、市販の材料のデータに基づき設定した。また、ガラス固化体の冷却条件は、ガラス固化体の外側面においては対流境界条件を設定し、強制換気に対応する対流係数として $80 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ を仮定した。なおガラス固化体周辺温度の時間変化は、ガラス固化体冷却時の時の実績（初期：550°C、22時間後：50°C）を参考にした。

b) 解析結果

例として固化体中央部についての応力解析結果を、最初の割れ目が生じる時点（6.5時間後）での主応力（最も引っ張りの大きい成分）分布、割れ目の伝播および温度分布として図3.2-16に示す。固化体中央部の応力分布は、側面の近傍において顕著な引張応力が発生することを示しており（左図）、6.5時間後の時点での引張応力に起因する割れ目が45度上方および下方に向けてそれぞれ発生している（中央図）。また、この割れ目の生成によって上部および下部の引張応力は解消され、その後の割れ目は、これらの割れ目の間に残る引張応力の存在する部分を横断するようにほぼ鉛直に形成するものとシミュレーションの結果から予想された。他方、応力解析の結果生じる割れ目内でのギャップ熱伝達を考慮して熱解析を再度実施した結果、等温線は依然として鉛直のままであるが（右図）、温度の絶対値は割れ目の形成によって影響を受けた。

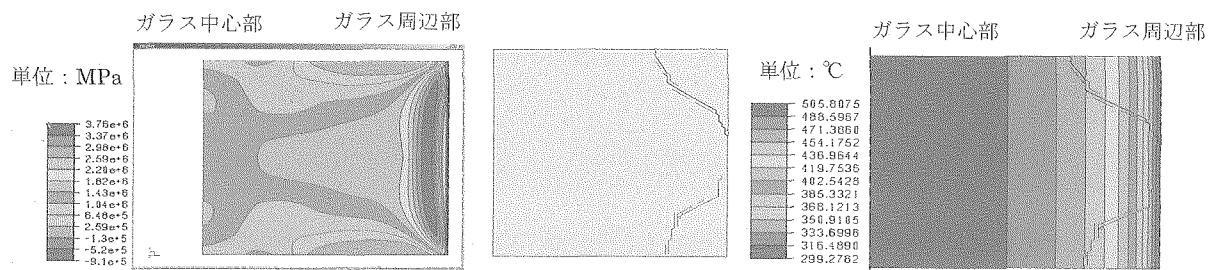
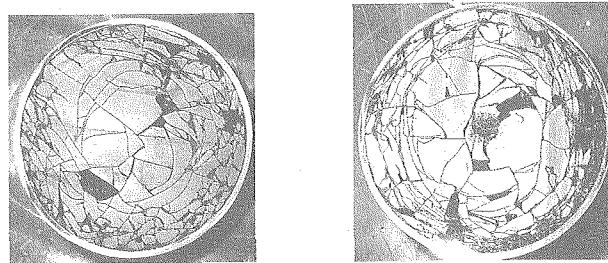


図3.2-16 ガラス冷却時の主応力分布(左)割れ目の伝播(中央)
および温度分布(右)解析例²⁾

解析によって得られたガラス内の割れ目形成パターンは外周に沿って割れ目が分布する傾向を示しており、定性的には実規模固化体における割れ目パターンの観察例（園部ほか^{10, 11)}）（図3.2-17）と整合的と考えられる。しかしながら、両者の間には、特に割れ目の頻度について顕著な差異が存在しており、その原因としては、以下のことが考えられる。

- ・本解析は軸対称二次元のものであり、実規模固化体の中心に見られる半径方向の割れ目を表現することができない

- ・ガラスの引張強度および亀裂エネルギーには温度依存性があるものと考えられるが、データが入手できないことから解析上は一定値を用いている
- ・浸出試験のために製作された実規模固化体と解析上仮定した冷却条件が異なる
今後の課題としては、解析モデルを三次元化することに加えて、解析条件と実験条件の整合性を担保することの出来るような確証試験を行うことが必要と考えられる。またこれに加えて、ガラスの力学特性（特に強度と亀裂エネルギー）に関する温度依存データも必要になると考えられる。



断面1 (下底より 306mm) 断面2 (下底より 138mm)

図 3.2-17 実規模固化体における割れ目パターンの例⁹⁾

3) オーバーパックの変形に伴うガラスの破壊についての解析

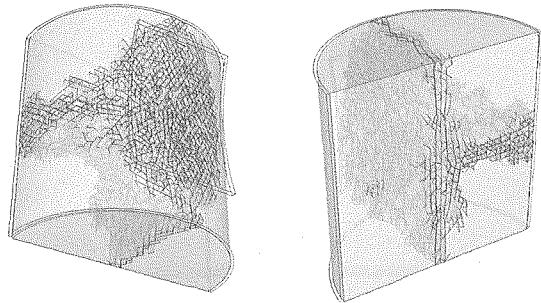
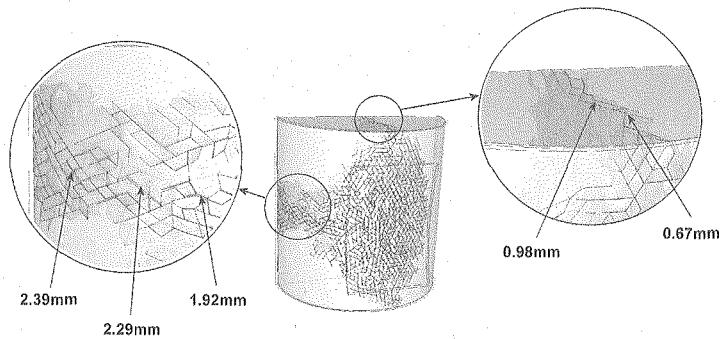
a) 解析条件

既に述べたオーバーパックの変形に関する解析から、オーバーパック側面において内側に向かって塑性変形が生じて破壊・開口が生じるという結果が得られており、このような状況では、まず、変形したオーバーパックの内壁がステンレス製キャニスターに接触してキャニスターの変形が生じ、さらにその内側にあるガラスの変形・破壊が生じるものと考えられる。そこで、本解析では、オーバーパック内壁がキャニスターと接触する部分を含む領域を解析対象とした。

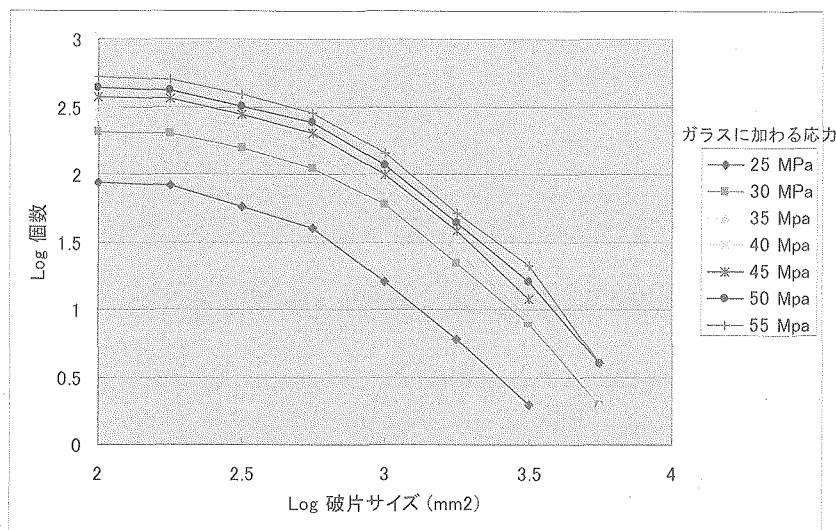
b) 解析結果

ガラスの変位は、オーバーパックがキャニスターに接触する部分の近傍に集中しており、内向きのものである。オーバーパックの接触点の直近では、ガラスには圧縮応力が作用しているが、その点から少し離れた部分の円周上に引っ張り応力が生じている。このような引っ張り応力の分布に呼応して、初期の割れ目は、接触点から少し離れた部分から放射状に生成していることがわかった。

オーバーパックの塑性変形が進み最大 60 MPa の圧縮応力がガラスに徐々に加わるにつれて、ガラス中の割れの領域が拡大すると同時に、割れの深さも進展してついには中心部にまで到達するという結果が得られた（図 3.2-18）。ガラスに働く応力が最大値である 60 MPa に達すると、固化体を鉛直に横断する大規模な割れ目ゾーンが固化体の中心部に到達し固化体を横断することとなる。また、これと直交して水平方向の大きな割れ目ゾーンが形成され、これも中心部に到達している。なお、後者と左右対称の位置にある割れ目ゾーンは、固化体の中心に到達する寸前の状態にあるものと考えられる。本解析によって推定されたガラス中の割れ目の開口幅はほとんど 0 に近いものであり、形成後速やかに閉じる傾向がある。ただし、前述した鉛直方向の割れ目ゾーンと水平方向の割れ目ゾーンにおいては、ある程度の開口幅を保った割れ目が存在しており、図 3.2-19 に示すように、これらの割れ目の中には部分的に 1 mm～2 mm 程度の開口幅を示すものも存在している。

図 3.2-18 ガラス内部の割れ目の分布（応力 60MPa；拡大図）²⁾図 3.2-19 最大応力が作用している時点でのガラス中の開口割れ目の幅²⁾

ガラスの割れによって生じる破片の大きさの累積頻度分布を整理した結果が図 3.2-20 である。1000 mm³ 程度以上の比較的大きい破片については、両対数プロットにおいて直線的な関係が成立しており自己相似的なスケール則が示されている。しかしながら、微小な破片（100 mm³～1000 mm³ 程度）については、累積頻度分布はべき乗則から顕著に乖離しており、自己相似性の成立する範囲に下限（フラクタルシル）の存在する可能性を示唆している。

図 3.2-20 ガラス破片サイズ頻度分布の応力依存性²⁾

3. 2. 3 ガラスの変質・変形に関する実証試験の可能性評価

ガラス固化体近傍での現象理解に関する課題について、化学的挙動、力学的挙動および物質移

行挙動の各観点から整理した。抽出された課題のうち、「試験研究による現象理解やデータ取得が期待されるテーマ」を、主に核種移行挙動への影響に対する潜在的重要性に基づき抽出した。なお、試験の実現可能性や試験と解析をどのように関係づけていくかについては、今後さらに検討を深める必要がある。これらを以下に示す。

【力学的挙動】

- ・ 处分場閉鎖前の熱収縮による割れ、閉鎖後の応力による割れ
- ・ 热収縮による割れが存在する場合の応力による割れの進行
- ・ ガラス破壊に関する諸特性の温度依存性
- ・ 工学規模ガラスに対して所定の歪を与えた場合の破壊挙動

【化学的挙動】

表面変質層

- ・ 表面変質層の形成過程・反応機構の解明
- ・ 表面変質層の特性（組成、間隙構造、密度など）
- ・ 表面変質層特性（Si含有率、原子配置および結晶性の程度）の時間依存性
- ・ ガラス組成による表面変質層形成への影響
- ・ 間隙水組成による表面変質層形成への影響
- ・ 人工バリア材の表面変質層形成への影響（腐食生成物、ベントナイト）

二次鉱物

- ・ 二次鉱物（ケイ酸塩鉱物）生成（種類、機構など）
- ・ 間隙水組成による二次鉱物生成への影響
- ・ 人工バリア材による二次鉱物生成への影響（腐食生成物、ベントナイト）

人工バリア材でのシリカ消費

- ・ 腐食生成物層へのシリカの取着・共沈
(不可逆性、取着速度、ガラス溶解速度への影響など)
- ・ ベントナイトへのシリカの取着（不可逆性、取着速度など）

【物質移行】

- ・ 核種の生成二次固相への固定化
(アクチニドのケイ酸塩鉱物、Cs含有鉱物、Se-S-Fe化合物)

3. 3 今後の課題

本共同研究においては、ガラスの溶解・変質挙動やオーバーパック／ガラス系の破壊挙動といった現象を取り込んだ性能評価モデルの開発、特に現象理解が進んでいない「保守性」を考慮した扱いになっている人工バリア内部で発生すると考えられる事象を主要な対象とし、より現実的な評価手法を開発することを目的とした。それぞれの現象に関する既往研究の動向と、それを踏まえた開発の方向性は以下の通りであった。

① 溶解・変質に係る解析技術の動向と開発の方向性

溶解・変質機構の考え方には、大きく分けて、Dissolution control model（例：化学親和力によるモデル）とDiffusion control model（例：保護的なゲル層による溶解・変質抑制モデル）の2つがある。これらの巨視的スケールモデルのどちらがガラス溶解・変質を適切に表現するモデルであるかは議論されているところであり、その取り扱いは各国の性能評価書において必ずしも統一

一されたものとなっていない。

それぞれの溶解モデルの課題を検討するためのツールとして、欧洲においては Monte Carlo シミュレーションや ab initio 計算など、メゾスケール／ナノスケールの解析手法が注目されつつある（例えば、ONDRAF/NIRAS¹²⁾）。これらの手法は、 μm 程度の解析体系において変質層の形成過程をシミュレートしたり、原子・分子間の結合の乖離と再結合のエネルギーを評価したりするものである。

近年の解析技術開発の方向性は、世界的にみても、メゾスケール／ナノスケールと巨視的スケールモデルの両方を開発し、それぞれの利点／欠点を補完する傾向が主流である。今後、わが国においても同様な方向での手法開発の必要性があると考えられた。

② 力学に係る解析技術の動向と開発の方向性

これまでには、ガラスの割れに伴う表面積の実効的な増倍率については、試験によって経験的に設定されてきた。しかしながら、そのときの試験条件が、実際の地層処分システムにおいて核種漏洩が開始する時点でのガラス固化体近傍の状態（オーバーパックの開口状態、オーバーパックの腐食膨張等を含めたガラスの割れなど）を忠実に模擬しているとは考えにくいという問題があった。

その意味では、解析技術の高度化により、核種漏洩が開始する時点でのガラス固化体近傍の状態をシミュレートし、実効的な表面積に基づき、より現実的な核種漏洩量を算出するというアプローチは、より現実的な評価を目指すという観点からも、ロバスト性のゆえに見込まれてこなかった隠された安全性能 (reserved FEP) を正当に評価するという観点からも、今後の解析技術開発の方向として妥当であると考えられた。

本研究においては、ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発として、ガラスの溶解・変質挙動、オーバーパック／ガラス系の破壊挙動について、事例研究として、代表的な条件下での各解析技術の基本動作が確認されたと言える。したがって、今後の課題としては、これをより広範な条件下でも解析可能とするように、その適用性を拡張することが重要になる。前節の 3.1.5 項での議論も踏まえると、今後、ガラスの溶解・変質挙動解析については、

- ・より現実的な化学環境条件 (pH, ケイ酸濃度など) およびその変遷を考慮した解析手法の高度化

が重要である。また、オーバーパック／ガラス固化体系の破壊挙動解析については、

- ・冷却時の割れを初期条件とした解析
- ・ガラス固化体全体を対象とした解析
- ・人工バリアや周辺岩盤の力学特性を変化させた感度解析

が重要と考えられる。

さらに、化学／力学的挙動に関して取得された知見を統合し、複雑な破壊形状を場として与えた場合のガラス溶解・変質、さらには物質移行・核種移行を解析するための手法を構築することも課題として挙げることができる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“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, 1999.
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成17年度 地層処分技術調査等性能評価技術高度化 報告書（第2分冊）第II編 現実的性能評価技術の開発”，2006.
- 3) Mitsui, S. and Aoki, R.: “Effect of a siliceous additive on aqueous alteration of waste glass with engineered barrier materials”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 298, pp. 184-192, 2001.
- 4) 林 真紀, 佐竹憲治, 吉川英樹, 油井三和：“ガラス溶解速度データベースの開発”，JNC公開技術資料, JNC TN8400 2005-008, 2005.
- 5) 稲垣八穂広, 三ツ井誠一郎, 牧野仁史, 石黒勝彦, 亀井玄人, 河村和廣, 前田敏克, 上野健一, 馬場恒孝, 油井三和：“高レベルガラス固化体の性能評価に関する研究－現状と信頼性向上に向けて－”，原子力バックエンド研究 Vol. 10 No. 1-2 p. 69, 2004.
- 6) Grambow, B.: “A general rate equation for nuclear waste glass corrosion”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Vol. 44, pp. 15-27, 1985.
- 7) Lobanova, M., Maurer, L., Barboux, P., Devreux, F., and Minet, Y.: “Monte Carlo Modelling of Glass Dissolution: Comparison with Experiments”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Vol. 663, pp. 237-245, 2001.
- 8) Grambow, B. and Muller, R.: “First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment”, Journal of Nuclear Materials 298, pp. 112-124, 2001.
- 9) Strassburger, A. S. and Senf, H.: “Experimental Investigations of Wave and Fracture Phenomena in Impacted Ceramics and Glasses”, ARL-CR-214, 1995.
- 10) 園部一志, 石黒勝彦, 佐々木憲明：“実規模ガラス固化体の浸出試験”，PNC TN8410 90-068, 1990.
- 11) 園部一志, 石黒勝彦, 石川博久, 佐々木憲明：“実規模ガラス固化体の浸出試験(II)”，PNC TN8410 92-114, 1992.
- 12) ONDRAF/NIRAS: “SAFIR-2. Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2”, NIROND 2001-06E, Dec. 2001.

4. 処分場スケールを対象とした解析技術の開発

4. 1 共同研究における議論の概要

4. 1. 1 実施計画の策定

2章で検討した多様なスケールの一部となる処分場スケールの評価においても、3章のガラス固化体スケールに関して述べたことと同様に、従来の評価では保守性を維持するために、パラメータ設定やモデル化のための仮定が用いられている。例えば第2次取りまとめ¹⁾では、廃棄体1体を含む人工バリアとその外側に想定する母岩および断層での核種移行を評価し、その結果に廃棄体本数を乗じることで処分場全体からの影響を保守的に評価している。しかしながら、処分場スケールでの核種移行挙動を詳細に考えると、そのスケールでの地質環境条件の空間的分布、処分場の設計に基づくパネル配置や坑道・プラグ配置、複数の廃棄体からの核種移行による相互影響等、様々な要素やプロセスが関係する。

本研究は、処分場スケールで発生する現象をより現実的に評価する解析技術を開発することにより、処分場スケールにおける核種の移行挙動、特に移行遅延あるいは移行促進等の可能性や程度を、より詳細かつ定量的に把握できるようにすることを目的とする。開発にあたっては、まず地上からの調査段階で得られる地質環境データの質・量を考慮した評価が可能な技術的レベルを目指す。

上記の検討を踏まえて設定した実施内容と役割分担を以下に示す（「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する内容を含む）。

これら実施計画にしたがって、共同研究として実施した議論や検討の内容と成果を本節の4.1.2項～4.1.4項に、「現実的性能評価技術の開発」²⁾において実施した検討の内容と成果を次節4.2に示す。

実施内容

① 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理

処分場スケールにおける核種移行を考える上で着目すべき因子（地質環境や処分場構成要素の特性、処分場レイアウトならびに関連するプロセス）等の調査・整理、およびそれらをモデル化するにあたっての安全評価とサイト特性調査の関連についての基本的な考え方や適用可能な既存性能評価技術等を調査・整理する。

② 処分場スケールを対象とした評価のためのマルチスケールモデルの適用性の検討

上記目的を達成するためのモデルの候補の1つとして、マルチスケールモデルを検討する。マルチスケールモデルは、物質移行解析コード（VRコード¹⁾等）によるコンパートメント中の核種の移行確率および滞留時間を導出する解析階層Iと、この移行確率と滞留時間を入力情報としてマルコフ連鎖により計算領域での核種移行を評価する解析階層IIとからなる解析手法である³⁾。本年度は、物質移行に関する移行確率の理論開発を行い、3次元化に向けた解析手法の検討を開始する。また本開発手法の適用性や適用限界等を示す。

③ 処分場スケールを対象とした評価技術開発のための計画立案

上記①、②の検討結果および既存の評価技術等の分析を行い、これまでに開発された処分場スケールでの核種移行を評価し得るモデルや解析ツールに関する適用性あるいは適用限界等を考慮

¹ Virtual Repository コードのことであり、コンパートメントモデルを利用した複数廃棄体から構成される体系に適用可能な物質移行解析コードである。

しながら、今後のモデル開発を体系的に進めていくための計画を策定する。

役割分担

本研究の実施にあたっての主な役割分担は、以下の通りである。

研究項目	原子力機構	原環センター
① 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理	○ (方針提案)	○ (調査・整理) *
② 処分場スケールを対象とした評価のためのマルチスケールモデルの適用性の検討	○ (方針提案, 移行確率**)	○ (3次元化, 移行確率**)
③ 処分場スケールを対象とした評価技術開発のための計画立案	○	○

* : 主に「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施した。

** : 原子力機構での移行確率に関する検討は未終了のため、本年度の共同研究では反映できなかった。一方、原環センターでは、追加的に移行確率の検討を実施した。

4. 1. 2 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理

2章で示した調査と同様に、日本を含めた諸外国（スウェーデン、フィンランド、米国、スイス）の最近の安全評価報告書を対象に、処分場スケールの評価に関わる情報を調査し、そこで着目されている現象や評価技術を整理することとした。このとき、特にどのような処分場要素がモデル化の対象とされているか、どのようなプロセスが対象とされているか、どのような解析手法が用いられているかに着目するとともに、具体的な解析がどこまで可能になっているか、何が課題となっているか等についても整理を試みることとした（これは、4.1.1 項で示した研究項目③に含まれる既存の評価技術等の分析を先行的に実施することに該当する）。この方向性は、「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する調査に反映した（4.2.1 項参照）。

また、それらをモデル化するにあたっての安全評価とサイト特性調査の関連に関する基本的な考え方として、例えばマトリクス拡散深さや有効間隙率等の核種移行パラメータや亀裂パラメータ等について、サイトによる事例調査を参考にしながら性能評価でのデータ設定に反映する考え方には、上記の調査において検討事例が見られた。しかしながら、地下研究施設等で実施されたサイトでの試験データからパラメータ値を評価するには、データそのものの不確実性やデータを解釈する際に用いるモデルの自由度に起因した不確実性があるとの技術的な観点から⁴⁾、これまでの知見や経験に基づき、以下のような点を原子力機構から指摘した。

- サイト調査での水理試験、物理探査によって把握できる水理地質構造とトレーサ試験でトレーサの移行経路となる間隙構造との違い。
- トレーサ試験で対象とする比較的狭い空間スケールから性能評価で対象とする広い空間スケールへの外挿手法。
- マトリクス拡散の取り扱い：トレーサ試験での速い流速と短い時間スケールおよび性能評価で対象とする緩慢な流速と長期の時間スケールとの違いにより、移行遅延に寄与するマトリクス拡散が、前者では地下水路と亀裂周辺の破碎部分を対象としたものに限られるのに対し、後者では亀裂充填物を介したものやさらに変質部や健岩部に達するものが含まれることが考えられないので、前者に基づき設定したマトリクス拡散寄与面積やマトリクス拡散深さを後者にそのまま適用しようとする場合には不整合が生じる可能性がある。

また、性能評価において導入される考え方や簡略化に関しても、サイト調査と性能評価との整合をとるために留意すべき点として以下を指摘した。今後、下記のような亀裂やマトリクス拡散

に関わるパラメータの同定や適用にあたっては、サイト調査の進展に応じて不確実性や保守性を適切な方法で定量的に評価していく必要がある。

- ・大規模亀裂は決定論的に、小規模な亀裂は統計論的に扱うことが実際的であるが⁵⁾、亀裂の規模や対象とするスケールに応じ、両者をどのように区分するかについては判断根拠や考え方方が地質環境条件や性能評価のアプローチによって異なる。
- ・マトリクス拡散に寄与する間隙構造の簡略化やチャンネルネットワークモデル⁶⁾による取扱いにおいてどのように評価の保守性を裏付けるかが課題であり、原位置での樹脂注入試験によるマトリクス拡散に寄与する間隙構造の把握⁷⁾やナチュラルアナログ^{8),9)}、古水理地質学的情報¹⁰⁾に基づく性能評価の時間スケールでのマトリクス拡散寄与面積やマトリクス拡散深さに関する裏づけの知見を得る必要がある。

4. 1. 3 処分場スケールを対象とした評価のためのマルチスケールモデルの適用性の検討

本研究項目については、まず、これまでに「現実的性能評価技術の開発」の中で実施してきた内容の詳細を共有した。このとき、標記開発の中で検討を進めてきたマルチスケールモデルの特徴と、研究項目①の調査結果（4.1.2 項および 4.2.1 項参照）として整理された利用可能なモデル化のアプローチの特徴とを比較しつつ、マルチスケールモデルの利点とともにその利点が活かされる適用範囲等を明確にすることの必要性が指摘され、その対応を図ることとした。

また、マルチスケールモデルの説明に用いられる用語や表現にわかりにくさや曖昧さがあることが指摘され、より理解しやすい用語や表現となるように見直しを図った。特に、詳細な計算と比較的簡単な計算を適切に組み合わせて大規模な領域での解析の効率的な実施を可能とするマルチスケールの概念を、「コンパートメント（廃棄体）領域レベルと処分場領域レベルの 2 つに分けて計算を行う」と表現していたことにより、スケールの大小が過度に強調される形になっており、概念の理解を阻害していた。そこで、共同研究の場で意味の確認と誤解のない表現の検討を行った（付録 5 参照）。このような見直しを踏まえ、「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する調査や個別技術の開発の結果を説明する文章および概念図等を大幅に修正し、分かりやすさの向上を図った（4.2.2 項参照）。なお、この見直しにより、本報告書の用語の一部については、平成 17 年度までに実施された「現実的性能評価技術の開発」の用語とは異なることを注意しておく。

上記マルチスケールモデルの利点と適用範囲に関する検討を適切に進めるとともに、国際的にも検討事例が少ない処分場スケールを対象にした評価に関する有望な解析技術の 1 つであることおよび利用可能な解析技術のバリエーションを広げておくことも重要との観点から、マルチスケールモデルを対象に、これまでの「現実的性能評価技術の開発」で挙げられていた 3 次元化に向けた技術の高度化を中心とした検討の方向性を、基本的に踏襲することとした。

このように設定された方向性は、「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施される調査や個別技術の開発に反映した（4.2.2 項参照）。

4. 1. 4 処分場スケールを対象とした評価技術開発のための計画立案

本項目に関しては、上記 4.1.2 項、4.1.3 項で示した研究項目①、②それぞれの検討の方向性、および 4.2 節で示す「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施した検討結果を踏まえ、共同研究の場において再度整理し、確認と評価を行った。その結果、基本的には各研究項目で示される開発事項や課題を着実に実施・解決していくことが適切であると、現時点では判断された。その際、特に以下の点に留意することの重要性が強調された。

- ・マルチスケールモデルについては、3 次元化のための技術開発を実施するとともに、さらに解析で考慮できるプロセスを既存の解析技術と同等なレベルとする必要性が示された。

マルチスケールモデルの実用性と有効性および今後数年程度で実用的なレベルでの評価技術になり得るかを判断することが必要であり、鍵となる課題の明確化と優先的な取り組みにより、その判断に資する具体的な成果（解析例等）を早期に提示することが重要。

- ・処分場スケールを対象に、複数の評価技術や評価手法を客観的に比較できるように、適切な共通問題を設定し、解析した結果等の定量的な情報を整備する（ユーザが技術や手法を選択する際に参考になる共通点や相違点に関する知見の整備）。
- ・併せて、処分場スケールで着目すべき現象が処分場性能に与える影響の把握に加えて、処分場概念のオプションの比較を行うための評価技術の適用方法や開発課題等を整理する。

4. 2 調査や個別技術の開発の概要

以下に、4.1 節に示した共同研究での議論を反映した調査や個別技術の開発²⁾の結果の概要を示す。

4. 2. 1 着目すべき現象や評価技術に関する調査と整理

(1) 着目すべき要素とプロセス

処分場スケールでの核種移行に関するモデル化のためには、まず着目すべき処分場要素やそこで生じるプロセス等を整理し、次に本スケールの評価において求められる精度や不確実性に応じた保守的簡略化に留意しながら、どの要素とプロセスをどのようにモデルに取り込むかという目的と意味を明確にしつつ、概念を構築していく必要がある。ここではまず前者に関連して、処分場スケールでの核種移行を評価する上での着目すべき要素やプロセスに関する整理を行い、さらに次項(2)では、日本を含めた諸外国の性能評価報告書において、本スケールを対象としたモデル解析が、実際にどのような手法を用いて行われているか、またどのような技術的課題が挙げられているかについて調査した。

処分場スケールにおける核種移行を考える上では、廃棄体、緩衝材やその周辺の岩盤といった領域および断層を伴うその外側の比較的広い岩盤領域の他に、プラグや埋め戻しといった構成要素についてもモデル化の対象となり、解析モデルに取り込むプロセスとしては物質移行および地下水の流れ、地下水の化学的条件を考慮する必要がある。これらの要素やそこに含まれるプロセスを以下にまとめる。

①モデル化対象の要素

- ・廃棄体、緩衝材および周辺岩盤（多孔質媒体、亀裂性媒体）
- ・埋め戻し、プラグ、掘削影響領域（EDZ）等および処分施設（処分坑道、連絡坑道等）
- ・断層を伴う周辺岩盤外側の（比較的広い領域での）地質媒体等

②プロセス

- ・物質移行：核種の移流・分散、吸着、放射性崩壊、マトリクス拡散、溶解度制限による濃度干渉効果等
- ・地下水の流れ：ダルシー流速、移行経路、移行時間
- ・地下水の化学的条件：ニアフィールドにおける地下水の化学的変遷等

処分場スケールの物質移行評価モデルを開発するにあたっては、これらの要素やプロセスを取り込めるようなモデルを構築することが必要である。また評価体系としては、核種移行に関する単一かつ卓越した移行経路が想定されるようなケースについては、それらを抽出して簡易的な3次元体系でのモデルを構築していくことも可能と考えられるが、さらに処分場の複雑

な構成やレイアウト、地質環境の空間的な不均一性、核種の移行経路の離合および移行経路間での相互影響等を取り込み、それによってより多くの要素やプロセスを考慮した現実的な核種移行評価を行うためには、処分場および周辺の地質環境に対し、詳細な3次元的な体系を想定したモデルを構築していくことが望ましいと考えられる。

(2) 評価技術に関する調査と整理

処分場スケールを対象とした核種移行解析が、どのようなコードや体系を用いて行われ、またそれに対しどのような開発課題が挙げられているかを整理するために、日本を含めた諸外国の性能評価報告書に関する調査を行った。なお本調査は、第2章の多様なスケールを対象とした核種移行解析技術に関する調査をもとに、処分場スケールに該当する整理の結果を取りまとめたものである。スウェーデン(SR-97およびSR-Can)¹¹⁾⁻¹⁹⁾、フィンランド(TILA-99)²⁰⁾⁻²³⁾、米国(TSPA-LA)²⁴⁾⁻³¹⁾、スイス(Project Opalinus Clay)³²⁾⁻³⁴⁾、日本(第2次取りまとめおよび平成17年取りまとめ)^{1), 4)}の5ヶ国、7報告書を調査対象とした。なお処分場スケールの評価は処分場周辺岩盤を対象にした水理や物質移行の扱いを含んでいるため、同様に水理や物質移行の評価を行うフェールドの解析事例もここでは含めた。

処分場スケールの核種移行解析モデルに関する調査結果については付録に示す(付録4:表4-1)。また、それらの性能評価報告書で挙げられている残された課題を解決するための対応策および本調査での整理のもとに本検討の中で考察・判断した対応策を併せて付録に示す(付録4:表4-2)。その結果、処分場サイトが決まっている米国を除いては、核種移行モデルの概念や解法手法等に関連したバリエーションは認められるものの、基本的には1次元の移行モデルを用いていることが確認された。これはサイトが決まっていない諸外国では、現時点では保守性を考慮した性能評価を実施しており、処分場レイアウトの最適化や合理化といった観点からより多くのプロセスを考慮することや3次元的な詳細な評価を実施するには至っていないことが要因として挙げられる。そのため、本スケールの評価において求められる解析の精度や不確実性に応じたモデルの簡略化と、解析の実質的な計算負荷とを勘案して、これら1次元体系による核種移行解析が、現状の評価体系としては妥当であるとの共通認識があると推測される。なお、これら諸外国における核種移行解析技術に関する傾向と、(1)項で実施した着目すべき要素やプロセスおよび評価体系の検討結果を踏まえ、今後、より多くのプロセスを考慮した現実的な核種移行評価のための技術開発の方向性の1つとして、処分場および近傍の地質環境の3次元化が重要な開発課題であると判断した(付録4:表4-2)。

米国(TSPA-LA)では、処分場スケールを対象とした3次元物質移行解析が行われており、そこでのモンテカルロ法による物質移行解析に関する調査結果を表4.2-1にまとめる。なおわが国では、サイト選定は文献調査、地表からの調査、地下施設を用いた調査と段階的に進められていくため、このようなサイト調査の進捗状況を十分に考慮しながら、3次元化に関する開発を進めることが重要と考える。

表4.2-1 米国における処分場スケールの物質移行解析の調査結果

国	領域	解析手法	備考
米国	不飽和領域	パーティクルトラッキングによる3次元物質移行	ソースにEBSからの核種放出データを使用して物質移行を解析
	飽和領域	パーティクルトラッキングによる3次元物質移行	単位ステップ入力により物質移行を解析し、畳み込み積分法を適用して生物圏への放出率を計算

米国の処分場スケールの物質移行解析には、飽和領域での解析に畳み込み積分法が導入されている。この方法に関する使用上の制限事項として、物質移行プロセスがソースタームに関して線形である場合のみ適用可能なことが挙げられる。したがって、地質環境の不均一性や濃度干渉等の相互影響に起因する非線形現象を考慮する必要がある場合は、この方法では現象を正しく反映できない可能性がある。処分場レイアウトの効果や最適化の評価に資することが可能なモデルとするためには、処分場スケールで考慮すべきより多くのプロセスを取り込み、それらの影響を精度良く評価するとともに、計算負荷の問題も少ない3次元の物質移行解析手法の開発が望まれるものと考える。

処分場スケールにおける3次元物質移行解析の主な目的は、(1)項で抽出したような着目すべき要素やプロセスを取り込むとともに、1次元のモデルでは表現できない処分場の地質環境の不均一性や廃棄体間の相互影響および処分場レイアウトの相違による移行挙動への影響を評価することにより、レイアウトの最適化や合理化に資することにある。そのためには、これらの不均一性やレイアウトの効果を評価できるようなサイズに関する知見を十分に把握し、解析モデルの大きさの設定に反映していく必要がある。したがって解析ツールの性能としては、処分場要素（例えば、プラグ、埋め戻し等）の配置や処分場レイアウトをモデルにおいて容易に変更できる機能、地質環境の不均一性を取り込むことができる機能等を有し、それらの処分場性能への影響を評価・比較できることが求められる。また、実用的なツールとするためには、信頼性を有する解析結果が得られるとともに、解析が現実的な時間内で比較的迅速かつ簡易に実施可能であることが望まれるため、処分場要素、処分場レイアウト、地質環境の不均一性のサイズを、処分場性能に与える影響を適切に捉えられる範囲でなるべく大きく設定できること等が必要になると考えられる。

4. 2. 2 処分場スケールを対象とした評価のためのマルチスケールモデルの適用性の検討

(1) マルチスケールモデルの高度化に関する開発理由

4.2.1 項での調査・整理より、非線形現象や処分場レイアウトの効果等を考慮した物質移行の解析が可能であり、かつ計算負荷の少ない3次元物質移行解析手法の開発意義が示されたが、処分場スケールを対象とした評価手法開発の技術的課題に対する解決策の1つとして、米国(University of California, Berkeley)ではマルチスケールモデルを適用した検討が進められている^[3]。マルチスケールモデルは、原子炉設計の分野で実績のある計算手法である。モデル体系を複数のブロックに分割し、各ブロックでの解析を組み合わせることにより全体を表現する手法であり、大規模な3次元解析に際しても、比較的少ない計算負荷で解析できるという特徴がある。そのため比較的柔軟に様々な移行挙動を表現することが可能であるため、処分場スケールの評価手法の候補の1つとして適用可能と思われる。

マルチスケールモデルに基づく解析は、以下のような特徴を潜在的に有する可能性がある。

- ① 少ない計算負荷、それにより迅速かつ簡便に解析が可能
- ② 複数廃棄体（例えば4万体）から構成される処分場スケールの3次元物質移行計算が可能
- ③ プラグ、EDZ等の処分場構成要素を考慮した物質移行解析が可能
- ④ 断層を含む比較的広い領域での地質媒体を対象とした物質移行解析が可能
- ⑤ 処分場レイアウトの影響や非線形現象の評価が可能
- ⑥ 処分場を想定した体系のコンパートメントへの分割方法、移行確率の計算モデルおよびパラメータ等の解析条件を適切に設定した場合、信頼性の高い解析が可能

したがって本検討では、利用可能な解析技術のバリエーションを広げることも重要との観点から、マルチスケールモデルの3次元化に向けた高度化を開発方針として妥当なものと判断し、技術開発を継続して実施していくこととした。

(2) マルチスケールモデルの構成

マルチスケールモデルによる計算とは、(1)項で記述したように、1つのコンパートメントにおける物質移動の移行確率を適切に求めた上で、複数のコンパートメント間の物質移動の関係を解くことで、大規模な系での計算を実施するものである。本開発では、表4.2-2に示すように、評価の対象を2つの解析階層に分けて物質移行計算を行う構成を検討する。解析階層Iでは既存の物質移行計算コードを利用して、移行確率および滞留時間を求める。また解析階層IIでは、解析階層Iの計算より求められた移行確率等のパラメータを入力として利用し、処分場マルコフコードにより物質移行計算を行う。以下、(3)項には開発の最終達成目標である詳細な3次元でのマルチスケールモデルについて、また(4)項には開発の中間段階として簡易的なモデルとして扱った簡易3次元でのマルチスケールモデルについて、それぞれの概念を上記の構成に基づき、記述する。

なお本共同研究における検討や議論を通して、本開発の内容をより理解しやすい表現とするために、一部の技術的な用語に関しては見直しを行い、平成17年度までの「現実的性能評価技術の開発」および本共同研究の実施計画策定時の用語から変更することとした。それらの用語については付録に示す（付録5）。

表4.2-2 マルチスケールモデルの構成

	解析階層I	解析階層II
計算対象	廃棄体（1体または複数）および周辺岩盤	複数廃棄体から構成される領域 (数体～4万体)
入力	廃棄体および周辺岩盤の特性(物性、形状)	核種の移行確率・滞留時間
数学モデル	移流・分散	マルコフ連鎖
出力	移行確率・滞留時間	計算領域外への核種放出率
計算コード	物質移行解析コード (例：VRコード、移流・分散解析コード)	処分場マルコフコード

(3) 3次元でのマルチスケールモデルの概念

1) モデルの体系

3次元でのマルチスケールモデルでは、3次元的に設定したコンパートメント全てを対象として核種移行解析を実施する。このモデルは、個々のコンパートメント中での核種の濃度や、設定

した計算領域外への核種放出率を求めることが可能であり、最終的な開発目標としているモデルである。なお、本3次元のマルチスケールモデルの具体的な開発検討は、次年度以降に実施する予定である。マルチスケールモデルの解析では、水理場に関するデータ（計算領域での地下水の流れ方向および流速の分布）を解析階層Iでの入力データとして利用するため、事前に既存の地下水解析コードによって水理場のデータを求めておく必要がある。地下水の流れも含めた3次元でのモデルのイメージを図4.2-1に示す。想定している解析の全領域（全てのコンパートメント）について水理条件を把握し、それに基づき各コンパートメントに対応する水理場のデータを設定する。

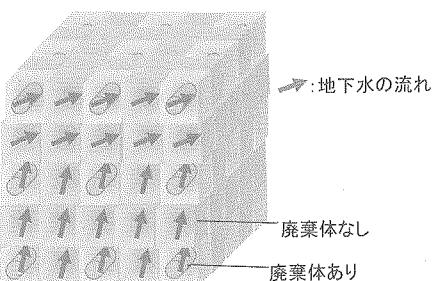


図4.2-1 地下水の流れと3次元でのマルチスケールモデルのイメージ

2) 解析階層Iの解析

3次元でのマルチスケールモデルにおける解析階層Iでは、コンパートメントとして設定した廃棄体およびその周辺岩盤領域での物質移行計算を、既存の物質移行解析コードを用いて実施する。図4.2-2に3次元でのマルチスケールモデルの解析階層Iの概念を示す。

6面体のコンパートメントを設定した場合には、廃棄体を含むコンパートメントについては、計6方向（3次元的方向）の移行確率（隣接するコンパートメントへの核種放出率）を、既存のVRコードや移流・分散コードといった解析コードを用いて算出する。この移行確率には、上述の3次元の地下水流动場における流れの方向・流量の情報の他に、ガラス固化体からの核種放出（放出モデルおよび放出量）、緩衝材中の物質移行（溶解度制限、拡散、吸着等）、周辺岩盤中の物質移行（核種の移流・分散、吸着、掘削影響領域中の物質移行）が反映される。

また廃棄体がないコンパートメントについては、周辺岩盤中を核種が地下水により移行するときの、コンパートメント中に核種が存在する滞留時間を求める。この滞留時間も移行確率と同様に、3次元の地下水流动場における地下水の流れの方向・流量、周辺岩盤中の物質移行が反映される。また滞留時間としては、プラグ、埋め戻しといった処分場構成要素や処分施設中の物質移行（坑道、連絡坑道中の物質移行）についても、コンパートメントとして取り扱う手法を検討する。

なお、現実の複雑な処分場環境（廃棄体特性、人工バリア特性、地質環境の不均一性）をそのままモデル化すると、解析階層Iで移行確率および滞留時間を求めるためのコンパートメントの数が莫大となり、解析の負荷が低減できるという本手法の最大の特徴を損なう恐れがある。そこで、例えば現実の複雑な処分場環境を分類して、コンパートメントを少数の代表例に類型化し、これら代表例のコンパートメントについて解析階層Iでの物質移行解析を行うという手順をとることが効率的と考えられる。

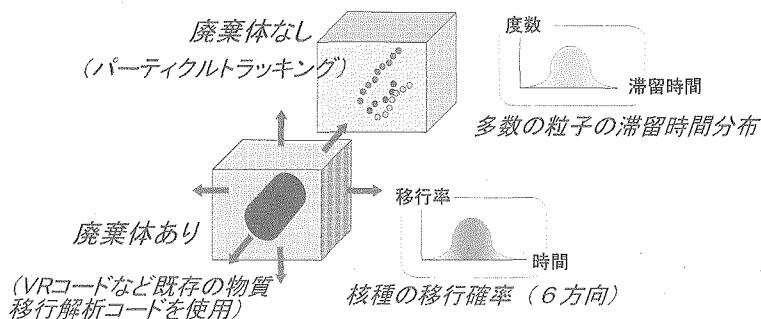


図4.2-2 解析階層Iの解析（3次元でのマルチスケールモデル）

3) 解析階層IIの解析

解析階層IIでは、解析階層Iで求められた各コンパートメントの移行確率および滞留時間を利用して、処分場マルコフコードによって処分場全体の物質移行計算を実施する。概念を図4.2-3に示す。

なお3次元でのマルチスケールモデルでは、全てのコンパートメントを対象とし、解析階層Iで求められる移行確率および滞留時間に基づき、比較的単純な規則にしたがった演算処理により、核種移行を評価することを特徴とする。また、解析階層Iでは考慮されていなかったプロセスとして、核種の放射性崩壊や濃度干渉効果については、解析全体での効率性等も勘案し、最終的にはこの解析階層IIにおいて考慮することを、本技術開発の中で進めるものとする。

3次元でのマルチスケールモデルを核種移行解析に適用した場合に想定される解析全体の流れを付録にまとめる（付録6：図6-1）。

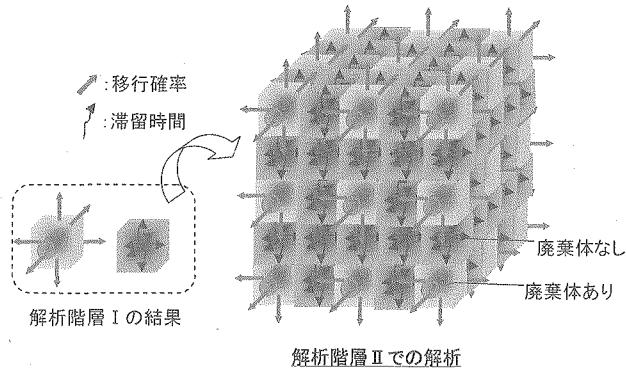


図4.2-3 解析階層IIの解析（3次元でのマルチスケールモデル）

(4) 簡易3次元でのマルチスケールモデルの概念

1) モデルの体系

(3)項で記述した3次元でのマルチスケールモデル（以下、本項のモデルと区別するためにフル3次元でのマルチスケールモデルとする）の開発に着手する前に、マルチスケールモデルの有用性や実用性を事前に確認することを目的として、開発の中間段階としてモデルを簡便に取り扱った簡易3次元でのマルチスケールモデルの検討を実施する。ただし、簡易3次元でのマルチスケールモデルは、離合を伴わない独立した地下水流路のみが想定できるという、限定された条件においてしか適用できないことに留意する必要がある。また廃棄体間の相互影響（濃度干渉効果）は考慮しない。

簡易3次元でのマルチスケールモデルの解析では、対象とする計算領域での物質移行を、地下水流路に沿った物質移行の重ね合わせにより近似可能という前提のもとで解析を行う。単一の地

下水流路に沿って配置される複数の廃棄体や周辺岩盤を含むコンパートメントを、コンパートメント列として直列に再配列し、複数の廃棄体からの核種の移行を重ね合わせて解析する手法をとる。したがって模擬的にコンパートメントを1次元体系に置き換えて解析を実施するため、計算負荷の低減が期待される。

簡易3次元のモデルでもフル3次元のモデルと同様に、水理場に関するデータを解析階層Iでの入力データとして利用するため、事前に既存の地下水解析コードにより求める必要がある。地下水流れを含む簡易3次元でのモデルのイメージを図4.2-4に示す。フル3次元でのモデルと異なり、想定している全領域について詳細な水理条件となるデータを把握する必要はなく、抽出した流路に沿った各コンパートメントに対してのみ、水理場のデータを入力することになる。

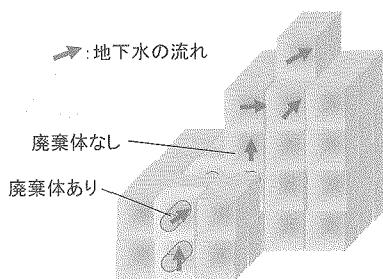


図4.2-4 地下水の流れと簡易3次元でのマルチスケールモデルのイメージ

2) 解析階層Iの解析

簡易3次元でのマルチスケールモデルにおいても、フル3次元の場合と同様に、解析階層Iにおいて、コンパートメントとして設定した廃棄体およびその周辺岩盤での物質移行計算を、既存の物質移行解析コードを用いて実施する。図4.2-5に簡易3次元でのマルチスケールモデルの解析階層Iの概念を示す。

廃棄体を含むコンパートメントについては、計2方向（1次元的方）の移行確率を既存のVRコードや移流・分散コードを用いて算出する。なお3次元化されたVRコード等を用いた場合には、3次元的な方向性を有する移行確率を求めることができるが、簡易3次元のモデルでは多孔質媒体かつ均一な地下水流れを仮定し、その均一な地下水流れの方向以外への移行確率は小さいと考え、移行確率としては地下水流路に沿った方向のみを考慮する。また廃棄体がないコンパートメントについては、コンパートメント中に核種が存在する滞留時間を、フル3次元でのモデルと同様に求める。

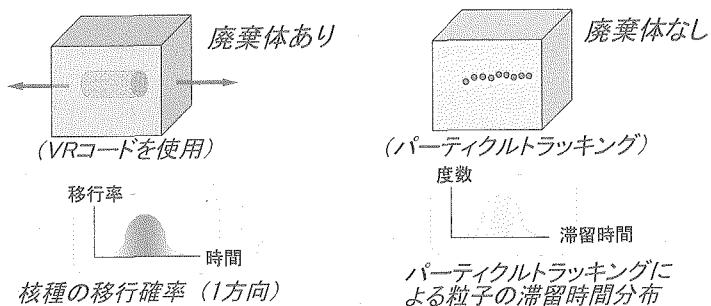


図4.2-5 解析階層Iの解析（簡易3次元でのマルチスケールモデル）

3) 解析階層IIの解析

解析階層IIでは解析階層Iで求められた各コンパートメントの移行確率および滞留時間を利用して、マルコフ連鎖と加成則による重ね合わせとにより、直列に再配列したコンパートメント列

での物質移行計算を実施する。解析階層Ⅱの概念を図4.2-6に示す。なお、簡易3次元モデルでの解析階層Ⅱの具体的な解析手順は以下の通りである（図4.2-7）。

- ① 複数の廃棄体を含む1列のコンパートメント列を、廃棄体1体のみを含むコンパートメント数の異なる列（以下、細分化列と呼ぶ）に分解する。細分化列とは、最上流に廃棄体が存在するコンパートメント1個が配置され、それ以外は廃棄体が存在しないコンパートメントとして取り扱われる。また、この細分化列でのコンパートメントの特性は、もとのコンパートメント列でのそれと同じとする。各細分化列に対する物質移行を入力データに移行確率と滞留時間を用いたマルコフ連鎖により一括して計算し、最下流のコンパートメントからの核種放出率および周辺岩盤の濃度等を求める。
- ② 次に複数の廃棄体を含む1列のコンパートメント列の周辺岩盤の濃度および核種放出率等を求める。この過程では複数の廃棄体を含む1列のコンパートメント列からの移行率は、単純な加成則を適用して、各細分化列の解析結果（周辺岩盤の濃度および核種放出率等）の和をとることにより求めること（第1の重ね合わせ）。この取扱いのため、簡易3次元モデルでは各廃棄体間の相互影響（濃度干渉）を考慮することはできない。
- ③ 簡易3次元でのモデルでは、複数の独立した地下水路を考える場合など、計算領域を1列のコンパートメント列から拡張する場合は、複数のコンパートメント列を設定することによって対処する。複数のコンパートメント列からの移行率は、単純な加成則を適用して、各コンパートメント列の移行率の和をとることにより求められる（第2の重ね合わせ）。この取扱いのため、簡易3次元モデルではコンパートメント列間の相互影響（濃度干渉）は考慮できない。

ここで解析階層Ⅱでのマルコフ連鎖は、フル3次元でのモデルで言及したように、本来は上記の①～③の過程を一括して取り扱うことができる特徴としている。ただし、簡易3次元のモデルでは、各廃棄体間やコンパートメント列間での相互影響を考慮せずに、②や③の過程については、単純な加成則による重ね合わせで簡便に表現している。そのため図4.2-7では、特に②や③の過程は、本来のマルコフ連鎖としての機能とは別の扱いであることを明示するために、第1および第2の重ね合わせを別途のプロセスとして区分して示した。なお図4.2-7では、個々のコンパートメント列について、便宜上全てのコンパートメントに廃棄体が含まれるものとして図示したが、図4.2-6のように廃棄体を有さないコンパートメントが含まれていても取り扱うことは可能である。

本簡易3次元でのマルチスケールモデルを核種移行解析に適用した際に想定される解析全体の流れを付録にまとめる（付録6：図6-2）。

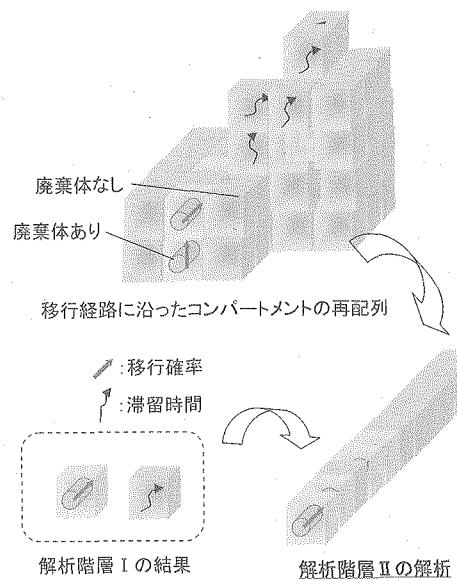


図 4.2-6 解析階層Ⅱの解析（簡易 3 次元でのマルチスケールモデル）

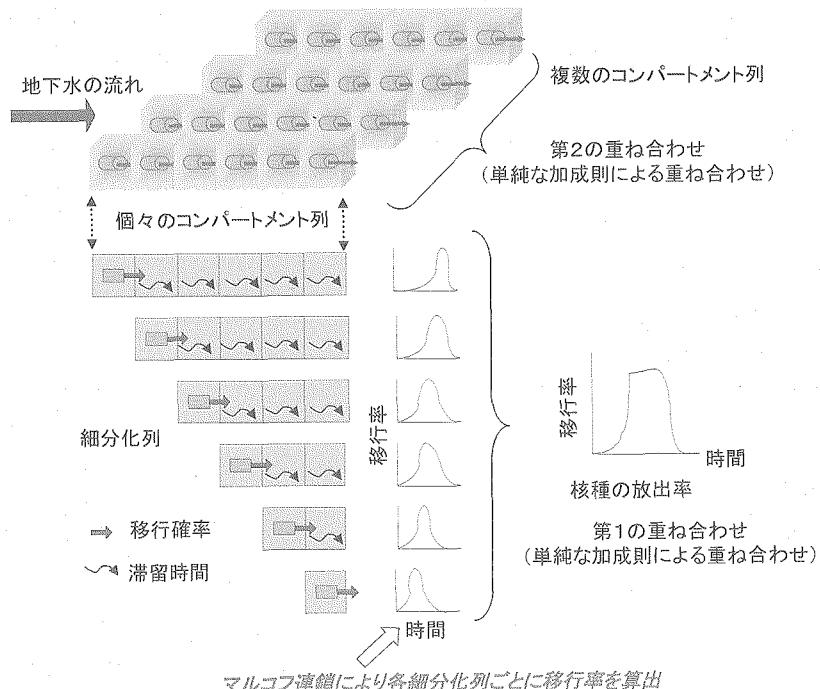


図 4.2-7 解析階層Ⅱにおける重ね合わせのイメージ

(5) 本年度の開発概要

1) 目的

解析階層Ⅰにおいて移行確率および滞留時間を求める際の信頼性は、解析階層Ⅰの物質移行計算において用いる解析モデルに依存する。そこで本年度は、信頼性を有する核種の移行確率を求めるための解析階層Ⅰの物質移行計算の解析コードの開発を実施することとした。

信頼性の高い移行確率を求める方法として、廃棄体および周辺岩盤の物質移行を、3次元移流・分散コードにより解析することが挙げられる。しかし、この3次元移流・分散解析コードは計算

負荷が高いため、解析階層Ⅰにおいて柔軟かつ迅速に3次元的な移行確率を求めるのは実質的に困難であることが予想された。そこで平成16年度までに実施してきた「現実的性能評価技術の開発」^{35), 36)}では、比較的計算負荷が低いという特徴を有するVRコードを物質移行解析コードの候補として着目し、廃棄体100体程度からなる条件での物質移行解析を試行した。その結果、VRコードにより複数廃棄体を考慮した現実的な物質移行評価を行える可能性があることを示し、最大で4万体程度の廃棄体を想定する解析階層Ⅱでの処分場マルコフコードの入力に供する、解析階層Ⅰでの移行確率および滞留時間を求める解析コードとして有用であると判断された。

以上のことから、本年度の開発内容を、VRコードを複数の廃棄体が3次元に配置された体系に機能拡張することにより、解析階層Ⅰでの3次元的な移行確率を求める解析コードとして適用できるようにすることとした。後述の2)項では、VRコードの3次元化に関する具体的な開発内容を記述する。また3)項では、廃棄体が3体配置されている3次元の体系に対し、開発した3次元化VRコードを用いた試解析結果について述べる。

2) VRコードの3次元化

VRコードの3次元化にあたっては、1次元(2方向)の物質移行しか扱うことができなかつた既存のVRコードに対し、図4.2-8に示すように3次元(6方向)の物質移行を表現できるようにすることにより、体系中での任意の方向の地下水経路に沿った物質移行を扱うことを可能とした。特徴は以下の通りである。

- ① コンパートメントは直方体ブロックとしてモデル化した。また、周辺岩盤については多孔質媒体を仮定した。
- ② コンパートメント内でのガラス固化体と緩衝材での物質移行については、円筒モデルの半径方向への拡散を等価に考慮した平板モデルとして扱い、緩衝材中の核種は直方体のある辺方向に拡散(1次元)により移行するようにモデル化した。
- ③ コンパートメント内での周辺岩盤での物質移行については、緩衝材から周辺岩盤に放出された核種は瞬時混合し、周辺岩盤中の核種濃度は一定となるようにモデル化した。このときの計算方法としては、既存のVRコードと同じ混合タンクモデルを用い、移流・分散方程式に基づく詳細な計算方法は採用しなかった。
- ④ コンパートメント間では移流による物質移行のみを考慮し、流速ベクトルのX,Y,Z軸の各成分の大きさにしたがってコンパートメント間での核種の移行量を算出するようにモデル化した。これにより、3次元(6方向)での物質移行を考慮可能となる。このときの計算方法としては、周辺岩盤中の核種濃度と地下水流速(移流)との積としてコンパートメント間での核種の移行量を求めており、移流・分散方程式に基づく物質移行に比べて簡便な取扱いとしている。
- ⑤ また、3次元VRコードによる解析では、周辺岩盤での核種濃度と緩衝材中の移行を連成させること、および複数のコンパートメントを3次元的に連結させることにより、上流側の廃棄体から放出された核種の移行により下流側の周辺岩盤の核種濃度が増加して、緩衝材中の濃度勾配が低減する濃度干渉効果を評価することができるものとした。

なお、⑤の濃度干渉効果については、(3)3)項で言及したように、最終的には解析階層Ⅱにおける理論開発で考慮することを念頭におくが、上記のようにVRコードにおいても近似的に考慮することも可能である。そこで、まずはVRコードにより予備的な検討を行い、濃度干渉効果の影響を事前に把握することも有用であると考え、解析階層Ⅰで求める移行確率に濃度干渉効果を考慮する機能も、本開発の中間段階においては検討の範囲に入れるものとする。

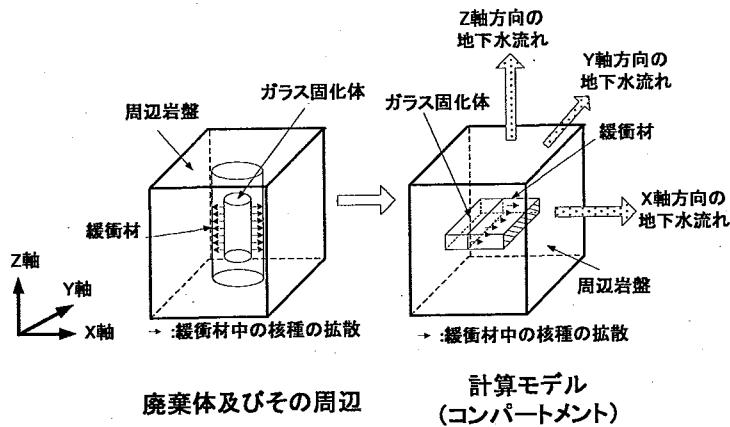


図4.2-8 VRコードの3次元化に関する開発

3) 3次元化したVRコードと移流・分散コードとの比較

ここでは廃棄体3体から構成される3次元のモデル体系について、移流・分散コードおよび3次元化したVRコードを利用して物質移行計算を実施し、様々な条件下での両コードの解析結果を比較した。基本的な物質移行に関する特性（分配係数等）はNpで代表し、放射性崩壊は考慮しなかった。緩衝材中、掘削影響領域、母岩中の移行特性、および処分坑道のレイアウトは第2次取りまとめ¹⁾の設定を参考とした。解析ケースを表4.2-3に示すが、ケース01と比較することにより、以下の影響を評価した。

- ・ 坑道方向に対する地下水流向の影響
- ・ ガラス固化体からの核種放出の取り扱いの影響（緩衝材内側濃度固定、フラックス固定）
- ・ 掘削影響領域での透水量係数の影響
- ・ 緩衝材での拡散係数の影響
- ・ 緩衝材での分配係数の影響

移流・分散コードによる解析には、有限要素法による物質移行解析コード（Dtransu-3D・EL）を利用した。ガラス固化体からの核種放出、緩衝材中の拡散、岩盤中の核種移行を連成して解析し、濃度干渉効果を考慮した。移流・分散コードの解析結果の一例を図4.2-9に示す。

VRコードでの物質移行解析では、コンパートメント（廃棄体1体および周辺岩盤領域）の各境界を通過する水理場の条件（地下水のダルシー流速）は、上記移流・分散コードの解析結果を利用した。VRコードで地下水の流れ方向に設置された廃棄体3体を解析するケース（地下水流向0°）のモデルを図4.2-10に示す。なお本図では、実際には3×3×3個のコンパートメントを設定して3次元的な解析を実施しているが、図では廃棄体を含むその一部の9個を示している。なお本比較では、両コードから得られる結果の相違を明確に確認することに主眼をおいて、100万年という経過年数を仮に設定した。

表 4.2-3 解析ケース

解析 ケース	地下水流动場		掘削影響領 域の透水量 係数*	緩衝材		備考
	地下水 流向	緩衝材の内側 の濃度境界		拡散係数**	分配係数** (遅延係数)	
01	0°	濃度固定	$5 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$	$9.5 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{y}$	$1 \text{m}^3/\text{kg}$ (3900)	坑道方向に対する 地下水流向の影響
02	45°					
03	90°					
04	0°	フラックス固定***	$5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ $5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ $5 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$	$6 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{y}$ $7 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{y}$ $9.5 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{y}$	$50 \text{m}^3/\text{kg}$ (195000)	ガラス固化体からの 核種放出の扱いの 影響 透水量係数の影響 拡散係数の影響 分配係数の影響
05	0°					
06	0°					
07	0°					
08	0°					
09	0°					

* : 第2次取りまとめの考え方方に従い、母岩の10倍の透水量係数で幅は0.5mとした。また、透水性が大きなケースは母岩の100倍の透水係数とした。なお、VRコードでの計算では本パラメータは用いていない。

** : 物質移行に関する特性（拡散係数、分配係数、遅延係数等）はNpに関するものである。ただし、放射性崩壊は考慮しなかった。

*** : ケース04については、緩衝材で濃度の制限を考慮していない。

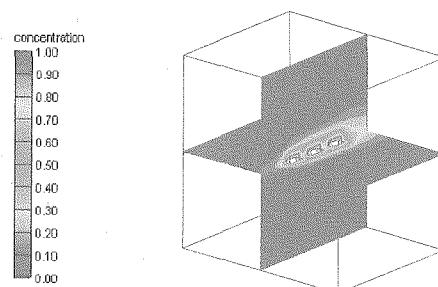
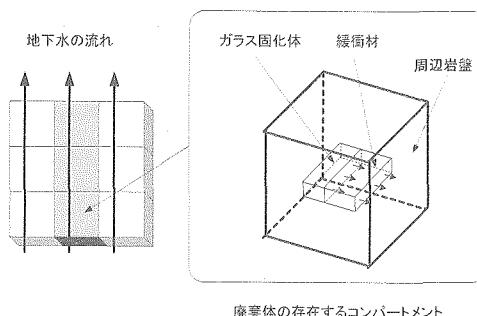
図4.2-9 濃度分布（100万年後）（地下水流向が坑道と平行；ケース01）²⁾

図4.2-10 VRコードの計算モデル

(3×3×3個のコンパートメントを設定して3次元的な解析を実施し、その一部の9個を図示：
各コンパートメントについては3次元化したVRコードを使用して解析)

上述の種々の条件での解析の結果について、両コードにおける計算領域外への核種放出率の相違をVRコード／移流・分散コードの比として示すと、解析ケース01, 02, 05～09では0.5～1.9の範囲内であった。またケース04については、緩衝材の内側境界において濃度の制限を考慮せずにフラックス一定として設定したため、核種の放出率が他の解析ケースよりも大きく、両コードの相違として上記の比は約5であった。

これより、緩衝材の核種移行に関する特性（拡散係数、分配係数）等は、両コードの解析結果の相違に及ぼす影響は比較的低いものと判断された。一方、ケース03では核種放出率に1オーダー以上の相違（VRコード／移流・分散コードの比として約0.04）が生じ、今回実施した9ケースの解析の中では最も大きな差が認められた。この解析ケースでは坑道と垂直方向に地下水が流れれる体系を想定しており、廃棄体を含むコンパートメントと岩盤のみのコンパートメントが流れ方向に隣接して設定されている。地下水は廃棄体を通過した後、岩盤のみのコンパートメントを通過するが、現状の3次元VRコードでは周辺岩盤において、地下水を一様な流れとして仮定するとともに、核種は瞬時混合して周辺岩盤中での核種濃度は一定となるように単純化したモデルを用いている。これらの単純化が複合的に寄与し、移流・分散方程式に基づく詳細な計算結果との相違が生じているものと考えられる。

なお解析ケース03を含めて、移流・分散コードとの比較からは3次元VRコードの計算結果が非保守的に評価される（VRコード／移流・分散コードの比が1よりも小さい）ケースも存在することに留意する必要がある。上記の単純化したモデルの取り扱い等が複合的に起因していることが考えられるが、評価の保守性への配慮の観点からも、さらに解析の精度を向上させていく必要があると思われる。

4. 3 今後の課題

4.1.4項で示したように、処分場スケールを対象とした評価技術の開発にあたっては、本検討において取り上げられた開発事項や課題を、今後、着実に実施・解決していくことが重要であると判断された。特に、評価技術の候補として着目したマルチスケールモデルについては、3次元化のための具体的な技術開発を開始し、その過程で以下のような課題や高度化の必要性が示された。今後、本評価手法を既存の解析技術と同等なレベルにすることも念頭におき、優先性にも配慮しながら、着実にこれらの検討事項に対処していくことが重要であると思われる。

- 解析階層Ⅰにおいて、VRコードにより信頼性を有する移行確率を求めるためには、周辺岩盤中で核種移行を瞬時混合として扱う現状のモデルに対し、核種の濃度分布を考慮できるような改良を加え、物質移行計算を移流・分散方程式に基づいた評価が可能なモデルに更新することが、より現実的かつ精度を向上させた評価をするための今後の開発の1つの方向性と考えられる。ただし、移流・分散を考慮するモデルは、計算負荷の増加につながり、マルチスケールモデルのメリットを損なう恐れもあるので、必要としている解析の精度と負荷を勘案しながら開発を進めていくことが重要である。
- 解析階層Ⅰにおいて、廃棄体のないコンパートメントでの滞留時間の算出については、例えばVRコードにおいて周辺岩盤を均一な媒体として単純化し、地下水流速等の代表値から簡便に求めることも可能である。しかし、本来の滞留時間は分布を伴うため、パーティクルトラッキング等の手法を機能として付加することにより、水理場のデータ（地下水流速の分布）から、各コンパートメントにおける滞留時間の分布を確率論的に評価することが有効である。そのために、周辺岩盤をメッシュ分割する等のモデルの修正が必要である。
- また、プラグ、埋め戻しやEDZといった処分場の構成要素をコンパートメントとして取り

込むこと、および現状では均一な流れ場を想定している（多孔質媒体）コンパートメントに対し、亀裂等の不均一性を考慮するための開発を行うことが課題である。

- ・ 解析階層Ⅱの評価手法の具体化としては、その核となる処分場マルコフコードに関し、核種崩壊や濃度干渉効果を取り扱うための理論開発を進める。これらの開発も踏まえ、簡便化のために加成則による重ね合わせによって計算を行う簡易3次元のモデルから、一括した演算処理が可能なフル3次元へのモデルへと機能拡張を実施していく必要がある。

さらに4.1.4項で示したように、一連の解析評価の流れの中でマルチスケールモデルの実用性と有用性を示すとの観点からは、以下のような適用上の留意点にも対処していくことが重要である。

- ・ フル3次元でのマルチスケールモデルでは、どのようにコンパートメントを選定・設定していくか、適切な判断材料を予め検討しておくことが重要である。コンパートメントに分割するための適切な部位やサイズに関する判断基準の明確化および特性（形状、サイズ、廃棄体や岩盤の特性、水理場の条件等）に基づくコンパートメントの類型化に資する知見を取得し、本手法を適用する上で反映できるような整備を行う必要がある。同様に、簡易3次元のモデルにおいても、どのように流路を抽出し、またどのような大きさのコンパートメントをこの流路に沿って設定していくか、解析の精度や効率に基づいて検討を行い、指標となる判断基準を整理しておく必要がある。
- ・ 事前に導出される水理場のデータとマルチスケールモデルで使用する水理場のデータとは、データの種類、量、密度等に相違があると考えられる。両者の整合をとるため、水理解析モデルとマルチスケールモデルとのデータ変換のための手法等を検討しておく必要がある。
- ・ 開発した手法をレイアウトの最適化等に関する評価にどのような手順で適用していくのかを具体的に提示し、解析例を提示する。

なお、これらのマルチスケールモデルの開発成果も反映させ、処分場スケールを対象とした種々の評価手法に関し、例えば処分場レイアウトの最適化等に関する適切な共通問題から、各々の評価手法の取り扱いや役割の相違（例えば、坑道やパネルスケールでのレイアウト評価や設計オプションの検討／処分場全体を包括的に考慮したレイアウトの最適化の検討）について整理する。これらにより、各評価手法について利用者が客観的に比較することを可能とし、目的に応じて適切な手法を選択できるような定量的な情報を整備・提示していくことが重要である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“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, 1999.
- 2) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成17年度 地層処分技術調査等 性能評価技術高度化 報告書（第2分冊） 第II編 現実的性能評価技術の開発”，2006.
- 3) Kawasaki, D., Ahn, J. and P. Chamber, E. : “Markov Chain Model for Particle Migration at the Repository Scale”, GLOBAL 2005, 2005.
- 4) 核燃料サイクル開発機構：“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3 安全評価手法の開発”，JNC TN1400 2005-016, 2005.
- 5) OECD/NEA：“Water-conducting Features in Radionuclide Migration”, GEOTRAP Workshop Proceedings, Barcelona, Spain, 1998.
- 6) Ijiri, Y., Sawada, A., Webb, E., Uchida, M., Ishiguro, K. and Umeki, H. : “Strategy for Characterisation and Radionuclide Migration Modelling in Block-Scale Geological Media”, GEOTRAP Workshop Proceedings, pp.259-270, Barcelona, Spain, 1998.
- 7) Möri, A., Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Adler, M., Mazurek, M., Ota, K., Haag, P., Ando, T. and Alexander, W.R. : ”The Nagra-JNC In Situ Study of Safety Relevant Radionuclide Retardation in Fractured Crystalline Rock IV: the In Situ Study of Matrix Porosity in the Vicinity of a Water-conducting Fracture”, Nagra Tech. Rep. NTB 00-08, 2002.
- 8) Alexander, W.R., McKinley, I.G., MacKenzie, A.B. and Scott, R.D. : ”Verification of Matrix Diffusion by Means of Natural Decay Series Disequilibria in a Profile across a Water Conducting Fracture in Granitic Rock”, Sci. Basis Nucl. Waste Manag., XIII, pp. 567-576, 1990.
- 9) OECD/NEA : ” Confidence in Models of Radionuclide Transport for Site-specific Assessment”, GEOTRAP Workshop Proceedings, Carlsbad, New Mexico, USA, 1999.
- 10) IAEA: “Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes”, IAEA Technical Reports Series No. 413, 2003.
- 11) SKB : “Deep Repository for spent nuclear fuel, SR97 – Post closure safety, Main Report Vol. I, II – Main Report summary”, SKB TR-99-06, 1999.
- 12) SKB : “Background report to SR97, SR97 Processes in the repository evolution”, TR-99-07, 1999.
- 13) SKB : “Background report to SR97, SR97 Waste, repository design and sites”, TR-99-08, 1999.
- 14) SKB : “SR97 Data and data uncertainties”, TR-99-09, 1999.
- 15) SKB : “Summary to hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg”, TR-97-23, 1997.
- 16) SKB : “Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/5”, TR-97-06, 1997.
- 17) SKB : “Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/2”, TR-97-03, 1997.
- 18) SKB : “Planning report for the safety assessment SR-Can”, TR-03-08, 2003.
- 19) SKB : “Interim main report of the safety assessment SR-Can”, SKB TR-04-11, 2004.
- 20) Posiva : “Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara – TILA-99”, POSIVA 99-07, 1999.

- 21) Posiva : "Site-to-Canister scale flow and transport in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara" , POSIVA99-15, 1999.
- 22) Posiva : "Site scale groundwater flow at Olkiluoto" , POSIVA99-03, 1999.
- 23) Posiva : "Regional-to-Site scale groundwater flow in Kivetty" , POSIVA 99-13, 1999.
- 24) BECHTEL SAIC COMPANY : "Total System Performance Assessment - License Application Methods and Approach" , TDR-WIS-PA-000006, REV 00, ICN 01, Las Vegas, Nevada, 2003.
- 25) BECHTEL SAIC COMPANY : "UZ Flow Models and Submodels" , MDL-NBS-HS-000006, REV 02, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 26) BECHTEL SAIC COMPANY : "Multiscale Thermohydrologic Model" , ANL-EBS-MD-000049, Rev01, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 27) K. MacNeil : "EBS Radionuclide Transport Model" , ANL-EBS-MD-000034, REV00, OCRWM, Las Vegas, Nevada, 2000.
- 28) B.A. Robinson : "Particle Tracking Model and Abstraction of Transport Processes" , MDL-NBS-HS-000020, REV00, OCRWM, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 29) B.W. Arnold, and S.P. Kuzio : "SZ Flow and Transport Model Abstraction" , MDL-NBS-HS-000021, Rev00, OCRWM, Las Vegas, Nevada, 2003.
- 30) BECHTEL SAIC COMPANY, "WAPDEG Analysis of Waste Package and Drip Shield Degradation" , ANL-EBS-PA-000001, REV02, Las Vegas, Nevada, (2004)
- 31) BECHTEL SAIC COMPANY : "CSNF Waste Form Degradation: Summary Abstraction" , ANL-EBS-MD-000015, REV02, Las Vegas, Nevada, 2004.
- 32) NAGRA : "Project Opalinus Clay Safety Report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste" , NTB-02-05, 2002.
- 33) NAGRA : "Project Opalinus Clay Models, Codes and Data for Safety Assessment" , NTB 02-06, 2002.
- 34) NAGRA : "Projekt Opalinuston Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse" , NTB 02-03, 2002.
- 35) 原子力環境整備促進・資金管理センター: "平成 15 年度 地層処分技術調査等 性能評価技術高度化 報告書 (第 2 分冊) 第 II 編 現実的性能評価技術の開発" , 2004.
- 36) 原子力環境整備促進・資金管理センター: "平成 16 年度 地層処分技術調査等 性能評価技術高度化 報告書 (第 2 分冊) 第 II 編 現実的性能評価技術の開発" , 2005.

5. 地球化学情報の統合化技術の開発

5. 1 共同研究における議論の概要

5. 1. 1 実施計画の策定

核種移行解析にとって重要な地下水の地球化学については、平衡論に基づく数学モデルの適用が試みられているが、このような数学モデルの適用性や役割については、最終的に核種移行評価にどのように役立て得るのかについて、必ずしも体系的な検討が行われていない。この点を検討することは、2章で述べた多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本戦略を考える上で重要である。そこで、核種移行評価への反映を念頭に、地球化学モデリングの戦略を検討すると共に、地球化学モデリングにおける実用的解析技術や解析に必要となるコード、データベースについての調査・検討を行うこととした。

上記の検討を踏まえて設定した実施内容と役割分担を以下に示す（「現実的性能評価技術の開発」¹⁾を活用して実施する内容を含む）。これら実施計画に沿って、共同研究として実施した議論や検討の内容と成果を本節の5.1.2～5.1.4項に、「現実的性能評価技術の開発」において実施した検討の内容と成果を次節5.2に示す。

実施内容

① 地球化学モデリングの戦略検討

処分場スケールの地球化学場の設定として、地球化学特性の空間分布などの不確実性、地球化学特性の長期的変遷、地表で得られた地下水実測値の深部地質環境への補正、地下水化学の掘削影響などに関して、水質の統計解析手法や平衡論モデルを中心とした解析手法の組み合わせや適用方法に関して検討、整理する。

② 地球化学モデリングに関する実用的な解析技術の開発

①に基づき、文献調査、概要調査、精密調査の各段階における地下水化学に関して、核種移行評価への反映を念頭に原位置測定手法の限界、実測値の信頼性評価、採水の可能性などを考慮した解析技術や課題を国内外の調査例を踏まえて整理する。

③ 地球化学モデリングに必要な解析コードやデータベース開発

②の解析技術で必要となる解析コード開発、我が国の地下水水質や熱力学データといったデータベース開発および水質分類などに使われる統計的解析コードについて国内外の現状を整理し、今後の課題を抽出する。

役割分担

本研究項目の実施にあたっての役割分担は以下の通りである。

研究項目	原子力機構	原環センター
① 地球化学モデリングの戦略検討	○ (方針)	○ (調査・整理)
② 地球化学モデリングに関する実用的な解析技術の開発	○ (整理方針、 課題抽出)	○ (調査・整理)
③ 地球化学モデリングに必要な解析コードやデータベース開発	○ (整理方針、 課題抽出)	○ (調査・整理)

本研究の実施に当たっては、上記の役割分担に基づき、原子力機構は、各研究項目実施のための方針の整理や課題の抽出を行い、原環センターは、それらに対しての具体的な調査・整理を実施した。以下に原子力機構が主となり実施した研究方針の整理や課題抽出に至る検討内容につい

て述べる。また、各研究項目での検討概要や研究項目間の関係については、図 5.1-1 に図式化して示した。

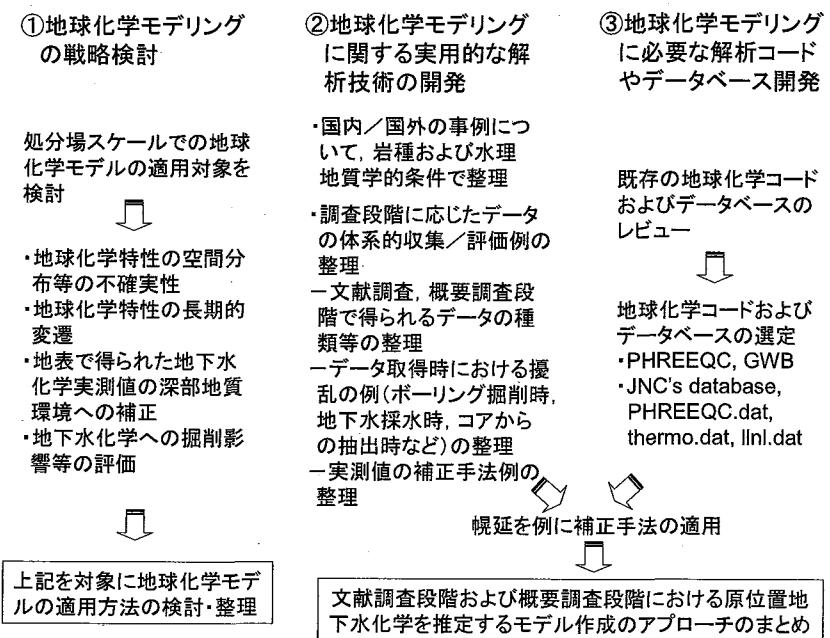


図 5.1-1 地球化学情報の統合化技術の開発における各研究項目での概要や研究項目間での関係

5. 1. 2 地球化学モデリングの戦略検討

地下水水質に関わる地球化学モデルは、わが国においては、ジェネリックな安全評価において地質環境を幅広く想定した深部地下水水質を設定するために用いられた例がある^{2), 3)}。この場合、地下深部では地下水流速は一般に非常に遅いと考えられ、地下水流れに沿った地層の構成物質(鉱物、ガスなど)と地下水の化学的相互作用の時間はそれに比べると短いと予想されるため、化学平衡に基づく地球化学モデルが適用されている^{4), 5)}。このようなモデルは、比較的広域なスケールを対象に構築されているが、スケールに応じた詳細度や不確実性などについては考慮されていない。しかしながら、具体的な地質環境を対象にした場合、調査の段階に応じて、得られるデータの量や質が異なると共に、対象となるスケール毎に評価レベルも異なることが予想される。そこで、文献調査、概要調査、精密調査といった各段階における地下水化学に関して、安全評価への反映を念頭に、処分場スケールでの地球化学モデルの適用性について以下の観点から検討することとした。

- ① 地球化学特性の空間分布などの不確実性
- ② 地球化学特性の長期的変遷
- ③ 地表で得られた地下水化学実測値の深部地質環境への補正
- ④ 地下水化学の掘削影響などの評価

上記検討対象について、各々、地球化学モデルの適用方法の検討・整理を行った。

①については、文献調査の結果を念頭におきつつ、概要調査、精密調査段階における処分場スケールにおいて、掘削されたボーリング孔の数、孔長、得られた地下水データの量や質、地質や地下水流动の不均一性など、様々な要因を考慮し、評価する必要があると考えられる。このよう

な評価に当っては、限られたボーリングで得られた地質、水理、地球化学データをもとに、統計学的手法（主成分分析など）や地球統計学的手法（クリギング法など）によりボーリング間のデータを補完し、空間分布を推定する^{6), 7)}と共に、そこで用いられたデータやモデルの不確実性に基づき空間分布の不確実性を評価する手法が適用されると考えられる。

②については、概要調査、精密調査段階で得られた情報をもとに、サイトの長期的な変遷を考慮し、地球化学特性の将来予測を行うものである。このためには、過去から現在までに生じた変動の履歴を把握し、その中から時間的および空間的な変動の傾向を見出し、その傾向を将来へ外挿して予測する手法（外挿法）が適用されると考えられる。地球化学特性の長期的変遷の評価に当っては、過去から現在に至るまでの古水理地質学的変遷を明らかにする⁸⁾⁻¹⁰⁾と共に、それに基づいた地下水の水質変遷に関する概念モデルや評価のための数学モデルを作成し、モデルの適用性を評価することが一つのアプローチとして重要と考えられる。

③については、文献調査、概要調査段階で想定されるような、データ量が少なく、信頼性の高い原位置の地下水化学実測値に乏しい状況下において、どのように深部地質環境を推定するかといった観点で重要な検討項目である。地表で得られた地下水化学実測値の深部地質環境への補正に関しては、わが国や諸外国における原位置試験や地下研を通じて、幾つかの検討例が示されている^{11), 12)}。その中では、平衡論モデルに基づいた補正手法の適用が行われている。

④については、精密調査段階で想定される坑道掘削による地下水化学への影響などの評価であり、複合的に生ずる水理学的・地球化学的条件の変化を考慮し、評価する必要がある¹³⁾⁻¹⁵⁾。このような評価に当っては、地下水流动の変化を予測する水理モデルや過渡的な状態を予測する速度論モデルを組み合わせた解析手法の適用を考慮することが必要である。

上述したように、上記検討対象について、これまでに国内および海外での事例研究が幾つか報じられており、モデルの適用のみならず、様々な情報を含めてこれらを体系的に整理することで、文献調査、概要調査、精密調査の各段階において必要となる地球化学情報の統合化に反映できると考えられる。平成17年度は、上記検討対象のうち、主に文献調査、概要調査段階で必要になると想定される③を対象に検討を進めることとした。

5. 1. 3 地球化学モデリングに関する実用的な解析技術の開発

5.1.2 での検討において当面、特に重要と考えられる「地表で得られた地下水化学実測値の深部地質環境への補正」について、実用的な解析技術を開発するため、以下の観点から既存情報や評価例の整理を行うこととした。また、調査・整理の結果を踏まえ、原子力機構と原環センターで協議し、地球化学情報の統合化にあたり必要な情報の整理や統合化の考え方を整理することとした。

- ・国内外の既往調査サイトの岩種および水理地質学的条件の違いに基づいた分類
- ・調査段階に応じたデータの体系的収集／評価例の整理

調査サイトの水質、水理の不均質性に依存して、地球化学的条件の調査方法も異なると考えられる。そこで、このような観点での既往調査サイトの分類を試みた。対象とした国および調査地域は、フィンランド (Olkiluotoなど)、スウェーデン (Äspö, Oskarshamn, Forsmarkなど)、英国 (Sellafield)、ベルギー (Mol)、フランス (Bure)、スイス (Grimsel, Mont Terri)、カナダ (Whitehell)、日本 (瑞浪／東濃、幌延、釜石、茂原¹⁾) である。

次に、調査段階に応じて収集されるデータの種類や特性、それらを用いた評価（実測値の補正）

¹⁾ 茂原地域は、圧縮ベントナイト中におけるガラスの長期変質挙動評価のためのナチュラルアナログ研究の調査場所である。

などについて、国内外の既往調査サイトでの例をもとに体系的な整理を行うこととした。

5. 1. 4 地球化学モデリングに必要な解析コードやデータベース開発

5. 1. 3 の解析技術で必要となる解析コードやデータベースについて、国内外で幅広く利用されているもの（解析コードでは、USGS が開発した PHREEQE¹⁶⁾ および PHREEQC¹⁷⁾, LLNL が開発した EQ3/6¹⁸⁾, イリノイ大学で開発された Geochemist's Workbench : GWB¹⁹⁾, データベースとしては、JNC が開発した熱力学データベース^{20), 21)}, PHREEQE や PHREEQC に付随する熱力学データベース, EQ3/6 に付随する熱力学データベース, GWB に付随する熱力学データベース : thermo.dat², thermo.com.v8+6³など）を中心にレビューを行い、現状を整理した。

さらに、5. 1. 3 で示された地下水化学実測値の深部地質環境への補正手法、5. 1. 4 で選定された解析コードおよびデータベースを用い、幌延を例にした補正手法の適用に関する検討も行い、文献調査、概要調査の各段階における原位置地下水化学を推定するモデル作成のアプローチについてまとめた。

5. 2 調査や個別技術の開発の概要

本節では、5. 1 節で示された方針や課題に対して、原環センターが主となり実施した具体的な調査・整理の結果¹⁾を参考にまとめる。

5. 2. 1 国内外の既往調査サイトの岩種および水理地質学的条件の違いに基づいた分類

対象とした国および調査地域について、岩種および水理学的条件の違いをもとに整理した。以下にその結果をまとめる。

- ・ 結晶質岩－沿岸地域（低動水勾配）：Olkiluoto²³⁾（フィンランド）、Äspö²⁴⁾（スウェーデン）
- ・ 結晶質岩－沿岸地域（より動水勾配が大きい）：Sellafield²⁵⁾（英国）
- ・ 結晶質岩－内陸地域（平野、丘陵部：低動水勾配）：Whiteshell²⁶⁾（カナダ）
- ・ 結晶質岩－内陸地域（山岳部：より動水勾配が大きい）：Grimsele²⁷⁾（スイス）、瑞浪／東濃⁷⁾（日本）、釜石²⁸⁾（日本）
- ・ 堆積岩－沿岸地域（低動水勾配）：茂原²⁹⁾（日本）
- ・ 堆積岩－沿岸地域（より動水勾配が大きい）：Sellafield²⁵⁾（英国）
- ・ 堆積岩－内陸地域（平野、丘陵部：低動水勾配）：Bure³⁰⁾（フランス）、Mol³¹⁾（ベルギー）、幌延³²⁾（日本）
- ・ 堆積岩－内陸地域（山岳部：より動水勾配が大きい）：Mont Terri¹¹⁾（スイス）、瑞浪／東濃³³⁾（日本）

上記のサイトにおける地下水調査方法としては、ボーリングを利用したパッカー区間に流入する地下水の採水が主であるが、堆積岩を対象としたサイト（Mont Terri, Mol, Bure, 幌延）では、圧搾によるコアからの間隙水の抽出方法も用いられている。

5. 2. 2 調査段階に応じたデータの体系的収集／評価例の整理

² LLNL の研究者ら (Wolery, Delany, Jackson, Johnson ら) によりコンパイルされたデータベースであり、SUPCRT²²⁾のデータコンピレーションをベースとしている。

³ LLNL で整備された EQ3/6 に付随する熱力学データベースをベースにしたものであり、thermo.dat に比べると organic species に関するデータが充実している。

文献調査および概要調査段階で収集されるデータの種類や特性について、5.2.1で対象としたサイトにおける調査事例に基づき整理した（表5.2-1）。収集されるデータの種類としては、水理地質データ、岩相、地質構造、岩石学的データ、化学組成、鉱物組成、地下水組成が挙げられる。これらに対し、文献調査および概要調査段階の各々において、利用可能なデータの特性がどう変わるかが表5.2-1に示されている。概要調査段階では新たなボーリングが掘削され、水理試験、岩石／地下水試料の採取・分析、原位置測定等が行われることで、文献調査段階に比較して、深部データの増加、データの信頼性向上などにより、深部地下環境に関わるデータ、情報の解像度が高くなる。

表5.2-1 文献調査および概要調査段階で収集されるデータの種類や特性¹⁾

データの種類	文献調査段階		概要調査段階	
	データのソース：公開文献	データ例	データのソース：公開文献、地表からの調査（ボーリング等）	データ例
水理地質データ	地形データ、井戸水位データ、降雨データなど	涵養量の推定値、地下水の流动方向など	新たなボーリングでの水理試験結果	より深部の詳細なデータ、他の分野（種類）のデータとの相関性が分るようなデータ、三次元的な理解の向上するデータ
岩相に関するデータ	地表地質図、既存トンネル／ボーリング岩相図など	岩石の種類	新たなボーリングでの岩石コア、物理検層、ボアホールTV調査結果	
地質構造に関するデータ	上記の地質／岩相図に加え、地形図、航空写真、衛星写真など	主要な地質構造の位置と特性	および地表物理探査結果	
岩石学的数据	地表踏査、既存トンネル／ボーリングなどからえられた岩石・鉱物試料分析結果	鉱物の種類、鉱物の分布、主要～微量元素、安定同位体組成など	新たなボーリングでの岩石・鉱物試料分析結果	
地下水化学	井戸水、温泉、湧水、河川、湖などの分析値	主要～微量元素、安定同位体組成など	地表水、新たなボーリングで得られた地下水分析結果および孔内物理検層結果	上記に加え、原位置データ、採水に伴う擾乱に関するデータ

しかしながら、地表から掘削されたボーリングを用いた調査では、ボーリング掘削に伴う地下水化学への影響により、地表で得られた地下水化学実測値は、本来の深部地下環境の特性を示していない可能性がある。ボーリング掘削に伴い地下水化学に影響を及ぼす要因としては、以下のものが挙げられる。

- ① 掘削水や掘削水への添加剤による影響
- ② 掘削時に発生したスラリー、ボーリング孔に設置されたケーシングとの反応による影響
- ③ 掘削後のボーリング孔の開放による影響
- ④ 地表での採水に伴う溶存ガスの変化による影響

①は、掘削水には粘性を上げるために粘土やポリマーを混合する場合があり、このような混合

材による地下水水質への影響である³⁴⁾。また、掘削水の地層中への浸入量と地下水との混合の影響を評価するため、掘削水にトレーサーを添加する場合がある。トレーサーとしては、蛍光性有機剤（ウラニンなど）、地下水中に微量しか含まれない無機イオン（Li⁺など）、トリチウムなどがあり、これらは調査対象となる地層や地下水の種類に応じて使い分けられている^{35), 36)}。このようなトレーサーによる地下水水質への影響も懸念される。

②は、ボーリング孔内に残存した破碎された岩石などを含むスラリーと地下水との反応による地下水水質への影響である。鋼製のケーシングは、地下水との接触により腐食し、地下水中のFe濃度に影響を与える可能性もある。

③は、ボーリング孔の長期開放により、異なる深度の地下水が混合し、採水深度の地下水水質に影響を与えるものである。

④は、地下深部から地表に地下水を汲み上げた際に生ずる圧力の違いにより、地下水中の溶存ガスが変化することによる地下水水質への影響である。溶存ガスとしてのCO₂(g)の変化は、地下水のpHや炭酸濃度などに影響を与え、He(g)の変化は、地下水年代測定の推定に影響を与える。

上記のような影響が想定される場合、地表で得られた地下水化学実測値の深部地質環境への補正を行う必要がある。ここでは、①および④による地下水水質への影響に対する補正手法の適用例について述べる。

・掘削水への添加剤による影響の補正

Sellafield(英国)における事例では、トレーサーとしてトリチウムや無機イオン(Li⁺, I⁻)を用い、EC(電気伝導度)や地下水中の溶存成分(Na, K, Mg, Cl, Sr, Ba, Cl, SO₄, F, Br, 酸素水素同位体など)とトレーサーとの2成分での回帰直線を最小二乗法により求め、トレーサー濃度が0の場合の値を算出し、補正する手法が適用されている³⁷⁾。ただしこの手法は、補正対象とする化学成分とトレーサーとの間に線形の関係がある場合、適用可能であるが、pH, Eh, TIC(全無機炭素), 炭素同位体などのように、トレーサーとの間の相関が非線形に変化する可能性がある成分については適用が困難である。

・地表での採水に伴う溶存ガスの変化による影響の補正

Mont Terri(スイス), 茂原(日本)における事例では、地表で採水された地下水化学実測値に基づく熱力学的解析で地下水が方解石に対し過飽和であり、これはCO₂(g)の脱ガスによる影響と仮定し、地下水が方解石に対し飽和になるような補正を行っている^{11), 12), 38)}。これにより、地下水のpHおよび炭酸濃度が補正される。また、茂原における事例では、微量のH₂S(g)の脱ガスと地層中に認められる還元性鉱物(黄鉄鉱、菱鉄鉱)との整合性を考慮し、地下水のEhを補正する手法も提示している。

このほかに、堆積岩を対象としたサイト(Mont Terri, 幌延)で行われている圧搾によりコアから抽出された間隙水に対しては、統計学的解析(Principal Component Analysis: 主成分分析)に基づくデータの信頼性評価が行われており、抽出時における人為的擾乱による影響(大気との接触による黄鉄鉱の溶解に伴う水質への影響)を受けている場合があることが例示されている^{11), 39)}。

5. 2. 3 地球化学モデリングに必要な解析コードやデータベース

レビューの対象とした地球化学コードの多くは、溶液中の化学種の濃度(活量)や固相(鉱物等を含む)に対する飽和度の計算、固相と溶液の化学反応(化学平衡、反応速度)計算を行うことができる。また、コードによっては、物質移行との連成解析也可能である。活量の計算式としては、Debye-Hückel式、拡張Debye-Hückel式、Davies式、B-dot式、Pitzer式などがあり、コードによって適用可能な式が異なるものの、海水系地下水を含めた通常の地下水を対象とした

解析に利用する上では、いずれのコードを用いても問題はない。なお、解析結果の可視化の観点では、これらのコードの中では、GWB が最も優れている。GWB は、pH-Eh diagram 作成モジュールである Act2、固相と溶液の化学反応経路計算を行うモジュールである React、その結果を描画するモジュールである GtPlotなどを備えている。

一方、レビューの対象とした熱力学データベースは、大別すると、USGS の研究者らが中心となり整備されたデータベース (PHREEQE, PHREEQC に付随するデータベース), LLNL の研究者らが中心になり整備されたデータベース (EQ3/6, GWB に付随するデータベース) がある。原子力機構が旧サイクル機構時代に開発したデータベースも、放射性元素の熱力学データを除けば(すなわち、鉱物等の熱力学データ), 前述した 2 つのデータベースに類似したものである。このうち、SPRONS. JNC²¹⁾ は、LLNL で整備されたデータベースである SPRONS96 をベースに、データベースの内部整合性を維持しながら、必要なデータを更新・拡張したものである。

解析コードやデータベースについては、現状では、最良の単一のコードやデータベースというものは存在しないため、解析の目的や用途に応じて、適切なコードやデータベースを利用する事になる。原子力機構では、従来から、解析コードとしては PHREEQC および GWB を中心に利用してきており、データベースについては、独自に開発を行ってきてている。ここでは、解析コードとしては、これまでの利用経験が豊富な PHREEQC および GWB を選定し、データベースとしては、上記 SPRONS. JNC を中心とし、比較検討用として他のデータベースも利用することとした。

5. 2. 4 幌延を例にした補正手法の適用

原子力機構では、堆積岩-内陸地域の分類に相当する幌延において、深地層の研究施設計画を進めている⁴⁰⁾。ここでは、幌延における調査研究により得られた地表での地下水化学実測値とともに、前述した補正手法例や前項で選定した解析コードやデータベースを用い、深部地質環境への補正を試みた。

幌延地下水は、溶存する炭酸が多く、炭酸分圧が高い特徴がある。このような深部地下水が地表にくみ上げられ、大気と接した場合、大気中の炭酸分圧との差により、地下水中に溶存していた炭酸ガスが脱ガスし、地下水の pH や炭酸濃度などに影響を与える。そこで、地表での採水に伴う溶存ガスの変化による影響の補正として、地下水が方解石に対し飽和になるような手法を適用した。幌延地下水のような化石海水（滞留時間が長く、鉱物-水反応が平衡に達していると考えられる）に対しては、方解石との平衡を仮定した補正是、深部地下水水質を支配すると考えられる一般的知見と照らし合わせても妥当である。補正にあたっては、解析コードとして PHREEQC、熱力学データベースとして 990900c1 (SPRONS. JNC の PHREEQC フォーマット版データベース) を用いた。また、掘削水に添加されたトレーサー（蛍光染料である sodium naphthionate）濃度から、掘削水残留の影響を考慮した補正も行った。結果を図 5.2-1 に示す。補正前後でのイオン強度および pH の差は、最大で各々、0.13 および 1.5 となり、特に pH への影響は顕著であり、このような補正の必要性が示唆された。

さらに、解析コードやデータベースの違いによる評価結果への影響をみるために、同一のデータベースを異なるコードで用いた場合、一つのコードで異なるデータベースを用いた場合の評価を行った。

前者の場合についての結果を図 5.2-2 に示す。このケースでは、幌延の HDB-3 孔⁴¹⁾ (GL-167m : 塩分濃度の高い地下水) および HDB-5 孔⁴²⁾ (GL-180m : 塩分濃度の低い地下水) の地下水を例とし、これらの地下水が混合した場合の水質変化の挙動を PHREEQC および GWB を用いて解析した。データベースは SPRONS. JNC の PHREEQC フォーマット (990900c1) および GWB フォーマット (990900g1) を用いた。解析では、前述した掘削水の影響や脱ガスによる影響の補正も含めて行

った。その結果、解析コードの違いによる計算結果への影響は、pH では 0.2 程度の差異であり、それほど顕著な影響は認められなかった。この差異の原因は、両コードで用いられている活量補正方法の違いによると考えられる。

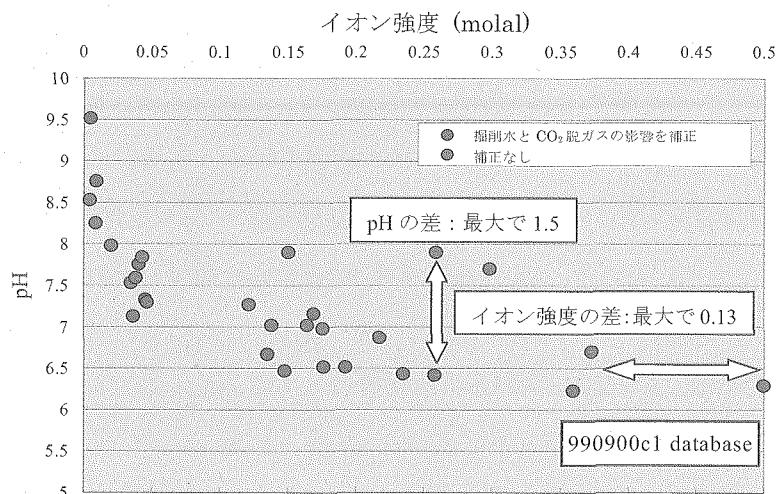


図 5.2-1 方解石との平衡を仮定した補正前後でのイオン強度と pH の関係¹⁾
(解析コードには PHREEQC を利用、データベースは 990900c1 を利用)

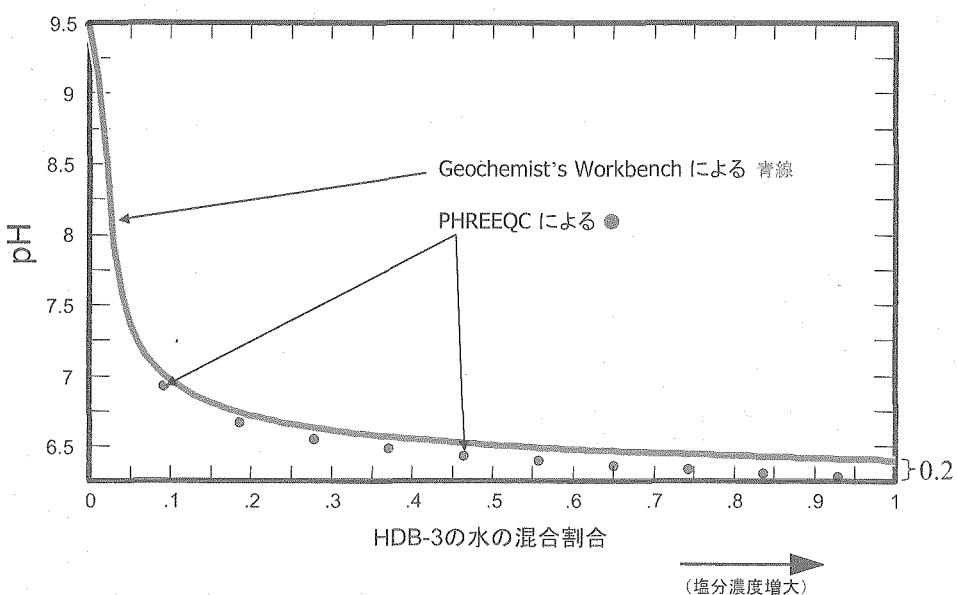


図 5.2-2 解析コードの違いによる補正結果の違い¹⁾
(データベースは 990900g1 を使用)

次に、異なるデータベースの影響を調べた結果を図 5.2-3 に示す。このケースでは、幾つかの幌延地下水をもとに、PHREEQC により異なるデータベース (11nl.dat⁴および 990900c1) を用い、

⁴ 11nl.dat は、PHREEQC¹⁷⁾ に付随する熱力学データベースであり、EQ3/6 に付随するデータベースである thermo.com.v8.R6.230 のデータを含む。

前述した掘削水の影響や脱ガスによる影響の補正を行い、結果を比較した。その結果、補正された地下水の炭酸分圧は、データベースの違いにより異なり、その差異はイオン強度（塩分濃度）が高いほど大きくなる傾向が認められた。この原因として、2つのデータベースにある化学種が異なること（特に、990900c1に NaHCO_3^- のデータがないこと）と、活量係数を計算するパラメータがデータベースにより異なることが考えられる。また、炭酸分圧と同様に地下水のpHにも差異が認められた。

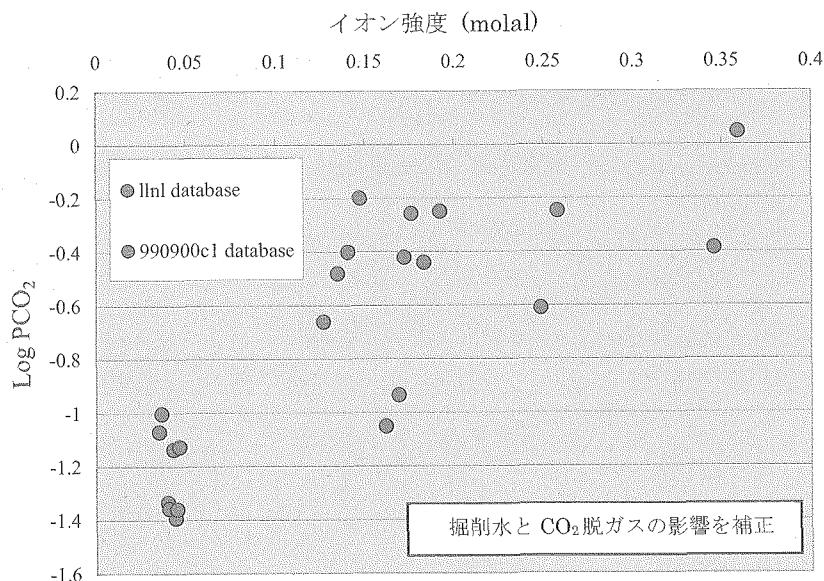


図 5.2-3 データベースの違いによる補正結果の違い¹⁾ (解析コードは PHREEQC を使用)

以上のような検討例から示されるように、補正で用いる解析コードやデータベースの違いによる差も原位置地下水化学を推定する上での不確実性として留意することが必要である。

最後に、文献調査、概要調査の各段階において、原位置の地下水化学を推定するモデル作成のアプローチを以下のようにまとめた。

文献調査段階では、既存情報やデータを収集すると共に、一般的な地球化学的知見（たとえば、方解石との平衡など）に基づき原位置状態を推定するモデルを作成する。この際には、データやモデルで考慮する仮定の不確実性、用いる解析コードやデータベースの違いによる推定結果の不確実性なども反映する。一方、概要調査段階では、文献調査段階で作成されたモデルの適用性を確認するためのデータ取得方法を検討すると共に、新たなデータを取得する。データ取得方法の検討にあたっては、得られるデータの精度や不確実性、それらの原因となる要因について考慮することが必要である。また得られたデータとモデルによる推定結果との比較により、モデルを修正し、モデルで考慮する仮定の不確実性を低減する。概要調査段階では、このようなプロセスを繰り返すことで、より信頼性のあるモデルを構築していくことができると考えられる。

5. 3 今後の課題

本研究では、5.1.2 項において、処分場スケールでの地球化学モデルの適用対象として、地球化学特性の空間分布などの不確実性、地球化学特性の長期的変遷、地表で得られた地下水化学実測値の深部地質環境への補正、地下水化学の掘削影響などの評価を取り上げ、各々に対する地球化学モデルの適用方法の検討・整理を行った。これらは、ある地質環境が与えられた場合、安全

評価への反映を念頭に、地球化学情報を統合化していく上で必要な作業である。図 5.2-4 に、地球化学情報の統合化にあたり必要な情報整理を体系的に行うための作業フローの例を示す。

ある地質環境が与えられた場合、それを対象として設計・安全評価を行うための地下水水質を設定する必要がある。その際、現在の地下水条件を勘案するとともに、過去から現在までの長期的な地球化学環境の変遷に基づき将来的な変動も考慮することが重要である。また、立坑掘削、処分場の操業閉鎖、坑道埋め戻しといった人為的な影響による地下水化学への影響が考慮できるように設定することも重要である。こうした点に配慮して、どの様な考え方、どの様なアプローチで、設計・安全評価に必要な地下水水質を設定すれば良いか、またどの様な手法で地下水化学への掘削影響の評価を行えば良いかなどを国内および海外での事例研究を基に体系的に整理することが地球化学情報の統合を行ううえで必要である。

今年度は、図 5.2-4 における地下水データの信頼性確認や信頼性が低いと判断された場合のデータの補正例に関わる事例研究をまとめた。今後は、地球化学特性の空間分布などの不確実性、地球化学特性の長期的変遷、地下水化学の掘削影響などの評価について、同様に調査・整理を行っていく予定である。

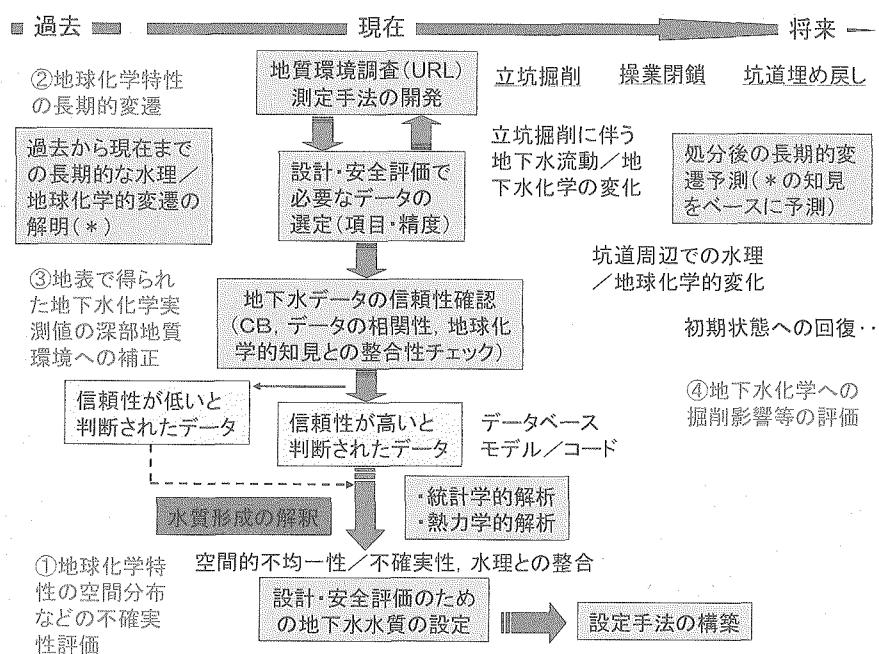


図 5.2-4 地球化学情報の統合化のための体系的情報整理の進め方の例

参考文献

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成 17 年度 地層処分技術調査等性能評価技術高度化 報告書（第 2 分冊）第 II 編 現実的性能評価技術の開発”，2006.
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成 3 年度－”，PNC TN1410 92-081, 1992.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：“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, 1999.
- 4) 油井三和, 武田精悦, 小室光世, 牧野仁史, 濵谷朝紀, 梅木博之, 石黒勝彦, 高瀬博康, 根山敦史：“高レベル廃棄物地層処分システムの性能評価における地下水の地球化学的特性に関するモデル化”，PNC TN8410 92-166, 1992.
- 5) Yui, M., Sasamoto, H. and Arthur, R. C. : “Geostatistical and geochemical classification of groundwaters considered in safety assessment of a deep geological repository for high-level radioactive wastes in Japan”, *Geochemical Journal*, vol. 38, pp. 33-42, 2004..
- 6) Luukkonen, A. and Kattilakoske, E. : “Groundwater flow, mixing and geochemical reactions at Aspo HRL, Task 5. Aspo task force on groundwater flow and transport of solute”, SKB IPR 02-41, 2001.
- 7) Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S. and Mizuno T. : “Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory” (MIU), *Applied Geochemistry*, 20, pp. 2283-2302, 2005.
- 8) Wallin, B. and Peterman, Z. : “Calcite fracture fillings as indicators of paleohydrology at Laxemar at the Aspo Hard Rock Laboratory, southern Sweden”, *Applied Geochemistry*, 14, pp. 953-962, 1999.
- 9) Metcalfe, R., Hooker, P. J., Darling, W. G. and Mildowski, A. E. : “Dating quaternary groundwater flow events: a review of available methods and their application”, In: Parnell, J. (Ed.), *Dating and duration of fluid flow and fluid–rock interaction*, Special Publications, 144, Geological Society, London, pp. 233-260, 1998.
- 10) Iwatsuki, T., Satake, H., Metcalfe, R., Yoshida, H. and Hama, K. : “Isotopic and morphologic features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan: a promising paleohydrogeological tool”, *Applied Geochemistry*, 17, pp. 1241-1257, 2002.
- 11) Pearson F. J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J. Y., Fernández, A. M., Gäbler, H. E., Gaucher. E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernán, P., Waber, H. N. : “Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory”, Report of the Swiss Federal Office for Water and Geology, Geology Series. N° 5, 319 pp., ISBN 3-906723-59-3, 2003.
- 12) Sasamoto, H., Yui, M. and Arthur, R. C. : “Estimation of in situ ground-water chemistry using geochemical modeling: A test case for saline-type ground water in argillaceous rocks”, *Physic and Chemistry of the Earth* (in press), 2006.
- 13) Rhen, I., Gustafson, G. and Wikberg, P. : “Aspo HRL – Geoscientific evaluation 1997/4: Results of pre-investigation and detailed site characterization; Comparisons of predictions and observations; Hydrogeology, groundwater chemistry and transport of solutes”, SKB TR 97-05, 1997.

- 14) 戸高法文, 阿島秀司, 中西繁隆, 手塚茂雄：“超深地層研究所周辺の地下水水質変化に関する多変量解析”, 契約業務報告書, JNC TJ7400 2005-001, 2005.
- 15) Molinero, J. and Samper, J. : “Large-scale modeling of reactive solute transport in fracture zones of granitic bedrocks”, Journal of Contaminant Hydrology, 82, pp. 293–318, 2006.
- 16) Parkhurst, D. L., Thorstenson, D. C. and Plummer, L. N. : “PHREEQE - a computer program for geochemical calculations, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 80-96, 1980.
- 17) Parkhurst, D. L. : “User’s guide to PHREEQC, a computer model for speciation, reaction-path, advective-transport and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4227, 143p, 1995.
- 18) Wolery, T. J. : “EQ3/6, a computer package for geochemical modeling of aqueous systems, package overview and installation guide (version 7.0), Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-MA-110662(1), 1992.
- 19) Bethke, C. : “Geochemical reaction modeling”, Oxford Univ. Press, New York, 397p, 1996.
- 20) Yui, M, Azuma, J. and Shibata, M. : “JNC thermodynamic database for performance assessment of high-level radioactive waste disposal system”, JNC TN8400 99-070, 1999.
- 21) Arthur, R. C., Sasamoto, H., Shibata, M., Yui, M. and Neyama, A. : “Development of thermodynamic databases for geochemical calculations”, JNC TN8400 99-079, 1999.
- 22) Johnson, J. W., Oelkers, E. H. and Helgeson, H. C. : “A software package for calculating the standard molar thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reaction from 1 to 5000 bars and 0 to 1000°C”, Geol. Sci. Am. Short-course manual, San Diego, Ca., Oct. 21-24, 1991.
- 23) Pitkanen, P., Partamies, S. and Luukkonen, A. : “Hydrochemical interpretation of baseline groundwater conditions at the Olkiluoto site”, Posiva 2003-07, Finland, 2004.
- 24) Smellie, J. and Laaksoharju, M. : “The Äspö hard rock laboratory: final evaluation of the hydrogeochemical pre-investigations in relation to existing geologic and hydraulic conditions”, Technical Report TR 92-31, SKB, 1992.
- 25) Bath, A. H., McCartney, R. A., Richards, H. G., Metcalfe, R. and Crawford, M. B. : “Groundwater chemistry in the Sellafield area: a preliminary interpretation, in: The geology and hydrogeology of the Sellafield area”, Proceedings of the Nirex Seminar, Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, supplement 1, pp. S39–S59, 1996.
- 26) Gascoyne, M., Davison, C. C., Ross, J. D. and Pearson, J. : “Saline groundwaters and brines in plutons in the Canadian shield”, Geol. Assoc. Canada Special Paper, 33, pp. 53–68, 1987.
- 27) Pearson, F. J. and Sholtis, A. : “Chemistry of reference waters of the crystalline basement of northern Switzerland for safety assessment studies”, Nagra Technical Report, NTB 93-07, 1993.
- 28) Sasamoto, H., Yui, M. and Arthur, R. C. : “Hydrochemical investigation and status of geochemical modeling of groundwater evolution at the Kamaishi in-situ tests site, Japan”, JNC TN8400 99-033, 1999.
- 29) Kamei, G, Yusa, Y. and Arai, T: “A natural analogue of nuclear waste glass in compacted bentonite”, Applied Geochemistry, 15, pp. 141–155, 2000.

- 30) Gaucher, E., Blanc, Ph., Braibant, G., Cailleau, A., Crouzet, C., Gaboriau, H., Lassin, A., Sanjuan, B., Sada, A. and Seron, A.: "Modelisation de la chimie des eaux des argillites a partir d'une carotte de roche", BRGM/RC-50682 FR, BRGM, Orleans, 2000.
- 31) Beaucaire, C., Pitsch, H., Toulhoat, P., Metellier, S. and Louvat, D.: "Regional fluid characterization and modeling of water-rock equilibria in the Boom clay formation and in the Rupelian aquifer at Mol, Belgium", Applied Geochemistry, 15, pp. 667-686, 2000.
- 32) Hama, K., Kunimaru, T., Metcalfe, R. and Martin, J. A. : "The hydrogeochemistry of argillaceous rock formations at the Horonobe URL site, Japan", Physic and Chemistry of the Earth (in press), 2006.
- 33) Iwatsuki, T., Sato, K., Hama, K. and Seo, T: "Hydrogeochemical investigation of groundwater in the Tono area, Japan", Proc. Mat. Res. Sci, Vol. 353, pp. 1251-1257.
- 34) McCartney, R.A. and Ledingham, P. : "Design considerations for the acquisition of hydrochemical data from deep boreholes. Pres. at 3rd Äspö Int. Sem. on Characterisation and Evaluation of Sites for Deep Geological disposal of Radioactive Waste in fractured rocks", Oskarshamn, Sweden, 10-12 June, 1998.
- 35) Hall, C. and Hughes, T.L. : "Ion chromatography tracer experiments during drilling", SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 2-5 March, New Orleans, Louisiana, 1993.
- 36) Kleven, R., Dahl, J.B., Bjørnstad, T., Qvenild, C and Tolland, O. : "Use of tracers for mud filtrate and completion fluid invasion studies", J. of Petroleum, Science & Engineering 16, 15-32, 1996.
- 37) Nirex : "The Hydrochemistry of Sellafield: 1997 Update" (Authors: H.G. Richards and A.H. Bath). Science Report SA/97/089. UK Nirex, Harwell, UK, 1997.
- 38) Bradbury, M. H., Baeyens, B., : "Derivation of in situ Opalinus clay porewater compositions from experimental and geochemical modelling studies", PSI Bericht Nr. 97-14 ISSN 1019-0643, 1997.
- 39) Yamamoto, H., Kunimaru, T., Kurikami, H., Shimo, M. and Xu, T. : "Long-term simulation of ambient groundwater chemistry at Horonobe Underground Research Laboratory, Japan - application of coupled hydrogeochemical model". GeoProc2006, International Conference on Coupled THMC Processes in Geosystems: Fundamentals, Modeling, Experiments and Applications (submitted), 2006.
- 40) 核燃料サイクル開発機構：“幌延深地層研究計画 平成 17 年度調査研究計画”, JNC TN5400 2004-007, 2004.
- 41) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 久慈雅栄：“幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-3 孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5420 2004-003, 2004.
- 42) 山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 久慈雅栄：“幌延深地層研究計画における試錐調査 (HDB-5 孔)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5420 2004-005, 2004.

6. 安全性を説明するための論理構造に関する理解促進技術の開発

6. 1 共同研究における議論の概要

6. 1. 1 実施計画の策定

地層処分の安全評価に関する理解促進に必要な事項を原子力機構と原環センターで協議し、安全評価の結果のみを説明の対象とするのではなく、安全評価の考え方や内容を含むより本質的な安全性の論理構造を対象として含めることを基本方針とした。さらに、安全性の論理構造に関しては、原子力機構の第1次取りまとめ¹⁾や第2次取りまとめ²⁾の説明にあたってのこれまでの経験に基づいて、特に安全評価に直接関係している人以外にはわかりにくくと考えられる安全性と安全機能や保守性との関係を視軸におくこととした。

上記の検討を踏まえて設定した実施内容と役割分担を以下に示す（「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施する内容を含む）。

これら実施計画に沿って、共同研究として実施した議論や検討の内容と成果を本節の6.1.2項～6.1.4項に、「現実的性能評価技術の開発」において実施した検討の内容と成果を次節6.2に示す。

実施内容

地層処分の安全性の論理構造をわかりやすく説明することに重点をおいた情報発信の技術（説明の技術）を開発することを目的とし、以下の研究を実施する。

① 理解促進のために説明すべき安全性の論理構造の抽出

安全機能を視軸とした取組みとして、性能評価で考慮されている主要な安全機能や保守性と安全性との関係に関する論理構造を整理し、重要性とわかりにくさの両方の観点から理解促進技術を開発するまでの優先度を検討する。

② 安全性の論理構造の説明技術の開発

整理された安全機能や保守性のうち優先度の高いものについて、わかりにくさの原因、説明上留意すべき点および技術的課題などを明らかにしつつ、可視化技術などを活用してそれらをわかりやすく説明するための手法開発を実施する。

③ 理解促進技術開発のための全体計画の策定

地層処分の性能評価において、個々の事象における安全機能や保守性を担保するための論理構造およびそれらが有機的に組み合わされた評価全体の論理構造を整理する。さらに、これら全体の論理構造を説明するための情報提供技術開発に関する全体計画を策定する。

役割分担

本共同研究の実施にあたっての役割分担は以下の通りである。

研究項目	原子力機構	原環センター
① 理解促進のために説明すべき安全性の論理構造の抽出	○	
② 安全性の論理構造の説明技術の開発		○*
③ 理解促進技術開発のための全体計画の策定	○	○

*：主に「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施。

さらに図 6.1-1 に示すより具体的な作業項目レベルでの役割分担を設定し検討を進めた。

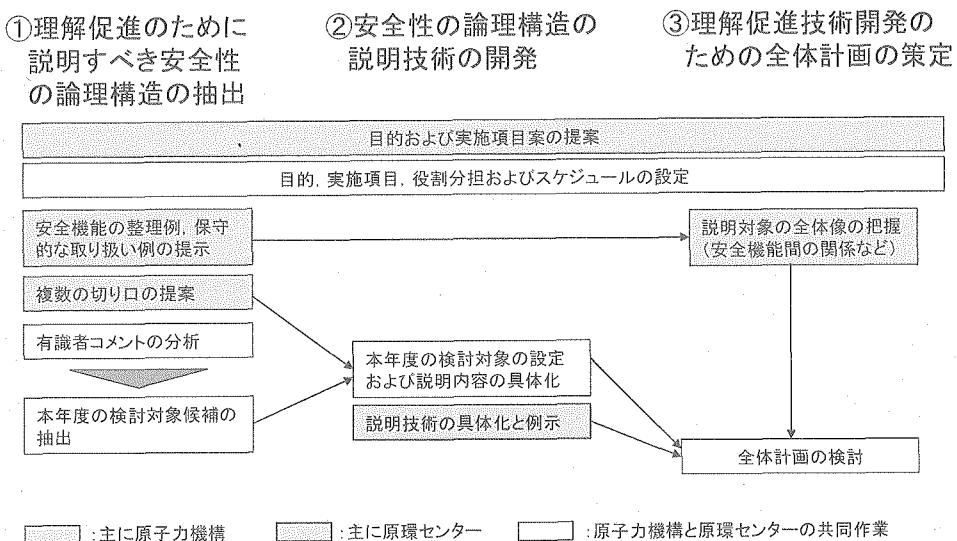


図 6.1-1 具体的な作業項目レベルでの役割分担

6. 1. 2 理解促進のために説明すべき安全性の論理構造の抽出

性能評価で考慮されている主要な安全機能や保守性、それら安全機能と安全性との関係および保守性と安全性の関係に関して、第 2 次取りまとめでの考え方や取り扱いを例として検討した。

また、本検討においては、被説明者の興味や知識レベルに応じた柔軟な対応を可能とすることが重要と考え、原子力機構より「説明の切り口」および「説明の内容」を以下に示すように複数考えておくことを提案した。

<説明の切り口>

- ・ 安全機能の発現に係わるプロセスを起点とする切り口
- ・ 安全機能の発現に必要な環境条件を起点とする切り口
- ・ 安全機能への擾乱を生ずる事象を起点とする切り口
- ・ 核種移行率の低減に対する各バリアの役割を起点とする切り口
- ・ 核種移行率の低減に対するプロセスの役割を起点とする切り口
- ・ 評価上の設定や取り扱いの不確実性とそれへの対策を起点とする切り口
- ・ 研究開発の現状（どこまで分かっているのか、どこがわかっていないのか）と課題への対策を起点とする切り口

<説明の内容>

- ・ 背景、必要性の説明（なぜその安全機能が必要なのか、なぜ保守的な取り扱いをするのかなどの説明）
- ・ 期待する効果の説明（機能の発揮によりどのような効果が期待されるか、その機能が発揮されない場合に何が問題となるかなどの説明）
- ・ 該当機能の一般的な知見の説明（比較的身近な例の提示）
- ・ 該当機能の地層区分分野での知見の説明（どのような研究が行われているか、現状どこまでわかっているか、残っている課題は何かなどの提示）
- ・ 評価上の取り扱いの説明（どのような情報・知見に基づいているか、どのような取り扱い（モデル化など）をしているか、どのような不確実性があるか、どのような単純化をしているか、どのような保守性を考えているかなどの提示）

- ・ 評価結果の説明（どのような評価結果が得られているか、どのような結論が得られているかなどの説明）

このような考え方の適切性に関しては、原環センターから提示された有識者コメント³⁾における「ガラス溶解・核種溶出の抑制」に関する具体的な指摘事項と対比することで確認を試みた。その結果、上記切り口と内容を視軸として適切に整理できると考えられたことから、このようなアプローチを導入することは適切であると判断した。

以上の検討を通じて、安全機能としては、核種移行のソースタームとして重要となる「ガラス溶解・核種溶出の抑制」や「溶解度による濃度制限」、保守性としては「処分場の広がりの効果を考慮せずに、廃棄物1体を対象とした評価結果を全廃棄体数で乗ずることで処分場全体の結果としていること」、を本年度の試行の対象候補として抽出した。

6. 1. 3 安全性の論理構造の説明技術の開発

本年度の説明技術の試行的検討においては、「ガラス溶解・核種溶出の抑制」を事例として選定し、説明の切り口として「安全機能の発現に係わるプロセスを起点とする切り口」、説明の内容として「該当機能の地層処分分野での知見の説明」、「評価上の取り扱いの説明」、および「評価結果の説明」を主な対象とすることとした。

これを踏まえ、原環センターが説明フレームの構築、説明素材の整備およびそれを効果的に提示するためのソフトウェアの設計・試作を行った。試作の成果については、6.2節において示す。

6. 1. 4 理解促進技術開発のための全体計画の策定

全体計画の策定においては、まず、6.1.2項と6.1.3項での検討および6.2節で示す「現実的性能評価技術の開発」を活用して実施した説明技術の開発を通じて見出されたわかりにくさの原因、説明上留意すべき点あるいは技術的課題等の知見を整理するとともに、説明の対象の全体像を俯瞰する試みとして安全機能の有機的な関係の整理を進めた。

このような検討を通じて見出された知見としては、以下のことが挙げられた。

- ・ 安全機能については、それが何かを説明するだけでなく、その必要性や現状の知見をあわせて提示することが有効と考えられる。
- ・ 一方、説明の内容の全てについて現段階で利用できる適切な説明ツールがあるわけではないため、優先度の高い説明内容を選ぶとともに、利用可能な素材の収集・整備とともに、その内容に応じた適切な説明ツールの作成を進める必要がある。
- ・ 説明の切り口および内容の全ての組み合わせを対象に説明技術を準備することができれば、原理的には全ての被説明者の興味や知識レベルに応じた柔軟な対応が可能になると考えられるが、現実的な作業量とするには対象とする組み合わせを優先度などを考慮しつつある程度絞り込む必要がある。絞り込みには、被説明者を見極め、興味の高い事項等を調査することが有効になると考えられる。
- ・ 具体的な説明の内容や流れあるいは素材の示し方（たとえば、計算機上での説明したい内容の配置や階層構造）にも、様々なパターンが考えられる。また、被説明者が自分の興味で説明項目と内容のレベルをインタラクティブに選ぶことができるようになると効果が高いと考えられる。この点については、計算機技術や情報処理技術としての実現可能性を調査するとともに、どの程度まで柔軟性を持たせることが効果的かを見極める必要がある。

安全機能の有機的な関係の整理については、たとえば、第2次取りまとめで示した安全機能を例として、図6.1-2に示すような示し方を考案した。本整理作業は来年度以降も継続していくも

のであり、本図は途中経過であるが、特定の安全機能が他の多数の安全機能と関係を有する場合や特定の安全機能が他の安全機能の発現の前提になっている場合があり、このような関係をわかりやすく説明することが安全性の論理構造の説明において重要になるとの見通しを得た。

以上のことと踏まえ、今後の検討に係わる全体計画を以下のように設定した。

- ・ 個別の安全機能および保守性に係わる説明技術の検討事例を拡充する（個別の説明技術の開発・整備）
- ・ 安全機能間の関係や保守性と評価結果の意味との関係などの体系的な整理を進め、安全性の論理構造の説明において骨格とすべき要素を見出すとともに、それらを中心とした評価全体を対象とした説明構造の構築を図る（全体的な説明構造の構築）
- ・ 上記の「個別の説明技術」と「全体的な説明構造」を組み合わせた総合的な説明技術の構築を段階的に進める

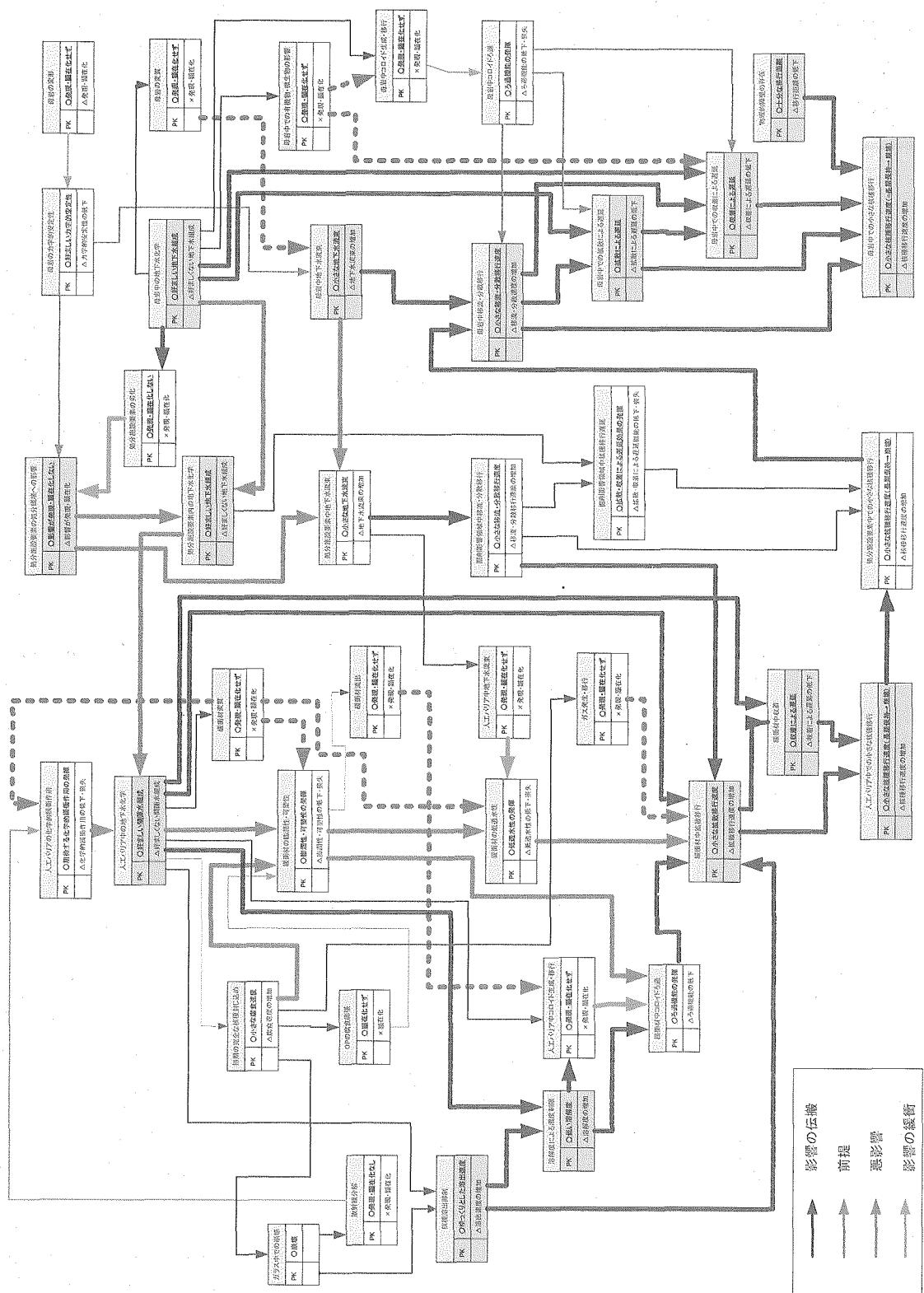


図 6.1-2 第2次取りまとめで示した安全機能の有機的な関係の示し方の例

6. 2 調査や個別技術の開発の概要

以下に、6.1節に示した共同研究での議論を反映した、説明フレームの構築、説明素材の整備およびそれを効果的に提示するための説明ツールの設計・試作⁴⁾の概要を示す。

6. 2. 1 説明のメッセージとポイントの設定

説明方法および説明ツールを検討するにあたっては、6.1.2項で整理した「説明の切り口」と「説明の内容」に留意することとした。また、何がわかりにくいのかという点への配慮を重視し、説明の始め方や順序、内容、詳細度などをいくつか用意し、理解しやすい説明の組み合わせを検討することとした。

また、内容を説明するための具体的な手法を以下のように整理した。

- ・テキストや音声による説明
- ・直観的、定性的な表現での説明（全体像を概念的に説明する）
- ・詳細な描写表現や科学的根拠に基づいたより現実的な挙動の説明（確認されている現象や各種データを用いて定量的に説明する）
- ・安全機能間の相関に関する説明（複数のプロセスの関連や応答をマルチウインドウやリンクなどの形式を用いて説明する）

なお、本年度の試行の対象としては、安全機能のひとつである「ガラス溶解・核種溶出の抑制」を事例とすることとした。これは、3章で示したように本共同研究の中で別途技術開発を進めており、より現実的な挙動をシミュレーションによる解析結果として例示できること、またそれにより第2次取りまとめにおける性能評価の保守性の確保に関する扱いの例を定量的に示せる可能性があることによる。また、「ガラス固化体の溶解は極めてゆっくりと進む」ということを最も伝えたいメッセージをとし、実際のガラスの溶解速度が、第2次取りまとめで設定されている値よりも遅い可能性を提示することにより、第2次取りまとめでの地層処分の安全性評価が頑健なものであることを示すことを説明のポイントとすることとした。

図6.2-1に、上記のメッセージと説明のポイントに対して、情報の受け手の理解促進に利用できると考えられる説明素材を説明の内容の項目ごとに整理した例を示す。

具体的な説明手法および説明ツールについては、次項6.2.2で述べる。

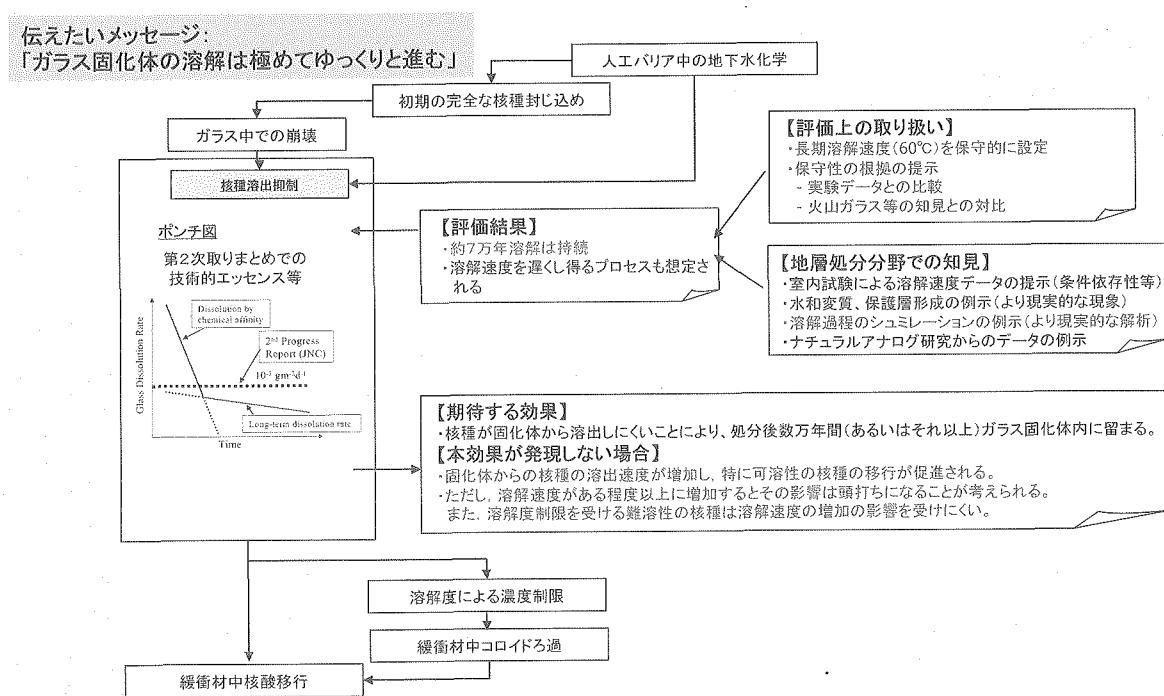


図6.2-1 理解促進に利用できると考えられる説明素材の整理例

6. 2. 2 説明方法および説明ツールの設計・試作

本試行では、説明の内容として 6.1.3 項で設定した「該当機能の地層処分分野での知見の説明」、「評価上の取り扱いの説明」、および「評価結果の説明」を主な対象とし、ガラス固化体の溶解現象に関し、関係するプロセスをガラス固化体のスケールから分子スケールまでの複数のスケールで示すこと、プロセスに関する特性や状態を視覚的に示すこと、およびそれらの経時変化を時系列的に動画を用いて示すなどを特徴とした手法を用いて説明することとした。説明には、図 6.2-2 に示すような 6 つの Window (サブ画面) を用いることとした。また、図 6.2-2 の左の構造図は「ガラス固化体の溶解は極めてゆっくりと進む」ということを説明するために考案した説明の内容の組合せを階層的に整理したものであり、右の 6 つの Window (Window1～Window6) と対応させている。

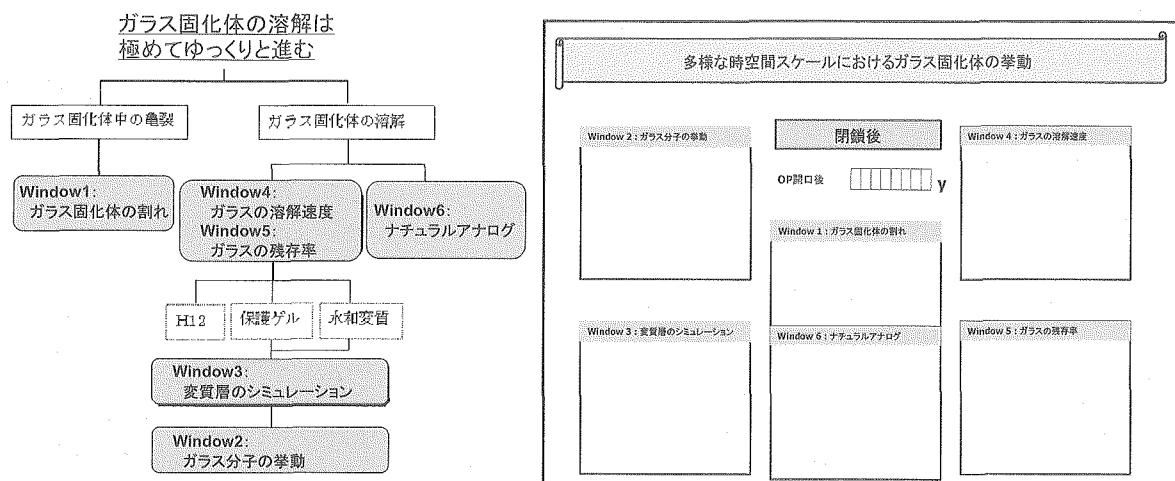


図 6.2-2 ガラス固化体の溶解挙動についての説明内容の構造と画面構成

以下、各 Window での説明の具体的な内容を、図 6.2-2 の左の構造の順番で記述する。

(1) Window1: ガラス固化体の割れ

ガラス固化体に生じる亀裂に関して、製造時から中間貯蔵の期間でガラス固化体の冷却により生じる亀裂進展（図 6.2-3 参照）およびオーバーパックの変形により生じるガラス固化体の亀裂進展をシミュレーションにより評価した結果を示す（図 6.2-4 参照）。このような結果により、開口直後のオーバーパックの開口部が限定的であることおよびガラス固化体に生じた亀裂のほとんどが閉じていることが視覚的に示される。

(2) Window4: ガラスの溶解速度と Window5: ガラスの残存率

ガラスの溶解速度について、3 つの考え方に基づくガラスの溶解速度、すなわち、実験結果に基づき保守的に設定する考え方（第 2 次取りまとめでの考え方）、水和変質モデルを基にする考え方、保護的なゲル層を基にする考え方を比較し、第 2 次取りまとめの保守性の程度ならびにより現実的で小さな溶解速度の設定の可能性を視覚的に示す（図 6.2-5 中の右上参照）。

また、ガラスの溶解が極めてゆっくりと進むことをより視覚的に示すためにガラスの残存率をあわせて示す（図 6.2-5 中の右下参照）。

(3) Window3: 変質層のシミュレーションと Window2: ガラス分子の挙動

ゲル層の形成と成熟過程を、微視的なスケール（メゾスケール）でのシミュレーション（ランダム格子モデル）により視覚的に示す（図 6.2-6 の左下参照）。

また、Window3 の微視的なスケールでのシミュレーションを補完する、さらに小さなナノスケールを対象としたガラス分子の挙動のイメージを示す（図 6.2-6 の左上参照）。

(5) Window6:ナチュラルアナログ

種々の検討を行っても、モデルにより評価された数万年間のガラスの溶解速度の妥当性や信頼性、実験結果の数万年間の評価への適用の妥当性については疑問が残る。そのため、火山ガラスについての研究事例を利用して、変質が殆ど認められること、この事例では火山ガラスは数十万年間安定であったことを示す（図 6.2-7 参照）。

6. 3 今後の課題

今後は 6.1.4 項において策定した理解促進技術開発のための全体計画のそれぞれの項目に対応していくことが必要である。

その中で、6.2 節で示した本年度の試行の結果を踏まえると、具体的な課題として以下の検討を進めることが重要と考えられる。

- ・本年度試作した説明ツールでは、「ガラス固化体の溶解速度は極めてゆっくりと進む」ことを、プロセスの可視化や評価において保守的な設定を考慮していることなどから説明する内容となっているが、それにより核種の固化体からの溶出が抑制され数万年間は固化体内に留まるという、核種移行抑制としての安全機能に関する具体的な説明には至っていない。今後、この点についての説明内容と説明ツールを充実させる必要がある。
- ・またガラス固化体に止まらず、処分システムを構成する各要素における個別の安全機能や保守的設定の考え方を説明できるように説明ツールを拡張していく必要がある。
- ・さらに、安全機能や保守性が有機的に組み合わされた評価全体での安全性の論理構造を説明する上でわかりにくさの原因、説明上留意すべき点および技術的課題などを具体化するとともに、その中から優先度の高い部分を明らかにすることにより、説明すべき論理構造の具体化、説明内容の具体化、および説明ツールの開発等を段階的に進める必要がある。

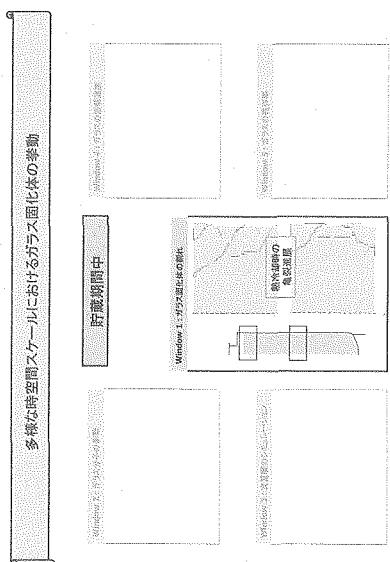


図 6.2-3 Window 1 におけるガラス固化体の冷却による亀裂進展の評価結果の提示

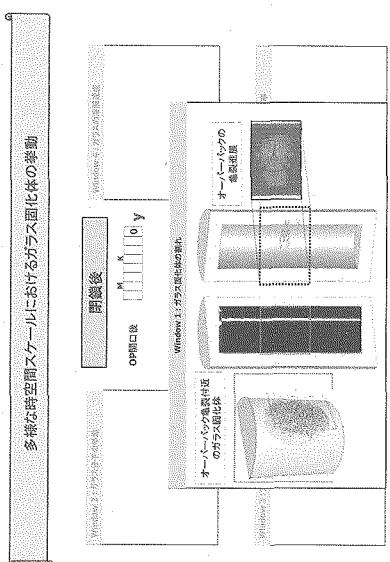


図 6.2-4 Window 1 におけるオーバーパーパック変形とガラス固化体の亀裂進展の評価結果の提示

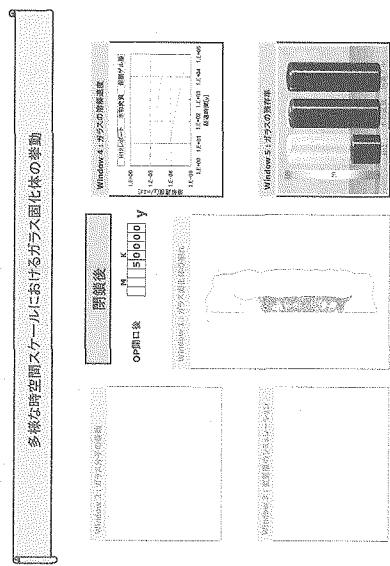


図 6.2-5 Window 4 と 5 におけるガラスの溶解速度及び残存率の比較例 (OP 開口後 50000 年) の提示

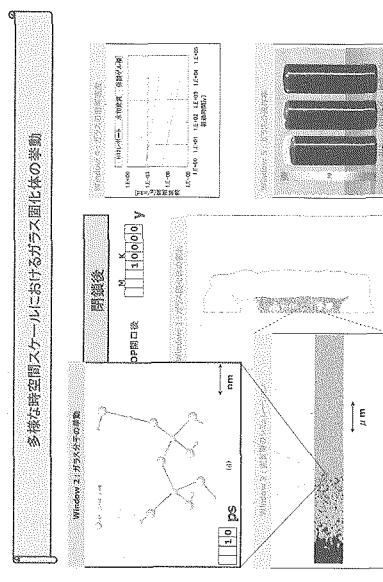


図 6.2-6 Window 2 と 3 におけるガラス分子の挙動イメージとゲル層形成のシミュレーション結果の提示

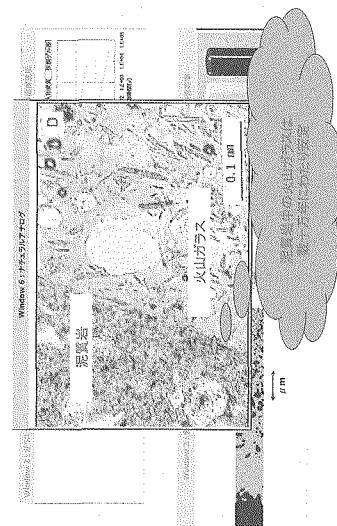


図 6.2-7 Window 6 におけるナチュラルアナログ (火山ガラス) での溶解速度の評価事例の提示

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：“高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－”, PNC TN 1410 92-081, 1992.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：“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, 1999.
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成16年度 技術情報広報調査 報告書”, 2005.
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“平成17年度 地層処分技術調査等 性能評価技術高度化 報告書（第2分冊） 第II編 現実的性能評価技術の開発”, 2006.

7. おわりに

本共同研究において、原子力機構と原環センターで保有している技術や情報およびリソースの効果的な活用を図ることにより、以下の研究項目について地層処分における性能評価技術の高度化を図った。

「多様なスケールを対象とした核種移行解析技術の開発の基本戦略の立案」では、原子力機構のこれまでの技術的蓄積をベースに、既存の性能評価技術の事例に関する調査・整理のための方針や方向性などを議論・検討し、それに基づき原環センターが諸外国やわが国における、特に水理と物質移行に着目した調査を実施した。

「ガラス固化体スケールを対象とした解析技術の開発」では、原子力機構で保有するガラス固化体の特性に関する情報（ガラス固化体の溶解速度や割れに関する情報など）を利用し、原環センターがより現実的な溶解や破壊に関するシミュレーションやその検証を実施した。

「処分場スケールを対象とした解析技術の開発」では、処分場スケールの評価手法に関する情報に着目し、原子力機構の策定した整理方針のもと、原環センターが既存の評価技術の調査・整理を実施した。また、マルチスケールモデルについては、本共同研究での議論・検討を通じて、処分場スケールに適用可能な解析手法の候補と判断されるものの、マルチスケールモデルの考え方の説明をよりわかりやすくすること、および開発の利点と課題を明確にすることの必要性が指摘された。そのため、原環センターにおいて上記の点を踏まえたモデル化技術の検討の継続と説明の工夫を実施した。

「地球化学情報の統合化技術の開発」では、原子力機構において研究の実施および情報の体系化の方針の策定や課題抽出を行い、その方針に基づき原環センターにおいて地球化学モデリングに関する具体的な事例の調査や情報の整理を実施した。

「安全性を説明するための論理構造に関する理解促進技術の開発」では、原子力機構において、理解促進技術の開発の方針として、安全性を安全機能や保守性との関係に着目して説明する技術の開発を提案し、その方針に基づき原環センターにおいて、ガラス溶解を例とした説明ツールの作成を試行した。

上記のように、各研究項目とも、両機関における技術や情報の提供あるいは共有のもとに、共同研究の場を活用して研究開発の方針や方向性を議論・検討した。またその結果を反映して、適切な役割分担のもと、調査や個別の評価技術の開発を効率的に実施した。調査や技術開発の過程で、新たな技術的な課題も抽出され、それらについては共同研究の中での各研究項目における全体的な研究計画や戦略の策定にフィードバックした。

今後、本年度策定した全体計画等に基づき、課題解決のための具体的な研究開発を本共同研究を活用しつつ継続して実施していくことが重要と考えられる。

謝辞

本共同研究の実施にあたり、日揮株式会社の千葉 保氏、嶋田秀充氏、三菱マテリアル株式会社の辻本恵一氏、山口耕平氏、株式会社クインテッサジャパンの高瀬博康氏、リチャード・メトカーフ氏には、多大なご協力を頂きました。

また、本報告書の取りまとめにあたり、株式会社 NESI の林 真紀氏には、報告書の編集作業などにおいてご協力を頂きました。原子力機構 地層処分研究開発部門 研究開発推進室の園部一志氏には、共同研究の締結に関わる契約業務などにおいてご尽力頂きました。同部門 河村和廣研究主幹には、ガラス固化体の物性等に関する特性や割れに関する情報についてご提供頂きました。Monitor Scientific LLC の Randolph C Arthur 氏には、英文要旨の修正をして頂きました。これらの方々に深く感謝致します。

付録1 解析の目的に応じたサイズとその設定根拠の関係付けの例

This is a blank page.

付録1 解析の目的に応じたサイズとその設定根拠の関係付けの例

表 1-1 POSIVA98-02 におけるスケール分類とその根拠

項目	スケール	目的	サイズ	設定根拠
水理	Regional (Regional Scale Model)*	・水文地質学的な全体状況を把握して、詳細なモデルの境界条件を与える ・沿岸地域では、陸地の隆起と気候変動が塩分と境界条件に与える影響を評価する	数km四方	・広域の亀裂と流域を含むようモデル領域を設定 ・解析結果が影響を受けない程度に、解析モデル領域を十分大きく設定
	Site (Site Scale Equivalent Porous Medium Model)	・水文地質学的な全体状況を把握して、詳細なモデルの境界条件を与える ・処分場が地下水流れに与える影響を評価する ・生物圈評価に必要な核種の放出点を評価する ・沿岸地域では、塩分と境界条件の変化の影響を評価する	4x4x2km	・Regionalモデルと整合性が取れるように、破碎帯に合わせてモデル領域を決める必要がある ・処分場閉鎖後は、定常状態モデルが適用
	Stochastic Continuum (Stochastic Continuum Model)	・下位スケールの流れの経路の分布を求める ・物質移行計算に必要なデータを生成する(移行パラメータ)	1kmのオーダー	・計算負荷が高いため、メッシュサイズと計算機の計算能力によりモデルの大きさが制限される ・Siteスケールの解析の境界条件(主な破碎帯)を、当該スケールの外側境界条件とした解析モデルを設定することは計算負荷の観点から不可能
	Discrete Feature (Discrete Feature Model)	・廃棄体規模の流量、及び分布を評価する ・流速の変動性、個別亀裂の空間変動性を評価するために、処分場から最も近い破碎帯への移行特性を与える	10mのオーダー	亀裂ネットワークのモデル作成は、計算機の計算能力により制限される ・1辺が100mの立方体のモデルが必要最小限の大きさであるが、計算能力の制限により達成困難である ・亀裂20000個、1辺が20~30mの立方体が現実的に計算可能
物質移行**	Far-Field	Far-Field 中の物質移行の解析		記述無し
	Deposition Holes and Tunnels	廃棄体、緩衝材、処分孔中の物質移行の解析		記述無し

This is a blank page.

付録2 評価技術に関する調査結果の詳細表

This is a blank page.

付録2 評価技術に関する調査結果の詳細表

表-2-1 SR97 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(1/5)

スケール	モデルの目的	区分	解析モデルと境界条件	モデルと設定根拠	水理		物質移行			
					プロセス及びイベント	特徴		プロセス及びイベント		
						人工バリア、処分場	天然バリア			
Regional scale	①ローカルスケールの外側境界条件の設定 ^{2) p.250}	Aberg			密度流(密度は塩度に依存) 水理プロセス(浸透、降雨、塩水の地下への浸入 ^{2) p.155})	①全領域で細粒の灰色がかった赤い花崗岩(Småland granite)が主 ^{12) p.14-15} ②沿岸の低い立地、塩水、地下水の再放出により淡水のレンズ深さ約200mまで浸透 ^{2) p.155-159} ③広域亀裂領域の存在 ^{10) p.19} ④透水係数の深度依存性(Arithmetic mean log K): 0 to -200(m.a.s.l.) -6.9, -200 to -400(m.a.s.l.) -6.7, -400 to -600(m.a.s.l.) -6.6 ^{10) p.54} ⑤処分場深度の流速0.03リットル/(m ² y)、動水勾配0.05-0.2% ^{2) p.155-159} ⑥放出域は島を囲む海港 ^{2) p.155-159} ⑦平均表面流水量の計算値は150-200mm/y。表面水は直接海に排水されるかあるいは泥炭地及び堆積物を通って排水される。 ^{8) p.54-55}				
		Beberg	・密度流 ・浸透流 ・多孔質媒体モデル(危険を変換) ・サイズはAbergについて100km ² ^{2) p.155} の場合の解析と170km ² ^{10) p.21} の場合の解析が行われている。Bebergについて150km ² ^{2) p.155} の解析と約10×10km ^{10) p.55} の場合の解析が行われている。Cebergについて、300km ² ^{2) p.155} 程度の領域の解析が行われている。			①平坦な底層の露出、沼沢、小さな湖の広がる低地帯 ^{2) p.157} ②Uppland郡の北部海岸から15km内陸、塩水(基本ケースは淡水) ^{2) p.157, 8) p.254 10) p.47, 67} ③東側に垂直亀裂領域 ^{2) p.157} ④透水係数の深度依存性(Arithmetic mean log K): above to -100(m.a.s.l.) -6.81, -100 to -200(m.a.s.l.) -7.67, -200 to -400(m.a.s.l.) -8.07, below -400(m.a.s.l.) -7.80 ^{10) p.54} ⑤処分場深度の流速0.03リットル/(m ² y)、動水勾配0.2-0.3% ^{2) p.155-159} ⑥北部の放出域はDalälven、Tämnarän、Forsmarksän、Ölandsän川、南部の放出域はÖresundaんとFyrisän川を経由したMälaren湖への排水 ^{8) p.57}				
		Ceberg				①海面から0と300mの間で変動するかなりの地形の起伏。 ^{2) p.159} 地質学的には堆積岩の片麻岩が支配的。 ^{8) p.41} ②淡水。從って密度流は無視される。 ^{2) p.159} ③亀裂領域と岩マトリクス間の透水性の違いがCebergでは他の比較的低い。 ^{2) p.159} ④大規模な地下水の移動はより深部でのみ起こる。 ^{2) p.159} 透水係数の深度依存性:Arithm.Mean Log10K(m/s):+110 to 0(masl):-7.16, 0 to -100(masl):-8.65, -100 to -300(masl):-9.63, Below -300(masl):-9.83 ^{10) p.59} ⑤処分場深度の流速0.03リットル/(m ² y)、動水勾配0.5-0.8% ^{2) p.155-159} ⑥処分場深度の放出域は主に処分場の東、南、西の3つの異なる地域に起きた。 ^{2) p.55}				
Local scale	Repository system, Biosphereにおける放射性核種の移行計算に使用される境界条件を供給する。 ・次元の地下水流动の確率論的な連続体シミュレーションのための多孔質媒体モデル ^{2) p.251} ・サイズは、Aberg 2400×2200×1250m, Beberg 4130×5355×1805m, Ceberg 6510×4290×1190m ^{2) p.252} の場合の解析とAberg 1km ² ^{10) p.21} , Beberg 6km ² ^{10) p.55} , Ceberg 3km×2km ^{10) p.19} の場合の解析が行われている。 ・境界条件はRegional model計算から取得される。 ^{2) p.254} ・キニスタの位置から地図と生物圏の境界までの移行経路と移流移行時間(y) ・地表における出口の座標 ^{2) p.251}	Aberg			・ダルシー流 ・透水俓数(連続的で空間的に則通付けられた簡単なブロセス)、結晶質岩の亀裂の透水俓数は不連続	①ローカルスケールで支配的な四つの岩種 ^{10) p.21} ②沿岸の低い立地、塩水、地下水の再放出により淡水のレンズ深さ約200mまで浸透 ^{2) p.155-159} ③EW1(幅100m以上), Major fracture zones(幅5m以上), Minor zones(幅5m以下) ^{2) p.35} ④透水俓数の深度依存性(Arithmetic mean log K): 0 to -200(m.a.s.l.) -6.9, -200 to -400(m.a.s.l.) -6.7, -400 to -600(m.a.s.l.) -6.6 ^{10) p.54} ⑤処分場深度の流速0.03リットル/(m ² y)、動水勾配0.05-0.2% ^{2) p.155-159} ⑥放出域は島を囲む海港 ^{2) p.155-159} ⑦表面水は直接海に排水されるか、あるいは泥炭地及び堆積物を通って排水される。 ^{8) p.55}				
		Beberg				①灰色の花崗岩が支配的で最低深度700mに及ぶ。高さ差は±15m内。 ^{8) p.38} ②Uppland郡の北部海岸から15km内陸、塩水(基本ケースは淡水) ^{2) p.157, 8) p.254 10) p.47, 67} ③14の破碎帶の長さ(2km), 幅(100m scale median log K, 3m scale median log K) ^{2) p.40} ④透水俓数の深度依存性(Arithmetic mean log K): above to -100(m.a.s.l.) -6.81, -100 to -200(m.a.s.l.) -7.67, -200 to -400(m.a.s.l.) -8.07, below -400(m.a.s.l.) -7.80 ^{10) p.54} ⑤処分場深度の流速0.03リットル/(m ² y)、動水勾配0.2-0.3% ^{2) p.155-159} ⑥南部ブロックの地表水系は二つの系に分けられ、一つは北東に排水され、他は南西に排水される。北部ブロックは北東に排水する。 ^{10) p.74}				
		Ceberg				①海面から0と300mの間で変動する重大な地形の起伏 ^{2) p.159} 堆積岩の片麻岩が支配的。 ^{8) p.43} ②淡水。從って密度流は無視される。 ^{2) p.159} ③亀裂領域と岩マトリクス間の透水性の違いがCebergでは他の比較的低い。 ^{2) p.159} ④大規模な地下水の移動はより深部でのみ起こる。 ^{2) p.159} 透水俓数の深度依存性:Arithm.Mean Log10K(m/s):+110 to 0(masl):-7.16, 0 to -100(masl):-8.65, -100 to -300(masl):-9.63, Below -300(masl):-9.83 ^{10) p.59} ⑤処分場深度の流速0.03リットル/(m ² y)、動水勾配0.5-0.8% ^{2) p.155-159} ⑥三つの小さな川の流域がサイトを分断、一つは南と西にGideälvenに排水し、一つは北にそして西にGideälvenに排水、三つ目は北と東、Stormyrn bogとHusånの流れに排水。				
Repository system(Geosphere)	COMP23からの放出どのだけがBiosphereに到達するかを記述する	Geosphere	・岩中の地下水流动に沿って床空の粒子が移行する仮想的な流动経路に沿った放射性核種の移行を計算する。 ^{2) p.251} ・Local scale モデルで計算された処分場深度における地下水フランクス(ダルシー流速)[m ³ /(m ² y)], キニスタの位置から地図と生物圏の境界までの移行経路と移流移行時間(y)を入力として使用。 ^{2) p.251}				・移流、マトリクス拡散、吸着、コロイド移行、ガス相中の移行、崩壊 ^{7) p.171}	・断層、亀裂ネットワーク、透水俓数・マトリクス拡散		
Repository system(Fuel, Canister, Buffer/backfill)	損傷のあるキニスタ中の核種の放出と移行の評価。 ^{2) p.258}	Fuel	・溶解度制限に従いどのように沈殿し、どのように核種がキャニスター中の剥離材に拡散するかにより生じる。 ^{2) p.258}			・移流、拡散、吸着、コロイド移行、ガス相移行、崩壊 ^{7) p.171}	・溶解度制限(放出は二つのメカニズム、同時に放出及び一定速度Rでの二酸化ウランマトリクスの放出による) ^{2) p.258-259}			
		Cast iron insert/copper canister	・溶けた核種を通る外の地層中の核種がキャニスター中の剥離材中を通り、どの上に異なる移行経路に沿て岩の危険中の活動地下水中に移行するかを計算する。 ^{2) p.258}			・岩中では、地下水流动による移流により移行する。定常状態では拡散が重要である。マトリクス拡散により放射性核種が保持され移行時間に延長が生じる。 ^{2) p.74}	・移流、拡散、吸着、コロイド移行、ガス相移行、崩壊 ^{7) p.171, 8) p.258-259} ・損傷したキニスタを通してどのように核種が拡散するか、割れの大きさが放出を制限する。 ^{2) p.258-259}			
		Buffer/backfill	・サイズはキャニスター外径1050mm、緩衝材外径1750mm。 ^{2) p.15}			・移流、拡散、吸着、コロイド移行、化学生態同定、崩壊 ^{7) p.85}	・拡散、吸着、崩壊過程のプロセスで記述され、溶解度制限はモデル化されていない。 ^{2) p.258}			
Biosphere	Biosphereに放出されたすべての放射性核種についてターンオーバーについて記述することにより、潜在的に被ばくする人間と環境への放射線学的影響を評価することを可能とする。 ^{2) p.251}	Biosphere	・BIO42モデルはFARF31により計算された地図からの放出(B/q/y)に生態系固有の線量換算係数(EDF)(Sv/Bq)を掛けることにより計算される。 ^{2) p.251} ・Local scale モデルで計算される地表における出口の座標を入力として使用。 ^{2) p.251}				・決定グループ、EDFの決定、三つの処分場サイトの典型的な生態系への分割、処分場システム(燃料、キニスタ、緩衝材/埋め戻し材、地図)に応じ、生物圏はもっと不均質で複雑で変わらやすい。 ^{2) p.251}			

2) TR-99-06 SR97 Post closure safety Main report Volume 1, II, main report summary

7) TR-99-07 Background report to SR97, SR97 Processes in the repository evolution

8) TR-99-08 Background report to SR97, SR97 Waste, repository design and sites

9) TR-99-09 SR97 Data and data uncertainties

10) TR-97-23 Summary to hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg

11) TR-97-06 Åspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/5

12) TR-97-03 Åspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/2

13) TR-03-08 Planning report for the safety assessment SR-Can

表-1-1 SR97 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(2/5)

(結晶質岩/堆積岩)			
スケール	区分	不均質性	不確実性と取り扱い 開発課題、感度
Regional scale	Aberg	①主要な岩はTrans-Scandinavian Granite-Porphyry Belt ^{12)p.14} ②透水性の高い/低い領域に分割 ^{8)p.54-55} ③主要な断層領域(幅>5m)と亀裂群(EW-1,NE-1等) ^{12)p.16} ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.9 ^{8)p.54-55} ⑤透水性の低い領域: Transmissivity mean(T)=0.3E-5, 高い領域: 10E-5m ² /s ^{8)p.54-55}	支配的な不確実性は、全体を記述するのに使用可能なデータが限定されることによる。最新の地理的な構造の位置に関する不確実性は、航空地球物理及び特徴表示だけが利用可能な場合、100-200mと評価される。地上地球物理、地理学的なフィールド調査及び掘削により構造の位置が実証された場合には、不確実性が著しく減少する(5-20m)。Abergは、限定的でない研究サイトが不足している(南Äspöからの掘削データが必ずしも全地域を代表しない)。Beberg, Cebergに関しては、地質学的な記述に相対的に大きな不確実性がある。長期的な不確実性に関して、AbergとCebergの基本ケースは現在想定される条件を表現している。 ^{2) II p.264} Abergでは土地の隆起により現在の状況が変わると考えられ、2000-5000年で泥炭地がおそらく支配的な生態系となると予想される。 ^{2) II p.266} Cebergでは土地の隆起による支配的な生態系の分布への影響は想定されていない。 ^{2) II p.286} 土地の隆起を除き、処分場建設前の地層条件が長期的に持続すると想定している。 ^{2) II p.249} Bebergの基本ケースは将来考えられる、現在の塩水が塩水でない水で置き換わった状況を表現する仮定的な状況。 ^{2) II p.264} 森林が支配的な生態系であるが、保守的にモデル化では泥炭地を仮定している。土地の隆起及び湖の乾燥が状況を変えることは想定していない。 ^{2) II p.286} 土地の隆起を除き、処分場建設前の地層条件が長期的に持続すると想定している。 ^{2) II p.249}
	Beberg	①地表は起伏が少ない(高低差30m)。西側に沢沼が広がる。 ^{10)p.51} ②Uppland北東部の一つの特徴: Singö断層。 ^{8)p.54-55} ③北西に向かうSingö断層は幅100-200mで垂直に準じ、複雑な構造を持つ。平均透水係数4E-6m/s。 ^{10)p.55} ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.81 ^{8)p.64} ⑤高度400m以下の岩Arithmetic mean log10K(m/s)=-7.80 ^{8)p.54-55}	
	Ceberg	①処分深度における低透水性が特徴、高度の高い地域はRechargeの地下水流動パターン、断層谷間では、流れへのDischargeが主 ^{10)p.85} ②Gideåサイトの南側は花崗岩片麻岩の集合で西に向かって花崗岩が集合する。侵入する玄武岩から成る堤防および年齢の12億年のシートはこれらの岩塊を中断する。堤防はほぼ200-300mごとに配置し、0.5-15mの幅があり、東西のストライクと急峻な傾斜を持つ。 ^{10)p.91} ③岩塊の広域水平方向の主要な成分は方向N67°CEの岩圧。広域の東西の特徴と玄武岩の堤防はEW旧圧を提起する。南北に掘りあたる広域の特徴は通常の断層と解釈される。Arithm. Mean Log10K(m/s): +110 to 0(masl): -7.16, 0 to -100(masl): -8.65, -100 to -300(masl): -9.63, Below -300(masl): -9.83 ^{10)p.99}	
Local scale	Aberg	①Ärvö granite(Småland granite), Äspö diorite, greenstone, fine-grained granite ^{8)p.31} ②Major fracture zones(幅5m以上東-西、北-東方向で支配的)、Minor zones(幅5m以下、北-北西から北-東方向で支配的) ^{8)p.35} ③最大の単一構造帯はEW-1(北-東の可塑性変形帯、幅100m以上) ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.9 ⑤16の破碎帯の幅(m)、T mean(m ² /s)等のデータ ^{8)p.35}	支配的な生態系となると予想される。 ^{2) II p.266} Cebergでは土地の隆起による支配的な生態系の分布への影響は想定されていない。 ^{2) II p.286} 土地の隆起を除き、処分場建設前の地層条件が長期的に持続すると想定している。 ^{2) II p.249} Bebergの基本ケースは将来考えられる、現在の塩水が塩水でない水で置き換わった状況を表現する仮定的な状況。 ^{2) II p.264} 森林が支配的な生態系であるが、保守的にモデル化では泥炭地を仮定している。土地の隆起及び湖の乾燥が状況を変えることは想定していない。 ^{2) II p.286} 土地の隆起を除き、処分場建設前の地層条件が長期的に持続すると想定している。 ^{2) II p.249}
	Beberg	①地表は起伏が少ない(高低差15m内)。灰色の花崗閃緑岩が支配的で深度700mに及ぶ。 ^{8)p.38} ②Uppland北東部の一つの特徴: Singö断層。 ^{8)p.54-55} ③北東から南西に分断するSteeply-dipping fracture zone, Zone 1(長さ5-6km, 幅約20m)。 ^{8)p.38} ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.81 ^{8)p.64} ⑤高度400m以下の岩Arithmetic mean log10K(m/s)=-7.80 ^{8)p.54-55}	
	Ceberg	①処分深度における低透水性が特徴、高度の高い地域はRechargeの地下水流動パターン、断層谷間では、流れへのDischargeが主 ^{10)p.85} ②いくつかの相対的に透水性の高い5-50m幅の破碎帯を同定。 ^{10)p.103} ③岩塊の広域水平方向の主要な成分は方向N67°CEの岩圧。広域の東西の特徴と玄武岩の堤防はEW旧圧を提起する。南北に掘りあたる広域の特徴は通常の断層と解釈される。Arithm. Mean Log10K(m/s): +110 to 0(masl): -7.16, 0 to -100(masl): -8.65, -100 to -300(masl): -9.63, Below -300(masl): -9.83 ^{10)p.99}	
Repository system (Geosphere)	Geosphere		確率計算に際して、3通りの計算が行われた。(1)移流移行時間及び地下水フランクスに関する、計算された相関分布が使用された。(2)遅延時間、処分孔周辺の亀裂の幾何、岩マトリクス中のペクレ数と最大拡散侵入深さに関しては、保守的な値だけが使用された。(3)残りのデータ、つまり、破損キャニスターの数、溶解度、瞬時放出割合、分配係数、拡散係数等について、現実的な値と保守的な値にそれぞれ0.9と0.1が割り当てられた。 ^{2) II p.314}
Repository system (Fuel, Canister, Buffer/backfill)	Fuel		・気候変動、氷河期の状況等他の気候の取り扱い ^{13)p.93}
	Cast iron insert/copper canister		・性能評価上の感度については、気候シナリオは基本シナリオに比べて生物圈条件が異なる点で大きく異なるが、放射性核種放出の影響はキャニスター破損シナリオに比べてはるかに小さかった。
Buffer/backfill			
Biosphere	Biosphere		EDFの各サイトにおける値が現実的な値から保守的な値に変化した場合の影響。確率として、0.9及び0.1がそれぞれ現実的、保守的なデータに割り当てられた。 ^{2) II p.312-314}

2) TR-99-06 SR97 Post closure safety Main report Volume I, II, main report summary

7) TR-99-07 Background report to SR97, SR97 Processes in the repository evolution

8) TR-99-08 Background report to SR97, SR97 Waste, repository design and sites

9) TR-99-09 SR97 Data and data uncertainties

10) TR-97-23 Summary to hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg

11) TR-97-06 Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/5

12) TR-97-03 Äspö HRL-Geoscientific evaluation 1997/2

13) TR-03-08 Planning report for the safety assessment SR-Can

表・2-1 SR97 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(3/5)

		Aberg	Beberg	Ceberg
入力データ及び利用可能性	概要調査段階	①SGUの井戸文献データ ②Ärvö島の掘削孔透水試験と発電所とCLAB施設の建設に関連したSimpevarpの地球水理調査の情報 ^{11)p.8}	①SGUの井戸文献データ ②SKBの放射性操業廃棄物の最終処分場(SFR)ForsmarkはFinnsjönサイトの15km北東に位置し、SFRの建設に伴うサイト特性調査とモデル化研究は広域地質及び水理に重要な情報を与えた ^{10)p.47}	①SGUの井戸文献データ ②Gissjö水圧トンネル近くの広域傾向及び測定の報告書 ^{10)p.92}
	精密調査段階（地表）	Regional scaleについて、起伏マップを含む衛生画像解析と航空写真解析、岩種と主要な亀裂領域、地上からの詳細調査、地下調査に関する基本マップ、20×30km 亀裂マップと Simpevarp (2×2km) のマップ、詳細特性調査地域外の試験掘削、航空磁気マップ、地上の地球物理調査（地磁気と重力のマップ、VLF調査、地震の屈折調査の情報）のうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.29} 。Local scaleについて、地形マップ、衛生写真、DTM、コンターマップ、母岩マップ、亀裂マップ、掘削孔、地上地球物理測定、地上地球物理調査(Slingram, VLF, 地上レーダー、抵抗と磁気調査及び地震調査)、掘削孔地球物理調査(レーダー、Flow logging, 自然γ放射線、破碎帶における抵抗測定)のうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.30}	Regional scaleについて、起伏マップを含む衛生画像解析と航空写真解析、岩種と主要な亀裂領域に関する基本マップ、地上の地域外の試験掘削(SFRの掘削孔とSingo断層の掘削孔)、航空磁気マップのうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.29} 。Local scaleについて、地形マップ、航空写真、IR写真、母岩マップ、亀裂マップ、掘削孔、地上地球物理測定、地上地球物理調査(Slingram, VLF, 抵抗と磁気調査及び地震調査)、掘削孔地球物理調査(レーダー、Flow logging, 自然γ放射線、破碎帶における抵抗測定)のうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.30}	Regional scaleについて、航空写真解析と地形マップ、岩種と主要な亀裂領域に関する基本マップ、地上の地球物理調査(地磁気マップ、Slingram、VLF調査)のうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.29} 。Local scaleについて、地形マップ、地質構造と共に解釈される処分場領域について利用可能な情報、母岩マップ、亀裂マップ、掘削孔、地上地球物理測定、地上地球物理調査(Slingram, VLF, 抵抗と磁気調査及び地震調査)、掘削孔地球物理調査(レーダー、Flow logging, 自然γ放射線、破碎帶における抵抗測定及び地震断層撮影)のうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.30}
	精密調査段階（地下）	地下水組成、地形、動水勾配、破碎帶		

表-2-1 SR97 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(4/5)

数学モデル及び計算コードの詳細内容				
スケール	大分類	中分類	小分類	項目
Regional scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 密度流、水理プロセス(浸透、降雨、塩水の地下への浸入) 2) I p.155
			物理要素: 岩	
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 地下水流動と移行に関する連続体モデル 2) II p.251
		数学モデル及び数値計算方法		数値計算手法: 有限要素法 2) II p.251
				計算体系: 三次元
	計算コード		連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -
				コード名称: NAMMU 13)p.91
				基本機能、入出力データ: 塩分分布データ、測定された地下水水位、地下水流速 2) I p.155
				計算環境: -
				コードの適用限界: -
Local scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地下水流動、移流移行 2) II p.251
			物理要素: 岩	
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 地下水流動と移流移行に関する確率論的な連続体シミュレーション 2) II p.251。地下水水流動はダルシー則で記述され、透水係数は連続的で空間的に相關した確率論的プロセスとして記述される。 2) II p.293
		数学モデル及び数値計算方法		数値計算手法: 有限差分法 2) II p.251
				計算体系: 三次元。メッシュ数はAbergについて96×88×50個。
	計算コード		連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -
				コード名称: HYDRASTAR 2) II p.251
				基本機能、入出力データ: 透水係数、ダルシー流速(入力データ)。境界条件はRegional scaleの解析から決定される。
				計算環境: -
				コードの適用限界: 塩度の差から生じる密度流は計算不可能。 2) II p.251 境界における時間変動は無視される。 2) II p.293
Repository system (Geosphere)	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 移行経路に沿った移流と分散、岩マトリクスへの収着と結合したマトリクス拡散、放射性崩壊連鎖。 2) II p.291
			物理要素: 岩	
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: いわゆる二重空隙モデルを使用。 2) p.79 定常状態の流動条件についてのみ有効。 13)p.94
		数学モデル及び数値計算方法		数値計算手法: -
				計算体系: 一次元。
	計算コード		連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -
				コード名称: FARF31 2) II p.291
				基本機能、入出力データ: 移行時間 t_w 、水流表面積/体積 aw 、 $F(tw \times aw)$ 、ペクレ数、岩のKdとDe等(入力パラメータ)。 2) II p.312-314 境界条件はLocal scaleの解析から決定される。COMP23からの放出が入力となる流動チューブ概念による。
				計算環境: -
				コードの適用限界: 一次元流動チューブ概念は定常状態の流動についてのみ有効であり、海岸線の移動による遷移的な流動には適用できない。 13)p.96

表-2-1 SR97 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(5/5)

Repository system (Fuel, Canister, Buffer/backfill)	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 溶解度制限に従いどのように沈殿し、どのように核種がキャニスター中の割れ目を通って拡散し外側の緩衝材中を通り、どのように異なる移行経路に沿って岩の亀裂中の流動地下水水中に移行するかを計算する。 ^{2) II p.288}
			物理要素: 燃料、キャニスター、緩衝材/埋め戻し材	
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: いわゆるコンパートメントモデル。 ^{2) p.78} 定常状態の流動条件についてのみ有効。 ^{13) p.94}
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: 一次元。
		連成方法	連成方式: -	
			連成計算の方法: -	
		計算コード	コード名称: COMP23 ^{2) II p.288}	
			基本機能、入出力データ: キャニスターの数、遅延時間、瞬時放出割合、溶解度、緩衝材Kd、埋め戻し材Kd、流動など(入力パラメータ)。 ^{2) II p.288}	Local scaleのモデルから処分場深度における地下水フラックス(ダルシー速度)、キャニスターの位置から地図と生物圏の境界までの移行経路と移流移行時間(y)が提供される。
			計算環境: -	
			コードの適用限界: 一次元流動チューブ概念は定常状態の流動についてのみ有効であり、海岸線の移動による遷移的な流動には適用できない。 ^{13) p.96}	
			モデル化の対象	プロセス: BIO42における線量換算係数は、放出がどの種類の生物圏モジュールで起こるかにより決定される。モジュールの種類は、直接明記されるか、あるいは、どこで放出が起こるかに関する関数として決定される。 ^{2) II p.291}
			物理要素: -	
Biosphere	数学モデル	個別モデル	モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 線量計算は、FARF31により計算された岩石圏からの放出(Bq/年)に生態系固有の線量換算係数(EDF)(Sv/Bq)を掛けることにより線量が計算される。 ^{2) II p.291}
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: 一次元。
			連成方式: -	
			連成計算の方法: -	
		計算コード	コード名称: BIO42 ^{2) II p.291}	
			基本機能、入出力データ: 線量換算係数はどのタイプの生物圏モジュールで放出が生じるかにより決定される。 ^{2) II p.291}	Local scaleのモデルにより、地表における出口の座標が提供される。
			計算環境: -	
			コードの適用限界: -	

This is a blank page.

表-2-2 SR-Can 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(1/5)

(鉱質岩/堆積岩)										
スケール	モデルの目的	区分	解析モデルと境界条件	モデルと設定根拠	水理		物質移行		特徴	
					プロセス及びイベント	特徴	プロセス及びイベント	特徴		
Regional scale	①Nested modelによるローカルスケールへの接続(連続性、マスバランスの保存) ②土地の隆起による海岸線の移動による地下水流动の遷移プロセスの考慮 ③Forsmarkのバルト海への接近に伴う密度流と塩水場の取り扱い	Forsmark 13p.29 Simpevarp 13p.29	・密度流 ・Multi-rate diffusion ・連続多孔質媒体モデル(CPMモデル)、決定的大規模破砕帶の説述を含む 13p.192-193, 13p.92 ・長さのスケールが10~100km 13p.192 ・Local scaleへの接続(連続性、マスバランス)		密度流(密度は塩度に依存)、 Multi-rate diffusion 13p.91-92 地下水流动 13p.192	①平坦な地盤の露出、沼、小さな湖の広がる低地帯 21p.167 ②Uppland都の北部海岸から15km内陸、塩水(基本ケースは淡水) 21p.167, 5p.264 10p.47,67 ③東側に垂直亀裂領域 21p.167 ④透水係数の深度依存性(Arithmetical mean log K): above to -100(m.a.s.l.) -6.81, -100 to -200(m.a.s.l.) -7.67, -200 to -400(m.a.s.l.) -8.07, below -400(m.a.s.l.) -7.80 10p.64 ⑤処分場深度の流速1リットル/(m ² ・s)、動水勾配0.2~0.3% 21p.165-169 ⑥北部の放出域はDalälvven, Tämnarän, Forsmarksän, Olandsän川、南部の放出域はÖresundssänとFyrisån川を経由してMälaren湖への排水 4p.67 ⑦計算された表面流量は240mm/y. 22p.67			人工バリア、処分場 天然バリア	
Local scale	①Nested modelによるキャニスター スケールへの接続(連続性、マスバランスの保存) ②アーフィールド移行経路の評価 ③土地の隆起による海岸線の移動による地下水流动の遷移プロセスの考慮	Forsmark 13p.29 Simpevarp 13p.29	・Regionalの連続多孔質媒体モデル(CPM)内 亀裂ネットワークモデル(DFNモデル) 13p.192 ・長さのスケールが1~10km 13p.192 ・Repository scaleへの接続(連続性、マスバランス)		透水係数の確率的なシミュレーション、 確率的な透水係数値の等価な均一値への置き換えの実施 3p.169	①灰色の花崗閃緑岩が支配的で最低深度700mに及ぶ。高度差は±15m内。 4p.38 ②Uppland都の北部海岸から15km内陸、塩水(基本ケースは淡水) 21p.167, 5p.264 10p.47,67 ③14の破砕帶の長さ(km)、幅(m)、100m scale median log K, 3m scale median log K 8p.40 ④透水係数の深度依存性(Arithmetical mean log K): above to -100(m.a.s.l.) -6.81, -100 to -200(m.a.s.l.) -7.67, -200 to -400(m.a.s.l.) -8.07, below -400(m.a.s.l.) -7.80 10p.64 ⑤処分場深度の流速1リットル/(m ² ・s)、動水勾配0.2~0.3% 21p.165-169 ⑥南北ブロックの地表水系は二つの系に分けられ、一つは北東に排水され、他は南西に排水される。北部ブロックは北東に排水する。 10p.74			人工バリア、処分場 天然バリア	
Repository scale	①Nested modelによるCanister scaleへの接続(連続性、マスバランスの保存) ②土地の隆起による海岸線の移動による地下水流动の遷移プロセスの考慮	Forsmark 13p.29 Simpevarp 13p.29	・亀裂ネットワークモデル(DFNモデル)内に 処分孔、EDZ、処分トンネルがCPMで記述さ れる 3p.193 ・長さのスケールが10~1000m 13p.192 ・Canister scaleへの接続(連続性、マスバランス) ・COMP23におけるQ1,Q2の等価流量の入力の提供 3p.192	透水係数の確率的なシミュレーション、 確率的な透水係数値の等価な均一値への置き換えの実施 3p.169	①灰色の花崗閃緑岩が支配的で最低深度700mに及ぶ。高度差は±15m内。 4p.38 ②Uppland都の北部海岸から15km内陸、塩水(基本ケースは淡水) 21p.167, 5p.264 10p.47,67 ③14の破砕帶の長さ(km)、幅(m)、100m scale median log K, 3m scale median log K 8p.40 ④透水係数の深度依存性(Arithmetical mean log K): above to -100(m.a.s.l.) -6.81, -100 to -200(m.a.s.l.) -7.67, -200 to -400(m.a.s.l.) -8.07, below -400(m.a.s.l.) -7.80 10p.64 ⑤処分場深度の流速1リットル/(m ² ・s)、動水勾配0.2~0.3% 21p.165-169 ⑥南北ブロックの地表水系は二つの系に分けられ、一つは北東に排水され、他は南西に排水される。北部ブロックは北東に排水する。 10p.74			人工バリア、処分場 天然バリア		
Canister scale	①Nested modelによるRepository scaleへの接続(連続性、マスバランスの保存) ②土地の隆起による海岸線の移動による地下水流动の遷移プロセスの考慮	Forsmark 13p.29 Simpevarp 13p.29	・亀裂ネットワークモデル(DFNモデル)内に 処分孔、EDZ、処分トンネルがCPMで記述さ れる 3p.193 ・長さのスケールが1~10m 13p.192 ・Repository scaleへの接続(連続性、マスバランス) ・COMP23におけるQ1,Q2の等価流量の入力の提供 3p.192	透水係数の確率的なシミュレーション、 確率的な透水係数値の等価な均一値への置き換えの実施 3p.169	①灰色の花崗閃緑岩が支配的で最低深度700mに及ぶ。高度差は±15m内。 4p.38 ②Uppland都の北部海岸から15km内陸、塩水(基本ケースは淡水) 21p.167, 5p.264 10p.47,67 ③14の破砕帶の長さ(km)、幅(m)、100m scale median log K, 3m scale median log K 8p.40 ④透水係数の深度依存性(Arithmetical mean log K): above to -100(m.a.s.l.) -6.81, -100 to -200(m.a.s.l.) -7.67, -200 to -400(m.a.s.l.) -8.07, below -400(m.a.s.l.) -7.80 10p.64 ⑤処分場深度の流速1リットル/(m ² ・s)、動水勾配0.2~0.3% 21p.165-169 ⑥南北ブロックの地表水系は二つの系に分けられ、一つは北東に排水され、他は南西に排水される。北部ブロックは北東に排水する。 10p.74			人工バリア、処分場 天然バリア		
Repository system (Geosphere)	GOMP23からの放出のどれだけが Biosphereに到達するかを記述する。	Geosphere	・岩中の地下水流动に沿って架空の粒子が 移行する仮想的な流动経路に沿った放射性 核種の移行を計算する。 21p.291 ・Repository/canister scale モデルで計算さ れたQ1,Q2の等価流速を入力として使用。 3p.192				移流、マトリクス拡散、吸着、コロイド移 行、ガス相中の移行、崩壊 7p.171	・断層、亀裂ネットワーク、 透水係数、マトリクス拡散		
Repository system (Fuel, Canister, Buffer/backfill)	損傷のあるキャニスター中の核種の 放出と移行の評価。 21p.298	Fuel	・溶解度制限に従いどのように沈殿し、どの ように核種がキャニスター中の割れ目を通じて 拡散し外側の緩衝材中を通り、どのように異 常な移行経路に沿って岩の亀裂中の流动地 帯中に移行するかを計算する。 21p.288	・緩衝材中では、粒和後、 緩衝移行は緩衝材空隙 中の拡散だけにより生じる。 移流もコロイド移行も 緩衝材特性により生じない。 3p.74		移流、拡散、吸着、コロイド移行、ガス相 移行、崩壊 7p.171	溶解度制限(放出は二つのメカニズム、瞬時放出及び一定速度Rで の二段階ランダムリクスの放出による) 21p.298-299			
		Cast iron insert/copper canister	下水中に移行するかを計算する。 21p.288	・岩中では、地下水流动による移流により移行す る。定常状態では拡散も重要である。マトリクス拡 散により放射性核種が保持され移行時間に遅延が 生じる。 3p.74		移流、拡散、吸着、コロイド移行、ガス相 移行、崩壊 7p.171	損傷したキャニスターを通してどの ように核種が放出されるか。割れの 大きさが放出を制限する。 21p.298- 299			
		Buffer/backfill	・サイズはキャニスター外径1050mm、緩衝材 外径1750mm。 3p.74			移流、拡散、吸着、コロイド移行、化学種 同定、崩壊 7p.171	拡散、吸着、崩壊連鎖のプロセス で記述され、溶解度制限はモデル 化されていない。 21p.290			
Biosphere	Biosphereに放出されたすべての放 射性核種についてターンオーバーに ついて記述することにより、潜在的 に被ばくする人間と環境への放 射 線学的影响を評価することを可能 とする。 21p.291	Biosphere	・BIO4モデルは、FARF3Iにより計算された 地図からの放出(Bq/y)に生態系固有の換算 算換算係数(EDF/Sv/Bq)を掛けることにより計 算される。 3p.291 ・Local scale モデルで計算される地表にお ける出口の座標を入力として使用。 21p.291				決定グループ、EDFの決定、三つの処 分場サイトの典型的な生態系への分割、処 分場システム(燃料、キャニスター、緩衝材/ 緩和材、地盤)に比較し、生物圈は もっと不均質で複雑で変わりやすい。 3p.290			

2) TR-99-06 SR97-Post-closure safety, Main report volume I, II, main report summary
 3) TR-04-11 Interim main report of the safety assessment SR-Can
 7) TR-99-07 Background report to SR97, SR97 Processes in the repository evolution
 8) TR-99-08 Background report to SR97, SR97 Waste, repository design and sites
 10) TR-97-23 Summary to hydrogeologic conditions at Åberg, Beberg and Oberberg
 13) TR-03-08 Planning report for the safety assessment SR-Can
 14) 平成15年度 RWM/C性能評価技術高度化報告書

表-2-2 SR-Can 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(2/5)

(結晶質岩/堆積岩)			
スケール	区分	不均質性	開発課題、感度
Regional scale	Forsmark ^{13)p.29}	①地表は起伏が少ない(高低差30m)。西側に沢沼が広がる。 ^{10)p.51} ②Uppland北東部の一つの特徴: Singö断層。 ^{8)p.54-55} ③北西に向かうSingö断層は幅100-200mで垂直に準じ、複雑な構造を持つ。平均透水係数4E-6m/s。 ^{10)p.55} ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.81 ^{8)p.64} ⑤高度400m以下の岩Arithmetic mean log10K(m/s)=-7.80 ^{8)p.54-55}	支配的な不確実性は、全体を記述するのに使用可能なデータが限られることがある。最新の地理的な構造の位置に関する不確実性は、航空地球物理及び特徴表示だけが利用可能な場合、100-200mと評価される。地上地球物理、地理学的なフィールド調査及び掘削により構造の位置が実証された場合には、不確実性が著しく減少する(5-20m)。Beberg(Finnsjön siteのこと)。ForsmarkはFinnsjön siteの北東15kmにある。 ^{10)p.47} Bebergに関しては、地質学的な記述に相対的に大きな不確実性が存在し、したがって亀裂の幾何に関する相対的に大きな不確実性が存在する。 ^{2)p.10} 今後千年間の気候変動及び温室効果は、これらの現象に付随する大きな不確実性により環境の連続的な変化の関連付けを困難にする。 ^{13)p.76}
	Simpevarp ^{13)p.29}		気候変動、氷河期の状況等他の気候の取り扱い ^{13)p.93}
Local scale	Forsmark ^{13)p.29}	①地表は起伏が少ない(高低差15m内)。灰色の花崗閃緑岩が支配的で深度700mに及ぶ。 ^{8)p.38} ②Uppland北東部の一つの特徴: Singö断層。 ^{8)p.54-55} ③北東から南西に分断するSteeply-dipping fracture zone, Zone 1(長さ5-6km, 幅約20m)。 ^{8)p.38} ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.81 ^{8)p.64} ⑤高度400m以下の岩Arithmetic mean log10K(m/s)=-7.80 ^{8)p.54-55}	支配的な不確実性は、全体を記述するのに使用可能なデータが限られることがある。最新の地理的な構造の位置に関する不確実性は、航空地球物理及び特徴表示だけが利用可能な場合、100-200mと評価される。地上地球物理、地理学的なフィールド調査及び掘削により構造の位置が実証された場合には、不確実性が著しく減少する(5-20m)。Beberg(Finnsjön siteのこと)。ForsmarkはFinnsjön siteの北東15kmにある。 ^{10)p.47} Bebergに関しては、地質学的な記述に相対的に大きな不確実性が存在し、したがって亀裂の幾何に関する相対的に大きな不確実性が存在する。 ^{2)p.10} 今後千年間の気候変動及び温室効果は、これらの現象に付随する大きな不確実性により環境の連続的な変化の関連付けを困難にする。 ^{13)p.76}
	Simpevarp ^{13)p.29}		代替亀裂概念モデルの考察と解釈。 ^{3)p.201} 気候変動、氷河期の状況等他の気候の取り扱い ^{13)p.93}
Repository scale	Forsmark ^{13)p.29}	①地表は起伏が少ない(高低差15m内)。灰色の花崗閃緑岩が支配的で深度700mに及ぶ。 ^{8)p.38} ②Uppland北東部の一つの特徴: Singö断層。 ^{8)p.54-55} ③北東から南西に分断するSteeply-dipping fracture zone, Zone 1(長さ5-6km, 幅約20m)。 ^{8)p.38} ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.81 ^{8)p.64} ⑤高度400m以下の岩Arithmetic mean log10K(m/s)=-7.80 ^{8)p.54-55}	支配的な不確実性は、全体を記述するのに使用可能なデータが限られることがある。最新の地理的な構造の位置に関する不確実性は、航空地球物理及び特徴表示だけが利用可能な場合、100-200mと評価される。地上地球物理、地理学的なフィールド調査及び掘削により構造の位置が実証された場合には、不確実性が著しく減少する(5-20m)。Beberg(Finnsjön siteのこと)。ForsmarkはFinnsjön siteの北東15kmにある。 ^{10)p.47} Bebergに関しては、地質学的な記述に相対的に大きな不確実性が存在し、したがって亀裂の幾何に関する相対的に大きな不確実性が存在する。 ^{2)p.10} 今後千年間の気候変動及び温室効果は、これらの現象に付随する大きな不確実性により環境の連続的な変化の関連付けを困難にする。 ^{13)p.76}
	Simpevarp ^{13)p.29}		
Canister scale	Forsmark ^{13)p.29}	①地表は起伏が少ない(高低差15m内)。灰色の花崗閃緑岩が支配的で深度700mに及ぶ。 ^{8)p.38} ②Uppland北東部の一つの特徴: Singö断層。 ^{8)p.54-55} ③北東から南西に分断するSteeply-dipping fracture zone, Zone 1(長さ5-6km, 幅約20m)。 ^{8)p.38} ④表層帶水層の透水係数: Arithmetic mean log K:-6.81 ^{8)p.64} ⑤高度400m以下の岩Arithmetic mean log10K(m/s)=-7.80 ^{8)p.54-55}	支配的な不確実性は、全体を記述するのに使用可能なデータが限られることがある。最新の地理的な構造の位置に関する不確実性は、航空地球物理及び特徴表示だけが利用可能な場合、100-200mと評価される。地上地球物理、地理学的なフィールド調査及び掘削により構造の位置が実証された場合には、不確実性が著しく減少する(5-20m)。Beberg(Finnsjön siteのこと)。ForsmarkはFinnsjön siteの北東15kmにある。 ^{10)p.47} Bebergに関しては、地質学的な記述に相対的に大きな不確実性が存在し、したがって亀裂の幾何に関する相対的に大きな不確実性が存在する。 ^{2)p.10} 今後千年間の気候変動及び温室効果は、これらの現象に付随する大きな不確実性により環境の連続的な変化の関連付けを困難にする。 ^{13)p.76}
	Simpevarp ^{13)p.29}		EDZが明白にモデル化されなければならない。トンネルが局所的な流動と移行に関して支配的である、連結性の少ないネットワークでは特に、より大きなメッシュ分解能がトンネル内の移行を解くために使用されなければならない。キャニスタスケールモデルはすべてのキャニスタを含まなければならない。 ^{3)p.201} 気候変動、氷河期の状況等他の気候の取り扱い ^{13)p.93}
Repository system (Geosphere)	Geosphere		・流動と移行を統合した新しいツールの開発。色々な流動モデルで移行抵抗がどのように定義され計算されるべきかに関するEU-project RETROCKで研究中。 ^{13)p.94-95}
Repository system (Fuel, Canister, Buffer/backfill)	Fuel		
	Cast iron insert/copper canister		・気候変動、氷河期の状況等他の気候の取り扱い ^{13)p.93} ・性能評価上の感度については、現在の外部条件が時間が経過しても変わらないという仮定の下に損傷のあるキャニスタについての解析を行った。基本ケースに関して、I-129とRa-226が支配核種であった。処分孔と交差する亀裂がニアフィールドからの支配的な放出経路であった。変動ケースに関して確率論的に計算したところ、燃料溶解速度に関する概念上の不確実性により一桁程度の影響があった。仮定上の極端なケースについて確率論的に解析したところ、岩石圈の遅延の役割が大きく、この役割を無視したところ、約一桁の線量の増大が認められた。すべてのキャニスタが1000, 10000, 100000年で破損すると仮定したところ、かなりの線量影響が認められた。処分孔を横切る剪断変形によるキャニスタ破損を仮定したところ、腐食による破損よりもかなりの悪影響が認められた。 ^{3)p.293}
	Buffer/backfill		
Biosphere	Biosphere		

2) TR-99-06 SR97-Post-closure safety, Main report volume I, II, main report summary

3) TR-04-11 Interim main report of the safety assessment SR-Can

7) TR-99-07 Background report to SR97, SR97 Processes in the repository evolution

8) TR-99-08 Background report to SR97, SR97 Waste, repository design and sites

10) TR-97-23 Summary to hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg

13) TR-03-08 Planning report for the safety assessment SR-Can

14) 平成15年度 RWMC性能評価技術高度化報告書

表・2・2 SR-Can 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(3/5)

		Forsmark ^{13)p.29}	Simpevarp ^{13)p.29}
入力データ及び利用可能性	概要調査段階	<p>①SGUの井戸文献データ ②SKBの放射性操業廃棄物の最終処分場(SFR)ForsmarkはFinnsjönサイトの15km北東に位置し、SFRの建設に伴うサイト特性調査とモデル化研究は広域地質及び水理に重要な情報を与えた ^{10)p.47}</p>	
	精密調査段階 (地表)	<p>Regional scaleについて、起伏マップを含む衛生画像解析と航空写真解析、岩種と主要な亀裂領域に関する基本マップ、詳細特性調査地域外の試験掘削(SFRの掘削孔とSingo断層の掘削孔)、航空磁気マップのうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.29}。Local scale及びRepository / Canister scaleについて、地形マップ、航空写真、IR写真、母岩マップ、亀裂マップ、掘削孔、地上地球物理測定、地上地球物理調査(Slingram, VLF、抵抗と磁気調査及び地震調査)、掘削孔地球物理調査(レーダー、Flow logging、自然γ放射線、破碎帶における抵抗測定)のうち、概要調査段階の①及び②以外のもの ^{8)p.30}。</p>	
	精密調査段階 (地下)	地下水組成、地形、動水勾配、破碎帶	

表・2-2 SR-Can 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(4/5)

数学モデル及び計算コードの詳細内容				
スケール	大分類	中分類	小分類	項目
Regional scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 密度流、地下水流動、Multi-rate diffusion ^{13)p.91-92 3)p.192} 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 連続多孔質媒体(CPM)モデル。決定的な大規模破碎帯の記述を含む。 ^{3)p.192}
		数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: -	
			計算体系: 三次元。メッシュは1000m厚(水平平面3800×5200m)	
		連成方法	連成方式: -	
			連成計算の方法: -	
	計算コード		コード名称: CONNECCTFLOW ^{3)p.192}	
			基本機能、入出力データ: 塩分分布データ、測定された地下水水位、地下水流速。Local scaleの境界条件を提供する。	
			計算環境: -	
			コードの適用限界: -	
			コード名称: CONNECCTFLOW ^{3)p.192}	
Local scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地下水流動 ^{3)p.192}
			物理要素: 岩	
		モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: Regionalの連続多孔質媒体モデル(CPM)内亀裂ネットワークモデル(DFNモデル) ^{3)p.192} 透水係数の確率的なシミュレーション。確率的な透水係数値の等価な均一値への置き換えの実施 ^{3)p.198}	
			数値計算手法: -	
		数学モデル及び数値計算方法	計算体系: 三次元。	
			連成方式: -	
			連成計算の方法: -	
	計算コード		コード名称: CONNECCTFLOW ^{3)p.192}	
			基本機能、入出力データ: 測定された地下水水位、地下水流速。Regional scaleはLocal scaleの境界条件を提供する。	
			計算環境: -	
			コードの適用限界: 密度は一定。定常状態の流動条件について移行が想定される。亀裂の異方性はモデル化されていない。 ^{3)p.193}	
			コード名称: CONNECCTFLOW ^{3)p.192}	
Repository / Canister scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地下水流動 ^{3)p.192}
			物理要素: 岩	
		モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 処分トンネル、処分孔、EDZのNested CPMの記述を含む亀裂ネットワークモデル(DFNモデル) ^{3)p.198}	
			数値計算手法: -	
		数学モデル及び数値計算方法	計算体系: 三次元。	
			連成方式: -	
			連成計算の方法: -	
	計算コード		コード名称: CONNECCTFLOW ^{3)p.192}	
			基本機能、入出力データ: 測定された地下水水位、地下水流速。Local scaleは境界条件を提供する。	
			計算環境: -	
			コードの適用限界: 密度は一定。定常状態の流動条件について移行が想定される。亀裂の異方性はモデル化されていない。 ^{3)p.193}	

表-2-2 SR-Can 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(5/5)

Repository system (Geosphere)	数学モ デル	個別モ デル	モデル化の対象	プロセス: 移行経路に沿った移流と分散、岩マトリクスへの吸着と結合したマトリクス拡散、放射性崩壊連鎖。 ^{2) II p.291}
			物理要素: 岩	
		モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: いわゆる二重空隙モデルを使用。 ^{2) p.79} 定常状態の流動条件についてのみ有効。 ^{13) p.94}	
		数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: 一次元。	
		連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -	
	計算 コード		コード名称: FARF31 ^{2) II p.291}	コードの適用限界: 一次元流動チューブ概念は定常状態の流動についてのみ有効であり、海岸線の移動による遷移的な流動には適用できない。流動と移行を同時に扱えるCHAN3Dコードの使用により計算は、影響が小さいという条件下で可能。 ^{13) p.96}
			基本機能、入出力データ: 移行時間t _w 、水流表面積/体積aw、F(tw × aw)、ペクレ数、岩のKdとDe等(入力パラメータ)。 ^{2) II p.312-314} Repository/canisterスケールはCOMP23におけるQ1,Q2の等価流速の入力を提供する。 ^{3) p.192} COMP23からの放出が入力となる流動チューブ概念による。	
			計算環境: -	
			コードの適用限界: 一次元流動チューブ概念は定常状態の流動についてのみ有効であり、海岸線の移動による遷移的な流動には適用できない。流動と移行を同時に扱えるCHAN3Dコードの使用により計算は、影響が小さいという条件下で可能。 ^{13) p.96}	
Repository system (Fuel, Canister, Buffer/ backfill)	数学モ デル	個別モ デル	モデル化の対象	プロセス: 溶解度制限に従いどのように沈殿し、どのように核種がキャニスター中の割れ目を通して拡散し外側の緩衝材中を通り、どのように異なる移行経路に沿って岩の亀裂中の流動地下水中に移行するかを計算する。 ^{2) II p.288}
			物理要素: 燃料、キャニスター、緩衝材/埋め戻し材	
		モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: いわゆるコンパートメントモデル。 ^{2) p.78} 定常状態の流動条件についてのみ有効。 ^{13) p.94}	
		数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: 一次元。	
		連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -	
	計算 コード		コード名称: COMP23 ^{2) II p.288}	コードの適用限界: 一次元流動チューブ概念は定常状態の流動についてのみ有効であり、海岸線の移動による遷移的な流動には適用できない。流動と移行を同時に扱えるCHAN3Dコードの使用により計算は、影響が小さいという条件下で可能。 ^{13) p.96}
			基本機能、入出力データ: キャニスターの数、遅延時間、瞬時放出割合、溶解度、緩衝材Kd、埋め戻し材Kd、流動など(入力パラメータ)。 ^{2) II p.289} Repository/CanisterスケールはCOMP23におけるQ1,Q2の等価流速の入力を提供する。 ^{3) p.192} 。	
			計算環境: -	
			コードの適用限界: 一次元流動チューブ概念は定常状態の流動についてのみ有効であり、海岸線の移動による遷移的な流動には適用できない。流動と移行を同時に扱えるCHAN3Dコードの使用により計算は、影響が小さいという条件下で可能。 ^{13) p.96}	
Biosphere	数学モ デル	個別モ デル	モデル化の対象	プロセス: BIO42における線量換算係数は、放出がどの種類の生物圏モジュールで起こるかにより決定される。モジュールの種類は、直接明記されるか、あるいは、どこで放出が起こるかに関する関数として決定される。 ^{2) II p.291}
			物理要素: -	
		モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 線量計算は、FARF31により計算された岩石圈からの放出(Bq/年)に生態系固有の線量換算係数(EDF)(Sv/Bq)を掛けることにより線量が計算される。 ^{2) II p.291}	
		数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: 一次元。	
		連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -	
	計算 コード		コード名称: BIO42 ^{2) II p.291}	コードの適用限界: -
			基本機能、入出力データ: 線量換算係数はどのタイプの生物圏モジュールで放出が生じるかにより決定される。 ^{2) II p.291} Local scaleのモデルにより、地表における出口の座標が提供される。	
			計算環境: -	
			コードの適用限界: -	

This is a blank page.

表-2-3 TILA-99 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(1/5)

(結晶質岩/堆積岩)		モデルの目的	解析モデルと境界条件	モデルの設定根拠	水理			物質移行		
スケール	プロセス及びイベント	特徴	人工パリア、処分場	天然パリア	プロセス及びイベント	特徴	人工パリア、処分場	天然パリア		
Regional	①サイトの流動パターンの評価 ②地下水の塩性の評価 ③処分場から生物圏への流動経路の評価 ④処分場内の地下水流れの分布を評価 ⑤Siteスケールの評価の境界条件の設定(4) p69)	・等価な多孔質媒体の浸透流(密度流)解析モデル(4) p71) ・サイズは10km四方(4) p68) ・Siteスケールへ境界条件を与える(4) p71)		浸透流(密度流)、土地の隆起、飽和(4) p69)		・主要な亀裂(約30個)(4) p69) ・塩淡境界				
Site	①サイトの流動パターンの評価 ②地下水の塩性の評価 ③処分場から生物圏への流動経路の評価 ④Canisterスケールの評価の境界条件の設定(4) p69)	・等価な多孔質媒体の浸透流(密度流)解析モデル(4) p71) ・サイズは2-3km四方(4) p68) ・Canisterスケールへ境界条件を与える(4) p71)		浸透流(密度流)、飽和(4) p69)	・処分場モデル(岩石より高い透水係数を持つプレート)(4) p69)	・主要な亀裂(4) p69) ・塩淡境界				
Canister	①Canisterスケールの地下水流れの評価(4) p74)	・亀裂性媒体(確率論的モデル)の地下水流れ ・サイズは40m四方 ・物質移行解析へ境界条件を与える(流量)(4) p74)		・浸透流 ・亀裂ネットワーク	処分坑道、廃棄体	・キャニスタ周辺の亀裂ネットワーク ・岩 ・EDZ(掘削影響領域)(4) p74)				
Geosphere	①Geosphereの物質移行の評価	・亀裂性媒体の物質移行(移行経路(流管)モデル) 移行抵抗はWL/Qで表される(W:岩石の単位断面積あたりの流動チャネルの全幅、L:移行距離、Q:チャネルの流量)(4) p114-116) ・生物圏解析へ境界条件を与える(移行経路の移行抵抗値)					・移流、分散 ・亀裂ネットワーク ・マトリクス拡散 ・収着(4) p116-120)		・亀裂 ・EDZ ・岩石	
Near-Field	Source Term	①廃棄体からの核種放出率の評価(4) p99)	・瞬時放出モデル(4) p100) ・アルファ自動酸化モデル(4) p100)				・瞬時放出(燃料と被覆の隙間、燃料ペレットの割れ、燃料マトリックスの粒界) ・燃料マトリクス ・ジルカロイ中の放射化生成物 ・金属部品中の放射化生成物 ・核種崩壊(4) p99、100)	・使用済み燃料 ・被覆 ・廃棄体		
	Near-Field	①核種のニアフィールド移行評価	・核種移行モデル、ニアフィールドモデルから岩石圈への漏洩経路(①キャニスタ周囲のペントナイトから処分孔と交差する岩石の割れへ至る経路②処分孔最上部の埋め戻し材からトンネル床面下の掘削によって損傷されたEDZへ至る経路③トンネルから岩石またはEDZへ至る経路)(4) p108) ・Geosphere解析へ境界条件を与える(移行率)				・核種の溶解(4) p103) ・核種の収着及び拡散(4) p105) ・移流、拡散 ・キャニスタ消失(4) p108) ・キャニスタの孔(4) p111) ・核種崩壊(4) p112)	・キャニスタ ・キャニスタの孔 ・キャニスタ内部の水 ・ペントナイト ・埋め戻し材		
Biosphere		①線量の評価	・WELL-97飲料シナリオ				・被曝経路(井戸水、青物野菜、根菜類、穀物、肉類、ミルク、魚類、外部被曝、埃の吸引)			

表-2-3 TILA-99 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(2/5)

(結晶質岩/堆積岩)				
スケール		不均質性	不確実性と取り扱い	開発課題、感度
Regional			<ul style="list-style-type: none"> ・陸地の隆起が地下水流れ、塩性に与える影響 ・代表的な亀裂のみモデル化 ・亀裂は多孔質媒体でモデル化 ・破碎帯の位置による不確実性(19) p.68) 	<ul style="list-style-type: none"> ・2重ポロシティモデルの採用(4)p.71)
Site			<ul style="list-style-type: none"> ・陸地の隆起が地下水流れ、塩性に与える影響 ・代表的な亀裂のみモデル化 ・亀裂は多孔質媒体でモデル化 	<ul style="list-style-type: none"> ・2重ポロシティモデルの採用(4)p.71)
Canister				
Geosphere			<ul style="list-style-type: none"> ・マトリクス拡散の浸透深さ(4) p165) ・ルート分散(4) p165) ・塩性地下水条件における早い流量(4) p170) ・氷河融解水が放射性核種の放出と移行に及ぼす影響(4) p176) ・現実的な岩のKd値(4) p168) 	<ul style="list-style-type: none"> ・水酸化鉄などを含む割れ充填物への収着(4) p116) ・分岐のある流れにおける停滞領域への拡散(4) p116) ・マトリクス拡散の効果を高める可能性のある表面拡散(4) p116) ・移流モデルに分散が含まれていない(4) p116) ・緩衝材、埋め戻し材、岩石の収着及び拡散データベース(4) p118)
Near-Field	Source Term		<ul style="list-style-type: none"> ・現実的な瞬時放出量(4) p157) 	
	Near-Field		<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスター消失時期(4) p157) ・酸化条件(4) p162) ・高い溶解度設定(4) p161) ・ペントナイト性能(4) p170) ・ガスによる汚染水のキャニスターからの追い出し(4) p173) ・トンネル沿いの移行(4) p164) ・緩衝材と埋め戻し材の現実的なKd及び拡散データ(4) p168) 	<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスター-緩衝材-埋戻し材システムの熱力学的挙動(4) p79,217) ・処分孔でのキャニスターの移動(4) p79,217) ・塩性が強い塩水型地下水、および緩衝材と埋め戻し材上のコンクリートから発生する超アルカリ性流体の影響 (4) p217) ・欠陥のあるキャニスターからのガス発生と放出(4) p77,217) ・EDZ領域中にある処分孔上部の埋戻し材、シール構造、坑道の改良(4) p217) ・輸送抵抗の計算が保守的(EDZ中50mの経路長に限定、流量の高い経路のみ解析) (17)p144)
Biosphere			<ul style="list-style-type: none"> ・線量変換係数(4) p167) 	

17) POSIVA, Site-to-Canister scale flow and transport in Hästholmen,Kivetty,Olkiluoto and Romuvaara,POSIVA99-15 (1999)

18) POSIVA, Site scale groundwater flow in Olkiluoto,POSIVA99-03(1999)

19) POSIVA, Regional-to-Site scale groundwater flow in Kivetty,POSIVA99-13(1999)

表-2-3 TILA-99 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(3/5)

		Geosphere	Near field
入力データ及び利用可能性	概要調査段階		
	精密調査段階（地表）		
	精密調査段階（地下）	<ul style="list-style-type: none"> ・移行特性パラメータ、移行抵抗 ・流路幅 ・移行距離 ・流量 ・分配係数 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料からの核種放出率 ・溶解度 ・緩衝材及び埋め戻し材の収着と拡散（拡散係数、間隙率、密度、分配係数）

表-2-3 TILA-99 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(4/5)

数学モデル及び計算コードの詳細内容				
スケール	大分類	中分類	小分類	項目
Regional scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地下水流れ、溶質移行、熱解析 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 1重ポロシティモデル。代表的な亀裂のみモデル化。亀裂は多孔質媒体でモデル化。
		連成方法	数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: 3次元有限要素法 計算体系: メッシュ数は母岩が6.9万、亀裂が1.6万個
			連成方式	連成方式: -
	計算コード		連成計算の方法	連成計算の方法: -
			コード名称	FEFTRA
			基本機能、入出力データ	-
			計算環境	- コードの適用限界: 2重ポロシティモデルではない。
Site scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地下水流れ、溶質移行、熱解析 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 1重ポロシティモデル。代表的な亀裂のみモデル化。亀裂は多孔質媒体でモデル化。
		連成方法	数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: 3次元有限要素法 計算体系: メッシュ数は母岩が4.7万、亀裂が1.8万個
			連成方式	連成方式: 密度流と移流拡散方程式の連成
	計算コード		連成計算の方法	連成計算の方法: -
			コード名称	FEFTRA
			基本機能、入出力データ	RegionalスケールはSiteスケールへ境界条件を与える。
			計算環境	- コードの適用限界: 2重ポロシティモデルではない。
Canister scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地下水流れ(多孔質、亀裂性媒体、確率論的モデル) 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 浸透流、亀裂ネットワーク、多孔質、亀裂性媒体、確率論的モデル
		連成方法	数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: -
			連成方式	連成方式: -
	計算コード		連成計算の方法	連成計算の方法: -
			コード名称	-
			基本機能、入出力データ	SiteスケールはCanisterスケールへ境界条件を与える
			計算環境	- コードの適用限界: -

表-2-3 TILA-99 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(5/5)

Geosphere	計算コード	個別モデル	モデル化の対象	プロセス:— 物理要素:岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式:2重ポロシティモデル。マトリクス拡散と不均質性をモデル化。
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法:— 計算体系:—
			連成方法	連成方式:— 連成計算の方法:—
				コード名称:FTRANS 基本機能、入出力データ:Near fieldはGeosphere解析へ境界条件を与える(移行率)。 計算環境:—
				コードの適用限界: ・水酸化鉄などを含む割れ充填物への収着 ・分岐のある流れ ・表面拡散 ・分散 ・塩水条件における陽イオンの溶解度、収着性、拡散性 ・岩石の収着、拡散データ
			モデル化の対象	プロセス:— 物理要素:ソースターム、ニアフィールド
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式:—
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法:— 計算体系:—
			連成方法	連成方式:— 連成計算の方法:—
Near field	計算コード	個別モデル		コード名称:REPCOM 基本機能、入出力データ:CanisterスケールはNF解析へ境界条件を与える(移行率)。 計算環境:—
				コードの適用限界: ・キャニスター-緩衝材-埋戻し材の熱力学的挙動 ・処分孔でのキャニスターの移動 ・塩性が強い地下水、緩衝材と埋戻し材上のコンクリートから発生する超アルカリ性流体の影響 ・欠陥のあるキャニスターからのガス発生と放出 ・処分孔の上部とトンネル埋戻し材と密閉の構造物の改良

This is a blank page.

表-2-4 スイスの性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(1/5)

(結晶質岩/堆積岩)				モデルの設定根拠	水理 プロセス及びイ ベント	物質移行			特徴 人工バリア、処分場	特徴 天然バリア
スケール	モデルの目的	区分	解析モデルと境界条件			特徴 人工バリア、処分場	特徴 天然バリア			
Buffer	使用済み燃料、 HLW、ILWを巻く bufferから母岩 への、放射性核 種の放出率 ^{20p.21}	使用済み 燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料用ニアフィールド移行モデル ・STRENGと同じだが、次の3つの放出経路を考慮する：①燃料マトリクスからの放射性核種の一斉放出、②ギャップ部分や粒界からの即時放出、③被覆材の溶解に伴う一斉放出。 ・サイズは内側半径0.25m、外側半径1.15m(ペントナイト緩衝材のみモデル化)^{20p.32} ・接続に関して、Host rockへ境界条件を与える。緩衝材からのフラックスをhost rockへ入力する。実際には、母岩に入り込んだ放射性核種が、緩衝材中へ再び拡散で移動する現象(Back diffusion)があるが、保守的に無視している。^{20p.23} 	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済み燃料の溶解 ・放射性核種の一斉放出 ・使用済み燃料-ペントナイト界面での析出／溶解 ・溶解度の共有限度 ・ペントナイトを通じた拡散 ・ペントナイト内での収着 ・ペントナイト-母岩界面での流動地下水との混合 	トンネル、傾斜路、縫隙及びそれらのEDZに沿って移動する放射性核種は無い。 ^{20p.24}	-	
	同上	HLW	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化HLW用ニアフィールド移行モデル ・ガラス・マトリクスの溶解、放射性核種の一斉放出、ガラス-ペントナイト界面での析出／溶解、溶解度の共有限度、ペントナイトを通じた拡散、ペントナイト内での収着、ペントナイト-母岩界面での流動地下水との混合 ・サイズは内側半径0.47m、外側半径1.15m(ペントナイト緩衝材のみモデル化)^{20p.32} ・接続に関して、同上。 	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス・マトリクスの溶解 ・放射性核種の一斉放出 ・ガラス-ペントナイト界面での析出／溶解 ・溶解度の共有限度 ・ペントナイトを通じた拡散 ・ペントナイト内での収着 ・ペントナイト-母岩界面での流動地下水との混合 	トンネル、傾斜路、縫隙及びそれらのEDZに沿って移動する放射性核種は無い。 ^{20p.24}	-	
	同上	ILW	<ul style="list-style-type: none"> ・ニアフィールド移行モデル ・ペントナイト層に囲まれた円筒形または球対称形のコンクリート・サイロからの放射性核種放出をモデル化する。コンクリート・サイロでの放射性核種の収着と析出／溶解(共通した溶解度制限を伴う)、ペントナイトを通じた拡散、ペントナイト内での収着、ペントナイト-母岩界面での流動地下水との混合 ・サイズに関して、ILW-1のグループはトンネルの半径4.5m、外側の半径4.51mをモデル化している。^{20p.C-26} ・ILW-2のグループはトンネルの半径2.9m、外側の半径2.91mをモデル化している。^{20p.O-26} ・接続に関して、同上。 	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・収着^{20p.C-26及びp.31} ・拡散^{20p.C-26及びp.31} ・溶解度制限^{20p.C-26及びp.31} 	ILWには緩衝材は配置されない。 ^{20p.28}	トンネル周囲の厚さ1cmの範囲を、緩衝材に相当する機能を持つとしてモデル化している。 ^{20p.C-26} ^{20p.24}	
Hostrock	母岩(Opalinus Clay相に含まれる、Opalinus ClayとMurchisonae層)の放射性核種の移行 ^{20p.24}	使用済み 燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・移行経路の幾何学的形状: 1次元チャンネルネットワーク(レッグ) ・流動: 定常状態 ・放射性核種の放出: 過渡的 ・移行プロセス: 離散構造内の移流／分散／拡散 ・保持プロセス: 特性の異なる複数の地層への1次元マトリクス拡散、2次元マトリクス拡散(リファレンスケースでは本機能は使用していない) ・放射性核種／系列の処理: 崩壊／内部成長 ・サイズは、40m長さの1次元チャンネル。^{20p.33} ・接続に関して、生物圏へ境界条件を与える。母岩から放出された放射性核種は、ただちに生物圏へ到達するとした。すなわち、母岩のさらに上に存在する地層による放射性核種の遅延を保守的に無視した。^{21)SUMMARY} 	拡散支配	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ・移流^{20p.33} ・拡散^{20p.33} ・収着^{20p.33} 	トンネル、傾斜路、縫隙及びそれらのEDZに沿って移動する放射性核種は無い。 ^{20p.24}	Opalinus Clay(多孔質媒体) ^{20p.33}	
	同上	HLW	同上	同上	-	-	同上	同上	同上	
	同上	ILW-1	同上	同上	-	-	同上	同上	同上	
	同上	ILW-2	同上	同上	-	-	同上	同上	同上	
Surface Environment and Exposure Pathway	生物圏へ到達した放射性核種の放出率を被ばく線量へ換算する。 ^{20p.26}	使用済み 燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・生物圏移行コード ・「環境の陸生・海生モデル」、コンパートメントモデル、11の被ばく経路をモデル化する。 ・サイズは、$2.3 \times 10^6 \text{ m}^2$(リファレンスケースのsurface area of the biosphere region)^{20p.C-66} ・接続に関して、母岩からの放出率を入力値とした。^{20p.28} 	-	-	-	希釈(第四紀層中の帯水層あるいは地表水) ^{20p.25}	-	第四紀層 ^{20p.26} 下部土壤層 ^{20p.26} 上部土壤層 ^{20p.26} 河川水 ^{20p.26} 水中堆積物 ^{20p.26}	

5)NAGRA NTB 02-05 Project Opalinus Clay, Safety Report, December 2002

20)NAGRA NTB 02-06 Project Opalinus Clay Models, Codes and Data for Safety Assessment, December 2002

21)NAGRA NTB 02-03 Projekt Opalinuston Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse Dezember 2002

表-2-4 スイスの性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(2/5)

(結晶質岩/堆積岩)				開発課題、感度
スケール	区分	不均質性	不確実性と取り扱い	
Buffer	使用済み燃料	ペントナイト緩衝材中の放射性核種の移行に関する特性は、空間内において均質している。 ^{20p-22}	ペントナイト緩衝材中の放射性核種の移行に関する特性は、評価期間内において一定としている。 ^{20p-22} 使用済み燃料はすべて48GWd/LHMのBurn upをしている。 ^{20p-144} キャニスターは、1万年間、完全なバリア機能を維持する。 ^{20p-182}	<ul style="list-style-type: none"> ・有機C-14の揮発性ガスとしての移行 ^{20p-A-13} ・キャニスター破損時期のばらつき ^{20p-A-13} ・キャニスター腐食物への吸着 ^{20p-A-14} ・自然界に存在する放射性核種が溶解度制限へ及ぼす影響 ^{20p-A-14} ・腐食生成物などのバリア機能 ^{20p-A-14} ・トンネルのライナーの必要性 ^{20p-A-14} ・ガス影響 ^{20p-A-15} ・性能評価上の感度について、使用済み燃料のマトリックス部分に溶解度制限を考慮すると、燃料の溶解速度(Fractional fuel dissolution rate[a-1])はリファレンスケースに比較して2倍程度減少する。^{20p-36} ・ガスが発生し、かつ、傾斜路あるいは縫坑からの放射性核種の放出を考慮する。^{20p-88} ・Host rockとともにRampあるいはShaftを移行経路として考慮する。^{20p-53}
	HLW	同上	ペントナイト緩衝材中の放射性核種の移行に関する特性は、評価期間内において一定としている。 ^{20p-22} キャニスターは、1万年間、完全なバリア機能を維持する。 ^{20p-182} 地下水に接触したHLW(ガラス固化体)の表面からの溶出速度は評価期間中、一定。 ^{20p-185}	<ul style="list-style-type: none"> ・キャニスター破損時期のばらつき ^{20p-A-32} ・ガス発生速度 ^{20p-A-32} ・キャニスター腐食物への吸着 ^{20p-A-33} ・自然界に存在する放射性核種が溶解度制限へ及ぼす影響 ^{20p-A-33} ・腐食生成物などのバリア機能 ^{20p-A-33} ・トンネルのライナーの必要性 ^{20p-A-33} ・性能評価上の感度について、ペントナイトの熱変質として125°Cを超える内側半分の拡散係数が大きくなる場合を想定した。^{20p-35} ・Host rockとともにRampあるいはShaftを移行経路として考慮する。^{20p-53}
	ILW-1		ILWには緩衝材は設置されない。トンネル周囲の厚さ1cmのOpalinus Clayを緩衝材に相当する機能を保持するとして、そこでの選択を考慮している。 ^{20p-C-26}	<ul style="list-style-type: none"> ・ILWの腐食あるいは溶解の速度 ^{20p-A-8} ・ガス発生及びガス影響 ^{20p-A-8} ・性能評価上の感度について、ガスが発生し、かつ、傾斜路あるいは縫坑からの放射性核種の放出を考慮する。^{20p-88} ・Host rockとともにRampあるいはShaftを移行経路として考慮する。^{20p-53}
	ILW-2	同上	同上	同上
Hostrock	使用済み燃料	母岩中には顯著な透水性を保持した不連続な構造は存在しないとした。 ^{20p-24}	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起と浸食が母岩の水理的特性に与える影響は小さく、無視し得る。^{20p-24} ・アルプス造山運動に伴う隆起が母岩に期待する性能に与える影響は小さい。^{21)SUMMARY} ・氷河性の侵食が母岩に期待する性能に与える影響は小さい。^{21)SUMMARY} ・母岩中には顯著な透水性を保持した不連続な構造は存在しないとした。^{20p-24} ・核種の流出経路として、キロメーター以上、横方向に移動し大きな透水性の構造に到達する経路と鉛直方向に拡散し上下の帯水層に到達する経路の2つがある。^{21)SUMMARY} ・掘削影響領域は閉鎖後にセルフ・シーリングするとした。^{21)SUMMARY} ・建設操業中のトンネル周辺の地化学変化(主に黄鉄鉱の酸化)は実質上無視し得る。^{21)SUMMARY} ・SFあるいはHLWの母岩への熱影響は無視し得る。^{21)SUMMARY} ・腐棄体から発生する腐食生成ガスの影響 ^{21)SUMMARY} ・トンネル掘削時の不飽和時の母岩の力学特性 ^{21)SUMMARY} 	<ul style="list-style-type: none"> ・非定常の地下水流れ場 ^{20p-A-51} ・隆起浸食の影響 ^{20p-A-51} ・Opalinus Clay中ににおける不可逆的な沈殿など ^{20p-A-51} ・ガス発生及びガス影響 ^{20p-A-52} ・性能評価上の感度について、氷河に起因するOpalinus Clay中の地下水流动に与える影響を考慮する。^{20p-39} ・リファレンスケースでは無視されたOpalinus Clayの上下に存在する地層のバリア機能を考慮する。^{20p-45} ・傾斜路あるいは縫坑が放射性核種の放出に与える影響を考慮する。^{20p-53} ・性能評価上の感度について、リファレンスケースでは無視されたOpalinus Clayの上下に存在する地層のバリア機能を考慮する。^{20p-45}
	HLW	同上	同上	<ul style="list-style-type: none"> ・非定常の地下水流れ場 ^{20p-A-51} ・隆起浸食の影響 ^{20p-A-51} ・Opalinus Clay中ににおける不可逆的な沈殿など ^{20p-A-51} ・ガス発生及びガス影響 ^{20p-A-52} ・性能評価上の感度について、リファレンスケースでは無視されたOpalinus Clayの上下に存在する地層のバリア機能を考慮する。^{20p-45}
	ILW-1	同上	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起と浸食が母岩の水理的特性に与える影響は小さく、無視し得る。^{20p-24} ・アルプス造山運動に伴う隆起が母岩に期待する性能に与える影響は小さい。^{21)SUMMARY} ・氷河性の侵食が母岩に期待する性能に与える影響は小さい。^{21)SUMMARY} ・母岩中には顯著な透水性を保持した不連続な構造は存在しないとした。^{20p-24} ・核種の流出経路として、キロメーター以上、横方向に移動し大きな透水性の構造に到達する経路と鉛直方向に拡散し上下の帯水層に到達する経路の2つがある。^{21)SUMMARY} ・掘削影響領域は閉鎖後にセルフ・シーリングするとした。^{21)SUMMARY} ・建設操業中のトンネル周辺の地化学変化(主に黄鉄鉱の酸化)は実質上無視し得る。^{21)SUMMARY} ・腐棄体から発生する腐食生成ガスの影響 ^{21)SUMMARY} ・トンネル掘削時の不飽和時の母岩の力学特性 ^{21)SUMMARY} 	<ul style="list-style-type: none"> ・傾斜路あるいは縫坑が放射性核種の放出に与える影響を考慮する。^{20p-53} ・性能評価上の感度について、リファレンスケースでは無視されたOpalinus Clayの上下に存在する地層のバリア機能を考慮する。^{20p-45} ・傾斜路あるいは縫坑が放射性核種の放出に与える影響を考慮する。^{20p-53}
	ILW-2	同上	<ul style="list-style-type: none"> ・隆起と浸食が母岩の水理的特性に与える影響は小さく、無視し得る。^{20p-24} ・アルプス造山運動に伴う隆起が母岩に期待する性能に与える影響は小さい。^{21)SUMMARY} ・氷河性の侵食が母岩に期待する性能に与える影響は小さい。^{21)SUMMARY} ・母岩中には顯著な透水性を保持した不連続な構造は存在しないとした。^{20p-24} ・核種の流出経路として、キロメーター以上、横方向に移動し大きな透水性の構造に到達する経路と鉛直方向に拡散し上下の帯水層に到達する経路の2つがある。^{21)SUMMARY} ・掘削影響領域は閉鎖後にセルフ・シーリングするとした。^{21)SUMMARY} ・建設操業中のトンネル周辺の地化学変化(主に黄鉄鉱の酸化)は実質上無視し得る。^{21)SUMMARY} ・腐棄体から発生する腐食生成ガスの影響 ^{21)SUMMARY} ・トンネル掘削時の不飽和時の母岩の力学特性 ^{21)SUMMARY} 	<ul style="list-style-type: none"> ・傾斜路あるいは縫坑が放射性核種の放出に与える影響を考慮する。^{20p-53} ・性能評価上の感度について、リファレンスケースでは無視されたOpalinus Clayの上下に存在する地層のバリア機能を考慮する。^{20p-45}
Surface Environment and Exposure Pathway	使用済み燃料, HLW, ILW-1及びILW-2		現在の気候及び地表環境が将来にわたって維持するとしている。 ^{20p-25}	<ul style="list-style-type: none"> ・傾斜路あるいは縫坑が放射性核種の放出に与える影響を考慮する。^{20p-53} ・性能評価上の感度について、気候変動によって、放射性核種の希釈を期待する河川がライン川の支流相当になるケース、温潤になり非常に高い地下水位を形成するケース、渓谷のそばの池に放射性核種が放出されるケース、気温が高く乾燥する気候になるケース、気温が高く湿潤な気候になるケース、ツンドラ気候になるケースが考慮された。^{20p-189}

5)NAGRA NTB 02-05 Project Opalinus Clay, Safety Report, December 2002

20)NAGRA NTB 02-06 Project Opalinus Clay, Models, Codes and Data for Safety Assessment, December 2002

21)NAGRA NTB 02-03 Projekt Opalinuston Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse Dezember 2002

表-2-4 スイスの性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(35)

表・2-4 スイスの性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(4/5)

数学モデル及び計算コードの詳細内容				
スケール	大分類	中分類	小分類	項目
Buffer scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス:— 物理要素:ベントナイト緩衝材
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式:ベントナイト緩衝材のみをモデル化しており、内側半径0.525m、外側半径1.15mである。 ^{20)p.32} キヤニスタが破壊する時点には、ベントナイト緩衝材は再冠水しているとした。 ^{20)p.22}
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法:— 計算体系:—
		連成方法		連成方式:— 連成計算の方法:—
	計算コード			コード名称:STMAN(SPENTモジュール、STRENGモジュール) ^{20)p.27} 基本機能、入出力データ:廃棄体と接触する内側境界の条件は、燃料集合体、HLWからの放射性核種の放出率である。 ^{20)p.28} 母岩と接触する外側境界の条件は、ミキシング・セルによる地下水流れ場である。また、ミキシング・セルに流れ込む地下水中の放射性核種の濃度はゼロとしている。 ^{20)p.32} Host rockへ境界条件を与える。
				計算環境:— コードの適用限界:—
	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス:— 物理要素:緩衝材
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式:厚さ1cmのオパリナス・クレイを緩衝材に相当するとしてモデル化している。ILW-1の内側半径4.5m、外側半径4.51mであり、ILW-1,2の内側半径2.9m、外側半径2.91mである。 ^{20)p.C-26} 100年後には完全に再冠水するとした。 ^{20)p.23}
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法:— 計算体系:—
		連成方法		連成方式:— 連成計算の方法:—
	計算コード			コード名称:STMAN(STALLIONモジュール) ^{20)p.27} 基本機能、入出力データ:ILWと接触する内側境界の条件は、ILWからの放射性核種の放出率である。 ^{20)p.28} 外側境界の条件は、ミキシング・セルによる地下水流れ場である。また、ミキシング・セルに流れ込む地下水中の放射性核種の濃度はゼロとしている。 ^{20)p.32} Host rockへ境界条件を与える。
				計算環境:— コードの適用限界:—

表-2-4 スイスの性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(5/5)

Host rock scale	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地下水流動、移流移行 ^{5) II p.251} 物理要素: Opalinus Clay
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 1本の移行経路の周囲にはマトリックスは存在せず、したがって、マトリックス拡散及びマトリックス表面への吸着はゼロとした。根拠は、Opalinus Clayは多孔質媒体であるからとした。 ^{20)p.33}
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: — 計算体系: —
		連成方法	連成方式	連成方式: —
			連成計算の方法	連成計算の方法: —
	計算コード		コード名称	PICNIC ^{20)p.27}
			基本機能、入出力データ	: bufferスケールはhost rockへ境界条件を与える。(ニアフィールドからの放出率)。Host rockスケールの解析は生物圏へ境界条件を与える。
			計算環境	: —
			コードの適用限界	: —
			コード名称	TAME ^{20)p.27}
Surface Environment and Exposure Pathway	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 地表水による希釈を想定している。その根拠は、放射性核種の到達地点には幅広いライン渓谷が存在し、その流量は豊富で、また、河底はレキから構成され透水性が高いことによる。 ^{20)p.25} 物理要素: —
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 生物圏移行モデル。「環境の陸生-海生モデル」、コンパートメントモデル、11の被ばく経路をモデル化する。
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: — 計算体系: —
		連成方法	連成方式	連成方式: —
			連成計算の方法	連成計算の方法: —
	計算コード		コード名称	TAME ^{20)p.28}
			基本機能、入出力データ	: 母岩からの放出率を入力値とし、1つの解析モデルを作成した。 ^{20)p.28} Host rockスケールの解析は生物圏へ境界条件を与える。
			計算環境	: —
			コードの適用限界	: —

This is a blank page.

表-2-5 TSPA-LA 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(1/5)

(結晶質岩/堆積岩)								
スケール	モデルの目的	解析モデルと境界条件	モデル設定根拠	水理		物質移行		
				プロセス及びイベント	特徴		プロセス及びイベント	
					人工バリア、処分場	天然バリア		
Unsaturated Zone (UZ) Flow	①処分場の上下の不飽和凝灰岩の水分の空間、時間分布を求める ②EBS Environmentへ境界条件(山の表面、及び廃棄体定置坑道への浸透量を与える ③EBS Flow and Transportへ境界条件(廃棄体定置坑道の浸透量)を与える ④UZ Transportへ境界条件(UZ領域の水理場)を与える(6) p66~68) ⑤EBS Flow and Transportへ境界条件(山の表面、及び廃棄体定置坑道への浸透量)を与える ⑥EBS Transportへ境界条件(UZ領域の水理場)を与える(6) p66~68) ⑦モデル境界(上部:山の表面、下部:地下水) (22) p6~11)	①3次元地下水流れモデル ・気候(古気候、古環境条件、及び地下水面データに基づくモデル) ・浸透(川の流域スケールの体積バランスモデルにより、浸透量を計算。川の流域スケールモデルは、積雪、蒸発及び放射、鉛直方向の植物の根領域の1次元浸透流、及び2次元の表面水の流れモデルから構成されている。山規模の地下水流れモデル、及びEBSの熱水連成へ境界条件を与える。 ・山規模の不飽和水の流れ(定常状態、亀裂と凝灰岩マトリクスの二重浸透率モデルを体積平均アプローチによるモデル化、各水理ユニットの岩特性を平均化及び調整により特徴づけた3次元の多層ブロック近似モデル) ・坑道への浸透量 ・坑道スケールの連成プロセス(崩壊熱による亀裂の開口幅への影響を評価、2次元熱、水、化学連成モデル) ②サイズは13x6x1km(22) p6~6, p6~18) ③EBS Environmentへ境界条件(山の表面、及び廃棄体定置坑道への浸透量)を与える ④EBS Flow and Transportへ境界条件(廃棄体定置坑道の浸透量)を与える ⑤EBS Transportへ境界条件(UZ領域の水理場)を与える(6) p66~68) ⑥モデル境界(上部:山の表面、下部:地下水) (22) p6~11)		①気候(降雨、気温、地下水位) ②浸透流(降雨、蒸発、分散、表面の流水、積雪、放射、植物の根領域の浸透) ③山規模の不飽和水の流れ ④坑道の浸透流 ⑤坑道スケールの連成プロセス(熱水化学連成:NF岩の熱による水及びガス組成の変化)(6) p66~68)	①坑道(6) p66~68) ②断層、亀裂及びマトリクス ③地層(6) p66~68)			
EBS Environment	①定置坑道の水-熱-化学環境の決定 ②Waste Package and Drip Shield Degradationへ境界条件(EBSの温度、相対湿度、飽和度、流率、蒸発率、水溶液の組成)を与える ③EBS Flow and Transportへ境界条件(水溶液の組成)を与える ④EBS Flow and Transportへ境界条件(水溶液の組成)を与える(6) p68~70)	①モデル ・EBSの熱水連成モデル ・EBSの化学モデル(6) p68~70) ・サイズは2x4km(水平)(23) p4~12) ②Waste Package and Drip Shield Degradationへ境界条件(EBSの温度、相対湿度、飽和度、流率、蒸発率、水溶液の組成)を与える ③EBS Flow and Transportへ境界条件(水溶液の組成)を与える(6) p68~70)		①定置坑道中の水-熱-化学連成プロセス(浸透率、廃棄体が定置されている岩の特性、坑道中の熱の輸送、処分場の端部の熱のロス、廃棄体の特性)(6) p68~70)	①坑道 ②廃棄体(6) p68~70)	①岩(6) p68~70)		
Waste Package and Drip Shield Degradation	①ドリップシールド及び廃棄体パッケージの崩壊の非定常の定量的評価 ・ドリップシールドモデルへの主な入力は、定置坑道の温度、相対湿度プロファイル(非定常) ・廃棄体パッケージモデルへの主な入力は、定置坑道の温度、相対湿度プロファイル(非定常)、浸透水およびガスの化学組成、鉱物の沈殿、廃棄体パッケージ内の化学条件 ・主な出力は、ドリップシールド及び廃棄体パッケージの初期崩壊時間、応力腐食割れによる廃棄体パッケージの初期崩壊時間、時間の関数としてのドリップシールド及び廃棄体パッケージの崩壊(6) p70~71) ②Waste Form Degradation and Mobilizationへ境界条件(ドリップシールド及び廃棄体パッケージの崩壊の評価結果)を与える(6) p70~71)	①ドリップシールド及び廃棄体パッケージの崩壊の確率論的評価モデル(WAPDEG) ・ドリップシールドモデルへの主な入力は、定置坑道の温度、相対湿度プロファイル(非定常) ・廃棄体パッケージモデルへの主な入力は、定置坑道の温度、相対湿度プロファイル(非定常)、浸透水およびガスの化学組成、鉱物の沈殿、廃棄体パッケージ内の化学条件 ・主な出力は、ドリップシールド及び廃棄体パッケージの初期崩壊時間、応力腐食割れによる廃棄体パッケージの初期崩壊時間、時間の関数としてのドリップシールド及び廃棄体パッケージの崩壊(6) p70~71) ②Waste Form Degradation and Mobilizationへ境界条件(ドリップシールド及び廃棄体パッケージの崩壊の評価結果)を与える(6) p70~71)		①腐食 ②応力腐食割れ(欠陥、クラックなど) ③微生物による腐食 ④製造時及び材料欠陥(6) p70~71)	①廃棄体パッケージ及びドリップシールド ②EBS環境(6) p70~71)			
Waste Form Degradation and Mobilization	①EBSからUZへの核種放出率を求める ・被覆材と廃棄体マトリクスの崩壊率の評価 ・溶出した核種濃度の評価 ・ジルカロイ被覆材の崩壊の評価 ・廃棄体パッケージの残りの部分からの核種移行の評価(6) p71~73)	①廃棄体崩壊計算モデル ・核種インベントリ ・パッケージ内の化学組成の評価 ・ジルカロイ被覆材の崩壊の評価 ・マトリクスの崩壊率(民間及び軍事使用済み燃料、ガラス固化体)の評価 ・水相中の核種濃度の評価 ・廃棄体及びEBSのコロイド層の評価(6) p71~73)		①核種インベントリ ②パッケージ内の化学環境 ③ジルカロイ被覆材の崩壊 ④マトリクスの崩壊率(民間及び軍事使用済み燃料、ガラス固化体) ⑤水相中の核種濃度 ⑥廃棄体フォームのコロイド特性(6) p71~73)	①廃棄体、及びパッケージ(6) p71~73)			
EBS Flow and Transport	①EBSからUZへの核種の放出率を評価 ②EBSからUZ Transportへ境界条件(核種の放出率)を提供する(6) p73~74)	①EBSの1次元輸送モデル(吸着と沈殿を考慮した移流拡散モデル) ・廃棄体から放出された核種の、EBSの端部までの経路の核種輸送 ②EBSからUZ Transportへ境界条件(核種の放出率)を提供する(6) p73~74)(6) p73~74)		①坑道の浸透水 ②Waste Package 及びDrip Shield の崩壊 ③廃棄体と被覆材の崩壊 ④人工バリア環境(温度、相対湿度、蒸発フラックス) ⑤EBSの設計(6) p73~74)	①廃棄体、及びパッケージ(6) p73~74)	①廃棄体パッケージを通してする水 ②廃棄体フォームの溶解 ③放射性核種の溶解 ④コロイド(6) p73~74)	①廃棄体、及びパッケージ(6) p73~74)	
UZ Transport	①EBSから放出され、UZを移行して、地下水面上に到達する核種の移行を評価 ②UZ TransportからSZ Flow and Transportへ境界条件(核種の放出率)を提供する(6) p74~75)	①3次元移流拡散モデル ・パーティクルトラッキングモデル ・亀裂と凝灰岩マトリクスの二重間隙率モデル ②サイズは13x6x1km(水平)(22) p6~6, p6~18) ③水面の核種のフラックスをSZ Flow and Transportへ提供する ④UZ TransportからSZ Flow and Transportへ境界条件(核種の放出率)を提供する(6) p74~75)		①山規模の不飽和水の流れ(6) p74~75)	①坑道(6) p74~75) ③地層(6) p74~75)	①山の表面 ②断層、亀裂及びマトリクス ③地層(6) p74~75)	①移流拡散 ②亀裂 ③マトリクス拡散 ④コロイド ⑤吸着 ⑥核種崩壊(6) p74~75)	①坑道(6) p74~75) ①亀裂及びマトリクス拡散(6) p74~75)
SZ Flow and Transport	①地下水面から放出された核種が生物圈へ到達するまでの移行を評価 ②Biosphereへ境界条件(核種の放出率)を提供する(6) p75~76)	①3次元地下水流れ及び移流拡散モデル(親核種) ・パーティクルトラッキングモデル ②1次元FLOW TUBE モデル(娘核種)(6) p75~76) ③サイズは約30x40Km (26) p.51)		①地下水の流れ(6) p75~76)		①亀裂、断層、井戸 ②層序 ③BIOSPHEREへの地下水放出(6) p75~76)	①溶質の移流拡散 ②コロイドによる輸送 ③核種崩壊(6) p75~76)	①亀裂、断層、井戸 ②層序 ③BIOSPHEREへの地下水放出(6) p75~76)
Biosphere	①生物圏中の核種輸送及び個人被曝線量の評価(6) p76~77)	①生物圏での核種輸送 ・地下水を介したSZ層による核種の生物圏への移行 ・火山の噴火による大気を介した核種の生物圏への移行(6) p76~77)				①地下水の利用によるSZからの核種放出 ②火山噴火による空気中の核種放出 ③採取 ④呼吸 ⑤外部露出(6) p76~77)		

6) Total System Performance Assessment License Application Method and Approach,TDR-WIS-PA000006,(2003)

22) UZ Flow Models and Submodels (MDL-NBS-HS-000006 REV 02)

23) Multiscale Thermohydrologic Model (E0120 ANL-EBS-MD-000049)

26) SZ Flow and Transport Model Abstraction (S0055 MDL-NBS-HS-000021)

表・2・5 TSPA-LA 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(2/5)

(結晶質岩/堆積岩)			
スケール	不均質性	不確実性と取り扱い	開発課題、感度
Unsaturated Zone (UZ) Flow		①現在と将来の気候の差 ②定常流れ近似 ③地質モデルの地層毎の均質化 ④PTn ⑤雨水の発生 ⑥断層 ⑦高流速の地下水流路 (22) p6-105～6-107	①現在、過去、将来の気候条件の差による山への浸透量の差 ②溶結及び非溶結の凝灰岩の非均質性、流れ特性、山中の分布(特に処分場の下方) ③フィールドデータから得られたゼオライトユニット及び断層の亀裂特性 ④ゼオライトの横方向の拡散 ⑤輸送特性(岩種の差によるKdの差、異なった核種に対するマトリクスの分子拡散係数の差、亀裂及びマトリクスの分散性)(22) p8-9)
EBS Environment		①母岩の熱容量(比熱及び密度) ②母岩の熱伝導度 ③INVERTの熱伝導度 ④母岩の透水性 ⑤浸透フラックス(23) 6-88.6-89)	
Waste Package and Drip Shield Degradation		①Drip Shield の横側の腐食率 ②アロイ22の腐食率(ワイルド分布で与える)(23) 6-88.6-89)	
Waste Form Degradation and Mobilization		①使用済み燃料の瞬時放出(隙間、及び粒界インペントリ)(28) p6-17～6-21) ②使用済み燃料マトリクスの崩壊(温度、炭酸塩の濃度、酸素の逃散度、pH)(28) p6-27～6-29)	
EBS Flow and Transport			
UZ Transport		①亀裂の分散係数 ②マトリクスの間隙率 ③岩の密度 ④亀裂の間隙率 ⑤亀裂の特性(頻度、間隔、開口幅) ⑥コロイド特性(濃度、コロイドの核種への吸着、サイズ、フィルトレーション、排除因子、遅延係数) ⑦マトリクス吸着係数 (25) p21,22)	①現在、過去、将来の気候条件の差による山への浸透量の差 ②溶結及び非溶結の凝灰岩の非均質性、流れ特性、山中の分布(特に処分場の下方) ③フィールドデータから得られたゼオライトユニット及び断層の亀裂特性 ④ゼオライトの横方向の拡散 ⑤輸送特性(岩種の差によるKdの差、異なった核種に対するマトリクスの分子拡散係数の差、亀裂及びマトリクスの分散性)(22) p8-9)
SZ Flow and Transport		①核種の吸着係数(Np,Sr,U,Ra,Pu,Am,Cs) ②コロイド遅延係数 ③透水係数の異方性(亀裂、断層の特性、岩の非均質性) ④流れのインターバル(亀裂、断層の特性、岩の非均質性) ⑤長さ方向分散度(亀裂、断層の特性、岩の非均質性) ⑥核種のコロイドへの吸着係数(Pu,Am,Cs) ⑦地下水中のコロイド濃度 ⑧火山UNITと冲積層UNITのKdの相関(Np,U,Pu) (26) p18-21, 34-37)	シミュレーション時間の限界(100000年)(26) p154)
Biosphere			

22) UZ Flow Models and Submodels,(MDL-EBS-HS-000006)

25) Particle Tracking Model and Abstraction of Transport Process,(ANL-EBS-HS-000020)

26) SZ Flow and Transport Model Abstraction,(MDL-EBS-HS-000021)

23) Multiscale Thermohydrologic Model(ANL-EBS-MD-000049)

27) WAPDEG Analysis of Waste Package and Drip Shield Degradation(ANL-EBS-PA-000001)

28) CSNF Waste Form Degradation Summary Abstraction(ANL-EBS-MD-000015)

表-2-5 TSPA-LA 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(3/5)

入力データ及び利用可能性	概要調査段階 (地表)	精密調査段階 (地表)	精密調査段階 (地下)	SZ Flow and Transport ²²⁾
				<p>①各モデル層の亀裂特性(頻度、透水係数、von Genuchenパラメータ、インターフェース面積)、②各モデル層のマトリクス特性(間隙率、蒸発・相対湿度、蒸発率、Invertの熱、水理特性(透水係数、間隙率、溶度、比熱、熱伝導率、放出率)、③Invertの熱、水理特性(透水係数、間隙率、溶度、比熱、熱伝導率、放出率)、④各モデル層の熱、水理特性(透水係数、間隙率、溶度、比熱、熱伝導率、放出率)、⑤Drip Shieldの熱、水理特性(透水係数、間隙率、溶度、比熱、熱伝導率、放出率)、⑥UZ層の水理特性(亀裂とマトリクス特性、亀裂頻度、亀裂ヒマトリックスのインターフェース面積)、⑦各モデル層の物理特性(密度、比熱、熱伝導率)、⑧EBSからUZへの核種の放出率、⑨EBSからUZへの核種の吸収率、⑩3次元地質学単位ごとの断層の溶解度、放射性核種の溶解度、コロイド濃度、⑪表面の温度、⑫拡散係数、⑬地下水流ア流速、間隙率、分散性、密度、分配係数)</p>

表・2-5 TSPA-LA 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(4/5)

数学モデル及び計算コードの詳細内容				
スケール	大分類	中分類	小分類	項目
Unsaturated Zone (UZ) Flow	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 3次元地下水流れ(不飽和、ダルシーフロー、毛管現象) 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 多相流解析モデル(不飽和、ダルシーフロー、毛管現象、二重ポロシティモデル)
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: 3次元地下水流れモデル
			連成方法	連成方式: 連成計算の方法: -
	計算コード			コード名称: TOUGH2コード 基本機能、入出力データ: - 計算環境: - コードの適用限界: -
EBS Environment	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 浸透流、熱輸送 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: MUTHモデル(処分場形状を考慮した熱解析、浸透流の空間時間分布解析、坑道内熱輸送解析、廃棄体の解析モデル)
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: -
			連成方法	連成方式: EBSの熱水化学連成モデル 連成計算の方法: -
	計算コード			コード名称: MUTHモデル 基本機能、入出力データ: - 計算環境: - コードの適用限界: -
Waste Package and Drip Shield Degradation	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 非定常、熱水化学連成モデル 物理要素: Waste Package and Drip Shield
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 確率論的シミュレーション、非定常、処分場の設計、熱水化学連成モデル
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: -
			連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -
	計算コード			コード名称: WAPDEGモデル 基本機能、入出力データ: EBS EnvironmentはWaste Package and Drip Shield DegradationへTHC条件(境界条件)を提供する。 計算環境: - コードの適用限界: -

表・2-5 TSPA-LA 性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(5/5)

EBS Flow and Transport	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 1次元移流拡散モデル
			物理要素: 燃料、キャニスター、緩衝材/埋め戻し材	
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 1次元移流拡散モデル
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: 一次元。
		連成方法		連成方式: - 連成計算の方法: -
	計算コード		コード名称: - 基本機能、入出力データ: Waste Form Degradation and Mobilizationは EBS Flow and Transportへ核種移行データを提供する。Unsaturated Zone (UZ) FlowはEBS Flow and Transportへ浸透量(境界条件)を提供する。 計算環境: -	
			コードの適用限界: -	
			コード名称: - 基本機能、入出力データ: EBS Flow and TransportはEBSからUZへの核種の放出率をUZ Transportへ提供する。 計算環境: WS,PC	
			コードの適用限界: -	
			コード名称: FEHMコード 基本機能、入出力データ: EBS Flow and TransportはEBSからUZへの核種の放出率をUZ Transportへ提供する。 計算環境: WS,PC	
UZ Transport	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 亀裂及びマトリクス中の輸送。EBSから放出され、UZを移行して、地下水面上に到達する核種の移行を評価。 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: 亀裂及びマトリクス中の輸送を扱う二重連続体モデル、粒子追跡モデル
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: -
			連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -
	計算コード		コード名称: FEHMコード 基本機能、入出力データ: EBS Flow and TransportはEBSからUZへの核種の放出率をUZ Transportへ提供する。 計算環境: WS,PC	
			コードの適用限界: -	
			コード名称: FEHMコード、SZ_CONVOLUTEコード 基本機能、入出力データ: ①FEHMコード: 有限要素法による移流拡散計算コード②SZ_CONVOLUTE: 置み込み積分法(粒子追跡モデルより得られたブレークスルー曲線を利用)により、18Km地点に到達する核種の質量と時間を求める。 計算環境: WS,PC	
			コードの適用限界: -	
			コードの適用限界: -	
SZ Flow and Transport	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 亀裂及びマトリクス中の輸送。地下水面上から放出された核種が生物圏への放出点に到達するまでの移行を評価。 物理要素: 岩
			モデル化における単純化	数学モデル、及び支配方程式: ①亀裂及びマトリクス中の輸送を扱う二重連続体モデル。②粒子追跡モデル(UZからSZへの核種移行率は非定常データを利用。SZ中の核種移行は、大きさ1のパルス状の入力を与えた場合の非定常核種移行率データを利用。両者を置み込み積分で評価して、生物圏(18km)へ移行する核種移行率を求める。)
			数学モデル及び数値計算方法	数値計算手法: - 計算体系: -
			連成方法	連成方式: - 連成計算の方法: -
	計算コード		コード名称: FEHMコード、SZ_CONVOLUTEコード 基本機能、入出力データ: ①FEHMコード: 有限要素法による移流拡散計算コード②SZ_CONVOLUTE: 置み込み積分法(粒子追跡モデルより得られたブレークスルー曲線を利用)により、18Km地点に到達する核種の質量と時間を求める。 計算環境: WS,PC	
			コードの適用限界: -	

表-2-6 日本の性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(1/4)

(結晶質岩/堆積岩)			解析モデルと境界条件	解析モデルの設 定根拠	水理			物質移行		特徴	
スケール	区分	モデルの目的			プロセス及び イベント	特徴	人工バリア、処 分場	天然バリア	プロセス及びイベント	人工バリア、処 分場	天然バリア
人工バリア	—	・ガラス固化体からの核種の溶出 ・緩衝材中での核種の遅延・崩壊をともなう移行 ・緩衝材外側から周辺母岩への放出1) 「5.3.1 人工バリアのモデルとデータ」	①円筒1次元のモデル ・緩衝材内側の境界条件は核種濃度 ・緩衝材外側の境界条件は掘削影響領域における完全瞬時混合1)「5.3.1.1.2 数学的定式化」 ・サイズは、緩衝材の内側半径820mm、外側半径2220mm、厚さ2140mm(1次元円筒座標系) ・接続については、周辺母岩へ核種移行率を与える。1)「5.3.1.1.2 数学的定式化」 ②2次元人工バリア(モデル不確実性の影響の定量化に利用)(15)p4-28~4-32)		—	—	—	・ガラス固化体からの溶出 ・緩衝材中の収着、沈殿、崩壊、拡散 ・掘削影響領域中の瞬時混合 1)「5.3.1.1.2 数学的定式化」	・ガラス固化体 ・緩衝材1) 「5.3.1.1.2 数学的定式化」	・掘削影響領域1) 「5.3.1.1.2 数学的定式化」	
天然バリア	母岩	・母岩中の核種移行解析 1)「5.3.2.1.1 概念モデル」	・サイズは100m 1)「5.3.2.1.1 概念モデル」 ・接続については、下流側断層へ核種移行率を与える。1)「5.3.2.1.1 概念モデル」 ・1次元平行平板モデル1)「5.3.2.1.1 概念モデル」 ・人工バリアからの核種移行率1)「5.3.2.1.2 数学的定式化」 ・亀裂表面とマトリクス拡散の最大深度d [m] における境界条件は以下のようである。1)「5.3.2.1.2 数学的定式化」 $C_n(x, t) = C_n^*(x, 0, t) \quad (\omega = 0)$ $\frac{\partial C_n^*}{\partial \omega} \Big _{\omega=d} = 0 \quad (\omega = d)$ ・亀裂ネットワークモデル(15) p3-3~3-7) ・コロイド等の影響評価モデル(15) p3-92~3-102) ・天然有機物、微生物の影響評価モデル(15) p3-103~3-112)		—	—	—	・亀裂内での移流・分散 ・亀裂から岩石基質中への拡散(マトリクス拡散) ・岩石基質内の鉱物粒子表面への収着 ・崩壊1)「5.3.2.1.1 概念モデル」	—	・花崗岩(亀裂性岩盤)1)「5.3.2.1.1 概念モデル」	
	下流側断層	・下流側断層の核種移行解析 1) 「5.3.2.2.1 概念モデル」	・サイズは800m 1)「5.3.2.2.1 概念モデル」 ・接続については、生物圏への核種移行率を与える。1)「5.3.4 安全評価の解析で用いるモデルチェイン」 ・1次元平行平板モデル1)「5.3.2.2.1 概念モデル」 ・母岩からの核種移行率1)「5.3.2.2.1 概念モデル」 ・断層表面とマトリクス拡散の最大深度d [m] における境界条件は母岩と同様である。1)「5.3.2.2.1 概念モデル」		—	—	—	・断層内での移流・分散 ・断層から岩盤基質中への拡散(マトリクス拡散) ・岩石基質内の鉱物粒子表面への収着 ・崩壊1)「5.3.2.2.1 概念モデル」	—	・下流側の断層1) 「5.3.2.2.1 概念モデル」	
生物圏	—	・生物圏評価:人間の生活環境である地表環境における核種移行プロセスとこれによる被ばくの形態(被ばく経路)についてモデルを構築して評価を行い人間への影響を推定する。1)「5.3.3.1 生物圏評価モデルの考え方」	・コンパートメントを用いて表現した生物圏評価モデル 1)「5.3.3.2.4 FEP 間の相関関係の特定と概念モデルの構築」 表面土壤 $6 \times 10^3 \text{ m}^3$ ・下部土壤 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ・河川水 $5 \times 10^3 \text{ m}^3$ ・河川堆積層 $1 \times 10^3 \text{ m}^3$ ・沿岸海域水 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ ・沿岸海域堆積層 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 1)「付録 F 生物圏評価におけるデータセット」 ・接続については、下流側断層からの核種移行率を受け取る。1)「5.3.3.2.4 FEP 間の相関関係の特定と概念モデルの構築」		—	—	—	・灌漑 ・洪水 ・侵食 ・浸透 ・逡巡+蛇行 ・侵食+流出 ・再浮遊 ・沈殿 ・河川水流 ・ベットロード ・海洋拡散1)「5.3.3.2.4 FEP 間の相関関係の特定と概念モデルの構築」	—	・河川水 ・河川堆積層 ・表面土壤 ・飽和度が可変な下部土壤 ・沿岸海域水 ・沿岸海域堆積層 1)「5.3.3.2.4 FEP 間の相関関係の特定と概念モデルの構築」	

1)第2次取りまとめ第III分冊

15)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(JNCTN1400 2005-003)

表-2-6 日本の性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(2/4)

(結晶質岩/堆積岩)				
スケール	区分	不均質性	不確実性と取り扱い	開発課題、感度
人工バリア	一	・掘削影響領域の透水性や大きさに起因する不均質性 1)「6.1.2.1 人工バリアについてのデータ不確実性ケース」	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス溶解速度(約7万年でガラス固化体の全量が溶解) ・処分1,000年後にオーバーパックが破損 ・掘削影響領域通過流量=0.001m³/y)「6.1.2.1 人工バリアについてのデータ不確実性ケース」 ・長期間の不確実性 ・隆起・侵食による地下水流動と地下水水質の変遷は変動シナリオで扱った。 ・気候・海水準変動による地下水水質の周期的変遷は変動シナリオで扱った。1)「6.2 変動シナリオ解析ケース」 ・ガラスの長期溶解挙動(15) p3-69~3-77) ・核種の熱力学データ、活量係数(15) p2-1~2-12) ・核種の収着、拡散データ(15) p2-13~2-20) ・地下水及び間隙水の水質(15) p3-59~3-67) ・核種の溶解度(アクチニド元素等に関する溶解度制限固層の変遷など)(15) p3-78~3-81) ・核種の収着、拡散(Kd、鉄の腐食性生物、緩衝材の拡散係数)(15) p3-82~3-91) 	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食生成物層での核種移行遅延(Cs-135, Se-79, およびNp-237 の最大移行率は、レファレンスケースとの差がほとんどみられなかった。) ・掘削影響領域での核種移行遅延(Np-237 およびSe-79 はレファレンスケースから変化はみられなかった。Cs-135 は最大移行率がレファレンスケースよりも減少した。) 1)「6.1.2. ・放射性核種の熱力学データベースの整備(データの信頼性向上、化学アナログの妥当性確認、幅広い地下水条件を対象に評価を行なうための高イオン強度に対応できる活量係数モデルの整備、熱力学データの温度依存性に関わるデータの整備、データベースの利用環境整備) ・収着・拡散データベースの整備(文献調査による最新のデータ収集およびデータベースの更新、データの不足している海水系やアルカリ環境下でのデータ拡充、データ取得方法の標準化に関する基盤情報整備、収着データベースを用いたデータの信頼度に関する検討) ・地下水・間隙水水質形成モデルの高度化(具体的な地質環境データをもとにした地下水水質形成に関わる地球化学モデルの適用性確認、圧縮ペントナイト間隙水の時空間変化に関するデータ取得およびモデル化、セメント系鉱物を含む熱力学データベースの開発) ・ガラスの長期溶解挙動に関する研究(高アルカリ条件下でのガラス浸出試験の実施と表面変質層の特性評価、表面変質層核種相互作用データ取得) ・核種の溶解現象に関する研究(アクチノイド元素の溶解度制限固相の変遷に関する研究、共沈データの取得と固溶体モデルの適応性の検討) ・核種の収着・拡散現象に関する研究(圧縮ペントナイトへの核種の収着現象解析に関するメカニズムの理解、核種の収着現象に関するメカニズムの理解、圧縮ペントナイトへの核種の収着・拡散現象解析に関するメカニズムの理解、岩石中の収着・拡散現象に関するメカニズムの理解、収着、拡散に及ぼすオーバーパック腐食生成物の影響) ・コロイドの影響評価モデルの開発(コロイドの特性評価、コロイドと核種の相互作用評価、コロイド影響評価モデルの開発) ・天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発(有機物及び微生物の特性評価、緩衝材の有機物透過特性、有機物と放射性核種の相互作用、微生物影響評価モデルの概念検討) ・シナリオ解析技術の高度化 ・不確実性評価技術の高度化(データ不確実性の定量化技術、モデル不確実性の影響の定量化技術、データ不確実性の影響の定量化技術、感度分析技術)(15)付録表)
天然バリア	母岩	・各亀裂内のパラメータ(透水量係数、開口幅、分散長、マトリクス拡散寄与面積率、マトリクス拡散深さ、マトリクスの有効間隙率／乾燥密度／実効拡散係数／分配係数)の不均質性 ・亀裂頻度1)「付録C 3次元モデルを用いた天然バリア中核種移行解析」	<ul style="list-style-type: none"> ・母岩および断層での核種移行解析に用いたデータ1)「6.1.2.3 天然バリアについてのデータ不確実性ケース」 ・透水係数が移行経路、到達範囲に与える不確実性(15) p3-12 ~3-16) ・堆積岩の透水性(15) p3-17~3-22) ・亀裂パラメータ(開口幅など)(15) p3-25~3-27) ・核種移行パラメータ(流速、分散長)(15) p3-35~3-38) ・亀裂パラメータ(亀裂充填物、開口幅、濾過域)(15) p3-39~3-52) ・亀裂を有する堆積軟岩のパラメータ(透水性、拡散係数)(15) p3-39~3-52) ・核種の収着、拡散データ(15) p2-13~2-20) ・地下水及び間隙水の水質(15) p3-59~3-67) ・核種の溶解度(アクチニド元素等に関する溶解度制限固層の変遷など)(15) p3-78~3-81) ・核種の収着、拡散(Kd、岩のマトリクス拡散及び拡散係数)(15) p3-82~3-91) 	<ul style="list-style-type: none"> ・コロイドの影響(最大線量がレファレンスケースよりも増加するが、それは数倍程度である。) ・処分場レイアウト(レファレンスケースの最大線量の数分の1程度であった。) ・処分場内の濃度干渉効果(最大線量は、レファレンスケースよりも1桁程度小さくなる。) ・断層を多孔質媒体とする(レファレンスケースと同様である) 1)「6.1.2.4 天然バリアについてのモデル変更ケース」 ・放射性核種の熱力学データベースの整備(データの信頼性向上、化学アナログの妥当性確認、幅広い地下水条件を対象に評価を行なうための高イオン強度に対応できる活量係数モデルの整備、熱力学データの温度依存性に関わるデータの整備、データベースの利用環境整備) ・収着・拡散データベースの整備(文献調査による最新のデータ収集およびデータベースの更新、データの不足している海水系やアルカリ環境下でのデータ拡充、データ取得方法の標準化に関する基盤情報整備、収着データベースを用いたデータの信頼度に関する検討) ・地上からの調査段階における地下水流动モデル化技術の整備(亀裂ネットワークモデルの高度化、地下水水質変化を考慮した水理モデルの信頼性、移行パラメータ信頼性評価技術の開発、堆積プロセスを考慮した地質構造モデル推定技術の開発および幌延地域への適用、幌延地域を対象とした地下水流动解析) ・亀裂を対象とした水理物質移行現象の理解(天然単一亀裂を対象とした水理物質移行特性データの取得、亀裂を対象とした水理・物質移行モデルの信頼性検討、原位置トレーサー試験より得られる核種移行パラメータ値の不確実性評価、単一亀裂を対象とした原位置トレーザー試験による時間依存性を考慮した性能評価パラメータの評価) ・堆積軟岩中の水理物質移行現象の理解(亀裂を有する堆積軟岩中の水理物質移行概念モデルの検討) ・地下水・間隙水水質形成モデルの高度化(具体的な地質環境データをもとにした地下水水質形成に関わる地球化学モデルの適用性確認、圧縮ペントナイト間隙水の時空間変化に関するデータ取得およびモデル化、セメント系鉱物を含む熱力学データベースの開発) ・核種の溶解現象に関する研究(アクチノイド元素の溶解度制限固相の変遷に関する研究、共沈データの取得と固溶体モデルの適応性の検討) ・核種の収着・拡散現象に関する研究(圧縮ペントナイトへの核種の収着現象解析に関するメカニズムの理解、核種の収着現象に関するメカニズムの理解) ・コロイドの影響評価モデルの開発(コロイドの特性評価、コロイドと核種の相互作用評価、コロイド影響評価モデルの開発) ・天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発(有機物及び微生物の特性評価、緩衝材の有機物透過特性、有機物と放射性核種の相互作用、微生物影響評価モデルの概念検討) ・シナリオ解析技術の高度化 ・不確実性評価技術の高度化(データ不確実性の定量化技術、モデル不確実性の影響の定量化技術、データ不確実性の影響の定量化技術、感度分析技術)(15)付録表)
	下流側断層	・断層内部での不均質性 1)「5.3.2.2 断層中核種移行解析モデルとデータ」	同上	同上
生物圈	一	・GBI(地表環境の特徴に応じたGBIの設定) ・生物圈評価に利用するパラメータの重要度の分類(15) p3-113 ~3-123)		・生物圈評価モデルの高度化(パラメータの重要度分析と現在の設定状況の整理、モデル化手法の検討)

1)第2次取りまとめ第Ⅲ分冊

15)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(JNCTN1400 2005-003)

表-2-6 日本の性能評価（スケールに応じたモデリングの整理表）(3/4)

		人工バリア	天然バリア		生物圏
			母岩	下流側断層	
入力 データ 及び利 用可能 性	概要調 査段階	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルガラス固化体のインベントリ ・地下水組成 ・ガラス溶解速度 ・溶解度 ・拡散係数 ・分配係数 1)「5.3.1.2 データ」 	<ul style="list-style-type: none"> ・動水勾配 ・亀裂パラメータ(透水量係数分布、開口幅分布) ・核種移行パラメータ(巨視的分散長、マトリクス拡散深さ、マトリクス拡散寄与) 面積率、有効間隙率、乾燥密度、実効拡散係数、分配係数) 1)「5.3.2.1.3 データ」 	<ul style="list-style-type: none"> ・動水勾配 ・断層内での移行距離 ・断層の透水量係数、開口幅 ・分散長 ・核種移行パラメータ(マトリクス拡散深さ、マトリクス拡散寄与) 面積率、有効間隙率、乾燥密度、実効拡散係数、分配係数) 1)「5.3.2.2.3 データ」 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンパートメントの大きさに関するデータ ・コンパートメント間の移行プロセスに関するデータ ・被ばく経路に関するデータ1)「5.3.3.3 データ」
	精密調 査段階 (地表)	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルガラス固化体のインベントリ ・ガラス溶解速度 1)「5.3.1.2 データ」 	—	—	<ul style="list-style-type: none"> ・コンパートメントの大きさに関するデータ ・コンパートメント間の移行プロセスに関するデータ ・被ばく経路に関するデータ1)「5.3.3.3 データ」
	精密調 査段階 (地下)	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水組成 ・間隙水組成 ・溶解度 ・拡散係数 ・分配係数 ・緩衝材外側での地下水流量 1)「5.3.1.2 データ」 	<ul style="list-style-type: none"> ・動水勾配 ・亀裂パラメータ(透水量係数分布、開口幅分布) ・核種移行パラメータ(巨視的分散長、マトリクス拡散深さ、マトリクス拡散寄与) 面積率、有効間隙率、乾燥密度、実効拡散係数、分配係数) 1)「5.3.2.1.3 データ」 	<ul style="list-style-type: none"> ・動水勾配 ・断層内での移行距離 ・断層の透水量係数、開口幅 ・分散長 ・核種移行パラメータ(マトリクス拡散深さ、マトリクス拡散寄与) 面積率、有効間隙率、乾燥密度、実効拡散係数、分配係数) 1)「5.3.2.2.3 データ」 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンパートメントの大きさに関するデータ ・コンパートメント間の移行プロセスに関するデータ ・被ばく経路に関するデータ1)「5.3.3.3 データ」

表-2-6 日本の性能評価報告書（スケールに応じたモデリングの整理表）(4/4)

数学モデル及び計算コードの詳細内容					
スケール	大分類	中分類	小分類	項目	
人工パリア	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	プロセス: 緩衝材領域の内側境界条件を導くガラス固化体の溶解、ガラス固化体近傍の仮想的な領域への核種の溶出、沈殿／溶解、崩壊、および緩衝材への移行、緩衝材中の収着をともなう核種の拡散移行、沈殿／溶解、および崩壊、緩衝材領域の外側境界条件を導く緩衝材外側に到達した核種と掘削影響領域を通過する地下水との瞬時混合、掘削影響領域から周辺母岩への核種放出	
				物理要素: ガラス固化体、緩衝材	
		モデル化における単純化		数学モデル、及び支配方程式: ガラス固化体近傍の仮想的な領域への核種の溶出、沈殿／溶解、崩壊、および緩衝材への移行。緩衝材領域の外側境界条件を導く緩衝材外側に到達した核種と掘削影響領域を通過する地下水との瞬時混合。	
				数値計算手法: 有限差分法	
		連成方法		計算体系: 円筒1次元座標系	
				連成方式: -	
				連成計算の方法: -	
	計算コード		コード名: MESHNOTE 基本機能、入出力データ: - 計算環境: - コードの適用限界: -	コード名: MESHNOTE 基本機能、入出力データ: - 計算環境: - コードの適用限界: -	
				プロセス: 緩衝材領域の内側境界条件を導くガラス固化体の溶解、ガラス固化体近傍の仮想的な領域への核種の溶出、沈殿／溶解、崩壊、および緩衝材への移行、緩衝材中の収着をともなう核種の拡散移行、沈殿／溶解、および崩壊、緩衝材領域の外側境界条件を導く緩衝材外側に到達した核種と掘削影響領域を通過する地下水との瞬時混合、掘削影響領域から周辺母岩への核種放出	
				物理要素: ガラス固化体、緩衝材、周辺岩盤	
				数学モデル、及び支配方程式: ガラス固化体近傍の仮想的な領域への核種の溶出、沈殿／溶解、崩壊、および緩衝材への移行。緩衝材領域の外側境界条件を導く緩衝材外側に到達した核種と掘削影響領域を通過する地下水との瞬時混合。	
		連成方法		数値計算手法: - 計算体系: 2次元座標系	
				連成方式: - 連成計算の方法: -	
天然パリア(母岩及び下流側断層)	数学モデル	個別モデル	モデル化の対象	コード名: GOLDSIM 基本機能、入出力データ: - 計算環境: - コードの適用限界: -	
				プロセス: - 物理要素: 岩	
		モデル化における単純化		数学モデル、及び支配方程式: 1次元平行平板モデル	
				数値計算手法: - 計算体系: 1次元平行平板モデル	
		連成方法		連成方式: - 連成計算の方法: -	
	計算コード		コード名: 解析コードMATRICS 基本機能、入出力データ: 人工パリアからの核種移行率を受け取る(母岩)。母岩からの核種移行率を受け取る(下流側断層)。 計算環境: - コードの適用限界: -	コード名: 解析コードMATRICS 基本機能、入出力データ: 人工パリアからの核種移行率を受け取る(母岩)。母岩からの核種移行率を受け取る(下流側断層)。 計算環境: - コードの適用限界: -	
				プロセス: 経口摂取による内部被ばく、吸入摂取による内部被ばく、外部被ばく 物理要素: 岩	
				数学モデル、及び支配方程式: 経口摂取による内部被ばく、吸入摂取による内部被ばく、外部被ばく	
				数値計算手法: - 計算体系: 一次元。	
		連成方法		連成方式: - 連成計算の方法: -	
				コード名称: AMBER 基本機能、入出力データ: 接続については下流側断層からの核種移行率を受け取る 計算環境: - コードの適用限界: -	
生物圏	計算コード				

付録3 各国の性能評価書で示されている開発課題

This is a blank page.

付録3 各国の性能評価書で示されている開発課題

表3-1 各国の性能評価書で示されている開発課題のスケール区分毎の整理(1/2)

プロセス	スケール	POSIVA 99-02		SR-97		SR-Can		TILA99	
		諸外国の性能評価におけるスケール名	開発課題	諸外国の性能評価におけるスケール名	開発課題	諸外国の性能評価におけるスケール名	開発課題	諸外国の性能評価におけるスケール名	開発課題
水理	広域	Regional		Regional	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Regional	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Regional	・2重ボロシティモデルの採用
	Local	Site		Local	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Local	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Site	・2重ボロシティモデルの採用
	処分場	Stochastic Continuum		-	-	Repository	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い ・全キャニスターを含んだ水理モデル ・処分場構成要素モデル(EDZ, トンネル)の詳細化	-	-
	EBS周辺岩盤	Discrete Feature		-	-	Canister	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い ・全キャニスターを含んだ水理モデル ・処分場構成要素モデル(EDZ, トンネル)の詳細化	-	-
物質移行	EBS	Deposition Holes and Tunnels		Repository System(Fuel Canister Buffer)	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Repository System(Fuel Canister Buffer)	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Near Field	・キャニスター、緩衝材、埋め戻し材の熱力学的挙動 ・処分孔中のキャニスターの移動 ・緩衝材と埋め戻し材上のコンクリートから放出するアルカリ性流体の影響 ・欠陥のあるキャニスターからのガス発生と放出 ・EDZ領域中の処分孔上部の埋戻し材、シール機能、汎道の改良 ・輸送抵抗の計算が保守的
	EBS周辺岩盤、または処分場より大きいスケール	Far-Field	・1次元流體モデルの課題(複数の流路、亀裂内の流速の変化、モデルの小さな変動)	Repository System(Geosphere)	・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Repository System(Geosphere)	・非定常流れに対応するための地下水-物質移行の統合解析ツール ・物質移行計算の移行抵抗モデルの高度化 ・1次元流體モデルの課題 ・気候変動、氷河期の状況など他の気候シナリオの取り扱い	Geosphere	・割れ目充填材への収着 ・分岐のある流れにおける停滞領域への収着 ・表面拡散 ・輸送モデルに拡散が含まれていない ・緩衝材、埋め戻し材、岩石の収着、拡散データベース
	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表3-1 各国の性能評価書で示されている開発課題のスケール区分毎の整理(2/2)

プロセス	スケール	TSPA-LA		NAGRA OP		H12	
		諸外国の性能評価におけるスケール名	開発課題	諸外国の性能評価におけるスケール名	開発課題	諸外国の性能評価におけるスケール名	開発課題
水理	広域	UZ Flow	・現在、過去、将来の気候条件の差による山への浸透量の差 ・溶結及び非溶結の凝灰岩の非均質性、流れ特性、山中の分布 ・フィールドデータから得られたゼオライトユニット及び断層の亀裂特性	-	-	-	-
	Local	-	-	-	-	-	-
	処分場	-	-	-	-	-	-
	EBS周辺岩盤	-	-	-	-	-	-
物質移行	EBS	-	-	Buffer	・有機C-14の揮発性ガスとしての移行 ・キャニスタ破損時期のばらつき ・キャニスタ腐食への収着 ・自然界に存在する放射性核種が溶解析度制限へ及ぼす影響 ・腐食生成物などのバリア機能 ・トンネルのライナーの必要性 ・ガス影響 ・Host rockとともに shaftあるいはshaftを移行経路として考慮	人工バリア	・腐食生成物層での核種移行遅延 ・掘削影響領域での核種移行遅延 ・オーバーパックの腐食膨張と周辺母岩中の亀裂への緩衝材の侵入 ・放射性核種の熱力学データベースの整備 ・収着・拡散データベースの整備 ・地下水・間隙水水質形成モデルの高度化 ・ガラスの長期溶解挙動に関する研究 ・核種の溶解現象に関する研究 ・核種の収着・拡散現象に関する研究 ・コロイドの影響評価モデルの開発 ・天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発 ・シナリオ解析技術の高度化 ・不確実性評価技術の高度化
	EBS周辺岩盤、または処分場より大きいスケール	UZ Transport	・現在、過去、将来の気候条件の差による山への浸透量の差 ・溶結及び非溶結の凝灰岩の非均質性、流れ特性、山中の分布(特に処分場の下方) ・フィールドデータから得られたゼオライトユニット及び断層の亀裂特性 ・ゼオライトの横方向の拡散 ・輸送特性(岩種の差によるKdの差、異なった核種に対するマトリクスの分子拡散係数の差、亀裂及びマトリクスの分散性)	Hostrock	・非定常の地下水流れ場 ・隆起浸食の影響 ・Opalinus Clay中における不可逆的な沈殿 ・ガス発生及びガス影響 ・Opalinus Clayの上下の地層のバリア機能 ・傾斜路あるいは縫隙が核種放出に与える影響	天然バリア	・処分場レイアウト ・処分場内での濃度干渉効果 ・断層を多孔質媒体とする ・放射性核種の熱力学データベースの整備 ・収着・拡散データベースの整備 ・地上からの調査段階における地下水水流動モデル化技術の整備 ・亀裂を対象とした水理物質移行現象の理解 ・堆積軟岩中の水理物質移行現象の理解 ・地下水・間隙水水質形成モデルの高度化 ・核種の溶解現象に関する研究 ・核種の収着・拡散現象に関する研究 ・コロイドの影響評価モデルの開発 ・天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発 ・シナリオ解析技術の高度化 ・不確実性評価技術の高度化
	SZ Transport	・シミュレーション時間の限界(100000年)	-	-	-	-	-

付録4 諸外国における処分場スケールを対象とした核種移行解析技術に関する調査結果

This is a blank page.

付録4 諸外国における処分場スケールを対象とした核種移行解析技術に関する調査結果

表4-1 処分場スケールの解析モデル

性能評価書	スケール名	解析モデル (括弧内は解析 コード名)	解析体系の概要
SR-97 (スウェーデン)	Repository System (Geosphere)	1 次元流線モデル (FAR31)	キャニスターから Local スケールまでを 1 次元流線モデルで解析 (廃棄体 1 体)
SR-Can (スウェーデン)	Repository System (Geosphere)	1 次元流線モデル (FAR31)	キャニスターから Local スケールまでを 1 次元流線モデルで解析 (廃棄体 1 体)
TILA-99 (フィンランド)	Geosphere	1 次元流線モデル (FTRANS)	キャニスターから Local スケールまでを 1 次元流線モデルで解析 (廃棄体 1 体)
TSPA-LA (米国)	UZ(13x6x1km)	モンテカルロ法による 3 次元物質移行 (FEHM)	ソースに EBS からの核種放出データを使用して物質移行を解析。
	SZ(31x46km)	畳み込み積分法 (FEHM)	物質移行解析を実施することなく、既存のデータを利用した畳み込み積分法により、生物圈への放出率を計算 (UZ 領域からの移行率を単位ステップとした場合の SZ 領域の物質移行解析結果、及び UZ 領域からの移行率のデータを利用)
NAGRA OP (スイス)	Host Rock(40m)	1 次元輸送モデル (PICNIC)	廃棄体 1 体に母岩が接続したモデルで処分場をモデル化
H12 (日本)	天然バリア母岩 (100m)	1 次元輸送モデル (单一亀裂) (MATRIX)	廃棄体 1 体に亀裂が接続したモデルで処分場をモデル化

表4-2 処分場スケールの水理、物質移行評価に関する諸外国の開発課題とその対応策

プロセス	課題	出展	理由	対応策（調査結果）*	対応策 **
水理	気候変動、氷河期の状況等他の気候の取り扱い	SR-97 Regional & Local, SR-Can Repository & Canister	・非定常の境界条件、パラメータに関する水理解析を実施しているが、氷河による水応力造成、異なった地下水が混合する水-地球化学連成モデルは扱っていない。	・水-応力連成、水-地球化学連成を考慮した地下水解析モデルを開発する。	—
水理	全キャニスターを含んだ水理モデル	SR-Can Canister	・廃棄体604体のみモデル化して水理解析を実施している。	・全廃棄体をモデル化して処分場の水理解析を実施する。	・3次元の全処分場モデルによる解析を行う
水理	処分場構成要素の詳細化(EDZ、トンネル)	SR-Can Canister	・EDZ、及びトンネルが簡略化されて水理解析を実施している。	・無し (SKB-R-04-61に記載無し)	・EDZ、及びトンネルの3次元詳細モデルによる解析を行う
水理	2重ボロシティモデルの採用	TILA-99 Regional & Site	・水理解析は等価多孔質媒体モデルで実施されている。	・2重ボロシティによる水理解析モデル	—
物質移行	気候変動、氷河期の状況等他の気候の取り扱い	SR-97 Geosphere, Repository, Biosphere SR-Can Geosphere, Repository System, Biosphere	・非定常の境界条件、パラメータに関する水理解析を実施しているが、氷河による水-応力連成、異なった地下水が混合する水-地球化学連成モデルは扱っていない。	・水-応力連成、水-地球化学連成を考慮した地下水解析モデルを開発する。	—
物質移行	非定常流れに対応するための地下水-物質移行の統合解析ツール	SR-Can Geosphere	流線モデルは定常状態のみに対応、海岸線の変更には対応できない。	・地下水流れと物質移行を同時に解くツールを開発	・3次元の非定常物質移行-地下水流れ連成解析モデルによる解析を行う
物質移行	物質移行計算の移行抵抗モデルの高度化	SR-Can Geosphere	現在の移行抵抗モデルは様々な流れ場の環境で試験されていない	EUプロジェクト (RETTACK) で研究されている	—
物質移行	1次元流線モデルの課題 (亀裂ネットワークにおいて流れが交差する場合、解釈を利用する場合の柔軟性の欠如、核種崩壊を考えた場合の移行抵抗の誤差、非定常への適用)	SR-Can Geosphere	水理場に沿った複数の経路を1次元流線モデルで解析している	・2、3次元の多孔質、亀裂性媒体モデル	・2、3次元の多孔質、亀裂性媒体モデルによる解析を行う
物質移行	1次元流線モデルの課題 (複数の流路、亀裂内の流速の変化、モデルの小さな変動)	POSIVA FF	複数の経路を1次元流線モデルで解析している	・2、3次元の(非均質)亀裂ネットワークモデル、確率論的多孔質媒体モデル、亀裂性媒体モデル	・2、3次元の(非均質)亀裂ネットワークモデル、確率論的多孔質媒体モデルによる解析を行う
物質移行	・移流モデルに分散が含まれていない	TILA-99 Geosphere	輸送は移流のみモデル化して、最も保守的に流速の早い経路を解析している	無し (POSIVA 99-03に記載無し)	・2、3次元の多孔質媒体の移流拡散モデルによる解析を行う
物質移行	輸送抵抗の計算が保守的 (EDZ中50mの経路長に限定、流量の高い経路のみ解析)	TILA-99 Near-Field	流線モデルの経路を限定し、流量の高い経路のみ解析している	無し (POSIVA 99-15に記載無し)	・2、3次元の亀裂ネットワークモデルによる解析を行う
物質移行	緩衝材と埋め戻し材上のコンクリートから流出するアルカリ性流体の影響	TILA-99 Near-Field	現状の解析では扱われていない	無し (POSIVA 99-15に記載無し)	・2、3次元の物質移行及び地球化学の連成モデルによる解析を行う
物質移行	溶結及び非溶結の凝灰岩の非均質性、流れ特性、山中の分布の定量的説明	TSPA-LA UZ Transport	PTnユニット中の毛管バリア、宙水、断層を単純化してモデルを作成して物質移行解析を実施	無し (MDL-EBS-HS-000006に記載無し)	・3次元の不飽和多孔質、亀裂性媒体モデルによる物質移行解析を行う
物質移行	シミュレーション時間の限界(100000年)	TSPA-LA SZ Flow and Transport	シミュレーション時間を100000年に固定して物質移行を解析している	無し (MDL-EBS-HS-000006に記載無し)	・3次元の多孔質、亀裂性媒体モデルによる物質移行解析を行う
物質移行	粘土層中の不可逆な沈殿	NAGRA Host Rock	粘土層中の不可逆な沈殿などによる閉じ込めは性能評価から除外されている	無し (NTB 02-06に記載無し)	・2、3次元の不飽和多孔質、亀裂性媒体モデルによる物質移行解析
物質移行	ガス発生と影響	NAGRA Host Rock	使用済み燃料とILWのみガス影響を評価し、ILWではガス影響は評価していない	無し (NTB 02-06に記載無し)	・2、3次元の不飽和多孔質、亀裂性媒体モデルによる物質移行解析
物質移行	地上からの調査段階における地下水流动モデル化技術の整備	H17 天然バリア	亀裂ネットワークモデルに等価不均質連續体モデルへの変換、入れ子式モデルなどの機能が追加されたモデルが解析に利用されている。	地下研究所から新しく取得されたデータを用いてモデルの更新を行う。	・2、3次元の亀裂ネットワークモデルによる物質移行解析を行う
物質移行	堆積軟岩中の水理物質移行現象の理解	H17 天然バリア	亀裂ネットワークモデルでの解析結果と連続体モデルでの解析結果を重ね合わせる方法が解析に利用されている。	地下研究所から得られる様々な地層や深度の試料を用いた試験によりデータの蓄積を図り、解析モデルを確立する。	・3次元の多孔質、亀裂性媒体モデルによる物質移行解析を行う

*: 調査結果として出典の報告書に記載されていた課題解決のため対応策

**: 本調査での整理をもとに判断した課題解決のための対応策

付録5 本共同研究の議論を通じての技術的用語の見直し

This is a blank page.

付録5 本共同研究の議論を通じての技術的用語の見直し

表5-1 本共同研究の議論を通じ変更を実施した技術的な用語

本共同研究報告書（変更後）	実施計画策定時（旧）
移行確率	遷移確率
解析階層Ⅰ	廃棄体またはコンパートメント領域レベル
解析階層Ⅱ	処分場領域レベル

This is a blank page.

付録6 マルチスケールモデルを適用した場合の核種移行解析
の全体的な流れ

This is a blank page.

付録6 マルチスケールモデルを適用した場合の核種移行解析の全体的な流れ

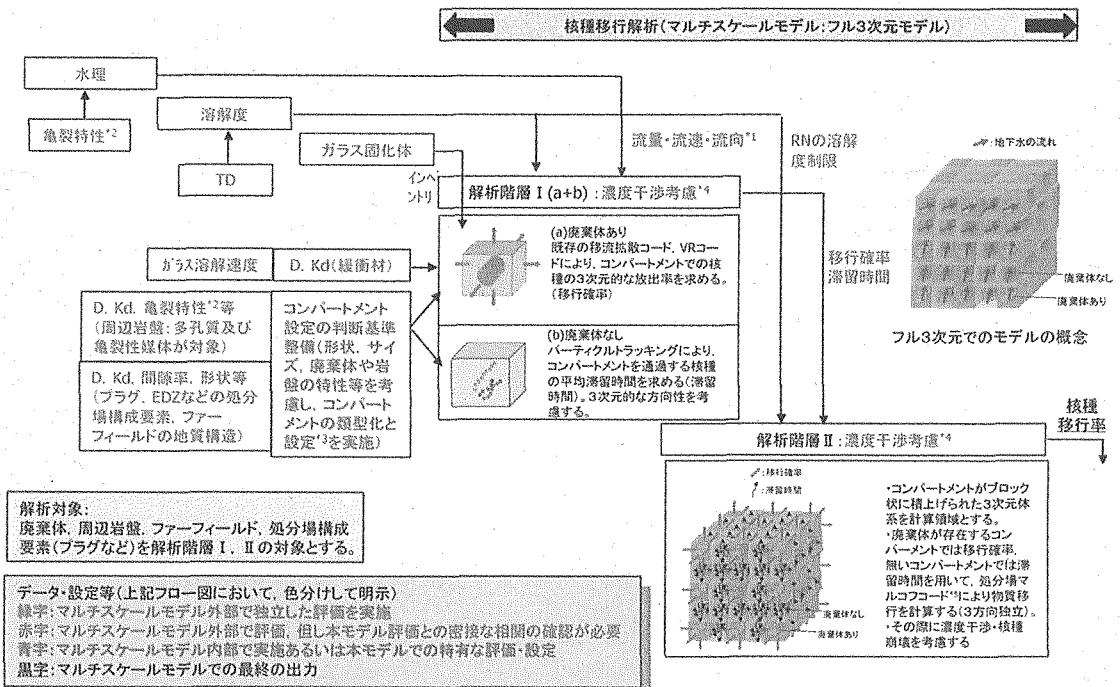


図 6-1 (フル) 3次元でのマルチスケールモデルを核種移行解析に適用した際に想定される解析全体の流れ

【注釈】

*1: 流量・流速・流向

水理解析(地下水解析)より、全計算領域について水理条件を把握する。それに基づき、コンパートメントの条件(サイズや配置)に相関させてデータの受け渡しを行い、階層Iでの解析に反映する。

*2: 亀裂特性

亀裂性媒体を扱う場合には、水理解析と解析階層Iでの核種移行解析において、解析の入力として利用する亀裂特性データを相関させることが必要である。したがってコンパートメントの条件に基づき、水理解析で用いた亀裂特性に関するデータの必要な部分を解析階層Iの物質移行解析で利用する。そのためには、水理解析と解析階層Iとでは、入力データや解析の詳細度を統一して取り扱う必要がある。

*3: コンパートメントの類型化・設定

地下水水流速、岩盤物性、亀裂特性等の地質環境条件、廃棄体の形状や緩衝材の物性等の人工バリアの特性、及びプラグの形状や物性等の処分場構成要素の特性等について、パラメータスタディを実施して、複雑な人工バリア及び地質環境に関するパラメータを分類して類型化する。類型化したコンパートメントを代表例として組み合わせるという手順を経ることにより、計算負荷の低減を図る。コンパートメントに分割するための適切な部位やサイズに関する判断基準の明確化及びコンパートメントの類型化に資する知見の取得・整備は本解析技術開発のなかで今後実施する予定である。

*4: 濃度干渉

濃度干渉効果の評価方法としては、現段階では解析階層Iにおいて、VRコードにより濃度干渉を考慮した移行確率を求める検討する。ただしこの方法では移行確率の変化に応じて、干渉効果を種々設定することが必要であり、非効率的な取り扱いとなることも予想される。そこで解析階層IIの物質移行計算時に周辺岩盤の濃度に合わせて、移行確率を変化させて、物質移行計算を行う方法が考えられる。この場合、処分場マルコフコードに濃度干渉効果を取り込むことが必要となるので、理論の高度化が必要となる。そのための理論開発は次の開発段階で実施する予定である。

*5: 処分場マルコフコード

処分場マルコフコードとは、解析階層Iで求められた移行確率と滞留時間をもとに、解析階層IIとして計算領域全体での核種移行率をマルコフ連鎖により求めるための計算コードである。物質移行計算を階層に応じて分離するので、計算負荷が軽くなるというメリットがあるが、コンパートメントを適切に設定しないと計算の信頼性が低下する可能性がある。

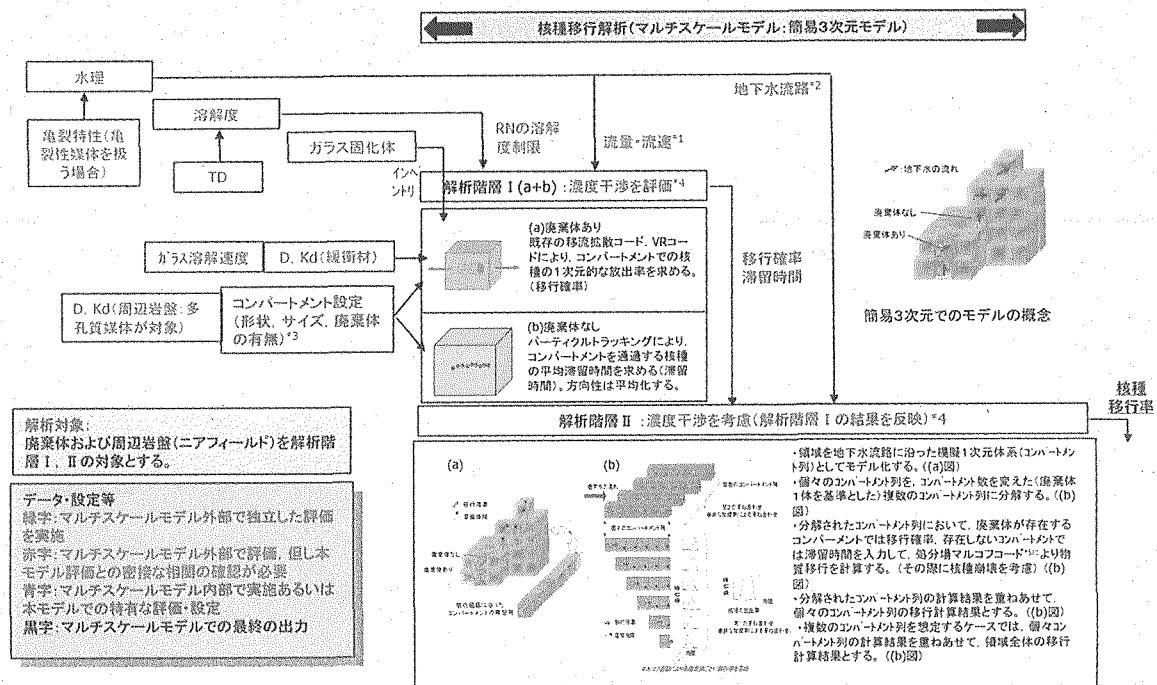


図 6-2 簡易 3 次元でのマルチスケールモデルを核種移行解析に適用した際に想定される解析全体の流れ

【注釈】

*1: 流量・流速, *2: 地下水流路
水理解析(地下水解析)より、地下水流路(方向)に関する情報とともに、局所的(コンパートメント)な流量に関するデータも取得し、それぞれ階層II、階層Iでの解析に反映する。なお、現状のモデルでは周辺岩盤を多孔質媒体として扱っているが、簡略化のために特に透水性が高い領域をコンパートメント列として抽出し、単一な流路として設定することとする。地下水流路は分岐や合流等を有すると考えられ、これらの経路の複雑性についても考慮する必要がある。これらの要因については、今後の改良(3次元化)の段階で取り込むようとする。

*3: コンパートメントの設定

現状では、計算領域を同じ大きさのコンパートメントに分割し、各コンパートメントに廃棄体1体及びその周辺岩盤が含まれるように設定している。今後は、地下水流速、岩盤物性、亀裂特性等の地質環境条件、廃棄体の形状、緩衝材の物性等人工バリアの特性、及びプラグの形状や物性等の処分場構成要素の特性等について、パラメータスタディを実施して、複雑な人工バリア及び地質環境等のパラメータを分類して類型化する。類型化したコンパートメントの代表例を組み合わせることにより、比較的低い計算負荷での物質移行解析を可能とする。

*4: 濃度干渉効果

濃度干渉効果の評価方法としては、VRコードにより地下水流路に沿った1次元体系の物質移行解析を実施して、濃度干渉を考慮した移行確率を求める。求めた移行確率を解析階層IIで利用する。

*5: 処分場マルコフコード

処分場マルコフコードとは、解析階層Iで求められた移行確率と滞留時間をもとに、解析階層IIとして計算領域全体での核種移行率をマルコフ連鎖により求めるための計算コードである。3次元モデルを簡略化したものが簡易3次元モデルであり、物質移行を地下水流路の1次元モデルの集まりとしてモデル化している。また、地下水流路の1次元モデル間の相互作用は考慮していない。

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
立体	積立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法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
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

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	p
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 3. 固有の名称とその独自の記号で表される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
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放熱束	ワット	W	$N^2 \cdot m^{-1}$
電荷、電気量	クーロン	C	$J \cdot s$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^2$
コンダクタンス	ジーメンス	S	V/A
磁束密度	テスラ	T	$V \cdot s$
インダクタンス	ヘンリリー	H	Wb/m^2
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/A
照度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー	ベクレル	Bq	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
ギー分率、カーマ	レイ	Gy	J/kg
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

表 6. 國際単位系と併用されるが國際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1° = $(\pi/180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)$ ° = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表 7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表 8. 國際単位系に属さないが國際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dm ² =10 ² m ²
ヘルツ	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチルブ	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表 10. 國際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	γ	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャニスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr=(101325/760) Pa$
カリ	cal	$1 atm=101325 Pa$
ミクロン	μ	$1 μ=1 μm=10^{-6} m$