JAEA-Research
2007-060

深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究
－平成17年度－

（委託研究）

Study on Systemizing the Technology on the Investigation and Analysis of Deep Underground Geological Environment, - Japanese Fiscal Year, 2005 -
(Contract Research)

小島 圭二*　大西 有三*　渡辺 邦夫*　西垣 誠*
登坂 博行*　嶋田 純*　青木 謙治*　朽山 修*
吉田 英一*　尾方 伸久　西尾 和久

Keiji KOJIMA*, Yuzo OHNISHI*, Kunio WATANABE*, Makoto NISHIGAKI*
Hiroyuki TOSAKA*, Jun SHIMADA*, Kenji AOKI*, Osamu TOCHIYAMA*
Hidekazu YOSHIDA*, Nobuhisa OGATA and Kazuhisa NISHIO

地層処分研究開発部門
結晶質岩工学技術開発グループ

Crystalline Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

September 2007

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が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp/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*では実費による複写頒布を行っております。

〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

深部地質環境の調査解析技術の体系化に関する研究－平成 17 年度－

（委託研究）

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

小島　圭二*1，大西　有三*2，渡辺　邦夫*3，西垣　誠*4，登坂　博行*5，嶋田　純*6，

青木　謙治*7，杤山　修*8，吉田　英一*9，尾方　伸久，西尾　和久※

（2007 年 6 月 7 日受理）

地表から地下深部にいたる地質環境を把握するための調査・解析技術の体系化を目標に，(1)「第 2 次とりまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化にむけた課題に関する研究」，(2)「調査・解析手法の高度化・体系化に関する研究」を，前年度に引き続き実施して次のような成果を得た。

(1)に関しては，前年度抽出した①処分技術，②安全評価，③地質環境の各分野の課題のうち，具体的な試験・計測と解析・分析を実施した。またその成果を踏まえて，それぞれの中間分野の研究課題の抽出と各課題の連携の仕方についての検討をおこなった。そして，これら 3 分野を関連づけたニァフィールドコンセプトの再構築に関する検討をおこなった。

(2)に関しては，日本原子力研究開発機構の調査研究計画の中から抽出される課題に基づき，調査・解析技術の高度化・実用化の研究開発の観点から，当研究会のメンバーが従来より実施している基礎的な要素技術の研究開発の成果を取り込み，課題の解明に資する研究を実施した。さらに，研究開発について，その成果の評価と実用化への道を議論した。

またこれらの調査研究の進展とあわせて，日本原子力研究開発機構が実施中の瑞浪超深地層研究所の第 2 段階の調査・研究課題に関する意見交換を行い，より具体的・実用的な調査・解析技術の高度化・体系化の検討を行った。

本報告書は、社団法人資源・素材学会が日本原子力研究開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132　岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64
*1 地圏空間研究所　代表（東京大学名誉教授）
*2 京都大学　教授
*3 埼玉大学　教授
*4 岡山大学　教授
*5 東京大学　准教授
*6 熊本大学　教授
*7 京都大学　教授
*8 東北大学　教授
*9 名古屋大学　准教授
※ 技術開発協力員

Study on Systemizing the Technology on the Investigation and Analysis of Deep Underground Geological Environment, - Japanese Fiscal Year, 2005 -

(Contract Research)

Keiji KOJIMA*[1], Yuzo OHNISHI*[2], Kunio WATANABE*[3], Makoto NISHIGAKI*[4], Hiroyuki TOSAKA*[5], Jun SHIMADA*[6], Kenji AOKI*[7], Osamu TOCHIYAMA*[8], Hidekazu YOSHIDA*[9], Nobuhisa OGATA and Kazuhisa NISHIO※

Tono Geoscientific Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency

Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

（Received June 7, 2007）

The following study was done with the aim of systemizing the technology on the investigation and analysis of deep underground geological environment in relation to the radioactive waste disposal.

(1) The study on the research and development (R&D) subjects which turned to the practical investigation and analysis of deep underground geological environment.

(2) The study on the advanced technical basis of the investigation and analysis of deep underground geological environment.

It continued in the former year and got the following results.

Concerning (1), the concrete investigation, measurements, numerical analyses and chemical analyses were enforced about the following items and extracted some subjects with the viewpoint of radioactive waste disposal. More over, the way to make the co-operative program among each field of the following ①, ② and ③ were discussed.

① The subjects extracted with the viewpoint of the repository design and engineering technology.

② The subject extracted with the viewpoint of the safety assessment.

③ The subjects extracted with the viewpoint of the geological environment.

The joint research subjects among each field of ①, ②, ③ were also discussed.

Concerning (2), the evaluation of the results and a way to the practical use were discussed on the R&D activities. The R&D activities of the study group concerning (2) are related to the fundamental and elemental technology. It was discussed if these results could be taken into the practical investigation programs which characterize the geological environment and engineering technology in the Tono Geoscience Center, the Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

The Study group also discussed and gave the comment on the 2nd stage (the shaft construction stage) of the MIU (Mizunami Underground Research Laboratory) research program in the JAEA.

Keywords: Deep Underground, Geological Environment, Geological Disposal, Underground Research Laboratory, Safety Assessment

---

This work was performed by the Mining and Materials Processing Institute of Japan under contract with Japan Atomic Energy Agency.

*1 Geospace Labo, *2 Kyoto University, *3 Saitama University, *4 Okayama University, *5 The University of Tokyo, *6 Kumamoto University, *7 Kyoto University, *8 Tohoku University, *9 Nagoya University, ※Cooperative Staff

目　次

はじめに ····· 1

1.　第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究 ····· 3
1.1　処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査･解析技術に関する研究 ····· 3
1.1.1　はじめに ····· 3
1.1.2　AE計測による掘削影響領域（EDZ）の評価技術の開発 ····· 4
1.1.2.1　はじめに ····· 4
1.1.2.2　岩石の破壊現象と微小破壊音 ····· 5
1.1.2.3　個別剛体要素法による解析 ····· 14
1.1.2.4　堆積軟岩におけるAE ····· 21
1.1.2.5　現場計測結果に基づく応力変化とAEパラメータの挙動 ····· 21
1.1.2.6　粒状体個別剛体要素法を用いた空洞掘削解析 ····· 23
1.1.2.7　岩盤の力学－水理学的連成挙動に着目した評価手法の構築 ····· 26
1.1.2.8　まとめ ····· 32
1.1.2.9　参考文献 ····· 33
1.1.3　低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発 ····· 35
1.1.3.1　はじめに ····· 35
1.1.3.2　動的注入工法に関する室内実験 ····· 36
1.1.3.3　グラウト材の注入メカニズムに関する理論的検討 ····· 39
1.1.3.4　動的注入工法に関する現場実験 ····· 48
1.1.3.5　数値シミュレーションによる最適注入仕様の決定 ····· 49
1.1.3.6　クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法とその検証 ····· 51
1.1.3.7　まとめ ····· 60
1.1.3.8　参考文献 ····· 60
1.1.4　まとめ ····· 61
1.2　性能評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究 ····· 64
1.2.1　はじめに ····· 64
1.2.2　セーフティケース：一般概念，目的と意味 ····· 65
1.2.2.1　定義 ····· 65
1.2.2.2　閉鎖後のセーフティケースの構成要素 ····· 68
1.2.3　わが国における安全規制の方向－原子力安全委員会：放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について－ ····· 75
1.2.3.1　背景 ····· 75
1.2.3.2　安全規制における共通的な重要事項について ····· 76
1.2.3.3　管理期間終了後における安全評価シナリオ ····· 76
1.2.3.4　わが国における放射線防護基準等の検討の方向性 ····· 79
1.2.4　セーフティケースからみた種々の処分システムの課題 ····· 81
1.2.4.1　背景 ····· 81
1.2.4.2　TRU廃棄物処分の処分システム概念 ····· 82
1.2.4.3　セメントの使用によるアルカリ影響について ····· 85

1.2.4.4 余裕深度処分のセーフティケースについて ····· 86
1.2.5 まとめ ····· 91
1.2.6 参考文献 ····· 91
1.3 地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究 ····· 93
1.3.1 はじめに ····· 93
1.3.2 研究課題 1～3 に関する調査・解析技術の開発の必要性 ····· 93
1.3.3 研究課題 1：活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に関する研究 ····· 94
1.3.3.1 研究目的 ····· 94
1.3.3.2 これまでの主な実施内容および成果 ····· 94
1.3.3.3 今年度の調査内容と主な結果 ····· 97
1.3.3.4 調査結果と主な考察について ····· 98
1.3.3.5 まとめ ····· 101
1.3.4 研究課題 2：割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究 ····· 102
1.3.4.1 研究目的 ····· 102
1.3.4.2 今年度実施内容および予察的検討結果 ····· 102
1.3.5 研究課題 3：ニァフィールドコンセプトの再構築に関する研究 ····· 105
1.3.5.1 背景と目的 ····· 105
1.3.5.2 検討内容および結果 ····· 105
1.3.6 今後の予定 ····· 105
1.3.7 参考文献 ····· 106

2. 調査・解析手法の高度化・体系化 ····· 107
2.1 立坑トンネル（SHAFT）の地下水制御のための情報化施工簡易システム（SWING-SHAFT）の構築 ····· 107
2.1.1 はじめに ····· 107
2.1.2 SWING-SHAFT 法（シリンダー）の構築 ····· 107
2.1.3 瑞浪超深地層研究所における解析 ····· 110
2.1.4 まとめ ····· 117
2.1.5 参考文献 ····· 117
2.2 表層水理現象の ANN, GA を用いた評価技術の体系化 ····· 119
2.2.1 はじめに ····· 119
2.2.2 環境影響評価の考え方と問題点 ····· 119
2.2.3 解析方法の改良 ····· 121
2.2.4 解析の物理的意味と予測精度の検討 ····· 124
2.2.4.1 問題点 ····· 124
2.2.4.2 データの平均間隔を変えた流出解析 ····· 125
2.2.4.3 人工降雨実験の解析 ····· 127
2.2.4.4 GA による埼玉県を対象とした広域地下水位変動解析と予測精度 ····· 130
2.2.5 まとめ ····· 135
2.2.6 参考文献 ····· 135
2.3 水理試験法および水理試験装置の研究開発 ····· 136
2.3.1 序論 ····· 136
2.3.1.1 緒言 ····· 136
2.3.1.2 本研究の目的および構成 ····· 137

2.3.2 従来の研究 ・・・

2.5.3.1　地下水観測用井戸 ･･ 180
2.5.3.2　現地調査および採水 ･･ 181
2.5.3.3　地下水観測井におけるポテンシャル測定 ･･････････････････････････ 182
2.5.3.4　水質および安定同位体分析 ･･････････････････････････････････････ 182
2.5.3.5　放射性同位体分析 ･･ 182
2.5.4　研究結果および考察 ･･ 184
2.5.4.1　地下水ポテンシャル ･･･ 184
2.5.4.2　安定同位体 ･･ 185
2.5.4.3　水質 ･･ 188
2.5.4.4　放射性同位体 ･･ 188
2.5.5　地下水流動シミュレーション ･･････････････････････････････････････ 191
2.5.5.1　内部･外部境界と検討したモデルケース ･･････････････････････････ 191
2.5.6　考察 ･･ 195
2.5.6.1　地下水流動システム ･･･ 195
2.5.6.2　不知火流域の 3 次元的地下水流動特性 ･･････････････････････････ 196

3.　実用化に向けた研究開発課題の提示および調査・解析技術の高度化・体系化の総括･･ 198
3.1　研究結果の検討 ･･ 198
3.1.1　基盤技術の実用化・高度化の方向のレビュー ･･････････････････････ 198
3.1.2　課題の提示／調査研究と基盤技術実用化への研究開発･･････････････････ 198
3.1.2.1　平成 17 年度（社）資源・素材学会研究委員会の基本方針に関するメモ ････ 198
3.1.2.2　地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術
に関する研究･･ 200
3.1.2.3　処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術
に関する研究･･ 200
3.1.2.4　安全評価の観点から抽出された深部地質環境の調査・解析技術
に関する研究･･ 200
3.1.2.5　各分野中間領域の調査研究の連携検討 ･･････････････････････････ 201
3.1.3　環境安全評価の地下水シナリオからみた調査・解析技術の高度化・体系化･････ 201
3.1.3.1　地下水調査・解析技術の地下水シナリオ FEP の高度化・体系化･････････ 201
3.1.3.2　地下水の基盤技術／要素技術の高度化 ･･････････････････････････ 201
3.1.3.3　環境安全の地下水技術と建設・操業安全の地下水技術･･････････････ 201
3.2　研究結果の取りまとめおよび技術の体系化に関する研究結果の総括･･････････ 202
3.2.1　「実用化に向けた研究開発課題の研究の検討」の総括 ･･････････････ 202
3.2.1.1　処分技術 ･･ 202
3.2.1.2　安全評価 ･･ 203
3.2.1.3　地質環境 ･･ 203
3.2.1.4　分野間の連携のまとめ／セーフティーケースからの見直しの試み･･････ 204
3.2.2　「調査・解析技術の高度化・体系化」の総括 ･･････････････････････ 204
3.2.2.1　調査技術の高度化に関する研究開発 ･･････････････････････････ 204
3.2.2.2　調査・解析技術の高度化・体系化のまとめ ･･････････････････････ 205
3.2.3　瑞浪超深地層研究所の第 2 段階の調査研究計画に関するコメント･･････････ 206
3.2.3.1　第 2 段階の調査研究計画に関する一般的なコメント ･･････････････ 206
3.2.3.2　第 2 段階の調査研究計画に関する分野毎，分野間の視点で見たコメント･･ 207
3.2.4　参考文献 ･･ 210

Contents

Introduction ····· 1

1. Research investigation and analysis technique for deep geological environment based on Report H12 ····· 3
1.1 Topics of the repository design and engineering technology ····· 3
1.1.1 Introduction ····· 3
1.1.2 Evaluation technique using acoustic emission (AE) of the excavation disturbed zone (EDZ) in hard fractured rock ····· 4
1.1.2.1 Introduction ····· 4
1.1.2.2 Fracture occurrence and acoustic emission in rocks ····· 5
1.1.2.3 Analysis based on distinct element method (DEM) ····· 14
1.1.2.4 AE in sedimentary rocks ····· 21
1.1.2.5 Measurements of the stress change and behaviour of AE parameters ····· 21
1.1.2.6 Cavity drilling analysis using granular material distinct element method ····· 23
1.1.2.7 Method for assessing rock mechanics-hydrology coupling behaviour ····· 26
1.1.2.8 Summary ····· 32
1.1.2.9 Reference ····· 33
1.1.3 Development of fracture sealing technology for low permeability rock ····· 35
1.1.3.1 Introduction ····· 35
1.1.3.2 Laboratory experiment concerning dynamic grouting method ····· 36
1.1.3.3 Theoretical treatment of the injection mechanism of grouting ····· 39
1.1.3.4 Field experiment on dynamic grouting ····· 48
1.1.3.5 Optimization of the injection specification based on numerical simulations ····· 49
1.1.3.6 New assessing and verification method of hydrogeological structures in rocks by crosshole permeability test ····· 51
1.1.3.7 Summary ····· 60
1.1.3.8 Reference ····· 60
1.1.4 Conclusions ····· 61
1.2 Topics on the safety assessment ····· 64
1.2.1 Introduction ····· 64
1.2.2 Safety cases：General concept, purpose and signification ····· 65
1.2.2.1 Definition ····· 65
1.2.2.2 Safety case for post-closure care ····· 68
1.2.3 Safety regulation in Japan -Nuclear Safety Commission：Important topics in the safety regulations of the radioactive waste— ····· 75
1.2.3.1 Introduction ····· 75
1.2.3.2 Important topics in the safety regulations ····· 76
1.2.3.3 Scenario for safety assessment after the management period ····· 76
1.2.3.4 Polarity of examination of Radiation Protection Guide in Japan ····· 79
1.2.4 Difficulties of various disposal systems from the viewpoint of safety case ····· 81
1.2.4.1 Introduction ····· 81
1.2.4.2 Concept of the TRU waste disposal system ····· 82
1.2.4.3 Alkaline effect caused by cements ····· 85

1.2.4.4 Safety case for intermediate depth disposal ··· 86
1.2.5 Summary ··· 91
1.2.6 Reference ··· 91
1.3 Topics on the geological environment ··· 93
1.3.1 Introduction ··· 93
1.3.2 Necessity of investigation and analysis technique (research subject 1-3) ··· 93
1.3.3 Research subject 1 : Data gathering on fracture distribution in active fault and research on in-situ investigation technique ··· 94
1.3.3.1 Purpose ··· 94
1.3.3.2 Current main topics and result ··· 94
1.3.3.3 Research result for the current year ··· 97
1.3.3.4 Research result and consideration ··· 98
1.3.3.5 Summary ··· 101
1.3.4 Research subject 2 : Research on natural analogue of fracture sealing ··· 102
1.3.4.1 Purpose ··· 102
1.3.4.2 Research and foreseen results for the current year ··· 102
1.3.5 Research subject 3 : Research on redefinition of near field ··· 105
1.3.5.1 Backgrounds and purposes ··· 105
1.3.5.2 Consideration and result ··· 105
1.3.6 Schedule for the future ··· 105
1.3.7 Reference ··· 106

2. Study on the advanced technical basis for the investigation and analysis ··· 107
2.1 Design of a simple observational method system (SWING-SHAFT) for groundwater control in a shaft ··· 107
2.1.1 Introduction ··· 107
2.1.2 Design of SWING-SHAFT method (cylinder) ··· 107
2.1.3 Analysis at the Mizunami URL ··· 110
2.1.4 Summary ··· 117
2.1.5 Reference ··· 117
2.2 Systematization of evaluation technique based on ANN, GA for surface water phenomenon ··· 119
2.2.1 Introduction ··· 119
2.2.2 Concepts and problems in the environmental assessment ··· 119
2.2.3 Improvement of the analytical procedure ··· 121
2.2.4 Physical meaning of analysis and examination of predictive accuracy ··· 124
2.2.4.1 Subject ··· 124
2.2.4.2 Run-off analysis that changes mean interval of data ··· 125
2.2.4.3 Analysis of artificial precipitation experiment ··· 127
2.2.4.4 Regional groundwater level variability analysis and predictive accuracy of the Saitama prefecture by GA ··· 130
2.2.5 Summary ··· 135
2.2.6 Reference ··· 135
2.3 Research and development of hydraulic testing methods and equipment ··· 136
2.3.1 Introduction ··· 136
2.3.1.1 Preface ··· 136

2.3.1.2 Purpose and plan of the research ··· 137
2.3.2 Present research ··· 137
2.3.2.1 Outline ··· 137
2.3.2.2 Research on physical property of bentonite ··· 138
2.3.2.3 Research on infiltration characteristic permeability of bentonite slurries ··· 138
2.3.2.4 Research on the swelling of bentonite slurries ··· 139
2.3.2.5 Problems of existing research and improvement actions ··· 140
2.3.3 Examination of flow of saline water bentonite slurry ··· 140
2.3.3.1 Outline ··· 140
2.3.3.2 Concentration technique for saline water bentonite slurries ··· 140
2.3.3.3 Calibration ··· 141
2.3.3.4 2 dimension flow examination of saline water bentonite slurries ··· 143
2.3.3.5 Flow examination of saline water bentonite slurries in large-scale earth tank ··· 146
2.3.4 Conclusion ··· 148
2.3.5 Reference ··· 149
2.4 Research on modelling the water cycle of the Hiyoshi river catchment based on the surface water observations ··· 155
2.4.1 Introduction ··· 155
2.4.2 3 dimension model establishing based on field essential information ··· 155
2.4.2.1 Summary of catchment ··· 155
2.4.2.2 Catchment 3-dimensional model ··· 156
2.4.2.3 Geological features distribution ··· 157
2.4.2.4 Application to Land Surface ··· 159
2.4.3 Choosing the hydraulic parameter ··· 160
2.4.3.1 Surface roughness coefficient ··· 160
2.4.3.2 Ground water physical properties ··· 160
2.4.3.3 Boundary conditions ··· 162
2.4.4 Summary of catchment hydrological observation ··· 162
2.4.4.1 Hydrological observation points ··· 163
2.4.5 Initial simulation state ··· 165
2.4.5.1 Potential distribution and stream network initialization ··· 167
2.4.6 Comparison of observation and calculated values ··· 168
2.4.6.1 Reproducibility of streamflow value ··· 168
2.4.6.2 Comparison between accumulated precipitation and accumulated flow volume ··· 172
2.4.6.3 Reproducibility of groundwater level observation ··· 173
2.4.7 Discussion on the analytical results ··· 175
2.4.7.1 Calculated value of catchment water balance ··· 175
2.4.7.2 Increase in recharges and groundwater levels ··· 176
2.4.8 Summary ··· 177
2.5 Research on geochemical characteristics of groundwater ··· 178
2.5.1 Introduction ··· 178
2.5.2 Scope of the research ··· 179
2.5.2.1 Outline ··· 179
2.5.2.2 Geographical features and vegetation ··· 180
2.5.2.3 Geological features ··· 180

2.5.2.4 Spring water and wells ····· 180
2.5.3 Research method ····· 180
2.5.3.1 Groundwater observation wells ····· 180
2.5.3.2 Site investigations and sampling waters ····· 181
2.5.3.3 Potential measurement in groundwater monitoring well ····· 182
2.5.3.4 Water qualities and stable isotope analysis ····· 182
2.5.3.5 Radioisotope analysis ····· 182
2.5.4 Research results and other considerations ····· 184
2.5.4.1 Groundwater potential ····· 184
2.5.4.2 Stable isotopes ····· 185
2.5.4.3 Water qualities ····· 188
2.5.4.4 Radioisotopes ····· 188
2.5.5 Groundwater flow simulation ····· 191
2.5.5.1 Internal, external boundary and examined model case ····· 191
2.5.6 Consideration ····· 195
2.5.6.1 Groundwater flow systems ····· 195
2.5.6.2 3-dimensional groundwater flow in the Syranui cacthment area ····· 196

3. Summary of systematization of research and development difficulty and improvement of investigation and analysis technique for practical use ····· 198
3.1. Research results ····· 198
3.1.1 Review of practical use of basic technology and improvement ····· 198
3.1.2 Research and development difficulty and improvement of investigation and analysis technique for practical use ····· 198
3.1.2.1 Basic policy of Mining and Materials Processing Institute of Japan committee fiscal years 2005 ····· 198
3.1.2.2 Geological environment ····· 200
3.1.2.3 Repository design and engineering technology ····· 200
3.1.2.4 Safety assessment ····· 200
3.1.2.5 Research of each field intermediate region examination ····· 201
3.1.3 Improvement and systematization of investigation and analysis technique: groundwater scenario based on environmental safety assessment ····· 201
3.1.3.1 Improvement and systematization of groundwater scenario FEP, investigation and analysis techniques ····· 201
3.1.3.2 Improvement of basic technology/component technology ····· 201
3.1.3.3 Safety and environmental operation during construction ····· 201
3.2 Summary of research results on technology systematization ····· 202
3.2.1 Summary of research and development for practical use ····· 202
3.2.1.1 Repository design and engineering technology ····· 202
3.2.1.2 Safety assessment ····· 203
3.2.1.3 Geological environment ····· 203
3.2.1.4 Summary of the interdisciplinary cooperation /Review based on safety case ····· 204
3.2.2 Summary of Improvement and systematization of investigation and analysis technique ····· 204
3.2.2.1 Research and development for improving investigation technology ····· 204

3.2.2.2 Summary of improvement and systematization of investigation and analysis technique205
3.2.3 Comment on the investigation plan for the second stage at Mizunami URL ····· 206
3.2.3.1 General comment about investigation plan ····· 206
3.2.3.2 Comments about investigation plan and interdisciplinary aspect ····· 207
3.2.4 Reference ····· · 210

This is a blank page.

図 目 次

第1章

図 1.1.1 AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発に関するフロー図 5
図 1.1.2 地下空洞の掘削の進行に伴う AE 発生数の変化 6
図 1.1.3 高剛性三軸圧縮試験装置 7
図 1.1.4 AE 計測システム 8
図 1.1.5 三軸圧縮試験結果 9
図 1.1.6 AE 波形の振幅値の変化 10
図 1.1.7 AE 発生数の比較 11
図 1.1.8 AE 周波数の比較 12
図 1.1.9 m 値の比較 13
図 1.1.10 岩石の破壊現象と AE 特性の関係についての検討フロー図 15
図 1.1.11 PFC 解析によるカーブフィッティング結果 17
図 1.1.12 応力ーひずみ曲線と亀裂発生分布（PFC 解析） 18
図 1.1.13 拘束圧を変化させた三軸圧縮試験の結果 19
図 1.1.14 シミュレーションにおいて観測された亀裂の累積発生数 19
図 1.1.15 拘束圧による亀裂の発生・進展過程の差異（DEM 解析結果） 20
図 1.1.16 堆積軟岩を対象とした高剛性三軸圧縮試験における AE ﾊﾟﾗﾒｰﾀの挙動 21
図 1.1.17 H 断面空洞周辺地質図 22
図 1.1.18 H10 計測線上 3m地点での計測結果 22
図 1.1.19 グローバルモデルとセクターモデル 23
図 1.1.20 セクターモデルによる解析結果 25
図 1.1.21 H10 計測線における亀裂開口量分布 25
図 1.1.22 H10 計測線上 3m地点での応力変化の比較 25
図 1.1.23 H10 計測線上 3m地点での計測結果 25
図 1.1.24 注水試験時における微小地震波の発生 26
図 1.1.25 注水試験設備の概略図 31
図 1.1.26 微小地震波の観測システム 32
図 1.1.27 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発に関するフロー図 35
図 1.1.28 注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入材料の粘性の影響） 37
図 1.1.29 注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入圧力の振幅の影響） 37
図 1.1.30 亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響） 38
図 1.1.31 亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響） 38
図 1.1.32 亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響） 39
図 1.1.33 亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響） 40
図 1.1.34 亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響） 40
図 1.1.35 亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響） 41
図 1.1.36 放射状流れのモデル 44
図 1.1.37 放射状流れモデル（流れの垂直方向からの視点） 45
図 1.1.38 ルジオン値と亀裂幅の関係 48
図 1.1.39 現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較 w/c=4 49
図 1.1.40 現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較 w/c=8 49

図 1.1.41　w/c と総セメント注入量の関係 ･･･ 50
図 1.1.42　w/c と注入効率の関係 ･･･ 50
図 1.1.43　w/c と透水性改良範囲の関係 ･･･ 51
図 1.1.44　クロスホール透水試験･･･ 52
図 1.1.45　水理学的布置･･･ 53
図 1.1.46　幾何学的再構成･･･ 54
図 1.1.47　地理的空間に再配置された点群･････････････････････････････････････ 54
図 1.1.48　点群の密度とイメージング結果･････････････････････････････････････ 54
図 1.1.49　数値実験モデル･･･ 55
図 1.1.50　透水層が水平なモデル･･･ 57
図 1.1.51　透水層が傾斜しているモデル･･･ 57
図 1.1.52　透水層が複数存在するモデル･･･ 57
図 1.1.53　注水孔・観測孔と透水層が交差しないモデル･････････････････････････ 57
図 1.1.54　現場実験の概要･･･ 58
図 1.1.55　現場実験に対する手法の適用結果･････････････････････････････････････ 58
図 1.1.56　3 次元イメージング手法 ･･･ 59
図 1.1.57　数値実験による手法の妥当性の検証･････････････････････････････････ 60
図 1.2.1　セーフティケースの構成要素･･･ 68
図 1.2.2　セーフティケースの構成要素（図 1.2.1 の邦訳） ･････････････････････ 69
図 1.2.3　使用済核燃料(SF)，ガラス固化体(HLW)，長寿命中レベル廃棄物(ILW)の
放射能毒性指数(RTI)の時間変化 ･･･ 72
図 1.2.4　種々の処分システム要素の将来挙動予測可能性･････････････････････････ 72
図 1.2.5　SAFIR2 において特定された安全機能とそれが機能すると期待される
時間枠 ･･･ 73
図 1.2.6　地層処分システムのロバスト性を支持するのに利用可能な議論の例･････････ 74
図 1.2.7　わが国の放射性廃棄物処分のための諸制度整備状況･････････････････････ 81
図 1.2.8　放射性廃棄物処分方法･･･ 82
図 1.2.9　地層処分対象 TRU 廃棄物の廃棄物区分と処分施設の概念図･････････････････ 83
図 1.2.10　地層処分対象 TRU 廃棄物の放射能濃度の経時変化（埋設時から） ･････････ 83
図 1.2.11　余裕深度対象廃棄物の放射能濃度の経時変化と
他の放射性廃棄物との比較 ･･･ 87
図 1.2.12　余裕深度対象廃棄物の単位重量あたりの潜在的影響（相対値）の
他の放射性廃棄物との比較 ･･･ 88
図 1.3.1　調査地域･･･ 94
図 1.3.2　断層周辺割れ目形成モデル･･･ 95
図 1.3.3　断層からの距離と割れ目頻度・密度の相関･････････････････････････････ 96
図 1.3.4　断層運動と影響範囲･･･ 96
図 1.3.5　濃飛流紋岩調査範囲と調査ルート･････････････････････････････････････ 98
図 1.3.6　阿寺断層破砕帯･･･ 99
図 1.3.7　断層運動による二次的割れ目･･･ 99
図 1.3.8　濃飛流紋岩中のバックグランド割れ目･････････････････････････････････ 99
図 1.3.9　調査地域に認められる割れ目の主な方向･････････････････････････････ 100
図 1.3.10　濃飛流紋岩中の割れ目頻度と断層からの距離との相関･････････････････ 101
図 1.3.11　濃飛流紋岩中の割れ目に確認される充填鉱物とその産状･････････････････ 103
図 1.3.12　深度ごとの割れ目充填鉱物一覧･････････････････････････････････････ 104

図 1.3.13　NF 評価のための Safety case を構築するに重要と思われる項目（案）・・・・・・ 105

第 2 章

図 2.1.1　シリンダーボリューム方式を用いた SWING-SHAFT 法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 108
図 2.1.2　換気立杭と主立杭のモデル化（暫定形）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 108
図 2.1.3　シリンダー内の水位低下を合わせコンターとして表示・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 109
図 2.1.4　平成 17 年度の検討フロー・・ 110
図 2.1.5　SWING-SHAFT における立坑掘削工程・・ 110
図 2.1.6　瑞浪超深地層研究所周辺の概要・・ 110
図 2.1.7　水理物性の設定（Case-1　Case-2　Case-3）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 112
図 2.1.8　掘削に伴う湧水量と地下水位低下量：3 ケースの比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 113
図 2.1.9　解析による立坑周辺の地下水位低下状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 114
図 2.1.10　掘削による周辺地山での地下水低下コンター・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 115
図 2.1.11　掘削に伴う湧水（Case-3）・・ 116
図 2.1.12　掘削に伴う湧水量と地下水位低下量（Case-3）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 116
図 2.1.13　地盤改良止水モデル・・ 117
図 2.2.1　環境影響評価システムの基礎的考え・・・ 119
図 2.2.2　予測方法（他地点のデータや他のデータの組み合わせで予測）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

図 2.3.4　比抵抗装置図 141
図 2.3.5　キャリブレーション装置図 142
図 2.3.6　比抵抗装置のキャリブレーション 142
図 2.3.7　川砂の粒径加積曲線 144
図 2.3.8　2 次元通水試験装置図 144
図 2.3.9　2 次元通水試験の校正曲線 145
図 2.3.10　2 次元通水試験の塩分濃度の経時変化 145
図 2.3.11　大型土層による通水試験装置図 146
図 2.3.12　流動が存在するモールドの校正曲線 147
図 2.3.13　流動が存在しないモールドの校正曲線 147
図 2.3.14　流動が存在するモールドの塩分濃度の経時変化 147
図 2.3.15　流動が存在しないモールドの塩分濃度の経時変化 148
付図 2.3.1　2 次元通水試験の交流電流の経時変化 150
付図 2.3.2　流動が存在する土槽の交流電流の経時変化 150
付図 2.3.3　流動が存在しない土槽の交流電流の経時変化 150
図 2.4.1　本検討の作業フロー 155
図 2.4.2　対象流域と水文観測位置図 156
図 2.4.3　地表格子分割 156
図 2.4.4　3 次元流域モデルの鳥瞰図 157
図 2.4.5　東濃地域の広域地質図 158
図 2.4.6　流域モデルに入力された地質分布 158
図 2.4.7　地表土地利用図 159
図 2.4.8　格子に入力した土地利用分布 159
図 2.4.9　不飽和パラメータ 161
図 2.4.10　蒸発効率と飽和率の関係 161
図 2.4.11　境界条件の設定 162
図 2.4.12　観測地点位置図 163
図 2.4.13　雨雪量および蒸発散量観測値 164
図 2.4.14　河川流量計測値の例 164
図 2.4.15　地下水位観測値の例 165
図 2.4.16　領域初期化過程の模式図 166
図 2.4.17　初期化過程における水位や流量の変化の一般的傾向 166
図 2.4.18　日吉川に沿うポテンシャル分布断面図 167
図 2.4.19　地表の河川の様子 168
図 2.4.20　日吉川流量観測値と計算値の比較 169
図 2.4.21　日吉川流量観測値と計算値の比較（拡大図） 169
図 2.4.22　正馬川観測河川流量と計算河川流量の比較 170
図 2.4.23　正馬川上流観測点の観測流量と計算流量の比較 171
図 2.4.24　柄石川下流観測点の観測流量と計算流量の比較 171
図 2.4.25　日吉川および正馬川下流における累積河川流量の比較 172
図 2.4.26　地下水位観測値と計算値の比較（断層南側，MIU-1,MIU-2,MIU-3） 173
図 2.4.27　地下水位観測値と計算値の比較 174
図 2.4.28　地下水位観測値と計算値の比較（断層北側） 174
図 2.4.29　水収支の時間変化の様子 176
図 2.5.1　研究地域位置図（上）と流域水文観測システム（右） 178

図 2.5.2　流域表層地質図 ····· 179
図 2.5.3　観測井戸の構造概念図 ····· 181
図 2.5.4　地下水観測井における地下水頭変化および期間中の降水量変化 ····· 183
図 2.5.5　研究流域における断面 2 次元地下水ポテンシャル分布 ····· 185
図 2.5.6　湧水と深度 20m以浅の井戸水の同位体比平均値とその地点標高関係図 ····· 186
図 2.5.7　研究地域の水質分布特性 ····· 188
図 2.5.8　研究地域における地下水中のトリチウム濃度 ····· 189
図 2.5.9　我が国に於ける降水中のトリチウム濃度変化 ····· 189
図 2.5.10　トリチウム濃度および炭素 14 濃度を基にした研究地域地下水の
年齢分布概念図 ····· 190
図 2.5.11　3 次元シミュレーションモデルの領域と境界条件 ····· 192
図 2.5.12　均質モデル結果に基づく流跡線と滞留時間解析結果 ····· 193
図 2.5.13　不均質モデルの内部透水層構造 ····· 194
図 2.5.14　不均質モデル結果に基づく流跡線と滞留時間解析結果 ····· 194
図 2.5.15　研究地域の地下水流動概念模式図 ····· 197

表・写真　目　次

第 1 章

表 1.1.1　処分施設の工学技術の体系化に関する課題 ･･････ 3
表 1.1.2　AE 測定装置の仕様 ･･････ 8
表 1.1.3　PFC 解析における入力パラメータ ･･････ 15
表 1.1.4　室内実験の条件 ･･････ 36
表 1.1.5　現場実験条件 ･･････ 48
表 1.1.6　シミュレーションにおいて設定した注入圧 ･･････ 50
表 1.1.7　水理学的距離行列 ･･････ 53

第 2 章

表 2.4.1　地表面粗度係数 ･･････ 160
表 2.4.2　浸透率および間隙率 ･･････ 160
表 2.4.3　境界条件の設定 ･･････ 162
表 2.5.1　推定涵養標高 ･･････ 187
表 2.5.2　放射性炭素年代測定結果 ･･････ 190
付表 2.3.1　ベントナイトの粒径加積曲線 ･･････ 151
付表 2.3.2　比抵抗装置のキャリブレーション結果 ･･････ 151
付表 2.3.3　川砂の粒径加積曲線 ･･････ 151
付表 2.3.4　2 次元通水試験のキャリブレーション結果 ･･････ 152
付表 2.3.5　2 次元通水試験の校正曲線 ･･････ 152
付表 2.3.6　流動のある大型土槽のキャリブレーション結果 ･･････ 152
付表 2.3.7　流動のない大型土槽のキャリブレーション結果 ･･････ 152
付表 2.3.8　大型土槽の校正曲線 ･･････ 153
付写真 2.3.1　比抵抗のキャリブレーション装置 ･･････ 153
付写真 2.3.2　2 次元通水試験装置 ･･････ 154
付写真 2.3.3　2 次元通水試験装置(モールド) ･･････ 154
付写真 2.3.4　大型土槽による通水試験装置 ･･････ 154

はじめに

本研究は，地表から深部にいたる地質環境を効率的かつ合理的に把握するための調査・解析技術の体系化を目標に，現状の技術レベルを評価し，研究開発課題の抽出をおこない，各課題の解決に向けた研究開発および調査・解析技術の体系化について検討するものである。

本年度は，核燃料サイクル開発機構（現；日本原子力研究開発機構）が国に提出した“地層処分研究開発第 2 次取りまとめ”[1)]の内容を地質環境，処分技術，安全評価の各観点で評価した結果に基づいて，抽出された深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた研究開発課題を対象として，研究を実施した。

また東濃地科学センターが実施している深地層の科学的研究の成果および研究計画を踏まえ，広域から局所的なスケールでの浅層・深層地下水の水理・水文，地下水の地球化学・物質移動を効率的かつ合理的に把握するための調査・解析手法の高度化・体系化について検討するものである。上記の“地層処分研究開発第 2 次取りまとめ”[1)]は，動力炉・核燃料開発事業団／核燃料サイクル開発機構が，およそ 20 年間実施してきた，地層処分に関する研究開発を含めた国内外の現状技術の集大成であり，現状の技術で地層処分は実現可能，その基盤技術は整ったと評価されている。これに加えて「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」[2)]の制定，これに伴う地層処分の実施主体と資金管理センターの設立は，まさに 21 世紀のはじまりを，地層処分実現へむけてのキックオフの年とした。しかしながら，これまでの研究開発は，基盤技術，要素研究に重点がおかれた，どちらかというと，サイトを特定していない段階の一般論であり，事例研究的な色彩が強い。地層処分実現へ向けて，サイトを特定し，地層処分場を建設／操業するためには，“第 2 次取りまとめ”[1)]に集大成された技術を，より具体化し，また要素技術を体系化するなど，実用化へ向けた課題は依然として多義にわたって存在する。また従来，いわば縦糸として分野を分けて実施してきた「地質環境」「処分技術」「安全評価」の間にいわば横糸を通す，中間分野の課題も多い。東濃と幌延で始まった深地層の研究施設の建設と研究開発は，これらの課題の解明と，実用的な技術のより一層の進展が期待される。

本年度は，(1)「深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究」（課題グループ）では，昨年度に引継ぎ，上記の各分野間にまたがる研究開発を視野にいれて，地層処分の実用技術の重点課題を，分野毎に具体的，事例的に抽出して調査・解析を試みた。その結果に基づいて，分野間にまたがる重要な課題を抽出し，具体的な事例についての研究開発／相互協力に関する検討をおこなった。

一方，(2)「調査・解析手法の高度化・体系化」（解析グループ）では，東濃地科学センターの調査研究計画（超深地層研究所計画の第 2 段階計画など）の中から抽出される課題に基づき，当委員会メンバーが従来より実施している基礎的な要素技術の研究開発に関連する科学技術をとりあげ，実用化へ向けた研究開発を実施した。

また東濃地科学センターの研究開発も立坑の掘削がはじまり，立坑での調査研究という第 2 段階に入ってきた。本調査・研究の成果を反映させて，第 2 段階の調査研究計画の評価もおこないながら，より具体的・実用的な調査・解析技術の高度化・体系化を構築していきたい。

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－”，総論レポート，JNC TN1400 99-020，1999
2) 「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」：平成12年　法律第117号

（地圏空間研究所　小島圭二）

1. 第2次取りまとめに基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究

1.1 処分技術の観点から抽出された深部地質環境の調査･解析技術に関する研究

1.1.1 はじめに

本研究では，深部地質環境の調査･解析技術のうち，主に地層処分の工学技術の分野において，今後実用化に向けて取り組むべき重要な研究開発課題を抽出した上で(表 1.1.1)，具体的な研究開発への取り組みを続けてきた。

平成17年度の研究では，深部地質環境の調査及び性能評価の両分野との連携・体系化を具体的に進めながら，重点的に取り組むべき下記2項目の研究開発を引き続き実施した。

(1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究
- ① 硬岩における各種AEパラメータの詳細検討
- ② AEと亀裂進展のメカニズムに関する研究
- ③ 岩盤の力学－水理学的連成挙動に着目した評価手法の構築

(2) 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究
- ① 長期耐久性を有する新しいグラウト材に関する材料特性および注入効果の検討
- ② 堆積軟岩中におけるフラクチャーシーリング技術の開発(動的限界注入圧とその付加方法に関する検討)
- ③ 多次元尺度構成法を利用した3次元水理モデル構築法のシステム化と統合

表 1.1.1 処分施設の工学技術の体系化に関する課題

処分施設の設計技術の体系化に関する重要研究課題

<u>処分施設の力学的設計体系の確立</u>
- ■大深度における岩盤の物性･地圧データベースの構築
- ■各種解析･設計手法の評価と適用方法の体系化
- ■掘削影響領域の特性化と解析･評価法の統合
- ■立坑の地震時安定性の評価と地下構造物の耐震設計手法の確立

<u>処分施設の水理学的設計体系の確立</u>
- ■広域･サイトスケール･局所における地下水の流動評価技術の体系化
- ■低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発
- ■建設･操業時の地下水制御法と長期安定性を有する岩盤グラウト技術の開発

<u>調査技術と設計技術の統合と体系化</u>
- ■調査ボーリング(方向制御ボーリング)技術の高度化
- ■力学的･水理学的MWD･LWD技術の実用化
- ■微少破壊音(AE)による調査･計測，設計，モニタリングシステムの研究
- ■新材料･新素材を用いた計測技術の高度化

1.1.2　AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発

1.1.2.1　はじめに

一般に，高地圧下における空洞掘削においては，応力再配分の過程で周辺岩盤内に分布する既存の微小亀裂の開口・進展および新規亀裂の発生によって，掘削影響領域(Excavation Disturbed Zone: EDZ)が形成される。この掘削影響領域の評価は，高レベル放射性廃棄物地層処分場の設計および性能評価上の重要な課題の一つとなっている。さらに，合理的な処分施設の設計体系を研究する上で，応力評価に基づく空洞設計手法の開発や，空洞掘削時の亀裂の発生・進展を計測により精度良く把握する手法の開発が重要であり，掘削影響領域の評価を軸とした体系的な研究が極めて重要である。

そこで，本研究においては，第一段階として亀裂の発生・進展挙動ならびに岩盤内の応力変化に対して鋭敏な反応を示す岩盤破壊音(Acoustic Emission: AE)に着目して掘削影響領域の評価を行うことを試みた。本研究の全体的なフローを図1.1.1に示した。

本研究では，まず高地圧下に掘削された岩盤地下空洞において採取された岩石供試体に対する高剛性三軸圧縮試験（AE 計測を同時に行う）の結果得られた応力－ひずみ曲線を個別剛体要素法の解析（PFC 解析）によってシミュレートし，応力経路の各点で観測される岩石の破壊状況（亀裂の発生・進展状況）と AE パラメータ（発生数・周波数・振幅等）との関係を把握する。

この検討結果から応力・破壊現象とAEパラメータの関係を検討し，AEデータによる応力変化・破壊過程の評価技術を構築する。本研究の最終的な目標は，この研究成果を基にして現場計測と空洞掘削解析を総合的に体系化することにより，応力に着目した高地圧下における岩盤空洞の設計手法を構築することである。

なお，今回は，高地圧下に掘削された岩盤地下空洞で得られている現場計測結果ならびに当該空洞において採取された岩石供試体に対する高剛性三軸圧縮試験結果の例を用いてAEパラメータと岩盤ならびに岩石の破壊状況との関連性を検討した。また，これらのうち高剛性三軸圧縮試験結果については，個別剛体要素法による解析を基に詳しい検討を行った。

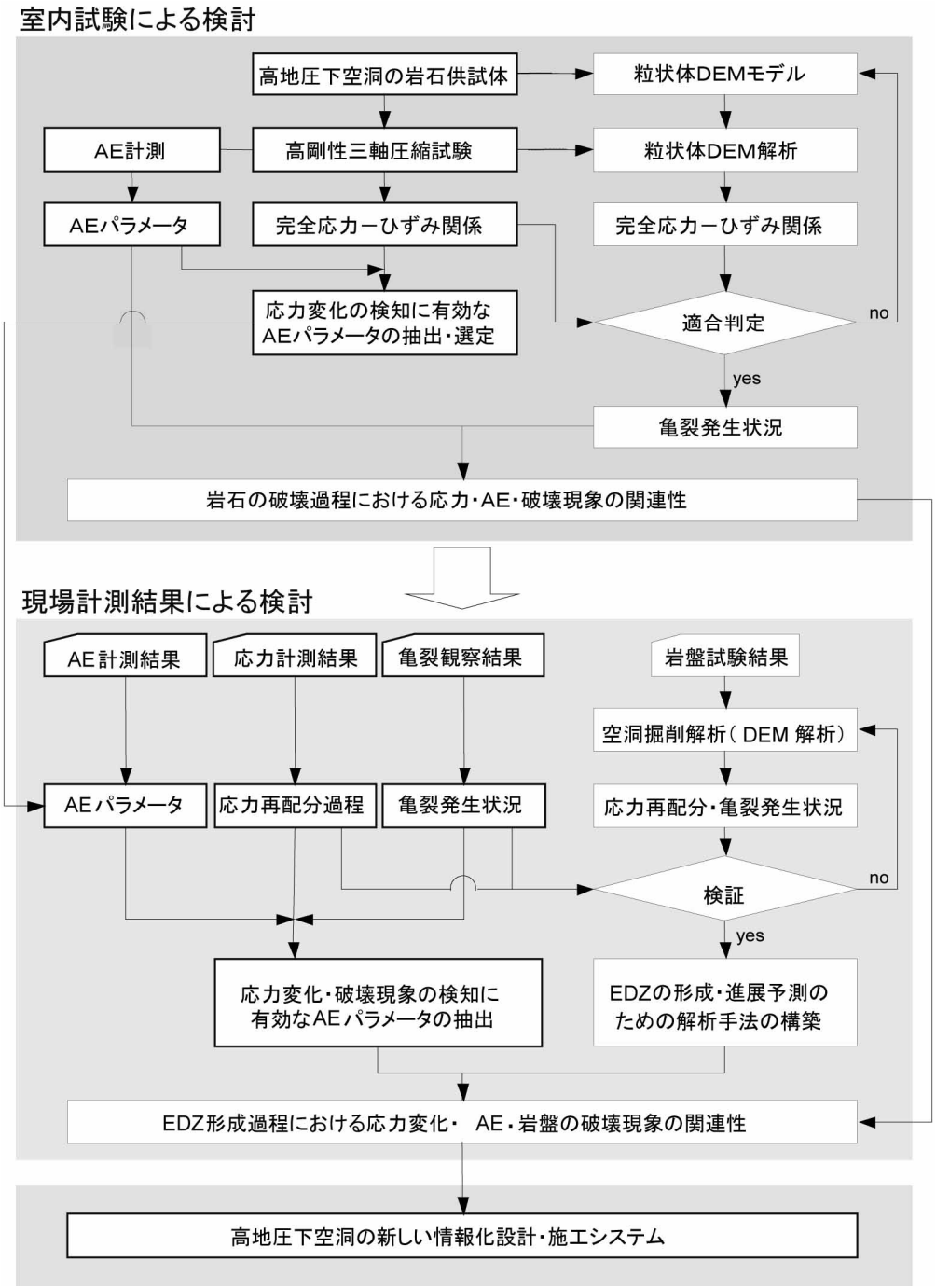


図 1.1.1　AE 計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の開発に関するフロー図

1.1.2.2　岩石の破壊現象と微小破壊音

(1) 実空洞における計測結果

図 1.1.2 は，高地圧下に建設された地下発電所における AE 計測結果の一例を示したものであり [1]，大断面空洞の掘削時に観測された，掘削の進行に伴う AE 発生数の変化をプロットしたものである。また，同位置で実施された岩盤応力変化測定の結果についても併せて示す。この地下発電所では，アーチ掘削の後，ベンチ高さ 3mのベンチカット工法により盤下げ掘削が行われたが，この例で示した AE 計測位置は，空洞のほぼ中段に位置する第 5 ベンチにおける空洞側壁から水平

深度 3m，6m，9mの 3 地点である。

本図を見ると，第 1 ベンチの掘削からすでに AE が観測され，その後第 2，3，4 ベンチと盤下げ掘削の進行に伴って AE 発生数が徐々に増加する傾向が認められる。微小な緩みの発生及び進展を検知するのに適しているとされる岩盤内応力変化測定でも，第 1 ベンチ掘削時にほとんど変化が認められていないのに対し，AE は明確に岩盤の変化の予兆を検知しているものと推察される。掘削が計測位置に近い第 5 ベンチに至ると深度 3mの地点で AE 発生数が最大となり，これに遅れて第6ベンチに至ると深度6mの地点,深度9mの地点の順でAE発生数が最大値を記録している。また，発生数の最大値は，壁面に近い深度 3mの地点で大きく，壁面から遠い深度 9mの地点で小さな値をとる。これらのことは，AE が各位置における掘削影響領域の進展の時期と岩盤の微小破壊の程度を表しているものと推察される。掘削が第 6 ベンチを通過すると，AE 発生数は急激に減少して最終的に発生が終息することになる。また AE 発生数は，深度 3mの地点よりも深度 6mの地点，深度 9mの地点が多くなるが，このことは，深度 3mの地点では既に岩盤応力が変化していないのに対して深度 6mの地点,深度 9mの地点では岩盤応力が引き続き変化していることと対応する。

以上より，AE は，岩盤応力の変化と共に形成される掘削影響領域の進展挙動を把握するための重要なパラメータであると考えられる。

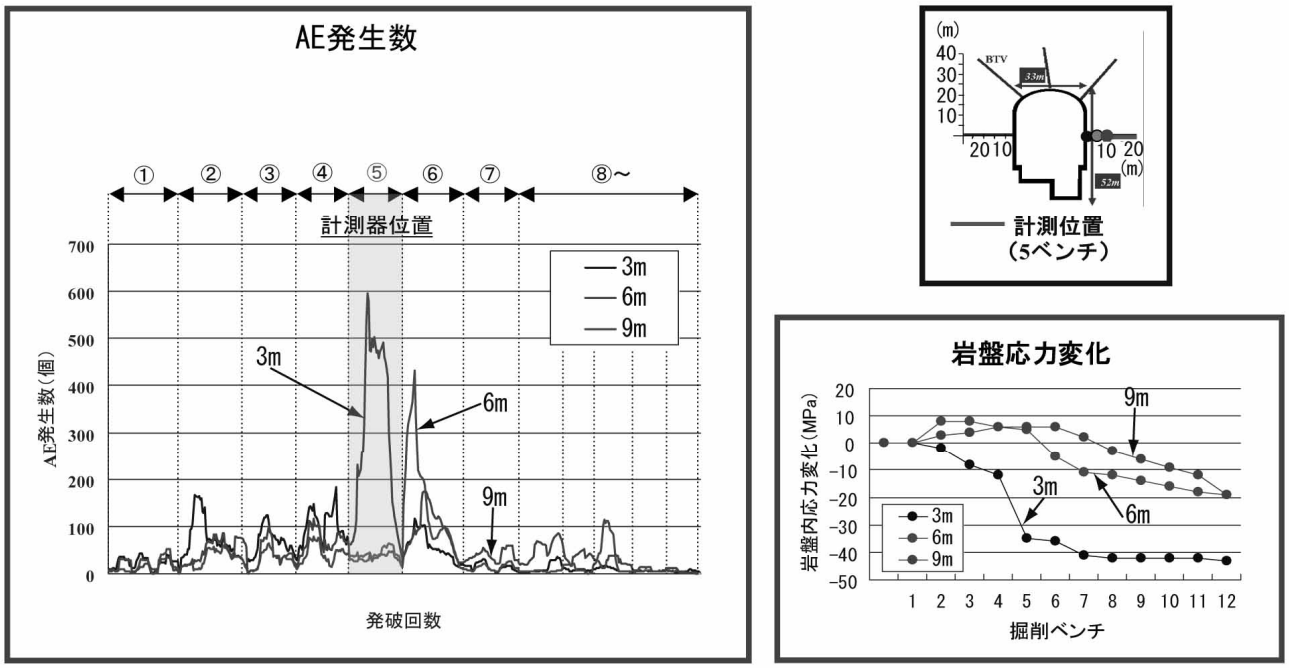


図 1.1.2　地下空洞の掘削の進行に伴う AE 発生数の変化

(2) 三軸圧縮試験時の AE 計測

岩石の室内三軸圧縮試験を行い,破壊過程に発生する AE を測定して AE 特性の分析を実施した。室内岩石三軸試験に用いる供試体は,(1)で述べた地下空洞の調査坑で実施されたボーリングのコアより採取された。ここでは，3 つの供試体（Case-1，Case-2，Case-3）についての試験結果を述べることにする。

三軸圧縮試験装置（図 1.1.3）としては，100tonf 容量のサーボコントロール式剛性材料試験機を用い，ピストンとラム間の変位が 0.05%/min(0.05mm/min)の速度で生じるようなひずみ制御方式（変位制御）で載荷を行った。なお，変位制御に用いる変位計（ひずみ式）はピストン部分に固定される。また側圧についてはサーボ制御で 10MPa とした。

また，試験に使用した AE センサー（直径 12mm，高さ 40mm）は波形解析を考慮して，センサーの特性が比較的表れにくい広帯域型（100kHz～1MHz 間で受振感度が比較的平坦）を選定して用いた。また油圧ポンプからのノイズや電気ノイズを省くために 100kHz～1MHz のバンドパスフィルターを使用した。なお，AE センサーは供試体上部，下部の載荷板の中にスプリングで圧着させた。図 1.1.4 に AE 計測システムの概要図，表 1.1.2 に AE 測定装置の仕様を示す。

図 1.1.3　高剛性三軸圧縮試験装置

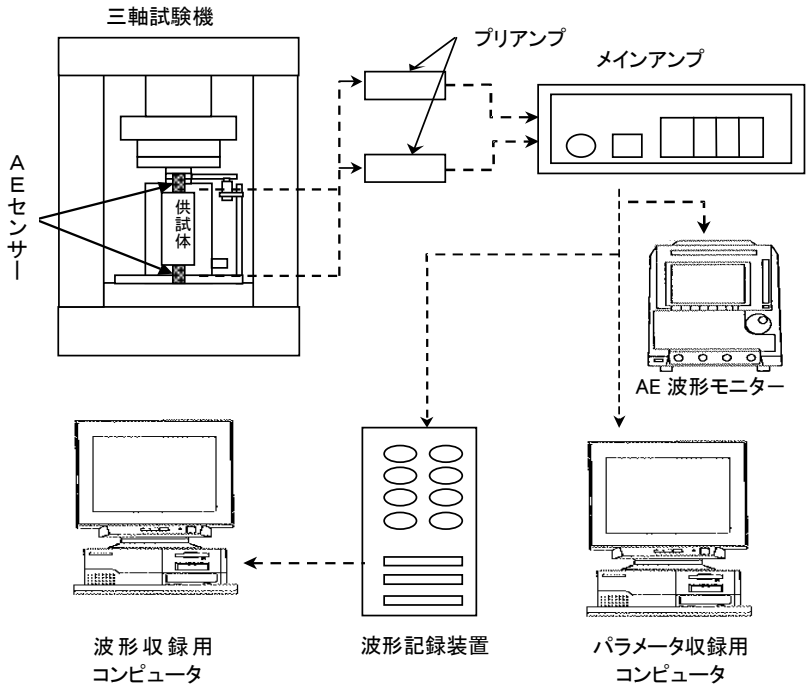


図 1.1.4　AE 計測システム

表 1.1.2　AE 測定装置の仕様

	機器名		型式名	仕　様		メーカー
AE測定装置	AEセンサー		AE900	・広帯域(100～1000kHz)		(株)昭和電気研究所
	プリアンプ		5100	・高周波(50kHz～2MHz) ・増幅度(20dB or 40dB)		(株)昭和電気研究所
	AE信号処理装置	ﾒｲﾝｱﾝﾌﾟ	NAIS5000	・増幅度 ・周波数特性 ・入力ｲﾝﾋﾟｰﾀﾞﾝｽ ・最大出力	最大60dB(f=200kHz) 10kHz～1MHz(-3dB) 75Ω 20VP-P以上	(株)昭和電気研究所
		AEしきい値		・設定範囲 ・分解能 ・精度	0～5V 10mV 0.1%FS	
		ﾌﾟﾘｱﾝﾌﾟ電源保護		・出力電圧 ・電源遮断電流	DC28V 約150mA	
	AE波形処理装置			・チャンネル数 ・入力レンジ ・サンプリング ・記録長 ・分解能 ・プレトリガー ・バッファ容量 ・波形ﾄﾘｶﾞ到着ﾛｼﾞｯｸ ・検出レベル	8 ±5V 10ks/s～10Ms/s 1Kw,2Kw,4Kw,8Kw 10ﾋﾞｯﾄ 0,25,50,75% 1~256kﾜｰﾄﾞ AND,OR 0V,0.1V,･･･,9.8V,9.9V	
変位　測定装置	A-D変換器		ADC-120	・チャンネル数 ・入力電圧 ・分解能 ・変換精度 ・ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ形式 ・ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞﾀｲﾑ ・変換速度 ・電源	4CH ±5V 12 bit ±0.025%FS 同時ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ 5μS～10S 5μS/ch AC90～130V　50/60Hz	(株)共和電業

３つの供試体に関する試験結果（応力ひずみ曲線）を図 1.1.5 に示す。また，本図には観測された AE の発生数・周波数・m値についても同時に示している。これより，応力経路の各点において AE の発生に次のような傾向が認められる。

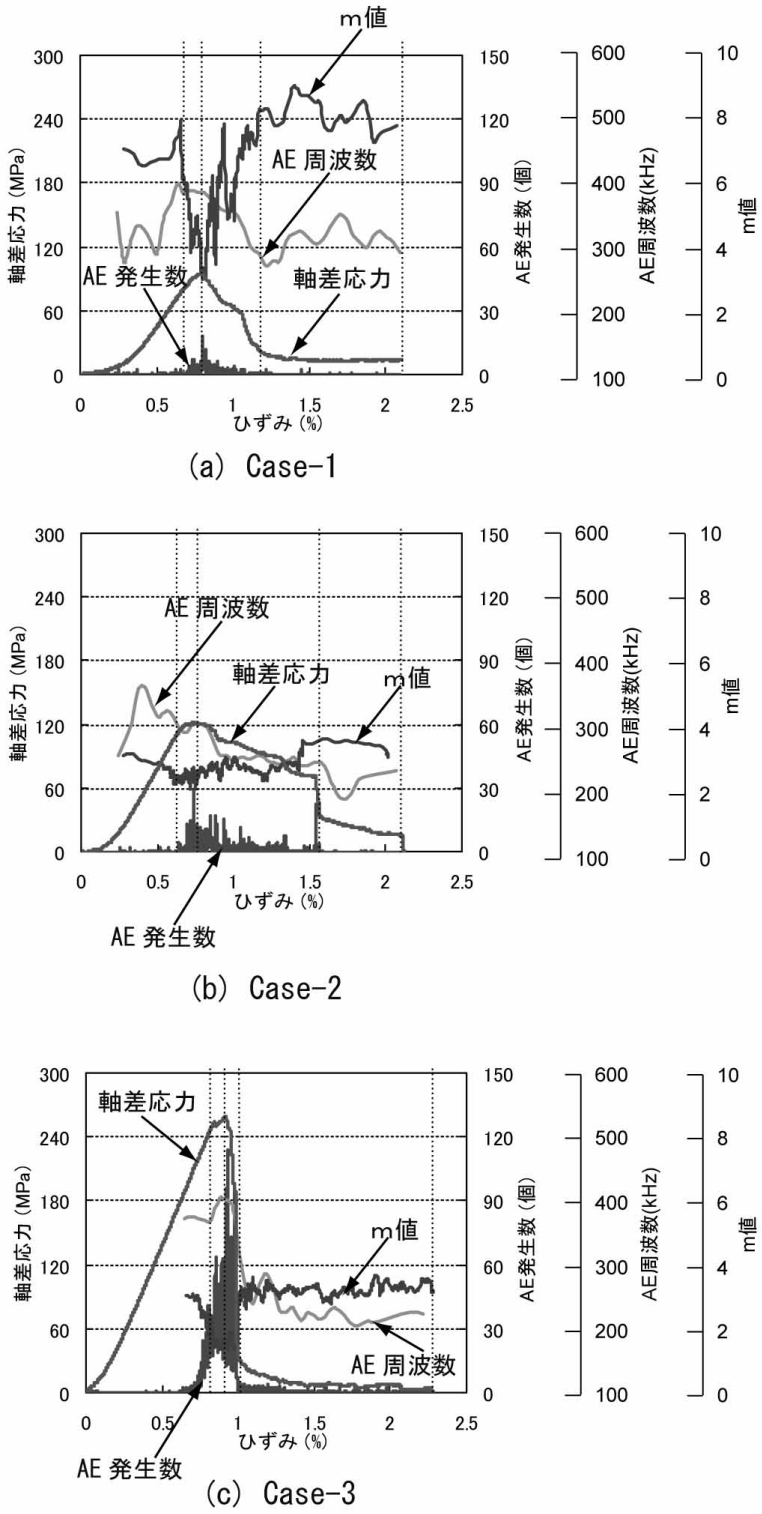
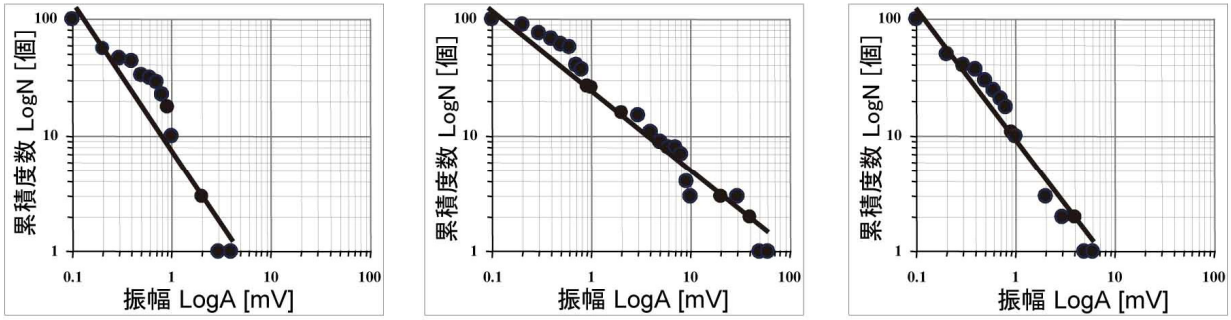


図 1.1.5　三軸圧縮試験結果

① 応力が降伏強度に至る前にAEが発生し始める。
② AE発生数は降伏強度に至ると顕著に増加し，ピーク強度に至った直後に最大値をとる。その後，残留強度に至るまでAE発生数は減少し，ほとんど発生が認められなくなる。
③ AE周波数についてはピーク強度に達するまで大きな変化が認められないが，ピーク強度に達すると残留強度に至るまで応力の低下とほぼ対応した減少傾向を示す。

なお，AE発生数および周波数の他にm値を用いてAE信号の振幅値の変化に注目した検討も行った。m値とはAE発生総数と最大振幅値との関係を図1.1.6のように両対数グラフ上で示し，直線近似したときの勾配である。

（黒丸は観測値，直線は観測値から求められた回帰線である。）



(a) 載荷直後　　(b) 破壊直前　　(c) 破壊後

図1.1.6　AE波形の振幅値の変化

岩石試験におけるAE波形の振幅値の変化は破壊との関連で次のようなメカニズムを反映している。

① 載荷初期の低い応力レベルにおいては，岩石内マイクロクラックなどの初期欠損部の閉合や開口進展によるAEが発生するが，これらは極めて局部的なものであることから，ひずみエネルギーが小さく，発生するAEの振幅値も小さくなる。
② 応力レベルが増加すると微小破壊が累積されていき，これらが互いに連結することによって供試体に分離面が形成されて破壊に至る。この破壊時には蓄積された大きな弾性ひずみエネルギーが放出されるので，発生するAEの振幅値も大きくなる（m値が減少する）。
③ 破壊後には，破断面の滑動に伴う局所的な微小破壊が発生し，発生するAEの振幅値も小さくなる。結果として，載荷の初期段階のAE波形と同様に振幅値が小さなものが卓越することになる（m値が増加する）。

(3) 応力と AE パラメータの関係

ここでは脆性的な破壊挙動を示す Case-3 の供試体とやや延性的な破壊挙動を示す Case-2 の供試体を例にとり，AE パラメータ（AE 発生数・卓越周波数・m値）の挙動について詳しく検討する。

①AE 発生数

図 1.1.7 に Case-2 と Case-3 の供試体について応力 - ひずみ曲線と AE 発生数をプロットしたグラフを示す。

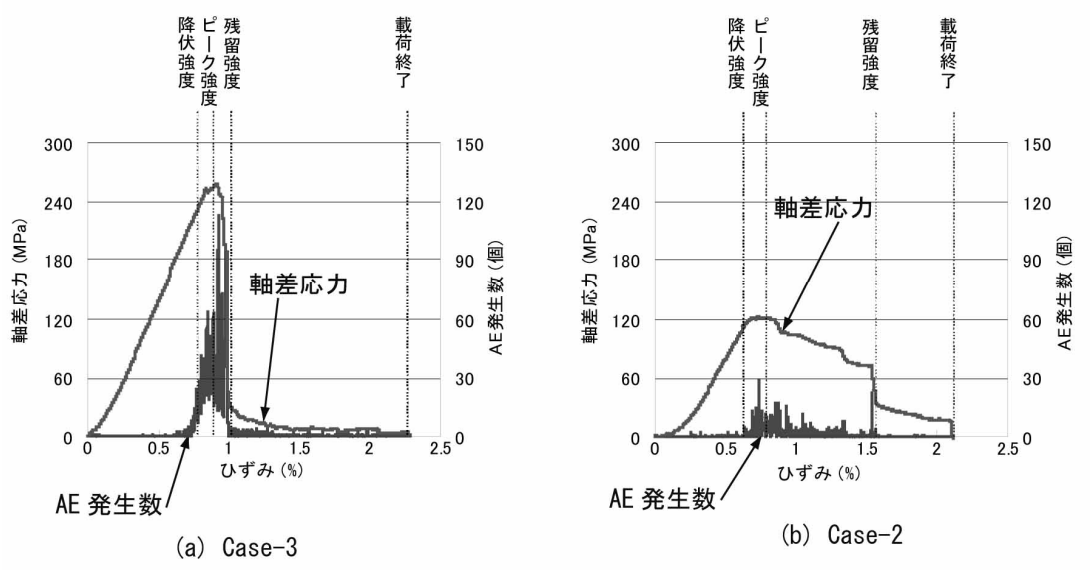


図 1.1.7　AE 発生数の比較

脆性的な破壊を示す Case-3 においては，降伏強度付近から AE が発生し始め，ピーク強度付近において発生数が最大となっている。ピーク強度以降は，ひずみがほとんど増大することなく，急激に応力が低下し，残留強度に達していることがわかる。残留強度以降については，AE はほとんど発生していない。

やや延性的な破壊を示す Case-2 については，Case-3 と同様にピーク強度前後に AE 発生数が最大となっているが，ひずみがある程度増大する（1.5%程度）まで緩やかに応力が低下しており，この間に AE が断続的に発生していることがわかる。残留強度以降についてはこちらも Case-3 と同様に AE はほとんど発生していない。

②卓越周波数

図 1.1.8 に Case-2 と Case-3 の供試体について応力 - ひずみ曲線と卓越周波数をプロットしたグラフを示す。

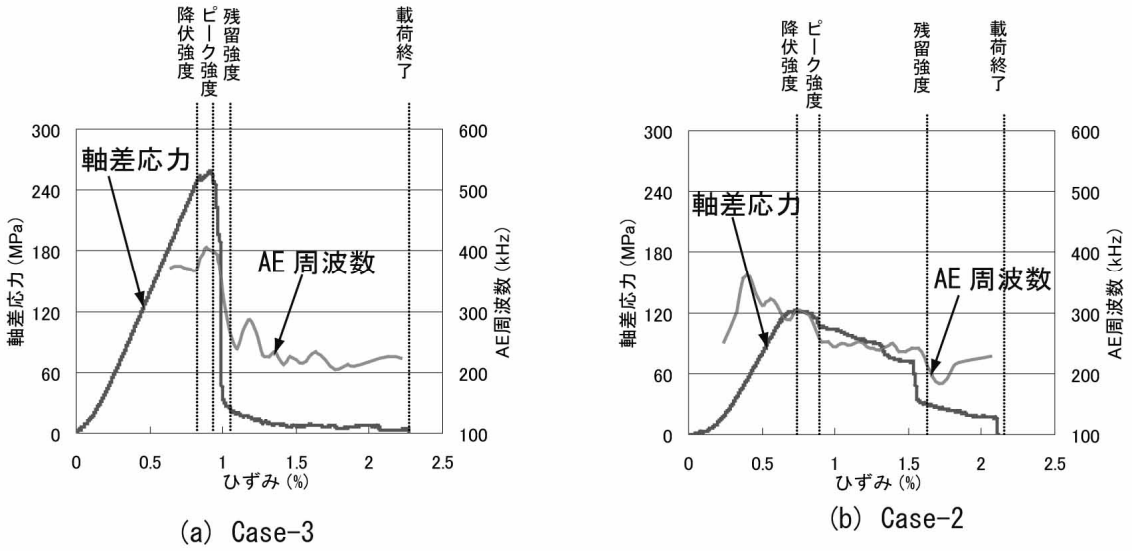


図 1.1.8　AE 周波数の比較

脆性的な破壊を示す Case-3 については，載荷開始からピーク強度までは約 400kHz の高周波の AE が卓越するが，その後ピーク強度から残留強度に達する軟化過程において急激に低周波の AE が卓越し，残留強度以降も引き続き低周波の AE が卓越している。

やや延性的な破壊を示す Case-2 については，載荷開始直後から徐々に高周波の AE が卓越し始め，その後，Case-3 と同じように軟化過程において低周波の AE が卓越しているが，Case-2 の場合は低周波の AE が徐々に卓越しており，卓越周波数の平均値は緩やかに低下している。なお，残留強度以降については引き続き低周波の AE が卓越している。

③ m値

図1.1.9にCase-2とCase-3の供試体について応力 - ひずみ曲線とm値をプロットしたグラフを示す。なお，1つのm値を算出するにあたっては，50個のAEデータを用いており，さらに前後2データ（計5データ）の移動平均処理を施している。

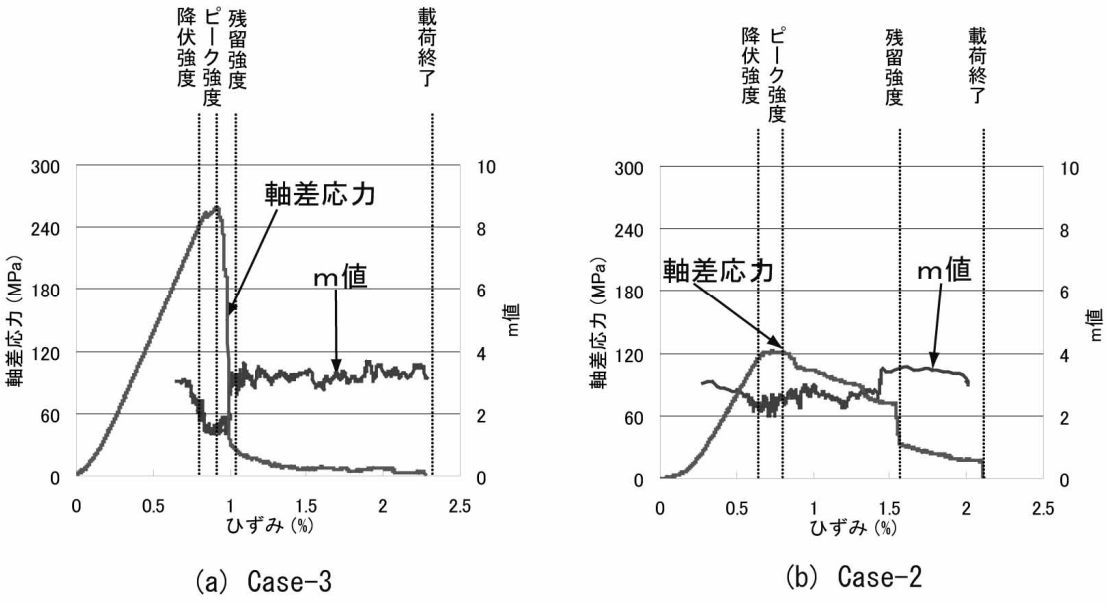


図1.1.9　m値の比較

まず，脆性的な破壊を示すCase-3においては，降伏強度付近においてm値の低下が始まり，その後残留強度に達するまではm値が低いレベルを維持している。その後，残留強度において明瞭なm値の急激な反転が確認され，載荷前と同じレベルに達している。

やや延性的な破壊を示すCase-2についても，残留強度付近においてm値の低下が確認された。しかしながら，その後ある程度ひずみが増大する間にわたり，低いレベルを維持し続ける。こちらに関しても残留強度付近で明瞭な反転が確認され，載荷前のレベルに戻っていることがわかる。

このように，m値に注目することによって，破壊過程における降伏強度点や残留強度点をAEパラメータから判定することができる。

以上，破壊過程とAEの挙動の差異について，3つのAEパラメータ（AE発生数・卓越周波数・m値）に着目し分析をおこなった結果，応力経路におけるAEパラメータの挙動について次のような知見を得た。

まず，岩種・破壊過程の差異にかかわらず，降伏強度に達する付近において，まずAEの発生が開始し，m値の低下が起こる。その後，ピーク強度に達する間に，AE発生数が急増し，m値の低下がいったん止まる。この段階においては，高周波のAEが卓越している。これは応力集中により岩石の構造が緻密となり，発生したAEのうち高周波のものであっても遮断されることなく計測されたためであると考えられる。m値の低下に関しては応力集中状態にある岩石には大規模のエネルギーが蓄積されていることから，発生するAEの振幅が大規模なものになったためであると考えられる。ピーク強度を超えると，AE発生数は徐々に減少に転じ，低周波のAEが卓越し始める。更に破壊が進行し，残留強度に達すると，m値が反転し，破壊前のレベルに戻る。これは岩石に

破壊面が形成されたことにより集中した応力が急激に解放されたため，m値が載荷前のレベルへ戻ったものであると考えられる。この段階において，AE の発生は収束に向かい，AE 周波数も低いレベルで推移を続ける。このように，AE 発生数の他に，卓越周波数・m値に着目することで岩石供試体の破壊過程を明瞭に捉えることができ，破壊現象の進行度合を評価することができる。

次に，脆性的な破壊を示すような岩石については，ピーク強度直後，ひずみがほとんど増大することなく AE 発生数が急激に減少し，低周波の AE が急激に卓越する。これは供試体の強度が非常に高く，蓄積された応力が大規模な破壊面の形成と共に急激に解放され，供試体の強度が低下しているからであると考えられる。

一方，やや延性的な破壊を示すような岩石については，ピーク強度に達した後，ひずみがある程度増大するまで AE が発生し続け，周波数についても，低周波の AE が徐々に卓越している。つまり，ひずみがある程度増大するまで，供試体内で小規模な破壊が断続的に発生し，その蓄積によって供試体が強度を失っていると考えられる。

1.1.2.3 個別剛体要素法による解析

ここでは，前項 1.1.2.2 (2)において示した高剛性三軸圧縮試験の結果得られた応力ーひずみ曲線を個別剛体要素法の解析（PFC 解析）によってシミュレートし，応力経路の各点で観測される岩石の破壊状況（亀裂の発生・進展状況）と AE パラメータとの関係をさらに詳しく検討する。

ここで，本研究においては，次のような特徴をもつ PFC(Particle Flow Code)と呼ばれる解析コードを用いて個別剛体要素法による解析を実施した。

① 粒状体をベースとした個別要素法の解析コードである。
② 結合力（ボンド）をもつ円形要素の集合体で各種材料をモデル化する。
③ 運動則と力ー変位関係則を交互に用いた陽解法により，粒子の位置・接触力等を経時的に算出することができる。
④ 引っ張りまたはせん断応力によって粒子間の結合が切れることで亀裂進展や破壊など不連続体挙動のシミュレーションが可能である。
⑤ ユーザー構成則の組み込みが可能である。

すなわち，この解析コードを用いることによって，応力経路の各点で引張亀裂ならびにせん断亀裂の発生状況を推定することができる。

以上を踏まえた上で，今回実施した検討のフローを述べる（図 1.1.10 参照）。まず，三軸圧縮試験によって得られた応力ーひずみ関係を個別剛体要素法（PFC）によってカーブフィッティングできるような粒状体モデルのパラメータ（表 1.1.3）の値を設定する。次に得られたモデルにおける亀裂発生状況（引張亀裂ならびにせん断亀裂の発生状況）と三軸圧縮試験時に観測された AE 発生状況（AE 発生数・AE 周波数）とを応力経路の各点で比較することによって，岩石の破壊現象と AE 特性との関係について検討を行う。

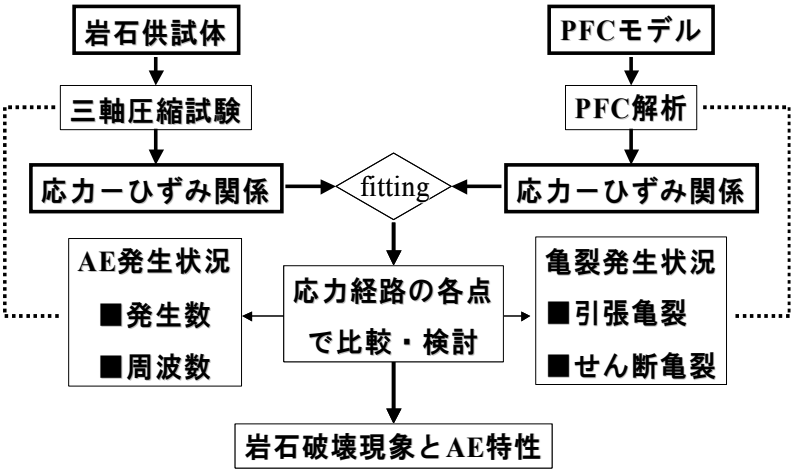


図 1.1.10　岩石の破壊現象と AE 特性の関係についての検討フロー図

表 1.1.3　PFC 解析における入力パラメータ

記号	内容	分類
R_{min}	粒子の最小半径	
R_{max}/R_{min}	粒子の最大半径と最小半径の比	粒子の形状
ρ	粒子の密度	
E_c	粒子間の接触におけるヤング率	粒子間の変形性
k_n/k_s	粒子剛性比	
σ_c(mean)	ボンドの引張り強度の平均値	
σ_c(std.dev.)	ボンドの引張り強度の標準偏差	
τ_c(mean)	ボンドのせん断強度の平均値	粒子間の強度
τ_c(std.dev)	ボンドのせん断強度の標準偏差	
μ	粒子間の摩擦係数	

ここで，PFC 解析における入力パラメータとカーブフィッティングの方法について述べる。まず，入力パラメータについては，表 1.1.3 に示すように粒子の形状・粒子間の変形性・粒子間の強度を設定するパラメータに大別される。これらのパラメータを次のような手順で適切に設定することで，カーブフィッティングを行うことができる。

① E_c の値を変化させて供試体のヤング率を設定する。

② k_n/k_s を変化させてポアソン比を設定する。

③ σ_c（std.dev.）=0，τ_c（std.dev)=0 とし，σ_c（mean），τ_c（mean)を変化させて載荷し，ピーク強度を仮に設定する。

④ σ_c（std.dev.），τ_c（std.dev）を変化させて降伏点を決定する。これらの値を大きく設定すると低い応力レベルで降伏が発生するようになる。この場合ピーク強度も低下するので調整が必要となる。実際には③④の設定を数回繰り返すことによって決定する。

⑤ μを変化させて残留強度を決定する。

なお，試験前の供試体に顕著な亀裂が存在し，応力の載荷後にこの面を介して破壊が進行したような場合（脆性的な破壊挙動を示すことが多い）には，粒状体モデルにおいて亀裂相当部分の強度値を低く設定し，カーブフィッティングを行う。

図 1.1.11 に Case-1，Case-2，Case-3 の各実験結果に対してカーブフィッティングをした結果を示す。本図には，応力ーひずみ曲線の他に，三軸圧縮試験の結果として試験前後の供試体のスケッチを，PFC 解析の結果として試験前後の粒状体モデルの状況および試験前後のボンドの破断状況を併せて表示している。また，Case-3 については，供試体の破断状況を参考にして，あらかじめ潜在亀裂を供試体に設定してカーブフィッティングを行った。図を見ると，いずれのケースも比較的高い精度でフィッティングできているものと考えられる。また，亀裂の発生位置も両者で整合した結果となった。

図 1.1.12 に Case-1，Case-2，Case-3 の PFC 解析結果として，引張亀裂ならびにせん断亀裂の累積発生数を示すと同時に，4 つの段階（①降伏強度・②ピーク強度・③残留強度にそれぞれ到達する点，および④残留強度到達後にひずみがある程度増大した点）における亀裂発生分布を示す。各段階において亀裂の発生に次のような傾向が認められる。

① 応力が降伏強度に至る前に引張亀裂が発生し始める。

② 引張亀裂の発生数は降伏強度に至ると顕著に増加し，せん断亀裂が発生し始める。ピーク強度に至るとせん断亀裂の発生数が顕著に増加し，全体の亀裂発生数は最大値をとる。その後，引張・せん断亀裂の発生数は徐々に減少し，残留強度に至るとほとんど発生が認められなくなる。

③ 亀裂の発生位置は，ピーク強度に至る前までは，供試体全体にほぼ均質に分布するが，ピーク強度を過ぎると特定位置（破壊によって形成される分離面の位置）に集中する。なお，潜在亀裂が存在する Case-3 の場合には，全体を通して潜在亀裂の周辺に亀裂の発生が集中する。

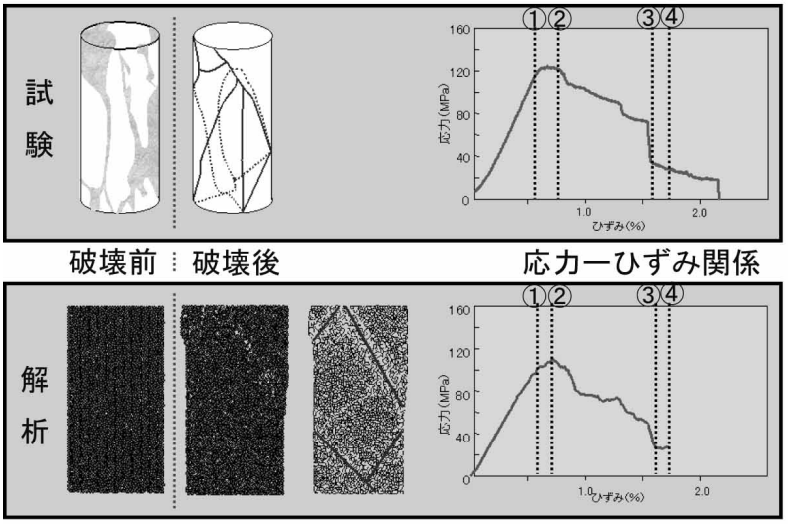
以上の結果から，1.1.2.2(3)で検討した三軸圧縮試験による AE の発生モードと PFC 解析によってシミュレートされた亀裂の発生モードとを岩石供試体の破壊の各段階において比較して，整理すると次のようになる。

① 載荷初期～降伏強度：岩石内にほぼ均質に引張亀裂が生じて AE が発生するが，その発生数は少ない。

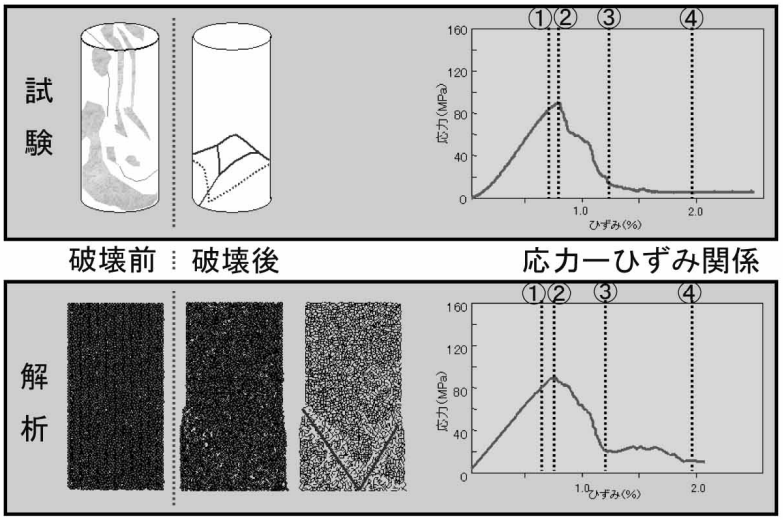
② 降伏強度～ピーク強度：引張亀裂の発生数が顕著に増加するとともに，せん断亀裂が発生し始める。これに伴って AE の発生数も増加する。また AE 波形の振幅値も徐々に大きなものが卓越するようになる。

③ ピーク強度～残留強度：せん断亀裂の発生数が顕著に増加し，全体の亀裂発生数はピーク直後に最大値をとる。亀裂の発生位置は特定位置に集中し，これらが連結し合うことによって岩石に分離面が形成される。その後，引張亀裂およびせん断亀裂ともに発生数が徐々に減少する。AE の発生数は全体の亀裂発生数と対応した傾向を示し，ピーク直後に最大値をとる。AE 波形の振幅値は残留強度付近まで大きなものが卓越し，周波数は応力の低下とほぼ対応した減少傾向を示す。

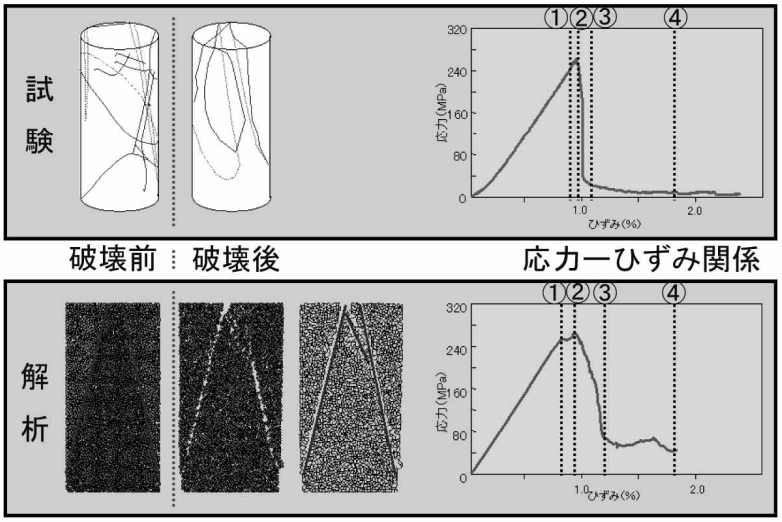
④ 残留強度到達後：残留強度に至った後は，破壊によって形成された分離面周辺にのみ亀裂が発生するがその発生数は少ない。AE 発生数も同様の傾向を示す。AE 波形の振幅値は再び小さなものが卓越するようになり，周波数は低いレベルで一定値を呈するようになる。



(a) Case-1

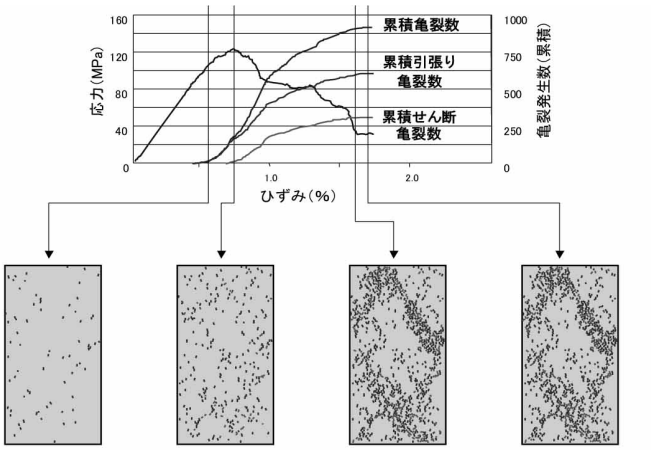


(b) Case-2

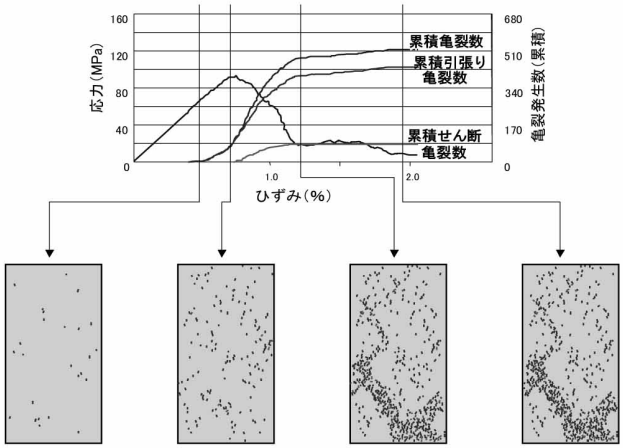


(c) Case-3

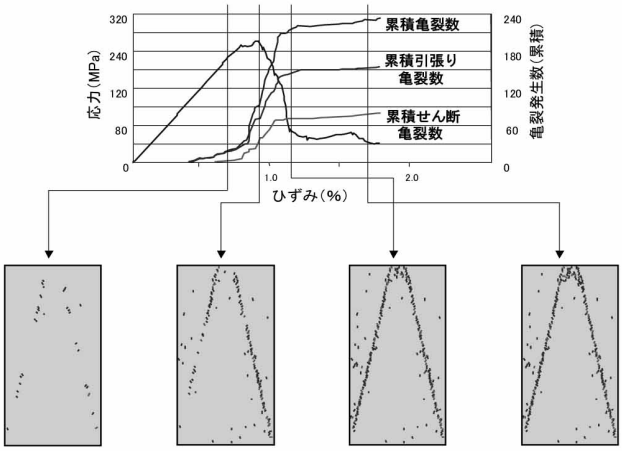
図 1.1.11　PFC 解析によるカーブフィッティング結果



(a) Case-1



(b) Case-2



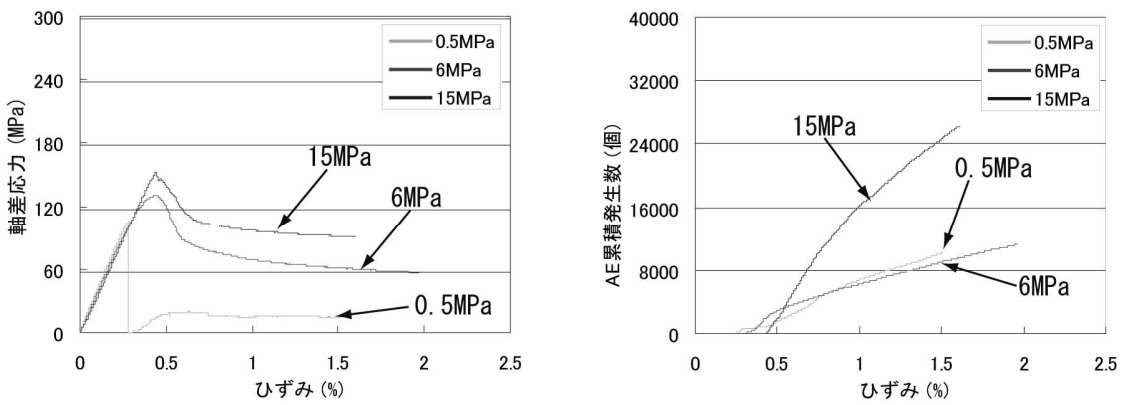
(c) Case-3

図 1.1.12　応力－ひずみ曲線と亀裂発生分布（PFC 解析）

筆者らの研究グループでは，岩石の破壊過程・AE の挙動に対する拘束圧の影響を検討するために，異なる拘束圧を作用させた三軸圧縮試験を行い，上述と同様の方法で検討を行っている。こ

こでは，その結果の一部を紹介する。

図 1.1.13 は，ほぼ同一の層準で採取された中粒砂岩の供試体に対して異なる拘束圧（0.5MPa・6MPa・15MPa）を作用させた三軸圧縮試験によって得られた応力ーひずみ曲線と AE 発生数（累積）の推移を示したものである。まず，応力ーひずみ曲線を見ると，拘束圧の増加に伴って，ピーク応力および残留応力が増加し，ピーク応力から残留応力へ至るまでのネガティブスロープが緩くなっていることがわかる。一方，AE 発生数の推移を見ると，拘束圧が大きい場合（15MPa）に発生数が高くなっている。

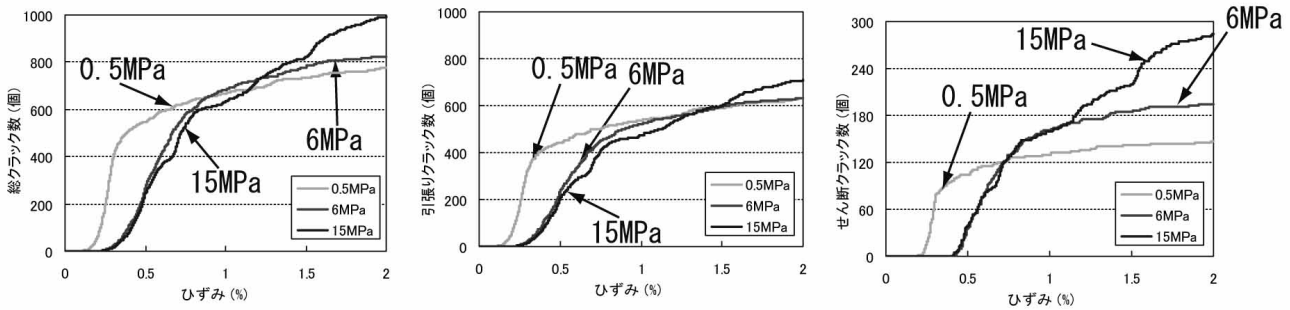


（a） 応力ーひずみ関係　　（b） AE 累積発生数

図 1.1.13　拘束圧を変化させた三軸圧縮試験の結果

このような応力および AE の挙動と破壊現象との関連性を検討するために，個別剛体要素法によるシミュレーションを行い，三軸圧縮試験で得られた応力ーひずみ曲線にカーブフィッティングすることで，亀裂の発生・進展状況を推定した。

図 1.1.14 は，シミュレーションにおいて観測された亀裂累積発生数の推移を(a)全亀裂（引張り亀裂 + せん断亀裂），(b)引張り亀裂，(c)せん断亀裂の別に示したものである。



（a） 全亀裂　　（b） 引張り亀裂　　（c） せん断亀裂

図 1.1.14　シミュレーションにおいて観測された亀裂の累積発生数

まず，拘束圧が増大するに従い，供試体内に発生する全亀裂の発生数が増加していることがわかる。また，拘束圧が大きいものについては，特に残留強度以降で多数の亀裂が発生しており，特にせん断亀裂の増加割合が大きい。このことから，拘束圧が増加すると，広範囲のひずみ領域にわたって破壊が継続され，せん断力による破壊が起こりやすくなるものと考えられる。

ここで，拘束圧 6MPa の場合の粒状体モデルと拘束圧 15MPa の場合の粒状体モデルには同一の micro parameter が設定されている。これは，①両供試体の初期状態が類似していたこと，②同一の micro parameter で十分に応力－ひずみ関係をカーブフィッティング可能であったことによる。このような状況から，この 2 ケースにおける亀裂発生状況を比較すれば，拘束圧の違いによる破壊現象の差異を同一材料条件のもとで検討できるものと考えられる。

図 1.1.15 は，降伏応力やピーク応力といった応力が特徴的な点およびピーク応力以降のひずみ 0.2%毎の点で囲まれた区間における亀裂発生個所を拘束圧 6MPa の場合と拘束圧 15MPa について示したものである。まず，拘束圧 6MPa の場合については，ピーク応力に達した直後に供試体下部および中央部に明瞭な破壊面が形成され，その後ひずみが増大すると，形成された破壊面周辺部に限りわずかに亀裂の発生が認められる。一方，拘束圧 15MPa の場合にも，ピーク応力に達した直後に供試体下部に明瞭な破壊面が形成されているが，応力は引き続き高い値を維持し，次の破壊面が供試体上部に形成され，その後ひずみがある程度増大した段階において供試体中央部に高角度の破壊面が形成されるといった逐次破壊の傾向が認められる。また，破壊面周辺におけるせん断亀裂の発生が顕著になっている。

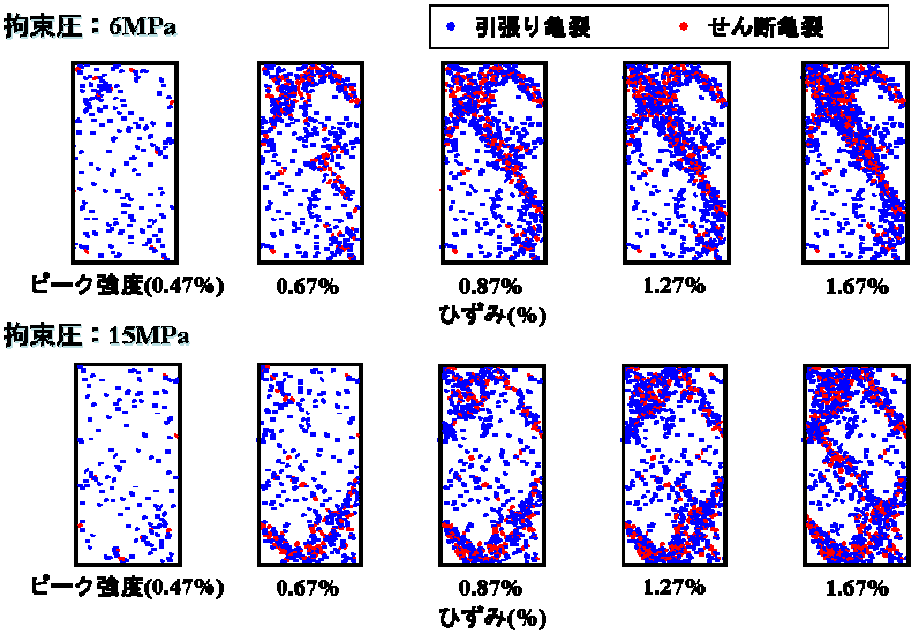


図 1.1.15　拘束圧による亀裂の発生・進展過程の差異（DEM 解析結果）

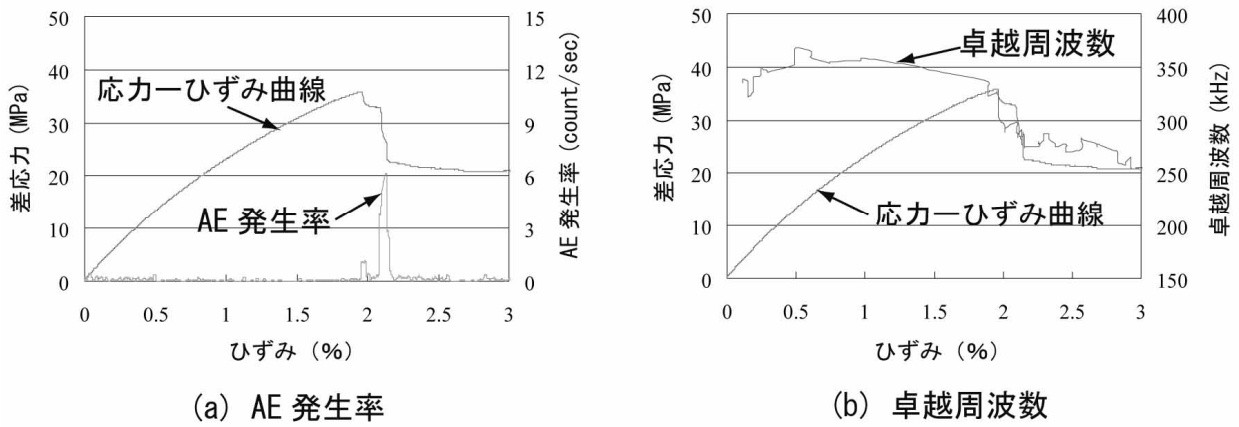
以上より，拘束圧が大きくなるほど，供試体内に発生する亀裂が増加する傾向にあり，特にピーク応力後のせん断亀裂の発生が著しい。これは，拘束圧が大きい場合には，拘束圧が小さい場合と比較して破壊面が形成された後にも破壊面の摩擦力が大きくなるため，破壊面周辺部により大きなせん断力が発生しやすく，結果としてせん断破壊が他のインタクトな部分へ進行しやすく

なるためと考えられる。

1.1.2.4 堆積軟岩における AE

AE は，硬岩に対しては，空洞周辺の亀裂の発生･進展挙動ならびに応力変化に関する物理的指標として有効であることが明らかになってきているが，軟岩に対しては，原位置測定の困難さ（AE 発生数が少ない，エネルギーが小さく到達距離が短い等）から計測事例が少なく，AE の物理的指標として有効性が明らかになっていない。そこで，筆者らの研究グループは，幌延で採取された新第三紀堆積軟岩のボーリングコアを用いて高剛性三軸圧縮試験時の AE 測定を行い，新第三紀堆積軟岩の AE 特性（発生数，周波数特性など）を硬質岩系のデータと対比しながら分析した。

その結果，3 つの AE パラメータ（AE 発生数・卓越周波数・m値）の挙動を捉えることにより，供試体が破壊へと至るまでの応力状態の変化と AE を対応付けすることができ，特に卓越 AE 周波数が応力変化や破壊現象を鋭敏に捉えていることがわかった（試験結果の一部を図 1.1.16 に示す)。卓越周波数は降伏応力からピーク応力に達するまでに低下し始め，残留応力に達するまでには低下が終了し一定のレベルに落ち着く。この変化はいずれの拘束圧においても顕著に見られた。これは，堆積軟岩のような軟質な岩石においてはもともと AE が減衰しやすく，微小亀裂の形成・進展の影響により特に高周波の AE がセンサに到達しなくなったためと考えられる。したがって，このパラメータは堆積軟岩において応力変化の評価に非常に有効であると考えられる。



(a) AE 発生率　　(b) 卓越周波数

図 1.1.16　堆積軟岩を対象とした高剛性三軸圧縮試験における AE パラメータの挙動

1.1.2.5 現場計測結果に基づく応力変化と AE パラメータの挙動

(1) 計測地点と現場計測の概要

現実の空洞周辺における応力変化と AE パラメータの挙動の関係を把握するために，地下発電所の本体空洞掘削時の計測結果[1)]について検討を行った。高さ 52m，幅 33m，長さ 216mのこの空洞は，土被り約500mの大深度に，アーチ部および12層のベンチごとに逐次掘削が進められた。図 1.1.17 に示すように，空洞周辺の岩盤は中生代に堆積した泥岩や砂岩などの混在岩（90%以上が CH 級）であり，6 つの地質に区分することができる。各地質の岩盤物性(弾性係数，破壊強度等)は，原位置岩盤試験などから得た。また，空洞周辺の初期地圧の主応力軸は垂直方向から約 26°傾いている。

計測は，空洞掘削に先立って周辺に掘削されたボーリング孔内の多数の地点において行った。その項目としてはAE，応力変化，変位，亀裂開口量などがある。今回は空洞H断面の4ベンチ位置に水平に掘削されたH10計測線上の空洞壁面から3mの地点において詳細な検討を行った。

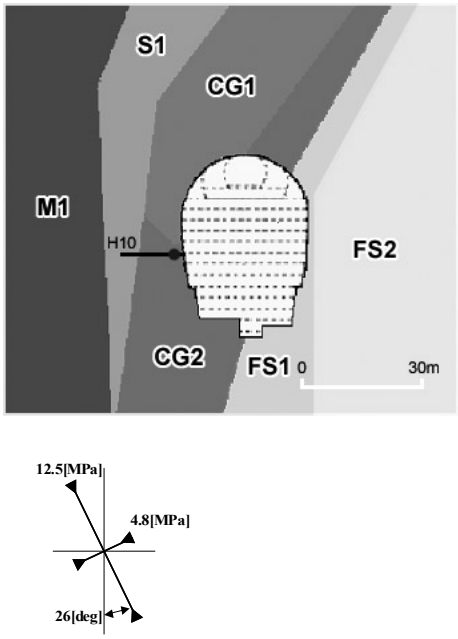


図1.1.17　H断面空洞周辺地質図

M1 = mudstone, S1 = sandstone,

CG1 = conglomerate,

CG2 = coarse sandstone,

FS1 = sandstone, and FS1 = sandstone.

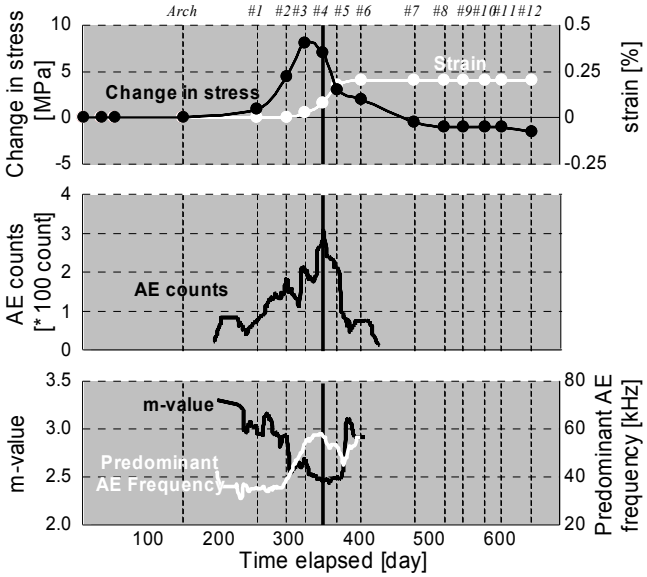


図1.1.18　H10計測線上3m地点での計測結果

(2) AEパラメータの挙動と応力変化・ひずみとの関係

H10計測線上3m地点における応力変化，ひずみ，AEパラメータの計測結果を図1.1.18に示す。これらの関係を，予め行った岩石の三軸圧縮試験におけるAEパラメータの挙動をふまえて検討した。

まず，アーチ部掘削時にはAEの発生は見られず，1ベンチ掘削段階になって発生し始める。この際応力はやや集中し始めるものの，ひずみはほとんど見られない。2ベンチ，3ベンチ掘削時にかけてはAE発生数の増加，高周波AEの卓越，m値の低下といった応力集中を示すAEパラメータの変化が確認できるが，実際極めて高い応力が集中しているのがわかる。4ベンチ，5ベンチ掘削時にAE発生数はピークを迎え，卓越周波数は高いレベルを，m値は低いレベルを維持している。これは岩盤にかかる応力がピーク強度に達し，破壊の直前であることを示している。またこのことはひずみが急激に増大していることからもわかる。6ベンチ，7ベンチ掘削段階になると，AE発生の収束，低周波AEの卓越，m値が急激な増加（反転現象）などから岩盤が破壊に至ったものと考えられる。その後の掘削において応力やひずみが一定のレベルを維持していることからもこの地点の岩盤の破壊が終結したことがわかる。以上のことから，AEの各パラメータの挙動が岩盤の応力変化を精度良く捉えていることが確かめられた。

1.1.2.6 粒状体個別剛体要素法を用いた空洞掘削解析

(1) 解析の概要

粒状体による個別剛体要素法（DEM）を用いた空洞の逐次掘削シミュレーションを行い，ベンチ掘削の各段階での応力状態や亀裂の発生状況を把握した。また解析結果を計測結果と比較することでその妥当性を確かめ，AE パラメータとの関連性もふまえて EDZ の形成および進展の過程について考察を行った。

以下にシミュレーションの手順を示す。

① 粒状体個別剛体要素法において岩盤物性はボンドで結合された個々の粒子の力学特性によって決まるため，まず個々の粒子の力学特性を設定する必要がある。二軸圧縮試験を模擬したシミュレーションを行い，得られた物性と実際の岩盤物性とを比較し，それらが一致するように粒子の力学特性を更新する，という一連の作業を何度も繰り返すことにより，適切な粒子の力学特性を決定する。

② 応力再配分や亀裂発生の大局的な傾向を把握するため，図 1.1.19 の左に示すグローバルモデルによるシミュレーションを行う。①で決定した粒子の力学特性をもとに空洞周辺の岩盤モデルを作成し，これに初期応力を作用させる。この条件の下で，アーチ部および各ベンチに相当する部分を逐次掘削していく。

③ 図 1.1.19 の右に示す空洞側壁部のセクターモデルによるシミュレーションを行う。このモデルの初期状態はグローバルモデルのアーチ部掘削完了時の応力状態をもとに設定している。セクターモデルでは粒子の直径を非常に小さく（12～20cm）設定することで，局所的な応力変化や亀裂の進展の過程を詳細に検討することが可能となる。実際の計測点に相当する地点には一定の大きさの計測円を設け，その円内での平均値を解析値としている。

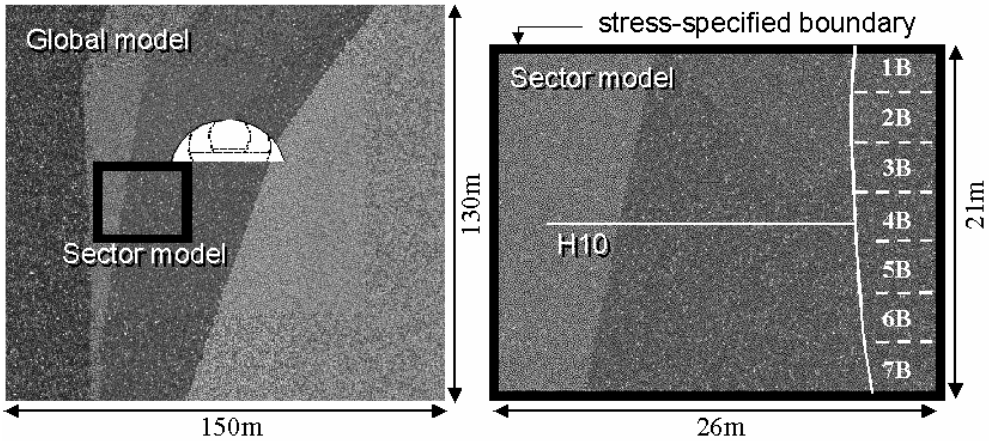


図 1.1.19 グローバルモデルとセクターモデル

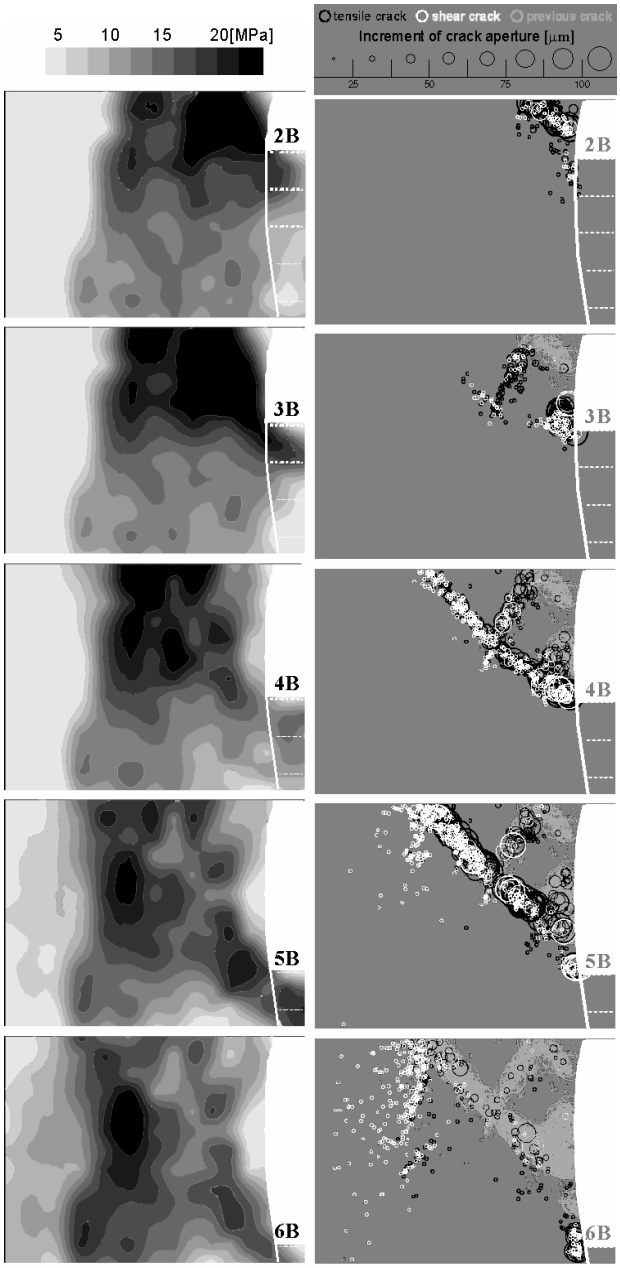
(2) 解析結果および計測結果との比較

はじめに，セクターモデルによる解析結果について，図 1.1.20 に (a) 差応力および (b) 微小亀裂の分布を掘削段階ごとに示す。まず 1 ベンチ，2 ベンチ掘削時には掘削ベンチの壁面付近に応力の集中が見られ，応力集中領域において微小亀裂が発生し始める。この段階では引張力による亀裂が卓越している。3 ベンチ掘削時には応力集中および微小亀裂発生の範囲が拡大する。4 ベンチ掘削段階になると応力集中領域が壁面から離れた位置へと移行し始め，それに伴って微小

亀裂がより岩盤深部でも発生するようになる。この際発生する微小亀裂は地質の境界周辺に集中しており，岩盤の不連続面を中心に破壊面が形成されつつあることがわかる。つづく 5 ベンチ掘削時には応力集中領域はさらに岩盤深部へと移行し，壁面近傍において応力が低下した領域（ゆるみ領域）が形成されている。また，破壊面に沿って比較的規模の大きな微小亀裂が集中的に発生し，亀裂が進展していく様子が捉えられている。6 ベンチ掘削完了段階で破壊面における亀裂の進展はほぼ終結し，さらに深部の地質境界に沿ってせん断力による微小亀裂が新たに発生し始めるが，その規模は小さなものである。解析により以上のような応力の再配分過程および微小亀裂の発生・進展過程を把握することができた。

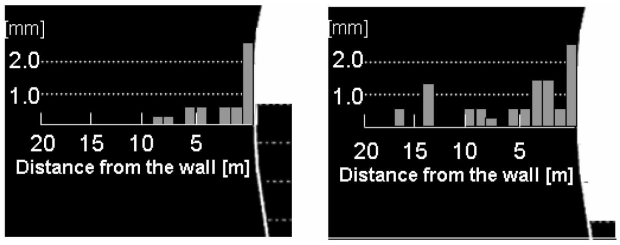
次に，解析結果の妥当性を確認する。まず亀裂の状況については，H10 計測線においてボアホールテレビにより観測された亀裂開口量の分布（図 1.1.21）と比較する。観測結果では，3 ベンチ掘削時の亀裂発生は壁面近傍のみであり，6 ベンチ掘削段階になると亀裂発生が岩盤深部に及ぶとともに，壁面近傍の亀裂がさらに開口しているが，解析結果（図 1.1.20）がこれと良く一致した挙動を示していることがわかる。また応力に関しては，H10 計測線上 3m地点における変化量を比較する（図 1.1.22）。図中には有限要素法（FEM）を用いたひずみ軟化解析の結果もあわせて表示してある。実測結果を見ると，3 ベンチ掘削時に応力集中がピークを迎えた後，掘削の進行に伴って徐々に低下している。解析結果のうち FEM の場合は，応力変化の傾向は捉えているものの，ピーク時のレベルやその時期および低下時の様子などが実測結果とやや異なっている。一方，本研究で用いた DEM の場合は，そのような細かな部分まで実測結果と極めて良く一致していることがわかる。これは，FEM の場合に比べ個々の要素（粒子）を非常に細かく設定したことで，粒子間に発生する微小亀裂の影響が逐次反映されたためであると考えられる。以上の比較により，解析結果が十分妥当なものであったといえる。

最後に，各 AE パラメータの物理的意味に基づいて，計測により得られた AE パラメータの挙動と解析により得られた破壊現象に関するパラメータの挙動とを比較し（図 1.1.23），応力変化をふまえて考察を行った。まず（a）の AE 発生数と微小亀裂の発生数については，微小亀裂の発生に伴って AE が発生するという直接的な関わりがあるため，両者とも応力集中に伴って増加し，破壊後の応力低下に伴って収束するという傾向がみられた。次に（b）の卓越周波数と空隙率については，応力が集中する段階で空隙率がやや減少する（岩盤が緻密になる）ため，高周波 AE が卓越するようになるが，岩盤が破壊に至ると空隙率が増加するため，高周波 AE が遮断され，結果的に卓越周波数は低下するという関係が示された。また（c）のm値と微小亀裂の発生時開口量については，岩盤が破壊に至る過程において，発生する微小亀裂の規模が大きくなるため，振幅の大きな AE が発生する割合も多くなり，m値は低下するが，破壊が終結すると微小亀裂の規模は小さくなるため，振幅の大きな AE はほとんど発生せず，m値が急激に増加するという関係が示された。以上の結果から，各 AE パラメータの挙動が示す物理的意味をより明確にすることができたといえる。



(a) Differential stress (b) Initiated crack

図 1.1.20 セクターモデルによる解析結果



(a) Bench No. 3 (b) Bench No. 6

図 1.1.21 H10 計測線における亀裂開口量分布

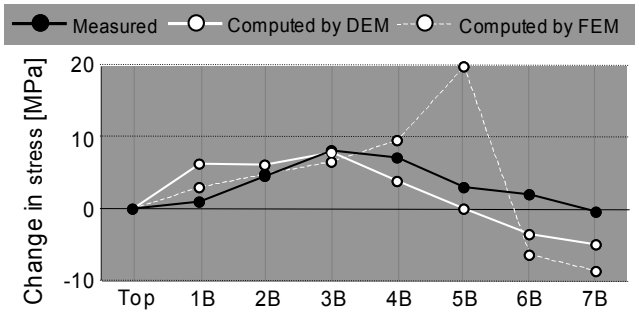
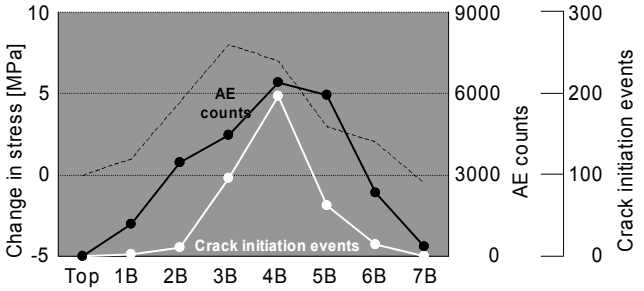
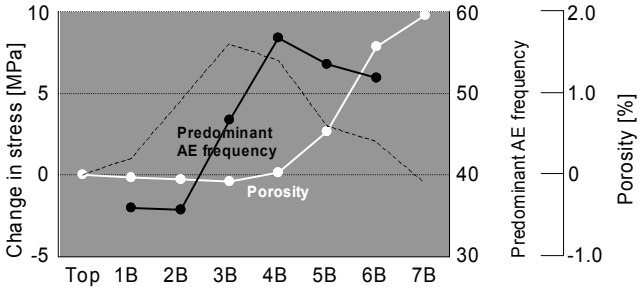


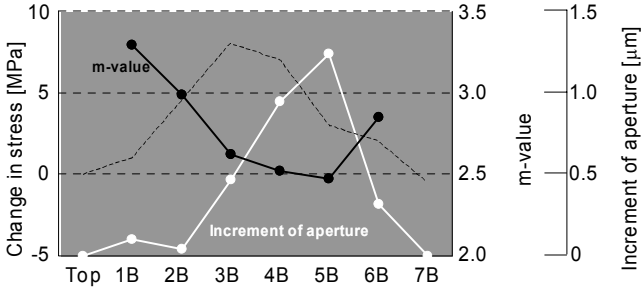
図 1.1.22 H10 計測線上 3m 地点での応力変化の比較



(a) AE counts and crack initiation events



(b) Predominant AE frequency and porosity



(c) m-value and total increment of crack aperture

図 1.1.23 H10 計測線上 3m 地点での計測結果

1.1.2.7 岩盤の力学－水理学的連成挙動に着目した評価手法の構築

地層中に注水を行うと，注水による岩盤変位及び地下水の間隙圧変化によって微小地震波（第二種Ｐ波である Biot 波[2)]）が発生する現象が知られているが，地熱分野においては，この現象を利用して貯留層の位置を推定する試みがなされている（図 1.1.24）。すなわち，この微小地震波の発生位置を経時的に観測することで，岩盤における卓越した透水経路の位置・形状およびその透水性を推定するものである。

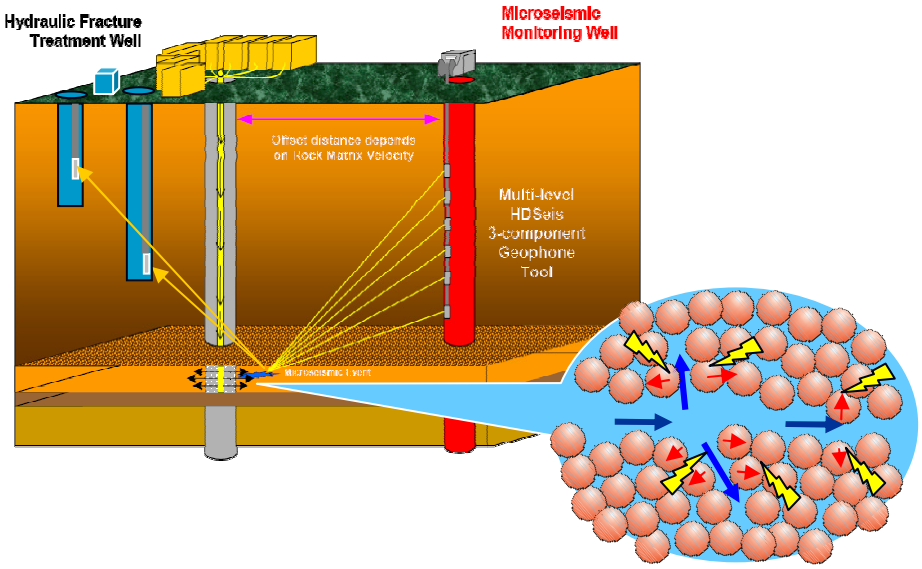


図 1.1.24 注水試験時における微小地震波の発生

本研究では，この観測技術によって得られるデータに対して，1.1.3.6 で述べる MDS イメージング手法を適用することによって，従来行われてきた卓越透水経路の水理物性の推定のみならず，サイトスケールにわたる岩盤の水理地質構造モデルを構築する手法を開発することを目的とする。

(1) 注水による媒体の変位と間隙圧拡散速度

Biot理論は，多孔質媒体を構成するフレーム部分（骨格：skeletonとよばれる）と，その間の空隙をそれぞれ別の波が伝わると仮定して，それらの波の伝播挙動を説明しようとするものである。すなわち，飽和した岩盤中に伝達する弾性波は，弾性波の周波数に応じて岩石構成粒子と間隙水の挙動が異なり，速度と減衰率が変化する[2),3),4)]。この理論に基づき，Silinら[5)]は，岩盤における注水試験時に弾性波が発生するメカニズムを詳細に述べている。

骨格部分の変位をuとすると，Newtonの運動法則によって次式が得られる。

$$\rho_b \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho_f \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{\beta}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial p}{\partial x} \tag{1.1.1}$$

ρ_b：飽和した媒体の全体密度，ρ_f：流体の密度，p：流体圧力，β：弾性係数

一方，Darcy 速度をW，浸透率をκ，流体の粘度をηとすると，非定常状態の場合に次式が成り立つ。

$$W + \tau \frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\kappa}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f \frac{\kappa}{\eta}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{1.1.2}$$

このとき，質量保存則から流体と骨格の質量変化を次式で表すことができる。

$$\frac{\partial \rho_f \phi}{\partial t} = -\frac{\partial\left(\rho_f W + \phi\rho_f \dfrac{\partial u}{\partial t}\right)}{\partial x} \tag{1.1.3}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho \frac{\partial u}{\partial t}\right) \tag{1.1.4}$$

ϕ：間隙率，ρ：骨格の密度，ρ_f：流体の密度

式(1.1.3)における流体の圧縮率を流体の弾性係数β_fを用いて表すとともに，微小項を省略すると，次式を得る。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi\beta_f \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial W}{\partial x} - \phi \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \tag{1.1.5}$$

一方，骨格の密度と粒子の密度の関係$\rho = (1-\phi)\rho_g$を式（1.1.4）に代入して，微小項を省略すると，次式を得る。

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + (1-\phi)\frac{1}{\rho_g}\frac{\partial \rho_g}{\partial t} = -(1-\phi)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \tag{1.1.6}$$

ここで，粒子の圧縮率は，応力および流体圧力の変化量により次式で表され，

$$\frac{1}{\rho_g} d\rho_g = \beta_{gs} d\sigma_x + \beta_{gf} dp \tag{1.1.7}$$

β_{gs}：粒子の圧縮率，β_{gf}：流体の圧縮率

これを式(1.1.6)に代入すると，

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = (1-\phi)\beta_{gf}\frac{\partial p}{\partial t} + (1-\phi)\left(1 + \frac{\beta_{gs}}{\beta}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \tag{1.1.8}$$

となり，式(1.1.5)に代入すると，次式を得る。

$$\left(1+(1-\phi)\frac{\beta_{gs}}{\beta}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial t}+(\phi\beta_f+(1-\phi)\beta_{gf})\frac{\partial p}{\partial t}=-\frac{\partial W}{\partial x} \tag{1.1.9}$$

さらに，流体及び骨格の圧縮率と比較すると，粒子の圧縮率と流体の圧縮率は極めて小さいので，式(1.1.9)は次式のように表すことができる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial t}+\phi\beta_f\frac{\partial p}{\partial t}=-\frac{\partial W}{\partial x} \tag{1.1.10}$$

また，小規模の骨格及び流体振動を考慮する場合には，流体の Darcy 速度と骨格の表面変形(Superficial Displacement) の間に

$$W=\frac{\partial w}{\partial t} \tag{1.1.11}$$

の関係があるので,この式を式(1.1.10)に代入して t に対して積分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial p}{\partial x}=-\frac{1}{\phi\beta_f}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}-\frac{1}{\phi\beta_f}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{1.1.12}$$

式(1.1.11)と式(1.1.12)を式(1.1.1)と式(1.1.2)に代入すると，最終的に次式が得られる。

$$\rho_b\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+\rho_f\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=\left(\frac{1}{\beta}+\frac{1}{\phi\beta_f}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{1}{\phi\beta_f}\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \tag{1.1.13}$$

$$\rho_f\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+\tau\frac{\eta}{\kappa}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=\frac{1}{\phi\beta_f}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{1}{\phi\beta_f}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}-\frac{\eta}{\kappa}\frac{\partial \omega}{\partial \mathrm{t}} \tag{1.1.14}$$

これらの式(1.1.13)と式(1.1.14)はBiot 方程式と等しい[2),3),4)]。

ここで，媒体の寸法に対して骨格の変位は微小であるため，式(1.1.1)と式(1.1.2)における変位に対する時間の 2 階微分及び Darcy 速度の時間微分については省略することができる。

$$\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{1}{\beta}\frac{\partial^2 u}{\partial x} \tag{1.1.15}$$

$$W=-\frac{\kappa}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x} \tag{1.1.16}$$

また，式（1.1.15）を x で積分し，t で微分すると次式を得る。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t\partial x}=\beta\frac{\partial p}{\partial t} \tag{1.1.17}$$

式(1.1.16)と式(1.1.17)を式(1.1.9)に代入すると，次式を得る。

$$\phi(\frac{\beta}{\phi}+\beta_f)\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{\kappa}{\eta}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{1.1.18}$$

この方程式は水理試験の解析によく用いられる圧力拡散方程式である[6),7)]。したがって，Biot 波理論[2),3),4)]によれば，注水における岩盤の微小変位と共に発生した振動は，間隙圧の拡散速度と関連性があり，この岩盤の振動に伴って発生する微小地震波の発生時間及び発生位置によって，岩盤における卓越した透水経路を推定することが可能であると考えられる。

(2) Triggering front と水頭拡散率

注水試験によって，岩盤の各所で微小地震波が発生するが，この発生領域は時間とともに拡大していく。この領域の外周面は Triggering Front と呼ばれ，微小地震波の時空間分布を表す。ここでは，この Triggering Front の時間的な変化と水頭拡散率との関連性について述べる。

Biot 方程式[2),3),4)]によって，均質媒体における間隙水圧 p の変化は式(1.1.19)によって示される。

$$\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[D_{ij}\frac{\partial}{\partial x}p\right] \tag{1.1.19}$$

D_{ij} ：水頭拡散率のテンソル成分，x_i ：注水点－微小地震波観測点間の距離ベクトル

低周波数の波の場合，この方程式は第二種 Biot 波(緩い P 波)に対応し，間隙水圧の減衰を記述する。均質等方性媒体の場合には，次式のようになる。

$$\frac{\partial p}{\partial t}=D\Delta p \tag{1.1.20}$$

式(1.1.20)は，水頭拡散率が注水圧力に依存することを示している。Shapiro[8)]らは，Triggering Front を半径 a の球として仮定することにより式(20)を解き，次式を得た。

$$p(r,t)=p_0 e^{-\omega t}\frac{a}{r}\exp\left[(i-1)(r-a)\sqrt{\frac{\omega}{2D}}\right] \tag{1.1.21}$$

r ：注水点から微小地震波観測位置との距離，ω ：角速度

Shapiro[8)]らは，定圧注水条件のもとで式（1.1.21）を簡略化し，注水から微小地震波発生までの時空間距離と水頭拡散率との関連性を導いた。

$$r=\sqrt{4\pi Dt} \tag{1.1.22}$$

(3) 既往の微小地震波観測例

自然界においては，降雨や洪水により微小地震波が発生することが知られており，たとえば，ダムの貯水池位の上昇に伴う微小地震波の発生により，断層や破砕帯などを把握した例などがある。Simpson ら[9]はこの微小地震波の発生原因を，岩盤の瞬間的な弾性変化によるものと地下水水頭拡散の遅延現象によるものの二種類に大別したが，MacGarr ら[10]は，これらの微小地震の発生原因は，水圧変化とともに水頭拡散によるものであると述べている。

注水試験による微小地震波の観測技術は，1966 年に Evan[11]が 10MPa の注水圧力によって小規模地震が発生したことを報告して以来，海外で実証されてきた。Fletcher ら[12]は，岩盤において，1－5MPa 程度の間隙水圧の上昇により微小地震波を誘発できると報告した。

また，微小地震波観測は水圧破砕試験に応用されている。微小地震波観測の利点は，一回の注水試験によって広域範囲にわたる水理地質構造を把握できる点にある。Philip ら[13]は，アメリカのケンタッキー州の地層中で注水試験を実施し，1kmの範囲にわたって 3,200 回の微小地震を観測し，岩盤における卓越した透水経路の存在を確認した。Evan ら[11]は，深度 3kmの箇所で行われた水圧破砕試験時に，長さ 1km，幅 500mの範囲にわたる 12,000 回の微小地震を観測し，7 つの卓越透水経路の走向・傾斜を推定した。

一方，Snoke ら[14]は微小地震波の水平方向 S 波（SH）と P 波の Polarity，及び各弾性波との間の振幅比率に基づき，水圧破壊によって発生した亀裂の走向と傾斜を計算した。Reasenberg と Oppenheimer[15]は発生した地震波 S 波（SH）と P 波の Polarity に基づき，亀裂の走向と傾斜を計算する解析コードを作成した。このコードを用いて，Rutledge[16]らと Philip[13]らは，地下 2.7kmのガス田における岩盤割れ目の走向・傾斜分布を把握した。近年では，新たな微小地震波観測システムを用いて P 波や S 波の初動の向きを解析することにより，せん断方向やせん断面の方向を推定することができる。この解析方法は「断層面解析」(Fault plane solution）と呼ばれ，地殻内の応力状態の推定に広く利用されている。これらの研究では，ボーリング孔の間の水理学連続性を把握できるが，水理特性を評価することができない。それに対して，Parney[17]は水圧破砕と共に発生した微小地震波の周方向速度に基づき，不連続性割れ目モデルを作成し，岩盤の透水係数分布を算出する試みを行っている。

Shapiro[8]らは，SBRC（Seismicity Based Reservoir Characterization）という Biot 理論[2),3),4)]に基づく貯水層の水理特性の評価手法を開発した。SBRC では，岩盤における注水による誘発した微小地震波の Triggering Front の伝達は，飽和状態の不均質・異方向性媒体における水頭拡散（間隙水圧の釈放）過程と一致するという仮説を用いる。この仮説のもとで，ある位置における微小地震波の Triggering Front 到達時間を標準カーブにより分析し，広域範囲にわたる水頭拡散率分布を評価するものである。Shapiro ら[8]は，この方法を用いてドイツの KTB 地熱貯留サイト地下 3kmにおいて，幅 1kmの範囲の水頭拡散率を測定した。Audigane ら[18]は雄勝の地熱貯留層における 3 次元浸透率を測定した。その結果，最

大を示す方向の浸透率が 1.23×10^{-15} m^2 となり，現場透水試験による測定した結果である 1.00×10^{-15} m^2 とよい対応を示した。この方法に基づき，Shapiro ら[8]は，不均質及び異方性を考慮した格子ベースの水理地質モデルの逆解析手法を構築した。Rother[19),20)]は，2・3 次元の不均質岩盤に対して浸透流解析を行い，岩盤における微小破壊の過程をシミュレーションすることで，この逆解析手法の検証を試みている。

(4) 注水・観測設備

先にも述べたように，微小地震波を誘発するためには，岩盤における注水は10MPaの定常注水圧力が必要である。注水試験の設備は三つの部分に大別され，それらは注水制御システム（Injection Control System），水圧増幅システム（Hydraulic pressure amplifier）とパイプ及びパッカー（Pipe and Packer）である（図1.1.25）。

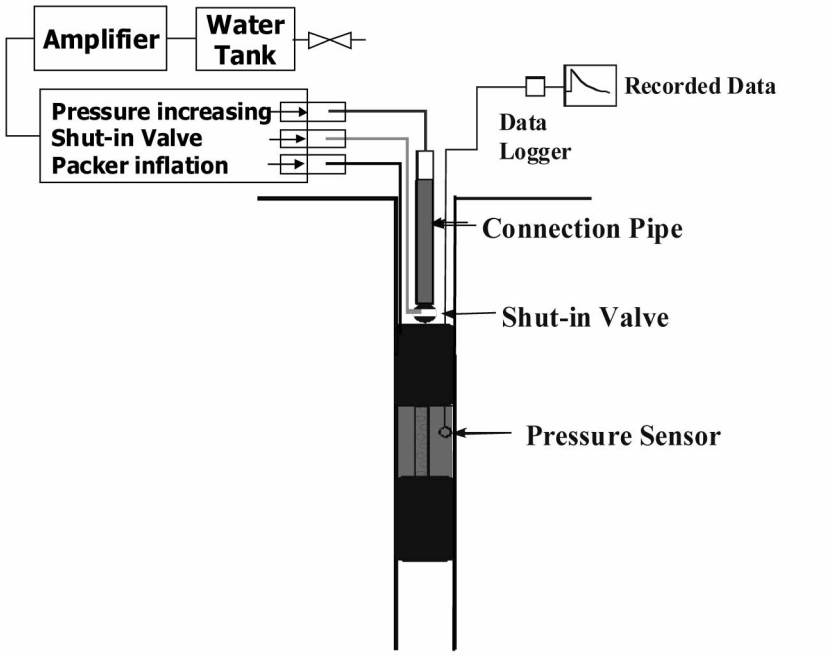
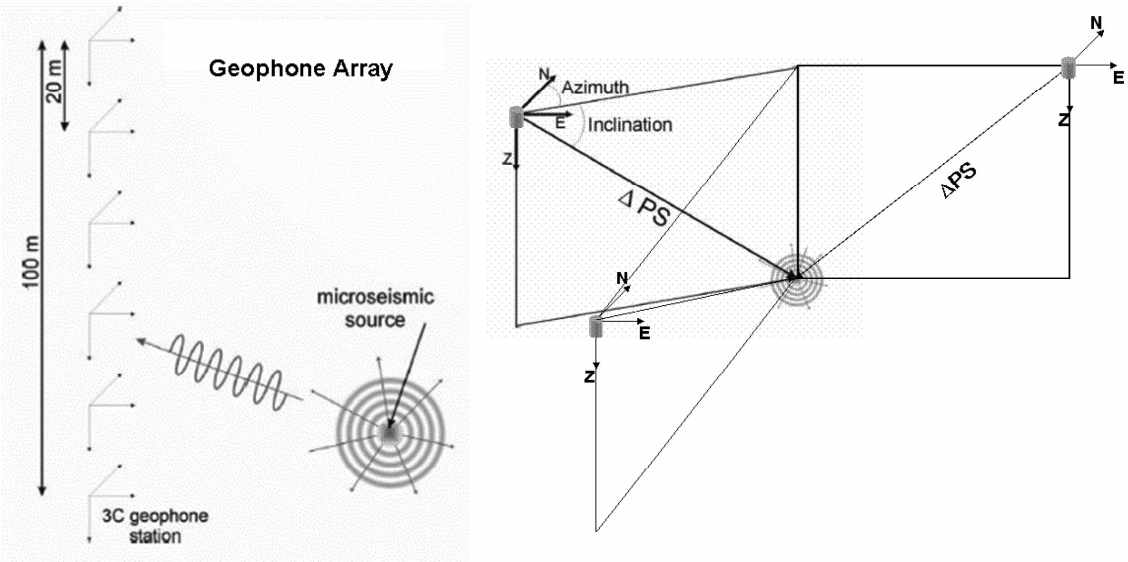


図 1.1.25　注水試験設備の概略図

一方，微小地震波観測設備は，①サイスミック・モニタリング・システム，②サイスミック収録システム，③ジオフォンの三つの部分に大別される。

ジオフォンのシステムには，観測周波数領域を選択的に抽出することが可能である並列式配置のシステムと観測周波数領域がより広い直列式配置のシステムがある。また，微小地震波観測用ジオフォンは，従来一方向成分のみしか探知できなかったが，近年では，微小地震波が発生した時に発生点からの方向，傾斜及び距離の三成分を測ることが可能なシステムが開発されている(図 1.1.26)。



(a) 直列式三成分ジオフォン　　(b) 並列式三成分ジオフォン

図 1.1.26　微小地震波の観測システム [12),13)]

1.1.2.8　まとめ

ニアフィールドにおける EDZ の力学的・水理学的な評価は，処分技術の工学分野のみならず，安全評価上も極めて重要な項目の一つである。筆者らは従来から，地下発電所空洞など大規模岩盤地下空洞における掘削影響領域の評価について様々な計測方法によって多角的な検討を実施して来た。ここ数年来，これらをシステムとして構成することを試みて来たが，大深度,高地圧下の岩盤空洞に対して，応力再配分現象を直接把握するための「岩盤応力測定」,「岩盤応力変化測定」，応力変化や破壊に至る過程を間接的に把握するための「AE 測定」，応力再配分過程で発生する岩盤変位挙動を把握するための「岩盤変位測定」，応力解放や破壊による亀裂開口現象に注目した「BTV 測定」，応力履歴を受けた岩盤材料の物理的性状を把握するための「マイクロサイスミック弾性波速度測定」,「透水・透気試験」などを統合した計測・評価システムをほぼ確立した [1),21)-24)]。

本研究において対象とした「AE 測定」に着目すると，これまでにいくつかの地下発電所の建設において，微小な緩みから比較的大規模な緩みまでの広い範囲の緩みを高精度で検知することが可能であること，その計測結果を応力変化と関連付けることにより，掘削の各段階での掘削影響領域の発生・進展挙動を高い精度で評価できることを明らかにして来た [25)]。

高レベル放射性廃棄物地層処分場として大深度かつ亀裂の少ない岩盤を対象とした場合,高地圧下における応力再配分の過程で生じる亀裂の発生･進展のメカニズム，ならびに形成される掘削影響領域を正確に評価し，設計及び性能評価に取り込む体系的な研究が今後一層重要であると考えられる。さらに，堆積軟岩を対象とした場合には力学的・水理学的挙動の適切な評価のための AE を指標とする破壊現象および流体の移動現象の解明は極めて重要

と考えられる。今年度は特に，深地層の研究施設での研究を視野に入れた岩盤の力学－水理学的連成挙動の評価手法に関する研究成果の一端を報告した。

1.1.2.9 参考文献

1) 前島敏雄，森岡宏之，森　孝之，青木謙治：神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価，第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2001

2) Biot, M. A.,: Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I: Low-frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 28, pp.168-178, 1956

3) Biot M. A.,: Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II: Higher frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 28, pp.179-191, 1956

4) Biot, M. A.,: Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, Journal of Applied Physics, 33, no. 4, pp.1482-1498, 1962

5) Silin D. B., V. A. Korneev, G. M. Goloshubin, AND T. W., Patzek: A hydrologic view on biot's theory of poroelasticity, Paper LBNL-54459, eScholarship Repository, University of California, 2004

6) Matthews, C. S. and D. G. Russell: Pressure buildup and flow tests in wells, Monograph Series, Society of Petroleum Engineers, New York., 1967

7) Barenblatt, G. I., V. M. Entov, and V. M. Ryzhik: Theory of fluid flows through natural rocks, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990

8) Shapiro, S. A., Huenges, E., and Borm, G.: Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site: Geophys. J. Internat., 131, F15-F18., 1977

9) Simpson, D. W., W. S., Leith, and C. H., Scholz: Two Types of Reservoir-induced Seismicity, Bull Seismol. Soc. Am. 78, pp.2025-2040, 1988

10) McGarr, A and Simpson, D., A broad look at induced and triggered seismicity: In Rockburst and Seismicity in Mines (eds Gibowicz, S. J. and Lasocki, S.), Balkema, Rotterdam, pp.385-396, 1997

11) Evans, D. M.: Man-made Earthquakes in Denver, Geotimes 10, pp.11-17, 1966

12) Fletcher J. B. and Sykes J. R.: Earthquake Related to Hydraulic Mining and Natual Seismic Activity in Western New York State, J.: Geophys. Res. 82, pp.3767-3780, 1977

13) Phillips, W. S., J. T. Rutledge and L., S. House, M. C. Fehler: Induced Microearthquake Pattern in Hydrocarbon and Geothermal Reservoirs: Six Case Studies, Pure and Applied Geophysics, Vol 159, pp.345-369, 2002

14) Snoke, J. A., Munsey, J. W., Eague, A. G., and Bollinger, G. A.: A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio

data: Earthquake Notes, 55, p.15, 1984

15) Reasenberg, P., and Oppenheimer, D.: FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions:U.S. Geol. Surv. Open-File Report 85-0739, 1985

16) Rutledge, J. T., and W. S. Phillips: Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas, GEOPHYSICS, Vol. 68, No. 2, pp.441-452, 2003

17) Parney, B.: Interpreting seismic fracture indicators under geologic and engineering models, 2004 CESG National Convention, 2004

18) Audigane, P., Jean-Jacques Royerz, and Hideshi Kaieda: Permeability characterization of the Soultz and Ogachi large-scale reservoir using induced microseismicity, Geophysics, Vol. 67, No. 1, pp.204-211, 2002

19) Rother, E. and S. A. Shapiro,: Microseismic monitoring of borehole fluid injections: Data modeling and inversion for hydraulic properties of rocks, Geophysics, Vol. 68, No. 2 m, pp.685-689, 2003

20) Rother, E..: Data modeling and inversion for hydraulic properties of rocks, PHD thesis, Freien Universit¨at Berlin, 2004

21) T. Mori, K. AOKI, H. Morioka, K. Iwano, M. Tanaka, T. Kanagawa :Application of Borehole Seismic and AE monitoring technique to the rock cavern excavation, 10th ISRM Congress, 2003

22) Takayuki MORI, Kenji AOKI, :Estimation of joint behavior by monitoring AE and numerical analysis around the rock cavern, 10th ISRM Congress, 2003

23) T. Maejima, H. Morioka, T. Mori, K. Aoki, :Evaluation of the loosened zone on excavation of the large underground rock cavern, Proceeding of the International Symposium on Modern Tunneling Science and Technology (IS-KYOTO 2001), 2001

24) T. Maejima, K. Aoki :Application of the observational construction technique for large underground cavern excavation, Proceeding of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001 Espoo, 2001

25) K. Aoki, Y. Mito, T. Mori, H. Morioka, T. Maejima :Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and DEM simulation using bonded particle model, ARMS2004, 2004

1.1.3 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発

1.1.3.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分施設においては，“第 2 次取りまとめ”[1)]では，岩盤の湧水を伴う割れ目を埋め戻し時に粘土グラウト等により処理することにしている。しかしながら，建設中，操業時に，湧水を伴う割れ目に適切な止水処理を行わないと，サイト全体の地下水流動が著しい影響を受けるため，深部地下水環境を維持するためのフラクチャーシーリング技術の開発は極めて重要な課題であると考えられる。具体的には，従来のダム建設やトンネル建設などでは透水性改良の対象とされていなかった低透水性の岩盤の微小亀裂についてもシーリングを行い，透水性を改良することが必要となる。しかしながら，従来のグラウチング工法ではこのような低透水性岩盤の微小亀裂を十分に改良することは困難であり，新たなグラウチング工法の開発が必要である。

このような背景のもと，低透水性岩盤の微小亀裂に対するグラウチング工法として，古くは STRIPA プロジェクト[2)]でも若干の検討が行われた動的注入工法が有用と考えられる。この工法は一定の注入圧力（定常圧）に振動圧を付加してグラウトを注入する工法である。筆者らの研究グループでは，長時間にわたってグラウト注入が可能である実用的な動的注入装置の開発，静的注入工法に対する動的注入工法の優位性の確認，動的注入工法によるグラウト注入メカニズムの解明，対象岩盤に応じた効果的な注入仕様の決定方法の確立，などの課題に取り組んできた[3)-9)]。

本研究では，動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討のため，主として理論面からの検討を行った。研究のフローを図 1.1.27 に示す。

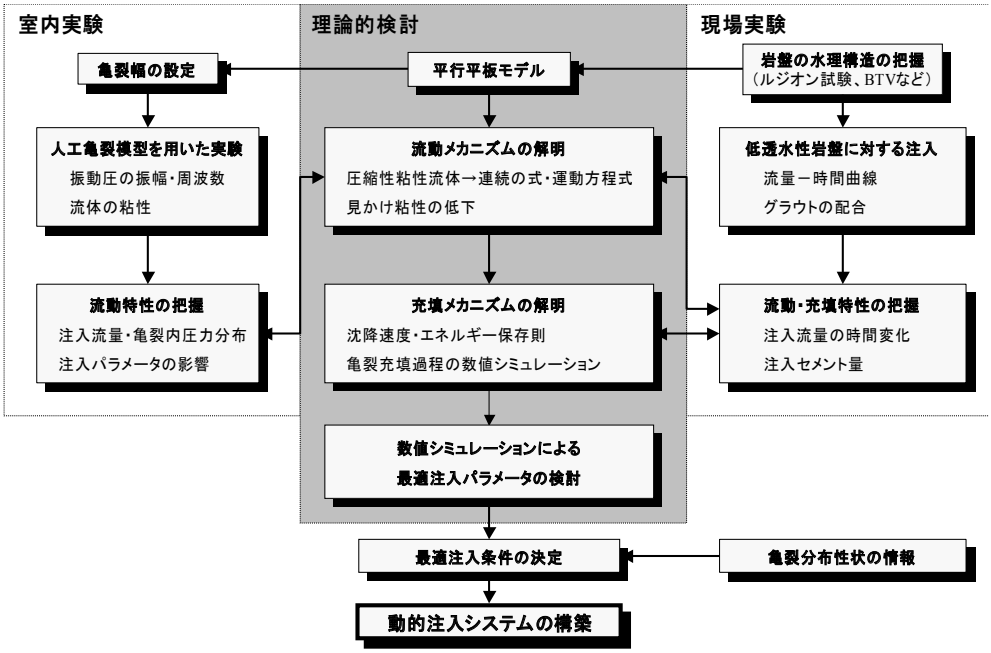


図 1.1.27 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発に関するフロー図

平成 17 年度の研究では，グラウト材の動的注入メカニズムをグラウト材の①流動メカニズムと②充填メカニズムの 2 つに分けて検討を行った。まず①流動メカニズムを明らかにするために，人工亀裂模型を用いた室内実験および理論的検討を行い，注入パラメータと流体の見かけ粘性の低下に関する関係を整理した。次に②充填メカニズムを明らかにするために，現場実験および理論的検討を行い，注入流量の時間変化および注入パラメータとの関係を明らかにすることを試みた。これにより，対象とする亀裂に対する最適注入パラメータを数値シミュレーションにより決定し，合理的な注入システムの構築を行うものである。

1.1.3.2　動的注入工法に関する室内実験

(1) 実験装置

動的注入を行った供試体は，流路長は 2m，流路幅 15cmの平行平板状の人工亀裂模型である。人工亀裂模型は，表面を鏡面仕上げした 2 枚の鋼製ブロックによって構成されており，面間に銅製スペーサーを挟み込みことによって亀裂幅を 100μmに設定した。注入口に与える注入圧力は，圧力変換用シリンダからの定常圧にサーボシリンダからの振動圧を振動装置を介して付与したものである。計測装置としては，注入圧力と亀裂内圧力の測定を目的として，注入口付近の 1 箇所と上部鋼製ブロックの計 7 箇所に間隙水圧計を設置し，さらに流出重量を測定する重量秤（ロードセル）を流出口下に設置した。

(2) 実験条件

実験条件を表 1.1.4 に示す。注入材料には，粘性を容易に設定できる水溶性セルロースを用いた。セルロース水溶液の粘性については，15mPas（超微粒子セメントに分散剤を加えて用いた場合の水ーセメント配合比 w/c=1 相当），2.7mPas（w/c=2 相当），1mPas を基本とした。注入圧力については，静的注入実験では 1MPa，動的注入実験では基準圧力 1MPa に 3 通りの振幅±0.5MPa，±0.3MPa，±0.1MPa を与え，周波数については，0.5Hz，1Hz，2Hz，5Hz，10Hz，20Hz，30Hz を基本とした。

表 1.1.4　室内実験の条件

ケース	動粘性係数	注入圧力	周波数
	mPas	MPa	Hz
1	1.0	1.0±0.3	0
2	2.7	1.0±0.1	（静的注入）
3	2.7	1.0±0.3	0.5，1.0，2.0，
4	2.7	1.0±0.5	5.0，10，20，30
5	15	1.0±0.3	（動的注入）

(3) 実験結果

図 1.1.28 および図 1.1.29 は，注入パラメータ（注入材料の粘性および注入圧力の振幅）毎に，振動圧の付加による注入流量の改良比（動的注入による流量／静的注入による流量）を注入圧力の周波数に対してプロットしたものである。

まず，注入材料の粘性の違いが流動性に与える影響の比較を行った図 1.1.28 を見ると，注入材料の粘性が大きいほど注入流量の改良比は大きくなり，流動性が向上すると考えられる。次に，注入圧力の振幅の違いが流動性に与える影響の比較を行った図 1.1.29 を見ると，注入圧力の振幅が大きいほど注入流量の改良比は大きくなり，流動性が向上すると考えられる。さらに，注入圧力の周波数に関しては，0.5Hz～20Hz においては，動的注入効果に顕著な違いは認められなかった。

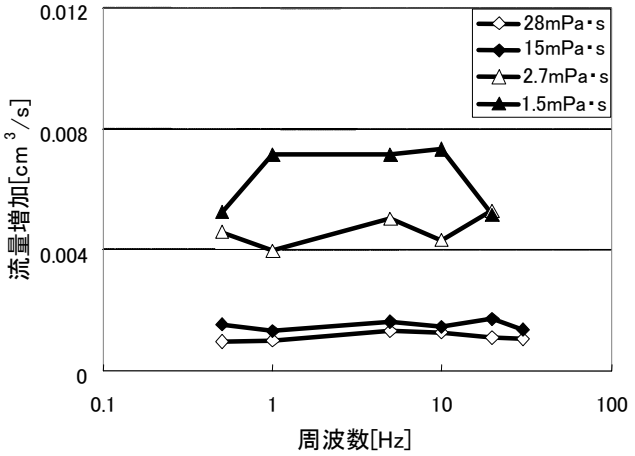


図 1.1.28　注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入材料の粘性の影響）

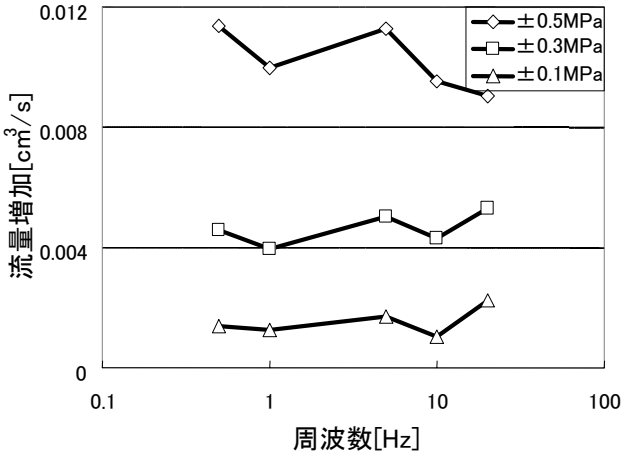


図 1.1.29　注入圧力の周波数に対する注入流量の改良比（注入圧力の振幅の影響）

図 1.1.30，図 1.1.31，図 1.1.32 は，注入パラメータ（注入材料の粘性，注入圧力の振幅，注入圧力の周波数）毎に，亀裂内部の振動圧の振幅を注入口からの距離に対してプロットしたものである。

まず，注入材料の粘性の違いが亀裂内部における振動圧の振幅に与える影響の比較を行った図 1.1.30 を見ると，注入材料の粘性が小さいほど亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいと考えられる。

同様に，注入圧力の振幅および周波数の違いが亀裂内部における振動圧の振幅に与える影響の比較を行った図 1.1.31 および図 1.1.32 を見ると，注入圧力の振幅が大きいほど，また周波数が小さいほど亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいと考えられる。

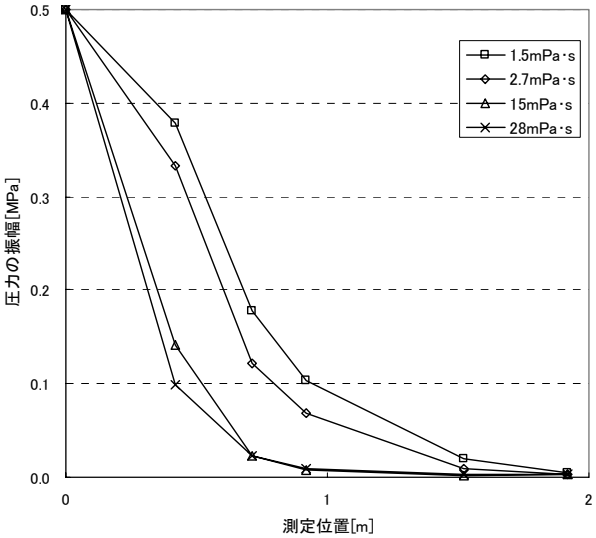


図 1.1.30　亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響）

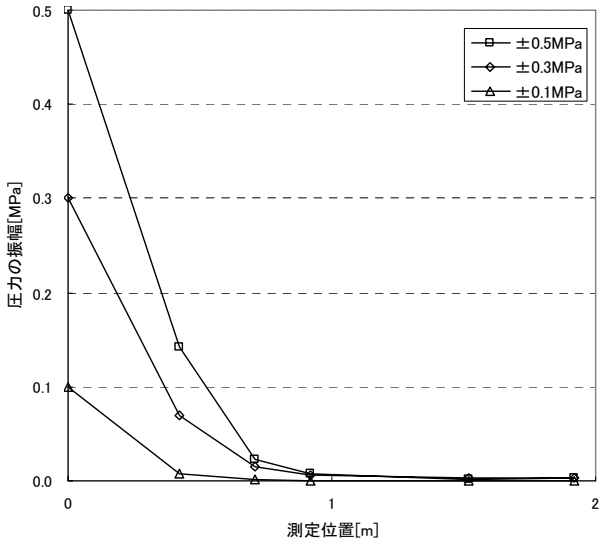


図 1.1.31　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響）

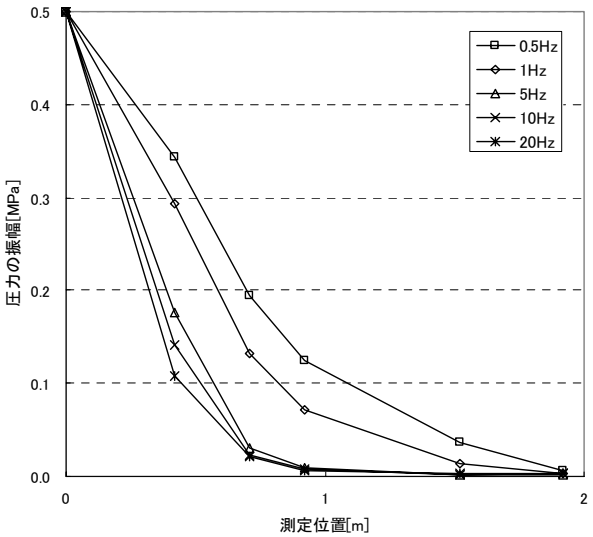


図 1.1.32　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響）

1.1.3.3　グラウト材の注入メカニズムに関する理論的検討

(1) 亀裂内におけるグラウト材の流動メカニズム

ここでは，注入材料が平行平板内を流れる圧縮性粘性流体であると仮定して，亀裂内部での圧力の振幅の変化，ならびに見掛け粘性の変化について理論的に検討する。

開口幅 b, 断面積 A の平行平板内を圧縮性流体が通過する場合，連続の式と運動方程式は式(1.1.23)(1.1.24)で与えられる。

$$C\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial t}=0 \tag{1.1.23}$$

$$L\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+Rq=0 \tag{1.1.24}$$

但し，

$$C=\frac{gA}{a^2} \tag{1.1.25}$$

$$L=\frac{4}{3gA} \tag{1.1.26}$$

$$R=\frac{32\nu}{gAb^2} \tag{1.1.27}$$

ここで，p：注入圧力の振幅，q：流量，t：時間，ν：動粘性係数，a：音速である。これより，注入口からの距離 x における振動圧力と流量の振幅はそれぞれ次式によって与えられる。

$$\left|p(x)\right|=\left|p(0)\right|\sqrt{\frac{\cosh\left(2f\left(D-x\right)\right)-\cosh\left(2k\left(D-x\right)\right)}{\cosh\left(2fD\right)-\cosh\left(2kD\right)}} \tag{1.1.28}$$

$$\left|q(x)\right| = \frac{\left|p(0)\right|}{g\rho_v}\sqrt{\frac{\cosh\left(2f\left(D-x\right)\right)-\cosh\left(2k\left(D-x\right)\right)}{\cosh\left(2fD\right)-\cosh\left(2kD\right)}} \tag{1.1.29}$$

但し，

$$f = \frac{CR\omega}{2k} \tag{1.1.30}$$

$$k = \sqrt{\frac{CL\omega^2}{2}+\sqrt{\frac{C^2L^2\omega^4}{4}+\frac{C^2R^2\omega^4}{4}}} \tag{1.1.31}$$

ここで，ω：振動圧の角速度，D：亀裂の長さである。

式(1.1.28)から算出した振動圧の振幅分布を注入パラメータごとに整理して，図 1.1.29，図 1.1.30，図 1.1.31 に示す。これらの結果は，室内実験結果と整合的な傾向にある。

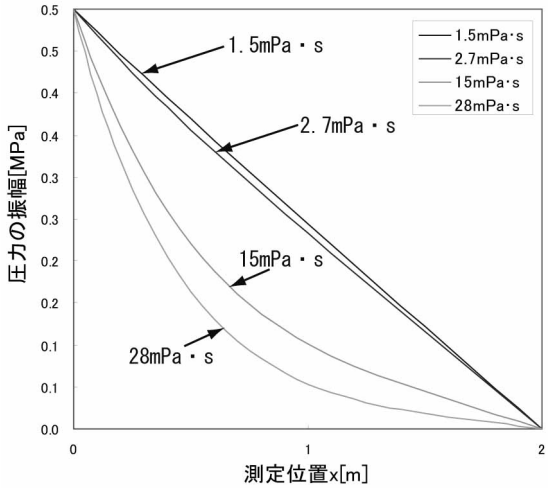


図 1.1.33　亀裂内部の振動圧の振幅（注入材料の粘性の影響）

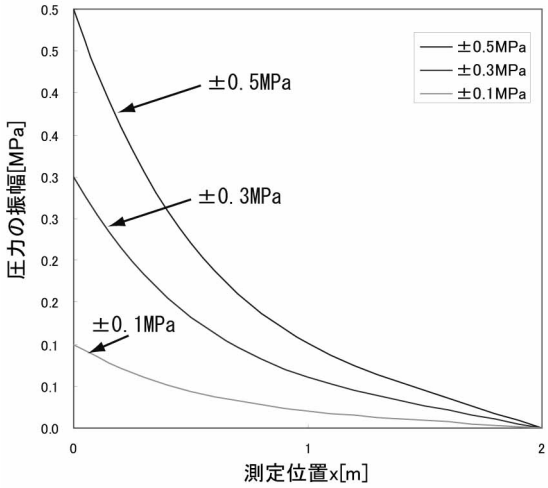


図 1.1.34　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の振幅の影響）

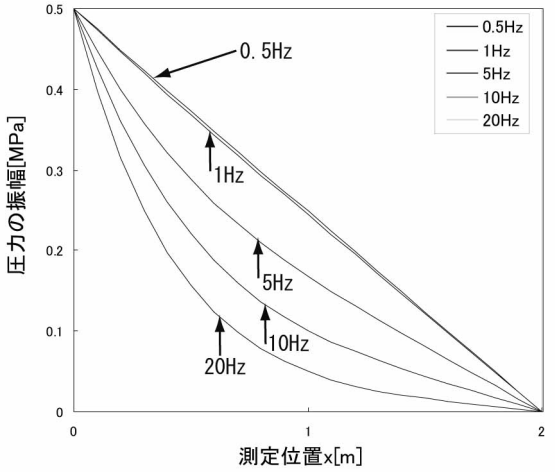


図 1.1.35　亀裂内部の振動圧の振幅（注入圧力の周波数の影響）

また，式(1.1.29)によって求められる流量の振幅分布を用いて，せん断ひずみ振幅と呼ばれる量が次式のように定義される。

$$\gamma_A = \frac{|q(x)|}{A\omega}\frac{2}{b} \tag{1.1.32}$$

せん断ひずみ振幅は流体のみかけの粘性μ'との間には，注入圧力の周波数ごとに次式のような関係をもつことがBörgesson[10]による実験から明らかになっている。

$$\mu' = \alpha\gamma_A^{\beta} \tag{1.1.33}$$

但し，α，β：流体と注入圧力の周波数に依存する値である（$\alpha>0$，$\beta<0$）。式(1.3.7)(1.1.32)(1.1.33)を用いれば，図1.1.28，図1.1.29に示したように，流体の粘性が高く，注入圧力の振幅が大きいほど，動的注入による流量の増加比が大きくなるという結果が得られる。

ここで，流体の振動成分の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{1.1.34}$$

に振動成分の境界条件

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = |p(0)|\exp(i\omega t) \tag{1.1.35}$$

を代入して解くと，亀裂の中心における流速の振動成分は次式で与えられる。

$$u_{y=0} = real\left[\frac{|p(0)|\nu}{i\omega^2\mu}\left\{1-\frac{1}{\cos\left(\sqrt{-\frac{i\omega^2}{\nu}}\frac{b}{2}\right)}\right\}\exp(i\omega t)\right] \tag{1.1.36}$$

但し，ρ：流体の密度，μ：流体の粘性である。せん断ひずみ振幅は式(1.1.36)で求められる流速の最大値であり，tを変化させてこの値を数値的に求めると，実験において設定した周波数の範囲ではせん断ひずみ振幅の大きさがほとんど変化せず，図 1.1.28 および図 1.1.29 の結果をよく説明することができる。

(2) 亀裂内におけるグラウト材の充填メカニズム（1 次元流れ）

グラウト粒子の沈降力およびグラウト材の抵抗力は，それぞれ次式で与えられる。

$$F_s = \frac{\pi}{6}d_p^{\,3}\left(\frac{\delta_p}{\delta}-1\right)\gamma \tag{1.1.37}$$

$$F_r = C_D\frac{\pi}{4}d_p^{\,2}\frac{v^2}{2g}\gamma \tag{1.1.38}$$

ここで，d_p：グラウト粒子の直径，δ_p：グラウト粒子の比重，δ：グラウト材の比重，γ：グラウト材の単位体積重量，C_D：抗力係数，D：亀裂の長さである。両者が釣り合うときの速度が沈降速度であるので次式が得られる。

$$v = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{1}{C_D}gd_p\frac{\delta_p-\delta}{\delta}} \tag{1.1.39}$$

また，そのときの抗力係数（層流）は次式で与えられる。

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} \tag{1.1.40}$$

ただし，Re はレイノルズ数であり，μをグラウト材の粘性係数とすると次式を得る。

$$v = 0.545d_p^{\,2}\frac{1}{\mu}(\delta_p-\delta) \tag{1.1.41}$$

この式は，単位時間あたりのグラウトの堆積量（沈降速度に比例する）は，グラウトの粘性と比重，すなわちグラウトの配合に依存することを示している。

いま，平行平板状の単一亀裂内におけるセメント粒子の堆積を考える。流れ方向の微小長さ区間における単位時間の沈降量は，亀裂内の抗力 F が粒子を拘束すると考えることによりエネルギー保存則から次式のように表せる。

$$F = \frac{1}{2}(s'(t)\Delta d\ m)u(t)^2 \tag{1.1.42}$$

ここで，$s'(t)$：固有沈降速度，Δd：流れ方向の微小長さ，m：セメント粒子の質量，$u(t)$：平板と平行な方向の粒子の速度（グラウト材の速度）である。抗力 F は，時間によらず一定値をとることから，

$$F = \frac{1}{2}(s'(0)\Delta d\ m)u(0)^2 \tag{1.1.43}$$

となり，また，単位時間あたりの堆積量 $s(t)\Delta d$ は沈降量に比例し，その時刻までに通過したグラウト材の総流量に反比例すると仮定すると，比例定数 c を用いて次式を得る。

$$s(t) = c\frac{s(t)'}{\sum_{t=0}^{t} q(t)} \tag{1.1.44}$$

但し，$s(t)$は，単位時間あたりの堆積幅であり，固有堆積速度と呼ぶ。

時刻 における亀裂内の流量 $q(t)$と流速 $u(t)$は三乗則からそれぞれ次式で与えられる。

$$q(t) = \frac{gb(t)^3}{12\nu} i \tag{1.1.45}$$

$$u(t) = \frac{q(t)}{b(t)} \tag{1.1.46}$$

ここで，$b(t)$：時刻 t における亀裂の開口幅，g：重力加速度，ν：グラウト材の動粘性係数，i：動水勾配である。式(1.1.43)（1.1.44）（1.1.45)より，最終的に次式を得る。

$$s(t) = \frac{q(0)u(0)^2}{\sum_{\tau=0}^{t} q(\tau)u(t)^2} s(0) \tag{1.1.47}$$

この式を

$$b(t+1) = b(t) - s(t) \tag{1.1.48}$$

に代入したものをさらに式(1.1.45)（1.1.46）（1.1.47)に代入すると，$q(t+1)$，$u(t+1)$，$s(t+1)$が順々に求められる。この手順を$b(t)=0$となるまで繰り返すことで流量の経時変化を求めることが可能となる。

岩盤内に注入されるグラウト材の流量 $q_{\mathrm{RM}}(t)$は，次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。

$$q_{\mathrm{RM}}(t) = N\Sigma\left(f_B(b)q(t|b(0)=b)\right) \tag{1.1.49}$$

ここで，N：注入孔と交差する亀裂数，$f_B(b)$：注入孔と交差する亀裂の開口幅分布の確率密度関数である。したがって，岩盤内における各亀裂の $b(0)$を決定するためには，注入孔と交差する亀裂の開口幅分布が必要となる。概算のため，全ての亀裂幅が同一であると仮定すると，平均開口幅 b_Mを用いた次式によって注入流量を算出することができる。

$$q_{RM}(t) = NQ(t|b(0)=b_M)b(t) \tag{1.1.50}$$

(3) 亀裂内におけるグラウト材の充填メカニズム（放射状流れ）

(2)で構築した１次元流れの式を，放射状流れに拡張する。まず図1.1.36のように，円筒座標系X-R-θ軸を設定する。

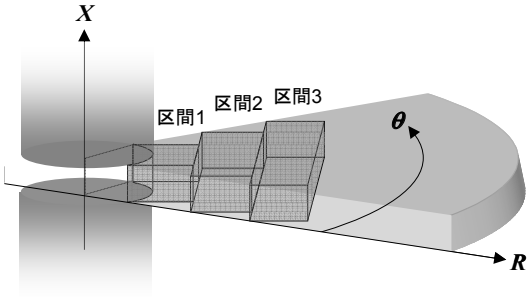


図1.1.36　放射状流れのモデル

放射状流れを考える上で，はじめに図1.1.36のように，$\Delta\theta$の範囲において，浸透距離に応じて亀裂奥行きを変化させるモデルを考え，それを360度積分することで放射状流れをモデル化する。(2)で構築したモデルは，R方向の単一微小区間を考えたものであるので，この微小区間モデルを，単位時間の浸透距離毎に設定し，各区間のグラウト充填過程を把握し，それぞれをθ方向に360度積分することで，グラウトの空間的な充填挙動を得る。各区間を，区間ξ（ξ=1,2,3,・・・)とする。

① 単位時間t=1における挙動

以後，() 内の値を時刻とし，添え字で区間を表す。図 1.1.37 は図 1.1.36 を上から見た図である。図中にある，区間 1 における・方向の奥行き L_1 は，

$$L_1 = \sqrt{2R^2(1-\cos\Delta\theta)} \tag{1.1.51}$$

として求まる。ここで，R: ボーリング孔半径である。単位時刻 t=1 における流量 $q_1(1)$，流速 $u_1(1)$，セメント粒子の堆積速度 $s_1(1)$は，各々

$$q_1(1) = \frac{gb_0^{\ 3}}{12\nu}\frac{\partial P}{\partial x_1}L_1 \tag{1.1.52}$$

$$u_1(1) = \frac{q_1(1)}{b_0 L_1} \tag{1.1.53}$$

$$s_1(1) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^{1} q_1(\tau)u_1(\tau)^2}s' \tag{1.1.54}$$

となる。ここで，b_0：亀裂幅である。

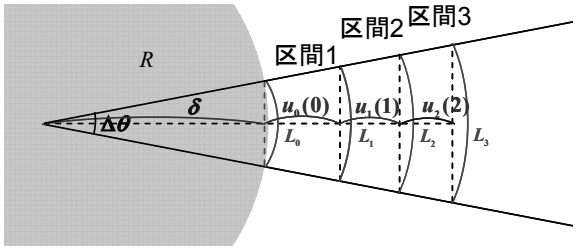


図1.1.37 放射状流れモデル（流れの垂直方向からの視点）

② 単位時間t=2における挙動

時刻 t=2 における浸透距離 ξ_2は，

$$x_2 = x_1 + u_1(1) \tag{1.1.55}$$

として得られる。時刻 t=-2 における区間 1 の開口幅は，式(1.1.29)より

$$b_1(2) = b_0 - s_1(1)\Delta t \tag{1.1.56}$$

と得られることから，単位時刻 t=2 における流量 $q_1(2)$は，

$$q_1(2) = \frac{gb_1(2)^3}{12\nu}\frac{\partial P}{\partial x_2}L_1 \tag{1.1.57}$$

流速 $u_1(2)$，セメント粒子の堆積速度 $s_1(2)$は，各々

$$u_1(2) = \frac{q_1(2)}{b_1(2)L_1} \tag{1.1.58}$$

$$s_1(2) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^{2} q_1(\tau)u_1(\tau)^2}s' \tag{1.1.59}$$

と決定される。次に，区間 2 における奥行き L_2については図 1.1.33 より

$$L_2 = \frac{L_1(\delta + u_1(1))}{\delta} \tag{1.1.60}$$

ここで，単位時刻 t=2 において，区間 1 の流量は，区間 2 の流量と一致することから，

$$q_2(2) = q_1(2) \tag{1.1.61}$$

時刻 t=2 における区間 2 の流量 $q_2(2)$と流速 $u_2(2)$の関係より，

$$u_2(\xi) = \frac{q_2(2)}{b_0 L_2} \tag{1.1.62}$$

を得て，式(1.1.60)，(1.1.61)，(1.1.62)より，時刻 t=2 における区間 2 の流速 $u_2(2)$を決定する。また，式(1.1.61)，(1.3.62)より，時刻 t=2 における区間 2 のセメント堆積速度 $s_2(2)$を求める。

$$s_2(2) = \frac{q_2(2)u_2(2)^2}{\sum_{\tau=2}^{2} q_2(\tau)u_2(\tau)^2} s' \tag{1.1.63}$$

③ 単位時間t=tにおける挙動

以上，同様の計算を繰り返すことにより，単位時刻 $t=t$ における区間 1 の流量 q_1(t)，流速 u_1(t)，セメント堆積速度 s_1(t)，開口幅 b_1(t)は，

$$q_1(t) = \frac{gb_1(t)^3}{12\nu}\frac{\partial P}{\partial x_1}L_1 \tag{1.1.64}$$

$$u_1(t) = \frac{q_1(t)}{b_1(t)L_1} \tag{1.1.65}$$

$$s_1(t) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^{t} q_1(\tau)u_1(\tau)^2} s' \tag{1.1.66}$$

$$b_1(t) = b_1(t-1) - s_1(t-1)\Delta t \tag{1.1.67}$$

区間 ξ （ξ>2)の奥行き，単位時刻 $t=\xi$ における流量 $q_\xi(\xi)$，流速 $u_\xi(\xi)$，セメント堆積速度 $s_\xi(\xi)$は，各々

$$L_\xi = \frac{L_1(\delta + \sum_{k=1}^{\xi} u_k(k))}{\delta} \tag{1.1.68}$$

$$q_\xi(\xi) = q_1(\xi) \tag{1.1.69}$$

$$u_\xi(\xi) = \frac{q_\xi(\xi)}{b_0 L_\xi} \tag{1.1.70}$$

$$s_\xi(\xi) = \frac{q_\xi(\xi)u_\xi(\xi)^2}{\sum_{\tau=\xi}^{\xi} q_\xi(\tau)u_\xi(\tau)^2} s' \tag{1.1.71}$$

単位時刻 $t>\xi+1$ における流量 $q_\xi(t)$，流速 $u_\xi(t)$，セメント堆積速度 $s_\xi(t)$は，

$$q_\xi(t) = \frac{gb_\xi(t)^3}{12\nu}\frac{\partial P}{\partial x_t}L_\xi \tag{1.1.72}$$

$$u_\xi(t) = \frac{q_\xi(t)}{b_\xi(t)L_\xi} \tag{1.1.73}$$

$$s_{\xi}(t)=\frac{q_{\xi}(\xi)u_{\xi}(\xi)^{2}}{\sum_{\tau=\xi}^{\xi}q_{\xi}(\tau)u_{\xi}(\tau)^{2}}s' \tag{1.1.74}$$

$$b_{\xi}(t)=b_{\xi}(t-1)-s_{\xi}(t-1)\Delta t \tag{1.1.75}$$

として決定される。

式(1.1.64)（1.1.72)を θ 方向に 360 度積分することにより，各区間 ξ における放射状流れの流量 $Q_{\xi}(t)$ を求める。（ξ =1, 2, 3, . . . ）

$$Q_{\xi}(t)=\sum_{\theta=0}^{360}q_{\xi} \tag{1.1.76}$$

また，式(1.1.67)（1.1.75)より，$b_1(t)$=0 をとる単位時刻 t=t における各区間の亀裂の開口幅 $b_{\xi}(t)$ を用いて，最終的な透水性改良範囲分布を得ることが可能である。

(4) 岩盤への適用

岩盤内においては，亀裂が複数存在するため，現場実験において注入されるグラウト材の流量 $Q_{RM}(t)$ は，次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。

$$Q_{RM}(t)=N\sum(f_B(b)Q_1(t\,|\,b_0=b)) \tag{1.1.77}$$

ここで，N: 注入孔と交差する亀裂数，$f_B(b)$: 注入孔と交差する亀裂の開口幅分布の確率密度関数である。したがって，岩盤内における各亀裂 b_0 を決定するためには，注入孔と交差する亀裂の開口幅分布が必要となる。概算のため，全ての亀裂幅が同一であると仮定すると，平均亀裂幅 b_M を用いた次式によって注入流量を算出することができる。

$$Q_{RM}(t)=N\sum(f_B(b)Q_1(t\,|\,b_0=b_M)) \tag{1.1.78}$$

式(1.1.57)を用いるにあたり，亀裂本数 N と平均亀裂幅 b_M が必要となる。以下に亀裂本数・平均亀裂幅を現場試験によって得られるルジオン値から算出する手順について提案する。

今回対象とするサイトでは，過去に数多くの透水試験が行われている。報告によれば，岩盤の透水係数は亀裂の本数に支配的に影響されるものと考えられ，透水係数 K と亀裂本数 N の関係が次のように求められている[4)]。

$$N=35.0+4.33\log(K) \tag{1.1.79}$$

また，ルジオン試験においてダルシーの法則が成立すると仮定すると，ルジオン値 Lu と透水係数 K の関係は，式(1.1.59)の関係で求めることが可能である。

$$K=\frac{Lu}{120000\pi HL}\ln\frac{L}{r} \tag{1.1.80}$$

以上，式(1.1.79)，(1.1.80)より，ルジオン値から亀裂本数を決定する。

一方，亀裂幅については，一般に亀裂の透水係数と相関があり，また平行平板を仮定した亀裂の透水係数は 3 乗則に従うことが知られている。そこで，透水係数を式(1.1.79)，(1.1.80)から決定した亀裂本数で除することにより，単一亀裂の平均透水係数を算出し，さらに流量の 3 乗則から逆算して平均的な亀裂幅を求める。

図 1.1.38 はルジオン値と平均的な亀裂幅の関係を表したものである。式(1.1.78)(1.1.79)，(1.1.80)より，注入量 $Q_{RM}(t)$ を求め，この各単位時刻の値を用いて，現場の状況を評価する上で重要な注入量の経時変化を表した理論曲線を得る。

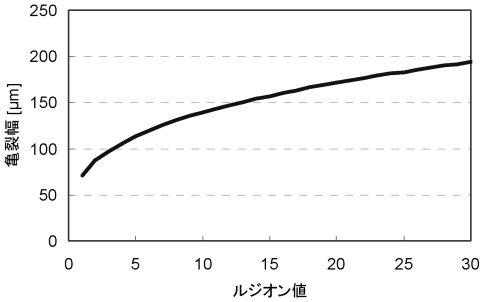


図 1.1.38　ルジオン値と亀裂幅の関係

1.1.3.4　動的注入工法に関する現場実験

提案した数値解析手法の妥当性を検討するために，原位置で実施した試験結果[2)]に対して，本解析モデルの適用を行った。原位置試験では，中生代白亜紀の新鮮な花崗岩より構成されている岩盤を対象として静的注入および動的注入を実施した。試験における注入仕様を表 1.1.5 に示す。また，グラウト材については，超微粒子セメントを使用し，水セメント比は w/c=4,8 で注入を行った。

図 1.1.39，図 1.1.40 は，それぞれ w/c=4,8 において，静的および動的注入したケースの原位置試験と数値解析結果を比較したものである。図より，数値解析結果は実測値と非常によく対応しており，本モデルの適応性が示されたものと考えられる。

表 1.1.5　現場実験条件

水セメント配合比		実施回数	注入圧力 [MPa]	振動圧周波数 [Hz]
4	動的注入	2	0.5±0.3	5
	静的注入	4	0.5	0
8	動的注入	6	0.5±0.3	5
	静的注入	7	0.5	0

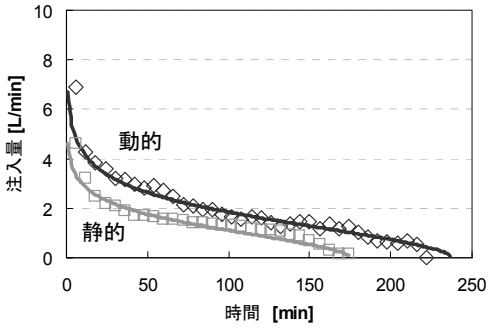


図1.1.39　現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較 w/c=4

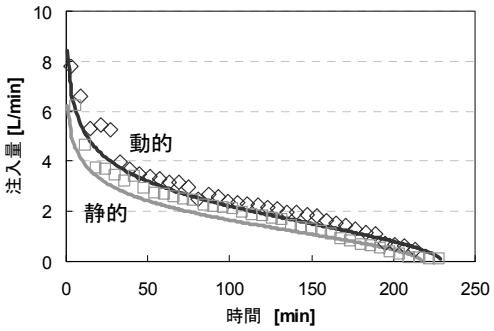


図1.1.40　現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較 w/c=8

1.1.3.5　数値シミュレーションによる最適注入仕様の決定

現場実験を通した検討により，本研究で提案したグラウトの充填過程モデルの妥当性を検証することができた。ここでは，このモデルを用いて，対象岩盤に応じた最適注入仕様を決定する方法を示す。手順は以下の通りである。

①対象岩盤のルジオン値より，亀裂本数・平均亀裂幅を推定する。

②注入パラメータより，グラウト充填挙動を支配するパラメータである見かけ粘性及び固有堆積速度を決定する。

③得られたパラメータを提案したグラウト充填過程モデルに代入してシミュレーションを行うことで，流量及び開口幅の経時変化を得る。これより注入仕様の性能の評価指標として次の３つの値を求める。

【セメント総注入量】

亀裂に注入されたセメントの総量

【注入効率】

単位時間あたりの平均セメント注入量

【透水性改良範囲】

亀裂幅が規定値まで改良された範囲

今回，シミュレーションの一例として，注入圧を固定した上で，最適な水セメント配合

比を検討したケースを示す。表 1.1.6 に，設定した注入圧のパラメータを示す。セメント配合比をパラメータとして各亀裂幅の総セメント注入量を求めたものを図 1.1.41 に，注入効率を求めたものを図 1.1.42，透水性改良範囲を求めたものを図 1.1.43 に示す。これらの図には，参考までに静的注入の場合の予測値も示してある。これらの図より，今回のシミュレーションケースにおいては，水セメント配合比 w/c=2，4 が最適であるという結果を得ることができる。

表 1.1.6　シミュレーションにおいて設定した注入圧

亀裂幅 [μm]	注入方法	注入圧力 [MPa]	振動圧周波数 [Hz]
80	動的注入	0.5±0.3	5
	静的注入	0.5	0

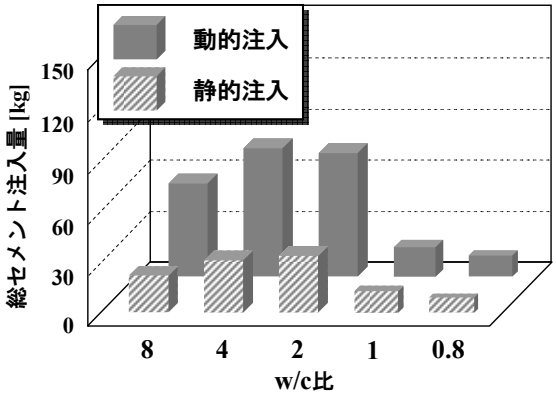


図1.1.41　w/cと総セメント注入量の関係

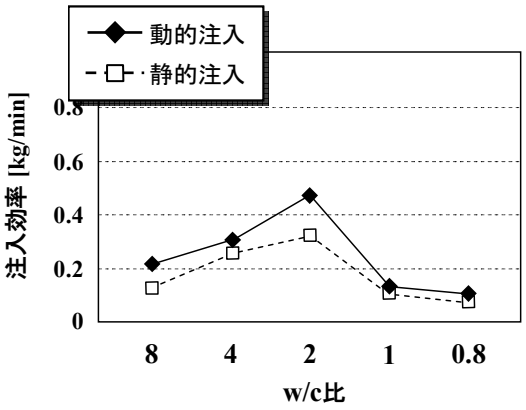


図1.1.42　w/cと注入効率の関係

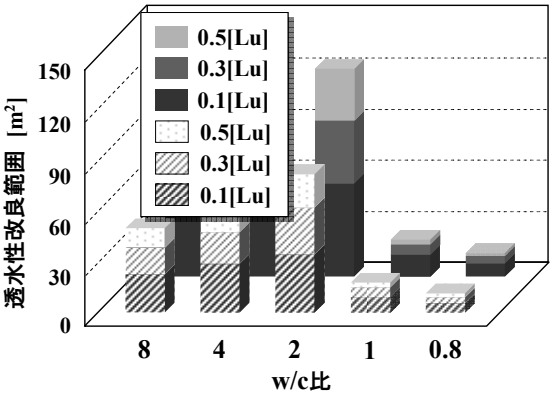


図1.1.43　w/cと透水性改良範囲の関係

1.1.3.6　クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法とその検証

これまでに述べてきたようなフラクチャーシーリングを確実かつ効果的に適用するためには，坑道周辺岩盤の水理特性に大きく影響する水みちの検知が必要不可欠となる。このような坑道周辺岩盤の水理学的な調査・試験には，岩盤の巨視的な 3 次元透水特性を評価することができるクロスホール透水試験が有効と思われる。

現在までにクロスホール透水試験結果から孔間の水理特性の空間分布を推定するためにいくつかの逆解析手法が提案されてきた。しかしながら，一般に初期モデルに対する依存性が大きくより現実の流れと類似した初期モデルを用いない限り，妥当な再構成結果を得ることが保証されないという問題点が残されている。また，格子ベースの解析方法では，水みちの形状に関わりなく格子が設定されるため，格子パターンに適合しないような水みちを経由する地下水の解析には適用性が低い。

これらの問題点を踏まえ，本研究においては，クロスホール透水試験結果から，多次元尺度構成法と空間補間法を利用して，不均質な岩盤の水理学的地質モデルを合理的に構築する方法を新たに提案した。また，その妥当性ならびに実用性を数値実験及び現場実験によって検証した[11)]。

(1) イメージング手法

岩盤の水理特性を把握するための現場試験のうち，孔間水理試験は，複数のボーリング孔を配置することによりボーリング孔間での地下水の変化を直接的に観測できるため，水理特性の空間的な広がりや水理学的な連続性を把握するのに適しており，その代表的な試験方法としてクロスホール透水試験がある。

クロスホール透水試験（図 1.1.44）には注水孔と少なくとも 1 本の観測孔を用いる。試験の準備段階においては，注水孔および観測孔の孔内に止水パッカーと間隙水圧計を設置し，ボーリング孔内を複数の注水区間(pumped interval)または観測区間(observation

interval)に分けておく。注水区間において所与の条件で注水を行い，観測区間において水圧の経時変化を観測することによって対象岩盤の水頭拡散率（透水係数／比貯留係数：圧力水頭の拡散の減衰を支配する定数）を評価する。なお本研究で提案する手法においては，注水孔においても水圧の経時変化を観測するものとする。

水頭拡散率の算定にあたっては，クロスホール透水試験によって得られた水圧の経時変化の実測値から得られる実測水頭変化カーブと理論解によるタイプカーブとをマッチングさせ，そのマッチングポイントの読み取り値から求める。

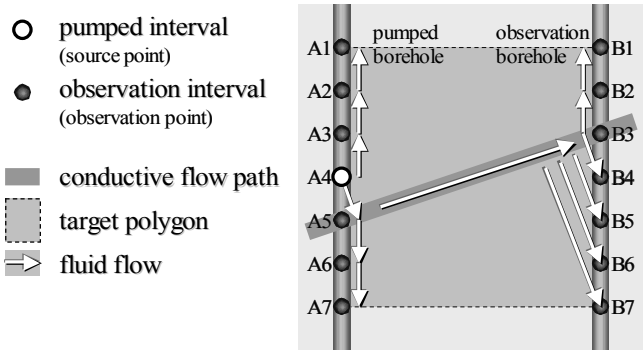


図1.1.44　クロスホール透水試験

クロスホール透水試験の観測点の配置は地理的距離が尺度となる現実の地理的空間(geographical subspace)におけるデカルト座標系で表される。ここで，水理学的距離が尺度となるような水理学的亜空間(hydraulic subspace)という別の座標系で観測点の配置を表現することを考える。

多次元尺度構成法（Multidimensional Scaling：MDS）はデータ内に潜在するデータ構造を可視的に解釈することを目的として，データ間の非類似度をあらわす概念である距離行列から多次元空間上での各データの配置を求める方法である。すなわち類似度が大きいほどデータ間での距離が小さくなるという関係を基にデータの空間配置を求めるものである（Kruskal の方法[12]）。なお，このときの空間配置のことを布置（configuration）と呼ぶ。

表 1.1.7 は算出した水頭拡散率をもとに作成した水理学的距離行列であり，これに多次元尺度法を適用することにより，図 1.1.45 に示すような水理学的亜空間における観測点の布置を求めることができる。

表1.1.7　水理学的距離行列

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
A2	44													
A3	158	44												
A4	794	417	158											
A5	1096	794	417	158										
A6	1514	1096	794	417	44									
A7	2069	1514	1096	794	158	44								
B1	2069	1514	1514	1096	1514	2069	2069							
B2	1514	1514	1096	794	1096	1514	2069	44						
B3	1514	1096	575	302	575	1096	1514	158	44					
B4	1096	794	302	575	302	794	1096	794	417	158				
B5	1514	1096	575	302	575	1096	1514	1096	794	417	158			
B6	2069	1514	1096	794	1096	1514	1514	1514	1096	794	417	44		
B7	2069	2069	1514	1096	1514	1514	2069	2069	1514	1096	794	158	44	

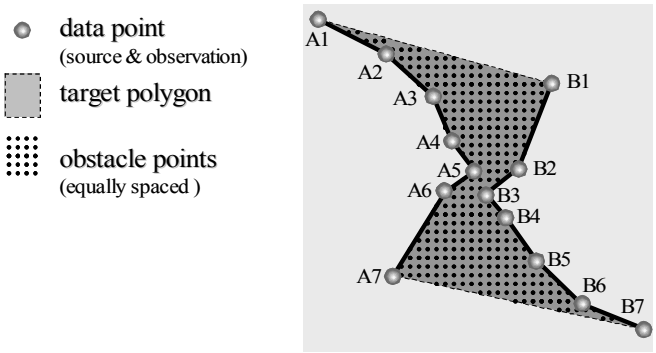


図1.1.45　水理学的布置

水理学的亜空間においては距離の等しい任意の 2 点間の水頭拡散率は等しくなる。そこで，水理学的亜空間内に均一に点群を設置したとき，この点群は流体の流れにとっての，土壌内における土粒子のような障害物と等価な意味を持つ。そこで，図 1.1.46 に示すように観測点の地理学的布置と水理学的布置の関係に基づいて，これらの点群を地理的空間に再配置することを考える。ここで以下のことを仮定する。

① この 2 つの空間にまたがる布置を対応付けることができる，無次元の幾何学的な距離が尺度となる幾何学的超空間(geometric hyperspace)において点群の再配置を行う。

② それぞれの空間での観測点を結んでできる多角形の面積は，幾何学的超空間で等しい値をとる。

③ 幾何学的超空間においては多角形の重心の位置が同一となるように配置する。

④ 水理学的亜空間から地理的空間の同一点へのベクトルは幾何学的町空間において空間的相関性を持つ。

この仮定のもとに，均一に設置した点群の地理的空間上での配置を決定することができ，水理学的亜空間から地理的空間へ変換することができる。(図 1.1.47)

空間補間法の中で最も単純かつ明解な方法として逆距離補間（inverse distance weight interpolation: IDW）を挙げることができる。この方法は，推定位置までの距離の逆数の p 乗（一般に p=2 がよく用いられる）によって各データに重み付けする（重みの総和を 1 とする）ものである。逆距離補間法において，ある任意の位置 $\mathbf{x}'$ 補間値 $Z(\mathbf{x}')$ は次式により算出される。

$$Z(\mathbf{x}') = \sum_{i=1}^{n} w_i Z(\mathbf{x}_i) \tag{1.1.81}$$

ここで，$Z(\mathbf{x}_i)$ は既存のデータであり，n は既存データの数である。また w_i は重み係数であり，次式で表される。

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^{n} h_j^{-p}} \tag{1.1.82}$$

但し，h_i は位置 $\mathbf{x}'$ と $\mathbf{x}_i$ との間のユークリッド距離である。逆距離補間は厳密な補間方法であり，推定位置で標本値が得られている場合には，解（推定値）はその値と等しくなる。

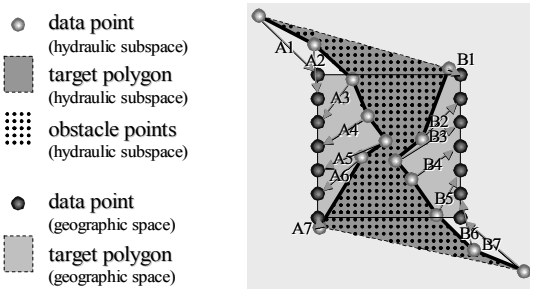


図 1.1.46　幾何学的再構成

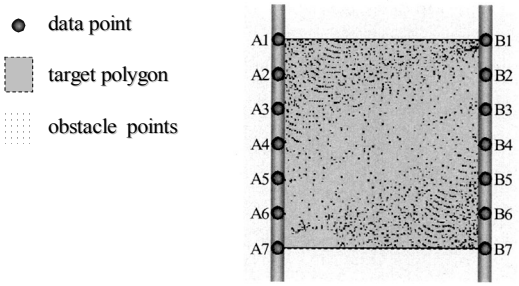
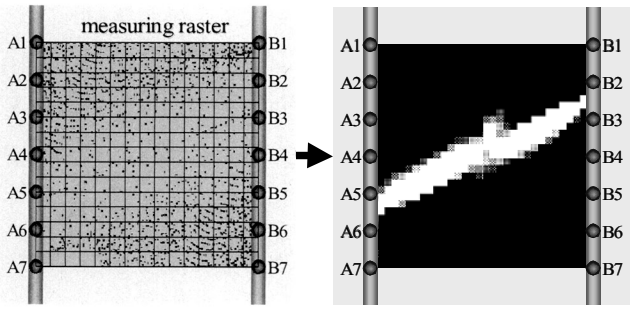


図 1.1.47　地理的空間に再配置された点群

地理的空間における点群の密度は岩盤の不透水性の程度を意味すると考えられる。したがって，点群の密度分布図において密度の低い領域は水みちを表していることになる。なお，空間内の密度を表現するに際していくつかの手法が考えられるが，例えばラスター形式の表示方法では図 1.1.48 のような結果を得る。



(a) density measurement　　(b) expression of path image

図1.1.48　点群の密度とイメージング結果

(2) 数値実験によるイメージング手法の検証

検証にあたっては，まず水理学的に等方均質な領域内に様々な位置・方向を有する高透水層を配置させた水理地質構造モデルを用い，クロスホール透水試験を模擬した 2 次元非定常有限要素法浸透流解析を行う。次に解析結果を基に，提案した方法によりイメージングし，水理地質構造モデルと比較することによって手法の妥当性・有効性を検証した。

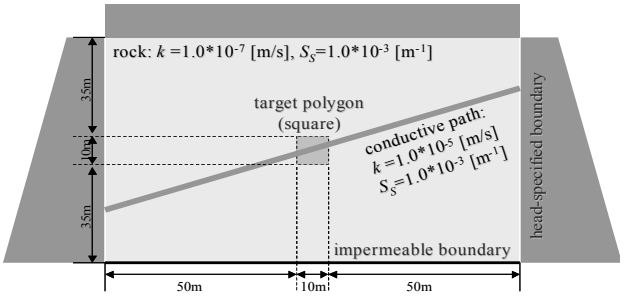


図1.1.49　数値実験モデル

浸透流解析の手順は以下の通りである。

① 解析領域の設定：図 1.1.49 に示すような解析領域を設定し，クロスホール透水試験を想定した孔長 45mの鉛直な注水孔および観測孔を水平距離で 10m離れるように配置する。注水区間および観測区間については 1.67m間隔で 1 孔あたり 7 箇所設定している。

② 水理地質構造の設定：透水層の位置・傾斜角が異なる複数の水理地質構造モデルを作成する。このとき，透水層の透水係数を 10^{-3}cm/s とし，透水層以外については透水係数を 10^{-5}cm/s とする。なお，比貯留係数については圧力応答の計算値に大きな影響を与えるものと考えられるが，今回は 10^{-4}cm/s と一定値を与える。

③ クロスホール透水試験のシミュレーション：作成した水理地質構造モデルに対して 2 次元非定常有限要素法浸透流解析を行うことにより，クロスホール透水試験（定流量注水試験）をシミュレートする。境界条件としては，解析領域の上下両端を不透水境界とし，左右両端に 80mの全水頭を与える。これを定常解析することにより領域内各所の水頭の初期条件を設定する。この条件のもと，注水区間において 10cm^3/s の定流量を境界条件として与えることで非定常解析を行う。なお，注水は注水孔における 7 つの注水区間から順次行う。

数値実験の結果を図 1.1.50，図 1.1.51，図 1.1.52，図 1.1.53 に示す。これらの図においては，左にシミュレーションに用いた水理地質構造モデル，中央に解析の結果得られた水頭拡散率を基に算出した水理学的布置，右に逆距離補間法による幾何学的再構成で得られたイメージング結果をそれぞれ示してある。

まず，図 1.1.50 は，水平な透水層が上部に位置するものから下部に位置するものまでの 7 つのモデルについて比較したものである。まず，これらの布置について着目すると，7 つのいずれの布置においても水理地質構造モデル上にて透水層によって連結される観測点ど

うしの距離が小さくなっていることがわかる。すなわち，2 点間の水理学的な距離が小さいことを表している。また，水理地質構造モデルとイメージング結果を比較すると，いずれも高精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これより，提案した方法によって透水層の位置を適正に再現できることが検証された。

次に図 1.1.51 は，透水層の傾斜が低角度で注水孔－観測孔間を連結するもの，高角度で注水孔－観測孔間を連結するものの 2 つについて比較したものである。これらの水理学的布置についても，透水層で連結される観測点間の距離が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果に関しては良好な精度で水理地質構造を再現していると考えられる。これより，提案した方法によって透水層の傾斜角度を適正に再現できることが検証された。

図 1.1.52 は，透水層が平行に複数存在するもの，複数存在して X 字状に交差するものの 2 つについて比較したものである。これらの水理学的布置についても，透水層で連結される観測点どうしの距離が小さくなっていることが確認できる。イメージング結果をみると，複数の透水層を有するモデルに対しても高い精度で水理地質構造を再現できることがわかる。

図 1.1.53 は，注水孔および観測孔と透水層が直接交差しない場合の検討結果を示したものである。このようなケースでは，透水層を通る地下水の挙動が明確な観測結果として得られにくいため，観測結果から水理地質構造を再構成するのは極めて困難である。しかしながら，本図をみると，高透水層が観測結果に与える小さな影響をも反映した布置が得られているとともに，高透水層の位置が特定できるイメージング結果が得られることが確認された。

以上の結果から，提案した方法によって各種の水理地質構造を適正に再現できることが判明し，その妥当性・有効性が検証されたものと考える。

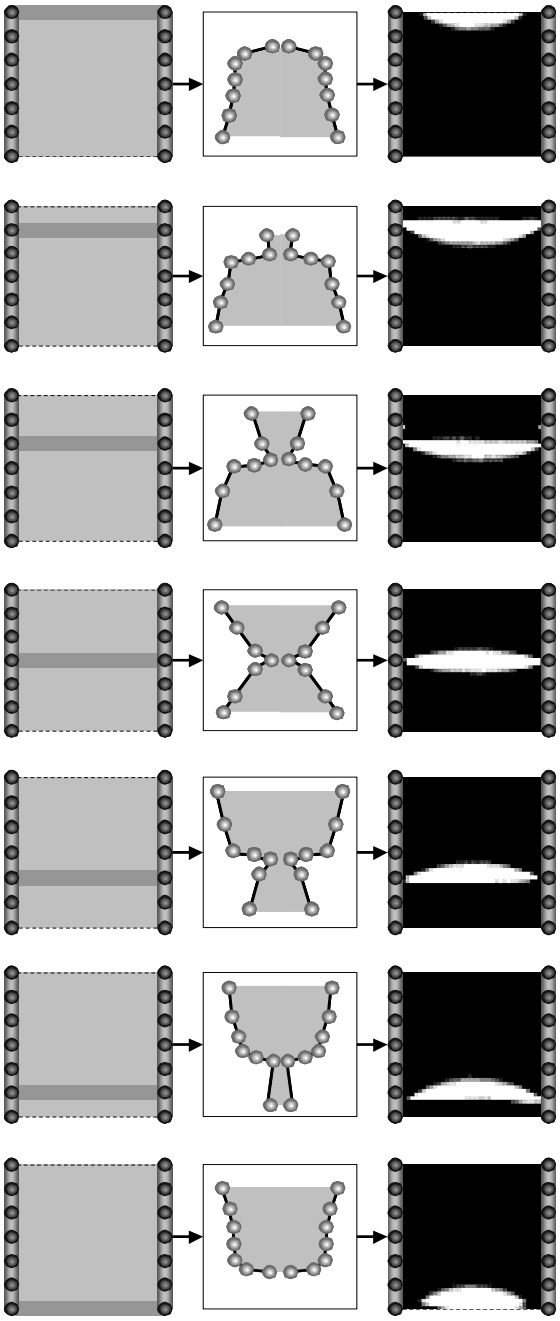


図 1.1.50　透水層が水平なモデル

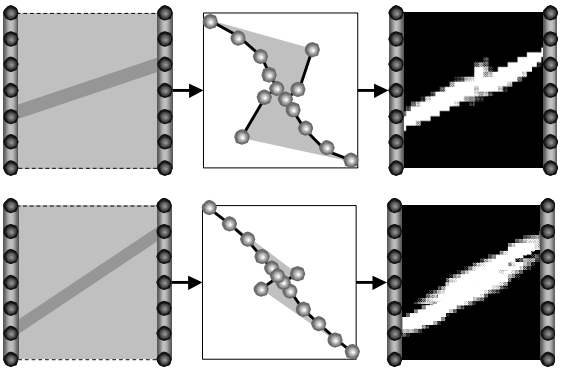


図 1.1.51　透水層が傾斜しているモデル

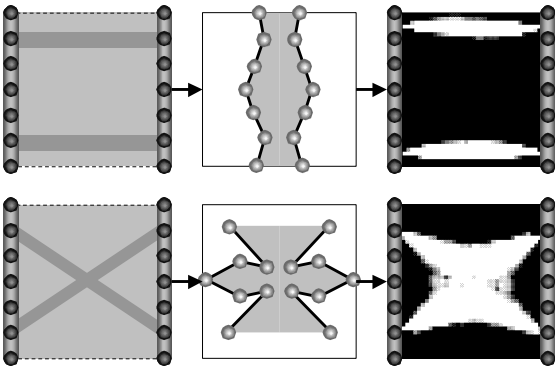


図 1.1.52　透水層が複数存在するモデル

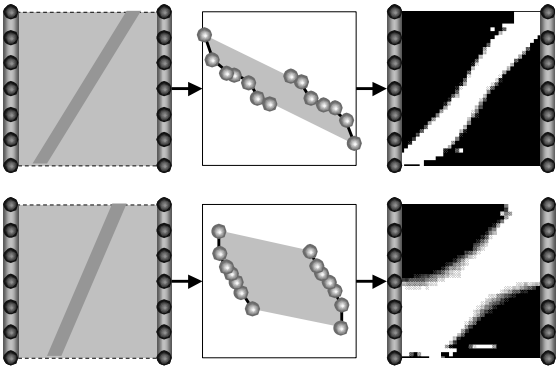


図 1.1.53　注水孔・観測孔と透水層が交差しないモデル

(3) 現場実験によるイメージング手法の検証

本手法の実用性を検証するために，地下発電所[13]の調査横坑から削孔した 2 本のボーリング孔を用いてサイナソイダルクロスホール透水試験を行った。本地点の岩盤は白亜紀砂岩泥岩互層から構成される。図 1.1.54 は調査横坑から深度 25～35mに設定した 7 つの注水・観測区間の配置を示したものである。横坑壁面の観察やボアホールテレビ観察により，本図に示すような急傾斜した破砕帯の存在が確認されている。なお，注水区間・観測区間とこの破砕帯は直接交差していない。

図 1.1.55 は注水点･観測点の水理学的布置と対象領域のイメージング結果を示している。これは対象領域において高透水層となりうる唯一の地質構造である破砕帯の位置をよく再現している。このことから提案手法が現場において高い適用性をもつことが確認された。

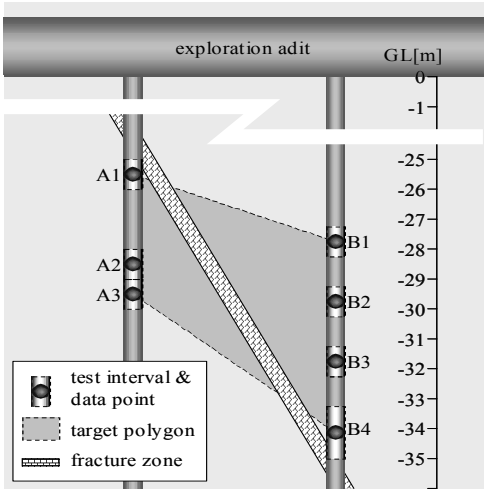


図 1.1.54 現場実験の概要

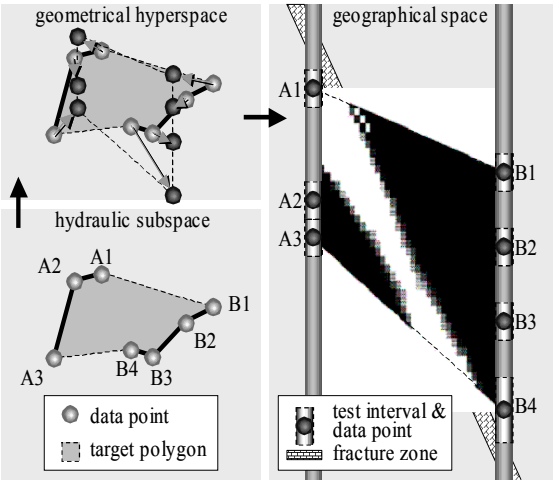


図 1.1.55 現場実験に対する手法の適用結果

以上，本研究ではクロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法を提案した。本手法は観測点間の連結性をあらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の空間分布を推定するものであり，主に掘削影響領域周辺の水理挙動を支配する不均質な地下水の流れを高精度に把握することを目的としている。

本手法の妥当性・有効性を検証するために，高透水層が存在する典型的な水理地質構造モデルをいくつか作成し，数値シミュレーションを行ったところ，提案した方法によって各種の水理地質構造を適正に再現できることが判明した。また，この手法の現場での実用性を検証するために，現場データの解釈に適用したところ，高透水層となりうる地質構造とよく一致するイメージング結果をえた。

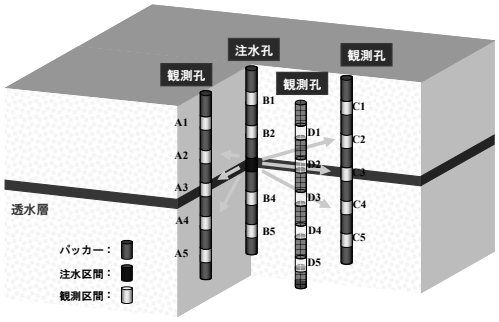
この方法の特徴は，①不均質岩盤を対象とする推定方法であること，②ベクトルベースの推定方法であるため，不連続面の交差によって形成される複雑な水みちを推定するのに有利であること，③初期モデルを必要としないこと（初期モデル依存性がない），④3 次元への拡張が容易であること，⑤極めて簡易な手法であることなどである。

今後は①イメージング結果と水理物性値との関連付け，②空間補間法の選定などを通した推定精度の向上，③3 次元空間への拡張，を行っていく所存である。

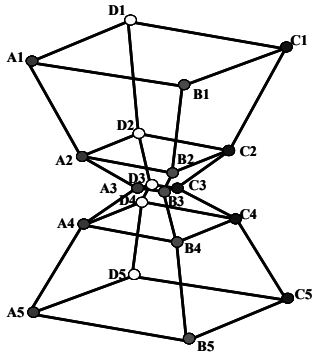
(4) 3 次元イメージング手法

多次元尺度構成法および逆距離補間法は 3 次元に対応した数学的手法であるため，これまでに構築してきた方法を 3 次元へ拡張することは容易である。すなわち，図 1.1.56 に示すように,地理的空間および水理学的空間を 3 次元デカルト座標で表現することによって，同様の手順によって水理地質構造の 3 次元イメージを得ることが可能である。

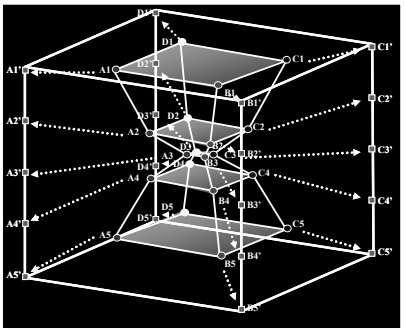
図 1.1.57 は，1.1.3.5 項で実施した数値実験と同様な方法で水理構造の 3 次元のイメージングを行った結果である。本図をみると，いずれの場合も対応する水理地質構造モデルを高精度に再現できていることがわかる。



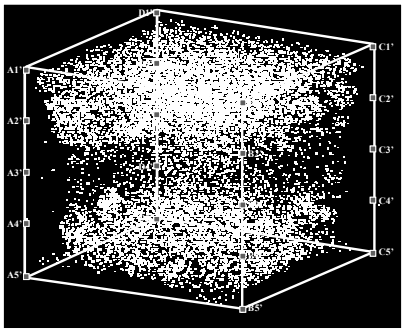
(a) クロスホール透水試験



(b) 水理学的布置



(c) 幾何学的再構成



(d) 地理的空間に再配置された点群

図 1.1.56　3 次元イメージング手法

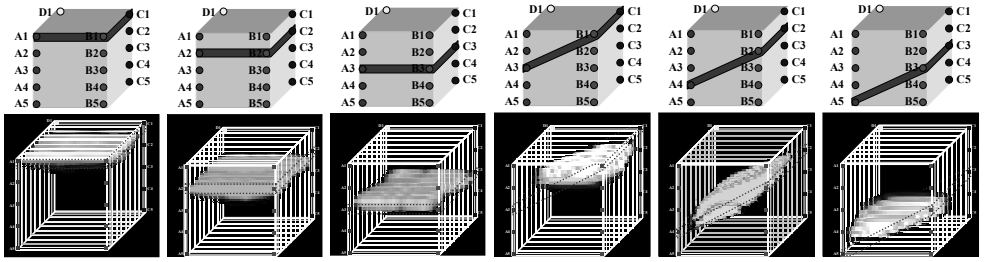


図 1.1.57　数値実験による手法の妥当性の検証

（上段：モデル，下段：イメージング結果）

1.1.3.7　まとめ

本研究では，動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討を行うとともに，この方法を確実かつ効果的適用するための水理地質構造の新しい評価手法を構築した。

まず，動的注入においては，振動圧の付加によってグラウト材の見掛けの粘性が低下し，流動性が向上することを示した。また，注入材料の粘性が小さいほど，注入圧力の振幅が大きいほど，そして注入圧力の周波数が小さいほど，亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいことを明らかにした。さらに，注入材料の粘性が大きいほど，注入圧力の振幅が大きいほど，動的注入の静的注入に対する注入流量の増加比が大きくなることについても明らかにした。

次に，このような亀裂内におけるグラウトの充填メカニズムを説明するために，エネルギー保存則に基づくグラウト堆積厚の計算と 3 乗則に基づいた流量・流速の計算とを交互に行うことによって亀裂幅を逐次減少させていく数値解析手法を構築した。この数値解析手法を用いて，現場実験のシミュレーションを行ったところ，実測値とよい対応を示したことから，解析手法の妥当性が示されると同時にグラウトの充填メカニズムが明らかになった。なお，現場実験の結果は，静的注入と比較して動的注入では初期注入流量が増加し，また総注入時間も増加することを示しており，これは動的注入によって流動性の向上によって初期注入流量が増加し，さらに目詰まりの発生が抑制された結果であると考えられる。

一方，クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法を提案した。本手法は観測点間の連結性をあらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の 2 次元あるいは 3 次元空間分布を推定するものである。2 次元および 3 次元の数値実験及び現場実験によってその妥当性ならびに実用性を検証した。

1.1.3.8　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－”，総論レポート，JNC TN1400 99-020，1999

2) R. Pusch, L. Börgesson, A. Fredrikson, I. Markström, M. Erlström, G. Ramqvist, M. Gray, B. Coons : Rock Sealing - Interim Report on the Rock Sealing Project. Stripa Project, Technical Report 88-11. SKB, Stockholm, 1988

3) 脇田伸吾,伊達健介，山本拓治，中村百合子，水戸義忠，青木謙治：動的注入工法に関する室内・現場実験とグラウト充填過程モデルを用いた結果の解析，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム，2004
4) 青木謙治，水戸義忠，山本真哉：クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価方法の提案，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム，2004
5) K. Aoki, Y. Mito, T. Yamamoto, K. Date, S. Wakita : An Evaluation of the grout effect by dynamic injection method, 10th ISRM Congress, 2003
6) K. Date, S. Wakita, T. Yamamoto, Y. Nakashima, Y. Hoshino, Y. Mito, K. Aoki : Development of dynamic grouting system, ITA World Tunneling Congress 2003
7) K. Aoki, Y. Mito, Y. Kurokawa, T. Yamamoto, K. Date, S. Wakita : Development of dynamic grouting technique for the improvement of low-permeable rock masses, THE 1st UE KYOTO, 2003
8) 脇田伸吾,伊達健介，山本拓也，黒川義民，水戸忠義，青木謙治：動的注入工法の注入特性に関する基礎的検討，第 32 回岩盤力学シンポ，2003
9) 山本拓治,青木謙治他 ： 3 次元孔間弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価，第 32 回岩盤力学シンポジウム，2003
10) L. Börgesson : Rheological properties of cement and bentonite grouts with special reference to the use of dynamic injection, International Symposium on Grouting in rock and concrete, Salzburg, Austria, 1993
11) K. Aoki & Y. Mito, T. Mori : New imaging method for hydro-geological structure in rock masses by cross-hole hydraulic test, ARMS2004, 2004
12) J. B. Kruskal : “Nonmetric multidimensional scaling : a numerical method”, Psychometrika 29, pp.115-129, 1964
13) 前島敏雄，森岡宏之，森　孝之，青木謙治：神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価，第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2001

1.1.4　まとめ

深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究のうち，処分技術の観点から実用化に向けた重要な研究課題のうち，調査・性能評価分野との体系化に対する優先度を評価した結果，平成 17 年度は，次の 2 課題についての研究を実施した。

(1) 微小破壊音(AE)計測による掘削影響領域(EDZ)の評価技術の研究

従来から地下発電所及び原油岩盤タンクなどの大規模岩盤地下空洞における掘削影響領域の評価にあたっては，様々な計測方法によって多面的な検討がなされて来た。筆者らの研究グループでは大深度，高地圧下の地下発電所空洞に対して，応力再配分現象を直接把握するための「岩盤応力測定」，「岩盤応力変化測定」，応力変化や破壊に至る過程を把握

するための「AE 測定」，応力再配分過程で発生する岩盤変位挙動を把握するための「岩盤変位測定」，応力解放や破壊による亀裂開口現象に注目した「BTV 測定」，応力履歴を受けた岩盤材料の物理的性状を把握するための「微小地震波測定」，「統帥・透気試験」などを統合した計測・評価システムの確立に取り組んできた。

特に，本研究において対象とした「AE 測定」に着目すると，これまでにいくつかの地下発電所の建設において，微小な緩みから比較的大規模な緩みまでの広い範囲の緩みを高精度で検知することが可能であること，その計測結果を応力変化と関連付けることにより掘削の各段階での掘削影響領域の発生・進展挙動を高い制度で評価できること，が実証されつつある。このような技術的ストックを活用し，高レベル放射性廃棄物地層処分場が対象とする大深度かつ亀裂の少ない岩盤に対して，高地圧下における応力再配分の過程で生じる亀裂の発生・進展によって形成される掘削影響領域の評価技術研究の一環として，AE と岩石の破壊機構についての試験及び解析を行った。なかでも各種 AE パラメータの特性を詳細に検討することによって，岩石･岩盤の微小破壊現象の検知が可能となることを明らかにし，処分施設の調査から設計，安全評価のためのモデル構築に至るプロセスを通して地質環境評価のための重要な指標とすることができることを示した。さらに，ニアフィールドにおける EDZ を対象とした場合には力学的・水理学的挙動の適切な評価のための AE を指標とする破壊現象および流体の移動現象の解明は極めて重要と考えられる。今年度は特に，深地層の研究施設での研究を視野に入れた岩盤の力学－水理学的連成挙動の評価手法に関する研究成果の一端を報告した。

(2) 低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の開発

処分施設の調査・設計及び建設・操業段階で，サイトの地下水環境を可能な限り維持すると共に，地下水流動の制御技術として必須と思われる，低透水性岩盤に対するフラクチャーシーリング技術の研究を実施して来た。本研究では，動的注入メカニズムの解明および最適注入条件の検討を行うとともに，この方法を確実かつ効果的適用するための水理地質構造の新しい評価手法を構築した。

まず，動的注入においては，振動圧の付加によってグラウト材の見掛けの粘性が低下し，流動性が向上することを示した。また，注入材料の粘性が小さいほど，注入圧力の振幅が大きいほど，そして注入圧力の周波数が小さいほど，亀裂内部における振動圧の振幅が大きい，すなわち振動圧の影響範囲が大きいことを明らかにした。さらに，注入材料の粘性が大きいほど，注入圧力の振幅が大きいほど，動的注入の静的注入に対する注入流量の増加比が大きくなることについても明らかにした。

次に，このような亀裂内におけるグラウトの充填メカニズムを説明するために，エネルギー保存則に基づくグラウト堆積厚の計算と 3 乗則に基づいた流量・流速の計算とを交互に行うことによって亀裂幅を逐次減少させていく数値解析手法を構築した。この数値解析手法を用いて，現場実験のシミュレーションを行ったところ，実測値とよい対応を示した

ことから，解析手法の妥当性が示されると同時にグラウトの充填メカニズムが明らかになった。なお，現場実験の結果は，静的注入と比較して動的注入では初期注入流量が増加し，また総注入時間も増加することを示しており，これは動的注入によって流動性の向上によって初期注入流量が増加し，さらに目詰まりの発生が抑制された結果であると考えられる。

以上の成果をもとに，今年度は，クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価手法を提案した。本手法は観測点間の連結性をあらわす一連の水理データから多次元尺度法と逆距離補間法を用いて水理特性の 2 次元あるいは 3 次元空間分布を推定するものである。2 次元および 3 次元の数値実験及び現場実験によってその妥当性ならびに実用性を検証した。

今後，長期耐久性を有する新しいグラウト材に関する材料特性及び注入効果の検討と共に，堆積軟岩中における動的限界注入圧を始めとする注入工法に関する検討を進める予定である。さらに，グラウト効果の長期的安定性を評価するために，地質環境調査研究領域及び性能評価研究領域との連携による評価システムの構築が重要であると考えられる。

(3) 深部地質環境の調査・解析技術の体系化

以上の研究成果は，処分施設の工学技術に関して重要な項目であるが，今後，深部地質環境の調査ならびに性能評価の両分野との連携，体系化を図るためには，現実的なニアフィールドコンセプトの再構築を行う必要がある。具体的な進め方としては，例えば超深地層研究所計画の第 2 段階や幌延深地層研究センターでの立坑を用いた研究計画について計画されている個別テーマを，体系的な取り組みとして構築するための検討作業の実施などが次年度以降の課題として残されている。

（京都大学　青木謙二）

1.2 性能評価の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

1.2.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究については，その対象とする科学あるいは工学分野が多岐にわたり全体像が把握しにくいため，その開発を効率的に行うときにどのような研究開発が重要あるいは必要であるかが常に議論・検討し直される必要がある。近年，これに対していくつかの観点から，そのニーズを整理してまとめようとするロードマップの調査・整備が並行してなされつつある。

① 「原子力の重点安全研究計画」原子力安全委員会安全研究専門部会（平成16年7月）[1)]
② 「高レベル放射性廃棄物処分研究開発全体マップ」資源エネルギー庁委託原子力環境整備促進・資金管理センター（平成16年3月）[2)]
③ 「原子力安全・保安院の安全研究ニーズについて」原子力安全・保安院(平成16年12月)[3)]
④ 「核燃料サイクルの安全に関する研究ニーズ調査」原子力安全基盤機構委託原子力学会（継続調査中）[4)]

またこれらと並行して旧核燃料サイクル開発機構でも旧原子力研究所との統合（現；日本原子力研究開発機構）を控えてそれまでの成果をまとめ新体制での研究開発のための態勢を整えるため，「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年とりまとめ－」（平成17年9月）[5)]をとりまとめている。これらの調査研究は，主として研究開発現場において現在行われているテーマを調査し，ニーズとしてまとめたものであるが，核燃料サイクル開発機構による「平成17年とりまとめ」[5)]では，高レベル放射性廃棄物地層処分の実現のために必要な研究開発について，地層処分システムの全体としての安全という観点から整理して課題を考えるべきだとの主張により，分冊「知識化と管理」においてセーフティケースをその軸とした整理の方向を示している。高レベル放射性廃棄物地層処分におけるセーフティケースの重要性は近年とくに強く叫ばれており，研究開発課題のロードマップ作成においてもセーフティケースの観点からの整理が重要との認識がなされるようになっている。

一方，本「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究」では，地表から深部にいたる地質環境を効率的かつ合理的に把握するため，調査・解析技術の体系化を目標に，現状の技術レベルを評価し，研究開発課題の抽出を行い，各課題の解決に向けた研究開発を行っている。具体的には，第2次取りまとめ[6)]に基づく深部地質環境の調査・解析技術の実用化に向けた課題に関する研究（課題グループ）と調査・解析手法の高度化・体系化（調査・解析グループ）に分かれて第2次取りまとめ[6)]の研究分野，「地質環境」，「地層処分の工学技術」，「安全評価」から，それぞれ最重要研究課題のいくつかを取り出し，地層処分施設構築の視点から，個々の事例について具体的な調査・解析を進めている。

地層処分の研究開発には，「環境安全の地下水技術」と「建設・操業安全の地下水技術」がある。前者は，放射線安全の「地下水シナリオ」の中枢である「閉鎖後の核種の移行と生活圏の放射線安全」に密接に係った技術であり，Far field よりの技術である。後者は，どちらかというと「構築された処分揚の性能」や「労働災害」に関する技術であり，どちらかというと Near field よりの技術である。前者については，従来から地層処分特有の技術として，多岐にわたる研究開発がなされており，現状の研究開発の方向は，地質環境，処分場構築の工学技術，安全評価の各領域の統合へ向けて，中間領域の課題をつめるべき段階にきている。後者については，既成の実

用技術の適用が可能であることから,サイトが特定していない段階では,検討が進まなかったが,深地層の研究施設の構築を通じて，深部・長期の工学へ向けて，具体的な高度化が望まれる技術も少なくない。環境安全，建設/操業の両分野について,「課題グループ」でも，地質環境の観点からは,「断層周辺の割れ目の幾何学的形状と割れ目充填鉱物の特性」，処分技術からは,「掘削にともなう力学的なEDZの破壊音による計測・解析とモニタリング手法」および「割れ目やEDZのシーリング技術としてのグラウチングとグラウトの充填メカニズムの試験・解析」そして性能評価の観点からは,「割れ目充填物の形成と変化が分配係数に及ぼす影響」や「建設・操業に伴う酸化性地下水・物質等の混入の影響評価」に関する研究などが提示された。またそれぞれの分野間にも重要な研究課題があることが確認されており,「調査・解析グループ」の基礎的・要素的研究開発の諸項目の目標も，両者にまたがるものである。

以上のように，これまでの調査・研究からニアフィールドコンセプトの再構築の重要性が指摘され，今後の中間分野の研究開発の具体的な連携のありかたの検討の必要性が明らかになった。特に，課題グループの目標の一つは，それぞれの中間分野で，研究開発が手薄な穴，共同研究でより明確な方向性が打ち出せるであろう課題を見出すことにある。すなわち，サイト選定/処分場の設計，建設／操業，処分／閉鎖(後)それぞれの段階で，どうしても必要な，重要な研究開発の具体的な内容と手法および，それらを実用技術として達成させる共同研究体制等について議論を重ねることを目標としている。これには，個々の要素の安全を積み重ねた従来の評価では捕らえにくかった相互の要素が連携した，より現実的な安全の評価のあり方を考える必要がある。

このように，高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発については，これまで進められてきた「地質環境」,「工学技術」,「性能評価」の各分野の成果や目標を横断的に把握して，地層処分システム全体の性能における個々の課題の重要性を評価する考え方が必要で，この考え方の核としてセーフティケースの概念が有効であろうという認識が高まりつつある。また，本「深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究」委員会における課題グループにおいても，地層処分研究における「地質環境」,「工学技術」,「性能評価」の各分野の中間領域で研究開発が遅れている重要課題の抽出に努めてきており，同様の認識を得るにいたっている。本年度の報告では，これらの認識の核となっているセーフティケースの概念について定義，目的，内容について述べた後，わが国における安全規制の方向とセーフティケースの概念の関係に触れ，さらにセーフティーケース概念の適用の具体例として，種々の放射性廃棄物の処分概念とそのセーフティケースを比較検討し,処分研究において研究開発が必要とされる課題の抽出を試みた結果について示す。

1.2.2 セーフティケース：一般概念，目的と意味

1.2.2.1 定義

高レベル放射性廃棄物の処分システムの性能評価，あるいはさらに広く安全評価の目的は，大きくいって

① 安全基準：国や国民が処分の実施の是非を判断したり，国や実施主体が特定の候補地が安全上処分地として適しているかどうかを判断したり，地方住民が処分候補地として応募したり受け入れたりすることの是非を判断したりする際の判断材料を提供すること

② 合理的地層処分システムの設計の技術的拠り所：安全を脅かすシナリオ，要素を抽出してシステム設計やその合理化および防災対策に反映させること

の2点にある。これに対して第2次取りまとめ[6)]は，今後地層処分を実施していくことが妥当で

実現性のあることかどうかを国が判断するための材料を提供したものであり，この結果実施主体が設立され，今後のスケジュールとして

① 概要調査地区選定
② 精密調査地区選定
③ 処分地選定

の段階を経て地層処分を実施していく計画がたてられた。このような全体計画を背景として考慮すると，第2次取りまとめでは主として国が地層処分の実施の是非を判断するための材料を与えるというどちらかといえば概念的，抽象的な妥当性に主眼が置かれていたのに対し，今後は各選定段階それぞれに応じた形での判断材料を具体的に提供する必要がある。特に今後の判断主体は，保安基準の策定における国や，処分地選定における地方住民など，地層処分工学に関する専門家ではない人々となるので，彼らがよりよい判断を下すために，

① 科学的信頼性と論理の首尾一貫性を明確にした提示
② 非専門家にも理解できる形での提示

が重要になると考えられる。

以上は地層処分研究開発のわが国の現状であるが，このように，地層処分計画は，計画変更等の可逆性を留保しつつ，着実に段階を踏んで進め，関連する利害関係者が技術的な課題を十分に理解し，実施主体や規制機関に関する信頼性を高め(透明性の確保による情報の非対称性の排除)，技術的開発が効率よく堅実に進められる（不確実性の所在が把握できる）ようにすべきであるとの認識は，わが国に限らず世界的に共通したものとなっている。例えば，米国研究評議会(National Research Council, NRC) [7]は，処分場開発における建設，操業，閉鎖，閉鎖後の各段階を通じてどのように段階設定をどのように行うかを検討し，ユッカマウンテン計画への適用性について論じており，意思決定ポイントにおいて次のような検討を行う必要があることを示している[7]。

① その時点までに得られた情報の体系的な整理，統合，評価および適用
② 以前の段階への回帰を含む次段階に関するオプションの明確化
③ オプションとの比較を含む地層処分システムの安全評価に関する検討と更新
④ 新たに見出された知見の透明性を持った公開
⑤ 利害関係者との対話の確保
⑥ 上記全ての点に基づく次段階の内容の決定
⑦ 意思決定内容とその理由の周知，普及

このような背景の下に，それぞれの意思決定段階でまとめられるべき文書として，セーフティケースの概念が示された。本来セーフティケース（safety case）という用語は，

case = The case for or against a plan or idea consists of the facts and the reasons used to support it or oppose it (Collins COBUILD)

という一般的用法から由来し，安全（safety）を主張する論拠や証拠の全体をさす用語としていくつかの工学の社会的実施に際して，ステークホルダー（利害関係者）に提示すべき書類として用いられてきたのであるが，地層処分においては特に，その段階的アプローチの種々の意思決定段階において示されるべき内容が，

① 不確実性の所在とその取り扱い（主な懸念がどこに存在しているのかを明らかにし，これを解決するのにどのような方策が採られているか）
② 意思決定における透明性の確保（実施者とステークホルダーの間で，情報の非対称性が存

在しないようにとの配慮）

③ 可逆性の確保（それまでに得られた新たな知識の獲得と，政治社会学的条件の変化に対応し，意思決定を行えるように配慮したオプションの提示）

等であるので，特にこの概念が重要であるとの認識が生じてきた。

セーフティケースという用語が採り上げられ，最初にその定義が示されたのは，IAEA [8]およびOECD/NEA [9]の文書であり，safety assessment および safety case について次のように定義されている。

Definitions of safety assessment and the safety case

Safety assessment is the process of systematically analyzing the hazards associated with the facility and the ability of the site and designs to provide the safety function and technical requirements.

The safety case is an integration of the arguments and evidence that describe, quantify and substantiate the safety and the level of confidence in the safety, of geological disposal facility.

すなわち，セーフティケースを，「安全性を主張する論拠や証拠の総体」として捉え，次のような点がその要点であるとしている。

① 地層処分を実施（遂行）しようとする主体（機関）が，ステークホーダー（利害関係者：意思決定にかかわる人々）に対して，地層処分が十分安全であることを主張するために提出する全ての論述の集合体

ステークホーダー ＝ 利害関係者：意思決定にかかわる人々，規制において安全評価を行う人，サイトの受け入れについてその是非を決定する人，国民一般

② integration of the arguments and evidence：単なる証拠や論拠ではなく，説明，主張のために整理しなおしたもの。ある決められた手順により規格や仕様を満足することを示す（既存の工学における安全評価）のではなく，様々な側面から議論を積み上げて総合的に安全を主張する。

③ that describe, quantify and substantiate the safety and the level of confidence in the safety：安全は絶対の白黒ではない。safety case は実施主体による意思決定や判断の結果を提示するものではなく，どの程度安全であるか，すなわち不確実性の所在と程度を記述し出来うる限り定量化すると共に，評価におけるその扱いを示し，意思決定（安全評価など）をステークホルダーに委ねるもの。

このことからも分かるように，セーフティケースの概念は，特に次のような地層処分工学の特徴を考慮することにより導入されている。

① 地層処分の安全評価が対象とする全時間・空間スケールに対して文字通りの実証は不可能（不確実性の増大）

② 安全評価（システムの安全レベルの定量化）だけでは十分な信頼性を提供できない－多様な証拠(multiple lines of evidence)による説明

③ 段階的なアプローチ／意思決定による信頼構築の各段階において safety case を提示する

安全評価とセーフティケースの違いは，前者が処分システムの安全を妥当なあるいは設定されたシナリオに従って解析・評価して，安全基準に適合するかどうかを判定することであるのに対して，セーフティケースでは，これに加えて，

① 処分システムはどのように組み立てられ，どのような計画で実現されようとしているのか，
② 処分システムの安全に対してどのようなシナリオが考えられるか，
③ 各シナリオの蓋然性はどの程度であるのか，
④ 各シナリオは何を評価しようとしているのか（もたらす影響の内容と程度），
⑤ 各シナリオで捨象されたものは何か，それに伴う不確実性はどのようなものか，
⑥ そこで用いられるデータやモデルはどのようなものか，
⑦ その時点で得られている知見はどのようなものか

を文書化することであり，これによって意思決定が正しくなされるように意図したものである。

1.2.2.2 閉鎖後のセーフティケースの構成要素

前段で述べたように，セーフティケースは，段階的アプローチの各段階およびセーフティケースを提出すべき対象（規制，開発，住民等）により内容が変化する一連の文書であるが，OECD/NEAでは，一般的に満たすべき構成要素について検討し，図1.2.1のように整理している[9]。図1.2.2は核燃料サイクル開発機構が平成17年度取りまとめ－地層処分技術の知識化と管理[5]の中でこれを邦訳したものである。

Figure 1. **An overview of the relationship between the different elements of a safety case**

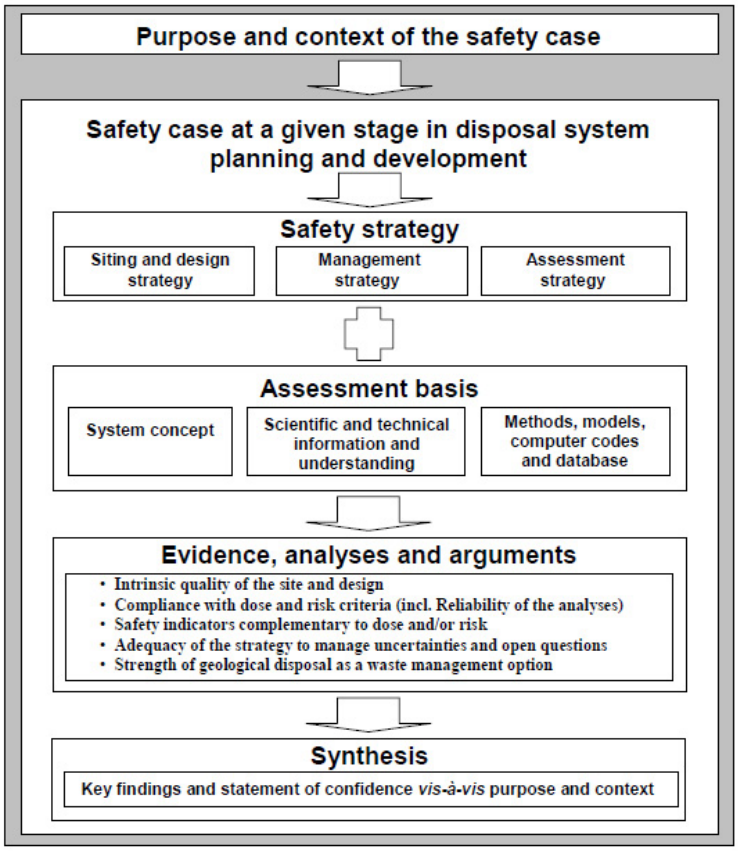


図1.2.1 セーフティケースの構成要素[9]

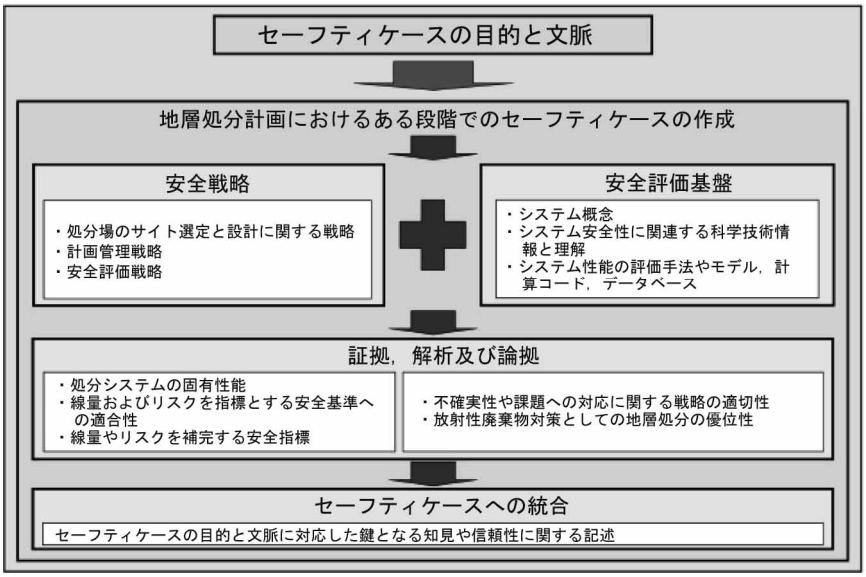


図 1.2.2　セーフティケースの構成要素（図 1.2.1 の邦訳）[5)]

図 1.2.1 に示されているように，各々の要素は並列関係にはないが，以下ではそれぞれについて簡単に説明する。

(1) Purpose and context（目的と背景）

まず，セーフティケースが，どのような対象（規制当局，政治的意思決定者，より広範な科学者または公衆，実施組織内の技術的専門家など）に対して，何を目的として，計画進行過程のどの時点で，それまでのどのような成果のもとに記述されるのかを明確に述べる必要がある。すなわちここでの記述には次のような内容が含まれていなければならない。

① 地層処分の計画・実施過程において，現在到達した段階
② 処分場の地質環境の属性として要求される事項をどのように調べ確認するか
③ 人工バリアシステムの製造・建設の実現可能性をどのように確認するか
④ 処分場をどのように建設，操業，閉鎖するか
⑤ これらの手順をどのように管理するか，またこの手順の進行において制限となる計画上および実施上の要因は何か

さらに，これらに加えて，過去に下された重要な意思決定や，将来下されるべき意思決定，肯定的意思決定がなされた時に採られる措置，意思決定にかかわるそれぞれの機関の責任についても説明がなされるべきである。またこれらの記述の際には，透明性（transparency），追跡可能性と歴史的展望（traceability and historical perspective），ピアレビュー（peer review）について特に配慮がなされるべきである。「安全」の提示においては，特に情報の非対称性（情報の提供者と受け手との間にある情報の質や偏り）について特に配慮する必要があることが指摘されているが[10)]，ここでは特に受け手の種類によりこの非対称性の内容が異なることを十分に配慮するべきであるとしている。

(2) The safety strategy（安全戦略）

(2)と(3)はセーフティケースの具体的内容のうちの，論拠の材料部分に当たる。安全戦略とは，

安全な処分を達成するための，研究開発，サイト選定，処分場設計，安全評価等の高次の戦略を意味している。すなわち，安全戦略の各要素は次のようになる。

① 総合的管理戦略：処分場の計画，実施および閉鎖について要求される種々の活動の総合的管理戦略。これにはサイト選定と処分場設計，安全評価，サイトおよび廃棄体の特性評価と R&D が含まれる。このような管理機能によって，作業の焦点がプロジェクトの目標に向けられ，個々の活動に対して開発資源が配分され，これらの活動が正しく実施され整理されることが保証される。

② サイト選定と処分場設計の戦略：サイトを選定し，選定されたサイトの特性と廃棄される廃棄体の特性に応じた工学的技術を開発するための戦略。

③ 安全評価戦略：どのようにして安全評価を行い，安全にかかわる証拠を評価し，システムの安全にかかわる将来挙動を解析し，セーフティケースを構築し更新するかを決めるための戦略。

これらの要素は各々密接に関連しており，そのいずれが欠けても他の要素では補えない。安全戦略における最も重要な側面は，不確実性の管理である。すなわちセーフティケースの本質として，意思決定の段階では常に何らかの不確実性があり，これをどのように取り扱うかということを明示的に示すことがこの項で特に重要な点である。

どのような工学システムも，これを社会に導入して実施しようとする際の安全評価においては，必ずその時点での不確実性が残っている。このためこれを実施するかどうかの意思決定は，常にこれらの不確実性が存在する条件でなされなければならない。このような問題はこれまでは，導入された工学の多くが比較的小規模で，その将来挙動の予測を，入手しうるデータを用いた内挿により行うことができたため，それほど深刻に考慮されてこなかったが，導入される工学が大規模複雑化するにつれて，工学システムの個々の要素に付随する不確実性がシステム全体の性能や挙動にどう影響を及ぼすのかを評価することが難しくなり，システムが様々な条件の下でどのように振舞うかを予測することが困難となってきた。これらの困難性は，CO_2その他のガスによる地球温暖化と気候変動や遺伝子改変のもたらす影響等々の分野でも顕著であるが，放射性廃棄物の地層処分においても，システムの安全性を評価すべき時間枠が極めて長く，評価にかかわる原位置の空間スケールが実験室規模に比べてはるかに大きくかつ接近できないという特徴のため，問題は深刻である。これらの原因により，

① システムの不確実性：地層処分システムが十分理解されており適切にその特性が把握されているかどうか，

② シナリオの不確実性：システムの将来挙動に影響を与え得る事象とプロセスについてのシナリオが適切かつ網羅的に考慮されているかどうか，

③ モデルの不確実性：処分システムの各要素の挙動を記述するのに用いられる概念モデルが実体を十分正しく表現しているかどうか，計算モデルのアルゴリズムが概念的理解を適切に表しているかどうか，

④ パラメータの不確実性：用いられるパラメータの値と範囲が適切か，自然界の変動や既存の測定技術の未熟性は正しく把握されているか，

といった不確実性が現れる。これらの不確実性は，地質環境など問題とする対象や現象そのものが不確実なばらつきを持っているものや測定技術の不完全さに由来するもの，対象や現象の理解の不足に由来するものなどがある。安全評価は結局のところ意思決定の問題であるので，これら

の不確実性の存在は，いずれかの時点で行われる意思決定に影響を与える。逆に言えば不確実性の評価には何らかの価値観が混入する。社会や人間の運命は，最も高い確率の事柄が実現されるのではなく，確率分布のなかのただ一つの点として実現され，個々の出来事が決定論で予測されるとしても，これらが複雑に絡み合ったシステムはカオス的性質を有しており実現される結果は予測不可能である。このため，人々は，回復が困難なほどの被害が及ぶなどの深刻な潜在的リスクがその工学にあり，これに対する評価が不確実である場合には，たとえその実現確率が非常に低くても，予防原則に従ってその実施を認めない。集団による直接投票などの意思決定で，多くの場合現状維持という結果が選ばれるのは，将来予測にかかわる不確実性が重く評価されていることの現れであると考えられる。不確実性の取扱いとは，ステークホルダーや規制当局が適切に意思決定することのできるように，不確実性を低減し，残る不確実性の影響を定量化してわかりやすく記述することである。逆にいえば，不確実性について最も避けるべきことは，その所在や特性を何らかの形で不透明で追跡不可能にしてしまうことである。不確実性を完全に除くことは不可能であるが，安全評価の目指すところは，安全に関する合理的な保証（すなわち将来の挙動を予言することではなく，起こるべき可能性について合理的にその影響を評価すること）であるので，この方針に沿って不確実性を低減，定量化する努力がなされている。これに対するアプローチには，

① 機構の解明などの科学的真理の追及，
② 感度解析や確率論的手法の適用，
③ 不確実性に影響を受けない（ロバストな）設計や解析の追及，
④ 単純性の追求（簡易型性能評価ツールの開発など），
⑤ 計画の進行に科学技術の進展を取り入れることのできる可逆性の確保，
⑥ 複数の説明原理やモデル，ナチュラルアナログなど，異なる論拠による安全性の提示，
⑦ what-if シナリオ(合理的には想定しにくいが想像しうる最悪のシナリオ)の提示と解析，
⑧ エキスパートジャッジメントによる決定過程の追跡可能性の確保，決定過程に入り込む可能性のある専門家集団に内在する偏向の排除，
⑨ 安全解析における追跡可能性の確保，
⑩ 同分野や異分野の専門家による評価，国際評価，非専門家との対話，

など様々なものがある。セーフティケースの目的は，ある様式化した評価法に従ってシステムが課せられた基準を満足するという形で安全を示す（安全評価または性能評価）のではなく，上記のような不確実性をどのように扱ったかを具体的に記述することによって，安全であることを主張すると共に，意思決定者が公正な判断をすることを助けるものである。

(3) The assessment basis（評価基盤）

評価基盤とは，安全評価を行うための情報や解析ツールの集合体のことで，次のような要素が含まれる。

① システム概念：処分システムおよびシステム要素とその安全機能の記述，および計画開発段階に応じて開発，建設，操業，操業および閉鎖後のモニタリング，工学システムが仕様を満たしていることを確認する品質管理手順等を記述したもの。
② 安全評価に関連する科学的，技術的なデータと知見。

③ システムの性能を解析するための，評価の方法，モデル，コンピュータコード，データベース。

安全評価の質と信頼性は，評価基盤の質と信頼性次第である。この項に含まれる内容が，これまで地層処分研究開発として技術者が追求してきて，「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」[6]として核燃料サイクル開発機構により集大成されたものであり，研究開発の根幹をなすものである。地層処分システムのセーフティケースにおける評価基盤における最も重要な側面は，問題とする事象の起こる環境の不均質開放系性および時間軸の長期性の取り扱いである。このうち特に時間軸の取り扱いについては OECD/NEA において議論が交わされている[11]。放射性廃棄物の地層処分において考慮すべき時間範囲はきわめて長期にわたるが，時間の進展と共に，廃棄物の潜在毒性，将来挙動の予測の確実性が大きく変化する。図 1.2.3[11]は種々の放射性廃棄物の潜在毒性の時間変化を示したものであり，半減期は物理学的に正確かつ精密に得られ変化しない係数であるため，これらはきわめて長期にわたり正確に予測できる。一方，図 1.2.4[11]は種々の処分システム要素の将来挙動予測可能性を示したもので，要素により予測可能な時間範囲は大きく異なっている。

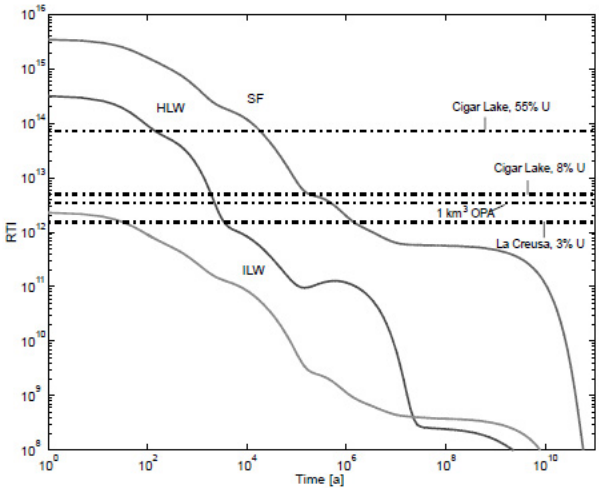


図 1.2.3　使用済核燃料(SF)，ガラス固化体(HLW)，長寿命中レベル廃棄物(ILW)の放射能毒性指数(RTI)の時間変化[11]

（比較は，SF/HLW の坑道が仮に天然ウラン鉱で満たされたと仮定したとき，または 1km³ のオパリナス粘土の値）

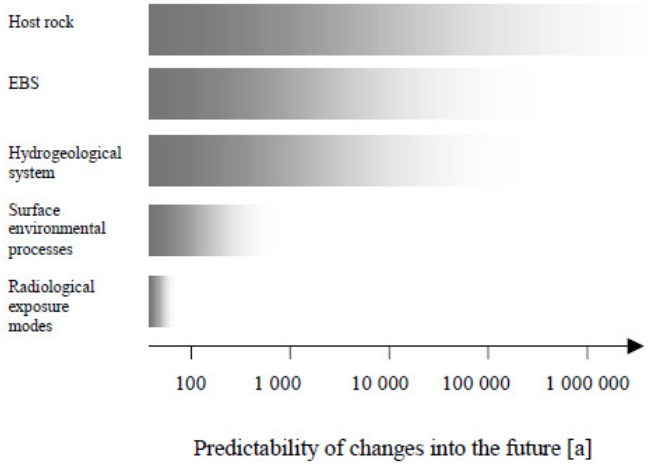


図 1.2.4　種々の処分システム要素の将来挙動予測可能性[11]

時間の進展と共に増大する不確実性の取り扱いは，一方では，安全評価をどのように様式化するか，またこの様式化をどのように正当化するか，安全目標をどのように設定するかという困難な課題を含んでおり，科学技術的には長期にわたる処分システム要素の変化をどのように予測するかというこれもまた困難な課題を含んでいる。1987 年に環境と開発に関する世界委員会（ブラントラント委員長）により発表された報告書“Our Common Future” [12]において提唱された持続可能な開発の概念では，「将来の世代がそのニーズを満たす能力を損なわないように，現在の世代のニーズを満たすような開発」として定義され，これによれば将来世代も現世代とまったく同様な安全を保証されるべきであると主張している。しかし，この概念における「将来世代」がどの位遠い将来までを含めているかは明らかではない。OECD/NEA のワークショップ [11]では，このような袋小路に陥る議論は避けて，セーフティケース構築において時間軸をどのように扱うかを中心に議論が進められたようである。そこでの共通の認識は，多重バリアの概念を考える時に，バリアの機能を第一義的に考えて時間軸を整理しようというものである。

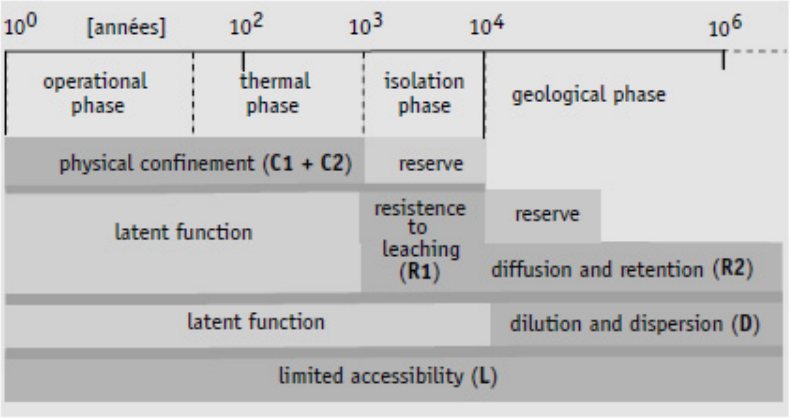


図 1.2.5　SAFIR2 において特定された安全機能とそれが機能すると期待される時間枠 [13]

図 1.2.5 はベルギーの ONDRAF/NIRAS により特定された安全機能とそれが有効に機能すると予測される時間枠を示したものである [13]（これは例示的なもので必ずしも全ての処分概念に共通のものではない）。ここでは大きな時間的枠組みとして

① 操業フェーズ
② 熱的フェーズ
③ 隔離フェーズ
④ 地質学的フェーズとし，

- 物理的閉じ込め(C)
  C1：人工バリアにより防水，C2：天然バリアにより水の流入を制限，
- 放出の遅延と時間的希釈（R）
  耐浸出性（R1）：放射性核種が放出されるのを遅らせることにより時間的に希釈する
  拡散と保持（R2）：人工バリア内およびニアフィールドに保持する
- 希釈と分散(D)
  地下水の流れと生物圏地表水により希釈
- 近接に対する制限
  意図的または非意図的な人間侵入の確率を減らす

という機能が，どの時間枠で働くかあるいは期待されるかを示している。すなわち，セーフティケースではこれらの機能がそれぞれの時間枠で有効に働くことを期待して文書化がなされるので，科学技術的知見（データと理解，モデルの構築）は，これらを証左する形で提示されなければならない。言い換えれば，地層処分研究では，問題としている研究対象が，シナリオの中でどのような意味を持つのか，そのシナリオは何を目的として，時間枠や空間枠を含めどのような背景の下に設定されているのか等を意識して，個別の研究を進める必要がある。

(4) Evidence, analyses and arguments（証拠，解析および論拠）

ここでは安全であると主張する根拠が示される。すなわち，安全目標とこれを満たすとする証拠が示される。安全目標については，ほとんどの国の規制当局は，線量またはリスクあるいはその両方を考えた安全基準を策定している。したがって，地層処分システムについて，多様なシナリオを設定し，これを記述するモデルとデータを用い，数学的解析によりこれを満たすことを示すのは，ここでの重要な要素となる。しかしながら，不確実性を伴う処分システムの安全を主張するためには，このような数値目標を満たすだけでは不十分で，その論拠を示すことが重要となる。これには，例えば次のようなその他の論拠を示すことも出来る。

① 廃棄物管理オプションとしての地層処分の優位性
② 地層処分システムの有するロバスト性
③ 選定された地層の安定性
④ 線量およびリスクを補足する安全指標（天然の放射能濃度やウラン鉱石との比較）
⑤ 不確実性や未解決の問題に対する戦略の妥当性
⑥ ナチュラルアナログ（地層処分システムが保守的であることを支持する観察的事実）

図 1.2.6 [11] には，地層処分のロバスト性を支持する議論の例を示した。セーフティケースにおいては，安全に関する利用可能なあらゆる論拠を最大限に活用することが重要である。

Box 5: Examples of the types evidence that can be used to support arguments for the robustness and other favourable characteristics of the repository and its environment when applicable [16]

Types of argument	Examples of application
The existence of natural uranium deposits, and other natural analogues of a repository system or one or more of its components	Long-term stability of formation, bentonite, used as a buffer material in many repository designs (also the feasibility, in principle, of geological disposal)
Thermodynamic arguments	Stability of copper, which is used as a canister material in some designs, in deep groundwaters
Kinetic arguments	Corrosion rate of iron, which is a canister material in some designs
Mass-balance arguments (showing that there is only a limited amount of reactant so that the extent of a detrimental reaction must be limited)	Limited chemical alteration (illitisation) of bentonite; the slow rate of copper corrosion
Natural isotope profiles in some argillaceous rocks, groundwater ages and palaeohydrogeological information in general	Slow groundwater movement and long-term stability of the geosphere
Long-term extrapolation of short-term experiments and observations	Corrosion processes; radioactive decay
Detailed modelling studies	Slow groundwater flow and radionuclide transport; low likelihood and consequences of earthquakes

図 1.2.6　地層処分システムのロバスト性を支持するのに利用可能な議論の例 [11]

(5) Synthesis（セーフティケースへの統合）

ここでは，これまでの議論を統合し，セーフティケースの目的と背景に対応した鍵となる知見や信頼性（confidence）に関する記述を行う。段階的アプローチの各段階およびセーフティケースを提出すべき対象（規制，開発，住民等）により内容が変化し，なされる意思決定も異なるので，これに配慮した形で結論が明瞭に示されねばならない。セーフティケースは，不確実性は伴われるが，事実に即した科学技術による知見と，リスクとベネフィットを考慮して意思決定をする社会的行為の架け橋となるものであり，科学技術の側からその判断材料を提示するものであるので，このことに配慮した形で統合がなされなければならない。

1.2.3 わが国における安全規制の方向 －原子力安全委員会：放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について－

1.2.3.1 背景

前節で述べたように，高レベル放射性廃棄物の地層処分の各時点での意思決定においては，安全評価の対象となる時間枠やシナリオ，評価基盤に多くの不確実性が伴うため，旧来の安全評価（処分システムの安全を妥当なあるいは設定されたシナリオに従って解析・評価して，安全基準に適合するかどうかを判定すること）では不十分であり，セーフティケースが必要となるとの認識が高まってきた。その一方で，安全規制の面から考えると，この考え方は，安全評価により基準に対する適合を判断するこれまでのやりかたとは異なる側面を持つ。一般的にセーフティケースを要求してそれに応じて当局が判断を下すやりかたは，裁量に依存した方法であるので，規制（法制）とはなじまないので，安全基準のなかにうまくセーフティケースの考え方を組み込む必要がある。セーフティケースの考え方は，本来，時間枠やシナリオ，評価基盤等に付随する不確実性に由来している。すなわち長寿命核種を含む放射性廃棄物の処分（高レベル廃棄物処分，TRU廃棄物処分，余裕深度処分，ウラン廃棄物処分）においては，これらの不確実性に十分考慮を払う必要がある。このため，これについての議論が IAEA[14]，ICRP[15]，OECD/NEA[9]等で行われ望むべき方向が文書として示されてきている。これを受けてわが国の原子力安全委員会でも，長寿命核種を含む放射性廃棄物の処分の安全基準を定める際に，共通的に重要となる事項をまとめ今後の方向性を示している [16]。ここでは明示的にセーフティケースという用語は用いられていないが，内容は，

① 管理期間終了後における安全評価シナリオ
② 自然過程と人為過程の取り扱い
③ シナリオ発生の可能性を考慮したリスク論的考え方と防護の基準
④ 評価期間

に関するもので，各廃棄物処分におけるセーフティケースのあり方を述べているといえる。

本報告書ではまず，報告書のまとめられた背景を次のように述べている。

① 低レベル（浅地）のほか，低レベル（炉内構造物等），TRU，ウラン，高レベル廃棄物等の処分の検討が始まりつつある（「基本的考え方」が提示された）。
② IAEA[14]：将来世代に過度の負担をかけることなく現在および将来にわたり人の健康と環境を防護することを目的として，全ての放射性廃棄物に共通する安全原則が示された。
③ 原子炉施設の解体に伴い発生する炉内構造物等の低レベル放射性廃棄物に対する審査指針の策定を念頭におきつつ，各種の性状の放射性廃棄物処分の安全規制に共通する基本的

な考え方を示す。

④ 事業者による立ち入り制限やモニタリング等の放射線防護上の管理を基本的に実施しない管理期間終了後においても安全が保たれるかどうかという，長期的安全確保について特段の注意を払う必要がある。

すなわち，ある期間処分廃棄物を管理し，期間終了後は管理する必要のないレベルであることを確認する管理型処分が適用できる浅地中埋設については，ある程度安全基準を定めてきたが，長期に放射能が残留して管理期間終了後の安全確保について考える必要のあるものについては，共通的に与えるべき規準が定められておらず，早急にこれを考える必要があるとしている。ここでは特に，炉内構造物等の低レベル放射性廃棄物に対する審査指針の策定を念頭においている。放射性廃棄物は，これまでは主としてその排出源により分類されてきており，大きくは，高レベル放射性廃棄物とそれ以外の全て（低レベル放射性廃棄物）に分類され，低レベル放射性廃棄物は「管理型処分」により処分できると考えられてきたのが旧来の方針であった。本文では法制度上の問題もあるので，これまでの考え方が不都合であるとは書かれていないが，内容的には，廃棄物の分類および処分法の分類が，処分方策についての十分な考察なしに進められてきた結果，ここに到って再考を要するものとなったと述べているものと解釈できる。

1.2.3.2 安全規制における共通的な重要事項について

本報告書[16]では，長寿命核種を含む放射性廃棄物の処分の安全評価または安全基準の制定において考慮すべきものとして次のような項目が挙げられている。

① シナリオ：処分システムに対し，人に健康影響を及ぼす可能性のある種々の現象を考慮した適切なシナリオを設定して評価を行う。

② 防護目標：将来世代の人々の健康に対しても，現在受け容れられている影響のレベルよりも大きくならないことを確認する。

③ 評価期間：安全評価の対象となる期間が，処分場の管理期間終了後にもおよび非常に長い。

④ 不確実性：多様な物理的，化学的，あるいは地球科学的な自然現象や人為的事象等が，緩慢に，あるいは突発的に関与する可能性に関し検討する必要がある。長期性のゆえに派生する不確実さも，安全評価上避けられない。

これらの項目は，前節で述べたセーフティケースの内容そのものである。すなわち安全基準の策定に当たっては，これらの事柄を考慮する必要があると述べている。特に①は重要で，種々の現象を考慮した適切なシナリオを設定して評価を行うと述べている。但しこのシナリオの設定は，基準策定側（規制側）が行うのか，申請者側が行うのかについては何も述べられていない。言い換えれば，規制はセーフティケースの提出を要求するのか，セーフティケースのあり方を規制側が考えて基準を設定するのかについては述べられていない。

1.2.3.3 管理期間終了後における安全評価シナリオ

報告書[16]の第3章では，長寿命放射性廃棄物処分における管理期間終了後の安全評価シナリオについて詳しく述べている。そこではまず安全評価シナリオの定義を述べた後，これを考える際の大方針を次のように述べている。

① 安全評価シナリオとは，埋設された廃棄物が人間およびその生活環境に及ぼす潜在的影響の程度を，主として放射線障害防止上の観点からあらかじめ評価するために想定する様々な状況。
② 安全評価シナリオは，設定される評価経路と対応する評価モデルおよび評価パラメータによって構成される。
③ 評価経路は，相対的重要度の高いものが欠けることなく抽出されていることが重要。
④ 自然過程を介して人間の生活に及ぼす経路を想定するシナリオと，人為過程を介する経路を想定するシナリオに分けて考える。

これらはいずれもが重要な内容を含んでいる。①では安全評価シナリオは「あらかじめ想定する様々な状況」であると定義して，安全評価シナリオの意味と意図を明示的に示している点は，シナリオについて明示的に説明を加えずにこれらが解析評価に使われていた旧来の安全評価とは異なり，セーフティケースとしての安全戦略に該当する側面を意識しているといえる。また②では安全評価シナリオとして，セーフティケースの評価基盤（assessment basis）に相当する内容を示している。③は，セーフティケースの証拠，解析および議論（Evidence, analyses and arguments）に相当するもので，シナリオの網羅性，シナリオの目的と意味，シナリオのもたらす影響の意味，含まれる不確実性の評価等を考慮する必要性が説かれている。特に「相対的重要度の高いものが欠けることなく抽出されていることが重要」としているのは，旧来の安全評価が，付与のシナリオについてのみ解析，評価を行い，得られた数値的結果が安全基準を満たしてさえいれば良いとしてきたこととは一線を画している。但しこれは，蓋然性のあるシナリオを実施主体が設定するというのではなく，基準の設定の際にこれを考慮すべきものと考えており，④でその具体的シナリオ設定の方策を示している。様々な不確実性を考慮すると，自然過程においてもたらされる不確実さと人間活動に由来する不確実さとでは，非常に大きな差があるとして，まずこれらを区別して考えようというのがここでの提案である。

(1) 自然過程によるシナリオ

自然過程によるシナリオとしては，

① 地下水シナリオ（多重バリアシステムが基本）
② 地震・断層活動，火山活動（突発的）⇒ 処分場の閉じ込め性能，地下水移行経路
③ 隆起・侵食作用（緩慢）⇒接近シナリオ，処分場地質環境

が挙げられており，地下水シナリオが最も重要なものであるとしている。また，②や③も，処分場の閉じ込め性能に直接影響を与える可能性があると共に，①における地下水移行経路に影響を及ぼす可能性があるとしている。すなわち，

- 一つの自然現象がいろいろな過程を通じて処分の安全性に影響を及ぼすことが考えられ，そのため安全評価上のいくつものパラメータの値が変化し得る。しかし，そのような相乗効果に関し正確に予見することは必ずしも容易ではない。

として，安全評価における将来予測に関する不確実性をどのように扱うかを課題としてあげ，

- シナリオ想定に際し，いわゆる安全裕度を十分に見込んでおくなどの配慮が欠かせない。また，評価期間が長いことに伴って派生する不確実性も避けられないものであり，その不確実性を勘案した上で，なお安全保障上支障がないことをいかに確認するかが重要である。

このように暗にセーフティケースの重要性を示している。「安全裕度」の考え方はそのまま数値化しないで基準に取り込むことは，裁量による規制につながることになるので好ましくない。したがってここでは，どのように安全裕度を見込むかが問題となる。安全委員会は，これについて，

- この不確実性を考慮し安全評価を行うために，シナリオの発生の可能性を勘案し，その影響の大きさを評価する，いわゆるリスク論的考え方に基づく安全評価手法が，例えば国際放射線防護委員会で提案されている[15)]

としてこの内容を紹介している。ICRP ではこれを行う方法として次の 2 つのアプローチを示している。

① 統合アプローチ（aggregated approach）
全てのシナリオの発生の可能性を確率として定量化　⇒確率と各シナリオの影響の程度との積の総和（全リスク）をリスク拘束値と比較。
考慮期間範囲の全ての被ばく状況とそれに付随する確率の包括的な評価が必要。

② 線量／確率分解アプローチ（disaggregated dose / probability approach）
起こりそうかあるいは代表的な放出シナリオの同定　⇒線量を拘束値と比較
その他あまり起こりそうもないシナリオ　⇒線量と発生確率を別々に考察して重要性を評価

これらのうち①の統合化アプローチは，概念的には満足なものであるが，考慮中の期間の範囲内における全ての関連した被曝状況とそれらに付随する確率の包括的な評価を必要とするため，②の分解アプローチの方がより現実的である。

またここではさらに，このようなリスク論的安全評価に併せて，

- 処分システムの頑健性（robustness）の追求
  複数のバリアを物理的および機能的に適切に組み合わせることによるシステム全体の安全裕度を考慮する。

という考え方が国際的に提案されていると述べている。これはセーフティケースにおけるロバスト性の追求であり，多重バリア機能を中心に評価するという考え方と一致している。

(2) 人為過程によるシナリオ

人為過程によるシナリオは

- 人間の活動にもとづく過程によって，処分場に埋設された放射性廃棄物から人が影響を受ける可能性の想定

である。これについては

① 複数のバリアが人の行為に対する防護機能を主眼として構築されていないことから，処分場の破壊行為などのような意図的活動に基づくものは本来的に安全評価の対象が意図する[15)]。

② 不注意による人の行為については，発生の可能性を極力小さくすることに努める。
- 通常の土地利用に係るシナリオ設定の必要がないほどに処分深度を深くする。
- そこに放射性廃棄物が埋設されていることに気づきやすくするための措置を講じる。
- 発生の可能性と，発生した場合の影響の程度について評価し，その評価結果に応じて適切と考えられる措置を講じておく。

③ 人為過程についてはこれを具体的かつ科学的に正確に予測したり推定したりすることは不可能なため，様式化したシナリオをあらかじめ定めておき，その対策の妥当性を確認するとしている。

前段で述べた分解アプローチに従えば，これらの希頻度事象（または事故）の扱いが分かりやすくなる。例えばボーリングによる被曝の，安全性に与えるインパクトを考える時，これは地下水シナリオのように地表のある範囲の環境が汚染され，そこで生活する人々の集団が生涯にわたってその被曝影響を受けるようなシナリオ（通常シナリオ）ではなく，ある特定の一時期に限られた人数の人が被曝するという事故シナリオであることがわかる。またその被曝影響を考える際には，そのような事故の発生確率と被曝の程度の積を比較すればよい。発生確率は独立には推定しにくいが，被曝の程度と拘束値の比較から，発生確率と被曝の程度の積が拘束値を超えないような発生確率であるとの推定は可能であろう。また，処分深度を深くする，記録やマーカーによりそのような事故の発生確率を下げるという，ALARA[15]の原則に基づいた努力も定量化が可能である。

1.2.3.4 わが国における放射線防護基準等の検討の方向性

報告書では第4章で放射線防護における国際的動向を述べた後，第5章でわが国における放射線防護基準等の検討の方向性として，シナリオの取り扱い，シナリオの発生の可能性を考慮した防護基準，評価期間，人為過程について論じている。

最初に防護基準のあり方としては，これまでは浅地中可能な低レベル放射性廃棄物処分に係る現行の安全規制（管理期間終了後の安全確保に必要な防護上のめやす）として

- 一般的な通常のシナリオ ＝ 一般公衆が受けるかもしれない年線量の評価値が 10 μSv/y を超えない
- 発生頻度が小さいシナリオ ＝ 評価値がその値を著しく超えない

とされてきた。しかしこれらは管理期間の終了で 放射性廃棄物としての管理を要しないものに対しての規制であって

- 管理期間内に放射能レベルが十分な減衰を期待できない廃棄物

の処分を想定したものではないので，「これまでの考え方と整合性をはかりつつ，今後決めていく必要がある」としている。また，

- 高レベルと低レベル放射性廃棄物の全ての処分にわたって共通的な規定を適用している国は，廃棄物の違いによらず同じ処分法をとるなどの，どちらかというと例外的な国に限られており，ほとんどの国では，処分の態様に即して種々の要件を定めている。
- わが国も，廃棄物の種類や特徴に応じて異なる処分方法が考えられているところから，そのような個別的アプローチが現実的と考えられる。

とし，いずれの処分法によっても共通的な基本的考え方が必要であると結論づけている。

(1) シナリオ発生の可能性を考慮したリスク論的考え方の導入

これについては「諸外国の処分の安全評価における共通的な考え方として注目すべきは，シナリオ発生の可能性が規制の中に明示的に考慮されていることであり，シナリオ発生の可能性に応じて基準（放射線防護上の要件）に対する充足性を判断するのが適当と考えられている」としており，

① 普通に考えられるような通常シナリオ
② 発生の可能性が低いシナリオ
を区別すべきである，すなわち，シナリオの発生の可能性が異なる場合には，それぞれに応じて防護基準を考えるべきであるとするリスク論的考え方を導入すべきであるとしている。

(2) シナリオの発生の可能性を考慮した放射線防護の基準

それぞれのシナリオに対応した基準値に関しては，国によって様々であるが，

① 普通に考えられるような通常シナリオ ＝ 線量拘束値
② 発生の可能性が低いシナリオ ＝ リスクまたは影響の期待値

を適用するのが妥当としている。わが国における発生頻度の小さいと考えられるシナリオに対する値は，浅地中可能な低レベル放射性廃棄物処分に関してめやすとして決められている「10 μSv /y を著しく超えないことをめやすとする」という表現にとどまっており，シナリオ発生の可能性をどのように考慮するかは考慮されていない。これに対しては，ICRP 勧告における

- 人為過程以外の自然過程に対する線量拘束値 ＝ 0.3 mSv/y
- 人為過程以外の自然過程に対するリスク拘束値 ＝ 10^{-5}/y

などを参考にして考えるのが良いとしている。

(3) 評価期間

評価期間についてはわが国ではまだ十分検討されていない。これに対しては

① 処分後数千年の比較的信頼性の高い評価が可能な期間についてはできるだけ防護機能を高めておき，それ以降の長期的な防護機能の頑健性を確保する。
② 超長期の防護基準については，天然の放射能濃度との相対比較などの補完的指標を考慮することも考えられる。

としている。評価期間については，時間的推移による処分システムの特性の変化により，評価期間を区別しておく方法などがあるが，人間活動の変化による不確実性が高いため，様式化された評価シナリオ（生物圏モデル，被ばく線量によるリスクの評価など）の解釈が十分でなく，安全確保のための期間をどのように定めるかについても国際的コンセンサスが得られていない。しかし，ここでは評価期間を，予測可能性の面から考えて，①と②に区別してはどうかという踏み込んだ提案がなされており，特筆に価する。

(4) 人為過程の取り扱い

これについては，前項で述べたとおりであるが，ここでは人為過程シナリオに対して防護基準として ICRP の介入レベル

- 10 mSv/y 以下 ⇒ ほとんどいつも介入は正当化されない
- 100 mSv/y 以上 ⇒ ほとんどいつも介入は正当化される

を参考にすべきであるとしている。すなわち，人為過程により起こる被曝は，前節で述べたように，地下水シナリオなど環境全般の汚染により起こるシナリオとは区別すべきであって通常シナリオではなく，事故シナリオとして扱うべきであると述べていると解釈できる。

1.2.4 セーフティケースからみた種々の処分システムの課題

1.2.4.1 背景

以上のように，長寿命放射性廃棄物処分の安全に関する共通の課題として，長期の時間枠，不均質開放系としての地質環境による不確実性の問題があり，これらの問題とそれに対する対処を意思決定者に正しく伝えるためには，セーフティケースの概念が重要であることが最近の認識として醸成されてきた。図 1.2.7[17] に示すようにわが国ではこれまで放射能レベルの比較的低いものの浅地中ピット処分が日本原燃で実施されてきており，高レベル放射性廃棄物の深地層処分については 1999 年の核燃料サイクル開発機構による詳細な検討[6]をうけて，2000 年に特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が制定され，実施主体である原子力発電環境整備機構が設立されたところであるが，その他の廃棄物の処分に関しては今後検討が進められることとなっている。これらの廃棄物は，図 1.2.8[17]に示すように，その放射能濃度とインベントリ，物理化学的性状に応じて，浅地中処分，余裕深度処分，地層処分によって処分しようというのがわが国の方針である。これらのセーフティケースにおける安全戦略，安全評価基盤（処分システム概念，評価モデル等），証拠，解析および論拠（不確実性やそれに対する論拠）はそれぞれに大きく異なっており，1.2.3 で述べたような共通的事項によっていかに整理していくかが現在の課題となっている。本年度の調査では，これらの全てについて検討することは出来なかったので，ここではセーフティケースから見て抽出された，いくつかの課題例について述べる。

<table>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">廃棄物の区分</td><td>原子力委員会</td><td colspan="4">原子力安全委員会</td><td colspan="2">安全規制関係法令等</td></tr>
<tr><td>処分方針</td><td colspan="2">安全規制の考え方</td><td>濃度上限値等</td><td>安全審査指針</td><td>政省令*1</td><td>規則，告示</td></tr>
<tr><td colspan="3">高レベル放射性廃棄物</td><td>報告
（1998年5月）</td><td>報告（暫定）
（2000年11月）</td><td rowspan="9">共通的な重要事項
報告
（2004年6月）</td><td></td><td>今後検討</td><td colspan="2">今後整備</td></tr>
<tr><td rowspan="7">低レベル放射性廃棄物</td><td rowspan="4">発電所廃棄物</td><td>放射能レベルの比較的高いもの ［余裕深度処分］</td><td>報告
（1998年10月）</td><td>報告
（2000年9月）</td><td>報告
（2000年9月）</td><td>今後検討</td><td>制定
（2000年12月）</td><td>今後整備</td></tr>
<tr><td>放射能レベルの比較的低いもの
［浅地中ピット処分］</td><td rowspan="3">報告
（1984年8月）</td><td rowspan="3">報告
（1985年10月）</td><td>報告
（1987年2月、1992年6月）</td><td>報告
（1988年3月）</td><td>制定
（1987年3月、1992年9月）</td><td>制定
（1988年1月、1993年2月）</td></tr>
<tr><td>放射能レベルの極めて低いもの （コンクリート等廃棄物）［浅地中トレンチ処分］</td><td>報告
（1992年6月）</td><td>報告
（1993年1月）</td><td>制定
（1992年9月）</td><td>制定
（1993年2月）</td></tr>
<tr><td>放射能レベルの極めて低いもの（金属等廃棄物）［浅地中トレンチ処分］</td><td>報告
（2000年9月）</td><td>今後検討</td><td>制定
（2000年12月）</td><td>今後整備</td></tr>
<tr><td colspan="2">超ウラン核種を含む放射性廃棄物（ＴＲＵ廃棄物）</td><td>報告
（2000年3月）</td><td>検討中
（2000年6月～）</td><td>今後検討</td><td>今後検討</td><td colspan="2">今後整備</td></tr>
<tr><td colspan="2">ウラン廃棄物</td><td>報告
（2000年12月）</td><td>検討中
（2001年4月～）</td><td>今後検討</td><td>今後検討</td><td colspan="2">今後整備</td></tr>
<tr><td colspan="2">ＲＩ・研究所等廃棄物</td><td>報告
（1998年6月）</td><td>検討中
（1998年6月～：RI廃棄物は報告：2004年1月）</td><td>今後検討
（研究所等廃棄物）</td><td>今後検討
（研究所等廃棄物）</td><td colspan="2">今後整備</td></tr>
<tr><td rowspan="2">放射性物質として扱う必要のないもの</td><td colspan="2">放射性物質として取り扱う必要のないものの放射能濃度</td><td>報告
（1984年8月）</td><td colspan="3">報告
（原子炉施設及び核燃料使用施設：2004年10月）</td><td rowspan="2"></td><td colspan="2" rowspan="2">今後整備</td></tr>
<tr><td colspan="2">クリアランスレベル検認</td><td></td><td colspan="2">報告
（原子炉施設のみ：2001年7月）</td><td></td></tr>
</table>

＊1：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律に係る政省令

図 1.2.7 わが国の放射性廃棄物処分のための諸制度整備状況[17]

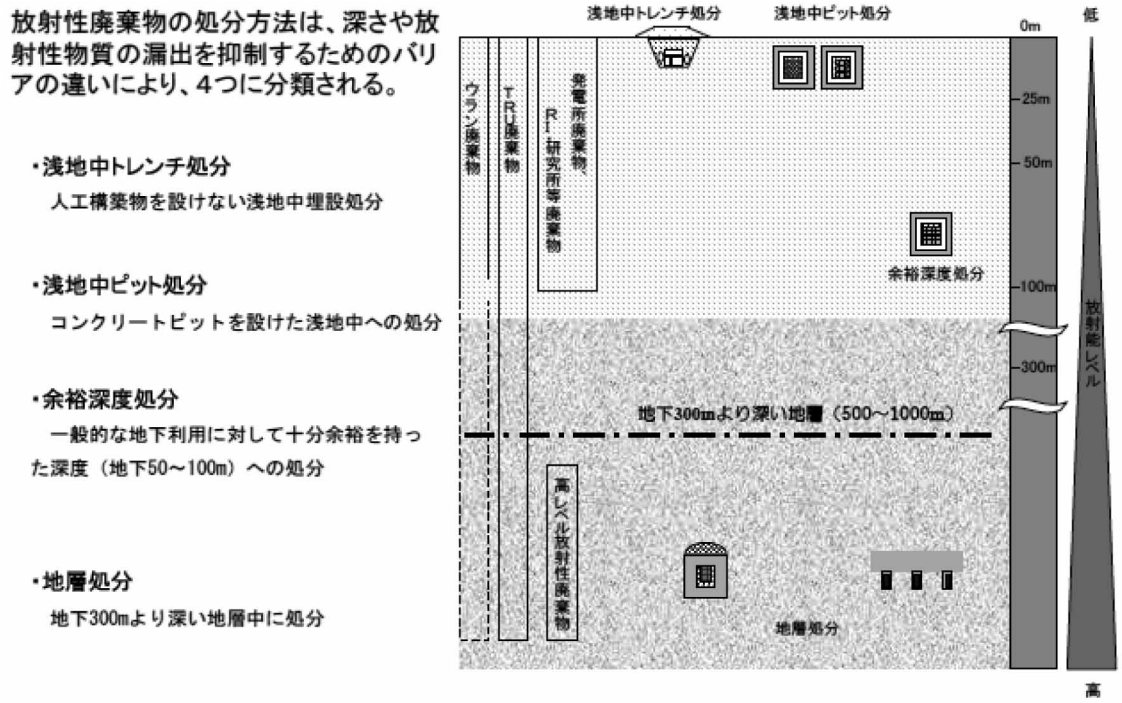


図 1.2.8　放射性廃棄物処分方法 [17]

1.2.4.2　TRU 廃棄物処分の処分システム概念

超ウラン（TRU）核種を含む放射性廃棄物については，その放射能濃度，性状に応じて，浅地中処分，余裕深度処分，地層処分に区分して処分することが考えられており，電気事業連合会と核燃料サイクル開発機構はこの処分技術について詳細に検討した結果を報告書(第2次TRU処分取りまとめ)としてまとめている [19]。図 1.2.9[17]はこのうち地層処分の対象となる廃棄物をまとめたもので，図 1.2.10[18]はその放射能濃度の時間変化である。第 2 次 TRU 処分取りまとめではこれらの廃棄物は，4 つのグループに分けられて別々の処分坑道に処分しようと考えている。4 つのグループとは，

① 廃銀吸着剤のセメント混練固化体
② ハル・エンドピースの圧縮体，セメント固化体
③ 低レベル濃縮廃液のアスファルト固化体およびモルタル充填固化体など
④ 可，難，不燃性廃棄物のモルタル充填固化体など

で，①③ 200 L ドラム缶，② キャニスタ，④ 角型容器，500 L ドラム缶など数個を一緒に入れてセメントモルタルと共にパッケージに収納したものからなる。パッケージの外側は，①と②には収着遅延しにくい C-14 や I-129 が含まれているので，ベントナイト緩衝材を用いるが，③，④については特にバリア材を設置しない。

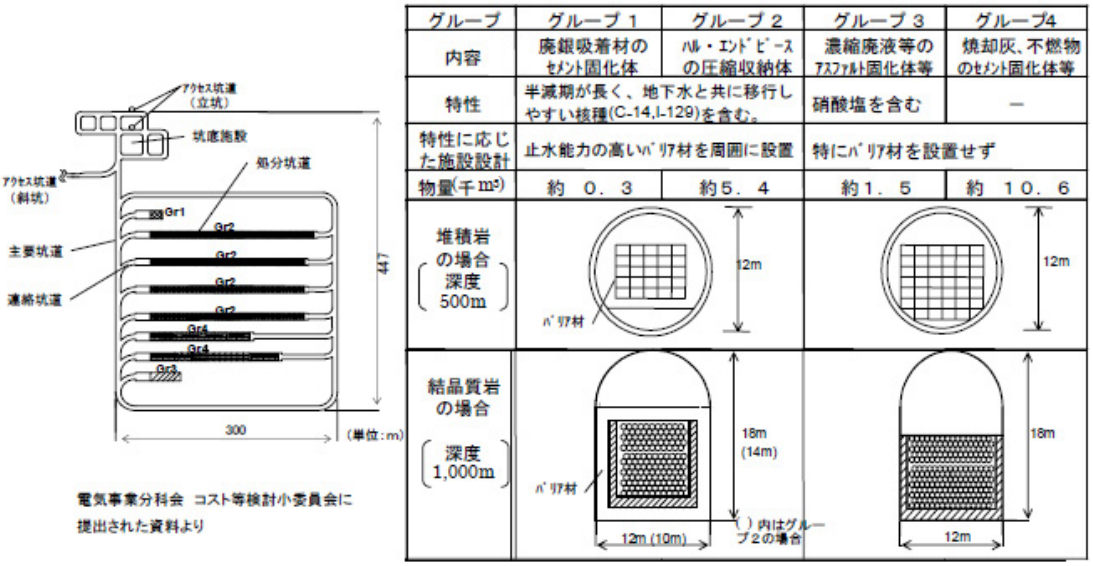


図 1.2.9　地層処分対象 TRU 廃棄物の廃棄物区分と処分施設の概念図 [17)]

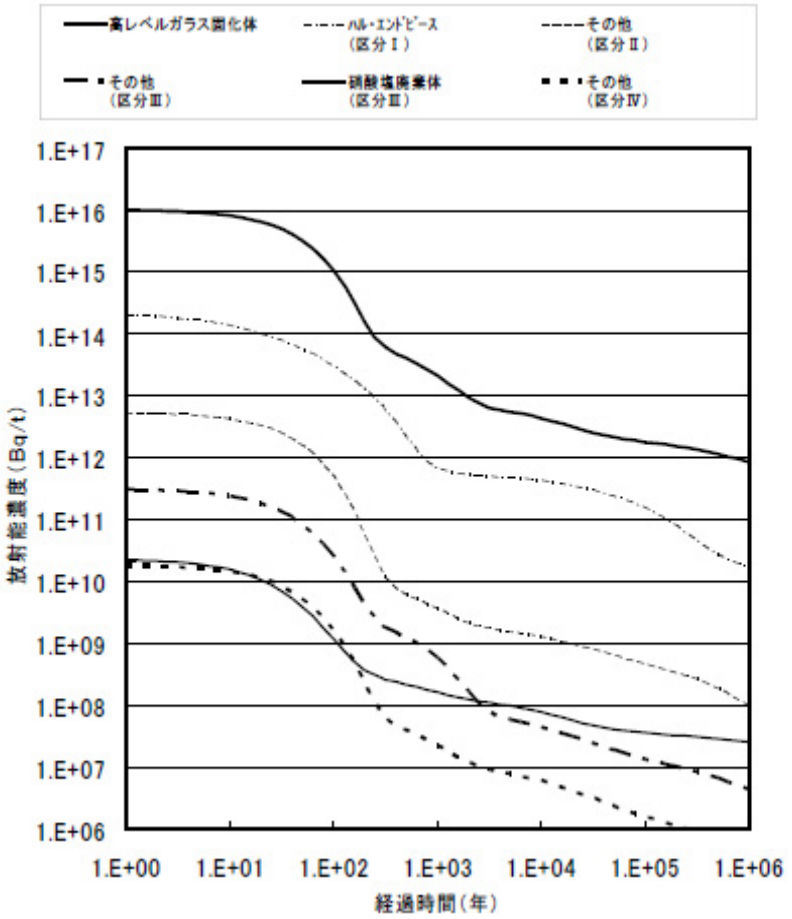


図 1.2.10　地層処分対象 TRU 廃棄物の放射能濃度の経時変化（埋設時から）[18)]

また，③のアスファルト固化体には硝酸塩が含まれるので，これによる影響を避けるため，これに対する処分坑道は他との離間距離を大きく取っている。

検討書では，それぞれ材料に次のような機能を期待し，これを工学バリアとして，天然バリアとのマルチバリアシステムと考えて，工学設計について検討した後，安全評価を行っている。

① 廃棄体(廃棄体固形化材,廃棄体容器および廃棄体パッケージ)：操業中の定置作業の効率化および操業時の核種漏出防止，処分場閉鎖後の核種の収着や化学緩衝性。

② 充填材：操業中の万一の汚染拡大の防止。幌型の処分坑道における廃棄体の耐埋設荷重の補完。セメント系材料による核種の収着等。

③ 構造躯体：廃棄体の定置および充填材・緩衝材の施工の効率化。セメント系材料を使用する場合には核種の収着。

④ 緩衝材：地下水浸入量の抑制。長期性能の維持のための廃棄体・構造躯体の支持および化学的安定性。

⑤ 埋め戻し材：建設，操業時に利用した坑道が，将来，多重バリアシステムの機能に対して有意な影響を及ぼさないよう空間の閉塞を行う。人間侵入の防止。

⑥ 支保工：操業中の空洞安定性の確保。

安全評価は基本的には高レベル廃棄物処分における種々のシナリオと同じものを考えているが，特にセメントや，アスファルト固化体に含まれる硝酸塩等の長期にわたる化学反応の影響を検討しており，この処分システムにより安全に対象 TRU 廃棄物が処分できるし，高レベル放射性廃棄物と併置する形での処分が可能と結論している。また地下水シナリオは高レベルと同様であるので，基本的には溶解度と収着遅延により核種の漏出は支配されるので，インベントリの違いは問題とならない。

セーフティケースにおいては安全戦略（Safety strategy）をまず述べる必要があるとしている。この点から考えると，TRU 廃棄物地層処分システムと高レベル放射性廃棄物では，バリア構成，バリアに期待する機能が異なっている。高レベル放射性廃棄物処分では，天然バリアにおける不確実性の問題を克服するために,言い換えれば処分システムのロバスト性を確保するために,人工バリアに重点を置いた処分システムが考えられ，ガラス固化体を囲む形で炭素鋼オーバパックが用いられ，さらにその周囲にベントナイト緩衝材が用いられる。高レベル処分では，処分坑道建設のため OPC セメントの使用が必要となるが，そのアルカリ影響が懸念され，炭素鋼の腐食（不動態化，局部腐食の発生・進展）やベントナイトの変質に対する影響が詳しく検討されている[20]。これに対して TRU 処分では，セメントはバリア材として考えられている。強いて対比すれば，高レベル処分システムにおけるガラス固化体とオーバパックは，TRU 処分システムにおいては，廃棄体とセメント充填材がこれに相当する。あるいは，高レベルではオーバパックの健全性を保障する期間を千年としており，初期の数百年を経た高レベル廃棄物のインベントリと TRU 廃棄物の初期のインベントリがほぼ等しいことから，ガラス固化体と地下水の接触を一定期間阻止する機能を持つオーバパックのようなバリアは必要がないと判断されているのかもしれない。いずれにしても TRU 廃棄物処分システムについては，高レベルガラス固化体が TRU 廃棄体になったとき，何故オーバパックは必要ないのかあるいはセメント充填材でその機能が代替できるのか，インベントリあるいは放射能濃度とシステムの関係はどうなっているのかについては説明がされていない。TRU 処分システムでは，セメントによるアルカリ影響や硝酸塩による酸化還元雰囲気への影響等，検討が十分でないように思われる課題もあるが，これらが検討書の主張どおり影響

しないとしても，高レベル廃棄物処分とTRU廃棄物処分の処分システム概念の違いは大きな問題である。もちろん異なる安全戦略でそれぞれの廃棄物が処分されても構わない。高レベル廃棄物処分システムにおいても，安全戦略としてオーバパックが採用されているのであって，オーバパックがなければならないとは主張されているわけではない。しかし，併置が考えられている２種の廃棄物で，一方では処分システムのロバスト性を高めるものとして最重要視されているガラス固化体やオーバパックが，TRU処分ではないまま，安全が主張されている。極論すれば，このようなバリア材の使用は最適設計の面からは不要(冗長)であると暗にいっているのと同じである。オーバパックは，他のバリア材と違い，物理的に廃棄物を閉じ込める（図1.2.5中のphysical containment）機能を有しているのに対し，TRU処分のバリア材は全て収着遅延型の機能であり，地下水と廃棄物の接触は処分後の早い時点から起こるので，酸化還元電位の変化のような同じ因子により全てのバリア性能が劣化するという点ではロバスト性に欠けている（オーバパックでも腐食の進展が変化するという点では影響を受けるが)。TRU廃棄物では特に，セメントによるアルカリ影響とアスファルト固化体に含まれる硝酸塩の影響が深刻である。このためTRU廃棄物処分の安全を主張するためには，長期にわたる化学反応の影響のないことをより信頼できる形で示す必要がある。検討書における化学反応の影響は，基本的には，限られた時間範囲での観察事実を長期に外挿するという形で論じられており，この点では説得力に欠ける。不均質開放系である自然界での長期にわたる反応がどのように進行するかは，物質移行と化学反応の速度が局所的な変化とどう関係するかを明らかにする必要がある。(例えばセメントによるアルカリ影響は，アルカリが周囲のシリカなどの固体の酸と反応する速度と，水酸化物イオンが移流・拡散により移動する速度との関係で起こる。また固体の酸の反応では，反応物が固体内から表面に拡散する速度も関係する)。また遅い化学反応は実験室で観測不可能であるが，ナチュラルアナログとして自然界にアナログを求めることが出来る（例えば検討書では実験室的観察事実から，硝酸塩は濃度が低ければ反応しないと結論づけているが，自然界では硝酸還元バクテリアの存在が示すように反応が進行し，酸化還元雰囲気が変化する可能性もある)。このような高レベル廃棄物とTRU廃棄物の処分システムの安全戦略の違いについては，処分システムにはどの程度のロバスト性を要求すべきか(最適設計の面から見れば冗長性の排除)，天然バリアのバリア性能の不確実性をどこまで減らしてバリア機能の深層防護機能として認められるようにすべきか，などの課題について取り組む必要があるだろう。

1.2.4.3　セメントの使用によるアルカリ影響について

2005年の12月に行われた原子力発電環境整備機構による「ニアフィールドプロセスに係る国際ワークショップ」[20]では，技術アドバイザリー国際および国内委員会のメンバーを集めて，特に人工バリアの次のような問題

① オーバパックの不動態化と局部腐食
② オーバパック腐食生成物と緩衝材の反応
③ 熱による緩衝材の変質
④ 強アルカリ地下水による緩衝材の変質

について集中的な議論が交わされた。この内容と結論については，技術アドバイザリー国際委員会のメンバーにより2006年1月にまとめがなされる予定であるが，個人的に重要と思われた結論として次のような点が挙げられる。

① オーバパックの局部腐食が起こる条件は極めて限られていて，これが起こる可能性は低い。セメントによるアルカリ影響を考えても結論に変わりはない。
② オーバパックの寿命を千年とする安全評価はあまりにも保守的で現実性に欠ける。より現実的には1万年のほうが妥当なのではないか。過度の保守性はセーフティケースではマイナスに働くのではないか。
③ オーバパック腐食生成物と緩衝材の反応は，緩衝材の本来の機能である拡散場を維持するという機能には影響しない。
④ どれだけのアルカリが供給されるか（セメント変質速度とフラックス）がわからないといけないが，強アルカリ地下水による緩衝材の変質については，深刻な影響はないと思われる。スウェーデンやフィンランドなどでは低pHセメントが使われているが，日本では，廃棄物量がより大きく処分場が大きいことと，TRU廃棄物でセメントが既に使われていることなどから，通常セメントの使用を前提にして考えるべきである。
⑤ 緩衝材に与える熱影響を避けるために100 ℃を考えているが，この温度に根拠はなく，単にそれ以上の温度について検討されていないだけであるので，もっと高い温度でも許される可能性がある。

ここでは処分の全体が考えられているわけではないが，セーフティケースの面から考えると，2つの重要な点が指摘できる。その一つは，前項でも述べたように，長期にわたる化学的物理的変化を考えるには，化学反応速度と物質移行速度の双方を考えた不均質開放系の変化のあり方を考える必要があり，ナチュラルアナログの援用が重要となる，という点である。たとえば，コンクリートからのアルカリの溶脱が地表環境で顕著に起こっていないのは，コンクリート表面が大気中の二酸化炭素と反応してカルサイトで覆われるからであり，地下水中にも炭酸塩は含まれているのでこれを考えるべきであるとの指摘もなされているが，これもナチュラルアナログと考えることができる。もう一つは④の結論またはアドバイスである。セーフティケースでは，これはPurpose and context（目的と背景）の③人工バリアシステムの製造・建設の実現可能性をどのように確認するか，またはSafety strategy（安全戦略）のdesign strategy（設計戦略）に含まれるとも考えられるが，セーフティケースが安全を最終目標においているため，工学的な設計および建設操業の実施可能性は，同じ尺度で論じるのが難しいものとなっている。実際にここで述べたセメントの使用の問題についても，アルカリ影響と工学的施工のどちらがどれだけ重要であるかがわかりにくく，専門家の直感的判断によりアドバイスがなされている。実際に設計，建設できるかどうか（経済性も含めて）という問題や，設計，建設，操業の段階での安全確保は，将来環境に与えられる可能性のある線量と共に，重要なもので現実にはこれを含めた最適化がなされなければならないが，設計や建設が具体化されないと議論しにくいこと，既存の考え方で進められるだろうと考えられていることなどから，整理が遅れている課題である。

1.2.4.4 余裕深度処分のセーフティケースについて

発電所廃棄物のうち，制御棒，チャネルボックス，炉内構造物，使用済イオン交換樹脂などの政令濃度上限値を越える廃棄物，TRU廃棄物のうち，浅地中に埋設できないもので，地層処分に該当しない廃棄物については，余裕深度処分という方法が考えられている[21]。対象と考えられている廃棄物の放射能濃度と潜在的影響は図1.2.11[22]，図1.2.12[22]に示すとおりである。余裕深度とは，平成10年10月の原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会「現行の政令濃度上限値を

超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について」[21]において提案された概念であり，管理期間終了後の跡地の人間による利用が制約されないようにとの基本的な考え方から,「管理期間終了後について，さまざまな人間の活動により人間が廃棄物に接触して生じる被ばくと，地下水による放射性核種の移行によって生じる被ばくに対し，廃棄物を埋設する時点で次の対策を講じておく必要がある。」と述べている。

① 人間の活動によって発生する被ばくについて

住居の建設や居住のような一般的と考えられる人間活動に対しては，それが処分場跡地で起こっても人間が廃棄物に接触することのないような処分深度を確保する。さらに，その他の事象についてもできるだけ起こることのない深度に処分することによって，人間が廃棄物に接触する可能性が十分小さく，かつ，万一人間が廃棄物に接触した場合でも安全上問題となるような被ばくが起きないようにする。

② 地下水による放射性核種の移行による被ばくについて

地下水による放射性核種の移行については，地下水流速が十分小さい地中に処分施設を設置し廃棄物を処分することや，地質条件などによっては処分施設の核種閉じ込め機能をより高くすることにより，放射性核種の処分施設からの漏出や地中での移行を抑制する。

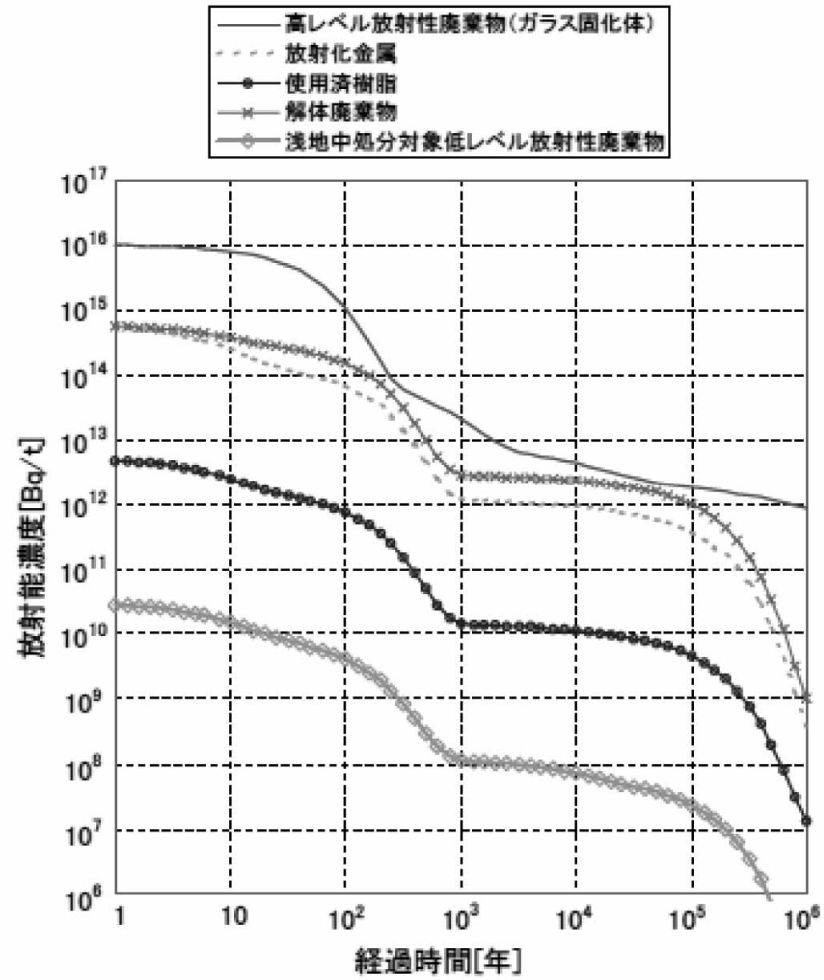


図 1.2.11 余裕深度対象廃棄物の放射能濃度の経時変化と他の放射性廃棄物との比較[22]

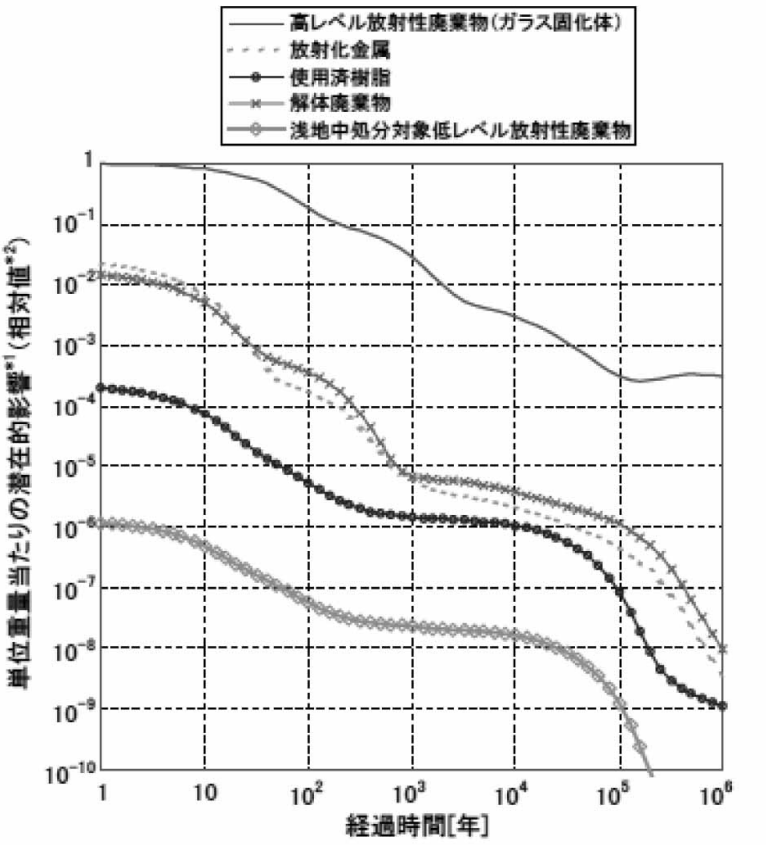


図 1.2.12　余裕深度対象廃棄物の単位重量あたりの潜在的影響（相対値）の他の放射性廃棄物との比較[22)]

余裕深度処分システムは，Safety strategy（安全戦略）の面から考えると，高レベル放射性廃棄物の地層処分システムとは大きくその安全戦略が異なっている。高レベル放射性廃棄物の地層処分システムでは，受動的安全系の確保のため，長期の地質環境の安定性が求められており，この時間枠は数十万年程度となっている。また人間活動の不確実性については，数百から数千年を超える時間枠に対して予測は不可能であり，考える生物圏での被ばく線量はあくまでも様式化されたモデルでの尺度で，代替の安全指標についても考える必要があるとしている。このような時間枠に対しては，50mから 100m程度とされる余裕深度における地質学的安定性はまったく保証されない。原子力バックエンド対策専門部会の提案を見ると，この廃棄物処分で考えられている安全は，浅地中埋設からの延長上にあり，管理期間終了後として対象とする時間枠も，高レベル放射性廃棄物の処分場閉鎖後として対象としている時間枠と異なっている。1.2.3 において示した安全委員会による「長寿命廃棄物の安全規制における共通的な重要事項」[16)]ではこのことに留意して今後の方向について議論を行っている。余裕深度処分では，図 1.2.5 で示された閉じ込め期間，耐浸出期間，拡散希釈期間や，人間と廃棄物の物理的距離が近づく接近シナリオの生起確率がすべて大きく異なっている。バリアの隔離および閉じ込め機能が期待できる時間枠は，その地質学的安定性，物理化学的性能と人間活動の変化の両面から考えなければならないが，過去の歴史や科学技術の変遷から考えて,「余裕深度」という概念が有効なのは,記録の保存などと同じく，たかだか数百から千年程度と考えられる。したがって，高レベル放射性廃棄物の処分場閉鎖後の安全評価で用いられているシナリオや浅地中埋設で用いられているシナリオをそのまま適用することはできない。すなわち 1.2.2 で示したセーフティケースの考え方あるいは 1.2.3 で示した共通的重要事項の考え方に従って，可能性のあるシナリオをすべて考慮するとともに，どのような

戦略で安全を担保しようとしているか，どのような時間枠を考えているかをきちんと整理する必要がある。端的にいえば，本来放射能インベントリや放射能濃度が低いから安全だろうと見込んで，深地層ではなく余裕深度に処分してよいだろうと考えているのに，このことが反映していないような安全評価（例えば地質環境の安定性や不変性を理由もなしに仮定して地下水シナリオによる被ばく線量で安全を評価するなど）を行うのでは，論理的な整合性は得られない。

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムと余裕深度処分システムでは，いずれも地下水シナリオを安全評価の中心に据えている。しかし，Safety strategy（安全戦略）およびAssessment basis（安全評価基盤）の面から考えるとその意味は異なっている。高レベル放射性廃棄物の地層処分システムでの多重バリアの主目的は，放射性核種の閉じ込めであり，地下水シナリオは，たとえ処分システムからの漏出があっても人間や環境に大きな影響を与えないことを示すのに用いられている。この地下水シナリオの大枠は次のようなものである。

① オーバパック破損後に容器の体積内で，ガラスからの浸出速度または溶解度にしたがって放射性核種濃度が決まる
② ベントナイト中を容器内側とベントナイト外側の掘削影響領域との濃度差による濃度勾配により拡散する
③ 掘削影響領域の体積と地下水流速（流量）にしたがってフラックスが決まる
④ すべてが地下水に渡される
⑤ 地下水中では１次元の移流拡散が収着により移行遅延を受けながら起こる。核種は地下水生物圏境界（GBI）に到達する時間が変化するだけで GBI に到達するフラックスは保存される。
⑥ このフラックス（ガラス固化体１本分）に全固化体本数を乗じてGBIに到達する全フラックスとする。
⑦ このフラックスが河川流量により希釈される。
⑧ 生物圏に入った核種は世界的に共通して用いられている生物圏モデル（ボックスモデル）に従って挙動し標準的住民集団に被ばくを与える。
⑨ その時点で生物圏に流入した核種フラックスは，生物圏およびその周囲（海など）で希釈され，生物圏に対する残留効果を与えることはない。

このように，高レベル放射性廃棄物の地層処分システムでは，天然バリアのうちの地下水移行では，移行遅延のみが考慮されており，核種がGBIに到達する時間的遅れと崩壊を考えなければ，すべての放射性核種は固化体からGBIに移されることになっている。すなわち，このシナリオでは，地下水移行における収着遅延による時間的希釈と河川による物量的希釈により安全を担保しようとしている。より現実的に考えれば，地下水による核種の移行は，(多くのフィールド実験でトレーサの回収率が100％ではないことからもわかるように，2次元的または3次元的に起こり空間的希釈が起こるはずであるので，掘削影響領域からのフラックスがGBIまで保存的に運ばれるとは考えられない。すなわち，このような極度に保守的なシナリオとモデルは，この地層処分システムの安全戦略が，放射性核種の高度の閉じ込めにあり，地下水シナリオは，核種の漏出があっても人間や環境に大きな影響を与えないことを示すのに使われているからであり，それでも評価の結果が線量目標値に比べてはるかに低くなるからである。

これに比べて余裕深度処分では，処分対象廃棄物の放射能濃度が低いので，より浅い深度でも安全を担保できるだろうと直感的に考えられている。化学毒性廃棄物は，より濃度が低ければ天

然にあっても有害ではない物質が，人工的に濃集された結果，毒性を示すような廃棄物である。このような廃棄物を処分することを考えると，一定期間は閉じ込めを図るが，それ以降は時間とともに空間的希釈が起こり深刻なリスクをもたらさないだろうと期待されている。化学物質には放射性崩壊のような毒性の減衰は期待できないので，この「一定期間」が具体的に示せないため「永久」という用語が用いられているが，この「永久」は地層処分の目標とする時間枠から見るとより近い未来を意味している。このような考察からすると，余裕深度対象廃棄物の処分の安全戦略では，化学毒性廃棄物と同様の見方をすることができる。すなわち，管理期間終了後には，余裕深度という深地層に比べるとより浅い深度で，コンクリートなどのバリアで保証できる，地層処分で対象とする時間枠に比べてより短い期間（千年程度）について閉じ込めを図り，それ以降については，減衰した結果の放射能の濃度とインベントリから，たとえ甚大な漏出があったとしても，天然バリアによる十分な物理的（空間的）希釈効果が期待できるようにするという安全戦略が可能であろう。このような安全戦略から地下水シナリオを考える場合には，高レベル廃棄物の地層処分において用いられている移行モデルをそのまま用いることはできない。このモデルでは，移行媒体である地下空間における希釈を一切考慮していないからである。現実的には，実際に起こっているさまざまな物質による汚染は，2 次元または 3 次元的に拡がっており，高レベル廃棄物の地層処分において用いられている移行モデルのように，移行経路が限られておりそこにフラックスが保存されるような例は，河川の汚染等の極端な場合に限定されている。また，異なる移行経路をたどる核種フラックスがすべて特定の GBI に到達する（固化体本数を乗ずる）形で移行することも考えにくい。我々が想像する最悪の汚染状況というのは，その地域一帯が汚染してしまうような状況である。このように考えると，地下水における移行においては，少なくとも，堆積岩系では媒体の広がりにより，結晶岩系では亀裂の交差により，2 次元的な分散または拡散による拡がりが起こると期待できる（深度方向の地下水の混合についてはどの程度かは不明である）。また透水係数の変化により地下水流量が増える場合には，地下水が移行経路に外部から流入するはずであるので濃度希釈が起こるはずである。最終的には，それぞれの経路により移行したフラックスのうちどの程度が特定の GBI に到達し，河川水で希釈されて生物圏に影響するかを考える必要がある。このようなモデルは，高レベル廃棄物の地層処分において用いられている移行モデルと比べてより精緻なものであり，地下水流動についてより詳細なサイトに固有の情報が必要となる。その一方で，処分深度ははるかに浅いので，余裕深度ではより詳細な情報がより容易に得られるということができる。このように，安全評価で用いるモデルは，想定する安全戦略により意味が異なる。浅地中埋設における管理期間終了時の安全評価においても，居住シナリオ，建設シナリオとともに地下水シナリオが用いられる。このときの地下水シナリオは，現実に放射性物質が含まれているかもしれない環境における人間活動の代表として選ばれているのであって，その時点ではなく将来の潜在的危険性を評価するためではない。このときの放射性物質が含まれているかもしれない物質は，地表にあるため，人間活動や天然現象によってその物理的化学的状態（濃集状態）が変化するかもしれないという意味では，クリアランスと同等の基準が採用される必要がある。クリアランスの場合ではこのことを考慮して，1 mSv/y の個人線量目標値を達成するため，線源の重畳を考慮して，各々の廃棄物に対して 10 μSv/y という厳しい線量拘束値を与えている。これに対して，管理期間終了時には，人間から隔離された状態，言い換えれば受動的管理状態にある地層処分や余裕深度処分による廃棄物の，将来もたらすかもしれない潜在的危険性を評価する地下水シナリオとは意味が異なる。後者において，廃棄物はその物理的化

学的性状が変化させられることはなく地下の特定の位置にあり，全体として，環境全体に影響を与える（地下水シナリオのような場合。その他のシナリオでは影響が局所的または被ばく者数が限定される場合もある)。またその影響は潜在的な可能性としての仮想的な値であることも忘れてはならない。このような場合には，線源がいくつも重なることはないと考えて，1 mSv/y の個人線量目標値の数分の一程度の線量拘束値を設定するのが妥当であろう。

1.2.5 まとめ

以上，長寿命放射性廃棄物の処分に関連して近年重要であると指摘されているセーフティケースの概念と，わが国における長寿命放射性廃棄物の処分の安全確保に対する考え方を紹介した後，種々の放射性廃棄物の処分システムを，セーフティケース構成要素のうち最も基本的な要素である安全戦略の面から見て，比較しながらその問題点を考察した。この過程で，これらの処分システムの安全性を考える場合には，特に，時間枠，不均質開放系地質環境についての考察，これに対処する新しい方法論が必要であることや，人工バリアシステムの製造・建設・操業・閉鎖の実現可能性との関連付けについては将来の課題であることなどが明らかになった。また，考察においては，高レベル放射性廃棄物の処分システムと比べて，他の処分システムのセーフティケースが不備であるという形で課題を示したが，見方を変えると，この遠因は，高レベル処分システムのセーフティケースの不備，すなわち，セーフティケースの要素が正しく示されておらず，理解されていないことや，シナリオの意味や不確実性の評価などが正しく示されておらず，システムが十分最適化されておらず冗長であるとも考えられる。したがって，より現実的で合理的な処分システムを目指す場合には，これらについての正しい理解が重要となる。

このように他の処分システムと比較対照しながらセーフティケースを考えることにより，それぞれのシステムを単独で考える時よりもより明確にセーフティケースの構成要素の問題点を考えることが出来ることが明らかになった。本検討では，セーフティケースの最も重要な根幹となる安全戦略について考察したが，まったく同様な形で，セーフティケースのその他の構成要素（安全評価基盤，証拠，解析および論拠）の面からも考察が可能でありまた必要でもある。さらに，個々の研究開発についても，セーフティケースにおける位置づけを明確にすることが必要である。

1.2.6 参考文献

1) 原子力安全委員会原子力安全研究専門部会：“原子力の重点安全研究計画”，原子力委員会原子力安全研究専門部会，平成 16 年 7 月，2004
2) 原子力環境整備促進・資金管理センター：高レベル放射性廃棄物地層処分に関する研究開発全体マップの整備，原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-04005-1，2005
3) 原子力安全・保安院：原子力安全・保安院の安全研究ニーズについて，2004
4) 日本原子力学会：平成 16 年度原子力安全研究ロードマップ整備，2005
5) 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 年度取りまとめ－，2005. －分冊 1 深地層の科学的研究－，JNC TN1400，2005-014，－分冊 2 工学技術の開発－，JNC TN1400，2005-015，－分冊 3 安全評価手法の開発－，JNC TN1400，2005-016，－地層処分技術の知識化と管理－，JNC TN1400，2005-020.
6) 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－，1999

7) NRC：One Step at a Time, The Staged Development of Geologic Repositorires for High-level Radioactive Waste, Committee on Principles and Operational Strategies for Staged Repository Systems, Board on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies, the National Academy Press, Washington, D. C. , 2003
8) IAEA：Geological Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standard Series DS154, Draft Safety Requirements No. WS-R-4, 2005
9) OECD/NEA：Post-Closure Safety Case for Geological Repositories －Nature and Purpose－, NEA No. 3679, 2004. 邦訳：原子力環境整備促進・資金管理センター：セーフティーケース統合化グループ（IGSC）に関する2004年出版物翻訳集, 2005
10) 原子力安全委員鈴木篤之：原子力と安全性－「手続き的安全性」の重要性－, 第 10 回原子力安全シンポジウム, 2005
11) OECD/NEA：The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, Paris, France, 16-18 April 2002, (2002), or The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety －Lessons Learnt from April 2002 Workshop in Paris, France, NEA No. 4435, 2004
邦訳：原子力環境整備促進・資金管理センター：セーフティーケース統合化グループ（IGSC）に関する2004年出版物翻訳集, 2005
12) World Commission on Environment and Development. ：Our Common Future, Oxford University Press, The report of the Brundtland Commission on sustainable development, 1987
13) ONSRAF/NIRAS, SAFIR 2 ： Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, NIROUND 2001-06E, 2001
14) IAEA：The Principles of Radioactive Management, IAEA Safety Series No. 111-F, 1995
15) ICRP：Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, 1999
邦訳：日本アイソトープ協会ICRP勧告翻訳検討委員会：ICRP Publication 81: 長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告, 2000
16) 原子力安全委員会：放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について, 2004
17) 原子力委員会新計画策定会議：第19回資料第2号放射性廃棄物処理処分について, 2005
18) 原子力安全委員会：第2回埋設分科会資料, 再処理施設等から発生するTRU核種を含む放射性廃棄物の物量及び放射能濃度について（電気事業連合会, 日本原子力研究開発機構作成), 2005
19) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構：TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-13, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005
20) 原子力発電環境整備機構：ニアフィールドプロセスに係る国際ワークショップ, 2005.12.7-9
21) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について, 1998
22) 原子力安全委員会：第2回埋設分科会資料, 浅地中処分に関する政令濃度上限値を超える発電所廃棄物の物量と放射能濃度について（電気事業連合会作成）, 2005

（東北大学　杤山　修）

1.3 地質環境の観点で抽出された深部地質環境の調査・解析技術に関する研究

1.3.1 はじめに

本研究委員会では，瑞浪超深地層研究所で実施すべき研究のみならず，地層処分の実施（サイト選定，概要地区の選定，精査段階それぞれの段階）において必要と考えられる深部地質環境の調査・解析技術に関する研究開発課題を提示し，かつ具体的に調査研究および手法等の開発を行うことを目的としている。本研究では，これまでの当委員会での議論，検討を踏まえ，以下に示した研究課題 1～3 を設置し調査研究を実施してきている。本報告書は，それらの調査研究成果のうち主に平成 17 年度に実施した内容についてまとめたものである。

（研究課題の設定）

研究課題 1：断層活動に伴う断層周辺岩盤中の割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に関する研究

研究課題 2：割れ目シーリング（充填鉱物）のナチュラルアナログに関する研究

研究課題 3：ニアフィールドコンセプトの再構築に関する検討／将来研究課題の抽出に関する検討

1.3.2 研究課題 1～3 に関する調査・解析技術の開発の必要性

我が国の地下深部地質環境では，サイト選定段階のみならず，地下坑道や処分場建設の各段階において，断層や割れ目帯といった地層処分場の設計や安全性に影響を及ぼすと考えられる地質構造に遭遇することを避けることはできない。これらに関しては，これまでも様々な地質学的および地球化学的な研究成果が報告されているものの，地層処分におけるサイト選定や安全評価などに直接的に活用できる地質学的な十分な情報が必ずしも得られているわけではない。とくに将来的な処分場の設計や建設・操業などの段階に対して求められる情報の１つは，断層周辺の断裂構造，断層運動に伴う新たな割れ目形成の有無や，新たな割れ目が形成された場合の範囲と量，そしてそれらの割れ目の長期的な挙動（成長やシーリング）などに関するものである。また新たな割れ目形成における地下施設や設計等への影響がどの程度あると考えられるのか，などといった疑問に対する解答を準備しておくことも処分技術の実用化の観点から必要と考えられる。そのためには実際の断層周辺での緻密な地質調査を実施し，岩盤中に認められる割れ目の形態と分布などから空間的な割れ目発生に関する情報を得ることが有効と考えられる。本研究ではこのような背景のもと，現地における割れ目形態の詳細調査を実施し，併せて断層活動に伴う新たな割れ目の発生をどのように調査するのか，また新たに発生した割れ目をどのように定義するのか，といったフィールドでの調査に基づいて具体的な検討を進めている。今年度は，昨年度までの阿寺断層近傍の花崗岩を主体にした調査に加え，調査地区を拡大し流紋岩地区において，これまでの割れ目形成に関する知見と同様の傾向が確認できるのかどうかの比較検討を開始した。

また 2 つ目の研究課題として，新たに発生した割れ目が天然の環境下でシールドされる可能性があるのか。またシールドされる場合，どのようにシールドされるのかについて，その可能性と現象に関して，ナチュラルアナログ的観点からの割れ目充填鉱物に関する調査研究を開始した。

そして 3 つ目の研究課題として，地下坑道周辺での新たに発生した割れ目が設計やニアフィールド(NF)環境にどういった影響を及ぼすのか，また物質移動現象との複合現象として，NF においてどのようなシナリオを想定することが現実的なのかの検討を開始した。これらは，とくに NF における操業期間や処分場閉鎖，坑道埋設後の工学的，地球化学的ならびに物質移動に関する現象を再検討し，現実的な解析シナリオを準備することを目的とするものであり，現実的な safety case を構築することに資するものである。このような NF 環境における複合反応に関する現象を把握することは，今後の地層処分研究において不可欠の課題であると言える。

本年度は，これらの３つの研究課題についてこれまでの研究成果（途中経過も含め），実施した調査研究結果を以下に述べる。

1.3.3 研究課題１：活断層を含む断層活動に伴う割れ目形成に関する情報収集と現場での調査手法開発に関する研究

1.3.3.1 研究目的

研究課題１における調査研究の目的は以下の通りである。

① 断層運動による新たに発生したと思われる割れ目を抽出し，その特徴的形態を明らかにし，新たな割れ目形成の可能性とその形態的特徴を把握すること

② 断層運動による割れ目発生の量，密度等の定量的変化の傾向性を把握すること

③ 上記のための，簡便な現地調査手法を構築すること

またこれらの調査結果を用いて，最終的には地下処分場の設計施工方法との連携やニアフィールド環境における物質移動との複合現象評価手法の構築を目指す。

1.3.3.2 これまでの主な実施内容および成果

これまでの主な研究成果の概要および今年度実施した内容と結果について以下に示す。

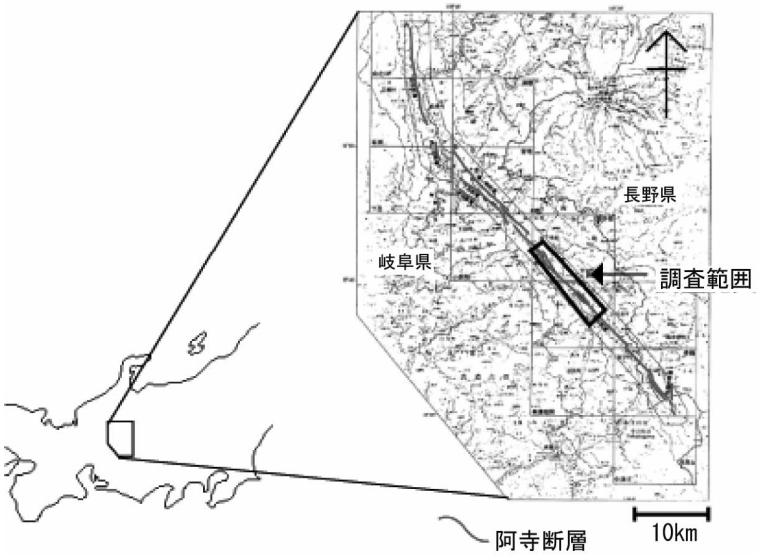


図 1.3.1 調査地域

本調査研究では，断層運動およびその影響によって生じたと考えられる割れ目について，天然の実例をもとにした研究を行っている。その事例として，中部地方において明らかに活断層と認知されているものの中から阿寺断層を調査対象として抽出し，調査研究を進めている（図 1.3.1）。

調査地域は，岐阜県中津川市付知町から同県中津川市川上を走る NW-SE 方向の阿寺断層周辺の岩盤（花崗岩と流紋岩）である。昨年度までは，主に調査地区の南部に広がる苗木花崗岩についての調査を進めてきた。その結果の詳細については，昨年度までの調査報告を参照されたい[1)]。

今年度からは，阿寺断層の北部半分に分布する濃飛流紋岩中の割れ目形成に注目した調査を開始した。その目的は，阿寺断層の運動に伴って異なった岩体中に形成される割れ目が同様の形態を示すものかどうかの確認を行い，これまでの構築してきた断層周辺の岩盤中に形成される割れ

目の特性についての一般的な傾向性が存在するものかどうかを確認することにある。
なお，苗木花崗岩体のこれまでの主な調査結果は以下の通りである。

(1) 結果１：割れ目の構造と方向性

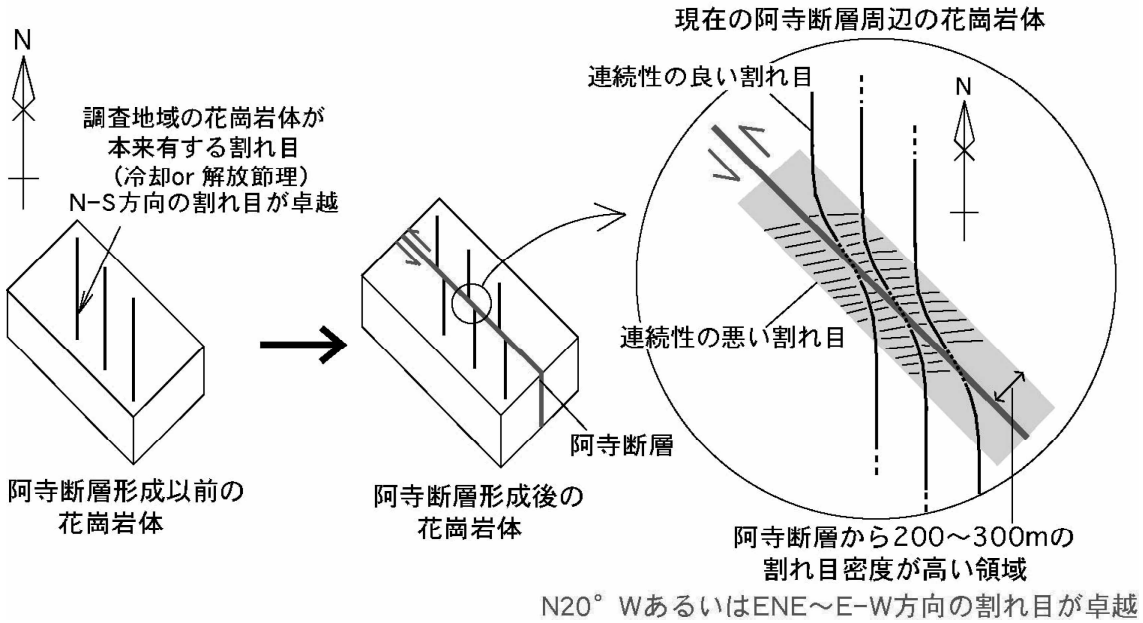


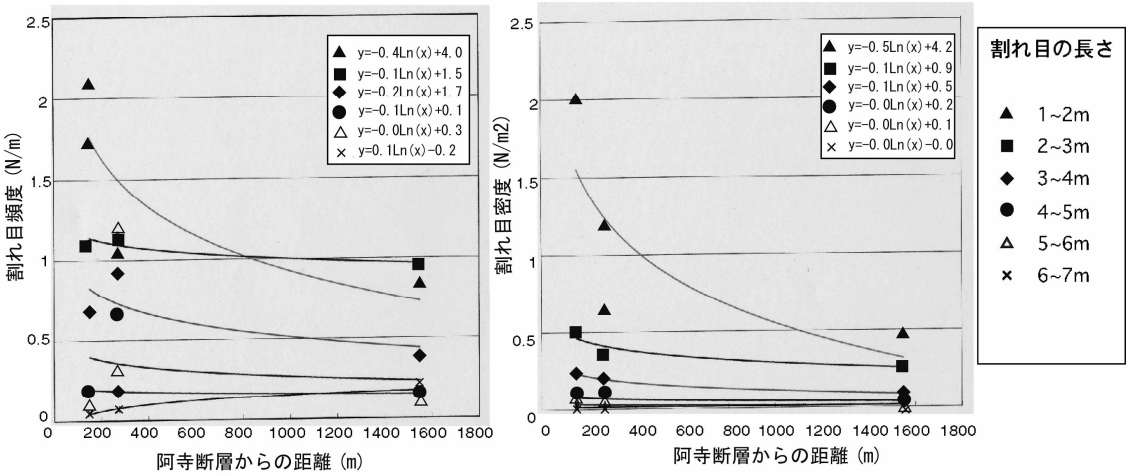
図 1.3.2　断層周辺割れ目形成モデル

阿寺断層周辺の露頭約 400 ケ所について確認された約 2000 本の割れ目データをもとに，阿寺断層周辺およびその近傍の花崗岩体中に発達する割れ目には，断層から離れるにしたがって NW 方向の割れ目へと変化する傾向を確認することができる。

フィールド観察，データを基に断層運動と引きずりに伴う割れ目方向の回転を模式化したモデルを図 1.3.2 に示す。これまでのフィールドにおける割れ目調査から，阿寺断層周辺の岩体では，割れ目密度の高い領域が約 250mの範囲で観察されることが分かってきた。とくにこの断層周辺の領域では，図 1.3.2 に示すように，花崗岩体全体に分布する NS 方向の連続性のよい割れ目が，阿寺断層の運動によって引きずられた様相を示す。さらに，断層周辺ではこの引きずりに伴う回転運動によって，周辺の岩体にさらに小規模の割れ目が新たに形成された可能性が考えられる。もし，このような考え方（モデル）が適応できるならば，断層運動によって後生的に形成された割れ目を抽出することが可能であることを示す。

(2) 結果 2：断層からの距離と割れ目密度，頻度との関係

阿寺断層からの距離と割れ目密度，頻度について，まず全体的な傾向として，断層から離れるに従って割れ目密度，頻度ともに減少する傾向にあることが示される。そして減少する割れ目は，連続性がおおよそ 3m以下の割れ目において顕著にあらわれる（図 1.3.3）。一方，連続性のよい割れ目は，ほとんど断層からの距離とは無関係に，ほぼ一定の割れ目密度と頻度を有していることが確認できる。



・頻度のデータはバラツキが多いのに対し、密度のデータはほぼ曲線上に収まっている。
　→密度による割れ目評価方法が妥当であると言える。
・連続性の悪い割れ目は断層に近づくほど密度が指数関数的に増加するのに対し
　連続性の良い割れ目は断層からの距離に関わらず密度がほぼ一定である。
　→断層の影響により形成されるのは主に連続性の悪い割れ目であると考えられる。

図 1.3.3　断層からの距離と割れ目頻度・密度の相関

このことから，阿寺断層形成以前に花崗岩体中には，NW 系の連続性のよい割れ目が存在しており，その後の阿寺断層の形成と運動に伴って，その周辺には連続性のわるい割れ目が新たに形成された可能性が考えられる。さらに岩石マトリクス中に形成された微小割れ目の割れ目密度について，その分布解析を行った結果からも，NW 系の連続性の良好な割れ目は，岩体中により初期の段階から形成されており，その後の阿寺断層の動きによって形成された後生的な割れ目ほど，連続性がわるいとする考えを指示するデータが得られつつある。つまり，断層運動にともなう二次的な影響，割れ目形成は，おそらく花崗岩体が地表近くあるいは地表に露出したのちに形成された可能性があり，その場合，地下深部で受けていた封圧からは解放されることとなり，より樹枝状の微小割れ目を多く形成させる要因となることが考えられる。

(3) 結果 3：阿寺断層近傍における断層運動と割れ目形成の関係

これまでのフィールドにおける割れ目観察，そしてその方向や頻度などといった割れ目の属性データ解析から示される，阿寺断層近傍での割れ目分布とその形成，そして断層運動による影響については，図 1.3.4 に示すようなイメージを構築することが可能である。

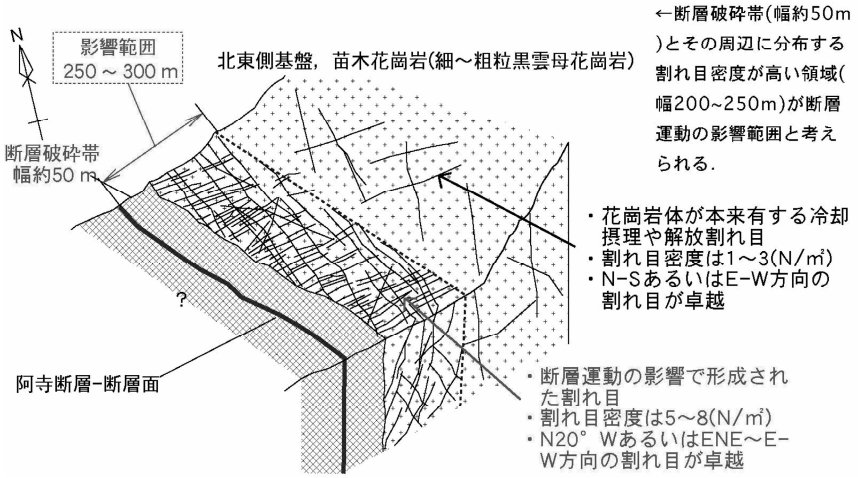


図 1.3.4　断層運動と影響範囲

この地域の苗木花崗岩体は，約 70Ma 前後に形成され，その後冷却過程を経て，隆起し現在の地域に位置する。いわゆる阿寺断層が，どの段階で形成されたかについては必ずしも明確ではないが，断層破砕帯中にマイロナイトなどが確認されていることから，地下深部にある段階から阿寺断層の前進となる断裂構造が形成されていたと考えられる。これらの段階で形成された断裂構造が，その後も継続的に活動していたかどうかについて議論できるデータは現在のところ確認されていない。しかし，第四紀以降での阿寺断層の左横ずれによる岩盤の移動は，地形にも断層崖などを形成するなど，明確にその活動履歴が確認されており，現在，阿寺断層近傍で確認できる割れ目は，これらの長期的な断層活動による影響の積算として考えることが妥当と思われる。そしてこれまでの割れ目形態や分布状態から，NW 方向の割れ目ほど，初生的な割れ目である可能性が高い。おそらく岩体の上昇に伴って，比較的連続性の良好な割れ目が形成され，その後の阿寺断層の形成，継続的な運動によって，岩体マトリクス中には樹枝状をなす，より微小な割れ目が形成された可能性が高い。また断層周辺では，断層の左横ずれ運動に伴って，割れ目全体が大きくローテーション（回転運動）したものと考えられる。

（これらの研究成果の一部を第 14 回環境地質学シンポジウム論文集[2] に発表した。）

1.3.3.3 今年度の調査内容と主な結果

本年度は，これまでの苗木花崗岩体において実施した研究成果の一般性を確認することを目的に，阿寺断層が切っている濃飛流紋岩についても断層周辺に関する同様の割れ目調査を開始した。その初年度としての調査内容，現状（一部結果）について以下に述べる。

(1) 調査地域概説

現地調査は，阿寺断層沿いの付知地域北東部の濃飛流紋岩の分布する幅約 1.5 km，長さ約 10 kmの範囲で行った(図 1.3.1)。阿寺断層周辺の断層岩類等に関する記載は，金折ら[3),4)] によって報告されているが，これまでにも述べてきているように断層破砕帯の幅に関する広域的な調査はこれまで行われていない。阿寺断層は広域的な特徴として，3 本の断層セグメントとして左雁行配列することが示されているが，調査地域内には他の断層が存在せず，阿寺断層を構成する単一の断層による運動の影響を検討することが可能である。

これらの既知データをもとに今年度，調査を行った露頭地点は，約 400 地点に及ぶ。今回の具体的な調査目的／内容は以下の通りである。また，今回阿寺断層近傍のボーリング調査を以前行った防災研究所から岩石コアを入手することができた。本研究ではこれらの岩石コア中の割れ目および割れ目充填鉱物の深度方向の調査を併せて行った。その成果については，とくに研究課題 2 の項目（シーリングに関するナチュラルアナログ研究）の部分で触れる。

(2) 濃飛流紋岩中の割れ目調査実施内容

① 断層から直交方向における空間的な割れ目分布密度，形態，走行傾斜の測定
② 数十～数百平方メートル以上の岩盤露頭での割れ目詳細調査（割れ目等の地質情報を取りまとめた“露頭カルテ”の作成）と割れ目解析
③ ボーリングコアによる断層周辺岩盤の割れ目と充填鉱物分析

断層運動による影響は，新たな割れ目の形成だけでなく，割れ目の分布，密度，形態そしてその後の地下水などとの二次的な反応によって形成される割れ目充填物などにもその痕跡が示されるものと考えられる。調査では，これらの情報にも注目した調査を進めている。また野外での割れ目情報をできるだけ一般化し，客観的に解析するためには，均質下した情報として取りまとめることが重要である。そのために，割れ目に関する各種情報を「露頭／割れ目調査カルテ」（平成 15 年度成果報告書参照[5)]）にデータシートとして取りまとめている。以下に今年度に行った調査

結果を示す。

1.3.3.4 調査結果と主な考察について

(1) 調査地域の地質および調査概説

阿寺断層は，中津川市付知町北部の付知川とほぼ平行に走る（阿寺断層によって破壊された弱線部分が付知川になったと考える方が自然である。[6)]）。その付知川両側に分布する濃飛流紋岩と東側に分布する苗木花崗岩について，今回，9 ルートの約 200 地点での割れ目調査を行った（図 1.3.5）。

(2) 割れ目形態の特徴について

① 濃飛流紋岩と苗木花崗岩の境界

両岩体の境界は，部分的には必ずしも断層とは限らないが，今回確認した露頭をその位置関係から，阿寺断層の一部を構成していることが確認された。今回確認することのできた露頭では，断層によって花崗岩と流紋岩が黒色の断層ガウジを挟んで接しており，両岩体ともにもとの岩石組織の一部を残しているものの破砕が著しい（図 1.3.6）。

② 阿寺断層近傍の割れ目状態（その 1：断層から 20 － 45m）

阿寺断層近傍では，幅数十mにわたって著しい岩盤の破砕が認められる。おおよその割れ目密度は，数本～10 数本/mの割れ目密度を有する。

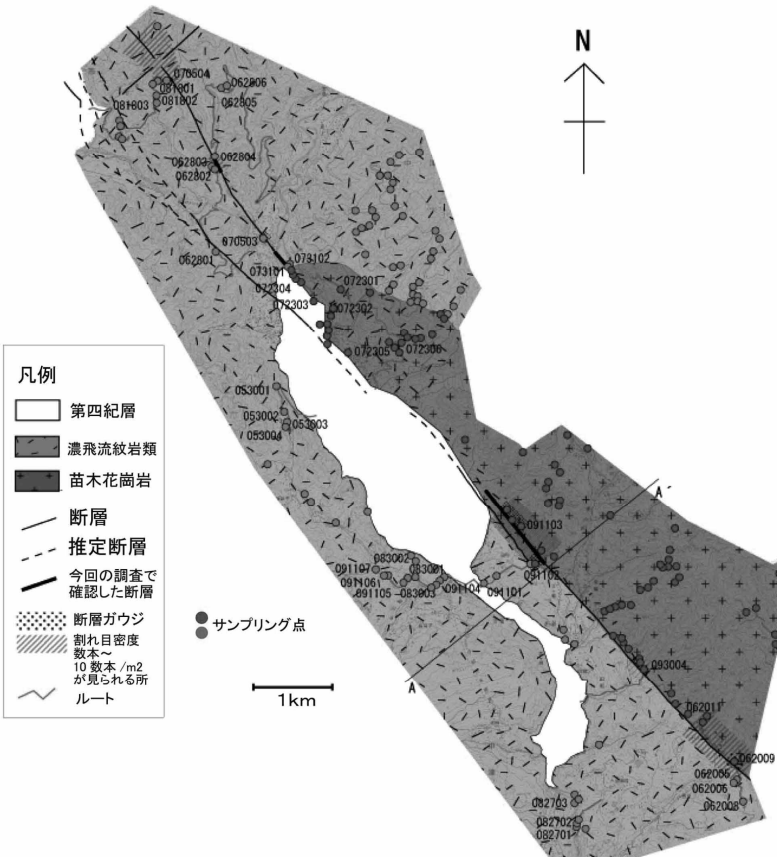


図 1.3.5 濃飛流紋岩調査範囲と調査ルート

③ 阿寺断層近傍の割れ目状態（その2：断層から80 － 120m）

阿寺断層から離れるにしたがって破壊状態は緩和されるものの岩盤の破壊は顕著である（図1.3.7）。しかし，割れ目密度もその程度が徐々にひくくなる。なお，割れ目密度に関しては後述する。

④ 阿寺断層近傍の割れ目状態（その3：断層から数百 － 1000m）

濃飛流紋岩の岩体全体に広がると思われる直線的な単一の割れ目が確認される。これらの割れ目は3次元的に広がっており，数十cm～1，2mサイズの立方体のブロックを形成する（図1.3.8）。

これらの割れ目の方向および割れ目密度に関しては，次にその調査結果について示すが，おおよその傾向として断層周辺ほど連続性の悪いネットワーク状の割れ目が形成され，断層運動に伴う影響が現れているものを考えられる。こういった変化の状態は，苗木花崗岩においてもほぼ同様に認められるものである。

図1.3.6　阿寺断層破砕帯

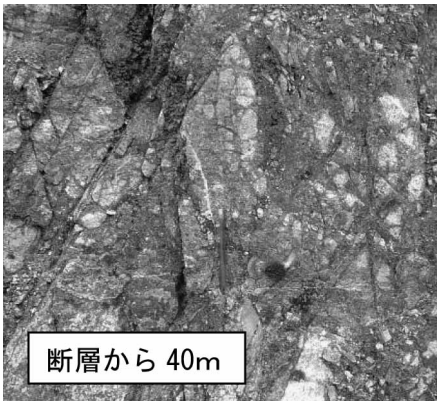


図1.3.7　断層運動による二次的割れ目

図1.3.8　濃飛流紋岩中のﾊﾞｯｸｸﾞﾗｳﾝﾄﾞ割れ目

(3) 断層からの距離と割れ目の方向について

調査地区内の割れ目の方向について，調査ルートをI～IIIに北側から分類し，岩体内に発達する割れ目（総数約850本について）の方向について解析を実施中である（図1.3.9）。

これまでのおおよその調査から，その方向については割れ目方向の阿寺断層による左横ずれの傾向が確認されつつある。

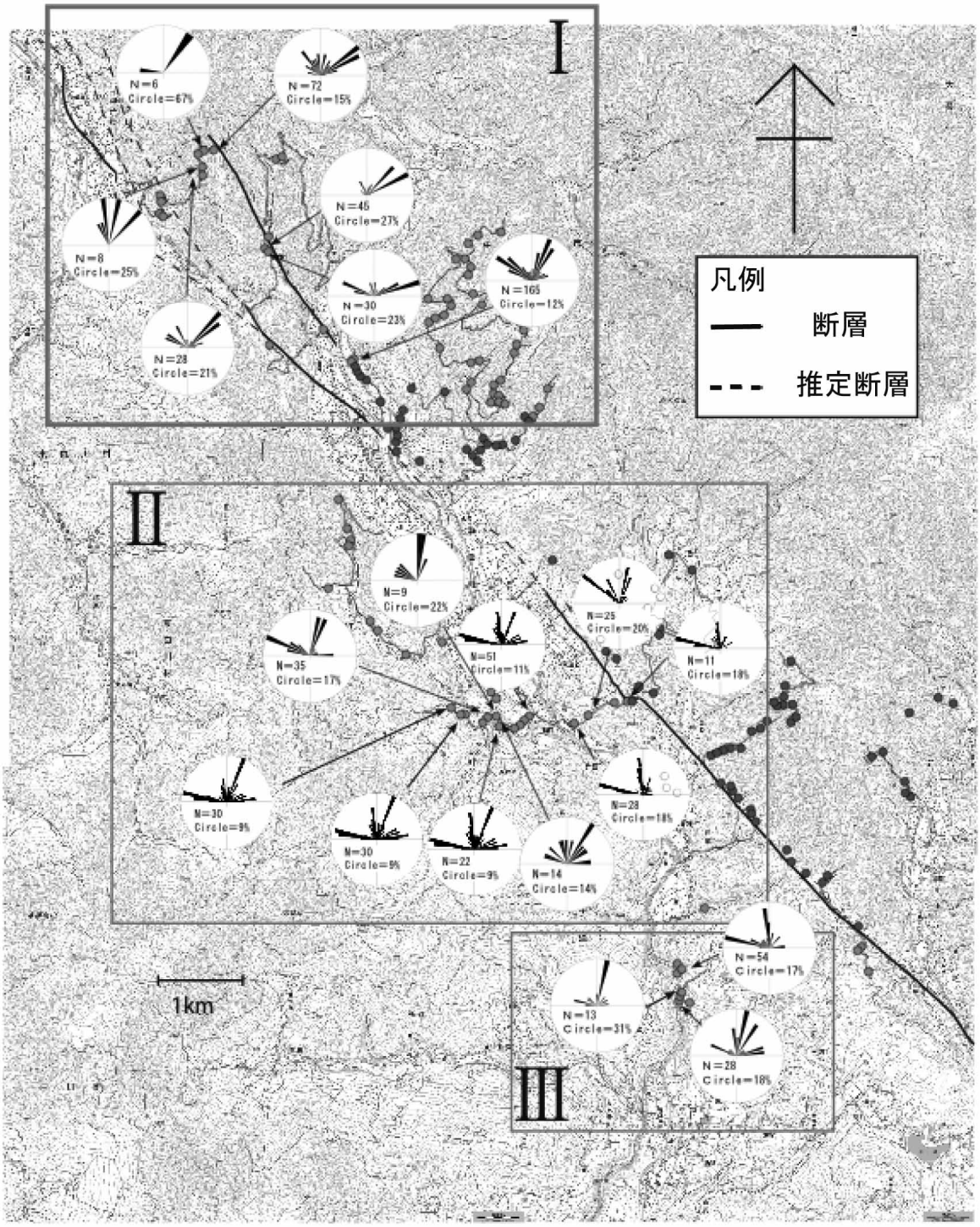


図1.3.9　調査地域に認められる割れ目の主な方向

(4) 断層からの距離と割れ目密度について

断層からの距離に応じて，その岩盤中の割れ目密度に関してのデータの取りまとめも実施中である（図 1.3.10）。

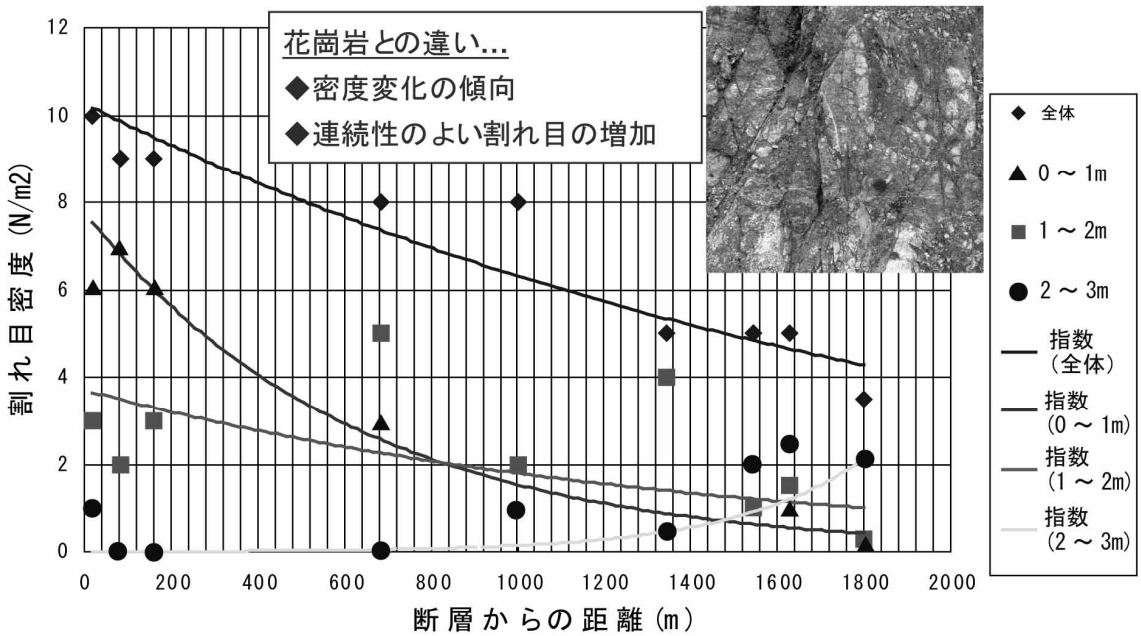


図 1.3.10　濃飛流紋岩中の割れ目頻度と断層からの距離との相関

これらの割れ目密度についての傾向として，連続性のよい 2～3m以上の単一の割れ目よりもそれよりも短い割れ目（露頭ではネットワーク状を呈する）の密度が断層に近づくほど増加する傾向にある。これはこれまでに調査を行ってきた苗木花崗岩と同様の変化傾向である。一方，連続性の良好な割れ目については，断層から離れるにしたがって若干ながら増加する傾向をしめす。これについては，苗木花崗岩の調査では確認できなかった傾向であり，1 つの可能性として，濃飛流紋岩の割れ目形成として，バックグランドを形成する割れ目が後生的割れ目によって切断され，断層近傍になるほど連続性の悪い割れ目が見かけ状形成されつつあるように見えるのかもしれない。これについては今後の詳細調査を行う予定である。

1.3.3.5　まとめ

① 断層周辺割れ目の形態や分布，状態について調査した結果，濃飛流紋岩においても断層周辺の約 150mの範囲での岩盤の破壊が確認できた。

② 形成された後生的な割れ目は，苗木花崗岩の場合と同様に連続性の短いもので，かつネットワーク構造を有するものが主体である。

③ 左横ずれの断層運動に伴って，初生的な割れ目および後生的な割れ目両方とも回転運動の影響を受けている可能性がある。

今後は，これらの知見をもとに流紋岩中に発生する割れ目と花崗岩中に発生する割れ目形態，破壊構造（組織）などの詳細な調査を行う予定である。

1.3.4 研究課題2：割れ目シーリングのナチュラルアナログに関する研究

（坑道周辺（ニアフィールド環境）における物質の移動経路の二次的物質（鉄酸化物，炭酸塩など）による自己シーリングプロセスと物質移動特性への長期的影響の検討）

1.3.4.1 研究目的

研究課題2における研究目的は次ぎの通りである。

① 岩盤力学，地球化学，物質移動などの境界領域として，これらの複合現象についての現実的なデータ，解析手法，モデルの構築を行う

② 地下水-岩石反応に伴うシーリング材，炭酸塩鉱物の沈澱や酸化還元反応に伴う水酸化鉄等酸化物の沈澱による坑道周辺環境の長期的な変化を検討する

③ 現実的な物質移動（吸着・固定）現象に即したKd等のデータセットの構築を行なう

④ 「ナチュラルアナログ」による現実的な現象の洗い出しを行なう

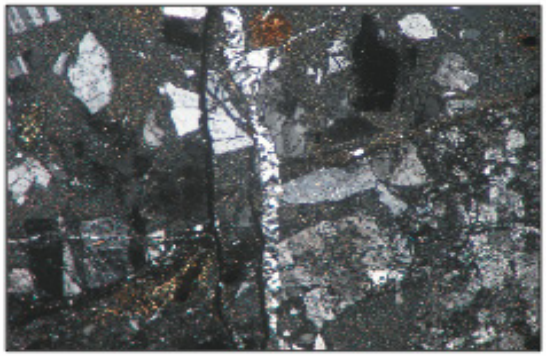
これらは，研究課題1で得られる「新たに発生する割れ目」という情報をもとに，将来の地下空間において，とくにニアフィールド近傍で遭遇し，処分システムに影響を与えると考えられる割れ目の分類と，それらの割れ目を介した人工バリア材等と天然バリアとの反応についてのより現実的なFEPとSafety caseを構築することを最終的な目的として実施するものである。

1.3.4.2 今年度実施内容および予察的検討結果

今回実施したのは，阿寺断層近傍で掘削された岩石コアの微小割れ目の充填鉱物についての調査である。

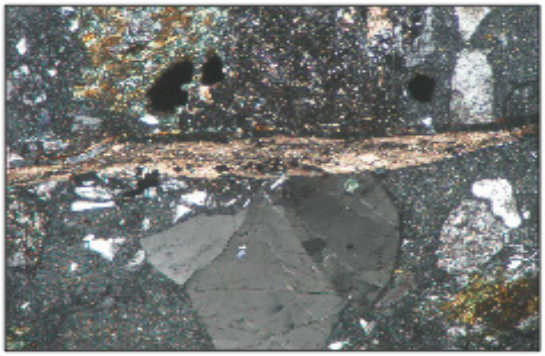
ボーリングは，付知町内の阿寺断層から約30m東側から約60度南傾斜で断層面に向けて450mほど掘削されたものである。そのボーリングから，今回約20地点の岩石コアサンプルを採取し，岩石コア中に発達した割れ目充填鉱物の種類や充填状態についての調査を行った。これまでの調査結果として，濃飛流紋岩中の割れ目を充填する特徴的な充填鉱物について図1.3.11に示す。

また，現在おこなっている深度と割れ目充填鉱物の種類や充填状態について取りまとめを行っている一覧リストを図1.3.12に示す。



Quartz vein (23.18~23.26m)

hogehoge

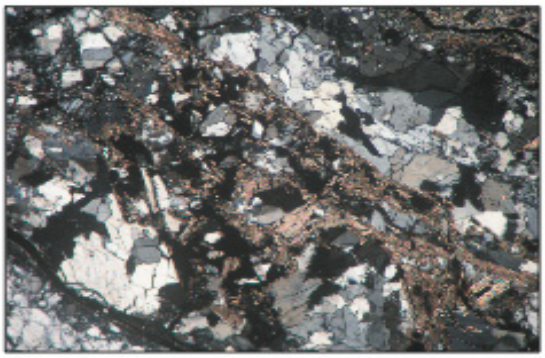


Calcite vein (48.74~48.82m)

hogehoge

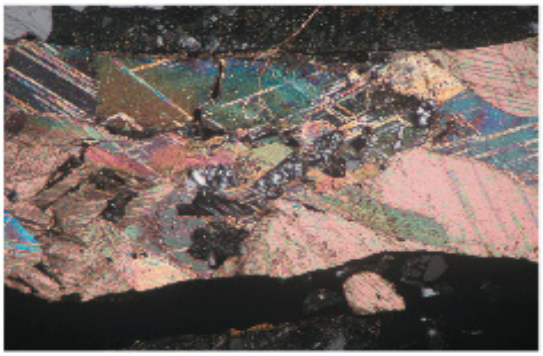
Open crack (285.47~285.64m)

hogehoge



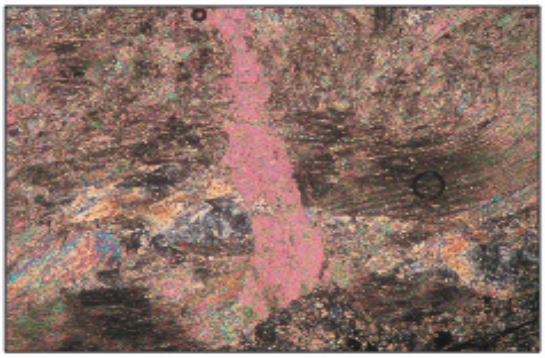
Quartz vein including calcite (58.69~58.73m)

hogehoge



Calcite vein (23.18~23.26m)

hogehoge



Calcite vein (62.17~62.26m)

hogehoge

図 1.3.11　濃飛流紋岩中の割れ目に確認される充填鉱物とその産状

コアの深度	実際の深度m～も	コア形状	割れ目等	薄片写真	元の組織を残しているかどうか	石英	斜長石	黒雲母	充填鉱物	充填鉱物の写真
27.30～27.40	22.36～22.44	短柱状コア	特になし		残している			一部変質して緑泥石になっている。	なし(オープンクラック)	
28.30～28.40	23.18～23.26	短柱状コア	特になし		残している	割れ目の中にカルサイトが充填している。		変質して緑泥石になっている。	カルサイト／石英	
37.10～37.20	30.39～30.47	短柱状コア	粘土含有破砕角礫(礫>>粘土)							
37.80～37.90	30.96～31.05	短柱状コア	粘土含有破砕角礫(礫>>粘土)							
39.40～39.50	32.27～32.36	棒状コア	特になし		残している	割れている。がさがさした別のものになっているところもある。	がさがさした別のものになっているところもある。	変質して緑泥石になっている。	カルサイト	
59.50～59.60	48.74～48.82	短柱状コア	特になし		残している	よくわれている。	変質しているものが多い。	大体変質していて緑泥石になっている。	カルサイト	
67.30～67.40	55.13～55.21	細棒状コア	礫含有破砕粘土(粘土>礫)		残している	よくわれている。	あまり変質されていなくて、割れている。	変質して緑泥石になっている。	カルサイト／石英	
70.00～70.10	57.34～57.42	細棒状コア	破砕粘土(粘土>>礫)							
71.65～71.70	58.69～58.73	細棒状コア	破砕粘土(粘土>>礫)		残していない	元の形を保っているものは少なく、ほとんど破砕されている。	あまり変質されていなくて、割れている。	変質されている。	カルサイトの中に石英が入っている。	
75.90～76.00	62.17～62.26	短柱状コア	特になし		残していない	元の形のものが多い。割れているものが多いが、その中をカルサイトが充填していることもあ	カルサイトに置換されていて、よくわからない。	変質されている。	カルサイト(Syntaxial ?)	
93.50～93.60	76.59～76.67	細棒状コア	特になし		残していない	割れ目が多い。粒子が細かい。	変質されている。	変質されている。	ほとんどオープンクラック。時々石英脈がある。	
95.36～95.50	78.11～78.23	短柱状コア	破砕粘土(粘土>>礫)							
106.40～106.50	87.16～87.24	短柱状コア	特になし		残している	割れている。		変質して緑泥石になっている	ほとんどオープンクラック。時々石英脈がある。	
116.60～116.70	95.51～95.60	短柱状コア	特になし							
122.10～122.20	100.02～100.10	細棒状コア	特になし							
142.20～142.35	116.48～116.61	短柱状コア	特になし							
159.30～159.40	130.49～130.57	短柱状コア	特になし		残していない	よく破砕されていて、元の形を保ったものが少ない。			石英脈がカルサイト脈を切っている。	
203.75～203.85	166.49～166.98	棒状コア	特になし							
208.35～208.50	170.67～170.79	棒状コア	特になし							
232.50～232.65	190.45～190.58	短柱状コア	破砕粘土<ガウジ>							
247.85～248.00	203.03～203.15	短柱状コア	粘土含有破砕角礫(礫>>粘土)							
294.90～295.00	241.57～241.65	短柱状コア	特になし							
321.50～321.60	263.36～263.44	短柱状コア	礫含有破砕粘土(粘土>礫)							
324.60～324.70	265.90～265.98	短柱状コア	粘土含有破砕角礫(礫>>粘土)		残していない	よく割れている	?	?	ほとんどオープンクラック。時々石英脈がある。	
336.70～336.90	275.81～275.97	短柱状コア	粘土含有破砕角礫(礫>>粘土)		残していない	大きな石英は残っているが小さいものはよく割れている。	破砕されていてよくわからない	破砕されていてよくわからない	オープンクラック	
348.50～348.70	285.47～285.64	短柱状コア	粘土含有破砕角礫(礫>>粘土)		残していない	よく割れている	変質されている。	変質されて緑泥石になっている。	ほとんどオープンクラック。時々石英脈がある。	
367.80～367.90	301.28～301.37	短柱状コア	特になし							
395.30～395.50	323.81～323.97	短柱状コア	破砕粘土(粘土>>礫)<ガウジ>							

図 1.3.12　深度ごとの割れ目充填鉱物一覧

1.3.5 研究課題3：ニァフィールドコンセプトの再構築に関する研究

1.3.5.1 背景と目的

坑道周辺におけるEDZ（掘削影響領域），割れ目形成あるいはそれらの環境下での物質移動をも考慮した，複合的環境のより現実的な解析を行うこととした。これは，従来のNF環境の概念モデルや核種移行解析シナリオの非現実性などが挙げられるとともに，深地層の研究施設をより有効に活用することを目的に行うものである。

1.3.5.2 検討内容および結果

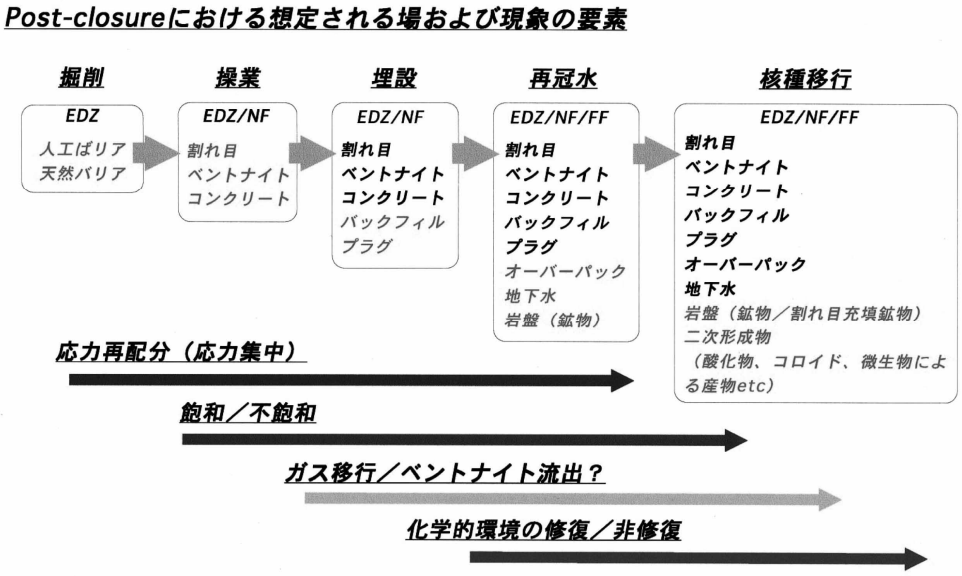


図1.3.13 NF評価のためのSafety caseを構築するに重要と思われる項目（案）

図1.3.13などが，将来的に検討されるべき課題として提示された。今後はこれらについても本研究を通してより具体化していく予定である。

1.3.6 今後の予定

今後，まず課題1については，これまで進めてきた断層活動に伴う割れ目形成等，断層運動の影響研究については，断層運動によって形成される割れ目の同定をさらに進め，地質学的，地球化学的手法と併せて，将来的な深部地下の研究の手法として適用できるものを構築していく予定である。そのために，今後とも次の調査研究を継続および新たに実施する。

① 現地割れ目データの追加と解析の継続
② 割れ目構造の変型と全体の地質構造との関係調査（モデルの詳細化）
③ 新たに発生した割れ目の同定と特徴の把握（仮説の検証）
④ 充填鉱物等，二次鉱物の調査手法の構築

断層活動に伴う割れ目発生のメカニズムやその特徴について，これまでおよび今回の調査から幾つかの仮説をたてることができた。今後の調査によって，仮説の検証を行うべく，野外調査での

系統的な割れ目の把握と一般化を行うことが必要である。また発生割れ目の同定方法や判断のクライテリアについても，引き続き併せて検討していくことが必要である。

1.3.7 参考文献

1) 小島圭二，大西有三，渡辺邦夫，西垣　誠，登坂博行，嶋田 純，青木謙治，杤山　修，吉田英一：深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究（平成16年度），核燃料サイクル開発機構委託研究報告書，p.314，JNC TJ7400 2005-081，2005
2) 大嶋章浩，吉田英一：活断層周辺岩盤の割れ目と化学組成の変化ー岐阜県付知地域の阿寺断層による事例研究，第14回環境地質学シンポジウム論文集，p.10，2004
3) 金折裕司，矢入憲二：阿寺断層中央部周辺に認められる変形構造の特徴. 岐阜大学教養部研究報告，25，pp.111-138，1990
4) 金折裕司，川上紳一，大西小百合，長尾敬介，杉崎隆一，矢入憲二：阿寺断層周辺の苗木-上松花崗岩に認められるカタクラサイトの微細構造とK-Ar鉱物年代. 岐阜大学教養部研究報告，27，pp.79-91，1991
5) 小島圭二，大西有三，渡辺邦夫，西垣　誠，登坂博行，嶋田 純，青木謙治，杤山　修，吉田英一：深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究(平成15年度)，核燃料サイクル開発機構委託研究報告書，p.234，JNC-TJ7400 2004-008，2004
6) 山田直利，小井土由光，棚瀬充史，原山　智，鹿野勘次：濃飛流紋岩-中部日本における白亜紀大規模火砕流の研究-，地団研専報53号，2005

（名古屋大学　吉田英一）