JAEA-Research
2007-045

JAEA-Research

幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Synthesis of Phase I Investigation 2001-2005
Volume "Geological Disposal Research"

藤田 朝雄　谷口 直樹　松井 裕哉　棚井 憲治
西村 繭果　小林 保之　平本 正行　前川 恵輔
澤田 淳　牧野 仁史　笹本 広　吉川 英樹
柴田 雅博　若杉 圭一郎　濱 克宏　操上 広志
國丸 貴紀　石井 英一　竹内 竜史　中野 勝志
太田 久仁雄　瀬尾 俊弘　宮原 要　内藤 守正
油井 三和

Tomoo FUJITA, Naoki TANIGUCHI, Hiroya MATSUI, Kenji TANAI
Mayuka NISHIMURA, Yasushi KOBAYASHI, Masayuki HIRAMOTO, Keisuke MAEKAWA
Atsushi SAWADA, Hitoshi MAKINO, Hiroshi SASAMOTO, Hideki YOSHIKAWA
Masahiro SHIBATA, Keiichiro WAKASUGI, Katsuhiro HAMA, Hiroshi KURIKAMI
Takanori KUNIMARU, Eiichi ISHII, Ryuji TAKEUCHI, Katsushi NAKANO
Kunio OTA, Toshihiro SEO, Kaname MIYAHARA, Morimasa NAITO
and Mikazu YUI

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2007

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

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

JAEA-Research 2007-045

幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

藤田 朝雄，谷口 直樹，松井 裕哉[+1]，棚井 憲治，西村 繭果[※1]，小林 保之[※1]，平本 正行[※1]，
前川 恵輔，澤田 淳，牧野 仁史[+2]，笹本 広，吉川 英樹，柴田 雅博[+3]，
若杉 圭一郎，濱 克宏[+4]，操上 広志[+1]，國丸 貴紀[+1]，石井 英一[+1]，
竹内 竜史[+4]，中野 勝志[+2]，太田 久仁雄[+1]，瀬尾 俊弘[+2]，
宮原 要，内藤 守正，油井 三和[+3]

（2007 年 3 月 27 日受理）

本報告書では，堆積岩で塩水系地下水を対象とした幌延深地層研究計画において段階的に得られる地質環境条件を一つの適用例として，第 1 段階である地上からの調査で得られた情報をもとに処分場の設計技術や性能評価技術それぞれの適用性について論じるとともに，必要に応じて実施した技術の改良や代替技術の開発状況を取りまとめた。

処分技術の信頼性向上では，最新の知見を踏まえ，第 2 次取りまとめにおいて示された処分場全体設計フローの更新や人工バリアなどの設計手法の詳細化，ならびに設計における地質環境条件の一般的な留意点や設計入力データ項目について整理を行なった。また，これらを踏まえ，幌延の地質環境条件を一例とした場合の施設設計，人工バリア設計及び閉鎖設計を通じて第 2 次取りまとめで採用された設計手法が適用可能であることがわかった。

安全評価手法の高度化については，第 2 次取りまとめにおいて示された安全評価手法を実際の地質環境に適用するために必要な具体的な作業をフローとして構築した。これに基づき，幌延の地質環境条件を一例として物質移行解析を行い，これらの検討を通じて第 2 次取りまとめの手法を堆積岩地域に適用した場合の調査から解析・評価にいたる一連の方法論及び，その過程で得られるノウハウや知見，調査や解析上の留意点を整理した。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松 4-33
+1　幌延深地層研究ユニット
+2　研究開発統括ユニット
+3　地層処分研究開発部門
+4　東濃地科学研究ユニット
※1　技術開発協力員

JAEA-Research 2007-045

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Synthesis of Phase I Investigation 2001 - 2005
Volume "Geological Disposal Research"

Tomoo FUJITA, Naoki TANIGUCHI, Hiroya MATSUI[+1], Kenji TANAI, Mayuka NISHIMURA[※1], Yasushi KOBAYASHI, Masayuki HIRAMOTO[※1], Keisuke MAEKAWA, Atsushi SAWADA, Hitoshi MAKINO[+2], Hiroshi SASAMOTO, Hideki YOSHIKAWA, Masahiro SHIBATA[+3], Keiichiro WAKASUGI, Katsuhiro HAMA[+4], Hiroshi KURIKAMI[+1], Takanori KUNIMARU[+1], Eiichi ISHII[+1], Ryuji TAKEUCHI[+4], Katsushi NAKANO[+2], Kunio OTA[+1], Toshihiro SEO[+2], Kaname MIYAHARA, Morimasa NAITO and Mikazu YUI[+3]

Geological Isolation Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 27, 2007)

This report summarizes the progress of research and development on geological disposal during the surface-based investigation phase (2001-2005) in the Horonobe Underground Research Laboratory project (HOR), of which aims are to apply the design methods of geological disposal and mass transport analysis to actual geological conditions obtained from the surface-based investigations in HOR as an example of actual geological environment.

For the first aim, the design methods for the geological disposal facility proposed in “H12 report (the second progress report)” was reviewed and then improved based on the recent knowledge. The applicability of design for engineered barrier system, backfill of disposal tunnel, underground facility was illustrated.

For the second aim, the conceptual structure from site investigation and evaluation to mass transport analysis was developed as a work flow at first. Then following this work flow a series of procedures for mass transport analysis was applied to the actual geological conditions to illustrate the practical workability of the work flow and the applicability of this methodology.

Consequently, based on the results, future subjects were derived.

Keywords: Geological Disposal, Design Methods, Solute Transport Analysis, Surface-based Investigation, Underground Research Laboratory

---

+1 Horonobe Underground Research Unit
+2 Research and Development Integration Unit
+3 Geological Isolation Research and Development Directorate
+4 Tono Geoscientific Research Unit
※1 Cooperative Staff

目　　次

1.　はじめに……1
1.1　深地層の研究施設計画の位置付けと役割……1
1.1.1　深地層の研究施設計画の位置付け……1
1.1.2　深地層の研究施設計画における研究開発の目標……3
1.1.3　わが国の地層処分計画における深地層の研究施設計画の役割……5
1.2　幌延深地層研究計画における研究開発の概要……6
1.2.1　幌延深地層研究計画における研究開発の目標と課題……6
1.2.2　幌延深地層研究計画の経緯……8
1.3　幌延深地層研究計画における第1段階成果の取りまとめ……9
1.3.1　第1段階成果の取りまとめの基本方針……9
1.3.2　分冊「地層処分研究開発」の位置付けと構成……10
参考文献……11

2.　処分技術の信頼性向上―設計手法の適用性確認―……13
2.1　処分場設計の基本的考え方と手順……14
2.1.1　処分場設計手順の検討……14
2.1.2　設計における地質環境条件の留意点……17
参考文献……19

2.2　地上からの調査研究段階における設計手法の適用事例……20
2.2.1　地質環境条件および深度の設定……20
2.2.2　地質環境条件を考慮した留意点……33
2.2.3　施設設計手法の適用事例……34
2.2.4　人工バリアの設計手法の適用事例……42
2.2.5　閉鎖設計手法の適用事例……57
2.2.6　低アルカリ性コンクリートの開発……61
参考文献……74

2.3　地上からの調査研究段階における第2次取りまとめの手法の適用性と留意点
……79
2.3.1　第2次取りまとめの手法の適用性……79
2.3.2　地上からの調査段階における留意点……80
2.3.3　結論……82
2.3.4　今後の課題……83
参考文献……86

2.4　幌延深地層研究計画第2段階を対象とした工学技術の適用性検討……87
2.4.1　幌延深地層研究計画　第2段階における調査試験……87

2.4.2　幌延深地層研究計画　第2段階と工学技術に関する技術開発……87
2.4.3　工学技術に関する各個別研究テーマの方向性……90
2.4.4　今後の課題……92
参考文献……93

3.　安全評価手法の高度化―安全評価手法の適用性確認―……94
3.1　検討の目的，進め方……94
3.1.1　検討の目的、基本的考え方……94
3.1.2　検討の進め方……96

3.2　地質環境特性に関する情報……98
3.2.1　地上からの調査研究の概要……98
3.2.2　研究所設置地区およびその周辺における調査研究に基づく情報……98

3.3　地質環境情報に基づく物質移行概念，モデル，パラメータの設定……107
3.3.1　物質移行解析に必要な情報の設定手順……107
3.3.2　物質移行概念，モデルの設定……108
3.3.3　物質移行解析で用いるパラメータの設定……111

3.4　物質移行解析の実施，結果の考察……123
3.4.1　物質移行解析の内容……123
3.4.2　物質移行解析の結果および考察……124

3.5　地上からの調査研究段階における第2次取りまとめの手法の適用性と留意点
……129

3.6　幌延深地層研究計画第2段階を対象とした安全評価手法の高度化……130
参考文献……133

4.　おわりに……137
4.1　成果のまとめ……137
4.1.1　処分技術の信頼性向上―設計手法の適用性確認―……137
4.1.2　安全評価手法の高度化―安全評価手法の適用性確認―……138
4.2　今後の計画……139
4.2.1　処分技術の信頼性向上―設計手法の適用性確認―……139
4.2.2　安全評価手法の高度化―安全評価手法の適用性確認―……140

Contents

1. Introduction····· 1
1.1 Positioning and role of underground research laboratory project···· 1
1.1.1 Positioning of underground research laboratory project····· 1
1.1.2 Objective of R&D on underground research laboratory project···· 3
1.1.3 Role of underground research laboratory project in geological disposal project of Japan····· 5
1.2 Outline of R&D on Horonobe URL Project····· 6
1.2.1 Objective and issue of R&D on Horonobe URL Project····· 6
1.2.2 Background of Horonobe URL Project····· 8
1.3 Synthesis of Phase I Investigations on Horonobe URL Project····· 9
1.3.1 Fundamental concept on synthesis of Phase I Investigations····· 9
1.3.2 Contents of Volume “Geological disposal Research” ····· 10
References····· 11

2. Improvement of reliability of disposal technology -demonstration of applicability of repository design-····· 13
2.1 Basic design methodology and procedure····· 14
2.1.1 Study of repository design methods····· 14
2.1.2 Advertency point of geological environmental conditions on disposal design····· 17
References····· 19

2.2 Applicability study of design method on surface-based investigation phase of Horonobe URL project····· 20
2.2.1 Geological environmental condition and disposal depth····· 20
2.2.2 Advertency point of geological environmental condition on Horonobe URL project····· 33
2.2.3 Applicability study of the underground facility design method·· 34
2.2.4 Applicability study of the EBS design method ····· 42
2.2.5 Applicability study of the backfilling design method····· 57
2.2.6 Development of low alkaline cement····· 61
References····· 74

2.3 Confirming the applicability of design method of H12 report on surface-based investigation phase of Horonobe URL project····· 79
2.3.1 Confirming the applicability of design method of H12 report···· 79
2.3.2 Advertency point on surface-based investigation stage on Horonobe URL project····· 80
2.3.3 Conclusions····· 82

2.3.4 Future work····· 83
References····· 86

2.4 Applicability study of engineering technology on construction phase of Horonobe URL project····· 87
2.4.1 Experimental plan on construction phase of Horonobe URL project 87
2.4.2 Development of engineering technology on construction phase of Horonobe URL project····· 87
2.4.3 Study approach of the each individual item in engineering technology ····· 90
2.4.4 Future work····· 92
References····· 93

3. Development of advanced safety assessment methodologies--Confirmation of the applicability of safety assessment methodology-····· 94
3.1 Objectives and study approaches····· 94
3.1.1 Objectives····· 94
3.1.2 Study approaches····· 96

3.2 Information on geological environment····· 98
3.2.1 Information based investigation for selection of the URL Area· 98
3.2.2 Information based investigation at the URL Area····· 98

3.3 Conceptualization and parameters for mass transport analysis based on geological information····· 107
3.3.1 Procedure of setting data for mass transport analysis····· 107
3.3.2 Conceptualization for mass transport····· 108
3.3.3 Parameters for mass transport analysis····· 111

3.4 Mass transport analysis····· 123
3.4.1 Sensitivity analysis····· 123
3.4.2 Discussion and conclusions····· 124

3.5 Confirming the applicability of safety assessment methodology of H12 report on surface-based investigation phase of Horonobe URL project ····· 129

3.6 Development of advanced safety assessment methodologies on construction phase of Horonobe URL project····· 130
References····· 133

4. Conclusions·····137
4.1 Progress of Phase I investigations·····137
4.1.1 Improvement of reliability of disposal technology-demonstration of applicability of repository design-·····137
4.1.2 Development of advanced safety assessment methodologies-Confirmation of the applicability of safety assessment methodology-·····138
4.2 Future plan·····139
4.2.1 Improvement of reliability of disposal technology-demonstration of applicability of repository design-·····139
4.2.2 Development of advanced safety assessment methodologies-Confirmation of the applicability of safety assessment methodology-·····140

1. はじめに

幌延深地層研究計画は，独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下，「原子力機構」という）が前身である核燃料サイクル開発機構（以下，「サイクル機構」という）以来，北海道幌延町で進めている堆積岩を対象とした総合的な研究開発計画であり，結晶質岩を対象として岐阜県瑞浪市で実施中の超深地層研究所計画と並んで「原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画」（原子力委員会，2000）（以下，「原子力長期計画」という）や「原子力政策大綱」（原子力委員会，2005）に示された深地層の研究施設計画の一つである。幌延深地層研究計画では，「深地層の科学的研究」と「地層処分研究開発」の二つの領域の分野の研究開発を進めている。本報告書は，地層処分研究開発について，幌延深地層研究計画の第 1 段階である地上からの調査研究段階における調査研究に基づく成果を取りまとめたものである。以下，1.1 において，わが国における深地層の研究施設計画の位置付けと役割を概観した上で，1.2 で幌延深地層研究計画における研究開発の概要を紹介し，1.3 で第 1 段階成果の取りまとめの基本方針と本報告書の構成について述べる。

1.1 深地層の研究施設計画の位置付けと役割

1.1.1 深地層の研究施設計画の位置付け

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分計画は，サイクル機構（現，原子力機構）が 1999 年に公表した技術報告書「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－」（核燃料サイクル開発機構，1999）（以下，「第 2 次取りまとめ」という）を技術的な拠り所として，研究開発だけの段階から，研究開発と並行して地層処分の事業と安全規制の施策を進めていく事業段階へと進展した。2000 年 6 月には「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，以下，「最終処分法」という）が公布され，この法律に基づき同年 10 月に処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下，「原環機構」という）が発足した。一方で，原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会により，「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）」（原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会，2000）が公表されるなど，処分事業と安全規制を進めていく上での基本的な枠組みが整備された。

この状況を踏まえ，原子力委員会は，原子力長期計画（原子力委員会，2000）において最終処分の実施に向けて必要となる取組みと役割分担を示した。すなわち，実施主体である原環機構は「最終処分事業の安全な実施，経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発」を，また，国及び関係機関は「最終処分の安全規制，安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等」を進めることとした。特に，サイクル機構には「これまでの研究開発成果を踏まえ，今後とも深地層の研究施設，地層処分放射化学研究施設等を活用し，地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けて研究開発を着実に推進すること」が求められた。

サイクル機構は，原子力長期計画などに示された研究開発の役割を踏まえ，第 2 次取りまとめ以降の事業段階における研究開発計画を策定し，2001 年に「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会，2001）（以下，「全体計画」という）として公表した。全体計画では，第 2 次取りまとめが示した「わが国における地層処分の技術的信頼性」をさらに向上させ，処分事業や安全規制を支える技術基盤を強化していくという観点から，「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「地層処分システムの長期*挙動の理解」の二つの研究開発目標を設定した。前者は，これまでに整備してきた地層処分に関連

＊ここでいう長期とは，廃棄体周囲の人工バリアの閉じ込め性能が失われた後，廃棄物が人間の生活環境に影響を与えないことを評価する上で十分な長さの期間を示す。

する様々な技術を実際の地質環境へ適用することを通じて，その信頼性や実用性を確認していくことであり，後者は，処分システムに関連する様々な現象への理解をさらに深めながら，モデルやデータベースを改良し，評価の信頼性や裕度を高めていくことである。このうち，深地層の研究施設は，主として第1の目標である「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」を進めるための中核となる研究施設である。全体計画では，これら二つの研究開発目標を達成するために，「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」から構成される「地層処分研究開発」と，その基盤となる「深地層の科学的研究」を設け，それぞれに研究開発課題を設定した（図1.1.1-1）。原子力機構の発足後も，引き続き上記の二つの研究開発目標や研究開発課題に沿って研究開発を進めており，「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成17年10月1日～平成22年3月31日）」（以下，「中期計画」という）において，「深地層の科学的研究」と「地層処分研究開発」の二つの領域を設けて研究開発を進めることを明記している。

第2次取りまとめまでの研究開発は，具体的な地質環境を特定せずに，わが国における地層処分の成立性を科学的根拠に基づき概括的に示すことを目標として進められてきた。地層処分技術の信頼性をさらに向上させ，処分事業や安全規制の段階的な進展にあわせて，その技術基盤を強化していくためには，第2次取りまとめで示したような技術を実際の地質環境に適用して，その実用性や信頼性を確認することが重要となる。これを総合的に行う場が深地層の研究施設である。

深地層の研究施設については，わが国の地質環境の特性と分布を考慮して「複数の設置が望まれる」（原子力委員会，1994）とされてきた。これを受けて，原子力機構では，堆積岩と塩水系地下水を対象とした幌延深地層研究計画（北海道幌延町）（核燃料サイクル開発機構，2001）及び結晶質岩と淡水系地下水を対象とした超深地層研究所計画（岐阜県瑞浪市）（核燃料サイクル開発機構，2002）の二つの計画を進めている（図1.1.1-2）。いずれも，地上からの調査研究段階（第1段階），坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階），地下施設での調査研究段階（第3段階）の3段階からなる全体で20年程度の計画である。なお，原環機構が行う処分地選定のための調査も，最終処分法に基づいて，文献調査，概要調査，精密調査（前段の地上からの精密調査と後段の地下施設を利用した精密調査）と段階的に進められ，概要調査の開始から精密調査の終了までが20年程度の計画である（原子力発電環境整備機構，2001）。深地層へのアプローチの方法としては，おおむね，深地層の研究施設計画における第1段階が概要調査と地上からの精密調査に，また，第2段階及び第3段階が地下施設を利用した精密調査に対応する。このうち，概要調査のための技術基盤は，第2次取りまとめやその後の深地層の研究施設計画における第1段階での調査研究などにより整備されてきた。今後は，地下施設の設置を前提として行われる地上からの精密調査の技術基盤を強化していく観点から，深地層の研究施設計画の第2段階に得られる地質環境データに基づき，第1段階に構築した地質環境モデルを確認することなどを通じて地上からの調査技術やモデル化手法の妥当性を評価し，その信頼性を高めていくことが重要となる。国の基盤研究開発に関する全体計画においても，地質環境調査評価技術に関するフェーズ2（2006～2010年度）の段階目標を「地上からの調査に関わる技術基盤の確立」，フェーズ3（2011年度以降）の段階目標を「地下施設を活用した調査に関わる技術基盤の確立」としている。

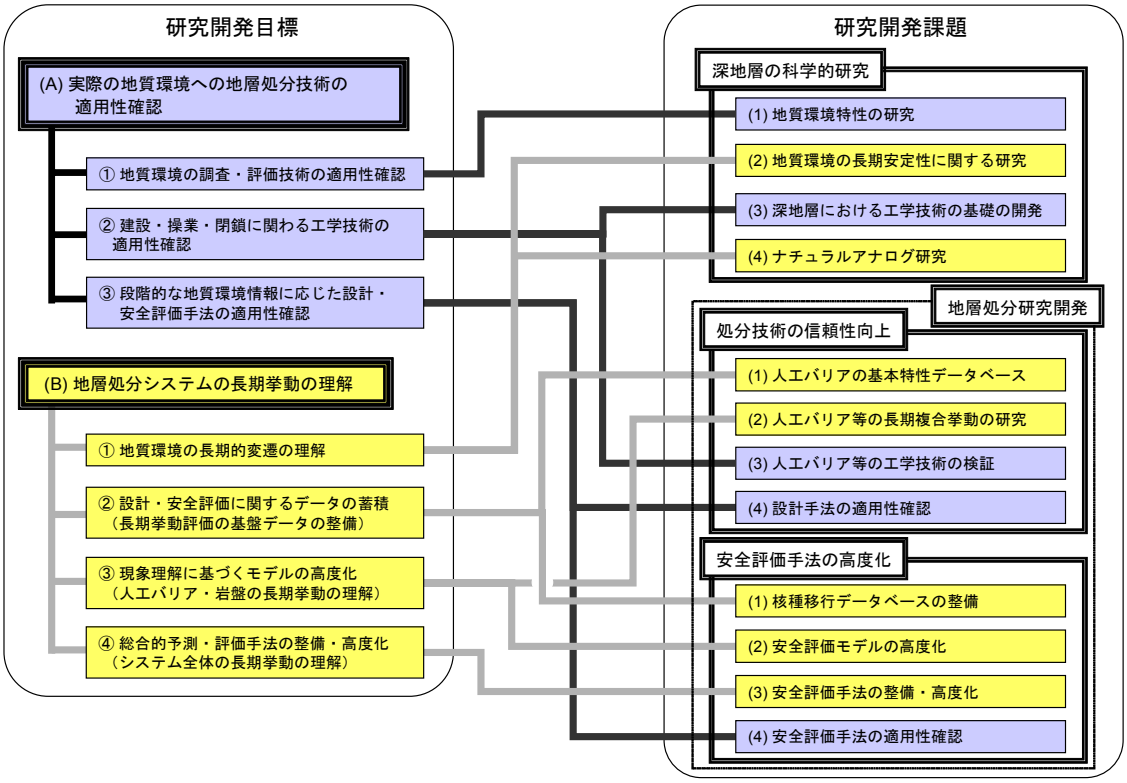


図 1.1.1-1　全体計画の二つの研究開発目標と研究開発項目の展開

図 1.1.1-2　二つの深地層研究施設計画

1.1.2 深地層の研究施設計画における研究開発の目標

第 2 次取りまとめで示したような地層処分に関連する技術を実際の地質環境に適用し，その実用性や信頼性を確認することを通じて，地層処分技術の信頼性を向上していくことが深地層の研

究施設計画における大きな研究開発目標である。第2次取りまとめでは，東濃鉱山（堆積岩）や釜石鉱山（花崗岩）の既存坑道を活用した調査研究，あるいは海外の地下研究施設での共同研究の成果などに基づいて，地質環境を調査・評価するための要素技術や基盤的な手法を整備した。また，これらの研究で得られた情報や文献情報を比較検討した上で，現状あるいはその延長上にある工学技術により処分場を合理的に設計・施工し，地層処分の長期的な安全性を解析的に評価できる見通しなどを示した。第2次取りまとめは，質・量の異なる様々な分野の情報を組み合せて解析・評価することにより，理論的に地層処分の成立性を示したといえる。

これを受け，二つの深地層の研究施設計画では，第2次取りまとめで示したような地層処分に関連する様々な技術を実際の地質環境に適用して，未擾乱の状態から段階的に調査研究を進めながら，順次得られてくる地質環境情報に基づき，実証的に地層処分技術としての信頼性を確認していく。すなわち，調査研究を段階的に進めることにより，地下深部の地質環境についての理解を深めながら，これを体系的に調査・評価するための技術基盤を整備する。また，得られた地質環境情報に基づき，地下施設の設計・施工を通じて，地層処分に特有の「情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設」を設置するための工学技術の基盤を整備していく。この「地質環境の調査・評価技術」と「深地層における工学技術」の基盤を整備していくことが，深地層の研究施設計画における深地層の科学的研究としての重要な技術課題である。加えて，幌延深地層研究計画では，幌延地域を事例として，地震活動や隆起・侵食などの天然現象に関する過去の記録や，過去から現在に至る地質環境特性の変遷に関する情報などを取得するための体系的な調査技術の整備を進めている。

一方,深地層の科学的研究を通じて得られた情報や知見,あるいは岩石や地下水の試料などは，処分技術の信頼性向上と安全評価手法の高度化を目指した地層処分研究開発における重要な基盤情報として活用していく。その際，調査研究が進展し得られる地質環境情報が詳細化されていくことに応じて，得られた地質環境情報に基づき，第2次取りまとめで示した人工バリア性能に関する工学要素技術の信頼性，設計や安全評価の手法の適用性などを確認し，それらの技術や手法の高度化を繰り返し図っていくことが重要となる。これにより，地層処分技術全体としての適用性を確認することができ，その検討結果を調査研究側へフィードバックすることにより，地質環境の理解度と安全評価上の感度や必要な調査量との関係などを検討することができる。また，3段階で進める調査研究に対応させて，各段階において，設計・施工や解析・評価などを進める際の留意点などを，地層処分技術の知識基盤として整理することができる。さらに，深地層の研究施設における特定の地質環境下での調査・試験結果と比較検討しながら，条件を制御した室内・工学試験や放射性核種を用いた試験を行うことにより，地層処分システムに関連する様々な現象に対する理解や一般化を進め，設計・安全評価に係る技術の信頼性向上を図ることができる（図1.1.2-1）。なお，幌延深地層研究計画においては，深地層の科学的研究とあわせて地層処分研究開発を進めており，特に，第2段階以降では，堆積岩における人工バリアの施工技術や性能を確認するための調査試験，安全評価モデルの信頼性向上に向けた原位置試験など，水平坑道を利用した研究開発を実施する予定である（核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会, 2005）。

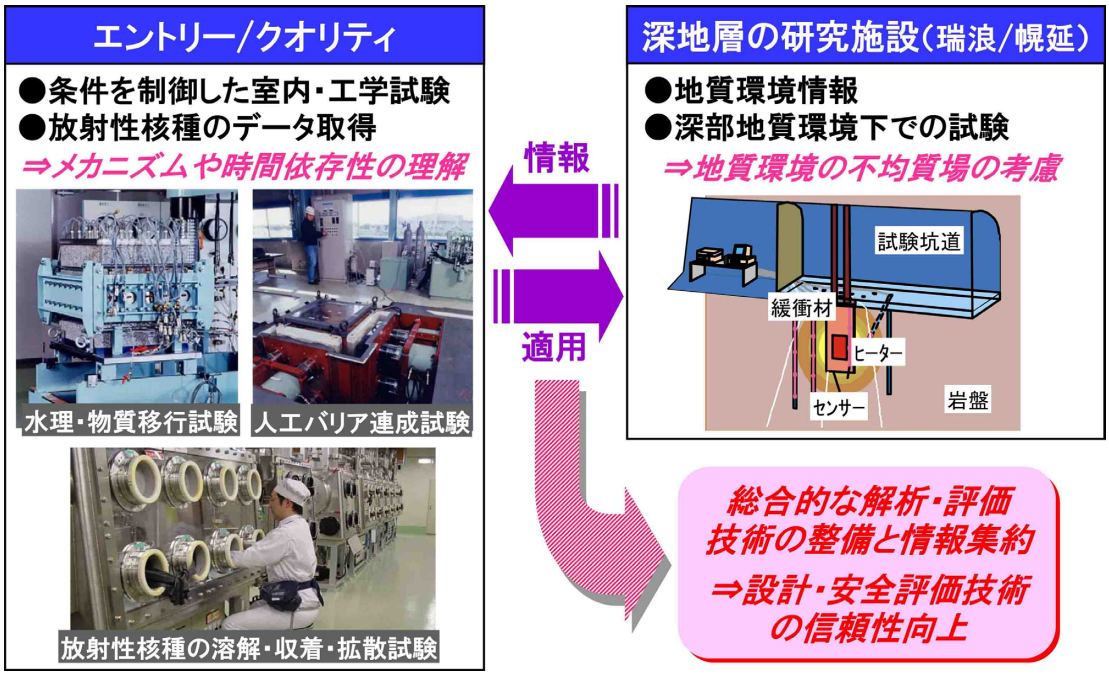


図 1.1.2-1　深地層の研究施設計画を活用した適用性確認と体系化

1.1.3 わが国の地層処分計画における深地層の研究施設計画の役割

深地層の研究施設計画で成すべきことを端的に表現すれば,「技術が現場で実際に,体系的に機能することの確認」といえる。この確認は,データの取得や技術の適用性評価といった課題設定のもと,「地質環境を的確に理解する」という目標意識によって達成される。その成果は,技術の最適化や改良・高度化を果たすと同時に,技術の精度や限界に対する理解と経験をもたらす。技術の限界を知ることは,処分事業における具体的な計画や安全規制に関する現実的な方法論を検討する上での基本となる。処分事業は最終処分法に基づいて段階的に進められ,これに伴い安全規制に関する指針なども段階的に整備されていく(原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会,2000,原子力安全委員会特定放射性廃棄物処分安全調査会,2002)ため,その技術基盤となる研究開発は,それらの進展に先行して進めることが必要である。特に,深地層の研究施設計画における各調査研究段階の成果については,処分地の選定プロセスに対して適切なリードタイムをもって整備していくことが重要である。その一方で,1.1.2 に述べたように,深地層の研究施設計画で得られる実際の地質環境に関する情報や知見を活用して,地層処分システムの設計や安全評価手法に関する検討を進めていくことが重要となる。このような検討の過程を通じて,地質環境を合理的に調査・評価する技術や,限られた地質環境情報あるいは段階的に得られてくる情報に基づき,効率的に処分システムの設計や安全性の検討を進める手法などが整備されていくことになる。

地質環境を調査・評価し,その結果を踏まえて処分システムの設計・安全性の検討を進めていく上での大きな課題は,実際の地質環境が有する空間的な不均質性をどう理解し,調査や理解,表現技術などの不十分さに起因する不確実性にいかに対処していくかである。そこには多くの試行錯誤や反復的なフィードバック作業が伴う。一般的に言えば,調査の量に応じて理解は深まるが,調査が進むにつれて調査量に対する理解の感度は鈍くなり,コストパフォーマンスは低下していく。地質環境を詳細に調べるためには大きな費用が必要となるが,いかに詳細な調査を行っても地質環境を完全に理解し尽すことはできない。一方,地質環境をどの程度具体的に理解できたかによって,換言すれば地質環境情報の不確かさの程度に応じて,評価に見込むべき安全裕度

が違ってくる。実際の処分事業であれば，それが処分場の設計における安全率の取り方，ひいては建設コストに反映される。地質環境をどの程度まで理解し，残る不確実性を設計や安全評価上の裕度としてどう扱うかは，まさに総合的課題である。処分地の選定に向けた各調査段階においては，その段階で目標とすべき理解の程度や判断すべき要件と，次段階に保留すべき課題や不確実性などを見極めながら，調査の目的や内容を検討することが重要となる。また，同規模の調査であっても，対象とするサイトの地質・地形条件や社会的な制約などに応じて，得られる情報の精度や理解の程度は異なってくる。これらの不確実性に対しては，安全裕度との関係で定量的に対処するだけでなく，システムが不確実性の影響を受けにくい頑健なものであることを定性的に示すこと，あるいは評価の保守性を示すことなど様々な論拠に基づくことが考えられる。このような現実の条件に対応していくためには，調査技術や機器のカタログを整備するだけではなく，現場での経験を積み，実際の適用事例に学ぶことが重要である。深地層の研究施設計画での現実の地質環境を通して培った経験は，処分地選定の調査を進めるための技術を支え，安全規制を具体化していくための議論を支える知識として生かしていかなければならない。深地層の研究施設計画を進めていくにあたっては，学術的な成果や技術開発の実績だけではなく，失敗事例なども含めた経験やノウハウを重要な研究の成果と認識し，それらをできるだけ知識化，体系化して継承していく工夫が必要である。深地層の研究施設計画においては，淡々と調査を進めるのではなく，調査の段階とその進展を明確に認識して，段階ごとに計画から実施，評価までの流れを意識的に繰り返していくアプローチをとっている。これは，調査の進捗と理解の進展や不確実性の低減との関係を明確に意識することにより，前段階の成果を次段階に反映しつつ調査全体を最適化し，収束を図っていくことを意図している。それは，理解や不確実性の程度を定量的にとらえ，経験を知識化していくプロセスでもある。

一方，深地層の研究施設計画は，「学術研究の場であるとともに，国民の地層処分に関する研究開発の理解を深める場としての意義を有し，その計画は，処分施設の計画と明確に区分して進めることが必要」（原子力委員会，2000）とされている。このため，深地層の研究施設においては，国内外の研究機関や専門家との研究協力を積極的に進め，また，広く学術的な研究の場としての活用を図るとともに，国民が地下深部の環境を実際に体験・学習し，研究者との対話を通じて，地層処分やその研究開発に対する理解を深める場としても整備していく。また，計画の内容や得られた成果については，地域の方々をはじめ広く国民に公開し，透明性の確保に努めていく。なお，深地層の研究施設計画を進めるにあたっては，放射性廃棄物を持ち込まないことや将来にわたって処分場としないことなどを関係自治体との協定により約束している。

1.2 幌延深地層研究計画における研究開発の概要

1.2.1 幌延深地層研究計画における研究開発の目標と課題

幌延深地層研究計画では，北海道幌延町に分布する堆積岩を対象として，以下の三つの全体目標を設定し，全体計画（図 1.1.1-1)に示された深地層の科学的研究と地層処分研究開発に関する調査研究を実施している（核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会，2005)。

① 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
② 深地層における工学技術の基盤の整備
③ 実際の地質環境での地層処分技術の適用性確認

深地層の科学的研究については，全体計画において設定された「地質環境特性の研究」を「地質環境調査技術開発」と「地質環境モニタリング技術の開発」の 2 項目に分け，「地質環境の長

期安定性に関する研究」及び「深地層の工学技術の基礎の開発」とあわせて 4 項目の研究開発課題を設定している。一方，地層処分研究開発のうち，処分技術の信頼性向上に関しては，「人工バリア等の長期複合挙動の研究」，「人工バリア等の工学技術の検証」及び「設計手法の適用性確認」の 3 項目の研究開発課題を，安全評価手法の高度化に関しては，「安全評価モデルの高度化」及び「安全評価手法の適用性確認」の 2 項目の研究開発課題をそれぞれ設定している。これらの研究開発課題については，地下施設の建設前から地下施設の完成後までの 20 年程度をかけて，三つの段階において調査研究を実施することにより取り組むこととしている（図 1.2.1-1）。その第 1 段階となる地上からの調査研究段階においては，人工バリア等の長期複合挙動の研究と安全評価モデルの高度化を除く 7 項目の研究開発課題に関する調査研究を，第 2 段階の坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階においては，人工バリア等の長期複合挙動の研究を除く 8 項目の研究開発課題に関する調査研究を実施する。さらに，第 3 段階の地下施設での調査研究段階においては，9 項目のすべての研究開発課題について調査研究を進めていく計画である（核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会，2005）。

幌延町には，白亜系を基盤岩として，古第三紀から前期更新世にかけての堆積岩類（羽幌層、曲渕層、宗谷夾炭層、鬼志別層、増幌層、稚内層、声問層、勇知層、更別層），中期更新世以降の段丘堆積物群，及び完新世堆積物（砂丘、沖積層）が分布している（図 1.2.1-2）（岡・五十嵐，1997）。また，北北西－南南東走向の規模の大きな 2 本の断層と褶曲構造が認められ（岡，1986；秋山・保柳，1990），幌延町の東部及び西部には，活断層，とう曲，傾動などの第四紀の新しい活構造も認められる（中田・今泉，2002）。さらに，調査研究の対象となる新第三系堆積岩類（主として稚内層及び声問層）は透水性が比較的低いこと，地層中に存在する地下水が塩水系地下水と淡水系地下水の 2 種類に分類されること，地下水には溶存ガスが存在することなどが確認されており，幌延深地層研究計画では，このような地質環境の特徴を活かして調査研究を進めていく。

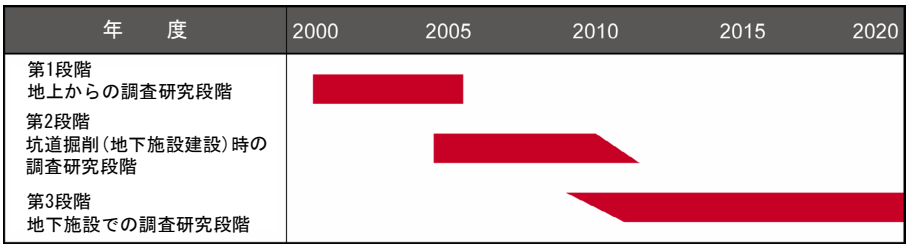


図 1.2.1-1　幌延深地層研究計画のスケジュール

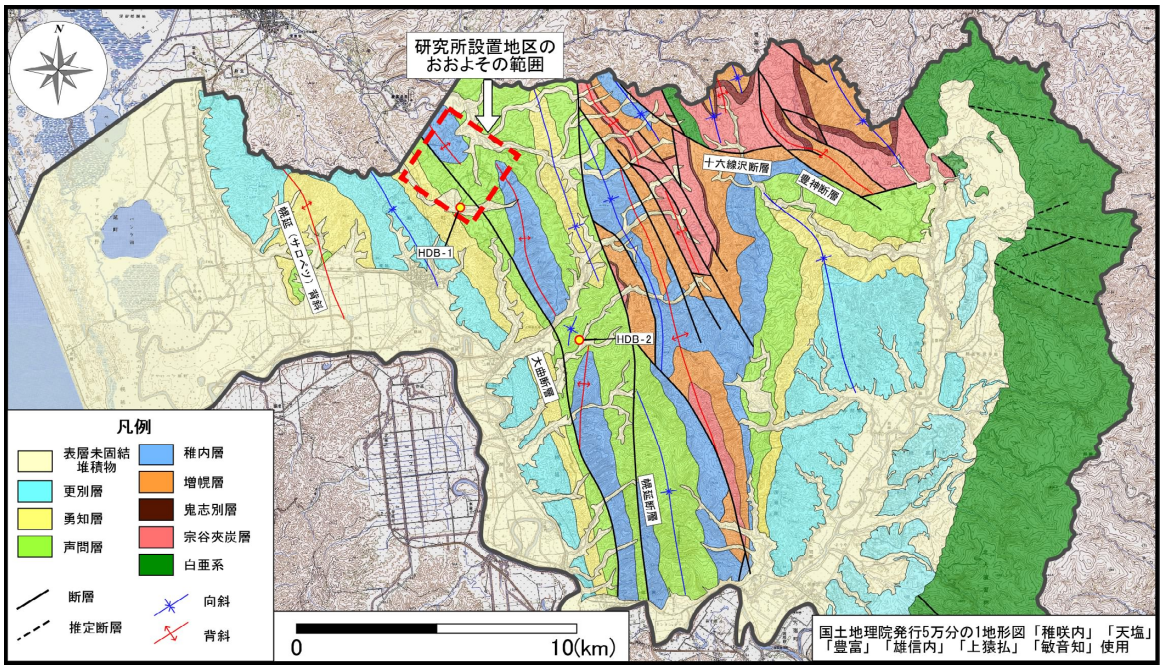
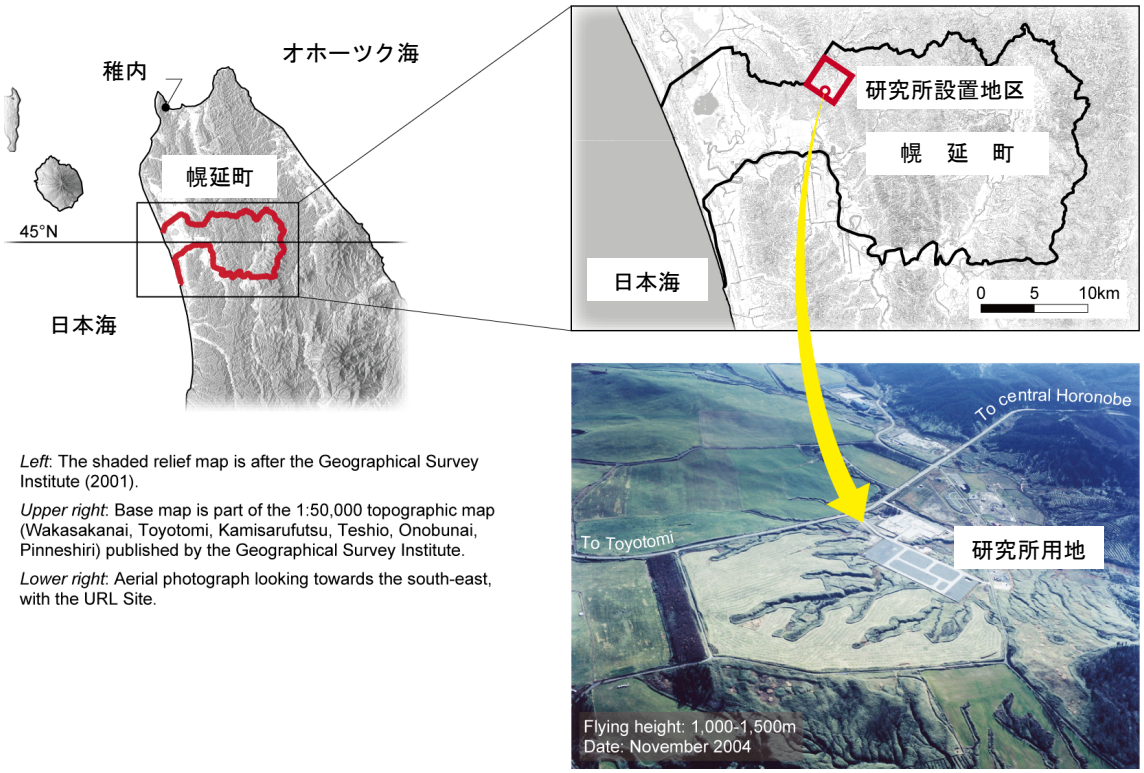


図 1.2.1-2　幌延町の地質概要

1.2.2 幌延深地層研究計画の経緯

幌延深地層研究計画は，2000 年 11 月に国（科学技術庁，現，文部科学省）の立ち会いの下に，幌延町，北海道及びサイクル機構（現，原子力機構）間で「幌延町における深地層の研究に関する協定」を締結し，2001 年 3 月より第 1 段階の調査研究を開始した。協定には，「研究実施区域に放射性廃棄物を持ち込むことや使用することはしない」，「深地層研究所を放射性廃棄物の最終処分を行う実施主体へ譲渡，貸与しない」，「研究終了後は地上の施設を閉鎖し，地下施設を埋め戻す」，「研究実施区域を将来とも放射性廃棄物の最終処分場とせず，幌延町に放射性廃棄物の中間貯蔵施設を将来とも設置しない」ことなどが定められている。2002 年 7 月には，地質環境と安全に関する基本的な要件，及び前年度に実施した既存情報の調査や空中・地上からの広域調査の結果などを踏まえ，社会的条件や環境条件なども加味して，地上からの調査研究を展開していく主な領域（研究所設置地区）として，幌延町北中部に位置する北進地区の 3km 四方を選定した。これに引き続き，社会的条件や道路・土地利用状況などの観点から，幌延町市街地北方約 3km の位置に地下施設及び地上施設を建設するための用地（研究所設置場所）を選定し，2003 年 3 月にこの用地を購入取得した（図 1.2.2-1）。2003 年 7 月には研究所用地の造成に着手し，2005 年 4 月からは地下施設工事（第 I 期工事）に着工するとともに，第 2 段階の調査研究を開始した（松井ほか，2006）。さらに，同年 11 月には立坑の一つである換気立坑の掘削を開始した。第 1 段階の調査研究は，2006 年 3 月末までの約 5 年間にわたって実施し，研究所設置地区及びその周辺において，空中物理探査及び地上からの様々な調査研究を展開するとともに，そこで得られた地質環境情報，あるいは岩石や地下水の試料などを利用した調査研究を進めてきた。



Left: The shaded relief map is after the Geographical Survey Institute (2001).

Upper right: Base map is part of the 1:50,000 topographic map (Wakasakanai, Toyotomi, Kamisarufutsu, Teshio, Onobunai, Pinneshiri) published by the Geographical Survey Institute.

Lower right: Aerial photograph looking towards the south-east, with the URL Site.

図 1.2.2-1　研究所用地（航空写真：南東方向を望む）

1.3 幌延深地層研究計画における第 1 段階成果の取りまとめ

1.3.1 第 1 段階成果の取りまとめの基本方針

幌延深地層研究計画では，2005 年度で第 1 段階を終了したことから，第 1 段階における調査研究の成果の取りまとめ（以下，「第 1 段階成果取りまとめ」という）を実施する。この取りまとめは，全体目標を踏まえて設定した第 1 段階における調査研究の目標（核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会，2005）に対して，その達成度を評価するとともに，今後の課題を明らかにし，第 2 段階以降における調査研究の方向性を具体化する上で重要な意味を持っている。また，ここで取りまとめる成果は，中期計画に示したように，原環機構による処分事業（例えば，処分地の選定に向けた概要調査や地上からの精密調査）と国による安全規制（例えば，精密調査地区選定に係わる環境要件や安全審査基本指針などの策定）の両面を支える地層処分技術の知識基盤として整備されるばかりでなく，地上から地下深部の地質環境を体系的に調査・評価するための技術基盤として，有効に活用されるものであることが重要となる。なお，第 1 段階における調査研究の 2004 年度までに得られた成果については，2005 年 9 月に公表した研究開発報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－」（以下，「H17 取りまとめ」という）の分冊 1～3（核燃料サイクル開発機構，2005a；2005b；2005c）に取りまとめている。

このため，第 1 段階成果取りまとめにおいては，「第 1 段階目標に対して調査研究の成果を適切に取りまとめるとともに，課題を抽出・整理し，第 2 段階以降の調査研究の必要性を明確にすること」を基本的な方針として設定した。具体的には，H17 取りまとめ以降に得られた成果も含めて，第 1 段階における調査研究の全ての成果を集約し，取りまとめるとともに，H17 取りまとめで示した今後の課題や H17 取りまとめに対して頂いたご意見なども参考にしつつ，第 1 段階における調査研究を通じて整備してきた一連の調査・解析・評価の方法論や工学的な技術の基盤について再整理することとした。また，地層処分技術の知識基盤を整備していく観点から，地上か

らの調査研究におけるノウハウや失敗例などの経験，あるいは技術的知見についても可能な限り整理するように留意した。

幌延深地層研究計画の第1段階成果取りまとめは，深地層の科学的研究と地層処分研究開発の2分冊の報告書で構成される。このうち，深地層の科学的研究に関する分冊は，1.2.1に述べたように，地質環境調査技術開発，地質環境モニタリング技術の開発，地質環境の長期安定性に関する研究,及び深地層の工学技術の基礎の開発に関する調査研究の成果を取りまとめるものである。一方，地層処分研究開発に関する分冊では，人工バリア等の工学技術の検証，設計手法の適用性確認及び安全評価手法の適用性確認に関する調査研究の成果の取りまとめを行う。

1.3.2 分冊「地層処分研究開発」の位置付けと構成

「最終処分法」で示された段階的なサイト選定の進め方と照らして，第2次取りまとめで構築した地層処分技術を実際の地質環境に対して適用し，その経験や知見を，適用にあたっての留意点として整理しておくことは，技術の実証の観点から重要である。また，適用にあたり，直面した課題を解決するための技術の改良や代替技術の開発を行い，これらを併せて技術基盤として示していくことは，今後の地層処分の事業や安全規制にとって重要である。

このような観点から，本報告書では，堆積岩で塩水系地下水を対象とした幌延深地層研究計画において段階的に得られる地質環境条件を一つの適用例として，第1段階である地上からの調査で得られた情報をもとに，処分場の設計技術や性能評価技術それぞれの適用性について論じるとともに，必要に応じて実施した技術の改良や代替技術の開発状況を取りまとめたものである。なお，幌延深地層研究計画は実際の処分場を対象としたものではないことから，処分場のシステム全体ではなく，部分的なシステムの構成要素を対象とした設計技術や性能評価技術に焦点をあて，その適用性について最新の科学技術的な知見を取り入れて検討したものとなっている。

本報告書は，全4章から構成される。第2章「処分技術の信頼性向上―設計手法の適用性確認―」では，最新の知見を踏まえ第2次取りまとめにおいて示された処分場全体設計フローの見直しや人工バリアなどの設計手法の詳細化，ならびに設計における地質環境条件の一般的な留意点や設計入力データ項目について記述する。また，これらの一般的な整理を踏まえ，幌延の地質環境条件を一例とした場合の深度および設計入力データの設定，それらの入力データをもとにした施設設計，人工バリア設計および閉鎖設計を通じて第2次取りまとめで採用された設計手法の適用性について検討を行った結果を記述する。最後に，総括としてこれらの検討プロセスにおいて抽出された留意点や今後の課題について述べる。第3章「安全評価手法の高度化―安全評価手法の適用性確認―」では，第2次取りまとめにおいて示された安全評価手法を実際の地質環境に適用するために必要な具体的な作業をフローとして記述した。これに基づき，幌延の地上からの調査研究段階の地質環境条件を一例として行った物質移行解析を行った結果を記述する。これらの検討を通じて得られた，第2次取りまとめの手法を堆積岩地域に適用した場合の調査から解析・評価に至る一連の方法論および，その過程で得られるノウハウや知見，調査や解析上の留意点を記述する。第4章「おわりに」では，第2章から第3章までの記述を踏まえて，幌延深地層研究計画の第1段階における地層処分研究開発の成果を総括するとともに，第2段階以降の計画等今後の展開について記述する。

参考文献

秋山雅彦，保柳康一(1990)：“新第三系，天北地域”，「日本の地質 1 北海道地方」，共立出版会，pp.105-106.

原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会(2000)：“高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）”．

原子力安全委員会特定放射性廃棄物処分安全調査会(2002)：“高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について”．

原子力発電環境整備機構(2001)：“特定放射性廃棄物の概要調査地区等の選定手順の基本的考え方について”，官報，号外第 238 号，平成 13 年 11 月 8 日..

原子力委員会(1994)：“原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画”，平成 6 年 6 月 24 日．

原子力委員会(2000)：“原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画”，平成 12 年 11 月 24 日．

原子力委員会(2005)：“原子力政策大綱”，平成 17 年 10 月 11 日．

核燃料サイクル開発機構(2002)：“超深地層研究所　地層科学研究基本計画”，JNC TN7410 2001-018.

核燃料サイクル開発機構(2005a)：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－”，分冊 1　深地層の科学的研究，JNC TN1400 2005-014.

核燃料サイクル開発機構(2005b)：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－”，分冊 2　工学技術の開発，JNC TN1400 2005-015.

核燃料サイクル開発機構(2005c)：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－”，分冊 3　安全評価手法の開発，JNC TN1400 2005-016.

核燃料サイクル開発機構(2001)：“深地層研究所（仮称）計画 地表から行う調査研究（第 1 段階）計画”，JNC TN1410 2001-001.

核燃料サイクル開発機構(1999)：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－”，総論レポート，JNC TN1410 99-020.

核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会(2001)：“平成 13 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書 研究課題「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」”，JNC TN1440 2001-008.

核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会(2005)：“平成 16 年度研究開発課題評価（中間

評価）報告書　評価課題「幌延深地層研究計画」”，JNC TN1440 2005-002.

松井裕哉，新里忠史，山口雄大編(2006)：“幌延深地層研究計画 平成 17 年度調査研究成果報告”，JAEA-Research 2006-073.

中田高，今泉俊文編(2002)：“活断層デジタルマップ”，東京大学出版会.

岡孝雄(1986)：“北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス”，地団研専報，No.31，pp.295-320.

岡孝雄，五十嵐八枝子(1997)：“北海道・天塩平野北部の上部新生界－特に勇知層・更別層の堆積相と花粉化石層序について”，加藤誠教授退官記念論文集，pp.341-365 (1997).

2. 処分技術の信頼性向上 - 設計手法の適用性確認 -

地層処分計画における様々な意思決定に際し，その都度適切に地層処分の長期安全性を示していくためには，今後，文献調査，概要調査，精密調査と進む過程で特化され詳細化される立地点でのサイトの特徴に応じて，最適な処分場を設計していく必要がある（原子力発電環境整備機構，2004）。

このような段階的サイト選定プロセスにおいて繰り返し構築される処分概念は，①地上および地下施設・人工バリアの設計とレイアウト，②建設・操業・閉鎖・モニタリング，③操業時および閉鎖後長期間の安全性，④環境および社会経済的影響といった点が考慮され，長期的な安全性だけでなく，経済性や効率性といった実際に処分場を建設する場合において重要となる側面も含め，様々な観点で検討されるものと考えられる（原子力発電環境整備機構，2004）。

幌延深地層研究計画において実施した地上からの調査予測段階における研究は，処分事業に照らせば概要調査および精密調査の前半において想定される調査・検討作業にほぼ類似するものと位置づけられる。

概要調査においては，地質環境条件の空間分布は概括的な評価になることが予想され，それに基づき実施される処分場や人工バリアシステムの設計は，特に地層処分システムの安全性を精緻に示すというよりは，同じ手法を幾つかの候補地に適用し，それらの結果を照らし合わせて相対的に次段階の精密調査に移行するサイトを決定するための情報提供を行うレベルでの評価になるものと考えられる。

一方，精密調査前半においてなされる処分場や人工バリアシステムの設計は，概要調査のそれよりもはるかに精度・確度の高い地質環境情報に基づき行われるものであり，それは処分システム全体の成立性をかなりの確度をもって示すことが要求されるものと想定される。

このような想定を踏まえ，本章では第 2 次取りまとめにおいて示された考え方を基本とし，精密調査前半までにおける調査量とそれに基づく人工バリアシステムおよび処分場の設計という観点から，実際の地質環境情報が把握された段階において，どのような設計が可能となるのかという方法論を具体的に明示する。なお，今回の検討においては，以下のような点を前提条件として行った。

・処分形態は，処分孔竪置き方式とする。

・地下施設の試設計で使用する処分坑道・処分孔断面は，図 2-1 に示すものとする。

また，処分場レイアウトの検討および建設・操業・閉鎖技術に関する検討については，下記に示す理由より今回の検討から除外することとした。

処分場レイアウトの検討に関しては，処分場位置，処分パネルの形状・規模および配置，アクセス・主要／連絡坑道の配置などがあり，レイアウト設計上考慮すべきいくつかの設計要件が示されている。そのうち，「核種移行遅延性能に有意な影響を与えないように配慮がなされていること」については，処分場，処分パネルおよび坑道の配置・方向・数を検討する際の要件となり，その検討に際しては，安全評価も念頭に置いた地下水流動や物質移行の観点からの検討，さらには岩盤の規模の把握も必要である。しかしながら，地下研究施設においては，研究開発が主眼であり実際の処分事業の経路を全て実証的に示すことを目的としているわけではなく，また，種々の制約条件もあり，これら全てを考慮した検討を行うだけのデータが充足されているわけではない。上のことから，ここではレイアウトに関する検討を除外した。

一方，建設・操業・閉鎖技術の検討のうち，操業および閉鎖技術に関しては，第 2 次取りまとめ以降，関係機関との役割分担に基づき，操業・閉鎖に関するハード技術に関わる特段の検討を行っていないことから，ここでの検討からは除外した。また，建設技術については，地下研究施設の建設という観点から，分冊「深地層の科学的研究」の 5 章において検討の概要が示されていることから，本報での記載は除外した。

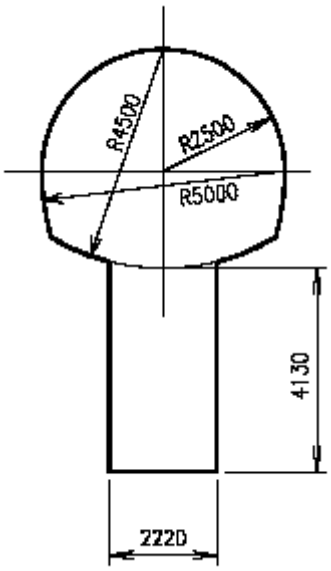


図 2-1 処分坑道・処分孔断面形状（核燃料サイクル開発機構，1999）

2.1 処分場設計の基本的考え方と手順

2.1.1 処分場設計手順の検討

図 2.1.1-1 に示す基本的な設計の流れ（以下，「H12 設計フロー」という。）は，処分場の深度などの前提条件を明らかにしたうえで，人工バリア，地上施設および地下施設それぞれの設計要件を設定した。そして，それに基づいて個々の構成要素に対する設計手順を明確にしたうえで設計解析を実施し仕様を設定するというものである（核燃料サイクル開発機構，1999）。また，設計要件はシステムとしての長期健全性を最優先としたうえで，人工バリア・地上施設および地下施設それぞれに求められる機能と現状の技術や近い将来達成可能な技術を考慮し，作業性や経済性も勘案して過度に保守的とならないように設定する必要がある。その際，岩石の種類や地下水の水質など実際のサイトが持つ環境条件を考慮することが必要となる。ここでは，前述したように第 2 次取りまとめにおいて示された考え方や手法を基本として，実際の地質環境条件に対する体系的な方法論を明示するため，これまでの最新の知見を踏まえつつ，H12 設計フローの見直しを考慮に入れた処分場全体の設計手順の検討を行った。

具体的には，設計手順が第三者にトレース可能であることを念頭に置きつつ，

①埋め戻しおよびプラグ設計の明示

②緩衝材とオーバーパックの力学的相互作用を考慮した設計手順の明確化

を行うため，設計相互の関連項目と影響を及ぼす因子などの整理を行った（表 2.1.1-1）。また，オーバーパックの腐食代の設定の観点から，緩衝材および埋め戻し材の仕様変更がどの程度のインパクトを与え得るかに関する検討も行い，それらの結果から，H12 設計フローをもとに処分場全体の設計手順の見直しを行った（松井ほか，2005）。図 2.1.1-2 に更新した処分場全体設計フローを示す。

なお，このような設計手法の構築に際しては，製作技術や施工技術などとの関連も考慮することが必要であるが，今回の検討ではこれらを考慮したものとなっていない。したがって，これらについては，今後の課題である。

ここで，更新した処分場設計フローと H12 設計フローとの主な変更点と理由を以下に示す。

①埋め戻し材，緩衝材の仕様設定上処分坑道のコンクリート支保厚さ，処分孔への支保工の要否が重

要となることから，それらの検討を行う「坑道・処分孔の空洞安定性の評価」を人工バリア設計の上位に配置した。

②オーバーパックの腐食代の設定に関しては，水の還元による腐食深さと酸素による腐食深さを合算し求める。このうち，後者に関しては緩衝材および埋め戻し材に取り込まれた酸素がすべて腐食によって消費されると仮定して評価を行うことから，これに影響を与える埋め戻し材の設計をオーバーパックの設計の上位に配置した。

③緩衝材とオーバーパックの力学的相互作用を考慮した設計の手順を明確化するため，「緩衝材単独設計」と「緩衝材仕様確認」に分割した。

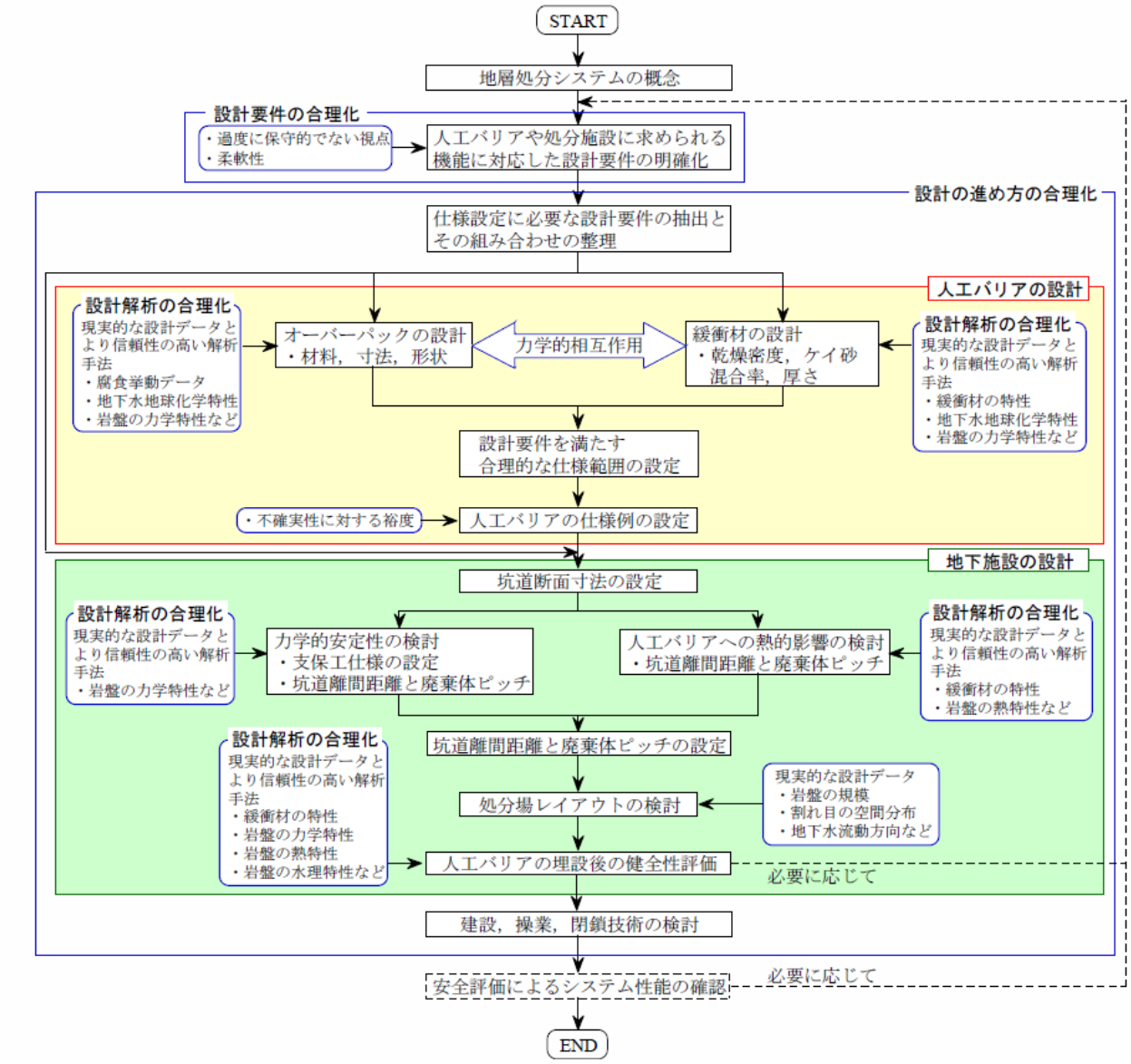


図 2.1.1-1　第 2 次取りまとめで示された処分場設計の基本的な流れ(核燃料サイクル開発機構, 1999)

表 2.1.1-1　処分孔竪置き方式における設計項目相互の関連と影響を及ぼす因子

対象	設計要件	設計項目	評価項目	要因		影響を及ぼす他の設計項目
オーバーパック	耐食性	腐食代	腐食深さ	酸素による腐食 水の還元による腐食	・緩衝材および埋め戻し材の間隙に含まれる酸素 ・ベントナイトに吸着している酸素	・緩衝材密度，ケイ砂混合率，厚さ ・埋め戻し材密度，ケイ砂混合率 ・坑道断面，廃棄体ピッチ
	耐圧性	厚さ，形状，材料	作用応力	緩衝材に発生する応力	緩衝材膨潤圧，圧密反力	緩衝材の密度，ケイ砂混合率，厚さ
	放射線遮蔽性	厚さ	局部腐食	水の放射線分解によるカソード電流	放射線場，酸化性化学種の移行	緩衝材密度，厚さ，ケイ砂混合率
緩衝材	応力緩衝性	厚さ，材料仕様	作用応力	緩衝材に発生する応力	オーバーパック腐食膨張量	オーバーパックの材料，厚さ，形状
	廃棄体支持	材料仕様	緩衝材強度	下部緩衝材にかかる荷重	オーバーパック重量	オーバーパックの材料，寸法
					埋め戻し材荷重	埋め戻し材密度，坑道断面
埋め戻し材	緩衝材の膨出対策	材料仕様	緩衝材の膨出量	緩衝材の膨潤，圧密挙動	緩衝材膨潤特性	緩衝材材料仕様
	坑道内の透水性を要求レベル以下に抑えること	材料仕様	自己シール性，透水性	埋め戻し材の膨潤，透水性	埋め戻し材の膨潤および透水特性	支保工の厚さおよび劣化の程度
処分施設	ニアフィールドの制限温度	廃棄体ピッチ	緩衝材の温度上昇	熱拡散	ニアフィールドの熱物性	緩衝材仕様，埋め戻し材仕様，坑道断面

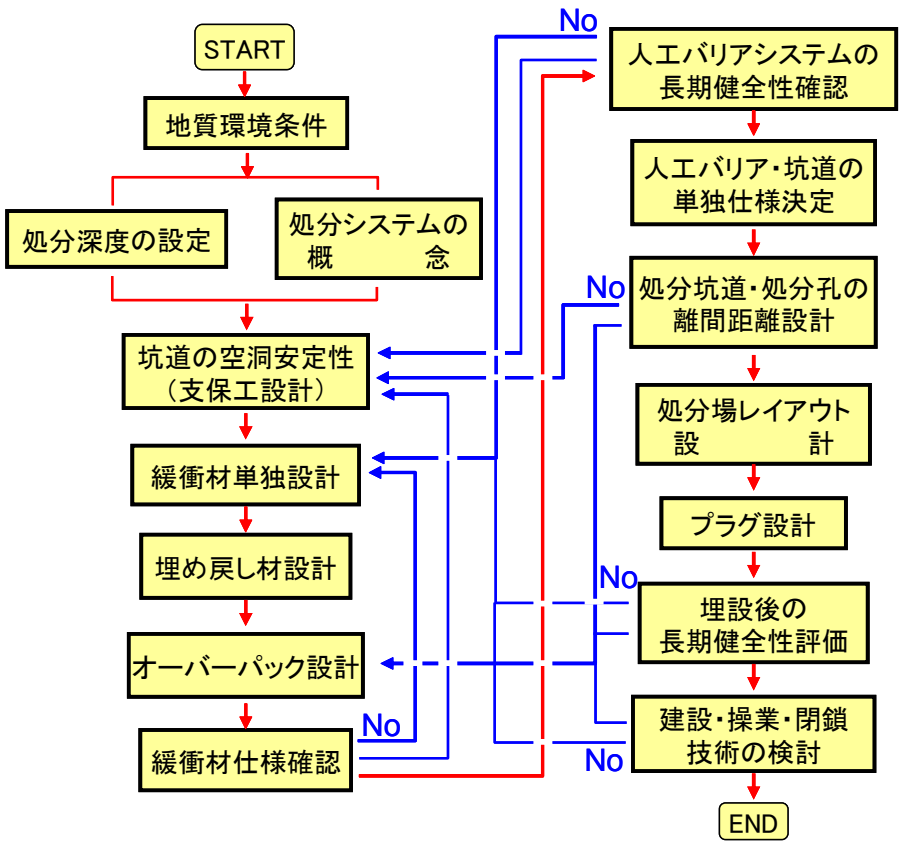


図 2.1.1-2　本検討にて更新した処分場の全体設計フロー（松井ほか，2005 を一部改定）

2.1.2 設計における地質環境条件の留意点

地下水組成や pH，地下水の酸化還元状態，さらには温度などの種々の特定の場所の地質環境条件や支保工材料，ガラス固化体の発熱などの地質環境以外の因子が，設計要件に挙げられている各性能に影響を与えることが考えられる。したがって，設計要件とそれに影響を及ぼす地質環境条件，ならびにその影響の内容を抽出し，地質環境条件などの変化への対応策を整理しておくことが特定の場所が選定された際に設計を実施するうえでも重要となる。このため，人工バリア設計（オーバーパック，緩衝材）および閉鎖設計（埋め戻し，プラグ）に影響を及ぼす地質環境条件と設計での対応との一般的な関係を，表 2.1.2-1～表 2.1.2-4 に整理した（栗原ほか，2004；杉田ほか，2003）。なお，これらの表で示した「影響を及ぼす地質環境条件」を設計入力データとして設定する必要があり，その具体的な内容を表 2.1.2-5 に整理した（栗原ほか，2004）。

表 2.1.2-1　オーバーパックに関する地質環境条件と設計の関係（栗原ほか，2004 を一部改訂）

設計要件	影響を及ぼす 地質環境条件	地質環境条件 以外の影響因子	影響内容	設計での対応
閉じ込め性，耐食性，耐圧性	地下水組成，地下水の酸化還元状態，温度	支保工材料の変質，緩衝材の化学的緩衝性，ガラス固化体からの発熱	腐食挙動，腐食速度	・材質 ・腐食深さ
	微生物の存在，温度	緩衝材中での増殖と活動，ガラス固化体からの熱	腐食挙動，腐食速度	・材質
	地下水圧，地圧，岩盤の力学特性	緩衝材の有効応力（岩盤のｸﾘｰﾌﾟ挙動，ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸの腐食膨張）	ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸに作用する外力	・材質 ・耐圧厚さ
放射線遮蔽性	地下水の酸化還元状態	ガラス固化体からの放射線	腐食挙動，腐食速度（水の放射線分解による酸化性化学種の影響）	・放射線遮蔽厚さ

表 2.1.2-2　緩衝材に関する地質環境条件と設計の関係（栗原ほか，2004 を一部改訂）

設計要件	影響を及ぼす 地質環境条件	地質環境条件 以外の影響因子	影響内容	設計での対応
低透水性	地下水組成（イオン強度），動水勾配 温度	ガラス固化体からの発熱	透水性	材料，仕様
		ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸからのガス発生	核種移行（緩衝材中のガス移行挙動による影響）	ｼｽﾃﾑとしての評価 ※1)
	割れ目の存在，地下水流速，温度		緩衝材密度（岩盤の割れ目内へのﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄの侵入による影響）	
コロイドろ過性，自己シール性	地下水組成（イオン強度），温度	ガラス固化体からの発熱	コロイドろ過性，膨潤性	材料，仕様
	割れ目の存在，地下水流速，温度		緩衝材密度（岩盤の割れ目内へのﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄの侵入による影響）	ｼｽﾃﾑとしての評価 ※1)
力学的安定性	地下水組成（イオン強度）	廃棄体形状，重量	オーバーパックの支持力	材料，仕様
	地圧，岩盤の力学特性	岩盤のクリープ挙動評価，ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸの腐食膨張量評価，ガス移行挙動評価	せん断破壊に対する安全性，ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸの支持力	ｼｽﾃﾑとしての評価 ※1)
応力緩衝性	地圧，岩盤の力学特性	岩盤のクリープ挙動 ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸの腐食膨張量	ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸに作用する外力	厚さ
熱伝導性	温度，岩盤の熱特性	ガラス固化体からの発熱，ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸ，支保工，埋め戻し材の埋設間隔	熱的な変質	材料，仕様 （施設設計における埋設間隔）
長期健全性	地下水組成（pH など），温度	支保工材料の変質	透水性，自己シール性など	ｼｽﾃﾑとしての評価 ※1)

※1)：評価結果により必要に応じて緩衝材，オーバーパックの材質と厚さ，または設計要件へフィードバックされる。

表 2.1.2-3　埋め戻し材に関する地質環境条件と設計の関係（杉田ほか，2003 を一部改訂）

設計要件	影響を及ぼす 地質環境条件	地質環境条件 以外の影響因子	影響内容	設計での対応
支保工の設置が想定される場合も考慮して，埋め戻し材に十分な膨潤性能をもたせること	地下水組成(イオン強度)，温度	支保工材料の変質	自己シール性	材料，仕様
充填された密度を長期にわたり維持し，地下水の流れで流出しないこと	地下水組成(イオン強度)，割れ目の存在，地下水の流速		密度(岩盤の割れ目内へのベントナイトの侵入による影響)	材料，仕様
坑道内の透水性を要求レベル以下に抑えること	地下水組成(イオン強度)，温度	支保工材料の変質	透水性	材料，仕様
緩衝材の膨潤圧に対して著しく変形せず，膨出を抑えること	地下水組成（イオン強度，pH)，地圧，静水圧，岩盤の力学特性	岩盤クリープ変位量，緩衝材の膨出	埋め戻し材の剛性	材料，仕様
緩衝材を劣化させる要因とならないこと		支保工材料の変質	透水性	材料，仕様

表 2.1.2-4　止水プラグ材に関する地質環境条件と設計の関係（杉田ほか，2003 を一部改訂）

設計要件	影響を及ぼす 地質環境条件	地質環境条件 以外の影響因子	影響内容	設計での対応
プラグ部分の透水性を低くすること	地下水組成(イオン強度)，温度	支保工材料の変質	透水性	材料，仕様
支保工，掘削影響領域を含めたプラグ周囲の低透水性を確保すること，また，連続性を遮断すること	地下水組成(イオン強度)，岩盤強度，割れ目頻度，掘削影響領域の広がり		低透水性やプラグ周囲の水理場	材料，仕様，切欠き部の設置

表 2.1.2-5　地質環境に関する人工バリア設計入力データ項目（栗原ほか，2004）

分類	設計入力データ項目
地球 化学	1)溶存酸素濃度，Eh，pH 2)地下水組成 ①優先：$HCO_3^-/CO_3^{2-}/H_2CO_3$，$SO_4^{2-}$，$HS^-/H_2S$，$Cl^-$，$CH_4$，イオン強度（Na，Ca，K，Mg，陰イオン） ②その他：P，NO_3^-，$NH_3(aq)$，NH_4^+，B
力　学	地圧，時間依存性パラメータ，変形係数，ポアソン比，一軸圧縮強度，引張強度
水　理	動水勾配，地下静水圧，流速
熱	温度，熱伝導率，比熱，地温勾配
その他	微生物（硫酸塩還元菌，メタン生成菌，鉄細菌），岩盤の割れ目の状態

参考文献

原子力発電環境整備機構 (2004): “高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性”, 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-01.

核燃料サイクル開発機構 (1999): “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－ 分冊 2 地層処分の工学技術”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-022.

栗原雄二, 油井三和, 棚井憲治, 川上進, 杉田裕, 谷口直樹, 平井卓, 小川豊和, 青柳茂男, 松井裕哉, 中山雅, 藤島敦 (2004): “人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境条件とした原位置試験環境の検討”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2004-006.

松井裕哉, 棚井憲治, 佐藤稔紀, 川上進, 西村繭果, 青柳茂男, 藤田朝雄, 谷口直樹, 菊池広人, 松本一浩, 油井三和 (2005): “設計技術（地下施設設計, 人工バリア設計, 閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN5400 2005-004.

杉田裕, 栗原雄二, 川上進, 神徳敬, 油井三和 (2003): “高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先(その 2)”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2003-015.

2.2 地上からの調査研究段階における設計手法の適用事例

2.2.1 地質環境条件および深度の設定

幌延の研究所設置地区のボーリング調査および深地層の研究施設の設計（以下，「幌延施設設計」という）からの情報を用いて，「深度設定の考え方」および「設計用物性値の設定」について述べる。幌延の深地層の研究施設計画の第 2 段階以降の調査は，深地層の研究施設にて行われる。よって，本検討では，ボーリング調査を行った HDB-3 孔と HDB-6 孔との間にある立坑位置を中心とした地下施設展開領域程度の範囲（図 1.1.1-2：数百 m 四方）を対象として検討を進める（図 2.2.1-1）。

(1) 深度設定の考え方

第 2 次取りまとめでは，地層処分の長期安全性，地質環境の特性（地下水の地球化学特性，地下水流動特性，岩盤の力学特性など），現状における建設技術や調査技術の適用範囲，設計で把握される処分深度の範囲（空洞の力学的安定性や人工バリアへの熱的影響）の 4 つの観点から概略検討を行い，想定深度は硬岩系岩盤で 1,000m，軟岩系岩盤で 500m としている。また，深度設定の主たる影響因子は，硬岩系岩盤では人工バリアの熱的影響（処分深度の廃棄体専有面積と緩衝材温度の関係）であり，軟岩系岩盤は空洞安定性（現実的な支保工厚で建設できる限界深度）としている。一方，最終処分法では処分深度は深度 300m 以深にすることが明示されている。これらを踏まえ，深度設定の検討範囲は，深度 300～500m とした。人工バリアは経済性を無視すれば任意の仕様で製作・設置ができ，地質環境に依存せず必要な耐用年数を満たすシステムを構築することが可能と思われる。このため，深度設定では，人工バリア近傍の地質環境に擾乱が生じるか否かが問題となり，擾乱のひとつとしてニアフィールド岩盤の破壊現象が想定される。この現象は，処分坑道周辺部の掘削影響領域（以下，「EDZ」という）における物質移行経路の形成，時間経過に伴う破壊領域拡大や異方的な変形による緩衝材厚さの局所的変化を生じさせ，結果としてニアフィールドの力学的安定性を損なう可能性がある（図 2.2.1-2）。したがって，人工バリアシステムのみならず安全評価に与える影響も大きいと考えられるため，深度設定に当たっての要件として，処分孔の力学的安定性が確保されること，設置環境として鉛直方向に均質で大きな岩体が存在すること，というふたつを設定した。後者の条件は，平面的には幌延の地下施設スケール（数百 m 四方）での地質的・物性的な不均質性は小さいと思われることによる。また，空洞の力学的安定性は，岩盤の力学物性と初期応力のバランスによって決まるものであるが，水平方向の処分坑道

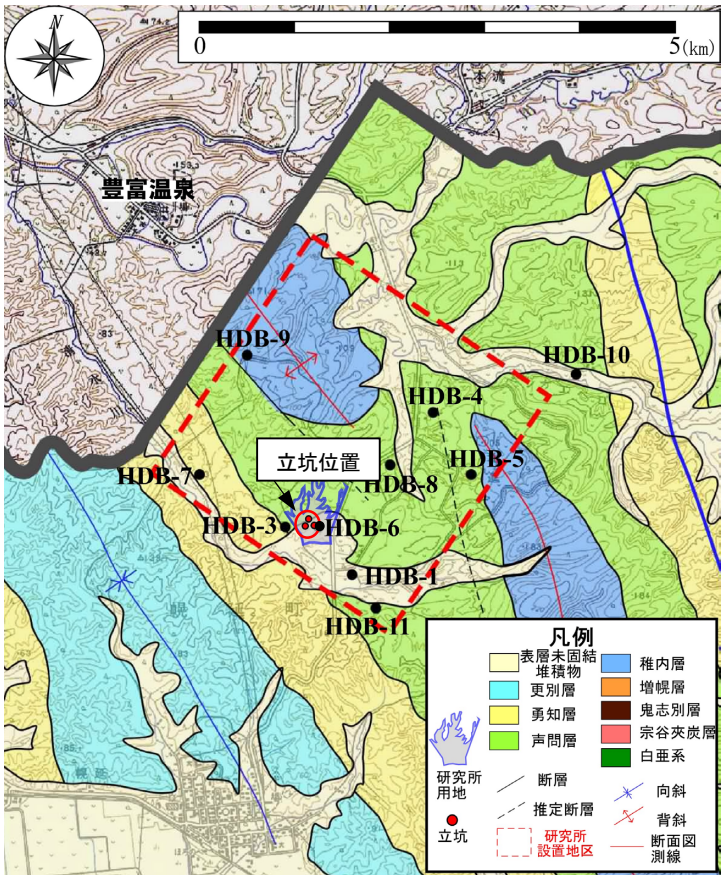


図 2.2.1-1　幌延深地層研究計画における地下施設建設予定地点

は，初期応力の方向が把握されれば，EDZ の発生を最小化する方向を選択可能である。したがって，上記条件を満たしうる深度の検討は，岩盤物性の鉛直分布に基づき行うこととした。図 2.2.1-3 に幌延の地下施設設計において評価された地下施設建設地点の岩盤等級区分を示し，表 2.2.1-1 に岩盤等級毎の変形・強度特性を示す。これらより，深度 450m 付近の岩盤（具体的には深度 434～474m 間の 40m 区間で岩盤等級は CM-H 級）が，ある程度の厚さを有しかつ処分孔の力学的安定性を満たし得る領域（詳細は，2.2.3 章に記述）と評価されたため，以降の検討は深度 450m を目安として実施した。表 2.2.1-1 に示す物性値の設定方法については，2.2.1 章(2)にて後述する。

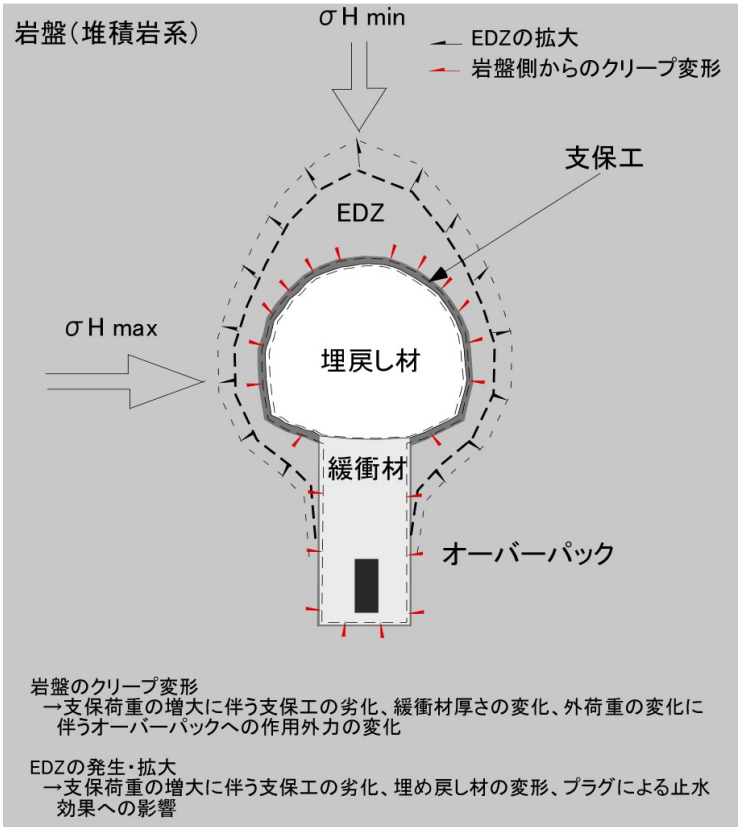


図 2.2.1-2　岩盤の安定性の観点から見た処分システムの設計に及ぼす影響因子

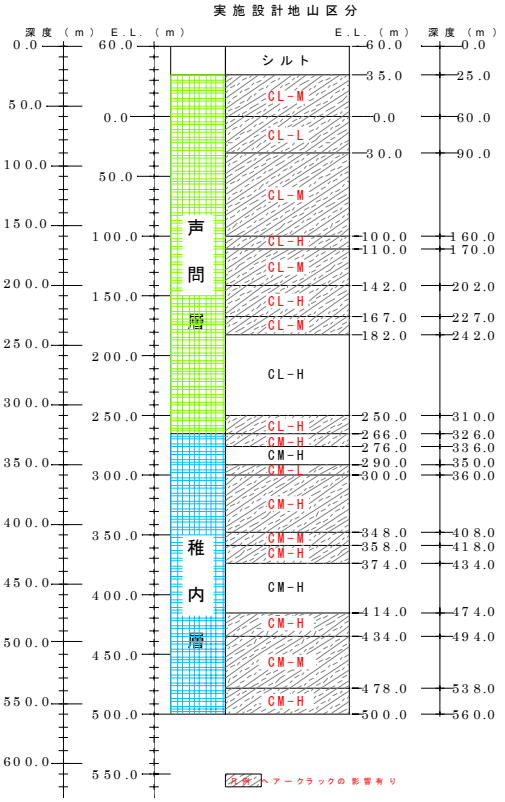


図 2.2.1-3　幌延地下施設設計に適用した岩盤等級区分

表 2.2.1-1　岩盤等級区分ごとの変形・強度特性

岩級区分	変形特性	強度特性		
	弾性係数 E [MPa]	粘着力 C [MPa]	内部摩擦角 φ [°]	一軸圧縮強度 σ_c [MPa]
CM-H	2,500	5.2	25.0	16.3
(Hr あり)	2,000	1.6	25.0	5.0
CM-M	1,500	3.1	25.0	9.7
(Hr あり)	1,350	1.9	25.0	6.0
CM-L	500	1.0	25.0	3.1
(Hr あり)	500	1.0	25.0	3.1
CL-H	1,300	2.2	15.0	5.7
(Hr あり)	1,040	1.5	15.0	3.9
CL-M	500	0.8	15.0	2.1
(Hr あり)	450	0.6	15.0	1.6
CL-L	300	0.5	15.0	1.3
(Hr あり)	300	0.5	15.0	1.3

※（Hr あり）とは，岩級区分毎に，ヘアークラックの影響を考慮し，物性を低減した区分をいう。（詳細は，図 2.2.1-10 を参照）

(2) 検討深度での地質環境条件の設定

幌延の研究所用地を対象とした地上からの地質調査結果（分冊「深地層の科学的研究」4.3.3 章，4.4.4 章，4.5.3 章および 4.6.3 章を参照）から，大曲断層西側領域の地質環境条件は以下のように概説される。

・地質学的・物性的な観点からは，深度 700m 程度までの範囲で鉛直方向に概ね 3 つのゾーン構成で説明でき，それぞれのゾーンは連続的な変化をしている（図 2.2.1-4；分冊「深地層の科学的研究」を参照）。

・岩盤中に存在する割れ目は 2 種類（層理面に高角に交わるものと層理面に平行なもの）に大別でき，岩盤の透水性に少なからず影響を及ぼしている可能性があるが，力学的物性への影響度合いは小さい。珪質泥岩中では深度の増加とともに透水性が減少する傾向が見られる。

・水圧分布は，特に高い被圧層は検知されておらず，鉛直方向には概ね静水圧分布していると考えられる。初期応力は，水平面内最大主応力方向は概ね東西方向であり，水平面内最大・最小主応力比は最大 1.5 程度である。

・地下水は深度が深くなるにつれ溶存成分濃度が高くなる傾向を示す。

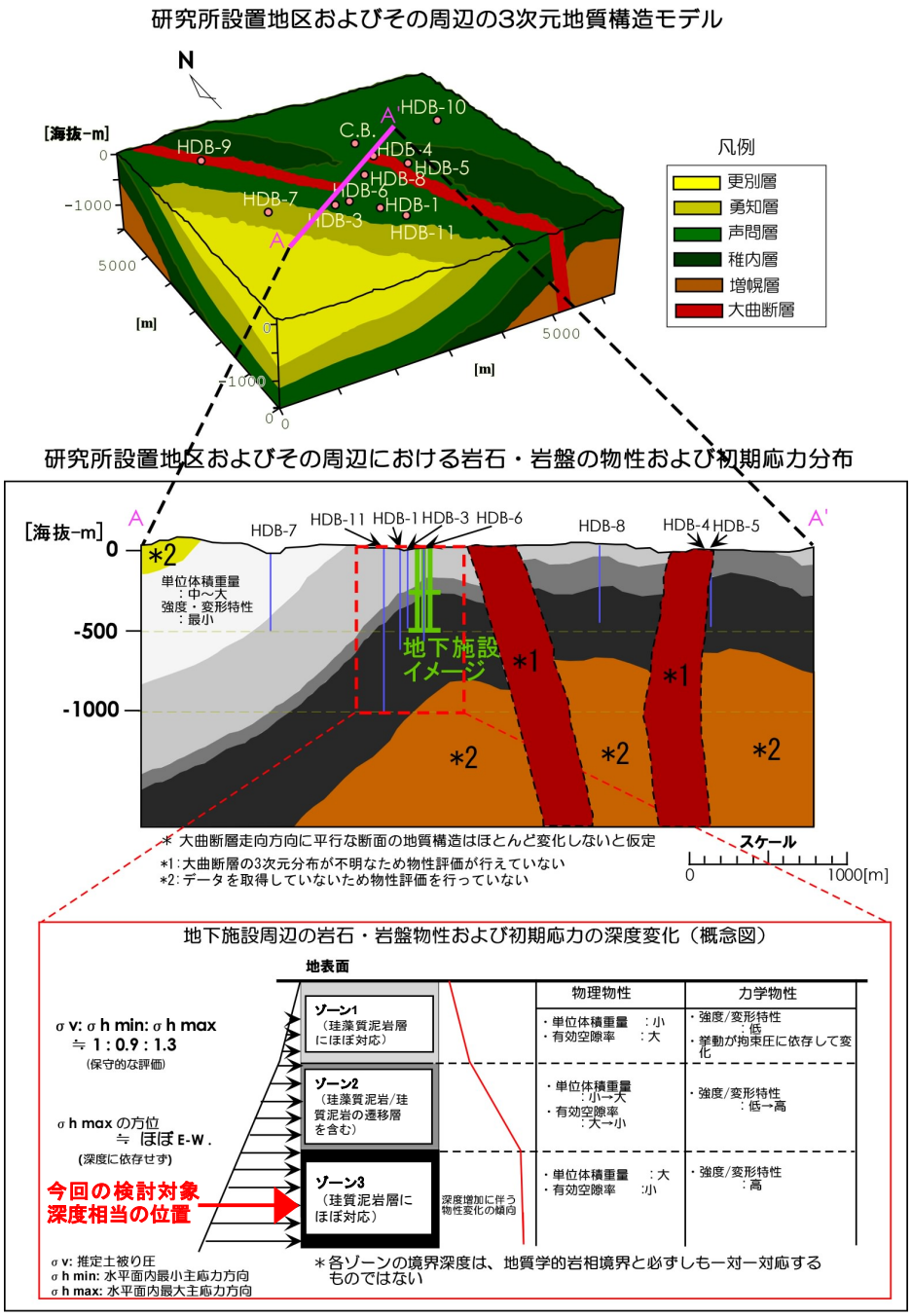


図 2.2.1-4　研究所設置地区およびその周辺における力学概念モデル

表 2.1.2-5 に示される人工バリアの設計入力データについては，ボーリング調査やボーリング孔から採取した試料を用いた室内試験のデータから，ゾーン区分ごとの相関性に着目し，検討対象深度（深度 450m を目安）の物性を決定することとした。力学物性については，幌延施設設計と整合をとるため，幌延施設設計用に設定された岩級区分による物性値を採用した。

大曲断層西側領域における地質的な声問・稚内層境界深度と力学的概念モデルに基づくゾーン区分（ゾーン 1，ゾーン 2，およびゾーン 3）については，以下のとおりである。ゾーン 1 は珪藻質泥岩層（声問層），ゾーン 2 は声問層と稚内層の遷移層で地質境界の上下 50m 程度の範囲（層厚約 100m）に相当しており，ゾーン 3 は珪質泥岩層（稚内層）に該当する。幌延施設設計では，建設予定地点の

声問層・稚内層の境界は深度 325m 付近と予測されているため，同地点のゾーン 1 下端境界深度（ゾーン 1 とゾーン 2 の境界深度）は深度 275m 程度，ゾーン 2 の下端境界深度（ゾーン 2 とゾーン 3 の境界深度）は深度 375m 程度となる。各ゾーン境界深度は物理検層結果に基づき決定することが可能であるため，ボーリング孔ごとの各ゾーンの境界深度を設定し，各ゾーン内での物性値の深度変化を検討した（分冊「深地層の科学的研究」4.6.3 章および 4.10.4 章を参照)。その結果，バラツキはあるが透水性や地下水の化学組成などを除く各ゾーン内での物性分布は概ね線形的に変化していることがわかってきたため，各ゾーン内の物性分布を表す線形補間式を作成し，検討深度の物性値を決定することとした（松井ほか，2005a)。

幌延の深地層の研究施設設置位置の深度 450m（ゾーン 3）（以下，「幌延 450m」という）における地質環境条件の設定例を以下に示す（松井ほか，2005a)。地上からの調査段階の限られたボーリング調査から，地下深部の幅広い地質状況を詳細に予測することは限界がある。したがって，人工バリアの設計に必要な地下深部の幅広い地質環境情報については，建設・原位置試験段階における施工実績や調査を通じてより理解を深めていくとともに，これらの情報を踏まえて段階的に解析用物性値の設定を見直していく必要がある。

以下に検討対象深度における物理特性，力学特性，初期応力，熱特性，地下水化学特性および水理特性に関する設定の考え方および設定値を示す。なお，設計検討項目とそれに用いた物性値との関連を表 2.2.1-2 に示す。

表 2.2.1-2　設計入力データと検討項目との関連

幌延における設計入力データ	データを用いて設計検討を行った項目
物理特性（密度，有効間隙率）	・熱的観点からの坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討 ・ガス移行挙動評価
力学特性（弾性係数，一軸圧縮強度，ポアソン比，粘着力，内部摩擦角など）	・単一坑道・単一処分孔の試設計 ・力学的観点からの坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討 ・岩盤の長期力学挙動評価
初期応力	・単一坑道・単一処分孔の試設計 ・力学的観点からの坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討 ・岩盤の長期力学挙動評価
熱特性（地温勾配，熱伝導率，比熱など）	・熱的観点からの坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討 ・ガス移行挙動評価
地下水化学特性（pH，Eh，イオン強度など）	・緩衝材の設計 ・オーバーパックの設計 ・緩衝材の長期力学挙動評価 ・緩衝材流出・侵入挙動評価 ・埋め戻し材の設計 ・プラグの設計
水理特性	・緩衝材の設計

1) 物理特性（密度・有効間隙率）の設定

図 2.2.1-5 に密度，図 2.2.1-6 に有効間隙率の設定図を示す。幌延のボーリング調査で得られたデータより，図に示す相関式を求め，幌延 450m の解析用物性値を，湿潤密度 1.89Mg m^{-3}，有効間隙率 39.7%と設定した。幌延 450m のゾーン 3 上端境界からの深さは 75m となる。有効間隙率は，設計に必要なパラメータではないが，力学特性や熱特性と相関があるため，参考までに設定する。

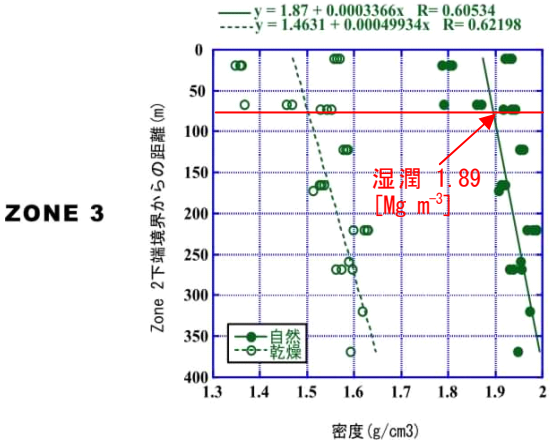


図 2.2.1-5 密度の設定

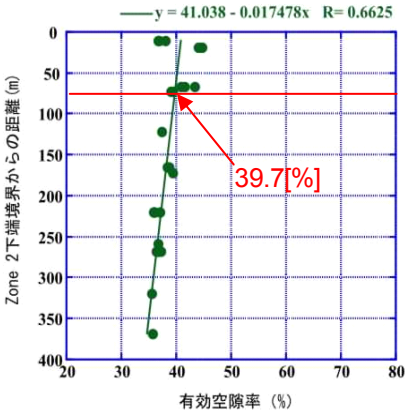


図 2.2.1-6 有効間隙率の設定

2) 力学特性の設定

力学特性として，岩盤強度（粘着力 C，内部摩擦角 φ），弾性係数 E，ポアソン比 ν，引張強度 T および初期応力について，幌延施設設計における設定例（分冊「深地層の科学的研究」5.2.4 章を参照）を以下に示す。図 2.2.1-7 のフローチャートに示すような手順で物性を設定した。設定には，幌延地下研究所に最も近い HDB-3 孔（山本ほか，2003），HDB-6 孔（山本ほか，2004a）のふたつのボーリング調査で得られたデータを用いた。なお，堆積岩では，一般に堆積方向の影響などにより変形特性や強度特性の異方性が存在することが多い。幌延の珪藻質泥岩，珪質泥岩では，室内試験の結果より鉛直方向が力学的に最小値を示す方向であったため，鉛直方向の試験結果に基づき力学物性を決定した（松井ほか，2005a）。

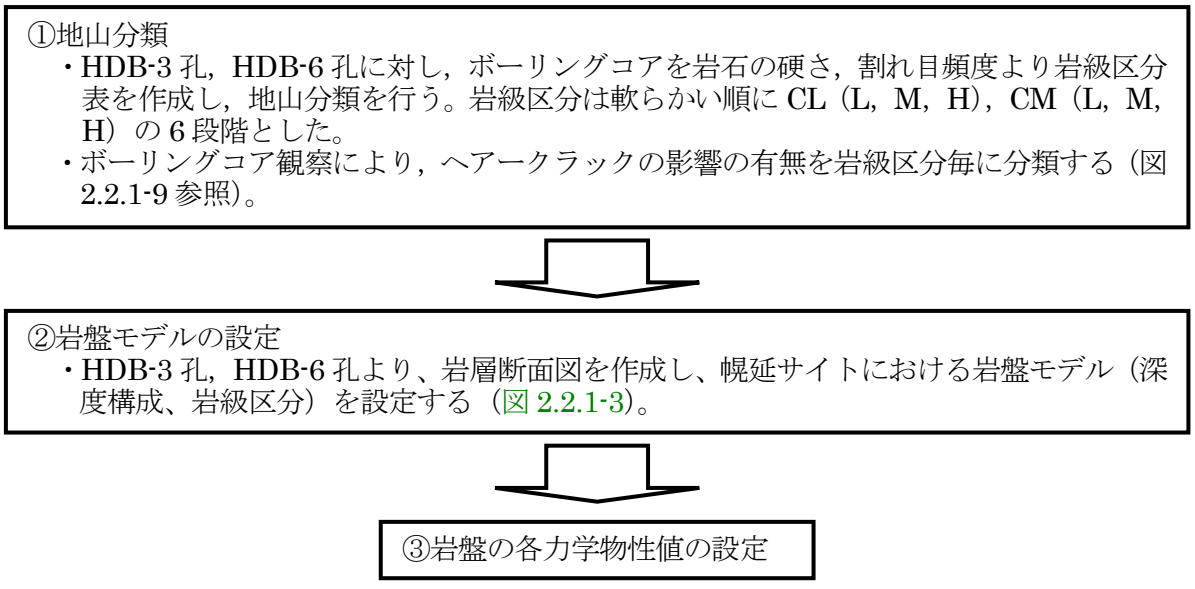


図 2.2.1-7 幌延施設設計における岩盤物性値の設定手法の概要

図 2.2.1-7 に示した方法は，HDB-3 孔，HDB-6 孔のデータより岩盤モデルを作成し，位置的にその間にある立坑位置（図 2.2.1-1）の地質環境を想定していることになる。処分事業では，処分坑道を展開する地下深部の地質環境を想定するうえでは同様の手段を採るものと考えるが，アクセス坑道の詳細設計に適用するという観点からは，地下研究所と異なり対象とするエリアが広くなるため，アクセ

ス坑道を配置する地点のごく近傍でボーリング調査を行い，そのデータに基づき設計することで，最も情報の少ない 1 本目のアクセス坑道における設計の不確実性や施工中の危険性を低減することができる。

図 2.2.1-7 の③にあたる岩盤の各力学物性の設定について述べる。ポアソン比 ν は，一軸圧縮試験結果より，静ポアソン比を算定し，ゾーンごとに平均した値で設定した。一軸引張強度は，表 2.2.1-1 に示す各粘着力 C，内部摩擦角 ϕ より，Mohr-coulomb の破壊基準である式（2.2.1-1）を用いて算出した換算一軸圧縮強度 σ_c の 1/10 として算出した（分冊「深地層の科学的研究」4.6.3 章を参照）。

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot C \cdot \cos\phi}{1 - \sin\phi} \qquad (2.2.1\text{-}1)$$

粘着力 C，内部摩擦角 ϕ，弾性係数 E の設定方法は，図 2.2.1-10 に示す。その方法を用いて設定された岩級区分ごとの解析用物性値が表 2.2.1-1 となる。以上のように設定した幌延 450m の設計用力学物性値を表 2.2.1-3 に示す。なお残留強度の物性値もピーク強度と同様の方法で，三軸圧縮試験（CD）の結果から設定した。時間依存性パラメータについては，岩盤の長期力学的変形挙動に関する研究として稚内層珪質泥岩を対象にコンプライアンス可変型構成方程式の定数 n，m の設定を実施している（大久保，2004：2005）。

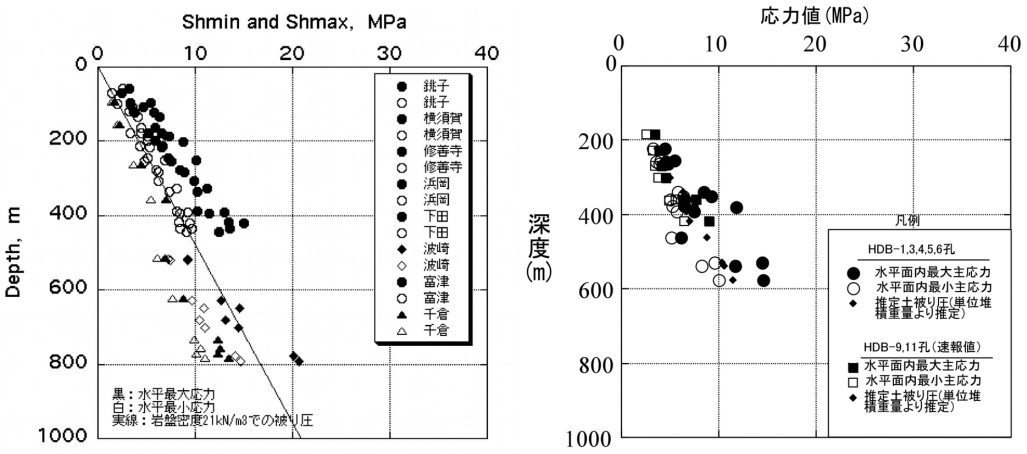
表 2.2.1-3　幌延 450m における設計用力学物性値

深度 [m]	岩盤等級	弾性係数 E[MPa]	一軸圧縮強度 σ_c [MPa]	ﾎﾟｱｿﾝ比 ν [-]	ピーク強度		残留強度		引張強度 [MPa]
					粘着力 c[MPa]	内部摩擦角 ϕ[°]	粘着力 c[MPa]	内部摩擦角 ϕ[°]	
450	CM-H,Hr 無	2,500	16.3	0.186	5.2	25.0	1.27	29.8	1.63

初期応力については，HDB-3 孔，HDB-6 孔のふたつのボーリング孔において実施した水圧破砕法による初期応力測定の結果から，表 2.2.1-4 に示すようにそれらの平均値を設定値とした。鉛直方向応力 S_v は，初期応力の測定結果と単位体積重量から求まる土被り圧とがほぼ一致していることから，土被り圧を用いることとした。表 2.2.1-4 に示した主応力の深度勾配は，国内の他地点で実施されている水圧破砕法の測定結果の傾向と矛盾しない（図 2.2.1-8）。なお，水平面内最大主応力（S_{max}）方向は概ね東西方向であり，鉛直方向土圧 S_v は土被り圧として，初期応力比は深度に依らずほぼ一定として考えることができる（松井ほか，2005b）。

表 2.2.1-4　初期応力測定結果と設定値

	ボーリング深度[m]	S_{max}/S_v	S_{min}/S_v		ボーリング深度[m]	S_{max}/S_v	S_{min}/S_v
HDB-6 孔	223.0	1.21	0.91	HDB-6 孔	529.5	1.59	1.08
	256.0	1.10	0.87		539.5	1.01	0.76
	338.1	1.56	1.06		576.0	1.47	1.00
	351.0	1.71	1.13	HDB-3 孔	263.5	1.02	0.80
	416.0	0.85	0.72		392.5	1.20	0.90
設定値（上記測定値の平均）	S_v：S_{max}：S_{min}＝1：1.3：0.9，水平面内応力比：1.4， S_v＝土被り圧，よって，S_v（450）=7.21MPa						



a) 岩盤密度が20～22kN/m3の8地点での水平面内最大・最小主応力の深度分布

b) 研究所設置地区およびその周辺における初期応力測定結果

図 2.2.1-8　国内の岩盤を対象に実施された水圧破砕法による応力測定結果と深層ボーリング孔における応力測定結果の比較（丹生屋ほか，2006）

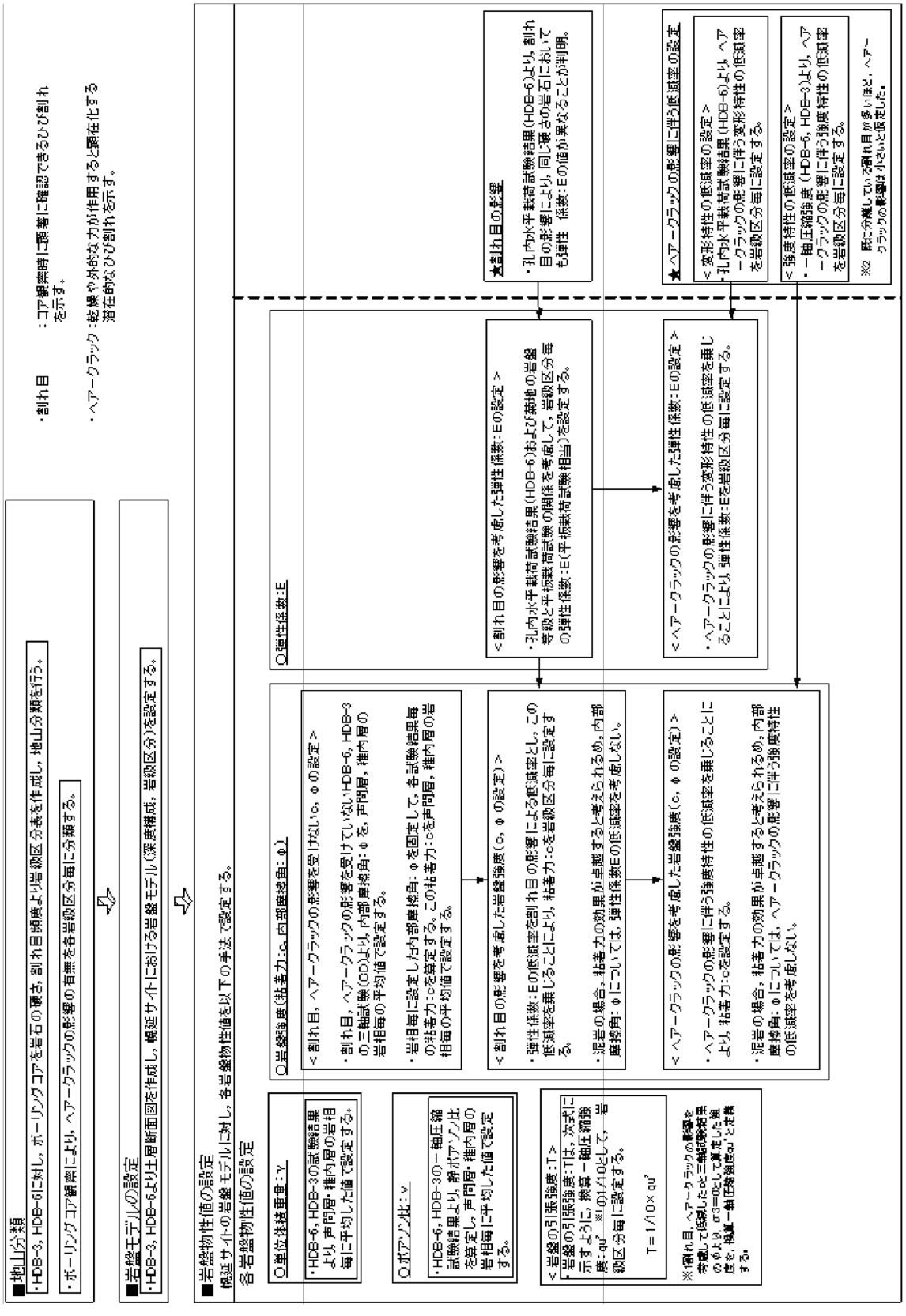


図 2.2.1-9　岩盤物性に及ぼす割れ目およびヘアークラックの影響

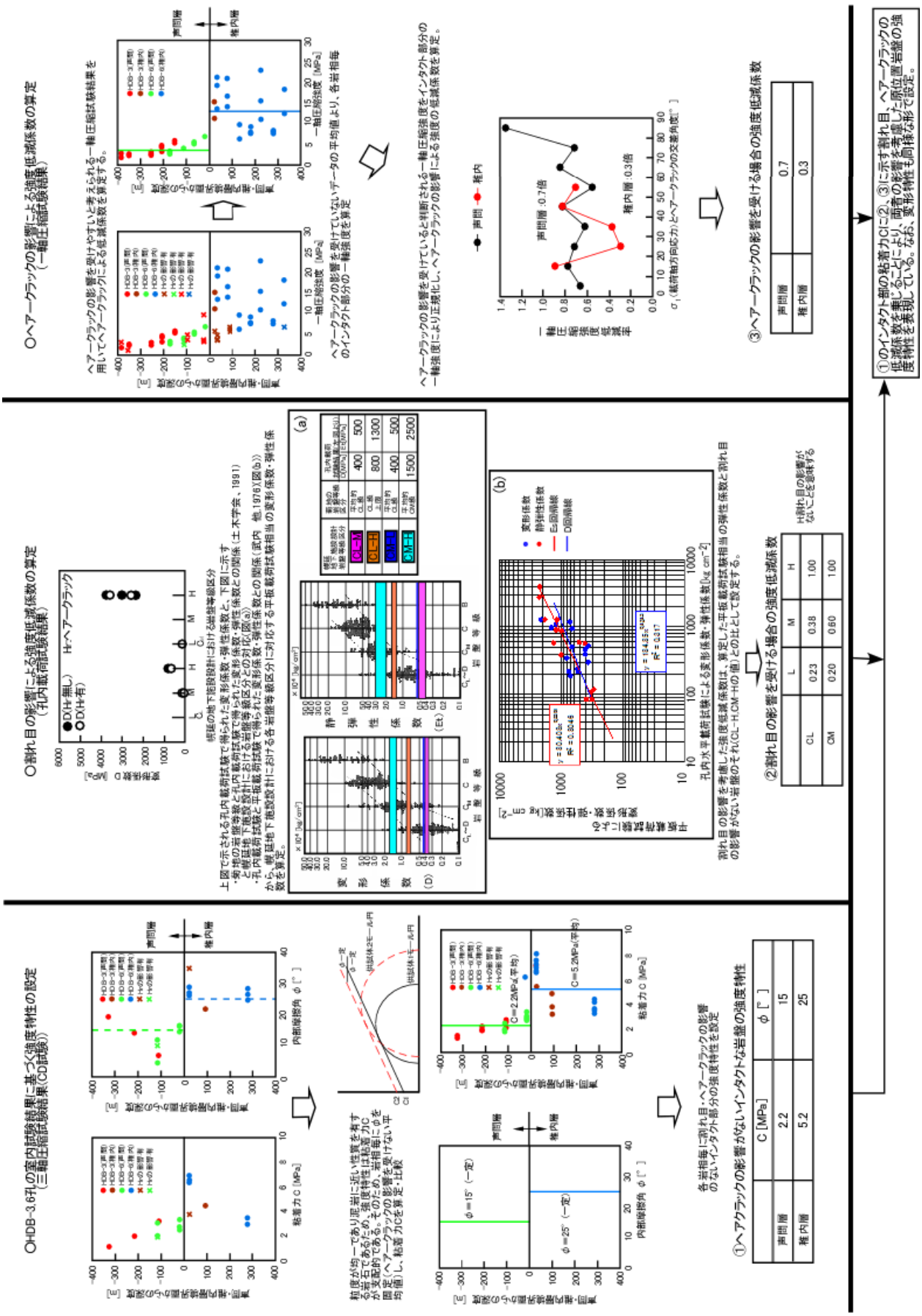


図 2.2.1-10　堆積岩における岩盤物性（粘着力，内部摩擦角，弾性係数）の具体的な設定方法（松井ほか（2005a）を参照）

3) 熱特性の設定

地温勾配に関しては HDB-1 孔（山本ほか，2002），HDB-3 孔，HDB-6 孔のボーリング孔で実施した温度検層と長期モニタリング装置を用いた温度測定によるデータが得られている（松井ほか，2005a）。このうち温度検層については，ある深度までボーリング孔が到達した段階でかつ掘削停止直後に実施されていることから，測定結果自体は正確な岩盤内の地温を測定しているものではなく，あくまで相対的な値として取り扱う必要がある。このような観点から，長期モニタリング装置（以下，「MP システム」という）によって得られた結果の方が相対的に信頼性は高いものと考えられる。MP システムによって得られた結果を図 2.2.1-11 に示す。ここで，図中に示した関係式において，y は温度（℃），x は深度（m）である。なお，温度と深度の相関を線形近似にしているのは，幌延における地下施設位置での地下水流動が遅いと考えられていることや，地温勾配に影響を与えるような熱源が近くにないことから，第 1 次近似として線形近似を適用した。図より HDB-1 孔と HDB-3 孔の結果には差があるが，地表付近で測定されていた水井戸（浅井戸）の水温が年間を通じて 7℃～9℃程度で安定していたことから，HDB-3 孔の結果を採用した（松井ほか，2005a）。しかし，データが少ないことから，上記の仮説等の妥当性は，今後の長期モニタリング観測で得られるデータを加味し検証する必要がある。

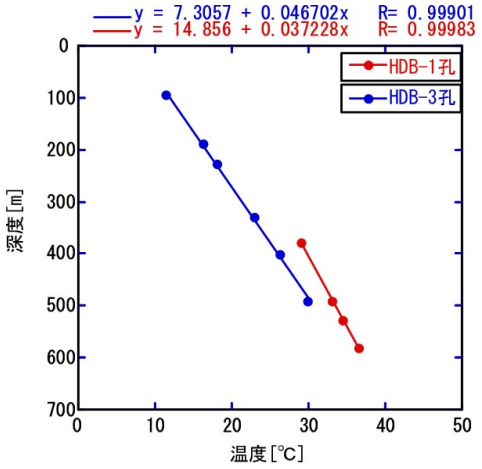


図 2.2.1-11 MP ｼｽﾃﾑで測定した地温勾配

熱伝導率，比熱および線膨張係数に関しては，岩相の違いからゾーン 1 とそれ以外（ゾーン 2 およびゾーン 3）という区分で評価している。また，50～60℃程度の温度を境に熱特性が変わる結果が得られているため（山本ほか，2004b），60℃を目安としてそれより低い場合と高い場合に区分した。さらに，飽和，自然および乾燥状態に分け深度方向の変化も合わせてデータを整理し相関式を導出している（松井ほか，2005a）。これらの整理を踏まえ，かつ上述した地温勾配により求められた検討対象深度における地温を考慮し，60℃以下での飽和状態における相関式（図 2.2.1-12 および図 2.2.1-13）のうち，検討対象深度の地温（28.3℃）に最も近い相関式を用いた。すなわち，熱伝導率については 25℃，比熱については 30℃，さらに線膨張係数に関しては 40℃での相関式により算出した（松井ほか，2005a）。なお，ゾーン 1 では，線膨張係数が負の値を示す場合がある。一つの要因としては，鉱物への吸着水の蒸発などが考えられるが現時点では明確ではない。この領域で熱負荷が発生する場合は，より詳細な検討が必要と考えられる。

熱特性に関する設定値を表 2.2.1-5 にまとめて示す。

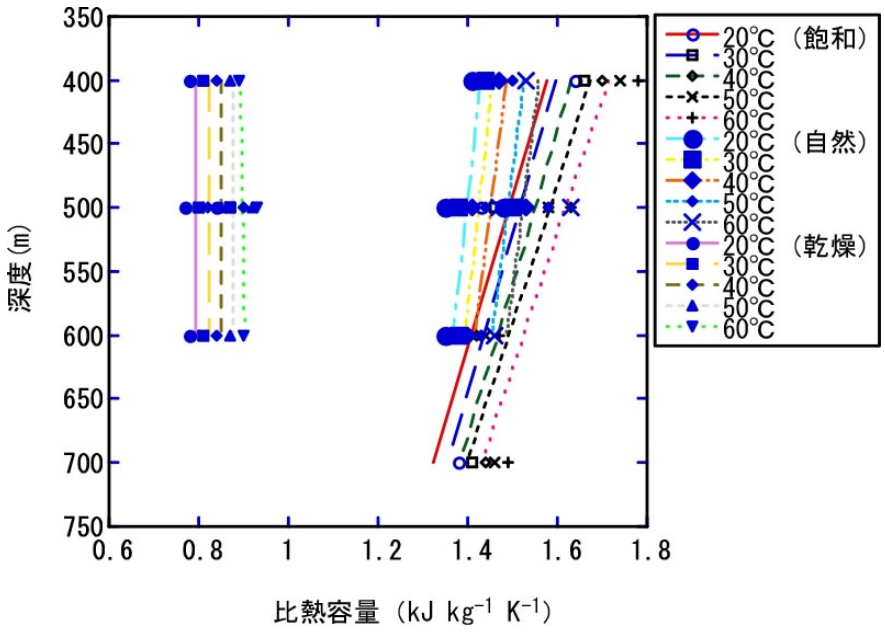


図 2.2.1-12　温度 60℃以下，ゾーン 2，ゾーン 3 における比熱の分布

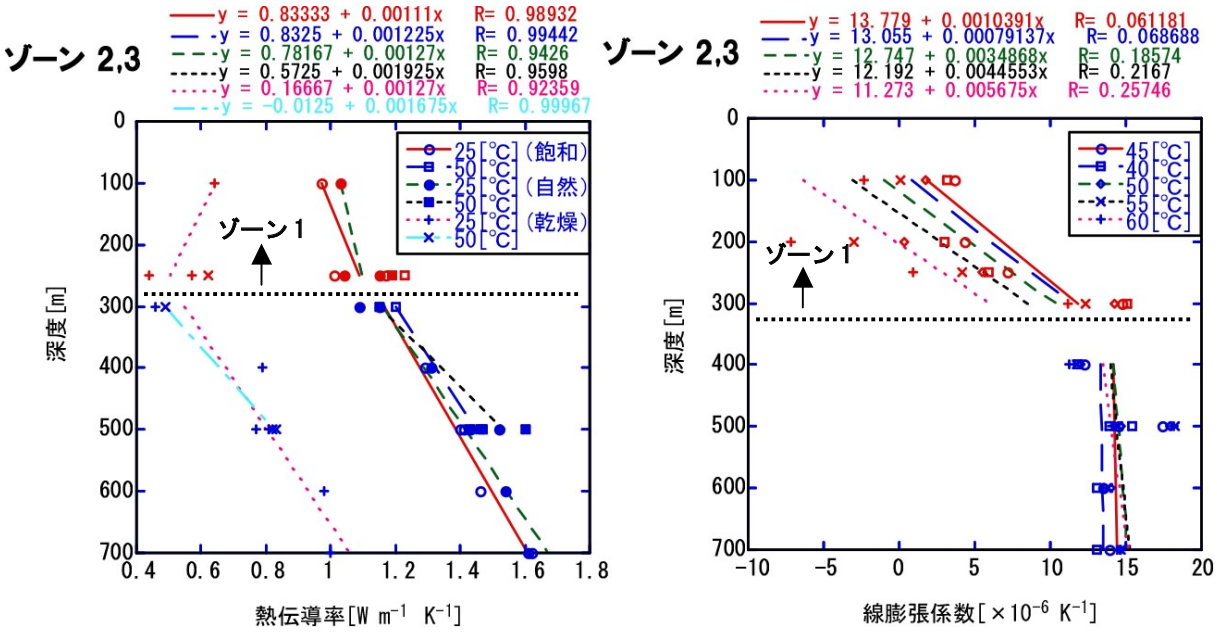


図 2.2.1-13　温度 60℃以下，ゾーン 2，ゾーン 3 における熱伝導率，線膨張係数の分布

表 2.2.1-5　検討対象深度（幌延 450m）における熱特性の設定値

地温勾配	・地温勾配：4.7℃/100m ・地温：28.3℃（450m）
熱伝導率	1.33 W m^{-1} K^{-1}　（25℃での相関式により算定）
比熱	1.56 kJ kg^{-1} K^{-1}　（30℃での相関式により算定）
線膨張係数	13.41×10^{-6} K^{-1}　（40℃での相関式により算定）

4) 地下水化学特性の設定（「分冊　深地層の科学的研究」の 4.4 章を参照）

幌延の研究所用地を対象とした人工バリアなどの設計入力データとして地下水の水質を設定するにあたって，幌延の深地層の研究施設設置予定地に最も近いボーリング孔である HDB-6 孔（孔長約 600m）の地下水分析結果を基本とした。幌延地域でこれまでに取得された地下水データには，地層中の地下水を地表にくみ上げて分析された「地層水」と岩石コアから抽出された「コア抽出水」が含まれる。HDB-6 孔では異なる深度において，地層水 2 点，コア抽出水 9 点の計 11 点のデータが得られている。コア抽出水は，岩石コアを一軸圧縮式の抽出装置を用い最大 70MPa の圧力で圧縮・抽出された水である。よって，抽出過程における大気との接触やコア中の鉱物の溶解・沈殿などにより，本来の地層水とは異なる可能性があるため（例えば，Pearson et al.，2003），データの利用にあたっては値の信頼性について留意する必要がある。設定にあたっては HDB-6 孔の地下水データに基づき，深度方向での地下水水質の深度依存性に関する知見，地下水水質の熱力学的解析結果，幌延地域の地層中に認められる鉱物に関する情報を総合的に考慮し，研究所設置予定深度である深度 450m の地下水の水質を推定し，これを幌延 450m での地下水化学特性の設定値（表 3.3.3-1）と仮定した（松井ほか，2005a）。この推定値は，地球化学コード PHREEQC（Parkhurst，1995）および熱力学データベース（Yui et al.，1999）を用いて 25℃で計算した値である。なお，これらの設定に関しては，現在の地質環境や地下水化学条件に基づいたものであり，将来的な変動の可能性も考慮した評価については，今後の課題である。

5) 水理特性の設定（「分冊　深地層の科学的研究」の 4.3 章を参照）

サイクル機構が実施している地下水流動解析結果で得られた要素ごとの動水勾配は，深度 450m 地点付近（E.L.-500m 付近）を含む部分において概ね 0.02 より小さい動水勾配を示す結果が得られている（操上ほか，2005）。また，同解析では，深部に向うほど南 - 南西方向への流れを示す結果が得られているため，地下施設建設予定位置に近い北東 - 南西方向において HDB-3 および HDB-6 孔を中心とした 400m 間の平均動水勾配を算定した結果，検討対象深度(G.L.-450m 程度)を包含する上下 100m 程度の区間の平均動水勾配は，0.007～0.01 程度と小さい。さらに，地下施設中心位置（3 本の立坑中心位置）における動水勾配の深度分布（図 2.2.1-14）を見ると，先の E.L-500m 付近で 0.01 程度の値を示しているため，本検討における動水勾配の値としては，0.01 を採用するものとした。一方，透水係数については，地下水流動解析において，稚内層の透水係数分布を最もよく説明できる評価式として，稚内層で見られる透水係数の深度依存性および割れ目の幾何学特性により生じる透水異方性を考慮したものを用いている。しかしながら，検討対象深度である 450m地点の岩盤（3.2 章参照）は，微細な割れ目の影響もほとんどないと評価されている部分であり，原位置透水試験結果から，割れ目の多少によらず，岩盤としての透水性は深度の増加とともに低下する，いわゆる深度依存性を有することが確認されている（操上ほか，2005）。以上のことから，検討対象深度（450m）においては，割れ目の幾何学性に依存する透水異方性はないものとして，稚内層全体の透水性を深度依存性も含め表現できる式（2.2.1-2）（操上ほか，2005）で算出す

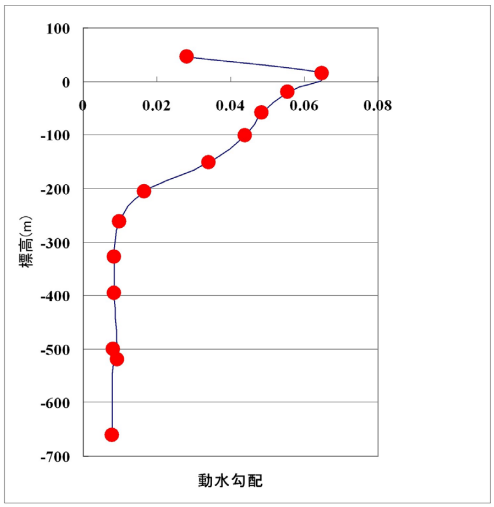


図 2.2.1-14 地下施設中心位置（立坑 3 本の中心位置）での要素ごと動水勾配の深度分布

ることとした。

$$\log(k) = -0.0105z - 3.9118 \qquad (2.2.1\text{-}2)$$

ここで，z は地表面からの深度であり，検討対象深度（G.L.-450m 程度）では，透水係数 k は 2×10^{-9}m s^{-1} となる。

2.2.2 地質環境条件を考慮した留意点

前項において述べられた幌延における地質環境条件の特徴をひとつの事例とした設計手法適用上の留意点を表 2.2.2-1 に示す（松井ほか，2005a）。幌延における地質環境条件で特に留意すべき特徴としては，①堆積軟岩であること，②海水系地下水であること，および③メタンガスが存在することから，2.2.3 章の施設設計以降においては，これらの特徴をひとつの事例として，空洞の安定性の検討（支保設計），力学的および熱的観点からの坑道離間距離と廃棄体ピッチの検討，さらには海水系地下水の[1]影響を踏まえた人工バリアおよび埋め戻し材の試設計などの結果について示す。

表 2.2.2-1　幌延における地質環境条件をひとつの事例とした設計手法適用上の留意点

項　目	幌延の特徴	設計手法適用上の留意点
地質構造	・検討対象深度 450m（434～474m） ・対象岩盤の広がり：鉛直方向は 40m 程度の厚さ，水平方向は地下施設スケールで地質構造にそって連続的に広がっていると推定 ・珪質泥岩および珪藻質泥岩から珪質泥岩へ遷移的に変化する岩盤部（稚内層）が存在 ・断層の存在（直接確認はされていない）	検討対象外
岩盤力学（強度と応力）	・岩盤等級：CM-H 級（軟岩～中硬岩） ・水平面最大主応力方向：東西方向 ・異方的な応力状態（鉛直 1.0，水平最小主応力 0.9，水平最大主応力 1.3 程度） ・多孔質であるため，一定応力下での継続的な岩盤の変形（クリープ）や掘削直後の水 - 応力連成現象が無視できない可能性あり。 ・強度特性，変形特性および一部の物理特性に異方性をもつ。	・処分孔への支保工の設置の要否 ・空洞安定性評価 ⇒支保工材料の検討（低アルカリ性コンクリート支保工の適用性） ・力学的観点による坑道離間距離，廃棄体ピッチの評価 ・耐震安定性の評価 ・岩盤の長期力学変形挙動の評価（緩衝材・オーバーパック設計へ反映） ・水 - 応力連成現象の評価（設計された支保工や空洞周辺岩盤の安定性の確認） ・異方性を考慮した物性値の設定
熱特性	・地温勾配：4.7℃/100m ・検討対象深度における温度：約 28℃ ・岩盤の熱物性（熱伝導率 1.33 W m^{-1} K^{-1}，比熱 1.56 kJ kg^{-1} K^{-1}） ・異方性をもつ。	・熱的観点による坑道離間距離および廃棄体ピッチの評価（人工バリア仕様の確認）
水理特性	・原位置透水試験結果から，10^{-11}～10^{-5}m s^{-1} の範囲であるが，室内試験結果なども踏まえ，保守的に 2×10^{-9}m s^{-1} と設定 ・地下研究施設中心位置における動水勾配の値は，0.01 程度であり，第 2 次取りまとめで示された最も頻度の高い値とほぼ一致 ・ほぼ静水圧分布 ・地下水流動は，深くなるにつれて南若しくは南西方向への流れが卓越（推定） ・大きな被圧帯は確認されていない	・緩衝材の設計（拡散場の保持の有無）
地下水化学特性	・塩化物イオン濃度が 0.1～0.4M と比較的高い海水系地下水 ・pH は約 6～7 のほぼ中性 ・トータルの炭素が約 0.1M 以下と推定 ・炭酸塩濃度は，0.1M 以下	・緩衝材，埋め戻し材および止水プラグの性能に与える影響を考慮した設計 ・オーバーパック材料の耐食性に与える影響（設計）
その他	・メタンガスの存在	・ガス湧出量の評価（事故の発生・拡大の防止，換気・避難にかかわる避難経路の確保ができるような地下施設の設計（規模，数，配置）へ反映）

2.2.3 施設設計手法の適用事例

図 2.1.1-2 に示す処分場の全体設計フローのうち，地下施設設計に係わる，「空洞の力学安定性の検討」，「坑道の離間距離および廃棄体ピッチの検討」について，幌延の地上からの調査段階を対象として検討された設計手法，および表 2.2.1-3～表 2.2.1-5 に示す幌延の深度 450m の地質環境の設定データを用いた試設計結果を以下に示す（松井ほか，2005a）。

(1) 地上からの調査段階を踏まえた設計手法の検討

実際の地質環境を対象とした地下施設の設計手法（空洞の力学的安定性）の検討例として，幌延の深地層の研究施設で採用されている設計手法（松井ほか，2005a）の中から，地下施設の設計手法として適用できる項目について，第 2 次取りまとめの手法と比較し整理するとともに，堆積岩における設計上の留意点や今後の課題を抽出した。

1) 検討手順

第 2 次取りまとめにおける空洞安定性評価および支保工設定は，以下の 3 つのステップを踏んで行われている（核燃料サイクル開発機構，1999）。

ステップ 1：各坑道に対して理論解析で支保工仕様を算定する。

ステップ 2：数値解析によりアクセス坑道を単一空洞，その他の坑道を連設空洞として，理論解析で求めた支保工仕様の妥当性を確認するとともに，坑道離間距離，廃棄体ピッチを設定する。

ステップ 3：ステップ 2 までで設定された支保工仕様で数値解析により坑道の耐震性を照査し，坑道交差部の補強工の必要範囲を設定する。

幌延施設設計における設計手順について，ステップ 1 は，以下を考慮し，既知である岩盤物性などの情報に基づきロックボルトの打設パターンも組み込まれている標準支保パターンを経験的手法により作成し，空洞安定性評価を行うことを基本とした。

・深地層の研究施設の建設地点が決定しておりかつ当該地点の力学特性（岩石・岩盤物性，初期応力状態）の情報が存在していること
・第 2 次取りまとめのように建設可能性を探るジェネリックな観点での評価ではないこと
・通常の地下構造物の施工ではロックボルトはひとつの重要な支保工である反面それをモデル化する手法が確立されていないこと

ステップ 2 以降は，地下 500m という大深度の構造物建設の事例が少ないため経験的手法のみで空洞安定性を保証できないことと，可能な限り合理的な設計手法を確立するという考え方から，数値解析的な手法（2 次元弾完全塑性解析）により作成した暫定支保パターンに対する検討を行っている。坑道交差部は，3 次元的な坑道形状・配置を考慮した弾性解析により影響範囲を把握した後，再配分された 3 次元的な応力を再度既設の支保工に作用させて健全性を照査している。

2) 空洞の安定性評価指標

空洞の安定性評価の指標について，第 2 次取りまとめと幌延の深地層の研究施設の違いを表 2.2.3-1 に記し，以下にその理由を述べる。

表 2.2.3-1　空洞安定性評価指標の比較

指　　標	第 2 次取りまとめ	幌延の深地層の研究施設
①支保工の応力	許容応力度以内	許容応力度以内
②応力状態	局所安全率 1.5 を下回る領域が対策工により改良可能な範囲であること	塑性領域が対策工（ロックボルト）により改良可能な範囲であること
③変形（岩盤の直ひずみおよび最大せん断ひずみ）	図 2.2.3-1 の式②（中央値）を上回る領域が対策工により改良可能な範囲であること	情報化施工のための指標

表 2.2.3-1 に示す空洞安定性評価の指標は，①支保工応力度，②岩盤の局所安全率，③岩盤の直ひずみおよび最大せん断ひずみ（図 2.2.3-1）の 3 つを用いている。③については，解析技術の進歩により簡易に複雑かつ詳細な支保設計が可能となり，現在は主として施工時に測定される変位量から再度空洞安定性評価を行い，それを当初設計仕様の見直しにフィードバックする，いわゆる情報化施工のための重要な指標として使われることが多くなっている。②は定量的ではなく定性的な判断基準（どのような対策工がどの程度の範囲必要か）に留まっており，最終的な空洞安定性の評価は①に基づいて行われている。さらに，実施工を考えると支保工設置前の空洞安定性（ゆるみ岩塊の抜け落ちなど）も安全上の観点から非常に重要となる。したがって，以上を踏まえた幌延施設設計にならい，実際の地質環境を対象とした処分場の単一坑道の設計においては，①許容応力度設計法による支保工の健全性照査，②弾塑性解析で得られる塑性領域の幅に対する許容値の設定（通常のロックボルトによる施工で塑性領域となった岩盤の補強が可能な範囲）のふたつの基準を設け単一坑道・単一処分孔の支保工の設計を行うこととする。一方で，1 パネル 50 本といった大規模な連接空洞の設計は，地層処分特有の課題であり，一般的な地下構造物での設計・施工例がこれまでになく，その設計の妥当性が確認されていないため，安全に裕度を持たせた評価・設計が必要となる。現段階では，表 2.2.3-2 に示す評価指標を用いることとするが，今後は，岩盤のクリープ挙動，地下深部の静水圧の影響，さらには構造的な破壊モードなども考慮して，設計手法や評価指標の妥当性を検証していくことが必要である。

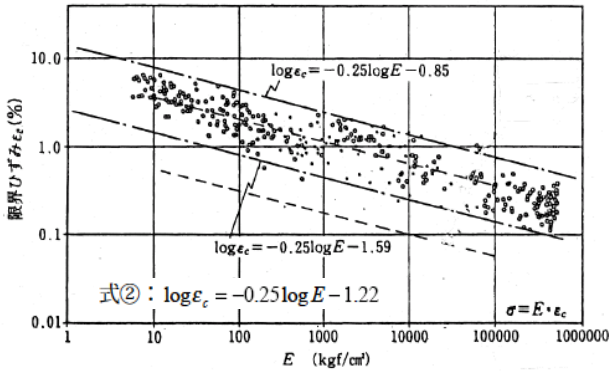


図 2.2.3-1　限界ひずみと弾性係数の関係　（桜井・足立，1988）

表 2.2.3-2　坑道離間距離，廃棄体ピッチの空洞安定性評価指標

1	隣接坑道間に局所安全率 1.5 以上の領域が十分確保されていること
2	坑道離間距離は最低でも掘削幅の 2 倍以上であること
3	支保工応力は，支保材料の設計基準強度に対し，所要の安全度を確保する応力以下であること
4	坑道離間距離を縮めることにより坑道周辺の最大せん断ひずみ分布が大きく変わらないこと

3) 地質環境を考慮した設計項目

2.2.1 章(2)に示すように，幌延の研究所用地に分布する岩盤は，「工学的には軟岩から中硬岩に分類される堆積岩」，「異方的な応力状態」，「多孔質」，「岩石物性の異方性」という力学的特徴を持っている。よって，堆積軟岩を対象とした処分場設計の際に，新たに検討する必要があると考えられる項目を幌延の施設設計を通じて表 2.2.3-3 のように整理した。

表 2.2.3-3　堆積岩の施設設計において新たに検討が必要と思われる項目

1	地盤が異方的な応力状態にある場合の安定性に関する検討
2	建設，操業期間を対象とした岩盤の長期変形挙動に関する検討
3	多孔質な岩盤である場合に考慮すべき掘削直後の水-応力連成現象に関する検討
4	岩石物性の異方性を考慮した解析用物性値の設定方法に関する検討

松井ほか（2005a）では，表 2.2.3-3 の 1～3 の 3 点について，幌延の深地層の研究施設を対象とした検討例を示しており，弾完全塑性解析の結果に基づき設計された支保工および施工計画に対して，問題が生じる可能性は低いことを確認している。4 については，異方性があったとしても，最小値の方向と値が把握されていれば，保守側の設計として対応することが可能である。本検討でも，そのようなデータがボーリング調査より採取されている力学物性については，異方性を考慮した設定を実施している。また，処分坑道，処分孔の解析においては，異方圧下かつ複雑な応力状態になることが想定されるため，掘削過程を再現した 3 次元解析を実施することが望ましいと考える。これらの結果の妥当性は地下施設建設時・操業時に取得される各種データに基づき検証していく予定である。

次に，幌延施設設計で新たに採用した，設計・施工の考え方を示す。堆積岩を対象とすると，処分坑道を展開する地下 300m 以深においては，岩盤の強度が小さく高応力下にあるため剛な支保が必要となる可能性が高い。また，処分坑道は約 300 本（＝50 本/1 パネル×6 パネル）建設する必要があり（核燃料サイクル開発機構，1999），経済性を考慮するとできるだけコンクリート支保工厚を減少させることが望ましい。そこで，例えば，押出し性地山として有名な飯山トンネル（北川ほか，2003）や，幌延の深地層の研究施設の実施設計でも採用されている「二重支保」の考え方を採り入れることで，空洞安定性を確保しつつ覆工厚を最小限とする設計が可能となる。「二重支保」とは，一次支保を施工してからある程度岩盤を変形させた後に二次支保を施工することをいい，最終的な構造物として支保全体に作用する応力を低減させる効果がある（松井ほか，2005a）。なお，「(3) 処分施設設計上の留意点の抽出」において後述するように，処分場設計に「二重支保の考え方」を採用する場合は，プラグなどで要求される坑道軸方向の遮水性能も考慮した検討が必要である。

4) コンクリート支保工の解析用物性値の設定

支保工による人工バリアや周辺岩盤への影響を低減するための材料のひとつとして，低アルカリ性コンクリートの開発を進めている。その状況については，後述する 2.2.6 章にて示すが，強度特性の観点から，現段階で支保工の吹付コンクリートへの適用が適切と考えられる HFSC424 を用いたコンクリートを対象とし，ここでは，これまでに得られている室内試験結果をもとに，吹付コンクリートにおける暫定的な解析用物性値（ポアソン比，設計基準強度，等価弾性係数）を設定するとともに，HFSC424 の特性を整理し設計における制約条件を明確化した（松井ほか，2005a）。ただし，これらは開発途上であり，今後の研究成果を踏まえ更新されるべきものである。

ポアソン比については，普通ポルトランドセメント（以下，「OPC」という）を用いたコンクリートのポアソン比を踏襲し，暫定的に 0.2 と設定したが，今後データを収集し検証を行なう予定である。土木学会（2002）では，現場におけるコンクリートの圧縮強度の変動幅を考慮して，室内試験におけ

るコンクリートの圧縮強度の照査は，「圧縮強度の予測値÷割り増し係数≧設計基準強度」を原則としている。以下，土木学会（2002）の方法に従い，入矢ほか（2003a）の試験データを用いて設定した，HFSC424 の吹付コンクリートの設計基準強度を表 2.2.3-4 に示す。表 2.2.3-4 のコアとは，模擬トンネルで吹き付け試験を実施したコンクリートから採取したコアをいい，ベースとは，現場に運搬する前の練り混ぜ後のコンクリートを試験室で型枠に打設したものをいう。ここでは，データ数が少ないため，両データを比較し安全側の設定となるベースの 30MPa を暫定の設定値とする。実際には，使用する環境で養生されたベースおよびコアの試験データを用いて設計基準強度を設定すべきであり，今後は，幌延の深地層の研究施設計画において同様のデータを採取し，設定を更新していく必要がある。吹付コンクリートの設計用弾性係数は，「弾性体としてのひずみ」の他に，「クリープによるひずみ」と「乾燥収縮によるひずみ」を考慮した等価弾性係数を採用している場合が多い。等価弾性係数は室内試験などから決定されるが，設定するために必要な低アルカリ性コンクリートのデータが現状不足しているため，入矢・三原（2003）をもとに，材齢 3 日目の弾性係数，乾燥収縮ひずみ，クリープひずみに関して HFSC424 を用いた低アルカリ性コンクリートと OPC を用いた普通コンクリートを定性的に比較した。その結果，前者においては後者と同じ強度と等価弾性係数の関係を用いるのが現段階では適切と判断し，表 2.2.3-4 に示すように 3,400MPa と設定した（松井ほか，2005a）。

トンネルなどの地下構造物で用いる吹付コンクリートに対しては，土木学会（1996）では，安全率は示されておらず，日本鉄道建設公団（1996）では，許容値の例として安全率 2 を提示している。ただし，これは二次覆工を巻くことを前提とした安全率と考えることもできる。よって，例えば，幌延の地下研究施設のように，地下深部で二次覆工を省略する設計を実施する場合には，安全率に裕度を持たせたほうが好ましいと考え，ここでは，土木学会（2002）の無筋コンクリートの安全率 4 を用いるものとする。

表 2.2.3-4　低アルカリ性コンクリート（HFSC424）の解析用物性値の設定

	ポアソン比	等価弾性係数	分類	試験本数	28 日強度平均	標準偏差	変動係数	割増係数	設計基準強度
HFSC424	0.2	3,400MPa	ベース	6	32.7MPa	1.18	3.6%	1.07	30.5MPa
			コア	6	39.8MPa	1.75	4.4%	1.09	36.5MPa

(2) 幌延 450m の地質環境における処分施設の試設計

幌延 450m の地質環境（力学物性値（表 2.2.1-3），初期応力（表 2.2.1-4），熱物性（表 2.2.1-5））を対象とし，支保部材は低アルカリ性コンクリート（表 2.2.3-4，安全率 4）を用いて，竪置き方式の単一坑道，単一処分孔の試設計を実施した後，連接坑道の離間距離，廃棄体ピッチを検討した（松井ほか，2005a）。本試設計では，図 2-1 に示す断面形状，断面寸法を採用した。

1) 単一坑道，単一処分孔の試設計

単一坑道，単一処分孔の試設計は，2.2.3 章(1)1)で記述した設計手順と空洞の安定性評価指標（表 2.2.3-1）を踏まえ，Mohr-Coulomb の破壊基準に従う弾完全塑性解析を用いた概略設計（支保工厚検討）を行った（松井ほか，2005a）。なお，表 2.2.3-3 に示す「堆積岩において新たに検討が必要と思われる項目」については，今回の検討には含めず今後の課題とした。また，本来は 3 次元モデルによる検討が望ましいが，ここでは初めに処分坑道の支保設計を 2 次元 FEM 弾塑性解析で実施した後，処分孔の空洞安定性評価のみ 3 次元 FEM 弾塑性解析で実施した（松井ほか, 2005a；吉野ほか, 2005）。坑道軸は，一例として空洞の安定性が見込める主応力方向（東西方向）とし，全断面掘削とした。2

次元弾塑性解析では，掘削解放率を 65%とし，3 次元弾塑性解析では，一掘削長を 1m と設定し，処分坑道掘削完了後処分孔を掘削するものとした。なお，この試設計は，幌延の深地層の研究施設の設計として実施されたものではない。

処分坑道は，はじめに「低アルカリ性コンクリートで巻厚 20cm，鋼製支保工無し」という条件で検討し，この条件が不適切な場合は，巻厚を大きくするとともに鋼製支保工の使用を検討するものとした。処分孔は，無支保で空洞が安定するか否かについて検討した。

その結果，幌延の深度 450m の地質環境では，処分坑道は，「巻厚 20cm，鋼製支保工無し」となり，処分孔は，掘削後すぐに定置する場合（岩盤クリープを考慮しない場合）に限り，無支保で自立するという結果が得られた（松井ほか，2005a）。ただし，これは今回検討対象とした深度 450m 地点の岩盤をクラックの影響のないインタクトな岩盤として評価しているためである（3.2 章参照）。幌延の地下施設設計では，鋼製支保工も加えられていることと，実際の地質環境は不均一である場合も多いことから，上記の妥当性については今後地下施設建設中に実施する各種の調査により検証するとともに，同様の設計の際には，物性設定に幅を持たせた解析評価が必要と考える。

2) 坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討

前節で実施した単一坑道，単一処分孔の仕様に基づき，表 2.2.3-2 で示した評価指標等を踏襲し，坑道離間距離，廃棄体ピッチについて力学的・熱的観点から検討した（松井ほか，2005a）。なお，ここでの検討は，竪置き方式における処分坑道の離間距離は 2.6D（D：坑道直径），廃棄体ピッチは 3.0d（d：処分孔直径）を基本ケースとした。

(a) 力学的観点からの坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討

複数の空洞を掘削することを除き，解析手順，解析手法，解析条件などは，単一坑道，単一処分孔と同様とした。なお，処分坑道に対する 2 次元解析では，2 本の坑道を順に掘削しその影響を評価することとし，処分孔に対する 3 次元解析では，坑道掘削後，3 本の処分孔を順に掘削し中央の処分孔を評価することとした。その結果，単一坑道，単一処分孔と同じ支保工仕様で，処分坑道の離間距離は，2.6D で安定するとともに，最大で 2.0D まで離間距離を短縮できるという結果が得られた。廃棄体ピッチについては，3.0d で安定するということが確認された。なお，2.2.3 章(1)2)で示したように，1 パネル 50 本といった大規模な連接空洞の設計は，地層処分特有の課題であり，一般的な地下構造物での設計・施工例はこれまでになく，設計の妥当性が確認されていないため，安全側に裕度を持たせた評価・設計が必要となる。そのため，今後は，岩盤のクリープ挙動，地下深部の静水圧の影響，構造的な破壊モードも考慮して，連接空洞に関する設計手法や評価指標の妥当性を検証していくことが必要となる。

(b) 熱的観点からの坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討

ガラス固化体の発熱による人工バリアおよび周辺岩盤の温度の時間的変化を解析し，緩衝材の最高上昇温度が人工バリアの性能を損なわないとする緩衝材の制限温度を下回るような処分坑道離間距離と廃棄体ピッチを求めた（松井ほか，2005a）。解析には，有限要素法汎用解析コード FINAS（動力炉・核燃料開発事業団，1992）を用いた。なお，埋め戻し材については，幌延における地質環境条件が海水系地下水であることから，2.2.5 章（1）において配合の見直し（ベントナイト 40%+掘削ずり 60%）が行われており，それらの熱物性に関しては，熱物性試験結果から導出された関係式を用い設定した（松井ほか，2005a）。これらの解析の結果から，坑道離間距離 2.6D，廃棄体ピッチ 3.0d でニアフィールドの制限温度（ガラス固化体：400～500℃，緩衝材：100℃，岩盤：150～300℃）を十分満足するとともに，坑道離間距離などを短縮可能であるという結果が得られた（松井ほか，2005a）。

(3) 処分施設設計上の留意点の抽出

地上からの調査段階の限られたボーリング調査から，処分坑道を展開する地下深部の幅広い地質環境条件を詳細に理解することには限界があり，段階を追って理解を深めていくことが重要である。よって，地上からの調査段階では，サイトとして成立する地層が地下 300m 以深に幅広く分布しているか否かという点と，建設段階の初めのステップとなるアクセス坑道（立坑）の詳細設計を主な対象とするべきであると考える。つまり，前者に対しては，地下深部の不確実性を考慮して，ボーリング調査で得られたデータをもとに地質環境情報に幅を持たせた評価を実施しておく必要があり，後者に関しては，一般的な地下構造物と同様，施工中の情報化施工により随時設計を更新し，施工しながら適切な支保や補助工法を選択していく必要があると考える。なお，設計の際には，建設・操業で取得されるデータ（例えば，内空変位）と直接的に対比できるパラメータ（例えば，限界ひずみ）などを中心に評価しておく必要がある。

幌延の地下研究施設では，具体的な施工を考慮した詳細設計を行っている。しかし，堆積岩における処分場としての詳細設計を実施する場合に，幌延の地下研究施設の設計手法を全て適用することはできない。すなわち，幌延の地下研究施設の設計では対象外としている安全性能の観点に考慮した各坑道や離間距離の評価を実施し，サイト・深度選定や設計・施工に反映していく必要がある。表 2.2.3-5 に具体的な課題を示す。なお，これらに関しては，これまで検討を行っていないため，今後検討すべき課題といえる。

表 2.2.3-5　安全性能を考慮した処分場の詳細設計に向けて検討すべき課題

1	安全評価の観点を考慮した EDZ に対する設計の考え方の構築
2	コンクリート支保工の化学影響と支保工材料の選定（処分孔の支保検討も含める）
3	地下深部の静水圧を考慮した設計・施工方法の検討

強度の小さい堆積岩では，空洞の掘削および長期的な岩盤クリープ挙動により，空洞周辺岩盤の剛性や透水性が変化する可能性がある（EDZ の発生）。つまり，長期的な閉じ込め性能が求められる処分場では，それらを考慮した設計を行うとともに，サイトや深度を選定する必要がある。しかし，地下深部における EDZ の発生状況や透水特性の変化を，地上からの調査段階で明確に把握することには限界があり，設計や施工方法の工夫で EDZ の発生を抑制するとともに，岩盤の自己回復特性（大久保，2005）や止水プラグなどを利用して隔離性能を担保する必要がある。具体的な課題のひとつとして，支保の考え方（設計方法の工夫）について考える。支保の考え方は，以下のふたつに分けられる。

①なるべく岩盤を緩ませないように，掘削直後に剛な支保を設置し支保工で応力を支持する考え方

②例えば，二重支保のように，ある程度変形（緩み）を許容し，岩盤に大きな応力を分担させ，支保工はそのサポートとして使用するという考え方

隔離性能だけを考えれば，①の方が望ましいが，地質環境によっては非現実的な支保工厚さになり，建設できない場合もある。逆に，設計の観点から②を採用すると，地質環境によっては EDZ が大きくなり隔離性が期待できない場合もある。よって，具体的なサイト・深度の選定に向けて，安全性能・設計の両方の観点と対策工についてより詳細な検討を進めていき，EDZ に対する設計上の考え方を整理していく必要があると考える。なお，幌延施設設計では，②の方法を採用している。

原子力発電環境整備機構（2004）では，支保工に対して要件を示している（表 2.2.3-6）。

表 2.2.3-6　支保工に対する要件（原子力発電環境整備機構，2004 を一部修正）

設　計　要　件	概　　要
力学的安定性（本来的に必要な機能）	・建設～閉鎖までの期間において周辺岩盤を完全に保持
化学的安定性 （人工バリアを保護する機能）	・コンクリートと緩衝材，埋め戻し材，岩盤との接触により，緩衝材や岩盤が許容限度を超えて劣化することを回避 ・コンクリートの劣化により，支保工部分が許容限度を超えた高透水性ゾーンとなることを回避
施工性 (付随して期待する機能)	・地山の安定のための早期架設が可能で初期強度の発現が早い支保工を選択

処分施設の支保工としては，表 2.2.3-6 に示す化学的安定性（コンクリートと緩衝材，埋め戻し材，岩盤との接触により，緩衝材や岩盤が許容限度を超えて劣化することを回避）を担保できる支保工材料を選定しなければならない。また，第 2 次取りまとめや原子力発電環境整備機構（2004）では，これまで，支保工の化学的安定性の観点から，処分孔は無支保を原則としている。しかしながら，幌延の研究所用地に分布する堆積岩（一軸圧縮強度 5～20MPa）の中では比較的大きな一軸圧縮強度 16.3MPa を設定している深度 450m 条件（表 2.2.1-3）において，短期的には自立する可能性があっても，数年間空洞を裸孔で放置した場合には，空洞周辺に剛性低下領域が発生し自立しないという知見が得られている（石島・木山，2004；吉野ほか，2005)。よって，堆積岩において掘削から定置までの期間，空洞を自立させるためには，必要に応じて支保工等の対策を講じる必要がある。

高アルカリ溶液下においては緩衝材の主要鉱物であるスメクタイトが溶解するため，緩衝材性能への影響は無視できないことが指摘されている。(柴田ほか，2004)。

一方で, pH を抑えた低アルカリ性セメントの研究開発が実施されているが, 2.2.6 章に示すように，低アルカリ性セメントのひとつである HFSC226 の海水暴露試験では，普通ポルトランドセメントと比較して鉄筋腐食が早期に認められたことから，現在の HFSC の開発状況では，通常の鉄筋と共用することは避けた方が望ましいとしている。よって，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートや低アルカリ性コンクリートの処分施設への適用性や制約条件について，今後も研究開発を進め整理していく必要がある。

また，地下深部ではかなり大きな静水圧が地下構造物に作用することから，設計・施工上の考え方として，幌延の深地層の研究施設のように導水することで支保工に作用する水圧を低減する考え方，グラウトや凍結工法などの地盤改良で水圧を低減する考え方，さらにはセグメントなど剛な支保工を使用し水圧を支持する考え方などがある（福島，1994)。しかしながら，処分事業では，設計と隔離性能の両方の観点から設計する必要があるため，最終的には導水路を残さないように閉鎖するのが最も適切な方法であると考えるが，今後より詳細な検討が必要である。

以上のように，今後は，より詳細な設計や具体的な施工方法を見据えた課題を抽出し，それらに対する検討を進めていく必要がある。

(4) その他の検討

幌延施設設計で実施しているその他の検討について，堆積岩における処分場の設計手法として適用可能な項目について以下に示す。

1) 耐震検討

一般にトンネルなどの地下構造物は，地震による影響をほとんど受けないことが経験的に知られて

おり，既往の研究などでも地下における地震動は地表部の数分の一になることがわかっている。しかしながら，地層処分場は国内に類を見ない深度 300m 以深に立坑（アクセス坑道）と水平坑道を展開する施設であり，かつ安全評価上は地震により周辺地質環境および空洞安定性に変化が生じないことが求められる。よって，地震による空洞の安定性検討は，処分場の設計においても地質環境ごとに確認しておく必要があるといえ，幌延の深地層の研究施設では，立坑，水平坑道，各坑道連接部を対象に耐震検討を実施している。その結果，地上から数十 m に堆積する軟弱層（勇知層）において，一部立坑の支保工の見直し（設計基準強度が大きいコンクリートを用いる）があったものの，その他においては，耐震の影響による支保工などの見直しは必要ないという結果が得られた（松井ほか，2005a）。幌延施設設計で実施した耐震検討は，実際の地質環境条件が与えられているため，施設周辺地域の過去の地震波や活断層調査，さらにその他の調査資料をもとに入力地震波を設定し，それを作用させた時の立坑や周辺岩盤の応答挙動を動的解析により把握するとともに，地震力を等価震度（動的なせん断応力を静的な震度に置き換えたもの）で表すことにより，健全性評価を実施する際に用いる静的解析手法の適用性を確認した。また，静的解析手法により等価震度を与えたときの立坑の覆工コンクリートと周辺岩盤の応力状態を解析し，それぞれの許容応力と比較することにより健全性を照査した。検討に用いている。幌延施設設計における耐震検討手法の詳細については，分冊「深地層の科学的研究」；松井ほか（2005a）に示されている。

2) メタンガスの湧出量に関する検討

幌延の地質環境の特徴として，メタンガスを含有していることが挙げられる。メタンガスを含む地質環境では，坑内にメタンガスが充満し重大災害を引き起こす可能性があるため，メタンガス湧出量を適切に予測し，通気制御などの対策のうえ，規定のメタンガス濃度以下になるよう管理する必要がある。幌延の深地層の研究施設では，ガス湧出量予測解析によりガスの湧出予測量を算出し，規定のメタンガス濃度以下になるよう換気設備の設計に反映している（松井ほか，2005a）。処分場の設計においても，メタンガスを含む地質環境を対象とした場合には，松井ほか（2005a）で示している検討手法などを用いて，メタンガスに対する対策を設計に組み込む必要がある。

3) 計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術（情報化施工）の検討

情報化施工は，地下空洞建設段階で様々な原位置での計測データを収集・解析し，事前設計の妥当性の検討や，必要に応じ設計仕様の見直しや補助工法の適用を図りつつ，実施工を進める手法である。幌延の深地層研究施設計画における地下施設建設では，国内に例がない新第三紀堆積岩を対象とした大深度地下空洞建設時の情報化施工の方法論を事例的に示す観点から，その設計段階（松井ほか，2005a）において情報化施工の計画を検討している。

図 2.2.3-2 に建設時の情報化施工の流れを示す。基礎となる計測は，日常管理計測とステップ管理計測のふたつから構成される。前者は，基本的に 1 掘削毎の計測であり，地質観察などの計測結果を，短時間で次ステップにおける支保工仕様の検討や補助工法の適用の判断などにフィードバックすることを主目的として実施する。後者は，空洞周辺岩盤の状態や挙動を多種多様な計測から把握し，事前設計の解析モデルなどの妥当性検討や見直しを通じ，次段階の坑道掘削の支保工仕様や安全管理基準の見直しなどを含んだ検討を目的として実施する。

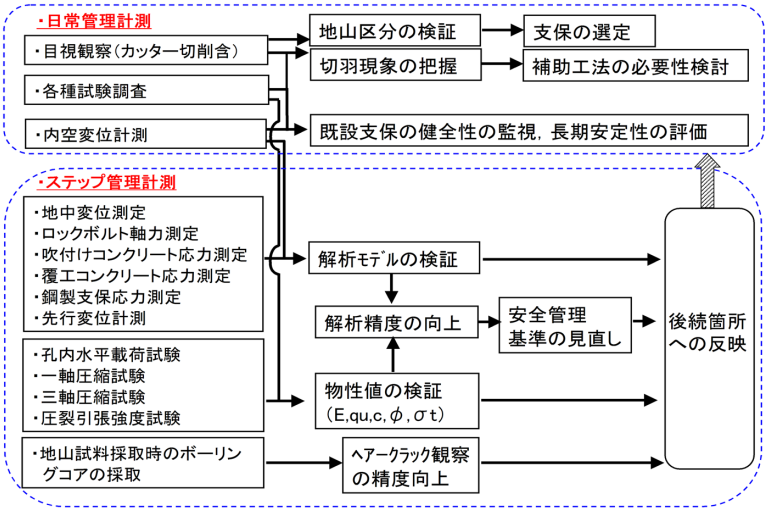


図 2.2.3-2　幌延の深地層の研究施設の建設時における情報化施工の流れ

2.2.4 人工バリアの設計手法の適用事例

ここでは，2.1.2 章において整理された緩衝材，オーバーパックおよび埋め戻し材設計相互の関連およびそれらの整理をもとに更新された処分場全体設計フローを踏まえ，緩衝材およびオーバーパックに関する個々の設計手順を検討し，個別設計フローの構築を行った。以下にその概要を示す。

(1) 設計手順の考え方

1) 緩衝材設計手順の考え方

人工バリアの設計は図 2.2.4-1 に示すようなフローとなっているが，緩衝材の設計要件の中には，オーバーパックの設計情報を用いずに，単独で緩衝材を設計できる項目もある。したがって，緩衝材の設計要件をオーバーパックなどの設計情報を必要としないものと必要とするものに分け，前者の要件を用いて緩衝材単独の設計により仮仕様を決め，後者の要件については，オーバーパックの設計により仕様が決まった段階で緩衝材の仮仕様を確認することとした（松井ほか，2005a）。

本検討にて適用した設計手順は図 2.2.4-1 に示すように，

①緩衝材の設計要件のうち，「止水性」「自己シール性」「コロイドろ過性」および「製作・施工性」を考慮した設計によりこれらの要件を満足する範囲の設定

②①の範囲の中から緩衝材の仮仕様を設定

③オーバーパックと埋め戻し材仕様が決定された後，②の仮仕様について「応力緩衝性」「廃棄体支持性」および「自己シール性」の観点からその妥当性を確認

を行うというものである（松井ほか，2005a）。ここで，①では要件を満たす有効粘土密度の範囲を求めることになる。ただし，自己シール性に関しては，緩衝材周辺の隙間体積を基に下限密度を設定する必要があるが，隙間体積は緩衝材やオーバーパックの寸法を用いて算出するため，その段階で再度確認の計算を行う必要がある。したがって，設計要件を満足する範囲の絞込み時点においては，隙間体積に関係なく緩衝材が飽和膨潤することにより隙間を充填し得ると考えられる膨潤応力を 0.1MPa（Dixon，2000）と定め，それを担保し得る下限密度を示すこととし，設定された仮仕様が操業上設定される隙間幅を充填可能か否かに関しては，③の段階で再度確認を行うこととする。

緩衝材設計手順の例を図 2.2.4-2 に示す。ここでは，「止水性」「自己シール性」「コロイドろ過性」および「製作・施工性」の 4 つの項目全てを満たす範囲を求める。

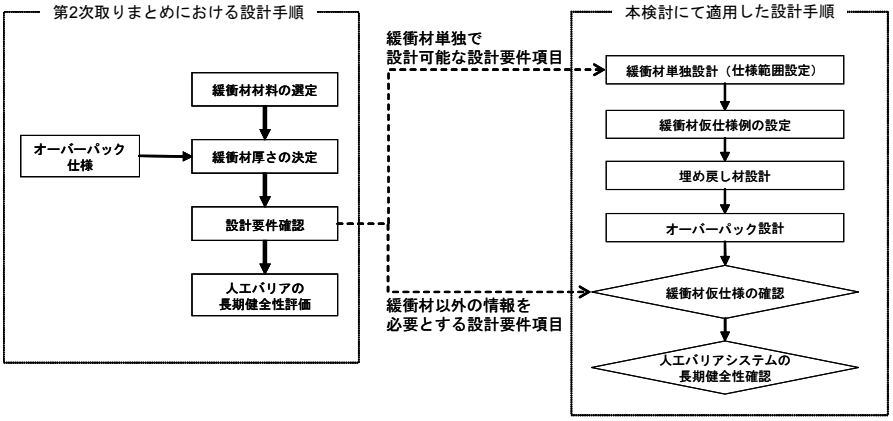


図 2.2.4-1　第 2 次取りまとめにおける設計手順との比較

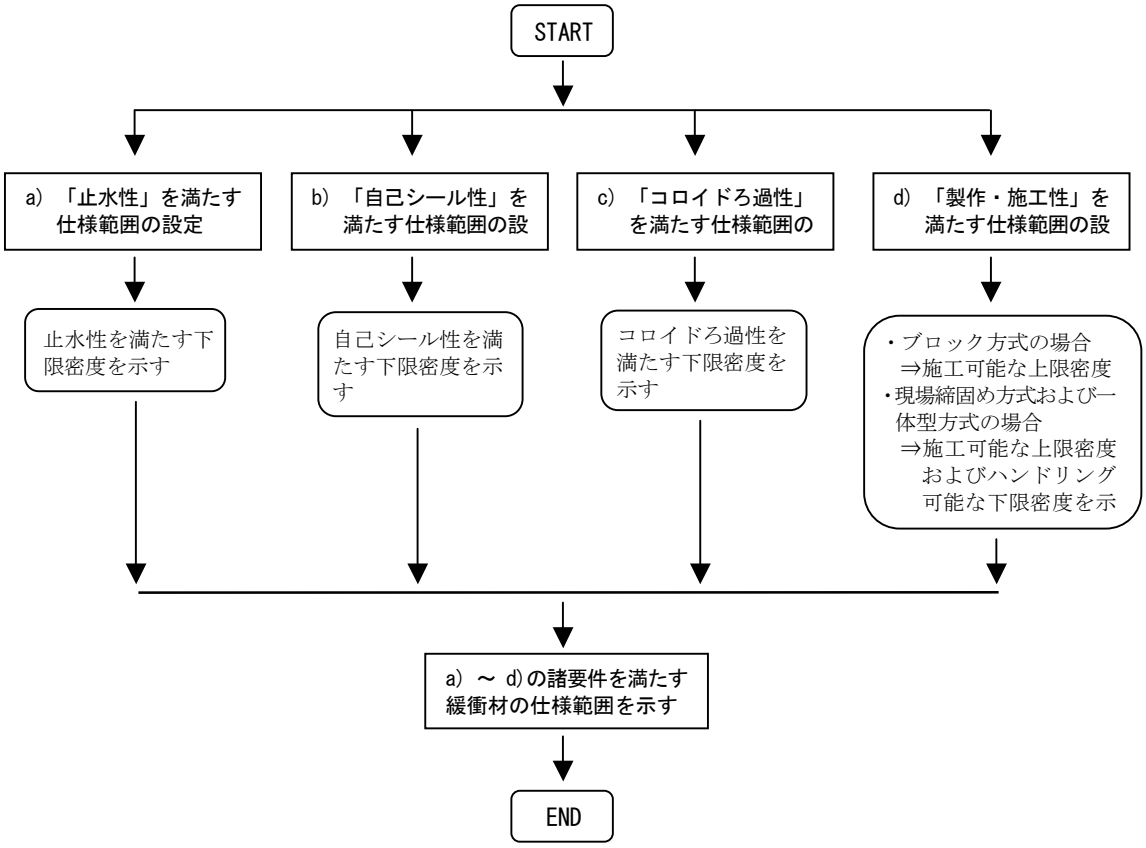


図 2.2.4-2　緩衝材設計手順の例

2) オーバーパック設計手順の考え方

幌延の地質環境に対するオーバーパックの設計においては，主として地下水の水質（海水系地下水）や岩盤挙動による耐食性や耐圧性への影響に着目した検討が必要である。これらの設計要件は，オーバーパックの厚さの設定において重要な項目である。図 2.2.4-3 に，炭素鋼，チタンおよび銅の各候補材料に対して，地質環境からの情報を考慮した設計フローを示す（栗原ほか，2004 を一部改訂）。本設計フローでは，フィードバックのルートは省略されている。ここでは，この設計フローに基づき，オーバーパックの厚さの設定を中心に設計検討を行った。検討項目は，図 2.2.4-3 の赤枠の項目になる。以下に各項目における設計の考え方を述べる。

・腐食寿命評価；幌延の深地層の研究施設計画で採取した地下水（以下，「幌延地下水」という）の水

質に対応した緩衝材間隙水に対して，炭素鋼，チタン，銅について，腐食挙動の評価，腐食代設定の考え方を示す。幌延地下水条件は，候補材料の腐食挙動に影響を及ぼす可能性があるかどうかの評価が重要となる。

・腐食代の設定；酸素による腐食については，オーバーパック周囲に持ち込まれた酸素量に基づいて腐食量を評価し，水の還元による腐食については，還元環境における腐食速度と耐用年数 1,000 年より腐食量を評価する。

・耐圧代の設定；検討対象深度に対応した地下静水圧と緩衝材の圧密反力を想定した強度評価により耐圧上必要な厚さを検討する。この際，幌延の地下水圧および岩盤挙動と地下水組成により変化する緩衝材圧密反力の設定が重要となる。

・放射線遮蔽から求められる厚さ；水の放射線分解により生成される酸化性化学種の供給量をカソード電流密度に換算し，放射線遮蔽上必要な厚さを評価する（核燃料サイクル開発機構，1999）。

・製作・施工性；検討により設定されたオーバーパック厚さについて，製作・施工性の観点からオーバーパックの成立性を確認する。ここでは，本検討により設定したオーバーパック仕様の成立性について確認を行う。

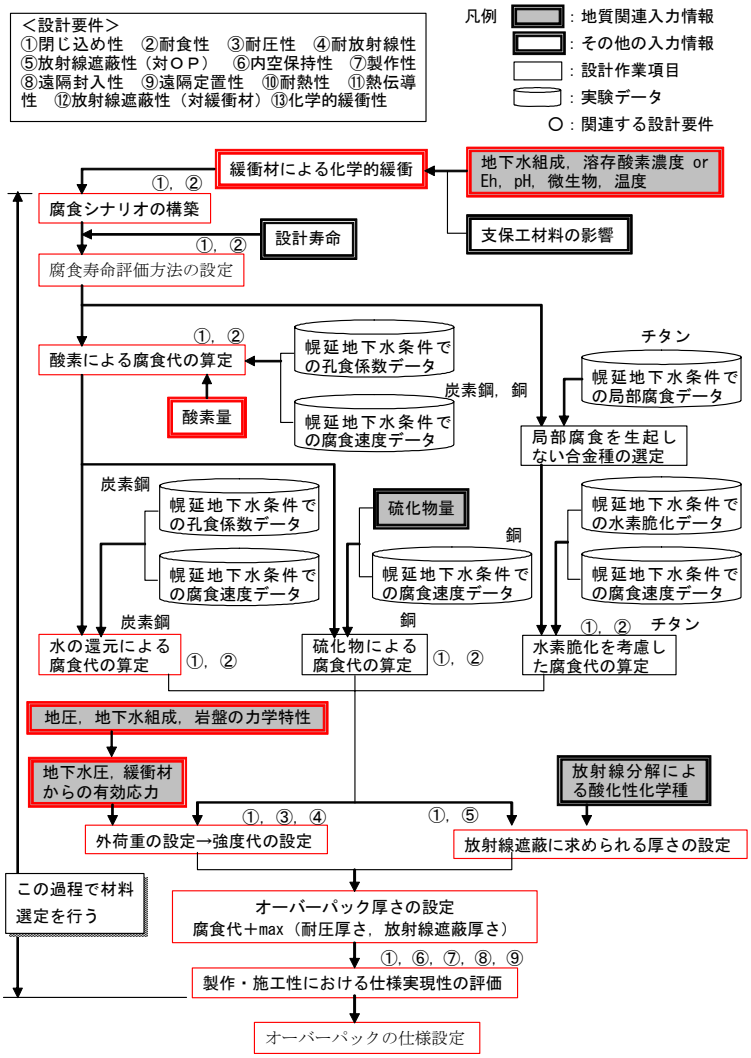


図 2.2.4-3　オーバーパック設計フロー（栗原ほか，2004 を一部改訂）

3) 人工バリアの長期健全性評価

本項目においては，前述までの設計フローに基づく緩衝材およびオーバーパックの設計において設定された人工バリアシステムについて，長期にわたる挙動解析を行ってその健全性を評価する。図 2.2.4-4 に人工バリアシステムの長期健全性評価のフロー図を示す（松井ほか，2005a）。ここでは岩盤の力学的変形挙動，緩衝材の力学的変形挙動，緩衝材中のガス移行挙動，緩衝材の流出・侵入挙動の 4 項目について個々に評価することになることから，フローは全ての項目が並列となる。これらの各項目に関する解析結果より，長期にわたる人工バリアシステムの成立性の可否について検討し，4 項目のうちひとつでも否と判断された場合には図 2.1.1-2 の処分場の全体設計フローに基づいて再度オーバーパックと緩衝材の設計の見直しを行うこととなる。

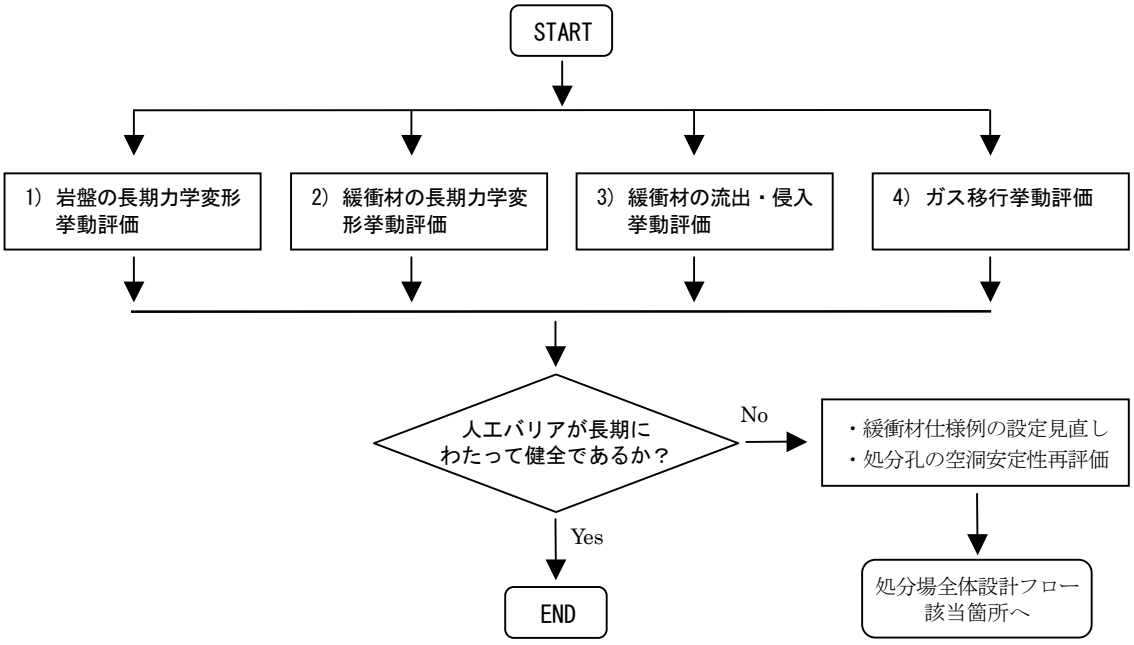


図 2.2.4-4　長期健全性フロー図

(2) 緩衝材の設計

ここでは，前述した設計手順の考え方を踏まえ，海水系地下水条件下での透水性や膨潤応力は，降水系地下水に比して性能が低下する傾向にある（菊池ほか，2004）ことから，これらの影響も考慮し幌延 450m の地質環境条件を対象とした緩衝材の試設計を実施した（松井ほか，2005a）。以下にその概要を示す。

1) 緩衝材仕様範囲の設定および仮仕様の設定

止水性に関しては，2.2.1 章（2）5）で示した幌延における動水勾配に基づきペクレ数に関する評価を行い，緩衝材が拡散場を保持している下限密度を設定した（松井ほか，2005a）。コロイドろ過性に関しては，海水系地下水条件下の実験的な知見は得られていないが，降水系地下水と同様に，有効粘土密度 0.8Mg m^{-3} 以上を下限密度と設定した（松井ほか，2005a）。緩衝材の自己シール性に関しては，POSIVA（フィンランド）において，緩衝材の自己シール性における判断基準のひとつとして検討されている膨潤応力 0.1MPa 以上を本設定においても適用し，幌延の海水系地下水条件を考慮して下限密度を設定した（Dixon，2000）。緩衝材の製作・施工性に関しては，現状の知見を踏まえ，現場締固め方式およびブロック方式を対象として，緩衝材を技術的に製作・施工可能な上限密度を設定し

た（松井ほか，2005a）。これらの設定結果を基に，図 2.2.4-5 にブロック方式を一例とした緩衝材仕様範囲の設定結果を示す。なお，同図には，第 2 次取りまとめにおいて示された緩衝材仕様（乾燥密度 1.60Mg m^{-3}, ケイ砂混合率 30wt%, 有効粘土密度 1.37Mg m^{-3}）をあわせて示す。図から，幌延 450m の地質環境条件においても乾燥密度 1.60Mg m^{-3}，ケイ砂混合率 30wt%の仕様で問題ないことから仮仕様として設定した。

2) 緩衝材仮仕様の確認

自己シール性に関する確認においては，緩衝材ブロック定置方式と現場締固め方式を用いた場合の隙間幅を表 2.2.4-1 のように仮定し，ガラス固化体の定置時にオーバーパックや周辺岩盤との間に生じる隙間体積を求め，隙間膨潤試験（菊池・棚井，2005）により得られたデータから，緩衝材の仮仕様が隙間体積を十分充填可能であることを確認した（松井ほか，2005a）。オーバーパック支持性については，建築基礎構造設計指針（日本建築学会，2001）の鉛直支持力の算定方法を安全側に用いて，オーバーパック下部に定置された緩衝材の一軸圧縮強度が上載荷重以上あれば，オーバーパックを十分に支持できるという考え方で，緩衝材の仮仕様におけるオーバーパックの支持性を確認した（松井ほか，2005a）。応力緩衝性に関する確認においては，幌延における地下水組成，地圧，静水圧および岩盤の力学特性を考慮しつつ，緩衝材の仮仕様の応力緩衝性を確認した（杉野ほか，1999；松井ほか，2005a）。その他の事項として，炭素鋼の不動態化への影響について，谷口ら（谷口ほか，2002）が緩衝材の乾燥密度とケイ砂混合率の関係を実験的に求めていることから，これらの成果をもとに緩衝材の仮仕様がオーバーパック材料である炭素鋼に対して不動態化しない領域（図 2.2.4-6）にあることを確認した（松井ほか，2005a）。なお，図 2.2.4-6 の実験条件は幌延地下水に比較して炭酸塩濃度が高く，また，塩化物イオンが含まれていないため，より不動態化しやすい条件での評価となる。これまでに緩衝材単独としての設計要件を踏まえた個々の項目に関する範囲を設定するとともに，緩衝材の仮仕様について確認を実施した結果を図 2.2.4-7 に示す。これらの結果から，幌延 450mの環境条件下において，本試設計にて示した緩衝材の仮仕様（乾燥密度 1.60Mg m^{-3}，ケイ砂混合率 30wt%）で十分に緩衝材に要求される性能を満足できると考えられる。

表 2.2.4-1　隙間の仮仕様（核燃料サイクル開発機構，1999）

ブロック定置方式	緩衝材と周辺岩盤との間に生じる隙間	40mm
	緩衝材と廃棄体との間に生じる隙間	20mm
現場締固め方式	据付時に定置装置（ハンドリング）の制約により緩衝材と廃棄体との間に生じる隙間	20mm

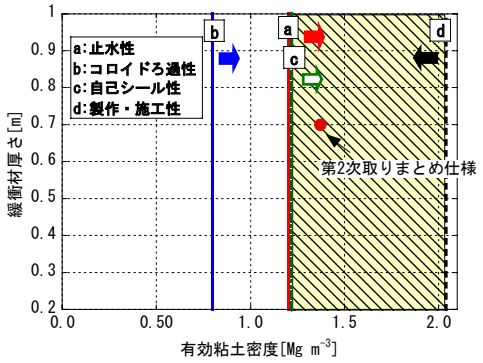


図 2.2.4-5　ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の設定

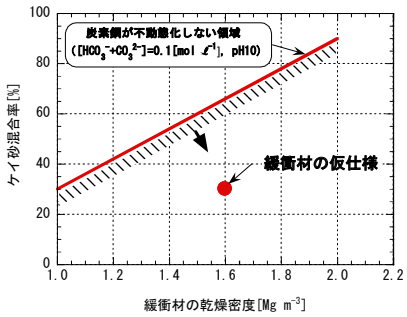


図 2.2.4-6　緩衝材の乾燥密度とケイ砂混合率に対する炭素鋼の不動態化条件

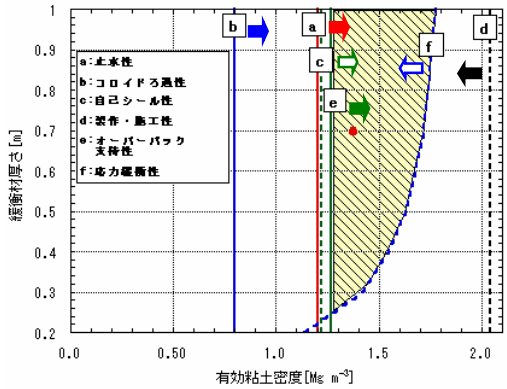


図 2.2.4-7　ブロック方式を一例とした緩衝材仮仕様の確認

(3) オーバーパックの設計

オーバーパックの仕様設定は，前述したように地質環境からの情報を考慮した設計フローに基づいて実施した。本設定では，これらの設計手順などの検討に基づき，また別途行われている緩衝材，埋め戻し材などに対する仕様の設定結果を用いて，オーバーパックの設計要件を満たす仕様を設定する。

仕様の設定として，前述したように，幌延地下水の水質を考慮した耐食性の検討および緩衝材，埋め戻し材仕様，緩衝材圧密反力，地下静水圧を考慮した厚さの検討を行い，厚さ 150mm を設定した（松井ほか，2005a）。なお，これら検討結果の概要を以下に示す。

1) 耐食性の検討

幌延の地下水（海水系地下水，炭酸塩濃度：0.1mol ℓ^{-1} 以下，pH：6～7，塩化物イオン濃度：約 0.1～0.4mol ℓ^{-1}）に対して，炭素鋼は緩衝材中において不動態化せず全面腐食を受けると考えられる（谷口ほか，2002）。

チタンについては，最も発生しやすい隙間腐食の観点から適用性を検討し，純チタンでは塩化物イオン濃度が 10-3mol ℓ^{-1} 以上の場合に隙間腐食の可能性があるため，幌延の地下水条件に対して隙間腐食の生起が否定できない。一方，チタン合金では，Ti-Ni-Mo 合金（ASTM Grade 12）と Ti-Pd 合金（ASTM Grade 7, 17 など）に関する検討が行なわれており（Nakayama et al.，2002），前者に関しては隙間腐食感受性を示すと予想されることから幌延地下水環境でも隙間腐食の可能性が考えられるが，後者に関しては隙間腐食感受性を示さないとされており，幌延の地下水条件で隙間腐食を生じることはないと考えられる。なお，隙間腐食が起こらない場合でも，環境条件によってはチタンの不動態皮膜が不安定になる可能性があるが，幌延の地下水はいずれもこの条件からはずれており，耐食性が顕著に劣化することは考えにくい。

銅については，これまでに行なってきた緩衝材中での電気化学試験によると，幅広い溶液条件で不動態化しにくく，活性溶解型に近い分極挙動を示すことがわかっている（川崎ほか，2002）。幌延の地下水条件である高濃度の塩化物イオン濃度でも明らかに活性溶解型の分極挙動であり，不動態皮膜の局所的破壊に起因する局部腐食発生の懸念は小さいと予想される。

以上のように，オーバーパック候補材料として挙げられている炭素鋼，チタン，銅に関して，幌延における地下水条件を想定すると，いずれも現時点でオーバーパック材料として否定する要因は見当たらない。

2) 厚さの設定

オーバーパックの厚さの設定に関しては，地下水による腐食に対する腐食代と，地圧，水圧や緩衝

材の膨潤圧などの荷重により破損しないための強度代，もしくは放射線遮蔽厚さを足し合わせることにより設定される。なお，強度代と放射線遮蔽厚さについては，どちらか厚い方の値を設定することにより他方を満足することができる。以下に，オーバーパック候補材料を炭素鋼材料として，設計寿命を 1,000 年とした場合の検討概要を示す。

腐食代の設定に関しては，酸素および水の還元による腐食量をそれぞれ評価し合算することにより腐食量を評価した。酸素による腐食量は，オーバーパック周囲の緩衝材および埋め戻し材中の酸素量を求め，その酸素が全て腐食に寄与すると仮定し算出すると，最大腐食深さは 15mm となる。また，水の還元による腐食量については，海水系地下水を模擬した人工海水中での炭素鋼の平均腐食速度は，3 年間の試験で 6～7 μ m y^{-1}（Taniguchi et al.，2004）という結果もでているが，保守的に 10 μ m y^{-1} として，1,000 年間の平均腐食深さを 10mm と評価し，密度の不均一化を考慮して最大腐食深さを 2 倍の 20mm とした。以上の結果をもとにした腐食代は，40mm となる。

一方，強度代に関しては，深度 450m での地下水静水圧（4.41MPa）と緩衝材の圧密反力（1.52MPa）を合算した外荷重に対する板厚の検討を行なった。板厚の計算方法としては，「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」（昭和 55 年通商産業省告示 501 号）の第 2 種容器の規定を準用して行い，蓋部で 80mm，胴部で 30mm という結果を得た。

放射線遮蔽厚さに関しては，ガラス固化体からの放射線による放射線場の解析からオーバーパック表面における吸収線量率を求め，これをもとに水の放射線分解によって発生する酸化性化学種が全てオーバーパック表面に供給され腐食に寄与するものとして計算される（核燃料サイクル開発機構，1999）。なお，ここでは，ガラス固化体の性状や緩衝材の仕様が第 2 次取りまとめと変わっていないことから，放射線遮蔽性として必要な厚さを，第 2 次取りまとめと同様な値である 150mm とした。

以上の検討結果から，厚さの設定を放射線遮蔽厚さ（150mm）と腐食代（40mm）を合算し，190mm とした。

(4) 人工バリアの長期健全性評価

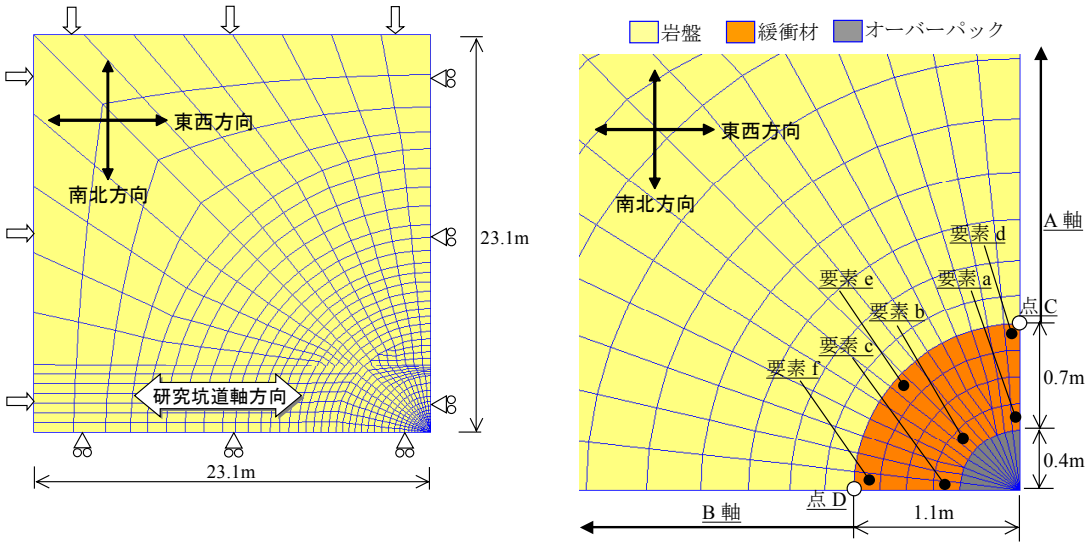
ここでは，設定された人工バリア仕様をもとに，幌延 450m の地質環境条件における単一の処分孔に関する，岩盤および緩衝材の長期力学変形挙動，緩衝材の流出・侵入挙動ならびにガス移行挙動の観点から人工バリアシステムとしての長期健全性を評価し，その成立性を示す。以下にこれらの評価結果を述べる。

1) 岩盤の長期力学変形挙動評価

処分孔竪置き方式を対象とし，定置後 1 万年間までの岩盤の長期力学変形挙動の試計算を実施し，処分孔壁面の変位量，処分孔周辺岩盤の剛性低下領域（掘削時に発生した掘削影響領域（EDZ）が時間とともに拡がった領域全体），緩衝材の応力状態について解析的に検討し，力学的に長期健全性を評価した（松井ほか，2005a）。

解析モデルは，図 2.2.4-8 に示すモデル（処分孔を平面的に見たモデル）を使用した。隣接する処分孔は考慮せず，単一のものとして取り扱い，処分孔に支保工は設置されないこととした。緩衝材およびオーバーパックのモデル化は，線形弾性体であると仮定した。また，最も安全側を想定し，クリープの影響が顕著となるように，緩衝材の膨潤，オーバーパックの腐食膨張は考慮しないこととした。岩盤の構成方程式には，粘弾性構成方程式であるコンプライアンス可変型構成方程式を用い，Mohr-Coulomb の破壊基準に従うこととした。解析用物性値は，表 2.2.1-3，表 2.2.1-4 および表 2.2.4-2 に示すデータを用いた。コンプライアンス可変型構成方程式に必要な定数 n，m は，幌延のボーリング調査（HDB-3，6）で採取された岩石を用いた室内試験の結果（大久保，2004；2005）より「n，m＝30，20」と設定した。なお，水平面内最大主応力（Smax）方向は，研究坑道軸方向（東西方

向）とし，初期応力は，鉛直方向：東西方向：南北方向＝1：1.3：0.9 と想定した（松井ほか，2005b）。



(a) 全体図　　(b) 処分孔周辺拡大図

図 2.2.4-8　2 次元長期力学解析モデル
（処分孔を平面的に見たモデル）

表 2.2.4-2　試計算に用いた人工バリアの力学物性値

	緩衝材	オーバーパック
ヤング率 [MPa]	18.31	210,000
ポアソン比 [-]	0.4	0.2

本検討で対象としたような強度が低い堆積岩で，かつ偏圧が作用している環境では，処分孔の力学評価をする際，処分坑道の掘削の影響を受けることが予想される。よって，処分孔の 2 次元長期力学挙動解析の前に，処分坑道掘削時の 3 次元弾塑性解析を実施し，その時の応力状態を初期応力として，2 次元長期力学挙動解析に反映した。2 次元長期力学挙動解析の解析ステップを図 2.2.4-9 に示す。なお，Step3 において，人工バリアは処分孔掘削後すぐに設置することとした。

step1　初期応力算出
（3 次元弾塑性解析における研究坑道掘削完了後の応力状態を算出）
↓
step2　処分孔掘削（d＝2.2m）
↓
step3　人工バリア設置
（処分孔掘削後すぐに設置）
↓
step4　10,000 年経過

図 2.2.4-9　2 次元長期力学挙動解析の解析ステップ

解析結果より，人工バリアへの影響，剛性低下領域の拡がりについて整理する。

- 各経過時間における壁面変位量（表 2.2.4-3）より，変位量は 1,000 年で 4.8mm（D 点），13.5mm（C 点），1 万年で 5.8mm（D 点），17.0mm（C 点）という結果が得られた。ここでいう壁面変位は処分孔半径 1.1m に対する変位量である。
- 緩衝材の応力状態（図 2.2.4-10）より，1 万年後までの緩衝材の応力状態は，常に破壊接近度=1 以下にあり，緩衝材は 1 万年後まで健全な状態に保たれるという結果が得られた。
- 処分孔周辺岩盤の応力状態（図 2.2.4-11）より，応力状態は偏圧の影響で A 軸方向に卓越し，緩み領域幅は 1 年後に 0.2d，1 万年後に 0.5d（d：処分孔直径）程度まで拡がるという結果が得られた。なお，ここで言う緩み領域とは，ヤング率 E が初期値より低下した領域を指し，クリープの影響が進行している領域を意味する。

表 2.2.4-3　各経過時間における壁面変位量

	処分孔壁面変位量		
経過時間[year]	1	1,000	10,000
A 軸方向 C 点[mm]	-8.6	-13.5	-17.0
B 軸方向 D 点[mm]	-2.9	-4.8	-5.8

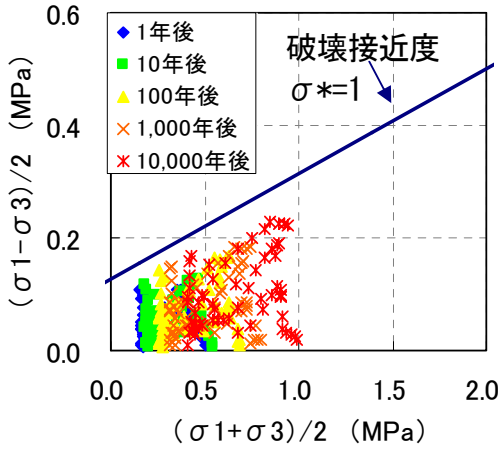
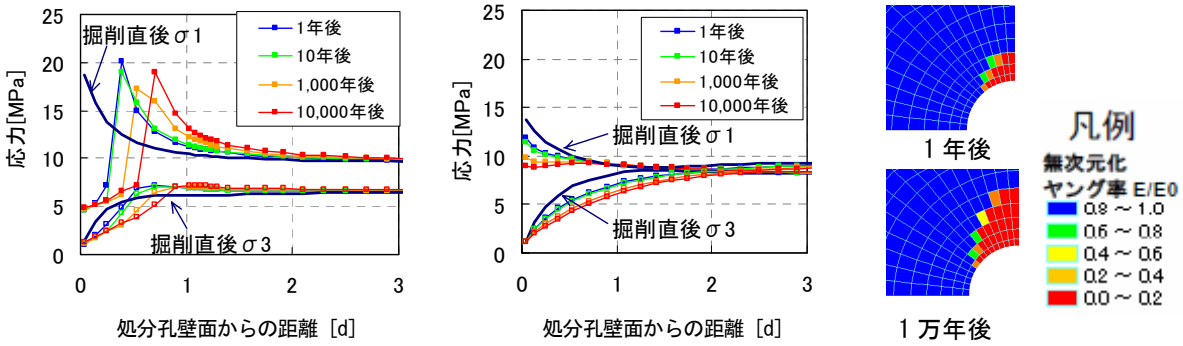


図 2.2.4-10　緩衝材の応力状態



(a) A 軸方向　　(b) B 軸方向　　(c) 剛性低下領域分布

図 2.2.4-11　処分孔周辺岩盤の応力状態

岩盤の長期力学変形挙動評価に関する今後の課題を以下に整理する。

- 本検討では掘削後すぐ人工バリアの定置としたが，処分工程を考えると掘削から定置まである程度の時間経過が見込まれる。よって，掘削から定置までの期間を考慮した検討や施工方法の検討も含めた，処分孔の設計，長期健全性評価が必要と思われる。
- 処分孔周辺岩盤の長期力学挙動だけでなく，処分坑道や連接の影響を考慮した全体系の検討が必要となる。
- 緩衝材の膨潤やオーバーパックの腐食膨張は，場合によっては空洞周辺岩盤の引張破壊を引き起こす可能性があるため，それらを考慮した解析手法の整備が必要である。

2) 緩衝材の長期力学変形挙動評価

ここでは，設定された緩衝材仕様（30%ケイ砂混合ベントナイト，乾燥密度 1.6Mg m^{-3}）についての幌延の地質環境における緩衝材の長期力学変形挙動評価として，オーバーパックの自重沈下と腐食膨張の影響について解析を行うとともに，これらの現象が生じた場合の，緩衝材のコロイドフィルター効果および自己シール性の有効性について評価した（松井ほか，2005a）。

緩衝材の構成モデルは関口-太田モデル（Sekiguchi and Ohta，1977）および足立-岡モデル（Adachi and Oka，1982）を用いた。これらの構成モデルは，緩衝材の長期力学変形挙動を評価するうえで基本となる弾塑性（応力-ひずみ関係に非線形表現を含む特性）と時間依存性（一定応力のもとで時間とともに変形が増大する特性；クリープ変形挙動）を考慮した構成モデルである。各モデルの詳細は「緩衝材長期力学挙動評価モデルの検討」（平井ほか，2004）に示すとおりである。解析コードは，MuDIAN（竹中工務店，1993）を使用した。

表 2.2.4-4 は構成モデルのパラメータで，幌延の深地層の研究施設計画で HDB-6 号孔より採取された地下水を用いた要素試験より設定した。その他の緩衝材およびオーバーパックの物性値は表 2.2.4-5 に示す。緩衝材の透水係数は密度変化に応じて変わるとし，人工海水を用いた実験結果（菊池ほか，2004）から（2.2.4-1）式および（2.2.4-2）式のように定めた。

表 2.2.4-4　パラメーター覧

	項　目		記号	単位	設定値
弾塑性パラメータ	圧縮指数		λ	[-]	0.117
	膨潤指数		κ	[-]	0.043
	ポアソン比		ν	[-]	0.144
	限界状態パラメータ		M	[-]	0.680
粘性パラメータ	関口-太田モデル	二次圧密係数	α	[-]	1.00×10^{-3}
		初期体積ひずみ速度	$\dot{v}_0$	[h-1]	1.02×10^{-8}
	足立-岡モデル	粘性パラメータ	m'	[-]	42.5
			C	[h-1]	1.98×10^{-8}

表 2.2.4-5　緩衝材およびオーバーパックの物性値

	項　目	記号	単位	設定値
オーバーパック	弾性係数	E	[MPa]	2.1×10^{5}
	密度	ρ	[Mg m^{-3}]	6.63
緩　衝　材	乾燥密度	ρ_d	[Mg m^{-3}]	1.60
	先行圧密時の静止土圧係数	K_0	[-]	1.00
	初期静止土圧係数	K_0	[-]	1.00
	密度	ρ_w	[Mg m^{-3}]	1.00
	初期全水頭	h	[m]	0.00

$$k=\frac{\rho g}{\mu}K \tag{2.2.4-1}$$

$$K=\exp(-47.155+15.138\rho_e-7.878\rho_e^2) \tag{2.2.4-2}$$

ここに，k は透水係数[m s^{-1}]，K は固有透過度[m^2]，　ρ_e は有効粘土密度[Mg m^{-3}]

図 2.2.4-12 に解析モデルを示す。緩衝材上部の拘束条件は，自重沈下解析では，オーバーパック沈下量の過小評価を避けるため自由端とし，腐食膨張解析では，腐食膨張によって緩衝材に発生する応力の過小評価を避けるために固定端とした。

腐食膨張解析におけるオーバーパックの体積膨張変形は，図 2.2.4-13 のように，中空円筒形状の半径方向と高さ方向の厚さが一定速度で等しく増加して，腐食生成物の体積は元の体積の 3 倍になると仮定する。オーバーパックの腐食速度を 0.04mm y^{-1} とすると，オーバーパック全厚さ 190mm の腐食が完了するのは 4,750 年後となり，この間の腐食による厚さの増分は 184.8mm となる。

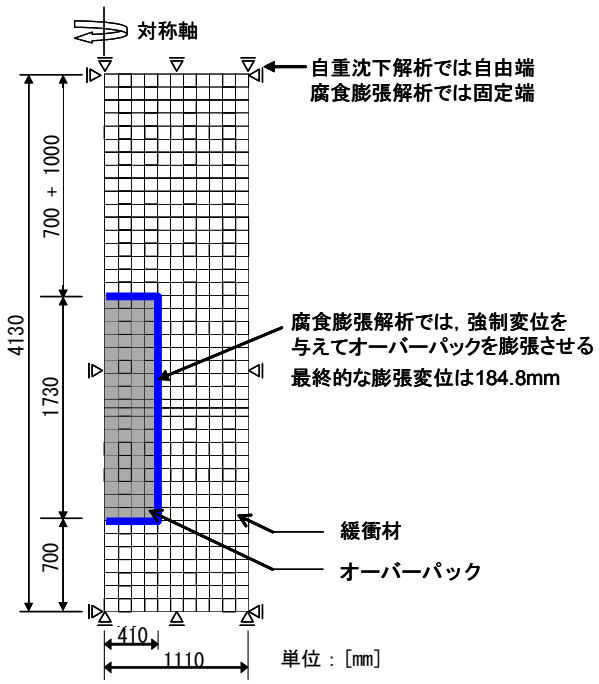


図 2.2.4-12　解析モデル

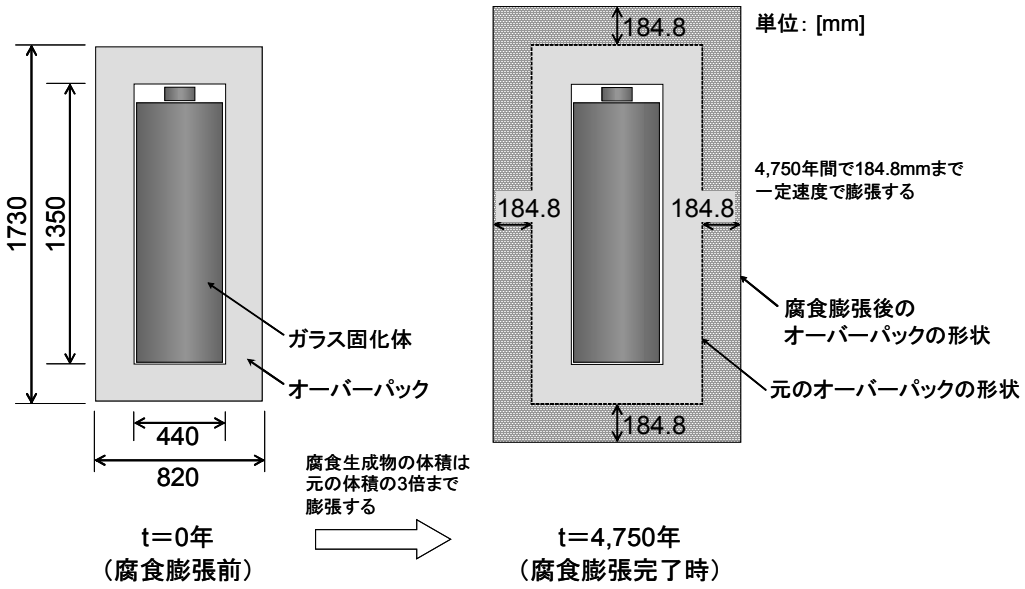


図 2.2.4-13　オーバーパックの腐食膨張変形

図 2.2.4-14 に，自重沈下解析より得られたオーバーパック沈下量の推移を示す。オーバーパック沈下量は，関口-太田モデルによる計算結果で，1 万年後で 31mm，10 万年後で 33mm 程度となった。さらに，長期において緩衝材に求められるコロイドフィルター効果と自己シール性機能の有効性について確認する。

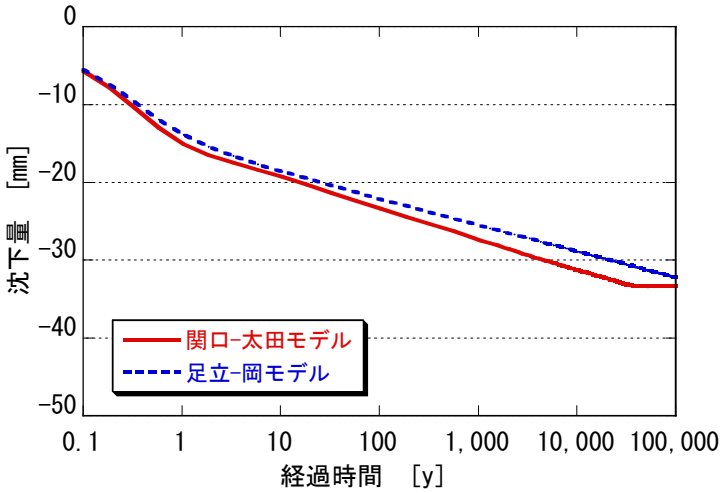


図 2.2.4-14　自重沈下解析結果

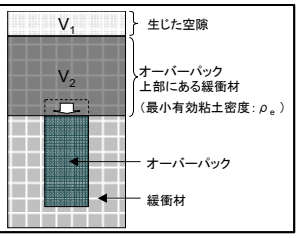
オーバーパックの自重沈下や緩衝材自身の変形によって，人工バリア上部に空隙が生じる可能性がある。このとき，オーバーパック上部にある緩衝材は，膨潤によって空隙を満たすのに必要な密度を有していることが求められる。検討には，緩衝材が初期体積の何倍まで膨潤し得るかを表す体積膨潤比 $\overline{V}$ という指標を用い，生じた空隙の体積が緩衝材によって充填される範囲であることを示す。

10 万年後の人工バリアにおいて生じている空隙体積を V_1，オーバーパック上部にある緩衝材部分

の体積をV_2，その有効粘土密度をρ_eとする。V_1およびV_2は解析モデルの個々のメッシュ要素の変形量の総和として求め，ρ_eはオーバーパック上部にある緩衝材のメッシュ要素のうち，最小値の密度として保守的に設定した。表 2.2.4-6 に 10 万年後における人工バリアの構成体積と有効粘土密度を示す。

表 2.2.4-6　10 万年後における人工バリアの構成体積と有効粘土密度

構成モデル	空隙体積 [m³] V_1	緩衝材体積 [m³] V_2	体積比 [-] $(V_1+V_2)/V_2$	有効粘土密度 [Mg m⁻³] ρ_e
関口-太田モデル	0.220	6.489	1.034	1.320
足立-岡モデル	0.247	6.458	1.038	1.322



一方，図 2.2.4-15 に緩衝材の隙間膨潤試験における有効粘土密度と体積膨潤比$\overline{V}$の関係（菊池・棚井，2005）に，自重沈下解析の結果を追加したものを示す。ここでいう体積膨潤比とは，緩衝材が膨潤したときの最大膨潤体積を初期体積で除したものである。隙間膨潤試験では，幌延地下水を用いたデータが得られていないため，幌延地下水よりもイオン強度の高い人工海水を用いた試験結果を示している。自重沈下解析で発生した空隙を充填するには，緩衝材が体積比で 1.038 倍（足立-岡モデル）まで膨潤する必要があるが，図 2.2.4-15 における人工海水（試験期間 2 週間）の結果でも体積膨潤比として 1.092 倍を達成している。さらに，人工海水条件下における試験期間 6 ヶ月でのデータは，それを上回る体積膨潤比を有している。これらのことから判断すると，ここで用いた緩衝材の仕様は，自重沈下により発生した空隙を充填するために必要となる自己シール性を十分有しているものと評価できる。

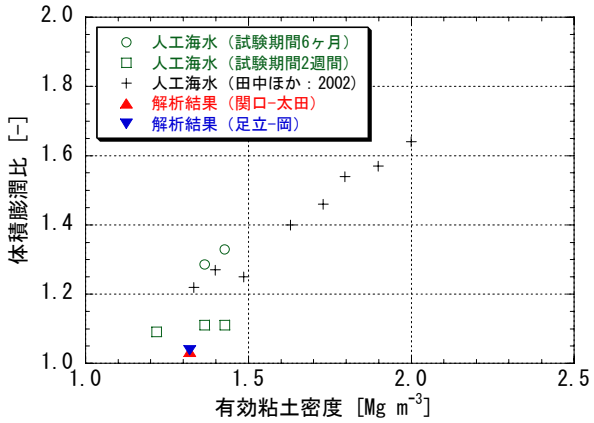


図 2.2.4-15　緩衝材の体積膨潤比と自重沈下解析の評価結果

また，オーバーパックが沈下し，オーバーパック上部の緩衝材が膨潤して空隙を充填した場合，緩衝材密度は低下する。このときの緩衝材密度が，コロイドフィルター効果を発揮する下限有効粘土密度 0.80Mg m^{-3} を上回っていることが要求される。10 万年後における緩衝材の膨潤後の有効粘土密度は，有効粘土密度を体積比で除した値として求められる。従って表 2.2.4-6 より，膨潤後の緩衝材密度は両モデルともに 1.27 Mg m^{-3} となり，10 万年後においても，コロイドフィルトレーション機能を有していると評価できる。

図 2.2.4-16 に腐食膨張解析より得られた，腐食膨張完了直後（4,750 年後）の緩衝材の破壊接近度

を示す。この結果より，オーバーパック周辺および隅角部で応力がほぼ限界状態にあるものの，緩衝材全体としては破壊には至っておらず，緩衝材は力学的に安定な状態にあるといえる。

以上，オーバーパックの自重沈下解析と腐食膨張解析により，緩衝材の長期力学変形挙動を評価した結果，緩衝材の長期健全性が損なわれるような現象は確認されなかった。

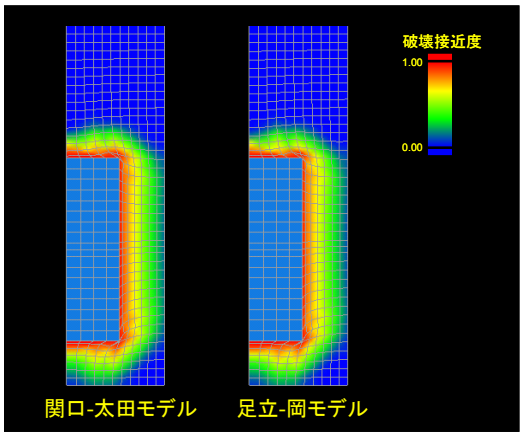
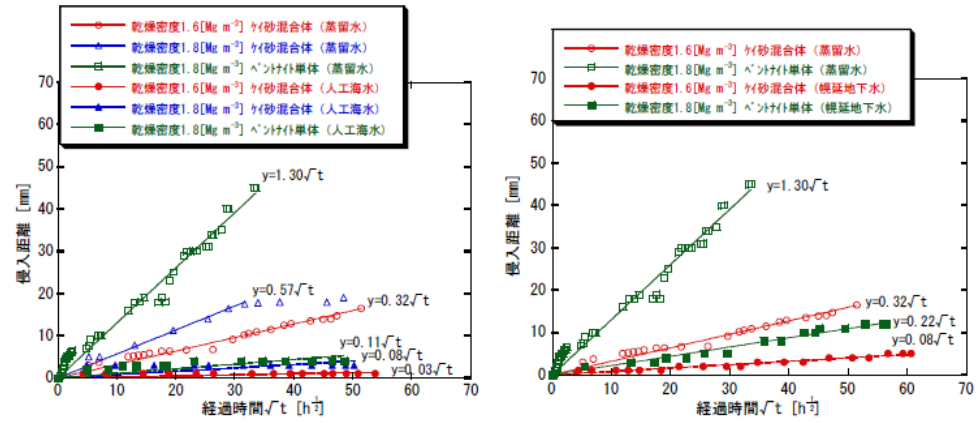


図 2.2.4-16　破壊接近度コンター図（4,750 年後）

3) 緩衝材の流出・侵入挙動評価

岩盤の割れ目内への緩衝材の侵入現象に関しては，海水系地下水条件（幌延地下水および人工海水）を想定して実施した試験結果（図 2.2.4-17）より，上記で設定された緩衝材仕様（2.2.4 章(2)）において，模擬した割れ目内への侵入速さが降水系地下水条件（蒸留水）よりも，1/4 程度（幌延地下水の場合）から 1/10 程度（人工海水の場合）と小さくなることが示されている（松本・棚井，2004・2005）。海水系地下水条件では，ベントナイトの凝集作用により膨潤応力が低下することから（核燃料サイクル開発機構，2005），侵入速さが小さくなる要因は侵入現象の動力である膨潤性の低下によるものと考えられる。この結果より，時間スケールにおける緩衝材の密度低下量が，降水系地下水条件よりも海水系地下水条件下で少ないことが確認された。したがって，幌延における地下水条件においては，本事象が顕著な問題となることは考えにくい。



(a) 蒸留水と人工海水の比較　　(b) 蒸留水と幌延地下水との比較

図 2.2.4-17　経過時間と侵入距離の関係（松本・棚井，2005）

4) ガス移行挙動評価

2.2.1(1)章において示す検討対象深度における岩盤の間隙率，密度および熱物性をもとに，炭素鋼オーバーパックの腐食で発生する水素ガスの影響を評価するために，改良型 TOUGH2 コードを用いて，間隙圧力の上昇や岩盤内へのガスの放出速度などについて解析を行った（松井ほか，2005a）。なお，絶対浸透率や相対浸透率などのガス移行パラメータについては実測値がないため，凝灰岩を用いて行ったガス移行試験の結果をもとに設定した（松井ほか，2005a）。また，腐食速度に関しては，第 2 次取りまとめと同じ 10μm y^{-1} とした（核燃料サイクル開発機構，1999）。その結果，閉鎖後約 3 年時点で間隙圧力が約 5.7MPa に上昇し緩衝材へのガスの侵入が開始される。図 2.2.4-18 に緩衝材中にガスが侵入を開始した時点のガスの飽和度分布を示す。岩盤へのガスの移動は約 100 年で開始し，約 130 年時点でガス発生域の間隙圧力は 4.9MPa でほぼ定常状態に達する。128 年経過時点でのガスの飽和度分布を図 2.2.4-19 に示すが，この結果から，処分孔側面から岩盤内に侵入し，処分坑道を迂回する形で岩盤中を移動している。また，岩盤側へのガスの放出速度は，処分孔側面から岩盤内にガスが侵入を開始する時点で，短期的に 0.08kg y^{-1} に達するものの，それ以降は約 0.02kg y^{-1} の一定値で放出が継続する。

以上の解析結果から，以下の点が明らかとなった。

・間隙圧力の最大上昇分は約 1.5MPa 程度である。

・ガスの移行に伴って緩衝材中から岩盤に排出される間隙水量は，累積排出水量が最大となる時点で約 8%程度であり，緩衝材の飽和度の変化は小さい。

・岩盤に放出されるガスの速度は，岩盤にガスが侵入を開始した直後のごく短期間のピークの後は，ガス発生速度にほぼ等しい速度で定常的に岩盤に放出されることから，緩衝材と岩盤の境界へのガスの蓄積の可能性は小さい。

以上のように今回設定した範囲では，ガス発生による人工バリアへの力学的影響はほとんど問題ないと考えられる。

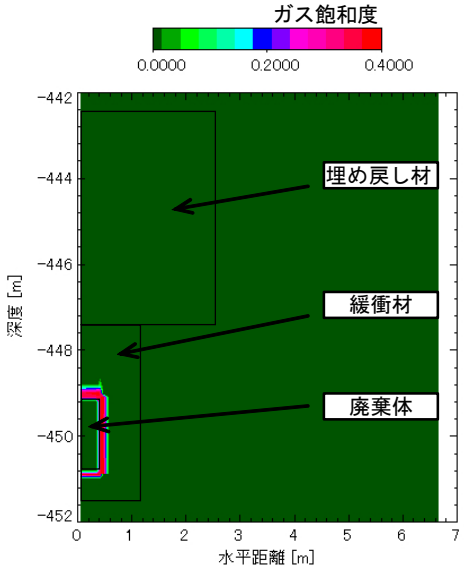


図 2.2.4-18　3 年経過時でのガス飽和度分布

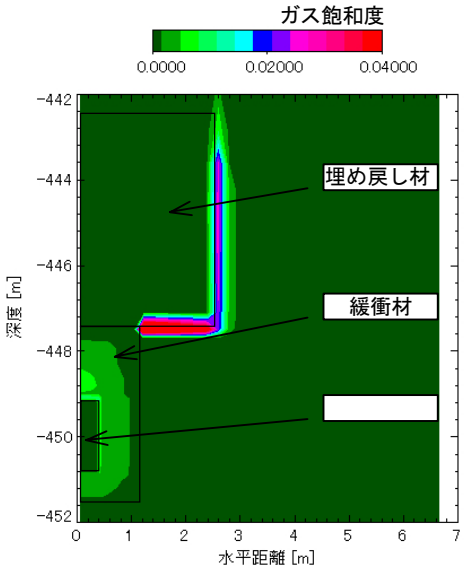
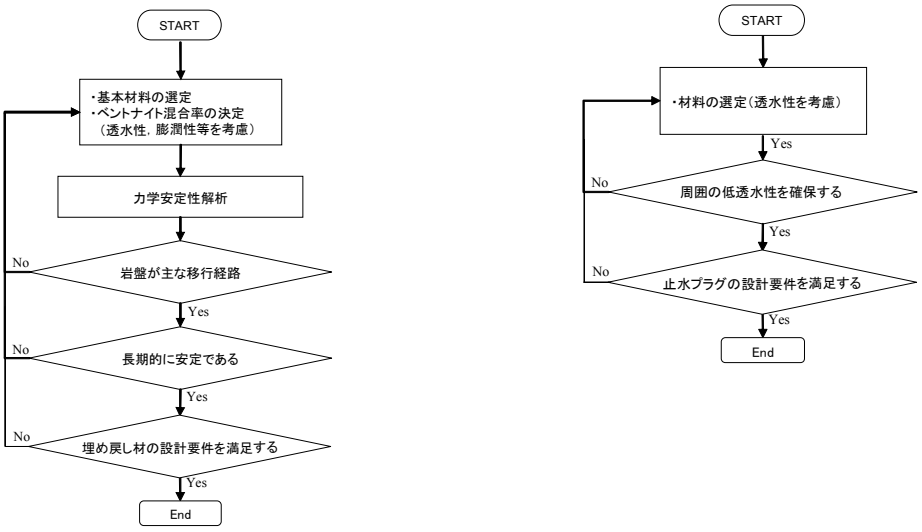


図 2.2.4-19　128 年経過時でのガス飽和度分布

2.2.5 閉鎖設計手法の適用事例

処分場建設のために掘削された坑道を放置しておくと，地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり，坑道が地下水の卓越した水みちとなるなど，処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが想定される。また，地下施設と地上とを直結する坑道が残置されていると，処分場と生活圏を結ぶ経路となることや処分場に人間が不用意に接近することも考えられる。したがって，掘削された坑道などの空洞は，地層処分システムの全体性能に有意な影響を与えないように，埋め戻し材やプラグなどで適切に処置しておく必要がある(核燃料サイクル開発機構, 1999)。閉鎖設計においては，閉鎖要素自体はバリアではない上に，人工バリア設置後に施工されるという時間的なギャップがあることに留意する必要がある。したがって，地質環境条件を考慮したうえで，埋め戻し材やプラグなどを組み合わせた閉鎖システムとしての処分場の安全確保の考え方や要件を考慮して，それぞれの仕様が決められるものである。図 2.2.5-1 に実際の地質環境を考慮した埋め戻し材および止水プラグについての設計フローの例を示す。以下に，幌延の研究所用地の地質環境における埋め戻し材および止水プラグの設計例を示す。



(a)埋め戻し材　　(b)止水プラグ

図 2.2.5-1　実際の地質環境を考慮した埋め戻し材および止水プラグの設計フローの例

(1) 埋め戻し材の設計

地下施設における坑道群の総延長は 100km 以上にもおよび，坑道などの掘削にともなって大量のずりが発生する。したがって，第 2 次取りまとめにおいては，元の岩盤から発生した材料であることに加えて，材料の調達のしやすさや経済性の観点から，埋め戻し材料としてずりの利用を基本にベントナイト混合率 15wt%，乾燥密度 1.8Mg m^{-3}（有効粘土密度 0.6Mg m^{-3}）を設定している（核燃料サイクル開発機構，1999)。ここで設定された埋め戻し材仕様における降水系地下水条件での固有透過度は 10^{-18} m^2，膨潤応力は 0.10MPa 程度となる。このように，粒度調整したずりにベントナイトを混合することにより，低透水性が実現できるとともに，ベントナイトの膨潤性により，坑道壁面との境界部の隙間を閉塞する自己シール機能も期待できる。したがって，幌延の地質環境を対象とした埋め戻し材に対してもずりにベントナイトを混合する材料を基本として設計検討を行なった。以下にその結果の概要を示す。

幌延の海水系地下水を対象とした透水試験結果（図2.2.5-2）より，上述した埋め戻し材仕様と同等

の固有透過度（10^{-18} m²程度）を確保するためには，有効粘土密度で1.2Mg m^{-3}程度が必要となる。また，膨潤応力についても，図2.2.5-3の結果から同様に1.2Mg m^{-3}程度の有効粘土密度が必要である。なお，フィンランドでは，埋め戻し材の膨潤特性には隙間充填性に加え，坑道内のキーブロックの崩落を抑える役割を期待しており，その場合でも数kPaの膨潤応力があれば十分に安定性を保てることが示されている（Autio et al.，2002)。仮に有効粘土密度1.2Mg m^{-3}程度の埋め戻し材仕様であれば，数100kPa程度の膨潤応力の発揮は期待できることから，フィンランドで考えられているようなキーブロックの崩落の抑止も可能と考えられる。さらに，処分孔竪置き方式における緩衝材の定置では，埋め戻し材の設置乾燥密度が小さい場合，緩衝材の膨出が発生すると考えられるが，幌延における海水系地下水条件を考慮した場合，緩衝材の平衡膨潤応力は，蒸留水の場合と比べ小さくなることが予測されること，また，杉田ら（杉田ほか，1999）が行った降水地下水条件下での3次元弾性解析結果などから判断して，有効粘土密度1.2Mg m^{-3}以上の埋め戻し材仕様を確保すれば緩衝材の膨出を抑えられると考えられる。さらに，埋め戻し材には長期にわたり流出しないことが求められており，流出試験結果より，海水系地下水の場合，降水系地下水よりも流出現象が顕著でないことが示されている（松本・棚井，2005)。

以上より，幌延の海水系地下水環境に対して，有効粘土密度1.2Mg m^{-3}を確保しうる仕様として，ベントナイト混合率40wt%，乾燥密度1.8Mg m^{-3}のベントナイト混合材料を埋め戻し材の基本とすることとする。

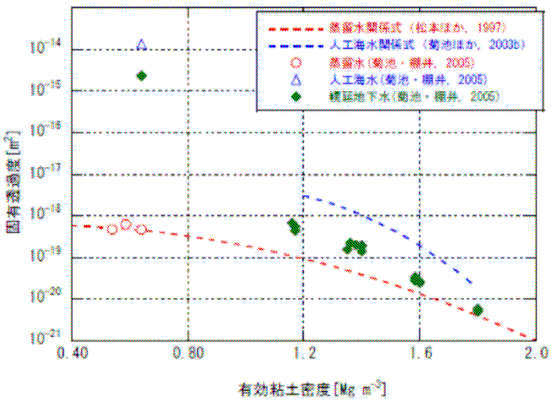


図 2.2.5-2　有効粘土密度と固有透過度の関係（菊池・棚井，2005）

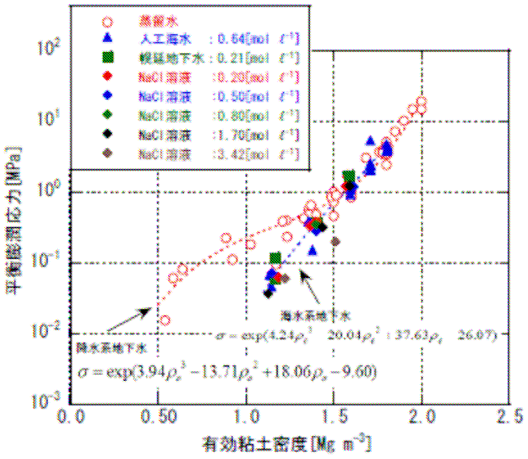


図 2.2.5-3　有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係（菊池・棚井，2005）

(2) プラグの設計

第 2 次取りまとめにおいては，止水プラグは長期の止水性能が求められることから，緩衝材と同等のベントナイト含有率が高い材料が考えられている。堆積岩系岩盤におけるプラグの概念として，フランスにおけるカテゴリーB（中レベル放射性廃棄物）の例がある（図 2.2.5-4（ANDRA，2005））。これは，止水プラグ自身の低透水性および可塑性を確保するために材料に膨潤性粘土を用いるとともに，EDZ を遮断するよう坑道に拡幅部を設ける概念である。

上述の例と同様に，幌延におけるプラグに関しても，止水プラグそのものの低透水性を確保し化学的に安定である緩衝材と同等のベントナイト含有率が高い材料とする。また，坑道沿いに連続する水理的経路を分断するため，拡幅部を設けることとする。AECL（カナダ）との共同研究として実施したトンネルシーリング性能試験（Martino et al.，2003）で用いられた粘土プラグの有効粘土密度は 1.6Mg m^{-3} に相当し，この時の固有透過度は，幌延の地下水を考えた場合にも，蒸留水と比べて 1 オーダー以内の変化となる（図 2.2.5-2）。したがって，幌延の地質環境に対して，止水プラグは粘土ブロックと吹付け層で構成し，ケイ砂混合率 30wt%で，ブロックの乾燥密度を 1.9Mg m^{-3}，吹付け層を 1.3Mg m^{-3} とするベントナイト混合材料を基本とすることとする（図 2.2.5-5）。幌延の研究所用地に分布する岩盤は他の堆積岩と同様，クリープ変形と坑道内からの反力により，一度緩んだ領域が回復することが期待できる（大久保，2005）。したがって，EDZ の透水性の改善も期待できることから，さらなるプラグの合理化が期待できる。

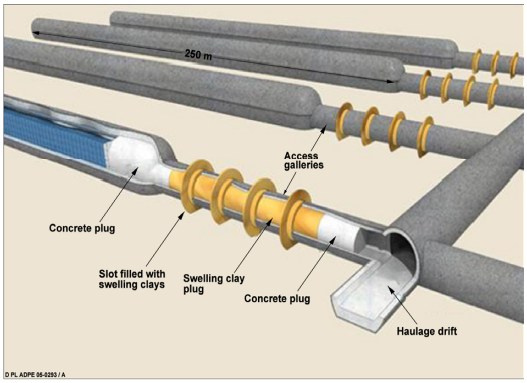


図 2.2.5-4　フランスの堆積岩系岩盤におけるプラグの概念

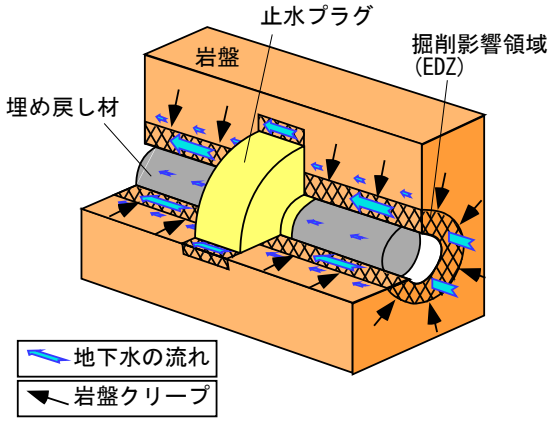


図 2.2.5-5　幌延の止水プラグ概念

ここでは，2.1.3 章において示された閉鎖に関わる設計要件および幌延の研究所用地の地質環境を対象とした場合の留意点を考慮して，閉鎖設計手法の適用事例を示した。その結果，幌延の研究所用地の地質環境として海水系地下水の場合であっても，結晶質岩と同様の止水プラグを設定できることを示した。

SR97 の処分場概念では，埋め戻し材が処分概念の弱点のひとつになることを指摘しており，特に長期の問題が今後の課題になっている（Sellin，2002）。たとえば，イオン交換の影響はベントナイト量が少ない埋め戻し材では無視できない問題であり，高塩濃度の地下水の場合，埋め戻し材の膨潤機能が低下する可能性がある。流出に関しては，緩衝材の流出試験結果から大きな問題にはならないと考えられるが（松本・棚井，2005），さらなる膨潤機能低下に伴う隙間が発生することになれば水みちが形成される可能性がある。これらの対策として，ベントナイト量を多くすることで膨潤，水理特性の向上を図ることが可能となる。しかし，これは同時に材料のコスト高や剛性の低下の原因となる。コストや性能の面では天然粘土材を使用することも考えられるが，そのためには，材料の特性を十分に調査する必要がある。仮に，内陸の処分地となればイオン強度の低い地下水となる可能性が増し，

これらの影響を抑えることができる（Sellin，2002）。人工バリアとの関係では，埋め戻しという概念そのものを制限できる横置き方式を採用するという考え方もある（Sellin，2002）。また，上述した単体の機能を処分場のレイアウトに適用し，処分システム全体としての評価の中に位置付けていくことによって，処分場における閉鎖要素の役割が明確化され，より信頼性が高く合理的な閉鎖概念の検討が可能となると考える。これらに関しては，現在，原子力発電環境整備機構と協力して検討を進めており，その一環として埋め戻し材およびプラグの組み合わせ方や材料特性をパラメータとした解析評価を開始している（Sugita et al.，2005）。

2.2.6 低アルカリ性コンクリートの開発

(1) 処分施設の建設に用いられるセメント系材料に要求される条件

地下数百 m の岩盤内に地下空洞を建設する際には，周辺岩盤の力学的な安定を図るため，支保工が設置されることが多い。ところが，支保工材料として広く使用されてきた普通ポルトランドセメント（Ordinary Portland Cement：以下，「OPC」という）を用いたコンクリートに地下水が接すると，pH が 12.5 から 13 程度の高アルカリ水になることが想定される。高アルカリ性の地下水は，高レベル放射性廃棄物の処分施設の緩衝材や周辺岩盤を変質させ，人工バリアや天然バリアの性能に影響を及ぼすことが懸念されており，その影響評価について国際的な研究が進められている（NUMO，2004）。今後の研究により，地下水の高アルカリ化により安全評価上重大な影響が予想される場合には，その影響を抑制する代替材料の検討が求められる。

OPC による高アルカリ水の影響は，コンクリートから溶出する高アルカリ性溶液の濃度および総量に対して，浸透するベントナイトや周辺岩盤の変質の程度，範囲および期間により評価される。したがって，これを抑制するには，セメントの低アルカリ化，コンクリートの低溶脱化，ベントナイトの低浸透化などが考えられている(土木学会，2004)。地層処分における化学的環境は超長期の反応により形成されることから，ここでは，反応が最も進行しても低アルカリ条件を担保できるセメントの低アルカリ化に関して検討することにした。

これまで土木構造物に使用されてきたコンクリートのうち，シリカフュームやフライアッシュなどのポゾラン材料を混入したコンクリートは，長期強度の増進，水和熱の減少，練混ぜ水の分離減少，耐久性の増進などの長所がある反面，初期強度および pH が低下し易いことが知られている。そこで原子力機構では，OPC による地下水の高アルカリ化を抑制するために，OPC にポゾラン材料を多量に添加したセメント（Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement：以下，「HFSC」という）を考案した(三原・入矢，1999)。このセメントを使用したコンクリートは，OPC のみを使用したコンクリートと比較して浸出液の pH が低下すると考えられ，以下，このようなセメントを「低アルカリ性セメント」，このセメントを用いたコンクリートを「低アルカリ性コンクリート」という。

原子力機構では第 2 次取りまとめにおいて，HFSC を坑道の支保工コンクリートに使用するセメントとして提案し，開発目標を以下に挙げた。

①セメント系材料の浸出液の pH を 11 程度以下にすること。

pH が 11，12.5，13 のセメント模擬浸出液に対する花崗岩の変質試験によると，12.5 以上では花崗岩の溶解などの処分環境に変化を生じる可能性があるのに対して，11.0 以下では処分環境への影響の大きさや影響を及ぼす範囲は小さいと考えられる（大和田ほか，2000）。また，pH が 10.5，11.5，12.5，13 のセメント模擬浸出液に対するベントナイトの変質試験によると，11.5 以上ではベントナイトの溶解が増加するのに対して，10.5 以下では顕著な変質は避けられることが示唆されている（久保ほか，1998）。そこで，第 2 次取りまとめでは，上記の周辺岩盤やベントナイト系材料への影響およびオーバーパックの腐食形態への影響評価には，長期データの蓄積や検討が必要であるものの，セメント系材料の浸出液の pH を最大でも 11 程度に抑えることができれば，顕著な変質は避けられるとした。

一方，開発可能なセメント系材料の pH の下限は，技術的実現性の観点より 10 から 11 程度と考えられる。これらを考え合わせて，HFSC の開発目標は pH を 11 以下とした。

②支保工コンクリートとしては，吹付け方式，場所打ち方式およびセグメント方式などに柔軟に対応できるようにすること。

HLW 処分施設の周辺で使われる可能性のあるセメント系材料は，図 2.2.6-1 に示すように支保工として吹付け・場所打ち・セグメントコンクリート，強度プラグとして場所打ちコンクリート，亀裂・ロックボルト孔への充填材としてグラウトなどが想定されている。

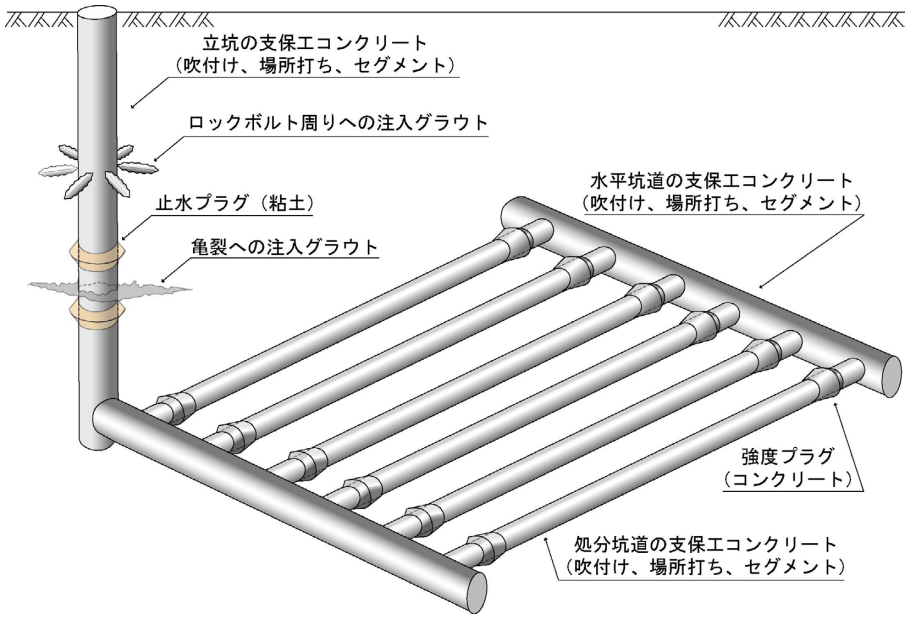


図 2.2.6-1　HLW 処分施設においてセメント系材料を使用する可能性のある人工物の概念

次に，第 2 次取りまとめ以降に示されたセメント系材料に対するニーズや課題について述べる。事業側が求めるニーズを以下に挙げる（原子力発電環境整備機構，2004）。

①セメント系材料は，必要な施工性，力学的特性を有すること。

支保工は，空洞の安定性を保つため力学的強度が必要であるとともに，施工において打込み，吹付けあるいは充填できる流動性能を有していなければならない。

②セメント系材料は，必要な低アルカリ性を有すること。

各国で開発されている低アルカリ性セメントを表 2.2.6-1 に示す。この他にも，ポゾラン材料による Low-pH cement などの開発が進められている(SKB，2003)。

表 2.2.6-1　各種の低アルカリ性セメント

	HFSC ｻｲｸﾙ機構(日本)	LHHPC(Gray and Shenton，1998) AECL（カナダ）	LAC-S (藤田ほか，1998) 電力中央研究所(日本)
pH の低下機構	ﾎﾟｿﾞﾗﾝ材料	ﾎﾟｿﾞﾗﾝ材料	ｸﾘﾝｶｰ設計
基本セメント	OPC:40%	OPC:25%	LAC-C:80%
シリカフューム	20%	25%	20%
フライアッシュ	40%	0%	0%
シリカフラワー	0%	50%	0%
pH の測定結果	11 以下を目標	10.6	10.2
材齢 28 日 圧縮強度結果	40MPa 以上	70MPa 以上を目標	40MPa 以上

注）OPC：普通ポルトランドセメント
LAC-C：アーウィン（$3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4$）を主成分とした低アルカリ性セメント

HFSC は，OPC を減量しポゾラン材料であるフライアッシュとシリカフュームを増量するこ

とにより, 高 pH の原因となる水酸化カルシウムをポゾラン反応により消費･低減するとともに, 難溶性の低 Ca/Si 比の CSH（珪酸カルシウム水和物）を生成して，セメント硬化体の浸出液の pH を低下させることを目的としたセメントである。ポゾラン材料のうち微細粒子のシリカフュームにより OPC の 70%以上を置換すると，加水後の粘性が増加し流動性が低下する。そこで，シリカフュームの混合率は 20%に抑えて，フライアッシュで 30%以上代替することにした（入矢・三原，2003)。ところが，フライアッシュは品質が変動し易く，コンクリートの品質がばらつくことが懸念された。また，OPC を減量するため，OPC のみを使用したコンクリートと比較して初期強度は低下する。さらに，ポゾラン反応により pH が低下するため，内部鋼材は腐食し易くなると考えられる。

以上のように，HFSC は OPC に替えてポゾラン材料を多量に添加するために，材料特性上確認すべき課題が多く残されている。また, 先に記述したように低アルカリ性コンクリートを HLW 処分施設に利用する場合には，多くのニーズが挙げられている。そこで，以上の課題やニーズを解明するために，本研究では，ポゾラン材料の混合割合を変えた HFSC を用いた材料試験などを実施して，その材料特性を把握・確認することにした。

以下で検討する HFSC の基本混合率を，表 2.2.6-2 に示す。

表 2.2.6-2　HFSC の基本混合率

	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	ポゾラン材料	
		シリカフューム	フライアッシュ
OPC	100%	0%	0%
HFSC424	40%	20%	40%
HFSC325	30%	20%	50%
HFSC226	20%	20%	60%

(2) 施工性ならびに圧縮強度の確認

HFSC を用いたコンクリートの流動特性は OPC と異なるが，土木構造物としての施工実績はない。また，地下数百 m の地下坑道への運搬距離，時間はともに長いことから，実際の処分場環境での施工性の確保が不可欠である。また，コンクリートは，支保工の吹き付けコンクリートなど強度部材として用いられることから，設計上必要とされる圧縮強度などの力学的特性が確保されていなければならない。

そこで, 横置き処分坑道掘削で想定されている（核燃料サイクル開発機構, 1999) Tunnel Boring Machine（以下，TBM という）掘削に支保部材として用いられるセグメントおよび竪置き処分坑道や主要坑道掘削などで想定されている（核燃料サイクル開発機構，1999）New Austrian Tunneling Method（以下，NATM という）掘削の支保部材として用いられる吹付けコンクリートを対象に，施工性ならびに圧縮強度の確認を実施した。

1）セグメントの製作試験および強度特性

(a)試験概要

HFSC には，微細粒子のシリカフュームとフライアッシュを用いており，水と混練りすると粘性が増しポンプ圧送性や充填性などの施工性が低下する。このため，コンクリートを高流動化させる高性能 AE 減水剤を使用する必要が生じる。そこで，高流動化したコンクリートの施工性を把握するためにセグメントを製作し，載荷試験を行う。

(b)試験条件

セグメントを製作できる試験体数が限られているために，結合材の混合率は，最もポゾラン材料が多く pH の低い HFSC226，高流動化したコンクリートのセグメント型枠への充填性を確認するために水結合材比は 27.3%を選定した。

水結合材比は，水とシリカフューム，フライアッシュを含むセメントの重量百分率で示し，一般的にこれが小さいと，水が少なく流動性が悪くなるものの緻密になり強度が高くなる。HFSC を用いたコンクリートの高流動化には，一般的なポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した（入矢・三原，2003）。高性能 AE 減水剤は，界面活性剤のひとつで放射性核種と錯体を形成する可能性があり，放射性核種の溶解度を上昇させることが実験的に確認されている（Greenfield et al.，1998)。しかしながら高性能 AE 減水剤は，セメント固相に強く収着すること，硬化後にセメントペーストから溶出する高性能 AE 減水剤は添加前の分子量と大きく異なることなどの理由から，放射性核種の移行挙動に大きな影響を及ぼすものではないと考えられている（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005)。

試験体の形状は外径 5,600mm × 厚さ 250mm × 幅 1,200mm の円弧形とし，セグメントの製作工場において HFSC226 を用いたコンクリートを鋼製型枠内に締固めずに打込み，高温蒸気養生（60℃，3 時間）後，脱枠し製作した。セグメントは 1 年間気中および水中養生後に，2 点集中荷重載荷による曲げ破壊試験を実施した。

(c) 試験結果

HFSC226 を用いて実規模セグメントを製作し，高流動コンクリートが基本的な施工性のひとつである充填性を有することを確認した。セグメントは 1 年間気中および水中で養生後に，それぞれの曲げ破壊試験を行ない，ともに設計上必要なひび割れ発生強度および破壊強度を有し，破壊性状も一般的なものとほとんど変わらないことを確認した（中山ほか，2004)。

2) 吹付コンクリートによる模擬施工試験

(a) 試験概要

HFSC は，OPC と同様に吹付けコンクリートに必要な初期強度が発現しにくいため，急結剤を添加する必要がある。そこで， HFSC を用いたコンクリートに急結剤を添加したものを地上に設置した模擬トンネルの壁面に吹付けて，施工性を確認するとともに強度の把握を行った。

また，HFSC は高性能 AE 減水剤で流動性を確保しているものの，フライアッシュに含まれる未燃カーボンが高性能 AE 減水剤を吸着することにより，練混ぜ後の時間の経過による流動性（スランプ）の低下が懸念される。スランプの低下は，ポンプ圧送性などの施工性に悪影響を与えることから，練り置き試験によりスランプの経時変化を測定した。

(b) 試験条件

結合材の混合率は HFSC424 を基本とし，初期強度を検討する目的から，セメントについては OPC と早強セメント用い，それぞれ HFSC424N，HFSC424H とした。水結合材比についても，初期強度を確保するため施工限界まで極力低くすることとし，HFSC424N に対しては 40%，HFSC424H に対しては 45%を選定した（小西ほか，2006)。急結剤はカルシウムサルフォアルミネート系の無機材料のうち，OPC では pH12 から 13 用を使用するのに対し，HFSC では 10 から 11 用を適用した（入矢ほか，2001）。

施工性については，急結材の混合状態，圧送管の脈動，粉塵などについて目視あるは触指より判断した。

圧縮強度試験について，試験材齢 3，6，24 時間の初期強度は，プルアウト試験により得られた圧縮強度(換算値)とし，試験材齢 7，28，56 日では，パネル型枠に急結材を添加したコンクリートを吹付け，コアリングを行いφ50mm×100mm に整形後，通常の圧縮強度試験を実施した。

スランプの経時変化測定は，HFSC424N の水結合材比 40%と 45%を対象とし，練り混ぜ直後，30 分後，60 分後にそれぞれスランプを測定した。

(c)試験結果

図 2.2.6-2 に示すように HFSC424N，HFSC424H とも吹付け性状に大差は無く，両配合とも施工可能なことを確認した。

図 2.2.6-2　吹付けコンクリートの模擬施工状況

圧縮強度試験結果を図 2.2.6-3 に示す。両配合とも幌延の地下研究施設で設定されている設計基準強度 36MPa（材齢 28 日）を十分満足している。また，3 時間強度についても 3MPa 以上を確保していることを確認した。

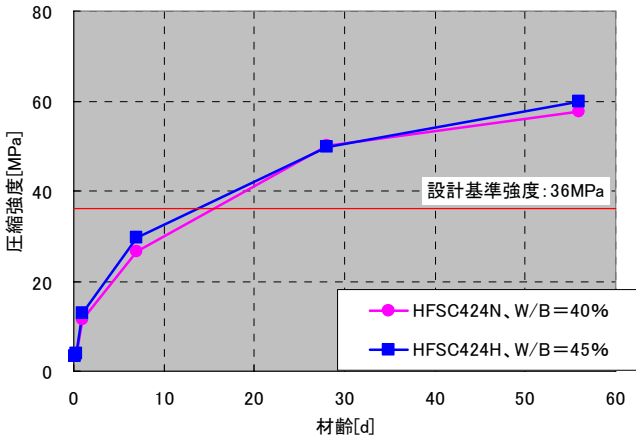


図 2.2.6-3　吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果

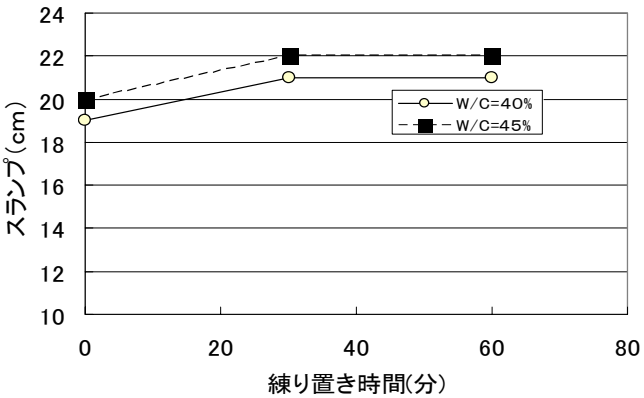


図 2.2.6-4　スランプの経時変化

次に，スランプの経時変化測定結果を図 2.2.6-4 に示す。同図より，練り置き後のスランプ低下は認められないことから，運搬時間の増大による流動性の低下は小さいと考えられる。

(3) フライアッシュの品質変動の把握

HFSC に混入するフライアッシュは，石炭火力発電所から発生する工業副産物であり，原料である石炭種などによって品質がばらつく可能性がある。ここでは，幌延 URL での適用を考慮し，同一の火力発電所において 2 ヵ年程度にわたりフライアッシュをサンプリングし，コンクリートの品質変動を試験により調査する。調査するコンクリートの品質は，硬化前のスランプフローおよび硬化後の圧縮強度とした。

1) スランプフロー試験

(a) 試験概要

HFSC を用いた硬化前コンクリートの品質は，スランプフローにより確認する。スランプフローとは，コンクリートのやわらかさの指標であり，平板上に置いた底のない容器内にコンクリートを詰め，容器を引き上げた後に広がるコンクリートの直径を cm で示す。

(b) 試験条件

フライアッシュは，JIS I 種およびII種相当品を試験対象とした。結合材の混合比は強度が比較的大きくなる HFSC424 を用い，水結合材比は，覆工コンクリートなどに用いる場所打ちコンクリートを想定して 27.3%とし，高性能 AE 減水剤により流動性を確保することとした。

(c) 試験結果

HFSC424 を用いた場所打ちコンクリートのスランプフローを，図 2.2.6-5 に示す。

スランプフローは，前半の測定時には±10cm 程度変動したものの，JISII種相当品のみを対象にした後半の測定時には，高流動コンクリートの推奨値である 65±5cm 程度に収まった。このことから HFSC のスランプフローは，今回試験対象とした JISII種相当品のフライアッシュに対しては，高性能 AE 減水剤の添加により，品質管理可能と考えられる。

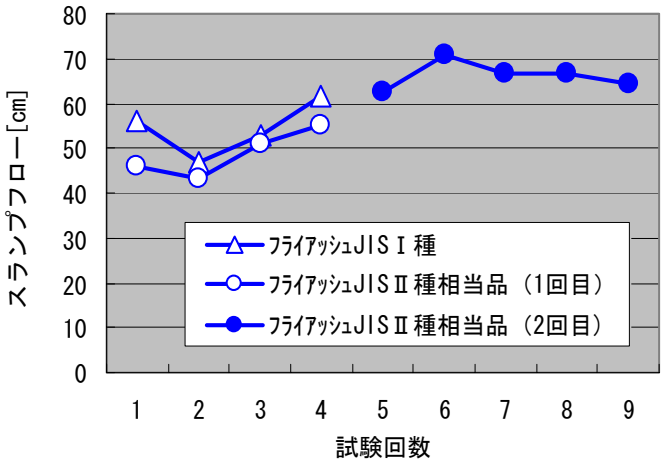


図 2.2.6-5　HFSC424 を用いた場所打ちコンクリートのスランプフローの変動

2) 圧縮強度試験

(a) 試験概要

HFSC は，OPC による高 pH を抑制するため，フライアッシュとシリカフュームを結合材として考慮している。従って，単位結合材量を一定とすれば，OPC のみを結合材とした場合と比較

して材齢 28 日における圧縮強度は小さくなることが予想される。そこで，フライアッシュの品質変動と，OPC の混合率がコンクリートの圧縮強度へ与える影響について検討した。圧縮強度の目標は，幌延の深地層の研究施設の基本計画時に設定した設計基準強度であり，材齢 28 日で 40MPa とした（窪田ほか，2003）。

(b) 試験条件

強度試験に用いた結合材の混合比は，HFSC424, HFSC325 の 2 種類とし，水結合材比は 27.3%，フライアッシュは JIS Ⅱ種相当品であり，HFSC424 については，図 2.2.6-5 に示したスランプフロー試験のうち，フライアッシュ JIS Ⅱ種相当品（1 回目）と同一配合である。

(c) 試験結果

圧縮強度と材齢の関係を図 2.2.6-6 に示す。まず，OPC の混合率が圧縮強度へ与える影響については，OPC の混合率の高い HFSC424 の方が各材齢とも圧縮強度が高くなっている。目標とした圧縮強度との対比では，HFSC325 で 47.2MPa（材齢 28 日，平均値）と目標値の 40MPa を満足していることが確認された。また，ばらつきの範囲は，42.5～51MPa であり，今回対象としたフライアッシュの品質の範囲内では，その変動が圧縮強度へ与える影響は小さいと考えられる。

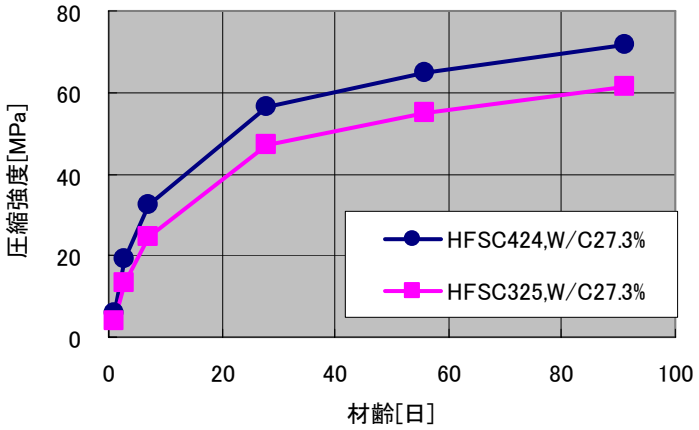


図 2.2.6-6　HFSC コンクリートの圧縮強度と材齢の関係

(4) 耐久性の評価

1) 海上暴露試験

(a) 試験概要

HLW 処分施設には，吹付けや覆工（場所打ち）コンクリート等のセメント系材料とともに，鋼製支保工，ロックボルトなどの鋼材が設置される場合が考えられる。コンクリート支保工は，基本的に圧縮部材として機能することが多く，鉄筋コンクリート構造が用いられることは少ないと考えられる。しかし，従来鉄筋コンクリートでは，OPC の高アルカリ性により鉄筋の腐食を抑制するといった利点を有しており，このような特徴に対し低アルカリ性が与える影響について検討するため，HFSC を用いたコンクリートを海水環境下に暴露する試験を行い，内部鋼材の腐食挙動を確認する。

(b) 試験条件

結合材は試験体数を限定するためOPCのみとOPCの混合率の低いHFSC226の2種類とし，水結合材比は場所打ちコンクリートを想定し，30%を選定した。コンクリート供試体の形状寸法は，直径 100mm×高さ 200mm とした。コンクリートに埋込む鉄筋は直径 13mm の丸鋼とし，かぶり 20mm の位置に1供試体あたり2本を配置した。供試体は材齢91日まで標準水中養生後，図 2.2.6-7 に示すように，清水港内の海中および海上飛沫帯に暴露した。鉄筋の腐食状況は，海水暴露 0.5 年，1 年，3 年目に観察した。

(c) 試験結果

海上飛沫帯に 3 年間暴露した HFSC226 を用いたコンクリート中の塩化物イオン量分布を図 2.2.6-8 に，埋設した鉄筋の腐食状況を図 2.2.6-9 に示す。

比較のために同様に暴露した OPC には鉄筋腐食が認められなかったのに対して，HFSC226 には鉄筋表面積の約 6%に腐食が認められた。また，HFSC コンクリート内のかぶり 20mm に配置された鉄筋は，塩化物イオンが十分に浸透していなくても，OPC と異なり腐食することが判明した。これより，HFSC は OPC に比べて，鉄筋の発錆しやすい傾向のあることが示された。

図 2.2.6-7　鉄筋を埋設したコンクリート供試体の海上飛沫帯での暴露状況

ただし，HFSC226 の海水暴露試験において暴露 3 年目の腐食面積は 1 年目と変わらず，進行が遅い結果も得られた。従って，現段階では，HFSC が OPC よりも耐久性が低いとは言い切れないため，今後継続してデータを収集し判断することが重要と考えられる。

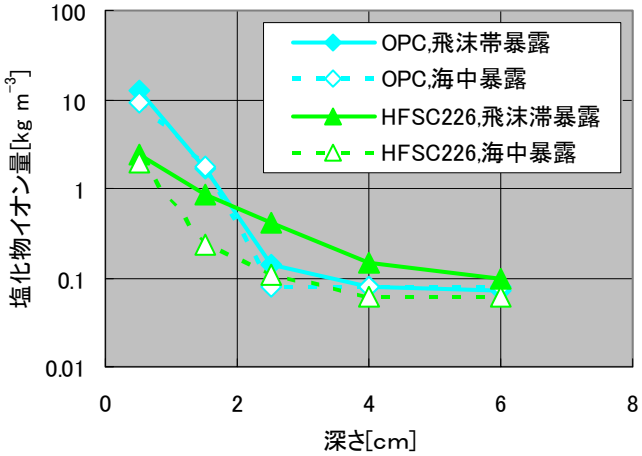


図 2.2.6-8　暴露 3 年目のコンクリート内の塩化物イオン量分布

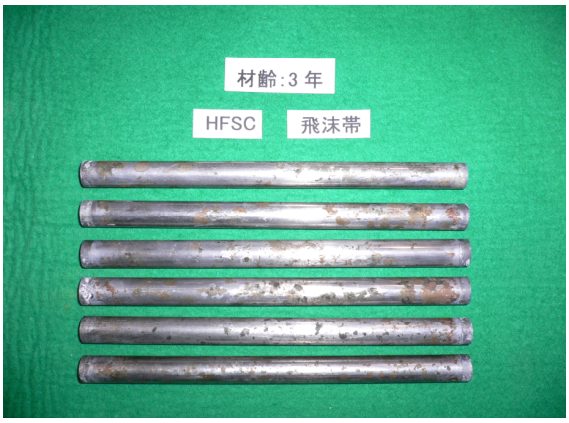


図 2.2.6-9　HFSC226 コンクリートの飛沫帯暴露 3 年目の鉄筋腐食状況

(5) HFSC の pH の低下挙動

HFSC の pH 低下挙動を試験および解析により把握して，HFSC の開発目標である pH を 11 以下にする目途を得る。

1)浸漬試験

(a) 試験概要

HFSC を用いたペースト粉体の浸漬試験を実施して，浸漬水の pH の低下挙動を確認する。また，浸漬水の温度を高くして pH 低下への影響を把握する試験も実施する。

(b) 試験条件

HFSC を用いたペーストを円柱形に成型し硬化後に粉体にし，浸漬液の pH を測定した。浸漬液の pH は，空気中の炭酸ガスに触れても低下する可能性があることから，浸漬容器内に窒素ガスを封入し保管したが，pH 測定時には空気に触れることから，炭酸ガスの影響の有無を調査した。一般に，セメント硬化体への炭酸ガスの影響は，各水和物と炭酸ガスが反応し，炭酸カルシウムを析出する炭酸化あるいは中性化と呼ばれる現象であることから，pH 測定後に試料の X 線回折分析および示差熱分析を行った結果，炭酸カルシウムはほとんど認められなかったため，浸漬水の pH 低下に対する空気中の炭酸ガスの影響は小さいと判断した（入矢ほか，2003b)。

浸漬試験は常温および高温条件にて行い，それぞれの試験条件を以下に示す。

・常温浸漬

セメントの配合は OPC，HFSC424，325，226 を用い，水セメント比は場所打ちコンクリートを想定し 27.3%のペーストを選定した。供試体寸法は直径 50mm × 高さ 100mm とし，28 日間水中養生後に 0.5mm 以下に粉砕した。粉体試料の浸漬条件は，20℃の蒸留水中に攪拌性を考慮して固液比 0.5g $m\ell^{-1}$ とした。

・高温浸漬

セメントの配合は HFSC424，226 を用い，水セメント比は吹付けコンクリートを想定し 40%

のペーストを選定した。供試体寸法は直径 50mm × 高さ 100mm とし，3 日間密封養生，1 日間真空乾燥後に 0.5mm 以下に粉砕した。粉体試料の浸漬条件は，20 または 65℃のイオン交換水中に，攪拌性を考慮して固液比 0.5g $m\ell^{-1}$ とした。なお，65℃で浸漬したものは 20℃に冷まして pH を測定した。

(c) 試験結果

・常温浸漬

HFSC の粉体試料を固液比 0.5g $m\ell^{-1}$ で浸漬した蒸留水の pH の経時変化を，図 2.2.6-10 に示す。水セメント比 27.3%のペーストを粉体にして水中に浸漬したもののうち，セメントが OPC のみの pH は 12.8 程度で，浸漬期間が経過してもほとんど変化は見られない。これに対して，OPC の混合率が最も少ない HFSC226 の pH は浸漬期間の経過とともに低下したが，91 日間浸漬しても pH は 11 以下まで低下しなかった（入矢ほか，2004）。両配合の間の HFSC424 および 325 では，OPC の混合率が少ない HFSC325 の浸漬水の pH 低下が若干早かったが，pH の低下速度に差はほとんど見られなかった。両配合の pH は浸漬期間が 182 日でほぼ 11.5 程度まで低下後，pH の低下速度が緩やかになり，浸漬期間が 476 日を経過しても pH は 11 まで低下しなかった（中山ほか，2004）。HFSC424 粉体の浸漬水の pH が 11 まで低下する浸漬期間は，182 日以降の低下速度およそ 7×10^{-4}/日が続くと仮定しても，10 年程度を要する。また，実際のコンクリート構造物は粉体ではなく，pH 低下にはさらに時間を要すると考えられる。

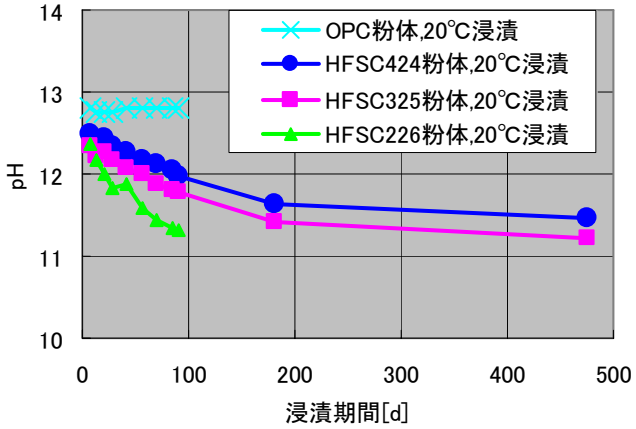


図 2.2.6-10　ペースト粉体の常温浸漬における pH の経時変化

・ 高温浸漬

HFSC の粉体試料を固液比 0.5g $m\ell^{-1}$ で高温浸漬したイオン交換水の pH の経時変化を，図 2.2.6-11 に示す。

粉体試料を 65℃で浸漬すると，浸漬後 3 日までに pH は著しく低下し，HFSC226 では pH が 11 以下になった。一方，浸漬後 3 日以降の pH は，20℃で浸漬したものと同様に緩やかに低下することがわかった。このことから，あらかじめ地上で製作したセグメントの pH を短期間に 11 以下に低下するには，工場製品の養生方法として一般的に用いられている蒸気養生することなどが有効になる可能性があると考えられる。

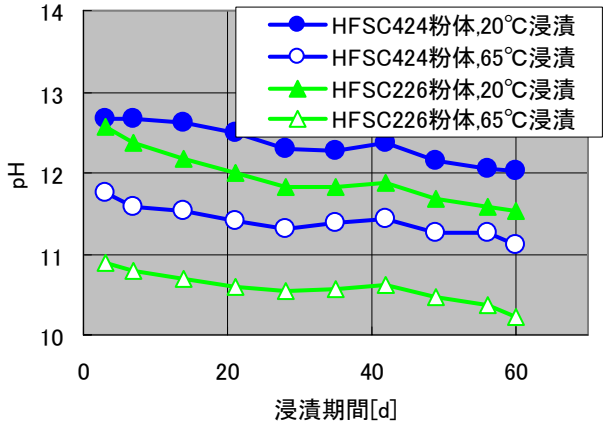


図 2.2.6-11　HFSC を用いたペースト粉体の高温浸漬における pH の経時変化

2) pH 低下解析

(a) 解析概要

HFSC を用いたコンクリートの pH が，常温において 11 以下に低下することを実験的に確認することは困難なことから，pH 低下挙動を解析的に評価することにした。ここでは，図 2.2.6-10 に示す常温の粉体浸漬試験の pH 低下結果を解析により再現することを目標とした。

(b) 解析条件

HFSC の pH の低下挙動は，シリカフュームとフライアッシュによるポゾラン反応により支配される。ポゾラン反応は，OPC の水和反応により生成される高アルカリ性のポルトランダイト（$Ca(OH)_2$）とポゾラン材料に含まれるシリカ質（SiO_2）が反応し，CSH（珪酸カルシウム水和物）を生成する反応である。そこで，OPC の水和反応による pH の上昇反応と，シリカフュームに含まれる SiO_2 固相の溶解速度反応による pH の緩衝作用を基本に考慮したモデルにより解析する。

(c) 解析結果

計算モデルにおいて，高アルカリ化を緩衝するシリカフュームの溶解速度式を導出するため，シリカフュームの溶出試験を行い（入矢ほか，2004b），その結果より溶解速度式を導出した（吉田・三原，2005）。シリカフュームの pH11 と 12.5 における実験値と溶解速度式による導出結果を，図 2.2.6-12 に示す。

以上のシリカフュームの溶解速度式を用い，セメントの水和反応生成物の溶解/沈殿反応を考慮して，図 2.2.6-10 に示す HFSC の粉体浸漬試験における pH の時間変化の計算を行った。計算では，シリカフュームの溶解反応速度に加え，セメント水和反応生成物の平衡反応を考慮して，CSH ゲルについては，固溶体の平衡反応により計算を行った（吉田・三原，2005）。計算結果を，図 2.2.6-13 に示す。図中には実験値のプロットに対して，セメント水和反応生成物の平衡反応とシリカフュームの溶解速度反応を考慮した計算モデルにおいて，CSH ゲルが生成するとした結果を実線で，CSH ゲルが生成しないとした結果を破線で，それぞれ示す。

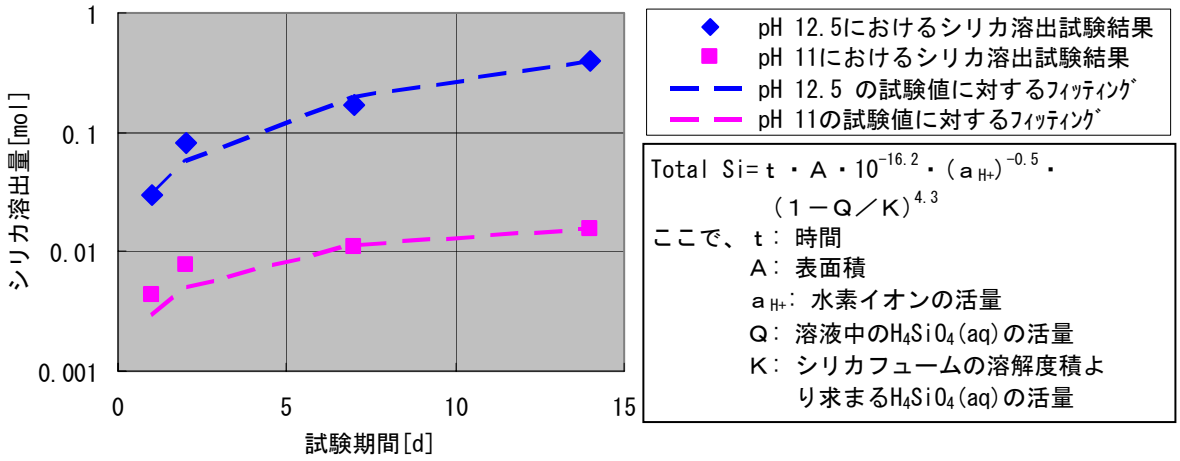


図 2.2.6-12　シリカフュームの浸出試験結果と溶解速度式

CSH ゲルが生成するとした計算では，pH が 200 日程度で急激に低下し最終的には 10.3 程度となるが，これは，シリカフュームの溶解により Si が供給され Ca を消費する CSH ゲルが生成されて，ポルトランダイト（$Ca(OH)_2$）などの高 pH 化に寄与する固相が急激に枯渇したためである。一方，CSH ゲルが生成しないとした計算では，pH は約 100 日で 11.9 程度となった後，定常状態となっている。これは，CSH ゲルが生成するとした計算とは逆に，高 pH 化に寄与する水和反応生成物の反応が支配的なためである。CSH ゲルが生成するとした計算では，実験で得られている緩慢な pH の低下挙動を再現することはできず，CSH ゲルの生成が高アルカリ化の緩衝作用の主要因であることが示される。

CSH ゲルを考慮した計算値は，反応初期における実験値の pH 低下挙動を再現することはできるが，pH 11.5 以下の領域で見られるなだらかな pH 低下を再現することはできない。計算において，pH 11.5 付近は CSH ゲルの Ca/Si 比が減少し，pH の急激な低下が生じる。一方，実験ではこのような急激な pH 低下が見られないことから，低 Ca/Si 比の領域において，CSH ゲルの生成反応速度などを考慮する必要が考えられる。現在，時間変化に伴う CSH ゲルの生成速度について知見は得られておらず，今後検討が必要である。

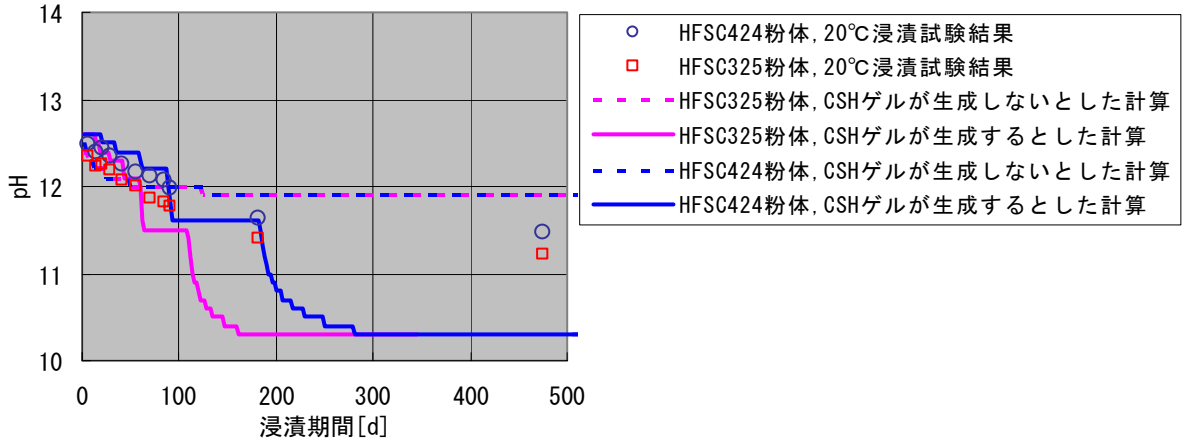


図 2.2.6-13　HFSC―水反応解析結果と実験値の比較

しかし，一般的に CSH ゲルは，セメント水和反応生成物が存在する系において生成が確認されており，時間の経過とともに反応溶液の pH は CSH ゲルが生成するとした結果に近づくと考えられる。

これまでに実施した HFSC の各種性能試験の概要を整理し，表 2.2.6-3 に示す。

表 2.2.6-3　HFSC を用いたコンクリートの各種性能試験の概要（○は実施した項目）

	試験項目	OPC	HFSC			概要
			424	325	226	
施工性の確認	高流動ｺﾝｸﾘｰﾄ ｾｸﾞﾒﾝﾄ製作試験				○	HFSC226 の場所打ち高流動コンクリートでセグメントを製作し打込み性能を確認
	吹付けｺﾝｸﾘｰﾄ 模擬施工試験	○	○		○	HFSC424 で吹付けコンクリートで模擬施工を行い，OPC と同等の吹付け性能を有し，幌延地下研究施設の設計基準強度を確保することを確認
品質変動の把握	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ試験（流動性）		○	○		フライアッシュを同一火力発電所で 1 ヶ月毎に採取し品質変動を確認した結果，管理可能なことを確認
	圧縮強度試験		○	○		HFSC424，HFSC325 は，幌延研究施設の基本計画時に設定した設計基準強度（場所打ちコンクリート）をほぼ満足。フライアッシュの品質変動が圧縮強度へ与える影響は小さい。
耐久性の評価	鉄筋を埋設したコンクリートの海水暴露試験	○			○	HFSC226 は OPC に比べ腐食開始が早いものの，腐食の進行性が低い。
目標品質の達成	粉体浸漬試験	○	○	○	○	HFSC424 を常温で 456 日浸漬しても pH は 11 以下に低下しないが，HFSC226 を 65℃で 60 日浸漬すると pH は 11 以下に低下することを確認
	粉体浸漬試験の pH 低下解析		○	○		シリカフュームの浸出試験から導出した溶解速度式を用いた計算により，CSH ゲルの生成を仮定すると，pH は 10.3 まで低下することを確認

参考文献

Adachi T., Oka F. (1982) : “Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity”, Soil and Foundation, Vol.22, No.4, pp.57-70.

ANDRA (2005): "Dossier 2005 argile".

Autio, J., Riekkora, R. and Salo, J-P. (2002): "Alternative backfilling concepts for a spent fuel repository at Olkiluoto", Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop, Swedish Nuclear Fuel and Wastes Management Co. (SKB), IPR-02-05, pp.39-48.

Dixon, D.A. (2000): "Porewatre salinity and the development of swelling pressure in bentonite-based buffer and backfill materials", POSIVA 2000-04.

土木学会 (1996): トンネル標準示方書[山岳工法編], 同解説.

土木学会 (2002): コンクリート標準示方書 [構造性能照査編].

土木学会 (2004): "高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上にむけて－土木工学に係わる技術を中心として－".

動力炉・核燃料開発事業団 (1992): "高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書―平成 3 年度―", 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN 1410 92-081.

福島啓一 (1994): わかりやすいトンネルの力学, 土木工学社.

藤田英樹, 野口聡, 廣永道彦 (1998): "アーウィン系低アルカリ性セメントの開発－pH 挙動に及ぼすシリカフューム添加の影響－", 日本原子力学会, 1998 年秋の大会要旨集, pp.823.

原子力安全委員会 (2000): "高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第 1 次報告)", 平成 12 年 11 月 6 日.

原子力発電環境整備機構 (2004): "高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性", 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-04-01.

Gray, M. and Shenton, B. (1998): "Design and Development of Low-Heat, High-Performance, Reactive Powder Concrete", High-Performance and Reactive Powder Concrete, Sherbrooke. PQ, Canada, 1998 August 16-20.

Greenfield, B. F., Ilett, D. J., Ito, M., McCrohon, R., Hearth, T. G., Tweed, C. J., Williams, S. J., and Yui, M. (1998): "The Effect of Cement Additives on Radionuclide Solubilities", Radiochim, Acta 82, pp.27-32.

平井 卓，棚井 憲治，菊池 広人，重野 喜政，並河 努，高治 一彦，大沼 敏：“緩衝材長期力学挙動評価モデルの検討”，核燃料サイクル開発機構 技術資料 JNC TN8400 2003-034（2004）.

入矢桂史郎，三上哲司，保岡哲治，上垣義明（2001）："幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究"，核燃料サイクル開発機構, JNC TJ1400 2001-004.

入矢桂史郎，三原守弘（2003）："ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発"，コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.185-190.

入矢桂史郎，三上哲司，武田宣典，秋好賢治（2003）："幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(III)"，核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5400 2003-002.

入矢桂史郎，田島孝敏，納多勝（2003b）："幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(IV)"，核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5400 2003-008.

入矢桂史郎，栗原雄二，藤島敦（2004a）："ポゾランを高含有した低アルカリ性吹付けコンクリートの性状"，土木学会，第 59 回年次学術講演会, CS1-29, pp.57-58.

入矢桂史郎，栗原雄二，納多勝（2004b）："幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(V)"，核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5400 2004-008.

石島洋二，木山保（2004）：“地層の長期安定性と幌延地圏環境研究所の取り組み”，日本原子力学会北海道支部第 22 回研究発表会講演要旨集，p.22.

川崎学，谷口直樹，川上進（2002）：“炭酸塩水溶液中およびケイ砂混合ベントナイト中における純銅のアノード分極挙動”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2002-016.

核燃料サイクル開発機構（1999）："わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－ 分冊２ 地層処分の工学技術"，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 99-022.

菊池広人，棚井憲治，松本一浩，佐藤治夫，上野健一，鐵剛志（2004）："緩衝材の飽和透水特性Ⅱ―海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響―"，核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2003-002.

菊池広人，棚井憲治（2005）：“幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性(試験報告)”,核燃料サイクル開発機構, JNC TN 8430 2004-005.

北川修一，梶原雄三，鈴木恒男，川原一則（2003）："二重支保工法で膨張性地山を克服 北陸新幹線 飯山トンネル富倉工区"，トンネルと地下，第 31 巻, 11 号, pp.7-16.

小西一寛，中山雅，三原守弘，吉田泰，入矢桂史郎，秋好賢治，”納多勝(2006):幌延深地層研究計画における吹付けコンクリートの施工性に関する研究”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2006-040.

操上広志, 竹内竜史, 瀬尾昭治 (2005): “幌延深地層研究計画における地下水流動解析”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN5400 2005-003.

栗原雄二, 油井三和, 棚井憲治, 川上進, 杉田裕, 谷口直樹, 平井卓, 小川豊和, 青柳茂男, 松井裕哉, 中山雅, 藤島敦 (2004): "人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境条件とした原位置試験環境の検討", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2004-006.

久保博, 黒木泰貴, 三原守弘 (1998): "ベントナイト系緩衝材のコンクリート間隙水による長期変質の基礎研究", 土と基礎, 46-10, pp.31-34.

窪田茂, 納多勝, 戸井田克, 岩佐健吾 (2003): "幌延深地層研究計画 地下施設建設に関する基本計画の検討", 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ1400 2002-003.

Martino, J., Chandler, N., Dixon, D., Sugita, Y., Vignal, B. and Hansen, F. (2003): "THE TUNNEL SEALING EXPERIMENT AND APPLICATION TO REPOSITORY SEAL DESIGN", IHLRWM 2003, Las Vegas, NV, March 30-April 2, pp.602-609.

松井裕哉, 棚井憲治, 佐藤稔紀, 川上進, 西村繭果, 青柳茂男, 藤田朝雄, 谷口直樹, 菊池広人, 松本一浩, 油井三和 (2005a): “設計技術（地下施設設計, 人工バリ ア設計, 閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN5400 2005-004.

松井裕哉, 山本卓也, 杉山和稔, 山本俊也, 向井昭弘, 佐久間済文 (2005b): "新第三紀堆積岩を対象とした大深度における初期応力測定", 第 40 回地盤工学会講演要旨集, pp.971-972.

松本一浩, 棚井憲治 (2005): "緩衝材の流出/侵入特性(II) －幌延地下水(HDB-6 号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価－", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2004-026.

三原守弘, 入矢桂史郎 (1999): 放射性廃棄物処分場用セメント系材料, 特許公報, 第 2941269 号.

NUMO (2004): "Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments", Nuclear Waste Management Organization of Japan, 14-16, April, 2004, Tokyo, Japan, NUMO-TR-04-05.

Nakayama. G, Nakamura. N, Fukaya. Y, Akashi. M and ueda. H (2002) : “Assessment of Crevice Corrosion and Hydrogen-Induced Stress-Corrosion Cracks in Titanium-Carbon Steel Composit Overpack for geological Disposal of High-Level Radioactive Waste”, EFC No.36, Proceedings of International Workshop on “Prediction of Long Term Corrosion Behaviour in Nuclear Waste Systems”, pp.373-394.

中山雅, 藤島敦, 入矢桂史郎, 栗原雄二 (2004): "ポゾラン反応を利用した低アルカリ性セメントの開発", 原子力学会北海道支部第 22 回研究発表会講演要旨集, pp.18-19.

日本建築学界（2001）. "建築基礎構造設計指針"

日本鉄道建設公団（1996): "NATM 設計施工指針", 日本鉄道建設公団.

大久保誠介（2004): “ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ8400 2003-081.

大久保誠介（2005): "ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法に関する研究", 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ8400 2004-018.

大和田仁, 三原守弘, 黒木泰貴, 有本邦重（2000): "アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動",核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2000-027.
Parkhurst, D. L. (1995): "User's Guide to PHREEQC - A Computer Program for Speciation, Reaction-Path, Advective-Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S.Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 95-4227.

Pearson, F. J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J-Y., Fernandez, A. M., Gabler,H. E., Gaucher, E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernan, P. and Waber, H. N. (2003): "Mont Terri Project - Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory", Reports of the FOWG, Geology Series, No.5.

桜井春輔, 足立紀尚（1988): 都市トンネルにおける NATM, 鹿島出版会.

柴田雅博, 笹本広, 神徳敬, 油井三和（2004): “緩衝材の長期安定性評価技術の現状”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2004-010.

Sellin, P. (2002): "What are the requirements of the backfill from the point of long-term safety?", Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop, Swedish Nuclear Fuel and Wastes Management Co. (SKB), IPR-02-05, pp.31-37.

杉野弘幸, 藤田朝雄, 谷口航, 長谷川宏, 岩佐健吾（1999): "緩衝材設計の考え方", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 99-096.

Sekiguchi H., Ohta H., : “Induced anisotropy and time dependency in clays”, Proc. 9th ICSMFE, special session9, pp.229-237 (1977)

SKB (2003): " Äspö Hard Rock Laboratory Planning Report for 2003", Swedish Nuclear Fuel and Wastes Management Co. (SKB), IPR-03-24, pp.37-39.

Sugita, Y., Fujita, T., Takahashi, Y., Kawakami, S., Umeki, H., Yui, M., Uragami, M. and Kitayama, K. (2005): "The Japanese Approach to Developing Clay-based Repository Concepts", Clays in Natural & Enin preparation.

竹中工務店：MuDIAN 概要書 Version2.0，pp.13-74（1993）

谷口直樹, 川上進, 森田光男 (2002): "ベントナイト/ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2001-025.

Taniguchi, N., Kawasaki. M., Kawakami. S. and Kubota, M. (2004) : “Corrosion Behaviour of Carbon Steel in Contact with Bentonite under Anaerobic Condition”, Proc. of EUROCORR 2004, 04-083.

山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創 (2002): "幌延深地層研究センターにおけるボーリング調査(HDB-1 孔)", 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ1400 2002-010.

山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 久慈雅栄 (2003): "幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-3 孔)", 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5420 2004-003.

山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 名合牧人, 田所照夫, 中垣真一 (2004a): "幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6, 7, 8 孔)のうち HDB-6 孔", 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ5400 2005-004.

山本卓也, 松井裕哉, 堀内康光, 富永英治 (2004b): "幌延深地層研究計画における堆積軟岩の熱特性について", 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.153-158.

吉田泰, 三原守弘 (2005): "低アルカリ性セメント(HFSC)硬化体浸出液の pH 低下挙動に関する研究－HFSC のポゾラン反応を考慮したモデル化－ 低アルカリ性セメント-水反応モデル構築に関する検討", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN 8400 2005-013 .

吉野尚人, 宮野前俊一, 井上博之, 梨本裕 (2005): "軟岩の長期安定性に関する検討", 核燃料サイクル開発機構, JNC TJ8400 2005-004.

Yui, M., Azuma, J. and Shibata, M. (1999): "JNC Thermodynamic Database for Performance Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal System", Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN 8400 99-070.

2.3 地上からの調査研究段階における第 2 次取りまとめの手法の適用性と留意点

2.3.1 第 2 次取りまとめの手法の適用性

第 2 次取りまとめでは，わが国の幅広い地質環境を対象に文献調査などによって設計に必要となる岩盤特性データをその傾向や物性相互の相関関係などから推定し，地質環境を想定した。さらに，現状の建設技術や長期安全性などを考慮し処分深度の設定を行い，人工バリアや処分場の設計検討を実施した。今回行った設計手法の適用性確認においては，幌延という実際の地質情報を一例として，人工バリアや処分場の設計について，第 2 次取りまとめの考え方や手法に基づき試行し，その適用性について検討を行った。以下に適用性で議論になった点や推奨すべき手法の概要を示す。

(1) 処分場の全体設計フロー

処分場の全体設計フローに関しては，オーバーパック，緩衝材および閉鎖設計に関する個別の設計フローの検討を通じて明らかとなった問題点として，施設設計を含めた相互関係の整理が挙げられた。これによって第 2 次取りまとめで示された処分場全体設計フローを更新し，例えば，設計構成要素間の相互関係の整理によって，一般性・客観性をより向上させたフローを構築した。

(2) 空洞の力学的安定性評価など

①単一坑道の空洞安定性評価および支保設計に際しては，以下の 2 点を考慮する必要がある。

・設計手順として，第 2 次取りまとめで示された理論解析による支保工の算定をもとにするのではなく，経験的手法に基づき作成した標準支保パターンをもとにした空洞安定性の評価の実施
・第 2 次取りまとめにおける空洞安定性の評価指標は定量的な評価を行う際には現実的ではないことと，現在の地下空洞施工で一般的になりつつある情報化施工を考慮した評価指標を用いることが設計・施工・操業・埋め戻しを含む長期間の施設管理の面から必要

②幌延の研究所用地に分布する稚内層珪質泥岩は，強度の小さい堆積岩であり，第 2 次取りまとめでは考慮していない地質環境の特徴として，「異方圧下」，「多孔質」という特徴を持つ。したがって，同じような特徴を持つ堆積岩では，第 2 次取りまとめと同様の弾完全塑性解析による空洞安定性評価・支保設計に加えて，

・岩盤が異方的な応力状態にある場合の長期安定性
・建設，操業期間を対象とした岩盤の長期変形挙動
・多孔質な岩盤である場合に考慮すべき掘削直後の水 - 応力連成現象
・岩石物性の異方性を考慮した解析用物性値の設定方法

といった事項についても検討し，必要に応じて設計に反映することを提案する。

③地山強度比の小さい堆積岩の地下深部における処分孔では，短期的には無支保で自立するとしても，定置までの岩盤クリープ挙動を考慮したときには，安定性が保てない可能性が高い。よって，処分孔（無支保）の安定を評価する際には，弾完全塑性解析に加え，建設・操業中の岩盤のクリープ挙動を考慮した評価を実施しておく必要がある。

④「連接坑道の離間距離，廃棄体ピッチ」の設計は，一般的な地下構造物では例のない地層処分特有の検討事項である。よって，単一坑道の設計よりも安全裕度をもった設計・評価を実施しておく必要がある。すなわち，第 2 次取りまとめでの評価に加え，対象とする岩盤の複雑な破壊メカニズム（ひずみ軟化挙動や岩盤クリープ挙動など）を考慮した評価も行い，総合的に空洞の安定性を確保する必要がある。なお，「坑道交差部の補強」に関する検討については，幌延の施設設計において，

第 2 次取りまとめと同様，3 次元的な坑道形状・配置を考慮した弾性解析により影響範囲を把握した後，再配分された 3 次元的な応力を再度既設の支保工に作用させてその健全性を照査している。

以上，幌延の深地層の地下研究施設の設計方法をもとに，設計の観点から新たな設計項目や評価指標を提案した。これらについて，処分場の施設設計に反映させるためには，2.4.2 項で後述するように，安全性能の観点についても考慮したうえで，適切な設計を実施していく必要がある。

(3) 人工バリア設計

人工バリアの設計については，第 2 次取りまとめにおいて示された考え方が適用可能である。特に，緩衝材仕様の設定においては，サイト環境条件に応じて要件を満足する幅を設定することで柔軟な設計が可能である。また，第 2 次取りまとめでは具体的な設計フローが示されていなかったが，今回の検討によって緩衝材の基本仕様の設定方法を具体的に示すことができた。さらに，試設計を通じて，今後充足すべきデータが明らかとなった。また，人工バリアの長期健全性評価に関しては，第 2 次取りまとめ以降のモデルの改良や入力パラメータの充足により手法そのものの信頼性の向上が図られ，今回の検討によってその手法が適用可能であることが分かった。

(4) 閉鎖設計

閉鎖設計に関しては，設計フローを明示し，それに基づいて実際の地質環境条件を考慮した設計フローの適用事例を示すことができた。上記以外の評価手法については，第 2 次取りまとめにおける手法が基本的に適用可能であることが分かった。

2.3.2 地上からの調査段階における留意点

2.1 節および 2.2 節における検討を踏まえ，地質環境調査手法，設計手法，材料選定，データ設定，さらには安全機能上の制約条件などの観点から留意すべき事項を「(1)地質環境調査」，「(2)施設設計」，「(3)人工バリア設計」，「(4)閉鎖設計」および「(5)その他」に区分し，以下にその概要を整理する。

(1) 地質環境調査

・処分孔にコンクリート支保工を使用できない場合には，処分孔が無支保で力学的に安定する地質環境が分布するか否かについて調査する必要がある。
・コンクリート支保工の化学的安定性から，処分施設に使用できる支保工材料が限られる場合には，その支保工材料で空洞の安定が確保できる地質環境が分布するか否かについて調査する必要がある。
・地下水化学に関するデータに関しては，大気との接触などが避けられない場合が多い。その場合，深度方向での地下水水質の深度依存性に関する知見や地下水水質の熱力学的解析結果および地層中に認められる鉱物に関する情報を総合的に考慮することが重要である。

(2) 施設設計（空洞安定性，支保設計，坑道離間距離）

・ニアフィールドへの化学的影響を考慮した支保工・グラウト材料について研究開発を進め，その適用性や制約条件を整理する必要がある。そして，適切な支保工材料を選定し，その特性を考慮した設計・施工を実施する必要がある。
・処分施設では，一般的な地下構造物と異なり，閉じ込め性能を考慮した設計が必要となる。よって，設計と安全評価の両方の観点と，それらに対する対策工について検討を進め，設計上の考え方や制約条件を整理するとともに，それらに基づく設計を実施する必要がある。
・地上からの調査段階だけでは，廃棄体を定置する地下深部の幅広い地質環境を詳細に理解すること

は難しく，段階を追って地質環境の理解を行っていく必要がある。つまり，地上からの調査段階で実施する設計は，施工中の情報化施工により随時更新され，施工しながら適切な支保や補助工法を選択していく必要がある。よって，設計の段階では，建設・操業で取得されるデータと直接比較できるパラメータ（例えば，内空変位など）を重視して評価する必要がある。また，設計にあたっては，解析用物性値に幅を持たせた評価を実施しておくことが望ましい。

・施設設計を行ううえでは，人工バリアの寸法形状などの仕様が情報として必要であり，人工バリアの設計や埋め戻し材の仕様を決める際には，廃棄体ピッチや支保工の厚さといった施設の仕様が必要となる。よって，第 2 次取りまとめのように，施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計を個別に検討していくのではなく，ある特定の場所が与えられた場合にその地質環境条件が構成要素の設計要件に与える影響を事前に検討し，その結果を踏まえて相互の相関性を考慮しつつ設計を進めていく必要がある。

・地下深部においても，二重支保を採用することで支保工厚を低減することは可能であるが，二重支保は岩盤をある程度緩ませる考え方であるため，処分場への適用性については，安全性能の観点も考慮した検討が必要である。

・アクセス坑道を配置する地点のごく近傍でボーリング調査を行うことにより，アクセス坑道における設計の不確実性や施工中の危険性を低減することができる。

・地下深部の構造物においては，一般的に地震の影響は受けにくいということが経験的に知られているが，大深度の地下構造物に対する耐震の設計指針や基準は存在しないことと，地震の影響は地質構造にもよるため，処分場の設計においては，地質環境ごとに確認しておく必要がある。

(3) 人工バリア設計（人工バリアの長期健全性評価を含む）

・緩衝材の試設計においては，設計要件のひとつである自己シール性を満足する範囲を設定するために，POSIVA がひとつの考え方として示した飽和膨潤後における膨潤応力（0.1MPa）を判断基準（Dixon, 2000）として採用したが，特に海水系地下水条件下において，より現実的な隙間や地下水の浸潤などを考慮した実験的検討において，その妥当性を確認しておく必要がある。

・人工バリアの長期健全性評価については，岩盤・緩衝材の長期力学挙動，緩衝材の流出・侵入挙動およびガス移行挙動に関する評価手法の適用性を確認した。特に，緩衝材の流出・侵入現象に関しては，海水系地下水条件下での割れ目内への侵入速さが降水系地下水条件下に比べ 1/4 程度から 1/10 程度小さくなるという実験結果が得られていることから，本事象に関しては，降水系地下水条件での考慮が重要となる。

・人工バリア設計のうち，緩衝材の仕様を決定する際には，炭素鋼が不動態化しない領域に緩衝材の仕様が入っていることを確認する必要がある。また，オーバーパックや緩衝材および埋め戻し材の設計に際しては，相互に関連している項目の影響度合いを十分考慮し，影響が大きい設計因子を重点的に検討することにより合理的な設計が可能となる。

(4) 閉鎖設計

・地下水のイオン強度によっては，埋め戻し材の性能に影響を及ぼすことが考えられる。また，支保工としてコンクリートが用いられた場合に，コンクリートが劣化し，卓越した水みちになり，処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことも懸念される。したがって，閉鎖システムとしてその影響を補完する場合には，止水プラグおよび埋め戻し材を含めた閉鎖設計全体の基本的な考え方および各閉鎖要素の役割を明確化しておくことが必要である。また，ベントナイト配合率が低い埋め戻し材の海水系地下水条件での自己シール性に係わるデータの拡充が必要である。

(5) その他

・第 2 次取りまとめでは，例えば「切羽の崩壊や膨張など切羽の不安定現象」，「湧水および湧水に起因する地山の崩壊などの現象」，「ガスの発生」といった突発的な現象を抽出し，それらに対する一般的な対策工について整理している。実際の地質環境を対象とした設計を実施する際には，第 2 次取りまとめで記されている突発現象に追加して，その地質環境に応じて起こりうる突発現象や，火災などの災害についても，漏れなく抽出し，それらに対する具体的かつ詳細な対策を準備しておく必要がある。
・メタンガスが発生する場合は，ガス湧出量予測解析などで，通気制御などにより建設・操業に影響を及ぼさない程度に対策が可能な湧出量であるかについて調査し，適切な対策を計画しておく必要がある。
・突発的な湧水が生じた場合の対策としては，地下深部の地質環境保全の観点から，水抜き工法よりも止水工法を推奨する。ただし，処分施設に適用する場合には，支保工材料と同様に止水プラグ材料の選定についても十分な検討が必要となる。
・施工，操業中に最も起こりうる可能性の高い坑内火災については，通気網解析などを用いて様々な火災発生状況を想定し，入坑者が安全に地上まで避難可能なレイアウトとなるよう設計に反映するとともに，状況に応じた通気制御，避難方法を準備しておく必要がある。

2.3.3 結論

処分場全体設計フローについては，処分孔竪置き方式を一例として，施設設計，人工バリア設計および埋め戻し材設計相互の複雑な関係を考慮し，影響因子と影響度合いについて検討を行った。それらの検討結果をもとに，より簡易的な設計が可能となるように第 2 次取りまとめで示した処分場全体設計フローの見直しを行った。第 2 次取りまとめで示されたフローとの主な違いとしては，①埋め戻し材および緩衝材の仕様設定上重要となる処分坑道のコンクリート支保厚さ，処分孔への支保工の要否を考慮した空洞安定性評価を人工バリア設計の上位に配置，②オーバーパックの腐食代設定への影響が大きい埋め戻し材の設計をオーバーパック設計の上位に配置するなどである。

堆積岩系岩盤の一例として，稚内層珪質泥岩が分布する幌延の研究所用地を対象として，上記で構築した処分場設計フローをもとに処分孔竪置き方式に関する設計手法の適用性について検討した。深度に関しては，「力学的に処分孔の空洞安定性が確保されること」，「設置環境の岩盤の厚さが十分であること（第 2 次取りまとめの解析モデルの領域で処分坑道径の 5 倍程度の領域程度存在すること）」から，450m と設定した。

設計用入力データは，幌延の研究所用地に対するボーリング調査からの情報をもとに，次のような方法で設定した。幌延のような多孔質の堆積岩には，間隙率の深度依存性が見られるため，密度や熱に関する入力データは，層境を原点として，深さとボーリングデータの相関式より入力データを求めた。力学に関する入力データは，岩盤等級に関する岩盤モデルを作成し，ボーリング調査で得られた岩石のデータを岩級ごとに低減し物性値として割り当てた。初期応力比は，深度によらずほぼ一定という調査結果が得られていることから，それらの平均値として設定した。水理に関する入力データは，検討深度近傍の透水試験の結果から透水係数を設定し，地下水流動解析より動水勾配を設定した。地下水の化学特性に関する物性については，ボーリング孔から採取した地下水の化学特性に関するデータに基づき，深度方向での水質の深度依存性に関する知見，水質の熱力学的解析結果および研究所用地の地層中に認められる鉱物に関する情報を総合的に考慮し推定した。

施設設計では，幌延の深度 450m の条件を対象に，見直した設計フローに沿って，処分孔，処分坑道の空洞安定性評価と，離間距離の検討に関する第 2 次取りまとめと同程度の概略設計を行うとともに，実際の地質環境情報を踏まえた新たな設計検討項目を抽出した。また，これらの検討を通して，

第 2 次取りまとめにおける設計手法の適用性や改良点を示すとともに設計上の留意点を整理した。

人工バリア設計に関しては，緩衝材およびオーバーパックに関する設計手順の考え方を整理するとともに，個別の設計フローの構築を行った。また，その手順に基づき幌延における地質環境条件を考慮し，緩衝材およびオーバーパックの試設計を行った結果，第 2 次取りまとめ仕様で十分対応可能であることが分かった。さらに，これらの結果を踏まえて，岩盤および緩衝材の長期力学挙動，緩衝材の流出／侵入挙動，さらにはガス移行挙動の観点から，人工バリアシステムの長期健全性に関する評価を実施した。その結果，第 2 次取りまとめの仕様の人工バリアは，システムとして長期にわたり健全であることを確認した。なお，これらの検討を通じて今後の課題を抽出した。

閉鎖設計に関しては，埋め戻し材および止水プラグに係わる設計要件と地質環境条件の留意点などを整理するとともに，それぞれの概略的な設計フローの構築を行った。また，埋め戻し材基本特性試験や海外での研究結果などを参考に構築したフローに基づき，幌延の地質環境の特徴により適した具体的な閉鎖材料の仕様例を示した。さらに，これらの検討を通じて，今後の課題の抽出を行った。

低アルカリ性コンクリート（HFSC）に関しては，セグメントの試作により打込み性能を確認するとともに模擬トンネルへの吹付け施工試験により，施工性や幌延地下研究施設の設計基準強度を満足することを確認した。また，フライアッシュの品質変動がフレッシュコンクリートのコンシステンシーに与える影響は，高性能 AE 減水剤の調整で対応可能と考えられる。鉄筋腐食に対する検討については，海上飛沫帯における暴露試験を実施し，3 年目までの結果では，HFSC226 は OPC に比べ腐食が早期に発生するものの 1 年目と比較しその進行性は小さい結果となったが，今後試験を継続し評価を行なう予定である。低アルカリ性の検討においては，HFSC424 を用いたペーストの粉体を常温で 456 日浸漬しても pH は 11 以下に低下しないが, HFSC226 を 65℃で 60 日浸漬すると pH は 11 以下に低下する温度依存性が認められた。これより，ポゾラン材料の含有量を多く，養生温度を上げることが低アルカリ性に対し有利であることを確認した。pH の低下挙動に関しては，シリカフュームの浸出試験から溶解速度式を導出し，CSH ゲルが生成し Ca の消費が進む条件で粉体の常温浸漬試験を解析すると，pH は 10.3 程度まで低下する結果となり，試験結果を再現することはできず, CSH ゲル溶解／沈殿反応についてより精緻なモデル化が必要であることが分かった。これら一連の検討結果から，現状では，低アルカリ性セメントとして HFSC の有用性が十分に確認されたとは言い難い。しかし，低アルカリ化については，高温浸漬によりポゾラン反応を促進させると pH が低下すること，pH 低下挙動解析では低 Ca/Si 比の領域におけるポゾラン反応速度を考慮する必要があることなど，今後検討すべき課題を抽出した。

2.3.4 今後の課題

幌延の地質環境条件を一例とした一連の処分技術の適用性確認に関する検討を通じて得られた課題を以下に示す。

(1) 処分場全体設計フロー

処分場の全体設計フローの更新に関しては，処分孔竪置き方式を一例として行ったが，竪置き方式と横置き方式とでは，各設計項目相互の影響因子が異なる。したがって，今後，横置き方式を考慮した処分場全体設計フローの構築が望まれる。また，幌延の深地層の研究施設計画の建設段階以降に予定されている原位置試験に係わる仕様設定に際して，本検討で用いた方法論に基づき再度実施し，その妥当性について検証することによって，より現実的な設計フローとしていくことが望まれる。

(2) 設計データの設定

地上からの調査を踏まえ，第 2 次取りまとめから見直した処分場の施設設計手法，地質環境条件の

設定方法，設計上の留意点について，今後，地下研究施設の建設段階，原位置試験段階で得られる情報をもとに妥当性を検証するとともに，新たに得られた知見を取り込み，より合理的かつ安全な設計手法に更新していく必要がある。

(3) 施設設計（空洞安定性，支保設計，坑道離間距離）

堆積岩を対象とした場合の処分孔の空洞安定性を検討する際には，掘削から定置までの岩盤クリープを考慮した評価が必要となる。それと同時にこれまで無支保を原則としてきた処分孔に対する低アルカリ性コンクリートの適用性を含め，具体的な施工方法を考慮した詳細な設計方法について検討する必要がある。

第 2 次取りまとめでは，坑道の離間距離の算定にあたり，本検討で実施したように弾塑性解析と評価指標を用いて離間距離を決定している。地下深部に 1 パネル 50 本もの坑道を並列に配置することは，一般的な地下構造物では例の少ない地層処分特有の課題であり，不適切な設計を実施した場合，坑道群全体が崩壊するといった大事故に繋がる可能性も否定できない。よって，これらの評価手法の妥当性，安全性に関して，今後検証していく必要がある。例えば，従来の弾塑性解析に加え，ひずみ軟化や岩盤クリープを考慮した検討を実施し，それらについて相互比較するとともに，原位置試験による検証を踏まえ，安全を考慮した適切な評価手法を選択することが必要であると考える。

施設設計においても，空洞の力学安定性確保の観点からだけではなく，人工バリアやニアフィールド岩盤の安全性能の観点から制約される様々な条件がある。地層処分ではそのような課題を漏れなく抽出し，設計・施工に反映し，安全性を保証していく必要がある。たとえば，坑道周辺岩盤やコンクリート支保工が長期的に劣化し，その部分の透水性が増すことが想定される。これらの現象について明確に理解することは困難であるため，安全性を考慮した評価と十分な対策を施すことが重要と考える。つまり，岩盤の自己回復特性，埋戻し材の膨潤や止水プラグ，止水グラウトなどの対策工に関して，その特性や適用性に関して検討を進め，閉じ込め性能を考慮した EDZ の評価の考え方や制約条件を明確化し設計に反映していく必要がある。また，ニアフィールドへの化学的影響を考慮すると，処分施設に使用できる支保工材料が限られてくる可能性がある。よって，たとえば，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートや低アルカリ性コンクリートといった支保工・グラウト材料に関する研究開発を進め，その適用性や制約条件を整理するとともに，適切な支保工材料を選定し，その特性を考慮した設計・施工を実施する必要がある。地下深部ではかなり大きな静水圧が地下構造物に作用する。設計・施工上の考え方には，幌延の地下研究施設のように導水することで支保工に作用する水圧を低減する考え方，グラウトや凍結工法などの地盤改良で水圧を低減する考え方，セグメントなど剛な支保工を使用し水圧を支持する考え方などがある（福島，1994）。処分事業では，安全性能の観点を考慮して設計する必要があるため，操業中排水しながら，最終的には導水路を残さないように閉鎖するのが最も適切な方法であると考えるが，今後はそういった安全性能を考慮した設計方法についてより詳細な検討が必要である。

(4) 人工バリア設計（人工バリアの長期健全性評価を含む）

緩衝材の設計要件のひとつである自己シール性については，POSIVA において検討されている飽和膨潤後の応力（0.1MPa）による判断基準（Dixon，2000）の妥当性に関し，特に海水系地下水条件を対象として，隙間幅を考慮したデータの整備が必要である。また，幌延のような堆積岩系岩盤における緩衝材の現場締固め施工について，岩盤への影響も考慮した施工の可否に関する検討も望まれる。

オーバーパックの厚さは，外部荷重を考慮した厚さが放射線遮蔽性として必要な厚さを上回らない限り，腐食代と放射線遮蔽厚さにより設定される。ガラス固化体からの放射線は時間とともに減衰することから，腐食代と放射線遮蔽厚さ相互の補完も踏まえた合理的な設計に対する考え方の検討が望

まれる。さらに，実地下水条件（支保工材料の影響も含む）に対する腐食挙動の実験的検討や板厚設定に大きく影響する放射線影響について，代替材料を対象とした知見の整備を進めていくことが必要である

(5) 閉鎖設計

地下水のイオン強度によっては，埋め戻し材の性能に影響を及ぼすことが考えられる。したがって，閉鎖システムとしてその影響を補完する場合には，止水プラグおよび埋め戻し材を含めた閉鎖設計全体の基本的な考え方および各閉鎖要素の役割を明確化しておくことが必要である。また，ベントナイト配合率が低い埋め戻し材の海水系地下水条件での自己シール性に関するデータの拡充が望まれる。支保工を施工した際に，支保工が劣化して水みちとなる場合についての閉鎖要素の評価も必要である。さらに，地下研究施設の建設段階を通じて，EDZ に関するデータの取得を行い，閉鎖設計に反映していくことが望まれる。

(6) 低アルカリ性コンクリートの開発

HFSC コンクリートの流動性や強度などの品質は，ポゾラン材料・配合・環境条件・経過時間などにより変動することから，最終的には，幌延の深地層の研究施設の研究坑道を利用した実証的な施工実験を通じて，施工性や品質変動を確認するとともに実環境下における強度特性の経時変化，ポゾラン反応による低アルカリ化などについて確認する。pH 低下モデルについては，反応速度に関するパラメータの拡充が必要であり，特に CSH ゲル生成の反応機構およびその生成速度パラメータについて，既往の研究報告をもとに検討し，実際のコンクリート構造物を透過する水の pH の低下挙動について，より精度の高い解析を行うことが必要である。

参考文献

Dixon, D.A. (2000): "Porewatre salinity and the development of swelling pressure in bentonite-based buffer and backfill materials", POSIVA 2000-04.

福島啓一 (1994): わかりやすいトンネルの力学, 土木工学社.

2.4 幌延深地層研究計画第 2 段階を対象とした工学技術の適用性検討

原子力機構では，北海道天塩郡幌延町にて堆積岩を対象とした深地層研究を進めている。この研究では，平成 17 年度より，地下研究施設（Under Ground Research Laboratory，以下 URL という）の建設に着手しており，地上からの調査研究を中心とした第 1 段階から，坑道掘削時における調査研究を実施する第 2 段階へと移行している。

一方，これまで工学技術の基盤技術開発として，「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術の技術的信頼性　- 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 分冊 2　地層処分の工学技術」において示した工学技術をもとに，幌延の第 1 段階で得られた地質環境条件を対象として，工学技術の具体的な地質環境への適用性の検討を行ってきた。なお，ここで「工学技術」とは，「建設・操業・閉鎖に関わる工学技術」，「段階的な地質環境情報に応じた設計手法」，「設計に必要なデータ（長期挙動評価の基盤データ）」，「現象理解に基づくモデル（人工バリア・岩盤の長期挙動の理解）」を統括したものであり，人工バリアや地下の処分施設の設計に必要な技術を指す。

今後，第 2 段階の調査試験の進捗により得られる知見（データ，メカニズムなど）をもとに工学技術の適用性をさらに検討し，工学技術の信頼性を向上させ，これらの成果を体系的に整理し，知識基盤へ反映することが必要である。

また，第 3 段階では，URL 周辺の地質環境特性の詳細調査，地層処分研究開発のための各種原位置試験を実施する予定である。

なお，以下に示す第 2 段階における調査研究および工学技術の適用性検討における試験仕様，開始時期，試験場所，試験期間などについては，幌延 URL 建設工程や諸般の事情により変更される場合がある。

2.4.1 幌延深地層研究計画　第 2 段階における調査試験

幌延 URL のレイアウトイメージを図 2.4.1-1 に示す。H17 年度末における幌延 URL の建設工程では，3 本の立坑が深度 500m 程度まで達し，第 1 段目（深度 400m 付近）のループ坑道が展開されるのは H25 年度頃になる予定である（松井ら，2005）。

幌延深地層研究計画の第 2 段階では，第 1 段階で構築した地質環境モデル，岩盤力学モデルや支保設計の妥当性を検討することを目的とした調査試験，第 1 段階では調査困難な EDZ の発生メカニズムや不飽和の発生メカニズムの解明などを目的とした調査試験，また，処分技術の信頼性向上を目的とした低アルカリ性コンクリートの施工性の確認やガス移行評価試験などを計画している（松井ら，2005）。また，この中には，第 3 段階において実施予定の原位置試験の実施箇所の選定，計画策定なども含まれている。表 2.4.1-1 に各試験調査項目を示す。

2.4.2 幌延深地層研究計画　第 2 段階と工学技術に関する技術開発

ここでは，幌延深地層研究計画第 2 段階の調査研究とこれに関連する工学技術の技術開発について述べる。

表 2.4.2-1 に示すように，工学技術に関する技術開発を「幌延 URL の建設工事に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する調査研究」，「幌延 URL の建設工事には直接関係ないものの，当該地点の地質環境条件（地質構造，水理，地球化学，岩盤力学的な環境条件）（「分冊　深地層の科学的研究」の 4 章を参照）を対象として実施する室内試験や解析的検討」，「幌延の地質環境条件を対象とせず，URL での検証を実施しない研究」の 3 つに分け，それぞれを A，B，C として分類する（青柳ら，2006）。

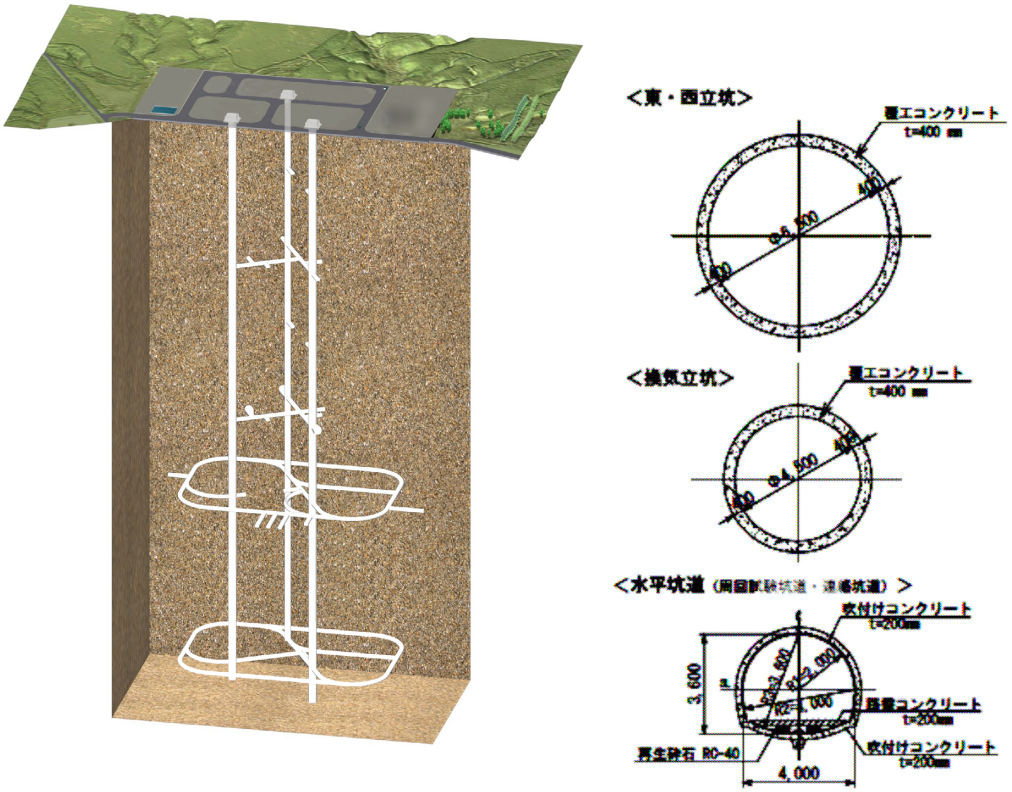


図 2.4.1-1　幌延 URL イメージ図

表 2.4.1-1　幌延深地層研究計画　第 2 段階における調査試験計画（青柳ほか，2006）

分類・目的	調査試験項目
1. 深地層の科学的研究	
(1) 立坑から実施する調査試験	
第1段階で構築した地質および地質構造モデルの妥当性検討	①地質観察
第1段階で構築した水理地質構造モデルの妥当性検討	②立坑内での湧水量測定
	③周辺岩盤中の地下水の圧力分布調査
	④周辺岩盤中の地下水の水質分布調査
第1段階で構築した岩盤力学モデルの妥当性検討	⑤立坑周辺岩盤中のEDZの物性に関する調査
	⑥立坑周辺岩盤中の変形挙動計測
第1段階で実施した支保設計の妥当性検討	⑦支保工応力測定
	⑧支保工（鋼製支保工）の変形測定
(2) 水平坑道から実施する立坑周辺岩盤を対象とした掘削影響試験（切羽の通過前後の挙動）	
掘削に伴う周辺岩盤への影響評価、岩盤力学モデルの妥当性検討、EDZの発生メカニズムの解明	①周辺岩盤中の応力分布および応力変化測定
	②周辺岩盤の力学物性変化測定
	③周辺岩盤中の透水性変化測定
(3) 立坑／水平坑道周辺部の調査	
第1段階の地質環境モデルの妥当性検討。第3段階調査試験研究のための地質環境モデルの不均質性の評価	①地質・地質構造に関する調査
	②水理・地球化学・岩盤力学に関する調査
(4) 水平坑道で実施する調査試験	
EDZの発生メカニズムの把握、EDZの発生範囲と物性値の取得	①水平坑道掘削影響試験
不飽和の発生メカニズムおよび範囲ならびに地下水化学組成変化領域範囲の把握	②不飽和・REDOX調査試験
2. 処分技術の信頼性向上	
(1) 水平坑道で実施する調査試験	
支保工としての施工性確認および適用範囲。プラグ、グラウト等の施工性確認	①低アルカリ性コンクリート施工性確認試験
システム全体の機能の実証。オーバーパック腐食に伴い発生するガスの移行評価モデルの妥当性検討	②ガス移行挙動試験

表 2.4.2-1　工学技術に関する研究開発項目の分類（青柳ほか，2006）

工学技術に関する研究開発	分類
幌延URLの建設工事に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する調査研究	A
幌延URL建設工事には直接関係ないものの，幌延の地質環境条件（地質構造，水理，地球化学，岩盤力学的な環境条件）を対象として実施する室内試験や解析的検討	B
幌延の地質環境条件を対象とせず，URLでの検証を実施しない研究	C

一方，工学技術に関する個別研究項目を表 2.4.2-2 に示す。表中の個別研究項目は，原子力環境整備促進・資金管理センター（2002）の，“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”における処分技術分野の研究項目の分類に基づき一部改訂したものである。また，同表には，表-2.4.2-1 にて分類した研究開発項目と表 2.4.2-3 に示す原位置試験項目を併記し，個別研究項目との関連を示した。

表 2.4.2-2　工学技術の個別研究項目（青柳ほか，2006）

個別項目	分類（表 2.4.2-1）	原位置試験（表 2.4.2-3 の試験項目）との対応
(1)工学技術		
①全体		全体計画，個別項目の統括，基盤技術の体系的整備，処分概念・設計オプションの検討
②人工バリア		
1)オーバーパックの基本特性	B	d
2)緩衝材の基本特性	B	a, b, e
③支保・グラウト・シーリング		
1)シーリング	B	h
2)低アルカリ性セメント	A	f
3)グラウト	A	e
④建設・操業・閉鎖技術		
1)建設技術	A	全て（試験坑道等の設計）
2)操業技術	B	g
3)閉鎖技術	B	h
4)品質管理	A	全て（特に b）
5)回収技術	C	×
(2)長期健全性		
①ガラス固化体	C	×
②緩衝材		
1)緩衝材の長期力学的変形挙動	B	b
2)緩衝材の長期変質挙動	B	a, d, e
3)緩衝材流出・侵入挙動	B	×
③セメント・コンクリート	C	×
④岩盤	A	b, e
⑤熱-水-応力-化学連成評価技術	B	a
⑥ガス移行挙動	B	c
⑦人工バリアせん断応答挙動	C	×

「(1)全体」は工学技術に関する研究開発全体で取り組む課題である。

「(1)③2」低アルカリ性セメント」，「(1)③3」グラウト」「(1)④1」建設技術」，「(1)④4」品質管理」「(2)④岩盤」については，URL の建設に伴い得られる様々な情報や URL 自体を利用する調査研究であり，分類 A となる。

「(1)④5」回収技術」，「(2)①ガラス固化体」，「(2)③セメント・コンクリート」，「(2)⑦人工バリアせん断応答挙動」は，幌延の地質環境条件を対象とせず，幌延深地層研究計画での検証も実施し

ない研究であり，分類 C となる。

これ以外が，URL の建設工事には直接関係ないものの，幌延の地質環境条件（岩や水や水理条件）を対象として実施する室内試験や解析的検討，もしくは第 3 段階での原位置試験に向けた準備であり，分類 B となる。

表 2.4.2-3 に，現在，幌延深地層研究計画にて予定している工学技術に関する原位置試験項目とその実施段階について，松井ほか（2005），栗原ほか（2004）をもとにまとめたもの示す。

表 2.4.2-3　工学技術に関する原位置試験項目（青柳ほか，2006 を一部改訂）

原位置試験項目	分類 （表 2.4.2-1）	研究項目 （表 2.4.2-2）	実施段階
a. 熱-水-応力-化学連成（T-H-M-C）試験	B	(1)②2)，(2)②2)，⑤に対応	第 3 段階
b. 緩衝材/岩盤クリープ試験	B	(1)②2)，(2)②1)，④に対応	第 3 段階
c. ガス移行挙動試験	B	(2)⑥に対応	第 2～3 段階
d. オーバーパック腐食試験	B	(1)②1)，(2)②2)に対応	
e. セメント影響試験	B	(1)②2)，③2)，③3)，(2)②2)，④に対応	第 3 段階
f. 低アルカリ性コンクリート施工性確認試験	A	(1)③2)に対応	第 2～3 段階
g. 定置精度確認試験	B	(1)④2)，4)に対応	第 3 段階
h. 坑道閉鎖試験	B	(1)④3)に対応	第 3 段階
i. グラウト	A	(1)③2)，(1)③3)	第 2～3 段階

原位置試験項目のうち，「低アルカリ性コンクリート施工性確認試験」と「ガス移行挙動試験」が，第２段階から試験を開始する予定になっている（松井，2005）が，「ガス移行挙動試験」は緩衝材の飽和時間を長く確保するために，浅い深度における試験専用坑道にて早期に試験を開始するものであり，地下施設建設工事に直接関係するのは，「低アルカリ性コンクリート施工性確認試験」のみの予定である。

2.4.3 工学技術に関する各個別研究テーマの方向性

表 2.4.2-2 に示した個別研究項目のうち主なものについて，幌延深地層研究計画の第２段階における研究の方向性を以下に概略的に示す。ただし，分類 C については，幌延を対象としていないのでここでは除外する。

(1)分類 A（幌延 URL の建設工事に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する調査研究）

1)低アルカリ性セメント

幌延 URL の水平坑道の一部を利用し HFSC（Highly Fly-Ash contained Silica-fume Cement）を中心とした低アルカリ性セメントを用いた吹付と覆工コンクリートを施工して，中間深度までの施工性を確認し，中間深度までの吹付けコンクリートの施工事例および留意点を提示する。なお，低アルカリ性セメントを含むセメント・コンクリートの長期健全性は，他分野の成果（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）や海外の地下研究施設における研究成果等を踏まえて検討を進める。

2)グラウト

建設・操業中の止水のためのグラウト技術を，処分システムの成立性も考慮した形で整理し，提示するとともに，幌延の地下施設を対象として，可能な範囲で具体的な地質環境への適用事例

を提示する。具体的には，グラウト適用環境が生じた際に，セメント影響試験として，グラウト注入箇所における pH，Eh のモニタリングや岩盤への影響評価（コア採取）を進めるとともに，例えば，低アルカリ性セメントなどの施工実績の少ないグラウト材料に関する施工試験を実施する。

3)建設技術

第 2 段階では，URL の建設に伴う計測・調査などにより得られた原位置の情報を用いて，第 1 段階で実施したアクセス立坑や単一坑道を対象とした設計手法の適用性確認に向けた検討を進めるとともに，地下深部の坑道群を対象としたより詳細な設計用物性値の設定および設計手法の構築に向けた検討を進める。

また，URL の建設工事を対象とした情報化施工計画を立案するとともに，それらの幌延深地層研究計画の第 2 段階（主にアクセス立坑）における実際の建設工事への適用事例を提示する。

URL の建設工事や調査研究における実績をもとに，地下施設の施工技術を整理するとともに，定置技術から地下施設の設計・施工への要求事項や性能評価への反映点・留意点を抽出する。

4)岩盤の長期健全性

長期予測の信頼性向上を目的とし，幌延深地層研究計画の第 2 段階で坑道掘削時に得られる計測データを用いて，岩盤の長期挙動予測モデルによる地下深部空洞周辺岩盤の実挙動の再現性，および幌延深地層研究所の地上からの調査段階で設定したモデル定数の設定方法に関する検証を進める。また，第 3 段階で実施する緩衝材／岩盤クリープ試験に向けて，地下施設内から実施する長試錐孔により原位置試験予定地点近傍で採取された岩石サンプルを用いて，評価に必要な力学物性を拡充するとともに，ニアフィールドの複合挙動を考慮した解析手法を整備する。さらに，性能評価や地質環境調査の分野と協力し，第 2 段階で予定されている掘削影響試験などを通じて，EDZ の性状調査とその長期的な挙動の把握，EDZ の自己修復（強度，透水性）特性の調査，安全評価における EDZ に関するモデルの詳細化を進める。

一方，岩盤の変質挙動については，普通セメント等を支保工やグラウト材として適用した場合の，ニアフィールド岩盤の長期劣化挙動について検討を進める。具体的には，これまでの成果（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）を基に，幌延の地下施設を利用したグラウトや支保工材に関するセメント影響試験や，NAGRA（グリムゼル岩盤試験場）との LCS（Long-term Cement Studies)共同研究等を利用して，その影響の程度に関する評価を進める。

(2)分類 B（幌延 URL 建設工事には直接関係ないものの，幌延の地質環境条件（地質構造，水理，地球化学，岩盤力学的な環境条件）を対象として実施する室内試験や解析的検討）

1)オーバーパックの基本特性

オーバーパック候補材料の幌延での地質環境条件に対する適用性と腐食寿命の評価を行う。また，幌延の地下水条件での腐食モニタリング手法を提示する。

2)緩衝材の基本特性

塩水環境下における緩衝材の隙間充填性能に関して，幌延の地質環境条件を対象とした緩衝材設計や材料選定に係わる基盤情報を提示する。

緩衝材設計や材料選定の具体化や最適化などに資するため，セメント影響および塩水+セメント影響に着目した緩衝材基本特性データの整備および評価手法を提示する。

幌延の地質環境条件を考慮した各原位置試験に係わる緩衝材基本特性データを整備する。

3)緩衝材の長期力学的変形挙動

緩衝材と岩盤の長期力学挙動に関する連成解析手法を構築し,原位置試験計画案の検討を行う。

4)緩衝材の長期変質挙動

セメント系材料の緩衝材に対する影響について,TRU 廃棄物処分研究と連携し評価モデルの開発やデータベース開発を行うとともに，実際の地質環境条件および比較的大きなスケールで試験することにより，室内試験を基に開発を行ってきたセメント系材料の影響評価モデルの確証を行うためのデータを取得する。

5)熱 - 水 - 応力 - 化学連成評価技術

熱 - 水 - 応力 - 化学連成挙動解析コードの開発において，第 2 段階(中間深度)で得られる地質環境データを用いた数値実験を実施し，適用事例の拡充，解析コードの信頼性向上を図る。

人工バリア試験に向けた検討として，第 2 段階（中間深度）で得られる地質環境データを用いて連成挙動解析コードによる予備解析を行い，解析結果を試験期間や試験規模を考慮した人工バリア仕様の設定，および計測計画の策定に資する。また，人工バリアやその周辺における熱や水などの挙動を計測する技術について，エネ庁事業との連携のもと適用性・長期耐久性の実験的検討を行い，計測計画の策定に資する。

2.4.4 今後の課題

本節は，幌延の深地層研究計画において最低限実施すべき具体的な研究項目を抽出し，幌延深地層研究計画と関連付けて概略的にまとめたものである。

今後は，本計画をベースとして，定期的に工学技術に関する個別研究の進捗を整理するとともに,地下施設の建設工事の進捗や高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する最新の動向を踏まえ,適宜，個別の研究計画ならびに原位置試験計画を詳細化していくことが必要である。

参考文献

青柳茂男，油井三和，棚井憲治，川上進，藤田朝雄，谷口直樹，柴田雅博，小西一寛，西村繭果，菊地広人，松本一浩，松井裕哉，中山雅 (2006) : “幌延深地層研究計画第 2 段階（平成 17～21 年度）を対象とした工学技術の適用性検討に関する計画案”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2006-14.

電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005) : “TRU 廃棄物地層処分技術検討書 －第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－”，JNC TN1400 99-022，FEPC TRU-TR2-2005-02.

核燃料サイクル開発機構 (1999) : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－ 分冊２ 地層処分の工学技術”， 核燃料サイクル開発機構， JNC TN1400 99-022.

原子力環境整備促進・資金管理センター (2002) : “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”，原子力環境整備促進・資金管理センター ，RWMC-TRJ-04005-1.

栗原雄二，油井三和，棚井憲治，川上進，杉田裕，谷口直樹，平井卓，小川豊和，三原守弘，松井裕哉，藤島敦，盛口洋，宮野前俊一，本間信之 (2002) : “幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討（研究報告）”， 核燃料サイクル開発機構， JNC TN8400 2004-002.

松井裕哉 (2005) : “幌延深地層研究計画　地下施設を利用した第 2，第 3 段階における調査試験計画案”， 核燃料サイクル開発機構， JNC TN5400 2005-014.

松井裕哉，棚井憲治，川上進，佐藤稔紀，西村繭果，青柳茂男，藤田朝雄，谷口直樹，菊池広人，松本一浩，油井三和 (2005) : “設計技術（地下施設設計，人工バリア設計，閉鎖設計）の実際の地質環境条件への適用性評価”， 核燃料サイクル開発機構， JNC TN5400 2005-004.