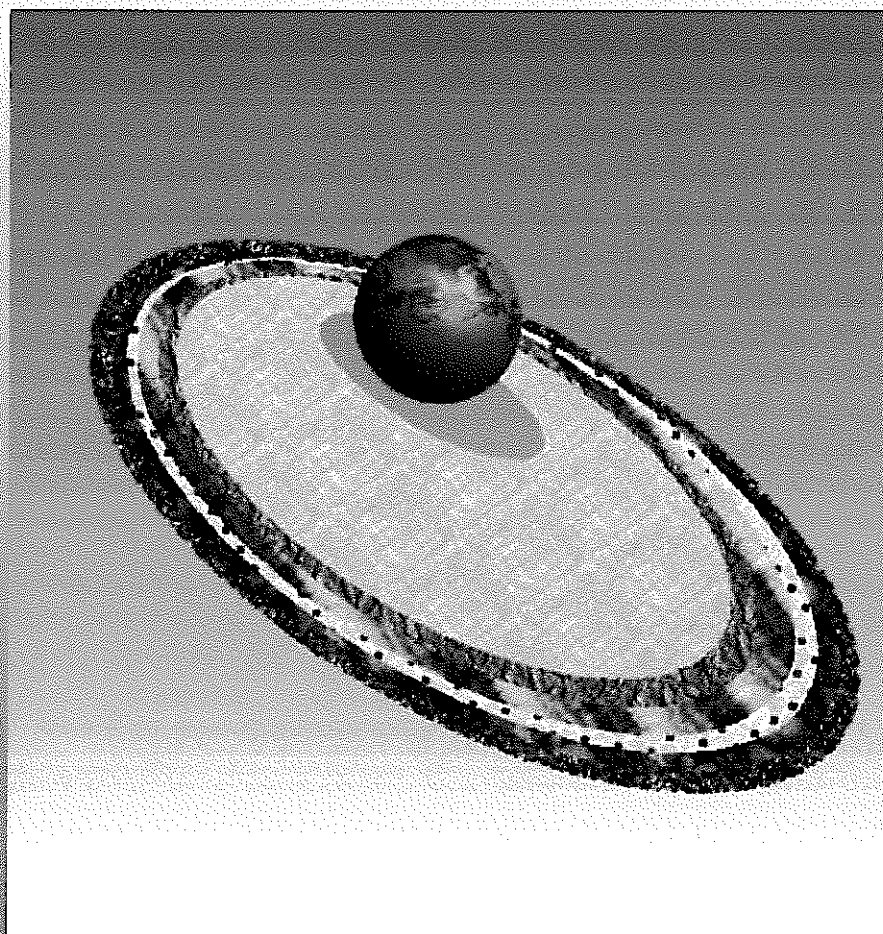




地層処分技術に関する研究開発報告会

実施段階を迎えた研究開発の新たな展開

予稿集



核燃料サイクル開発機構

平成14年1月23日(水) 東商ホール

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分は、原子力利用を進めていく上で最も重要な課題の一つですが、我が国では、私共サイクル機構を中心に行われた長年の研究成果の第2次取りまとめを技術的な拠り所として、一昨年「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が制定され、さらに処分の実施主体「原子力発電環境整備機構」が設立されたことで、地層処分は研究開発の段階から実施の段階へと進展致しました。

地層処分の事業は処分場候補地の段階的な選定から処分場の建設・操業・閉鎖に至るまで極めて息の長い事業になりますが、こうした事業の推進にあたっては、技術の信頼度を高めるとともに、幅広い国民の皆様の理解を得て行くことが極めて重要な要件であります。こうした観点から処分事業やその安全規制の円滑な進展を支えて行くためには、地層処分技術の信頼性の向上や安全評価手法の高度化のための研究開発を着実に進めていくことが重要であります。

この度、サイクル機構では、前年度改訂された原子力長期計画等で示された関係機関との役割分担等を踏まえ、処分の実施段階を支える新たな研究開発計画を策定いたしました。また、地層処分研究を進める上で、深地層の研究施設は重要な役割を持っていますが、お陰様でこの面では昨年は大きな躍進の年となりました。北海道幌延町においては、地元の皆様の御理解を得て、「幌延深地層研究センター」を発足させることができ、堆積岩を対象とした深地層研究所建設に向け、地表からの調査研究を開始することができました。一方、東濃地科学センターが進めている結晶質岩を対象とした超深地層研究所計画に関しては、瑞浪市から市有地に研究坑道および関連施設を設置することについてのご提案をいただきました。先週1月17日には市有地の賃貸借契約を締結させていただき、研究所計画の推進に向け新たな一歩を踏み出すことができました。

今回は、以上述べましたような背景で新たに策定いたしました地層処分技術に関する研究開発の全体計画をご紹介しますと共に、最近の主要な研究開発の進捗状況についてご報告させていただきます。

私共は、既に述べた2つの深地層の研究施設計画のほか、東海事業所には地層処分基盤研究施設（エントリー）や地層処分放射化学研究施設（クオリティ）など、世界的にも注目されている基礎研究開発施設が整っており、また地層科学や地層処分に関する基礎研究から、総合的な安全評価・解析まで幅広い研究開発を実施しております。今後とも、こうした貴重な研究資源や国内外との協力などを最大限有効に活用し、客観性のある優れた成果を出すことにより、地層処分技術の信頼性を高め、処分事業の円滑な推進に貢献していく所存ですので、皆様の一層のご支援とご指導お願い申し上げます。

目 次

はじめに

【サイクル機構の研究開発報告】

地層処分技術に関する研究開発の全体計画の概要 1
河田 東海夫

東濃地科学センターにおける深地層の科学的研究の現状 9
ー超深地層研究所計画を中心としてー
武田 精悦

幌延深地層研究計画の現状 19
山崎 眞一

人工バリアの長期挙動評価の信頼性向上と連成モデルの開発 27
亀井 玄人

安全評価手法の高度化に向けた取り組み 37
牧野 仁史

【特別講演】

フランスにおける地下研究施設計画の現状 45
- Bure's underground research laboratory: general framework, objectives,
siting process and schedule of the URL project -
Jean-Louis GAUSSEN (ANDRA)

【サイクル機構の研究開発報告】

地層処分技術に関する研究開発の全体計画の概要

地層処分技術に関する研究開発の全体計画の概要

サイクル機構 河田 東海夫

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が平成 11 年 11 月に公表した第 2 次取りまとめ（サイクル機構，1999）を技術的な拠り所として，処分事業を推進するための枠組みを定めた「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が平成 12 年 5 月に成立し（同年 6 月公布），これに基づき，平成 12 年 10 月には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）が発足した。また，平成 12 年 11 月の「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，2000a）」（以下，原子力長期計画）やそれを踏まえた平成 13 年 6 月の「原子力の技術基盤の確保について（総合資源エネルギー調査会原子力部会，2001）」において，最終処分の実施に向けて必要な取り組みや関係機関の役割分担が示された。一方，原子力安全委員会からは，平成 12 年 11 月に「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，2000）」（以下，安全規制の基本的考え方）が公表された。

以上のように，わが国の地層処分計画が事業化段階へと進展し，処分事業や安全規制の大枠が整備された状況を踏まえ，今後の研究開発は，適切な役割分担のもとに，処分事業や安全規制の今後の展開とも整合をとりつつ進めていくことが重要となる。本報では，今後のサイクル機構の地層処分技術に関する研究開発の全体計画の概要について紹介する。

2. 今後の研究開発における関係機関の役割と課題

2.1 関係機関の役割

原子力長期計画等において，関係機関の役割が以下のように示されている。

- ・ 国及び関係機関：
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
- ・ 特に，サイクル機構：
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，深地層の科学的研究，実測データの着実な蓄積とモデル高度化による地層処分技術の信頼性向上と安全評価手法の高度化に向けた研究開発
- ・ 実施主体（原環機構）：
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
- ・ 発電用原子炉設置者：
実施主体に対する人的及び技術的支援，放射性廃棄物に係る共通的研究開発
- ・ （財）原子力環境整備促進・資金管理センター：
国の政策立案のための適切な技術情報の整備・提供，周辺基盤技術の研究開発

2.2 今後の研究開発課題

第 2 次取りまとめ以降の研究開発課題については，「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価（原子力委員会，2000b）」（以下，国による第 2 次取りまとめ評価報告書）や「安全規制の基本的考え方」において，それぞれ以下のような具体的課題等が示されている。

(1) 「国による第2次取りまとめ評価報告書」

第2次取りまとめの成果を踏まえた技術開発課題への取り組みや基礎的な研究開発の継続などを通じて地層処分の技術的信頼性をさらに向上させることに努めることが重要であるとしたうえで、以下のような研究開発課題を例示している。

- ・ 工学技術や安全評価と関連付けた地表から地下深部までの調査の体系化
- ・ 深地層の研究施設等を活用した深部地質環境データの蓄積
- ・ 人工バリアの長期的健全性に関する詳細な研究
- ・ 深地層の研究施設等を活用した建設・操業・閉鎖技術の実証試験
- ・ 安全評価に用いるデータの蓄積
- ・ 実際の場所の特性を精度良く再現できるモデルの確立 等

(2) 「安全規制の基本的考え方」

今後、安全規制のための基準や指針等の策定を行う上で、以下のような評価や検討が必要であるとしている。

- ・ 実際の地質環境条件を適切に考慮した設計、シナリオに基づく評価
- ・ 緩慢な天然現象による地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価
- ・ モデル、パラメータの不確実性に配慮した指標の検討
- ・ 科学的合理性のある範囲での地下水シナリオの設定 等

上記の課題を踏まえると、今後の研究開発においては、実際の地質環境への適用を通じた地層処分技術の信頼性確認、データの蓄積とモデルや評価手法の高度化、それらを通じたシステム性能の長期的評価の信頼性向上などを中心とした研究開発が重要となる。なお、これらの課題については、地層処分計画を進める諸外国においても重要な課題として扱われている共通性が高いテーマであり、共同研究や国際的な議論の場でも国際的合意が必要とされる研究対象となっている。

3. サイクル機構における研究開発

上記の役割分担や今後の研究開発課題を踏まえて、サイクル機構では、第2次取りまとめまでに蓄積した知見や総合的評価能力、深地層の研究施設、地層処分基盤研究施設（エントリー）、地層処分放射化学研究施設（クオリティ）等の国内で最も充実した研究開発施設を活かし、基盤的な研究開発を国や関係機関等と十分に調整しながら進めていく。

3.1 研究開発目標

今後の研究開発においては、以下の2つを目標として研究開発を進めていく。

(1) 実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認（図1参照）

－第2次取りまとめまでに幅広い地質環境を対象として整備してきた技術や手法の実際の地質環境への適用を通じた信頼性確認－

段階的に進めていく深地層の研究施設計画において、これまで整備してきた調査技術を適用し、実際の地質環境の不均質性を理解するとともに、調査・評価技術の信頼性を確認する。また、これらの実際の地質環境の情報を参考にしつつ、地質環境の不均質性等を考慮して、設計や安全評価に関するモデルや手法の適用性を確認する。さらに、深地層の研究施設での技術の適用を通じて、地下施設の建設・施工技術や人工バリア等の工学要素技術の信頼性を確認する。

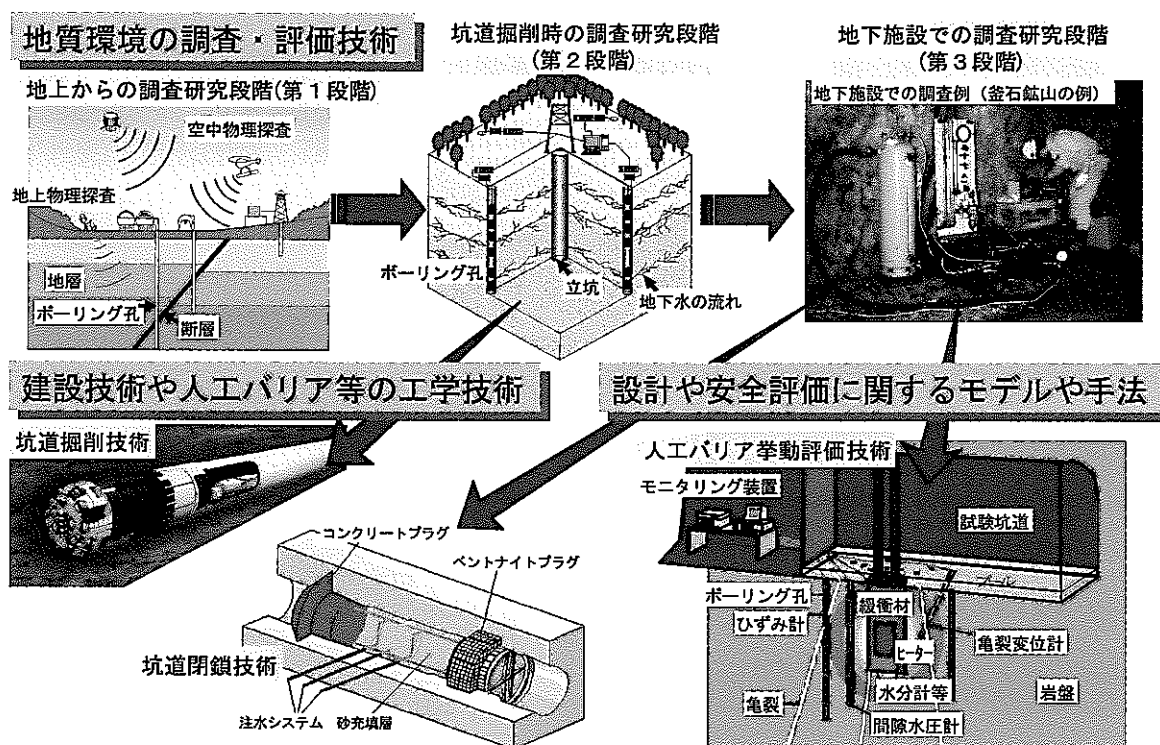


図1 目標「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」の概念

(2) 地層処分システムの長期挙動の理解 (図2 参照)

一現象理解に基づくより現実的なシステムの長期挙動の評価・理解と、第2次取りまとめにおいて簡略かつ保守的な考え方で評価したシステム性能の裕度確認一

エントリーやクオリティを中心に設計や安全評価に関するデータの蓄積と現象理解によるモデルの高度化等を進めるとともに、地質環境の長期安定性に関する研究やナチュラアナログ研究を通じて地質環境の長期的な変遷を把握する。これらを踏まえ、地層処分システムの挙動をより現実的に評価し、システムの長期挙動に対する理解を深めていく。

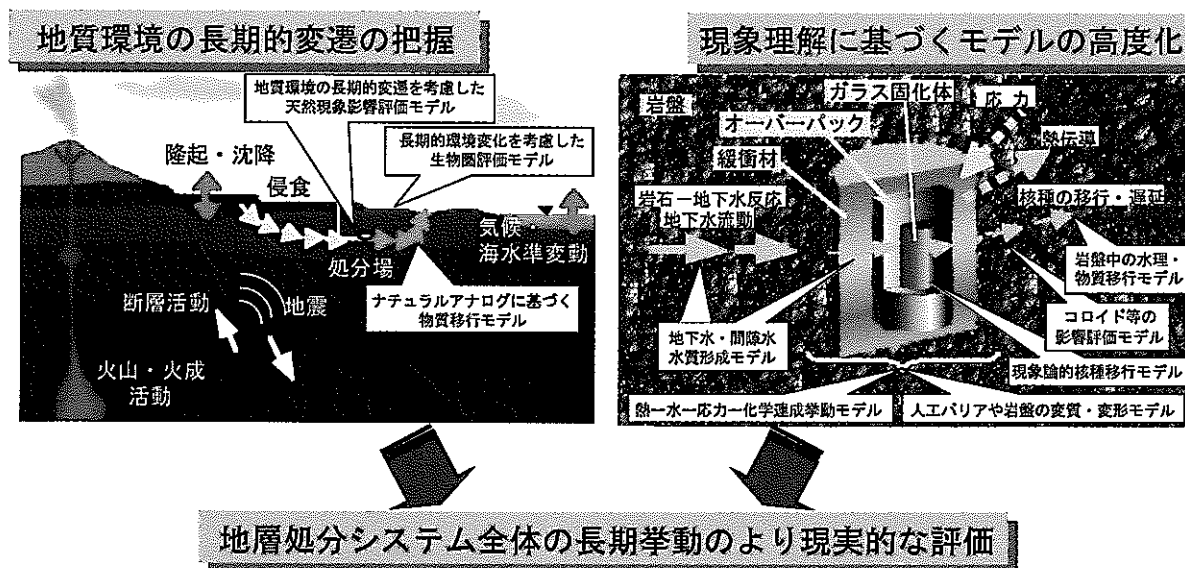


図2 目標「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」の概念

3.2 研究開発課題

上記の二つの目標に向けて重要な研究開発課題を具体的に設定した上で、「深地層の科学的研究」、「処分技術の信頼性向上」、「安全評価手法の高度化」の3つの分野に整理し、分野毎に研究開発を進めていく（図3、図5参照）。なお、サイクル機構の研究開発全体を「地層処分技術に関する研究開発」とする。これは「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」から構成し、さらに「地層処分研究開発」は「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」から構成するものとしている。

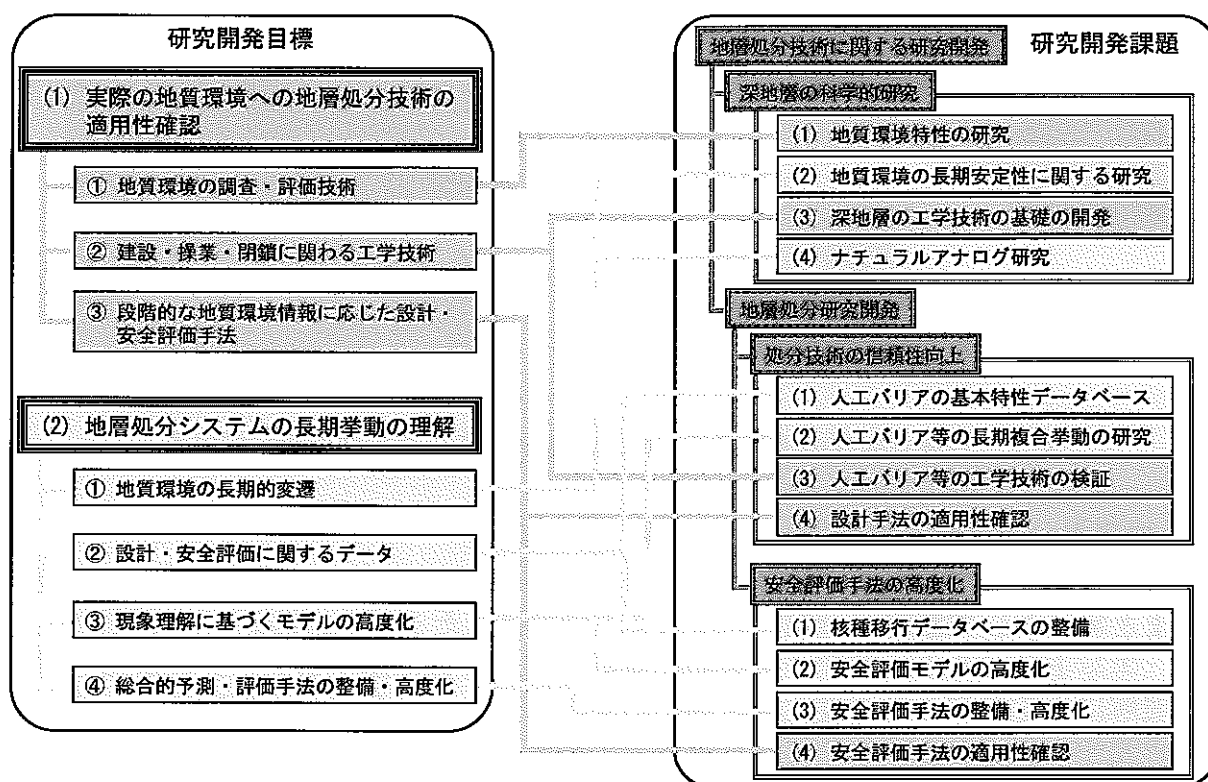


図3 二つの研究開発目標に向けた研究開発課題の設定

各分野の研究開発の概要を以下に示す。

(1) 深地層の科学的研究

深地層の研究施設等を活用し、これまで整備してきた地質環境の調査・評価技術を実際の地質環境に適用（検証・改良）することにより、特に、地質環境の不均質性を理解する観点で、調査・評価技術の信頼性確認と体系化を図る。また、地質環境の長期安定性に関する研究やウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究を通じて、地質環境の長期的な変化や物質を保存する能力を評価していく。

(2) 処分技術の信頼性向上

エントリーや幌延の深地層の研究施設等を活用し、人工バリア等の基本特性や長期複合挙動に関するデータの蓄積とモデルの高度化、工学要素技術の検証を行うことで、処分技術の信頼性向上を図る。特に、人工バリア等の長期挙動に係る個別現象や連成現象の理解に基づき、ニアフィールド環境の時間的変遷を把握することにより、地層処分システムの長期挙動評価の信頼性向上に反映させる。

(3) 安全評価手法の高度化

エントリー、クオリティ等を活用し、深地層の科学的研究の成果も基盤として取り込みつつ、安全評価に関するデータの蓄積、モデルや手法の高度化を行うことにより、信頼性の高い安全評価手法を確立する。特に、より現実的な現象の理解と実際の地質環境に起因する不確実性を考慮したモデルや評価手法の改良を通じて、地層処分システムの長期挙動評価の信頼性向上を図る。

3.3 研究開発施設（図5参照）

上記の研究開発は、深地層の研究施設、エントリーやクオリティ、東濃鉱山等を活用して進めていく。研究開発を効率的に実施する観点から、海外の地下研究施設の活用等の国際協力や国内関係機関との協力を積極的に進めるとともに、サイクル機構の研究施設は外部研究者への開放を積極的に図っていく。実際の地質環境を対象とした研究開発を進める上で重要な役割を果たす深地層の研究施設については、瑞浪と幌延の二つの計画を進めており、施設は国民の皆様に地下深部の環境や地層処分の研究開発に対する理解を深めて頂く場として、可能な限り早い段階に見学できるように整備を進めていく。

(1) 東濃地科学センター

深地層の科学的研究として、主に結晶質岩を対象とした超深地層研究所計画と広域地下水流動研究、ナチュラルアナログ研究等の東濃鉱山での調査試験研究、および地震や火山活動等の天然現象を対象とした地質環境の長期安定性に関する研究を進める。

・超深地層研究所計画

結晶質岩を対象とした深地層の研究施設計画として、1996年度より岐阜県瑞浪市にあるサイクル機構の所有地において、地上からの調査研究を進めてきた。これまで、地下深部の地質環境特性を把握するためのボーリング調査や物理探査などを実施してきており、今後、地上から地質環境を調査・解析・評価するための手法の有効性を確認していく。

なお、今般、瑞浪市から市有地に超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置することについてのご提案をいただき、2002年1月17日に市有地の賃貸借契約を締結させていただいたところである。

(2) 幌延深地層研究センター

堆積岩を対象として、深地層の科学的研究、地層処分研究開発を進める。2000年11月に地元自治体との協定書を締結し、2001年3月より調査研究を開始した。これまでに空中／地上物理探査等を行い、現在ボーリング調査を進めているところであり、2002年度のできるだけ早い時期に研究所設置地区を選定する予定である。2005年度頃に造成工事および立坑掘削に係わる作業を開始し、2010年度頃に研究坑道の主要部分の完成を目指している。

(3) 東海事業所（エントリー、クオリティ等）

エントリーは、放射性核種を用いずに、工学試験を中心として、人工バリアの長期挙動、地球化学、岩盤中の水理・物質移行等に関するデータ取得やモデル検証を行う試験設備ならびに総合的な評価が可能な解析ツール等を備えている。一方、クオリティは、放射性核種を用い、実験室レベルでの地下深部を模擬した環境下で核種移行データ等を取得するための試験設備や高度な分析機器を有する。これらの既

存の施設を活用し、データの取得やモデルの高度化などを進めるとともに、深地層の科学的研究の成果も取り込みつつ、成果の集約と総合的な評価を進めていく。

3.4 分野間の連携と成果の集約・反映

今後の研究開発においては、二つの目標に向けて、各々の研究開発分野や項目間で連携を図りつつ進めることが重要となる。そのため、エントリーやクオリティを中心に進める「処分技術の信頼性向上」や「安全評価手法の高度化」に係る研究開発においても、今後は深地層の研究施設等で取得される実際の地質環境に関する情報を活用するなど、以下のような観点で分野間の連携を図りつつ進める（図4参照）。

- ・ 地質環境の調査・評価の段階的進展に応じた設計・安全評価手法の適用性確認

深地層研究計画等において段階的に詳細化される実際の地質環境に関する情報を参考として、設計・安全評価手法の適用性を概略的に検討し、地質環境の調査における留意点等を整理する。

- ・ 建設・操業・閉鎖に関わる工学技術の適用性の例示

実際の地質環境を考慮しつつエントリー等で要素技術の機能確認等を行うとともに、深地層の研究施設での建設、施工等を通じて深地層における工学技術の信頼性を確認していく。

- ・ 実際の地質環境を考慮した設計や安全評価に関するモデルや手法の高度化

実際の地質環境の不均質性等の情報を参照しつつ、設計や安全評価に係るモデルの改良を進め、一部のモデルについては深地層の研究施設（幌延）等における原位試験によって信頼性を確認する。また、地質環境の長期安定性に関する研究やナチュラルアナログ研究の成果等を踏まえ、地質環境の長期的変遷を考慮しつつモデルや評価手法の高度化を図る。

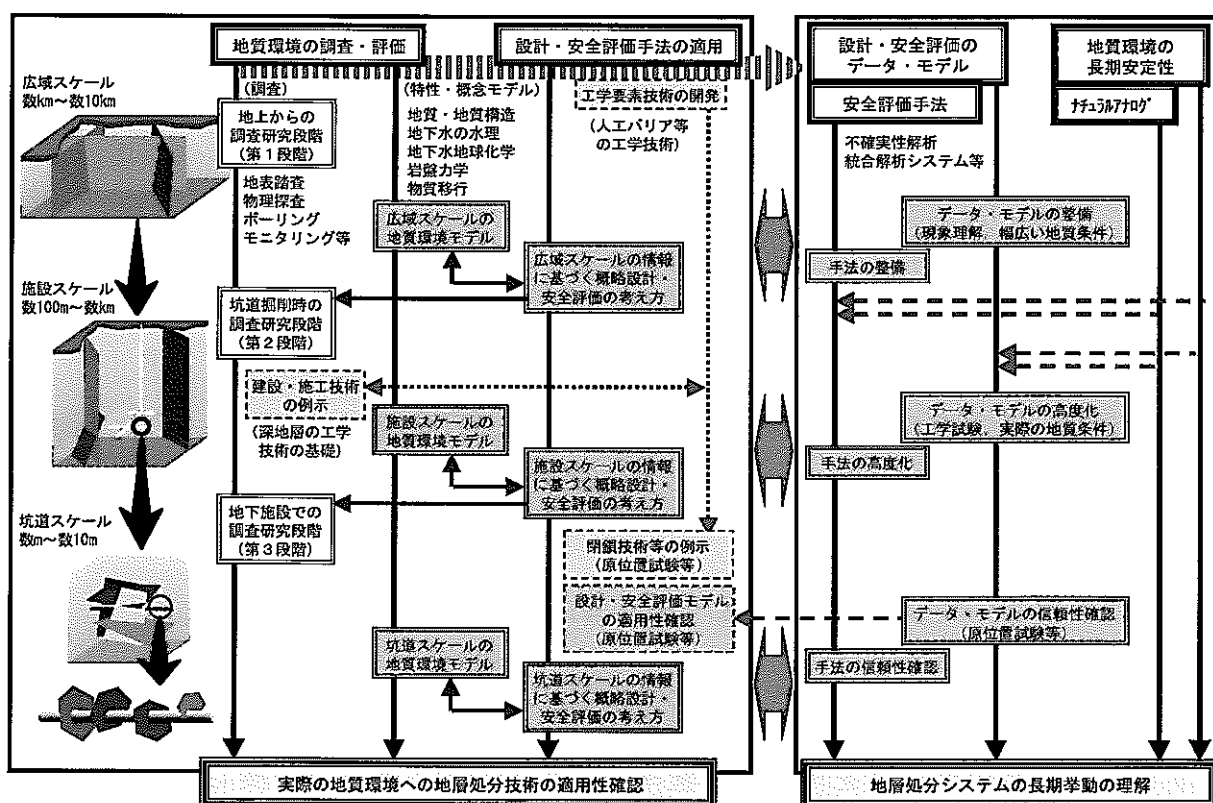


図4 二つの目標に向けた分野間の連携と情報の流れ

研究開発成果は、その都度公表するとともに、処分事業や安全規制のニーズやスケジュールを勘案し、分野間にまたがる情報を集約しつつ、段階的に取りまとめて公表していく（図5参照）。これらの成果については、原環機構との協定に基づき技術移転を進める。あわせて、科学的・技術的な面での国民の皆様の地層処分に対する理解を深めていただけるよう、研究開発機関として今後も成果の公表や施設の公開等を積極的に進めていく。

4. おわりに

サイクル機構は、我が国の地層処分計画が事業化段階に進展した状況を踏まえ、深地層の研究施設、エントリー、クオリティ等の研究開発施設やこれまでに蓄積してきた経験等を活かし、処分事業の円滑な推進と安全規制に反映するための基盤的な研究開発を進めていく。高レベル放射性廃棄物の地層処分は、国民各層の理解と信頼を得つつ進められるべきものと認識しており、研究開発成果等の情報を積極的に発信するとともに、報告会等の議論の場を通じて幅広いご意見を取り入れつつ、研究開発を展開していく。

参考文献

- 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）。
- 原子力委員会（2000a）：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（2000b）：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価。
- 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—，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 99-020～024。
- 総合エネルギー調査会原子力部会(2001)：原子力の技術基盤の確保について。

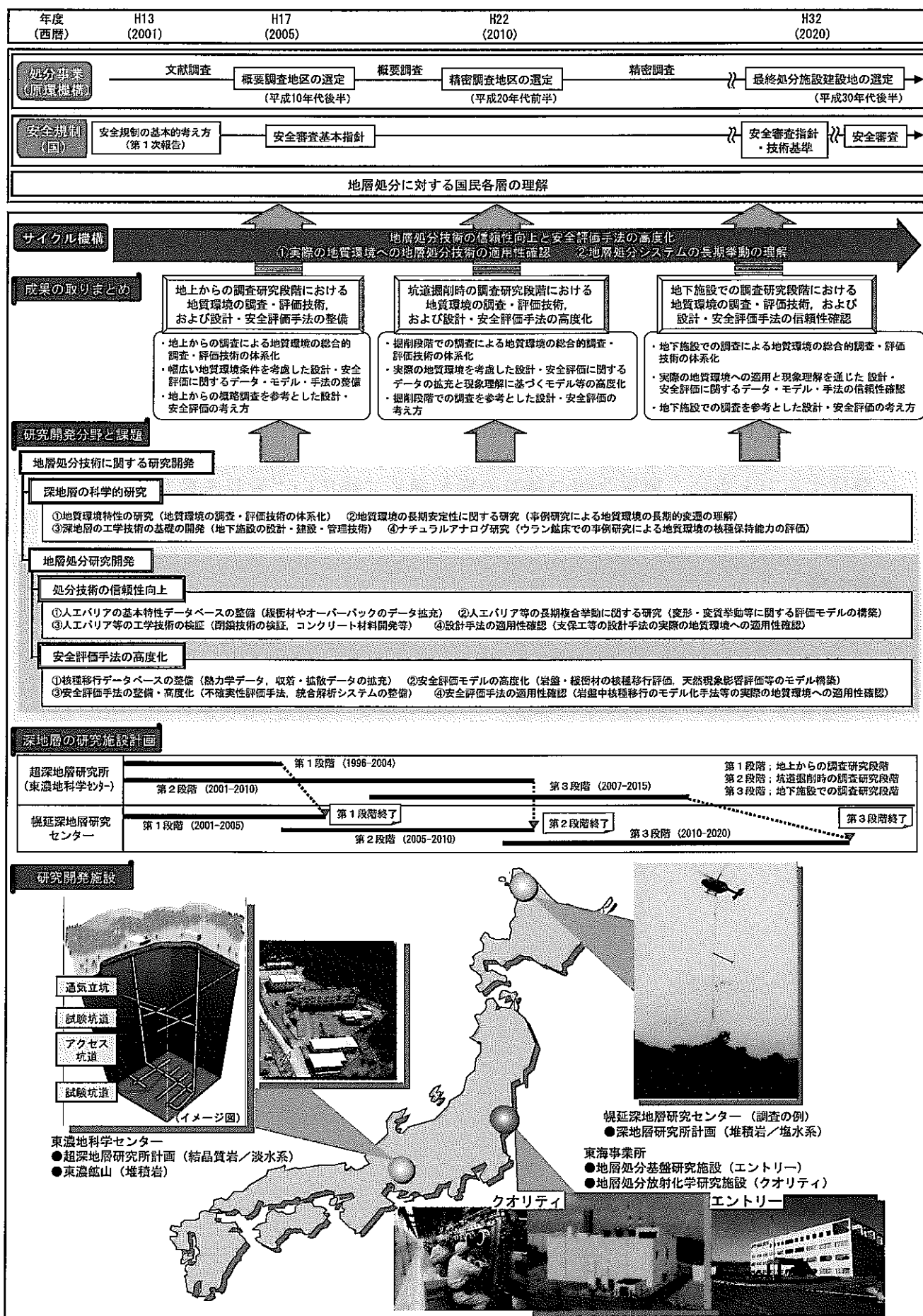


図5 処分事業と安全規制、サイクル機構における研究開発の今後の展開

【サイクル機構の研究開発報告】

東濃地科学センターにおける深地層の科学的研究の現状

ー超深地層研究所計画を中心としてー

東濃地科学センターにおける深地層の科学的研究の現状 －超深地層研究所計画を中心として－

サイクル機構 武田 精悦

1. はじめに

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については、「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、原子力委員会、2000a）」（以下、原子力長期計画）において、「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積極的に進めていくことが必要である。特に、核燃料サイクル開発機構等は、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必要である。」とされている。

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）東濃地科学センターでは、国の計画・方針にしたがい、地層処分技術に関する研究開発として、地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究（以下、地層科学研究）を進めている。東濃地科学センターにおける地層科学研究は、超深地層研究所計画、広域地下水流動研究、東濃鉱山での調査試験研究、地質環境の長期安定性に関する研究からなる。このうち、超深地層研究所計画は、原子力長期計画に示された深地層の研究施設のひとつとして、結晶質岩を対象に岐阜県瑞浪市において進めているものである。一方、北海道幌延町で進めている幌延深地層研究計画は、堆積岩を対象としている。

本稿では、超深地層研究所計画を中心に、東濃地科学センターにおける地層科学研究の現状について報告する。

2. 研究の課題

「第2次取りまとめ」（サイクル機構、1999b）以降における地層処分技術に関する研究開発の課題については、「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」（原子力委員会、2000b）や「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、2000）において、重要な項目が示されている。そのうち、地層科学研究に関連する課題としては、「地表から地下深部までの調査の体系化」「深部地質環境データの蓄積」（原子力委員会、2000b）、あるいは「実際の地質環境条件を適切に考慮した設計、シナリオに基づく評価」「地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価」（原子力安全委員会、2000）などが挙げられている。

これら国の報告書で示された課題を踏まえ、東濃地科学センターにおいては、以下の3つを大きな研究課題として地層科学研究を進めている。

- ①地質環境特性についての研究
- ②地質環境の長期安定性についての研究
- ③地質環境の調査技術・機器の開発

上記①は、地質環境条件として重要な地下水の動きや性質、岩盤の特性、ウランなどの物質の挙動、坑道掘削が周辺の岩盤に与える影響などを明らかにする研究である。

②は、火山や地震などの天然現象の活動の特徴や影響の程度を明らかにし、地質環境の将来における変化を予測評価する研究である。また、これらの研究を通じて、③の地表から地下深部までの地質環境を調査するための技術・機器の開発を進めている。

3. 研究の現状

東濃地科学センターが進めている地層科学研究のうち、東濃地域で実施している超深地層研究所計画、広域地下水流動研究、東濃鉱山での調査試験研究の3つのプロジェクトは、地下深部の岩盤とそこに含まれる地下水の性質やそこで起こっている現象を理解しながら、そのために必要な技術を開発整備していくことを主な目的としている。

超深地層研究所計画では、全体を3つの段階（地表からの調査予測研究段階、研究坑道の掘削を伴う研究段階、研究坑道を利用した研究段階）に分けて進めながら、地質環境を地表および地下から体系的に把握するための技術基盤を整備していく。平成8年度に地表からの調査を開始し、これまでに4孔の深層ボーリング調査などを実施した。本計画については、次節で詳しく述べる。

広域地下水流動研究は、地下水の涵養域から流出域（例えば、尾根から河川）までを包含する領域における地下水の大局的な流れや、それに伴う水質の変化などを効率的に把握するための技術の整備を主な目的として、平成4年度から実施している。東濃地域においては、東濃鉱山を含む約10 km四方程度を対象に、空中や地表からの物理探査、地表地質調査、表層での水理・水文調査、深度500 m～1,000 mの深層ボーリング調査（13孔）などを行ってきた。これまでの研究により、深度1,000 mまでの岩盤や地下水を調査・観測するための機器や手法を開発するとともに、大局的な地下水の流動状況や深度による地下水の水質変化などを把握した（サイクル機構、2000）。

今後は、地下水の流動状況や水質変化を規制する要因などを明らかにすることにより、これまでに整備してきた地質環境の調査・評価技術の体系化を進め、その一般化に向けた検討を行っていく。また、超深地層研究所計画における研究坑道掘削の広域的な地下水流動に対する影響の有無などにも留意しながら、ボーリング孔を利用した地下水の水圧や水質のモニタリングを実施し、地下水の経時的な変化を追跡する（サイクル機構、2001d）。

東濃鉱山での調査試験研究は、ウラン鉱床に掘削された既存の地下坑道を利用して、昭和61年度に開始した。深度約150 mまでの堆積岩が主な研究対象である。ウラン鉱床が存在し、さらにそれを断層が横切るという特徴を活かして、ナチュラルアナログ研究など物質の移行・遅延現象に着目した研究や、坑道周辺の地質環境を総合的に調べるための技術の整備を進めている。平成元年～3年には、直径6 m、深さ150 mの立坑を新たに掘削し、坑道の掘削が周辺の地質環境にどのような影響を与えるかを評価した（サイクル機構、1999c）。今後も、ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究として、ウランなどが地質環境中に保持されている状況やそのメカニズムを探究し、地質環境中における物質の移行・遅延現象の定量化、モデル化を進めていく。また、坑道周辺における岩盤（堆積岩）の力学的な特性や地下水の水質、水圧などの長期変化に関する知見をさらに蓄積していく（サイクル機構、2001c）。なお、ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究は、地質環境による物質の保存能力など、地層処分の長期的な安全性についての国民の理解を得ていく上でも有効であると考えている。

以上、東濃地域で実施している３つのプロジェクトについては、得られた成果や研究資源などを相互に活用することにより、研究の効率化や成果の充実化を図っている。

一方、地質環境の長期安定性に関する研究は、わが国における地震・断層活動、火山活動、隆起・侵食、気候・海水準変動といった天然現象の活動の特徴（活動の傾向・規則性、地域性、変動の速度・規模など）や影響の程度・範囲などを理解することを目的とした研究である。平成元年度より全国を視野に入れて、大学等の専門家の協力を得ながら、文献調査や事例研究による情報・知見の整備、データベース化を進めている。これまで研究により、過去数十万年にわたり、わが国における主要な地震・断層活動や火山活動が限られた場所や地域で繰り返し起こっていること、また、隆起・侵食および気候・海水準変動には、一定の傾向や周期性が認められることなどがわかってきている。このような状態は将来的にも継続すると考えられるため、現在の活断層（帯）や火山地域、あるいは隆起・侵食が著しい地域などを避けることにより、将来にわたって十分に安定な地域を見出すことができる（サイクル機構、1999b）。今後は、非火山地域の地温異常や火山活動のメカニズムの解明、隆起・侵食および海面変化の複合による地形変化プロセスのシミュレーション、地表付近の震源断層を検出するための調査手法の開発などに重点を置いて研究を進める（サイクル機構、2001e）。

4. 超深地層研究所計画

4.1 計画の概要

超深地層研究所計画は、結晶質岩を主な対象に、「深部地質環境の評価のための調査・解析・評価技術の基盤の開発」と「深地層における工学技術の基盤の開発」を全体目標とした約20年の計画である（サイクル機構、2001b；McCrank et al., 2001）。本計画の成果は、他の地層科学研究や東海事業所で実施している地層処分研究開発の成果とあわせて、地層処分技術の信頼性の向上および安全評価手法の高度化に反映していくとともに、国が行う安全基準等の策定や実施主体が進める処分事業の推進にも基盤情報として活用される。また、研究施設は広く公開し、地下深部についての学術的な研究の場、あるいは深部地質環境や地層処分の研究開発に対する国民の理解を深める場としても寄与する。

超深地層研究所計画は、大きく以下の３つの段階に分けて進める（サイクル機構、2001b）。

① 第１段階：地表からの調査予測研究段階

地表からの調査により地下の地質環境を推定し、第２段階で掘削する研究坑道が遭遇する地質環境の状況や現象を予測する。また、本段階で得られた地質環境情報に基づき、研究坑道の詳細設計を行い施工計画を策定する。

② 第２段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階

研究坑道を掘削することにより、第１段階で行った予測の妥当性や、予測のために用いた地表からの調査・解析技術の適用性を評価する。さらに、研究坑道周辺の地質環境の状況を予測する。また、研究坑道の設計・施工等に関する工学技術の有効性を確認する。

③ 第３段階：研究坑道を利用した研究段階

掘削した研究坑道を利用して、地質環境に関する詳細な情報を取得するとともに、第２段階の予測結果の妥当性を確認する。また、研究坑道の施工・維持・管理等に関する様々な工学技術の有効性を確認する。

現在は、第1段階の地表からの調査を進めながら、第2段階のための詳細な研究計画および施工計画の策定を並行して行っているところである。

4.2 現状と主な成果

東濃地科学センターでは、超深地層研究所計画として、平成8年度より岐阜県瑞浪市明世町の正馬様にあるサイクル機構用地（約14 ha、以下、正馬様用地）において、地表からの調査を実施してきた。この地域には、白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）が広く分布しており、これを基盤として、その上位を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、さらにその上位を固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合で覆っている。また、東西方向に伸びる月吉断層が存在する（図1）。月吉断層は、土岐花崗岩および瑞浪層群を切っているが、瀬戸層群には変位を与えていない。

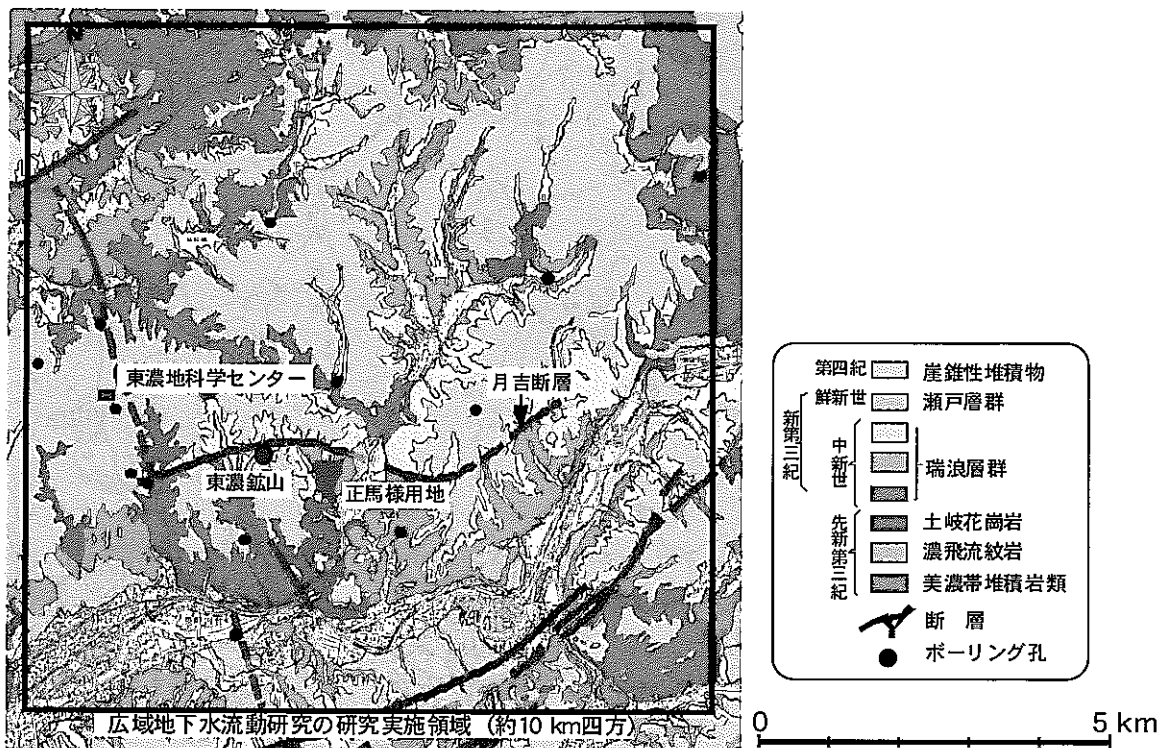


図1 研究実施領域周辺の地質

正馬様用地では、これまでに地上物理探査（電磁探査、反射法弾性波探査など）、表層水理調査（河川流量計測、気象観測など）および深度700～1,000 mのボーリング調査を実施した。本計画のボーリング調査では、これまで4孔（MIU-1, MIU-2, MIU-3, MIU-4号孔）を掘削し、物理検層、岩芯観察、水理試験、力学試験および岩芯を用いた室内試験などを行った。現在は、これらのボーリング孔を利用した地下水の長期的な観測（水圧、水質）や揚水試験を実施している。これまでに行った主な調査内容を図2に示す。

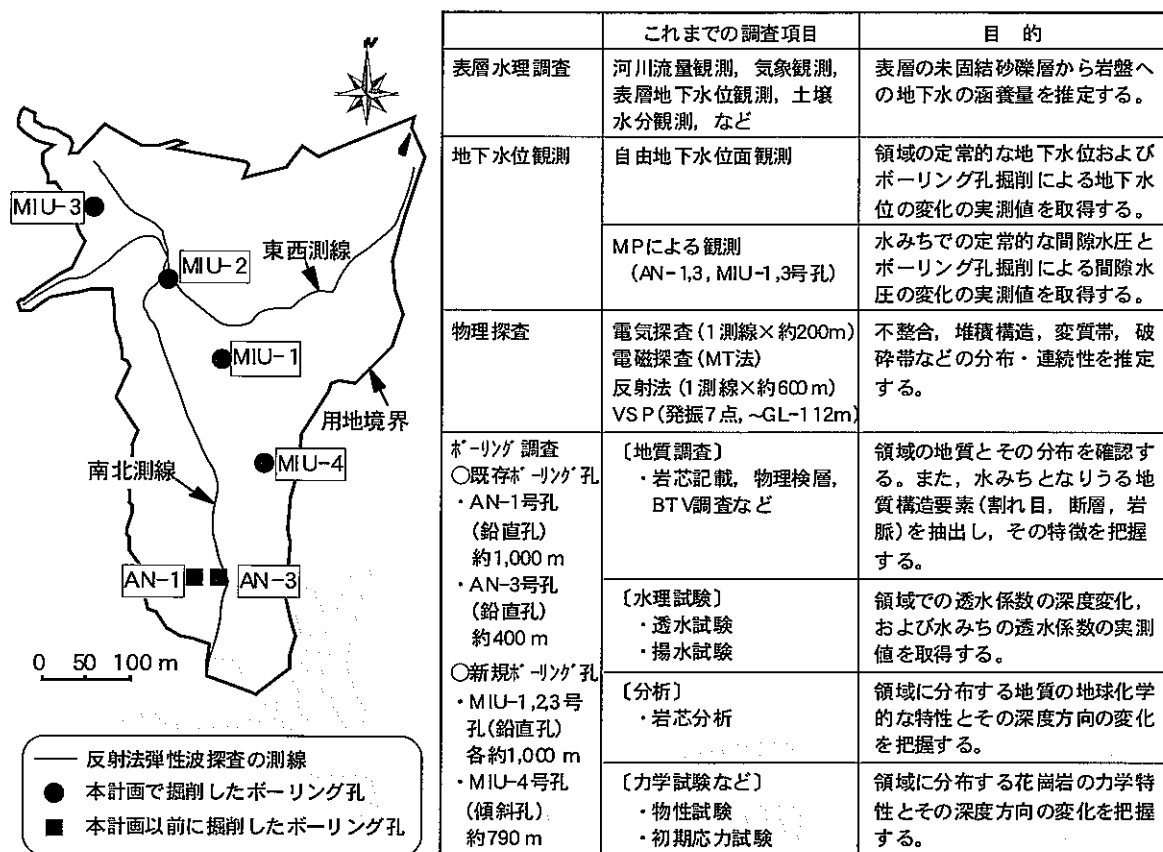


図2 研究領域内の調査位置と調査・試験の概要

1) 研究のアプローチ／成果の統合化

本計画においては、物理探査やボーリング調査などによって得られた結果を統合しながら、順次充実してくる情報に基づき、地質・地質構造、地下水の水理、地下水の地球化学、岩盤力学に関する地質環境モデルの構築を進めている。その過程で、調査計画の立案から調査結果の評価に至る一連のプロセスを繰り返すことを通じて、品質の確認、向上を図るとともに、情報の過不足や不確実性など地質環境に対する理解度を評価している（サイクル機構，2001a；三枝ほか，2001 など）。また、地層処分技術の信頼性の向上や安全評価手法の高度化といった観点から、研究成果の反映先や具体的なアウトプットを設定し、このアウトプットに至る調査・解析およびモデル化の流れ（データフロー）を明確化してきた（中野・大澤，2001）。あわせて、データの追跡性を確保するため、データベースの整備を進めてきている。このような流れに沿って実施してきた分野ごとの研究成果の概略を次項以下に示す。

2) 地質・地質構造に関する調査・研究

本計画以前に正馬様用地で掘削されていたボーリング孔（AN-1 号孔：1,000 m, AN-3 号孔：400 m）の情報や地形情報など、本計画の開始時点における情報だけを用いて地質構造モデルを構築した場合には、基盤の土岐花崗岩とこれを覆う堆積岩との境界およびその直下の花崗岩風化部を識別することしかできなかった。

一方、本計画で実施した物理探査とボーリング調査などの結果を加味することにより、正馬様用地の地下1,000 mまで（以下、対象領域）について、断層や割れ目の分

布などにも着目した地質構造モデルを構築することができた。すなわち、対象領域の地質構造は、表層の未固結砂礫層である瀬戸層群、3層に区分される瑞浪層群の堆積岩層および基盤の土岐花崗岩体からなり、土岐花崗岩体は黒雲母花崗岩相の部分と優白質花崗岩相の部分からなることが確認された。また、土岐花崗岩体における地下水の流動や水質形成などを規制すると考えられる主要な地質構造要素（透水性の高いゾーン）として、最上部（不整合面直下）の風化部、上部の割れ目帯、月吉断層に付随する割れ目帯を抽出した（図3）。図3のモデルには、MIU-3号孔までの情報が反映されている（MIU-4号孔の結果については、現在解析中）。

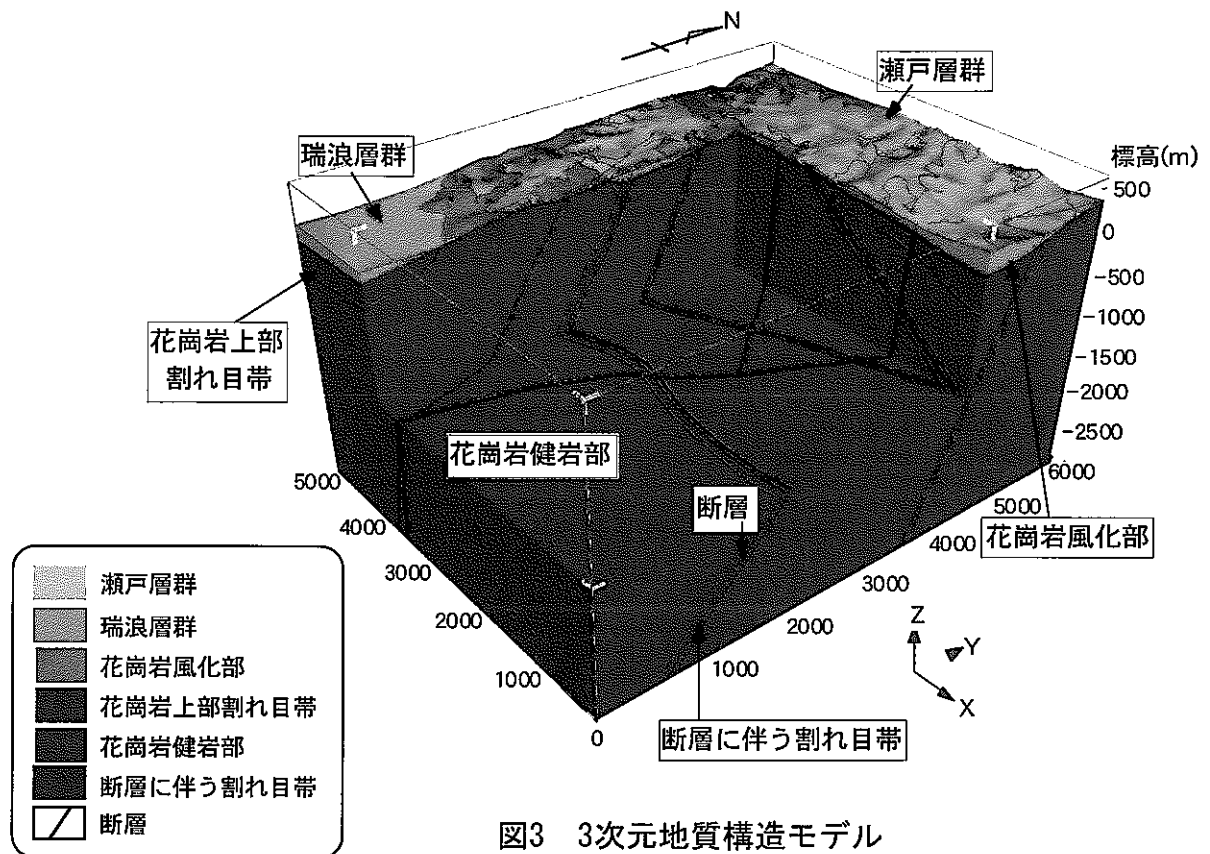


図3 3次元地質構造モデル

3) 地下水の水理に関する調査・研究

地下水流動を解析するための上部境界条件である地下水涵養量を把握するため、表層水理調査として河川流量の測定や気象観測などを行った。その結果、地下への涵養量は降水量全体の数%～十数%程度と推定された。また、ボーリング孔（MIU-1, MIU-2, MIU-3号孔）を用いた水理試験により、土岐花崗岩の健岩部、透水性割れ目部および月吉断層部について、透水係数や間隙水圧などの水理特性を計測した。

上記の調査によって得られた情報に基づいて、対象領域を包含する数 km 程度の領域の水理地質構造モデルを構築し、地下水流動解析を行った。その際、割れ目などの不連続構造に起因する土岐花崗岩体の不均質な物性分布を、等価な連続体モデルで表現した。その結果、研究坑道（とくに主立坑）の掘削時に、透水性割れ目の分布の傾向に沿った不規則な水頭低下領域が生じることが推定された。また、月吉断層については、東濃鉱山での調査試験研究（柳澤ほか、1992）において従来より確認されていた、遮水帯としての機能が再現できた（図4）。

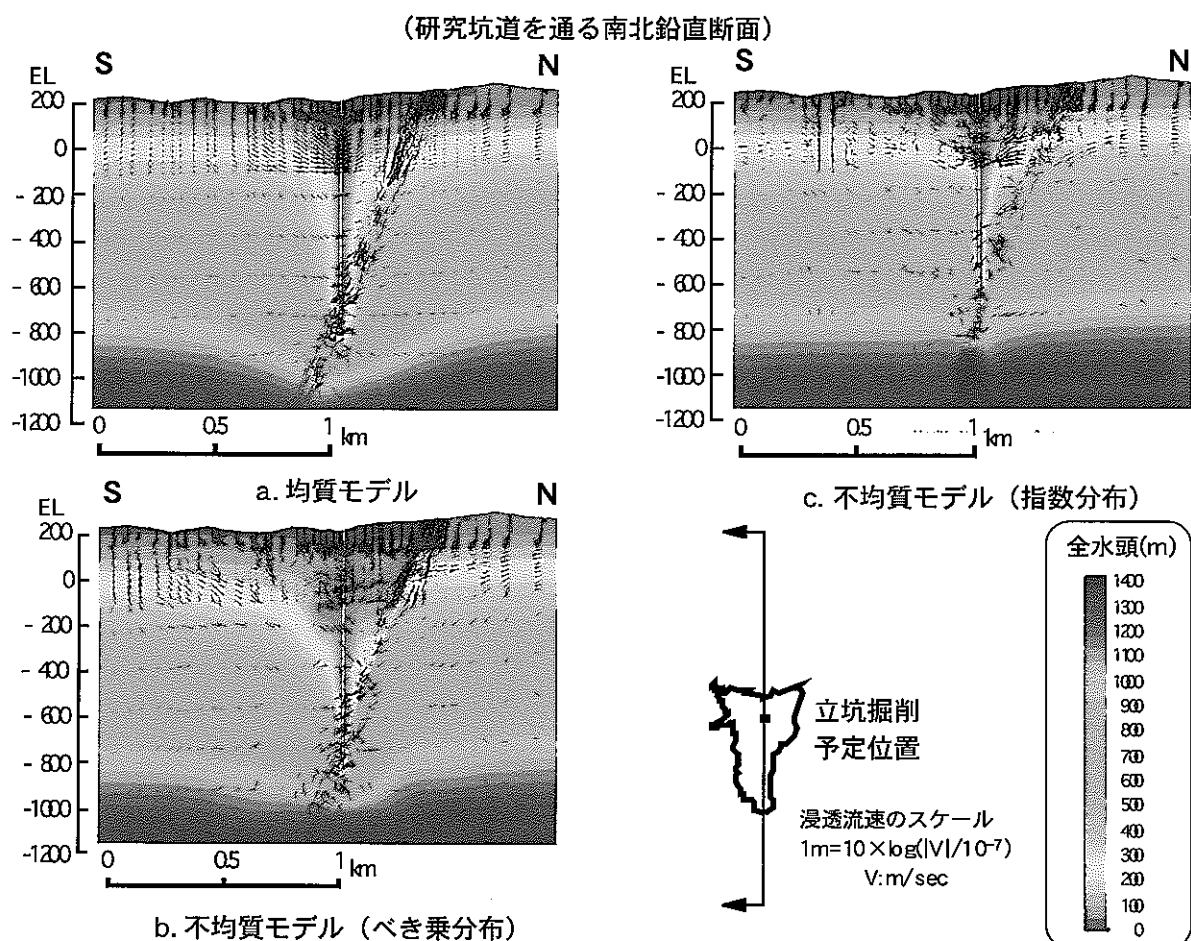


図4 地下水流動解析で得られた水頭分布
-非定常解析結果の一例：研究坑道が断層貫通後の水頭分布-

さらに、対象となる場に対する現状の理解度を評価するため、現在までに得られた情報をもとに複数の水理地質構造モデルを作成して地下水流動解析を行った。その結果、断層のモデル化の違い（透水性や透水異方性など）が、流動経路などの解析結果に大きな影響を与えることが明らかとなった（図5）（澤田ほか，2001 など）。

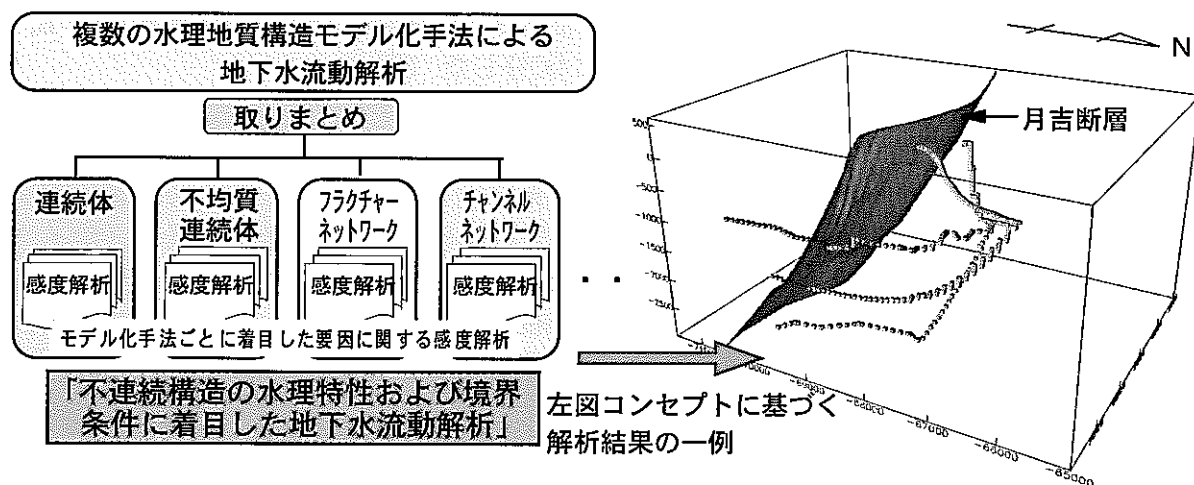


図5 複数のモデル化による異なる流動経路の例

4) 地下水の地球化学に関する調査・研究

MIU-4 号孔における地下水の採水・化学分析の結果によれば、正馬様用地における土岐花崗岩中の地下水は、弱アルカリ性 ($\text{pH} \approx 9 \sim 10$) の $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型であり、これまでの土岐花崗岩中の地下水に関する研究結果と整合している。土岐花崗岩中の地下水の地球化学特性については、広域地下水流動研究によって、浅部（深度約 300 m 以浅）では中性 ($\text{pH} \approx 7$) かつ酸化性 ($\text{Eh} > 0 \text{ mV}$) の $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型であるのに対し、深部にいくにしたがい、弱アルカリ性 ($\text{pH} \approx 9 \sim 10$) かつ還元性 ($\text{Eh} < -300 \text{ mV}$) の $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型の地下水へと変化することが明らかになっている（サイクル機構, 2000）。

地下水の採水にあたっては、試料への掘削水の混入の度合いを定量的に評価するため、あらかじめ掘削水に蛍光染料などを添加しておいて、採水時にその濃度および地下水の物理化学パラメータ（酸化還元電位、溶存酸素濃度、pH、電気伝導度、水温など）を測定し、これらを指標として採取した地下水試料の品質を評価している（JNC, 1999）。この方法により、当地域のように溶存成分濃度の低い地下水についても、その地球化学特性を把握することができ、地下水の流動との関係などを検討することが可能となっている（Metcalf et al., 2001）。

5) 岩盤力学に関する調査・研究

本計画においては、これまでボーリング孔を利用した応力測定や採取した岩芯を用いた力学試験などを実施してきた。その結果によれば、土岐花崗岩の物性値は、一軸圧縮強度が 100～200 MPa、ヤング率が 30～60 GPa であり、日本の花崗岩の平均的な値とほぼ同じである。また、対象領域内では、割れ目の分布に対応して、深度 300 m 付近と深度 700 m 付近で物性値の変化が認められる。初期応力に関しては、鉛直方向の応力は土被り圧とほぼ等しく、深さ方向の勾配は 0.026～0.027 MPa/m 程度である。水平面内の最小主応力は概ね鉛直応力と等しく、水平面内の最大主応力は最小主応力の 1.5～2 倍程度である。水平面内の最小主応力および最大主応力の値も、深度 300 m 付近と 700 m 付近を境に急激に変化している。また、水平面内の最大主応力の方向は、地表付近では南北方向を示すのに対して、深度 300 m 以深では北西－南東方向を示す。後者は、三角測量から推定される東濃地域における最大圧縮ひずみの方向と概ね一致する（松井, 1999）。

上記に基づいて構築した岩盤力学モデルでは、土岐花崗岩体を力学物性（物理特性、変形特性、強度特性）および応力状態の異なる 3 つの領域（地表～深度約 300 m、深度約 300～700 m、深度約 700～1,000 m）に区分した（図 6）。

6) 深地層における工学技術に関する研究

研究坑道の掘削を伴う研究段階ならびに研究坑道を利用した研究段階において実施すべき調査・研究項目について、国内外の先行事例などを参考に整理し（サイクル機構, 1999a）、それに基づいて研究坑道の展開手順や仕様の決定方法などを検討してきた。また、これまでの調査で得られた深部地質環境に関する情報を加味して、研究坑道のレイアウトや施工計画を検討した（見掛ほか, 2000）。

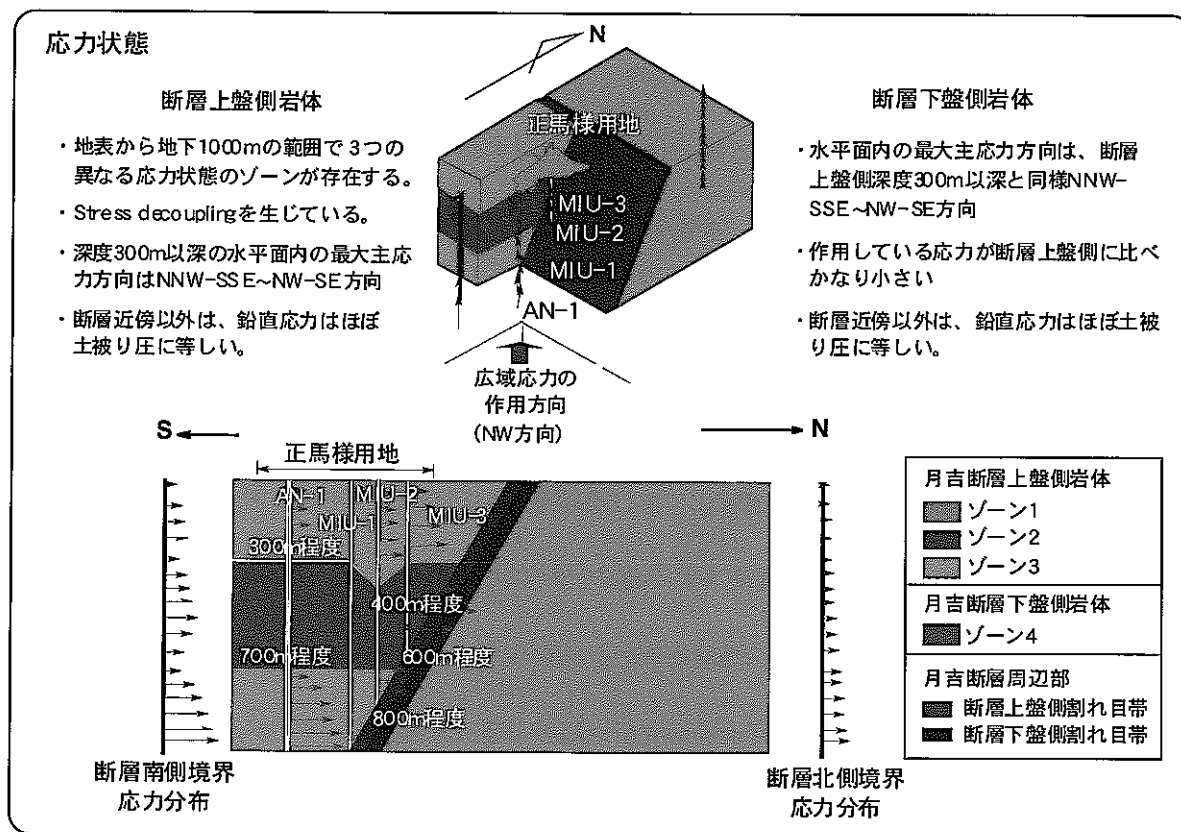


図6 構築した岩盤力学モデル

5. おわりに

東濃地科学センターにおいては、今後とも国内外の研究機関との連携をはかりながら、また、大学等の専門家の協力を得ながら、原子力長期計画等で求められている深地層の科学的研究（地層科学研究）を着実に、かつ効率的に進めていく。研究の成果については、地層処分技術の信頼性をさらに向上するための基盤的な知見・情報、技術として整備し、処分事業や安全規制への具体的な反映を念頭において時宜良く取りまとめていく。また、透明性を確保する観点からも、研究計画の策定段階から積極的に情報を公開していく。さらに、超深地層研究所等の研究施設についても広く公開し、地下深部についての学術的な研究の場、学習の場、国民の理解を深める場としても寄与していく。

なお、東濃地科学センターでは、これまで正馬様用地において超深地層研究所計画を進めてきたが、今般、瑞浪市から市有地に超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置することについてのご提案をいただき、平成14年1月17日に市有地の賃貸借契約を締結させていただいたところである。

参考文献

- 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)。
- 原子力委員会(2000a)：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価。
- 原子力委員会(2000b)：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)。
- Japan Nuclear Cycle Development Institute(1999)：Working Programme for MIU-4 Borehole Investigations. JNC Technical Report, JNC TN7410 99-007.
- 核燃料サイクル開発機構(1999a)：超深地層研究所地下施設の設計研究(平成10年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-001.
- 核燃料サイクル開発機構(1999b)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 99-020～024.
- 核燃料サイクル開発機構(1999c)：東濃鉱山における調査試験研究基本計画書，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 99-006.
- 核燃料サイクル開発機構(2000)：広域地下水流動研究の現状—平成4年度～11年度—，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2000-014.
- 核燃料サイクル開発機構(2001a)：超深地層研究所計画の現状—平成8年度～11年度—，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-001.
- 核燃料サイクル開発機構(2001b)：超深地層研究所地層科学研究基本計画，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-009.
- 核燃料サイクル開発機構(2001c)：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書(2001年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-010.
- 核燃料サイクル開発機構(2001d)：広域地下水流動研究年度計画書(平成13年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-012.
- 核燃料サイクル開発機構(2001e)：地質環境の長期安定性に関する研究年度計画書(平成13年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-014.
- 松井裕哉(1999)：AN-1号孔およびMIU-1号孔における力学的特性調査結果，サイクル機構技術資料，JNC TN7420 99-004.
- 見掛信一郎・杉原構造・永崎靖志(2000)：地下1000mに研究坑道を掘る—東濃地科学センター超深地層研究所計画—，トンネルと地下，第31巻，pp.1163-1171.
- McCrack, M. K. et al. (2001)：Mizunami Underground Research Laboratory in Japan Pre-Excavation Site Characterization and Influence on Design Concepts, ICEM Proc. (in press).
- Metcalfe, R. et al. (2001)：Groundwater Geochemistry in the Toki Granite—New Approaches for Understanding a Groundwater Flow System Using Groundwater Geochemistry (a case study of the Toki granite)—, abstract of The 108th Annual Meeting of the Geological Society of Japan, p174.
- 中野勝志・大澤英昭(2001)：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階の現状，サイクル機構技報，No.12 2001.9, pp.91-106.
- 三枝博光・前田勝彦・稲葉 薫(2001)：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価(その6)—不連続構造の水理特性及び水理学的境界条件に着目した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析—，地盤工学会亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集，pp.299-308.
- 澤田 淳・三枝博光・竹内真司・中野勝志・井尻裕二(2001)：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価(その1)—複数の概念モデル化手法による不確実性の検討—，地盤工学会亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集，pp.249-258.
- 柳澤孝一・今井 久・尾方伸久・大澤英昭・渡辺邦夫(1992)：立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究—東濃ウラン鉱山試験立坑を例として—，応用地質，Vol.33, No.5, pp.32-49.

【サイクル機構の研究開発報告】

幌延深地層研究計画の現状

幌延深地層研究計画の現状

サイクル機構 山崎 眞一

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）は、平成 11 年 11 月、地層処分研究開発の成果を取りまとめ（「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―」、以下、第 2 次取りまとめ）、国に報告した。

その後、平成 12 年に見直された「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（原子力長計）」において、処分の事業と並行して進められるべき今後の地層処分に関する研究開発の方向が示され、特にサイクル機構の役割としては、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、地層処分技術的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の必要性が述べられている。

この深地層研究計画の一つとして、サイクル機構が北海道及び、幌延町に申し入れていた幌延町における深地層研究所（仮称）計画について、平成 12 年 10 月、北海道より受け入れが表明されたことを受け、同年 11 月、研究に関する地元との協定を締結した。この協定に従い、平成 13 年 3 月、4 月に地表から行う調査研究（第 1 段階）計画等を北海道及び、幌延町に説明、具体的な調査研究に着手した。

2. 幌延深地層研究計画の概要

幌延深地層研究計画では、堆積岩を対象に地層処分の技術的な信頼性を実際の深地層での試験研究を通じて確認する。その成果は処分事業の推進や安全基準等の具体化に必要な技術や知見として反映される。また、一般の人々に深地層やそこで行われる研究を実際に見て体験して頂くことにより、深地層や地層処分に関する研究開発について理解を深める場として整備する。

本計画は、以下の 3 段階に分け、全体で 20 年程度行う。なお、各段階は一部重複する。

- ・ 第 1 段階：地表から行う調査研究 (6 年間)
- ・ 第 2 段階：坑道を掘削しながら行う調査研究 (6 年間)
- ・ 第 3 段階：坑道を利用して行う調査研究 (9～11 年間)

2.1 幌延町の地質環境の特徴

研究対象とする新第三紀の堆積岩中の地下水として「塩水系の地下水」と「淡水系の地下水」が存在することが確認されており、地下水には溶存ガスが存在することが確認されている。また、ほぼ南北方向の褶曲構造や断層構造が発達するが、活断層、とう曲、傾動などの第四紀以降の新しい時代の活構造も認められる。

これらの地質環境の特徴に着目した研究としては、以下のような研究が考えられている。

- ・ 断層及びその周辺の構造や断層運動の影響に関する研究
- ・ 地震・活断層、隆起・沈降等の第四紀の地殻変動に関する研究
- ・ 塩水系の地下水の研究や塩水/淡水の境界の性質についての研究
- ・ 地下水/ガスの地層中での動きに関する研究

2.2 研究所設置地区の選定の進め方

文献などの既存資料に基づき、対象となる地層が 500m 程度の深さに十分な厚さをもって分布すると推定される区域を抽出し（図 1）、その区域を対象に空中物理探査（磁気、電磁、自然放射能探査）、地上物理探査（電磁探査）、地質調査、試錐調査（2 孔）等の地表からの調査を行い、これらの調査により得られた地層や断層、地層の透水性・水質、溶存ガス量、地層の力学的強度に関するデータの確認を行うとともに、文献データや環境調査の結果の他、社会的条件も合わせて総合的に検討し、平成 14 年度のできるだけ早期に研究所設置地区を選定することとしている。

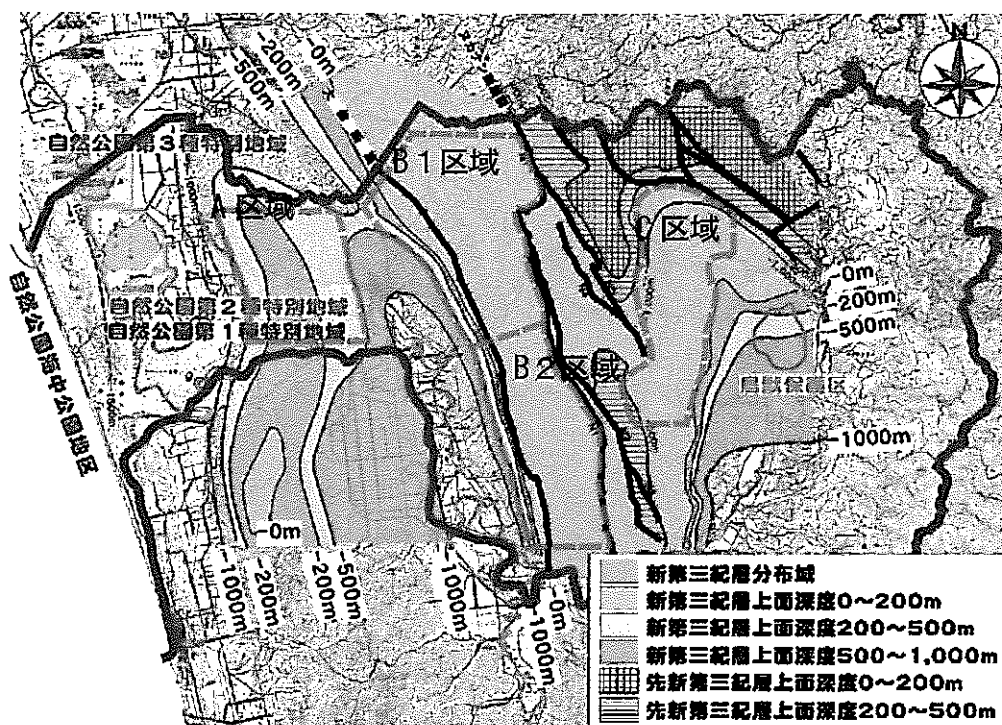


図 1 調査対象区域の選定

2.3 研究開発内容

幌延深地層研究計画では、地層科学研究と地層処分研究開発を実施する。地層科学研究としては、地質環境調査技術開発、地質環境モニタリング技術開発、地質環境の長期安定性に関する研究、深地層における工学的技術の基礎の開発の 4 課題を、地層処分研究開発としては、人工バリア等の工学技術の検証、地層処分場の詳細設計手法の開発、安全評価手法の信頼性向上の 3 課題を設定している。

(1) 地層科学研究

1) 地質環境調査技術開発

地表からの調査や坑道からの調査により信頼性の高いデータを取得し、地質環境をモデル化し、これを逐次更新することにより、地表から地下深部までの地質環境が調査・把握できることを具体的に示す。

2) 地質環境モニタリング技術の開発

試錐孔等を用いたモニタリングと遠隔モニタリング技術を開発し、第 1 段階よりモ

ニタリングを開始し、第2段階以降の地下施設掘削の影響や地下での活動の影響、その回復過程をモニタリングすることにより、その適用性の検証を行う。

3) 地質環境の長期安定性に関する研究

地震・断層活動、隆起・沈降運動、海水準・気候変動、火山活動等の活動履歴や活動様式、その影響範囲等について事例研究を行う。

4) 深地層における工学的技術の基礎の開発

堆積岩中の地下深部に大規模な施設を設計・施工する技術や地下施設の建設が地質環境に与える影響を明らかにするための試験研究、坑道掘削による岩盤領域への影響を修復する技術の検証、施設の長期的な安全確保、坑内の環境維持のための技術開発を行う。

(2) 地層処分研究開発

主として第2段階以降、地下施設等で行う研究開発については、研究対象が堆積軟岩であること、地下水がガスの溶存した塩水系地下水であることが推定されるという地質環境の特徴に着目して、その計画の具体化を進めている。

1) 人工バリア等の工学技術の検証

人工バリアの搬送定置技術、坑道閉鎖技術等の処分場に関する工学技術を実際の地質環境に適用し、その適用性を確認するとともに処分場の建設操業閉鎖における品質管理技術の開発を行う。

2) 地層処分場の詳細設計手法の開発

支保工として予想されるセメント系材料の地質環境及び人工バリアに与える影響を確認し、処分場の施設設計や建設工程に反映する。また、熱—水—応力—化学連成現象等の人工バリアとその近傍の長期挙動に関する試験を原位置において実施する。

3) 安全評価手法の信頼性向上

第1段階では、地表からの調査により取得されるデータを用いた安全評価モデル、およびシナリオ開発手法の適用、また不確実性の影響評価等を実施することにより、安全評価上重要であり、調査により取得されるべきデータ項目と、精度等について検討を行う。

(3) 環境調査・施設計画

地下施設は、地下500m以深を目途にスパイラル/斜坑、あるいは立坑でアクセスし、試験坑道を展開する。地上施設としては研究管理棟、コア倉庫棟等の他、展示館や国際交流会館等を建設する。また、研究活動の環境への影響を未然に防止する観点から自主的に環境調査として、希少動植物の生息の確認や地下水の利用状況等の調査を行う。

3. 調査研究の進捗状況

3.1 地層科学研究

(1) 地質環境調査研究開発

地表からの調査により地質環境データを取得することを目的に空中物理探査、地質調査、試錐調査を実施している。なお、当初実施を予定していた北海道大学天塩研究林については、研究林の理解が得られないことから調査を実施していない。

1) 空中物理探査（空中電磁探査、空中磁気探査、空中放射能探査）

平成13年6月、北大研究林（約60km²）を除く、民/町有地・国有林上空の約150km²において実施した。各探査結果とも、既存の地質分布と整合的な結果が得られた。図2には、電磁探査結果の一例を示す。勇知層と更別層の境界付近に高比抵抗帯が認められる。

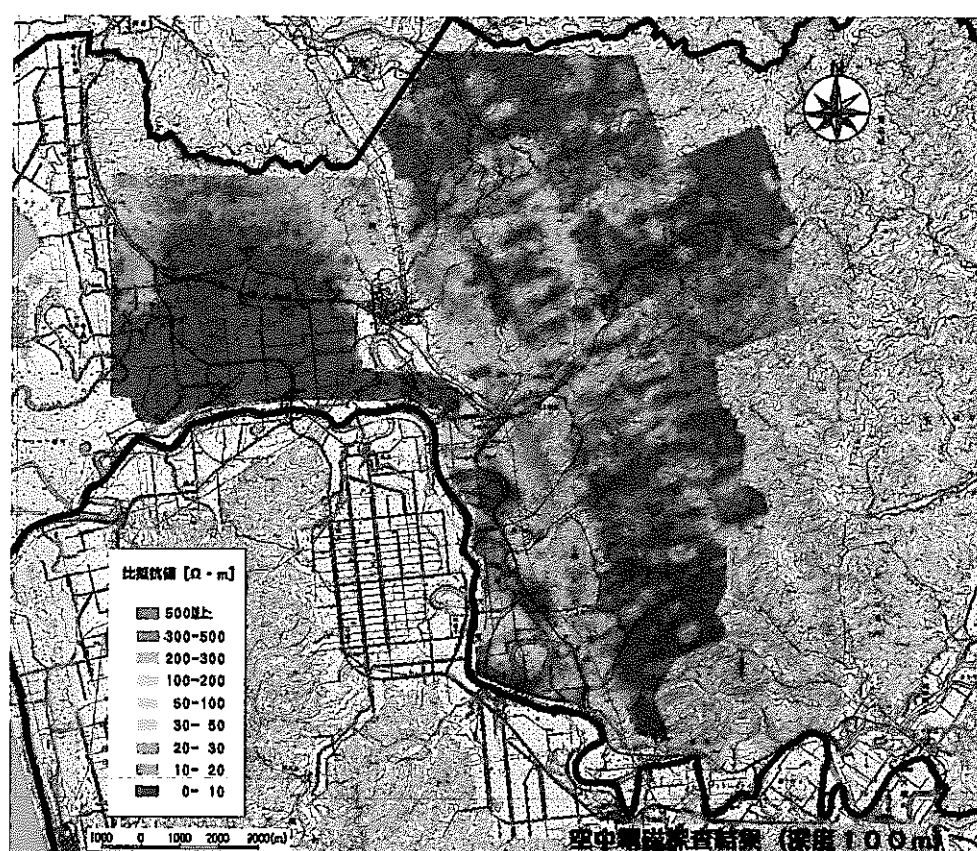


図2 空中物理探査結果（電磁探査：見掛比抵抗分布；100m 深度）

2) 地上物理探査（電磁探査：AMT・MT法：調査量は73計測点設定）

平成13年7月～8月および10月、北大研究林を除く国有林・民/町有地における合計60点で実施した。解析結果より、既存地質情報から推定される砂礫岩を主体とする更別層、砂岩を主体とする勇知層分布とよく一致する高比抵抗値の分布を得ている（図3）。

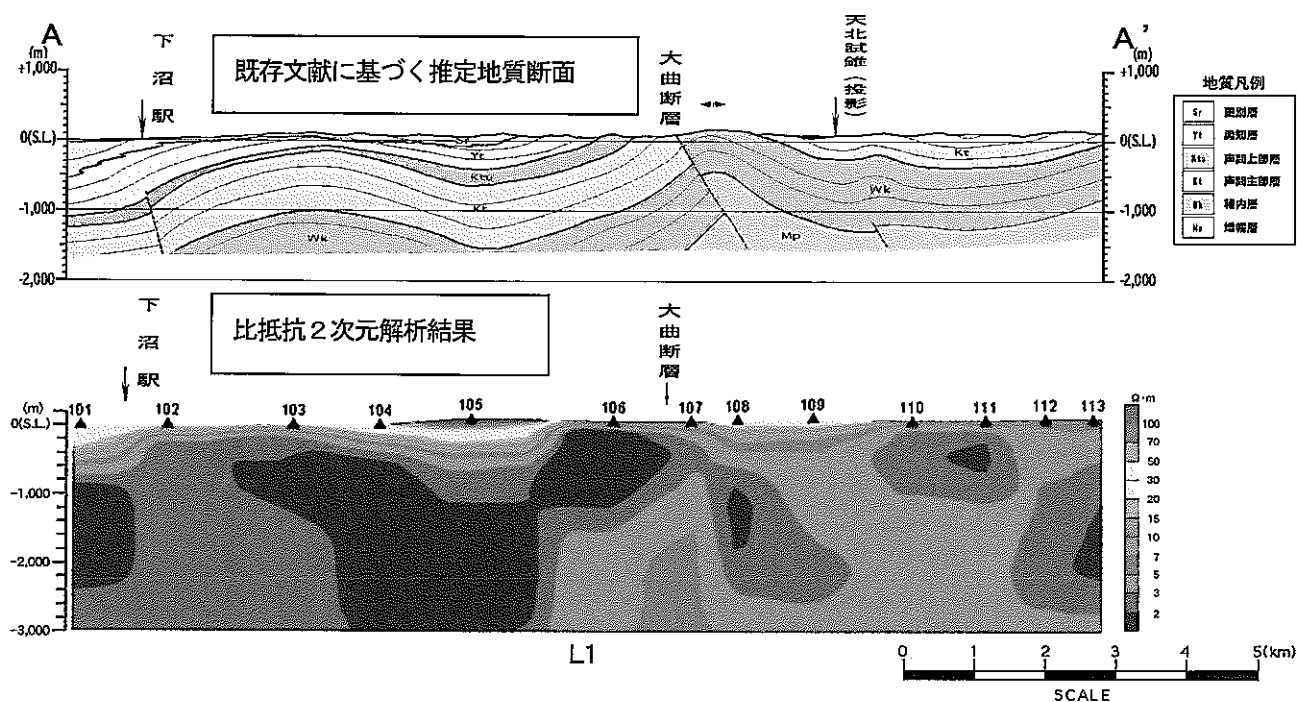


図3 地上物理探査（見掛比抵抗断面図：幌延町北部地区）

3) 地質調査（地質踏査，鉱物試験，花粉分析，顕微鏡観察，リニアメント解析）

平成13年7月，8月および10月，北大研究林を除く露頭調査34点，12ルート調査を実施した。調査の結果，既存の文献情報を支持する調査結果が得られた一方，大曲断層の東側の稚内層分布域とされる地区で声間層と推定される地層の存在，大曲断層東側で西傾斜とされている地層が東傾斜であったこと等，なお今後の検討を待たなければならないが，新たな知見が得られている。また，声間層上部相としている露頭サンプルの微化石（珪藻化石）分析の結果，従来の声間層よりも新しい地層であると推定された。

4) 試錐調査

空中物理探査，地上物理探査，地質調査の結果は，幌延町内における研究所設置区域（A，B1，B2，C区域）の選定に際して推定した地質の分布や地質構造と整合的な結果であった。この地表からの調査結果や文献データ，土地利用状況等を参考に，4区域の中，B1区域，B2区域を試錐調査の対象区域とした。それぞれの区域内における具体的な試錐調査実施場所は，調査実施の容易性（用地確保，アクセス，許認可）を配慮して選定した（図4）。

（調査内容）

- ・ 試錐孔掘削700m×2孔
- ・ 岩芯採取・観察（岩相，堆積構造）
- ・ 物理検層，水理試験（透水・揚水），地下水採水（揚水試験時）・分析，孔内水压破碎試験
- ・ 掘削時のガス成分等連続モニタリング
- ・ 岩芯室内試験
基本物性，力学特性（一軸・三軸圧縮等），熱特性/帯磁率/比抵抗，室内

- 透水試験，岩芯からの地下水・ガスの抽出/分析，微小空隙構造同定，鉱物試験，微化石分析，同位体比測定
- ・岩芯からの地下水抽出・分析

(調査の現状)

- ・B1区域 (HDB-1孔)，10月31日より掘削開始。1月18日現在，深度344.8mを掘削中
- ・B2区域 (HDB-2孔)，11月21日から掘削開始。1月18日現在，深度380.5mを掘削中
- ・HDB-1，HDB-2孔は，声間層および稚内層の泥岩を掘削中であり，掘削に並行して，鉱物分析，岩芯からの地下水・ガスの抽出/分析，力学試験用供試体のサンプリング・試験，物理検層を実施中

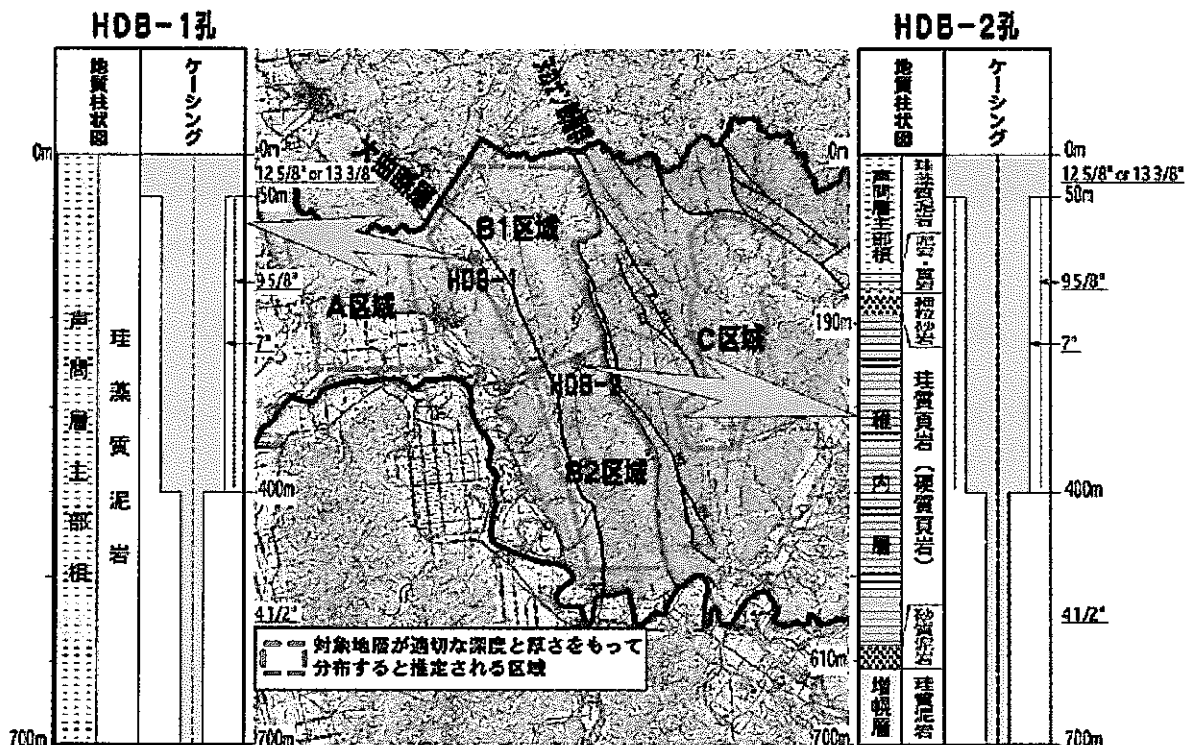


図4 推定地質層序とケーシングプログラム

5) 表層水理観測手法・システムの検討

幌延町の代表的な地質・地形・植生（被覆）条件を考慮し，表層水理観測を行うのに適切な観測流域を抽出した。現在，これらの抽出された流域を対象とした厳冬期の河川流量把握等に向けての現地調査を計画中である。今後，その結果や表層地質条件に基づき，幌延町における表層水理観測システムを検討していく考えである。

6) 地質環境のモデル化と地下施設建設による地質環境変化の予測

地質環境モデルの最も基本的なモデルである地質構造モデルを作成中である。これと並行して，地下水流動解析上の検討課題である解析領域の設定，涵養量の設定，断層のモデル化，モデル及び解析結果に含まれる不確実性の低減化手法に関する検討を行う。

(2) 地質環境モニタリング技術の開発

堆積軟岩中の試錐孔において、地下深部における水圧・水質等を長期的にモニタリングするシステムについて、国内外の長期モニタリングシステムを対象に機器の材質、耐久性、機能、精度、適用深度等について調査し、幌延で設置する長期モニタリングシステムの仕様の検討を行っている。また、遠隔監視システムについては、地下施設の建設前、建設中、建設後の地質環境の変化を地震波や電磁波を用いて常時観測するシステムを構成するアレイ送信・受信に関する記録計、孔内受信機（地震計）、磁気センサー等の整備を行っている。

(3) 深地層における工学的技術の基礎の開発

来年度の研究所設置地区の選定に備え、地下施設の概略の設計、施工性・研究の実施等を考慮した基本レイアウトの検討、空洞安定性評価、ガス発生量の予測評価、防災対策についての検討を行っている。この他、堆積軟岩の長期挙動に関する試験概念の検討や深地層の体験の場としての施設のあり方についての基本的な考え方の整理を行っている。

(4) 地質環境の長期安定性に関する研究

北海道北部地域の地震活動状況、地殻変動についての既存データの整理・検討を行い、断層の活動性等の天然現象に関する具体的な研究計画の検討を行っている。

3.2 地層処分研究開発

主に第２段階以降に地下施設等で行う試験研究の具体化のための検討を行っている。

(1) 人工バリア等の工学技術の検証

人工バリアの遠隔搬送・定置技術に関して、処分場に類似した環境で同様な技術を用いていると考えられる海外の炭鉱、ウラン鉱山等の施設を対象として調査を行い、得られた各情報を処分技術への応用の観点から分析・評価している。

また、人工バリアの遠隔定置概念に基づく緩衝材の施工技術では、定置初期に緩衝材とオーバーパックに隙間が生ずると考えられる。このような隙間がオーバーパックの腐食に与える影響を評価するために、隙間を模擬した室内試験を実施している。

(2) 地層処分場の詳細設計手法の開発

処分場において、コンクリート材料に起因する高アルカリ性溶液の緩衝材や岩盤への影響を考慮し、低アルカリ性コンクリートの使用が検討されている。現在、低アルカリ性コンクリートの強度試験、実規模模擬トンネルにおける吹き付け試験等により、コンクリートとしての施工性を確認中である。

(3) 安全評価手法の信頼性向上

不確実性の影響評価の結果を、原位置における調査・研究にフィードバックした海外の事例について、その方法、効果等について調査・整理し、幌延への適用性について検討している。

4. 環境調査（動植物調査，水利用調査）

地下施設の建設等が環境に与える影響を未然に防止する観点から，幌延町の希少動植物の存在，水利用状況の概要の把握を目的とした環境調査を実施中である。これまでに，平成13年7月に，国有林，北大研究林を除く範囲について動物（哺乳類，鳥類，両生・爬虫類，魚類，昆虫類，底性動物），植物の生息状況調査，水利用（表流水，地下水（井戸）利用状況等）調査を実施し，平成13年10月には，国有林について動物，水利用調査を実施した。調査の結果，ムクゲネズミ，エゾライチョウ，エゾサンショウウオ，エゾトミヨ等からミズムシ等の底性動物の生息，オオバタチツボスミレなどの植生，多くの地区で井戸水，表流水等を利用していることを確認した。今後，2月に冬期の動物調査を実施することとしている。

参考文献

- 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，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-001，2001年3月。
- 核燃料サイクル開発機構（2001）：深地層研究所（仮称）計画 平成12年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-002，2001年3月。
- 核燃料サイクル開発機構（2001）：幌延深地層研究計画 平成13年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-003，2001年4月。
- 核燃料サイクル開発機構（2001）：幌延深地層研究計画 平成12年度調査研究成果報告，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-008，2001年7月。
- Metcalf, R. (2001) : Some Implications for Site Characterization at Horonobe from Experience at Sellafield, U.K. and ASPÖ, Sweden: Constraining Groundwater Flow Models Using Hydrogeochemistry, 日本原子力学会「2001年 秋の大会」要旨集, p. 総8, 2001年9月。
- 尾方伸久, 若松尚則, 小田川信哉 (2001) : 寒冷地の堆積岩分布域における岩盤浸透量の観測手法, 日本応用地質学会 平成13年度研究発表会, 2001年10月。
- 内田雅大 (2001) : 幌延における安全評価技術開発上の課題, 日本原子力学会「2001年 秋の大会」要旨集, p. 総6, 2001年9月。
- 山崎眞一 (2001) : 放射性廃棄物の地層処分と幌延深地層研究所（仮称）計画, エネルギーレビュー, No. 243, p. 17-21, 2001年4月。
- 山崎眞一 (2001) : 幌延深地層研究計画の概要, 日本原子力学会バックエンド部会主催 第17回夏期セミナー資料集, 2001年8月。
- 山崎眞一 (2001) : 幌延深地層研究計画概要, 日本原子力学会「2001年 秋の大会」要旨集, p. 総5, 2001年9月。
- 油井三和, 栗原雄二, 宮野前俊一 (2001) : 幌延における処分技術開発上の課題, 日本原子力学会「2001年 秋の大会」要旨集, p. 総7, 2001年9月。

【サイクル機構の研究開発報告】

人工バリアの長期挙動評価の信頼性向上と連成モデルの開発

人工バリアの長期挙動評価の信頼性向上と連成モデルの開発

サイクル機構 亀井 玄人

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）では、処分技術に関して、第2次取りまとめ（サイクル機構、1999）までに、人工バリアと処分施設の設計、処分場の建設・操業・閉鎖・管理について、データ・モデルの整備や技術的検討を進めてきた。今後は、第2次取りまとめまでの成果や関係機関との役割分担を踏まえ、人工バリア等の基本特性や長期挙動に関するデータの蓄積とモデルの高度化、工学要素技術の検証など「地層処分技術の信頼性向上」に関する研究開発を進めていく。これらのうち、人工バリアの長期挙動評価は今後の重要な課題であり、これに関する個別現象や連成現象の理解を、実際の地質環境への適用性も検討しつつ進め、ニアフィールド環境の時間的変遷をより現実的に把握することを通じて、地層処分システムの長期挙動評価の信頼性の向上につなげていく。

本報告では、人工バリアの長期挙動評価の信頼性向上のための個別現象に関する研究開発と連成モデルの開発について、これまでの成果の要点を紹介しつつ、今後の計画と最近の成果を報告する。

2. 研究開発の全体像と進め方

地層処分システムの評価にあたっては、そのシステムに生起すると考えられる種々の現象について、将来のふるまいに関するシナリオを描き、次に、シナリオに従ってシステムの長期的な挙動を表現する数学モデルの開発と必要なデータの整備を行っていく、というのが基本的な進め方である（サイクル機構、1999）。このシナリオで想定される現象には、処分後、すぐに発生するものもあるし、数百年後、あるいは数千年後以降に想定されるものもある。仮に、①処分後 100 年程度まで、②1000 年程度まで、および③1000 年以降に区切った場合、各々の時間ステップにおいて、想定される条件と、人工バリアの長期挙動として、評価上とくにその影響を考慮すべき現象は、次のようなものである。

- ① 処分後 100 年程度まで（ガラス固化体と岩盤との間に顕著な温度勾配が存在し、緩衝材が水分に飽和するまでの過渡的な状態）；酸化条件下でのオーバーパック材（金属＝炭素鋼など）の腐食、緩衝材の変形など。
- ② 1000 年程度まで（緩衝材が水分で飽和、膨潤して岩盤との隙間を埋めるとともに、還元状態となる）；還元条件下でのオーバーパック材の腐食、緩衝材の変形、緩衝材の流出、緩衝材の変質（セメントや金属の腐食生成物が関与するベントナイトの溶解・変質）など。
- ③ 1000 年以降（地下水がガラス固化体に接触し、核種の移行が始まる）；ガラス固化体の溶解・変質、緩衝材の変形、緩衝材の変質、ガスの透過（金属腐食にともなって発生するガスの緩衝材中および岩盤中の透過）など。

また、発生する時間ステップが特定できない現象もある。たとえば、外的要因に起因する現象であるが、断層による人工バリアのせん断挙動が挙げられる。

これらの個々の現象はたがいに影響を及ぼしあうものと考えられ、より現実的な

評価のためには、これらのモデルを連成させた解析が必要となる。第2次取りまとめまでに、熱(Thermal)、水(Hydrological)、応力(Mechanical)の変化を連成させたTHMモデルの開発を進めてきたが、より現実的に人工バリアの長期挙動を評価する観点から、化学反応(Chemical)を加えた熱-水-応力-化学連成モデル (THMC) の開発が重要な課題となる (図1)。

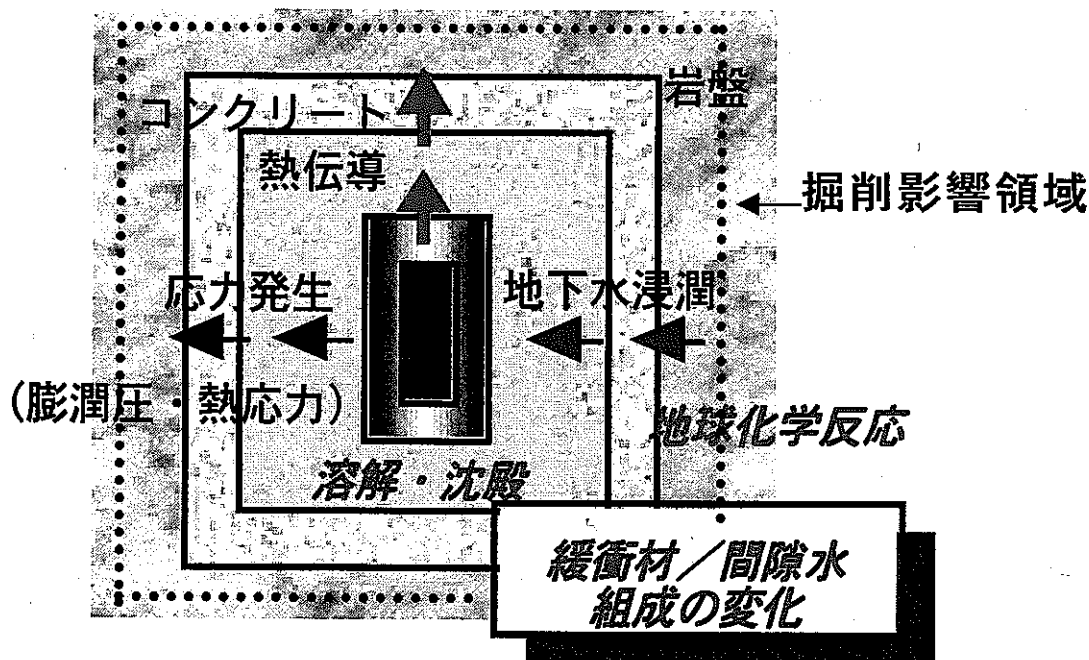


図1 熱—水—応力—化学連成解析の場

これらの個別現象の研究や連成モデルの開発は、地層処分基盤研究施設（エントリー）を中心とした実験室スケールや工学スケールでの室内試験を通じて、基礎データの取得やモデル開発を進めるとともに、幌延の深地層の研究施設を活用し、実際の地質環境への適用も確認しつつ進めていく。地層処分システムの長期挙動を予測するモデルの検証には、室内や地下研究施設での試験ではカバーできないような長期データを得る唯一の方法であるという理由から、ナチュラルアナログ研究を活用していく。また、数値実験技術や可視化技術など、より現実的かつわかりやすく予測評価結果を示す技術の開発を進めていく。

ここで、ナチュラルアナログとは、Chapman et al. (1984)によって定義づけられた概念で、処分後に想定される現象に類似すると考えられる天然現象のことである。しかし、その研究にあたっては、ナチュラルアナログと処分システムとの相違もよく認識しておかなくてはならない。たとえば、対象となる材料そのものや、それが置かれていた環境の相違などである。これらの影響が定量的に把握されてはじめて、ナチュラルアナログ研究は、性能評価にとってきわめて有用な武器となる。言い換えれば、ナチュラルアナログは天然での長期実験と見なせるような事例であるべきであって、対象とするプロセスの変化量とともに、それに関与する温度や水質などの種々のパラメータが、室内試験のそれと定量的に比較できることが望ましい。サイクル機構では、このような方針のもとに、とくに試料の選定には大きな注意を払いつつ、ベントナイトやガラスに関する事例研究を進め、それぞれの長期健全性についての見通しが得られている（例えば、サイクル機構, 1999；亀井, 1999；Kamei

et al., 2000 ; 湯佐, 2000)。今後は、セメントの存在する実際の地質環境などでも適用可能な、人工バリアの長期挙動評価モデルの検証をめざし、データや情報の蓄積を進めていく。

3. 計画と取り組みの現状

ここでは、処分後に想定される現象につき、上述の時間ステップの順に、研究の計画と取り組みの現状を述べる。個別の現象について記述したのち、THMC 研究について述べる。さらにこれに加え、時間ステップが特定できない現象として、人工バリアのせん断挙動についても記す。

(1) 炭素鋼オーバーパックスの腐食挙動

オーバーパックスの最有力候補材は炭素鋼である。その腐食挙動については、これまでに次のような知見が得られている。

- ・低酸素濃度の溶液中で、腐食速度は時間の経過とともに低下し、2年目以降、その値は $5 \mu\text{m y}^{-1}$ 以下となった(本田ほか, 1997 ; 谷口ほか, 1999a)。
- ・pH 9~11 の水溶液を含浸させた圧縮ベントナイト中では、不動態化の兆候を示さなかった(Taniguchi et al., 1998)。
- ・圧縮ベントナイト中では、腐食生成物による腐食速度の加速を認めなかった(谷口ほか, 1999b)。

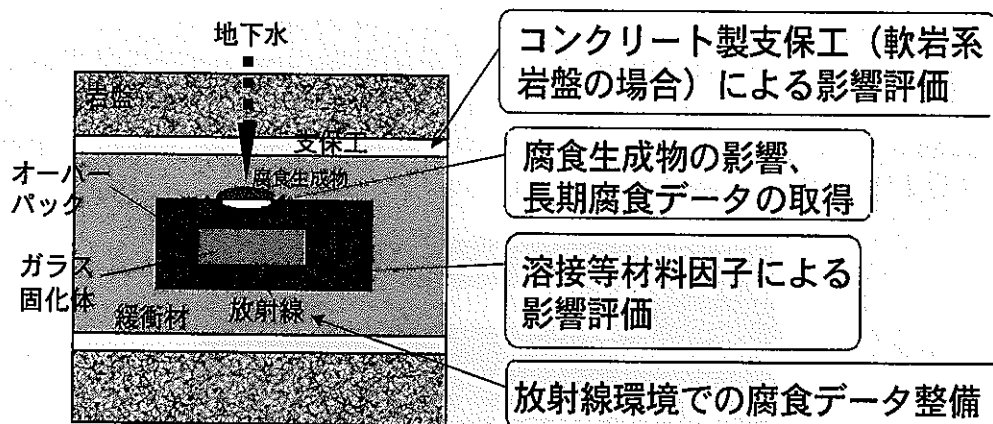


図2 オーバーパックス（炭素鋼）の腐食研究の概要

今後、これらの予測の長期的な信頼性を確認するため、より長期の試験によって腐食メカニズムの検討ならびに腐食データの取得を進める。図2にオーバーパックスの腐食研究の概要を示す。また、腐食形態や腐食寿命に直接関わる因子として、セメントによる影響と材料因子による影響（溶接による影響を含む）を明らかにするための研究を実施する。図3は、地下水、低アルカリセメント接触水および普通ポルトランドセメント接触水を模擬した溶液が緩衝材中に浸潤した場合の前と後の pH の変化と、炭素鋼の腐食挙動（全面腐食または不動態化）との関係を示したものである(谷口ほか, 2002)。低アルカリ性セメントを用いた場合、炭素鋼は全面腐食として評価できるといえる。今後は、普通セメントを用いた場合の条件での炭素鋼の腐食挙動について、詳細な評価を行う必要がある。

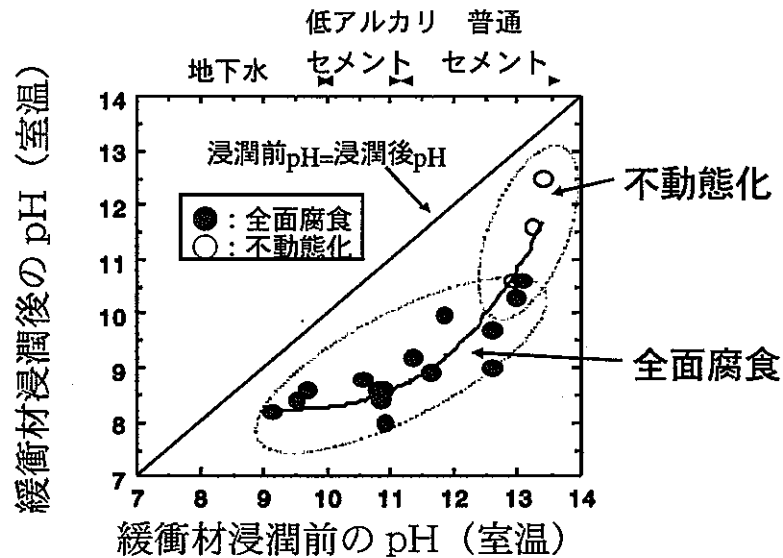


図3 緩衝材中における炭素鋼の腐食形態の pH 依存性

放射線の影響については、第2次取りまとめにおいて、オーバーパックの厚さ設定にあたり、水の放射線分解による腐食への影響を考慮した検討を行い、その影響を無視できるように保守的な値を与えた。今後は、その腐食への影響についての実験や解析により知見を充実させ、オーバーパックの厚さの最適化に反映させる。

オーバーパックのベントナイト中での長期挙動に関するナチュラルアナログとしては、粘土質土壌環境に長期間埋まっていた考古学的鉄製品の腐食調査を行う。X線CT装置の利用により、切断等の許されない考古学遺物の腐食層の厚さの計測が可能となった(図4)。このような調査から、数百年以上のデータ取得が可能であり、既存の室内試験データ(数年以内)や、従来から蓄積してきた数十年の土壌埋設鉄管のデータを合わせて、安全評価のためのモデルの検証に資する。

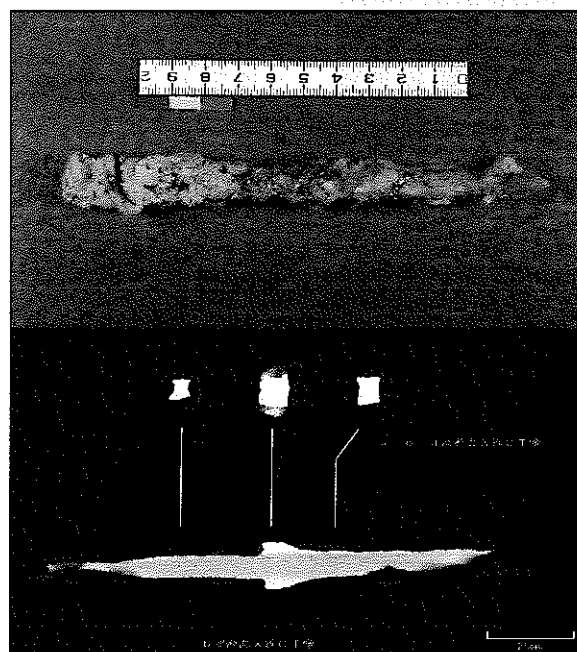


図4 約1200年前の鉄製品(上)とX線CT像(下=白色部が健全部、灰色部が腐食層)

(2) 緩衝材の長期変形挙動

緩衝材の長期変形挙動に関しては、海水性地下水環境条件等も考慮しつつ、長期モデルの適用性を検討する。そのため、緩衝材クリープ試験装置や腐食膨張模擬試験装置などを用いた、長期試験のデータの拡充をはかるとともに、腐食生成物の力学特性を把握する。また、緩衝材の力学挙動に対する岩盤クリープの影響評価モデルの信頼性向上をはかる。

(3) 緩衝材の流出・侵入挙動

緩衝材は、その膨潤特性によって岩盤の亀裂に侵入していくことが考えられる。この現象については、これまでに基本データの取得と解析的検討を進めてきた（サイクル機構, 1999）。今後、海水系地下水等の環境条件を考慮しつつ、ベントナイトの乾燥密度、ケイ砂混合率、亀裂幅などをパラメータとして、亀裂へのベントナイトの侵入現象に関するデータ（粘性係数や侵入域の密度分布等）の取得を行う。ちなみに図5は、模擬亀裂中へ侵入したベントナイトの密度変化をX線CTを用いて測定した結果である。これらの成果をもとに、評価モデルの構築を図る。

ナチュラルアナログ研究としては、このモデルの検証を目的に、国内のベントナイト鉱山を対象として、地下水によるベントナイト層の流出に関する調査を実施中である。ベントナイト層からのモンモリロナイト（ベントナイトの主成分鉱物）等の粒子（コロイド）の剥離、流出挙動に関して、水質との関係に関する情報の収集を進めている。

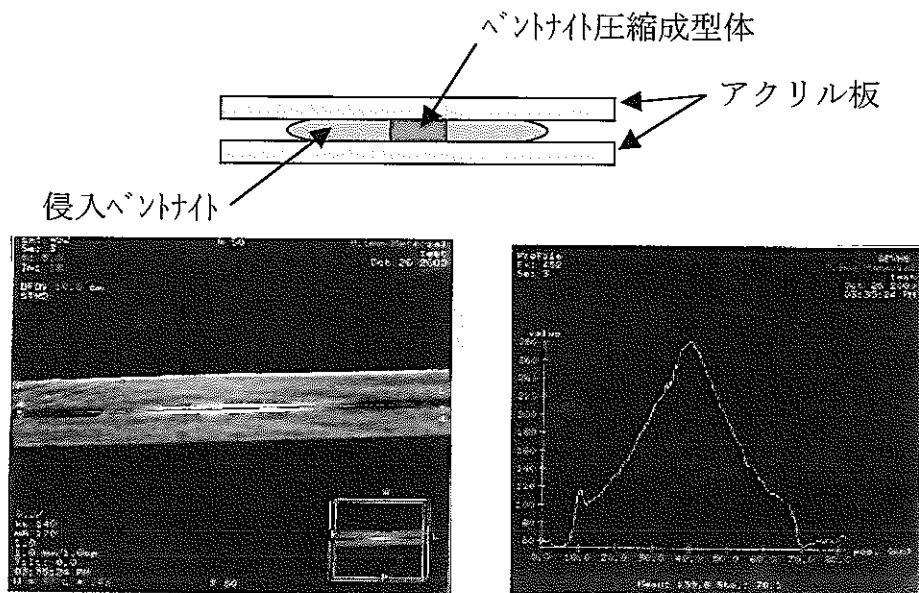


図5 断面のX線CT画像（左）とCT値（密度＝右）

(4) 緩衝材の変質

緩衝材の変質に関しては、セメントの影響と、オーバーパックの腐食生成物による影響について長期挙動の理解を深める必要がある。とくにセメントの影響評価においては、処分システムに用いるコンクリート材料の選定（普通ポルトランドセメントか、いわゆる低アルカリセメントかの選択）に直接かかわる課題であり、重点的な対応が必要と考える。

まず、セメント影響評価では、高 pH (10~13) の条件下でのモンモリロナイトの溶解変質に関する速度論的モデルを室内試験によって構築する。

一方、このようなプロセスのナチュラルアナログ研究としては、コンクリートまたは高アルカリ性溶液と長期間接触していたベントナイトや、モンモリロナイトを含む岩石を対象に、スイス、Nagra 等との国際共同研究として、ヨルダンにおける高アルカリ性溶液と岩盤との接触事例の研究を行う。

緩衝材の性能に対するオーバーパックの腐食生成物の影響に関しては、炭素鋼の腐食によって発生した Fe(II) イオンとベントナイトとの相互作用について、室内での収・脱着試験とともに、ベントナイト鉱山坑内で観察された約 2000 日のナチュラルアナログ事例の研究から、モンモリロナイトの層間において Fe^{2+} と Na^+ とが可逆的なイオン交換を行うことが明かとなっている (Kamei et al, 1999)。今後は、鉄イオンを収着したベントナイト試料を出発物質とした水熱試験等から、ベントナイトと鉄腐食生成物との相互作用のプロセスを同定する。

(5) ガラス固化体の溶解・変質

高アルカリ溶液条件での溶解や、その後の変質挙動についての知見を蓄積するため、バッチ式試験を基本とする実験的研究を行う。透過型電子顕微鏡やマイクロイオンビーム分光分析装置等を用いて、変質生成物の同定と元素分析を行い、変質プロセスの解明と、変質にともなう核種の挙動について知見を得る。ナチュラルアナログ研究としては、地層中に埋没していた天然ガラス（火山ガラス＝図 6）を調査対象に、元素の長期浸出挙動についての情報を蓄積する。とくに、高塩分濃度地下水やアルカリ性地下水環境での事例についてデータの蓄積を図る。ナチュラルアナログ研究の対象は天然ガラスであるので、それと廃棄物ガラスとの挙動の比較が重要である。そのため、長期変質試験によって、両者における表面変質層形成と核種の挙動についてデータを蓄積し、天然ガラスの性能評価への適用性を確認する。

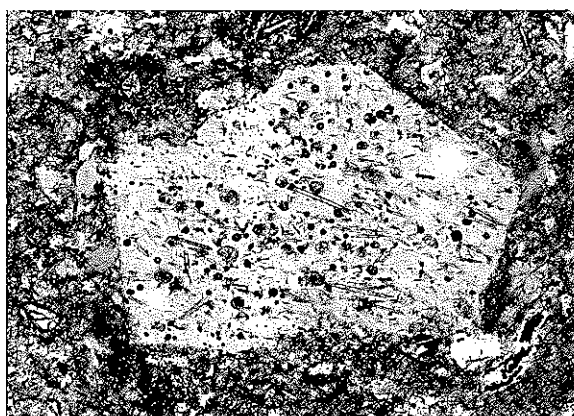


図 6 海水性地下水中で泥質岩中に約 100 万年埋没していた天然ガラス

(6) 緩衝材中のガス移行挙動

還元環境における炭素鋼の腐食にともなって水素が発生する可能性があるため、その緩衝材中の移行挙動が評価されつつある(例えば、棚井ほか, 1999)。しかし、評価モデルが開発途上にあり、その信頼性の確認が必要となっている。このため、可視化試験、国際共同研究(JNCとスウェーデンSKB、スイスNagra、フィンランドPOSIVA、フランスANDRAおよびスペインENRESAとの協力による)や、深地層の研究施設での原位置試験等を通じ、ガス移行挙動メカニズムを解明して、モデルの信頼性向上をはかる。一般に、地層処分研究での種々の試験では、試験容器内の現象を直接的に観察できないことが多い。しかし、可視化ができ、さらにその観察結果をモデル開発に反映できれば、そのモデルの信頼性は大いに向上する。本研究では、このための手法としてX線CTを用い、緩衝材中へのガス・水の浸透現象などを定量的に評価しようと考え、装置の導入を進めている。

(7) 熱-水-応力-化学反応連成 (THMC) 解析

第2次取りまとめにおいては、人工バリアの埋設後の再冠水挙動について、熱移動、水分移動、力学挙動の連成問題として扱うためのモデルを、緩衝材実規模試験、釜石原位置試験、国際共同研究(DECOVALEX*およびPRP**)などを通じて開発してきた。

今後は、THMC解析コードのプロトタイプの開発および高度化を目標に、以下の項目を実施する。すなわち、既存のTHM連成解析コードTHAMESを母体として、これに物質移行モデル、地球化学モデルを追加し、THMC解析コードのプロトタイプを開発する。さらに、開発・運用段階において個別現象の研究成果などを柔軟に反映し、概念モデル・数学モデルの変更を含めて、高度化したTHMC解析コードの構築をめざす(図7)。また、解析コードの信頼性の確認のため、THM試験設備の改良および同設備を用いた試験を実施する。これらの一環として、①オーバーパックの腐食環境の変遷(例えば、塩の蓄積)や、②核種移行環境の変遷(例えば、緩衝材中の間隙水化学や鉱物組成)の解析モデルの構築をめざす。このほか、上記の国際共同研究を今後も継続するとともに、幌延の深地層の研究施設での原位置試験等を通じて、モデルの検証を行う。

本システムを構築することにより、様々な地質環境条件に対して人工バリアを中心とした長期的なふるまいを数値実験により予測することが可能になると考える。

*DECOVALEX=International co-operative project for the DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation; 日本、スウェーデン、フィンランド、フランス、カナダ、スペイン、イギリス、アメリカの8カ国から11機関が参加

**PRP=Prototype Repository Project; 日本、スウェーデン、フィンランド、スペイン、ドイツ、イギリスの6カ国から13機関が参加

熱-水-応力-化学連成の整理

(個別現象間の相関マトリクス)

熱 エネルギー保存則 フーリエ則	<熱→水> ・温度勾配による 水移動	<熱→応力> ・熱応力の発生	<熱→化学> ・化学定数の変化
<熱→水> ・熱輸送 ・潜熱の発生	水 連続の式 ダルシー則	<水→応力> ・有効応力の変化 ・膨潤圧の発生	<水→化学> ・物質移行 ・液固比の変化
<熱→応力> ・内部エネルギー の変化	<水→応力> ・水理定数、間隙率 の変化	応力 釣り合いの式 フックの法則	<化学→応力> ・化学定数の変化
<熱→化学> ・熱定数の変化 ・化学反応による 発熱・吸熱	<水→化学> ・水理定数、間隙率 の変化	<応力→化学> ・力学定数の変化 ・膨潤圧の発生	化学 熱力学 反応速度則

モデル構築

現象理解

連成現象のモデル化

(間隙率に着目した連成モデルの一例)

検証試験

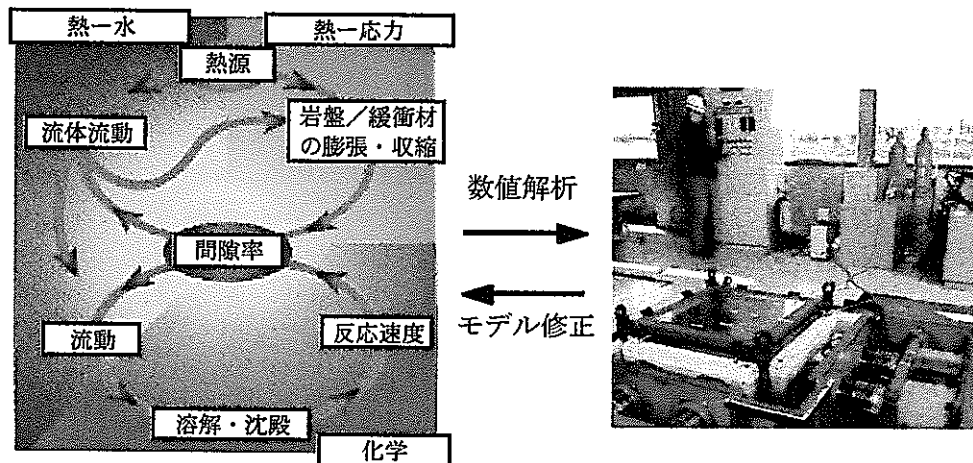


図7 ニアフィールドを対象とした熱-水-応力-化学連成挙動研究の取り組み

(8) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究

わが国の地層処分概念では、断層活動など、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある天然現象については、サイト選定によってその影響を避けることを基本としている。第2次取りまとめでは、このような天然現象の発生をあえて想定し、それらが処分システムに与える影響を、簡略的かつ悲観的なシナリオとモデルによって評価した。このような極端な条件を想定した試験を行い、人工バリアの性能に対する天然現象の影響を明らかにすることは、人工バリアの限界状態を把握する観点から重要であると考えられる。本研究では、オーバーパックの健全時と腐食時の、それぞれにおけるオーバーパックの状態を模擬したうえで、断層が人工バリアを横断するように発生することを想定して、試験（断層模擬試験）を行い、せん断

解析のシミュレーションに必要な物性データを取得する。さらに、この試験設備を用いた再現試験等を通じて、せん断変形に対する人工バリアの性能を明らかにするとともに、評価方法を確立する（図8）。これらの研究は、地質環境の長期的安定性に関する成果等の踏まえつつ進め、成果については安全評価における天然現象影響評価モデルの構築に反映する。

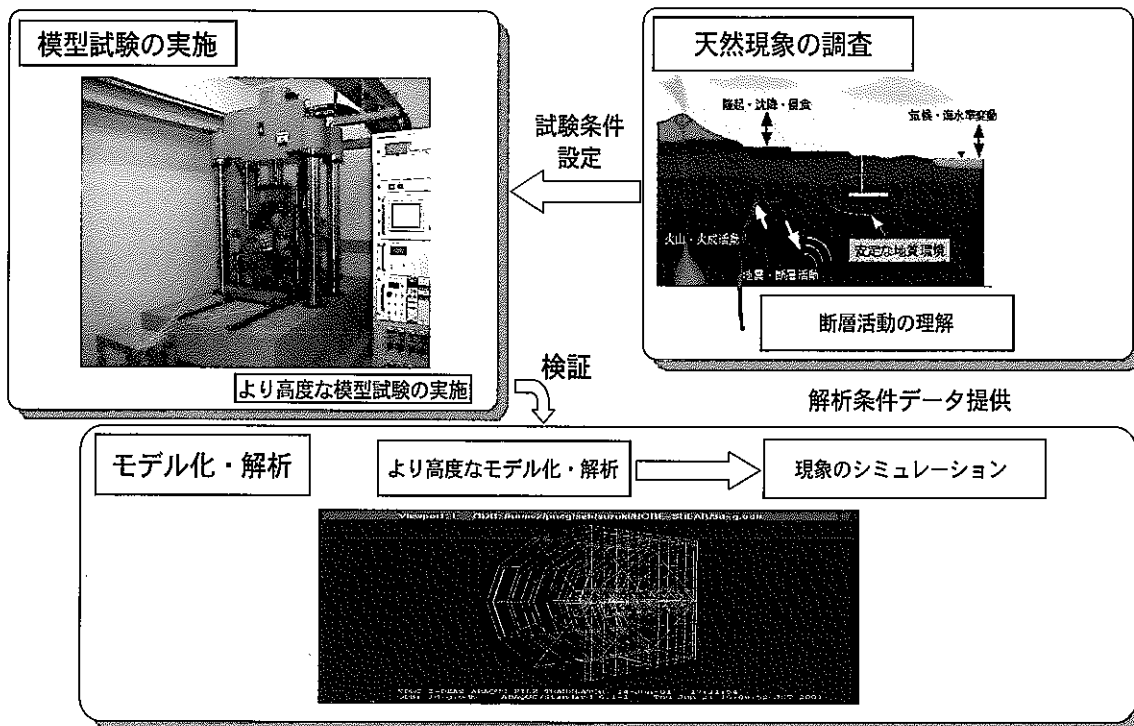


図8 人工バリアせん断応答挙動に関する研究の展開

4. おわりに

第2次取りまとめ以降のサイクル機構の地層処分開発の課題のひとつは、地層処分システムの長期挙動理解であり、その主眼は、メカニズム解明と予測モデルの信頼性向上である。その基本的な進め方は、東海事業所のエントリー等で行う室内試験によるデータ取得と数学モデルの構築であり、そのモデルによる予測結果やモデルそのものを、ナチュラアナログ研究や、地下研究施設での試験によって検証していくというものである。この過程で、各国に共通で、かつ、協力して行った方が効率的と考えられる課題については、国際共同研究契約を結び、十分な討議を行いつつ、データの取得やモデルの構築・検証を進めていく予定である。以上のすべてにおいて、サイクル機構は、各位のご指導とご協力を仰ぎつつ、積極的に研究を展開していく。

参考文献

- Chapman, N. A., McKinley, I. G., and Smellie, J. A. T. (1984): The potential of natural analogues in assessing systems for deep disposal of high-level radioactive waste. NAGRA NTB 85-41, EIR Bericht NR545, and SKB TR 84-16.
- 本田明, 谷口直樹, 石川博久, 藤原和雄(1997): 低溶存酸素濃度下における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討 動燃技報 104, 125-134.
- 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—, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 99-020~024.
- 亀井玄人(1999): 人工バリア材の耐久性を示す天然類似現象 電気評論 9, 34-39.
- Kamei, G., Oda, C., Mitsui, S., Shibata, M. and Shinozaki, T. (1999): Fe(II)-Na ion exchange at interlayers of smectite: adsorption-desorption experiments and a natural analogue, Engineering Geology, 54, 15-20.
- Kamei G., Yusa Y. and Arai T. (2000): A natural analogue of radioactive waste glass in a compacted bentonite, Applied Geochemistry, 15, 141-155.
- 棚井憲治, 佐藤治夫, 村上文啓, 井上雅弘(1999): 地層処分場におけるガスの拡散・移行に関する検討 サイクル機構技術資料 JNC TN8400 99-045.
- Taniguchi, N., Honda, A. and Ishikawa, H. (1998): Experimental investigation of passivation behavior and corrosion rate of carbon steel in compacted bentonite, Mat. res. Soc. Symp. Proc., 506, 495-501.
- 谷口直樹, 本田明, 川崎学, 水流徹(1999a): 圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食形態と腐食速度の評価 サイクル機構技術資料 JNC TN8400 99-003.
- 谷口直樹, 本田明, 川崎学, 森田光男, 森本昌孝, 油井三和(1999b): 炭素鋼オーバーパックにおける腐食の局在化の検討 サイクル機構技術資料 JNC TN8400 99-067.
- 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 サイクル機構技術資料 (準備中)
- 湯佐泰久(2000): 自然から学ぶ高レベル放射性廃棄物処分の智慧-ナチュラルアナログ研究のすすめ- 地学雑誌 109(5) 805-808.

【サイクル機構の研究開発報告】

安全評価手法の高度化に向けた取り組み

安全評価手法の高度化に向けた取り組み

サイクル機構 牧野 仁史

1. はじめに

地層処分の安全評価では、処分概念に基づき構築される地層処分システムの将来挙動について、シナリオ、モデル、データに基づく予測解析により評価した上で、結果を基準等と比較し、評価の信頼性を様々な観点から論ずることによって、長期的安全性の判断がなされる。

核燃料サイクル機構（以下、サイクル機構）では、第2次取りまとめ（核燃料サイクル機構、1999）までの安全評価において、幅広い地質環境を対象として、簡略・保守的な考え方にに基づき評価を行ってきたのに対し、今後は、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」および「地層処分システムの長期挙動の理解」を目標とし、「安全評価手法の高度化」に向けた取り組みを行っていく。

本報告では、「安全評価手法の高度化」として取り組む研究開発課題と高度化の視点を整理した上で、現状の成果や今後の研究計画について報告する。

2. 研究開発課題と高度化の視点

「安全評価手法の高度化」に向けた今後の具体的な取り組みとしては、これまでの成果や経験を踏まえ、さらに実際の地質環境の情報等の新たな知見を考慮しつつ、個々のモデルやデータの詳細化や信頼性の向上を図るとともに、安全評価で用いる手法について、基盤技術の向上と整備ならびに適用性の確認を進めていくことが重要となる。この点を踏まえ、また、第2次取りまとめの国による評価報告書（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会、2000）に示された課題等に基づき、今後サイクル機構が取り組む研究開発課題を以下のように設定した。

- ・ 核種移行データベースの整備
安全評価の基盤情報としての熱力学データや収着・拡散データ等の拡充，それらデータの信頼性の向上およびデータ取得方法の標準化などを図る。
- ・ 安全評価モデルの高度化
安全評価において考慮すべきプロセスについて，安全評価の基盤としての現象理解を深めるとともにモデルの詳細化や信頼性の確認を図る。
- ・ 安全評価手法の整備
安全評価の考え方や安全指標などの基本事項に関する技術・情報，シナリオ開発技術，不確実性評価技術，および総合的な安全評価を行う方法などについての基盤技術の向上と整備を図る。
- ・ 安全評価手法の適用性確認
実際の地質環境の調査・評価から得られる情報を参考として，安全評価モデルおよび安全評価手法の適用を図るとともに，研究開発の留意点等を明らかにしていく。

ここで、これら課題についての研究開発において「安全評価手法の高度化」を論じるために、高度化についての具体的な視点を以下のように整理した。これら視点は、第2次取りまとめの国による評価報告書に示された課題等や国際的な議論（OECD/NEA、1999）においてもその重要性が指摘されているものである。

- ・現象理解と定量的モデルの構築

より信頼性の高い安全評価を行うための、システム構成要素の挙動あるいは核種移行に係る現象理解の向上とそれに基づく詳細あるいは合理的な定量的モデルの構築

- ・不確実性の取扱い

地質環境条件の時間的变化や天然の地層の有する場の不均質性などに起因するシナリオ、モデル、データの種々の不確実性への対処

- ・実際の地質環境条件や設計条件等との整合性

安全評価における実際の地質環境条件や設計条件等の情報の適切な取り込み、安全評価の視点から地質環境の調査・評価あるいは設計での留意点等の提示

- ・分かり易さ、透明性、追跡性

複雑な安全評価の内容や結果についての分かり易い提示と透明性・追跡性の確保

以上のことから、「安全評価手法の高度化」に向けた今後のサイクル機構の取り組みは、『個々の課題について4つの高度化の視点に留意しながら研究開発を進めていくこと』とまとめることができる。このとき、サイクル機構が有する工学規模の試験などが行えるエントリー、雰囲気制御下において放射性核種を用いた試験が行えるクオリティ、および幌延深地層研究センターを活用することとし、「深地層の科学的研究」の成果を基盤として取り込むなど他分野との連携も図る。また、研究開発の進展に応じ、その成果をタイムリーに集約していく。

3. 研究開発計画と取り組みの現状

以下では、「安全評価手法の高度化」に向けて取り組んでいる研究開発課題について、現状の成果と今後の研究計画を幾つかの具体例を示しながら紹介する。

3.1 核種移行データベースの整備

溶解度評価のための熱力学データ、収着・拡散データ等をクオリティや国際共同研究等を活用して蓄積・更新していくとともに、国際的な最新データの調査・抽出・評価を実施し、安全評価の基盤としてのデータベース整備を進める。第2次取りまとめにおいても、国内外の知見を踏まえてデータベースを整備してきているが、今後は、さらに海水環境や堆積岩系等でのデータの拡充を図るとともに、分析技術やモデル化技術の開発・適用などを通じてデータの信頼性を高めていく。また、データ取得方法の標準化やデータの不確実性に係る情報整備を進める。

これまでに、クオリティ施設を用いて Np 等の重要核種について還元環境下での溶解度や収着に関するデータの蓄積など、第2次取りまとめで選定したデータの信頼性確認や海水環境下等でのデータ拡充を進めてきており（例えば、北村ほか、2000）、引き続き、データ拡充と高度分析技術を活用した化学種同定などを進めていく（図1）。

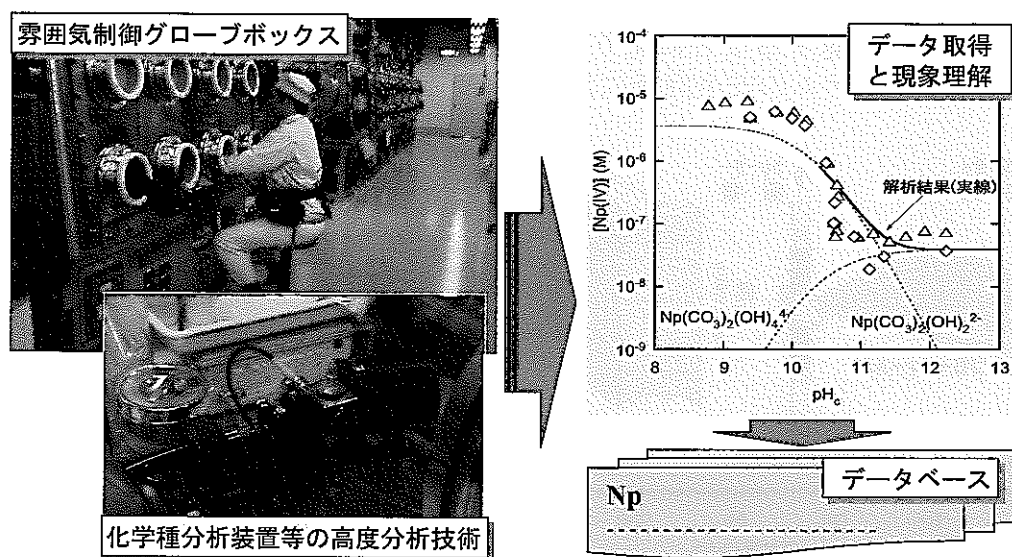


図1 クオリティ施設と試験結果の例 (Np の溶解度試験)

3.2 安全評価モデルの高度化

地質環境での水理・物質移行現象，地下水・間隙水水質形成機構，ガラスの長期溶解現象，核種の溶解および収着・拡散現象，核種移行に対するコロイド・有機物・微生物の影響評価，生物圏評価などの通常の地下水シナリオにおいて考慮すべきプロセスと，天然現象のシステム性能への影響などの変動シナリオや接近シナリオとして考慮すべきプロセスについて，エントリー，クオリティおよび幌延深地層研究センターでの研究や国際共同研究などを通じ，また「深地層の科学研究」の成果を踏まえることにより現象の理解を深め，モデルの詳細化や信頼性の確認を図る。

現状の成果や今後の研究計画の例を以下に述べる。

(1) 結晶質岩中の核種移行モデルに関する研究

第2次取りまとめでは，亀裂性岩盤中での核種の移行・遅延のモデル化について，実際の地質環境では複雑と考えられる移行・遅延プロセスと場の構造を単純化し，保守側に設定したデータを用いた評価を行った。

スイス放射性廃棄物処分協同組合 (Nagra) とサイクル機構では，スイスアルプス中央部に位置するグリムゼル原位置試験場において，亀裂性岩盤を対象とした核種の移行・遅延モデルの妥当性を評価するための原位置試験研究を実施してきた (太田・Alexander, 2001)。この研究では，単一透水性割れ目を対象とした孔間トレーサー試験 (図2) や，単一透水性割れ目を開削し核種の移行・遅延を直接的に評価するための原位置試験に加え，補完的な室内調査・試験やナチュラルアナログ研究などを実施した。その結果，予測解析と原位置試験結果との比較 (図3) をとおして，核種の移行・遅延の概念 (Dual-porosity Concept) を適用して単純化したモデルの妥当性を確認することができ，透水性割れ目におけるチャンネル構造，収着ならびにマトリクス拡散は亀裂性岩盤中における核種の移行・遅延に影響を及ぼす主要因であることが示された。また，このような核種の移行・遅延の概念や単純化したモデルが，実際の地質環境中で認められる現象を適切に表現すると確認されたことにより，同様の概念やモデルを地層処分システムの安

全評価の一部として取り込むことの信頼性を示すことができた。さらに、条件の違いを適切に考慮することにより、室内調査・試験データ（例えば、収着係数）を地層処分システムの安全評価においても用いることができる可能性が示された。

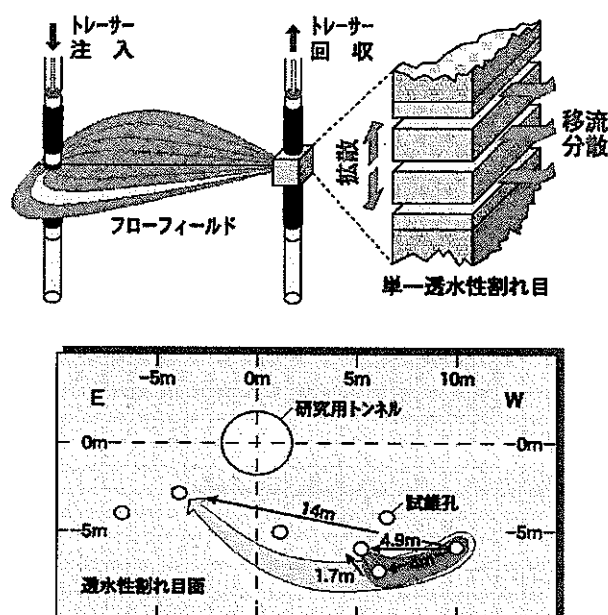


図2 原位置トレーサー試験の概念

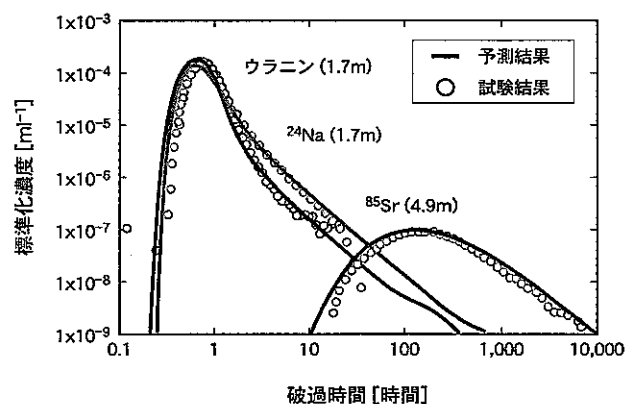


図3 原位置トレーサー試験における予測解析と試験結果の比較例

(2) 核種移行に対するコロイドの影響に関する研究

人工バリア材料から発生するコロイドおよび天然の地下水中に存在するコロイドについては、母岩中での核種の移行挙動に影響を及ぼすことが懸念されている。第2次取りまとめでのコロイドの影響評価においては、母岩中で期待されるコロイドろ過によるコロイドに収着された核種の移行抑制効果を考慮しないなど簡略なモデルでの影響評価を実施し、それでもコロイドの核種移行に及ぼす影響が大きいことを例示している。

今後は、核種移行に及ぼすコロイドの影響に関する現象理解をさらに深め、より現実的で定量的な評価を行うためのモデル構築を進める。コロイドが関与する現象の理解を深めるために、例えば、エントリー施設を用いて、コロイドが安定に存在する地下水条件の把握、コロイドの固相への付着現象の理解を図り、また、クオリティ施設においては、核種のコロイドへの収着挙動の把握等を進める。コロイド影響評価モデルに関しては、これまでにベントナイトコロイドが共存する系でのSrの岩石模擬亀裂中での移行試験を実施し、コロイドから容易に脱離するSrについてはその移行が顕著には助長されないことを示唆する結果も得ているが（久野・油井，2001）、さらに種々のコロイドや核種、地質媒体を想定した系での移行試験を実施するとともに、原位置試験等からの知見との比較・検討を行い、より現実的なモデル構築とその妥当性の確認を進めていく。

(3) 天然現象影響評価についての研究

サイト選定により地質環境の隔離能力を損なうような著しい天然現象の影響を回避できると考えられるものの、第2次取りまとめでは、適切な地質環境を選ぶことの重要性を例示することを目的として、それら影響についても簡略かつ保守的なシナリオとモデルを用いた検討を行った。

今後は、過度の保守性をできるだけ排除し、天然現象の影響をより現象に即して取り扱うことのできるシナリオとモデルの構築が求められる。そのため、「深地層の科学的研究」における地質環境の長期安定性に係る情報などを取り込みつつ、評価シナリオの構築、モデルの構築および解析評価を行う技術の開発を進める。この際、天然現象の発生時期やその影響を正確に予測することは困難であることから、評価の不確実性を考慮して、複数のシナリオ、モデルあるいはデータを過度に保守側にならないように設定した評価を行う。

3.3 安全評価手法の整備

時間スケールに応じた安全評価の考え方や安全指標などの基本事項に関する技術・情報、追跡性と透明性を有するシナリオの開発技術、シナリオ、モデル、データの不確実性についての評価技術、および実際の地質環境やその長期的変遷などを考慮して総合的な安全評価を行う方法などについて、基盤技術の向上と整備を図る。

現状の成果や今後の研究計画の例を以下に述べる。

(1) シナリオ開発技術についての研究

第2次取りまとめでは、我が国において想定される幅広い地質環境を一般化した上で、国際的に検討されてきた体系的アプローチを踏襲し、FEP リストの作成、スクリーニングおよびシナリオの作成を透明性と追跡性に留意しながら行い、安全評価の枠組みを設定した。

今後のシナリオ開発においては、実際の地質環境を対象として、不確実性を考慮しつつ適切なシナリオを開発するための技術の整備が必要となり、あわせて透明性や追跡性の向上を図ることが重要となる。そのため、FEP の設定、FEP と作成されるシナリオの対応、さらにはそのシナリオに基づく解析評価との対応など、シナリオ開発の一連の作業を統合的に進めるとともに、その作業経緯をわかりやすく提示する技術の開発に取り組んでいる。また、「深地層の科学的研究」の成果などを踏まえて、シナリオ開発技術の実際の地質環境への適用を図っていく。

(2) 不確実性評価技術についての研究

第2次取りまとめでは、幅広い地質環境を対象とした検討により、シナリオ、モデルおよびデータの不確実性を解析ケースとして分類し、決定論的な解析手法で評価した。

今後は、種々の不確実性が評価結果に与える影響を、現象理解の向上、データの拡充および実際の地質環境の情報等を活用しつつより詳細に検討するとともに、重要な不確実性要因を適切に抽出することにより、研究開発の効果的な実施（重要現象の理解の促進や重要データの優先的取得など）へと反映することが重要になる。これまでに、第2次取りまとめの核種移行評価モデルに準拠しつつ、入力値の統計的サンプリングと多数回のシミュレーション機能により、データの不確実性による影響を効率的に解析に取り込むことができるコードを開発した（図4）

(Wakasugi et al., 2000)。一方、各データの不確実性が結果に与える影響を種々の多変量解析手法を用いて分析することを通じて、その不確実性要因の重要度を定量的に示していくための技術の開発を進めている (Wakasugi et al., 2000)。

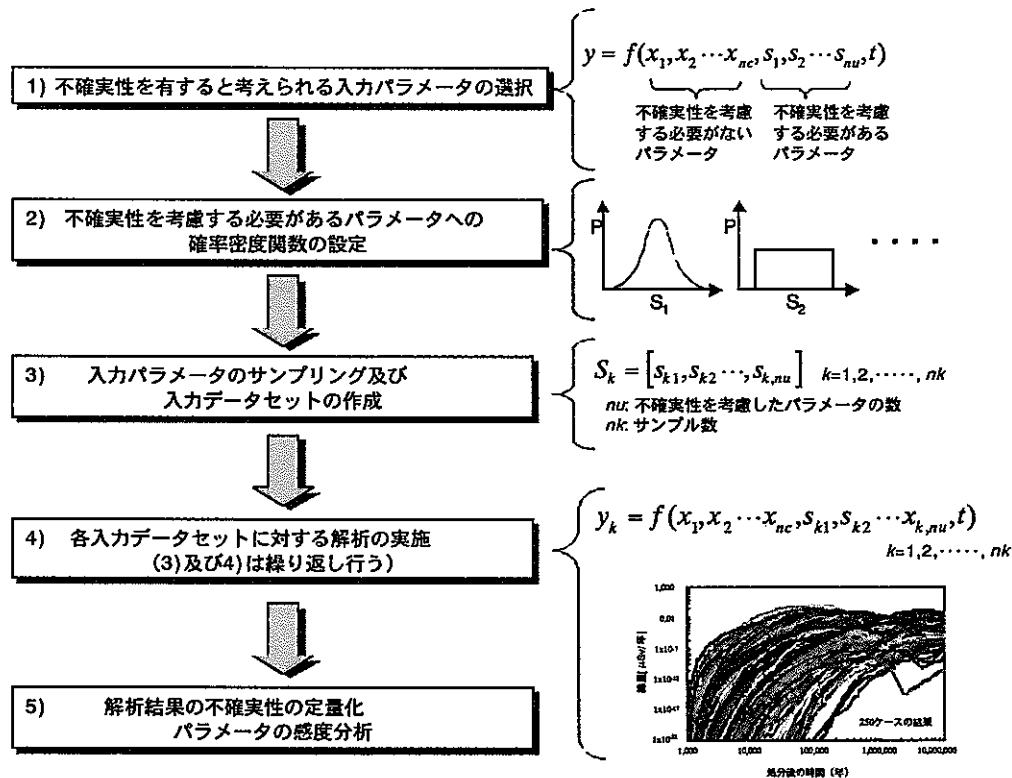


図4 データ不確実性の評価技術と解析結果の例

3.4 安全評価手法の適用性確認

実際の地質環境を調査・評価することにより段階的に得られる情報などを参考として、安全評価モデルおよび安全評価手法の実際の地質環境に対する適用性を検討しつつ、安全評価に係わる研究開発での留意点等や、安全評価における不確実性低減の観点からの地質環境の調査や設計での留意点等を提示していく。

これまでに、深地層の科学研究において、実際の調査で得られた地質環境の情報に基づき、複数の水理地質構造モデル構築手法を用いた地下水流動解析を実施し、大規模な断層や不整合面などの主要な地質構造の取扱いの不確実性などが地下水流動解析結果に与える影響の検討等を進めている (澤田ほか, 2001 など)。また、このような検討を踏まえて、引き続き調査・研究での項目・数量の優先度付けを検討することが予定されている。このような検討は、安全評価で用いるモデルについて、実際の地質環境に対する適用性を確認するとの観点、あるいはモデルの不確実性が与える影響を定量的に把握するという観点で重要な基盤情報を与えるものである。また、実際の地質環境の調査・研究と安全評価の連携を進めていくにあたっての留意点や課題の整理に活かしていくことができる。

3.5 分野間の連携と成果集約のアプローチ

「実際の地質環境への適用性の確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」を目標として地層処分の研究開発を進めるにあたっては、「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」およびその基盤となる「深地層の科学的研究」における研究開発は独立ではなく、研究開発分野間、研究開発課題間さらには研究開発課題内において種々の情報のやり取りによる連携が必要となる。例えば、天然バリア中の核種移行を評価するためには、水理および物質移行のプロセスの理解、場となる地質環境特性の理解、場の特性を表現するデータの取得・設定など複数の研究開発分野からの情報が必要であり、それら情報を整合をとりつつ適切に水理や核種移行のモデルやデータの構築に取り込む必要がある。

このため、今後、サイクル機構が研究開発を着実かつ効果的に進めるにあたっては、それら連携を明確にするとともに、情報とその流れを適切に運用・管理できる枠組みを準備し、さらに各分野の研究者がそれらの情報を効率的に引用・参照できる機能を整備していくことが一つの有効な手段になると考えられる。そのため、地層処分の研究開発に係わる種々の連携についての分析を進めてきており、さらに、情報とその流れを連携に即した形で運用・管理するための基盤技術の開発に取り組む予定である（例えば、統合解析システムにおける知識ベースの開発：図5）。

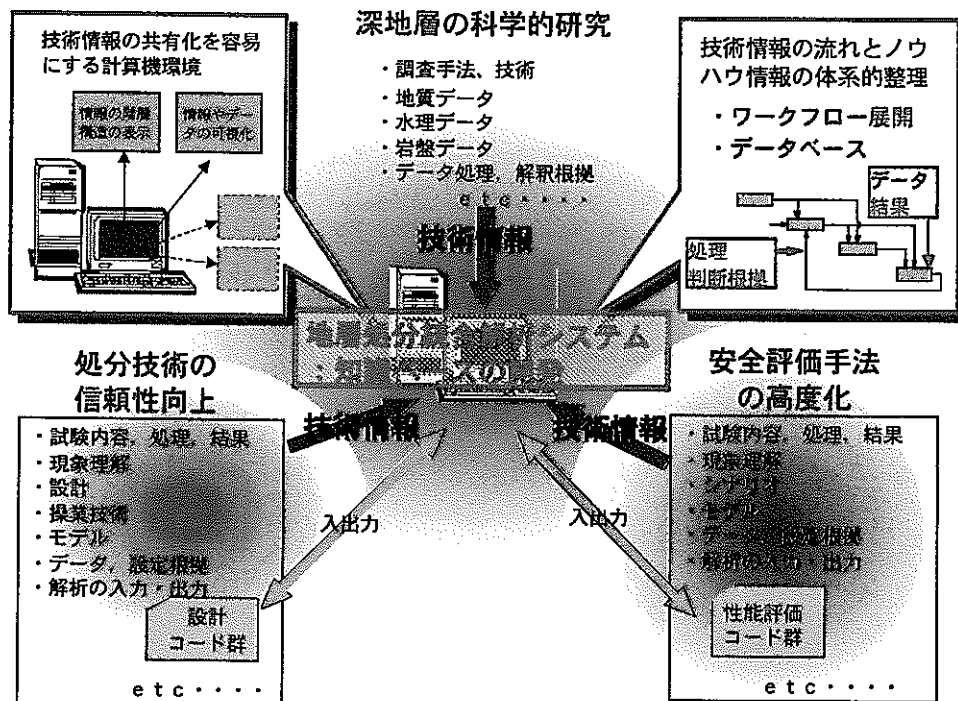


図5 分野間の連携と成果集約のアプローチの例
(統合解析システムにおける知識ベースの概念図)

4. おわりに

サイクル機構においては、「安全評価手法の高度化」に向けて、エントリー、クオリティなどを活用した現象理解の向上、および深地層の研究施設からの成果など実際の地質環境の情報を活用することに重点を置いた研究開発を進める。また、「深地層の科学的研究」および「処分技術の信頼性向上」との連携を強化しながら成果の集約を図っていく。

参考文献

- 核燃料サイクル機構 (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-, サイクル機構技術資料 JNC TN1400 99-020~024.
- 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 (2000) : 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価.
- OECD/NEA (1999) : Geological Disposal of Radioactive Waste : review of Developments in the Last Decade, Radioactive Waste Management.
- 北村暁, 内館信幸, 岡崎充宏, 渋谷朝紀 (2000) : 還元条件・炭素共存下におけるネプツニウムの溶解度測定, 日本原子力学会 2000 年春の年会予稿集 D17.
- 太田久仁雄, W. R. Alexander (2001) : 結晶質岩を対象とした放射性核種の移行・遅延モデルの構築と妥当性評価 -Nagra/JNC 原位置試験研究の概要-, サイクル機構技報 No. 11 2001. 6, JNC TN1340 2001-006.
- 久野義夫, 油井三和 (2001) : ベントナイトコロイドに収着した Sr の岩石亀裂中での移行挙動, サイクル機構技報 NO.13 2001. 12, JNC TN1340 2001-009.
- Wakasugi, K. et al. (2000) : A Trial of Probabilistic Simulation for Reference Case in the Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, In *Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management*, Osaka, Japan, November 27-December 1, 2000.
- 澤田淳, 三枝博光, 竹内真司, 中野勝志, 井尻裕二 (2001) : 水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価 (その1) -複数の概念モデル化手法による不確実性の検討-, 地盤工学会亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム発表論文集, pp. 249-258.

【特別講演】

フランスにおける地下研究施設計画の現状

- Bure's underground research laboratory: general framework, objectives, siting process and schedule of the URL project -

【講演者紹介】

Jean-Louis GAUSSEN

フランス放射性廃棄物管理機関(ANDRA)

企画部次長 (Projects Department Deputy Director)

<経歴>

	パリ農大・ナンシー地質高等学院にて地質・地質工学修士 石油工学高等学院にて石油工学修士
1979～1980 年	フランス原子力庁／防衛技術部(CEA/DAM)において ムルロア核実験場での核実験に従事
1980～1990 年	CEA/DAM ムルロア核実験場・掘削サイトマネージャー 地質学的調査, 試験立坑建設, 維持管理等の現地指導担当
1990～1993 年	CEA/DAM プロジェクトマネージャー ムルロア核実験計画担当
1993～1996 年	フランス放射性廃棄物管理機関(ANDRA)工学課長 3ヶ所の地下研究施設計画地での掘削調査 オーブ中低レベル廃棄物処分場での施設建設の現地指導 地下研究施設計画・地層処分計画に関する工学研究
1996 年～	現職 高レベル放射性廃棄物処分プロジェクト工学研究担当 地下研究施設プロジェクトマネージャー

BURE'S UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY : GENERAL FRAMEWORK, OBJECTIVES, SITING PROCESS AND SCHEDULE OF THE URL PROJECT

Jean-Louis GAUSSEN

Andra, 1-7 rue Jean Monnet, 92298, Châtenay-Malabry cedex, France

Introduction

Bure's URL project is one of the components of the French research program dedicated to the study of HLLW (High Level Long Lived Radioactive Waste) disposal in geologic repository within the framework of the 1991 Radioactive Waste Act. Pursuant to the said act, the objective of the URL project is to participate in the "evaluation of options for retrievable or non-retrievable disposal in deep geologic formations". More precisely, the goal of this URL, which is situated 300 km East of Paris (see figure 1), is to gain a better knowledge of a site capable of hosting a geologic repository.

Keywords : France, Waste Management, Disposal, Underground Laboratory, Research Program

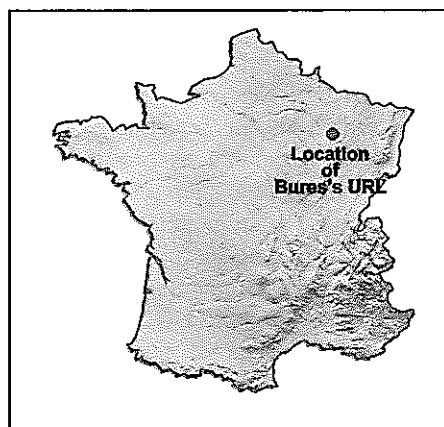


Figure 1: Situation of the URL

Schedule (see figure 2)

This program was launched in 1994. The unfolding of this project can be divided in 3 phases:

- the siting phase (1994-1996),
- the licensing phase (1997-1999),
- the URL phase (2000-2005).

This schedule is illustrated by figure 2.

➤ The siting phase

A mediation mission, appointed by the government, identified in 1993 a number of French "departments" deemed as favorable from a scientific standpoint as well as from a political one. Then, at the very beginning of 1994, three areas were granted to ANDRA by the government for geological investigation. During the 1994-1996 period, ANDRA accordingly implemented a geological investigation program in these three granted zones.

The area concerned by the Bure project straddles two departments (Meuse and Haute-Marne) in eastern France. In this area ANDRA's research program was divided in the three following phases:

- Regional synthesis: During the first months of 1994 ANDRA analyzed the existing documents and works findings coming mainly from the petroleum research activities carried out previously in this area. In this regard the reports of the seismic and drilling campaigns were very useful.
- Preliminary investigation: From mid 1994 until the end of 1995 ANDRA carried out its own seismic and core drilling campaign. These works consisted in the following tasks: geological mapping, hydro-geological inventory, two boreholes located 10km North-West of the site (one was 1101 m deep and the other was 102 m), one deep borehole (922m deep) 5 km South of the site, one borehole (522m) located on the site itself and a 2D seismic survey around the proposed site (15 km of profiles).
- Site confirmation phase: Then from the end of 1995 to mid 1996 ANDRA drilled 3 additional boreholes: 2 of them were located on the site (105 m and 425 m deep) to confirm the feasibility of the shaft sinking and a third one located 10 km North-West of the site was dedicated to the study of the hydro-geology of the overburden.

The findings of the works carried out in this area was the identification of an argillite layer, located at a depth of about 500 meters deep and 120 meters thick. This formation was considered as favorable to host an URL. On the basis of these findings, ANDRA made the basic design of an appropriate URL and estab-

lished the licensing documents. The license application was then lodged with the administration at the end of 1996.

➤ *The licensing phase*

The license application was analyzed and reviewed according to the French procedures and to the provisions of the 1991 Radioactive Waste Act. The administrations in charge of reviewing the documents were the Nuclear Safety Authority (DSIN) and the local administration. In addition, the project was subject to a public hearing and to the votes of the local elected assemblies. Moreover the National Review board (CNE) analyzed the scientific component of the project. Eventually, every concerned entity provided recommendations.

Then the government made the decision on the basis of these recommendations and granted authorization to construct and operate Bure's URL through a decree issued in August 1999.

➤ *The URL phase*

The URL phase is characterized by the simultaneity of two kind of concurrent and interwoven activities: the scientific research activity and the URL construction works.

The scientific activities are schematically divided in 3 steps:

- the 3D seismic and core drilling campaign from December 1999 until October 2000,
- the geologic survey of the shafts and drifts excavation from October 2000 until the end of 2003,
- the underground experiments from mid 2002 until the end of 2005.

The construction of the URL facilities started in February 2000 and should last until 2004. The shaft sinking, which is indeed the first experiment, will last 2 years: from the end of 2000 until the end of 2002.

➤ *The final milestone*

The final milestone (2006) will consist of a report submitted to the government and reviewed by the National Review Board (CNE) and the Nuclear Safety Authority (DSIN). Then the government should decide either to launch a repository project, to continue the scientific research or to give up any geologic repository related activities. In any case if a repository had to be constructed a new legal framework would have to be set up.

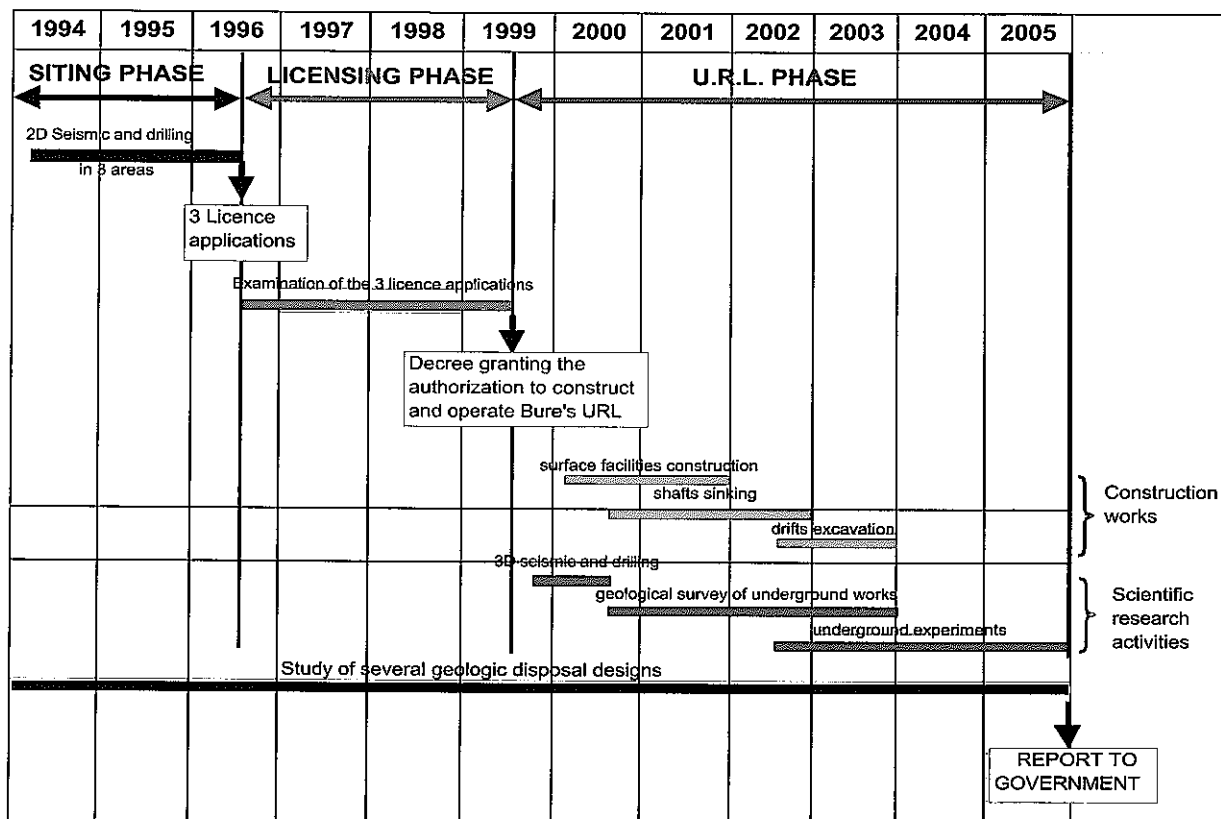


Figure 2: General schedule

Geology of Bure's site

The Bure site belongs to the Jurassic formation of the eastern part of the Parisian Basin. It is located in a favorable area of about 400 km². This area is bordered by 2 crustal faults to the West and South and by a graben to the East. In this area the layers have a low dipping and show a great continuity of facies characterising a stable sedimentary deposit without heterogeneity or important discontinuity. Schematically the geology consists of the following layers

- from surface to 160m: series of limestone and marl layers (Tithonian and Kimmeridgian),
- from 160m to 420m: stable and non aquiferous limestone (Oxfordian),
- from 420m to 540m: **Host formation** = argilite of the Callovo-Oxfordian
- below 540m : non aquiferous limestone (Dogger)

This geology is illustrated by figure 3 hereunder.

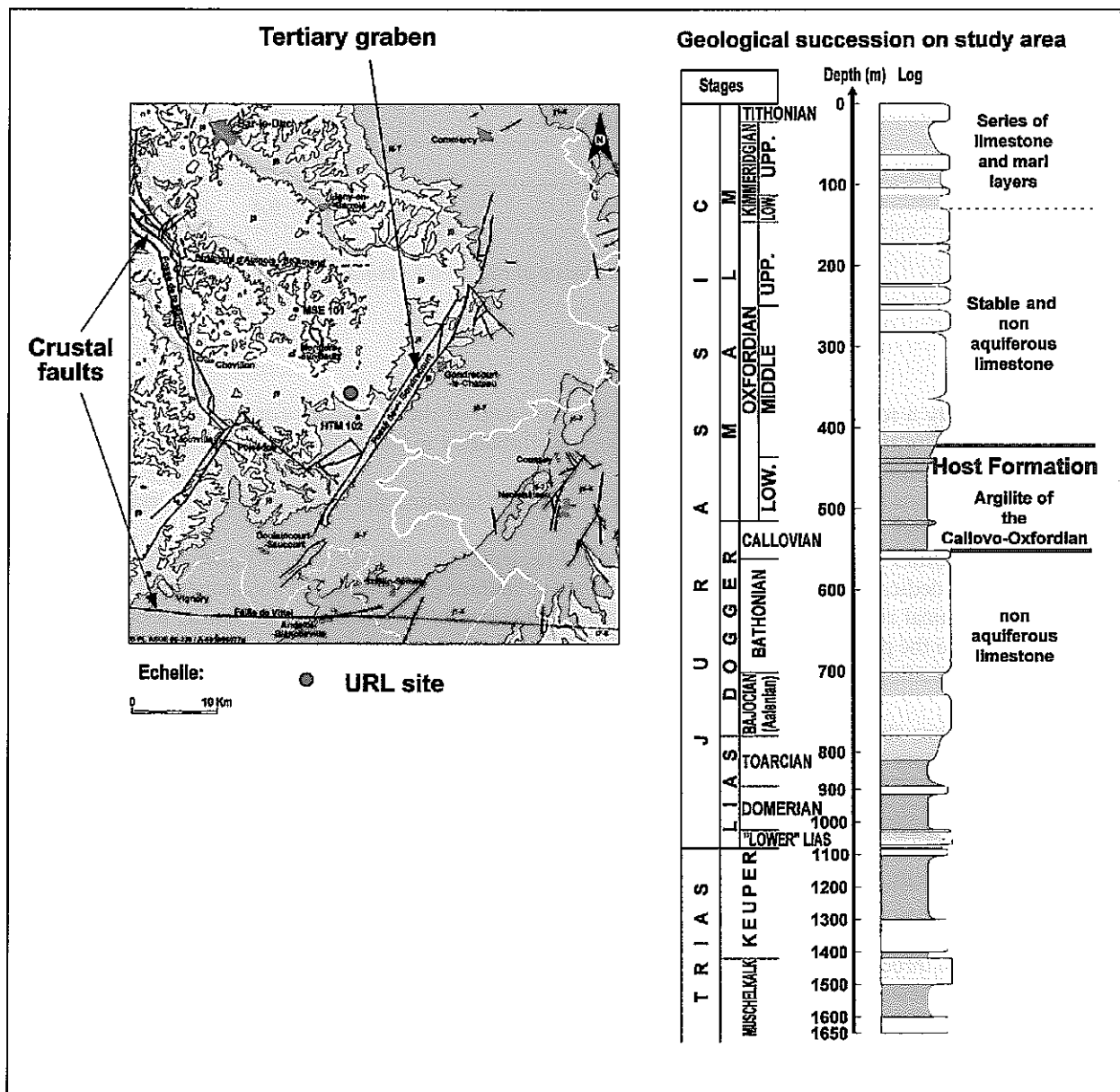


Figure 3: Geology of the site

The host formation of the Callovo-Oxfordian (120m thick located between 420 and 540m depth) is a carbonaceous silty argillite containing about 45% clay minerals, 25% quartz and 30% calcite. Its main features are set forth in figure 4 hereunder.

		Value range	Average
Physical properties	Density	2.32 - 2.61	2.42
	Water content (%)	2.8 - 8.7	6.7
	Porosity (%)	9 - 18	14
Hydrogeological properties	Permeability (m/s)	10^{-11} - 10^{-13}	10^{-12}
Thermal properties	Conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) (parallel)	1.35 - 1.65	1.47
	Thermal capacity ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)	1.9×10^6 - 1.2×10^6	2.05×10^6
	Coefficient of expansion (K^{-1})	0.8×10^{-5} - 6.2×10^{-5}	1.7×10^{-5}
Mechanical properties	Simple compressive strength (MPa)	12 - 49	26
	Simple tension strength (MPa)	0.9 - 5.4	2.6
	Young modulus (MPa)	2300 - 11000	4900
	Poisson ratio	0.17 - 0.4	0.3

Figure 4: Main features of the host formation

URL's design

The URL is only a research tool and in no case the first step of the repository construction. The use of radioactive waste, even for research purposes, is strictly forbidden in these facilities. The design of the URL is based on these considerations.

Bure's URL consists schematically of three parts: the surface facilities, the shafts and the galleries.

The surface facilities

The surface facilities are spread out over an area of 17 hectares. They are divided in 3 parts:

- a zone dedicated to the public information which includes a car park and a visitor center,
- a technical zone which notably houses the headframes of the shafts, a core house, a building dedicated to the preparation of the experiments and several other technical buildings
- a zone dedicated to the muck pile.

The shafts

For safety reasons there are two shafts: an access shaft (5 meters in diameter) and a ventilation shaft (4 meters in diameter). They are 100 meters distant from each other and 500 meters deep. The personnel transportation, the muck extraction and the air intake are performed through the access shaft. The air exhaust and the emergency personnel transportation are performed through the ventilation shaft. These shafts are equipped with a concrete lining and a drainage system. A small experimental "niche" will be excavated from the access shaft at a depth of 445 meters.

The galleries

The network of galleries will be constructed at a depth of 490 meters. Its total linear length is 1 kilometer. It is divided into three categories:

- the drifts dedicated to the technical facilities,
- the drifts dedicated to the experiments,
- two drifts dedicated to the geologic exploration of a bigger volume than that dedicated to the implementation of the experiments: one will be upward and the other downward.

Figures 5 and 6 show a 3D view of the URL and the location of the scientific experiments.

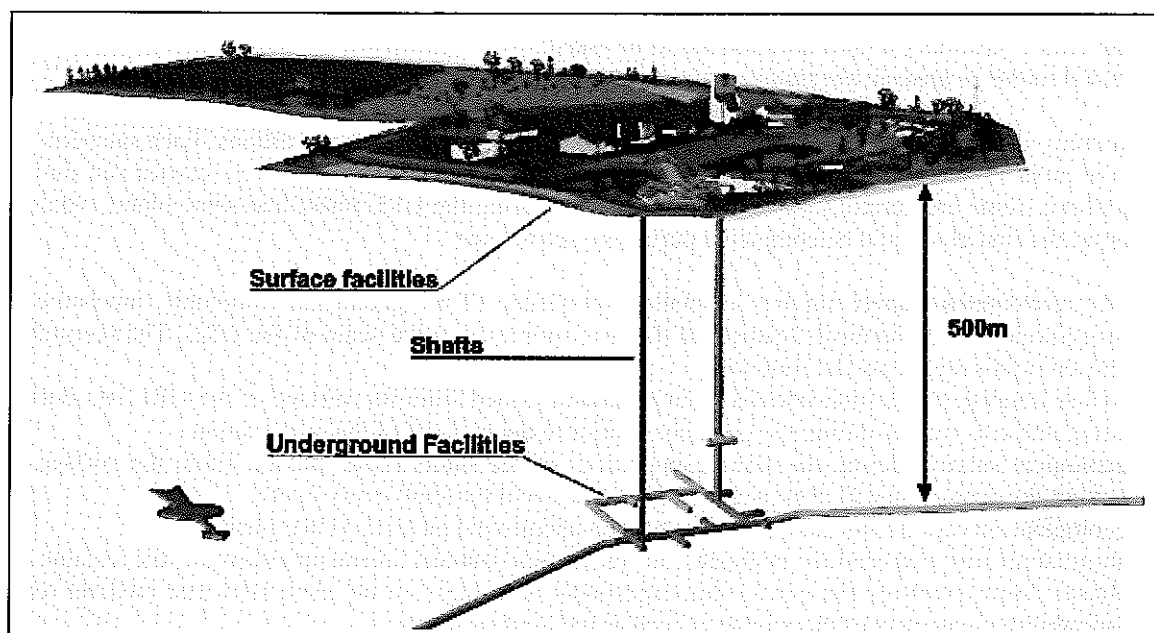


Figure 5: 3D view of the URL

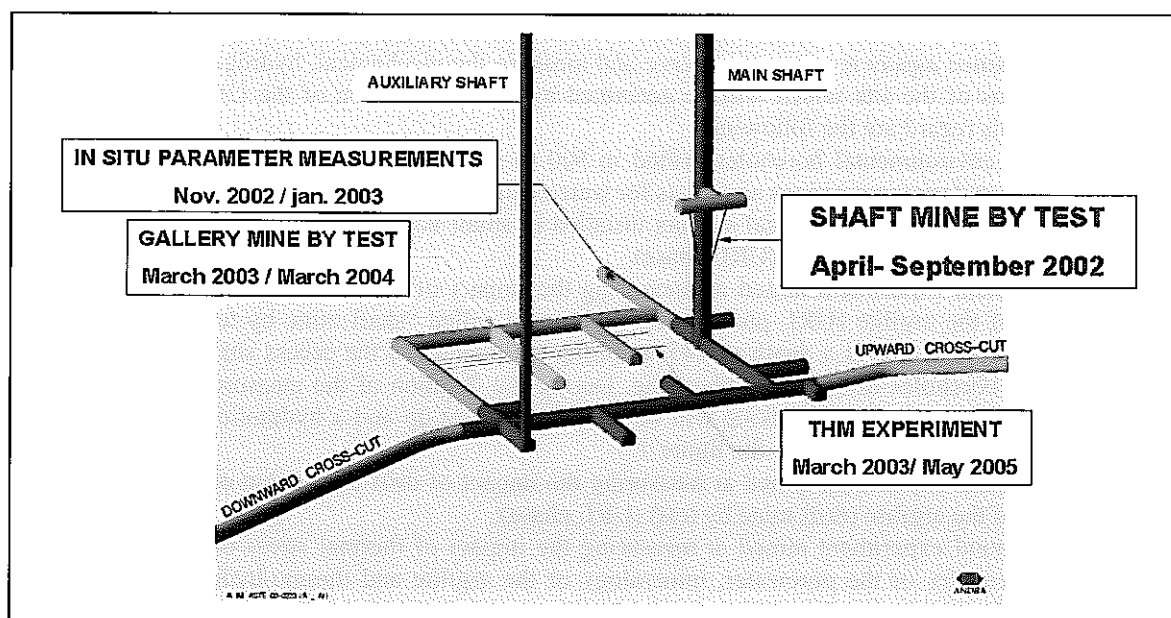


Figure 6: Location and planning of the scientific experiments

Objectives and contents of the scientific program

The scientific program of Bure's URL project is derived from the questions raised by the conceptual design studies of the repository. These studies take into account three categories of Waste: B Waste (technological waste, hulls and end-caps), C Waste (vitrified Waste produced by the reprocessing) and Spent fuel. For each category ANDRA is considering several options of disposal structures. The area of the general repository layouts containing these structures would range from 3 to 6 km².

These studies raise two major questions:

- *What is the containment performance of the argilite ?*,
- *What would be the disturbances generated by an underground repository ?*

The main research tool used by ANDRA to answer these questions is the URL. But since the URL is much smaller than a repository a third question has to be asked:

- *Is it possible to upscale the findings observed in the URL to the scale of a potential repository ?*.

In summary the contents of the scientific program is based on these three questions. Each question generates a number of survey, field operations or experiments. Some of these tasks were carried out during the siting phase, some are currently (or will be) conducted during the URL phase and some others which started during the first phase will be completed during the second one.

- **The containment aspect** requires a detailed knowledge of the geological (lithologic, mechanical, hydrogeological and chemical) features of the host formation at the scale of the URL. The research tools chosen in this regard are the following:
 - coring, logging and testing operations in boreholes drilled from the surface of the URL site during the siting phase as well as during the URL phase prior to the kick off of the construction ,
 - geological surveys during the sinking operations of the shafts (URL phase): From the surface to the bottom the geologists will observe and study the walls of the shaft every 2.5 m.
 - geological surveys during the excavation of the underground galleries (URL phase),
 - an underground experiment dedicated to the geomechanical characterization of the argilite (URL phase): More precisely the aim of this experiment is to measure the short term and medium term deformability parameters of the argilite as well as the in situ stresses.
 - an underground experiment dedicated to the measurement of the parameters governing the advective flows in the host formation, notably the gas migration processes and the osmotic effects (URL phase),
 - underground water sampling for chemical and isotopic analyses (URL phase): The goals of this experiment are the following: pH and Eh measurement, Fluid sampling for chemical and isotopic analysis and rock core samples for mineralogic analysis and extraction of porewater.
- **The disturbance aspect** requires to observe and measure the mechanical, hydrogeological and chemical modifications of the site which will be generated by the construction of the URL. The research tools chosen in this regard are the following:
 - a set of 12 environmental boreholes drilled in 500 m radius circle of the access shaft equipped with temperature and pressure gauges as well as for water sampling (URL phase),
 - a series of sets of geomechanical sensors installed in small boreholes drilled from the shaft (vibration transducers and extensometers) (URL phase)
 - an underground experiment aimed at measuring the impact of shaft sinking on the hydro-mechanical properties of the argilite (URL phase): this experiment called “shaft mine by test” will be carried out from a “niche” located at a depth of 445 m during the sinking of the access shaft. The sensors will be installed in boreholes drilled from the niche. During the duration of the measurement phase the “drilling and blasting” method of sinking will be temporary given up and a hydraulic hammer will be used. This experiment is illustrated by the figure 7.
 - an underground experiment aimed at measuring the impact of drift excavation on the hydromechanical properties of the argilite (drift mine by test) (URL phase),
 - an underground experiment aimed at measuring the impact of thermal stress on the properties of the argilite (chemistry of the porewater, mineralogy of the argilite and thermo-hydraulic-mechanical couplings) (URL phase)
- **The upscaling aspect** requires a study of the potential lateral variation of the host formation as a result of its diagenetic and sedimentary history as well as of its tectonic evolution. The research tools chosen in this regard are the following:
 - coring, logging and testing operation in 2 deep boreholes distant of a few km radius circle from the site (see siting phase),
 - a 2D seismic campaign (see siting phase),
 - a 3D seismic campaign (URL phase)

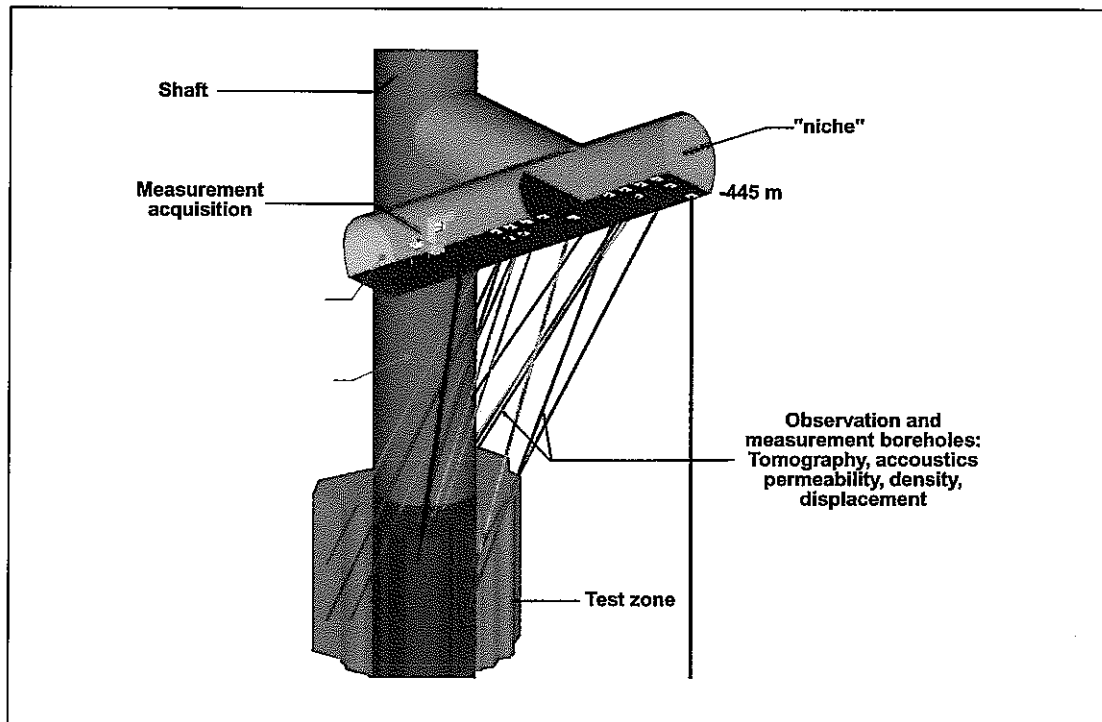


Figure 7: In-situ measurement of the impact of shaft sinking

Situation on the site as of January 2002: shaft sinking under progress

30 ANDRA employees (scientists, mining engineers, civil engineers and administrative personnel) are present on the construction site. The total number of people working on the site including the contractors is about 150.

90 % of the surface facilities are constructed. As far as the core of the URL is concerned, the sinking operations are currently under progress on both shafts. The sinking method is the conventional drilling and blasting technique which enables the geologists to survey the walls of the shafts after each blast. The depth reached in January 2002 is 150m. From a legal standpoint this operation is carried out in compliance with a very stringent legal framework that matches a high level of safety. Indeed, since the goal of the project is not to operate a mine, the underground activities of the URL are not subject to the mining regulations. As a consequence the sinking equipment and procedures must be compliant with the French "labor code" as well as with the European directives. For example the personnel must be transported in an additional cage specifically dedicated to this function and compliant with the European lift directive instead of in the usual "kibble" used for the muck extraction. As a result the sinking operation is carried out thanks to a specific multistage sinking platform which was custom designed as a prototype. Figures 8 and 9 show a global view of the construction site and the assembling of the sinking platform in March 2001.

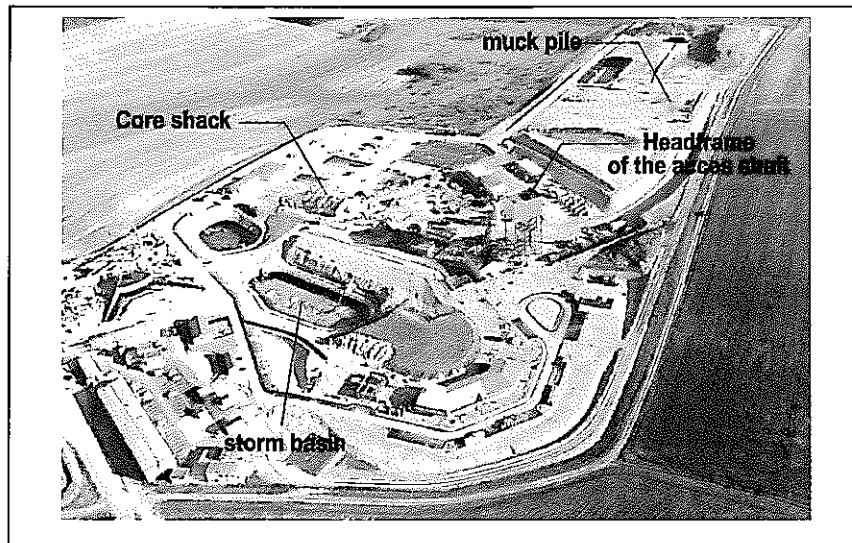


Figure 8: Global view of the construction site



Figure 9: Assembling of the sinking platform

Conclusion

The findings of this scientific program should bring answers to the three major questions raised by the study of the geologic disposal: containment, disturbances and upscaling. The results will also be used to improve the site models in the framework of the long term performance assessment.

All of these research works will be regularly reviewed by the National Review board (CNE) and by the Nuclear Safety Authority (DSIN) to keep informed all of the stakeholders and give the government all of the required elements to make a decision in 2006.