



地層処分技術に関する研究開発報告会

－平成17年取りまとめの公表と 今後の研究開発の方向性－

2005年9月22日

核燃料サイクル開発機構

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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)

2005

地層処分技術に関する研究開発報告会
ー平成 17 年取りまとめの公表と今後の研究開発の方向性ー
(平成 17 年 9 月 22 日(木), 13:00～17:00, 星陵会館ホール)

プログラム

1. 開会挨拶 副理事長 岸本 洋一郎 [13:00～13:10]
2. サイクル機構報告 [13:10～15:15]
 - 1) 平成 17 年取りまとめの全体概要
バックエンド推進部長 石川 博久
 - 2) 個別報告
 - ① 分冊 1: 深地層の科学的研究
東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所長 坂巻 昌工
 - ② 分冊 2: 工学技術の開発
東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 次長 油井 三和
 - ③ 分冊 3: 安全評価手法の開発
東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
システム解析グループリーダー 内田 雅大
 - ④ 地層処分技術の知識化と管理
バックエンド推進部 研究主席 梅木 博之
- ～ 休憩 ～ [15:15～15:30]
3. パネルディスカッション [15:30～16:50]
テーマ「今後の研究開発への期待」

[司 会]	小島 圭二	(地圏空間研究所)
[パネリスト]	河西 基	((財) 電力中央研究所)
	坪谷 隆夫	((財) 原子力環境整備促進・資金管理センター)
	西垣 誠	(岡山大学大学院)
	石川 博久	(核燃料サイクル開発機構)
4. 閉会挨拶 理事 河田 東海夫 [16:50～17:00]


1

平成17年取りまとめの 全体概要

地層処分技術に関する研究開発報告会
－平成17年取りまとめの公表と今後の研究開発の方向性－
平成17年9月22日 星陵会館ホール
核燃料サイクル開発機構 バックエンド推進部
石川 博久


2

わが国の高レベル放射性廃棄物地層処分計画

一般的な研究開発段階 (1976 - 1999)

- 地層処分概念の技術的成立可能性の提示
 - サイトや岩種を特定せずわが国の幅広い地質環境を対象
- 段階的な研究開発成果の取りまとめ
 - 第1次取りまとめ(H3レポート)：1992年（技術的可能性の提示）
 - 第2次取りまとめ(H12レポート)：1999年（技術的信頼性の提示）

事業段階 (2000 -)

- 「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」の公布 (2000年6月)
- 実施主体の「原子力発電環境整備機構」の設立 (2000年10月)
- 原子力安全委員会や原子力・安全保安院における規制基準の検討
- 実施主体、国および関係機関が行う研究開発の役割

事業段階における研究開発の役割



3

段階的なアプローチと意思決定

- 三段階のサイト選定→許認可→建設→操業→閉鎖→…

意思決定における信頼構築

- 地層処分安全性への信頼
 - ・ セーフティケース(長期にわたって安全性を確保できることの論拠)に対する科学的客観性と技術的信頼性
- 処分事業への信頼
 - ・ 政策や規制, 事業者の技術的能力と事業運営姿勢に対する信頼など

地層処分の特徴を考慮した研究開発戦略

- 安全性確保の長期性と処分事業の長期性
- 最新の研究開発成果を取り込みつつ, セーフティケース作成のための科学技術的基盤を処分事業全体にわたって支援

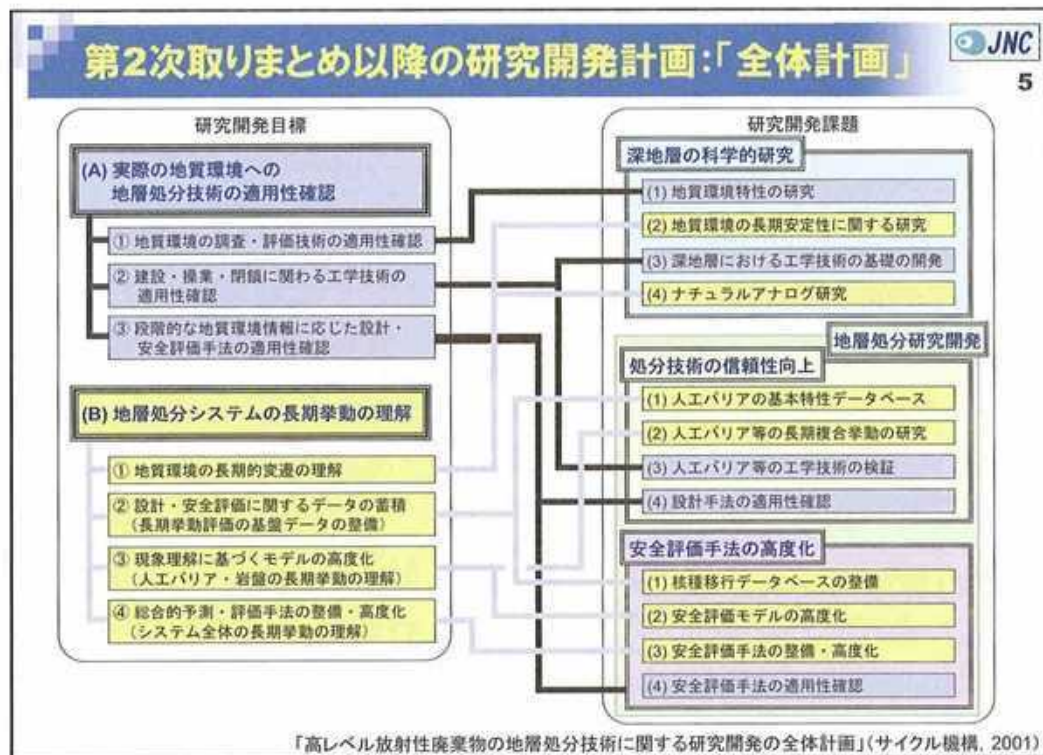
第2次取りまとめ以降のサイクル機構の役割



4

(2000年原子力長計等)

- ・ 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
- ・ これまでの研究開発成果を踏まえ, 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た研究開発



平成17年取りまとめの背景と位置づけ

JNC

7

背景

- ・ 最終処分法に沿った事業の展開
 - 実施主体による概要調査地区の選定に向けた公募の開始や安全規制に関わる議論の進展
- ・ サイクル機構の研究開発の進捗
 - 「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」に基づく研究開発の実施
 - 深地層の研究施設計画(瑞浪, 幌延)の第1段階から第2段階への移行期
- ・ 原子力二法人の統合(2005年10月)

位置づけ

- ・ 第2次取りまとめ以降のサイクル機構の研究開発成果について、個々の研究開発課題に対する達成度を確認し残された課題を明示
- ・ 今後、継続的な研究開発の成果を、地層処分技術の知識体系として整備していくための考え方を提示

平成17年取りまとめの構成

JNC

8

標題「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 -」

地層処分技術の知識化と管理 (知識化レポート)

- ・ 地層処分技術の知識化
- ・ セーフティケース概念に基づく知識の構造化と知識ベース開発の考え方

分冊1 深地層の 科学研究

- ・ 深地層の研究施設での調査・評価技術の適用性
- ・ 地質環境の長期安定性

分冊2 工学技術 の開発

- ・ 実際の地質環境情報に基づく第2次取りまとめの設計手法の適用性
- ・ 人工バリアの長期健全性

分冊3 安全評価手 法の開発

- ・ 実際の地質環境情報に基づく第2次取りまとめの安全評価手法の適用性
- ・ 処分システムの長期性能

ドラフト段階におけるレビュー



9

目的

- ・ 報告書の技術的な信頼性の向上

レビューにあたった専門家／機関

- ・ 大学等の外部有識者
- ・ 協力協定に基づく協力依頼
 - (財)電力中央研究所
 - 原子力発電環境整備機構
 - (財)原子力環境整備促進・資金管理センター

ドラフト公開及びレビュー会議



The timeline shows the following milestones:

5/25	6/21	6/24	7/1	7/4	7/15	最終版に反映
分冊1～3 ドラフト 公開	分冊3 レビュー 会議	分冊2 レビュー 会議	分冊1 レビュー 会議	知識化 レポート ドラフト 公開	知識化 レポート レビュー 会議	

実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認



10

主要な成果

深地層の研究施設での地上からの調査を通じて、

- ・ 地表から地下深部までの主要な地質構造、地下水、岩盤の物理的・化学的な特性を把握
- ・ 第2次取りまとめで示した地上からの特性調査技術の確認

第2次取りまとめで示した、

- ・ 設計手法
- ・ 安全評価手法(水理・物質移動モデル化技術)

の適用性の確認

深地層の研究施設の研究坑道の設計、掘削に基づく経験の蓄積

地層処分システムの長期挙動の理解



11

主要な成果

地質環境の長期安定性

- ・現象(地形変化, 火山活動など)の発生メカニズムの理解やその影響を予測するためのモデル開発
- ・テーマを特化した事例研究(非火山地域の地温異常など)

人工バリアの長期健全性

- ・室内・工学試験等による現象(オーバーパック腐食, ニアフィールドの熱-水-応力-化学連成現象など)の理解とモデルの拡充・改良
- ・海水系地下水やセメント影響を中心としたデータ拡充(緩衝材の基本特性など)

処分システムの長期性能

- ・シナリオ構築手法の拡充・改良
- ・室内・工学試験等による現象(亀裂媒体中の水理物質移動, コロイド影響など)の理解とモデルの拡充
- ・海水系等を中心としたデータベース(熱力学データ, 収着データなど)の拡充

まとめ



12

第2次取りまとめ以降

- ・全体計画に従った研究開発の推進
- ・深地層の研究施設計画やエントリー, クオリティを利用した第2次取りまとめの技術基盤の強化

今後の研究開発の方向性

- ・新法人の中期計画に従った着実な研究開発の推進
 - 深地層の研究施設計画(第2段階)
 - 研究坑道を掘削しながら, 地上からの調査研究段階に構築された地質環境モデルの評価などを行い, 地上からの調査技術および坑道掘削時の調査技術の信頼性を確認
 - 知識の体系化と知識ベースの開発
 - 関連機関の最新の研究開発成果も含め, 知識として統合し, 継続的に管理かつ将来世代に伝承していくための枠組みを整備

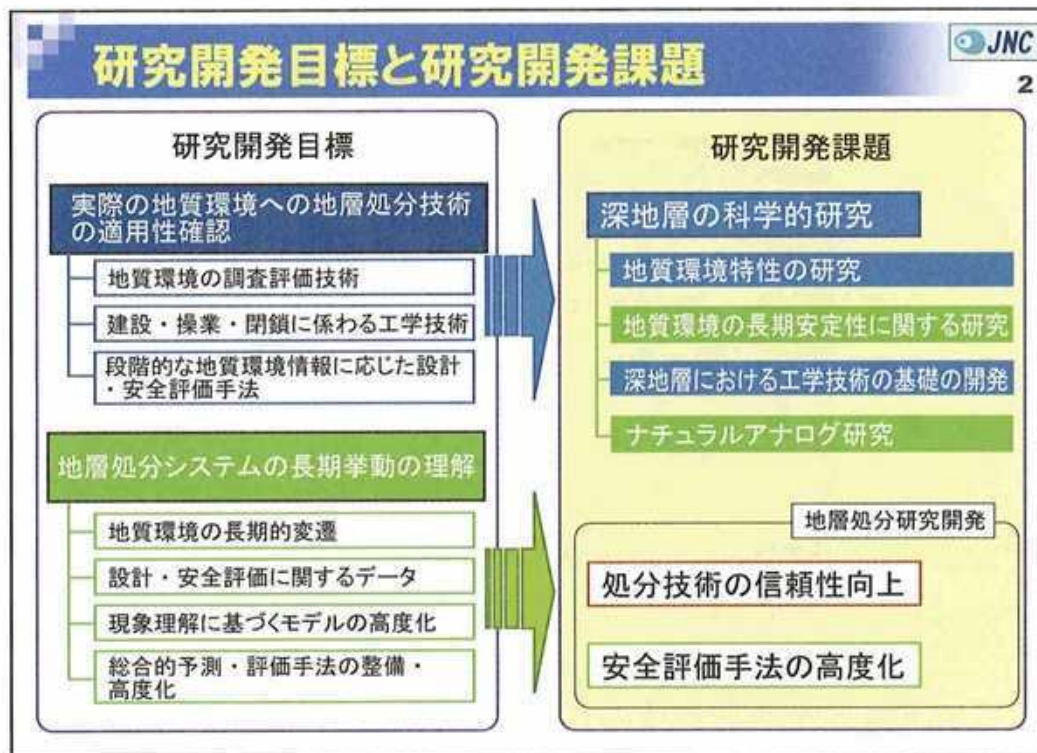


1

分冊 1

深地層の科学的研究

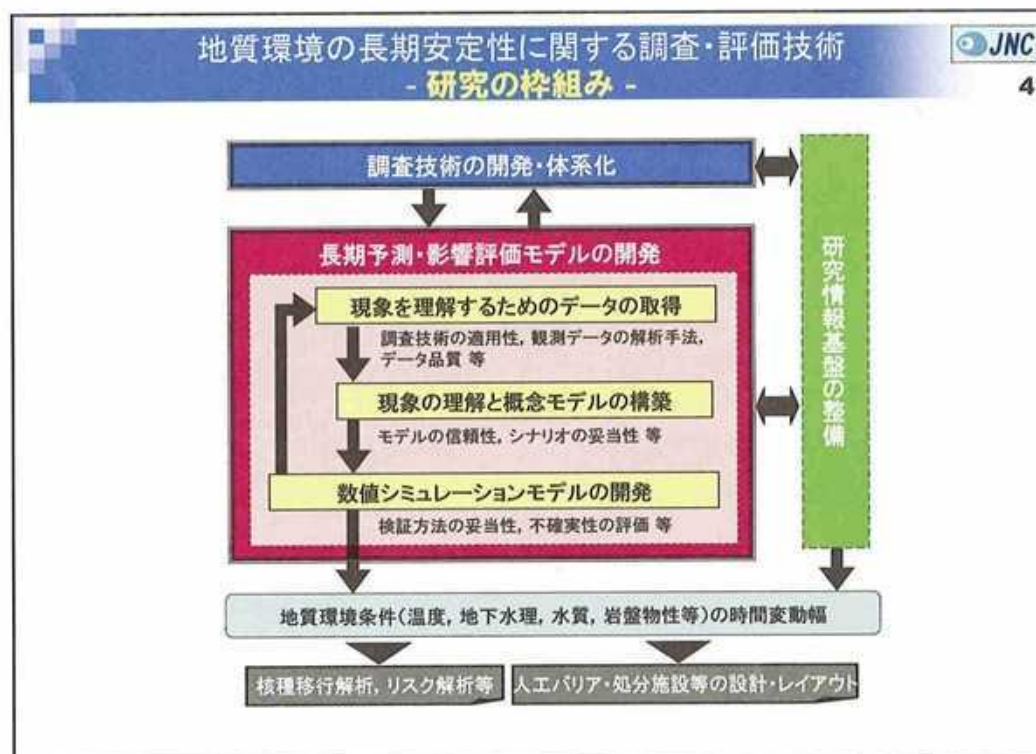
地層処分技術に関する研究開発報告会
 —平成17年取りまとめの公表と今後の研究開発の方向性—
 平成17年9月22日 星陵会館ホール
 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
 坂巻 昌工

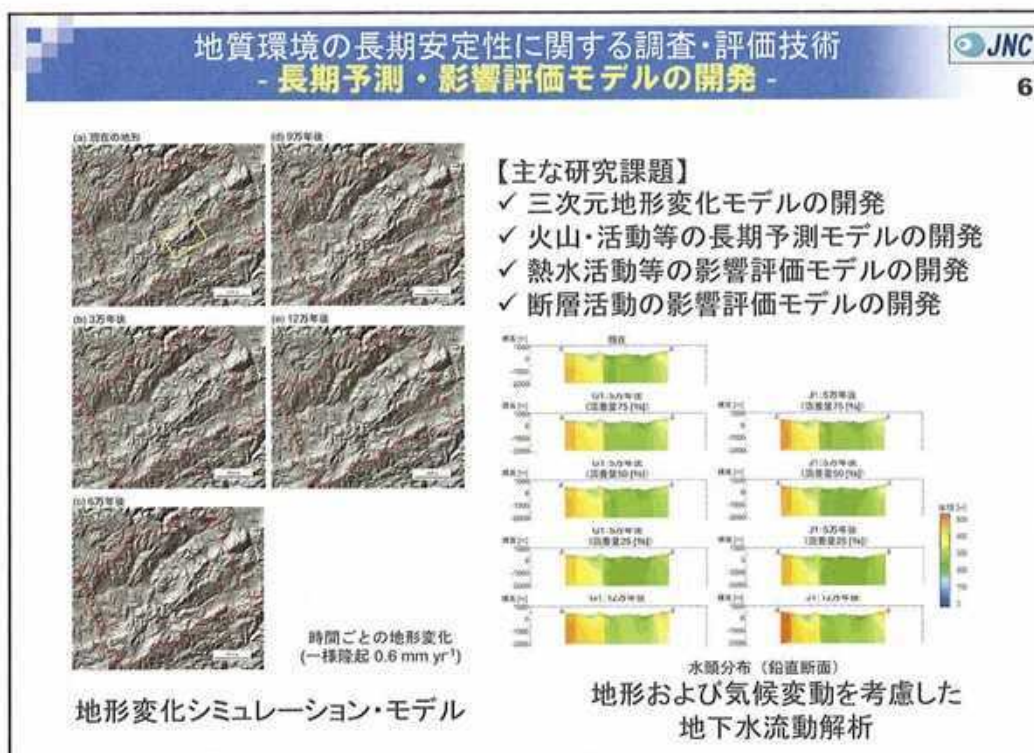
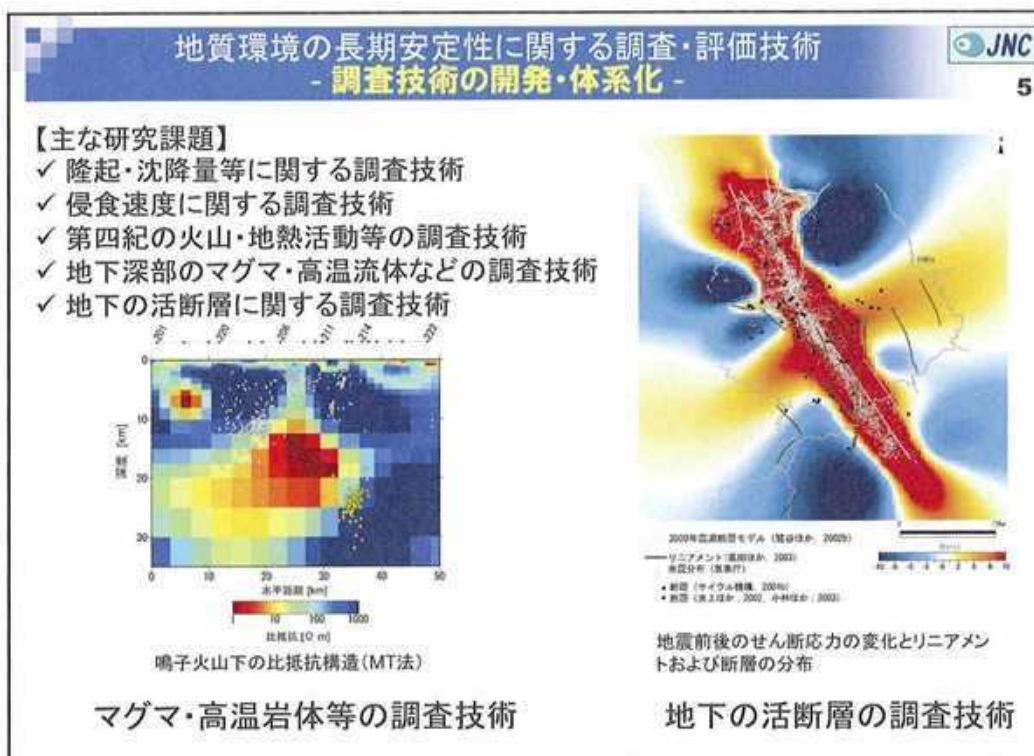


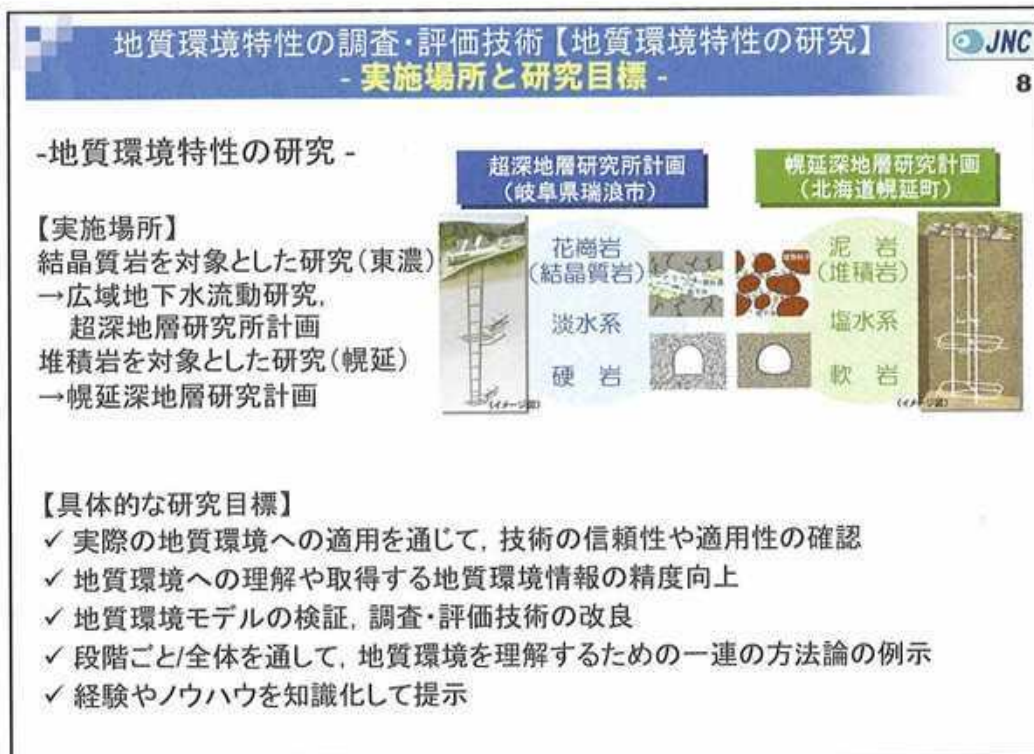
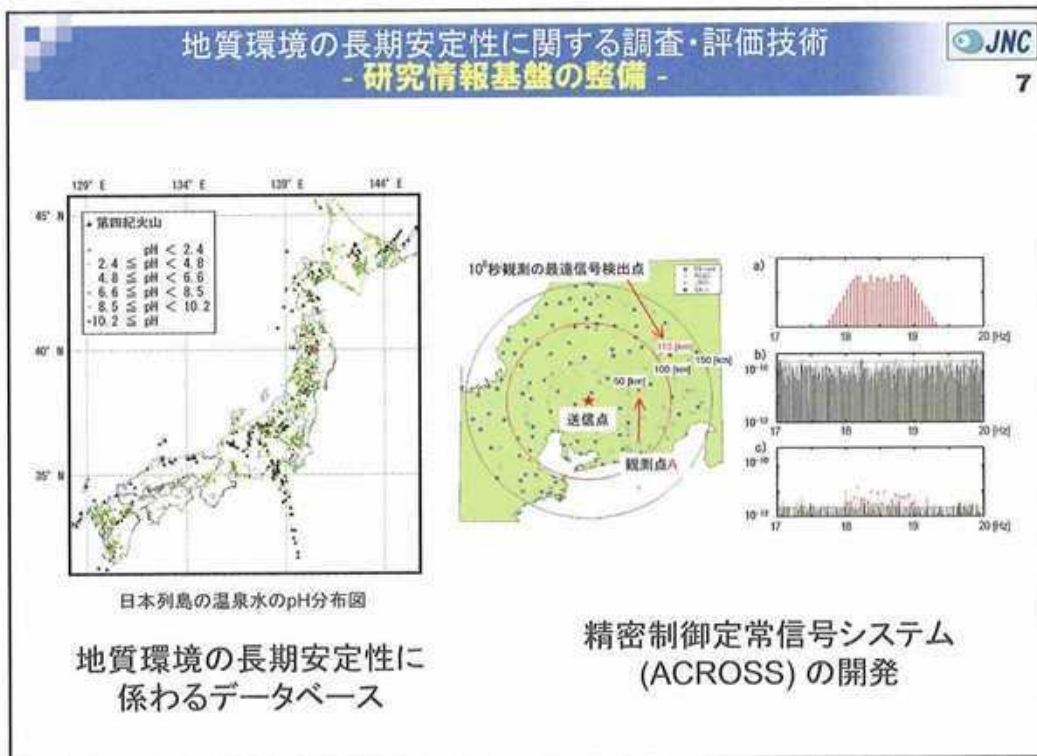
分冊1「深地層の科学的研究」の構成		JNC
3		
東濃と幌延の調査研究を 全体計画で示した4つの 研究開発課題で包括して 整理・記述		
地質環境の長期安定性 に関する研究	3. 地質環境の長期安定性に関する調査・評価技術	
地質環境特性の研究	4. 地質環境特性の調査・評価技術	
ナチュラルアナログ研究	5. 深地層における工学技術の基礎の開発	
深地層における工学 技術の基礎の開発	6. おわりに	

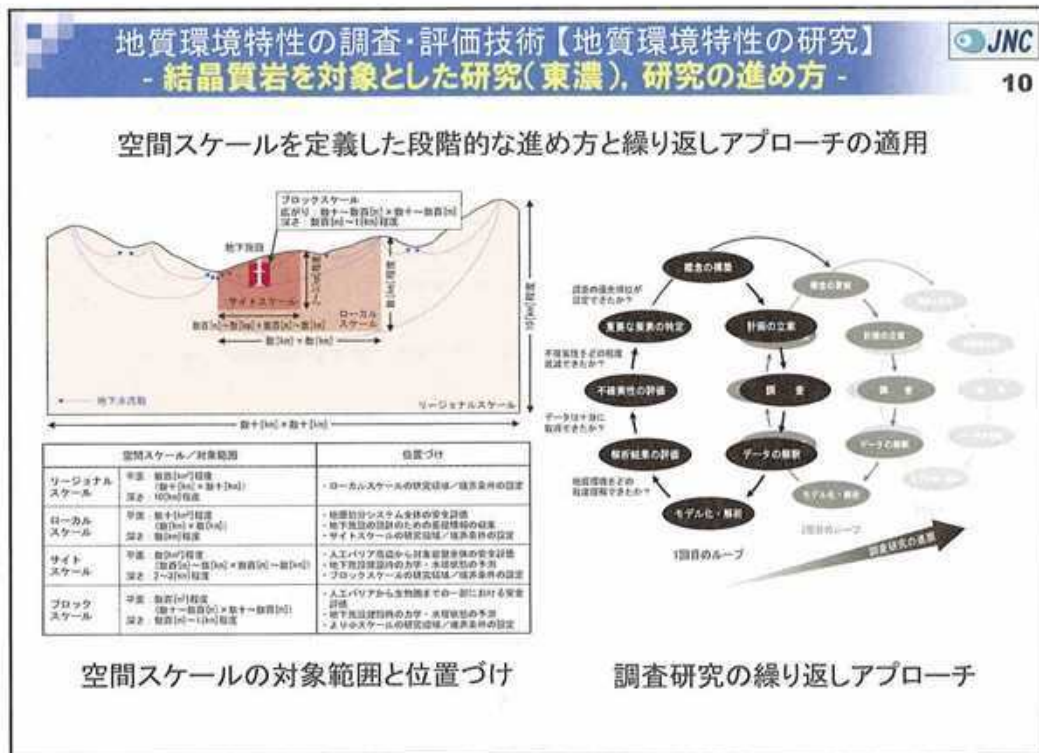
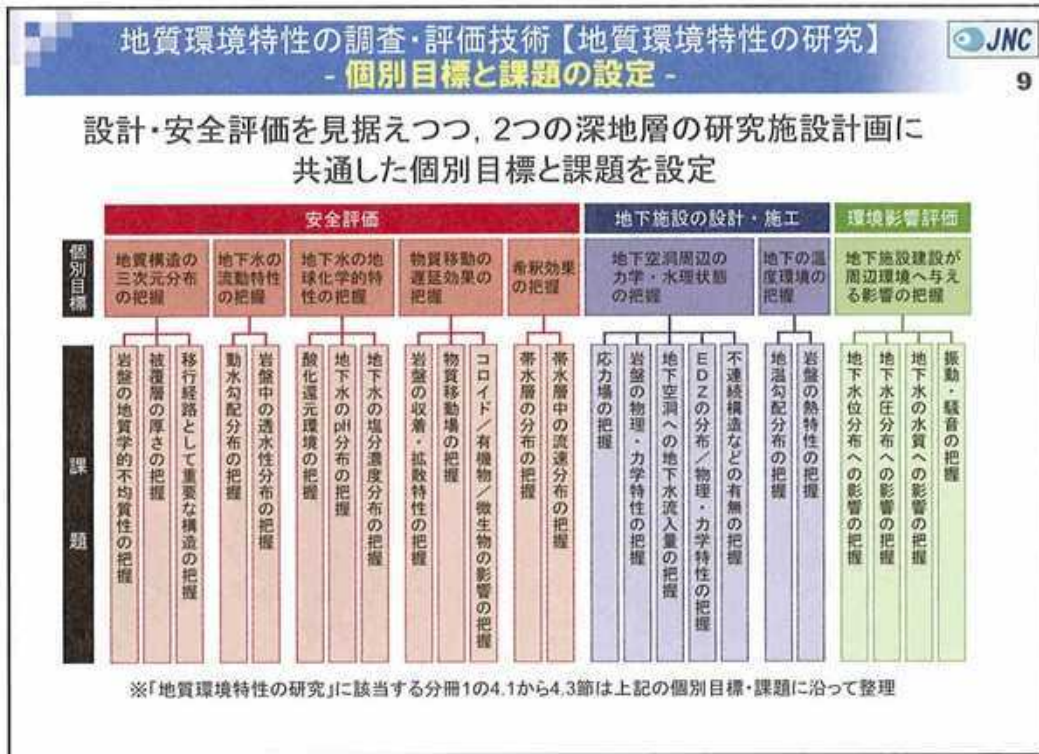
【分冊1の目次構成】

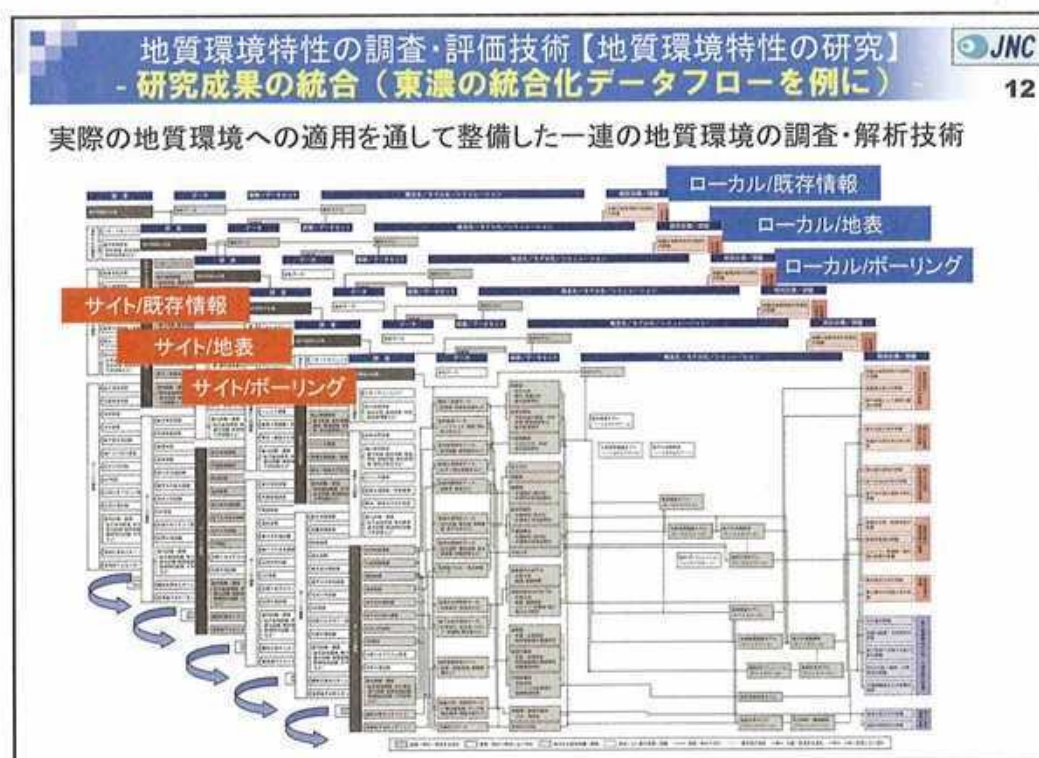
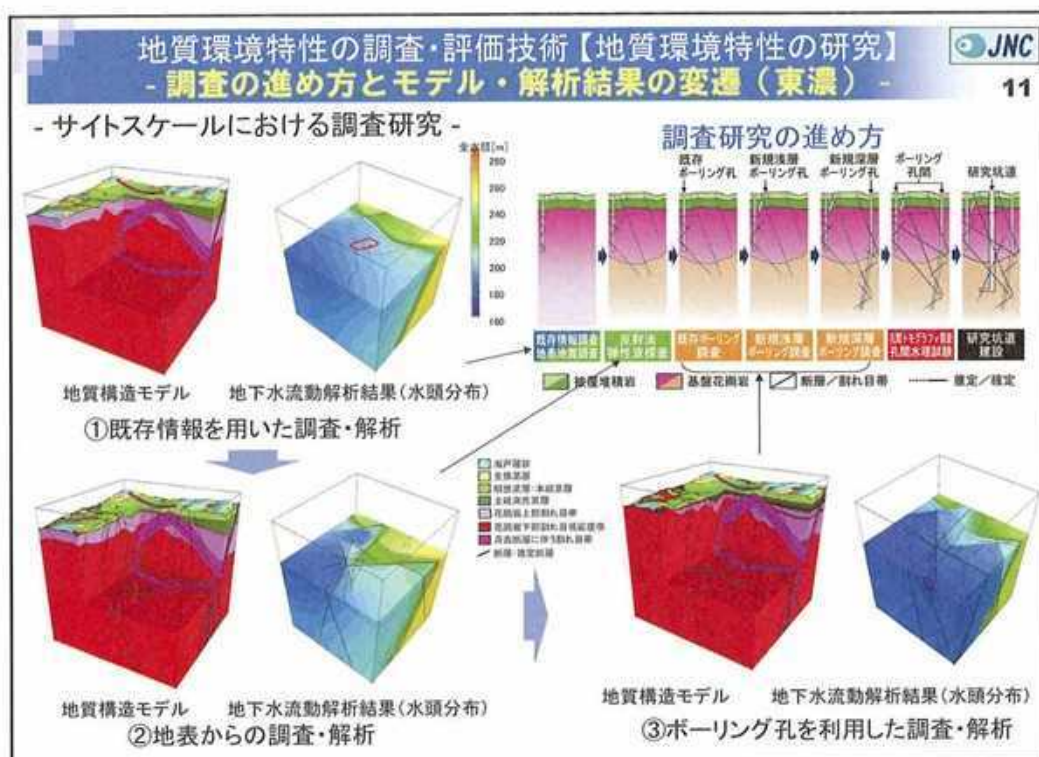
- はじめに
- 深地層の科学的研究の役割
- 地質環境の長期安定性に関する調査・評価技術
 - 研究の概要
 - 調査技術の開発・体系化
 - 長期予測・影響評価モデルの開発
 - 研究情報基盤の整備
- 地質環境特性の調査・評価技術
 - 研究の概要
 - 結晶質岩を対象とした調査研究
 - 堆積岩を対象とした調査研究
 - ナチュラルアナログ研究
- 深地層における工学技術の基礎の開発
 - 瑞浪超深地層研究所
 - 幌延深地層研究センター
- おわりに
 - 成果のまとめ
 - 今後の展望



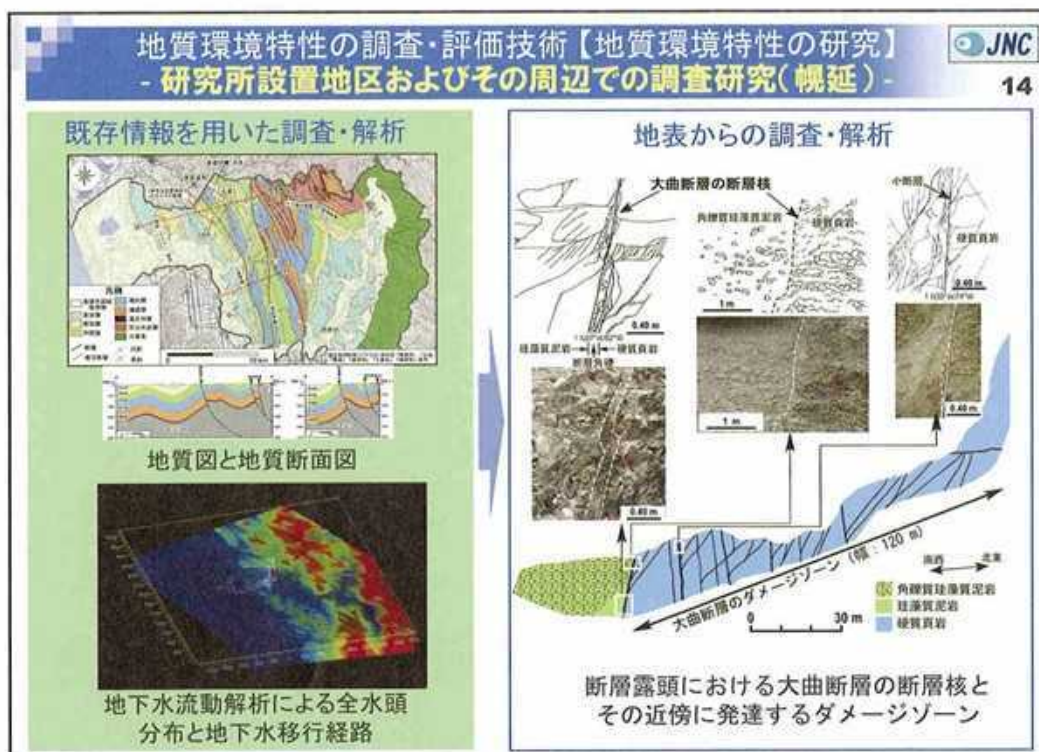


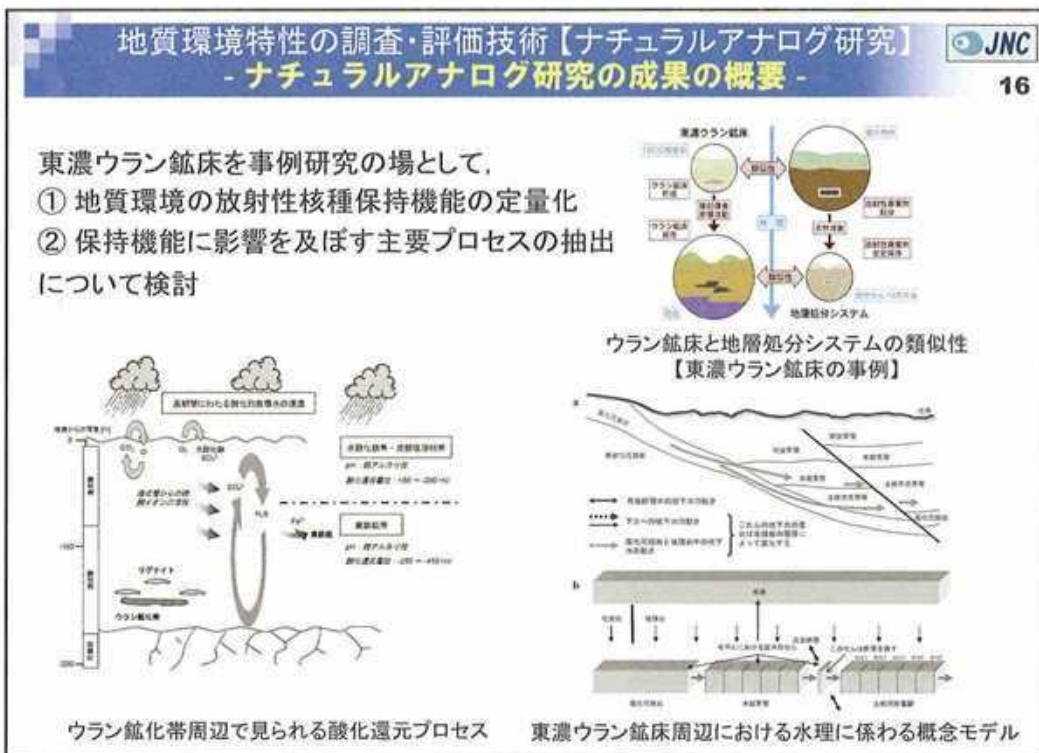
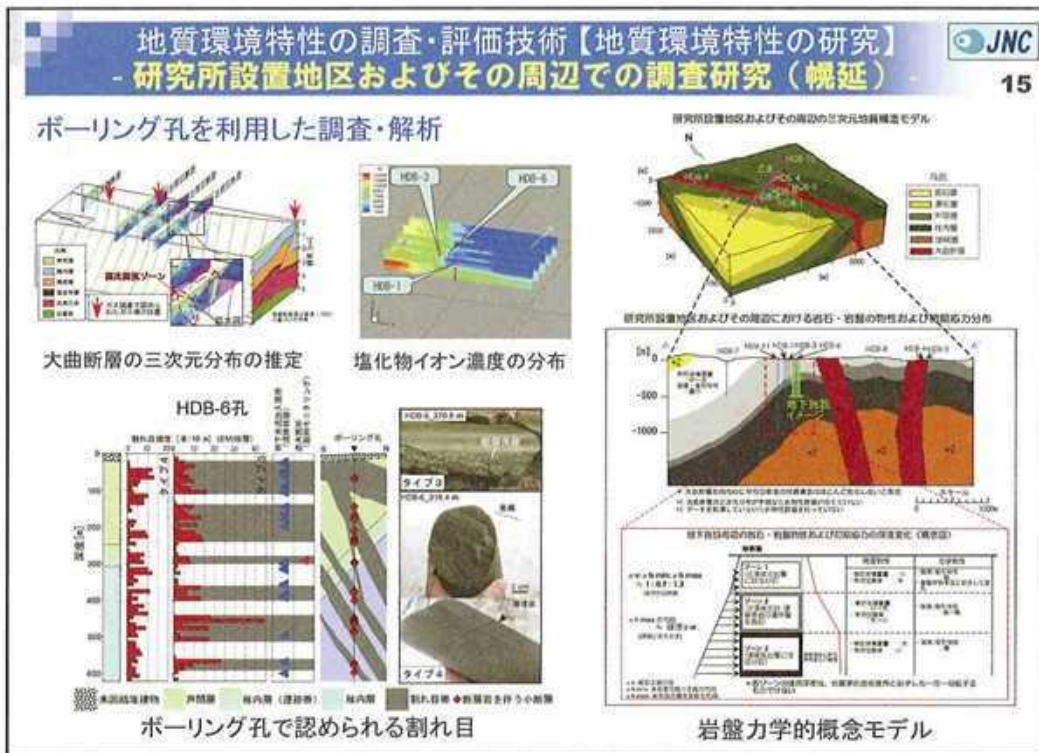






地質環境特性の調査・評価技術【地質環境特性の研究】 - 堆積岩を対象とした調査研究(幌延), 研究の進め方 -						JNC
	2001(平成13)年度	2002(平成14)年度	2003(平成15)年度	2004(平成16)年度	2005(平成17)年度	13
対象領域	幌延町全域	幌延町全域	研究所設置地区 およびその周辺地区	研究所設置地区 およびその周辺地区	研究所設置地区 およびその周辺地区	
調査目的	研究所設置地区の選定	研究所設置地区の選定 地質環境モデルの構築	地質環境モデルの構築	地質環境モデルの構築	地質環境モデルの構築	
						
調査項目	既存情報の調査 地表地質調査 地表水理調査 物理探査(空中・地上) ボーリング調査 ・HDB-1: 720 m ・HDB-2: 720 m	地表地質調査 地表水理調査 物理探査(地上) ボーリング調査 ・HDB-3: 520 m ・HDB-4: 520 m ・HDB-5: 520 m	地表地質調査 地表水理調査 物理探査(地上) ボーリング調査 ・HDB-6: 620 m ・HDB-7: 520 m ・HDB-8: 470 m	地表地質調査 地表水理調査 物理探査(地上) ボーリング調査 ・HDB-9: 520 m ・HDB-10: 550 m ・HDB-11: 800 m	地表地質調査 地表水理調査 ボーリング調査 ・HDB-11: 800 ~ 1,020 m	





深地層における工学技術の基礎の開発 - 瑞浪超深地層研究所の成果概要 -

JNC 17

地質環境情報に基づき、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・維持する工学技術の基盤の確立



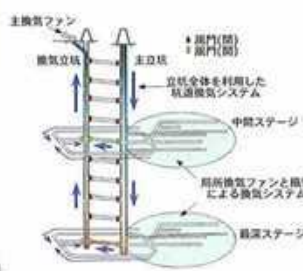


※地下施設の配置は調査研究の結果次第で見直すことがあります

地下施設の配置検討図

【留意点】・地下施設の設置深度が深い
・坑道のレイアウトが複雑で入坑者が多様

【設計を進める上での主な検討項目】
① 空洞安定性・支保安定性評価, ② 地震時の安定性,
③ 計測結果の設計・施工へのフィードバック技術, ④ 通気網解析
⑤ 突発湧水に対する掘削・施工対策技術, ⑥ 安全対策



通気網解析結果に基づいて
設定した通気システム



瑞浪超深地層研究所の建設状況

深地層における工学技術の基礎の開発 - 幌延深地層研究センターの成果概要 -

JNC 18

【留意点】
・地山強度比の小さい岩盤
・メタンガスを主成分とする可燃性ガスが賦存

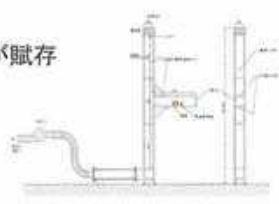
【設計を進める上での主な検討項目】
① 地下施設配置計画, ② 施工計画,
③ 空洞安定性, ④ 防災対策





※地下施設の配置は調査研究の結果次第で見直すことがあります

地下施設のイメージ図



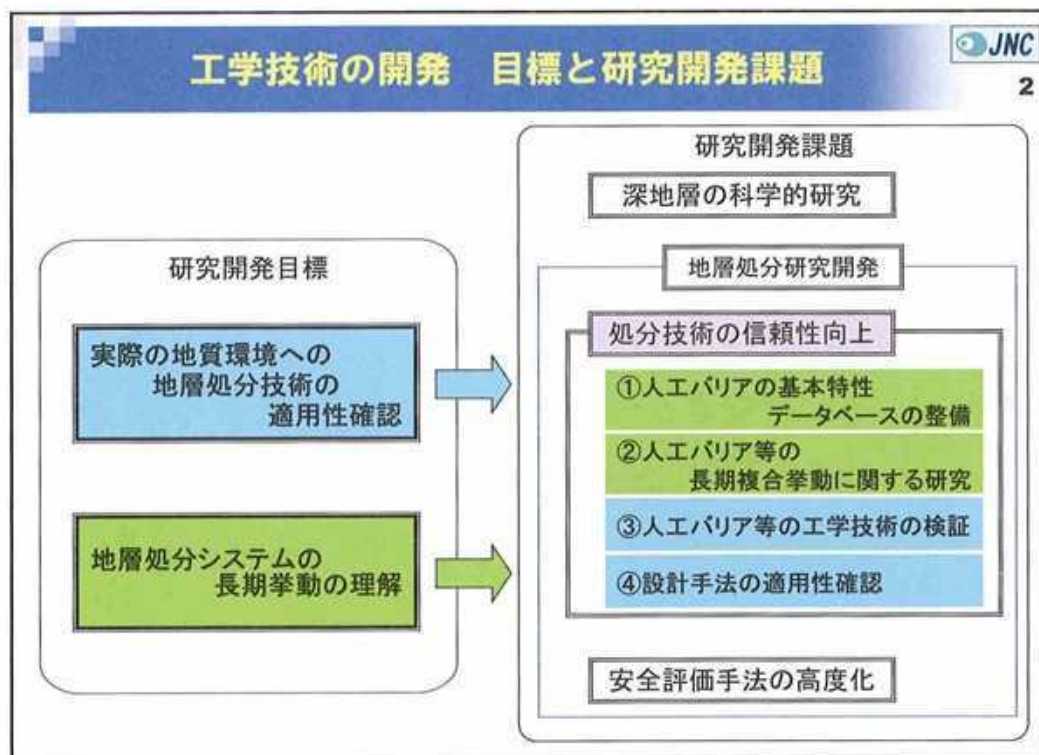
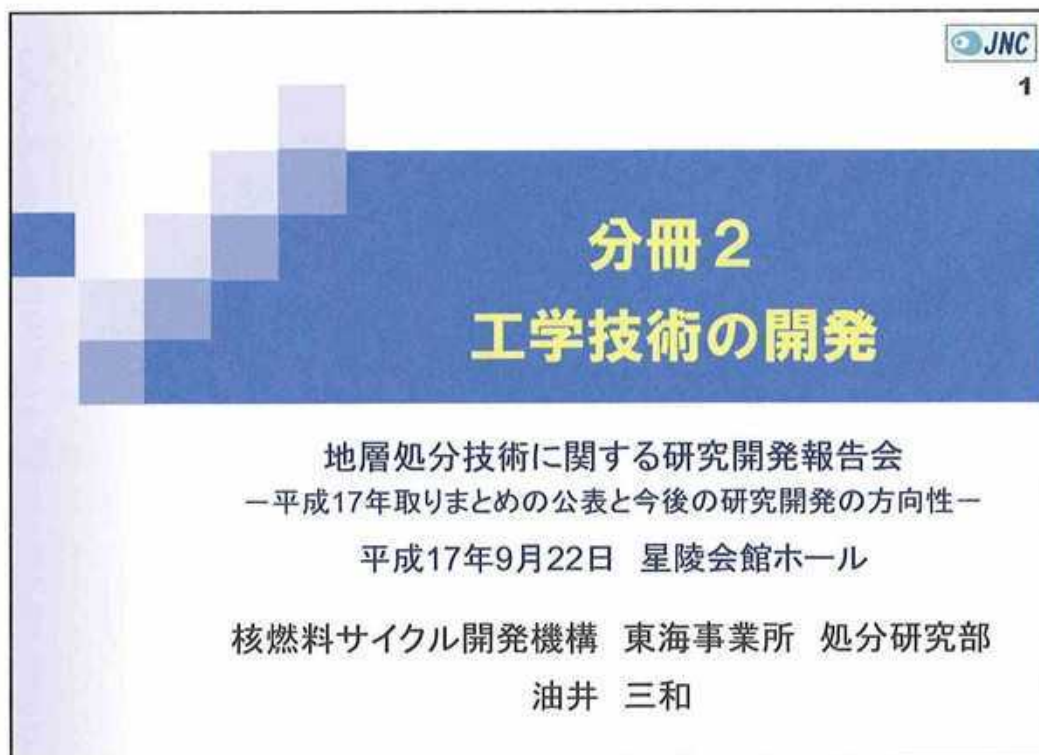
立坑模型の概要および模型実験による煙挙動の例

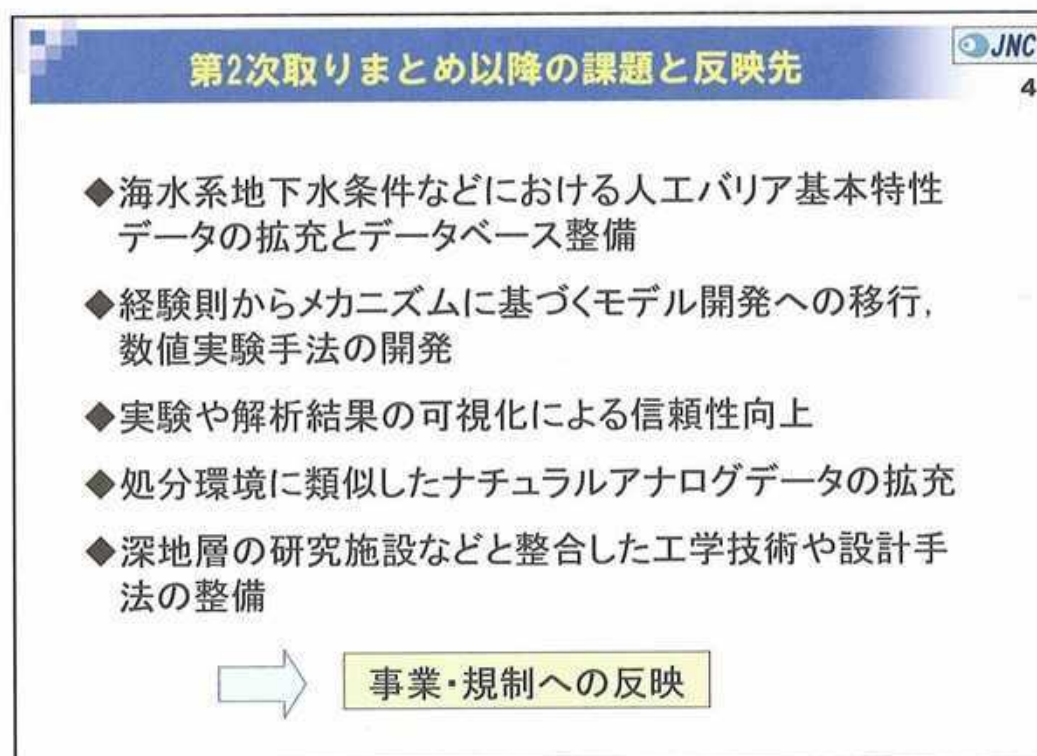
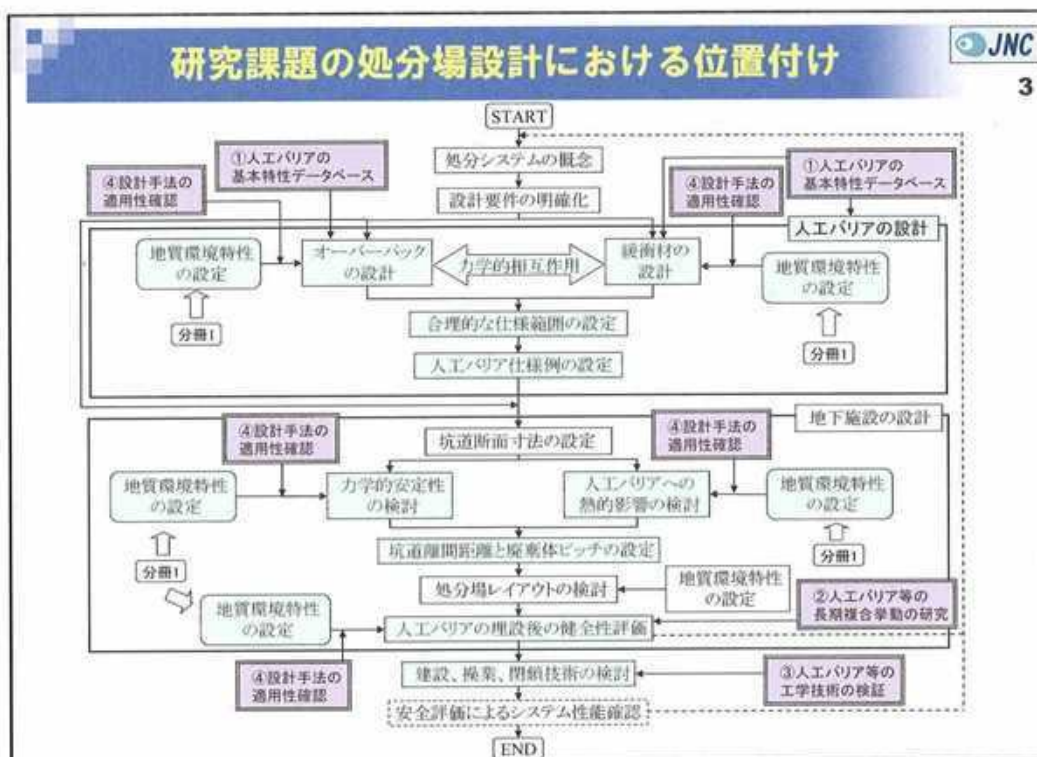
岩盤の物理性状 (HDB-3, 6孔データによる)

項 目	建築質泥岩 (声間層)	硬質頁岩 (種内層)	備 考
単位体積重量 [kN m ⁻³]	14~15	16~18	
空隙率 [%]	60~65	40~50	
一軸圧縮強度 [MPa]	5程度	5~25	ボーリングコア
透水係数 [m s ⁻¹]	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁸	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻⁸	原位直透水試験
耐久性 [%]	90以上	95以上	耐スレーキング指数
節理性 [%]	0.04以下	0.03以下	節理ひずみ指数
水平面内最大主応力方向	E-W方向		水圧破壊法による初期応力測定 鉛直応力は土被り圧相当を仮定
主応力比	水平面内最大主応力 1.3 水平面内最小主応力 0.9 鉛直応力 1.0		



 19	
まとめと今後の課題	
まとめ	地質環境の長期安定性に関する研究 ・ 地上からの調査による天然現象の調査手法の提示 ・ 地質環境の変化を予測・評価する手法に関するシミュレーション技術の開発
	地質環境特性の調査・評価技術 ・ 地上からの調査段階における体系的な調査・評価手法の例示
	深地層における工学技術の基礎の開発 ・ 地上からの調査結果に基づく地下施設の設計
今後の課題	地質環境の長期安定性に関する研究 ・ 地質環境の変化を予測・評価する手法の構築
	地質環境特性の調査・評価技術 ・ 2つの深地層の研究施設計画の第1段階の調査研究の総括 ・ 第2段階および第3段階の計画の具体化と実施および第1段階の評価
	深地層における工学技術の基礎の開発 ・ 第2段階の調査研究の本格実施と第1段階における地下施設の設計の評価





分冊 2・工学技術の開発 ー目次ー



5

1. 人工バリアの基本特性データベース

- オーバーバックの基本特性
- 緩衝材の基本特性
- 人工バリア等の性能保証に関する基盤情報整備

2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

- 人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究
 - 緩衝材の力学的変形挙動
 - 岩盤の力学変形挙動
 - 緩衝材の流出・侵入挙動
 - 人工バリアの変質・劣化挙動
- 熱-水-応力-化学連成挙動
- 人工バリア性能の維持限界条件
 - 緩衝材のガス透気回復挙動
 - 人工バリアせん断応答挙動
- ナチュラルアナログ研究

3. 人工バリア等の工学技術の検証

- 閉鎖技術
- 低アルカリ性コンクリートの開発

4. 設計手法の適用性確認

- 最新の知見に基づく第2次取りまとめ設計フローの更新
- 設計手法の適用事例
 - 堆積岩系岩盤における適用事例
 - 結晶質岩系岩盤における適用事例
- 地上からの調査段階における第2次取りまとめの手法の適用性と留意点

1. 人工バリアの基本特性データベース

ーオーバーバックの基本特性ー



6

炭素鋼オーバーバックの腐食挙動

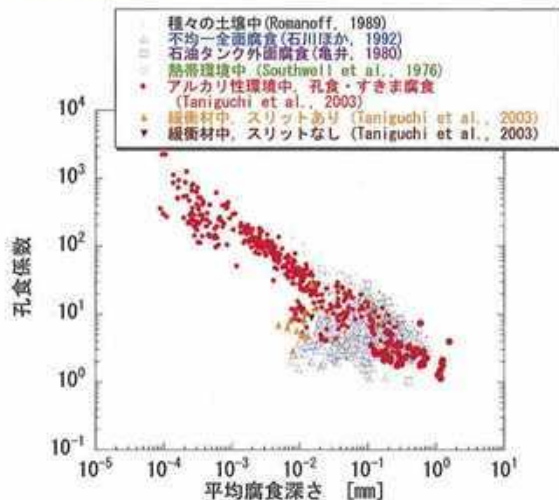
・第2次取りまとめ:

セメントによる影響、マグネタイトによる腐食加速など、限られたデータに基づく評価



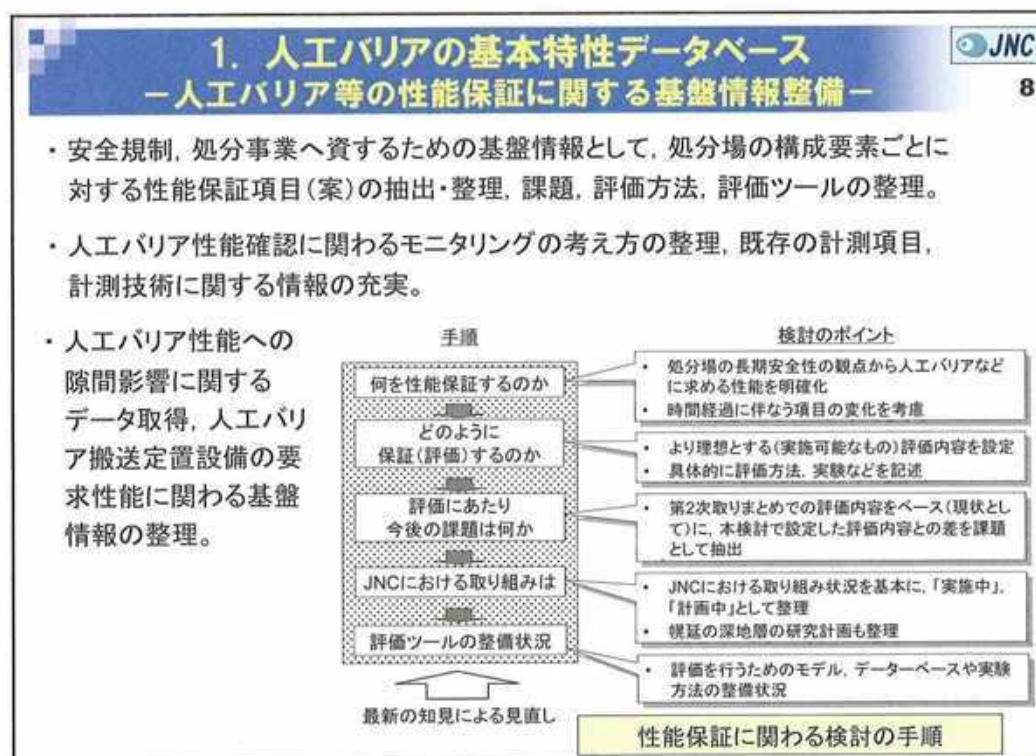
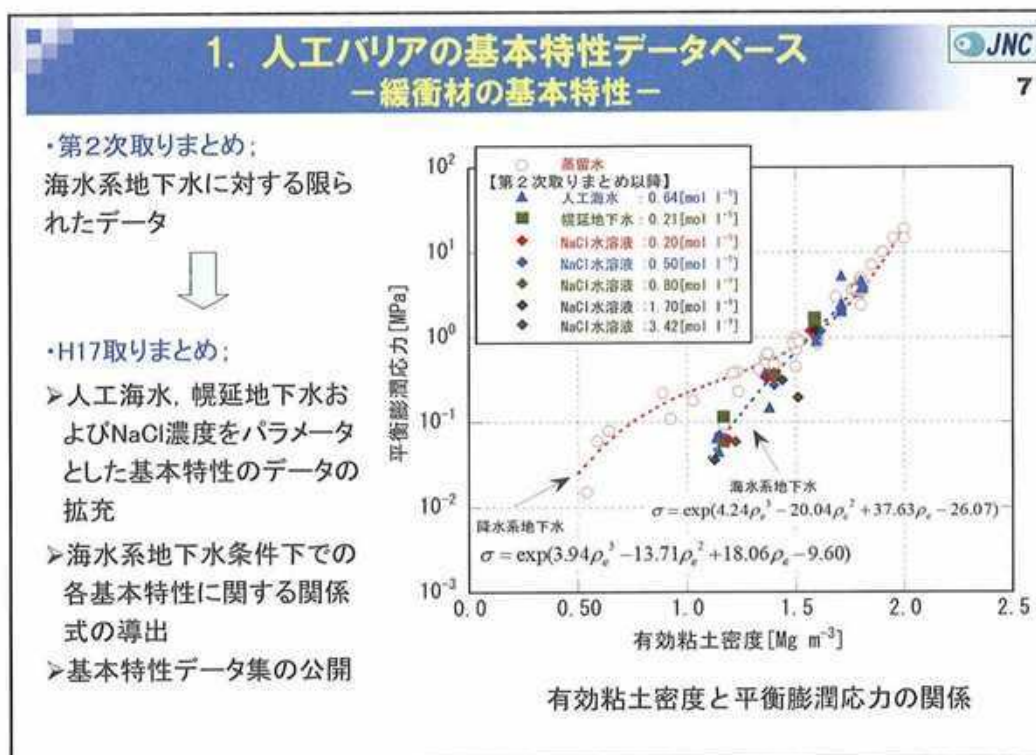
・H17取りまとめ:

数年間の長期データを含めた実験データの拡充により、1,000年間の腐食寿命評価の信頼性が向上



炭素鋼の孔食係数の平均腐食深さ依存性

高pH環境において炭素鋼が不動態化して局部腐食を生じたとしても顕著な腐食の局在化は生じない。



2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 — 緩衝材の力学的変形挙動 —

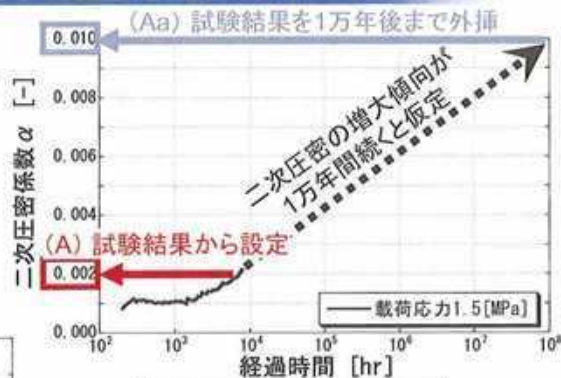
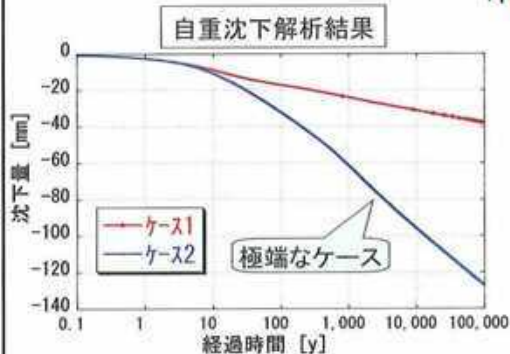
JNC

9

- ・第2次取りまとめ;
オーバーパックの自重沈下解析を行い、
1万年後の沈下量を評価



- ・H17取りまとめ;
クリープモデルの比較や基本データの
拡充によるモデル、パラメータの更新



二次圧密係数の増大傾向

二次圧密係数を次の方法で設定

- (ケース1) 実験の測定結果から設定 = 0.002
- (ケース2) 増大傾向を外挿して設定 = 0.01

ベントナイト鉱床の

二次圧密係数(推定値) = 0.001程度

2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 — 岩盤の力学変形挙動 —

JNC

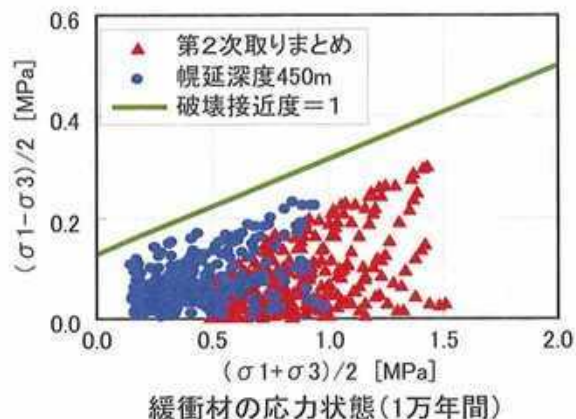
10

- ・幌延という実際の地質環境(堆積岩)を対象とした評価手法の検証, 超長期への適用性, 基本データの拡充

- 岩盤への内圧効果(支保工や人工バリアからの反力)による岩盤の長期変形挙動の抑制。
- 岩盤の強度・透水性の自己回復特性に関する知見の整備。
- 幌延の地質環境(力学特性, 地下水化学, 偏圧下)における, ニアフィールドの力学的長期安定性の確認。

さらに,

- 地圧現象に関するデータに基づく岩盤クリープモデル(大久保モデル)の適用性確認。



2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 －緩衝材の流出・侵入挙動－

JNC

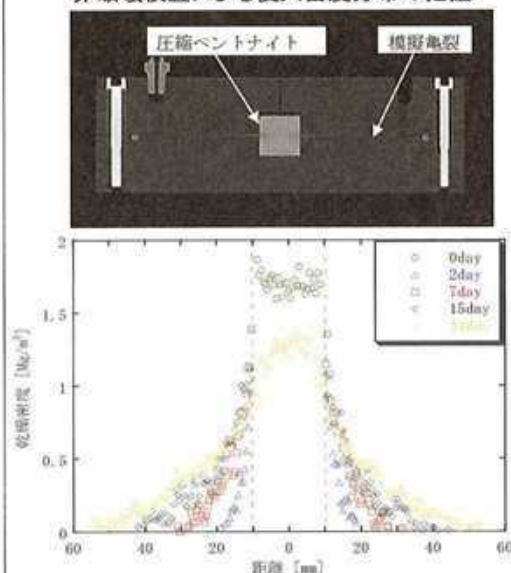
11

- ・第2次取りまとめ;
実験データに基づく経験則による評価



- ・H17取りまとめ;
 ▶第2次取りまとめでは、得られていなかった緩衝材の亀裂侵入密度のデータをX線CTを用いて取得
 ▶拡散モデルによる適用性確認
 ▶海水系地下水では降水系地下水に比べ緩衝材侵入は、顕著でないことを確認

非破壊検査による侵入密度分布の把握

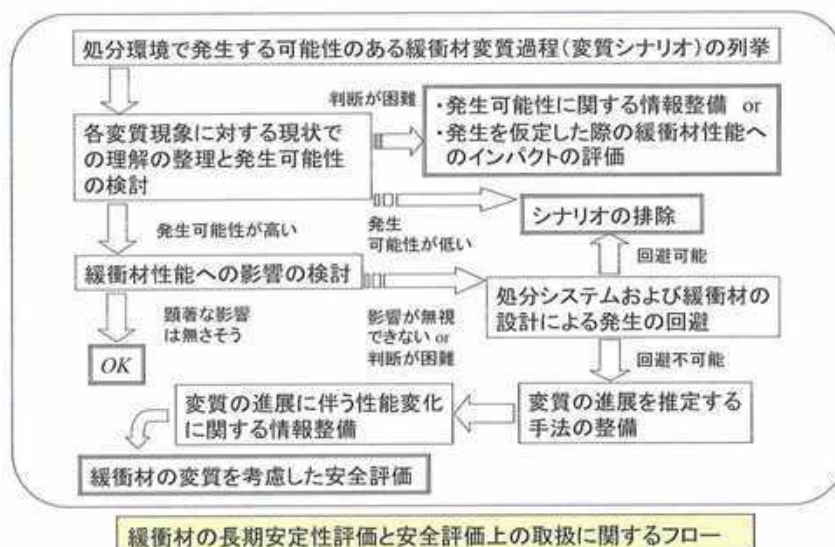


2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 －人工バリアの変質・劣化挙動－

JNC

12

- ・緩衝材の長期安定性評価に関するフローを作成して、温度、炭素鋼との相互作用、セメントとの相互作用の3つの影響について長期安定性を概略的評価。



2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 －熱-水-応力-化学連成挙動－

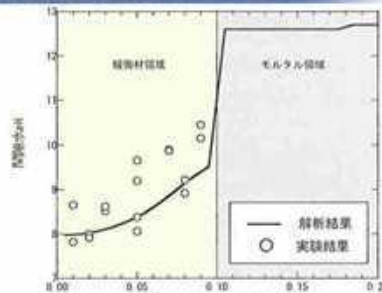
JNC

13

- ・第2次取りまとめ;
熱-水-応力連成解析による評価



- ・H17取りまとめ;
 ➢ 熱-水-応力解析コードに、化学現象を組み込んだプロトタイプ・コードを構築
 ➢ 室内連成試験による、熱-水-応力-化学連成モデルの一部検証
 ➢ プロトタイプ・コードによる、塩の蓄積に関する解析、国際共研(DECORALEX)を活用したユッカマウンテンの坑道規模加熱試験に対する検証解析、第2次取りまとめの処分場レイアウトを用いた熱-水-化学連成解析を実施
 ➢ 第2次取りまとめにおける緩衝材の最高温度、再冠水時間やpHの解析結果の妥当性を確認



180日後のpH分布
室内連成試験結果と予備解析結果の比較例

	第2次 取りまとめ	プロトタイプ・コード による解析結果
緩衝材の最高温度	82℃～98℃	90℃
緩衝材の再冠水時間	50年以下	20年
人工バリア定置後1,000年の 緩衝材間隙水pH	8.4	8.9

第2次取りまとめとプロトタイプ・コードによる解析結果の比較

2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 －緩衝材のガス透気回復挙動－

JNC

14

- ・第2次取りまとめ;
ガス圧力の測定データに基づく評価



- ・H17取りまとめ;
 ➢ 緩衝材中のガス移行メカニズムを把握するために、X線CT法の適用可能性を確認
 ➢ 選択的移行経路の形成によるガス移行挙動の確認



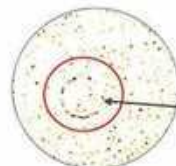
X線CTスキャナの概観



ガス供給19日後



ガス供給77日後



ガス供給96日後

リング状に現れた
局所的な変化領域
(選択的移行経路
の形成)

初期状態とガス供給後のCT値の差画像

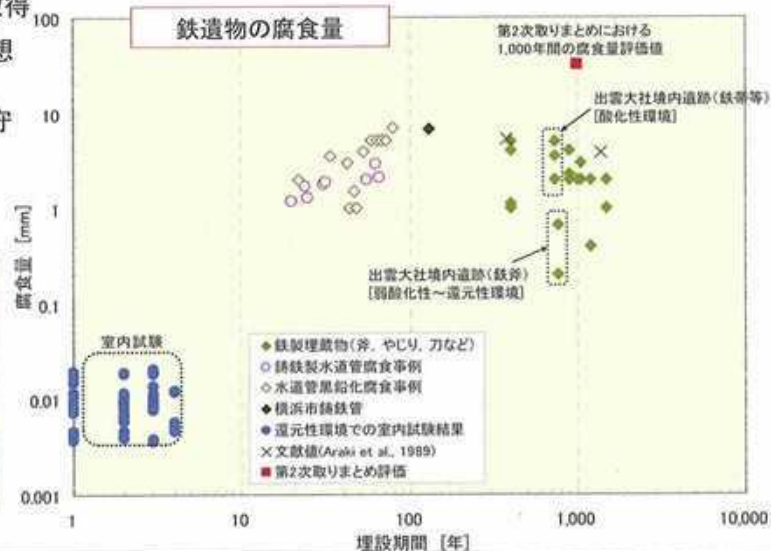
2. 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 — ナチュラルアナログ研究 —

JNC

15

- ・ 考古学試料の研究により、鉄の長期腐食挙動について、第2次取りまとめ段階ではデータがほとんど存在しなかった1,000年規模の弱酸化性から還元性環境での腐食速度事例データを取得
- ・ 第2次取りまとめで想定された1,000年後の腐食量評価の保守性を事例的に確認

(鉄斧の出土品)



3. 人工バリア等の工学技術の検証 — 閉鎖技術 —

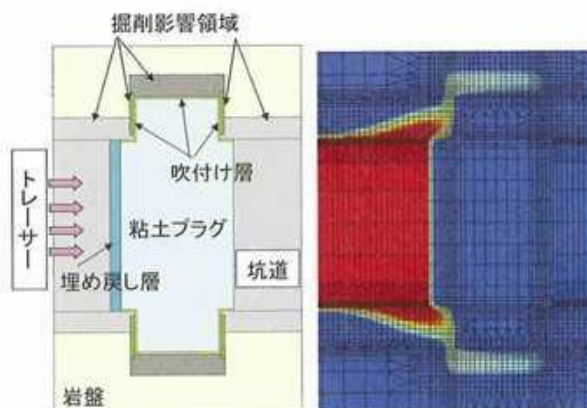
JNC

16

- ・ 第2次取りまとめ;
➢ 結晶質岩系岩盤での粘土プラグの施工の実証および降水系地下水条件下での埋め戻し材仕様の提示



- ・ H17取りまとめ;
➢ データの拡充によるシーリングに関する評価手法の体系化
➢ 結晶質岩系岩盤におけるプラグ性能の提示
➢ 海水系地下水条件下における埋め戻し材の適用性に関わる基本データの拡充
➢ シナリオ分析による閉鎖性能評価のための手法開発



原位置試験閉鎖要素 3次元トレーサ解析結果
(トレーサ濃度分布100日後)

トレーサは掘削影響領域を選択的に移行していることが示されている。

3. 人工バリア等の工学技術の検証 ー低アルカリ性コンクリートの開発ー

JNC

17

・第2次取りまとめ；

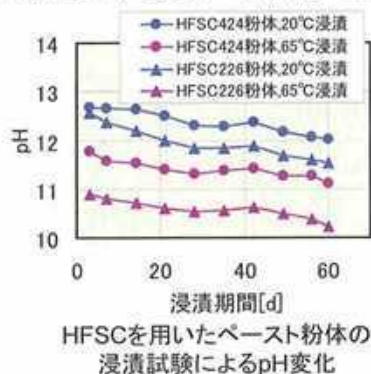
➢普通セメントによる地下水のpH上昇を抑制するため低アルカリ性セメント(HFSC)の使用を推奨



・H17取りまとめ；

➢HFSCの流動性・強度特性など、施工上問題ないことを確認

➢pHの低下挙動のデータ取得・モデル開発とpH目標達成についての見通し



吹付けコンクリートの模擬施工状況

4. 設計手法の適用性確認(1)

JNC

18

ー幌延における地質環境条件の設定と設計手法の適用性ー

・第2次取りまとめ；

サイトを特定しない地質環境条件の設定



・H17取りまとめ；

➢地下研サイト周辺のボーリングデータに基づき熱特性、力学特性、地下水化学特性及び水理特性を設定

➢第2次取りまとめにおける処分場全体設計フローの現実的な見直し。

➢第2次取りまとめにおける人工バリア設計の考え方は、適用可能。

➢第2次取りまとめにおける空洞の安定性評価指標について、実際の地質環境条件に基づく見直し(支保工の現実的設定のため)を実施(右表)。

指 標	第2次取りまとめ	幌延の深地層の研究施設
支保工の応力	許容応力度以内	許容応力度以内
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。	塑性領域が対策工により改良可能な範囲であること。
変形(岩盤の直ひずみ及び最大せん断ひずみ)	桜井・足立(1988)による限界ひずみと弾性係数の関係で示されている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。	第2次取りまとめの考え方(左記)は、情報化施工のための指標

4. 設計手法の適用性確認(2)

－地上からの調査段階における留意点－

JNC

19

地上からの調査段階における留意点について、地質環境調査、施設設計、人工バリア設計、閉鎖設計などの観点から整理

● 地質環境調査

- 力学特性の調査では、コンクリート支保工の使用可否、材料仕様に応じて空洞や処分孔が安定する地質環境が分布するか否か調査が必要
- 割れ目などが比較的少ない岩盤の分布調査
- 地下水化学データに関する熱力学的解析による補正

● 施設設計

- 設計の随時更新のための情報化施工の採用
- 支保工材料等に関する制約条件の明確化と二重支保に関する適用性の検討

● 人工バリア設計

- 影響の大きい設計因子の抽出と設計手法の合理化
- 地質環境条件と安全機能との関係の整理(例えば、緩衝材の流出、コロイド影響、セメント影響等に関する重要性の把握)

● 閉鎖設計

- 海水系地下水条件における埋め戻し材のシーリング性能の明確化

工学技術の開発 －まとめと今後の課題－

JNC

20

■ 基礎データの拡充と設計評価手法の信頼性の向上

- 人工バリア等の基本特性や長期挙動に関するデータの拡充とデータベース整備
- 個別現象や複合挙動に関するモデルの更新
- 現象の可視化によるメカニズム理解
- 1,000年規模の考古学的鉄製品に関するナチュラアナログデータの取得
- 閉鎖技術の検証と閉鎖性能の評価
- 実際の地質環境における試設計と地上からの調査段階における留意点の整理



海水系等を中心とした
現象理解の向上



現象理解の向上と評価
モデルの信頼性向上



閉鎖等の個別要素技術
の強化



設計手法の適用性確認

■ 今後の課題

- 最新の知見に基づく設計手法やデータベースの恒常的な更新、ならびに知識ベースの構築
- 深地層の研究施設計画と連携した設計手法の適用性確認



1

分冊3

安全評価手法の開発

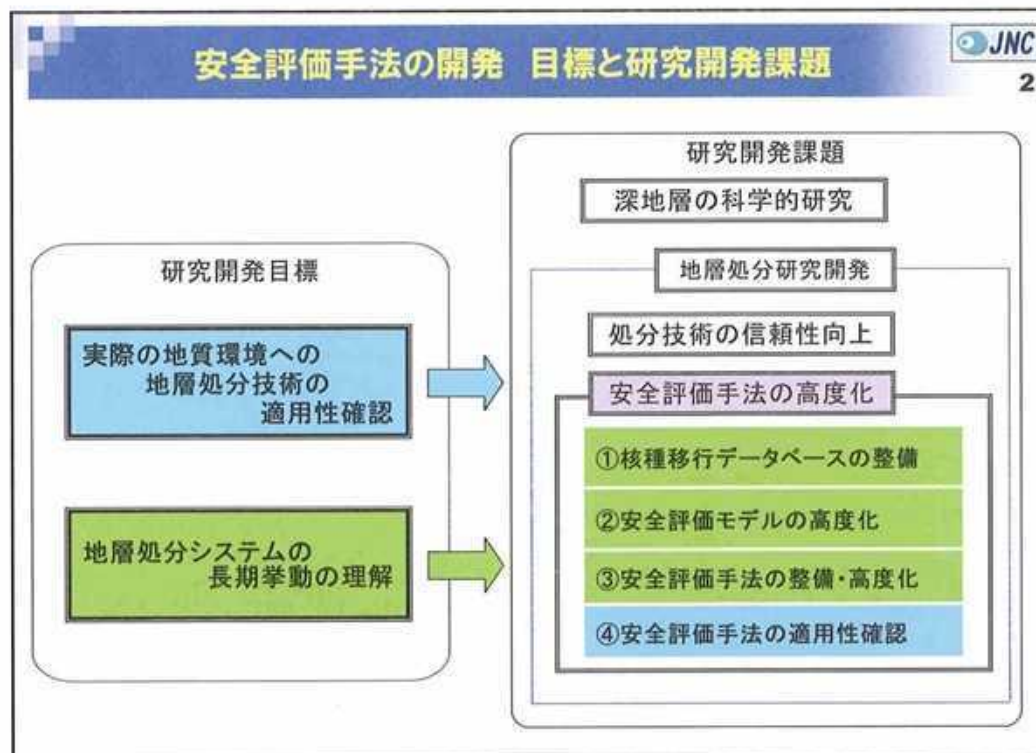
地層処分技術に関する研究開発報告会

ー平成17年取りまとめの公表と今後の研究開発の方向性ー

平成17年9月22日 星陵会館ホール

核燃料サイクル開発機構 東海事業所
環境保全・研究開発センター 処分研究部
システム解析グループ

内田 雅大



第2次取りまとめ以降の安全評価手法の開発の進め方



3

➤ サイクル機構の役割に鑑み、網羅性、全体評価のための統合よりも個別重要課題の技術基盤の強化を重視

➤ 全体評価を実施しないため、以下の視点を安全評価手法の開発の指標として考慮

- ・安全評価上重要なデータの拡充
- ・現象理解、定量的モデルの現実性向上
- ・合理的評価技術の整備
- ・実際の地質環境や設計条件等との整合性、適用性の向上
- ・不確実性の取り扱いの向上
- ・追跡性、透明性、わかりやすさの向上

分冊3・安全評価手法の開発 目次



4

①核種移行データベースの整備

- 放射性元素の熱力学データベースの整備
- 収着・拡散データベースの整備

②安全評価モデルの高度化

- 岩盤中水理・物質移行モデルの高度化
 - 地上からの調査段階における地下水流動評価手法の整備
 - ・亀裂ネットワークモデルの高度化
 - ・実測された間隙水圧データによる水理地質構造の推定
 - ・地下水水質変化を考慮した水理地質構造モデルの信頼性向上
 - ・堆積プロセスを考慮した地質構造推定技術の開発
 - ・地下水流動解析結果の不確実性定量化技術の開発
 - 亀裂を対象とした水理・物質移行現象の理解
 - ・天然亀裂を対象とした水理・物質移行特性データの取得
 - ・不均質な開口幅分布が水理・物質移行特性に与える影響検討のための基盤技術の整備
 - ・亀裂内充填物質や透水量係数などの不均質性が水理・物質移行に及ぼす影響の検討
 - ・原位トレーサ試験より得られる水理・物質移行特性値の不確実性評価
 - 堆積岩中の水理・物質移行現象の理解

➤ 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化

➤ 現象論的核種移行モデルの開発

- ガラスの長期浸出挙動
- 核種の溶解現象
- 核種の収着・拡散現象

➤ コロイド、有機物、微生物の影響評価モデルの開発

- コロイドの影響評価モデルの開発
- 天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発

➤ 生物圏評価モデルの高度化

③安全評価手法の整備・高度化

- シナリオに関する技術の高度化
 - シナリオ解析技術の高度化
 - 天然現象影響評価技術の高度化
- 不確実性評価技術の高度化
 - パラメータの分布設定技術の高度化
 - データ不確実性の影響評価技術の高度化
 - モデル不確実性の影響評価技術の高度化
- 技術情報の統合技術

④安全評価手法の適用性確認

1.核種移行データベースの整備(1)

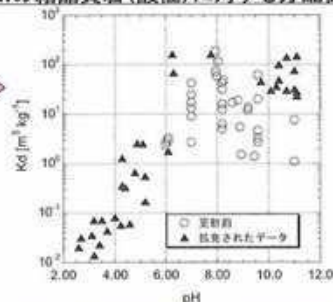


5

➤ 第2次取りまとめで不足していたデータの拡充

- 海水系地下水, 堆積岩系での収着についての実験データの取得(Cs, Se など)と文献調査を行い, データを拡充
- アクチノイド元素の溶存化学種, 溶解度積についての実験データを拡充し, データの傾向性, 系統性を把握 (Np(IV), U(IV), Pu(IV)など)

JNC-SDBを用いた分配係数のpH依存性の例
(Amの結晶質岩(酸性)に対する分配係数)



データの充実により分配係数の環境条件への依存性の理解が向上

安全評価上重要なデータの拡充,
実際の地質環境との整合性の向上

1.核種移行データベースの整備(2)



6

- ### ➤ 外部公開ホームページでのデータベースの公開
- 熱力学データベース(JNC-TDB),
収着データベース(JNC-SDB)を
2003年8月1日に運用開始し,
2005年7月時点で国内外の
利用登録者は300名を越えた

透明性の向上

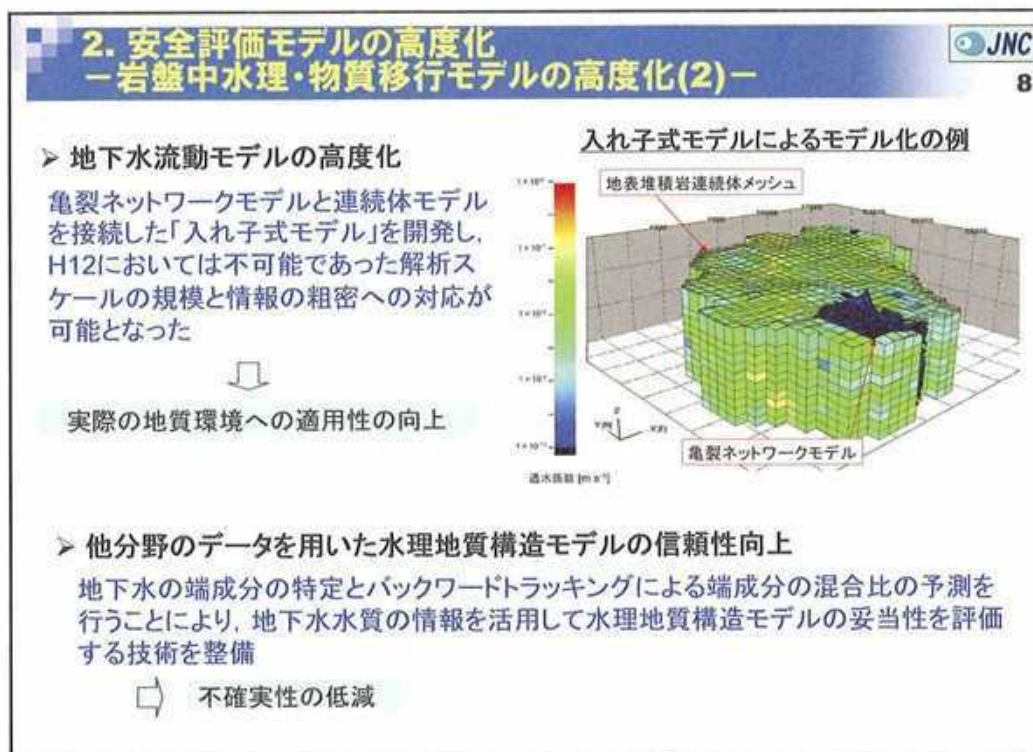
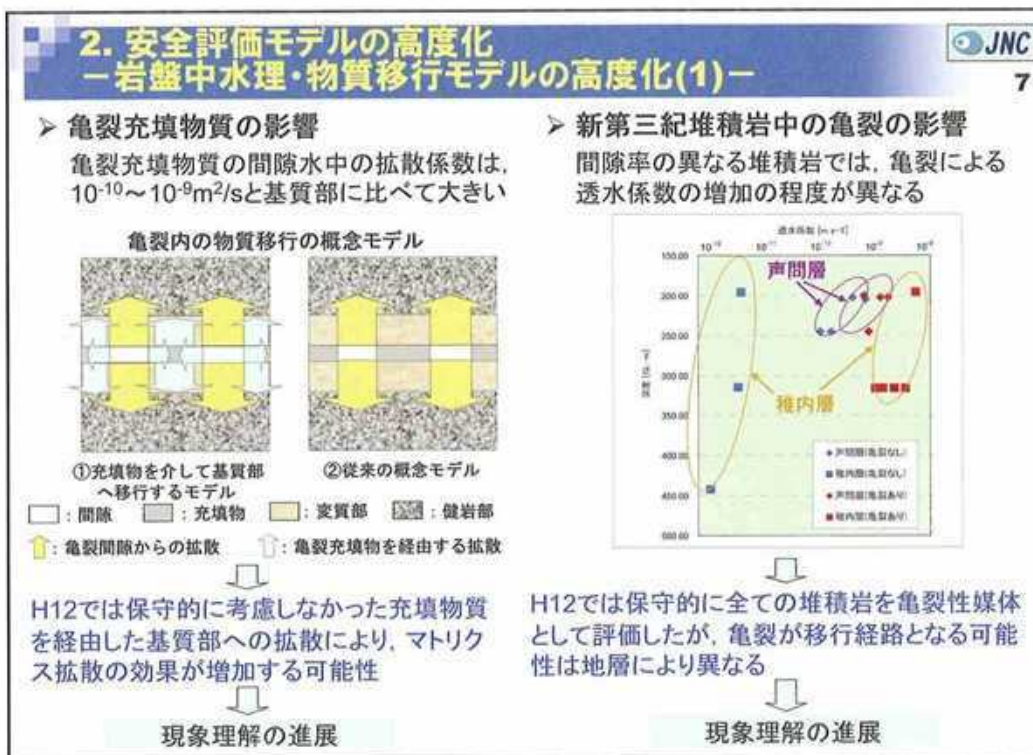
- ### ➤ データの信頼性を向上させるための技術基盤の整備

収着データの取得方法の標準化や信頼度付与の手法開発を行い,
データ取得の品質向上の基盤を整備した

追跡性, 透明性の向上

JNC-TDBとJNC-SDBの
ホームページ画面





2. 安全評価モデルの高度化 —地下水・間隙水水質モデルの高度化—

JNC

9

➤ 圧縮ベントナイト中の間隙水pHの時空間変化に関するデータ取得方法の開発

第2次取りまとめ時には実測できなかった圧縮ベントナイト中の間隙水のpHを実測する技術を整備



現象理解の進展

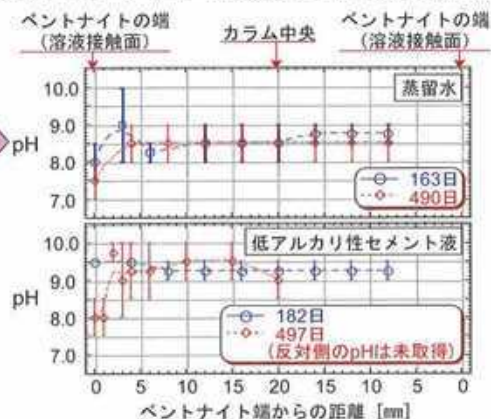
➤ 深部地下水水質の推定手法の構築

化学平衡論に基づき採水後地表で測定された地下水データから深部地下水水質を推定する手法を構築



実際の地質環境への適用性の向上

圧縮ベントナイト中間隙水のpHの時空間変化



試験後に圧縮ベントナイトを切断し、切断された試料面ごとに低脱色性pH試験紙を用いて、間隙水のpHを測定する手法を開発

2. 安全評価モデルの高度化 —現象論的核種移行モデルの開発—

JNC

10

■ ガラスの長期浸出挙動

- ・ pH11以上→方沸石が生成、ガラス浸出速度が加速
- ・ pH11以下→スメクタイトが生成、ガラス浸出速度が遅い



変質層の生成鉱物に応じたガラス浸出速度の違いを把握



現象理解の進展

生成鉱物とガラス浸出速度(Bに基づく浸出速度)の関係

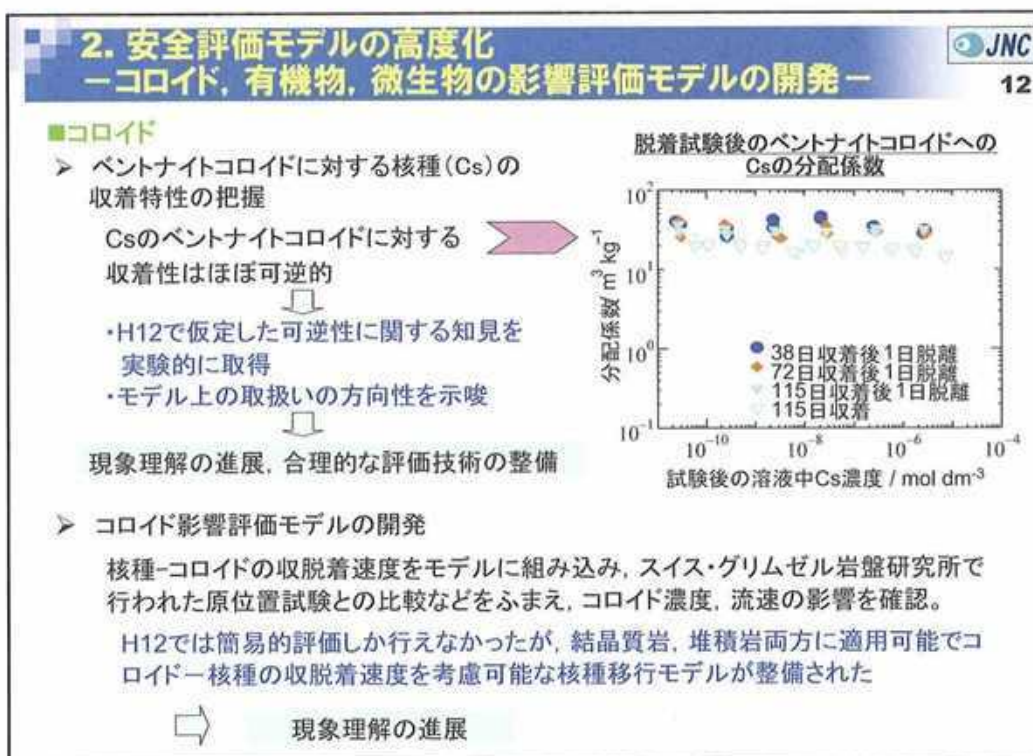
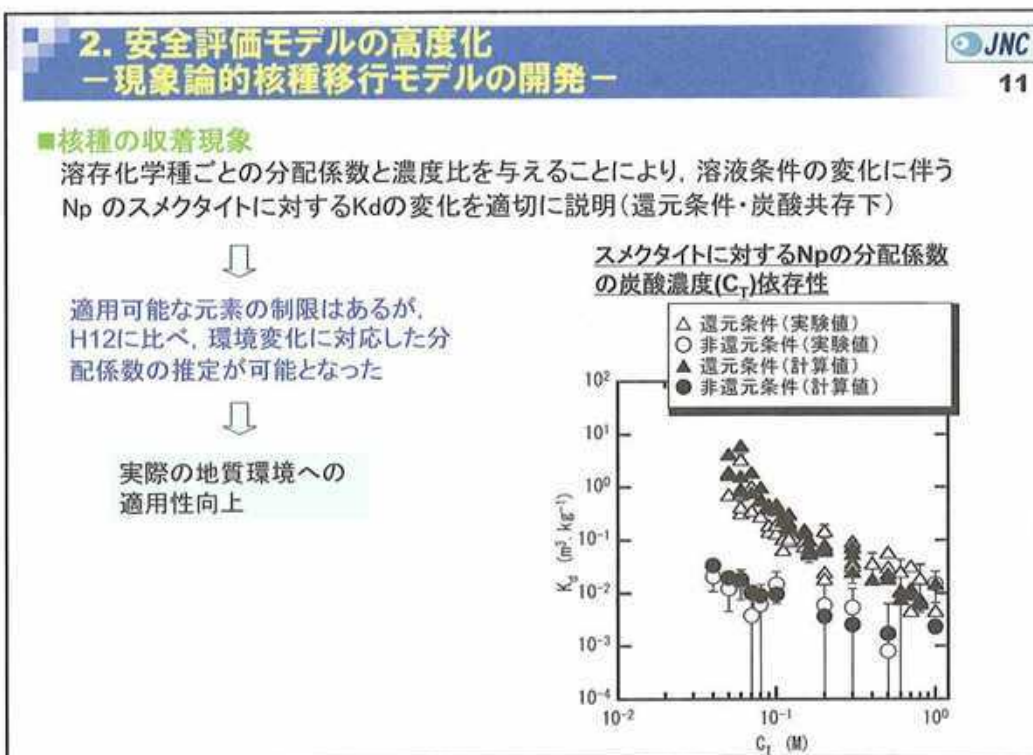
実験条件 (反応溶液、温度)	溶液pH	主な生成鉱物	ガラス浸出速度
0.1M NaOH 90~150°C	12	アナルサイム、 スメクタイト	非常に速い
0.03M NaOH 90~150°C	11	スメクタイト、 アナルサイム	速い
0.001M NaOH 60~120°C	9.5	スメクタイト	遅い
DIW 90~150°C	10	スメクタイト	遅い

■ 核種の溶解現象

➤ H12までのThO₂に引き続き、UO₂についても非晶質固相から結晶質固相への変遷に伴う溶解度の低下を確認、Ra等に関する固溶体モデルを開発



現象理解の進展



2. 安全評価モデルの高度化

—コロイド、有機物、微生物の影響評価モデルの開発—

JNC

13

■天然有機物

- 圧縮ベントナイト中の透過実験をポリアクリル酸を用いて人工海水、蒸留水の条件で実施

- ・分子量450,000のポリアクリル酸は、いずれの条件でも透過しない
- ・分子量15,000のポリアクリル酸は、人工海水の方が蒸留水に比べて透過しやすい

第2次取りまとめ時にはなかった地下水条件による有機物の透過性の違いに関する知見が得られた

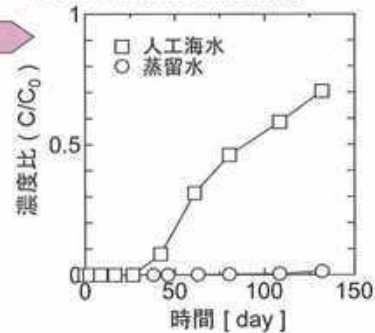
現象理解の進展

- フミン酸共存下での錯形成試験を行い、解離しにくい不可逆性の錯体の形成を示唆する知見(Np(IV))を取得



現象理解の進展

圧縮ベントナイトからのポリアクリル酸(分子量15,000)の破過曲線



2. 安全評価モデルの高度化

—生物圏評価モデルの高度化—

JNC

14

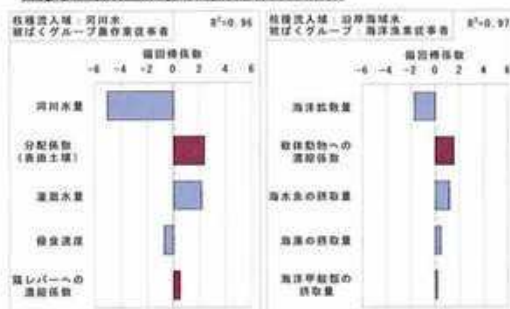
- 実際の地表環境の特徴に応じて優先的に整備すべきパラメータの選定を効率的に行う手法を整備

データ不確実性に関する感度解析

重要パラメータの抽出

パラメータの現在の設定状況の整理
→ 地表環境の特徴に応じた優先度の検討

重要パラメータ抽出の例(Cs135)



⇒ 実際の地質環境への適用性の向上

- 地質環境と生物圏のインターフェース(GBI)の候補の設定において重要な要因と、その把握に寄与すると考えられる調査項目を概略的に整理

⇒ 実際の地質環境への適用性の向上

設定状況整理の例

十分に特性化されている



特性化が充分でない

3. 安全評価手法の整備・高度化 —シナリオに関する技術の高度化—

JNC

15

■シナリオ解析技術の高度化

- ・FEPの相関関係を、マトリクス形式で整理するとともに、安全機能との関係も考慮して構造的に整理する手順を作成
- ・計算機上で相関関係の整理やスクリーニングなどが行える機能を整備

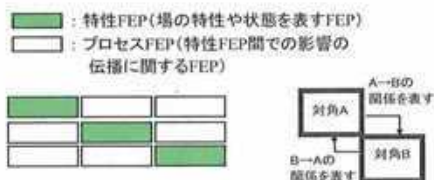


第2次取りまとめにおいて複雑で時間を要したFEPの相関関係の整理作業について、相関関係の十分性の確保、作業の効率性、追跡性、透明性などの向上を図ることができる手法を整備した

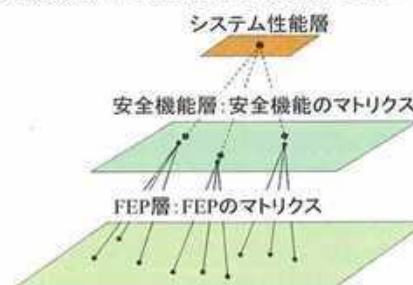


合理的な評価技術の整備
追跡性、透明性、わかりやすさの向上

相関関係のマトリクス形式での整理のイメージ



相関関係マトリクスの階層的な構造のイメージ



3. 安全評価手法の整備・高度化 —シナリオに関する技術の高度化—

JNC

16

■天然現象影響評価技術の高度化

「天然現象の発生様式、地質環境条件の変化、その地域性などの特徴の整理を行う作業」と「その結果を影響評価の観点から合理的に類型化し、影響解析を行う作業」を統合的に実施するための手順を構築



Step2での地質環境条件の変化に関する知見・データの収集・整理の作業例(火山の例)



第2次取りまとめに比べ、過度な保守性を排除した、より現実的な天然現象の影響評価手順を構築



合理的な評価技術の整備
追跡性、透明性、わかりやすさの向上

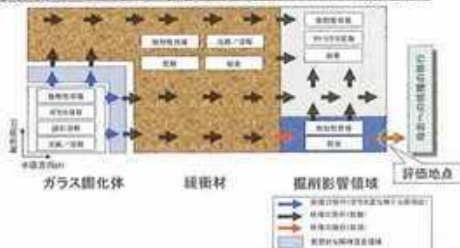
3. 安全評価手法の整備・高度化 —不確実性評価技術の高度化—

JNC

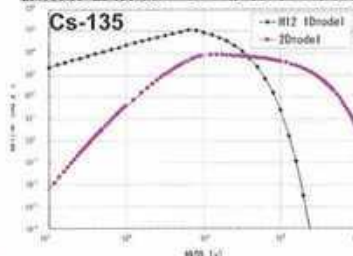
17

- 第2次取りまとめで保守的に簡略化あるいは無視したプロセス等を取り込んだ代替モデルの開発と影響評価(掘削影響領域での核種移行遅延, ガラスの割れの影響)を実施

2次元人工バリア中核種移行モデルの概念図



掘削影響領域からの移行率の経時変化



⇒ 不確実性の取扱い技術の向上, 合理的な評価技術の整備

- データ不確実性を分布として定量化するため, 実際の地質環境の特徴, 利用可能な情報および専門家の知見・判断を基に設定する体系的手順(誘出法)を整備
➤ データ不確実性の組合せが評価結果へ与える影響を網羅的かつ効率的に評価するためのモンテカルロ法を用いた影響評価技術を整備
➤ 目的に応じて重要なパラメータを分析するために, 重回帰分析, クラスタ分析, 決定木分析などを組合せたり使い分ける技術を整備

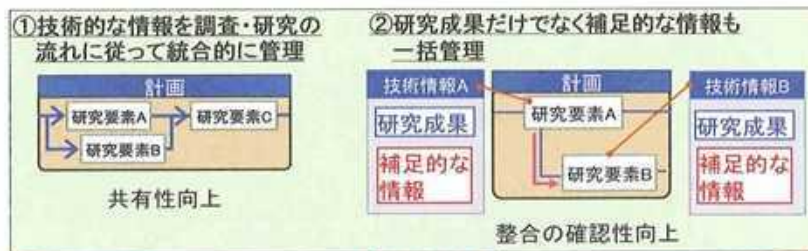
⇒ 不確実性の取扱い技術の向上, 合理的な評価技術の整備

3. 安全評価手法の整備・高度化 —技術情報の統合技術—

JNC

18

- 技術的な情報の共有と整合性の確保を支援するための技術として技術情報統合システム(JGIS)を開発

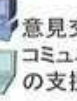


③ 情報共有・コミュニケーションの促進

自動的な通知による
タイムリーな情報の共有
の支援



技術情報
統合システム



意見交換などによる
コミュニケーション
の支援

H12に比べて多数の研究要素間での情報の共有と整合性の確保を向上させる環境を整備

実際の地質環境や設計条件等との整合性,
安全評価の追跡性, 透明性, わかりやすさの向上

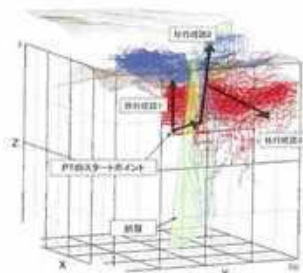
4. 安全評価手法の適用性確認

JNC

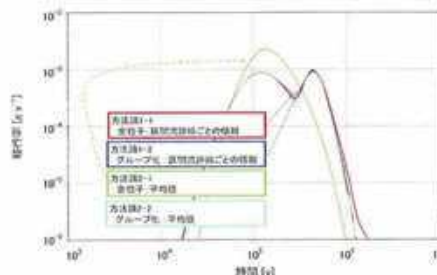
19

- 地質環境の調査から物質移行解析に至る一連の作業の枠組みを整備するとともに、物質移行解析における移行経路情報の処理の複数のオプションを構築

物質移行解析の対象とする移行経路の例



物質移行解析結果の例(複数の方法の比較)



H12では実施しなかった、実際の地質環境を対象とした地下水流動解析と物質移行解析を接続する手順を整備

⇒ 実際の地質環境への適用性の向上

- 安全評価に係る個別技術を、深地層の研究施設計画や海外の地下研究施設での調査試験データへ適用し、実際の地質環境に適用する際に重要と考えられる課題や留意点を抽出

⇒ 実際の地質環境への適用性の向上

まとめと今後の課題

JNC

20

■ まとめ

全体計画に基づき、安全評価の信頼性向上に向けて安全評価の技術基盤が第2次取りまとめ(H12)以降以下のように強化された

1. 核種移行データベースの整備: 重要核種の溶解度、分配係数(海水系、堆積岩)などの整備 ⇒ データの拡充 データベース公開 ⇒ 透明性の向上
2. 安全評価モデルの高度化: 亀裂中の水理・物質移動、コロイド、有機物など ⇒ 現象理解の進展、入れ子式モデルの開発など ⇒ 実際の地質環境への適用性の向上
3. 安全評価手法の整備・高度化: シナリオ解析技術、天然現象影響評価技術の高度化 ⇒ 合理的な評価技術の整備 不確実性評価技術の高度化 ⇒ 不確実性の取扱いの向上
4. 安全評価手法の適用性確認: 実際の地質環境を対象とした地下水流動解析と物質移行解析の接続技術など ⇒ 実際の地質環境への適用性の向上

■ 今後の課題

エントリー、クオリティ、深地層の研究施設計画を活用した技術基盤の継続的な強化と知見の拡充を以下のように行い、知識ベースとして知見の蓄積を図る

1. 核種移行データベースの整備: データ(溶解度、収着、拡散)の拡充、データベースの更新の継続、パラメータ設定技術としての体系化
2. 安全評価モデルの高度化: 重要な個別現象モデルの高度化の継続、安全評価モデルとしての体系化
3. 安全評価手法の整備・高度化: 各技術の高度化の継続、安全評価技術としての体系化
4. 安全評価手法の適用性確認: 各手法・技術の適用と調査へのフィードバックの継続、地質環境の調査等の段階に応じた手法・技術の体系化


1

地層処分技術の 知識化と管理

地層処分技術に関する研究開発報告会
－平成17年取りまとめの公表と今後の研究開発の方向性－
平成17年9月22日 星陵会館ホール
核燃料サイクル開発機構 バックエンド推進部
梅木 博之


2

知識化レポート：概要

地層処分技術に関する知識基盤化の必要性

- 事業主体や規制当局などステークホルダーの意思決定のための判断材料
 - 地層処分計画全体を通じて恒常的に信頼性を向上
 - 研究開発成果の集積ではなく“知識”として管理

知識基盤化のための方法論の提示

- 地層処分事業の推進や安全規制の策定に必要な科学技術的な知識を継続的に発展させ伝承していくための考え方と方法論

地層処分の特徴



3

技術的視点

- 安定な環境として深地層を利用することにより、長期にわたる受動的な安全系 (Passive Safety System) の構成が可能

【地下深部が有する特徴】

- 地表に比べ人間活動や自然現象の影響を受けにくい
- 還元性の環境にあり、腐食や溶解が進みにくい
- 物質を動かす媒体となりうる地下水の動きが極めて遅い

倫理的視点

- 段階的アプローチ
→ 将来世代の選択の自由度最大化、公平かつ公開性のある意思決定プロセス
- 受動的な安全系 → 将来世代の負担の最小化
- 現実的な技術が適用可能 → 適切な資源配分

事業段階における研究開発の役割



4

■段階的なアプローチと意思決定

- 三段階のサイト選定→許認可→建設→操業→閉鎖…→

■意思決定における信頼構築

- 地層処分安全性への信頼
 - セーフティケース（長期にわたって安全性を確保できることの論拠）に対する科学的客観性と技術的信頼性
- 処分事業への信頼
 - 政策や規制、事業者の技術的能力と事業運営姿勢に対する信頼など

■地層処分の特徴を考慮した研究開発戦略

- 安全性確保の長期性と処分事業の長期性
- 最新の研究開発成果を取り込みつつ、セーフティケース作成のための科学技術的基盤を処分事業全体にわたって支援

セーフティケース(Safety Case; SC)の定義

JNC

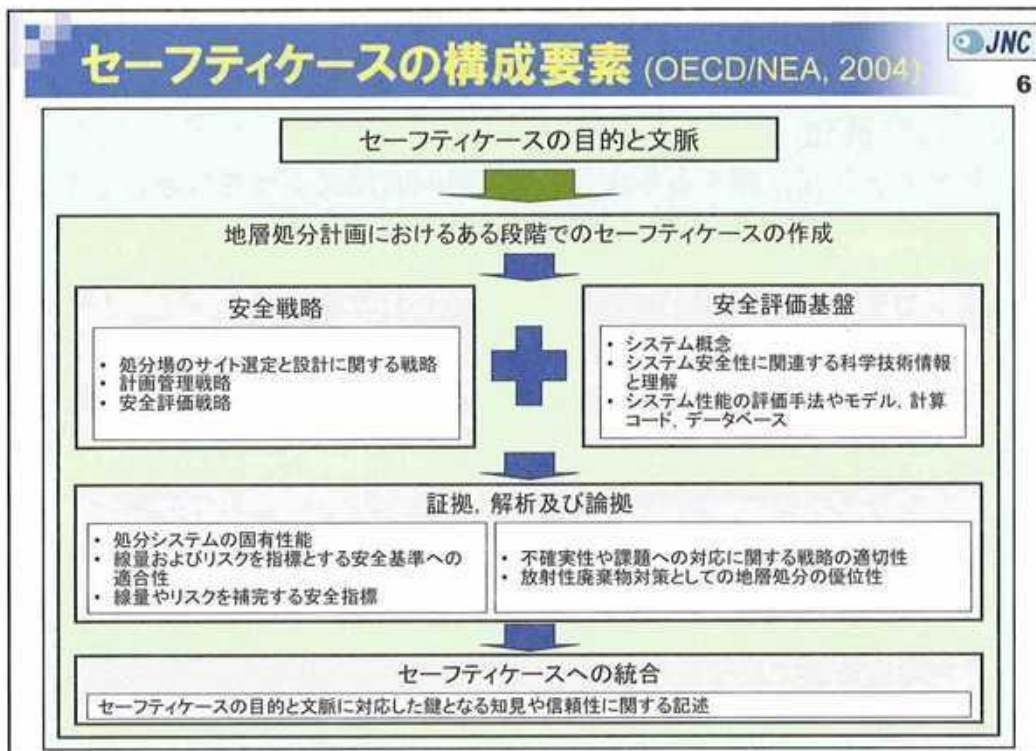
5

- 安全評価(safety assessment)とセーフティケース
- SC: 地層処分システムの安全性を示すためのすべての論述(arguments)の集合体
 - 対象とする全時間・空間スケールに対して文字通りの実証は不可能
 - 安全評価(システムの安全レベルの定量化)だけでは十分な信頼性を提供できないー多様な証拠(multiple lines of evidence)による説明
- 地層処分計画の各段階での作成/更新による継続的な信頼性向上(未解決の課題と次段階における対策の明示)
 - 情報(例えば地質環境)の質と量の段階的な充実
 - 品質保証の重要性

セーフティケースの構成要素 (OECD/NEA, 2004)

JNC

6



知識管理の必要性



7

- 受動的な安全系による極めて長期にわたる安全性の確保
 - セーフティケースによる安全性の実証
- 事業を通じたセーフティケース作成の支援と恒常的な信頼性向上
 - 技術全体の俯瞰: 細分化され全貌が見えにくくなっている知識の中に存在する相互の関連性を可視化
 - 要件管理への対応
 - 作成時点での最新の科学技術情報の提供
 - 時間的に変化する知識の動態的把握
 - 技術の共有化と伝承
- 研究開発の管理
 - 将来的な研究開発の方向性や課題の抽出

知識管理の方法



8

知識の体系化

- 地層処分技術に関する多分野にわたる研究開発成果を知識として統合し、継続的に管理していくための枠組みの構築
- セーフティケースの一般的概念を視軸とした構造化
 - 個々の研究開発成果の有機的な関係をより形式化
 - 情報の必要十分性の明示(意思決定の材料としての適合性判断)
 - 地層処分の安全性に対する信頼性の評価
 - 情報の価値の明確化(研究開発管理)
 - 多分野の研究領域の連携促進
- 知識ベースの開発
 - 地層処分の安全確保の考え方や評価に関わる様々な論拠, 利用できるデータやモデルとその設定根拠や適用範囲などを管理

知識の管理のための枠組み



9

一般的な要件

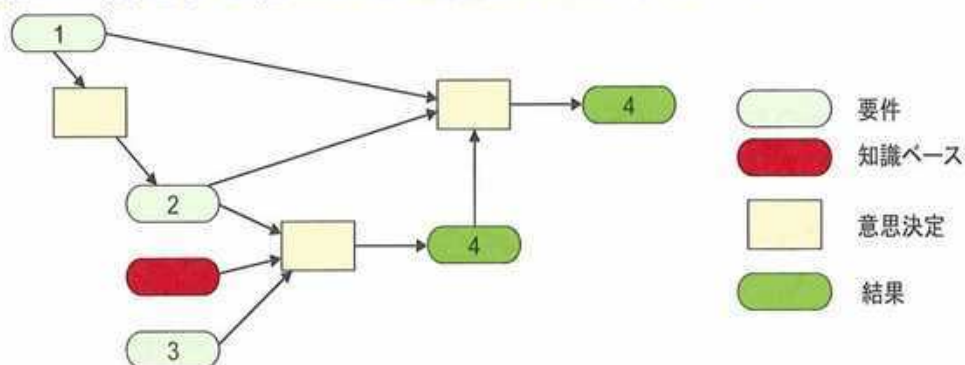
- 網羅性（地層処分技術に関する知識の総合性）
- 自律性（知識形成プロセス（データから情報，知識を創生するメカニズム），自己修復機能）
- 信頼性（品質保証，知識／情報（あらゆる形式）／データの一貫性と整合性）
- 更新性（最新の知識／情報の継続的な取り込みのメカニズム）
- 公開性（アクセス可能性，利便性）
- 保存性（履歴管理，次世代への伝承，セキュリティ）

意思決定問題



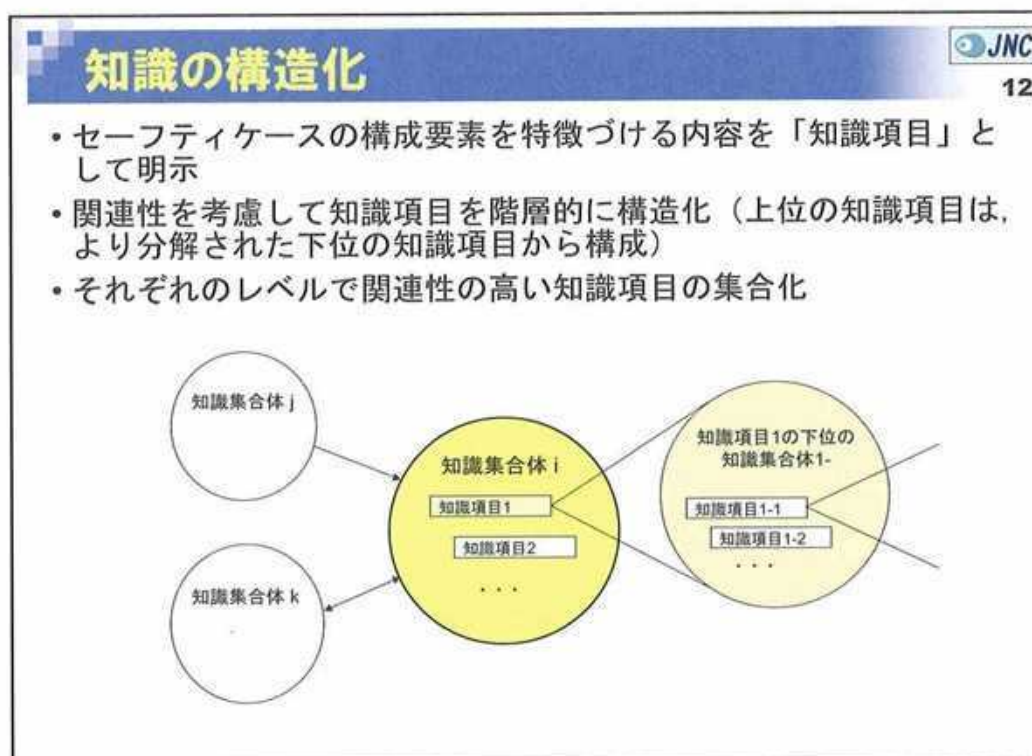
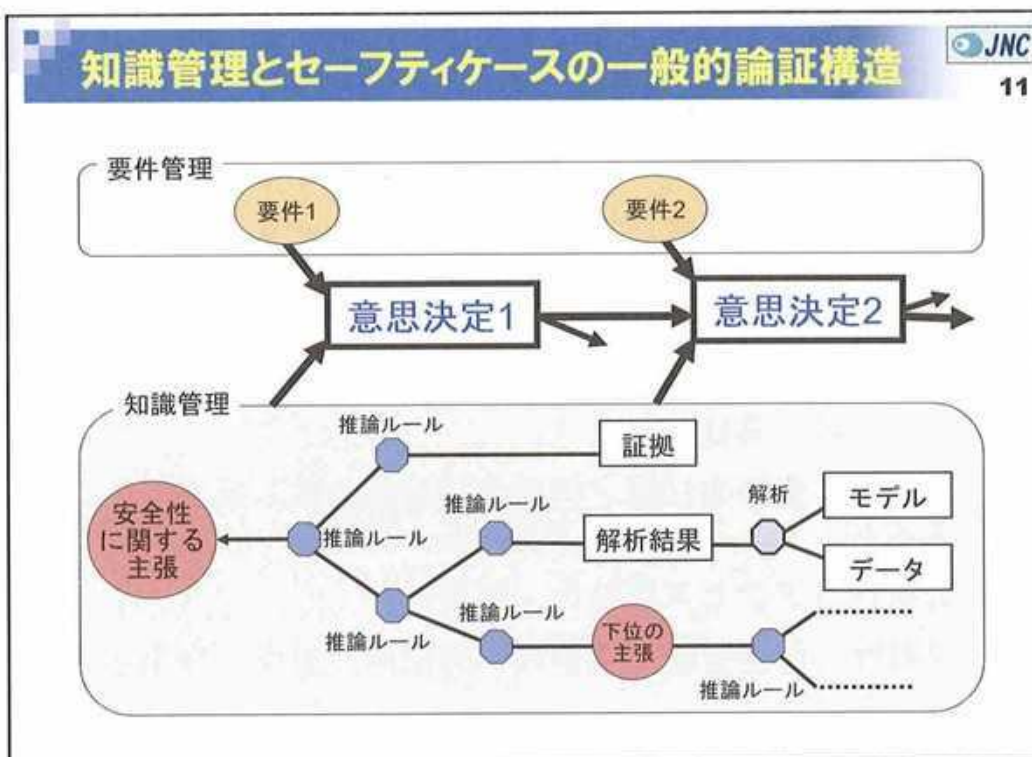
10

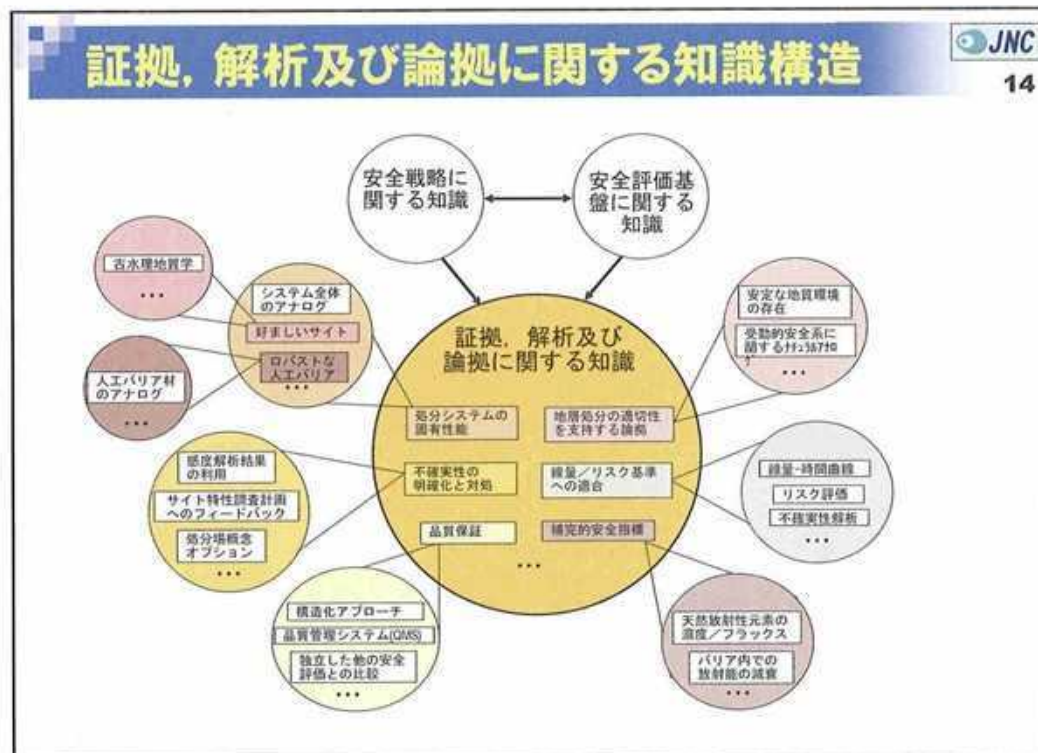
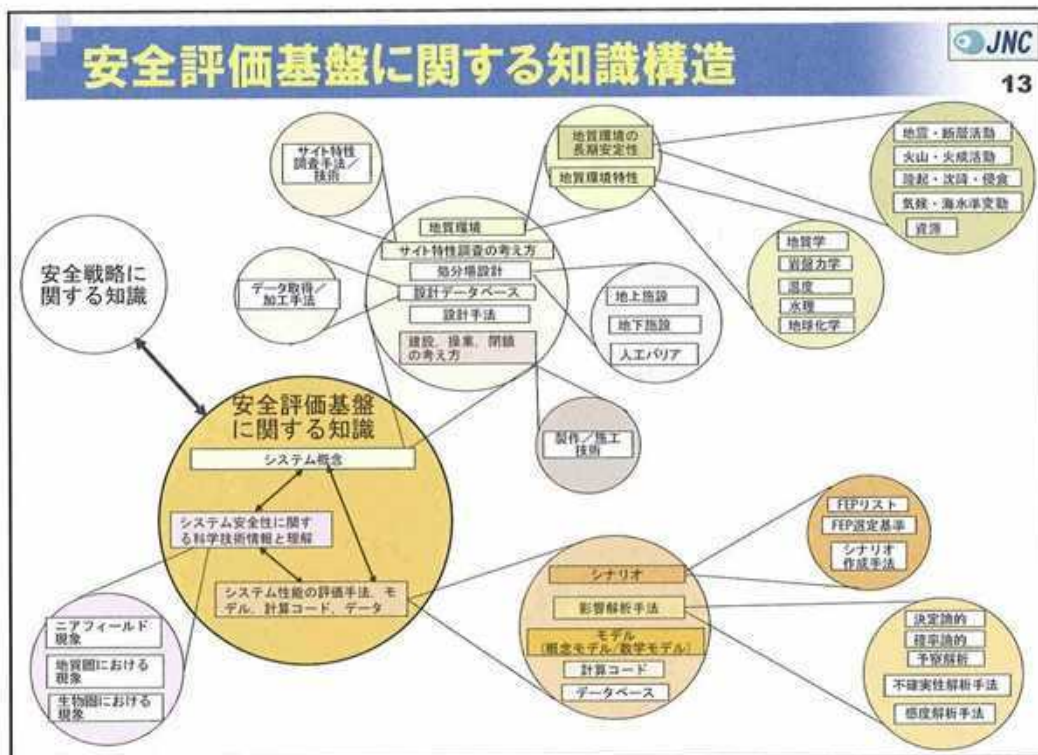
・相互に関連する種々の意思決定のネットワーク



・意思決定における主要な要素：意思決定の対象，要件（requirements），知識ベース（knowledge base）

- 要件：意思決定の枠組みと必要となる知識を特定
- 知識：意思決定の根拠





知識ベースの開発

JNC

15

■知識の記述にあたっての視点の明示(“知識の価値”)

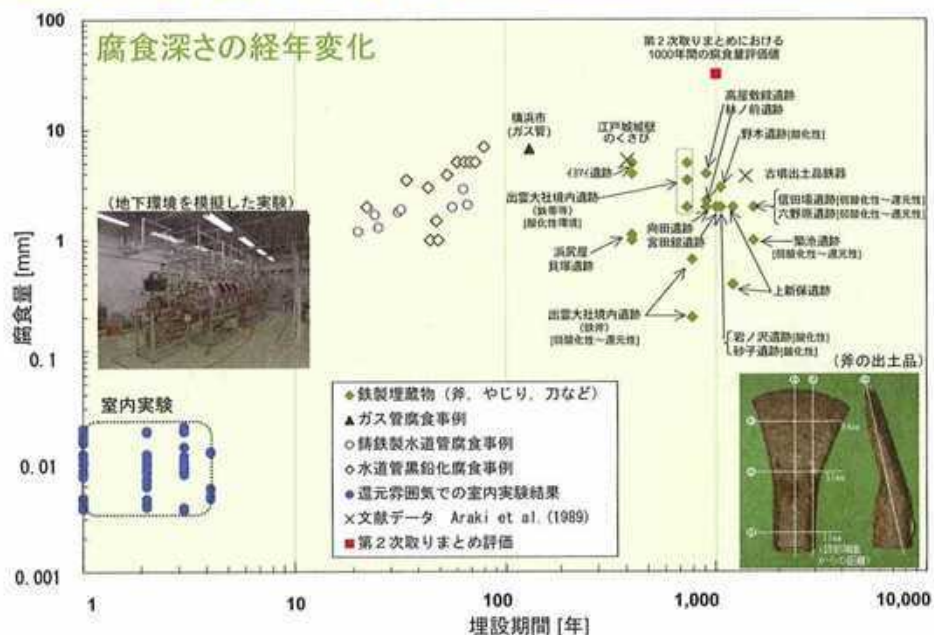
- ☐ 未解決の問題の解決
- ☐ アプローチ, 方法論などの開発や改良
- ☐ 新たな事実や法則性の発見
- ☐ データの質や量の向上
- ☐ 調査・測定手法の開発, 既存手法の精度向上, 標準化, 経験・ノウハウの蓄積など
- ☐ 解析手法の精度向上, 計算機負荷(CPUタイム, 容量)の低減, 経験・ノウハウの蓄積など
- ☐ 解析結果の表示法の改良(可視化など)
- ☐ 改良, 改善すべき課題の明確化
- ☐ ...

■知識項目への分類・整理

地層処分技術に関する知識の例: オーバーバックの長期腐食挙動

JNC

16



地層処分技術に関する知識の例： 収着データベースの更新・拡充

JNC

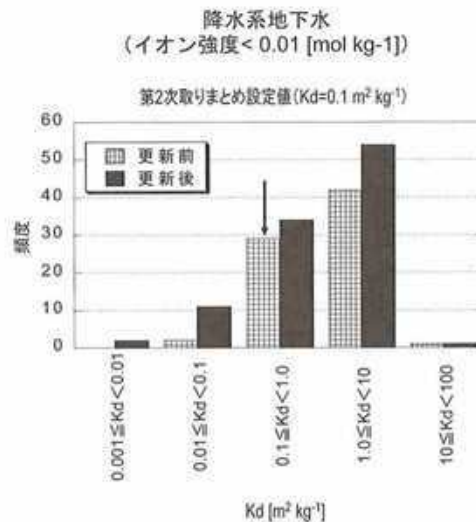
17

更新した19元素に対する
更新後のデータ数

(括弧内の数字は増加したデータ数を示す)
(分冊3表 2.2-1 より)

元素	岩石	粘土	その他	合計
Ag	13(9)	6(6)	0(0)	19(15)
Am	761(106)	397(24)	300(65)	1,458(195)
Ba	237(18)	8(0)	0(0)	245(18)
Co	183(10)	62(11)	40(4)	285(25)
Cm	35(6)	12(0)	0(0)	47(6)
Cs	1,626(115)	661(59)	472(65)	2,759(239)
Eu	250(0)	31(0)	37(28)	318(28)
Fe	41(9)	6(6)	0(0)	47(15)
I	74(0)	49(0)	123(51)	246(51)
Mn	114(10)	6(6)	36(0)	156(16)
Mo	15(9)	7(7)	0(0)	22(16)
Np	867(143)	599(61)	436(16)	1,902(220)
Pb	54(10)	205(2)	42(0)	301(12)
Pu	1,029(18)	326(5)	268(21)	1,623(44)
Se	499(0)	86(1)	445(39)	1,030(40)
Sr	1,077(80)	368(80)	443(48)	1,888(208)
Tc	579(2)	230(7)	287(0)	1,096(9)
U	1,229(23)	866(12)	321(28)	2,416(63)
Zn	9(9)	7(7)	0(0)	16(16)

Csの泥質・凝灰質岩に対する
Kdのヒストグラム

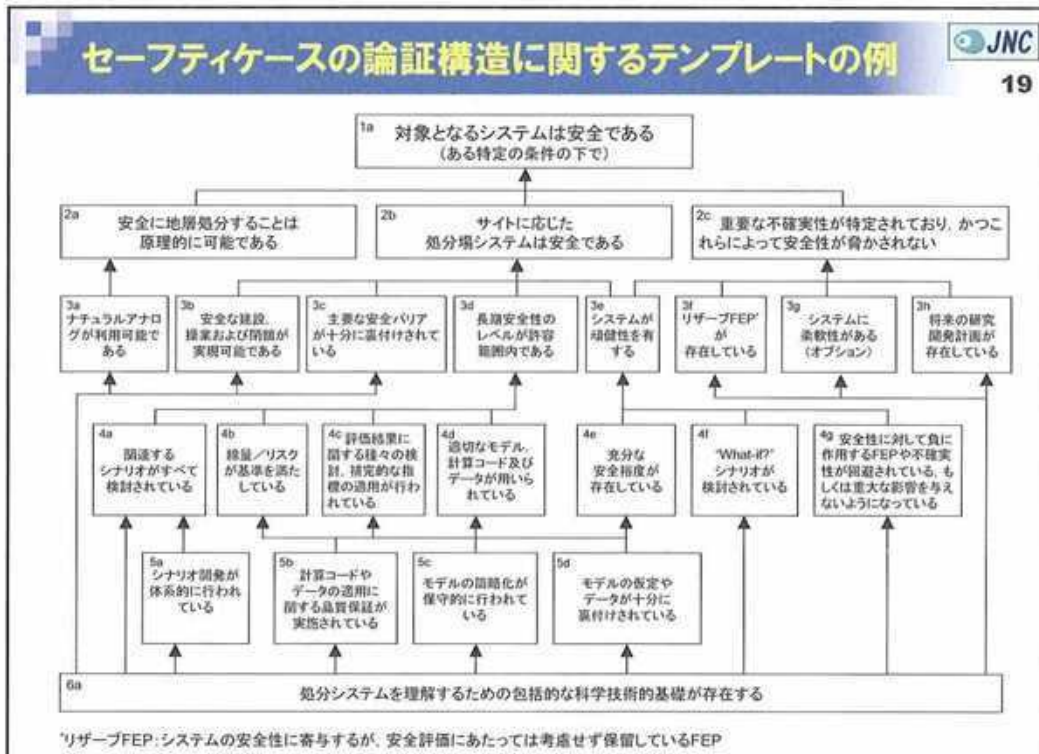


セーフティケースへの統合に関する知識構造

JNC

18

- 統合化に関する知識
 - 基本的には経験に基づく知識（ヒューリスティクス）
- 論証構造のテンプレート化
 - セーフティケースの論証において行うべき「主張（あるいは要件）」の一般的階層構造
 - わが国でセーフティケース作成に相当する知識の統合を行った第2次取りまとめの経験の活用



まとめと今後の方向性

JNC 20

- 継続的な研究開発と知識管理の必要性
 - － 安全確保の長期性と事業の長期性
 - － 受動的な安全性を説明するための多様な知識
 - － 事業を通じたセーフティケース作成の支援と恒常的な信頼性向上
 - － 知識の管理に基づく研究開発の管理(必要な知識の開発)
- 知識の構造化と管理の方法論
 - － セーフティケースの構成要素に基づく知識の構造化(個別知識の管理)
 - － セーフティケースの論証構造のテンプレート化(個別知識の統合)
- 知識ベース開発の考え方
 - － 知識構造に沿った分類と整理
 - － 知識の記述のための一般的視点の明確化
- 今後の方向性
 - － 知識管理の体系化と知識ベースの開発の推進
 - － 計算機支援システムの開発
 - － コミュニケーション理論の適用に基づくセーフティケース概念の拡張と関連する知識の構造化

分冊 1「深地層の科学的研究」

要 約

第2次取りまとめ以降、サイクル機構では、地層処分技術に関する研究開発の「全体計画」を2001年度に策定し、これに沿って、処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化を目指した「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」を進めてきた。全体計画では、「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」という大きく2つの研究目標を設定した。「深地層の科学的研究」においては、上記の2つの研究目標の達成に向けて4つの研究課題、すなわち「地質環境特性の研究」、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技術の基礎の開発」、および「ナチュラアナログ研究」を設定して調査研究を展開した。分冊1では、この「深地層の科学的研究」の第2次取りまとめ以降の進捗を示した。

分冊1は、全6章の構成とし、第1章「はじめに」と第2章「深地層の科学的研究の役割」に続き、第3章で「地質環境の長期安定性に関する研究」、第4章で「地質環境特性の研究」と「ナチュラアナログ研究」、第5章で「深地層における工学技術の基礎の開発」について報告する。第6章の「おわりに」では、第3章から5章の研究成果を簡潔にまとめるとともに、今後の研究課題について記した。

以降、「深地層の科学的研究」における4つの研究課題ごとに分冊1における報告の要点をまとめ、末尾に今後の研究の展開について簡単に記す。

地質環境特性の研究

「地質環境特性の研究」について、第2次取りまとめまでは、東濃地科学センターが中心となって、その周辺での広域地下水流動研究、釜石鉱山における結晶質岩の研究を実施してきた。第2次取りまとめ以降は、主に2つの深地層の研究施設計画において研究を進めており、「結晶質岩を対象とした研究」と「堆積岩を対象とした研究」に分けられる。前者については、東濃地科学センターが超深地層研究所計画および広域地下水流動研究として、また後者については、幌延深地層研究センターが幌延深地層研究計画として進めている。

本研究は、深地層の研究施設計画の全体目標の1つである「深部地質環境の調査・解析・評価技術の開発」を目指したものであり、これは、「全体計画」に示した第2次取りまとめ以降における研究開発の大目標の1つである「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」の基盤となる部分である。具体的には、深地層の研究施設等における調査研究を段階的に進めながら、これまでに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法などを実際の地質環境に適用していくことを通じて、その信頼性や適用性などを確認していく。その過程で、地質環境への理解や取得する地質環境情報の精度の向上を図りつつ、地質環境モデルの検証や調査・評価技術の改良を進め、段階ごとに、実際の地質環境に適用可能な技術として体系化していく。この体系化においては、調査によるデータ取得からモデル化や解析作業を経た評価に至るまでの、地質環境を理解するための一連の方法論を例示することに重点をおきつつ、あわせて、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウをできるだけ知識化して提示することを目指す。これは、処分事業や安全規制を支える技術基盤としての厚みを与えるものと考えている。

〔結晶質岩を対象とした調査研究〕

東濃地域における結晶質岩を対象とした調査研究では、地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するために、4つの空間スケール（リージョナル、ローカル、サイト、ブロック）を設定した。さらに、ローカルおよびサイトスケールでは安全評価および地下施

設の設計・施工への成果の反映を見据えて調査研究の個別目標と課題を設定した。この個別目標と課題に向けて、繰り返しアプローチを適用して様々な調査研究を進めてきた。

リージョナルスケール：ローカールスケールの研究実施領域を設定するために、深部地下水の涵養域から流出域までの地下水流動系に注目し、既存情報に基づく後背地地形と大規模な不連続構造を考慮した解析領域の異なる数段階の地下水流動解析を実施した。この結果、瑞浪超深地層研究所付近の深部地下水の流動系が推定でき研究実施領域を設定した。また、この妥当性については後述するローカールスケールの調査研究を通して確認できつつある。

ローカールスケール：ローカールスケールの調査研究は、リージョナルスケールの調査研究で予測した深部地下水の流動系および研究実施領域の設定の妥当性を実際の調査結果などに基づき評価すること、安全評価や地下施設の設計を見据えて設定した個別目標と課題の解決に向けて深部地質環境を段階的に理解し地質環境モデルの信頼性を向上していくこと、さらに、地下研究施設の設置場所を中心としてより詳細に地質環境を理解していくためのサイトスケールの解析領域や境界条件を設定することに重点をおいて調査研究を展開した。

ここでの調査研究は、①既存情報を用いた調査・解析、②空中および地表からの調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析の3段階に区分した。これらの段階を経て、上述した地質環境モデルの構築と更新を行い地下水の流動経路を再評価しつつサイトスケールの解析領域などを設定した。加えて、地質環境モデルの信頼性向上に向けて、例えば地下水流動解析結果と地球化学モデルの整合性などについて考察した。

以上の調査研究の過程で得た知見は、実際の地質環境を対象とした経験に基づく体系的な方法論の一端として、上記の3つの段階ごとに調査から反映先にいたるデータの流れを系統的に記述した統合化データフローを提示した。この他、ここでの調査研究を通して得られた主な知見を以下に記す。

- ・基盤花崗岩中の高角度の不連続構造を把握するためには高密度電気探査が有効である。
- ・リニアメントの長さ別頻度分布から、基盤花崗岩中の不連続構造の空間的な分布頻度を推定することが可能である。
- ・ローカールスケールでの地下水流動解析結果の妥当性を確認するためには、地下水の流動方向に沿ったボーリング調査を行い、水圧や水質分布に関する情報を取得することが効果的である。
- ・地下水流動に大きく影響を与える不連続構造の把握のためには、地下水流動の主流動方向にほぼ直交する断層の水理特性を調査することが必要である。

サイトスケール（ブロックスケールを包含）：サイトスケールの調査研究は、ローカールスケールの調査研究を踏まえ、個別目標と課題の解決に向けて、より精緻に深部地質環境を段階的に理解し地質環境モデルの信頼性を向上していくことに重点をおいた。特に、地下水流動に大きく影響を与えている断層などの不連続構造、岩盤中の透水性と水みちとなる構造、地球化学特性、岩盤力学特性の分布に注目した。加えて、データ、モデルおよび解析結果に含まれる不確実性についても注目し、その幅の低減に向けた調査研究の進め方についても検討した。

ここでの調査研究はローカールスケールと同様に、①既存情報を用いた調査・解析、②空中および地表からの調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析の3段階に区分した。これらの段階を経て、地質構造、水理地質構造、地球化学、岩盤力学および物質移動（概念）の各モデルの構築と更新を行い、地下水流動解析により研究用地周辺の地下水移行経路を推定するとともに、応力・掘削解析などにより地下空洞周辺の力学・水理状態を予測した。

以上の調査研究の過程で得た知見は、実際の地質環境を対象とした経験に基づく体系的な方法論の一端として、上記の3つの段階ごとに統合化データフローとして提示した。また、

第2段階以降の検討課題を抽出し整理した。この他、ここでの調査研究を通して得られた主な知見を以下に記す。

- ・地下水流動に影響を及ぼす可能性のある不連続構造を抽出するためには、その透水異方性に着目した地下水流動解析を実施し、不連続構造が動水勾配分布に及ぼす影響などを評価することが有効である。
- ・水理地質構造のモデル化にあたっては、トレース長に着目した不連続構造のスクリーニングが必要である。
- ・地質学的調査などにより同定された不連続構造の中から水理学的に重要な水みちを精度よく把握するためには、電気伝導度検層が有効である。
- ・局所的な応力場を把握するためには、ボーリング孔における水圧破碎試験などの原位置試験が有効である。

〔堆積岩を対象とした調査研究〕

幌延深地層研究センターの第1段階の調査研究は、大きく「研究所設置地区（主たる調査研究の展開場所、2～3 km 四方程度の領域）選定のための調査」と「研究所設置地区およびその周辺における調査研究」の2つに分けられる。「研究所設置地区選定のための調査」においては、研究所設置地区の選定のための要件などを設定し、段階的な調査により研究所設置地区を選定した。「研究所設置地区およびその周辺における調査研究」においては、結晶質岩を対象とした調査研究と同様に、安全評価および地下施設の設計・施工への調査研究成果の反映を念頭に置いた調査研究の個別目標と課題を設定し、段階的な調査・研究を展開した。以下に、第1段階の4年目である2004年度までに得られた主な成果について記す。

研究所設置地区選定のための調査：研究所設置地区の選定にあたっては、研究の対象となる地層と地下水が存在すること（地質環境要件）、安全に地下施設を建設でき、研究環境を確保できること（安全要件）を基本的要件と考えた。また、基本的な要件に加えて、調査・研究のための許認可や用地取得が容易なこと（社会的要件）、調査研究の展開や施設建設において有利であること（地形要件）、道路状況および土地利用状況を考慮して調査研究を進めた。ここでの調査研究は、①既存情報を用いた調査・解析、②空中からの調査・解析、③地表からの調査・解析、④ボーリング孔を利用した調査・解析の順序で段階的に実施することにより研究所設置地区を絞り込み、上記の要件に照らして最終的に幌延町北進地区に研究所設置地区と研究所用地を選定した。ここでの調査研究を通して得られた主な知見を以下に記す。

- ・調査研究の対象となる地層と地下水が存在すること（地質環境要件）を概略的に判断するためには空中物理探査（空中電磁探査、磁気探査、放射能探査）が有効である。
- ・しかしながら、大規模断層のような不連続構造の位置を特定するまでに十分な情報が取得できるとは言えない。
- ・地上物理探査や地表地質調査は、空中物理探査や既存の地質情報の妥当性の確認を行うための重要な情報を提供しうる。

研究所設置地区およびその周辺における調査研究：ここでの調査研究においては、安全評価や地下施設の設計を見据えて設定した個別目標と課題の解決に向けて、研究所設置地区とその周辺を対象に①既存情報を用いた調査・解析、②空中および地表からの調査・解析および、③ボーリング孔を利用した調査・解析に区分した段階的な調査研究により深部地質環境を効率的に理解すること、さらに情報量の増加とともに地質環境モデルを更新し、その信頼性を向上していくことに重点をおいて調査研究を展開している。上述した調査研究により得られた主な知見を以下に記す。

- ・既存情報を用いた調査・解析段階において、地下水流動解析を感度解析的に実施することで、パラメータの重要度が把握できるとともに、地下水流動方向や流速の概略的な値を示すことができる。
- ・異常高圧が存在する可能性のある堆積岩地域では、地下水の流動方向に大きな影響を与え

ることから、地質学的観点からの異常高圧の原因究明を優先的に行う必要がある。

- ・幌延地域のような地下深部に塩水系地下水が存在する場では、混合が重要な地下水水質形成プロセスの1つと考えられるので、表層水の水質に関する情報が重要となる。
- ・水理特性の観点で、幌延地域の岩盤は、亀裂性岩盤と多孔質とみなされる岩盤の特性をあわせ持つ。
- ・結晶質岩、堆積岩に関わらず、あらかじめ亀裂性岩盤であることを視野に入れて調査・解析を実施することが、効果的な調査計画策定に役立つと考えられる。
- ・幌延地域のように塩水系地下水を有する場においては、塩化物イオンの挙動を地下水流動解析と併せて検討することで、地下水流動特性の理解に役立つ。
- ・ただし、塩水系地下水の分布（塩淡境界を含む）は、長期的な地質環境変化の影響を強く受けているため、地球化学特性を含めた地質環境の長期安定性に関する調査・評価と整合するような解析の実施が必要である。
- ・岩盤力学特性については、幌延で対象とするような均質性の高い岩盤では、既往の物理検層・応力測定や標準的な室内試験の組み合わせにより、地質環境が有する特徴を考慮した物性分布や応力場の把握が可能であると考えられる。
- ・岩盤力学特性のうち変形特性に関しては、コア試験結果と物理検層結果からおおむね原位置岩盤のそれを把握することが可能で、特に一軸圧縮試験は、安価・短時間で実施できるため、可能な限り多点で実施しておくことが調査対象岩盤の特長を早期に捉え次段階の調査を合理化する観点から望ましい。

地質環境の長期安定性に関する研究

「地質環境の長期安定性に関する研究」について、第2次取りまとめまでは、地層処分に適した安定な地質環境がわが国にも広く存在し得るとの見通しを得るため、関連する地球科学の分野に蓄積された情報や知見を分析するとともに、過去の天然現象に認められる傾向や規則性に基づき、将来の活動の可能性や変動の規模などを検討した。

第2次取りまとめ以降の研究開発については、従来から進めてきた全国レベルでのデータの蓄積や個別現象・メカニズムの解明といった学術的な研究を継続する一方で、概要調査地区等の選定や安全規制に必要な調査技術や評価手法の整備に重点をおいて研究を進めることとした。当面の研究開発では、①調査技術の開発・体系化、②長期予測・影響評価モデルの開発および、③研究情報基盤の整備の3つの目標を設定し、隆起・侵食／気候・海水準変動、火山活動、地震・断層活動に関連するそれぞれの研究課題に取り組んでいる。

〔調査技術の開発・体系化〕

「調査技術の開発・体系化」では、天然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備を進めている。現段階では、最終的な体系化に向け、主に個別の要素技術の開発や既存の調査技術の適用性の確認などを進めており、「隆起・沈降量などに関する調査技術」、「侵食速度に関する調査技術」、「第四紀の火山・地熱活動などの調査技術」、「地下深部のマグマ・高温流体などの調査技術」、「地下の活断層に関する調査技術」の5つの研究課題について取り組んでいる。

隆起・沈降量などに関する調査技術：北海道北部における事例研究を通じて、沿岸域の隆起量や旧汀線の変遷や地殻水平短縮量を推定するための技術についての検討を行った。その結果、過去数～数十万年程度の時間スケールでは、海成段丘を指標とした垂直変動量や地下地質構造断面図を用いた地殻水平歪速度の解析などといった地質学的手法が測地学的手法に比べて有効であることを確認した。

侵食速度に関する調査技術：ボーリングによって得られた堆積岩中の自生鉱物を利用して埋没深度や削剥量を推定するとともに、古地温勾配と最大埋没時期から現在までの年代を用いて数十年以上のオーダでの侵食速度を計算する方法を提示した。

第四紀の火山・地熱活動などの調査技術：肉眼では識別できないテフラ降灰層準を認定する方法(RIPL法)によって、更新世中期までの火山の同定が可能であることを示すとともに、岩石や鉱物を用いた熱年代学的手法が古地温・熱水系の復元に有効な方法であることを示した。

地下深部のマグマ・高温流体などの調査技術：地震波トモグラフィー、MT法などの地球物理学的手法に加えて、希ガス同位体などを指標とした地球化学的手法を組み合わせた体系的な調査技術を提示した。また、紀伊半島南部の非火山性温泉の熱源は、沈み込むスラブの脱水に由来する深部流体であることを明らかにした。

地下の活断層に関する調査技術：顕著な地表地震断層を伴わずに、過去数十万年以降繰り返し活動した活断層を「地下の活断層」と定義し、これらの分布を調査するための方法について検討した。その結果、リニアメントの抽出と地震データおよびDEMデータの解析などによって、「地下の活断層」の存在の可能性やその方向を推定することができる見通しを得た。

〔長期予測・影響評価モデルの開発〕

「長期予測・影響評価モデルの開発」では、将来の天然現象に伴う地質環境条件の変化を予測・評価するための手法の整備を図るため、現象の発生頻度を空間統計学的に求める方法や現象のプロセスを考慮した数値シミュレーション技術などの開発を進めている。現段階では、「三次元地形変化モデル」、「火山活動等の長期予測モデル」、「熱水活動等の影響評価モデル」、「断層活動の影響評価モデル」の4つの研究課題に取り組んでいる。

三次元地形変化モデル：隆起・侵食、断層活動などに伴う地形変化を予測するため、従順化モデルによるシミュレーション技術を開発するとともに、地下水流動モデルとの結合を図り、東濃地域を事例に将来の地下水流動の変遷について検討を行った。

火山活動などの長期予測モデル：新たに火山の発生する可能性を確率論的アプローチによって評価するため、カーネル関数による空間モデルや最近隣接法による時空間モデルなどを構築するとともに、独立単成火山群（東伊豆単成火山群、神鍋・扇ノ山単成火山群）を事例にモデルの適用性などについて検討を行った。

熱水活動などの影響評価モデル：地下深部からの熱流束（熱エネルギー）や流体の上昇速度を評価するため、実際に測定された坑井温度プロファイルについて複数の解析方法を適用し、解析方法の違いによる熱流束の見積り誤差などについて検討した。また、マグマ溜り周辺岩盤の熱や地下水理などの変化を計算するための解析コード(Magma2002)を開発した。

断層活動の影響評価モデル：断層活動によって引き起こされる周辺岩盤の力学的、水理学的影響を予測・評価するため、断層活動に伴う地下水流動の変化モデルと逆断層帯の三次元構造発達モデルの開発に向けた基盤情報の整備を進めた。

〔研究情報基盤の整備〕

「研究情報基盤の整備」については、上記の「調査技術の開発・体系化」「長期予測・影響評価モデルの開発」の基盤となる最新の学術的知見やそれを支える最先端の観測・分析技術に関する情報の収集・整備を進めている。また、次世代の調査技術として地下深部の高分解能の探査技術やモニタリング技術についての基盤的な研究を進めている。

このうち、全国レベルでの天然現象の情報の収集・整備については、第2次取りまとめ以降についても引き続き実施し、「最近約10万年間の隆起速度分布図」、「地すべり地形分布図」、「坑井温度プロファイルデータベース」、「温泉地化学データベース」を新たに作成し、学術雑誌などを通じて公表した。また、天然現象を考慮した安全評価に必要となる変動シナリオや物質移行解析の前提となる一般的かつ現実的な現象のプロセスに関する情報や地質環境条件（力学、熱、地下水理、水質など）の変化などに関するデータを整備するためのデータベ

ースのプロトタイプを作成した。

地下深部の高分解能の探査技術やモニタリング技術については、精密制御定常信号システム（アクロス）の研究開発を進めており、これまでに、弾性波と電磁波の送受信システムとデータの解析手法を構築し、高分解能と探査深度の向上に必要な、高い信号対雑音比の信号観測を実現している。

深地層における工学技術の基礎の開発

第2次取りまとめ以降に開始した2つの深地層の研究施設計画は、実際の地質環境への適用を通じて地質環境を調査・解析・評価する技術の信頼性や適用性を確認していくことが大きな目標である。一方で、得られた地質環境情報に基づき地下の研究坑道を設計・施工していくことを通じて、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・維持するための工学技術の基盤を確立していくことも重要な目標である。ここに、地下施設建設そのものは目的ではなく、地質環境を理解するための調査手段であり、また深部の地質環境下での試験を行う場に到達するための手段である。このような深地層の研究施設での研究坑道の設計、施工および維持管理を通じて培われた技術や経験は、実際の処分事業において、処分地選定に向けた最終段階の調査（精密調査）での掘削の際に活用されることになる。また、本研究で得られた成果は、処分施設の設計・施工や人工バリアなどに関する工学技術の開発にも寄与する。

〔瑞浪超深地層研究所〕

瑞浪超深地層研究所では、岐阜県瑞浪市明世町を設置場所として2本の立坑によるアクセス方式を採用した地下1,000mに到達する地下施設の建設を2003年7月に開始した。地下施設の設計は、地下施設の建設深度が深いこと、また坑道のレイアウトが複雑で入坑者も多様となることなどに留意し、第1段階の調査研究により得られる地質環境情報を基に、地震時を含めた空洞安定性の評価、突発事象対策、通気網解析に基づく防災の検討、安全対策などを主要な課題として実施した。設計の妥当性については、地下施設建設時に取得される情報や第3段階において実施する原位置試験によって最終的に評価する。現時点における設計の成果は、以下のとおりである。

空洞安定性評価と支保設計：第2次取りまとめの手法を踏襲し、地表からの調査結果に基づいて地山区分を行い、この区分に応じて物性値を設定して、トンネル標準示方書を参考に支保を仮設定した。これに対して二次元および三次元有限要素解析により各坑道の力学的安定性を評価するとともに、支保発生応力が許容応力を満足することを確認し、設計としての支保を確定した。

耐震設計：瑞浪地域の特徴を考慮して、歴史地震、周辺の活断層、東海地震および東南海地震を震源と想定して地震波を作成し、これに対して第2次取りまとめの手法を踏襲して立坑および覆工コンクリートの許容応力度を照査した。さらに、大深度立坑の特徴を考慮して鉛直地震動についても検討を行い、耐震性を確認した。

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）：観察、計測および解析による地山評価を組み合わせた具体的なフィードバックフロー図を作成した。地質観察については、複数の岩盤分類法を適用して立坑壁面の地質状況を評価するうえで最適な方法を検討している。

突発湧水に対する対策技術：基本的には地上へ排水しなければならないこと、および、周辺環境への影響を最小限にとどめるという本計画の理念を考慮して、グラウトによる止水を基本とし、その計画を立案した。突発湧水や大量出水が発生した後での対応には期間と予算が多大となることが想定されるため、プレグラウト（事前のグラウト）を実施することとし

た。

深地層の研究施設計画を推進するうえで最も重要な安全対策：入出坑、火災、環境および通信システムと通気網解析を組み合わせた統合管理システムの概念を構築するとともに、立坑の特徴を考慮したリスクマネジメント手法を活用することにより、リスクを抽出し、安全対策に反映している。

地下施設の建設は、全体を大きく3段階（坑口上部工、坑口下部工、一般部掘削）に分けて施工している。瑞浪超深地層研究所用地の造成工事を2002年7月より開始し、引き続き2003年7月より坑口上部工、2004年4月より坑口下部工、2005年2月に一般部掘削に着手した。また、施工の進捗に合わせて、坑道壁面の地質観察、湧水量測定、各種計測（岩盤変位、支保工応力）を実施し、設計・施工へのフィードバックを行っている。また、掘削工事に伴う周辺環境への影響調査として、水文調査（河川流量調査、地下水位調査）、騒音・振動調査、水質・底質調査を工事開始前から継続して実施している。

〔幌延深地層研究センター〕

幌延深地層研究計画の第1段階では、地下深部で遭遇する様々な現象を考慮した坑道の安全確保、坑内環境の維持のために必要となる対策工（支保工の選定など）、施工管理方法について検討した。また、これらの成果を踏まえ、第1段階の調査研究で得られた地質環境情報を基に、2005年度より建設を開始する立坑によるアクセス方式を採用した深度約500mの地下施設の設計を行った。

設計・施工計画の検討：施設を安全に建設・維持するための空洞安定性評価や防災対策（可燃性ガス対策、坑内作業環境、火災など）だけでなく、研究に資するための各種データを取得することを考慮した。さらに、一般の人々が深地層を体験する場であることも考慮に入れた。

空洞安定性の検討：2003年度までに地下施設予定位置近傍で実施したボーリング調査で得られた力学試験結果などに基づいて解析条件を設定し、空洞安定性の検討を行った。地下施設の空洞安定性の検討では、割れ目の影響を考慮した評価を加え、ボーリングコアで柱状となる岩盤において乾燥や外的荷重により顕在化する潜在割れ目（ヘアークラック）に対しても強度・変形特性の低減する可能性があるとして地山区分および岩盤物性値を設定し、完全弾塑性モデルを用いた二次元有限要素法による予測解析を行った。

防災対策：可燃性ガスの発生が見込まれる坑内の研究・作業環境や入坑者の安全を確保するために、可燃性ガス対策、坑内作業環境対策、火災時対策、坑内情報管理システムなどの検討を行った。

ナチュラアナログ研究

「ナチュラアナログ研究」では、地層処分の長期安全性を傍証する情報の体系化や具体的な評価に寄与できるような科学的根拠の整備を目指し、東濃ウラン鉱床を利用して、ウラン系列核種を中心とした物質の長期挙動やこれを取り巻く地質環境の変遷を解明するための研究を進めている。第2次取りまとめまでにおいて、地質環境中でのウラン系列各種に注目した研究を行い、放射性核種は地質環境中に長期間にわたって保持されることを定性的に示した。第2次取りまとめ以降のナチュラアナログ研究においては、東濃ウラン鉱床を事例の場として、「地質環境が有する放射性核種保持機能の定量化」と「保持機能に影響を及ぼす主要因子の抽出」を主要な目的として研究を進めてきた。それぞれの目的に対するこれまでの主な成果を以下に簡潔に記す。

地質環境が有する放射性核種保持機能の定量化：東濃ウラン鉱床を胚胎する土岐炭層累層中の地下水組成に基づいて、ウランの長期的な溶解度を検討した。その結果、主要な溶解度

制限固相は $\text{UO}_2(\text{am})$ であり、その溶解度には pH、酸化還元電位および炭酸ガス分圧が影響することが明らかになるとともに、長期的なウランの溶解度が非常に低い範囲にあったことを確認した。

物質移動に影響を及ぼす主要因子の抽出：地質環境特性に関わるデータの取得、影響解析用のデータセット案の作成、影響解析、核種移行に影響を及ぼす主要な要因の抽出、という一連の作業を通じて、ウラン鉱床の移行／保持に影響を及ぼす主要な要因の抽出を行ってきた。影響解析の結果とウラン鉱床中のウラン量およびウラン鉱床の形成年代を比較することによって、ウラン鉱床形成に重要な影響を及ぼした要因として、地下水の流動様式が挙げられることを確認した。

なお、東濃鉱山の坑道内での研究は 2003 年度末をもって終了し、現在は、地表からの調査を主体に研究を進めている。

今後の研究の展開

「地質環境特性の研究」については、2つの深地層の研究施設計画が第1段階から第2段階へ移行する時期を迎えており、H17 取りまとめを1つの礎として、第1段階の終了後速やかにその研究成果を総括し報告書として取りまとめていく。深地層の研究施設計画を中心とした今後の調査研究においては、「実際の地質環境に適用可能な体系的な技術の提示」の信頼性をより高めていくために、段階的に進められる深地層の研究計画に沿って地質環境を理解するための一連の方法論の詳細化とその評価を重ねつつ、あわせて、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウをできるだけ知識化して提示していく。

「地質環境の長期安定性に関する研究」では、「調査技術の開発・体系化」において概要調査開始前までに天然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための個別の調査技術の適用性の確認を進めつつ、信頼性の高い総合的かつ体系的な調査手法の構築に向けて研究を進める。「長期予測・影響評価モデルの開発」では、それぞれの天然現象に応じた予測手法の検討や個別のシミュレーション技術の開発を進めるほか、予測結果の検証方法を検討していく。また、「研究情報基盤の整備」では、天然現象を考慮した安全評価に必要な地球科学に関する最新の知見のほか、天然現象に伴う地質環境条件（力学、熱、地下水理、水質など）の変化に関するデータを重点的に整備していく。

「深地層における工学技術の基礎の開発」においては、第1段階の地質環境情報を基に実施した地下施設の設計結果を第2段階以降に得られる計測データなどに基き確認・評価していく。なお、瑞浪超深地層研究所では 2003 年 7 月に地下施設の建設に着手しており、は 8 月末現在、2本の立坑は深度約 150m まで到達している。今後、2009 年度までに、地下 500 m 程度までの立坑を掘削したうえで、当該深度に試験用の水平坑道を展開して坑道内での調査研究を開始する計画である。また、2010 年代前半頃には、深度 1000m 程度に至る地下施設が完成する見込みである。幌延深地層研究センターにおいては、2005 年度後半に立坑掘削に着手し、2006 年度より掘削機を用いた本格掘削を開始する。2009 年度までに、3本の立坑のうち、換気立坑を深度 500m まで完成し、東立坑（主立坑 2本のうちの1本）を地下 300 m 程度まで掘削する計画である。また、2010 年代前半頃には、深度 500m 程度に至る地下施設が完成する見込みである。

「ナチュラアナログ研究」では、ウラン系列核種の挙動と地質環境条件の関係を明確にすることを目指して、地殻変動などによって生じる地質環境の変化がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価や、微生物などがウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす影響の評価を引き続き行っていく。

分冊 2「工学技術の開発」

要 約

本報告書は、第2次取りまとめ以降の処分事業や安全規制に関する動向を踏まえ、核燃料サイクル開発機構が実施してきた工学技術の研究開発の成果を取りまとめたものである。その内容は、核燃料サイクル開発機構が課題評価委員会による評価を受けながら策定した「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）に示された目標および課題に対応したものになっている。

全体計画で示された第2次取りまとめ以降の処分技術の信頼性向上に関する目標は、これまで整備してきた地層処分に関連する様々な技術や手法を、実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性を確認していくこと（「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」）および処分システムに関連する現象への理解を深め、評価の信頼性を高めていくこと（「地層処分システムの長期挙動の理解」）である。第2次取りまとめ以降の処分技術開発については、人工バリアと周辺岩盤を含むニアフィールド環境における長期的な個別現象や連成現象の理解向上により、処分システムの長期性能に関する評価の信頼性向上に焦点を当てて研究を進めた。そのため、地層処分基盤研究施設（ENTRY）での工学試験や国際共同研究により、炭素鋼オーバーパックの腐食挙動や緩衝材の基本特性に関するデータベースの整備、熱-水-応力-化学連成モデルの開発などを進めるとともに、ナチュラルアナログ研究により人工バリア材料の長期挙動に関するデータの蓄積と評価手法の妥当性確認を進めた。また、海外の地下研究施設を活用した閉鎖技術の開発や低アルカリ性セメントの開発などの工学技術開発を進めた。さらに、深地層の研究施設を対象とした地表からの調査段階における地質環境条件の設定に基づく設計手法の適用性確認を行った。これら、個別課題に対する研究の遂行により、個別の設計手法やデータベースについて常に最新の知見が取り込まれ、最新技術への更新が可能となる。第2次取りまとめと異なり工学技術関連の全分野を網羅的にカバーするのではなく、工学技術の基盤として、設計に関わる人工バリア等の長期挙動評価のための現象理解、モデル開発、データベース開発、閉鎖技術に関わる検証や材料開発などの中から、重要な課題を選択して実施している。

本報告書は、全6章から構成されている。第1章は全体計画に基づく目標および課題、ならびに研究の進め方を示している。第2章（人工バリアの基本特性データベース）、第3章（人工バリア等の長期複合挙動に関する研究）、第4章（人工バリア等の工学技術の検証）、第5章（設計手法の適用性確認）の各項目においては、課題を設定した背景、第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映、今後の課題について記述した。課題を設定した背景においては、どのように第2次取りまとめの課題、国際的動向、事業・規制のニーズ等を考慮して課題を設定したかを記述した。第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映においては、各課題において得られた成果の処分技術および事業・規制における位置づけや反映点について記述した。また、最後に今後の課題として、次のフェーズで取り組むべき課題について記述した。第6章では、第2次取りまとめ以降の研究の進捗および事業・規制への反映点を要約した。

以下に、第2次取りまとめ以降の進捗を中心に各項目の概要を述べる。

人工バリアの基本特性データベース

オーバーパックの基本特性に関する研究では、炭素鋼の腐食挙動のうち、腐食生成物堆積による影響については、腐食生成物としてマグネタイトによる腐食加速に起因するオーバーパックの短期破損の懸念は小さいことを示した。セメント影響についてはpHが13以上で不動態化する可能性があることを示すとともにアルカリ環境での腐食評価手法を提案した。同じく、溶接部の腐食速度については母材と同程度であることを確認した。代替オーバーパック

の腐食挙動では、チタンについては、還元性環境での実験データの取得により、長期の水素吸収・脆化の傾向を把握し、水素脆化寿命の評価手法を提案した。同じく、銅については、酸化性環境での実験データを取得し、腐食形態や酸素、硫化物の影響について腐食挙動の傾向性を把握した。さらに、現状の知見に基づき、地質環境条件に対する炭素鋼、チタン、銅といった材料の選定方法に関する基礎情報を整理した。

緩衝材の基本特性に関する研究では、海水系地下水条件下を模擬した飽和水理特性、膨潤特性、力学特性データの取得、関係式の一般化やデータ集の公開、データベース管理システムの一部を構築した。また、熱物性や力学物性測定手法について検討し、手法の違いによる影響を確認するとともに、標準化に関わる基盤情報に寄与する知見が得られた。

人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備では、設計段階における保証項目（案）（何を保証するのか）、評価方法（どのように保証するのか）、評価ツール（モデル、データベース、実験方法）の開発状況を整理した。また、人工バリア性能確認のためのモニタリング技術に関する情報や人工バリアの定置精度に関わる実験データに基づく知見が得られた。

人工バリア等の長期複合挙動研究

緩衝材の力学的変形挙動に関する研究では、既存のクリープ・モデルの体系的比較を行い、2つの評価モデルを選定するとともに、パラメータ設定手法を提示した。また、実験によりこれら2つのモデルが緩衝材構成モデルとして適用性を有していることを確認した。新たに選定されたモデルを用いてオーバーパックの自重沈下解析を行なった結果、第2次取りまとめより変形は大きくなったが、事例検討では、コロイドろ過性や自己シール性は維持されており安全評価上は問題にはならないことが示された。さらに、緩衝材-岩盤の長期力学的変形挙動に関する連成モデル構築に取り組んだ。

岩盤の力学的変形挙動に関する研究では、評価手法の検証のため地圧現象がナチュラアナログ的手法として有望であることを示した。幌延の研究所用地に分布する稚内層硬質頁岩を対象として、力学変形挙動評価に関する基本データを取得し、内圧効果により力学的な安定性が期待できることを示した。掘削後早期に支保工などの工学的対策で内圧を与えることで長期の力学的安定性を改善可能であることがわかった。また、堆積岩に見られる自己回復特性は、空洞周辺の剛性が低下した領域の力学・透水特性が長期的に回復する可能性を示唆している。

緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究では、海水系地下水条件等を考慮したデータを整備するとともに、海水系地下水条件での影響は顕著ではないことが示された。また、流出現象を評価する拡散モデルの信頼性向上を目的として、X線CT法を用いて模擬亀裂中に侵入したベントナイトの密度分布やベントナイトの粘度を測定した。その結果、X線CTを用いた亀裂中の密度分布測定がモデルの検証に有効であることを示すとともに、モデルの適用性確認を実施した。また、ベントナイトコロイドの発生が海水系地下水条件では顕著でないことも示した。

人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究では、セメント影響、鉄の腐食生成物による影響等に関する緩衝材の長期安定性評価フローを作成し、概略的評価を行った。セメント影響については、現段階では支保工材料として低アルカリ性セメントを推奨した。また、鉄の腐食生成物による影響については実験的研究も行い、その影響は顕著ではないことを示した。

熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究では、化学現象を取り込んだ熱-水-応力-化学連成解析コードのプロトタイプを開発し、ユッカマウンテンの坑道規模加熱試験や連成室内試験により検証を進めた。本コードを用いて第2次取りまとめでの条件に対する解析を実施し、緩衝材の最高温度、再冠水時間や間隙水のpHに関して比較評価を行い、第2次取りまとめの評価の妥当性を確認した。また、処分環境で懸念される塩の蓄積に関する解析を実施して、顕著な影響はないことを確認した。本解析コードの開発によりニアフィールド環境の数値実

験の基盤が構築された。

緩衝材のガス透気回復挙動に関する研究では、海水系地下水がガス移行に与える影響は、降水系地下水の場合に比べ、それほど顕著でないことを示した。これにより降水系、海水系両地下水でのガス透気回復挙動に関する概略的な評価が可能となった。緩衝材中のガス移行挙動を直接観察するためX線CT法の適用性を確認し、選択的移行経路の形成によるガス移行挙動を確認した。X線CTを用いた可視化試験とガス移行モデルによる解析との比較検討により、モデルの妥当性を示すことができた。これにより、X線CTを用いた密度分布測定がガス移行モデルの検証に有効であることを示した。

人工バリアせん断応答挙動に関する研究では、人工バリアの1/20の模型を用いて、緩衝材厚さの80%にあたる変位のせん断試験を行ない、土圧や間隙水圧を実測し、既存モデルによりせん断時の緩衝材の力学的挙動の傾向性を表現できることがわかった。なお、オーバーパックは緩衝材中で回転し、損傷を受けていないことを確認した。

炭素鋼オーバーパックのナチュラアナログ研究では、考古学的試料の調査が進み、1,000年規模のデータが取得された。また、弱酸化性から還元性環境での1,000年程度の考古学試料の研究結果より、第2次取りまとめにおける炭素鋼オーバーパックの腐食評価が保守的であることを事例的に示した。

人工バリア等の工学技術の検証

閉鎖技術に関する研究では、カナダの地下研究施設において施工されたプラグの閉鎖性能に関する検証データを取得し、低透水性を確認するとともに、解析によって、閉鎖性能を評価するモデルを開発することができた。花崗岩等岩盤性能が良好な場合、掘削影響領域が支配的な核種移行経路になることが示された。また、閉鎖システムを対象とした水理解析やFaultツリー分析による閉鎖シナリオ評価手法を提示した。さらに、海水系地下水条件での埋め戻し材の隙間充填性能に着目した基礎試験を実施した。その結果、塩水環境下でも降水環境下と同様、ズリを基本とする埋め戻し材料に粘土を含有することにより、十分にシーリング性能が確保できることがわかった。

人工材料の開発では、支保工材料として普通セメントを用いた場合の高アルカリブルームによる緩衝材や岩盤の変質を避けるため、代替材料として低アルカリ性セメントの開発を進めた。低アルカリ性セメントとしては、普通ポルトランドセメントに、シリカフュームやフライアッシュなどを添加したHighly Fly-ash contained Silica-fume Cement (以下、「HFSC」という)を用いた検討を進めた。普通ポルトランドセメント、シリカフューム、フライアッシュの混合率を変え性能試験や品質確認を行なった。以下、普通ポルトランドセメント、シリカフューム、フライアッシュの混合率が各々40%、20%、40%の場合の低アルカリ性セメントをHFSC424と呼ぶ。検討の結果、HFSC424を用いたコンクリートは、施工に必要な流動性や支保強度を確保でき、その適用性が確認された。また、HFSC424を用いたモルタルは、粉体を水中浸漬することによりポゾラン反応が促進され、pHの低下は高温では速いが常温では遅く、目標とするpH11以下になるには長時間を要することがわかったが、モデル解析によるpH低下挙動の評価に見通しを得た。

設計手法の適用性確認

深地層の研究所用地の地質環境条件を対象とした事例研究により、処分場の全体設計フローの検討、地上からの調査段階における地質環境条件に関する設計入力データの設定、処分施設や人工バリアの試設計等を行った。堆積岩系岩盤の一例として、稚内層硬質頁岩が分布する幌延の深地層の研究所用地を、結晶質岩系岩盤の一例として、土岐花崗岩が分布する瑞浪の研究所用地をそれぞれ対象とし、処分孔設置方式に関する検討を行った。検討対象深度は、力学的に処分孔の空洞安定性が確保されることなどから、幌延では450m、瑞浪では

1,000mを設定した。これらの検討結果に基づき、第2次取りまとめの設計手法の適用性、改良点、推奨すべき手法や地上からの調査段階における留意点を整理した。

処分場の全体設計フローの検討では、施設設計、人工バリア設計および埋め戻し材設計といった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。検討の結果、第2次取りまとめの設計フローとの違いとしては、埋め戻し材や緩衝材の仕様設定上重要な処分坑道の支保工設計、処分孔への支保工の要否を考慮した空洞安定性評価および埋め戻し材設計を人工バリア設計の上位に配置したことなどが上げられる。

地上からの調査段階における地質環境条件に関する設計用入力データは、各研究所用地のボーリング調査による地質環境特性に基づき設定した。密度や熱特性については、幌延のような多孔質の堆積岩の場合、間隙率の密度依存性が見られることから、深度依存性の相関式より入力データを求めた。瑞浪の結晶質岩については、深度依存性が見られないことから、同じ層の平均値を採用した。力学特性については、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データを岩盤等級ごとに低減し、物性値を設定した。初期応力比は、深度によらずほぼ一定であったため、それらの平均値を採用した。水理特性に関しては、設定深度近傍の透水試験結果により透水係数を、地下水流動解析により動水勾配を設定した。地下水化学特性に関しては、水質の深度依存性、鉱物情報に基づく熱力学解析による補正を踏まえ設定した。

処分施設の試設計では、低アルカリ性コンクリートの設計用物性値を設定するとともに、上記の見直した設計フローに基づき処分孔、処分坑道の空洞安定性評価、離間距離の検討について第2次取りまとめと同程度の概略設計を行い、第2次取りまとめの設計手法の適用性確認を行った。また、幌延、瑞浪の深地層の地下研究施設計画で検討している耐震検討、メタンガスの湧出量に関する検討、防災コンセプトの研究、情報化施工などについても、処分場設計において不可欠なものと考え、その検討例を提示した。

人工バリアの試設計では、緩衝材およびオーバーパックの設計手順の考え方を整理するとともに、個別設計フローを構築し、各研究所用地の地質環境条件の入力データをもとに試設計を行った。その結果、第2次取りまとめ仕様で十分対応可能であることがわかった。また、岩盤や緩衝材の長期力学挙動、緩衝材の流出・侵入挙動などの長期健全性に関する評価を行い、第2次取りまとめ仕様の人工バリアは長期にわたり健全であることを確認した。

閉鎖設計では、埋め戻し材や止水プラグに関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、概略的な設計フローの構築を行った。埋め戻し材については、基本特性試験や海外での検討例を参考に設計フローに基づき、幌延、瑞浪の地質環境の特徴により適した閉鎖材料の仕様例を示した。

以上の検討を通じて提示された第2次取りまとめの設計手法の適用性、改良点、推奨すべき手法について主なものを以下に整理する。

- ・ 処分場の全体設計フローに関してオーバーパック、緩衝材、埋め戻し材といった個別設計と施設設計の相互関係を整理し、より現実的な設計フローを提示した。
- ・ 空洞の力学的安定性評価では、経験的手法による標準支保パターンに基づく空洞安定性評価や情報化施工を考慮した現実的な評価指標を提案した。
- ・ 幌延の深地層の研究所用地に分布する堆積岩は強度が小さく、異方圧下、多孔質という特徴をもつため、第2次取りまとめと同様な空洞安定性評価・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・応力連成現象などについても必要に応じて設計に反映することを提案した。
- ・ 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、定置までの岩盤クリープ挙動を考慮した場合、安定性が保てない可能性が高いため、処分孔（無支保）の安定性を評価する際には、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。

- ・ 瑞浪の深地層の研究用地に分布する土岐花崗岩は、異方圧を受けているものの、強度が大きく力学的安定性が見込める結晶質岩であることから、第2次取りまとめと同様の弾完全塑性解析による設計が可能である。また、結晶質岩は、力学的に不連続面の影響が支配的になる場合があるため、潜在する割れ目の状況を調査で把握し、不連続面を考慮した評価・設計を実施し、設計の妥当性について確認することを提案した。
- ・ 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。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。

次に、地上からの調査段階における留意点について、地質環境調査、施設設計、人工バリア設計、閉鎖設計などの観点から主なものについて以下に記述する。

- ・ 地質環境調査では、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に限られる場合には、その支保工材料で空洞が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。結晶質岩を対象とした場合、処分坑道を展開する深度として、割れ目など不連続面の影響が比較的少ない健全な岩盤が分布するか否かを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ため、地下水水質の熱力学的解析結果や鉱物に関する情報などを総合的に考慮した補正が重要である。
- ・ 施設設計（空洞安定性、支保設計、坑道離間距離）では、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、段階を追った地質環境の理解を行っていく必要がある。そのため、情報化施工等により随時設計を更新してゆくとともに、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、堆積岩の場合、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、掘削影響領域を含め安全評価への影響に関する検討が必要である。
- ・ 人工バリア等の設計では、オーバーバック、緩衝材および埋め戻し材の設計に際して、相互に関連している項目の影響度合いを十分考慮し、地質環境条件を踏まえて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。また、地質環境条件と安全機能との関係を整理すること、例えば、緩衝材の流出・侵入現象の影響に関しては、海水系地下水条件では顕著ではなく、降水系地下水条件で重要であることなどを整理する必要がある。
- ・ 閉鎖設計では、地下水のイオン強度によっては、埋め戻し材の仕様に大きく影響を及ぼすことが考えられる。特に、海水系地下水条件の場合、埋め戻し材のベントナイト配合率について自己シール性に係わるデータの拡充が必要である。

今後に向けて

今後は、地層処分のセーフティケースの作成に必要な地質環境や処分場の設計に関するデータや情報、専門家の判断根拠などを知識としてわが国共通の資源とするため「知識ベース」の構築を行う。このため、地層処分基盤研究施設において、深地層の研究施設計画を中心とする深地層の科学的研究から得られる地質環境データや長期安定性に係わる知見も考慮し、特に海水系環境や軟岩系岩盤における処分場の設計の信頼性を向上できるよう、人工バリア等の長期挙動等に関わる基礎的データの拡充、モデルの改良、データベース開発を進める。また、評価に必要なデータ取得手法の標準的方法を提案し、関連機関の成果の統一化に資する。さらに、以上の成果と深地層の研究施設計画における研究成果を総合的に用いて、深地層の研究施設計画で得られた地質環境データに基づく設計手法の適用性確認を行う。

This is a blank page.

分冊3「安全評価手法の開発」

要 約

本報告書は、第2次取りまとめ以降処分事業や安全規制に関する動向を踏まえ、核燃料サイクル開発機構が実施してきた安全評価手法の開発の成果を取りまとめたものである。その内容は、核燃料サイクル開発機構が課題評価委員会による評価を受けながら策定した「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）に示された目標および課題に対応したものになっている。

全体計画で示された第2次取りまとめ以降の安全評価手法の高度化に関する目標は、これまで整備してきた安全評価に関連する様々なモデルや手法を、実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性を確認していくこと（実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認）および処分システムに関連する現象への理解を深め、評価の信頼性を高めていくこと（地層処分システムの長期挙動の理解）である。第2次取りまとめ以降の安全評価手法の高度化については、以下の4つの課題について取り組むこととした。

①核種移行のデータベース整備

核種移行パラメータについては、第2次取りまとめで使用した溶解度、収着、拡散などの核種移行パラメータの信頼性向上および拡充を目的とし、還元雰囲気、炭酸系でのアクチノイド元素の溶存化学種の明確化、海水系や堆積岩系を対象としたデータの拡充などを行うこととした。また、透明性を高めるためにデータベースを定期的に更新・公開することとした。

②安全評価モデルの高度化

安全評価モデルの高度化については、重要現象の理解とモデル化を通じて安全評価解析の信頼性を向上させるため、亀裂中の水理・物質移行現象、堆積岩中の水理・物質移行現象、ガラスの長期溶解挙動、核種の溶解現象、核種の収着・拡散現象、コロイドなどの影響評価について現象理解を進め、個別現象モデルを開発・改良することとした。また、実際の地質環境の重要な特徴のモデルへの取り込みを図るため、水理地質構造モデルと生物圏評価モデルについて必要な検討・改良を行うとともに、深部地下水の水質予測の信頼性を高めるために、地下水水質のモデル化について検討することとした。

さらに、不確実性の取扱い技術を向上させるため、不均質性が重要となる地下水流動の分野において、堆積プロセスを考慮した地質構造推定技術、地下水流動解析結果の不確実性定量化技術や原位置トレーサー試験より得られる水理・物質移行特性値の不確実性について検討することとした。

③安全評価手法の整備・高度化

安全評価の信頼性を確保するためには、モデルやデータの信頼性を高めるだけでなく、追跡性、透明性やわかりやすさなどを確保すること、不確実性が適切に取り扱われていること、評価者と研究者や調査担当者との間で適切なコミュニケーションが確保され評価の品質が保証されていることなどが必要とされている。こうした課題に対処するために、シナリオ解析技術、天然現象影響評価技術、不確実性評価技術の技術開発、技術情報の統合技術の開発に取り組むこととした。

④安全評価手法の適用性確認

安全評価手法の適用性確認については、データ整備、現象理解・モデル化、安全評価手法の個別技術について、改良した技術を実際の地質環境に適用することにより、実際の地質環境を対象とする場合の留意点・課題の抽出を行うとともに、地質環境の調査・評価から物質移行解析に至る一連の評価の中で、評価項目間の重要な接続部分における作業手順の開発と試行を行うこととした。

なお、本報告書で取扱う課題は、第2次取りまとめと異なり安全評価関連の全分野を網羅的にカバーするのではなく、安全評価の基盤として現象理解、モデル開発、データベース開発、手法開発などの中から、重要な課題を選択して実施している。

本報告書は、全6章から構成されている。第1章は全体計画に基づく目標および課題と研究の進め方を示している。第2章（核種移行データベースの整備）、第3章（安全評価モデルの高度化）、第4章（安全評価手法の整備・高度化）、第5章（安全評価手法の適用性確認）の各項目においては、課題を設定した背景、第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映、今後の課題について記述した。課題を設定した背景においては、どのように第2次取りまとめの課題、国際的動向、事業・規制のニーズなどを考慮して課題を設定したかを記述した。第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映においては、各課題において得られた成果の安全評価および事業・規制における位置づけや反映点について記述した。また、最後に今後の課題として、次のフェーズで取り組むべき課題について記述した。第6章では、第2次取りまとめ以降の研究の進捗および事業・規制への反映点を要約した。

以下に、第2次取りまとめ以降の進捗を中心に各項目の概要を述べる。

核種移行データベースの整備

放射性元素の熱力学データベースの整備については、アクチニドIV価の水酸化炭酸錯体やアモルファス含水酸化物の溶解度積や加水分解定数などの熱力学データを取得し、既存データとの比較などを踏まえ、その信頼性の向上を図った。また、放射性元素の熱力学データベース（JNC-TDB）について、最新の経済協力開発機構・原子力機関の熱力学データベース（OECD/NEA TDB）も含めて、各種地球化学計算コードに対応したフォーマットに変換し、透明性、客観性の確保などの観点から外部公開ホームページ上で一般に公開した。本データベースへの国内外の利用者登録は、2005年7月時点で300名を突破しており、利用者からの指摘に対する改訂も行なっている。

収着・拡散データベースの整備については、幅広い地質環境への適用性を考慮して、セシウム、セレン、スズなどの海水系環境などにおける堆積岩に対する収着データを拡充した。また、核種の収着データベース（JNC-SDB）についても、JNC-TDBと同じく、透明性、客観性の確保などの観点から外部公開ホームページ上で一般に公開した。利用者登録数は熱力学データベースに同じである。また、1998～2003年に公開された収着データ約1,200件を追加、更新した。データ数が増えたことにより、セシウム、アメリカシウムなどの元素の分配係数のイオン強度やpHに対する依存性がより明確になり、イオン交換や表面錯体反応といったメカニズム推定に有効なものとなった。さらに、2万件を超える収着データの信頼度付与のための指標を作成した。核種の収着データベース開発などにより、社団法人日本原子力学会標準化委員会の活動の一環で行われている深地層の分配係数の測定方法の標準化作業に汎用的な条件や方法などの基盤情報が提供できた。

安全評価モデルの高度化

岩盤中水理・物質移行モデルの高度化については、地上からの調査段階で必要となる地下水流動解析の信頼性向上に資するモデル化技術の整備として、以下の成果が得られた。

- ・データの少ない広域とデータの多い処分場近傍領域を同時に解析するために、亀裂ネットワークモデルと連続体モデルを接続した「入れ子式モデル」を開発するとともに、その有効性を確認した。
- ・間隙水圧データから地下深部の透水係数を推定する技術を、幌延地域で観測されている間隙水圧データに適用し、稚内層で観測された高い間隙水圧は、稚内層あるいはその上位の声間層の上部に低透水性の地層が存在することに起因する可能性が示唆され、本手法を用いることにより、対象地域の地下水流動に影響を及ぼす可能性がある要因を抽出し、調査や解析にフィードバックできる可能性が示された。

- ・水理と地下水水質変化を統一的にモデル化するために、ケモメトリックス法とバックワードトラッキングを組み合わせて地下水の端成分の混合割合の時間変化をモデル化する手法を開発し、スウェーデンのエスポ地下研究施設周辺地域における坑道掘削に伴う水質変化の予測解析に適用した。その結果、本手法が水理地質構造モデルの信頼性の確認とともに、間隙率の補正にも有効であることが分かった。
- ・定量的知見だけでなく定性的な地質学的データなども考慮することがモデルの信頼性向上に有効であるため、堆積プロセスを考慮して堆積岩中の不均質な堆積構造を再現することにより地質構造モデルの不確実性を推定する手法を開発した。
- ・水理解析から物質移行解析に受け渡す重要情報となる移行経路長は、透水係数の不均質性の影響を受けるため、移行経路長などの不確実性を確率有限要素法を用いて評価する手法を提案するとともに、モンテカルロ法との比較・検討を行った。

また、結晶質岩・堆積岩について安全評価上重要となる亀裂を対象とした水理・物質移行の現象理解に関して以下の成果が得られた。

- ・1 ケースではあるが亀裂交差部と交差部周辺の亀裂の透水性を測定し、亀裂交差部は周辺の亀裂より透水性が高く、移行経路となりうることを示した。
- ・亀裂充填物質の拡散係数を測定し、移流間隙と接する岩石基質部に拡散するだけでなく、亀裂充填物質を介して亀裂面全体からマトリクス拡散が起きうる可能性があることを示した。また、トレーサー試験に基づき安全評価で用いるパラメータを解釈するに当たっては、亀裂充填物質の影響を考慮する必要があることを示した。
- ・原位置トレーサー試験からパラメータ値とその不確実性を推定する手法を開発した。
- ・新第三紀堆積岩中の亀裂の影響を、コアを用いた室内試験で評価し、間隙率の異なる堆積岩で亀裂が移行経路になり得る場合とそうでない場合があることが示され、実際のサイトでは亀裂の影響を確認する必要があることが示唆された。また、物質移行開口幅と透水量係数の相関性については、第2次取りまとめの知見が堆積岩においても利用可能であることを示した。

地下水・間隙水水質形成モデルのうち、地下水水質に関しては、幌延の深地層の研究施設計画や茂原地域においてボーリング孔から採水され地表で測定された地下水データに基づき、地下深部での pH、Eh などの値を熱力学的手法により推定し、地表からの調査段階において深部地下水水質を測定することが困難な場合の推定方法を提示した。間隙水水質に関しては、圧縮ベントナイト中の間隙水の pH の時空間変化を直接測定する技術を開発した。また、セメントに起因して発生する高アルカリ溶液とベントナイトの変質を検討する際に必要な鉱物などに関する熱力学データベースを整備した。

現象論的核種移行モデルの開発のうち、ガラスの長期浸出挙動では、変質鉱物として pH11 以上では方沸石、pH11 以下ではスメクタイトの生成が確認され、方沸石生成の場合はガラス溶解が加速されることがわかった。核種の溶解現象では、溶解度制限固相の変遷について、トリウムに引き続き、ウランについても溶液中において非晶質含水酸化物の結晶性酸化物への変化が確認され、第2次取りまとめにおける溶解度制限固相の設定が保守的であることが示された。また、固溶体モデルの開発について、ネプツニウム IV 価とウラン IV 価が混合したアモルファス含水酸化物の溶解挙動が理想固溶体モデルで表現できることを示した。さらに、ラジウム（バリウム）とカルシウムが混合した炭酸塩の共沈挙動について、元素分配比の方解石沈殿速度依存性を取得するとともに、ラジウム（バリウム）の溶解挙動が、非理想系の固溶体モデルにより解釈できることを示した。収着拡散挙動では、収着メカニズムに基づくモデルの妥当性を確認するとともに、現状では適用可能な元素には制限があるものの、環境条件に対応した分配係数値の推定および環境条件の変化に対する感度の予測が可能となった。さらに、緩衝材中の微細間隙構造中における各イオンの移行経路などに関する現象理解が進んだ。

コロイド、有機物および微生物のうち、コロイド影響に関する研究では、原位置地下水

のコロイド特性（濃度・粒径分布）などを評価した。圧縮ベントナイトによるコロイドフィルター効果を均質化モデルにより検討し、コロイドろ過に必要な有効粘土密度を計算した。セシウムベントナイトコロイドに対する収着性は粉末状ベントナイトより大きいことを確認した。さらに、亀裂性媒体と多孔質媒体の両方に適用可能であり核種のコロイドへの収着速度を考慮できる核種移行計算コードを開発し、海外の地下研究施設における原位置試験においてその有効性を確認した。有機物の影響に関する研究では、実際の地下水中の有機物の同定と濃度測定を行った。圧縮ベントナイトへの有機物透過特性を調査し、蒸留水条件に比べ人工海水条件下では透過しやすいことを確認した。有機物と核種の相互作用については、トリウム、ネプツニウム IV 価と有機物の相互作用について錯生成定数を取得した。また、トリウムは溶液中の炭酸濃度がある程度以上の場合には有意に錯体を形成しないことを確認した。微生物影響に関する研究では、微生物がコロイド的挙動をする場合、微生物濃度によっては核種移行が促進される可能性があることを示した。

生物圏評価モデルの高度化については、実際の地表環境の特徴を考慮するため、希釈などの効果に大きく係わる地質環境と生物圏とのインターフェース（GBI）を実際の地表環境に応じた設定するための着眼点や考え方、および設定上考慮すべき要因を把握するための調査項目を概略的に検討した。また、海域を GBI としたモデル、下部土壌を GBI としたモデル、気候変動を考慮したモデルなどを拡充した。さらに、実際のサイトにおいて、パラメータの重要度と設定状況に基づき優先的に取得すべきデータを絞り込む手順を作成した。線量およびリスク以外の安全指標としての天然放射性核種の濃度とフラックスについて、基盤的情報としてわが国における天然放射性核種の濃度とフラックスのデータを収集・整理するとともに、集水域に着目した天然放射性核種のフラックスの算出方法を例示した。

安全評価手法の整備・高度化

シナリオ解析技術については、シナリオ解析において重要である反面複雑で時間を要する主要原因となっていた FEP の相関関係の整理に対して、FEP の相関関係をマトリクス形式で表現することに加え、安全機能という結果側の視点からの階層的整理を行うことによって構造化するとともに、計算機上に展開することにより、相関関係の十分性の確保、作業の効率化、および作業の追跡性・透明性の確保を可能とする技術を開発した。

天然現象影響評価技術に関しては、地質学的知見をより合理的に評価に反映することにより過度の保守性を排除可能とするとともに、整合性・追跡性についても確保可能な作業フレームを整備した。

不確実性評価技術のうち、パラメータの分布設定技術については、誘出法を用いた分布設定手順の検討および試行から、分布設定手順を具体化するとともに、留意点として、パラメータの変動要因について専門家間で情報を共有することが重要であるとの知見を得た。データ不確実性の影響の定量化については、複数のデータの不確実性が同時に存在する場合の影響をモンテカルロシミュレーションで評価可能な核種移行解析モデルを開発するとともに、決定論的な手法と確率論的な手法を相互に補完的に用いることにより、不確実性評価の信頼性と効率を向上させることができる見通しを得た。感度分析技術については、従来の重回帰分析に加えて、クラスタ分析、判別分析、決定木分析などの手法を、分析の目的に応じて使い分けること、および組み合わせて使うことの有効性を提示した。モデルの不確実性の影響の定量化については、第 2 次取りまとめの段階で、簡略化したり、安全側の観点からあえて効果を無視していたプロセスの検討として、掘削影響領域での移行遅延や、ガラス溶解に対するガラスの割れの影響について評価を行い、これらの現象の現実的評価がシステム性能の頑健性を示す上で有効となる見通しが得られた。

技術情報の統合技術については、広範囲におよぶ地層処分の各研究要素間で技術情報の共有を図ることにより、調査・設計・安全評価の整合性を確保し、評価の信頼性の向上を図るため、技術情報を利用しやすい形で統合的に管理することが可能なシステム（技術情報統

合システム：JGIS) を構築した。

安全評価手法の適用性確認

実際の地質環境を対象とした、地質環境の調査・評価から物質移行解析に至る一連の作業の枠組みを整理した。また、実際の地質環境を対象とした物質移行解析の大きな特徴のひとつである、地下水流動解析から得られる移行経路情報を物質移行モデルに反映する方法について検討し、複雑なモデルと簡略化したモデルを構築するとともに、簡略化したモデルで複雑なモデルを近似する手法を提示した。

安全評価手法を個別に深地層の研究施設計画や海外の地下研究施設における実際の地質環境データに対して適用した結果、実際の地質環境を対象とする際の留意点・課題について以下の事項を提示した。

地下水流動評価のうち、補完モデルとしての入れ子式モデルについては、適用結果と亀裂ネットワークモデルを構築する上での留意点・課題として、流体検層による水みちの透水量係数の測定精度の検討、亀裂の長さを設定する際のフラクタル特性データの活用などを示した。実測されたデータから水理パラメータを推定する手法については、幌延の深地層の研究施設計画のボーリング孔で観測された間隙水圧から地下深部の透水係数の推定を行い、留意点として、断層部分の透水係数の設定（高透水性部と低透水性部からなるサンドイッチ構造、あるいは低透水性部のみの一層構造）が地層の透水係数の推定値に影響を与えることを示した。水理地質構造モデルの信頼性を確認する上で、地下水水質変化との整合性を確認する手法については、留意点として、地下水水質の初期状態の把握とその後の変動の把握が重要であることなどを示した。堆積岩の地質構造を推定する技術の開発については、堆積プロセスおよび圧密プロセスを考慮して堆積岩の堆積構造を推定するうえでの留意点として、入力パラメータの設定にあたって、初期条件や堆積作用に影響する要因について堆積学的知見に基づき慎重な検討を行う必要があることを示した。

地下水水質の設定については、地下水水質を熱力学的解析に基づき補正する手法を検討し、留意点・課題として、地下水水質を推定するうえでの鉱物情報の取得の重要性や微生物影響などを含めた評価の必要性について述べた。

物質移行のための解析モデルの選定およびパラメータ設定に関しては、間隙率の異なる新第三紀堆積岩における卓越した水みちとして、亀裂の重要性が異なることが示唆されたことから、実際のサイトにおいて亀裂が岩石の透水性に与える影響を確認することを留意点として示すとともに、原位置での亀裂の連結性についても検討する必要性を今後の課題として示した。結晶質岩については、留意点として、トレーサ試験から安全評価に用いる物質移行パラメータを解釈する際には、亀裂中の充填物質への拡散が短期的には卓越するため、その影響を考慮した解釈を行う必要性を示した。

分配係数の設定に際しては、留意点として、岩石と地下水水質の把握が重要であり、特に後者については天然有機物の把握が重要であることを指摘した。また、実際の地質環境を対象とする際には、得られるデータが限られる可能性があり、そのような場合に既存の収着データベースを基に分配係数を推定する手法を示した。

コロイド、有機物の影響評価を行う際には、留意点として、地下水中における濃度、安定性、移行性、核種収着性・錯形成能およびそれらの不可逆性の 5 つの特性を評価する必要があること、地下水中のコロイド特性は地下水流速や Eh, pH などの影響を受けやすいため、できるだけ地下深部の環境を乱さずに地下水を採取する必要があること、また、有機物についても、コロイドレベルの大きさを持つ有機物が存在する可能性があるため、コロイドと同様に擾乱の小さい手法で地下水を採取する必要があることを述べた。

シナリオ解析については、留意点として、地質環境に対する理解が十分でない段階におい

ては、地質環境条件などを一義的に定めることができないことが想定されるため、そのような場合には複数の地質環境条件のそれぞれに対してシナリオを設定し、不確実性として評価できるようにしておく必要性と、このような課題に対応可能なシナリオ構築手法を整備したことを述べた。

不確実性評価については、パラメータ分布の設定技術、データ不確実性の影響の評価技術、重要な不確実性の抽出技術が整備され、今後実際の調査・研究にフィードバックすることが課題であることを述べた。

生物圏評価については、調査により得られる情報に応じて GBI 候補を絞り込むことの手順について検討を行い、今後深地層の研究施設計画で行われる調査を活用して検討することが今後の課題であることを述べた。

技術情報統合システムの開発については、実際の地質環境を対象とした調査・研究の進展に伴う技術的な情報の増大や複雑化への対応の実績の蓄積を図ることが課題であることを述べた。

今後に向けて

今後、地層処分のセーフティケースの作成に必要な地質環境の調査、処分場の設計および安全評価に関するデータや情報、および専門家の判断根拠などを知識という形でわが国共通の資源とするために、安全評価に関する技術基盤の強化を進めるとともに、知識の拡充と具体化、統合化の方法論の開発およびそれに基づく知識ベースの構築を進める。

安全評価に関する技術基盤の強化については、地層処分基盤研究施設や地層処分放射化学研究施設などの研究施設において、核種移行などに関するデータの拡充、現象理解の深化に基づくモデルの高度化を図る。また、安全評価への反映の筋道を明らかにしながら個別研究課題を進めるとともに、それらの連携を強化し、総合技術としての安全評価技術を向上させる。さらに、これらの技術の開発・整備に、深地層の研究施設計画で得られる地質環境データなどを活用していくとともに、全体システムモデルの整備も図りながら、個別の技術のみならず安全評価技術全体としての深部地質環境での適用性確認を行う。

知識の統合化に関する方法論の開発および知識ベースを管理する知識マネジメントシステムの開発と整合をとりつつ、上述のデータ、モデル、手法、それらの適用性などの安全評価に関する技術的成果、および深地層の科学研究の成果やすでに開発を進めている熱力学データベースなどを知識として整理し、それらを知識ベースとして体系化する。これにより、事業の進展に応じて研究開発成果や科学技術的進歩を反映した最新の知識を提供することを可能とする。また、関係機関の研究開発成果もこの知識ベースに統合し、地層処分技術に関する研究開発における中核機関としての役割を果たす。

「地層処分技術の知識化と管理」

要 約

第2次取りまとめ以降のサイクル機構の研究開発については、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）が5年の節目を迎え、深地層の研究施設計画が第1段階から第2段階へ移行しつつあること、研究開発を取り巻く国内外の状況が大きく変化していることなどを勘案すれば、その成果を一旦取りまとめ、全体計画で示した個々の研究開発課題に対する達成度と今後の課題を明らかにするとともに、今後行うべき研究開発の方向性を合わせて提示することは意義のあることである。

このためサイクル機構では「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年度取りまとめ—」（以下、「H17取りまとめ」という）として、これを行うこととした。H17取りまとめは、「深地層の科学研究」、「処分技術の信頼性向上」、「安全評価手法の高度化」の3つの分野における研究開発研究開発の進捗を記述した3つの分冊レポートと、これらの研究成果に基づいて知識基盤の構造化を試みた知識化レポートで構成されている。

本書は、地層処分計画の進展のなかで研究開発を捉え、成果を技術基盤として統合するとともに将来の研究開発の優先順位を明らかにするための新たな視点として知識管理（knowledge management）に注目し、「地層処分技術の知識基盤の開発と管理」と題する報告書（知識化レポート）として作成したものである。第2次取りまとめの成果に加え、上記分冊レポートに示された研究開発成果を処分事業と安全規制を支える技術基盤としてより確かなものとするができるよう、必要な科学技術情報を構造化し継続的に最適化していく（知識基盤化）ための考え方を提示することに主眼をおいた。

地層処分の長期安全性確保のための科学技術的基盤は、長期間にわたる事業全体に対する信頼を支えるうえで必須なものであり、最新の研究開発成果を取り込みつつ知識として統合し、これを継続的に管理するための枠組みを整えることが重要である。このような地層処分技術に関する知識は、実施主体や規制機関などのステークホルダーが、安全性を示す様々な論拠や地層処分計画の種々の時間断面において行う意思決定に用いられる。

本報告書では、安全確保策の長期性と事業の長期性という特徴を考慮して地層処分技術を体系的に開発していくため、関連するデータ、情報、知識をセーフティケース概念に基づいて構造化することにより地層処分計画の進展に応じて継続的に管理するための方法論について論じている。

段階的に進められる処分計画において、計画を次段階に進めるかどうかの意思決定のための鍵となる入力情報となることがセーフティケースの本質的な役割である。セーフティケースは、その時点での科学技術的知識を統合することによって段階的に作成され信頼性が高められる。セーフティケースの作成における様々な情報の統合作業を通じて、サイト調査、処分場設計、システムの安全評価に関わる担当者間の対話が促進される。

閉鎖前の処分場や他の原子力施設と異なり閉鎖後の処分場に関するセーフティケースの作成が特徴的な作業であること理由は、主に、閉鎖後においてはモニタリングやそれに基づく修正活動の可能性が制限されること、安全性の評価期間の長さ起因する不確実性を伴うことである。閉鎖後の処分場の安全評価が対象とする空間的・時間的スケールによって、処分場やその周辺環境の特性、時間的変遷に大きな不確実性を伴うことが不可避であり、このことは意思決定において常に念頭に置かれる必要がある。

セーフティケースの作成を行うためには適切なマネジメントが重要であり、種々の情報の統合化や文書化のための適正な専門的知識と能力が必要となる。サイトの調査によって処分

場の設計や安全評価のための情報が提供され、構築された処分システムの安全評価から処分場の設計やサイト選定へのフィードバックが行われる。こうした相互の連携による反復過程は、処分場のプランニングや開発にとって不可欠であり、これを適切に管理することが求められる。このような反復過程によってセーフティケースは処分計画を通じて恒常的に信頼性を高めていく必要があり、このためには専門家集団が継続的に関与しその技術的内容について確認を行うことが必要である。このような観点から関連する科学技術的な知識の管理を行うことは極めて重要である。

上記背景から、地層処分事業の実施と安全規制の策定に必要な科学技術基盤を知識として管理していくため、知識の構造化の視点としてセーフティケースの概念を用いることを提言した。セーフティケースの概念については、現在も国際的に議論が行われており、本書では基本的に OECD/NEA における検討に基づきつつ、知識管理の目的や範囲に応じて拡張を行っている。地層処分に関連するデータや情報、知識を、セーフティケースの一般概念に示されている構成要素ごとに相互の関係も含めて構造化し、これら知識の内容をセーフティケースの作成という観点での価値を含めた形式によって記述するという知識管理の方法論を示した。具体的には、セーフティケースの一般的構成要素である、「目的と文脈」、「安全戦略」、「安全評価基盤」、「証拠、解析及び論拠」、に沿って知識項目をそれらの集合体に整理し、これらの関係性を緩やかに把握するような構造化を行った。また、これらを用いた「セーフティケースへの統合」を行うための知識について、論証構造を階層的な主張の関係として例示したテンプレートとして捉える方法を示した。

この考え方にに基づき、第2次取りまとめとそれ以降サイクル機構において進められてきた研究開発成果を対象として、具体的に知識ベースを構築していくための基本的な枠組みの検討を行った。

セーフティケースの「目的と文脈」、「安全戦略」については、わが国の地層処分計画がどのような考え方と意思決定に基づいて進められてきたかを整理することによって、今後セーフティケースが作成される際に、知識として提供できるようにしておくことが重要であることから、計画の変遷をセーフティケースの作成という観点でたどり主要な事項を明らかにした。例えば、原子力発電環境整備機構が公募によるサイト選定を進めるうえでサイトの環境条件に柔軟に対応するため、種々の処分場概念のバリエーションを考慮し技術的な検討が進められていることや、安全規制策定に向けて種々の具体的な議論が進められていることは、これらの技術的基盤を提供する役割を担う研究開発機関として今後行うべき知識管理の枠組みと具体的な知識ベースの内容の検討にあたって留意すべき点である。

「安全評価基盤」と「証拠、解析及び論拠」については、技術的な知識という点で最も大きな比重を占め、第2次取りまとめや3つの分冊レポートに示されたそれ以降の研究開発の成果は、これらの要素を構成する知識の集合体としての一般的階層構造に従って整理することができる。また、「セーフティケースへの統合」に関する知識については、セーフティケースの一般的な論証構造のテンプレートの例を示しており、このような構造化に従って、第2次取りまとめや3つの分冊レポートに示したそれ以降の研究開発によって得られた知識を分類整理するとともに、テンプレートを構成する種々の「主張」とこれを支持するために必要な論拠との関係を論じた。これによって現在利用可能な知識ベースとともに今後整えていくべき知識の分野を明らかにしている。この検討にあたっては、第2次取りまとめ以降の研究開発を取り巻く状況の変化、特に上述したような原子力発電環境整備機構によって示された技術開発の枠組みなどを念頭に置いた。このような地層処分技術に関する知識の構造化と現状の知識に関する分析は、今後、具体的な知識ベースを開発していくうえで起点となるものである。

一般に、実際にセーフティケースを作成する実施主体やこれを評価する規制機関においては、種々の意思決定に対する要件管理システム (requirement management system) が不可

欠であり、科学技術基盤としての知識ベースと管理システムの開発にあたっては、要件管理と相互補完的に機能するように進めることが肝要である。上述したアプローチは、知識管理システム (knowledge management system) を直接、実施主体や規制機関の要件管理システムに関係づけるうえで便利であると考えられる。

高レベル放射性廃棄物対策に関しては、技術的な観点から地層処分が現在最も理にかなったものであることが国際的に認められており、これまでの研究開発から技術的に可能であると考えられている。一方、地層処分は、通常のシステムとは異なり、これまでに経験のない長期間を対象とした受動的な安全系に基づくシステムであることから、その安全性について感覚的にとらえることが困難という側面も有している。このためには、意思決定に関与する様々なステークホルダーに対し、「情報の非対称性」を念頭に置いてセーフティケースの内容を分かりやすく説明することが極めて重要なテーマとなる。また、理解しやすいセーフティケースの構造を与えるような処分場概念の構築、安全評価の方法論に関する科学的基礎の例示などにも取り組んでいく必要がある。上述した知識管理においてはこのような課題についても念頭においておくことが重要である。また、地層処分事業の長期性の観点から、地層処分に関わる専門家を糾合し人材育成の機能を確保するという観点でも本報告書で指向している地層処分技術の知識管理は重要な役割を果たす。これらの点についても今後の方向性として言及した。

