

性能評価へ適用可能なナチュラル アナログに関する研究 研究概要

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書)

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
㌞	J1561 96-002	1996.5.15
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1996年2月

財団法人 原子力環境整備センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

性能評価へ適用可能なナチュラルアナログに関する研究

	*		*
妹尾宗明		伊藤賢治	
	*		*
安保則明		深谷正明	

要 旨

本研究は、地層処分における性能評価事象との対比において、天然に存在する類似現象（ナチュラルアナログ）に関する研究の現状について国内外の事例を幅広く調査するとともに、今後の我が国における地層処分システムの性能評価への適用の可能性を検討することを目的とする。

国内外のナチュラルアナログに関する文献の内容を検討し、ナチュラルアナログ研究の構造と現状を整理した。整理の視点は調査場所、対象性能評価事象、環境条件、研究成果及び成果の利用方法などである。

また、抽出した性能評価事象を主体とした主要事象を対象として、性能評価への適用可能性を従来の考え方にこだわらず広く検討した。

合計75件のナチュラルアナログ文献を調査した結果を整理票に示した。

また、性能評価への適用可能性を検討した結果を示した。

本報告書は、（財）原子力環境整備センターが動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：070D0225

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発推進本部処分研究グループ(佐々木憲明)

* 研究第二部

Study on possibility of Natural Analogue to applicate for performance
assessment of high-level radioactive waste repository

* *
Muneaki Senoo Kenji Ito
* *
Noriaki Ambo Masaaki Fukaya

Abstract

The purpose of this work is to research about domestic and overseas examples of study for Natural Analogue by comparison with events of performance assessment on high-level radioactive waste repository, and to study on possibility of Natural Analogue to applicate for performance assessment of high level radioactive waste repository.

In this year, we studied to contents of domestic and overseas references as for Natural Analogue, and rearranged its structure and present condition of studies about Natural Analogue. The objects of these studies are analogue site, objective performance assessment events, environment conditions, results of study and usage of results. And also we studied on possibility of Natural Analogue to applicate for performance assessment of high-level radioactive waste repository as for selected performance assessment events.

The results of research of total 75 references are showed as research result sheets. And we showed the results of studies about on possibility of Natural Analogue to applicate for performance assessment of high-level radioactive waste repository as for selected performance assessment events.

Work performed by Radioactive Waste Management Center under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison ... Isolation System Research Program, Radioactive Waste Management Project, (Noriaki Sasaki)

* Second Research Division

まえがき

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる性能評価研究は、性能評価上対象となる特質、事象、プロセス（F E P s）を我が国の地質環境条件や処分概念に基づいて同定し、分類、選別、結合を経て必要なシナリオを作成し、その影響解析を行うことによってなされる。これらの性能評価研究において必要なことは、F E P sの同定、モデルの構築、コードの検証、モデルの確証等を行うにあたって、必要な情報（データ等）を室内試験、原位置試験、ナチュラルアナログ、専門家の助言・判断等から適切に取得し、モデルに入力することである。それらの必要な情報が有する信頼性は性能評価の信頼性を高め、そして維持する上において必須のものである。

本研究は、成立の可能性があり性能評価上重要と考えられているF E P s、あるいは成立性には今後の議論が必要であるが成立した場合には重要な影響が考えられるF E P sのうち、これまでの試験、データ等から得られている情報の量と質が不十分なもの、あるいはある程度十分であるもののさらにバックアップ情報が必要と考えられるF E P sを対象に、ナチュラルアナログ研究の観点から得られている既存データをとりまとめることにより、あるいはそれらが無い場合には新たなナチュラルアナログ研究を提案することにより、当該F E P sに関わる関連データベースの信頼性の向上を図ることを目的とする。また、これらにより、我が国で考慮されている地層処分システムに関わる性能評価研究に対して、ナチュラルアナログ研究の成果の適用可能性を明らかにすることが可能になると考えられる。

今年度は、これまでに文献及び関連する国際会議、学会等の場において発表されたナチュラルアナログに関する研究報告の内容を性能評価研究への適用の観点から整理するとともに、上記のF E P sについてナチュラルアナログの観点からその内容を整理した。

1. ナチュラルアナログの現状調査

本章においてまず、地層処分における性能評価事象との対比において、天然に存在する類似現象（ナチュラルアナログ）に関する研究の現状について国内外の事例、特に海外事例を中心に幅広く調査した結果をとりまとめる。

1.1 ナチュラルアナログの現状調査の方法

ナチュラルアナログの現状について調査の対象とした文献、文献調査結果の整理方法についてとりまとめる。

1.1.1 調査対象文献

対象とした文献の総数は75である。主要な文献分類とそれぞれの総数を以下に示す。

調査対象文献の概要

- RADWASTE Magazine Special Series on Natural Analogs, 1995(文献数3)
- Scientific Basis for Nuclear Waste Management, X V II), 1993(文献数7)
- Scientific Basis for Nuclear Waste Management, X V III), 1994(文献数15)
- Proc. 5th CBC/NAWG meeting and Alligator Rivers Analogue Project Final Workshop, 1992(文献数48)
- Studies on Natural Analogues and Geological Systems. Their Importance to Performance Assessment, SKB TR 93-05, 1993(単行本, 166 頁)
- Natural Analogue Studies in the Geological Disposal of Radioactive Wastes, Studies in Environmental Sciences 57, 1994(単行本, 395 頁)

1.1.2 文献調査の整理の方法

ナチュラルアナログの文献調査の結果を整理する上において考慮した事項は、

- 性能評価の枠組みにおいて研究内容を整理すること
- 特に、対象とする事象や場を明示し、その時間的、空間的広がりを明示すること
- 性能評価への適用性を明確にする観点から研究成果の利用方法を記述すること

・データベース化に対応できるようにすること

等である。これらをベースに、文献調査事項として決定した項目とそれらの記述方針について以下に示す。

① 研究テーマ名

一つの研究として独立して扱いうる内容のものについての名称（文献に記述がない場合には、調査者の表現（意見）として記述する。）；したがって、一つの文献において、複数の独立した研究テーマが認められる場合には、それぞれについて以下のとりまとめを実施した。

② 研究目的

そのテーマに固有の研究目的を示す。記述がない場合には、調査者が意見として適切に表現する。

③ 調査場所名

上記テーマの研究が実施された場所名を記述する。場所が特定されない、あるいは場所に関係のない研究の場合には記載しない。

④ 研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象

研究で扱っている事象（個々の研究に密接に関連した地質学的な表現名になる可能性が高い）と性能評価上のF E P（多くはevent:事象あるいはprocess:プロセスになる）を記述する。対置される性能評価事象の記載がない場合には、調査者の意見としてとりまとめる。

⑤ 研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素（ナチュラルアナログとしての試料数を含む）

研究で扱っている地層・岩石・核種・地下水・その他物質とナチュラルアナログとしての試料数を記述する。また、それが性能評価上の多重バリア構成要素の何に相当するのかを記述する。文献内にこれら事項が記述されていない場合には、調査者の意見としてとりまとめる。

⑥ 研究対象事象の空間的広がり

④で示した事象の三次元的な大きさを記述する。なお、あるサイトのある鉱床を対象としたもののうち、その研究が鉱床の一部であったり、鉱床の周囲の母岩であったりした場合には、その直接関係する領域の大きさを記述する。文献にそ

の記述があれば、それを示し、なければ、図から読み取ったり、あるいは記述内容から想定して調査者の意見として述べる。

⑦ 研究対象事象の時間的広がり

④で示した事象の過去の地質時代における「事象発生期間」を記述する。なお、鉱床生成時期が10億年前であっても、対象とする事象の発生が5億年から3億年と想定される場合にはその後者の期間を示す。これらについては、⑥と同様、研究者自信が文献内で記述している表現を基本的にとりまとめるものとし、記述のないものについては図や表あるいは文脈から読み取り、調査者の意見としてとりまとめる。

⑧ 研究対象事象に係る場の幾何的特性

④で示した事象が生じている場（空間）の三次元的な形状（構成要素の位置関係）を示す。例えば、ある岩石中の断層を調査しているのであれば、どのような大きさのどういう岩石中にどのような走向傾斜のどういう幅のどういう断層（その断層の断面内で、どういう充てん物質がどのように空隙を埋めているのかなど）の記述も対象とする事象の内容によっては含まれる）のかな等の記述をする。

⑨ 研究対象事象の環境条件（地下水組成等の化学的条件、熱的条件、応力条件、水理的条件など）

当該研究で対象としている事象の環境条件の地下水組成等の化学的条件、熱的条件、応力条件、水理的条件などのうち、記述されているものを取りまとめる。

⑩ 研究概要

当該研究の概要を記述する。必要に応じて文献中の図表を引用する。

⑪ 主要な成果

文献で示されている「成果」を記述する。また、調査者の意見としての「成果」の記述が含まれる場合もある。

⑫ 成果の利用方法

当該研究成果を地層処分研究（あるいは性能評価研究）にどのように利用しようとするのか、利用しているのか、利用できると考えているのかを示す。利用方法としては、

- ・モデル開発のための基礎資料
- ・モデル（数式）への入力パラメータ

- ・モデルの確証のためのデータ
- ・定量的なあるいは定性的なシステムの理解のための資料
- ・信頼の形成 (Confidence Building)のための資料
- ・定性的なPublic Acceptance 資料

としての利用等が考えられる。これについても研究者の記述（記述がある場合）と調査者の意見（記述がない場合の調査者の想定）に分けて記述する。

⑬ 研究成果の評価

当該研究成果を研究者がどのように自己評価しているのかを、あるいは調査者の意見として調査者がどのように研究内容を評価できるのかを記述する。特に、当該研究成果の性能評価への適用性については可能な限り記載する。その際の主要な記述方針は、定性的な適用性の範囲であればその定性的なレベルを、定量的な適用性が議論できる場合にはその定量的な議論のレベルを記述することである。

⑭ 課題

本研究をベースとして、

- ・今後さらにどのような研究を行っていけば、研究目的をより達成できるのか、あるいは別の研究目的を達成できるのか
- ・当該研究のどのような部分をどのように調査・研究していけば、さらに好ましい情報が得られるのか

等について、今後の地層処分研究・性能評価研究への貢献という観点から記述する。記述内容は研究者自身の記述と調査者の考え（意見）に分けられる。

⑮ その他の特記事項

①～⑭以外に特に記述すべき事項があれば、それを記述する。主として、調査者の意見としてまとめられる。

⑯ 著者名（著者の所属を含む）

著者名と著者の現時点での所属、あるいは論文や報告書を提出した時点での所属を記述する。

⑰ 文献名（総頁数、図表枚数、引用文献数を含む）

当該研究が記載されている文献名と当該研究報告についての総頁数、図表枚数、引用文献数を示す。

上記各事項についての記述方針において重要なことは、著者の記載と調査者の記載は明確に区別することである。文献調査における調査者の意見は墨付き括弧、すなわち【・・・】により、・・・で示す意見内容を明示した。

1.2 主要性能評価報告書におけるナチュラルアナログの記述の現状

各国の安全評価書のうち、最近刊行された三つの文献、すなわち、

- ・スイスのKristallin-I(1994)

表題「スイス北部の結晶質基盤岩におけるHLW処分場立地に関する広域調査計画の結論」

- ・カナダのE I S (1994)

表題「使用済燃料処分に係る環境影響評価書」

- ・スウェーデンのSKB91(1991)

表題「使用済燃料の最終処分に関する安全性事前評価書；安全性にとっての基盤岩の重要性」

について、ナチュラルアナログの性能評価への適用性について調査した結果を整理した。さらに、SKB91で出典としているSKB TR91-50の内容についても合わせて調査結果を示した。

記述の方針は1.1で示した文献調査方針にならうものの、あくまで、ナチュラルアナログ研究がどのように反映されているかを主体とした調査であり、必ずしもその枠組みにはとらわれていない。これら文献に示されたナチュラルアナログの記述のレベルを概略的に述べれば、いずれも定性的ではあるが、評価書本文中にナチュラルアナログを適用している旨の記述が認められた。以下に調査結果をとりまとめた整理表を表1.2-1に示す。

1.3 文献調査結果の整理

1.1で示したナチュラルアナログの現状の調査結果を116個のデータシートとしてとりまとめた。それらのデータシートで整理した内容のうち、性能評価の観点から主要と思われる事項について調査結果を比較表として整理した結果を表1.3-1に例示する。この比較は全てのデータシート情報に対して実施した。

これら文献の中には、現地における調査ではなく、全くの室内解析の文献もあっ

表 1.2 - 1 各国の安全評価書におけるナチュラルアナログの適用例

	Kristallin-I (スイス)	E I S (カナダ)	S K B 91 (スウェーデン)
処分対象、概念	H L W及びT R Uを 深地層処分	使用済燃料を深地層 処分	使用済燃料を深地層 処分
適用性評価事象	天然バリア特性 評価期間 ベントナイト劣化	地下水中の酸素 廃棄体の溶解	燃料の溶解(変換) ベントナイト劣化 コロイド影響
適用ナチュラルア ナログ	①Menzenschward ウ ラン鉱山 ②Pocos de Caldas ウラン鉱山	①カナダCigar Lake ウラン鉱床	①カナダCigar Lake ウラン鉱床 ②ゴットランド島ハ ムラのベントナイト層
性能評価への適用	①上記両ナチュラル アナログ結晶質岩盤 の直接的な検討実施 例でサイト調査の補 足となるであろう。 【具体的記載なし】 ②人工バリア性能の 長期的外挿期間とし て10 ⁴ 年がナチュラル アナログ調査で十分 裏付けられるとして いる。 【具体的記載なし】 ③ベントナイトの長 期耐久性への信頼性 がナチュラルアナロ グ調査により強化さ れるとある。 【具体的記載なし】	①地下水中の酸素量 の不足に関する長期 的予測に関してウラ ン鉱床での観察によ り裏付けられるとし ている。 【具体的記載なし】 ②還元条件下のUO ₂ 粒子の長期安定性に ついて上記鉱床での 観察によって確認さ れているとある。 【具体的記載なし】	①ウラン鉱床は10億 年飽和状態の開放系 で核種分散がなく、 計算の保守性の度合 いを比較している。 ②ベントナイトの長 期安定性がナムラで 一千万年間110-130 ℃の加熱状態で劣化 が認められなかった ことで確認されたと している。 ③ナチュラルアナロ グ地下水中の粒子に 核種が結合すること とその移動はごく少 量であることを確認 した。
適用効果	①結晶質岩盤調査の 補足 ②人工バリア性能の 長期的な外挿の裏付 け ③ベントナイトの長 期耐久性の信頼性強 化	酸素を含まない地下 水環境において数万 年の間、腐食による 欠陥が発生しないコ ンテナの設計が可能	①ナチュラルアナロ グとの比較により計 算の保守性度合いを 定性的に見積もるこ とが可能 ②ベントナイトの長 期安定性を確認する ③コロイド影響が安 全性上重要ではない ことを示す。
適用性に関する評 価	モデル検証及び有効 性確認に関して、ナ チュラルアナログを 利用する。【方針を 示している】	【定性的ではあるが 性能評価上の長期的 予測の想定の根拠の 一つとしている。】	①計算の保守性の上 限を確認できる。 ②長期安定性の確認 ③コロイド影響評価 は不要と判断。

た。これは、ナチュラルアナログ研究として分類されている実態が、実は非常に幅広い内容を示していると言えるであろう。ある場合には会議のテーマの分類の仕方
の関係からナチュラルアナログに分類されたものもあったものと思われる。これら
についても同様にとりまとめたが、最終的な整理においては「ナチュラルアナログ
研究」の範囲を本研究として定めてゆく必要がある。

表1.3-1(1) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(1/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(1)	ナチュラルアナログ(以下NAと略す)：高レベル放射性廃棄物処分場の信頼性を確立する手段(考古学的人工物の腐食について)	NA研究の基礎の説明及び放射性廃棄物処分場の安全評価に使用された評価の確証に対するNAの適用の説明	【記載なし】	考古学的人工物の腐食—廃棄物パッケージや人工バリアの構成物質の腐食	考古学的人工物【試料数の記載なし】廃棄物パッケージや人工バリア(ビチューメン、セメント、鉄、鋼鉄、銅)	【記載なし】	数百年～数千年(考古学的人工物)	【記載なし】	【記載なし】	NA物質の腐食についての研究結果がモデルの支援に使用できることを定性的に示している。	【定性的な可能性を示したものである。】	5頁、1葉、【明示なし】
(1)	NA：高レベル放射性廃棄物処分場の信頼性を確立する手段(HLW処分場システムに対する全体的なアナログについて)	同上	Oklo鉱床(①)、Cigar Lake鉱床(②、③)	地質学的長期間における放射性核種の地層中の封じ込め実現可能性—【該当する性能評価事象なし】(①)、マトリクスとしての二酸化ウランの安定性—【使用済燃料の安定性】(②)、粘土の隔離剤としての有効性—埋戻し材/緩衝材の隔離特性(③)	Okloの天然原子炉に分布する核分裂生成物【試料数の記載なし】—【放射性核種と核分裂生成物】(①)、Cigar Lakeの二酸化ウランのマトリクス【試料数の記載なし】—【使用済燃料】(②)、Cigar Lakeの粘土【試料数の記載なし】—【埋戻し材/緩衝材】(③)	【記載なし】	20億年(①)、【記載なし】(②、③)	【記載なし】	処分場で想定される地球化学的条件とは異なる環境条件(①)、【記載なし】(②、③)	HLW処分の根本的な実現可能性に対する信頼性と人工バリアの特定のシステムの能力における信頼性の確立	同上	同上
(2)	深処分場を構成する物質の考古学的なアナログ及び工業的なアナログの研究	処分場構成物質の考古学的なアナログや工業的なアナログの研究のレビュー	エジプト(①)、イタリ(②)、その他(場所の明記なし)	ガラスの劣化—放射性廃棄物のガラス固化体の劣化	考古学的ガラス—放射性廃棄物のガラス固化体の劣化【試料数の記載なし】	【記載なし】	3,500年前～(①、②)、【その他については記載なし】	【記載なし】	劣化しやすい環境(aggressive environment)	【腐食速度等は求められていないので、利用方法は定性的なPublic Acceptance(以下PAと略す)試料、信頼の形成のための試料である。】	【放射性廃棄物のガラス固化体が大した変質なしに数千年の耐久性を有しているという事項を定性的に説明することができる。】	11頁、9葉、【明示なし】
(2)	同上	同上	【記載なし】	銅の腐食—銅キャニスタの腐食	銅製及び銅合金製の考古学的人工物—銅キャニスタ、試料数33	【記載なし】	8,000年前～	【記載なし】	研究対象物の多くは酸化して酸性の環境条件にあった。沈没船の大砲：中性で種々の酸化状態の環境にあった。	【銅製キャニスタの腐食速度の値として、NAから求めた腐食速度が参考になるが、右欄に示す理由から、値の適用には注意を要する。したがって、定性的なPA試料、信頼の形成のための試料である。】	NAを用いた腐食速度は、アナログ物質の化学組成、環境条件、アナログ物質の製造方法等が実際の処分場及び処分場構成物質と異なること、アナログ物質の周囲の環境が一定であると仮定することによる不確実性のため、値をそのまま適用することは危険である。	同上
(2)	同上	同上	ScotlandのInchtuthil(①)【その他記載なし】	鉄製及び鋼鉄製の考古学的人工物の腐食—鋼鉄製キャニスタの腐食	鉄製及び鋼鉄製の考古学的人工物—キャニスタ【試料数44個；図からの読み取り】	【記載なし】	約2,000年(①)、【その他記載なし】	5mの深さの穴(①)、【その他記載なし】	非常に酸化的な環境条件(①)、酸化的な海水中(②)、【その他記載なし】	鋼鉄製キャニスタの耐久性の見積もり	【NAの置かれていた環境条件が明らかにされていないので、定量的な適用はできない。】	同上
(2)	同上	同上	エジプト(①)、古代ローマ人の文化圏(②)、イギリス北部(③)、イギリスその他(④)	コンクリートの耐久性—処分場に使用される可能性のあるコンクリートの耐久性	石灰ベースのコンクリート(①)、ポゾラン石灰コンクリート(②)、含カルシウム珪酸塩コンクリート(③)、ポルトランドセメントベースコンクリート(④)—【コンクリート人工バリア】【試料数の記載なし】	【記載なし】	7,600年前～(①)、古代ローマ時代～(②)、1,700年前～(③)、150年前～(④)	【記載なし】	海水中(④)、【記載なし】(①、②、③)	【定性的なPA試料、信頼の形成のための試料】	【極めて定性的なレベルの記述に止められている。】	同上
(2)	同上	同上	【棧橋の土台として花崗岩ブロックが使用されている船着場(場所の特定なし)】	花崗岩ブロックの亀裂から生じるマトリクスへの塩水の拡散—花崗岩における地下水のマトリクス拡散	海水中に沈められた花崗岩ブロック—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	【記載なし】	【花崗岩ブロックが海水中に沈められたから引き上げられるまでの期間】	【花崗岩ブロックの海水中における深度と形状に関する記述なし】	海水中	【定性的なPA、信頼の形成のための試料】	【定性的な可能性を示す記述レベルにとどまっている】	同上

表1.3-1(2) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(2/19)

【・・・】: 調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(3)	Okloの化石原子炉における閃ウラン鉱の安定性	HLWの地層処分に係る予測は信頼性に影響を与える超長期間の地球化学的プロセスを試験し、性能評価に使用されるモデルとデータの検証を支援すること。特にUO ₂ の溶解に関する安定性についてアナログ研究に重点を置いている。	Oklo鉱床	天然原子炉中の閃ウラン鉱の溶解に関する安定性—使用済燃料の溶解に関する安定性	天然原子炉中の閃ウラン鉱—使用済燃料【試料数の記載なし】	原子炉ゾーン：広がり様々で、例えば原子炉ゾーン10は長さ40m、幅10m、厚さ10~50cm。	約20億年前から現在まで	原子炉ゾーン：層状で平坦	原子炉ゾーンの温度は臨界時で160~350℃であった。また、ドレライトの貫入を受けたことがある。	【性能評価に使用される閃ウラン鉱の安定性に関するモデルとデータの検証の支援】	閃ウラン鉱と使用済燃料は次の相違点がある。①使用済燃料はUO ₂ の閃ウラン鉱よりも核分裂生成物を多く含有している他、アクチノイドがUO ₂ マトリクスと固溶体を作っているため表面に近いほど含有量が高い。②Okloの閃ウラン鉱の多くは使用済燃料と比較して核反応が完全でないで反応生成物が地下水に影響を及ぼす。	9頁、7葉、【明示なし】
(3)	Okloの化石原子炉の母岩中における天然の核分裂生成物の保持特性、移動性	【前半部は同上】特に核種の移行特性及び遅延特性についてアナログ研究に重点を置いている。	同上	母岩中における天然の核分裂生成物の保持特性、移動性—母岩中における核分裂生成物の保持特性、移動性	天然の核分裂生成物—【HLW起源の核分裂生成物】【試料数の記載なし】	原子炉ゾーン	化石原子炉が臨界に達した時点以降【20億年前】	【記載なし】	同上	【HLWの地層処分に係る予測は信頼性に影響を与える超長期間の核種の保持特性及び移動性に関する地球化学的プロセスの試験】【性能評価に使用される核種の保持特性及び移動性に関するモデルとデータの検証の支援】	20億年前の地下水のEh、pH、温度はよくわかっていないので、室内実験の結果から導かれる予測と一致するかどうか定量的に試験することはできない。	同上
(3)	Okloの化石原子炉における原子炉ゾーン中の水の放射線分解の影響	【前半部は同上】特に原子炉ゾーン中の水の放射線分解の影響についてアナログ研究に重点を置いている。	同上	Okloの原子炉ゾーン中の水の放射線分解の影響—【使用済燃料と接する水の放射線分解】	複数の酸化還元状態を有するウラン及び核分裂生成物、原子炉ゾーンの周囲の石英中の流体包有物—【使用済燃料、緩衝材】【試料数の記載なし】	原子炉ゾーンから数mの範囲	地質学的な長期間【20億年?】	【記載なし】	同上	【HLWの地層処分に係る予測は信頼性に影響を与える超長期間の、水の放射線分解の影響に関する地球化学的プロセスの試験】【性能評価に使用される、水の放射線分解の影響に関するモデルとデータの検証の支援】	【放射線分解が生じていたことが定性的に確かめられている】	同上
(3)	Oklo及びOkelobondoの化石原子炉に及ぼす鉱業活動による二次的影響	化石原子炉に及ぼす地下鉱業活動の影響を調査することにより、処分場の建設、操業段階における地下水流動、地下水化学、微生物活動の変化を予測すること	Oklo及びOkelobondo鉱床	化石原子炉に及ぼす鉱業活動による二次的影響—建設、操業段階の地質環境と地下水流動環境の擾乱	原子炉ゾーン及びその周辺環境（地下水流動、地下水化学、微生物活動）—【ニアフィールド岩盤及びファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	原子炉ゾーン及びその周辺環境	【鉱床の地下鉱業活動を開始した時点から処分場の建設、操業段階に要する時間が経つまでの期間】	【記載なし】	Oklo: 原子炉ゾーンの温度は臨界時で160~350℃であった。また、ドレライトの貫入を受けたことがある。Okelobondo: 【記載なし】	【化石原子炉に及ぼす鉱業活動による二次的影響の調査結果は、モデル開発のための基礎資料、モデル（数式）への入力パラメータ及びモデルの検証のためのデータとして利用可能である。】	【化石原子炉に及ぼす鉱業活動による二次的影響の調査結果のNAとしての有用性については論じられていないが、具体的な調査結果については記述されておらず、また、実際にどのような調査が行われているのかも不明である。】	同上
(4)	ホウ珪酸ガラス固化体のNAとしての火山ガラス	ガラスに関する10,000年のオーダーの長期間の反応を天然のガラスのアナログ物質の評価を通して比較研究法により評価すること	Surtsey火山、その他	火山ガラスの変質—ホウ珪酸ガラス固化体の変質	火山ガラス—ホウ珪酸ガラス固化体【試料数の記載なし】	【記載なし】	10,000年間（ホウ珪酸ガラスからのカルシウムの放出に関する計算の対象期間）	【記載なし】	【記載なし】	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	火山ガラスのNA研究により、長期のガラスの挙動に関する重大な特性を明らかにすることができた。しかし、サイトレベルの放射性廃棄物のガラス固化体の挙動を評価するモデルができていない。	11頁、4葉、45件
(5)	ニュージーランドの熱水システムにおける地球化学的モデル化コードのフィールドベースの試験	地球化学的モデル化コードEQ3/6の飽和系における流体—固体反応シミュレーション能力を試験すること	Taupo Volcanic Zoneの中のWairakei地熱地域(①)とKawerau地熱地域(②)	飽和条件下における地下水と鉱物の反応—【天然バリアと地下水の反応】	Taupo Volcanic Zoneの中の地下水及びそれと共存する鉱物—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	【記載なし】	500,000年	【記載なし】	248℃(①)、273℃(②)、流体に関して飽和	【モデルの検証のための方法の提示】	【地球化学的モデル化コードの検証の研究の途中経過を報告したものと見做し、文献中に提示された成果は、モデル検証のための方法のうちの一部である。したがって、これだけでモデルの検証には不十分である。】	8頁、5葉、12件

表1.3-1(3) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(3/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(6)	Ianthiniteの生成、酸化、変質	使用済燃料の腐食に関する可能性のある反応経路を洞察するため、天然のウラン相の生成及び変質の条件について理解を深めること	【記載なし】	Ianthiniteの生成、酸化、変質—使用済燃料の腐食	Ianthiniteとその他のウラン酸化物水和物—使用済燃料【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	風化的環境条件	使用済燃料の腐食に関する可能性のある反応経路を洞察するための基礎資料	【非常に基礎的な研究レベルにあり、本研究結果だけでは左記の利用方法には適用できないと考えられる。】	6頁、2葉、18件
(7)	オクロウラン鉱床内の天然核分裂反応炉から採取された試料のXRSとXRDによる研究	オクロウラン鉱床内の天然核分裂反応炉(ゾーン10と13)(試料の採取位置)	オクロウラン鉱床内の天然核分裂反応炉(ゾーン10と13)(試料の採取位置)	オクロウランの組成及び化学的結合状態—使用済燃料(組成及び化学的結合状態)	オクロ天然核分裂反応炉からのウラン鉱石—使用済燃料 試料数：3個	試料は厚さ3-4mmの切片で、黒色で固い。	天然核分裂反応は約20億年前に生じた。	ゾーン10はゾーン7と9の間から500m、ドリフト帯から50m-100mの所に存在する。ゾーン13はドリフト帯の15-30m間に位置し、採石場から丘を下った所にある。	【記載無し】	低いU ²³⁵ /U ²³⁸ の値は、ウラン鉱床が地下水と20億年接触している期間、還元条件にあったことを示唆し、還元条件化での使用済燃料の長期的安定性を示している。	【オクロウラン鉱石の組成については述べられているが、実際の使用済燃料中の酸化ウランの組成には触れられておらず、比較としては不十分である。】	8頁、4葉、20件
(8)	セメント質放射性廃棄物処分場の攪乱帯のNAとしての鉱化帯の移行を決定するための準定常状態近似の利用	放射性廃棄物処分場の性能評価の支援において重要な、長いタイムスケールにおける化学界面の運動の計算のため、計算コードMARQUISS(準定常状態近似を用いた鉱化帯)を発展させた。	Maqarin(北部Jordan)	セメント質放射性廃棄物処分場の周囲の化学的界面の移動の計算—セメント質放射性廃棄物処分場のニアフィールド	Maqarin(北部Jordan)のセメント質鉱床—セメント質放射性廃棄物処分場のニアフィールド 試料数：【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	Maqarinの高pHは、高い温度と、凝灰岩の自然酸化により生じた低圧変成岩との相互作用により生じた。	MARQUISSは、放射性廃棄物処分場の性能評価に支援において重要な、長いタイムスケールにわたる化学的界面の運動の計算に有効である。	【MARQUISSは長いタイムスケールの地質学的挙動のシミュレーションには適するということであるが、短いタイムスケールにも適合するような本質的な改造が必要なのだろうか?】	6頁、2葉、18件
(9)	核種移行に及ぼす鉱物の変質の効果の重要性	ウランの移動に及ぼす鉱物の変質の効果を検討すること	Koongarra 鉱床	ウランの移行に及ぼす緑泥石の風化プロセスの効果—【天然バリア中の放射性核種の移行プロセス】	緑泥石及びその風化生成物、ウラン—【ファーフィールド岩盤、放射性核種】 試料数：【記載なし】	一次鉱床：地下60mまで、二次鉱床：地表下20mまで	風化期間：200万年	深さ20m以下：カライト、深さ20-24m：カライト、バミキアイト、深さ24-25m：緑泥石、バミキアイト、深さ25m以下：深、緑泥石	風化的環境条件	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【鉱物の風化の核種の移行に及ぼす影響を定性的に性能評価に適用でき、また、鉱物の風化プロセスを考慮したモデル化の方法論は定量的な評価に適用できる。】	8頁、6葉、13件
(10)	Koongarra 鉱床における二次ウラン鉱物の生成	ウラン鉱物の生成と変質プロセス及び変質帯中のウラン、鉛、カルシウム、希土類元素の移行挙動を理解すること	Koongarra 鉱床	風化的条件下でのウラン鉱物の生成及び変質プロセス—【放射性核種を含む鉱物の生成及び変質プロセス】	Koongarra 鉱床二次鉱体から採取したボーリングコア—【ファーフィールド岩盤】、試料数4個	Koongarra 鉱床の主要鉱体：水平的広がり450m×200m垂直方向の広がり深さ100mまで	二次鉱体：200万年前から現在にかけて形成(一次鉱体：1,600~1,550Maに形成)	地表から20m~30mの深さまでの変質帯とそれ以深の未変質帯からなる。	風化的環境条件	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【研究対象事象に係る環境条件が定性的に記述されていないので、研究成果の性能評価への適用も定性的になる。】	8頁、5葉、14件
(11)	フィンランド南西部のPalmottu NAサイトでのマトリクス拡散のモデル化における収着性状	古典的なマトリクス拡散の概念で、Palmottu NAサイトの岩石マトリクス中のウラン及びその娘核種の濃集を説明できるかどうか調べることで、その概念の妥当性を検討する。	フィンランドの南西部のPalmottuのU-Th鉱床	ウラン及びその娘核種の岩石マトリクス中での収着性状—【HLW期限のウラン及びその娘核種の天然ウランの岩石マトリクス中での収着性状】	PalmottuのU-Th鉱床に於ける亀裂周辺の岩石マトリクス—ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、試料数1個	【記載なし(濃度プロファイルの結果より160mm以上)】	20万年(シミュレーション時間)	深さ50mの鉱化帯から25mの距離から採取したボーリングコア試料	試料が存在している環境条件：空隙水pH7-8;シミュレーションの条件：pH7-10、空隙水組成Ca 1mM, Na 1mM, 炭酸塩0.1-2.5mM	【モデル開発のための基礎資料】	【古典的なマトリクス拡散の概念の限界がわかったということが成果である。】	9頁、8葉、9件
(2)	深処分場を構成する物質の考古学的なアナログ及び工業的なアナログの研究	処分場構成物質の考古学的なアナログや工業的なアナログの研究のレビュー	中国	粘土の隔離性能—処分場の埋戻し材/緩衝材の隔離性能	2,100年前の中国の墓の埋戻し材に用いられた粘土—【処分場の埋戻し材/緩衝材】 試料数：【記載なし】	約4m×6m、深さ約10~13m	2,100年前から現在まで	深度約10~13mの、縦横約6m×高さ約4mの直方体	【記載なし】	【定性的なPublic Acceptance資料、信頼の形成のための資料】	粘土の化学組成、鉱物組成がよくわかっていないこと、地下水の酸化ポテンシャルと化学組成が処分場環境と一致していないことが問題である。	11頁、9葉、【明示なし】

表1.3-1(4) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(4/19)

【・・・】: 調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(12)	Cigar Lakeのウラン鉱体中の放射線分解	Cigar Lakeのウラン鉱体における放射線分解の程度を計算する。	Cigar Lakeのウラン鉱床	含ウラン鉱石近傍の水の放射線分解 — 【使用済燃料による水の放射線分解】	Cigar Lakeのウラン鉱物及びその近傍の水 — 【使用済燃料】 試料数: 【記載なし】	a線の計算: μmからmmの大きさのウラン鉱物の周囲に30 μm以下の水の薄層が覆っている。β線、γ線の計算: ウラン鉱物の周囲に水の薄層が覆っているものをブロックとして数ブロックの広がりをもつ。	【記載なし】	一辺の長さaの立方体のウラン鉱物の周りに非常に薄い水の膜が覆っているもの	【記載なし】	【使用済燃料と接する水の放射線分解の程度の見積もり】	【ウラン鉱物と接する水による最大酸化体生成速度の算出にあたって、ウラン鉱物の結晶形、水の薄膜等を計算し易い様に簡略化が行われており、算出された数値自体は定性的なものともみべきであると思う】	8頁、6葉、12件
(13)	Bangonbeの天然原子炉の周囲のウラン、トリウム、ランタノイドの移動性	湿潤な熱帯気候での過酷な浅成変質作用を受けた天然原子炉の安定性を調べ、天然原子炉コアを構成する閃ウラン鉱の変質を調べる	Bangonbe鉱床 (ガボン共和国のOklo鉱床の20 kmの場所)	U ₃ O ₈ マトリックスの安定性の風化変質作用の影響 — 【使用済燃料の安定性の風化変質作用の影響】	Bangonbe鉱床の天然原子炉中の閃ウラン鉱 — 【使用済燃料】 試料数: 【記載なし】	【地下4m~16mの範囲から採取したボーリングコア】	【閃ウラン鉱が風化変質作用を受けた後から現在まで。風化変質作用の年代の記述あり】	【地下16~4mの範囲に存在する水平な層。地層の広がり、地層の記述あり。(図から読み取り)】	酸化的環境条件	【処分場が隆起侵食により浅所に位置した時、処分場から地下水により使用済燃料が溶解する可能性があること、モデル開発の基礎資料や定性的なシステムの理解のための資料として利用できる。】	【定性的に性能評価に適用できる。そのレベルは使用済燃料が浅成変質作用を受けると部分溶解を起こすという事実だけである。】	8頁、7葉、14件
(13)	同上	湿潤な熱帯気候での過酷な浅成変質作用により引き起こされたU、Th、希土類元素の移動を調べる	同上	Bangonbe鉱床中に分布するU、Th、希土類元素 — 【処分場から放出されたU、Th、希土類元素の移動性に及ぼす風化変質作用の影響】	Bangonbe鉱床中に分布するU、Th、希土類元素 — 【ファーフィールド岩盤、HLW 期限の核種】 試料数: 【記載なし】	同上	同上	同上	同上 【熱的条件の記述あり】	【処分場が隆起侵食により浅所に位置した時、処分場から放出された核種が酸化的な地下水と接した場合、核種の移動性の定性的な説明、モデル開発の基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【定性的に性能評価に適用できる。地下水の酸化性の程度及び核種の移動性の程度は明らかにされていない。】	同上
(14)	Bangonbe天然原子炉における熱水変質帯中の含緑泥石中の閃ウラン鉱の沈殿	熱水変質帯中の層状珪酸塩鉱物/閃ウラン鉱/方鉛鉱を含む脈中の鉱物学的性質(共生関係、晶出順序等)を調べることにより層状珪酸塩鉱物の存在下における地下水中のウランの遅延現象の証拠を得ること	ガボン共和国のBangonbe天然原子炉	層状珪酸塩鉱物の存在下における地下水中のウランの遅延現象 — 【層状珪酸塩鉱物の存在下における地下水中のHLW起源のウランの遅延現象】	ボーリングコア中の脈を充填する層状珪酸塩鉱物及びウラン鉱物 — 【緩衝材、ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】 試料数: 1個	ボーリングコア(1個)【コアの大きさの記述なし。コア中の1.26mm四方の領域を研究対象としていると考えられる。】	20億年前から現在まで	原子炉コアの直上の熱水変質帯の部分から採取したボーリングコア、【試料採取深度は約11.5m(図から読み取り)】	【記載なし】	層状珪酸塩鉱物の存在下における地下水中のウランの遅延現象の評価	【本研究はレドタイトの存在下における地下水中のウランの遅延現象を扱ったものであり、この研究結果が層状珪酸塩鉱物全般について言えるかどうかは疑問が残る。】	8頁、7葉、10件
(15)	Okloの天然原子炉におけるイライト:Csの閉じ込めに関する考察	イライト及び石油でコーティングしたイライトのCsの収着/脱着特性を研究することにより、イライト及び有機物でコーティングしたイライトの埋戻材としての有用性を評価するため	Okloの天然原子炉におけるイライトの状態を考慮して室内で収着/脱着実験を行った。	イライト及び石油でコーティングしたイライトに対するCsの収着/脱着特性 — イライト及び石油でコーティングしたイライトに対するHLW起源のCsの収着/脱着特性	イライト及び石油でコーティングしたイライト埋戻材 試料数: 【記載なし】	【典型的な実験規模】	~24時間	約1cm ³ 以内で実験	溶液の条件: 脱イオン水、0.001, 0.01, 0.1及び1 MのNaCl水溶液、温度条件: 25, 40, 60, 80, 90°C	イライト及び有機物でコーティングしたイライトの埋戻材としての有用性の評価、イライトに収着したCsに対する堆積岩中の塩水の脱着効果	【フィールド研究あるいはフィールドデータに基づく研究ではなく、実験そのものに主眼を置いた研究である。】	8頁、5葉、22件
(16)	Okloの天然原子炉ゾーン2における酸化的環境下でのウランの再分配	Oklo鉱床の原子炉ゾーン2の浅い酸化的な条件下にある母岩の変質生成物と、ウランの分配との関連性を調べる	Oklo鉱床の原子炉ゾーン2	酸化的な条件下にある母岩の変質生成物とウランの分配との関連性 — 【酸化的な条件下にある母岩の変質生成物とHLW起源のウランの分配との関連性】	原子炉ゾーン粘土 — 【緩衝材、ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】 試料数: 2個(粘土部分の試料)	深さ7.37~7.44m【水平方向の広がりに関する記述なし】	【記載なし】	原子炉ゾーン2の下の原子炉ゾーン粘土(深さ7.37と7.44mの部分から採取したボーリングコア)	酸化的環境	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	原子炉ゾーン2の変質生成物について詳細に理解するための変質生成物の定量的なタイムスケールを明らかにする。変質生成物中のウラン及び放射能によって生じる核種の放射化学分析は変質生成物のタイムスケールの情報を与えることができる。	8頁、5葉、10件

表1.3-1(5) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(5/15)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(17)	酸化的条件下におけるウランの移動中のウランの固定	ウランの固定や遅延のメカニズムを調査すること及びKoongarraでのウランの移動をより良く理解すること	Koongarra 鉱床	鉄鉱物の触媒作用による地下水中のウランの固定【鉄鉱物の触媒作用による地下水中のHLW 起源のウランの固定】	鉄鉱物Saleeite【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】 試料数：3個	【記載なし】	数百万年前から現在まで	少なくとも二次的鉱床の鉱化帯の端から20m 下流の地点で、地下23mの部分で事象の発生あり。	酸化的環境条件；二次鉱床下流の地下水中U 濃度0.001ppm、同鉱床の地下水中U 濃度0.1ppm、同鉱床地下水はsaleeiteに関して不飽和	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【触媒作用でsaleeiteが生成するためには、生成環境がsaleeiteの安定領域にない。本研究成果が適用できる地質環境条件がsaleeiteの安定条件を満たしている場合に限定される。】	8頁、7葉、17件
(18)	風化的環境条件下におけるウランの移動の研究	Koongarra 鉱床におけるウランの移動に及ぼす岩石の変質の効果を理解すること	Koongarra 鉱床	ウランの移動に及ぼす岩石の変質の効果【HLW 起源のウランの移動に及ぼす天然バリア岩石の変質の効果】	緑泥石及びその変質生成物、ウラン【ファーフィールド岩盤、放射性核種】、【試料数18個、図からの読み取り】	深さ25m まで【一次鉱化帯から水平距離約110mまで、図からの読み取り】	風化時間：約200 万年	緑泥石変質と深さの関係：25m 以深未風化帯、25-24m遷移帯、24-20m遷移帯、20m 以浅風化帯	Koongarra 鉱床の母岩：石英-緑泥石片岩、地下水流速2.5m/y、地下水中U初期濃度0.1 μg/cm ³	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【計算において、transfer probabilityが0.3以上、結晶質鉄鉱物の付可逆サイトからのUの溶解速度が10 ⁻⁶ /y以下という条件を満たしていないと観察結果をよく表現することができない。この満たしていることをフィールドデータから確認する必要がある。】	8頁、5葉、11件
(19)	ガンマ分光測定法によるKoongarra 鉱床のウラン系列放射性核種の分配の決定	ガンマ分光測定法の適用性を評価すべく、Koongarra 鉱床のウラン系列放射性核種の分配を同法により決定し、その結果から地下水の流動方向を地球化学的水理学的に求め地下水流動方向と比較する。	同上	Koongarra 鉱床近傍のウラン系列核種の移動挙動【処分場近傍のHLW 起源のウラン系列核種の移動挙動】	Koongarra 鉱床近傍の岩石試料中の ²³⁰ Th/ ²³⁸ U比【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】、試料数9個	試料採取地点：深さ2.2m~15m【試料採取地点の水平方向の広がり：200m(図からの読み取り)】	【記載なし】	【研究対象領域の北西部にUの鉱化帯あり、それは南東に行くほど浅くなる。風化部は約20m 以浅である。(図からの読み取り)】	【風化的環境条件(図からの読み取り)】	Koongarra 鉱床近傍のウラン系列放射性核種の分配の決定にガンマ分光測定法が適用可能であることの実証	【ガンマ分光測定法の適用可能性の実証を目的としているので、本研究の視点からの成果自体は、すでに他の研究方法によって出されており、したがって、新たに性能評価に貢献するものではない。】	8頁、8葉、21件
(20)	El Berrocal プロジェクトにおける亀裂性花崗岩体中の核種移動の研究	El Berrocal 調査サイトでの天然の放射性核種の挙動を支配する地球化学的プロセスの解明	El Berrocal 花崗岩体	El Berrocal 花崗岩体内のウランの挙動【花崗岩の天然バリア中のHLW 起源のウランの挙動】	El Berrocal 花崗岩(構成鉱物)、地下水、天然ウラン【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、放射性核種】 【試料数の記載なし】	【水平方向の広がり：約200m、垂直方向の広がり：約600m(図からの読み取り)】	300 ±1 百万年~	同花崗岩体は黒雲母花崗岩に貫入し径約5km の円形のカルドあり、多数の亀裂(7方向あり)が入っている。	現在の地下水は若い天水である。Ca硫酸塩に富み、地表近くで酸化的で弱酸性、地下で重炭酸塩に富みpHは中性。石英脈近くのみpH 3の酸性。	【El Berrocal プロジェクトの調査結果はモデル(数式)への入力パラメータ、モデルの検証のためのデータとして利用できる。】	【同プロジェクトにおける花崗岩中のウランの挙動に関する研究結果を総合的に扱っているため、それを構成する個々の事象について詳細に記述していない。本研究結果から性能評価に定性的な適用はできない。同プロジェクトの詳細な研究からは定量的な性能評価への適用が可能】	8頁、2葉、17件
(21)	東濃地域における地下水の水理地球化学的研究	東濃地域の堆積岩の地下水の化学的進化を評価すること	東濃地域	東濃地域の堆積岩中の地下水の化学的進化【天然バリア中の地下水の化学的進化】	東濃地域の堆積岩及び地下水【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】、試料数(地下水化学組成分析19個、バッチ試験岩石試料2個・地下水試料2本【共に図からの読み取り】、炭素同位体分析9個)	縦300m×横300m×深さ200m	(13,000 ~15,000) 年前から現在まで	白亜紀花崗岩の上を第三紀の堆積岩が覆っている。深さ200mの所に低透水層あり、二つの帯水層を生成している。	地下水：深さ方向に中性から弱アルカリ性、地下水のpHと化学組成のデータあり。	【本研究で用いたアプローチは一般的な地下水の化学的進化の評価に適用可能である。】	【研究成果自体はサイトスパンが狭いもので、性能評価への適用範囲は非常に限られたものだが、用いたアプローチは一般性があるので、意義ある。】	7頁、10葉、12件
(22)	Adamello接触変成岩からの試料への選択的相抽出法の適用	Adamello系におけるアクチノイドと希土類元素の分配を理解すること	イタリア北部のAdamello接触変成帯	Adamello系におけるU, Th, 希土類元素の分配【天然バリアにおけるHLW 起源のTRU 元素、3 個のアクチノイドの分配】	Adamello系内のU, Th, 希土類元素、【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、放射性核種】、試料数6個	【記載なし】	ドロマイト質大理石に熱水脈が入ってから現在まで【熱水脈の年代の記載なし】	ドロマイト質大理石に熱水脈(4つの鉱物帯に分類)が入っている。フォルステライゼン は母岩との境界部に存在する。	【記載なし】	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【天然バリア中の熱水脈系の核種の分配を定性的に理解でき、熱水変質作用が関係する変動シナリオの評価において有用である。】	8頁、4葉、12件

表1.3-1(6) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(6/15)

【・・・】: 調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(23)	結晶質岩中の核種移動の概念的流路モデルの開発—釜石原位置試験サイトでのケーススタディー	釜石原位置試験サイトの亀裂系結晶質岩中の核種の移行を十分に評価できる概念的流路モデルを開発すること	釜石原位置試験サイト	亀裂性結晶質岩中の核種の移行—【亀裂系結晶質岩の天然バリア中のHLW 起源の核種移行】	釜石原位置試験サイトの花崗閃緑岩、U、Th—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、放射性核種】、試料数【表から10個以上と推定】	栗橋花崗閃緑岩中の250mレベル坑道及び550mレベル坑道	120Ma 前から現在まで	花崗閃緑岩、閃緑岩、スカル、粘板岩からなる釜石サイトの250mレベルと550mレベルに坑道が存在している。	【記載なし】	【システムの理解のための資料、モデル開発のための基礎資料】	【特定のサイト(釜石原位置試験サイト)の核種の移行の半定量的なより深い理解に適用できる。】	7頁、9葉、7件、
(24)	足尾の花崗岩類における放射性核種の吸着物質としての変質鉱物	足尾の白亜紀花崗岩類中の変質鉱物を記載すること	足尾地域	花崗岩類の変質—【花崗岩類の天然バリアの変質】	花崗岩類のポーリングコア—【ファーフィールド岩盤】、試料数11個(母岩試料)、4個(割れ目部の試料)	長さ12km×幅6kmの白亜紀花崗岩岩株から採取したポーリングコア(孔の最大深度2002m)	87Ma～現在まで	古生代堆積岩にいくつかの白亜紀花崗岩類が貫入し、上位を第三紀の火成岩が覆っている。	50℃以下の地下水のpHは10近くと考えられる。	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステム理解のための資料】	【足尾地域の鉱物の変質を明らかにすることが主体である。他の地域の他の環境条件にある鉱物の変質について、系統的な研究を行えば、定量的に性能評価に適用できる可能性がある。】	8頁、14葉、10件
(25)	長期の地層処分場へのマグマ活動の効果限定するためのNA及びモデル化研究の使用	Yucca Mountain処分候補地に対するマグマプロセスの重大性を決定するために使用されたアプローチ法を紹介すること	Lucero火山地域のAlkali Buttes とVolcano Hill	Lucero火山地域のAlkali Buttes とVolcano Hillの火山噴火に伴う捕獲岩の取込み—【火山噴火による直接的な被ばく】	Lucero火山地域のAlkali Buttes とVolcano Hillの火山噴火に伴う捕獲岩—【直接接近シナリオのうちの天然事象シナリオ】【試料数の記載なし】	10 ⁷ ~10 ⁸ m ²	Alkali Buttes 記載なし; Volcano Hill 0.8 ±0.1 百万年	Alkali Buttes 記載なし; Volcano Hill 周囲約180m高い大鐘火山円錐丘も比較的簡単な火山中心体を持つ。	【記載なし】	Yucca Mountain処分候補地に対するマグマプロセスの重大性の決定	【Lucero火山地域のフィールドデータは、7つのサイトの選定基準が同地域を満たすようなサイトにのみ適用可能である】マグマの重大性を決定するためにこのアプローチ法は他のサイトにも適用できる。	8頁、3葉、35件
(26)	性能評価における信頼形成のための親善システムからの情報の利用	性能評価の支援として、NAシステムからの情報の利用方法に関する様相について議論する。	Oklo (引用事例として)	ナチュラルアナログシステムからの情報の利用方法—処分場の性能評価	ナチュラルアナログシステムからの情報—ニアフィールド・ファーフィールド全般【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	NA、天然の地化学的フラックスの研究及び古水理地質学的研究といった手法を利用することは、処分場の性能評価に寄与する。	【NA当の性能評価への効能を述べている反面、それらを処分場の安全の証拠とすることはできないという理由を挙げている。より深い議論が必要である。】	9頁、0葉、5件
(27)	Alligator Riversアナログプロジェクト: 序論	【Alligator Riversアナログプロジェクト全体の目的及び概要を説明すること】	Koongarra 鉱床	【Koongarra 鉱床の風化帯における放射性核種の移行挙動】—【ファーフィールドにおける放射性核種の移行挙動】	【Koongarra 鉱床の風化帯からの岩石試料、地下水試料】—【ファーフィールド岩盤、放射性核種】【試料数の記載なし】	【記載なし】	dispersion fanの生成年代: 1-3百万年のオーダー	Koongarra 鉱床の地表近くが風化帯にあり、そこに二次鉱床が生成している。風化帯下部が未変質帯でそこに一次鉱床が生成している。	現在は地下水がU鉱物について著しく不飽和、モンスーン気候; 二次鉱床の形成時期は乾燥気候で二次鉱床は不飽和帯で生成した。	【本文献自体はAlligator Riversアナログプロジェクトの概要の理解に利用可能である。】	【Koongarra 鉱床やAlligator Riversアナログプロジェクトについて全体を概観できる。】	3頁、0葉、0件
(28)	Alligator Riversアナログプロジェクト (ARAP) における性能評価と確認の側面	処分場の性能評価のモデルと概念の確認におけるAlligator Riversアナログプロジェクトの可能な役割を記述すること	Alligator Riversアナログサイト	【性能評価のモデルと概念の確認におけるARAPの役割】—【ARAPが貢献した性能の側面】	【記載なし】	【Koongarra 鉱床の主要鉱体の広がり記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【性能評価におけるARAP等のNA研究の重要性についての一般公衆に対する啓蒙】	【ARAPの性能評価への貢献について概観できる。しかしながら、本研究は特定の研究対象事象を詳細に扱ったものでないため、研究成果は直接性能評価に適用されるものではない。】	6頁、0葉、8件

表1.3-1(7) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(7/19)

【・・・】: 調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(29)	地下水流に関するサイト特性調査	Koongarra 鉱床について理解を深めるため、様々な地質学的、地化学的、水理学的データが蓄積された。	Koongarra ウラン鉱床	フィールドと実験室の測定による固相と地下水のデータ及び水理学的データ—地化学的、水理学的、及び核種移行のモデル	フィールドと実験室の測定による固相と地下水—【使用済燃料、ニアフィールド・ファーフィールド】【試料数の記載なし】	【記載なし】	後期原生界に生成された。	左記ウラン 鉱床は石英カソライトのCahill構造中に不均一に存在し、卓越した南東向きの砂岩絶壁の基盤に近い。	片岩の上部25mは風化している。サイトは採鉱によって擾乱されているが、百本以上の探査孔の鉄製ケーシングが電磁気探査のバイアス源となっている。	地球物理学的及び地質学的現地調査によって左記ウラン 鉱床の様々なデータが蓄積され、その詳細な状況が把握された。	【本研究は左記鉱床の地球物理学的、地質学的現地調査の紹介であって、NAに関する記述は全くない。】	7頁、3葉、0件
(30)	新ホールレベルによる新ホール中の岩石の片理方向、クラック密度、クラック走向方向、クラック開口量の直接観測	【新ホールレベルの有効性を検証するため、Koongarra 鉱床の試錐孔を選んで、岩石の片理方向、クラックの密度・走向・開口量を測定する。】	Koongarra 鉱床の南西部にある20本の試錐孔	【Koongarra 鉱床近辺の岩石中の片理、クラック特性】—【天然バリアの亀裂特性】、試料数931本のクラック、432本の片理	岩石中のクラック、片理—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】	【水平方向の広がり数は数百m四方(図より推定)】	【記載なし】	調査サイトの岩石は結晶片岩、砂岩、断層角礫岩からなる【配置関係は不明】	【記載なし】	【サイト特性調査手法】	【Koongarra 鉱床で成功した新ホールレベルによる検層を地層処分候補地で行えば、クラックの分布密度や走向を直接観測できる。】	6頁、7葉、4件
(31)	Koongarra 鉱床における水理地質学的研究	【左記鉱床における様々な地層の水理学的な性質を明らかにし、総合的に理解すること】	Koongarra 鉱床	ウラン鉱床中の地下水流動—【天然バリア中の地下水流動】	ウラン鉱床の地層と地下水—【天然バリア(ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤)】	【水平方向には具体的な記載はない。深さ方向には100m以内まで(図より推定)】	【記載なし】	【記載なし】	現在の気候下では帯水層は10-30mで非常に不均一である。	【モデル開発のための基礎資料】	【定量的なデータを全く出さず総合的な解釈をするのは説得力に欠ける。また、その解釈が必ずしも妥当性の高いものであるという保証が全くない。定量的議論は乖離がある。】	5頁、0葉、0件
(32)	Koongarra ウラン鉱床における現在の地下水流動のモデリング	同鉱床の第一鉱体付近の現在の地下水流動の速度と方向を計算したモデルは、これまでに多くある。それらのモデルを総括すること	同上	同鉱床の現在の地下水流れ—地層処分場における地下水流れ	同鉱床の現在の岩石と地下水—【天然バリア(岩層と地下水)】【試料数の記載なし】	【モデルにより様々な例がある。例えば水平方向26km、鉛直方向3kmのものあり。】	【モデルにより様々な例がある。例えば2年のタイムスケールでの計算あり。数百万年の必要性も述べられている。】	【モデルにより様々な形状をしている。】	【記載なし】	【NA研究における水理のモデル化は野外観察と数値モデリングが同時平行で行われ成功するであろうとされている。地層処分場の応用については具体的な記述はない。】	【異方性を考慮した三次元水理モデルは既に存在する。したがって、後は野外観測によってパラメータの空間分布を観測すればよいがそのためには大量の資金、人材、時間が必要であろう。】	5頁、4葉、2件
(33)	割れ目中の水の流動の証拠とAlligator RiversNAの不連続割れ目解析	【フィールドスケールでの計算機による不連続割れ目モデリングが可能かどうか調べること】	同上	Cahill片岩中の地下水流動—【天然バリア中の地下水流動】	Cahill片岩—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】、試料数1岩体	一辺180mの立方体	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【割れ目系岩石のフィールドスケールでの水理解析】	【不連続割れ目の概念に基づいたモデルを用いたフィールドスケールのシミュレーションは、少なくとも亀裂の入ったCahill片岩の評価には適用できることがあった。】	1頁、0葉、0件
(34)	Koongarra 鉱床の地下水の化学的性質と同位体組成	放射性同位体の拡散とそれに関するパラメータの関係を定性的に見積もること、天水と地下水が混ざることによってどのような変化を与えるかを考えること	同上	ウラン鉱床に胚胎する元素その他の放射性同位体の地下水中の拡散—【地下水中の核種の拡散】	地下水—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	ウランの同位体の拡散の範囲の関係から、数百m四方に限られている。	【記載なし】	鉱化帯と隣接する断層が北東～南西方向に延びている。地下水は北から南に流れている。	地下水のpHは中性、Ehは100～300mV、主要イオンはMgとHCO ₃ 、10mより浅所では季節変動あり、雨水に近い。12mより深所では一定。	【定性的なシステムの理解のための資料】	【Koongarra サイトの導電率の定量的な分布はなかった。地質環境が異なる他のサイトに対しては定性的なシステムの理解に適用できる。】	6頁、5葉、4件
(35)	Koongarra 鉱床におけるコロイド研究	Koongarra 鉱床の地下水における放射性核種移行のメカニズムとしてのコロイド(1μm以下の粒子)の重要性を評価すること	Koongarra 鉱床の近隣	ウラン鉱床の地下水におけるコロイドによる放射性核種移行—【天然バリア中のコロイドによる放射性核種の移行】	ウラン鉱床近隣の地下水の中のコロイドと地下水—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	【(図より)2,000-2,500m幅、50m深さまで】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【定性的なシステムの理解のための資料】	【同鉱床と同様な地質環境で、コロイドは放射性核種の輸送にはあまり寄与しないことがあったが、核種の輸送に及ぼすコロイド効果の程度を決定する因子が明記されていないので、何を以て同様とするかわからず、したがって本研究成果の性能評価への適用範囲を定めることができない。】	6頁、3葉、3件

表1.3-1(8) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(8/19)

【・・・】:調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(36)	Koongarra 鉱床における固相の研究とウランの分配	ウランなどの放射性同位体がどのような化学的作用を受けて運ばれてゆくのかを明らかにすること	Koongarra 鉱床	【風化的地質環境におけるウランの分配】—【天然バリア中のウランの移行】	【ボーリングコア試料】—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	断層から100m、地下水流の方向に300m程度の広がり50m程度の深さを有する。	【記載なし】	地表から順に風化帯、遷移帯、未風化帯と変化している。	風化的環境条件	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【風化的環境条件下にあるシステムにおいてウランがどのような移行挙動を示すかを定性的に理解することができ、またそのプロセスをモデル化する際の基礎資料を提供する。】	6頁、2葉、5件
(37)	放射性核種の源としてのウラン鉱床:測定とモデル	核反応生成物の生成速度の見積りとウラン鉱床による放射性核種の保持の割合に対する正当性、正確さを評価する。	Koongarra、Key Lake、Cigar Lake、Beverlodge(カナダ)、Oklo、Sinkolobwe(ザイール)	ウラン鉱床中の放射性核種が壊変し、それが移動・沈殿する特性をモデル化して評価する。—使用済燃料からの核種の移行	²³⁹ Pu、 ¹²⁹ I、 ⁹⁹ Tc—使用済燃料【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	核反応生成物の濃度をあらかじめ予想することが可能であり、仮にその予想が困難であっても、不確定コウ素を消去してゆく大掛手掛かりとして機能させることができる。	【文面通り解釈は非常に有効なモデルであると言えるが、残念ながらそのモデルの機構の詳細を記していない。地質学的条件の扱い方や定量的記述が不十分である状況ではこのモデルがどの程度定量的議論に使用できるか不明である。】	6頁、3葉、16件
(38)	鉱物の変質とウラン鉱物の集合体	Koongarra におけるウランの再分配に影響を及ぼす加圧・脱水の風化の地球化学的過程を明らかにするとともに、それが長期的な核種の移行の予測に、どの程度有効であることを示唆すること	Koongarra 鉱床	石英・緑泥石片岩の風化とウランの再分配—ニアフィールドでの核種移行	石英・緑泥石片岩及びウラン—【埋戻材、ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	【(図より)深さ方向に25m、水平方向に160m】	数百万年程度	【記載なし】	【記載なし】	著者はモデル計算と観察の一致が長期の未来予測に有用と述べる。【詳しい記載は無く、評価不能である。】	【ウランの再分配というNA的事象を扱っているが、そのNAとしての位置が明確でない。したがって、研究の意義がはっきりしない。また、研究自体でも議論の際レビューした部分が主に重要性を占めているようである。】	6頁、4葉、6件
(39)	U(IV)の酸化により生じたU(VI)の天然における収着現象のモデル化—表面複合モデル(SCL)を用いて	ウラン鉱床周辺の風化帯におけるU(VI)の収着現象を実験的に検討し、数学的モデルを適用し評価する。	同上	ウラン鉱床周辺の風化帯天然基盤岩のU(VI)の収着—天然バリア中のウランの収着	風化体天然基盤岩、ウラン—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、ウラン】、試料数4こ(天然基盤岩コア)	ウラン鉱床の極周辺の風化(酸化)帯—U(IV)複合帯が殆ど存在しない地域	U(IV)が風化により酸化されてからU(VI)複合帯が形成されるまで	【記載なし】	風化的環境条件	【モデル開発のための基礎資料】	【水酸化鉄として Ferrihydrite を代表させて実験しているなどの措置が施されているので、収着モデルへの適用は限定されたものになると思われる。】	6頁、4葉、2件
(40)	Koongarra ウラン鉱床の現在の地下水の化学組成のモデリング	左記鉱床の現在の地下水の地球化学的状态を研究しモデルを総括し地下水の化学組成の変化を規定する要因を解明すること	【完全な室内研究である。】	ウラン鉱床の現在の地下水の化学組成の深さ分布—地層処分場における地下水の化学組成の深さ分布	Koongarra 鉱床の現在の地下水—天然バリア中の地下水【試料数の記載なし】	水平方向【記載なし】、垂直方向【地表から地下数十mまで(図より読み取り)】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【明確な記載はないが、おおよそ著者は、自分達のモデルをサイト付近の地下水の化学組成(特にウラン濃度)をシミュレートできると主張したいであろう。】	【性能評価への適用性についての記述なし。モデルの具体的な内容やモデルと現実のデータとの定量的な比較が論じられていない。】	5頁、0葉、34件
(41)	ウラン酸塩鉱物を含む二次鉱化帯の形成の地球化学的モデリング	Koongarra 鉱床の二次鉱化帯の形成メカニズムを地球化学モデリングによって解明すること	同上	二次鉱化帯の形成プロセス—【天然バリア中の核種の移行・濃集プロセス】	Koongarra ウラン 鉱床の二次鉱化帯の鉱物と地下水—【天然バリア、地下水、核種】【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	現在の気候のもとで起こっている岩石の風化、地下水の化学組成の変化、収着は現在の気候のもとで核廃棄物移動のNAになる。過去の乾燥気候のもとで起こったウラン酸塩鉱物の形成プロセスは、過去の乾燥気候のもとでNAになる。【具体的な利用方法についての記述はない。】	【性能評価への適用性についての記述なし。モデルの具体的な内容やモデルと現実のデータとの定量的な比較も、また文献リストもない。これら著者の主張が正しいかどうかを第三者が公正にチェックできない。】	2頁、0葉、0件

表1.3-1(9) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(9/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(42)	Koongarra 鉱床に於ける二次的ウラン鉱物の進展：地球化学的データの正確性に関する意味合いにおいて	地球化学的モデリングの力に着手することにより、Koongarra システムの進展の理解を促進すること	Koongarra 鉱床	【二次的ウラン鉱物の晶出】—【天然バリア中でのHLW 起源のウランの遅延】	【二次的ウラン鉱物】—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤【試料数の記載なし】】	【水平方向は約350m、垂直方向は深さ約150mまで(図からの読み取り)】	ウラン分散の形成:0.5~1.0Ma から現在まで	【記載なし】	現在の地下水高Mg含有量、pH中性、saleeiteに関して不飽和	【定性的なシステムの理解のための資料】	【分種化—溶解度と反応経路の計算及び一次元の化学的一輸送連結モデルに必要な全部のフィールドデータが明記されていないので、本研究で用いている手法を性能評価に適用できない。】	6頁、2葉、15件
(43)	ウラン鉱床風化帯における放射性元素の移行のモデル化	Koongarra ウラン鉱床に於ける放射性元素の地下水流れによる移行速度を推定したモデルが数多くある。それらのモデルの総括をすること	同上	【ウラン鉱床中の核種の移行による移行】—【天然バリア中の核種の移行による移行】	Koongarra ウラン鉱床中の岩石、地下水、 ²³⁸ U, ²³² Th, ²³⁵ U—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】、試料数5個	【50mあるいは400m(文中より)】	【百万年スケール(図からの読み取り)】	【具体的な記載なし】	【記載なし】	ウランの大部分は百万年のオーダーの時間スケールでも50~100mのオーダーしか移動しておらず、地層処分の実施に肯定的な根拠を与える。【Uの堆積盆地(数10km)での移動を説明するモデルを扱った研究もある。】	観測データの不足がモデリングでファン進化のシナリオについて最終的な決着をつけることはできなかったが、ある曖昧さを持ちながらも何らかの示唆を与えることはできた。	5頁、2葉、3件
(44)	モデルの性能評価への連結	アナログ研究に用いられたモデルと性能評価に用いられる他モデルの間の連結を研究する。	同上	同鉱床のアナログ研究に用いられるモデルにおける理解をより深める必要がある事項、核種移行モデルで考慮しにくい地球化学的プロセス、取り扱う必要がある不確実性—性能評価に用いられるモデルに於ける同様の事項	同鉱床のアナログ研究に用いられるモデル—【使用済燃料、緩衝材、ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	アナログ研究におけるモデル化研究により、処分候補地の性能評価で用いられるモデルとその手法の信頼性を確立する。	【アナログ研究に用いられるモデルと性能評価に用いられるモデルの相違点が明記されていないので、どの程度アナログサイトでのモデル及びモデル化手法が性能評価に適用できるかわからない。】	2頁、0葉、4件
(45)	Koongarra アナログの評価におけるシナリオ手法の適用	Koongarra ウラン鉱床のNA研究に、Sandiacより開発された技法とSKI/SKBのシナリオ開発プロジェクトの中で利用された方法論を適用した。	同上	Koongarra アナログ研究におけるFEP—処分場のシナリオ解析技法	【特になし】	【記載なし】	母岩の風化は約160 万年前の更新世水期開始の頃始まった。	【記載なし】	【記載なし】	外的条件及び外的特徴に基づいた定式化が試みられ、特にウランの浸透に関する主要なシナリオが作成された。アナログのモデル化のためのシナリオの適用は、その実行可能性の証拠を提供する明白な次の段階である。	本来の目標を完全に達成してはいないが、さらなるシナリオ化作業に基礎を与えるのと同様に、Koongarra アナログのよりよい理解に寄与すると信じる。	6頁、2葉、6件
(46)	Alligator Riversアナログプロジェクト；規制面の展望	US NRCは処分施設の安全性を評価する規制的時間枠が、物質や性能評価予想をテストする時間枠を遙に越えるので、NAに興味を抱き、合理的保証を得るためにNAを調査した。	同上	ウランの浸透する酸化性地下水による活発な浸出と移行—損壊したHLW 処分場	ウラン鉱石及び地下水—【ニアフィールド・ファーフィールド】【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	Koongarra 領域は高い降水量と断層流条件にもかかわらず、粘土に富んだ風化体が濾過速度を制限するが、全体の流速は低い。	性能評価のモデル化での水理地質学的地化学データ及び概念モデルの簡略化は定性的判断を包含するプロセスである。ARAPはより一層の意思疎通の構築と学際的手法のよりよい理解の発展の重要なステップである。規制的观点からはARAPの参加から出現する改良された判断は定量的結果より重要である。	【規制側の見解としてはARAPの結果は好意的であるが、例えば米国の処分場候補地であるYucca Mountainとかなり異なるKoongarraの情報がそのまま役にたつとはいえない。】	6頁、3葉、17件
(47)	AECL/SKB CIGAR LAKE アナログ研究；性能評価への意義	様々な地化学的、地質学的視点からCIGAR LAKEウラン鉱床を調査し、アナログ研究としてまとめると	CIGAR LAKEウラン鉱床	CIGAR LAKEの様々な地化学的、地質学的プロセス—放射性核種のニアフィールド・ファーフィールドでの挙動	CIGAR LAKEの様々な地化学的、地質学的特徴—使用済燃料、ニアフィールド、ファーフィールド【試料数の記載なし】	深さ方向に約500m、推定方向に約1km	【フルボ酸中の ¹⁴ C年代として15,000年】	ウラン鉱石の周囲に泥岩、さらにはQzによるセメント・礫岩、母岩として砂岩を想定	【多くの事象・プロセスについて膨大な知見が得られており、これに係るデータは処分場の性能評価に大いに貢献すると考えられる。】	【扱っているテーマは非常に広いが、個々についてはあまり詳しい記載がない。一種のレビュー—ペーパーである。】	19頁、5葉、43件	

表1.3-1(10) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (10/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(48)	廃棄物地層処分場中の放射性核種移行プロセスに関するOkloのNA; 計画の現状	1988年半ばから再出発したOkloの放射性廃棄物のアナログ研究の経過と内容を概観した。	Oklo天然原子炉	Oklo天然原子炉における放射性核種の挙動—【処分場のニアフィールド・ファーフィールドにおける放射性核種の移行】	ウラン鉱石—【使用済燃料、ニアフィールド、ファーフィールド】 【試料数の記載なし】	【記載なし】	核分裂は19.7億年前に生じ、鉛の主要な移行現象は7.5億年前に生じた。	【記載なし】	【記載なし】	Okloの天然原子炉で生じた現象を理解する上で、様々な学問分野の有益な沢山の情報が集積された。これらのデータは水理地化学的断面図を提供し、予備的な水理学的モデル化を始めることを可能にした。	【Okloの天然原子炉で生じた現象を理解する上で様々な学問分野の有益な沢山の情報が集積されているようだが、それがNAとしての様に理解されたまま利用可能なものについて記述がない。】	6頁、0葉、0件
(49)	ELBERROCALカサカサ割れ目の多い花崗岩地域を利用した原位置における天然放射性核種の移行過程の特性調査及び放射性廃棄物処分場としての有用性の立証—	天然に存在する放射性核種が割れ目の多い花崗岩環境においてどのように拡散し移行するのかを理解しその過程をモデル化すること	スペインのBerrocal花崗岩体	花崗岩体中の核種のマトリクス拡散—花崗岩よりなるニアフィールドにおける核種のマトリクス拡散	花崗岩体、天然のU, Th—【ニアフィールド岩盤、放射性核種】 【試料数の記載なし】	Berrocal花崗岩体 (22km ²) に貫入した含ウラン石英岩脈の周囲150m、深さは地表面下300m程度	【含ウラン石英岩脈の貫入時期 (記述なし) から現在まで】	Sierra de Gredos中央山系内の花崗岩の斜面に海拔900m前後で含ウラン石英岩脈貫入し、多数の割れ目あり。	【記載なし】	【ELBERROCALカサカサのPhase 1 と呼ばれる段階での総括報告書あり、詳細な調査結果は個々の報告書に任せている。】	【具体的な調査結果及び評価に関する記載は行われていないが、高濃度の放射性核種を含む岩脈をもつ天然の花崗岩環境をそのまま利用は非常に現実的な調査であることが評価される。】	15頁、4葉、11件
(50)	日本の東濃ウラン鉱床におけるNA研究	ウランの移行、濃集に影響する因子を調べること、岩石の幾何学的な特性、化学的な保持能力がウランの濃集に与える影響を調べること	東濃ウラン鉱床	Uの移行・濃集、U系列核種の再分配・移動、間隙・割れ目を介した物質の移行・吸着—【ニアフィールド及びファーフィールドにおける核種移行】	瑞浪層の第三紀堆積岩中の岩石、地下水—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、放射性核種】 【試料数の記載なし】	U鉱体を有する瑞浪層下部層は長さ3km、幅0.5km、厚さ10m	放射平衡非平衡の研究が還元環境とU, Thの保持については100万年前まで大変動が概ね可能性を保證。	花崗岩の基盤上に瑞浪層が第三紀堆積岩の一部として分布し、鉱体は断層で切れ目がある。	温度19°C、Eh-300mV、pH9.2、EC168 μS/cmが得られている。	用いられた方法は地中での核種移行モデルに対する信頼性を増すものとしている。	【核種移行モデルのための定量的データや概念が新たに得られたわけではない。】	6頁、5葉、7件
(51)	HLIPナチュラルアナログプロジェクト—性能評価への意味合い	イギリスで行われているHMIPナチュラルアナログプロジェクトの概況説明	Lock Mond(①)、Broubster(②)、Needle's Eye (③)	①: 堆積岩中のヨウ素の移動—【堆積岩の天然U 中のHLW 起源のヨウ素の移動】、②: 泥炭中のウランの移動—【有機物を含む天然U 中のHLW 起源のウランの移動】、③: 緑青ウラン 鉱脈から U, Th—【使用済燃料、HLW 起源の核種】 【いずれも試料数の記載なし】	①: 堆積物、ヨウ素—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、HLW 起源の核種】、②: 泥炭、ウラン—【①に同じ】、③: 緑青ウラン 鉱脈、U, Th—【使用済燃料、HLW 起源の核種】 【いずれも試料数の記載なし】	①: 堆積物中の層の厚さ数m、②: ウランの移動距離100-200m、③: ウランの移動距離80m	①:5,400年、②:5,000年、③:<10,000年	【記載なし】	①・②: 【記載なし】、③: 低いpHの地下水	【①・③: モデルへの入力パラメータ、②: モデル開発のための基礎資料・定性的なシステムの理解のための資料】	【①・③: 研究対象事象の環境条件等が詳細に調べられていないが、パラメータの入力廃棄が限定で、定量的な議論が可能である。②: 定性的な記述しかないので、性能評価には定性的な適用しかできない。】	6頁、4葉、17件
(52)	フィンランドのPalmottuのNA研究	亀裂性結晶質母岩中の放射性核種移行プロセスのより深い理解のため	フィンランド南西のPalmottu	亀裂性結晶質母岩中の放射性核種移行プロセス—【ニアフィールド岩盤・ファーフィールド岩盤中での放射性核種の移行】	ウラン鉱石—【使用済燃料】 【試料数の記載なし】	【不連続なウラン鉱化帯は全長約400m】	PalmottuのU-Thの鉱化は18~17億年前の造山運動の最終段階と関連する。	PalmottuのU-Thの鉱化の露頭部分はPalmottu湖の南東部・一部湖底に位置し、鉱化帯の厚さは15mに及ぶ。	【記載なし】	この研究を地化学的プロセスが物質移行の考えと結合される原位置移行アナログ研究へ適用する。また、使用済燃料のアナログとしての鉱化のU-Thに富む部分の研究に適用する。	【現行の研究は放射性核種の移行と遅延のプロセスの基礎的理解を目的としており、使用済燃料のアナログとしての研究成果は今後期待すべきである。】	11頁、4葉、29件
(53)	強アルカリ性地下水との相互作用の結果としての大理石の鉱物学的変質	強アルカリ性地下水との相互作用の結果としての非変成質の緑青質の大理石と石灰岩の母岩の鉱物学的変質を調べること	Naqarin サイト	強アルカリ性地下水と大理石の相互作用—【ファーフィールド岩盤と強アルカリ性地下水の相互作用】	大理石と石灰岩の母岩、強アルカリ性地下水—【ファーフィールド岩盤】 【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	強アルカリ性地下水	大理石と石灰岩の母岩の強アルカリ性地下水との相互作用により引き起こされる処分場の擾乱帯中の鉱物学的変化及び流路の変化に関する理解を深めることに役立つ。	【強アルカリ性地下水のpH等の定量的な記述がなされていないので、上記の研究成果の利用方法も限定されたものとなる。】	7頁、1葉、12件

表1.3-1(1) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (11/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(53)	強アルカリ性の泉中の微生物の検出及び研究	セメントを主材量とする処分場に対して影響を与える可能性のある微生物の強アルカリ性泉における存在量を研究すること、特に硫酸還元バクテリアに主眼を置く。	Maqarin の強アルカリ性泉	【強アルカリ性泉中における硫酸還元バクテリアの生存】 【硫酸還元バクテリアによる硫化水素の生成】	強アルカリ性泉の水、微生物—【処分場使用されるコンクリート、オーバーパック】 【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	強アルカリ性泉	EMMAのような微生物学コードの試験	【強アルカリ性泉中の硫酸還元バクテリアの存在量が定量的に求められていないので、左記の利用方法には研究成果として不十分と考えられる。】	7頁、1葉、12件
(54)	放射性核種の放出速度に対する天然の制限	HLW 処分場の性能評価モデルで用いられる放射性核種を含む相の変質速度に限定を与えること	Oklo鉱床、Cigar Lake鉱床、Koongarra 鉱床、Key Lake 鉱床	【NAサイトでの放射性核種の移行】—【放射性核種の移行】	Oklo鉱床、Cigar Lake鉱床、Key Lake鉱床の岩石試料、Koongarra 鉱床の岩石・地下水試料—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】 【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	Koongarra 鉱床中の地下水試料は ¹²⁹ Iに富んでいる。	【分別ファクター $\alpha = (\text{娘}/\text{親})_{M} / (\text{娘}/\text{親})_{SE}$ [M:娘核種及び親核種の測定は存在度、SE: 永続平衡における存在度] はモデルへの入力パラメータ】	【NAサイトにおいて、 α 値を求め試料の詳細な環境条件が明らかであれば、その α 値を同じ環境条件をもつサイトの性能評価のモデルへ入力することができる。本研究で試料の置かれた環境条件の詳細は明記されていない。】	8頁、3葉、6件
(55)	Pena Blanca と Santorini でのNA研究の性能評価上の重要性	Yucca Mountain処分場の性能評価モデルに貢献できるような情報情報の明確化に重点を置き、Pena Blanca と Santorini でのCNWRA によるNA研究について記述すること	Pena Blanca (①)、Santorini (②)	閃光性 鉱の変質及び溶解—使用済燃料の変質及び溶解 (①)、不飽和条件下での地下水流動及びウランの移動—【YMサイトにおける地下水流動及びウランの移動 (①)、考古学的人工物の腐食—【YMサイトにおけるキャニスタの腐食】 (②)、微量元素の移動—【YMサイトにおけるHLW 処分場が放出した核種の移動】 (②)	閃光性 鉱—使用済燃料 (①)、【地下岩盤】—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】 (①)、考古学的人工物 (青銅製品、鉛製品、石材製品)—【キャニスタ】 (②)、微量元素—【HLW 起源の放射性核種】 (②)、【いずれも試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】 (①)、3,600年 (②)	【記載なし】 (①)、3現在の地下水面は約7m上で、現在の地表面は5m下の部分に位置する (②)。	比較的乾燥した気候にある酸化的で不飽和な珪質の火山環境	【Pena Blanca 及び Santorini でのNA研究の成果は、YMサイトの定量的性能評価に適用できると思われる。具体的には、モデルへの入力パラメータ、モデルの検証のためのデータである。】	【Pena Blanca 及び Santorini でのNA研究自体は、詳細な研究が行われていると思われ、本文に記載されている内容は、極めて定量的なシステムの理解のための資料にはならない。】	6頁、1葉、24件
(56)	難透水性の地層における地下水流動のモデリング	難透水性の地層における地下水の挙動のモデル化の際の非定常性の重要性を示すこと	ベルギーとパリ盆地	難透水性の地層中の地下水流動—【天然バリアにおける地下水流動】	ベルギーのBoom Clay とパリ盆地のドゥッガー統の透水性—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】 【試料数の記載なし】	【図中の記載は不十分】	【(図から) 数万年?】	【ベル 階の透水性層と新第三紀の透水性層に挟まれた100mの厚さのBoom Clay、ドゥッガー統は複雑】	【記載なし】	Boom Clay のような難透水性の粘土は廃棄物処分場のバリアとして重要であり、そのような地層における地下水の挙動をモデル化する時は、非定常性を考慮したモデリングを行わなければならない。	非定常性を取り入れたモデリングを行えば、地層処分における地下水の挙動解析に貢献できるであろう。	6頁、3葉、6件
(57)	原生界堆積盆のウラン鉱床の形成メカニズムの地球化学的及び水理学的解析	ウラン鉱床の形成メカニズムを特に原生界の堆積盆という環境に絞って地球化学的、水理学的モデリングにより解明すること	【JabilukaとCigar Lakeのウラン鉱床を念頭に置いたシミュレーション】	JabilukaとCigar Lakeのウラン鉱床の形成プロセス—【地層処分場周辺における核種の移行・反応プロセス】	堆積盆の岩石と地下水及びウラン鉱物などの12種類の化学成分—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤、放射性核種】 【試料数の記載なし】	【モデルとしての広がり 水平方向100-1,000kmと1-10km、鉛直方向は図より数km】	【20万年のタイムスケールのシミュレーションを実施】	【堆積盆の幾何学的特性は二次元で、結晶質層の上に砂岩を不整合で載せている。】	【シミュレーションの境界条件として、上端境界の温度は100°C一定とする。基盤の熱流束は80mW/m ² とする。】	地下水の流れ、熱の輸送、種々の物質の輸送と化学反応をすべて考慮したウラン 鉱床形成の定量的モデルは、地層処分場における核種の移行加減と、ニアフィールドにおけるウラン 鉱物の化学反応や還元フロントの形成加減の解明へ貢献できる可能性がある。	本研究の性能評価への適用性については、現段階のモデルで多くの困難 (三次元解析を実施すること、亀裂を考慮すること、風化の効果の確認、同位体分別と化学反応イテックスの考慮、透水係数の確率的取扱) がある。全てを考慮した本研究を進展させるには正しいNA研究が可能となる。【提案しているモデルの妥当性を評価するためには文献リストにある論文をチェックする必要がある。】	7頁、2葉、5件
(58)	泥岩中の間隙水の進展	安全評価に有益な泥岩に関する過去のHydrogeologyにおける研究をレビューすること	イギリス南部及び西部	泥岩中の間隙水の長期における移動—泥岩のファーフィールド性能	泥岩、空隙水—ファーフィールド岩盤【試料数の記載なし】	【地表から深さ約90mまで (図からの読み取り)】	200 万年間 (水と泥岩の相互作用の期間)	【記載なし】	【記載なし】	【定性的なシステムの理解のための資料】	【泥岩のファーフィールド性能に関する基礎的な知見を得ることができる。】	6頁、8葉、12件

表1.3-1(12) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (12/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(59)	ニュージーランドの地熱システムを用いた水理地化学コードの検証	既に起こったかまたは起こりつつある処分場の関連プロセスを含む複雑な自然システムに計算コードを適用して、その能力を顕現させる。	ニュージーランド北島のTaupo火山帯の地熱地域	地質学的及び水理学的計算モデルによる地熱地域の地質学的及び水理学的特性—【ニアフィールドの特性】	地質学的及び水理学的計算モデルによる地熱地域の地質学的及び水理学的特性を有する岩盤—【ニアフィールド】【試料数の記載なし】	Rotokawa湖地域	Rotokawa湖は6,000年前の熱水噴出孔跡にできた。	【記載なし】	湖水は温度が若干上昇、上昇する沸騰塩化アルカリ液体よりもたはれるH ₂ SによりpH 2.3である。H ₂ Sの酸化反応生成物として硫黄が沈殿し続ける。	計算機シミュレーションは更なる現地調査で試験される膨大な予測的情報を生成することができる。	【計算機シミュレーションの効能についてはいろいろ挙げているが、結果については実際の状態を十分シミュレートしていない(硫黄の沈殿現象)。】	7頁、3葉、6件
(60)	NA研究の発展とその性能評価への適用；レビュー	長年かかるNA研究からもたらされる膨大な情報から、性能評価に提供でき、かつ更なるNA研究が必要な地域を同定するために重要な結論を抽出する。	【特定せず】	現在までのNA研究によりもたらされた情報—処分場物質・放射性核種の放出・移行プロセス	現在までのNA研究によりもたらされた情報—ガラス固化体、使用済燃料、ニアフィールド、ファーフールド	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	この論文では、性能評価に適用できるNA研究から導出されたかなりの量の肯定的な情報が存在することを概観した。さらには、NAの手法を用いて実際に研究を行うが、適切なデータを欠く多くの分野があることを示唆した。	【NA研究からの多くの肯定的(性能評価に適用可能である)データが存在することが示され、またNA研究で今後研究されるべき課題等について具体的にまとめられ、NA研究の現状を理解する上で有効な論文である。】	10頁、0葉、33件
(61)	ガス圧の発生と母岩の力学—高レベル放射性廃棄物処分場の性能及び性能評価への意味合い	【ガス圧の上昇による処分場の母岩の破断の危険性を評価する手法を紹介すること】	【火山岩や貫入岩の熱の影響を受けている地域】	火成活動の熱の影響によるガス圧上昇に起因する岩石の破断—【ガス圧上昇に起因する処分場の母岩の破断】	火山岩、貫入岩近くの岩石—ニアフィールド岩盤【試料数の記載なし】	【記載なし】	数千年間	【記載なし】	火成活動の熱の影響を受ける環境条件	【ガス圧の上昇による処分場母岩の破断に関するNA研究の適用方法の提示】	【本研究はNA研究の適用方法の提示を目的としており、性能評価に直接反映される成果の記述はされていない。】	6頁、0葉、27件
(62)	NAとしての粘土層へのマグマの貫入現象を力学的な側面から見る。	HLW地層処分において廃棄物が発生する放射線変熱が緩衝材/埋戻材の力学特性(透水係数や間隙水圧)にどのような影響を及ぼすかを評価するため、過去にマグマの貫入を受けた天然の粘土層の力学特性を調べること	イタリアのOrciatico	粘土の力学的特性の熱的变化—HLW処分場で使用されるベントナイト緩衝材/埋戻材の力学的特性の熱的变化	粘土—ベントナイト緩衝材/埋戻材【試料数の記載なし】	貫入したマグマの周囲数十m	鮮新世(5.3~1.6Ma)から現在まで	【野外調査については記載なし、数値シミュレーションでは円筒形の熱源と粘土を想定している。】	マグマの初期温度:800°C	【Orciaticoのフィールドデータはモデル開発のための基礎資料、モデル(数式)への入力パラメータ、モデルの検証のためのデータ】	【放射線変による高温熱に対する粘土の力学的特性の変化において、粘土のワグナー特性の温度依存性が鍵になることがわかった重要な成果である。】	7頁、2葉、11件
(63)	NAとネオテクトニクス	ネオテクトニクスとNA研究の結合方法を提案すること	MontanaのGallatin River	断層破壊による地震水理学的変化—【断層破壊によるHLW処分サイトの地震水理学的変化】	MontanaのGallatin Riverの水流—【生物圏】【試料数の記載なし】	【10,000km ² (過剰放水領域の面積)】	【32カ月(図からの読み取り)】	【記載なし】	【地殻の破断が生じるような応力条件下】	【モデル開発のための基礎資料、定性的なシステムの理解のための資料】	【断層破壊が生じた時どのような地震水理学的変化が起こることかわかった。しかしながら性能評価にそのまま適用できる程度の定量的研究ではない。】	6頁、2葉、2件
(64)	性能評価において、何故我々はNAからの知見をもっと研究しないのか？	地層処分の性能評価におけるNAの適用性について参加者からの意見を取りまとめた。	【特定せず】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	NA研究の現状と問題点及び将来性等について戦線からの集約された意見が述べられている。	【NA研究の現状等について専門家の集約された意見の他に、部外者からのNAについての評価や注文も含めて、より突っ込んだ議論が必要である。】	5頁、0葉、0件
(65)	核廃棄物処分場の性能評価におけるNAからの情報の利用	NA研究が安全評価の様々な分野と特に予測的モデル化による放射線学的影響の制限において、状況証拠をたらし寄与する程度について議論することを目的とする。	Pocos de Caldas, Cigar Lake	化学的溶解の熱力学的モデル—【使用済燃料からの放射性核種の地下水への溶解】	ウラン鉱石—使用済燃料及びニアフィールド【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	Pocos de Caldasの酸化性地下水のEh 300-400mV	PA試行で見られるNAの潜在的な適用法は、Pocos de Caldas及びCigar Lake観察により明らかになった挑戦を、使用済燃料の化学的廃棄物のマトリクス拡散に関する現在の模範として構成することである。	このようなNA研究は、PA試行におけるPAモデルの堅実性・ロバスト性・一貫性をテストする役割を持つ。またNA研究は処分場のための考察は人間活動によらないシナリオの有効性をチェックする明確な役割を果たす。	9頁、4葉、5件

表1.3-1(3) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (13/19)

【・・・】: 調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(66)	スウェーデンのSKB 91の安全評価へのNAの適用	SKB91を用いて長期にわたる使用済燃料の安全性を検討する。	Sweden, Pocos de Caldas, Morro do Ferro, Cigar Lake	地下水の酸化還元状態、コロイドによる放射性核種の収着、水の放射線分解【ニアフィールド・ファーフィールドの酸化還元フロント・コロイド輸送・放射線分解】【試料数の記載なし】	【地下水・コロイド・地下水・放射性核種】—【ニアフィールド・ファーフィールド】	使用済燃料容器周囲	【長期間】	【記載なし】	還元性の地下水		redox model は地下深部の地下水条件、特にpHとアルカリ度について有効	13頁、4葉、15件
(67)	新しい性能評価熱力学データベースの評価のためのNAテストケースの利用	NA研究に提供されたテストケースが、化学的熱力学的モデルと共に伴う熱力学データベースの検証に貢献し、またこの手法がWAGRAの新しい熱力学データベースのように適用されることを示した。	Pocos de Caldas, Maqarin	化学的、熱力学的データベース—ニアフィールド・ファーフィールド地下水の化学的熱力学的諸特性	地下水(化学成分・溶解度等)—【ニアフィールド・ファーフィールド(の地下水)】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	Pocos de Caldas, Maqarinの地下水の温度24, 30°C、pH6.4, 12.6, pe 4.3, 2.1	確立されたアナログのテストケースを用いて、性能評価のモデル化へデータベースを応用する。	性能評価のモデル化へのデータベースの応用が、確立されたアナログのテストケースを用いて可能であることがこの研究により示された。	11頁、3葉、7件
(68)	自然鉄に関するNA研究	【岩石中に自然鉄が保存されている理由を解明し、その機構をNA研究に応用すること】	ドイツのBuhlとグリーンランドのDiskoの玄武岩	自然鉄の腐食—廃棄物容器の腐食	自然鉄—廃棄物処分容器【(オーバーパック)】【試料数の記載なし】	岩石中の自然鉄(数cm:Buhl 1、数mm/m:Disko)とその周囲	自然鉄が生成してから現在までの数10Maにわたる期間	地表付近に露出し、地下水と接している岩石中に自然鉄が保存されている。	Buhl-ironの玄武岩中の局所的な空隙水の組成: ~pH 10、還元的	埋戻材としてolivine FeO-rich(超塩基性岩)、廃棄物処分容器の材質としてFeあるいは(Fe-Ni)metal	水—岩石反応の詳細なメカニズムは明らかでないが、超塩基性岩の観察からFeO-Olivine岩石は埋戻材として妥当であろう。鉄の廃棄物処分容器はその腐食物質がMagnetiteなので、その還元性の緩衝能がある程度有効であろう。また、流れのない場において、花崗岩容器/塩基性岩埋戻材でも地質学的時間の間大丈夫であろう。	10頁、9葉、6件
(69)	高FeOオリビン岩の埋戻材としての潜在的な酸化還元能力に関するNA調査	大規模酸化還元緩衝能力を持つ高FeOオリビン岩を埋戻材として使用した場合、地質学的な長い時間の間にどのような特性を示すかを天然の貫入岩体を用いて調査する。	フィンランド南東部Mantylharju近郊Lovasjarvi貫入岩体	高FeOオリビン岩による酸化還元緩衝能—【第一鉄を含む物質による酸化還元緩衝能】	天然の高FeOオリビン岩の岩体—埋戻材【試料数の記載なし】	水平方向の広がり1,500m×400m、深さは地表より150m程度;オリビン岩の貫入岩体の直径は約400m	【年代測定は高FeOオリビン岩の貫入時期は1.643Maであり、それ以降の事象である。】	周囲の花崗岩体の方が50m程度高く、オリビン岩の貫入岩体部分は噴火口の穴を塞ぎ地になっている。	風化的環境条件;周囲は花崗岩体で地表の海拔は100m前後	埋戻材として高FeOオリビン岩が有用であることの提言を行う。【また、処分地の母岩として高FeOオリビン岩地域が適しているかどうかを判断する材料にもなるであろう。】	【本貫入岩体中が還元的に保たれていることは種々の証拠から確認され、それだけで還元的に維持している主要因がオリビン岩体そのものであることの確認には不十分と思われる。実験による確認も高温状態での反応を早めれば結果である。】	10頁、9葉、5件
(70)	EL BERROCAL 花崗岩の顕微鏡画像による割れ目解析	岩体中の核種移行遅延の潜在的な能力を評価し放射性核種の移行モデルへの効果をとり込むため岩石の割れ目に関するパラメータを測定する。	スペインの中部トレドにあるEl Berrocal地域	岩石マトリクス中の核種移行遅延—【核種のニアフィールド岩盤・ファーフィールド岩盤中での移行挙動】	岩石マトリクス—【ニアフィールド岩盤、ファーフィールド岩盤】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【花崗岩の岩石物性パラメータとして様々なものを求めたと思われるので、数値の更なる精密化を行い、核種移行モデルに入力する。】	【各岩石物性パラメータは放射線性核種の移行に影響を与えかねないことについては一切触れられておらず、それぞれの値を見積もっているものであり、マトリクスによる遅延メカニズムが解明されたいことではないと言える。】	6頁、8葉、0件
(71)	Palmottu地域の岩石マトリクス中での元素の移動性	U, Thなどの放射性元素に加え、主要元素、希土類元素まで含む多くの元素に関して、地下水の流路を伴った岩石の割れ目が岩石の内部に向けてどのように元素移動が起こるかを岩石サンプルの分析により明らかにする。	フィンランド南西部Palmottu鉱床	岩石の割れ目に関係した元素の移動—【ニアフィールド岩盤・ファーフィールド岩盤中のマトリクス拡散】	様々な岩石のマトリクス—【天然バリア(ニアフィールド岩盤・ファーフィールド岩盤)】【試料数の記載なし】	深さ205m付近の70cm程度の長さのコア	【記載なし】	鉱床は1~15mの厚さ、不連続な400m程度の長さ	先行研究は深さ200m付近の地下水はNa-Cl-SO ₄ -HCO ₃ タイプ、Eh約-300mV、pH約9である。	【元素の拡散の速度定数など具体的な定量的データを出していないので、本研究の結果をそのまま廃棄物処分に利用するのは困難である。】	【下部割れ目サイズで割れ目近傍の空隙率が高いのに、元素移動が起こらないか、二つの割れ目サイズで元素移動の様式が異なってしまう最大の原因は何なのかという点に関する考察がされていない。】	6頁、6葉、11件

表1.3-1(4) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (14/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(72)	移動する風化帯を持つ Koongarra でのウラン移行のモデル化	Alligator Rivers 沖積地帯に於ける Koongarra ウラン鉱床での分散プロセスのモデル化を論じる。	Koongarra 鉱床	ウランの分散—【ウラン及び類似核種の分散】	ウラン鉱石—使用済燃料【試料数の記載なし】	約100mのバレン片岩によって鉱体が二つに分離。	分散プロセスは約二百万年前に始まったと評価された。	南西鉱体は二次ウラン鉱化作用を受け扇状分散帯を含む。	分散帯は高度風化帯と部分的風化（遷移）帯に分かれ、移行は後者で止まり、強い風化が始まる層で止まる。	単純化されたモデルにより計算されたウランの分布は実測データと定性的に一致し、Koongarra 鉱床のモデル化の今後の発展に寄与する。	【ウラン分布の計算結果と実測データは定性的に一致するが、実際にはかなりの乖離が見られる。筆者はその原因として、ソース濃度が低い、遅延因子が高い、モデル化期間が短い、流速が低い等の点を挙げているが、それらの条件が満足されなければ十分なモデル化とはいえないであろう。】	9頁、5葉、2件
(73)	地化学的モデルの評価と適用について	種々な地質学的モデルの適用性を示すための方策を開示する。	【記載なし】	地質学的モデルの適用性—地層処分性能評価技術	地質学的モデル—ニアフィールド・ファーフィールド【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	核廃棄物産業において、科学的及び哲学的な確固とした基盤なく地化学的モデルの確証を追求することは混乱を招くことであり、当論文はそうした概念的基盤を提供するものである。	【計算コードの分野で用いられる語句の定義や諸概念の解説が目的であり、NAとは直接関係がない。】	12頁、0葉、36件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 2-1	サイト、アナログ研究の主要目的、及びこれらの目的を満たすために利用された主要特性の簡潔な描写、を目的とする【SKBレポートの第2章】。	Osumi Utsumi ウラン鉱山 (Pocos de Caldas)	希土類元素と天然系列の放射性核種に富む環境—【放射性核種の処分場のニアフィールドにおける挙動】	希土類元素と天然系列の放射性核種—【使用済燃料、ニアフィールド】	Pocos de Caldas カルダス (半径30km) の内部	7,500万年前に形成された白亜紀アルカリ性火山複合体の一部	2kmにおよぶオープンピットのウラン鉱山	活性な地下水の循環（酸化条件の限界）は地下50mまで、それ以下は大深度まで還元条件。	【上述のように、現地情報は放射性廃棄物処分場のモデル作成に関して、様々な面で役立てられた。】	【当該サイトは掘削（鉱石の掘り出し）により、地下水条件が変化しており、処分場のアナログとして最適かどうか疑問である。人為による環境変化の例として考慮すべきかもしれない。】	4頁、2葉、7件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-2	同上	Morro de Ferro	希土類元素と天然系列の放射性核種に富む環境—【放射性核種の処分場のニアフィールド・ファーフィールドにおける挙動】	希土類元素と天然系列の放射性核種—【使用済燃料、ニアフィールド・ファーフィールド】	Pocos de Caldas カルダス (半径30km) の内部、直径1kmで台地基盤からの高さ140mの丸い丘	同上	直径1kmで台地基盤からの高さ140mの丸い丘	鉱物体は礫岩の貫入を受け、非常に風化したカーボナタイト複合体であり、風化作用により水に溶けやすい成分は失われている。	【上述のように、現地情報は放射性廃棄物処分場のモデル作成に関して、様々な面で役立てられた（特にコロイドによるプロセスの理解）。】	【アナログ研究に関して多方面から検討されている。】	3頁、1葉、3件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-3	同上	Cigar Lake ウラン鉱床 (カナダ)	13億年前に形成された下部のコフィナイトを伴う閃ウラン鉱及び瀝青ウラン鉱からなるウラン鉱床—【放射性核種の処分場のニアフィールド・ファーフィールドにおける挙動】	13億年前に形成された下部のコフィナイトを伴う閃ウラン鉱及び瀝青ウラン鉱からなるウラン鉱床—【使用済燃料、ニアフィールド、ファーフィールド】	深さ430mの Athabasca 砂岩累層と原生界基盤岩体の不整合部に存在する。	13億年前の原生界に形成された。	不規則なレンズ状；長さ2,000m、幅25-100m、厚さ1-10m。	鉱石鉱床は、厚い（5-30m）粘土に富んだハローにより、取り囲まれている。	【Cigar Lakeの研究は、処分場のニアフィールドとニアフィールドのアナログとして極めて有効である。】	【放射性廃棄物処分場で想定される発熱の影響等を、Cigar Lakeの研究から類推することが可能か？】	8頁、4葉、7件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-4	同上	Alligator Rivers (Koongarra ウラン鉱床) オーストラリア	岩石マトリクス及び断層中のウランの拡散、核種移行における地下水とコロイドの役割、核分裂生成物の生成と拡散—【核種のニアフィールド・ファーフィールドにおける挙動】	岩石マトリクス及び断層中のウラン、核種移行における地下水とコロイド—【使用済燃料、ニアフィールド、ファーフィールド】	砂岩の下、約100mの深さに長さ450mにわたり存在する鉱体1と、深さ30mに存在する鉱体2よりなる。	約16億年前の熱水活動による鉱物化により形成された。	鉱体1は長さ80mにわたり、拡散ファン（扇状体）を形成している。	風化作用は深さ約25mまでであり、鉱体は風化作用を受けていない。深さ23-26m；広域地下水流パターンを示し、水質はMg, HCO ₃ が支配する。	【実地研究から多くのデータが、モデル作成に寄与していることを示した。又鉄等の酸化物が放射性核種の捕獲に強く寄与することが示され、処分場のニアフィールドの性能評価に寄与するものと考えられる。】	【成果としてモデル作成に寄与したことは述べられているが、そのモデルの内容及びその評価については記述がない。】	5.5頁、2葉、9件

表1.3-1(15) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (15/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-5	サイト、アナログ研究の主要目的、及びこれらの目的を満たすために利用された主要特性の簡潔な描写、を目的とする【SKBレポートの第2章】。	Oklo (天然原子炉) (ガボン)	閃ウラン鉱の臨界現象、核分裂生成物の移動/遅延作用、その他 【使用済核燃料に含まれる核種のフィールドにおける挙動】	閃ウラン鉱、核分裂生成物— 【使用済燃料、緩衝材及びフィールド】	Franceville 盆地に16カ所存在。	Okloのウラン鉱化作用は初期原生成代に起こったウランの部分的移動により生じた。	微細砂岩層と礫岩層には含まれている。各“原子炉”は直径1mぐらい。	反応炉鉱石は粘土ハローに取り巻かれている。17.5-19.7億年前、各原子炉では、50-80万年にわたる臨界現象で温度は450℃に達した	①当地域は過去20億年間ほとんど広域の変動を経験していないこと、また各原子炉では50-80万年にわたる臨界現象で温度は450℃に達した	【核種がクワリツマトリクス内に長期保留されたこと、また臨界現象による放射線分解の周囲への影響の調査は、使用済核燃料の処分場内での挙動の想定に役立つものと考えられる。】	7.5 頁 5 葉、 10件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-6	同上	Palmottu (フィンランド南西部)	ウラン鉱床区域の地質学的水理地質学的条件、基本鉱物からの核種の開放を支配する現象、水-岩石システムにおいて核種遅延と支配する現象— 【使用済燃料の溶解、放射性核種のフィールドでの移動】	ウラン鉱、地下水と岩石のシステム— 【使用済燃料、ベントナイト、フィールド】	鉱体は不連続で400mの長さになり、1-15mの厚さでおおよそ300mの深さに存在する	18-19億年前花崗岩の大規模な貫入により鉱化が生じた	【図のみで、詳しい説明なし。】	当該領域は水河の影響によるアイススタシー活動を生じ母岩は破壊されている。	①広域的水理地質学的評価及び限定された立坑による水理測定が行われた。鉱床の内部及び周囲における核種の移行に影響する最も重要な地下水方向と帯域を決定する地下水地図が作成された。	【母岩に対する水河気候の影響が観察され興味深い。】	5 頁、 3 葉、 9 件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-7	同上	Broubster (北部スコットランドのThursoの南西)	ピートに富んだ湿地帯で発見された高濃度ウラン鉱床— 【ウランのニアフィールドでの移動・遅延現象】	ピートに富んだ湿地帯で発見された高濃度ウラン鉱床— 【使用済燃料、ベントナイト緩衝材及びニアフィールド】	古い変成岩質基盤の上に存在するデボン期堆積岩の周期的鉱床と、その上のピートに富んだ表層からなる。	U異常(高濃度)は最後の氷河期から5,000年前にわたり形成された。	【図以外の記載なし】	サイトは平らな湿地である。高い透水性断層が西部に存在し、しみ込んだ水は15-20mの深さまで浸透し、南部で湧出する。	・ピート状有機物がウランの支配的な近地表溜まりであることがわかった。 ・ウランは析出した鉄及びマンガン酸化物を伴い、再不動化されることがわかった。	【詳細に検討された物理的・化学的境界条件は、モデル化の改良に貢献する。】	2.5 頁 2 葉、 2 件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-8	同上	Needle's Eye (南西スコットランドのthe Solway Firthの北部海岸)	二次鉱物(クワリツ)を伴うピットが支配的なウラン鉱床— 【ウランのフィールド・フィールドでの移動・遅延現象】	二次鉱物(クワリツ)を伴うピットが支配的なウラン鉱床生成— 【使用済燃料、緩衝材及びフィールド・フィールド】	鉱化作用は、北へ向く沿岸堆積物直下の断層に沿って存在する。	【記載無し】	崖の真下に、溶解したウランを含み、堆積物を通して上昇する強い運動地下水の準垂直成分が存在する。	ウランの鉱化は大気に触れて六価ウランの溶解を引き起こし、浅い地下水に伴いシルト状堆積物へ移行し主にフミン酸物及び鉄酸化物に吸着。	測定された水頭の分布、天然崩壊系列の放射性核種のウラン活性比、及びピット中の記録されたプロファイルに基づき、地下水流とウランの移動の概念モデルが作成された。	Needle's Eyeの調査からのデータは、化学的移行のモデル化において、また化学的種分離モデルと共に、利用されてきた。	2.5 頁 3 葉、 4 件
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-9	同上	Oman (アラビア半島; the Semail Ophiolite Nappe)	高アルカリ性の泉水— 【多量のセメントとソルタイトを含む核廃棄物処分場のフィールド】	高アルカリ性の泉水— 【ニアフィールド】	the Semail Ophiolite Nappeに伴い発見された、水酸化カルシウムに富んだ被圧泉。	【記載無し】	【地図のみ】	pH10-12で、塩分を含み、極度に還元性で、自由水素を含有する。	①長期的に高アルカリ条件に曝された放射性廃棄物処分場周辺のプロセスの理解が増した。Fe(II)化合物及び水素ガスの形成により確立した還元条件の研究を行った。	以前の研究からの発表された水理化学的及び鉱物学的データが、広範に利用された	1.5 頁、 1 葉、 4 件

表1.3-1(16) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (16/19)

【・・・】: 調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(74)	評価されたナチュラルアナログの簡潔な描写 (74)2-10	サイト、アナログ研究の主要目的、及びこれらの目的を満たすために利用された主要特性の簡潔な描写、を目的とする【SKBレポートの第2章】	Maqarin (NW Jordan)	堆積岩母体中のセメント質鉄床の岩石-地下水相互作用—【セメントとコンクリートを含む低・中レベル廃棄物処分場のニアフィールドの性能】	堆積岩母岩中のセメント質鉄床—【低・中レベル処分場のニアフィールド】	後期白亜紀の泥灰土とビチューメン質凝灰岩、第三紀chalk(白堊)と凝灰岩それに続く更新世アルカリ玄武岩と表面の堆積物からなる	【後期白亜紀という表現のみ】	【地図参照; 高温鉄物領域は数平方キロに及ぶ】	ビチューメン質岩はbiomicritesで、15-20%の有機物及び12%程度のSO ₃ を含有する。ウランを含むト्रेस元素は有機物に殆ど吸収される。	同様なアナログ手法を用いて、Maqarin とOmanの比較を行った。	【高アルカリ水のセメント・コンクリート等への影響の記述はない。8章で一部紹介されている】	3頁、2葉、2件
(74)	HLW処分のニアフィールドバリアの形成材料のナチュラルアナログ研究(1) 廃棄体(ガラス固化体、使用済核燃料)	【世界各地のナチュラルアナログ研究を広範にレビューし、第8章を廃棄物処分の構成物質のアナログとしての紹介に割いている。】	②; Shinkolobwe, Zaire、③; Ciger Lake、④; Okloの天然原子炉他	天然の鉄物(ウラニナイト等)からのUO ₂ の溶解—【使用済燃料、ニアフィールド・ニアフィールド】	ウラニナイト—【使用済燃料①②③④⑥⑦⑧、ガラス廃棄体⑤】	【記載無し】	一部あり(②③④⑥⑦)	【記載無し】	酸化性地下水によるUO ₂ 等の溶解	【長いタイムスケールを扱うNA事例の詳細な調査及び、実験室における短いタイムスケールを扱う研究の検討により、地下水が還元条件であればウラニナイト等の鉄物は長期にわたり保存される。】	【還元性条件下における使用済核燃料の安定性を推測することにより、地層処分技術の向上(適格な地質条件の把握)に寄与するものと考えられる。】	2.5頁、00葉、20件
(74)	HLW処分のニアフィールドバリアの構成材料のナチュラルアナログ研究(2) 【キャニスタ、又はオーバーパックの材料】	同上	①バルチック海で17世紀に沈没したスウェーデン戦艦Kronanに搭載されていた銅製のカノン砲等	様々な銅製又は鉄製の考古学的出土品及び天然鉄物の特性(腐食の程度、腐食生成物等)—【緩衝材(キャニスタ・オーバーパック)の寿命の推定)、ニアフィールド】	銅及び鉄製の考古学的出土品および天然銅鉄床。①銅製カノン砲—【銅製キャニスタ; ①②③④、鉄製オーバーパック; ④】	①スウェーデンの沈没した戦艦Kronanの銅製のカノン砲	①~ 300年前	①海底の粘土堆積物中	①海底(塩水)の粘土堆積物中に300年以上埋もれていた。	【銅に関する様々なナチュラルアナログの研究から、銅製キャニスタの腐食速度が類推できる(10cm厚さ⇒百万年以上)。】	【銅に関するナチュラルアナログ研究を通して銅製のキャニスタの寿命は百万年程度と長く評価しているが、鉄に関してはアナログデータからナグラ型の軟鉄製キャニスタの全腐食時間は10,000~250,000年であろう。】	2頁、0葉、11件
(74)	HLW処分のニアフィールドバリアの構成材料のナチュラルアナログ研究(3) 【ベントナイト緩衝材】	同上	①Hamra, Gotland, S. E. Sweden等	スメクタイト粘土の、温度・圧力・水循環の上昇によるイライト化の研究⇒ベントナイト緩衝材の安定性の調査—【緩衝材の変化】	地下のベントナイト鉄物—【ベントナイト緩衝材】	①②③④⑤【記載無し】	① 4億 5千万年前に生成された。	①地下 525m	① 110-120°C、	以上のような様々なアナログ研究により、ベントナイトの性質は少なくとも百万年は一定に維持されるという安全分析上の想定は正当化されるだろう。	【ベントナイトの安定性と、核種移行の障壁としての有効性を示している。】	1.5頁、0葉、9件
(74)	LLW/MLW処分のニアフィールドバリアの構成材料のナチュラルアナログ研究(4) 【セメント・コンクリート】	同上	①北部イングランドのハドリアンの壁 ②南西フランスのガロ-ローマン浴場	①②考古学的建設材料の変化 ③産業用建設材料の変化等—【①②③④上記の材料中のセメントバインダの安定性】	①②考古学的建設材料(セメント) ③産業用ポルトランドセメント—【コンクリートとセメント】	【記載無し】	①②【ローマ時代; ~ 2,000年?】 ③60年前に建設	①②名称のみで詳細な記述無し	①②大気中の二酸化炭素の影響、	【セメント成分は環境条件によればかなり長期にわたり安定である。】	【セメントの安定性を説明する事例が中心で詳細な条件等が書かれていない。】	1.5頁、0葉、9件
(74)	LLW/MLW 処分のニアフィールドバリアの構成材料のナチュラルアナログ研究(5) 【ビチューメン】	同上	③バビロニアの考古学的遺物、等	様々な条件における天然のビチューメンの劣化現象—【低・中レベル廃棄物処分場で用いられるビチューメンの安定性】	③有機物(木製ボート等)の保存に用いられたビチューメン—【低・中レベル放射性廃棄物処分場で用いられるビチューメン】	③【塗布対象】木製ボート	③バビロニア時代(B.C. 1,300年頃)	③【塗布対象】木製ボート	③酸化条件、	処分状態において支配的であると予想される温度及び酸化条件下でのビチューメンの安定性、保存性、不動性を支持する。	【ある特定の条件においてビチューメンの安定性が確認できるのであり、処分場への適用については、より広範な環境条件の調査が必要であろう。】	1頁、6葉、0件

表1.3-1(17) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (17/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第3章 ナチュラルアナログ研究の選択 3-1 化学的アナログ	処分場の高レベル廃棄物または使用済燃料に含まれる放射性元素の挙動を調べるために天然の放射性核種や希土類元素の挙動をナチュラルアナログ研究として取り上げた。	【引用事例として; Pocos de Caldas】	天然の放射性核種及び希土類元素の挙動—高レベル廃棄物または使用済燃料に含まれる放射性元素の挙動	天然の放射性核種及び希土類元素の挙動—高レベル廃棄物または使用済燃料	【記載無し】	【記載無し】	【記載無し】	【記載無し】	放射性核種の挙動を、類似な化学的性質を持つ元素の挙動から類推することができるが、それはシビアな条件下で適用されるであり、定性的な情報として捉える必要がある。	【通常の良く知られた元素であっても、地下水環境のような極低濃度でかつ複雑なプロセスでの挙動は、かなり常識とは異なるものと想定され、そういった事象もアナログ研究の前提として議論されるべきであろう。】	4頁、1葉、5件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第3章 ナチュラルアナログ研究の選択 3-2 ナチュラルアナログ環境	歴史的にナチュラルアナログ研究は、数多くの幅広い地質学的環境に焦点を当ててきた。本項では処分場システムの対象プロセスの挙動になりうる典型的な地質学的環境について簡潔にまとめている。	【記載無し】	ナチュラルアナログ研究が実施された地質学的環境—ニアフィールド・ファールフィールド	ナチュラルアナログ研究が実施された地質学的環境—ニアフィールド・ファールフィールド	同上	同上	同上	同上	【上記の様にナチュラルアナログ研究全体の目標と検討課題が、簡明かつ合理的にまとめられている。】	【本項では、ナチュラルアナログ研究全体の目標と検討課題の抽出が目的であり、詳細な検討は続く第4章、第5章で述べる。】	8頁、2葉、3件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-1 ガラス	処分場のニアフィールドで見いだされる多くの異なった物質の性能に関して、ナチュラルアナログがどのように情報を提供するかを提示することを目的とする。	【特定せず】	天然及び人工の様々なガラス状物質の特性と挙動—ガラス固化体	天然及び人工の様々なガラス状物質—ガラス固化体	【具体的記載無し】	同上	同上	同上	NA研究におけるガラスの研究の現状と今後の課題が理解し易く示された。	【上記(1)のように、矽酸ガラスと天然ガラスの組成の違いからNAの成果を全て信用することはできない。ガラスの化学的変化等についてももう少し詳しい説明が望まれる(化学反応プロセス等)。】	12頁、4葉、42件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-2 使用済燃料	同上	【具体的記載無し】	ウラン鉱石—使用済燃料	ウラン鉱石—使用済燃料	同上	【具体的記載無し】	【具体的記載無し】	【具体的記載無し】	ウランの様々な研究は、処分場環境での使用済燃料の安定性を示唆している。	【使用済燃料のNA研究としてウランの研究の現状と今後の課題が理解し易く示されている。しかしながら、本質的に使用済燃料とウランの組成の違いからNAの成果を全て信用することはできない。】	12頁、3葉、25件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-3 金属	同上	考古学的遺物の各出土地等	様々な金属製品または天然の金属の腐食等の特徴—処分場の金属材料(オパール、ニッケル等)の腐食現象等の挙動	考古学的金属製品及び天然産金属—処分場の金属材料(オパール、ニッケル等)	【記載無し】	【個別の試料に対し、例えば“ローマ時代”等という表現】	①銅; [例] ローマ時代のコイン・花瓶、スクエーデンの沈没船のKronan cannon、	【個別の試料に対して簡略に記載】	金属の様々なNA研究は、処分場環境での廃棄物容器の安定性を示唆している。	【銅に関しては、NA研究はその長期的安定性を示しているが、より確かな保証を得るためには、一層定量的なデータの収集が必要であろう。】	19頁、6葉、41件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-4 ベントナイト	同上	①沖ノ子湾岸(米) ②Stripa鉱山(スウェーデン) 他	天然の様々な粘土鉱物の特徴—ベントナイトによる核種移行の遅延効果等	天然の様々な粘土鉱物—処分場のベントナイト緩衝材	同上	【記載無し】	【記載無し】	同上	粘土鉱物によるNA研究は、処分場環境でのベントナイトの安定性を示唆している。	【ベントナイトのNA研究はその長期的安定性を示しているが、より確かな保証を得るためには、処分場に近い環境での定量的なデータの収集が必要であろう。】	17頁、6葉、37件

表 1.3 - 1 (18) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表 (18/19)

【・・・】：調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるフェルリトの研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-5 セメントとコンクリート	処分場のフィールドで見いだされる多くの異なった物質の性能に関して、フェルリトがどのように情報を提供するかを提示することを目的とする。	①1700年前の Hadrian's Wall, ②Maqarin 北部ヨルダン 等	人工的なコンクリート・セメント構造物及び天然セメント質鉱物の挙動—処分場のコンクリート・セメント構造物の耐久性及び核種移行の遅延効果	人工的なコンクリート・セメント構造物及び天然セメント質鉱物—処分場のコンクリート・セメント構造物	【記載無し】	【記載無し】	【記載無し】	【個別の試料に対して簡略に記載】 Maqarinの高pH地 下水 等	NA研究は処分場環境でのコンクリート・セメントの安定性を示唆している。	【NA研究は処分場環境でのコンクリート・セメントの安定性を示唆しているが、確かな保証を得るためには処分場に近き環境での定量的なデータの収集が必要であろう。】	17 頁 5 葉、 67件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるフェルリトの研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-6 ビチューメン	同上	②Oklo ⑤Maqarin(北ヨルダン)	天然のビチューメン及びアスファルトの特性(特に劣化現象)—低レベル廃棄物処分場の廃棄体の固定材料であるビチューメンの耐久性及び核種移行の遅延効果等	天然のビチューメン及びアスファルト—低レベル廃棄物処分場の廃棄体の固定材料であるビチューメン	同上	同上	同上	同上	NA研究は処分場環境でのビチューメンの安定性を示唆している。	【Miller, Alexander, Chapman等により編集された表題の書物は、フェルリトの研究の現在までの集大成であり、また今後の研究課題も様々に検討している。】	8 頁、 1 葉、 18件
(75)	放射性廃棄物の地層処分におけるフェルリトの研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-7 セルロース	同上	Dunarobba(イタリア)、 Maqarin(北ヨルダン)	天然のセルロース(植物繊維等)の特性(特に劣化現象)—低レベル廃棄物処分場の廃棄体の一部であるセルロース(紙類等)の劣化	天然のセルロース(植物繊維等)—低レベル廃棄物処分場の廃棄体の一部であるセルロース	Dunarobba(イタリア)から採取された化石化した樹木	Dunarobba(イタリア)から採取された150万年前の化石化した樹木	同上	Dunarobbaでは還元状態だった。	NA研究は還元条件下でのセルロースの安定性を示唆している。	【NA研究は還元環境下でのセルロースの安定性を示唆しているが、事例が少なく今後のNA研究による情報の集積と検討が期待される。】	4 頁、 1 葉、 3 件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるフェルリトの研究』より 第4章 処分場物質のアナログ 4-8 ポリマーと樹脂	同上	【記載無し】	天然のポリマー(炭化水素及びセルロース系の樹脂)の安定性及び劣化—低レベル廃棄物処分場の廃棄体の固定材料であるポリマー等の劣化	天然のポリマー(炭化水素及びセルロース系の樹脂)—低レベル廃棄物処分場の廃棄体の固定材料であるポリマー	【記載無し】	天然の樹脂(琥珀等)の生成年代は数百年から1.4億年前の幅を持つ。	【記載無し】	樹脂は石炭生成の初期の200°Cの環境で数百万年間、100°Cで二千万年間、生き残った。	NA研究は極く限られた情報によりポリマーの安定性を示唆している。	【事例が少なく今後のNA研究による情報の集積と検討が期待される。】	2 頁、 0 葉、 2 件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるフェルリトの研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-1 溶解度と種分化	処分場のフィールドでの核種の運動と、フィールド及びフィールドでの核種の移送と遅延に、潜在的に重要な物理的・化学的プロセスについて議論する。	①)Boubster ②)Needle's Eye, ③)South Terras(英国)等	地化学モデルの性能評価に使用されたシミュレーション研究—フィールド、フィールドにおける核種の溶解度と種分化	研究対象物質;核種の溶解度と種分化の地化学モデル—フィールド、フィールドにおける核種の溶解度と種分化	同上	【記載無し】	同上	【記載無し】個別に還元条件等という表現	NA研究からの情報によるシミュレーション研究は核種の挙動の予測にほぼ成功している。	【NA研究からの情報によるシミュレーション研究は核種の挙動の予測にほぼ成功しているということであるが、いずれも短い時間スケールから類推したものであり、現実の数百万年等という長時間スケールで成り立つか疑問である。】	14頁、 3葉、 23件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるフェルリトの研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-2 遅延プロセス	同上	① Kliperas(スウェーデン)、 Palmottu(フィンランド) 他	地圏における放射性核種の遅延プロセス—フィールド、フィールドにおける核種の遅延現象	放射性核種(その遅延プロセス)—廃棄体、フィールド、フィールド	同上	同上	同上	同上	NA研究からの情報による放射性核種の遅延プロセスの理解は性能評価に役立つ。	【NA研究からの情報による核種の遅延の研究は、処分場の性能評価における核種の挙動の予測に役立つということであるが、より処分場環境に近い条件のデータが必要であろう。】	18頁、 5葉、 68件

表1.3-1(19) ナチュラルアナログ現状調査結果の整理表(19/19)

【・・・】:調査者の意見

文献番号	研究テーマ名	研究目的	調査場所名	研究対象事象及びそれと対置される性能評価事象	研究対象物質及びそれと対置される多重バリア構成要素	研究対象事象の空間的広がり	研究対象事象の時間的広がり	研究対象事象に係る場の幾何的特性	研究対象事象の環境条件	成果の利用方法	研究成果の評価	総頁数、図表数、引用文献数
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-3 マトリクス拡散	処分場のニアフィールドでの核種の運動と、ニアフィールド及びファールフィールドでの核種の移送と遅延に、潜在的に重要な物理的・化学的プロセスについて議論する。	Grimsel テストサイト (スウェーデン), Boettstein (スイス),	地質圏における放射性核種のマトリクス拡散—ニアフィールド、ファールフィールドにおける核種の遅延現象	放射性核種—廃棄体、ニアフィールド、ファールフィールド【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】還元条件等、という記載のみ	NA研究からの情報による種のマトリクス拡散のメカニズムの理解は性能評価に役立つ。	【NA研究からの情報による核種のマトリクス拡散の研究は、処分場の性能評価における核種の挙動の予測に役立つことであるが、処分場環境に近い条件の(よりサイトベンフィックな)データが必要である。】	18頁、6葉、85件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-4 放射線分解	処分場のニアフィールドでの核種の運動と、ニアフィールド及びファールフィールドでの核種の移送と遅延に、潜在的に重要な物理的・化学的プロセスについて議論する。5-4では放射線分解についての研究をレビューする。	①Oklo天然原子炉 (ガボン)、Cigar Lake (カナダ) ②Shinkolobwe (ザイール)	地質圏における放射性核種による放射線分解の影響—ニアフィールドにおける放射性廃棄体の放射線分解による影響	放射性核種—廃棄体、ニアフィールド (ファールフィールド) 【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	Okloの反応炉では温度が600°Cに達した。	NA研究からの情報による放射線分解の影響の理解は性能評価に役立つ。	【NA研究からの情報による放射線分解の研究は、処分場の性能評価における核種の挙動の予測に役立つということであるが、Okloの環境と処分場環境がかなり異なるという点はもっと検討される必要がある。】	9頁、1葉、37件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-5 レドックスフロント	処分場のニアフィールドでの核種の運動と、ニアフィールド及びファールフィールドでの核種の移送と遅延に、潜在的に重要な物理的・化学的プロセスについて議論する。5-5ではレドックスフロント(酸化還元界面)についての研究をレビューする。	①Osamu Utsunomiya 鉱山 (ブラジル)、Grimsel テストサイト (スウェーデン) ②Oklo天然原子炉 (ガボン)	地質圏におけるレドックスフロントの挙動と放射性核種の移送の相関—ニアフィールド・ファールフィールドにおけるレドックスフロント	天然の放射性核種—廃棄体、ニアフィールド・ファールフィールド【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	レドックスフロントにおけるpH、Ehの変化等	NA研究からの情報によるレドックスフロントの挙動の理解は性能評価に役立つ。	【NA研究からの情報によるレドックスフロントの研究ではOsamu Utsunomiya 鉱山の例が、比較的にうまくいっているのみで、今後の発展のためには他のサイトからの情報が必要であり、Grimsel テストサイト等の研究結果が期待されるだろう。】	11頁、4葉、14件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-6 コロイド	処分場のニアフィールドでの核種の運動と、ニアフィールド及びファールフィールドでの核種の移送と遅延に、潜在的に重要な物理的・化学的プロセスについて議論する。5-6ではコロイドについての研究をレビューする。	Cigar Lake, Pocos de Caldas, Alligator Rivers, Palmottu, Maqarin, Mortandad Canyon	地質圏におけるコロイドの挙動と放射性核種の相関—ニアフィールド・ファールフィールドにおけるコロイドの挙動と働き	天然の放射性核種とコロイド粒子—廃棄体、ニアフィールド・ファールフィールド【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【各サイトでの地下水中のコロイド密度等が言及されている。】	NA研究からの情報によるコロイドの挙動の理解は性能評価に役立つ。	【いくつかの記述によると地下水中のコロイドの濃度は測定限界以下ということであるが、そういった状況でどの様にしてコロイドの影響を定量的に捉えているのか疑問である。】	13頁、3葉、26件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-8 ガスの発生と移動	処分場のニアフィールドでの核種の運動と、ニアフィールド及びファールフィールドでの核種の移送と遅延に、潜在的に重要な物理的・化学的プロセスについて議論する。5-8ではガスの発生と移動に関するNA研究をレビューする。	①Maqarin ②Semail Ophiolite, Oman	地質圏におけるガスの移動と反応—金属腐食によるガスの発生とニアフィールド・ファールフィールドにおけるガスの移動による影響	地質圏におけるガス—廃棄体、ニアフィールド、ファールフィールド【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	例; Maqarin の高アルカリ性泉	NA研究からの情報によるガスの挙動の理解は性能評価に役立つであろう	【ガスについてのNA研究は注目され始めたばかりで、「成果」は今後の課題の提示をすることが中心である。】	7頁、2葉、13件
(75)	『放射性廃棄物の地層処分におけるナチュラルアナログ研究』より 第5章 核種の放出と移送 5-7 微生物活動	処分場のニアフィールドでの核種の運動と、ニアフィールド及びファールフィールドでの核種の移送と遅延に、潜在的に重要な物理的・化学的プロセスについて議論する。5-7では微生物活動に関するNA研究をレビューする。	①Oman, Maqarin ②Pocos de Caldas, Oman	地質圏における微生物の活動と放射性核種の相関—ニアフィールド・ファールフィールドにおける微生物活動とその影響	微生物—廃棄体、ニアフィールド、(ファールフィールド) 【試料数の記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	【記載なし】	Maqarin の高アルカリ性環境、等。	NA研究からの情報による微生物の挙動の理解は性能評価に役立つ。	【微生物の影響は現在対象とするものが少なく結論は今後の課題であろう。】	5頁、2葉、10件

2. 性能評価に適用可能なナチュラルアナログの検討

2.1 ベントナイトに関わる事象・特質

2.1.1 ベントナイトの変質

(1) イライト化

(a) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

ベントナイトの利用に関連して生じる重要な問題の一つは、温度、圧力、地下水流動が増大する間に生じる可能性のあるスメクタイト粘土のイライト粘土への変化である。イライトはスメクタイトに比べて膨潤力が低く、透水性が高い。さらに、固結性がより高まることにより、割れ目を形成する可能性もある。

(b) 従来のアナログ研究

自然界においては、地質学的タイムスケールではベントナイトを構成するスメクタイトは最終的にはイライトに変化する。これは約4億年よりも古いベントナイトの存在が極めて稀なことによって示されるであろう。スメクタイトのイライト化のナチュラルアナログ研究は、長期の様々な地質環境中において生じた粘土の変質を扱ったものである。この変質の主要なものは埋没続成作用と接触変成作用である。

熱水作用により変質したベントナイト粘土から得られたアナログデータによれば、数十万年間に渡る110℃までの温度環境において実質的なイライト化は生じているものの、明らかな物理特性の劣化は認められていない。カナダのCigar Lakeでの研究によれば、150℃を越える温度環境ではイライトが卓越して形成されるものの、何百万年以上にも渡る期間において地下水の循環と放射性核種の移行に対しては有効なバリアとして機能したことが示されている。

(c) 今後のアナログ研究

ナチュラルアナログ研究によって、ベントナイトのイライト化の速度がゆっくりしたものであり、低い温度環境(100℃未満)を考慮した場合には恐らく重要でないであろうことが示されてきているため、低温環境を想定する場合には、アナログ研究の必要はないであろう。

スメクタイトのイライトへの変化に関する多量の公開文献があるにもかかわらず

ず、そしてまた、低温で低カリウム濃度地下水条件下でのベントナイトの挙動が一般的に受け入れられているにもかかわらず、イライト化への変化（及びセメンテーションのプロセス）に関する定量的データは依然として欠落していると言えるようである。この問題は部分的にはモデル開発によって解決されつつあるが、現在の知識における重大な欠陥を埋めるためにより多くのナチュラルアナログデータが必要である。

(2) クロライト化

(a) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

物理特性がイライトに似ているクロライトは、バイデライトを經由してスメクタイトからイライトに変化する間の副産物として少量形成される可能性がある。その形成の程度は多くのベントナイト製品中に存在するマグネシウムの量が少ないことによって限定されることになると思われる。

(b) 従来のアナログ研究

今日までのクロライトに関する研究が欠落しているために、クロライト化に関する実験室試験及びアナログ研究の必要性を提示することが必要である。泥質粘土中のクロライト（及びその他の粘土鉱物）のアナログ研究は現在、Okloプロジェクトにおいて取り組まれているところである。しかしながら、これらは現在の所放射性核種移行遅延に限定されている。

幾つかのクロライト化に関連した研究がCigar Lakeでも行われた。そこで得られたデータは、さらにナトリウム型ベントナイトのMX-80（スウェーデンの処分概念で使用）及び幾つかの処分概念で好ましいとされている粘土質の緩衝材であるカルシウム型ベントナイト（ドイツのバイエルンのMoosburg）と対比された。物理特性の変化があるにも関わらず、Cigar Lake粘土は非常な地質学的長期間にわたり鉱体に対して有効な水理バリアとして機能していたことを示している。

(c) 今後のアナログ研究

クロライトを多く含む泥質堆積岩は豊富にあり、長期間低温環境に置かれたものも短期間高温環境に置かれたものもある（例えば、貫入活動とそれに関連した熱水活動）。フィールド研究は、温度変化のある均質な粘土断面部分から試料を採取して岩石の化学特性（例えば、スメクタイト／クロライト比の系統的な変化）と物理特性（例えば、膨潤圧、透水係数、レオロジー特性等）を把握するた

め、良く制御された実験室試験と組み合わせて行われる必要がある。

(3) 方解石の生成

(a) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

天然ベントナイトは、粘土中のpH緩衝反応に関係し、カルシウムイオンと炭酸イオンの内部供給源としての役割をも有する方解石の形で炭酸カルシウムを含んでいる。処分場閉鎖後の容器周辺で生じる温度勾配が増大するにつれて、ベントナイト中の方解石の移動性の増大と再結晶化（すなわち、方解石化）は可塑性の劣化をもたらすことになる。これはさらにベントナイト中の割れ目形成を促進し、最終的に廃棄物容器への地下水の接触を高めることになる。

(b) 従来のアナログ研究

この問題に取り組んだアナログ研究はない。

(c) 今後のアナログ研究

アナログ研究は実験室試験と平行して実施すべきである。興味ある地質条件は高温かつ乾燥条件下で粘土を地表面にさらしたものであろう。太陽熱による蒸発散（それは、ベントナイト／容器界面への温度勾配のアナログである）は、粘土堆積物からの溶解した塩類（例えば、カルシウムイオンと炭酸イオン）の濃度が徐々に増大するような空隙水の上方への移行をもたらすことになろう。その結果として鉱物相の沈殿が粘土堆積物の表面と表面近傍に生じるであろう。深度方向の断面に沿って得られる試料は粘土中の溶脱と沈殿のメカニズム、及び粘土の物理特性の系統的变化を明らかにするかもしれない。

(4) シリカ及び鉄酸化物のセメンテーション

(a) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

ベントナイト中でのシリカの沈殿、あるいは代替的に鉄酸化物の沈殿によって、ベントナイトの膨潤特性の喪失と脆性特性の発達が全体的にあるいは部分的に生じることになる。高温環境（150～200℃）においては、スメクタイトはバイデライトを経由してイライトに変化する。冷却期間中にはシリカが沈殿し、 Si^{+4} の代わりに格子中に Al^{+3} が入る。この放出されたシリカは、間隙水が既に主としてシリカにより飽和しているであろうことから、イライト相の周辺で沈殿し、セメント質の結合を生じることが推定されることになる。

鉄酸化物は黄鉄鉱とマグネタイト（もし添加物として加えられるのであれば）

中の第一鉄を酸化することにより生じる。

(b) 従来のアナログ研究

Sardiniaでの研究によれば、高温におけるスメクタイトのイライトへの変化と冷却期間中のシリカの沈殿が連続して生じることが示されている。その後の研究では、セメンテーションの影響による粘土の特性変化は不可逆的ではないことが示されている。しかしながら、100°C以下においては重要な変化は期待できない。

鉄酸化物のセメンテーションの影響に関するアナログ研究はあまり報告されていない。報告された一例はドイツのバイエルンのMoosburgに関するもので、酸化還元フロントの両側の粘土の物理特性を調べた結果として、鉄酸化物によるセメンテーションの存在が報告されている。

(c) 今後のアナログ研究

セメンテーションプロセスと、熱的力学的あるいはテクトニクスによるベントナイト中の割れ目形成の後に生じる“セルフヒーリング”のメカニズムをより良く理解するために、シリカセメンテーションの研究を進めることを提案する。このためには、シリカセメンテーションを伴うスメクタイト／イライトの変化を生じさせるのに必要な十分大きな温度勾配（例えば火成岩の貫入など）を、ベントナイトあるいはベントナイトに富む粘土層が始めから受けていたような複雑な地質環境を明らかにすることが必要である。

鉄酸化物については、周辺温度環境と様々な酸化還元条件下に置かれた黄鉄鉱を含むベントナイトの変質を調査し、鉄酸化物のセメンテーションの影響を評価すべきである。

(5) ゼオライト化

(a) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

セメントを用いた処分場近傍において想定される高pH条件の元では、ベントナイト中にゼオライトが形成される可能性がある。もしこのゼオライト化が真実であるならば、プラスの効果としてはベントナイトの放射性核種の遅延特性の増大であり、マイナスの効果は可塑性の減少であろう。

(b) 従来のアナログ研究

Maquarin Projectではゼオライト質の可能性のあるゲルを対象にしたX線回折による同定が行われている。

(c) 今後のアナログ研究

熱水作用末期の証拠（ゼオライトの形成等）が認められている玄武岩流近傍にあるベントナイト粘土あるいは泥質粘土を研究することにより、スメクタイト／イライトに富む粘土に対するゼオライト形成の地球化学的影響についての情報が得られるかもしれない。

2.1.2 ベントナイト中における高濃度の塩の蓄積

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

廃棄体の定置及び処分場の閉鎖後に熱源近傍でベントナイト中の孔隙水が蒸発し、溶解した塩の濃度が高まるかもしれない。これによりベントナイト中に高濃度の溶解塩あるいは沈殿物が形成されることになる。これは緩衝材の膨潤特性と可塑性に悪影響を及ぼす可能性がある。

(2) 従来のアナログ研究

このプロセスに関するアナログ研究は報告されていない。

(3) 今後のアナログ研究

可能性としては、ベントナイト質の飽和粘土層に貫入した火成岩の近傍を対象とした研究が挙げられる。

2.1.3 腐食生成物のベントナイト中の移行

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

処分場閉鎖の後にベントナイトが飽和されれば、特に廃棄体からの発熱による周辺温度の上昇、及びその後の期間中には、オーバーパック構成材料の金属と地下水との間で相互依存的な反応が生じるかもしれない。その結果として容器の腐食と金属イオンの生成及びベントナイト中の拡散、移行を生じさせることとなろう。腐食生成物は元の金属と比較して、密度の最も高い状態においてすら、1モル当たりの体積は大きい。これは周囲のベントナイト粘土中の空隙や割れ目への腐食生成物の膨張をもたらすことになるかもしれない。もし内部空隙が十分大きくなければ、この体積膨張は割れ目を発生させる可能性があるということである。一方、そのような膨張は空隙空間に対して良い影響をもたらすかもしれない。すなわち、それにより核種移行が低減するかもしれない。

(2) 従来のアナログ研究

腐食生成物に直接関連したアナログ研究は多くはなされていない。多くは廃棄物の溶解の結果として生じる粘土中の核種移行に関するものである。例えば、スコットランドのLoch Lomond、イタリアのOrte、ベルギーのモル等である。

ベントナイトとマグネタイトの反応を扱った研究によれば、20%までのベントナイトがchamositeのような鉄含有鉱物の生成に関与している。このことはベントナイトの膨潤特性に好ましくない影響を与えるかもしれない。

(3) 今後のアナログ研究

粘土と金属がはっきりと確認されるような箇所が選定される必要がある。例えば、金属鉱体と接触している粘土層や適切な環境に埋没していた考古学的人工遺物などである。もっとも、深部環境においては鉄—粘土—地下水反応に高圧がかかるのであれば、近地表が実際的なアナログを代表するかどうかは疑問である。

Cigar Lakeで得られた既存データを再評価することは価値がありそうである。さらにまた、初期のスウェーデンのブロンズ製の大型の研究から得られた既存粘土断面試料の材料特性は定量的に特性が把握されるべきである。

2.1.4 オーバーパックの沈下（ベントナイトのレオロジー）

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

ベントナイトの長期健全性は耐荷重能力に依存している。耐荷重能力が長期的に十分でなければ、時間とともに重量のある廃棄物容器（HLWガラス固化体を包有するオーバーパック）はベントナイト中を沈下するかもしれない。これは、廃棄物容器と母岩の間の距離を狭めることになる。さらには、容器の上部表面周辺のベントナイト接触部にゆるみの部分を生じさせることになるかもしれない。これらは、廃棄物容器への地下水の流れを増大させ、地圏への潜在的な放射性核種の移行を促進し、コロイド移行に対するフィルター効果を最小にすることにつながる可能性がある。

(2) 従来のアナログ研究

これらの問題に焦点を当てたアナログ研究は報告されていない。ベントナイトあるいはベントナイトに類似した粘土があり、水で飽和しており、処分場性能評価に関連する適切な時間枠内の粘土中の緻密な物体の動きを定量的に把握でき

る可能性があるサイトを定めるのは実際的に明らかに困難である。現在のところ、容器の沈下に関連するデータの多くはスウェーデンのストリバ鉱山で実施されたような原位置試験からのものである。

幾つかの興味深い氷河に関連した観察結果がスウェーデンのイライトに富む氷河性粘土から得られている。深部の粘土層の調査の結果、この時間間隔においてはクリープが発生した証拠はほとんど認められなかった。圧密下では、イライトは物理的にはベントナイトと同じように振る舞うため、そのような観察に価値があるであろう。

(3) 今後のアナログ研究

今後のアナログ研究として考えられるのは、大きな密度を有する巨礫、稠密な重晶石の集合体あるいは不規則な密度を有する色々な種類のコンクリーション、重量のある考古学的人工物などを含んでいる飽和したベントナイトの自然界における産状についての研究や、粘土層中に埋没しているかもしれない外来の鉄隕石に関連した研究である。

2.1.5 ベントナイトの流出

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

ベントナイトと接触している透水性の高い割れ目は、地下水の流動方向に向けて定置孔から離れるようにゲル状のベントナイトを侵食し、除去すること（ベントナイトの流出）をもたらすかもしれない。これはさらに希釈によるベントナイト密度の低下をもたらす。時間とともに、このプロセスは廃棄物容器を防護するベントナイトの機能を劣化させ、最悪のシナリオとしては、幅広く容器の腐食や貫通をもたらし、さらに、放射性核種の溶解と地圏への移行を急速にもたらすことになる。

(2) 従来のアナログ研究

この流出現象に特に焦点を当てたナチュラルアナログ研究はこれまでなされていない。一般的な侵食特性に関しては、多量のスメクタイトを含む近地表の粘土帯の観察によれば、それが最初に大気に晒された更新世（第四紀前半）以来、侵食の証拠はない。これは割れ目閉塞材料としてのベントナイト質粘土の安定性を支持するものと言える。

(3) 今後のアナログ研究

十分な涵養量をもたらす条件に置かれた割れ目を有するベントナイト層（あるいはその他の粘土層）を適切な箇所に見いだすことは可能であろう。もし、ベントナイトの侵食が重要なプロセスであれば、透水性の割れ目は大きく拡幅されなければならない、その結果として生じる崩壊性の地形（カルスト地形のような）が認められるかもしれない。

2.1.6 ベントナイトと地下水の相互作用（陽イオン交換など）

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

ベントナイトそのものの安定性は地下水との相互作用によって、特にスメクタイトからイライトへの変化に関係するカリウムが存在する状態において、損なわれることになるかもしれない。カリウムについての最も近傍にある供給源は地下水そのものである。もっとも、深部の花崗岩中の水-岩石相互作用はカリウムイオン濃度を20mg/L未満に制限している。しかしながら、その他の処分場母岩を選択することになれば、それよりも高いカリウムイオン濃度をもたらす可能性があるため、処分場への潜在的な影響に留意する必要がある。

その他に考えられるカリウム供給源は、埋戻し材中の顕著な混合材として含まれるカリウム長石である。

(2) 従来のアナログ研究

アナログ研究により処分場深度では地下水中にはほとんどカリウムが含まれていない（<20mg/L）ということが明らかにされている。塩水性地下水環境におけるスメクタイトからイライトへの変化も問題とは考えられない。これは石油探査のための堆積盆でのボーリングデータによっても支援されており、そこではスメクタイトが飽和環境において全く安定な状態で認められている。

(3) 今後のアナログ研究

カリウムのイオン交換反応の領域では今まで以上の研究をする必要はない。ベントナイトに及ぼす塩水地下水の影響は継続して研究する価値がある。その理由は、処分場深度を想定した場合、我が国で将来選定される可能性のある結晶質岩、堆積岩環境では、処分場を最終的には飽和するかもしれない塩水地下水の存在を否定できないからである。研究に値する模式地域としては、塩水地下水を含み、

ベントナイトに近い粘土を含む深部の堆積盆が挙げられる。

2.1.7 ベントナイト中のガス移行（空気を含む）

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

高レベル廃棄物処分概念においては、主として水素からなるガスは鋼鉄製の容器の腐食により生じると考えられている。ベントナイト中のガス移行はガス圧が当該物質中にガス移行経路を形成するのに必要なしきい値を超える場合に生じる。このしきい値はおおよそ、高い粘土含有量と密度を有する物質の膨潤圧に相当し、含有量の低い場合にはその毛管圧に関係する。この値以下であれば、ガス圧が再度そのしきい値を超えるまで、経路は閉塞することになる。

(2) 従来のアナログ研究

今日までガスの生成と移行を扱ったナチュラルアナログ研究は報告されていない。

(3) 今後のアナログ研究

幾つかのナチュラルアナログ研究の可能性を挙げることができる。例えば、地下水で飽和し、還元的な環境にあるベントナイトやその他の粘土中の鋼鉄製物質を研究することにより、ガスの生成速度を決定する研究である。

2.1.8 ベントナイト中の酸化還元フロントの進展

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

緩衝材としてのベントナイトは、閉鎖後の還元状態が処分場内で達成されたとした時でさえも酸化状態に置かれるかもしれない。酸化還元フロントの形成と関連したこの酸化状態は、容器の貫通によって廃棄体/地下水界面で発生する放射線分解に起因するであろう。将来の気候変化もまた、ベントナイトの領域にまでそのフロントの移動を生じさせるような処分場深度での酸化状態をもたらすことになるかもしれない。さらにまた、緩衝材まで酸化還元フロントが及べば、それによるコロイドの生成を生じ、生成したコロイドが地圏に運ばれるかもしれない。

(2) 従来のアナログ研究

放射線分解と酸化還元フロントのナチュラルアナログ研究は、幾つかのナチュラルアナログ研究プログラムにおいて広範に研究されてきている。その結果、放

射線分解反応は自然界において実際に生じるものであり、これにより局所的な酸化状態と放射性核種の移行をもたらすということが明らかにされた。しかしながら、最近用いられている性能評価モデルにおいては、正味の変化がかなり過大評価されている。Cigar Lakeの研究では、周囲のイライト粘土中に熱水作用により生じた酸化還元フロント（250 °C）が及んだ証拠が示され、また、放射線分解により生じた環境下でフロントが継続した証拠が示された。部分的にイライト/クロライトに富む層で囲まれているOkloの原子炉ゾーンについても、放射性核種とその他の微量元素に対する粘土層の緩衝能力が明らかにされている。

酸化性地下水の予期しない浸入により生じる酸化還元フロントの下方への移動は、スカンジナビア地域におけるアナログ研究において、現在、氷河活動に関連させてこの問題が取り扱われている。

(3) 今後のアナログ研究

今後のアナログ研究としては、実際のベントナイト鉱床における酸化還元フロントの形成と移動の研究が挙げられる。可能性ある場所としてはドイツバイエルンのMoosburg（あるいはそれに類似した近地表の産状を呈する所）を挙げる事ができる。

2.1.9 コロイド、微生物、有機物に対するベントナイトのフィルトレーション

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

微細粒子やコロイド物質が、容器が反応する間に形成されることが考えられる。性能評価上のこの重要性は、そのような粒子は放射性核種やその他の微量元素を収着する可能性があり、それによってファーフィールドへの放射性核種の移行を促進するかもしれないということにある。ベントナイトはコロイドの粒子を除去するフィルタとして機能することが期待されており、幾つかの性能評価においてはベントナイトがフィルタ効果を有するが故にコロイドは重要でないと考えられている程である。もっとも、ベントナイト中の有効孔隙の大きさは明らかでなく、その調査の必要性は認めるべきであろう。

(2) 従来のアナログ研究

粘土鉱物のフィルタ効果を説明するために二つのアナログ研究を提示することができる。Pocos de Caldas におけるMorro do Ferroサイトは、強く風化作用を

受けた火山岩（主としてイライトよりなる粘土）で特徴づけられるが、放射性核種とランタノイド元素を収着した多量のコロイド物質を含有している浸透地下水が飽和ゾーンに入ってきた時に、脱着が生じ、その脱着した核種が岩石構成鉱物や粘土鉱物の表面に収着したことが示されている。その研究の結論は、母岩と粘土のフィルタ能力が効果的であるが故にコロイド輸送はほとんど心配がないということであった。

Cigar Lakeのアナログ研究からは、鉱体中の地下水中粒子の組成は周囲の母岩である砂岩中のそれとは別個のものであり、その事実は、鉱体から粘土（イライト）を經由した粒子の移行はほとんど無視できるということが示された。

(3) 今後のアナログ研究

Okloにおける微粒子とコロイドについて継続的な研究を実施することにより、粘土のフィルトレーションのメカニズムに関する現在の知識がさらに増すことになろう。

2.2 オーバーパックに関わる事象・特質

2.2.1 腐食のモード及び炭素鋼腐食生成物の性質

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

腐食速度は酸化還元条件、pH及び地下水組成と温度に依存する。処分場環境下では閉鎖直後においては、酸化性環境が、全ての自由酸素がオーバーパックや周辺の緩衝材、埋戻し材で消費されるまでの期間、支配的となるであろう。この段階においては、ヘマタイト、マグネタイト、シデライトが支配的な固体としての鉄腐食生成物であろう。鋼に含まれる金属（例えば、NiやCr）の存在は、腐食の不動態を促進させるかもしれない。自由酸素の除去された環境条件では、酸化物あるいは水酸化物の皮膜の耐食性が低下し、水素ガスが発生する。一方、水素ガスの蓄積は恐らく腐食速度を減少させるであろう。還元条件においては、マグネタイトが支配的であると言われているが、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が溶液の化学条件によっては支配的という報告もある。

深部の塩水地下水が存在している場所の近くに処分場が設けられる場合もあるかもしれない。そして、氷河作用のような気候変動あるいは火山活動—構造運動

の期間中に塩淡境界の揺らぎが生じると、塩水地下水が金属製オーバーパックに接触することになる。

微生物の活動は、還元条件下においてさえも、硫化水素を生成することによって金属の腐食をもたらしたり、高めたりするかもしれない。

自然界における自然鉄の存在が稀であるということは、想定される処分場条件下における本来的な地下水に関連して述べる場合、自然鉄の不安定性を説明している。

(2) 従来のアナログ研究

地下水環境が還元的で弱アルカリ性であれば、鉄の腐食は地層処分場内におけるオーバーパックの腐食と良く似たもきである必要がある。しかしながら、そこには明らかな組成の相違がある。アナログ研究で調査された金属物質の大半は考古学的な人工遺物であり、そのため成分の不均質性という問題を提起することになる。多くの人工遺物は様々な劣化速度をもたらしている合金であるのが普通であり、それらには強度の孔食あるいは局部腐食が生じている。

鋼製容器の腐食に対するアナログとして最も多く引用されているのは、スコットランドのInchtuthilで発見されたローマ時代の鉄製のクギである。それらのクギは圧密された土壌で覆われた5 mの深さのピット中に保存されていたものである。還元的な環境がおよそ2000年間にわたり維持されていたと思われるが、それは外側のクギの層の部分が錆で形成された殻の存在によるものである。

工業材料（例えば、鋳鉄や炭素鋼で作られ、粘土環境に置かれていたガス管あるいは水道管など）の埋設の結果生じた腐食生成物質とその腐食速度の値と実験室試験結果、考古学的人工遺物の値との比較から、最大腐食速度は0.04～0.09mm/yr で、主要な腐食生成物としては FeCO_3 と FeOOH が得られた。

(3) 今後のアナログ研究

グリーンランドのDisko 島とドイツのBuhlにおける自然鉄が高温で生成されたにもかかわらず、その後の低温環境における変質反応物質を分析すれば、処分場条件下における鉄の長期挙動について重要な考察や発想が可能になるかもしれない。

考古学的人工遺物や工業遺物についてはさらに調査を進めることが望まれる。その調査の内容としては、製作に用いられた鉄合金の不均質性を決定することを

目的としたより定量的な分析を行う作業や製作法（すなわち、冷間加工や鋳造）である。後者は腐食速度をより正確に定量的に見積もることを可能にするものである。埋設環境、すなわち化学環境の変動や酸化物質の供給等をより十分に研究することは同様の重要性がある。さらにまた、時間スケールに着目することが重要である。例えば、長期の歴史的期間にわたって使用されてきた水井戸や湧水箇所内の鉄製の人工遺物は調査する必要があるだろう。汽水性から塩水性で、還元的～酸化的地下水環境中の考古学的、地質学的金属人工遺物は有益な情報を提供する可能性を有している。

2.2.2 オーバーパック破壊のモード

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

地下深部にオーバーパックが定置されると、それにかかる外部圧力は母岩のクリープ特性に依存する地圧（地下水圧を含む）と周囲のベントナイトの膨潤圧である。これらの圧力を支持し損なえば、オーバーパックの力学的破壊（ねじれや破断など）をもたらすことになる。

(2) 従来のアナログ研究

この種のアナログ研究の実施は知られていない。

(3) 今後のアナログ研究

この問題については明白なアナログがはっきりしない。恐らく、鋼で裏張りされた地下貯蔵施設がアクティブなテクトニックの地域にあれば、そのような鋼を調べることにより機械的なねじれ等の証拠が得られるかもしれない。

2.2.3 鉄の腐食生成物への核種の吸着と共沈

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

処分場条件下における炭素鋼製容器の腐食生成物は、副次的にヘマタイト、鉄炭酸塩鉱物 (?) と少量の $FeOOH$ を伴うマグネタイトと想定されている。その容器の貫通という事象が生じれば、その生成物は以下のような機能を発揮することとなるだろう。

- a) 放射線分解反応に対する酸化還元緩衝能
- b) 物理的に放射性核種を収着する核としての機能

c)放射性核種を共沈する機能

(2) 従来のアナログ研究

鉄酸化物とFeOOHの放射性核種移行遅延特性はウラン鉱床において広範に研究されてきており、放射性核種やその他の微量元素の移行に対する非常に有効なシンクであることが分かっている。

(3) 今後のアナログ研究

これらの鉄酸化物/水酸化物に関連する遅延メカニズムは、ウランがソースタームとして用いられる全てのアナログ研究において重要な部分である。それゆえ、現在研究が継続しているOklo, Palmottuや東濃におけるアナログ研究からは有益な結果が得られることであろう。

2.3 ガラス固化体に関わる事象・特質

2.3.1 長期的なガラスの溶解

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

実験室試験によれば、硼珪酸ガラスの変質と玄武岩ガラスの変質との間に著しい類似性、特に、固液界面で形成する水和性の外殻、即ちパラゴナイトの存在が認められている。硼珪酸ガラスに関して言えば、このパラゴナイトは一方でガラスの水和がさらに進むのを部分的にも防護し、他方では、ガラス表面に移行する放射性核種を保持する役割を果たすと言える。

(2) 従来のアナログ研究

定量的な溶解速度の推定値を求めるために、硼珪酸ガラスと天然ガラス、特に玄武岩質ガラスを比較するナチュラルアナログ研究が多くなされてきている。この速度を測定する試みは水和した変質外殻部の厚さを計り、それを時間と関係づけることによってなされてきた。玄武岩ガラスの溶解が2相に分かれたプロセスで生じることを示した研究がある。それによれば、溶解速度として1000年で3~20 μm (低シリカ濃度条件; 海洋底相) から0.1 μm (高シリカ濃度条件; 埋没相) のオーダーが示唆されている。

考古学的ガラスは、様々な生産技術と組成に関わる固有の異質性があるにも関わらず、長期間の安定性を示すという点においてはいくらか定性的にでも価値が

あると思われる。悪条件下で3500年間も置かれていながら、ほんのわずかな劣化しか示していない高アルカリガラスの存在もある。処分場環境はそれとは対照的に長期耐久性を提供しうるものであろう。

(3) 今後のアナログ研究

今日まで、処分場条件に近い条件下で行われたアナログ研究は少ない。将来のアナログ研究としては天然と人工のガラスの間の組成の相違が考慮される必要がある。天然ガラスが通常非常に少量の α 放射核種、即ち 1~30ppm の濃度のU及び/あるいはThを含むのみなので、放射線の影響に関してバルクの性能を直接推論する結果をナチュラルアナログ研究で得ることは困難かもしれない。

2.3.2 溶解度制限固相

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

処分場性能評価の観点からは、ガラス固化体表面への変質生成物の形成を理解することは重要である。これらの生成物が放射性核種に対する溶解度制限を与えるであろうことから、これら生成物はニアフィールドからの放射性核種の放出の決定要因となる。主要な溶解度制限固相には水酸化物、酸化物、炭酸塩、フッ化物、硫酸塩及びリン酸塩がある。

(2) 従来のアナログ研究

ナチュラルアナログ研究によれば、変質生成物は炭酸塩、粘土鉱物及びゼオライトの三つのグループに分けられている。しかしながら、これら生成物の核種保持特性を扱った研究は少ない。少ないながらもそれらの研究は、ガラスが溶解する間の処分場の安全性に係わる元素の保持挙動を基本的に確認している。これらのアナログ研究はまた、変質生成物による保持はほんの一時のことかもしれないことを示している。それは、水和層が完成すると時間とともにそれが結晶化し、それによって核種の放出が生じることを示唆する証拠があるからである。

玄武岩質ガラス中の希土類元素（いくつかの三価の超ウラン元素に対する化学的なアナログ）の挙動に関する調査の結論は、ガラスの溶解は希土類元素の正味の放出をもたらすものではあるが、変質相への直接的な収着による保持は、結晶格子中への直接的な取り込みに比較して極めて小さいということである。

(3) 今後のアナログ研究

個々の変質相を同定し、分析するためには高度に洗練された分析技術が必要になろう。さらにそのようなデータを用いてモデル化することは恐らく不十分な熱力学的なデータベースに悩むこととなろう。しかしながら、予期される鉱物相を実証するためにblind predictionの手法を採用し、そして実際の溶解度制限固相と対比することは、放射性核種移行性能評価モデルへの重要な基礎を提供している最新のデータベースに対してアナログとして重要な貢献をすることとなろう。

2.4 ニアフィールド母岩に関わる事象・特質

2.4.1 マトリクス拡散

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

結晶質岩等におけるニアフィールド核種移行に影響を与える可能性のある幾つかの遅延メカニズムのうち、岩盤中のマトリクス部におけるマトリクス拡散と収着は最も重要なものの一つであろう。このメカニズムの効果は透水性の割れ目帯から岩盤中への拡散到達深度に依存しており、流動する地下水と接触する割れ目面の表面積にも依存している。

(2) 従来のアナログ研究

ほとんどのナチュラルアナログ研究は、様々な水理地質学的環境での放射性核種の拡散深さに焦点を当ててなされている。これらのデータが示すのは、多くの拡散深さは1mm から50mm (50cmまでの数値あり) の範囲にあるということである。10mmという数値が保守性を考慮した場合に適切な数値とされている。最大の拡散深さは通常割れ目に近接する変質増大部 (即ち、より大きな空隙部) と関連性がある。

しかしながら、フィールドデータは当面は拡散係数を求めるためにある。さらにまた、利用可能なそれらデータの幅は $10^{-19} \sim 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ と幅広い。

(3) 今後のアナログ研究

マトリクス拡散に関する将来の処分場サイトに固有の、あるいはアナログサイトに固有の研究は以下の点を考慮すべきであろう。

- ① 放射性核種の断面に沿った測定は、岩石の物理的パラメータ (例えば、空隙率、拡散係数、透水係数等) と接触する地下水化学組成を測定する詳細な岩石

学的、地球化学的研究によって支援される必要がある。

- ② 割れ目断面に沿った放射性核種濃度の測定が未変質の透水ゾーンにおいて得られる必要がある。
- ③ 報告済の多くのデータはランダムに選んだ割れ目試料に基づくものであるが、調査の対象とする断面は、酸化性から還元性に至る母岩条件で選定されたものに系統立って割り振られている必要がある。
- ④ 今後行う拡散試験は将来の処分場の応力状態に等しい原位置条件下でなされる必要がある。

2.4.2 坑道掘削に伴う岩盤中の酸化還元フロントの進展

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

開削された通気可能なトンネル（横坑）と立坑を経由して、大気は地下施設の建設及び操業中に地下岩盤と接触することになる。透水压が常に地下水を強制的にトンネル等の空洞方向に向けられることから、大気が岩盤中に浸透する深さは恐らくある一定レベルに限定されるであろう。岩盤の特性を考慮した場合には、大気の浸透深さは割れ目の分布と特性に依存するものと思われる。大気は、非常に不規則で岩盤中に指交的に入り込んでいる大気/水の界面を生成する割れ目のうち、より大きなものに選択的に入り込むことになるであろう。Fe²⁺のような還元性を与える成分を含む地下水が一定量流出することになれば岩盤を酸化から保護するように思われる。

(2) 従来のアナログ研究

これらの問題を扱ったアナログ研究は特に報告されていない。なお、Okloでは岩盤環境に対する大気の影響を調べるために、鉱山内の坑道で地下水と微生物の採取が行われている。

(3) 今後のアナログ研究

開放された処分場条件に対するアナログとして、Okloやその他の鉱山地下施設を用いる考えは、特に将来の処分場母岩に類似した組成の母岩中を想定する場合においては、検討されてよいであろう。

2.4.3 岩盤中におけるガス発生と透気

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

ニアフィールドで自然に発生するガス（例えばメタン、ラドン、ヘリウム等）は地圏の割れ目を通して、最終的には生物圏に到達する可能性がある。圧力がかかっている状態では、ガスは最初は低透水性のニアフィールド岩盤内の地下水中に溶解しているのであろうが、地下水が徐々に上方に向かえば、圧力の低下を伴いつつ、共に流動することになる。ガスの移行は、地下水組成に影響を与えるとともに、割れ目内の地下水の流れ方にも影響を与える。

もしキャニスタが破損し、ガスを含むニアフィールド岩盤中に放射性核種が放出されれば、ガス状態での放射性核種の移行は地表まで急速に生じることとなるため、性能評価においてはガスによる移行の問題が考慮される必要がある。

(2) 従来のアナログ研究

この問題に関してのアナログ研究は特になされていない。地殻における水素ガスとメタンガスの起源とそれらの地圏及び生物圏に及ぼす影響についてレビューした研究がある。

(3) 今後のアナログ研究

将来のアナログ研究について検討された結果を以下に示す。

- ① ガスの発生速度に関する情報は粘土等の中にある補強のための鉄の棒を研究することにより得られるかもしれない。
- ② ガスの移行に伴う物理的プロセスは石油産業において研究されてきている。しかしながら、これらのガスと母岩との地球化学的相互作用は扱われていない。
- ③ 炭化水素の貯留層以外のガス発生源は確認される必要があり、もし可能であれば岩盤との相互作用の研究がなされるべきである。
- ④ ベースメタルの探査においては、しばしば、深部の鉱体から割れ目を通ってもたらされたと信じられている金属の異常な濃集を検出することを目的として地球化学的地表踏査が実施されている。これなどは有望な研究方法かもしれない。

2.5 その他の事象・特質

2.5.1 マグマの貫入、熱水の浸入による鉱物の変化と地下水の（水理的、化学的）変化

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

周期的な火山活動とそれに関連した熱的な活動に関するシナリオは日本においては潜在的な脅威を提供するものである。それゆえ、地質学的なタイムスケールにおけるそのようなプロセスの理解は処分場の選定と性能評価においては決定的な要因となるものである。火山活動の予測とその影響に関する地質学的情報は我が国には多く存在している。しかしながら、これらの情報は処分場の性能評価上の問題に対して纏められたものではない。ここではヤッカマウンテンにおける火山活動の再活動の可能性と処分場の長期隔離性能に及ぼすその影響についてとりまとめた。

(2) 従来のアナログ研究

ヤッカマウンテンは引っ張り応力とそれに付随する火山・地震活動によって特徴づけられるいわゆる堆積盆—山脈地域に位置している。テクトニクスの詳細な環境と、将来の活動を評価し、予想し、予測するためのより良い基礎を提供するかもしれないマグマ活動史（すなわち、浅部の貫入活動及び噴火活動の時期、場所、形態及び量）の文脈の中で苦鉄質複合岩体を理解する研究が進行中である。

また、例えば、理論的な研究によれば、マントル対流は無秩序なプロセスである可能性もある。もしこれが事実であれば、処分場の機能期間中において火山活動と地震動を予測することはある程度不確実なことかもしれない。

火山活動や地熱活動に関連した、処分場への高温の熱水の潜在的な浸入は処分場のタイムスケールにおいては起こりうるかもしれない。そのような意味では、ニュージーランドにおける類似の研究は価値があろう。

(3) 今後のアナログ研究

新しいアナログ研究計画を入念に作り上げることよりも、既存の地質情報を処分場性能評価要件に照らし合わせて再評価することが望ましい。

2.5.2 断層運動／地震動による人工バリアの破壊と地下水の（水理的、化学的）変化

(1) 内容の説明及びF E Pとしての実現可能性

地震活動と断層運動を含むシナリオは処分場の安全性と性能にかなりの関連性を有している。それらの活動は必ずしもマグマ活動や熱水活動に関連していないかもしれないが、多くの場合には直接的な関連性であろう。処分場に対する最悪の影響は、一度あるいは数度の運動によってニアフィールドを歪ませたり、破壊したりすることであろう。ファーフィールドに限定すれば、地震活動／断層運動の事象の発生によって地下水流動と化学組成の変化が生じ、それによりニアフィールドが好ましくない影響を受け、予定よりも早い放出をもたらすことになる。

(2) 従来のアナログ研究

この問題に関するアナログ研究はあまり多く報告されていない。しかしながら、スウェーデンにおいて報告が一つ挙げられる。スカンジナビア半島北部に限定されると思われる後氷期の大規模な断層運動についてのその研究によれば、そのような断層運動は本質的に既存の古い構造に沿った再活動を示しており、新しい割れ目はどれも再活動した断層の近傍数m以内に限定されているようである。これは地震活動によって繰り返し破壊された割れ目帯と一般に一致するものである。その割れ目帯では断層の破壊のうち95%が繰り返し発生したことが推定されている。結論としては、氷河作用によって生じる不安定なテクトニクスは既存の断層帯に沿った再活動によって適切に緩衝されているようである。

(3) 今後のアナログ研究

我が国における既存の地震に関する情報は処分場の安全性と性能評価に照らし合わせて評価される必要がある。また、リスクをもたらす要因が何であるのかを明らかにすることと、タイムスケールを定量的に示すことが必要である。さらに、地震活動に伴って多量の地下水が移動し、あるいは交換する可能性、地下水の移動についての性質、多量の地下水が排出されたり、岩盤中にもたらされたりすることが断層の形態に依存しているのか、引っ張りあるいは圧縮状態にあることによるのかということに関する検討も必要である。地下水組成と量の変化に伴う透水性の大規模な変化は処分場近傍においては明らかに望ましいものではない。スカンジナビア半島の楯状地の相対的な安定性はこのようなシナリオを排除するで

あろうが、圧縮応力場で特徴づけられる地質環境を有する我が国においてはこれは当てはまらないであろう。

2.6 多数のF E P sを研究しているアナログサイト

2.5節までにおいては、幾つかの国際的に実施されているナチュラルアナログ研究について述べた。このような研究で対象とされている大規模な処分場全体を模擬できるサイトの利点は、最終的な処分場サイトに密接に近似していると思われる天然の地質システム内において複数のF E P sを統合的に研究できる可能性があることである。表2.6-1に主要な国際的アナログ研究計画において取り組まれている主要なF E P sを要約して示す。

3. まとめ

本研究は今年度新たに発足したものである。今年度は、主として最新のナチュラルアナログ文献を対象とした「ナチュラルアナログの現状調査」を行うとともに、特定のF E P sを対象とした「性能評価に適用可能なナチュラルアナログの検討」を実施した。

前者においては、ナチュラルアナログの専門書（単行本）を含め、計75に及ぶナチュラルアナログ文献の整理を、性能評価の視点において行った。文献調査の対象としては、未だ多くの文献が残されており、今年度実施した分は第一段階のものとして見るべきものである。また、この現状調査に先立って諸外国においてどのようにナチュラルアナログの研究成果が組み込まれているのかを把握するため、スイスのKristallin-I(1994)、カナダのE I S(1994)、スウェーデンのS K B 91(1991)を対象にナチュラルアナログの記述の現状を調査した。

安全評価書（あるいは、プロジェクト評価書）においては、特定の事象・プロセスに対して、何らかの形でナチュラルアナログの研究成果の適用がそれぞれ異なる形で図られていることがわかった。それらは各国の各機関の研究の事情（進捗度、概念、安全確保の考え方、将来の扱い方等）を反映しているものと想定される。

ナチュラルアナログ研究の現状についての第一段階としての予備的な文献調査結果からは、様々なレベルでの研究報告がなされていることが分かった。また、報告としては、大規模アナログ研究（処分場システム全体を対象）が多い。これは、対象とした文献の選び方にもよるものであるが、複数のF E P sを同時に扱うことができるため研究としての効率が良く、結果的に研究費が充てられているということにもよるのであろう。

「性能評価に適用可能なナチュラルアナログの検討」においては、挙げられたF E P s項目についての性能評価への適用可能性を予備的に検討した。主として検討した内容は各F E Pの記述とナチュラルアナログとしてのアプローチの仕方、及び既往の研究内容や今後の研究のあり方の第一段階のとりまとめである。その結果として予備的に、個々には国際的にも取り組みが十分でないF E P sも多くあることが分かった。これらについては、我が国の処分概念や処分スケジュール等をベースとして、必要性に十分配慮しつつ我が国固有の取り組みが必要であらう。これらは次年度以降の課題とならう。

あとがき

本研究は、動燃事業団が2000年前に計画している地層処分研究の進捗状況についての第2次とりまとめの内容、すなわち、主としてニアフィールド性能の定量化を図ることによる地層処分の実現可能性のより信頼性ある提示をさらに確実にするための一つの重要なアプローチとして今年度より取り組みが開始されたものである。今年度は、既往のナチュラルアナログ研究について、予備的な整理を行った。その結果として概略的なナチュラルアナログの現状の把握がある程度なされつつある。

次年度以降は今年度の取り組み方針への依拠のもと、さらに既存文献についての現状の調査を進めることが必要である。また、提示されているF E P s項目についてさらにその性能評価への適用可能性を検討してゆくことも必要である。それらの検討の先には我が国の処分事情を考慮したナチュラルアナログ研究計画が必要なF E P sについて立案されることが望まれる。