



高レベル放射性廃棄物処分に関する安全研究の概要

—安全研究の経緯と今後の進め方—

Outline of Safety Research on High-Level Radioactive Waste Disposal
- Background and Future Study for Safety Research -

園部 一志

Hitoshi SONOBE

地層処分研究開発部門

研究開発推進室

Research and Development Co-ordination and Promotion Office
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

高レベル放射性廃棄物処分に関する安全研究の概要

－安全研究の経緯と今後の進め方－

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

園部 一志⁺¹

(2008年1月7日受理)

高レベル放射性廃棄物の安全研究は、国が行う安全基準、指針類の策定への寄与等を目的に、国内の研究機関の間で進められてきた。日本原子力研究開発機構においても、これまでにその前身である動力炉・核燃料開発事業団、核燃料サイクル開発機構及び日本原子力研究所の頃から、精力的に進めてきており、得られた成果は、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方の策定などの検討に反映されている。

高レベル放射性廃棄物の最終処分については、既に処分のための事業活動が開始されている。西暦2000年に処分事業の実施主体として原子力発電環境整備機構が設立され、2002年には、国内における高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募が開始され、2030年代から2040年代半ばまでに最終処分施設の操業開始を目指した事業活動が展開されている。

以上のように、高レベル放射性廃棄物を取り巻く情勢は、安全規制と事業化に関する展開が並行して進んでおり、これらを支える研究開発の成果はそれらへの反映が求められる。動力炉・核燃料開発事業団、核燃料サイクル開発機構では、これらの状況を踏まえ、処分事業と安全規制の両者に反映させることを視野に入れ、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を進めてきた。ここでは、旧法人である動力炉・核燃料開発事業団が安全研究に着手した昭和61年度から現在に至るまでの国の動向なども交え、動力炉・核燃料開発事業団及び核燃料サイクル開発機構における高レベル放射性廃棄物に関する安全研究の方針、計画、成果を整理するとともに、日本原子力研究開発機構における安全研究の今後の進め方についても検討を加えた。

核燃料サイクル工学研究所(駐在)：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

+1 研究開発推進室

Outline of Safety Research on High-Level Radioactive Waste Disposal

— Background and Future Study for Safety Research —

Hitoshi SONOBE⁺¹

Geological Isolation Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 7, 2008)

The safety research on the high-level radioactive waste has been conducted by domestic research institutes in order to contribute to the safety standard and guideline determined by safety authority. In the Japan Atomic Energy Agency, it has been conducted aggressively since the previous organization (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Japan Nuclear Cycle Development Institute, and Japan Atomic Energy Research Institute), and the achieved results has been reflected to the documents related to the decision of a basic idea of the safety regulation for disposal of the high-level radioactive waste etc.

The high-level radioactive waste disposal is in the implementation stage, and the Nuclear Waste Management Organization of Japan was established as an implementation body in 2000. The voluntary approach to select preliminary investigation area has been initiated in 2002, and the repository operation will be started between 2030's and middle of 2040's.

As mentioned above, the regulatory and implementation activities have been progressed in parallel, and the basic research and development should contribute to these activities. The Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation(PNC) and Japan Nuclear Cycle Development Institute(JNC), have developed the geological disposal technology of the high-level radioactive waste to contribute the implementation of disposal and the safety regulation. This report describe the outline of the safety research conducted up to now: the policy and the plan of the safety research on the high-level radioactive waste disposal, the summary of results, and future studies required.

Keywords : Safety Research, High-Level Radioactive Waste Disposal, Regulation, Implementation

目次

1. まえがき	1
2. 安全研究に関する最近の国の動向	2
2.1 国の方針及び計画	2
2.2 安全研究年次計画の策定(平成12年3月)	3
2.3 原子力の重点安全研究計画の策定(平成16年7月)	4
2.4 重点安全研究計画における高レベル放射性廃棄物処分に関する研究	5
2.5 重点安全研究計画の評価	5
2.6 重点安全研究計画に沿った研究課題の取組状況	6
3. 動燃事業団及びサイクル機構における高レベル放射性廃棄物処分に関する安全研究	6
3.1 安全研究の基本方針	6
3.2 安全研究基本計画	8
3.2.1 平成3年度～平成7年度	8
3.2.2 平成8年度～平成12年度	8
3.2.3 平成13年度～平成17年度	9
3.3 安全研究成果の概要	10
3.3.1 昭和61年度～平成2年度	10
3.3.2 平成3年度～平成7年度	10
3.3.3 平成8年度～平成12年度	10
3.3.4 平成13年度～平成17年度	10
3.4 まとめ	10
4. 今後の進め方	11
5. あとがき	11
謝辞	12
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Trend concerning of safety research in Japan	2
2. 1 Policy and plan of Japan	2
2. 2 Safety research annual plan (March, 2000)	3
2. 3 Safety research plan of nuclear power(July, 2004)	4
2. 4 Research on high-level radioactive waste disposal in safety research plan	5
2. 5 Evaluation of safety research plan	5
2. 6 Status of safety research plan	6
3. Safety research on high-level radioactive waste disposal in PNC and JNC	6
3. 1 Basic policy of safety research	6
3. 2 Safety research basic plan	8
3. 2. 1 From 1991 to 1995 fiscal year	8
3. 2. 2 From 1996 to 2000 fiscal year	8
3. 2. 3 From 2001 to 2005 fiscal year	9
3. 3 Outline of results of safety research	10
3. 3. 1 From 1986 to 1990 fiscal year	10
3. 3. 2 From 1991 to 1995 fiscal year	10
3. 3. 3 From 1996 to 2000 fiscal year	10
3. 3. 4 From 2001 to 2005 fiscal year	10
3. 4 Conclusion	10
4. Future Development	11
5. Postscript	11
Acknowledgement	12
References	13

1. まえがき

我が国の放射性廃棄物の取り扱いについては、昭和 51 年 10 月に原子力委員会が基本方策を示している¹⁾。この中で、高レベル放射性廃棄物については、当面、地層処分に重点を置き、処分方法の調査研究を進めることとされた。また、調査研究を含む研究開発については、その中核を動力炉・核燃料開発事業団(以下、「動燃事業団」という)及び日本原子力研究所とし推進することが述べられている。これを受け動燃事業団は、昭和 52 年度から高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する調査研究を開始した(昭和 62 年 6 月に原子力委員会が定めた「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」では、動燃事業団が中核推進機関とされた)。その後、動燃事業団の後身となる核燃料サイクル開発機構(以下、「サイクル機構」という)に至るまでの間、関連する研究開発を着実に進展させ、得られた成果を節目ごとに技術報告書としてまとめ、国へ提出するとともに公表してきた。この間の代表的な技術報告書を以下に示す。

- ・高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 ー平成 3 年度ー²⁾(以下、「第 1 次取りまとめ」という)
- ・わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー³⁾(以下、「第 2 次取りまとめ」という)
- ・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 ー平成 17 年取りまとめー⁴⁾(以下、「H17 取りまとめ」という)

国は、「H17 取りまとめ」を除くこれらの技術報告書について技術的な観点だけでなく、社会的な側面からも評価を行っており、第 2 次取りまとめに対しては、『我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性が示されているとともに、処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されている』とし、『地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となる』との評価を与えるとともにこれらの評価結果を公表している⁵⁾。

上記の進展などを踏まえ、国は平成 12 年 6 月に「特定放射性廃棄物[※]の最終処分に関する法律」(以下「特廃法」という)を公布し、高レベル放射性廃棄物の最終処分を計画的かつ確実に実施させるために必要な措置等が制度化された。同年 10 月には、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」及び「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」(以下「最終処分計画」という)が、閣議決定を経て定められるとともに、高レベル放射性廃棄物処分の実施主体として原子力発電環境整備機構(以下、「NUMO」という)が設立された。NUMO は、特廃法に基づいて、処分のための資金として電気事業者等から拠出金の徴収を行うほか、高レベル放射性廃棄物の最終処分事業として、概要調査地区、精密調査地区及び最終処分施設建設地の選定、最終処分施設の建設、最終処分、最終処分施設の閉鎖、そして閉鎖後管理という順で事業を進めていくことになっている。平成 14 年に NUMO は、国内における高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募に着手しており、平成 40 年代後半までに処分場の操業開始を目指した事業活動が展開されている。

特廃法では、NUMO が最終処分を行う場合についての安全の確保のため、別に法律を制定し、規制を行うと定めている。原子力安全委員会では、そのための検討を進めている。

※ 発電用原子炉の使用済燃料の再処理後に残存する高レベル放射性廃棄物を固形化したものをいう。

一方で、国が行う安全基準、審査指針類の策定への寄与等を主目的に、国内の研究機関の間で安全研究が進められてきた。日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という)においても、これまでに国の方針等に沿って旧法人(動燃事業団、サイクル機構、日本原子力研究所)の頃から、安全研究を精力的に進めてきており、得られた成果の一部は、原子力安全委員会が策定した高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方の策定などの検討に反映されている⁶⁾。

以上のように、高レベル放射性廃棄物を取り巻く情勢は、安全規制と事業化が並行して進んでおり、これらを支える研究開発の成果はそれらへの反映が求められる。JAEA 発足前の動燃事業団、サイクル機構では、これらの状況を踏まえ、処分事業と安全規制の両者に反映させることを念頭に高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発プロジェクトとして、安全研究を視野に入れた研究開発を進めてきた。ここでは、特に高レベル放射性廃棄物について、社内で安全研究に関する方針や計画が明確に示された昭和 61 年度から平成 17 年度を対象に、安全研究の側面からこれまでの研究開発の進展の概要を整理した。また、JAEA 地層処分研究開発部門における安全研究の今後の進め方についても検討を加えた。

2. 安全研究に関する最近の国の動向

2.1 国の方針及び計画

原子力安全委員会が定めた安全研究年次計画⁷⁾によれば、国が推進する安全研究は、安全審査指針類の整備や安全審査等の判断に必要なデータ等の整備において、常に最新の技術的知見を安全規制に反映させること。また、安全規制の基盤となる知見を蓄積することなどにより、高いレベルでの安全規制体制の実現・維持に貢献するものであること。我が国の原子力開発利用の新たな進展に対して安全規制の面からの確な対応を図っていく上で重要な役割を果たし、さらには、我が国の原子力安全に関する研究、技術水準の維持・向上及び人材等の確保に貢献することによる我が国の原子力の安全を維持する基盤としての役割も重要との見解を示している。

その中で、原子力安全委員会が推進する安全研究の範囲は以下のとおり記載されている。

- ・安全規制からの要求に応える研究であり、国の安全審査等に係る各種指針類、安全審査における判断等に必要と考えられるデータの整備等を目的とした研究、原子力施設の事故・故障等の評価に関する研究、新たな安全評価手法の安全規制への活用に関する研究等が含まれる
- ・放射線の人体への影響に関する研究
- ・原子力施設の安全性の向上を目的とした研究
- ・原子力防災対策に資する研究

上記のような観点から、原子力安全委員会は、国の試験研究機関等(以下、「研究実施機関」という)で実施すべき研究課題を示した「安全研究年次計画」を概ね 5 年ごとに策定し、その推進を図ってきた。安全研究年次計画は、研究実施機関から安全研究として提案された研究課題を踏まえて、原子力安全委員会の原子力安全研究専門部会の下に、原子力施設等安全研究分科会、環境放射能安全研究分科会、放射性廃棄物安全研究分科会の 3 つの分科会を設置して、安全研究年次計画の策定及び成果の評価等を行ってきた。

2.2 安全研究年次計画の策定(平成12年3月)

放射性廃棄物に関する計画として平成12年3月に、「放射性廃棄物安全研究年次計画(平成13年度～平成17年度)」⁸⁾が策定、公表されている。日本原子力研究所、サイクル機構等の特殊法人や関係する独立行政法人、大学等の研究実施機関は、この安全研究年次計画に基づき高レベル放射性廃棄物を含む放射性廃棄物全般の安全研究を実施してきた。以下に主要な研究実施機関を示す。

- ・(独)JAEA(旧日本原子力研究所、旧サイクル機構)
- ・(独)原子力安全基盤機構
- ・(独)放射線医学総合研究所
- ・(独)産業技術総合研究所
- ・(財)電力中央研究所
- ・(財)原子力環境整備促進・資金管理センター

原子力安全委員会は、安全研究年次計画の中で特に我が国の安全規制に必要な知見を得ることを目的に、以下の4つの観点から安全研究課題全体の中で特に優先的に取り組むべき重点分野を定めており、重点的な推進を図るための指標としている。

- ・概ね5年から10年後の原子力開発利用を踏まえ、安全審査等に用いる指針類の策定や、安全性の判断等に必要データの整備等により、安全規制へ成果の活用が期待できるもの
- ・放射線障害防止に成果の活用が期待できるもの
- ・原子力防災対策に成果の活用が期待できるもの
- ・我が国の原子力安全に関する技術水準の維持、向上や人材の育成、確保への寄与に著しい効果が期待できるもの

また、原子力安全委員会が定めた重点分野のうち、放射性廃棄物に関連するものは、以下のとおりである。

- ・高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究
- ・RI・研究所等廃棄物の浅地中処分に係る安全評価手法に関する研究
- ・TRU核種を含む放射性廃棄物の安全評価に関する研究
- ・クリアランスレベル検認技術に係る研究

原子力安全委員会は、重点研究分野の研究進捗状況を確認し、研究成果の達成見通し等を総合的に検討して、原子力開発利用の進展等の状況に応じて、年度ごとに見直しを行うとしている。この見直しについては、必要に応じて安全研究専門部会、規制行政庁などの関係行政機関、研究実施機関等からの意見も参考にされる。また、原子力安全委員会は、安全研究年次計画の計画開始後概ね3年目に研究課題ごとに成果の達成度や達成見込み等の観点から、評価、検討を行い、必要に応じて計画の見直し等を図ることとし、さらに、計画終了時には、研究成果の達成度及び成果の活用の可能性の観点から評価、検討を行うこととしてきた。

2.3 原子力の重点安全研究計画の策定(平成 16 年 7 月)

近年発生した原子力関連施設におけるトラブルなどにより、原子力安全の確保や安全規制に係る状況が変化し、また、平成 13 年度の放射線医学総合研究所の独立行政法人化、平成 15 年度の原子力安全基盤機構の設立、さらには、日本原子力研究所とサイクル機構の廃止・統合により独立行政法人として平成 17 年度に JAEA が設立されるなど、安全研究を担う研究実施機関の体制も変化している。

このため、原子力安全委員会は、原子力安全に関して解決すべき課題に対し確実に取り組むことや、今後、重点的に実施すべき安全研究の内容や実施体制について、明確な基本方針を打ち出すこととした。そのため、我が国の原子力安全に関する研究活動の現状を国、民間を問わず広く俯瞰・把握しつつ、原子力安全委員会や規制行政庁が行う原子力安全に関する規制の向上に向けて、特に必要となる研究成果を得るために重点的に進めるべき安全研究やその推進体制等を「原子力の重点安全研究計画」⁹⁾(以下、「重点安全研究計画」という)として策定し、平成 16 年 7 月に公表した。この重点安全研究計画は、これまでの安全研究年次計画において、安全規制上必要となるニーズが明確に示されていなかったことや、安全研究の成果をどのように原子力安全の確保のための施策に反映するかを明示してこなかったことなど、原子力安全委員会自身の反省を踏まえて策定されている。従って、重点安全研究計画は、原子力安全委員会による安全規制の基本的考え方の取りまとめ、規制行政庁の安全審査結果をダブルチェックするための指針の整備、規制行政庁の安全審査に必要な規格、安全基準の整備等、原子力安全委員会及び規制行政庁が行う原子力安全の確保のための安全規制の向上に向けた方針や安全研究項目が示されている。特に必要な研究成果を得るために重点的に進めるべき安全研究を原子力安全委員会自らが提示した形となっている。また、重点安全研究計画では、重点安全研究の範囲や内容を提示するだけでなく、研究成果を原子力安全の確保のための安全規制の向上に向けた施策に円滑に取り込むことを含め、安全研究が的確に推進されるための実施体制のあり方について、基本的な考え方を示している。原子力安全委員会は、この計画が安全研究を担う研究実施機関に対して、機関独自が定める安全研究計画立案に際しても明確な目標となることを期待している。

なお、原子力安全に係る安全性実証、信頼性実証に関する事業や安全技術の調査等における研究(実証研究)については、従来、安全研究年次計画には含まれていなかった。しかし、近年の実証研究の内容から単に安全性、信頼性を実証するだけでなく、原子力安全の確保のための安全規制に資するものとなっていることから、重点安全研究計画ではこれらの実証研究を安全研究の範囲に含めている。重点安全研究計画の研究分野のうち、放射性廃棄物に関連するものは、「IV.放射性廃棄物・廃止措置分野」とされ、構成は以下のとおりとされている。

- ・IV.放射性廃棄物・廃止措置分野
 - ・高レベル放射性廃棄物の処分
 - ・高 β γ 廃棄物、TRU 廃棄物、ウラン廃棄物等の処理・処分
 - ・廃止措置技術

2.4 重点安全研究計画における高レベル放射性廃棄物処分に関する研究

高レベル放射性廃棄物の処分については、特廃法において処分施設建設地の選定に当たっては、3段階(概要調査地区選定、精密調査地区選定、最終処分施設建設地選定)に分けた選定を行うことが定められている。原子力安全委員会としては、既に概要調査地区選定のための環境要件を定めているが、概要調査地区が選定されると、次の段階として精密調査地区の選定作業が開始されることになっており、精密調査地区選定のための環境要件や基本指針について検討を進めていく必要がある。このための研究内容としては、調査の際に考慮すべき地質環境データ等の評価、精密調査地区の選定条件の設定、安全評価の基本的考え方(評価時間枠の取扱い、安全指標等)、人工バリアの長期健全性評価の信頼性向上に関する研究等が重要であるとし、得られる成果は、原子力安全委員会が定める環境要件、基本指針、指針の策定等への活用を期待している。また、規制行政庁においては、処分場の建設から事業廃止に至るまでの安全規制の実施に当たって必要な法令や安全基準の策定等への活用を期待している。

2.5 重点安全研究計画の評価

重点安全研究計画の評価は、従前の安全研究年次計画と同様、実施後3年目を目途に進捗状況(安全研究の進捗、実施されていない安全研究の有無等)や成果の活用状況について、中間評価が実施される。中間評価の結果に基づき、必要に応じて関係省庁等に対して、その後の安全研究の推進のために重要と考えられる事項を指摘するとともに、併せて重点安全研究計画の必要な見直しを行い、次期重点安全研究計画の策定に反映される。

重点安全研究計画終了後は、重点安全研究計画の達成状況、成果の活用状況に関する総合評価が行われる。総合評価の結果に基づいて、必要に応じ、関係省庁等に対して意見を示すこととされている。また、重点安全研究計画で示している重点安全研究の推進体制のあり方についても評価を加え、より改善された推進体制の構築を目指すものとされている。

研究実施機関の多くは独立行政法人であり、安全研究を含む事業の進展については自己評価の他に、第三者機関による事業評価を受ける形となる。これに加え、重点安全研究計画に沿って実施した安全研究については、原子力安全委員会が行う評価も受けることになる。因みに原子力安全委員会の評価の観点には以下のとおりとされている。

- ・現行の安全規制の基本的考え方、指針、安全基準等に研究成果が反映されたか、現行の安全規制の高度化につながる成果や知見が得られたか
- ・新たな安全規制の基本的考え方、指針、安全基準等に研究成果が反映されたか、新たな安全規制体系を構築するために必要な成果や知見が得られたか、安全確保の基本的考え方等の概念の拡張につながる成果や知見が得られたか
- ・学協会標準等、民間による安全基準の作成に当たり研究成果が活かされたか、原子力施設の安全性の維持・向上につながる成果や知見が得られたか
- ・安全研究の推進体制が十分であったか

上記の評価を行うに際しては、研究実施機関のみならず、安全研究の成果を活用する規制行政庁の意見を踏まえることや、評価作業のために研究実施機関に過大な負担をかけないこと、などの留意点も示されている。

2.6 重点安全研究計画に沿った研究課題の取組状況

原子力安全委員会では、平成 18 年 7 月に重点安全研究計画に沿って研究実施機関が行ってきた安全研究課題の取組状況について調査した結果¹⁰⁾を公表している。これによれば、「高レベル放射性廃棄物の処分」分野については、重点安全研究計画に掲げられた研究内容に沿って、各研究実施機関において研究課題が実施されており、重点安全研究計画に述べたとおり、引き続き、これらの研究課題の実施及び成果の活用が期待される、と評価している。同時に精密調査地区選定のための環境要件及び安全審査基本指針の策定のために必要な情報の蓄積や研究成果の取りまとめを期待している。

一方、規制行政庁の動向としては、経済産業省 原子力安全・保安院において、地層処分のための安全規制の整備が進められている。原子力安全・保安院は、平成 18 年 9 月 11 日に開催された総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会の廃棄物安全小委員会がまとめた放射性廃棄物の地層処分の安全規制制度のあり方に関する報告書¹¹⁾を公表した。政府はこれらを踏まえ、平成 19 年の通常国会に高レベル放射性廃棄物や長半減期低発熱放射性廃棄物 (TRU 廃棄物) の地層処分のための安全規制を盛り込んだ原子炉等規制法の改正案を提出した。この改正案は、同年 6 月に成立した。今後は、必要な技術基準についても整備が進められることになっている。なお、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会の検討において活用された、放射性廃棄物の処分に向けた安全規制等の制度整備の現状を参考に作成した一覧を表-1 に示す¹²⁾。

3. 動燃事業団及びサイクル機構における高レベル放射性廃棄物処分に関する安全研究

動燃事業団及びサイクル機構における安全研究は、当時の法人として定めた以下の方針、計画に沿って、主に高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関するプロジェクトの研究開発計画と密接なにかかわりを持たせつつ推進されてきた。

- ・「安全研究の基本方針」(昭和 61 年 3 月策定)¹³⁾
- ・「安全研究基本計画(平成 3 年度～平成 7 年度)」(平成 3 年 3 月策定)¹⁴⁾
- ・「安全研究基本計画(平成 8 年度～平成 12 年度)」(平成 8 年 3 月策定)¹⁵⁾
- ・「安全研究基本計画(平成 13 年度～平成 17 年度)」(平成 12 年 10 月策定)¹⁶⁾

ここでは、動燃事業団及びサイクル機構における高レベル放射性廃棄物処分に係る安全研究に関する方針、計画、成果について整理する。

3.1 安全研究の基本方針

原子力安全委員会によって策定された以下の安全研究年次計画を踏まえ、当時の動燃事業団において実施すべき安全研究の基本的考え方となるものを動燃事業団の安全研究の基本方針として示した。

- ・原子力施設等(昭和 61 年度から 5 ヶ年)
- ・環境放射能(昭和 61 年度から 5 ヶ年)
- ・低レベル放射性廃棄物(昭和 59 年度から 5 ヶ年)
- ・高レベル放射性廃棄物等(昭和 61 年度から 5 ヶ年)

この基本方針では、原子力安全委員会によって策定された安全研究年次計画において動燃事業団が担当する研究項目の他に、原子力安全委員会が安全研究年次計画を改定する機会に、動燃事業団の担当する追加研究項目、安全性向上に関する研究項目も対象とされ、毎年、内外の情勢の変化を考慮し、適切な時期に見直しを行うとされていた。

当時の動燃事業団の安全研究は、新型動力炉及び核燃料サイクル施設の開発のための研究の一環として行われており、動燃事業団が所有する施設及びその設計、建設、運転、並びに管理を通じて得た技術の蓄積を背景に、安全研究を実施することで、以下の項目を遂行していく必要性を示している。

- ・施設の安全性確保による原子力に対する国民の信頼性の増進
- ・民間への技術協力ないし技術移転を円滑に遂行するための蓄積技術の体系化、及び技術の高度化

- ・安全裕度の適正化による原子力の経済性の向上

上記を遂行するため、以下の分野の安全研究を積極的に実施することとしていた。

- ・施設の通常運転時の安全性向上のための研究
- ・事故の予知、防止、緩和のための研究
- ・安全性評価のための研究
- ・安全基準等の整備のための研究

また、効率的な安全研究の実施の観点から、以下の2点に十分留意することとしていた。

- ・安全研究項目の設定にあたっては、安全研究の体系的な検討により、未解決課題を的確に把握するとともに、規制当局、産業界の要望、並びに国際的な動向等を十分に考慮する。
- ・安全研究成果の他部門による有効利用を図るとともに、安全研究の効率的な実施体制の確立を図る。

上記を踏まえ、放射性廃棄物処分の安全研究に関する基本方針は、以下のように定められた。

(1) 処分に関する研究開発

地層処分及び陸地処分の実施に備え、処分システムの検討、固化体・人工バリアの開発・評価、天然バリアについての検討、安全評価手法の整備及び評価に用いるデータの蓄積、並びにモニタリング手法の確立等を進める。

(2) 減容、安定化処理技術の開発

減容、安定化処理技術の確立したものに関しては、その処理作業を進めるとともに、処理技術の未確立なものに関してはその開発を行う必要がある。なお、安定固化体は、貯蔵、輸送、処分に適した耐久性、閉じ込め性能等諸性能を備えたものでなければならず、その確認のための試験研究を規制の動向等を的確に把握しつつ、実施する必要がある。

(3) 国による処分に係わる指針・基準等の策定作業への協力

処分に関する安全評価の考え方の取りまとめ、処分に関する法令・指針・基準、処分施設の設置に関する指針・基準の整備が国を中心に行われる予定であるが、動燃事業団としては考え方の取りまとめを行い、その結果を積極的に国へ提案していく必要がある。

このうち、高レベル放射性廃棄物処分の安全研究は、(1)、(3)の方針に沿って安全研究を進めてきている。また、上記の方針は、平成 10 年 10 月に動燃事業団を改組し発足したサイクル機構にも引き継がれている。

この当時に定めた、高レベル放射性廃棄物に関する研究課題を抜粋したものを表-2 に示す。

3.2 安全研究基本計画

安全研究基本計画は、昭和 62 年 8 月に当時の動燃事業団の中長期事業計画が策定されたこと、及び平成 2 年 9 月に原子力安全委員会の安全研究年次計画(平成 3 年度～平成 7 年度)が策定されたことを契機に、安全研究の基本方針を見直し、作成されたものである。

以下に各期間の安全研究基本計画における高レベル放射性廃棄物処分に関する部分の抜粋を示す。

3.2.1 平成 3 年度～平成 7 年度

動燃事業団は、昭和 62 年に原子力委員会が定めた「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」において、高レベル放射性廃棄物処分の研究開発の中核機関として位置づけられており、処分の実現可能性を評価するための研究を実施してきている。当時の当面の目標とする処分の安全確保方策の有効性を評価するための研究は、処分の安全性を評価するための研究と一体のものであることが平成 2 年に原子力安全委員会が策定した「高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画(平成 3 年度～平成 7 年度)」の検討の中で共通認識として得られており、動燃事業団の安全研究基本計画においてもその考え方が踏襲されている。この期間のまとめり課題は以下のとおりである。また、まとめり課題毎の研究課題一覧を表-3 に示す。

- (1) 高レベル廃棄物地層処分の安全性に関する基本的な研究
- (2) 高レベル廃棄物の多重バリアシステムの安全評価に関する研究
- (3) 高レベル廃棄物処分の総合安全評価手法に関する研究

3.2.2 平成 8 年度～平成 12 年度

この時期の動燃事業団は、我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の確立を目指した研究開発を、国が定めた研究開発の進め方に則り、その推進機関として実施していた。その結果、地層処分の安全確保方策としての多重バリアシステムの技術的有効性が明らかになりつつある時期でもあった。国の長期計画では、本基本計画の最終年度にあたる平成 12 年頃を目安に処分事業の実施主体の設立を図ることとされていた。また、実施主体は処分予定地を選定し、西暦 2030 年代から遅くとも 2040 年代半ばまでの操業開始を目途として、処分に係る事業の申請を行うこととされた。一方、国は、処分予定地の選定に対し、その結果を確認するとともに、処分に係る事業を許可するにあたり、必要な法制度等の整備を図り、安全審査を行うこととしている。本基本計画においては、国の長期計画に示された高レベル放射性廃棄物の処分スケジュールを念頭に置きつつ、地層処分に係る安全確保の方針、基本的考え方についての研究を進めるとともに、地層処分に係る指針・基準類の策定及び安全性の定量的把握のための研究を着実に進めるものとしている。(平成 10 年 10 月以降はサイクル機構に継承)

この期間のまとめ課題は以下のとおりである。また、まとめ課題毎の研究課題一覧を表-4に示す。

- (1) 地層処分における安全評価の基本的考え方に関する研究
- (2) 高レベル廃棄物地層処分システムの安全評価に関する研究

3.2.3 平成13年度～平成17年度

サイクル機構は、平成9年4月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について」に従い、関連する研究機関等の協力を得て、第2次取りまとめを作成し、平成11年11月に原子力委員会に報告した。

第2次取りまとめは、平成4年に公表した第1次取りまとめの成果を受けて、わが国における地層処分の技術的信頼性を示し、処分事業を進めるうえでの処分予定地の選定、安全基準の策定の技術的拠り所を与えるとともに、国による評価を経て平成12年以降の研究開発を具体化するうえで重要なものと位置づけられていた。

当時の国の計画では、前述のように平成12年に処分事業の実施主体の設立が予定され、実施主体は最終処分施設建設地を選定し、西暦2030年代から遅くとも2040年代半ばまでの操業開始を目途として、処分に係る事業の申請を行うこととされた。一方、国は、実施主体による精密調査地区選定開始時期までに、処分場の設計要件、安全評価に係る安全指標とその基準値、安全評価シナリオ等を定めた安全審査基本指針を策定するなど、事業の進展に合わせて安全の確認が適切に行われるように、安全審査、安全確認等に係る指針・技術基準を策定していくこととされていた。

このように、高レベル放射性廃棄物処分の事業化や制度化の検討が急速に進んでいたことから、処分事業等の具体的進展を考慮し、長期的視野に立った計画的かつ総合的に安全研究を推進する必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分については、今後の安全規制に係る基準・指針類について処分事業の進展に応じた段階的な整備や安全評価手法の確立に資するための研究が喫緊の課題であるとされていた。

本基本計画では、このような研究ニーズを踏まえ、今後、具体的に予定されている安全基準・指針等の策定、安全評価手法やデータの信頼性向上、安全裕度の定量的把握等に資する研究を着実に進めていくものとされた。

この期間のまとめ課題は以下のとおりである。また、まとめ課題毎の研究課題一覧を表-5に示す。

- (1) 安全規制の基本的事項に関する研究
- (2) 地質環境評価手法に関する研究
- (3) 地層処分の安全評価手法に関する研究
- (4) 処分場の設計要件に関する研究

3.3 安全研究成果の概要

3.1 及び 3.2 に示された基本方針、基本計画に沿って遂行してきた安全研究成果は、節目ごとにまとめられてきた。以下にその概要を示す。

3.3.1 昭和 61 年度～平成 2 年度

この期間に得られた成果は、「動燃における安全研究成果(昭和 61 年度～平成 2 年度)(高レベル廃棄物処分分野)」¹⁷⁾として公開されている。これら成果の概要を表-6 に示す。また、ここでの成果は、第 1 次取りまとめに反映されている。

3.3.2 平成 3 年度～平成 7 年度

この期間に得られた成果は、「放射性廃棄物処分安全研究成果(平成 3 年度～平成 7 年度)」¹⁸⁾として公開されている。これら成果の概要を表-7 に示す。また、ここでの成果は、第 2 次取りまとめに反映されている。なお、原子力安全委員会が取りまとめた「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第 1 次報告)」(平成 12 年 11 月)⁶⁾では、地下水移行シナリオにおける一般公衆の線量評価において、第 2 次取りまとめにおける評価結果が引用されている。

3.3.3 平成 8 年度～平成 12 年度

この期間に得られた成果は、「安全研究 5 ヶ年成果(平成 8 年度～平成 12 年度—核燃料サイクル分野)」¹⁹⁾として公開されている。これら成果の概要を表-8 に示す。また、ここでの成果は、H17 取りまとめに反映されている。

3.3.4 平成 13 年度～平成 17 年度

この期間に得られた成果は、「放射性廃棄物安全研究年次計画(平成 13 年度～平成 17 年度)研究成果報告集」²⁰⁾として公開されている。これら成果の概要を表-9 に示す。また、ここでの成果は、H17 取りまとめに反映されている。さらに、一部の成果は第 2 次取りまとめの成果とも併せ、原子力安全委員会が取りまとめた「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」²¹⁾の検討に活用されたほか、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会の廃棄物安全小委員会報告書「高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて」¹²⁾の検討にも活用された。なお、原子力安全委員会の評価では、今後、原子力安全委員会が取りまとめる予定の精密調査地区選定段階において考慮すべき環境要件の検討への活用にも期待されている。

これらの成果のうち、特に放射性核種の移行評価に関する知見は、(社)日本原子力学会において整備が進められてきた「収着分配係数の測定方法—深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順」²²⁾の策定にも活用されており、地層処分において用いられる各種バリア材の収着分配係数の相互比較を、データの信頼性や再現性、適用できる範囲の判断を行なえるよう基本的な測定手順を規定したものとなっており、同学会が進めてきている標準化活動に対しても一定の貢献を果たしている。

3.4 まとめ

上記を踏まえ、国の策定した安全研究に関する方針や計画と、本報告書で取り上げた高レベル

放射性廃棄物処分の安全研究に関する計画、成果などとの関連について整理したものの表－10を示す。表－10からは、時系列の観点からも概ね国の方針や計画と整合のとれた安全研究の遂行がなされてきたことがわかる。

4. 今後の進め方

重点安全研究計画においては今後、国が精密調査地区選定のための環境要件や安全審査基本指針についての検討を進めるうえで、調査の際に考慮すべき地質環境データ等の評価、精密調査地区の選定条件の設定、安全評価の基本的な考え方（評価時間枠の取り扱い、安全指標等）、人工バリアの長期健全性評価の信頼性向上などが重点的な研究テーマとして示されている⁹⁾。また、これを受けたJAEAへの期待の中で、原子力安全委員会が必要とする研究成果として、「安全規制に係る基本的考え方の構築」と「安全評価手法の開発」が挙げられている²³⁾。

JAEAは、このような期待に応えるため、これまでの安全研究成果に基づき、重点安全研究計画に沿った課題の研究を進めていく計画である。一方、関係する研究実施機関との連携を図り、地層処分技術の包括的な研究開発を行う計画である²⁴⁾。この中で研究開発成果の体系化のための具体的なアプローチとして、知識管理システムを開発し、これによって事業の推進や規制の策定に資するための技術基盤を継続的に整備していくことを示している²⁵⁾。こうした研究開発の成果は、透明性、追跡性、客観性、中立性の確保に留意して、適切に重点安全研究計画の課題遂行に反映していく必要がある。

重点安全研究計画の課題遂行や地層処分技術に関する研究開発にあたっては、JAEAが有する多様な研究領域の専門家の豊富な経験と知識、北海道幌延町と岐阜県瑞浪市に整備中の深地層の研究施設、東海研究開発センター内の地層処分放射化学研究施設（QUALITY）、地層処分基盤研究施設（ENTRY）、燃料サイクル安全工学研究施設（NUCEF）など地質環境から人工バリアまでを対象とする幅広い研究施設を効果的に活用するとともに、処分事業や安全規制の動向に柔軟に対応してこれを進めていくことが重要であると考えられる。

5. あとがき

ここでは、安全研究年次計画に沿った高レベル放射性廃棄物地層処分に関する安全研究の位置づけや内容、その成果の概要を、旧動燃事業団及び旧サイクル機構時代に進めてきたプロジェクトとしての研究開発の側面から整理を試みた。その際に留意したことは、地層処分の安全性は、様々な研究の成果を総合して示されるものであり、設定された各研究課題の相互関係を明確にしつつ、その成果を体系的にまとめて国の進める安全規制策定に資するものとなるように配慮した点である。この観点からは、特に深地層の研究施設計画において実施した調査手法の適用性確認、得られた具体的な地質環境のデータや知見などを利用した処分場の設計・安全評価のための手法の信頼性向上、ENTRYやQUALITYなどにおける室内実験、モデル化や関連するデータベース（現在、Web上で公開）などは重要な成果であると考えられる。今後は、関係する研究実施機関との適切な役割分担のもとに高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する安全研究を進めていく。

謝辞

本報告書を作成するにあたり、地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット 油井研究
主席(ユニット長)には、粗稿に目を通して頂くとともに有益な助言を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 原子力委員会、放射性廃棄物対策について、昭和 51 年 10 月
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 ー平成 3 年度ー」、平成 4 年 9 月
- 3) 核燃料サイクル開発機構、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ー地層処分研究開発第 2 次取りまとめー」、平成 11 年 11 月
- 4) 核燃料サイクル開発機構、「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 ー平成 17 年取りまとめー」、平成 17 年 9 月
- 5) 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会、「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」、平成 12 年 10 月
- 6) 原子力安全委員会、「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方(第 1 次報告)」、平成 12 年 11 月 6 日
- 7) 原子力安全委員会、安全研究年次計画について、平成 12 年 7 月
- 8) 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会、「放射性廃棄物安全研究年次計画(平成 13 年度～平成 17 年度)」、平成 12 年 3 月
- 9) 原子力安全委員会 原子力安全研究専門部会、「原子力の重点安全研究計画」、平成 16 年 7 月
- 10) 原子力安全委員会 原子力安全研究専門部会、「重点安全研究計画に沿った研究課題の取組状況等について」、平成 18 年 7 月
- 11) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会、「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」、平成 18 年 9 月
- 12) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会、「高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて」、平成 15 年 7 月
- 13) 核燃料サイクル開発機構、「安全研究基本方針」、JNC TN1400 2002-010、平成 14 年 7 月
- 14) 核燃料サイクル開発機構、「安全研究基本計画(平成 3 年度～平成 7 年度)」、JNC TN1400 2002-011、平成 14 年 7 月
- 15) 動力炉・核燃料開発事業団、「安全研究基本計画(平成 8 年度～平成 12 年度)」、PNC TN1010 96-001、平成 8 年 3 月
- 16) 核燃料サイクル開発機構、「安全研究基本計画(平成 13 年度～平成 17 年度)」、JNC TN1400 2000-010、平成 12 年 10 月
- 17) 動力炉・核燃料開発事業団、「動燃における安全研究の成果(昭和 61 年度～平成 2 年度)(高レベル廃棄物処分分野)」、PNC TN1410 92-049、平成 4 年 4 月
- 18) 動力炉・核燃料開発事業団、「放射性廃棄物処分安全研究の成果(平成 3 年度～平成 7 年度)」、PNC TN1410 97-008、平成 9 年 2 月
- 19) 核燃料サイクル開発機構、「安全研究 5 ヶ年成果(平成 8 年度～平成 12 年度ー核燃料サイクル分野)」、JNC TN1410 2001-015、平成 13 年 10 月
- 20) 原子力安全委員会、「放射性廃棄物安全研究年次計画(平成 13 年度～平成 17 年度)研究成果報告集」、平成 18 年 3 月

- 21) 原子力安全委員会、「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」、平成 14 年 9 月
- 22) 日本原子力学会、「日本原子力学会標準 収着分配係数の測定方法－深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順:2006」、平成 18 年 8 月
- 23) 原子力安全委員会、「日本原子力研究開発機構に期待する安全研究」、平成 17 年 6 月
- 24) 日本原子力研究開発機構、「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画(中期計画)(平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日)」、平成 17 年 10 月
- 25) 核燃料サイクル開発機構、「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－ ー地層処分技術の知識化と管理ー」、JNC TN1400 2005-020、平成 17 年 9 月

表-1 放射性廃棄物処分等の制度化等に関する検討状況

対象廃棄物			原子力安全委員会			関係法令		
			安全規制の考え方	処分場の制限等	個別施設の審査方法	安全規制の枠組み	廃棄体に係る埋設濃度上限値等	技術基準(廃棄体、施設)
高レベル放射性廃棄物			検討済み	今後検討予定		原子炉等規制法の改正<2007年6月成立>	今後制定予定	
低レベル放射性廃棄物	原子炉施設から発生する廃棄物	炉心等廃棄物(仮称)	検討済み		今後検討予定	原子炉等規制法	制定済み	今後制定予定
		低レベル放射性廃棄物(固化体)	検討済み				制定済み	制定済み(大型金属廃棄物は除く)
		極低レベル放射性廃棄物	検討済み		検討済み(金属等廃棄物は除く)		制定済み	制定済み(金属等廃棄物は除く)
	TRU廃棄物	検討済み	今後検討予定		今後制定予定			
	ウラン廃棄物	検討中						

(本資料は、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会報告書 「高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて」(平成15年7月8日)を参考に最近の進捗を踏まえ作成したものである。)

表-2 動燃事業団における安全研究課題(昭和61年度～平成2年度)

＜高レベル放射性廃棄物処分研究関連のみ抜粋＞

1. 地層処分施設の耐震性に係る信頼性評価に関する研究
2. オーバーパック、緩衝材等の人工バリア材料性能の信頼性評価に関する研究
3. 人工バリアシステムの性能の信頼性評価に関する研究
4. 人工バリアに係るナチュラルアナログ研究
5. 天然バリアへの核種吸着特性評価に関する研究
6. 天然バリアの熱的・力学的・水理学的特性の信頼性評価に関する研究
7. 天然バリアに係わるナチュラルアナログ研究
8. 地層処分システム性能の信頼性評価に関する研究

(核燃料サイクル開発機構, 平成14年7月*)

* 初版は昭和61年3月策定、平成14年7月に公開

表-3 動燃事業団における安全研究課題(平成3年度～平成7年度)

＜高レベル放射性廃棄物処分研究関連のみ抜粋＞

1. 高レベル廃棄物地層処分の安全性に関する基本的な研究
 - 1-1 安全に関する基本的考え方と安全評価の考え方等に関する研究
 - 1-2 安全評価シナリオに関する基礎的な研究
 - 1-3 地層処分システムの長期安定性に関する研究
 - 1-4 安全評価に用いる解析手法・モデル・データの品質保証に関する研究
2. 高レベル廃棄物の多重バリアシステムの安全評価に関する研究
 - 2-1 人工バリア要素の安全評価に関する研究
 - 2-2 人工バリアシステムにおける放射性核種の移行に関する研究
 - 2-3 人工バリアのナチュラルアナログ研究
 - 2-4 地下水の水理地質学的特性に関する研究
 - 2-5 地下水の地球化学的特性に関する研究
 - 2-6 天然バリアにおける放射性核種の移行に関する研究
 - 2-7 天然バリアのナチュラルアナログ研究
 - 2-8 地質環境予測に関する研究
 - 2-9 地層処分システムの地震動特性に関する研究
 - 2-10 人工バリアとその周辺岩盤との相互作用に関する研究
3. 高レベル廃棄物処分の総合安全評価手法に関する研究
 - 3-1 地層処分システムの総合安全評価手法に関する研究
 - 3-2 地層処分システムの確率論的評価手法に関する研究

(核燃料サイクル開発機構, 平成14年7月*)

* 初版は平成3年3月策定、平成7年1月に改訂後、平成14年7月に再改訂され最終版として公開

表-4 動燃事業団における安全研究課題(平成8年度～平成12年度)

＜高レベル放射性廃棄物処分研究関連のみ抜粋＞

1. 地層処分における安全評価の基本的考え方に関する研究
 - 1-1 安全に関する基本的考え方と安全評価の考え方等に関する研究
 - 1-2 安全評価シナリオに関する研究
 - 1-3 地質環境の長期安定性に関する研究
2. 高レベル廃棄物地層処分システムの安全評価に関する研究
 - 2-1 人工バリア要素の安全性に関する研究
 - 2-2 人工バリア中核種移行評価に係るデータベース整備
 - 2-3 人工バリアのナチュラルアナログ研究
 - 2-4 人工バリア等の構造安定性に関する研究
 - 2-5 人工バリアの長期物理的安定性に関する研究
 - 2-6 放射性廃棄物処分における微生物影響に関する研究
 - 2-7 地下水流動モデルの確立に関する研究
 - 2-8 地下水の地球化学的特性に関する研究
 - 2-9 天然バリアにおける放射性核種の移行に関する研究
 - 2-10 天然バリアのナチュラルアナログ研究
 - 2-11 地質環境の適性評価手法に関する研究
 - 2-12 地震動が地質環境特性に与える影響に関する研究
 - 2-13 人工バリアとその周辺岩盤との相互作用に関する研究
 - 2-14 地層処分システムの総合安全評価手法に関する研究
 - 2-15 地層処分システムの確率論的評価手法に関する研究
 - 2-16 安全評価に用いる解析手法・コード・データの品質保証に関する研究

(動力炉・核燃料開発事業団, 平成8年3月)

表－5 サイクル機構における安全研究課題(平成13年度～平成17年度)

＜高レベル放射性廃棄物処分研究関連のみ抜粋＞

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. 安全規制の基本的事項に関する研究<ol style="list-style-type: none">1-1 安全評価の基本的考え方等に関する調査研究2. 地質環境評価手法に関する研究<ol style="list-style-type: none">2-1 環境変動に伴う地質環境の安定性評価に関する研究2-2 結晶質岩に関する地質環境評価手法に関する研究2-3 堆積岩に関する地質環境評価手法に関する研究2-4 地質環境におけるナチュラルアナログ研究3. 地層処分の安全評価手法に関する研究<ol style="list-style-type: none">3-1 安全評価シナリオに関する研究3-2 安全評価モデルの体系化・高度化に関する研究3-3 安全評価におけるシナリオ、モデルの不確実性に関する研究3-4 地下水水質形成モデルの検証及び高度化に関する研究3-5 深部地下環境下における核種移行データの取得及びデータベースの整備4. 処分場の設計要件に関する研究<ol style="list-style-type: none">4-1 人工バリア及び岩盤の長期挙動に関する研究4-2 人工バリア等の性能保証に係る工学技術研究4-3 人工バリアのナチュラルアナログ研究 |
|---|

(核燃料サイクル開発機構, 平成12年10月)

表－6 安全研究成果の概要(昭和61年度～平成2年度)

項目	研究成果
(1) 人工バリアに係る研究	<p>地層処分施設の耐震性に係る信頼性に関し、地下深部における地震特性を実測把握するとともに、人工バリア材の基本特性に関し、オーバーパック材の腐食、緩衝材等の水理・熱特性等の把握、及び緩衝材中の核種移行挙動の試験、ガラス固化体の浸出挙動について実固化体及び模擬固化体を用いた試験をそれぞれ進め、人工バリアシステムの基本特性の確認及び性能評価のモデル化に資した。なお、ここで得られた知見は、性能評価研究施設(のちの地層処分基盤研究施設(ENTRY))の設計並びに試験方法、試験条件の設定等に反映された。</p>
(2) 天然バリアに係る研究	<p>天然バリアの核種吸着の基本特性につき岩石への吸着試験等により把握し、また天然バリアの力学的、水理学的特性について既存坑道等で実測した。また、東濃鉱山の天然ウラン鉱床の試料あるいは火山ガラス、土壌中に埋設された金属試料を分析して天然バリア及び人工バリアについてのナチュラルアナログ研究を行い、それらの長期的安定性に関する挙動把握を進め、長期性能評価に関するモデル化に資した。本研究により、天然バリアの吸着機構を考慮した長期閉じ込め性能評価のモデル化に資するデータが蓄積された。</p>
(3) 総合安全評価に係る研究	<p>ニアフィールド性能評価モデル「AREST-PNC」を開発し、コーディングを行った。また、このモデル等を用いて解析を実施して人工バリア及び天然バリアの性能の概括的評価を行い、地層表面への核種移行の機構についての知見を得た。</p>

(動力炉・核燃料開発事業団, 平成4年4月)

表-7 安全研究成果の概要(平成3年度~平成7年度)

項目	研究成果
(1) 高レベル廃棄物地層処分の安全性に関する基本的な研究 ①安全に関する基本的考え方と安全評価の考え方等に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・安全基準の策定にあたっては、倫理的観点や安全指標、時間枠について配慮を行うことが重要である。また、制度的管理や将来の人間活動に対する考え方の議論が必要。 ・確率論的評価、決定論的評価などの安全評価の方法論について検討しておくことが肝要であり、特に技術論の枠をこえるような議論には規制面でのルール化を図るよう適切な措置が求められる。 ・安全性の指標は、線量が最大となる時間までの評価を行うとともに、線量に併せて放射性核種放出率等の指標による評価を行っておくことが適切と考えられる。
②安全評価シナリオに関する基礎的な研究	<ul style="list-style-type: none"> ・シナリオ開発の一般的枠組みに基づきシナリオ開発を進めた。 ・FEP又はそれらに関する個々の因子の安全評価指標に対する感度を網羅的に解析評価するための手法を地下水シナリオを対象として開発した。 ・安全性に影響を与える可能性のある現象を抽出し、102のFEPリストとしてまとめ、相互関係及び因果関係を整理した。 ・核種移行プロセスとの関連を類型化、リスト化し、インフルエンスダイアグラムを作成するとともに、これらの影響を評価するための手順、手法を整理した。 ・主要なシナリオを分類、整理し、安全評価の予備的評価シナリオの作成に対する見通しを得た。 ・シナリオの開発を容易にするツールを開発するとともに、シミュレーションを具体化するために必要なモデルの調査、検討を行った。
③地層処分システムの長期安定性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・気候・海面変動、断層活動、火山活動、隆起・侵食について、将来変化予測に必要な日本列島における各現象の分布や地質時代の変動範囲、変動規模に関して、過去の時間的・空間的変遷を明らかにした。
④安全評価に用いる解析手法・モデル・データの品質保証に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・データの品質保証プログラム及び履歴管理システムを具体化した。
(2) 高レベル廃棄物の多重バリアシステムの安全評価に関する研究 ①人工バリア要素の安全評価に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・可溶性元素、難溶性元素の溶解挙動をモデル化した。ガラスの長期の耐放射線性を有することを明らかにした。 ・炭素鋼オーバーパックの全面腐食と局部腐食モデルを開発した。 ・イライト化の結晶化学的変化を明らかにした。

項目	研究成果
②人工バリアシステムにおける放射性核種の移行に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・Pu、Am等のベントナイトに対する分配係数を取得するとともに、ベントナイトへの主要14核種の分配係数を取りまとめた。 ・炭素鋼及びマグネタイト共存下でのガラスの浸出挙動を把握した。 ・電気二重層理論に基づいたベントナイト中での拡散モデルを構築した。
③人工バリアのナチュラルアナログ研究	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア構成要素単独の条件での長期挙動を明らかにした。
④地下水の水理地質学的特性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水流動特性評価に必要な調査、解析、評価技術などの要素技術を開発し、各手法の適用範囲や基本性能を確認した。 ・地下水流動解析手法及び地下水流動特性プロセスの妥当性を確認するとともに、東濃鉱山周辺領域を対象とした調査解析において、要素技術の有効性・適用性の確認を行った。
⑤地下水の地球化学的特性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積岩中の地下水起源、年代など地球化学特性値の分布、水質形成機構、地下水の酸化還元電位などを把握した。花崗岩中の地下水の物理化学パラメータを把握した。 ・原位置において地下水のpHや酸化還元電位などの物理化学パラメータを測定する装置の製作を完了。
⑥天然バリアにおける放射性核種の移行に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・岩石中の核種移行経路についての知見を得るとともに、岩石の空隙特性と核種の拡散挙動に相関関係があることが示された。
⑦天然バリアのナチュラルアナログ研究	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積岩中の物質移行経路、花崗岩割れ目からのマトリックス拡散、地下水中のコロイドの核種移行への寄与、東濃ウラン鉱床におけるウラン系列核種の長期挙動及び堆積岩、主要構成鉱物のウラン収着特性など、天然バリアの核種遅延機能に関する知見が得られた。
⑧地質環境予測に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積岩中の地下水の水質形成メカニズムを明らかにした。地質環境の安定性や地質環境中での放射性核種の挙動について明らかにした。岩石の熱特性や変形特性及び破壊後挙動を明らかにした。
⑨地層処分システムの地震動特性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・釜石鉱山の地表部から地下深部における地震波の観測等により、地下深部の地震動特性を明らかにした。地震動特性に関する解析から加速度振幅特性の傾向を把握した。 ・地震に伴う地下水の水圧、水質の変化について知見を得た。
⑩人工バリアとその周辺岩盤との相互作用に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・釜石鉱山及び東濃鉱山における掘削影響試験より、掘削影響領域の岩盤物性、掘削損傷、応力再配分などの知見を蓄積した。工学規模試験より熱-水-応力連成解析コードの有効性が確認された。

項目	研究成果
(3) 高レベル 廃棄物処分の 総合安全 評価手法に 関する研究 ①地層処分 システムの 総合安全評 価手法に関 する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・核種移行に関する評価コードの開発、整備を行った。不確実性を有する生物圏での核種移行評価及び被ばく評価を行った。 ・統合システムの開発及び既存コードの整備を行い、人工バリア中の核種移行評価を行った。
②地層処分 システムの 確率論的評 価手法に関 する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・シナリオ、モデル、パラメータ値の不確かさを定量的に扱う確率論的評価手法について、基礎的な知見を得た。

(動力炉・核燃料開発事業団, 平成9年2月)

表-8 安全研究成果の概要(平成8年度~平成12年度)

項目	研究成果
(1) 地層処分における安全評価の基本的考え方に関する研究 ①安全に関する基本的考え方と安全評価の考え方等に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・適切なサイト選定と設計によってロバストなシステムが構築できることを例示したほか、処分場の管理に関する考え方を整理した。 ・シナリオ、モデル、データの信頼性向上を図ったほか、安全評価によって処分システムのロバスト性を確認する方法を例示した。 ・処分予定地選定とサイト特性調査の各段階で実施する調査内容、方法と対応する要件を整理した。また、安全評価の時間スケールに関する考え方を整理した。
②安全評価シナリオに関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・処分システムの安全性に影響を与える可能性のある事象、プロセス、特性を抽出、階層化を行い、シナリオの構成要素を整備した。 ・地下水移行シナリオ設定のための情報の蓄積を図り、基本ケースの変動を含めた地下水移行シナリオを設定した。 ・処分システムの長期挙動を予測するためのシミュレーション手法の開発、整備を行った。
③地質環境の長期安定性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・地質環境の変動等に影響を及ぼす天然現象に関するデータを収集、解析し、我が国の事象の発生の地域性について取りまとめ、データベースに収録した。 ・我が国における地殻変動について長期変動予測モデル開発について見通しを得た。 ・火山活動が地質環境に与える影響範囲を明らかにしたほか、活断層の断層破碎帯と非活断層の断層破碎帯の透水係数について評価した。
(2) 高レベル廃棄物地層処分システムの安全評価に関する研究 ①人工バリア要素の安全性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラスからの核種の浸出の際のコロイド生成や浸出溶液中の濃度評価における溶解度制限固相の妥当性の検討等を進めた。 ・オーバーパックの腐食寿命評価に関して、幅広い環境条件に対する腐食挙動について知見を取得した。 ・ベントナイトの変質現象の一部である鉄型への変化に関して、着実に基礎的情報を拡充した。 ・緩衝材と地下水の相互作用に関する基本定数の整備、モデルの構築及び確認試験を通じて安全評価に用いる緩衝材間隙水水質の導出を行った。 ・放射性核種の緩衝材への収着に関して、溶液中の化学種が比較的単純で熱力学データが整備されている元素のバッチ系での収着については、概ねモデル化が可能であるとの知見を得た。
②人工バリア中核種移行評価に係るデータベース整備	<ul style="list-style-type: none"> ・安全評価上重要な21元素に対し、既存データの調査及び評価を行うとともに、一部の元素に対しては溶解度試験を行い、熱力学データベースの整備を実施した。また、同データベースを用いて、安全評価で用いる溶解度の設定を行った他、設定の妥当性評価を行った。 ・安全評価上重要な22元素に対し、バッチ収着試験および既存データの調査を行いデータベースを構築した。また、拡散係数についても、データ取得を行い、データを拡充するとともに、既存データの調査整理を行った。 ・これらに基づき、第2次取りまとめにおける安全評価で用いる緩衝材への元素の分配係数、緩衝材中の拡散係数の設定を行った。さらに、設定値の保守性、妥当性を確認するため、核種の収着および拡散データを取得し、設定値の妥当性評価を行った。
③人工バリアのナチュラルアナログ研究	<ul style="list-style-type: none"> ・火山ガラスの溶解は溶存ケイ酸に飽和した条件では発生しないことを明らかにするとともに、廃棄物ガラスのアナログとしての適用性を確認した。 ・鉄の数十年間のデータをもとに経験的な腐食速度式を得た。また、銅について、青銅製考古学遺物による純銅の長期挙動評価への適用が可能であることを確認した。 ・イライト化の温度、時間条件を把握した。また、長期にわたって鉄やコンクリートと接触した場合のベントナイトの変質プロセスは、モンモリロナイトの層間におけるイオン交換であることを解明した。

項目	研究成果
④人工バリア等の構造安定性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・力学的安定性の観点から必要となる処分坑道離間距離及び処分孔間隔を具体的に設定した。 ・地震応答解析コードを開発し、その適用性を検討した後、ニアフィールドの耐震安定性解析を実施した。 ・廃棄体、緩衝材の温度が制限を下回る坑道離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせを具体的に設定した。
⑤人工バリアの長期物理的安定性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスによる緩衝材への構造力学的影響や間隙水の排水に伴う核種移行の促進に対する影響はほとんど無く、この事象が人工バリアの物理的安定性にほとんど影響を与えないとの見通しを得た。 ・炭素鋼オーバーパックの自重及び腐食膨張等の緩衝材に作用する外力の影響はほとんどなく、この事象が人工バリアの物理的安定性にほとんど影響を与えないとの見通しを得た。 ・緩衝材の侵入及び浸食現象による密度低下は小さく、この事象が人工バリアの物理的安定性にほとんど影響を与えないとの見通しを得た。
⑥放射性廃棄物処分における微生物影響に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・地下坑道において検出された鉄酸化菌存在下での溶液中のFe^{2+}に対するFe^{3+}の割合の経時変化から、微生物による地下水水質の酸化の可能性に関する知見を取得した。 ・耐性領域については、硫酸塩還元菌、脱窒菌、好アルカリ性メタン生成菌のpH及びEhに対する耐性に関する知見を取得した。 ・緩衝材中の微生物の透過性に着目し、大腸菌を使用し、ナトリウム型ベントナイト及びカルシウム型化ベントナイトの乾燥密度及びケイ砂混合率をパラメータとしたときの微生物の透過性に関する知見を取得した。 ・微生物とベントナイトが共存する系に対するPu、Np及びIの吸着試験を実施し、微生物の核種吸着能に関する知見を取得した。
⑦地下水流動モデルの確立に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・東濃地域において空中物理探査、地上物理探査、地表踏査及び表層水理調査を実施し、地表から地下浅部における地質構造、岩盤の透水性並びに地下水の水圧や水質に関するデータを取得した。 ・深層試錐孔(DH-5～DH-11号孔、MIU-1～3号孔)において地質構造調査及び水理試験を実施し、中・深層の地質構造並びに水理特性の把握を行った。また、各種調査について、試験機器及び調査技術の適用性を確認するとともに、効率的にデータ取得を行うための調査手法を明らかにした。 ・地下水流動モデルの確立に向け、対象スケールや岩相に応じた水理地質構造モデルに考慮すべき地下水流動の支配因子の選択方法、水理地質構造モデル及び地下水流動解析に必要な情報の種類や質、量、物性値の空間分布の推定方法、地下水流動解析手法、水理学的境界条件の設定方法並びに地下水流動解析結果の有する不確実性の評価手法の検討を実施した。
⑧地下水の地球化学的特性に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・東濃地域における地下水の酸化還元電位、水質、含まれる微生物に関するデータを取得した。また、深度1000m付近の地下水の滞留時間をヘリウム同位体法及び炭素同位体法で測定した。 ・花崗岩中の割れ目帯における鉱物観察などを通して、東濃地域の花崗岩中の地下水水質形成過程を検討したほか、地下水の地球化学モデルの構築について検討を実施した。

項目	研究成果
<p>⑨天然バリアにおける放射性核種の移行に関する研究</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・室内試験を通して、岩石に対する放射性核種の拡散係数データ等の取得・蓄積を進め、核種移行解析のためのデータベースへ反映した。 ・分配係数については、花崗閃緑岩及び凝灰岩に対して、安全評価上重要と考えられている22元素に対する分配係数を取得し、データベースへ入力した。 ・拡散係数については、国内の主要岩石を対象として、文献調査に基づいて拡散係数データ等を調査・整理し、4種類に分類した岩種に対してデータベースを整備した。 ・釜石原位置トレーサ試験エリアにおいて、割れ目の地質学的データを収集し、水理応答データに基づいて透水性割れ目を抽出、亀裂性岩盤における水理地質構造を把握した。また、亀裂ネットワーク中核種移行解析コードLTGを開発し、核種移行解析を実施した。 ・不均質性媒体に対する核種移行モデルの開発については、亀裂性媒体に対して、グリムゼル岩盤研究所(スイス)における花崗岩透水性割れ目を対象として、室内試験による拡散係数、分配係数、空隙特性データ及び原位置でのレジン注入試験やウラン系列核種の放射非平衡調査、並びに2孔間トレーサ試験結果に基づいて物質移行経路に関する概念モデルを構築した。 ・割れ目中の移流・分散・収着及びマトリックス部への拡散を考慮した従来の核種移行モデルによりトレーサ試験結果が保守的に表現され、モデルの保守性が示された。また、多孔質性媒体に対しては、モンテリートンネル(スイス)において、難透水性堆積岩を対象としてトリチウム及びヨウ素を用いた室内拡散試験及び原位置拡散試験を実施し、原位置拡散試験からの濃度分布を室内拡散試験データに基づいて予測した結果と比較し、核種移行モデルの整合性を確認した。
<p>⑩天然バリアのナチュラルアナログ研究</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・東濃ウラン鉱床の過去100万年にわたるウランの挙動を把握したほか、地下水中のコロイド粒子が微量元素の移行挙動に与える影響を調査した。 ・東濃ウラン鉱床における希土類元素の分布に関する研究から、天然におけるアクチノイド元素の挙動の推定にあたり有用性を検討した。
<p>⑪地質環境の適性評価手法に関する研究</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・釜石原位置試験研究(平成10年3月終了)において、地下坑道周辺の地質環境特性に関するデータの取りまとめを完了した。 ・東濃地域での超深地層研究所計画および広域地下水流動研究において、地質調査、地下水調査、1000m級の試錐孔13本における試錐調査、地上電磁探査、空中物理探査、及び岩盤物性調査などを実施し、地下深部の地質、地質構造、水理学的特性、地球化学的特性、並びに岩盤の力学的特性などの地質環境特性に関するデータを収集した。 ・釜石原位置試験研究において、取得されたデータ全てをデジタル化し、一元的に管理するためのデータベースシステムを構築した。 ・東濃地域での超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究において、一元的に管理するためのデータベースシステム(G☆BASE)を導入し、各種調査で取得されたデータを随時登録し、現在では42本の試錐調査などから収集されたデータを一元的に管理できるようにした。 ・イントラネットを利用したデータベース検索ソフトウェアの構築を実施し、サイクル機構LANに接続された多数のパーソナルコンピュータから利用者側のコンピュータの機種を特定することなく、一般的なWEBブラウザソフトでデータベースにアクセスすることが可能になった。 ・データベース検索ソフトウェアにおいて、研究分野別のデータ検索と、その検索結果を任意の項目・順番・形式でテキストファイルに出力する機能を整備した。 ・深部地下水の流動特性や地球化学特性に関するデータを取得するための地下水調査機器の製作と、地下坑道周辺の詳細な地質構造や掘削影響領域の性状などを計測するための物理探査技術の高度化、に重点を置いた技術開発を実施した。また、これらの技術を東濃地域や釜石鉱山での研究に活用することを通じて、適用性の確認や複数の手法の比較検討などを行った。その結果、地下深部の地下水流動や物質移動の評価に必要な地質環境特性データを取得するための機器や手法など、サイトでの地質環境調査の基盤となる要素技術について概ね整備することができた。 ・地質環境の調査・解析手法の妥当性を確認するためのプロセスを検討し、データの取得、モデルの構築、予測解析、新規データの取得、モデル及び予測解析結果の不確実性の評価の一連の作業を反復的に繰り返すことによりモデルの不確実性を低減させ、最終的に一連の調査・解析手法の妥当性を評価するシナリオを構築した。

項目	研究成果
⑫地震動が地質環境特性に与える影響に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・釜石鉱山(花崗岩)において地震観測を継続するとともに、釜石鉱山で観測を開始した平成2年から平成10年3月までの観測結果を取りまとめた。 ・平成2年から平成10年3月までの観測結果に基づき、地下深部から地表部にかけての地震動特性に関する解析を行い、地下深部における地震の最大加速度の低減特性に加え、最大加速度の距離減衰、応答スペクトル等について評価を行った。 ・釜石鉱山における地下水の水圧の連続観測結果について解析を行い、地下水に対する地震の影響に関して評価を行った。
⑬人工バリアとその周辺岩盤との相互作用に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道周辺岩盤の掘削影響領域において、力学的水理学的影響範囲を実測することが可能となった。 ・人工バリアにおける熱-水-応力連成現象を実測することが可能となった。 ・上記のデータを使用することによりモデルの高度化を図った。
⑭地層処分システムの総合安全評価手法に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアの性能に影響を与えられとされる因子(溶解度、分配係数、インベントリ、ガラス溶解速度)並びに天然バリアの性能に影響を与えられとされる因子(地下水流速、移行距離、亀裂開口幅、分配係数、拡散係数、拡散深さなど)に着目した感度解析や簡略化モデルでの検討などを行うことにより、システムの評価において重要と考えられる現象の影響を定量的に把握することができた。また、将来起こり得ると考えられる天然事象が核種移行に及ぼす影響を解析するため、パラメータの時間変化が取扱い可能な核種移行コードの整備・開発を行い、天然現象の影響特性について知見を得た。 ・安全評価に必要なデータベースについて、放射線場の影響を検討するためのデータベースを想定される様々な条件を考慮した解析結果に基づいて整備するとともに、生物圏評価に必要なパラメータに関するデータベースを作成した。 ・統合化計算コードシステムについて、亀裂媒体中の核種移行解析コードや生物圏における核種移行/線量評価コードを既存の統合化計算コードシステムに搭載することにより、地下水シナリオの基本ケースについて、廃棄物から人間環境に至る放射性核種の移行経路(人工バリア、天然バリア、生態系等)に沿った一連の評価解析を実施することが可能になった。また、変動シナリオに対する核種移行解析コードをシステムに搭載することにより、地下水シナリオによる被ばく線量を同システム上で総合的に評価することが可能になった。
⑮地層処分システムの確率論的評価手法に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・処分場周辺の母岩から生物圏への移行経路について、地層の不均質性を確率論的に取り扱うために、核種移行遅延効果に最も影響を与えられとされる透水性の不均質性に着目して天然バリア中の核種移行モデルを開発し、確率論的評価モデルを構築した。 ・データの不確実性を考慮する必要があるパラメータを抽出するとともに、データの不確実性が核種移行解析結果に与える影響を定量的に検討した。 ・感度解析/不確実性解析を効率的に行うためのパラメータサンプリング手法を用いて、不確実性を考慮した確率論的評価が可能な総合安全評価コードを開発した。
⑯安全評価に用いる解析手法・コード・データの品質保証に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> ・安全評価における核種移行解析で使用するデータについて、その妥当性や追跡性を確保するための情報の種類や管理方法をデータの取得段階から、加工・選択(スクリーニング)段階を経て、運用段階に至るまでの全過程を対象として検討し、データの特性に応じた品質保証のための項目について整理した。これらの検討により、解析に用いるデータの妥当性や追跡性の確保とその向上を図る方法として、データの特性に応じて系統的な分類や整理を行い、関連する情報とあわせて保存/管理することが有効であることを確認した。 ・安全解析に用いられる解析コードの運用時に発生し得るエラーの要因とこれらのエラーを低減するための対策を使用上のノウハウや注意点として整理した。また、核種移行解析コードの検証ならびに数値解の安定性や結果の確からしさについての分析を行うことにより、これら解析コードの適用範囲の情報などを知識ベース化した。 ・コードとデータを組み合わせた解析作業の品質を総合的に管理するシステムについて、データベースによる品質管理を中心とした計算機システム概念検討を行った。また、その具体的開発を上記の成果を取り込みつつ段階的に進めた。

(核燃料サイクル開発機構, 平成13年10月)

表-9 安全研究成果の概要(平成13年度～平成17年度)

項目	研究成果
(1)安全規制の基本的事項に関する研究 ①安全評価の基本的考え方等に関する調査研究	<ul style="list-style-type: none"> ・安全評価の基本的考え方について検討を行ううえでの課題を明らかにした他、安全評価に関わる信頼性を向上させるための手段を検討した。 ・時間スケールに応じた評価の考え方について、諸外国における考え方を調査し、地層処分システムの安全機能や安全指標との関係を整理した。 ・天然放射性物質の濃度やフラックスの補完的指標としての適用性に資するため、評価の方法論を検討し、具体的な地質環境へ適用させるための考え方を提示した。 ・天然現象影響を安全評価シナリオの不確実性のひとつとして取り扱うための基盤を整えた。
(2)地質環境評価手法に関する研究 ①環境変動に伴う地質環境の安定性評価に関する研究	<p>火山・地熱活動、地震・断層活動、隆起・侵食の緒現象について、発生の可能性や地質環境に及ぼす影響の予測・評価に資するため、確率モデルや数値シミュレーション等の開発を進めるとともに、予測・評価に必要となるデータを取得するための調査技術、モニタリング技術の整備を行った。</p>
②結晶質岩に関する地質環境評価手法に関する研究	<p>東濃地域における主として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)を設定するとともに、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て調査研究の個別目標と課題を設定した。この個別目標の達成に向けた課題への取り組みにあたり、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。</p> <p>その結果、調査研究の成果を段階的に評価するとともに、重要な要素を明確にして次の調査研究を展開することによって、地層処分にとって重要な地質環境特性を効率的に理解することができた。これにより、繰り返しアプローチに基づく段階的な調査研究の合理性および妥当性を確認するとともに、このようなアプローチを進める上で有効となる調査・解析の道すじを統合化データフローとして例示した。</p> <p>本調査研究を通じて実際に地質環境を評価する上で適用可能な地上からの調査・評価技術(技術基盤)の整備を図ることができた。さらに、断層や割れ目帯などに起因する深部地質環境の様々な不均質性を理解することができ、地質環境特性に関するデータの蓄積を図ることができた。</p>
③堆積岩に関する地質環境評価手法に関する研究	<p>第1段階において実施した「研究所設置地区及びその周辺における調査研究」から得られた知見と課題は以下のとおり。</p> <p>(a)地上からの調査による地質環境のデータ取得</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング調査から得られる情報を、既存情報の調査、地表地質調査、地上物理探査の結果と合わせて総合的に検討・解釈することにより、地層や断層の三次元分布など、地質構造モデルの構築に必要な情報を得ることができる。 ・地下水流動解析における地表境界条件を与えるために表層水理調査を実施することが重要であり、積雪寒冷地である幌延地域において、涵養量を推定するために水収支法が適用できる見通しを得た。 ・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、物理検層、初期応力測定及び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となる。

項目	研究成果
	<p>(b)モデル化及びモデルの妥当性評価手法の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地質図及び地質断面図に基づき水理地質構造モデルを構築するにあたっては、広域的な流動系を概括的に把握することがまずもって重要であり、評価対象領域がモデル境界の影響を受けないようにモデル化領域を十分に広く設定する必要がある。 ・幌延地域に分布する岩盤、すなわち、亀裂性岩盤ないし亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を併せ持つ岩盤をモデル化する際には、割れ目の分布特性、水理特性の調査・分析を詳細に行うことが重要である。 ・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。 ・深部地下水の起源について検討するための解析手法として、M3法は有効であり、水素・酸素同位体比の測定結果と比較することにより、その信頼性を確認することができる。 ・地上からの調査研究の進展に伴って集積されるデータを適切に説明し得るようにモデルを発展させることにより、モデルの妥当性評価を行うことは有効である。 <p>(c)モニタリングシステムの検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・幌延地域の気候(冬季の極低温状況)や地質環境特性(石油やガスの胚胎)下において、2つの水圧モニタリングシステム、スイスのSolexperts社製のSPMPシステムとカナダのWestbay社製のMPシステムの適用性に問題は認められなかった。 ・幌延に分布するような堆積軟岩中において水質モニタリングを行う際には、ケーシングパイプの設置時に使用したセメントとの反応、掘削水の影響についての対策を検討する必要がある。 <p>上記の知見や課題については、幌延深地層研究計画の第1段階における体系的な調査・研究から得られた成果としてまとめたものであり、堆積岩を対象とした地上からの調査段階における地質環境調査手法の信頼性向上に反映できる。</p>
<p>④地質環境におけるナチュラルアナログ研究</p>	<p>東濃ウラン鉱床をナチュラルアナログの事例研究の場として、長期的な時間スケールで生じる地質学的事象とそれに伴う地質環境の変化に関する検討を行った。その結果、東濃ウラン鉱床において、隆起・侵食や断層活動といった地質事象が生じたにもかかわらずウランが現在に至るまで存在したのは、硫酸還元を主とする反応によって酸化還元電位が低く維持されてきたこと、地質事象に伴う酸化帯の形成が地表近くに限られたことによって、ウラン鉱床が存在する深度ではウランの溶解度が低く保たれてきたためであるとまとめられる。</p>
<p>(3)地層処分 の安全評価 手法に関する研究 ①安全評価 シナリオに関する研究</p>	<p>(a)FEP情報等の整備</p> <p>第2次取りまとめにおいて整理されたFEPに関わる情報に最新の知見を付加した。これによって、シナリオを作成するために必要となるシステムの時間変遷や現象の理解に関する信頼性向上を図った。また、FEPリスト及び名称の見直しを行い、シナリオ開発手法の改良に反映した。</p> <p>今後は、最新の知見の反映によるFEP情報の更新を継続的に実施する。</p> <p>(b)シナリオ開発手法の改良</p> <p>FEPの相関関係の処理を効率的に、透明性と追跡性を確保しつつ行うことができるようにするため、マトリクス形式と階層化とを組み合わせた手法の開発を行うとともに、それらの作業を計算機上で行うためのツールを開発した。</p> <p>今後は、手法や計算機ツールについて実際に運用を行い、必要な改良を行っていく。併せて、FEPの整理だけでなくシナリオ作成全体の手順や方法を体系化していく。また、変動シナリオ等の作成に関わる手法との結合を図る。</p> <p>(c)ケーススタディによる適用性の検討</p> <p>第2次取りまとめレファレンスシステムの人工バリアを対象としてシナリオ作成のケーススタディを行い、シナリオ開発手法及び計算機ツールの適用性を検討し、これらが有効であることを確認した。今後は(b)の検討と関係づけつつ、与えられた条件での相関関係の整理、シナリオの提示、影響評価で用いるモデルや解析ケースの設定との関係づけなどを行う。</p>

項目	研究成果
<p>②安全評価モデルの体系化・高度化に関する研究</p>	<p>(a)人工バリア中核種移行モデルの高度化 第2次取りまとめレファレンスケースの人工バリア中核種移行解析において、さらに詳細なモデル化が可能と考えられるプロセスを整理し、一例として掘削影響領域での核種移行プロセスについて検討を行った。掘削影響領域中での核種の遅延効果を考慮するため、人工バリアとその周辺の掘削影響領域に対する二次元の核種移行モデルを開発し、計算精度を確認した。これを用いた結果は、安全評価上最も重要な核種の一つであるCs-135の最大移行率で第2次取りまとめに比べて約1桁低減、その他の多くの核種も数分の1から短半減期核種では数桁程度低減する結果となり、第2次取りまとめにおける評価の保守性の程度を定量的に示した。</p> <p>(b)天然バリア中核種移行モデルの高度化 結晶質岩については、亀裂ネットワークモデルと連続体モデルによる入れ子式モデル化手法を開発し、瑞浪地域における地下水流動解析に適用した。移行経路情報の不確実性を定量化するため、確率有限要素法を適用したツールを開発した。また、亀裂内に不均質に分布する開口幅が亀裂中の水理・物質移行に与える影響の検討に必要な実験及び解析上の基盤技術を整備した。さらに、スウェーデン・エスポ地下研究施設などでのデータを活用して、亀裂内の透水量係数の不均質性や亀裂内充填物質が核種の移行遅延に与える影響について事例的に検討した。 堆積岩については、水理地質構造モデルの構築に関し、幌延地域の地質環境条件のうち、地下深部で測定された高い間隙水圧の要因を検討した。また、不均質性を再現する手法に関して、堆積岩の形成過程の時間変化を考慮する機能の拡張を行うことにより、より現実的な堆積過程を考慮することを可能とした。さらに、幌延深地層研究計画で取得した堆積岩試料を用いて実施した室内試験を通じて、亀裂を有する堆積岩における核種移行評価に必要な水理・物質移行特性データの拡充を行った。</p> <p>(c)生物圏評価モデルの高度化 IAEAの国際共同研究BIOMASSで示されたレファレンスバイオスフィアの構築アプローチに基づいて、第2次取りまとめにおいて検討した海域をGBIとした生物圏評価モデルの詳細化を行うとともに、固相を媒体として隆起・侵食等により核種が移動することを想定したモデルの構築を行った。また、生物圏評価パラメータの不確実性について検討するために、IAEAの国際共同研究BIOMASSでの検討をベースとし、生物圏評価に使用するパラメータ値の選定において、透明性と信頼性を確保し、かつ効率的なデータ選定手法を開発した。さらに、わが国の幅広い地表・地質環境を対象として、地表近傍での特性、事象及びプロセスに着目した予察的なFEPデータベースを作成するとともに、わが国におけるGBIの設定手順のフローを作成した。このフローに基づいて、可能性のあるGBI候補のバリエーションの具体的な抽出を試行するとともに、それら候補の中から評価上考慮するGBIを絞り込むために有効な情報あるいは調査項目・手法を整理した。</p> <p>(d)総合的な安全評価手法の検討 総合的な安全評価に関わる技術として、地質環境情報に基づいて核種移行解析に用いるモデルやパラメータを設定するための作業フレームと作業内容を具体化した。また、種々の調査や研究開発から得られる成果などの多くの技術的な情報とその利用形態等を体系的に管理することを目的とした技術情報統合システムを開発した。</p>

項目	研究成果
<p>③安全評価におけるシナリオ、モデルの不確実性に関する研究</p>	<p>(a)シナリオ及びモデルの不確実性 シナリオの不確実性については、その要因として天然現象に起因するシステム性能への影響及びその安全評価上の取り扱いを検討した。これによって、天然現象に起因する影響に関する不確実性を見落とさずにシナリオの検討の枠組みに取り込み、さらにシナリオの検討の中での取り扱いプロセスの透明性と追跡性を確保する作業手順を体系化した。また、掘削影響領域(EDZ)の移行遅延効果、ガラス固化体の表面積が溶解に与える影響、水理地質構造のモデル化手法、3次元の地下水流動解析の結果の核種移行解析への取り込み方法を事例として、モデルの不確実性の要因を整理するとともに、その結果として考えられる概念モデルの違いによる核種移行解析結果への影響を定量的に示した。 今後は、天然現象に起因するシナリオの不確実性について、上記作業手順を適用し、様々な事例研究成果の整理とそれに基づくシナリオの評価を進める。モデルの不確実性については、安全評価で考慮するシステムや現象に関する理解の進展を踏まえつつ、それらの核種移行解析上の取り扱いに関して可能と考えられる代替概念モデルあるいは数学モデルを明らかにし、不確実性を定量的に検討するための基盤整備を進める。</p> <p>(b)不確実性の定量化手法の検討 重要パラメータの抽出に関して、決定木分析の適用性を確認するとともに、誘出法によるパラメータの分布設定の手順や内容及び留意点を実際の地質環境条件を例題とした適用を通じて整備した。 今後は、シナリオ、モデル及びパラメータの不確実性の整理にあたっての重要パラメータの抽出、パラメータの分布設定に関する方法論の改良及び適用事例の蓄積を継続するとともに、重要パラメータの抽出結果の反映の方法などを検討し、不確実性の評価に係わる技術の体系化を図る。</p>
<p>④地下水水質形成モデルの検証及び高度化に関する研究</p>	<p>地表からの調査段階における地下水実測データの信頼性評価や原位置地下水を推定するための補正にあたり重要な要因についての検討を行い、実際の地質環境を対象とした推定例を示した。また、圧縮ベントナイト中間隙水水質の時空間変化を把握するため、pH試験紙を埋め込んだ室内カラム試験を実施した。併せて、天然のベントナイト鉱床におけるコアサンプルから中間隙水水質の空間分布に関わるデータも取得した。さらに、処分環境でセメント系材料が用いられた場合に想定されるような高アルカリ溶液とベントナイトが反応した場合の生成物や高アルカリ条件で支配的な化学種に関する熱力学データを収集し、データベースを整備した。これらにより、水質形成モデルの検証及び高度化に資する基盤情報や手法が整備された。 今後は、幌延の深地層の研究施設計画で得られた地下水を対象に、データの信頼性評価、原位置地下水の推定結果と原位置における信頼性のある測定結果との比較による推定手法の妥当性検討を行う。微生物、有機物が水質に及ぼす影響について幌延を例に知見を蓄積していく。また、室内試験・天然事例による中間隙水水質の時空間変化に関わる現象解明を進めていくことも必要である。鉱物などの熱力学データベース開発では、選定された熱力学データの信頼性について、関連する実験や天然事例をもとに検証を進めることが重要である。</p>

項目	研究成果
<p>⑤深部地下環境下における核種移行データの取得及びデータベースの整備</p>	<p>(a)熱力学的基礎データの取得 安全評価上重要であるNp(IV)について、重要な熱力学データであるヒドロキソ炭酸錯体の錯生成定数、溶解度積、加水分解定数を求めた。これにより、今後実施を予定している、熱力学データベースの再整備において、熱力学データ選定の基礎となる情報が得られ、熱力学データの信頼性向上に寄与した。 今後も、安全評価上重要であり、信頼性が十分でないと判断される熱力学データについては、継続してデータ取得を実施する。</p> <p>(b)核種移行挙動評価データの取得 溶解度制限固相の変遷に関する知見の充実を図るとともに、$UO_2(am)-NpO_2(am)$系の固溶体現象及びRaの$CaCO_3$との共沈に関する研究を実施し、より現実的な溶解度設定に資する知見が得られた。 収着や拡散現象については、熱力学的収着モデルの安全評価への適用性に関する国際的検討への参画、拡散係数の塩濃度依存性等のデータに基づく拡散メカニズムに関する検討、マトリクス拡散深さに関する実験等を実施し、個別現象に関する理解を深め、知見の充実を図ることができた。 核種移行に及ぼすコロイドの影響については、ベントナイトコロイドへの核種収着挙動に関するデータを得るとともに、収脱着を速度論的に扱うことができる核種移行解析コードを整備し、室内試験及び原位置試験の結果に適用した。さらに、感度解析を通じてコロイド影響が顕著となる環境条件(地下水流速や地下水中的コロイド濃度等)に関する知見を得ることができた。 今後も、核種移行に関する安全評価上重要な現象については、さらに理解を深め、信頼性の高いデータ取得等を目的として研究を継続する。この際、実際に地質環境が与えられた場合の核種移行評価へ、具体的にどのように得られた知見を反映するかという点を考慮しつつ研究を進めていくことが肝要である。</p> <p>(c)核種移行評価に係るデータベースの整備 熱力学データベースについては、OECD/NEAIにより選定された熱力学データベースを含め、JNC-TDBを各種地球化学計算コード用のフォーマットに変換し、ホームページで公開するとともに利用者の利便性の向上を図った。 収着データベースについては、新たに取得したKdを加えてJNC-SDBを更新するとともに、個別データの信頼性評価によるデータベースとしての品質向上の検討を実施した。さらに、Webを介した検索機能を持つシステムを構築してJNC-SDBのホームページで公開を行った。 また、日本原子力学会における深地層処分のバリア材を対象とした収着分配係数の測定方法の標準化に向け、これまでの経験などの情報提供を通じて貢献を行った。 今後、熱力学データベースについては、OECD/NEAIによる選定値や最新の研究動向の調査を継続するとともに、(a)で述べたような新たに取得したデータの取り込みを行い、それらに基づいて熱力学データベースを更新していくことが必要である。収着データベースについては、熱力学データベースと同様、最新情報の調査に基づくデータベースの更新と、個別データの信頼性評価を継続するとともに、拡散データについてもデータベース化を実施する。これらのデータベースについては、公開されたものが利用者にとって便利なものとなるよう配慮して整備を行っていく。</p>

項目	研究成果
<p>(4)処分場の設計要件に関する研究 ①人工バリア及び岩盤の長期挙動に関する研究</p>	<p>(a)緩衝材の長期物理的・化学的安定性に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の基本特性に関しては、海水系地下水条件における緩衝材特性に関するデータ取得によって、その傾向を把握するとともに、これらの結果から各基本特性に関する関係式を提示した。また、これまでに取得したデータをデータ集として取りまとめた。 ・緩衝材の長期力学的変形挙動に関しては、既存の粘性モデルを体系的に整理した上で、関口-太田モデル及び足立-岡モデルを選定し、実験結果との比較検討を通じてこれらのモデルの適用性の確認、並びに降水系地下水条件下におけるパラメータ設定方法を提示した。 ・緩衝材の流出・侵入挙動に関しては、海水系地下水条件における実験データの拡充により、侵入現象で相対的に留意しなければならないのは降水系地下水条件であることを示した。また、X線CT測定等によるデータなどをもとに解析結果との比較検討を通じ、粘土粒子拡散モデルの適用性を確認し、現状で用いることのできる基本モデルとして提示した。 ・緩衝材の変質・劣化については、鉄腐食生成物共存下および高アルカリ条件下での変質プロセスや変質速度などに関する基礎データを整備した。鉄型化による緩衝材性能への影響は顕著ではないと考えられるが、セメント影響については緩衝材の主要鉱物であるスメクタイトが溶解するため、無視できないと考えられる。今後、圧縮ベントナイトへの適用を考慮したスメクタイトの溶解速度式の導出方法の検討が必要である。また、長期的な変質・劣化現象による緩衝材性能への影響として考慮すべきシナリオを体系的に抽出し、緩衝材の長期安定性に関する網羅的な評価を行うための視点を整えた。 <p>(b)オーバーパックの腐食挙動に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電気化学試験により幌延深地層研究所の地下水条件における炭素鋼の主たる腐食形態は全面腐食であることが示された。今後は全面腐食を想定した腐食量評価が必要である。 ・炭素鋼溶接部の耐食性を電気化学的手法により検討した結果、電子ビーム溶接では母材とほぼ同程度の腐食挙動を示したが、TIG溶接部において耐食性の低下を示唆する結果が得られ、腐食局在化の可能性について、今後より詳細な調査が必要である。 ・水素を吸収したチタンの機械特性試験によって脆化の起こりうる水素濃度条件が把握された。また、水素が均一に分布した状態のほうが脆化の程度は顕著であることがわかった。 ・緩衝材中における硫化物の拡散移動を考慮して純銅の腐食量を推定した結果、硫化物濃度が十分低い(0.001M以下)条件であれば腐食量は無視できるほど小さく、1000年を超える極めて長い寿命を有する可能性が示唆された。

項目	研究成果
	<p>(c)ガス移行挙動に関する研究 海水系地下水条件下での緩衝材の透気試験データの拡充により、降水系地下水条件も含めた幅広い条件に対して概略的な評価が可能となった。また、改良型TOUGH2モデルを開発し、これを用いた解析とガス移行試験の結果との比較検討によりモデルの適合性向上を確認して、ガス移行挙動を評価するための一つの手法を提示した。</p> <p>(d)岩盤長期変形挙動に関する研究 幌延深地層研究所の地上からの調査に基づいて想定された具体的な地質環境を対象とし、力学物性の取得から解析評価まで、縦置き式処分孔周辺岩盤の長期変形挙動に関する一連の評価を事例的に示した。また、予測モデルの長期間への外挿可能性、実際の原位置挙動の再現性の観点から、地圧現象を利用した岩盤の長期挙動に関する検証例を提示するとともに、幌延深地層研究所設置地区に分布する岩盤を対象として、温度(100℃以下)、含水比、内圧に関するニアフィールド環境の変化が岩盤の長期変形挙動へ及ぼす影響について評価例を示し、設計上の留意点を抽出した。</p> <p>(e)再冠水挙動に関する研究、 化学現象と熱-水-応力との連成挙動を組み込んだ解析モデルを作成し、プロトタイプ・コードを構築した。室内連成試験COUPLEの実施、国際共同研究DECOVALEXを通じてこの解析モデル・コードの確証・検証を行った。これによって、熱-水-応力から化学への基礎的な連成についてはほぼ達成することができたことを確認した。開発したプロトタイプコードを使用して、オーバーパックの腐食に影響を与える可能性のある緩衝材中への塩の蓄積について熱-水-応力-化学連成解析を実施し、温度勾配下における緩衝材浸潤時の塩の濃縮現象をシミュレートできることを確認した。また、第2次取りまとめで行った処分孔縦置き方式における熱-水-応力連成挙動解析と、プロトタイプ・コードによる熱-水-応力-化学連成挙動解析との比較により、緩衝材の最高温度や再冠水までの時間、間隙水のpH変化について大きな差異がないことが明らかになり、第2次取りまとめの結果が化学現象を連成させても大きな影響を受けないことが示された。</p>
<p>②人工バリア等の性能保証に係る工学技術研究</p>	<p>(a)設計・施工に関わる性能保証研究 処分場の構成要素に対する性能保証項目を試案として抽出し、これらに対する評価方法、評価ツールを体系的に整理した。 緩衝材ブロック定置施工に伴う隙間の人工バリア性能への影響について実験的な検討を行った。本検討での試験条件の範囲では、施工時の隙間の人工バリアへの影響は無視できる程度であることを確認した。試験で設定した隙間の大きさは、試験体寸法の比でみると実際の施工での想定されるものに比べて数倍程度大きい条件になっていると考えられ、これらの室内試験によって、実際の施工においてもこれらの隙間の影響は大きなものとはならないことが推測できる。これらの成果は、遠隔操作による人工バリア搬送定置設備の定置精度などの要求性能を策定するための基盤情報として用いることができるものとする。</p> <p>処分場の閉鎖性能に関する検討を行い、プラグと埋め戻し材の設計、施工技術やその止水性能に関わる実験データなどの最新の知見を提供するとともに、処分場全体の安全性向上に寄与することを目的に検討を実施した。施工されたプラグの止水性能に関する検証データを取得し、閉鎖性能を評価するモデルを開発した。また、海水系地下水条件下での埋め戻し材の隙間への膨潤性能に着目した基礎試験を実施し、海水環境下でも降水環境下と同様、掘削土(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、降水環境下と同等のシーリング性能が確保できることが分かった。さらに、閉鎖性能の観点から水理解析やフォールトツリー分析により閉鎖シナリオを検討した結果、「連絡坑道を横切る破碎帯を経由する核種移行」の可能性は低いことを示した。</p> <p>(b)処分場管理／モニタリングに関する研究 人工バリア性能確認に関わるモニタリングに着目して、基本的考え方、計測項目、計測技術に関する情報を整理した。これらは、幌延の深地層の研究施設計画における人工バリア試験計画などへ反映する。</p>

項目	研究成果
<p>③人工バリアのナチュラルアナログ研究</p>	<p>(a) ガラスの溶解・変質に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地下深部のボーリングコアを用いて火山ガラスの変質調査を実施した結果、推定温度約70°Cに約50万年間埋設していた試料で変質鉱物として斜方沸石とモンモリロナイトを確認した。 ・変質に関与した地下水はNa-Cl型と考えられる。 ・埋設温度約40°C程度ではガラスの顕著な変質は認められなかった。 <p>(b) 金属の腐食に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・埋蔵期間約750～1500年、弱酸化性から還元性環境におかれた鉄の考古学的試料等の分析を行った結果、第2次取りまとめで想定された1000年間の腐食量が、酸化性雰囲気におかれたものと比較しても10倍以上保守的に評価されていることが示された。 <p>(c) ベントナイトの変質に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アルカリ性地下水のナチュラルアナログ事例を調査し、国内ではpHが9程度の地下水調査を実施した。本条件下では粘土質鉱物の変質は見られなかった。 <p>(d) 比較試験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・P0798ガラスを用いて、アルカリ水溶液中での変質を調べるための浸出試験を実施した。pHが11以上の条件では方沸石(analcime: $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、pHが11以下ではスメクタイト($\text{Na-beidellite: Na}_{0.33}\text{Al}_2(\text{Si}_{3.16}\text{Al}_{0.33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)への変質が認められた。同時に非晶質シリカ($\text{SiO}_2(\text{am})$)やゲル相も生成することが分かった。 ・変質が浸出に与える影響については、方沸石が生成することによりガラス溶解／変質速度は加速される。一方、スメクタイトが生成する条件では、生成の有無に関わらずガラス溶解／変質速度は遅く、拡散過程に律速される。これは、水(H_3O^+: hydronium ion)の拡散がガラス溶解／変質の律速過程になるためと考えられる。 ・ベントナイト共存下における変質では、ガラス表面変質層の成長による拡散の抑制は顕著では無く、変質層はベントナイト側に成長すると考えられる。

(原子力安全委員会, 平成18年3月)

This is a blank page.

表-10 動燃事業団及びサイクル機構*における安全研究に関する計画、成果と反映先 <高レベル放射性廃棄物処分関連>

項目	年次	昭和60年	昭和61年	昭和62年	昭和63年	平成元年	平成2年	平成3年	平成4年	平成5年	平成6年	平成7年	平成8年	平成9年	平成10年	平成11年	平成12年	平成13年	平成14年	平成15年	平成16年	平成17年	平成18年	
		計画等	原子力安全委員会等からの要求事項 高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画(昭和61年度)～昭和65年度)＜昭和60年8月 原子力安全委員会＞(昭和62年8月改訂)						高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画(平成3年度～平成7年度)＜平成2年9月 原子力安全委員会＞		高レベル放射性廃棄物対策について＜平成4年8月 原子力委員会放射線廃棄物対策専門部会＞				放射性廃棄物安全研究年次計画(平成8年度～平成12年度)＜平成7年12月 原子力安全委員会＞					放射性廃棄物安全研究年次計画(平成13年度～平成17年度)＜平成12年3月 原子力安全委員会＞				原子力の重点安全研究計画＜平成16年7月 原子力安全委員会＞
研究計画		安全研究基本方針＜昭和61年3月策定 動力炉・核燃料開発事業団＞					安全研究基本計画(平成3年度～平成7年度)＜平成3年3月策定 動力炉・核燃料開発事業団＞						安全研究基本計画(平成8年度～平成12年度)＜平成8年3月 動力炉・核燃料開発事業団＞					安全研究基本計画(平成13年度～平成17年度)＜平成12年10月 核燃料サイクル開発機構＞						
成果	主な研究成果								動燃における安全研究の成果(昭和61年度～平成2年度 高レベル放射性廃棄物処分量)＜平成4年4月 動力炉・核燃料開発事業団＞					放射性廃棄物処分安全研究の成果(平成3年度～平成9年2月 動力炉・核燃料開発事業団)				安全研究5カ年成果(平成8年度～平成12年度 核燃料サイクル分野)＜平成13年10月 核燃料サイクル開発機構＞	第1回安全研究成果報告会＜平成14年2月 原子力安全委員会＞	第3回安全研究成果報告会＜平成15年12月 原子力安全委員会＞		第4回安全研究成果報告会＜平成17年3月 原子力安全委員会＞	放射性廃棄物安全研究年次計画(平成13年度～平成17年度)研究成果報告集＜平成18年3月 原子力安全委員会＞	
安全研究に 関連の深い 主要なレポート								高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 -平成3年度-＜平成4年9月 動力炉・核燃料開発事業団＞								わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次取りまとめ-＜平成11年11月 核燃料サイクル開発機構＞							高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 -平成17年取りまとめ-＜平成17年9月 核燃料サイクル開発機構＞	
反映先	原子力安全委員会(指針等)																高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)＜平成12年11月 原子力安全委員会＞		高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について＜平成14年9月 原子力安全委員会 特定放射性廃棄物処分安全調査会＞					
学協会(基準等)																								収着分配係数の測定方法 -深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順-＜平成18年8月 日本原子力学会＞

* 平成17年10月、JAEAに統合

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁻¹ ・m ¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の) 放射能吸収線量, 質量エネルギー一分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	Pa・s	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻¹
表面張力	ニュートン毎メートル	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
表角速度	ラジアン毎秒	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	rad/s ²	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ジュール毎キログラム	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エンタロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	W/(m・K)	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ボルト毎メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
体積電荷	クーロン毎立方メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
透磁率	ヘンリー毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	H/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエンタロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≙10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

