

動力炉・核燃料開発事業団
研究開発課題評価委員会

平成10年度
—新規研究開発課題評価用資料—

技 術 資 料		
開示区分	レポ ー ト No.	受 領 日
T	N1000 98-001	1998.5.29
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		

平成10年5月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107-8445 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-8445, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

動力炉・核燃料開発事業団

研究開発課題評価委員会

平成10年度

新規研究開発課題評価用資料

平成10年5月

動力炉・核燃料開発事業団

もくじ

1. 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発
幌延町における深地層試験
(環境技術開発推進本部)
2. 放射性廃棄物処理・処分
核燃料サイクル廃棄物の廃棄体化の技術開発
(環境技術開発推進本部)
3. MOX燃料製造技術の高度化
MOX燃料製造工程の簡素化(ショートプロセス)に関する研究開発
(核燃料施設計画部)(プルトニウム燃料工場)
4. 高速増殖炉
高速炉におけるナトリウム伝熱流動数値実験に関する研究
(動力炉開発推進本部)(大洗工学センター)

高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発

幌延町における深地層試験

環境技術開発推進本部

研究概要

- | | |
|-----------|--------------------|
| 1. 研究開発分野 | 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発 |
| 2. 評価対象 | 幌延町における深地層試験 |
| 3. 研究開発課題 | 深地層試験 |
| 4. 実施担当部署 | 環境技術開発推進本部 |

5. 研究の必要性

原子力長計(平成6年6月)は、地層処分の研究開発の基盤となる深部地質環境の科学的研究を着実に進めることとしている。この中で、深地層の研究施設は、深地層の環境条件として考慮されるべき特性等の正確な把握や地層処分を行うシステムの性能を評価するモデルの信頼性向上等、地層処分研究に共通の研究基盤となる施設であり、我が国の地質の特性等を考慮して複数の設置が望まれるとしている。

幌延の深地層試験計画は、東濃の結晶質岩を対象とした超深地層研究所計画に対して、堆積岩を研究対象とした深地層の研究施設の一つである。

深部地質環境条件として重要な特性の正確な把握や地層処分システムの性能評価モデルの信頼性の向上には、地表から地下深部までの岩石や地下水に関する包括的なデータの取得と、その取得に必要な体系的な調査技術開発を行う深地層試験が必要不可欠である。また、地層処分技術に対する国民の理解と信頼を得る観点から、一般の人々が実際に地下深部の環境を見て体験できる場としての、深地層試験を行う施設の整備が必要である。

6. 研究目的・内容

6.1 目的

2000年に予定している地層処分研究開発成果の「第2次取りまとめ」では、地層処分の技術的な信頼性が示されるとともに、処分子定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所が示されることになる。深地層試験では、これらの技術的な信頼性や技術的拠り所を実際の深地層での試験を通じて検証していく。

6.2 期間

全体で20年の展開を計画している。

2010年頃までに地表からの調査技術の信頼性の検証を終えておくためには、遅くとも2000年頃には地表からの調査試験研究に着手しておく必要がある。

6.3 目標(成果)

実施主体が行う処分事業と国が行う安全基準や指針の策定に対して、時宜を得た役割を果たしていけるよう、以下の開発目標を設定して計画を進める。

- ・地質環境の体系的調査技術・手法の確立
- ・人工バリア・処分施設の最適化技術と処分場の管理技術の確立
- ・処分システムの安全評価手法の確立及び安全評価データベースの提示

6.4 研究内容

幌延町で行う深地層試験の内容は、地層科学研究および地層処分研究開発からなる。
なお、深地層試験では放射性廃棄物を持ち込まないし、使用しない。

6.4.1 地層科学研究

(1) 地質環境の総合的な調査技術の検証

これまでの東濃の堆積岩の既存坑道等を利用した研究開発により個別に開発・改良されてきた地質環境の調査技術を系統的に組み合わせた地上からの調査手法及び地下坑道での調査手法の有効性を確認する。

(2) 地質環境モデルの妥当性確認

上記調査技術を用いた地質環境条件の測定や坑道掘削に伴うそれらの変化の把握、あるいは坑道を利用した物質移行試験等を通じ、堆積岩を対象として開発を行ってきた地質構造、水理、水質等を予測するためのモデルの妥当性を確認する。

6.4.2 地層処分研究開発

(3) 堆積岩における人工処分施設の設計・施工技術の開発

処分施設の設計・建設・操業などに関する技術の開発を行う。

(4) 安全評価手法の信頼性確認

人工バリア材の化学的健全性評価や人工バリア/岩盤系の熱・水・応力連成試験、非放射性トレーサ試験などを行う。

6.4.3 平成11年度実施内容

初年度であり、研究計画、地下施設計画の検討を行うとともに、これに必要な情報の取得のため、地質踏査、表層水理観測、地震観測、環境影響調査を実施する。また、地上施設の概念設計、測量等を実施する。なお、現地作業は地元の理解、信頼を得て進める。

6.4 進め方

堆積岩を対象とした大深度の地下の研究施設は、国際的にも整備されていないため国際的に中核となる総合的な研究センターとしての発展を目指すとともに、学界、産業界等の地下における研究の場としても提供していく。また、地域の人々をはじめとする国民に情報や施設を広く公開し、施設の運営方法や整備については、地域との共生を図りながら進めていく。

6.5 施設概要

地上施設と地下施設の2つから構成される。

地上施設は、研究管理棟、室内試験棟、総合試料保管棟、ワークショップ等の研究施設群、及び坑口建屋、通気・給電設備、排気・排水設備等の付帯設備から成る。

地下施設は、調査試験研究用の坑道とそれに至るアクセス坑道(主立坑)と換気立坑(副立坑)から成る。深度は概ね500m程度に調査試験研究用坑道を展開することを考えている。

7. 成果の反映

実施主体が行う処分事業(特に処分予定地におけるサイト特性調査と処分技術の実証)及びそれと並行して国が進める安全基準や指針の策定に反映する。

8. 予算

総予算額の目安

- ・研究必要施設の設計・建設費：約310億円（地上施設110億円、地下施設約200億円）
- ・調査研究費：年間約35億円
- ・付帯施設（展示館、国際交流施設、厚生施設等）：約30億円

研究内容

1. 研究開発分野: 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発

2. 評価対象: 幌延町における深地層試験

3. 研究開発課題: 深地層試験

4. 実施担当部署: 環境技術開発推進本部

5. 地層処分研究開発の概要と深地層試験

5.1 わが国の地層処分の概念と研究開発

わが国の地層処分概念は、高レベル放射性廃棄物のガラス固化体を、活断層や活火山の近傍と言った地質環境の長期的な安定性の点で不適切な場所を避け、地下深部の安定な地層(岩盤)中に多重バリアシステム(オーバーパックや緩衝材からなる人工バリアとその周囲の地層、岩盤からなる天然バリアを組み合わせた多層の防護システム)を構築し、埋設、処分することにより、長期にわたって人間の生活環境から隔離し、将来の世代にも廃棄物による影響が及ばないようにすることである。不適切な場所を避けることにより、処分された廃棄物が人間環境に直接的に影響を及ぼす可能性(接近シナリオ)については、これを排除することを基本とし、多重バリアシステムは、地下水によって放射性核種が人間環境に運ばれるという可能性(地下水シナリオ)に対する措置である。ここで、地質環境には、廃棄物を人間環境から物理的に隔離すること、人工バリアがその機能を発揮できる設置環境を維持すること、核種の移行を抑制することが期待されている。

地層処分の研究開発は、動燃事業団を中核機関として、この地層処分概念が科学的、技術的に成立することを示すことを目標として、当面、地域や地層を特定することなく、対象とすべき地質環境を幅広く想定し、他の関連研究機関の協力を得て2000年前までに第2次取りまとめとしてとりまとめ、これによってわが国における地層処分の技術的信頼性を示すとともに、2000年以降実施される処分予定地の選定、および安全基準の策定に資する技術的拠り所を与えることが求められている。

事業団は、多重バリアシステムの長期挙動を予測するための性能評価モデルおよびデータベースの開発、システム全体の安全評価、深部地質環境特性と長期的安定性に関する情報の整備、人工バリア・処分施設に関わる技術の開発について、東海事業所の地層処分基盤研究施設(ENTRY)を中心として進めている。また、これらの基盤研究として、釜石鉱山、東濃鉱山およびその周辺地域において「地層科学研究」を実施してきている。さらに、第2次取りまとめ以降の研究開発の展開も視野に入れながら、地層処分放射化学研究施設(QUALITY)計画や東濃地科学センターの超深地層研究所計画等を進めてきており、平成11年度からは新たに北海道幌延町の深地層試験計画を開始したいと考えている。

深地層試験では、「第2次取りまとめ」による技術的な信頼性や技術的拠り所を実際の深地層での試験を通じて検証していく。

深地層試験で得られる成果は、岐阜県の東濃地科学センターや茨城県の東海事業所で実施している研究、あるいは国際共同研究等の成果と合わせて、2000年以降に実施主体が行なう処分地選定のため予備的調査やサイト特性調査、処分技術の実証、及びこれと並行して国が進める安全基準や指針の策定に反映される。深地層試験は、このような処分予定地の選定から安全審査に至るまでの処分事業の進展に対して、時宜を得た役割を果たしていけるよう、計画を進めていく。とくに重要な展開として、当面のマイルストーンを、処分候補地での予備的調査及び処分予定地でのサイト特性調査の開始に置き、これらの時期を目途に、それぞれに必要となる調査技術を段階的に整備していく。

また、深地層試験を行う施設については、研究のみならず、一般の人々が実際に深地層の環境を体験し、また、研究者との直接的な対話を通じて深地層への理解を深めていただく場として整備していく。

5.2 深地層試験の政策的位置付け

(1) 「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」(平成9年4月15日、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会)において、深部地質環境の科学的研究を行う研究施設は、堆積岩及び結晶質岩の双方について推進していくことが望まれている。

(2) 「高レベル放射性廃棄物処分に向けての基本的考え方について(案)」(平成9年7月18日、原子力委員会高レベル放射性廃棄物処分懇談会)において、「深地層の研究施設は、一般の人々が実際に見て体験できるという意味で社会的な観点からきわめて重要な役割を持つことから早期に実現する必要がある。」とされている。

5.2 幌延町の地質環境の特徴

昭和61年から昭和62年までに実施した1,000m級のボーリング調査等の結果、幌延町には、深地層の試験研究の対象となる厚い堆積岩が存在することが確認されている。更に地下深部には、塩分濃度の高い地下水の存在が確認されており、結晶質岩と淡水系の地下水を対象とする岐阜県瑞浪市における「超深地層研究所」と対比できる特徴を有している。

6. 深地層試験の内容

幌延町で行う深地層試験の内容は、地層科学研究および地層処分研究開発からなる。その実施にあたっては、岐阜県で進めている地層科学研究や茨城県で進めている地層処分研究開発との連携を図りつつ進めていく。

なお、深地層試験では放射性廃棄物を持ち込まないし、使用しない。

6.1 研究目的、目標

6.1.1 地層科学研究

(1) 地質環境の総合的な調査技術の検証

これまでの東濃の堆積岩の既存坑道等を利用した研究開発により個別に開発・改良されてきた地質環境の調査技術を系統的に組み合わせた地上からの調査手法及び地下坑道での調査手法の有効性を確認する。

(2) 地質環境モデルの妥当性確認

上記調査技術を用いた地質環境条件の測定や坑道掘削に伴うそれらの変化の把握、あるいは坑道を利用した物質移行試験等を通じ、堆積岩を対象として開発を行ってきた地質構造、水理、水質等を予測するためのモデルの妥当性を確認する。

6.1.2 地層処分研究開発

(3) 堆積岩における人工バリア、処分施設の設計・施工技術の開発

処分施設の設計・建設・操業などに関する技術の開発を行う。

(4) 安全評価手法の信頼性確認

人工バリア材の化学的健全性評価や人工バリア/岩盤系の熱・水・応力連成試験、非放射性トレーサ試験などを行う。

6.2 施設概要

深地層試験を行う研究施設は、地下の施設と、地上の施設からなる。

地下の施設は、軟岩における坑道の掘削、支保等の土木工学的観点から、深度 500m 以上を目途に展開する試験坑道を主とし、この他、連絡(アクセス)坑道、通気立坑等の建設を計画している。

地上の研究施設としては、地下深部の雰囲気を維持したままでの試験が可能な室内試験設備を含む研究施設、機器整備施設、岩芯倉庫等の建設を計画している。

6.3 地層科学研究の内容

研究の対象となる岩盤は、比較的軟らかい堆積岩であること、深部の塩水の地下水、浅部～表層の淡水が存在し、現在の海水との境界部に近いこと等が特徴であり、このような特徴を持った岩盤の熱的・力学的な特性や塩淡境界に着目した、地下水の流動・水質及び物質移動、坑道掘削の影響等を明らかにしていくことが主要な研究課題となる。また、これらの研究に必要となる軟岩及び塩水に適した物理探査手法やボーリング掘削技術、地下水調査技術などの調査技術・機器等を開発、整備することも重要な課題である。

深地層試験においては、地下の岩盤や地下水の特徴を効率的かつ的確に調べる手法を整備するため、

- 「調査試験によるデータの取得」
- 「取得データによる解析評価と予測」
- 「新規データによる予測結果の検証」 —

というステップを繰り返しながら、

- 「広域を対象として地表から行う調査研究」、
- 「坑道を掘削しながら行う調査研究」、

「坑道を利用して行う調査研究」

へと進展させていく。

調査研究の進展に応じて取得されてくるより詳細なデータに基づき、深地層の地質環境への理解を深めていくとともに、その過程で「調査—予測—検証」のステップを何度も繰り返すことを通して、調査手法や解析手法の改良及び妥当性の確認を行っていく。

このことにより、「第2次取りまとめ」で示されることになる地層処分に適切な地質環境の要件をもとに、実施主体が行う処分地の選定に必要なデータの種類や精度を具体化していく。

また、同様に「第2次とりまとめ」までに整備されることになる地上及び地下での物理探査技術やボーリング調査技術を、深地層試験へ適用することにより、地表からの調査技術の信頼性の検討及び地下における体系的調査技術の信頼性の検証を行っていく。

これらをもとに、実施主体が実際の処分候補地や処分予定地で行うべき調査の内容や精度等が検討されることになる。

(1) 地表から行う広域スケールでの調査研究

まず、本地域の岩盤や地下水に関する基本的な情報を取得するため、10km四方程度の広域を対象に、空中及び地表からの物理探査やボーリング調査を主体とする広域的な調査を実施する。得られたデータをもとにモデル解析等を行って、地下における地層や断層の分布状況といった地質構造、そこでの地下水の流れ、水質の分布あるいは坑道を掘削したときの変化などを予測する。

(2) 坑道を掘削しながら行うサイトスケールでの調査研究

実際に地下に坑道を掘削することによって、地層や断層の分布、地下水の性質等を観察、調査する。この結果に基づき、地表からの調査で予測したことを確認し、調査手法や解析評価手法の妥当性を検証していく。また、坑道を掘削することに伴う周辺の岩盤や地下水の変化とその範囲などを調べる。

(3) 坑道を利用して行うブロックスケールでの調査研究

地下に掘削された坑道の中で、数10m程度のブロックスケールを対象に、精密な物理探査やボーリング調査を行うことにより、断層の詳細な特性や掘削影響領域を含む坑道周辺の岩盤と地下水の性質及びそれらの長期的な変化を詳細に調べる。また、岩盤中にトレーサーを注入してその動きを観察することにより、岩盤中での水や物質の挙動を実際に確認する。なお、坑道の掘削に合わせて、これらの調査を順次異なる場所や深度で行い、予測と検証のステップを繰り返すことにより、岩盤や地下水の性質の空間的な違いを調べるとともに、調査解析手法の妥当性を確認していく。

6.4 地層処分研究開発の内容

深地層試験では、広域の地質環境条件に関する具体的な情報を体系的に整備できるとともに、地下坑道を利用した連続的な深度の地質環境条件での試験が可能である。

この特徴を活かし、実施主体が行う処分事業に反映させるため、第2次取りまとめで示されることとなる人工バリア及び処分施設の設計・施工要件を基に、それらの構築技術に関する検証やこれを踏まえた設計の最適化のための研究開発を行う。

併せて、国が進める安全基準・指針の策定に反映させるため、具体的な地質環境条件に対し、第2次取りまとめの安全評価手法を適用して、地下深部における現象を予測評価するモデル、解析手法の検証を行い、安全評価手法の信頼性を確認する。

(1) 人工バリア、処分施設の設計・施工技術の開発

- * 処分施設の設計・建設・操業などに関する技術の開発: 軟岩中の坑道掘削、保坑技術
- * シーリング技術開発: 割れ目帯や坑道掘削損傷領域のグラウト、プラグによる止水技術開発
- * 人工バリアの施工技術開発・品質確認: 人工バリア/岩盤熱・水・応力連成試験の施工など

(2) 安全評価手法の信頼性確認

- * 人工バリア材の化学的健全性評価研究: 実際の地下水に対する模擬ガラス固化体、オーバパック材、緩衝材の化学的耐久性に関するデータの取得とモデルの妥当性の評価
- * 人工バリア/岩盤熱・水・応力連成研究: 実際の地下水、岩石および模擬発熱体を含む人工バリアの組み合わせによる水理、応力に関するデータ取得とモデルの妥当性の評価
- * 緩衝材・岩石中の物質移動評価研究: 非放射性トレーサを用いた緩衝材・岩石中の物質の収着・移行に関するデータの取得とモデルの妥当性の評価など

6.5 地震に関する研究

科学技術庁が進める『地震総合フロンティア研究』の一環として、事業団は、岐阜県の東濃鉦山や神岡鉦山において、地震発生機構の解明や観測手法の開発を目的とした『陸域地下構造フロンティア研究』を進めている。

北海道北西部は、ユーラシアプレートと北米プレートという2つのプレートの境界に位置し、過去に比較的大きな地震が発生しており、また、最近では局地的な群発地震が観測されている。このような地域は、地震発生機構の解明を目的とした研究の場としても重要な地域と言えることから、地震防災科学技術の発展にその成果を活用していくとの構想の下、当地での『陸域地下構造フロンティア研究』の実施について、今後、関係機関との協議を進めていく。

本研究については、地震や地震に関連する地殻の変動のみならず、地震の発生に関与していると考えられている地下水等の地殻内流体の動きや化学的性質の変化にも着目して、総合的に進めていくことが重要である。

7. 研究開発の進め方

7.1 研究の進め方・実施体制

深地層試験の計画は先ず、20年に及ぶ計画全体の基本計画を策定し、その前段階までに得られた情報に基づき各研究段階ごとに最適化、詳細した実施計画を策定し、これに従って研究を実施していく。

実施に当たっては、東海事業所および東濃地科学センターと連携をとって研究を進める。

調査試験研究の品質保証、効率的進捗の観点から、研究の計画や成果について外部の評価、助言を受けつつ研究を進める。

研究の実施に当たっては、委託研究や共同研究の形態による外部資源の活用を図るが、物質移行などの地層処分研究開発に肝要な課題については内部実施するとともに、得られた成果の統合化は内部実施とする。

深地層試験の実施には、高度な学術的知見や技術が必要であるため、国内外の関係研究機関や大学などの協力を得て進める。また、深地層の知見は将来の地下利用に役立てられると考えられることから、広く外部の研究者に深地層試験を行う研究施設等を研究の場として提供していく。

7.2 スケジュール

各試験研究段階毎に、計画の策定、研究設備の設置、試験研究実施、結果の評価などを行っていく。全体の期間は、20年程度を考えている。

平成11年度は、初年度であり、研究計画、地下施設の検討を行うとともに、これに必要な情報の取得のため、地質踏査、表層水理観測、地震観測、環境影響調査を実施する。また、地上施設の概念設計、測量等を実施する。なお、現地作業は地元の理解、信頼を得て進める。

7.3 マイルストーン

深地層試験計画の成果は、岐阜県の東濃地科学センターや茨城県の東海事業所で実施している研究あるいは国際共同研究等の成果と合わせて、2000年以降の処分の実施に向けて必要となる処分予定地選定のための技術的拠り所である、処分予定地におけるサイト特性調査技術(地表からの体系的調査技術・手法/坑道を利用した体系的調査技術・手法)として提供され、また、処分技術の実証のために必要な技術基盤としての人工バリア・処分施設の最適化技術、処分場の管理技術として提供される。

具体的には、2010年頃の処分予定地の選定のための予備的調査および処分予定地でのサイト特性調査に必要な地表からの体系的な調査技術・手法を提供する。

さらに、2015年頃までに地下における体系的調査技術を、2020年頃までには処分技術の実証のために必要な技術を提供する。

処分の実施における時間軸上の特に重要なポイントである「処分予定地でのサイト特性調査(地表調査)」(2010年頃に開始予定)への適切な技術の提供を目指すためには、

それまでに、地表からの調査試験研究による予測結果に対する地下坑道での検証結果に基づき、地表からのサイト特性調査技術の評価を完了しておかなければならない。

地表調査の開始から第2段階の予測結果の検証までに、少なくとも10年程度の期間が必要と考えられることから、2010年頃までに地表からのサイト特性調査技術の検証を完了するためには、遅くとも2000年頃には第1段階の地表からの調査試験研究に着手する必要があると考えられる。

7.4 開かれた研究の進め方

7.4.1 学際的研究の展開

地下深部を対象とした研究は、極めて学際的であるため、広く関連する分野の研究機関や専門家の参加を得つつ総合的に進めていく。また、堆積岩を対象とした大深度の地下の研究施設は、国際的にも整備されていないため、国際共同研究の実施やアジア地域の研究者の招へい等を積極的に推進し、国際的に中核となり得る総合的な研究センターとしての発展を目指す。

このための施設として、国際交流施設の建設を計画する。

7.4.2 情報及び施設の公開

深地層試験の目的や施設の位置付けを明確化し、地域の人々をはじめとする一般国民の理解と信頼を得るため、深地層試験を行う研究施設で実施する研究の計画や成果に関する情報及び施設自体を広く公開する。このため、情報ネットワークの整備や展示館の設置等、広報メディアの充実を図っていく。

7.4.3 学界、産業界等への場の提供

深地層試験を行う研究施設周辺の地質学的特徴や地下深部の環境を活用した種々の研究を並行して行うための場を提供する。並行研究として、現時点では宇宙線ミュオンによる地下構造解析の研究等が考えられる。その他、地下深部に特徴的な環境（超低振動、超低電磁気、完全暗室、恒温・定湿度、無風等）を生かした様々な先端の実験研究への利用の可能性が想定される。

7.4.4 地域との共生

深地層試験を行う研究施設の運営方法、計画管理及び厚生施設の計画等に関しては、関係地元自治体等とご相談しつつ、地元雇用を優先するなど地元地域の振興に協力しながら、地域との共生を最優先に進める。

地下の施設については、多くの方々に地下深部の環境を実際に体験していただけるように、整備・運営していく。例えば、地下の探索や地球の生い立ちなども実感できる地下体験ホール等が考えられる。また、地下体験ホールへの低公害の輸送手段によるアクセスや地層の様子の変り変わりなどが直接目で観察できるような施設整備なども考えられる。

8. 投入資源の活用計画

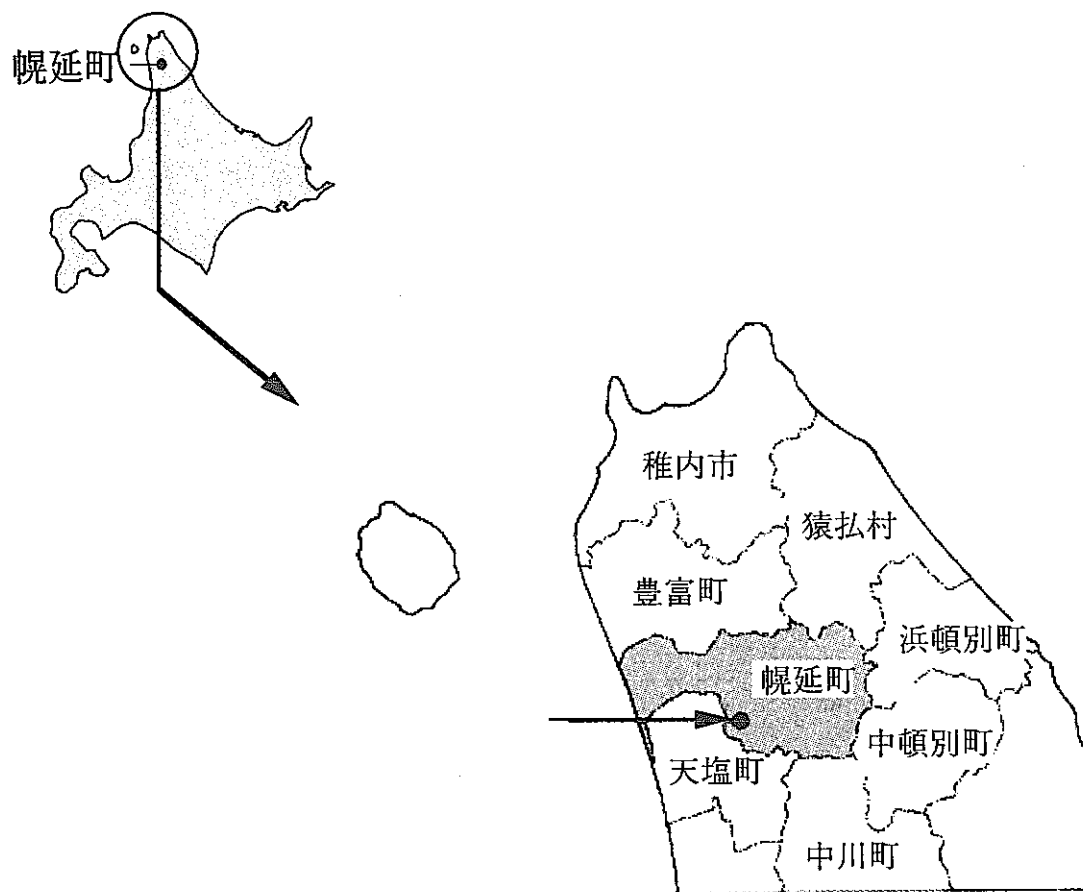
8.1 総予算額の目安

- ・研究必要施設の設計・建設費：約310億円（地上施設110億円、地下施設約200億円）
- ・調査研究費：年間約35億円
- ・付帯施設（展示館、国際交流施設、厚生施設等）：約30億円

8.2 開発人員計画

各調査試験研究段階で構成が異なるが、地質学、水理地質学、地球化学、岩盤力学、物質移行、工学技術などの研究者よりなる。坑道の掘削が進んだ段階からは、50名程度の研究者の配置を考えている。

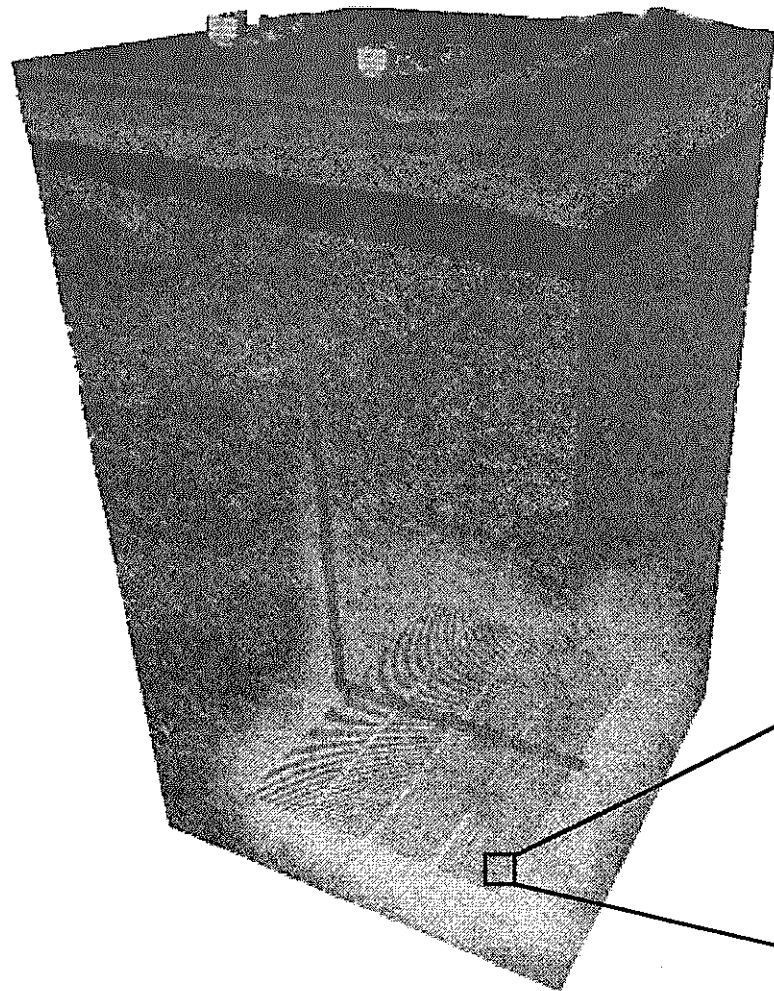
20年にわたる長期計画であり、研究の継続性や組織の活性を保っていく観点から、外部/内部構成比率や年齢構成等を考慮した人員配置とする。



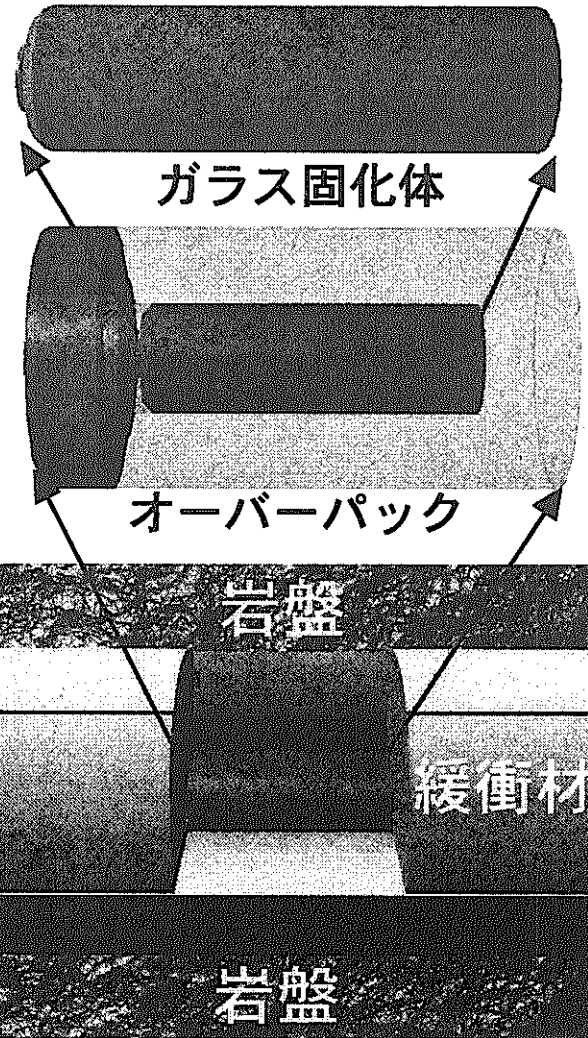
深地層試験の位置図

わが国における地層処分の基本的考え方

「安定な地層に強力な人工バリアを核とする多重バリアシステムを構築」

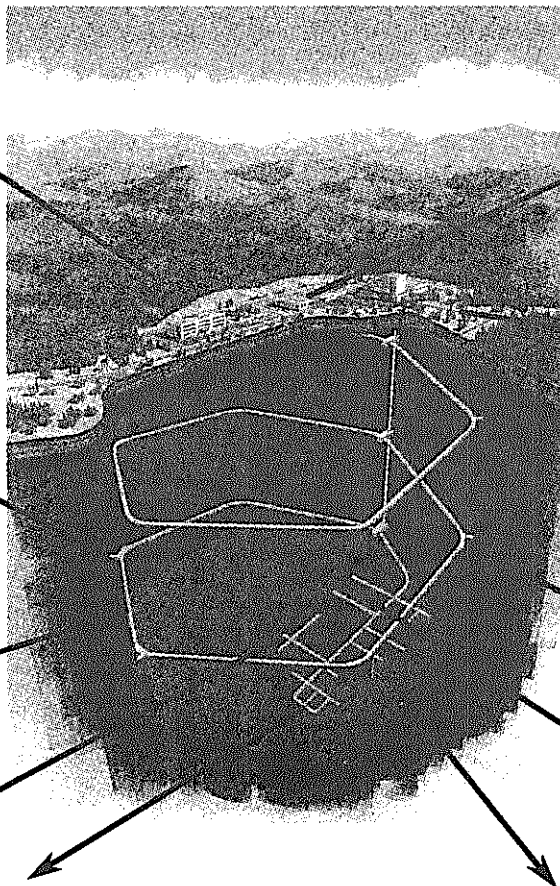


生活圏から離れた
深地層



多重バリアシステム

深地層試験のイメージ



深部地質環境特性に関する研究
(物理探査)

深部地質環境特性に関する研究
(岩盤の透水試験)

処分施設の設計・施工技術の開発
(試験斜坑掘削施工性試験)

処分施設の設計・施工技術の開発
(粘土充填・熱負荷試験)

深部地質環境特性に関する研究
(坑道における調査試験研究)

処分施設の設計・施工技術の開発
(坑道シーリング試験)

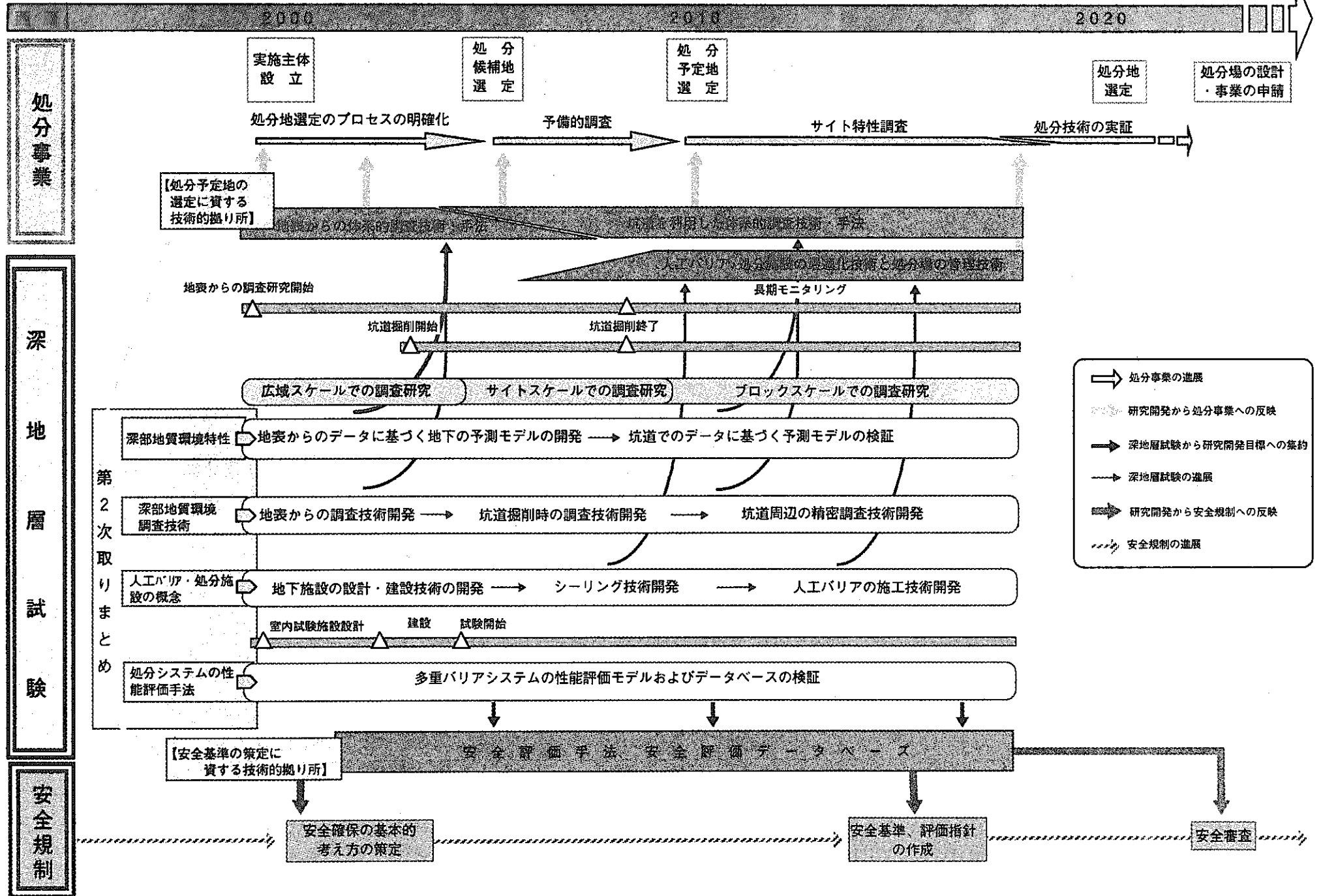
多重バリアシステムの性能評価
モデルの開発
(試験室イメージ図)

深部地質環境特性に関する研究
(地表からのボーリング調査)

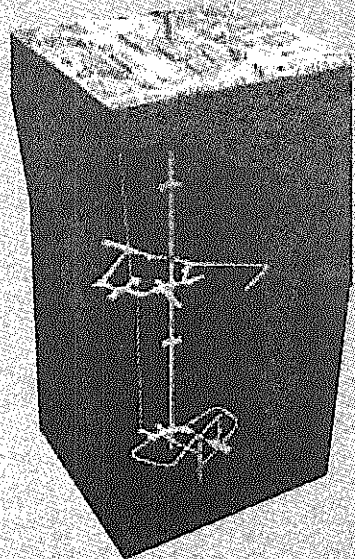
深部地質環境特性に関する研究
(地下水の採水)

深部地質環境特性に関する研究
(坑道掘削影響試験)

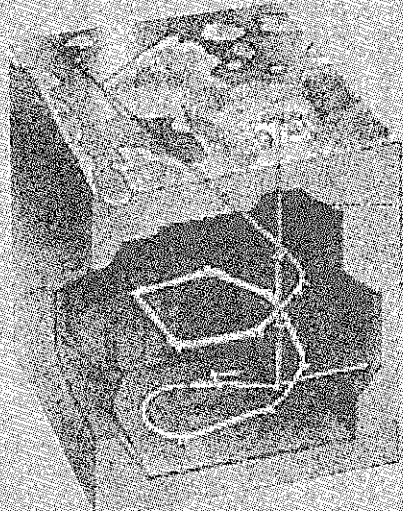
深地層試験のスケジュールと成果の反映先



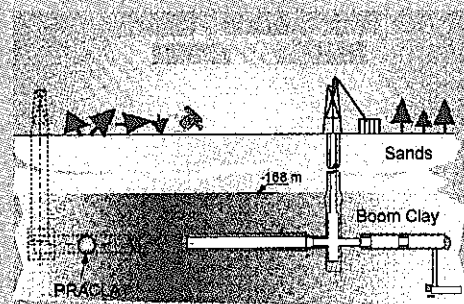
深地層の研究施設の例



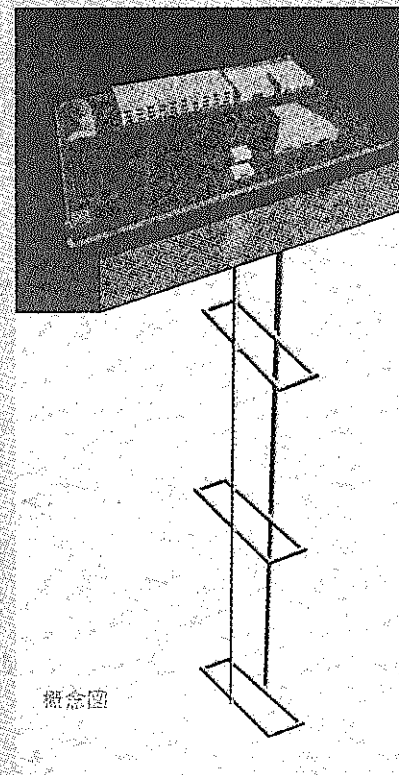
ホワイトシェル (URL)
 カナダ原子力公社 (AECL)
 花崗岩、深度約430m
 (1980年～、建設費：約100億円、研究費：約15億円/年)



エスポ (HRL)
 スウェーデン核燃料廃棄物管理会社 (SKB)
 花崗岩、深度約450m
 (1986年～、建設費：約80億円、研究費：約15億円/年)



モル (URF)
 ベルギー王立原子力研究センター (SCK/CEN)
 粘土層、深度約220m
 (1974年～、建設費：約40億円、研究費：約10億円/年)



超深地層研究所 (MIU)
 動力炉・核燃料開発事業団 (PNC)
 花崗岩、深度約1000m
 (1997年～、建設費(予算)：約200億円、
 研究費(予算)：約20億円/年)

放射性廃棄物処理・処分

核燃料サイクル廃棄物の
廃棄体化の技術開発

環境技術開発推進本部

研究概要

1. 研究開発分野 放射性廃棄物処理・処分
2. 評価対象 核燃料サイクル廃棄物の処理技術開発
3. 新規開発課題 核燃料サイクル廃棄物の廃棄体化の技術開発
4. 研究の必要性

これまで動燃における放射性廃棄物の管理は、主に発生廃棄物の貯蔵・保管とそのための減容処理（技術開発を含む）を行ってきた。

この間、放射性廃棄物の処分に関しては、国を含め、関係機関での検討が進み、廃棄体としての必要要件が明らかになりつつあり、有害物質の分別管理、処分を考慮した処理の実施、廃棄体確認の重要性が強く認識され、技術開発や実際の対策が進んできている。

今後新法人においては、自ら発生させる放射性廃棄物について、発生から処分に至る廃棄物管理を合理的かつ総合的に実施していくことが必要であり、このため、全体プログラムの策定とこれを実施していくための廃棄体化技術開発（除染、廃棄体化、廃棄体確認）を鋭意進めていく必要がある。

5. 研究目的・内容

動燃（新法人）で発生する全ての核燃料サイクル廃棄物の発生、処理、貯蔵、処分に關する合理的かつ総合的な廃棄物管理計画の立案と計画の実施に必要な以下の技術の開発（ソフトの開発を含む）を行う。この構想を図-1に示す。

①核燃料サイクル廃棄物管理に関する解析システムの開発

動燃ですでに発生しているものもとより、今後発生すると考えられる全ての核燃料サイクル廃棄物（定常廃棄物、解体廃棄物）について、その量と性状に関するデータベースを作成するとともに、性状に応じた処理、貯蔵、処分方策の解析（コスト、廃棄体量等）手法を整備し、総合的な対策の立案と実施に資する。

②固体廃棄物の廃棄体化技術開発

廃棄体としての処理方法の決まっていない種々の固体廃棄物（金属、セラミックス/コンクリート、焼却灰、混合物等）を対象として、減容/安定化に優れ、今後の廃棄体化処理に有望であると考えられる高温熔融技術の調査検討、適用性の評価及び必要な技術開発を行う。

③ウラン系廃棄物の高除染技術開発

処分の安全性に関するこれまでの検討結果によれば、ウラン系廃棄物の多

くは、深部地下埋設処分が必要となる可能性が高い。このため処分の経済性の観点から、簡易な浅地中処分あるいはクリアランスレベル以下にできるような高除染技術の開発を行う。

④超臨界による放射性有機廃棄物の処理技術開発

現在の処分研究の知見では、アスファルト固化体やプラスチック固化体などの有機性廃棄物の処分に対しては、有機物の分解によるバリア機能低下の可能性など不確実な問題が残されており、特別な配慮が必要とされている。そのため、オプションとしてより安定性に優れた固化体への変換を目的とした有機物の無機化処理技術開発を行う。さらに、フッ素を含む廃油等の処理技術開発を行う。

6. 予想される成果と反映

(1)予想される成果

動燃（新法人）における核燃料サイクル廃棄物データを一元的に管理できるようになるとともに、廃棄物の性状に応じた合理的、体系的な廃棄物対策計画の策定と実施が可能となる。

(2)成果の反映

既存の処理施設の今後の運転計画及び新設の処理貯蔵施設（HWTF,LWTF-2等）の建設・運転及び廃止措置、処分計画に反映させる。民間へも成果・ノウハウを技術移転していく。

7. 研究開発期間及び総予算

当面、平成11年4月から平成16年3月（5年計画）とする。

総予算 2070百万円を目安としている。

8. 実施担当部署 環境技術開発推進本部

9. 必要人員 20名/年程度を見込んでいる。

10. 特記事項

技術開発に当たっては、外部の専門家等の意見をうかがい、評価を受けつつ進める。

図-1 動燃（新法人）における核燃料サイクル廃棄物対策の構想

	廃棄物の発生	減容・安定化処理	貯蔵	処分
現状	東海事業所 大洗工学センター 人形峠事業所 ふげん もんじゅ で発生。	一部の廃棄物について減容処理 (焼却等)を実施。	保管管理を実施。	サイクル廃棄物やR I・研究所等 廃棄物について廃棄体としての必 要要件が明らかになりつつある。
課題	全体保管本数 約18万本(平成9年度末概算値) (大洗分は原研廃棄物管理施設としての値を加算) 全体本数が明確でない。特に、 施設解体時に発生する廃棄物の 発生量が明確でない。	最終的な廃棄体化の方策が明確に なっていない。	保管量や廃棄物種別(可燃・難 燃・不燃)等のデータは整備さ れているものの内容物(有害物 質を含む)や核種インベントリ の詳細なデータが整備されてい ない。	TRU核種を含む廃棄物、ウラン 廃棄物やR I・研究所等廃棄物に ついて処分方策が明確になってい ない。

対策

総合的かつ合理的な核燃料サイクル廃棄物対策の実施

廃棄物発生量の予測

- ・発生元における廃棄物の抑制計画
- ・施設運転計画
- ・デコミッション計画

処理計画の策定

- ・処理計画
- ・処理施設計画
- ・コスト評価

貯蔵計画の策定

- ・貯蔵計画(高レベル
廃棄物の中間貯蔵等)
- ・貯蔵施設計画
- ・コスト評価

処分計画の策定

- ・処分基準の統一化
- ・処分計画
- ・処分施設計画(R I・研究所等
廃棄物事業推進準備会(実施主
体)とも関係あり)
- ・コスト評価

(新規項目)

【核燃料サイクル廃棄物管理に関する解析システムの開発】

【発生廃棄物データの整備】
解体廃棄物を含む全事業所にお
ける発生量予測データの整備。
廃棄物性状等のデータの整備。
(データベース化)

【合理的処理・貯蔵・処分方法の解析】

廃棄物量と廃棄物性状に応じた処理・貯蔵・処分方法の解析
(コスト、廃棄体量、スケジュール等)可能な計算コード整備。

【廃棄体確認用データの整備】
廃棄体確認に向けての内容物(有
害物質を含む)や核種インベ
ントリデータの整備
(データベース化)

【技術開発】

(新規項目)

- 固体廃棄物の廃棄体化技術開発 (溶融技術を応用した廃棄体化のため
の技術開発)
- ウラン系廃棄物高除染技術開発 (処分の経済性の観点から簡易な浅地
中処分等を目指した除染技術開発)
- 超臨界による放射性
有機廃棄物の処理技術開発 (アスファルト固化体/プラスチック固化体等
の超臨界による無機化処理技術開発)

(既存項目)

- ・低レベル濃縮廃液の核種分離技術開発(LWTF)
- ・塩廃液分解技術(LWTF)
- ・ハル等廃棄物の高圧縮技術開発(HWTF)
- ・よう素廃棄物安定化技術
- ・TRU廃棄物測定技術等
- ・デコミッション要素技術開発等

核燃料サイ
クルに
関する
廃棄物
技術策
開発

研究内容

1. 研究開発分野 放射性廃棄物処理・処分
2. 評価対象 核燃料サイクル廃棄物の処理技術開発
3. 新規開発課題 核燃料サイクル廃棄物の廃棄体化の技術開発
4. 実施担当部署 環境技術開発推進本部
5. 全体説明

5.1 研究目的と開発計画

5.1.1 廃棄物管理の現状/課題

これまで動燃における放射性廃棄物の管理は、主に発生廃棄物の貯蔵・保管とそのための減容処理（技術開発を含む）を行ってきた。

この間、放射性廃棄物の処分に關しては、国を含め、関係機関での検討が進み、廃棄体としての必要要件が明らかになりつつあり、有害物質の分別管理、処分を考慮した処理の実施、廃棄体確認の重要性が強く認識され、技術開発や実際の対策が進んできている。

今後新法人においては、自ら発生させる放射性廃棄物について、施設の廃止措置を含め発生から処分に至る廃棄物管理を合理的にかつ総合的に実施していくことが必要であり、このため、全体プログラムの策定とこれを実施していくための廃棄体化技術開発（除染、廃棄体化、廃棄体確認等）を鋭意進めていく必要がある。

5.1.2 動燃（新法人）における核燃料サイクル廃棄物対策の基本方針及び目標

(1)基本方針：

- ①自ら発生させる放射性廃棄物について、施設の廃止措置も含め、放射性廃棄物の発生から処分に至る合理的かつ整合性のある廃棄物管理方策の確立を目指す。
- ②国内外の動向を踏まえ、社会のニーズに沿った技術開発を進める。
- ③技術移転を視野に入れた技術開発を行う。

(2)目標：

- ①放射性廃棄物の発生量の抑制
- ②放射性廃棄物の安全かつ計画的な処理と保管管理
- ③放射性廃棄物の廃棄体要件の明確化及び処分方策の確立

尚、従来の研究成果、今後新たに実施する「核燃料サイクル廃棄物の廃棄体化の技術開発」を進める事により、当面は3年後程度をめぐり、発生から処分までの廃棄物管理方策の基本的な計画（案）を立案する。

5.1.3 技術開発計画概要

上記の目標を達成するために必要な技術開発は、下記のとおりである。

(1)既存の技術開発

動燃（新法人）における核燃料サイクル廃棄物の処理・貯蔵及び技術開発の現状を図-1に示す。

○減容・安定化処理に関する研究開発

(イ)東海事業所再処理工場の廃棄物

- ①高放射性廃液については、ガラス固化技術開発施設（TVF）でガラス固化技術の実証を行っている。
- ②ハル等については、高圧縮法に関する技術開発を進めており、その成果に基づいてハル等処理技術開発施設（HWTF）の設計を進めている。
- ③廃溶媒、廃希釈剤については、廃溶媒処理技術開発施設でプラスチック固化技術の実証を行っている。
- ④低レベル濃縮廃液については、アスファルト固化処理に代わる減容性に優れた処理技術として核種分離技術開発を進めており、その成果に基づいた低放射性廃棄物処理技術開発施設（LWTF）の建設を計画している。LWTFでは、難燃物の焼却処理も合わせて計画している。
- ⑤低レベル濃縮廃液の核種除去済廃棄物（塩廃液）の処理技術開発及びよう素含有廃棄物の減容安定化処理技術の開発を進めており、低レベル不燃性廃棄物の廃棄体化を目指した第二低放射性廃棄物処理技術開発施設（LWTF-II）の設計に反映する計画である。
- ⑥クリプトンについては、クリプトン回収技術開発施設（KRF）において、液化蒸留法による回収技術の開発を行ってきた。今後は固定化ホット試験を行っていく計画である。

(ロ)東海事業所プルトニウム燃料施設の廃棄物

- ⑦プルトニウム廃棄物処理開発施設（PWTF）で可燃・難燃物の焼却処理及び焼却灰、金属類の溶融処理による減容安定化処理技術の開発・実証試験を行っている。

(ハ)東海事業所ウラン取扱施設

- ⑧ウラン系廃棄物については、可燃物の焼却処理を行っている。金属類やフィルター類については、圧縮法による減容処理施設としてウラン廃棄物処理施設（UWTF）の建設を行っている。

(ニ)大洗工学センター

- ⑨各種試験施設から発生する液体廃棄物については、マイクロ波溶融法による固化処理を行っている。
- ⑩固体廃棄物については固体廃棄物前処理施設（WDF）において除染・

解体・切断等の処理を行っている。

- ⑪大型固体廃棄物の減容安定化処理を目的とした固体廃棄物処理技術開発施設（LEDF）の設計を行っている。

(ホ)人形峠事業所

可燃・難燃物の焼却処理を行っている。

○共通技術開発

- ⑫ドラム缶中の放射性核種インベントリーの定量のため、TRU 廃棄物測定技術開発を進めている。
- ⑬将来の大型施設の廃止措置に備え、測定・除染・解体等の要素技術開発を進めている。

(2)新規研究開発

従来動燃においては、減容処理を中心に技術開発を進めてきたが、今後廃棄体化に関する技術開発を充実させるため、下記研究開発を新規に実施する。課題設定、内容については、6項以降で説明する。

- ①核燃料サイクル廃棄物管理に関する解析システムの開発
- ②固体廃棄物の廃棄体化技術開発
- ③ウラン系廃棄物の高除染技術の開発
- ④超臨界による放射性有機廃棄物の処理技術開発

5.1.4 成果の反映

既存の処理施設の今後の運転計画及び新設の処理貯蔵施設の建設・運転及び廃止措置、処分計画に反映させると共に民間へ技術移転を行っていく。

5.2 既存研究開発課題

既存研究の技術開発課題、開発目的、開発の現状を表-1に示す。

5.3 実施体制

新法人移行までは、本社の環境技術開発推進本部がとりまとめ、東海事業所の環境技術開発部および環境施設部で主に進めていくが、新法人移行後は、本社では環境保全プロジェクトチームが、東海事業所では環境保全センターがとりまとめを行う。

6. 課題設定について

- 1) 課題設定の考え方・開発展開の位置づけ（必要性・緊急性・設定の背景）
 - ・定常廃棄物の発生量や可燃・不燃などの種別についてのデータは、各事業

所毎に整備されているが、処分をにらんだ内容物や核種インベントリーの詳細データ整備及び大型施設解体に伴う廃棄物発生量の把握は、今後実施していく必要がある。

- ・ 今後各種の放射性廃棄物を廃棄体化していくためには、適切な処理技術を選定し、放射性核種インベントリー、核種の挙動等に関するデータ蓄積を行っていく必要がある。そこで、廃棄体化に優れた技術として一般産業廃棄物分野及び原子力分野で研究が進み導入されつつある高温熔融技術に着目し、調査、検討、適用性の評価を行い、技術開発項目の摘出を行って、必要な開発を進める。
- ・ 処分の安全性に関するこれまでの検討結果によれば、ウラン系廃棄物の多くは、深部地下埋設処分が必要となる可能性が高い。このため処分の経済性の観点から、簡易な浅地中処分あるいはクリアランスレベル以下にできるような高除染技術の開発を行う必要がある。
- ・ 現在の処分研究の知見では、アスファルト固化体やプラスチック固化体などの有機性廃棄物の処分に対しては、有機物の分解によるバリア機能低下の可能性など不確実な問題が残されており、特別な配慮が必要とされている。そのため、オプションとしてより安定性に優れた固化体への変換を目的とした有機物の無機化処理技術開発を行う必要がある。さらに、フッ素を含む廃油等の処理技術開発を進める必要がある。このため、近年研究開発が進展している超臨界流体技術の適用性について、技術開発を行う。

2) 従来計画、方針との整合性

放射性廃棄物対策に関する国の方針や新法人に求められているミッションと整合がとれている。

3) 関連する国内外の他研究機関での進捗状況

- ・ 高温熔融技術については、一般産業廃棄物分野では実用化されており、原子力分野でも開発が進み、原研や電力で導入されつつある。また、原子力委員会バックエンド対策専門部会で検討された RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方の中にも、高温熔融固化技術開発の重要性が述べられている。
- ・ ウラン系廃棄物に対する除染技術については、原子力環境整備センターが、スラッジ、焼却灰、フィルタ等を対象に、化学的除染方法、電気化学的除染方法、物理的除染方法などの従来技術について研究を進めている。また、高除染が期待される新技術としてのレーザー除染法については、アイオワ大学（米国）等で基礎研究が進んでいる。

- ・超臨界による廃棄物処理は、有機物の無機化という観点からも、有望な方法の一つと考えられており、一般産業廃棄物分野では、技術開発が進んでおり、原子力分野でもイオン交換樹脂の分解等基礎的な検討が進みつつある。

4) 予算額の目安

当面、5年間で総予算2070百万円を目安としている。

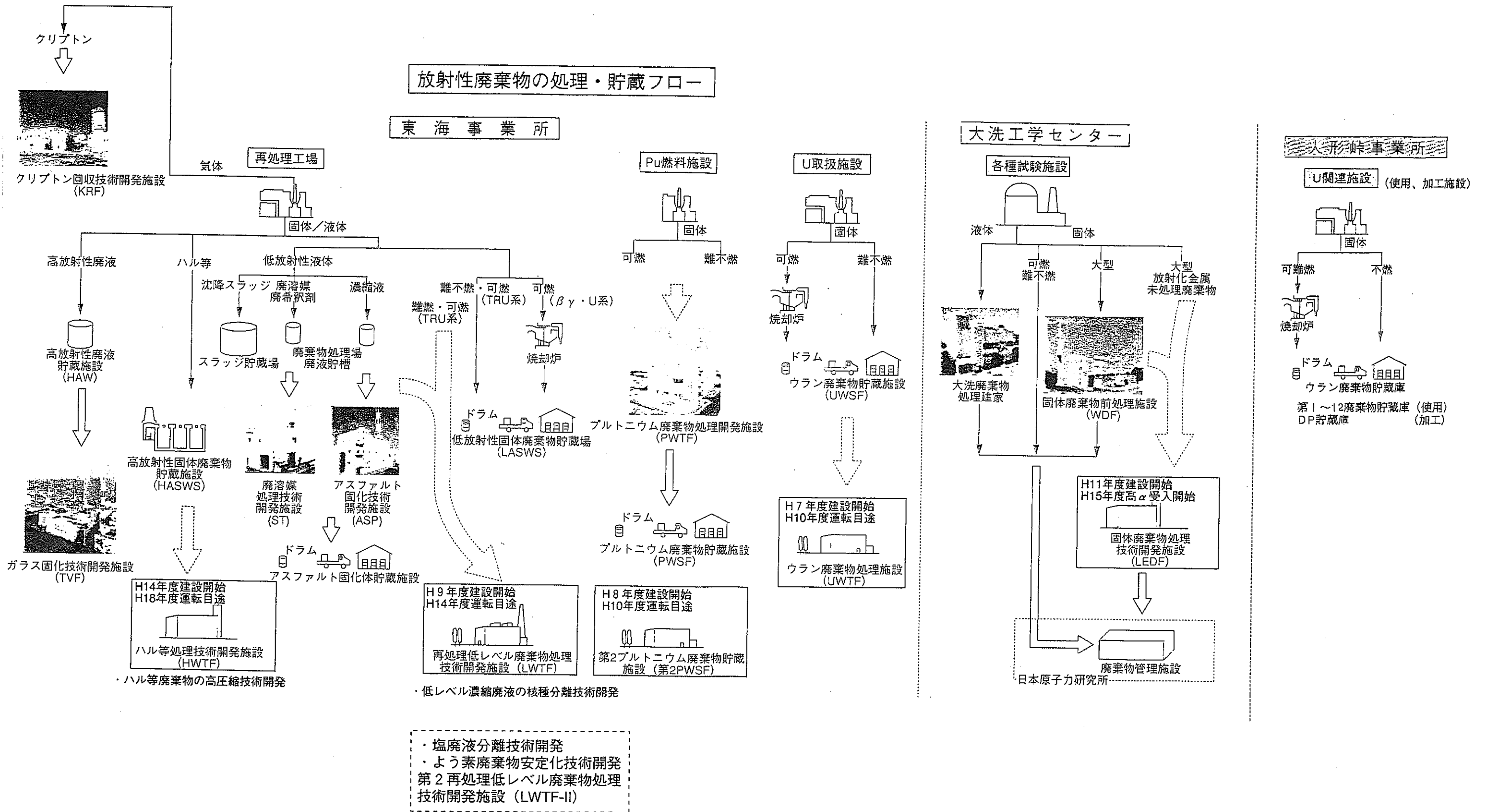
7. 研究内容

研究内容、投入資源の活用計画等について7.1から7.4に示す。

8. 特記事項

技術開発に当たっては、外部の専門家等の意見を伺い、評価を受けつつ進める。

図-1 動燃（新法人）における核燃料サイクル廃棄物の処理・貯蔵及び技術開発の現状



共通技術
 ●
 ●
 デ
 コ
 ミ
 ッ
 シ
 ョ
 ニ
 ン
 グ
 測
 定
 技
 術
 要
 素
 開
 発
 技
 術
 開
 発

表－1 既存研究開発課題／開発目的／開発の現状

既存研究開発課題	開発目的	開発の現状
高放射性廃液のガラス固化技術開発	ガラス固化技術の実証	ガラス固化技術開発施設（TVF）でガラス固化技術の実証を行っている。
ハル等廃棄物の高圧縮技術開発	ハル等廃棄物の減容安定化	高圧縮法の開発及びジルカロイファイン特性評価等を進めている。 ハル等廃棄物処理技術開発施設（HWTF）の設計を進めている。
廃溶媒、廃希釈剤のプラスチック固化技術開発	廃溶媒、廃希釈剤の固化	廃溶媒処理技術開発施設でプラスチック固化技術の実証を行っている。
低レベル濃縮廃液の核種分離技術開発	核種分離による廃棄物量の減容化	コールド／ホット試験により最適運転条件を検討中。低放射性廃棄物処理技術開発施設（LWTF）の建設計画中。
低レベル濃縮廃液の塩分解技術開発及び よう素廃棄物安定化技術開発	核種除去剤廃棄物の処理（硝酸塩の分解）	硝酸塩分解技術について、コールド試験実施中。
	よう素含有廃棄物の減容・安定化处理	水熱固化、セメント固化、銅マトリクス固化等の試験を実施中。
プルトニウム廃棄物処理技術開発	減容・安定化处理	プルトニウム廃棄物処理開発施設（PWTF）で焼却・溶融（マイクロ波）固化処理実施中。
ウラン系廃棄物処理技術開発	減容化处理	ウラン廃棄物処理施設（UWTF）の建設終了。近々運転開始の予定。
固体廃棄物の処理技術開発	減容・安定化处理	大洗工学センターで固体廃棄物前処理施設（WDF）を運転中。さらに、固体廃棄物処理技術開発施設（LEDF）の設計を行っている。
T R U 廃棄物測定技術開発（共通技術）	放射性核種インベントリーの定量等の非破壊測定技術開発	パッシブ／アクティブ中性子法による均質廃棄物の測定方法を確立。
デコミッショニング要素技術開発（共通技術）	大型施設の解体技術、解体廃棄物の除染、測定等の要素技術開発及びデコミッショニングシステム構築	プラズマ切断技術、湿式、乾式等の各種除染技術の開発及びデータベースの整備を実施中。

7-1 核燃料サイクル廃棄物管理に関する解析システムの開発

(1) 研究開発の進め方・実施内容

1) 研究開発の目的・方向性

動燃（新法人）で発生する全ての放射性廃棄物（定常廃棄物および将来の施設デコミ廃棄物）を対象に、発生から処分に至る廃棄物管理を合理的かつ総合的に実施していくために、全体プログラムの策定を行う。

2) 研究内容（図-1）

- ・定常廃棄物およびデコミ廃棄物の種類、量、性状についてデータ整備するとともに発生量予測等の解析を行う。
- ・国内外の廃棄物の処理フローや適用技術などの技術情報を収集し、動燃（新法人）の放射性廃棄物処理プロセスや適用技術などの評価選定を行う。
- ・発生する廃棄物について、適切な貯蔵計画を作成する。
- ・各種の廃棄物に対して、処分の観点から重要な核種についての解析、処分形態の検討及び安全性の解析を行う。
- ・これらをまとめて、廃棄物の発生から処分に至る全体的な計画を作成する。

3) 開発計画（図-2）

- ・平成11年度～12年度にかけて施設解体に伴う廃棄物量評価を行うとともに、定常廃棄物のデータと併せデータベースの整備を進める。平成13年度以降はデータベースの改良及びデータの補充を進めていく。
- ・合理的処理・貯蔵・処分方法の解析、評価については、平成11年度～12年度に廃棄物量の解析、スケジュール等の解析、処分の安全性解析等に基づき放射性廃棄物の処理・貯蔵・処分の全体計画（案）を策定する。平成13年度以降は見直しを進める。
- ・廃棄体確認データ整備については、平成11年度～12年度にかけて既存固化体のデータ整備を進める。平成13年度以降はデータベースの改良及びデータの補充を進めていく。

2) 研究開発を行うに当たっての予算・支出計画

- ・当面は内部実施用の人件費と外部委託費等を予定し、廃棄物データベースの構築、解析作業に必要なツールの整備及び解析に必要な予算を予定する。

3) 管理体制

- ・本社の「環境保全プロジェクトチーム」、東海事業所の「環境保全センター」を中核組織とした体制により実施し、外部の専門家等による評価及び外部関連機関との技術情報交換を行うことにより、効率的に進めていく。

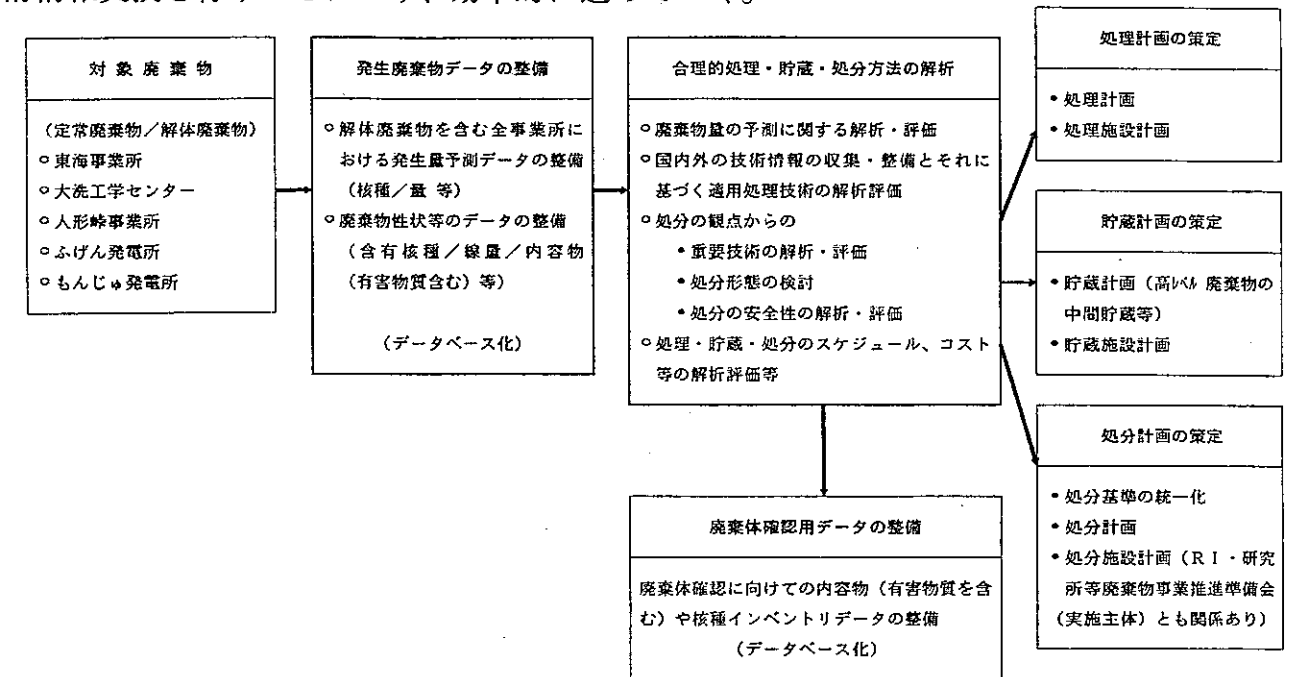


図-1 核燃料サイクル廃棄物管理に関する解析システムの開発内容

(2) 投入資源の活用計画

1) 研究開発を行うに当たっての組織、人員の構成および今後の拡充計画

- ・実施組織は、本社の「環境保全プロジェクトチーム」及び東海事業所の「環境保全センター」を中核的な実施主体とし、関連する事業所内の各センターや各部、大洗工学センターや人形峠事業所と連携して研究を推進する。
- ・また、設計作業の一部やデータベース化については、外部委託作業等により対応していく。

	平成11年	平成12年	平成13年	平成14年	平成15年
○発生廃棄物のデータ整備	解体廃棄物の発生量調査/定常廃棄物のデータに基づくデータベースの整備		データベースの改良		
○処理・貯蔵・処分方法の解析 (廃棄物量の予測、スケジュール、処分の安全性解析等)	解析、評価		処理・貯蔵・処分に関する全体計画(案)の策定	見直し	
○廃棄体確認データの整備	既存固化体のデータ整備		データベースの改良		
必要人員数(人)	10	10	10	10	10
概略予算案(百万円)	120	120	120	120	120

図-2 核燃料サイクル廃棄物管理に関する解析システム等の概略工程

7-2 固体廃棄物の廃棄体化技術開発（その1）

(1) 研究開発の進め方・実施内容

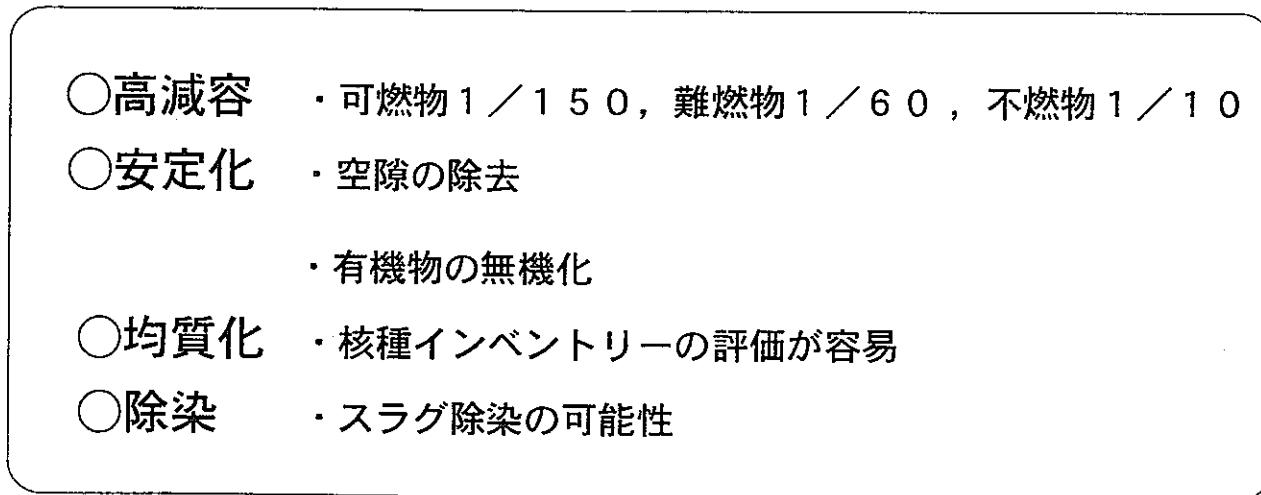
1) 研究開発の目的・方向性

低レベル放射性廃棄物は、発生量が多く、種類も紙、布、木材等の可燃物、塩ビ、ゴム等の難燃物、金属、コンクリート等の不燃物まで多岐にわたる。

一方、貯蔵・輸送・処分コストを軽減する目的の減容化とともに、化学的に安定なものとする目的で、高温熔融処理技術（図-1参照）を適用することが原子力発電所廃棄物及びRI・研究所廃棄物等を対象に検討されている。

これらのことから、動燃（新法人）で発生する多種多様な低レベル放射性廃棄物について高温熔融技術の適用性を評価し、必要な技術開発課題を抽出整理して技術開発を進める。

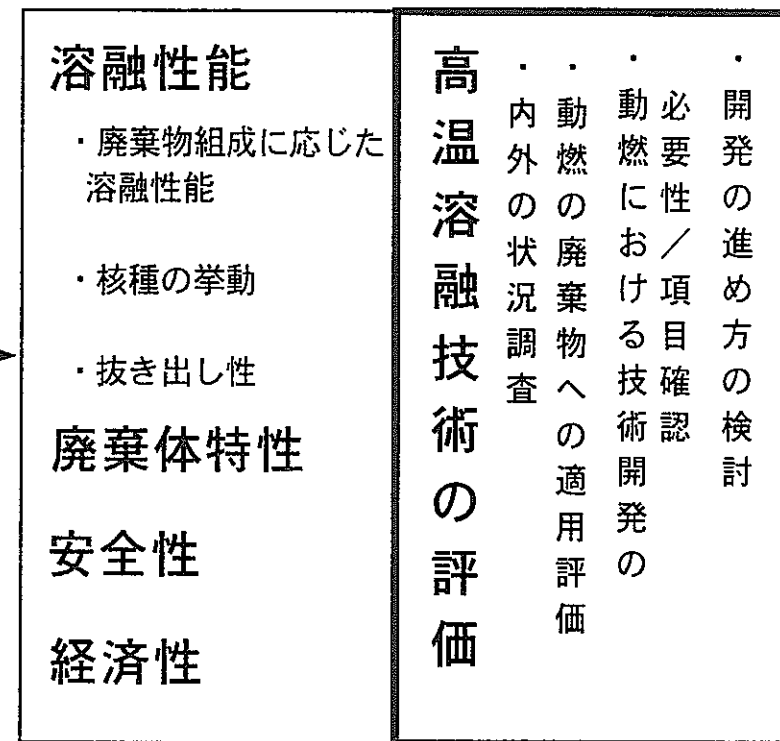
図-1 高温熔融の特徴



対象廃棄物の候補

低 レ ベ ル 放 射 性 廃 棄 物	不燃物
	・金属類
	・ポンプ等機器
	・コンクリート
	・フィルタ類
	・スラッジ類
	・焼却灰
	可燃物
	・紙/布/木片
	・プラスチック類
難燃物	
・塩ビ類	
・ゴム類	

課題として考えられる項目



高温熔融技術の開発・導入

2) 研究内容/開発計画（図-2、図-3、図-4参照）

①高温熔融技術の適用性評価研究

不燃物、可燃物、難燃物を処理対象とした高温熔融技術に関して、国内外の技術情報の調査を行ない、その結果に基づき、熔融性能、廃棄体特性、安全性、経済性等の観点から、高温熔融技術の動燃（新法人）で発生する廃棄物への適用性評価を行う。あわせて、開発すべき課題を明らかにする。

②高温熔融技術の開発

適用性評価結果および抽出された開発課題に基づき、試験装置の設計製作およびデータ取得を行う。

図-2 高温熔融技術の開発の進め方

7-2 放射性廃棄物の廃棄体化技術開発 (その2)

項目/年度	平成11	平成12	平成13	平成14	平成15
1.高温熔融技術の適用性評価研究					
①高温熔融技術調査	○	○	○	○	○
②事業団廃棄物への適用性評価および開発課題の抽出	○	○	○	○	○
2.高温熔融技術の開発					
			○	○	○
人員(名)	4	4	4	5	6
予算額(百万円)	約50	約50	約100	約330	約70

図-3 廃棄体化技術開発の概略工程

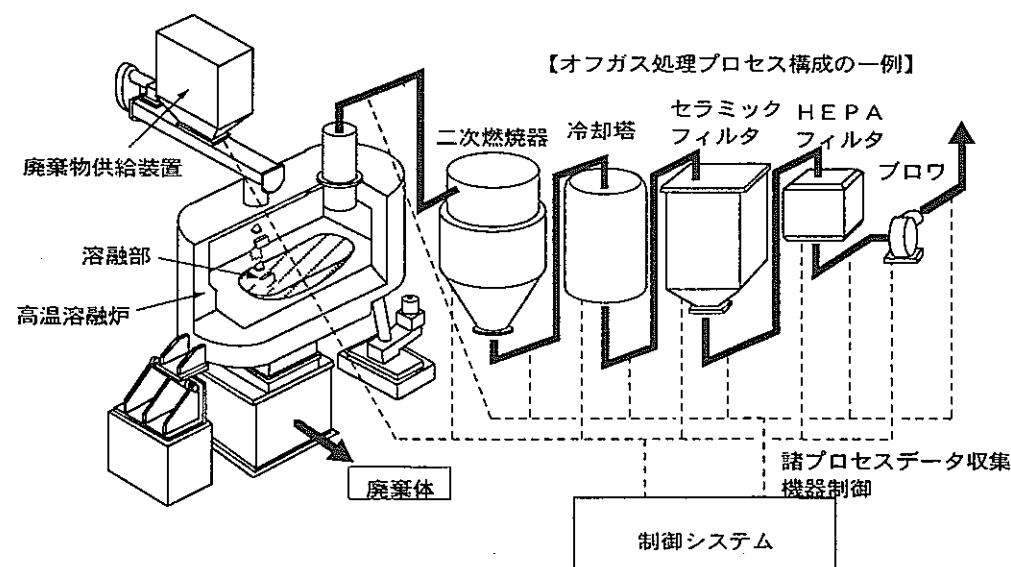


図-4 試験装置の概念

4) 期待される成果

動燃から発生し、広範にわたる組成・性状・放射性核種濃度等を特徴とする多種多様な低レベル放射性廃棄物について、減容化、安定化、均質化に優れた廃棄体への処理ができる可能性がある。また、廃棄物の処理・処分コストの低減化につながる。

(2) 投入資源の活用計画

1) 研究開発を行うに当たっての施設・設備の内容と整備状況と利用計画

試験設備の設置は、東海事業所 工学試験棟が可能である。平成14年度に製作予定の工学試験装置は、溶融性能試験等を終了した後、将来、廃棄物処理施設に設置する実機の高温熔融装置の設計・評価データの取得等に活用する。

2) 研究開発を行うに当たっての組織等

実施組織は、東海事業所「環境保全センター」を主体とし、関連事項の調査・検討については東海事業所の各センター及び他事業所との連携を図る。

なお、本技術開発に関する人員・予算については図-3の概略工程に示す。

(3) 管理体制

新法人では各事業所の環境保全関連部門が、施設運転及び研究開発を含めた廃棄物管理関連業務を担当する。安全の確保、試験廃棄物の処理等については、法令及び新法人の諸規定を遵守し、安全第一を旨として研究開発を実施する。

また、外部の専門家による評価および外部関連機関との技術情報交換を行うことにより効率的に進めて行く。

7. 3 ウラン系廃棄物の高除染技術の開発（その1）

（1）研究開発の進め方・実施内容

研究開発の目的・方向性

ウラン系廃棄物を簡易な浅地中処分あるいはクリアランスレベル以下にするために、従来技術の再評価及び新しい除染技術を開発することは、廃棄物処理処分コストの低減化に対し極めて重要である。また、除染後の放射線量がクリアランスレベル以下であることを確認するための測定技術を確認することが必要となる。新しい除染技術の開発の方向性は、デコミッションも視野に入れ、大型機器やセルの部分除染に対応できる乾式で可動式の除染技術を開発することである。

研究内容

・浅地中処分あるいは想定されるクリアランスレベルを念頭においた除染技術の確立を目指し、まず、従来技術である下記①、②と③を利用した除染技術の調査研究を行い、新除染技術との比較や適用範囲を検討する。有望と推定される従来技術については、改良研究を実施する。また、新除染技術であるレーザー除染法についてはアブレーション基礎試験及び汚染物の回収試験を行い、その結果に基づき除染対象物の形状や形態による適用方法を検討し、小規模試験に反映させる。これらの方法は、平成14年度末に工学試験への展開の可否を評価する。

- ①物理的除染法 ②化学的除染法 ③電気化学的除染法
- ④アーク除染法等 ⑤レーザー除染法

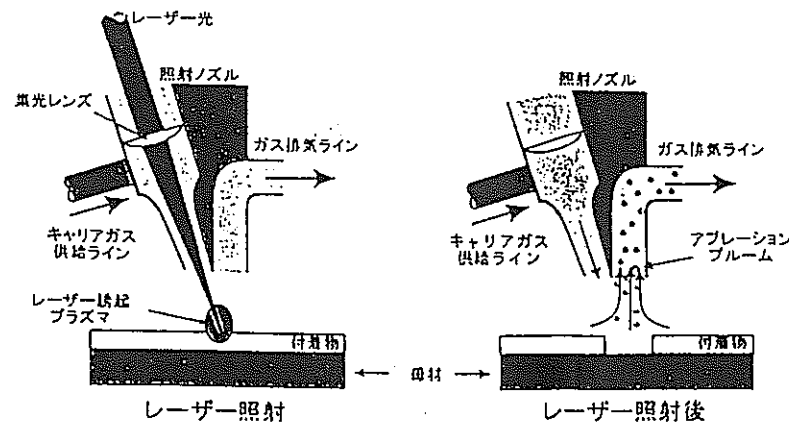
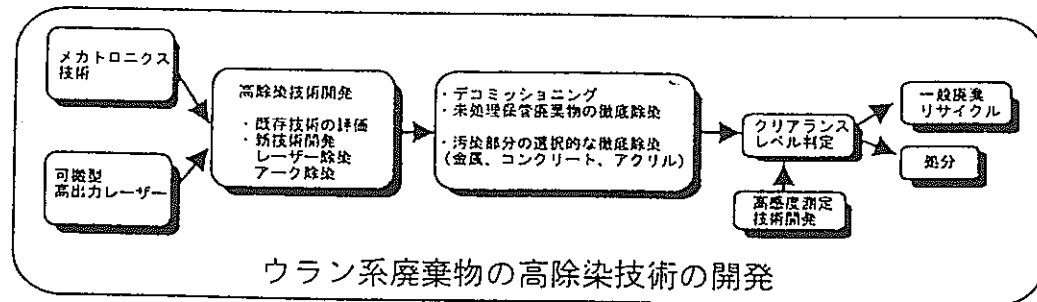


図-1 除染技術の例(レーザー除染法概念図)

・除染後の対象物がクリアランスレベルを満たしているか否かの判定には、低レベル放射性廃棄物中の放射線量の測定技術の確立が不可欠である。低レベル放射性廃棄物に対する含有放射性物質測定技術は確立しつつあるが、まだ実施においての適用例は無い。そのため、測定対象物の違いによる問題点や改良すべき点を抽出し、実用化に向けた検討及び研究を行う。

期待される成果

- ・深地層処分を必要とする廃棄物の一部が、高除染後、浅地層処分可能となり、処分コスト低減化につながる。
- ・高除染後、クリアランスレベル以下であれば、一般廃棄物としての取扱いが可能となり、廃棄物管理コストが低減される。
- ・TRU廃棄物等の除染にも適用できる。

内部実施の比率

研究内容に応じて、外部機関へ委託研究、共同研究を実施する。

開発スケジュール

項目及び研究等の概要	11年度	12年度	13年度	14年度	15年度
従来除染技術の再評価	○ 調査研究		○ 改良研究		○ C & R
新除染技術開発 (レーザー除染)		○ アブレーション基礎試験 汚染物の回収試験	○ 小規模システム試験		○ 工学試験 (装置設計製作)

7. 3 ウラン系廃棄物の高除染技術の開発（その2）

(2) 投入資源の活用計画

施設・設備の内容と整備状況と利用計画

平成10年度までL棟において分子レーザー法ウラン濃縮技術開発が行われており、この技術開発に使用されたレーザー（パルス炭酸ガスレーザー、YAGレーザー、エキシマレーザー）及び各種表面分析機器等（AES, XPS, TBM, SEM, XMA）が揃っている。

平成11年度から平成15年度までの当初5年間は、こうした既存の施設・設備を充分活用して研究開発を行う。

組織、人員の構成

平成11年度から平成15年度までの5年間を通じて、職員3名で研究開発を行う。

予算・支出計画

当初5年間の予算額 (単位 百万)

	H11年度	H12年度	H13年度	H14年度	H15年度	合計
予算額	40	40	80	80	80 (工学試験装置設計費)	320

(3) 管理体制

安全確保（放射線及び一般安全）、放射性廃棄物の処理等については、関連する法令及び新法人の諸規定を遵守し、安全第一を旨として研究開発を実施する。

(4) その他

開かれた研究開発体制

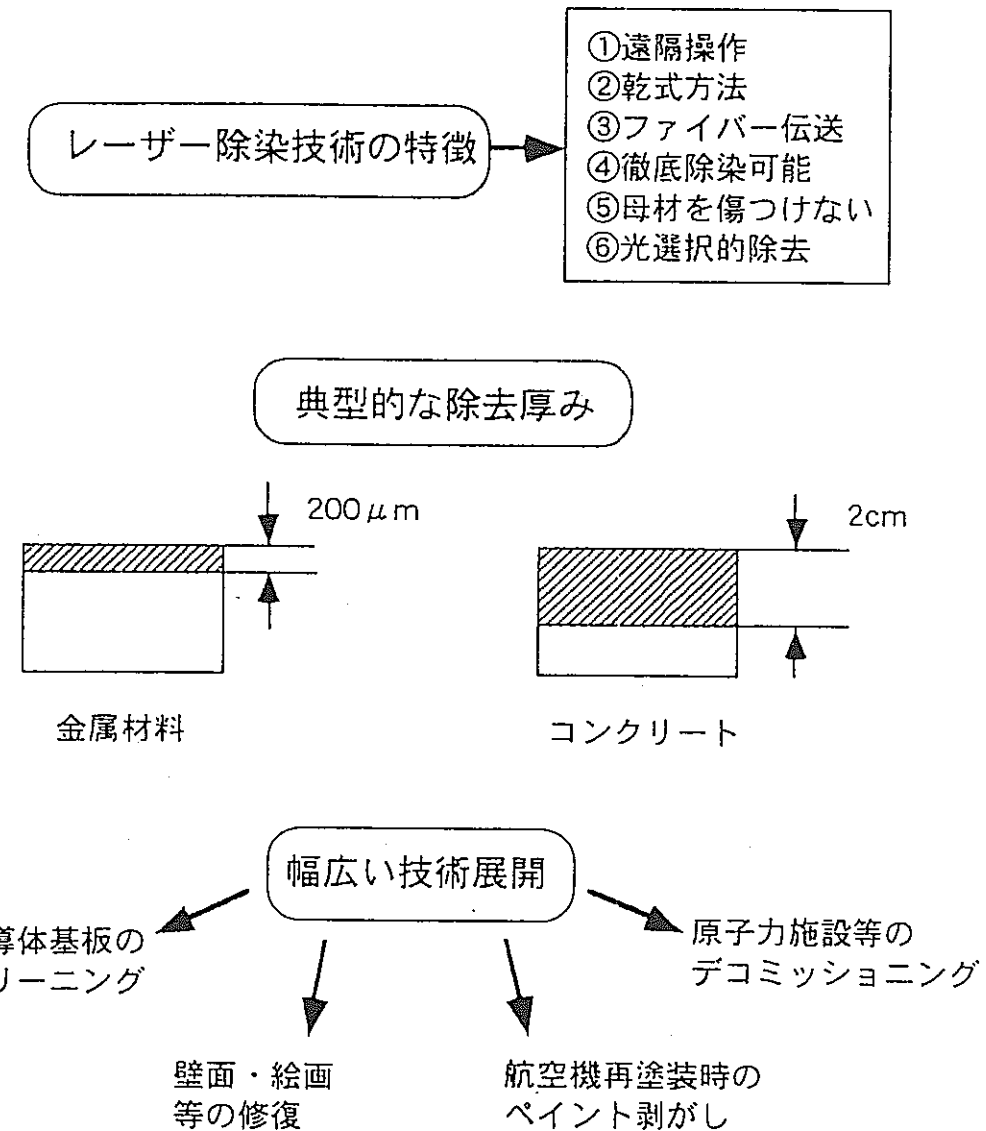
・レーザー除染技術においては、既に学会発表・プレス発表を実施した。また、従来除染技術に関しては、多くの他産業分野で利用可能なことが既に分かっており、本技術開発の成果も、メーカーや研究機関等への技術移転が十分に考えられる。また、本技術開発におけるデータは逐次公開し、事業団施設の共同利用化も進めていく。

技術移転を含む成果の普及・社会への還元

・原子力施設の除染、廃炉等への応用が考えられる他、一般建築業・航空機産業での再塗装時のペイント剥がし等への応用も考えられる。

研究開発終了後の設備の解体除染や廃棄物処理対策

・放射性廃棄物の区分管理を行い、除染した後に保管管理することにより、廃棄物の発生量を極力おさえる。



7.4 超臨界による放射性有機廃棄物の処理技術開発（その1）

(1) 研究開発の進め方・実施内容

研究開発の目的・方向性

廃棄体に含まれる有機物の中には処分環境条件において難溶性の放射性核種と錯形成して、その溶解度を上昇させるものが存在する。有機物の形態は多種多様であり、処分性能の評価において、不確定要因を取り除くためには、極力それらの有機物を取り除いた廃棄体とすることが望ましい。このため、動燃東海再処理工場で発生したアスファルト固化体及びプラスチック固化体に関して処分方策の選択枝の一つとして、無機化処理の可能性について検討を行う必要がある。無機化処理の方法には直接焼却する以外にも方法がある。特に近年技術開発の進展がめざましく、環境に優しい技術である超臨界状態を利用した酸化法について技術の成立性を評価する。

また、放射性液体廃棄物の不燃性フッ素油、溶媒等の有機性廃棄物の処理についても超臨界状態を利用した処理法の適用可能性を評価する。

研究内容

超臨界を利用した技術は図-1に示すように、酸化反応、加溶媒反応、水酸化反応などに関して応用研究が行われている。本件は有機廃棄物の無機化処理技術として、超臨界水酸化法による廃棄物の分解技術の適用性の検討を行うものである。

超臨界水酸化法の模式図を図-2に示す。水に廃棄物及び酸素を混合し、超臨界状態（374℃、221気圧以上）にすることにより、廃棄物は、二酸化炭素と無機塩類に分解される。超臨界水酸化法は、分解効率が非常に高い（99.9%以上）、ダイオキシン等の有害物質を発生しない等の特徴があり、環境に優しい廃棄物処理方法として世界各地の企業及び研究所において技術開発が進められている。

本件では、超臨界水酸化法の適用性に関する調査を行うとともに、基礎試験装置を製作して放射性有機廃棄物の超臨界水酸化法による無機化処理技術に関する基礎データを取得し、適用性の評価を行う。

① 基礎試験（コールド試験、ホット試験）

バッチ処理で模擬廃油や模擬固化体を使用した試験を行う。

- ・分解条件の最適化（温度、圧力、処理時間、触媒、試料の性状（粒径等））
- ・問題点の抽出と安全性の検証

② 工学試験（プラント設計データ取得試験）

連続処理のための問題点の抽出を行う。

- ・反応器の耐食性
- ・無機塩の析出防止対策
- ・信頼性、安全性の確認

③ 調査

- ・水酸化分解法の放射性廃棄物の処理への適用性に関する調査
- ・超臨界を利用した放射性廃棄物の除染に関する調査

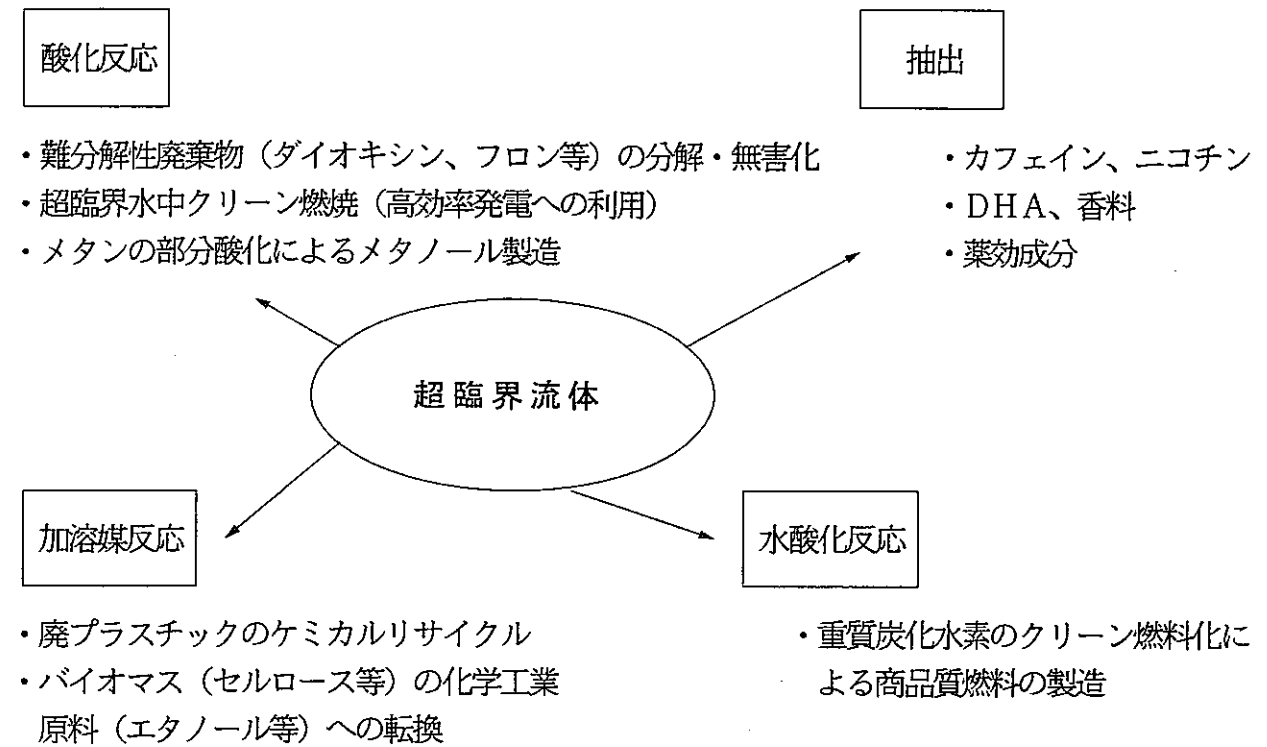


図-1 超臨界流体利用技術の応用例

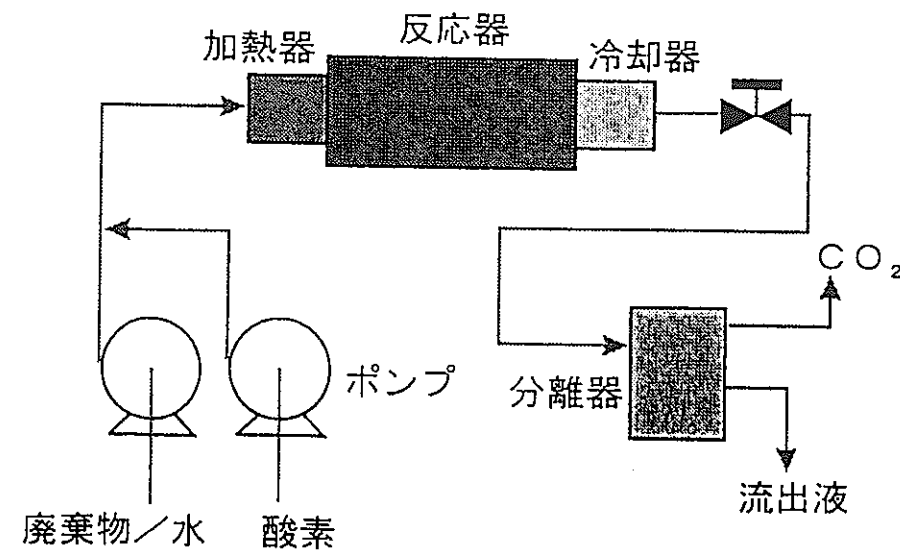


図-2 超臨界水酸化法

7.4 超臨界による放射性有機廃棄物の処理技術開発（その2）

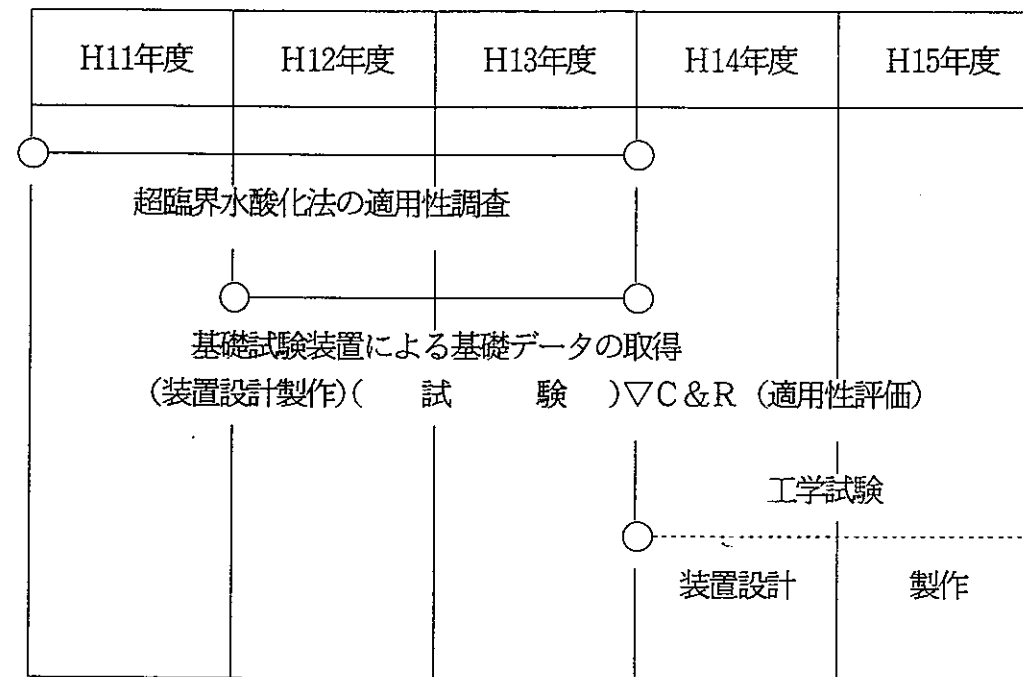
期待される成果

- (1) アスファルト固化体及びプラスチック固化体の無機化処理技術の確立。
- (2) 廃フッ素油及び廃溶媒の無機化処理技術の確立。

内部実施の比率

研究内容に応じて、外部機関へ委託研究、共同研究を実施する。

開発スケジュール



(2) 投入資源の活用計画

施設・設備の内容と整備状況と利用計画

- ① 施設
工学試験棟、ウラン濃縮施設L棟などを使用する。
- ② 設備の内容と整備状況
本研究は新規立ち上げとなるため、試験装置は製作する。なお、分析装置の一部は既存のものを転用する。

組織、人員構成

平成11年度から平成15年度までの5年間を通じて、職員3名で研究開発を行う。

予算・支出計画

当初5年間の予算額 (単位 百万円)

年度	11年度	12年度	13年度	14年度	15年度	合計
予算額	30	60	60	100	300	550

(3) 管理体制

安全確保（放射線及び一般安全）、放射性廃棄物の処理等については、関連する法令及び新法人の諸規定を遵守し、安全第一を旨として研究開発を実施する。

(4) その他

開かれた研究開発体制

超臨界を利用した技術の研究開発はかなり以前から行われており、民間企業等が保有する技術・ノウハウを積極的に活用することとする。下水の汚泥処理では、既にプラントが稼働している。またロケット燃料、混合廃棄物等の処理のためのパイロットプラントも稼働している。なお、民間では、主としてコストの問題から超臨界を利用しなければならないもの以外への超臨界技術の展開がすすんでいないが、潜在的なノウハウ等のポテンシャルは高いといえる。また、基礎研究を実施している大学等との協力も必要不可欠であり、本研究の成果は積極的に公開してゆく。

技術移転を含む成果の普及・社会への還元

民間の濃縮事業者や燃料加工メーカー等が保管している廃棄物の処理に適用できる可能性がある。

研究開発終了後の設備の解体除染や廃棄物処理対策

放射性廃棄物の区分管理を行い、除染した後に保管廃棄することにより、廃棄物の発生量を極力おさえる。

MOX燃料製造技術の高度化

MOX燃料製造工程の簡素化
(ショートプロセス)に関する研究開発

核燃料施設計画部
プルトニウム燃料工場

研究概要

1. 研究開発分野：高速増殖炉

2. 評価対象：(中区分：炉心・燃料開発、小区分：MOX 加工コストの低減)

3. 新規研究開発課題：

MOX 燃料製造簡素化プロセス（ショートプロセス）の開発

4. 研究の必要性：

FBR サイクルの実用化には、FBR 及びそれに関連する核燃料サイクル技術の革新的な経済性向上が不可欠である。MOX 燃料製造において大幅なコストダウンを達成するためには、現行プロセスを簡素化し設備数を減らすことが最も効果的である。

このため、混合転換段階で富化度調整と粉末調整を一貫して行い、現行プロセスの原料及び粉末工程を削除するショートプロセスの開発を進め、FBR 燃料製造技術の実用化の技術的見通しを得る。

5. 研究目的・内容：

短期的目標としては、マイクロ波脱硝方式での富化度調整、粉末の流動性向上、粉末の焼結性等の基礎試験をここ4年程度でプルトニウム転換技術開発施設及びプルトニウム燃料製造施設等で実施し、「MOX 燃料製造工程簡素化」に向けての技術的見通しを得る。

中期的目標（10～15年で実現）としては、基礎試験の結果の技術評価を受け、技術的見通しが確認できれば、プルトニウム燃料第三開発室 ATR 棟に小型試験設備を設置し、小規模試験を経て実燃料製造による技術の確証を行う。

また、実燃料製造結果に基づく実用プラント設計評価を実施し、経済性の見通しを得る。

6. 予想される成果と反映：

現行プロセスを簡素化し設備数が大幅に削減されることから、プラントのコンパクト化及び中間査察（IAEA、国）前のクリーンアウト作業等に伴う不稼動日数が減り、プラントの建設費及び運転コストの低減が期待できる。また、工程内核物質滞留量が多い粉末工程を大幅に削減できることから、プラント全体の工程内核物質滞留量を低減することが期待できる。

なお、本プロセスの開発は、軽水炉用MOX燃料製造にも適用できる技術であり、波及的効果は大きい。

7. 研究開発期間及び総予算：

平成11年4月～平成15年3月（基礎試験：4年計画）

総予算 約8億円（基礎試験）

8. 実施担当部署：プルトニウム燃料センター（新法人組織）

研究開発責任者：プルトニウム燃料センター長

研究内容

研究開発課題評価説明資料

平成 10 年 5 月 30 日

核燃料施設計画部

1. 研究開発分野 大区分：高速増殖炉
 MOX 燃料製造技術の高度化（工程の合理化・経済性向上）
2. 評価対象 中区分：炉心・核燃料開発
 小区分：MOX 加工コストの低減
3. 研究開発課題 MOX 燃料製造簡素化プロセス（ショートプロセス）の開発
4. 実施担当部署 核燃料施設計画部
 プルトニウム燃料工場
5. MOX 燃料技術開発の概要（MOX 燃料技術開発の経緯、今後の技術開発の方向性）

事業団におけるプルトニウム-ウラン混合酸化物燃料（Plutonium-Uranium Mixed Oxide Fuel：以下「MOX 燃料」）製造技術開発は、昭和 41 年、米国 NUMEC 社からの技術導入によって建設されたプルトニウム燃料第一開発室（以下「第一開発室」）において、プルトニウムの安全取扱技術、燃料製造技術、物性研究、燃料設計技術、照射試験燃料製造などの基礎技術開発などから始まり、当施設で約 2 トン MOX の燃料製造が行われた。

第一開発室での技術開発成果は、グローブボックス内設備の一部自動化を採用した中規模量産ラインとして事業団が設計・建設し昭和 46 年に運転を開始したプルトニウム燃料第二開発室（以下「第二開発室」）に反映され、ATR（ふげん）、FBR（常陽）の燃料製造を行ってきた。第二開発室では現在も燃料製造を継続しており、これまで 25 年間におよぶ運転で累計約 142 トン MOX の生産実績を有している。この運転を通じて、MOX 燃料の量産性ならびに製品品質の妥当性及び MOX 燃料製造工程の自動化の有効性を確認している。

第二開発室の技術開発成果は、昭和 58 年に着工した第三開発室の建設に活かされ、MOX 燃料の量産燃料製造技術の実証を目的に世界に先駆けた遠隔・自動運転による MOX プラントとして昭和 63 年に運転が開始された。以来、第三開発室では、約 11 トン MOX にのぼる「もんじゅ」、「常陽」の燃料製造を行いつつ、MOX 燃料量産製造に有効な設備機器の開発とプルトニウムを大量に取扱う上で必要となる保障措置上の技術開発などを行ってきた。

一方、昭和 52 年 4 月の日米再処理交渉の結果、事業団は再処理工場で分離精製さ

れた硝酸プルトニウム溶液を硝酸ウラニル溶液と混合転換することを提案し、独自に開発したマイクロ波加熱直接脱硝法（Microwave Heating direct denitration process：以下「MH法」）によってMOX粉末に転換する技術を完成させ（以下MH法によるMOX粉末を「MH粉末」とする）、昭和58年2月にはプルトニウム転換技術開発施設を建設し、以来約12トンのMH粉末を燃料製造に供給し続けている。

以上のように、これまで事業団はMOX燃料製造について、原料粉の製造から焼結ペレット法による燃料製造技術開発を一貫して行ってきており（図-1参照）、これらの技術についてはほぼ確立できたと考えている。今後は、FBR発電コストの低減に向けてMOX燃料製造加工コストの低減と、Pu系廃棄物の処理技術の確立が重要と考えている。（図-2参照）

MOX燃料製造コストの低減には、①建設費、②運転費及び③部材費のそれぞれを低廉化する必要があるが、前二者は主として設備・機器の高度化・コンパクト化とプロセスの合理化により対応すべきと考えている。設備の高度化・コンパクト化に関する技術開発については、第三開発室における設備更新に合わせて実施していくものとしているが、製造プロセスの合理化については、新たな技術開発と位置付け、これまでの開発経験から得られた知見を十分活用し、基礎試験から開始する必要がある。

他方、部材費の低廉化については、量産化と合理化を進めることが必要と考えており、別途対応することとする。

6. 研究開発課題の設定

6.1 課題設定の考え方（背景及び課題、目的及び必要性、開発概要）

プルトニウムは、ウランと比較して比放射能が大きいのみならず、崩壊による発熱量が大きいこと、臨界質量が小さいことなどから（図-3参照）、MOX燃料施設はウラン燃料施設に較べて建物及び工程設備などに相応の配慮が必要であり、加えて、プルトニウムは核拡散防止上国際的な査察下で管理されることから、厳重な計量管理と各々の燃料製造設備機器へのプルトニウムの付着／滞留防止対策等も必須要件となっている。また、MOX燃料製造に当たっては、Pu-241の崩壊による炉装荷時のfissile量低下を考慮しつつ、原子炉装荷時を想定したプルトニウム-ウラン比に調整する秤量工程と、原子炉照射条件下での燃料内局所発熱の原因となるプルトニウムスポットの発生を防止するための粉碎混合（均一化混合）工程が必要であること、加えてFBR燃料ペレットではそのサイズが小さいことから、成型ダイスへの粉末充填性を確保すべく造粒工程が必要であることなどが要求されるといった特徴がある。

このように、考慮すべき点やそれに伴って工程が多くなるということは、設備機器の重厚長大化を招くこととなり、設備費の高騰、査察対応作業の増加、ホールドアップ（核物質滞留）の増加、運転員の増加とそれに伴う総被ばく線量の増加、廃

棄物発生量の増加等につながり、ひいては、初期投資及びランニングコストの増大等、燃料製造の経済性に大きく影響する。

以上のような課題解決のため、「転換施設でのプルトニウム-ウラン富化度調整と MOX 施設での直接ペレット成型」を基本とする以下のような開発／改善を図ることによって、23 工程ある現行の FBR 燃料ペレットの製造工程を 8 工程にまで大幅な簡素化（以下「ショートプロセス」と呼ぶ）（図-4 参照）を図る技術開発を実施する。

- ① プルトニウム-ウランを溶液段階で、燃料仕様に合った Pu 富化度調整を行うとともにペレット成型に適した流動性のある MOX 粉末を製造する技術を開発することにより、秤量、均一化混合、造粒工程を削除する。
- ② 原料粉末に潤滑剤を添加せず、ペレット成型時にダイスの内側に潤滑剤を塗布するダイ潤滑型成型機を開発することにより、添加剤混合、予備焼結、脱ガス工程を削除する。
- ③ ペレットの寸法／密度検査、外周研削及び外観検査の 4 工程を一括して行える機能複合化設備を開発し、検査工程を簡素化するとともに、設備設置スペースの低減を図る。また、气流搬送技術を用いることによって、MOX 粉末の搬送経路及び MOX 粉末保管容器の保管スペースの削減を図る。
- ④ 各工程から規格外品等として回収される粉末／ペレットを再処理センター側で再溶解してリサイクルするプロセスを確立することにより、乾式回収工程を削除する。

このようなショートプロセス技術の開発は、原料粉末が従来の 3 種類（MOX 粉末+UO₂粉末+乾式回収粉末）から均一性のある 1 種類になるため、ペレット焼結時の制御因子が単純化できるというメリットがあり、製品品質並びに歩留まりの向上が期待できる。

ショートプロセス技術開発は、現行プロセスの技術開発の過程で培った技術、ノウハウを踏まえプロセスの簡素化を極限まで進めたペレット製造技術の集大成であり、軽水炉用 MOX ペレットの製造技術にも十分効果的な技術として利用可能である。

本技術開発は、新法人のミッションとして FBR 用 MOX 燃料製造加工技術として開発を進めるが、民間の MOX 加工事業の進展を踏まえてタイムリーな技術移転も念頭に入れる。

6.2 開発展開の位置付け

6.2.1 事業団が継続してきた技術開発との関係

事業団は、これまでプルトニウム燃料製造技術として、MOX（酸化物）及び

窒化物ペレット法、あるいはバイパック法といった種々の開発を行ってきたが、現在は、MOX ペレット法を開発の中心とし、「ふげん」、「常陽」、「もんじゅ」への燃料供給を通じてその実証を進めてきた。

本ショートプロセス技術の開発は、事業団が開発したMH法転換を前提とした技術であり、30年間にわたって培ったMOX燃料製造技術によりはじめて開発が可能な技術開発である。

6.2.2 海外技術の方向性との比較

海外のMOX燃料製造方法は、単体PuO₂粉末をプルトニウム原料粉末とするMIMAS/OCOM法（比較的高Pu富化度のMOXに調製してから、流動性の良いUO₂粉末を添加し、造粒工程を省く）とSMP法（混合、造粒、成型工程を垂直に配置し、粉末の輸送を簡素化する）が中心である。（図-5参照）いずれも工程を簡素化してプラント建設費の削減をねらいとしたプロセスである。

事業団の現行プロセスも、これら海外のMOX技術と同様の考え方で構成されているが、これまでの技術開発結果から、現行プロセスは技術的に完成度は高いものの、コスト低減には限界のあることがわかった。

今回提案したショートプロセス技術開発は、事業団が独自に開発した混合転換法を有効に利用し、海外のMOXプラントのペレット製造工程よりもさらに大幅な簡素化を図るプロセス技術を目指すものである。

6.2.3 他分野の技術成果の活用

本ショートプロセス技術の開発を進めるにあたっては、コストを低く抑える観点から他分野の技術成果を積極的に活用していくこととし、一般産業界で既に実用化されている気流搬送技術ならびにダイ潤滑型成型技術をMOXプラントに適応した方式に改良する。

7. 研究開発の内容

ショートプロセスを開発する上での技術開発項目は、①Pu富化度調整技術開発、②粉末流動性の改良（含む焼結挙動把握）、③粉末気流搬送技術開発及び④ダイ潤滑型成型機の開発に大別される。

当初の平成11年度から平成14年度の4年間は基礎試験期間と位置付け、①から④までの基盤技術の確立を目的として開発を進める。基礎試験を通して得られた結果を評価し、技術的見通しが確認されれば、第二ステップとしてプルトニウム燃料第三開発室ATRラインで小型試験設備^{*1}の整備を行い、ショートプロセスによるペレット生産性、製品品質等の確認を行う。また、ダイ潤滑型成型機の試作機の開発を行い、メンテナンス性及び安定運転の確認を行う。この小型試験設備を用いた

小規模試験並びにダイ潤滑成型試験機により技術的確認が得られた場合は、さらに第三ステップとしてもんじゅ中空ラインの一部にダイ潤滑型成型機を組み込み、ペレット量産性の性能確認を行う。

以上のように、本ショートプロセス開発にあたっては、その節目毎にチェック&レビューを行いながら、その後の実施の可否を判定していく。したがって、今回の事前評価においては、当初4年間の基礎試験の方法、開発の進め方等の妥当性について御評価いただく。

7.1 研究開発の目標

7.1.1 到達目標

ショートプロセス技術開発の到達目標は、溶液段階で所定のPu富化度に3%以内の誤差範囲で安定的に転換する技術を開発すること、並びにMH粉末のみでの良好なペレット製造性（成型性、焼結性、収率等）と製品品質の達成と、製造プロセスの途中段階で生じる規格外品の再溶解時の挙動について、現行プロセスと同等もしくはそれ以上の品質を保証できる見通しを得ることとする。

また、プラントの品質としての運転性向上、ホールドアップ量低減、廃棄物量低減、運転員の被ばく線量低減などのプラント運転性能が現行プロセスよりも優れた技術であることの見通しを得ることも重要である。

本ショートプロセス技術の成否の判定は、FBR 5基程度の発電炉に燃料供給できうる規模を想定し、年産50トン規模のプラントを建設するとした場合、その経済性において現行プロセスの場合と比較して格段の優位性を得るとともに、軽水炉燃料サイクルにおける発電単価に占めるウラン燃料製造コストと同等のFBR用MOX燃料製造コスト達成の技術的見通しを得ることとする。具体的には、対軽水炉用ウラン燃料比で3倍程度を目標とする。

7.1.2 基礎試験の目標

基礎試験は、以下の観点から評価し、次のステップである小型試験設備での確認試験に展開していく。（図-6参照）

まず、①Pu富化度調整技術開発試験では、溶液混合精度の確認やPu富化度の調整方法の改良・改善の成果を評価する。次いで、②粉末流動性改良試験では、流動性指標の確立と粉末流動性を高める処理方法及び焼結性について評価する。また、プルトニウムスポットの発生とMOX回収品の溶解性についても評価する。これらの評価結果を基に、MH粉末の量産対応化に関する検討を進める。

③粉末気流搬送技術の開発試験は、気流速度、配管内の摩耗、配管内粉末滞留量などについて評価のため試験機を設計・製作し、性能評価試験を行う。

④ダイ潤滑型成型機については、国内外の調査を行い、MOX燃料製造に適

した、機構と構造について検討評価し、その結果を基に試験機の設計を行う。

7.2 具体的な研究開発内容

図-7 に技術開発目標と課題を示す。

7.2.1 Pu 富化度調整技術開発

本技術開発は、現行プロセスの①秤量工程の削除、②均一化混合工程の削除及び③乾式回収工程の削除を目的として開発を行う。

現行プロセスでは、MOX 燃料製造側で MH 粉末と UO_2 粉末を重量測定により、所定の U/Pu 比に調整している。ショートプロセスでは転換工程において高精度の送液システム技術の開発と、送液中の貯槽内の液位量の測定精度を高める技術開発を行うことにより、所定の U/Pu 富化度に対して±3%以内の精度に調整する技術開発を行う。また、各工程毎に規格外品として回収される粉末等についても乾式回収ではなく、再処理センター側に戻して溶解/混合するので、炉内照射環境下における局所発熱の原因となる プルトニウムスポットの発生を防止できるというメリットとともに、前述の①～③の工程を削除することが可能となる。

7.2.2 粉末流動性改良

本技術開発は、現行プロセスの添加剤混合工程と造粒工程の削除を目的として開発を行う。

MH 法で転換された粉末の平均粒径は数 μm と小さく、かつ流動性の悪い微小粉末が混在している（写真-1）。現行プロセスでは、この微小粉末を含む MOX 粉末を FBR 用の細い成型ダイスに直接充填することが困難であるため、結合剤（バインダ）を添加し、乾式で造粒を行って一定の粒度に揃えることによって成型ダイスへの充填性を確保している。

MH 粉末の流動性改良は、MH 粉末を従来の焙焼還元条件よりも高い温度で処理し、仮焼して粒成長を起こさせることにより流動性の改良を図る高温熱処理試験と、脱硝後粉末を粉碎・加湿して転動造粒する方法など（脱硝造粒）の試験を行って流動性を改良し、成型ダイスに安定に充填できることを確認する。あわせて、これらの方法で得られる粉末の流動性、充填性を表す指標を確立する。また、この粉末で成型したペレットの焼結特性について、焼結温度をパラメータとして確認する。

7.2.3 粉末気流搬送技術開発

現行プロセスにおける工程間の粉末の搬送は、専用の容器を使ったバッチ式を基本としていることから、多くの専用容器を保有し、保管スペースが大きいプラントとなっている。また、工程間での搬送競合等により粉末搬送に時間を

要している。本粉末気流搬送技術は、MOXプラントのコンパクト化を図る観点から、①専用粉末搬送容器の廃止、②粉末気流搬送への変更を目的として開発を行う。

開発に当たっては、既に第三開発室内のグローブボックス内に設置している工程内の短距離の気流搬送システムの原理を踏襲して、工程間を結ぶ長距離搬送システムで必要となる大容量気流搬送システムの技術開発に必要な配管径、曲率、風量、配管内摩耗量等についての評価を行うための試験機の製作を行う。

また、配管中のホールドアップ挙動についても確認する必要がある、計量管理法の開発とともに気流搬送システムの有効性を確認する。

7.2.4 ダイ潤滑型成型機の開発

現行プロセスでは、MOX粉末に成型直前に添加剤（潤滑剤）を添加混合し、成型後のペレットのダイスからの抜き出しを容易にしている。

一方、ショートプロセスは、Pu富化度調整済みの原料粉末を直接成型設備に受け入れペレットに成型する方法であり、添加剤混合工程が存在しないことから、成型時に金型内側のみ自動的に潤滑剤（ルブリカント）を塗布する機構を有する成型機の開発を実施する。

この方法は、アルミナ産業における粉末成型技術として既に実用化されているが、MOX燃料製造での使用実績がないため、機器の開発から開始し、グローブボックス作業でのメンテナンス性の確認及び安定運転の確認を行うとともに、成型・焼結試験により、成型寸法のばらつき、焼結寸法・密度のばらつき等の評価を行い、現行プロセスと同等の品質のペレットに仕上げることができると確認する。

※1；小型試験設備

小型試験設備は、ピーカ試験レベルでは判断できないペレットの量産性を評価するために、プルトニウム燃料第三開発室ATRラインに設置するものであり、混合、成型、焼結の各設備と、粉末物性、プルトニウムスポット、O/M（Oxygen to Metal ratio）、ガス成分等の分析設備を有するラインである。その規模は量産性の確認を行うために必要な量であること、及び手作業でのグローブボックス作業によることから3kg MOX/バッチ程度の試験レベルの設備とする。

小型試験設備によるペレットの生産量は、1バッチで約1000～1500個であり、この燃料製造を通してペレットの生産性、製品品質、バッチ内のばらつき等の確認を行う。なお、本試験により生産されたペレットは照射試験や溶解性試験に供する。

8. 研究開発の進め方

8.1 研究開発体制

本技術開発は、新法人として新しくスタートするプルトニウム燃料センターを中心として一元的に開発を進める。

具体的には、本ショートプロセス技術開発の総責任者をプルトニウム燃料センター長とし、その下に製造加工部、燃料製造技術開発室及び再処理センターの転換課を置いて実施する。図-8 に実施体制を示す。

また、メーカー及び民間事業主体との協力関係については、事業団の研究開発への参加を民間要員の受け入れ等によって柔軟に対応し、メーカーの MOX 製造設備設計能力や製作能力の向上に寄与するとともに、民間事業主体へのスムーズな技術移転にも配慮した実施体制とする。

8.2 研究開発の進め方

本技術開発を進めるにあたっては、図-6 に示すように基礎試験終了時及び小型試験設備での確証試験実施後にそれぞれ評価ポイントを定めてチェック&レビューを行い、段階を踏まえて実施していく。また、試験機器、設備等はメーカーで製作されることとなるが、緊密な連携体制を確立して開発を進めていく。

8.3 今後 4 年間の詳細工程と研究開発内容

8.3.1 Pu 富化度調整技術開発

Pu 富化度調整技術開発は、平成 11 年度から溶液混合精度に関する基礎試験をコールドで行う。平成 12 年度からは、この基礎試験の成果を基に粉末流動性試験用の粉末転換を、転換施設の基礎実験室にある既設設備を用いて核物質を用いたホット基礎試験を実施する。この試験結果は、その後実施する量産対応検討に反映する。

8.3.2 原料粉末流動性改良

粉末流動性改良は、①脱硝後の粉末の高温焙焼還元処理試験と、②脱硝後粉末を粉碎・加湿して転動造粒するなどの脱硝造粒試験の 2 つの試験を実施する。

これらの試験実施にあたっては、平成 11 年度までに転換施設に新たに高温焙焼還元炉及び SEM を据付け、その後、平成 12 年度から原料粉末高温処理試験と脱硝造粒試験を実施する。そして、それぞれの試験で得られる粉末を用いて、流動性の指標、成型ダイスへの充填性、焼結特性等との相互相関を求める試験を、プルトニウム燃料第一開発室の既設設備を用いて行う。

8.3.3 粉末気流搬送技術開発

粉末気流搬送技術開発にかかわる試験は、平成 11 年度から平成 14 年度にかけて実施する。具体的には、平成 11 年度と 12 年度に試験機の設計・製作を行い、その性能評価試験を平成 13 年度と 14 年度にかけて実施する。

8.3.4 ダイ潤滑型成型機の開発

ダイ潤滑型成型機の開発は、平成 12 年度から国内外の技術調査・評価を行い、平成 14 年度に概念設計を実施する。さらに、平成 15 年度から試験機の製作を行い、平成 18 年度から模擬粉末及び UO_2 粉末を用いたモックアップ試験を行うことによって、ダイ潤滑型成型機の技術的性能、ホールドアップ量及び成型機の制御性、保守性を評価する。

8.4 開かれた研究開発体制への取り組み

事業団では、従来より新たな研究開発成果について、日本原子力学会、海外の学会への発表、国内関係誌への投稿や関係者への積極的な施設公開に努めてきた。

今後、プルトニウム燃料センターでの技術開発を進めるに当たり、第三者を加えた新たな評価委員会を設け、技術開発の達成度や進め方について適宜見直しを図りつつ開発を進める。また、開発の節目では、成果報告会等により実施状況を関係者に報告していく。

9. 投入資源の活用計画

9.1 開発資金計画

開発資金は、当初 4 年間の基礎データの取得のために 8 億円、その後の小型試験設備整備と小型試験に必要な資金については、4 年後のチェック&レビューで具体化することとしているが、現時点での見積もりでは 60 億円程度と想定している。

図-9 に示すように、本技術開発の当初 4 年間は 2 億円/年の割合で資金を投入していく。平成 11 年度はその 2 億円のうち試験に必要な設備、測定機器の整備を考慮して Pu 富化度調整試験に 0.2 億円、粉末流動性改良として高温焙焼還元炉(～1200℃)の製作・据付に 1.2 億円、SEM 据付に 0.3 億円をそれぞれ充てる。また、粉末気流搬送技術開発試験に 0.3 億円を充てる。平成 12 年度からはダイ潤滑型成型機の開発が始まるので、それに国内外の技術調査費として 0.2 億円を充て、試作機の製作が始まる粉末気流搬送技術開発に 1.2 億円を充ててこれに対応する。Pu 富化度調整試験と粉末流動性改良については試験の実施としてそれぞれ 0.3 億円を充てる。平成 13 年度と 14 年度については、概念設計が始まるダイ潤滑型成型機の開発に部分的な機能試験も含めて 1 億円/年を充て、主に試験を実施する粉末流動性改良と粉末気流搬送技術開発にはそれぞれ 0.5 億円/年を充てる。

9.2 開発人員計画

本ショートプロセス技術開発を行うために必要な人員は、計画期間中を通して10人である。当初4年間は各試験の進捗状況に応じて人員配置を行うことになり、平成11年度はPu富化度調整技術開発に研究員1名と試験要員1名の計2名を充てて、混合基礎試験、混合精度評価及び溶液濃度の制御技術開発を行う。粉末流動性改良には、副主任研究員1名と研究員2名及び試験要員に3名の計6人を充てて各設備の製作・据付、脱硝造粒方法の検討、粉末流動性測定方法の検討を行う。粉末気流搬送技術開発には研究員1名と試験要員1名の計2名を充てる。

平成12年度は前述の要員を業務の進捗に合わせた組み合わせとし、Pu富化度調整技術開発と粉末流動性改良にそれぞれ3人を充て、他の開発にそれぞれ2人を充てる。平成13年度と14年度は、ダイ潤滑型成型機の開発に4人を、他の開発にそれぞれ3人を充てる。

小型試験設備の整備とその後の試験運転には、当初4年間の試験を行った人員が継続して充たる。

この人員は、グローブボックスでのプルトニウム取り扱い作業においては、原則2名以上で一つの仕事をすることになっていること及び製作メーカーとの調整、許認可手続き等、相当の仕事量が予想されていることを勘案した上で、必要最低限の配置とした。

10. 管理体制

本技術開発における保安の確保は、新法人の保安規定に定める組織に基づいて担保する。特に、放射線安全に関する管理は、図-8に示すようにプルトニウム燃料センター所管施設については安全管理部放射線管理第一課と連携して行い、再処理センター所管施設については放射線管理第二課と連携して行う。

また、業務の開始に当たっては、事前に試験計画及び保安体制を計画書として両センターに提出し、センター長の了解を得て開始するものとする。なお、試験条件の変更がある場合には、プルトニウム燃料センターの技術評価検討会で審議し、センター長の了解を得て試験を行うものとする。さらに、技術開発の進捗については、技術評価検討会において年度毎の総括を行うとともに、センターで実施する幹部会において進捗状況及び作業内容等の確認を行う。

11. 期待される開発成果

11.1 ペレット製造工程コスト低減効果

ショートプロセス技術が完成することによって、原料調製、粉末調製、製品検査、

回収品リサイクル及び分析工程の各プロセスが大幅に簡素化される。その結果、ペレット製造工程のコンパクト化が図れ、単位面積当たりの生産能力が現行プロセスと比較して約3倍になると試算される。これに伴い、設備投資額の約35%の低減が見込まれる。また、運転員も約20%削減することが可能となり、最終的には、物品費、工場管理費などを合わせた操業費全体で約20%の低減化が可能になるものと試算される。

11.2 ホールドアップ低減効果

国際的な核物質管理の要求事項の一つに、技術的に可能な限りホールドアップ量を低く抑えることが挙げられる。事業団では、ホールドアップ量の低減のために、設備内MOX粉末の気流搬送技術、プルトニウムダストの連続回収技術の開発を行い成果を上げてきている。現行プロセスの約90%の設備については、既にホールドアップ対策を施しているため、現行プロセスではホールドアップ量をこれ以上大幅に低減させることは困難である。

一方、ショートプロセスは、ペレット製造工程内で最もプルトニウムの滞留量が多い粉末工程を大幅に削減できるため、現行プロセスと比較して約80%以上のホールドアップ量を低減することができる。

11.3 生産性向上効果

ショートプロセスの導入は、①現行のペレット製造工程に比べホールドアップ量が多くなる粉末取扱工程の設備数が大幅に削減されることから、毎月毎にIAEA、国により実施される中間査察の前の設備クリーンアウト作業時間についても約60%の削減が期待できる。

また、②現行プロセスでは、中間査察及びそれに係わる設備クリーンアウト期間での工程停止期間中の添加剤の変質防止の観点から、設備クリーンアウト直前に添加剤混合及び造粒工程での処理が行えないのに対し、ショートプロセスでは、添加剤混合工程が不要なことから、工程設備が少ないことから設備の停止及び再立ち上げ期間の短縮が見込まれ、設備利用率^{※2}の向上が期待できる。さらに③工程の削減、MOX粉末の気流搬送方式の導入により、容器への粉末詰替工程が削減され、核物質搬送の効率化が図られる。

上記①～③の効果により現行プロセスに比べ設備利用率が約20%向上することが期待できる。

11.4 他産業への効果

現在、ショートプロセスで使用することとしている気流搬送システムの基本原理については、既に一般産業で実用化されているが、MH粉のような微粉で流動性の低い粉末には必ずしも使いやすいシステムにはなっていない。

一方、ショートプロセス技術開発過程で開発する気流搬送技術は、グローブボッ

クス間を介した技術であること及び比較的長い距離の移送を目指した技術であることから、今後、グローブボックス等を採用して不活性ガスの雰囲気下で取り扱う必要のあるプロセス（例えば燃料電池製造プロセス）への採用の可能性も期待される。

※2 設備利用率= {月間運転時間(シフト/月)-設備利用不可能時間(シフト/月)} / 月間運転時間(シフト/月)

ただし、「設備利用不可能時間」とは中間査察、クリーンアウト、段取り（装置原点出し、運転条件の設定等）、定常メンテナンス（グローブ交換、ボックス内整理、搬送皿交換等）、容器搬送待ちにより設備の利用が不可能な時間をいう。

1 2. 開発終了後の設備活用

ショートプロセス技術開発は、10年間を一つの開発期間と位置付けている。開発期間終了後には、プルトニウム燃料第三開発室 ATR ラインに小型試験設備が、燃料製造機器試験施設には粉末気流搬送システムとダイ潤滑型成型機のモックアップ機が残ることになる。これらの装置は開発期間終了後も解体・撤去をせずに引き続き使用する。特にホット設備である小型試験設備は、FBR 燃料製造時に出てくる技術的課題を機動的にかつタイムリーに克服し、量産ラインにフィードバックするために必要なものであり、このような小型試験設備を有する開発体制は、もんじゅ中空ラインが整備される平成 20 年以降において特に需要が高くなると考えられることから、継続して活用する。また、このように小型試験設備を活用することは、これまでの量産運転の経験からペレット生産ラインの安定運転実現のため、大きな役割を果すものと考えられる。

昭和40~44年	昭和45~49年	昭和50~54年	昭和55~62年	昭和63~	現在の役割	今後の役割など
第一開発室（基礎試験） （昭和41年1月 運開） 					<ul style="list-style-type: none"> ・ 新型燃料（窒化物）の基礎研究 ・ 新溶接法開発 ・ 分析法開発 ・ 照射燃料の製造 	高性能燃料の基礎研究 <ul style="list-style-type: none"> ・ 現在の燃料及び製造技術の改良 ・ 新型燃料及びその製造に関する基礎技術開発 ・ ショートプロセスの基礎技術開発 ・ 照射燃料製造
<ul style="list-style-type: none"> ・ Pu取扱技術の開発 ・ MOX燃料加工技術の開発 ・ 物性研究 ・ 燃料設計技術開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 照射試験用MOXの製造 (Saxton, GETR, DFR, Rapsodie) <ul style="list-style-type: none"> ・ MOX燃料加工技術の開発 ・ 物性研究 ・ 燃料設計技術開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 照射試験用MOXの製造 (Halden, Puサーマル, 常陽照射燃料) 						
第二開発室（中規模試験） （昭和47年1月 運開） 					<ul style="list-style-type: none"> ・ ふげん燃料製造（～平成13年まで） 	MOX燃料加工施設の廃止措置技術開発 ・ 廃棄物の前処理技術の開発など
<ul style="list-style-type: none"> ・ DCA燃料製造 ・ ふげん燃料製造 ・ 常陽燃料製造 <ul style="list-style-type: none"> ・ ふげん燃料製造 ・ 常陽MK-II燃料製造 						
転換技術開発施設 （昭和58年10月 運開） 					<ul style="list-style-type: none"> ・ MOX粉末の転換（常陽, もんじゅ） 	プルトニウム混合転換技術の開発・実証 ・ 混合転換技術の実証 ・ 混合転換技術の改良 ・ 粉末特性改良
<ul style="list-style-type: none"> ・ MOX粉末の転換 						
第三開発室（量産規模試験） （昭和63年4月 運開） 					FBRライン ・ 常陽燃料製造 ・ もんじゅ燃料製造 ATRライン ・ ウラン廃棄物の貯蔵	MOX燃料製造技術の実証 ・ 量産規模での燃料製造技術の実証（常陽, もんじゅ燃料製造） ・ ショートプロセス技術開発 ・ 中空ペレット燃料製造技術開発
<ul style="list-style-type: none"> ・ 常陽MK-II, MK-III燃料製造 ・ もんじゅ燃料製造 <ul style="list-style-type: none"> ・ 量産技術の実証 ・ 計量管理技術開発 ・ 製造設備高度化 						

図-1 MOX燃料製造技術開発の経緯と今後の技術開発

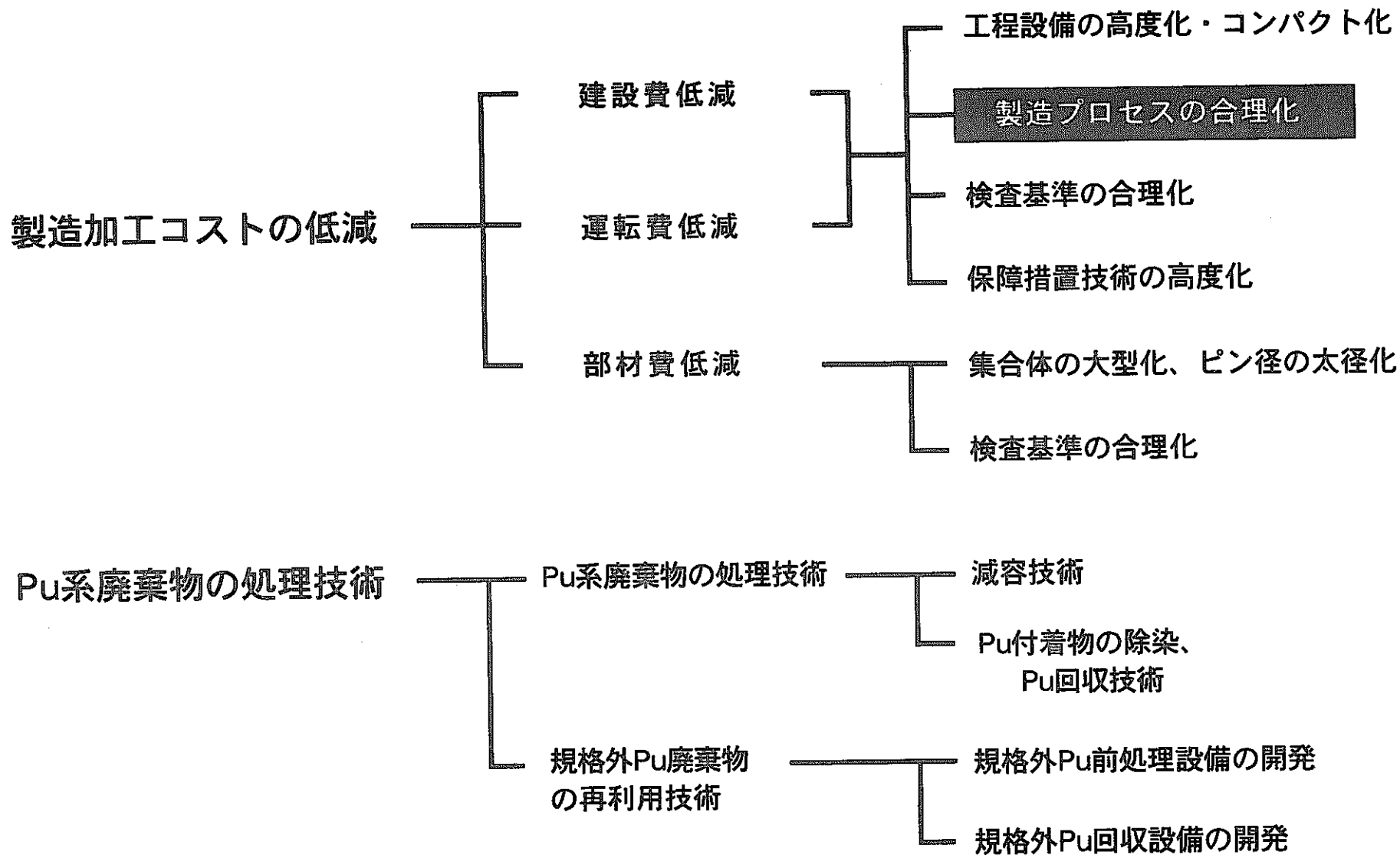
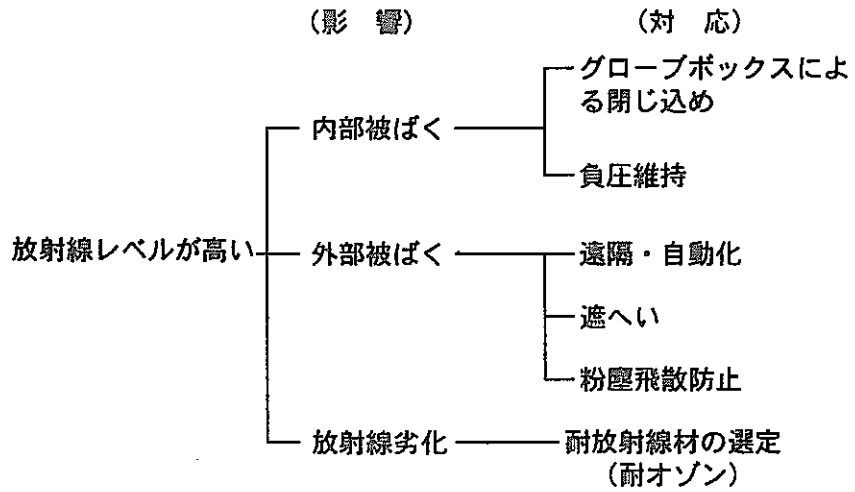
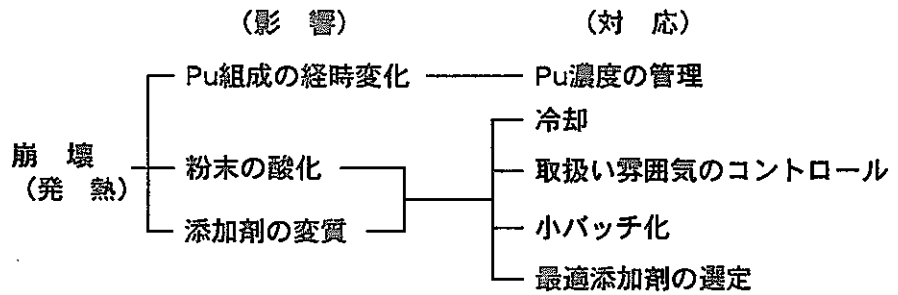


図 - 2 FBR用MOX燃料製造技術の今後の主要課題

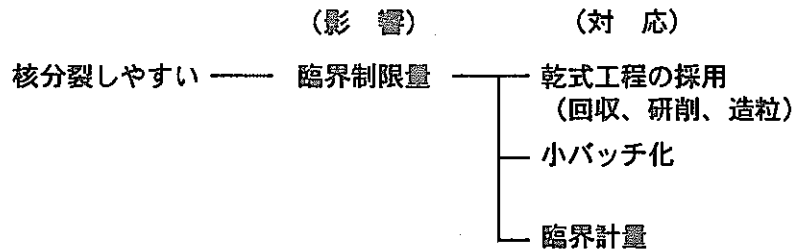
Puは放射線レベルが高い



Puは崩壊して熱を出す



Puは臨界制限量が小さい



MOXは多種原料の混合物

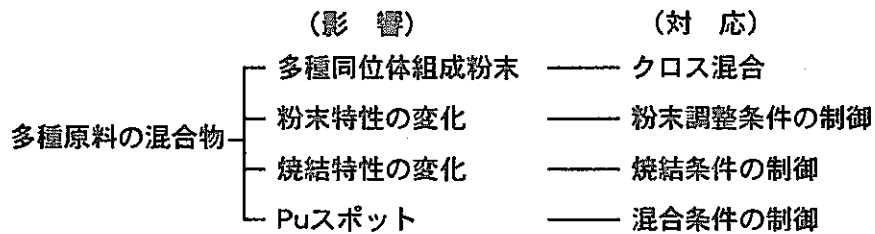


図-3 MOX燃料製造の特徴

工程	(ベ) ヘルニュークリア・デッセル工場	(仏) COGEMA MELOX工場	(独) SIEMENS HANAU工場	(英) BNFL SMP工場	(日) PNC プロセス
	生産能力 : 3.5 tHM/年 粉末調製法: MIMAS法 使用UO ₂ 粉末: AUCからのUO ₂ ADUからのUO ₂	生産能力 : 1.20 tHM/年 粉末調製法: MIMAS法 使用UO ₂ 粉末: AUCからのUO ₂ ADUからのUO ₂ PWR専用 2シフト/一部3シフト	生産能力 : 1.20 tHM/年 粉末調製法: OCOM法 使用UO ₂ 粉末: AUCからのUO ₂ 2シフト/一部3シフト	生産能力 : 1.20 tHM/年 粉末調製法: コートインダレイト法 使用UO ₂ 粉末: IDRからのUO ₂ 3シフト	生産能力 : 1.00 tHM/年 粉末調製法: PNC法 使用UO ₂ 粉末: JCO・ADUからのUO ₂ を想定
原料秤量	UO ₂ PuO ₂ Recycle 秤量	UO ₂ PuO ₂ Recycle 秤量	UO ₂ PuO ₂ Recycle 秤量	UO ₂ +ZnSt UO ₂ PuO ₂ Recycle 秤量	UO ₂ MOX Recycle MOX 秤量
一次混合 若しくは 粉碎	ミキサー 1台 ボールミル 2台 篩分離	スクリー ミキサ ボールミル 2台 篩分離	ボールミル (36 kg / Batch) Wコーン型 ミキサ (150 kg / Batch) 篩分離	アトリターミル (50 kg / Batch) ブレンダー (150 kg / Batch)	デルタ型ミキサ (150 kg / Batch) ジェットミル 1台 粉砕
二次混合	回転羽根式 混合機	スクリー ミキサ	Wコーン型 ミキサ (300 kg / Batch)	アトリターミル (50 kg / Batch)	デルタ型ミキサ (150 kg / Batch)
造粒				スフェロダイザー (50 kg / Batch)	
成型	レシプロ式 8ダイス	レシプロ式 7連×2 =14ダイス ()内 は予備	ロータリー式 2台 ()内 は予備	レシプロ式 10ダイス 2台	ロータリー式 1台

(FBR燃料プロセスを軽水炉
燃料製造に応用した場合)

図-5 MOX加工施設の粉末調製工程の概要

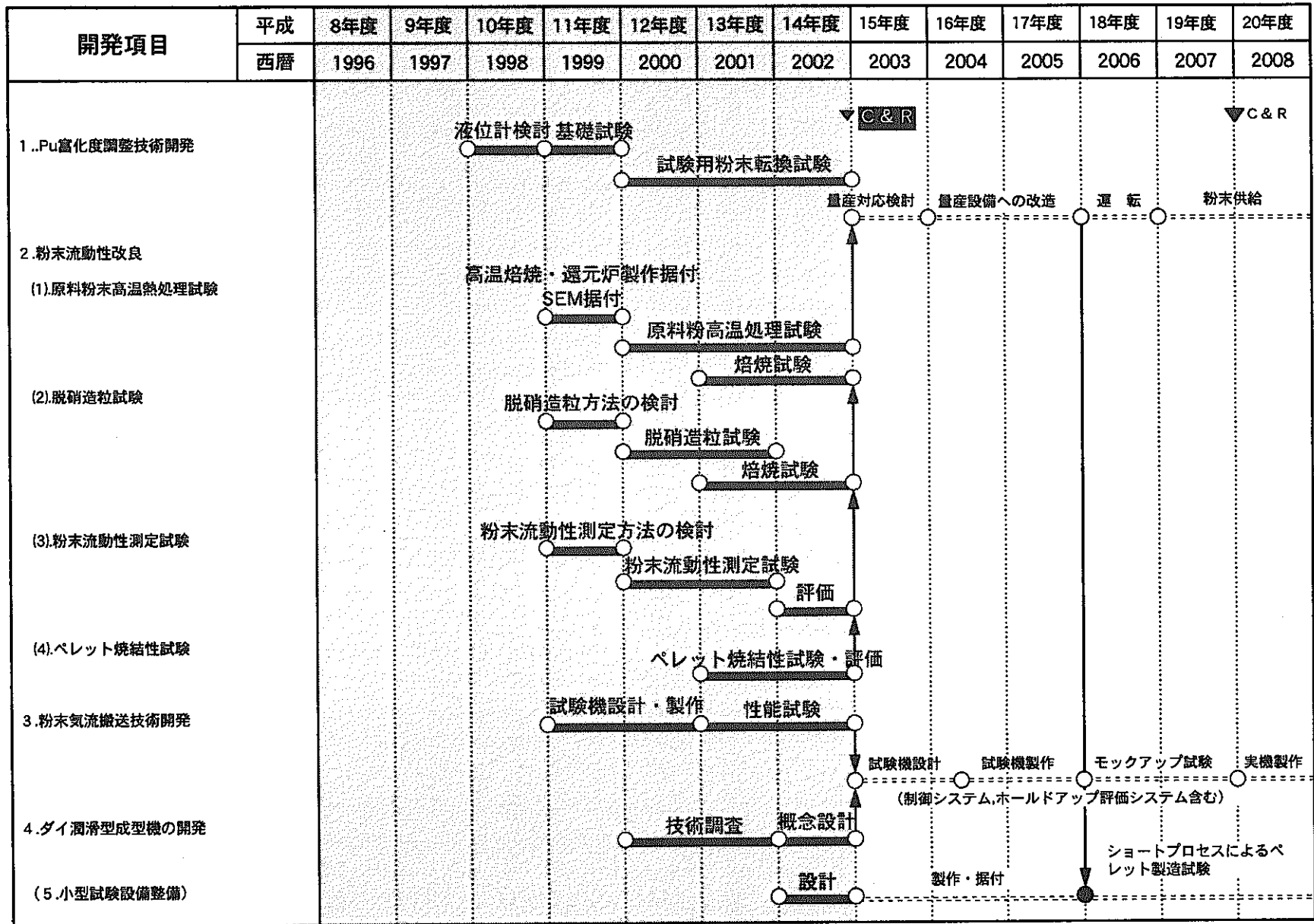


図-6 ショートプロセス技術開発スケジュール

目 標	現状の各工程の概要	基礎試験での課題
<p>・ Pu 富化度調整技術開発</p>		
1. 秤量工程の削除	(1) MOX粉末とUO ₂ 粉末の重量測定により、所定のU/Pu富化度に調整。	① 溶液での混合精度の確認
2. 乾式回収工程の削除	(1) 乾式回収粉として一定割合を原料の一部としてリサイクル。MOX粉末の性状、焼結条件確立。	① 焼結性 MOX転換粉のみの焼結挙動
3. 均一化混合工程の削除	(1) MOX粉末、UO ₂ 粉末をボールミルにより粉碎混合、Puスポット発生防止、ロット内均一性の確保。 (2) MOX粉末特性の性状を把握し、焼結条件確立。	① 液混合と粉碎混合の均一性比較 ② ロット内のPu富化度の均一性の確認 ① 転換粉のみの性状との焼結挙動の確認
<p>・ 粉末流動性改良</p>		
1. 添加剤混合、造粒工程の削除	(1) MOX粉末にバインダを添加し、乾式で造粒し、成型機への充填性を確保。 (2) 造粒粉にルブリカントを添加し、成型機でのペレット成型性を確保。	① MOX粉末の流動性の確保 ① ルブリカントなしでペレット成型ができる機構の開発 <u>ダイ潤滑型成型機の開発</u>
2. 予備焼結（脱脂）工程の削除	(1) グリーンペレット中の添加剤を焼結前に除去し、焼結挙動の安定、焼結炉のメンテナンス性を確保。	① 焼結挙動の確認
<p>・ 粉末気流搬送技術開発</p>		
1. 専用粉末搬送容器の廃止	(1) 多くの搬送容器を保有。 (2) 多くの容器保管スペースを保存。	
2. 粉末気流搬送への変更	(1) ロット毎に粉末容器に移し替え。	① 粉末気流搬送方法の確立 ② ホールドアップの確認 ③ 計量管理法の開発

図-7 技術開発目標と課題整理

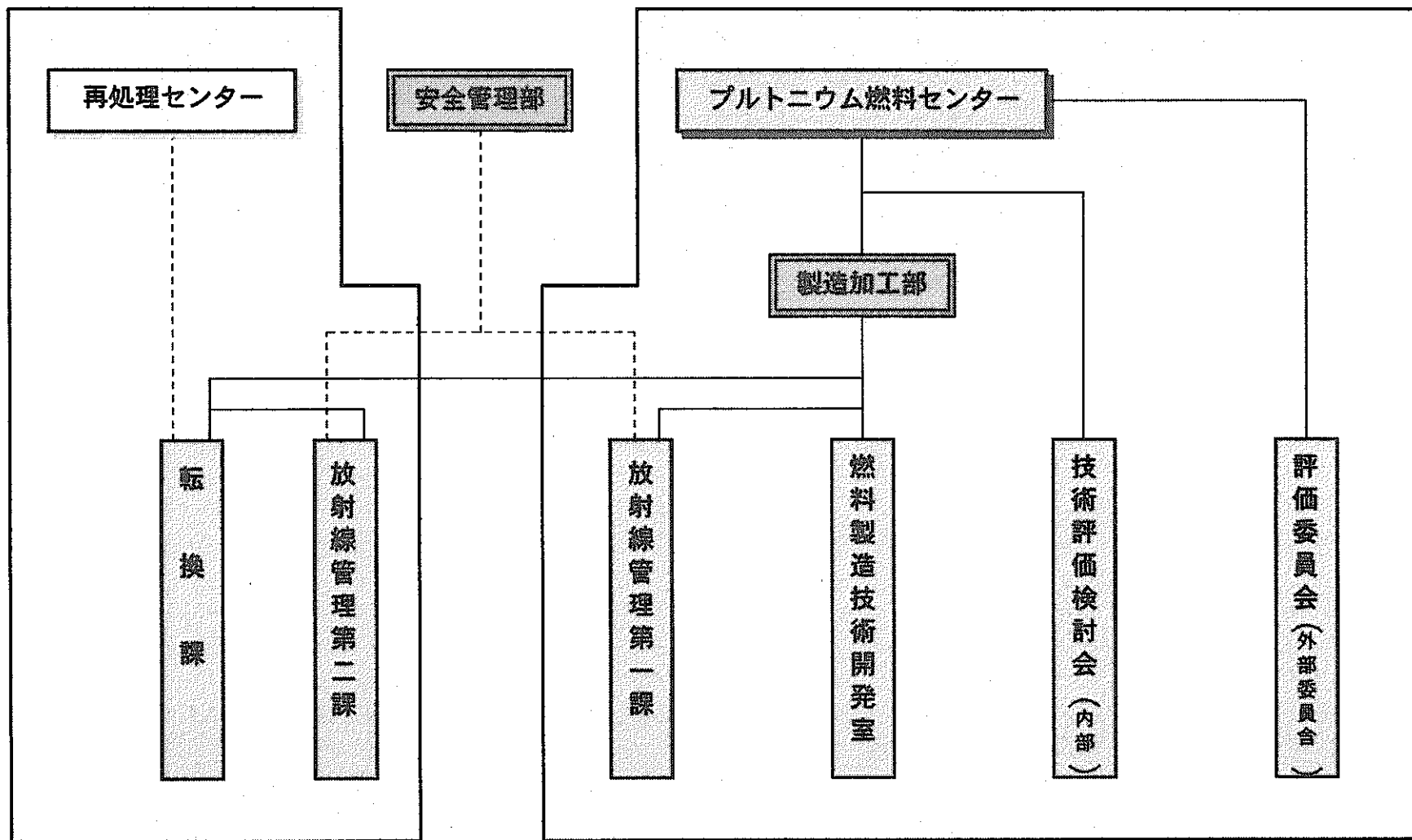


図-8 ショートプロセス技術開発実施体制

単位：億円（人員数）

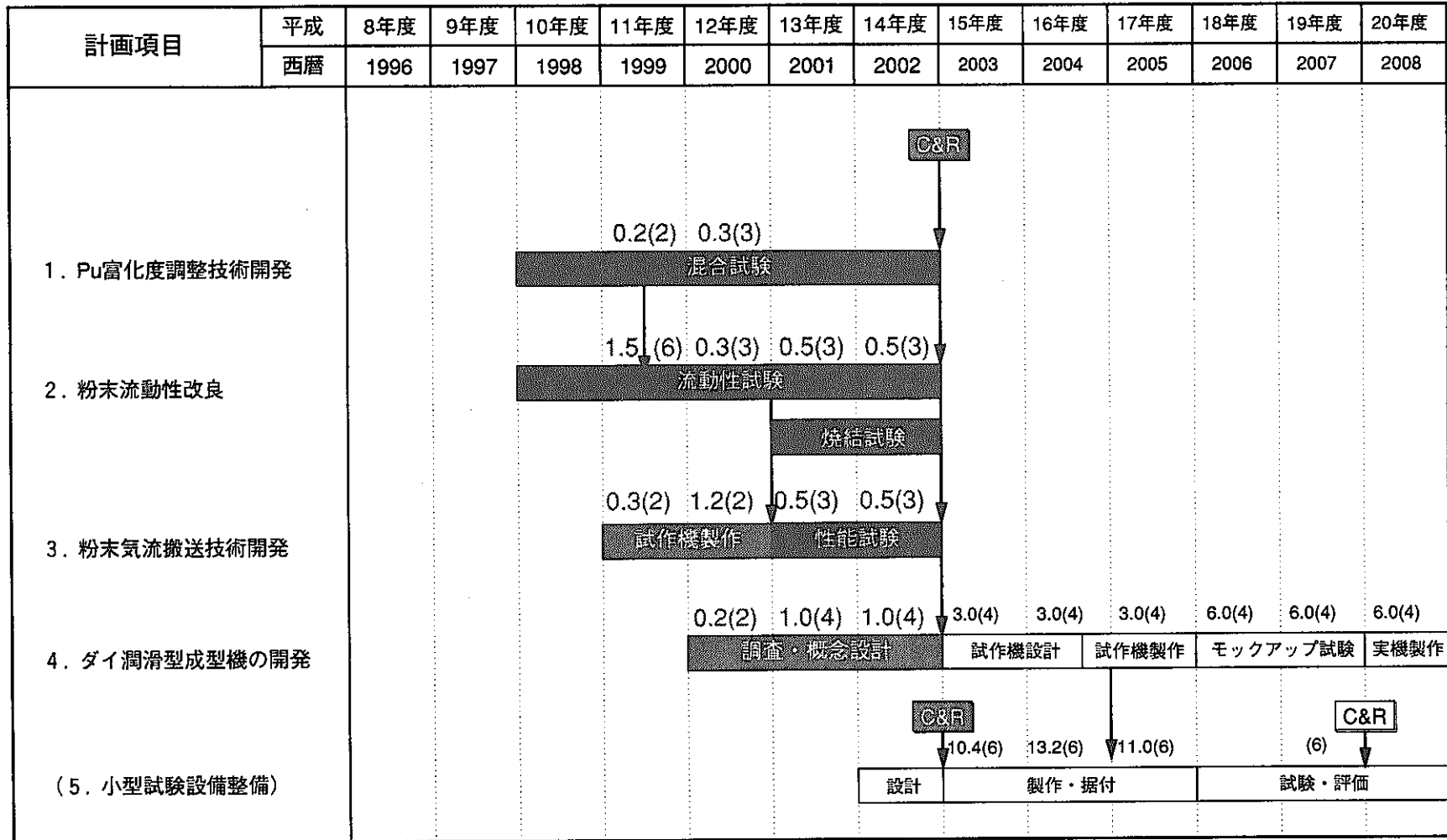
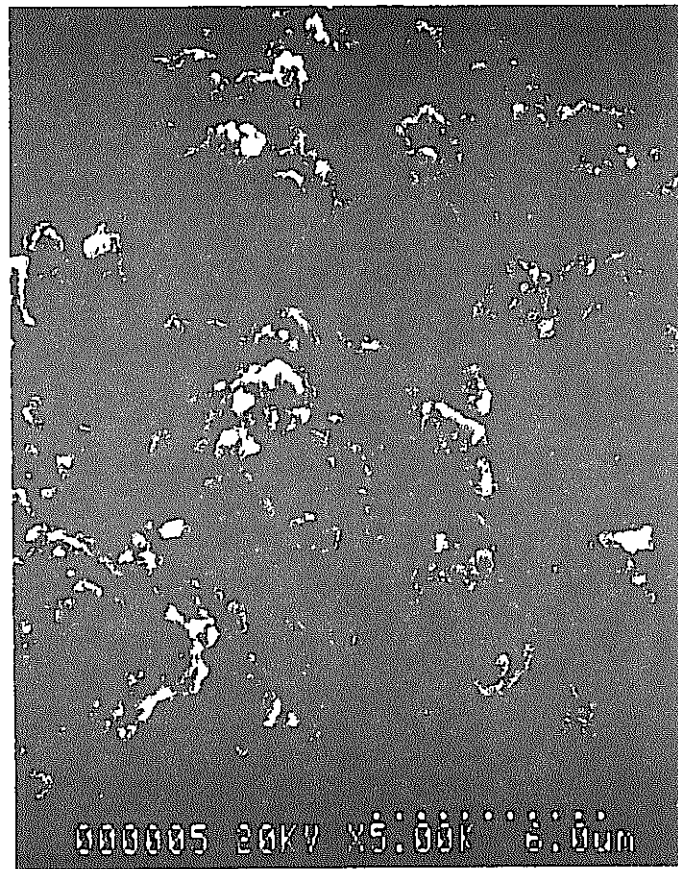
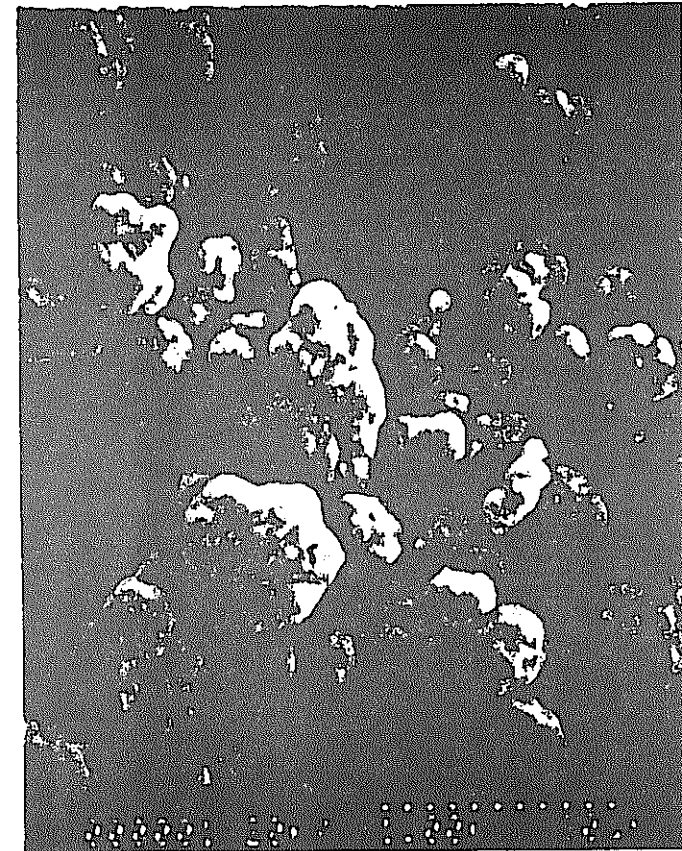


図-9 ショートプロセス技術開発に係わる資金及び人員計画



6.0 μ m

MH粉末



30 μ m

UO₂粉末

写真-1 MH粉末とUO₂粉末のSEM

高速増殖炉

高速炉におけるナトリウム伝熱流動
数値実験に関する研究

動力炉開発推進本部
大洗工学センター

研究概要

1. 研究開発分野

: 高速増殖炉

2. 評価対象

: 伝熱流動、計算工学

3. 新規研究開発課題

: 高速炉におけるナトリウム伝熱流動数値実験に関する研究

4. 研究の必要性

■ 高速増殖炉へのニーズ

高速増殖炉は長期にわたってエネルギーを安定供給できるので、その開発の重要性は論を待たないが、その実用化にあたっては、高い安全性の確保と既存軽水炉技術に匹敵する経済性向上が求められている。そのため、バランスのとれたシステム設計を達成することが必須である。

■ 高速炉開発の方法論に対する要求

高速増殖炉に対するニーズに加えて、開発期間短縮化と開発コスト低減、及び、システムの最適化を追求して設計を適宜見直せる柔軟性が、その開発プロセスに関して要求されている。

■ 従来手法の限界

従来は、モックアップ試験を実施し、それに基づく適切な工学モデルを構築して高速増殖炉の設計評価を行ってきた。このアプローチは(1)工学モデルにモデルパラメータ依存性があること、(2)大型モックアップ装置のコスト(時間、費用)が大きいこと、(3)設計変更が困難であること、(3)要因分析的検討が困難であることの問題がある。従って、バランスのとれたシステム設計をコストミニマムで達成するには、モックアップ試験と工学モデル利用のみでは不十分である。

■ 伝熱流動数値実験

上に述べた開発目標を達成するためには、新しい方法論を組み入れる必要がある。ここでは、数値解析技術の進歩と成熟により可能となった高精度シミュレーション技術に期待し、伝熱流動数値実験研究を提案する。

5. 研究目的・内容

高速増殖炉の実用化にあたり、経済性・安全性・信頼性の飛躍が必要である。このためには、設計概念のブレークスルーとともに、設計合理化の追求が必要である。それを可能とするため、伝熱流動数値実験システムの基盤を確立することを本研究の目的とする。

(1) 微視的シミュレーションの熱流動への適用性研究（現象の微視的な分析）

ナトリウム伝熱流動現象の微視的な分析法を開発し、従来の手法のみでは困難であった、現象の素過程に立ち戻ったミクロな視点からの現象解明とモデリングにより、詳細なシミュレーション技術へ反映する。

- 微視的シミュレーション手法の開発とその検証に関する研究
- 巨視的な手法との組み合わせによる工学的利用法に関する研究

(2) 混相流シミュレーション技術の研究（複雑現象の定量化）

燃焼などの化学反応や蒸発・凝縮・溶融・凝固といった相変化を伴う混相流の解析評価手法を開発し、ナトリウム技術に関連する設計や安全評価上の課題解決に資する。

- ナトリウム燃焼、ナトリウム-水反応等の化学反応と伝熱流動の解析手法開発と検証に関する研究
- 蒸発や融解・凝固問題等の相変化を伴う伝熱流動の解析手法の調査並びにその開発に関する研究
- 多成分多相（固気、固液、気液）流体の伝熱流動解析手法に関する研究

(3) 流体-構造連成評価技術の高度化研究（システム設計評価法への発展）

熱流動現象に起因する構造物健全性の問題を解決するために、ナトリウムの熱的・機械的流体-構造の連成評価手法を確立し、適切な評価基準策定や構造物破損のより正確な予測や評価を行う。

- 熱荷重評価手法の開発と検証及び設計評価法への反映に関する研究
- 三次元流力振動評価手法の開発と検証及び設計評価法への反映に関する研究

6. 予想される成果と反映

■ 大型熱流動試験から数値熱流動実験へ

本研究の成果により、革新的な設計概念等の有効性を判断することや幅広い条件での安全性を解析的に確認することが可能となる。高速増殖実証炉を開発

するにあたり大規模なナトリウム試験を網羅的に実施しなくとも、数値シミュレーション、現象解明とコード検証のための基礎的な実験、及び、既存炉等の活用によって、バランスのとれたシステム設計が達成できると考えられる。従って、時間と経費を要する大規模な試験を最小限とすることにより、開発経費、開発工程の一層の合理化が図れる。

■ 基礎的実験による検証データの充実（数値実験システムの検証技術）

ナトリウムを使用することに起因する特徴的な熱流動現象を、詳細かつ高精度に予測・評価するための解析技術の開発に不可欠な、解析手法検証のための基礎実験技術が進展するとともに、検証用データベースが蓄積される。また、高速増殖炉の設計や安全評価において解析コードを利用するとき、その妥当性を必要十分な証左をもって示すための、解析コードの系統的な検証技術を検討する。

■ 伝熱流動数値解析研究

微視的なシミュレーションや、化学反応や相変化を伴う伝熱流動の数値シミュレーションは、当該分野において最近関心の高い研究開発分野である。本研究では、原子力分野からの研究ニーズを提案し、伝熱流動数値解析研究を活性化することができる。

7. 研究開発期間

平成 11 年 4 月～平成 16 年 3 月（5 年計画）

総予算：625 百万円

8. 実施担当部署

実施担当部署：大洗工学センター 熱流体技術開発グループ
構造材料技術開発グループ

研究内容

1. 研究開発分野

高速増殖炉

2. 評価対象

伝熱流動、計算工学

3. 研究開発課題

高速炉におけるナトリウム伝熱流動数値実験に関する研究

4. 実施担当部署

大洗工学センターシステム技術開発部
熱流体技術開発グループ
構造材料技術開発グループ

5. 全体説明

5.1. 研究目的と計画

5.1.1. 研究目的

高速増殖炉の実用化にあたり、経済性・安全性・信頼性の飛躍が必要である。このためには、設計概念のブレークスルーとともに、設計合理化の追求が必要である。それを可能とするため、伝熱流動数値実験システムの基盤を確立することを本研究の目的とする。

5.1.2. 研究計画

(1) 微視的シミュレーションの熱流動への適用性研究（現象の微視的な分析）

ナトリウム伝熱流動現象の微視的な分析法を開発し、従来の手法のみでは困難であった、現象の素過程に立ち戻ったミクロな視点からの現象解明を実施するとともに、その成果を巨視的なシミュレーション技術へ反映する。

- 微視的シミュレーション手法の開発とその検証に関する研究
- 巨視的な手法との組み合わせによる工学的利用法に関する研究

(2) 混相流シミュレーション技術の研究（複雑現象の定量化）

燃焼などの化学反応や蒸発・凝固といった相変化を伴う混相流の解析評価手法を開発し、ナトリウム技術に係る設計や安全評価に資する。

- ナトリウム燃焼、ナトリウム-水反応等の化学反応と伝熱流動の解析手法開発と検証に関する研究
- 蒸発や融解・凝固問題等の相変化と伝熱流動に関する解析手法の調査並びに開発研究
- 多成分多相（固気、固液、気液）流体の伝熱流動解析手法に関する研究

(3) 流体-構造連成評価技術の高度化研究（システム設計評価法への発展）

熱流動現象に起因する構造物健全性の問題を解決するために、ナトリウムの熱的・機械的流体-構造の連成評価手法を確立し、適切な評価基準策定や構造物破損のより正確な予測や評価を行う。

- 熱荷重評価手法の開発と検証及び設計評価法への反映に関する研究
- 3次元流力振動評価手法の開発と検証及び設計評価法への反映に関する研究

5.1.3. 成果の反映

■ 大型熱流動試験から数値熱流動実験へ

本研究の成果により、革新的な設計概念等の有効性を判断することや幅広い条件での安全性を解析的に確認することが可能となる。高速増殖実証炉を開発するにあたり大規模なナトリウム試験を網羅的に実施しなくとも、数値シミュレーション、現象解明とコード検証のための基礎的実験、及び、既存炉等の活用によってバランスのとれたシステム設計が達成できると考えられる。従って、時間と経費を要する大規模な試験を最小限とすることにより、開発経費、開発工程の一層の合理化が図れる。

■ 基礎的実験による検証データの充実（数値実験システムの検証技術）

ナトリウムを使用することで生じる特徴的な熱流動現象を詳細かつ高精度に予測・評価するための解析技術の開発に不可欠な、解析手法検証のための基礎

実験技術が進展するとともに、検証用データベースが蓄積される。また、高速増殖炉の設計や安全評価において解析コードを利用するとき、その妥当性を必要十分な証左をもって示すことが必要である。本研究において、解析コードの系統的な検証技術を検討する。

■ 伝熱流動数値解析研究

微視的なシミュレーションや、化学反応や相変化を伴う伝熱流動の数値シミュレーションは、数値流体力学の研究領域において最近関心の高い研究開発テーマである。本研究では、原子力分野からの研究ニーズを提案し、当該研究分野を活性化することができる。

5.2. 既存研究課題との関連

関連する既存研究課題には国の策定する安全研究年次計画、及び社内的高速増殖炉実用化研究開発WBSがある。安全研究年次計画は、高速増殖炉の安全性評価に関連して、個別の研究成果をとりまとめて基準化等を図ることにより国の施策に寄与するものである。高速増殖炉実用化研究開発WBSは、高速増殖炉開発のために必要十分な研究開発課題をもれなくかつ重複無くリストアップした体系であり、全体として高速増殖炉の実用化に寄与するものである。また、原子力基盤技術研究（クロスオーバー研究）として計算科学研究を実施し、平成9年度にて終了した。クロスオーバー研究は異分野研究機関が協力して推進するシーズ集約型の研究であり、その目的と成果は必ずしも特定の分野に限定するものではない。以下にこれらの研究の特徴を述べた上で、ここで提案する研究がこれらの既存研究課題とどのような関連にあるかを述べる。

5.2.1. 安全研究年次計画

高速増殖炉安全研究年次計画に基づき、平成3年から平成7年までの前期5カ年、及び平成8年以降の現行5カ年計画で以下の伝熱流動研究を実施している。

平成3年から平成7年まで

- 「炉内過渡伝熱流動現象評価に関する研究」
- 「もんじゅ性能試験を活用したプラントシステム熱過渡流動特性の評価に関する研究」

平成8年から平成12年まで

- 「過渡伝熱流動現象評価に関する研究」

ここでは、高速増殖炉の安全性評価、設計評価、基準類の整備への反映の観点から、ナトリウムの伝熱流動解析評価手法の開発・検証を実施している。また、もんじゅのナトリウム漏えいを踏まえて、現行年次計画を見直し、平成10年度

から「ナトリウム燃焼に関する研究」の中で

- 「ナトリウム漏えい燃焼解析コードの高度化」
に着手することとした。

5.2.2. 高速増殖炉実用化WBS

高速増殖炉実用化のための研究開発 WBS では、伝熱流動に関して、「過渡伝熱流動現象評価に関する研究」を実施している。ここでは高速増殖炉の設計評価の観点から高速増殖炉に適用できる体系的なコード整備を実施している。また、平成9年度より、冷却材の安全性に関して「ナトリウム安全の機構論的評価手法に関する研究」、高温構造設計技術の開発のため「系統熱過渡から構造健全性にいたる熱・流動・構造の統合評価解析技術の開発」に着手した。

5.2.3. クロスオーバー研究

平成6年から平成10年までの5カ年計画で「計算科学的手法による流体—構造統合シミュレーション研究」を原子力基盤技術研究（クロスオーバー研究；計算科学分野）として、電子技術総合研究所、日本原子力研究所との協力の下に実施した。この研究は、伝熱流動研究は流体部分のみの評価を行うのでは評価精度に限界があり、構造応答を含めて統合的な数値シミュレーション技術を確立しようとして着手したものである。着眼点は、流体—構造の機械的相互作用と熱的相互作用であった。当初は平成6年から10年までの5カ年計画であったが、実質的には平成9年半ばにて研究を中断した。

5.2.4. 本研究の位置づけ

クロスオーバー研究の成果により、複雑現象の統合的な数値解析技術は実用問題に適用できるレベル（いわゆるReal World Computing）に近づいてきた状況にある。また、高速増殖炉全体を対象としたナトリウム伝熱流動解析コード体系が、安全研究年次計画や高速増殖炉の実用化研究開発WBSにおいて開発されている。一方で、もんじゅナトリウム漏えいをかえりみれば、ナトリウム熱流動と構造応答が強く関連する現象や、ナトリウム燃焼等の化学反応を伴う伝熱流動現象の機構論的な評価手法の成熟度は十分とは言えなかった。

そこで、そのようなナトリウムの化学反応や構造応答挙動と伝熱流動現象の相互作用を微視的に検討すること、それを反映した解析コードを高速炉体系の伝熱流動解析コード群のように体系化する研究を実施する。クロスオーバー研究の成果である複雑現象の数値シミュレーション技術をさらに発展させて、ナトリウム伝熱流動実験を行うことにより、高速増殖炉実用化のための評価ツールを提示することを目標としている。

6. 研究開発課題の設定

6.1. 研究の背景

■ 高速増殖炉へのニーズ

高速増殖炉は長期にわたってエネルギーを安定供給できるので、その開発の重要性は論を待たないが、その実用化にあたっては、高い安全性の確保と既存軽水炉技術に匹敵する経済性向上が求められている。そのため、バランスのとれたシステム設計を効率よく達成することが必須である。

■ 高速増殖炉開発の方法論に対する要求

技術を実用化段階まで進展させるのにどの程度の期間とコストを要するかに重大な関心が向けられる。高速増殖炉の開発では、高い安全性が要求されるので、実験炉、原型炉、実証炉と段階を踏んで開発が進められる。従って、実用化までに比較的長期間を要する。開発の過程で技術課題が生じたときにそれを短期間で解決できること、開発期間短縮化と開発コスト低減、及び、システムの最適化を追求して設計を適宜見直せる柔軟性が、高速増殖炉に対するニーズに加えて、それを開発するプロセスに対しても要求されている。

■ 従来手法の限界

従来は、図 1に示すように、モックアップ試験を実施し、それに基づく適切な工学モデルを構築して高速増殖炉の設計評価を行ってきた。このアプローチは(1)工学モデルのモデルパラメータ依存性があること、(2)大型モックアップ装置のコスト（時間、費用）が大きいこと、(3)設計変更が困難であること、(3)要因分析的検討が困難であることの問題がある。従って、バランスのとれたシステム設計をコストミニマムで達成するには、モックアップ試験と工学モデル利用のみでは不十分である。

■ 伝熱流動数値実験

従来手法の課題を解決するべく、伝熱流動数値実験研究を提案する。図 2に示すとおり、将来の高速増殖炉開発における伝熱流動特性評価のアプローチでは、コストの高いモックアップ試験を最小限とし、数値シミュレーションコードを機軸とし、それに基礎的な検証実験を組み合わせる用いることが有効であると考えられる。伝熱流動数値実験によれば上記課題を解決できる可能性がある。

■ 既往研究との関連

平成7年度までに安全研究年次計画、高速増殖炉実用化のための研究開発WBS

の枠で、開発整備した解析コード体系を図 3 に示す。これにより、高速増殖炉の炉心内部から原子炉容器、主冷却系及び水蒸気系に至るまでの全体系を解析することが可能となっている。また、このコード体系は、高速増殖炉の事故事象区分に関しても通常運転時から異常な過渡変化、事故、設計基準外事象に至るまでの熱流動現象を対象としている。この成果により、高速増殖炉の伝熱流動特性評価に必要な解析手法が確立されている。

クロスオーバー研究は、シーズ集約型の研究であり、異分野複数研究機関の協力のもとで実施してきた。動燃事業団は数値解析技術の高度化、工学的利用手法の確立の観点から寄与してきた。ここでは図 3 に示した解析コード体系をさらに発展させて図 4 に示す解析コードを開発してきた。その成果は、流体—構造の機械的相互作用に関しては、流体関連振動に関する高精度数値解析手法を確立し、もんじゅの温度計破損の流力振動評価や改良温度計の振動応答評価などに利用した。流体—構造の熱的相互作用に関しては、サーマルストライピングの統合的な評価技術を確立し、フランスの高速増殖原型炉フェニックスの 2 次系配管の亀裂発生評価、もんじゅの安全総点検と設備の改良等に活用した。このように、流体—構造統合解析に関しては手法の確立、実用問題への応用のフェーズに到達したと認識している。

ここに提案する伝熱流動数値実験システムは、クロスオーバー研究の成果を、もんじゅナトリウム漏えいで明らかになった課題と、高速増殖炉実用化にあたっての課題を踏まえてさらに発展させるものであり、その位置づけを次節に述べる。

6.2. 研究の位置づけ

■ 伝熱流動数値実験

上に述べた開発目標を達成するためには、新しい方法論を取り入れ、高速増殖炉研究開発の質的転換を図る必要がある。ここでは、数値解析技術の進歩と成熟により可能となった高精度シミュレーション技術に期待し、伝熱流動数値実験研究を提案する。

高速増殖炉全体を対象としたナトリウム伝熱流動解析コード体系が、安全研究年次計画や高速増殖炉の実用化研究開発WBSにおいて開発されている。しかし、これらの解析コード利用を継続するのみでは、ブレークスルーを拓き、高速増殖炉の開発コストを大幅に低減することは容易でない。一方、クロスオーバー研究で目指してきた、流体—構造系の統合シミュレーションは、実用問題に適用できるレベル（いわゆるReal World Computing）に近づいている。ところが、もんじゅのナトリウム漏えいをかえりみれば、ナトリウム熱流動と構

造応答が強く関連する現象や、ナトリウム燃焼等の化学反応を伴う伝熱流動現象の機構論的な評価手法の成熟度は十分とは言えなかった。

これらの状況を踏まえて、本研究では、クロスオーバー研究の成果を発展させて、ナトリウムの化学反応や構造応答挙動と伝熱流動現象の相互作用を微視的に検討すること、それを高速炉体系の伝熱流動解析コード群のように体系化すること、さらに伝熱流動数値実験を実施する。

本5カ年計画では、クロスオーバー研究の成果である数値シミュレーション技術をさらに発展させて、伝熱流動数値実験システム（解析によるシステム設計手法の原型）を提示することを目標とする。引き続き、ナトリウム冷却系数値試験ループ、数値高速増殖炉を開発し、実証炉の開発支援を実施する計画を検討している。それぞれの項目の相互関係を図5に示す。

■ 伝熱流動に関する実験・試験と数値実験

数値シミュレーションを活用する上での重要なポイントは、モデリング技術、数値解析技術、検証技術である。

モデリング技術では、さまざまな現象を計算機上で離散化して再現するために、その現象を十分に理解して基礎方程式の上で適切に記述することが大切である。数値解析技術では、解析によって得られた解が数値的な散逸や不安定性などの不具合が無いことを保証し、かつ、大規模シミュレーションのための高速化技術、解析者が解析された現象を理解・把握するためのコンピュータグラフィックス技術を確立する必要がある。これらの方法が実現象を再現することを確認するための検証実験の体系的な実施、計測技術の開発、検証データベースの蓄積が不可欠となる。

こうして確立した伝熱流動数値実験システムは、多くの支配方程式が複合した複雑な現象を、それが解析コード上でモデル化されている限り、再現することが可能であり、かつ、解析結果を個々の要因毎に分析し、その影響度を検討することができる。すなわち、高速増殖炉の設計を最適化するとき、着目すべき点を明確化できる。また、伝熱流動数値実験の特徴は、任意の空間点、時間点での物理量を評価し、またそれを演算することが可能となる。また実験とは異なり、ナトリウムのような高温で可視化のできない環境においても計測系を置くことなくデータを取得することが可能であり、場を乱さない理想的な試験・測定条件を実現できる。数値実験と実験／試験の対比を図5に示す。

■ 研究の緊急性

以上に述べたように、実用化レベルのツールとして解析コード体系が確立されており、伝熱流動数値実験に着手する技術基盤が整っている。一方、実証炉の開発では革新的概念の導入などによる経済性向上が養成されているが、本研究の成果によりこのような検討を効率に実施できる。また開発成果は他分野、

多領域にも拡張性が高い。従って、数値実験ツールを早期に開発し、活用することによってその効果は何倍にも増幅されると考えられ、直ちに研究を開始すべきである。

7. 研究の内容

7.1. 全体構成

平成7年までに整備した解析コード体系の活用にあたり、以下の課題を指摘した。

- (1) 伝熱流動解析手法の応用範囲拡大（化学反応、構造応答と伝熱流動の複合事象を考慮）
- (2) 解析評価手法の系統的な検証と解析コードの品質保証
- (3) もんじゅの活用：実機データ等による総合検証

高速増殖炉開発ツールとして伝熱流動数値実験を導入して、開発の効率化、経済性向上、安全性向上を達成するためには、上記の解決が必要である。

■ 微視的現象のモデリング

上記課題の中で、化学反応や構造応答と伝熱流動の複合事象を評価するためには、素事象まで立ち返って現象のモデリングが必要である。例えば、化学反応においては分子レベルで反応定量化を行い、化学反応の生じる環境条件に応じたソース項を評価しなければならない。構造応答に関しては、流体と構造壁境界における相互作用は本来、流体分子と壁との分子レベルでの相互作用であり、構造壁の温度応答や変形挙動を厳密に評価するためには流体と構造間の相互作用の微細構造を解明する必要がある。これを微視的シミュレーションの熱流動への適用研究にて実施する。

■ 伝熱流動解析手法の応用範囲拡大

従来開発してきた伝熱流動解析手法とは、連続体としての流体の支配方程式（ナビエ-ストークスの式）を離散化する技術に集約される。この手法の応用範囲を拡大し、化学反応や構造応答までを視野に入れた場合には、流体の支配方程式に加えて化学種の保存方程式や構造系の運動方程式やエネルギー方程式を解かなければならない。それぞれに流体の支配方程式とカップリングする項があるため、両者を独立に解くことはできず、同時進行的に解く必要がある。これを混相流シミュレーション技術の開発研究並びに流体-構造連成評価技術の開発研究にて実施する。

■ 大型熱流動試験から数値熱流動実験へ

ここに述べた三研究テーマは相互に関連しており、微視的現象のシミュレーション技術は混相流シミュレーション技術や流体-構造連成シミュレーション技術に反映される。開発した伝熱流動数値シミュレーション手法は、従来開発してきた解析コードと併せて数値高速増殖炉設計評価システムを構成する。さらに、微視的現象のシミュレーション技術と伝熱流動数値実験技術を支えるものとして、検証用基礎的実験データを集約する。また原型炉やナトリウム施設を活用して、伝熱流動数値実験システムを総合検証することにより、安全性と信頼性の高い、また開発コストを抑制した高速増殖炉開発のためのツールに繋がるものである。

■ 研究テーマの構成

以上の研究テーマをまとめれば、伝熱流動数値実験研究は以下のテーマにより構成される。

- 微視的な現象の分析（微視的シミュレーション）
- 複雑現象の定量化（混相流シミュレーション、流体-構造連成シミュレーション）
- システム設計評価法への発展（流体-構造連成技術の高度化）
- 基礎的実験による検証データの充実（数値実験システムの検証技術）

表1には高速炉の重要な熱流動現象と本研究の関連を示す。網掛け部分がナトリウム伝熱流動数値実験の課題である。主に残された課題は、ナトリウムバウンダリが破損したときの技術課題（ナトリウム燃焼やナトリウム-水反応等）、構造健全性や破損に直結する課題、ミクロな現象の評価技術であることが理解される。

7.2. 微視的シミュレーションの熱流動への適用研究

7.2.1. 現状と課題

高速増殖炉の分野では、炉心の除熱および熱輸送特性、構造バウンダリへの熱荷重特性、流力的な振動特性などの観点から熱流動評価が行われる。熱流動評価においては、時間・空間平均的に物理量を記述したり、複合的な物理現象を平均的に定量化する方法がとられている。

例えば流体-構造間の熱伝達に関して言えば、実験的に得られた時間及び空間平均的な温度差と熱移行量の関係をマクロな熱伝達率として表し、流体の代表温度から構造の表面温度を求めて熱過渡評価がなされてきた。また、流動特

性に関して言えば、高速炉の燃料集合体などの複雑な体系内部の圧力損失を、いくつかの設計パラメータを変更して実験的に求める。そのような圧力損失の相関式を組み込んだ工学的な解析モデルを用いて、時としてより広い範囲の条件に適用して流動特性を定量化している。化学反応の解析では、マクロなエネルギーや物質バランスに基づいて化学反応量に関する相関式を求めて解析コードに組み込んでいる。

このような方法は、計算機能力の制約から現実的な設計評価手法であるが、経験的・実験的な知見に依存するところが多々あった。また、設計条件は必ずしも最確解を与えるわけではない。

7.2.2. ニーズ

これまでに解析したコード体系を用いれば、現象の支配方程式を離散化して、それに必要な相関式を組み込めば解析を行うことができる。近年の計算機性能の著しい向上により、これらの相関式を用いない直接数値シミュレーションが限定された条件のもとでは可能となっている。しかしながら、工学システムでしばしば見られる、複雑な形状内部の高レイノルズ数流れなどの実用的な条件では、未だ直接数値シミュレーションは不可能である。

従来の熱流動解析手法を巨視的な方法論と呼ぶことにする。巨視的シミュレーションにおいて、相関式などの一部分を直接シミュレーションによりモデリングし、広範な条件に対して適用できるような手法を作成すれば、従来手法の問題点を解決し、かつ現実的に解析が可能となる。このような、物理現象の微視的機構に着目した直接数値シミュレーションを微視的シミュレーションと呼ぶこととする。

微視的シミュレーションによれば、時間・空間的な分解能の向上、複合的な現象の緻密な分析、現象を記述する支配方程式に基づく第一原理的な数値解析、実験に依存しない評価手法の提案が可能となる。すなわち、巨視的シミュレーションの工学モデルに依存している部分を汎用化することが可能となる。

7.2.3. 研究内容

物理現象の微視的機構に着目した数値シミュレーションの基盤的研究を実施する。具体的な課題としては、

- 構造壁周辺の温度境界層内部の熱伝達特性
- 気相と液相あるいは液相と固相界面における相変化のモデル化
- エアロゾルなどの微粒子の挙動評価
- 分子レベルでの化学反応の定量評価

が挙げられる。これらは、いずれも巨視的シミュレーション技術では解決が困

難な問題である。

微視的シミュレーション手法について調査研究を行った上で、各手法を適用するに適した現象を比較検討するためにベンチマーク解析を実施する。さらに、微視的シミュレーションと巨視的シミュレーションとの比較研究を行い、微視的シミュレーション手法が有効である分野を明らかにする。以上の結果に基づいて、上に挙げた高速増殖炉の安全評価において重要な現象について、適切な微視的シミュレーション手法の開発研究を実施する。その後、微視的シミュレーション手法を検証できる基礎的な実験を実施し、手法の検証を行なう。検証された手法を、巨視的な手法に取り入れていく方法を検討し、両者の組み合わせにより工学的利用を図る方法論を確立する。

本研究は、一般性のある数値シミュレーション手法の開発であり、異種分野の研究者との交流により研究が活性化されるとともに、その成果は原子力以外の分野への適用性と拡張性が高い。

7.3. 混相流シミュレーション技術の研究

7.3.1. 現状と課題

高速増殖炉の安全評価において、もんじゅのナトリウム漏洩を機に、ナトリウムの燃焼の機構論的な評価の重要性が指摘された。また、最近の技術的知見を反映して、ナトリウム-水反応などの複雑現象の評価手法も再構築されつつある。

これらの現象は、これまで高速増殖炉分野で伝熱流動研究の中心テーマであった单相流の自然対流や炉心燃料の伝熱問題などと比べれば、取り扱う物質の数や相の数、また反応速度、などの観点から、はるかに複雑さが増している。このような現象を、分析する数値解析手法はこれまでにはなく、主として実験的な知見により技術的な判断を行っていると考えられる。

7.3.2. ニーズ

ナトリウム燃焼やナトリウム-水反応に関しては、安全裕度を適正化するとともに適切な設計対策を施すためには、広範な事故影響スペクトラムを評価することが要求される。このような包括的な影響評価は、想定すべき事故条件やパラメータの数が多いため、実験によっては不可能であり、数値解析によることが効率的である。化学反応や相変化を伴う混相流の解析手法を開発し、実験的に検証した上で事故影響評価に活用することが求められている。本研究の成果はシビアアクシデント時の熔融燃料と冷却材の相互作用評価、融解・凝固問

題などへの拡張性という観点からも広範なニーズがあると考えられる。

7.3.3. 研究内容

高速増殖炉の実用化において、安全裕度を適切なものとするために、ナトリウム燃焼現象とナトリウム-水反応に関する解析手法の開発を主要テーマとする。併せて、その手法を検証するための実験を検討する。

ナトリウム燃焼現象は、液体ナトリウム内部の対流と熱伝導、表面からのナトリウムの蒸発、ナトリウム蒸気の対流と拡散、雰囲気からナトリウム表面への酸素や水蒸気の輸送、火炎面における化学反応、反応生成物の輸送、雰囲気ガスの対流や輻射、雰囲気における燃焼エアロゾルや酸素などの移流といった数多くの現象が関連している。これらを直接的に解析することはできないので、上に述べた微視的シミュレーション手法を活用した、いくつかの解析コードを組み合わせて総合的に評価することが不可欠である。このような解析コード体系を設計し、順次開発を進めていく。

ナトリウム-水反応は、熱交換器内部で伝熱管から水が流出したときに胴側のナトリウムと激しく反応する現象である。ナトリウム-水反応では、伝熱管破損部からの水噴出の挙動、ナトリウム中の水ジェットの貫通、水とナトリウム界面における化学反応、管群の間隙を通るナトリウムの多次元熱流動、周辺構造物への熱輸送と熱伝達、反応生成物の輸送といった現象が複合している。従って、ナトリウム燃焼と同様、複数の適切な数値シミュレーション手法を選択し、いくつかの解析コードを組み合わせて用いる方法が必要である。

相変化を伴う流れに関しては、気液二相流、固液二相流、固気二相流、凝固・融解や蒸発などの解析手法の調査研究を実施する。ナトリウム燃焼やナトリウム-水反応で扱う流れの状態は混相流であり、混相流解析手法開発により得られた成果はナトリウム燃焼解析等に利用できると同時に、混相流の汎用的な解析手法を確立できる可能性がある。

計画の4年度目からは混相流解析手法の検証のための実験を計画立案し、外部機関に委託して検証データ拡充を図る。

以上に述べたとおり、化学反応を伴う伝熱流動の解析手法、化学反応を伴う多成分液体の流動解析手法、相変化や気・液・固三相流（二相流）の解析手法の開発に関する研究を実施する。

7.4. 流体—構造連成評価技術の高度化研究

7.4.1. 現状と課題

流体—構造連成評価技術に関しては、これまでに述べたように、クロスオーバー研究において解析手法の開発を実施し、もんじゅ温度計の流力振動やフェニックス炉のサーマルストライピングによる二次系配管の亀裂発生などに適用してきた。これらの手法は、実際の高速炉の問題に適用したという観点からは、整備がかなり進んでいると言える。一方で、解明が必要な現象としては、流力振動における三次元特性、サーマルストライピングにおける乱流や構造物への熱伝達メカニズムが挙げられる。

一方、実験データに関しては、ナトリウムは水／空気よりも遙かに大きな熱伝導率を持つことから、乱流が及ぼす速度場と温度場への影響も異なり、水や空気での実験結果をそのまま適用できない。そこで基礎的な試験による検証データの蓄積が望まれる。特に流力振動や、温度変動による熱荷重等、流体—構造連成現象の評価においては、温度場のみならず、速度場の把握が極めて重要な位置を占めており、ナトリウム中での計測技術構築も重要である。

7.4.2. ニーズ

ここに述べたように、流体—構造相互作用に関する解析コードがほぼ実用レベルにあることから、それらの手法をいかに活用するかという点に関心が寄せられる。高速増殖炉をはじめとする原子力技術開発では、システムそのものの経済性向上に加えてその開発に伴うコストの低減、安全性の維持・確保などのトレードオフの問題が重要課題である。このような課題に適用するための前提条件として、残された不確定要因の解明とコードの検証が必要である。従って、現象の解明と解析手法を検証できるデータ取得へのニーズは高い。また、これらの伝熱流動解析手法は高速増殖炉の構造設計に最終的に反映されるものである。従って、伝熱流動現象を考慮した構造設計法の研究も重要である。

7.4.3. 研究内容

1) 三次元流力振動評価

流力振動などの流体力学的荷重が構造系に作用するときの振動問題の三次元特性を評価する。特に、構造の形状効果や三次元流れ構造などは、乱流励振力、自励振動特性などに大きな影響を及ぼすため、計算時間の短い三次元解析手法の確立と三次元特性に関する現象解明は不可欠である。本研究では、解析モデルの検討、直接解析手法の開発、基礎実験結果を用いたコードの検証を実施す

る。

2) 熱的荷重評価

流体—構造連成現象の評価においては、乱流現象の取り扱いが最も重要な技術課題である。よって、既往の乱流モデルのナトリウムへの拡張を行うと共に、直接解析において流体と構造を同時に扱う手法の開発を行い、検証を行う。検証実験には、管内流の熱伝達および噴流の混合と構造物への熱伝達を取り上げ、速度／温度変動の計測を行う。得られた実験データを用いて、熱的荷重の評価手法を検証するとともに、境界層熱伝達評価手法、熱的荷重の周波数応答特性の分析を行ない、構造最適化研究に反映させる。

構造最適化研究としては、高速増殖炉で生じる熱過渡荷重を対象とし、荷重の発生源である冷却材温度変化から構造健全性までを、流体—構造熱的連成を考慮して、一貫的に評価できる統合解析技術を開発する。当面は、サーマルストライピングに関しては、熱・流動・構造の複合現象による熱荷重発生機構の解明に関する研究を行う。以上により、熱過渡荷重評価の精度を向上させ、不確定性に起因する過剰な安全裕度を廃した合理的なプラント設計に反映させる。

7.5. 数値実験システムの検証技術

ここに開発したナトリウム伝熱流動数値実験を実用に供する場合に、これらの解析手法が体系的に検証されていることが必要である。各研究項目で述べたように、開発した解析コードの必要十分な検証を行うためにどのような検証データを蓄積すべきかに関する検証データマトリクスの検討を実施し、検証用の実験データを広範に調査し、蓄積する。

7.6. 期待される成果

■ 大型熱流動試験から数値熱流動実験へ

伝熱流動の分野では、高速増殖実証炉開発を担当する電気事業者より国への要望として、ナトリウムループを用いた原子炉冷却系総合試験が計画されている。これは、高速増殖実証炉の3分の1縮尺、2ループ構成でフルセクター炉心から水蒸気系、崩壊熱除去系までを模擬した、電気加熱のナトリウムループである。一方、原型炉「もんじゅ」や実験炉「常陽」を有効に活用するという観点から、各種炉内試験計画が立案され、その中には、自然循環試験などの伝熱流動試験も含まれている。

本研究の成果が成熟するにつれ、数値実験が徐々に試験を代替するであろう。すると、革新的な設計概念等の有効性を判断することや幅広い条件での安全性

を解析的に確認することが可能となる。高速増殖実証炉の開発においても大規模なナトリウム試験を網羅的に実施しなくとも、数値シミュレーション、現象解明とコード検証のための基礎的試験、及び、既存の高速炉やナトリウム施設の有効活用によって、バランスのとれたシステム設計が達成できると考えられる。従って、時間と経費を要する大規模な試験を最小限とすることにより、開発経費、開発工程の一層の合理化を図ることができる。

■ 基礎的実験による検証データの充実（数値実験システムの検証技術）

ナトリウムを使用することで生じる特徴的な熱流動現象を詳細かつ高精度に予測・評価するための解析技術の開発に不可欠な、解析手法検証のための基礎実験技術が進展するとともに、検証用データベースが蓄積される。また、高速増殖炉の設計や安全評価において解析コードを利用するとき、その妥当性を必要十分な証左をもって示すことが必要である。本研究において、解析コードの系統的な検証技術を検討する。

■ 伝熱流動数値解析研究の活性化

微視的なシミュレーションや、化学反応や相変化を伴う伝熱流動の数値シミュレーションは、伝熱流動数値解析の研究分野において最近関心の高い研究開発テーマである。本研究では、原子力分野からの研究ニーズを提案し、当該分野の研究を活性化することができる。

8. 研究開発の進め方

8.1. 実施体制

(1) 微視的シミュレーションの熱流動への適用研究

各種微視的シミュレーション手法の調査	外部機関に委託研究
各手法の比較ベンチマーク解析	大学等外部機関と共同研究
解析手法開発	大学等外部機関と共同研究
解析手法の検証、適用	動燃 熱流体技術開発グループ
検証用基礎実験	大学等外部機関に委託研究

(2) 混相流シミュレーション技術の研究

化学反応と熱流動の解析手法開発	動燃 熱流体技術開発グループ
解析手法の検証解析	動燃 熱流体技術開発グループ
検証用基礎実験	大学等外部機関に委託研究

相変化と熱流動解析手法の調査
解析手法の開発

大学等外部機関に委託研究
大学等外部機関と共同研究

(3) 流体一連成構造評価技術の高度化研究

熱的荷重評価手法開発と検証

動燃 熱流体技術開発グループ
構造材料技術開発グループ

三次元流力振動評価調査

動燃 熱流体技術開発グループ

流力振動解析手法開発と検証

大学等外部機関と共同研究

検証用基礎実験

大学等外部機関に委託研究

8.2. 工程

項目\会計年度	平成 11 年	平成 12 年	平成 13 年	平成 14 年	平成 15 年
(1) 微視的シミュレーション 流体構造間の熱伝達機構	調査	手法開発		手法検証・適用	
	調査	手法開発		手法検証・適用	
化学反応メカニズム					
(2) 混相流シミュレーション 化学反応と熱流動	手法開発			手法検証・適用	
	調査			手法開発・検証	
(3) 流体一連成構造評価技術 熱的荷重評価	ナトリウム中 解析手法開発		手法検証	システム 最適化	
	調査	手法開発			検証
(4) 検証技術		調査	検証実験		検証デー タ構築

8.3. マイルストーン

中間評価（平成 13 年度末）におけるマイルストーンは以下の通りとする。

(1) 微視的シミュレーションの熱流動への適用研究

微視的シミュレーション手法開発の主要部分を終了し、「混相流シミュレーション技術の研究」と「流体一連成構造評価技術の高度化研究」に反映で

きる手法がアウトプットとして得られる。また、必要な検証実験計画を立案する。

(2) 混相流シミュレーション技術の研究

化学反応と熱流動解析に関して、ナトリウム燃焼を対象として手法開発並びにコード検証を終了する。相変化と熱流動に関しては、開発方針が確定する。また、必要な検証実験計画を立案する。

(3) 流体—連成構造評価技術の高度化研究

熱的荷重評価に関しては構造物を対象とした構造健全性評価システムの開発を提案する。三次元流力振動評価に関しては三次元体系に特有な現象の整理を終了する。また、必要な検証実験計画を立案し、その一部を実施する。

9. 投入資源の活用方策

研究開発に必要な資源は、(1)人材、(2)予算、(3)計算機である。以下、それぞれに関して詳述する。

9.1. 開発資金計画

(単位：百万円)

	業務協力員	調査委託	共同研究	実験委託	計算機費	合計
平成 11 年	75 (5 人)	20	10	0	15	120
平成 12 年	75 (5 人)	15	20	0	15	125
平成 13 年	75 (5 人)	5	20	20	10	130
平成 14 年	75 (5 人)	0	25	20	5	125
平成 15 年	75 (5 人)	0	30	15	5	125

9.2. 開発人員計画

	微視的シミュレーションの適用	混相流シミュレーション技術	流体—構造連成評価技術の高度化
研究統括管理者	1 名 (職員)		
タスクリーダー	1 名 (職員)	1 名 (職員)	1 名 (職員)
サブリーダー			1 名 (職員)
エンジニア	1 名 (職員)	1 名 (職員)	1 名 (職員)
プログラマー	1.5 名 (業務協力)	1.5 名 (業務協力)	2 名 (業務協力)

年度展開（平成 11 年度～平成 15 年度）

合計	職員	統括管理者	主任研究員	1名×5年
		タスクリーダー	主任研究員	3名×5年
		サブリーダー	主任研究員	1名×5年
		エンジニア	研究員	3名×5年
	業務協力員	プログラマ		5名×5年

9.3. その他

これらの研究開発を実施するためには高速計算機が不可欠である。動燃事業団では情報センターに並列計算機、ベクトル計算機等が設置されている。一方、近年のパーソナルワークステーション(PWS)の高速化と低価格化を踏まえると、研究開発効率化のためには研究者がそれぞれ PWS を手許において手法開発を進める必要がある。さらに、数値シミュレーションのプリ・ポスト処理を実施するためのグラフィックワークステーションの導入整備を実施する。

大規模シミュレーションを実現するためには、超並列環境を構築する必要があるが、こちらは情報センター計算機のリプレースを前提とする。本研究の予算計画では研究室所有の現有計算機のメンテナンスとリプレースの費用、ネットワーク維持費等も含まれる。なお、本研究で整備する計算機等システムは共同研究者に開放して共同利用する。

10. その他特記事項

10.1. 研究成果の普及

研究成果は、計算コード、検証用実験データベース、高速増殖炉設計評価手順として整備される。計算コードに関しては、社内でコード登録をし、公開することにより外部機関でも利用できる形とする。また、外部研究機関との共同研究では、開発したコードを提供し、相互利用を推進する。検証用データベースや設計評価手順については、高速増殖炉分野で適用する。しかしながら、ここで取り扱う成果は高速増殖炉分野に限定されないもので、学会等の場に提供し、他分野も含む外部利用を促進する。

研究成果の普及を図るためには、研究成果を公開し、外部研究者との交流を

活性化させることが不可欠である。従って、成果の学会発表、論文投稿を積極的に実施する。また、大学研究者や外国人研究者を客員研究員として迎え入れ、研究成果の共同利用を図るとともに、計算機等を利用してもらうように配慮する。

表1 高速炉の重要な熱流動現象と本研究の関連

高速炉の重要な熱流動現象	安全上の視点	数値実験技術現状	残された課題と解決策
自然循環崩壊熱除去	炉心除熱	評価技術確立	総合検証（もんじゅ等活用）
複雑形状内部の詳細熱流動	炉心除熱	解析手法開発中	乱流モデル、複雑形状モデル化+基礎実験
炉心—プレナム等相互作用	炉心除熱	解析手法開発中	解析手法の統合化と検証+実験
自由液面の熱流動	冷却系流動	評価手法開発	設計で対応
サーマルストライピング	構造健全性	評価技術確立	Na中における検証、構造との非定常熱伝達
原子炉容器内温度成層化	構造健全性	評価技術確立	総合検証（もんじゅ等活用）
流体関連構造振動	構造健全性	本研究対象	三次元特性、乱流の影響
ナトリウム燃焼	Naバウンダリ破損時	本研究対象	化学反応、生成物輸送
エアロゾル挙動（検知など）	Naバウンダリ破損時	本研究対象	粒子の移流拡散、相互作用
ナトリウム水反応	Naバウンダリ破損時	本研究対象	化学反応、相変化、混相流
流体からの熱荷重発生機構	構造設計	本研究対象	構造損傷・破損過程の解明、試験

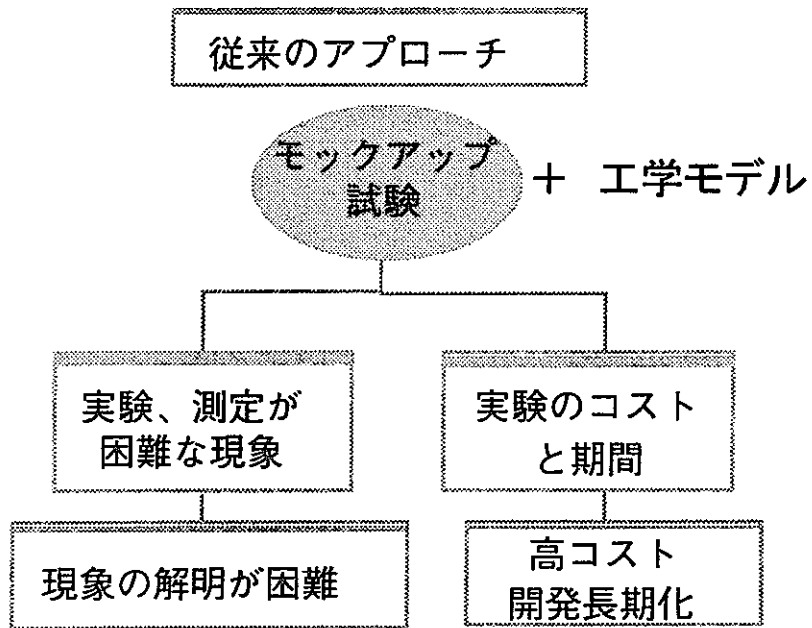


図1 高速増殖炉の伝熱流動特性評価
(モックアップ試験と工学モデルによる方法)

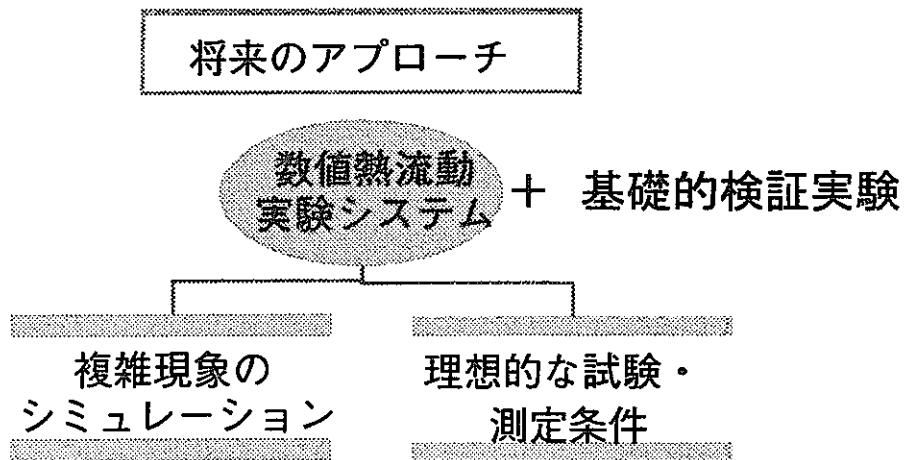


図2 高速増殖炉の伝熱流動特性評価 (数値熱流動実験による方法)

対象領域 \ 事象区分	通常運転	異常な過渡変化	事故	設計基準外事象
燃料集合体	ASFRE(単相流サブチャンネル解析コード) (圧力損失、乱流混合、ホットスポット温度、局所閉塞)			
	SPIRAL	集合体 詳細熱流動 解析コード	二相流 サブチャンネル 解析コード	SABENA
炉容器 プラント機器	AQUA(多次元熱流動解析コード) 温度成層化、サーマルストライピング、自然対流、乱流混合、自由液面			
	DINUS-3	乱流直接シミュレーション解析コード		
	SPLASH	移動格子座標系自由液面解析コード		
システム全体	Super-GOPD(プラント動特性解析コード) (熱過渡、プラント制御、不安定挙動、運転手順、事故管理)			
	SSG(プラント安全評価解析コード) (自然循環除熱、配管破損、除熱源喪失、受動安全性評価)			

図3 安全評価のための解析コード体系

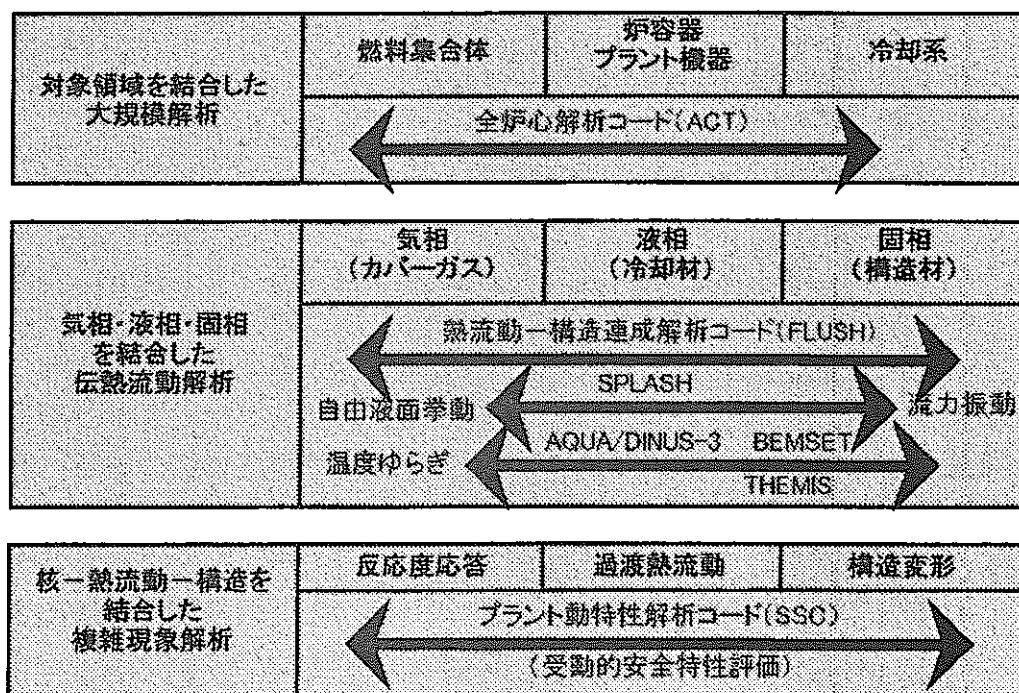
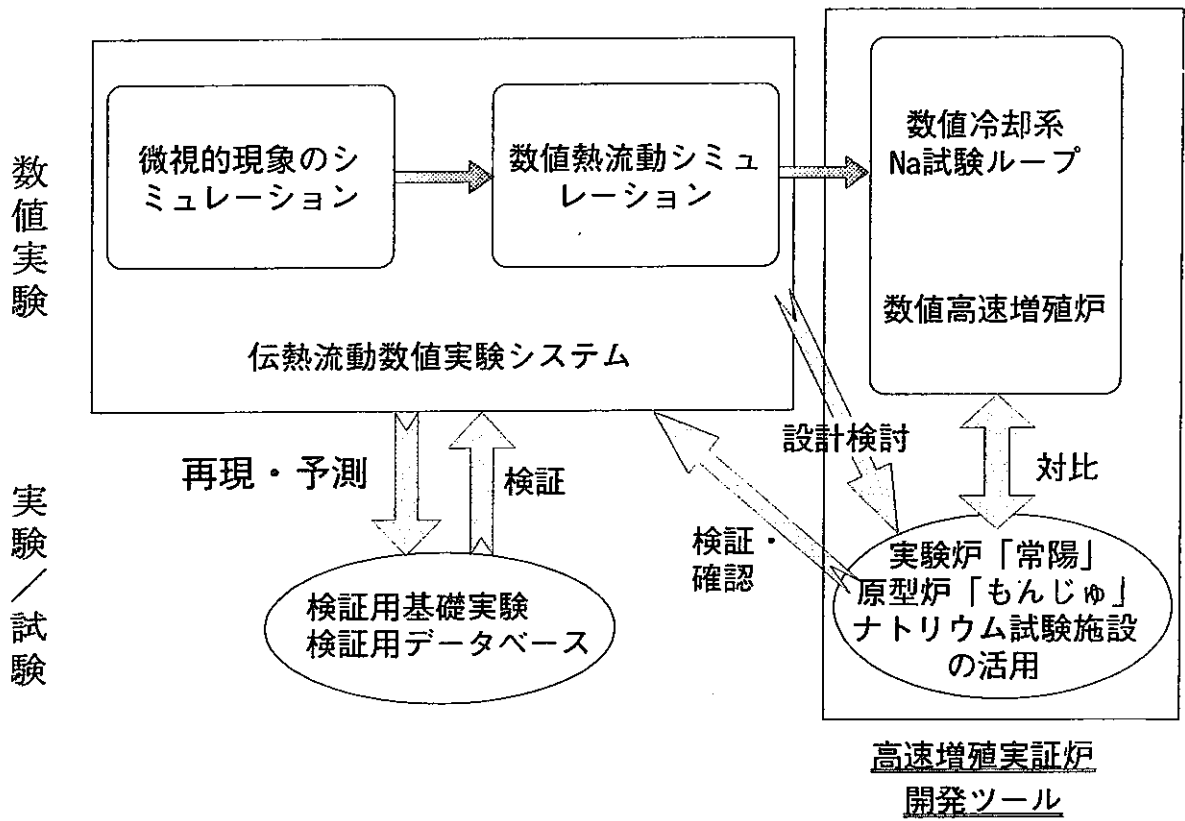


図4 境界領域/複合現象を対象とする解析コード



実験/試験

実験装置
装置製作
実験技術・原理
使用方法
測定精度

実験準備
装置の校正
データ収録時間間隔
データ収録点数

実験データ
データ処理

数值実験

解析コード
プログラミング
数值アルゴリズム
適用限界
解析精度

メッシュ生成 (データ作成)
機能検証
時間分解能
空間分解能

数值シミュレーション結果
グラフィックス

図5 ナトリウム伝熱流動数值実験と実験/試験