

FBR安全性炉内試験計画(SERAPH計画)の検討

1995年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1994

FBR安全性炉内試験計画（SERAPH計画）の検討

大洗工学センター
SERAPH計画技術検討グループ

要旨

FBR安全性炉内試験計画（SERAPH計画）の検討は昭和62年後半から開始され、既に、その必要性、及び施設概念の検討結果に関して、原子力安全委員会、FBR安全研究専門委員会などへの報告を通して、内外の専門家から多くの意見や提案を得ている。これらの意見を踏まえて、これまでに、以下のような観点で試験の必要性及び施設概念の検討を行った。

- 1) SERAPH計画とその他の安全研究を全体的に統合することによって、SERAPH計画がFBRの実用化に対して果たし得る貢献の明確化を図る。
- 2) 炉心損傷防止や影響緩和に関するサクセスシナリオを実証することによって実用化を促進するような安全研究の課題のうち、SERAPH計画に取り込むべきテーマを幅広く検討する。
- 3) 個々の試験の内容や試験施設の仕様の妥当性、十分性を検討する。
- 4) SERAPH施設の成立性に係わる主要な要素技術について、それぞれが整合性を持つような概念を検討する。
- 5) 各要素技術について、それぞれの性能向上を図ることにより、試験の要求条件を技術的に成立させるまでの裕度を確保する一方、それらの性能を保証するための基礎的な研究の計画を具体化する。

これまでの検討から、以下の結論が得られた。

—FBRの実用化段階において高水準の安全性を達成するために求められる安全確保の考え方と目標の設定を行った。その達成に必要な安全研究課題を摘出し、その研究手段のひとつとしてSERAPH計画を位置づけた。

—受動的安全特性を活用した炉心損傷への拡大防止、炉心損傷の早期終息、再臨界の排除等に重点を置いて幅広く試験の必要性の検討を行い、従来の検討成果を含め、全体的試験計画の形にまとめた。

—これらの試験研究、及び関連して進められるR&Dなどから取得される知見を総合すれば、上で述べた実用炉における安全性の目標が達成できるものと期待できるが、その達成のためには、特に、本計画で提案した炉内試験計画の推進が不可欠である。

—施設検討においては、概念設計研究を通じて駆動炉心構成を改良することにより、各要素技術の整合性を考慮したリファレンス炉心の概念が得られた。

—提案された各試験テーマについて、それぞれの要求条件に対する充足度の評価を行い、施設概念の基本的成立性の見通しを得た。

—性能保証のための基盤技術開発の端緒として、燃料ペレットの試作を行い、その製造可能性について目途が得られた。

目 次

1. 序	1
2. 実用炉における安全確保の考え方とSERAPHの役割	4
2.1 実用炉における安全確保の考え方	5
2.2 燃料安全について	8
2.3 炉心安全について	10
2.3.1 炉心損傷事故に係わる安全問題についての基本的考え方	10
2.3.2 炉心損傷事故に対する実用炉の安全性の目標	10
2.3.3 目標への達成手段とSERAPHの役割	11
3. 炉内安全性試験の必要性に関する検討	17
3.1 実用化先導研究テーマに関する検討	19
3.1.1 はじめに	19
3.1.2 受動的安全方策の項目の整理	20
3.1.3 重点テーマの絞り込みのための評価の視点の摘出	23
3.1.4 ランク付けの結果	37
3.1.5 分類の結果及び考察	43
3.1.6 受動的安全方策の組み合わせ	46
3.1.7 実用化先導研究テーマに関する研究開発実施方針の検討	52
3.1.8 まとめと今後の課題	53
3.2 基盤安全研究テーマに関する検討	86
3.2.1 燃料ピンの健全性確保	87
3.2.2 異常拡大防止	97
3.2.3 炉心損傷の早期終息と炉心損傷起因過程	104
3.2.4 炉心崩壊過程	114
3.2.5 ソームターム研究	131
3.2.6 新型燃料に関する安全研究	137
3.3 SERAPHによる試験研究テーマの提案	146
3.4 必要性検討のまとめ	198
4. 炉内安全性試験施設に関する検討	204
4.1 施設検討の経緯	205
4.2 施設要求条件及び主要仕様	208
4.2.1 施設に要求される試験性能	208
4.2.2 施設の主要仕様と各要素技術の検討内容	210
4.3 各要素技術の検討状況	216
4.3.1 核特性	216

4.3.2 热輸送・熱流動	225
4.3.3 駆動炉心燃料	238
4.3.4 燃料移動計装	254
4.3.5 試験体構造	283
4.4 SERAPH施設の試験性能	292
4.4.1 基盤安全研究に対する試験性能	292
4.4.2 実用化先導研究に対する試験可能性検討	294
4.5 SERAPH施設概念検討のまとめ	303
5. 結論	304
参考文献	307

編集・執筆担当者

主編集 必要性検討部（1～3章）：丹羽 元^{#1}
施設検討部（4章）：川太徳夫^{#1}

執筆担当

- 1章 : 丹羽 元^{#1}、川太徳夫^{#1}
2章 1節 : 近藤 悟^{#1}、丹羽 元^{#1}
2.2節 : 佐藤一憲^{#1}
2.3節 : 丹羽 元^{#1}
3章 : 丹羽 元^{#1}
3.1節 : 家田芳明^{#2}、宇都成昭^{#2}、上出英樹^{#2}、山口 彰^{#2}、大島宏之^{#2}
3.2.1節 : 佐藤一憲^{#1}
3.2.2節 : 佐藤一憲^{#1}
3.2.3節 : 丹羽 元^{#1}
3.2.4節 : 守田幸路^{#1}、近藤 悟^{#1}、飛田吉春^{#1}
3.2.5節 : 宮原信哉^{#3}、中桐俊男^{#3}
3.2.6節 : 佐藤一憲^{#1}
3.3節 : 丹羽 元^{#1}、佐藤一憲^{#1}、大島宏之^{#2}、江沼康弘^{#2}、宮原信哉^{#3}
3.4節 : 丹羽 元^{#1}、佐藤一憲^{#1}、家田芳明^{#2}
4章 : 川太徳夫^{#1}
4.1節 : 川太徳夫^{#1}
4.2節 : 大野修司^{#3}、川太徳夫^{#1}
4.3節 : 川太徳夫^{#1}
4.3.1節 : 大野修司^{#3}、宇都成昭^{#2}
4.3.2節 : 上出英樹^{#2}
4.3.3節 : 川太徳夫^{#1}
4.3.4節 : 小西賢介^{#1}、川太徳夫^{#1}
4.3.5節 : 中桐俊男^{#3}、宮原信哉^{#3}
4.4節 : 大野修司^{#3}、川太徳夫^{#1}
4.5節 : 川太徳夫^{#1}
5章 : 近藤 悟^{#1}

^{#1} : 安全工学部 高速炉安全工学室

^{#2} : 安全工学部 原子炉工学室

^{#3} : 安全工学部 プラント安全工学室

1. 序

1. 序

現在、FBRの実用化へ向けての開発道程を長期的に見通すべき重要な局面を迎えてい
るが、動力炉・核燃料開発事業団、大洗工学センターでは、従来、安全工学部を中心に、
実用化を着実かつ効果的に推進するための今後の安全研究の目標及び実施手段を検討し、
その具体的計画の策定を図ってきた。その中では、特に炉心及び燃料の挙動の実験事実
に基づく安全性の裏付けがFBRの性能向上の鍵を握り、実用化の推進において重要な位
置を占めるとの認識に立ち、国内に安全性炉内試験炉（SERAPH: Safety Engineering
Reactor for Accident Phenomenology）を設置し、これを用いて炉内試験研究（SERAPH計
画）を実施することを基軸に据えて、安全研究を積極的に展開することを目指し、技術的
検討を行っている。

本SERAPH計画に関する検討は1987年（昭和62年）後半から開始された。その
中では、1992年前半までの概略以下の3期から成る期間をフィージビリティ検討過
程と位置付け、実用化のための安全研究に重要な貢献を果たし得る試験課題の摘出と炉
内試験炉の概念の創出を平行して実施してきた。

第1期（1987年後半－88年前半）では、技術検討の概略計画を立案し、これまでの
炉内試験の実績と実用炉の開発動向の分析を通じて、今後実施すべき試験課題の範
囲と新規炉内試験炉の基本性能について予備的な検討を行った。

第2期（1988年後半－90年前半）では、研究課題に対する既存施設の適用性の
検討結果を踏まえ、新規試験炉に求められる試験機能を具体化し、それを実現するため
の試験炉概念を炉心構成を中心に広範にサーベイし、選定するスコーピング研究を米国
サンディア国立研究所（SNL）と共同で実施した。

第3期（1990年後半－92年前半）では、確率論的安全評価（PSA）研究<sup>(1, 2,
3)</sup>、CABRI炉内試験の総合評価研究⁽⁴⁾、EBR-II炉内試験研究⁽⁵⁾、炉心損傷事象評価
手法の開発研究⁽⁶⁻⁹⁾等の動燃を中心進められてきたFBR安全研究に関する最新の知
見に基づき、FBRの実用化のために重点化すべき研究課題を摘出し⁽¹⁰⁾、SERAPH計
画において実施すべき炉内試験の代表的条件を整理した。試験炉施設に関しては、前記ス
コーピング研究の結果選定されたベリリア希釀燃料・重水冷却炉心に対し、炉心燃料、
冷却材組成等をパラメータとした炉心静特性、動特性等の核熱解析を中心として、炉心
性能の評価を行った。これらの検討を通じて、検討の基準となるリファレンス炉心を設
定し、提案された重点課題試験に対する試験炉性能の充足度を評価するとともに、試験
炉施設の開発における主要課題を摘出した。

これらの検討成果については、原子力安全委員会、FBR安全研究専門委員会等での報
告を通して、内外の専門家から多くの意見や提案を得ている。それらの意見を踏まえて、
1992年後半から1994年度にかかる第4期では、特に以下の観点での検討を実施
した。

必要性検討の側面では、

- 1) SERAPH計画とその他の安全研究を全体的に統合することによって、SERAPH計
画がFBRの実用化に対して果たし得る貢献の明確化を図る、

- 2) FBRの実用化に向けた安全性の一層の向上のために提案されている事故防止や影響緩和のための種々の方策を実証する安全研究課題のうち、SERAPH計画に取り込むべきテーマを幅広く検討する、
- 3) 個々の試験の内容（特にスケール則、測定方法などの裏付け）や試験施設への要求仕様の妥当性、十分性の検討の詳細化を図る、

などの観点である。これらのうち、1) 及び2) の観点は、第3期までの必要性検討が過去の研究の延長上で現象解明や評価精度の向上を図ることを主眼とするものであったのに対して、今後はそれらを基盤としてより高いレベルの安全性を達成する道を積極的に切り開いて行くことを主眼として、そのための道具としてSERAPHを位置づけようとするものである。すなわち、従来のいわゆる「ボトムアップ型」であった安全研究を、達成すべき安全性の目標を掲げ、その達成に必要なR&D課題を抽出してその中にSERAPHを位置づけるという「トップダウン型」に組み替えようとする試みである。2) に関する検討は、本報告書の中では「実用化先導研究テーマ」に関する検討と位置づけた。3) の観点は、第3期までに実施してきた検討の詳細化、一層の具体化を図るものであり、本報告書では「基盤的安全研究テーマ」として扱っている。

施設検討の側面では、スコーピング研究によって絞り込まれた試験炉施設の基本概念について、

- 1) SERAPH施設の成立性に係わる主要な要素技術について、それぞれが整合性をも持つような概念を検討する、
- 2) 各要素技術について、それぞれの性能向上を図ることにより、試験の要求条件を技術的に成立させるまでの裕度を確保する一方、それらの性能を保証するための燃料ペレット・要素試作、臨界実験、熱流動実験、高速中性子検出器開発等の基礎的な研究の計画を具体化する、

等の観点から検討を継続している。SERAPHの施設概念の中には既存技術の組み合わせだけでは解決できない技術が含まれている。このため、施設全体について整合のとれた設計を行うことはもとより、2) の観点から、基礎的なR&Dについても開発のリードタイムを考慮した早期の立ち上げが必要である。

本報告書は、SERAPH計画に関する主として1992～1994年の検討内容とその成果をとりまとめたものである。第2章では実用炉における安全確保の考え方と目標を示し、その達成手段としてのSERAPHの役割を述べる。第3章では実用化先導研究テーマ及び基盤安全研究テーマの双方についての検討を深め、その成果に基づいてSERAPHにおける試験研究テーマをまとめた。これらの試験の実施によって第2章に述べた安全の目標達成に大きく貢献できるものと考えられる。これを受け、第4章では現在までの施設概念に係わる各要素技術の検討状況を記述するとともに、実用化先導研究テーマ及び基盤安全研究テーマに対する試験ニーズの充足度についてまとめた。最後に、以上の検討に基づき、試験炉施設実現へ向けての検討の重点課題等をまとめる。

2. 実用炉における安全確保の考え方とSERAPHの役割

2. 実用炉における安全確保の考え方とSERAPHの役割

2.1 実用炉における安全確保の考え方

FBRの実用化においては、原型炉で既に達成し、実証炉においても維持される高い安全性の水準を損なうことなく、プラントの大型化、高性能化やコスト低減のための合理化を追求することによって、軽水炉と比肩しうるレベルの経済性の目標が達成されなければならない。すなわち、FBRの実用化へ向けての安全研究の使命は、「実用炉において達成すべき安全性の水準の目標を掲げ、プラントの大型化、高性能化、合理化がなされることを前提としつつ、その目標を達成する手段を示し、そして実際にその水準を達成するとともに、そのための安全確保体系をシンプルで分かりやすい論理で構築すること」にあると言えよう。すなわち、我々が追求している「合理的な安全論理の構築」とは、「プラントの合理化に際しても達成すべき安全性の水準を確保することを保証でき、かつこれが論理的に現象論的にも容易に理解できるような安全確保の理念と体系を構築すること」であると換言できよう。

実用化時代のFBRにおける安全確保の考え方が、一般に「深層防護」又は「多重防護」と訳される "defence in depth" の概念に基づくことは根本的に変わらない。これは、防止、緩和及び格納の3レベルで構成される、原子力施設の安全確保のための基本的な考え方である。通常、我が国の原子炉施設においては、安全設計及び安全評価の主対象となる異常状態（「運転時の異常な過渡変化」及び「事故」）に対して、

- ① 異常発生防止対策
- ② 異常拡大防止対策
- ③ 放射性物質放出防止対策

の3レベルで構成される「深層防護」を基本概念として、安全確保対策（事故防止対策）が講じられているところである。

一方、前述の高い安全性の水準を確保するということは、究極的には公衆や環境に対するリスクの低減を追求することに他ならない。FBRのリスクとしては、大量の放射性物質を内包する炉心が損傷したときに顕在化するリスクが支配的なものと考えられるので、それを低減するためには、炉心損傷事故（FBRにおいては、歴史的に「炉心崩壊事故」（CDA: core disruptive accident）と呼ばれている。）に対する十分な配慮が必要となる。そのための基本的な考え方は、異常状態に対する十分な安全裕度を確保することを前提とした上で、さらに、

- ① 炉心損傷発生防止方策（以下、「防止方策」という）
- ② 炉心損傷影響緩和方策（以下、「緩和方策」という）
- ③ 放射性物質放出防止方策（以下、「格納方策」という）

の3レベルで構成される防護の概念をも追求することとなろう。本報告書で述べる「深層防護」とは、このようなリスク低減方策も含めた安全確保の考え方に対応したものである。ここで重要な点は、これらのリスク低減方策が、適切なバランスを保って構成されなければならないという点である。例えば、「格納方策」を徹底的に強化すれば炉心

は損傷しても構わない、というような短絡的な考え方には容認できるものではない。また、「防止方策」を十分に強化すれば「緩和方策」は省略できるのではないかとの議論もあるが、そのような主張は、『深層防護』の考え方になじまないばかりではなく、運転経験が乏しく、実用化プラント像が確立していない現時点において採用することは妥当ではない。ただし、将来実用炉が多数基建設され、十分な運転経験と安全確保の実績が積み重ねられ、FBR技術が完全に確立・定着できた段階において、相対的に「緩和対策」を軽減する方向性が生まれてくることは期待されよう。

後述する如く、2.3節に述べる安全目標に対してのアプローチにおいては、上記の3レベルそれぞれの役割が重要であるというのが一つの結論である。上記の3レベルの適切なバランスの中で、「防止方策」のレベルに最も優先度が置かれるべきであることは当然である。このために、FBRにおける炉心損傷の防止対策を一層強化することを目的として、種々の受動的安全方策の導入が提案され、現在精力的な研究開発が進められている。その具体的な内容及び有効性・成立性の見通しについては、3.1節で「実用化先導研究テーマ」として詳細な検討・評価を行っている。ただし、そこでは、「防止方策」に限らず、「緩和方策」を目的とした受動的安全方策についても併せて検討している。一方、従前よりの、主要現象の解明と不確かさ幅の低減（精度の向上）の努力を通じて一層の安全性向上を図る趣旨の研究テーマを、ここでは「基盤安全研究テーマ」と呼び、「実用化先導研究テーマ」との組み合わせにより、実用炉において『深層防護』の深みを増した安全確保体系を構築することを目指している。その場合でも、『深層防護』のできるだけ前段に重みを置いた構成を採ることにより、分かり易い論理の構築を行うことが重要となろう。

なお、FBR実用炉の概念自体についても、現在のMOX大型炉の延長のみに限定されるわけではなく、燃料形態を含めて多様な実用化像が想定される。これら新概念のFBRを含めて、実用化に向けての両研究テーマの役割と関連を図2.1-1に示す。

以上に述べてきた実用炉の安全確保体系の構築におけるSERAPH計画の位置づけは、炉内試験の主な試験対象である炉心及び燃料の挙動にウェイトを置いた検討を分担することである。検討の対象を大きく2つに区分して、異常状態に係わる安全問題については燃料安全性、炉心損傷に係わる安全問題については炉心安全性として、以下の節でそれぞれ達成すべき安全性の水準の目標を掲げ、その達成のための主要な手段としてSERAPHがはたすべき役割を述べる。

リスク低減方策のレベル

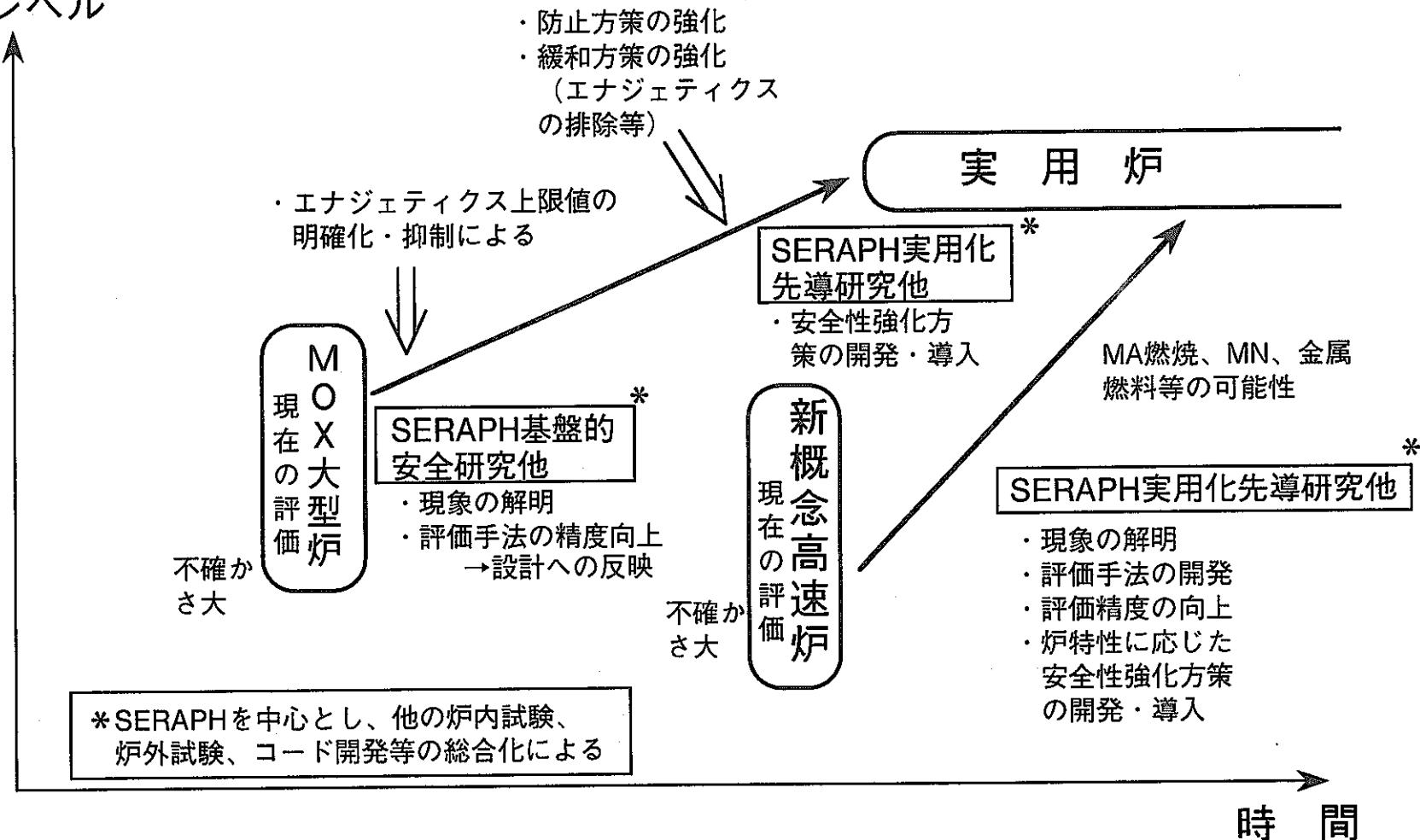


図 2.1-1 高速炉の実用化を目指した安全研究とSERAPHの役割の概念図

2. 2 燃料安全について

燃料ピンの被覆管は、内包する燃料と放射性物質の放散を防止する上での重要な物理的障壁であり、燃料ピンの健全性は安全確保の基本となる。また、万一、燃料の一部に破損が生じた場合においても、異常の拡大あるいはその影響が十分に抑制される設計とする必要がある。すなわち、今後のFBRの実用化に至る過程においては、新型燃料（金属燃料、窒化物燃料、低線出力MOX燃料など）の採用の可能性を含めた検討がなされ、燃料設計の進展、大型化などに伴う炉特性の変化、及び燃料の過渡挙動の解明がみられると予想されるが「運転時の異常な過渡変化」や「事故」などの事象に対する基本的な安全性の判断の基準は「燃料ピンの健全性確保」及び、万一燃料破損を生じた場合（炉心の局部閉塞事象なども含む）の「異常拡大の防止」であるといえる。

現行のMOX燃料炉心については、定常照射挙動の安定性はもとより、「運転時の異常な過渡変化」や「事故」においても、これらの基本的な安全性が満たされているが、実用炉としての高性能化を達成する上では、高線出力・高燃焼度などの条件での安全性の確認が課題となる。

一方、前述の「新型燃料」は運転時の燃料温度を低くできることから、炉出力低下時のドップラー反応度の変化が小さくなり、ATWS事象等における負の反応度効果による炉心損傷の回避に大きな可能性を有する。しかしながら、このような低頻度事象に対する安全性のポテンシャルが総合的な安全性の向上につながるためにには、定常照射挙動の安定性をはじめ、「運転時の異常な過渡変化」や「事故」における「燃料ピンの健全性確保」と「異常拡大の防止」が現行のMOX燃料に匹敵するレベルの安全性を有することの確認が必要である。したがって、何れの燃料概念の場合でも、高性能化の実現のためには、

- ①定常照射挙動の安定性
- ②過渡時の燃料ピンの健全性確保
- ③燃料ピン破損時の異常拡大の防止

の3つが適切に達成されるための条件の明確化と、その知見に基づく設計の最適化、及び合理的な安全評価手法が必須の課題となる。

また、ATWSなどにおいても炉心損傷を回避できる安全ポテンシャルのより高い設計を実現し、その安全性を具体的に安全評価において示すという観点からは、プラント全般にわたる応答に依存した反応度変化の定量化はもとより、比較的長時間の高温状態での「燃料ピンの健全性確保」及び一部に損傷を生じた場合の「異常拡大の防止」もまた新たな課題となる。

安全性・経済性を向上させたFBRの開発・実用化のためには、以上のような燃料安全研究の課題があり、これらを許認可性の観点から十分なレベルで解決することが目標となる。このような目標の達成のためには、実証炉、実用炉と燃料設計や炉心設計が進

展し高性能化が展開されてゆく中で、燃料ピンの破損限界の解明と異常拡大の防止条件の解明、及びそれらを踏まえた設計の最適化を進めてゆくことが不可欠であり、実機の過渡条件の模擬性に優れたS E R A P H試験がそれを達成する役割を担う。

2. 3 炉心安全性について

2.3.1 炉心損傷事故に係わる安全問題についての基本的考え方

炉心損傷事故に対しては、炉心損傷を発生させないこと、たとえ発生しても影響を閉じ込めるこの2つが重要である。ここでは、FBRプラントの特徴を考慮し、深層防護のレベルを以下のように設定して、もって安全確保に関する基本的考え方とする。

炉心損傷事故に対する深層防護の考え方

第1 レベル. 炉心損傷の発生防止

[起因事象発生防止] 起因事象を発生させない

[事故の拡大防止] 起因事象が発生しても炉心損傷事故へは拡大させない

第2 レベル. 炉心損傷影響緩和

[影響緩和] 炉心損傷事故へ拡大しても、炉内終息できる

第3 レベル. 放射性物質の放出防止

[放射性物質格納] 炉内終息ができなくても、放射性物質を格納系内に閉じ込められる

注) 第1 レベルの発生防止のレベルを2つに分けているが、これは、FBRでは冷却材のサブクール度が高いことから、ULOFのような起因事象が発生しても冷却材の沸騰に至るまでの間に早期終息の方策を考慮することが可能であるという特徴による。さらに、深層防護の前段を厚くすることによって受容性の高い安全性確保の体系を構築するとの狙いもある。

2.3.2 炉心損傷事故に対する実用炉の安全性の目標

実用化時代には、PSAの技術は進歩し、現在よりも一層信頼性の高いリスクの定量化が可能となっていると考えられる。その時代には、安全目標をリスクカーブ（たとえばCCDFカーブ）で定義する方法がより定量的で一般性があるものとなっているであろう。そのような定量的安全目標として、現在でも、例えば内田私案⁽¹¹⁾のような安全目標が提案されているが、そこでの論点の一つは、Pの小さな領域（例えば $10^{-7}/y$ 程度以下）での目標設定の考え方である。内田私案でも次の2つの考え方が示されている（図2.3-1参照）。

A案： $R = P \times C^n$ で定義されるリスクRが、ある一定値となるような曲線で定義する方法（Pが小さければある程度大きなCを許容するとの考え方、図2.3-1中の⑥）

B案：ある P (P -min) 以下ではコンシケンス C の上限値 C -maxへ漸近する曲線で定義する方法 (P が小さくとも C は C -maxを超えてはならないとの考え方、図 2.3-1中の⑤)

B案はリスクという確率論的な考え方に対して、公衆の健康への有害な影響を生じさせないレベルに C -max という決定論的な「たが」をはめる考え方である。一般に「定量的安全目標」と言うと確率論的評価の領域の議論と考えられているが、このコンシケンスの上限値を併用するとの考え方は、確率に依存しないという意味で決定論的である。この、 C の上限値 C -max を低く抑える手段については、内田私案では防災対策やアクシデントマネジメントによるとしている。

両案のうちいずれがより適切かつ妥当であるかについては今後の検討を待つこととするが、いずれにしても炉心損傷事象に対する確率 P 、及びコンシケンス C の低減を目標としていることには変わりはない。

これを前述の深層防護のレベルと対応させると、図 2.3-2に示す如く、第1レベルが P の低減に、第2、第3のレベルが C の低減に対応する。すなわち、 C の低減には第2レベル、第3レベルが必要である。特にFBRの実用化を考慮すると、プラント設計に對しては一層の合理化が図られる必要があり、炉心の大型化、プラントの合理化に對して更に炉心損傷時のコンシケンスの低減を図るためには、上述の第2レベル、第3レベルにおける安全防護の重要性が増大するものと考えられる。

2.3.3 目標への達成手段とSERAPHの役割

前節において、実用炉において達成すべき安全性の目標として、炉心損傷事故の発生頻度を一層低減すること、コンシケンスを一層低減することの2つを掲げた。これらの達成のためには、2.3.1節で示した深層防護の各レベルにおいて、以下の手段を講じることが必要と考えられる。

第1レベル - [起因事象発生防止] に対して：

工学的安全系の信頼度向上

2系統独立急速炉停止系及び崩壊熱除去系の多様性、信頼性を向上させる。このレベルにおいて通常、I- [事故の拡大防止] において考えられる受動的な方策を、その信頼度を高めてクレジットを取った上で採用することもできる。キュリーポイント方式のSASSや、自然循環による崩壊熱除去などはその候補であろう。

第1レベル - [事故の拡大防止] に対して：

受動的な炉停止又は出力静定方策、崩壊熱除去方策の実用化による炉心損傷への拡大の可能性の低減

有効かつ受動性の高い事故拡大防止方策を開発し、併せて評価技術を開発し、効果を実証した上で導入する。方策は、受動的な装置によるもの（例えばキュリ一点方式SASS）から炉心変形や低温燃料の採用によるものまで多種・多様であるが、いずれも、そのR&Dの過程において炉内、炉外試験が必要となる。

第2 レベル - [影響緩和] に対して：

再臨界の排除、及び溶融デブリの炉内冷却・保持

レベル2 PSAの経験によれば、格納容器の大規模破損（開口面積数m²以上）は、炉心での厳しい核的エネルギー発生、特に遷移過程における再臨界に起因する床上でのナトリウムのスプレイ燃焼によってのみ生じる可能性がある。また、格納容器の小規模破損（ペネトレイション部の局部的開口破損、0.05m²程度）は、再臨界に起因する床上でのナトリウムのスプレイ燃焼と、炉心デブリが炉容器を溶融貫通した場合に発生する水素の床上での爆燃によってのみ生じる可能性がある。したがって、実用炉における炉心の大型化やプラントの合理化を考慮すると、まず再臨界によるエネルギー発生の可能性を排除することが、格納容器の健全性確保のために必要であると言える。このためには、まず炉心損傷の過程の初期において事象が終息するシナリオを成立させることが望ましい。しかし、炉心損傷の初期段階における炉心状態は起因事象の違いに依存して異なるため種々のケースを考えられる。早期終息シナリオの成立が困難な起因事象に続く後続事象に対しては、炉心崩壊が進展する過程の早期段階で、炉心の溶融が全炉心規模へ拡大するよりも前に、燃料の炉心外への流出によって恒久的な未臨界が達成されること、及びその時間内に大きな反応度印加要因がないことを示す必要がある。さらに、炉容器の溶融貫通を防止するために、溶融デブリの炉内冷却・保持を確実とすることが必要である。

以上から、第2 レベルでは、再臨界の排除、事故の炉内終息を可能とする設計の条件の明確化、及びそれらの実用化を目的として、重要な現象の理解の向上、事象推移評価手法の確立、有効な緩和方策の開発・有効性実証・導入を図る必要がある。このうち、特に再臨界排除に関する現象の解明、実験的裏付けの取得には、炉内安全性試験が不可欠である。

第3 レベル - [放射性物質格納] に対して：

格納系内での水素及びナトリウムの燃焼の影響緩和方策、ソースターム移行量低減方策等による格納系の健全性の確保と放射性物質の放出量の低減

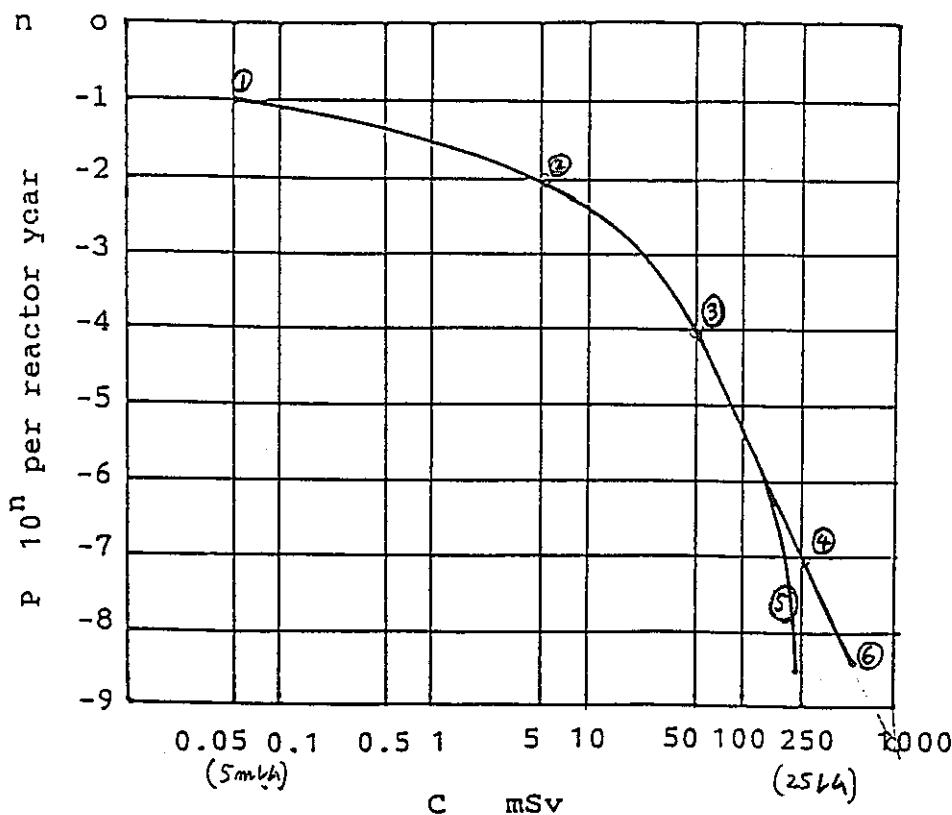
レベル2 PSAの経験によれば、格納容器の健全性が維持されることが放射性物質の放出量低減に直接的に役立つと言える。プラントの合理化が図られるであろう実用炉では、水素燃焼、ナトリウム燃焼などによる影響を大幅に緩和することによって格納系の破損を回避する設計の実用化が必要であろう。また、ソースターム移行挙動の定量的把握を進め、合理的評価手法として確立するのみならず、移行量低減方策の開発へ結びつけることも必要であろう。以上から、第3 レベルで

は、放射性物質の格納に関連するこれらの重要な現象の理解の向上、事象推移評価手法の確立、有効な緩和方策の開発・有効性実証・導入を図る必要がある。このうち、特に破損燃料からのソーススター放出・移行挙動の解明については、炉内安全性試験が必要である。

上述した炉心安全性に関する目標の達成の展開を表2.3-1に示した。同表に示したように、SERAPHの役割は、第1レベル- [事故の拡大防止]、第2レベル- [影響緩和]、第3レベル- [放射性物質格納]に関連する。すなわち、SERAPHは、実用炉における前述の安全性の目標を満たすために、Pを低減すること（拡大防止）、コンシケンスを低減しつつそれを実証すること（影響緩和、放射性物質格納）のために必要であると位置づけることができる。もとより、これらはSERAPH計画の実施のみで可能となるものではなく、SERAPH計画とその他の安全研究計画を全体的に統合することによって可能となるものである。しかし、その中にあって、高速炉条件に合った硬い中性子スペクトル場を提供するSERAPH施設が中心的な役割を果たすことは言うまでもない。

表 2.3-1 炉心安全性に関する安全性の目標の展開

実用炉において達成すべき安全性の目標	安全防護のレベル	大目標	大目標の展開（小目標）	炉内試験必要性
炉心損傷発生頻度 P の一層の低減	I-炉心損傷の起因事象の発生防止	工学的安全系の信頼度向上	-炉停止システムの信頼度向上 -崩壊熱除去系の信頼度向上	— —
	I-炉心損傷への拡大防止	受動的な炉停止又は出力静定方策、崩壊熱除去方策の実用化による炉心損傷への拡大の可能性の低減	-受動的な負の反応度挿入方策の開発・導入 -受動的な崩壊熱除去方策の開発・導入	部分的に必要 —
合理化されたプラント設計における炉心損傷コンシケンスの一層の低減	II-炉心損傷の影響緩和	再臨界によるエネルギー発生可能性の排除 事故の炉容器内終息	-部分損傷規模での早期終息方策の開発・導入 -燃料早期流出挙動の確認 -全炉心プール拡大前における反応度印加要因の排除 -炉心デブリの冷却・保持方策の開発・導入	必要 必要 必要 —
	III-放射性物質の格納	格納系への負荷要因の緩和による格納系の健全性確保 ソースターム移行量低減	-水素燃焼、ナトリウム燃焼に対する緩和方策の開発・導入 -ソースターム移行挙動の解明	— 部分的に必要



P (probability of an incident per reactor year)
 versus
 C (adverse effect associated with an incident)

- ① 通常運転時の被曝線量の目標値 0.05 mSv に対して $P = 1 \sim 10^{-1}$ 。
- ② 一般公衆に対する最大許容被曝線量 5 mSv に対して $P = 10^{-2}$ 。1 軽水炉寿命当たり 1 回未満。
- ③ 50 mSv に対して $P = 10^{-4}$ 。わが国の全軽水炉寿命当たり 1 回未満。
- ④ 立地評価事故に対する目安線量の 250 mSv に対して $P = 10^{-7}$ 。
- ⑤ 立地評価事故を越えるシビアアクシデントに対しては、防災対策の適切な適用によって被曝線量を 250 mSv 以下に抑えることを期待し、確率 10^{-6} より小さい部分は 250 mSv に漸近する凸状の曲線とする。放射線審議会によって提案されている退避のための目安線量 250 mSv も考慮されている。
- ⑥ ⑤を無視して、確率 10^{-6} より低い範囲を対数関係で直線的に延長しても、被曝線量が 1 Sv を越える範囲の確率は極めて小さく、無視できる。

図 2.3-1 内田による定量的安全目標の私案

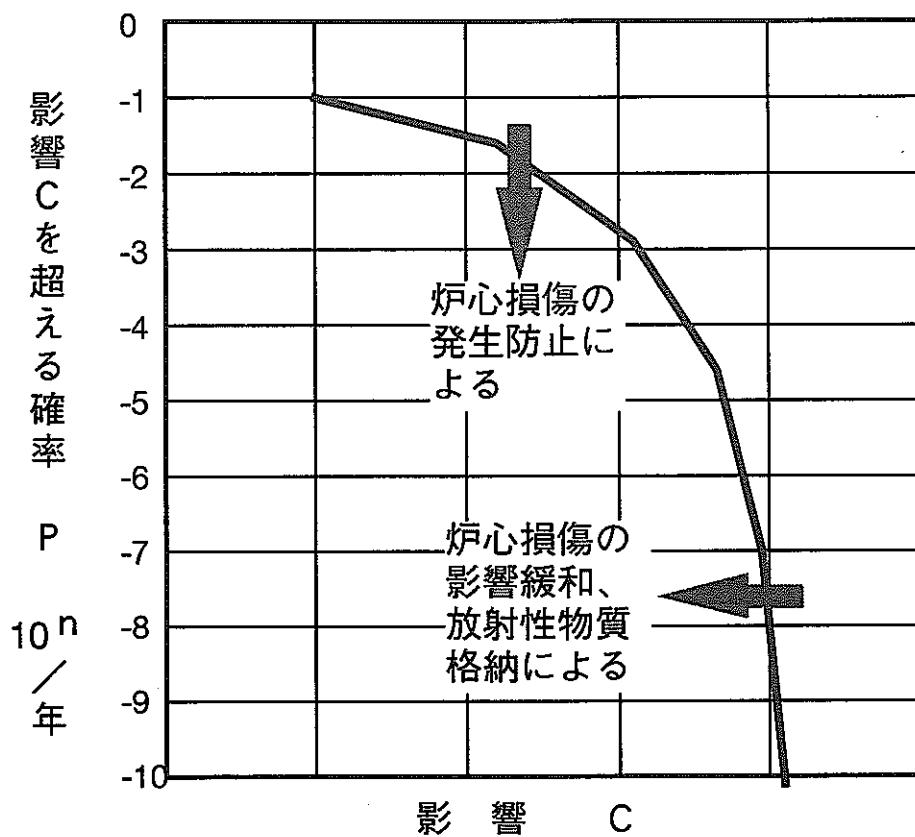


図 2.3-2 実用炉における安全目標の概念

3. 炉内安全性試験の必要性に関する検討

3. 炉内安全性試験の必要性に関する検討

1992年後半から1994年度にかかる第4期の検討においては、第1章序に述べたごとく、実用化先導研究テーマ及び基盤安全研究テーマの2つの領域に分けて、炉内安全性試験の必要性に関する検討を行った。各々の検討の目的は以下の通りである。

実用化先導研究テーマ検討の目的

事故防止や影響緩和に関するサクセスシナリオを実証する実用化を先導するための安全研究課題のうち、SERAPH計画に取り込むべきテーマを幅広く検討する。

基盤安全研究テーマ検討の目的

個々の試験の内容（特にスケール則、測定方法などの裏付け）や試験施設への要求仕様の妥当性、十分性の検討の詳細化を図る。

3.1 節に記した実用化先導研究テーマの検討は、今期において新規に開始したものであり、既に検討されてきている炉心損傷事故の影響緩和方策に加えて、事故の発生防止方策の部分へも検討の幅が広げられている。また、新型燃料の開発に伴って必須となる燃料破損限界に関する研究なども含んでいる。安全性向上のために有効と評価された方策については、実験計画とその他のR&D計画を全体的に検討し、その全体計画の中で常陽、もんじゅ等と並べてSERAPHの役割を規定している。

基盤安全研究テーマの検討については、3.2節で、今期に新たに検討を加えた点、あるいは検討を深めた点を重点的に記述した。さらに、基盤安全研究テーマと実用化先導研究テーマとは厳密には分離できないので、基盤安全研究テーマの検討の延長で、第2章で述べた事故防止や影響緩和に関するサクセスシナリオに結びつく項目についても記述を補強した。すなわち、3.2 節の記述は、これまでの検討の上に積み重ねられた追加部分である。なお、最終的に炉内試験のテーマとして絞られた項目については、3.3 節に示す図表の中にこれまでの検討のエッセンスを含めて簡潔にまとめられている。

3.3 節では、3.1 節及び3.2節での検討成果を統合してSERAPHにおける試験研究テーマを表形式でまとめた。これらの試験テーマは、第2章に述べた達成すべき安全性の目標を展開した小目標（表2.3-1参照）の達成を目指したものである。

3. 1 実用化先導研究テーマに関する検討（受動的安全方策の評価、絞り込み、組み合わせの検討、研究開発方針の提案）

3. 1. 1 はじめに

実用化先導研究の一環として受動的安全方策に関する研究を実施することを考え、ここでは、種々提案されている受動的安全方策の利害得失の評価、有望な方策の絞り込み、炉に採用する場合の適切な組み合わせの検討を実施し、研究の重点テーマを明らかにする。以下の手順で検討を進める。

①受動的安全特性を重視したフィロソフィー、システム概念の提案

②受動的安全方策についての評価

種々の受動的安全方策について、重点テーマ絞り込みのための評価を実施する。そのため、以下の作業を実施する。

i) 評価の視点の決定

重点テーマを絞り込むための評価において立脚する視点を整理する。

ii) 評価の実施

受動的安全方策の適切な組み合わせを検討するとともに、有望な方策を拾いだすため、整理した全ての視点から利害得失の評価を実施する。文献等を参照して、できるだけ定量性のある（半定量的）評価を実施する。適切な過去の研究がない場合は、定量評価するための課題の抽出を行う。

③重点テーマの絞り込み

②の評価結果に基づき、重点的に研究を進めるべき有望な受動的安全方策の絞り込みを実施する。絞り込みを行う際には、方策の適切な組み合わせについても考慮する。

④課題の抽出、研究方法の検討

絞り込んだ受動的安全方策について、その有効性の確認や実証、評価手法の確立等のために必要なR&D課題を抽出する。また、その研究方法（炉外・炉内・実炉試験の実施、解析評価手法の開発）を検討する。

⑤SERAPHの役割、SERAPHへの要求性能の検討

④で抽出された研究開発において、SERAPHにどのような役割をもたせるのか、常陽、もんじゅの役割は何かについて検討するとともに、SERAPHへの要求性能の検討を行う。

②～⑤の検討は、概ね、番号の順に検討を進めることとなる。ただし、本資料では、②

～④の検討及び⑤の検討の一部を行う。⑤の内、SEARAPHで実施する試験の試験計画、SERAPHへの要求性能の検討については、別途実施する。①については、②～⑤と関連を持たせながら平行して検討を進め、受動的安全方策を導入する意味を安全論理との整合性の観点から議論する。

3. 1. 2 受動的安全方策の項目の整理

まず、従来から国内外で提案されているものに新たな提案を加えて、受動的安全方策を拾い上げることとする。拾い上げに当たっては、以下の点に配慮した。

- (1) 活用するメカニズムのみの提案ではなく、具体的な方策を提案する。
- (2) 従来の設計でも生じる現象を受動的安全性の強化という観点から積極的に取り上げようとするもので、そのためには評価手法の高度化が必要という程度の位置付けのものは、従来の安全研究の範疇で検討することになるので、その現象についての具体的な促進方策の提案が無いかぎり拾わない。
- (3) 現象が速く、運転員による介在の余地が少ない「炉停止（反応度効果）」に係わる方策のみを検討対象とする。

「崩壊熱除去」に係わる受動的安全方策 - 自然循環等 - も重要度は高い（12）が、相対的に研究の進捗度が高いため、ここでの検討対象としない。

ただし、「炉停止」に係わる安全方策の評価の視点の一つとして、「除熱との干渉効果」（炉停止に係わる受動的な安全方策が働いたために、それが炉心の除熱を阻害するような要因として作用する効果）については、それがないかという観点から取り上げて検討する。

「格納」に係わる安全方策については、具体的な促進方策が示されていないのでここで検討対象とはせず、メカニズムに係わる研究のみ従来の安全研究の中で考える。

上記方針に基づいて摘出された項目は以下の通り。

A. 炉心設計による初期事象進展速度の緩和

No.1. ボイド反応度の低減

No.1-1. 偏平炉心

No.1-2. 軸方向非均質炉心

No.1-3. 径方向非均質炉心

No.1-4. アニュラー炉心

No.2. 熱設計に関わる安全性向上

No.2-1. 低線出力炉心

B.炉心燃料物質の変更による初期事象進展速度の緩和

No.3. 高熱伝導度、高重金属密度燃料のメリットを安全性向上に活用

No.3-1. 金属燃料炉心

No.3-2. 窒化物燃料炉心

C.炉心損傷事故の発生防止機構

C1.冷却材密度係数の活用

No.4. ガス膨張機構 (GEM) (13)

No.4-1. 従来型GEM (FFTF型)

No.4-1-1. 炉心の周辺部に設置する場合

No.4-1-2. 炉心の中央部に設置する場合

No.4-2. 中性子吸収ガス封入型GEM

No.4-2-1. 炉心の周辺部に設置する場合

No.4-2-2. 炉心の中央部に設置する場合

No.5. 炉心中心部にボイド領域を設けておき、炉心の温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される機構 (GEMの反対の発想) [図 3.1.2-1 参照]

No.6. ナトリウムプレナム付炉心 (14)

No.7. 負のボイド反応度領域でNa沸騰を先行的に発生させる人工的リードチャンネルの設置

No.7-1. Power/Flowを大きくした特別の燃料集合体を設置

No.7-2. 燃料を活用しない、核分裂以外の核反応による発熱で冷却材を沸騰させる

C2.固体吸収材の炉心内への挿入

No.8. フローティング型炉停止機構

No.8-1. 制御棒を冷却材の動圧によって浮かせておくのみのタイプ

No.8-2. フローティング型SASS (自己作動型炉停止機構) [図 3.1.2-2 参照]

No.9. キュリー点式SASS (自己作動型炉停止機構) (15)

No.10. 中性子束の上昇により溶融する物質を利用した中性子吸収材の炉心への混入

No.11. 燃料ピン型SASS機構 (ボイドからナトリウムへの置換機構を含む) [図 3.1.2-3 参照]

No.12. 集合体内SASS (自己作動型炉停止機構) [図 3.1.2-4 参照]

C3.燃料と吸収材の相対変位

No.13. 制御棒駆動軸の膨張促進機構

No.13-1. 伸長リンク機構 (16)

No.13-2. 感温チェンバー活用

No.13-2-1. 感温チェンバーによる制御棒駆動軸の膨張促進のみに期待 (16)

No.13-2-2. 制御棒駆動軸の膨張促進に加え、制御棒を落下させる機能(SASS機能)を付加したタイプ (EPRのATHENA) (17)

No.13-3. バイメタル方式

C4.炉心形状の変化

No.14. 炉心湾曲、フラワリング効果の促進

No.14-1. 炉心槽での集合体拘束方式の工夫 [図 3.1.2-5 参照]

(例えば、

①板バネ状のものでの拘束：燃料集合体の変形により板バネにある程度以上の応力が働くと板バネが座屈し集合体上部の拘束が解ける。

②メカニカルスナッパー的な支持機構による拘束：地震に対しては剛に拘束し、熱変形に対しては柔に変形を許容する。)

No.14-2. 集合体上部に集合体変形モードを規定するガイドを設ける方式 [図 3.1.2-6 参照]

No.14-3. 集合体ラッパ管パッドの剛性強化

No.15. 炉心軸方向膨張促進機構

膨張率の高い材料で集合体内の燃料を支持しておく方式 [図 3.1.2-7 参照]

No.16. 炉心径方向膨張促進機構

超塑性変形グリッドスペーサ (ダクトレス炉心に対応) [図 3.1.2-8 参照]

C5.液体又は気体吸収材の炉心内への投入

No.17. 燃料ピン上部又は下部への吸収材 (気体又は液体) 封入 [図 3.1.2-9 参照]

D.炉心損傷事故の影響緩和

D1.中性子吸収材の炉心内への投入

No.18. 吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入

D2.燃料の炉心外への排出

No.19. 集合体内SASS (集合体内の制御材案内管を通した溶融燃料の炉外排出)

No.20. 中空ペレットによるピン内燃料移動・分散

No.21. 人工的燃料分散リードチャンネルの設置

(先行的に燃料分散が発生するチャンネルを設け、非同時性を持たせた燃料分散により負の反応度を投入する)

No.22. 軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進

No.23. 集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保（燃料スイープアウトパスの確保）

No.24. 制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出

No.25. ナトリウムプレナム付炉心による燃料流出促進

上記の方策の中で、炉心設計、燃料組成を変える方策についての検討は、以下の点で取り扱いが難しい。

- 炉心形状、燃料組成を変える方策は、定常状態での炉心の特性をマイルドにする（ボイド反応度を小さくする等）ことを意図した方策であり、人工的に何らかの装置を持ち込むことによって、事故が発生した過渡状態において受動的な特性を促進させることを意図したその他の方策と同列では議論しにくい。

- 設計によって、炉心特性に大きな差があり、一般化した議論がしにくい。

これらの方策とその他の方策については、別扱いにして評価すべきとの考え方もある。しかし、この資料の中では、「評価の視点」の摘出を行う際にできるだけ幅広い洗いだしに心掛けることとして、とりあえず共通の視点で評価を行い、炉心形状、燃料組成を変える方策において評価にそぐわない項目については、評価を行わないこととする。

また、設計を限定しないと評価が困難であるため、検討対象として、出力が100万KWe程度の大型炉で、線出力は従来設計の大型MOX炉程度（ピーク400W/cm）の炉心（2-1を除く）を想定する。例えば、窒化物炉心では、その利点である安全性の余裕を炉心設計において線出力を高めるのに充てることも考えられるが、ここでは、余裕はそのまま残すこととした。また、金属燃料では、小型炉心の方が利点を良く發揮できる面もあるが、小型炉と大型炉とは安全性のみならず広い視野から比較すべきことから、ここでは大型炉に限定して検討を進める。

炉心損傷事故の発生防止方策と影響緩和方策についても、本来、それらを同格に扱うのは困難である。したがって、「評価の視点」の内、防止方策あるいは緩和方策の評価にそぐわないものについては、それぞれの評価項目から省くものとする。

3. 1. 3 重点テーマの絞り込みのための評価の視点の摘出

重点テーマを絞り込む検討の流れは、一般的には図3.1.3-1に示すとおりである。すな

わち、まず前節で摘出した受動的安全方策を「ランク付け」する視点で評価して有望な受動的安全方策を摘出し、次にそれらを「分類」し、最後にその分類結果を念頭に置きながら「総合化」する視点で評価して有望な受動的安全方策を実機の設計に採用する際の適切な組み合わせを設定する。ただし、「ランク付け」の結果だけを、研究開発の重点テーマの絞り込みの判断材料として用いる場合もある。炉停止に係わる受動的な安全方策は、一般的に、その反応度効果の大きさや機能する期間が限定されるものが多いため、組み合わせまで検討する必要性が高い。「分類」の検討結果は、この組み合わせを検討するための判断材料として用いられる。

このような評価において立脚する「視点」を摘出した結果を図3.1.3-2に示す。評価の視点は以下の5つに大きく分類される。

- ①メカニズム
- ②確実性
- ③経済性
- ④運転制御性
- ⑤安全論理との整合性

「視点」は、受動的安全方策の「分類」を実施するための視点と、安全方策の重要性の「ランク付け」を行うための視点、さらには、安全方策の組み合わせを考えるための「総合化」の視点に分けられる。以下に、各評価の視点を選定した背景、根拠を、また「分類」に係わる項目については、分類の考え方を述べる。

①メカニズム

受動的安全機能に求められるものは、能動的な（機械的、電気的な）動作を必要とする従来の設備が適切に作動しない場合でも、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」、の原子炉安全の大原則を、自然現象を有効活用した受動的な方策により達成することである。ただし、いくら受動的安全システムとはいえ、100%受動的であるとは限らず、その受動性の程度については色々と種別されるものと考えられる。

受動的安全機能を備えた方策（システム）には、自然現象による物理量変化の伝達メカニズムが存在する。「メカニズム」という視点からの評価では、個々の受動的安全システムがどのような物理的メカニズムによりその機能を発揮するのかについて調べる。

受動的な安全システムにおいて、炉停止能力等の効果の大きさが大きい方が望ましいことはいうまでもない。しかし、その機能がどのような時間フェーズで有効となるかは、方策ごとに異なり、したがって、各方策がどのような異常または事故事象に有効に活用し得るかについても自ずと異なってくる。また、特定の方策の効果の大きさに過度に期待する設計を行うと、場合によっては、安全システムが作動するまでの経路が複雑になったり、除熱能力を妨げたりすることもあり得る。換言すれば、ここで検討する受動的

安全方策の中には、炉を安全な方向にのみ終息させるものと、炉の状態によっては安全側にも非安全側にも作動させ得るものとがあると考えられる。

以下に、効果の大きさ、受動性の程度（簡易性、単純性）、除熱との整合性を「ランク付け」のための評価の視点とし、検知・作動に係わる物理量、作動原理、即応性（事故フェーズ）、非可逆性を「分類」のための評価の視点としてそれぞれ摘出し、検討を行うことにする。ただし、効果の大きさは、組み合わせを考える上での目安ともなるので、「分類」のための視点の一つとの見方もできる。

i) 検知・作動に係わる物理量

- 受動的安全機能に対する最も基本的な考え方は、自然現象を有効に活用してシステムを安定な状態に終息させる、というものである。
- これらの機能は、その自然現象による物理量の変化を検知して（誘発されて）初めて作動するゆえ、この検知される物理量は、個々のメカニズムにおける本質に相当するものである。
- 各受動的安全方策における、検知・作動に係わる物理量について調べる。

ii) 作動原理

- 物理量の変化を検知した受動的安全機能は、その目的に従った作動を行うまでに種々の物理現象を経過する。
- この物理的伝達経路は、「検知・作動に係わる物理量」と並び、個々の受動的安全方策のメカニズムにおける本質に相当するものである。
- 各受動的安全方策が実際に作動するまでの経路、すなわち作動原理について調べる。

iii) 即応性（事故フェーズ）

- 各方策の有効性を考える上で、それぞれの効果が有効となる時間スケールを考慮することが重要である。
- システムが過渡状態にある場合、過渡開始後各々の安全機能が有効に作動するまでの時間は、その作動原理に大きく依存する。
- また、各々の安全機能が有効に作動するのはどの事故フェーズかということを把握しておくことは、それが異常防止のためのものか、それとも影響緩和のためのものかを分類する意味でも重要である。
- 各々の方策が、過渡開始後時間的にどの程度の即応性で作動するか、またどの事故フェーズで有効となるのか、について調べる。

iv) 非可逆性

- 自然現象をシステムの安全確保の方策として取り入れる場合、過渡事象の進展によりその現象がシステムの状態に与える影響を充分評価できない場合には、可逆的に変動することを許すよりも、安全な方向にのみ終息させる方が望ましい。

- 起因事象発生過程における可逆性は、より高度な固有安全機能である自己制御性としての可能性を持っているが、システムの安全確保という観点からすれば、可逆的現象は過渡事象の進展によりシステムの状態を安全側にも非安全側にも至らせる可能性を常に秘めているといえる。したがって、即応性があるが可逆的な方策は、即応性が小さいが非可逆的な方策と組み合わせて採用するというようなことも考える必要がある。
- ここでは、各方策が有する機能が可逆的か非可逆的かについて調べる。

v) 効果の大きさ

- 炉に過渡変化が生じた場合、できる限り迅速でかつ大きな反応度投入により炉の過渡状態を終息させることは、早期炉停止、及びその後の除熱性能へのインパクトという観点から望ましい。
- 各方策における効果の大きさを、投入される反応度、事象終息への寄与の程度に焦点をあてて相互比較する。
- 効果の大きさを、「ランク付け」のための視点から検討する目的は、取るに足らない程度の効果しか有しない方策を排除することにある。
- それぞれの受動的な安全方策は、単独で事象終息させる程度の効果を有していない場合には、最低限、他の方策と組み合わせることによって事象終息を達成できる程度の効果がなければならない。この点で、効果の大きさは、組み合わせを考えるうえで判断材料とする「分類」のための視点と見ることもできる。

vi) 受動性の程度

- ある安全機能が工学的機能や物質の移動に依存していないほど、その機能はより受動性の高いものであり、このような受動性の程度を評価することは受動的安全システムを考える上で重要な一項目である。
- 受動性の程度が高い方策は、簡易性または単純性にも優れている。簡易性は、動作の確実性を高める上でも、安全性を平易に説明する上でも重要である。
- 各々の安全方策が、どの程度の受動性を有し、能動的作用に依存していないかについて比較する。

vii) 除熱との整合性

- 安全性を高めるために設けた受動的安全システムが、炉停止には有効に働いたものの除熱性能には著しく悪い影響を及ぼすというようなことがあっては本末転倒である。
- 例えば、ある安全機能が働き、炉心の反応度及び出力を十分に低下させたが、その際中性子吸収物等の何らかの物質を炉内に混入させたために、その物質がある領域で固まり冷却材の流路閉塞を引き起こす、といった現象が起こることも考えられる。
- ここでは、各方策における受動的安全システムが有効に作動した後、除熱との整合

性はどの程度とれているかについて比較する。

②確実性

起因事象の発生、またはある時点までの進展により、その機能が確実に発動し、その効果を求められる時間フェーズにおいて確実に維持できることが受動的安全機能の重要な条件である。以下に「ランク付け」のための評価の視点として摘出した信頼性、不確定性、点検保守性、交換の容易性、マイナス要因、実証性、寿命（耐久性）と、「分類」のための評価の視点として摘出した独立性・多様性について、検討を進める。

i) 信頼性、不確定性

- 安全機能の起動、効果の維持に関する確実性が高いことの第一条件は、それらの信頼性が高いこと、すなわち起動や機能の維持に失敗する可能性が小さいことである。
- 第二にその高い信頼性が安定して確保されることも重要である。
- 起動のメカニズムや反応度印加の原理上、排除し難い不確定要因がある場合には、これを明確にする。ただし、ここでいう不確定性とは、その安全方策が現時点で開発段階であるがゆえの知見の無さを指すのではなく、原理上の本質的な不確定性を指す。例えば、境界条件に影響され易い現象を活用している方策で、その境界条件が運転履歴等に依存する場合は不確定性が大きいと判断する。

ii) 点検保守性、交換の容易性

- 実機に施す安全方策が事故時に確実に機能することを担保するに当たっては、供用期間中に点検や保守が可能か否かは重要な問題である（ただし、点検保守が不要と考えられる安全方策に対してはこの限りではない）。
- 供用期間中に点検・保守が可能であることは、その安全方策の信頼性を確認することができ、確実性を担保できると考えられる。
- 作動のトリガーとしている物理量によっては、点検を行う際に事故条件を模擬した状態を実現しようとしてもできない場合がある。炉心部の永久構造物に工夫を施すような方策に関しては、関連設備の保守が困難となる。
- それぞれの安全方策のために設置あるいは付加される部品、設備が、寿命あるいは予期せぬ原因で機能を喪失する可能性がある。この場合、部品、設備を交換することが必要となる。
- 定期的に交換することによって、確実性を高めることができる。
- 交換に際して大規模な工事を必要とするようでは、経済的にインパクトが大きく、事実上、交換不能と言える。
- ただし、明らかに故障を考慮する必要のないものについては、別扱いとする必要がある。

<例>

SASSでは感温部の周囲に検査用ヒータを設けることでデラッチ機構を検査する事が可能である。

iii)マイナス要因

- ある受動的安全方策を導入したことにより、別の事象や事象の推移において安全に対してマイナスの効果が発生し得る場合、これを排除する必要がある。ここでは、特に、正の反応度を与える可能性に着目して検討する。
- また、受動的な安全方策として持ち込んだ設備が故障することにより、大きなマイナス効果を生じさせる可能性がある。フェイルセーフ性の観点から、この可能性に着目して検討する。ただし、原理から言って故障を考慮する必要のないものはこの限りではない。
- 導入した安全機能がグローバルな視点において非安全側に寄与することがないことを示す。

<例>

炉心変形の促進：予期しない変形モードにより正の反応度が入る可能性。

リーディングチャンネル：先行破損集合体内での破損が事象進展の過程で隣接集合体に波及する可能性。

iv) 実証性

- 安全方策の信頼性の高さは、メカニズムの単純さ等の根源的な尺度だけで表すことができるものではなく、何らかの実績すなわち実機条件下での実験等に基づく実証が必要である。
- 安全方策の実証が著しく困難な場合、採用面で不利と判断される。
- したがって、実証の可能性を把握することは、安全方策の確実性を評価する上で極めて重要である。

<例>

炉外試験での実証が可能なものの：フローティング型制御機構

フローティング型制御機構は、冷却材の動圧のみを利用した方策で、形状及び熱流動条件を模擬することでその起動メカニズムの確実性を実証できる。反応度効果については通常の固体中性子吸収体であり、これまでの制御棒での実績が適用できると考えられる。

小規模炉内試験（単一燃料ピン規模）での実証が可能なものの：燃料ピン内中性子吸収材封入

燃料ピン規模でのTOP事象を模擬することによりその機能をほぼ実証できる。

既存の実機での実証が可能なものの：炉心湾曲

炉心湾曲は1次系冷却材の温度上昇とともにラッパー管の熱膨張を利用した方

策であり、その動作は、実機に集合体位置の検出計を設け反応度を測定することにより実証することができる（ただし、解析コードを介した実証となる可能性が高い）。

大規模炉内試験（燃料ピンバンドル規模）が必要なもの：集合体内SASS

集合体規模での炉内試験により、集合体内温度上昇や出力上昇を模擬し、SASSの起動と反応度の投入、出力低下を確認、実証することができる。

v) 該当設備の寿命（耐久性）

- 安全方策のために設置あるいは付加される部品、設備の中には、照射損傷等によつて劣化し、プラントの寿命中に機能しなくなるものが存在するかもしれない。
- 寿命の短いものは、確実性が高いとは言いがたい。
- 部品、設備の寿命（耐久性）について比較を実施する。

vi) 独立性・多様性

- 安全方策に独立性・多様性を持たせ、いくつかの安全方策を組み合せることは、想定する全ての起因事象とその事象進展に対して安全方策が確実に機能することを担保する上で非常に重要となる。
- そこで、独立性・多様性の観点で各安全方策を分類する。

<例>

GEMは電気的起動信号を必要とせず、流量低下による圧力低下を受けて自動的に起動する。起動に伴う物体の移動機構は、ガス領域が圧力の低下により拡大することである。反応度印加の原理は、ガス領域の拡大による中性子漏れの増大である。この3点はいずれも既存の制御棒と原理が全く異なり、独立性、多様性を兼ね備えた方策と言える。

③経済性

自然循環のように、大規模な動的機器を減らしたり、ポンプポンニーモータ等の機器の安全性のグレード下げたりすることによって経済性を高めるポテンシャルを有する方策もある。一方、安全性を高めるために、経済性に犠牲を強いられる場合もある。例えば、炉停止に係わる受動的な安全方策については、多くの場合、それを導入することによって何らかの設備を軽減できる可能性は少なく、導入コストだけ経済性を低下させることになる。しかし、受動的な安全性を活用する方策では、付加する設備としては軽微なもので良いものも多い。プラント全体のコストに占める付加設備のコストの割合を考えると、そのような設計を排除する要因にはならない可能性も大きい。

しかし、設備の付加という形での安全性の強化ではなく、炉心等の設計を根本的に変更することによって受動的な安全特性を高める場合もある。このようなケースでは、燃料サイクルまで総合的に考えると、経済性へのインパクトが大きくなると考えられる。

以下では、「ランク付け」のための評価の視点として摘出した当該設備のコスト（製作、保守）、設計へのインパクト、開発要素、再起動可能性、に分けて検討を進める。燃料サイクルへのインパクトという視点については、別途検討することとする。

i) 設計へのインパクト

- 例え付加した安全方策によって安全性が高められたとしても、FBRのメリットが著しく損なわれては本末転倒である。
- 安全性を重視するために別の面での犠牲が必要となることが多い。例えば、除熱に関する裕度を高めるため、燃料の線出力を下げるような設計も考えられる。
- 高い熱効率、増殖性、TRU消滅性能等、FBRが本来有する利点を損なう要素となりうるかについての比較を実施する。

ii) 開発要素

- 原理的にすばらしい安全方策でも、開発コスト、期間が極端に大きすぎる場合は採用することが困難である。
- 例え、高機能な材料の活用等、まだ見通しの立っていない今後の研究開発の進展に期待する方策も考えられる。逆に、従来技術の組み合わせで成立し、実証のみが必要な方策もあるかもしれない。
- それぞれの方策を実現するために必要な研究開発に要する資金、期間を比較する。

iii) 当該設備のコスト（製作、保守）

- 安全方策を実現するために付加される部品、設備を製作、設置するための費用、あるいは供用期間中に保守を施す費用が莫大なものとなると、経済性の観点から問題となる。
- 部品、設備を製作・設置、あるいは保守するのに必要な費用について比較する。

iv) 事象終息後の再起動可能性

- 安全方策により事故事象を終息させた後プラントを再起動する場合に、必要な運転操作、補修工事等が多いか少ないかは、経済性の面から重要である。
- 事象終息後の再起動が可能か否か、再起動が可能としてもどの程度の作業が必要なのかについて比較する。
- 安全方策の中には、炉心損傷事故の影響緩和方策のように、ある程度の炉心損傷を前提にしたものも含まれる。ここでの検討は、このような再起動可能性の低い方策を排斥することを意図したものではない。このため、炉心損傷事故の影響緩和方策に対しては、再起動可能性の視点からの評価を実施しないものとする。

④運転制御性

受動的な安全方策は、一般に自然現象を有効に活用しようという考え方を採用してい

るため、能動的にコントロールすることなく成り行きに任せることとなる。このため、受動的な安全方策の導入が、通常運転時の運転を難しくしたり、炉の安定性を悪くしたりというような影響を与えることが懸念される。このようなマイナス要因が存在しないかについて、運転の容易性、安定性、誤作動の可能性にわけて検討する。

i) 運転の容易性

- 受動的な安全方策を導入することによって通常時の運転を複雑にすることはないかという観点も重要である。
- 運転が複雑になると、運転員のミスをまねき、事故の要因にもなりかねない。
- 安全方策を導入したプラントの運転の複雑さ、容易さについて比較する。

ii) 安定性

- 運転時の炉の安定性は、運転制御性の観点から重要である。
- 極端な場合には、通常運転時に炉が準安定な状態となるよう維持し、外乱により不安定となり炉停止するという設計も有りうる。すなわち、炉停止しやすい設計である。このような設計では、安全性は高められるかもしれないが、炉の安定性には乏しく、運転制御性が低い。
- 安全方策の導入が炉の安定を損なう要因（場合によっては、事故の起因事象を増加させる要因）とならないかを調べる。

iii) 誤作動の可能性

- 通常運転中に誤作動が頻発するようでは安全方策として役に立たず、結局は、その機能を殺してプラントを運転することになりかねない。誤作動の頻度がいかに小さいかが、重要なポイントである
- また、誤作動が発生した後のプラント復帰措置がどの程度のものであるかも、重要なポイントである。

⑤安全論理との整合性

安全性が達成されていることを論理的に判り易く示すことが必要である。それとの係わりで言えば、受動的安全特性を導入する目的は、以下であると考えられる（図3.1.3-3は、ここで示す考え方を概念的に示したものである）。

- ・ 安全系の設計を厚くすること、
- ・ 高い安全性が容易に理解されること

安全系の設計が厚いことを示すためには、事故進展への障壁の観点（**深層防護**）^①からは、深層防護が適切に達成され、かつ各防護線に関して多重性、多様性、独立性に十分に配慮した安全系が用意されていることを確認しておく必要がある。また、事

故カテゴリの観点（事故シナリオ）^②からは、全ての起因事象に対して十分な安全対策が施されていることを示す必要がある。

高い安全性が達成されていることが容易に理解されるためには、各安全系の効果が確実であること（能動的）、信頼性が高いこと（受動的＊能動的）、その信頼度評価の確実度が高いこと（受動的＊固有の特性：考慮外の現象がない、失敗がない）が必要である。したがって、十分で適切な能力（单一故障を想定しても問題ないだけの十分な能力）と設計裕度（不確定性をカバーできる裕度）を備えている能動的な安全方策と、能力としては必要最低限もしくはそれを若干下回るかもしれないがその不作動がきわめて想像し難い受動的な安全方策並びに固有の特性を活用した安全対策の適切な組み合せ^③によってシステム全体としてタフであることを示すことが社会的受容性^④にとって有効であると考えられる。

安全論理が安全設計の合理性と完全性を説明する方法であるとすれば、以上を満足すれば安全論理との整合性があると考えられる。そこで、評価の視点として、①深層防護、②事故シナリオ、③能動的な安全方策と受動的な安全方策並びに固有の特性の適切な組み合わせ、④社会的受容性の4点を挙げる。すなわち、深層防護と事故シナリオの両方の観点から、工学的な方策と受動的な安全方策並びに固有の特性の適切な組み合わせを検討することによって、安全論理との整合性をチェックすることができ、それが社会的受容性の向上にもつながる。

上記4つの視点は、「ランク付け」の視点にも「分類」の視点にも属さない、いわば「総合化」の視点といえる。

「分類」の視点としては、「起因事象と事故カテゴリ」、「基本的安全機能」が挙げられる。「ランク付け」の視点としては、「リスク」が挙げられる。しかし、リスクを低減するための発生頻度の低減及び事故のコンセクエンスの低減は、それぞれ、「確実性」の視点で議論した「独立性、多様性」や「メカニズム」の視点で議論した「効果の大きさ」で判定することとなる。このため、検討が重複することとなる。ここでは、むしろ、「分類」の視点の方に加え、炉心損傷事故の発生防止（発生頻度の低減）に効果があるのか、炉心損傷事故の影響緩和（コンセクエンスの低減）に効果があるのかを明確にすることによって、「総合化」の「深層防護」の視点からの検討に資するよう配慮する。

以上の「分類」、「総合化」の視点の内のいくつかについて、もう少し詳しく議論する。

i) 起因事象と事故カテゴリ（「分類」の視点）

- 起因事象は、「原子炉の緊急停止を必要とする異常な事象であり、プラントの安全系設備の作動を要求する事象」と考える。事象発生後のプラントの応答、有効な緩和設備の観点から、カテゴリ別の分類（もんじゅでは18種類）を考え、その中に受動的安全機能の効果を著しく損なうものがないことを確認する。
- 事故カテゴリは起因事象とプラント応答に応じてULOF, ULOHS等に分類される。
- 起因事象と事故カテゴリは共通の分類が可能であると考えられるので、両者を一括して検討する。

ii) 基本的安全機能（「分類」の視点）

- 基本的安全機能としては、原子炉の核的停止、崩壊熱除去、液位の確保、放射性物質の格納がある。
- それぞれに対して能動的な安全方策と受動的な安全方策が用意される。
- ただし、ここでは炉停止機能のみに着目する。
 <例> 原子炉停止； 主AND/OR後備炉停止系+受動的炉停止系+固有の安全特性

 崩壊熱除去； 強制循環+自然循環+放散熱等。

iii) 深層防護（リスク低減）（「分類」の視点）

- ここでは設計基準事象を越える領域の事象に着目する。
- 各事象によるリスクを低減するに当たって、事故の発生／拡大防止（発生頻度Pの低減）にウェイトを置くべきものと、事故の影響緩和（事故影響Cの抑制）にウェートを置くべきものがある。防止と緩和のどちらを重視するかの判断は事象によって異なると考えられる。
- 設計対策の多くはPもしくはCの低減の一方にのみ効果がある場合がほとんどである。したがって、設計対策を講じるとき、いずれかを選択する必要がある（両方に効果的な方策は燃料内への毒物混入か燃料分散）。
- 例えば、バウンダリ破損のないPLOHSでは、Cの低減よりもPの低減対策が効果的である。溶融燃料プールのスロッシングによる再臨界では、もともと極めて低発生頻度であり、Pを低減することの意味は明確でないので、プールのサイズを制限したりプールが形成され得ない構造を採用する等のCを制限する対策が有効であると考えられる。
- リスクアバージョンの考え方があり、Cが大きくなると許容されるPははるかに小さくなると考えられる。また、Cには上限がある。
- すなわち、図3.1.3-3中のリスク平面上でどのような座標に位置するかに応じてPとCの何れを重視するかを判断する。Pが大きくCが小さいものはPの低減に、Cが大きくPが小さいものはCの抑制に努力する方が効果的である。

- 安全方策が炉心損傷事故の発生防止（発生頻度の低減）に効果があるのか、炉心損傷事故の影響緩和（コンセクエンスの低減）に効果があるのかの「分類」を行う（影響緩和に関しては、さらに、全炉心損傷への拡大防止【損傷の局在化】を目的とした方策と、炉心損傷事故の炉容器内終息を目的とした方策に分類する）。その結果は、「総合化」の視点から安全方策の組み合わせを検討する際に考慮する。

iv) 工学的な安全方策と受動的な安全方策並びに固有の特性の組み合せによる安全対策の厚みの適正化（「総合化」の視点）

- ここでは、能動的な安全方策、受動的な安全方策、固有の特性を以下のように定義する。

「能動的な安全方策」

- 自然現象に頼らずに、電気信号による情報伝達や電気的、機械的な駆動機構を採用することによって、十分に大きな効果、十分な即応性を実現できるように設けられたもの。
- 信頼性は、十分に品質管理を行うことや、独立性・多重性等を確保することによって担保される。
- また、運転員の意志で制御ができるし、試験も容易である。
- 起動信号やエネルギー供給が必要であり、それに係わる設備の故障や誤作動への対策が必要である。

「受動的な安全方策」

- 自然現象による安全にとってプラスの効果を、人工的な工夫によって促進するよう意図した方策。
- 自然現象を活用することによって作動失敗の可能性を低くし、確実性を高める。
- 電気的な信号あるいは機械的な駆動機器を自然現象で置換することによって、「能動的な安全方策」とは全く違った角度から事象に対処する方法も考え得る。
- 効果の大きさが決定的ではなく、他の方策との組み合せが必要なものも多い。即応性に欠けるものも多い。運転員が制御できない。試験、作動確認が困難なものもある。故障の可能性は「能動的な安全方策」に比べて小さいが、誤作動の可能性を完全には否定できない。

「固有の特性」

- プラントが本来的に有している物理的特性。それをプラスに活用するべく設計上配慮する。
- 機能喪失や誤作動を想定する対象とはならない（次元が違う）。したがつ

て、供用期間中試験を行う必要はない。

「受動的な安全方策」と「固有の特性」とは、元来、対比させて考えるべきものではなく、「受動的な安全方策」で活用している自然現象も固有の特性の一部と言える。しかし、「受動的な安全方策」では、炉の出力を低下させる目的で固有の特性を活用しようとして、種々のエンジニアリングデバイスを導入している。根幹となる作動原理は固有の特性であっても、その方策全体としては固有の特性と言い切れないのが「受動的な安全方策」である。ここで「固有の特性」と分類しているものは、作動のための検知の原理から負の反応度挿入の原理まで一貫して自然現象に基づくものであり、「受動的な安全方策」の中の特別なものとも言える。

具体的に、この資料でピックアップした安全方策のうち、「固有の特性」に分類されるものは以下のようになる。

「固有の特性」

No.1-1～1-4. 炉心設計によるボイド反応度の低減

No.2-1. 炉心設計に関わる安全向上：低線出力炉心

No.3-1～3-2. 炉心燃料物質の変更による初期事象進展速度の緩和

No.6. ナトリウムプレナム付炉心

また、以下のものについては、「受動的な安全方策」に分類されているが、デバイスというほどのものを設けておらず、重力によって溶融燃料が排出されるという元来の特性を、より発揮し易いように工夫したものであり、「固有の特性」に近いものと言える。

No.19. 集合体内SASS（炉心損傷事故の影響緩和機能として、集合体中央部の中性子吸収材の案内管を通して溶融燃料の炉心外排出を促進）

No.24. 制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出

一方、以下の方策は、原理が単純で、作動のための検知の原理から負の反応度挿入の原理まで一貫して自然現象に基づくものであることから、「固有の特性」に分類するという考え方もある。しかし、燃料集合体の照射履歴等に依存して条件によっては適切に作用しないことも懸念されるので、ここでは、「受動的な安全方策」に分類している。今後のR & Dの進展により、不確定性がほとんど存在しないということが示されれば、「固有の特性」と同等に扱うことが可能になる。

No.14-2.集合体上部に集合体変形モードを規定するガイドを設ける方式

No.14-3.集合体ラッパ管パッドの剛性強化

No.15.炉心軸方向膨張促進機構

能動的な安全方策、受動的な安全方策、固有の特性の三重の安全機能を組み合せることにより、安全上弱点がなく、シーケンスの抜け穴がないようにする。これは、安全系を一層重装備にするのではなく、三重の安全機能により安全対策の厚みを最適化すること、FBRの本来的な特性を安全の観点からきちんとカウントすること、それに受動的安全方策として新規の安全機能を検討することを意図したものである。

具体的には、従来からのFBRプラントの設計に備わっていた能動的な安全方策に、さらに受動的な安全方策を付加するよう努力し、また、固有の特性として有効なものを拾い上げて見て（固有の特性については、現状以上のものを付加することを想定しているのではなく、有効なものを見いだして安全のロジックに組み込むことを想定している）、安全性の厚みを確認する。ただし、「能動的な安全方策」には、従来からの設計で備わっている静的な機器も含めて考える。

明かに安全上の厚みが薄いと考えられる深層防護上の障壁の一部、あるいは事故シナリオの部分については、厚みを増すための対策を実施するものとするが、すべてに完全な3重の安全機能を要求するものではない。

v) 社会的受容性（「総合化」の視点）

「能動的な安全方策」、「受動的な安全方策」、「固有の特性」を組み合せれば確実で信頼度の高い安全機能が達成される。換言すれば、今までに挙げた「ランク付け」の視点から見て大きな欠点を有していない方策を、「分類」の視点からの検討結果を踏まえて、「総合化」の考え方則って組み合わせることにより、社会的受容性に優れるシステムを作り上げることができると考えられる。

社会的受容性の観点から注目すべきポイントとしては、以下が考えられる。

システムの簡易さ

メカニズムの利用実績（既存技術とかけ離れすぎないこと；開発要素、実証性と関連）

多様性（メカニズム、材料等）

故障検知の容易さ（点検保守性と関連）

検査の容易さ（点検保守性と関連）

交換の容易さ

フェイルセイフ性（マイナス要因と関連）

誤作動がないこと（信頼性と関連） 等

これらのポイントは、「メカニズム」、「確実性」、「経済性」、「運転制御性」として取り上げた評価の視点と深く関係している。

3. 1. 4 ランク付けの結果

ランク付けのために摘出した評価の視点の小項目ごとに、受動的安全方策の比較を実施する。

①メカニズム

メカニズムに関するランク付けのための評価パラメータ及び判定基準を表3.1.4-1に示す。また、ランク付けを実施した結果を表3.1.4-2に示す。

ランク付けにおいて、効果の大きさの視点は、単独で十分な効果を有するものを明かにするとともに、取るに足らない効果のみしか有しない方策を除外することを目的とする。受動性の程度の視点は、受動的な方策とは呼びがたいものを除外することを目的とする。受動性の程度のランク分けI～VIIは（社）日本原子力産業会議での検討結果にしたがった⁽¹⁸⁾。それとともに、このランク付けを判り易くするため、I、IIをA、IIIをB、IV以降をCランクとした。除熱との整合性の視点は、除熱への影響が大きく、事象進展を悪化させる可能性のあるものを除外することを目的とする。

効果の大きさでは、「軸方向非均質炉心」が効果の小さいものと判定される。「燃料ピン上部又は下部への吸収材（気体又は液体）封入」も、取るに足らない効果しか有しないものと判定される。これは、効果の大きな液体又は気体の吸収材が存在しないためである。また、「集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保」も効果が小さい。

受動性の程度では、Cランクのものは無い。起動時に固体の移動を伴う「制御棒駆動軸の膨張促進機構」が、Bランクと判定される。

除熱との整合性では、Power/Flowを大きくした特殊な集合体で先行的にナトリウム沸騰を生じさせる「人工的リードチャンネル」を、ナトリウム沸騰とともに燃料破損を生じる可能性が大きいので、Cランクとした。「超塑性変形グリッドスペーサ」は、塑性変形を生じた後のピン接触等が懸念されるため、Bランクとした。また、燃料排出により事象終息を狙った方策の内でも、排出した燃料の冷却性が問題となりそうな方策についてはBランクとした。

評価の視点の3項目全てにおいてAランクと判定された、メカニズムの面から優れた

方策と言えるものは、炉心中央部に設置した場合のGEM、温度、流量、中性子の変化を感じて固体吸収材を炉心内に落下させる方策、溶融燃料を重力で炉心外に排出させる方策の内で燃料排出流路が比較的大きなものである。

②確実性

確実性に関するランク付けのための評価パラメータ及び判定基準を表3.1.4-3に示す。また、ランク付けを実施した結果を表3.1.4-4に示す。

信頼性、不確定性では、特に、フュージブルメタルを用いた方策をBランクとした。これは、フュージブルメタルの融点には不確定性が小さいとしても、吸収材の保持力を失う温度等には比較的大きな不確定性が存在すると考えられるからである。また、「先行的ナトリウム沸騰」についてもBランクとした。これは、流路を細くして沸騰を生じやすくしているため流路変形が除熱に及ぼす影響度が大きく、また、リードチャンネルと炉容器上部プレナムとの熱流動相互作用も予測に課題があるため、沸騰の発生、沸騰領域の拡大に不確定性が生じ得ると考えられるからである。緩和機構での燃料排出についても、境界条件依存性が大きいと考えられるのでBランクとした。

点検保守性では、フュージブルメタルを活用した方策では、原理的に最も重要なと考えられるメタルの溶融を検査することが困難と考えられるのでCランクとしている。また、全炉心を変形させる方策についても、検査が困難であり、Cランクとした。「先行的ナトリウム沸騰」についても、重要な沸騰を生じさせる部分が検査不可能であり、Cランクである。緩和方策については、点検保守に馴染まないので、評価対象外とした。

マイナス要因では、炉心変形によって正の反応度が入る可能性のある「集合体軸方向間隙の確保」をCランクとした。その他、過流量時に正の反応度が入る「GEM」をBランクとした。また、「リードチャンネル」については、先行的に事象を進展させることによる危険性や設定点より早く沸騰、燃料排出が発生することを懸念してBランクとした。

実証性では、原型炉クラスの炉（あるいは炉心）での実証が必要な新型燃料をCランクとした。また、受動的安全システム全体を通した実証試験を実施しにくいもの（部分試験となるもの）をBランクとした。

寿命では、吸収材の劣化が考えられるもの等がBランクとなっている。燃料集合体に工夫を施した方策のうち、安全方策の機能維持の目的ではなく、燃料交換のために一緒に交換が必要となる方策については、評価対象外とした。

確実性で満点となった方策は存在しない。5項目中4項目でAランクと判定された方策は、フローティング型制御機構と制御棒駆動軸の膨張促進機構である。これらは、固体吸収材という効果の確実なものを、冷却材の動圧変化、熱膨張変化という動作が確実な方法により炉心内に導入する方策である。

③経済性

経済性に関するランク付けのための評価パラメータ及び判定基準を表3.1.4-5に示す。また、ランク付けを実施した結果を表3.1.4-6に示す。

設計へのインパクトでCランクとしたのは、主に増殖性を劣化させる方策（「偏平炉心」、「アニュラー炉心」）である。

開発要素では、核設計、燃料設計が今後の大きな課題となるもの、及び全炉心のモックアップ試験が必要となるもの等をCランクとした。

再起動可能性では、燃料交換装置を用いた修復が困難な「炉心内での集合体拘束方式の工夫」がCランクである。炉心形状、燃料形態により炉心特性を変更する方策、及び緩和方策については、評価対象としていない。

燃料サイクルへのインパクトでは、通常の燃料ピンに対策を施す「燃料ピン上部及び下部への吸収材封入」をCランクとした。また、MOX以外の燃料を採用する方策は、現状の燃料サイクルを変更する必要があるのでCランクである。

経済性で満点と判定されるのは、炉心の周辺部に設置したGEM、フローティング型制御棒、キュリー点式SASS、制御棒駆動軸の膨張促進であり、これらは、通常の炉心設計からの変更が小さく、開発が容易なものである。

④運転制御性

運転制御性に関するランク付けのための評価パラメータ及び判定基準を表3.1.4-7に示す。また、ランク付けを実施した結果を表3.1.4-8に示す。

運転の容易性、安定性で大きなマイナスポイントを与えたのは、炉心のデカップリングが大きくなる方策である。

誤作動の可能性では、誤作動が生じた場合に影響が大きい「人工的リードチャンネル」、燃料ピンに対策が施され、誤作動時にほぼ全炉心の取り替えが必要となる「燃料ピン型SASS」「燃料ピン上部又は下部への吸収材封入」、誤作動時に容易に交換ができない「炉心内での集合体拘束方式の工夫」がCランクである。

運転制御性で満点と判定された方策は多く、軸方向非均質炉心、低線出力炉心、金属燃料炉心、窒化物炉心、Naプレナム付炉心、制御棒駆動軸の膨張促進機構、集合体上部にガイドを設ける方式とラッパ管パッドの剛性を強化する方式の炉心湾曲促進機構、超塑性変形グリッドスペーサ、中空ペレット、軸方向プランケット短縮化、制御棒案内管の薄肉化である。

⑤ランク付けの総括

①～④の大項目に関する総合評価をまとめて表3.1.4-9に示す。

「メカニズム」、「確実性」、「経済性」、「運転制御性」の大項目について、Aランクの数とCランクの数を整理して示している。Aランクの数は加点法の採点、Cランクの数は減点法の採点を示していることとなる。Cランクについては、どの項目でCランクとなっているのかも合わせて示した。また、総括評価として、Aランク、Cランクのトータル数を示した。

減点法では、各方策が許容し難いマイナスポイントをどの程度有しているかを示している。Cランクの評価の数が少ない方策が今後のR&D対象として有望である。ここでは、Cランクが無いものを有望な方策として選択することとし、総括評価の減点法の欄をハッチングして示した。

加点法では、各方策が優れた利点をどの程度有しているかを示している。各大項目ごとに満点となった方策の加点法欄をハッチングした。また、総括評価の加点法欄では、評価項目の内、半数以上がAランクとなった方策についてハッチングを施した。

ちなみに減点法、加点法いずれにおいても上位にランクされるものを挙げると、「制御棒駆動軸の膨張促進機構」、「キュリ一点式SASS」、「フローティング型制御棒」、「集合体上部にガイドを設ける炉心湾曲促進機構」、「ラッパ管パッドの剛性を強化する炉心湾曲促進機構」、「制御棒案内管の薄肉化による早期燃料排出」である。これらの内、いくつかについては、現在精力的に研究開発が進められているが、まだ本格的に研究開発がスタートしていないものもある。

これらの評価結果から、重点テーマの絞り込みを以下のように実施してみる。

- ① 減点法で、Cランクの評価がある方策を除外し、その他を有望な方策としてまず選定する。
- ② Cランクは、今後の開発の進展（材料に関するブレークスルー等）によって問題がなくなる可能性がある。特に、「開発要素」のような項目はその可能性が高い。そこで、減点法で除外されたものから、加点法で敗者復活させる。その方法としては、まず、利点として特に重要性が高いと考えられる「メカニズム」について、満点となっているものを捨う。
- ③ 次に、加点法トータルで高得点のもの、具体的には10以上のAランクがあるもの（10とする根拠はないが、2/3程度以上の項目でAランクとなったこととなる）を捨うこととする。
- ④ 組み合せでは、目的の違うものを組み合せることとなるので、目的ごとに不足がないかを確認し、不足が生じそうであれば、削除されたものの中から比較的高得点の方策を捨い上げる。

⑤最終的には、組み合せを検討し、過不足の確認を行う。（小節3.1.6での検討）

まず、①として、Cランクが1つまでのものを選ぶと以下のとおりである。

No.2-1. 炉心設計によるボイド反応度抑制：低線出力炉心

No.4-1-1 & -2. 従来型ガス膨張機構GEM (FFTF型)

No.4-2-1 & -2. 中性子吸収ガス封入型GEM

No.5. 炉心中心部にボイド領域を設けておき、炉心の温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される機構（GEMの反対の発想）

No.6. ナトリウムプレナム付炉心

No.8-1. フローティング型炉停止機構：制御棒を動圧で浮かせるのみ

No.9. キュリー点式SASS（自己作動型炉停止機構）

No.13-1. 制御棒駆動軸の膨張促進機構：伸長リンク機構

No.13-2-1 & -2. 制御棒駆動軸の膨張促進機構：感温チェンバー活用

No.13-3. 制御棒駆動軸の膨張促進機構：バイメタル方式

No.14-2. 炉心湾曲、フラワリング効果の促進：集合体上部に集合体変形モードを規定するガイドを設ける方式

No.14-3. 炉心湾曲、フラワリング効果の促進：集合体ラッパ管パッドの剛性強化

No.15. 炉心軸方向膨張促進機構

膨張率の高い材料で集合体内の燃料を支持しておく方式

No.18. 吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入

No.19. 集合体内SASS（溶融燃料への吸収材混入による事故影響緩和効果）

No.20. 中空ペレットによるピン内燃料移動・分散

No.22. 軸プランケット短縮化による燃料炉外流出促進

No.24. 制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出

No.25. ナトリウムプレナム付炉心による燃料流出促進

次に、②として、減点法で除外されたものの内で、メカニズムが満点のものを拾うと、

No.8-2. フローティング型炉停止機構：フローティング型SASS

No.10. 中性子束の上昇により溶融する物質を利用した中性子吸収材の炉心への混入

No.11. 燃料ピン型SASS機構（ボイドからナトリウムへの置換機構を含む）

No.12. 集合体内SASS（自己作動型炉停止機構）

さらに、③として、トータルのAランク数が10以上のものを拾うとすると、No.1-2の軸方向非均質炉心がピックアップされるが、この方策は肝心の効果の大きさが小さい

ので選択しない。

ここまでで有望とされた方策を目的ごとに整理すると、

A.炉心設計による初期事象進展速度の緩和

No.2-1

B.炉心燃料物質の変更による初期事象進展速度の緩和

なし

C.炉心損傷事故の発生防止機構

C1.冷却材密度係数の活用

No.4-1-1、No.4-1-2、No.4-2-1、No.4-2-2、No.5、No.6、

C2.固体吸収材の炉心内への挿入

No.8-1、No.8-2、No.9、No.10、No.11、No.12

C3.燃料と吸収材の相対変位

No.13-1、No.13-2-1、No.13-2-2、No.13-3

C4.炉心体積の変化

No.14-2、No.14-3、No.15

C5.液体又は気体吸収材の炉心内への投入

なし

D.炉心損傷事故の影響緩和

D1.中性子吸収材の炉心内への投入

No.18

D2.燃料の炉心外への排出

No.19、No.20、No.22、No.24、No.25

目的ごとに不足をなくすという④の観点からは、炉心燃料物質の変更による初期事象進展速度の緩和として、

No.3-1.金属燃料炉心

No.3-2.窒化物燃料炉心

が追加される。液体または気体吸収材の炉心への投入については、No.17があるが、これは効果が非常に小さいので選定しない。

このようにして、重点テーマとして選定された方策については、ランク付け総括表の方策名をハッチングして示した。

3. 1. 5 分類の結果及び考察

3. 1. 2 節で摘出した受動的安全方策について、3. 1. 3 節で摘出した「評価の視点」にしたがって、分類を実施する。

①メカニズム

メカニズムに関する分類の結果を、表3.1.5-1に示す。

1) 作動メカニズムについては、作動に起因する炉内の検知物理量があるしきい値に達したときに作動するものと、変化量に応じて連続的に作動するものがある。ここでは、まずメカニズムと出力抑制・低減策との相関について調べるため、分類項目を以下のように設定し、各方策を再分類してみる。

①炉内検知物理量

- ア) 温度
- イ) 冷却材流量、圧力
- ウ) 中性子束

②出力抑制・低減策

- A) 中性子漏洩の促進
- B) 中性子吸収の促進
- C) 核分裂性物質の減少（燃料密度の減少、燃料の炉心外への移動等）

上記に従い、今回対象としたNo.2-1, 3-1, 3-2を除く方策を分類すると下表のようになる。

検知物理量	作動メカニズム	(A) 中性子漏洩促進	(B) 中性子吸収促進			(C) 核分裂性物質減少
			毒物重力落下	制御棒軸伸び	その他	
温度	しきい値により作動	16、7 11、19	9、12、18、 13-1、13-2、 11 13-3	17、5、 11	20、21、22、 23、24、25	
	連続的に作動	1-1、1-2、 1-3 1-4、6、 14-1、14-2、 14-3		13-1、13-2、 13-3		15
冷却材流量	しきい値により作動		8			
	連続的に作動	4-1、4-2			4-2	
中性子束	しきい値により作動		10			
	連続的に作動					

表より、次のことが伺える。

- 検知物理量では、温度によるものが大半を占めている。この中で、中性子漏洩、吸収の促進効果を狙ったものは、しきい値により作動するものも、変化量に応じて作動するものも多いが、核分裂減少効果に着眼したものは、No.15, 20, 21, 22, 23, 24, 25である。
- 今回検討した方策の中で、No.10 のみ炉内中性子束を検知しようというものである。これは出力の上昇を構造材や冷却材等を介さず直接検知するものであるため、特に反応度添加型のUTOPにおいては、有効であると考えられる。
- 中性子束を検知物理量としてその変化量に応じて連続的に作動する原理の受動的安全方策が全くない。今後、このメカニズムによる方策の調査・検討もしていく必要があると考えられる。
- 今回の方策では、炉心設計による工夫はすべて、中性子漏洩を促進させることを狙ったものである。
- 検知物理量がしきい値に達することにより作動するものは、毒物の重力落下を伴うものが多い。いずれも急速な炉停止につながるもので、ランク付け結果からも判るように反応度低下効果はかなり大きい。したがって、物質の融点等のしきい値に達した後、直ちに重力落下を引き起こすことを実験等により確証する必要がある。
- 検知物理量の変化に応じて連続的に作動するものとしては、温度変化による材料の熱膨張を利用したものが多く、いわゆる炉心フラワリング効果、制御棒軸のび効果と呼ばれるものである。

- 2) フローティング型制御機構 (No.8) 及びGEM (4-1, 4-2) は、いずれも冷却材動圧を検知物理量としており、即応性は1 sec以下で温度検知型よりも速い。これは、流量検知の方が、熱伝導、熱伝達といった慣性遅れを伴わない分、温度検知よりも応答が速いためである。これらはいずれもL OF時に有効に機能する。さらに、GEM (4-1, 4-2) は、中性子漏洩促進により全反応度をより負側にシフトさせる機能を有する。
- 3) 非可逆性については、中性子漏洩促進を狙った方策の半数以上が可逆的なものとなっている。漏洩という物理現象そのものは非可逆的であるが、その作動源が温度や密度の変化といった可逆的なものであることがその要因である。炉心冷却材流量の低下を作動源とする No.8, 4-1, 4-2 は、中性子漏洩促進を狙ったものであり、ポンプ起動等による動圧回復を考慮すれば可逆的といえるが、ここでは動圧回復はないとして非可逆的と分類している。また、炉心フラワリング効果に着眼した No.14 は可逆的と分類したが、塑性変形のような非可逆的要素もあり、そのメカニズムについては現在のところ不明瞭な点も多く、今後種々の試験等を通じてその実証が要求される。
- 4) 金属燃料、窒化物燃料炉心の採用は、本来安全性向上のみならず、増殖特性等の向上も狙った、MOX燃料炉心の炉心特性を総合的に変えようとするものである。しかし、これは同時に、燃料温度上昇時の即発的なフィードバック効果として重要な負のドップラー効果を低減化してしまう。さらに、中性子スペクトルがMOX炉心に比べて一般に硬くなることから、ナトリウムボイド反応度はMOX炉心に比べより正となる。No.1-1 ~ 1-4、2-1 及び今回挙げた3-1, 3-2 以外のすべての方策は、炉が有する安全性以外の炉心特性を変えずに、安全性のみを向上させようというものである。したがって、それらと3-1, 3-2とは評価する土俵が元から違うということを認識しておく必要があろう。

②確実性

確実性に関する分類の結果を表3.1.5-2に示す。

起動信号については、何れも電気信号を介さず直接検知するため独立性が高い。信号の種類は動圧、温度、中性子束の3パターンに分れる。

流量低下に伴う動圧の低下

フローガイド後の集合体出口温度

ラッパー管温度

集合体内部温度

ペレット温度

集合体上部中性子束

温度については、検知する場所がより内部に近い方が確実性を高くすると考えられる。

起動の機構としては、全ての方策が制御棒に対する多様性を有している。

反応度印加の過程と原理としては、以下の分類が可能である。

固体吸収材の挿入による吸収

ピン内の液体／ガス吸収材の拡散による吸収

ガス領域の形成による漏れ

炉心変形による燃料の移動（核分裂の抑制）、漏れ

燃料分散による核分裂の抑制

この内、固体吸収材の挿入による吸収以外は制御棒に対する多様性を有している。

③安全論理との整合性

安全論理に関連する項目の分類結果を表3.1.5-3に示す。

事故カテゴリについては、ULOFまたはUTOPのみに有効な方策もあるが、ULOF, ULOHS, UTOPいずれにも有効な方策が多い。これは、出力と流量とのアンバランスによる温度上昇(中性子束の増加を検知する方策も結局は溶融金属部分の温度上昇を検知)を活用した方策が多いことによる。

深層防護の観点からは、炉心損傷事故の発生防止と影響緩和のどちらか一方にのみ有効な方策が大部分である。しかし、集合体内SASSは、燃料の排出促進による事象終息をも意図している。

3. 1. 6 受動的安全方策の組み合わせ

3. 1. 4節のランク付け結果及び3. 1. 5節の分類結果に基づき、受動的安全方策の組み合わせの検討を実施する。その方法は、以下の通り。

-組み合わせの検討には、

組み合わせにより効果の大きさが十分になること

組み合わせにより多様性、独立性が十分になること

組み合わせにより考えられる事故カテゴリのいずれにも対応できるようになること

組み合わせにより事象進展の時間フェーズに抜けなく対応できるようになること(可逆的な方策には非可逆的な方策を組み合せる必要がある)

等に配慮する。

-受動的安全方策の組み合わせを検討する際、「メカニズム」、「確実性」、「安全論

理との整合性」の視点からの分類の結果を活用することとなるが、組み合わせを決める基本的な考え方は、「安全論理との整合性」のところで述べた受動的な安全特性の位置づけに則ることとなる。

3. 1. 4節で摘出した有望な方策について、組み合せ検討のための分類を実施した結果を、表3.1.6-1に示す。分類項目の意味は以下の通り。

有効な事象

- 事故カテゴリの何れにも対応できる必要がある。
- 本来、事故カテゴリは多岐に亘るが、ここでは大きくLOF型とTOP型に分け、どちらにも対応できる組み合せを考える。

固有か受動か

- 「安全論理との整合性」の検討で、能動的な安全設備、受動的な安全方策、固有の特性の3重の安全特性を揃えるように配慮するという考え方を示した。
- ここでは、能動的な安全設備は検討対象としないので、「受動」と「固有」の分類を示した。
- ただし、「固有に近い受動的安全方策」、及び今後のR&Dにより機能喪失を想定する必要がなくなり「固有に近い受動的安全方策」に格上げされる可能性のあるものは、期待を込めて、「固有」と同等に扱う。

効果の大きさ

- 単独で十分な効果を有するか、他との組み合せが必要かの分類。ここでは、炉の出力レベルを崩壊熱出力程度にまで低下させるだけの負の反応度効果を持つか否かを基準として分類する。
- 効果の小さい方策は、なんらかの利点があつて選択されるのであるが、効果の大きなものと組み合せる必要がある。

即効的か

- 効果の現れるのが遅いものは、より即効的なものと組み合せる必要がある。
- ただし、この分類に関しては、今後、プラント応答の解析を実施して、本当により即効的な別の方策が不可欠か否かを定量評価した上で判断する必要がある。

可逆的か非可逆的か

- 可逆的な方策には、非可逆的な他の方策を組み合せる必要がある。

反応度印加の原理

- 多様性を持たせた組み合わせを検討する上で重要となる。例えば、固有の特性と受動的な安全方策を組み合せる場合は、反応度印加の原理が異なるものを組み合せた方が望ましい。

炉心損傷防止方策か影響緩和方策か

- 事象進展の時間フェーズに抜けなく対応を施す必要がある。
- 時間フェーズを詳細に追って、十分に対策が施されていることを確認するためには、プラント応答解析、事象進展解析を実施する必要があるが、ここでは、単純に、炉心損傷防止と影響緩和の両方に対して十分な対応がなされていることを確認する。

まず、炉心損傷防止方策について考察する。表3.1.6-1の分類で、有効な事象の内一つに×が付いているもの、負の反応度効果の大きさに△が付いているもの、即効性に△が付いているもの、可逆的なものについては他の方策との組み合わせが必要である。したがって、組み合わせの必要がない方策は、

「No.8-2 フローティング型SASS（フローティング方式とフェュージブルメタル方式の両方の機能を有する）」

「No.9 キュリー点式SASS」

「No.13-2-2 SASS機能付きの制御棒軸伸び促進機構」

の3つである。この内、No.8-2については、LOFに対して即効性があるが、TOPに対してはフェュージブルメタルを活用する方策であるため、即効性に欠けることが懸念される。よって、本当に単独で良いのは、No.9とNo.13-2-2の2つである。その他の方策については、他との組み合わせが不可欠である。

一方、炉心損傷の影響緩和方策では、

「No.18 吸収材上部設置型集合体」

「No.19 集合体内SASS」

「No.24 制御棒案内管の薄肉化」

の3つが単独でも十分な能力を有する方策、その他が組み合わせを必要とする方策である。

受動的安全方策の組み合わせの例を以下に示す。基本的な組み合わせの考え方の例を図3.1.6-1に示した。

従来の能動的な炉停止系は、制御棒を採用した方式(一般に独立な2系統で構成される)であり、設計、製作、保守の各段階での配慮によって、十分な信頼性と十分な効果が確保されている。信頼性が十分に高くなるように設計されているがゆえに、さらにもう一段階信頼性を高めようとしても、同様の炉停止系の追加では限界がある(共通要因故障の影響)。そこで、異常を検出して作動をトリガーする信号が不要で、かつ、能動的な手段を用いていないという、従来とは異なる原理の受動的な炉停止系を追加することによって、信頼性のいっそうの向上のため質的な強化を図る(共通要因故障等に伴う信頼度の不確定性を低減する)。

まず、単独で十分に大きな効果を有する点を重視して、固体の中性子吸収材の落下ある

いは挿入方式を採用するものとする。ただし、No.9及びNo.13-2-2以外の方策は、即効性等の面から他との組み合わせが必要となる（この組み合わせについては後述する）。

固体の中性子吸收材を落下あるいは挿入させる方式は、効果の確実さ、効果の大きさ、即効性の点では最も望ましい方策である。しかし、固体中性子吸收材を移動させるという原理は、従来の炉停止系と共通である。多様性を高め、炉停止系の信頼性のいっそうの向上のため質的な強化を図るという観点からは、他の原理の方策とも組み合わせることが望ましい。他の原理を用いた方策は単独では十分な能力を有していないので、適切な組み合わせを検討し、これを付加するものとする（この組み合わせについては、後述する）。ただし、原理の異なる方策によっても炉心出力がある程度のレベルにまで低下でき、事象進展速度を大幅に緩和できることが重要であって、炉停止に近いレベルまでに出力を低下させることは必要条件とはしない。

深層防護の観点から、炉心損傷事故の防止方策に加え、影響の緩和方策にも受動的な安全方策を付加し、安全確保方策の厚みを増すこととする。緩和方策の中でも、中性子吸收材の落下方式は、多様性のさらなる向上には寄与しない面があるので、燃料を排出する方式から選択するのが適切と考えられる。単独では効果が不十分な方策があるため、場合によつては緩和方策同士の組み合わせが必要である（この組み合わせについては、後述する）。

（固体中性子吸收材落下、挿入方式の受動的な炉心損傷事故防止方策の組み合わせ）

組み合わせの検討に当たっては、事故カテゴリ、事故の時間フェーズに抜けなく対応でき、可逆的なものは非可逆的なものと組み合わせることに配慮する必要がある。

No.9及びNo.13-2-2については、単独で十分な能力を有しているので、組み合わせることなく採用することが可能である。これらの方策は、従来型の制御棒に工夫を凝らした形状のものであるため、従来の2系統の炉停止系の内的一方にこの機能を付加するのも一つの考え方である。

「No.8-2 フローティング型SASS（フローティング+フージブルメタル）」、「No.11 燃料ピン型SASS」、「No.12 集合体内SASS」については、想定事象によつては即効性の面から他の方策との組み合わせが必要である。「制御棒駆動軸の膨張促進機構」と組み合わせるのが一つの方法と考えられる。

「No.8-1 フローティング型制御棒（制御棒を動圧で浮かせるのみ）」は、LOFにしか有効でない。TOPのみに有効な方策が存在しないことから、それのみで十分な能力を有する方策のセットに、さらにこのNo.8-1を付加する方法をとることとなる。このNo.8-1は、制御棒の数を増加させる方策であり、設計へのインパクトも大きい。これを採用する適切な組み合わせは設定しにくい。

（固体中性子吸收材落下方式以外の受動的な炉心損傷事故防止方策の組み合わせ）

いくつかの組み合わせ案を検討する。

組み合わせの検討に当たっては、事故カテゴリ、事故の時間フェーズに抜けなく対応でき、可逆的なものはできるだけ非可逆的なものと組み合わせることに配慮する必要がある。

また、ここでは、効果の大きさよりも不確定要因の少なさを要求するので、固有の特性に属するもの、あるいは、固有の特性に近いものからできるだけ選択するのが望ましい。「固有の特性」あるいはそれに近いもの（工学的には機能喪失を想定する必要がないと判断されるもの、あるいは、原理が単純で将来のR&Dの結果、機能喪失を想定する必要がないと言えるようになる可能性のあるもの）として挙げられているのは、

「No.2 低線出力炉心」

「No.3-1 金属燃料炉心」

「No.3-2 窒化物燃料炉心」

「No.6 ナトリウムプレナム付炉心」

「No.14-2 炉心湾曲、フラワリング効果の促進：集合体上部にガイドを設ける方式」

「No.14-3 炉心湾曲、フラワリング効果の促進：集合体ラッパ管パッドの剛性強化」

「No.15 膨張率の高い材料で集合体内の燃料を支持しておく方式」

まず、低線出力炉心、窒化物燃料炉心の内のいづれかを採用した場合を考える（窒化物炉心は、燃料の融点に対して大きな裕度を確保できるので、低線出力炉心の場合と同様の検討ができる。金属燃料炉心についてはUTOPに対する有効性に議論があるのでここでの組み合わせ例の検討では検討対象としない）。これらの方策は、事象進展速度を緩和させる効果を有しているが、出力を十分に低下させるという意味では、他の方策との組み合わせが必要である。組み合わせの候補としては、炉心湾曲の促進機構や炉心軸方向膨張の促進機構（燃料集合体の膨張促進）が挙げられる。

次に、ナトリウムプレナム付き炉心を採用した場合を考える。この方策も、主に事象進展速度を緩和させる効果を有している。組み合わせの候補としては、炉心湾曲の促進機構や炉心軸方向膨張の促進機構が挙げられるが、さらに、炉中心部のボイド領域をナトリウムに置換する方式の組み合わせも一つの方法であろう。ただし、相互の干渉効果を評価しておく必要がある。

GEMを採用した場合について検討してみる。GEMは、フローティング型制御棒と同様、LOFにしか有効でない。TOPのみに有効な方策が存在しないことから、それのみで十分な能力を有する方策のセットに、さらにGEMを付加する方法をとることとなる。GEMは、燃料集合体と置換して配置されるため、炉心径を大きくする等の設計へのインパクトがある。もし、炉心の外周部に設置するので設計への影響は小さいと判断するのであれば、他の方策のセットにさらにGEMを付加することも考えうる。

(受動的な炉心損傷事故の影響緩和方策の組み合わせ)

影響緩和方策は、1つを除き燃料を排出する方策である。

設計へのインパクトが小さいものであれば、できるだけ多くの方策を採用することが望まれる。特に、「No.24 制御棒案内管の薄肉化」については、工夫すれば設計へのインパクトが極めて小さいと考えられ、しかも効果が大きく、固有の特性に近いものであることから、広く採用することが推奨される。

集合体内SASSやナトリウムプレナム付き炉心については、防止方策として採用されれば、緩和方策としてもカウントできる。中空ペレットによるピン内燃料移動は、効果が有効となる事象、事故条件が限定されるため、中空ペレットを採用した設計の場合にその効果を見込むという程度と考えられる。

吸収材上部設置型集合体については、もし、設計へのインパクトが非常に小さいのであれば、広く採用すべき方策であろう。

緩和方策は、どのような事象カテゴリに対しても有効な手段が選定されている。言うなれば、事象進展のキーとなる現象（分岐）を押えた方策である。この方策の確実性が明確になり、「固有の特性」と同等に扱えるようになれば、炉心損傷は燃料を炉心下部に排出して終息し、再臨界の可能性は想定する必要がないと判断できるようになる（どんな事象でもこの分岐点を通ることを示す必要はある）。最後に残る問題は、炉心が損傷した状態での崩壊熱除去となる。

以上、組み合わせ方策案を示した。

（固体吸収材を用いた防止方策）+（固体吸収材以外の防止方策）+（緩和方策）

という組み合わせであり、個々に具体的な方策を当てはめると、可能な組み合わせの数は、かなり膨大となる。今後、各方策のフィージビリティスタディが進展すれば、採用すべき方策は絞り込まれてくると考えられる。現状では、ある程度広くサーベイして研究開発を進めるべきであろう。組み合せの検討結果を踏まえて、重点テーマとして残った方策を再度列挙すると以下の通りである。

No.2-1 低線出力炉心

No.3-2 硝化物燃料炉心

No.4-1-1, 4-1-2, 4-2-1, 4-2-2 GEM

No.5 炉心中心部にボイド領域を設けておき、炉心の温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される機構

No.6 ナトリウムプレナム付炉心

No.8-2 フローティング型SASS

No.9 キュリー点式SASS

No.10 中性子束の上昇により溶融する物質を利用した中性子吸収材の炉心への混入

No.11 燃料ピン型SASS機構

No.12 集合体内SASS

No.13-1, 13-2-1, 13-2--2, 13-3 制御棒駆動軸の膨張促進機構

No.14-2, 14-3 炉心湾曲、フラワリング効果の促進

No.15 膨張率の高い材料で集合体内の燃料を支持しておく方式

No.18 吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入

No.19 集合体内SASS

No.24 制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出

No.25 ナトリウムプレナム付炉心による燃料流出促進

3. 1. 7 実用化先導研究テーマに関する研究開発実施方針の検討

3. 1. 6節までで、受動的安全方策の内、特に、炉停止に係わる種々の方策について比較検討を実施し、受動的安全方策をFBRプラントに適用する場合の組み合せ方についての検討を実施した。この小節では、重点テーマとして選定された方策を中心にして、種々の受動的安全方策について、研究開発の実施方針を検討する。

研究開発実施方針として以下の検討を実施した。

①開発、実証ステップ

まず、各方策の現状での開発状況を調べ、次に、各方策を実機で採用できるようになるためには、どのようなステップで開発を進める必要があるか、考え方を整理した。ステップとしては、基本的には、

Feasibility study段階、要素試験段階、機能確認試験段階、実証試験段階の4段階に分けた。

Feasibility study段階では、文献調査、簡単な計算等による各方策の有効性の確認を、要素試験段階では、水試験を中心とした小規模な試験での基本的な特性の確認を、機能確認試験段階では、ナトリウム試験等によるシステムとしての機能確認を、そして、実証試験段階では、より大規模なナトリウム試験や実炉試験、炉内試験を実施することによるLicensabilityの獲得を行う。ただし、方策によっては、すでにR&Dが進展しており、4段階全てが必要な訳ではない。

②開発スケジュール

開発にどの程度の時間が必要となるかを検討した。

③各ステップごとの実施内容、方法

各ステップごとに確認すべき内容のポイントを検討した。また、方法はどのように

にするのか、炉外試験か、炉内試験か、実炉試験かを、その方法を選択する理由を明確にしながら検討した。さらに、必要となる解析についても整理した。

以上の検討結果の概略を一覧にして表3.1.7-1に示した。

- 基礎試験、実機体系に近い炉外試験、実炉あるいは炉内試験と段階を踏んで研究を進める必要のある方策が多い。
- 特に、熱流動現象が支配因子となる方策については、炉外試験のウエートが大きい。
- 解析評価については、既存のコードで対応できる部分も多いが、核、熱流動、構造のカップリング効果が重要となる方策については、コード開発や改良が必要となる。
- 炉心損傷事故の影響緩和方策では、研究開発に新たな炉内試験施設（SERAPH）を必要とするものが多い。この研究分野では、溶融燃料の炉外排出等の基礎的なデータ取得が重要であり、研究開発の多くは、従来からのCDA研究の中で今後の研究課題として挙げられていた研究項目と部分的に一致する。
- 炉心損傷事故の防止方策で、新たな炉内試験施設（SERAPH）を必要とするのは、フェュージブルメタルの開発に係わるものや、特殊な機能をもった燃料ピンの開発に係わるものである。
- 炉心損傷事故の防止方策に関する研究開発では、新たな炉内試験施設（SERAPH）のニーズは必ずしも大きくなく、むしろ、実炉試験のニーズが大きい。これは、炉内試験では、反応度効果の測定が困難なこと、全炉心あるいはそれに近い大きな規模の試験が実施できないことに起因している。この欠点を克服できるような炉内試験施設であれば、そのニーズは大きい。
- 「防止方策」に関連した研究で炉内試験施設のニーズが小さいのは、UTOPに有効な方策が提案されていないからとも言える。今後、UTOPに有効な方策が提案されれば、炉内試験施設のニーズも高まる。
- なお、炉内試験施設のドライバー炉心部分を利用して実施できる「防止方策」に関連した研究を敢えて挙げてみると、「GEM」や「フローティング型制御棒」の作動確認試験が挙げられる。ただし、これを、重水冷却炉（SERAPH）のドライバー炉心で実施するメリットは明確ではないので、研究開発実施方針の表の中には含めていない。

3. 1. 8 まとめと今後の課題

まとめ

①受動的安全方策の評価方法を提案

- 種々の受動的安全方策を総合的に評価し、重要度を判断する上での参考情報を得る方法論を提案した。
- 評価の視点として、
 - メカニズム：受動性の程度、除熱との整合性、効果の大きさ、検知または作動に係わる物理量、作動原理、即応性、非可逆性
 - 確実性：信頼性、不確定性、点検保守性、マイナス要因、実証性、寿命、独立性、多様性
 - 経済性：設計へのインパクト、開発要素、コスト、再起動可能性、燃料サイクルへのインパクト
 - 運転制御性：容易性、安定性、誤作動の可能性
 - 安全論理との整合性：起因事象と事故カテゴリ、基本的安全機能、深層防護、能動・受動・固有の組み合せ、事故シナリオ、社会的受容性
- を挙げた。

②受動的安全方策の提案

- 新たな受動的安全方策をいくつか提案した。

③受動的安全方策の組み合せ方法の提案

- FBRの安全論理における受動的安全方策の位置付けを提案した。ここでは、受動的安全方策は、FBRの安全系の設計を厚くすることと高い安全性を容易に理解できるようすることを目的に導入されるものとして検討を進めた。このため、従来の能動的な安全設備に替るものとして導入するのではなく、付加して安全性を高めることを検討した。
- 能動的な安全設備、受動的な安全方策、固有の特性の3重の安全機能が配置されていることをチェックすることにより、安全系の厚みが十分であることを確認するという方法を提案した。
- 受動的な安全方策の組み合せを検討する際に、可逆的なものには非可逆的なものを組み合せるべきこと、事故カテゴリ、事象進展に抜けなく対応すべきこと等を指摘した。特に、固有な特性あるいはそれに近いものは、工学的には機能喪失を想定する必要がないという特性を有するため、安全性向上に大きな意味をもつ。

④受動的安全方策の評価、重点テーマ絞り込み、組み合せの検討

- 上記の考え方則り、国内外で提案されている受動的安全方策に今回提案したものと含めて、開発を進めるべきものであるか否かの評価、重点研究テーマの絞り込み、組み合せの検討を実施した。
- 重点テーマとして挙げられた受動的な安全方策は以下のとおり。

低線出力炉心

窒化物燃料炉心

GEM

炉心中心部にボイド領域を設けておき、炉心の温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される機構

ナトリウムプレナム付炉心

フローティング型炉停止機構

キュリー点式SASS

中性子束の上昇により溶融する物質を利用した中性子吸収材の炉心への混入

燃料ピン型SASS機構

集合体内SASS

制御棒駆動軸の膨張促進機構

炉心湾曲、フラワリング効果の促進

膨張率の高い材料で集合体内の燃料を支持しておく方式

吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入

集合体内SASSでの燃料流出促進

制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出

ナトリウムプレナム付炉心による燃料流出促進

- 受動的安全方策の組み合せ案を提案した。すなわち、

　固体中性子吸収材の落下、挿入方式の防止手段

　固体中性子吸収材の落下、挿入方式以外の防止手段の組み合わせ（固有の特性に近いものを重視）

緩和手段

を適切に組み合せることを提案した。

⑤受動的安全方策に関する研究開発の実施方針

- 受動的安全方策に関する研究開発の実施方針をまとめた。開発ステップを、Feasibility study、要素試験、機能確認試験、実証試験の4段階に分け、それぞれの段階で何を実施すべきか検討した。
- 炉外試験、炉内試験、実炉試験の役割分担を検討した。
- 炉内試験は、特に炉心損傷事故の影響緩和方策に関連してニーズが高い。炉心損傷事故の発生防止方策の研究では、実炉試験のニーズが高い。
- 受動的安全方策の開発においては、炉外試験、炉内試験、実炉試験を適切に組み合わせて実証性を高めていくことが重要である。しかし、既存の試験炉の能力は受動的安全方策の実証に用いるのに不十分であることを考えると、SERAPH炉のような新しい試験炉が不可欠である。

今後の課題

①受動的安全方策の効果の大きさの定量化

- 重点テーマとして摘出された種々の受動的安全方策について、その効果の大きさを定量化し、有効性を確認する必要がある。
- この資料の中でも、「メカニズム」のランク付け項目として「効果の大きさ」を取り上げ、概算値を提示している。しかし、これらの数値は、国内外の公開文献で記されている解析結果を参考にしたり、手計算で数値を概算したりして求めたものである。文献に記されている解析は、対象としている炉心設計がまちまちであったり、解析条件がまちまちであったりするため、この資料で提示した数値の信頼性は高いものばかりではない。
- 例えば、ナトリウムプレナム付炉心の効果については、大きいとする解析結果や小さいとする解析結果が存在しており判断を下せないので、我々の検討の目的に合致した解析を実施する必要がある。
- 炉心設計、解析条件を固定して、種々の安全方策の単独での効果を解析により求め、有効性の程度を定量化する必要がある。

②受動的安全方策相互間の干渉効果の定量化

- 資料の中で、受動的な安全方策の組み合せを検討したが、安全方策相互間の干渉効果の評価がなされていない。
- 例えば、炉心湾曲の促進方策として炉心出力を低下させたため、事象進展速度が緩やかになり、SASS作動までに時間がかかり、事象終息がいたずらに遅くなつてプラントの構造健全性に悪影響を与えるというようなことも考えられる。
- また、各時間フェーズに抜けなく対策すること、トータルの効果の大きさを十分にすることを意図して組み合せを検討したわけであるが、過渡変化を調べてみると十分な組み合せとなつていない可能性もある。
- したがつて、いくつかの受動的な安全方策を組み合せたプラントを想定して、プラントの過渡応答解析を実施し、受動的安全方策相互間の干渉効果を定量化して、組み合せが適切であるかどうかを確認する必要がある。

③受動的安全方策のフィージビリティスタディ

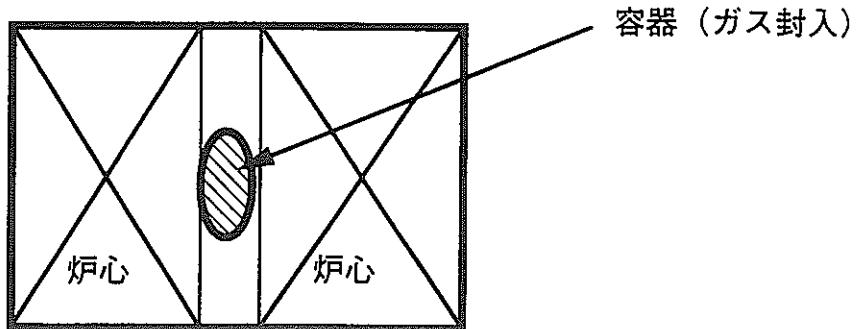
- この資料で絞り込んだ受動的安全方策は、その数が多く、また、組み合せについて多くの可能性がある。
- 研究の第1段階としては、多くの方策を拾った方がよいが、フィージビリティスタディを進めて、実現可能性が低いものは切捨ていく必要がある。

④炉心部分損傷状態での崩壊熱除去に関するR & D

- 受動的安全方策を取り入れることによって、FBRの安全対策に厚みが増し、ATWS

事象の事象進展がマイルドになると考えられる。

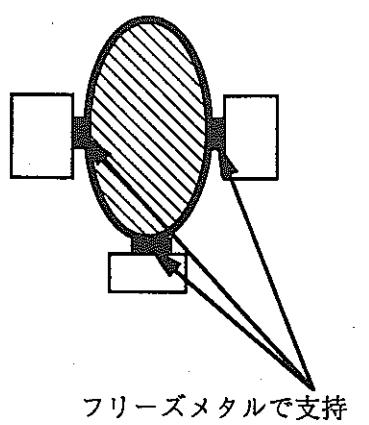
- しかし、受動的な安全方策はその効果の不確定性が懸念されるものも存在するため、事象終息した時点で局所的な燃料破損や炉心の部分損傷が生じていることを想定する必要があるかもしれない。
- 完全な事象終息と見なすためには、長期の崩壊熱除去が担保されていなければならない。
- したがって、今後、炉心が部分損傷した状態での崩壊熱除去（自然循環崩壊熱除去を想定する必要があると考えられる）に関するR&Dの重要性が高くなると考えられる。



炉心中心部にガスを封入した容器を入れておく（ナトリウムによる吸収を減らし、かつ、容器近傍の中性子スペクトルを硬くして、あらかじめ正の反応度を加えてある）。

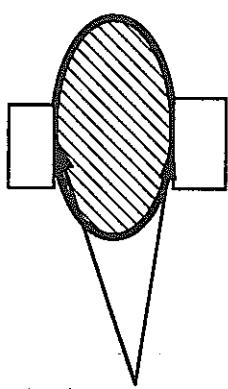
炉心の温度上昇時に容器が浮き上がるか、容器内にナトリウムが入るように工夫する（下図参照）

[その1]



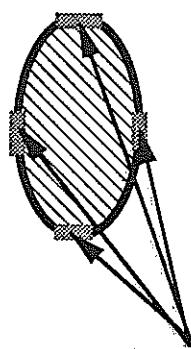
フリーズメタルで支持
高温で溶融し浮き上がる

[その2]



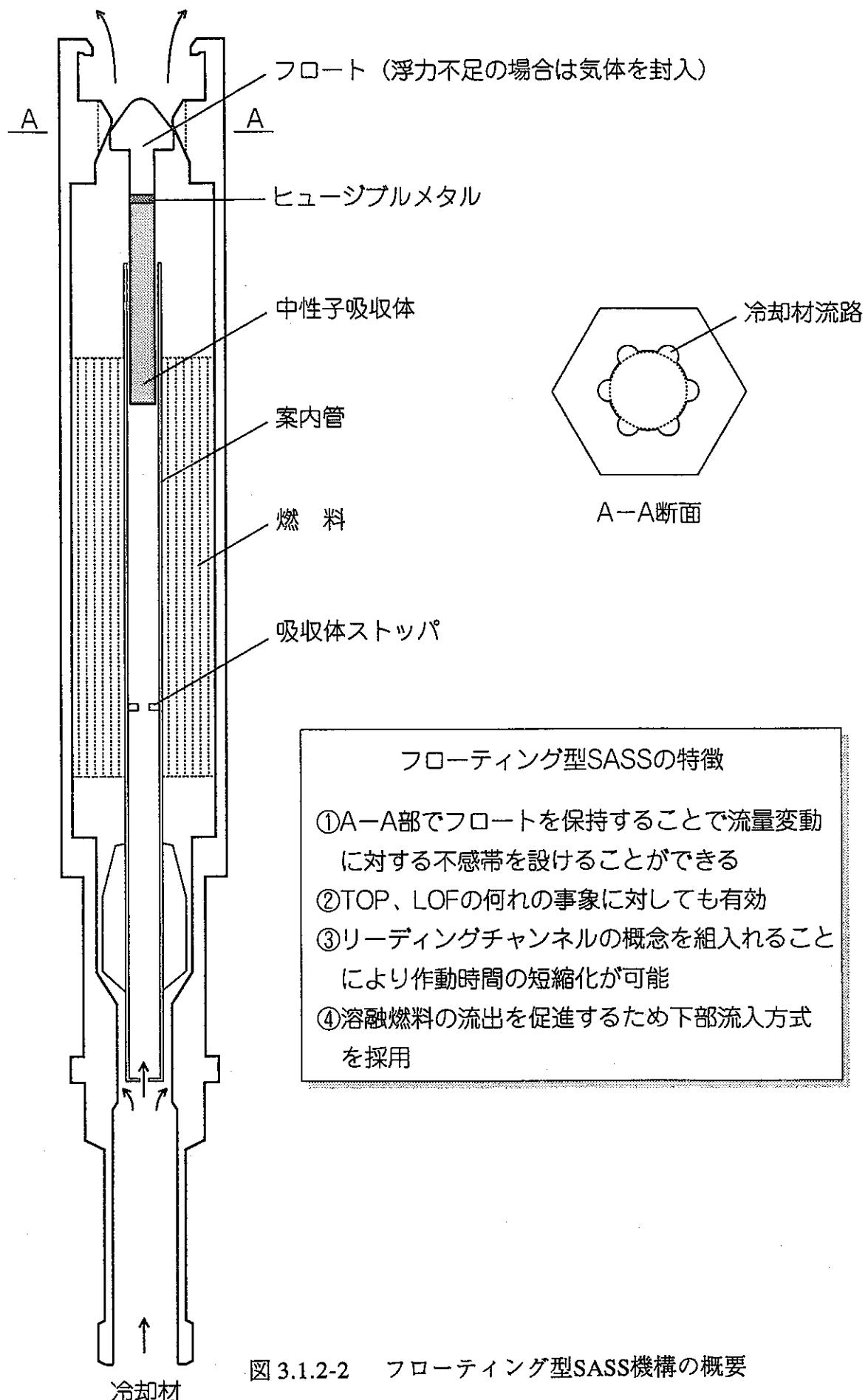
異種金属の熱膨張差で
支持が外れ浮き上がる

[その3]



フリーズメタル
溶融すると容器に穴が開き
ナトリウムが流入する

図 3.1.2-1 炉心中心部にボイド領域を設けておき炉心の温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される機構



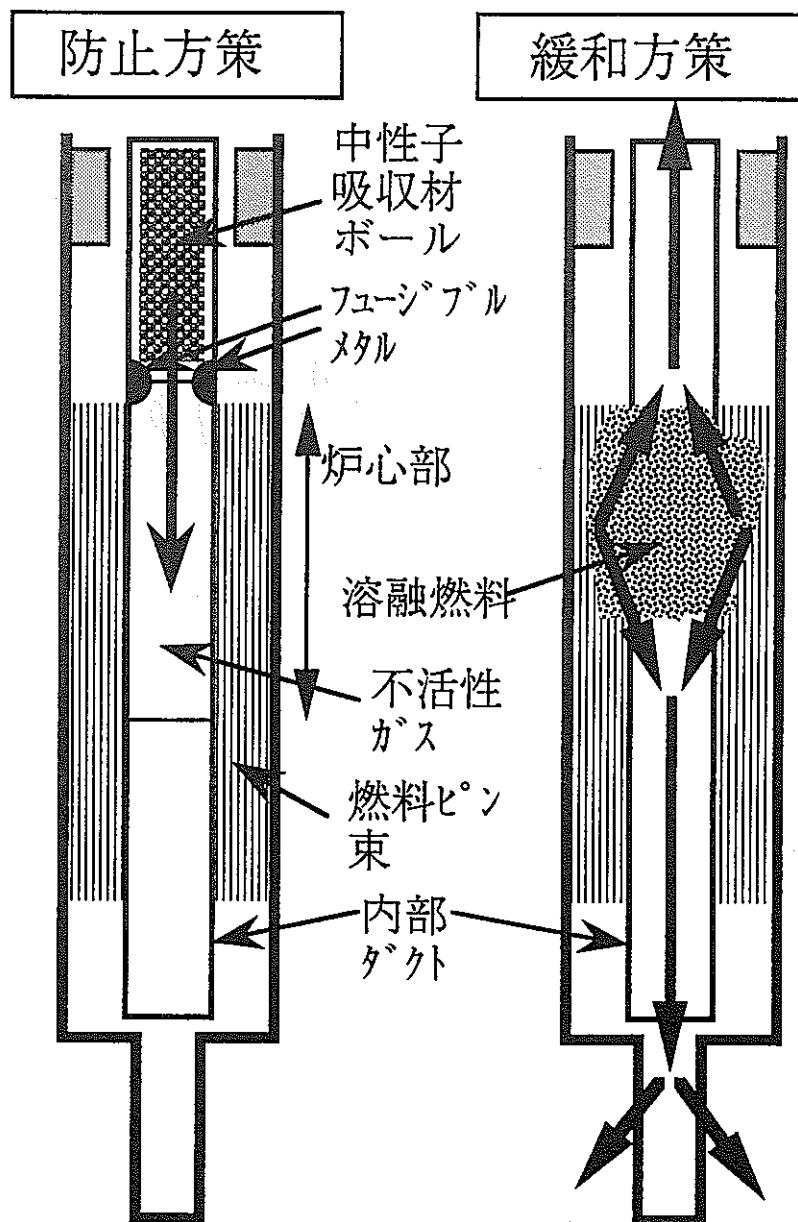


図 3.1.2-3 集合体内SASS機構

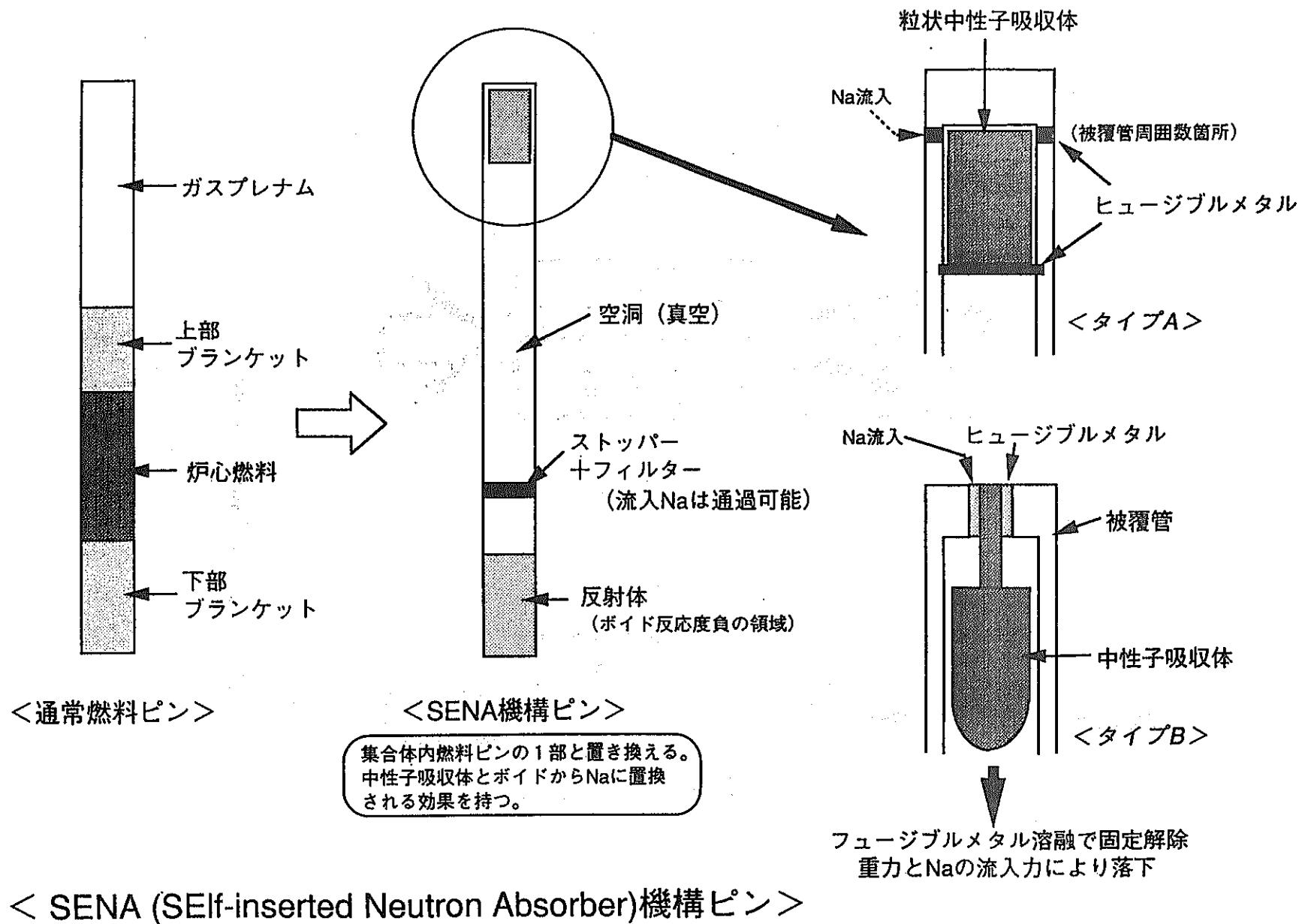
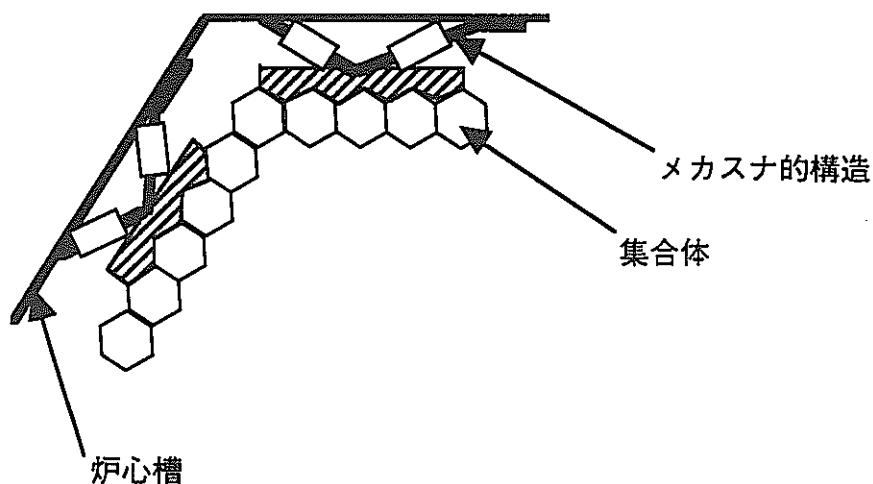
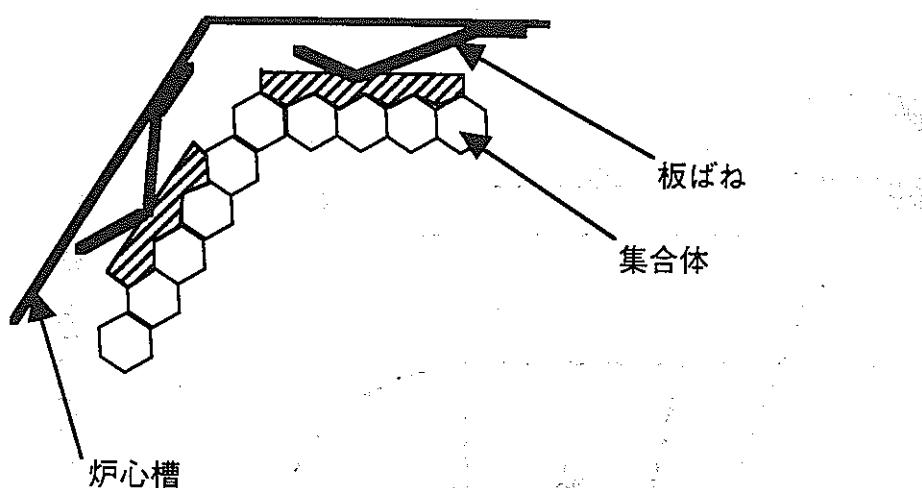


図 3.1.2-4 燃料ピン型SASS機構



燃料集合体の変形に際してメカスナ的变形促進機構が柔に変形を許容する。しかし、地震時には炉心の振動を抑制できる。



燃料集合体の変形により板ばねが変形し、上部の拘束力を解く方式

図 3.1.2-5 炉心槽での集合体拘束方式の工夫

炉心湾曲、フラワリング効果の促進：集合体上部にガイドを設ける

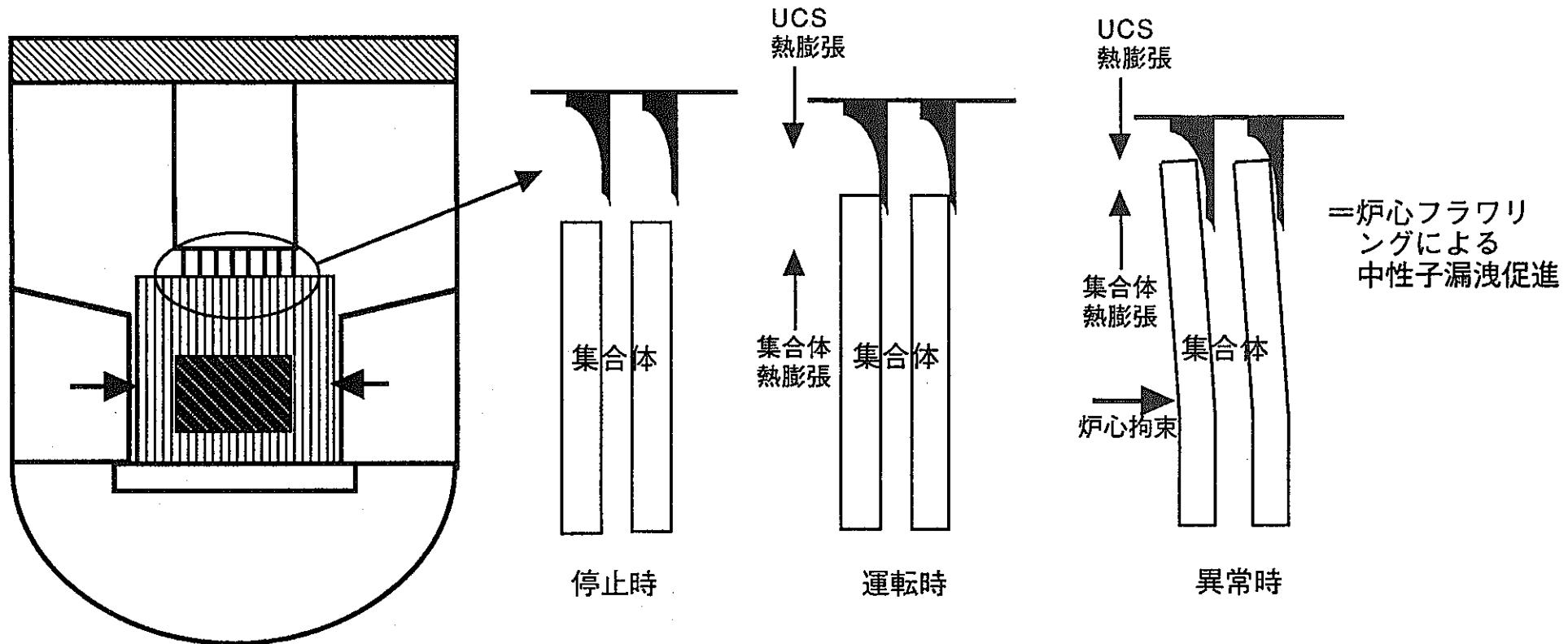


図 3.1.2-6 集合体上部に集合体変形モードを規定するガイドを設ける方式

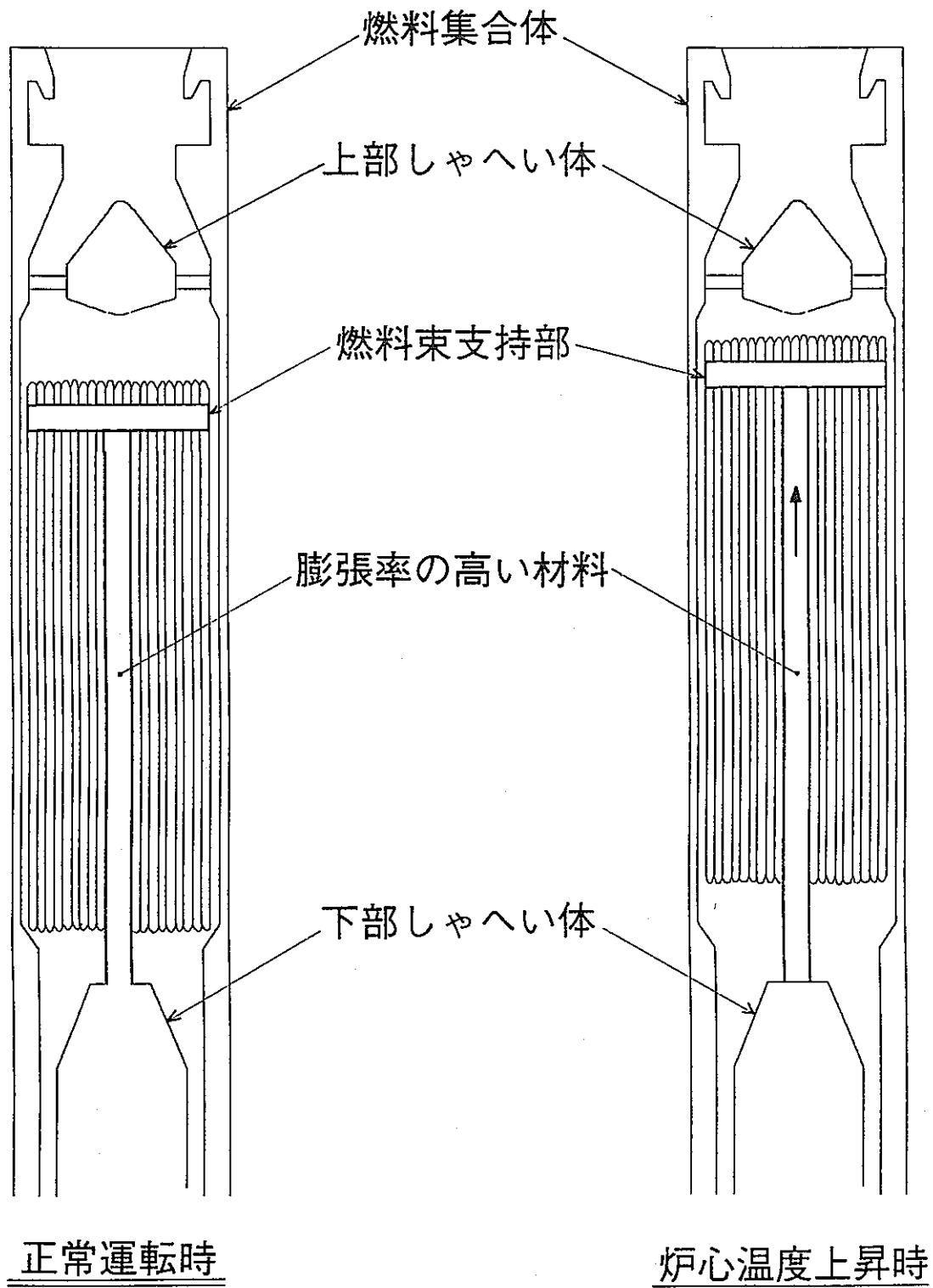


図 3.1.2-7 炉心軸方向膨張促進機構（膨張率の高い材料で集合体内の燃料を支持してお
く方式）

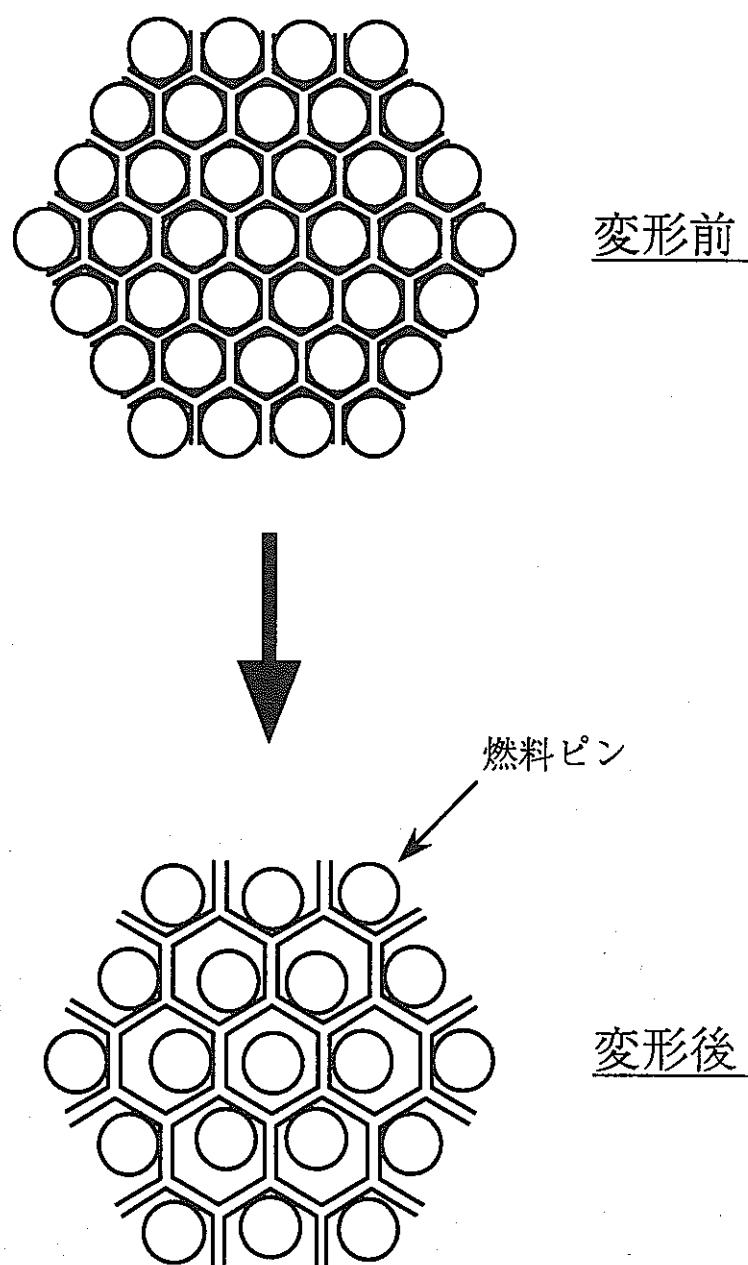


図 3.1.2-8 超塑性変形グリッドスペーサ

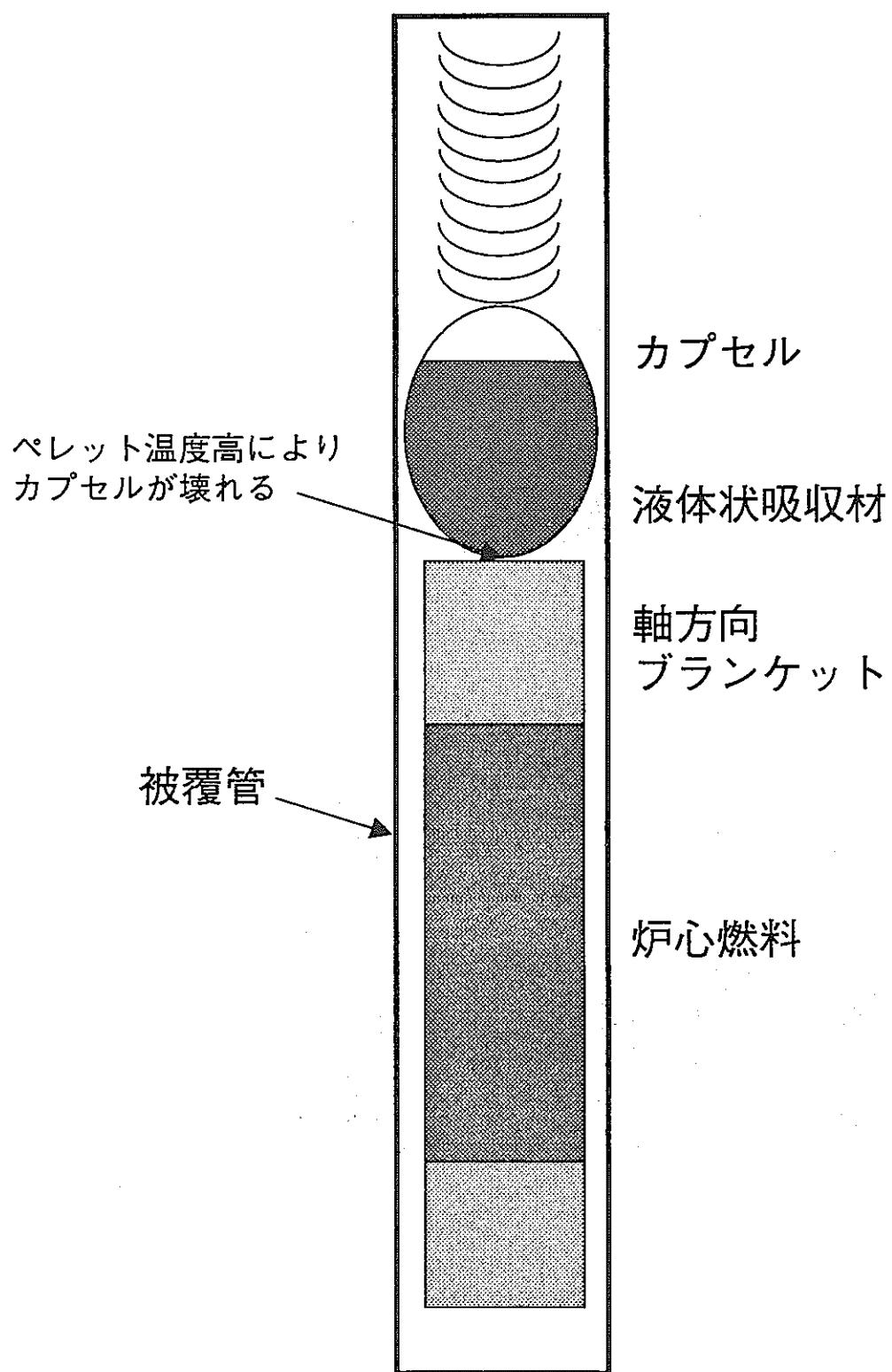


図 3.1.2-9 吸収材封入カプセル入り燃料ピン

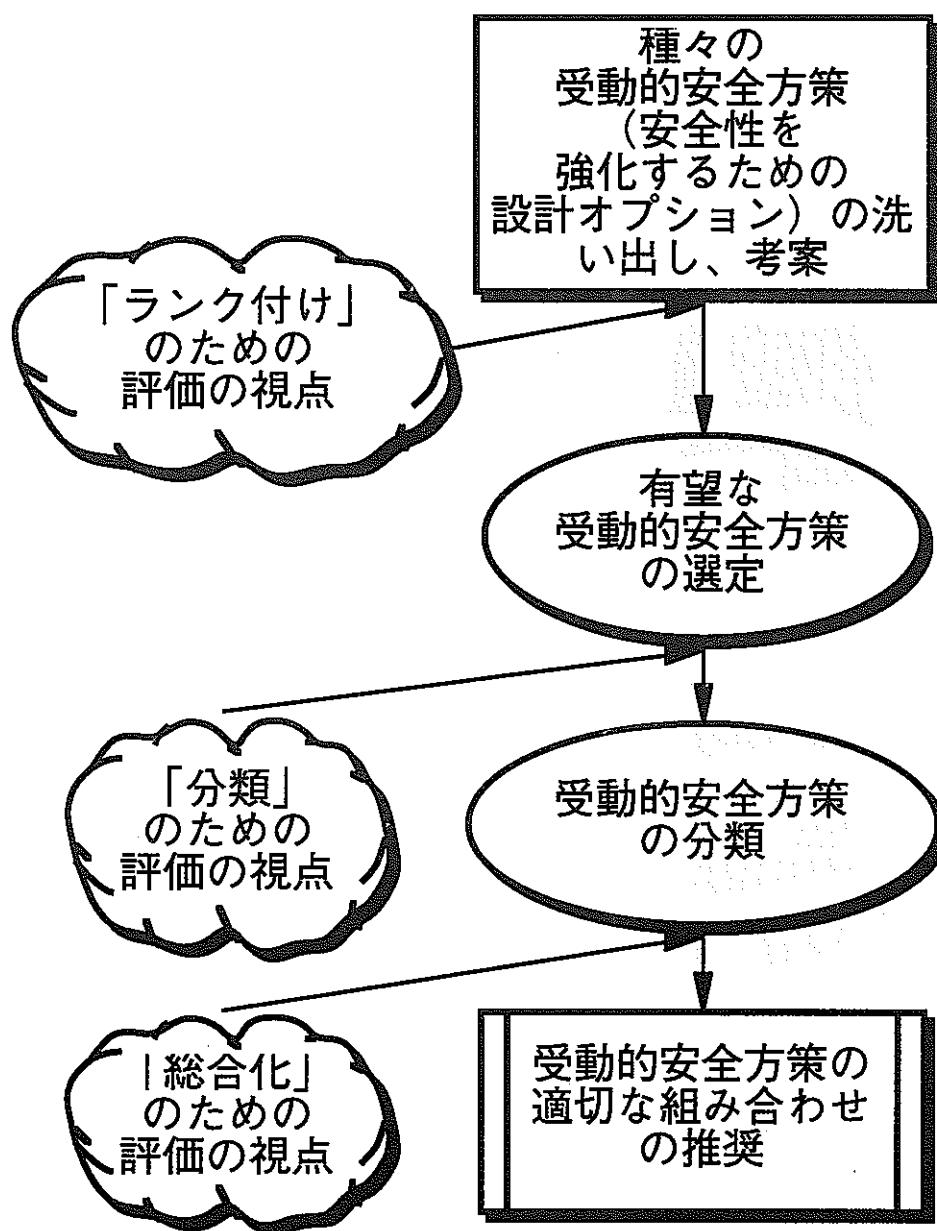


図 3.1.3-1 受動的安全方策の絞り込み、組み合わせ検討の手順

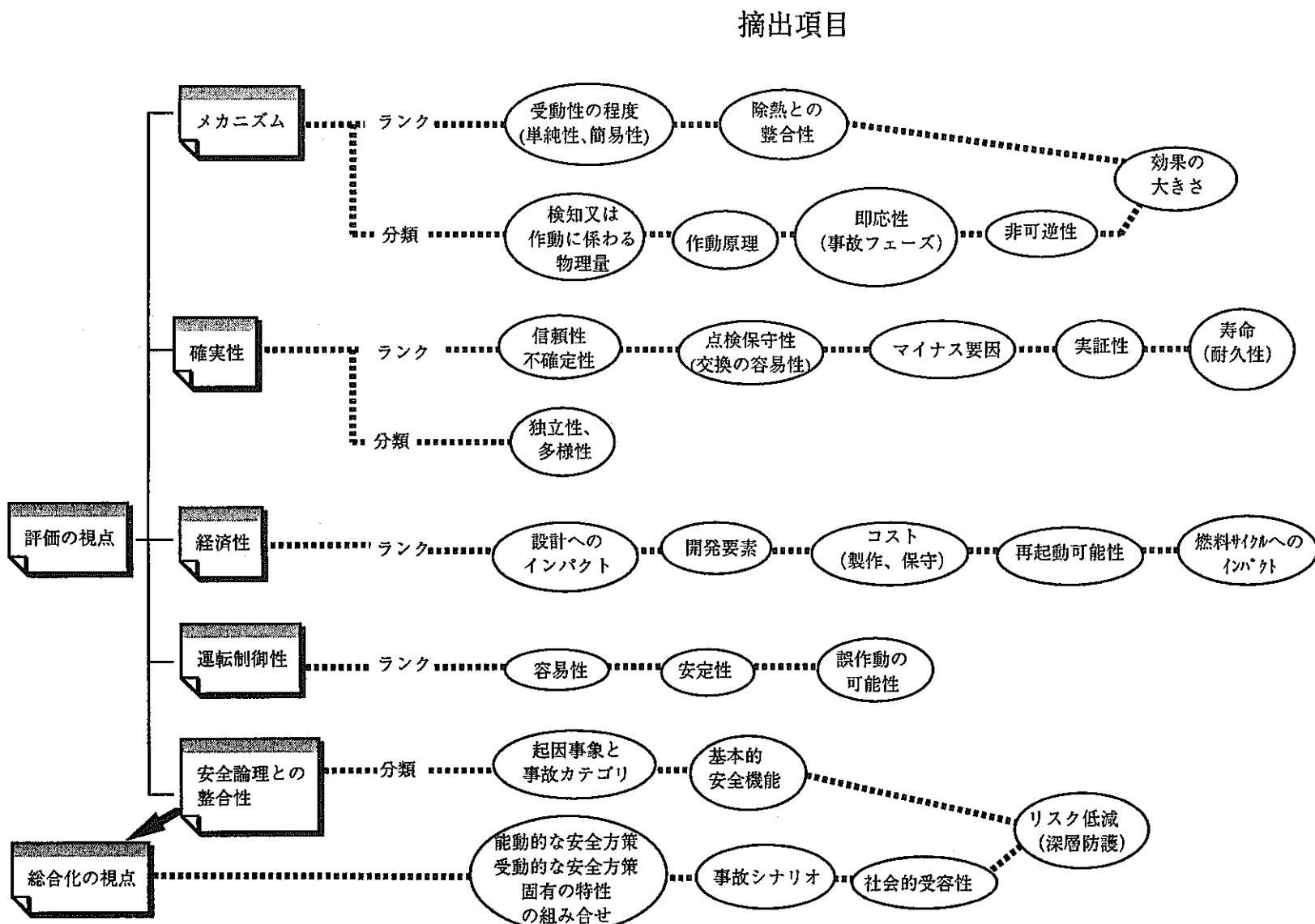
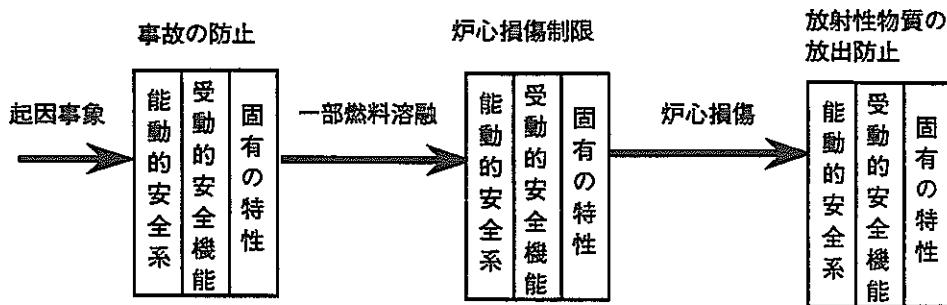
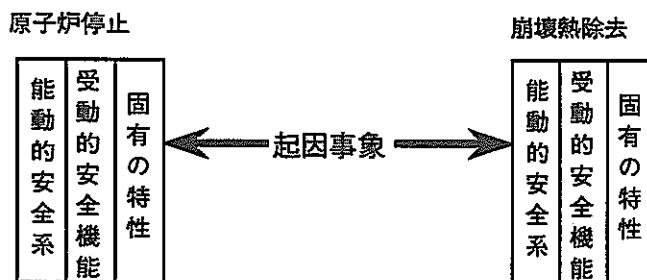


図 3.1.3-2 受動的安全方策の評価の視点

深層防護（事故進展への障壁）の観点から



事故シナリオ（基本的安全機能）の観点から



事故シナリオ（事故カテゴリ）の観点から

ULOF
ULOHS
UTOP
ULOPI
LF
PLOHS
LORL
LOCC

事故シナリオ（起因事象）の観点から

流量減少型	一次主冷却系循環ポンプ故障／トリップ 一次主冷却系強制循環能力喪失 一次主冷却系逆止弁閉 外部電源喪失 原子炉トリップ
流量減少型	一次主冷却系コールドレグ破損 一次主冷却系漏洩 (GV内／外)
反応度挿入型	正の反応度挿入
除熱喪失型	二次主冷却系流量減少 二次主冷却系循環能力喪失 二次主冷却系漏洩 給水流量喪失 タービントリップ 蒸気発生器伝熱管破損
その他	メンテナンス冷却系漏洩 局所的燃料破損

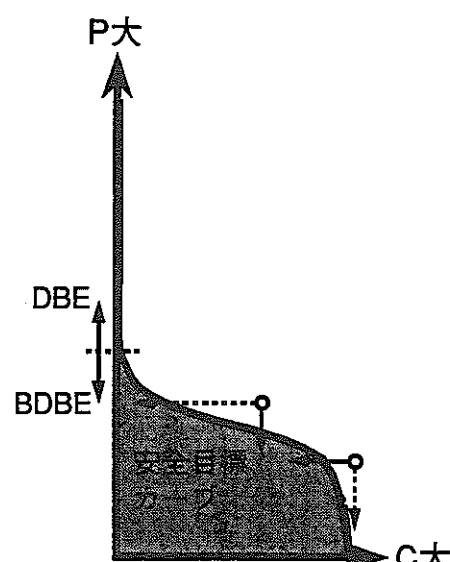


図 3.1.3-3 「安全論理との整合性」を検討する評価の視点についての考え方・概念

第1ステップ

能動的炉停止 - 独立2系統
(制御棒で構成)

裕度をもって十分に大きい効果を有する
十分に高い信頼性

第2ステップ +

受動的安全特性（防止）-1
(固体吸収材の落下、挿入)

多様性の付加
検出信号不要
能動的な手段に依存しない
効果が大きい

対応する受動的安全方策の具体例

- キュリー一点式SASS
- ATHENa
- 集合体内SASS + ETEM
- FloatingかつFusible metal型SASS + ETEM
- SENA pin + ETEM

第3ステップ +

受動的安全特性（防止）-2
(固体吸収材以外の組み合せ)

多様性のさらなる付加
負の反応度効果の荷重原理が異なる
固有の特性に近い方策、単純性を重視
効果は必ずしも十分ではない

対応する受動的安全方策の具体例

- 窒化物燃料 + 炉心湾曲促進 (or 軸方向膨張促進)
- 低線出力燃料 + 炉心湾曲促進 (or 軸方向膨張促進)
- ナトリウムプレナム付き炉心
+ 炉心湾曲促進 (or 軸方向膨張促進)
+ ボイドからナトリウムへの置換

第4ステップ +

受動的安全特性（緩和）
(燃料排出)

深層防護の観点から、防止方策に加え、
緩和方策にも受動的な特性を強化

対応する受動的安全方策の具体例

- 制御棒案内管の薄肉化
- 集合体内SASS

(+ 吸収材上部設置型集合体)

図 3.1.6-1 受動的安全方策の組み合わせの例

表 3.1.4-1 評価の視点の各項目における評価パラメータ及び判定基準：メカニズム

ランク付け項目	評価パラメータ	判定基準	備考																																
効果の大きさ	<p>防止方策に対しては投入反応度（過渡時の単位要素数または単位物理量変化に対する負の投入反応度と、ある設計を仮定して要素数、物理量変化巾から、全投入反応度を算定する。ただし、炉心形状・燃料組成に関する項目に対しては、各々ボイド反応度の低減割合、ドップラー係数の低減割合で評価する。）</p> <p>緩和方策の内、燃料の炉外排出方策に対しては、恒久的な未臨界を達成できる状態を基準に（燃料の炉外排出について言えば、炉心燃料全量の30%が基準）、炉心燃料全体に対する排出可能割合を、20%以上を大、10~20%を中、10%以下を小とする。</p>	<p>事故防止対策に対しては、炉停止への寄与の程度をみる。事故緩和対策に対しては、事象の終息（核的な観点から）に対する寄与をみる。</p> <p>それぞれの方策が効果を現す事故フェーズにおいて、それのみで事故を終息させるだけの効果を有するものをA、それのみでは事故終息しないが効果の大きなものをB、とるに足らない効果しか示さないものをCランクとする。</p>	<p>効果の大きさについては、今後、有望概念を絞り込んだ上で、定量化の精度向上を図る必要がある。</p> <p>ABCのランク付けについて、例えば、防止方策では、炉心全体で-1\$より大きな効果のあるものをAランク、-0.1\$以下の効果しかないものをCランクとする。</p>																																
受動性の程度	起動信号、流体／固体移動等の有無（I～VIIランク）	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ランク</th> <th>起動信号</th> <th>起動時 固体移動</th> <th>安全機能時 流体/固体移動</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>不要</td> <td>無</td> <td>無</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>不要</td> <td>無</td> <td>自然力</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>不要</td> <td>自然力</td> <td>自然力</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>要</td> <td>無</td> <td>自然力</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>要</td> <td>自然力/外部動力</td> <td>自然力</td> </tr> <tr> <td>VI</td> <td>不要</td> <td>—</td> <td>外部動力</td> </tr> <tr> <td>VII</td> <td>要</td> <td>—</td> <td>外部動力</td> </tr> </tbody> </table> <p>さらに、このランク付けを判り易くするため、I、IIをA、IIIをB、IV以降をCランクとする。ここで、ランクIに分類されるものは、本文の定義上、「固有の特性」に相当する。</p>	ランク	起動信号	起動時 固体移動	安全機能時 流体/固体移動	I	不要	無	無	II	不要	無	自然力	III	不要	自然力	自然力	IV	要	無	自然力	V	要	自然力/外部動力	自然力	VI	不要	—	外部動力	VII	要	—	外部動力	左欄I～VIIの例： I：ドップラー効果 II：キュリーポイントマグネット（開）→自然落下 III：水圧作動弁（開）→ボロン水自然流動 IV：マグネット（オフ）→制御棒自然落下 V：ラッチ機能（開）→制御棒自然落下 VI：常時運転安全系機器による冷却材強制流動 VII：電磁（空圧）弁（開）→冷却材強制流動 （社）日本原子力産業会議の「受動的安全システムに関する調査」を参考にした。
ランク	起動信号	起動時 固体移動	安全機能時 流体/固体移動																																
I	不要	無	無																																
II	不要	無	自然力																																
III	不要	自然力	自然力																																
IV	要	無	自然力																																
V	要	自然力/外部動力	自然力																																
VI	不要	—	外部動力																																
VII	要	—	外部動力																																
除熱との整合性	炉心冷却材流路形状への影響（A～Cランク）	<p>除熱との整合性を確保するには炉心冷却材流路形状の維持が最も重要である。ただし、それぞれの安全方策によって、作動する事故フェーズが異なるため、単純に破損規模によりランク付けするのではなく、作動後の事象進展を悪化させる可能性があるか否かを判定基準とする。</p> <p>ランク　　除熱への影響 A 作動前後で冷却材流路形状の劣化が生じない B 作動により冷却材流路形状が劣化するが影響は小さい C 作動により冷却材流路形状が著しく劣化する</p>	除熱との整合性に関するもう一つのパラメータに安全方策作動後の必要除熱容量が考えられるが、これについては効果の大きさと同様な関係がある。すなわち、効果の大きいものほど次の除熱フェーズでの必要除熱量が少なくて済むことになるので、ここでは省略した。																																
総合評価	上記の3項目の視点について、減点法では、大きなマイナスのポイントがいくつの項目に対して存在するかを評価基準とする。加点法では、大きなプラスポイントがいくつの項目に対して存在するかを評価する。具体的には、単純にAランク、Cランクの数をカウントする。																																		

表 3.1.4-2 「メカニズム」に関するランク付け結果一覧

No.	方策	効果の大きさ	受動性の程度	除熱との整合性	総合評価：加点法 Aランクの数	総合評価：減点法 Cランクの数	ランク付けの根拠等	
1-1	炉心設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	B:ボイド反応度が1~2 \$程度低減	燃焼反応度損失を最大4 % $\Delta k/kk'$ まで抑制。	A (I)	A	2	0	軸方向のピーキングを下げ、燃料溶融までの裕度を増大する効果もあるが、ボイド反応度を低減する効果は小さい。
1-2	炉心設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	C:ボイド反応度が0. 5~1 \$程度低減		A (I)	A	2	1 (効果の大きさ)	
1-3	炉心設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	B:ボイド反応度が2~4 \$程度低減		A (I)	A	2	0	
1-4	炉心設計によるボイド反応度抑制:アニユラー炉心	B:ボイド反応度が2~4 \$程度低減		A (I)	A	2	0	
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	B:燃料溶融までの裕度増加	A (I)	A	2	0	低線出力炉心（窒化物燃料炉心も一種の低線出力炉心と考えられる）は、燃料を壊さず事象終息させることを意図した方策である。燃料が壊れて易動性となる可能性を残した方策と比較すると、燃料の移動に伴う正の反応度要因を排除している点で「効果が大」といえる。しかし、ここでの分析的な評価では、その差が明確に表れてきていない点に注意する必要がある。	
3-1	燃料物質による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	B:高熱伝導率（対MOX 7倍程度）、低ドッブラー係数（対MOX約40%減）によるULOF時の正の反応度低減	A (I)	A	2	0		
3-2	燃料物質による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	B:高熱伝導率（対MOX 6倍程度）、低ドッブラー係数（対MOX約20%減）によるULOF時の正の反応度低減	A (I)	A	2	0		
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFT型を大型炉心に適用):炉心の周辺部に設置	B: -0. 8 \$ / 80 体	A (II)	A	2	0	炉心の周辺部に設置する場合は通常のGEMと効果の差が無い。	
4-1-2	GEM:従来型GEM(FFT型を大型炉心に適用):炉心の中央部に設置	A: -1. 5 \$ / 30 体	A (II)	A	3	0		
4-2-1	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置	B: -0. 8 \$ / 80 体	A (II)	A	2	0		
4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の中央部に設置	A: -2 \$ / 30 体	A (II)	A	3	0	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	B: -10 ~ -20 e (炉心集合体周囲の6体集合体を想定)	A (II)	A	2	0		
6	ナトリウムプレナム付炉心	B: ボイド反応度1~2 \$低減	A (I)	A	2	0		
7-1	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 P/F大の燃料集合体	B: -40 e / 6体	A (II)	C	1	1 (除熱との整合性)	沸騰によりリーディングチャンネルで燃料破損が発生する可能性がある。	
7-2	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 燃料使用しない	B: -40 e / 6体	A (II)	A	2	0	8-1 フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	
8-1	フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	A: -1 \$以上 (ステップ状投入)	A (II)	A	3	0		
8-2	フローティング型制御機構:フローティング型SASS	A: -1 \$以上 (ステップ状投入)	A (II)	A	3	0		
9	キュリー点式自己作動型制御機構(SASS)	A: -6 \$ / 6体 (ステップ状投入)	A (II)	A	3	0	10 中性子束高による溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	
10	中性子束高による溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	A: -1 \$以上 (ステップ状投入)	A (II)	A	3	0		
11	燃料ピン型SASS機構 (ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	A: -1 \$以上	A (II)	A	3	0		
12	集合体内SASS機構	A: -1 \$以上 (ステップ状投入)	A (II)	A	3	0	13-1 制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	A: -1 \$以上	B (III)	A	2	0		
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能なし	A: -1 \$以上	B (III)	A	2	0		
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	A: -1 \$以上	B (III)	A	2	0		
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	A: -1 \$以上	B (III)	A	2	0	起動時にまずバイメタル部が動く必要があるため、受動性の程度がBとなる。	
14-1	炉心湾曲、フローリング効果の促進:炉心内の集合体拘束方式の工夫	B: -50 e (炉心部最外層3 mm膨張)	A (II)	A	2	0	14-2 炉心湾曲、フローリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	
14-2	炉心湾曲、フローリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	B: -50 e (炉心部最外層3 mm膨張)	A (II)	A	2	0		
14-3	炉心湾曲、フローリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	B: -50 e (炉心部最外層3 mm膨張)	A (II)	A	2	0		
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	B: -10 e (膨張材料温度200°C上昇、膨張促進集合体10体)	A (I)	A	2	0	16 炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(アーチレス対応)	
16	炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(アーチレス対応)	A: -1. 5 \$ (p/d 1%増大、径方向一様膨張)	A (II)	B	2	0		
17	燃料ピン上部又は下部への吸収材(気体又は液体)封入	C: -5 e (集合体100体、 ³ H e封入)	A (II)	A	2	1 (効果の大きさ)		
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入(影響緩和)	A: 大	A (II)	A	3	0	19 集合体内SASS機構(影響緩和)	
19	集合体内SASS機構(影響緩和)	A: 大	A (II)	A	3	0		
20	中空ベレットによるピン内燃料移動・分散	B: 中 (燃料ピン破損のタイミングに依存)	A (II)	A	2	0		
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	B: -0. 5 ~ -1 \$ (リードチャンネル5体)	A (II)	B	1	0	炉心上部に排出した燃料については、必ずしも除熱が担保されていないため除熱との整合性はB。	
22	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	B: 中	A (II)	B	1	0	炉心上部に排出した燃料については、必ずしも除熱が担保されていないため除熱との整合性はB。	
23	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	C: 小	A (II)	B	1	1 (効果の大きさ)	集合体間のような狭い間隙を通って排出する燃料については、必ずしも除熱が担保されていないため除熱との整合性はB。	
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	A: 大	A (II)	A	3	0	炉心上部に排出した燃料については、必ずしも除熱が担保されていないため除熱との整合性はB。	
25	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	B: 中	A (II)	B	1	0	炉心上部に排出した燃料については、必ずしも除熱が担保されていないため除熱との整合性はB。	

表 3.1.4-3 評価の視点の各項目における評価パラメータ及び判定基準：確実性

ランク付け項目	評価パラメータ	判定基準	備考
信頼性 不確定性	1.検出機構の信頼性、不確定性、 2.作動メカニズムの単純さ、機械的可動部の少なさ 3.反応度印加上の不確定性	検出、作動での信頼性が高いこと、不確定性の小さいことが要求される。メカニズムの単純さ、機械的可動部の少なさが故障の可能性を低下させ、信頼性を向上させる。また、検出・作動メカニズム及び負の反応度印加について、それぞれの原理上の不確定性を評価する（開発途上であるがゆえの不確定性は含めず、あくまで原理上の根本的な不確定性について検討する。例えば、活用している現象が非常に境界条件依存性の大きなものであり、境界条件が運転状態等により変化するとすれば、不確定性は大きい）。 A：検出、作動メカニズム及び負の反応度印加のいずれについても信頼性が高く、不確定性が小さい。 B：いざれかに比較的大きな欠点があると考えられるもの C：いざれかに致命的な欠点があると考えられるもの	
点検保守性 (交換の容易性を含めて)	1.システムの点検の容易さ 2.保守の容易さ（交換の容易さを含む）	受動的安全システムは、いかなる時においても、その作動条件に達すれば確実に作動することが要求される。そのため、常にシステムの健全性が確認できるか、または、点検保守ができることが望ましい。 A：起動、作動、負の反応度印加について検査が可能（もしくは原理上検査が不要）であり、かつ、保守が容易（もしくは原理上メンテナンスフリー） B：必要な検査、保守に対して、多少の困難さが予想される C：検査が必要と考えられるにも係わらず、主要な部分についての検査が不可能、もしくは、保守が必要だが不可能	
マイナス要因	1.マイナス要因の生じる可能性の大きさとその事象の範囲 2.正に投入され得る反応度の大きさ 3.故障時のフェールセイフ性	マイナス要因の顕在化を考える上で、ある事象でマイナス要因が顕在化する可能性の大きさ、顕在化し得る事象の範囲及びフェーズが重要である。また、その影響の大きさをみる上で、正に投入され得る反応度の大きさが重要である。さらに、故障を無視できない機構に対しては、故障によってマイナス要因が顕在化しないこと（フェールセーフ性）が重要である。 A：マイナス要因の影響が無視できるレベルのもの。 B：無視できないマイナス要因があるが設計や運転方法の工夫でカバーできると判断されるもの。 C：致命的なマイナス要因があると判断されるもの。	
実証性	1.実証できる範囲 2.実証できる設備	どのような設備でどこまでの実証が可能かを検討し、最終的な実証性を判断する。設備として以下を考える（右側の設備ほど実施が困難と見なす）。 炉外試験／既設炉内試験(NSRR等)／既設実機(Joyo, Monju等)／新設炉内試験（SERAPH等）／新設実機 A：受動的な安全システム全般にわたって、新設の実機を用いた試験を実施せずとも、炉外試験から新設炉内試験までの範囲の試験を実施すれば実証が可能 B：受動的な安全システムの主要な部分については、新設の実機を用いた試験を実施せずとも、炉外試験から新設炉内試験までの範囲の試験を実施すれば実証が可能 C：受動的な安全システムの主要な部分について、実証が不可能か、実証のために新設実機が必要 炉心形状、燃料形態を変更する方策については以下のようランク付けを行う。 A：燃料集合体の単体照射や臨界集合体を用いた試験を実施すれば、実用化できる。 B：既設の実験炉で全炉心を構成した試験を実施すれば、実用化できる。 C：原型炉規模の新設実機で試験を実施しなければ実用化できない。	
寿命 (耐久性)	機能を保証できる期間	当該安全方策を導入するために使用する部品の材質によっては、照射劣化を起こし、時間とともにその機能が劣化し、性能を保証できなくなる可能性がある。その耐久時間とプラント寿命あるいは燃料交換周期との関係が重要である（開発途上で耐久性が明確でないものについても、開発が進んだ段階を予測して評価する）。 A：プラント寿命中余裕を持って機能を維持することができる。 B：燃料交換周期程度の期間は、機能を維持することができる。 C：燃料交換周期程度の期間も機能を維持することができない。	
総合評価	上記5個の評価パラメータを基に、総合評価を行う。減点法ではCランクの数を、加点法ではAランクの数をカウントする。		

表 3.1.4-4 「確実性」に関するランク付け結果一覧

No.	方策	信頼性 不確定性	点検 保守性	マイナス 要因	実証性	寿命	総合評価：加点法 Aランクの数	総合評価：減点法 Cランクの数	ランク付けの根拠等
1-1	炉心設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	A	-	A	C	-	2	1 (実証性)	偏平の程度にもよるが、従来炉心との差が大きい偏平炉心については、制御性等の問題があり、原型炉クラスの新規炉による実証が必要と考え、実証性Cとした。 炉心形状、燃料形態を変える方策については、点検保守（固有の特性に対しては点検不要）、寿命（燃料は燃料交換するが受動的な安全機能を維持することを目的とした交換ではない）の判定に馴染まない。
1-2	炉心設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	A	-	A	B	-	2	0	
1-3	炉心設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	A	-	A	B	-	2	0	
1-4	炉心設計によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	A	-	A	C	-	2	1 (実証性)	アニュラー炉心については、制御性等の問題があり、原型炉クラスの新規炉による実証が必要と考え、実証性Cとした。
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	A	-	A	A	-	3	0	
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	A	-	A	B	-	2	0	集合体単体照射、実験炉クラスの全炉心試験、原型炉クラスの全炉心試験と段階を踏んだ実証が必要と考えられるが、既存の実験炉、原型炉の燃料を交換することにより対応でき、新規炉は不要と判断し、実証性をBとした。
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	A	-	A	B	-	2	0	集合体単体照射、実験炉クラスの全炉心試験、原型炉クラスの全炉心試験と段階を踏んだ実証が必要と考えられるが、既存の実験炉、原型炉の燃料を交換することにより対応でき、新規炉は不要と判断し、実証性をBとした。
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の周辺部に設置	A	B	B	A	B	2	0	ポンプの過流量等で正の反応度が投入されるのでマイナス要因をBとした。
4-1-2	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の中央部に設置	A	B	B	A	B	2	0	ポンプの過流量等で正の反応度が投入されるのでマイナス要因をBとした。
4-2-1	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置	A	B	B	A	B	2	0	ポンプの過流量等で正の反応度が投入されるのでマイナス要因をBとした。
4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の中央部に設置	A	B	B	A	B	2	0	ポンプの過流量等で正の反応度が投入されるのでマイナス要因をBとした。
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	B	B	A	B	B	1	0	ガス封入部分について、ガスが抜けていないかを確認することが困難と考えられるので、点検保守性はB
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:Naブレナム付き炉心	A	-	A	B	-	2	0	炉心形状を変更してボイド反応度を抑制する方策については、点検保守、寿命の判定に馴染まないのでランク付けしない
7-1	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 P/F大の燃料集合体	B	C	B	B	B	0	1 (点検保守性)	設定条件で沸騰を開始し、設計通りに沸騰領域が拡大するか否かがポイント。炉心の条件、リードチャンネルの炉心内滞在期間により状況が変化する可能性があるが、点検ができない。
7-2	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 燃料を使用しない	B	C	B	B	B	0	1 (点検保守性)	チャンネル流路が詰まっているか等の点検が重要だが、点検が困難。
8-1	フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	A	A	A	A	B	4	0	
8-2	フローティング型制御機構:フローティング型SASS	B	C	A	B	B	1	1 (点検保守性)	フローティングの機能は No.8-1 と差は無いが、TOP対応のためのフェージブルメタルを活用したSASS機能については点検ができない。また、信頼性も少し劣る。
9	キュリ一点式自己作動型制御機構(SASS)	A	A	A	B	B	3	0	
10	中性子束高により溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	B	C	A	B	B	1	1 (点検保守性)	中性子束高によって溶融させる部分について点検が実施できない。
11	燃料ビン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	B	C	A	B	B	1	1 (点検保守性)	フェージブルメタルを活用したSASS機能について点検ができない。
12	集合体内SASS機構	B	C	A	B	B	1	1 (点検保守性)	フェージブルメタルを活用したSASS機能については点検ができない。
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	A	A	A	A	B	4	0	
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能なし	A	A	A	A	B	4	0	
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	A	A	A	A	B	4	0	
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	A	A	A	A	B	4	0	
14-1	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:炉心内での集合体拘束方式の工夫	B	C	A	B	B	1	1 (点検保守性)	炉心温度上昇時に炉心拘束が外れる機構が最も重要であるが、点検ができない。
14-2	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	A	B	A	B	A	3	0	炉心温度上昇時にガイドがうまく機能し適切に炉心湾曲することが最も重要である。ガイドが健全であることの点検はUSVの使用等が考えられる。
14-3	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	A	-	A	B	-	2	0	炉心温度上昇時に剛性の強いパッドがうまく機能し適切に炉心湾曲することが最も重要である。固有の特性に属する機能であるため点検は不要（但し、十分な実証が必要）
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	A	B	A	B	B	2	0	
16	炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ケントレス対応)	A	C	A	B	B	2	1 (点検保守性)	炉心温度上昇時に超塑性スペーサがうまく機能し、炉心の径方向膨張が適切になされることが最も重要であるが、点検ができない。
17	燃料ビン上部又は下部への吸収材(气体又は液体)封入	B	C	A	B	B	1	1 (点検保守性)	ビン内に設置された機構であるため、運転中に状態を把握することが困難である。
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	B	-	A	B	B	1	0	
19	集合体内SASS機構(影響緩和)	B	-	A	B	B	1	0	
20	中空ペレットによるビン内燃料移動・分散	B	-	A	B	-	1	0	
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	B	-	B	B	B	0	0	燃料が炉心上部に排出された場合、再度炉心に燃料が戻り、正の反応度が入る可能性がある。
22	軸ブランケット短縮による燃料炉外流出促進	B	-	B	B	-	0	0	燃料が炉心上部に排出された場合、再度炉心に燃料が戻り、正の反応度が入る可能性がある。
23	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	B	-	C	B	-	0	1 (マイナス要因)	集合体パッドの間隙を大きくすることによって、炉心湾曲時に正の反応度が入る要因となり得る。
24	制御棒案内管の導向化等による早期破損・燃料流出	B	-	A	B	A	2	0	
25	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	B	-	B	B	-	0	0	燃料が炉心上部に排出された場合、再度炉心に燃料が戻り、正の反応度が入る可能性がある。

表 3.1.4-5 評価の視点の各項目における評価パラメータ及び判定基準：経済性

ランク付け 項目	評価パラメータ	判定基準
設計への インパクト	プラント熱効率への影響 増殖性能への影響 TRU消滅性能への影響 炉容器のサイズ等物量への影響	受動的な安全方策を導入するためにFBRの利点（増殖性、TRU消滅性能、コンパクトな炉心、高熱効率等）がある程度犠牲にする必要があるかもしれない。経済性の観点から、犠牲が少ないことが望ましい。 A - FBRの利点へのインパクトがほとんどない。 B - FBRのいずれかの利点をある程度（例えば、10~30%）損ねる可能性がある。 C - FBRの利点を大幅に損ねる可能性がある。
開発要素	開発期間 開発費用 開発の見通し	経済性の観点からは、R&D費用をある程度FBRの建設費に加算して考える必要がある。あまりに開発要素の大きい安全方策は採用が困難となる。 A - 主に従来技術に基づいて達成可能であり、開発期間、コスト等が小さい。 B - 開発期間10年以上、または、開発コスト数10億円とかなりのリソースを必要とするが開発の見通しが立つ。 C - 開発期間が極めて長いか、開発コストが極めて大きい。
コスト (製作、保守)	関連する部品、設備の設計、製作 コスト 部品、設備の保守コスト	当該受動的安全方策を導入するための関連部品、設備の製作コスト、または、保守のために必要なコストが極端に大きいと経済性に与える影響が大きい。 A - 発電単価に影響を与えるほどには製作コスト、保守コストへのインパクトが大きくない（発電コストの1%程度をクラス分けの目安とする） B - 発電単価にかなりの影響を与える（発電コストの20%程度をクラス分けの目安とする）。 C - 発電単価に極めて大きな影響を与える。
再起動 可能性	再起動に要する手間（人員、時間） 経済的負担	異常事象が終息すればプラントとしては通常の再起動条件で立ち上げられるものが最も好ましい。このため、再起動に要する経済的な負担、時間、人員等を考慮するパラメータとした。ただし、この評価項目は、炉心損傷事故の発生防止方策のみを適用対象とする。 A - 異常事象終息後、自動的に使用可能な状態に戻り、通常の再起動ができる。 B - 燃料集合体等の部品、または、破損、変形部品を通常設備を使用して交換すれば再起動できる。 C - 炉上部機構等を取り外し、原子炉内部品、または、破損、変形部品を交換しなければ、再起動できない。かなり、大規模な工事となる。莫大な費用、期間を要する。もしくは、原子炉部品、または燃料の交換が行えず、再起動不可能。
燃料サイクル へのインパクト	燃料製造へのインパクト 再処理へのインパクト	再処理等燃料サイクルへのインパクトが大きいと結果的にはサイクルコストに影響を及ぼす。例えば、燃料自体へ手を加える方式では、再処理を著しく困難にする可能性がある。また、高レベル放射性廃棄物の量を極端に多くするような方策も望ましくない。ただし、ここでは、燃料サイクル関連の開発コストについては評価対象としない（「開発要素」の項目で評価する）。 A - 燃料サイクルへのインパクトはほとんど存在しない。 B - 燃料サイクルへのインパクトがあるが、サイクルコストのアップは小さく、問題にならない。 C - 燃料サイクルへのインパクトが大きく、サイクルコストを大幅にアップさせる可能性がある。
総合評価	大項目「経済性」の5つの視点について、総合評価を行う。減点法ではCランクの数を、加点法ではAランクの数をカウントする。	

表 3.1.4-6 「経済性」に関するランク付け結果一覧

No.	方策	設計へのインパクト	開発要素	コスト	再起動可能性	燃料サイクルへのインパクト	総合評価：加点法 Aランクの数	総合評価：減点法 Cランクの数	ランク付けの根拠等
1-1	炉心設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	C	C	B	-	A	1	2 (設計へのインパクト、開発要素)	増殖性劣化、炉容器径増大で設計へのインパクト大。炉心のデカップリングが大きく、制御性の良い炉心に仕上げるのに開発要素が大きい。
1-2	炉心設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	A	A	A	-	B	3	0	燃料ピン製造の複雑等を考慮し、サイクルへのインパクトはB。
1-3	炉心設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	B	B	B	-	A	1	0	
1-4	炉心設計によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	C	C	B	-	A	1	2 (設計へのインパクト、開発要素)	増殖性劣化、炉容器径増大で設計へのインパクト大。炉心のデカップリングが大きく、制御性の良い炉心に仕上げるのに開発要素が大きい。
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低熱出力炉心	B	A	B	-	A	2	0	
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	A	C	-	-	C	1	2 (開発要素、燃料サイクルへのインパクト)	MOXに比べれば開発要素は大きくC。現状の燃料サイクルから大幅に変更となり、インパクトは大。
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	A	C	-	-	C	1	2 (開発要素、燃料サイクルへのインパクト)	MOXに比べれば開発要素は大きくC。現状の燃料サイクルから大幅に変更となり、インパクトは大。
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFT型):炉心の周辺部に設置	A	A	A	A	A	5	0	
4-1-2	GEM:従来型GEM(FFT型):炉心の中央部に設置	B	A	A	A	A	4	0	炉心中央部に設置する場合は核的な劣化要因となるので設計への影響ある。
4-2-1	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置	A	B	A	A	A	4	0	
4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の中央部に設置	B	B	A	A	A	3	0	炉心中央部に設置する場合は核的な劣化要因となるので設計への影響ある。
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	B	B	A	B	A	2	0	
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:Naプレナム付き炉心	B	B	A	-	A	2	0	
7-1	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 P/F大の燃料集合体	B	B	A	B	B	1	0	燃料を使用しないリーディングチャンネルと異なり、再起動に際し、リーディングチャンネル集合体の交換を必要とする可能性あり。 特殊な燃料集合体を装荷する方策は、燃料サイクルへのインパクトをBランクとした。
7-2	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 燃料を使用しない	B	B	A	A	A	3	0	
8-1	フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	A	A	A	A	A	5	0	
8-2	フローティング型制御機構:フローティング型SASS	B	B	A	B	B	1	0	フュージブルメタルを活用する方策は、開発要素、再起動可能性がAランクではなくBランクとなる。
9	キュリー一点式自己作動型制御機構(SASS)	A	A	A	A	A	5	0	
10	中性子束高により溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	B	B	A	B	B	1	0	
11	燃料ピン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	B	B	A	B	B	1	0	
12	集合体内SASS機構	B	B	A	B	B	1	0	
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	A	A	A	A	A	5	0	
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能無し	A	A	A	A	A	5	0	
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	A	A	A	A	A	5	0	
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	A	A	A	A	A	5	0	
14-1	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:炉心内の集合体拘束方式の工夫	A	C	A	C	A	3	2 (開発要素、再起動可能性)	適切な拘束方式の開発が困難と考えられる。 フラワリングを起こさせた後は、元の状態に復帰させるのが困難。
14-2	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	A	B	A	A	A	4	0	
14-3	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	A	B	A	A	A	4	0	
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨脹率の高い材料で集合体内燃料を支持	B	B	B	A	B	1	0	
16	炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ゲートレス対応)	A	C	B	B	A	2	1 (開発要素)	十分な強度を有する超塑性変形材料を開発することが困難。
17	燃料ピン上部又は下部への吸収材(気体又は液体)封入	B	B	B	B	C	0	1 (燃料サイクルへのインパクト)	燃料ピンの製造が繁雑となる。毒物を混入した燃料ピンの再処理についても従来の再処理からの工夫が必要となる。
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	B	B	A	-	B	1	0	
19	集合体内SASS機構(影響緩和)	B	B	A	-	B	1	0	
20	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	A	B	A	-	A	3	0	
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	B	C	A	-	B	1	1 (開発要素)	事故発生要因とならないような適切なリーディングチャンネル設計を確立するには多くの開発期間が必要となる。
22	軸プランケット短縮化による燃料炉外流出促進	B	B	A	-	A	2	0	
23	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	B	B	A	-	A	2	0	
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	A	B	A	-	A	3	0	
25	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	B	B	A	-	A	2	0	

表 3.1.4-7 評価の視点の各項目における評価パラメータ及び判定基準：運転制御性

ランク付け 項目	評価パラメータ	判定基準
容易性	システムを付加したことによるプラント運転方法の変化が及ぼす影響	<p>受動的安全システムを設けたことによっても、プラント内の他の設備への波及効果が少なく、運転員の負担にならず、誤操作の確率が少ないものを選ぶ必要がある。</p> <p>A - 全ての運転モードにおいて影響はない。 B - 一部または全ての運転モードについて運転方法が複雑になるが、設計上の工夫によりその程度は軽微にでき、運転の安定性は保たれる。 C - 一部または全ての運転モードについて運転方法が大きく変わり複雑になり、運転員の負担が増え、安全性が低下する。</p>
安定性	原子炉の通常運転の物理量変動範囲での運転制御性に及ぼす影響	<p>通常運転の物理量変動範囲ではあまり作用せず、原子炉が安定に運転されることが要求される。例えば、受動的安全システムの導入によって、起因事象を増加させるようなことがあってはならない。温度等のプラント条件に対して連続的に変化するような現象を活用したシステムでは、通常運転状態の範囲内では出力等に影響を与えないよう不感帯を設けたものが望ましい。</p> <p>A - 通常運転の物理量変動範囲では安定している。 B - 外乱に対する安定性が悪くなり、炉出力に変動を及ぼすが、設計上の工夫によりその影響を小さくできる。 C - 外乱に対する安定性が悪く、炉出力に大きな変動を及ぼす。もしくは、システム自身の問題で、外乱がなくても安定しない（例えば流力振動による）。</p>
誤作動の可能性	誤作動の頻度 誤作動後の運転復帰措置の容易さ	<p>通常運転中に誤作動が頻発するようでは安全方策として役に立たず、結局は、その機能を殺してプラントを運転することになりかねない。誤作動の頻度がいかに小さいかが、重要なである。また、誤作動が発生した後のプラント復帰措置がどの程度のものであるかも、重要なポイントである。</p> <p>A - 通常運転時に誤作動が発生する可能性は極めて低い。 B - 誤作動が発生する可能性があるが、その頻度は小さく、また、運転復帰の措置が容易である。 C - 誤作動が頻発する可能性がある。または、その頻度はあまり大きくは無いが、運転復帰措置が容易ではない。</p>
総合評価	大項目「運転制御性」の3つの評価の視点を通しての総合評価を行う。減点法ではCランクの数を、加点法ではAランクの数をカウントする。	

表 3.1.4-8 「運転制御性」に関するランク付け結果一覧

No.	方策	容易性	安定性	誤作動の可能性	総合評価：加点法 Aランクの数	総合評価：減点法 Cランクの数	ランク付けの根拠等
1-1	炉心設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	C	B	A	1	1 (容易性)	炉心のデカップリングが大きいため運転の容易性に欠ける。
1-2	炉心設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	A	A	A	3	0	
1-3	炉心設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	C	B	A	1	1 (容易性)	炉心のデカップリングが大きいため運転の容易性に欠ける。
1-4	炉心設計によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	C	B	A	1	1 (容易性)	炉心のデカップリングが大きいため運転の容易性に欠ける。
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	A	A	A	3	0	
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	A	A	A	3	0	
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	A	A	A	3	0	
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFT型)：炉心の周辺部に設置	B	B	A	1	0	流量変動により反応度変化が生じるため容易性、安定性がB。
4-1-2	GEM:従来型GEM(FFT型)：炉心の中央部に設置	B	B	A	1	0	流量変動により反応度変化が生じるため容易性、安定性がB。
4-2-1	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM：炉心の周辺部に設置	B	B	A	1	0	流量変動により反応度変化が生じるため容易性、安定性がB。
4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM：炉心の中央部に設置	B	B	A	1	0	流量変動により反応度変化が生じるため容易性、安定性がB。
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	A	A	B	2	0	原理的に作動設定点に誤差が生じ易いので誤差動はB。
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:Naブレナム付き炉心	A	A	A	3	0	
7-1	人工的リードチャンネルの設置：先行的Na沸騰 P/F大の燃料集合体	A	A	B	2	0	燃焼効率等を考慮すると作動設定点に誤差が生じ易いと考えられるので誤差動はB。
7-2	人工的リードチャンネルの設置：先行的Na沸騰 燃料を使用しない	A	A	B	2	0	流路の詰まり等で誤作動の可能性があるのでB。
8-1	フローティング型制御機構：制御棒を動圧で浮かせるのみ	B	B	B	0	0	流量変動により反応度変化が生じるため容易性、安定性がB。
8-2	フローティング型制御機構：フローティング型SASS	B	B	B	0	0	流量変動により反応度変化が生じるため容易性、安定性がB。
9	キュリー点式自己作動型制御機構(SASS)	A	A	B	2	0	
10	中性子束高により溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	A	A	B	2	0	
11	燃料ビン型SASS機構 (ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	A	A	C	2	1 (誤作動の可能性)	炉心内に多数設置することとなるので、炉心内の温度分布の影響等により誤作動の可能性は高い。
12	集合体内SASS機構	A	A	B	2	0	
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	A	A	A	3	0	
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能なし	A	A	A	3	0	
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	A	A	A	3	0	
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	A	A	A	3	0	
14-1	炉心弯曲. フラワリング効果の促進:炉心内の集合体拘束方式の工夫	A	A	C	2	1 (誤作動の可能性)	拘束方式にも依存するが、誤作動の可能性があり、もし誤作動すると復帰操作が困難。
14-2	炉心弯曲. フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	A	A	A	3	0	
14-3	炉心弯曲. フラワリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	A	A	A	3	0	
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	B	B	A	1	0	炉心の温度変動により反応度変化が生じるため容易性、安定性がB。
16	炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(グリース対応)	A	A	A	3	0	
17	燃料ビン上部又は下部への吸収材(气体又は液体)封入	A	A	C	2	1 (誤作動の可能性)	炉心内に多数設置することとなるので、炉心内の温度分布の影響等により誤作動の可能性は高い。
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	A	A	B	2	0	
19	集合体内SASS機構 (影響緩和)	A	A	B	2	0	
20	中空ペレットによるビン内燃料移動・分散	A	A	A	3	0	
21	人工的リードチャンネルの設置：先行的燃料放出	A	B	B	1	0	
22	軸プランケット短縮化による燃料炉外流出促進	A	A	A	3	0	
23	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	A	B	A	2	0	不適切なパッド間隙は、反応度外乱要因となり、安定性に影響を与える。
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	A	A	A	3	0	
25	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	A	A	A	3	0	

表 3.1.4-9 ランク付け結果総括

No.	方策	メカニズム	確実性	経済性	運転制御性	総括評価	
		加点法：減点法：Cランクの Aランク の数 の数 (マイナス要素)	加点法：減点法：Cランク Aランク の数 の数 (マイナス要素)	加点法：減点法：Cランクの Aランク の数 の数 (マイナス要素)	加点法：減点法：Cランクの Aランク の数 の数 (マイナス要素)	加点法 (Aランク トータル)	減点法 (Cランクト ータル)
1-1	炉心設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	2 0	2 1 (実証性)	1 2 (設計へのインパクト、開発要素)	1 1 (容易性)	6	× (4)
1-2	炉心設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	2 1 (効果の大きさ)	2 0	3 0	3 0	10	△ (1)
1-3	炉心設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	2 0	2 0	1 0	1 1 (容易性)	6	△ (1)
1-4	炉心設計によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	2 0	2 1 (実証性)	1 2 (設計へのインパクト、開発要素)	1 1 (容易性)	6	× (4)
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	2 0	3 0	2 0	3 0	10	○ (0)
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属性燃料炉心	2 0	2 0	1 2 (開発要素、燃料サイクルへのインパクト)	3 0	8	△ (2)
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:炭化物燃料炉心	2 0	2 0	1 2 (開発要素、燃料サイクルへのインパクト)	3 0	8	△ (2)
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の周辺部に設置	2 0	2 0	5 0	1 0	10	○ (0)
4-1-2	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の中央部に設置	3 0	2 0	4 0	1 0	10	○ (0)
4-2-1	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置	2 0	2 0	4 0	1 0	9	○ (0)
4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の中央部に設置	3 0	2 0	3 0	1 0	9	○ (0)
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反応)	2 0	1 0	2 0	2 0	7	○ (0)
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:Naブレナム付き炉心	2 0	2 0	2 0	3 0	9	○ (0)
7-1	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 P/F大の燃料集合体	1 1 (除熱との整合性)	0 1 (点検保守性)	1 0	2 0	4	△ (2)
7-2	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 燃料を使用しない	2 0	0 1 (点検保守性)	3 0	2 0	7	△ (1)
8-1	ブローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	3 0	4 0	3 0	0 0	12	○ (0)
8-2	ブローティング型制御機構:フローティング型SASS	3 0	1 1 (点検保守性)	1 0	0 0	5	△ (1)
9	キュリー式自己作動型制御機構(SASS)	3 0	3 0	5 0	2 0	13	○ (0)
10	中性子束高により液温する物質を利用し中性子吸收材の炉心混入	3 0	1 1 (点検保守性)	1 0	2 0	7	△ (1)
11	燃料ビン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	3 0	1 1 (点検保守性)	1 0	2 1 (誤作動の可能性)	7	△ (2)
12	集合体内SASS機構	3 0	1 1 (点検保守性)	1 0	2 0	7	△ (1)
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	2 0	4 0	5 0	3 0	14	○ (0)
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チャンバー活用 SASS機能無し	2 0	4 0	5 0	3 0	14	○ (0)
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チャンバー活用 SASS機能付	2 0	4 0	5 0	3 0	14	○ (0)
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	2 0	4 0	5 0	3 0	14	○ (0)
14-1	炉心弯曲、フラワリング効果の促進:炉心内の集合体拘束方式の工夫	2 0	1 1 (点検保守性)	3 2 (開発要素、再起動可能性)	2 1 (誤作動の可能性)	8	× (4)
14-2	炉心弯曲、フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	2 0	3 0	4 0	3 0	12	○ (0)
14-3	炉心弯曲、フラワリング効果の促進:ランバーバッドの剛性強化	2 0	2 0	4 0	3 0	11	○ (0)
15	炉心袖方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	2 0	2 0	1 0	1 0	6	○ (0)
16	炉心径方向膨張促進機構:超弾性変形グリッドスペーサ(ゲートレス対応)	2 0	2 1 (点検保守性)	2 1 (開発要素)	3 0	9	△ (2)
17	燃料ビン上部又は下部への吸収材(气体又は液体)封入	2 1 (効果の大きさ)	1 1 (点検保守性)	0 1 (燃料サイクルへのインパクト)	2 1 (誤作動の可能性)	5	× (4)
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への導入	3 0	1 0	1 0	2 0	7	○ (0)
19	集合体内SASS機構(膨胀緩和)	3 0	1 0	1 0	2 0	7	○ (0)
20	中空ペレットによるビン内燃料移動・分散	2 0	1 0	3 0	3 0	9	○ (0)
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	1 0	0 0	1 1 (開発要素)	1 0	3	△ (1)
22	袖ブランケット拘束による燃料外流出促進	1 0	0 0	2 0	3 0	6	○ (0)
23	集合体スペーサバッドの袖方向間隙の確保	1 1 (効果の大きさ)	0 1 (マイナス要因)	2 0	2 0	5	△ (2)
24	制御棒条内管の溶肉化等による早期破損:燃料流出	3 0	2 0	3 0	3 0	11	○ (0)
25	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	1 0	0 0	2 0	3 0	6	○ (0)

↑ ハッチング*はメカニズム満点

↑ ハッチング*は経済性満点

↑ ハッチング*は運転制御性満点

↑ ハッチング*はAランクが半数以上
(8/16以上又は7/14以上)↑ ハッチング*は
Cランクが無いもの

表 3.1.5-1 「メカニズム」に関する分類結果一覧

No.	方策	検知・作動に係わる物理量	作動原理	即応性 事故フェーズ	非可逆性
1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	炉心冷却材密度	炉心偏平化による軸方向中性子漏洩の促進 →冷却材温度係数、ボイド反応度の低減化→時間余裕増大	数sec 起因事象発生時	可逆
1-2	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	炉心冷却材密度	内部ブランケット領域への中性子漏洩の促進 →冷却材温度係数、ボイド反応度の低減化→時間余裕増大	数sec 起因事象発生時	可逆
1-3	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	炉心冷却材密度	径方向ブランケット領域への中性子漏洩の促進 →冷却材温度係数、ボイド反応度の低減化→時間余裕増大	数sec 起因事象発生時	可逆
1-4	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	炉心冷却材密度	炉心領域のアニュラー化による中性子漏洩の促進 →冷却材温度係数、ボイド反応度の低減化→時間余裕増大	数sec 起因事象発生時	可逆
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	冷却材温度、燃料温度	発熱密度の低減によるATWS時の事象進展速度の緩和 →反応度を印加する手段を講じるまでの時間余裕の増大	数sec 起因事象発生時	非可逆
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	燃料温度	中性子スペクトルが酸化物燃料炉より硬いことによるドップラー係数の低減化、高熱伝導度 →ULOF時の正のドップラー反応度の低減化	数sec 起因事象発生時	非可逆
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	燃料温度	中性子スペクトルが酸化物燃料炉より硬いことによるドップラー係数の低減化、高熱伝導度 →ULOF時の正のドップラー反応度の低減化	数sec 起因事象発生時	非可逆
4-1-1 4-1-2	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の周辺部に設置の場合と中央部に設置の場合共通	炉心冷却材流量	冷却材動圧により圧縮されていたガスが流量喪失により炉心部へ延伸 →中性子漏洩の促進	1sec以下 起因事象発生時	非可逆
4-2-1 4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置の場合と中央部に設置の場合で共通	炉心冷却材流量	冷却材動圧により圧縮されていた毒ガスが流量喪失により炉心部へ延伸 →中性子漏洩・中性子吸収の促進	1sec以下 起因事象発生時	非可逆
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	S/A内設置ヒュージブルメタル温度	正のボイド反応度領域へガス封入体をヒュージブルメタル支持で設置、温度高でナトリウムが流入 →中性子吸収促進	数sec 起因事象発生時	非可逆
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:ナトリウムプレナム付き炉心	ナトリウムプレナム部冷却材密度	冷却材温度上昇に起因したナトリウムプレナム部のボイド化による中性子漏洩の促進 →ボイド反応度の低減化	数sec 起因事象発生時	可逆
7-1 7-2	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰P/F大の燃料集合体を設置する場合と燃料を使用しない場合で共通	リードチャンネルナトリウム温度	人為的に先行沸騰するチャンネル(リードチャンネル)を設け、事故時にナトリウムを沸騰させる →中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生時	非可逆
8-1	フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	炉心冷却材流量	冷却材動圧に支持される制御材が流量喪失により支持力喪失 →制御材重力落下	1sec以下 起因事象発生時	非可逆
8-2	フローティング型制御機構:フローティング型SASS	炉心冷却材流量 S/A上部構造材料温度 燃料温度	冷却材動圧に支持される制御材が流量喪失により支持力喪失 →制御材重力落下 温度感知のヒュージブルメタルの溶融によりS/A上部に設置された吸収材の支持解除→吸収材重力落下 重力による溶融燃料の炉心外への排出促進	1sec以下 数sec 燃料溶融後5~6秒以内 遷移過程 起因事象発生時	非可逆 非可逆 非可逆
9	キュリー点式自己作動型制御機構(SASS)	制御棒駆動部温度	キュリー点現象を利用した制御棒ディラッチ機構 →制御棒重力落下	数sec 起因事象発生時	非可逆
10	中性子束高による溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	炉内中性子束	中性子束感知のヒュージブルメタル(中性子照射により発熱する物質)による吸収材支持 →吸収材重力落下	数sec 起因事象発生時	非可逆
11	燃料ピン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	特殊ピン内温度	温度感知のヒュージブルメタルの溶融によりピン上部に設置された吸収材の支持解除→吸収材重力落下、炉中心部のボイドがナトリウムに置換	数sec 起因事象発生時	非可逆
12	集合体内SASS機構	S/A上部構造材料温度	中性子の吸収促進・溶融燃料と吸収材の混合による中性子吸収促進・炉心外への燃料排出促進	数sec 起因事象発生時	非可逆

表 3.1.5-1 「メカニズム」に関する分類結果一覧（続き）

No.	方策	検知・作動に係わる物理量	作動原理	即応性 事故フェーズ	非可逆性	
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	制御棒駆動軸温度	制御棒駆動軸の熱膨張促進 → 制御材の炉心挿入	数sec 起因事象発生時	可逆	
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能無し	制御棒駆動軸温度	制御棒駆動軸の熱膨張促進 → 制御材の炉心挿入	数sec 起因事象発生時	可逆	
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	制御棒駆動軸温度	制御棒駆動軸の熱膨張促進 → 制御材の炉心挿入 → 制御材切り離し炉心内落下	数sec 起因事象発生時	可逆 非可逆	
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	制御棒駆動軸温度	制御棒駆動軸の熱膨張促進 → 制御材の炉心挿入	数sec 起因事象発生時	可逆	
14-1	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:炉心内の集合体拘束方式の工夫	ラッパ管温度	ラッパ管の熱膨張により炉心拘束機構を解放し、炉心フラワリングを促進 → 中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生時	非可逆	
14-2	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	ラッパ管・UCS温度	UCS下面に延伸ガイドを設置し、ラッパ管・UCSの熱膨張による炉心フラワリングを促進 → 中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生時	可逆	
14-3	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	ラッパ管温度	ラッパ管パッドの剛性を強化し、炉心フラワリング効果を促進 → 中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生時	可逆	
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	炉内構造材料温度	集合体を上部・下部支持で交互に炉心構成し、温度上昇時に炉心高さ延伸を増大させる → 燃料の移動による核分裂減少	数sec 起因事象発生時	可逆	
16	炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ターベルス対応)	グリッドスペーサ温度	形状記憶合金グリッドスペーサの温度上昇検知により炉心径を拡大する → 中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生時	可逆	
17	燃料ピン上部又は下部への吸収材(气体又は液体)封入	燃料ピン内ヒュージブルメタル温度	燃料ピン上部または下部に封入された毒物質流体をヒュージブルメタルの高温検知によりピン内放出 → 毒物質による中性子吸收促進	数sec 起因事象発生時	非可逆	
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	S/A上部構造材料温度	中性子の吸収促進・溶融燃料と吸収材の混合による中性子吸収促進	数sec 起因事象発生時	燃料溶融後数秒 遷移過程	非可逆
19	集合体内SASS機構	S/A上部構造材料温度 燃料温度	中性子の吸収促進・溶融燃料と吸収材の混合による中性子吸収促進・重力による溶融燃料の炉心外への排出促進	燃料溶融後数秒以内 遷移過程	非可逆	
20	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	燃料中心部温度	中空ペレットの中心空孔部を燃料溶落経路とし、事故時の燃料分散を図る → 溶融燃料の炉心外への排出促進	数sec 起因過程	非可逆	
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	リードチャンネル温度	人為的に先行溶融するチャンネル(リードチャンネル)を設け、事故時に炉心外へ溶出させる → 燃料移動による核分裂減少	数十sec 起因過程	非可逆	
22	軸プランケット短縮化による燃料炉外流出促進	燃料温度	F C I圧力、F Pガス圧による溶融燃料の炉心外への排出促進	燃料溶融後10秒 遷移過程	非可逆	
23	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	燃料温度	重力による溶融燃料の炉心外への排出促進	燃料溶融後6秒以内 遷移過程	非可逆	
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	燃料温度	重力による溶融燃料の炉心外への排出促進	燃料溶融後5~6秒以内 遷移過程	非可逆	
25	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	燃料温度	F C I圧力、F Pガス圧による溶融燃料の炉心外への排出促進	燃料溶融後数秒以内 遷移過程	非可逆	

表 3.1.5-2 「確実性」(独立性、多様性)に関する分類結果一覧

No.	方策	起動信号	評価	起動の機構	評価	反応度印加の原理	評価
1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	—	—	なし	—	—	—
1-2	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	—	—	なし	—	—	—
1-3	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	—	—	なし	—	—	—
1-4	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	—	—	なし	—	—	—
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	—	—	なし	—	—	—
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	—	—	なし	—	—	—
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	—	—	なし	—	—	—
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の周辺部に設置する場合と中央部に設置する場合で共通	ポンプ動圧の低下	多様	ガス空間の膨張	多様	ガスを通した径方向の中性子漏れ	多様
4-1-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置する場合と中央部に設置する場合で共通	ポンプ動圧の低下	多様	制御材入りガスの膨張	多様	ガスを通した中性子漏れと吸収	多様
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	集合体内温度上昇	多様	ガス空間支持部の膨張又は溶融によるロック外れ 又はナトリウム流入	多様	ガスの移動によるスペクトルソフト化	多様
6	Naプレナム付き炉心	集合体上部Na温度上昇、沸騰	独立	なし	—	軸方向中性子漏れの促進	多様
7-1	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰	特殊集合体内温度上昇、沸騰	多様	低密度Na領域の発生	多様	負のボイド反応度	多様
7-2	P/F大の燃料集合体を設置する場合と燃料を使用しない場合で共通	ポンプ動圧の低下	多様	フロートの落下	多様	集合体内制御材の落下による吸収	独立
8-1	フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	ポンプ動圧の低下	多様	フロートの落下	多様	集合体内制御材の落下による吸収	独立
8-2	フローティング型制御機構:フローティング型SASS	ポンプ動圧の低下 集合体内上部温度 集合体損傷	多様 多様	支持部の熱膨張又は溶融によるロック外れ 内管の溶融貫通による燃料炉外排出	多様	集合体内制御材の落下による吸収 燃料の移動の促進	独立 多様
9	キュリー点式自己作動型制御機構(SASS)	フローガイド後集合体出口温度	独立	キュリー点超過によるデラッチ	多様	制御棒の落下による吸収	独立
10	中性子束高による溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	集合体上部中性子束	独立	核物質の発熱による支持部材溶融	多様	集合体内制御材の落下による吸収	独立
11	燃料ピン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	特殊ピン内上部温度	多様	溶融によるロック外れ	多様	特殊ピン内吸収材の落下による吸収	独立
12	集合体内SASS機構	集合体内上部温度	多様	支持部の熱膨張又は溶融によるロック外れ	多様	集合体上部制御材落下による吸収	独立
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	フローガイド後集合体出口温度	独立	マジックハンド各部の膨張	多様	制御棒の挿入による吸収	独立
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能無し	フローガイド後集合体出口温度	独立	チェンバー内Naの膨張	多様	制御棒の挿入による吸収	独立
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	フローガイド後集合体出口温度	独立	チェンバー内Naの膨張 制御棒駆動軸の伸びによるロック外れ	多様	制御棒の挿入による吸収 制御棒の落下	独立
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	フローガイド後集合体出口温度	独立	バイメタルの変形	多様	制御棒の挿入による吸収	独立
14-1	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:炉心内での集合体拘束方式の工夫	ラッパー管温度	多様	炉心拘束機構のルーズな支持による炉心変形の促進	多様	炉心変形による燃料移動と漏れ	多様
14-2	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	ラッパー管温度	多様	ラッパー管の延びと変形制御	多様	炉心変形による燃料移動と漏れ	多様
14-3	炉心湾曲、フラワリング効果の促進:ラッパー管パッドの剛性強化	ラッパー管温度	多様	ラッパー管の変形	多様	炉心変形による燃料移動と漏れ	多様
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	集合体内温度	多様	燃料の支持棒の延び	多様	健全燃料の移動	多様
16	炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ゲタレス対応)	集合体内温度上昇	多様	形状記憶合金の変形	多様	炉心径方向膨張、燃料移動と漏れ	多様
17	燃料ピン上部又は下部への吸収材(气体又は液体)封入	燃料ペレット温度	独立	制御材入りチューブの破損	多様	制御材のピン内拡散による吸収	多様
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	集合体損傷	-	損傷域の上方への拡大	-	吸収材の落下による吸収	多様
19	集合体内SASS機構(影響緩和)	集合体損傷	-	内管の溶融貫通による燃料炉外排出	-	燃料の移動の促進	多様
20	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	燃料ピン溶融	-	なし	-	ピン内燃料移動	多様
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	集合体損傷	-	なし	-	燃料移動	多様
22	軸プランケット短縮化による燃料炉外流出促進	集合体損傷	-	なし	-	燃料の移動の促進	多様
23	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	集合体損傷	-	なし	-	燃料の移動の促進	多様
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	集合体損傷	-	なし	-	燃料の移動の促進	多様
25	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	集合体損傷	-	なし	-	燃料の移動の促進	多様

表 3.1.5-3 「安全論理との整合性」に関する分類結果一覧

No.	方策	事故シナリオ		深層防護
		事故カテゴリ	基本的安全機能	
1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	ULOF,ULOHS,UTOP	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止
1-2	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	ULOF,ULOHS,UTOP	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止
1-3	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	ULOF,ULOHS,UTOP	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止
1-4	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	ULOF,ULOHS,UTOP	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	LF,ULOF,UTOP	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	ULOF	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	ULOF,UTOP	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の周辺部に設置	ULOF	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
4-1-2	GEM:従来型GEM(FFTF型):炉心の中央部に設置	ULOF	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
4-2-1	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置	ULOF	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の中央部に設置	ULOF	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
5	炉心温度上界によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:ナトリウムプレナム付炉心	ULOF,ULOHS,UTOP	ATWSの初期事象進展速度の緩和	炉心損傷事故発生防止、炉心損傷事故の炉容器内終息
7-1	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 P/F大の燃料集合体	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
7-2	人工的リードチャンネルの設置:先行的Na沸騰 燃料を使用しない	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
8-1	フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	ULOF	炉停止	炉心損傷事故発生防止
8-2	フローティング型制御機構:フローティング型SASS	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止	炉心損傷事故発生防止
9	キュリー点式自己作動型制御機構(SASS)	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止	炉心損傷事故発生防止
10	中性子束高による溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止	炉心損傷事故発生防止
11	燃料ピン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止	炉心損傷事故発生防止
12	集合体内SASS機構	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止	炉心損傷事故発生防止、全炉心損傷への拡大防止
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能無し	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止	炉心損傷事故発生防止
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
14-1	炉心湾曲. フラワリング効果の促進:炉心内の集合体拘束方式の工夫	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
14-2	炉心湾曲. フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
14-3	炉心湾曲. フラワリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
16	炉心径方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ケントレス対応)	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
17	燃料ピン上部又は下部への吸収材(气体又は液体)封入	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止	炉心損傷事故発生防止、全炉心損傷への拡大防止
19	集合体内SASS機構	ULOF,ULOHS,UTOP	炉停止、恒久的未臨界達成	炉心損傷事故発生防止、全炉心損傷への拡大防止
20	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	UTOP	恒久的未臨界達成への貢献	炉心損傷事故の炉容器内終息
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	ULOF,ULOHS,UTOP	恒久的未臨界達成への貢献	全炉心損傷への拡大防止
22	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	ULOF,ULOHS,UTOP	恒久的未臨界達成への貢献	炉心損傷事故の炉容器内終息
23	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	ULOF,ULOHS,UTOP	恒久的未臨界達成への貢献	炉心損傷事故の炉容器内終息
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	ULOF,ULOHS,UTOP	恒久的未臨界達成	全炉心損傷への拡大防止
25	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	ULOF,ULOHS,UTOP	恒久的未臨界達成への貢献	炉心損傷事故発生防止、炉心損傷事故の炉容器内終息

表 3.1.6-1 組み合わせ検討のための分類一覧

No.	方策	有効な事象		固有か受動か	負の反応度効果 の大きさ (崩壊熱相当までに 出力を低下させる 反応度を 基準として) ○: 単独で十分 △: 組み合せ必要	即効的か ○: 組み合せ不要 △: より即効的な他の方 策との組み合せが必要	可逆的か 非可逆的か	反応度印加の原理	炉心損傷防止か 影響緩和か
		LOF	TOP						
2-1	炉心熱設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	○	○	固有	△	○	非可逆的	事象進展速度の緩和	防止
3-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	○	×	固有	△	○	非可逆的	事象進展速度の緩和	防止
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	○	○	固有	△	○	非可逆的	事象進展速度の緩和	防止
4-1-1	GEM:従来型GEM(FFT型):炉心の周辺部に設置	○	×	受動	△	○	非可逆的	中性子漏洩	防止
4-1-2	GEM:従来型GEM(FFT型):炉心の中央部に設置	○	×	受動	○	○	非可逆的	中性子漏洩+吸収	防止
4-2-1	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置	○	×	受動	△	○	非可逆的	中性子漏洩	防止
4-2-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM:炉心の中央部に設置	○	×	受動	○	○	非可逆的	中性子漏洩+吸収	防止
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	○	○	受動	△	○	非可逆的	ボイド反応度	防止
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:Naブレナム付き炉心	○	○	固有	△	○	可逆	冷却材密度係数 +ボイド反応度	防止
8-1	フローティング型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	○	×	受動	○	○	非可逆的	固体吸収材落下	防止
8-2	フローティング型制御機構:フローティング型SASS	○	○	受動	○	○	非可逆的	固体吸収材落下	防止
9	キュリー点式自己作動型制御機構(SASS)	○	○	受動	○	○	非可逆的	固体吸収材落下	防止
10	中性子束高により溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	○	○	受動	○	△	非可逆的	固体吸収材落下	防止
11	燃料ピン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	○	○	受動	○	△	非可逆的	固体吸収材落下	防止
12	集合体内SASS機構	○	○	受動	○	△	非可逆的	固体吸収材落下	防止
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	○	○	受動	△	○	可逆	固体吸収材押し込み	防止
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能無し	○	○	受動	△	○	可逆	固体吸収材押し込み	防止
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	○	○	受動	○	○	非可逆的	固体吸収材押し込み +落下	防止
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	○	○	受動	△	○	可逆	固体吸収材押し込み	防止
14-2	炉心湾曲. フラワリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	○	○	今後のR&Dで固有に近付ける	△	△	可逆	炉心形状変化	防止
14-3	炉心湾曲. フラワリング効果の促進:ラッパ管バッドの剛性強化	○	○	今後のR&Dで固有に近付ける	△	△	可逆	炉心形状変化	防止
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	○	○	固有	△	○	可逆	炉心形状変化	防止
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	○	○	受動	○	-	非可逆的	固体吸収材落下	緩和
19	集合体内SASS機構(影響緩和)	○	○	固有に近い	○	-	非可逆的	溶融燃料排出	緩和
20	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	×	○	受動	△	-	非可逆的	溶融燃料排出	緩和
22	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	○	○	受動	△	-	非可逆的	溶融燃料排出	緩和
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	○	○	固有に近い	○	-	非可逆的	溶融燃料排出	緩和
25	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	○	○	受動	△	-	非可逆的	溶融燃料排出	緩和

表 3.1.7-1 実用化先導研究テーマに関する研究開発実施方針一覧

No.	方策	第1ステップ Feasibility Study		第2ステップ 要素試験		第3ステップ 機能確認試験		第4ステップ 総合実証試験		開発期間 (年)
		実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	
2-1	炉心然設計に係わる安全性向上:低線出力炉心	不要	特性予備評価	不要	不要	燃料破損挙動・弾性進展把握 (SERAPH)	試験解析	不要	実機解析	10
3-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:空化物燃料炉心	不要	特性予備評価は既実施	高温での材料特性データ取得 (炉外)	不要	照射(常陽),炉物理(FCA等), FCI(炉外),破損限界・破損挙動・弾性進展把握 (SERAPH)	試験解析	過渡時の炉心温度変化挙動 (常陽・全炉心空化物)	試験解析 実機解析	30
4-1	GEM:従来型GEM(FFT型)	情報調査(文献)	特性予備評価	機構開発・ガス挙動試験 (炉外;水、高溫気、Na)	解析手法整備	機能確認 (炉外;水、Na)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析	10
4-2	GEM:中性子吸収ガス封入型GEM	情報調査(文献)	特性予備評価	機構開発・ガス挙動試験(炉外;水、高溫気、Na),毒物ガス選定(FCA等)	解析手法整備	機能確認 (炉外;水、Na)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析	10~15
5	炉心温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	候補溶融物質選定 (文献)	特性予備評価	材料特性(炉外;高溫気、Na/SERAPH)、装置形状最適化(炉外;水)	解析手法整備	材料照射(常陽), 機能確認(Na)、 ボイド反応度係数(臨界集合体)	試験解析/設計最適化	システム応答(Na)、 実機での機能実証(常陽)、	試験解析 実機解析	10~20
6	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:ナトリウムプレナム付き炉心	形状選定(文献)	特性予備評価	プレナム内熱流動(炉外;Na)	試験解析	プレナム内混合特性(炉外;Na) 解析手法検証(臨界集合体)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析	15
8	フローティング型制御機構	情報調査(文献)	不要	フロート単体流動特性(炉外;水)	試験解析	機能確認(炉外;Na)、 材料照射(常陽)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析	10
9	キュリーポイント式自己作動型制御機構(SASS)	既実施	既実施	既実施	既実施	材料照射(常陽), 機能確認(炉外;Na)	試験解析/設計最適化	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析 (非同時性)	5~10
10	中性子束高により溶融する物質を利用し中性子吸収材の炉心混入	候補溶融物質・吸収材選定(文献)	特性予備評価	溶融物質・吸収材材料特性(炉外)	解析手法整備	材料照射(常陽), 溶融物質の溶融挙動の確認 (SERAPH)	試験解析/設計最適化	実機での機能実証(常陽)	試験解析 実機解析 (非同時性)	10~20
11	燃料ビン型SASS機構(ボイドからナトリウムへの置換機構を含む)	候補溶融物質・吸収材選定(文献)	特性予備評価 (効果見積り、作動条件設定)	溶融物質・吸収材材料特性(炉外)、 照射(常陽)、流動特性(炉外;水)	熱流動解析 (感温部温度変化)	材料照射(常陽), 機能確認(炉外;Na)、 反応度効果確認(臨界集合体)	試験解析/設計最適化	機能実証(常陽)、動作の 確認、燃料流出挙動確認 (SERAPH)	試験解析/ 実機解析 (非同時性)	10~20
12	集合体内SASS機構	候補溶融物質・吸収材選定(文献)	特性予備評価 (必要荷荷体数)	落下機構(炉外;空気、水)、感温部特性 (炉外;ガス)、吸収体・感温部試作	熱流動解析 (感温部温度変化)	材料照射(常陽), 機能確認(炉外;水、Na)	試験解析/設計最適化	総合機能確認(PLANDTL)、 実機での機能実証(常陽)、 動作の確認、燃料流出挙動 確認(SERAPH)	試験解析/ 実機解析 (非同時性)	10
13-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	既実施	既実施	静的作動特性(炉外;Na)	熱流動解析 (感温部温度変化)	過渡応答特性(炉外;Na)、 材料照射(常陽)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析	10
13-2-1	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能なし	既実施	既実施	静的作動特性(炉外;Na)	熱流動解析 (感温部温度変化)	過渡応答特性(炉外;Na)、 材料照射(常陽)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析	10
13-2-2	制御棒駆動軸の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	既実施	既実施	静的作動特性(炉外;Na)	熱流動解析 (感温部温度変化)	過渡応答特性(炉外;Na)、 材料照射(常陽)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析	10
13-3	制御棒駆動軸の膨張促進機構:バイメタル方式	既実施	既実施	静的作動特性(炉外;Na)	熱流動解析 (感温部温度変化)	過渡応答特性(炉外;Na)、 材料照射(常陽)	試験解析	効果実証(常陽)	試験解析 実機解析	10
14	炉心湾曲・フラワリング効果の促進	有効性・成立性 (文献)	特性予備評価 解析コード体系 の検討	作動特性、構造・機構開発(炉外) の検討	解析手法整備 単体構造変形 解析	変形挙動確認試験(炉外;大気)、 材料照射(常陽)	試験解析	熱流動・構造結合効果確認 (炉外;Na)、 実機での機能実証(常陽)	試験解析/ 実機解析	10~20
15	炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	候補材料選定(文献)	特性予備評価 (効果見積り)	材料特性(炉外)、メカニズム開発	熱流動解析	静的・過渡的作動特性 (炉外;Na)、材料照射(常陽)	試験解析	システム応答(Na)、 効果実証(常陽)	試験解析/ 実機解析	10~20
18	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	候補材料選定(文献)	特性予備評価 (効果見積り、 通常運転への影響評価)	落下機構(炉外;空気)、 混入挙動(炉外;模擬燃料物質)	試験解析	落下機構・混入挙動確認 (SERAPH)	試験解析	実機での実証:通常運転への 影響(常陽)	試験解析	10~20
19	集合体内SASS機構(影響緩和)	排出経路(文献)	特性予備評価 (効果見積り、 必要荷荷体数)	溶融貫通・排出挙動 (炉外;模擬燃料物質)	試験解析	排出挙動確認(SERAPH)	試験解析	実機での機能実証:通常運 転への影響(常陽)	試験解析	10~20
20	中空ペレットによるビン内燃料移動・分散	燃料移動挙動、反応度推移 (文献)	既実施	移動挙動把握(炉外;模擬燃料物質)	解析手法整備 単体試験解析	燃料移動挙動把握(SERAPH)	試験解析	不要	実機解析	10~20
21	人工的リードチャンネルの設置:先行的燃料放出	不要	不要	不要	設定方法、 有効性評価	燃料破損限界及び燃料流出挙動 把握(SERAPH)	試験解析	実機での機能実証;マイル 下な過渡状態での温度変化 確認(常陽)(最適設計)	試験解析	20
22	軸ブランケット短縮による燃料炉外流出促進	流出・固化挙動 (文献)	不要	流出・固化挙動把握(炉外)	試験解析	流出・固化挙動確認(SERAPH)	試験解析	不要	実機解析	10~20
24	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損・燃料流出	候補材料選定(文献)	構造特性評価	材料特性(炉外)	不要	機能確認(炉外;Na)、管壁破 損、融体流出挙動把握(炉外)、 材料照射(常陽)	試験解析	実機での機能実証;通常運 転への影響(常陽)、流出 挙動実証(SERAPH)	試験解析	10~20
25	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	流出・固化挙動 (文献)	不要	流出・固化挙動把握(炉外)	試験解析	流出・固化挙動確認(SERAPH)	試験解析	不要	実機解析	10~20

3. 2 基盤安全研究テーマに関する検討

従来の検討では、基盤安全研究テーマとして以下の3領域5テーマを重点課題として挙出し、検討を行ってきた。

燃料安全研究（事故防止と抑制）

- －燃料の健全性確保と破損限界
- －局所異常の拡大の抑制

炉心安全研究

- －起因過程研究
- －炉心崩壊過程研究

ソースターム研究

これらの各テーマについては既に以下の内容について検討が行われた。

1. 研究の位置づけと目標、
2. 研究課題の具体化と炉内試験の必要性、
3. SERAPH試験の内容と中期計画との関係、
4. SERAPH炉内試験と必要条件の提案、
5. SERAPH試験の効果と成果の反映

したがって、ここではその詳細を繰り返すことはせず、今期に新たに検討を加えた点、あるいは検討を深めた点を重点的に記述する。なお、最終的に炉内試験のテーマとして絞られた項目については、次節（3.3節）に示す図表の中に、1.試験名称、2.試験の目的、3.現状の知見と問題点、4.試験によって確認すべき事項とその方法、5.成果の反映方法、6.期待される効果、7.安全設計・安全評価基準類との関連性、8.試験体図、9.試験体仕様、10.試験パラメータ、11.試験方法、が簡潔にまとめられている。これらはこれまでの検討のエッセンスを包絡しているので、参照されたい。

3.2.1 燃料ピンの健全性確保

過渡の基本的条件は除熱低下と過出力に分けられる。一般に、除熱低下事象においては、被覆管の熱膨張により燃料と被覆管との接触圧は低下する。このため、温度上昇に伴う被覆管の強度低下とピン内ガス圧負荷によって破損が支配され、炉外での材料試験などによる研究が有効である。一方、過出力事象においては、被覆管の熱膨張よりも燃料の熱膨張やスウェーリングの方が大きく、燃料と被覆管の接触圧の上昇が破損限界に重要となる。このような挙動は照射済燃料の発熱条件下で調べる必要があり、炉内試験による研究が主体となる。

過出力事象としては、緩慢なものあるいは急速なものが考えられるが、急速な過渡条件では中性子計測によるスクラム条件に短時間に到達し、この間の燃料の積分発熱量が抑制されるため、燃料破損限界に対する裕度の観点からはむしろ緩慢な過出力条件の方が重要となる。すなわち、数%定格出力／秒以内の緩慢な過出力条件において、発熱量と冷却材による除熱量がバランスし、燃料温度がほぼ線出力に比例して増加するような過渡条件をスローTOPと呼ぶが、このスローTOPが燃料健全性確保の観点からの中心課題といえる。

3.2.1.1 スローTOPにおける破損メカニズムに関する現状の知見

現在までに得られているスローTOP炉内試験データの概要を表3.2.1-1に示す。これらのデータにおける、破損時の燃料断面溶融割合（軸方向ピーク位置のもの）あるいは非破損の場合のその到達最高値と燃焼度の関係を示したものが図3.2.1-1である。燃料断面溶融割合は、燃料溶融の大きさを示すと同時に、燃料未溶融領域の高温化の程度をも代表しており、過出力の厳しさの程度を表す指標として有用である。破損時の断面溶融割合は、高スミア密度燃料では低く、また同じスミア密度条件では燃焼度の増加とともに低下する傾向が見られる。

図3.2.1-2は、スローTOPにおける燃料ピン破損に重要な影響を与える被覆管への負荷の概念を示したものである。過出力レベルの増大とともに、燃料熱膨張とFPガスによる燃料スウェーリングが被覆管に対する機械的負荷を増大させる。ただし、燃料溶融の進展により、燃料内部の固相部分が消失するため、外部の固相燃料部分の熱膨張あるいはスウェーリングが吸収され、被覆管への負荷は増加が鈍るかあるいは減少する。また、燃料溶融に伴う溶融燃料の体積膨張及び溶融燃料中に含まれていたFPガスの圧力解放は、溶融領域の圧力上昇を生じさせ、もう一つの被覆管に対する負荷要因となる。溶融領域圧力負荷の形成は、燃料スミア密度の大小に大きく左右され、高スミア密度の燃料では少量の燃料溶融で大きな圧力負荷を形成する。

FPガスによる燃料スウェーリングの発生については、スローTOP条件を含めた広範な過渡時間スケールの炉内・炉外試験データの検討により、高FPガス保持領域の温度と過渡時間スケールによって、概略的に図3.2.1-3のように表されることが判っている⁽¹⁹⁾。このようなスウェーリングは、図3.2.1-4のように燃料粒界の微小バブルが成長・

合体してトンネルを形成するために燃料組織が全体的に膨張したことによると考えられ、その結果、粒界に蓄積された高圧のFPガスが燃料粒界に拘束できなくなつて放出されるものと考えられる。微小バブルの成長は燃料粒界上の空孔拡散に支配されることから、燃料スウェーリングは前述の温度と時間スケールへの依存性を持つものと理解できる。

以上のように高FPガス保持領域が高温になると粒界のガス圧は解放されるが、解放されたガスは、燃料内ポロシティー等のガス空間の大小に応じてガス・プレナムなどの自由空間に放出され、被覆管への負荷は低減される。また、スウェーリングによる体積増加の一部は、燃料の形状やポロシティー分布などに依存して、中心空孔側への燃料変形によって吸収し得る。したがって、スウェーリングによる被覆管への負荷もまた、燃料スミア密度等の条件に依存する。

定常照射線出力の低い燃料では燃料の径方向の広い領域が高圧のFPガス保持領域となっており、より低い線出力状態から被覆管への負荷が発生するとともに、スウェーリング領域が広いことから体積増加のポテンシャルも高い。例えば、EBR-II TOPIシリーズ試験⁽²⁰⁾においては、性能の劣る被覆材や薄肉被覆を使用し、燃料未溶融での破損データを得ているが、これらの未溶融破損データからは、定常線出力条件が低いことが破損線出力レベルを低下させるという傾向を見ることができる。

既存スローTOP試験データの範囲では、一部を除いて耐スウェーリング性能の劣る被覆材が用いられており、5a/o以上以上の高燃焼度条件では被覆管のスウェーリングにより燃料との間のギャップが開き、過出力時のPCM Iが低減しているものが殆どである。このため、これらの破損データの大部分は燃料溶融領域の圧力上昇に伴う破損となっており、溶融領域の軸方向範囲の中で被覆管温度の最も高くなる溶融域上端付近で破損を生じている。破損時の溶融領域の軸方範囲は、燃料スミア密度や燃焼に伴うFPガスの蓄積量に依存し、低スミア密度燃料あるいは低FPガス保持燃料ではフィッサイル上端であり、高スミア密度かつ高FPガス保持燃料では軸方向中心に近付く傾向を持つ。

一方、低スウェーリング被覆材と高燃焼度燃料の組み合せ条件下では破損データはCABRI-2 E12試験及びこれと同等のCABRI-FAST BCF1試験のみであるが、スウェーリングによるPCMIが破損に重要な寄与を与えていている。これらの試験の燃料は中実の高スミア密度燃料のため、燃料の溶融領域の圧力上昇をも伴っており、25%程度の断面溶融割合での破損となっている。

軸方向の破損位置は、破損後の放出燃料の冷却性（異常拡大防止）の観点から、あるいは燃料移動に伴う反応度変化（炉心安全）の観点から重要な問題であり、上部での破損になるほど両観点からは有利となる。このように、PCM I負荷の寄与による破損における破損位置が特に重要であるが、前述のCABRI試験では、破損位置は被覆管温度に依存し、フィッサイル長に対する相対高さが0.7程度の上方破損であった。

3.2.1.2 燃料健全性確保の観点からの今後の課題

上記のような被覆管に対する機械的負荷の基本メカニズムが理解され、そのモデル化によって、燃料スウェーリングと溶融領域の圧力を適切に取り入れた機構論的燃料破損評

価が可能になりつつある。しかし、一方では、燃料設計の高度化の方向である高スミア密度、高燃焼度、低スウェーリング被覆の条件ではPCM Iが顕在化することもまた明らかになってきており、中空燃料などの設計対応によるPCM I負荷の低減と燃料性能の向上との間の最適化が重要な課題となっている。

また、実機バンドルの過出力条件においては、ラッピングワイヤを介して隣接ピン同志やピンと集合体壁とが点接触した状況にあり、冷却材の部分的な温度上昇や燃料ピンにおける応力集中といった要因が破損限界を低下させ得る。現在までのグリッドスペーサーによる単一ピンの試験結果、あるいはワイヤーラップスペーサーによる7本ピン束の試験結果の範囲では、このようなローカルな効果が破損限界に顕著な影響を与えてはいないと考えられるが、今後の設計の高度化を考慮すると、バンドル形状条件が破損限界に大きな影響を与えないことを実験的に確認しておく必要がある。

CABRIやEBR-II炉における今後数年の計画の中では、低スウェーリング被覆管材質、燃料スミア密度（中空／中実）などをパラメーターとした高燃焼度条件でのスローTOP試験が数種計画されており、設計高度化のインパクトを探る重要なデータが得られるものと期待される。しかしながら、CABRI炉における試験では、中性子束デプレッションの効果により、所定の燃料溶融割合に到達させる場合の試験条件は、実機条件よりも線出力が高くなるとともに、燃料外周のFPガス保持領域の温度も高めになるため、過大なスウェーリングとなる可能性がある。一方、EBR-IIでは、高速中性子炉のために中性子束デプレッションが無いという特徴があるものの、試験燃料ピンが短尺条件のために、中実燃料でも照射による中心空孔がフィッサイル上下端に達する（特に低スミア密度燃料の場合）ことや、軸方向出力分布が比較的平坦なために被覆管温度の最も高いフィッサイル頂部の燃料発熱が実機条件に比べ相対的に大きいなどにより、PCMによる機械的負荷と被覆管温度の軸方向分布が実機条件から外れてしまう。

これらのCABRIやEBR-IIの試験データは、各々の長所を組み合わせることにより有効に利用することが重要であるが、燃料高性能化の所期の目的の達成のためには、中性子束デプレッションが少なく、実機相当の長尺条件で、かつ19本ピン束程度の照射燃料のスローTOP試験の実現が可能なSERAPHにより、燃料設計の進展に応じて破損限界の解明を進めてゆくことが必要である。

3.2.1.3 高破損限界燃料のCDA影響緩和の観点からの特徴

高破損限界燃料の開発は、異常の発生と拡大を防止する観点から重要であることはもちろん、ATWSなどにおけるパワーバーストを回避する上でも有効である。ATWSの炉心崩壊過程においてパワーバーストに至る可能性のある代表的な事象として、炉心周辺の未沸騰冷却材領域での燃料ピン破損による急激な冷却材ボイド化の進展と破損口へのピン内溶融燃料移動による正の反応度挿入が挙げられる。このような事象をLOF-driven-TOPと呼ぶが、その発生は冷却材沸騰が燃料ピン破損に先行して起る場合には避けられる。図3.2.1-5はこの状況を模式的に示したものである。同図の横軸は炉心全体の中で冷却材の沸騰している集合体の割合を、また縦軸は全炉心燃料の平均温度を用

いている。炉心各部の集合体の冷却材沸騰の起り易さは出力・流量比によって、また冷却材沸騰前の燃料破損の起り易さは比出力によって決まる。したがって、各集合体はその出力・流量比に依存して全炉心のボイド化割合があるレベルに達した場合に沸騰を生ずるが、それまでに単相冷却材中で破損を生じなければ、その集合体は、冷却材の沸騰、被覆管の溶融、燃料崩壊分散を通じて事象進展を緩慢にする方向に寄与する。このような集合体を同図中では○印で示しているが、出力・流量比が低く比出力が比較的高い集合体では●印で示すように未沸騰集合体での破損が生じ、その規模によってはLOF-driven-TOPに至る。炉心のボイド化と燃料平均温度の履歴はボイド反応度や初期の崩壊燃料の移動挙動等に依存し、低ボイド反応度炉心では、冷却材沸騰が炉心周辺の出力流量比の低い領域まで広がる過程での出力上昇が限定され、未沸騰領域での破損は生じ難い。また、破損限界の高い燃料が実現されれば、未沸騰領域での破損を生じさせるための炉心平均燃料温度は高くなり、出力上昇のより進んだ段階でのみ破損が可能となるため、この間に冷却材沸騰を生じてLOF-driven-TOPが回避できる。

パワーバーストが問題となるような急激な過渡領域においては燃料溶融領域の圧力上昇が破損限界に支配的であり、低スミア密度燃料の使用により破損限界は高くなる。さらに、中空軸ブランケットの採用あるいはブランケットとフィッサイルの間にある程度の空間を設けることにより空間部分への溶融燃料の吹き出しを促し、燃料ピンの破損限界を飛躍的に向上させることも考えられる。このような燃料の吹き出しの可能性については、CABRI-FAST試験の中で基本データが得られる見込みであるが、このような積極的な吹き出しの活用等を図った高破損限界燃料はCDAの影響緩和にも効果的なものであり、その研究開発は今後の課題の一つである。

表3.2.1-1 既存スローTOP炉内試験データの概要

試験名称	ピン数 (破損数)	燃焼度 (a/o)	フィッ サイル 長さ (cm)	破損条件			出力上昇 速度	
				燃料断面 溶融割合 (%)	線出力 (W/cm)	破損位置 相対高さ (X/L)		
PFR/TREAT	CO4	1 (1)	4	91.4	不詳	1230	~1.0	5 cent/s
	CO5	1 (1)	9	91.4	不詳	1310	0.96	5 cent/s
	LO3	7 (7)	4	91.4	不詳	1280	0.84	5 cent/s
SLSF	W2	7 (7)	0.6	91.4	不詳	不詳	0.5*	5 cent/s
TREAT	TS1	1 (1)	0.2	91.4	77	1270	0.87	5 cent/s
	TS2	2 (2)	5.8	91.4	77	1200	0.72	5 cent/s
	RFT-L2	3 (0)	0.2	91.4	-	-	-	5 cent/s
	RFT-L3	3 (0)	2.6/5.2	91.4	-	-	-	5 cent/s
	J1	7 (7)	7/0	34.3	45	1050	~1.0	10 cent/s
CABRI	E12	1 (1)	12	85	25	810	0.7	1%Po/s
EBR-II	TOPI-1C	19 (2#)	0~11	34.3	0	不詳	~0.7	0.1%Po/s
	TOPI-1D	19 (1#)	2~10	34.3	0	不詳	0.8~0.9	0.1%Po/s

Po : 初期線出力

* : 中性子束減衰の大きなSLSFでの7本ピン束条件のため、周辺ピンの湾曲による特異な破損モード

: 燃料破損データ取得のため、被覆管材質や肉圧などを意図的に厳しく設定

注) バンドル条件はTREATとSLSFの7本束が最大、EBR-IIとTREAT/RFTでは各ピン毎のシュラウド管使用

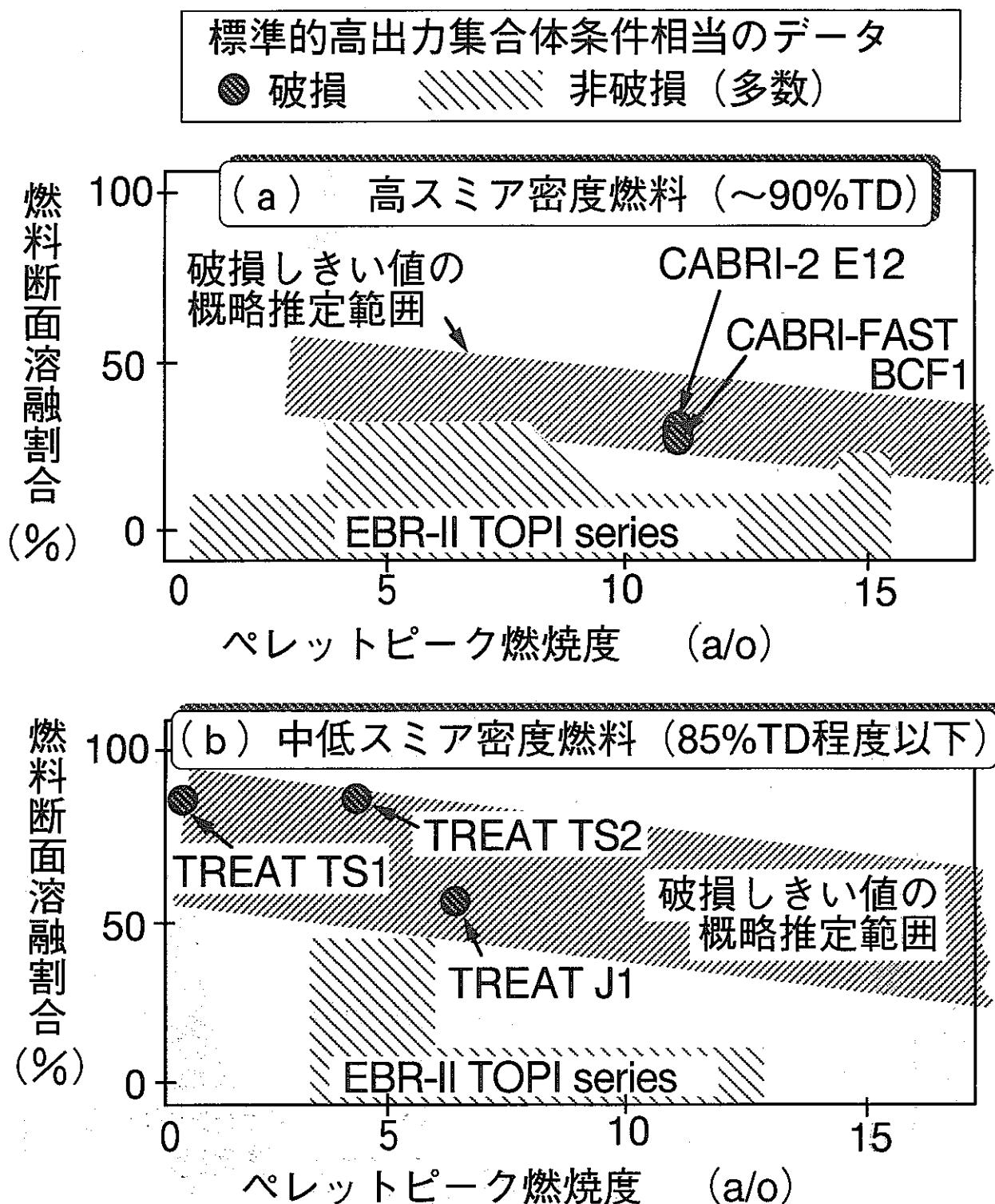


図3.2.1-1 スローキーTOP炉内試験の結果と破損しきい値の概略推定

注) 燃料断面溶融割合は概算値

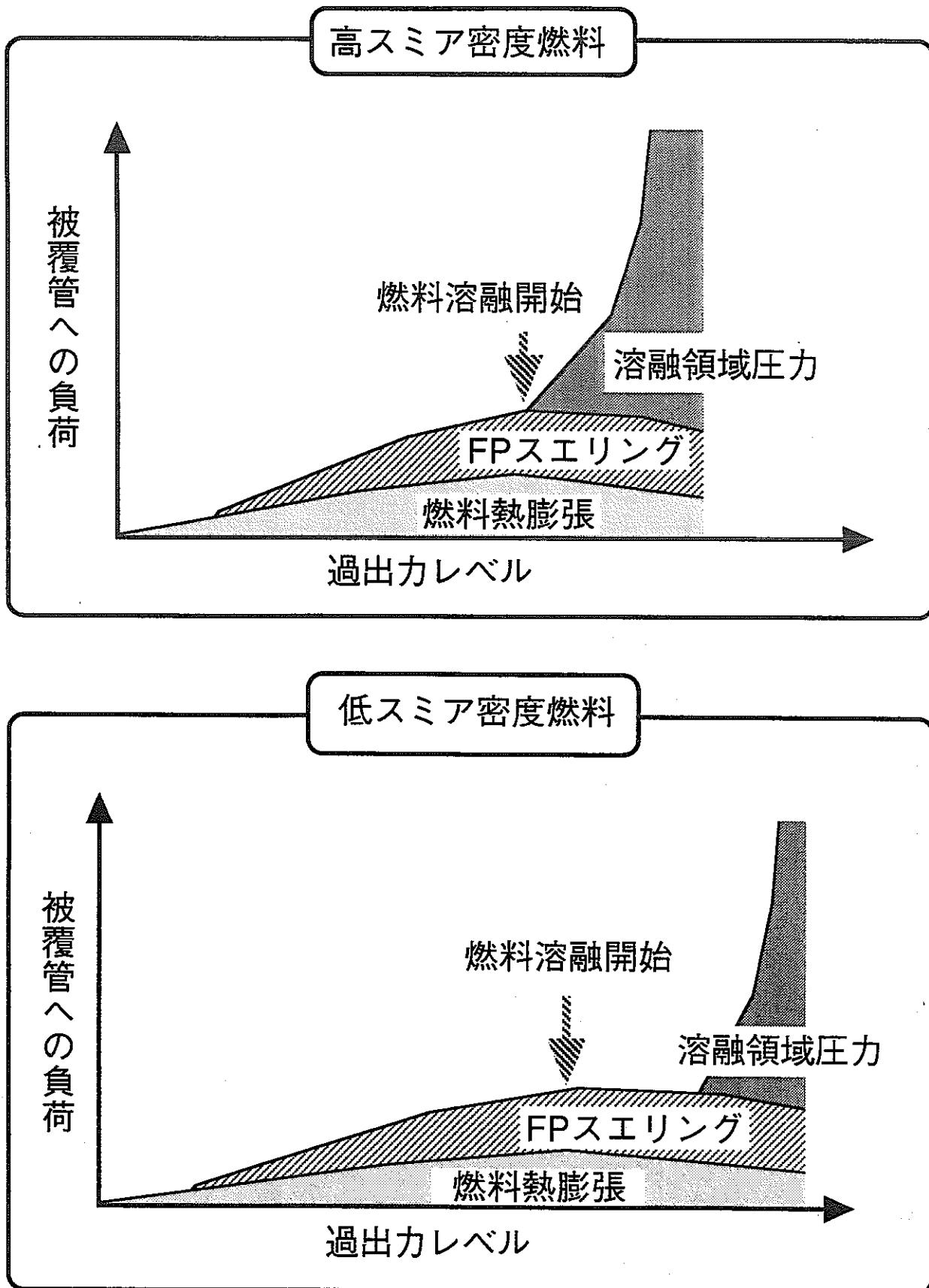


図3.2.1-2 過出力の進展と被覆管への負荷の関係（概念）

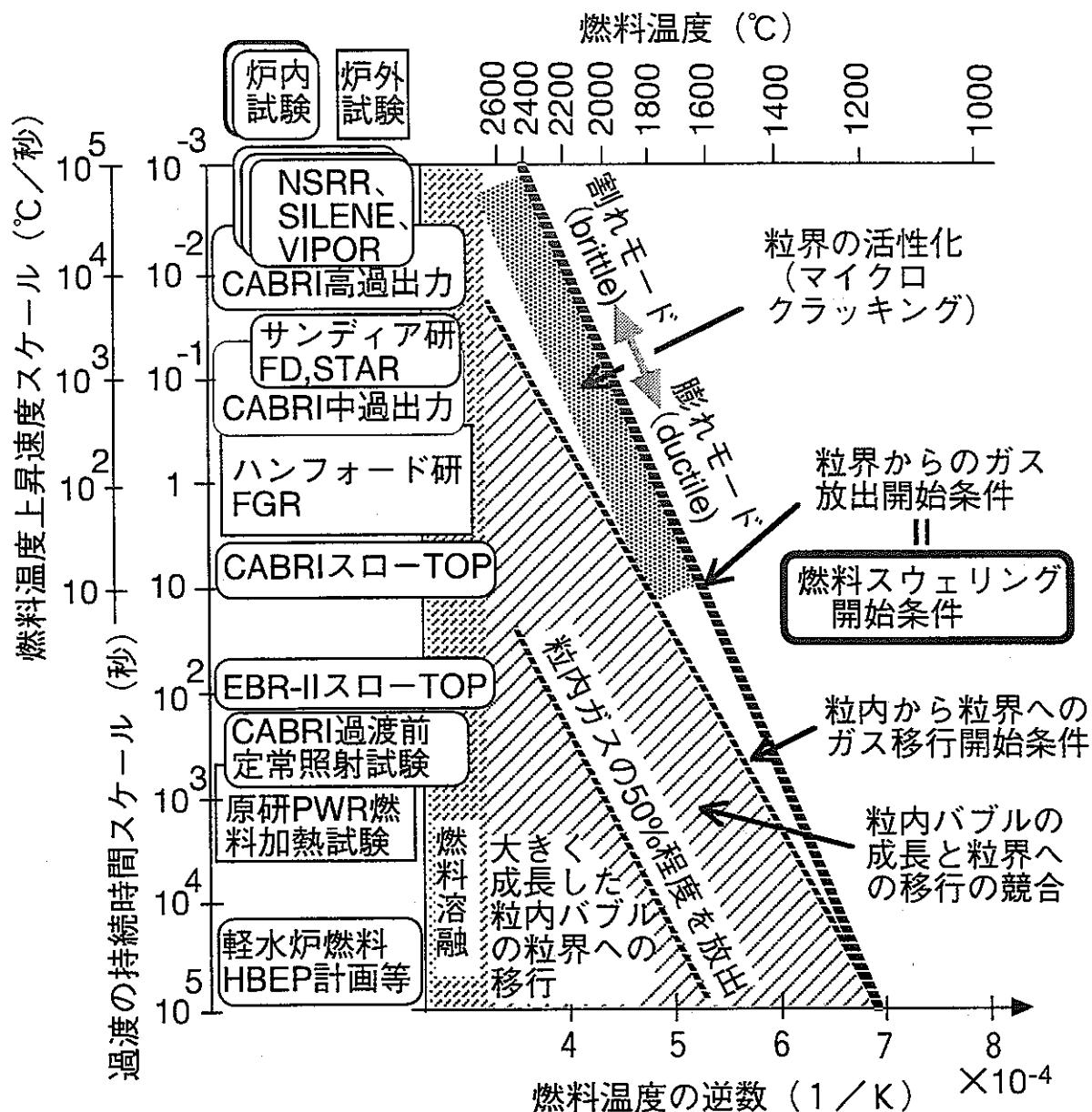


図3.2.1-3 過渡時間スケールに依存した燃料スウェーリング開始条件

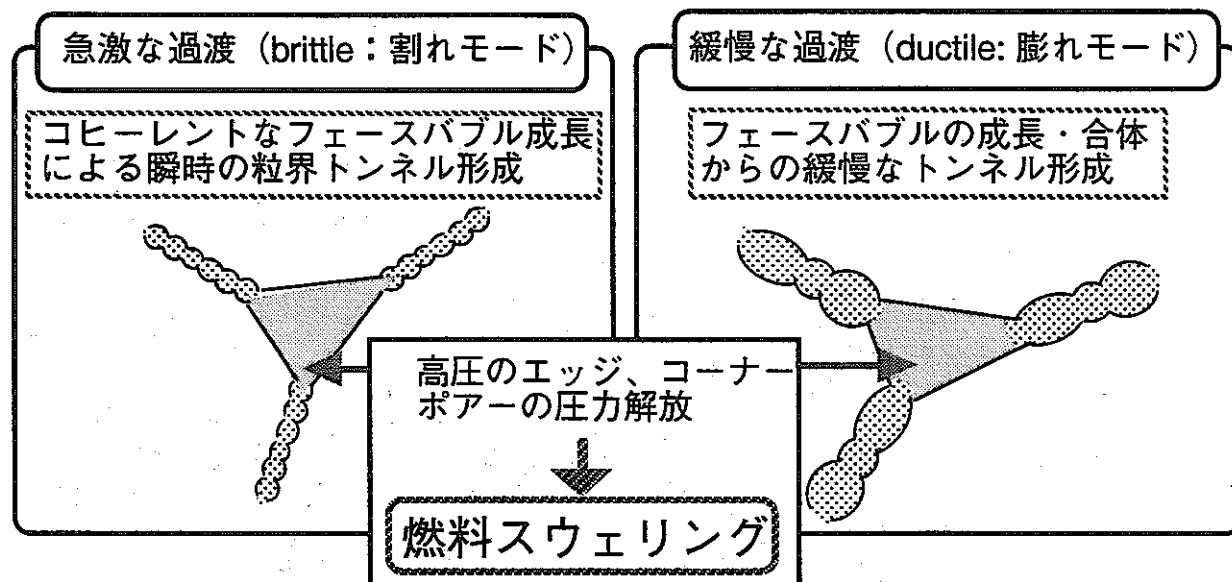
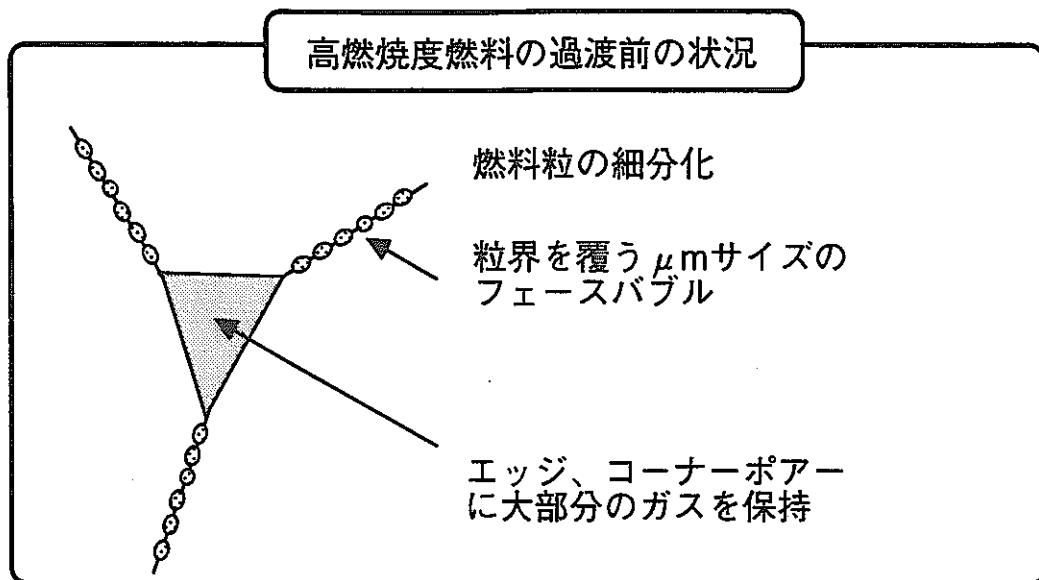


図3.2.1-4 過渡の条件に依存した燃料粒界のトンネル形成とスウェリング

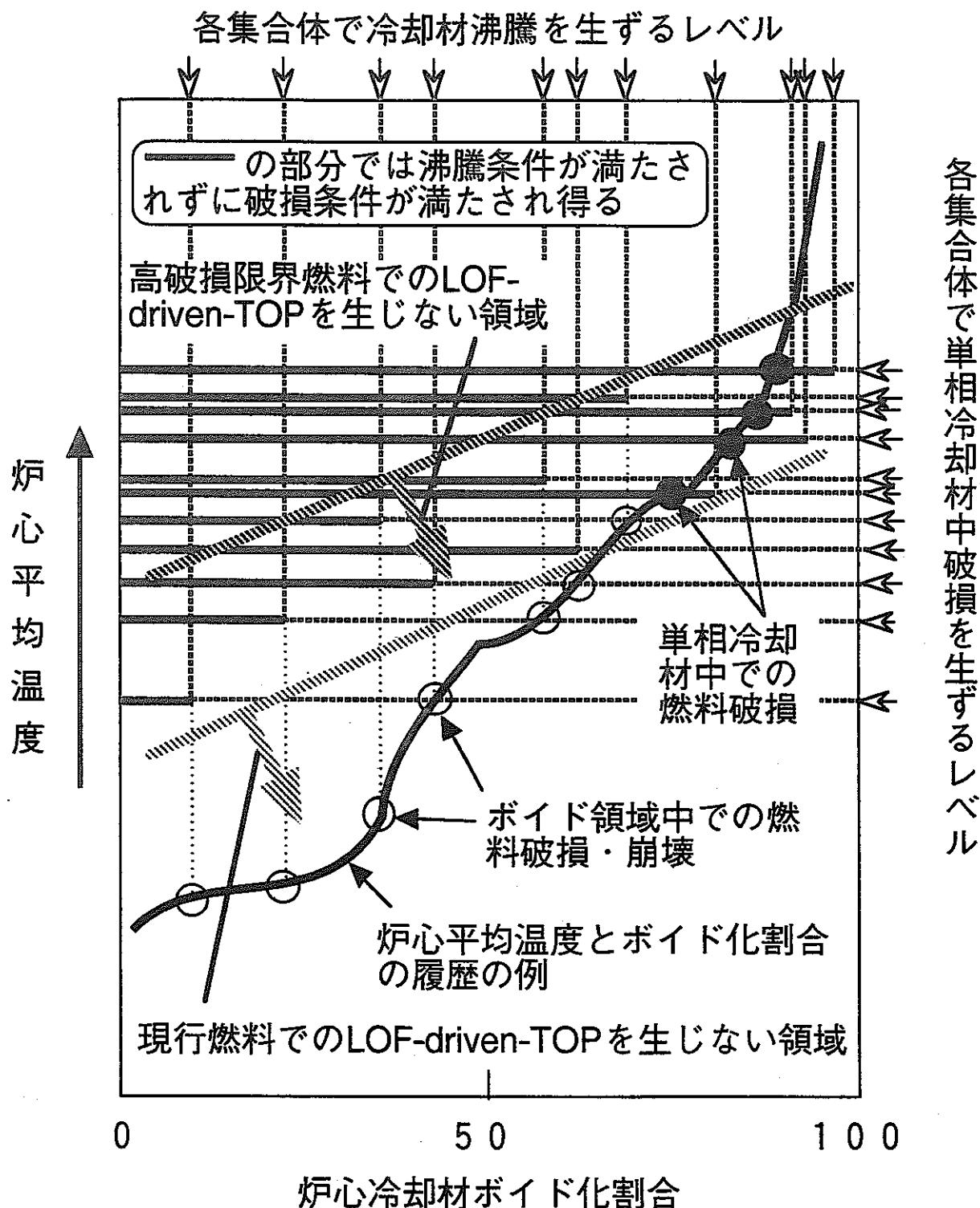


図3.2.1-5 実機ULOFにおける炉心ボイド化と温度上昇の概念

3.2.2 異常拡大防止

異常拡大防止の観点からは、炉心の局所的な除熱の喪失、これによる燃料ピンの破損、破損伝播、燃料損傷領域の拡大などを確実に検知して速やかに炉停止することが必要である。燃料ピン破損を伴わない局所的除熱の喪失（例えば非発熱閉塞事象）においては、集合体出口の冷却材温度上昇が異常の検知のための主な情報となる。燃料ピンの破損を生じない限り異常の拡大はないから、異常拡大の観点からは、続いて燃料破損あるいはそれによる発熱閉塞を生ずるような事象だけが検討対象となる。このような対象としては、定格出力状態からの発熱閉塞形成・拡大事象と、過渡条件下での燃料ピン破損からの破損伝播・損傷拡大事象が考えられる。図3.2.2-1はこれらの想定し得る事象進展と、これらの異常を検知して炉停止する手段、及び炉内試験により解明すべき課題となる事象を示したものである。これまでの炉内試験による知見からは、発熱閉塞規模の増加とともに損傷拡大の速度が速まることが示されているが、DBE/BDBEを問わず、広範な異常発生の原因に対して異常拡大を確実に防止するという観点からは、損傷拡大の各過程の損傷拡大速度を解明し、DNなどによる検知と炉停止が十分早期に行われるとの確認、及びそのための設計条件の明確化が重要である。

3.2.2.1 定常運転条件からの異常拡大の防止

定常運転状態からの発熱閉塞形成に至り得る要因としては、燃料ピンの自然破損からの破損伝播、及び何等かの非発熱物質による冷却材流の阻害からの燃料ピン破損が考えられる。

定常運転状態において、ピンホール状の被覆管破損が発生した場合、ガスサンプリングによって破損の発生を知ることができるが、冷却材中へのDN先行核の有意な放出ではなく、この状態の安定性は高いため、通常は数時間程度の運転を継続することにより破損ピンの属する集合体の同定などを行う。このような継続運転中にDN先行核の放出を伴う開口破損に至った場合、あるいは最初から開口破損を生じた場合には、DN信号によって異常の状況を把握することができる。DNによる自動スクラムのレベルは、燃料ピン間破損伝播や有意な発熱閉塞の形成を防止できるように設定される必要があり、破損口拡大や破損伝播とDN先行核の放出輸送の関係の解明に基づき余裕をもったものとする必要がある。

また、非発熱閉塞の要因としては、過去の事例に学び、それらを防止する対策が取られているが、FBRの運転経験が必ずしも十分でないことから、広範な要因を想定し、それらに対して適切な異常拡大防止機能を備えた設計とすることが必要との立場に立って検討する。ただし、非発熱閉塞からの異常拡大を考える場合、閉塞規模と発生頻度の関係から規模の大きな閉塞の発生する可能性は極めて低いと言えるので、一部の燃料ピン破損からの破損伝播の可能性と一緒に考慮することが有効である。したがって、異常拡大を評価する上での境界条件としては、初期発熱閉塞規模を用いることとする。

図3.2.2-2に定常出力相当条件からの発熱閉塞拡大挙動に係わるこれまでの炉内試験データの概要を示す。E B R - IIにおけるR B C B 運転⁽²¹⁾からは、燃料ピン自然破損時の破損伝播は極めて起り難いことが示されている。M O L - 7 B 試験⁽²²⁾では、自然破損を発生させるために冷却材温度を実機条件よりも高めに設定した結果、複数の燃料ピンが破損し、破損伝播や極端な燃料スウェーリングにより19本ピン束内の流量が低下する状況に至り、試験を停止した。また、S L S F P 4 試験⁽²³⁾においても、出力レベルを増加させてゆく過程において損傷が拡大し、試験部流量の低下に至って試験を停止している。M O L - 7 C シリーズ試験⁽²⁴⁾では、燃焼度の異なる37本ピン束条件の試験体を複数体用いて、燃焼度の増加とともに損傷拡大速度が大きくなる傾向を確認したが、10a/oの高燃焼度燃料試験では、試験体壁が損傷したため、安全のために試験を停止した(M O L - 7 C 試験の試験体壁は、実機の集合体壁条件と異なり肉圧が薄く、外側はガスギャップで、冷却材流はない。)。S C A R A B E E - N シリーズ試験⁽²⁵⁾は、当該集合体の除熱が完全に失われた状態を境界条件とした場合には、集合体壁の破損が熱的な負荷によって比較的早期に起ることを明らかにした。また、隣接集合体のピン束中に放出された融体は、短時間に径方向に侵入して隣接集合体の冷却材流路を塞ぐポテンシャルを有していることも示された。

これらの試験結果に基づき、損傷規模と損傷拡大速度との関係を整理すると、図3.2.2-2の下部に示すものとなる。損傷拡大速度は、損傷規模及び燃焼度の増加とともに大きくなる。しかしながら、損傷拡大速度とDN輸送時間が競合するような大きな初期損傷規模事象(例えばM O L - 7 C の24サブチャネル発熱閉塞の条件)は極めて起り難く、設計の妥当性を確認する観点からは、発生する可能性を踏まえて小さな初期損傷規模からの事象進展挙動を見極め、急速な損傷拡大条件に至る以前に余裕をもって炉停止することを示すことに重点を置くべきである。このような観点から、M O L - 7 B とM O L - 7 C の間の領域の試験の重要性が高いが、この領域のデータはS L S F P 4のみであり、同試験の燃料は殆ど新燃料同然であることなどから、今後照射燃料による試験を実施してゆく必要がある。

また、安全評価の中では、発生頻度は極めて低いが集合体全体に及ぶ損傷に至った場合の影響も把握することにより、全炉心炉心損傷などへの異常拡大が適切に防止されるための設計条件を明らかにすることも重要であり、S C A R A B E E - N の領域についての照射燃料による試験の重要性も高い。

3.2.2.2 過出力条件からの異常拡大の防止

「運転時の異常な過渡変化」においては燃料の健全性を確保することが必要であるが、この場合の「健全性確保」とは、通常予想される平均的な特性をもつ炉心燃料の破損、いうなればノミナル破損を防止するというものである。一方で、高燃焼度条件では、定格状態においても少数の燃料ピンにピンホール状の破損を生じている事態についても考慮する必要がある。したがって、「運転時の異常な過渡変化」においては、事前に炉心の中の数本の燃料ピンがピンホール型の破損を生じたとしても、定常運転時のピン破損

に対する場合と同様の対処により十分な安全性が確保できることが要求される。「事故」においては、燃料破損があった場合でも局所的な損傷部分の冷却性を確保することによって異常拡大を防止することが必須であるから、全炉心の中の数本の少数ピンの破損と集合体内の多数のピンのノミナル破損につながりかねない「事故」事象とがオーバーラップした状況をも想定した上で、適切に考慮する必要がある。図3.3.2-3は、集合体内の多数のピンが燃料溶融を伴って同時的に破損した場合に、集合体全体の冷却性が失われる状況を表したノミナル破損限界と、少数ピンの破損と「事故」のオーバーラップを想定した場合の冷却性限界の関係を示したものである。

冷却性の限界をおさえる観点からは、少数ピンの破損時の「事故」事象の進展を把握することが重要課題となる。換言すれば、少数ピン破損時の冷却性確保の観点からは

- ①初期破損燃料からの溶融燃料放出量
- ②溶融燃料ジェットによる隣接ピンへのアタックと破損伝播範囲
- ③破損伝播を含めた放出燃料の堆積範囲と冷却性

が研究の中心課題となる。これらの課題に係わる現状での知見の概要を図3.2.2-4に示す。ピン内の溶融燃料の大部分は破損によって短時間に放出され、放出量は燃料溶融量に支配される。また、溶融燃料ジェットは隣接ピンの被覆管を破損させる可能性が極めて高い。ただし、溶融ジェットによる破損伝播は方向性が限られており、双方の破損ピンからの放出燃料は破損ピン間の流路に堆積する傾向をもつ。したがって、各ピンの燃料溶融割合が一定のレベル以下であり放出燃料の量が抑制されれば、周囲の冷却材流路からの除熱により冷却性は確保できるものと考えられるが、残念ながら、過出力条件を持続した場合のバンドル条件での放出燃料の冷却性に係わるデータは得られていない。このような少数ピン破損時の冷却性限界の解明は、今後の燃料高性能化にあたり最も重要な課題の一つとなる。

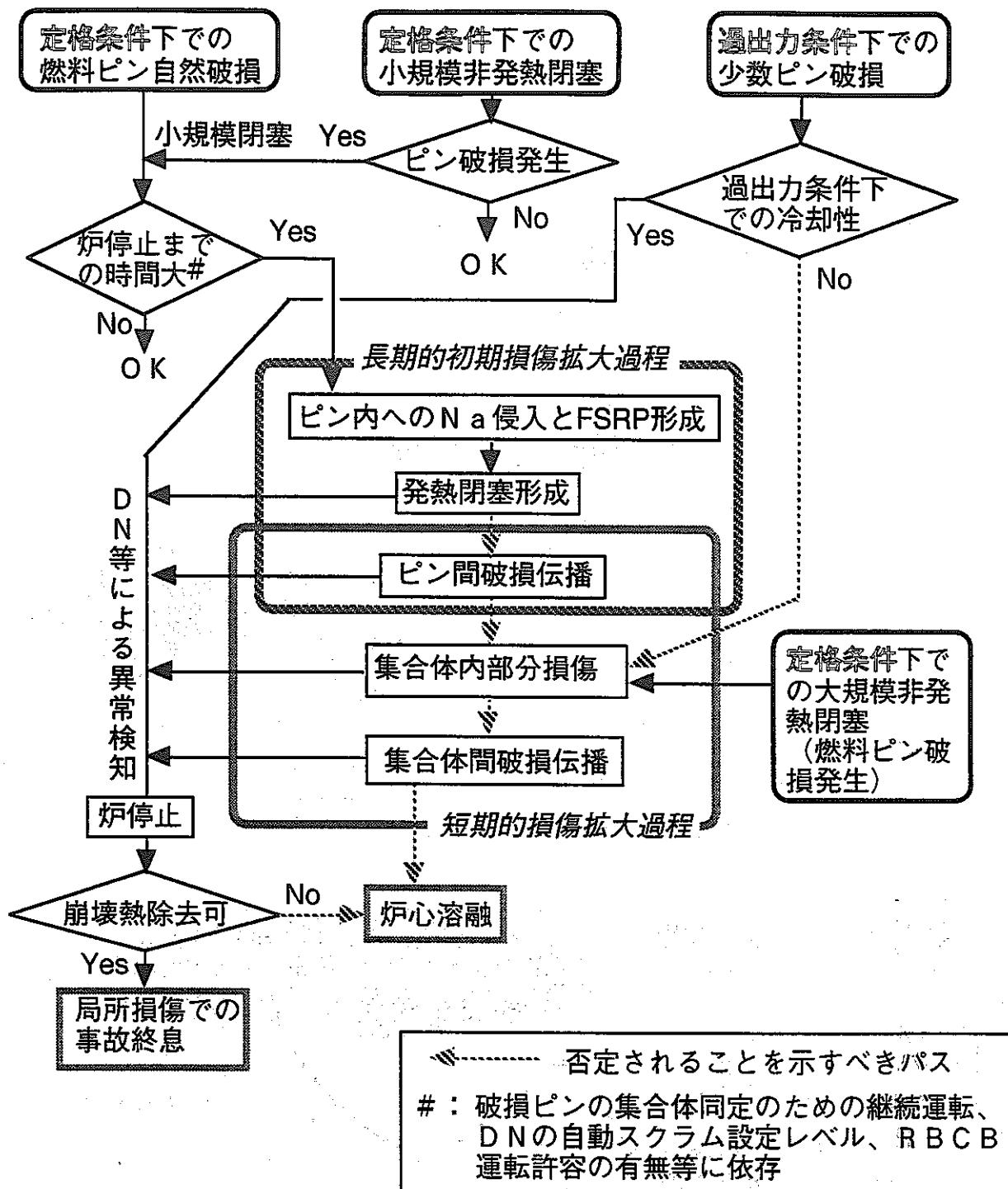


図3.2.2-1 異常拡大防止の観点から想定し得る事象進展と否定されることを示すべきパス

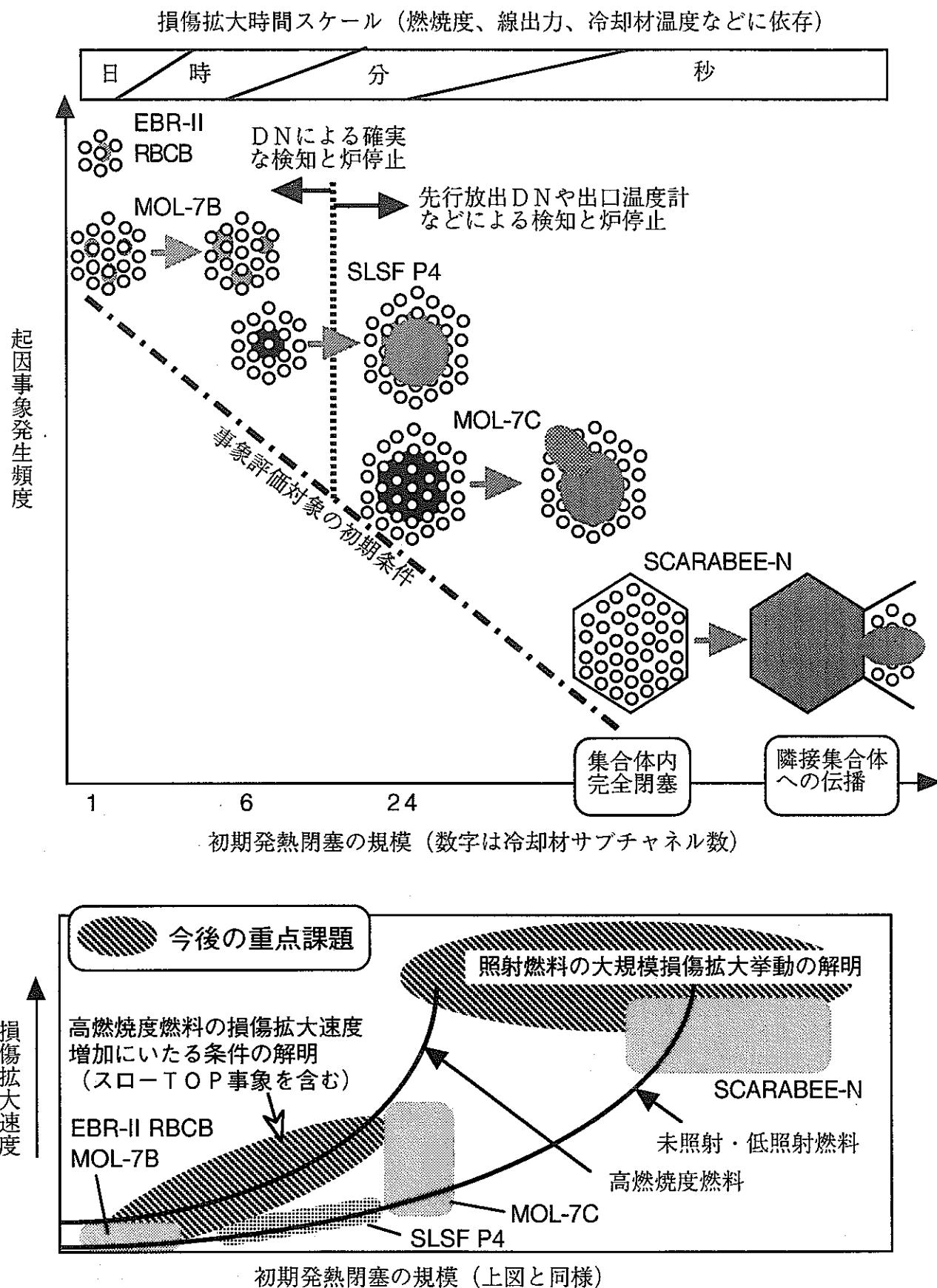


図3.2.2-2 局所損傷拡大挙動研究における現状の知見と今後の重点課題

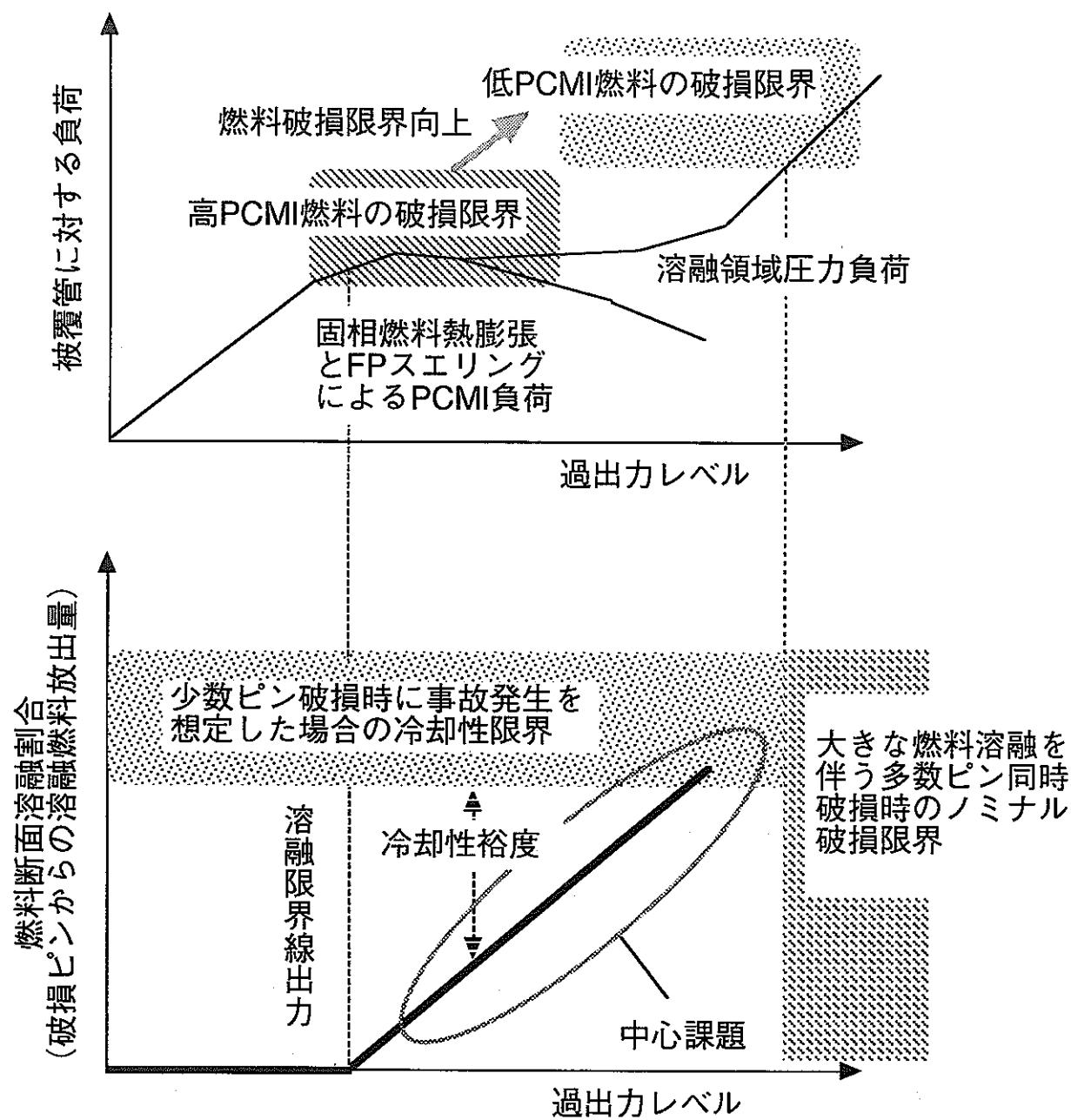


図3.2.2-3 少数ピン破損想定時の損傷部冷却性の概念

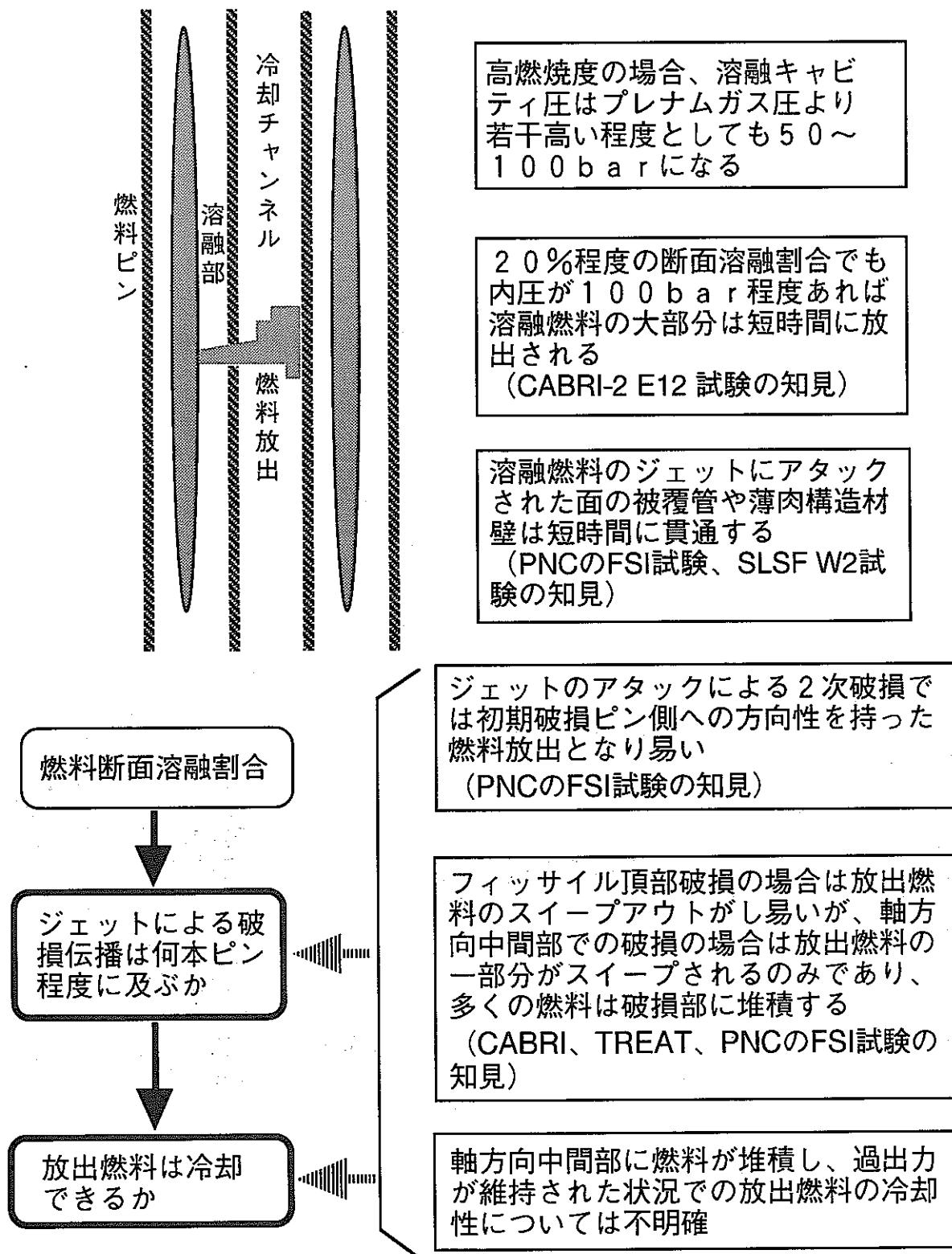


図3.2.2-4 過出力における少数ピン破損時の冷却性に係わる現状の知見と今後の課題

3.2.3 炉心損傷の早期終息と炉心損傷起因過程

炉心が最大反応度の体系となっていないうFBRの核的特徴から、炉心損傷事故の安全評価がなされ、その起因事象の代表としてATWS事象が想定される。しかし、冷却材のサブクール度が高いことから、起因事象の発生以降冷却材の沸騰に至るまでの間に早期終息の方策を考慮することが可能である。そこで、今年度は、これまでの検討では重点を置いていなかった早期終息のシナリオについても新たな検討対象とし、そのための方策と課題に関する検討を行った。また、炉心損傷に進展した場合の起因過程に関しては、炉心冷却材のボイド化が進展する過程におけるエネルギー発生を抑制するための条件について検討を深めた結果を記述する。

3.2.3.1 炉心損傷の早期終息のシナリオ

この分野における近年の研究は、主として受動的な負の反応度効果による冷却材未沸騰状態での終息を目指すものが多い。しかし、事故開始時に既にランダム破損しているもしくは耐性を失っている燃料ピンが存在している場合や、ピンの変形によって流路が狭められている場合を考えると、炉物理・熱流動計算の結果のみで早期終息シナリオが完成することはできず、ピン破損の発生・拡大、長期冷却などの課題についても検討する必要があると認識される。また、早期終息シナリオの成功条件として、集合体内燃料の部分損傷までを許容するとすれば、設計へのインパクトは軽減できるであろう。

このような認識から、本節では、まず、炉心損傷へ拡大する過程での事象推移をイベントツリーによって検討することにより早期終息シナリオのターゲットを定め、それを具体化し得る方策とそのための課題の検討を行った。この検討では、固有の特性である反応度効果（ドップラー、燃料膨張等）に加えて、炉心損傷への拡大防止方策として、不確かさはあるものの効果は期待できると考えられている炉心変形、制御棒相対挿入促進などによる受動的な出力低下方策と、ナトリウムの昇温により作動するSASSによる受動的な炉停止機構とを想定する。また、炉心ボイド化後の燃料移動による負の反応度効果の促進についても考慮した。このような受動的安全機能を考慮した炉心におけるULOF事象起因過程のイベントツリーを図3.2.3-1に示す。図中の分岐については、明らかに可能性の高いと考えられる分岐を太線によって示した。以下に図3.2.3-1のイベントツリーの各ヘッディングを説明する。

「受動的安全特性による出力低下」は20~30%以下の出力状態へ低下することを意味するが、これのみによって崩壊熱レベルまで低下することは期待していない。

「Na昇温SASS作動」によってはじめて十分な未臨界度となり崩壊熱レベルに達する。

「冷却不可となるようなピン破損なし」は、健全ピンであっても被覆管が高温に維持されることによって破損を生ずることがあり得るが、そのような状態ではないこと、あるいは、微小破損（3.2.2節での「少数ピン破損」に対応）が存在していたか事故過程で生じたとしても破損の拡大や隣接ピンへの伝播、損傷領域の拡大がなく冷却性が確保さ

れることを意味しており、SASSが作動していない場合には「冷却不可となるようなピン破損なし」が言えない可能性が高まる。

「長期冷却」の成功は燃料損傷規模と熱輸送系の利用可能性とに依存する。燃料の破損が無い場合、または破損があっても小規模な損傷である場合には、自然循環でも除熱が可能であり、成功の可能性は高い。ポンーモーターによる強制循環除熱が可能であればより大きな規模の損傷でも冷却可能となる。

「早期燃料移動負反応度効果」では、3.2.3.2節で述べるような先行集合体における燃料移動による負の反応度効果の有効性を考慮する。ボイド反応度を相殺しうる十分な負の反応度が挿入されれば、出力は低下して、他の燃料集合体における沸騰は防止できる。

「部分損傷集合体長期冷却」に成功すれば、炉心の部分損傷はあるものの事故は終息できる。これに失敗すると、損傷部は隣接集合体へ拡大し、事象は炉心崩壊過程へ進む。

冷却材沸騰が生じずに終息できるシーケンスは、SASSが作動して長期冷却に成功するシーケンス (#1, 7) と、受動的安全特性による出力低下は有効で、SASSは作動に失敗するが長期冷却に成功するシーケンス (#4) である。イベントツリーを検討すると、SASSによる炉停止に成功すれば以後の冷却成功の可能性が高まると結論できることから、信頼度の高いSASSの開発が重要であることが指摘できるとともに、受動的安全特性への依存について、炉停止を十分に達成できない方策、可逆性のある方策（たとえば冷却材温度が低下すると正の反応度印加があるもの）などはSASSと組み合わせて使用するのが妥当と言える。

#3と#9のシーケンスは、核的には炉停止しているが、ピン破損部分の冷却ができず、損傷部が拡大して低反応度状態で炉心崩壊へ進むシーケンスである。

#10は、受動的安全機能が働かなくて炉心のボイド化が進むシーケンスであるが、燃料の移動は大きな負の反応度効果があることから、これを用いた早期終息の方策も考慮できる。さらに、部分損傷集合体の長期冷却に成功すれば、事故は終息できる (#101)。

#5, 6は、低出力から炉心のボイド化が進むシーケンスである。#10と同様に燃料移動による負の反応度効果によって早期終息する可能性もある (#51, 61)。それに失敗すると炉心損傷へ進むが (#52, 53, 62, 63)、その時点で既に炉容器上部プレナム内の冷却材や構造材が昇温しているために#102, 103とは事象推移が若干異なる可能性がある。すなわち、集合体間の沸騰の同時性・非同時性に差が生じる可能性があること、沸騰拡大に伴って炉心変形がさらに強調もしくは緩和される状況が異なってくる可能性があること、高温融体が熱エネルギーから機械的エネルギーへエネルギー変換する際の効率が異なる可能性があること、炉容器の機械的強度の低下具合が異なる可能性があること、冷却材の未飽和度の違いによって事故後冷却性が異なる可能性があることなどである。

以上の検討から、炉心損傷への拡大防止方策を検討する際の留意点として以下が挙げられよう。

— サクセスシナリオを描くためには、受動的特性による炉停止機能を強化するとともに、微小な破損を有しているような燃料ピンをも安定に長期的に冷却可能であることを示す必要がある

- 炉停止を達成する方策としては、十分な負反応度を投入でき、かつ非可逆的な方策であることが望ましい、
- 拡大防止方策の機能が不十分であると、その方策を採用しなかった場合と比較して、炉心損傷への進展を想定した場合のコンセクエンスが増大する可能性がある。その場合には、拡大防止の成功確率や事象進展の遅延効果をも勘案して、総じてリスクの低減が達成されることを確認する必要があろう。

3.2.3.2 早期終息の方策と課題

本節では前節での検討から抽出された早期終息方策と課題について述べる。重要なテーマについてはその位置づけ等が3.3節の試験テーマ表にまとめられているので、ここで記述は簡略なものに留める。

(1) 負の反応度効果を期待できる受動的安全特性

この分野の研究は近年大幅に進められているところである。本報告書では、3.1.8節にまとめられている。

(2) 十分な負の反応度を与えるSASS、及び関連する基盤的研究

受動的な負の反応度効果により出力の低下または事象進展の遅延が期待できた場合でも、最終的には十分な負の反応度を与えられる物質、例えば固体中性子吸収材を炉心部へ挿入することによって恒久的未臨界状態を達成する必要がある。キュリーポイント方式のSASSはその代表であるが、ポピュラーなので、ここではその他の方策について説明する。

- 集合体内SASS^(2,6)：通常の燃料集合体の燃料ピンに取り囲まれた内側に内管を設置する。内管上部のフィッサイル領域直上部に小球状の固体中性子吸収材を設置する。これは燃料ピン束を流れ出たナトリウムが昇温した場合には溶融する金属で作られた落下機構によって保持されている。ナトリウム昇温時には中性子吸収材が炉心部へ落下して負の反応度を印加する。例え炉心損傷へ進展した場合でも、この内管は溶融燃料の早期流出経路となることから負の反応度効果を期待できる。図3.1.2-3参照。

- 燃料ピン内SASS：集合体内SASSと同様な機能を燃料ピン形状の構造で実現するもの。

図3.1.2-4参照。

- フローティング型SASS：ナトリウム流量が十分ある場合には流力的に保持され、流量減少時には炉心内に落下して負の反応度を与える構造。図3.1.2-2参照。

- 中性子吸収材反射体^(2,6)：上部ナトリウムプレナム付き炉心のみに適用可。中性子吸収材で作られた反射体が昇温時に溶融する金属で集合体管に固定されている。これがナトリウム昇温時に炉心上部に落下して負の反応度を与える。炉心損傷へ進展した場合にも、この中性子吸収材が溶融プール内へ混入、もしくはその上部を覆うことによって負の反応度効果が期待できる。

上記のいくつかの方策には、昇温時に溶融する金属を使用している。ナトリウムの沸点以下で溶融、もしくは強度を失う金属はいくつかあるが（金ろう、銀ろうなどでもよい）、これに少量の核分裂性物質を加えれば、中性子束増加に対しても即効的に昇温して所期の機能を果たしてくれるであろう。そのような金属の開発には中性子束場が必要であるため、3.3節では、SERAPHの試験研究テーマの一つとして、中性子束高で溶融するヒュージブルメタルの開発を加えた。

(3) 燃料ピンの健全性、破損、破損伝播と長期冷却

受動的安全方策の作用によって出力が低下した場合でも、炉内には多様な燃料ピンが存在することを考えると、以下の点の明確化がサクセスシナリオの達成に必要である。

- －燃料ピンの高温維持時健全性
- －破損燃料の高温維持時破損拡大、破損伝播の有無
- －破損燃料の高温維持時長期冷却性

上記の3点はいずれも熱輸送系の流動状態に依存している。ポニーモーター駆動時には比較的問題は少ないが、自然循環状態では破損が拡大しつつある燃料の冷却は困難となるかもしれない。これらの明確化のため、3.3節では、SERAPHによる研究テーマとして、早期終息シナリオに係わる燃料拳動試験を挙げた。

(4) 早期燃料移動による負の反応度効果

以下の現象及び方策が考慮されている。

－中空ペレット燃料におけるピン内溶融燃料移動：中空ペレット燃料においては、過出力時にペレット中心部が溶融し、圧力勾配によって軸方向上下へ移動する可能性がある。ただし、その際の過出力が早過ぎれば燃料の移動が十分に生じる前に燃料の内圧によってバースト型の燃料破損に至るし、遅過ぎれば燃料移動が生じにくいためその前に燃料スウェーリングによる破損の可能性が出てくる。UTOP事象において被覆材が健全な状況でこの現象が有効に働けば、燃料の破損前に大きな負の反応度が挿入される可能性がある。ULOF事象においては、このような現象は被覆材の健全な中程度の出力の集合体で期待でき、いわゆるLOF-driven-TOPを抑制する機構として働く可能性がある（3.2.1.3節参照）。しかし、この現象に関する実験データ及び解析モデルは不十分であり、今後のR&Dの加速が必要である。

－人工的リードチャンネルでの燃料流出：さらに積極的な方策として、燃料の破損を許容することとして、溶融した燃料の炉心外への流出を促進する構造を考える。そのような集合体と他の集合体とを差別化するためには、出力・流量比の調整が必要であろう。また、十分に早いタイミングでの流出を保証するためには、ルースバンドル（水力等価直径の大きなバンドル）とするか、集合体内SASSで示したような燃料流出経路を集合体内に設けることが必要であろう。他方、このような集合体の燃料が必要以上に早期に破損してしまわないことの確認も必要である。

以上2件ともSERAPH試験テーマとして3.3節で提案した。

(5) 部分損傷集合体の長期冷却挙動

上記(4)で挙げた方策は、いずれも、燃料の部分的な損傷は避けられないかそれを前提としている。そこで、核的に十分な未臨界度に達したとしても、その後の炉心冷却に失敗すると全炉心の崩壊に至る可能性がある。したがって、集合体内の小規模な損傷段階、もしくは溶融物質が隣接集合体へ侵入した初期段階での冷却を考える必要があり、3.3節では「部分損傷集合体の長期冷却挙動試験」を提案している。

3.2.3.3 起因過程におけるエネルギー発生を抑制するための条件

事象が炉心損傷の起因過程に進んだ場合を想定して、これまでの検討では、以下の3つを重点課題として挙げた。

重点課題 A : バンドル体系における燃料分散の加速機構の解明

重点課題 B-1 : バンドル体系における分散・再配置後の燃料の落下挙動の解明

重点課題 B-2 : 分散・再配置燃料の2次的過出力による再移動挙動の解明

このうち、B-1とB-2は後続する炉心崩壊過程の現象と重複するものである。したがって、ここでは、重点課題Aに関連して、エネルギー発生を抑制するための条件について検討を深めた結果を述べる。

起因過程における核的エネルギー発生の機構が明らかとなれば、これを抑制すること、あるいは安全余裕を拡大することを意図した設計も可能となろう。また、今後の安全研究の方向性も指摘できるであろう。ここでは、これらを目的として、起因過程でのエネルギー発生を支配する主要因子とそれらの相関について述べる。

起因過程での核的エネルギー発生を支配する主要因子は以下の4つである。

- 最大ボイド反応度
- 径方向出力分布
- 燃料破損閾値（ボイドチャンネル中、及び未沸騰チャンネル中）
- ボイドチャンネル中の燃料分散挙動

これらの相関関係が定量的に明らかにされつつある。その議論の概要を以下に示す。

(図3.2.3-2、3.2.3-3参照)

- 1) 起因過程では、核的エネルギーはLOF-driven-TOP(3.2.1.3節参照)によってのみ発生する。
- 2) 未沸騰集合体での破損が生じる以前に、先行破損集合体における燃料の分散によって十分な負の反応度挿入が生じることが示されれば、LOF-driven-TOPの発生を否定できる。
- 3) 沸騰によって全反応度が1\$に近接し、出力が上昇した状態で、ボイド化した高

出力側の集合体が先行的に破損する状況（図 3.2.3-2における時刻 t_f ）を考える。そのときの炉心平均温度は、先行集合体での破損発生が燃料溶融と関連すること（先行破損発生時の破損燃料集合体の平均温度が図中C点すなわち2700K近傍に定まること）と、炉心内径方向出力分布の平坦さ（図 3.2.3-2中の曲線の傾きの程度）で定まる。例えば、径方向出力分布の平坦な炉心では、集合体平均温度の分布は図中のC点を基点として垂直に立った曲線となり、したがって時刻 t_f における炉心平均温度はC点の温度に近づくが、通常の炉心設計では、炉心平均温度は2400～2500Kであり、定格運転状態からの温度上昇は約1000Kである。この時のボイド反応度は、次のように炉心特性によってほぼ定まる値となる。すなわち、大型炉の設計例では、約1000Kの温度上昇によって定まるドップラー反応度は-1.2\$程度、燃料膨張反応度は-0.4\$程度であるから、これらとのバランスから、全反応度が1\$に近接したとき（4）で示すように90セントとみなして求める）のボイド反応度は約2.5\$となる。この先行破損発生時に挿入されているボイド反応度を、炉心の核特性からほぼ定まる値であることから「特性ボイド反応度」と呼ぶことにする。

- 4) 通常、冷却材沸騰によるボイド反応度挿入率は数\$/sのオーダーであるが、出力上昇率、すなわち燃料温度の上昇率が増加すればドップラー反応度挿入率（負）がほぼ比例的に増す関係にあるため、全反応度の挿入はおさえられ、沸騰だけでは即発臨界超過は生じ得ない。すなわち、ボイド化した先行集合体における燃料破損は即発臨界未満（通常は90セント程度）で生じる。
- 5) 先行破損発生から未沸騰集合体の破損発生までの時間差（図3.2.3-2中の τ_d あるいは t_e-t_f ）は、先行破損時のボイド化進展度で定まる未沸騰集合体（図 3.2.3-2中のA点より左）の熱状態、その時の出力レベル、未沸騰集合体における破損閾値（図 3.2.3-2中のB点の温度）によって決定される。この3つを以下の6)～8)で説明する。
- 6) 先行破損発生時の未沸騰集合体の熱状態は、ボイド反応度がある定まった値（特性ボイド反応度：通常の大型炉では2.5\$程度）だけ挿入されていることと、炉心内の径方向出力分布とから概ね求められる（なお、特性ボイド反応度と最大ボイド反応度との比は、先行破損時刻における沸騰集合体割合（図3.2.3-2中のFv）と強い相関がある。例えば、最大ボイド反応度が特性ボイド反応度を大きく超えない炉心では、先行破損発生時には未沸騰集合体は存在せず、したがってLOF-d-TOPも生じ得ないことが言える。）。
- 7) 先行破損発時の出力レベルは、想定される反応度条件（数\$/sのボイド反応度の挿入率と燃料温度上昇率に対応したドップラーによる負の反応度挿入率により定まる小さな全反応度挿入率、及び全反応度が1ドル未満の条件）の下では、定格出力の数10倍から高くても100倍程度であることが、簡単な動特性計算によつても確かめられる。
- 8) 未沸騰集合体における破損閾値は、被覆材の温度依存の強度と、主として燃料溶融に支配されるピン内の加圧との関係で定まる。
- 9) そのままの出力が維持されるもしくは若干上昇する程度に推移とした場合の、

先行破損発生から未沸騰集合体での破損が発生するまでの時間差は、100万kWe程度の炉心では数10ms以上である。この間に先行破損集合体での燃料分散による十分な負の反応度印加があれば、出力は低下し、未沸騰集合体の破損は避けられる、あるいは未沸騰集合体の破損が生じても全反応度の低下挙動を反転させることはない。

- 10) 起因過程における核的エネルギー発生を抑制する条件を摘出すために、逆にエネルギー発生が生じやすい条件を調べてみる。それは、図3.2.3-3に示すように、炉心の最大ボイド反応度が大きく先行破損時の沸騰集合体割合Fvが小さいこと（図3.2.3-3の(1)）、炉心内の径方向出力分布が平坦で図3.2.3-3の曲線が垂直に近いこと（図3.2.3-3の(2)）、先行破損発生から未沸騰集合体破損までの時間差と比較して先行破損集合体での燃料分散速度が緩慢であること（図3.2.3-3の(3)）、そして未沸騰集合体の燃料破損閾値が低いため燃料分散に期待できる時間余裕が小さいこと（図3.2.3-3の(4)）の4つである。

上に挙げた4つの因子のうち、最大ボイド反応度と出力分布は炉心設計で定めるパラメータであり、他の2つは実験的に求めることができる物理現象パラメータである。径方向出力分布の平坦さは、従来は事象進展の同時性（「同時性が強い」とは、「沸騰によるボイド反応度の挿入速度が速い、及び先行破損からバースト型破損発生までの時間余裕が小さい」を意味する）を支配する因子と考えられてきたものであるが、本考察によって、その効果を図3.2.3-2のように定量的に表現することが可能となった。すなわち、径方向出力分布の平坦さについては、通常の核熱設計で生ずる程度の平坦さであれば事象進展の同時性に関して問題とはならないことが従来の解析からも分かっているが、最大ボイド反応度については、それが特性ボイド反応度を大きく上回る設計では未沸騰集合体での破損が生じやすくなり問題であることが上の説明によって明らかになった。したがって、大型炉において起因過程におけるエネルギー発生を抑制するためには、最大ボイド反応度を低減するための設計上の配慮が必要と結論できる。

他方、安全研究の側面では、実際に採用される燃料仕様、燃焼度、バンドル条件を模擬した燃料破損及び破損後挙動試験による実験データの取得・補強が必要である。

これらの両面からの改善努力があれば、ULOF起因過程における核的エネルギー発生を確実に抑制できる大型炉心の設計は可能であると考えられる。

それでは、どの程度の最大ボイド反応度を目安とすればよいであろうか。もちろん、FBRとしての性能を低下させずに最大ボイド反応度を小さくすることが可能であれば小さいほどよいであろうが、ULOF起因過程における核的エネルギー発生を抑制するとの観点では、以下のような議論が可能である。

図3.2.3-4に、最大ボイド反応度を変化させた場合の、先行破損集合体におけるエネルギー投入速度と燃料分散速度（図中では、燃料分散時定数、すなわち燃料が分散して反応度価値が相対的に2.5%低下するのに要する時間で表示した）との関係、及びそれに支配される発生エネルギーのランクの評価例を示した。発生エネルギーランクの評価では、

いくつかの最大ボイド反応度の炉心に対して燃料分散速度を変化させて発生する熱エネルギーを求め、それを用いて評価した。ただし、図中で到達炉心燃料平均温度でランク分けしたランクIII（平均温度>3500K）の領域では、ある程度の機械的エネルギーの発生も想定される。

他方、最大ボイド反応度の大きな炉心では、最大ボイド反応度の小さい炉心に比べ沸騰によるボイド反応度の挿入率が増大するため、先行破損が生じるときの炉心出力、すなわち燃料へのエネルギー投入率が高くなる。したがって、図の横軸は炉心の最大ボイド反応度であるが、同じ図の上にもう一つの横軸を最高出力ノードの破損後エネルギー投入率として重ね合わせることができ、これによって実験データを同図上にプロットすることができる。もちろんこのエネルギー投入率は炉心の核熱流動設計に依存して変わるものであるから、最大ボイド反応度との間に正確な比例関係が定まるものではないが、概略の傾向は表現されている。また、実験データは制約のある炉内試験で取得されたものであるため、解析モデルを通して実機条件に外挿する必要がある。現状での評価範囲とその不確かさの幅が同図中に斜めのハッチングで示されており、上端の縁が保守側の想定に、下端が最確の想定に対応する。この図から、最大ボイド反応度が4～5ドル程度までかつ先行破損集合体燃料分散時定数が100ms程度までならば、現状評価の保守側の想定でもULOF起因過程におけるエネルギー発生を抑制できるランクIIにおさまると見通すことができる。最確評価では、エネルギー発生がランクIIに留まる最大ボイド反応度の範囲は6ドル程度まで広がることが示されている。しかし、30%程度と考えられているボイド反応度の不確かさを考えると、さらに安全余裕を拡大することが必要である。特に、従来の試験が小規模体系であるため実機のバンドル体系へ外挿する場合の不確かさが大きくなることが燃料分散に関する不確かさの主因であることから、バンドル体系での試験データの取得が、安全余裕の拡大のために不可欠であると考える。

SERAPHによってバンドル体系試験体による燃料分散挙動試験が実施できたとした場合の燃料分散速度の予測が同図中に水平のハッチングで示されている。これによれば、実用炉の最大ボイド反応度が5ドル程度であれば、不確かさ幅を含めても、ULOF起因過程におけるエネルギー発生を抑制できるものと考えられる。

以上のようなエネルギー発生抑制条件の分析によって、バンドル体系試験体による実機模擬度の高い試験データが得られれば、実用炉のエネルギー発生が抑制されることの実験的裏付けとなることが示された。そのような試験を実施できる施設は世界には無く、このSERAPHによって初めて可能となるものである。

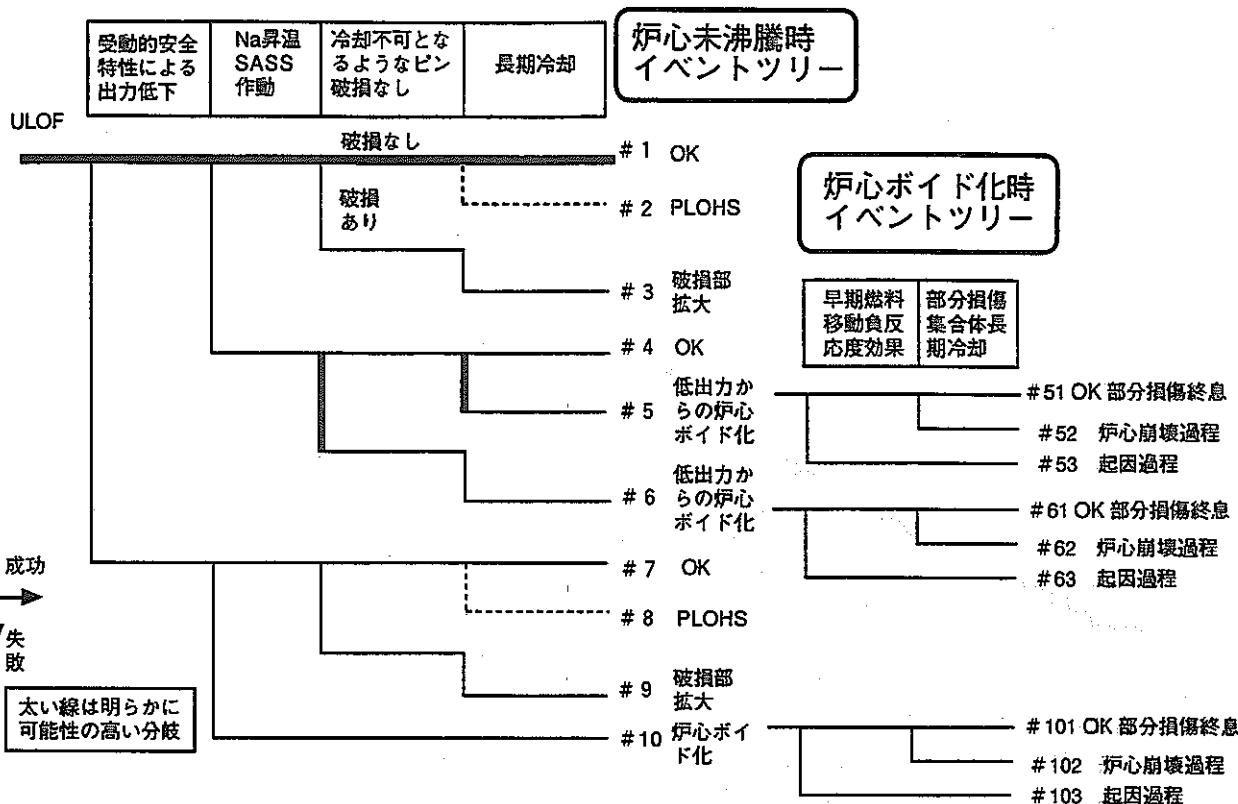


図 3.2.3-1 受動的安全機能を考慮したULOF初期過程のイベントツリー

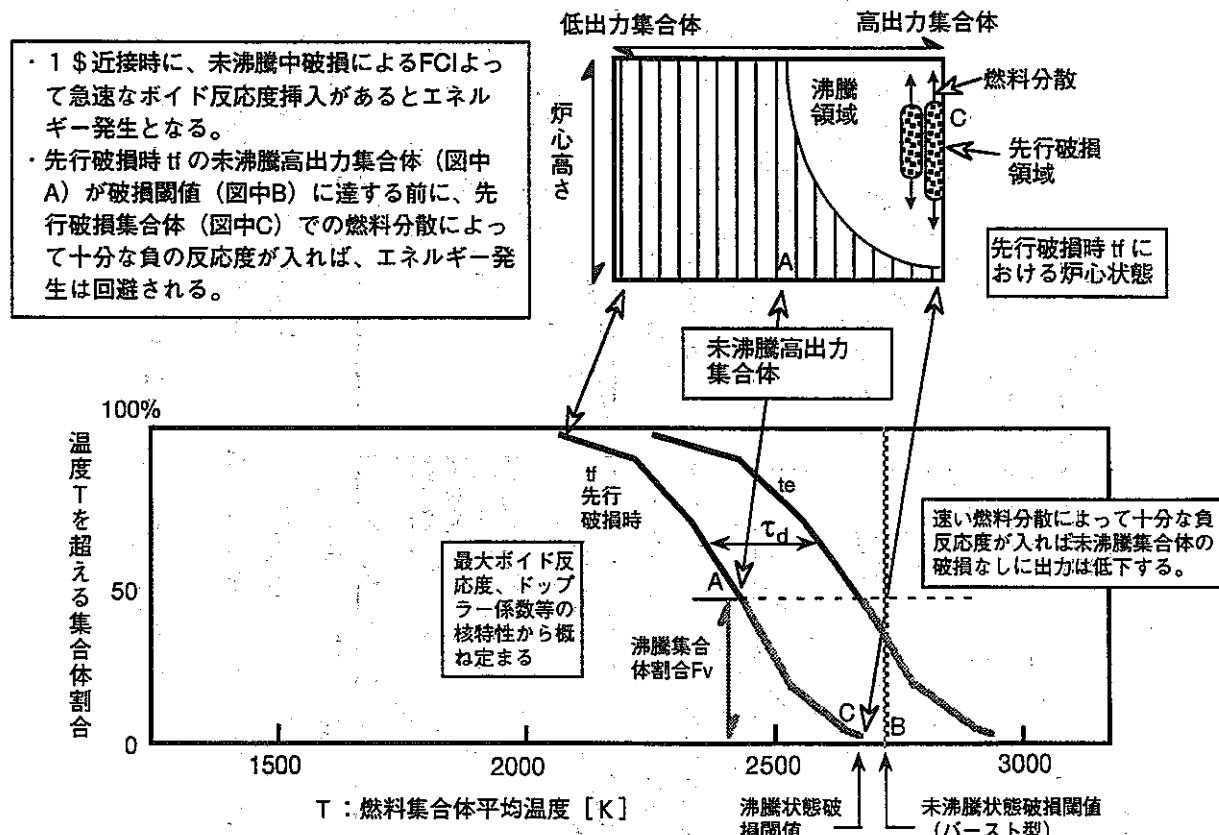


図 3.2.3-2 起因過程におけるエネルギー発生 (LOF-driven-TOP) の抑制条件の検討

燃料分散時定数：燃料相対反応度価値で2.5%の低下にする時間
Tcore : 1次出力逸走後の炉心燃料平均温度

大型炉のULOFにおける特性ボイド反応度の例

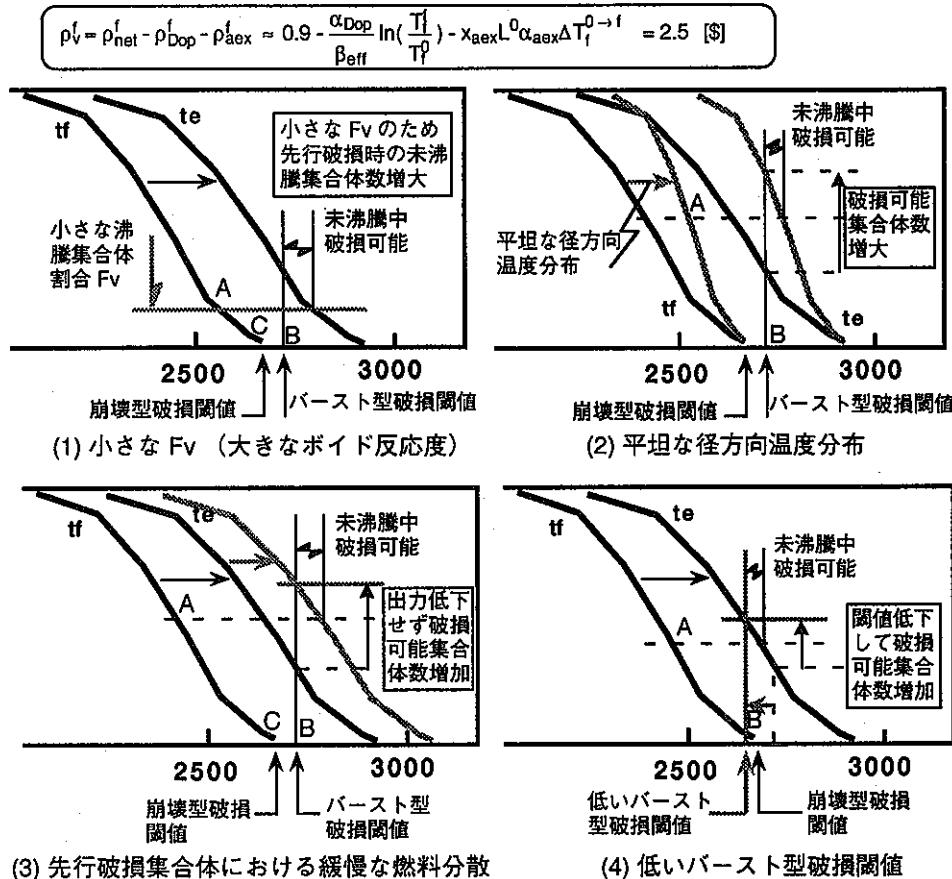


図 3.2.3-3 ULOF初期過程におけるエネルギー発生の条件分析

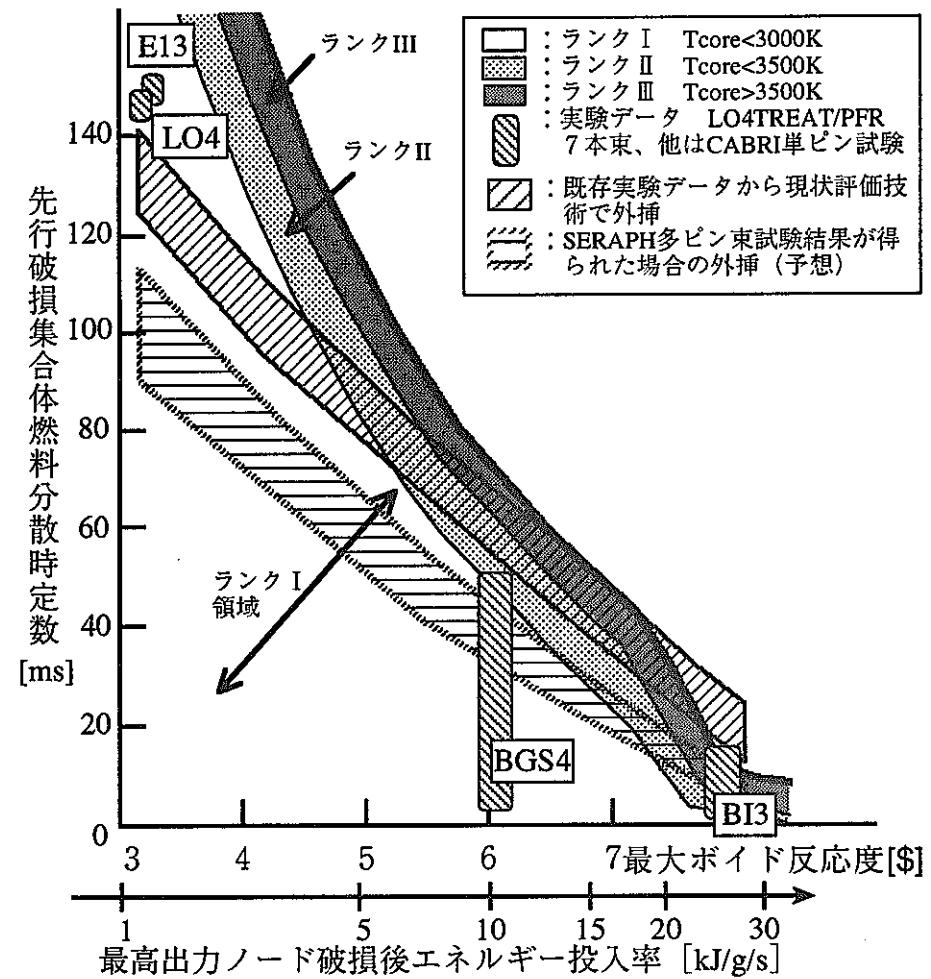


図 3.2.3-4 実機解析での最大ボイド反応度、先行破損集合体燃料分散時定数、発生エネルギーランクの相関、及び既存実験データ及びSERAPH試験予想データに基づく大型炉実機体系の燃料分散時定数外挿予測

3.2.4 炉心崩壊過程

3.2.4.1 研究の目的・必要性

CDA の起因過程（炉心冷却材ボイド化過程）を経て炉心の崩壊が進展する遷移過程（炉心プール形成過程）では、再臨界の発生を事象進展の早い段階で防止するとともに、仮に再臨界が生じてもそれに伴う機械的エネルギーの発生（エナジエティクス）が十分低いレベルに抑えられることを立証していくことが重要な課題となる。このために、次の 2 分野に集約される重点テーマについての炉内試験研究を進めることにより、燃料インベントリの早期流出による再臨界ポテンシャルの排除、及び炉心プールのより現実的な挙動の解明によるエネルギー発生の抑制の二つの柱によって再臨界の懸念を排除するサクセスシナリオの構築を計画している。

- ① 融体放出挙動試験
- ② 炉心プール挙動試験

これらは、①は炉心領域からの燃料流出時の放出流路における挙動を問題にするのに対し、②では炉心内での燃料及びスティールからなる溶融・沸騰プールの挙動を問題とする点が異なる。いずれの場合についても、ある程度の質量（10 kg程度）まで実炉心物質を体積加熱する条件で事故条件を模擬する必要がある。これは、SERAPHのような高い加熱性能を有する炉内試験においてのみ実現が可能である。すなわち、これらの現象に対する研究手段としては炉内試験の役割がきわめて大きいが、当面は解析的アプローチを中心にして、炉外試験で基本挙動を十分におさえた上で、最終的に炉内試験で実炉物質を用いて核発熱の条件で実証性の高いデータを取得することとなる。このような炉内試験の役割分担を、炉心プール拡大の各段階ごとに、再臨界の観点から重要な反応度印加のメカニズムとの関連で、表 3.2.4-1 に示す。

また、これまでの検討結果を踏まえて、本報告書では、「実用化先導研究テーマ」として検討した種々の影響緩和方策の中で、早期燃料流出を促進するためのいくつかの方策を提案している。これらの方策も、実際に将来のFBRプラントに導入するためには、その有効性と効果を実験的に立証することが不可欠となるが、そのためにもSERAPH試験の必要性は高い。したがって、以下の節では、従来からの検討の詳細化・具体化という視点からの検討結果に加えて、新たな研究テーマについての検討結果も併せて記述することとする。なお、個々の具体的な試験内容（体系図、試験条件、測定項目等）、試験によって確認すべき事項、期待される効果等については、一覧表の形で 3.3節に整理してある。

3.2.4.2 融体放出挙動試験に関する検討

(1) 融体放出挙動試験の必要性

遷移過程における再臨界のポテンシャルは炉心領域に残存する燃料のインベントリに強く依存し、約 30 % の燃料が炉心外に流出すれば再臨界の可能性を排除することができる（図 3.2.4-1 参照）。表 3.2.4-2 に示すように、集合体ピン束、制御棒案内管等から

の燃料流出挙動は、核的ポテンシャル低下によるエネルギー発生緩和として重要であり、集合体内ピン束流路を流出経路とする場合は、ピン束構造による機械的エネルギー発生遮断・低減要因としても重要である。また、起因過程初期において炉心上部の残存ピン束構造物に堆積した燃料の落下は、集合体規模の低温プールにおいては反応度印加要因となり、分散／再配置燃料の安定性が遷移過程における事象進展を大きく左右することになる。一方、早期の燃料流出を促進することによるエネルギー発生緩和をより効果的に利用するための新たな影響緩和方策が提案されているが、これらについては、炉外試験による最適化を実施し、最終的に炉内試験で実物質を用いた挙動確認を行い、その有効性・効果を実証する必要がある。

(2) 炉内試験の重点的研究分野

遷移過程における炉心融体の炉心外流出に利用可能となる流出経路としては、集合体内ピン束流路、制御棒案内管流路、集合体内設置型 SASS、及び集合体間ギャップ流路が挙げられる。このうち、集合体間ギャップ流路の有効性については、炉外試験を中心として、その利用可能性と流出量に関する実験データを蓄積していくことを基本として研究を進めて行く。一方、集合体内ピン束流路、制御棒案内管流路及び集合体内設置型 SASS の有効性に関しては、以下に述べるように、現状の知見では、燃料流出によるエネルギー発生緩和効果あるいはピン束構造物による機械的エネルギー発生遮断・低減効果を定量化する上で不十分であり、SERAPH による炉内試験が必要となる。したがって、本項では、融体放出試験の炉内試験として提案する集合体内ピン束流路、制御棒案内管流路、及び集合体内設置型 SASS を対象とした試験の試験目的、成果の反映方法及びその効果について述べる。また、集合体内ピン束流路及び制御棒案内管流路を対象とした早期燃料流出を目的とする影響緩和方策は、集合体内ピン束流路に対しては軸プランケットの短縮化、制御棒案内管流路に対しては案内管構造の最適化を前提として提案されているが、これらを試験パラメーターの一部として取り込むことによって、各方策の有効性・効果を実証する。各試験の具体的な試験体仕様、試験パラメータ、試験方法に関しては、3.3 節を参照されたい。

集合体内ピン束への融体流出挙動試験

ピン束流路への分散挙動は、融体（温度、質量、組成）、融体駆動力及び流路（冷構造材の影響、閉塞の有無）の諸条件によってその支配現象が決定付けられる。実機の中～大規模プール条件下では、融体中に低融点の溶融金属成分が高い過熱度で大量に含まれているために構造材のアブレーションが促進される一方で、燃料の分離固化挙動によって流路下流で強固な閉塞が形成される可能性がある。従来の試験では、これらの条件がコントロールされた状況下で実現されておらず、例えば、小規模ピン束が用いられているため、融体と冷構造材壁との相互作用によって熱エネルギー及び運動量の損失が実機条件に比べて過大に働き、結果として本来の分散機能が制限されているなど、実機条件との違い（融体、融体駆動力及び流路条件）による挙動の差異を明確に弁別し、高エネルギーの中～大規模プール条件下への外挿性に優れた、実証性の高い実験的知見を得るには至っていない。また、遷移過程初期において炉心上部の残存ピン束構造に堆積した

燃料は、核発熱により再流動化し重力落下する可能性がある。すなわち、CABRI 炉内試験では、分散／再配置燃料の高い安定性と緩慢な落下挙動が示唆されているが、冷構造材壁の過冷却効果が全体挙動を支配している状況の中で、試験では流路面積が実際より狭くなっているため、この挙動を一般化し実機条件に外挿することはできない。また、再臨界発生時の比較的低温で可動性の低いプールの再分散による閉塞燃料の移動・崩壊挙動は、プールの過渡挙動ならびに閉塞形成条件に強く依存すると考えられるが、現状の知見では、このエネルギー緩和機構を実証する実験的裏付けはない。

以上の観点から、集合体内ピン束への融体流出挙動試験では、

- ① 起因過程～遷移過程初期（集合体規模プール）におけるピン束への燃料分散機構、分散／再配置後の燃料落下挙動、再臨界発生による燃料分散挙動の解明（低温プール条件）
- ② 遷移過程後期（中規模～大規模プール）におけるピン束への燃料分散機構の解明（高温プール条件）

を目的とした二つの試験を実施する。低温プール条件では、遷移過程初期（集合体規模プール形成）までの連続事象推移を模擬し燃料分散／再配置と形成閉塞の落下挙動（安定性）を、また再臨界過出力を模擬し燃料再分散と閉塞移動を、高温プール条件では、中規模～大規模プール条件下（～3600 K）での集合体ピン束への燃料分散／再配置挙動を、また再臨界過出力を模擬し閉塞形成条件下での燃料再分散と閉塞移動を、それぞれ観察する。本試験では、エネルギー投入量／速度（再臨界過出力模擬時を含む）、集合体ピン束本数、燃料スティール混合比（高温プール条件）、融体放出駆動圧（高温プール条件）等が主要な試験パラメータとなるが、軸プランケットの短縮化による燃料炉外流出促進の効果を示すため、軸プランケット長さも試験パラメータとする。本試験では、ホドスコープによる軸方向燃料分布の時間変化及び試験後破壊／非破壊検査による最終的な物質空間分布が主要な測定物理量であり、これらから、ピン束本数、軸プランケット長さ、エネルギー投入量／速度、融体温度（成分）及び放出駆動圧と融体流出量（距離）の関係を明らかにし、分散／再配置燃料の落下挙動（落下速度、モード）、燃料再分散時の分散／再配置燃料の閉塞強度（熱・機械的安定性：閉塞の移動の有無）、試験後検査による固化挙動（分離固化挙動の有無と分布、固化モード等）の確認を行う。

本試験の実験解析を通して解析コードの物理モデルを改良し、精度の向上を図ることによって、ピン束への融体流出・固化挙動をきちんと評価できるようにする。これを実機解析に適用すれば、遷移過程の初期において、残存ピン束部に分散燃料によって形成されていた閉塞が安定に存在し続け、分散燃料の齊時的落下による厳しい再臨界は発生しないことが示される。また、全炉心プールに至るまでの遷移過程において、ピン束部流路への燃料分散が全炉心インベントリの15 %以上であること、及びピン束部に形成された閉塞が炉心融体の輸送遮断・エネルギー損失効果に対して有効に働くことが示される。さらには、軸プランケットの短縮化による燃料流出促進の有効性を確認することを通じて、炉心融体の炉外流出促進に対して効果的な構造設計提案が可能となる。

制御棒案内管への融体流出試験

制御棒案内管への燃料流出は、中規模プールにおいて有効になり得ると考えられ、その流出量を評価して利用の可能性を論じる場合には、制御棒案内管の破損タイミングと位置、破損モード、破損後の融体放出とFCI、及び制御棒案内管内の融体軸方向移動等の挙動をおさえることが重要である。制御棒案内管を対象としたANL/CAMEL炉外試験（模擬融体：thermite）では、初期のFCIによる案内管内のボイド化が比較的早く生じるため、その後の燃料流出は容易であると結論されているが、融体条件（成分、量、温度）の不適切さから、破損と流出に関する基本的な関係を見極めるには至っていない。また、SIMMER-IIを用いた解析的研究においては、案内管内のボイド化部分の減圧が不十分な場合には、全炉心プールへの拡大と時間的に競合するため核的ポテンシャルの低減に寄与するほどの燃料流出を達成することは難しいことが示唆されている。案内管の破損及び融体の流出挙動は炉心沸騰プール挙動と密接に係わる現象であるが、現状では、案内管からの早期融体移行シナリオにつながる実証性の高い実験的情報は得られていない。

以上の観点から、制御棒案内管への融体流出試験では、遷移過程（中規模プール）における制御棒案内管の破損と破損後の燃料流出挙動の解明を目的とした試験を実施し、中規模プール条件下（～3400K）での制御棒案内管の破損挙動（破損タイミング、モード）、制御棒案内管内のFCI圧力発生と減圧挙動、FCI発生下での融体流出と軸方向移動を観察する。本試験では、溶融プール温度、溶融プール圧力、案内管内の冷却材流量等が主要な試験パラメータとなるが、早期の燃料流出を促進するための案内管構造も試験パラメータとして挙げられる。この案内管構造は、薄肉化、無壁面化、穴付き壁面、ダッシュポットの位置と形状、構造材材料等の工夫により燃料流出を促進するというものであるが、案内管構造の最適化については、別途炉外試験を行う。本試験では、ホドスコープによる軸方向燃料分布の時間変化及び試験後破壊／非破壊検査による最終的な物質空間分布が主要な測定物理量であり、これらから、熱（炉心融体）及び機械的負荷（案内管内外圧力差）の違いによる案内管の破損タイミングと破損モード、案内管内冷却材流量の違いによるFCI発生（減圧）挙動と融体流出ポテンシャル（流出融体速度と軸方向移動挙動）の関係の違い、燃料流出に対して最適化された案内管構造による融体流出ポテンシャルの確認を行う。

本試験結果は、実験解析を通して解析コードの物理モデルの改良及び精度の向上に反映され、案内管の破損挙動、及びFCI発生条件下での融体流出挙動が再現できるようになる。これを実機解析に適用することによって、全炉心プールに至るまでの遷移過程において、再臨界ポテンシャルの排除に最も寄与することが期待される案内管の破損による早期燃料流出が可能であり、流出量が全炉心インベントリの10～20%であることが示される。さらには、最適化された案内管構造による燃料流出促進の有効性を確認することを通じて、炉心融体の炉外流出促進に対して効果的な構造設計提案が可能となる。

集合体内SASS実証試験

集合体内設置型SASSを通じての燃料流出は、燃料流出による影響緩和を目的として、燃料流出量を評価して利用の可能性を論じる場合には、制御棒案内管を流出経路とする

場合と同様に、内管の破損タイミングと位置、破損モード、破損後の融体放出と FCI、及び内管内での融体軸方向移動等の挙動をおさえることが重要である。早期の燃料流出を促進するための SASS の構造に関しては、別途炉外試験で最適化を行い、本試験では、実炉心物質を用いた内管の破損と破損後の燃料流出挙動の確認を目的とし、燃料破損が生じた場合でも、溶融燃料による内管の破損、侵入、流出が十分に早い時間内（例えば集合体内管壁の溶融よりも早い）に生じることを確認する。集合体内設置型 SASS を通じての燃料流出による影響緩和については、遷移過程の集合体規模プールの段階で燃料の流出が始まり、さらに、局所プールの段階でも流出量は増加し続けることから、中～大規模プールに至る以前に核的不活性化を達成するための炉心インベントリの減少に大きく寄与できると期待される。

3.2.4.3 炉心プール挙動試験に関する検討

(1) 炉心プール挙動試験の必要性

今期に検討を深めた点は、遷移過程の事象推移に関する現象論的検討である。図 3.2.4-2 には、遷移過程の事象推移を、再臨界ポテンシャルの観点から重要となる反応度印加のメカニズムとこれを抑制緩和するメカニズムに着目して示す（基本的には表 3.2.4-1 の内容を詳細化し模式的に示したものである。）。再臨界を抑制する主要なメカニズムは、炉心からの燃料の流出及び炉心への中性子吸収材（毒物）の導入である。3.2.4.2 節に述べたように、事象進展の過程で炉心部の燃料インベントリが減少し、約 30 % 以上の燃料が炉心外に排出されれば、炉心の核的ポテンシャルは十分に低下し、再臨界の生じる可能性が無視できるようになる。したがって、再臨界に伴う機械的エネルギーの発生を問題とするのは、燃料のインベントリが維持される時間範囲における炉心プール挙動である。再臨界の激しさを決定する反応度印加の速度は、燃料移動の規模と速度に依存する。したがって、この分野の研究の目的は、大量の分散燃料の斎時的な集中（compaction）や炉心プール全体の大規模な揺動が生じないことを実証していくことである。表 3.2.4-1 に示したように、燃料の核発熱条件下で生じるこれらの現象についての実験データはきわめて少なく、炉内試験研究を通じて実証性の高い実験データベースを蓄積する必要性は高い。

(2) 炉内試験の重点的研究分野

遷移過程の炉心プール拡大の各段階（小～大規模プール）における反応度印加は主として燃料移動によるが、そのスケールと再臨界のモードは事象進展により異なったものとなる。各再臨界モードとそれに伴うエネルギー発生のポテンシャルを図 3.2.4-3 に示す。縦軸のエネルギーは出力バースト時の核的エネルギーの放出量を示し、相対出力の時間積分値 (FPS: full power second) で表してある。1.0 FPS は、燃料の断熱加熱を仮定した場合の 200 K 弱（スティールとの熱平衡を仮定すれば 100 K 弱）の平均的温度上昇に対応する。すなわち、10 FPS の出力バーストは 1,000～2,000 K の燃料温度の上昇を意味している。機械的エネルギーの発生がほぼ無視できる、すなわち再臨界の発生が事実上有意とならない限度は、初期の低温プールにおいてはおおよそ 15 FPS 程度、後期

の全炉心プールではバースト前の燃料温度レベルの上昇があるためおおよそ 10 FPS 程度となる。

表 3.2.4-1 及び図 3.2.4-3 によれば、厳しい再臨界を引き起こす可能性のある反応度印加のモードであり、現状で不確かさの大きい現象は次の 2 種である。

- ① 集合体プールにおける炉心上部分散燃料の齊時的落下
- ② 大規模プールにおけるプール全体のスロッシング

この内の①については、炉心全体での数十体の集合体スケールでの齊時的な重力落下を仮定すれば、大きな反応度挿入率を生じることは当然である。この現象については、すでに 3.2.4.2 節に記したように、集合体内ピン束への融体流出挙動試験で検討する計画であり、分散燃料の落下挙動が実際には重力落下と比べて低減されることが実証されれば、図 3.2.4-3 における 10 FPS を超えるような再臨界の発生は排除できる。また、分散燃料の落下の条件が定量化されれば、本来期待される炉心内での燃料移動の非齊時性 (incoherency) の効果を適正に評価に反映するための実験的根拠が与えられることになる。

したがって、ここでの検討は、②の炉心プールの大規模なスロッシングに伴う厳しい再臨界の可能性を排除するための方策を主眼としたものである。このために、以下に、スロッシングを引き起こす物理メカニズムを明らかにした上で、これを現象論的に検討することによって、炉心プールの沸騰挙動が本来安定的に生じるとの見通しを示すとともに、この見通しを確認するための重要な研究として SERAPH における炉心プール挙動試験を位置づける。

プールスロッシングのメカニズム

これまでに行われた遷移過程の解析では、炉心中央部で生じるスティールの急激な蒸発と大気泡の発生の結果、炉心プール全体がスロッシング（最初、炉心融体は周辺部に slosh-out し、次に、これが重力により炉心中央に slosh-in する。）し、炉心中心線に向けて燃料集中を生じることが予想されている。しかも、現在用いられている r-z 2 次元形状での解析では、この効果が過大に扱われ、厳しいモードの再臨界が生じている。特に、過去の SIMMER-II コードを用いた標準的な解析では、小液滴径の液体燃料と液体スティールが瞬時に混合・熱移行するという仮定を置いていたことにより、スティールが急速に加熱され、1 m/s を超える高い気泡成長速度を生じていた。

このような結果が物理的に妥当であるかどうかを検討するために、スティール蒸気泡の成長挙動をより実現象に則した伝熱支配の気泡成長モデルにより評価した。その結果、気泡の成長速度は 0.1 m/s のオーダー以下になると予測が得られ、この速度ではプールの沸騰は安定的である（スティール蒸気泡の成長が大規模なプールのスロッシングを引き起こすことはない）との見通しを得た。SIMMER-II コードの解析でも、気泡の成長速度が 0.1 m/s のオーダー以下となるような入力パラメータの場合であれば、スロッシングを引き起こすような不安定な沸騰モードに至ることはないとの結論を得た。

なお、炉心プールの安定性は、図 3.2.4-4 の右図に示すように、プールの大きさとプール中で発生する蒸気泡の大きさの関係に支配される。直感的には、気泡径がプールの大

きさよりも十分に小さければ安定な沸騰となり、気泡径がプールの大きさのスケールとなれば不安定な沸騰になると考えられる。一方、気泡の成長最大径は、気泡の成長速度と気泡がプール内に存在する時間（気泡浮上速度とプールの深さから決まる。）で予測される。典型的な炉心プールでは、プールの深さは0.5~1.0mであり、気泡の滞在時間は2~4sとなる。プールの代表長さ（直径又は深さ）は1mのスケールであることから、気泡の最大直径がプールの代表長さと同程度になり、不安定な沸騰モードになるために必要な気泡の成長速度は、0.1~0.3m/s程度の大きさ（保守的に見ても0.1m/s）である。

炉心プール挙動に関する炉内試験の必要性

上記の現象論的検討により、プールスロッシングによる再臨界問題を解決することは、炉心プールが不安定に沸騰する可能性を排除することに他ならないこと、また、そのためには、支配的な素過程であるスティールの沸騰・蒸気泡成長挙動を解明することが不可欠であることが明らかとなった。この現象は、炉心物質の熱物性、炉心プールの圧力・温度条件に直接依存する現象である。このような条件下でのスティールの沸騰挙動を解明するためには、実炉心物質を用いて核加熱条件を模擬し得る炉内試験において、炉心プールの一部を切り出した状態を模擬した試験体を用いた炉内試験を行うこと、すなわち、炉心全体をスケールダウンするのではなく、炉心挙動を支配する素現象を実スケールで再現する考え方が必要である。

前述のように、炉心プールのスロッシングに誘起される再臨界の可能性、すなわち、プール沸騰の安定性は、究極的にはスティール蒸気泡の成長速度という指標に集約されることが明らかとされている。しかしながら、実炉心物質での実験データが皆無であるために、大きな不確かさが存在し、保守的な安全評価条件を設定せざるを得ないのが現状である。そこで、SERAPH計画の炉心プール挙動試験では、実証性の高い試験条件での試験により、成長速度が0.1m/sのオーダーよりも小さいことを実験的に確認することにより、炉心プールの不安定な沸騰の可能性を否定することを目的とする。試験体で模擬すべきプールのサイズに関しては、後述の試験計装との関連から、10cm程度の直徑で必要十分であるとの見通しである。本試験により、スティール蒸気泡の発生と成長という支配的な素現象が解明されれば、これを安全解析コードの物理モデル（例えば、SIMMER-IIIコード）に反映することにより、炉心プールの大規模スロッシングが回避できることが確認できる。すなわち、本試験により、現在想定されている最も厳しいモードの再臨界の発生を完全に排除するためのシナリオ構築のためのきわめて重要なデータが提供されることになる。

炉内試験での計測性の検討

本試験においては、試験体内部に形成される溶融プール中でのスティール蒸気泡の成長挙動を測定し、それが、図3.2.4-4に示した安定沸騰のケースであることを実験的に確認する必要があるが、これは、直徑10cm程度の試験体サイズで十分に実現可能であると考えられる。測定の手段としては、燃料の過渡的移動を動的に測定する高速中性子ホドスコープが最も有効である。安定沸騰のケースでは、気泡成長が緩慢であるために十分な測定が可能である。また、非常に保守的に気泡成長速度を仮定した場合において

も（図 3.2.4-4 に示す急速成長のケース）、直径 10 cm 程度の試験体内で気泡が成長するのに要する時間は 100 ms 程度であり、ホドスコープの時間分解能である 1 ms に比べて十分に長く、測定が可能である。

一方、4.3.4節における中性子ホドスコープの性能検討によれば、プール試験体の内部での気泡成長は、気泡周囲の液体燃料による遮蔽効果により、十分な解像度で測定することが困難であるとの見通しである。気泡形状の直接の測定は不可能であっても、プールの全体的な密度変化の分布はある程度見ることは可能であること、及びプール液面の上昇は高解像度で測定可能であることから、本試験の主要課題であるスティールの蒸発速度についての試験データは十分に得られるものと考えられる。

その他の炉内試験

炉心プール挙動の解明による厳しい再臨界モードの排除の他に、再臨界のポテンシャルを積極的に減じる手段として、炉心燃料集合体の上部に中性子吸収体を設置することが提案されている。炉心燃料が溶融した際に、この吸収体が下方に落下し、炉心プールに混合するとすれば、炉心の核的ポテンシャルを低減する負の反応度効果として有効となる。ここでの不確かさは、低密度の吸収体がうまく溶融燃料に混合するかどうか、混合しない場合にも十分な負の反応度効果が期待できるかどうかの点である。この現象についても、炉内試験は貴重な実験的知見を提供する手段となることから、「融体プールへの中性子吸収体混入試験」として試験計画を 3.3 節に示している。

3.2.4.4 SERAPH 試験の成果の反映及び期待される効果

SERAPH 炉施設は、従来の炉内試験施設と比べて、加熱規模の点からは大規模な燃料溶融を実現することを狙ったものであるが、遷移過程における事象推移そのものを炉心サイズの規模で模擬することはできない。駆動炉心に設置される試験孔サイズは高々直径 30 cm 程度であり、その内部に作る溶融燃料プールも高々直径 10 cm 程度となる。

融体放出挙動に関しては、個々の燃料放出流路を対象とした一連の試験を実施することになるが、解明すべき現象の規模はそれぞれの放出流路のスケールであり、このために必要な試験体は直径約 30 cm の試験孔に設置できる。たとえば、燃料集合体内ピン束流路については、重要となるバンドル効果は 37 ピン束（直径 5~6 cm）で適切に模擬されることが示されている。また、燃料・スティールのプールの熱流動挙動の基本メカニズムはプールのサイズに依らず共通である。炉心プール全体の挙動も結局は局所的な基本メカニズムにより支配されている。このような基本メカニズムに含まれる燃料の核発熱（内部発熱）、燃料からスティールへの熱移行、スティールの蒸発と気泡成長、及びこれに伴うプール全体の応答からなる個別現象は、現在提案している SERAPH の炉心プール挙動試験、すなわち、炉心体系をスケールダウンして SERAPH 試験体を構成するのではなく、炉心内のある場所で起こる基本現象をそのままのスケールで具現することを計画している試験において十分に実現できるものである。したがって、これらの基本メカニズムをいわば現象論的に実スケールで実験的に解明し、これを基に解析コードを開発・検証することにより、より合理的な安全評価に反映していく。

3.2.4.3 節の冒頭で述べたように、融体放出挙動及びプール挙動の解明は SERAPH 試験を唯一の研究手段とするものではない。当面は、SIMMER-III コードの開発・整備のような解析的アプローチを基盤として、炉外の模擬物質試験により基本現象をパラメトリックに押さえ、これを解析コードの検証に反映する。炉内試験では、最終的な実炉心物質での確認データを取得することにより、信頼性の高い安全評価を可能にする。

以上、融体放出挙動及び炉心プール挙動に対する炉内試験並びに試験結果の反映によって、FBR の実用化に向けて以下の重要な効果が期待される。

- ① 遷移過程の初期で、ピン束部の分散燃料の齊時的落下による厳しい再臨界は発生しないことが、実験的に裏付けられる。
- ② プールが全炉心に拡大するまでの過程で、炉心融体流出経路（集合体ピン束、制御棒案内管、集合体間ギャップ）を通して、炉心インベントリの約30%を超える炉心燃料の炉心外流出（軸ブランケットへの再配置を含む）が生じ、核的終息が達成される。
- ③ 仮に、全炉心プールに至る可能性があっても、プールの大規模なスロッシングを引き起こさないことが実験的に示される。
- ④ 炉心融体の炉外流出促進、または炉心への毒物導入のための効果的な設計方策の提案とその実用化（軸ブランケットの短縮化、制御棒案内管構造、集合体内設置型 SASS）が可能となる。

表 3.2.4-1 プール形成過程における反応度印加要因と炉内外試験の役割

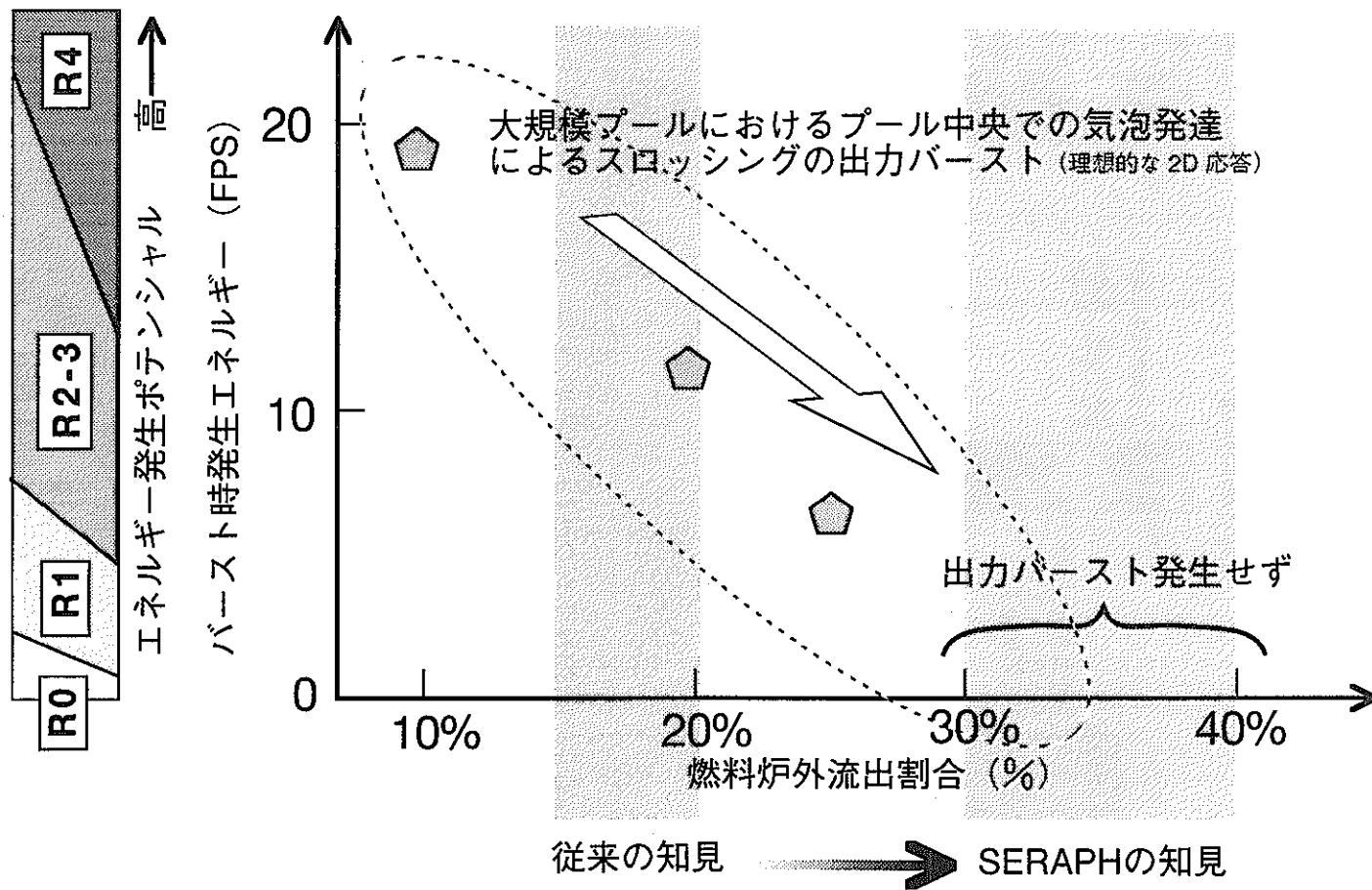
プール規模	反応度印加要因	発生エネルギーに対する重要度	現状の現象解明に対する必要度	炉外試験で解明すべき基本拳動	支配機構の実証に不可欠かつ炉内試験のみが達成可能な試験条件
集合体規模 低温プール	炉心上部分散燃料の落下	大	◎		・分散・再配置燃料の模擬と核発熱
	低出力集合体におけるボイド化進行	小	△		
中規模 プール	炉中心部の制御棒案内管におけるFCI 加圧	中	○	・実機模擬度の高い系でのFCIによる圧力発生拳動 ・圧力印加に対する沸騰プールの巨視的拳動	
中～大規模 プール	炉心プール沸騰に駆動されたスロッシング	大	◎	・体積加熱下での気泡成長・浮上拳動 ・不混和性2成分液体十気体系の混合・伝熱拳動	・実物質（燃料／スティール）、 ・核加熱（駆動炉心との核的結合拳動を含む）
	炉心外周部での制御棒案内管、集合体におけるFCI	小	○	・実機模擬度の高い系でのFCIによる圧力発生拳動 ・圧力印加に対する沸騰プールの巨視的拳動	
	上部プレナムのナトリウム再流入によるFCI	小	◎		
	炉心上方低温物質の落下・混入	小	○		

表 3.2.4-2 燃料流出挙動と炉内外試験の役割

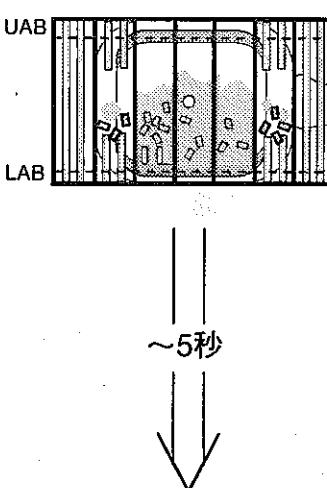
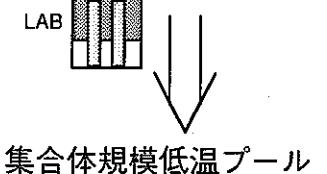
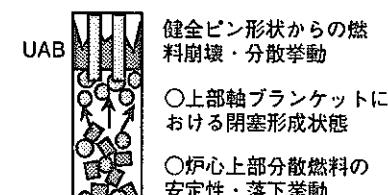
事象進展	流出経路	反応度印加要因／発生エネルギー緩和機構	主要支配現象	発生エネルギーに対する重要度	現状の現象解明に対する必要度	炉外試験で解明すべき基本挙動	支配機構の実証に不可欠かつ炉内試験のみが達成可能な試験条件
炉心冷却材ボイド化過程	健全ピン束	燃料流出による核的ポテンシャル低下	健全ピン束への融体侵入・固化挙動	小	○	・金属成分を含む融体の分離・固化挙動 ・固／液混相融体の固化 ・冷構造壁との相互作用 ・被覆管アブレーション	・実物質融体を用いた多ピン束流路 ・流動様式模擬（固／液混相） ・駆動圧力模擬
		機械的エネルギー発生遮断・低減		大	○		
	集合体規模低温プール	炉心上部分散燃料の落下による反応度印加	分散／再配置燃料の安定性	大	○		・実物質融体を用いた多ピン束流路 ・分散／再配置燃料の模擬と核発熱
		低出力集合体	1段目に同じ	大	○	1段目に同じ	
中～大規模プール	閉塞ピン束	機械的エネルギー発生遮断・低減	閉塞ピン束への融体侵入・固化挙動	大	○		・実物質融体を用いた多ピン束流路 ・閉塞ピン束流路の模擬と核発熱 ・駆動圧力模擬
		燃料流出による核的ポテンシャル低下					
	制御棒案内管	燃料流出による核的ポテンシャル低下	制御棒案内管壁の破損挙動	大	○	・実機模擬度の高い系でのFCI 発生挙動 ・FCI 発生下での融体流出挙動	
		FCI 発生圧力に駆動されたプールのスロッシング	FCI 壓力発生挙動	中	○		
			FCI 発生下での融体流出挙動				

表 3.2.4-3 プール形成過程におけるエネルギー発生緩和要因と炉内外試験の役割

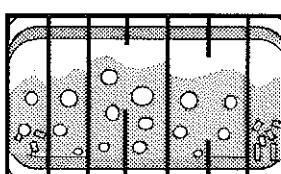
プール規模	発生エネルギー緩和要因	発生エネルギー緩和効果	現状の現象解明に対する必要度	炉外試験で解明すべき基本挙動	支配機構の実証に不可欠かつ炉内試験のみが達成可能な試験条件
集合体規模 低温プール	低温プールの1次元的分散	小	◎		
	ピン束構造による機械的エネルギー発生遮断・低減	大	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・金属成分を含む融体の分離・固化挙動 ・固／液混相融体の固化 ・冷構造壁との相互作用 ・被覆管アブレーション 	<ul style="list-style-type: none"> ・実物質融体を用いた多ピン束流路 ・閉塞ピン束流路の模擬と核発熱 ・駆動圧力模擬
中～大規模 プール	出力印加に対する沸騰プールの2次元的分散	大	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・加熱速度の変化に対する体積加熱沸騰プールの過渡応答挙動 	<ul style="list-style-type: none"> ・実物質（燃料／スティール） ・急速体積加熱模擬
	制御棒案内管からの燃料流出による核的ポテンシャル低下	大	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・実機模擬度の高い系でのFCI 発生挙動 ・FCI 発生下での融体流出挙動 	
	ピン束からの燃料流出による核的ポテンシャル低下	中	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・金属成分を含む融体の分離・固化挙動 ・冷構造壁との相互作用 ・被覆管アブレーション 	<ul style="list-style-type: none"> ・実物質融体を用いた多ピン束流路 ・閉塞ピン束流路の模擬と核発熱 ・駆動圧力模擬
	ピン束構造による機械的エネルギー発生の遮断・低減	大	◎		



炉心ボイド化過程



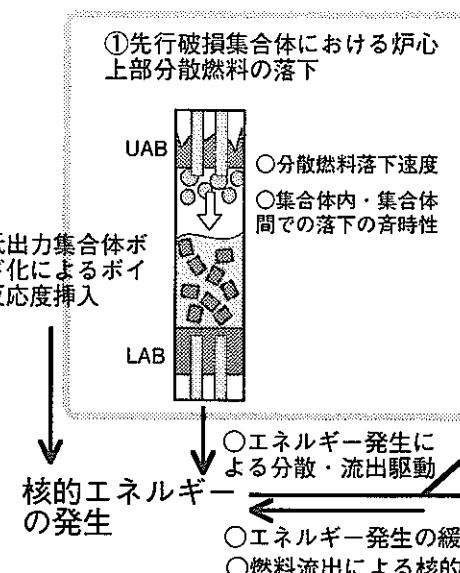
小規模プール



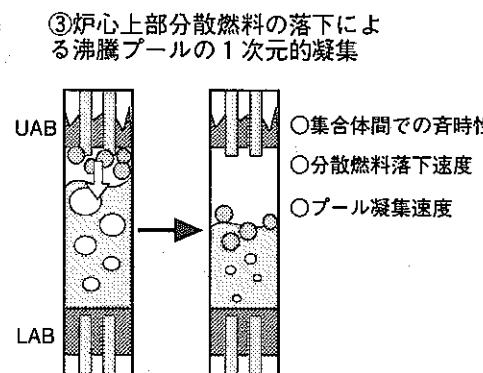
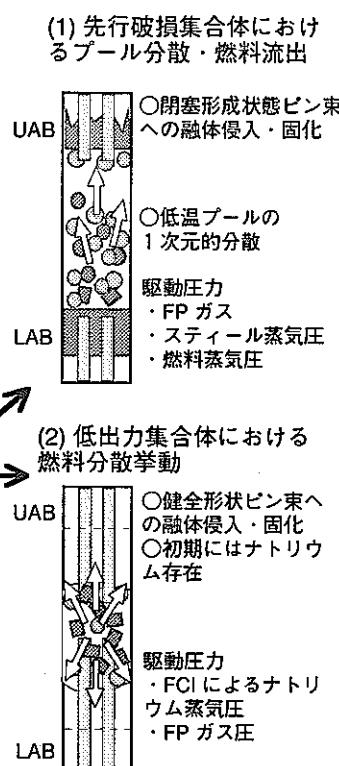
～2秒

中規模プール

反応度印加機構



エネルギー発生緩和機構



UAB : 上部軸プランケット
LAB : 下部
FPS : Full Power Second

図 3.2.4-2 プール規模と反応度印加／緩和機構 (1/2)

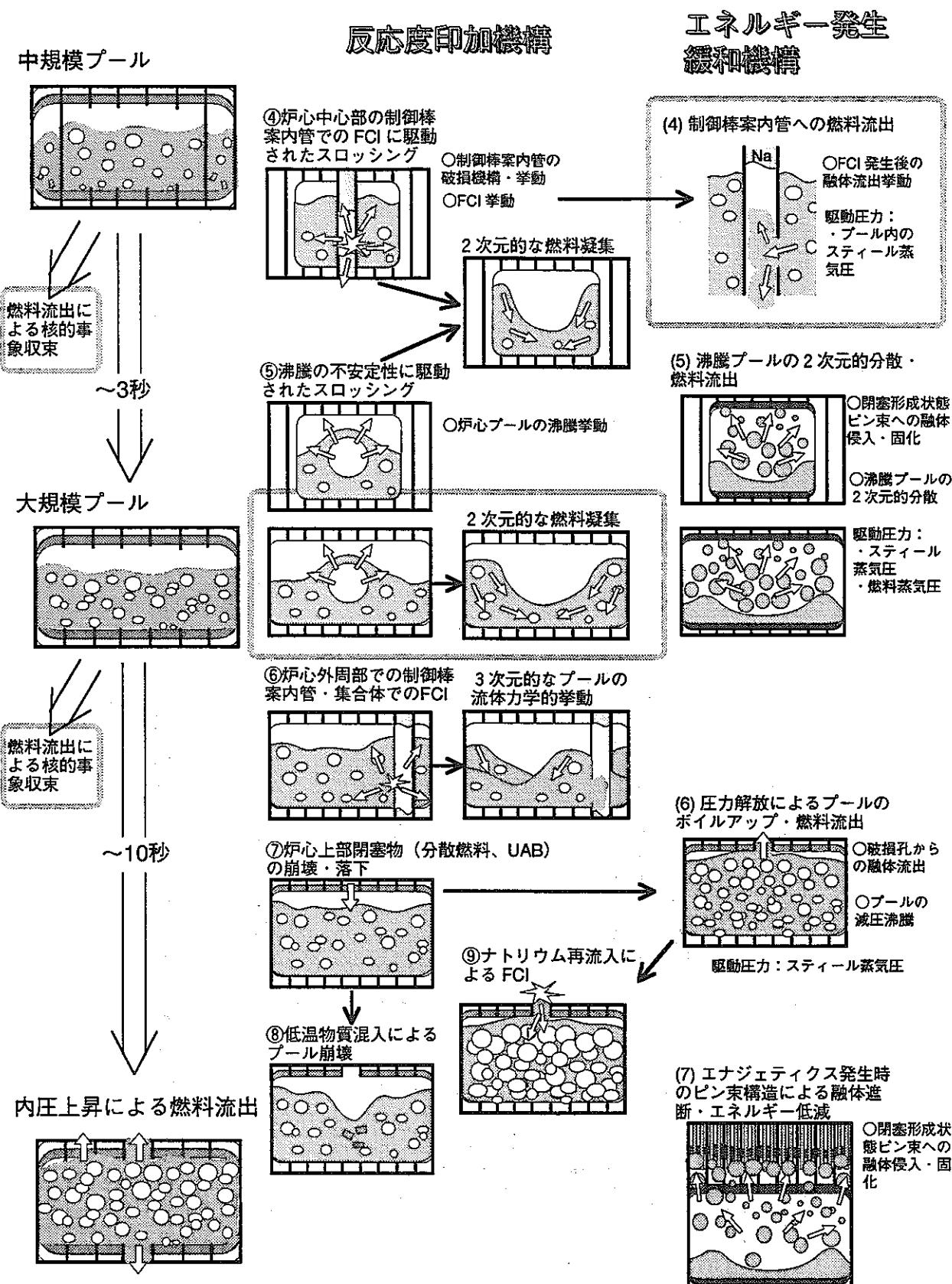


図 3.4.2-2 プール規模と反応度印加／緩和機構 (2/2)

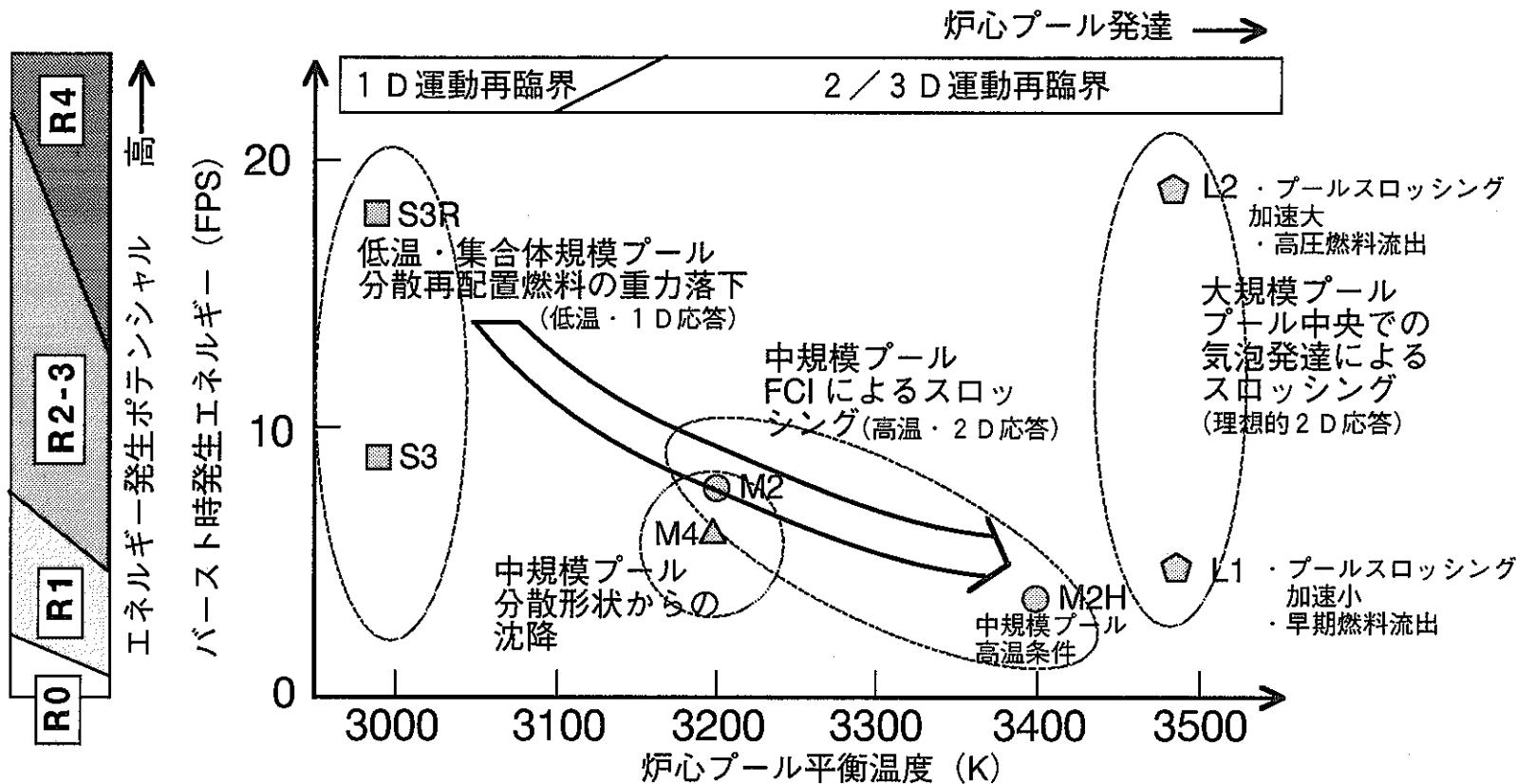


図 3.2.4-3 プール形成過程における出力バーストの例

(燃料 30 ton/アスペクト比 3 のプール)

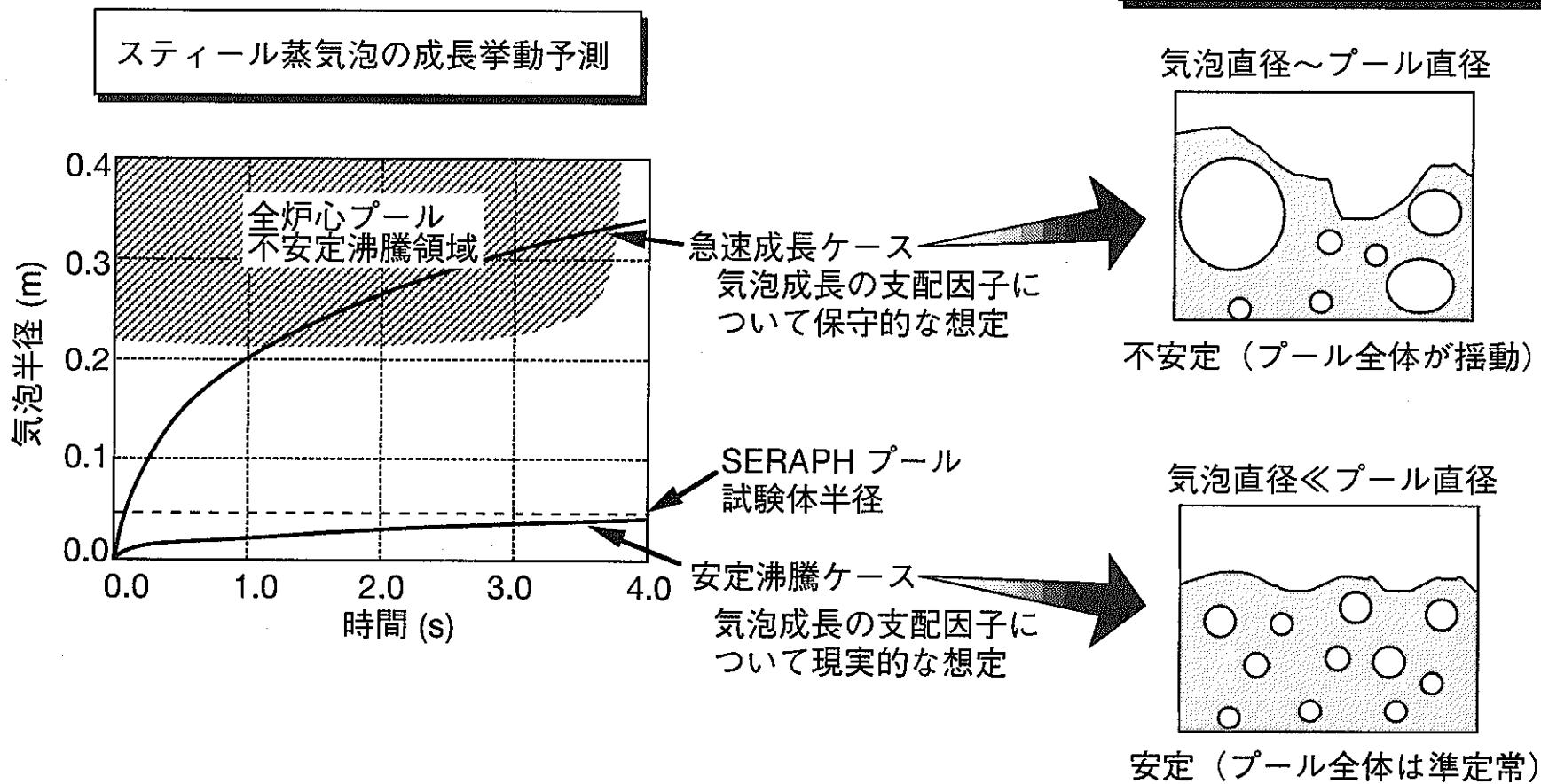


図 3.2.4-4 スティール沸騰挙動と炉心プールの安定性の関係

3.2.5 ソースターム研究

ソースターム研究に関連した我が国におけるその後の動きとして、LWRを対象としたアクシデントマネジメントに関する勧告が1992年5月に原子力安全委員会より出され、これを受けて電力業界が格納容器対策を含むシビアアクシデント対応を検討していることから、FBRにおいても、シビアアクシデントを含めた事故時のソースターム評価をより現実的かつ合理的に行うための機構論的な手法を整備しておくことはますます重要となろう。すなわち、FBRにおけるソースターム挙動を現象論的に解明することによって、それを踏まえて格納施設内における積極的なソースターム移行低減方策を講じることが可能となれば、シビアアクシデントにも対応した合理的な格納施設を成立できるようになると考えられる。

このような認識に基づき、本報告では、FBRのソースターム研究を進める上で必要となる試験研究の方法論と必要性を、既存の炉外および炉内試験の問題点と今後の課題についての調査検討結果を踏まえて、総合的に判断する。

3.2.5.1 既存の炉外試験データの精度と今後の課題

ここでは、これまでの検討で炉内試験の対象として抽出された以下の事象について、炉外試験データの現状精度と試験技術上の課題を述べる。

(1) 燃料からのFP放出挙動

燃料からのFP放出挙動に関する炉外試験は、これまで国外で実施されているのみであり、そのほとんどがLWRまたはHWRを対象とした試験^{(27)~(30)}である。FBRを対象とした試験は模擬照射燃料ペレットであるフィッシュウムを用いたKfKのSUSI試験⁽³¹⁾のみである。これらの試験では、燃料の加熱方法として制御が容易な高周波誘導加熱が採用されているが、試験時の最高温度として燃料の融点である約2800°Cを超えて実施された試験はない。得られたデータは1分間当たりのFP放出割合である放出速度定数として整理されているが、その現状精度は±2~3桁であり、今後の課題として、燃料からのFP放出挙動に影響を及ぼす燃焼度、燃料昇温速度、加熱時間の効果を考慮する必要がある。燃料の融点以上の領域ではデータが存在しない。これについては、3000°C以上の最高温度を制御可能な方法で達成できる試験技術上の課題があるが動燃で現在進めている実照射燃料からのFP放出挙動に関する炉外試験で解決できる見通しである。

(2) FP・燃料蒸気泡のナトリウム中減衰挙動

FP・燃料蒸気泡のナトリウム中減衰挙動に関する炉外試験は、水中での模

擬試験も含めて米国⁽³²⁾、ドイツ⁽³²⁾、フランス⁽³²⁾、日本⁽³³⁾で実施されている。気泡の発生方法に関しては、模擬燃料ピンに瞬間に直接通電してナトリウム中で蒸気泡を発生させる方法とラブチャーディスクやガラス球を破裂させて気泡を発生させる方法が採用されている。得られたデータは気泡内初期存在量とカバーガスへの放出量の比であるDF（除染係数）として整理されているが、その現状精度は±1桁程度である。この精度を向上させるための今後の課題としては、発生する気泡の温度変化や形状変化および気泡内のFPや燃料物質の物理化学的挙動を定量的に把握する必要があるが、ナトリウム中の気泡形状変化の測定に関してはその手法開発にも課題がある。これらの課題についても、動燃で現在進めている炉内ソースターム挙動に関する炉外総合模擬試験で今後取り組んでいく予定である。

3.2.5.2 既存炉内試験の問題点と今後の課題

ソースタームに関する炉内試験研究は、LWR、HWRおよびFBRをそれぞれ対象として行われており、現在実施中のものを含めて11試験^{(34)~(44)}ある。これらをソースターム測定の観点からまとめたものを表3.2.5-1に示す。この表から、FBRを対象とした試験^{(40)~(44)}は、LWRやHWRを対象としたもの^{(34)~(39)}と比較して測定装置等の種類や設置数が少ないことがわかるが、これをさらに分析検討した結果から以下のことがわかった。

(1) FBR対象試験でソースタームに関する必要情報が得られなかつた原因

FBRを対象とした試験のうち、Mol7C/6⁽⁴²⁾、CABRI⁽⁴³⁾、SCARABEE⁽⁴⁴⁾の3試験については、本来の試験目的がソースターム挙動を対象としたものではなかった。このため、既存施設にγ線スペクトロメータや各種サンプラーを設置するに当たっては制限（特に、試験体部分とカバーガス系）を受けざるを得なかつた。また、CABRI炉とSCARABEE炉は冷却材ナトリウムを再使用するシステム構成となっているため、バックグラウンドが増大することによるγ線スペクトルの測定精度への悪影響も無視できない。さらに、機器分析や湿式化学分析等を中心としたPIE実施部隊の不足もあげられる。

一方、表中にあるLWRやHWRを対象とした試験のうち、Phebus⁽³⁸⁾とBTP⁽³⁹⁾については、本来の試験目的がソースターム挙動を対象としたものであることに加えて、それまでの類似の炉内試験の経験を十分反映させる等の対策を取った上で現在実施されている試験であることから、その測定装置等も充実している。

(2) 実験手法上克服すべき点

上記の問題点については、水冷却炉とナトリウム冷却炉とのシステムの複雑さの違いや、冷却材の持つ物理化学的性質の違いが測定装置等に与える制約に起因するものも含まれている。特に、試験時のサンプリング装置に要求され、したがって実験手法上克服すべき点は、耐高温ナトリウム性を満たした上でその機能を發揮でき、かつ試験体部分等の限られたスペースに設置できるコンパクトな各種サンプラーを開発するとともに、その信頼性と機能的な配置方法を事前に炉外試験で十分検討しておくことである。

(3) 試験上の限界

実機の事故時に起こると想定される実事象の模擬性については、全てのテーマに共通する限界がソースタームに関する炉内試験にも存在するが、ソースターム試験に特有の問題に限定するならば、放出FPの物理化学形態に関するon-line測定並びに試験炉に設けられる試験孔と試験体および各種サンプラーの大きさの制約に起因するサンプラーの設置数の限界がある。

これらのことと加味し、現状の技術レベルでFBRのソースタームに関する炉内試験を実施する際の必要データの取得方法についてまとめたものを表3.2.5-2および表3.2.5-3に示す。

3.2.5.3 ソースターム研究の進め方と炉内試験の必要性に関する検討のまとめ

これまでの検討結果および今回の検討結果から、ソースターム研究の今後の進め方に関しては次のように判断された。すなわち、FBRのソースターム研究（特に、炉内ソースターム）については、炉心安全研究等に比べてその進捗度に遅れが目立つため、炉外試験を中心としたデータベースの拡充と機構論的な評価手法の整備を急ぎ、ソースタームに影響度の高い事象を定量的に絞り込む必要がある。また、炉内試験の必要性に関しては、炉内試験と炉外試験で得られたデータの違いを根拠に炉内試験の必要性、重要性を議論できるような精度の良い炉内試験データがこれまでに得られていないことから、近い将来に得られる炉内試験データ（例えば、NSRR⁽⁴⁵⁾）を十分検討した上で、再度炉内試験（特に、炉内ソースターム総合試験）の必要性、重要性を判断することが必要である。

表3.2.5-1 既存炉内試験とソースターム測定

対象炉型分類		LWR					HWR	FBR				
炉内試験名		SFD	STEP	ST	LOFT	Phesus	BTP	DFPP	FPL-II	Mol7C/6	CABRI	SCARABEE
原子炉施設名		PBF	TREAT	ACRR	LOFT	PHEBUS	BTB	SILOE	TTR	BR-2	CABRI	SCARABEE
実施国		米	米	米	米	仏	加	仏	日	ベルギー&独	仏	仏
試験対象（目的）		シビアアクシデント時の燃料挙動とソースターム挙動	シビアアクシデント時のソースターム挙動	↑	LOCA時の一次冷却系応答とソースターム挙動	シビアアクシデント時のソースターム挙動	↑	燃料ビン破損時のソースターム挙動	一次冷却系内のFP沈着挙動	燃料集合体局所流路閉塞時の燃料挙動	ATWS時の燃料挙動	燃料集合体入口完全閉塞時の燃料挙動
試験体部分	沈着クーポン	○	○		○	○	○					
	エアロゾルサンプリングフィルター		○	○	○							
	Ge(Li)γ線スペクトロメーター*		○		○							
	温度勾配管			○								
	ガスサンプラー			○								
	活性炭フィルター			○								
冷却系	DN検出器*											
	Ge(Li)γ線スペクトロメーター*	○			○	○	○	○	○	○	○	○
	エアロゾルサンプリングフィルター	○	○		○	○	○					
	ガスサンプラー	○			○		○					
	エアロゾルモニター	○				○						
	ICトータルγ線検出器*	○				○						
	Nalトータルγ線検出器*	○			○					○	○	
	冷却材サンプラー	○				○	○					
	沈着クーポン				○	○		○				
	カスケードインパクター					○						
カバーガス系	DN検出器							○	○	○	○	○
	ガスサンプラー	○				○						
	水素モニター	○	○									
	Ge(Li)γ線スペクトロメーター*	○			○	○	○	○				
	カスケードインパクター					○						
	エアロゾルサンプリングフィルター					○						
P I E	沈着クーポン					○	○					
	マススペクトロメーター						○					
	ICトータルγ線検出器*					○		○		○**		
	Ge(Li)γ線スペクトロメーター	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○
	ラジオグラフィー	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○
	破壊検査	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
化学分析						○	○					

*: オンライン測定装置、**: 試験時にガスサンプリング配管が閉塞したため、未測定

表3.2.5-2 炉内試験における燃料破損挙動とFP放出に関する
データ取得方法

評価項目	測定・評価方法	留意点
1. 燃料ピンの初期インベントリー	ORIGENコードで解析	<ul style="list-style-type: none"> ・照射履歴が明確であること。 ・シブリングピンを有していること。 ・試験燃料を前照射して短半減期核種FPのビルトアップを行ってること。
2. 燃料ピンの温度履歴	W/Re熱電対による計測	<ul style="list-style-type: none"> ・測定箇所はピン中心、被覆管、断熱シュラウド等である。
3. 燃料ピンの破損箇所とタイミング	<ul style="list-style-type: none"> ・W/Re熱電対による計測 ・γ線スペクトロメータによる計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・トータル γ線の時間変化を炉心上部で計測 ・試験後、γ-Tomographyをとる。
4. 燃料被覆管破損・溶融	<ul style="list-style-type: none"> ・音響計測 ・被覆管内圧力計測 	
5. 燃料ピンから放出されるFPの種類と量	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料上部に設けられたクーポンへの沈着FPのPIE ・γ線スペクトロメータによる計測 ・燃料ピンPIEによって残留FPの分布と量を計測 	<ul style="list-style-type: none"> ・クーポンは数種類用いて、化学形態を同定できること。 ・スペクトロメータは高速で計測し、コンピュータによって較正及び核種の同定を自動的に行う。較正はisotope注入や放射化ワイヤーを用いて行う。 ・試験後、試験体のγスキャンを行う。

表3.2.5-3 炉内試験におけるFPの輸送挙動、ステンレス鋼への沈着速度に関するデータ取得方法

評価項目	測定・評価方法	留意点
1. 冷却系配管へ流れ込むFPの種類と量	γスペクトロメータによる計測	
2. 冷却系の配管温度履歴	熱電対による計測	
3. 冷却材流量	電磁流量計による計測	配管温度及び冷却材温度を計測する。
4. ステンレス鋼への沈着FPの種類と量	γ線スペクトロメータによる計測	グラブサンプリングを一定間隔で行い、γ線スペクトロメータで計測する。サンプリングは複数本。
5. Trapが期待できないFPの種類と量	<ul style="list-style-type: none"> ・カバーガス空間内でのクーポンによるサンプリングとPIE ・気相のγスペクトロメータによる計測 ・マススペクトルによる分析 	マススペクトルはOn Line, Off Line

3.2.6 新型燃料に関する安全研究

窒化物、金属、低線出力MOXなどの「新型燃料」が、従来型MOX燃料よりも総合的な安全性において優位性を持つことを示すためには、CDA回避の観点のみでなく、運転信頼性、過渡時の健全性確保、異常拡大の防止、及びCDAの格納などの観点からの研究がMOX燃料炉心に対するものと同等のレベルで必要となる。これらの新型燃料については、照射実績が少ないとから、運転信頼性、過渡時の健全性、異常拡大の防止性に関して不確定要素が多くあり、そのことが総合的な安全性の確認をむずかしくしている可能性が高く、その解決が重要な課題である。

以下に、これらの燃料に対する課題を整理して示す。その検討においては、図3.2.6-1, -2,-3,-4に示した過渡分布を前提とした。

3.2.6.1 定常照射時の安定性

低線出力MOX燃料

低線出力MOX燃料の場合、燃料温度が低く（これはATWS時の炉心崩壊回避に有利な条件）、差再組織化やガス放出が抑制される。燃焼度が低い間は、この状況は軽水炉燃料の状況に近く、大部分のFPガスは燃料内部に蓄積されるものと考えられる。燃焼度が進むと、燃料粒の細分化と粒界へのガス移行などによって燃料マトリクス中のFP保持能力が低下し、低温でもFPガスの放出量の増加が生ずる^(4,6)傾向があるが、軽水炉燃料ではペレット周囲のリム領域からこの現象が見られるのに対して、FBR燃料では7a/o程度以上で非再組織化領域全般に見られる。低線出力MOX燃料の場合、EOL線出力は一層低下していることを考えると、燃料全体にわたって燃料粒の細分化が生じるとともに、かなりの粒界ガスが保持された状況になるものと考えられる。このような状況で定常照射が10a/o以上の高燃焼度に至った場合の燃料健全性については、知見が殆どなく、実用化において解明すべき課題となる。

窒化物、金属燃料

これまでの報告の範囲では、これらの燃料の定常照射時の安定性に否定的な見解は示されていない。しかし、MOX燃料の経験から類推すると、例えばFCCIの可能性など、今後の照射データの蓄積とともに種々の改良すべき点が明らかになり、これを受け設計が進展してゆくものと考えられる。したがって、照射データの蓄積が急務である。

3.2.6.2 健全性の確保

低線出力MOX燃料

過出力事象においては、定常照射中に粒界ガスが豊富に蓄積された”cold gassy pin”的特性のために、線出力の絶対レベルが低くてもFPスウェーリングによるPCM Iは顕著なものとなる。ただし、PCM Iによる破損の可能性は、高線出力MOX燃料の場合

と同等かそれ以下と考えられる。また、低線出力MOX燃料の場合、PCM Iにより破損を生じたとしても燃料溶融は生じにくく、破損後の冷却性は十分に達成できる。したがって、過出力事象に対する安全性はかなり向上するものと考えられるが、その確認・定量化のためには炉内試験の実施が必要である。

除熱低下型事象に対しては基本的に従来型MOX燃料と同様であると考えられる。

窒化物、金属燃料

ヘリウムボンドの窒化物燃料では、図3.2.6-1、-2に示す定格時及びスローTOP時の燃料温度分布によって規定される燃料内部の温度上昇時の燃料組織の安定性（窒素ガスの解離の影響）が不明確である。また、FPガス保持能力は極めて高いと考えられ、過渡時の燃料スウェーリングによるPCM Iも重要な課題である。金属燃料については、スローTOPでの破損データも若干得られており、共晶により劣化した被覆材の内圧負荷による破損という破損モードであると報告されている。したがって、図3.2.6-3に示す除熱低下型事象については共晶の観点から特別な注意を払う必要があるが、いずれの場合も高燃焼度条件を含めたデータ蓄積が必要と考えられる。なお、窒化物燃料については従来型MOX燃料と同様、共晶の問題はないと考えられる。

3.2.6.3 異常拡大の防止

低線出力MOX燃料

線出力化は、局所異常において小規模発熱閉塞の安定冷却が期待できるので、確実な検知と炉停止の観点から極めて有利と考えられる。ただし、燃料内蓄積FPの増大に伴い、損傷拡大を促進させる要素も含まれるため、その解明には炉内試験の実施が必要である。

窒化物、金属燃料

ナトリウムボンド燃料では、ピン破損時のボンド喪失による破損部より上方の燃料の溶融が考えられるので、その場合の損傷拡大挙動を解明する必要がある。破損燃料からのDN放出と損傷拡大速度との関係は、これらの燃料の場合の安全性を律則し得る重要課題である。なお、燃料の熱伝導度が高いことは、局所事故において被覆管や構造材への熱的アタックをより厳しくする可能性があり、破損拡大速度が極めて注目される。さらに、金属燃料では、燃料融点が低いことも、損傷拡大挙動を左右し得る。

このように、異常拡大防止の観点において、これらの燃料の安全研究課題は大きい。

3.2.6.4 ULOF、ULOH S時の炉心損傷回避

低線出力MOX燃料

ULOF、ULOH S時に負の反応度効果によって一応の静定状態に至った場合を考えると、ピン破損の有無は、プレナムガス圧と高温化した被覆管の強度低下、及びこの

のような静的状態の持続時間に左右される。ただし、この問題は、反応度応答の推移状況に左右されるといつても基本的には被覆管物性の問題であるから、従来型MOX燃料の研究が活用できる。持続時間の途中でのクリープ破損などを仮定した場合の事象進展については、新たな課題として検討する必要が生ずる。

窒化物、金属燃料

ナトリウムボンド燃料では、ULOF、ULOHSからの出力静定時に燃料温度は冷却材温度とともに上昇する。したがって、被覆管の強度低下の観点のみならず、燃料内のFPの効果などを含めた評価が必要であり、炉内試験の課題となる。被覆管のクリープ破損や共晶破損からの事象進展も同様に課題となる。

3.2.6.5 炉心安全研究

低線出力MOX燃料

①UTOP事象起因過程

低線出力MOX燃料炉は、高線出力MOX燃料炉に比べて運転時の燃料温度が低く、出力補償のための制御対象反応度が小さいので余剰反応度を小さく設定でき、UTOPの挿入反応度も低くできるという特徴を有するが、それでも、UTOP事象に対して炉心崩壊を回避することは、他のパッシブ・セイフティ概念を導入した場合と同様、難しい問題といえる。窒化物や金属燃料の場合との比較では、過出力時の燃料温度上昇が大きいことが、UTOP事象において逆に負のドップラー反応度によって出力上昇を抑える上で有利な要素となる（金属燃料では余剰反応度は小さいが、燃料温度が上昇せず、低い反応度挿入で出力が大きく上昇する）。したがって、UTOP時の炉心崩壊の回避性能において、低線出力MOX燃料炉心が優位性を持つ可能性が高く、燃料安全研究のスローティングのデータを活用できる。また、挿入反応度が炉心損傷に至るような条件について考えると、低線出力炉心のUTOPは従来型MOX燃料炉心の部分負荷運転状態からのUTOPに類似したものとなる。この場合、燃料ピンの破損の前に冷却材沸騰を生じ、これによるボイド反応度が炉心崩壊をドライブする形でULOFと類似の事象進展となる。したがって低線出力炉のUTOPの炉心損傷挙動はULOF事象の研究によって包絡されるものと考えられる。

UTOP時の破損後挙動については、スローティング試験によってデータを得ることにより把握できる。

②ULOF、ULOHS事象起因過程

低線出力炉におけるULOF、ULOHS時の炉心崩壊を考える場合、負の反応度効果が十分でなく、かなりの炉出力低下を達成したものの冷却材沸騰を生じてしまった状況からの事象進展を考える必要がある。この場合、冷却材のボイド化が出力上昇を加速することとなるが、炉心崩壊までに入る負のドップラー反応度が大きいこと、出力と冷

却材流量レベルがそれぞれ低いことなどが関連して、炉心ボイド化の進展の度合いが決まる。炉心崩壊後は、燃料の分散によって負の反応度が得られ、炉出力は低下し、遷移過程に推移する。

”cold gassy pin”であることにより、炉心崩壊後については燃料分散の駆動力は大きいものと考えられるが、炉心周辺の未沸騰冷却材領域でのピン破損を考えると、LOF-driven-TOPのリスクが増える要素を有する。このように、炉心崩壊初期過程の事象進展を考える上では低線出力MOX燃料に特徴的な要素もあるが、概して従来型MOX燃料の安全研究の成果が利用できる。

③遷移過程、事故後過程（未臨界状態を達成した後の炉心物質再配置、崩壊熱除去などのフェーズをここでは「事故後過程」と呼ぶものとする）

遷移過程は、燃料インベントリーや炉心扁平度がプール挙動へ及ぼす影響、あるいは炉心物質の炉心外への流出のタイミングなどによって左右され、線出力依存性というよりは炉心設計依存性の側面が強い。炉心設計依存性として考えると、一般に、再臨界のポテンシャルが増加する場合でも、炉心物質の流出タイミングが早い場合には、遷移過程エナジエティクスのリスクは減少し得る。ただし、流出先での再臨界をも考慮した上で総合的なリスクを評価する必要がある。

事故後過程との関係では、低線出力化の効果は低発熱密度でより量の多い炉心融体の挙動ととらえることができる。融体移動の観点からは、発熱密度よりも融体の蓄熱が支配的であり、高インベントリーでは概してデブリ化して炉内冷却することの困難さは増加する。デブリ化に成功したものとして、その後の崩壊熱除去を考えた場合には、低発熱密度でデブリ厚みの大きいものと高発熱密度で厚みの小さいものの冷却の容易性の比較となるが、チャネリングの効果などを考慮した検討が必要である。

以上のように事象進展そのものについては線出力への依存性が考えられるものの、安全研究上の課題は従来型MOX燃料の場合と共通である。

窒化物燃料、金属燃料

①UTOP事象起因過程

UTOP事象に対しては、炉心損傷の可能性が否定できないものと考えられる。したがって、スローティOPにおける破損挙動と破損後挙動の解明が課題となる。また、炉心損傷事象についてはULOF事象の研究によって包絡される。

②ULOF、ULOH事象起因過程

低線出力MOX燃料炉心の場合と同様、かなりの炉出力低下を達成したものの冷却材沸騰を生じてしまった状況からの事象進展を考える必要がある。この場合も、冷却材のボイド化が出力上昇を加速することとなる。図3.2.6-4は急速な出力上昇時の燃料及び冷却材の温度分布を各種の燃料について模式的に示したものであるが、燃料から冷却材への伝熱性能の高いナトリウムボンド燃料では、単相冷却材中での燃料破損は生じ難く、

出力上昇に伴う炉心冷却材のボイド化が急速に生じる。急速なボイド化は反応度挿入速度を増加させる方向であり望ましくないが、反面、ボイド化が適度の速さで生ずる場合には、MOX燃料でのLOF-driven-TOPのような厳しい事象を回避できる可能性もある。また、燃料ピンの破損モードと破損後物質移動は、MOX燃料の場合と大きく相違することも予想され、事象推移を左右する重要な研究課題である。

したがって、各燃料について、MOX燃料同様、ULOF燃料破損分散挙動の試験を実施する必要がある。

③遷移過程、事故後過程

遷移過程については、沸騰プールの安定性の観点から、やはりMOX燃料と同様のプール挙動試験が必要である。また、炉心損傷過程でのFCI挙動についても、炉外試験によってMOX燃料の場合と同様の研究を行う必要がある。さらに、炉心からの融体流出挙動についても炉内・炉外試験による研究が必要である。

事故後過程については、デブリ化して炉内冷却することの容易性に関わる研究が、MOX燃料同様、課題である。

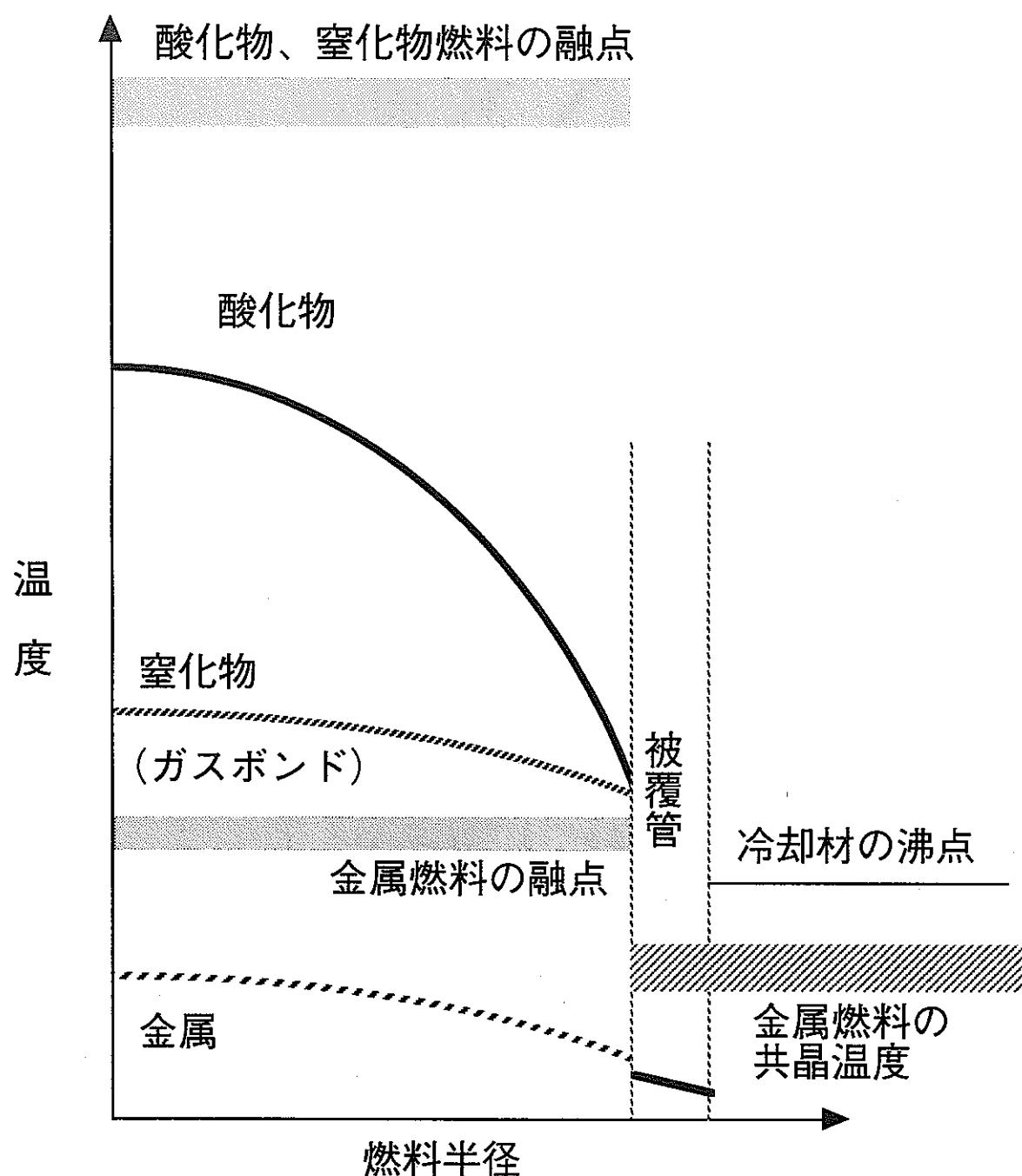


図3.2.6-1 定格出力時の燃料温度分布の概念

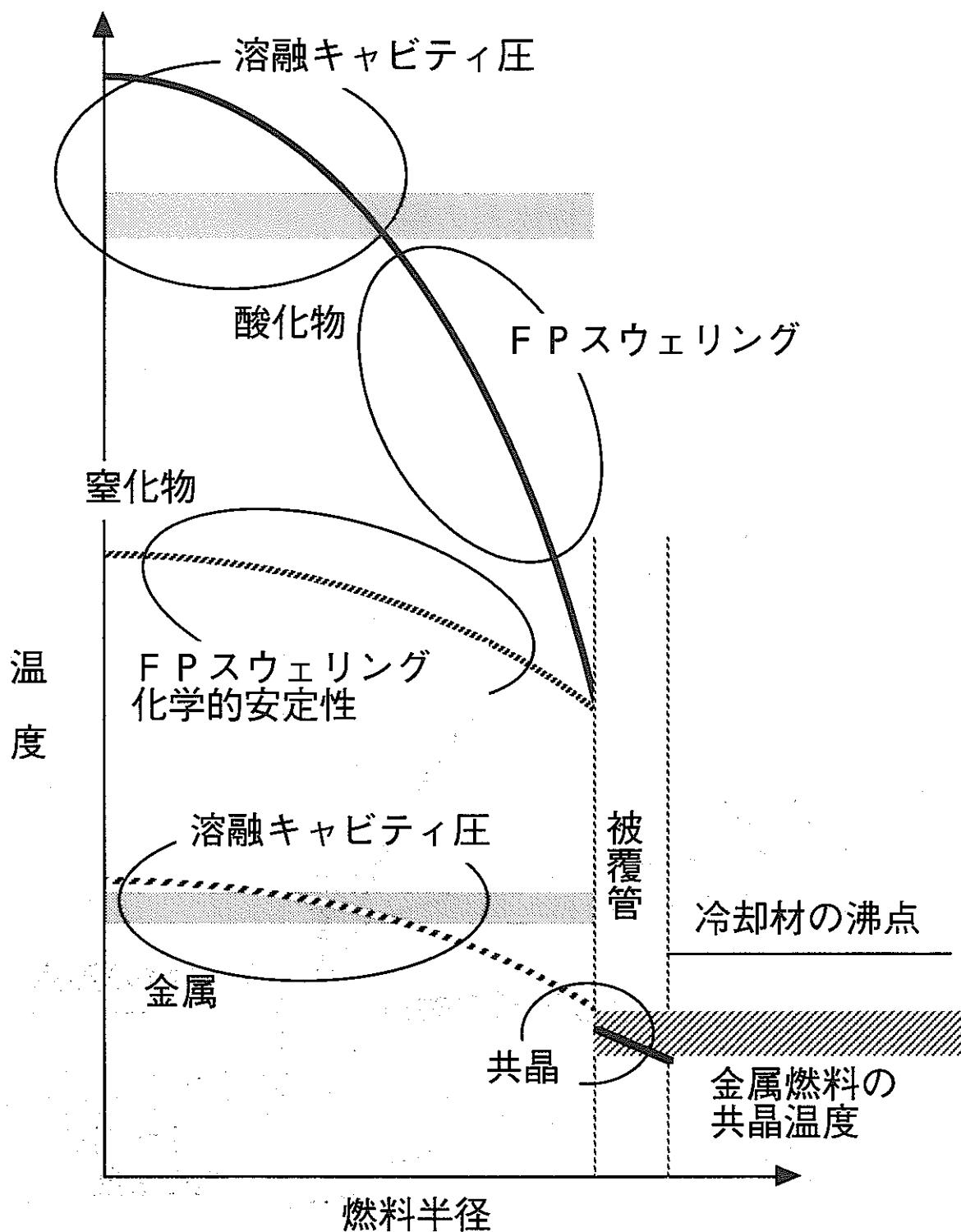


図3.2.6-2 スローTOP時の燃料温度分布の概念

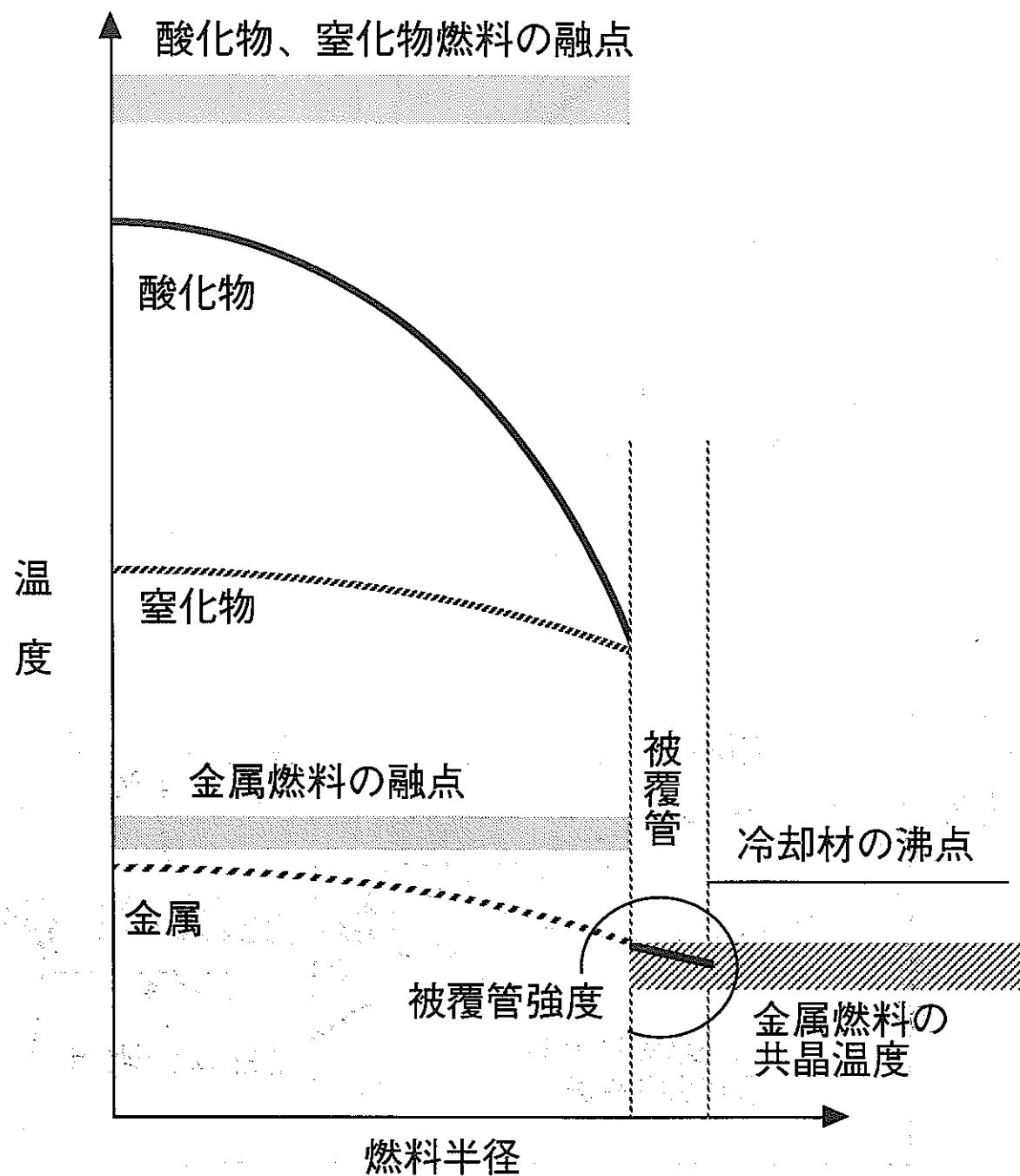


図3.2.6-3 除熱低下時の燃料温度分布の概念

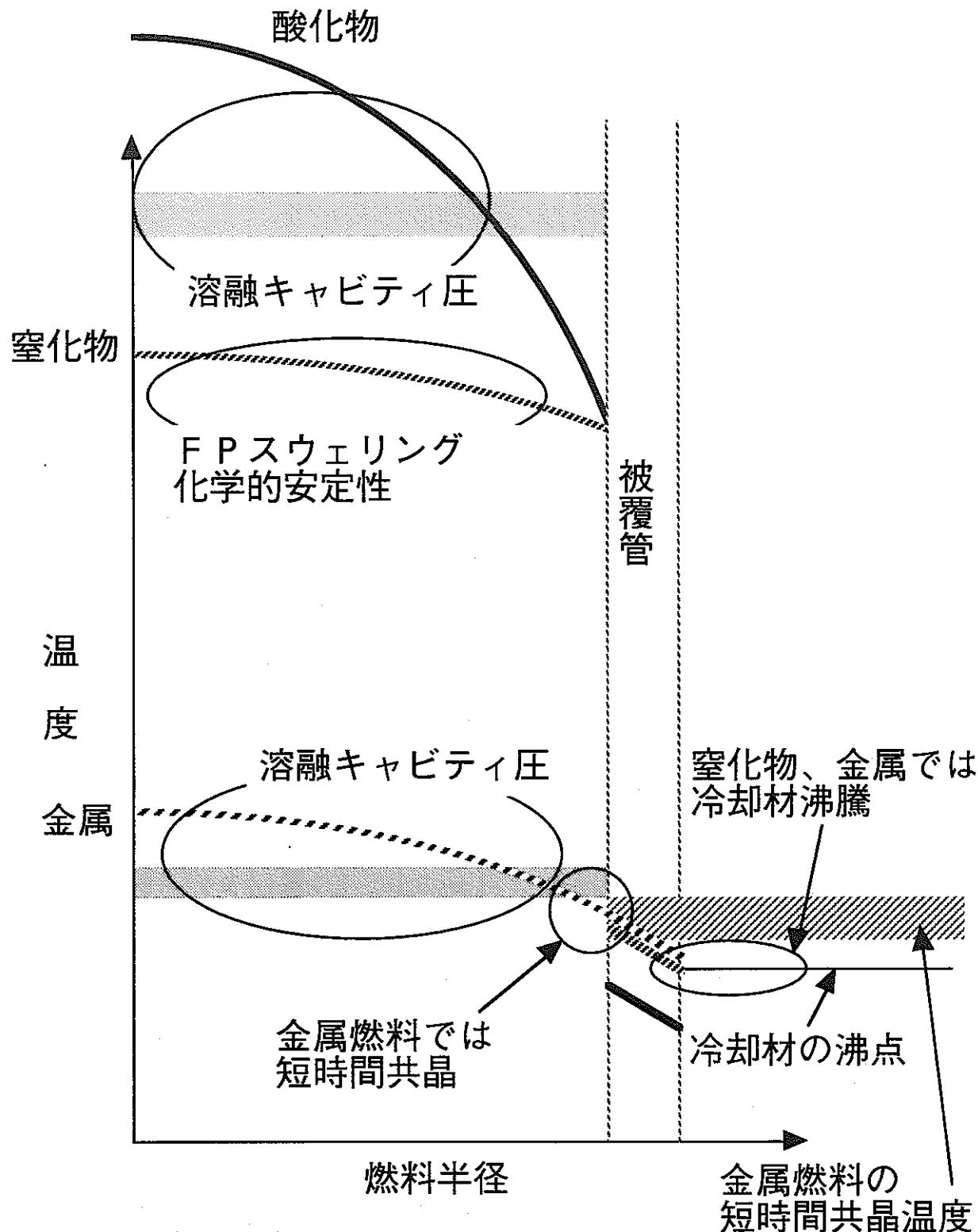


図3.2.6-4 急速な出力上昇時の燃料温度分布の概念

3. 3 SERAPHによる試験研究テーマの提案

3. 3 SERAPHによる試験研究のテーマの提案

本節では、実用化先導研究テーマ及び基盤安全研究テーマに関する検討から提案されるSERAPHにおける試験研究テーマをまとめる。

SERAPHによる試験研究テーマの一覧表を表3.3-1に示した。同表には、概ね深層防護のレベルに従って、合計8分野23テーマが挙げられている。右端の列に記した番号は3.1節「実用化先導研究テーマに関する検討」の中で使用された分類番号であり、本節で用いる分類番号と対照できるようになっている。

表3.3-1に示した炉内試験テーマの各々については、本節後段に示すまとめ表の中に、1.試験名称、2.試験の目的、3.現状の知見と問題点、4.試験によって確認すべき事項とその方法、5.成果の反映方法、6.期待される効果、7.安全設計・安全評価基準類との関連性、8.試験体図、9.試験体仕様、10.試験パラメータ、11.試験方法、が簡潔にまとめられている。これらは、これまでの検討のエッセンスを包絡し、かつ本報告の3.1節、3.2節での検討の結果を受けて作成されている。

表3.3-1の特徴は、本報告書第2章における目標設定に対応して、既報告の内容に対して、CDAへの拡大防止、早期終息、新型燃料の分野を加えたこと、及びCDAの影響評価から影響緩和の追求へ重点を移したことである。

CDAへの拡大防止と早期終息の分野に挙げられたテーマは、実用化先導研究テーマが主であるが、#10「早期終息シナリオ燃料挙動試験」、#17「部分損傷集合体の長期冷却挙動試験」のように、シナリオ上は基盤安全研究テーマとの境界に位置しているために3.1節の検討では陽には取り上げられていなかったテーマもある。

新型燃料については、MOX燃料に対して計画されている#1から#20までの試験研究が、各新型燃料について同様に計画されるべきであろう。しかし、ここでは、新型燃料の開発自体を支援・推進するための研究（#21）、新型燃料開発の1つの目的である炉心損傷の回避に注目した研究（#22）、深層防護の観点からシビアアクシデントに進展した場合の燃料挙動に注目した研究（#23）の3テーマに絞って記述した。この分野については、新型燃料の開発の進展と併せて、今後さらに必要な研究テーマを切り出してリストに加えていくこととなろう。

図3.3-1は表3.3-1に示された研究テーマを炉心の出力・流量状態によってまとめたものである。同図に示すように、燃料は、MOX燃料、新型燃料を問わず、定常運転時には100%流量、100%出力の状態にある。また、炉停止時には崩壊熱出力レベル、低除熱量状態にある。表3.3-1に示した安全研究テーマは、これらの状態からの逸脱に対応している。同図で特に強調すべきは、たとえばULOF時にも未沸騰終息となることを期待して導入を検討されている低温燃料においても、除熱量の不確定性、反応度応答の不確定性によって、燃料の健全性が問題となる領域に入る可能性があるということである。#10や#17、及び新型燃料に関する#22のような試験テーマは、そのような領域にある燃料の健全性、あるいは事故の終息性に関する研究である。

分類番号#12、13、14は、基盤安全研究テーマとしてこれまでに検討してきたもので

あるが、3.1節では、これらにさらに溶融燃料の炉心外への流出を促進する構造を検討するとの観点を加えて評価を行った。これらは、基盤安全研究テーマをさらに発展させて積極的な影響緩和方策を提示したものの例である。

図3.3-2はSERAPH試験で使用する標準的な試験体ループの概念図である。本節に挙げる各試験テーマの多くはこのような試験体ループを用いるため、これを標準試験体ループと呼んで各まとめ表の中の試験体図での重複使用を避けた。したがって、試験体図の部分に「標準試験体ループ使用」と記してある場合には、炉心内試験口に挿入される試験部のみが図示されている。

表 3.3-1 SERAPH試験研究テーマの一覧

分野	分類番号	テーマ	先導テーマでの番号
燃料安全	燃料健全性	1 単一ピン破損限界試験	
		2 19本ピン束破損限界試験	
	異常拡大防止	3 過出力時集合体内少数ピン破損挙動試験	
		4 集合体内損傷拡大挙動試験	
CDAへの拡大防止	5 中性子束高で溶融するヒュージブルメタル特性試験	10	
	6 燃料ピン型SASS機構実証試験（防止、緩和）	11	
	7 集合体内SASS実証試験（防止、緩和）	12, 19	
	8 中空ペレット燃料におけるピン内燃料移動挙動試験	20	
CDAの影響評価／緩和	9 人工的リードチャネルでの燃料流出挙動試験	21	
	10 早期終息シナリオ燃料挙動試験		
	11 ピン束燃料分散挙動試験		
	12 集合体内ピン束への融体流出挙動試験：低温プール条件	22	
炉心崩壊過程	13 集合体内ピン束への融体流出挙動試験：高温プール条件	22	
	14 制御棒案内管への融体流出試験	24	
	15 炉心プール沸騰挙動試験		
	16 融体プールへの中性子吸収体混入試験	18	
	17 部分損傷集合体の長期冷却挙動試験		
ソースターム	18 燃料からのFP放出挙動炉内試験		
	19 燃料蒸気泡挙動炉内試験		
	20 炉内ソースターム総合試験		
新型燃料	21 新型燃料に関する燃料安全研究試験		
	22 新型燃料に関する低出力・低除熱条件での燃料挙動試験		
	23 新型燃料に関する炉心安全研究試験		

イタリック文字は安全研究の主要対象

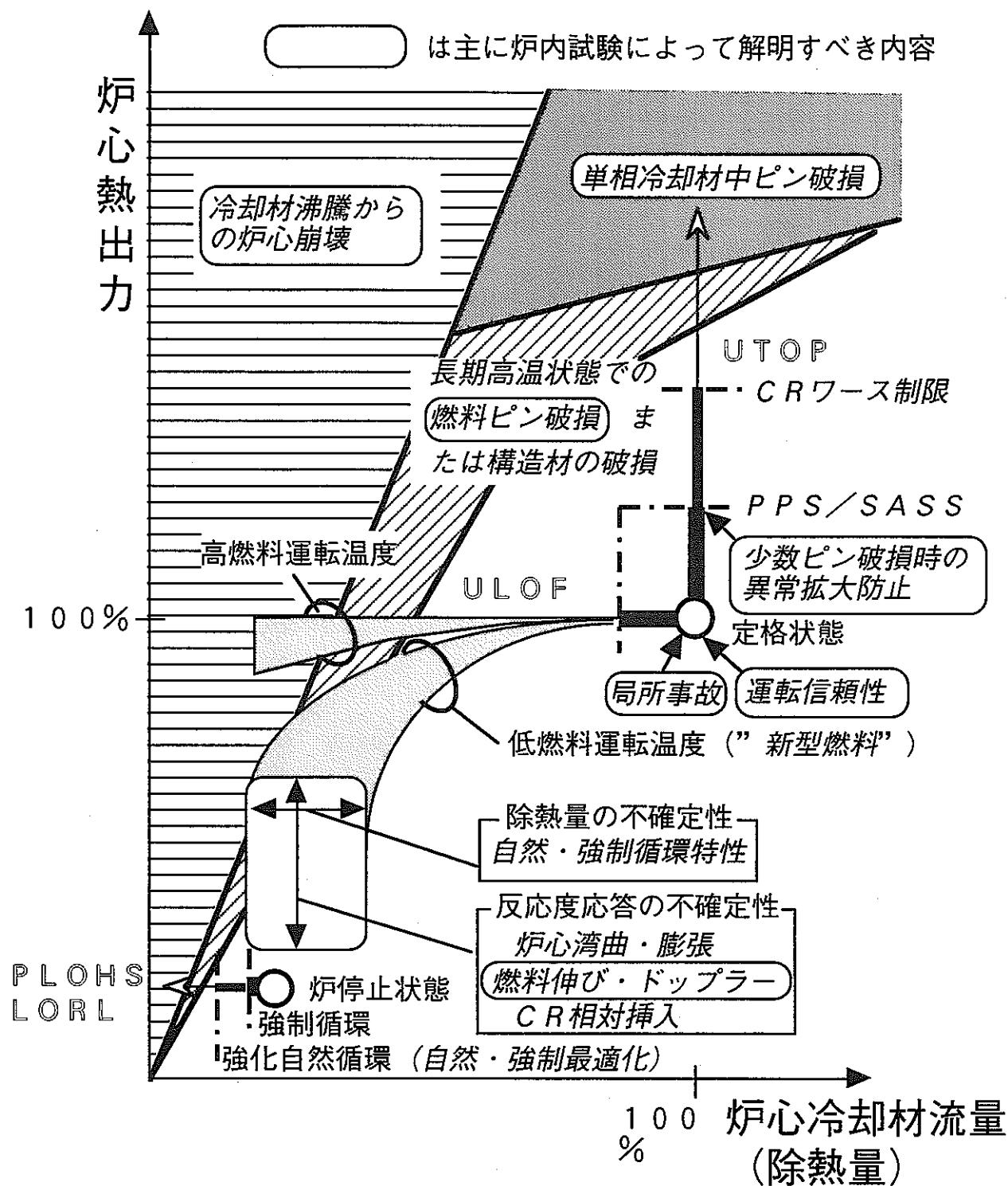


図 3.3-1 高速炉安全研究の主要対象とその設計依存性、及び炉内試験によって解明すべき内容

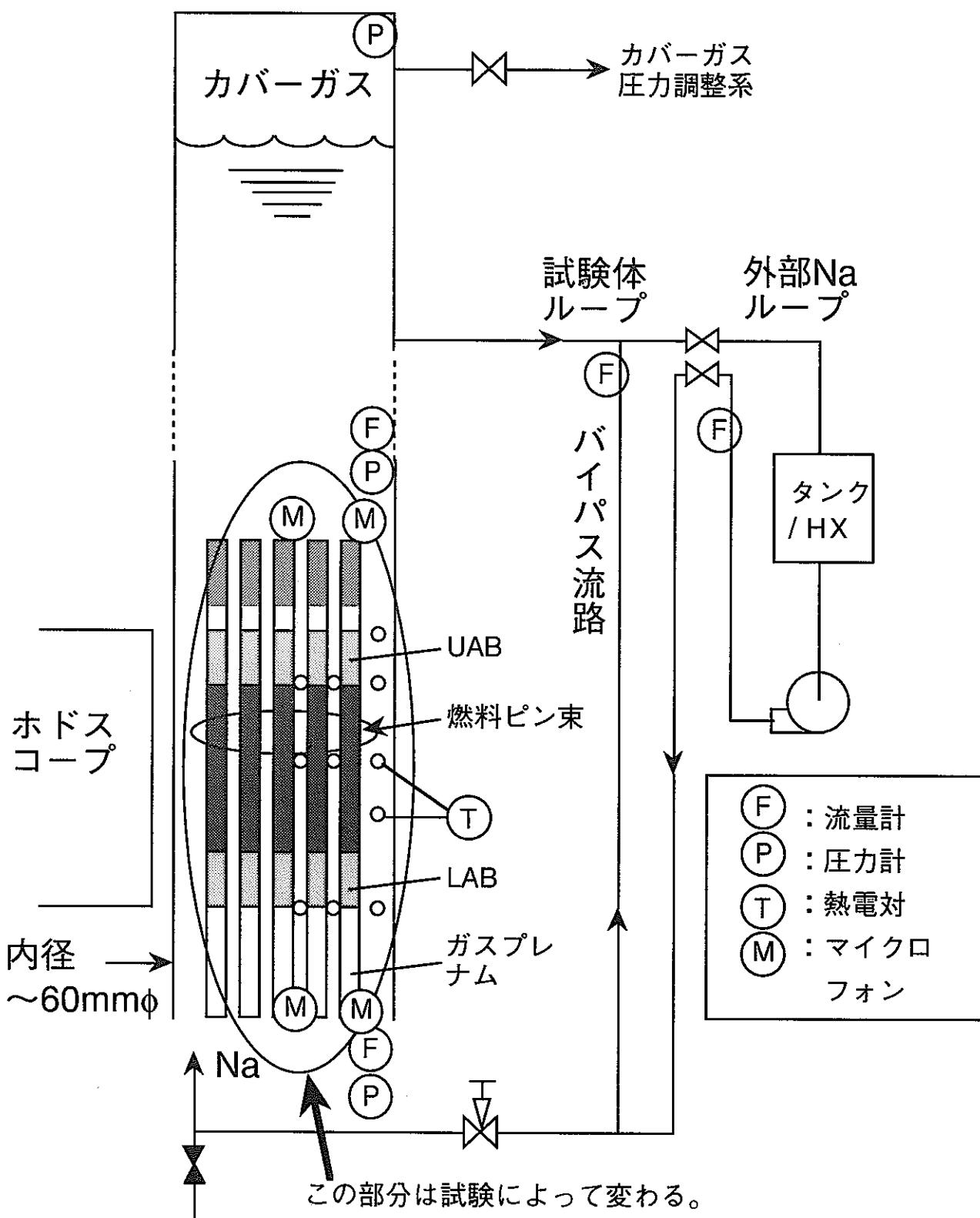


図 3.3-2 標準試験体ループ概念図
(19本ピン束試験体の例)

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

1

1. 試験名称： 単一ピン破損限界試験

2. 試験目的： 燃料条件・過出力条件に依存した破損限界と破損モードの解明、解析コードの改良・検証を通じて燃料設計高度化に対応した破損評価手法の整備と、高破損限界燃料の開発を可能にする。

3. 現状の知見と問題点： これまでの照射燃料による破損データとしては、高密度燃料による10数種の破損データが得られているが、今後の設計高度化において重要となるFCMIの効果について、低スウェーリング被覆材、高燃焼度燃料、あるいは中空燃料といった条件でのデータがほとんど得られていない。また、このような燃料挙動については、FPガス挙動を中心に詳細なモデル化が従来よりなされてきているが、新たな燃料条件や過渡条件への外挿には不確定性が大きく、破損データベースの整備が課題となっている。なお、既存施設では熱中性子束減衰や軸方向長などの点で問題がある。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい物理量：破損限界線出力

燃料溶融範囲と溶融領域圧力

固相燃料スウェーリング

冷却材・被覆管温度

被覆管変形量

(2) 測定対象信号等：冷却材流量、流路圧力、音響信号、中性子ホドスコープ（破損前ピン内溶融燃料移動の測定が可能）、冷却材・被覆管温度、ピン内圧、被覆管歪ゲージ、被覆管伸び計測、過渡後PIE

(3) 試験パラメータ： 右ページの試験仕様に表示

(4) データから目的の物理量を導く方法

破損データから実機の一般的な燃料条件や過渡条件における破損条件を評価するためには、破損に至る以前の被覆管への機械的負荷などのメカニズムの解明と定量化が必須であり、非破損・破損各試験を組み合わせて実施することが有効である。破損線出力は定常でのヒートバランスと過渡時の出力変化から得られる。破損位置は出入口流量応答の時間差、中性子ホドスコープでの放出燃料の検出などの過渡データからも得られるが、破損後直ちにスクラムして破損状態を保全することにより、破損位置、燃料溶融範囲、被覆管変形量をPIEから得ることもできる。詳細な燃料挙動に関わる情報は主にPIEから取得する。（右ページのPIE内容参照）

5. 成果の反映方法：

破損に関わる支配的要素をパラメータとした試験を実施し、破損メカニズムの同定とその確認及び解析モデルの改良・検証を行い、これを実機評価に適用する。

6. 期待される効果：

高線出力化、高燃焼度化の目標を達成しつつ、十分な破損耐性をもつ燃料の実現、さらにはこれらの知見を発展させた先進的燃料の開発が可能となる。

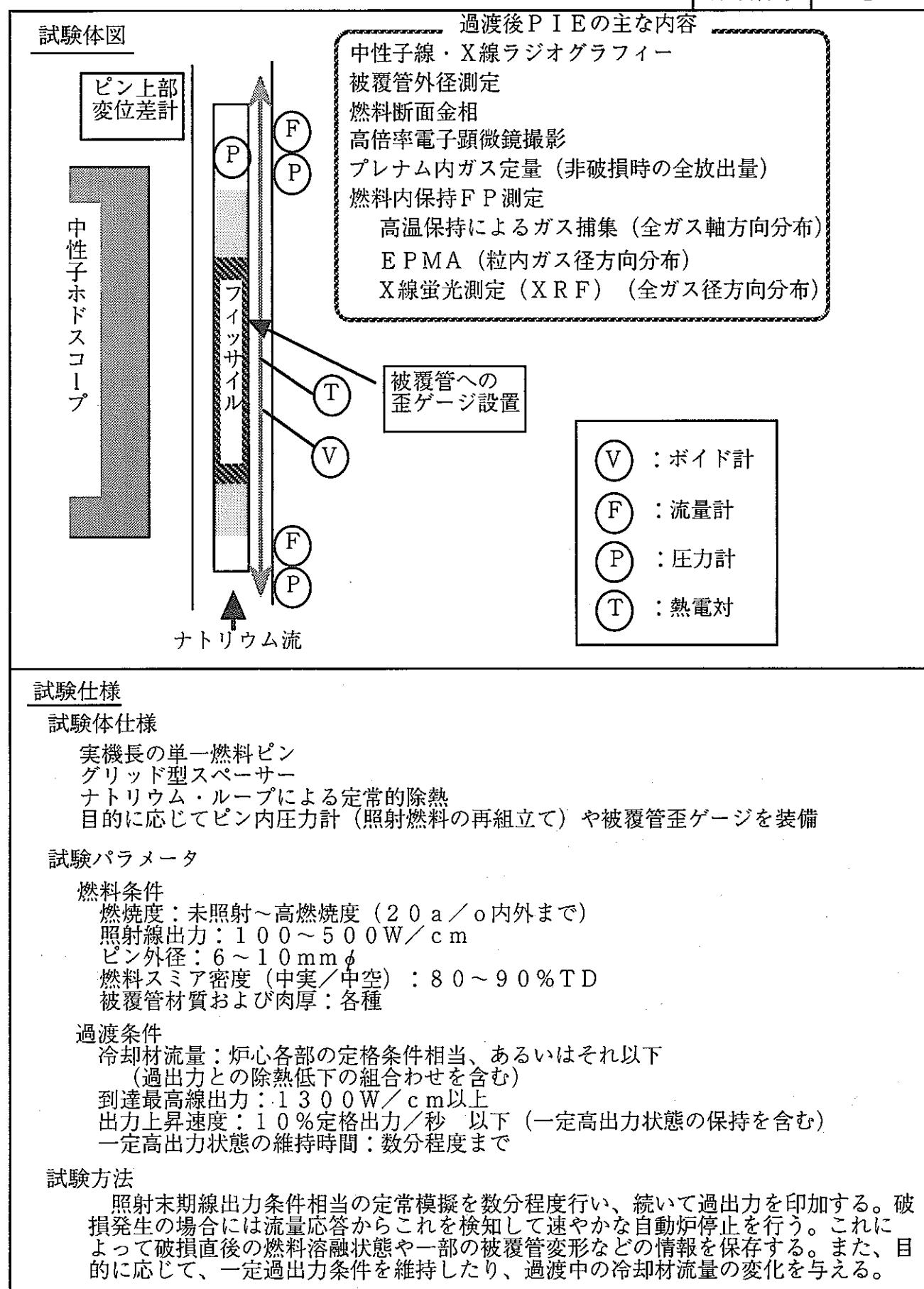
7. 安全設計・安全評価基準との関連性：

安全性と炉心高性能化を両立する設計、及びその安全評価が可能になる。また、燃料条件や運転条件に依存した合理的な破損判断基準を整備できる。

試験名称： 単一ピン破損限界試験

分類番号

1



炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

2

1. 試験名称： 19本ピン束破損限界試験
2. 試験目的： ラッパー管による拘束やピン相互の拘束などによる応力集中、及び冷却材温度のホットスポットなど、ピン破損に与えるバンドル効果を解明する。
3. 現状の知見と問題点： 炉外での模擬ピン束の外部からの圧縮試験などの基礎試験や解析コードの整備が進められているが、バンドル体系での過出力時の燃料破損限界に関するデータはほとんど得られていない。一方、燃料設計の高度化の方向性を考慮すると、このようなバンドル効果の重要性は増加するものと考えられ、定量化しておく必要がある。
4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：
(1) 求めたい物理量：基本的に「単一ピン破損限界試験」と共通である。 以下についてのバンドル効果に重点をおく。 被覆管変形とそのローカルな分布 被覆管温度とそのローカルな分布
(2) 測定対象信号等：各部の冷却材・被覆管温度、冷却材流量、流路圧力、音響信号、中性子ホドスコープ（燃料ピン頂部の伸びなどの情報）、過渡後 P I E
(3) 試験パラメータ： 右ページの試験仕様に表示
(4) データから物理量を導く方法 「単一ピン破損限界試験」と同様、過渡中のデータ及び過渡後の P I E データから初期破損の線出力と軸方向位置、燃料溶融やスウェーリング等の情報を得る。特に、過渡中の冷却材・被覆管の温度分布や被覆管変形の詳細データを得ることにより、スペーサーウィヤーや壁の効果を二次元的に分析できるようにする。
5. 成果の反映方法： 単一ピンでの破損データとの差を、応力集中や温度分布などの効果を考慮した解析評価によって定量的に把握する。また、バンドル・ダクト相互作用（B D I）やピン間接触圧の効果を低減する条件を解明して設計に反映する。
6. 期待される効果： バンドル効果の定量化により、安全性と燃料高性能化の目標を達成するための合理的設計が可能となる。
7. 安全設計・安全評価基準類との関連性： バンドル効果の定量化とその設計依存性を含めた合理的破損判断基準の整備が可能となる。

試験名称： 19本ピン束破損限界試験

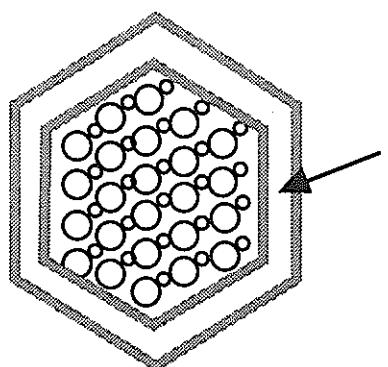
分類番号

2

試験体図

「標準試験体ループ」使用。

ただし、ピン内圧力計、ピン頂部変位検出器、被覆管歪みゲージ設置の可能性は「単一ピン破損限界試験」と同様。また、B D I の模擬の観点からバンドル壁温度を実機条件相当とする必要があり、バンドル壁外側からの冷却条件を適正にするための集合体間ギャップ冷却材流などを設置することも考えられる。



集合体間ギャップ流の模擬、
またはガスギャップとして断熱壁とする

試験仕様

試験体仕様

実機長の照射済19本ピン束
ワイヤー型スペーサー
ナトリウム・ループによる定常的除熱
バンドル壁の外側に集合体間ギャップ冷却材流を模擬した流路を設置
(またはガスギャップにより断熱化)

試験パラメータ

燃料条件

「単一燃料ピン破損限界試験」と同様。

過渡条件

基本的に「単一燃料ピン破損限界試験」と同様。ただし、バンドルでのF C M I の効果を見ることが主要な目的であり、50%断面溶融割合前後までの過出力条件とする。(最大1000W/cm前後、燃料条件に依存)

試験方法

「単一燃料ピン破損限界試験」と同様。

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

3

1. 試験名称：過出力時集合体内少數ピン破損挙動試験
2. 試験目的：大型炉の制御棒誤引抜き事象において炉心局部の集合体内の多数の燃料ピンが燃料溶融を生じる状況を想定し、少數ピンの破損を生じた場合の異常拡大のポテンシャルを把握し、安定冷却確保のための条件を解明する。
3. 現状の知見と問題点：過出力時に燃料溶融を伴って破損した炉内試験のデータはこれまでに1～7本束の条件で数点得られているが、多くの場合、放出燃料量が大きく、また冷却材流路が限定された条件のために、流路が完全に閉塞して除熱が回復しない結果となっている。除熱の回復した例は破損位置がフィッサイル頂部かつ溶融燃料放出量の少ない場合に限られており、広い流路条件での破損条件に依存した冷却性限界の解明が課題となっている。
4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法： 破損ピンからの溶融燃料放出と、これによる隣接ピンの破損、及び隣接破損ピンからの溶融燃料放出を経て、どの程度までの損傷拡大が生ずるか、また、どの程度の損傷規模まで過出力条件下での冷却性が確保できるのかを確認する。 (1) 求めたい物理量：損傷拡大範囲と時間、冷却材流路確保の有無 (2) 測定対象信号等：バンドル内各部の温度、ボイド率、ピン内圧、 中性子ホドスコープ、冷却材流量、流路圧力、音響信号、DN (3) 試験パラメータ：右ページの試験仕様に表示 (4) データから物理量を導く方法： 流路中の熱電対、ボイド計、ピン内圧力計、中性子ホドスコープなどのデータから、溶融燃料放出、破損伝播、放出燃料移動などを同定する。また、破損後の事象進展を段階的に解明すべく、単一ピン、7本ピン束、19本ピン束の条件を組み合わせるとともに、19本ピン束条件では各事象進展の途中でスクラムし、これらのPIEから事象進展を同定することも併せて行う。
5. 成果の反映方法：ピン束条件（単一ピン、7本ピン束、19本ピン束）及び破損から炉停止までの時間などをパラメータとした試験マトリクスを構成し、これらの試験データに基く現象解明、及び解析評価を通じて、実機の安定冷却が確保される最大燃料溶融量、線出力、異常検知機能などを明確化する。
6. 期待される効果： 大型炉、高線出力化、高燃焼度化を実現して行く上での安全評価に必須であり、これらの試験実施を通じた研究によって、所期の目的が達成できる。
7. 安全設計・安全評価基準類との関連性： 異常拡大防止の観点からの炉心設計基準類（線出力、燃焼度など）の合理性の確保、少數燃料ピン破損時の冷却性限界に関する評価基準類の整備が可能になる。

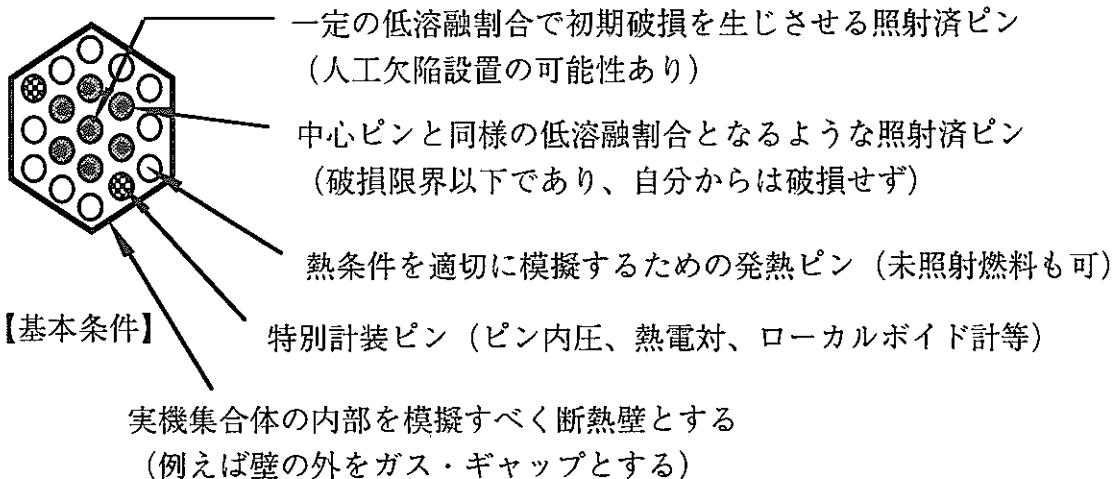
試験名称：過出力時集合体内少數ピン破損挙動試験

分類番号

3

試験体図

基本的に「標準試験体ループ」を使用。ただし、個々の事象進展の段階的解明のため、单一ピン、7本ピン、19本ピン体系での試験を組み合わせて行う。



計装についても基本的に「標準試験体ループ」と同様。ただし、ローカルなボイド化と燃料の到達状況を確認するため、最外周列への特別計装ピンの設置、あるいは多数の熱電対などの設置を行う。

試験仕様

試験体仕様

- 実機長の19本ピン束を基本とする（7本ピン、单一ピン体系を併用）
- 内側のピン7本は照射済燃料（最外周ピンは必ずしも照射済ピンの必要はない）
 - 中心ピンは人工欠陥を加えるなどして低燃料溶融割合で破損するものを使用
 - 2列目の6本は中心ピン同様の低燃料溶融割合だが破損限界以下の条件
- ワイヤー型スペーサー
- ナトリウム・ループによる定常的除熱
- 試験体壁は断熱条件

試験パラメータ

燃料条件

内側の照射燃料7本については「単一燃料ピン破損限界試験」と基本的に同様。ただし、被覆管材質の影響は考え難く不要。

過渡条件

「単一燃料ピン破損限界試験」と同様。ただし、破損後の冷却性が確保し得る条件は燃料溶融が比較的低い場合に限られるため、到達最高線出力は 900W/cm^2 程度以下。

試験方法

基本的に「単一燃料ピン破損限界試験」と同様。ただし、破損後も過出力条件を維持して損傷拡大挙動を観測すべく、一定時間の過出力継続を行う。なお、冷却材流量の極端な低下など損傷の拡大が顕著な場合にはスクラムにより停止する。

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

4

1. 試験名称：集合体内損傷拡大挙動試験

2. 試験目的：集合体内の種々の損傷状態での安定冷却性や損傷拡大速度とDN放出などの特性を確認し、大規模な損傷拡大防止のための条件を明確にする。

3. 現状の知見と問題点：単一ピンの自然破損のような条件では数日から数十日といった長期の安定冷却性を持つことがEBR-II RBCB試験などから分かってきた。一方、より大きな初期損傷規模からの試験では、損傷規模の増加とともに損傷拡大速度が増加しており、局所的損傷の範囲内で異常検知の可能な条件の解明が大きな課題となっている。また、隣接集合体への伝播をも含めた大規模損傷の研究については未照射燃料によるSCARABEE-Nの結果が得られているが、照射燃料の場合の挙動解明が重要な課題である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

初期損傷規模（発熱閉塞の大きさ）、燃焼度、線出力などをパラメータとして、損傷拡大速度とモードを明らかにし、損傷拡大速度の急増する（分から秒オーダーへの遷移）条件の明確化、確実な検知と炉停止のための条件の明確化を行う。

初期発熱閉塞規模については、数～24サブチャネルの条件に重点を置き、中心／片側閉塞などの条件に応じた損傷拡大速度を求めるとともに、流量応答、冷却材出口温度応答、音響信号などのデータを取得し、異常の検知性を解明する。

(1) 求めたい物理量：損傷拡大範囲と時間、冷却材出口温度・流動状況、音響、DN移行

(2) 測定対象信号等：バンドル内各部の温度・ボイド率、冷却材流量、ピン内圧、中性子ホドスコープ、流路圧力、音響信号、DN

(3) 試験パラメータ：右ページの試験仕様に表示

(4) データから物理量を導く方法

各部の熱伝対信号、ボイド計、冷却材流量、流路圧力、各ピンの内圧、中性子ホドスコープなどの情報から、冷却材ボイド化の範囲や損傷拡大範囲を同定する。また、事象進展の途中でスクラムする条件を組み合わせて行い、PIE情報（断面金相主体）からも事象進展を確認する。

（この種の試験を実施し得る施設としてはSCARABEEやMOLなどがあるが、37本束条件までに限られ、冷却材流の二次元的効果が重要となる大規模損傷挙動の解明にはSERAPHでの61本束条件が必要となる。）

5. 成果の反映方法：試験データに基く現象解明を行い、現象論を主体とした解析結果を補助的に活用し、実機における種々の損傷状態からの損傷拡大挙動を評価する。また、試験データからのDN等の情報に基き、異常検知システムの設計に依存した炉停止時間を評価し、損傷拡大時間、初期異常の発生頻度の評価などから総合的な安全性確保のための条件を明確化する。

6. 期待される効果：DBE、BDBEを含めた総合的安全性を向上させるための設計条件の明確化、及び合理的な安全評価が可能になる。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性：DBE、BDBEを含めた総合的安全性を向上させるための設計ができる。異常検知システムの最適化を図り、これを基準類に反映できる（例えばDN計や出口温度の自動スクラムレベル設定など）。

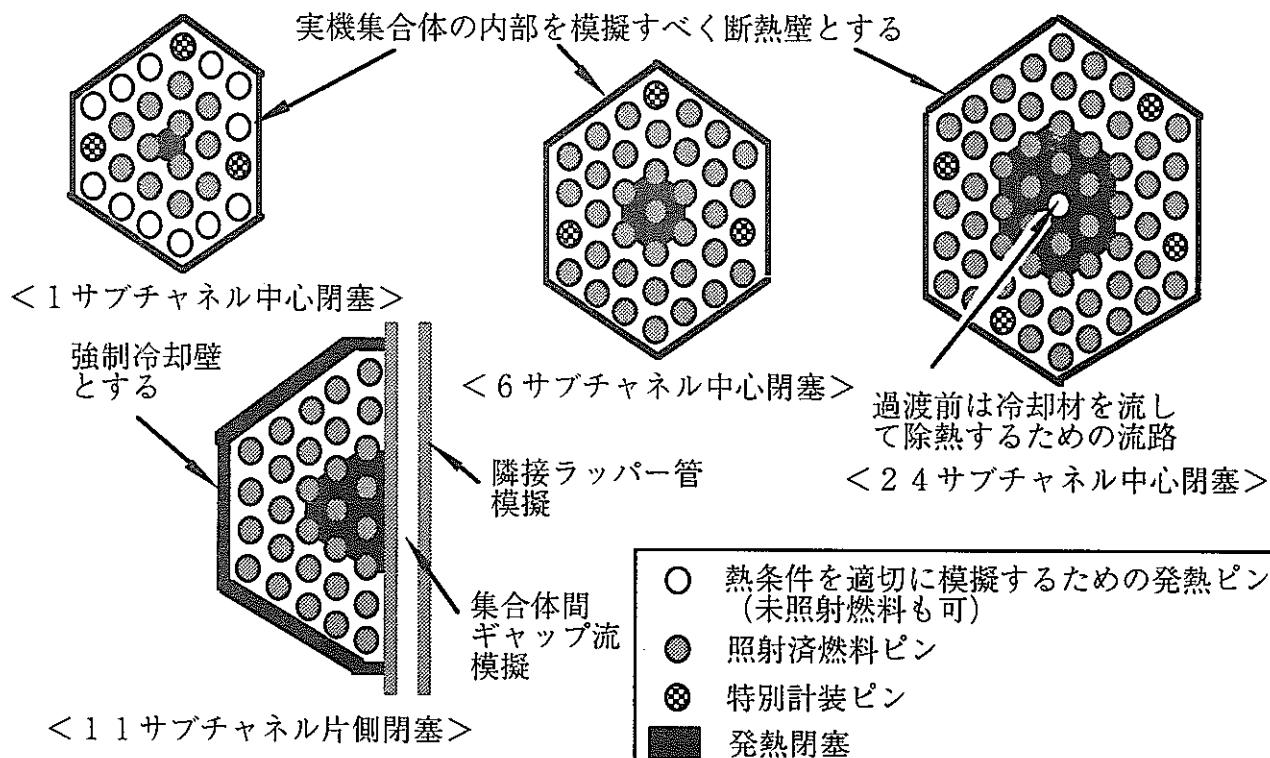
試験名称：集合体内損傷拡大挙動試験

分類番号

4

試験体図

基本的に「標準試験体ループ」と同様。ただし、規模の異なる初期発熱閉塞からの事象進展の解明のため、中心／片側閉塞の別、閉塞規模の異なる条件を組み合わせて行う。なお、発熱閉塞は軸方向の一部のみとし、軸方向長をパラメータとする。以下は代表的試験体例。



計装についても基本的に「標準試験体ループ」と同様。ただし、熱電対、圧力計などをピン内に備えた特別計装ピンの設置を考える。

試験仕様**試験体仕様**

実機長の照射済燃料ピン束条件を基本とする（最大61本束まで）
ワイヤー型スペーサー

ナトリウム・ループによる定常的除熱

試験体壁は断熱条件及び強制冷却条件を適宜使用

集合体間ギャップの状況の模擬を含む

発熱閉塞は粉末燃料をステール製ネットで覆ったもの、あるいは特殊成形ペレット
発熱閉塞の大きな条件では初期の冷却性確保のため閉塞内部に冷却材を流す

試験パラメータ**燃料条件・閉塞条件**

照射済ピンは「単一燃料ピン破損限界試験」と同様だが、被覆管材質の影響は不要。
中心／片側閉塞、初期発熱閉塞規模（1～24サブチャネル）

発熱閉塞高さ（数cm～数10cm）

発熱閉塞ポロシティ割合（50～100%）

過渡条件

定格出力（300～600W/cm）

定格冷却材出口温度（500～600°C）

冷却材流速（流路断面積に依存）

試験方法

小規模閉塞条件では出力／流量比の小さい状態から定常条件（400W/cm程度の線出力）に変化させる。大規模閉塞条件では定格条件から閉塞内冷却材流を停止させる。この状態を数分間継続して損傷拡大を観測する。流量の極端な低下等の場合にはスクラムにて停止。

1. 試験名称：中性子束高で溶融するフュージブルメタル特性試験**2. 試験目的：**

中性子束高を直接とらえ感応する方式の炉停止装置成立性の見通しを得る。

3. 現状の知見と問題点

UTOP事象に対応し得るSASSでは、中性子束高という状態変量を直接とらえ感応するフュージブルメタル方式のSASSが応答時間の点で有利である。しかし、フュージブルメタルに関する知見は少なく、成立性の見通しを得るために、照射、核加熱、冷却の各実炉条件を総合的に模擬し得る炉内試験でのデータ取得が必要である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：**A) 定常運転時の冷却材除熱による安定性（定常時の発熱量及び安定性、除熱量）**

- ・ランプ状立ち上げで定常維持
(パラメータ)
フュージブルメタル内径、肉厚
(測定する物理量)

冷却材流量、圧力、温度、フュージブルメタル挙動（中性子ホドスコープ）

B) T O P 及び L O F → T O P 時の溶融特性の定量化（溶融発生時の線出力、溶融後の移動挙動）

- ・パルス加熱
(パラメータ)
エネルギー投入量（実機装荷時中性子束の1.0～1.5倍）、
流量（LOF模擬時に流量減少）
(測定する物理量)

冷却材流量、圧力、温度、フュージブルメタル挙動（中性子ホドスコープ）

5. 成果の反映方法

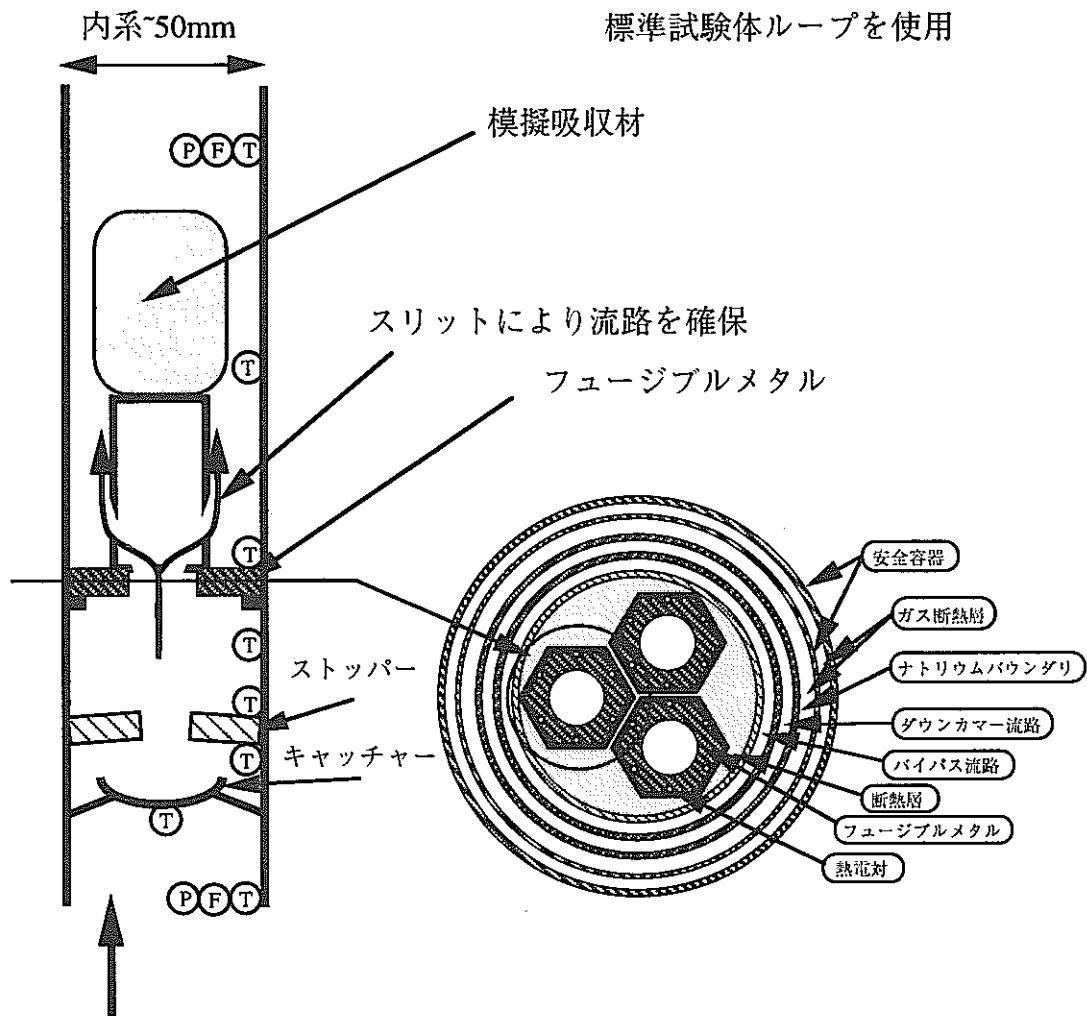
得られたデータをもとに、本方策の成立性を評価する。そして、本方策の設計の最適化を図り、反応度異常事象に対処する炉停止系の開発を行う。

6. 期待される効果

反応度異常事象に対して、事象推移の速い段階で抑制することが可能となる。また、スクラム系に多様性をもたせることが可能となる。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性

原理の異なる炉停止装置（中性子束高）の成立性の見通しを得ることにより、大型炉段階における炉停止系の信頼性・多様性向上と H C D A 防止の強化が図れる。

試験体図主な仕様

フュージブルメタル：ドーナツ状

主要パラメータ：

- 1) 流量／通常運転時流量変化及びLOF時の流量減少模擬
- 2) エネルギー投入量及び速度／TOP及びLOF時を模擬
- 3) フュージブルメタル内径、肉厚／作動条件の汎用性を考慮

試験部形状：内系～50mm、試験部3体（互いに断熱）

試験体特徴：ドーナツ状のフュージブルメタルを炉心部高さに固定し、その上部にスリットを有する円管及び吸収材を設置する。フュージブルメタルからキャッチャーまでをホドスコープ視野に入れる。

試験方法

定常までの立ち上げ

- ・ランプ状立ち上げで定常維持

過渡

- ・LOFを模擬した流量減少

- ・パルス加熱

投入エネルギー

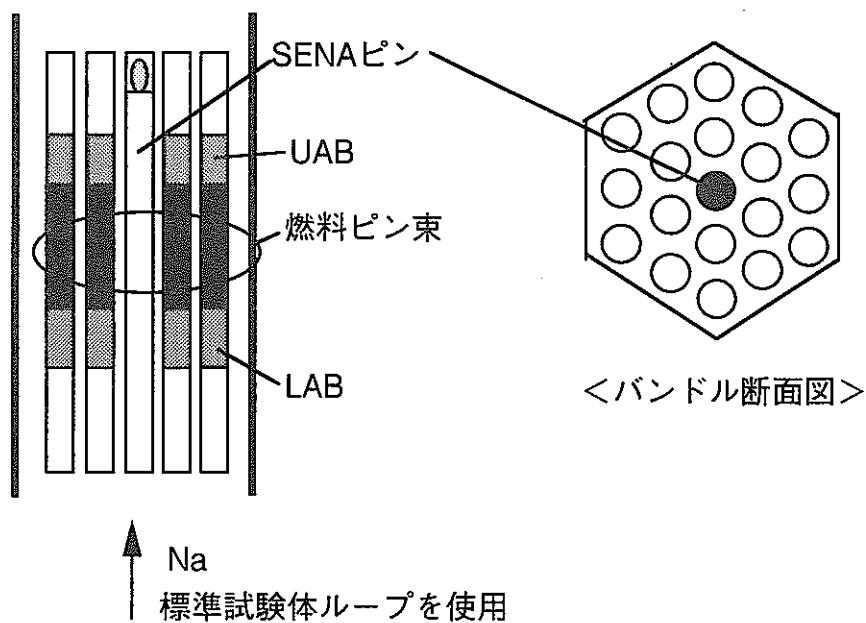
- ・実機装荷時中性子束の1.0～1.5倍

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

6

1. 試験名称： 燃料ピン型SASS機構（SENAピン）実証試験（防止、緩和）
2. 試験目的： 燃料ピン型SASS機構（ボイドからナトリウムへの置換機構を含む。以下SENAピンと呼ぶ）開発の最終段階として、DBE,BDBEベースの過渡に対する作動を実証する。また、不作動時におけるmitigation効果を確認／評価する。
3. 現状の知見と問題点 SENAピンは、受動的安全の観点から提案されたCDAへの拡大を防止するための新しい方策であり、フィージビリティスタディから開発・実証までを新規に行わなければならない。特に実証段階では、作動限界確認のための過渡試験や溶融燃料との相互作用を把握する試験が必要となる。
4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法： 本試験は、最終段階である実証試験として位置づけられるものである。 確認すべき事項は次のとおり。 (1) 実条件下での作動確認（作動保証限界の確認を含む） ・燃料バンドル体系の中にSENAピンを組み込み、代表的／包絡的事象発生時と同等の過渡を与えた際に、確実に作動し負の反応度が投入されることを確認する。遅れ時間等定量評価に必要なデータを取得する。 ・過渡の速さ、大きさをパラメータとし、不作動もしくはprevensionへの有効性が失われる条件を導出する。あわせて破損モードを同定する。 (2) 不作動時の挙動確認 SENAピンは、その構造から不作動時でもmitigation効果を期待できる可能性がある。これらの効果を確認／定量評価するため事象進展を把握する試験を行う。 ・不作動時（もしくはprevensionへの有効性が失われた場合）において、内蔵される中性子吸収体の溶融移動挙動を確認する。 ・溶融燃料流出促進のポテンシャルを有することを確認する。
5. 成果の反映方法 SENAピンに期待されるprevension効果が、信頼性を含めて実証されるとともに、併せ持つmitigation効果も立証される。
6. 期待される効果 破損モードの同定をはじめとする各種定量データがフィードバックされることにより、設計／安全評価手法（解析コード等）の高度化が図れる。
7. 安全設計・安全評価基準類との関連性 本機構の採用により深層防護の強化が図れ、安全設計の合理化に寄与できる。

試験体系図試験仕様

試験体仕様

燃料集合体を安全容器等で保護した体系

燃料：太径（燃料設計の進展に依存して可変）

ピン本数：19本、37本、61本（パラメータ）

SENAピン：別添概念図参照

SENAピン本数：1本～数本（期待する反応度に依存）

試験パラメータ

試験部形状（燃料／SENAピン本数）

設定事象に対応した過渡条件（流量、入口Na温度、発熱量）

SENAピンのタイプ

試験方法

実炉運転時と同等の条件で定常状態を維持した後、事前評価により設定した過渡

（TOP, LOF, LOHS型等）を与える。（燃料破損／溶融、SENAピン破損を引き起

こすまでパラメータを振る）

1. 試験名称：集合体内SASS実証試験（CDA防止及び燃料流出による影響緩和）

2. 試験目的：ATWSの拡大防止及び緩和を目的とする集合体内設置型SASSの有効性確認のため、吸収体落下動作の確認に続いて、発熱する実物質による炉外流出挙動の確認を行う。

3. 現状の知見と問題点

本装置のR&Dは現状では皆無であるが、実現困難な要素はない。防止方策については落下機構については炉外での要素試験、ナトリウム中での動作確認試験、実炉での照射による劣化の有無の確認などを行う。緩和方策である燃料流出挙動についても炉外試験を行うが、最終的に炉内試験で実物質による挙動確認を行う。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい情報（Y）：

吸収材落下機構の適切な作動の確認。

炉停止に失敗した場合の、吸収材が落下した場合、落下しない場合の両者について、溶融燃料による内管の溶融貫通の時刻、燃料流出速度を確認する。

(2) 試験における主要な測定パラメータ（X）：

落下機構の作動は、ホドスコープ信号で把握できる。

ホドスコープによる径方向、軸方向燃料密度の時間挙動、フィッサイル上・下端からの流出燃料量の測定。事後破壊検査。

(3) XとYとの関係：

上記測定量より、直ちに落下機構の作動、燃料流出量などが把握できる。

(4) 成功条件：

冷却材温度上昇型事故条件において、燃料破損を生じる前に吸収材の落下が生じることが確認されること。

燃料破損が生じた場合でも、溶融燃料による内管の破損、侵入、流出が十分に早い時間内（たとえば集合体管壁の溶融よりも早い）に生じることが確認されること。

5. 成果の反映方法

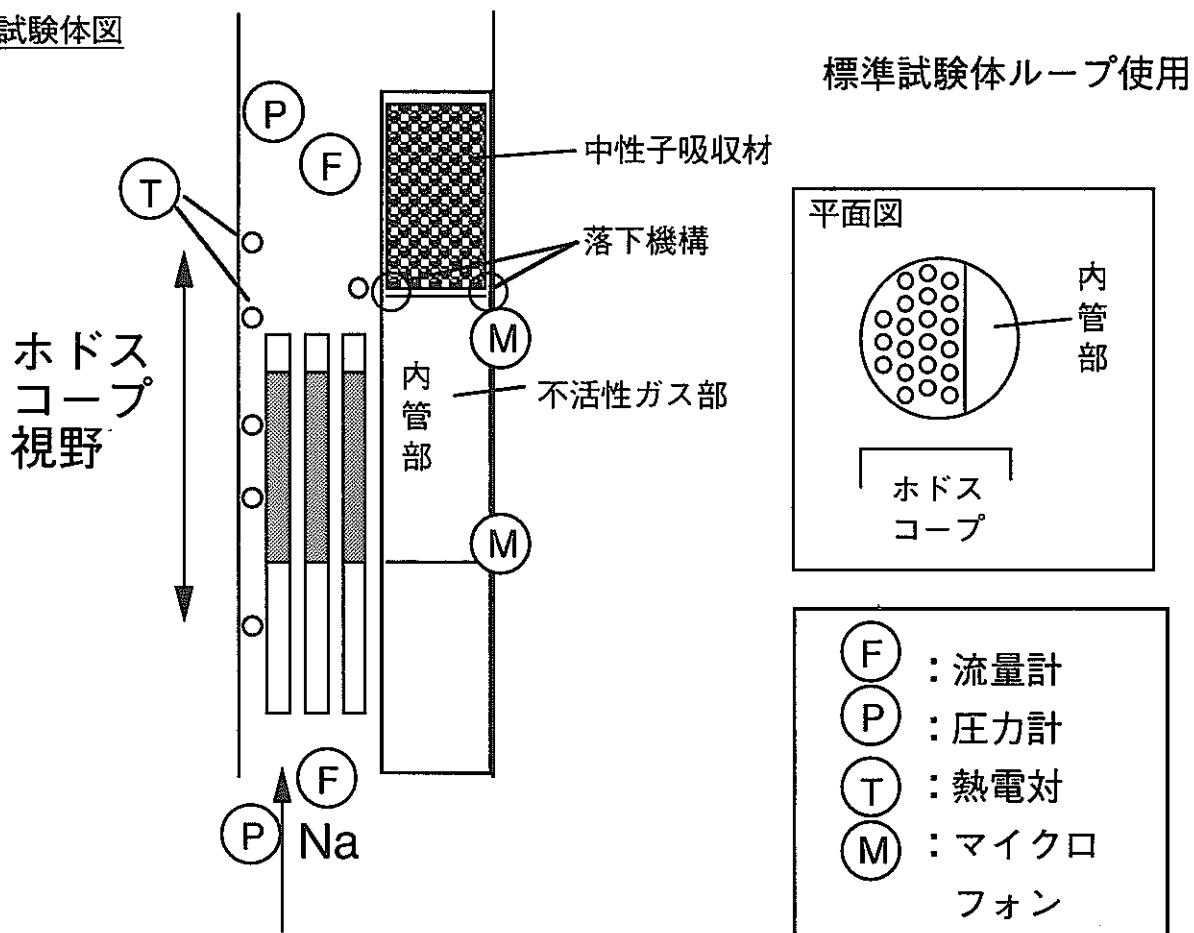
動作、有効性を実証することにより、実炉への本格採用を可能とする。

6. 期待される効果

CDAへの拡大防止方策及び影響緩和方策の強化が図れる。特に影響緩和については、遷移過程における集合体規模プールの段階で燃料の流出が開始し、さらに局所プールの段階でも流出量は増加し続けることから、中～大規模プールに至る以前に核的不活性を達成できる。よって再臨界による過大なエネルギーの発生を排除できる可能性が増大する。これらが炉心、燃料の大きな変更無しに可能となる。既存炉への装荷も可能である。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性

特にCDAにおける再臨界に対する影響緩和方策が受動的な機器で達成されることから、遷移過程での再臨界による過大なエネルギー発生を、少なくとも最確評価の範囲では考慮する必要がなくなる。

試験体図試験仕様

試験体仕様：標準試験体ループを使用

ピン数：20本～40本程度

燃料燃焼度：新燃料～燃焼度 5 a/o

試験体特徴：燃料ピン部とSASS部とをホドスコープで横方向に分離できるように配置。

試験パラメータ

吸収体落下の有無

エネルギー投入量、投入速度：SASSの部分的作動を模擬した緩慢な過出力

試験方法

定常までの立ち上げ

ランプ状立ち上げで20秒以上定常維持

過渡

流量低下後緩慢な過出力過渡。

スローTOP後SASSの部分的作動を模擬した出力整定、流量低下もしくは入り口ナトリウム温度上昇条件にて燃料を破損させる。

1. 試験名称：中空ペレット燃料におけるピン内燃料移動挙動試験

2. 試験目的： ATWSの拡大防止及び緩和に寄与し得る機構と考えられる、中空ペレット燃料での出力過渡時の破損前ピン内燃料移動挙動の解明

3. 現状の知見と問題点

中空ペレット燃料による過出力試験は例が多くはなく、その中でピン内燃料移動が明確に観測された例はほとんど無い。検証された解析モデルはなく、よって安全評価の中でこの効果を考慮するには至っていない。また、既存の炉内試験施設は熱中性子炉であるためにペレット中心部での発熱が小さく、温度勾配が小さいために、実機条件よりもピン内燃料移動が生じにくい条件である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい情報 (Y) :

燃料の健全性が維持される範囲内の、投入エネルギー量・速度に依存したピン内燃料移動挙動。

(2) 試験における主要な測定パラメータ (X) :

ホドスコープによる軸方向燃料線密度の時間挙動、フィッサイル上・下端からの流出燃料量。
事後破壊検査。

(3) X と Yとの関係：

上記測定量より、ペレット内溶融範囲の時間挙動、移動挙動を把握する。

(4) 成功条件：

ULOFまたはUTOP事故条件において、燃料破損を生じる前に十分な負反応度に相当するピン内燃料移動量が確認されること。

燃料破損が生じる場合でも、破損を生じる前に、以後の事象推移を緩和できる程度の負反応度挿入に相当するピン内燃料移動量が確認されること。

5. 成果の反映方法

実験解析、モデル改良を通して解析によるピン内移動量予測技術を向上し、内外挿を可能とする。これをATWS解析に反映する。

6. 期待される効果

中空ペレットにおけるピン内燃料移動現象の解析モデルが検証されることによって、同現象の効果を、安全解析の中に取り入れることができる。これによってスローTOP時、ULOF時などでの、中空ペレットの持つより大きな安全裕度を考慮した評価が可能となる。

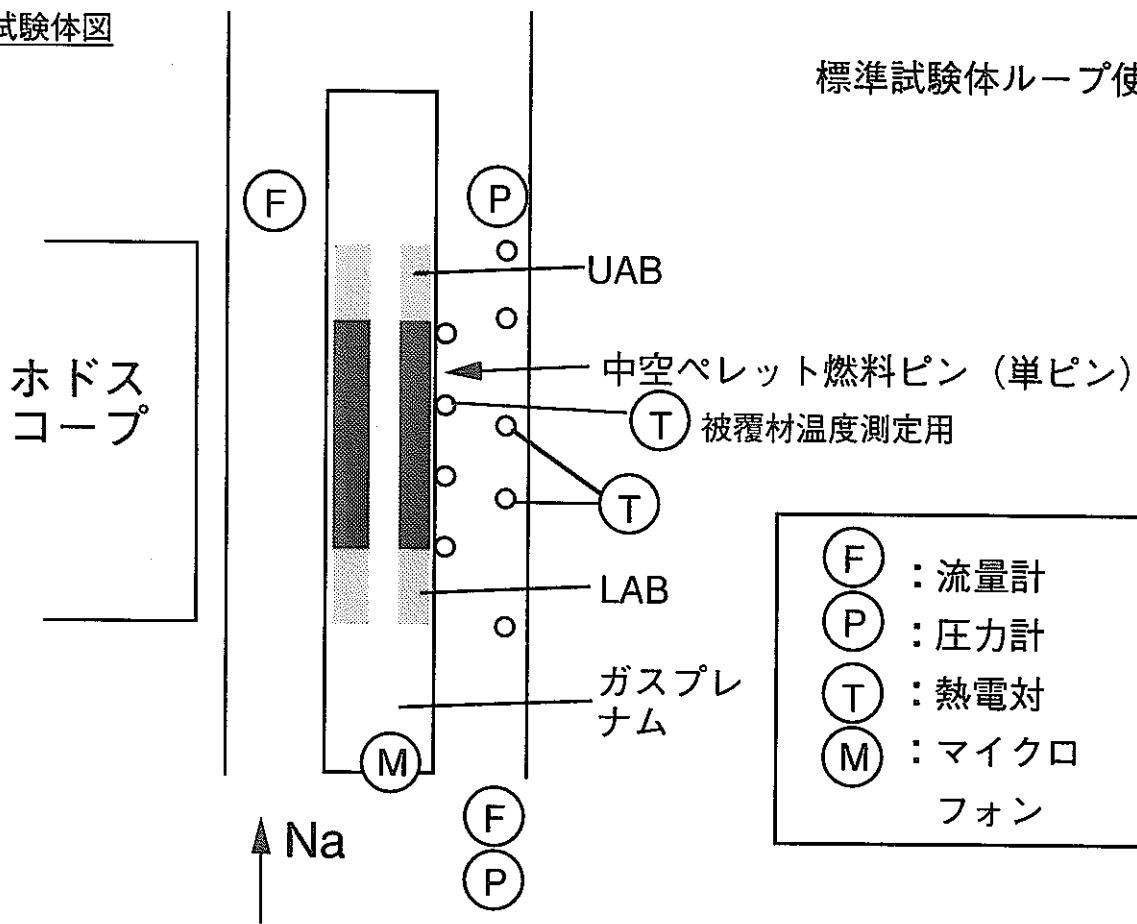
ピン内燃料移動現象を最大限に期待できる中空ペレット形状の設計提案が可能となる。

7. 安全設計・安全評価基準類との間連性

安全裕度の高い中空ペレット用の安全評価基準を別途作成することが可能となる。

試験体図

標準試験体ループ使用

試験仕様

試験体仕様：標準試験体ループを使用

燃料：太径中空ペレット

ピン数：単ピン

燃料燃焼度：新燃料～最高燃焼度 (20a/o)

試験パラメータ

燃料条件：燃焼度、ペレット形状（内径の大きさ）

エネルギー投入量：破損限界以下に抑制することが主であるが、
破損後挙動への影響を調べる破損実験も必要。エネルギー投入速度：（遅すぎるとFCMI破損、速すぎるとピン内移動前に
内圧破損の可能性が高まるため、ピン内移動が可能な
エネルギー投入速度範囲を調べることになる。）試験方法

定常までの立ち上げ

- 1) ランプ状立ち上げで20秒以上定常維持
- 2) 小パルスで加熱し20秒以上定常維持

過渡

スローTOP、

ULOF時ボイド反応度印加による出力上昇を模擬した過出力過渡。

1. 試験名称：人工的リードチャンネルでの燃料流出挙動試験

2. 試験目的：炉心損傷の早期終息を目的として設置する人工的先行破損集合体での早期破損・分散の有効性確認を行う。

3. 現状の知見と問題点

本集合体は他の燃料よりも出力もしくは出力流量比を増大させたものであり、出力流量ミスマッチ時に早期破損を期待し、かつ炉心からの早期の燃料流出を期待するものである。他の燃料よりも燃料、被覆材が高温条件となるため、定常時、異常な過渡時などでの不必要的燃料破損（悪影響）がないこと、破損時には早期に有効な燃料流出が期待できることの確認が必要。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

燃料健全性／破損限界の確認は分類番号1の燃料破損限界試験と同様な方法で行う。

燃料の早期流出についての確認が必要。定格出力近傍で燃料の早い流出を期待するために、大きな水力等価直径の流路、もしくは不活性ガスを封入した内管（分類番号7「集合体内SASS」参照）を設置するなどの設計が必要だが、そのような設計での燃料流出挙動について、以下のような試験を行う。

(1) 求めたい情報(Y) :

本集合体内で、沸騰は拡大しているが出力は比較的低い状態での燃料破損、及び流出挙動。

(2) 試験における主要な測定パラメータ(X) :

落下機構の作動は、ホドスコープ信号で把握できる。

ホドスコープによる径方向、軸方向燃料密度の時間挙動、フィッサイル上・下端からの流出燃料量の測定。事後破壊検査。

(3) XとYとの関係 :

上記測定量より、直ちに燃料移動開始時刻、燃料流出挙動などが把握できる。

(4) 成功条件 :

設計依存だが、燃料の破損、流出が十分に早い時間内（たとえば通常集合体における燃料移動開始よりも早い）に生じることが確認されること。内管設置型では、破損燃料による内管の破損、侵入、流出が十分に早く生ずること。

5. 成果の反映方法

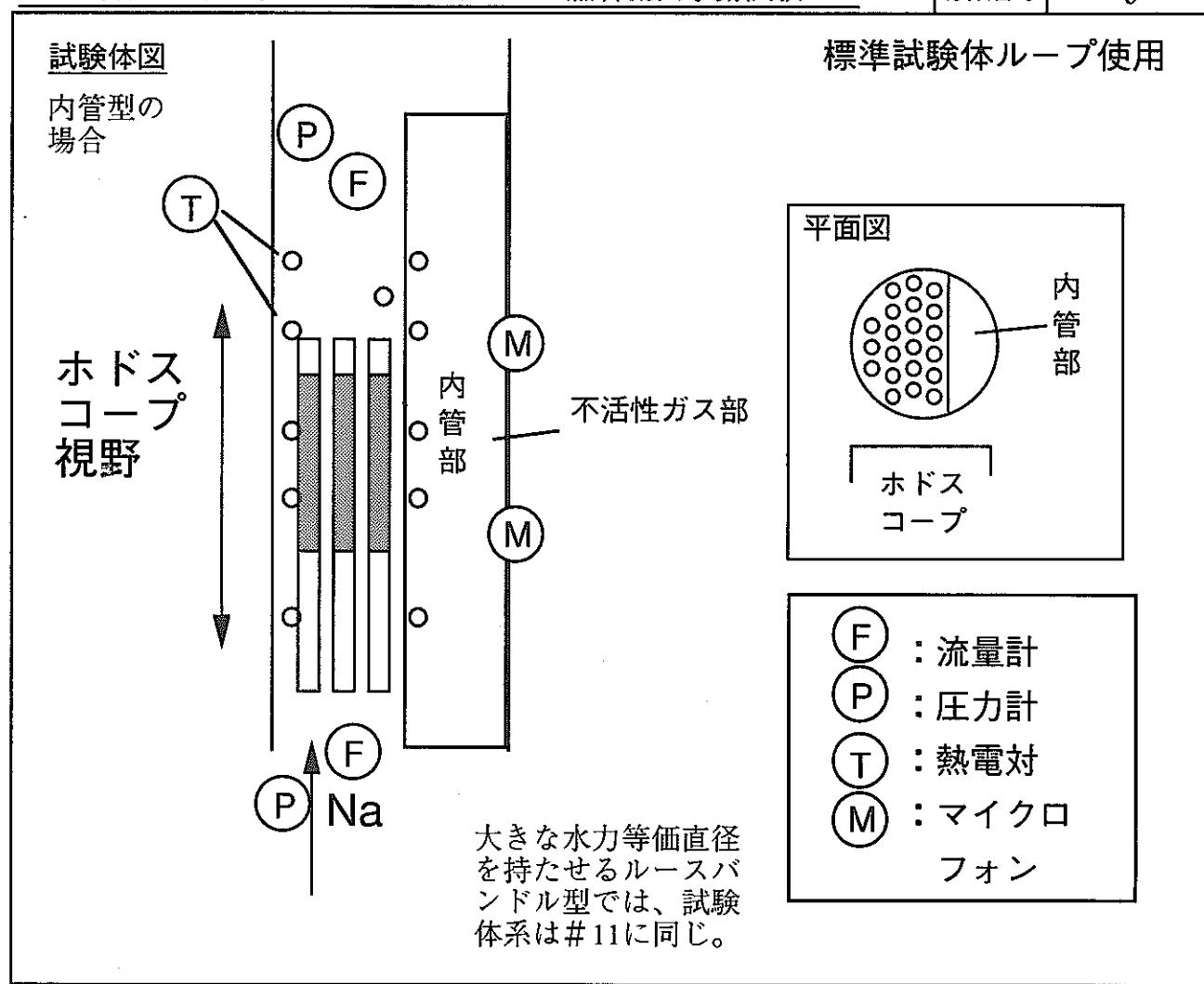
悪影響がないこと、十分な有効性があることを実証することにより、実炉への本格採用を可能とする。

6. 期待される効果

全炉心損傷事故へ拡大する過程での、初期過程初期での終息（部分損傷早期終息）が達成できる。

7. 安全設計・安全評価基準類との間連性

全炉心損傷へ進む初期段階での影響緩和方策が静的かつ簡易な設計で達成されることから、初期過程、遷移過程での再臨界による過大なエネルギー発生を、少なくとも最確評価の範囲では考慮する必要がなくなる。

**試験仕様**

(内管型を想定して記述したが、ルースバンドル型も試験体部特徴以外は同様)

試験体仕様：標準試験体ループを使用

ピン数：20本～40本程度

燃料燃焼度：新燃料～燃焼度 5 a/o (高温照射条件に留意)

試験体特徴：燃料ピン部と内管部とをホドスコープで横方向に分離できるように配置。

試験パラメータ

エネルギー投入量、投入速度：ULOFの進展を模擬した緩慢な過出力

試験方法**定常までの立ち上げ**

ランプ状立ち上げで20秒以上定常維持

過渡

定常出力維持、または沸騰拡大後極めて緩慢な過出力過渡。

1. 試験名称：早期終息シナリオ燃料挙動試験

2. 試験目的：ATWSに対する拡大防止方策の採用や低ボイド反応度炉心などを想定した、低出力低除熱条件における破損を含む長期燃料挙動の解明。作用が不十分であった場合の燃料破損後移動挙動の解明。

3. 現状の知見と問題点

低出力状態で被覆材が高温に長時間にわたって維持される条件での破損／非破損のデータはない。炉内には高燃焼度燃料、変形・接触した燃料、通常運転では問題とならない検出限界以下の破損ピンが存在しており、それらの過渡時の破損限界、または破損拡大限界を把握する必要がある。また、破損が拡大した場合の燃料移動挙動も重要。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい情報（Y）：

健全燃料の場合は破損限界。破損ピンの場合は破損拡大限界。損傷拡大条件では被覆材溶融移動、燃料崩壊移動挙動。

上部ナトリウムプレナムをボイド反応度低減に用いる場合には、沸騰挙動とそれに対応した流量、被覆材温度挙動、燃料過渡・破損挙動

(2) 試験における主要な測定パラメータ（X）：

破損または破損拡大に至るまでの線出力、流量、燃料変形挙動、冷却材温度、被覆材温度、音響。

損傷拡大時の出力密度、流量、冷却材温度、被覆材温度、被覆材移動挙動、燃料移動挙動、DN情報。

(3) XとYとの関係：

燃料破損限界は、燃焼度を主要パラメータとして、線出力、被覆材温度で整理できる。

燃料破損拡大限界は、初期破損規模と燃焼度などをパラメータとして、線出力、被覆材温度で整理できる。

損傷拡大挙動は、沸騰挙動、溶融被覆材移動挙動（配置した熱電対による）、燃料移動挙動（ホドスコープ）などにより把握する。

(4) 成功条件：

想定範囲内の過渡によっても、高燃焼度燃料や変形ピンでは破損が生じず、検出限界以下の破損ピンでも破損の拡大が生じないこと。

想定を上回る過渡によっても、ATWSに対する拡大防止方策を探らなかった場合を有意に上回るエネルギー発生が無いよう、ボイド反応度等の挿入を相殺し得る燃料分散挙動が確認できること。（対策を探らなかった場合を有意に上回るエネルギー発生の可能性がある場合には、対策の採用の可否については慎重な検討が必要となろう。）

5. 成果の反映方法

実験データの蓄積を通して燃料の破損限界、破損の拡大限界が明らかになる。実験解析、モデル改良を通して解析による予測技術を向上し、内外挿を可能とする。これをCDA拡大防止方策の不確かさを含めた解析に反映する。

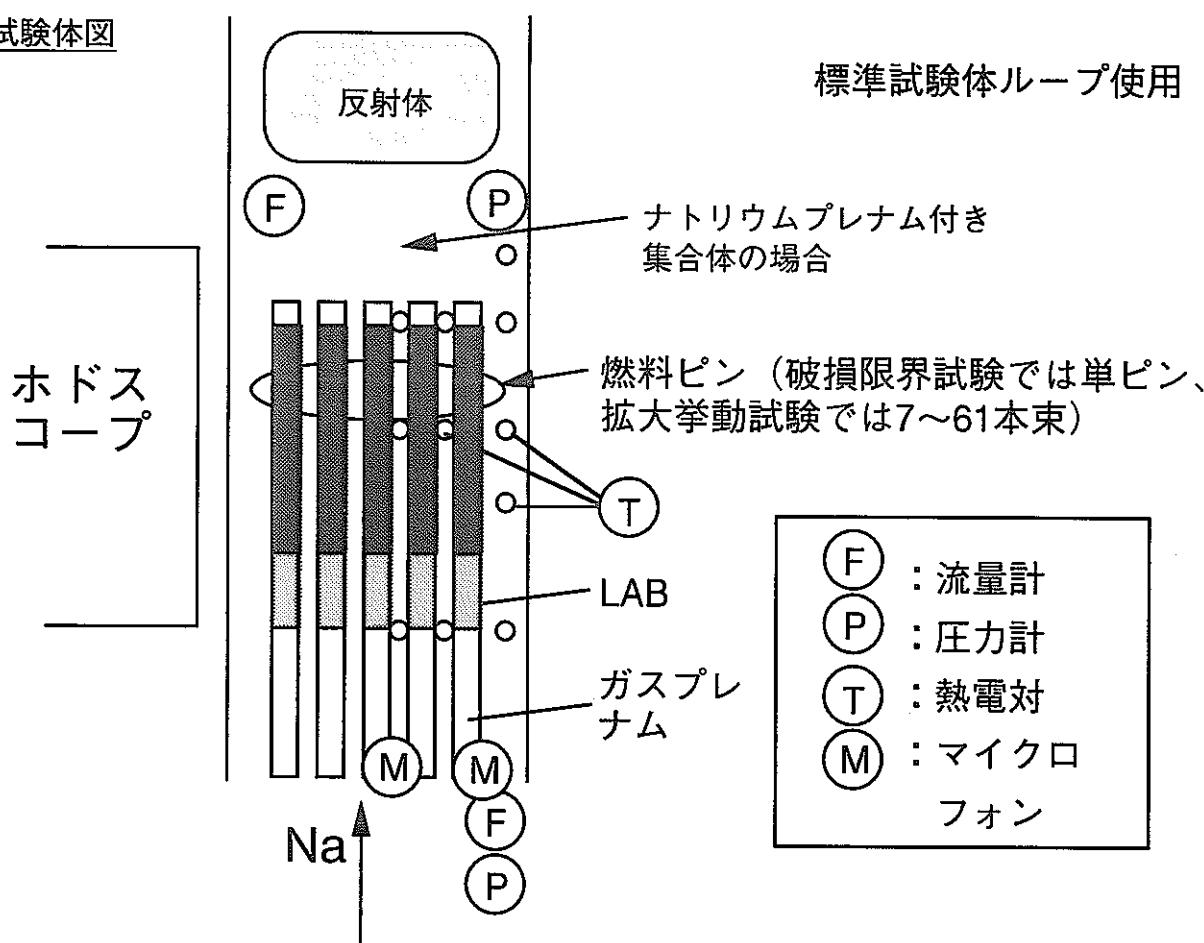
損傷拡大に至る場合については、解析モデルの改良、検証を通してCDA解析に反映する。

6. 期待される効果

#17（部分損傷集合体の長期冷却挙動試験）と併せて部分損傷早期終息シナリオを成立させることによって、全炉心損傷への拡大の可能性を大幅に低減できる。他方、拡大防止の成功基準を現在、一般的に使用されている「燃料健全」から、「部分損傷終息」へ緩和できる。

7. 安全設計・安全評価基準との関連性

ATWS時のCDA拡大防止方策の厚みがさらに増すため、少なくとも最確評価の範囲では全炉心損傷を想定する必要が無くなる。

試験体図試験仕様

試験体仕様：標準試験体ループ使用

燃料：太径（燃料設計の進展に依存して可変）

ピン数：破損限界試験では単ピン、損傷拡大試験では7本～61本バンドル。

燃料燃焼度：最高燃焼度 (20a/o)

試験部形状：実機の照射ピンを格納できるサイズ。

試験体特徴：例として、Naプレナム付き集合体

試験パラメータ

燃料条件：燃焼度、変形（隣接ピンとの接触）

初期破損条件：薄肉化による

出力、流量挙動

損傷拡大条件では；

エネルギー投入量、エネルギー投入速度

試験方法

定常までの立ち上げ

1) ランプ状立ち上げで20秒以上定常維持

2) 小パルスで加熱し20秒以上定常維持

過渡

LOFを模擬した流量減少、併せて出力も低下させて長期間維持。

損傷拡大条件では、沸騰開始後にエネルギー投入

1. 試験名称：ピン束燃料分散挙動試験

2. 試験目的：実用化炉級大型炉では最大ボイド反応度は不確かさを含めても6ドルを越えることはないと考えられる。そのような炉心において、ULOF起因過程における先行破損集合体での燃料分散速度がLOF-d-TOPを抑制できるほど十分に速いことを確認する

3. 現状の知見と問題点

現状での燃料分散速さに関する実験データは図1にエネルギー投入速度に依存する形で示されている。しかしこれらは小規模体系による試験結果であり、実機バンドル体系とは流路条件、冷構造壁の存在などが異なるために実機評価への外挿では保守性を考慮せざるを得ない。このため現状評価では最大ボイド反応度が5ドルを越えると発生エネルギーが増加する領域に入る。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

SERAPHでは19本ピン束での破損後分散挙動の実現が可能であり、現実的な流路条件の設定、冷構造壁の影響の排除が可能である。（これらは既存施設では実現不可能）

(1) 求めたい物理量 (Y) : エネルギー投入速度 (試験条件) に対する燃料分散時定数の相関 (燃料設計、燃焼度が媒介変数となり得る)。

燃料分散時定数の定義は以下。まず燃料相対反応度値 $\rho(t)$ を次式で定義。

$$\rho(t) = \int (m(z,t) w(z)) dz / \int (m(z,0) w(z)) dz \quad (1)$$

燃料分散時定数：燃料相対反応度値で2.5%の低下に要する時間
Tcore : 1次出力逸走後の炉心燃料平均温度

ここで $w(z)$ は軸方向の燃料反応度値分布、 $m(z,t)$ は軸方向燃料線密度分布の時間変化挙動である。 $\rho(t)$ が1.0から0.975に減少するまでに要する時間を燃料分散時定数と定義する。

(2) 試験における主要な測定パラメータ (X) :

軸方向燃料質量線密度分布の時間変化挙動 $m(z,t)$ (ホドスコープにより直ちに求められる。)

(3) X と Y との関係 :

(1) 式より $\rho(t)$ を求めて横軸を破損後時間として作図すれば、容易に燃料分散時定数は求められる。エネルギー投入速度は実験条件である。

(4) 成功条件 :

Y の範囲として、炉心の最大ボイド反応度とエネルギー投入速度を横軸とする図1で、ボイド反応度6~7\$以下の炉心に対する領域において、図中に示す線より下の範囲。

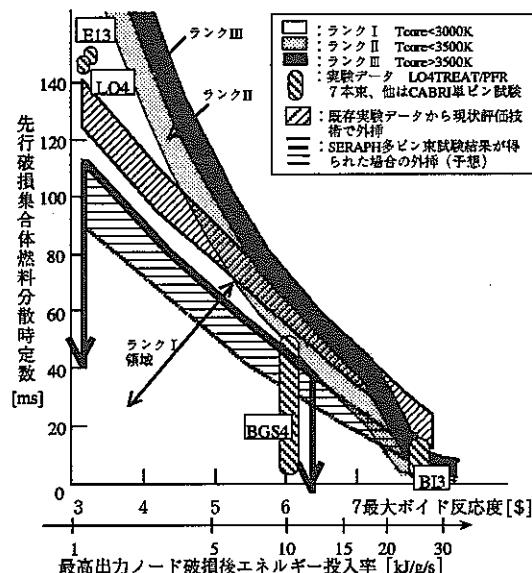


図1 実機解析での最大ボイド反応度、先行破損集合体燃料分散時定数、発生エネルギーランクの相関、及び既存実験データ及びSERAPH試験予想データに基づく大型炉実機体系の燃料分散時定数外挿予測

5. 成果の反映方法

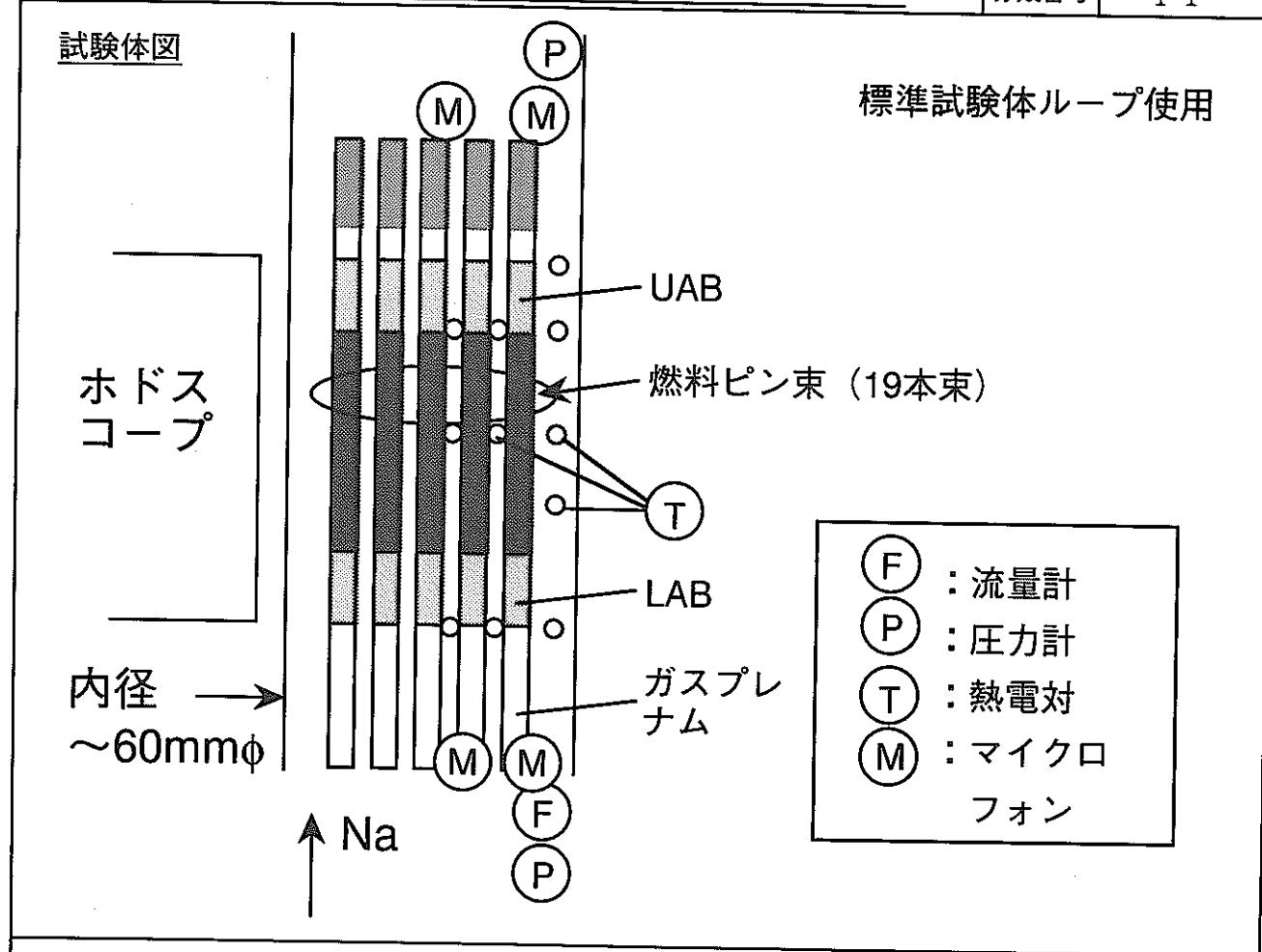
実験解析を通して解析コード (SAS4A) の燃料移動モデルを改良し (精度向上) 、燃料分散速度 (時定数) を再現できるようにする (モデルの検証)。これを実機解析に適用して、沸騰によるボイド反応度の挿入率がドップラー挿入率によりほぼ相殺されている状態において、更に燃料分散で全反応度挿入率が負側へ向くことにより、未沸騰集合体での破損が生じる前に、全反応度の十分な低下が達成されることを示す。

6. 期待される効果

ボイド反応度6\$程度の炉心においてもULOF起因過程でのLOF-d-TOPによるエネルギー発生が余裕をもって抑制できる (燃料平均温度で3000K以下) ことが示される。

7. 安全設計・安全評価基準との間連性

起因過程事象推移の最大ボイド反応度に対する感度の小さい領域が明らかになることを通して、起因過程において核暴走に至らないことの判断の基準の整備に反映される。

試験仕様試験体仕様

燃料：太径（燃料設計の進展に依存して可変）

ピン数：19本

燃焼度：10 a/o 程度

試験部形状：実機の照射ピンを19本束にて格納できるサイズ。内径～60mm

試験体特徴：バイパスチャンネルを有す。

上・下部プランケットをホドスコープ視野に入れる。

試験パラメータ

投入エネルギー（最高出力位置にて）

エネルギー投入量：1～1.5 kJ/g

エネルギー投入速度：1～15kJ/g/s（主パラメータ）

ピン数：1～37本

燃焼度：新～20a/o

試験方法

定常までの立ち上げ

1) ランプ状立ち上げで20秒以上定常維持

2) 小パルスで加熱し20秒以上定常維持

過渡

LOFを模擬した流量減少

沸騰開始後、エネルギー投入

1. 試験名称：集合体内ピン束への融体流出挙動試験：低温プール条件

2. 試験目的：炉心冷却材ボイド化過程～炉心プール形成過程（集合体規模プール）における

- 1) ピン束への燃料分散機構
- 2) 分散／再配置後の燃料落下挙動
- 3) 再臨界発生による燃料分散挙動 の解明

3. 現状の知見と問題点：

炉心プール形成過程初期において、炉心上部の残存ピン束構造に堆積した燃料は、核発熱により再流動化し重力落下する可能性がある。CABRI 炉内試験では、分散／再配置燃料の高い安定性と緩慢な落下挙動が示唆されているが、冷構造材壁の過冷却効果が全体挙動を支配しかつ狭い流路面積のため、この挙動を一般化し実機条件に外挿することはできない。また、再臨界発生時の比較的低温で可動性の低いプールの再分散による閉塞燃料の移動・崩壊挙動は、プールの過渡挙動ならびに閉塞形成条件に強く依存すると考えられるが、現状の知見では、このエネルギー緩和機構を実証する実験的裏付けはない。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい物理量、情報

炉心プール形成過程初期（集合体規模プール形成）までの連続事象推移における

- 1) 集合体ピン束への燃料分散／再配置と形成閉塞の落下挙動（安定性）
- 2) 再臨界過出力模擬による燃料再分散と閉塞移動

(2) 試験で測定する主要な物理量

- 1) 軸方向燃料分布の時間変化（ホドスコープによる計測）
 - オンラインによる温度、圧力、冷却材ボイド率の同時測定
- 2) 最終的な物質空間分布（試験後破壊／非破壊検査）

(3) 試験パラメータ

- 1) エネルギー投入量／速度 ($1 \sim 1.5 \text{ kJ/gf}$, $1 \sim 15 \text{ kJ/gf/s}$)
- 2) 集合体ピン束本数 (~ 37 本)
- 3) 軸プランケット長さ

(4) 試験によって確認する事項

- 1) ピン束本数、軸プランケット長さ及びエネルギー投入量／速度と融体流出量（距離）の関係
- 2) 分散再配置燃料の落下挙動（落下速度、モード）
- 3) 燃料再分散時の分散再配置燃料の閉塞強度（熱・機械的安定性：閉塞移動の有無）
- 4) 試験後検査による固化挙動（分離固化挙動の有無と分布、固化モード等）

5. 成果の反映方法：

実験解析を通して解析コード（SIMMER-III）の熱及び質量移行モデルを改良し（精度向上）、ピン束への融体流出・固化挙動を再現できるようにする（モデルの検証）。これを実機解析に適用して、全炉心プール形成過程の初期において、分散燃料によって形成される閉塞が安定に存在すること、及び、ピン束部に形成された閉塞が炉心融体の輸送遮断・エネルギー損失効果に対して有効に働くことを示す。また、軸プランケットの短縮化による燃料炉外流出促進に対する効果を確認する。

6. 期待される効果：

炉心プール形成過程の初期で、ピン束部の分散燃料の齊時的落下による厳しい再臨界が発生しないことが示される。さらに、分散燃料によってピン束部に形成された閉塞によって初期の再臨界過出力による機械的エネルギーの発生が遮断・低減されることが示される。また、炉心融体の炉外流出促進に対して効果的な構造設計提案が可能となる。

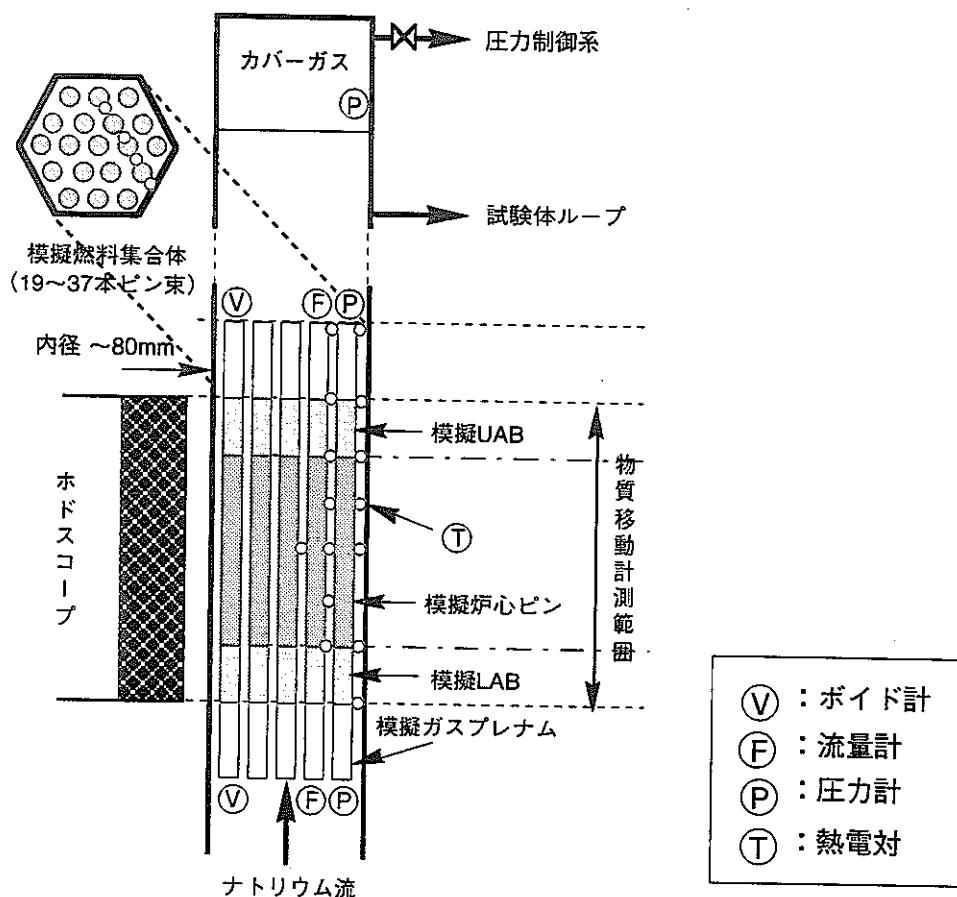
7. 安全設計・安全評価基準との関連性：

炉心プール形成過程において過大なエネルギーが発生しないことを実証することにより、合理的な格納施設を成立させるための安全設計に成果を反映できる。

試験名称：集合体内ピン束への融体流出挙動試験：低温プール条件

分類番号 | 12

試験体図



試験仕様

試験体仕様

集合体ピン束：19~37本

試験部内径 : ~80mm (37本ピン束)

試験パラメータ

- (1) エネルギー投入量／速度：1～1.5kJ/gf, 1～15kJ/gf/s
 エネルギー投入量／速度の違いによる融体流出量（距離）、
 侵入融体の固化挙動及び閉塞形成への影響

(2) 集合体ピン本数 ：～37本

(3) 軸プランケット長さ
 侵入融体の固化挙動、閉塞安定性に対する冷構造材壁の影響

試驗方法

- (1) 単一パルス加熱
燃料ピン破損後の燃料分散／再配置
分散／再配置燃料の安定性

(2) 二重パルス加熱
再臨界過出力模擬による燃料再分散と閉塞移動

エネルギー投入量 : ~1.5kJ/gf
 エネルギー投入速度 : ~15kJ/gf/s

1. 試験名称：集合体内ピン束への融体流出挙動試験：高温プール条件

2. 試験目的：炉心プール形成過程（中規模～大規模プール）におけるピン束への燃料分散機構の解明

3. 現状の知見と問題点：

ピン束流路への分散挙動は、融体（温度、質量、組成）、融体駆動力及び流路（冷構造材の影響、閉塞の有無）の諸条件によってその支配現象が決定付けられる。従来のほとんどの試験では、小規模ピン束が用いられており、融体と冷構造材壁との相互作用によって熱エネルギー及び運動量の損失が実機条件に比べて過大に働き、結果として本来の分散機能が制限されている。実機の中～大規模プール条件下では、融体中に低融点の溶融金属成分が高い過熱度で大量に含まれているために構造材のアブレーションが促進される一方で、燃料の分離固化挙動によって流路下流で強固な閉塞が形成される可能性がある。従来の試験では、これらの条件がコントロールされた状況下で実現されておらず、実機条件との違い（融体及び流路条件、融体駆動力）による挙動の差異を明確に弁別するには至っておらず、高エネルギー・中～大規模プール条件下への外挿性という観点では実証性の高い実験的知見が得られていない。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい物理量、情報

中規模～大規模プール条件下（～3600 K）での

- 1) 集合体ピン束への燃料分散／再配置挙動
- 2) 再臨界過出力模擬による閉塞形成条件下での燃料再分散と閉塞移動

(2) 試験で測定する主要な物理量

1) 軸方向燃料分布の時間変化（ホドスコープによる計測）

→ オンラインによる温度、圧力の同時測定

2) 最終的な物質空間分布（試験後破壊／非破壊検査）

(3) 試験パラメータ

1) 溶融プール条件（温度：～3600 K [エネルギー投入量、投入速度]
燃料スティール混合比：スティール質量比～0.3）

2) 集合体ピン束本数（～37本）

3) 軸プランケット長さ

4) 融体放出駆動圧（ガス系付加的駆動圧：～1 Mpa／スティール蒸気圧：5 Mpa at 3500 K）

5) 第二パルスのエネルギー投入量、投入速度（再臨界過出力模擬）

(4) 試験によって確認する事項

1) ピン束本数、軸プランケット長さ、融体温度及び成分、放出駆動圧と融体流出量（距離）の関係

2) 燃料再分散時の分散／再配置燃料の閉塞強度（熱・機械的安定性：閉塞の移動の有無）

3) 試験後検査による固化挙動（分離固化挙動の有無と分布、固化モード等）

5. 成果の反映方法：

実験解析を通して解析コード（SIMMER-III）の熱及び質量移行モデルを改良し（精度向上）、ピン束への融体流出挙動を再現できるようにする（モデルの検証）。これを実機解析に適用して、全炉心プールに至るまでの炉心プール形成過程において、ピン束部流路への燃料分散が全炉心インベントリの15 %以上であること、及び、ピン束部に形成された閉塞が炉心融体の輸送遮断・エネルギー損失効果に対して有効に働くことを示す。また、軸プランケットの短縮化による燃料炉外流出促進効果を示す。

6. 期待される効果：

プールが全炉心に拡大するまでの過程で、炉心融体流出経路（集合体ピン束、制御棒案内管、集合体ギャップ）を通して、約30%を超える炉心燃料の炉心外流出（軸プランケットへの再配置を含む）が達成されることが実証される。これにより、全炉心プールでの厳しい再臨界が発生を排除するための十分条件が示される。さらに、分散燃料によってピン束部に形成された閉塞によって機械的エネルギーの発生が遮断・低減されることが示される。また、炉心融体の炉外流出促進に対して効果的な構造設計提案が可能となる。

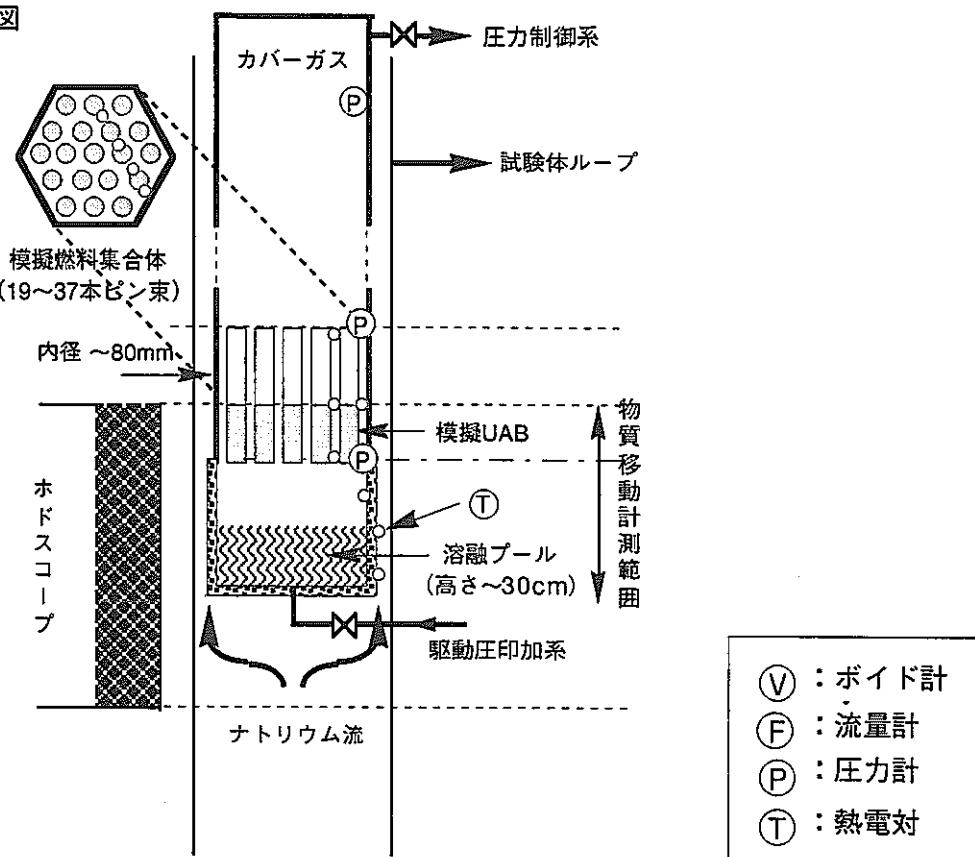
7. 安全設計・安全評価基準類との関連性：

炉心プール形成過程において過大なエネルギーが発生しないことを実証することにより、合理的な格納施設を成立させるための安全設計に成果を反映できる。

試験名称：集合体内ピン束への融体流出挙動試験：高温プール条件

分類番号 13

試験体図



試験仕様

試験体仕様

[溶融プール]	燃料／スティール質量（体積）比	: 0.7/0.3 (0.6/0.4)
	燃料／スティール質量	: 14kg/6kg
	プール温度	: ~3600K
	プール壁面境界条件	: 断熱条件
[流出経路]	集合体ピン束	: 19~37本
	内径	: ~80mm (37本ピン束)

試験パラメータ

- (1) 溶融プール条件 : 溶融プール温度 (~3600K), 燃料スティール混合比
溶融プール条件の違いによる侵入融体の固化挙動、構造材のアブレーション挙動、閉塞形成及び安定性への影響
- (2) 集合体ピン本数 : ピン本数 (~37本)
- (3) 軸プランケット長さ
侵入融体の固化挙動に対する冷構造材壁の影響
- (4) 融体放出駆動圧 : ~1 MPa (ガス系による付加的駆動圧の印加)
融体駆動圧をパラメータとした流路への融体侵入距離

試験方法

- (1) 予備パルス (1.5kJ/gf) によって溶融プール (~3200K) を形成後、
単一パルスあるいは二重パルス加熱による
融体の集合体ピン束流路への放出
エネルギー投入量 : 1.5kJ/gf
エネルギー投入速度 : 10kJ/gf/s
- (2) 融体放出駆動圧をパラメータとする場合
融体放出に対する付加的駆動圧の印加 (ガス系)

1. 試験名称：制御棒案内管への融体流出試験

2. 試験目的：炉心プール形成過程（中規模プール）における制御棒案内管の破損と
破損後の燃料流出挙動の解明

3. 現状の知見と問題点：

ANL/CAMEL 炉外試験（模擬融体：thermite）からは、初期の FCI による案内管内のボイド化が比較的早く、定性的にはその後の燃料流出が容易であると結論されているが、融体条件（成分、量、温度）の不適切さから、破損と流出との関係を見極めるには至っていない。また、SIMMER-II を用いた解析的研究においては、案内管内のボイド化部分の減圧が不十分な場合、核的ポテンシャルの低減に寄与する程の燃料流出を達成するには時間を要し、全炉心プールへの拡大と時間的に競合する可能性が示唆されている。案内管の破損及び融体の流出挙動は炉心沸騰プール挙動と密接に関わる現象であるが、現状では、案内管からの早期融体移行シナリオにつながる実証性の高い実験的知見は得られていない。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい物理量、情報

中規模プール条件下（～3400 K）での

- 1) 制御棒案内管の破損挙動（破損タイミング、モード）
- 2) 制御棒案内管内のFCI 壓力発生と減圧挙動
- 3) FCI 発生下での融体流出と軸方向移動

(2) 試験で測定する主要な物理量

- 1) 軸方向燃料分布の時間変化（ホドスコープによる計測）
 - オンラインによる温度、圧力、冷却材ボイド率の同時測定
- 2) 最終的な物質空間分布（試験後破壊／非破壊検査）

(3) 試験パラメータ

- 1) 溶融プール温度（予備パルスによる溶融プール形成後の低出力加熱：0.1 ～ 0.2 Po）
- 2) 溶融プール圧力（溶融プール・カバーガス圧力：～1MPa）
- 3) 案内管内の冷却材流量（～定格）
- 4) 案内管構造（薄肉化、無壁面化、穴付き壁面、構造材材料等：別途、炉外試験で構造最適化）

(4) 試験によって確認する事項

- 1) 热（炉心融体）及び機械的負荷（案内管内外圧力差）の違いによる案内管の破損タイミングと破損モード
- 2) 案内管内冷却材流量の違いによるFCI 発生（減圧）挙動と融体流出ポテンシャル（流出融体速度と軸方向移動挙動）の関係
- 3) 燃料流出に対して最適化された案内管構造による融体流出ポテンシャル

5. 成果の反映方法：

実験解析を通して解析コード（SIMMER-III）の熱及び質量移行モデルを改良し（精度向上）、案内管の破損挙動、及びFCI 発生条件下での融体流出挙動を再現できるようにする（モデルの検証）。これを実機解析に適用して、全炉心プールに至るまでの炉心プール形成過程において、再臨界ポテンシャルの排除に最も寄与することが期待される案内管の破損による早期燃料流出が可能であり、流出量が全炉心インベントリの10～20%であることを示す。また、最適化された案内管構造による燃料炉外流出促進に対する効果を確認する。

6. 期待される効果：

プールが全炉心に拡大するまでの過程で、炉心融体流出経路（集合体ピン束、制御棒案内管、集合体ギャップ）を通して、約30%を超える炉心燃料の炉外流出（軸プランケットへの再配置を含む）が達成されることが実証される。これにより、全炉心プールでの厳しい再臨界の発生を排除するための十分条件が示される。また、炉心融体の炉外流出促進に対して効果的な構造設計提案が可能となる。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性：

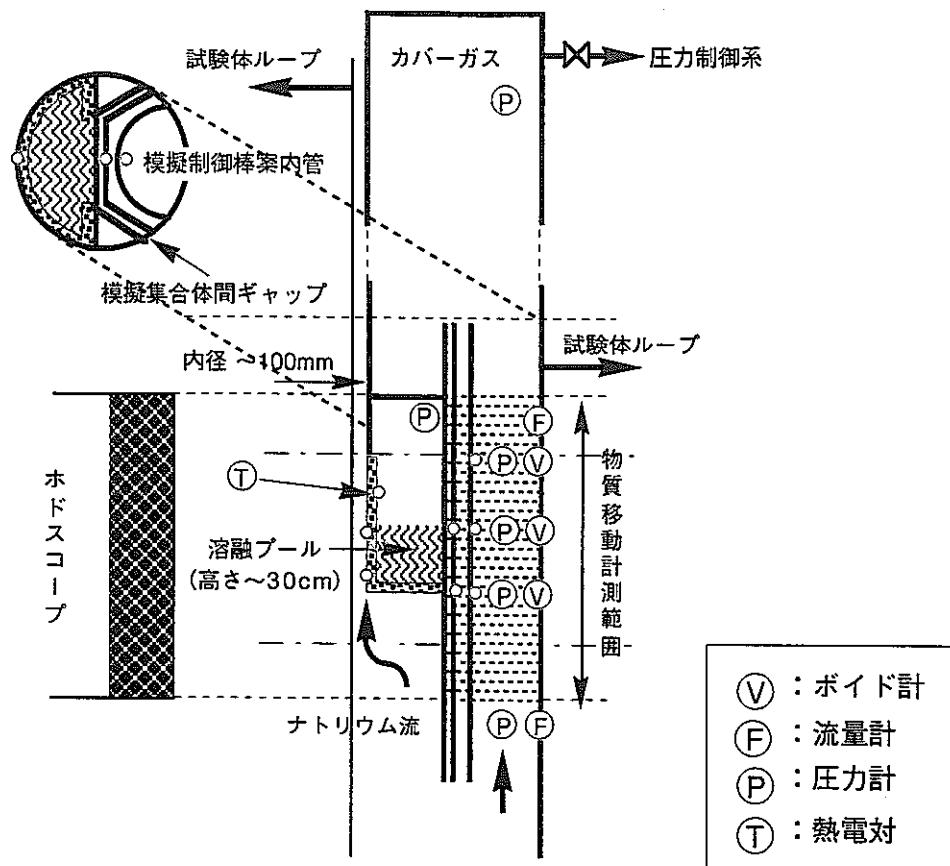
炉心プール形成過程において過大なエネルギーが発生しないことを実証することにより、合理的な格納施設を成立させるための安全設計に成果を反映できる。

試験名称：制御棒案内管への融体流出挙動試験

分類番号

14

試験体図



試験仕様

試験体仕様

[溶融プール] 燃料／スティール質量（体積）比 : 0.7/0.3 (0.6/0.4)

燃料／スティール質量 : 7kg/3kg

プール温度 : $\sim 3400\text{K}$

[流出経路] 模擬制御棒案内管

試験部内径 : $\sim 100\text{mm}$

試験パラメータ

- (1) 溶融プール条件 : 溶融プール温度 ($\sim 3400\text{K}$)、圧力
溶融プール温度、圧力の違いによる制御棒案内管の
破損挙動（タイミング、モード）への影響
- (2) 案内管内冷却材流量 : 制御棒案内管内ナトリウム流量（～定格）
ナトリウム流量の違いによるFCI発生及び融体流出挙動への影響
- (3) 案内管構造（薄肉化、穴付き壁面、構造材材料など）: 炉外試験で最適化

試験方法

- (1) 予備パルス (1.5kJ/gf) によって溶融プール ($\sim 3200\text{K}$) を形成後、
低出力 (0.1~0.2P₀) による溶融プール加熱 ($\sim 3400\text{K}$)
制御棒案内管破損及び融体流出によるFCI発生の模擬

1. 試験名称：炉心プール沸騰挙動試験

2. 試験目的：炉心プール形成過程における沸騰不安定性に駆動された再臨界によって過大なエネルギー発生が起きないことを立証する。

3. 現状の知見と問題点：

上記目的を達成するためには内部発熱を伴う燃料／スティール沸騰プールにおけるスティール気泡の発生成長によるボイド率の変化率、すなわちスティールの単位体積当たりの蒸発速度を測定する必要がある。このような沸騰プールを実現した炉内試験に SCARABEE BF3 があるが、本試験は局所事故を対象としているために壁面を強制的に冷却しており、熱条件が炉心プールとかなり異なった条件での試験である。また SCARABEE 炉にはホドスコープが無いためにプールの沸騰挙動が直接観測されておらず、必要な情報が得られていない。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

燃料／スティール混合沸騰プールにおける沸騰挙動が安定であること、すなわちスティールの蒸発によるプールのボイド化は遅く、蒸気泡の直径はプール深さ程度まで成長しないことを確認する。

(1) 求めたい物理量、情報

沸騰プールにおけるスティール気泡の発生成長によるボイド率の変化率 $\dot{\alpha}$ (1/s) の速さ、すなわちスティールの蒸発速度 ($\text{kg/m}^3 \text{s}$)

(2) 試験で測定する主要な物理量

プール液面の揺動速度 \dot{L} (m/s)：これは沸騰プールの燃料質量分布の時間変化挙動（ホドスコープによるデータ）から求める。プールの深さを L 、そのときのプール平均ボイド率を α とすると、(1)式の関係がある。ここで、 L_0 は単相状態でのプールの深さである。したがって、液面の揺動速度 \dot{L} からプール内のボイド率の変化速度は (2) 式から求められる。スティールの体積平均蒸発速度は $\dot{\rho}$ から (3) 式によって求められる。

(3) 試験パラメータ

1) 過渡出力（溶融プール温度）

$$2) \text{燃料／スティール混合比} \quad L = \frac{L_0}{1 - \alpha} \quad (1) \quad \dot{\alpha} = \frac{(1 - \alpha)^2}{L_0} \dot{L} \quad (2) \quad \dot{\rho} = \dot{\alpha} \rho \quad (3)$$

(4) 試験によって確認する事項

図1に気泡の発生・成長とプールの沸騰安定性の関係を考察した結果を示す。この図から気泡の成長速度として、プール滞在時間 4.0 (s) 内に直径 10cm 成長する程度であれば、プールは安定であると言える。炉心プールの深さは 50cm 程度であるため、これをプールのボイド率の変化率に換算すると、0.2（気泡直径のプール深さに対する比）/ 4.0 (s) ≈ 0.05 (1/s) である。すなわち、(2)式で求めた $\dot{\alpha}$ が 0.05 (1/s) 程度の大きさであれば、炉心プールの沸騰は安定であるといえる。

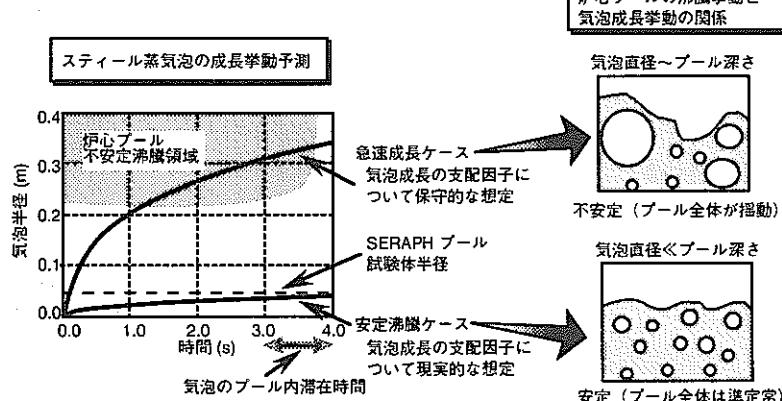


図1 スティール沸騰挙動と炉心プールの安定性の関係

5. 成果の反映方法：

実験結果によって炉心プールにおけるスティール気泡の成長速度が遅いことを実証する。これを実機解析に反映することにより、プールの不安定沸騰による過大な再臨界が発生しないことを示す。

6. 期待される効果：

遷移過程での沸騰不安定性に駆動された再臨界現象で過大なエネルギー発生が生じないことが示される。

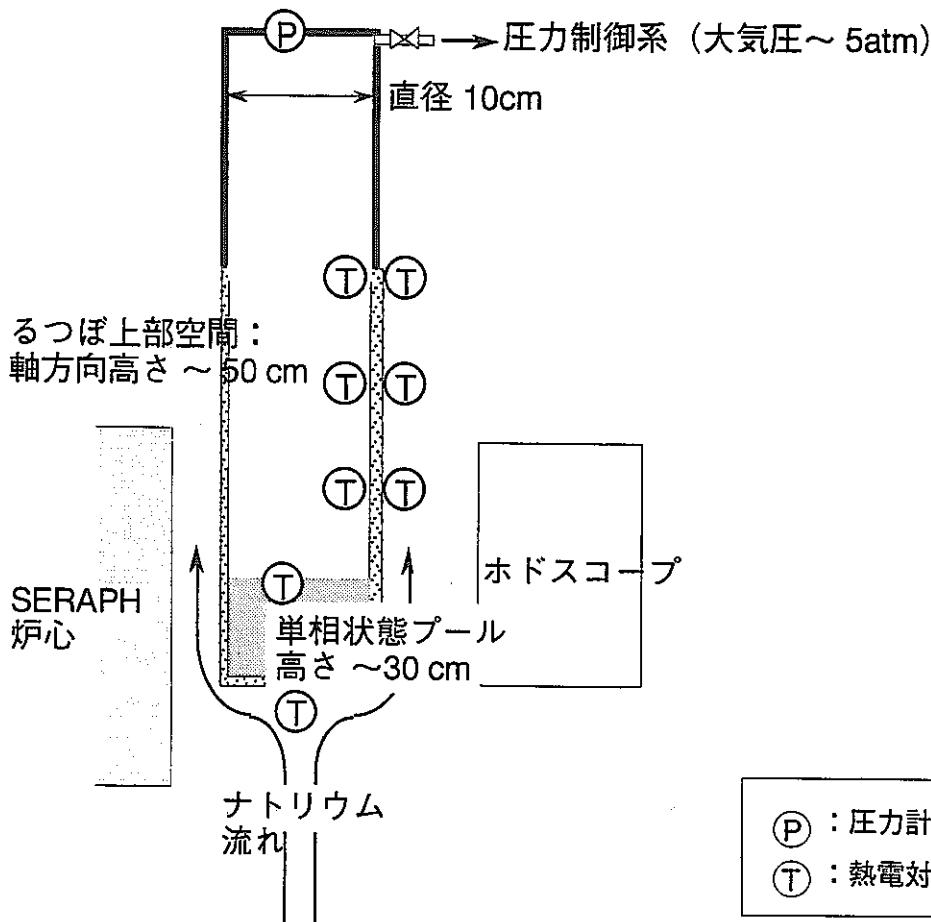
7. 安全設計・安全評価基準類との関連性：

炉心プール形成過程において過大なエネルギーが発生しないことを実証することにより、合理的な格納施設を成立させるための安全設計に成果を反映できる。

試験名称：炉心プール沸騰挙動試験

分類番号 15

試験体図



試験仕様

試験体仕様

[溶融プール]	燃料／スティール質量（体積）比	: 0.7/0.3 (0.6/0.4)
	燃料／スティール質量	: 14kg/6kg
	プール温度	: ~3600K
	試験体プール深さ	: 0.5 ~ 0.6 m
[試験部]	内径	: ~100mm
	プール壁面境界条件	: 断熱条件

試験パラメータ

- (1) 溶融プール条件 : 溶融プール温度 (~3600K)
燃料／スティール混合比
- (2) 過渡印可出力 : 0.1 ~ 0.2 Po

試験方法

- (1) 予備パルス (1.5kJ/gf) によって溶融プール (~3200K) を形成後、
低出力 (0.1~0.2Po) による溶融プール加熱 (~3600K)

1. 試験名称：融体プールへの中性子吸收体混入試験

2. 試験目的：ATWSの影響緩和を目的とする中性子吸收材反射体の有効性確認のため、吸収体落下動作の確認に統いて、発熱する実物質プールへの混入挙動の確認を行う。

3. 現状の知見と問題点

本防止方策装置のR&Dは現状では皆無であるが、実現困難な要素はない。その落下機構については、炉外での要素試験、ナトリウム中での動作確認試験、実炉での照射による劣化の有無の確認などを行う。緩和方策である融体プールへの混入についても炉外試験を行なうが、最終的に炉内試験で実物質プールによる挙動確認を行う。一般には、低密度の中性子吸収体が融体プールと部分的にでも混入できるかあるいは分離したままかを調べる。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい情報（Y）：

吸収材落下機構の適切な作動の確認。
炉停止に失敗した場合の、吸収体の融体プールへの混入挙動。

(2) 試験における主要な測定パラメータ（X）：

落下機構の作動は専用センサーで確認できる。
融体プールへの混入挙動はホドスコープ信号と事後破壊検査。

(3) XとYとの関係：

上記測定量より、落下機構の作動、混入挙動などが把握できる。

(4) 成功条件：

冷却材温度上昇型事故条件において、燃料破損を生じる前に吸収材の落下が生じることが確認されること。
燃料破損が生じた場合でも、吸収体がプール上部に留まり、または部分的にプールに混入して再臨界の回避に十分な負の反応度効果を与え得ることが確認されること。

5. 成果の反映方法

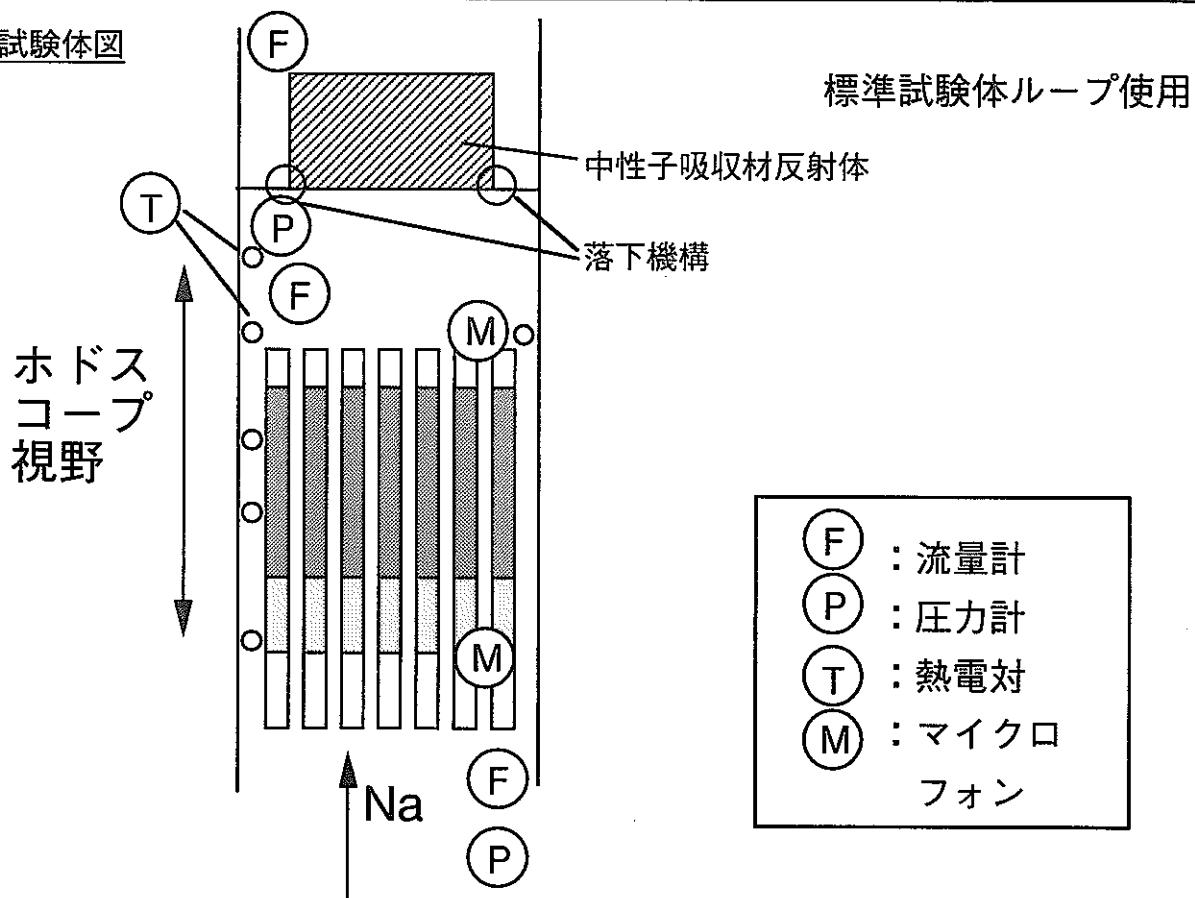
動作、有効性を実証することにより、実炉への採用を可能とする。

6. 期待される効果

CDAへの拡大防止方策及び影響緩和方策の強化が図れる。特に影響緩和については、遷移過程における集合体規模プールの段階でプール上層部に多量の中性子吸収材を供給できるので、中～大規模プールに至る以前に核的不活性を達成できる。よって再臨界による過大なエネルギーの発生を排除できる可能性が増大する。

7. 安全設計・安全評価基準類との間連性

特にCDAにおける再臨界に対する影響緩和方策が、燃料流出とは異なる方策によって達成されることから、多様性が強化されることとなり、遷移過程での再臨界による過大なエネルギー発生を、少なくとも最確評価の範囲では考慮する必要がなくなる。

試験体図試験仕様

試験体仕様：標準試験体ループを使用

ピン数：37本程度

燃料燃焼度：新燃料～燃焼度 5 a/o

試験体特徴：上部ナトリウムプレナム付き集合体

試験パラメータ

エネルギー投入量、投入速度：SASSの部分的作動を模擬した緩慢な過出力
吸收体として複数の設計候補がある場合には、各候補。

試験方法

定常までの立ち上げ

ランプ状立ち上げで20秒以上定常維持

過渡

流量低下後SASSの部分的作動を模擬した緩慢な過出力過渡。

スローTOP後SASSの部分的作動を模擬した出力整定、流量低下もしくは
入り口ナトリウム温度を上昇させて燃料を破損させる。

1. 試験名称：部分損傷集合体の長期冷却挙動試験

2. 試験目的：部分損傷レベルで事故の拡大が防止された場合の中規模に損傷した集合体での長期冷却性を調べる。

3. 現状の知見と問題点

崩壊熱レベルの中規模（燃料10～20本程度）損傷部の冷却性に関する知見は皆無である。このような知見は、ATWSにおける部分損傷終息時の、除熱条件に対応した長期冷却性を評価する際に必須の情報である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい情報（Y）：

崩壊熱レベルにおける、自然循環及び強制循環条件下での冷却可能な損傷規模。

(2) 試験における主要な測定パラメータ（X）：

冷却材流量、冷却材温度、燃料移動挙動（ホドスコープ）、事後破壊検査。

(3) XとYとの関係：

損傷部冷却可能限界は、初期破損規模、燃焼度、出力密度、冷却材流量などで整理できる。

損傷拡大の有無は、流量応答、燃料移動挙動（ホドスコープ）などにより把握する。

(4) 成功条件：

想定範囲内の損傷が、自然循環流量レベル（あるいは、ポンーモーター流量レベル）で長期冷却可能であることが確認できること。

5. 成果の反映方法

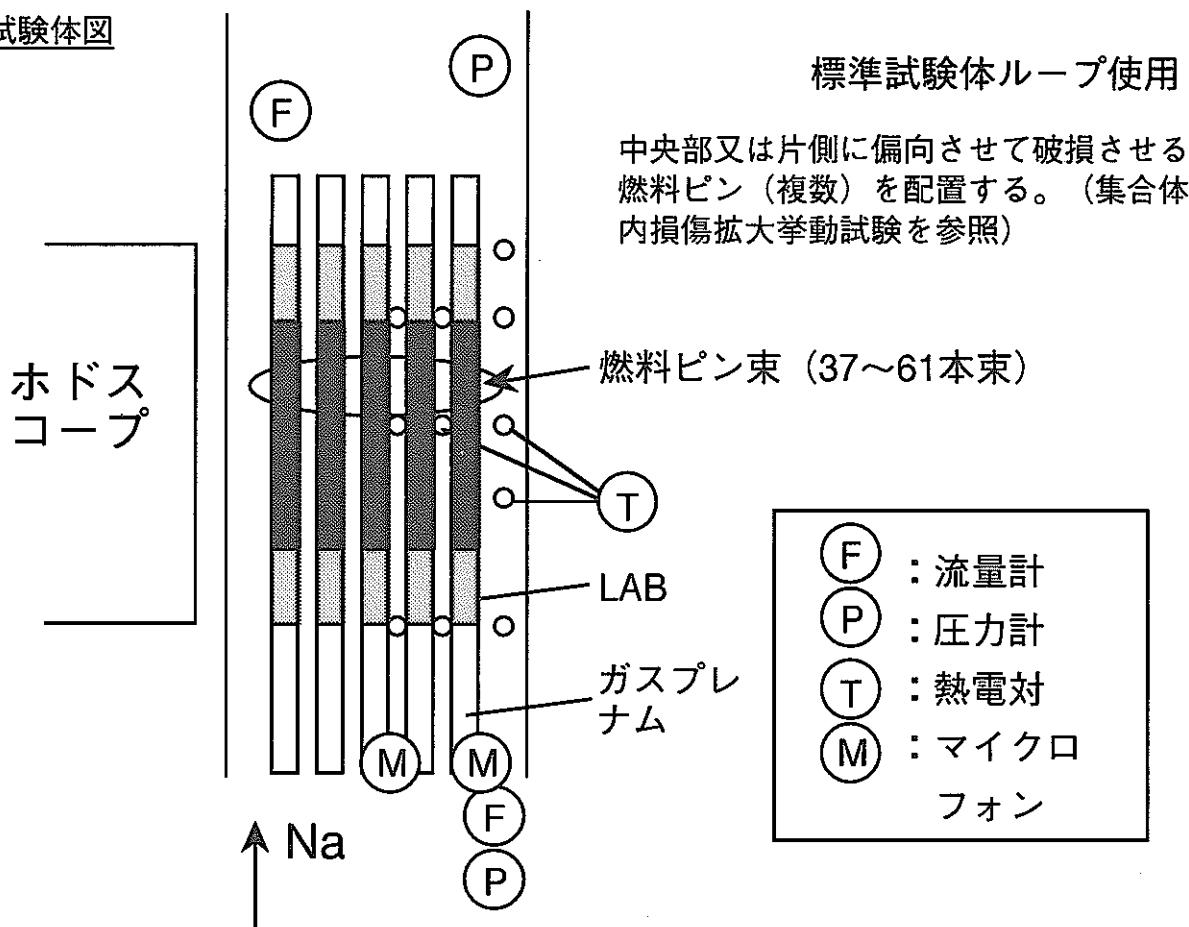
実験データの蓄積を通して損傷の冷却可能限界が明らかになる。実験解析、モデル改良を通して解析による予測技術を向上し、内外挿を可能とする。これをCDA拡大防止方策の不確かさを含めた解析に反映する。

6. 期待される効果

現在、燃料健全性確保をCDA拡大防止方策の成功基準とすることが一般的であるが、本試験のような知見の蓄積によって、成功基準の緩和が可能となる。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性

CDA拡大防止方策の採用に際しての、判断基準の策定に資する。

試験体図試験仕様

試験体仕様：標準試験体ループ使用

ピン数：37本～61本バンドル。

燃料燃焼度：損傷ピン及びその周辺は可能な限り高燃焼度。他は低燃焼度。

試験体特徴：中央もしくは集合体壁近傍に初期に破損させる燃料（高濃縮、薄肉化などによる）を10～20本程度配置。

試験パラメータ

初期破損規模：10～20本（局所事故研究等の知見から決定。）

流量挙動：ポンーモーター流量レベルから自然循環流量レベルまで

試験方法

定常までの立ち上げ

- 1) ランプ状立ち上げで20秒以上定常維持
- 2) 小パルスで加熱し20秒以上定常維持

過渡

流量を絞って2～3 Po×数秒の出力過渡により燃料破損を生じさせる。
出力を崩壊熱レベルに落とした後、流量をポンーモーターレベルから自然循環レベルまで数時間かけて段階的に低下させてゆき、冷却可能限界を調べる。

1. 試験名称：燃料からのFP放出挙動炉内試験

2. 試験目的：炉外模擬試験では実現不可能かつソースターム評価上重要な反応度投入型条件や高温の燃料溶融・沸騰プール条件での燃料からのFP放出挙動とこれに及ぼす核加熱（内部加熱）の影響を把握する。

3. 現状の知見と問題点

高速炉では事故時の燃料温度がその融点（約2800°C）を超える領域まで評価の対象となるが、これまでに得られているデータは軽水炉の事故を対象としたものであるために主に融点未満のものである。このため、現行及び今後の炉外試験では、達成可能な最高温度約3300K、最大昇温速度約15K/sまでの範囲で実照射燃料を使用したデータを取得すると共に、これに及ぼすナトリウムやステンレス被覆管の影響を把握する予定であるが、燃料昇温速度が $10^3 \sim 10^4$ K/sと極端に速くピン形状が溶融分散によって崩壊する反応度投入型条件や、燃料最高温度が約4000Kにもなる燃料溶融・沸騰プール条件は、燃料からの不揮発性FPの放出量が極めて多くなるためにソースターム評価上重要な事象であるにもかかわらず炉外試験では実現不可能である。また、実事象では核加熱（内部発熱）によって燃料が昇温するために、燃料内部での温度プロファイルは中心が高く外側が低くなるが、炉外試験では外部加熱のために中心が低く外側が高くなる。燃料からのFP放出挙動が燃料内部でのFP拡散に支配されるとすると温度プロファイルは模擬すべき重要な条件の一つであると考えられるが、これを炉外試験で模擬することは不可能である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい物理量、情報

単位時間、燃料の単位表面積又は単位質量当たりのFP放出量（初期インベントリに対する割合）とその物理・化学形態

(2) 試験で測定する主要な物理量

・燃料温度	・キャリアガス中のFPガス濃度	・キャリアガス流量
・ γ 線スペクトル	・エアロゾル粒径分布	・試験時間

(3) 試験パラメータ

① 燃料形態、② 燃料燃焼度、③ 燃料昇温速度、④ 燃料最高温度

(4) (2) から (1) を導く方法

- ・ γ 線スペクトル分析とキャリアガス中FPガス濃度分析の結果から、測定時の燃料温度における単位時間当たりのFP放出量が得られる。これを、事前に計算または実測しておいた初期FPインベントリと比較し、放出速度定数（fraction/min）が求まる。
- ・温度勾配をつけたサンプリング管やカスケードインパクターのFP付着プロファイルを γ 線スペクトル分析し、事前に形態既知の模擬物質で実測しておいた付着プロファイルと比較することにより、物理・化学形態を同定する。

5. 成果の反映方法

炉外模擬試験結果とこれを基に開発した解析コードによる計算結果から構築した高速炉の炉内ソースタームに関するデータベースを補完するとともに、従来データとの比較検討からこれらの妥当性を確証する。

6. 期待される効果

高速炉に固有なソースターム低減効果を反映し、かつ従来の不確定要因を低減したデータベースを構築できることから、そのデータベースを基にして従来の過度に保守的で非機構論的なソースターム評価手法に替わる現象論に裏付けられた機構論的な評価手法を確立できる。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性

事故事象とソースタームに関する技術的知見に基づいた合理的な格納施設の成立に必要な安全設計・安全評価指針における炉内ソースタームの考え方を、高速炉のソースタームに関して構築されたデータベースとこれに裏付けられた機構論的な評価手法に基づいて策定できる。

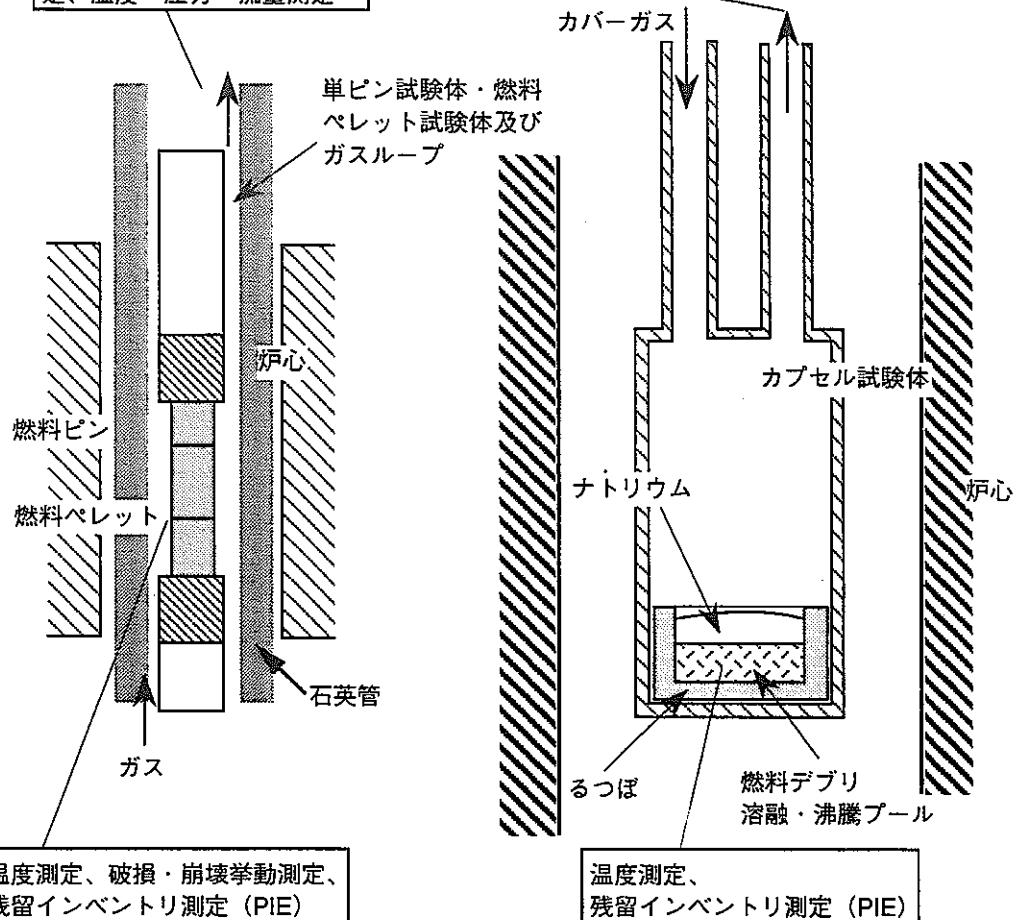
試験名称：燃料からのFP放出挙動炉内試験

分類番号

18

試験体図

ガス・エアロゾルサンプリング、DN・ γ 線スペクトル測定、温度・圧力・流量測定

試験仕様

試験体仕様

試験燃料形態：ペレット、単pin、デブリ、溶融・沸騰プール

試験体形状：ガスループ型（ペレット、単pin）
カプセル型（デブリ、溶融・沸騰プール）

試験パラメータ

試験燃料量 : 10~50g
燃料燃焼度 : 0~10 a/o
燃料最高温度 : ~4000K
燃料昇温速度 : 1~ 10^4 K/s

試験方法

約30秒の前照射の後、定出力維持～高速パルス

1. 試験名称：燃料蒸気泡挙動炉内試験

2. 試験目的：冷却材ナトリウム中での蒸気泡減衰挙動や気泡内FPのナトリウム中への移行挙動に及ぼす燃料蒸気泡の自己発熱効果や気泡構成成分の影響を把握する。

3. 現状の知見と問題点

高速炉のシビアアクシデントの特徴的なものの一つである反応度投入事故で燃料蒸気泡が生成される場合には、燃料から放出されたFPが燃料蒸気泡に取り込まれて冷却材ナトリウム中にトラップされずにカバーガスへ直接移行し得ることから、燃料蒸気泡挙動はソースターム評価上重要な事象である。このため、炉外試験では模擬燃料ピンを直接通電加熱することによってナトリウム中で燃料蒸気泡を発生させ、蒸気泡のナトリウム中減衰挙動とこれに及ぼす不活性ガスの影響を把握するとともに、気泡内FPのナトリウム中への移行速度（蒸気泡に伴うFPのカバーガスへの放出割合）に関するデータを取得する予定である。しかし、これらの挙動は気泡内温度変化に大きく左右されるため気泡内の燃料とFPの自己発熱効果やその構成割合は模擬すべき重要な条件であると考えられるが、これらを炉外試験で模擬することは不可能である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい物理量、情報

蒸気泡生成時の気泡構成成分量に対するカバーガス到達時の気泡構成成分量の割合

(2) 試験で測定する主要な物理量

- ・カバーガス中の γ 線スペクトル
- ・カバーガス中のエアロゾル量とそれに含まれるFPの種類と量
- ・カバーガス中のFPガス濃度

(3) 試験パラメータ

- ① 燃料燃焼度、② 単位時間、燃料の単位質量当たりへの投入エネルギー

(4) (2) から (1) を導く方法

- ・蒸気泡生成時の気泡構成成分量は、投入エネルギーと試験燃料の蒸発・分散量の関係として事前に予備試験又は計算で求めておく。また、(2) の測定値から試験時のカバーガスへのFPと燃料物質の移行量を求め、両者を比較してカバーガスへの放出割合を求める。

5. 成果の反映方法

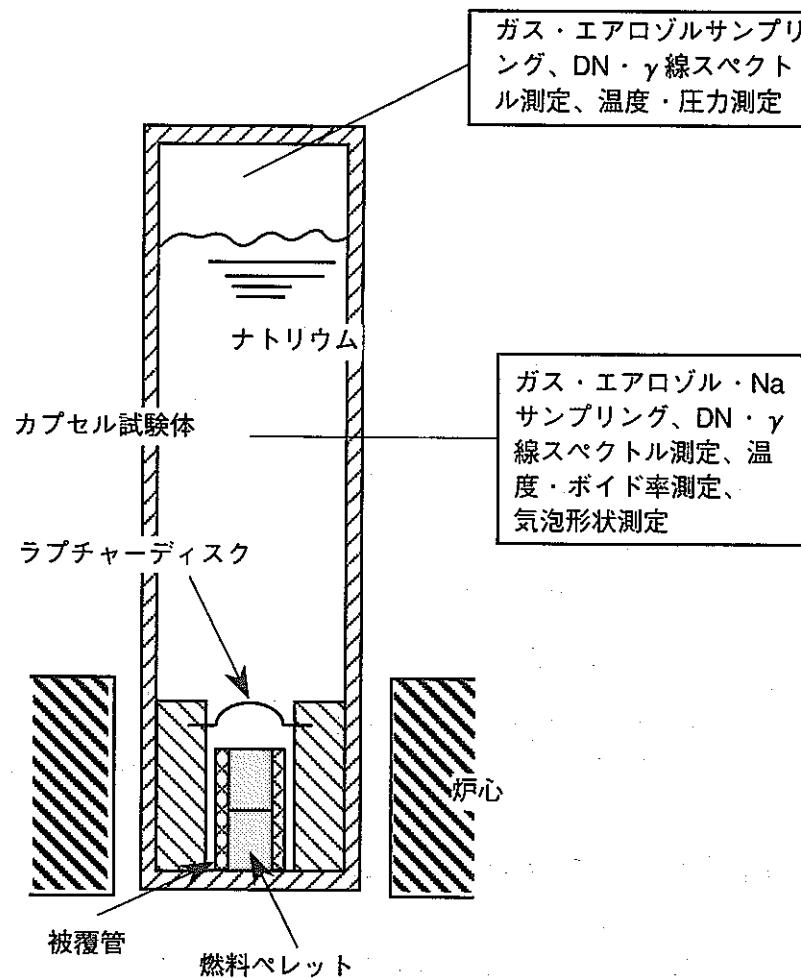
炉外模擬試験結果とそれを基に開発した解析コードによる計算結果から構築した高速炉の炉内ソースタームに関するデータベースを補完するとともに、従来データとの比較検討からそれらの妥当性を確証する。

6. 期待される効果

高速炉に固有なソースターム低減効果を反映し、かつ従来の不確定要因を低減したデータベースを構築できることから、そのデータベースを基にして、従来の過度に保守的で非機構論的なソースターム評価手法に替わる現象論に裏付けられた機構論的な評価手法を確立できる。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性

事故事象とソースタームに関する技術的知見に基づいた合理的な格納施設の成立に必要な安全設計・安全評価指針における炉内ソースタームの考え方を、高速炉のソースタームに関して構築されたデータベースとこれに裏付けられた機構論的な評価手法に基づいて策定できる。

試験体図試験仕様

試験体仕様

試験燃料形態：被覆管付ペレット

試験体形状：耐圧構造ナトリウムカプセル

試験パラメータ

試験燃料量 : 5~10g
 燃料燃焼度 : 0~10 a/o
 燃料最高温度 : ~5000K
 燃料昇温速度 : ~ 5×10^4 K/s

試験方法

約30秒の前照射の後、高速パルス

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

20

1. 試験名称：炉内ソースターム総合試験

2. 試験目的：ピン単体規模およびバンドル規模での事故事象の進展状態が炉内ソースターム挙動全般に及ぼす影響を把握する。

3. 現状の知見と問題点

事故時における破損・溶融燃料からのFP放出挙動とその後の一次冷却系内のFP移行挙動（炉内ソースターム挙動）は、事故時の燃料温度履歴、ピン形状の崩壊状況、冷却材ナトリウムの流動状況等の事故の状態とその時間的推移である事故事象の進展に大きく左右されるが、そもそも炉外試験でこれらを総合的に模擬することは不可能である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

(1) 求めたい物理量、情報

一次冷却系内におけるFPの分布に関する時間変化

(2) 試験で測定する主要な物理量

- | | |
|-------------------|--------------------|
| ・ γ 線スペクトル | ・ガス・エアロゾル・Na等のサンプル |
| ・カバーガス中FPガス濃度 | ・遅発中性子 |
| ・温度・圧力・流量 | ・カバーガスエアロゾル粒径分布 |

(3) 試験パラメータ

模擬する事故のタイプ（ATWS、LOHRS、LF）

(4) (2)から(1)を導く方法

測定する物理量の時間変化からFPや燃料物質の種類と量に関する分布の時間変化を求める。

5. 成果の反映方法

炉外試験結果を基に開発した炉内ソースタームの機構論的な評価手法（解析コード）の総合的な検証・改良に資する。

6. 期待される効果

高速炉に固有なソースターム低減効果を反映し、かつ従来の不確定要因を低減したデータベースを構築できることから、そのデータベースを基にして、従来の過度に保守的で非機構論的なソースターム評価手法に替わる現象論に裏付けられた機構論的な評価手法を確立できる。

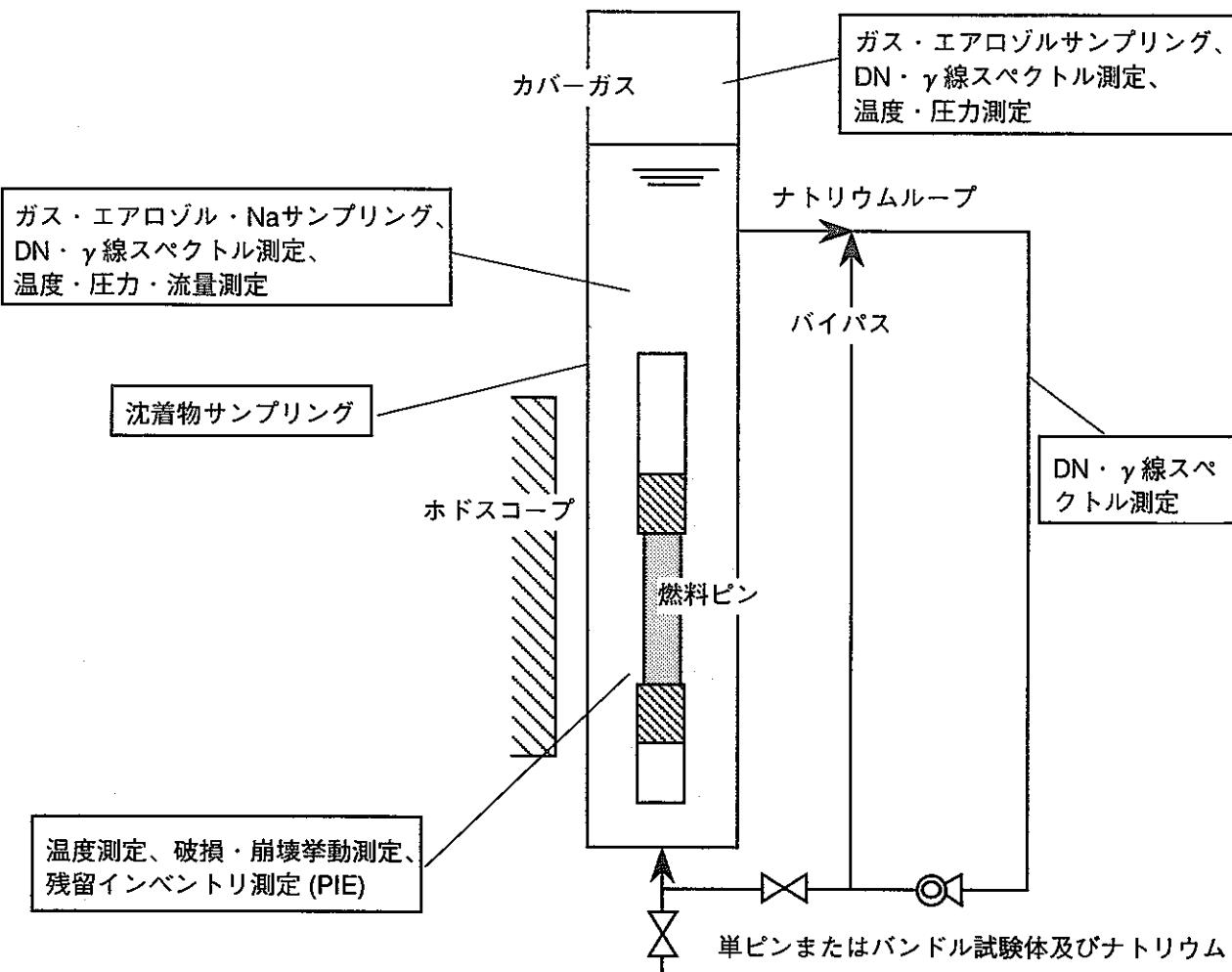
7. 安全設計・安全評価基準類との関連性

事故事象とソースタームに関する技術的知見に基づいた合理的な格納施設の成立に必要な安全設計・安全評価指針における炉内ソースタームの考え方を、高速炉のソースタームに関して構築されたデータベースとこれに裏付けられた機構論的な評価手法に基づいて策定できる。

試験名称： 炉内ソースターム総合試験

分類番号

20

試験体図試験仕様

試験体仕様

- 1) 試験燃料形状： 単ピンまたはバンドル
- 2) 試験体特徴 :
 - ・バイパス流路はナトリウムループ
 - ・ナトリウム上部はプレナム及びカバーガス空間にて on-line γ 線スペクトル測定が可能のこと

試験パラメータ

燃料燃焼度 : 0~10 a/o

試験方法

- 1) 短半減期核種のインベントリ立上げのための過渡前照射
- 2) その後は、燃料安全研究または炉心安全研究のための試験運転モードに従う

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

21

1. 試験名称：新型燃料に関する燃料安全研究試験

2. 試験目的：窒化物、金属、低線出力MOXなどの新型燃料について、定常照射挙動を把握するとともに、設計基準事象あるいはこれを若干越える事象における燃料ピン健全性の確保または異常拡大の防止のための条件を確認する。

3. 現状の知見と問題点：

低線出力MOX燃料の挙動については、これまでの通常のMOX燃料の定常照射挙動や過渡試験などの結果からの推定がある程度可能である。ただし、低線出力で高燃焼度まで照射する場合の照射挙動や、そのような高燃焼度燃料の過渡挙動については未知の部分が多い。

金属燃料については、かなりの定常照射データが比較的高い燃焼度条件まで得られており、過渡挙動についても一定の知見が得られている。

窒化物燃料については、定常照射データも希少であり、過渡挙動についてはほとんど知見が得られていない。

以上のように、燃料タイプに依存して程度の差はあるが、いずれの場合においても、統計性を有する程度まで、高燃焼度までの照射データを得るには至っていない。また、過出力事故や局所事故などでの異常拡大防止に関わる知見は少ない。さらに、窒化物燃料についてはランダム破損燃料の継続照射時の安定性についても不明である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

単一ピン破損限界線出力及び破損前ピン内燃料移動（健全性確保、再起動性）

19本ピン束での破損限界線出力（健全性確保におけるバンドル効果）

過出力条件下での集合体内少数ピン破損時の損傷拡大範囲と安定冷却条件（異常拡大防止）

集合体内損傷拡大速度と、DN放出・輸送などを含めた異常検知性（異常拡大防止）

以上の内容は、従来MOX燃料の燃料安全研究におけるものと同様であり、分類番号#1～#4の「4. 試験によって確認すべき事項とその方法」に記載した内容が上記4項目に各々対応する。

5. 成果の反映方法：

新型燃料の破損メカニズムに立脚した機構論的破損評価手法を確立し、これに基づいて、燃料設計の最適化、評価基準類の整備に資する。

6. 期待される効果：

新型燃料について、定常照射挙動、設計基準事象あるいはこれを若干越える事象における、燃料ピン健全性または異常拡大防止性の確認を可能にし、安全性や経済性を向上させた新型燃料・炉心の開発と実用化を可能とする。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性：

新型燃料・炉心に対する燃料破損限界や異常拡大防止に関わる評価基準類の整備が可能になる。

試験名称： 新型燃料に関する燃料安全研究試験

分類番号

21

「試験体」及び「試験仕様」については、従来型MOX燃料の研究に関する条件と基本的に同様であり、従来型MOXについての分類番号#1～#4の内容と基本的に等価。

分類番号#1： 単一燃料ピン破損挙動試験

分類番号#2： 19本ピン束破損限界試験

分類番号#3： 過出力時集合体内少数ピン破損挙動試験

分類番号#4： 集合体内損傷拡大挙動試験

ただし、燃料仕様、線出力、冷却材温度の対象範囲は異なる。また、燃料タイプの相違に関する安全研究上注目すべき課題の例としては以下が挙げられる。

1) 金属燃料での共晶による被覆管減肉（健全性確保）

ATWS時の負の反応度効果により除熱と出力がバランスした状況での比較的長期の高温状態における被覆管健全性への影響。

2) 金属燃料での局所事故時の損傷拡大（異常拡大防止）

局所事故などにおいて、高熱伝導率の金属燃料が融体を形成すると、冷却材沸騰やボイド化チャネル中での被覆管や構造材へのアタックが急激なものとなり得る。一方、異常の検知に重要なDN先行核の冷却材流中への移行挙動も未解明である。

3) ナトリウム・ボンド燃料でのボンド沸騰・喪失

単一ピン破損時、あるいは局所事故時のボンド喪失による燃料溶融などの有無と影響。ATWSにおけるボンド沸騰の可能性とその影響。

4) 窒化物燃料の高温化時の化学的安定性

高温での窒素の解離の有無あるいはその条件、及び破損燃料の継続運転中の化学的安定性。

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

22

1. 試験名称：新型燃料に関する低出力・低除熱条件での燃料挙動試験

2. 試験目的：窒化物、金属、低線出力MOXなど新型燃料について、燃料ピン挙動に依存した反応度応答の定量化と、出力平衡状態に至る過程での燃料ピンの健全性を確保するための条件を解明する。

3. 現状の知見と問題点：

反応度応答

低線出力MOX燃料については、出力レベルに依存した燃料伸びや燃料温度などは通常のMOX燃料の知見から推定可能であり、反応度応答の概略評価には十分な知見がある。また、金属燃料の伸びなどの知見はある程度得られており、高伝熱燃料での燃料温度の評価誤差は少ないことを考慮すると、反応度応答の概略評価の観点からはあまり問題はない。ただし、実用化を念頭に置いた段階では、実証性を持つデータの取得が必要となる。

燃料ピンの健全性

比較的長期の低出力レベル・高温状態での破損メカニズムについては、MOX燃料をも含めて直接的データがなく、知見は不十分である。このような条件下での破損限界の解明は、重要である。また、実用化を念頭においた段階では、炉心変形などの反応度応答とともに、実証性を持つデータの取得が必要となる。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

- 炉出力レベル、冷却材温度に依存した燃料スタックの伸びと燃料温度分布
(反応度応答)
- 炉出力レベル、冷却材温度、持続時間に依存した燃料ピン破損条件と破損の影響
(炉心損傷の開始条件)

以上の確認事項及びそれらを確認する手法は、従来型MOXの燃料安全研究の場合と同様であり、分類番号#21の内容があてはまる。

5. 成果の反映方法：

新型燃料の破損メカニズムに立脚した機構論的破損評価手法を確立し、これに基づいて、燃料設計の最適化、評価基準類の整備に資するとともに、過渡時の健全ピン体系での反応度応答を把握し、他の炉外試験や実炉試験等による研究と総合することにより、受動的安全特性を活かした設計の成立性の確認、評価基準類の整備に資する。

6. 期待される効果：

受動的安全特性を活かした設計により安全性を確保するFBRの開発と実用化を可能とする。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性：

受動的安全特性を活かした設計の実現、及びそのようなプラント概念に対する評価基準類の整備が可能になる。

試験名称： 新型燃料に関する低出力・低除熱での燃料挙動試験

分類番号

22

本試験の「試験体」及び「試験仕様」については分類番号# 21と基本的に等価。ただし、出力条件、冷却条件、過渡時間スケールについては異なり、低出力・流量の条件を数分から數十分保持する。なお、出力レベルと時間スケールが相殺する形となるため、駆動炉心、あるいは熱除去系への負担は同様のレベルと考えられる。

また、ATWSにおける炉心損傷回避のサクセスシナリオに相当する比較的長期の過渡における高温化した被覆材のクリープ破損、燃料のスウェーリングなども注目すべき課題となる。

炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ

分類番号

23

1. 試験名称： 新型燃料に関する炉心安全研究試験

2. 試験目的： 窒化物、金属、低線出力MOXなど新型燃料について、炉心損傷に関する挙動を明らかにし、その影響の定量化と設計依存性の解明を行う。

3. 現状の知見と問題点：

低線出力MOX燃料の挙動については、これまでの通常のMOX燃料の過渡試験などの結果からの推定がある程度可能である。ただし、低線出力で高燃焼度まで照射した燃料の破損条件や破損後挙動についてはデータも無く、炉心損傷過程の定量評価には大きな不確定性を伴う。

金属燃料については過出力条件での破損及び破損後挙動に関するデータが若干得られているが、ULOF条件のような冷却材沸騰状態からの燃料分散・固化挙動の知見はほとんど無く、定量評価が困難な状況にある。

窒化物燃料の過渡挙動については全く知見が無く、破損メカニズムを始めとする基本的理解が得られていない。

以上のように、炉心安全研究の観点からは、燃料タイプに依存して知見のレベルに大きな差がある。ただし、いずれの場合においても、実用化を念頭においた安全評価の観点からは従来型MOX燃料と同様の炉心安全研究が必要である。

4. 試験によって確認すべき事項（または取得すべき情報）とその方法：

- ULOF型事象時の燃料分散・固化挙動（起因過程エナジエティクスの排除）
- 炉心プール形成・拡大挙動（遷移過程エナジエティクスの排除）
- 炉心からの溶融物質放出挙動（プール物質の炉心外流出による遷移過程の終息）
- ソースターム挙動（影響評価）

以上の確認事項は、従来MOX燃料の炉心安全研究における内容と同様である。

5. 成果の反映方法：

新型燃料の破損及び破損後挙動を解明し、これに基づき、機構論的評価手法を確立する。

6. 期待される効果：

従来型MOX炉心をも含めた異なる炉心概念間の総合的な安全性（異常発生防止、異常拡大防止、事故の影響の緩和などの観点を含む）の比較を可能にし、安全性・経済性を向上させる新型燃料・炉心の開発と実用化を可能とする。

7. 安全設計・安全評価基準類との関連性：

新型燃料・炉心に対する炉心損傷事象に関する評価基準類の整備、及び上記の総合的な観点からの安全評価が可能になる。

試験名称： 新型燃料に関する炉心安全研究試験

分類番号

23

「試験体」及び「試験仕様」については、従来型MOX燃料の研究に関する条件と基本的に同様であり、従来型MOXについての分類番号#11～#20の内容と基本的に等価。

分類番号#11： ピン束燃料分散挙動試験

分類番号#12： 集合体内ピン束への融体流出挙動試験（低温プール試験）

分類番号#13： 集合体内ピン束への融体流出挙動試験（高温プール試験）

分類番号#14： 制御棒案内管への融体流出試験

分類番号#15： 炉心プール沸騰挙動試験

分類番号#16： 融体プールへの中性子吸收体混入試験

分類番号#17： 部分損傷集合体の長期冷却挙動試験

分類番号#18： 燃料からのFP放出挙動炉内試験

分類番号#19： 燃料蒸気泡挙動炉内試験

分類番号#20： 炉内ソースターム総合試験

ただし、燃料仕様、線出力、投入エネルギー、冷却材温度などの対象範囲は異なる。また、燃料タイプの相違に関わる安全研究上注目すべき課題の例としては以下が挙げられる。

- 1) 負の反応度効果により炉出力が低下している条件からの炉心損傷開始
- 2) 炉心設計に依存したボイド反応度や遷移過程での再臨界ポテンシャルの変化
- 3) 高伝熱燃料であることによる過出力時の急激な冷却材沸騰の拡大
- 4) 高熱伝導率燃料であることによる激しいFCIあるいは構造材へのアタック
- 5) デブリ冷却性の相違

3. 4 必要性検討のまとめ

本章では、第2章で提示した安全性の目標とその展開とを受けて、目標達成に必要な具体的R&D課題について、基盤安全研究テーマと実用化先導研究テーマとに分けて検討した。

基盤安全研究テーマでは、従来検討を行ってきた燃料健全性、異常拡大防止、炉心安全性、ソースタームなどに関する研究テーマの現状における問題点を、特に第2章で示した安全性の目標との関連で把握し、その解決のために必要な研究課題の摘出、研究手段の役割分担、新たな炉内試験の提案と期待される効果などを集約した。

実用化先導研究テーマでは、安全性の向上に有効な受動的安全特性に注目し、炉心損傷への拡大防止方策、炉心損傷時の影響緩和方策の両面から、既提案、新規提案の各方策の有効性、技術的成立性、経済性などを総合的に検討し評価した。その結果に基づいて、適切な方策の組み合わせ例を抽出し、実用化までのR&D計画を検討した。その中で、SERAPH施設を必須とする研究テーマについては、SERAPHの試験研究テーマとして採用した。

以上の検討結果を集約して、SERAPHの全体的試験計画の形にとりまとめた。最終的にとりまとめられた試験研究テーマは以下の8分野23テーマである。

- 燃料健全性
- 異常拡大の防止
- 炉心損傷への拡大防止
- 炉心損傷の早期終息
- 炉心損傷起因過程での緩和
- 炉心崩壊過程での緩和
- ソースターム評価手法の合理化
- 新型燃料に関する安全研究

提案された23の試験研究テーマの実施によって得られる効果は、各分野ごとにまとめるところ以下の通りである。また、表3.4-1は第2章で提示・展開した安全性の目標との関連でSERAPH試験研究の位置づけを表示したものである。

燃料健全性

- 破損限界の燃料条件依存性を定量化し、高性能燃料の設計・実用化を達成できる。
- 統計性・実証性を有する破損データの取得によって、破損評価基準の過度の保守性を排除できる。

異常拡大防止

- 燃料損傷時の安定冷却性限界を解明することにより、冷却性の判断基準類の合理化と高性能燃料の実用化を達成できる。
- 損傷規模に応じた損傷拡大速度、及び異常の検知性を解明し、異常検知システムの最適化を通じて、安全性の一層の向上を達成できる。

炉心損傷への拡大防止

- 提案された多様なSASSの有効性、成立性を確認することによって、より実証レベルの高い方策を導入できる。
- フュージブルメタルの開発によって、UTOP事象にも対応できるSASSの開発を促進できる。

炉心損傷の早期終息

- 集合体部分損傷状態での早期終息シナリオを成立させる破損規模条件、除熱条件を明確化できる。
- 実証レベルの高い受動的炉心損傷防止方策の導入と部分損傷集合体での長期冷却性の確認によって、炉心損傷への拡大防止・早期終息を一層確実にすることができる。

炉心損傷起因過程での緩和

- 最大ボイド反応度5ドル（ノミナル値）程度までのMOX燃料大型炉心でのULOF起因過程におけるエネルギー発生は余裕をもって抑制されると結論できる。

炉心崩壊過程での緩和

- 新規に提案された方策も含めて、溶融燃料の早期流出経路の有効性を確認できる。
- 溶融燃料プールの沸騰安定性を確認することによって、溶融プールの拡大過程での再臨界の発生を否定できる。
- 以上から炉心崩壊過程における全炉心プールへの拡大に至る前の早期恒久的未臨界の達成、すなわち再臨界の排除が達成できる。

ソースターム評価手法の合理化

- FBRに固有なソースターム低減効果を、実験データに裏付けられた機構論的評価手法として確立でき、合理的な格納施設を成立させることができる。

新型燃料に関する安全研究

- 燃料ピンの健全性確保、異常拡大防止の観点から、従来型MOX燃料と同程度あるいはより高い安全性をもつような新型燃料の設計条件を明らかにして、その実用化を達成できる。
- ULOFなどの事象における新型燃料の炉心損傷回避の条件を、燃料の健全性と異常拡大防止の観点から明らかにし、受動的な安全特性を活かした設計の実用化と安

全評価基準類への反映を達成できる。

- 新型燃料炉心の炉心崩壊事象時における初期過程から事故後過程に至る各物理過程をMOX燃料炉心の場合と同様な知識レベルで解明し、確実な事故格納のための設計条件を明らかにできる。
- 一定常照射時の安定性、燃料破損限界、炉心損傷回避性能、炉心崩壊時の事象推移などの知見を集約することにより、安全性の高い高速炉システムの選定と実用化が達成できる。

以上から、燃料安全性については、高線出力、高燃焼度化の下での過渡時の燃料ピン健全性の確保、及び燃料ピン破損時の異常拡大防止の達成条件の明確化を達成し、設計の最適化及び合理的な安全評価基準の確立に反映することによって、2.2節で述べた目標を満たすことができるものと判断される。

また、炉心安全性については、炉心損傷への拡大防止方策の開発に対するSERAPH試験による寄与は限定されるが、出力静定が達成された後の微小破損燃料の破損伝播条件、長期冷却性確保条件の明確化等に貢献することによって、早期終息のシナリオを完結させ、もって炉心損傷の発生頻度Pの低減に寄与することができる。

また、集合体部分損傷状態での早期終息シナリオの追求は、炉心設計に影響される可能性の比較的高いものであるが、例え事故の起因過程では不十分であっても後続の炉心崩壊過程では再臨界排除・事故終息をより容易にするという大きな効果をもたらすと考えられるため、積極的に実施し、サクセスシナリオの達成条件の明確化を通じて、導入可能な方策を提案していくべきものと考える。

再臨界の排除は、従来の実機評価における想定からは大きく前進した課題設定である。しかし、これの解決無しには、プラント設計の合理化を前提とした上でのコンシケンスの低減や、最大コンシケンスの限定などは成し得ないものと考えられるために本検討の中でも重点を置いた。基本的には炉心外への燃料の流出促進が主体であり、そのための構造を炉心内に持ち込む提案と、既存の流出経路における流出可能性を増大させる方策とが考えられた。従来の知見から、これらの流出経路は早期の恒久的未臨界の達成には十分な流出能力があると考えられるため、炉内試験によってそれが実証されれば、炉心損傷事故における再臨界の可能性を排除するための有力な裏付けとなるものと考えられる。

再臨界排除のための炉心からの燃料流出経路が定められれば、以後の炉心デブリ冷却・保持方策の検討も焦点をより絞りやすくなるであろう。このテーマは炉外試験によって研究が進められてきている。

以上によって第2章表2.3-1に示した大目標の1つ、「炉心損傷の影響緩和：再臨界排除と炉内終息」が達成できるものと期待できる。

放射性物質の格納では、格納系の健全性確保とソースターム移行量の低減が大目標であった。前者については、主として炉外試験による研究が中心となり、既に水素の発生量低減や点火器の導入等の格納系への負荷緩和方策が提案、検討されている。もちろん、燃料からのソースターム放出移行挙動に関してはSERAPHによる上述の貢献が可能であ

り、合理的な移行量評価手法の確立と、移行量低減方策の提案に反映できるものと考えられる。

以上に述べた通り、SERAPH試験研究と他のR&D計画とにより取得される知見を統合することによって、第2章3節にて提示した、炉心の大型化とプラントの合理化を前提とする実用炉において達成すべき2つの安全性の目標、すなわち炉心損傷の発生頻度Pの一層の低減と、プラント設計の合理化を前提とした上でのコンシケンスCの一層の低減が達成できるものと考える。

図 3.4-1 実用炉における安全性確保の目標と手段；SERAPH計画の役割 (1/2)

分野	目標と手段	現状（実証炉）	中長期計画	実用炉段階
燃料安全研究 「従来型MOX」及び「新型燃料」	燃料ピン健全性確保	目標： 「新型燃料」を含む燃料高性能化（高燃焼度、高線出力、安全性）に対応した燃料ピン健全性確保 手段： 破損限界の燃料条件依存性を解明して、燃料設計や評価基準類に反映	「従来型MOX」 破損メカニズムの解明が進み、スミア密度などの燃料条件への依存性が大きいことが判明したが、燃料条件依存性を定量化して破損の評価基準に反映するにはさらにデータ取得が必要であり、現状では保守性の高い破損評価基準となっている。 「新型燃料」 定常照射挙動をも含めてデータが希少であり成立性が不明	SERAPH計画の役割 長尺で中性子束減衰の少ない実機模擬性の高い条件によりバンドル効果を含めた統計性・実証性を有する破損限界データ取得 破損限界の燃料条件依存性の定量化
		目標： 燃料高性能化においても異常拡大防止が適正になされることの確認 手段： 異常拡大及び異常検出の設計依存性を解明して、設計や評価基準類に反映	「従来型MOX」「事故」におけるピン破損時の冷却性確保の観点から、現状のデータのみでは、保守性の高い設定とせざるを得ず、高性能化のレベルは限定される。 「新型燃料」 異常拡大防止に関わるデータはほとんど無く成立性が不明	19本ピン束での過出力など、既存施設の能力を越える試験要求条件の充足 高性能化燃料での異常拡大防止性を実証するデータ取得 (特に新型燃料炉心では総合的な安全性を判断する上で重要)
				燃料設計に依存し過度の保守性を低減した合理的安全評価基準類の確立、及び安全性・経済性を高めた高性能化燃料の実用化

表 3.4-1 実用炉における安全性確保の目標と手段、及びSERAPH計画の役割 (2/2)

目標と手段	現状（実証炉）	中長期計画	実用炉段階
I. 炉心損傷起因事象の発生防止	燃料の健全性確保 高信頼性の炉停止機構	完全独立 2 系統の 炉停止系	工学的安全系の信頼度向上
II. 炉心損傷への拡大に対する受動的な防止	炉心損傷への拡大を防止 物理現象による負の反応度効果	SASS等の負の 反応度挿入機構	<p>SERAPH計 画の役割</p> <p>受動的防止機構 の開発、実証、 評価技術の開発</p> <p>より受動性レベルが高 く有効な負の反応度挿 入機構の導入 実証レベルの高い方策 長期冷却性の保証 →炉心損傷への拡大防止</p>
III. 炉心損傷の影響緩和 (炉容器内)	炉心損傷への進展を仮定しても影響は炉内終息 炉心損傷時にも再臨界(即発臨界)は生じさせない	事象推移評価技術の高度化、これに裏付けられた適切な設計上の配慮 遷移過程における機械的エネルギーの発生を想定 炉容器内終息	<p>早期終息シナリオ、燃料早期流出挙動に関する現象解明・評価技術の開発・高度化 炉心損傷緩和方策の開発、実証</p> <p>再臨界の排除と炉内終息を可能とする設計の実用化 評価の不確かさ低減 機械的エネルギー発生なし 影響緩和方策と整合したデブリ冷却保持構造 →炉容器内終息</p>
IV. 炉心損傷の影響緩和 (炉容器外)	敷地外への影響は上限でも許容できるレベル 適切な影響緩和対策	事象推移評価技術の高度化、これに裏付けられた適切なNa、水素燃焼対策など	<p>燃料からのソースターム放出・ 移行現象解明と評価技術の開 発、移行低減方策の開発、実証</p> <p>ソースタームの格納系内閉込めを可能とする 設計の実用化 ソースターム移行評価手法高度化 影響緩和技術の高度化 最大コンシケンスの限定 格納系破損確率は無視でき るレベル</p>

4. 炉内安全性試験施設に関する検討

4. 炉内安全性試験施設に関する検討

4.1 施設検討の経緯

SERAPH施設概念については、1988～89年に行われたPNC/SNL フィージビリティ研究において検討を開始し、幅広い研究の結果、重水冷却、PuO₂-BeO燃料、標準的燃料ピン構造の組み合わせを選択した。

1990～91年には、試験ニーズの分析に基づき、図4.1-1に示す施設性能の指標に対して目標値を設定し、各種の制限値に対する適合性を評価しながら炉心概念構築の可能性を模索した。施設性能の最も基本的な指標は、結合係数と呼ばれる試験体出力密度と駆動炉心出力密度との比であり、この向上のため試験体と駆動炉心の核分裂性物質の密度の差別化の努力が行われた。検討は主に炉心核熱特性を中心に行われ、燃料の富化度、BeOの希釈率、燃料・冷却材の体積比、寸法諸元の適正化が図られた。また、各要素技術についても試験ニーズから予想される設計上の問題点、開発項目の抽出がなされた。

1992年以降は、各要素技術についてSERAPH炉構想での成立性に係わる検討を進めている。図4.1-2にはこれらの要素技術とその主な検討項目を示している。この検討の中では、各要素技術の概略評価を踏まえ、燃料製造性、炉体構造、試験体構造、燃料移動計測等を考慮して、工学的に整合性のあるリファレンス炉心設定の努力が行われている。ここでは、前述した燃料組成による核分裂性物質密度の差別化のみならず、駆動スペクトルの変更、試験体での反応性向上等、炉心構成全体の改良が範囲となっており、各要素技術の整合性はますます重要になっている。

SERAPHの技術的成立性を確認するためには、従来技術の適用及び外挿による解析・評価に基づいて設計の成立性を見通す研究－概念設計研究－を行い、適切な裕度をもつて性能が確保されることを確認する必要がある。さらに、SERAPHの概念構想の中には従来技術の単なる外挿では解決できない多くの技術が含まれている。これらの分野については、燃料ペレット・燃料要素試作、臨界実験、熱流動実験、高速中性子検出器開発等を含めた基礎的な研究－基盤技術開発－を行い、設計裕度の中で成立し得ることを実証する必要がある。

現在は、概念設計研究で各要素技術の整合性をもった施設概念の最適化を進める一方、基盤技術開発の一部に着手したところである。

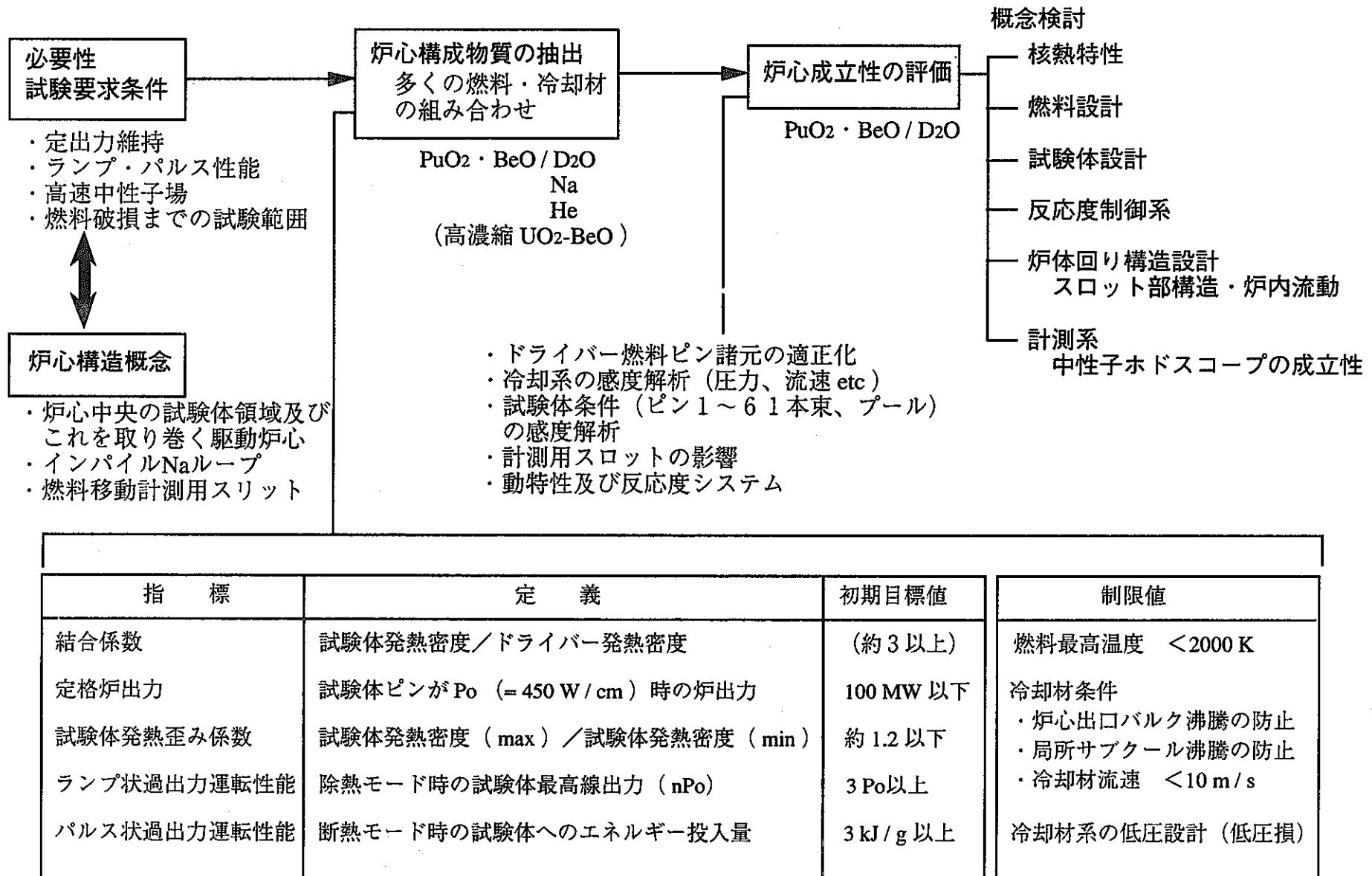
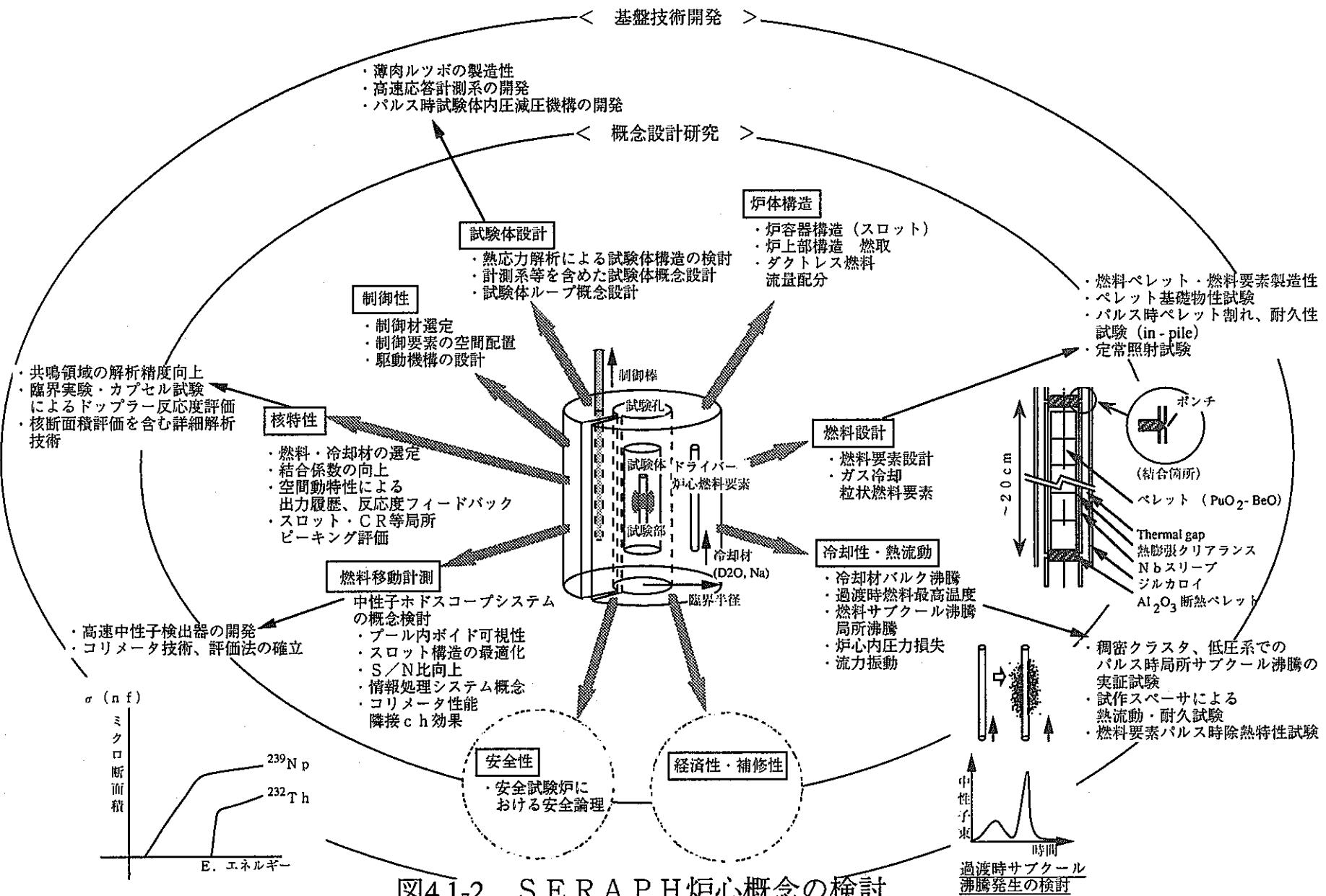


図4.1-1 SERAPH施設検討の流れ



4.2 施設要求条件及び主要仕様

第3章で検討した炉内安全性試験を実現する観点からSERAPH施設に要求される条件を考える場合、基盤安全研究テーマに対する炉内試験の要求条件を満足すれば実用化先導研究テーマに対しても試験の条件をほぼ満足すると考えることができる。そこで、本章では、まず基盤安全研究テーマに関する試験の実現を念頭においてSERAPH施設に要求される試験性能をまとめ、その後に現在検討中である施設概念の主要仕様とそれをリファレンス炉心として構築した各要素技術の検討項目を示す。

4.2.1 施設に要求される試験性能

基盤安全研究テーマに関する試験を実施する上で、SERAPHの駆動炉心に要求される性能の概要を、炉内試験の実施方法、すなわち定出力維持、ランプ、パルス（ダブルパルス）の各運転モード別に、表4.2-1にまとめた。

以下では、同表に記載されている各種モードの定義と要求条件および制限条件を述べるとともに、試験ニーズから導かれる一般的な要求条件をまとめる。

（1）一般的な条件

各運転モード共通の要求条件としては以下のものが挙げられる。

① 試験条件の設定能力

a. 大型試験体・加熱規模

燃料ピンバンドルとしては61本ピン束を最大と想定する。この場合8 cm程度のバンドル径となる。また、プール試験の場合はプール径が10 cmである。したがって、試験体の燃料収納部内径として約10 cmを必要とし、さらにその外側にナトリウムループ等を構成するための試験孔有効空間が必要である。

b. 硬スペクトルによるFBR模擬性

一般に、供給される中性子スペクトルが軟化すると試験体外周部での出力割合が大きくなつて径方向発熱歪みは増大するため、FBRの実機模擬性を悪化させることになる。このため、上記の大型試験体燃料の径方向発熱密度歪み（最大／最小比）として、1.5以下を目標とする。また、軸方向発熱分布については、約1 mの試験体発熱長に対し、実炉条件と等価するために、ピーピング係数（最大／平均）を1.2～1.3の範囲とする。

② 試験体燃料の実機模擬性

試験体燃料は実機模擬性を高くすることが要求される。一般的には、燃料の燃焼度增加およびクラスタ規模の増大は結合係数の低下につながり、試験条件設定能力

は低くなる。一方、試験目的は、破損限界・破損メカニズムの同定、破損伝播、破損後挙動（バンドル分散等）、プール沸騰挙動等多様であるが、これらは必ずしも高燃焼度かつ大型バンドルの条件を具備することを必要とはしない。また、場合によっては、試験燃料として核分裂性物質富化度を増加させた模擬燃料を用いた試験体系によっても目的とする挙動把握が十分に可能であると考えられる。

a. 試験燃料の必要燃焼度

試験燃料の必要燃焼度は試験の着眼点によって異なる。燃焼度の値が試験観測目的に直接影響すると考えられる試験では最高で20 a/oまで想定する。定出力モードにおける局所事故の破損伝播試験、高燃焼度燃料の破損限界測定試験などがこれに相当する。一方、プール沸騰挙動のように燃料組織依存性（FPの含有）が大きな問題にならないと予想される試験では未照射燃料の使用が可能である。

b. 試験燃料の濃縮

試験燃料中の劣化ウランを濃縮ウランに置換することで試験体の発熱密度を高めることができ試験性能の大幅な改善が可能となる。SERAPH施設の検討においては、原型炉外側炉心燃料と同等の核分裂性物質濃度の試験体を標準条件とし、これに対してウラン濃縮度を20%とした高濃縮条件についても検討する。

バンドル体系の試験においては、ある程度の大型バンドル模擬が必須である。これに対しては、破損限界の同定には実機単ピンを使用し、破損後挙動については高濃縮燃料を利用するという考え方が可能である。ただし、高濃縮条件を採る場合には、まず比較的小規模のバンドルを用いた試験により濃縮の差が破損後挙動に大きな影響を及ぼさないことを確認し、その後に高濃縮大型バンドル燃料を用いた試験によって目的を達成するという方法が必要である。

プール試験においては、その試験目的から考えて、未照射燃料の利用と高濃縮条件の採用には比較的高い自由度があると考えられる。ただし、高濃縮化が径方向発熱歪みを助長する点には留意する必要がある。

③ 燃料挙動の検出能力

a. 高性能試験計装

試験計装に関しては、測定対象に応じた温度、流量、圧力、音響等の測定に加えて、燃料の2次元移動挙動を弁別するための広視野、高空間分解能の燃料移動計測を行う必要がある。

(2) 定出力維持型運転モードに対する要求条件・制限条件

本運転モードの試験は、バンドルの部分閉塞、破損伝播等を対象とする多ピン束体系のものとプールの沸騰挙動を観測するものに分けられる。検討すべき要求条件としては、定常出力持続時間が重要である。表4.2-1に示される定常出力Poは、燃料ピン構成の場合には軸方向最高出力位置での線出力が450 W/cm、プール構成の場合には燃料平均発熱密度が1000W/ccをもって基準出力とし、以下のランプ過出力型およびバル

ス過出力型試験にも共通して定義される（ただし、これらは未照射燃料における値として定義したものであり、試験燃料の燃焼度に応じて値が変わる）。これらの条件下で、主に定常出力維持中の冷却性（後述する熱容量蓄積型冷却ループでの炉心出口沸騰防止）および照射による燃焼欠損、物性変化が評価の対象となる。

（3）ランプ過出力型運転モードに対する要求条件・制限条件

この運転モードによる試験は単ピンから19本程度のピン束試験体を対象とする。試験燃料の初期条件として安定なバランス状態を実現するために、過出力開始前にある程度の時間Po定常出力状態を維持する必要がある。ランプ過出力の要求条件は、過出力上昇速度で1~3%Po/s、最高到達出力2.5~3Po程度である。これらの条件下では、主に準定常加熱時の燃料最高温度と冷却材出口の沸騰の有無が評価の対象となる。

（4）パルス過出力型運転モードに対する要求条件・制限条件

本モードの試験は、19本ピン束への中速～高速パルスの印加（ダブルパルスを含む）、溶融プールへの高速パルスの印加などで構成される。ランプ過出力運転モードの場合と同様に、パルス投入前にある程度の時間Po出力維持が必要である。パルス印加に係わる要求条件は、試験燃料へのエネルギー投入速度と単位質量あたりの積分投入エネルギー量であり、表に示すように、その値は試験対象によって異なる。これらの条件下における主な評価対象は、断熱加熱時の燃料最高温度、非定常除熱時の冷却性、特にパルス直後の過大な熱流束による局所的なサブクール沸騰の有無である。

4.2.2 施設の主要仕様と各要素技術の検討内容

SERAPH施設の検討では、試験ニーズを実現するためのリファレンス炉心を設定し、各要素技術について成立性の評価検討を行っている。表4.2-2に、現在重点的に検討を進めているPuO₂-BeO燃料/D₂O冷却駆動炉心の概念に基づく施設の主要仕様をまとめた。この表には、前節で列挙した要求性能を満足するために各要素技術の検討で考慮すべき項目についても併せて示してある。

具体的な検討方法としては、まず、核特性でさらに性能向上するため、種々の方策により他の要素技術となるべく競合しないように設計裕度を確保する検討を行っている。ここで、試験ニーズの達成状況を確認しつつリファレンスとなる炉心構造・過渡時の境界条件を設定する。

一方、冷却性・熱流動・燃料設計等では、リファレンス条件を取り合い条件として熱的制限値、熱流動特性、燃料健全性等を確認している。特に、燃料設計に関しては、燃料ペレットの製造性、熱物性の確認のため、開発のリードタイムが長い分野であることにかんがみて、燃料ペレットの試作に着手している。以下に各要素技術の検討内容を概説する。

は低くなる。一方、試験目的は、破損限界・破損メカニズムの同定、破損伝播、破損後挙動（バンドル分散等）、プール沸騰挙動等多様であるが、これらは必ずしも高燃焼度かつ大型バンドルの条件を具備することを必要とはしない。また、場合によっては、試験燃料として核分裂性物質富化度を増加させた模擬燃料を用いた試験体系によっても目的とする挙動把握が十分に可能であると考えられる。

a. 試験燃料の必要燃焼度

試験燃料の必要燃焼度は試験の着眼点によって異なる。燃焼度の値が試験観測目的に直接影響すると考えられる試験では最高で20 a/oまで想定する。定出力モードにおける局所事故の破損伝播試験、高燃焼度燃料の破損限界測定試験などがこれに相当する。一方、プール沸騰挙動のように燃料組織依存性（FPの含有）が大きな問題にならないと予想される試験では未照射燃料の使用が可能である。

b. 試験燃料の濃縮

試験燃料中の劣化ウランを濃縮ウランに置換することで試験体の発熱密度を高めることができ試験性能の大幅な改善が可能となる。SERAPH施設の検討においては、原型炉外側炉心燃料と同等の核分裂性物質濃度の試験体を標準条件とし、これに対してウラン濃縮度を20%とした高濃縮条件についても検討する。

バンドル体系の試験においては、ある程度の大型バンドル模擬が必須である。これに対しては、破損限界の同定には実機単ピンを使用し、破損後挙動については高濃縮燃料を利用するという考え方が可能である。ただし、高濃縮条件を採る場合には、まず比較的小規模のバンドルを用いた試験により濃縮の差が破損後挙動に大きな影響を及ぼさないことを確認し、その後に高濃縮大型バンドル燃料を用いた試験によって目的を達成するという方法が必要である。

プール試験においては、その試験目的から考えて、未照射燃料の利用と高濃縮条件の採用には比較的高い自由度があると考えられる。ただし、高濃縮化が径方向発熱歪みを助長する点には留意する必要がある。

③ 燃料挙動の検出能力

a. 高性能試験計装

試験計装に関しては、測定対象に応じた温度、流量、圧力、音響等の測定に加えて、燃料の2次元移動挙動を弁別するための広視野、高空間分解能の燃料移動計測を行う必要がある。

(2) 定出力維持型運転モードに対する要求条件・制限条件

本運転モードの試験は、バンドルの部分閉塞、破損伝播等を対象とする多ピン束体系のものとプールの沸騰挙動を観測するものに分けられる。検討すべき要求条件としては、定常出力持続時間が重要である。表4.2-1に示される定常出力Poは、燃料ピン構成の場合には軸方向最高出力位置での線出力が450 W/cm、プール構成の場合には燃料平均発熱密度が1000W/ccをもって基準出力とし、以下のランプ過出力型およびパル

(1) 駆動炉心

現状の検討状況のもとで最も重要と思われる駆動炉心（燃料の組成と冷却材割合を適切に設定したもの）の核的な評価項目は、全ての試験運転モードにおける試験性能に直接的な影響を及ぼす「結合係数」である。この結合係数を向上させるためには、これまで実施してきた燃料構成の最適化に加え、炉心構成の適正化を図ることが必要である。そこで、具体的には後述するように、試験体薄肉化や駆動炉心スペクトル軟化等について検討を行い、それらが炉心核特性に及ぼす影響を明らかにし、結合係数の向上方策を他の要素技術への波及効果にも留意して評価した。

その結果得られた仕様の炉心について、FBR条件を模擬するために試験燃料に硬スペクトルの中性子を供給し、各運転モードでの試験性能を満足すること、およびそのための運転制御性を有することなどが概略明らかにされている。そして、このリファレンス炉心構成を前提として、燃料寸法への要求、冷却性評価のための境界条件、試験体構造への要求等が示される。

(2) 燃料

燃料設計においては、低寄生吸収燃料が要求されることから、製造・使用実績が若干あるPuO₂-BeO燃料が選定されている。この燃料に期待される熱的性能（高熱伝導、高熱容量、高融点）について、ペレットの製造性を確認しつつ検討を進めるものとする。具体的には、ペレット製法の文献調査、ペレットの試作、熱物性試験の段階を踏みながら、現在解析で暫定的に使用している物性値の確認を行う。

一方、燃料要素設計としては、伝熱抑制型燃料要素という従来の燃料設計にはない概念の追求が必要となる。リファレンス炉心としては、燃料・冷却材体積比の適正值が示され、細径（6.0 mm φ）ペレットで、0.3 mm程度のペレット-被覆管ギャップとされている。この仕様のもとで、ランプ試験時に燃料中心溶融と冷却材バルク沸騰を避け、かつ、パルス試験時の過大な熱流束による局所サブクール沸騰を避ける燃料要素概念を構築し、試作を経て、品質保証を含めた製造性を確認する。

(3) 冷却系

現設計は重水冷却としているため、最終ヒートシンクへの熱除去の観点からは熱容量蓄積型となるが、この前提およびリファレンス炉心仕様から決まる境界条件のもとで、試験時における定常・非定常の炉心冷却性を評価し、冷却系容量、冷却材流量の適正化を図る。また、パルス時の局所サブクール沸騰については、文献サーベイ等により限界熱流束を推定し、リファレンスの暫定熱流束の場合に対する評価を行うとともに、検証試験についても今後計画を進めるべく検討する。さらに、今後の検討項目となるが、熱流動については、炉心部冷却材流速が10 m/sと設定されており、炉心内圧力損失、ポンプキャビテーション、燃料要素の流力振動等について燃料要素スペシングの試作を含めた検討が必要であり、それらの検討結果は計測用スロットにより

複雑な形となる炉体構造に影響を及ぼすため、十分に留意しなければならない。

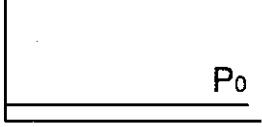
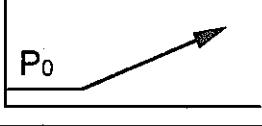
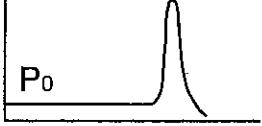
(4) 試験体／計測系

試験容器壁の構造は結合係数および燃料移動計測性の観点から薄肉化が期待されている。このため、最大10 cmの内径となるテストセクションの高温物質保持性能を確保するための構造について成立性を評価する第一段階として、断熱層として従来考慮していた ThO_2 , ZrO_2 層を約半分程度に薄肉化したものを想定し、これをリファレンスとしたケースで試験体ルツボの熱的・機械的成立性を検討した。試験体設計としては、熱応力解析を始めとし、パルス入熱時の過渡的な発生応力の緩和機構の解析等の他に、試作・実証が必須であり、これらを併せて検討していくものとする。

計測系については、SERAPHで特徴的なものとして、燃料移動計測技術が挙げられる。ここでは、種々の試験炉における実績の調査から、中性子ホドスコープによる計測が最も試験ニーズに合うものとして採用され、リファレンス炉心でも計測用のスロットを炉内に設定している。燃料移動計測については、各種試験体系でのS/N比および燃料内部可視性等をパラメータサーベイで評価しながら、性能向上の方策を検討する。また、システム構成にあたっては、炉心構造（バックスロットの設置、駆動炉心スペクトルの軟化等）に影響する部分も多いため、これらの感度について十分評価する。現時点は、パラメータサーベイによる概略的な検討の段階であり、どの程度までの性能が得られればシステム全体として燃料移動に関する十分な計測性が達成できるかを判断するには、経験の少ない分野だけにさらなる評価が必要となると考えられる。

以上に述べたように、各要素技術は、リファレンス炉心の構造・性能条件を暫定的な取合い条件にしつつ、これに対する適合性という観点から評価されている。一方、性能向上のための仕様変更に対する感度や他要素技術への波及についても把握し、次の段階で整合のとれたより高性能の基準炉心構造を構築できるようにするための検討も進めている。

表 4.2-1 駆動炉心に要求される性能

試験モード	試験体形状	注目事象	要求条件	備考
1 定出力維持型 	61本ピン	・バンドル部分閉塞 ・破損伝播	定常運転 5分以上	・模擬性の高い実証試験 ・広範な燃焼効果をサーベイ
	10 cm ϕ プール	・沸騰プール挙動	定常運転 1分以上 (プール生成後)	・新燃料／濃縮燃料の使用可
2 緩ランプ過出力型 	単ピン	・ランプ破損限界	ランプレート 1~3% P_0/s 最高出力 2.5~3 P_0	・EOL線出力を初期値 (P_0)とした模擬性の高い実証試験
	19本ピン	・バンドル破損限界 および異常拡大	ランプレート 1~3% P_0/s 最高出力 2~2.5 P_0	・燃焼度~10a/o (濃縮燃料の使用可)*
3 パルス過出力型 (定常十中・高速パルス) 	19本ピン	・バンドル燃料分散	$P_0 + 1 \sim 1.5 \text{ kJ/g}$ (1~15 kJ/g/s)	・燃焼度~10a/o (濃縮燃料の使用可)*
	7~8 cm ϕ プール	・プール過渡分散	$P_0 + 0.7 \sim 1.3 \text{ kJ/g}$ (5~20 kJ/g/s)	・新燃料／濃縮燃料の使用可
4 パルス過出力型 (ダブルパルス) 	19本ピン	・崩壊バンドル 2次 分散	$P_0 + 1.5 \text{ kJ/g} + 1.0 \text{ kJ/g}$	・燃焼度~5 a/o (濃縮燃料の使用可)

* 小規模バンドルを用いて濃縮の差により破損限界、破損後挙動に大きな差がないことを確認する。

表 4.2-2 SERAPH主要仕様

	主要仕様	目標性能・制限値
炉心	<p>炉心形状 27 cm Φ (ID), 180 cm Φ (OD) \times 100 cm (H) (炉心内側重水層厚 0~4 cm)</p> <p>重水冷却稠密炉心</p> <p>冷却材割合 ~30% vol.</p> <p>インパイルテストループ</p> <p>燃料移動計測用スロット</p>	<p>パルス・ランプ性能 (~2 kJ / g, ~3 Po)</p> <p>結合係数の向上 (CF, ~3)</p> <p>定常時 (Po) 長時間運転 (>5 min)</p> <p>定常時 (Po) 炉心全出力 (~200 MWth)</p> <p>試験体部硬スペクトル (SF < 1.5)</p> <p>制御性</p>
燃料	<p>希釀型燃料ペレット (BeO : PuO₂ = 95 : 5)</p> <p>伝熱抑制型燃料要素 (pellet : 6.0 mm Φ, pellet-clad gap : ~0.2 mm)</p>	<p>燃料最高温度 (融点-余裕)</p> <p>ペレット割れ性、熱特性等、燃料健全性</p> <p>反応度経年劣化</p>
冷却系	<p>重水冷却 热容量蓄積型 (~300 m³)</p> <p>冷却材流量 ~10 m / s</p> <p>炉内圧損 ~ 8 kg / cm²</p>	<p>冷却材炉心出口でのバルク沸騰防止 (<400K)</p> <p>局所サブクール沸騰防止 (<2~3 MW/m²)</p>
試験体／計測系	<p>試験試料 単ピン (7 mm Φ) ~ プール (10 cm Φ) (燃焼度 0~20 at%, 初期濃縮)</p> <p>多層ルツボ構造テストセクション (20 cm Φ) (ThO₂/W, ZrO₂/Nb)</p> <p>高速中性子ホドスコープシステム</p>	<p>試験体構造成立性</p> <p>S/N比向上</p> <p>試験体内部可視性 (プール内ボイド弁別等)</p>

4.3 各要素技術の検討状況

4.3.1 核特性

4.3.1.1 概要

SERAPHの駆動炉心の仕様は、1992年までの検討により継り込まれてきたものであるが、ここでは、この基準駆動炉心をベースとし、関連する炉体構造の具体的な概念を考慮に入れた駆動炉心の特性およびそのさらなる向上方策、特に試験性能に直接的な影響を及ぼす結合係数の向上方策を検討した結果について示す。

具体的な検討内容を論ずる前に、まず、結合係数の向上方策を検討するに至った経緯を示す。前述の通り、今回検討の対象とした駆動炉心は、より工学的に現実性のある炉心構造を考慮に入れているため、これまでの検討のものと比べて以下の点で異なっている。

- ・駆動炉心燃料ピンの製造性と過渡時熱応力特性を検討した結果、ペレットと被覆管のギャップを拡大した。
- ・駆動炉心集合体の概念検討結果に伴い、炉内の構造材物量が増加した。
- ・適切な強度を有し、かつ、試験時の燃料移動計測の効率を向上させる観点から、駆動炉心周囲の炉容器材料をTiとした。

上記3点の設定根拠等、詳細は後の節に述べるが、いずれも駆動炉心内の燃料割合が減少するか核特性を低下させる原因となっている。上記の3点を考慮することによって、例えば19本ピン束試験燃料の場合、結合係数は25%程度低下した。

以上の経緯を踏まえて、本章ではSERAPH炉における結合係数を向上させる方策の検討結果について報告する。ここで得られた結果に基づき、試験体壁の薄肉化等を反映した新たなリファレンス炉心を設定し、冷却系・燃料・試験体および機器構造等の設計に対する取合い条件とする。向上方策としては、駆動炉心と試験容器の構成を主眼に方策を検討した結果、図4.3.1-1にも示す通り、以下の5つの方策を検討の中心とした。

(1) 重水層の活用

駆動炉心の最内領域と炉容器壁との間に形成される冷却材（重水）層を積極的に利用することにより、試験燃料に供給される中性子スペクトルを軟化させ、試験体の核分裂効率を向上させる。この方策は燃料移動計測の検出性を向上させる観点からも有効である。

(2) 試験孔径の削減

試験容器を挿入する空間を狭くすることにより、試験燃料と駆動炉心の距離を短くして、試験体への中性子供給効率を向上させる。

(3) 試験容器の薄肉化

中性子吸収の大きな材質の物量を合理的に削減し、試験体への中性子供給効率

を向上させる。

(4) 駆動炉心高さの増加

駆動炉心の軸長増加により炉心径を削減し、試験体への中性子供給効率を向上させる。

(5) 駆動炉心の発熱分布の平坦化

駆動炉心燃料の希釈率を部分的に変更（多領域構成）することにより、ピーキングを抑制し、試験燃料への中性子供給効率を相対的に向上させる。

本報告では、上記の5方策のうち、重点的に検討した(1)～(3)の3方策を中心に述べる。

4.3.1.2 評価手法

本検討で用いた評価手法はこれまでの検討における手法と同じものである。特にここでは駆動炉心と試験燃料の結合度に着目した評価をするため、核静特性解析のみによって検討を進めた。

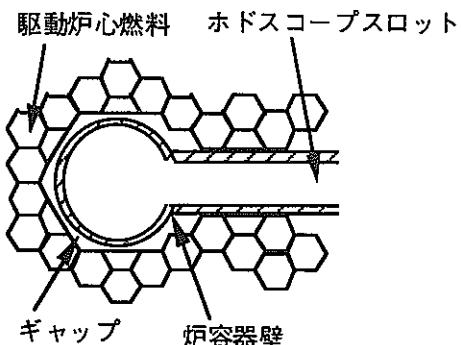
図 4.3.1-2 に示すように、静特性解析ではSCALE-4システム⁽⁴⁷⁾および2次元輸送計算コードTWOTRAN-II⁽⁴⁸⁾を用いた。実効断面積は、ENDF-B/IVをベースとする218群断面積セットCSRL⁽⁴⁹⁾を用い、SCALE-4システム中のモジュールCSASI, CSASIXにて作成した。これを同システム中の1次元輸送計算モジュールXSDRNPMにて22群に縮約し、TWOTRAN-IIコードに入力した。TWOTRAN-IIコードによる解析からは、臨界半径、実効増倍率、中性子束分布、出力分布、全出力、ドップラー反応度係数等とともに、ここで重点的に着目する結合係数と試験体発熱歪み係数が計算される。

4.3.1.3 各種方策の検討結果

(1) 重水層の活用

SERAPH駆動炉心は、次頁の図に示すように六角形ダクトレス集合体で構成されるため、駆動炉心の最内領域と内側炉容器壁との間にギャップが存在する。SERAPH炉は中速～高速中性子炉である反面、熱中性子に対する感度も大きく、このようなギャップに冷却材（重水）が満たされるとその近傍に局所的なピーキングが生じる。このため、駆動炉心のスペクトルおよび試験燃料へ供給される中性子を所定の硬さに維持するためには、このギャップへの重水の侵入を妨げるような配慮が必要であるが、逆に、この部分に積極的に重水層を設けることにより試験燃料への供給中性子をわずかに軟化して試験体の核分裂効率を向上させることを検討する。

重水層の厚みを変化させた場合の径方向中性子束分布、中性子スペクトル、核分裂率分布の例を図 4.3.1-3 及び図 4.3.1-4 に示す。ここに示した結果は、駆動炉心のサイ



ズを一定にして計算したものであり、重水層厚みの増加は試験容器構造中のHeガス部分を減らすことで模擬している。図4.3.1-4の径方向核分裂率分布からわかるように、重水層を厚くするにつれて駆動炉心と試験燃料の相対的な核分裂率比が増加している。重水層厚みが増すと試験燃料へ供給される中性子は熱群のものが相対的に増加していることもわかり、試験燃料の径方向発熱歪み係数が増加（悪化）していることが予想される。また、重水層近傍の駆動炉心部において、スペクトルの軟化に伴う局所ピークが出現している。

試験性能に直接影響を与える結合係数とFBRの高速スペクトル模擬性の指標となる試験体径方向発熱歪み係数を評価する観点から、重水層の厚みとこの2つの指標の相関を図4.3.1-5に示した。試験体がプール試験体の場合には改善度が比較的小さいものの、19本ピン束の場合には結合係数が大幅に改善されている。前者の場合には高温プールを保持するためのルツボにW, ThO₂などの中性子吸収の大きな材料を使用しているため軟化された中性子の多くがそれらにより吸収されたものと推測する。試験体の発熱歪み係数は予想通り悪化しているが、4cm厚の重水層でも1.5程度の値であり、試験要求条件を満足する。

最後に、重水層近傍部におけるピーキングの抑制方策として、駆動炉心内側部分を多領域化した場合の結果を図4.3.1-6に示す。駆動炉心燃料は平成3年度までの検討結果から5%のPuO₂体積割合 (PuO₂:BeO=5:95) を基準としているが、この図は内側の数cmの領域についてPuO₂割合を減少させたものである。この方法により重水層設置に伴う局所ピークが駆動炉心全体のピーキングと同程度の大きさに抑えることができている。この場合の結合係数、試験体発熱歪み係数はそれぞれ2.45, 1.66であり、前述の結果とほぼ同等である。

(2) 試験孔径削減

試験孔径を削減した場合の解析を実施した。結果を図4.3.1-7に示す。試験容器の構造材物量は変化させず、駆動炉心と試験燃料の距離だけを変化させる観点から、試験体多層構造の中に含まれるHeガス部分を削減することで孔径削減を模擬した。19本ピン束試験体で10%、プール試験体で数%の結合係数改善が見られる。試験体発熱歪み係数については有意な差が見られず、中性子スペクトルには影響を与えないことが確認できる。

(3) プール試験体の薄肉化

プール試験体についてはW, ThO₂, ZrO₂等中性子吸収の大きな材料が使用されており、これらの物量を減することは(2)の試験孔径削減にもつながり、試験性能に少なからぬ影響を及ぼすものと考えられる。

図 4.3.1-8 に、ThO₂とZrO₂の厚みを2 cmずつ薄くした場合の計算結果を示す。プール試験燃料の規模は変更せずに試験容器だけを薄肉化することにより、試験体発熱歪み係数を一定に保ったまま結合係数が大幅に（20%以上）改善されていることがわかる。また、この結合係数向上効果は重水層の有無に依存しない。

4.3.1.4 核特性向上方策の検討結果まとめ

以上に述べてきたように、SERAPH炉体構造のより現実的な概念をベースに駆動炉心の核静特性を評価した結果として、炉心および試験容器関連の構造に工夫を施すことにより、試験燃料へ供給される中性子のFBR模擬性をある程度維持した状態で結合係数を改善させる諸方策の有効性が示された。本報告の中で検討した3種類の方策についてその有効性を相対的に示すと下表のようになる。

結合係数向上方策	試験体種類	有効性
駆動炉心内側への重水層の設置 (スペクトルシフト)	ピン束	大
	プール	中
試験孔径の削減	ピン束	中
	プール	小
試験容器の薄肉化	プール	大

上表に示した各向上方策を全て採用することにより、結合係数は、現実的な炉体構造を考慮していなかった場合の評価値と同等の値が得られた。

一方、現実の炉心では燃料移動計測用スロットや制御棒チャンネルが存在するため、炉心形状はかなり複雑となる。これは臨界性の低下を招き、また出力分布が変わることを通じて結合係数に影響を与えることも予想される。今後は、このような複雑な3次元形状を考慮した上で精度良い核特性評価について検討を行う。また、SERAPH炉の中性子エネルギースペクトルは、一般に実効断面積の誤差を生じやすい²³⁹Puや²⁴⁰Pu等の共鳴エネルギー領域にかなりの部分が重なっているため、断面積誤差に起因する核特性評価精度への影響は十分考慮する必要がある。今後、連続エネルギー手法を用いて、断面積の誤差評価及びそれによる核特性評価への影響について検討を行う。あわせて、4.3.1.1に述べた他の結合係数向上方策についても検討を進めていく予定である。

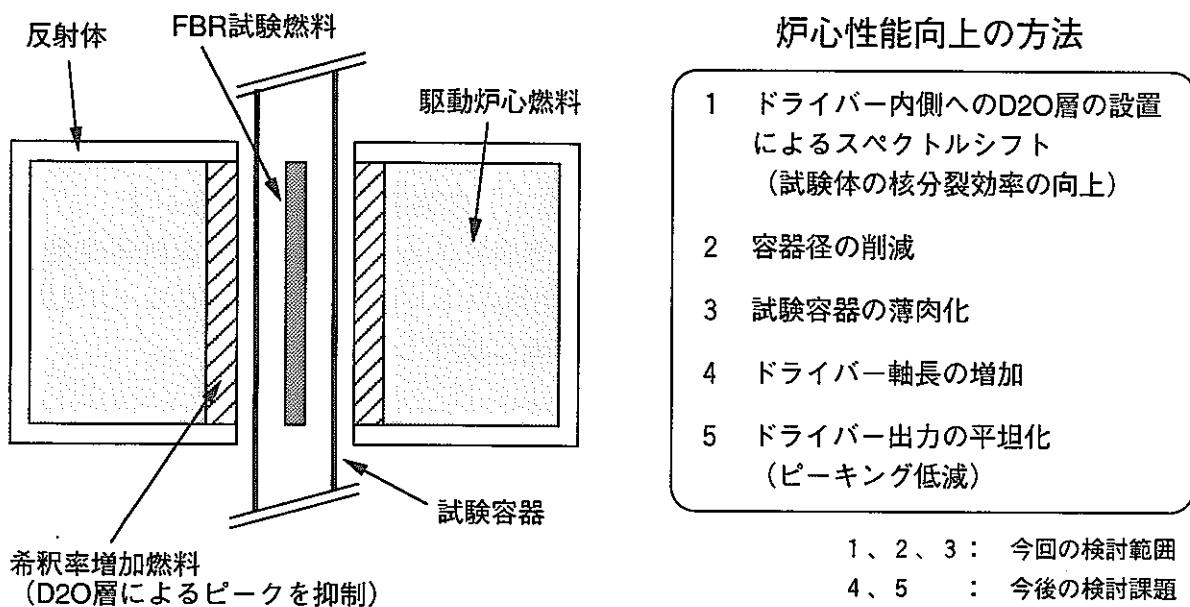


図 4.3.1-1 試験性能の向上方策

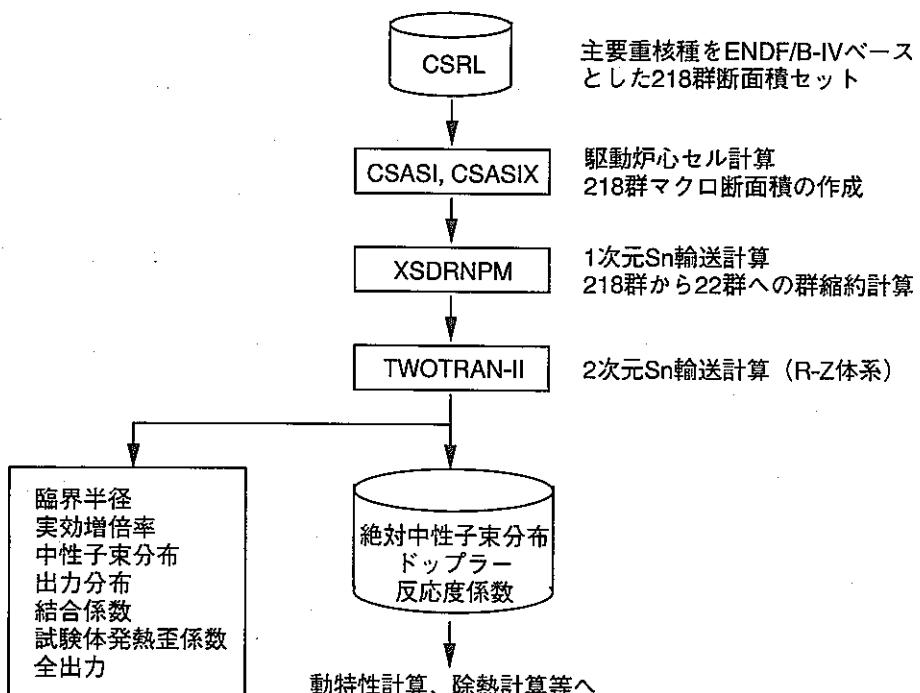
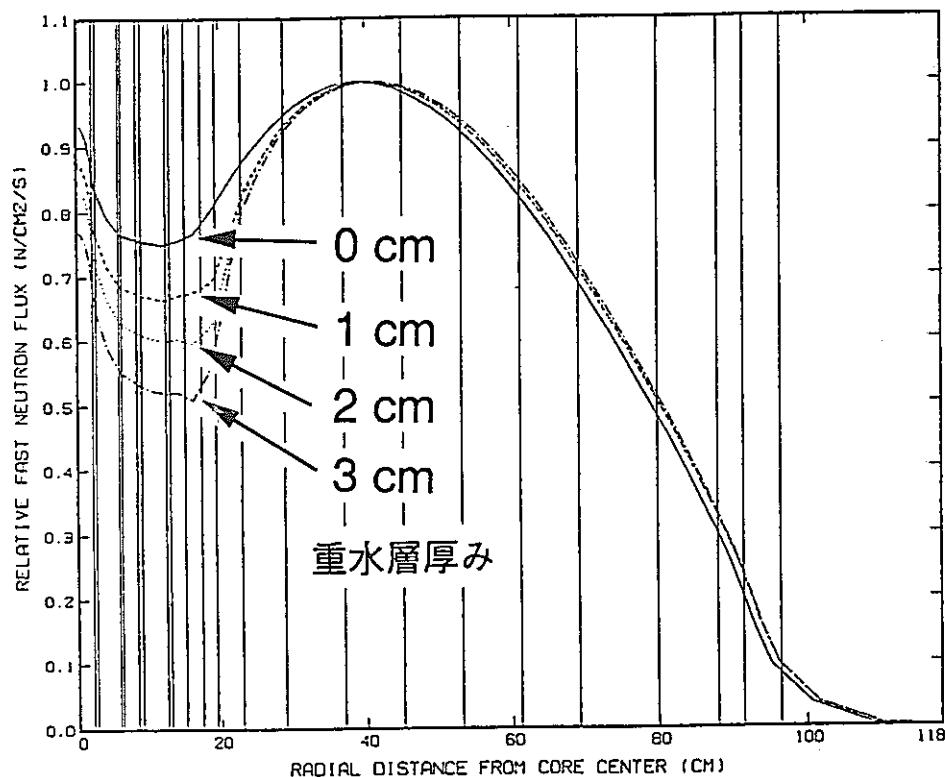
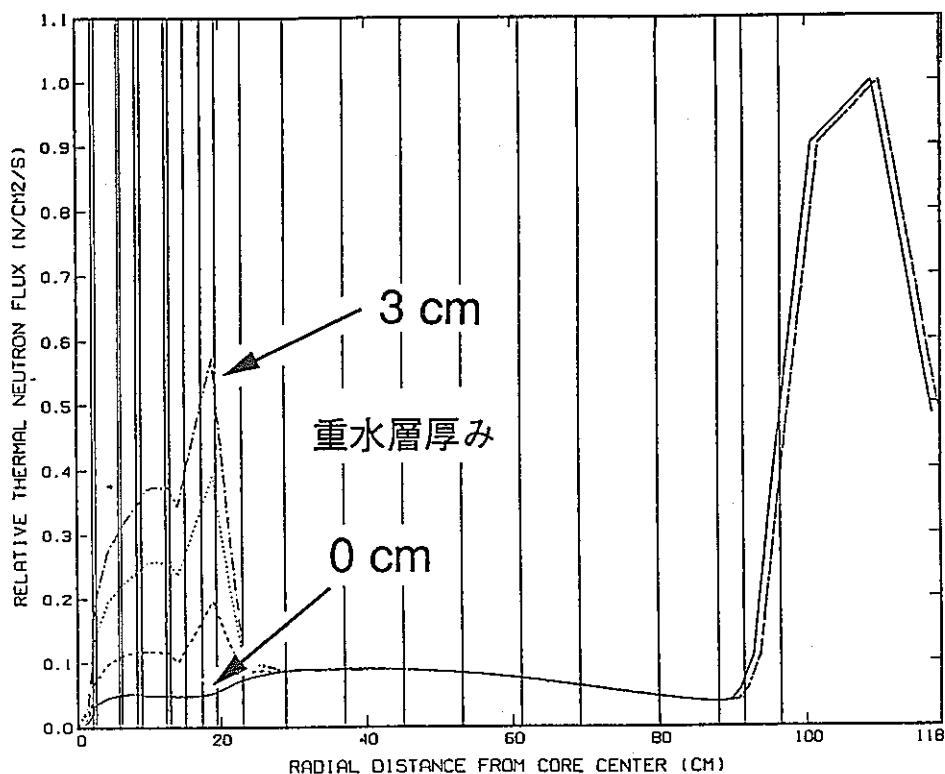


図 4.3.1-2 炉心の核静特性に関する解析手法

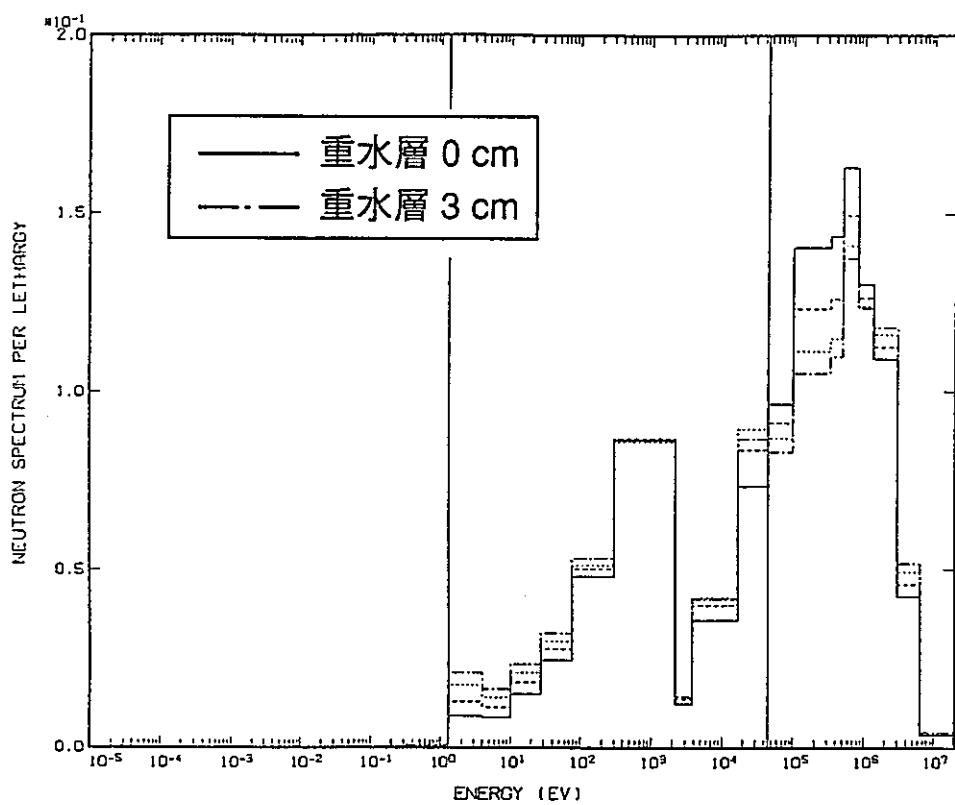


径方向中性子束分布（高速群）

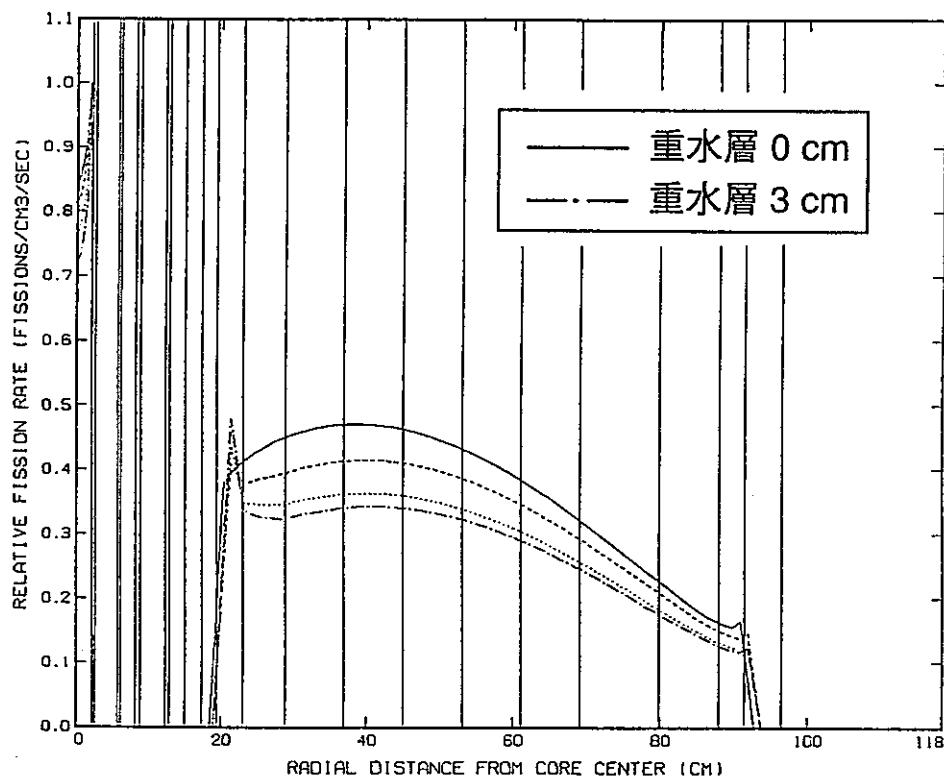


径方向中性子束分布（熱群）

図 4.3.1-3 重水層設置の効果（1）
- 中性子束分布の変化 -



試験燃料中心の中性子スペクトル



径方向核分裂密度分布

図 4.3.1-4 重水層設置の効果 (2)
- 中性子スペクトルおよび核分裂率 -

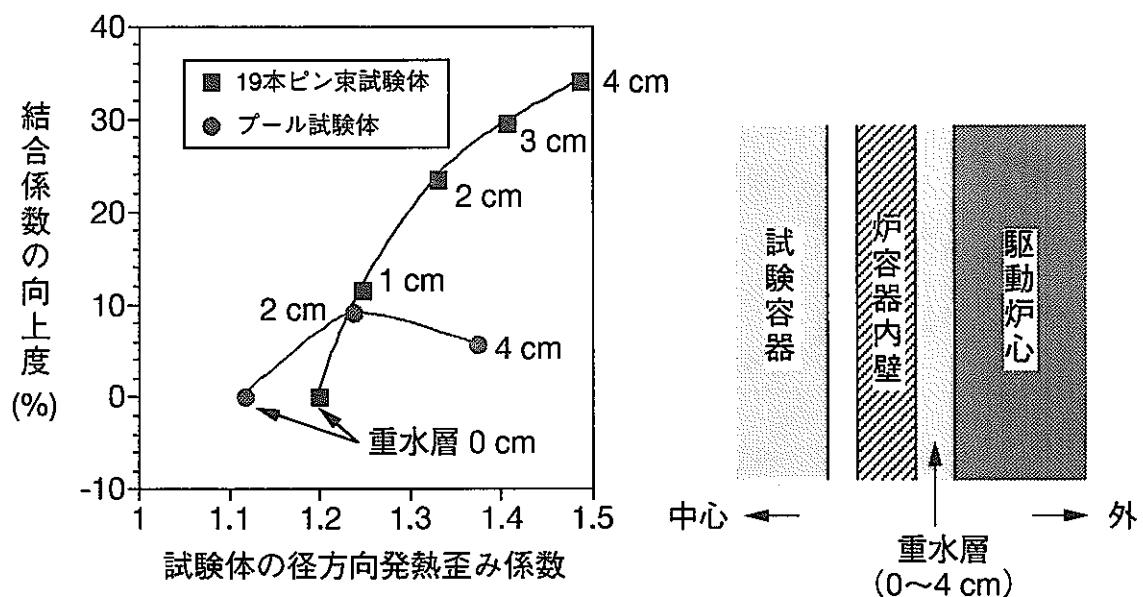


図 4.3.1-5 重水層設置の効果（3）

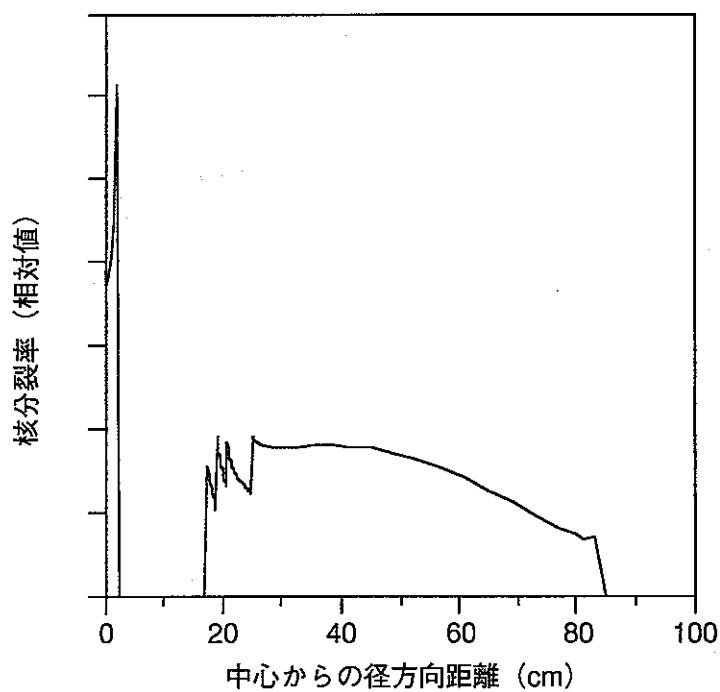
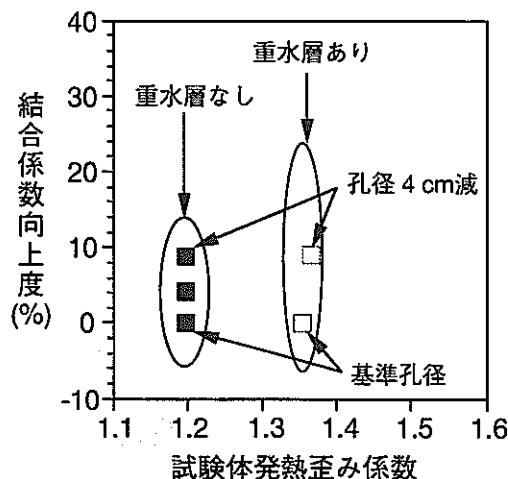
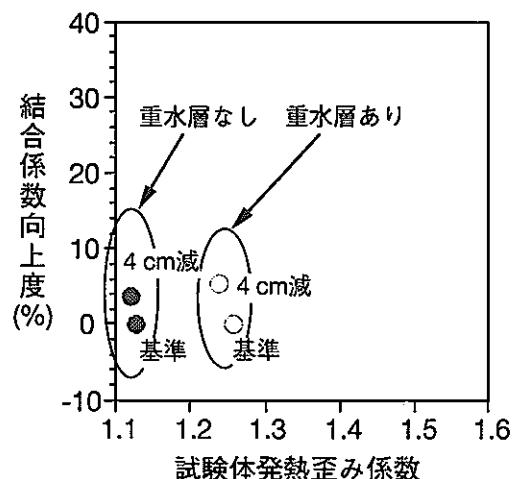


図 4.3.1-6 重水層による局所ピーキングを抑制した場合の核分裂率分布



19本ピン束試験体



プール試験体

図 4.3.1-7 試験孔径削減の効果

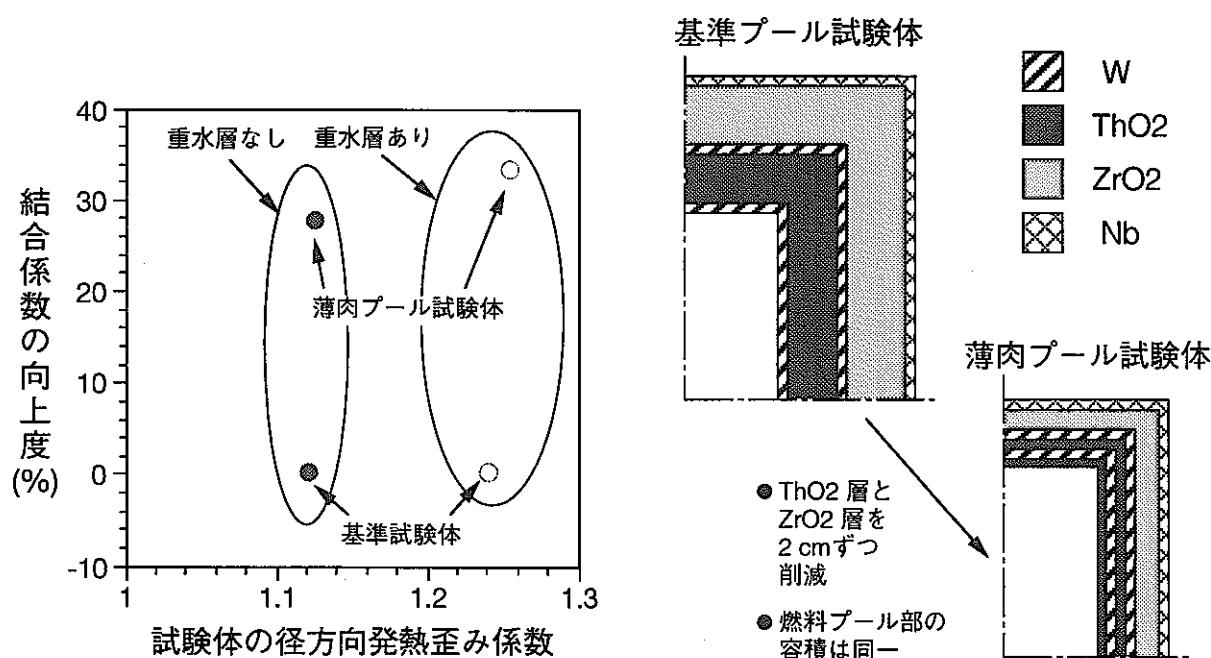


図 4.3.1-8 プール試験体薄肉化の効果

4.3.2 热輸送・热流動

ここでは、駆動炉心に要求される熱的性能に対して現在設定している炉体、熱輸送系の概念を示すとともに、重要な熱的課題として以下の2点を取り上げ、検討の現状を述べる。

- a. 定常試験時及びランプ状過出力試験時の沸騰防止
- b. パルス状過出力試験時のサブクール沸騰・DNB防止

4.3.2.1 要求される熱流動性能

駆動炉心の熱的健全性を議論する上で最も厳しいと考えられる試験条件を各試験モードについて表4.3.2-1に示す。駆動炉心の出力及び積分出力が最も大きくなるケースとして定常出力試験では照射済み61ピン束試験体を用いる試験を、ランプ状過出力型試験では照射済み19ピン束試験体を対象としたケースを選んだ。パルス状過出力試験では、試験要求条件に対する核特性・燃料設計評価の結果からピン表面最大熱流束として $3\text{MW}/\text{m}^2$ を設定することとした。

このときの駆動炉心の熱流動条件としては、以下を前提とする。

- a. 集合体内冷却材流速 : 10m/sec
- b. 主容器カバーガス圧 : $3\sim 5\text{気圧}$ (沸点 : $134\sim 152^\circ\text{C}$)
- c. 冷却材初期温度 : 10°C (予め冷却器で低温にしておく)

流速については液体の単相流として、圧力損失、キャビテーション、燃料要素の流力振動等を考慮すると限界に近い値と考えられる。カバーガス圧については、軽水炉なみの高圧体系とはならない範囲とし、ホドスコープ、試験体貫通孔等を設ける炉体構造の設計に柔軟性を持たせ得る5気圧程度を設定した。ただし、今回の検討範囲には入っていないが、ポンプのキャビテーションをさけるためにカバーガス圧を高くする必要が生じる可能性はあり、今後の検討において注意すべき点である。

上記の試験条件において駆動炉心の熱的健全性、試験の安定性を確保するための制限条件としては、以下の2点をとるものとした。

- a. 冷却材のバルク温度は 127°C (400K) 以下 (沸点より十分低い温度)

- b. 最高熱流束はDNBが生じない範囲とする。 ($\text{DNBR}>1.3$ 、パルス状過出力試験時)

冷却材の密度反応度係数としては負の炉心であるが、過渡試験時の冷却材の相変化による駆動炉心出力への外乱を抑える意味で沸騰が生じない範囲で使用するものとする。このためバルクでの最高温度をカバーガス圧での沸点を十分下回る値とする。パルス状過渡試験時には、ピーク時の熱流束は非常に大きい値となるためバルク温度が沸点を下回っていても局所的にサブクール沸騰を起こす懸念がある。そこで、ここでは、駆動炉心の熱的健全性を保つ観点も含めることとして、試験時のピーク熱流束がDNBに至る熱流束に比べ十分低い値であることを制限条件として加えた。十分な低さの目安としてPWRでのDNBR条件を参考に $\text{DNBR}>1.3$ をとるものとする。

4.3.2.2 炉体及び熱輸送系の概念

(1) 炉体の概念

① 駆動炉心

駆動炉心集合体の構造は図4.3.2-1に示すグリッドスペーサー型ダクトレス集合体とした。ダクトレスとしたもっとも大きな理由は駆動炉心の核的性能を向上させるために構造材をできるだけ少なくすることにある。スペーサの形状としてはバネ押さえ付きハニカム構造を考えている。ダクトレスとしたことに伴い、集合体間ギャップへの漏れ流れを抑えるために集合体をネステッド配列により配置するものとした。漏れ流量の定量的評価には実験的研究を実施する必要があるが、構造上隙間自体を小さくしているのでネステッド配列が漏れ流量を抑える効果は大きいと考えられる。

② 炉体構造

炉体構造を検討するにあたり、まず材料を選定した。

- a. 核特性の向上の観点から中性子吸収が少ない
- b. 試験体中の被覆管の移動に対する計測の精度向上の観点からノイズとなる鉄原子をなるべく含まない
- c. 構造上必要な強度をもつ
- d. 重水との親和性（耐腐食性）が高い

という4点を考慮し、最終的に純チタンまたは高強度チタン合金を炉心中心部の強度部材の材料とした。具体的には試験体挿入孔壁、ホドスコープスロットをチタン材料とする。ホドスコープスロットと炉体容器（圧力境界）の接続部において溶接構造をとる上で異材溶接を避けるため、炉体容器についてもチタン材料とする。配管についてはSUSを用いるものとし、配管部と炉体容器との接続部には既存の爆着技術（タンゲステンを挟む）を大口径配管に使えるようにR&Dを行うものとする。炉体構造を図4.3.2-2に示す。チタン材料を使用する部分をなるべく少なくする、製作上の精度を向上させるの2点を考慮し、炉体の下部を分割しSUS製とした。上部のチタン材料を用いた主容器と炉体下部との接続はリップ溶接を行うフランジ構造とした。炉体容器は既存の試験炉を参考に、事故時の冷却材喪失を防止する点から軽水プールに漬けるものとした。フランジ構造部の点検において、隙間が小さいガードベッセル方式よりも、プール方式は水を抜けば広い作業空間をとれることから点検性に優れている。

(2) 冷却系の概念

冷却系は出力運転時の駆動炉心出力に見合う定常的な冷却能力を持たせるのではなく、特にランプ状過出力試験時の積分出力に対して冷却材の温度上昇幅をある程度以下に抑えるような熱容量を持たせるものとした。このような熱容量型とした最も大きな理由は、1次系の最高温度が沸点で制限される120°C前後となり最終ヒートシンク（大気または河川水、海水：20°C程度）との温度差が小さく、1次系の重水を閉じ込める非開放型の熱交換器では規模が極端に大きくなる点にある。

表4.3.2-1に示したように最大積分出力の目安として100GJを考える。これを80°Cの温度上昇幅で抑えるとすると約300m³の重水容量が必要となる。下図に冷却系の概念を示す。

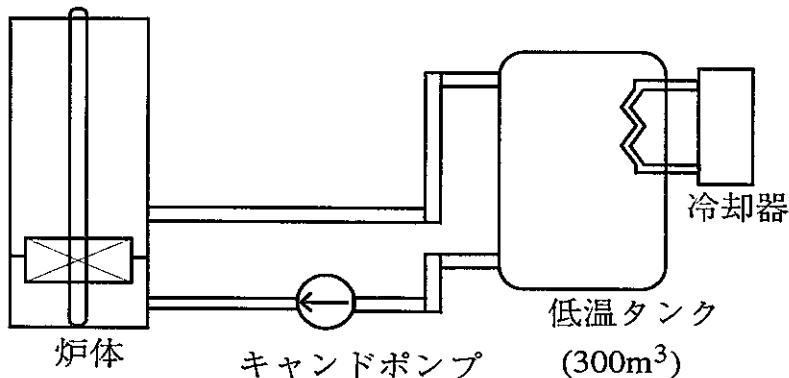


図 SERAPH冷却系の概念

駆動炉心を含む炉体容器に1ないし2ループの1次冷却系を接続する。冷却系には合計300m³の容量を持たせた低温タンクと重水を漏らさないキャンドポンプを設ける。低温タンクには予め重水を冷却するための冷却器を備え付ける。

崩壊熱除去の観点では、駆動炉心がほとんど燃焼しない使用形態をとるため、崩壊熱量が非常に少ないと考えられる。自然循環に配慮した高低差を低温タンクと駆動炉心に設けておけば、動力源がなくとも放熱により十分冷却できると考えられる。定量的評価については今後行うものとする。

4.3.2.3 热的課題の検討の現状

(1) 定常試験時及びランプ状過出力試験時の冷却材沸騰の防止

冷却系に設定したタンク容量が十分あれば、駆動炉心の冷却材最高温度を制限条件(バルク温度で127°C)以下に維持できる。ここでは1次元ネットワークコードを用いて定常試験時及びランプ状過出力試験時の熱的動特性を確認する。

駆動炉心での冷却材最高温度を議論する上でホットテストチャンネルの設定が必要となる。核特性の評価において駆動炉心の最大出力はカップリングファクター(駆動炉心最大出力密度/試験体部軸方向最大出力断面での径方向平均出力密度)により表現されている。この駆動炉心最大出力密度は集合体平均の断面積を用いて評価されている。ここでは集合体間の重水の遍在等による集合体内の局所的な出力歪みを想定し、核特性で得られた最大出力密度の1.2倍の出力密度を与えたチャンネルをホットテストチャンネルとして設定した。冷却材流速については流量配分により最低限10m/secを確保するものとした。

ネットワークコードでは、ホットテストチャンネル、駆動炉心全体の出力を表すチャンネルの2チャンネルで炉心部を表現し、軸方向に発熱長1mを10分割、燃料ピンの径方向構造についてはペレットを3分割、ギャップ部1分割、被覆管3分割として考慮した。低温タンクの形状は内径4mの円筒形とし、輸送遅れを考慮するため軸方向に10分割し

た（各分割領域内では完全混合を仮定した）。このモデルによりホッテストチャンネルの最高到達温度を集合体内サブチャンネル流路の水平断面内混合平均温度ベースで、すなわちバルク温度で評価できる。

計算は以下の2ケースについて実施した（表4.3.2-1参照）。

a. 定常試験

照射済み61ピン束試験体について試験体部最大線出力密度が400W/cmとなる駆動炉心出力（基準出力, P_0 ）で350秒間維持するケース、

b. ランプ状過出力試験

照射済み19ピン束試験体に対し試験体部最大線出力密度が400W/cmとなる駆動炉心出力を基準 (P_0) として、250秒間で2.5倍まで出力上昇させるケース

図4.3.2-3、図4.3.2-4にそれぞれのケースについて出力の時間変化、ホッテストチャンネルの出入口温度変化を示す。図より、出口の最高温度は両ケースともに120°Cを下回ることがわかる。また、定常試験およびランプ状過出力試験時の冷却材バルク温度は設定した試験条件の下で制限温度（127°C）以下となり、十分沸騰を防止できると予測できる。

(2) パルス状過出力試験時のDNB防止

パルス状過出力試験時のピン表面熱流束は試験条件に対する核特性・燃料設計の評価において最大で3MW/m²に達すると予測されている。この値は典型的なPWRのDNB熱流束を越えている。SERAPHの駆動炉心では冷却材流速を大きくし、入口温度を低温とすることで、流路中の温度上昇を抑え、沸騰及びDNBを防止する設計としている。入口温度10°Cの条件で3MW/m²（ピーク位置）の熱流束が定常的に与えられた場合にも、出口温度は高々90°C程度に抑えられており、沸騰制限温度（127°C）を30°C以上下回っている。しかし、高速炉の炉心燃料集合体以上に燃料ピン間隔が非常に狭い流路形状をしていることから、局所的なサブクール沸騰が懸念される。また、5気圧以下の低圧力条件で、流速10m/sec程度の高質量流速条件でのDNBについての検討例があまりないことから、定量的評価には予測手法の開発及び実機模擬性の高い条件での実証試験が必要と考えられる。

ここでは、まず、流路形状の効果について検討する。日本原子力研究所において高転換軽水炉を対象とした限界熱流束試験が実施され、ピン配列ピッチをパラメータとした実験研究が行われた⁽⁵⁰⁾。図4.3.2-5に示すように三角配列の7ピンバンドル試験体を用いており、発熱長は0.5mとなっている。ピン配列の緊密さを表す指標としてピンピッチ(P)のピン径(D)との比 (P/D) を用いると、SERAPH駆動炉心の1.13に対し、実験では1.126～1.421までカバーされている。そこで、この実験データからSERAPHの密なピン配列の効果について検討する。

図4.3.2-5に実験で得られた限界熱流束 (CHF) データを示す。同一出口クオリティーでのCHFを比較するとP/Dの小さいケースほどCHFが減少しているが、SERAPHのP/D値とほぼ同一のP/D=1.126のケースではP/Dが大きいケースと比較してCHFがオーダーで変化するような極端な低下は見られない。また、出口クオリティーの低下に従ってCHFが

増加する傾向はP/Dが大きいケースと同様である。これらの結果から、SERAPH程度の密なピン配列形状であっても沸騰からバーンアウトにいたる現象は粗いピン配列形状の場合と大きくは変わらない、すなわち稠密配列による局所効果を極端に懸念する必要はないと考えられる。

次に、CHF相関式によるSERAPH体系での限界熱流束の評価について述べる。水を作動流体とする三角配列ピンバンドルのCHF相関式としてKfKのダレドンネの提案する相関式⁽⁵¹⁾がある。先の原子力研究所の試験についても、知られている相関式の中で最も良好な一致を示したことが報告されている。図4.3.2-6にKfKの相関式、表4.3.2-2にその実験データベース範囲を示す。SERAPHでの条件と比較すると、P/Dの値は包含されているが、データベースの範囲は圧力条件が10倍高く、質量流速は1/2となっている。そのため、SERAPHのCHFを評価するには低圧・高流量条件に外挿する必要がある。低圧力は沸点の低下、蒸発潜熱の上昇をもたらす。流量の増加は単位出力あたりの流体の温度上昇率の低下、出口クオリティーの減少をもたらし、CHFを大きくする。

表4.3.2-3に相関式により評価したCHFを示す。実験データベースの内挿範囲での予測とSERAPHの条件に対応する圧力、流量条件への外挿での予測を行った。内挿範囲での予測では、高压での沸点の上昇については入口サブクール度を合わせることで評価に取り込み、蒸発潜熱については安全側であるので高圧力条件のままとして評価した。CHFは内挿範囲での予測では3MW、外挿での予測では5.3MWという結果となった。内挿範囲でのCHFと比較して、外挿条件では、圧力の効果は入口サブクール度によりある程度考慮されていると考えられ、主に流速が大きいためにCHFが上昇している。SERAPHの圧力条件における流速、水力等価直徑 (D_h ; P/Dが小さいほど小さくなる) へのCHFの依存性を図4.3.2-7に示す。同図より、現在の知見の範囲ではCHFは3MWを上回ることは確実であり、5MW程度の値になると考えられる。DNB熱流束はCHFとほぼ同等であるので、3MWをパルス状過出力試験時の最大熱流束としたとき、DNBRは1.3以上 (CHF>4MW) という条件を満足できる見通しが得られた。今後、CHFをさらに定量的に評価するため、低圧、高流量条件でのサブクール沸騰について文献調査に加え、実験研究を含めた検討を実施する。

4.3.2.4 热輸送・熱流動のまとめ

ダクトレス集合体からなる駆動炉心、低温タンクを有する熱容量型の熱輸送系の各概念を示した。熱的課題として定常試験、ランプ状過出力試験時の冷却材沸騰防止、パルス状過出力試験時のサブクール沸騰・DNB防止を取り上げ評価を実施した。その結果、両課題ともに克服できる見通しを得た。

サブクール沸騰については、今後、さらに実験研究を含めた検討を行う。また、炉心部圧力損失の低減、炉心部流量配分、燃料要素の流力振動等について、グリッドスペースの形状への依存性と合わせて検討を進めるものとする。

表 4.3.2-1 热的観点からの主要な試験条件

試験モード	試験条件
定常型	試験体：照射済み61ピン束 基準出力：370MW (1Po) 積分出力：～100GJ カップリングファクター：1.1
ランプ型	試験体：照射済み19ピン束 基準出力：220MW (1Po) 最大出力：550MW (2.5Po) 積分出力：～100GJ カップリングファクター：1.9
パルス型	燃料ピン表面最大熱流束：2～3MW/m ²

表 4.3.2-2 KfK相関式の実験データベース

	KfK相関式のデータベース範囲	SERAPH条件
圧力条件 (MPa)	2.8～13.8	0.3～0.5
質量流速 (kg/sec m ²)	68～5540	10,000
P/D	1.051～1.36	1.13

表 4.3.2-3 KfK相関式によるCHF評価

	内挿範囲での予測	外挿での予測
圧力 (MPa)	8.0	0.3
質量流速 (kg/sec m ²)	6000	10,000
入口サブクール度 (K)	124	124
CHF (MW/m ²)	3.0	5.3

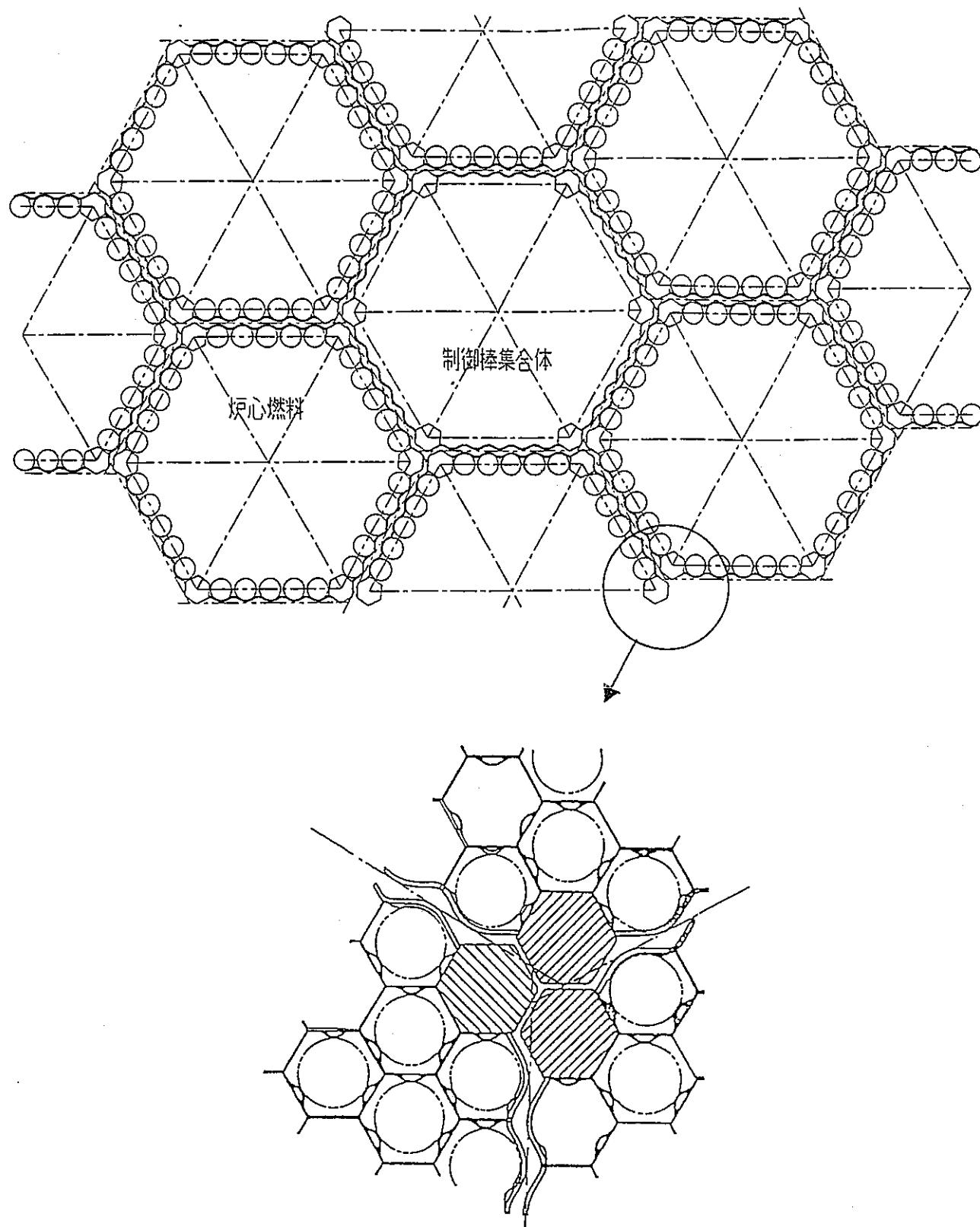


図 4.3.2-1 駆動炉心の集合体とそのネステッド配列

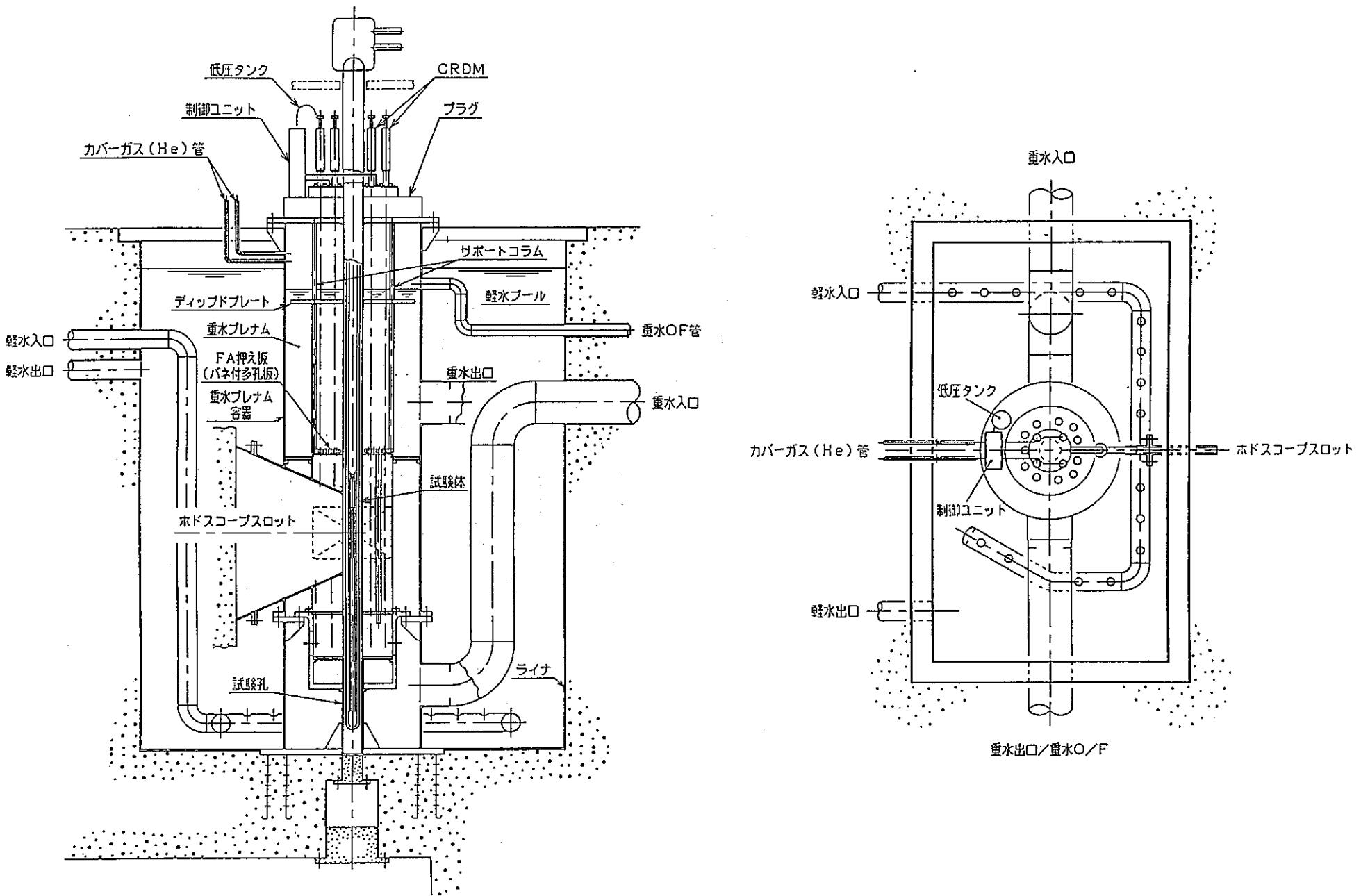
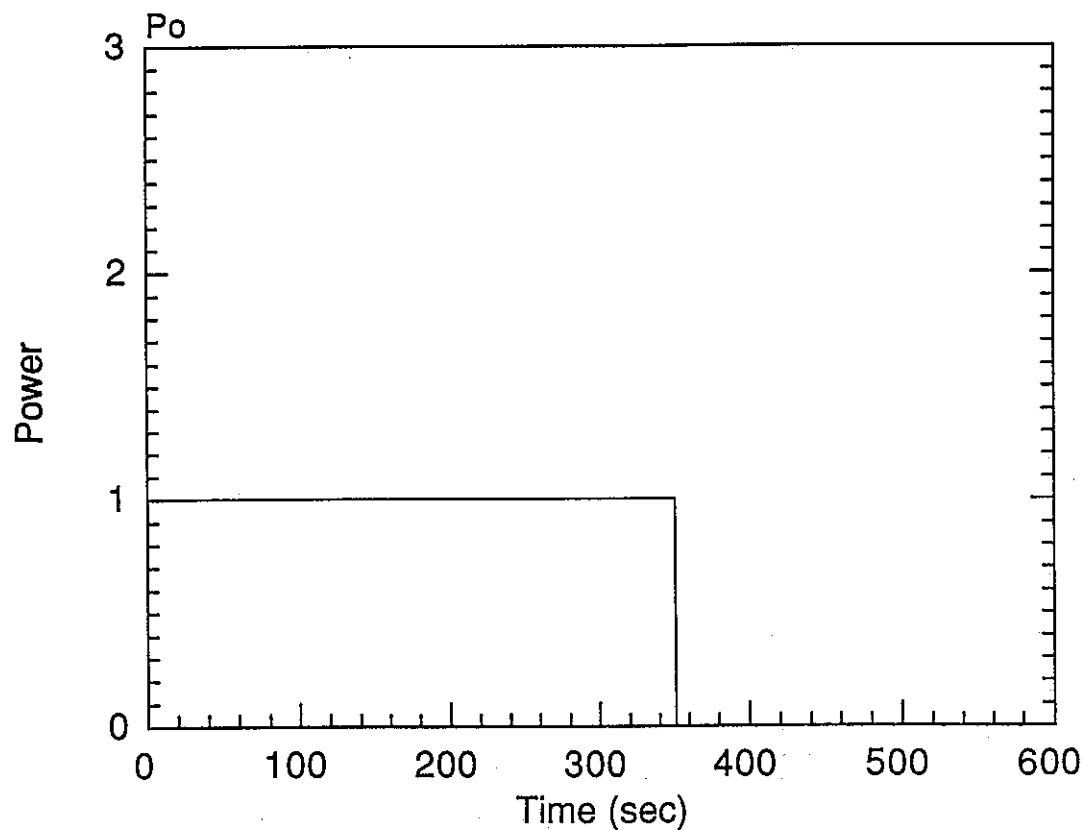
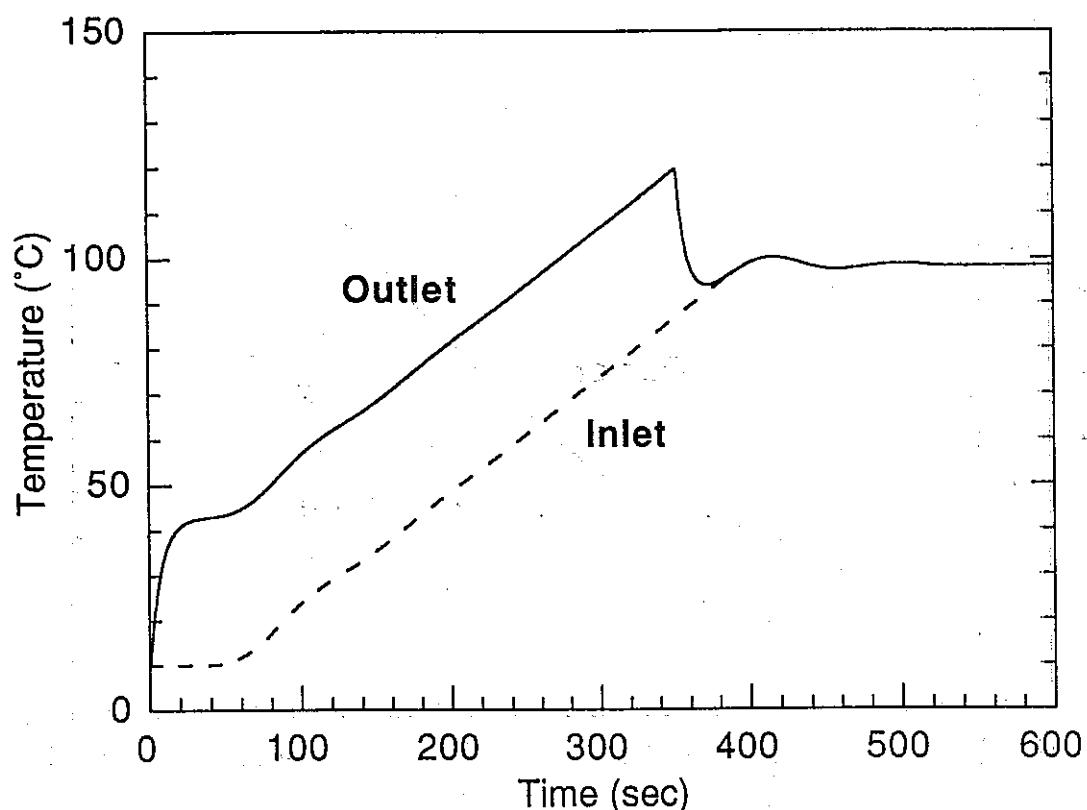


図 4.3.2-2 炉体構造の概念

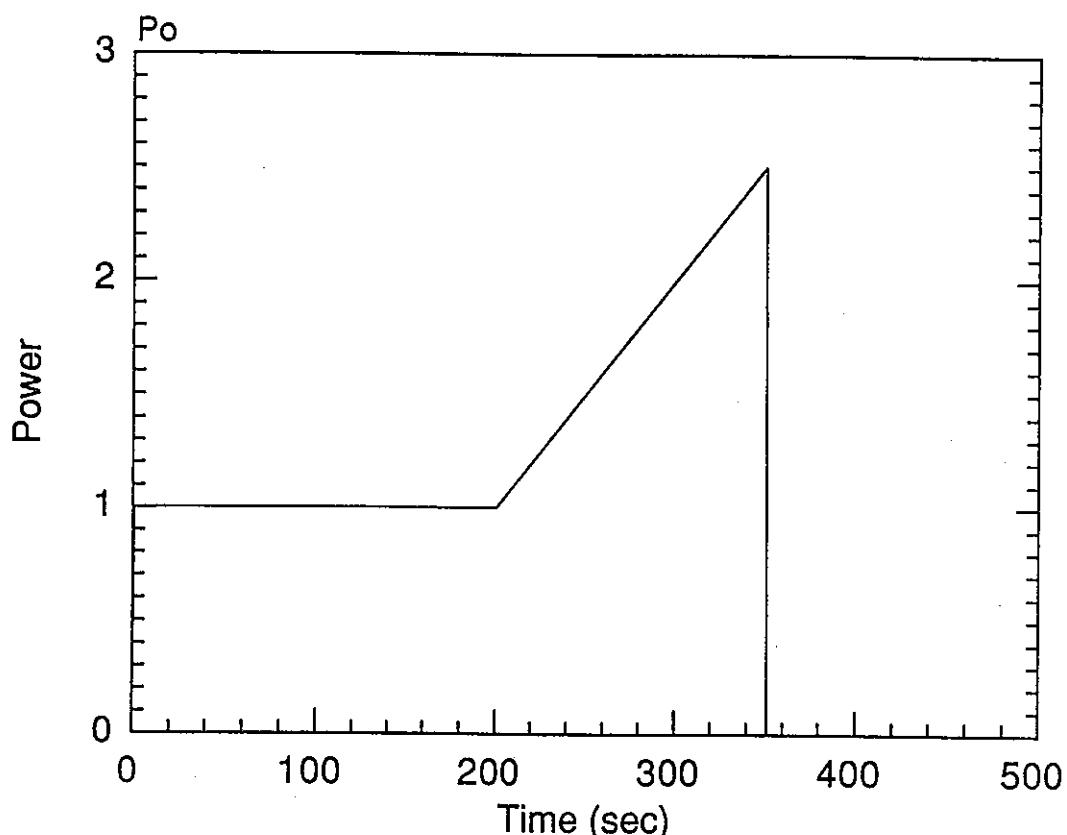


(a) 出力変化

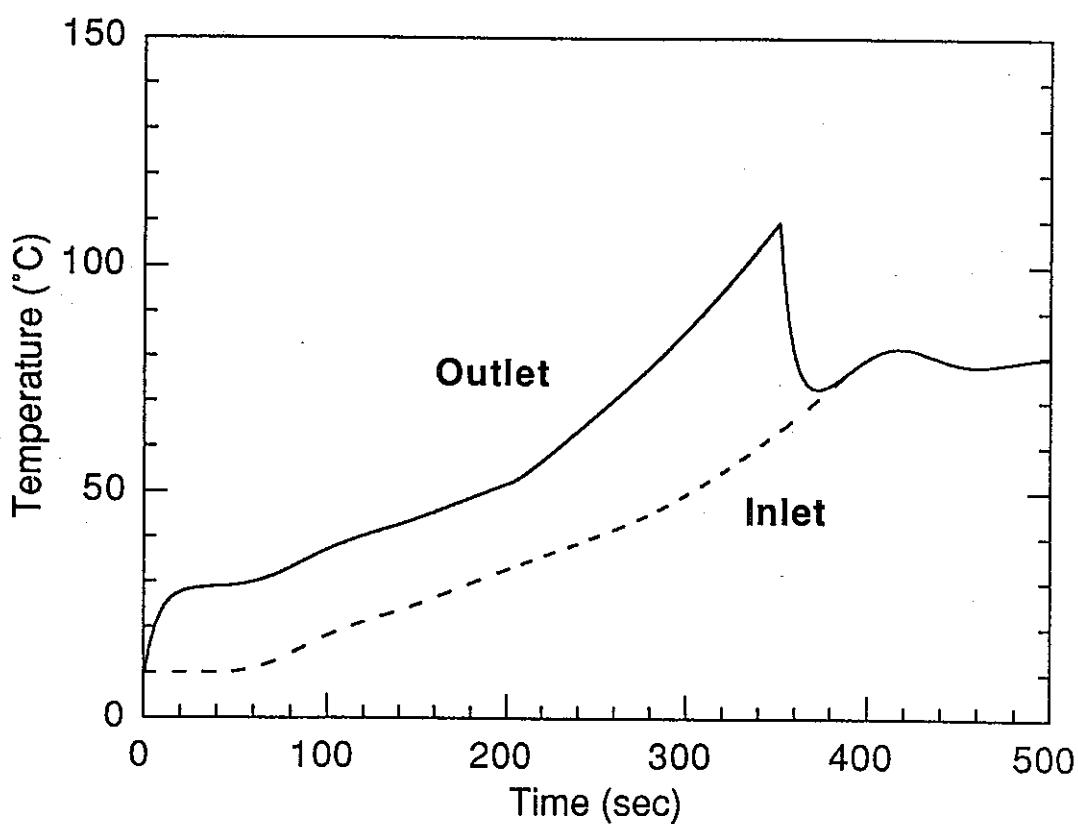


(b) 出入口温度変化

図 4.3.2-3 定常出力試験時の出力変化と駆動炉心
ホットテストチャンネル出入口温度変化

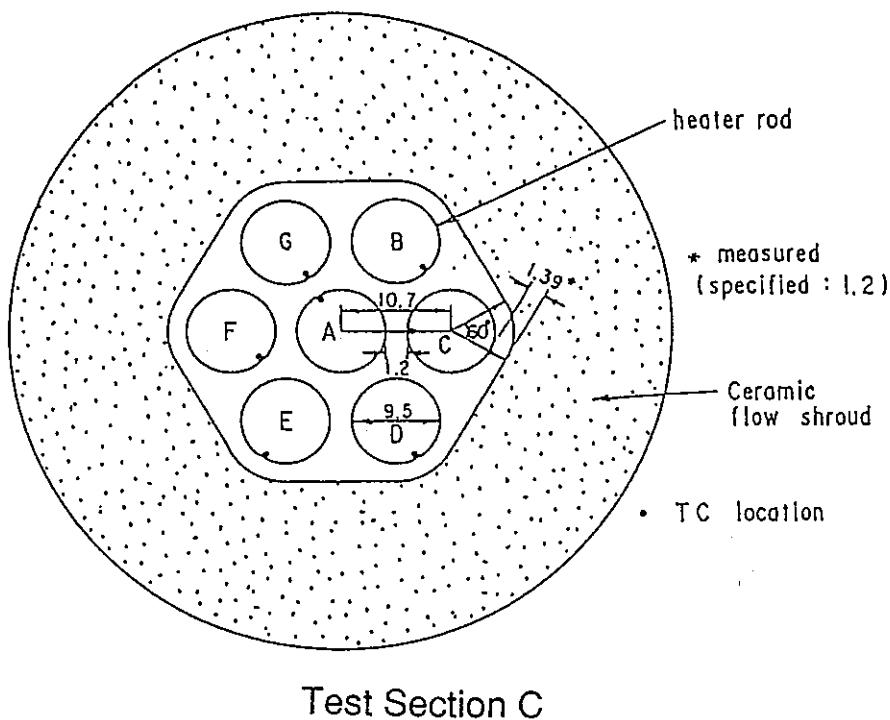


(a) 出力変化



(b) 出入口温度変化

図 4.3.2-4 ランプ状過出力試験時の出力変化と駆動炉心
ホットテストチャンネル出入口温度変化



Test Section C

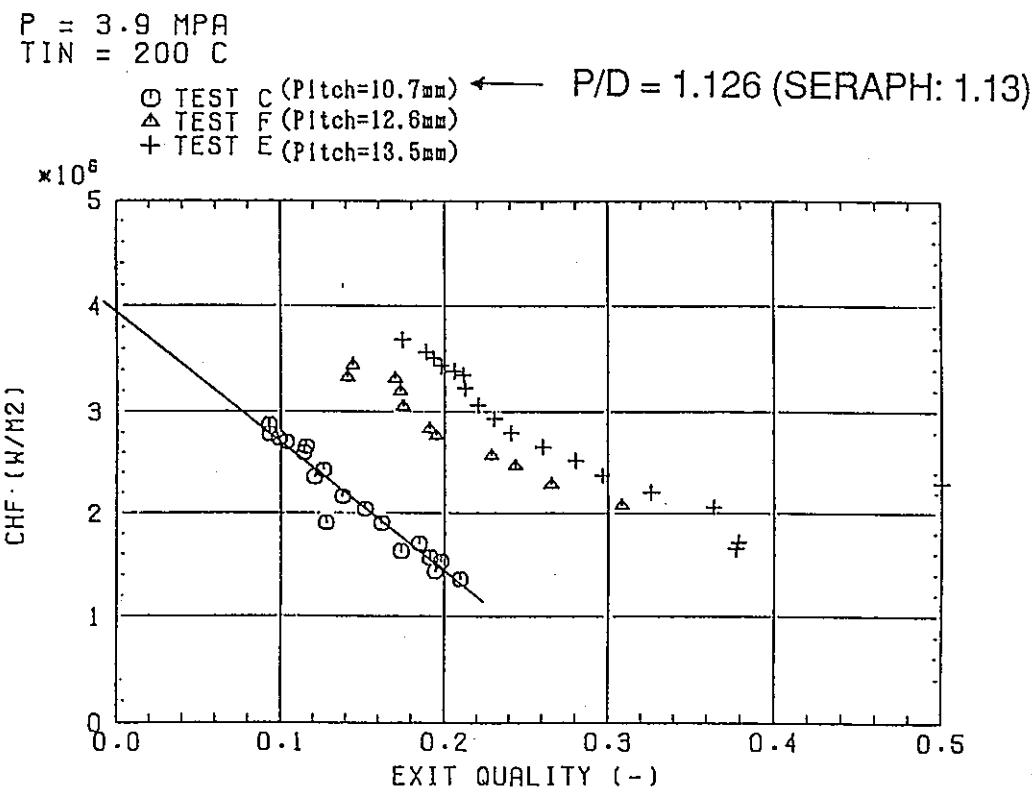


図 4.3.2-5 日本原子力研究所におけるHCLWR限界熱流束試験
 — ピン配列ピッチパラメータ試験 —

KfK相関式はWSC-2相関式中の形状パラメータ(Q_1, Q_2, Q_4)、グリッドスペーサパラメータ(V)を三角配列ピンバンドルに対して設定したものである。

パラメータ

$Q_1: 1.748$

$Q_2: 7.540$

$Q_4: 8.783$

$V: -0.252$

$$\begin{aligned} & -2.789 \exp(-3.874 G) \\ & +1.915 \exp(-0.234 G) \end{aligned}$$

$G:$ 質量流速 ($10^6 \text{ lb}/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$)

The WSC-2 Correlation

$$\phi_{\text{CHF}} (10^6 \text{ Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2) = \frac{A + B\Delta H_i}{C + ZY}$$

$$A = \frac{0.25 GD \lambda F_1 Q_1}{1 + Q_2 F_2 GD},$$

$$B = 0.25 GD,$$

$$C' = \frac{Q_4 F_3 (GD)^{1/2}}{D_h},$$

and

$$C = C' V \left[1 + \frac{Y - 1}{1 + G} \right],$$

where

$D = F_p D_h$; D_h = coolant channel hydraulic diameter (in.)

F_p = radial form factor in the considered section of the bundle

$p_r = 10^{-3} p$; p = pressure (psia)

$F_1 = p_r^{0.982} \exp[1.17(1 - p_r)]$

$F_2 = p_r^{0.841} \exp[1.424(1 - p_r)]$

$F_3 = p_r^{1.851} \exp[1.241(1 - p_r)]$

$G = \text{mass velocity } (10^6 \text{ lb}/\text{ft}^2 \cdot \text{h})$

$\lambda = \text{latent heat of evaporation (Btu/lb)}$

$\Delta H_i = \text{inlet subcooling (Btu/lb)}$

$Z = \text{distance from channel inlet (in.)}$

$Y = \text{ratio of average cluster heat flux from entry to } Z \text{ to local cluster radial-average heat flux at } Z$

$V = \text{grid spacer parameter; for the best fit of experimental data } V = 0.7.$

Geometry parameter	Q_1	Q_2	Q_4
Triangular array	1.329	2.372	12.26

図 4.3.2-6 KfK相関式の構成

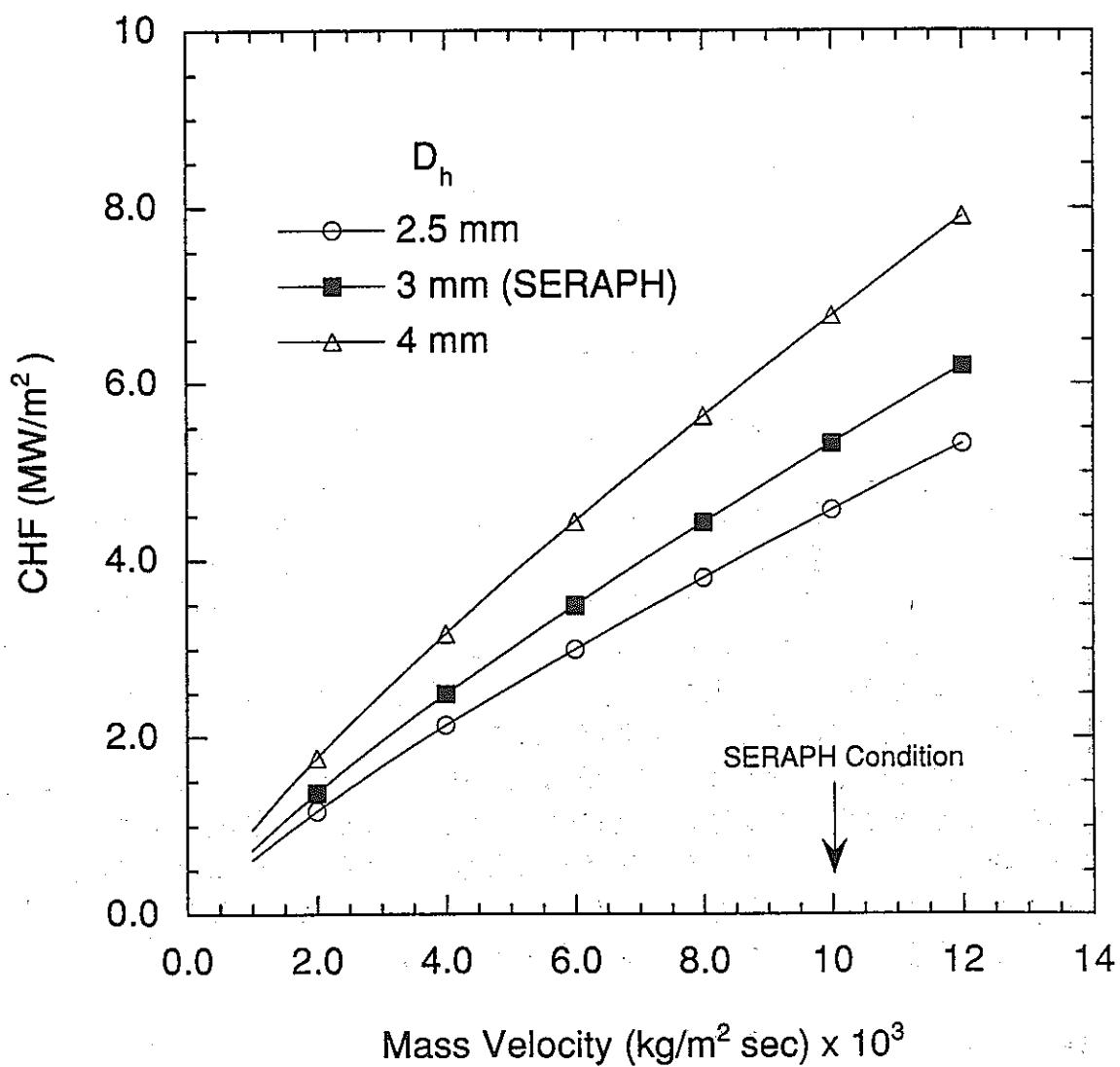


図 4.3.2-7 KfKのCHF相関式によるSERAPH駆動炉心体系のCHF

4.3.3 駆動炉心燃料

駆動炉心の試験性能を達成する上で最も重要な因子のひとつは駆動炉心燃料の過渡試験時の健全性確保である。特にSERAPHにおいては、核的には希釈型炉心を必要としつつ、熱的には、パルス・ランプ時で各々相反した除熱制限があり、これを克服する技術的なブレーキスルーを必要とする。SERAPH概念の幅広いスコーピング研究の中から、パルス・ランプの過渡試験ニーズに最も余裕をもって対応し得るドライバー燃料はベリリア希釈型プルトニウム燃料($\text{PuO}_2\text{-BeO}$)であるとの結論が得られた。

ドライバー燃料についてのR&Dは、このベリリア希釈燃料について1992年より文献サーベイ、試作という方法で開始された。現在までの検討状況を以下にまとめると。

4.3.3.1 試験要求条件から求められる燃料性能

SERAPH過渡試験はパルス・ランプ特性を要求条件としており、一般の燃料設計概念とは異なるものとなっている。

一般にパルス炉と呼ばれる急峻なエネルギーを試験体に入熱する装置は、TREATを代表とする断熱マシンである（表4.3.3-1参照）。このタイプの炉は、過渡時の発熱が急速なため、除熱が間に合わず、ドライバー燃料自体の熱容量の中に発生エネルギーを蓄積することになる。このため、炉心の熱容量が大きいこと、高融点であることがパルス能力を大きくする。さらに、発熱分布を均質化すること等により燃料内のローカルな温度ピークをなくし、燃料の温度変化許容幅を広げる工夫がされている。

一方、ランプ炉と呼ばれる試験炉は、SCARABEE、BR-2等を代表とするが、これは定常加熱状態からランプ状に出力を増加し、長時間（～数分）に渡って加熱を続けるものであり、冷却材の強制循環によって燃料から準静的に除熱を続ける。このため、除熱能力に優れた燃料要素となっている必要がある。これら二つの機能を両立させるためには、燃料ペレット、燃料要素設計、それぞれに充分な留意が必要となる。

（1）燃料ペレットに求められる性能

- ・パルス、ランプ運転時の温度制限までの裕度が大きい。
- ・ペレット内温度ピークが小さい。
- ・核的な希釈性が優れている（寄生吸収が少ない）。
- ・照射、過渡運転による特性変化が少ない。

これらの特性を満たす具体的なペレットの概念は、以下のように示される。

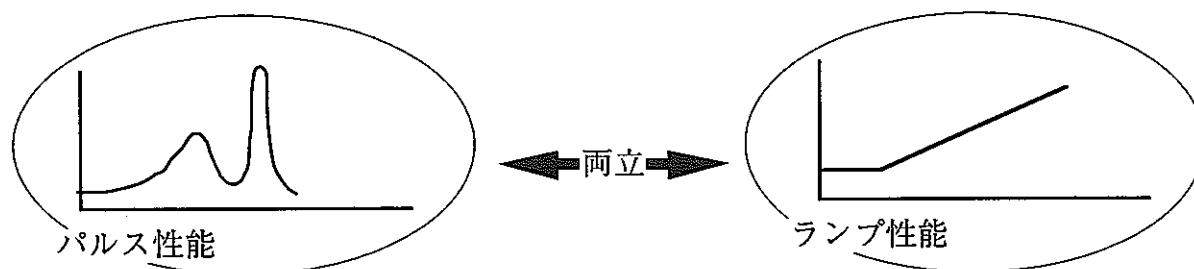
炉への要求仕様等	燃料に要求される条件	実現手段
過渡試験炉 ・ランプ状過出力運転 ・パルス状過出力運転	定常時の低発熱密度化 高熱伝導度、高融点 高熱容量、高融点	条件を満たし、かつ、化学的に安定な希釈物質中に核燃料物質を均一分散させる →「希釈型燃料」概念
低熱出力（高反応度）	高中性子経済	高fissile燃料(高濃縮U燃料あるいはPu燃料)
設計性能の保証	燃料ペレットの健全性	耐熱衝撃強度の向上（R&D課題）

具体的に対象燃料としてサーベイされた燃料ペレットの主なものは以下に示す通りであり、それらの温度制限値についてまとめる。

対象物	温度制限値	根拠データ等
燃料ペレット： UO ₂ (PuO ₂)-BeO	2000 K	BeO相変化：約2300 K, 熱衝撃健全性：1900～2100 K以下
UO ₂	2300 K	融点：3100 K, 被覆管 (Nb, Mo等)との共存性：約2300 K
U-Mo	800 K	共晶融点：約1500 K (評価では不確かさを考慮)
PuO ₂ -Fe/Al	1500 K	製造時のPuO ₂ 相変化：約1600 K
(U,Zr)C-C	2300 K	共晶融点：2700～3100 K, 熱衝撃健全性：2300 K以下

(2) 燃料要素に求められる性能

燃料ペレットにおいてはパルス・ランプ性能は必ずしも相矛盾する要求ではないが、燃料要素からの除熱を考える場合、この両性能は二律背反の要求となる。パルス・ランプにおける冷却形態、除熱条件、その方策等を以下に示す。



燃料冷却形態：

- ・ 発熱に除熱が追いつかない断熱モード後、蓄積エネルギーを放出
- ・ 発熱と除熱がほぼ拮抗する定常除熱モード

除熱の必要条件：

- ・ 冷却材を沸騰させないため燃料 - 冷却材の伝熱をある程度抑制する。
- ・ 燃料の最高温度を低くするため、過渡出力中は除熱をできるだけ効率的にする。

方策：

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| ・ 热容量が大きく、融点の高い燃料を用いる。 | ・ 燃料ピンの細径化を図る。 |
| ・ 過渡時にも燃料と被覆管の間に一定のギャップを確保する。 | ・ 燃料内の熱伝導をよくする(ペリリア使用) |
| | ・ 燃料と被覆管の間のギャップができるだけ狭くする。 |

このように、パルス入熱後の冷却材の沸騰（核的な外乱）を避けるためには燃料からの除熱をある程度抑制する必要があり、これはランプ性能を低下させることになる。

このため、駆動炉心設計としては、パルス・ランプ性能をバランス良く両立させる燃料・冷却材の仕様を求めるとともに、燃料要素設計としては、除熱抑制の機能を持つ燃料の性能確保を行う必要がある。

4.3.3.2 ペレット材料の選定

(1) ベリリアの特性、他の希釈材との比較⁽⁵²⁾

原子炉への利用という観点からのベリリアの魅力、及び、欠点を列挙すると以下のようになる。

(長所) • 热伝導度が高い (図4.3.3-1参照)

一般のセラミックを大きく上回り金属並の値となる。

• 中性子捕獲断面積が小さい

• 高温でもかなりの強度が期待できる

• 热衝撃に対する抵抗が大きい

• 高温での化学的活性が低い (燃料や冷却材との共存性が良い)

(短所) • 高価である

• 高温では湿分と反応して揮発する

• 金属ベリリウムは化学的毒性を有している

このように、ベリリアは、燃料ペレットに求められる性能としてまとめた高融点、高熱伝導度、高熱容量、寄生吸収の少ないこと、耐熱衝撃性等、全ての性能が満たされている。

ベリリウムは ($n \alpha$) 反応によって He 泡がマトリックス中に生成されるので、燃料健全性の観点から一般的な核燃料としては適さないが、SERAPHにおいては、燃焼度が極めて低い試験炉であるのでこれにより制限されるものではない。

一般に希釈材として用いられるグラファイトとの比較を以下に示す。

評価項目	ベリリアの対グラファイト優劣評価
中性子束スペクトル	若干軟化する。
試験体発熱歪み係数	スペクトルの軟化のため、やや大きくなる。
結合係数	等価。
ランプ状過出力運転性能	熱伝導度がほぼ等しく(低温では大、高温では小)等価。
パルス状過出力運転性能	比エンタルピが約 2 倍高いため、約 2 倍大きくなる。

このように、核的な性能の観点からは、BeO (M_{Be}=9, M_O=16) は、グラファイト (M_C=12) に比して若干駆動スペクトルを軟化させる傾向を持つが、熱的には比エンタルピが高いためパルス運転性能が大きい。このため、ベリリアはガス冷却炉及びTREATのような熱中性子パルス試験炉の減速材として広く利用されているグラファイトほど一般的な材料ではないが、性能的にはこれに勝るものと言える。

(2) ベリリアペレットの製法に係わる検討

ベリリア希釈燃料はBeO,PuO₂粉を出発物質に使用するセラミックスであり、その特性は粉体の性状、セラミックスの製造法等によって大きな影響を受ける。

SERAPHの駆動炉心燃料としては、高熱容量、高熱伝導が要求されるため、焼結密度の向上が必須条件となる。以下に要求特性に対する粉体性状・製造法、焼結体性状の影響を示す。

①. 焼結性

- ・サブミクロン級の小粒子、狭い粒径分布→焼結駆動力が大きく、焼結性が良くなる
(⁽⁵³⁾ 粉体性状の研究が進み、Brush UOX級BeO粉は定評がある)
- ・圧縮圧力、結合剤、焼結温度、焼結時間等種々パラメタの影響が大きい→R&D対象
- ・焼結体製造法:CPS;低温圧縮法⁽⁵⁵⁾→粉体の改良により充分高性能
HP;高温圧縮法⁽⁵⁶⁾→残留応力によるグレーン境界剥離の可能性
ES;押し出し法(硬練りした可塑体)

②. 照射損傷 格子定数変化、スエリング($\Delta V/V$)、破壊強度、熱伝導度

- ・グレーンサイズが小さいほどスエリングは小さく微細クラックは発生しない。
- ・割れ、微粉化はスエリングを指標に評価できる。(グレーン境界の剥離)
→SERAPH照射条件(最大フルエンス $5 \times 10^{19} n/cm^2$)では
影響は小さいものの、グレーンサイズを小さくする必要がある。

③. 热物性、耐熱衝撃、高温強度

- ・小グレーンサイズ、理論密度比が高いペレットが必須条件。

④. 均一性

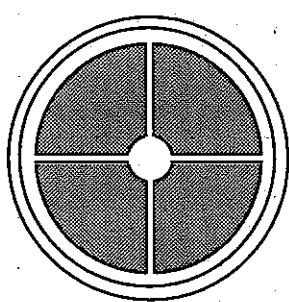
- ・1次粒子の燃料粒が大きいと、焼結性が悪くなり均一性が低下する。また、Puスポットも大きいのは好ましくない。さらに混合法としても乾式混合より均質性の向上が期待できる湿式混合の採用について検討が必要となる。

以上から高理論密度比(99%TD)、小グレーンサイズ(<10 μm)、均一PuO₂分散(PuO₂粒径<10 μm)を目標に1次粉体の調整、セラミックスペレット製造法について試作を含めてR&Dを行った。

さらに初期の概念検討の中で、燃料ペレットの割れ性に対する配慮から下図のよう

に予め周方向で4つに分割したペレット(4つ割ペレット)を調整するアイデアが出された。

しかし、試験ニーズへの対応から燃料ペレットは、ある程度細径化が前提となり、かつ、燃料-被覆材ギャップ間の製造上のクリアランス保持の問題からこの様な加工は極めて困難が予想される。このため現行のペレット製法検討の基準としては通常の円筒型(中実or中空)ペレットを想定することとした。



燃料要素断面図

4.3.3.3 ペレット製造技術R&Dの現状

1993年3月から9月にかけて、第1回ペレットの試作のR&Dを実施した。

ここではPuO₂の模擬物質として劣化UO₂粉を使用し、Brush Wellman社のUOXグレードのBeO粉との混合によりベリリア希釀型燃料の試作を行った。以下に試作調査の内容を示す。さらに、表4.3.3-2に試作試験のマトリックスを示す。

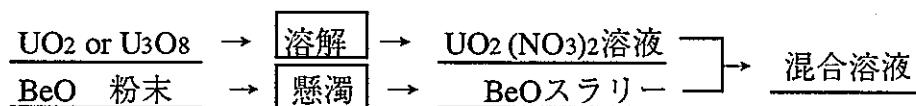
- ① BeOに関する文献調査
- ② BeO焼結体構造に関する調査



- ③ 乾式混合工程に関する調査



- ④ 湿式混合工程に関する調査



アンモニア水



ADU-BeO粉末 → 焙焼還元 → UO₂-BeO粉末

調査対象	調査項目	試験パラメータ
1. BeO焼結体製造に関する調査	市販BeO粉末を用いた焼結試験	成形圧 焼結温度 焼結時間
2. 乾式混合工程に関する調査	UO ₂ -BeO焼結体の試作試験	混合時間 成形圧 焼結温度 焼結時間
3. 湿式混合工程に関する調査	(1)沈殿生成と回収	スラリー温度 NH ₃ 添加量
	(2)酸化物への転換	焙焼還元温度
	(3)成形、焙焼	成形圧 焼結温度 焼結時間

これまでのR&Dによって得られた主な知見を示す。

- ① コールドプレスー焼結法によりBeO焼結体、BeO-UO₂混合焼結体の試作を行い、製品の特性に及ぼす製造条件の影響を調査した。（図4.3.3-2に一例を示す。）

本調査で設定した焼結ペレット特性の目標値と試験結果との比較を下表に示す。

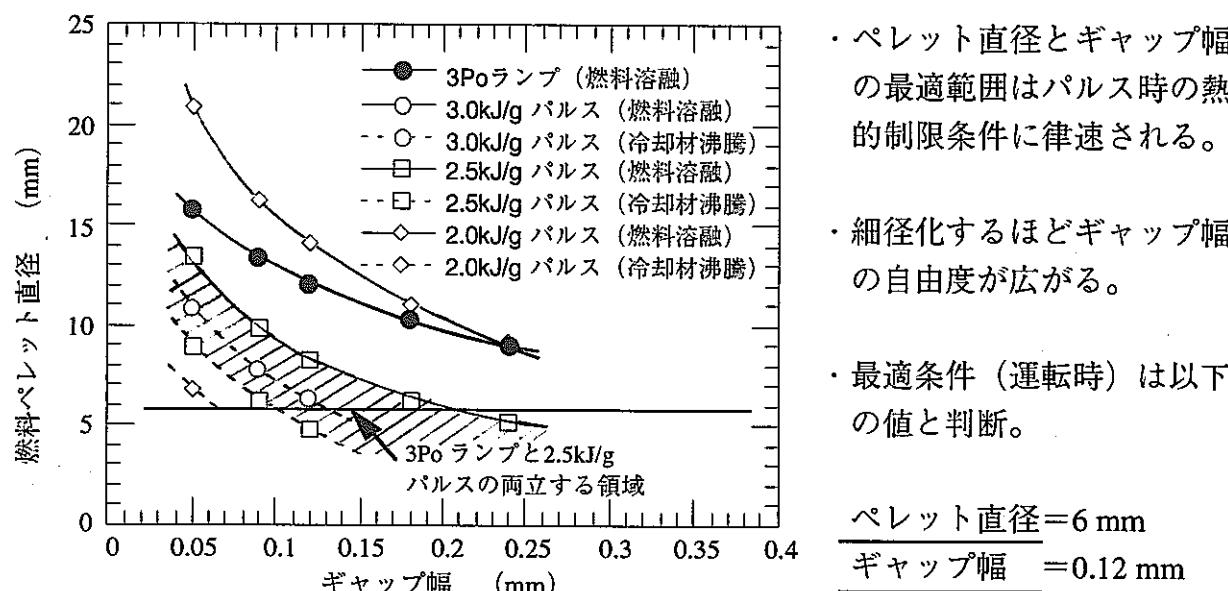
製造方法	密度 (%TD)	BeO粒径 (μm)	UO ₂ 最大粒径 (μm)
目標値	99 程度	10 以下	(均一分散)
乾式混合（乳鉢）	約 96	8.0	約 100
アルミナボールミル混合 (混合時間 1 hr)	約 98	8.2	約 20
ナイロンボールミル混合 (混合時間 5 hr)	約 96.5	3.7	約 15
湿式混合 (焙焼還元 550°C-2Hr)	約 98.5	約 3	1 以下

- ② アルミナ製ボールミルを用いて混合した場合、1 hr の混合で原料にアルミナが混入した。アルミナの混入により焼結体の密度が約98%TDに増加する。また、BeO粒が等軸から板状に成長するとともに粒径がやや増加する傾向が見られる。
- ③ ナイロン製ボールミルを用いて混合した場合、焼結密度は96~97%TDである。3 hr 以上の混合で焼結体中ではUO₂粒子のほとんどが粒径約 $1\mu\text{m}$ で分散し、残りの15~50 μm のUO₂粒子も混合時間の増加とともに減少する。
- ④ BeO粉末を硝酸ウラニル水溶液と攪拌してスラリーとし、ウラン成分を沈殿させてBeO-UO₂混合粉末を作成する湿式混合工程を用いた場合、約98%TDの焼結密度が得られる。UO₂粒子径は $1\mu\text{m}$ 以下でそのほとんどはBeO粒界に均一に分散する。
(図4.3.3-3にEPMA結果によるUO₂分散状態を示す。)
- ⑤ 湿式混合工程で作製したBeO-UO₂焼結体には、マトリックスの2~3倍に粒成長したBeO粒子や、BeO粒界にすじ状につながった微細UO₂粒子が存在する。

4.3.3.4 燃料要素の概念

燃料ペレットに高い性能（高熱容量、高融点、高熱伝導性）を求める結果、パルス入熱後のペレットからの除熱は極めて大きくなる。冷却材に対してこの除熱を無制限に許すと冷却材の沸騰を招くことになる。

試験必要条件に沿った各種形状パラメータによる核熱計算を行った結果を下図に示す。



定常時ペレット発熱密度平均値： $P_0=237.5 \text{ W/cc}$ の場合

この図は、試験体に定常時出力 (P_0) を与える時のドライバー燃料の発熱密度を基準として、そこから $3P_0$ までランプ状に入熱あるいは所定の積分熱量をパルス状に入熱した場合の燃料温度及び冷却材出口温度の計算結果から、燃料溶融も冷却材沸騰も生じない条件をまとめたものである。図では縦・横軸で左下が除熱のよい状態（ペレット直径が小さく、ギャップ幅が小さい）を示し、右上に行くほど除熱が悪くなることになる。

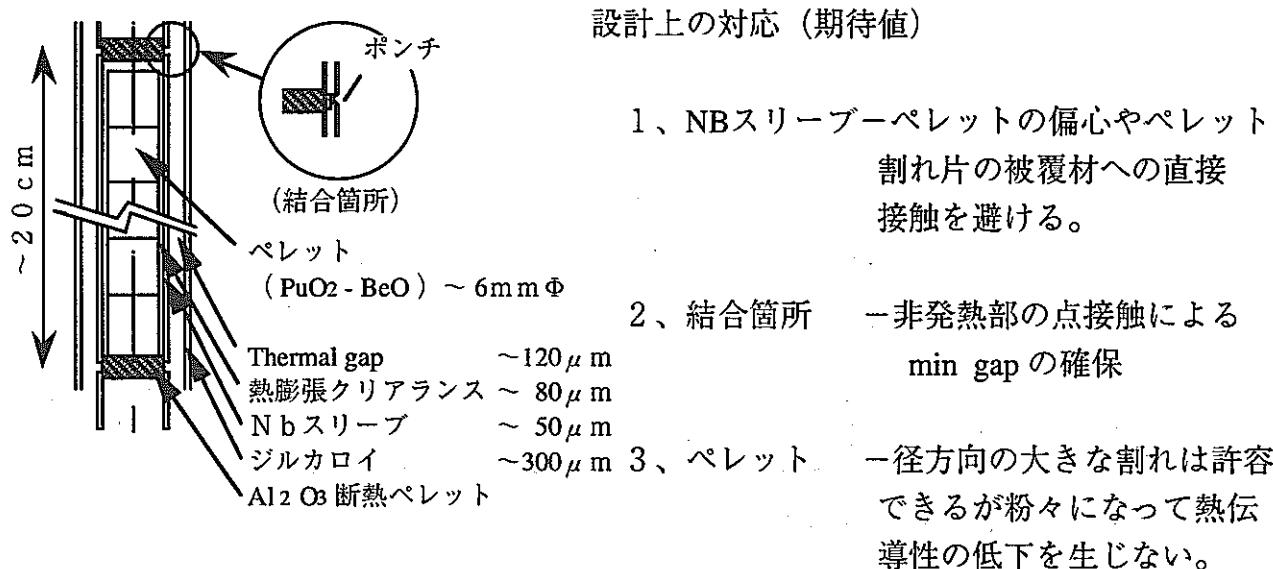
$3P_0$ ランプ曲線は、燃料中心温度（溶融温度）についてプロットされており、この等温線より左下なら中心溶融が生じないことになる。各パルス状積分入熱の実線で示すカーブ（燃料溶融）は同様に燃料中心温度（溶融温度等温線）を示しており、この線より左下側でなければ溶融を引き起こすことになる。

一方、破線で示すカーブ（冷却材沸騰）は冷却材出口温度（沸騰温度等温線）についてのプロットであり、これより除熱が良くなる（左下になる）と冷却材への熱移動が大きくなり過ぎ冷却材沸騰に至ることになる。

ちなみに燃料直径を6 mm程度に想定してみると、 2.5 kJ/g の積分入力を与えた時、ペレット-被覆管を $100\sim200 \mu\text{m}$ 程度に保持しないと燃料ペレット中心の溶融を避けつつ冷却材の沸騰を回避することはできない。

これに加え、最大熱流束を、ギャップ幅を保持することによって、局所的なサブクール沸騰を避けるため熱流動評価（被覆材-冷却材間熱移行）で想定している値以下に抑える必要がある。

このため、具体的な燃料要素のイメージとしては下図に示すものを想定している。



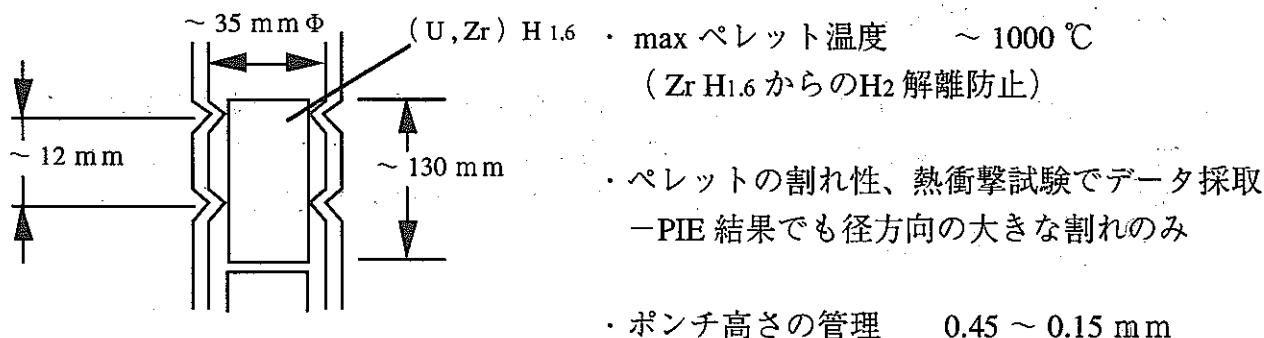
これは、ニオブスリーブをライナーとし被覆管との熱遮蔽ギャップを確保した燃料要素のイメージである。

ニオブスリーブは、高温耐熱材として、構造強度上の期待はないもののペレット偏心、割れ片の直接の点接触には熱的に耐え、被覆材とペレットの直接の接触を防ぐ目的で設置される。

結合部は、被覆材をかしめることにより非発熱ペレットと点接触させ、局所的に大きな熱流束が生じないようにするとともに、熱遮へいギャップを構造的に確保するためのものである。

ペレットには、パルス時の耐熱衝撃性を確保するため、熱伝導が大きく熱応力発生が小さいことが本来持つべき特性として要求される。さらに、径方向のマクロな割れ（熱伝導の低下は生じない）は許容され得るが、熱衝撃により微粉化し、径方向の熱伝導性を劣化させないことが要求される。

同様なパルス炉燃料として NSRR の例を以下に示す。



NSRRでは、発熱部と被覆材の点接触により熱遮へいギャップを確保している。ペレット最高温度を1000°C程度に抑えたNSRRのケースに比べ、SERAPHの熱条件はかなり厳しくなるため、熱接触部には特段の配慮が必要と考えられる。

以上のような燃料要素概念を基準に、今後、製造性、燃料集合体の熱・機械的特性、ペレット耐衝撃性の確認を行いつつ検討を進める。

4.3.3.5 今後の研究開発課題

今後のSERAPH駆動炉心燃料の研究開発スケジュールを図4.3.3-4に示す。

$\text{UO}_2\text{-BeO}$ のパルス炉での利用はACRRで実績があるものの、SERAPHでの $\text{PuO}_2\text{-BeO}$ 燃料の使用環境は極めて厳しい。このため、燃料ペレットの試作・物性試験から始め、燃料要素製造性検討・試作を行い、炉内・外試験による性能の確認を行う必要がある。

これらの中で特に注目されるのは、 $\text{PuO}_2\text{-BeO}$ の熱伝導度等の熱物性、及び、耐熱衝撃性の確認である。図4.3.3-5にBeOの熱伝導を示す。5 vol %程度の $\text{PuO}_2\text{-BeO}$ では熱的性能のほとんどをBeOの物性によることになると考えられるが、特に空孔率による熱物性の劣化はランプ・パルス性能を直接低下させるものであり、現在の解析ベースの物性値を充分担保できるような性能が要求される。

さらに、高流速の冷却材中での冷却が行われるためスペーサ設計等燃料集合体の構造設計、熱流動特性にも留意する必要がある。

4.3.3.6 駆動炉心燃料検討のまとめ

以上に示された現状までのR&D結果をまとめると以下に要約される。

- (1) 核的な希釈材としての要求及びパルス、ランプ時の熱的裕度の観点から高融点、高熱容量、高熱伝導度の $\text{PuO}_2\text{-BeO}$ 燃料が選定される。
- (2) 様々な製造パラメータの中で $\text{UO}_2\text{-BeO}$ ペレットの試作を進め、98% TD以上の密度を持つ極めて緻密な構造の試作ペレットが得られた。今後このペレットを使って熱・機械物性の確認を行うとともに、均一性向上のためさらなる改良を図る。
- (3) パルス時の熱保持性、ランプ時の速やかな除熱性という相反する熱的要求を満たすため、燃料要素としては最小のギャップ幅を確保するような設計をリファレンスに検討を進める。
- (4) 今後は燃料ペレットについては、熱物性、耐熱衝撃性、定常照射による熱物性変化を炉内・外で確認する。また、燃料要素については概念を詳細化し、この試作を実施するとともに、燃料集合体としてパルス照射時の熱的健全性、冷却性について確認するものとする。

表 4.3.3-1 高速炉安全研究のための過渡試験炉の主要仕様

項目	施設名 組織	TREAT ANL-W	ACRR Sandia	NSRR 原研	BR-2 Mol	SCARABEE Cadarache	CABRI Cadarache	SERAPH 動燃(計画*)
ドライバ	型式 発熱長 定常炉出力 ピーク出力 炉周期 燃料 冷却材 冷却系形式 中性子束 スペクトル	パルス型 122 cm 0.1 MWth 4.4 GWth* 35 ms UO ₂ -黒鉛 (94%濃縮) 空気 強制循環 熱	パルス型 52.2 cm 2 MWth 52 GWth* 1 ms UO ₂ -BeO (35%濃縮) 軽水 プール型 $2.4 \cdot 10^{13} \text{n/cm}^2\text{s}$ 熱	パルス型 38 cm 0.3 MWth 23 GWth* 1.17 ms U-ZrH (20%濃縮) 軽水 プール型 $5 \cdot 10^{12} \text{n/cm}^2\text{s}$ 熱	(ランプ型) 76.2 cm 100 MWth U-Al板状 (93%濃縮) 軽水 強制循環 $1.2 \cdot 10^{15} \text{n/cm}^2\text{s}$ 熱～熱外	(ランプ型) 60 cm 80 MWth 94 MWth 5 s U-Al板状 (93%濃縮) 軽水 強制循環 $3.8 \cdot 10^{13} \text{n/cm}^2\text{s}$ 熱～熱外	パイモ-タル型 80 cm 25 MWth 11.5 GWth* 20 ms UO ₂ (6%濃縮) 軽水 バッチ式冷却 $2 \cdot 10^{13} \text{n/cm}^2\text{s}$ 熱	約 200 MWth 100 GWth 3.3 ms PuO ₂ -BeO (75% Fissile) 重水 バッチ式冷却 $1 \cdot 10^{15} \text{n/cm}^2\text{s}$ 熱外～高速
試験体	試験孔直径 試験体直径 試験体規模 試験体長	20 cm 22.8 cm 6 cm 7 本ピン束等 238 cm	22 cm (計画) 約 2.5 cm 单ピン、7 本ピン束 38 cm	20 cm 6 cm 37 本ピン束 220 cm	23 cm 10 cm 37 本ピン束 140 cm	12 cm 3.2 cm 单ピン 80 cm	30 cm 8～10 cm 61 本ピン束等 100 cm	
試験性能	試験体出力 ランプ性能 パルス性能 試験時間 燃料計測	Po = 24 W/cm 5 %Po/s 以上 max 800 W/cm 30～100 kJ/g.s max 約 2 kJ/g 数 ms～100 秒 ペリスコープ	~50 kJ/g.s max 4.5 kJ/g 10 秒～数日 CAIS	Po = 410 W/cm 21 日 なし	Po = 450 W/cm 9 分 なし	Po = 480 W/cm 1～3 %Po/s max 1430 W/cm 1～100 kJ/g.s max 約 2 kJ/g 約 10 分 ホドスコープ	Po = 450 W/cm 1～10 %Po/s 1350 W/cm 以上 0.1～10 kJ/g.s 2.5 kJ/g 以上 約 10 分 ホドスコープ	
備考	* 積分出力制限 : 1010 MW.s	* 積分出力制限 : 380 MW.s	* 積分出力制限 : 117 MW.s				* 積分出力制限 : 250 MW.s	* 暫定値

(注) 試験性能は試験燃料の燃焼度、濃縮度等に左右されるので、主に未照射の汎用的な混合酸化物燃料に対する代表値を記した。

表4.3.3-2 BeO希釈燃料製造に関する技術調査 試験マトリックス

No.	試験項目	乾式、ホーミング		湿式沈殿作製			湿式焙焼還元		粉末 特性評価	成形		焼結			調査内容	
		UO ₂ 粉末	混合 hr	U濃度 gU/l	NH ₃ 量 NH ₃ /U	湿式工程 評価	温度 °C	時間 hr		成形圧 t/cm ²	成形体 特性評価	温度 °C	時間 hr	焼結体 特性評価		
1-1	BeO焼結体製造に関する調査	-	-	-	-	-	-	-	B E T S E M X R D 粒度分布	3	重量、寸法 成形性	1800	2	重量、寸法 S E M O M	焼結時間	
1-2		-	-	-	-	-	-	-		4		-	4			
1-3		-	-	-	-	-	-	-		3		-	6			
1-4		-	-	-	-	-	-	-		1600		2	X R D	焼結温度		
1-5		-	-	-	-	-	-	-		1700		-				
1-6		-	-	-	-	-	-	-		1800		2		成形圧		
1-7		-	-	-	-	-	-	-		2		-				
2-1	乾式混合によるBeO-UO ₂ 焼結体製造調査	高活性 5vol%	乳鉢 混合	-	-	-	-	-	原料B E T S E M X R D 粒度分布	3	重量、寸法 成形性	1800	2	重量、寸法 S E M O M	焼結時間	
2-2				-	-	-	-	-		4		-				
2-3				-	-	-	-	-		6		-				
2-4				-	-	-	-	-		1600		2	X R D	焼結温度		
2-5				-	-	-	-	-		1700		-				
2-6				-	-	-	-	-		1800		2		成形圧		
2-7				-	-	-	-	-		2		-				
3-1	ボールミル混合工程に関する調査	高活性 5vol%	1	-	-	-	-	-	X R D	3	重量、寸法 成形性	1500	2	重量、寸法 S E M O M	焼結温度	
3-2				-	-	-	-	-		1600		-	焼結挙動			
3-3				-	-	-	-	-		1700		-				
3-4				1	-	-	-	-		3		1600	2	X R D E P M A	混合時間	
3-5				3	-	-	-	-		3		-	-			
3-6				5	-	-	-	-		3		1600	2		UO ₂ 量	
3-7				3	-	-	-	-		3		1600	2		UO ₂ 活性度	
3-8				3	-	-	-	-		3		1600	2			
4-1	湿式混合工程に関する調査	5vol%UO ₂ p H 搅拌方法	7.5	-	20	10vol%UO ₂	650	2	X R D	3	重量、寸法 成形性	1600	2	重量、寸法 S E M O M X R D E P M A	スラリー濃度	
4-2				-	40					3		-	-			
4-3				-	60					3		1600	2		NH ₃ 添加量	
4-4				-	40		5	5vol%UO ₂		3		1600	2		UO ₂ 量	
4-5				-	-		10			3		1600	2		焙焼還元温度	
4-6				-	40		7.5			3		1600	2			
4-7				-	40		7.5			3		1600	2			
4-8				-	-		-			4		1600	2			
4-9				-	40		7.5			3		1600	2			
4-10				-	-		-			4		-	-			

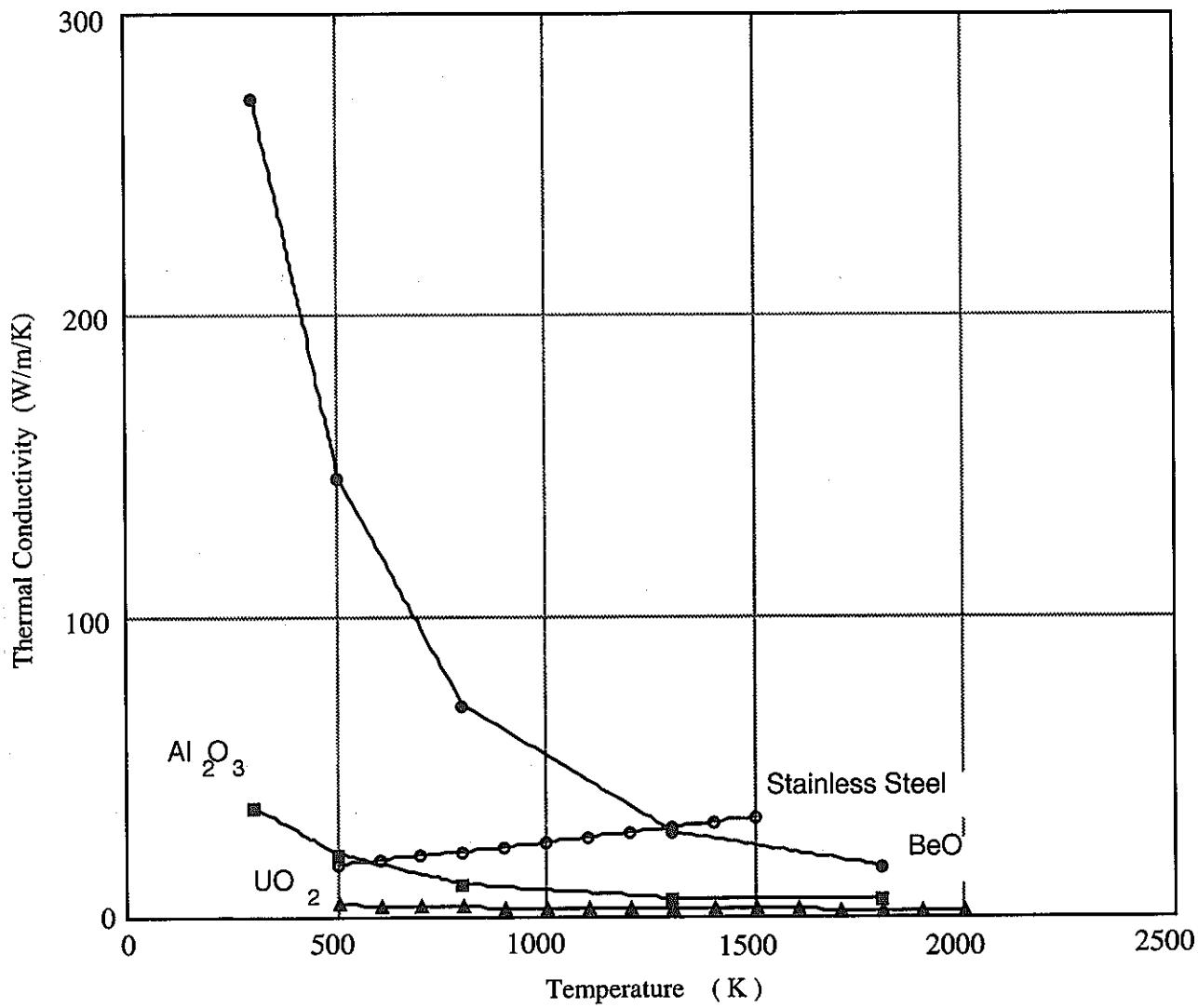
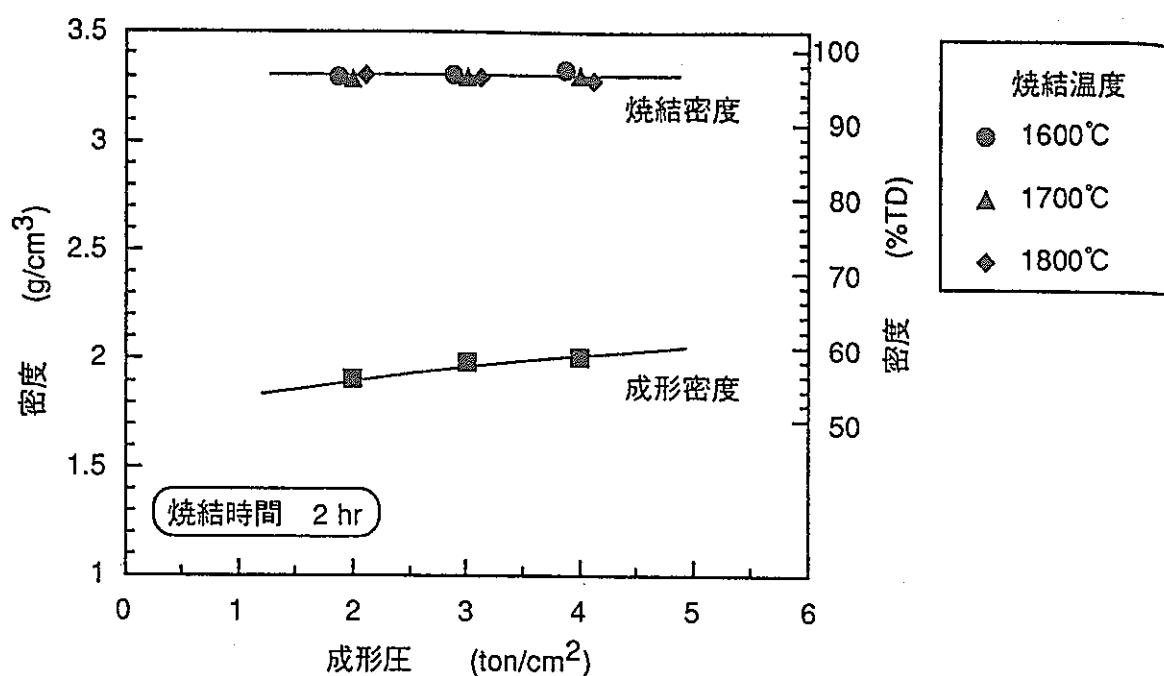
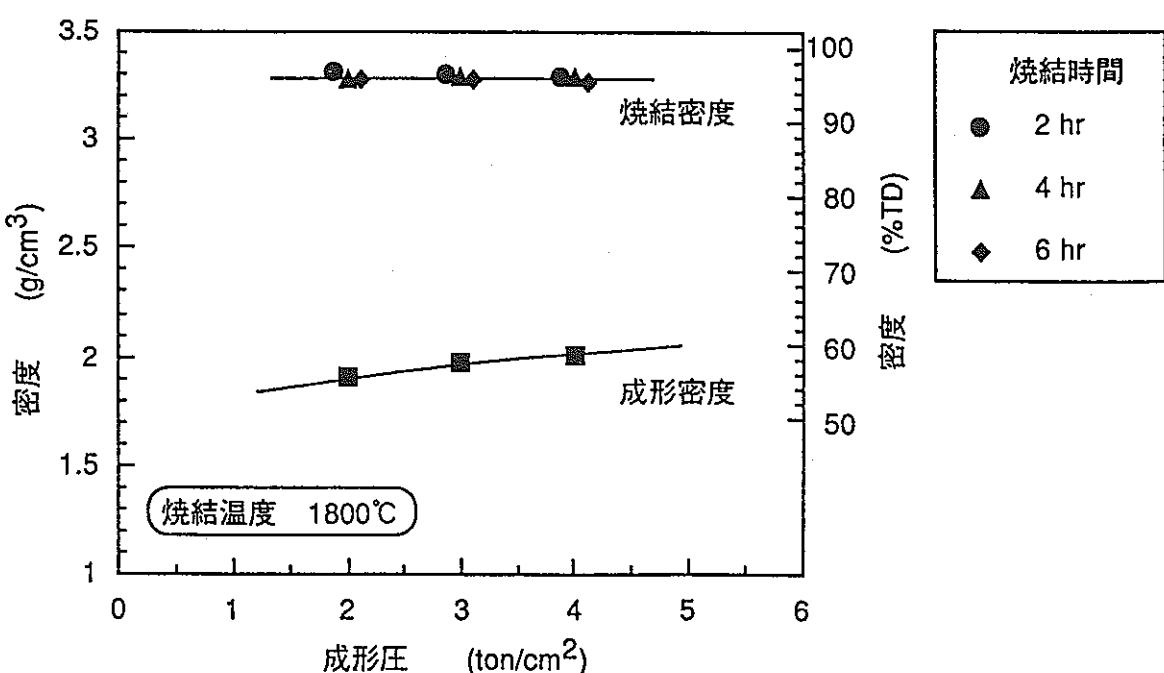


図4.3.3-1 酸化物の熱伝導度
(伝熱工学資料改4,ANL/RAS 81-16より)



(1) 成形圧、焼結温度依存性



(2) 成形圧、焼結時間依存性

図4.3.3-2 BeO-5vol%UO₂混合焼結体の密度

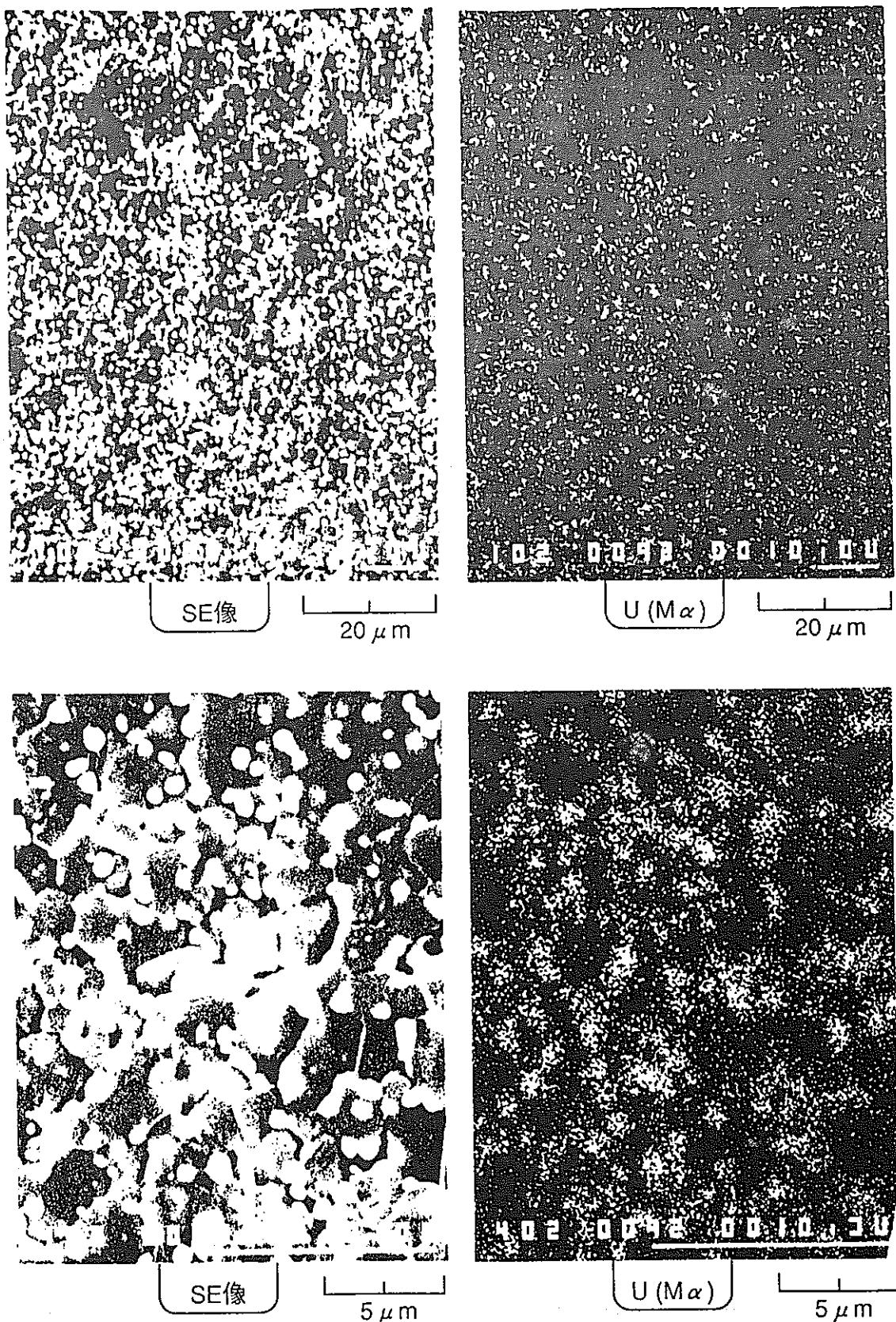


図4.3.3-3 湿式混合工程で作製したBeO-UO₂焼結体のEPMA結果

(BeO-5vol%UO₂、沈殿条件：40 gU/l、NH₃/U=7.5、
焙燒条件：650°C-2hr、焼結条件：1600°C-2hr)

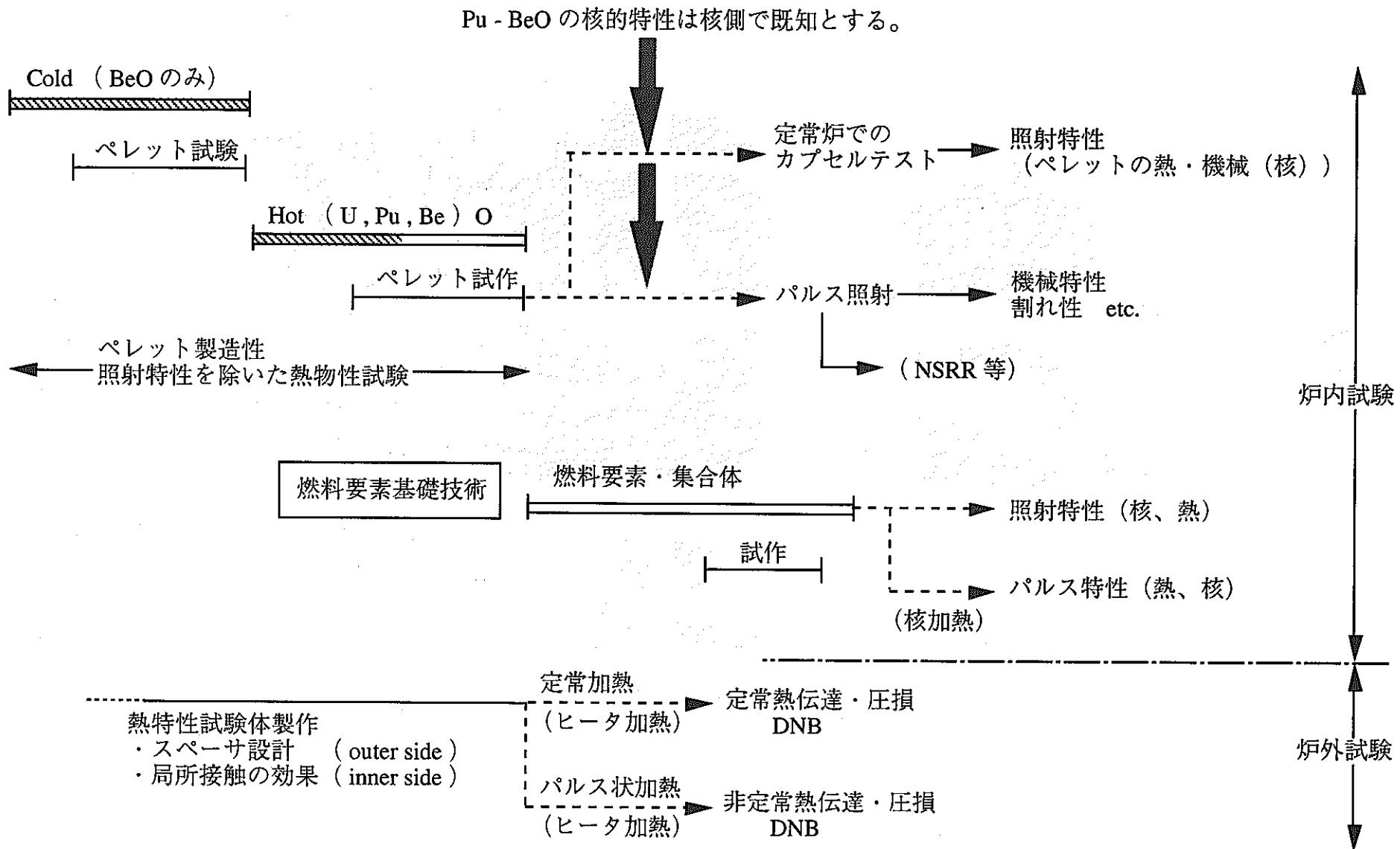
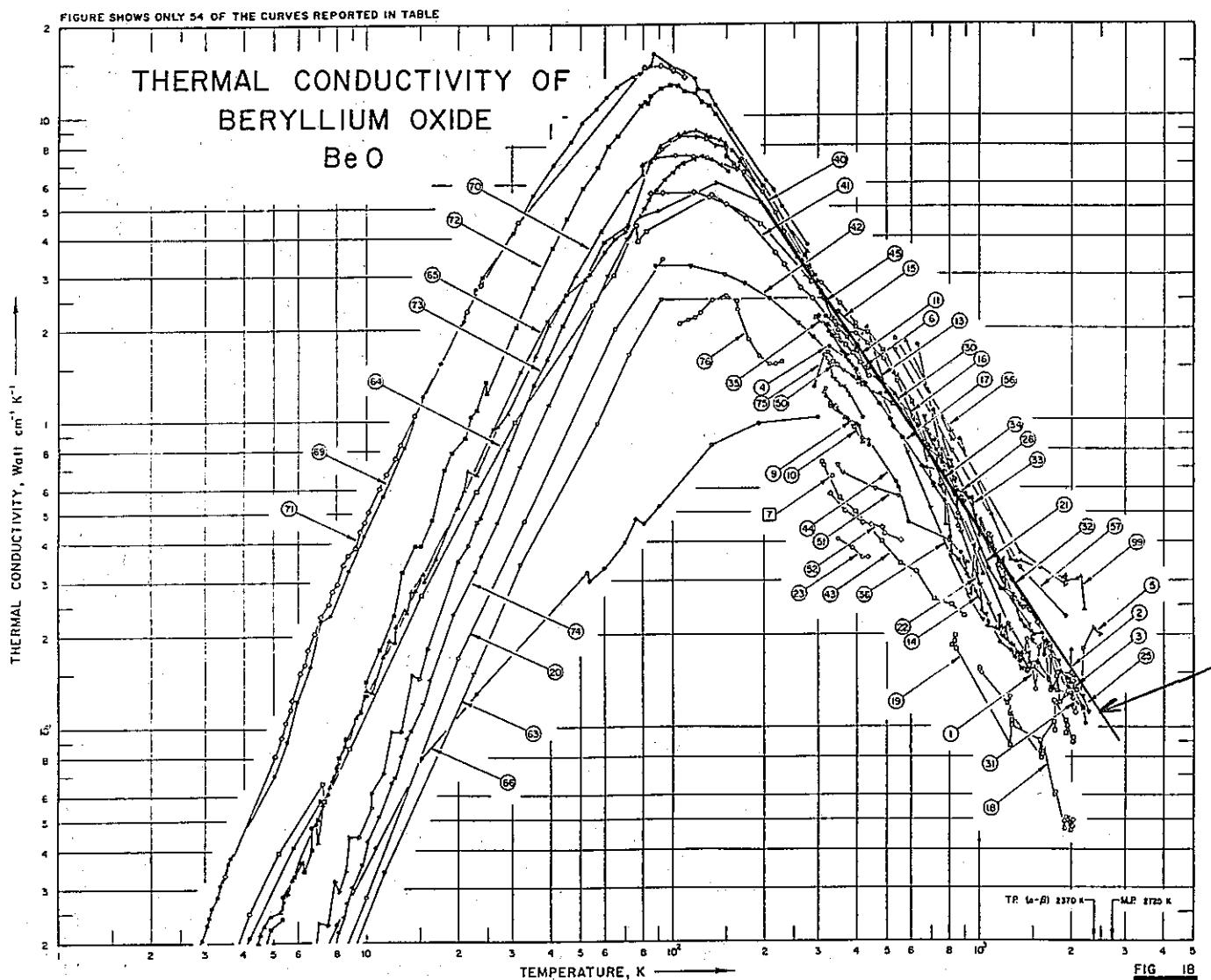


図4.3.3-4 SERAPH 燃料の研究開発スケジュール



温度 (K)	k TAC2D (W/cm.K)	k カタログ 95% TD (W/cm.K)
298	2.72	2.5
423	1.56	1.3

$k_{\text{BeO}} = -5.262 + 3.316 \times 10^4 / T + 1.474 \times 10^7 / T^2$
[W / m.K]

<解析コード (TAC2D) 入力式>

図4.3.3-5 BeOの熱伝導度

4.3.4 燃料移動計装

SERAPHの試験計装においては、圧力、流量、温度、音響等の計装や炉内中性子計装に加えて、溶融燃料挙動のメカニズム解明の観点から、燃料移動挙動そのものを映像化して観察する必要が生じる。ここでは、このような計装手法のうちで現在検討を進めている中性子ホドスコープシステムの技術的可能性についての検討状況をまとめることとする。

4.3.4.1 燃料の移動計測の方法

(1) 計測の必要条件、目標仕様

SERAPHにおける過渡試験時の試験燃料の移動挙動は、CABRI試験等の知見による類推から時定数が msec オーダーの極めて急速なものとなると予想されるため、計測の時間分解能に関して ~ msec 程度の性能が要求される。また、全試験時間は数秒から数分までと多様であることを考慮する必要がある。

一方、空間的には、単ピンの試験体から多数本ピンバンドル、さらには直徑 10 cm のプール体系に至るまでを包絡するため、観察視野として径方向に 10 cm 、軸方向に全燃料長 (~ 100cm) 以上、分解能として 1 cm 程度を目標としている。さらに、大型試験体の内部挙動（バンドル内の中心ピン破損やプール試験体内部のボイド挙動等）の観察を目的とするため強い内部可視性を有する必要がある。

(2) 具体的な計測法の例

燃料移動計測の例としては、軽水炉の分野においては石英管中の透明な冷却材を通した光学的な可視化により計測した例もあるが、ナトリウムを冷却材とした高速炉条件が対象の場合には、燃料から発生される中性子線や高エネルギー γ 線を計測するのが一般的である。このような放射線利用による燃料移動計測については、日本原子力研究所の NSRR の実験計装への適用が検討された経緯があり、有望な計測概念抽出のために広範な調査が行われている⁽⁶⁰⁾。

中性子を利用した計測法では中性子ホドスコープ、ピンホールカメラの原理を応用した中性子ラジオグラフ（一般に感度不足のため、時間分解能に問題）、CTスキャニングを応用した周方向中性子束多点計測等が挙げられる。

また、 γ 線計測による方法としては、coded aperture (格子スリット) を通過した γ 線をシンチレーション・カウンターにより検出した後に実像再生を行う CAIS システム (ACRR にて特性基礎試験の経験がある⁽⁶¹⁾、図 4.3.4-1 参照) 、 γ 線ホドスコープなどが挙げられる。一般に γ 線計測による手法は、物質の透過性の観点から高速中性子と比較すると内部可視性が低いが、Fe, Co, Ni 等の高エネルギーの二次 γ 線を検出し、燃料と区別してスティールを同定すること等に利用することが考えられる⁽⁶²⁾。

以下では、実際に CABRI⁽⁶³⁾ や TREAT^{(64) (65) (66)} 等の炉内過渡試験で実績を有し、時間・空間分解能の面で高い能力が期待される中性子ホドスコープについて、その技術的成立性を検討する。

4.3.4.2 中性子ホドスコープの概念

ホドスコープシステムの基本構成は、駆動炉心を貫いたスロット、スロットの出口に設置される多チャンネルのコリメータ、その背後において各チャンネルごとに取り付けられる中性子検出器、そしてデータ収録・処理系から成っている。スロットはコリメータの視野内から駆動炉心燃料を除去するために設けられており、通常、試験体をはさんだ対向側にも駆動炉心燃料除去領域（バックスロット）を設ける。コリメータは通常炉外に置かれ、各チャンネル（各検出器）の視野は互いに接しながら試験体の全面をカバーするよう設計される。

例として図4.3.4.2にCABRI炉の高速中性子ホドスコープを示す。試験体からの中性子信号は炉心に設けられたスロットによって引き出され、空間的に細分化（ 3×51 分割）された後コリメータによって検出器に導かれて計測される。

表4.4.4-1は各施設の中性子ホドスコープシステムについて基本仕様及び性能を比較したものである（SERAPHの欄については目標値）。TREATは水平方向の視野に関して、各チャンネルの視線が試験体手前で交差するいわゆる交差スリットタイプのコリメータであり、CABRIは視線の交点が試験体背後の非常に遠くに位置する平行スリットタイプである。SERAPHで目標としているように観察する全視野を増やすことあるいは空間分解能を上げることは、検出チャンネル数を大幅に増加させることになり、コリメータ背後への検出器の実装の点で技術的に難しい課題となる。

検出の時間分解能は試験体からの中性子の強度によって異なる。すなわち、一般にデータ収録のインターバルは信号量が多くなると短くなり、計測の統計誤差を適正化するように調整される（表に示している時間分解能はパルス運転時のものを示している）。検出器については、測定対象である試験燃料からの信号情報（核分裂高速中性子）と駆動炉心からのバックグラウンド（高速～熱中性子）を適切なしきい値でエネルギー弁別することが重要で、CABRIにおいては閾値400keVの²³⁷Np核分裂計数管と陽子反跳比例計数管が採用されている。陽子反跳比例計数管は、過渡直前までの比較的低レベル時における検出を目的に検出効率の高いものとして選ばれており、²³⁷Np核分裂計数管とともに広いダイナミックレンジを分担している。SERAPHの目標仕様としては、後に述べるように駆動炉心からの高い高速中性子バックグラウンドをできるだけ除外して検出するために、より高いエネルギーしきい値（約1MeV）反応を有する²³²Th核分裂計数管を想定している。また、低レベル用検出器の候補として、よりエネルギー依存特性の優れている⁴He反跳比例計数管を想定している。

4.3.4.3 SERAPHにおける中性子ホドスコープ

ここでは、以上の内容を踏まえ、SERAPHにおけるホドスコープシステムの計測環境を整理した後に、SERAPHホドスコープの成立性、達成性能に関する検討の現状について記述し、さらに現在想定しているシステム構成を紹介する。

(1) ホドスコープ計測の環境

SERAPHにおけるホドスコープシステムの計測環境を以下に整理しておく。

- ① SERAPH 駆動炉心は高速炉実機模擬度を上げる（大型試験体燃料中に一様な核分裂率分布を与える）ために、駆動スペクトルを硬い中性子スペクトルとしている。ホドスコープによる燃料移動計測の立場からは、このことは試験燃料の核分裂による信号（シグナル）と駆動炉心からの中性子（バックグラウンド）の弁別が困難となることを意味する。すなわち、S/N 比が低くなる。
- ② 試験燃料が既存過渡試験のものに比べ大型（直径10 cm のプール試験体等）であるために、試験体内における信号減衰が大きいという特徴を有する。すなわち、試験体内部の燃料分布状況の可視性が困難となる。
- ③ 試験燃料の移動による試験体周辺中性子場への影響が大きいことが挙げられる。ホドスコープによる計測においては、試験体周辺のバックグラウンドのみを検出するコリメータチャンネルを設け、その計数率を用いて試験体信号から過渡出力による変化分を差し引き、燃料移動の情報を分離する手法が通常採用されるが、この特性のため、過渡出力変化分のみを独立にキャンセルすることが困難となり、信号処理の面で問題となる。
- ④ 試験燃料が大型であることに起因して、シグナル中性子束の絶対値が高く検出器感度がある程度低くとも統計上十分な精度の計数が期待できる、という点が挙げられる。この特性により検出器の選択に幅を持たせることができる。

(2) SERAPH ホドスコープの特性・性能評価

SERAPH ホドスコープの特性・性能評価のために炉内中性子輸送透過計算を実施した。ここでは、現在までの計算結果の例を幾つか示し、上述のSERAPHホドスコープシステム構成上の各課題に対する現状の知見を整理して紹介する。

① 炉内中性子透過計算

表 4.4.3-2 に中性子透過計算の主要パラメータ（手法）を示す。計算は遮蔽計算コードDOT-3.5 を用い 2 次元 X-Y 体系にて実施している。TWOTRANコード（R-Z 体系）により核分裂密度分布、断面積を計算し、この結果を DOT-3.5 解析の入力データとして使用する。解析体系は、プール試験体系を基準ケースとし、試験体を構成する構造材壁の有無や試験体周囲の重水層の厚み等をパラメータとして様々に変えている。また、コリメータ方向に高い計算精度を得るために、試験体からスロット出口までの領域に細かな空間メッシュをとる必要がある。このためコリメータ・チャンネルの軸方向の狭い角度に対して角度分点の μ の第 1 レベルを 23 に詳細分割した非対称 114 分点を用いた（表 4.3.4-3）。核定数ライブラリーは中性子 22 群の CSRL ライブラリーであり（表 4.3.4-4）、0.1 MeV 以上の高速群に関して詳細な構造を採用了した。

② S/N 比

S/N 比の向上はデータの精度を確保するために是非とも必要とされる。その方策としては、シグナルをできる限り減衰させないで検出器に導くという観点から試験体壁構造の減量化、エネルギー弁別機能を強化するという観点から検出器のしきい値エネルギーのアップ、さらに駆動炉心のスペクトルを軟化させる等がある。

a. 試験体薄肉化

図 4.3.4-3 は、プール試験体体系（駆動炉心領域に $1 P_0$ 時の線源を設定し、他の領域は散乱のみを考慮）線源において壁構造を変化させた場合のスロット、コリメータ方向に関する角度中性子束 ($> 1 \text{ MeV}$) のトラバース曲線である。スロット方向へ向かうバックグランド中性子束は壁構造が存在するところで急峻に立上り、スロットへの入口における大きさは壁構造の厚さにはほとんど感度を持たないことがわかる。したがって、試験体領域での散乱成分に基づくバックグランド中性子束を、試験体によって薄肉化で低減させることは困難である。

次に、試験体の薄肉化がシグナル成分の減衰を緩和し、結果として S/N 比が向上することを示す。図 4.4.4-4 は評価計算に用いた解析体系を示す。バックスロット有りの SERAPH 炉心にプール試験体を装荷した体系において、るつぼ構造であるタンゲステン・トリア層、ニオブ・ジルコニア層、ジルコニウム層の吸収・散乱の有無の設定を計算ケースごとに変化させてシグナル及びバックグラウンドを評価した。解析ケースを以下に示す。

$T+Z+Zr$; 全ての壁構造を備えたケース

$T+Z$; ジルコニウム層を真空に置き換えたケース

T ; ジルコニウム層及びニオブ・ジルコニア層を真空に置き換えたケース
(リファレンス炉心構成に近い体系)

Z ; ジルコニウム層及びニオブ・ジルコニア層を真空に置き換え、タンゲステン・トリア層をニオブ・ジルコニア成分で置き換えたケース

B ; 試験体領域を真空に設定したケース

図 4.3.4-5 は、スロット出口位置における出口方向を向いた 1 MeV 以上の角度中性子束について、 $S+B$ （試験燃料領域及び駆動炉心領域に線源を設定した場合）、 B_0 （試験燃料を真空に設定した場合）の条件で各解析体系でプロットしたものである。これにより、 $1 P_0$ による定常照射時の健全試験燃料を観察する場合の対象となる中性子束が $S+B$ で評価され、試験燃料が欠損して無くなった場合の観察対象中性子束が B_0 で評価される。同図 (a) から、試験体のるつぼ壁構造を減ずるほど $S+B$ は増大すること、試験体のるつぼ壁構造を減じても B_0 はほとんど変化しない（当然、全く壁構造を無くすれば B_0 はゼロとなる）ことがわかる。したがって、同図 (b) に示したように $(S+B)/B_0$ は約 2 倍 (Z ケースの場合) に向上させることができる。このように、試験体を薄肉構造にすることでシグナルの減衰を抑制し S/N 比を向上させることができる。

b. 検出のエネルギー閾値の影響

図 4.3.4-6 は、前述の各解析ケースについてスロット出口位置における出口方向を向いた中性子束をエネルギーしきい値をパラメータとして計算した結果である。 $(S+B)/B_0$ はエネルギーしきい値が高いほど増加する傾向にあることが同図 (c) からわかる。これは検出エネルギーを高くすることにより、 $S+B, B_0$ の各々の計測中性子束の絶対値は落ちるもの、ややエネルギーの低い駆動炉心の散乱中性子（バックグランド）と核分裂スペクトルとの信号の分離が容易となるからである。したがって、MeV オーダーの高いエネルギーしきい値を有する核分裂計数管等を開発し、採用す

ることにより、シグナル/バックグラウンド弁別性能を向上させることができる。

c. 駆動炉心内側への重水層追加

スロット方向以外の試験体周囲に重水層を巻き、試験体に入射する中性子を減速させ、バックグラウンドのスペクトルを軟化させることにより S/N 比を向上させる方策について検討した。図 4.3.4-7 は、T ケースを基準として、駆動炉心燃料領域の内径を変えずジルコニウム炉壁-試験体壁間のギャップを減少し、その分重水層厚みを 2 cm から 7 cm まで変化させた解析ケースを示している。図 4.3.4-8 からわかるように、重水層を設定してその厚みを増していくにつれて、 $S+B$ 及び B_0 はともに減少する傾向にある。これは、炉心からの中性子が減速し 1 MeV 以上のバックグラウンドが低下するためである。一方、核分裂による信号は変化しないことから、両者の比 $(S+B)/B_0$ は増加する。また、エネルギーしきい値の影響に関しては、高いエネルギーしきい値でより高い比を示し、重水層による改善は著しくなる。

図 4.3.4-9 はプール試験体中心位置における中性子スペクトル分布状況を各解析ケースについて描いたものである。同図(a) は T ケースの $S+B$ 及び B_0 についてのものである。試験体に入射する中性子 (B_0) は減速されて低エネルギー側に移り、試験体から生成される中性子 ($S+B$) はスペクトルが硬い。同図(b) はプール試験体燃料に線源を設定した場合で、重水層厚みをパラメータとしたものであるが、試験体中心位置でのスペクトルには顕著な違いは見られない。つまり $S+B$ のスペクトルは重水層の厚みいかんに関わらずほとんど変化しないことがわかる。同図(c) はプール試験体燃料に線源を設定しない場合であるが、この図より、重水層を設定しその厚みを増すことによって試験体に流入してくる中性子のスペクトルの軟化が効果的になっていくことが理解される。このように、試験体周りに重水層を巻くことは S/N 比向上の方策として有効であることがわかった。

③ 内部可視性

SERAPHにおける試験体は比較的大型の燃料バンドルやプールを内蔵するものであるため、試験体中心部で発生した核分裂中性子は試験燃料自身により吸収減衰されてしまい、燃料移動情報としての検出が困難となる。以下、現状の評価結果について説明する。

a. 試験体における中性子、 γ 線減衰

図 4.3.4-10 に、試験体中心メッシュに点線源を設定した場合の中性子減衰曲線を示す。単ピン試験体の場合に比べプール試験体の場合のほうが試験体中のシグナル減衰が大きい。また、図 4.3.4-11 に 8 MeV 及び 10 MeV の高エネルギー γ 線の減衰曲線を示すが、径方向の各領域における減衰の度合は 8 MeV、10 MeV の違いに依らずあまり変わらないことがわかる。両図において試験体中心からの距離（横軸）5 cm の位置は、プール燃料の外周位置に相当するが、中心からの減衰率を計算してみると、1 MeV の高速中性子の場合に約 0.2、8 MeV の高エネルギー γ 線の場合に 0.03 となる。つまり、試験体内部可視性の観点からは、高速中性子の利用のほうが有利である。

b. プール内部ボイドの検出可能性

プール試験体の中心部にスティール蒸気泡によるボイド領域が形成された場合に、

その形状や大きさが検出できるか否かを検討した。図 4.3.4-12(a) は T+Z+Zr ケースでボイド半径をパラメータとした場合のスロット出口位置における中性子強度分布を示したものである。ボイド半径に関する有意な強度分布変化を読み取ることは困難、すなわち内部可視性が悪いことがわかる。T ケースについて同様の計算結果を示したのが同図 (b) である。薄肉化によって内部可視性は向上したもの、ボイド半径を同定するほど明瞭にはならなかった。現状のプール試験体体系における評価では、プール試験体内部の気泡検出（単気泡を仮定）は困難であるが、径方向平均信号の変化によるプール燃料密度軸方向変化の測定や液面の揺動のような境界検知の用途であれば可能性はあると考えられる。

④ バックグランド・キャンセル法

ホドスコープの検出器で検出され計数される信号 ($S + B$) は、試験体に投入されるエネルギー (P) に比例する成分が大半であり、これに燃料移動情報のシグナルが付加されたものとなっている。したがって、過渡試験中（投入エネルギーとして $P_0 \sim 100 P_0$ ）に試験体に投入されるエネルギーによる比例変化分をキャンセルする必要がある。このようなバックグランド・キャンセルの方法として、以下の 2 つの方式が挙げられる。

a. 平均炉出力による規格化

先行のTREATで採用されている方法で、ここでは過渡中の駆動炉心出力/試験体出力比を過渡前から一定とみなして、試験体出力の経時変化を駆動炉心出力の経時変化で近似するが、過渡中の制御棒移動による径方向出力分布の変化（カップリング係数の変化）等を評価できないため精度が落ちるという難点がある。

b. 試験体周辺中性子場による規格化

CABRIで実施されている方法で、ここではコリメータのチャンネルの縦一列を試験燃料を直接見込まない試験燃料近傍に向けておき、バックグランド測定用として使用するものである。試験燃料を駆動する中性子場の変化を直接測定するため、カップリング係数の変化があっても測定できる利点がある。

図 4.3.4-13 は、前項の③-b. と同様の体系でスロット幅のみを 12 cm に広げた場合のスロット出口位置での中性子束強度分布を示したものであり、 $\pm 5 \text{ cm}$ より外の位置で試験燃料を直視しないチャンネル（バックグランド測定用チャンネル；6 ch.）での中性子束強度が測定できる。同図から、 $\pm 6 \text{ cm}$ 位置における中性子束強度は、試験燃料内のボイド半径の変化（試験燃料の量）に影響されていることがわかる。すなわち、SERAPHホドスコープにおけるバックグラウンド・チャンネルによるキャンセル法においては、試験体容積が大きく、試験燃料の量の変化の影響を受けることから、単純に過渡出力増加による信号増をキャンセルすることは困難である。

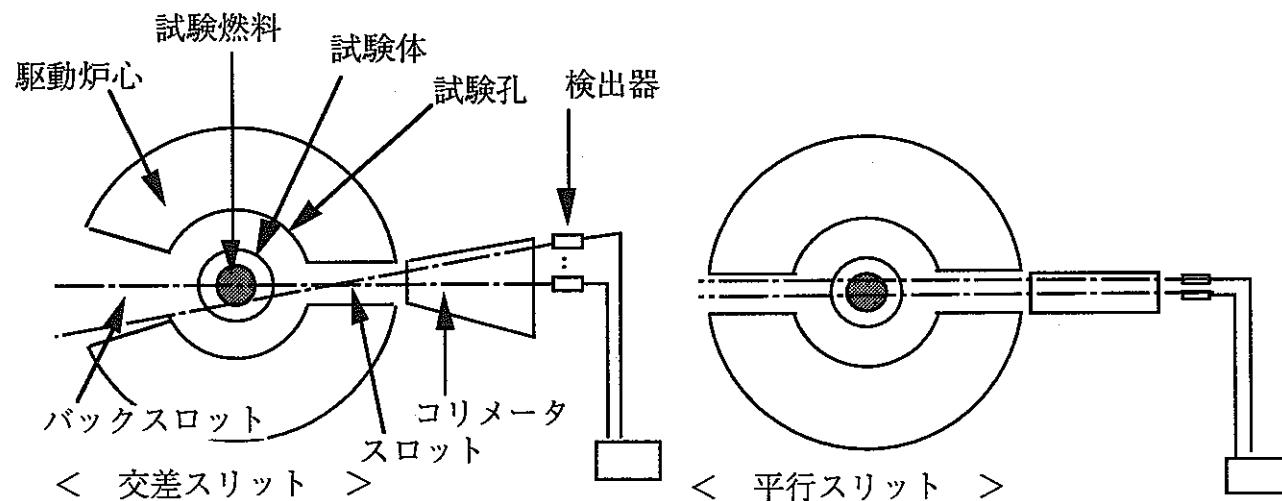
図 4.3.4-14 は、ボイド半径の変化に伴う中心チャンネル (0 ch.) 及びバックグランド・チャンネル (6 ch.) の信号変化量を調べたものである。0ch.の信号変化はボイド半径に対して高い感度で変化する方が良く、6ch.はその逆で、感度の低い方（フラット）が良い。同図 (a) は前述の T+Z+Zr ケース、(b) は T ケースであり、両者の比較から、0 ch. の感度は薄肉壁構造の場合のほうが高く、6 ch. の感度は若干薄肉壁構造のほ

うが低いことがわかる。両者の比は $(S + B) / B (= S / B + 1)$ を示し、炉出力の変化によらない値となり、 S / B が試験燃料移動の情報を与えることになる。また、(a)と(b)を比較すると、バックグランド測定による補正を考慮した場合も薄肉壁構造の場合の方が有利である (S / B が大きい) ことがわかる。

(3) システム構成に関する検討

SERAPHホドスコープシステムを構成する場合には、上述の特性以外に、スロット等の設置による駆動炉心の核的特性へのインパクトや検出器の配列・実装性、コリメータ内の隣接チャンネル効果（散乱成分の流入による影響）等を考慮しなければならない。これらの比較とシステム構成の概念図を以下に示す。

	交差スリット体系	平行スリット体系
炉心核特性	バックスロットの影響大	バックスロットの影響小
検出部配置等	コリメータ後面の検出器配置、隣接 $c\ h$ からの流入の問題が少ない	コリメータ後面の検出器配置が困難、隣接 $c\ h$ からの散乱成分の流入が多い



交差スリット方式では、バックスロットを設ける場合、図のように比較的大きな容積のものとする必要があり、駆動炉心性能に多大な影響を及ぼす。したがって、炉心性能維持の観点からは交差スリットは好ましくない。一方、検出器の実装性及び隣接チャンネルからの散乱中性子成分の流入を防ぐという観点からは、コリメータ背後に検出器実装空間が得やすい交差スリットが望ましい。したがって、現状のSERAPHホドスコープシステムの検討では、バックスロット無しで交差スリットを採用する設計とバックスロット有りで平行スリットを採用する設計を候補としている。前者の場合、試験体に対してホドスコープと対向側の駆動炉心燃料直視によるバックグランドを抑制することが課題となる。後者の場合、検出器の実装性を向上させるために検出器の小型化検討や隣接チャンネル効果削減のためにチャンネル配列の工夫、コリメータ材質についての考慮等が必要となる。

現状の知見では、幅 10 cm のスロットを 1 本設置することに伴う反応度低下は約 2 %

$\Delta K/K/\text{slot}$ である。これを駆動炉心の径（炉出力）増大で補償する場合、 P_0 出力時に必要とされる駆動炉心出力は 1 スロットを設ける場合に約 1.3 倍に、2 スロットを設ける場合に約 2.1 倍になる。また、10 cm のプール試験体の観察のために 10 cm のスロットと平行スリットのコリメータを想定しているが、現実的な検出器の大きさ（実装空間）を考慮すると、チャンネル数の削減（現状の 10 チャンネルから 8 チャンネルへ）を想定する必要がある。隣接チャンネルからの流入中性子割合は交差スリットの場合 3.4 %、平行スリットの場合には 13.5 % というように、交差スリットの設計ではチャンネル間に比較的厚い金属物質層を存在させることができると有利な結果が得られている。

バックスロットの有無と試験体壁構造の厚さの効果の関係について検討したのが図 4.3.4-15 である。図から、バックスロットが無い場合には、試験体が有っても ($S+B$)、無くても (B_0) 信号の差が少ないとわかる。 $(S+B)/B_0$ 比はほぼ 1 となり、これは燃料の有無を検知できないことを意味する。このことは、試験体を薄肉化するとますます顕著になる。要するに、試験燃料が無くなると試験燃料背面の駆動炉心部の中性子が直接計測されるのでバックグラウンドが大きくなり、信号差が出ないことを示している。

バックスロットの有無と試験体周囲への重水層追加の効果の関係について検討したのが図 4.3.4-16 である。重水層追加によって試験体燃料に注入される中性子のエネルギースペクトルは軟化するため、1 MeV をしきい値とした $S+B$ 及び B_0 の絶対値はバックスロットの有無に関わらず減少する。注目すべきは B_0 の落ち方の違いであり、バックスロットが無い場合には試験体背後からのバックグラウンド中性子の軟化が非常に効果的に効き、 B_0 を低減する。したがって、S/N 特性に直して同図 (b) に示したように、バックスロットが無い場合でも重水層追加により S/N 比はバックスロット有りの特性に近付くことがわかる。

以上から、システム構成に対する現状の判断としては、下表に示すような組合せとなる。これによると、S/N 比の改善が十分に達成できれば、交差スリット、バックスロット無し、重水層追加が適切な組合せとなる。

システム構成の検討結果（括弧内は 5 段階評価点数）

	核的特性	検出系配置制約	信号特性 (S/N)	
平行スリット	・バックスロット有	△ (3)	△ (3)	○ (5)
	・バックスロット無	○ (5)	△ (3)	×
	・バックスロット無 +重水層	○ (4)	△ (3)	△ (3)
交差スリット	・バックスロット有	×	○ (5)	○ (5)
	・バックスロット無	○ (5)	○ (5)	×
	・バックスロット無 +重水層	○ (4)	○ (5)	△ (3)

核的特性 ; スロットを設置することによる炉心固有値の低下
 検出側のスロットのみであれば、平行スロット／交差スロットとも同じ影響
 バックスロットによる影響は 交差スリット > 平行スリット

検出系配置制約 ; 検出器の空間配置と隣接チャンネル効果
 信号特性(S/N) ; バックスロット有無、重水層によるバックグラウンド抑制条件での S/N 比

(4) 今後の研究開発課題

中性子ホドスコープに関する今後の研究開発課題は、

- ・燃料形状対ホドスコープ信号マップの詳細化（特にバンドル体系の中心燃料ピン溶融移動、ブランケット部への燃料侵入の試験の場合のマップ）
- ・高速中性子検出器の開発（しきい値エネルギー特性や小型化の検討）
- ・コリメータ等の複雑体系における中性子透過解析手法の高度化
- ・高速中性子場における少数チャンネルコリメータを用いた特性確認試験

であり、これらを実施しながら最適なシステム構成を模索する。

高速中性子検出器の開発検討に関しては、図 4.3.4-17 に示したように、 ^{232}Th は ^{237}Np よりも若干検出感度が落ちると予想されるが、1 MeVから2 MeVの間の高いエネルギーに核分裂反応のしきい値を有しており、SERAPH ホドスコープシステムを構成する検出器のために有望な電極塗布物質であると考えている。 ^{232}Th を用いた核分裂計数管については仕様及びその成立性、予測性能の検討に着手したところである。

その他、燃料と識別してスティールを検出する手段としての高エネルギー γ 線（特に7.6 MeVの鉄の特性 γ 線）を利用したホドスコープ概念の成立性の検討（高エネルギー分解能計測）や試験体周辺中性子場の詳細測定による燃料移動補助情報の取得可能性に関する検討等を実施する必要がある。

4.3.4.4 燃料移動計装検討のまとめ

SERAPH燃料（スティール）移動計装に関する検討は、炉内中性子及び γ 線の輸送透過計算やコリメータ、検出器等のホドスコープシステム構成機器設計研究等について 1991 年より着手しており、現在までに以下のようないし見が得られている。

- (1) SERAPH体系における中性子ホドスコープの性能向上は、試験体の軽量化（壁構造の薄肉化）、検出中性子の高エネルギー化、駆動炉心スペクトルの軟化等によって、結合係数を劣化させずに達成できる。
- (2) プール試験体内の中性子減衰により試験体の内部可視化は困難であるが、軸方向密度分布の観察によるボイド率分布測定や液面揺動の検出に関しては可能性がある。
- (3) プール試験体近傍のバックグラウンド測定チャンネルの設定には、試験体内部の燃料移動による影響を受けにくいよう、試験体からの距離、検出エネルギーしきい値に留意する必要がある。
- (4) システム構成としては、炉心核特性への影響、検出器実装性等を考慮すると交差スリットでバックスロット無しとするのが最も適当であるが、バックグラウンドを許容できる範囲までに抑えるためには駆動炉心スペクトルの適正な軟化等が必要であり、最適なシステム構成の検討が今後とも必要である。

表4.3.4-1 中性子透過計算主要パラメータ

	TREAT	CABRI	SERAPH (目標)
最大観察幅 鉛直方向	1.2m	1.0m	1.5m
水平方向	7cm	3cm	10cm
観察領域分割数 (スリット本数, 検出チャンネル数)	360 (10×36)	153 (3×51)	1500 (10×150)
水平方向移動分解能	0.2mm(min)	0.2mm	—
鉛直方向移動分解能	6mm	2mm	—
1ウインド当たりの視野 (巾×高さ)	(7mm × 34mm)	(10.2mm × 20.4mm)	(10mm × 10mm)
データ収録インターバル (時間分解能)	0.1msec(min) 2msec(typ)	1msec	0.1msec
連続収録時間 (インターバル積分)	8000 intervals 3600sec	9000sec	15000sec(max)
検出器タイプ	Hornyak Button + Proportional-Counter	^{237}Np -FC + Proton Recoil Counter	^{232}Th -FC + ^4He Recoil Proportional Counter

表4.3.4-2 中性子透過計算の主要パラメータ

項目	計算手法及び計算条件
計算コード	D O T - 3.5
解析理論	2次元輸送計算
計算体系	2次元X Y体系
核定数ライブラリー	C S R L ライブラリー (中性子 22群) (表4.3.4-4 参照)
角度分点数	非対称 114分点 (μ 第1レベルを23分割) (表4.3.4-3 参照)
非等方散乱近似	P 3 近似
メッシュ分割	1／2-X Y体系 34×68メッシュ 1／1-X Y体系 68×68メッシュ
線源条件	ドライバー燃料部ないしは試験体燃料部
境界条件	1／2-X Y体系 左：反射 それ以外：真空 1／1-X Y体系 全て真空
収束判定条件	各メッシュ点の中性子束の最大誤差が1%以下

表4.3.4-3 2次元計算用の非対称S114分点

分点	μ	η	重み	分点	μ	η	重み
1	-0.3086067	-0.9511898	0	58	-0.1008868	0.99489790	0
2	-0.2182179	-0.9511898	0.03024691	59	-0.0713378	0.99489790	0.00049491
3	0.2182179	-0.9511898	0.03024691	60	0.0713378	0.99489790	0.00049491
4	-0.6172134	-0.7867958	0	61	-0.1203885	0.99272686	0
5	-0.5773503	-0.7867958	0.02268519	62	-0.0851275	0.99272686	0.00059058
6	-0.2182179	-0.7867958	0.02268519	63	0.0851275	0.99272686	0.00059058
7	0.2182179	-0.7867958	0.02268519	64	-0.1398438	0.99017358	0
8	0.5773503	-0.7867958	0.02268519	65	-0.0988845	0.99017358	0.00068602
9	-0.8164966	-0.5773503	0	66	0.0988845	0.99017358	0.00068602
10	-0.7867958	-0.5773503	0.02268519	67	-0.1592453	0.98723906	0
11	-0.5773503	-0.5773503	0.02314815	68	-0.1126034	0.98723906	0.0007812
12	-0.2182179	-0.5773503	0.02268519	69	0.1126034	0.98723906	0.0007812
13	0.2182179	-0.5773503	0.02268519	70	-0.1785855	0.98392439	0
14	0.5773503	-0.5773503	0.02314815	71	-0.1262791	0.98392439	0.00087608
15	0.7867958	-0.5773503	0.02268519	72	0.1262791	0.98392439	0.00087608
16	-0.9759001	-0.2182179	0	73	-0.1978570	0.98023087	0
17	-0.9511898	-0.2182179	0.03024691	74	-0.1399061	0.98023087	0.00097062
18	-0.7867958	-0.2182179	0.02268519	75	0.1399060	0.98023087	0.00097062
19	-0.5773503	-0.2182179	0.02268519	76	-0.2170524	0.97615993	0
20	-0.2182179	-0.2182179	0.03024691	77	-0.1534792	0.97615993	0.00106478
21	0.2182179	-0.2182179	0.03024691	78	0.1534792	0.97615993	0.00106478
22	0.5773503	-0.2182179	0.02268519	79	-0.2361642	0.97171319	0
23	0.7867958	-0.2182179	0.02268519	80	-0.1669933	0.97171319	0.00115854
24	0.9511898	-0.2182179	0.03024691	81	0.1669933	0.97171319	0.00115854
25	-0.0030040	0.9999955	0	82	-0.2551851	0.96689224	0
26	-0.0021241	0.9999955	2.895E-06	83	-0.1804431	0.96689224	0.00125185
27	0.0021241	0.9999955	2.895E-06	84	0.1804431	0.96689224	0.00125185
28	-0.0068958	0.9999762	0	85	-0.2741077	0.96169901	0
29	-0.0048760	0.9999762	6.739E-06	86	-0.1938234	0.96169901	0.00134468
30	0.0048760	0.9999762	6.739E-06	87	0.1938234	0.96169901	0.00134468
31	-0.0108102	0.9999416	0	88	-0.2929248	0.95613545	0
32	-0.0076440	0.9999416	1.0589E-05	89	-0.2071291	0.95613545	0.00143699
33	0.0076440	0.9999416	1.0589E-05	90	0.2071291	0.95613545	0.00143699
34	-0.0147297	0.9998915	0	91	-0.3116291	0.95020384	0
35	-0.0104155	0.9998915	1.4439E-05	92	-0.2203550	0.95020384	0.01855077
36	0.0104155	0.9998915	1.4439E-05	93	0.2203550	0.95020384	0.01855077
37	-0.0186509	0.9998261	0	94	-0.6172134	0.78679579	0
38	-0.0131882	0.9998261	1.8289E-05	95	-0.5773503	0.78679579	0.02268519
39	0.0131882	0.9998261	1.8289E-05	96	-0.2182179	0.78679579	0.02268519
40	-0.0225728	0.9997452	0	97	0.2182179	0.78679579	0.02268519
41	-0.0159614	0.9997452	2.2139E-05	98	0.5773503	0.78679579	0.02268519
42	0.0159614	0.9997452	2.2139E-05	99	-0.8164966	0.57735026	0
43	-0.0264949	0.9996489	0	100	-0.7867958	0.57735026	0.02268519
44	-0.0187347	0.9996489	2.5988E-05	101	-0.5773503	0.57735026	0.02314815
45	0.0187347	0.9996489	2.5988E-05	102	-0.2182179	0.57735026	0.02268519
46	-0.0304169	0.9995373	0	103	0.2182179	0.57735026	0.02268519
47	-0.0215080	0.9995373	2.9837E-05	104	0.5773503	0.57735026	0.02314815
48	0.0215080	0.9995373	2.9837E-05	105	0.7867958	0.57735026	0.02268519
49	-0.0421809	0.9991100	0	106	-0.9759001	0.21821791	0
50	-0.0298264	0.9991100	0.0002069	107	-0.9511898	0.21821791	0.03024691
51	0.0298264	0.9991100	0.0002069	108	-0.7867958	0.21821791	0.02268519
52	-0.0617753	0.9980901	0	109	-0.5773503	0.21821791	0.02268519
53	-0.0436817	0.9980901	0.00030303	110	-0.2182179	0.21821791	0.03024691
54	0.0436817	0.9980901	0.00030303	111	0.2182179	0.21821791	0.03024691
55	-0.0813466	0.9966859	0	112	0.5773503	0.21821791	0.02268519
56	-0.0575207	0.9966859	0.00039905	113	0.7867958	0.21821791	0.02268519
57	0.0575207	0.9966859	0.00039905	114	0.9511898	0.21821791	0.03024691

表4.3.4-4 CSRLライブラリーの中性子エネルギー22群構造及び核分裂スペクトル

エネルギー群番号	エネルギー範囲 (eV)	核分裂スペクトル
1	$2.0000 \times 10^7 \sim 6.4340 \times 10^6$	2.5619×10^{-2}
2	$6.4340 \times 10^6 \sim 3.0000 \times 10^6$	2.0196×10^{-1}
3	$3.0000 \times 10^6 \sim 1.3560 \times 10^6$	3.5342×10^{-1}
4	$1.3560 \times 10^6 \sim 8.2000 \times 10^5$	1.7574×10^{-1}
5	$8.2000 \times 10^5 \sim 4.9952 \times 10^5$	1.1141×10^{-1}
6	$4.9952 \times 10^5 \sim 3.3000 \times 10^5$	5.5859×10^{-2}
7	$3.3000 \times 10^5 \sim 1.0000 \times 10^5$	6.2019×10^{-2}
8	$1.0000 \times 10^5 \sim 4.5000 \times 10^4$	9.6573×10^{-3}
9	$4.5000 \times 10^4 \sim 1.7000 \times 10^4$	3.3047×10^{-3}
10	$1.7000 \times 10^4 \sim 3.7400 \times 10^3$	9.0981×10^{-4}
11	$3.7400 \times 10^3 \sim 2.2000 \times 10^3$	5.7788×10^{-5}
12	$2.2000 \times 10^3 \sim 3.0500 \times 10^2$	4.5101×10^{-5}
13	$3.0500 \times 10^2 \sim 7.6000 \times 10^1$	2.1512×10^{-6}
14	$7.6000 \times 10^1 \sim 2.7500 \times 10^1$	2.3910×10^{-7}
15	$2.7500 \times 10^1 \sim 1.0000 \times 10^1$	5.1936×10^{-8}
16	$1.0000 \times 10^1 \sim 4.0000 \times 10^0$	1.0897×10^{-8}
17	$4.0000 \times 10^0 \sim 1.3000 \times 10^0$	3.0066×10^{-9}
18	$1.3000 \times 10^0 \sim 3.2500 \times 10^{-1}$	5.9827×10^{-10}
19	$3.2500 \times 10^{-1} \sim 1.0000 \times 10^{-1}$	7.0880×10^{-11}
20	$1.0000 \times 10^{-1} \sim 3.0000 \times 10^{-2}$	1.2190×10^{-11}
21	$3.0000 \times 10^{-2} \sim 1.0000 \times 10^{-2}$	1.9356×10^{-12}
22	$1.0000 \times 10^{-2} \sim 1.0000 \times 10^{-5}$	4.6127×10^{-13}

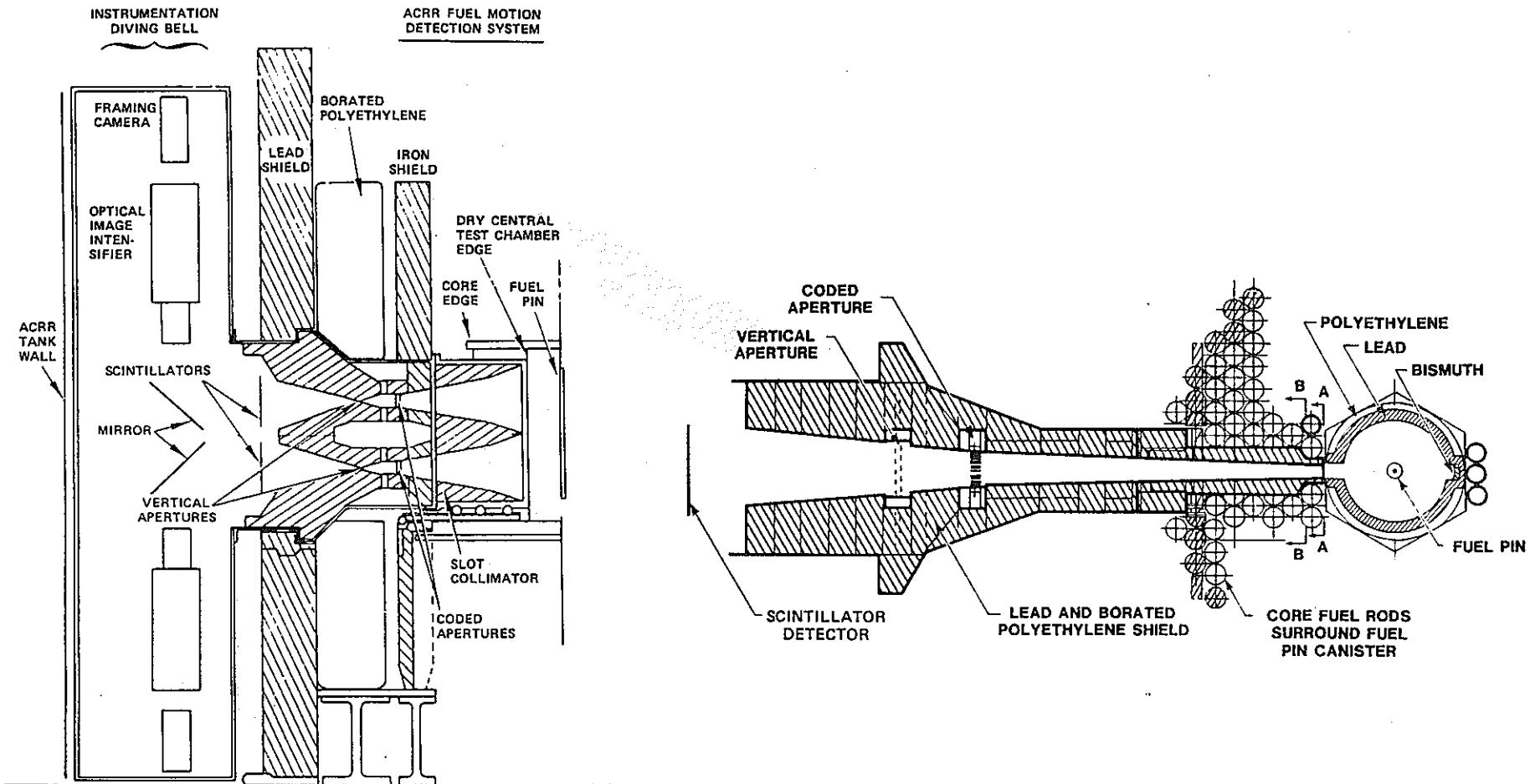


図4.3.4-1 燃料移動計装システムの例 (ACRRにおけるCAISシステム)

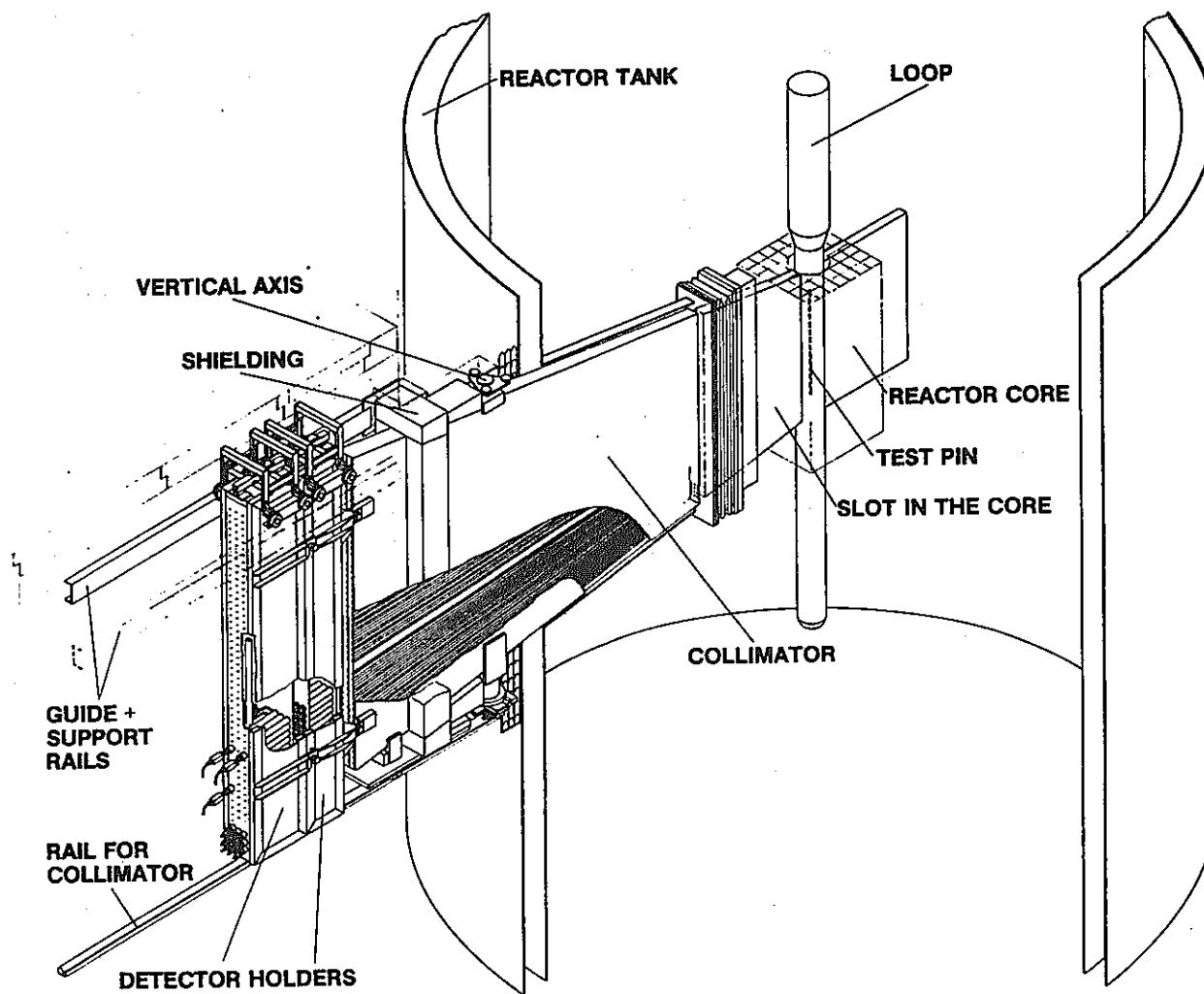
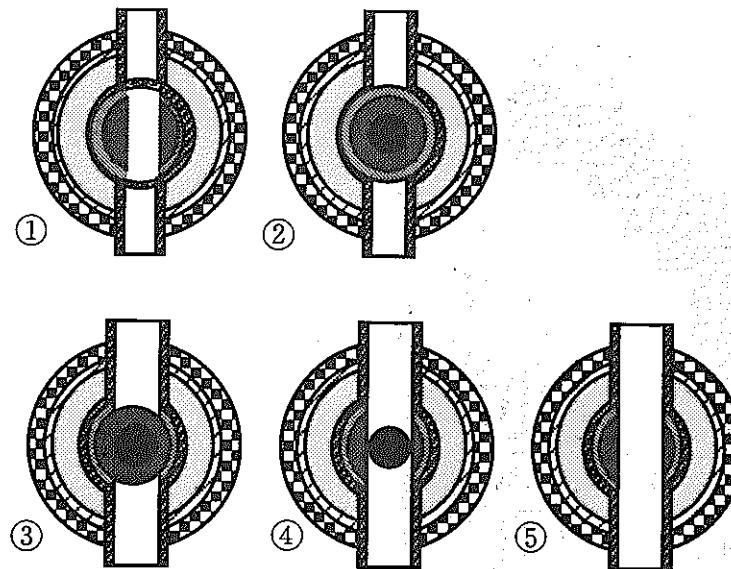


図4.3.4-2 CABRI炉の高速中性子ホドスコープ

凡例	
■ プール燃料	□ ドライバー燃料
■ ThO ₂ , W	□ 径方向反射体
■ ZrO ₂ , Nb, He, SUS	■ D ₂ O
■ Zr壁	□ 真空



(a) 解析体系

東京電機大学の中性子源実験装置 (構造圖)

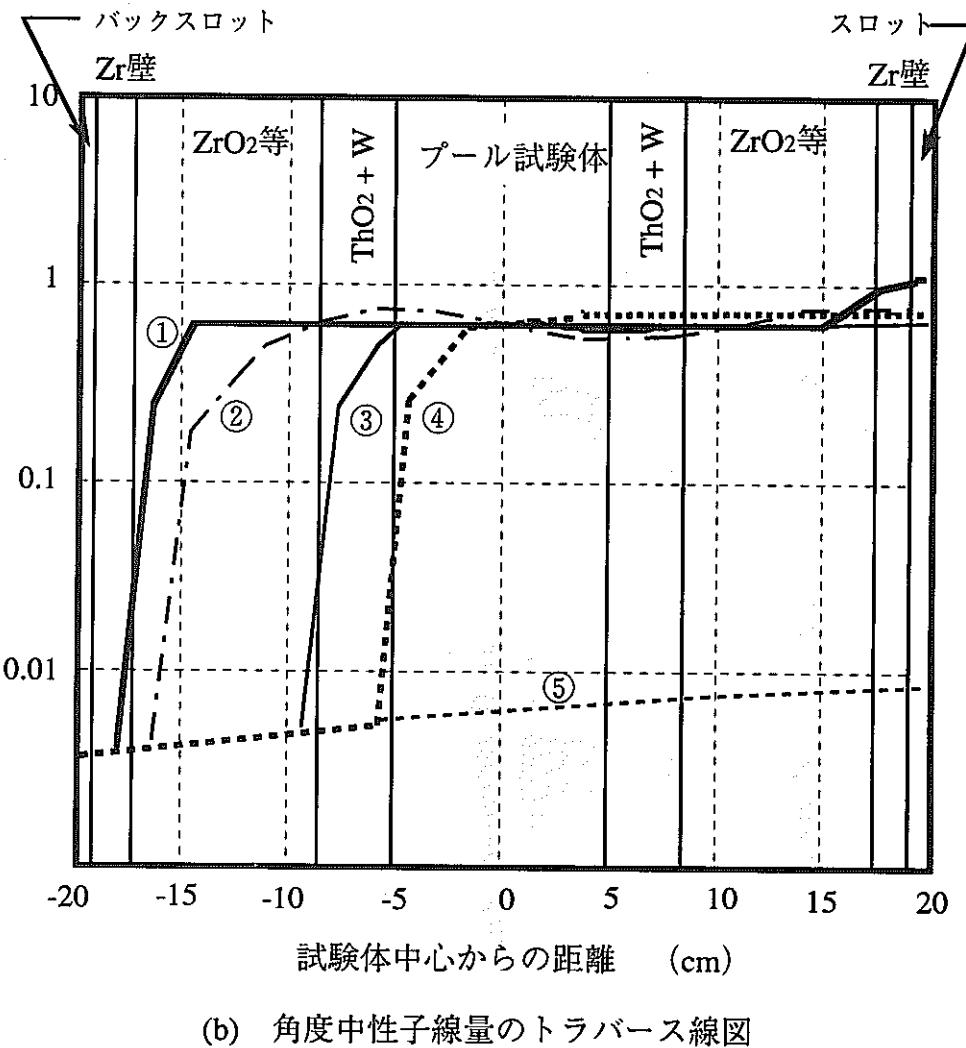


図 4.3.4-3 試験体周りからの散乱中性子線の影響

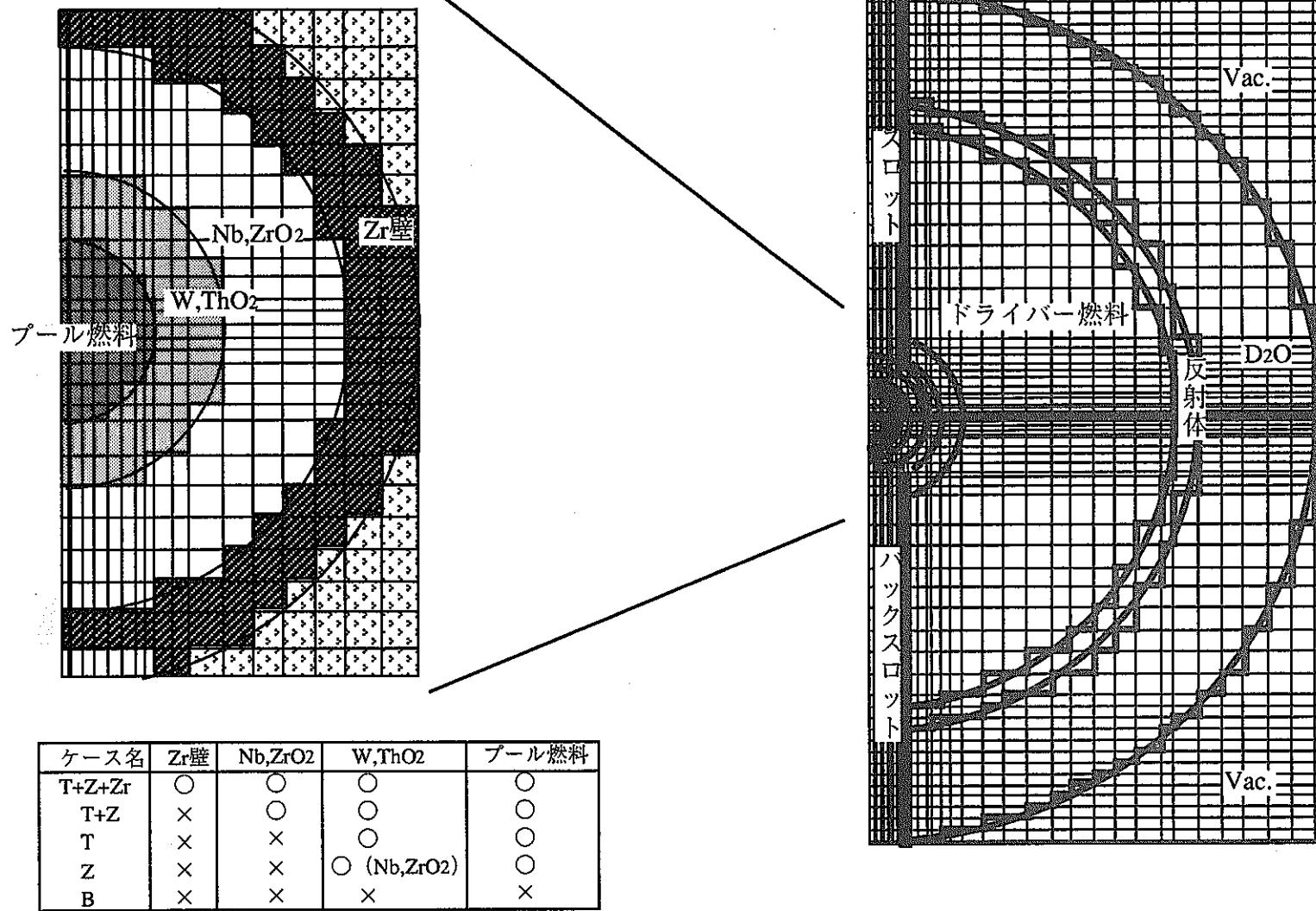
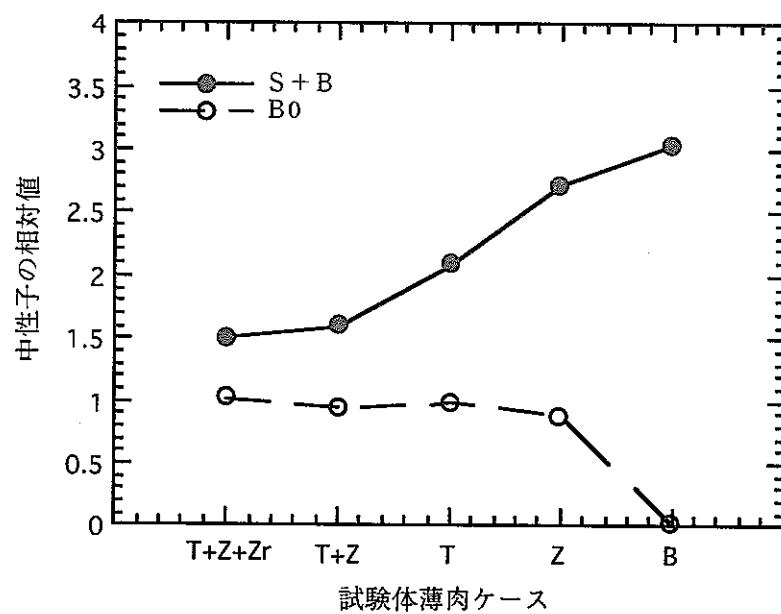
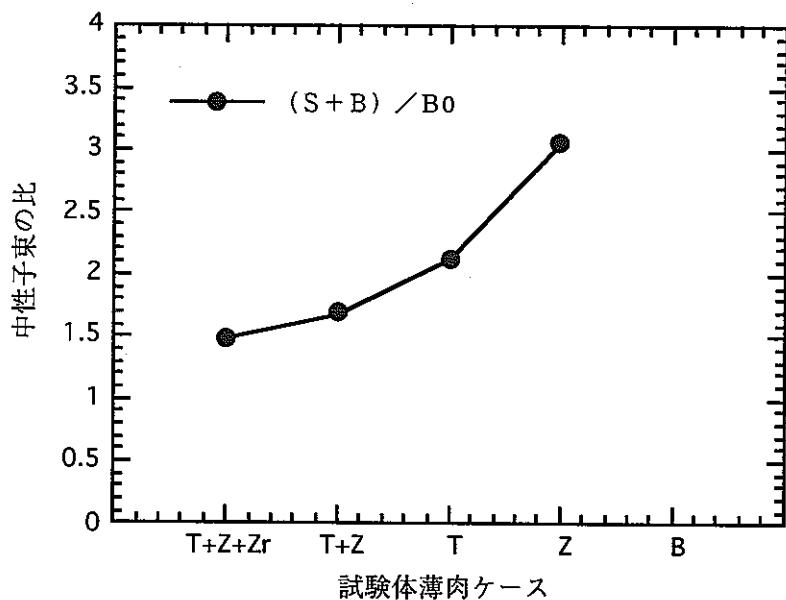


図4.3.4-4 試験体構造の薄肉化

スロット出口位置での角度中性子束による体系依存傾向図



(a) 1 MeV以上のS+B及びB0



(b) (S+B) / B0比

図4.3.4-5 試験体薄肉化による信号／バックグラウンド比

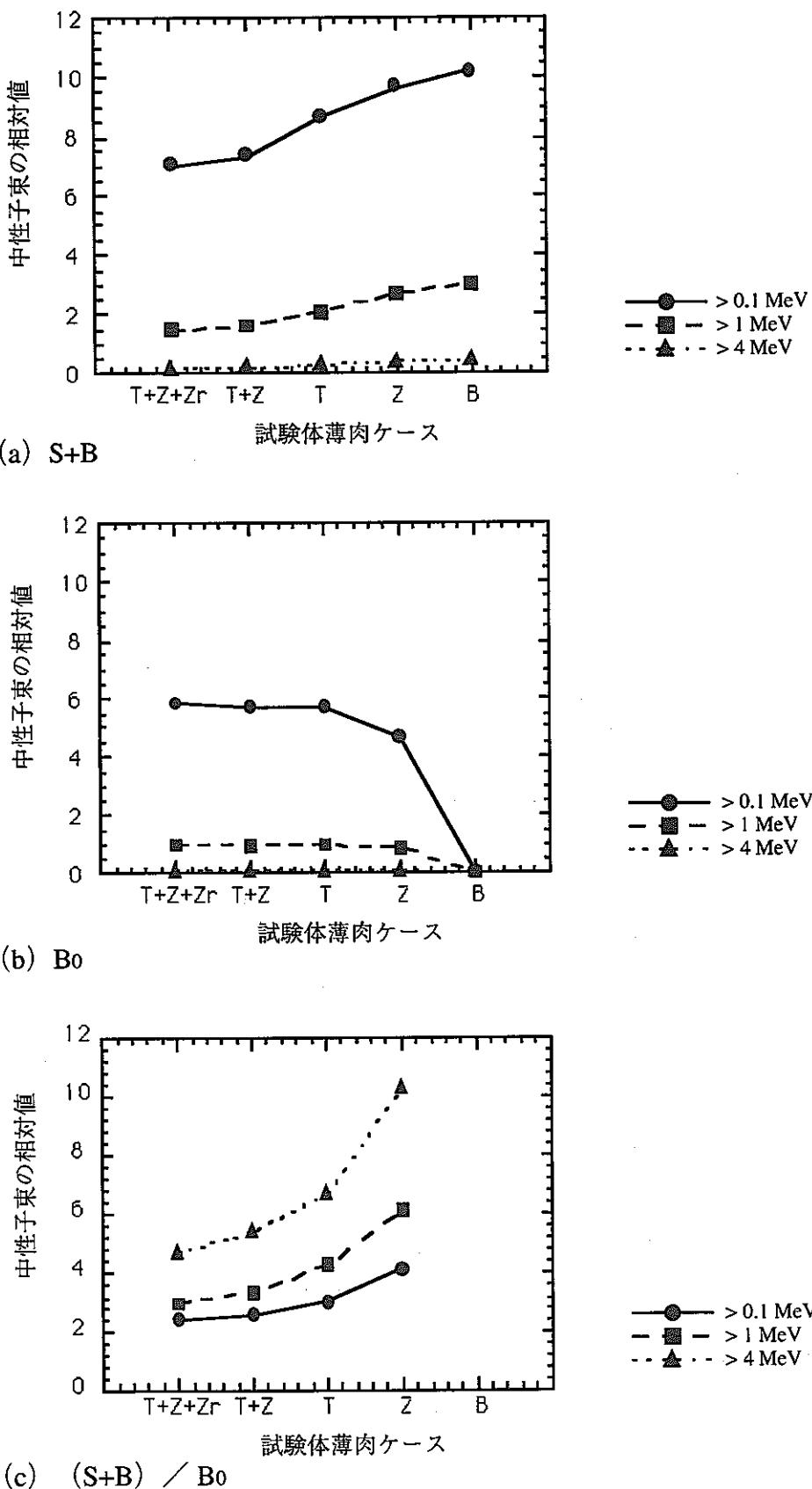


図4.3.4-6 信号／バックグラウンド比の検出エネルギー依存性

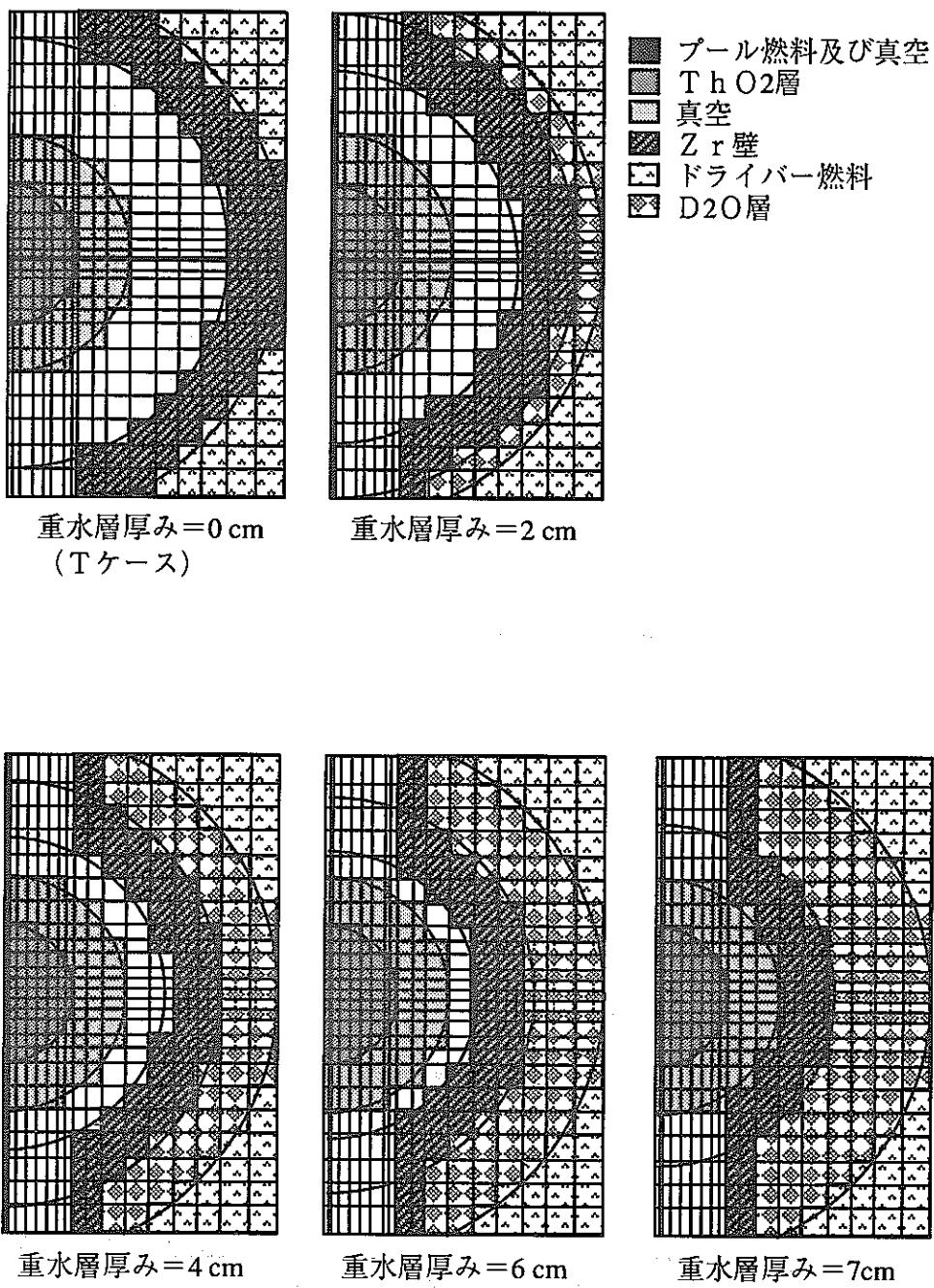
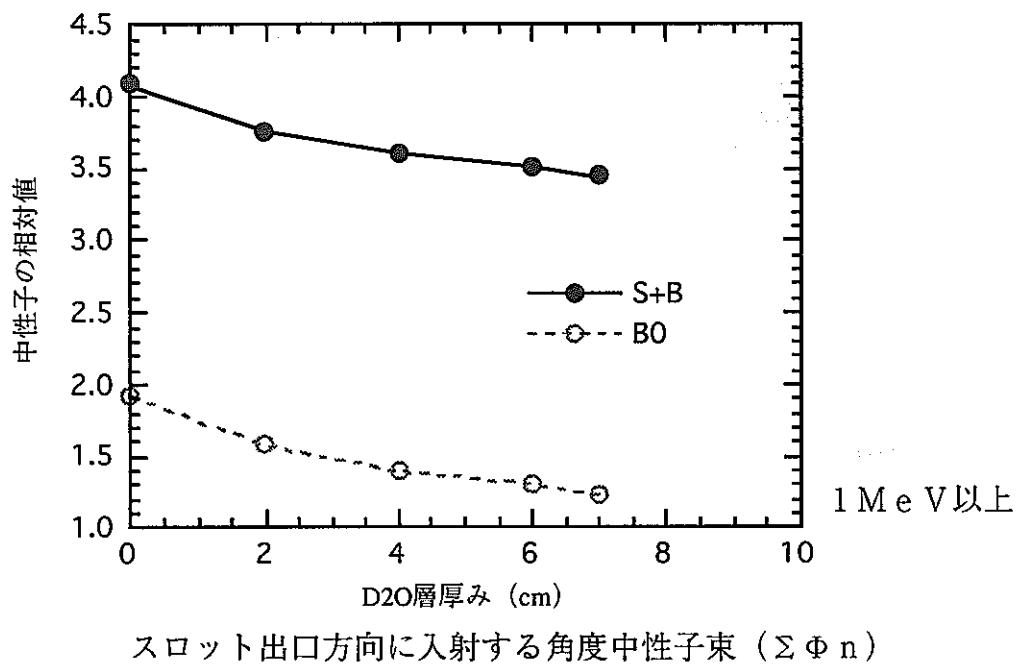
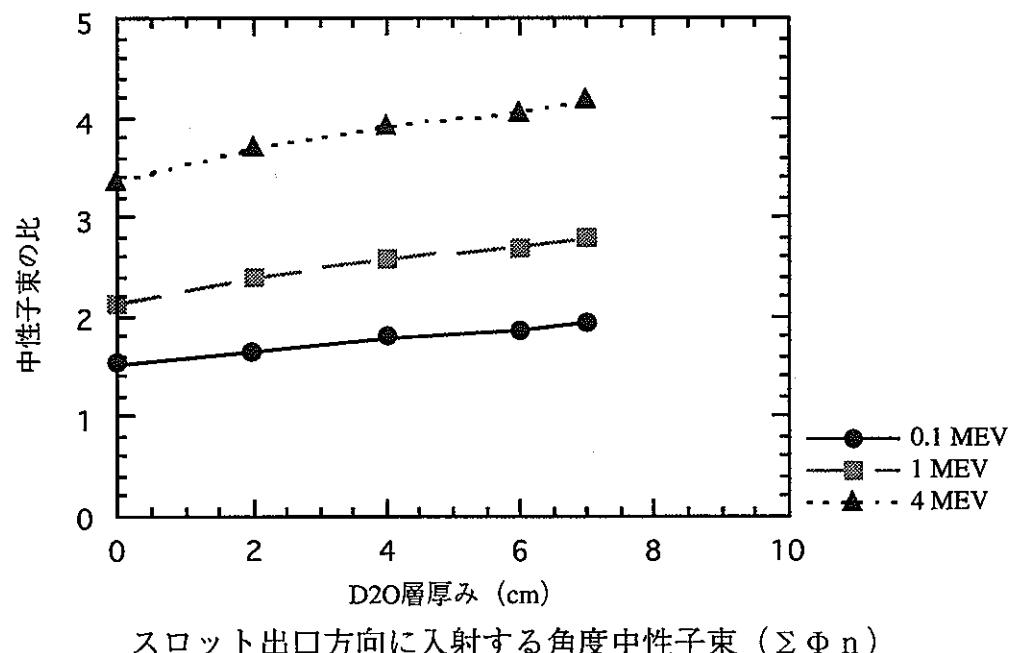


図4.3.4-7 駆動炉心内側への重水層追加（計算ケース）

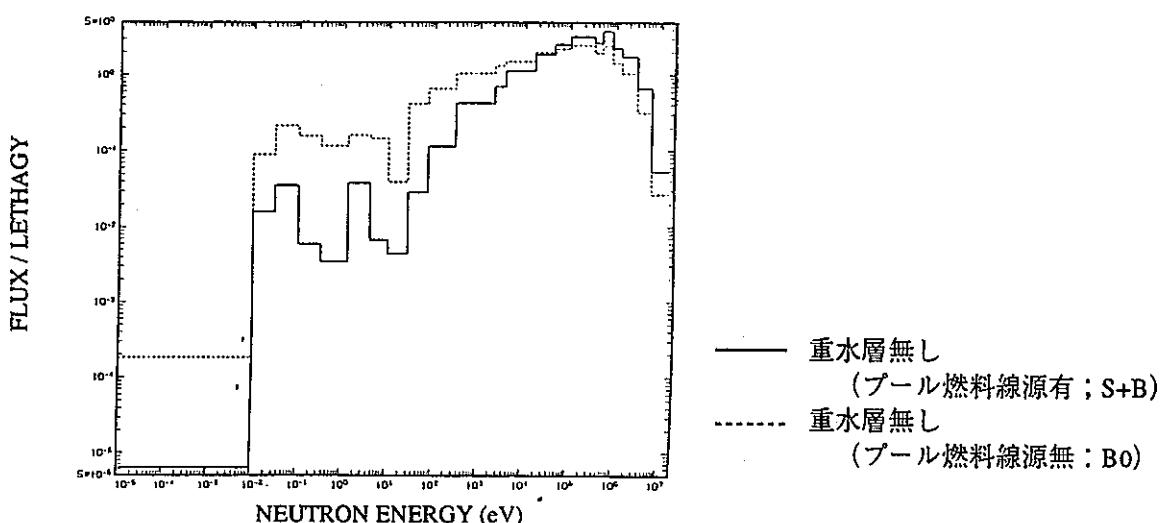


(a) 1 MeV以上のS+B及びB0

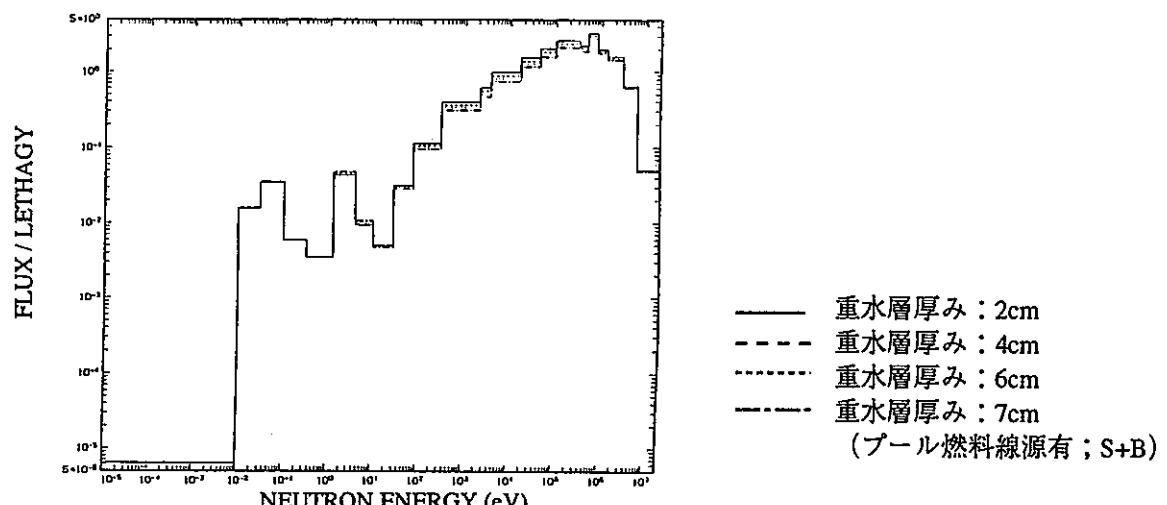


(b) (S+B) / B0比

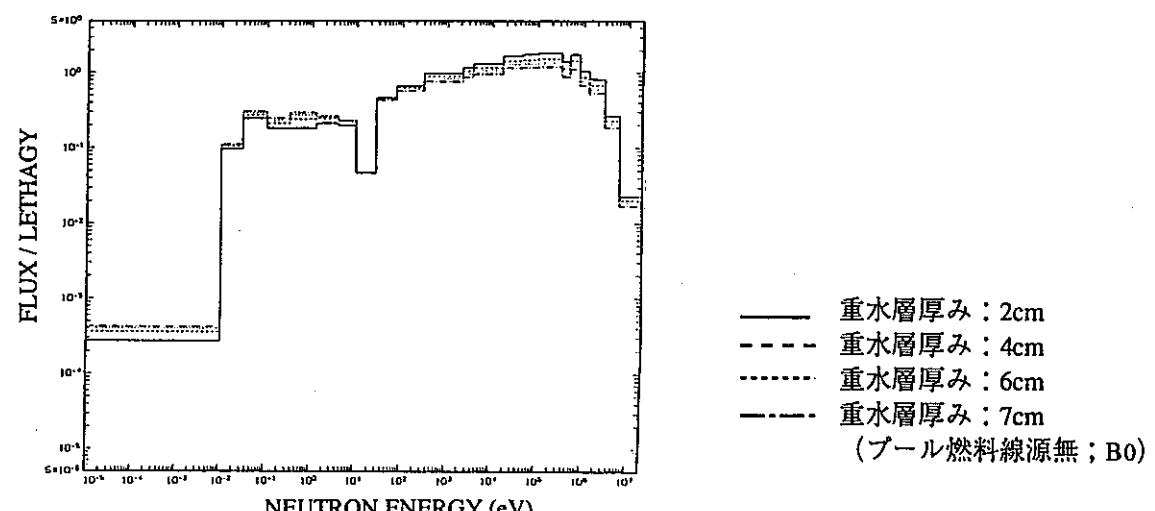
図4.3.4-8 重水層厚みによる信号変化比



(a) Tケース



(b) プール線源有り状態ケース



(c) プール線源無し状態ケース

図4.3.4-9 プール試験体中心位置における中性子スペクトル

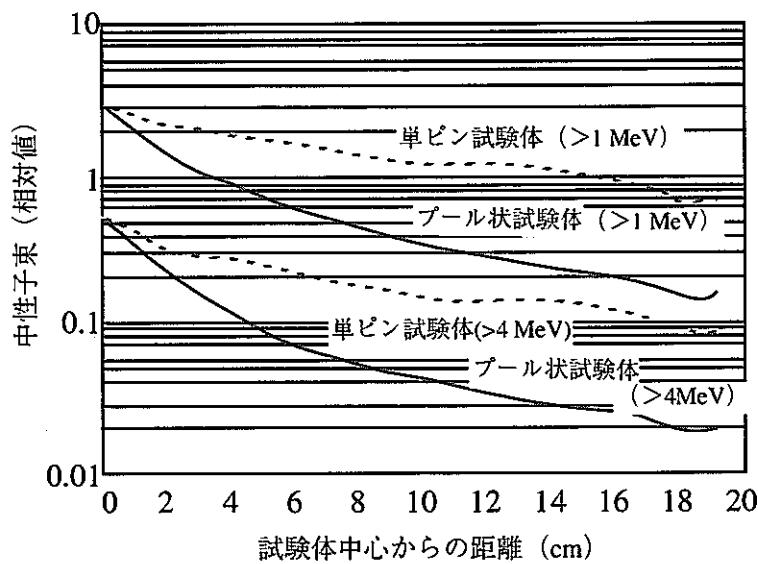
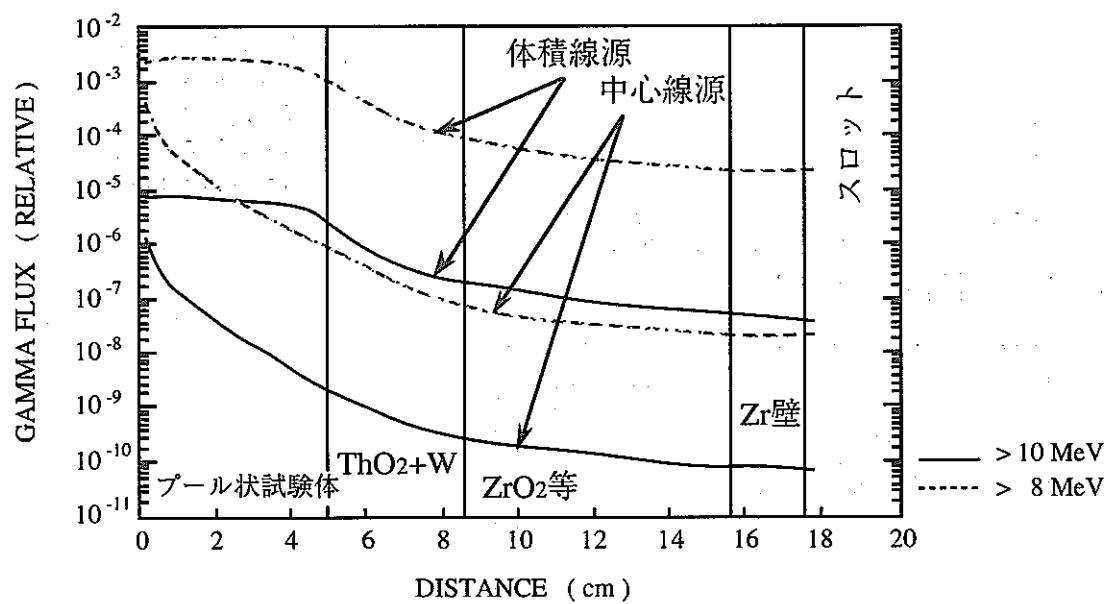


図4.3.4-10 試験体周りでの中性子減衰曲線（試験体中心メッシュ線源）

図4.3.4-11 試験体周りでの γ 線減衰曲線

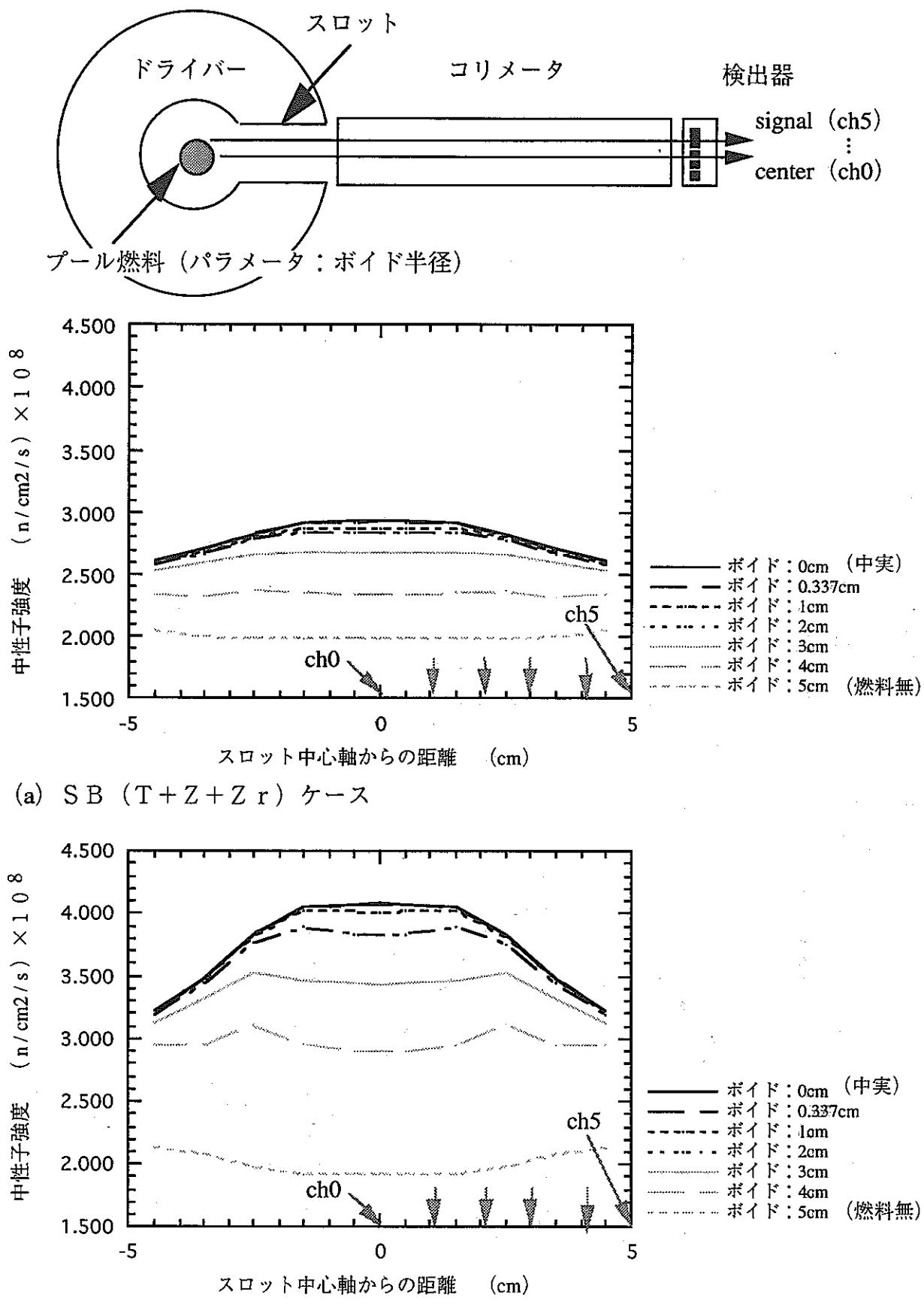
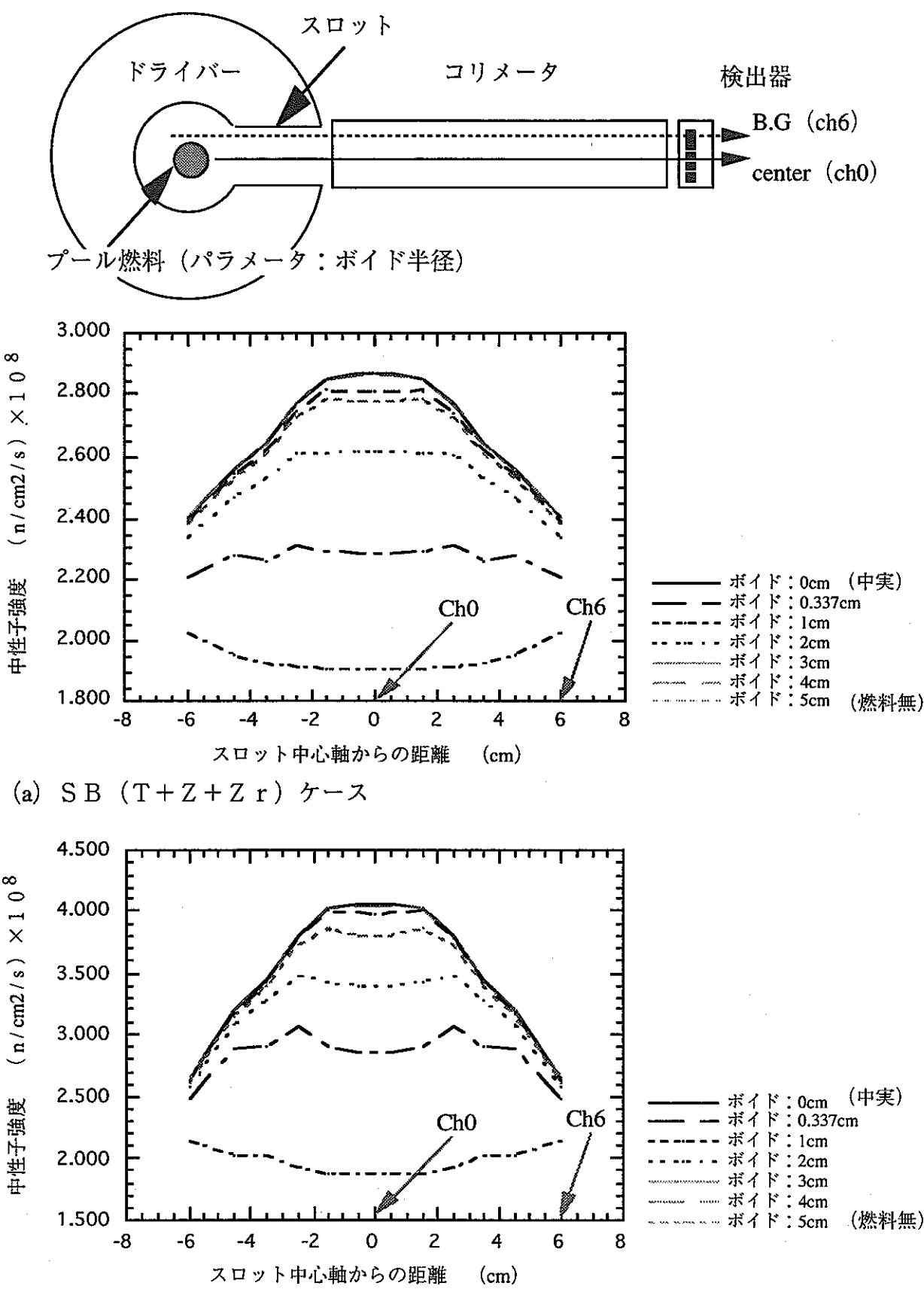
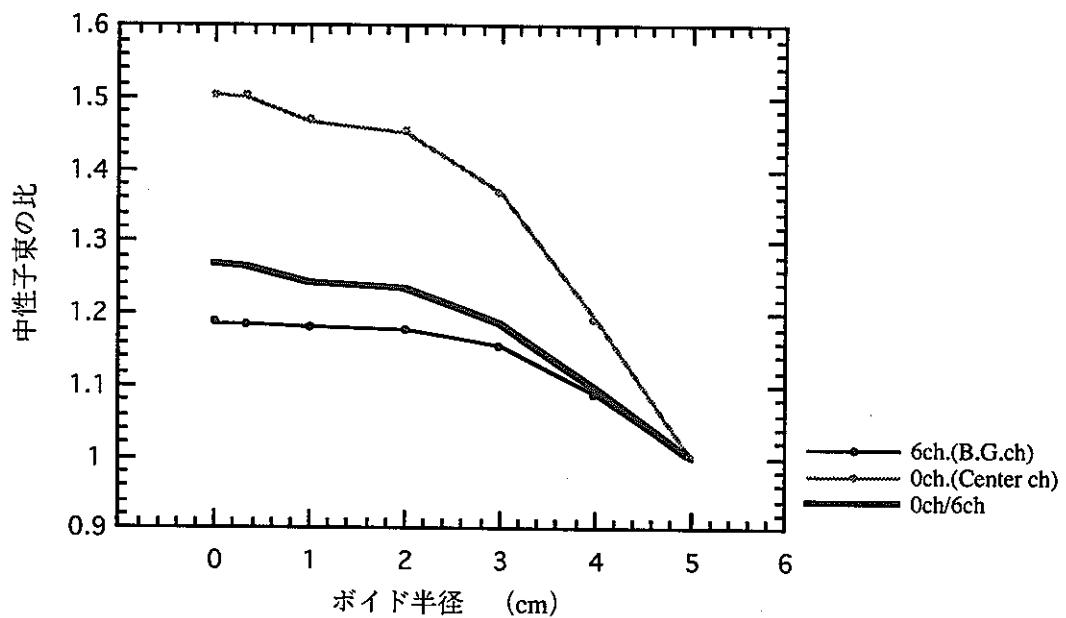


図4.3.4-12 スロット中心軸からの距離ごとの中性子強度 (1MeV以上)

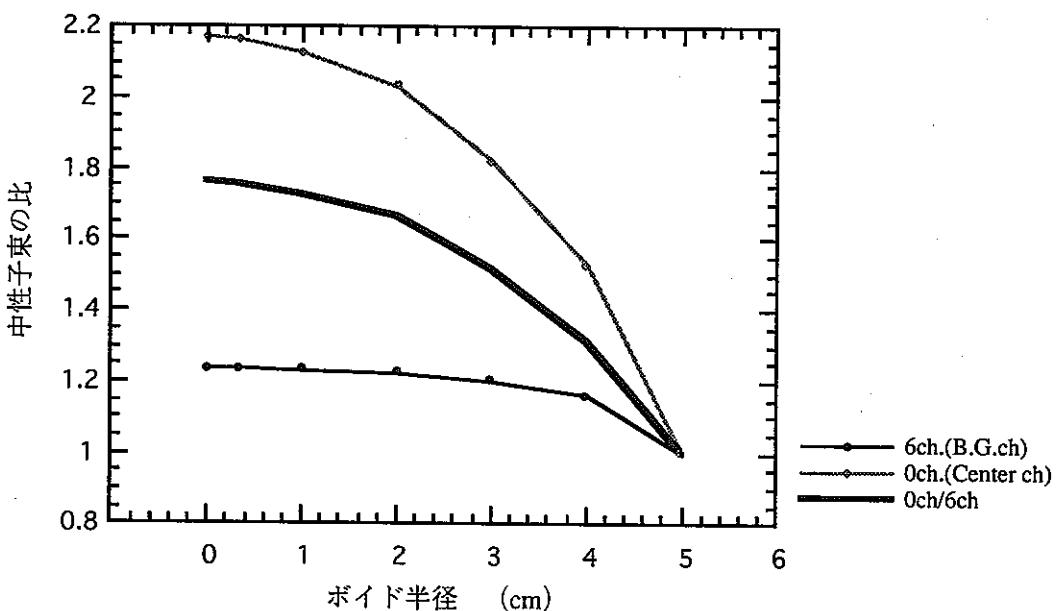


(b) S B T ケース

図4.3.4-13 スロット中心軸からの距離ごとの中性子強度 (1MeV以上)

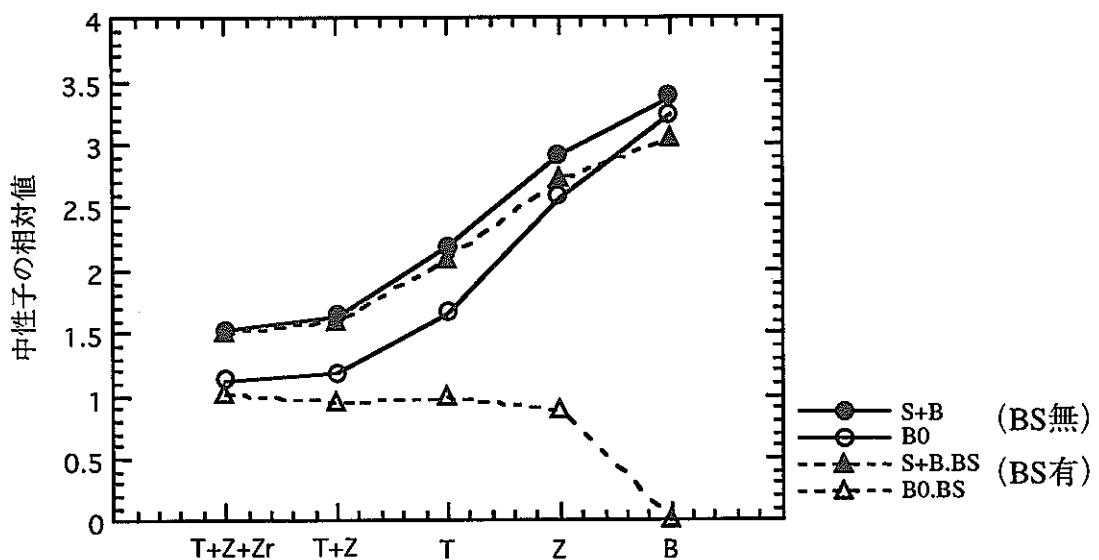


(a) $T + Z + Z_r$ ケース

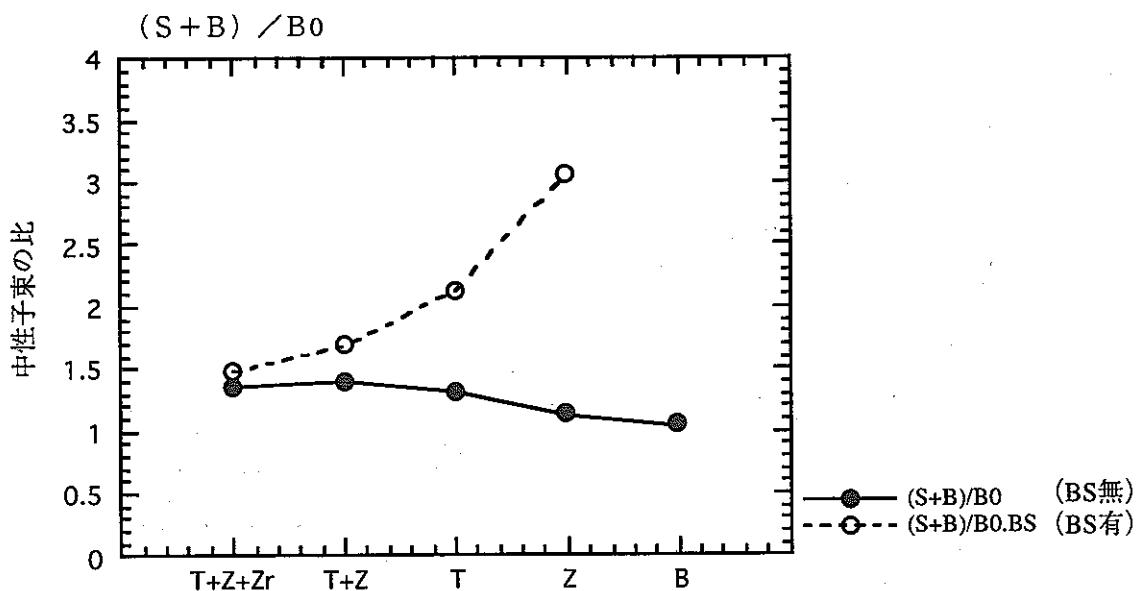


(b) T ケース

図4.3.4-14 ボイド径の増減に伴う中心ch及びBack ground測定chの信号変化量 (1MeV以上)

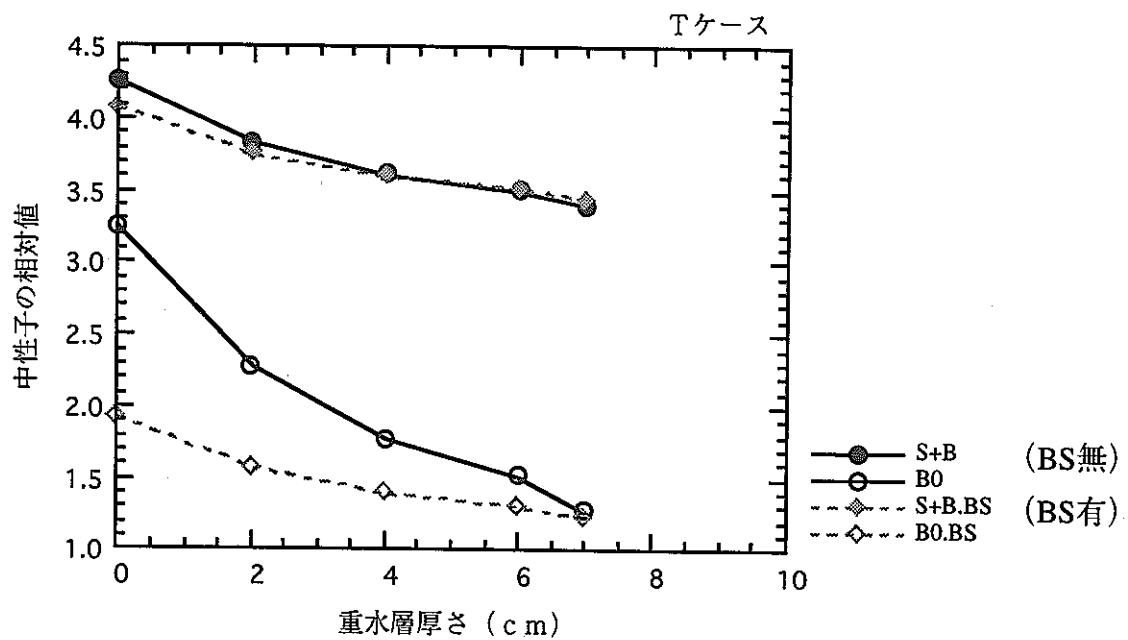


(a) S+B 及び B0

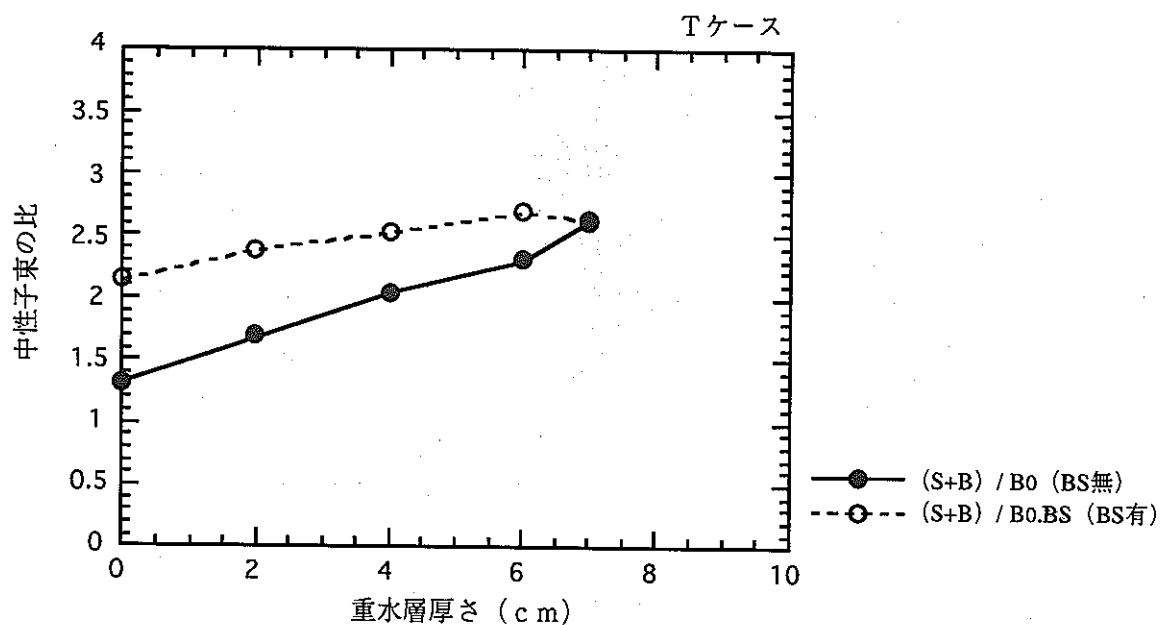


(b) (S+B) / B0比

図4.3.4-15 バックスロット有無による信号変化比（薄肉化との関係）

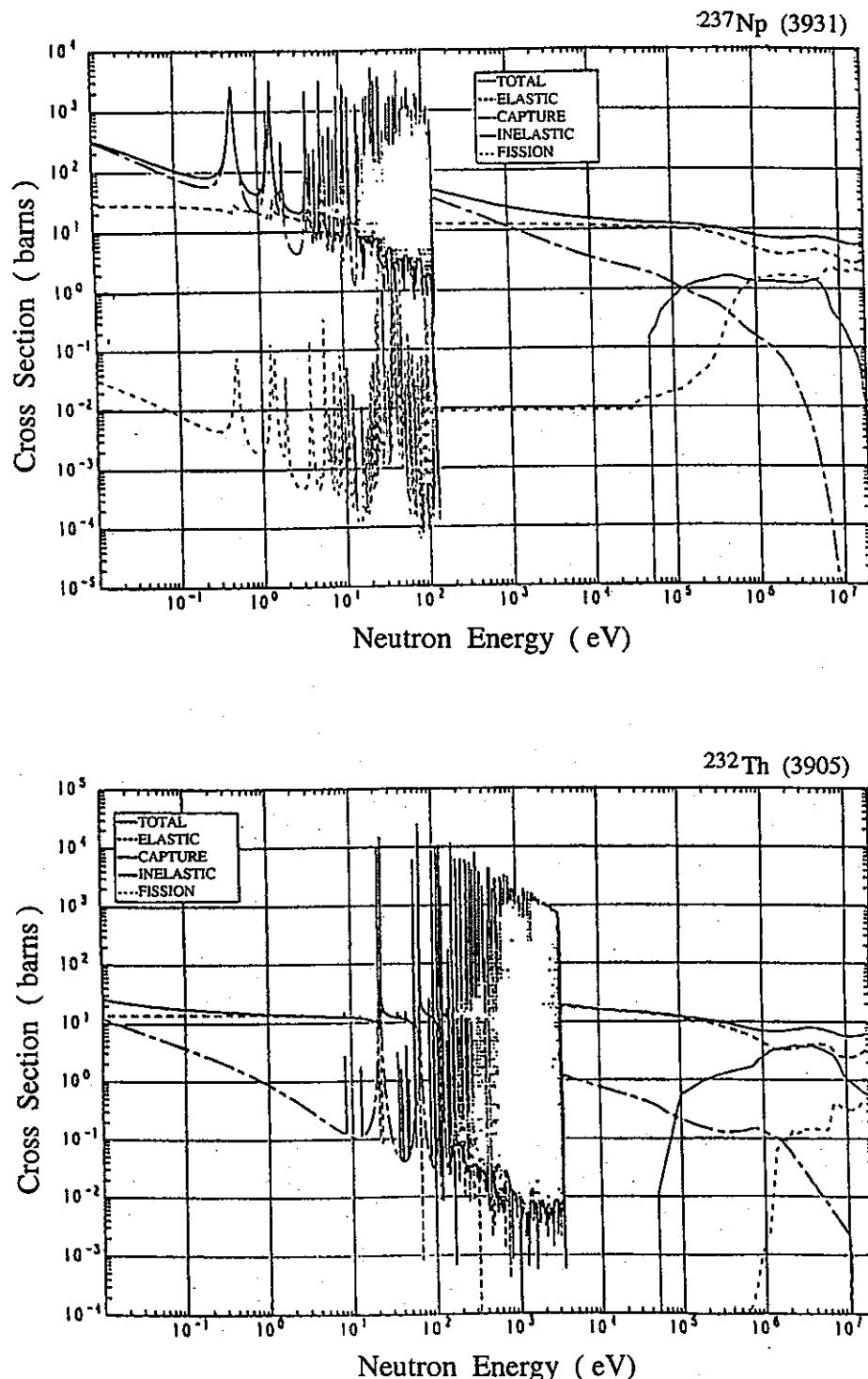


(a) 1 MeV以上のS+B及びB0



(b) (S+B) / B0比

図4.3.4-16 バックスロット有無による信号変化比（重水層追加との関係）

図4.3.4-17 ^{237}Np 、 ^{232}Th の核反応断面積

4.3.5 試験体構造

SERAPH試験施設におけるインパイルループ、特に試験体構造は、駆動炉心と並んで極めて重要な検討分野である。駆動炉心は健全な燃料形状を前提とするのに対して、試験体は、その内部において燃料破損、溶融、分散に至る範囲までを実現させるため、高温・高圧の物質を安全に保持し得るように設計することが最大の案件となる。試験体におけるこのような過渡的な状況は極めて厳しいものであり、このような試験体は設計経験が少ないため、詳細設計、試作などの各段階でそのつど成立性を確認していくものとする。

一方、試験体は、駆動炉心とは設備的には独立しているものの、試験孔の寸法諸元の条件やその他の多くの要素技術と密接に関連している。例えば、核設計では、試験体壁構造に中性子吸収の多い材料を使用すると結合係数の低下を招くことになり、燃料移動計測では、試験体壁構造の薄肉化が試験燃料の可視性を上げる観点から必須の条件となっている。このため、現時点では、条件的に最も厳しいと思われる試験条件で薄肉化した試験体構造が熱的・機械的に十分な裕度があるかどうかを確認する作業の第一段階として、試験体るつぼの検討を行った。ここではその検討結果と今後の検討の進め方について述べる。

4.3.5.1 試験体構造に要求される熱的・機械的条件

SERAPHの試験のうち高温物質保持の観点から熱的・機械的に最も厳しいと考えられるのは、炉心プール沸騰拳動試験である。炉心プール沸騰拳動試験で用いられる試験体の概念図及び試験条件は、「3.3 炉内安全性試験計画：必要性検討のまとめ」分類番号15を参照のこと。この試験で用いられる試験体のタイプは、表4.3.5-1に示す6種類のもののうち、タイプVになる。

炉心プール沸騰拳動試験では、試験体の初期温度は冷却材温度と等しい650Kである。試験開始とともに、予備パルス1.5kJ/gf及び低出力(0.1~0.2Po)の加熱により試験体るつぼ内の燃料・スチール混合物の温度は3600Kまで加熱され、その後は徐冷されて、ほぼ24時間後には加熱前の初期温度に戻る。また、るつぼ内部の圧力も同時に上昇し、最高で約5気圧の準定常圧になると予想される。なお、実際の試験では、パルス加熱直後数100 msecの間に瞬時圧力上昇が5気圧より大きくなる可能性があるが、るつぼ壁の内側部分の材料($\text{ThO}_2, \text{ZrO}_2$)の熱伝導率が非常に小さいため、構造の健全性を受け持つ最外壁の温度が上昇するまでにはるつぼ内部の圧力は今回の想定圧力の5気圧程度に落ち着くものと考えられる。

上記試験条件において、るつぼの熱的・機械的な成立性を確保するための制限条件として、以下のものを採用した。

① 温度

試験体るつぼの熱的・機械的な成立性を確保するためには、温度に対する制限が重要

である。炉心プール沸騰拳動試験では、溶融プールの温度が最高で3600Kと高温になる試験条件の達成のために、試験体るつぼはほぼ断熱構造であることが要求され、試験条件の達成とるつぼの健全性を両立させるため、るつぼは多層構造とする。すなわち、溶融プールと接する部分及びその外側は断熱用およびプールの保持用の層とし、その外側を機械的な健全性を保つための構造用の層とする。このため、断熱用およびプール保持用の層に対しては融点を、構造用の層に対しては従来の強度基準の適用上限温度を、それぞれ熱的な制限値とする。

② 歪み量

構造用部材に対しては歪み量を制限の対象とする。今回の検討では、構造用部材にはステンレス(SUS304)を採用したため、歪み量に対する制限値には従来のASME Sec.III NB⁽⁶⁷⁾、及びもんじゅの高温構造設計基準⁽⁶⁸⁾を参考にした。歪み量に対する制限値は、試験体の破損モードのうち比較的短時間の破損、すなわち、初期の圧力上昇に起因する破損、及び加熱開始から温度分布が定常状態に落ち着く前までの間の温度勾配に起因する破損を対象に、それを回避するために設けたものである。

③ クリープ破壊時間

これも構造用部材(ステンレス等)に対するものである。これは、温度分布が定常状態に落ち着いた後に、主にるつぼ内部の圧力により長時間にわたり徐々に進行する破損に対する基準である。

4.3.5.2 炉心プール沸騰拳動試験におけるるつぼの熱的・機械的成立性の評価

(1) 試験体るつぼ概念

今回検討した試験体るつぼの体系を図4.3.5.-1に示す。これは、リファレンス炉心で採用しているものよりはかなり薄肉化されたものであり、るつぼは、上述のように、熱的な成立性を保つための断熱層と機械的な成立性を保つための層に分かれている。各層に期待される機能、概要を以下に示す。

① ThO₂層

W層を加熱開始時の熱衝撃から保護することを目的としている。

② W層

想定温度が融点に近く延性の大きい温度であるため機械的な強度は期待しないが、溶融プール内物質を確実に閉じ込めるために用いる(シール性の確保)。層の厚みは5mmである。

③ ZrO₂層

断熱層として用いる。断熱性能を向上させ、内部の層の変形の影響が外側のステンレス層に及ぶことを防ぐため、顆粒状のものを用いる。層の厚みは10mmである。

④ ステンレス層

るつぼの機械的な健全性を確保するために用いる。層の厚みは5mmである。

(2) 評価項目

上記(1)で述べた各層に期待する役割に対し、以下のような評価項目を設けた。断熱層($\text{ThO}_2, \text{W}, \text{ZrO}_2$)は融点により熱的な成立性を評価するが、ステンレス層は機械的な成立性という観点から、従来の強度基準を適用するための温度制限に適合するかどうかの評価が必要になる。

- ・試験体各部の熱的成立性
- ・ステンレス層の機械的健全性
 - 内圧及び熱応力に起因する歪み量の算出・評価
 - クリープ破断時間の算出・評価
- ・ ThO_2 と燃料・スティール混合プールの化学的共存性

(3) 評価手法

①るつぼ各部の熱的成立性

非線型熱伝導解析コードTAC2Dによる熱伝導計算により、試験体各部の温度分布を計算し、それらが融点を越えないことを確認する。

②ステンレス層の機械的成立性の評価

熱伝導計算の結果から、ステンレス層の最高温度は940Kである。内部の断熱層内を熱が移動する時間を考えると、実際にステンレス層の温度上昇が始まる時間は初期の衝撃的な圧力上昇が終息し、想定圧力の5atm程度に落ち着いてからであると考えられる。このため、ステンレス層が破断するモードとしては、内部の圧力(5atm)による破断、ステンレス層内の温度勾配に起因する歪みによる破断、またはその両方が合わさったものが考えられる。

a.内圧及び熱応力に起因する歪み量の算出・評価

内圧及び熱応力に起因する歪み量の算出・評価には以下の2つの応力の算出がまず必要である。

- ・内圧による応力 --- 応力の算出に関しては、試験体形状を単純な円筒形とし、理論的な応力算出式⁽⁶⁹⁾を用いる。また、算出した応力の評価にはASME Sec.III NBを用いる。
- ・熱応力 --- 炉心プール沸騰拳動試験を想定してTAC2Dで計算された試験体各部の温度履歴を用い、非線型構造解析コードFINASにより算出する。

次に、これら2つの応力を用いて、O'Donnell-Pollockの線図⁽⁷⁰⁾により、歪み量の概略値の算出・評価を行う。

b.クリープ破断時間の評価

クリープ破断時間の評価は、内圧に起因する応力と温度からクリープ歪み線図⁽⁶⁸⁾を用いて行う。

③ ThO_2 と燃料・スティール混合プールの化学的共存性

燃料内には元々様々な物質が存在しているため、現時点では全ての物質について

ThO_2 との共存性を確認しているわけではないが、高温でもスティール、 UO_2 との共存性は比較的良好である。

(4) 評価結果

表4.3.5-2に各層の最高温度、表4.3.5-3にステンレス層の最大歪み量、クリープ破断時間の計算結果を示す。また図4.3.5-2、図4.3.5-3にそれぞれ各層内の温度の経時変化、ステンレス層内の肉厚平均歪み量の経時変化を示す。

①温度

この結果から ThO_2 層を除き、融点を越える部分は存在しないことがわかる。

②歪み量

歪み量（肉厚平均歪み）は最大で0.12%になる。もんじゅの高温構造設計制限の1%に比べ、十分な裕度のある値である。

③クリープ破断時間

ステンレス層温度が940Kの時、5atmの内圧により発生する応力の最大値は11.11 kg/mm²であり、この応力が維持された場合のクリープ破断時間は $10^3 \sim 10^4$ 時間である。これは予定の実験時間の24時間に比べ十分大きい値であり、実験時間中にクリープ破断が起こる可能性はほとんどない。

以上の結果から、リファレンス炉心で採用されているものよりも薄肉化されているつぼでも、炉心プール沸騰拳動試験を想定した条件下でかなりの裕度を持っていることがわかった。

4.3.5.3 試験体構造検討のまとめ

今回は試験体構造の熱的・機械的な健全性の概略検討を行い、非常に単純化された体系を対象とし、薄肉化された系でも成立性が期待できるという結果を得た。実際の試験体の形状は、計装系、制御系等の取り付けによる複雑化に伴い、冷却材の流動特性が変化し、局所的な冷却性能の低下、応力集中等の生じる体系となることが考えられる。このため、今後試験体構造の検討を詳細化する段階で、重要な課題としては、以下のような項目が考えられる。

- ①Na冷却系ループを含めたバンドル試験用試験体構造の検討
- ②試験ニーズに合致した計測系の摘出と、これらを組み込んだ試験体全体の概念設計
- ③構造健全性に係わる技術的成立性の検討（熱応力、熱衝撃、過渡的な圧力発生、クリープ、応力集中、局所的な冷却性能の低下）
- ④パルス時の過渡的な内圧減圧機構の検討
- ⑤試験体容器、試験燃料（照射燃料）組み立て性、解体、再利用性の検討

これらの検討のためには、設計評価のみならず、材料の高温強度に係わる基礎的なデータベースの拡充、薄肉大口径るつぼの製造性、高速応答計測系の開発等、基礎的な試作研究、基礎物性研究が不可欠となると考えられる。

表4.5.3-1 試験体のタイプ

タイプ	名称及び概略
タイプI	ナトリウムループ外付け型ピン束試験体 局所閉塞試験、燃料ピン破損試験等において比較的高流量の条件下で使用するピン束形状試験部を有する試験体
タイプII	ナトリウムループ内臓型ピン束試験体 ソースターム挙動試験等においてFPの混入していない高純度の冷却材環境下で使用するピン束形状試験部を有する試験体
タイプIII	ガス冷却型単ピン試験体 ガス冷却条件下で燃料破損挙動やFP放出挙動を可視化等の手段で観測する試験に用いる試験体
タイプIV	ナトリウム／ガス封入型カプセル試験体 燃料破損挙動やFP放出挙動を調べるための試験で冷却材の循環が不要なものに用いる試験体
タイプV	定常保持型プール試験体 沸騰プールの定常／過渡挙動を調べるための試験体
タイプVI	加圧放出型プール試験体 溶融プール状態から急速パルス加熱や急速加圧を行うことにより燃料の分散・移動挙動を調べるための試験体

表4.5.3-2 るつぼ各層の最高温度

	最高温度(K)
ThO ₂ 層	3,600
W層	2,470
ZrO ₂ 層	2,300
ステンレス層	940

表4.5.3-3 ステンレス層の最大歪み量とクリープ破断時間

項目	計算結果
最大歪み量 (%)	0.12
クリープ破断時間 (hour)	$10^3 \sim 10^4$

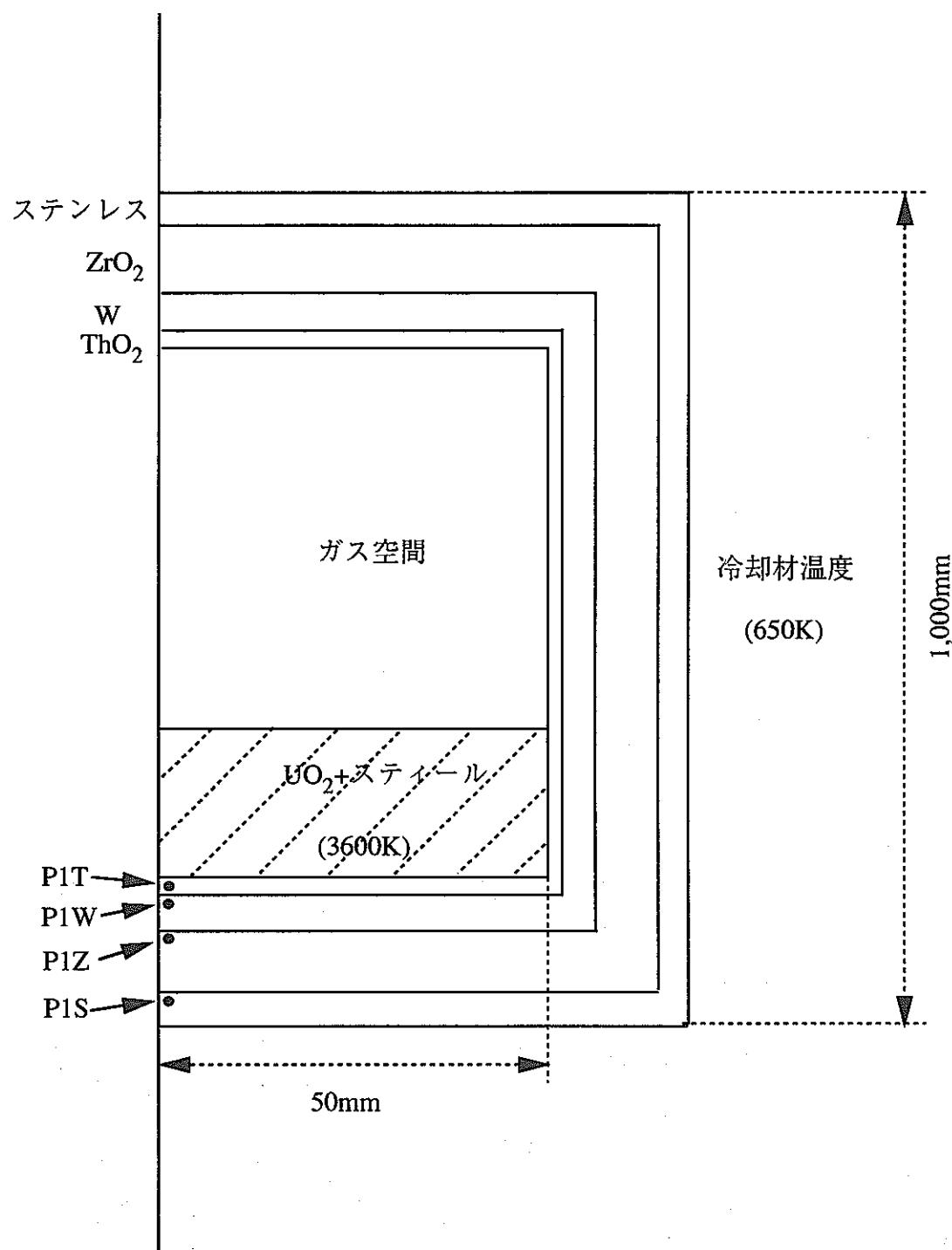


図4.3.5-1 試験体るっぽ体系

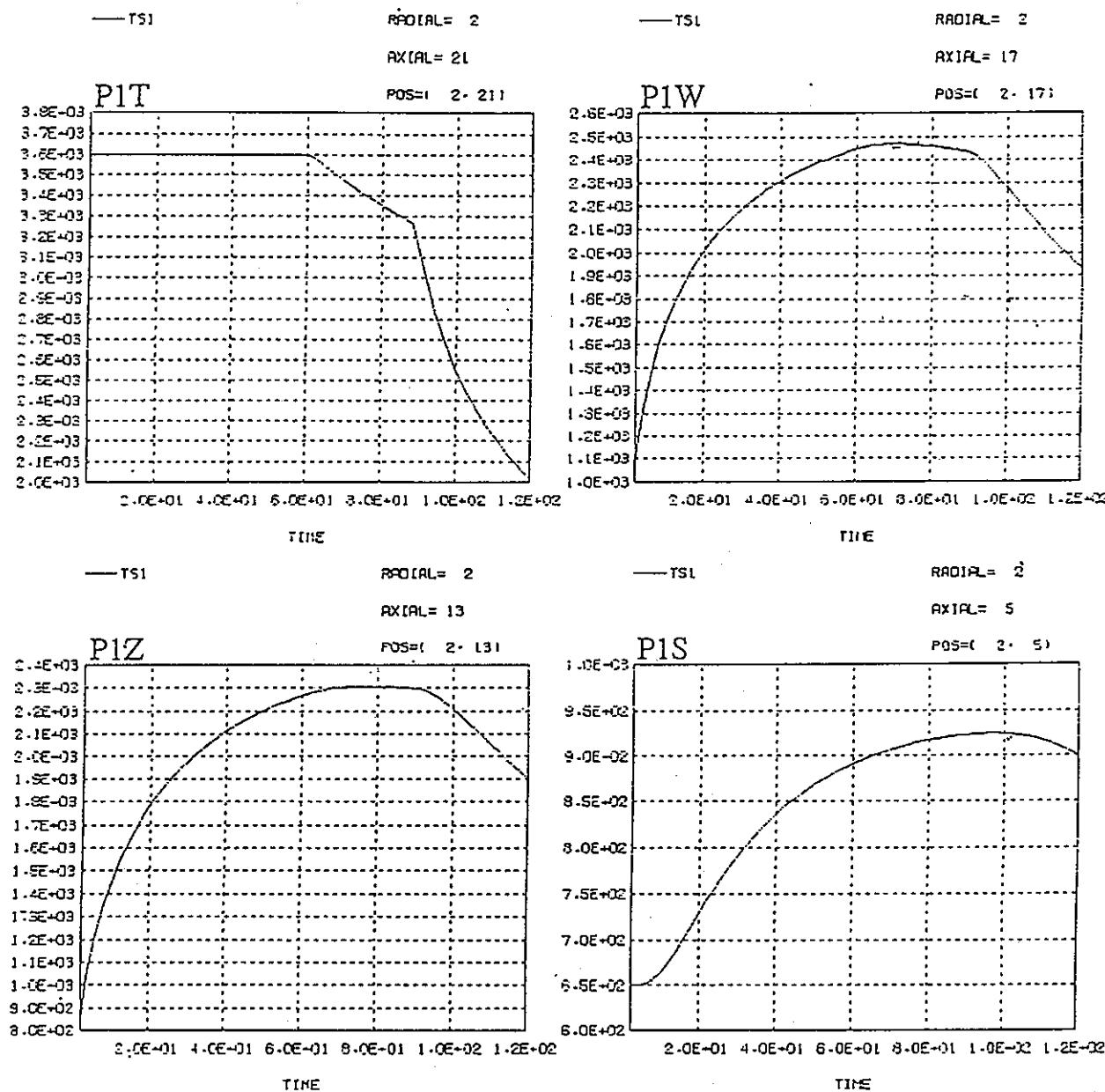


図4.3.5-2 各層内の温度の経時変化

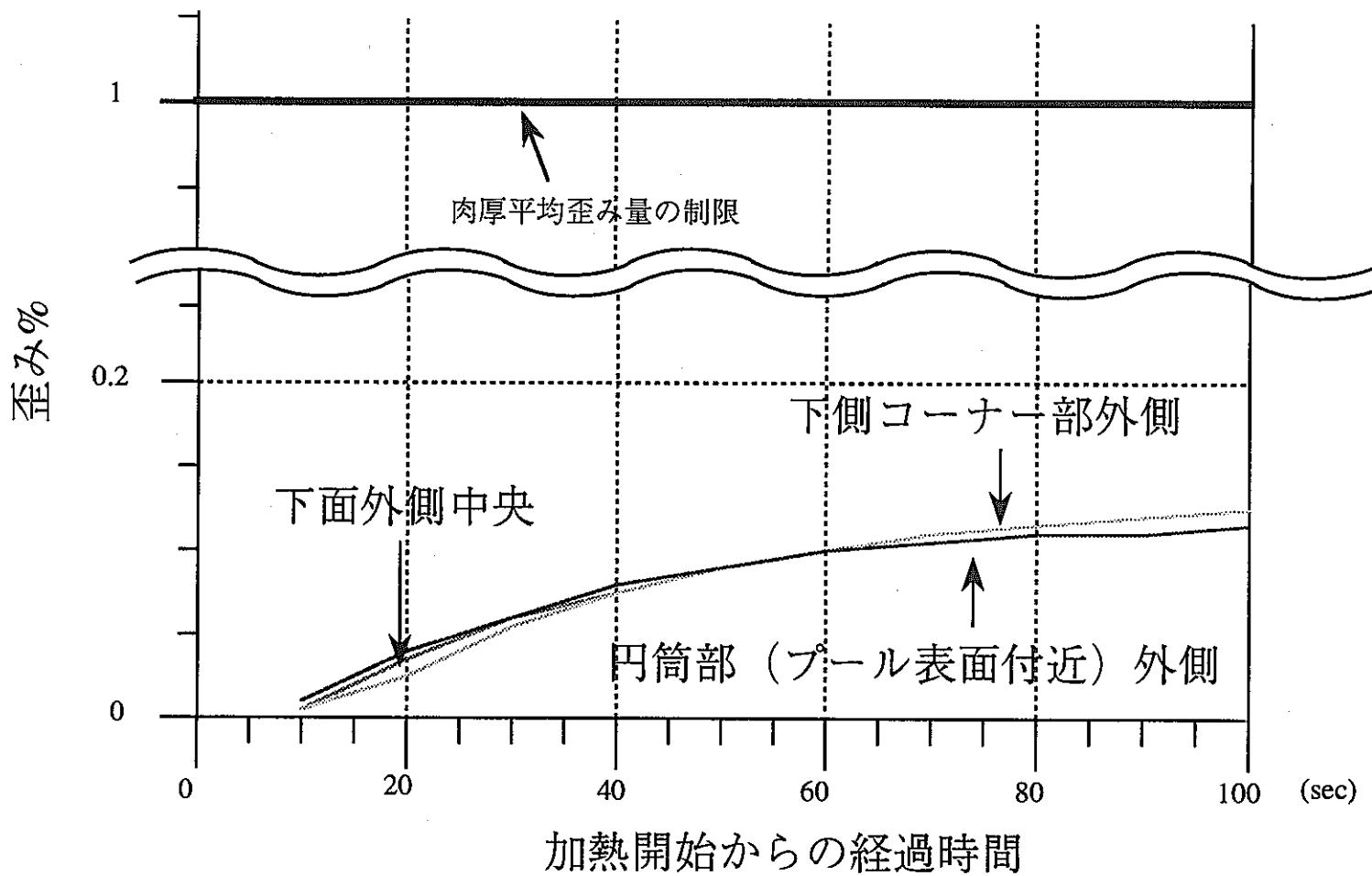


図4.3.5-3 ステンレス層内の肉厚平均歪みの経時変化

4.4 SERAPH施設の試験性能

4.4.1 基盤安全研究に対する試験性能

「基盤安全研究」については、4.2にまとめられているように、各種試験に対する要求条件が詳細に設定されている。ここでは、現状のSERAPH炉概念がその要求条件をどの程度満足し得るかについて定量的に評価した結果を述べる。

4.4.1.1 評価方法

基盤安全研究で想定される試験は、定常、ランプ状、パルス状、の3種類の運転モードに大別される。このうち、定常試験とランプ状過出力試験については、4.3.2節の熱輸送評価において代表的な試験に対する性能が評価済であるため、ここではパルス状過出力試験について概説する。

パルス状過出力試験の性能を評価する上で要求される条件は、試験燃料への投入エネルギー量とその投入速度である。これらを評価するために、1点炉近似動特性解析コードPK1Dと2次元非定常熱伝導解析コードTAC2D⁽⁷¹⁾を使用した。

解析の流れを図4.4-1に示す。TWOTRAN-IIコードから得られた静特性量を入力としてPK1Dコードによる解析を実施し、パルス印加時の駆動炉心の動特性応答を求める。得られる特性量は、駆動炉心の平均温度、試験体への投入エネルギー、全中性子束の時間変化である。次に、TWOTRAN-IIコードから得られる最大出力チャンネルの出力密度とPK1Dコードから得られる全中性子束の時間変化を入力としてTAC2Dコードによる駆動炉心燃料ピンの冷却性解析を行い、最大出力チャンネルでの燃料、被覆管、および冷却材の温度変化を求める。これらのいずれかが温度制限条件の範囲内に収まらない場合には動特性計算に戻り、PK1Dコードで与える反応度の大きさを調整して中性子束の時間変化データを更新し、温度制限条件を満たす運転条件を求める。ここで、駆動炉心の温度制限条件としては、燃料、被覆管、冷却材に対してそれぞれ、2000 K、1000 K、400 Kと設定した。また、これらの温度評価と並行して、サブクール沸騰防止の観点から、被覆管から冷却材への熱流束が2~3 MW/m²以下であることも確認する。なお、TAC2Dコードではペレットの熱膨張によるギャップ幅の変化を考慮に入れた計算を行う。

4.4.1.2 評価結果

代表的なパルス状過出力試験として、以下の3ケースについて性能評価結果を示す。

- ・ 19本ピン束 + 速パルス
- ・ 19本ピン束 + ダブルパルス
- ・ プール形状 + 速パルス

19本ピン束燃料は試験目的に応じて異なる燃焼度を必要とするが、ここでの評価は炉心の負担が大きくなる10 a/oの条件で実施する。なお、以下では、試験性能の達成度を判定する上で次の記号を使用する。

P_0 : ピン束試験体へのパルス投入直前の目標出力 (MW)

(未照射試験燃料ピンの線出力が 450 W/cm になるような駆動炉心出力)

E_{max} : パルス過出力による試験燃料への投入エネルギー (J/g)

E' : パルス過出力時の試験燃料へのエネルギー投入速度 (J/g/s)

q_{max} : パルス過出力時の被覆管から冷却材への最大熱流束 (MW/m²)

図 4.4-2～4.4-4 および表 4.4-1 に、試験性能評価結果を示す。

(1) 19本ピン束試験体への速パルスの印加 (図 4.4-2)

まず、速パルス印加前に予熱パルスを加え、約15秒間にわたって $1 P_0$ の出力を維持させている。この予熱パルスにより駆動炉心燃料温度は最大チャンネルで 1000 K まで昇温される。この試験における速パルスの要求条件は 1～1.5 kJ/g のエネルギーが 1～15 kJ/g/s の速度で試験体に投入されることである。これに対して、 $E_{max} = 1.25 \text{ kJ/g}$, $E' = 11 \text{ kJ/g/s}$ となり、要求条件を満足していることがわかる。新燃料を用いる場合には同じ駆動炉心出力で試験燃料に大きな入熱が可能となるため、余裕をもって要求条件を満たす。また、冷却材への最高熱流束 q_{max} は 1.97 MW/m² となっており、速パルス投入時の最も厳しい時においてもサブクール沸騰は発生しない。

(2) 19本ピン束試験体へのダブルパルスの印加 (図 4.4-3)

試験要求条件は第1パルスで 1～1.5 kJ/g、第2パルスで 0.5～1 kJ/g のエネルギーを投入することである。評価結果はそれぞれ 1.0 kJ/g, 0.52 kJ/g であり、要求条件の上限値に対して 60% 程度の達成度である。ただし、ダブルパルス試験の試験体必要燃焼度は 5 a/o であることから、実際には達成度が高くなるものと考えられる。また、破損燃料挙動の把握という試験目的の観点から、試験燃料中の劣化 UO₂ を濃縮度 20 % の UO₂ に置き換えることが許容され、さらに達成度を高めることが可能である。なお、 q_{max} は 1.79 MW/m² である。

(3) プール試験体への速パルスの印加 (図 4.4-4)

プール過渡分散試験では、試験燃料を溶融させるためにまず 1.8 kJ/g のエネルギーを投入し、その後に 0.7～1.3 kJ/g のエネルギー投入を実現することが要求される。この試験の場合、速パルス投入直前に FBR の定格出力状態が模擬される必要はなく、プールの溶融状態が維持されればよい。したがって、試験パルス印加直前（予熱パルス終了時）の発熱量は定格出力条件の 10 % と設定した。

図 4.4-4 および表 4.4-1 からわかるように、予熱パルスで 1.84 kJ/g、速パルスで $E_{max} = 0.94 \text{ kJ/g}$ のエネルギー投入が可能である。エネルギー投入速度 E' は 42 kJ/g/s と要求条件を十分に満足している。 q_{max} は 1.95 MW/m² である。

4.4.1.3 試験性能評価結果のまとめ

表4.4-1は、上で例を示したパルス状過出力試験の性能評価結果とランプ状過出力試験および定常出力試験の結果をまとめたものである。試験によっては、試験燃料の核分裂性物質含有量を増加させる必要が生じる可能性はあるものの、全般的に、通常の富化度を持った燃焼度10 a/o程度の照射燃料ピンを用いて試験の要求条件を満足することができる。駆動炉心燃料被覆管から冷却材への熱流束についても、最大で 2.0 MW/m^2 であり、過渡中にサブクール沸騰を生じることがないと判断できる。以上から、これまで検討してきたPuO₂-BeO燃料・D₂O冷却炉心は、基盤安全研究の炉内試験の要求条件を満たす概念であると結論できる。

4.4.2 実用化先導研究に対する試験可能性検討

「実用化先導研究」については、基盤安全研究に加えて安全性試験の幅広い範囲を網羅するものとして、主に受動的安全方策を中心に第3章で検討した。ここでは、これらの方策のうち、炉内過渡試験が必要なテーマを抽出し、現状のSERAPH炉で試験の成立性があるか否かを概説する。

試験成立性については、試験条件の設定可能性および期待される事象が生じた場合の検出可能性の観点から検討する。また、各試験の概念は示されているものの、個々の試験に対する定量的な要求条件は明確でないので、ここでは定性的な範囲の判断にとどめる。

4.4.2.1 評価結果

各試験項目について、試験による検証の着眼点、炉内過渡試験の必要性、SERAPHによる試験可能性を表4.4-2に示す。

窒化物燃料および低線出力燃料の試験は、従来MOXで実施しようとしている基盤安全研究と同じテーマであり、十分な試験可能性が期待できる。新燃料を開発する上で、SERAPHによる検証は避けて通れないものである（表内の整理番号A-21～23）。

中性子束増により溶融する物質を利用した反応度印加機構の試験については、物質の材料特性の確認、システムの動作確認試験のための条件設定、物質移動検出は可能であると考えられる（A-5）。

SASSの自動停止および溶融燃料の炉外排出の検証のための試験は、動作条件設定、物質移動検出については試験体の形状を工夫すれば可能である。ただし、プールへの混入の中性子吸収材の挙動検出は極めて困難である（A-6, 7, 16）。

中空ペレット燃料ピンのピン内燃料移動の試験は、SERAPHのような高性能検出系を

備えた過渡試験炉でなくては行えない特殊な試験のひとつであり、PIEの結果等を併せてホドスコープで移動同定が期待できる（A-8）。

人工的リードチャンネル燃料の単ピン試験は、スローTOP試験範囲内に包絡され問題はない。また、バンドル試験による破損後流出挙動の把握は、基盤研究のバンドル試験のLOF-TOP試験の範囲内に包絡されるので対応できると考えられる（A-9）。

燃料流出機能促進の各試験も、大型試験体を用いた核加熱による実機模擬が可能となるという点で、SERAPHならではの試験である。条件設定、検出性は十分対応可能であると考えられる（A-12～14）。

早期終息シナリオ燃料挙動試験、部分損傷集合体の長期冷却挙動試験は、低出力・低除熱状態での破損・非破損燃料の長期燃料挙動試験を対象とするが、従来の局所燃料破損の試験条件設定能力内で対応できると考えられる（A-10, 17）。

4.4.2.2 試験性能評価結果のまとめ

実用化先導研究テーマの試験可能性については、試験条件が基盤安全研究の試験能力範囲内で十分設定でき、また検出性についても、動作確認等に対してはホドスコープ等で十分に対応できる。インパイルループの大型試験体による燃料破損まで含めた試験は、炉外試験、既設の過渡試験炉ではカバーできない点である。ただし、十分な実機模擬性での反応度効果の実証、全炉心規模での反応度抑制の実証等については、SERAPH試験でもインパイルループ内の実験であることから限界があり、実炉等での反応度試験の結果と合せた評価が必要とされる。

表 4.4-1 基盤安全研究に対する試験性能の評価結果

運転モード	試験	要求条件			達成される性能
		試験燃料	過渡条件	燃焼度 a/o	
ランプ	ランプ破損限界	1本ピン	ランプレート：1 %Po/s 最高出力：3 Po	10	3 Po
	バンドル破損限界 および異常拡大	19本ピン	ランプレート：1 %Po/s 最高出力：2.5 Po	10	2.5 Po
定常	バンドル部分閉塞	61本ピン	定常運転時間：5分以上	5	6分
	沸騰プール挙動	~15 kg	発熱密度：200 W/cc 運転時間：1分以上	0	5分*
パルス	バンドル燃料分散 (中・高速パルス)	19本ピン	パルスエネルギー：1~1.5 kJ/g 加熱速度：1~15 kJ/g/s	10	1.25 kJ/g 11 kJ/g/s
	崩壊バンドル2次分散 (ダブルパルス)	19本ピン	第1パルス：1.0~1.5 kJ/g 第2パルス：0.5~1.0 kJ/g	5	第1：1.00 kJ/g 第2：0.52 kJ/g
	プール過渡分散	~10 kg	パルスエネルギー：0.7~1.3 kJ/g 加熱速度：5~20 kJ/g/s	0	0.94 kJ/g* 42 kJ/g/s*

* 初期濃縮燃料を使用した場合

表4.4-2 実用化先導研究試験項目の実施可能性(1/2)

整理番号		試験項目	検証の着眼点	SERAPHによる炉内試験の可能性
A	B			
21 S 23	2-1	低線出力炉心	・低出力ベース照射燃料の破損限界 (特にスローTOP)、破損後挙動	・基盤研究試験の試験条件、計測範囲内で対応可能。
	3-2	窒化物燃料炉心	・LOF条件での燃料冷却性(非沸騰) ・破損限界(FP挙動、N2解離内圧上昇) 破損後挙動(FCI、流出挙動)	・種々の加熱モードでの破損限界、破損後挙動の評価が可能
5 5 10	5	炉心温度上昇によりボイド がナトリウムに置換される 機構(GEMの反対)	・中性子束増により溶融する物質の材料 特性をインパイルループで確認	・基盤研究試験能力で動作条件設定は可能。 ・検出性については検討が必要。 (・定常炉カプセル試験でも可。)
	10	中性子束高により溶融 する物質を利用した中性子 吸収材の炉心混入	・溶融物質の溶融挙動の確認 (動作確認)	・動作試験体のインパイルループ内収容性があれば、 動作条件設定は可能。 ・検出性については、検討が必要。
6	11	燃料ピン型SASS機構 (ボイドからナトリウムへ の置換機構を含む)	・システム動作確認 ・不作動で溶融に至った際の燃料流出 挙動の確認	・動作条件設定はドライバー炉心との相対位置の調整で可能。 ・流出検出は少数ピン束ならばhodoscopeで計測できる可能性有り。
7	12 19	集合体内SASS (自己作動型炉停止機構) (溶融燃料の炉外への排出)	・同上	・動作条件設定は可能。 ・燃料層が1層程度で模擬できれば吸収材挿入、炉外 排出ともhodoscope検出の可能性有り。

整理番号 A : SERAPH炉内安全性試験計画；試験研究テーマの一覧 B : 実用化先導研究テーマに関する研究開発実施方針一覧表

表4.4-3 実用化先導研究試験項目の実施可能性 (2/2)

整理番号		試験項目	検証の着眼点	SERAPHによる炉内試験の可能性
A	B			
16	18	吸収材上部設置型集合体での溶融プールへの吸収材混入	・落下機構の動作確認 ・混入挙動（実機体系に近い固相を含む燃料スティール混合プール内への混入）	・基盤研究の沸騰プール（定常）の試験範囲で落下機構の動作条件設定は可能、また、動作の検出も hodoscope、中性子計測等により可。 ・プールへの混入後の挙動評価は hodoscope では困難。
8	20	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	・エネルギー投入速度によるピン内燃料移動挙動の把握	・基盤研究の単ピン試験範囲で条件設定は可能。 ・ピン内燃料移動は、hodoscope、PIE結果、ピン内T/C設置等の併用で同定は可。
9	21	人工的燃料分散リードチャンネルの設置	・単ピンスローTOPでの破損限界把握 ・バンドル燃料の破損後流出挙動（冷却材沸騰、過出力）	・基盤研究試験の試験条件、計測範囲内で対応可能。
12 13 14	22 24 25	・軸ブランケット短縮化 ・制御棒案内管の薄肉化による早期破損 ・ナトリウムプレナム付炉心による燃料流出促進	・流出機能、FCIによる逆流、固化挙動の把握	・試験体形状を実機模擬し、沸騰プール（定常）の試験条件で設定可能。 ・流出検出については、主に hodoscope により検出可。
10	—	早期終息シナリオ燃料挙動試験	・低出力・低除熱状態での破損、非破損燃料の長期燃料挙動	・破損拡大（ボイド反応度）によるエネルギー投入、拡大防止方策の効果(解析値)に応じた駆動炉出力制御は可能
17	—	部分損傷集合体の長期冷却挙動試験	・中規模損傷燃料集合体の崩壊熱レベルの長期冷却性	・中規模損傷燃料集合体の形成は基盤研究試験能力から可能。長期運転も崩壊熱レベルであれば可能性有り。

整理番号 A : SERAPH炉内安全性試験計画；試験研究テーマの一覧

B : 実用化先導研究テーマに関する研究開発実施方針一覧表

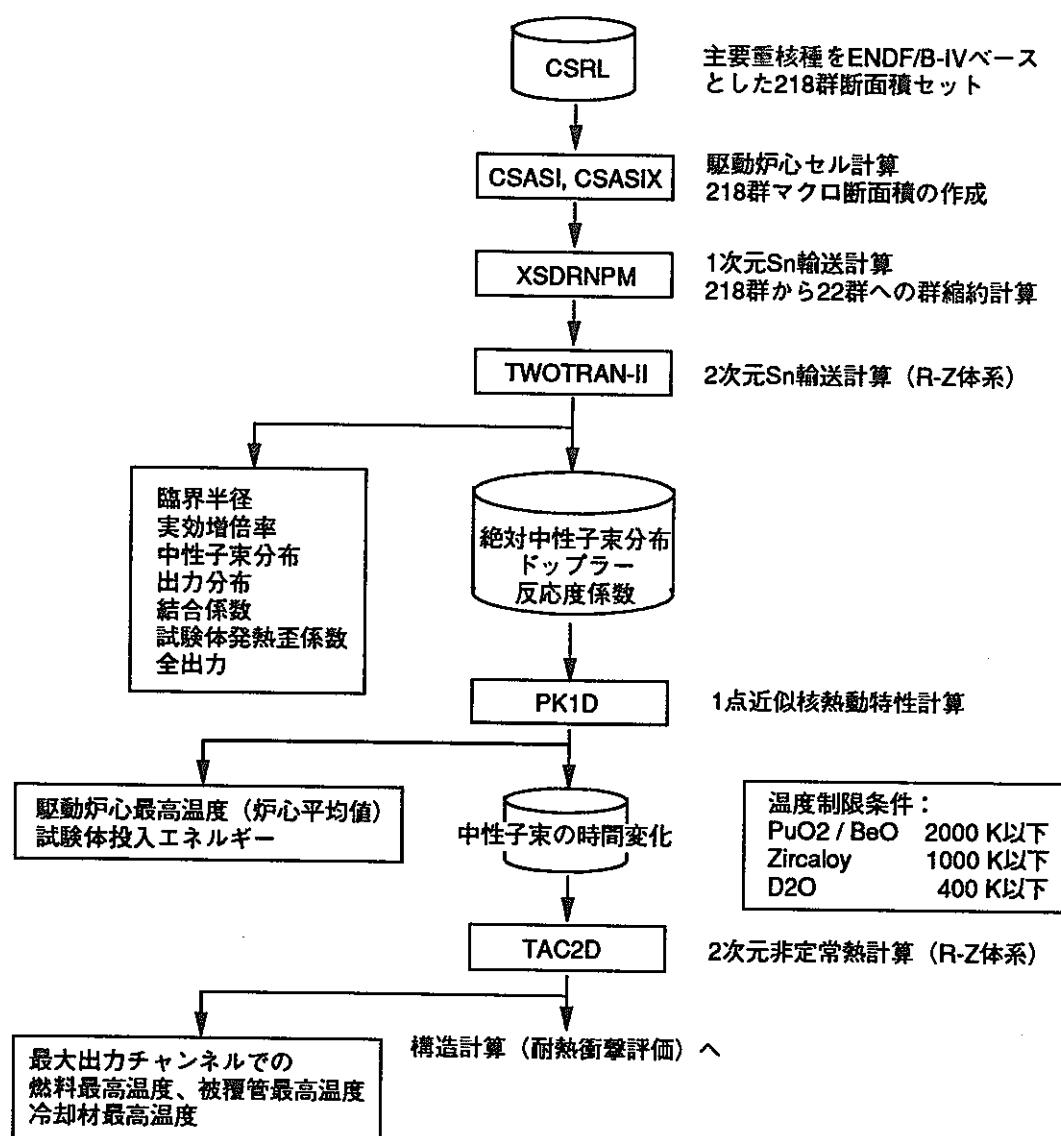
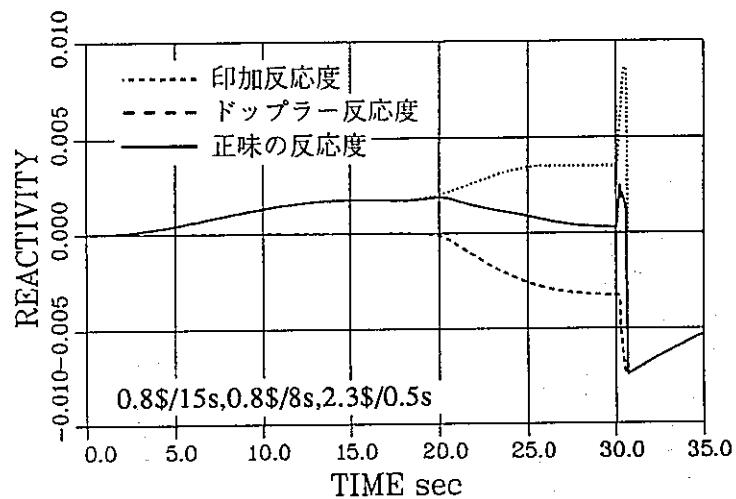
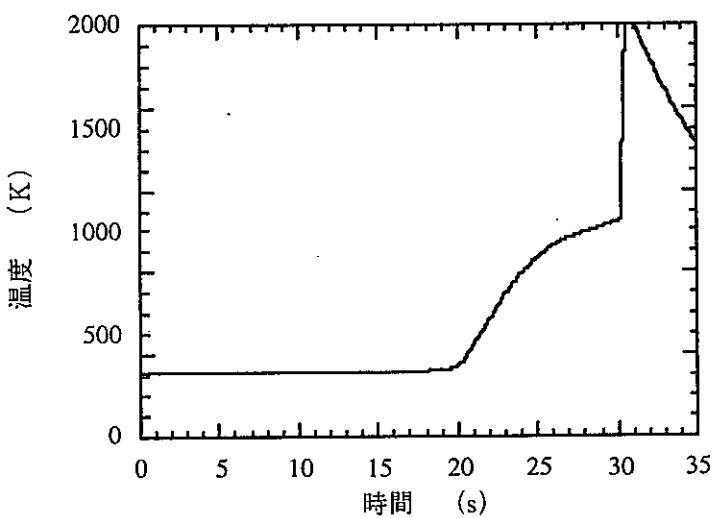


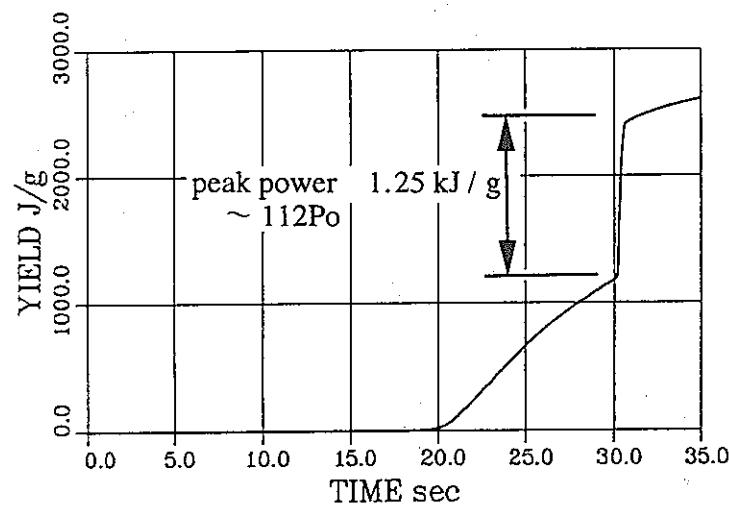
図 4.4-1 試験性能に関する解析手法



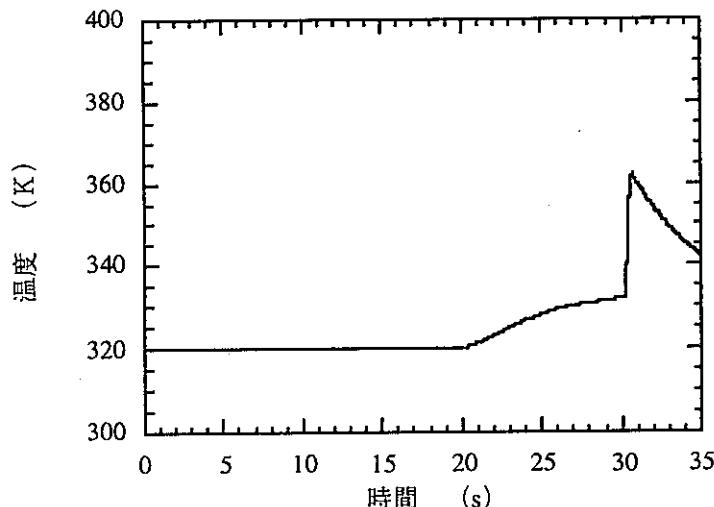
反応度履歴



駆動炉心燃料の最高温度履歴

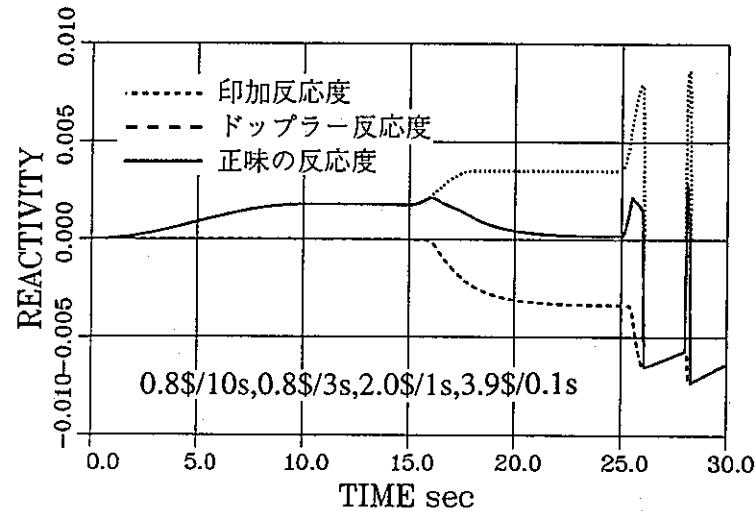


試験体への投入エネルギー積分量

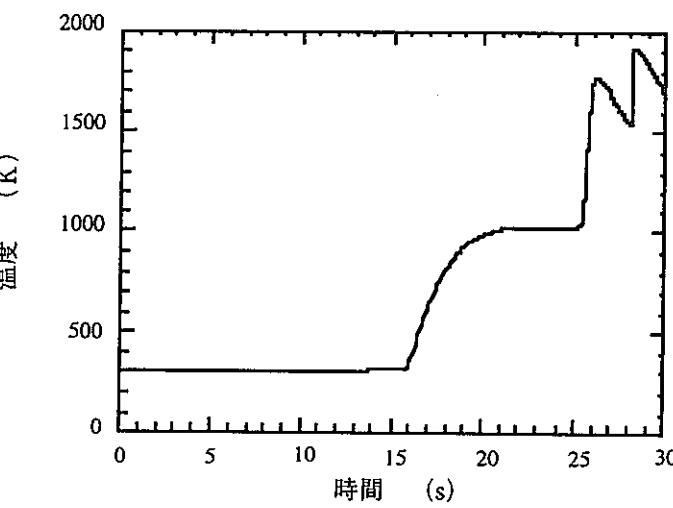


冷却材の最高温度履歴

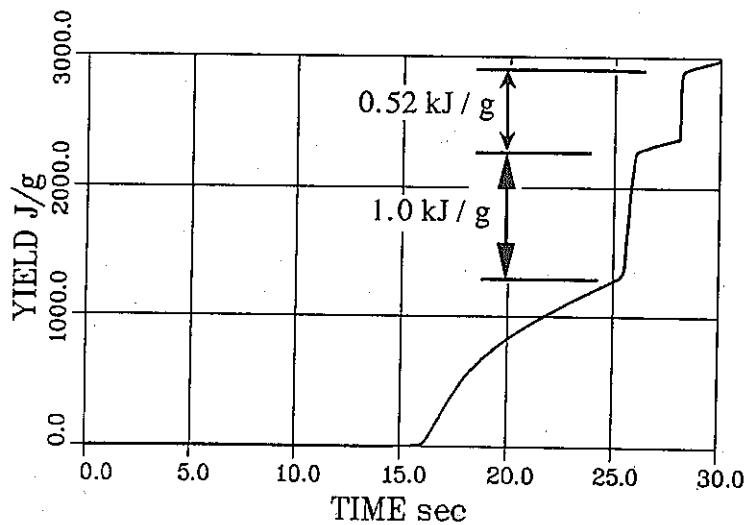
図4.4-2 19本照射ピン束パルス試験の評価結果



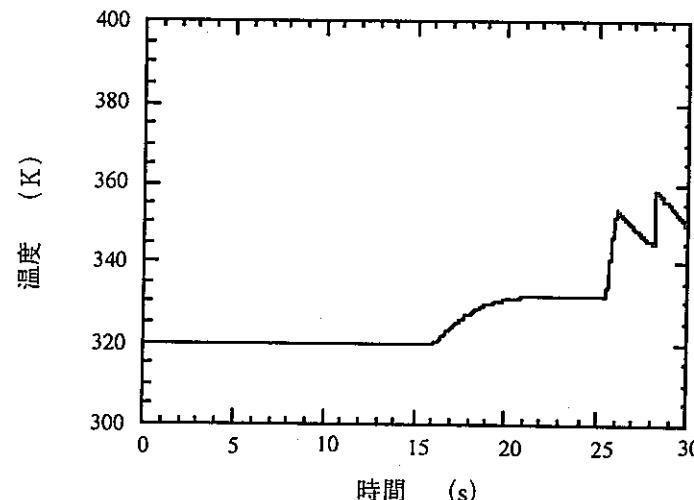
反応度履歴



駆動炉心燃料の最高温度履歴

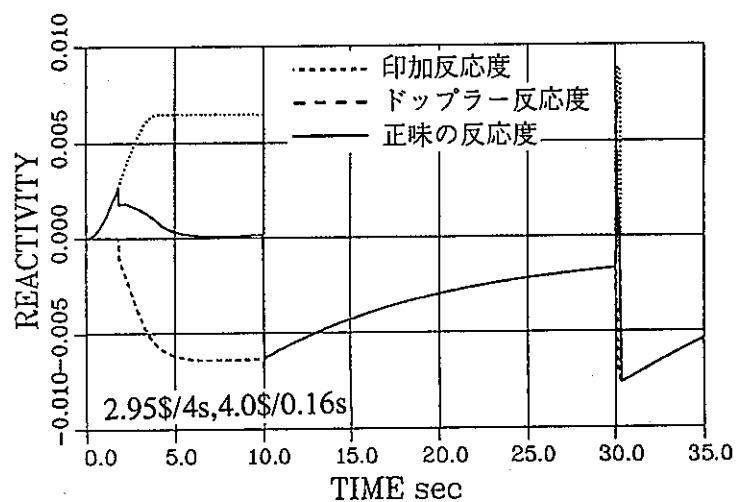


試験体への投入エネルギー積分量

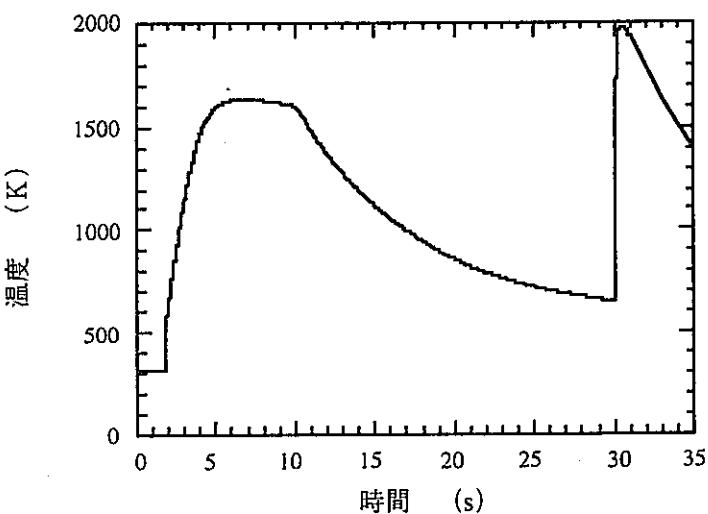


冷却材の最高温度履歴

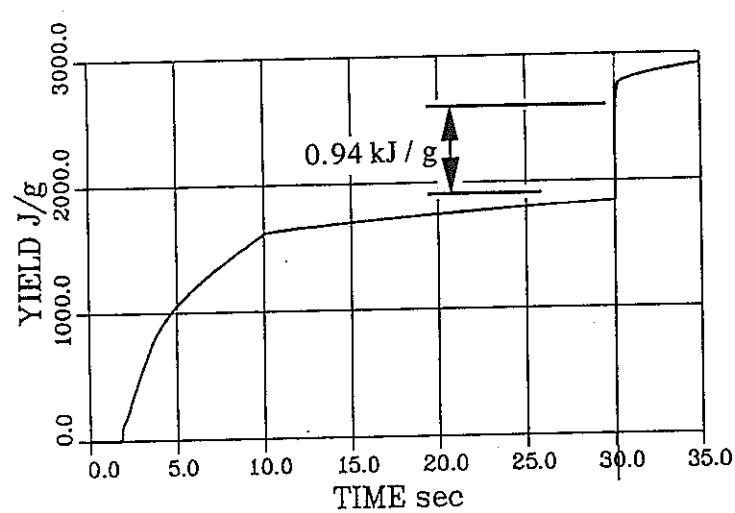
図4.4-3 19本照射ピン束ダブルパルス試験の評価結果



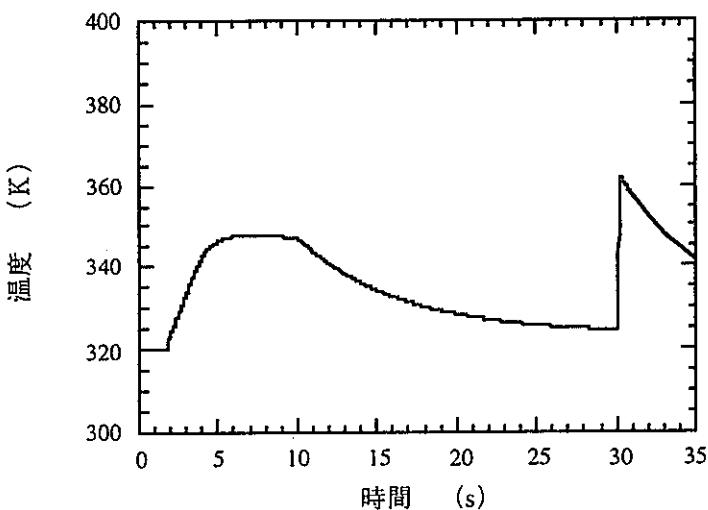
反応度履歴



駆動炉心燃料の最高温度履歴



試験体への投入エネルギー積分量



冷却材の最高温度履歴

図4.4-4 プール過渡分散試験の評価結果

4.5 SERAPH施設概念検討のまとめ

- (1) PuO₂-BeO / D₂O体系の炉心概念の検討を継続し、各要素技術の性能向上、成立性検討を行い、今後の検討課題を抽出した。

- ①核特性.....炉心構成の改良、試験体薄肉化等により硬スペクトルを保持しつつ結合係数の向上を行った。核特性においては、軸長増大、軸方向富化度分布等によるドライバー炉心のピーキング低減等による結合係数のさらなる向上、及び過渡時空間動特性による性能評価を行う。さらに、共鳴領域の解析精度向上、スロット等による臨界性解析評価とともにこれらを実証する臨界試験の検討を行う必要がある。
- ②熱輸送・熱流動.....炉体構造、熱輸送系の概念を構築し、局所サブクール沸騰防止について見通しを得た。今後、局所サブクール沸騰については、実証試験を行うとともに低圧損スペーサの開発を行う計画である。
- ③燃料設計.....BeO希釀燃料ペレットの試作を行い、小粒径、高焼結密度、均一分散のペレット製造の見通しを得るとともに、燃料要素概念を構築した。今後は、燃料熱物性を確認するとともに、設計研究としては要素設計に重点を移し、伝熱抑制型燃料の成立性について検討を実施する計画である。
- ④燃料移動計測.....中性子ホドスコープのシステム概念を構築するとともに、S/N向上、内部可視性等の検討を行った。バックスロットの有無は、核特性とも密接に関連するものであり、システム構成について検討を継続する。また、高速中性子検出器の開発についても着手する必要がある。
- ⑤試験体設計.....薄肉化した試験体壁構造での熱応力解析を実施し、試験体ルツボの高温融体物質保持性について見通しを得た。今後、計測系配置を考慮した試験体全体概念の検討を進めるとともに、試作・実証を含めた研究開発を実施する計画である。

以上、各要素技術の検討を継続するとともに、これらの整合性のとれた全体構想の構築を推進するものとする。

(2) 基盤安全研究に対する試験性能

SERAPH施設としては、定常、ランプ、パルスの各試験運転モードにおいて、駆動炉心の制御性を含め、試験体の所定の試験要求条件をほぼ満足し、また、試験時の試験体に係わる種々のプロセス量の変化及び試験燃料移動挙動を計測できる概念が成立する見通しが得られた。

(3) 実用化先導研究に対する試験性能

抽出された各テーマについて、試験成立性、検出性の観点からSERAPHの適用性を概括した。

- ① 試験条件設定は、基盤安全研究のために備えた試験能力で対応可能である。
- ② システム動作及び燃料移動挙動等は、基盤安全研究で検討されたプロセス計測及び、ホドスコープを含んだ中性子計測でほぼ検出可能と考えられる。

5. 結論

5. 結論

本報告書は、動燃事業団におけるSERAPH計画に関する、主として1992～1994年度にかけての期間の検討内容とその成果をとりまとめたものである。

以下、本報告書に記載した検討の成果を結論としてまとめる。

- (1) FBR 実用炉に向けての総合的安全確保の考え方と目標の明確化を試み、それを達成するための安全研究課題の抽出と研究手段を包括的にとりまとめた。その中で、実用化段階で求められる経済性と安全性の水準を達成するための有効な研究手段のひとつとしてSERAPH計画が位置づけられ、その必要性が認識された。
- (2) 安全研究課題は、従来より検討してきた基盤安全研究テーマと、新たに検討スコープに加えた受動的安全性向上方策のような革新的技術を含む実用化先導研究テーマとに分けて検討された。後者に対する検討にあたっては、広く研究テーマの抽出を行った。
- (3) 基盤安全研究テーマでは、現状において、また、実用化時代においても重要と考えられる燃料破損限界、異常拡大防止、炉心安全、ソースタームなどに関する研究テーマについての今後の研究の必要性を明確化し、これらを解決するために必要な研究課題の抽出及び新たな炉内試験テーマの提案を含む研究実施方針の提示を行った。また、各テーマごとに炉内試験研究から期待される効果などが集約された。
- (4) 実用化先導研究テーマでは、安全性の一層の向上のために有効な受動的安全特性に注目し、炉心損傷への拡大防止方策、炉心損傷時の影響緩和方策の両面から、既提案、新規提案の各方策の有効性、技術的な成立見通し、経済性などを総合的に検討し評価した。その結果に基づいて、適切な方策の組み合わせ例を抽出し、実用化に向けての研究開発実施方針を検討した。その中で炉内試験研究を必要とする研究テーマについては、SERAPHの試験研究テーマとして提案した。
- (5) (3)及び(4)における検討結果を集約して、SERAPH試験研究計画としてとりまとめた。SERAPHを用いた各テーマの試験成果に加えて、関連して進められる炉外試験や解析コード開発などから取得できると期待される知見及び今後高度化される技術基盤を総合すれば、(1)で述べた実用炉における安全性の目標が達成できるものと期待できる。言い換えるならば、FBR 実用化に求められるより合理的な安全性の水準を達成するためには、今後の安全研究の進展、特に SERAPH 計画で提案した炉内試験計画の推進が重要な役割を担うものと判断される。
- (6) 施設概念の検討については、SERAPH計画で提案された各研究テーマに対する炉内試験を実現するために試験炉施設に対する要求条件の一層の具体化・明確化を図っ

た。現状での基準炉心概念の抽出によって絞り込まれた全体施設概念の検討及び物質移動計装等の関連技術開発に関する検討が着実に進展していることが認識された。現在までの検討により、各試験テーマについての要求条件に対する充足度の評価を行い、施設概念が基本的には成立するとの見通しが得られた。すなわち、予備的ではあるが、SERAPH計画が単なる机上の計画ではなく、今後その実現可能性を追求する価値のあるプロジェクトであるとの技術的見通しを得た。

- (7) ただし、(6)で述べた見通しを試験炉施設の技術的成立性を確認するレベルまで引き上げるためには、駆動炉心の核熱性能の一層の向上による余裕のある施設設計の追求等が重要であるということが現在までの検討の結果明らかにされた。また、燃料開発・設計、物質移動計装等の長期的研究開発を要する重要な要素技術も認識され、これらの重点課題に対する検討を引き続き着実に進める必要がある。
- (8) 今後の検討としては、試験計画の検討においては、必要な研究テーマに関する長期的な研究開発計画の明確化と具体化をさらに進めるべきである。またより効率的な安全性向上方策を求めて、炉内試験研究テーマの検討の継続と試験条件等の研究内容の具体化を行い、施設概念の検討への反映を行うことが重要となる。
- (9) 今後の施設概念の検討においては、次ステップである「概念設計」段階への移行に向けて、施設概念の基礎的検討を一步ずつ着実に進める必要がある。その中では、(7)に述べた重点課題に加えて、例えばナトリウム冷却方式のような施設概念の候補についても併せて幅広く検討を行っておくことも重要である。

本報告書では、第4期までのSERAPH計画検討の結果を取りまとめたが、上記のように、着実な検討の進展が認められる。炉内試験の必要性の検討においては、FBR実用化に向けての安全確保体系の中に各試験研究テーマを明確に位置づけるという目的指向型のアプローチを探った。その結果、試験計画全体の構成と期待される効果が鮮明に見えるようになったと考える。また、受動的安全性向上方策の検討は、安全確保体系の厚みを増す意味から有効であり、特に深層防護の前段である「防止方策」を強化した構成は、今後、社会的受容性が高く、合理的で分かりやすい安全論理を構築していく上からも重要な観点であると考えられる。

参考文献

- (1) Y. Kani and K. Aizawa, "Application of Probabilistic Safety Assessment," *Symposium on the Core Disruptive Accidents of Fast Breeder Reactors*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, July 27-28, 1990.
- (2) S. Kondo, N. Nonaka, O. Miyake, et al., "Integrated Analysis of In-Vessel and Ex-Vessel Severe-Accident Sequences," *1990 Intnl. Fast Reactor Safety Mtg.*, Snowbird, Utah, U.S.A., August 1990.
- (3) N. Nonaka, O. Miyake, S. Kondo, "Characterization of LMFBR Severe Accident Progression," *Intnl. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant*, Tokyo, October 1992.
- (4) 野中, 佐藤, 丹羽, 「国際共同CABRI炉内試験計画の進展とその成果」動燃技報, No.82, p.38, 1992年6月
- (5) A. Boltax, S. Shikakura, et al., "Fuel Pin Behavior during Duty Cycle Testing," *1990 Intnl. Fast Reactor Safety Mtg.*, Snowbird, Utah, August 1990.
- (6) N. Nonaka and I. Sato, "Improvement of Evaluation Method for CDA Initiating-Phase Energetics Based on CABRI-I In-Pile Experiments," *Nucl. Technol.*, Vol.98, p.54, 1992.
- (7) Satoru Kondo, et al., "SIMMER-II Application and Validation Studies in Japan for Energetics Accommodation of Severe LMFBR Accidents," *Int. Mtg. on Fast Reactor Safety*, Knoxville, Tennessee, April, 1985.
- (8) M. Saito and M. Ishikawa, "Sensitivity Study on Shock Structural Response of the Prototype LMFBR Vessel under HCDAs Using the PISCES-2DELK Code," *BNES Conf. on Science and Technology of Fast Reactor Safety*, Guernsey, Channel Islands, May, 1986.
- (9) O. Miyake, et al. "Development of CONTAIN Code for FBR Severe Accident Analysis," *Intnl. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant*, Tokyo, October 1992.
- (1 0) H. Ninokata, et al., "Key Issues in R&Ds and Their Prospective Views Related to LMFBR Core Disruptive Accidents," *ibid.*
- (1 1) H. Uchida, "The principal Nuclear Safety Policies in Japan," The Second NEA Seminar on Interface Questions in Nuclear Health and Safety, Paris, 12-13 September, 1990.
- (1 2) Y. Ieda, et al., "STRATEGY OF EXPERIMENTAL STUDIES IN PNC ON NATURAL CIRCULATION DECAY HEAT REMOVAL," Proc. of Spec. Mtg. on Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection, IAEA-IWGFR/88, O-arai, Feb. 22-23 , 1993.
- (1 3) J. B. Waldo, et al., "APPLICATION OF THE GEM SHUTDOWN DEVICE TO THE FFTF REACTOR," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, vol. 53 p312, 1986.

- (1 4) V.I. Matveev, et al., "PHYSICAL GROUNDS FOR FURTHER IMPROVEMENT OF FAST SODIUM POWER REACTOR SAFETY," Int'l. Fast Reactor Safety Mtg., Snowbird, Utah, Aug. 12-16 , 1990.
- (1 5) R.B. Tupper, et al., "DEVELOPMENT OF A SELF-ACTUATED SHUTDOWN SYSTEM," ASME-JPGC-NE-8 , 1981.
- (1 6) K. Satoh, et al., "A STUDY OF ENHANCED SAFETY SYSTEMS FOR LMFBRS," Int'l. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP92), Tokyo, Oct. 25-29 , 1992.
- (1 7) M. Edelmann, et al., "ENHANCED THERMAL EXPANSION CONTROL ROD DRIVE LINES FOR IMPROVED PASSIVE SAFETY OF FAST REACTORS," Int'l. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP92), Tokyo, Oct. 25-29 , 1992.
- (1 8) 安成弘他：「受動的安全システムに関する調査」,(社)日本原子力産業会議受動的安全システムに関する調査委員会報告書, 1991年
- (1 9) 佐藤, 「CABRI-2炉内試験総合評価 (1) : 破損前燃料挙動の解釈とモデル化」日本原子力学会93年秋の大会予稿集, C 2
- (2 0) H. Tsai, L.A. Neimark, T. Asaga, S. Shikakura, "Performance of Fast Reactor Mixed-Oxide Fuel Pins during Extended Overpower Transients," *SMiRT 11 Trans.* Vol.C, August 1991, Tokyo, Japan.
- (2 1) S. Ukai, et. al., "Release Characterization of Delayed Neutron Precursors from Breached FBR Fuel Element," *Nucl. Science and Technology*, Vol.26, pp931-938, October 1989.
- (2 2) P. Weimar and W. Ernst, "MOL-7B - An 18-pin Bundle Operating 200 days Beyond Breach," *Nucl. Tech.*, Vol.57, p81, April 1982.
- (2 3) D.H. Tompson, et. al., "SLSF Local Fault Safety Experiment P4 - Summary and Conclusions," *Proc. Intnl. Topic. Mtg. on Fast Reactor Safety*, Knoxville, p.129, April 1985.
- (2 4) P. Weimar and K. Schleisiek, "Results of Postirradiation Examinations of the In-pile Blockage Experiments MOL7C/4 and MOL7C/5," *Nucl. Tech.*, Vol.96, p.29, October 1991.
- (2 5) M. Schwarz, et. al., "Propagation of the Molten Fuel out of a Faulted Subassembly: the SCARABEE Programme and the Supporting Experiments - Preliminary Results and Analysis," *Proc. of Intnl. Conf. on Science and Technology of Fast Reactor Safety*, Guernsey, p.257, May 1986.
- (2 6) Y. Ieda, H. Niwa, N. Uto and S. Kondo, "Assessment of Proposed Passive Prevention and Mitigation Features for Future Fast Breeder Reactors," *ARS'94 - International Topical Mtg. Advanced Reactors Safety*, 17-21 April, 1994.
- (2 7) C. Allison, et al., "Severe Core Damage and Associated In-Vessel Fission Product Release," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.20, No.2, pp.89-132, 1987.

- (2 8) H. Albrecht, et al., "Review of the Main Results of the SASCHA Program on Fission Product Release under Core Melting Conditions," *Proc. Fission Product Behavior and Source Term Research ANS Topical Mtg.*, Snowbird, Utah, July 1984.
- (2 9) M. F. Osborne, et al., "Experimental Studies of Fission Product Release from Commercial Light Water Reactor Fuel under Accident Conditions," *Nuclear Technology*, Vol.78, pp.157-169, August 1987.
- (3 0) D. J. Wren, et al., "High-Temperature Reactor Safety Research in Canada," *High Temperature Science*, Vol.24, pp.103-122, 1987.
- (3 1) H. Feuerstein, et al., "Behaviour of Fission Products and Fuel in a Sodium Vapor Atmosphere at Temperatures up to 2600 C," *Proc. BNES Conf. on Sci. and Tech. of Fast Reactor Safety*, Guernsey, May 1986.
- (3 2) G. Berthoud, et al., "Experiments on Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Aerosol Source Terms after Severe Accidents," *Nuclear Technology*, Vol.81, pp.257-277, May 1988.
- (3 3) 下山, 石川, 宮原, 「希ガス気泡に隨伴するヨウ素のナトリウム中への移行挙動」, 動燃技報No.83, pp.46-50, 1992年9月
- (3 4) D.J. Osetek, et al., "Behavior of Fission Products Released from Severely Damaged Fuel during The PBF Severe Fuel Damage Tests," KfK3880/3, 1984.
- (3 5) J. E. Herceg, et al., "TREAT Light Water Reactor Source Term Experiments Program," CONF-840701--15, 1984.
- (3 6) M. D. Allen, et al., "Fission Product Release and Fuel Behavior of Irradiated Light Water Reactor Fuel under Severe Accident Conditions: The ST-1 Experiment," *Nuclear Technology*, Vol.92, pp.214-228, April 1990.
- (3 7) M. L. Carboneau, "Highlight of the OECD LOFT LP-FP-2 Experiment including Hydrogen Generation, Fission Product Chemistry, and Transient Fission Product Release Fractions," EGG-M--90151, 1990.
- (3 8) P. Delchambre, et al., "The Phebus FP project," EUR-12195, 1989.
- (3 9) P. J. Fehrenbach, et al., "Description of the Blowdown Test Facility COG Program on in-Reactor FP Release, Transport, and Deposition under Severe Accident Conditions," AECL-9343, 1987.
- (4 0) H. Wild, et al., "Release of Fission Products from Defective Pins into Sodium,"
- (4 1) H. Endo, et al., "Deposition Mechanism of Fission Products on Stainless Steel Surfaces," *Proc. BNES Conf. on Sci. and Tech. of Fast Reactor Safety*, Guernsey, May 1986.
- (4 2) L. Leenders, et al., "Fission Product Transfer from Fuel to Sodium in Mol7C6&7 Experiments," EUR-12343-EN, pp.906-922, 1989.
- (4 3) F. Daguzan-Lemoine, et al., "The Fission Product Behaviour in CABRI 1 Experiments," *Proc. 1990 Int. Fast Reactor Safety Mtg.*, Snowbird, Utah, August 1984.
- (4 4) D. K. Cartwright, et al., "Fission-Product Measurements in the SCARABEE Mono and

- Seven-Pin Loss-of-Coolant Experiments," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.59,pp.287-300,1980.
- (4 5) 傍島,他,「高速炉の事故時燃料挙動に関する研究の現状とNSRRにおける計画」, JAERI-M 88-158, 1988年8月
- (4 6) L.E. Thomas, C.E. Beyer and L.A. Charlot, "Microstructural Analysis of LWR Spent Fuels at High Burnup," *J. of Nucl. Mater.*, Vol.188, pp80-89, 1992.
- (4 7) N. F. Landers and L. M. Petrie, "CSAS4 : An Enhanced Criticality Safety Analysis Module with An Optimum Pitch Search Option," Oak Ridge National Laboratory.
- (4 8) K. D. Lathrop and F. W. Brinkley, "TWOTRAN-II : An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport," LA-4848-MS, July 1973.
- (4 9) W. E. Ford, C. C. Webster and R. M. Westfall, "A 218-Group Neutron Cross-Section Libraries in the AMPX Master Interface Format for Criticality Safety Studies," ORNL/CSD/TM-4, 1976.
- (5 0) 村尾良夫他,「高転換軽水炉の熱水力工学の研究」, JAERI-M 91-055 , 1991.
- (5 1) Dalle Donne, M. et. al., "Critical Heat Flux Correlation for Triangular Arrays of Rod Bundles with Tight Lattices, Including Spiral Spacer Effect", Nuclear Technology, Vol.71, pp. 111 , 1985.
- (5 2) "ペリリアに関する国際会議（第1回）提出論文及び討議回答のレビュー" R.Smith and J.P.Howe (Editors) , *J. of Nucl.Mat* , Vol.14, 1964
- (5 3) W.W.Beaver, J.G.Theodore and C. A. Bielawski, " Effects of Powder Characteristics, Additives and Atmosphere on the Sintering of Sulfate-Derived BeO," *J. of Nucl. Mat.* Vol.14, pp.326-337, 1964.
- (5 4) B.R.Steele, N.S.Hibbert, F.Rigby, B.Oldfield, and F.S. Martin," The Preparation and Characterisation of Ceramic Grade BeO," *J. of Nucl. Mat.*, Vol.14, pp.310-314, 1964.
- (5 5) R.J.Brown and N. W. Bass," Fabrication and Properties of Commercial Beryllia Ceramics for Nuclear Applications," *J. of Nucl. Mat.*, Vol.14, pp. 341-348, 1964.
- (5 6) S. C. Carniglia, R. E. Johnson, A. C. Hott and G. C. Bentle," Hot Pressing for Nuclear Applications of BeO ; Process, Product, and Properties," *J. of Nucl. Mat.*, Vol.14, pp. 378-394, 1964.
- (5 7) K. Fukuya, M. Terasawa and K. Ozawa, " Data Compilation for Radiation Damage on Ceramic Insulators ; Revised with Updated Data and Reviews," JAERI-M 87-217, Jan. 1988., 邦文表題：「セラミック絶縁材料の放射線照射効果に関するデータ収集；(新データの追加および評価による改正版)」
- (5 8) C. G. Collins," Radiation Effects in BeO," *J. of Nucl. Mat.*, Vol.14, pp. 69-86, 1964.
- (5 9) R. W. Swindeman," Thermal Shock Tests on Beryllia," *J. of Nucl. Mat.*, Vol.14, pp. 404-415, 1964.
- (6 0) NSRR 研究委員会実験計装開発専門部会「放射線による燃料移動測定の現状」, JAERI-M 7683 , 1978.

- (6 1) J. G. Kelly, K. T. Stalker, " Performance Characteristics of the Annular Core Research Reactor Fuel Motion Detection System ", Nuclear Technology, Dec. 1983-Vol. 63.
- (6 2) C. L. Fink, A. De Volpi and G. Stanford, " Advances in Clad Blockage Detection ", Trans. of the 2nd Technical Exchange Meeting on Fuel- and Clad-motion Diagnostics for LMFBR Safety Test Facilities, 1976, ANL/RAS 76-34.
- (6 3) K. Baumung, K. Bohnel and H. Bluhm, " The CABRI Fast Neutron Hodoscope ", Nuclear Technology, Oct. 1985-Vol. 71.
- (6 4) A. De Volpi et al., " Fast-Neutron Hodoscope at TREAT : Development and Operation ", Nuclear Technology, Nov. 1975-Vol. 27.
- (6 5) A. De Volpi et al., " Fast-Neutron Hodoscope at TREAT : Data Processing, Analysis, and Results ", Nuclear Technology, Sept. 1976-Vol. 30.
- (6 6) A. De Volpi et al., " Fast-Neutron Hodoscope at TREAT : Methods for Quantitative Determination of Fuel Dispersal ", Nuclear Technology, Jan. 1982-Vol. 56.
- (6 7) CASES OF ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE CASE N-47-28
- (6 8) 「高速増殖炉工学基礎講座」, 日刊工業新聞社刊「原子力工業」誌, 1989年3月号～1992年6月号別冊
- (6 9) 安藤良夫・岡林邦夫, 原子力工学シリーズ3「原子力プラントの構造設計」, 東京大学出版会
- (7 0) W. J. O'Donnell, J. S. Porowski, M. Badlani, " DEVELOPMENT OF ELEVATED TEMPERATURE STRUCTURAL DESIGN CRITERIA ", FINAL REPORT for TECHNICAL RESEARCH ASSOCIATION FOR INTEGRITY OF STRUCTURES AT ELEVATED SERVICE TEMPERATURES and NIPPON BENKAN KOGYO CO., LTD.
- (7 1) S. S. Clark, J. V. Del Benc, R. Katz, J. F. Petersen and M. Troost, "TAC2D : A General Purpose Two-Dimensional Heat Transfer Computer Code - User's Manual -," GA-8868, Sept. 1969.