

分置

受動的 안전特性による F B R の安全性の強化(I)

— 受動的 안전方策の評価、研究開発計画の提案 —

1994年8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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

受動的安全特性によるFBRの安全性の強化 (I) - 受動的安全方策の評価、研究開発計画の提案 -

家田芳明*1、丹羽元*2、宇都成昭*1、山口彰*1、上出英樹*1、
大島宏之*1、林謙二*1、宮越博幸*1、戸田信一*3、早船浩樹*1、
小林順*1、江沼康弘*1、村松寿晴*1、佐藤和二郎*1

要旨

この報告書では、将来の大型高速増殖炉を対象として、炉心崩壊事故（CDA）の発生防止あるいは影響緩和の目的で導入される可能性のある受動的な安全方策について議論する。

まず、受動的な安全方策を評価するための方法論を提案する。また、従来から提案されている受動的な安全方策をレビューするとともに、CDAの発生防止及び（または）影響緩和に有効な革新的な受動的な安全方策を提案する。これらの受動的な安全方策を、提案した方法論で評価した後、推奨される受動的な安全方策の組み合わせ例を提示する。

さらに、受動的な安全方策の有効性を実証するために必要な研究開発計画を、新たな炉内試験計画を含めて提示する。

*1 安全工学部原子炉工学室
*2 安全工学部高速炉安全工学室
*3 安全工学部原子炉工学室（現：川崎重工（株））

Improvement of the Level of Safety for Future FBR by means of
Passive Safety Features (1)
- Assessment of Passive Safety Measures and Proposal of their R&D
Programs -

Yoshiaki Ieda*¹, Hajime Niwa*², Nariaki Uto*¹, Akira Yamaguchi*¹,
Hideki Kamide*¹, Hiroyuki Ohshima*¹, Kenji Hayashi*¹,
Hiroyuki Miyakoshi*¹, Shin-ichi Toda*³, Hiroki Hayafune*¹,
Jun Kobayashi*¹, Toshiharu Muramatsu*¹ and Kazujiro Satoh*¹

Abstract

In this report passive prevention and mitigation measures with regard to core disruptive accident in future large scale liquid metal cooled fast breeder reactors are discussed and assessed.

First the criteria for the assessment of passive safety measures are proposed, and the commonly proposed passive prevention and mitigation measures are briefly reviewed. Then innovative prevention and mitigation measures are newly proposed to provide additional mechanisms to limit the core damage or to prevent a recriticality event during the core disruption process. After assessing these passive measures based on the proposed criteria, appropriate combinations of the measures are recommended.

Further, required R&D programs to confirm their effectiveness are described including necessity of a new in-pile experimental program.

*1: Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC.

*2: FBR Safety Section, Safety Engineering Division, OEC.

*3: Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC. (Presently, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

目次

要旨	
第1章	はじめに 1
第2章	受動的安全方策の項目の整理 2
第3章	重点テーマの絞り込みのための評価の視点の抽出 6
第4章	ランク付けの結果 19
第5章	分類結果及び考察 25
第6章	受動的安全方策の組み合わせ 28
第7章	受動的安全方策に関する研究開発実施計画の検討 34
第8章	まとめと今後の課題 36
	謝辞 39
	参考文献 40
資料A	受動的な安全方策に関するR&D項目 - R&D実施計画の検討 85

図リスト

- 図 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 2 - 2 フローティング型SASS機構の概要
- 図 2 - 3 集合体内SASS機構
- 図 2 - 4 燃料ピン型SASS機構
- 図 2 - 5 炉心槽での集合体拘束方式の工夫
- 図 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 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 2 - 8 超塑性変形グリッドスペーサ
- 図 2 - 9 吸収材封入カプセル入り燃料ピン
- 図 3 - 1 受動的安全方策の評価の視点
- 図 3 - 2 受動的安全方策の絞り込み、組み合わせ検討の手順
- 図 3 - 3 「安全論理との整合性」の視点について、評価の考え方・概念
- 図 6 - 1 受動的安全方策の組み合わせ例

表リスト

- 表4-1 評価の視点各項目に対する評価パラメータ及びその設定理由：メカニズム
- 表4-2 「メカニズム」に関するランク付け結果一覧
- 表4-3 評価の視点各項目に対する評価パラメータ及びその設定理由：確実性
- 表4-4 「確実性」に関するランク付け結果一覧
- 表4-5 評価の視点各項目に対する評価パラメータ及びその設定理由：経済性
- 表4-6 「経済性」に関するランク付け結果一覧
- 表4-7 評価の視点各項目に対する評価パラメータ及びその設定理由：運転制御性
- 表4-8 「運転制御性」に関するランク付け結果一覧
- 表4-9 ランク付け結果総括
- 表5-1 「メカニズム」に関する分類結果一覧
- 表5-2 「確実性」に関する分類結果一覧
- 表5-3 「安全論理との整合性」に関する分類結果一覧
- 表5-4 組み合わせ検討のための分類一覧
- 表7-1 受動的な安全方策に関する研究開発計画一覧

第1章 はじめに

高速増殖炉の実用化に向けて、さらに安全性を強化することが望まれる。このためには、受動的な安全方策を積極的に導入することが有効であると考えられる。従来より、種々の受動的な安全方策が提案されてきているところではあるが、それらを平等に、システマティックに比較評価した研究は無く、どの方策が本当に有望なのか判断するのが困難である。そこで、本研究では、種々提案されている受動的な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受動的な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受動的な安全方策についての評価

種々の受動的な安全方策について、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) 評価の視点の抽出

重点テーマを絞り込む上で評価すべき項目（視点）を洗いだし、整理する。

- ii) 評価の実施

受動的な安全方策の適切な組み合わせを検討するとともに、有望な方策を拾い出すため、抽出した「視点」についての評価を実施する。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なう。

- 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な安全方策の絞り込みを実施する。方策の適切な組み合わせについても検討する。絞り込みを行う際には、組み合わせをも考慮する必要がある。

- ④課題の抽出、研究方法の検討

絞り込んだ受動的な安全方策について、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。特に、炉内試験、実炉試験については、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の検討を行なう。

②～④の検討は、概ね、番号の順に検討を進めることとなる。①については、②～④と関連を持たせながら平行して検討を進める必要がある。本報告書では、②～④の検討を行なう。①に関連するものとしては、受動的な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。また、受動的な安全方策の適切な組み合わせの検討は、システム概念の提案に結びつくものである。

第2章 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で、評価手法の高度化が必要という程度の位置付けのもので、その現象についての具体的な促進方策の提案が無いものは拾わない（従来の安全研究の範疇で検討すべき）。
- (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 - も重要度は高いが、相対的に研究の進捗度が高いため⁽¹⁾、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しないかという観点）を取り上げ検討を実施する。

「格納」に係わる安全方策については、軽水炉で提案されているような静的な格納容器冷却の方策等は高速炉では重要でないこともあり具体的な促進方策が示されていないし、メカニズムに係わる研究としては従来の安全研究の中で考える。

上記方針に基づいて抽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. アニユラー炉心

No.2. 熱設計に関わる安全向上

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）⁽²⁾

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 2-1 参照]

No.6. ナトリウムプレナム付炉心 (3)

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 (4)

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 2-2 参照]

No.9. キュリー一点式SASS (自己作動型炉停止機構) (5)

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 2-3 参照]

No.12. 集合体内SASS (自己作動型炉停止機構) [図 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 (6)

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 (6)

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 (EFRのATHENa) (7)

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 2-5 参照]

(例えば、

- ①板バネ状のもので拘束：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炉心拘束：地震に対しては剛に炉心を拘束し、炉心の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 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 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 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 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熔融燃料への毒物混入 (動燃の林提案)

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熔融燃料の炉外排出)

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weep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、この報告書の中では、「評価の視点」の抽出を行なう際に、できるだけ幅広い洗いだしに心掛ける。したがって、とりあえず、共通の視点で評価を行なうこととし、炉心形状、燃料組成を変える方策の評価にそぐわない項目については、評価を行なわないこととする。

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、線出力を高めた炉心設計も考えられるが、ここでは、その利点を安全性の余裕に充てると考える。また、金属燃料では、小型炉心の方が整合性が良い面もあるが、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。

第3章 重点テーマの絞り込みのための評価の視点の抽出

重点テーマを絞り込む前段階として、前の章で抽出した受動的安全方策の項目を比較評価する「視点」の抽出を行なった。抽出結果を図 3-1 に示す。抽出された評価の視点を整理すると、以下の5つに大きく分類される。

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

また、「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なうための視点、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。

「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、組み合わせて導入する必要がある。「分類」の検討結果は、主に、この組み合わせを検討するための判断材料として用いることとなる。一方、「ランク付け」の結果は、研究開発対象の重点の絞り込みの判断材料として用いる。

すなわち、「ランク付け」の視点で有望な受動的な安全方策を抽出し、「分類の視点」でそれらを分類し、その分類結果を念頭に入れながら「総合化の視点」で受動的な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（図 3-2 参照）。

以下に、各項目を評価の視点として選択した背景、根拠、「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

受動的な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。

受動的な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を中心としたメカニズムが存在する。ここでは、個々の受動的な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ことにする。

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、従って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、その効果の大きさに期待するあまり、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。

一方、いくら受動的な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。

さらに、ここで検討する受動的な安全方策の中には、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し得るものがあると考えられる。

以下、効果の大きさ、受動性の程度、簡易性（単純性）、除熱との整合性の4つをランク付け項目とし、検知・作動に係わる物理量、作動原理、即応性（事故フェーズ）、非可逆性の4つを分類項目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なるので、分類の項目の一つとの見方もできる。

i) 検知・作動に係わる物理量

- 受動的な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初めて作動する故、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。
- 各受動的な安全方策における、検知・作動に係わる物理量について調べる。

ii) 作動原理

- 物理量を検知した受動的な安全機能は、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、個々の受動的な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。
- 各受動的な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、ということ把握しておくことも、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性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、可逆的に変動させ得るよりも、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、システムの安全性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、事象終熄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、ランク付けの項目として検討する目的は、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、例え単独では事象終熄させる程度の効果を有していないとしても、最低限、組み合わせを行なうことによって事象終熄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も重要な項目であり、単一の方策で事象を終熄させることができるか否かを調べる分類項目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な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といえる。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な安全システムが、有効に作動したにも係わらず除熱性能に著しい影響を及ぼすようなことがあっては、二次的な意味で異常を発生させる恐れがあり、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等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に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り得ることも考えられる。

- ここでは、各方策における受動的な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な安全機能の重要

な条件である。

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。
- 信頼性が高いことに加えて、その高い信頼性が安定して確保されることが重要である。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これを明確にする。
- ただし、ここでの不確定性とは、その安全方策が現時点で開発段階であるが故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

- それぞれの安全方策を実際に実機に施した後、その方策が事故時に確実に機能することを担保するため、供用期間中に点検や保守が可能か否かは重要な観点である（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、点検を行なう際に、事故条件を模擬した状態を実現できない。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、大規模な交換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ことが可能である。

iii) マイナス要因

- ある受動的な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を持ち得る場合、これを排除する必要がある。特に正の反応度を与える可能性に着目する。
- 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持ち込む可能性がある（フェイルセーフ性の観点）。この可能性に着目する。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。

- この項目により、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、何等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。
- 従って、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：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：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：炉心湾曲

炉心湾曲は1次系冷却材の温度上昇にともなう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、集合体内温度高、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）

- 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、設備の中には、照射損傷等によって劣化し、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（分類項目）

- 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わせることは、想定する全ての起因事象とその事象進展を考慮したときに、安全方策が機能すること

の確実性を確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は電氣的起動信号を必要とせず、流量低下による圧力低下を直接検知して起動する。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点はいづ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、ポンプボニーモータ等の機器の安全性のグレードを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、経済性を犠牲にすることを強いられる場合もある。

ここで検討している炉停止に係わる受動的な安全方策については、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、経済性を低下させるものが多いと考えられる。

ここでは、それぞれの方策の導入を断念せざるを得ないほどの経済的なマイナス要因が存在しないかを調べる。

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、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、当該設備の寿命（耐久性）、当該設備の交換の容易性という5つの小項目にわけて検討を進める。なお、これらの小項目は、ランク付けのための視点として摘出した。

i) 設計へのインパクト

- 例え付加した安全方策で安全性が高められたとしても、FBRのメリットが著しく損ねられては本末転倒になる。
- 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ねる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。
 - 例えば、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実施する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）
- それぞれの安全方策を実現するため、部品、設備が付加される。それらを製作、設置するための費用、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) 事象終熄後の再起動可能性
- それぞれの安全方策により事故事象を終熄させた後、プラントを再起動するために必要な運転操作、補修工事等が多いか少ないかは、経済性の面から重要な観点である。
 - 事象終熄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。
- それぞれの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。
- 極端な安全設計では、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。

- この項目では、それぞれの安全方策を導入することによって、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

安全論理とは必要十分な安全性が達成されていることを論理的に判り易く示すものであると考えられる。受動的な安全特性を導入する目的は、以下であると考えられる（図 3-3 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、

- ・ 事故進展の観点（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、
- ・ 事故分類の観点（事故シナリオ）^②からは、全ての起因事象、基本的な安全機能、事故カテゴリ分類を含めた事象進展全般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。従って、十分に適切な能力（単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わせ^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によ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。そこで検討すべき項目として、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確保することができ、それがすなわち、社会的受容性にもつながる。

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、「起回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」が上げられる。しかし、リスクの尺度は、発生頻度及び事故のコンセクエンスの低減への寄与であり、それは、確実性の項目で議論した「独立性、多様性」やメカニズムの項目で議論した「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、分類項目の方に加え、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、深層防護の観点からの総合化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) 起回事象と事故カテゴリ（分類項目）

- 起回事象の考え方は、「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」。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、その中に受動的な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必要がある。
- 事故カテゴリは起回事象とプラント応答に応じてULOF, ULOHS等に分類される。
- 起回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（分類項目）

- 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。
- これらはいずれもが安全停止に不可欠なものであるため、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適切に用意されていなければならない。
- 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）（分類項目）

- ここでは設計基準事象を越える領域の事象に着目する。
- リスクは、発生頻度（P）と事故影響（C）の積と単純に定義できない。各事象のリスクカーブ上の座標によっては事故の発生／拡大防止（Pの低減）にウェイトを置くべきものと、事故の影響緩和（Cの抑制）にウェイ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など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。従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)
 - 設計基準を越える事象においては、PとCの持つ重要性は異なっていると考えられる。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。一方、熔融燃料プールのスロッシングによる再臨界は、もともと極低発生頻度であり、Pを低減することの意味は明確でない。よって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の採用等の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 3-3 中のリスクカーブの座標に応じて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はないか。
 - この項目では、各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(コンセンサスの低減)に効果があるのかの分類[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]を行なうのみにとどめ、上記の考察の観点は、総合化として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わせによる安全対策の厚みの適正化(総合化)
- 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氣的、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なうことや冗長性・多様性・独立性により多重性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。
- 欠点としては、起動信号やエネルギー供給が必要であるため、故障の可能性があり、誤作動の可能性もある。

「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。

- 電氣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、能動的な安全方策でカバーできない事象に対処する。
- 欠点としては、効果の大きさが決定的ではなく、他の方策との組み合わ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」

- 本来プラントが有している自然現象に基づく特性。もしくは、それを活用するべく、設計上配慮をする。
- 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。したがって、供用期間中試験を行う必要はない。
- その性質が発現する状況にならない限り誤作動の可能性はない。
- 欠点としては、多くの場合、効果の大きさが決定的でない。また、即応性に欠けるものがある。運転員が制御できない。

「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いため、上記の定義でも重複する部分がある。

「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、固有の特性と言いきれないのが「受動的な安全方策」である。一方、ここで「固有の特性」と分類しているのは、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、かつ、局所的な境界条件（運転条件等によって条件が異なる可能性がある）に依存する等の不作動要因がなく、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である。「固有の特性」は、「受動的な安全方策」の中の特別なものとも言える。

「固有の特性」は、元来、炉を停止に至らしめる効果が決定的でないものが大部分である。この効果が大きくなるように人工的に工夫される。この工夫の部分を含むが故に「受動的な安全方策」と呼んでいる。この工夫の部分が多くなるほど故障の要因となり易い。

「固有の特性」は、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ので、PSAにおけるイベントツリーの中でも、故障の有無を分岐させる必要がない。

- 具体的に、この資料でピックアップした受動的な安全方策を「受動的な安全方策」と「固有の特性」に分類すると以下ようになる。

「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

「受動的な安全方策」

固有の特性と分類された以外の方策。

但し、以下のものについては、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、固有の特性による第三の安全機能の三重の安全機能を、深層防護の各障壁と事故シナリオ（各起因事象、各安全機能、各事故カテゴリ）の何れにも確保するべく組み合わせることとする。これにより、安全上Weak Linkがなく、シーケンスの抜けがないことを示す。なお、これは安全系を一層重装備にするものではなく、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の本来の特性を安全の観点からもカウントすること、それに受動的な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要求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に意義がある）、安全性の厚みを確認する。「能動的な安全方策」は、「従来設計で備わっている静的な機器」で置き換えて検討してもよい。

明かに安全上の厚みが薄いと考えられる部分（深層防護の各障壁、事故シナリオ）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。

「固有の特性」をカウントする目的は、言うならば、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をカウントすることによって、PSAにおけるイベントツリーのキーとなる分岐について、その分岐を不要とすることにある。現象を支配する重要な分岐を「固有の特性」で一つ一つ抹消していくことによって、決定論的な評価と確率論的な評価との違いが小さくなっていく効果もある。したがって、「受動的な安全方策」の中でも、故障を想定する必要がないと考えられる単純なものは、「固有の特性」と同等に扱うことが可能である。三重の安全機能を準備する場合も、「故障の想定が必要無いような受動的な安全方策」+「一般的な受動的な安全方策」+「能動的な安全方策」という組み合わせも可能である。

「一般的な受動的な安全方策」の中でも原理が単純なものは、SERAPH等により実験的な裏付けを得ることによって、「故障の想定が必要無いような受動的な安全方策」に格上げすることが可能と考えられる。但し、受動的なシステムに類する複雑な「受動的な安全方策」は、実証が進んでも完全に故障の可能性を排除するのは困難と考えられる。

- ある受動的な安全方策が全ての事故カテゴリに対して有効とは限らないので、適切に組み合わせる必要がある。全ての事故カテゴリに対して3重の対策の確認を実施する。

v) 社会的受容性（総合化）

- 能動的な安全方策、受動的な安全方策、固有の特性の組み合わせによれば確実に信頼度の高い安全機能が達成されると考えられる。社会的受容性の観点から注目すべきポイントとしては、例えば以下が考えられる。

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

フェイルセーフ性（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、運転制御性の項目で取り上げた評価の視点と深く関係している。したがって、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、総合化の考え方に則って組み合わせることにより、社会的受容性に優れたシステムを作り上げることができると考えられる。

第4章 ランク付けの結果

ランク付けのために抽出した「評価の視点」の小項目毎に、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、評価パラメータの設定理由及びランク付けの方法を表 4-1に示す。この考え方に則ってランク付けを実施した結果を表 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。

受動性の程度では、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。（7）

除熱との整合性では、除熱への影響が大きく、事象進展を熱的に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」について、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ため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」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、中性子の変化を感知して固体吸収材を炉心内に落下させる方策、熔融燃料を重力で炉心外に排出させる方策の内燃料排出流路が比較的大きなものである。

②确实性

确实性に関するランク付けのための評価パラメータ、評価パラメータの設定理由及びランク付けの方法を表 4-3に示す。この考え方に則ってランク付けを実施した結果を表 4-4に示す。

信頼性、不確定性では、特に、フェ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に部分的な詰まりが生じたり、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が生じたりして、沸騰の発生、沸騰領域の拡大に不確定性が存在す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もので、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、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もので、安全方策の機能維持の目的ではなく、燃料交換の目的で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、評価パラメータの設定理由及びランク付けの方法を表4-5に示す。この考え方に則ってランク付けを実施した結果を表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（「扁平炉心」、「アニューラー炉心」）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方策及び、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、評価パラメータの設定理由及びランク付けの方法を表 4-7に示す。この考え方に則ってランク付けを実施した結果を表 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、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、中空ベレット、軸方向ブランケット短縮化、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。各大項目毎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、加点法いづ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」、「キュリー点式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（材料に関するブレイクスルー等）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拾う。
- 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）を拾うこととする。
- ④ 組み合わせでは、目的の違うものを組み合わせることとなるので、目的毎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拾い上げる。
- ⑤ 最終的には、組み合わせを検討し、過不足の確認を行う。（第6章での検討）

まず、①として、Cランクがない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：集合体ラップ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熔融燃料への毒物混入
- No.19. 集合体内SASS（熔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. 軸ブ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毎に整理すると、

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

目的毎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。

第5章 分類結果及び考察

第2章で抽出した受動的安全方策の項目について、第3章で抽出した「評価の視点」の項目にしたがって、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、まずこの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	9、12、18、 11、19	13-1、13-2、 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・検討も行っ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。
 - 検知物理量のしきい値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。従って、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認する必要がある。
 - 検知物理変化量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、いわゆる炉心フラウリング効果、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, 2) はいずれも、冷却材動圧を検知物理量としており、即応性では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LOF時に有効に機能する。さらにGEM (4-1, 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、その作動源は温度や密度の変化といった、可逆的なる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, 2 は、中性子漏洩促進を狙ったものであり、ポンプ誤起動等の動圧回復を考慮すれば可逆的といえるが、ここでは非可逆的に分類している。また、炉心フラウ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性が要求される。
- 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、燃料温度上昇時に即時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い、さらに中性子スペクトルがMOX炉心に比べて一般に硬いことから、ナトリウムボイド反応度はMOX炉心に比べより正である。No.1-1～1-5、2-1を除き、今回挙げた3-1、3-2以外のすべての方策は、元々炉が有する安全性以外の炉心特性を向上させることも損なうこともせずに、ただ安全性のみを向上させようというものである。従って、これらと3-1、3-2とは評価する土俵が元から違う、ということを確認しておく必要がある。

② 確実性

確実性に関する分類の結果を表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に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を除いて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。

第6章 受動的安全方策の組み合わせ

第4章のランク付け結果、第5章の分類結果に基づき、受動的安全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こと（可逆的な方策には非可逆的な方策を組み合わせる必要がある）

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。

第4章で抽出した有望な方策について、組み合わせを考える上での重要な分類を実施した結果の一覧を、表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亙るが、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わせを考える。

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。

- 但し、「固有に近い受動的な安全方策」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、「固有に近い受動的な安全方策」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、他との組み合わせが必要かの分類。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って選択されるのであるが、効果の大きなものと組み合わせる必要がある。

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わせる必要がある。

- 但し、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わせる必要がある。

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わせる場合は、反応度印加の原理が異なるものを組み合わせる方が望ましい。

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6-1の分類で、有効な事象の内の一つに×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。

受動的な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故に、さらにもう一段階信頼性を高めようとしても、同様の炉停止系を追加したのでは信頼性向上に限界がある（共通要因故障の影響）。そこで、異常検出から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）。

固体の中性子吸収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、固体中性子吸収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を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、中性子吸収材の落下方式は、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、場合によっ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）。

経済性等の観点から、必要最低限の数の方策を組み合わせるべきとの考えもあるが、設計へのインパクトが小さい方策であれば、可能な限り多く取り入れるべきとの考えも成り立つ。

（固体中性子吸収材落下、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の一方にこの機能を付加するの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、想定事象によっ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にしき有効でない。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。

(固体中性子吸収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ず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、低線出力炉心の一種ともいえる。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、炉心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、設計を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。言うならば、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。組み合わ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 窒化物燃料炉心

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 キュリー一点式SASS

No.10 中性子束の上昇により溶解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熔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

第7章 受動的安全方策に関する研究開発実施計画の検討

第6章までで、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わせ方についての検討を実施した。この章では、重点テーマとして選定された方策を中心にして、種々の受動的な安全方策について、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するためには、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、単純な計算等による各方策の有効性の確認。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。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。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って、Licensability を高める。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各ステップ毎の実施内容、方法

各ステップ毎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。

以上の検討結果を資料Aに一件一様形式で示す。また、この検討結果の要約を一覧にして表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、熔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、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一致する部分も多い。

- 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。
- 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。これを、重水冷却炉のドライバー炉心で実施するメリットが明確ではないので、研究開発実施方針の表の中には含めていない。
- 「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であるとも言える。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。

第8章 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、検知又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・固有の組み合わせ、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わせ方法の提案

- 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、受動的な安全方策は、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にすることを目的に導入され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わせを検討する際に、可逆的なものには非可逆的なものを組み合わせるべきこと、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、組み合わせの検討

- 上記の考え方に則り、国内外で提案されている受動的な安全方策に今回提案したものを含めて、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、組み合わ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わせ案を提案した。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

を適切に組み合わ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、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

- 重点テーマとして抽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であるため、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。

- 特に、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あり、定説が無いのが現状である。
- 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受動的な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わせを検討したが、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で炉心出力を低下させたため事象進展速度を緩やかにになり、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っ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わせを検討した訳であるが、過渡変化を調べてみると十分な組み合わせとなっていない可能性もある。
- したがって、いくつかの受動的な安全方策を組み合わ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、受動的な安全方策相互間の干渉効果を定量化して、組み合わせが適切であるかどうかを確認する必要がある。

③受動的な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な安全方策は、その数が多く、また、組み合わせについても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していく必要がある。

④炉心部分損傷状態での崩壊熱除去に関するR & D

- 受動的な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実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。

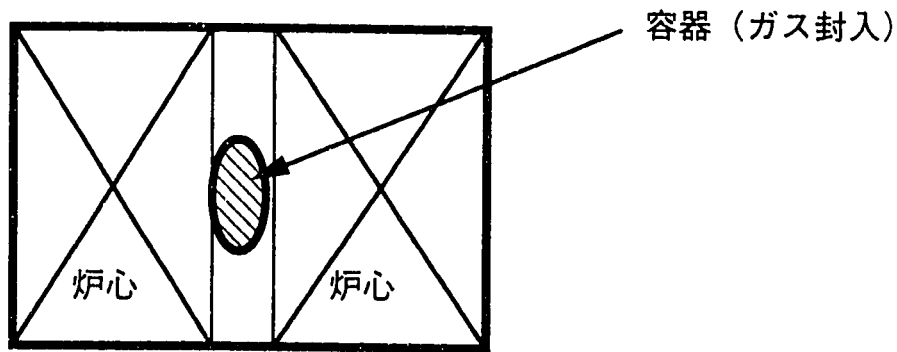
謝辞

本研究を進めるに当たって、終始有益なコメントを頂いた相澤安全工学部長、一宮プラント工学室担当役、原研藤城博士、石島博士、三菱原子力（株）澤田氏、（株）東芝大田氏、（株）日立製作所川島氏、川崎重工（株）滝谷博士に感謝の意を表します。



参考文献

1. 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)
2. J. B. Waldo, et al., "APPLICATION OF THE GEM SHUTDOWN DEVICE TO THE FFTF REACTOR," Trans. Am. Nucl. Soc., vol. 53 (1986) p312.
3. V.I. Matveev, et al., "PHYSICAL GROUNDS FOR FURTHERIMPROVEMENT OF FAST SODIUM POWER REACTOR SAFETY," Intl. Fast Reactor Safety Mtg., Snowbird, Utah, Aug. 12-16 (1990).
4. T. Yokoyama, "SAFETY-ENHANCED FBR CORE DESIGN UTILIZING NEUTRON STREAMING EFFECT," Japanese-Russian FBR Seminar "General Approaches for Fast Reactor Safety Ensuring", Tokyo, Feb. 7-9 (1994)
5. R.B. Tupper, et al., "DEVELOPMENT OF A SELF-ACTUATED SHUTDOWN SYSTEM," ASME-JPGC-NE-8 (1981).
6. K. Satoh, et al., "A STUDY OF ENHANCED SAFETY SYSTEMS FOR LMFBRs," Intl. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP92), Tokyo, Oct. 25-29 (1992).
7. M. Edelmann, et al., "ENHANCED THERMAL EXPANSION CONTROL ROD DRIVE LINES FOR IMPROVED PASSIVE SAFETY OF FAST REACTORS," Intl. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP92), Tokyo, Oct. 25-29 (1992).
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)



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）

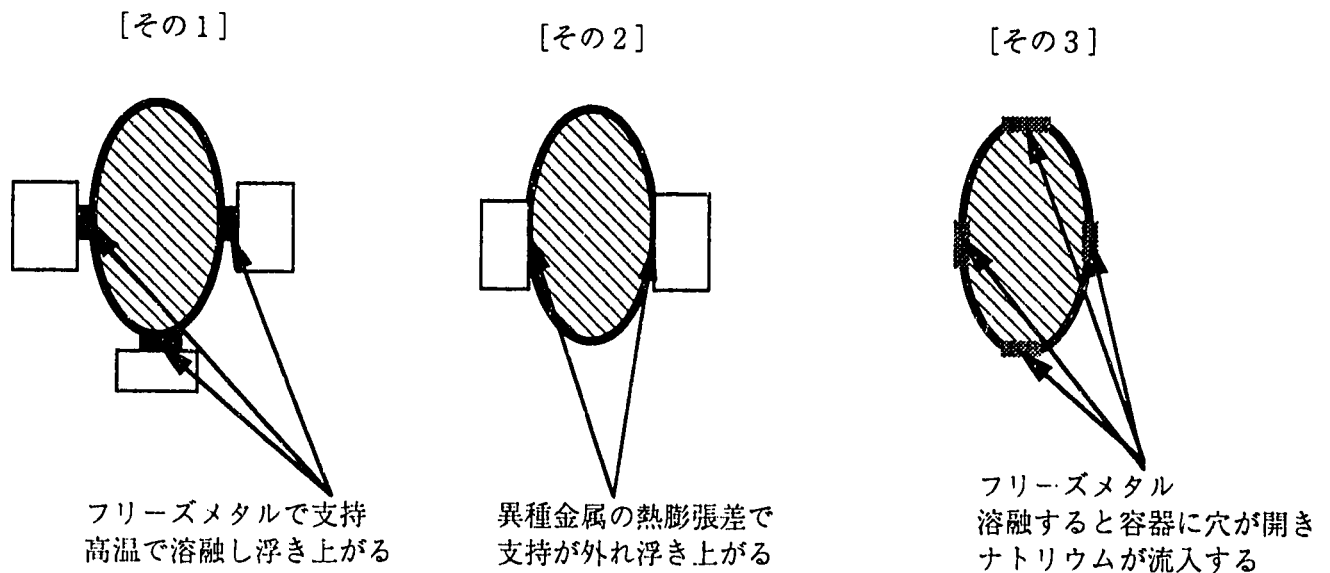


図 2-1 炉心中心部にボイド領域を設けておき炉心の温度上昇によりボイドがナトリウムに置換される機構

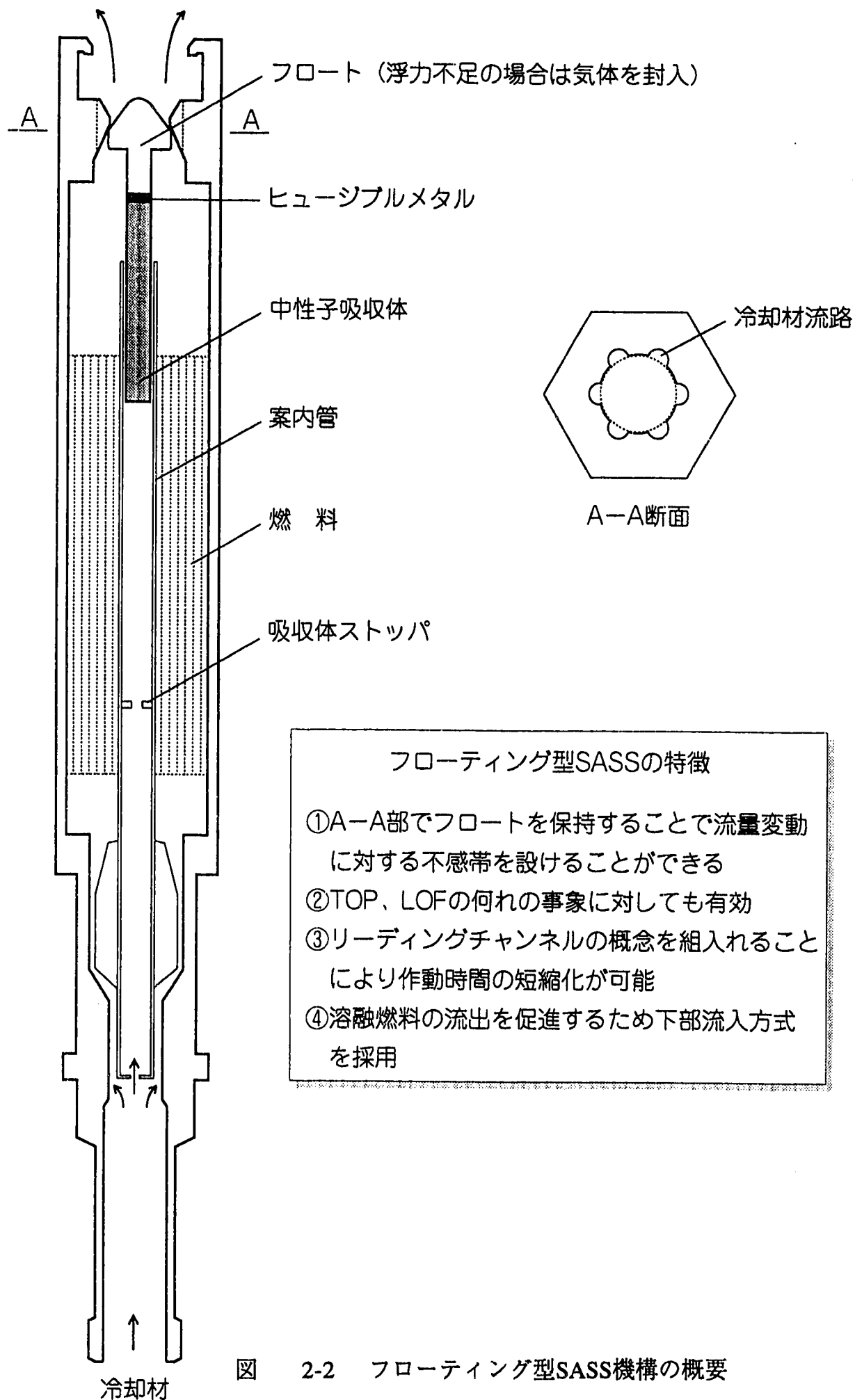


図 2-2 フローティング型SASS機構の概要

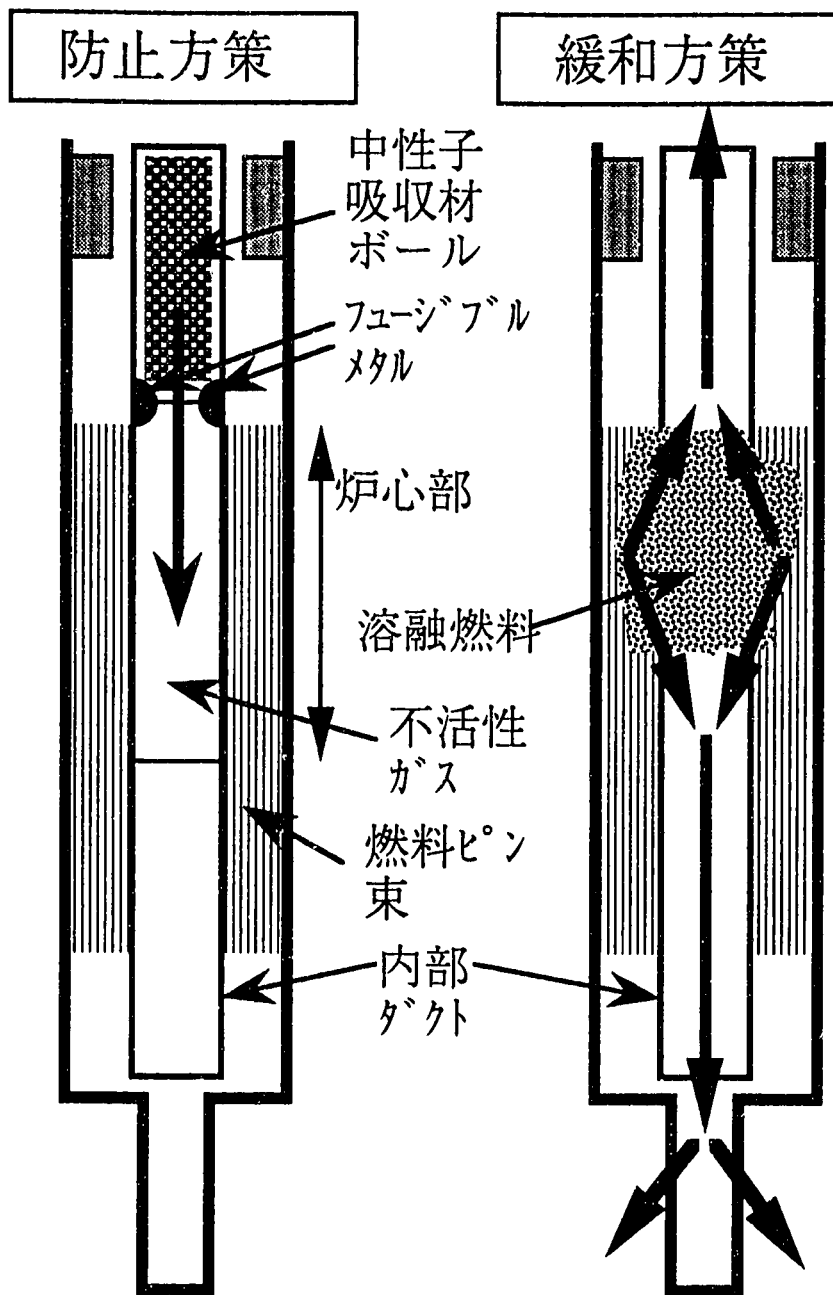


図 2-3 集合体内SASS機構

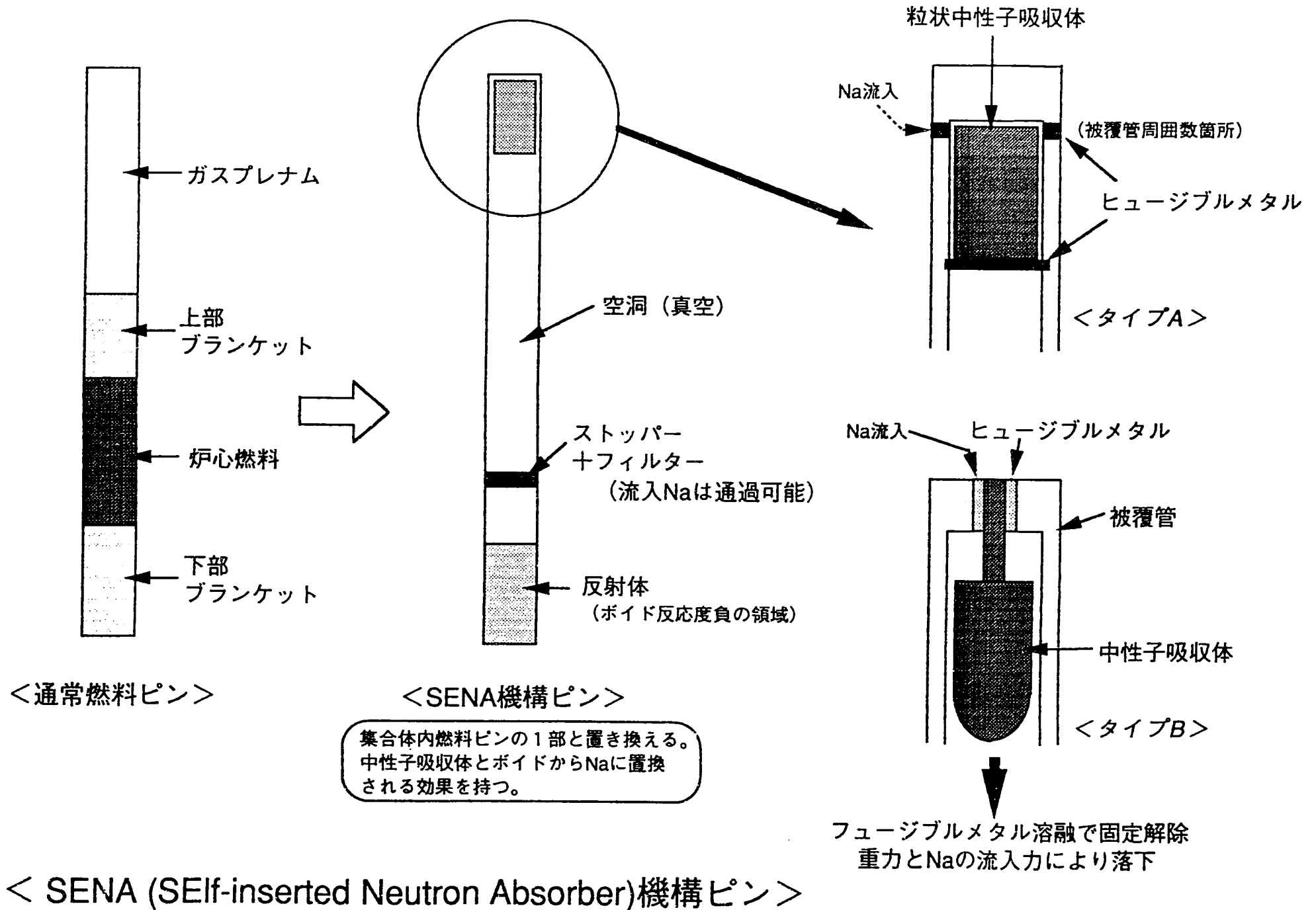
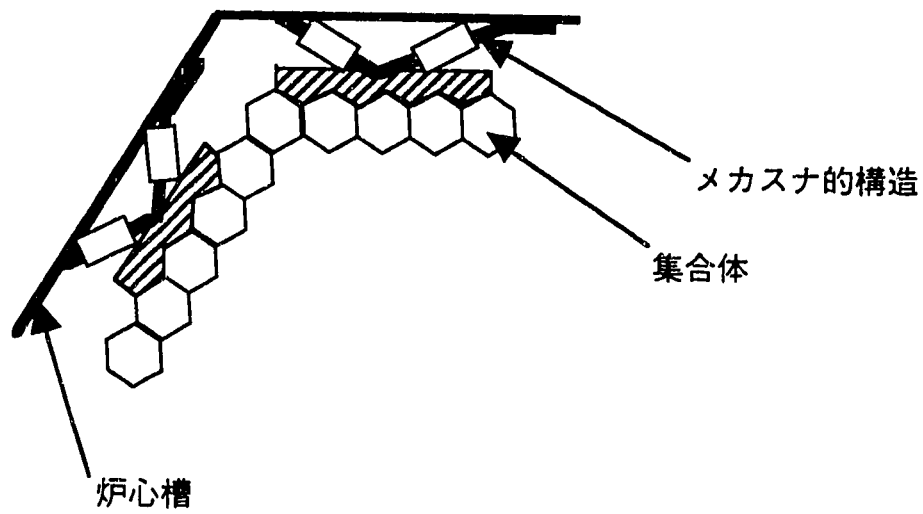
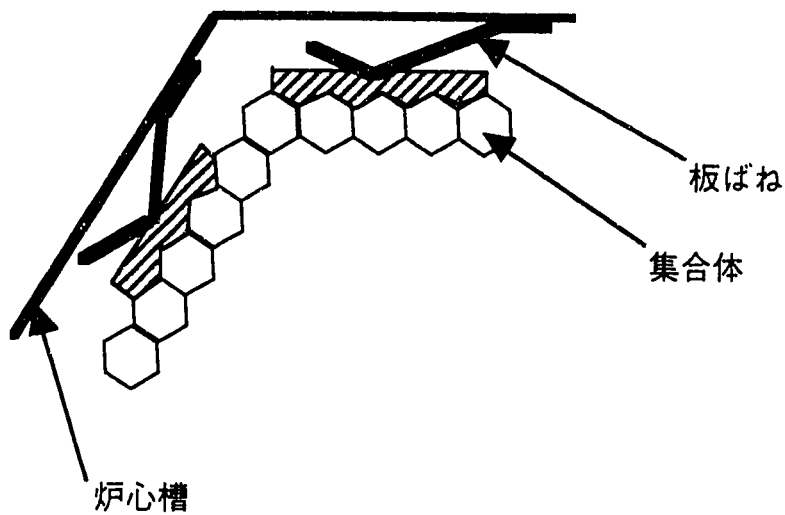


図 2-4 燃料ピン型SASS機構



燃料集合体の変形に際してメカストナ的変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 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

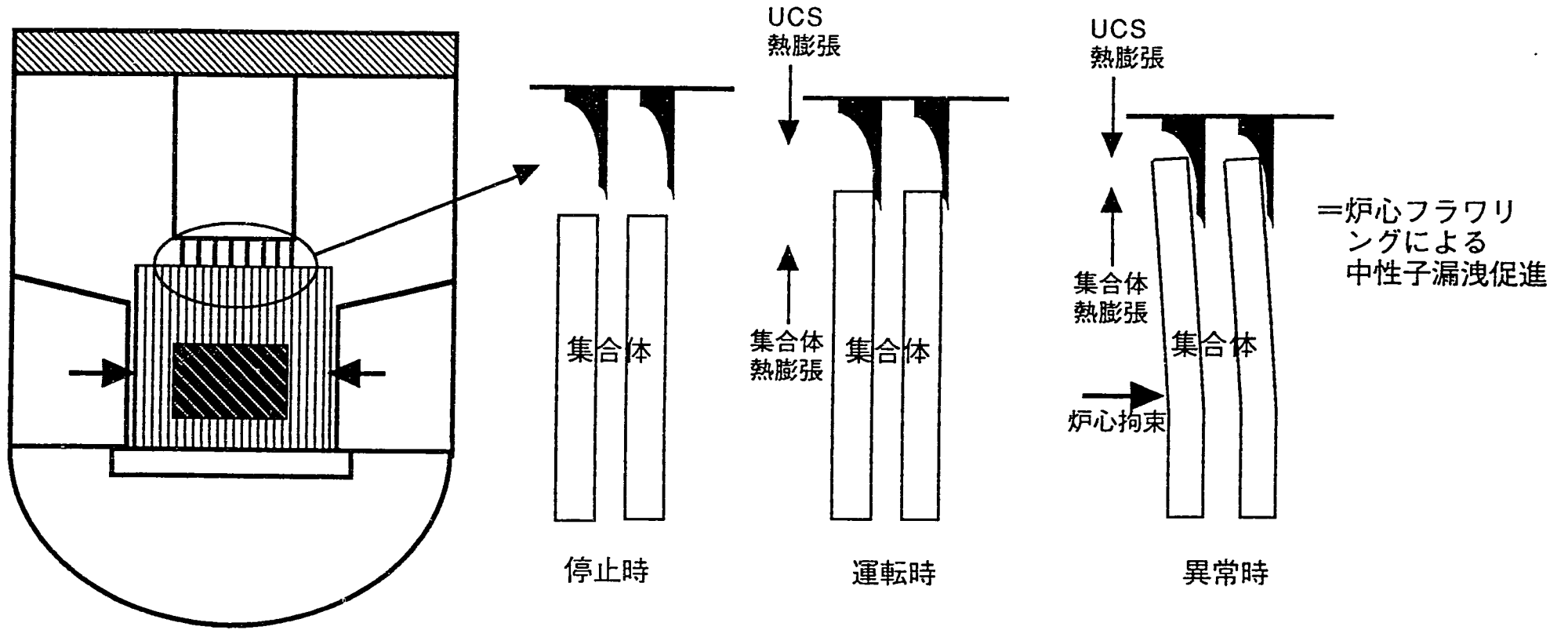


図 2-6 集合体上部に集合体変形モードを規定するガイドを設ける方式

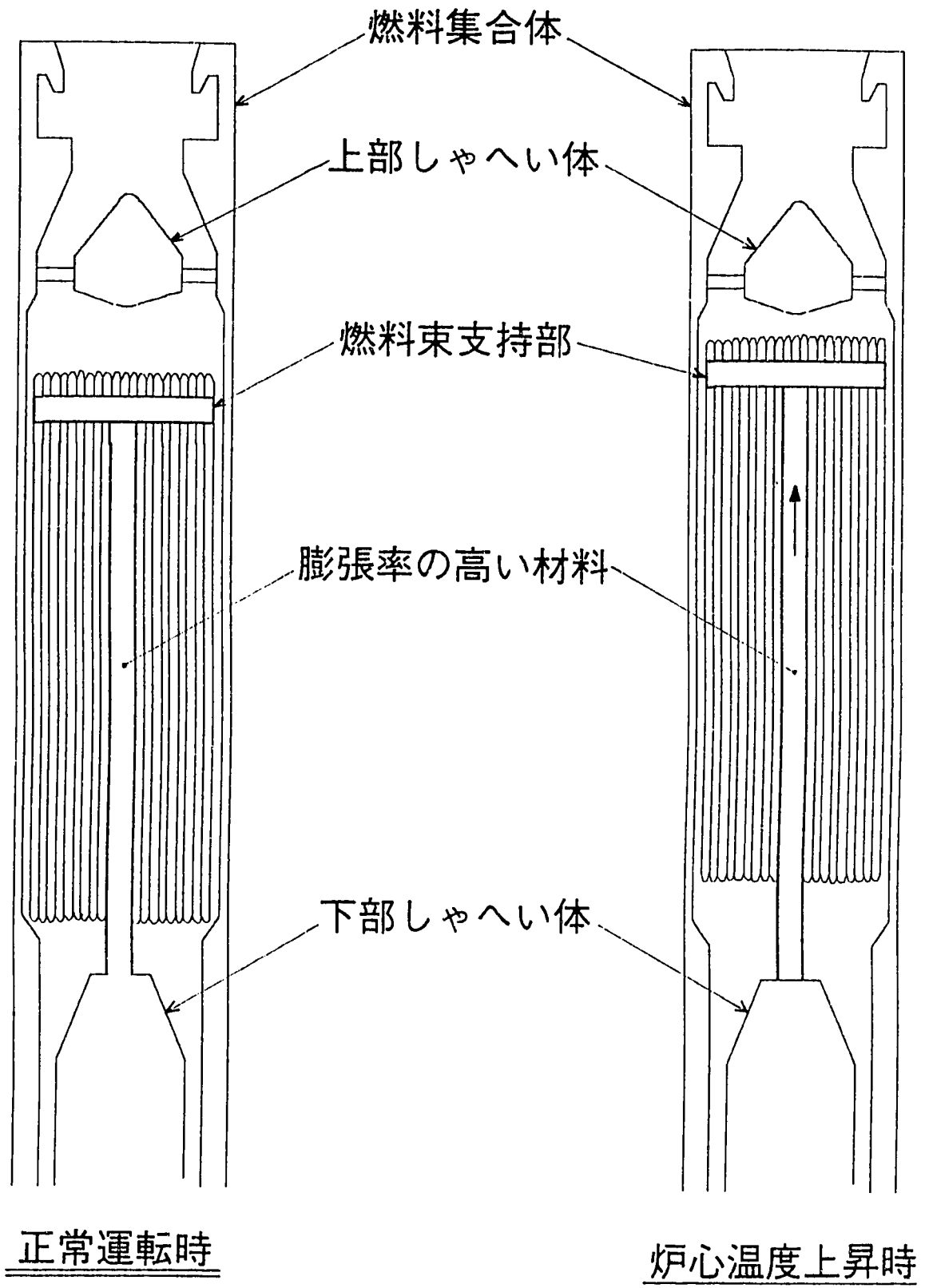


図 2-7 炉心軸方向膨張促進機構（膨張率の高い材料で集合体内の燃料を支持しておく方式）

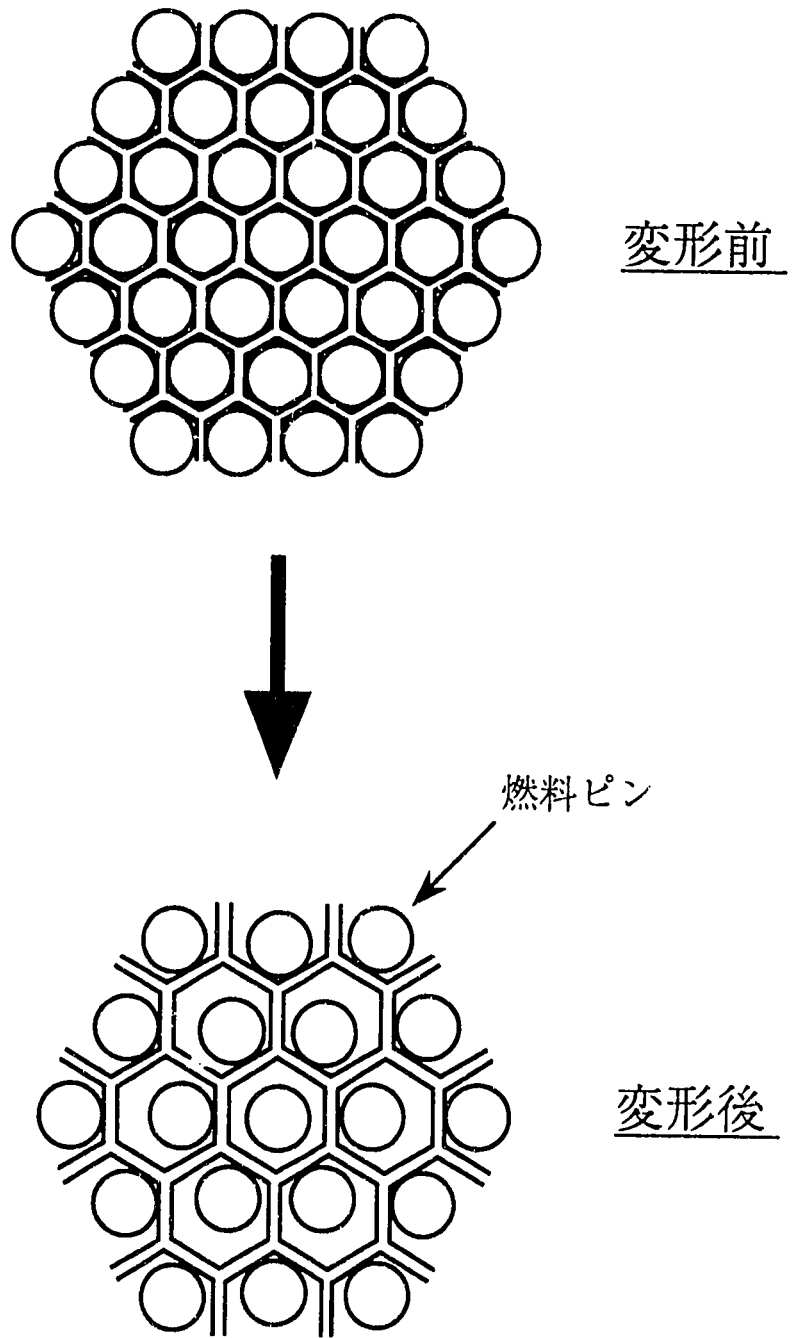


図 2-8 超塑性変形グリッドスペーサ

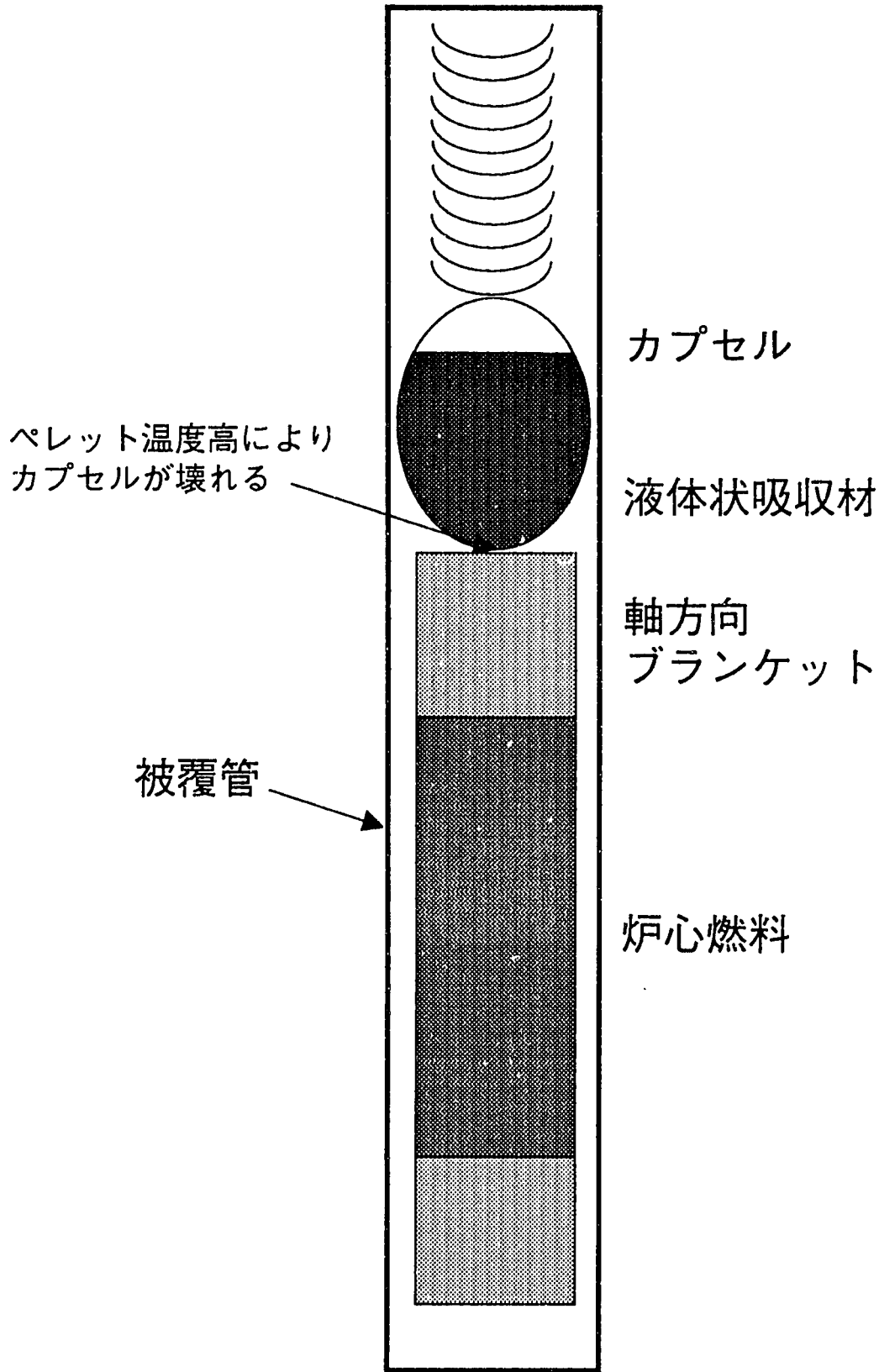


図 2-9 吸収材封入カプセル入り燃料ピン

抽出項目

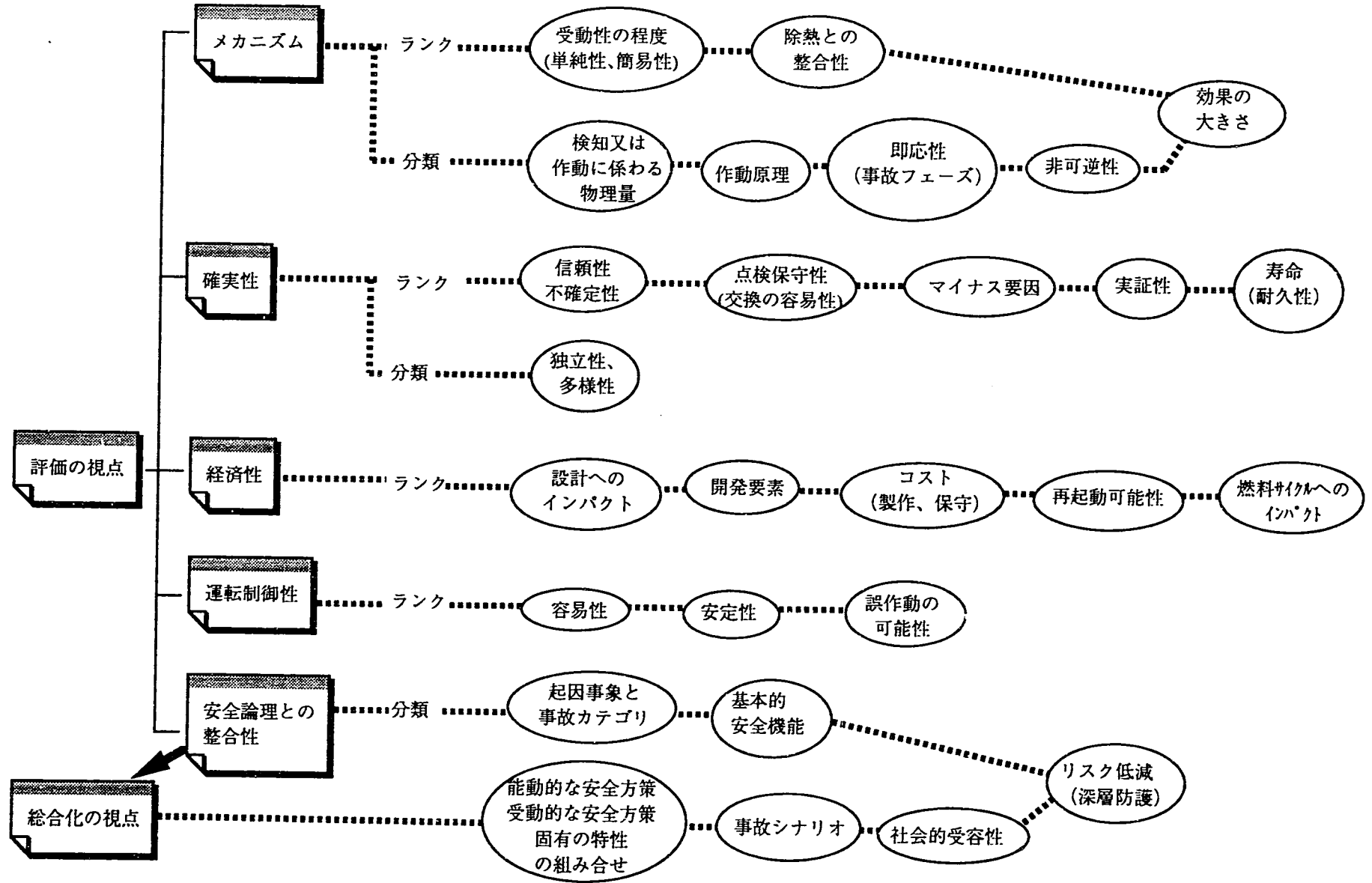


図 3-1 受動的な安全方策の評価の視点

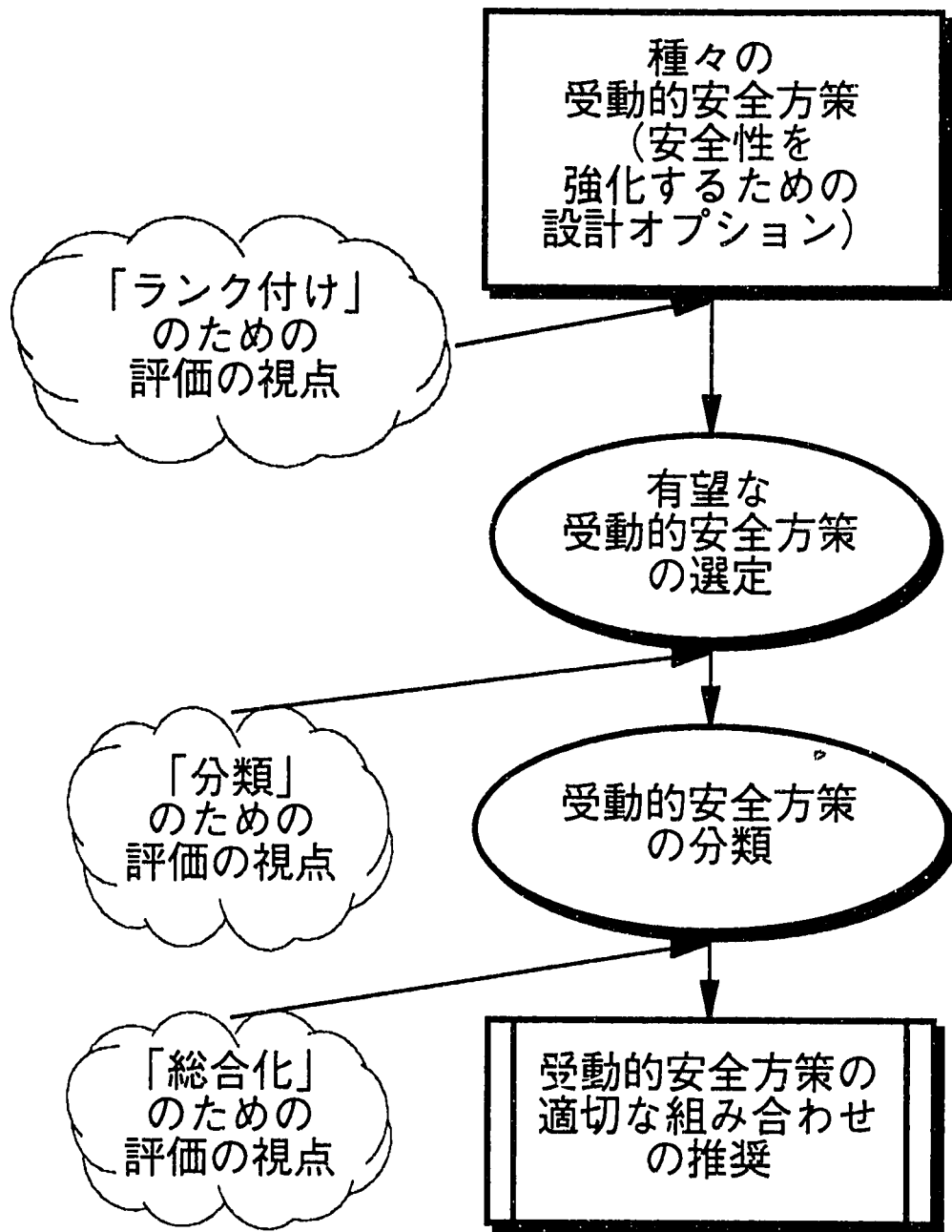
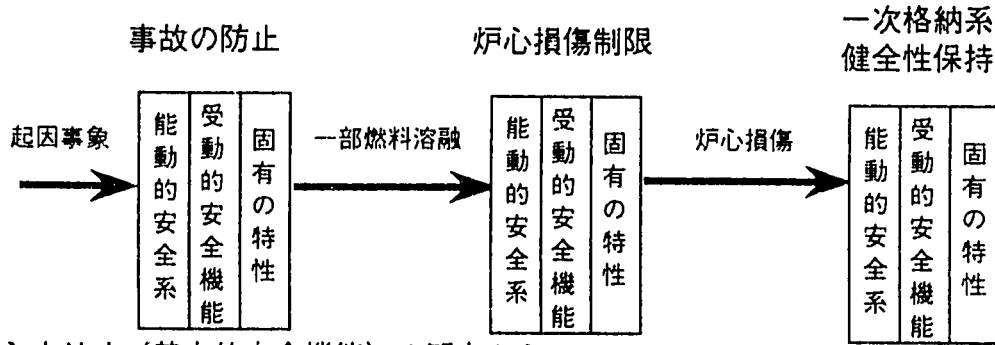
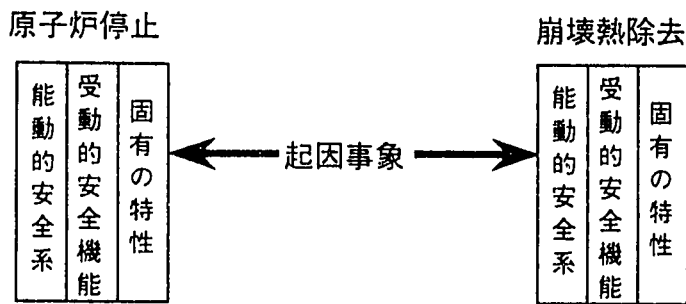


図 3-2 受動的安全方策の絞り込み、組み合わせ検討の手順

深層防護（事故進展への障壁）の観点から



事故シナリオ（基本的な安全機能）の観点から



- 「能動的な安全系」は、場合により、従来設計の静的機器で代用する。

- 「固有の特性」は、従来設計に付加するのではなく、従来設計でカウントできるものを探す。もしくは、若干の工夫により、効果が期待できると考えられる。

- 「固有の特性」は、一般的な定義ではドブラー反応度等限られたものしかないが、ここでは、「受動的な安全機能」の中で、受動性の程度が高く、不作動をほとんど見込む必要がないものでも良いこととする。

- すべてに3重の障壁を完璧に揃えることを要求しているのではなく、この視点から安全性の深みが適切であることを確認する。

事故シナリオ（事故カテゴリ）の観点から

- ULOF
- ULOHS
- UTOP
- ULOP1
- 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 |

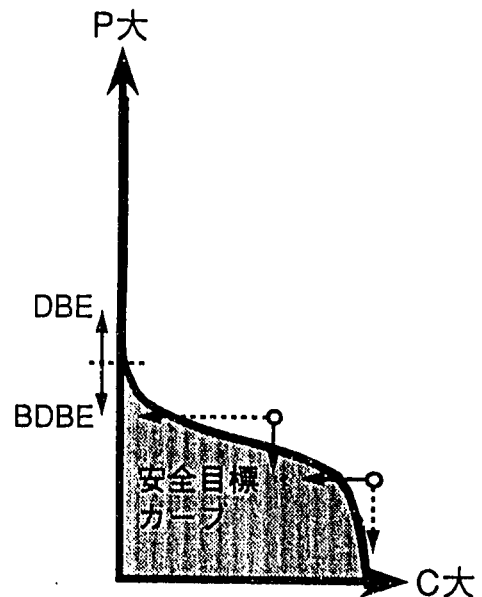


図 3-3 「安全論理との整合性」の視点について、評価の考え方・概念

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 +

受動的な安全特性 (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

対応する受動的な安全方策の具体例
- 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 +

受動的な安全特性 (防止) - 2
(固体吸収材以外の組み合わせ)

多様性のさらなる付加
負の反応度効果の装荷原理が異なる
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

対応する受動的な安全方策の具体例
- 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 +

受動的な安全特性 (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

対応する受動的な安全方策の具体例
- 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 6-1 受動的な安全方策の組み合わせの例

点

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を算定する。次に、ある設計を仮定して、要素数、物理量変化中を決めて、全投入反応度を算定する。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)

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。

事故防止対策に対しては、炉停止への寄与の程度をみる。なお、炉心形状及び燃料組成に関しては、他の工学的手段と区別する意味で、それぞれ定常時のボイド反応度、ドップラー係数を評価パラメータに選定した。

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。

それぞれの方策が効果を現す事故フェーズにおいて、そ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。

効果の大きさについては、今後、込んだ上で、定量化の精度向上を

ABCのランク付けについて、例えば、炉心全体で-1\$より大きな効果は、炉心全体で-0.1\$以下の効果しかないとする。

程度

起動信号、流体/固体移動等の有無 (I~VIIランク) (8)

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

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。

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
 III : 水圧作動弁 (開) → ボロン水
 IV : マグネット (オフ) → 制御棒
 V : ラッチ機能 (開) → 制御棒自
 VI : 常時運転安全系機器による冷
 VII : 電磁 (空圧) 弁 (開) → 冷却

整合性

炉心冷却材流路パスへの影響 (A~Cランク)

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。但し、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断基準とする。

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

除熱との整合性に関するもう一つ安全方策作動後の必要除熱容量がこれについては効果の大きさと同すなわち、効果の大きいものほどズでの必要除熱量が少なくて済むここでは省略した。

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

項目	効果	評価	リスク	優先度	備考		
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	燃焼反応度損失を最大4%Δk/k'まで抑制。	A (I)	A	2	1 (効果の大きさ)	軸方向のピーキングを下げ、燃料溶融までの裕度ボイド反応度を低減する効果は小さい。
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	
応度抑制:アニュラー炉心	B:ボイド反応度が2~4\$程度低減		A (I)	A	2	0	
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)を壊さず事象終息させることを意図した方策となる可能性を残した方策と比較すると、燃料の融点を排除している点で「効果が大きい」といえる。しかし、その差が明確に表れていない点に注意
係わる安全向上:金属燃料炉心	B:高熱伝導率(対MOX7倍程度)、低ドブラー係数(対MOX約40%減)によるULOF時の正の反応度低減	A (I)	A	2	0		
係わる安全向上:窒化物燃料炉心	B:高熱伝導率(対MOX6倍程度)、低ドブラー係数(対MOX約20%減)によるULOF時の正の反応度低減	A (I)	A	2	0		
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		
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		
入型GEM: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
入型GEM:炉心の中央部に設置	A:-2\$/30体	A (II)	A	3	0		
ドがナトリウムに置換される(GEMの反対)	B:-10~-20¢ (炉中心集合体周囲の6体集合体を想定)	A (II)	A	2	0		
心	B:ボイド反応度1~2\$低減	A (I)	A	2	0		
の設置:先行的Na沸騰 P/F大の燃料集合体	B:-40¢/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
の設置:先行的Na沸騰 燃料使用しない	B:-40¢/6体	A (II)	A	2	0		
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		
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		
機構:制御棒機構(SASS)	A:-6\$/6体 (ステップ状投入)	A (II)	A	3	0		
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		
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		
	A:-1\$以上 (ステップ状投入)	A (II)	A	3	0		
機構:伸長リンク機構	A:-1\$以上	B (III)	A	2	0		起動時にまずリンク機構が動く必要があるため、
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		起動時にまず感温チェンバーのペロー等が動く必要度がBとなる。
機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	A:-1\$以上	B (III)	A	2	0		起動時にまず感温チェンバーのペロー等が動く必要度がBとなる。
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、
効果の促進:炉心内での集合体拘束方式の工夫	B:-50¢ (炉心部最外層3mm膨張)	A (II)	A	2	0		
効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	B:-50¢ (炉心部最外層3mm膨張)	A (II)	A	2	0		
効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	B:-50¢ (炉心部最外層3mm膨張)	A (II)	A	2	0		
膨張率の高い材料で集合体内燃料を支持	B:-10¢ (膨張材料温度200℃上昇、膨張促進集合体10体)	A (I)	A	2	0		
性:超塑性変形グリッドスペーサ(ダクト対応)	A:-1.5\$ (p/d1%増大、径方向一様膨張)	A (II)	B	2	0		超塑性変形グリッドスペーサが変形した時点で、発生することが懸念されるので除熱との整合性は
への吸収材(気体又は液体)封入	C:-5¢ (集合体400体、 ³ He封入)	A (II)	A	2	1 (効果の大きさ)		
本での溶融燃料への毒物混入 (影響緩和)	A:大	A (II)	A	3	0		
影響緩和)	A:大	A (II)	A	3	0		
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		この方策は、被覆管破損の前に燃料がかなりの量トにのみ有効である。有効な事象が限定される点
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、必ずしも除熱との整合性はB。
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、必ずしも除熱との整合性はB。

<p>1. 検出機構の信頼性、不確定性、</p> <p>2. 作動メカニズムの単純さ、機械的可動部の少なさ</p> <p>3. 反応度印加上の不確定性</p>	<p>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、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（開発途上であるが故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、境界条件が運転態等により変化するとすれば、不確定性は大きい）。</p> <p>ランク</p> <p>A：検出、作動メカニズム及び負の反応度印加のどちらについても信頼性が高く、不確定性が小さい。</p> <p>B：どちらかに比較的大きな欠点があると考えられるもの</p> <p>C：どちらかに致命的な欠点があると考えられるもの</p>
<p>1. システムの点検の容易さ</p> <p>2. 保守の容易さ（交換の容易さを含む）</p>	<p>受動的な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を確認できるか。又は、点検保守ができることが望ましく、その点検保守性に関するパラメータを選定した。</p> <p>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）</p> <p>B - 必要な検査、保守に対して、多少の困難さが予想される</p> <p>C - 検査が必要と考えられるにも関わらず、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</p>
<p>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</p> <p>2. 正に投入され得る反応度の大きさ</p> <p>3. 故障時のフェールセーフ性</p>	<p>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。</p> <p>A：上記パラメータを勘案して、その潜在的影響が無視できるレベルのもの。</p> <p>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。</p> <p>C：致命的なマイナス要因があると判断されるもの。</p>
<p>1. 実証できる範囲</p> <p>2. 実証できる設備</p>	<p>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（右側の設備ほど実証が困難と見なす）。</p> <p>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</p> <p>A：受動的な安全システム全般にわたって、新設炉内試験までを用いて実証が可能</p> <p>B：受動的な安全システムの主要な部分については、新設炉内試験までを用いて実証が可能</p> <p>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</p> <p>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なランク付けを行う。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>C：原型炉規模の新設実機で試験を実施するか、もんじゅの大幅な改造を伴う全炉心試験を実施しなければ実用化できない。</p>
<p>機能を保証できる期間</p>	<p>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）。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>

ボイド反応度抑制:偏平炉心	A	-	A	C	-	2	1 (実証性)	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。
ボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	A	-	A	B	-	2	0	
ボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	A	-	A	B	-	2	0	
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された。
安全性向上:低線出力炉心	A	-	A	A	-	3	0	
安全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 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
安全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 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
(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。
(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。
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。
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。
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
ボイド反応度抑制:Naプレナム付き炉心	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
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 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。
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ないか等の点検が重要だが、点検が困難。
制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	A	A	A	A	B	4	0	
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 は点検ができない。また、信頼性も少し劣る。
自作動型制御機構(SASS)	A	A	A	B	B	3	0	
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。
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。
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。
膨張促進機構:伸長リンク機構	A	A	A	A	B	4	0	
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	
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	
膨張促進機構:バイメタル方式	A	A	A	A	B	4	0	
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。
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 はUSVの使用等が考えられる。
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。 機能であるため点検は不要(但し、十分な実証が必要)
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	
促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ダクトレス対応)	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、炉心の経方向膨張が適切になされることが最 点検ができない。
下部への吸収材(気体又は液体)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。
型集合体での溶融燃料への毒物混入	B	-	A	B	B	1	0	
機構(影響緩和)	B	-	A	B	B	1	0	
によるビン内燃料移動・分散	B	-	A	B	-	1	0	
ビン内の燃料の排出・再循環	B	-	A	B	-	1	0	燃料がビン上部に排出された場合、再度炉心に燃料が戻り、正の反応度が注入される可能性がある

の ア 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、高熱度）を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のいずれかの利点がある程度（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。
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。あまりに開発期間が長いと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、又は、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明るい。 C - 開発期間が極めて長い、開発コストが極めて大きい。
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	当該受動的な安全方策を導入するための関連部品、設備の製作コスト、又は、保守のために必要なコストが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10%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。
動 生	再起動に要する手間（人員、時間） 経済的負担	受動的な安全システムはDBEまたはBDBEで作動するシステムであるが、異常事象終熄すればプラントは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、人員をパラメータとした。但し、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 - 異常事象終熄後、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。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ない。
クル パ ク	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、燃料製造に追加の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削減する方策も望ましくない。但し、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かった（燃料製造の項目で評価する）。 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。
毎		

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
よるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	B	B	B	—	A	1	0	
よるボイド反応度抑制:アニユラー炉心	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が大きく、制御性の良い炉心に仕上げるの
に係わる安全性向上:低線出力炉心	B	A	B	—	A	2	0	
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。現状の燃更となり、インパクトは大。
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。現状の燃更となり、インパクトは大。
型GEM(FFTF型):炉心の周辺部に設置	A	A	A	A	A	5	0	
型GEM(FFTF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
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	
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
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	
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	
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
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	リーディングチャンネル集合体の交換を必要とす
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	特殊な燃料集合体を装荷する方策は、燃料サイ
ング型制御機構:フローティング型SASS	B	B	A	B	B	1	0	ンクとした。
式自己作動型制御機構(SASS)	A	A	A	A	A	5	0	
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	
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	
SASS機構	B	B	A	B	B	1	0	
軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	A	A	A	A	A	5	0	
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	
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	
軸の膨張促進機構:バイメタル方式	A	A	A	A	A	5	0	
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	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	フラワリングを起こさせた後は、元の状態に復
フラワリング効果の促進:ラップ管パッドの剛性強化	A	B	A	A	A	4	0	
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	B	A	B	1	0	
膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ダクトレス対応)	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
※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
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	ても従来の再処理からの工夫が必要となる。
SASS機構(影響緩和)	B	B	A	—	B	1	0	
トによるピン内燃料移動・分散	A	B	A	—	A	3	0	
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

<p>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>	<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、運転員の負担は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</p>
<p>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>	<p>受動的安全システムはDBEを越えた領域で原子炉の制御に直接作用させるものであるため、通常運転の物理量はあまり作用せず、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、外乱がなくい（例えば流力振動による）。</p>
<p>誤作動の頻度 誤作動後の運転復帰措置の容易さ</p>	<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、重要な点である。また、誤作動が発生した後のプラント復帰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>

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

によるボイド反応度抑制:軸方向非均質炉心	A	A	A	3	0	
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。
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。
計に係わる安全性向上:低線出力炉心	A	A	A	3	0	
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	
による核特性に係わる安全向上:空化物燃料炉心	A	A	A	3	0	
型GEM(FFTF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。
型GEM(FFTF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。
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。
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。
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。
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	
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	燃焼効果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。
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。
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。
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。
式自己作動型制御機構(SASS)	A	A	B	2	0	
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	
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可能性は高い。
SASS機構	A	A	B	2	0	
軸の膨張促進機構:伸長リンク機構	A	A	A	3	0	
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	
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	
軸の膨張促進機構:バイメタル方式	A	A	A	3	0	
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	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。
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	
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	
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。
膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ダクトに対応)	A	A	A	3	0	
上部又は下部への吸収材(気体又は液体)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可能性は高い。
部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	A	A	B	2	0	
SASS機構(影響緩和)	A	A	B	2	0	
ットによるピン内燃料移動・分散	A	A	A	3	0	
ードチャンネルの設置:先行的燃料放出	A	B	B	1	0	

るボイド反応度抑制:偏平が心	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
るボイド反応度抑制:軸方向非均質が心	2	1 (効果の大きさ)	2	0	3	0	3	0	10
るボイド反応度抑制:径方向非均質が心	2	0	2	0	1	0	1	1 (容易性)	6
るボイド反応度抑制:アニュラーが心	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
係わる安全性向上:低線出力が心	2	0	3	0	2	0	3	0	10
る核特性に係わる安全向上:金属燃料が心	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
る核特性に係わる安全向上:窒化物燃料が心	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
EM(FFTF型):が心の周辺部に設置	2	0	2	0	5	0	1	0	10
EM(FFTF型):が心の中央部に設置	3	0	2	0	4	0	1	0	10
収ガス封入型GEM:が心の周辺部に設置	2	0	2	0	4	0	1	0	9
収ガス封入型GEM:が心の中央部に設置	3	0	2	0	3	0	1	0	9
こよりボイドがナトリウムに置換される (GEMの反対)	2	0	1	0	2	0	2	0	7
こよるボイド反応度抑制:Naブレナム付きが心	2	0	2	0	2	0	3	0	9
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
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
型制御機構:制御棒を動圧で浮かせるのみ	3	0	4	0	5	0	0	0	12
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
自己作動型制御機構(SASS)	3	0	3	0	5	0	2	0	13
より溶融する物質を利用し中性子吸収材のが心混入	3	0	1	1 (点検保守性)	1	0	2	0	7
SS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
機構	3	0	1	1 (点検保守性)	1	0	2	0	7
の膨張促進機構:伸長リンク機構	2	0	4	0	5	0	3	0	14
の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能無し	2	0	4	0	5	0	3	0	14
の膨張促進機構:感温チェンバー活用 SASS機能付	2	0	4	0	5	0	3	0	14
の膨張促進機構:バイメタル方式	2	0	4	0	5	0	3	0	14
ワリング効果の促進:が心内で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
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
ワリング効果の促進:ラップ管パッドの剛性強化	2	0	2	0	4	0	3	0	11
限促進機構: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
限促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ (ダクト対応)	2	0	2	1 (点検保守性)	2	1 (開発要素)	3	0	9
又は下部への吸収材(気体又は液体)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
管型集合体での溶融燃料への汚物混入	3	0	1	0	1	0	2	0	7
る機構 (影響緩和)	3	0	1	0	1	0	2	0	7
によるピン内燃料移動・分散	2	0	1	0	3	0	3	0	9
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
下短縮化による燃料が外流出促進	1	0	0	0	2	0	3	0	6
サパッドの軸方向間隙の確保	1	1 (効果の大きさ)	0	1 (マイナス要因)	2	0	2	0	5
の溝肉化等による早期破損・燃料流出	3	0	2	0	3	0	3	0	11
ブレナム付き集合体での燃料流出差動	1	0	0	0	2	0	3	0	6

計によるボイド反応度抑制:偏平炉心	炉心冷却材密度	炉心扁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
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
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
計によるボイド反応度抑制:アニューラー炉心	炉心冷却材密度	炉心領域のアニュー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
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
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燃料より硬いことによるドブラー係数の低減化、高熱伝導度 →ULOF時の正のドブラー反応度の低減化	数sec 起因事象発生
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燃料より硬いことによるドブラー係数の低減化、高熱伝導度 →ULOF時の正のドブラー反応度の低減化	数sec 起因事象発生
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
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物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
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内設置ヒューズブルメタル温度	正のボイド反応度領域へガス封入体をヒューズ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
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
ドチャンネルの設置:先行的Na沸騰 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
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棒が流量喪失により支持力喪失 →制御棒重力落下	1sec以下 起因事象発生
ング型制御機構:フローティング型SASS	炉心冷却材流量	冷却材動圧に支持される制御棒が流量喪失により支持力喪失 →制御棒重力落下	1sec以下 起因事象発生
	S/A上部構造材料温度	温度感知のヒューズ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	数sec 起因事象発生
	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分 遷移過程
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ダイヤッチ機構 →制御棒重力落下	数sec 起因事象発生
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ズブルメタル(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
		温度感知のヒューズブルメタルの溶融により炉心上部に設置された吸収材の	数sec

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
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
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
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
ラッピング効果の促進:炉心内での集合体拘束方式の工	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、炉心フラウリングを促進 →中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生
ラッピング効果の促進: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ウリングを促進 →中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生
ラッピング効果の促進: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、炉心フラウリング効果を促進 →中性子漏洩促進	数sec 起因事象発生
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
膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ダクトレス対応)	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
部又は下部への吸収材(気体又は液体)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収促進	数sec 起因事象発生
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
SSS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 遷移過程
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
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
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分 遷移過程
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5～6分 遷移過程
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分 遷移過程
ブ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 遷移過程

によるボイド反応度抑制:径方向非均質炉心	-	-	なし	-	
によるボイド反応度抑制:アニュラー炉心	-	-	なし	-	
による安全性向上:低線出力炉心	-	-	なし	-	
核特性に係わる安全向上:金属燃料炉心	-	-	なし	-	
核特性に係わる安全向上:窒化物燃料炉心	-	-	なし	-	
型(MFFTF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
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	ガスを通した径
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
炉心	集合体上部Na温度上昇、沸騰	独立	なし	-	軸方向中性
チャンネルの設置:先行的Na沸騰 集合体を設置する場合と燃料を使用しない場合で共通	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
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
型制御機構:フローティング型SASS	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
	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	集合体内制御材
	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
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
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
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
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
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
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
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 制御棒
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
フリリング効果の促進: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
フリリング効果の促進:集合体上部にガイドを設ける	ラッパ管温度	多様	ラッパ管の伸びと変形制御	多様	炉心変形による
フリリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	ラッパ管温度	多様	ラッパ管の変形	多様	炉心変形による
伸促進機構:膨張性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、棒の伸び	多様	健全燃
伸促進機構:変形グリッドスペーサ(ダクトレス対応)	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
又は下部への吸収材(気体又は液体)封入	燃料ベレット温度	独立	制御材入りチューブの破損	多様	制御材のピン
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
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
によるピン内燃料移動・分散	燃料ピン溶融	-	なし	-	ピン内

設計によるボイド反応度抑制:扁平炉心	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
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
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
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
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
条件による核特性に係わる安全性向上: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
条件による核特性に係わる安全性向上: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
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
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
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
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
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)	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
設計によるボイド反応度抑制:ナトリウムブレナム付炉心	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
ロ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
ロ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
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
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
一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
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
イン型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
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
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
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
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
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
曲.フラウリング効果の促進:炉心内で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
曲.フラウリング効果の促進: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
曲.フラウリング効果の促進: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
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
方向膨張促進機構:超塑性変形グリッドスペーサ(ダクトレス対応)	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
上部又は下部への吸収材(気体又は液体)封入	ULOF,ULOHS,UTOP	炉出力低下	炉心損傷事故発生防止
上部設置型集合体での溶融燃料への汚物混入	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
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
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
ロ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

方策	LOF TOP		固有か受動か	出力を低下させる 反応度を 基準として) ○：単独で十分 △：組み合わせ必要	○：組み合わせ不要 △：より即効的な他の方 策との組み合わせが必要	可逆的か 非可逆的か	反応度印加の原理
	LOF	TOP					
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
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
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
型GEM(FFTF型):炉心の周辺部に設置	○	×	受動	△	○	非可逆的	中性子漏洩
型GEM(FFTF型):炉心の中央部に設置	○	×	受動	○	○	非可逆的	中性子漏洩+吸収
生子吸収ガス封入型GEM:炉心の周辺部に設置	○	×	受動	△	○	非可逆的	中性子漏洩
生子吸収ガス封入型GEM:炉心の中央部に設置	○	×	受動	○	○	非可逆的	中性子漏洩+吸収
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
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
リング型制御機構: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
リング型制御機構:フローティング型SASS	○	○	受動	○	○	非可逆的	固体吸収材落下
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
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
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
SASS機構	○	○	受動	○	△	非可逆的	固体吸収材落下
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
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
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
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
フラウリング効果の促進: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
フラウリング効果の促進:ラッパ管パッドの剛性強化	○	○	今後のR&Dで固有に近付ける	△	△	可逆	炉心形状変化
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
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
SASS機構 (影響緩和)	○	○	固有に近い	○	-	非可逆的	溶融燃料排出
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
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
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

形態による核特性に係る安全向上:窒化物燃料炉心	不要	特性予備評価は既実施	高温での材料特性アータ取得(炉外)	不要	照射(常陽),炉物理(FCA等),FCI(炉外),破損限界・破損挙動・事象進展把握(SERAPH)	試験解析	過渡時の炉心温度変化挙動(常陽・全炉心窒化物)	試験解析 実機解析
M:従来型GEM(FFTF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、高温気、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
M: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、高温気、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
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;高温気、Na/SERAPH)、装置形状最適化(炉外;水)	解析手法整備 感温部境界条件評価解析	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
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
ローディング型制御機構	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
ローディング方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)
炉心高さ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)
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)	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)
炉心体内SASS機構	候補溶融物質・吸収材選定(文献)	特性予備評価(必要装荷体数)	落下機構(炉外;空気、水)、感温材特性(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)
ローリング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
ローリング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
ローリング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
ローリング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
炉心湾曲、フラフリング効果の促進	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)	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
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
燃料棒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
炉心体内SASS機構(影響緩和)	排出経路(文献)	特性予備評価(効果見積り、必要装荷体数)	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
燃料ペレットによるピン内燃料移動・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
燃料棒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;マイルドな過渡状態での温度変化確認(常陽)	試験解析/実機解析 (最適設計)

資料A

受動的な安全方策に関する R&D 項目 - R&D 実施計画の検討

方策名	No.2-1 低線出力炉心	
開発・実証ステップ	<p>低線出力炉心については、従来型のMOX炉心と本質的な差はなく、R&D課題は比較的少ないと言える。</p> <p>低線出力炉心の特徴から考察される安全性に係わる課題は以下のとおり。</p> <p>①低線出力である程度の炉心出力を担保しようとする、炉心径が大きくなる。 - 炉心のデカップリングが大きいことに対する対策</p> <p>②定常運転時の燃料温度が低いため、燃料内蓄積FPが多い。 - 高燃焼度条件での燃料健全性</p> <p>③TOP時の破損限界が向上すると考えられる。 - 破損限界の定量化</p> <p>④LFにおける冷却性の向上とFP増大に伴う事象進展の促進 - 破損限界と事象進展挙動の把握</p> <p>⑤UTOPの事象進展において冷却材沸騰が先行する等、高線出力炉心での進展と異なるものとなる。 - 事象進展の把握</p> <p>⑥燃料内蓄積FPの多さが炉心崩壊過程の事象進展に影響する。 - 事象進展の把握</p> <p>⑦炉心インベントリーの多さがPAHRでの冷却性に影響する。 - 冷却性の評価</p> <p>これらの課題の内の多くは、従来からの試験データによってある程度の解が得られる。また、現有の解析ツールが有力な評価手法となり得る。現状の知見が豊富であることから、開発ステップは概ね以下のとおり。</p> <p>ステップ1：現有のデータ及び解析ツールによる低線出力炉心の特性評価及び不足しているデータの洗いだし ステップ3：炉内試験による不足データの取得 ステップ4：実機の安全評価解析実施</p>	
スケジュール	<p>ステップ2：1年 ステップ3：8年 ステップ4：1年</p>	
ステップ1	<p>(試験名) (目的) (方法)</p>	<p>(解析名)現有データ及び解析ツールを用いた評価 (目的) 低線出力炉心の特性把握 不足しているデータの洗いだし (方法) 過去、従来高速炉のために炉内試験で取得されてきたデータの内、比較的low出力のデータ及びSAS-4A等の解析コードを用いて評価を実施する。</p>

ステップ 3	<p>(試験名)炉内試験</p> <p>(目的) 低線出力炉心に特有の、高燃焼度条件での燃料健全性、TOP時の破損限界、LFにおける破損限界と事象進展挙動、UTOPの事象進展、炉心崩壊過程の事象進展等に関するデータを取得する。</p> <p>(方法) SERAPH炉を用いた炉内試験を実施する。</p>	<p>(解析名)炉内試験試験解析</p> <p>(目的) 左記の炉内試験について、予備解析を実施し、その結果に基づき詳細な試験条件を設定する。あるいは、事後解析を実施し、試験結果の物理的な解釈の助けとする。また、場合によっては、解析コードの検証解析を実施する。</p> <p>(方法) 主に既存の解析コードを用いて解析を行う。</p>
ステップ 4	<p>(目的、実証のポイント) 実機安全評価解析の実施、設計への反映 ステップ3で得られたデータに基づいて実機の安全評価解析を実施する。どの程度の線出力に設定すべきかについて、ATWS事象への耐性、高燃焼度条件での燃料健全性、経済性等を考慮して、最適値を設定する。</p> <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて) 従来の炉心と本質的な差は無いので、特徴的な部分に関するデータのみを拡充すれば、十分にLicensabilityはあると判断される。</p>	

方策名	NO.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	
開発・実証ステップ	<p>窒化物燃料は、以下のようなメリットを有していることから、MOX燃料の代替燃料の有力候補の一つとしてこれまで国内外で検討されてきている。</p> <p>①熱伝導率がMOX燃料に比べ6倍程度高く、融点が約2300℃と比較的高いため、同線出力のMOX燃料に比べ、定常出力時の燃料の熱的裕度の確保、及びATWS時の初期事象進展防止の点で優れている。特にULOF時において、燃料の温度低下が生じる場合でも、その温度変化幅がMOX燃料に比べて小さいので、投入される正のドブラー反応度を低減することが可能である。</p> <p>②重金属密度がMOX燃料の約1.4倍であるため、増殖性能に優れ、制御棒反応度値を低減することが可能である。これはUTOP時の燃料破損回避に有利である。</p> <p>しかし、以下に記すような技術的課題も残されている。</p> <p>①照射実績が数百本程度と極めて乏しい。</p> <p>②燃料スエリング等によるPCMIの緩和の観点からギャップ間隙を広くとる必要があるため、ナトリウムボンド方式を採用している例が多いが、この種の燃料に対する再処理技術の確立が不可欠である。</p> <p>③¹⁴Nの(n,p)反応により生成される¹⁴Cの処理方法の検討が必要である。あるいは、この問題を回避するのに¹⁵Nの濃縮が考えられるが、濃縮技術の確立が必要である。</p> <p>④融点に達するまでにペレット内窒素が解離し熱安定性を低下させ、ピンの内圧上昇やウラン-プルトニウム金属と被覆管との反応を引き起こす恐れがある。</p> <p>ここでは、燃料製造や再処理に係わる開発課題については触れず、安全性の観点からの技術的検討課題についてのみ述べるにとどめる。</p> <p>第1ステップでは、窒化物燃料炉心のATWS時の特性を予備的に評価する必要があるが、各国で既に実施されている。</p> <p>第2ステップでは、高温状態での燃料の物性データを炉外試験により取得する必要がある。</p> <p>第3ステップでは、窒化物燃料の照射試験、炉物理臨界実験、燃料破損限界試験、窒化物燃料-ナトリウムのFCI挙動、事故後の物質移行挙動に関する試験等を行う。</p> <p>第4ステップでは、常陽の炉心を窒化物燃料によって構成し、過渡変化時の炉心温度変化挙動等を測定することによって、窒化物燃料炉心の受動的安全性を実証する。</p>	
スケジュール	<p>(第2ステップ) 要素試験 : 3年</p> <p>(第3ステップ) 機能確認試験 : 15年</p> <p>(第4ステップ) 実証試験 : 15年</p>	
ステップ2	<p>(試験名)高温での燃料物性データの取得</p> <p>(目的)</p> <p>窒化物燃料により受動的な安全性を高めた炉心を構成したとしても、CDA解析は必要と考えられる。このため、通常運転状態を越えた高温での燃料の物性データを取得する必要がある。</p> <p>(方法)</p> <p>炉外試験により、UN,PuN,MNの高温(熔融状態、蒸気を含む)での物性値(熱伝導率、比熱、飽和蒸気圧等)を測定し、データベースを作成する。</p>	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>

ステップ 3	<p>(試験名)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 窒化物燃料の照射試験 ② 炉物理臨界試験 ③ 窒化物燃料-ナトリウムのFCI挙動試験 ④ 過出力時燃料挙動試験 ⑤ 破損後燃料挙動試験 <p>(目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 窒化物燃料の照射挙動に関するデータを蓄積し、破損限界等の燃料健全性についての知見を得、安全設計に反映させる。 ② ドブラー係数等安全性に係わる各種反応度係数や、中性子束分布、反応率分布等を測定し、窒化物燃料炉心に対する炉心核特性解析手法が妥当であることを検証する。 ③ 窒化物燃料のFCI挙動を現象論的に把握し、実機での再臨界防止方策に対する有益な知見を得る。 ④ 燃料安全の観点から、過出力状態において、燃焼効果に着目したPCMI、燃料内FP挙動、ボンドナトリウムとの共存性、窒化物燃料の熱分解による内圧破損等の破損メカニズムの把握を行い、破損限界の知見を得る。 ⑤ CDAの観点から、破損後燃料挙動、FP保持特性、プール再臨界挙動(化学形態)、流出挙動、事故後の物質移行と冷却性の把握を行う。 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 窒化物燃料からなる特殊燃料集合体を常陽に装荷し、定格出力状態にて照射試験を実施する。試験結果をPIE等で評価し、出力、燃焼度、ボンド材、スミア密度、ギャップ幅、Pu富化度等の違いにより、スエリング、FP放出率、窒素解離等がどのような特性を示すのかを調べる。 ② FCA等の既存の高速臨界集合体を用いて行う。 ③ 炉外にて、窒化物燃料-ナトリウムのFCI、窒化物燃料-構造材の浸食性について調べる(MELT試験)。 ④ SERAPH炉を用いて、過出力状態での燃料挙動試験を実施する。 ⑤ SERAPH炉を用いて、窒化物燃料バンドルを破損溶解させる試験を実施する。 <p>④、⑤の試験には、即応性の高いプロセス計測の他、燃料移動計装等特殊な計装系が必須である。</p>	<p>(解析名)</p> <p>試験解析</p> <p>(目的)</p> <p>左記の各試験について、事前に予測解析を行うことによって、詳細な試験条件の設定、計測点の配置の検討等を実施する。</p> <p>試験の事後解析を実施し、試験結果の物理的な解釈の一助とする。</p> <p>解析コードの検証を行う。</p> <p>(方法)</p> <p>既存の解析コードを用いて解析を実施する。必要に応じて、コードの整備を行う。</p>
ステップ 4	<p>(目的、実証のポイント)</p> <p>窒化物燃料炉心の過渡時の特性を段階を踏んで調べ、最終的にはULOF, UTOPの事象の終息性を実証する。</p> <p>解析コードの最終的な検証を行う。</p> <p>検証された解析コードを用いて実機解析を行い、大型窒化物炉心での事象の終息性を示す。また、設計への提言をまとめる。</p> <p>以下の事項について評価し、冷却材非沸騰、燃料非破損、再臨界防止等の燃料及び炉心安全に係わるクライテリアが十分に満足されることを現象論的に実証する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① LOF試験(定格流量→自然循環流量)での燃料冷却性(非沸騰)、出力静定を実証する。 ② 1集合体規模での反応度抑制機能(ドブラー反応度、冷却材反応度等)を検証する。 ③ UTOP条件での燃料非破損を実証する。 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <p>常陽の全炉心を窒化物燃料によって構成する。まず、各種の緩やかな過渡試験を実施し、炉心の過渡応答特性を調べるとともに、解析コードの検証度を高める。出力の低い条件から順にATWS試験を実施し、事象の終息性を実証する。</p>	

<p>方策名</p>	<p>4-1 GEM (Gas Expansion Module) : 従来型GEM (FFTF型)</p>	
<p>開発・実証ステップ</p>	<p>GEMはFFTFにおいて既に開発されて機能等が紹介されているが、詳細な機構等は明きらかではない。フィージビリティスタディ (ステップ1) : GEMのメカニズムまたはGEMに応用できる既存技術の調査、既存核特性評価コード及び検証に使用できるデータの調査を行い開発手段を決定する。 要素試験 (ステップ2) : 実証試験及び実用化を考慮して「常陽」型、実証炉型の2つのタイプのGEM機構の試作を行い、機構及び封入ガスの基礎的な挙動について確認し、最適な機構を開発する。並びに、供用期間中のガス漏れの検査機構を開発する。また、核熱流動特性評価手法の開発及び検証を行う。 機能確認試験 (ステップ3) : 開発したGEMの単体流動特性、外乱に対する作動量及び検査機構の機能を炉外試験により確認する。開発した核熱流動特性評価手法を用いて外乱評価、事故時評価、最適配置評価及び実証試験予備解析を行う。これらの実験及び解析結果は「常陽」を使用する実証試験の許認可に必要なバックデータとする。 実証試験 (ステップ4) : 「常陽」を用いた実証試験を行い、実炉における反応度及びばす効果を確認する。また、核熱流動特性評価手法を用いて実証試験の (試験後) 解析を行い評価手法の精度を再評価する。さらに、実証炉または大型炉に実用化のための許認可に供する予備評価解析を実施する。</p>	
<p>スケジュール</p>	<p>フィージビリティスタディ (ステップ1) : 初年度 要素試験 (ステップ2) : 2年度～3年度 機能確認試験 (ステップ3) : 4年度～5年度 実証試験 (ステップ4) : 6年度～7年度</p>	
<p>ステップ1</p>	<p>(試験名) GEM機構に係わる情報調査 (目的) GEM機構の開発方法、機構の提案のために有効な情報を文献等より調査し、開発手段の方向づけを行う。 (方法) 1. 従来型GEMに関する情報調査 FFTFのGEMに関する情報を文献等から収集し、メカニズム、反応度抑制効果等の問題点を抽出する。また、特許出願についても調査する。これらの情報からGEM機構開発手段の方向づけをする。</p>	<p>(解析名) 核熱流動特性評価手法の調査 (目的) GEM作動による核熱流動を結合した精度良い動特性評価を行うに当たり、既存の高速炉用核熱流動特性評価手法の信頼性及び現状を調査し、手法の改良、新規コード作成等の必要性についての見通しをつける。 (方法) 国内外の公開コードまたは政府機関の開発コードについて高速炉の核熱流動特性解析に使用できるものを見つける。また、コードの検証に使用できる試験データを調査する。</p>
<p>ステップ2</p>	<p>(試験名) 要素試験 (目的) 従来型GEM機構の問題点改良を考慮した新機構の開発を目的とし、機構の考案、試作を行う。また、実証炉内での供用期間のシステムの機能健全性を検査する方法についてもその方策を開発する。 新たに開発した機構の実機流動条件下におけるガス挙動を確認し、炉心流量低下時の反応度抑制効果評価解析に資するデータを収集する。 (方法) 1. ガス保持機構の開発 (常陽型、実証炉型) 抽出された問題点を改善した機構を提案、試作し、炉心内ガスを定格流量下で確実に安定した圧縮封入状態に保ち、且つ、流量低下時で確実に軸方向にガスが延伸し、機構外にガスが放出されることなく安定な状態を保つことの出来る最適な機構を開発する。(炉外試験: 水試験) 2. ガス挙動確認 (常陽型、実証炉型) GEM作動時のガス延伸速度、炉心出力低下に伴うガス収縮等の挙動を確認する。 (炉外試験: 水試験、高温気中試験、Na試験) 3. ガス漏れ検査方法の開発 (常陽型、実証炉型) 供用期間中のガス漏れの有無を検査する方法、ツールの開発を行う。(炉外試験: 水試験、Na試験)</p>	<p>(解析名) 核熱流動特性評価手法の開発 (目的) 既存炉、実証炉及び大型炉の核熱流動特性評価を適切に行える手法を開発する。 (方法) 1. 評価手法の整備 既存の評価手法の適切な改良も含め、GEM作動時の核熱流動特性評価手法を整備する。 2. 検証 国内外の既存データを使い評価手法が妥当であることを検証し、定量的な解析精度を確認する。この検証データは十分に信頼できるものでなければならない。</p>

ステップ 3	<p>(試験名) 機能確認試験</p> <p>(目的) 開発したGEM機構の実機（常陽及び実証炉）で想定される流動条件下における流動特性、耐久性及び実機で予測される外乱に対する特性を確認する。ここで、得られる試験結果は実証試験の許認可に必要な実験的信頼性立証データ及び核熱流動特性評価手法を用いた解析的信頼性立証データに資する。</p> <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 流動特性試験（常陽型、実証炉型） 水流動試験により実機R₀数範囲の流動特性（圧力損失特性、キャピテーション等）を把握する。 （炉外試験：水試験） 2. 機構健全性試験（常陽型、実証炉型） 実機で想定される流動条件範囲で炉心流量を繰り返し変化させる長期間のナトリウム流動試験を行い、ガス封入機構及び機構が装着されるダクトの健全性を確認する。 （炉外試験：ナトリウム試験） 3. 外乱効果の確認（常陽型、実証炉型） 想定される定格運転中の冷却材流量変化等の外乱によるGEM作動量を把握する。（炉外試験：水試験） 4. ガス漏れ検査機構の機能確認（常陽型） GEM内ガスの検査機構が実機で想定される高温ナトリウム中環境で機能することを確認する。 （炉外試験：ナトリウム試験） 	<p>(解析名) GEM評価解析</p> <p>(目的) 実機炉を用いたGEM実証試験時の許認可に必要なデータを得るため、核熱流動評価手法を用い反応度抑制効果評価を行う。（必ず安全側に働くことを解析的に確認する。）</p> <p>(方法) 解析は実証試験に用いる「常陽」体系について、以下に示す解析を行う。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 定常時外乱効果評価 2. 事故時反応度評価 3. 最適配置評価 4. 実証試験予備解析
ステップ 4 ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <p>実証炉または大型炉での実用化に向けての許認可を考慮すると、GEM機構のDBE範囲における実機炉心に対する影響、効果が定量的に判定できるものであること、異常な過渡及び事故に相当する炉心流量低下により確実にGEMが作動し、炉心の安全が確保されることを既存の炉を用い実験的に実証することが重要である。</p> <p>また、実証炉または大型炉にGEMを装荷した場合の核熱流動特性評価を精度の高い実験データを用いて検証した解析コードにより実施し、GEMが十分に信頼性のあるものであることを立証しなければならない。</p> <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 実炉試験（常陽型） 実機炉心流量を100%→75%→50%の範囲で変化させ、炉心出力変化を測定し、その効果を定量的に把握する。また、再現性も確認する。 （炉内試験：「常陽」） 2. 実証試験解析 解析は実証試験で得られたデータ等を用いて以下に示す解析を行い、予測精度の確認及び実証炉または大型炉におけるGEMの安全性を確認する。 <ol style="list-style-type: none"> a. 実証試験解析 b. 実証炉または大型炉解析 	

<p>方策名</p>	<p>4-2 GEM (Gas Expansion Module) : 中性子吸収ガス封入型GEM</p>	
<p>開発・実証ステップ</p>	<p>GEMはFFTFにおいて既に開発されて機能等が紹介されているが、詳細な機構等は明きらかではない。 フィージビリティスタディ (ステップ1) : GEMのメカニズムまたはGEMに応用できる既存技術の調査、既存核特性評価コード及び検証に使用できるデータの調査を行い開発手段を決定する。 要素試験 (ステップ2) : 実証試験及び実用化を考慮して「常陽」型、実証炉型の2つのタイプのGEM機構の試作を行い、機構及び封入ガスの基礎的な挙動について確認し、最適な機構を開発する。並びに、供用期間中のガス漏れの検査機構を開発する。また、核熱流動特性評価手法の開発及び検証を行う。 機能確認試験 (ステップ3) : 開発したGEMの単体流動特性、外乱に対する作動量及び検査機構の機能を炉外試験により確認する。開発した核熱流動特性評価手法を用いて外乱評価、事故時評価、最適配置評価及び実証試験予備解析を行う。これらの実験及び解析結果は「常陽」を使用する実証試験の許認可に必要なバックデータとする。 実証試験 (ステップ4) : 「常陽」を用いた実証試験を行い、実炉における反応度に及ぼす効果を確認する。また、核熱流動特性評価手法を用いた実証試験の(試験後)解析を行い評価手法の精度を再評価する。さらに、実証炉または大型炉に実用化のための許認可に供する予備評価解析を実施する。</p>	
<p>スケジュール</p>	<p>フィージビリティスタディ (ステップ1) : 初年度 要素試験 (ステップ2) : 2年度~3年度 機能確認試験 (ステップ3) : 4年度~5年度 実証試験 (ステップ4) : 6年度~7年度</p>	
<p>ステップ1</p>	<p>(試験名) GEM機構に係わる情報調査 (目的) GEM機構の開発方法、機構の提案のために有効な情報を文献等より調査し、開発手段の方向づけを行う。 (方法) 1. 従来型GEMに関する情報調査 FFTFのGEMに関する情報を文献等から収集し、メカニズム、反応度抑制効果等の問題点を摘出する。また、特許出願についても調査する。これらの情報からGEM機構開発手段の方向づけをする。</p>	<p>(解析名) 核熱流動特性評価手法の調査 (目的) GEM作動による核熱流動を結合した精度良い動特性評価を行うに当たり、既存の高速炉用核熱流動特性評価手法の信頼性及び現状を調査し、手法の改良、新規コード作成等の必要性についての見通しをつける。 (方法) 国内外の公開コードまたは政府機関の開発コードについて高速炉の核熱流動特性解析に使用できるものを見つける。また、コードの検証に使用できる試験データを調査する。</p>
<p>ステップ2</p>	<p>(試験名) 要素試験 (目的) 従来型GEM機構の問題点改良を考慮した新機構の開発を目的とし、機構の考案、試作を行う。また、実機炉内での供用期間中のシステムの機能健全性を検査する方法についてもその方策を開発する。 GEM機構で使用する中性子吸収に最も効果のあるガスの選定を行い、新たに開発した機構の実機流動条件下におけるガス挙動を確認し、炉心流量低下時の反応度抑制効果評価解析に資するデータを収集する。 (方法) 1. ガス保持機構の開発 (常陽型、実証炉型) 摘出された問題点を改善した機構を提案、試作し、炉心内ガスを定格流量下で確実に安定した圧縮封入状態を保ち且つ、流量低下時に確実に軸方向にガスが延伸し、機構外にガスが放出されることなく安定な状態を保つことの出来る最適な機構を開発する。(炉外試験: 水試験) 2. 毒物ガスの選定 最適な毒物ガスを選定する為に、毒物ガスの種類を変えて臨界集合体に挿入し、反応度抑制の特性を確認する。(FCA (Fast Critical Assembly)を用いた試験) 3. ガス挙動確認 (常陽型、実証炉型) GEM作動時のガス延伸速度、炉心出力低下に伴うガス収縮等の挙動を確認する。(炉外試験: 水試験、高温気中試験、Na試験) 4. ガス漏れ検査方法の開発 (常陽型、実証炉型) 供用期間中のガス漏れの有無を検査する方法、ツールの開発を行う。(炉外試験: 水試験、Na試験)</p>	<p>(解析名) 核熱流動特性評価手法の開発 (目的) 既存炉、実証炉及び大型炉の核熱流動特性評価を適切に行える手法を開発する。 (方法) 1. 評価手法の整備 既存の評価手法の適切な改良も含め、GEM作動時の核熱流動特性評価手法を整備する。 2. 検証 国内外の既存データを使い評価手法が妥当であることを検証し、定量的な解析精度を確認する。この検証データは十分に信頼できるものでなければならない。</p>

ステップ 3	<p>(試験名) 機能確認試験</p> <p>(目的) 開発した GEM 機構の実機（常陽及び実証炉）で想定される流動条件下における流動特性、耐久性及び実機で予測される外乱に対する特性を確認する。ここで、得られる試験結果は実証試験の許認可に必要な実験的信頼性立証データ及び核熱流動特性評価手法を用いた解析的信頼性立証データに資する。</p> <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 流動特性試験（常陽型、実証炉型） 水流動試験により実機 Re 数範囲の流動特性（圧力損失特性、キャビテーション等）を把握する。 （炉外試験：水試験） 2. 機構健全性試験（常陽型、実証炉型） 実機で想定される流動条件範囲で炉心流量を繰り返し変化させる長期間のナトリウム流動試験を行い、ガス封入機構及び機構が装着されるダクトの健全性を確認する。 （炉外試験：ナトリウム試験） 3. 外乱効果の確認（常陽型、実証炉型） 想定される定格運転中の冷却材流量変化等の外乱による GEM 作動量を把握する。（炉外試験：水試験） 4. ガス漏れ検査機構の機能確認（常陽型） GEM 内ガスの検査機構が実機で想定される高温ナトリウム中環境で機能することを確認する。 （炉外試験：ナトリウム試験） 	<p>(解析名) GEM 評価解析</p> <p>(目的) 実機炉を用いた GEM 実証試験時の許認可に必要なデータを得るため、核熱流動評価手法を用い反応度抑制効果評価を行う。（必ず安全側に働くことを解析的に確認する。）</p> <p>(方法) 解析は実証試験に用いる「常陽」体系について、以下に示す解析を行う。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 定常時外乱効果評価 2. 事故時反応度評価 3. 最適配置評価 4. 実証試験予備解析
ステップ 4 ・ ・ ・ ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <p>実証炉または大型炉での実用化に向けての許認可を考慮すると、GEM 機構の DBE 範囲における実機炉心に対する影響、効果が定量的に判定できるものであること、異常な過渡及び事故に相当する炉心流量低下により確実に GEM が作動し、炉心の安全が確保されることを既存の炉を用い実験的に実証することが重要である。</p> <p>また、実証炉または大型炉に GEM を装荷した場合の核熱流動特性評価を精度の高い実験データを用いて検証した解析コードにより実施し、GEM が十分に信頼性のあるものであることを立証しなければならない。</p> <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 実炉試験（常陽型） 実機炉心流量を 100%→75%→50% の範囲で変化させ、炉心出力変化を測定し、その効果を定量的に把握する。また、再現性も確認する。 （炉内試験：「常陽」） 2. 実証試験解析 解析は実証試験で得られたデータ等を用いて以下に示す解析を行い、予測精度の確認及び実証炉または大型炉における GEM の安全性を確認する。 <ol style="list-style-type: none"> a. 実証試験解析 b. 実証炉または大型炉解析 	

方策名	No.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)	
開発・実証ステップ	<p>まず、本方式に係わるR&Dは過去に実施されていないため、Feasibility study (第1ステップ)としては、本方式の基本的な有効性を確認することを目的に、核計算により反応度効果を定量化する。また、冷却材の温度上昇あるいは中性子束の増加により溶融する物質のサーベイ・選定 (もしくは熱膨張率の異なる適切な2種の金属の選定) を実施する。</p> <p>要素試験 (第2ステップ) では、キーとなる要素の開発を行う。具体的には、冷却材の温度上昇、中性子束の増加で溶融する物質の材料特性の確認、装置形状を最適化するための流動試験等である。</p> <p>機能確認試験 (第3ステップ) では、作動遅れ時間の確認、ナトリウム中での耐久性確認、ISI方法の開発を実施することによって、システムとしての設計を洗練させ、有効性の確認を実施する。また、臨界集合体を用いた反応度効果の定量化などが挙げられる。</p> <p>実証試験 (第4ステップ) では、Licensabilityを高めるため、材料の照射効果の確認、実炉での耐久性、ISI可能性の確認等を実施する。また、大規模なナトリウム試験で、システム特性試験を実施する。</p>	
スケジュール	<p>ステップ1 (文献サーベイ、反応度効果確認解析) : 1年</p> <p>ステップ2 (材料特性基礎試験、流動特性試験) : 3年</p> <p>ステップ3 (作動遅れ時間測定試験、耐久性確認試験、ISI開発、ボイド反応度精度向上、システム特性解析) : 5年</p> <p>ステップ4 (材料照射効果試験、システム応答確認試験、実機内耐久試験) : 5年</p> <p>ただし、試験の準備は前の段階の試験とある程度重複して進めるものとする。</p>	
ステップ1	<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的)</p> <p>冷却材の温度上昇あるいは中性子束の増加により溶融する物質の開発、選定 (もしくは熱膨張率の異なる適切な2種の金属の選定) が必要である。材料の開発に着手する以前に文献調査により、適切な材料選定の可能性を調べる。また、特許申請の有無を調査する。</p>	<p>(解析名) ボイド-ナトリウム置換機構の反応度効果確認解析</p> <p>(目的)</p> <p>ボイド-ナトリウム置換機構にどの程度の反応度効果を期待できるか、炉心のどの位置にどの程度のボイド領域を持ち込むのが有効か等の検討を行い、核的な成立性を見通しを付ける。</p> <p>(方法)</p> <p>汎用核特性解析コードを用いたパラメータサーベイ解析を実施する。</p>
ステップ2	<p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 冷却材の温度上昇あるいは中性子束の増加により溶融する物質、もしくは、熱膨張率の異なる適切な2種の金属を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。 以下の点を調べ、装置形状を最適化する <ul style="list-style-type: none"> - 通常運転時の流動特性 - 作動時の容器の浮上特性 - 溶融物質あるいは支持部近傍での冷却材混合特性 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> については、高温気中試験、ナトリウム試験 (小規模な試験装置) を実施する。但し、中性子の増加により溶融する物質を使用する場合には、インパイルループを用いた特性把握が必要。高速中性子場が必要であることを考えると、SERAPHが適切。 については、水流動試験 	

ステップ 3	<p>(試験名) システム試験</p> <p>(目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 作動遅れ時間 (冷却材の混合効果、冷却材から溶融物質あるいは熱膨張物質への伝熱遅れ、溶融開始から容器支持力を失うまでの時間、容器の浮上時間あるいはナトリウムへの置換時間) を不確定性を含めて測定する。 2. 高温ナトリウム中での耐久性の確認 (封入ガスの漏れ、溶融物質のナトリウム環境での劣化等) 3. ISI方法 (封入ガスが漏洩していないことの確認) の開発 4. ボイド反応度係数の精度向上。 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. については、ナトリウム試験 (小規模なナトリウム試験) 2. については、ナトリウム試験 (過渡試験を与える必要がなく単純な試験装置で良い) 3. については、ナトリウム試験 (単純な装置) 4. については、臨界集合体を用いる。 	<p>(解析名) システム特性解析</p> <p>(目的)</p> <p>実機で異常事象が発生した場合に、どの程度の時間遅れを持って、どの程度の負の反応度が投入されるのかを解析する。また、誤作動した場合に、プラントにどのような影響を与えるのかを解析する。</p> <p>(方法)</p> <p>SSC-Lコードを改良し、左記の実験から得られた実験関連式を導入して、プラント応答を解析可能にする。</p>
ステップ 4 ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 材料の照射効果を調べる。 2. システム応答の確認 (システムを組み上げた状態で作動の確実性を確認する) 3. 実機内にこのシステムを設置し、実機中での耐久性の確認、ISIが確実に実施できることの確認を実施する。 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. については、常陽を用いた照射試験を実施する。 2. については、大規模なナトリウム試験 (PLANDTL) 3. については、その目的から炉のサイズは影響しないので、実機として常陽を用いる。 	

方策名	NO.6 ナトリウムプレナム付き炉心	
開発・実証ステップ	<p>本方策は、1990年Snowbird国際会議で、ロシアのMatveevが提案したもので、本方策の適用により大型FBRに対し、ナトリウムボイド反応度ゼロの炉心設計が可能との見通しが得られている。既に本方策を応用した炉心設計例に関する論文が多数出されている、というのが現状である。しかし、そのほとんどが核特性のみに焦点をあてたもので、その解析手法もまちまちであり、さらに熱流動特性も考慮した詳細な過渡特性解析まで行われた例は極めて少ない。従って、本方策を適用することによる反応度特性への効果を適切に評価し得る解析手法の確立と、過渡状態におけるナトリウムプレナム層の熱流動特性に関する研究が今後必要となる。</p> <p>(第1ステップ) Feasibility study</p> <p>①ナトリウムボイド反応度及び過渡時プレナム内ナトリウムの密度変化を適切に考慮した過渡時反応度特性を定量的に評価する。</p> <p>②ナトリウムプレナム付き集合体の最適な形状を概略選定する。</p> <p>(第2ステップ) 要素試験</p> <p>①Feasibility studyの結果に基づいたナトリウムプレナム付き模擬集合体を試作する。</p> <p>②発熱体の温度変化に対するナトリウムプレナム部内における密度変化等の熱流動挙動を把握する。</p> <p>(第3ステップ) 機能確認試験</p> <p>①複数の模擬集合体、特に発熱量の異なる集合体からなる試験体をナトリウム中に装荷し、プレナム部の温度変化により生じるプレナム内混合特性がナトリウム密度変化に与える影響を調べる。</p> <p>(第4ステップ) 実証試験</p> <p>①ナトリウムプレナム付き集合体を実炉に装荷し、過渡応答を調べる。</p> <p>②臨界集合体を用い、ナトリウムプレナムを装荷した場合のナトリウムボイド反応度、冷却材密度係数等の核特性解析手法の妥当性を検証する。</p> <p>③過渡時のプレナム内ナトリウム密度変化に、機能確認試験で得られたプレナム内混合特性の知見を導入し、本方策を取り入れたことによる反応度効果への有効性を定量的に評価する手法を確立する。</p>	
スケジュール	<p>(第1ステップ) Feasibility study : 1年</p> <p>(第2ステップ) 要素試験 : 3年</p> <p>(第3ステップ) 機能確認試験 : 3年</p> <p>(第4ステップ) 実証試験 : 3年</p>	
ステップ1	<p>(試験名)ナトリウムプレナム付き集合体形状に関する調査</p> <p>(目的)構造健全性、熱流動特性、製作性等を考慮して、最も有効な反応度効果を与え得るプレナム部形状を選定する。</p> <p>(方法)過去に検討された例について文献調査を行う。また、過去に類似の集合体設計の実例があれば参考にする。必要に応じて、プレナム部厚さ、プレナム容量、プレナム付き集合体本数等をパラメータとした反応度効果の定量的評価を行う。</p>	<p>(解析名)ナトリウムボイド反応度及び過渡時反応度特性の定量的評価</p> <p>(目的)ナトリウムプレナムを設けることにより得られる反応度効果を適切に把握する。</p> <p>(方法)ボイド時の中性子輸送効果、過渡時のプレナム内ナトリウム密度変化を適切に考慮した核特性解析を実施する。</p>
ステップ2	<p>(試験名)過渡時ナトリウムプレナム部熱流動特性試験</p> <p>(目的)過渡変化によりプレナム部ナトリウム温度が上昇したことによる、ナトリウム密度変化、ボイド形成時のボイドの拡大縮小等の熱流動特性を調べる。</p> <p>(方法)ナトリウムプレナム付き集合体を試作し、集合体内ナトリウム流量や発熱体部の発熱量を変化させて、プレナム内ナトリウム温度またはボイドの空間分布が時間的に変化する様子を観測する。</p>	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>

ステップ 3	<p>(試験名)ナトリウムプレナム内混合特性試験</p> <p>(目的)発熱量の異なる集合体同志によるプレナム部でのナトリウムの混合特性が、過渡時のプレナム内ナトリウム密度変化やボイドの空間分布に与える影響を調べる。</p> <p>(方法)発熱量の異なる複数の模擬集合体からなる試験体をナトリウム中に装荷し、集合体内ナトリウム流量や発熱体部の発熱量を変化させ、プレナム内ナトリウムの温度変化またはボイドの拡大縮小挙動を観測する。</p>	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>
ステップ 4 ・ ・ ・ ・ ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <ol style="list-style-type: none"> ①実炉を用いた、過渡変化に対する反応度効果の実証 ②臨界集合体を用いた核特性解析手法の妥当性の検証 ③プレナム内混合特性をも考慮した、過渡時反応度特性に対する定量的評価手法の確立 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ol style="list-style-type: none"> ①常陽の燃料集合体全数をナトリウムプレナム付き燃料集合体に置換する。集合体内ナトリウム流量を変化させ、炉心の反応度変化を測定し、期待される反応度効果が得られることを確認する。 ②ナトリウムプレナム付き炉心をモックアップした臨界集合体を設置する。ナトリウムプレナム部がナトリウムで充満された集合体とボイド化された集合体を互いに置換し、置換反応度、反応率分布等を測定することにより、核特性解析手法が妥当であることを確認する。 ③プレナム内混合特性をも考慮した過渡時のプレナム部ナトリウム密度変化をモデル化し、核熱動特性解析コードに組み込む。このコードを用いて過渡時反応度特性を解析し、①の実験結果と照らし合わせ、解析手法が妥当であることを確認する。さらに、想定される大型FBRに対し、本コードを用いて過渡特性を解析し、過渡時反応度特性に対しナトリウムプレナム設置が有効な手段であることを定量的に確認する。 	

方策名	No.8 フローティング型制御機構	
開発・実証ステップ	<ol style="list-style-type: none"> 1. Feasibility Study (ステップ1) : 本方式の有効性及び成立性を検討するため、文献調査を中心に、最適なフロート材質、形状、評価手法等について調査する。 2. 要素試験 (ステップ2) : フロート単体及び制御要素全体に対して、浮力、圧損等の基本特性を把握するために、水を作動流体とする実験を実施する。また、流体中に浮遊する物体の動特性と、流動計算とをカップリングして解く計算手法を開発する。 3. 機能確認試験 (ステップ3) : 高温ナトリウム中における作動確認、応答及び流動特性を評価するナトリウム実験、並びにステップ2で開発したツールの整備 (核計算とのカップリングを追加) ・検証を行う。 4. 実証試験 (ステップ4) : 炉内試験により信頼性、動特性、検査性等を実証するとともに、評価ツールの核計算部も含めた検証及び実機評価を行い、許認可に耐え得るデータを蓄積する。 	
スケジュール	<ul style="list-style-type: none"> ・ステップ1 6ヶ月-1年 ・ステップ2 1-2年 ・ステップ3 2-3年 ・ステップ4 2-3年 	
ステップ1	<p>(試験名) 調査・検討</p> <p>(目的)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フロート材質、封入気体フロート形状等、概略仕様を決定する。 ・制御棒要素形状に関して適切なフローティング構造を検討する。 ・特許に関する調査。 <p>(方法)</p> <p>概念検討、特許調査。</p>	<p>(解析名) 流体中浮遊物体動特性評価手法の調査・検討</p> <p>(目的)</p> <p>流体中に浮遊する物体の動特性を流動計算とカップリングさせて解けるコードについて調査・検討する。</p> <p>(方法)</p> <p>文献調査及び試計算</p>
ステップ2	<p>(試験名) 水流動特性試験</p> <p>(目的)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フロート単体による浮力確認 ・制御棒要素を含めた下記流動特性 <ul style="list-style-type: none"> - 流状確認 - 各部圧損測定 - 作動応答性 - 外乱 (流量変動、偏流、地震等) 効果 <p>(方法)</p> <p>フロート単体及び制御棒要素を含めた集合体1体の実寸大モックアップにより流量、外乱をパラメータとした流動特性試験を実施する。</p>	<p>(解析名) 流体中浮遊物体動特性コード開発</p> <p>(目的)</p> <p>上記コードの開発 (または改良・整備) を実施する。</p> <p>(方法)</p>

ステップ 3	<p>(試験名) Na流動特性試験</p> <p>(目的)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高温Na熱過渡に伴う浮力変化の影響や構造健全性を調べる。 ・供用期間中に機能の健全性を確認する手段について検討試作し、炉外Na試験により実証する。 <p>(方法)</p> <p>高温ナトリウム中試験により実機相当の熱流動過渡変化を与え上記について調べる。</p>	<p>(解析名) 試験解析</p> <p>(目的)</p> <p>開発したコードの検証を水試験、Na試験解析により実施する。</p> <p>(方法)</p> <p>実験解析によるコード検証</p>
ステップ 4 ・・・ ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実際の制御材を用いた製作性の実証、課題の抽出及び解決 ・運転、制御上の課題抽出及び解決 ・炉内試験解析により解析コードの精度を確認し、実機評価ツールとしての信頼性向上 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実際の制御材を用いたフローティング型制御機構を試作して、問題点、改善点等を抽出し、実機の製作性の検討に反映する。 ・「常陽」に装荷して、信頼性、動特性、検査性等を実証するとともに、実際の運転・操作上の問題点や改善点等を抽出し、実機設計へ反映する。 ・解析コードによる事前解析と試験結果の比較評価及び実機予測解析を実施する。 	

方策名	No.9 キュリー一点式自己作動型制御機構	
開発・実証ステップ	<p>添付表1及び図1に示すように開発が進められてきており（昭和62年－平成元年の3年間は動燃－原電共研）、基本的に要素試験（ステップ2）までは終了しており、今後はステップ3以降の機能確認及び実証試験が残されている。</p>	
スケジュール	添付表1参照	
ステップ1	(試験名)	(解析名)
	(目的)	(目的)
ステップ2	(試験名)	(解析名)
	(目的)	(目的)
	(方法)	(方法)
	(方法)	(方法)

ステップ 3	<p>(試験名) 炉停止系信頼性確証試験</p> <p>(目的) 下記に示すステップ2までの試験により残された課題の検討及びモックアップ試験体による総合的な機能確認を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・感温部流体温度ゆらぎが作動応答時間に与える影響 ・導入管等構造物がサーマルストライピングに与える影響 ・誤作動要因及び作動時の非同時性に関する検討 ・作動特性、信頼性、検査性、耐久性等の総合機能確認 <p>(方法) 実機形状を模擬した多集合体モデルにより、定格運転条件及び流量・温度の過渡変化 (ULOF、UTOP、ULOHS等) を模擬したナトリウム試験を行う。</p>	<p>(解析名) 最確評価解析手法の開発</p> <p>(目的)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実機予測解析 SASS作動時に実機において現実的に予想される過渡特性を評価し、設計上の課題を抽出する。 ・実験解析 応答性能解析コードSASSTAC (AQUA+FINAS+MAGNA) の検証及び実験から温度ゆらぎ、サーマルストライピング等の影響が確認された場合には、さらにDINUSを組み合わせた解析評価システムを確立する必要がある。これにより、SASSの単体作動特性に関する評価モデルの高度化及び実験検証により、設計上の不確かさを低減する。 <p>(方法)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実機予測解析 局所的な出力分布を考慮した解析手法を開発し、誤作動を含むSASS作動時の最確ベースの動特性解析を行う。 ・実験解析 左記の実験に関する検証解析を行う。
ステップ 4 ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・信頼性及び検査性の実証 ・誤作動時の影響確認 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「常陽」による炉内試験 	

項目 \ 年度	60-61	62	63	元	2	3	4	5	6	7	8
調査・方式選定											
基本原理の確認 (原理確認試験)		静的保持力測定									
材料特性		高温Na中経時変化、自己融着			耐放射線性						
冷却材流動特性		水流動試験									
誤動作防止機構			振動試験								
熱過渡応答特性 (部分モデル試験)			熱過渡応答性試験								
炉内機能確認 試験						概念設計	基本設計	周辺設備の 基本設計	設計・製作	試験	
大型炉システム 概念構築						予備検討	概念検討	システム 概念検討	信頼性確認試験		

表1 キュリー一点式自己作動型制御機構開発工程

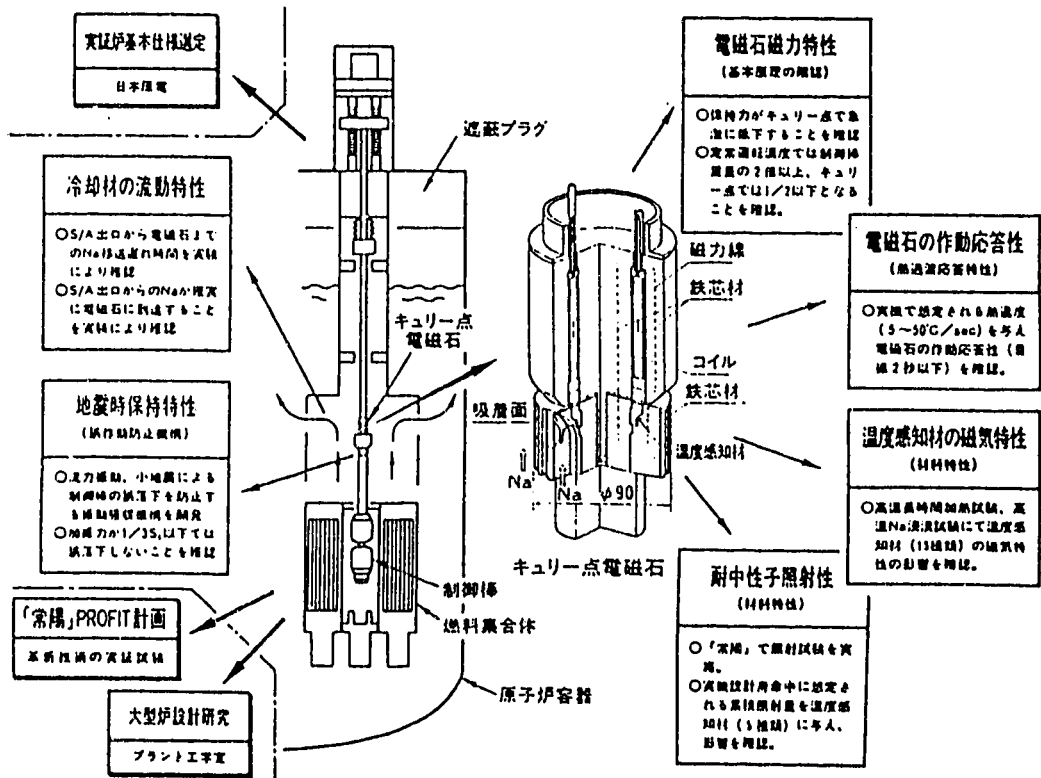


図1 自己作動型炉停止機構の開発体系

<p>方策名 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</p>			
<p>開発・実証ステップ</p>	<p>まず、Feasibility study (第1ステップ)として、本方策による反応度効果の定量化、作動条件に関して評価を実施し、本方策の基本的な有効性を確認する。また、中性子束高による溶融する物質、吸収材の調査をする。</p> <p>要素試験(第2ステップ)では、中性子束高による溶融する物質、吸収材の特性評価を実施する。また、効果量、作動条件、吸収材形状について評価する。そして、基本システム設計を実施する。</p> <p>実証試験(第4ステップ)では、Licensabilityを高めるため、材料の照射効果の確認、実炉での耐久性及び動作安定性、運転制御性、経年変化の評価をする。</p> <p>現状は、溶融物質及び吸収材の調査中である。</p>		
<p>スケジュール</p>	<p>ステップ1：文献サーベイ、確認解析 1.0年</p> <p>ステップ2：要素試験 1.0年 反応度効果評価解析 1.0年</p> <p>ステップ4：照射試験 1.5年 炉内試験 1.0年</p>		
<p>ステップ1</p>	<table border="1"> <tr> <td> <p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 中性子束高による溶融する物質の開発・選定が必要である。また、炉心に混入する吸収材の開発・選定(個体(形状)、液体、気体)も必要である。そのため、文献調査により、適切な物質選定の可能性を調査する。また、特許調査を実施する。</p> </td> <td> <p>(解析名) 中性子束高による溶融する物質による吸収材炉心混入の反応度効果確認解析</p> <p>(目的) 吸収材炉心混入の反応度効果、混入量、作動条件の設定等の検討を行い、本方策の有効性を評価する。</p> <p>(方法) 核動特性解析コードを用いて、時定数、溶融に必要なflux、融点、吸収材をパラメータとした解析を実施する。</p> </td> </tr> </table>	<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 中性子束高による溶融する物質の開発・選定が必要である。また、炉心に混入する吸収材の開発・選定(個体(形状)、液体、気体)も必要である。そのため、文献調査により、適切な物質選定の可能性を調査する。また、特許調査を実施する。</p>	<p>(解析名) 中性子束高による溶融する物質による吸収材炉心混入の反応度効果確認解析</p> <p>(目的) 吸収材炉心混入の反応度効果、混入量、作動条件の設定等の検討を行い、本方策の有効性を評価する。</p> <p>(方法) 核動特性解析コードを用いて、時定数、溶融に必要なflux、融点、吸収材をパラメータとした解析を実施する。</p>
<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 中性子束高による溶融する物質の開発・選定が必要である。また、炉心に混入する吸収材の開発・選定(個体(形状)、液体、気体)も必要である。そのため、文献調査により、適切な物質選定の可能性を調査する。また、特許調査を実施する。</p>	<p>(解析名) 中性子束高による溶融する物質による吸収材炉心混入の反応度効果確認解析</p> <p>(目的) 吸収材炉心混入の反応度効果、混入量、作動条件の設定等の検討を行い、本方策の有効性を評価する。</p> <p>(方法) 核動特性解析コードを用いて、時定数、溶融に必要なflux、融点、吸収材をパラメータとした解析を実施する。</p>		
<p>ステップ2</p>	<table border="1"> <tr> <td> <p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的) 1.中性子束高による溶融する物質を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。 2.吸収材を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。</p> <p>(方法) 1.炉外での材料試験により、融点、断面積、Naとの共存性、膨張率等を明確にする。 2.炉外での材料試験により、吸収材形状(固体、液体)ごとの、融点及び沸点、吸収効果等を明確にする。</p> </td> <td> <p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) 要素試験で得られた知見をもとに、吸収材炉心混入による反応度効果評価を行い、溶融物質、吸収材の選定をする。そして、試作体作成に反映させる。</p> <p>(方法) スウェリング時の挙動、必要とされる強度、吸収材流入特性を評価し、核動特性解析コードを用いて溶融物質特性(融点、断面積、膨張率)及び吸収材形状(固体、液体)をパラメータとした解析を実施し、作動しきい値の自由度、負の反応度効果、作動時間について評価する。そして、試験体作成をする。</p> </td> </tr> </table>	<p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的) 1.中性子束高による溶融する物質を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。 2.吸収材を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。</p> <p>(方法) 1.炉外での材料試験により、融点、断面積、Naとの共存性、膨張率等を明確にする。 2.炉外での材料試験により、吸収材形状(固体、液体)ごとの、融点及び沸点、吸収効果等を明確にする。</p>	<p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) 要素試験で得られた知見をもとに、吸収材炉心混入による反応度効果評価を行い、溶融物質、吸収材の選定をする。そして、試作体作成に反映させる。</p> <p>(方法) スウェリング時の挙動、必要とされる強度、吸収材流入特性を評価し、核動特性解析コードを用いて溶融物質特性(融点、断面積、膨張率)及び吸収材形状(固体、液体)をパラメータとした解析を実施し、作動しきい値の自由度、負の反応度効果、作動時間について評価する。そして、試験体作成をする。</p>
<p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的) 1.中性子束高による溶融する物質を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。 2.吸収材を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。</p> <p>(方法) 1.炉外での材料試験により、融点、断面積、Naとの共存性、膨張率等を明確にする。 2.炉外での材料試験により、吸収材形状(固体、液体)ごとの、融点及び沸点、吸収効果等を明確にする。</p>	<p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) 要素試験で得られた知見をもとに、吸収材炉心混入による反応度効果評価を行い、溶融物質、吸収材の選定をする。そして、試作体作成に反映させる。</p> <p>(方法) スウェリング時の挙動、必要とされる強度、吸収材流入特性を評価し、核動特性解析コードを用いて溶融物質特性(融点、断面積、膨張率)及び吸収材形状(固体、液体)をパラメータとした解析を実施し、作動しきい値の自由度、負の反応度効果、作動時間について評価する。そして、試験体作成をする。</p>		

ステップ 3	
ステップ 4 ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 照射試験を実施し、 <ul style="list-style-type: none"> ・材料及びシステムの照射効果 ・検知性評価 ・経年変化 ・運転制御性 ・耐久性 を調べる。 2. 炉内でこのシステムを設置し、 <ul style="list-style-type: none"> ・システム応答特性の確認 ・効果量評価 ・吸収材流入特性評価 ・動作の安定性の確認(作動のしきい値) を実施する。 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 常陽において照射試験を実施し溶融物質、吸収材の特性評価及び各種特性評価を実施する。 2. SERAPHにてカプセル試験を実施し、各種特性評価をする。また、炉内試験にて得られた知見をもとに、解析コードを整備し、定量評価ができるようにする。 <p>☆本方策は、中性子束高により作動するため、炉内における試験の重要度が高い。</p>

<p>方策名</p>	<p>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)</p>	
<p>開発・実証ステップ</p>	<p>本方策は、燃料集合体内の1部の燃料ピンをボイド消滅を含むSASS機構を内蔵したピン (以下、SASSピンと称する) と置き換えるものである。新規方策であるため、機構のフィージビリティの検討から実証までのステップが必要である。開発ステップは以下のとおり。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. フィージビリティスタディ (反応度効果の見通し、作動要求条件の設定、フュージブルメタル等の材料成立性および機構の成立性検討など) 2. 要素試験 (材料選定、機構・設計の最適化) 3. 試作、機能確認試験 4. 実証試験 	
<p>スケジュール</p>		<ol style="list-style-type: none"> (1) フィージビリティスタディ (2) 各種要素試験 (3) 材料照射試験 (4) 試験体設計・製作 (5) 機能確認試験 (6) 設計最適評価解析 (7) 実証試験
<p>ステップ1</p>	<p>(試験名) 文献等サーベイ (目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 機構作動のトリガーとなるフュージブルメタルについて、作動要求条件 (集合体内冷却材温度上昇レベル、上昇速度、溶解速さ等) や耐久性要求条件を満たす材料の選定もしくは開発の可能性を調査する。 2. SASSピン内に装荷される中性子吸収材選定のための調査を行う。 3. SASSピン構造設計・最適化のための調査を行う。(変形防止・強度確保等) 	<p>(解析名) 反応度効果評価解析 (目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 反応度効果の見積り 2. 作動要求条件の設定 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 核計算コードやプラント応答解析コードによる評価を行う。ここでは1集合体を含むSASSピンの本数/位置、SASSピンを含む集合体の炉心内装荷本数/位置、中性子吸収材種類をパラメータとして、通常運転/異常な過渡状態 (SASS起動前) およびSASS作動時の核特性を含むプラントへの影響を把握する。(設計/設定最適化へも反映) 2. プラント応答解析により各種起因事象に対して集合体内冷却材温度の変化を求め、作動要求条件を導出する。
<p>ステップ2</p>	<p>(試験名) 各種要素試験 (目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. フュージブルメタルの選定 (or開発) 2. 中性子吸収体の選定 (or開発) 3. 作動機構の最適化 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 炉外での材料試験により物理的/化学的安定性、物性値等を明確にするとともに、要求作動条件を満たすことを確認する (場合によっては条件を満たす新材料を開発する)。また、材料照射試験 (例えば常陽) により照射の影響や経年変化を把握する。 2. 1.と同様+中性子吸収能力の確認 3. 種々の模擬ピン及び種々の形状の模擬中性子吸収体を製作し、基礎的な流動試験 (作動流体: 水) により、ピン内への冷却材の流入状況、中性子吸収体の挿入状況を把握することにより、設計の最適化を行う。 	

<p>ステップ3</p>	<p>(試験名) 機能確認試験 (目的) 1. 試作したSASSピンについて、設定条件での作動の確認 2. 反応度効果の確認 3. バンドル体系での照射影響の確認</p> <p>(方法) 1. SASSピン単体でナトリウムループを用いた炉外試験を行う。regular/irregular環境下において、設定条件でSASS機構が作動することを確認する。 2. 未臨界試験施設で、反応度効果を確認する。</p>	<p>(解析名) 設計最適化解析 (目的) 想定されるあらゆる条件下において作動が適時に確実に行われるよう、各種解析を通して設計の最適化を行う。</p> <p>(方法) 1. 照射条件下におけるバンドル形状の変形や流力振動の可能性を評価し、中性子吸収体の落下軌道が確保されることを確認する。 2. 熱過渡に関する包絡事象をいくつか設定し、バンドル内熱流動・構造解析を実施する。これより中性子吸収体落下軌道確保の確認、およびヒューズブルメタルの応答評価を行う。 3. 1、2の結果を考慮し設計の最適化を図る。</p>
<p>ステップ4 ・・・ ライセンスを考慮した最終段階の実証</p>	<p>(目的、実証のポイント) 1. 燃料交換までの供用期間中、通常運転に影響を与えないことを実証する。 2. 供用期間中の作動要求に対して確実に作動することを実証する。(特に供用末期) 3. DBE, BDBEベースの過渡に対する作動を実証し、その効果を確認する。</p> <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて) 1. 常陽(もしくはもんじゅ)へ実際に装荷し実証する。 2. 常陽で作動要求条件を満たす過渡を設定し作動を確認する。もしくは供用期間以上の装荷後、ナトリウムループを用いた炉外試験にて過渡条件を与え作動を確認する。 3. 安全性試験炉にてBDBE条件を再現し、そこでの作動を確認するとともに事象進展の影響を把握する(不作動で溶融に至った際のmitigation効果、燃料流出チャンネル効果等の確認)。また、多次元核計算等により作動非同時性の影響も評価する。</p>	

方策名	No.12 集合体内SASS（自己作動型炉停止機構）
開発・実証ステップ	<p>現状の技術レベル：R&Dは未着手。しかし原理的には困難なものではない。</p> <p>第1ステップ（フィージビリティ研究） 中性子吸収体の仕様、落下機構、作動検出方法などのサーベイ。必要装荷体数概算</p> <p>第2ステップ 要素試験：落下の機構試作・試験、感温材の試作・特性試験、中性子吸収体の試作</p> <p>第3ステップ 炉外総合試験、新材料の照射試験、作動検出方法の開発</p> <p>第4ステップ 実証試験：実炉への試験装荷、取りだし後の炉外動作試験、照射挙動観察</p>
スケジュール	<p>ステップ1：1年</p> <p>ステップ2：3年</p> <p>ステップ3：3年</p> <p>ステップ4：3年</p>
ステップ1	<p>文献サーベイなどによるフィージビリティ研究</p> <p>【目的】 中性子吸収体の仕様 形状：落下時に閉塞を生じないような形状の選定 材質：通常時に吸収体同士であるいは管壁と融着し難く、少量で十分な吸収効果があり、照射安定性、高温安定性に優れた材質の選定 作成法：比較的大量生産が可能な方法の検討</p> <p>落下機構の検討 感温材：定常時温度では安定で、適度な融点を持ち、照射安定性に優れた易融金属の選定 中性子束の増加により溶解する金属（核発熱物質を含む金属）の選定 落下機構：誤作動がなく、必要時には確実に作動する、極力簡易な機構の選定</p> <p>作動検出方法の検討 検出パラメータ：例として、中性子束、落下機構の変位、中性子吸収体のレベルなど 検出方法：離れた位置からの検出、その位置での検出などの方法の検討 送信方法：ケーブルによる方法、ケーブルを用いない方法（例えば超音波発信による）の検討</p> <p>必要装荷体数概算 材質、挿入可能量から、後備炉停止系と同等の反応度を持たせるに必要な装荷体数を概算 特許の調査</p>
ステップ2	<p>要素試験</p> <p>【目的】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感温材の特性試験：温度特性を主とする材料の特性試験。確実な不感帯が確保できること、必要時には十分な特性の変化があることの確認 2. 落下機構試験：誤作動が少ないこと、落下が確実であることを確認する。Na温度変化時の感温部温度応答測定 3. 中性子吸収体の製作性確認 4. 作動検出計装の成立可能性検討 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 小規模なサンプルによる不活性ガス中試験 2. 1/2程度での空気中試験、水中試験 3. 選定された方法による中性子吸収体の試作及び試験 4. 候補となる作動検出計装に依存するが、この段階では簡単な試作まで

<p>ステップ3</p>	<p>試験</p> <p>[目的]</p> <p>1. 炉外総合試験 作動特性（作動遅れ時間、吸収体挿入所要時間など）の測定</p> <p>2. 新材料の照射試験 新材料を用いる場合には、照射による特性劣化、他の物質との相互作用の有無を確認する</p> <p>3. 作動検出方法の開発 実機条件で安定な動作を期待できることの確認。</p> <p>[方法]</p> <p>1. 実規模での水中及びNa中試験（ヒーター加熱）</p> <p>2. 実炉（常陽）での照射試験</p> <p>3. Na中試験</p>
<p>ステップ4 ・ ・ ・ ・ ライセンスを考慮した最終段階の実証</p>	<p>(目的、実証のポイント)</p> <p>1. システム総合試験（炉外） 高温Na中での耐久性確認、作動確認、作動検出方法の有効性の確認</p> <p>2. 実機への装荷 実機条件（高温Na中、放射線環境）での耐久性確認、作動確認、作動検出方法の有効性の確認、誤作動のないことの確認</p> <p>(方法)</p> <p>1. 大規模なNa中試験（PLANDTL）</p> <p>2. 常陽への試験的装荷</p>

<p>方策名</p>	<p>NO.13-1,13-2-1,13-3 制御棒駆動軸の膨張促進機構:伸長リンク機構、感温チェンバー活用、バイメタル方式</p>	
<p>開発・実証ステップ</p>	<p>伸長リンク機構、感温チェンバー活用は、ガス中での基礎試験による静的作動特性、及び60万kWe級FBRに本膨張促進機構を適用した場合の、代表的なATWS事象に対する受動的な安全評価解析について、原子力学会等で既に報告されている。</p> <p>バイメタル方式は、EFRへの適用案として、FR91、ANP92等で紹介されているが、基礎試験の実施は未着手の様相である。</p> <p>このような現状を踏まえ、今後開発を進める上で必要となる技術的検討課題は以下の通りである。</p> <p>(第1ステップ) Feasibility study 伸長リンク機構、感温チェンバー活用については概ね終了。 バイメタル方式については、大気中での基礎試験を行う。</p> <p>(第2ステップ) 要素試験 ナトリウム中での感温チェンバーの静的作動特性について調べる。具体的には、熱伸長量、熱伸長率の測定、及び作動開始温度の再現性について確認を行う。</p> <p>(第3ステップ) 機能確認試験 制御棒駆動機構と組み合わせた場合の、ナトリウム中での過渡応答性について調べる。具体的には、応答時定数を測定すると共に、集合体出口ナトリウム温度のばらつき、感温部の設置位置、感温部近傍の流動特性、フローガイド（仮に設けた場合）が伸長特性に及ぼす影響について把握する。また、ナトリウム中での使用の再現性についても調べる。</p> <p>(第4ステップ) 実証試験 実機条件下での総合的作動の有効性を実証するため、期待される反応度フィードバック効果が得られるか、耐久性は問題がないかについて確認し、Licensabilityを高める。</p>	
<p>スケジュール</p>	<p>(第1ステップ) Feasibility study : 2年（但し、バイメタル方式に対してのみ） (第2ステップ) 要素試験 : 3年 (第3ステップ) 機能確認試験 : 3年 (第4ステップ) 実証試験 : 3年</p>	
<p>ステップ1</p>	<p>(試験名) ガス中での要素試験</p> <p>(目的) 伸長リンク機構、感温チェンバー、バイメタルの静的作動特性を把握し、期待通りの性能が得られるかどうかの見通しをつける。</p> <p>(方法) ガス中にて熱伸長量、熱伸長率及び作動開始温度を測定する。 → 伸長リンク機構、感温チェンバーについては原子力学会にて報告済み。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・熱伸長量 : 100mm ・熱伸長率 : 100mm/200℃ ・作動開始温度: 作動開始設定温度に比べ約20℃低 (製作時の調整により修正可能) 	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>
<p>ステップ2</p>	<p>(試験名) ナトリウム中での要素試験</p> <p>(目的) ステップ1で確認された静的作動特性が、ナトリウム中においても確保できるかどうかを調べ、実機での適用性について検討する。</p> <p>(方法) 小規模なナトリウム試験施設にて実施する。</p>	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>

ステップ 3	<p>(試験名) 機能確認試験</p> <p>(目的) 制御棒駆動軸との組み合わせで、ナトリウム中での応答時定数を測定し、また集合体出口ナトリウム温度のばらつき、感温部の設置位置、感温部近傍の流動特性、フローガイドの設置の各々が伸長特性にどのような影響を及ぼすかについて調べ、総合的システムとしての過渡応答性について検討する。さらに、ナトリウム中での使用の再現性についても調べる。</p> <p>(方法) 7体または19体集合体モデルを用いたナトリウム試験施設にて実施する(例: PLANDTL)。</p>	<p>(解析名) システム動特性解析</p> <p>(目的) 実機で異常事象が発生した場合に、どの程度の時間遅れによりどの程度の負の反応度フィードバック効果があるのかについて評価する。また、複数の膨張促進機構が非同時に作動した場合、ディカップリングの大きい大型炉において、炉の安定性を損なう反応度スウィングや出力変動が生じないかどうかを調べる。</p> <p>(方法) 3次元的な過渡特性が効率良く、かつ精度良く行えるような解析手法を確立する。</p>
ステップ 4 ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント) 実機で想定される中性子束場や温度場、あるいは種々の運転モード(燃焼平衡初期、燃焼平衡末期等)の環境の中で、本膨張促進機構の耐久性や異常時に対する反応度効果を定量的に評価し、反応度フィードバック効果として十分に機能していることを実証する。</p> <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて) ①常陽に本膨張促進機構を持つ制御棒集合体を装荷し、炉心流量を変化させることにより膨張促進機構周囲のナトリウム温度を変化させる。その時に測定して得られた制御棒軸方向伸長量から投入反応度を求め、ULOF時の反応度フィードバック効果として十分効果的であることを実証する。 ②本膨張促進機構を取り付けた制御棒集合体とその周囲の実機高速炉用燃料ピン束からなる試験体をSERAPHの試験孔に装荷し、過出力外乱を試験孔に与えて燃料ピン束部の温度を上昇させる。その時に測定して得られた制御棒軸方向伸長量から実機で投入される反応度を推定し、UTOP時の反応度フィードバック効果として十分効果的であることを実証する。</p>	

方策名	NO.13-2-2 制御棒駆動軸の膨張促進機構：ATHENA	
開発・実証ステップ	<p>本方策は独国KfKにてEFRへの適用として考案されたもので、試験体の製作、ULOF時の核熱動特性解析評価について、ANP92で既に報告されている。従って、今後実用化を目指すにあたり、以下の手順により技術的検討を進める必要がある。</p> <p>(第1ステップ) Feasibility study ガス中での基礎試験を行い、熱伸長量、熱伸長率、作動開始温度を測定する。また、熱伸長時に球状リリース機構の適切な作動により、ロッド部が正常に落下するか、また落下しなかった場合でも、2次駆動部によりロッド部が炉心部に適切に押し込まれるかどうかについて調べる。</p> <p>(第2ステップ) 要素試験 ガス中での試験と同様、ナトリウム中にて熱伸長量、熱伸長率、作動開始温度を測定し、球状リリース機構が適切に作動するかどうかについて調べる。</p> <p>(第3ステップ) 機能確認試験 ナトリウム中での過渡応答性について調べる。具体的には、応答時定数を測定すると共に、集合体出口ナトリウム温度のばらつき、シュラウドチューブ内シリンダー間に元々存在するナトリウムと炉心出口から流れ込んでくるナトリウムとの混合特性が伸長特性に及ぼす影響、さらには球状リリース機構の耐久性について調べる。また、ナトリウム中での使用の再現性についても調べる。</p> <p>(第4ステップ) 実証試験 実機条件下での総合的作動の有効性を実証するため、期待される反応度効果が得られるかどうか、耐久性は問題がないかについて確認し、Licensabilityを高める。</p>	
スケジュール	<p>(第1ステップ) Feasibility study : 2年 (第2ステップ) 要素試験 : 3年 (第3ステップ) 機能確認試験 : 3年 (第4ステップ) 実証試験 : 3年</p>	
ステップ1	<p>(試験名) ガス中での要素試験</p> <p>(目的) ATHENAの熱伸長量、熱伸長率、作動開始温度等の静的作動特性の把握、球状リリース機構の適切な作動について調べ、期待通りの性能が得られるかどうかの見通しをつける。</p> <p>(方法) ガス中での試験施設にて行う。</p>	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>
ステップ2	<p>(試験名) ナトリウム中での要素試験</p> <p>(目的) ステップ1で確認された静的作動特性、球状リリース機構の適切な作動が、ナトリウム中においても確保できるかどうかを調べ、実機での適用性について検討する。</p> <p>(方法) 小規模なナトリウム試験施設にて実施する。</p>	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>

<p>ステップ 3</p>	<p>(試験名) ナトリウム中での過渡応答試験</p> <p>(目的) ナトリウム中での応答時定数を測定し、集合体出口ナトリウム温度のばらつき、シュラウドチューブ内シリンダー間に元々存在するナトリウムと炉心出口から流れ込んでくるナトリウムとの混合特性が伸長特性に及ぼす影響を定量的に把握する。さらに、球状リリース機構の耐久性について調べる。また、ナトリウム中での使用の再現性についても調べる。</p> <p>(方法) 7体または19体集合体モデルを用いたナトリウム試験施設にて実施する(例: PLANDTL)。</p>	<p>(解析名) システム動特性解析</p> <p>(目的) 実機で異常事象が発生した場合に、どの程度の時間遅れによりどの程度の負の反応度効果があるのかについて評価する。また、万一球状リリース機構が適切に作動せず、ロッドが炉心に落下しない場合における過渡応答についても調べる。さらに、ATHENAが非同時に作動した場合、ディカップリングの大きい大型炉において、炉の安定性を損なう反応度スウィングや出力変動が生じないかどうかを調べる。</p> <p>(方法) 3次元的な過渡特性が効率良く、かつ精度良く行えるような解析手法を確立する。</p>
<p>ステップ 4 ・ ・ ・ ライセンスを考慮した最終段階の実証</p>	<p>(目的、実証のポイント) 実機で想定される中性子束場や温度場、あるいは種々の運転モード(燃焼平衡初期、燃焼平衡末期等)の環境の中で、本機構の耐久性や異常時に対する反応度効果を定量的に把握し、反応度フィードバック効果として十分に機能していることを実証する。</p> <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて) ①常陽にATHENAを装荷し、炉心流量を変化させることによりATHENA周囲のナトリウム温度を変化させる。その時に測定して得られたATHENAの伸長量から投入反応度を求め、ULOF時の反応度フィードバック効果として十分効果的であることを実証する。 ②ATHENAを取り付けた制御棒集合体とその周囲の実機高速炉用燃料ピン束からなる試験体をSERAPHの試験孔に装荷し、過出力外乱を試験孔に与えて燃料ピン束部の温度を上昇させる。その時に測定して得られたATHENAの伸長量から実機で投入される反応度を推定し、UTOP時の反応度フィードバック効果として十分効果的であることを実証する。</p>	

方策名	No.14 炉心湾曲, フラワーリング効果 促進機構	
開発・実証ステップ	<p>促進機構として以下の概念が考えられる。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 柔炉心拘束機構：炉心の熱変形に柔な拘束機構を用いる。 2) 集合体上部ガイド機構：ラッパ管熱膨張の縦方向伸びを径方向に変換する。 3) ラッパ管パッド剛性の強化：パッドでの変形吸収量を抑える。 <p>現状の技術レベル 促進機構をもたない炉について構造、核特製についてそれぞれ炉心変形の効果を解析可能な状態。 FFTFについて実験解析が行われ、その解析精度が評価された。</p> <p>開発ステップとしては、以下を実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1：フィジビリティ研究 2：要素試験 3：大気中モックアップ試験 4：Naモックアップ試験及び臨界集合体試験（または実機特性試験） 	
スケジュール	<p>各開発ステップに必要な期間</p> <p>ステップ1：1年半 ステップ2：1年半 ステップ3：2年 ステップ4：4年</p>	
ステップ1	<p>(試験名) フィジビリティ研究</p> <p>(目的) 促進機構の有効性、成立可能性を確認する。 各促進機構の概念について、 概念、構造、材料の具体化 フラワーリング変形量に対する効果の大きさ 促進機構に求められる機械特性、 炉容器中での親和性 (Na, 放射線、高温等) 地震時の健全性を検討する。</p> <p>(方法) 文献サーベイ アイデアの創出 BEACON等による変形予備解析</p> <p>(特許) 多分なにもない。</p>	<p>(解析名) 炉心湾曲解析手法の高度化その1</p> <p>(目的) 各促進機構の効果を取り入れるモデルの導入。</p> <p>(方法) BEACON等をベースとして柔炉心拘束機構等を取り入れられるモデルを開発、組み入れる。 BEACON等による炉心湾曲予備解析を実施する。</p>
ステップ2	<p>(試験名) 促進機構単体試験</p> <p>(目的) 基本的作動の確認を行う。 機械特性を把握する。 望ましい特性を持つ構造、機構を開発する。 (熱変形のような遅い変形に追従するが、地震動のような速い変形には剛な特性：メカニカルスナバーのようなもの) 単体特性での解析モデルの検証</p> <p>(方法) モーター駆動により炉心湾曲（集合体移動）を模擬する 集合体を数体組み合わせた模擬炉心に対して各促進機構を取付けた試験装置を用いる。 集合体の変形（移動）量、変形速度、押しつけ荷重等をパラメータとし、促進機構の変形量、ダンピング特性等を把握する。</p>	<p>(解析名) 炉心湾曲解析手法の高度化その2</p> <p>(目的) 温度分布から炉心湾曲を予測する手法の解析精度の向上を行う。</p> <p>(方法) BEACONによる予測で十分であるかを検討する。検討結果により必要があれば、BEACONのモデル改良、または3次元での炉心湾曲を扱うコードを開発する。</p>

ステップ 3	<p>(試験名) 大気中モックアップ試験</p> <p>(目的) 炉心温度分布に対して炉心湾曲量を予測する手法を確立する。 塊状に変形するモードがないことを示す。 温度分布から炉心湾曲量を予測する解析手法を検証する。 永久変形を受けた集合体の効果を把握する。 地震動等の外乱に対する安定性</p> <p>(方法) ヒーターを内蔵した100体規模の模擬ラッパー管からなる炉心部に各促進機構を取付けた試験装置を用いる。 ヒーターにより炉心部に様々な温度分布を与え、変形量、変形モードを測定する。 照射による永久変形を模擬した集合体を組み入れ、その全体変形に及ぼす効果を把握する。 温度分布と変形量、変形モードを詳細に測定し、温度分布を入力とする解析コードを検証する。 地震動を模擬した振動を炉心部に与え、その減衰特性等を把握する。</p>	<p>(解析名) 反応度予測手法の高度化</p> <p>(目的) フラワリングによる投入反応度を予測する手法として、現在の手法が十分な精度を持つかを検討し、精度向上が必要な場合には、炉心湾曲を計算に取り入れる手法等を開発・高度化する。</p> <p>(方法) 文献サーベイ 炉心変形による反応度予測手法を開発する。 臨界集合体に変形を与える試験を計画し、その予測解析を行う。</p>
ステップ 4 ・ ・ ・ ・ ライ セン ス を 考 慮 し た 最 終 段 階 の 実 証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <p>炉心湾曲促進効果(変形量)のナトリウム中での定量化 炉心湾曲による反応度の定量化 促進機構の放射線損傷について確認する。</p> <p>炉心変形により、十分な大きさの負の反応度が、十分な速さで投入できることを示す。 どんな場合にも、反応度効果が正に投入されないことを示す。</p> <p>(方法) ナトリウム中モックアップ炉心による温度分布、炉心湾曲の関係を把握。 ナトリウムの存在による温度分布への影響を考慮する。 促進機構等の高温ナトリウム中の機械特性、耐久性を実証する。</p> <p>臨界集合体または常陽を用い、炉心湾曲と投入反応度の関係を定量的に予測する手法を開発、検証する。 臨界集合体では構成要素の全体的移動により炉心湾曲を模擬 常陽では集合体頂部の位置を数箇所モニターし、温度変化に伴う、炉心湾曲と反応度を計測する。 これらにより、反応度予測手法を検証する。常陽を用いる場合には、熱による湾曲の予測を含め、総合解析手法の検証を実施する。</p> <p>常陽に促進機構の一部を持ち込み、高速中性子による照射損傷の程度を把握する。</p> <p>実機での温度上昇時の投入反応度を熱、構造、核の解析手法を組み合わせ評価し、十分な速度と量をもって負の反応度を投入できることを示す。 また、温度分布や集合体の永久変形のいかんによらず、正の反応度が投入されるモードがないことを示す。</p>	

方策名	15.炉心軸方向膨張促進機構:膨張率の高い材料で集合体燃料を支持	
開発・実証ステップ	<p>まず、Feasibility study (第1ステップ)として、炉心軸方向膨張促進機構による反応度効果の定量化及び不感帯域と集合体支持方式に関して評価を実施し、本方策の基本的な有効性を確認する。また、膨張率の高い物質の調査をする。</p> <p>要素試験(第2ステップ)では、膨張率の高い物質の特性評価、汎用性のある不感帯メカニズムの開発を実施する。また、効果量、作動条件について評価する。</p> <p>機能確認試験(第3ステップ)では、不感帯域設定の汎用性、作動時間、動作の安定性、ナトリウム中での耐久性の確認をする。そして、基本システム設計を実施する。</p> <p>実証試験(第4ステップ)では、Licensabilityを高めるため、材料の照射効果の確認、実炉での耐久性、運転制御性、経年変化の評価をする。</p> <p>現状は、炉心軸方向膨張促進機構による反応度効果の有効性を調査中である。</p>	
スケジュール	<p>ステップ1: 文献サーベイ、効果確認解析 1.0年</p> <p>ステップ2: 要素試験 1.0年 メカニズムの開発 2.0年</p> <p>ステップ3: システム試験 1.5年 特性評価解析 1.0年</p> <p>ステップ4: 照射試験 1.5年 特性評価 0.5年 炉内試験 1.0年</p>	
ステップ1	<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 集合体を支持する構造材として膨張率が高く、かつ高温で強度が維持される高延性材料の開発・選定が必要である。そのため、文献調査により、適切な材料選定の可能性を調査する。また、特許調査を実施する。</p>	<p>(解析名) 炉心軸方向膨張促進機構の反応度効果確認解析</p> <p>(目的) 炉心軸方向膨張促進機構の反応度効果を期待できるか、集合体支持方式はどのようにしたら効果的か、不感帯域はどの程度設けるのが有効的か等の検討を行い、本方策の有効性を評価する。</p> <p>(方法) 核動特性解析コードを用いて評価する。</p>
ステップ2	<p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的) 1.膨張率の高い材料を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。 2.汎用性のある不感帯域を設定できるメカニズムの開発。</p> <p>(方法) 1.炉外での材料試験により、物理的/化学的安定性(引張試験、クリープ試験等)、物性値等を明確にする。 2.ステップ1で得られた知見及び1.にて明らかになった物性値から、要求作動条件、効果量、不感帯域を設定し、そのスペックを満たすメカニズムの開発を実施する。</p>	

<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">ステップ3</p>	<p>(試験名)システム試験</p> <p>(目的) 試作品を製作し、 1.不感帯域設定の汎用性の確認 2.システム作動時間の確認 3.動作の安定性の確認 4.耐久性の確認 5.作動特性評価 を実施する。</p> <p>(方法) 1,2については小規模な、ナトリウム試験を実施する。 3,4,5については過渡条件可能な試験装置にてナトリウム試験を実施する。</p>	<p>(解析名)システム特性解析</p> <p>(目的) これまでの知見をもとに、どの程度の時間遅れをもって、どの程度の負の反応度が投入されるのかを解析する。そして、実証試験における基本設計諸量の設定をする。</p> <p>(方法) 解析コードにより、これまで得られた知見をもとに、作動条件、動作の安定性、反応度効果、作動特性も含め評価する。そして、実証試験における基本設計諸量の設定に反映させる。</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;">ステップ4 ライセンスを考慮した最終段階の実証</p>	<p>(目的、実証のポイント)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.材料及びシステムの照射効果、経年変化を調べる。 2.システム応答特性の確認(システムを組み上げた状態での特性評価をする。) 3.炉内にこのシステムを設置し、耐久性、効果量、運転制御性の確認を実施する。 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.常陽において照射試験の実施。 2.大規模な、ナトリウム試験の実施。 3.常陽にて、炉心を入れ換え実証試験を行う。 	

<p>方策名 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(ダクトレス対応)</p>			
<p>開発・実証ステップ</p>	<p>まず、Feasibility study (第1ステップ)として、本方策の基本的な有効性を確認する為にフラワーリング効果による反応度効果を評価する。また、形状記憶合金の選択及び開発可能性を調査をする。</p> <p>要素試験(第2ステップ)では、形状記憶合金の特性評価を実施する。また、炉心のフラワーリング効果を定量的に評価できるコードを開発する。そして、試作体形状及び材料の選定をする。</p> <p>機能確認試験(第3ステップ)では、試作体が、要求される作動条件を満足するか確認する。</p> <p>実証試験(第4ステップ)では、Licensabilityを高めるため、材料の照射効果の確認、実炉での耐久性及び動作安定性、運転制御性、経年変化の評価をする。</p> <p>現状は、ダクトレス炉心の開発、フラワーリング効果による反応度効果の評価及び形状記憶合金の調査を実施している。</p>		
<p>スケジュール</p>	<p>ステップ1: 文献サーベイ、効果確認解析 1.0年</p> <p>ステップ2: 要素試験 1.0年 反応度効果評価解析及び試作体の開発 2.0年</p> <p>ステップ3: システム試験 1.5年</p> <p>ステップ4: 照射試験 1.5年 特性評価 0.5年</p>		
<p>ステップ1</p>	<table border="1"> <tr> <td> <p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 形状記憶合金の開発・選定が必要である。そのため、文献調査により、適切な物質選定の可能性を調査する。また、フラワーリングによる反応度効果について調査する。特許調査も実施する。</p> </td> <td> <p>(解析名) フラワーリング効果による反応度効果解析</p> <p>(目的) フラワーリング効果による反応度効果、変化量、作動条件の設定等の検討を行い、本方策の有効性を評価する。</p> <p>(方法) 核動特性解析コードを用いて、時定数、変化量、作動温度をパラメータとした解析を実施する。</p> </td> </tr> </table>	<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 形状記憶合金の開発・選定が必要である。そのため、文献調査により、適切な物質選定の可能性を調査する。また、フラワーリングによる反応度効果について調査する。特許調査も実施する。</p>	<p>(解析名) フラワーリング効果による反応度効果解析</p> <p>(目的) フラワーリング効果による反応度効果、変化量、作動条件の設定等の検討を行い、本方策の有効性を評価する。</p> <p>(方法) 核動特性解析コードを用いて、時定数、変化量、作動温度をパラメータとした解析を実施する。</p>
<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 形状記憶合金の開発・選定が必要である。そのため、文献調査により、適切な物質選定の可能性を調査する。また、フラワーリングによる反応度効果について調査する。特許調査も実施する。</p>	<p>(解析名) フラワーリング効果による反応度効果解析</p> <p>(目的) フラワーリング効果による反応度効果、変化量、作動条件の設定等の検討を行い、本方策の有効性を評価する。</p> <p>(方法) 核動特性解析コードを用いて、時定数、変化量、作動温度をパラメータとした解析を実施する。</p>		
<p>ステップ2</p>	<table border="1"> <tr> <td> <p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的) グリッドスペーサ材料(形状記憶合金)を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。</p> <p>(方法) 炉外での材料試験により、融点、作動温度、Naとの共存性、膨張率等、変化形状の自由度を明確にする。</p> </td> <td> <p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) フラワーリングによる反応度効果評価を行い、グリッドスペーサ材料及び変化形状の選定をする。そして、試作体作成に反映させる。</p> <p>(方法) 要素試験で得られた知見をもとに、しきい値、必要とされる強度、変形特性を評価し、核動特性解析コードを用いて変化量、形状(変形前・変形後)、しきい値をパラメータとした解析を実施し、負の反応度効果、作動時間について評価し、グリッドスペーサ材料及び変化形状を選定する。そして、試験体作成に反映させる。</p> </td> </tr> </table>	<p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的) グリッドスペーサ材料(形状記憶合金)を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。</p> <p>(方法) 炉外での材料試験により、融点、作動温度、Naとの共存性、膨張率等、変化形状の自由度を明確にする。</p>	<p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) フラワーリングによる反応度効果評価を行い、グリッドスペーサ材料及び変化形状の選定をする。そして、試作体作成に反映させる。</p> <p>(方法) 要素試験で得られた知見をもとに、しきい値、必要とされる強度、変形特性を評価し、核動特性解析コードを用いて変化量、形状(変形前・変形後)、しきい値をパラメータとした解析を実施し、負の反応度効果、作動時間について評価し、グリッドスペーサ材料及び変化形状を選定する。そして、試験体作成に反映させる。</p>
<p>(試験名) 要素試験</p> <p>(目的) グリッドスペーサ材料(形状記憶合金)を選定するため、基礎的な材料特性を調べる。</p> <p>(方法) 炉外での材料試験により、融点、作動温度、Naとの共存性、膨張率等、変化形状の自由度を明確にする。</p>	<p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) フラワーリングによる反応度効果評価を行い、グリッドスペーサ材料及び変化形状の選定をする。そして、試作体作成に反映させる。</p> <p>(方法) 要素試験で得られた知見をもとに、しきい値、必要とされる強度、変形特性を評価し、核動特性解析コードを用いて変化量、形状(変形前・変形後)、しきい値をパラメータとした解析を実施し、負の反応度効果、作動時間について評価し、グリッドスペーサ材料及び変化形状を選定する。そして、試験体作成に反映させる。</p>		

<p>ステップ3</p>	<p>(試験名)システム試験</p> <p>(目的) 試作体を製作し、 1.作動温度設定の自由度の確認 2.システム作動時間の確認 3.動作の安定性の確認 4.耐久性の確認 5.変化形状の自由度の確認 を実施する。</p> <p>(方法) 過渡条件可能なナトリウム試験を実施する。</p>	
<p>ステップ4 ライセンスを考慮した最終段階の実証</p>	<p>(目的、実証のポイント) 1.照射試験を実施し、 ・材料及びシステム ・経年変化 ・運転制御性 ・耐久性 ・動作の安定性 を調べる。</p> <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて) 常陽において照射試験を実施し各種特性を評価する。そして、得られた知見をもとに、形状変化及び反応度効果を定量的に評価する。</p> <p>☆本方策は、ダクトレス炉心対応のため、ダクトレス炉心の実用化が必要である。</p>	

方策名 No.17 燃料ピン上部または下部への吸収材（気体または液体）の封入			
開発・実証ステップ	<p>本方策は燃料ピンの上部または下部にヒュージブルメタルによって毒物質を封入し、フュージブルメタルの高温検知によりピン内放出を行い、中性子吸収促進を狙うものである。</p> <p>(現状の技術レベル) 反応度の見積、作動要求条件の理論的有効性未確認 (開発のフロー)</p> <p>第1ステップ 実現可能性の検討 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 実証試験</p>		
スケジュール	<p>第1ステップ 0.5年 第2ステップ 水流動試験1年（試験体製作含）、常陽照射試験0.5年 第3ステップ ナトリウム試験1年（試験体製作含） 第4ステップ 各試験供試体製作1年。常陽照射試験0.5年、ナトリウム試験0.5年、SERAPH照射試験0.5年</p>		
ステップ1	<table border="1"> <tr> <td> <p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 材料の開発に着手する以前に文献調査により、適切な材料選定の可能性を調査する。また、特許の調査を行うしておく。</p> </td> <td> <p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) 反応度効果の見積、及び作動要求条件設定</p> <p>(方法) プラント応答解析コード、核計算コードによる評価</p> </td> </tr> </table>	<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 材料の開発に着手する以前に文献調査により、適切な材料選定の可能性を調査する。また、特許の調査を行うしておく。</p>	<p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) 反応度効果の見積、及び作動要求条件設定</p> <p>(方法) プラント応答解析コード、核計算コードによる評価</p>
<p>(試験名) 文献サーベイ</p> <p>(目的) 材料の開発に着手する以前に文献調査により、適切な材料選定の可能性を調査する。また、特許の調査を行うしておく。</p>	<p>(解析名) 反応度効果評価解析</p> <p>(目的) 反応度効果の見積、及び作動要求条件設定</p> <p>(方法) プラント応答解析コード、核計算コードによる評価</p>		
ステップ2	<table border="1"> <tr> <td> <p>(試験名) 各種要素試験</p> <p>(目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 中性子吸収体の流動現象の把握。フュージブルメタルの溶融温度及び溶融時間を考慮した最適形状の決定。 中性子吸収体及びフュージブルメタルの照射特性の把握。 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 水流動試験。 常陽による照射試験 </td> <td> <p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p> </td> </tr> </table>	<p>(試験名) 各種要素試験</p> <p>(目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 中性子吸収体の流動現象の把握。フュージブルメタルの溶融温度及び溶融時間を考慮した最適形状の決定。 中性子吸収体及びフュージブルメタルの照射特性の把握。 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 水流動試験。 常陽による照射試験 	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>
<p>(試験名) 各種要素試験</p> <p>(目的)</p> <ol style="list-style-type: none"> 中性子吸収体の流動現象の把握。フュージブルメタルの溶融温度及び溶融時間を考慮した最適形状の決定。 中性子吸収体及びフュージブルメタルの照射特性の把握。 <p>(方法)</p> <ol style="list-style-type: none"> 水流動試験。 常陽による照射試験 	<p>(解析名)</p> <p>(目的)</p> <p>(方法)</p>		

<p>ステップ3</p>	<p>(試験名) 機能確認試験</p> <p>(目的) 作動遅れ時間の測定及び高温ナトリウム試験による耐久性の確認。</p> <p>(方法) ナトリウム試験</p>	<p>(解析名) システム動特性解析</p> <p>(目的) 実機で異常事象が発生した場合に、どの程度の時間遅れによりどの程度の負の反応度フィードバック効果があるのかについて評価する。また、複数の装置が非同時的に作動した場合の過渡特性について調べる。</p> <p>(方法) 過渡特性が効率よく、かつ精度よく行えるような解析手法を確立する。</p>
<p>ステップ4 ライセンスを考慮した最終段階の実証</p>	<p>(目的、実証のポイント)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 装置の照射効果を調べる。 2. システム応答の確認。 3. 実機により、耐久性の確認及び動作の確認試験を実施する。 <p>(方法・・・必要に応じて試験と解析を交えて)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 常陽による照射試験。 2. ナトリウム試験。 3. SERAPHによる動作確認試験。 	

方策名 No.18 吸収材上部設置型集合体での溶融燃料プールへの吸収材混入	
開発・実証ステップ	<p>現状の技術レベル：R&Dは未着手。しかし原理的には困難なものではない。</p> <p>第1ステップ（フィージビリティ研究） 感温落下機構の検討、吸収体材質の検討、混入挙動簡易評価、反応度挙動評価</p> <p>第2ステップ 要素試験：感温落下機構試験、吸収体試作・試験、混入挙動評価手法の整備</p> <p>第3ステップ 炉内総合試験：SERAPHにおける実証試験、混入挙動評価手法の検証</p> <p>第4ステップ 実証試験：実炉への試験装荷</p>
スケジュール	<p>ステップ1：1年</p> <p>ステップ2：3年</p> <p>ステップ3：3年</p> <p>ステップ4：3年</p>
ステップ1	<p>フィージビリティ研究</p> <p>【目的】</p> <p>1. 感温落下機構の選定 通常時には十分な安定性があり、Na昇温時には確実に落下する機構の選定。</p> <p>2. 吸収体材質の選定 溶融燃料プール中へ混入しやすくするため、密度差が小さく沸点の高い吸収体材料を選定する。</p> <p>3. 特許の調査</p> <p>【方法】</p> <p>1、2、3共に既存類似試験の文献サーベイなどによる。</p> <p>解析</p> <p>【目的】</p> <p>1. 混入挙動簡易評価 吸収体落下後の混入（又は分離）挙動、沸騰（又は昇華）挙動の簡易評価</p> <p>2. 反応度挙動評価 混入による負反応度効果、核的停止の確認</p> <p>【方法】</p> <p>1. 物性値からの推定、及び既存コードによる簡易解析</p> <p>2. 混入状態を仮定した静的核計算による。</p>
ステップ2	<p>炉外要素試験</p> <p>【目的】</p> <p>1. 感温落下機構試験 選定された感温落下機構の試作と作動の信頼性（誤作動がなく必要時には確実に作動すること）の確認</p> <p>2. 吸収体試作と混入試験 選定された吸収体材料による吸収体の試作と熟物性試験、さらに模擬融体プール中への混入挙動の把握</p> <p>【方法】</p> <p>1. 1/2から実規模程度での空气中試験</p> <p>2. 燃料と密度に近い金属等で模擬された高温溶融プール中への落下・混入試験</p> <p>解析</p> <p>【目的】</p> <p>混入挙動評価手法の整備と実機条件での混入、反応度挙動予備的解析</p> <p>【方法】</p> <p>既存の二流体解析コードを左記炉外模擬試験(2)のデータに基づき検証。実機条件へ外挿使用し、混入挙動、及び反応度挙動を概略評価する</p>

<p>ステップ3</p>	<p>炉内総合試験：</p> <p>SERAPHにおける実物質による実証試験</p> <p>[目的] 実体系に近い規模での落下機構の実証、混入挙動の実証、及び解析コード検証用データの取得</p> <p>[方法] SERAPH炉内試験炉による。燃料バンドルを核発熱で加熱、冷却材を沸騰させることにより吸収体を落下させる。実体系に近い固相を含む燃料スチール混合物プール内への混入挙動を把握。これにより起因過程から吸収体混入までの現実的な事象推移と時間スケールを把握できる。</p>	<p>解析コードの検証</p> <p>[目的] 混入挙動評価手法の検証</p> <p>[方法] 左記炉内試験データを使用</p>
<p>ステップ4 ライセンスを考慮した最終段階の実証</p>	<p>[目的、実証のポイント]</p> <p>1. 実機への装荷 実機条件（高温Na中、放射線環境）での耐久性確認、悪影響の無いことの確認、誤作動のないことの確認</p> <p>(方法) 1. 常陽への試験的装荷</p>	

方策名 No.19 集合体内SASS (溶融燃料の炉外への排出)					
開発・実証ステップ	<p>現状の技術レベル：積極的に炉外排出を意図した方策は未検討だが、原理的には単純であり、評価手法も現状技術の外挿で可能。</p> <p>第1ステップ (フィージビリティ研究) 排出経路形状検討と解析コードによる炉外への排出挙動評価。必要装荷体数概算。</p> <p>第2ステップ 炉外模擬試験：模擬物質による排出挙動模擬試験。解析コード検証。</p> <p>第3ステップ 炉内試験：実機体系に近い規模での、実物質 (溶融燃料スチール混合物) による排出挙動試験。解析コード検証。</p> <p>第4ステップ 実証試験：実炉への試験装荷</p>				
スケジュール	<p>ステップ1：1年</p> <p>ステップ2：2年</p> <p>ステップ3：3年</p> <p>ステップ4：2年</p>				
ステップ1	<table border="1"> <tr> <td>排出経路の形状検討</td> <td>解析</td> </tr> <tr> <td> <p>[目的] 排出性能と中性子遮蔽とを考慮して、妥当な排出経路を検討する</p> <p>[方法] 既存類似試験の文献サーベイなどによる。 特許の調査</p> </td> <td> <p>[目的] 溶融燃料の炉外への排出時間挙動の把握。炉心損傷事故が起因過程から遷移過程へ移行した際、集合体規模のプールが大規模なプールへ拡大する以前に余裕を持って全炉心インベントリの30%程度の燃料を炉心外へ排出することが可能か。そのために必要な装荷体数を見積もる。</p> <p>[方法] 既存コードによる解析結果と、既存試験データとに基づく評価による。</p> </td> </tr> </table>	排出経路の形状検討	解析	<p>[目的] 排出性能と中性子遮蔽とを考慮して、妥当な排出経路を検討する</p> <p>[方法] 既存類似試験の文献サーベイなどによる。 特許の調査</p>	<p>[目的] 溶融燃料の炉外への排出時間挙動の把握。炉心損傷事故が起因過程から遷移過程へ移行した際、集合体規模のプールが大規模なプールへ拡大する以前に余裕を持って全炉心インベントリの30%程度の燃料を炉心外へ排出することが可能か。そのために必要な装荷体数を見積もる。</p> <p>[方法] 既存コードによる解析結果と、既存試験データとに基づく評価による。</p>
排出経路の形状検討	解析				
<p>[目的] 排出性能と中性子遮蔽とを考慮して、妥当な排出経路を検討する</p> <p>[方法] 既存類似試験の文献サーベイなどによる。 特許の調査</p>	<p>[目的] 溶融燃料の炉外への排出時間挙動の把握。炉心損傷事故が起因過程から遷移過程へ移行した際、集合体規模のプールが大規模なプールへ拡大する以前に余裕を持って全炉心インベントリの30%程度の燃料を炉心外へ排出することが可能か。そのために必要な装荷体数を見積もる。</p> <p>[方法] 既存コードによる解析結果と、既存試験データとに基づく評価による。</p>				
ステップ2	<table border="1"> <tr> <td>炉外模擬試験</td> <td>解析コード検証</td> </tr> <tr> <td> <p>[目的] 解析コードの検証用データの取得を目的とする。内管の溶融貫通、狭い流路における固化閉塞、冷却材中への侵入挙動に関するデータ</p> <p>[方法] 燃料模擬物質による排出促進構造への溶融貫通・排出挙動試験。</p> </td> <td> <p>[目的] 排出挙動評価用解析コードの検証</p> <p>[方法] 左記炉外模擬試験データを使用</p> </td> </tr> </table>	炉外模擬試験	解析コード検証	<p>[目的] 解析コードの検証用データの取得を目的とする。内管の溶融貫通、狭い流路における固化閉塞、冷却材中への侵入挙動に関するデータ</p> <p>[方法] 燃料模擬物質による排出促進構造への溶融貫通・排出挙動試験。</p>	<p>[目的] 排出挙動評価用解析コードの検証</p> <p>[方法] 左記炉外模擬試験データを使用</p>
炉外模擬試験	解析コード検証				
<p>[目的] 解析コードの検証用データの取得を目的とする。内管の溶融貫通、狭い流路における固化閉塞、冷却材中への侵入挙動に関するデータ</p> <p>[方法] 燃料模擬物質による排出促進構造への溶融貫通・排出挙動試験。</p>	<p>[目的] 排出挙動評価用解析コードの検証</p> <p>[方法] 左記炉外模擬試験データを使用</p>				

ステップ 3	<p>炉内試験</p> <p>実物質（溶融燃料スチール混合物）による排出挙動試験</p> <p>[目的] 実体系に近い規模での排出挙動の実証、及び解析コード検証用データの取得</p> <p>[方法] SERAPH炉内試験炉による。燃料バンドルを核発熱で破損させることにより実体系に近い固相を含む燃料スチール混合物を造る。この混合物による排出促進構造壁の溶融貫通、侵入、及び排出挙動を観察する。これにより起因過程から燃料排出までの現実的な事象推移と時間スケールを把握できる。</p>	<p>解析コードの検証</p> <p>[目的] 排出挙動評価用解析コードの検証</p> <p>[方法] 左記炉内試験データを使用</p>
ステップ 4 ・ ・ ・ ・ ライセンスを考慮した最終段階の実証	<p>(目的、実証のポイント)</p> <p>1. 実機への装荷 実機条件（高温Na中、放射線環境）での耐久性確認、悪影響の無いことの確認</p> <p>(方法)</p> <p>1. 常陽への試験的装荷</p>	

方策名 No.20 中空ペレットによるピン内燃料移動・分散			
開発・実証ステップ	<p>現状の技術レベル：従前より期待されていた効果であるが、エネルギー印加速度が遅くても速すぎても同現象が生じる前に破損が生じると考えられている。本効果は燃料及び軸ブランケットに対して通常の中空ペレット構造を採用することで得ることができるため、開発要素はなく、効果の実証が主である。事象が燃料未破損で終了できた場合にも、事後の炉心冷却性が問題となる。</p> <p>第2ステップ 既存試験情報のサーベイ、解析モデル開発、移動挙動予備的評価</p> <p>第3ステップ 炉内試験：高速中性子束場（SERAPH）における実証試験、解析モデル検証</p> <p>第4ステップ 実機安全解析への適用</p>		
スケジュール	<p>ステップ2：2年</p> <p>ステップ3：3年</p> <p>ステップ4：1年</p>		
ステップ2	<table border="1"> <tr> <td> <p>既存試験情報のサーベイ</p> <p>[目的] エネルギー投入条件に依存したピン内燃料移動挙動の把握、期待し得る反応度の時間挙動把握</p> <p>[方法] 既存試験情報のサーベイ</p> </td> <td> <p>解析モデル開発と予備的評価</p> <p>[目的] 1. ピン内燃料移動解析モデル開発 モデルの開発、SAS4Aへの組み込み 2. 予備的評価 同現象の発生条件の把握</p> <p>[方法] 1. 既存モデルのサーベイとモデル開発 2. 上で開発したモデルによるパラメトリック解析</p> </td> </tr> </table>	<p>既存試験情報のサーベイ</p> <p>[目的] エネルギー投入条件に依存したピン内燃料移動挙動の把握、期待し得る反応度の時間挙動把握</p> <p>[方法] 既存試験情報のサーベイ</p>	<p>解析モデル開発と予備的評価</p> <p>[目的] 1. ピン内燃料移動解析モデル開発 モデルの開発、SAS4Aへの組み込み 2. 予備的評価 同現象の発生条件の把握</p> <p>[方法] 1. 既存モデルのサーベイとモデル開発 2. 上で開発したモデルによるパラメトリック解析</p>
<p>既存試験情報のサーベイ</p> <p>[目的] エネルギー投入条件に依存したピン内燃料移動挙動の把握、期待し得る反応度の時間挙動把握</p> <p>[方法] 既存試験情報のサーベイ</p>	<p>解析モデル開発と予備的評価</p> <p>[目的] 1. ピン内燃料移動解析モデル開発 モデルの開発、SAS4Aへの組み込み 2. 予備的評価 同現象の発生条件の把握</p> <p>[方法] 1. 既存モデルのサーベイとモデル開発 2. 上で開発したモデルによるパラメトリック解析</p>		
ステップ3	<table border="1"> <tr> <td> <p>炉内試験</p> <p>[目的] 1. 炉内試験 エネルギー投入速度とピン内燃料移動挙動／破損先行との関係の把握、モデル検証用に燃料移動挙動の測定、事後冷却性の把握</p> <p>[方法] 1. 高速中性子束場（SERAPH）における実証試験（熱中性子場ではペレット内温度分布が平坦化し、中心部での溶融移動よりも破損が先行しやすい条件となる）</p> </td> <td> <p>解析モデルの検証</p> <p>[目的] 解析モデルの検証</p> <p>[方法] 左記にて取得された試験データによる事後解析を通じて検証する。安全評価における負の反応度効果となるため、試験における測定の不確かさを考慮して保守性の確保に留意する。</p> </td> </tr> </table>	<p>炉内試験</p> <p>[目的] 1. 炉内試験 エネルギー投入速度とピン内燃料移動挙動／破損先行との関係の把握、モデル検証用に燃料移動挙動の測定、事後冷却性の把握</p> <p>[方法] 1. 高速中性子束場（SERAPH）における実証試験（熱中性子場ではペレット内温度分布が平坦化し、中心部での溶融移動よりも破損が先行しやすい条件となる）</p>	<p>解析モデルの検証</p> <p>[目的] 解析モデルの検証</p> <p>[方法] 左記にて取得された試験データによる事後解析を通じて検証する。安全評価における負の反応度効果となるため、試験における測定の不確かさを考慮して保守性の確保に留意する。</p>
<p>炉内試験</p> <p>[目的] 1. 炉内試験 エネルギー投入速度とピン内燃料移動挙動／破損先行との関係の把握、モデル検証用に燃料移動挙動の測定、事後冷却性の把握</p> <p>[方法] 1. 高速中性子束場（SERAPH）における実証試験（熱中性子場ではペレット内温度分布が平坦化し、中心部での溶融移動よりも破損が先行しやすい条件となる）</p>	<p>解析モデルの検証</p> <p>[目的] 解析モデルの検証</p> <p>[方法] 左記にて取得された試験データによる事後解析を通じて検証する。安全評価における負の反応度効果となるため、試験における測定の不確かさを考慮して保守性の確保に留意する。</p>		
ステップ4	<p>実機安全解析への適用</p> <p>ステップ2で開発検証されたピン内移動モデルを含むSAS4Aコードを実機解析へ適用し、ピン内移動の反応度効果による影響緩和効果を把握する。事象が燃料未破損で終了する場合には、事後の炉心冷却性の問題を別途検討する必要がある。</p>		

方策名	No.21 人工的燃料分散リードチャンネルの設置
開発・実証ステップ	<p>現状の技術レベル：従前より提案されていた方策であるが、十分に検討された例はない。これは、少数の集合体内燃料の破損までの余裕を意図的に削減するものであり、不必要な破損を生じさせる可能性があるためである。また、ボイド反応度を低減した炉心では、起因過程でのエネルギー発生抑制のためにこのような方策を導入する利点は小さくなる。</p> <p>第2ステップ 人工的リードチャンネルの設定方法の検討と解析</p> <p>第3ステップ 導入によるメリットの評価、 リードチャンネル燃料の破損限界測定のための炉内試験</p> <p>第4ステップ 実機への装荷、照射試験</p>
スケジュール	<p>ステップ2：1年 ステップ3：3年 ステップ4：3年</p>
ステップ2	<p>人工的リードチャンネルの設定方法の検討と解析</p> <p>〔目的〕 人工的リードチャンネルの具体的な設定方法について検討する。その有効性、悪影響についても解析結果を用いつつ検討する。</p> <p>〔方法〕 具体的な設定方法として出力を増加させる、出力流量比を増加させる、などが一般的である。炉心の燃焼状態による出力分布の変化を考慮しても常に有効となることが必要であり、かつ、特定の事象(通常は反応度挿入事象)に対しても極度に破損余裕を減ずることとはならないような配慮が必要である。解析コードとしては既存SASコードの他、破損限界の詳細予測モデル(テーマ1で整備される)が必要。</p> <p>特許の調査</p>
ステップ3	<p>リードチャンネル燃料の破損限界測定のための炉内試験</p> <p>〔目的〕 破損余裕を削減した燃料の破損限界を正確に把握すること</p> <p>〔方法〕 実機模擬性の高い高速中性子場SERAPHによる炉内試験。単ピン、スローTOPによる破損限界の観察</p> <p>導入によるメリットの評価</p> <p>〔目的〕 導入しようとする炉心設計(特にボイド反応度)を勘案し、ULOF起因過程におけるエネルギー発生抑制によるメリットと、破損余裕を削減した燃料の導入によるデメリットとを総合評価し判断する。</p>
ステップ4	<p>実機への装荷、照射</p> <p>ステップ2において利点が十分に大きいと判断されれば、実機へ装荷し照射試験を行う。</p>

<p>方策名 No.22 軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進 No.25 ナトリウムプレナム付き炉心による燃料流出促進</p>			
<p>開発・実証ステップ</p>	<p>本方策を対象とした開発・実証研究は未実施であるが、既存試験結果等の情報から本方策の有効性を確認することは可能である。また、ライセンスビリティに関する新たな研究開発も必要ない。</p> <p>本方策の有効性を確認し、最適化した構造で実機に適用するには、ピン束構造への融体侵入挙動の支配現象を解明して評価手法を開発するとともに、実機条件での融体侵入挙動を実現した試験でこの評価法を実証する事が必要である。No.25はNo.24の軸ブランケット長さが0に相当するため、ここに含める。</p> <p>(第1ステップ) Feasibility study 構造材流路への融体侵入挙動に関する既存の試験及び知見の現状に関する文献サーベイを実施する。</p> <p>(第3ステップ 炉外試験) 炉外試験による要素試験 流出・固化挙動における複合現象を構成する素過程の基本特性を弁別するために、適切な融体条件と融体駆動条件を設定した炉外試験を実施する。また、放出された融体が上方のナトリウムとのFCIによって逆流しないことを確認する炉外試験も必要である。これらの試験による現象解明と試験データにより、流出・固化挙動を解析し得るモデル及びコードの開発と検証を進める。</p> <p>(第3ステップ 炉内試験) 炉内試験による確認試験 複合現象及び連続事象としての融体・固化流出挙動に関する高い模擬性を実現し、実機での確度の高い定量的評価につなげるための実験的根拠を得るために、炉内試験を実施する。</p> <p>(第4ステップ) ライセンスビリティの検討 本方策は新規の構造を炉内に持ち込むものではなく、従来のブランケット部のサイズの変更のみで行われるため、特別にライセンスビリティを検討する必要は無いと考えられる。</p>		
<p>スケジュール</p>	<p>第1ステップ：～1年 第3ステップ：～3年(炉内試験)、～4年(炉外試験) 第4ステップ：～0年</p>		
<p>第1ステップ</p>	<p>文献サーベイ (目的) これまでに実施された流出・固化挙動に関する研究の現状と知見を整理し、本方策の有効性を定量的に確認するために必要となる研究課題を抽出する。</p>		
<p>第3ステップ(炉外)</p>	<table border="1"> <tr> <td> <p>1. 燃料流出・固化挙動試験 (目的) 流出・固化挙動における複合現象を構成する素過程の基本特性を弁別するために、適切な融体条件と融体駆動条件を満たした炉外試験を実施する。 (方法) テルミット反応、誘導加熱等の方法によって生成した模擬融体を管内もしくは模擬ピン束構造の流路へ放出し、溶融・固化挙動を測定する。放出の駆動力はテルミット反応による生成ガスまたは加圧ガスによって得る。</p> <p>2. 燃料流出・固化挙動試験 (目的) 放出された融体が上方のナトリウムとのFCIによって逆流しないことを確認する。 (方法) テルミット反応、誘導加熱等の方法によって生成した模擬融体をナトリウムプール内に底部から放出し、物質移行挙動、圧力変化等を測定する。</p> </td> <td> <p>(解析手法の開発・検証) 試験によって得られた支配現象に関する知見に基づき、解析コードの物理モデルの開発・最適化と検証を行う。このコードによって、実機条件におけるブランケット長さや排出促進効果の関係の見通しを得る。</p> </td> </tr> </table>	<p>1. 燃料流出・固化挙動試験 (目的) 流出・固化挙動における複合現象を構成する素過程の基本特性を弁別するために、適切な融体条件と融体駆動条件を満たした炉外試験を実施する。 (方法) テルミット反応、誘導加熱等の方法によって生成した模擬融体を管内もしくは模擬ピン束構造の流路へ放出し、溶融・固化挙動を測定する。放出の駆動力はテルミット反応による生成ガスまたは加圧ガスによって得る。</p> <p>2. 燃料流出・固化挙動試験 (目的) 放出された融体が上方のナトリウムとのFCIによって逆流しないことを確認する。 (方法) テルミット反応、誘導加熱等の方法によって生成した模擬融体をナトリウムプール内に底部から放出し、物質移行挙動、圧力変化等を測定する。</p>	<p>(解析手法の開発・検証) 試験によって得られた支配現象に関する知見に基づき、解析コードの物理モデルの開発・最適化と検証を行う。このコードによって、実機条件におけるブランケット長さや排出促進効果の関係の見通しを得る。</p>
<p>1. 燃料流出・固化挙動試験 (目的) 流出・固化挙動における複合現象を構成する素過程の基本特性を弁別するために、適切な融体条件と融体駆動条件を満たした炉外試験を実施する。 (方法) テルミット反応、誘導加熱等の方法によって生成した模擬融体を管内もしくは模擬ピン束構造の流路へ放出し、溶融・固化挙動を測定する。放出の駆動力はテルミット反応による生成ガスまたは加圧ガスによって得る。</p> <p>2. 燃料流出・固化挙動試験 (目的) 放出された融体が上方のナトリウムとのFCIによって逆流しないことを確認する。 (方法) テルミット反応、誘導加熱等の方法によって生成した模擬融体をナトリウムプール内に底部から放出し、物質移行挙動、圧力変化等を測定する。</p>	<p>(解析手法の開発・検証) 試験によって得られた支配現象に関する知見に基づき、解析コードの物理モデルの開発・最適化と検証を行う。このコードによって、実機条件におけるブランケット長さや排出促進効果の関係の見通しを得る。</p>		
<p>第3ステップ(炉内)</p>	<p>炉内試験 (目的) 複合現象及び連続事象としての融体・固化流出挙動に関する高い模擬性を実現し、実機での確度の高い定量的評価につなげるための実験的根拠を得る。また、試験結果による解析コードの検証を行い、本方策によって燃料の炉外流出が促進され、かつ流出した融体が炉心内に逆流しないことを確認する。 (方法) テーマ1の燃料分散試験による</p>		

方策名	No. 23 集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保 (燃料スウィープアウトパスの確保)
開発・実証ステップ	<p>本方策を対象とした開発・実証研究は未実施であるが、既存試験結果等の情報から本方策の有効性を確認することは可能である。</p> <p>(第一ステップ) Feasibility study 本方策の基本的な有効性を確認するため、集合体ギャップ模擬流路を通しての融体流出試験の既存実験データベースを基に、流出量と支配パラメータの関係を整理する。また、軸方向ギャップ確保の観点から構造設計上可能なスペーサパッドの形状を選定する。その情報を基に可能な限り最適化された解析コードを用いて、事故条件下での集合体ギャップ幅と燃料流出量の関係を推定・定量化する。</p> <p>(第二ステップ) 要素試験 Feasibility study の結果、設計上確保可能な集合体ギャップ流路で、有効な燃料流出が期待できると判断された場合、炉外での要素試験を実施する。ここでは、模擬物質を用いた実験により、侵入距離 (流出量) に対するギャップ形状、駆動圧及び融体温度の関係に対して実験データベースの蓄積を図る。</p> <p>(第三ステップ) 実証試験 要素試験通じた実験データの蓄積と現象解明 (解析コードへの反映) の結果、これらの成果を安全評価に適用し得る実証性の高い実験的根拠として一般化するために炉内試験データが必要と判断された場合、SERAPH による実証試験を実施する。</p>
スケジュール	<p>第一ステップ：～2年</p> <p>第二ステップ：～3年</p> <p>第三ステップ：～4年 (PIEを含む)</p>
ステップ1	<p>(検討名) 既存実験データベースの整理 (目的) 現在利用可能な実験データベース (集合体ギャップ模擬流路を対象とした試験：TRAN/G シリーズ、ANL/GAP 試験等) を基に、実験条件と流出量の関係を調べ、現状の現象論的知見を整理する。また、併せて実機条件下での外挿性を検討し、問題点の摘出を行なう。</p> <p>(検討名) スペーサパッドの形状検討 (目的) 軸方向ギャップ確保の観点から構造設計上可能なスペーサパッドの形状の検討を行ない、候補となる形状を選定する。</p> <p>(解析名) 解析コードの最適化と流出量の推定 (目的) 既存実験データベースの情報を基に、解析コードの物理モデルの最適化を実施する。この解析コードを用いて、選定されたスペーサパッド形状による実機条件下での流出量を推定する。その結果から、本方策による燃料流出促進の効果の有効性の判断を行なう。判断根拠は、事故条件下で、集合体ギャップ流路を通して全炉心インベントリの5%以上の流出が十分に期待できることとする。</p> <p>(方法) 解析コードによるパラメータサーベイ</p>
ステップ2	<p>(試験名) 要素試験 (目的) 集合体ギャップを通しての融体流出・固化挙動挙動に対する実験データベースを蓄積する。ここでは、模擬融体 (アルミナ等) を用いた炉外試験とし、流出量に対するギャップ形状、駆動圧、融体温度等の関係を実験的に明らかにする。また、実験データベースを基に、解析コードの物理モデルの妥当性の確認を進める。</p> <p>(方法) PNC の既存の高温融体実験施設の利用</p>
ステップ3	<p>(試験名) 実証試験 (目的) 現象解明 (解析コードへの反映) の成果を安全評価に適用し得る実証性の高い実験的根拠として一般化するために、実物質を用いた炉内試験データを得る。</p> <p>(方法) SERAPH 試験施設の利用</p>

方策名	No.24 制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出
開発・実証ステップ	<p>本方策を対象とした開発・実証研究は未実施であり、ライセンスビリティに対する新たな研究開発が必要となる。</p> <p>(第1ステップ) Feasibility study 薄肉化の限界の調査、低融点・高強度の材料の調査、他の構造変更（無壁面化、穴付の管壁）方策の検討</p> <p>(第2ステップ) 要素試験 材料特性、構造強度特性の確認</p> <p>(第3ステップ) 機能確認試験 構造の最適化を図るための流動試験、制御棒としての機能を確認するための試験、信頼性試験を実施する。一方で、融体の早期流出促進の見通しを得るために、模擬融体を用いた管壁の破損挙動、FCI条件下での融体流出挙動試験を行う。</p> <p>(第4ステップ) 実証試験 Licensability を高めるため、材料の照射効果の確認、実炉での耐久性の確認を実施する。また、実炉条件の模擬性の高い条件で融体流出挙動試験を実施し、早期破損／燃料流出を確認する。</p>
スケジュール	<p>第1ステップ：～1年</p> <p>第2ステップ：～2年</p> <p>第3ステップ：～3年</p> <p>第4ステップ：～4年（PIEを含む）</p>
第1ステップ	<p>(目的及び方法) 現在の材料のままの薄肉化の限界の検討を行う。そのために、基準類の調査、及び構造解析コードによる評価を行う。また、低融点で高強度の材料の選定のために文献調査により候補となる材料を調査する。さらに、管壁の構造自体の変更（孔開き、無壁面化）の可能性の検討を行う。</p>
第2ステップ	<p>(目的及び方法) 材料特性（機械的強度特性、ナトリウムとの共存性等）の測定試験を行う。</p>
第3ステップ	<p>(目的) ①構造の最適化を図るための通常運転状態の流動特性を調べる。 ②制御棒としての機能の確認を行う。 ③信頼性確認を行う。 ④炉外試験を通じて、制御棒案内管の破損、FCI下での融体流出・固化挙動等に関する基本現象を解明し、現象論的理解度を深めるとともに、融体の早期流出促進の見通しを得る。</p> <p>(方法) ①、②は実規模の制御棒案内管を用いてナトリウム流中での流動特性、制御棒作動の確認を行う。 ③はナトリウムループを用いて信頼性試験を実施する。 ④は模擬融体（テルミット反応、誘導加熱によるアルミナ等）をナトリウム中へ放出する試験、融体をナトリウムプールの壁面の外側に接触させ壁面の破損挙動を観測する試験を実施する。</p>
第4ステップ	<p>(目的) ①材料の照射効果を調べる。 ②実炉での耐久性の確認。 ③制御棒案内管構造の熱・機械的損傷／破損、融体の初期放出とFCI、ナトリウムのボイド化と減圧、融体の大量流出といった一連の挙動を模擬し、制御棒案内管からの早期融体移行シナリオについて実証性の高い実験的根拠を得る。</p> <p>(方法) ①、②炉のサイズは影響しないので、実機として常陽を用いる。 ③SERAPHによるテーマ1の制御棒案内管への流出挙動試験。</p>