

分置

SERAPHに期待される役割に関する検討

—実用化先導研究テーマに関する検討(1)—

1993年11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)

SERAPHに期待される役割に関する検討
— 実用化先導研究テーマに関する検討 (1) —

丹羽 元*
家田芳明**

要 旨

本報告は、SERAPHに期待される役割を明確化するためにFBR安全研究専門委員会小委員会にて平成5年度上期に検討した結果を中間的に報告するものである。本小委員会では以下の方法により検討を行った。

- 実用化時代の高速炉は従来型のNa冷却MOX大型炉から更に改良されたものとなることを踏まえて、そこで採用される可能性のある種々の安全性向上方策、設計オプションに関する研究テーマを新規の提案も含めて提示し、委員からの追加提案も加えてそれらの有効性、技術的成立性に関して小委員会委員に対してアンケート調査を実施した。
- アンケート結果、及び小委員会での議論を踏まえて、SERAPHを含む長期的な安全研究によって達成すべき目標としてリスク低減を指標として選択した。さらにリスク支配事象であるCDAにおける主要な現象（例えば再臨界）に対する防止、緩和方策を強化するとの観点から分析と評価を行った。
- それらの研究テーマに関して、新規の炉による炉内試験、実炉試験の必要性について検討を行い、以上に基づいて新規テーマをSERAPHに期待される役割として抽出した。

本年度下期では、専門委員会におけるコメントを反映して検討を継続し、検討結果をまとめた上で、本年度末の専門委員会において最終的に報告する予定である。

* 大洗工学センター安全工学部高速炉安全工学室

** 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室

**A Study on Requested Roles for SERAPH Project
- R&D Themes for Promoting FBR's Commercialization (1) -**

Hajime NIWA*
Yoshiaki IEDA**

ABSTRACT

This is an interim report of a study on requested roles of the Safety Engineering Reactor for Accident Phenomenology (SERAPH) project which has been performed by the working group organized under the FBR safety research specialist committee. In this working group, the future requirements for SERAPH has been studied as follows:

- Considering that the safety level of future FBRs would be much more improved from the present concept of sodium cooled mixed-oxide fueled large scale FBR, prevention and mitigation measures could be introduced or much more enhanced. Therefore currently proposed design measures have been widely reviewed and some were newly proposed, then the information was presented to the working group. An investigation was conducted by means of "questionnaire" to the working group members asking their effectiveness and technical feasibility.
- Based on the results of the questionnaire and discussions in the working group, "risk reduction" has been selected as an index which should be pursued of through long-term safety research where SERAPH is expected to play an important role. The presented measures were analyzed and evaluated from the viewpoint of preventing and/or mitigating important phenomena in CDA (for example, recriticality) because CDA is a risk dominant event in FBRs.
- R&D plans of each measure were drafted and needs of in-pile and reactor-scale experiments were examined including new experimental facilities. Based on this study, new R&D themes were preliminarily selected as future requirements for the SERAPH project.

The final report will be presented at the end of the FY1993. This will include the results of the additional study reflecting the comments from the members of the FBR safety research specialist committee.

* O-arai Engineering Center, Safety Engineering Division, FBR Safety Engineering Section

** O-arai Engineering Center, Safety Engineering Division, Reactor Engineering Section

目 次

1	序	1
2	アンケート調査の方法と結果	2
3	アンケート結果の分析と評価	9
3. 1	安全性向上方策に対するリスク低減効果の検討と カテゴリ化による考察	9
3. 2	リスク低減の観点からの評価	13
3. 3	評価結果と分析	16
4	結論 -SERAPHに期待される役割の提示-	31
5	下期における検討項目	34
	参考文献	35
付録- 1	実用化先導研究テーマに関するアンケート調査依頼	37
付録- 2	FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果	39
付録- 3	FBR安全研究専門委員会報告用OHP集	55

1章 序

本資料は、高速炉安全性試験計画 SERAPH に期待される役割を明確化するためにFBR安全研究専門委員会小委員会にて検討した結果を中間的に報告するものである。本小委員会では以下の方法により検討を行った。

－実用化時代の高速炉は従来型のNa冷却MOX大型炉から更に改良されたものとなることを踏まえて、そこで採用される可能性のある種々の安全性向上方策、設計オプションに関する研究テーマを事務局より提示し、委員からの追加提案も含めてそれらの有効性、技術的成立性に関して小委員会委員に対してアンケート調査を実施した。

－アンケート結果、及び小委員会での議論を踏まえて、SERAPHを含む長期的な安全研究によって達成すべき目標としてリスク低減を指標として選択し、リスク支配事象であるCDAにおける主要な現象（例えば再臨界）に対する防止、緩和方策を強化すると観点から分析と評価を行った。

－それらの研究テーマに関して、新規の炉による炉内試験、実炉試験の必要性について検討を行い、以上に基づいて新規テーマをSERAPHに期待される役割として抽出した。

本資料の構成は以下の通り。

2章 アンケート調査の方法と結果

3章 アンケート結果の分析と評価

4章 結論 —SERAPHに期待される役割の提示—

5章 下期における検討項目

なお、小委員会はメーカ4社より4名、原研より1名、動燃より3名、計8名で構成され、アンケート調査及び本報告の検討に携わって戴いた。

2章 アンケート調査の方法と結果

第2回小委員会において、実用化先導研究テーマとして既存及び新規¹⁾・²⁾に提案された安全水準向上方策(計31件)を事務局から提示した。これを表2-1に示す。ちなみに、研究テーマ番号は以下の4つに分類されている。

- 第1分野：炉心・燃料設計等による安全向上テーマ(異常防止対策)
- 第2分野：炉心損傷の防止に関するテーマ(受動的安全特性強化のための機構)
- 第3分野：炉心損傷に対する影響緩和対策に関するテーマ(部分損傷早期終息を含む)
- 第4分野：格納施設における影響緩和対策に関するテーマ

このうち、説明を要すると思われるテーマについては図2-1に簡単なイラストを示した。これらに対して以下の項目に関して小委員会委員に対してアンケート調査を行った。(付録-1：アンケート調査依頼書を参照)

- 有効性に関する評価：A～C
- 技術的成立性の評価：A～D
- 成立条件：効果が特定の炉心設計、燃料形態等でのみ期待できる時の条件の記述
- 研究内容：技術の開発、効果の実証等のための研究が必要な項目については、その
内容の提案
- 研究手段：上で提案した各課題毎に研究手段を以下の分類で記載
 - 技：技術開発(新たな機器等の開発による確立)
 - 解：解析主体(解析、設計研究等による効果の実証)
 - 外：炉外試験(核加熱、システム全体特性依存しない現象/効果の実証)
 - 炉：実炉試験(既存炉、新試験炉等の実プラントを用いた試験による実証)
 - 内：炉内試験(原子炉内設置の試験体/試験ループにおける模擬試験による
実証)
- 備考：コメント、評価に際しての前提条件など、自由記述

各委員からの回答を研究テーマ毎に1件1葉で付録-2に示した。アンケートの結果、委員から新規テーマの提案が3件あったので、これも付録-2の最終ページに附した。

特に有効性に関して評価の高い順に並べ直した結果を表2-2に示す。集計結果の傾向は、以下のようにまとめられる。

- 第2分野（炉心損傷防止）、第4分野（格納系影響緩和）の有効性に関する点が高く、第3分野（炉心損傷影響緩和）の点が低い。第1分野はテーマ依存で分散している。
- 第3分野でも、集合体内SASS (3-3)¹⁾ やコアキャッチャー (3-10) のような、第2、第4分野に近いテーマの点が高い。（「止める、冷やす」に直結するテーマ）
- 第3分野の、燃料流出や毒物混入²⁾ のような熔融炉心に関する影響緩和対策の得点が低い。（「止める、冷やす」に直結しない、純粋な緩和対策）

集計結果に対して小委員会において以下のような議論があった。

- 提示された項目には防止効果（発生頻度の低減）を狙うもの、緩和効果（影響の低減）を狙うものがあるため、包括的な指標としてリスク低減を選び、これに対する寄与度で再評価を行うべきである。
- アンケートの項目には設計依存性のあるもの、一般性のあるもの、有効となる深層防護のレベルが異なるもの、1つの項目で複数の分類に現れるものなどが混在しているので、カテゴリ化を行って再整理をおこなうべきである。

この議論に基づく検討を下記のように進めることにより、SERAPHに期待される役割の明確化を図った。

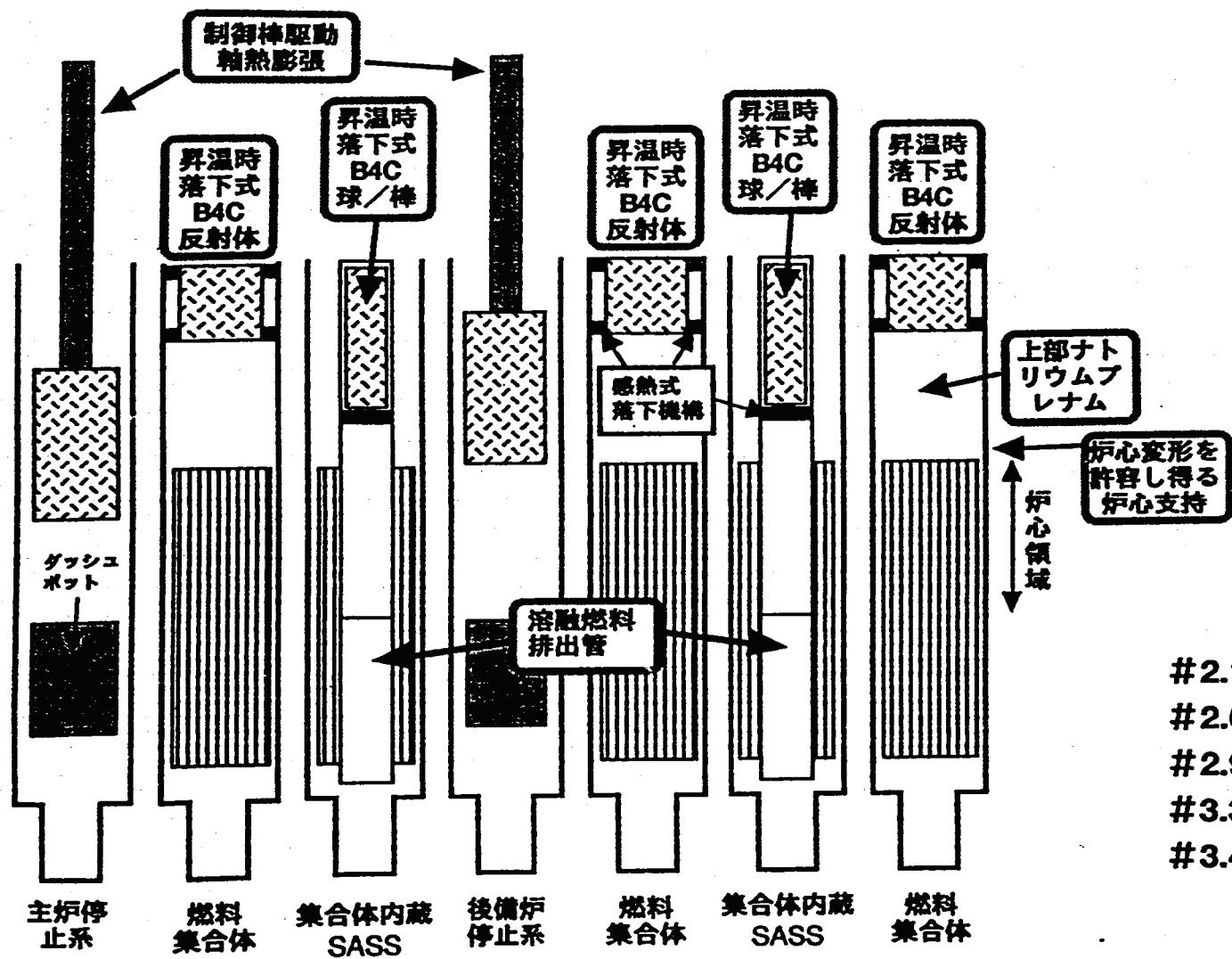
表 2-1 高速炉に対する安全水準向上方策

ID #	研究テーマ	備考
1.1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制	
1.2	燃料形態による核特性に係わる安全向上	
1.3	従来型炉停止系／崩壊熱除去系の信頼性向上	
1.4	鉛冷却材使用による安全向上	
1.5	ポンプ流量減少特性の延長	
2.1	ナトリウムプレナム付き炉心	
2.2	自己作動型制御機構（SASS）：キュリー点式	
2.3	フローティング型制御機構	
2.4	ガス膨張機構（GEM）	
2.5	炉心軸方向膨張（制御棒との相対膨張）	
2.6	制御棒駆動軸の膨張（膨張促進機構設置を含む）	
2.7	炉心支持板の膨張（既存の効果）	
2.8	炉心集合体のフラワーリング	
2.9	炉心湾曲効果（集合体、炉心）	
2.10	原子炉容器の膨張（既存の効果）	
2.11	完全自然循環による崩壊熱除去	
2.12	原子炉容器壁補助冷却系（RVACS）	
3.1	人工的リードチャンネルの設置	
3.2	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	
3.3	集合体内SASS機構（炉停止＋燃料排出促進機構）	新規
3.4	吸収材上部設置型集合体での熔融燃料への毒物混入	新規
3.5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	
3.6	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	
3.7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出	
3.8	燃料炉外流出促進構造（non-fuel集合体）	
3.9	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	
3.10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	
4-1	ナトリウムの燃焼抑制対策	
4-2	水素の発生・燃焼抑制策	
4-3	格納施設自体の合理的強化（減圧機構等）	
4-4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	

表2-2 アンケート結果の集計表 (得点順)

ID	研究テーマ	有効性			成立性				炉内 試験	実炉 試験	有効性 順位	
		A	B	C	A	B	C	D				
2-11	完全自然循環による崩壊熱除去	8.			8.					○	1	
2-2	自己作動型制御機構 (SASS)	6.	2.		8.			(○)	○	○	4	
1-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上	5.5	2.5		3.	5.		○	○	○	6	
2-9	炉心湾曲効果 (集合体、炉心)	5.	3.		2.	6.			○	○	7	
2-6	制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)	5.	2.		3.	4.			○	○	9	
3-3	集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)	5.	2.		3.	3.	1.	○	○	○	10	
3-10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	5.	2.	1.	6.	2.		○	○	○	11	
1-5	ポンプ流量減少特性の延長	4.5	3.5		1.	7.			○	○	12	
2-3	フローティング型制御機構	4.	4.		2.	5.	1.		○	○	13	
2-7	炉心支持板の膨張	4.	3.	1.	3.	2.	3.		○	○	14	
2-12	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)	4.	3.	1.	1.	6.5	0.5		○	○	15	
1-4	鉛冷却材使用による安全向上	3.	5.			7.5	0.5	○	○	○	16	
2-8	炉心集合体のフラワーリング	3.	5.		2.	6.			○	○	17	
2-4	ガス膨張機構 (GEM)	3.	4.5	0.5	0.5	4.5	3.		○	○	18	
1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制	3.	4.	1.	1.	7.		○	○	○	19	
1-3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	3.	4.	1.	3.	3.	2.		○	○	20	
3-8	燃料炉外流出促進構造	3.	4.	1.	1.	1.	6.	○	○	○	21	
2-1	ナトリウムプレナム付き炉心	2.	6.		7.	1.		○	○	○	22	
3-1	人工的リードチャンネルの設置	2.	5.	1.	1.	6.5	0.5	○	○	○	23	
3-2	中空ベレットによるピン内燃料移動・分散	2.	5.	1.	2.	6.		○	○	○	24	
3-4	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	2.	4.	2.	1.	6.	1.	○	○	○	25	
3-7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出の実証 (ダッシュポットの削除等)	2.	3.5	2.5	2.	5.	1.	○	○	○	26	
2-5	炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)	1.	6.	1.	1.	2.5	4.5	○	○	○	27	
3-5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	1.	6.	1.	3.	5.		○	○	○	28	
3-9	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	1.	5.	2.	1.	7.		○	○	○	29	
3-6	集合体スパーサパッドの軸方向間隙の確保		5.5	2.5	3.	4.	1.	○	○	○	30	
2-10	原子炉容器の膨張		3.	5.	1.	4.	2.	1.		○	○	31
4-1	ナトリウムの燃焼抑制対策	7.	1.		2.	6.					2	
4-2	水素の発生・燃焼抑制策	7.	1.		1.	6.	1.				3	
4-3	格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)	5.	3.		1.	7.					8	
4-4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	6.	1.			4.5	2.5	○	○	○	5	

安全機構多層化炉心の概念

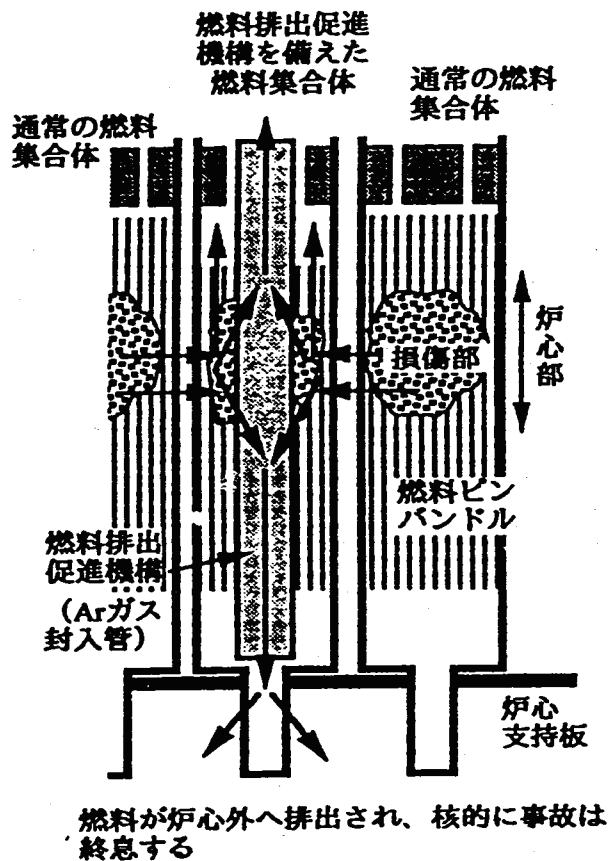


- #2.1 ナトリウムプレナム付炉心
- #2.6 制御棒駆動軸熱膨張
- #2.9 炉心湾曲効果
- #3.3 集合体内SASS機構
- #3.4 吸収体上部設置型集合体

図 2-1 (1) 安全性向上方策の例

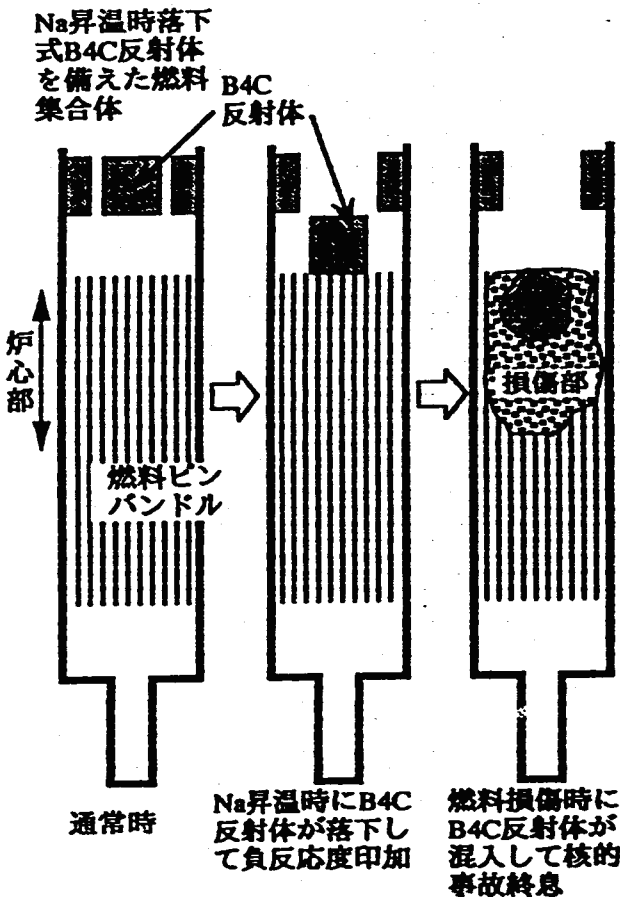
炉心損傷事故の影響緩和方策の例

炉心からの燃料排出による負の反応度効果
→ 損傷集合体からの燃料排出挙動評価



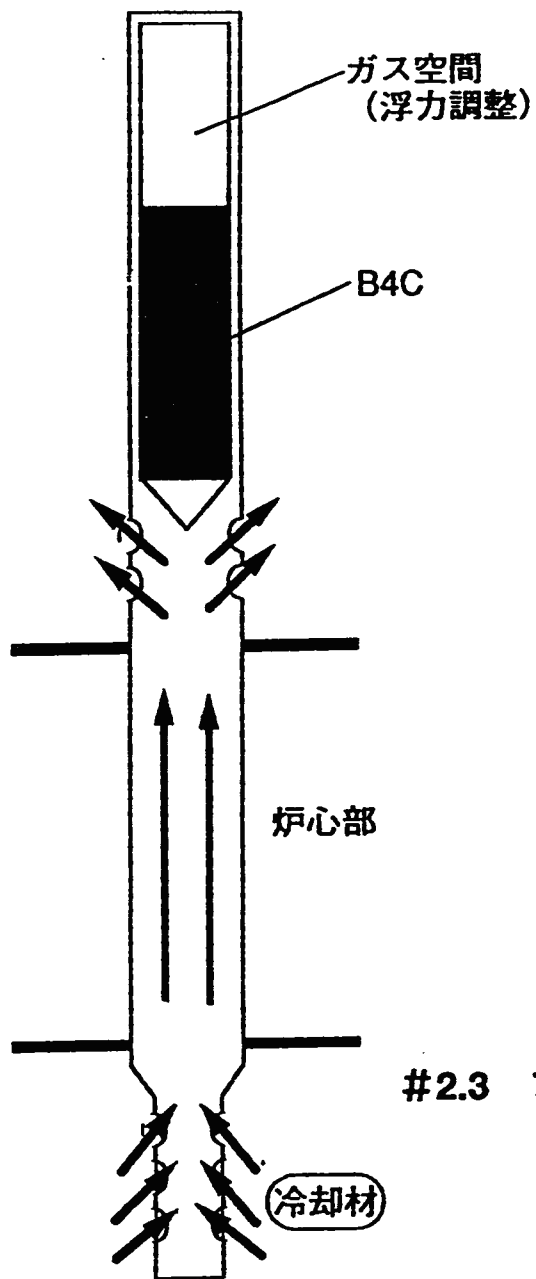
#3.3 集合体内SASS機構
#3.8 燃料炉外流出促進機構

炉心への核的毒物混入による負の反応度効果
→ 冷却材昇温時の核的毒物質混入挙動評価

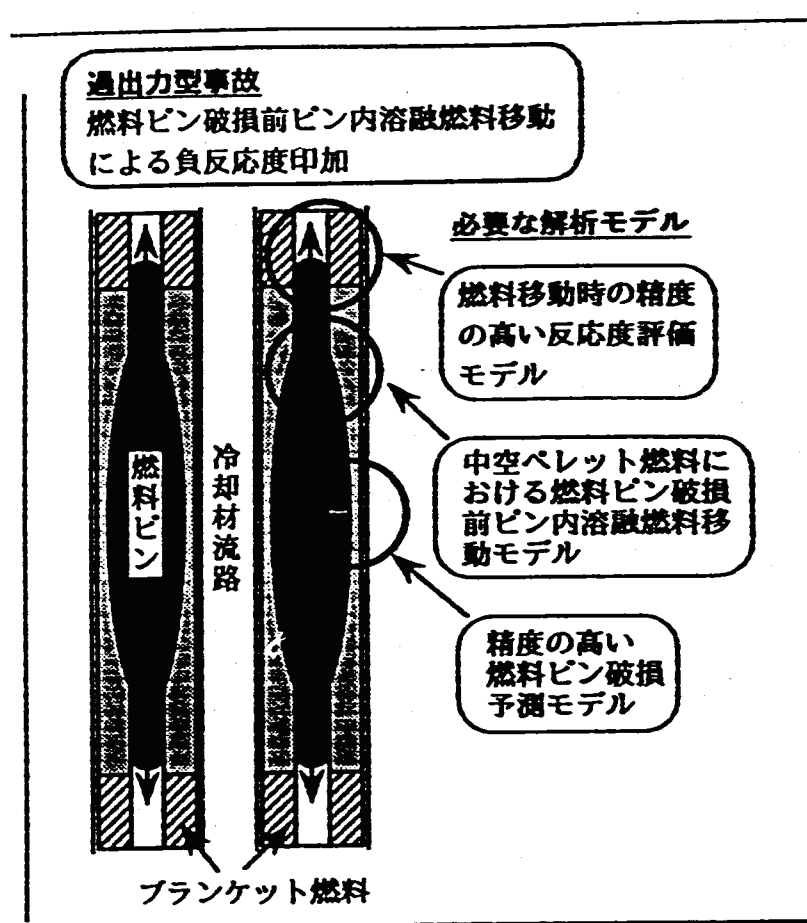


#3.4 吸収体上部設置型集合体

図 2-1 (2) 安全性向上方策の例



#2.3 フローティング型SASS



#3.2 中空ペレットによるピン内
溶融燃料移動・分散

図 2-1 (3) 安全性向上方策の例

3章 アンケート結果の分析と評価

3.1 安全性向上方策に対するリスク低減効果の検討とカテゴリ化による考察

安全性向上方策に対するリスク低減効果の検討

図3-2に、いくつかの方策の種類に関してリスク低減への寄与の質、程度を示した。図中で、各事故のプロット点を右方へ移す方策が防止効果、下方へ移す方策が緩和効果である。右下方への移動距離が大きな方策ほど、リスク低減への寄与が大きいことになる。注意すべきは、リスク曲線は、図中の全ての事故事象の包絡線（正確には各事故シーケンスの累積確率分布曲線の和）となるので、限られた事故事象を右下方へ移すことしかできないような方策は、リスク低減への寄与は大きくはないと考えられる。また、同図中で、両方の軸上に設定される安全確保上の目標となる境界線を低い側へまたがせるような方策は、質的に有効性の高い方策であると考えられる。図中にはその境界線の例として、「格納系の健全性を堅持する」、あるいは厳しい側の例として「施設外への影響を許容しない（例えばバックグラウンドの変動幅以内）」との目標線を示してみた。これらの線より左上にある全ての事故事象に対して、これらの境界線を右下へまたがせることができるような方策（又は方策の集合）を実証の上で採用すれば、その炉の安全性のレベルが、当該の目標を満たすこととなる。そのような方策の開発・実証は、今後の安全研究における一つのテーマであると認識する。

特に、防止方策は炉心損傷の発生頻度を低減はするが事故影響のポテンシャルを低減はしないのに対して、事故影響のポテンシャル自体を低減できるような有効な緩和方策が実験的に実証された上で導入されれば、決定論的にFBRの安全性を確認できることになる。たとえば、遷移過程における再臨界の問題は極めて大きな事故影響のポテンシャルを有しており、プール挙動の安定性を議論することによっても、そこでの再臨界が生じた場合の発生エネルギーのポテンシャルを減じることにはならなかった（低い可能性ながらプールの揺動・1点への集中によって再臨界を生ずる可能性がないとは言えない、すなわち確率的にはある）。しかしもし溶融プールの燃料を臨界量以下に早期に（プールの揺動が可能となる前に）低減させる方策や、多量の中性子吸収材を早期に混入する方策が実証の上で導入されれば、物理的に再臨界とはなり得ないことから、決定論的に事故影響の上限を限定することができるであろう。

安全性向上方策のカテゴリ化による考察

アンケートの項目には設計依存性のあるもの／一般性のあるもの、有効となる深層防護のレベルが異なるもの、1つの項目で複数の分類に現れるものなどが混在しているので、カテゴリ化を行って再整理をおこなった。カテゴリとして以下の5つを考慮した。

I. 深層防護のレベルで分類

- (1) 一般的な異常の発生防止、安全性向上方策
- (2) 炉心損傷事故の拡大防止方策
- (3) 炉心損傷事故の緩和（炉内）方策
- (4) 炉心損傷事故の緩和（格納系内）方策

II. 適用する炉心・燃料で分類

- (1) Na冷却MOX大型炉のみに適用できる方策
- (2) Na冷却MOX大型炉以外に適用できる方策
- (3) 共通（炉型を問わず）

III. 方策が有効となる事故のタイプで分類

LOF型、TOP型、PLOHS型、集合体事故

IV. 方策のコストによる分類

- (1) 特殊な装置、燃料等の開発を前提とする方策
- (2) 設計の小変更で可能となる方策

V. 方策で期待する現象・機構による分類（炉内緩和）

燃料排出、核的毒物質混入、冷却等

I、IIを縦、横にとった表3-1（その1）を作成し、同表中にIII～Vの分類も加えて表示した。

表3-1（その2）には、縦軸は深層防護のレベルのままとして、横軸を事故のタイプ（III）をとって整理した。表3-1では原則として安全性向上につながる研究テーマを記しているが、金属燃料炉心における集合体事故のように安全上問題となる可能性の高い組合せについても下線を付して示した。また、安全上の効果が正負のいずれであるか不明であり、見極めが必要と考えられる項目については、記号「±」を付した。

考察

—提案されている事故発生防止、影響緩和方策は、燃料や冷却材の種類を変えるという方策を除き、ほとんどが炉型によらず共通な方策であることが判る。しかし、炉型によって、その効果の程度に違いがあることに注意する必要がある。例えば、GEMやRVACSについては、大型炉でも効果はゼロでは無いが、表3-1（その1）では小型炉に有効な手段として分類している。

—異常発生防止に関する方策の提案の数が相対的に少ない。これは、異常発生防止に関しては研究開発要素を大きく残している問題は少ないためであると考えられる。

異常発生防止方策として挙げられたもののほとんどが、炉心や冷却系の設計を根本的に変えるものであることから、その点が窺える。

- 防止と緩和両方に現れている項目、すなわち集合体内蔵型SASS、落下型反射体はCDAの発生防止と影響緩和の両方に現れているので、防止方策と緩和方策とを同格に置いた以下での評価では、総合的な有効性は高く評価されると考えられる。
- 集合体事故を積極的に防止する方策、緩和する方策には目立ったものがない。これは既に十分に手当てされていることを示すのか、あるいは未検討なのか。検討のポイントとして、燃料破損の検出性向上、燃料破損に連動した早期受動的炉停止系、燃料破損や破損の伝播を生じにくくする燃料、冷却材、集合体構造などが考えられる。鉛冷却ではサブクール度増大と圧損低減のためのピッチ拡大とが拡大防止に有効と考えられる。ダクトレス燃料については冷却性の観点、燃料破損検出の観点からの利点と破損拡大に対する障壁がないことの欠点があり、総合的に安全性向上にとってプラスか否かを今後検討する必要がある。
- PLOHS型の拡大防止に対しては除熱能力を高める方策を採用するのみであり、完全自然循環とRVACSが提案されている。熱輸送系のループに依存する完全自然循環ではナトリウム凍結の問題が有るので、RVACSのような長時間熱除去に対応できる手段がより有効である（図3-2参照）。また、時間的余裕があるならば、事故管理による通常のDHRS回復を挙げることができる。
- PLOHS型で炉心崩壊に至った場合には対処手段は少ないが、中性子吸収材を主炉停止系、後備炉停止系の他に持つような集合体内蔵SASSや落下型中性子吸収材反射体では、再臨界を十分に回避できるだけの負反応度を与えることができる。
- 炉停止失敗事象については、GEM、フローティング型SASSが流量減少型事象以外には有効ではないという点に注意が必要である。ULOFがATWSの代表的な事象であるとは言え、これらの採用によってULOFの発生頻度が2桁程度下げられたとすると、UTOPやULOHSが相対的に浮上してくるはずである。よって上記方策を採用するに際しては要注意であり、他との組合せが必要と考えられる。
- 炉停止失敗事象については、いずれの事象においても燃料、冷却材の温度上昇が生ずるため、温度上昇に対応して負反応度が投入される手段が共通的に有効であり、ここで提案されている。しかし事象毎に温度上昇のモードが異なるため、各手段の有効性の程度が異なることに注意が必要であり、時間の要素を考慮した分類が必要である（図3-2参照）。
- 炉停止失敗事象に対しては、即効的に大きな負の反応度を投入させる手段はULOFに対する浮遊型SASSのみであり、これを用いない場合には、最終的な負反応度を投

入できる方策が有効となるまで、事象進展を遅延させることが必要となる。しかし特に温度上昇に対応して負反応度を投入する手段には可逆的なものが多いため、恒久的な未臨界を保つためのSASS（キュリー一点方式、集合体内蔵型SASS等）との組合せが必要である（図3-2参照）。

一炉停止の手段として、即効的に、より大きな負反応度を投入できる手段の開発が望まれる。

一炉停止失敗事象に対する負反応度投入のための検知物理量として、冷却材温度上昇と流量低下による圧力低下があるが、他の物理量ではどうか。中性子束増加で機能する受動的炉停止手段はあるか。

一炉心損傷に至った場合の再臨界に対する緩和手段は、大部分が炉心外への燃料排出であり、他には中性子吸収材を炉心内に持ち込むものが1件ある。他の手段は考えられないのか、今後の検討課題であろう。（中性子漏洩増大：やや弱い。）

以上の考察から、安全性向上方策を検討する際の注意点として以下が挙げられる。

- 1) 起因事象が限定されない方策はリスク低減への寄与が大きい。
- 2) 炉型に依存しない方策は、研究テーマとしての一般性がある。（有効性の大小は有り得るので要注意）
- 3) 有効性の実証可能性の高い方策
- 4) 他への悪影響の小さい方策
- 5) 従来の方策に対して多様性のある方策
- 6) 防止方策として有効でも、炉心損傷時の耐性が不明である方策（新型燃料など）については、見極めが必要
- 7) 安全上の目標を達成させ得る方策は、量的に加えて質的な有効性も高い。

3.2 リスク低減の観点からの評価

挙げられた項目には防止効果（発生頻度の低減）を狙うもの、緩和効果（影響の低減）を狙うものがあるため、包括的な指標としてリスク低減を選び、これに対する寄与度で再評価を行うこととした。

3.1節での検討結果を踏まえ、またアンケートにおける自由記述部分でのコメントを参考として、再評価のために以下のような評価基準を設定した。

[採点方法]

①発生・拡大防止効果：

a. 事故発生・拡大防止対応策の質的变化

従来の事故発生・拡大対応策に対し、多様性確保につながる：2

多様性確保にはつながらないが、従来設計からの転換度が大きい：1

（ボイド反応度を負にする工夫等）

従来の対策の補強にすぎない：0

b. 事故発生・拡大防止効果の量的変化

その対応策のみで事故終熄に至るほどの効果を有する：2

事故終熄に至らずとも顕著に事故進展を遅らせる：1

効果が小さい：0

c. 有効となる事象の範囲

有効となる事象が極度に限定されない：2

有効となる事象が限定されるが、重要度の高い事象に効果を有する：1

有効となる事象が些細な事象に限定される：0

②影響緩和効果：

a. 影響緩和効果の大きさ

バウンダリの健全性を確保する、影響の大きなリスク支配現象を排除する、などを、

ある程度の保守性を考慮しても／あるいは原理的に主張可能：2

有意な成功確率の増大が期待できる、最確評価では主張可能、他との組み合わせで2となる：1

上記に対してある程度の寄与しかない：0

b. 有効となる事象の範囲

有効となる事象が極度に限定されない：2

有効となる事象は限定されるが、リスク評価上重要度の高い事象に効果あり：

1

有効となる事象が些細な事象に限定される：0

③テーマの一般性：

炉や燃料設計に対する一般性、汎用性は有るか：有 or 無

④テーマの重要性：

従来は十分な評価がなされていなかったが、本来、精度良い評価が必要か：
大 or 中 or 小

⑤技術的成立性：

a. 開発に必要なリソース等

従来技術の組合せ等で実現可能で、開発のための必要な資金、時間が少ない：

2

新技術の開発、大掛かりな実証試験等、開発のために必要な資金、時間が大きい：1

現状では、開発、実証のめどが立たない：0

b. プラントや燃料サイクルへの影響

プラント本来の性能や燃料サイクルへの影響が小さいかプラス要因が多い：2

プラント本来の性能や燃料サイクルへの影響もあるが、追加される効果と同程度と見なせる：1

プラント本来の性能や燃料サイクルへの影響が大きく、許容しがたい：0

c. 有効性実証の可能性

実機条件（規模、物質等）での実証が可能：2

実機条件での実証は困難だが、炉外試験や要素メカニズムの実証の組み合わせで立証可能：1

立証は困難：0

⑥新規炉での実炉／炉内試験の必要性：大 or 中 or 小

大規模なインパイルループ試験が必要か（実物質、核発熱、直径10cm、61本束程度）

あるいは特殊な計測系や試験用装置を建設時から配置した実炉が必要か

なお、防止方策に関してはいくつかの方策の組み合わせで極めて有効となる場合があるため、それらを1つのセットとして評価してみた。ここでは、

ID# 2.21 CRD熱膨張促進機構 + Naプレナム付炉心によるボイド反応度低減
+ SASS

(炉心湾曲は特に強調する設計とはしない。ただしある程度の反応度効果はあるとする)

のセットをID# 2.21として評価した(表3-2、3-3に網掛で示してある)。

補足：集合体内蔵型SASSや落下型中性子吸収材反射体は防止機能の成否に対して緩和機能の従属性があると考えられるので検討しておくこととする。

集合体内蔵型SASS：

防止機能が働かない場合にも、下方への流出経路は常に確保されている。また内管や開機構は容易に溶融貫通できるように設計するため、初期に防止機能が働かなくとも、溶融燃料の上方向移動が生ずる時期には中性子吸収体は落下してきて、上方への経路も確保される。従って防止機能の成否に対する従属性は小さいと考える。

落下型中性子吸収材反射体：

本構造は全ての燃料集合体に設置されることを想定している。従って落下機構に多様性を持たせることによって、必要時に、全ての反射体が落下しないとの共通要因故障は回避できる。なお、数十体程度(全集合体数の数分の1)であっても落下していれば、防止効果としては不十分であっても、溶融プールへ混入した場合の緩和効果は十分であると考えられる。従って防止機能の成否に対する従属性は小さいと考える。

3.3 評価結果と分析

表3-2に再評価の結果を示す。防止効果、緩和効果の満点は各々6点、4点であるので、

$$(\text{総合得点}) = (\text{防止効果の得点}) + 1.5 \times (\text{緩和効果の得点})$$

をリスク低減効果の序列評価に用いることとした。表3-3はこの総合得点順にソートした表である。なお、格納系に関する方策（第4分野）は、具体的な方策を提示していないため、表3-3では順位付けには加わっていない。

表3-3では、表3-1の考察で述べたように、当然のことながら防止効果と緩和効果の両面を併せ持つ方策（#3.3, #3.4）の得点が高い。

防止方策について

防止方策（第2分野、2.xのIDを持つもの）の順位が全体的に低めとなっている。防止方策には、単独で多様性、効果、広い適用範囲の3条件を満たすものは、既存の方策の中にはなかった。これらの条件を意識して考案した集合体内SASS機構のみが単独では満点であった。また、防止方策の中で単独で効果に関して2点を取ったものはSASSの機能を持つものとRVACSのみであった。すなわち、ここで挙げられた既存の方策の多くが、

- ・単独での効果は不十分であり、他との組み合わせで初めて決定的に有効となるものが多い
- ・即効的な方策は適用可能な事故事象が限定されている、逆に限定されない方策は即効的でない

等の特徴を持つことが改めて認識される。これらを改善するためには、今後さらに、即効的、決定的、汎用的で従来の手段に対して多様性がありかつ有効性の実証が容易な方策を追求することが必要であるほか、それらの実証を目的とした実炉試験を既存炉や新規炉で考えていくことが必要であろう。

セットで評価したID#2.21については、緩和効果のあるものも組み合わせたために総合順位で3位となっている。減点となっているのはNaプレミアム付燃料での緩和効果における燃料排出が弱いためであり、もしこのセットでSASSを内蔵型SASSか落下型反射体に替えれば、満点となる。なお、もし緩和効果のない組合せであれば防止側で満点となるのみであったであろう。

緩和方策について

他方、緩和方策（炉内事象、第3分野、3.xのIDを持つもの）の緩和効果の判定が概ね大となっているのは、表3-1の考察で述べたように、

- ・炉心損傷に至ったとの前提で有効となる方策には起因事象への依存性が小さい
- ・単一で有効となるような方策が多い、
- ・効果については比較的定量的に良く判っていて、もう一步で再臨界回避に足る燃料排出量が得られると判っているものについてその効果を強調する方策を提案している（R&Dの成果）

などが考えられる。

このように防止方策、緩和方策を同格において比較してみると、ここで挙げられた緩和方策は、リスク低減の観点からは、防止方策と同等以上の有効性を有していると言えることができる。もちろん、これは総合得点の比較において言えることであって、その有効性の持つ意味が防止と緩和とでは自ずと異なることは言うまでもない。なお、緩和方策の中の多くの項目がテーマ1でも挙げられていた燃料流出という現象に関連していることから、安全評価を中心としていたテーマ1での研究目的を、「燃料流出を促進する方策の追求」と置き換えることによって、容易にテーマ2の研究に繋げることができよう。

コストと実証性について

ここで提示された方策に限ってみれば、防止方策と緩和方策を比較すると、緩和方策の方が、開発コストが低く、実証の可能性が高い（表3-2参照）。緩和方策のコストの低さは、従来の炉心、燃料設計を大きく変えることなく、炉心損傷事故時に燃料の炉心外流出を促進する工夫を施したものが多いことによる。実証可能性の高さは、従来から実施されてきている炉心崩壊事故の研究を進めることが、新たに提案された緩和方策の立証にもつながるとの判断による。

アンケート結果との比較検討

受動的な安全方策（もしくは方策の集合）を新たに採用しようとする場合、リスクを低減させることが目的であるため、その方策が想定される全ての事象に有効であること、炉心損傷事故のシナリオ上従来の設計では弱かった部分の補強となるものであること、事象を終息させるか事故管理に期待できる程度に事象の進展を遅らせるような大きな効果を有するものであること、実証性が高いこと、炉の特性を大きく損なわないこと等に留意して評価を下す必要がある。

また、確率論的なリスク評価手法では、評価方法が完全には確立されておらず、不確定要素の一つとなっている共通原因故障をできるだけ排除しようとするのが、受動的な安全方策採用の大きな目的の一つである。このため、従来の安全方策に付加することによ

て、多様性を深めることができる新たな方策が望まれている。

これらの点に配慮した採点方法が3.2節の評価手法である。これに基づく再評価結果とアンケート結果との比較を試みた。

委員に対して実施したアンケート結果（表2-2）と、再評価結果（表3-3）とを、図3-3に比較して示した。図中で、特に炉内事象の緩和方策（#3.xのIDを持つもの）は太線でその変化を示してあるが、コアキャッチャー以外は全て再評価においてアンケート結果よりも高い順位となっている。逆に防止方策については、緩和方策が上位を占めた分、全般的に順位は低下している。防止方策の中で再評価で順位が上昇しているものは、

ボイド反応度抑制、
ナトリウムプレナム付き炉心、
GEM、
炉心軸方向膨張

であり、GEM以外は炉心損傷に至った場合の緩和効果もあるとして総合で高く評価されたものである。もちろんここでの評価は絶対的な順位に意味があるようなものではないが、両評価の差異は、これまでも述べてきたことも含めて、以下のようにまとめられるであろう。

- アンケート結果は、炉心損傷が生じたとの条件下で初めて有効となる緩和方策よりも、炉心損傷を生じさせないとの防止方策に優先度を置くとの評価基準で評価されているようである。すなわち委員の多くは、安全性向上のためには緩和よりも防止が重要であると考えていた。
- 再評価ではリスク低減の観点から防止と緩和とを同格に置いた。これは以下の意図である。
 - ・ 防止方策の導入によって炉心損傷の発生頻度が何桁か低下しても、炉心損傷に至った場合の事故影響のポテンシャルは低減されておらず、低確率故に据きりできる／低確率でも据きりできない、との議論に納得できる解を与えない。（確率論の限界）
 - ・ 他方、炉心損傷に至った場合の事故影響のポテンシャルを低減できるような緩和方策が、実験的にその有効性を実証した上で導入されるならば、決定論的にFBRの安全性を確認できる。
- 再評価の結果、緩和方策の多くは起因事象への依存性が小さい、単一で有効となる

ような方策が多い、等の理由で比較的高得点となって、アンケート結果との差異となった。

表 3-1 (その1) 研究テーマの分類 (対象炉型別)

	Na冷却MOX大型炉にのみ有効	Na冷却MOX大型以外の炉型にのみ有効			
		メタル	MN, MC	小型炉	その他
異常発生防止 一般的な安全性向上策		金属燃料±	MN, MC±	ボイド反応度低減	鉛冷却
<p>共通 従来型RSS, 扁平化によるボイド反応度低減 DHR強化 TRU添加燃料* ダクトレス集合体*±</p>					
炉心損傷事故発生・拡大防止		金属燃料±	MN, MC±	GEM LOR RVACS PLOHS	鉛冷却
<p>共通 Naプレナム付、SASS、内蔵SASS、落下型反射体、浮遊型SASS LOR、炉心軸膨張、CRD伸び、支持板膨張、フラワリング、炉心湾曲、炉容器膨張 LOR延長 完全NC PLOHS</p>					
炉心損傷事故影響緩和 (炉容器内)		金属燃料± ピン内燃料移動TOP	MN, MC±		
<p>共通 人工的リードチャネル、内蔵SASS、落下型反射体、短尺軸ブラ流出、集合体間ギャップ流出、CRDから排出、流出促進構造、Naプレナム付での流出、コアキャッチャー</p> <p>他の炉内影響緩和は全て燃料排出 (毒物混入)</p>					
炉心損傷事故影響緩和 (格納系内)					
<p>共通 Na燃焼抑制、水素発生燃焼抑制、格納強化、ソースターム移行低減</p> <p>冷却</p>					

ゴシック：装置、燃料の開発を伴うもの

*：将来炉にて採用の方向と考えられる設計オプション

±：効果不明故、見極め必要

表3-1 (その2) 研究テーマの分類 (事故カテゴリ別)

	集合体事故	PLOHS 崩壊熱除熱喪失型	ULOF 流量減少型	ULOHS 入口温度上昇型	UTOP 反応度投入型
異常発生防止 一般的な安全性 向上策	燃料健全性 向上	従来型DHR 信頼性向上	共通 従来型RSS信 頼性向上	新型燃料士 ボイド反応度低減	燃料健全性 向上 鉛冷却
炉心損傷事故発生 ・拡大防止	窒化物燃料 金属燃料 鉛冷却 ダクトレス 集合体士	RVACS 完全NC 事故管理	GEM LOF延長 浮遊型SASS 共通 Naプレナム付、SASS、内蔵SASS、落下型反射体、 炉心軸膨張、CRD伸び、フラワリング、炉心湾曲士、 炉容器膨張 新型燃料士 鉛冷却	支持板膨張	
炉心損傷事故影響緩和 (炉容器内)		内蔵SASS 落下型反射体	共通 人工的リードチャンネル、内蔵SASS、落下型反射体、 短尺軸ブラ流出、集合体間ギャップ流出、 CRDから排出、流出促進構造、Naプレナム付での流 出、コアキャッチャー 新型燃料士		ピン内燃料移動
炉心損傷事故影響緩和 (格納系内)	共通		Na燃焼抑制、水素発生燃焼抑制、格納強化、ソースターム移行低減		

ゴシック：装
置、燃料の開発
を伴うもの

*：将来炉にて採
用の方向と考
えられる設計オ
プション

士：効果不明故、
見極め必要
下線：非安全側
効果あり

表 3-2 リスク低減の観点による再評価

ID #	研究テーマ	防止効果				緩和効果			一般性 / 重要性	技術的成立性			新規炉試験 必要性	防止+ 1.5*緩和	
		多様性	効果	範囲	計	効果	範囲	計		開発 コスト	他への 悪影響	実証 可能性			
															a
1.1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制：小型炉心	1	1	2	4	1	2	3	無/小	2	1	2	5	中	8.5
1.1-2	炉心形状設計によるボイド反応度抑制：扁平炉心	1	1	2	4	0	1	1	無/小	1	1	1	3	小	5.5
1.2-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上：金属燃料	1	1	1	3	0	0	0	無/中	1	1	1	3	大	3.0
1.2-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上：窒化物燃料	1	1	1	3	0	0	0	無/中	1	2	1	4	大	3.0
1.3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	0	0	2	2	0	0	0	有/小	2	2	2	6	小	2.0
1.4	鉛冷却材使用による安全向上	1	1	2	4	0	0	0	無/中	1	0	1	2	大	4.0
1.5-1	ポンプ流量減少特性の延長：～10秒	0	1	1	2	0	0	0	有/中	1	1	1	3	小	2.0
1.5-2	ポンプ流量減少特性の延長：～50秒以上	1	1	1	3	0	0	0	有/小	0	0	1	1	小	3.0
1.6	ダクトレス炉心 (対局所事故)	1	1	0	2	0	0	0	有/大	1	2	1	4	大	2.0
1.7	TRU添加燃料炉心	0	0	0	0	0	0	0	有/大	1	2	0	3	大	0.0
2.1	ナトリウムプレナム付き炉心	1	1	2	4	1	2	3	有/中	1	1	1	3	小	8.5
2.2	自己作動型制御機構 (SASS)：キュリー点式	1	2	2	5	0	0	0	有/大	1	2	1	4	中	5.0
2.3	フローティング型制御機構	2	2	1	5	0	0	0	有/大	1	2	2	5	中	5.0
2.4-1	ガス膨張機構 (GEM)：大型炉への適用	2	0	1	3	0	0	0	無/中	1	1	2	4	大	3.0
2.4-2	ガス膨張機構 (GEM)：小型炉への適用	2	2	1	5	0	0	0	無/小	1	1	2	4	大	5.0
2.5	炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)	1	0	1	2	0	2	2	有/中	2	2	0	4	中	5.0
2.6	制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)	0	1	2	3	0	0	0	有/大	1	2	1	4	中	3.0
2.7	炉心支持板の膨張 (既存の効果)	1	1	1	3	0	0	0	有/大	2	2	1	5	大	3.0
2.8	炉心集合体のフラワーリング	1	1	2	4	0	0	0	有/小	1	0	1	2	大	4.0
2.9	炉心湾曲効果 (集合体、炉心)	1	1	2	4	0	0	0	有/大	1	2	1	4	大	4.0
2.10	原子炉容器の膨張 (既存の効果)	1	0	1	2	0	0	0	有/小	2	2	0	4	中	2.0
2.11	完全自然循環による崩壊熱除去	1	1	1	3	0	0	0	有/大	1	1	1	3	中	3.0
2.12-1	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)：大型炉	2	0	1	3	0	0	0	無/小	0	0	0	0	大	3.0
2.12-2	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)：小型炉	2	2	1	5	0	0	0	無/大	1	2	1	4	大	5.0
2.12-3	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)：SASS	2	2	2	6	1	2	3	有/大	1	2	1	4	大	6.0
3.1	人工的リードチャンネルの設置	0	0	0	0	1	2	3	有/中	2	1	2	5	大	4.5
3.2	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	0	1	1	2	1	1	2	無/大	2	2	2	6	中	5.0
3.3	集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)	2	2	2	6	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	12.0
3.4	吸収材上部設置型集合体での熔融燃料への毒物混入	2	1	2	5	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	11.0
3.5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	0	0	0	0	1	2	3	有/大	2	1	2	5	大	4.5
3.6	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	0	0	0	0	1	2	3	有/大	2	2	2	6	中	4.5
3.7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出	0	0	0	0	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	6.0
3.8	燃料炉外流出促進構造 (non-fuel集合体)	0	0	0	0	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	6.0
3.9	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	1	1	2	4	1	2	3	有/大	2	1	2	5	大	8.5
3.10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	0	0	0	0	2	2	4	有/大	1	1	2	4	中	6.0
4.1	ナトリウムの燃焼抑制対策	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	小	6.0
4.2	水素の発生・燃焼抑制策	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	小	6.0
4.3	格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	小	6.0
4.4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	中	6.0

表 3-3 リスク低減の観点による再評価 (得点順)

ID #	研究テーマ	防止効果				緩和効果			一般性 /重要性	技術的成立性			新規炉試験 必要性	防止+ 1.5*緩和	
		多様性	効果	範囲	計	効果	範囲	計		開発	他への	実証			
		a	b	c		a	b		コスト	悪影響	可能性				
3.3	集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)	2	2	2	6	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	12.0
3.4	吸収材上部設置型集合体での熔融燃料への毒物混入	2	1	2	5	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	11.0
2.20	制御棒駆動系NEZ/燃料付SASS	2	2	2	6	2	2	3	有/大	1	1	1	3	中	10.5
1.1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制: 小型炉心	1	1	2	4	1	2	3	無/小	2	1	2	5	中	8.5
2.1	ナトリウムブレナム付き炉心	1	1	2	4	1	2	3	有/中	1	1	1	3	小	8.5
3.9	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	1	1	2	4	1	2	3	有/大	2	1	2	5	大	8.5
3.7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出	0	0	0	0	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	6.0
3.8	燃料炉外流出促進構造 (non-fuel集合体)	0	0	0	0	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大	6.0
3.10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	0	0	0	0	2	2	4	有/大	1	1	2	4	中	6.0
1.1-2	炉心形状設計によるボイド反応度抑制: 扁平炉心	1	1	2	4	0	1	1	無/小	1	1	1	3	小	5.5
2.2	自己作動型制御機構 (SASS): キュリー点式	1	2	2	5	0	0	0	有/大	1	2	1	4	中	5.0
2.3	フローティング型制御機構	2	2	1	5	0	0	0	有/大	1	2	2	5	中	5.0
2.4-2	ガス膨張機構 (GEM): 小型炉への適用	2	2	1	5	0	0	0	無/小	1	1	2	4	大	5.0
2.5	炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)	1	0	1	2	0	2	2	有/中	2	2	0	4	中	5.0
2.12-2	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS): 小型炉	2	2	1	5	0	0	0	無/大	1	2	1	4	大	5.0
3.2	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	0	1	1	2	1	1	2	無/大	2	2	2	6	中	5.0
3.1	人工的リードチャンネルの設置	0	0	0	0	1	2	3	有/中	2	1	2	5	大	4.5
3.5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	0	0	0	0	1	2	3	有/大	2	1	2	5	大	4.5
3.6	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	0	0	0	0	1	2	3	有/大	2	2	2	6	中	4.5
1.4	鉛冷却材使用による安全向上	1	1	2	4	0	0	0	無/中	1	0	1	2	大	4.0
2.8	炉心集合体のフラワーリング	1	1	2	4	0	0	0	有/小	1	0	1	2	大	4.0
2.9	炉心湾曲効果 (集合体、炉心)	1	1	2	4	0	0	0	有/大	1	2	1	4	大	4.0
1.2-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上: 金属燃料	1	1	1	3	0	0	0	無/中	1	1	1	3	大	3.0
1.2-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上: 窒化物燃料	1	1	1	3	0	0	0	無/中	1	2	1	4	大	3.0
1.5-2	ポンプ流量減少特性の延長: ~50秒以上	1	1	1	3	0	0	0	有/小	0	0	1	1	小	3.0
2.4-1	ガス膨張機構 (GEM): 大型炉への適用	2	0	1	3	0	0	0	無/中	1	1	2	4	大	3.0
2.6	制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)	0	1	2	3	0	0	0	有/大	1	2	1	4	中	3.0
2.7	炉心支持板の膨張 (既存の効果)	1	1	1	3	0	0	0	有/大	2	2	1	5	大	3.0
2.11	完全自然循環による崩壊熱除去	1	1	1	3	0	0	0	有/大	1	1	1	3	中	3.0
2.12-1	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS): 大型炉	2	0	1	3	0	0	0	無/小	0	0	0	0	大	3.0
1.3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	0	0	2	2	0	0	0	有/小	2	2	2	6	小	2.0
1.5-1	ポンプ流量減少特性の延長: ~10秒	0	1	1	2	0	0	0	有/中	1	1	1	3	小	2.0
1.6	ダクトレス炉心 (対局所事故)	1	1	0	2	0	0	0	有/大	1	2	1	4	大	2.0
2.10	原子炉容器の膨張 (既存の効果)	1	0	1	2	0	0	0	有/小	2	2	0	4	中	2.0
1.7	TRU添加燃料炉心	0	0	0	0	0	0	0	有/大	1	2	0	3	大	0.0
4.1	ナトリウムの燃焼抑制対策	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	小	6.0
4.2	水素の発生・燃焼抑制策	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	小	6.0
4.3	格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	小	6.0
4.4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	0	0	0	0	2	2	4	有/大				0	中	6.0

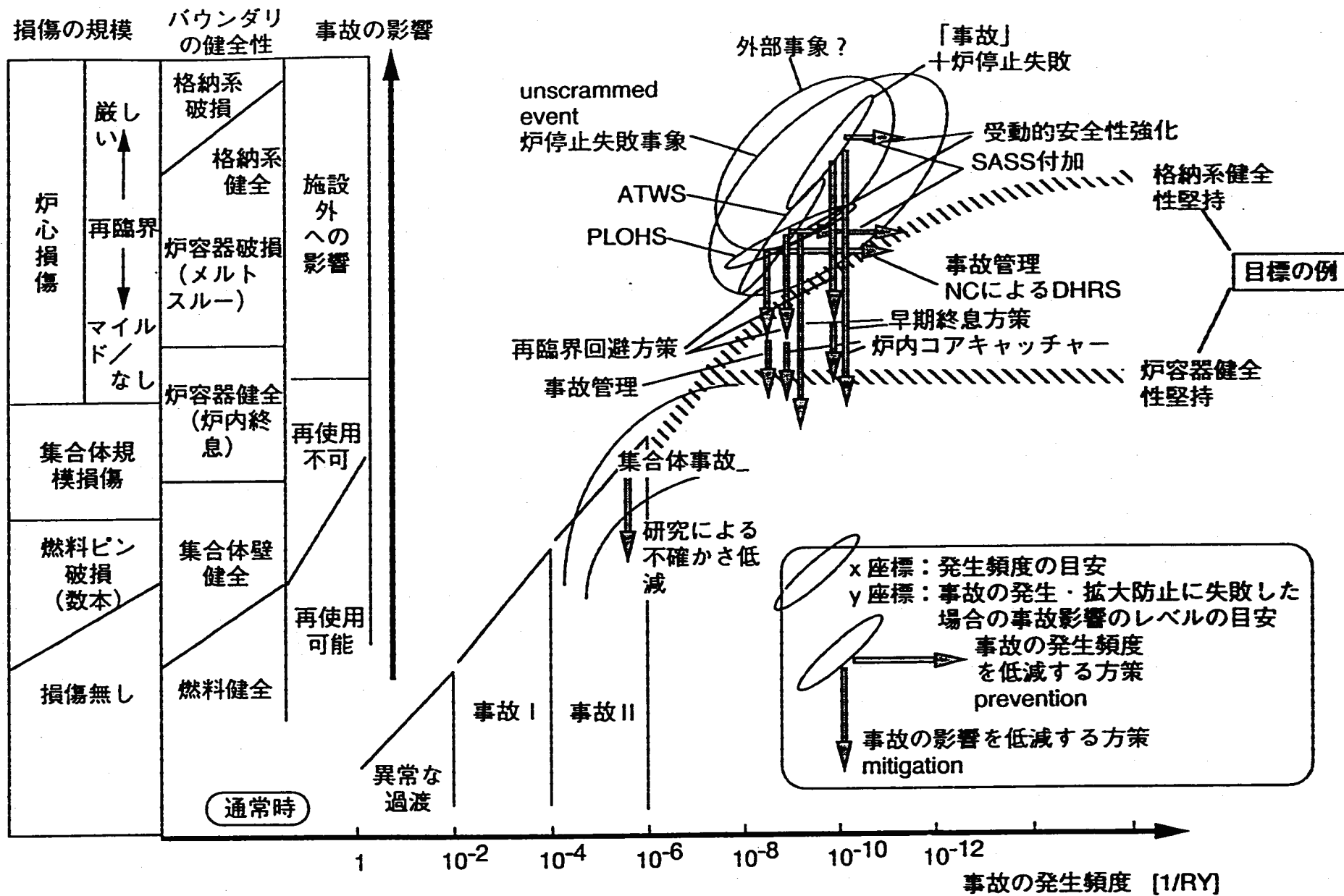


図 3-1 高速炉における各種安全水準向上方策の位置付け

局所異常冷却

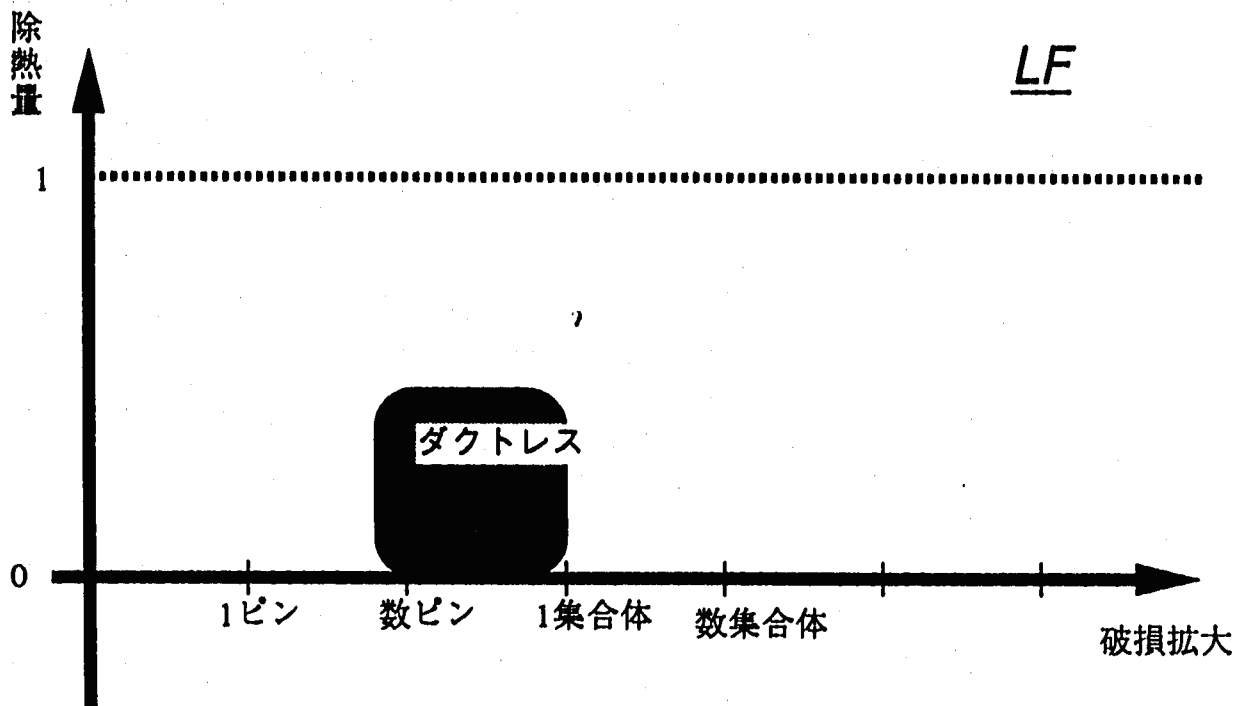
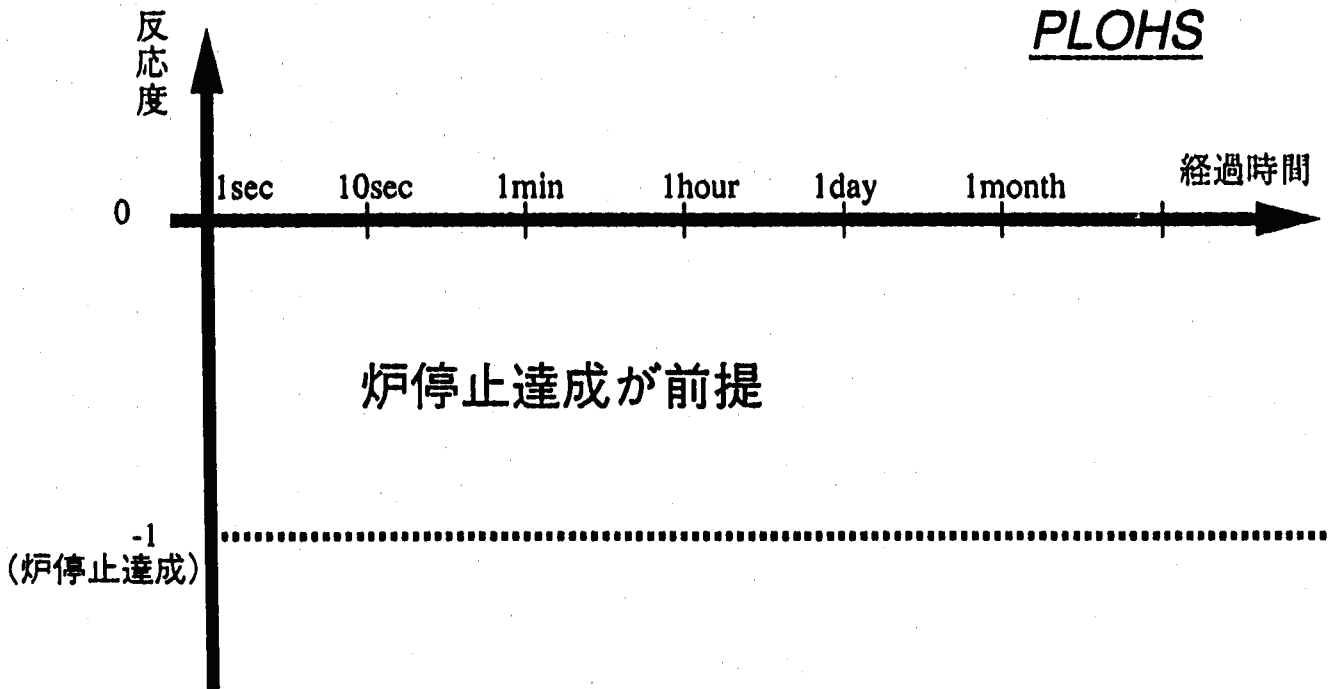


図 3-2 (1) 受動的 safety 特性の時間効果検討 (LF)

炉停止機能



熱除去機能

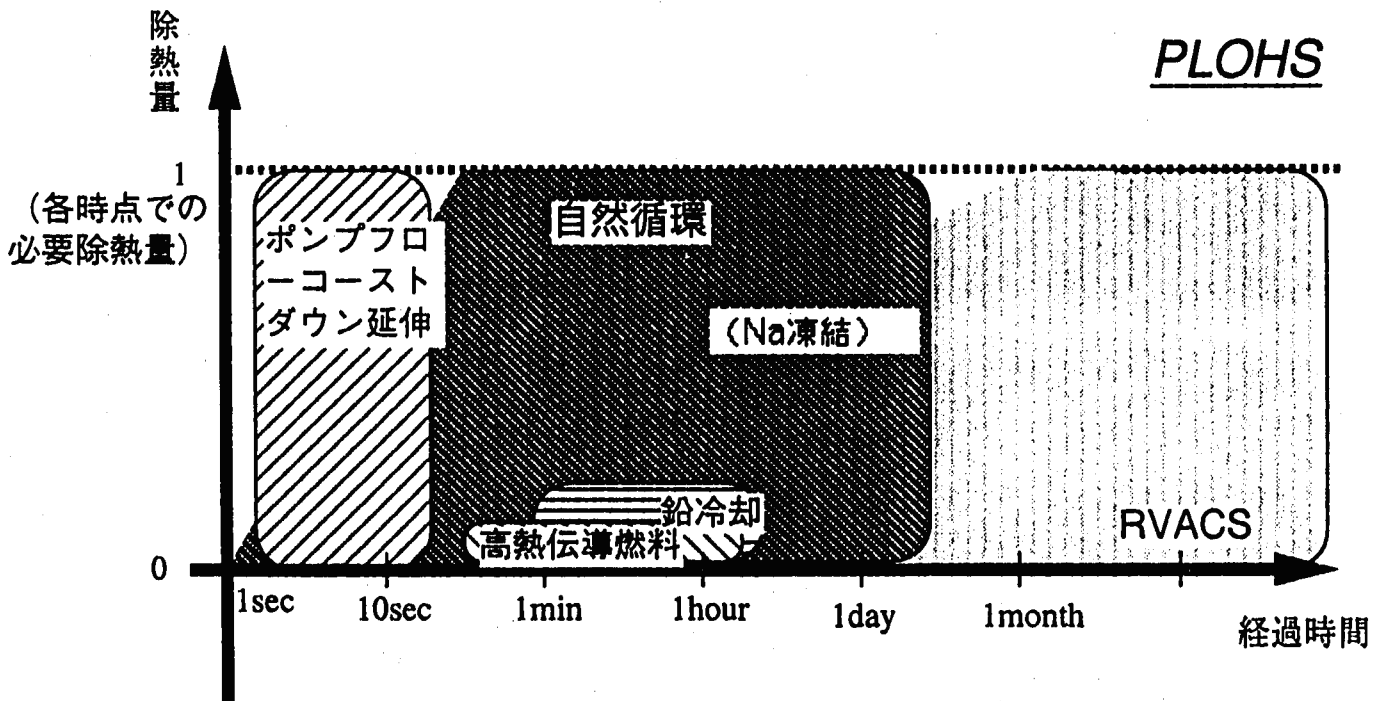
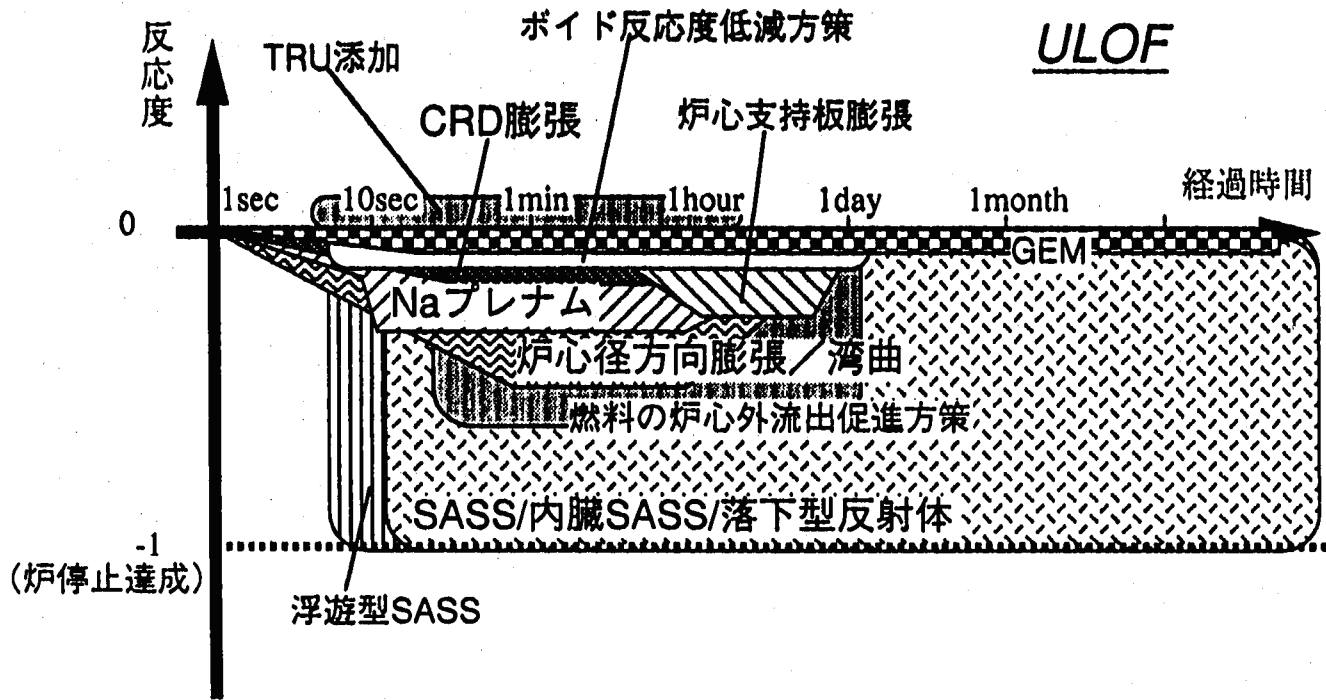


図 3-2 (2) 受動的安全特性の時間効果検討 (PLOHS)

炉停止機能



熱除去機能

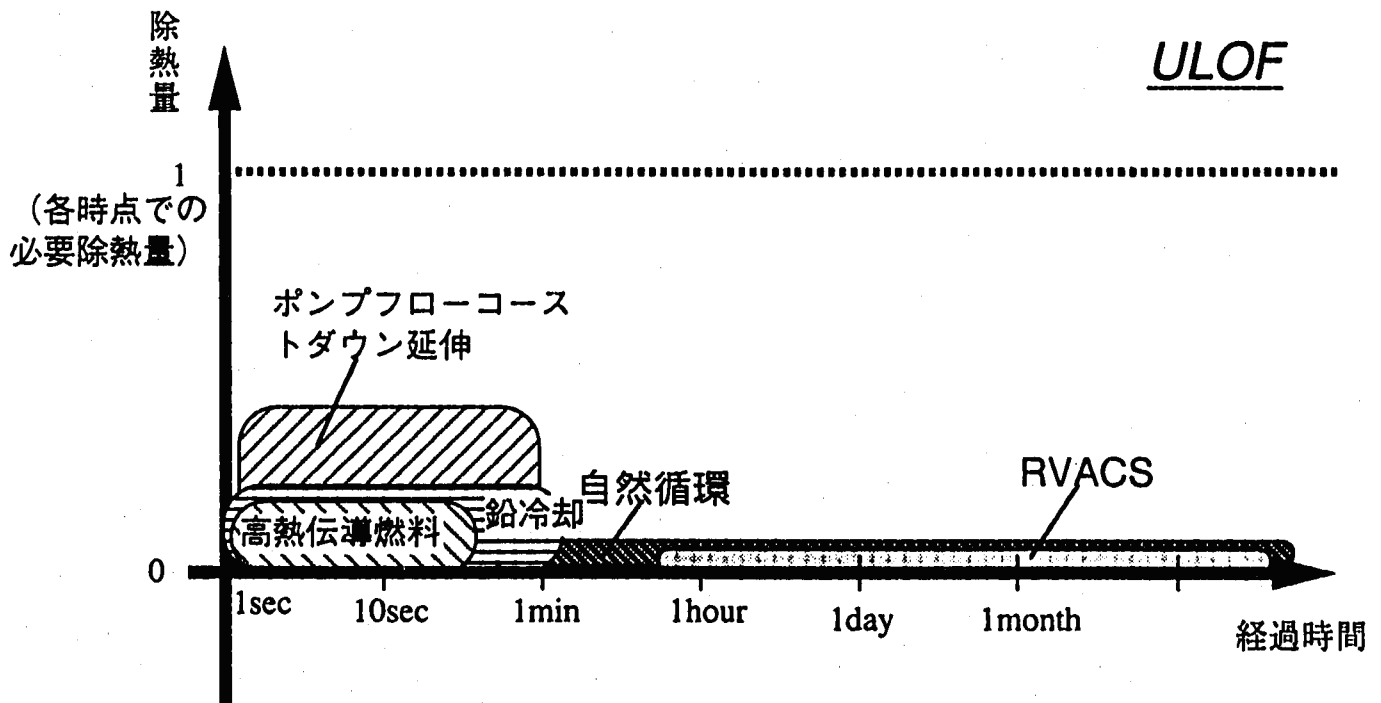
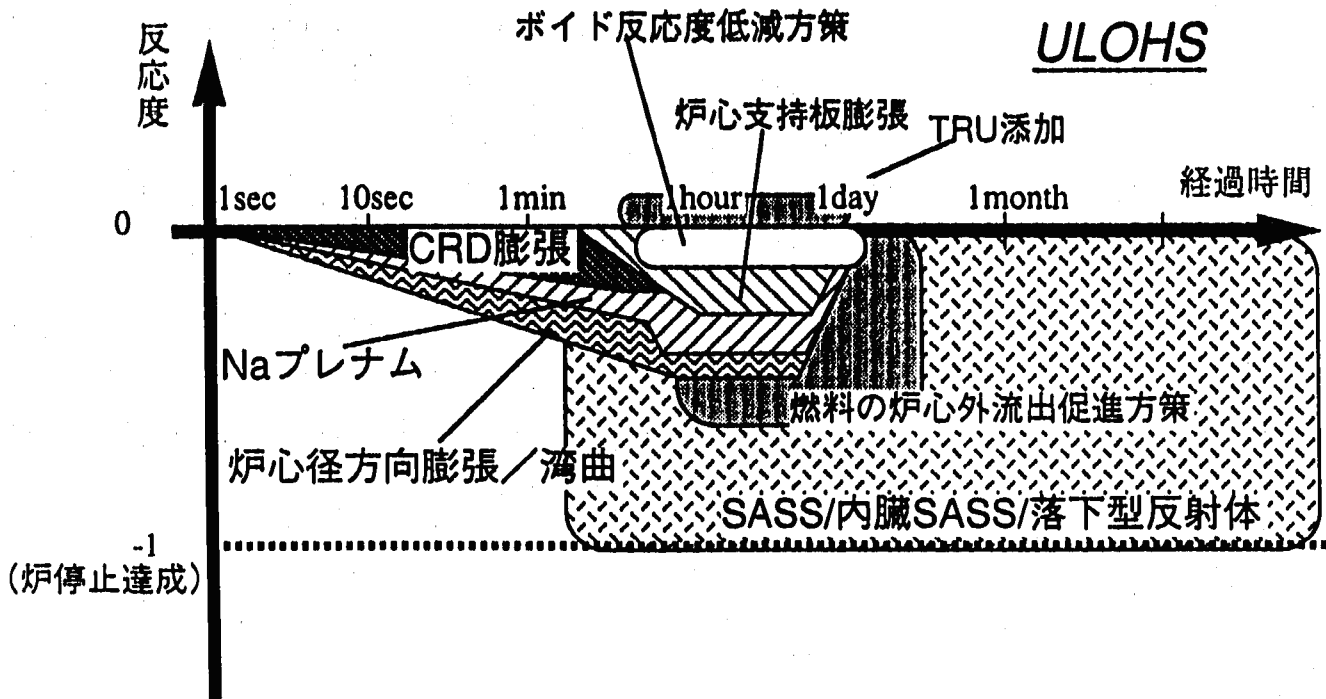


図 3-2 (3) 受動的 safety 特性の時間効果検討 (ULOF)

炉停止機能



熱除去機能

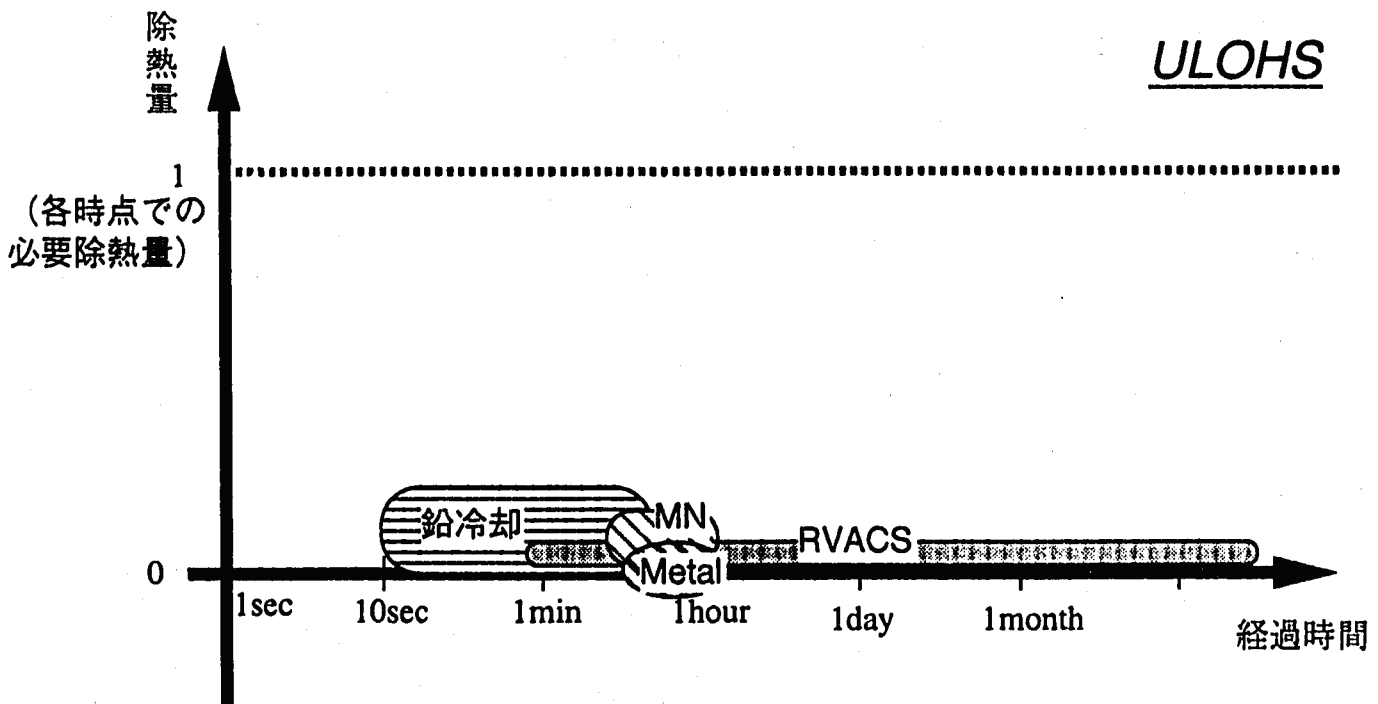
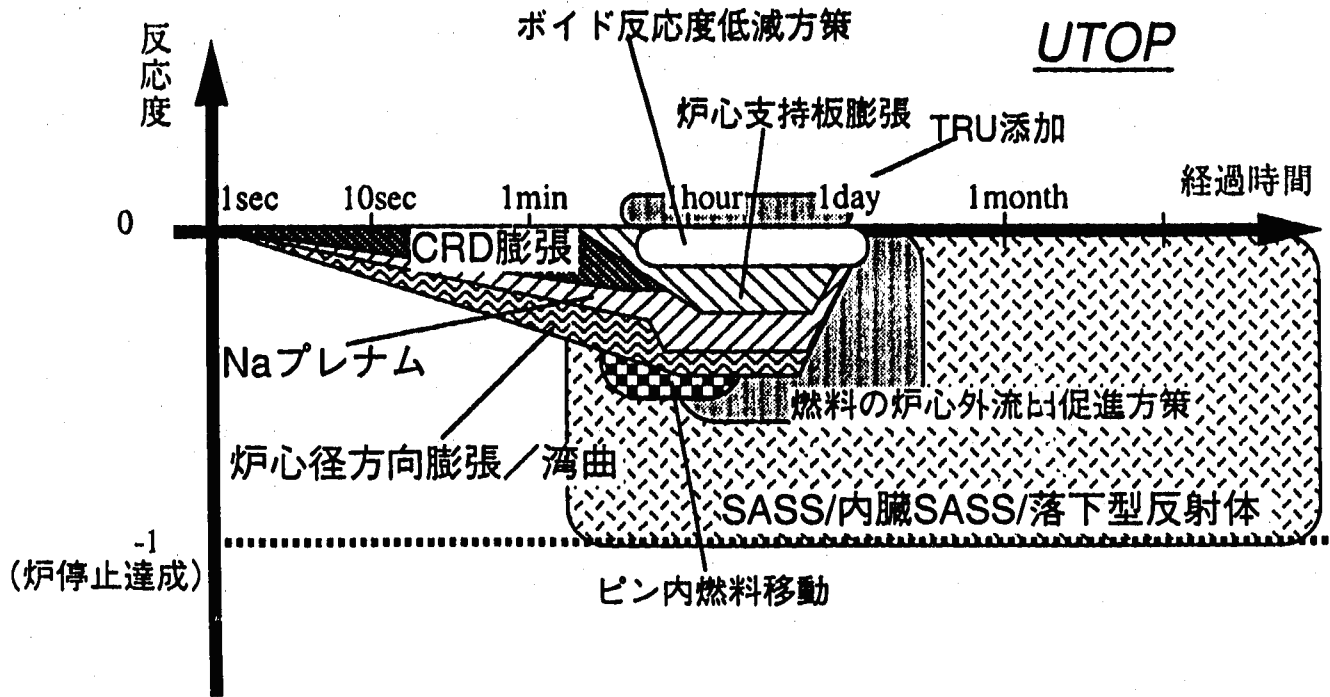


図 3-2 (4) 受動的な安全特性の時間効果検討 (ULOHS)

炉停止機能



熱除去機能

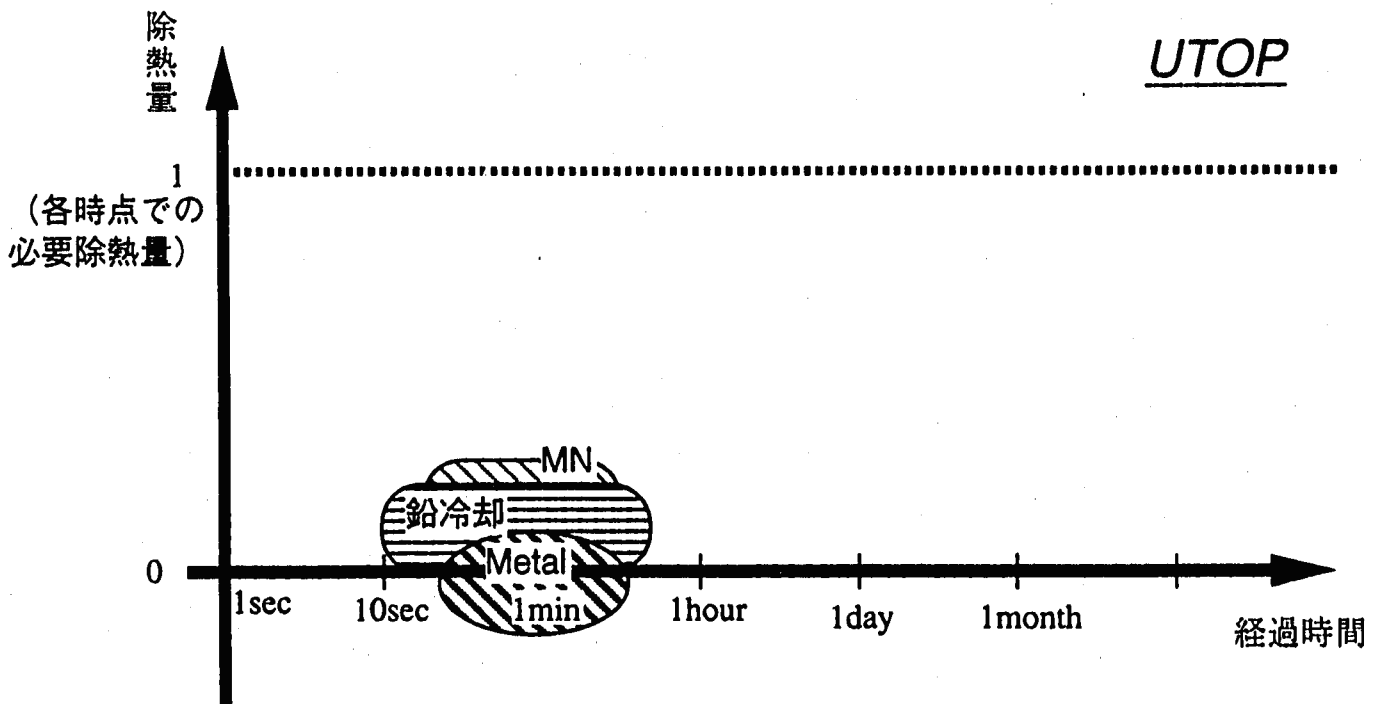


図 3-2 (5) 受動的な安全特性の時間効果検討 (UTOP)

アンケート結果		再評価結果	
ID	研究テーマ	ID #	研究テーマ
2-11	完全自然循環による崩壊熱除去	3.3	集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)
2-2	自己作動型制御機構 (SASS)	3.4	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入
1-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上	2.20	制御棒膨張系/ナトリウム付きSASS
2-9	炉心湾曲効果 (集合体、炉心)	1.1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制: 小型炉心
2-6	制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)	2.1	ナトリウムブレナム付き炉心
3-3	集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)	3.9	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動
3-10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	3.7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出
1-5	ポンプ流量減少特性の延長	3.8	燃料炉外流出促進構造 (non-fuel集合体)
2-3	フローティング型制御機構	3.10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置
2-7	炉心支持板の膨張	1.1-2	炉心形状設計によるボイド反応度抑制: 扁平炉心
2-12	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)	2.1	自己作動型制御機構 (SASS): キュリー点式
1-4	鉛冷却材使用による安全向上	2.3	フローティング型制御機構
2-8	炉心集合体のフラワーリング	2.4-2	ガス膨張機構 (GEM): 小型炉への適用
2-4	ガス膨張機構 (GEM)	2.5	炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)
1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制	2.12-2	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS): 小型炉
1-3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	3.2	中空ベレットによるピン内燃料移動・分散
3-8	燃料炉外流出促進構造	3.1	人工的リードチャンネルの設置
2-1	ナトリウムブレナム付き炉心	3.5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進
3-1	人工的リードチャンネルの設置	3.6	集合体スベサパッドの軸方向間隙の確保
3-2	中空ベレットによるピン内燃料移動・分散	1.4	鉛冷却材使用による安全向上
3-4	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	2.8	炉心集合体のフラワーリング
3-7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出の実証	2.9	炉心湾曲効果 (集合体、炉心)
2-5	炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)	1.2-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上: 金属燃料
3-5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	1.2-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上: 窒化物燃料
3-9	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	1.5-2	ポンプ流量減少特性の延長: ~50秒以上
3-6	集合体スベサパッドの軸方向間隙の確保	2.4-1	ガス膨張機構 (GEM): 大型炉への適用
2-10	原子炉容器の膨張	2.6	制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)
4-1	ナトリウムの燃焼抑制対策	2.7	炉心支持板の膨張 (既存の効果)
4-2	水素の発生・燃焼抑制策	2.11	完全自然循環による崩壊熱除去
4-3	格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)	2.12-1	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS): 大型炉
4-4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	1.3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上
		1.5-1	ポンプ流量減少特性の延長: ~10秒
		1.6	ダクトレス炉心 (対局所事故)
		2.10	原子炉容器の膨張 (既存の効果)
		1.7	TRU添加燃料炉心
		4.1	ナトリウムの燃焼抑制対策
		4.2	水素の発生・燃焼抑制策
		4.3	格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)
		4.4	ソースタームの放出移行に関する低減機構

図 3-3 アンケート結果と再評価結果との比較

4章 結論 —SERAPHに期待される役割の提示—

今回試みた受動的な安全方策の分析的な評価により、既に提案されている方策の得失を浮き彫りにすることができた。逆の言い方をすれば、現在提案されている方策では不十分な部分を明確にすることができた訳であり、新たな、より効果的な方策を着想するための思考の道筋を示すものでもある。

3章までの検討から、SERAPH、あるいはこれからの安全性試験炉に期待される役割は以下の2つに大別された。

(1) 炉心損傷の発生防止方策の実験的検証

初期のアンケート結果において防止方策の得点が高かったことから、このような役割が期待されていることは明らかである。特に高得点であったものは、完全自然循環による崩壊熱除去、SASS、燃料形態による核特性に係わる安全向上、炉心湾曲効果、などである（表2-2参照）。

(2) 炉心損傷の影響緩和方策の実験的検証

検討の結果、炉心損傷に至った場合の事故影響のポテンシャル自体を低減できるような有効な緩和方策が実験的に実証された上で導入されれば、決定論的にFBRの安全性を確認できることが認識された。また、これを意図した緩和方策の候補も提案されている（表3-3参照）。提案された方策によって真に再臨界問題が決定論的に解決できるか否かは現時点では確言できないが、このようなアプローチの価値は認められる。今後も新たな緩和方策が提案されてくることを期待しつつ、その実験的検証の成果を強くSERAPHに期待する。

これからの安全性試験炉に期待されるこれら2つの役割は、炉外試験に加えて、炉心全体を用いる実炉試験と、燃料ピンから集合体規模でのインパイループを用いた炉内試験とによって達成できる。各方策に対する試験のタイプに関するアンケート結果は表2にまとめられている。一般に防止方策については実炉試験が多いが、これを理由として炉内試験炉である現在のSERAPH炉を実炉試験専用に変更することは、常陽、もんじゅの存在を考慮すれば不合理である。従って、SERAPHには炉内試験炉としての役割を期待する。もちろん対象とする研究テーマには防止方策の検証も含むべきである。また、SERAPHの駆動炉心を用いてできる実炉試験があれば、SERAPHを活用すべきである。

SERAPHに期待する試験テーマを表3-3から整理すると、以下のとおりである。

—溶融燃料排出を促進する方策に関する研究

排出経路がNaに満たされている場合、気相雰囲気の場合での燃料侵入までの所要
時間と排出速度の差異

背圧の影響

水力等価直径の影響

ピン束上部構造の影響

—核的毒物質の混入に関する研究

B4C、ブランケット燃料も含む

混入方式（落下方式）

—クエンチを促進する経路、構造（炉外試験が主）

コアキャッチャーの設計研究

—中空ペレット内での溶融燃料移動挙動研究

なお、特に新概念FBRの研究開発において対象となるテーマとして、以下が挙げられ
る。

—新型燃料の過渡挙動、破損後挙動に関する研究

金属燃料、窒化物燃料、TRU添加燃料

—ダクトレス集合体での局所事故挙動研究

—Na以外の冷却材の研究

燃料の定常、過渡挙動、破損後挙動

以上の検討を下に、FBRの実用化過程におけるSERAPHの役割の位置付けを従来検討
されてきた研究テーマ³⁾ 図示すると、図4-1のように示されるであろう。

安全性の
レベル

実用化

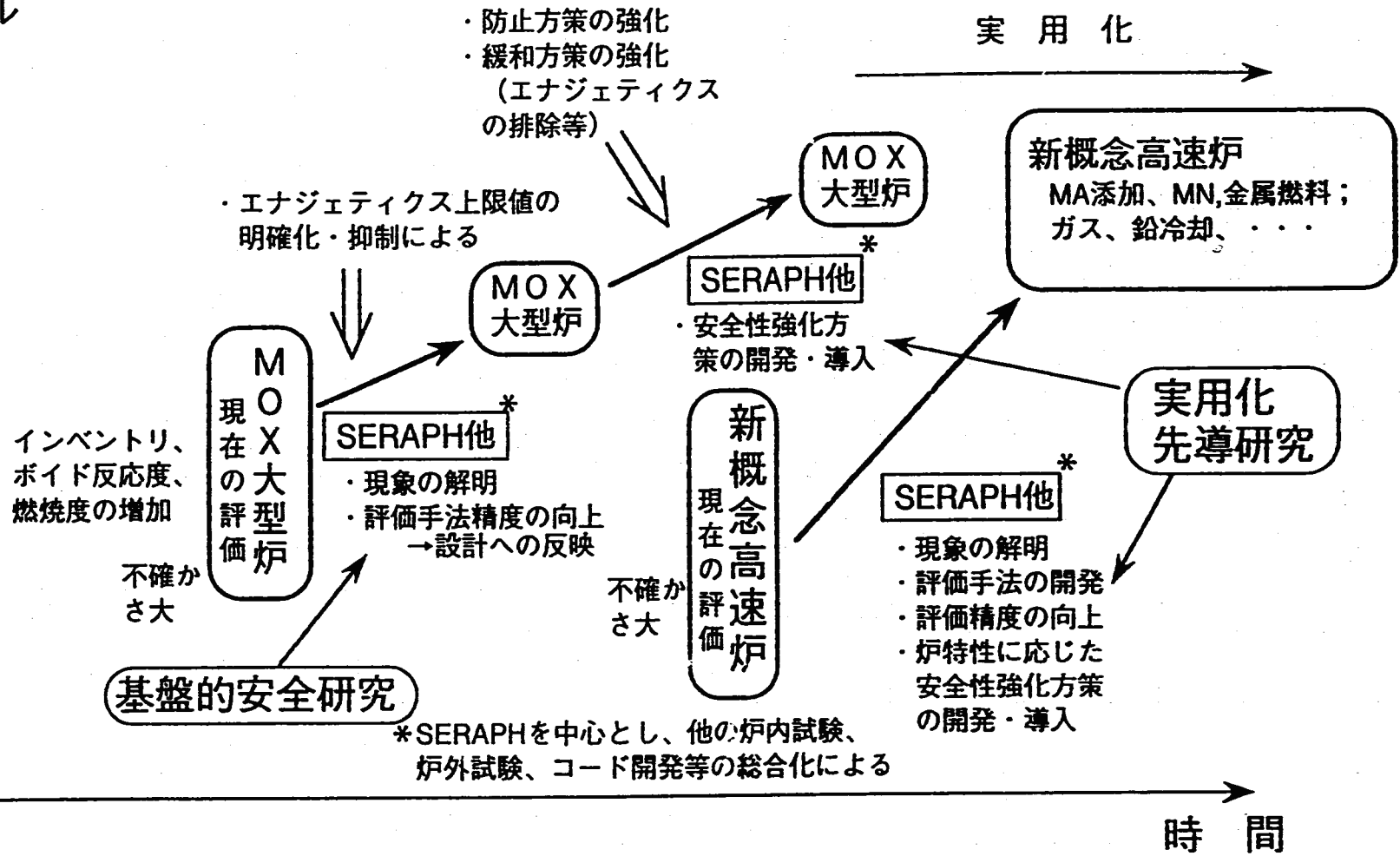


図 4-1 高速炉の実用化を目指した安全研究とSERAPHの役割の概念図

5章 下期における検討項目

前章までの検討では、長期的な安全研究として必要となる項目を広範に拾い出し、有効性に重点を置いた評価を行った。これらの検討内容を第190回FBR安全研究専門委員会にて報告討議した結果、以下のような提言を得た。

- CDAへの進展防止方策に関してさらに検討を深めること
- 研究の優先順位付けを詳細化、明確化すること
- 優先順位付けに基づく研究テーマの絞り込みを実施すること

以上に基づき、93年度下期では以下の手順で絞り込みと明確化を進めることとした。最終的にはテーマ1と融合した形で、集約された炉内試験計画を提示する予定である。

1. CDAへの進展防止方策について、研究テーマを拡充する。
2. 優先順位付けに関する基準を詳細化し、採点方法を改める。
3. 優先順位付けに基づいて研究テーマを絞り込む。
4. 選択された研究テーマに関してR&D計画を立案し、炉内試験、実炉試験の区分を明確にする。
5. 炉内試験に関する試験内容、試験方法、条件等を詳細検討する。
6. SERAPH施設性能に対する付加的要求の有無を検討し、必要に応じて評価を行う。
7. テーマ1との研究テーマの融合をおこない、集約された炉内試験計画を提示する。

(以上)

参考文献

- 1) 丹羽、「溶融燃料排出機能を備えた自己作動型炉停止装置の概念」、PNC ZN9410 93-278, 1993年11月
- 2) 林、私信、1992年11月
- 3) SERAPH計画技術検討グループ、「高速炉安全性炉内試験計画 (SERAPH計画) -必要性と試験炉概念の検討-」PNC ZN9410 92-312, 1992年11月

付録－１ 実用化先導研究テーマに関するアンケート調査依頼

FBR 安全研究専門委員会第2回小委員会

平成5年3月9日
専門委員会事務局

実用化先導研究テーマに関するアンケート調査依頼

本小委員会では、FBR 実用化に向けての一層の安全向上の観点から、安全研究を実用化先導型の研究のひとつと位置付け、「テーマ2」として検討を行うこととしています。これまで内外において多方面から提案がなされている設計案、アイデア等を基に研究テーマリスト（案）を用意しました。その具体的な検討を進めるに当たり、テーマリストの追加、有効性・技術的成立性の予備的評価、重点検討テーマの同定等を行うために、委員の方々にアンケート調査を依頼させて頂くことになりました。

つきましては、年度末の多忙な中ではありますが、次回の第3回小委員会で集計結果を報告したいと思いますので、3月31日までに委員会事務局宛*に回答願えれば幸いです（*事務局：動燃本社・動燃本部 伊藤和元；Fax (03)3586-7427）。

添付のアンケート用紙への記入に際しての要領は下記の通りにさせていただきます。リストアップされていない新テーマの提案については、追加用用紙をご利用下さい。また、このアンケートに限らず、追加御意見等ありましたら、随時お寄せ下さい。

アンケート表記載要領

- ①研究テーマ：第2回小委員会で提示した検討項目リストのテーマ
- ②有効性に関する評価：A－安全向上の観点から大きな効果が期待できる
B－安全向上の観点からある程度の効果が期待できる
C－安全向上の観点から効果はあまり期待できない
- ③技術的成立性の評価：A－すでに十分に技術が確立・実証され、適用可能
B－技術の確立又は効果の実証が容易であり、成立が見通せる
C－技術の確立又は効果の実証が困難であるが、研究の進展により成立可能
D－技術の確立又は効果の実証がきわめて困難で、成立不可能
- ④成立条件：効果が特定の炉心設計、燃料形態等でのみ期待できる時の条件の記述
- ⑤研究内容：技術の開発、効果の実証等のための研究が必要な項目については、その内容の提案
- ⑥研究手段：⑥で提案した各課題毎に研究手段を以下の分類で記載
技：技術開発（新たな機器等の開発による確立）
解：解析主体（解析、設計研究等による効果の実証）
外：炉外試験（核加熱、システム全体特性依存しない現象／効果の実証）
炉：実炉試験（既存炉、新試験炉等の実プラントを用いた試験による実証）
内：炉内試験（原子炉内設置の試験体／試験ループにおける模擬試験による実証）
- ⑦備考：アンケート記入の際の判断根拠、補足説明、コメント、問題点、その他の自由記述欄。特に、導入した場合の問題点（経済性、通常運転への影響等）など。また、工業所有権等の問題があれば付記。

付録－２ FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(1)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
I-1. 炉心形状設計による ボイド反応度抑制 (偏平化、非均質化)	A3	A1	・偏平炉心 ・非均質炉心	・中性子リークの大い炉心構成の最適化 ・内部ブランケット配置の最適化	内、解	・炉心核熱特性の確保が前提
	B4	B7	・特定の炉心形状、構成が要求 される。ボイド反応度のメリッ トは大であるが、設計上のアメ リットもあり	・将来型FBRの炉システム設計の中で、他 の要素も考慮した上で採否を議論すべきで ある	解	・経済性に影響有り
	C1	C	・左記特定炉心	・炉心形状の適正概念の導出 a)ボイド反応度 b)通常運転時炉心性能 ・軸方向非均質燃料の過渡挙動把握	解 内	・炉心配置を介して炉容器直 径の増加等 ・燃料インベントリ、増殖性 を介して燃料 サイクルコス ト増
		D	・ボイド反応度低減と炉心サイ ズ拡大を両立する新しい炉心概 念A-APC等の新しい概念を中心 に研究する	・臨界実験装置によるボイド反応度計算精度 確認 ・非均質燃料ピンの健全性 ・基礎実証試験として模擬臨界実験による検 討・核の定常炉心の成立性確認・実証中心 とする。FCA,ZPPR等を利用する。	解 外 内 解 外 炉	・モジュールアイランド炉心 形状による核的カップリン グ、反射体制御方式などとし い概念について実験する ・燃料ピン挙動については (内) 試験
		・偏平炉心 ・モジュール炉 心小型炉心 ・非均質炉心	・中性子経済の効率化を取り入れた方策の確 立	解 炉	・出力増大に注意を要する ・I-1のみでなくI-2等と広く 炉心設計と関連付けると効 果が増す	
		・炉心径、炉容器径の増大 が必要	・解析中心 ・偏平化の場合には、制御棒調引抜き時 の局所的出力上昇等のマイナス面への対 応が必要	解 炉	・経済性低下とのトレード オフ ・核的結合低下による運 転性能の低下	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(2)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
I-2. 燃料形態による核特 性(反応度効果)に 係る安全向上	A5.5	A		・中空ベレット ・窒化物燃料 ・金属燃料	内、解	
	B2.5	B3		・通常運転～事故時での安全評価、燃料製作 時との関連も評価する必要有り	解/炉	
	C	C5	・比較的簡単な形態によるもの であれば成立性はあるが、複雑 にすると成立性は難しい	・新型燃料の開発 ・新型燃料の過渡挙動の把握	技 内	・燃料サイクルシステムに影 響有り ・高熱伝導燃料により通常運 転時の燃料温度が低く、出力 低下時の正のドップラー反応 度を低減
		D	・炭化物燃料 ・窒化物燃料 ・金属燃料	・燃料健全性 ・燃料物性	炉内解 炉一外	
		・金属燃料又は窒化物燃料	・FCAではMOX, Metal, Nitride (予定) が行 われている。出来れば大型炉体系ZPPR等で 実施したい。(ドライバ領域の効果をなく した燃料形態による効果を見るため)	解 内	・窒化ウランの場合、外国で 製造、使用の実績があるので 技術的成立性をBとした	
		窒化物燃料 金属燃料	局所事故(燃料熔融事故)時の安全評価	解 内		
		・燃料の変更は投資大故、製 造が容易で効果大の燃料形態 が打ち出せるかどうか依存。 ・形態依存だが、従来概念と大きく異なる ものであれば、燃料開発が必要となる他、 効果を期待する事故条件以外の状況でも問 題のないことの確認が必要。長期的開発と なる。 ・燃料の基礎的データ、照射データの蓄積		解 炉内	・有効性については判断根 拠十分ではない。 ・サイクルコストまで含め たR&Dコストを容認でき るかの判断が必要。	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(3)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
1-3. 従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	A 3	A 3	<ul style="list-style-type: none"> プラント型式に一部依存 多重性による高信頼度化には限界あり。従来型に対してどれだけの多様性を導入できるかがポイント。 	<ul style="list-style-type: none"> 信頼性評価 システムへの反映 大切な課題で実施すべきであるが、「先導的な研究課題」とはなりにくいであろう 最新技術に関する信頼度データベースの構築 共通原因故障の低減 機器の信頼性データ取得 共通要因、HF等の評価手法 崩壊熱除去系の運用方法(ダンパー、ベーンの運用法)に関する改良、人的要素の研究 冷却系からの放熱量評価 自然循環放熱量評価の精度向上 共通要因故障評価 実績に基づく設計改良 運転手順改訂等 	外 解 外 技 外、 解、 炉 解外 表 解 炉 技外 解 炉	<ul style="list-style-type: none"> 既往技術よりも向上していることを実証する 基盤的意味で重要 既存安全設備の信頼性は十分に高いレベルにあり、大幅に信頼性向上を図りかつ実証するのは困難。
	B 4	B 3				
	C 1	C 2				
		D				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(4)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
1-4. 鉛冷却材使用による安全向上(炉心核熱特性、漏洩対策軽減)	A 3	A	<ul style="list-style-type: none"> 妥当なポンプ動力 日本での適用を考えると耐震設計への対応の可否が成立性の重要なポイントとなる 効果は特に炉心設計に依存しない ポンプの開発 構造強度強化 低圧炉心設計 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心核特性 流動特性 機器開発 まずは概念評価をベースとした成立性の評価が必要 プラント概念の構築(炉心、冷却系、制御棒機構等) 材料共存性データベースの確立 炉心損傷事故時過渡挙動の把握 伝熱・流動・耐震等 鉛を駆動するポンプ開発 熱流データ取得 伝熱流動特性 事故シナリオの明確化 ポンプの特性向上 解析による核熱特性評価 冷却材への伝熱低下による燃料設計対応 重量増大に対する耐震/免震の考慮 基礎的データ(核、熱)の取得 	内 外 技 解 解 外 内 技 解 外 技 解 技	<ul style="list-style-type: none"> 経済性への影響あり メリット：漏洩対策軽減 2次系削除容易化 デメリット：伝熱性能低下 冷却材重量大による機器配管耐震構造の肥大化 溶融燃料に対する浮力の影響に差 有効性で効果は大きいと考えるが、鉛の腐食性等プラントの総合的安全性からは課題は大きいと思われる 漏洩に対しては他のNa燃焼抑制対策との比較が先ず必要 中性子計装
	B 5	B				
	C	C 7.5				
		D 0.5				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(5)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
1-5. ポンプ流量減少特性 の延長	A4.5 B3.5 C	A1 B7 C D	<ul style="list-style-type: none"> ・有効性は炉心熱設計に依存する 妥当なポンプ動力 ・効果は特に炉心設計に依存し ない ・ULOFにのみ効果あり ・これのみでULOF時OKを達 成するには数10秒オーダーの 時定数が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・熱過渡対策 ・機器開発 ・概念設計の中で有効性評価、ニーズに 対応して技術開発 ・要求する延長特性の明確化 ・構造健全性ととの両立性評価 ・熱過渡に対する機器の健全性評価の高度 化 ・耐震性 ・フライホイール(機械式ポンプ)等の試作 による流量減少特性データ取得と、実炉で の実証 ・熱過渡対策 (構造健全性評価) ・フライホイール等LOF時定数延長方法の 開発 ・通常スクラム時のサーマルショック対 策 	技 解 技 解 解 解、外 外 技炉 解 技 解 外 炉	<ul style="list-style-type: none"> ・熱過渡条件が厳しくなり、 設計成立領域が狭まる ・流量減少を延長させる方策 を実用化することが課題 ・画期的な安全性向上(例え ばATWS排除)には、非常に 大きな延長が必要であるが、 フライホイールの規模が非現実 的である ・他の効果との重ね合わせが 重要 ・他の受動的な安全特性と の組み合わせで効果大と なる。 ・自然循環崩壊熱除去の 場合は、初期の過冷却が 後期にて炉心温度の上昇 をまねく。

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(6)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-1. ナトリウムプレナム 付き炉心	A2 B6 C	A B7 C1 D	<ul style="list-style-type: none"> ・下部プレナム型燃料ビンに適 用 ・設計によっては炉上部に無駄 スペースをとることになる。成 果と経済性の評価が必要 ・炉心上部プレナム及び炉心側 部プレナム炉心 ・ガスプレナムは下に限 定。Naボンド燃料とは両立 しにくい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心構成最適化 ・燃料性能実証 ・炉心安全解析・実験 ・概念設計をベースとした効果評価 ・炉心損傷事故時過渡挙動の把握 ・臨界実験装置によるボイド反応度精度向 上 ・ボイド生成挙動の評価 ・核的には炉心及び周辺のナトリウム領域 のナトリウム反応度値の予測 ・熱的には安定沸騰除熱の可能性 ・特殊集合体の製作 ・臨界実験によるボイド反 度評価精度向上 ・CDA事象推移評価 ・解析中心 ・臨界集合体による詳細データ取得 ・Na昇温、沸騰拡大の流動試験と、それ による反応度挙動の評価 	解 内 外 解 外 内 解 外 外、解 解 炉 内 技 外 外 解 解 外 解 外	<ul style="list-style-type: none"> ・ナトリウム沸騰領域の拡 大挙動にボイド反応度は依 存 ・本案と1-2等と合わせて採 用することによりULOFに対 する受動的な安全性が強化さ れる ・早期にNa昇温、沸騰拡大 と核とを結合した解析を行 い有効性を評価すべき。 ・プレナム部のボイド化に 期待するならばボイド拡大 挙動を実験的に確認する必 要あり。(プレナム部のみ に拡大するかは疑問)

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(7)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-2. 自己作動制御機構 (SASS)	A 6 B 2 C	A B 8 C D	<ul style="list-style-type: none"> ・機器として信頼性が高くなれば効果大。受動的という原理だけでは不十分 ・集合体出口部形状、感温部形式等設計依存性がある。 ・既存のものにとられず、必要な時に速く確実に作動する機構の開発が必要。 ・従来型との多様性確保が必要 ・実験空間の確保 	<ul style="list-style-type: none"> ・長期間保持の実験(自己融着防止) ・SASS回りの状況の評価 ・信頼性の実証が必要な段階 ・機能確認、作動信頼性のデータベース拡充・炉内条件下での機能実証 ・実規模実験 ・実機での運用経験 ・出口温度等の設計条件が変化した場合の材料に応じた物性値の測定 ・制御棒落下時(多数本)共通原因故障排除のための挿入試験 ・実機での動作試験 ・誤作動防止対策 ・信頼性実証試験(実機を用いた適用研究を含む) ・作動原理、機構依存 ・機器の開発 ・多様性、高信頼度の達成、誤作動の防止が必要 ・経年劣化(照射による劣化) 	外 炉 外 (炉) 技、外 炉 外、技 技、解 外、炉 解 技 炉 技解 外 炉 (内)	<ul style="list-style-type: none"> ・実績を積むのが第1 ・実証炉向けに開発中 ・照射条件下での機能維持 ・SASSを実際に設置した場合のプラントに及ぼす影響(検査性、運転性等)についての総合的評価が必要 ・実効的な効果を期待するとした場合、相当の量のデータ蓄積が必要となる。 ・高速炉において炉停止の強化は安全性の向上に直結する。作動時に十分な負反応度が期待できかつ実証も可能なSASSは、効果の保証が容易ではない受動安全機構よりも有効であるとも考えられる。また、燃料選択に依存しない対策は研究テーマとして一般性あり。 ・一般に遅れ時間大。 ・ATWS時出力上昇抑制方策との組み合わせで有効性大

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(8)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-3. フローティング型 制御機構	A 4 B 4 C	A B 2 C 5 D 1	<ul style="list-style-type: none"> ・形式に特定されない。 ・流量減少事故時にのみ有効 ・従来型との多様性確保が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・信頼性の実証が必要な段階 ・機構概念の開発 ・機能確認、作動信頼性の確立 ・炉内条件下での機能実証 ・基本動作(液体吸取材部注入)試験 ・実機での動作試験 ・挿入反応度の周定のための解析評価 ・信頼性実証試験 ・作動原理、機構依存 ・機器の開発 ・多様性、高信頼度の達成、誤作動の防止が必要 	外 炉 外 炉 技 技、解 外、炉 外 技 技解 外 炉	<ul style="list-style-type: none"> ・SASSに比べ経済性劣る ・可動部を有する点でGEMに劣る ・運転性の評価を要する ・流量減少時に炉心部にリチウム等の液体中性子吸取材を注入し、反応度制御を行うシステムで、工業所有権(東芝)を有する。 ・流量急上昇時の飛び出し防止対策が必要 ・原理によっては特許の問題あり。 ・通常運転時の出力振動の原因となり得る。 ・作動機構のアイデアが最重要。

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(9)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-4. ガス膨張機構 (GEM)	A 3	A0.5	・小型炉	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計ベースでの成立性評価からスタート ・対象炉心に対する適用性検討 ・作動特性の確認 ・ポンプ運転異常時特性評価 ・臨界実験装置によるポイド反応度 ・信頼性実証試験 ・大型炉での設置位置、本数、反応度効果(輸送計算) ・低流量からの流量増加事故評価 	外 解/技 技、解 外、炉 解、炉 技、外 解 炉 技解 外	<ul style="list-style-type: none"> ・大型炉では必要本数大 ・米圏で小型炉用に開発中 ・炉心性能を介して経済性に影響 ・流量増加時正の反応度挿入の可能性有り ・SASSに比べ経済性は劣る ・運転性の評価を要する ・FFTF型GEMの大型炉への採用は非現実的 ・ポイド反応度が正の大型炉では逆に、定常時にポイドとし、ポンプ停止時にNaを流入させる機構ではどうか。反応度評価が必要。
	B4.5	B4.5	・機器として信頼性が高くなれば効果大。受動的という原理だけでは不十分			
	C0.5	C 3 D	・形式に特定されない。 ・小型炉心 ・大型炉では多数必要 ・流量減少事故時にのみ有効			

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(10)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-5. 炉心軸方向膨張(制御棒との相対膨張)	A 1	A 1	・金属燃料 ・MOX、窒化物燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心設計の中でこの効果を考慮 ・炉心軸方向膨張特性の把握と実証 ・実証炉条件のピン、集合体での膨張の実証 ・LOF時の収縮の有無 ・炉内試験により燃料ピン形態、燃焼状態、事故条件等に応じた膨張メカニズムを把握する ・解析コードでの検証により実機評価へ反映する ・実機使用環境下での実証試験 ・被覆管との相互作用 ・高燃焼度燃料における固体FP存在下での膨張挙動 ・予測精度向上が重要 	内 内 解 解/炉 炉、内 解 解炉内 炉 解 解 内	<ul style="list-style-type: none"> ・定量的な実証が難しい ・照射挙動等複雑な要素と組み合うので注意が必要。positiveな効果としてのみならず、negativeな効果としても現象把握は必要。 ・高熱伝導度燃料使用が前提 ・燃料膨張の伸び量は小さいため、制御棒駆動軸膨張に注目する方が効果的 ・設計上の工夫の余地が少ない。
	B 6	B2.5	・反応度効果としては十分了解できるが、これを「安全機構」として利用するのは難しいのでは			
	C 1	C4.5 D	・効果は特定の炉心設計に依存しない ・MOX燃料では事故時の燃料昇温一負反応度効果は事象進展の遅延に効くのみで炉停止には寄与しない。高熱伝導度燃料(定常時低濃)で有効側だが、反応度寄与は小			

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(11)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-6. 制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)	A 5	A	<ul style="list-style-type: none"> ・ 後備的な機構としては有効 ・ Na温度が上昇する型の事故で有効 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機器開発 ・ 技術開発がベース ・ 膨張促進機構の開発 ・ 駆動軸膨張特性の把握と実証 ・ 実機試験 ・ 実機での適用試験 (信頼性実証) ・ 機器開発 ・ 実機での実証実験過渡時の炉心応答特性評価 ・ 事故条件に応じた炉内熱流動、駆動軸への熱伝達、膨張実・験解析 ・ 応答速度の向上と誤作動防止のための高信頼度機構開発 ・ 照射による影響の確認 ・ フローガイドの開発 	<ul style="list-style-type: none"> 技、外 技、外 技 解外 外 外、技 技外 解 解 外 外 	<ul style="list-style-type: none"> ・ SASSとの組み合わせがよい ・ 膨張促進メカニズムの成否にかかっている ・ 機構によっては特許の問題あり。
	B 2	B 3				
	C	C 4				
		D				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(12)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-7. 炉心支持板の膨張	A 4	A 3	<ul style="list-style-type: none"> ・ 反応度効果としては十分了解できるが、これを「安全機構」として利用するのは難しいか ・ 入口温度上昇型の事故 (ULOHS等) で有効だが、即効的ではない。 ・ 即効的な膨張促進機構を考えるならば◎はC。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 予測手法の開発 ・ 概念の検討 ・ 炉心支持板膨張特性の把握 ・ 膨張特性と反応度変化量の相関性の評価法確立 ・ 実機でのデータ取得 ・ 大温度変化時のリニアリティ ・ 炉外過渡熱試験 (NaF) ・ 予測手法の整備 ・ 事故条件に応じた炉内、冷却系内熱流動 ・ 径方向膨張モード、下部プレナム内流況の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 解 解 解、外 炉、解 炉 解 解外 解外 解外 解外 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 炉心支持板の膨張は下部プレナム冷却材温度上昇を介するため、ATWS直後よりも長期炉停止特性に影響 ・ 整定時に向かって効果が大きいと考える ・ 絶対値は大きいが穏やかな効果であるので適用可能な事象が限定されることに注意が必要 ・ 支持板の損傷は影響大のため、その膨張促進機構の採用は望ましくない。 ・ 炉心湾曲がより効果的。 ・ 設計上の工夫の余地が少ない。
	B 3	B 2				
	C 1	C 3				
		D				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(13)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-8. 炉心集合体のフ ワ ーリング	A 3	A	・ free Poweringを提議 ・ 耐震をクリアしていること	・ 予測手法の開発 ・ 実験による確認	解 外	・ 集合体パッド位置、接触状 態(通常運転中)、炉心拘束 機構等に依存度大きい ・ FFTF試験データ ・ 英国製UKAEAが外湾曲実 験データを手し解析手法の 検証を行うのが最も重要ステ ップと思われる ・ 小型炉心を念頭において有 効性大 ・ 炉心拘束の必要性との兼 ね合いが微妙 ・ 緩い拘束機構は日本で は成立しにくい。
	B 5	B 2	・ 大事故に対しては有効かもし れないが、通常運転時の機能に マイナスとならない工夫が要	・ 炉心システム設計の中で考慮し、有効性を 評価	解/注	
	C	C 6	・ 炉心拘束の仕方に依存	・ 炉心集合体の径方向膨張、変位特性の把 握・膨張変位特性と反応度変化量の相関性の 評価法確立	外、解 炉、解 解外炉	
	D	D	・ 炉心拘束機構としてはフラン ス型のFree Standingよりは、日 米式のLimited Free Bow形式の 方が有利 ・ 炉心上部の拘束を緩める構 造。耐震とのかねあい要考 慮。	・ 核(照射)、材料(スエリング)、熱、メ カニズムと幅広い研究の統合が必要 ・ 炉外での炉心湾曲実験 ・ 多集合体群過渡熱実験(炉内or炉外) ・ FCAによる燃料移動時反応度実験 ・ 通常運転時並びに地震時の応答評価 (ルースコアの挙動把握) ・ 炉内熱流動解析 ・ 初期変形を考慮した上での過渡時変 形・相互作用挙動 ・ 燃料交換時の引抜き性 ・ 耐震性 ・ 予測手法確立がポイント	解外 解外 解外 解外	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(14)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-9. 炉心湾曲効果 (集合体、炉心)	A 5	A	・ 集合体パッド接触状況 ・ 炉心拘束方式との整合性	・ 予測手法の開発 ・ 実験による確認(模擬集合体を用いた湾曲 試験)	解 外	・ 集合体パッド位置、接触状 態(通常運転中)、炉心拘束 機構等に依存度大きい ・ 小型炉心を念頭において有 効性大 ・ positiveな効果としての みならずnegativeな効果と しても現象把握は必要とな る。 ・ 他の受動安全機構との 併用が必要 ・ 設計上の工夫の余地が ある(炉心拘束方法)
	B 3	B 2	・ 「安全機構」として利用する のは難しいであろう	・ 炉心設計の中で考慮し、この効果を評価	解	
	C	C 6	・ 炉心拘束の仕方に依存	・ 炉心集合体の径方向膨張、変位特性の把 握・膨張変位特性と反応度変化量の相関性の 評価法確立 ・ 核(照射)、材料(スエリング)、熱、メ カニズムと幅広い研究の統合が必要 ・ 実炉によるATWS試験 ・ 評価計算コードの検証と改良 ・ 集合体変形に係わる炉外試験 ・ 照射燃料集合体の塑性変形挙動評価 ・ 実炉を用いた特性試験	外、解 炉、解 解外炉	
	D	D	・ 炉心変形をある程度許容す る炉心拘束機構 ・ 応答は比較的速いが期待で きる負反応度量は大型炉では 小さくなる。	・ 炉内熱流動解析 ・ 初期変形を考慮した上での過渡時変 形・相互作用挙動 ・ 燃料交換時の引抜き性 ・ 耐震性 ・ 評価手法の確立と検証がポイント	解外 解外	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(15)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-10. 原子炉容器の膨張	A	A1	<ul style="list-style-type: none"> ・「安全機構」として利用するのは難しいであろう ・原子炉容器下部支持方式 ・炉容器及び炉心支持方式に対する依存性大 ・即効性はない。 ・炉容器膨張を負反応効果に変換する機構(下部支持等)開発がポイントとなる 	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心設計の中で考慮し、この効果を評価 ・原子炉容器の軸方向膨張特性の把握 ・実機による実証 ・温度上昇抑制対策 ・炉外過渡熱試験(Na中) ・予測手法の整備 ・炉内熱流動解析 ・機器開発 	解 解、炉 炉、解 技 解外 解外 技解	<ul style="list-style-type: none"> ・応答に時間がかかるのでATWSの直後よりも長期炉停止特性に影響 ・炉熱伝達機構方式に依存 ・安全性に対するマイナス効果 ・応答が緩やかなので適用可能な事象が限定されることに注意が必要 ・炉容器の熱過渡は、構造健全性の観点からの配慮の方を優先すべき。 ・出力抑制のための設計工夫よりも、起動時を含む非事故時の反応度への影響を把握しておくことが重要。
	B3	B4				
	C5	C2				
		D1				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(16)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-11. 完全自然循環による崩壊熱除去	A8	A	<ul style="list-style-type: none"> ・LMFBRでは原理的に成立性が大 ・ダンパー、ペーンの閉閉による起動を必要としないDHR ・FBRでは比較的成立し易い ・TRU添加燃料での崩壊熱レベル増加は配慮要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・1次系熱流動評価 ・熱移行挙動、流れ再配置 ・自己作動ダンパーの開発 ・炉心設計、プラント設計の中で考慮 ・自然循環除熱特性の実証 ・解析評価手法の確立 ・解析手法の高度化 ・冷却材流動形成に有効な機構の開発 ・冷却材流動形成の確認 ・除熱能力の評価 ・大型容器内の多次元流動の評価手法の整備 ・大型試験装置を用いた模擬実験 ・炉心/炉内/熱輸送系内熱流動解析 ・寿命中の想定回数が多くなると構造健全性(熱過渡)が厳しくなるため、高精度の評価手法が必要。 ・DBEでこれに期待するならば確証試験が必要。 	解 外 技 解/炉 外 解 技、解 外、炉 外 解 外 解 解外 炉	<ul style="list-style-type: none"> ・プラントシステム、崩壊熱除去系概念に依存 ・工業所有権(東芝)の問題あり。 ・空気冷却器内での固化によるPLOHS発生確率増大に注意する必要あり。
	B	B8				
	C	C				
		D				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(17)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
2-12. 原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)	A 4	A 1	・小型炉で効果的	・炉内自然循環挙動評価	解、外	<ul style="list-style-type: none"> ・小型炉では有効 ・大型炉では除熱量不足というのが一般的認識 ・アクシダントマネジメントとして、R/V、G/V間にNaを注入すると成立性大。
	B 3	B 6.5	・大事故に対しては有効、経済性を悪くしない工夫が必要	・炉心設計、プラント設計の中で考慮	解/炉	
	C 1	C 0.5	・プラント出力規模の制約を受ける(中小型炉に通ずる)	・自然循環除熱特性の実証 ・解析評価手法の確立	外 解	
	D	D	・中小型炉のみ ・大型炉については炉室冷却系 ・小型炉については崩壊熱除去系としての成立性が問われる	・自然循環試験 ・冷却促進機構(フィン、ハニカム構造等)の実証耐久試験	解、外 解外	
			・小型炉心	・実炉を用いた実証試験	解 知	
			・大型炉では③はC。除熱量増大のための工夫が必要 ・TRU添加燃料での崩壊熱レベル増加は配慮要。	・炉心/炉内熱流動解析 ・R/V、G/V間の熱輸送の促進 ・通常運転時の熱ロス低減	解 外	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(18)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-1. 人工的リードチャンネルの設置(部分損傷終息シナリオ)	A 2	A	・経済性は大幅に低下	・破損燃料流出挙動評価	解、内	<ul style="list-style-type: none"> ・最終的には可能な範囲で実炉規模での効果の実証が必要 ・特殊燃料開発が必要。安価な設計が打ち出せればよい。 ・燃料放出リードチャンネルはPA上は印象が悪い。 ・反応度低下を担保するための設計工夫として、リードチャンネルの短尺化。
	B 5	B 1	・大事故に対してはある程度有効。通常運転、小事故に対し悪影響が無いようにする必要が有る	・炉心設計、プラント設計の中で考慮	解/外	
	C 1	C 6.5	・リードチャンネルの設置位置とポイド反応度分布に配慮が必要	・リードチャンネル構造概念の開発 ・燃料溶融時機能実証 ・リードチャンネルの挙動	技、外 炉 解、内	
	D 0.5	D 0.5	・特殊燃料が必要	・解析による効果の把握 ・炉心設計との最適化の面での調和 ・リードチャンネル集合体の設計、試作、応答の確認 ・リードチャンネル構造の成立性検討 ・炉内模擬実験及び解析	技解炉 解技 内解	
			・多様な事故条件に有効となる設計・機構の開発 ・確実に部分損傷終息できることの立証(起因過程の緩和に有効でも遷移過程へ進むならば採用価値は低くなる)	技解 外内		

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果 (19)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-2. 軸ブランケットを含む 中空ペレットによる 炉内燃料移動・分散 (かつての米国の PINEX)	A 2	A	・TOP型事象に限定	・燃料移動挙動評価	解、内	SERAPH ・PINEXの他、PER/ TREAT試験でも燃料移動・ 分散が観測されている ・仕様適合する燃料体の 製作性の検討が不可避
	B 5	B 2	・燃料溶解事故評価上はメリットがあるかもしれない。「安全機能」とするには難しい	・炉心評価の中で考慮。これにクレジットを持たせるには立証がかなり大変であろう	解外内	
	C 1	C 6	・中空ペレット燃料	・中空ペレット燃料の開発 ・燃料溶解時の燃料移動、分散特性の把握 ・炉内試験と評価手法 ・中空ペレット照射挙動	技、炉 内、解 炉	
		D	・効果は特定の炉心設計に依存しない ・TOP型事象の緩和対策 ・TOP型で有効 ・中空ペレットならばMOXだが、中実燃料でも低融点燃料ならば可能 ・LOFでもCDAバースト緩和に有効	・様々な事故条件下、燃料燃焼条件下での炉内試験による移動・分散挙動の精度の良いデータの取得 ・解析によるメカニズムの解明と、実機評価への反映 ・中空の空孔径の適正化とそのための実証データの取得 ・CDA模擬炉内試験 ・TOP事故では沸騰開始以前に燃料溶解と反応度的に十分な移動とが生じることの確認	解外内 技解 内解 解内	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果 (20)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-3. 集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出 促進 機構)	A 5	A	・特定の集合体設計を要する。技術開発の負担が大。実現すれば効果はあるとは思いますが ・特殊な燃料集合体が必要	・機器開発 ・燃料排出挙動評価	技、外 内	SERAPH ・作動・排出に困難有り ・SASSとしての高信頼度化が困難かもしれないが、従来炉停止系との多様性確保はメリット ・特許出願中 (PNC)
	B 2	B 3		・SASS機構としての成立性の確認、信頼性評価が必要	解、外	
	C	C 3		・集合体内SASS機構の概念具体化と成立性評価 ・SASS機能確認試験 ・炉内試験と評価手法	技 炉、内	
		D 1		・マテリアルロケーション/反応度値値の予測精度の実証 (臨界実験等を含む) ・機器開発 ・炉内試験による実証 ・SASSとしては多様性、誤作動防止を含む高信頼性の機器開発が必要 (2-2と同様) ・燃料排出所要時間、可能量 ・必要装荷体数と炉心体積増大とのトレードオフ	技解外 技 内解 技解外 内	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(21)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-4. 吸収材上部設置型 集合 体での熔融燃料へ の 毒物混入	A 2	A	<p>増殖性能悪化</p> <p>CDA評価に対しては有効と思われるが、特殊な炉心設計、無駄スペース等が必要</p> <p>効果は特定の炉心設計に依存しない</p> <p>上部Naプレナム付炉心との整合性がよい。 SASSとしての機能はやや弱い</p>	<p>集合体開発 落下・混合挙動評価</p> <p>概念設計の中で有効性を評価すべき</p>	技、解 内、外 解	<p>SERAPH</p>
	B 4	B 1		<p>吸収材上部設置構造の開発 燃料熔融時の機能確認試験</p>	技 炉、内	<p>・作動・検出に困難有り</p>
	C 2	C 6 D 1		<p>通常運転時不作用の信頼性確認 事故時作用性の確認 熔融燃料と毒物の混入形態確認 解析による効果の把握</p> <p>機器開発 概念成立性評価 炉内試験による実証</p> <p>B4C反射体概念は既存。ルースパーツを出さない高信頼度の昇温時落下機構の開発がポイント。 熔融燃料への混入挙動（プール形成時の密度差による分離可能性）</p>	<p>内、解 +技 技外解</p> <p>技 外解 内解</p> <p>技解 外内</p>	<p>・混入の確実性について十分な検討が必要</p> <p>・全燃料集合体に吸収材が設置されるので、炉心熔融時の再臨界回避には有効。説得力あり。</p> <p>・特許出願中 (PNC)</p>

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(22)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-5. 軸ブランケット短縮 化による燃料炉外流 出促進	A 1	A	<p>CDAに対する有効性は理解できるが、立証は難しい</p> <p>軸ブランケットのない集合体の分散配置でも効果あり</p>	<p>燃料流出挙動評価</p> <p>炉心設計の中で一つの要素として考慮</p>	内	<p>SERAPH</p>
	B 6	B 3		<p>燃料炉外流出挙動の把握</p> <p>炉内試験と評価手法</p>	<p>炉、内 内、解</p>	<p>増殖性への影響有り</p>
	C 1	C 5 D		<p>実機事故条件に近い状態での炉外、炉内試験による効率の確認 解析によるメカニズム把握と実機評価への反映</p> <p>事象推移評価</p> <p>固化流出挙動の解析及び試験</p>	<p>外内解</p> <p>解外</p> <p>解外 内</p>	<p>軸ブランケット短縮化は全ての燃料集合体に必要ではない</p> <p>炉心外への排出は促進されるが、一方、事故後膨張過程での緩和効果は低減するので、総合的評価が不可欠</p> <p>増殖比低下 性能低下デメリットに対して、メリットが明確な違いとして見えない。</p>

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(23)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-6. 集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	A B5.5 C2.5	A B3 C4 D1	<ul style="list-style-type: none"> ・CDAに対する有効性は理解できるが、立証は難しい ・通常運転時、燃料交換時の影響 ・非均質（径方向）炉心の場合ある程度有効 ・細い炉心拘束機構が必要 ・ダクト剛性の低下を伴うす間隙の確保方法では炉心湾曲による負の反応度効果を弱める ・ダクトレス燃料ではどうか？ 	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心設計の中で一つの要素として考慮 ・集合体スペーサパッドの軸方向間隙確保概念の具体化 ・燃料炉外流出挙動の把握 ・パッドのIE耐性 ・流路バスの有効性 ・研究の必要性は低い ・ギャップでの燃料流出の確認 ・効果の有効性を実証する炉内試験評価 ・固化流出挙動の解析及び試験 	解 注 炉、内 解、外 外内解 外内解 技解 外内	<ul style="list-style-type: none"> ・周方向切欠きあるいは位置をずらしたパッド概念 ・燃料交換特性、集合体群挙動等に影響有り ・均質炉心では径方向遮蔽体/径方向ブランケット部でギャップ流出が期待できる ・細い炉心拘束機構による耐震上の問題

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(24)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-7. 制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出の実証(ダッシュポット削除等)	A2 B3.5 C2.5	A B2 C5 D1	<ul style="list-style-type: none"> ・効果は特定の炉心設計に依存しない 	<ul style="list-style-type: none"> ・先ず有効性の確認が必要であろう ・薄肉案内管構造概念の開発 ・燃料溶融時の流出挙動の把握 ・炉内試験と評価手法 ・案内管厚さと破損時期への影響 ・実機事故条件に近い状態での炉外・炉内試験による効果の確認 ・構造概念の開発 ・有効性の確認評価 ・溶融燃料アタックによる案内管破損、内部Naとの反応、流出挙動 ・案内管薄肉化よりもダッシュポットの配置、構造の工夫が効果的では、 ・流出先での再臨界にも留意。 	解、外 技 炉、内 内、外 外内解 技 外内解 技解 外内	<ul style="list-style-type: none"> ・解析では有効性が確認されている ・健全性確保に必要な案内管強度と競合しないことの確認 ・制御棒が作動すればATWSとはならない。制御棒の信頼性を多少でも損なう設計変更は論理矛盾であり、採用すべきでない。慎重に配慮すべき。

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(25)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-8. 燃料炉外流出促進構造 (高出力領域へのnon-fuel SA設置等)	A 3	A 1	・炉心特性を犠牲	・燃料流出挙動評価	解、内	・SERAPH ・炉心性能に対して影響有り ・全炉心事故対応の無駄スペースとなり、PA上も印象が悪い。計装用等他の利用法を考えると付加価値が出る。
	B 4	B 1	・特定の炉設計が必要	・概念設計をベースとして成立性、有効性を評価	解外	
	C 1	C 6 D	・炉心設計との最適化(経済性) ・効果は特定の炉心設計に依存しない ・ダクトレス燃料ではより有効(低濃Na流と燃料との仕切り層1枚は必要だが)	・燃料炉外流出促進構造の具体化 ・燃料溶融時の流出挙動の把握 ・炉内試験と評価手法 ・実機事故条件に近い状態での炉外・炉内試験による効果の確認 ・構造概念の成立性評価 ・燃料排出所要時間、可能量 ・必要装荷体数と炉心体積増大とのトレードオフ	技 炉、内 内、解 解外内 解外内 解外内 解外内	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(26)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-9. ナトリウムプレナム 付き 集合体での燃料流出 挙動	A 1	A	・TOP型事象に効果有り	・燃料流出挙動評価	外、内	・SERAPH
	B 5	B 1		・まず有効性の評価が必要	外/内	
	C 2	C 7 D	・炉心設計との最適化(経済性) ・効果は特定の炉心設計に依存しない	・ナトリウムプレナム付き集合体構造の具体化 ・燃料溶融時の流出挙動の把握 ・炉内試験と評価手法 ・実機事故条件に近い状態での炉外・炉内試験による効率の確認 ・解析によるメカニズム把握と実機評価への反映 ・事象推移評価 ・流出のみならず支持喪失による落下・正反応度効果も考慮する必要あり(落下可能性が高ければ①はC)	技 炉、内 内、解 解外内 解外内 解外内	

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(27)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
3-10. 冷却機能促進型コアキャッチャー設置(下面、冷却管等)	A 5 B 2 C 1	A B 6 C 2 D	<ul style="list-style-type: none"> CDA対策上は有効と思えるが、経済性上は負担が大きくなる 効果は特定の炉心設計に依存しない 	<ul style="list-style-type: none"> アプリベットの根・熱流動挙動評価(冷却性、臨界性) 概念設計ベースで有効性の評価 冷却機能促進構造の具体化 コアキャッチャーの機能の実証 コアキャッチャー周辺の流動挙動の確認 アプリ除熱性能の確認 機器構造開発 効果の実証 融体クエンチ挙動、アプリ冷却性、最終ヒートシンクまでの流路、流動等 大型炉の大量のインベントリ保持を保證できる規模、設計の研究 	外、内 解 技外、炉 解外 技外解 解外内	<ul style="list-style-type: none"> 経済性との兼ね合い PA上は重要 コアキャッチャーの概念、アイデアに依存 炉内または炉外のオプションあり。事象推移に対する防護ラインの設定と厚みを適正配分するため、他に施す安全対策との組み合わせを考慮し、設置位置、設計を選択 最終的な冷却性の確保は必要不可欠

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(28)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
4-1. ナトリウムの燃焼抑制対策	A 7 B 1 C	A 2 B 6 C D	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム燃焼抑制は一般的な要請 ナトリウム系機器収納室の雰囲気組成、気密性、漏洩ナトリウム堆積部形状、材質等に依存する。 	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウムの燃焼抑制対策の具体化 機能実証 新型ライナーの開発・実証 実機機器配置でのナトリウム漏洩時の圧力・温度応答評価 評価手法の高度化 対策依存(イナータ化、スプレイ抑制機構等) 	解、外 技 技外 技、外 技、解 外 解 技解 外	<ul style="list-style-type: none"> 対策の概念に依存

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(29)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
4.2. 水素の発生・燃焼抑制 対策	A7	A1	<ul style="list-style-type: none"> 常に要求される事項 格納施設形式に依存 	<ul style="list-style-type: none"> 水素の発生・燃焼抑制対策の具体化 機能実証 過酷事故時のマネージメント方針の検討と効果評価 <ul style="list-style-type: none"> ・スチール構造(代替)の効果 ・CV加圧時のベント対策 ・CV外部スプレイ冷却等 水素発生量の低減を目指した材料開発 ソースタームの観点からの挙動評価 対策依存(改良コンクリート、イナータ化、イグナイター) 	解、外 技 技 技、外 解、外 技 解外 技 解外	<ul style="list-style-type: none"> 対策の概念に依存 工業所有権の問題あり。(海外、国内、先行知の分野まで)
	B1	B6				
	C	C1				
		D				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果(30)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
4.3. 格納施設自体の合理的 強化 (減圧機構等を含む)	A5	A1	<ul style="list-style-type: none"> 特に大型炉設計上は重要な課題 	<ul style="list-style-type: none"> self-vent機構の開発 経済性との競合が大であり「合理的」な対応が必要 格納施設の合理的強化概念の具体化 機能実証 事故シナリオの検討(設計基準事象の明確化) 成立性評価 対策依存 	技解外 解、外 技 技、外 解 外解 技解外	<ul style="list-style-type: none"> 対策の概念に依存 結果として格納系のコンパクト化につながるようなものであればなお良い。
	B3	B7				
	C	C				
		D				

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果 (31)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
4.4. ソースタームの放出 移行 に関する低減機構	A 6 B 1 C	A B4.5 C2.5 D	・常に要求される開発項目 ・形式によらない	・ナトリウム中でのトラップ挙動 ・FPの化学形態 ・エアロゾル挙動評価 ・ソースタームの放出移行に関する低減機構 の特性把握 ・炉容器内での放出FPの移行量測定、評価 ・炉容器外での放出FPの移行量測定、評価 ・化学形態の効果確認 ・不揮発性FP, TRUの移行挙動評価 ・対策依存 (現象自体の持つ移行低減機構、 吸着物質の供給、環境の制御) ・発生からNa中への移行、移動については 燃料破損炉内試験から有用なデータ取得が 可能	解、内 技、外 外炉 技、外 解内外 外内解 技解 外内	・SERAPH ・機構の概念による ・炉容器内外でのFP移行特性を実機規模程度 の高い施設で測定し、解析コードの検証を行う ことが急務 ・炉心溶融事故まで含めたシナリオ検討が 必要

FBR実用化先導研究テーマに関するアンケート結果 (新規)

研究テーマ	有効性	技術的 成立性	成立条件	研究内容	研究 手段	備 考
1. 制御棒引き抜き速度の 原理的制限機構	A	B		・制御棒引き抜き速度の原理的制限機構	技	・UTOP緩和対策として引き抜き速度を原理的に制限する引き抜き機構とする ・負荷追従性に影響
2. 燃料ピン束スネーク ダンス			・グリッド型燃料で観測されている 原理的にはスパイラルワイヤ 型でも発生する可能性有り	・炉外 (Na中) 試験 ・計算コードの開発	外解	・EBR-II炉、大径燃料バンドルの被覆管ウエアー発生及びピン接触破損の原因であった スパイラル型燃料での検討をしておく必要がある
3. 燃料線出力の低下	B	A	・低熱伝導度燃料でULOF時の ドップラー等正反応度効果 寄与低減に有効 ・経済性低下	・ATWS時燃料健全性確保に必要な減出力 ・定常時、過渡時燃料温度の評価精度向上 ・経済性低下とのトレードオフ	解炉	・安全性向上のための極めて 安易な方法であるが、議論に際して参照されるべき 一つの解として挙げておく。

付録－3 FBR安全研究専門委員会報告用OHP集

第190回FBR安全研究専門委員会

1993.7.22
本社役員大会議室

FBR安全性試験炉 (SERAPH) 計画

実用化先導研究テーマの検討

SERAPH技術検討T/F 必要性検討T/F

安全工学部高速炉安全工学室

丹羽 元

目 次

1. 序
2. アンケート調査の方法と結果
3. 分析と評価
4. 結論 -SERAPHに期待される役割-

1. 序

検討の内容

- 実用化時代のFBRで採用される可能性のある種々の安全性向上方策、設計オプションに関する研究テーマに関して、事務局、委員からの提案を含めてそれらの有効性、技術的成立性などに関して小委員会委員に対してアンケート調査を実施。
- SERAPHを含む長期的安全研究の目標検討とリスク低減の観点からの分析
- 上記研究テーマに対するリスク低減の観点からの再評価
- 上記研究テーマに関して、新規の炉による炉内試験、実炉試験の必要性について検討を行い、以上に基づいて新規テーマをSERAPHに期待される役割として抽出した。

2. アンケート調査の方法と結果

—調査対象 31 件の説明 → 表 1、図 1

—調査項目

有効性、技術的成立性、成立条件、研究内容、研究手段、自由記述

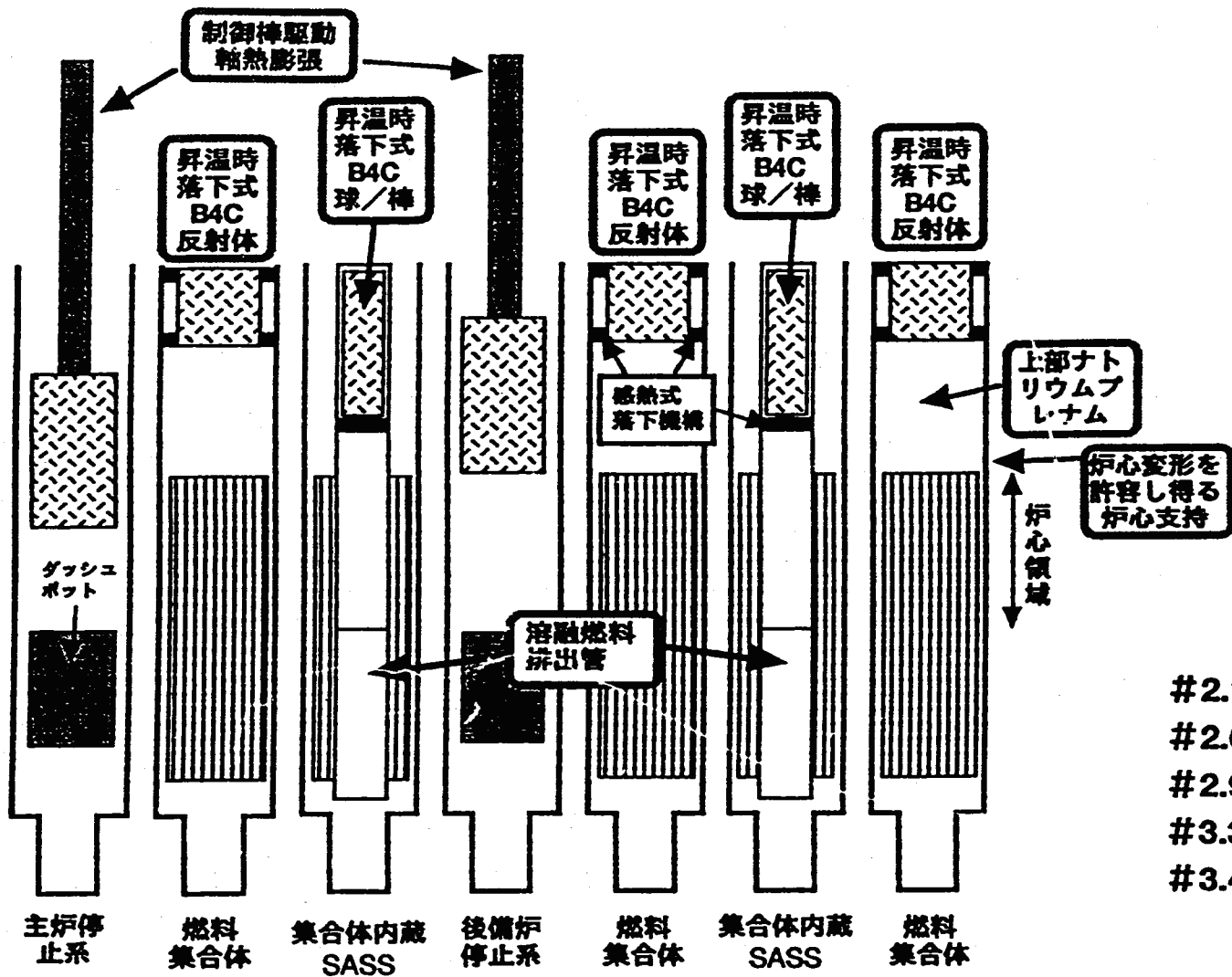
—調査結果 → 表 2

- 炉心損傷防止、格納系影響緩和方策の有効性に関する点が高く、炉心損傷影響緩和方策の点が低い。一般的安全向上方策はテーマ依存で分散。
- 炉心損傷影響緩和方策でも、集合体内SASS (#3-3) やコアキャッチャー (#3-10) のような、防止、格納系緩和に近いテーマの点が高い。（「止める、冷やす」に直結するテーマ）
- 炉心損傷影響緩和方策の、燃料流出や毒物混入のような溶融炉心に関する影響緩和対策の得点が低い。（「止める、冷やす」に直結しない、純粹な緩和対策）

表1 高速炉に対する安全水準向上方策

ID #	研究テーマ	備考
1.1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制	
1.2	燃料形態による核特性に係わる安全向上	
1.3	従来型炉停止系／崩壊熱除去系の信頼性向上	
1.4	鉛冷却材使用による安全向上	
1.5	ポンプ流量減少特性の延長	
2.1	ナトリウムプレナム付き炉心	
2.2	自己作動型制御機構（SASS）：キュリー一点式	
2.3	フローティング型制御機構	
2.4	ガス膨張機構（GEM）	
2.5	炉心軸方向膨張（制御棒との相対膨張）	
2.6	制御棒駆動軸の膨張（膨張促進機構設置を含む）	
2.7	炉心支持板の膨張（既存の効果）	
2.8	炉心集合体のフラワーリング	
2.9	炉心湾曲効果（集合体、炉心）	
2.10	原子炉容器の膨張（既存の効果）	
2.11	完全自然循環による崩壊熱除去	
2.12	原子炉容器壁補助冷却系（RVACS）	
3.1	人工的リードチャンネルの設置	
3.2	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	
3.3	集合体内SASS機構（炉停止＋燃料排出促進機構）	新規
3.4	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	新規
3.5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	
3.6	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保	
3.7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損／燃料流出	
3.8	燃料炉外流出促進構造（non-fuel集合体）	
3.9	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	
3.10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	
4-1	ナトリウムの燃焼抑制対策	
4-2	水素の発生・燃焼抑制策	
4-3	格納施設自体の合理的強化（減圧機構等）	
4-4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	

安全機構多層化炉心の概念

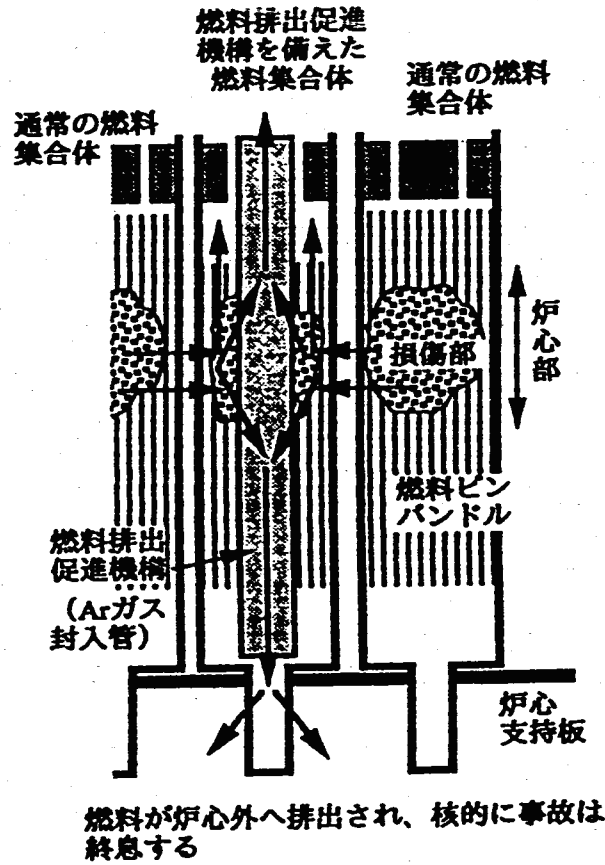


- #2.1 ナトリウムプレナム付炉心
- #2.6 制御棒駆動軸熱膨張
- #2.9 炉心湾曲効果
- #3.3 集合体内SASS機構
- #3.4 吸収体上部設置型集合体

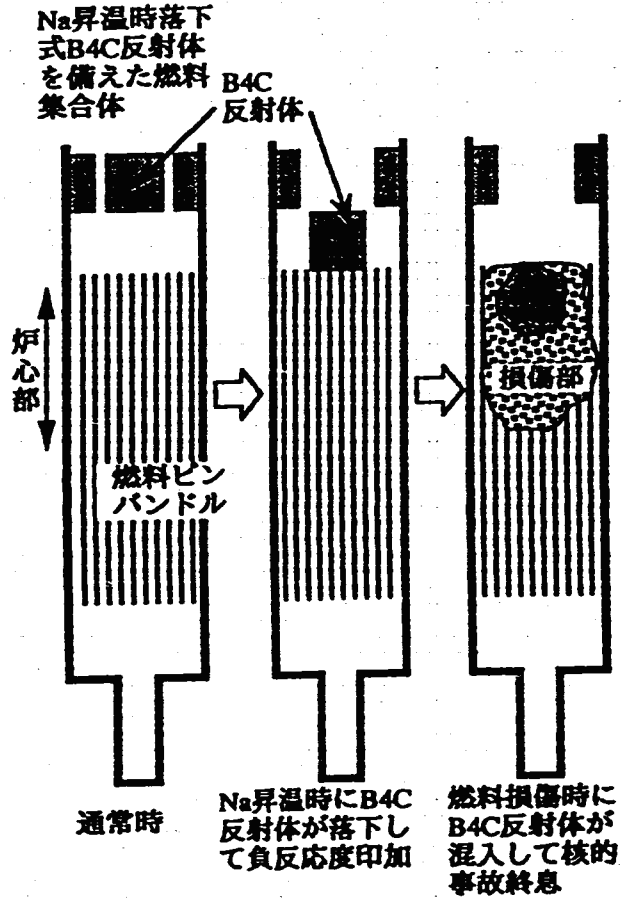
図1 (1) 安全性向上方策の例

炉心損傷事故の影響緩和方策の例

炉心からの燃料排出による負の反応度効果
→ 損傷集合体からの燃料排出挙動評価



炉心への核的毒物混入による負の反応度効果
→ 冷却材昇温時の核的毒物質混入挙動評価

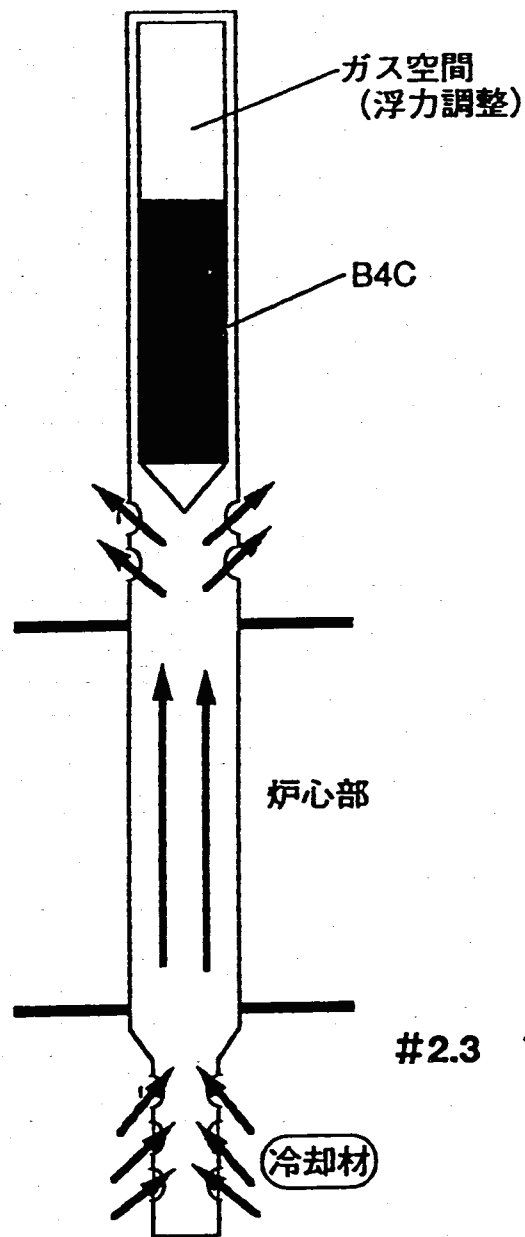


#3.3 集合体内SASS機構

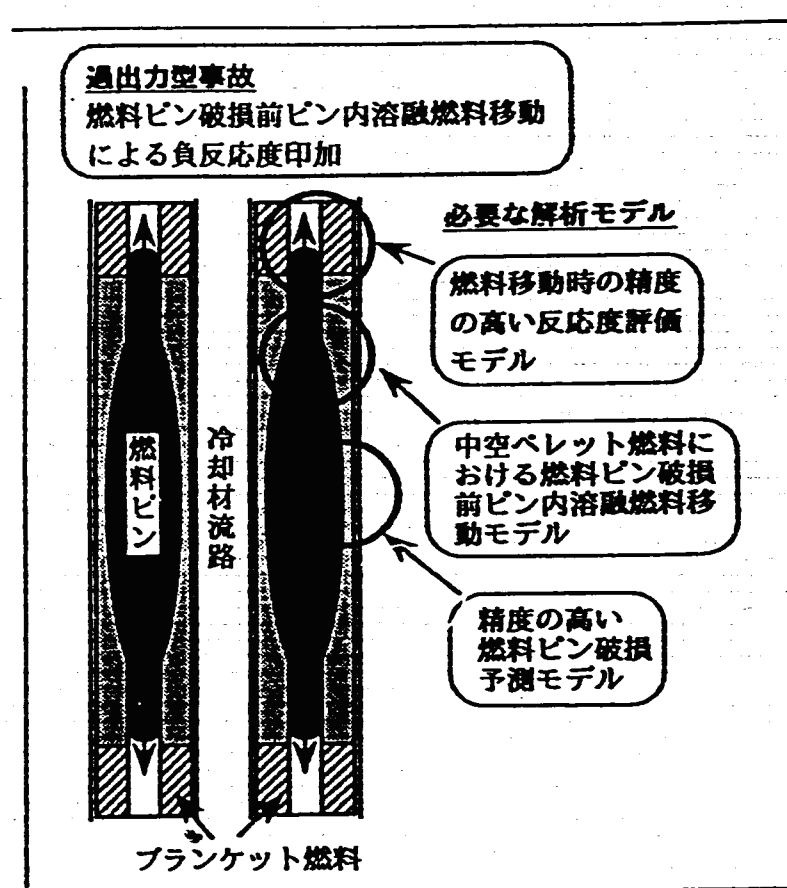
#3.8 燃料炉外流出促進機構

#3.4 吸収体上部設置型集合体

図1 (2) 安全性向上方策の例



#2.3 フローティング型SASS



#3.2 中空ペレットによるピン内溶融燃料移動・分散

図1 (3) 安全性向上方策の例

表2 アンケート結果の集計表 (得点順)

ID	研究テーマ	有効性			成立性				炉内 試験	実炉 試験	有効性 順位
		A	B	C	A	B	C	D			
2-11	完全自然循環による崩壊熱除去	8.				8.				○	1
2-2	自己作動型制御機構 (SASS)	6.	2.			8.			(○)	○	4
1-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上	5.5	2.5			3.	5.		○	○	6
2-9	炉心湾曲効果 (集合体、炉心)	5.	3.			2.	6.			○	7
2-6	制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)	5.	2.			3.	4.			○	9
3-3	集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)	5.	2.			3.	3.	1.	○	○	10
3-10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	5.	2.	1.		6.	2.		○	○	11
1-5	ポンプ流量減少特性の延長	4.5	3.5		1.	7.				○	12
2-3	フローティング型制御機構	4.	4.			2.	5.	1.		○	13
2-7	炉心支持板の膨張	4.	3.	1.	3.	2.	3.			○	14
2-12	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)	4.	3.	1.	1.	6.5	0.5			○	15
1-4	鉛冷却材使用による安全向上	3.	5.				7.5	0.5	○	○	16
2-8	炉心集合体のフラワーリング	3.	5.			2.	6.			○	17
2-4	ガス膨張機構 (GEM)	3.	4.5	0.5	0.5	4.5	3.			○	18
1-1	炉心形状設計によるポイド反応度抑制	3.	4.	1.	1.	7.			○	○	19
1-3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	3.	4.	1.	3.	3.	2.			○	20
3-3	燃料炉外流出促進構造	3.	4.	1.	1.	1.	6.		○	○	21
2-1	ナトリウムプレナム付き炉心	2.	6.			7.	1.		○	○	22
3-1	人工的リードチャンネルの設置	2.	5.	1.		1.	6.5	0.5	○	○	23
3-2	中空ペレットによるピン内燃料移動・分散	2.	5.	1.		2.	6.		○	○	24
3-4	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	2.	4.	2.		1.	6.	1.	○	○	25
3-7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出の実証 (ダッシュポットの削除等)	2.	3.5	2.5		2.	5.	1.	○	○	26
2-5	炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)	1.	6.	1.	1.	2.5	4.5		○	○	27
3-5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	1.	6.	1.		3.	5.		○	○	28
3-9	ナトリウムプレナム付き集合体での燃料流出挙動	1.	5.	2.		1.	7.		○	○	29
3-6	集合体スペーサパッドの軸方向間隙の確保		5.5	2.5		3.	4.	1.	○	○	30
2-10	原子炉容器の膨張		3.	5.	1.	4.	2.	1.		○	31
4-1	ナトリウムの燃焼抑制対策	7.	1.		2.	6.					2
4-2	水素の発生・燃焼抑制策	7.	1.		1.	6.	1.				3
4-3	格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)	5.	3.		1.	7.					8
4-4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	6.	1.			4.5	2.5		○	○	5

議論

- 提示された項目には防止効果（発生頻度の低減）を狙うもの、緩和効果（影響の低減）を狙うものがあるため、包括的な指標としてリスク低減を選び、これに対する寄与度で再評価を行うべきである。
- アンケートの項目には設計依存性のあるもの、一般性のあるもの、有効となる深層防護のレベルが異なるもの、1つの項目で複数の分類に現れるものなどが混在しているので、カテゴリ化を行って再整理をおこなうべきである。

3. 分析と評価

→ 図2 高速炉における各種安全水準向上方策の位置付け

- 1) 炉心損傷防止方策の強化によるCDA発生頻度の低減（確率論）と、CDA発生時の影響緩和方策の強化による現象論に基づく影響上限値の抑制（決定論）とによって、リスク低減は達成される。
- 2) 特に溶融炉心プールの再臨界に対する影響緩和方策がその有効性を実験的に検証した上で導入できれば、安全水準の向上に極めて有効である。

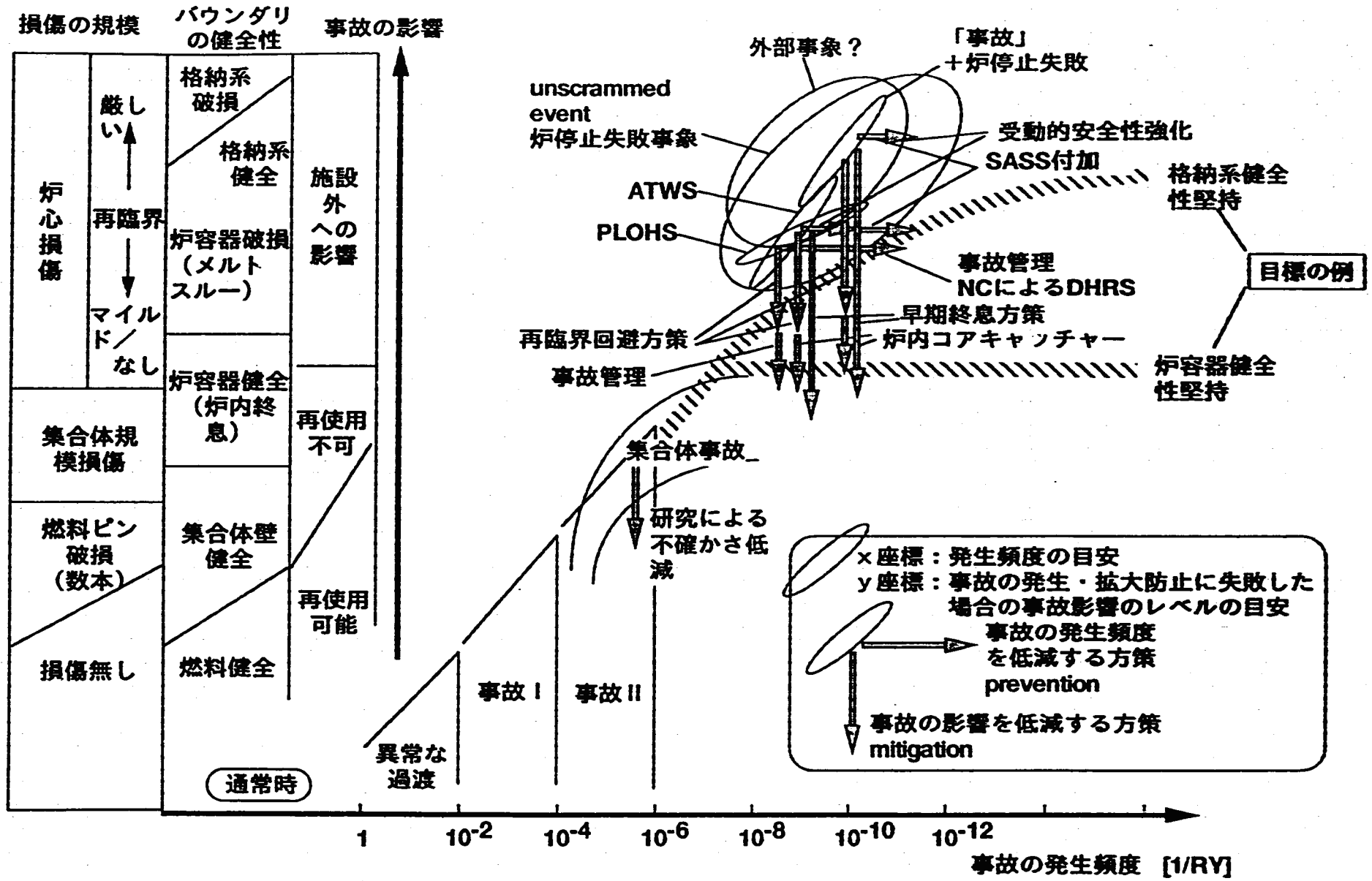


図2 高速炉における各種安全水準向上方策の位置付け

表3 (その1) 研究テーマの分類 (対象炉型別)

	Na冷却MOX大型炉にのみ有効	Na冷却MOX大型以外の炉型にのみ有効			
		メタル	MN, MC	小型炉	その他
異常発生防止 一般的な安全性向上策		金属燃料±	MN, MC±	ボイド反応度低減	鉛冷却
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>共通 従来型RSS, 扁平化によるボイド反応度低減 DHR強化</p> <p>ダクトレス TRU添加燃料* 集合体±</p> </div>					
炉心損傷事故発生・拡大防止		金属燃料±	MN, MC±	GEM LOP RVACS PLOHS	鉛冷却
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>共通 Naプレナム付, SASS, 内蔵SASS, 落下型反射体, 浮遊型SASS LOP, 炉心軸膨張, CRD伸び, 支持板膨張, フラワリング, 炉心湾曲, 炉容器膨張 LOF延長 完全NC PLOHS</p> </div>					
炉心損傷事故影響緩和 (炉容器内)		ピン内燃料移動 ^{TOP}	他の炉内影響緩和は全て燃料排出	金属燃料± ピン内燃料移動 ^{TOP}	MN, MC± 毒物混入
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>共通 人工的リードチャンネル, 内蔵SASS, 落下型反射体, 短尺軸ブラ流出, 集合体間ギャップ流出, CRDから排出, 流出促進構造, Naプレナム付での流出, コアキャッチャー</p> </div>					
炉心損傷事故影響緩和 (格納系内)			冷却		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>共通 Na燃焼抑制, 水素発生燃焼抑制, 格納強化, ソースターム移行低減</p> </div>					

ゴシック：装置、燃料の開発を伴うもの

*：将来炉にて採用の方向と考えられる設計オプション

±：効果不明故、見極め必要

表3 (その2) 研究テーマの分類 (事故カテゴリ別)

	集合体事故	PLOHS 崩壊熱除熱喪失型	ULOF 流量減少型	ULOHS 入口温度上昇型	UTOP 反応度投入型
異常発生防止 一般的な安全性 向上策	燃料健全性 向上	従来型DHR 信頼性向上	共通 従来型RSS信 頼性向上	新型燃料± ボイド反応度低減	燃料健全性 向上 鉛冷却
炉心損傷事故発生 ・拡大防止	窒化物燃料 金属燃料 鉛冷却 ダクトレス 集合体±	RVACS 完全NC 事故管理	GEM LOF延長 浮遊型SASS 共通 Naプレナム付、SASS、内蔵SASS、落下型反射体、 炉心軸膨張、CRD伸び、フラワリング、炉心湾曲±、 炉容器膨張 新型燃料± 鉛冷却	支持板膨張	
炉心損傷事故影響緩和 (炉容器内)		内蔵SASS 落下型反射体	共通 人工的リードチャネル、内蔵SASS、落下型反射体、 短尺軸ブラ流出、集合体間ギャップ流出、 CRDから排出、流出促進構造、Naプレナム付での流 出、コアキャッチャー 新型燃料±		ピン内燃料移動
炉心損傷事故影響緩和 (格納系内)	共通 Na燃焼抑制、水素発生燃焼抑制、格納強化、ソースターム移行低減				

ゴシック：装
置、燃料の開発
を伴うもの

*：将来炉にて採
用の方向と考え
られる設計オプ
ション

±：効果不明故、
見極め必要
下線：非安全側
効果あり

表3 研究テーマの分類（対象炉型別、事故カテゴリ別）

- 1) 起因事象が限定されない方策はリスク低減への寄与が大きい。
- 2) 炉型に依存しない方策は、研究テーマとしての一般性がある。（有効性の大小は有り得るので要注意）
- 3) 有効性の実証可能性の高い方策
- 4) 従来の方策に対して多様性のある方策
- 5) 他への悪影響の小さい方策従来の方策に対して多様性のある方策
- 6) 防止方策として有効でも、炉心損傷時の耐性が不明である方策（新型燃料など）については、見極めが必要
- 7) 安全上の目標を達成させ得る方策は、量的に加えて質的な有効性も高い。

再評価

— 上記検討結果を踏まえて再評価 → 表5

評価方法

- ①発生・拡大防止効果：
 - a. 事故発生・拡大防止対応策の質的变化
 - b. 事故発生・拡大防止効果の量的変化
 - c. 有効となる事象の範囲

- ②影響緩和効果：
 - a. 影響緩和効果の大きさ
 - b. 有効となる事象の範囲

- ③テーマの一般性：炉や燃料設計に対する一般性、汎用性は有るか

- ④テーマの重要性：従来は十分な評価がなされていなかったが、本来、精度良い評価が必要か

- ⑤技術的成立性：
 - a. 開発に必要なリソース等
 - b. プラントや燃料サイクルへの影響
 - c. 有効性実証の可能性

- ⑥新規炉での実炉／炉内試験の必要性：

表5 リスク低減の観点による再評価(得点順)

ID #	研究テーマ	防止効果				緩和効果			一般性 /重要性	技術的成立性			計	新規炉試験 必要性
		多様性	効果	範囲	計	効果	範囲	計		開発 コスト	他への 悪影響	実証 可能性		
		a	b	c		a	b							
3.3	集合体内SASS機構(炉停止+燃料排出促進機構)	2	2	2	6	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大
3.4	吸収材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	2	1	2	5	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大
2.20	制御棒膨張+Naブレナム付+SASS	2	2	2	6	1	2	3	有/大	1	1	1	3	中
1.1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:小型炉心	1	1	2	4	1	2	3	無/小	2	1	2	5	中
2.1	ナトリウムブレナム付き炉心	1	1	2	4	1	2	3	有/中	1	1	1	3	小
3.9	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	1	1	2	4	1	2	3	有/大	2	1	2	5	大
3.7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出	0	0	0	0	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大
3.8	燃料炉外流出促進構造(non-fuel集合体)	0	0	0	0	2	2	4	有/大	2	1	2	5	大
3.10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	0	0	0	0	2	2	4	有/大	1	1	2	4	中
1.1-2	炉心形状設計によるボイド反応度抑制:扁平炉心	1	1	2	4	0	1	1	無/小	1	1	1	3	小
2.2	自己作動型制御機構(SASS):キュリー点式	1	2	2	5	0	0	0	有/大	1	2	1	4	中
2.3	フローティング型制御機構	2	2	1	5	0	0	0	有/大	1	2	2	5	中
2.4-2	ガス膨張機構(GEM):小型炉への適用	2	2	1	5	0	0	0	無/小	1	1	2	4	大
2.5	炉心軸方向膨張(制御棒との相対膨張)	1	0	1	2	0	2	2	有/中	2	2	0	4	中
2.12-2	原子炉容器壁補助冷却系(RVACS):小型炉	2	2	1	5	0	0	0	無/大	1	2	1	4	大
3.2	中空ベレットによるピン内燃料移動・分散	0	1	1	2	1	1	2	無/大	2	2	2	6	中
3.1	人工的リードチャンネルの設置	0	0	0	0	1	2	3	有/中	2	1	2	5	大
3.5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	0	0	0	0	1	2	3	有/大	2	1	2	5	大
3.6	集合体スペースバッドの軸方向間隙の確保	0	0	0	0	1	2	3	有/大	2	2	2	6	中
1.4	鉛冷却材使用による安全向上	1	1	2	4	0	0	0	無/中	1	0	1	2	大
2.8	炉心集合体のフラワーリング	1	1	2	4	0	0	0	有/小	1	0	1	2	大
2.9	炉心湾曲効果(集合体、炉心)	1	1	2	4	0	0	0	有/大	1	2	1	4	大
1.2-1	燃料形態による核特性に係わる安全向上:金属燃料	1	1	1	3	0	0	0	無/中	1	1	1	3	大
1.2-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上:窒化物燃料	1	1	1	3	0	0	0	無/中	1	2	1	4	大
1.5-2	ポンプ流量減少特性の延長:~50秒以上	1	1	1	3	0	0	0	有/小	0	0	1	1	小
2.4-1	ガス膨張機構(GEM):大型炉への適用	2	0	1	3	0	0	0	無/中	1	1	2	4	大
2.6	制御棒駆動軸の膨張(膨張促進機構設置を含む)	0	1	2	3	0	0	0	有/大	1	2	1	4	中
2.7	炉心支持板の膨張(既存の効果)	1	1	1	3	0	0	0	有/大	2	2	1	5	大
2.11	完全自然循環による崩壊熱除去	1	1	1	3	0	0	0	有/大	1	1	1	3	中
2.12-1	原子炉容器壁補助冷却系(RVACS):大型炉	2	0	1	3	0	0	0	無/小	0	0	0	0	大
1.3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	0	0	2	2	0	0	0	有/小	2	2	2	6	小
1.5-1	ポンプ流量減少特性の延長:~10秒	0	1	1	2	0	0	0	有/中	1	1	1	3	小
1.6	ダクトレス炉心(対局所事故)	1	1	0	2	0	0	0	有/大	1	2	1	4	大
2.10	原子炉容器の膨張(既存の効果)	1	0	1	2	0	0	0	有/小	2	2	0	4	中
1.7	TRU添加燃料炉心	0	0	0	0	0	0	0	有/大	1	2	0	3	大

評価結果の分析

防止方策の特徴

- 単独での効果は不十分であり、他との組み合わせで初めて決定的に有効となるものが多い
- 即効的な方策は適用可能な事故事象が限定されている、逆に限定されない方策は即効的でない

緩和方策の特徴

- 炉心損傷に至ったとの前提で有効となる方策は起因事象への依存性が小さい
- 単一で有効となるような方策が多い、
- 効果については比較的定量的に良く判っていて、もう一步で再臨界回避に足る燃料排出量が得られると判っているものについてその効果を強調する方策を提案している（R&Dの成果）

コストと実証性について

ここで提示された方策に限ってみれば、緩和方策の方が、開発コストが低く、実証の可能性が高い。緩和方策のコストの低さは、従来の炉心、燃料設計を大きく変えることなく、炉心損傷事故時に燃料の炉心外流出を促進する工夫を施したものが多くることによる。実証可能性の高さは、従来から実施されてきている炉心崩壊事故の研究を進めることが、新たに提案された緩和方策の立証にもつながるとの判断による。

表1 (2)

アンケート結果		再評価結果
ID	研究テーマ	ID# 研究テーマ
2-11	完全自然循環による崩壊熱除去	3.3 集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)
2-2	自己作動型制御機構 (SASS)	3.4 吸取材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入
1-2	燃料形態による核特性に係わる安全向上	2.20 制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)
2-9	炉心湾曲効果 (集合体、炉心)	1.1-1 炉心形状設計によるボイド反応度抑制: 小型炉心
2-6	制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)	2.1 ナトリウムブレナム付き炉心
3-3	集合体内SASS機構 (炉停止+燃料排出促進機構)	3.9 ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動
3-10	冷却機能促進型コアキャッチャー設置	3.7 制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出
1-5	ポンプ流量減少特性の延長	3.8 燃料炉外流出促進構造 (non-fuel集合体)
2-3	フローティング型制御機構	3.10 冷却機能促進型コアキャッチャー設置
2-7	炉心支持板の膨張	1.1-2 炉心形状設計によるボイド反応度抑制: 扁平炉心
2-12	原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS)	2.2 自己作動型制御機構 (SASS): キュリー点式
1-4	鉛冷却材使用による安全向上	2.3 フローティング型制御機構
2-8	炉心集合体のフラワーリング	2.4-2 ガス膨張機構 (GEM): 小型炉への適用
2-4	ガス膨張機構 (GEM)	2.5 炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)
1-1	炉心形状設計によるボイド反応度抑制	2.12-2 原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS): 小型炉
1-3	従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上	3.2 中空ベレットによるピン内燃料移動・分散
3-8	燃料炉外流出促進構造	3.1 人工的リードチャンネルの設置
2-1	ナトリウムブレナム付き炉心	3.5 軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進
3-1	人工的リードチャンネルの設置	3.6 集合体スベサパッドの軸方向間隙の確保
3-2	中空ベレットによるピン内燃料移動・分散	1.4 鉛冷却材使用による安全向上
3-4	吸取材上部設置型集合体での溶融燃料への毒物混入	2.8 炉心集合体のフラワーリング
3-7	制御棒案内管の薄肉化等による早期破損/燃料流出の実証	2.9 炉心湾曲効果 (集合体、炉心)
2-5	炉心軸方向膨張 (制御棒との相対膨張)	1.2-1 燃料形態による核特性に係わる安全向上: 金属燃料
3-5	軸ブランケット短縮化による燃料炉外流出促進	1.2-2 燃料形態による核特性に係わる安全向上: 窒化物燃料
3-9	ナトリウムブレナム付き集合体での燃料流出挙動	1.5-2 ポンプ流量減少特性の延長: ~50秒以上
3-6	集合体スベサパッドの軸方向間隙の確保	2.4-1 ガス膨張機構 (GEM): 大型炉への適用
2-10	原子炉容器の膨張	2.6 制御棒駆動軸の膨張 (膨張促進機構設置を含む)
4-1	ナトリウムの燃焼抑制対策	2.7 炉心支持板の膨張 (既存の効果)
4-2	水素の発生・燃焼抑制策	2.11 完全自然循環による崩壊熱除去
4-3	格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)	2.12-1 原子炉容器壁補助冷却系 (RVACS): 大型炉
4-4	ソースタームの放出移行に関する低減機構	1.3 従来型炉停止系/崩壊熱除去系の信頼性向上
		1.5-1 ポンプ流量減少特性の延長: ~10秒
		1.6 ダクトレス炉心 (対局所事故)
		2.10 原子炉容器の膨張 (既存の効果)
		1.7 TRU添加燃料炉心
		4.1 ナトリウムの燃焼抑制対策
		4.2 水素の発生・燃焼抑制策
		4.3 格納施設自体の合理的強化 (減圧機構等)
		4.4 ソースタームの放出移行に関する低減機構

図 アンケート結果と再評価結果との比較

4. 結論 —SERAPHに期待される役割の提示—

以上の検討から、SERAPHに期待される役割は以下の2つにまとめられた。

(1) 炉心損傷の発生防止方策の実験的検証

初期のアンケート結果において防止方策の得点が高かったことに基づく。特に高得点であったものは、完全自然循環による崩壊熱除去、SASS、燃料形態による核特性に係わる安全向上、炉心湾曲効果、などである。

(2) 炉心損傷の影響緩和方策の実験的検証

検討の結果、炉心損傷に至った場合の事故影響のポテンシャル自体を低減できるような有効な緩和方策が実験的に実証された上で導入されれば、決定論的にFBRの安全性を確認できることが認識された。また、これを意図した緩和方策の候補も提案されている。提案された方策によって真に再臨界問題が決定論的に解決できるか否かは現時点では確言できないが、このようなアプローチの価値は高いと認められる。今後も新たな緩和方策が提案されてくることを期待しつつ、その実験的検証の成果がSERAPHに期待される。

SERAPHに期待する試験テーマ (役割は図5に示す)

— 溶融燃料排出を促進する方策に関する研究

排出経路がNaに満たされている場合、気相雰囲気の場合での燃料侵入までの所要時間と排出速度の差異。水力等価直径の影響。ピン束上部構造の影響。

— 核的毒物質の混入に関する研究

B4Cなどの中性子吸収材、ブランケット燃料も含む。混入方式（落下方式）。

— クエンチを促進する経路、構造（炉外試験が主）

コアキャッチャーの設計研究

— 中空ペレット内での溶融燃料移動挙動研究

— 新型燃料の過渡挙動、破損後挙動に関する研究

金属燃料、窒化物燃料、MA添加燃料

— ダクトレス集合体での局所事故挙動研究

— 鉛冷却材の研究

燃料の定常、過渡挙動、破損後挙動

安全性の
レベル

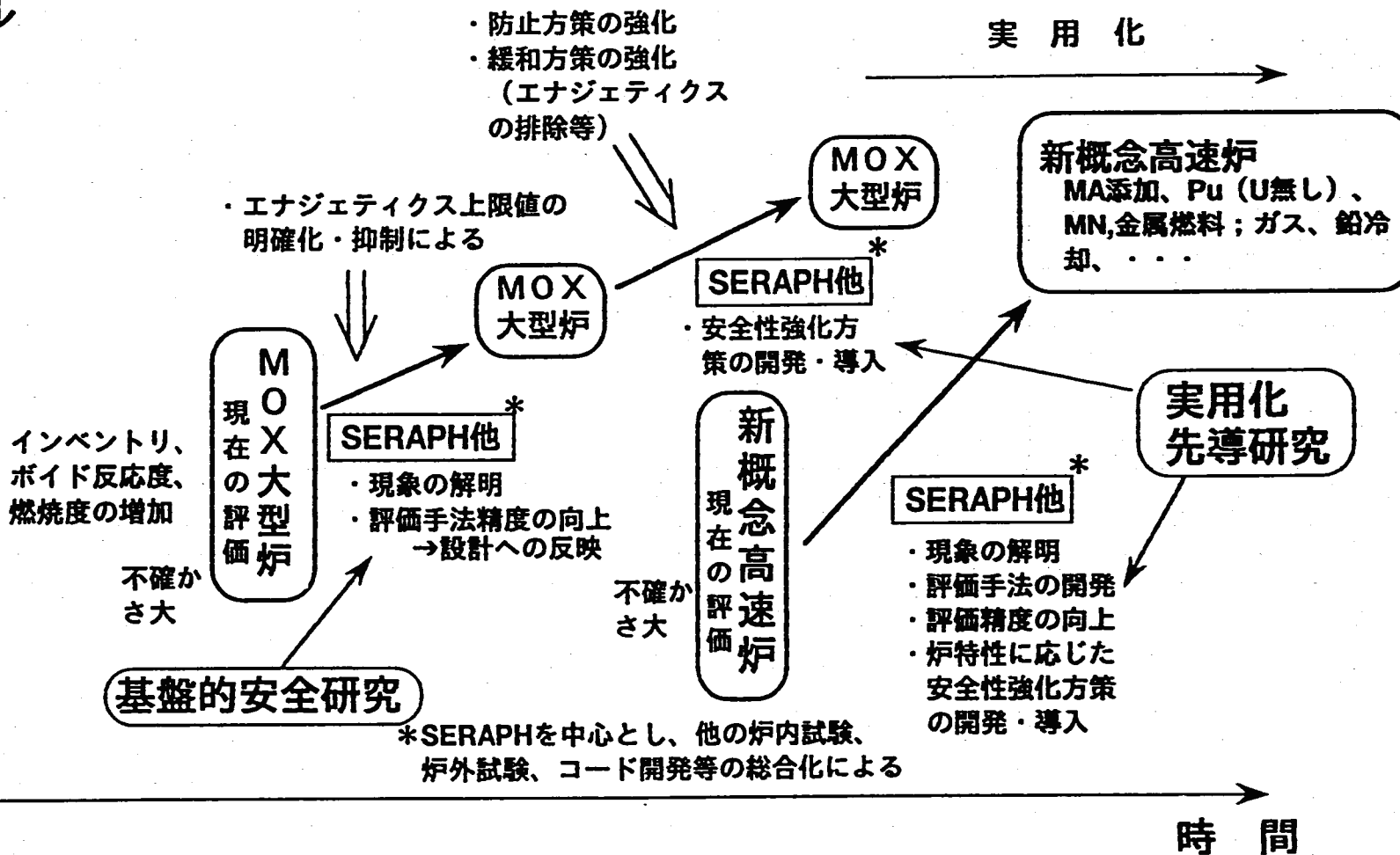


図5 高速炉の実用化を目指した安全研究とSERAPHの役割の概念図

テーマ2に関する下期の予定

- －研究テーマの絞り込み（優先度）
- －炉内試験、実炉試験の区分明確化
- －試験内容、方法、条件等の詳細検討
- －SERAPH施設性能に対する付加的要求とその評価
- －テーマ1との研究テーマの融合、集約した炉内試験計画の提示