

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

[技術情報室]

F B R 実用化のための技術開発に関する調査研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1990年 9 月



(社) 日本原子力産業会議

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

sure to the third party should be made without prior written consent of Power
Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術管理部 技術情報室

目 次

1. 緒 言	1
2. 革新技術・システムに関する調査・検討 (主要技術についての技術開発の方策についての検討)	
2.1 ダクトレス・セミダクトレス燃料集合体	6
2.2 使用済燃料直接取出し方式	17
2.3 複合免震	25
2.4 使用済燃料乾式貯蔵	31
2.5 1次系機器合体	45
2.6 超長寿命高性能炉心	59
2.7 ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプ	67
2.8 ホットセル方式燃料交換方式	75
2.9 2重管SGによる2次系削除システム	91
2.10 逆ノズル型短尺集合体	100
2.11 プラント高温・高効率化	105
2.12 人工知能技術の利用によるFBR運転の自律化	113
3. FBRの利活用・応用	
3.1 FBR技術の他分野への波及について	119
3.2 FBR技術の核融合分野への応用可能性	134
3.3 LWRへのFBR技術利・活用について	162
3.4 高温ガス炉技術の現状と将来展望	167
4. 結 言	197

1. 緒 言

我が国における将来のエネルギー供給の長期安定化とエネルギーセキュリティの向上を図るため、安全性、経済性を含め、軽水炉によるウラン利用体系に勝るものとして高速増殖炉（FBR）によるプルトニウム利用体系を構築していくことが必要である。このため、FBRは将来の原子力発電の本命の炉であるとの位置付けの下に官民の協力体制により開発が進められてきており、現在、1992年の臨界を目指して原型炉「もんじゅ」の建設が順調に進められている。

一方、FBRによるプルトニウムの利用については軽水炉が定着し、当面適切な努力によって天然ウランを確保する見通しのあること、FBRの実用化に必要な経済性の達成には、なお大きな課題が残されていることが明らかになってきたため、昭和62年に策定された原子力開発利用長期計画では2010年頃とする従来の実用化の時期の見直しに関して見直しがなされた。その結果、複数の炉の建設、運転経験を経るとともに所要の研究開発を積み重ねることにより、技術的基盤の確立を図りつつ、2020年代～2030年頃におけるFBRによるプルトニウム利用の技術体系の確立を目指すとの考えが示された。これを受けて、電気事業者による実証炉の設計研究が進められ、関係機関により研究開発が実施されている。

FBRの実用化に当たっては、従来の技術を一層高度化し、さらに新しい概念構想を導入することにより、ハード、ソフトの両面から設計、建設、運転、保守の全般にわたって一層の合理化、高性能化を図り、安全性・信頼性の確保ならびに経済性の向上を追及していくことが課題であり、これを達成することによって同世代の軽水炉と競合しうるFBRの実現を図らねばならない。

本調査研究では、FBRの実用化のための革新技術・要素システムとして考えられる各種技術やシステムのアイデアを出すことに主眼を置いた前回の調査をさらに発展させ、いくつかの主要技術について、それが実現されれば効果が大きいものを優先的に取り上げ、その技術開発の具体的進め方、課題解決のための方策を検討するとともに、それらを含むFBR技術全体について、他分野への応用、波及効果の可能性についても調査検討を行った。

F B R 実用化のための技術開発に関する調査研究委員会

委 員 名 簿

(敬称略・順不同)

委員長	安 成 弘	東京大学 名誉教授
委 員	柴 田 碧	東京大学 生産技術研究所教授
	矢 川 元 基	東京大学 工学部教授
	鈴 木 篤 之	東京大学 工学部教授
	成 合 英 樹	筑波大学 構造工学系教授
	班 目 春 樹	東京大学 工学部助教授
	吉 川 栄 和	京都大学 原子エネルギー研究所助教授
	田 畑 信 之	東京電力㈱ 技術開発本部原子力研究所新型炉研究室副研究室長
	梅 岡 利 弘	関西電力㈱ 原子力建設部副調査役
	浜 田 正 男 (旧委員：鐘ヶ江 直 道)	日本原子力発電㈱ 高速炉開発部課長
	池 本 一 郎	㈱電力中央研究所 原子力総合推進室 F B R グループリーダー
	福 島 穰	高速炉エンジニアリング㈱ プロジェクト部部长
	舘 靖 雄	㈱日立製作所 日立工場副技師長
	佐 藤 守 彦	㈱東芝 エネルギー事業本部動力炉開発部主幹
	三 村 泰	三菱重工業㈱ 新型炉技術部部長代理
	滝 谷 紘 一	川崎重工業㈱ 原子力本部技術第一部部長
	井 上 隆	富士電機㈱ 原子力技術部第一技術室課長
	吉 見 宏 孝	動力炉・核燃料開発事業団 もんじゅ建設所担当役
	谷 賢	動力炉・核燃料開発事業団 核燃料サイクル技術開発部プルトニウム燃料開発室長
	亀 井 満	動力炉・核燃料開発事業団 技術開発部部長代理
	谷 山 洋	動力炉・核燃料開発事業団 動力炉技術開発部次長

以上 21 名

F B R 実用化のための技術開発に関する調査研究委員会

第1回会合

平成2年3月7日（水） 14:00～16:00

日本消防会館会議室

- (1) 趣旨説明
- (2) 安 委員長挨拶
- (3) 調査研究の進め方
- ① 議論の方向

第2回会合

平成2年4月24日（火） 14:00～16:00

日本原子力産業会議 第2会議室

- (1) 幹事会における調査研究の進め方に関する検討とその整理結果の概要
- (2) 革新技术・システムに関する主要技術の項目別検討
(各項目について担当幹事各位より説明の後、検討)
 - 2-1 ダクトレス・セミダクトレス燃料集合体
 - 2-2 使用済燃料直接取出し方式
 - 2-3 複合免震
 - 2-4 使用済燃料乾式貯蔵
- (3) F B R の利活用・応用に関する検討
 - 3-1 F B R 技術の他分野への波及について

第3回会合

平成2年6月4日（火） 14:00～16:00

幸ビル 1304号会議室

- (1) 革新技术・システムに関する主要技術の項目別検討
(各項目について担当幹事各位より説明の後、検討)
 - 2-5 1次系機器合体
 - 2-6 超長寿命高性能炉心
 - 2-7 ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプ

2-8 ホットセル方式燃料交換方式

第4回会合

平成2年7月6日(金) 14:00～16:00

日本原子力産業会議 第1, 2会議室

(1) FBRの利活用・応用に関する検討

3-2 FBR技術の核融合分野への応用可能性について

(2) 革新技术・システムに関する主要技術の項目別検討

(各項目について担当幹事各位より説明の後, 検討)

2-9 2重管SGによる2次系削除システム

2-10 逆ノズル型短尺集合体

2-11 プラント高温・高効率化

2-12 人口知能技術の利用によるFBR運転の自律化

(3) 報告書のまとめ方について

第5回会合

平成2年9月5日(水) 14:00～16:30

航空会館会議室

(1) FBRの利活用・応用に関する検討

3-3 LWRへのFBR技術利・活用について

3-4 高温ガス炉技術の現状と将来展望

F B R 実用化のための技術開発に関する調査研究委員会

幹 事 会 名 簿

(敬称略・順不同)

鐘ヶ江 直 道	日本原子力発電(株) 高速炉開発部課長
池 本 一 郎	(株)電力中央研究所 原子力総合推進室 F B R グループリーダー
福 島 稜	高速炉エンジニアリング(株) プロジェクト部部長
舘 靖 雄	(株)日立製作所 日立工場副技師長
佐 藤 守 彦	(株)東芝 エネルギー事業本部動力炉開発部主幹
三 村 泰	三菱重工業(株) 新型炉技術部部長代理
滝 谷 紘 一	川崎重工業(株) 原子力本部技術第一部部長
井 上 隆	富士電機(株) 原子力技術部第一技術室課長
谷 山 洋	動力炉・核燃料開発事業団 動力炉技術開発部次長
(旧委員：土 屋 毎 雄)	

以上 9 名

F B R 実用化のための技術開発に関する調査研究委員会

幹 事 会

準備打合せ会合（幹事会）

日 時： 平成 2 年 1 月 30 日（火） 15:00～16:00

場 所： 日本原子力産業会議 第 3 会議室

議 題： 本委員会における調査研究の進め方に関する打ち合わせ

第 1 回幹事会

日 時： 平成 2 年 3 月 29 日（木） 14:00～15:30

場 所： 日本原子力産業会議 第 3 会議室

議 題： 調査研究の具体的進め方について

2. 革新技术・システムに関する調査・検討

(主要技術についての技術開発の方策についての検討)

2.1 ダクトレス・セミダクトレス燃料集合体

2.1.1 目的

実用化段階の高速炉においては、コスト低減が要求される。特に燃料製造～再処理に至る高速炉燃料サイクル全体にわたるコスト低減が大きな課題となっている。

この要求に応え得る高速炉燃料の概念として、ダクトレスバンドル集合体がある。すなわち、ラップ管削除によるダクトレスバンドル集合体は、構造部材の低減による製造コスト低減、再処理廃棄物の低減による燃料サイクルコスト低減が期待できる。また、ラップ管削除による核特性の向上により運転サイクル長が伸長され、運転コストの低減も併せて期待できる。

2.1.2 全体の概要

実用炉炉心への適用を想定し、ダクトレスバンドルの実用化のための開発ステップ (1)構造の設定段階 (2)確性段階 (3)実炉への適用段階の3段階に分けた。

(1) 構造の設定段階はラップ管を削除することによる課題に対し、その役割に代わり得る概念、対策を検討し構造を設定する。ラップ管を削除することによって生じる課題は、熱流特性、脱装荷性、燃料の健全性、浮上り防止、破損燃料検知、安全性に関し生じる。

流動特性については、除熱に寄与しない無駄流量の削減と、ダクトレスにおける流調が導入可能か、流動特性評価方法の開発と模擬炉心による流動試験が必要となる。脱装荷性については、模擬炉心による組立試験および脱装荷性試験により流動特性への影響も考慮した適切なギャップの設定が必要である。燃料健全性については、地震時の健全性の確保が重要となる。浮上り防止に高ハイドロリックホールドダウン力構造の導入とその性能確認が必要となる。

破損燃料検知については、破損燃料の SHIPPING の可能性を流動試験による確認が必要となる。安全性については、集合体間事故および C D A への影響の評価を評価手法の開発を含めて行うことが必要である。

- (2) 確性段階は、(1)で設定した構造につき、炉内照射試験により挙動の確認を行う。また、安全性については炉外特殊ループによる実験により許認可用のデータを収集する。
- (3) 実炉への適用段階において、確性済の燃料で炉心を組む。

2.1.3 開発課題と解決方法

実用炉炉心への適用を想定し、ダクトレスバンドルの実用化のために次の3段階を経るものとする。

- (i) 構造の設定……ラッパ管を削除することによる課題に対し、その役割に代わり得る概念、対策を検討し、構造を設定する。
 - (ii) 確性……本概念の照射下における挙動の確認を行い、実用炉に対する適用のための許認可のデータ等を収集する。
 - (iii) 実炉への適用……実炉への適用方法について、従来炉からの移行等について検討する。
- (1) 構造の設定段階（～1995 or 2000年）

ラッパ管の役割とその削除による課題を表-1に示す。

(i) 熱流力特性

ラッパ管削除により、出力分布に応じた流量配分がかなり困難となること、および集合体間ギャップ等への無駄流量の発生により被覆管ホットスポット温度の上昇が生じる。本課題に対する対策および検討項目は以下の通りである。

(a) ダクトレスにおける流量配分方法

ダクトレスにおいては、エントランスノズルにおけるオリフィスによる流量調節は困難である。これに対しグリッド段数を変えることによりバンドル抵抗係数を替え、流量を集合体ごとに変えることは可能と考えられる。

この場合に隣接集合体との混合等についての挙動の確認が必要である。

(b) 集合体ギャップ流量

(ii)で述べるが、集合体間には脱装荷性保持のためある程度のギャップが必要である。このため集合体間ギャップへの流量リークが考えられる。また、集合体としてブランケット、中性子遮蔽体、制御棒集合体等はダクト付のままの集合体を用いることが想定され、この部分への流量のリークが考えられる。

- ① 集合体間ギャップ流量については、ギャップを脱装荷性を確保して小さくし、ま

た、N E S T 配列（図－１に示すように隣接集合体間で対面するピンが３角配列となるようにピンを配列する。）を行うことにより減少すると考えられる。なおセミダクトレスバンドル（集合体炉心領域のラッパ管に穴をあけたもの）を採用した場合には表－２に示すようにN E S T 配列は採用できないので、この点でセミダクトレスとダクトレスの熱的挙動の差について検討して構造を選択することが必要である。

② ダクト付集合体の部分へのリーク流量について、制御棒については案内管に六角管を用いる等リーク流量防止策をとる必要がある。また、外周部（ブランケット、中性子遮蔽体領域）へのリーク流量の評価が必要である。

(c) その他、熱特性

自然循環時、もしくは安全上の課題（局所閉塞）時の流動特性の評価が必要となる。

以上の課題に対する特性評価のための評価手法は現在整備されておらず、整備する必要がある。また、そのために部分模擬炉心による流動試験により集合体流量配分、ギャップ流量等の確認を行うことが必要である。

これらにより被覆管温度がダクト付並となる流動特性を得ることができることを確認する。また、炉上部機構に対する流動特性を確認する。

(ii) 脱装荷性

ダクトを削除することにより、脱装荷時に隣接集合体間のピンが接触する可能性がある。これを防止するため、適切なギャップを設定する。ギャップの設定に当たっては、集合体の湾曲およびグリッドの膨張等に対し適切な余裕をとることが必要である。また（i）で示したギャップ流量の増加を防ぐために過度にギャップを拡げることは、避ける必要がある。

また、従来にないN E S T 配列等に対し、炉心組みの方法等も検討が必要となる。これに対し、炉外において部分模擬炉心による組立性確認および脱装荷性試験を行い適正なギャップを設定する。

(iii) 燃料の健全性

ダクトがなくなることによりB D I、D D I等のダクトに関係する挙動評価項目がなくなる。その代わりピン拘束がグリッドとなるため、それについての挙動評価が必要と

なる。また、ダクトがなくなることにより集合体剛性が大幅に低下するため、地震時の挙動が大きく変わる。

これにより従来ダクトに関係するBDI、DDIに代わりグリッドによる拘束力、グリッドバンドル相互作用について健全性確認が必要となる。

また、炉心湾曲も挿入引抜の際、集合体間のピンが接触防止を満たすことが必要であり、ダクトレスの場合の炉心湾曲評価が必要となる。

また、地震時についても衝突部はグリッドとなるので、グリッドが衝突時に変形等を生じないこと、さらに制御棒挿入が可能なことを示すことが必要である。

以上のためには評価手法の開発が必要である。

〔評価手法の開発〕

- ・グリッドバンドル相互作用については、海外でグリッド型バンドル（ただし、ダクト付）を用いているので、情報入手等を行い開発を進める。また、グリッド型の照射データを入手するための照射計画で進める。

- ・地震時については、従来のラッパ管付の評価方法を改造し、グリッドタイロッド方式を取扱い可能にして評価する。

これを用い地震時の健全性を確認、対策の検討を行う。すなわち、対策として炉心クランプ方式、免震等が必要かを判断する。最終的には炉心群震動実験（ダクトレス炉心）により評価手法の確認を行い、健全性を確認する。

(iv) 浮上り防止

ダクトレスバンドルとすると集合体に高圧がかかる面積がダクト付の場合、より大きくなるためHHD力（ハイドロリックホールドダウン力）が小さくなる。

このため高HHD力をもった構造、もしくはメカニカルに抑える方式が必要となる。高HHD力構造については、逆ノズルを用いた場合の構造について検討された例もあり、性能確認実験を行うことが必要である。

(v) 破損燃料検知

ラッパ管を削除すると隣接集合体との冷却材混合が発生するため、破損燃料のシッピングによる確認が困難になる可能性がある。

これについてどの程度検知が困難となるか、流動試験等で確認する。さらに、破損燃料の同定の精度向上の工夫（例、タグガスの隣接集合体間の組成差の設定方法）、数体

取り出しての同時炉外での確認方法等を検討する必要がある。

(vi) 安 全 性

ダクトレスにより（V）と同様に出口温度計による集合体大規模閉塞等の異常検知が困難になる可能性がある。逆に集合体閉塞時に除熱能力向上が期待でき、集合体間事故影響が低減する可能性がある。

CDAについては、初期にはボイドの拡大、燃料径方向移動が容易となるなど事象推移について現状の知見と異なる要因が生じる可能性がある。一方、末期は燃料溶融プールからの流出が促進され、事故の収束が促進されるものと考えられる。

従来型集合体における過渡挙動との差異について、炉外試験等で確認しておく必要がある。

(2) 確性段階（～2005 or 2010年）

(i) (I)において構造設定されたものに対し、炉外Na中耐久試験および炉内照射確性試験を行う。

〔炉内照射確性試験〕

着目する挙動としては下記のものが考えられる。

○健全性確認

- ・バンドルーグリッド相互作用
- ・グリッド膨張量
- ・グリッド間相互作用（図－3 参照）
- ・バンドル湾曲

○照射における課題

現状、照射に使用できる炉はほとんどがダクト付である。その中にダクトレスバンドルを装荷すると周囲の燃料集合体のハイドロリックホールドダウン力を低下させるので、特殊リグに入れて照射する必要がある。（図－2 参照）

(ii) 安全性

バンドルの破損伝播について、炉外特殊ループで破損伝播を行い、そのデータにより評価結果を確認する。

(3) 実用炉への適用（～2020年）

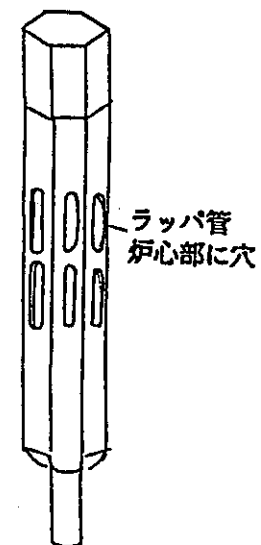
確性が済んだ燃料により炉心を組む。その場合に従来炉心からの移行が可能な設計についても検討する。

表－１ ラッパ管の役割と削除のための課題

ラ ッ パ 管 の 役 割		ラ ッ パ 管 削 除 時 の 検 討 課 題	課 題 の 分 類
集合体への流量配分	集合体の出力分布に応じて冷却材を配分し、集合体出口温度を平坦化する。	◦ 炉心の熱流動特性の確認 ◦ 被覆管ホットスポット温度の確認	熱流力特性
燃料要素束部の流量確保	流動抵抗の大きな要素束内部に冷却材を流入する。	◦ ラッパ管削除に伴う無駄流量の評価 - 集合体間ギャップへのリーク - ブランケット及び炉心周辺へのリーク	
集合体間のバウンダリー	隣接集合体の燃料要素との干渉防止	◦ グリッドスペーサによる燃料要素湾曲拘束機能の確認 ◦ ラッパ管に係わる燃料健全性指標の変更 BDI, DDI→グリッドバンドル相互作用等	機械的挙動に対する燃料健全性
	炉心における集合体の識別機能	◦ 集合体異常検知の精度（出口温度） ◦ 破損燃料検知	安全性 破損燃料検知
集合体間ギャップの保持	集合体パッドによって間隔を保ち、集合体の炉心への脱装荷性を確保する。	◦ 狭少ギャップ時の脱装荷性 ◦ ギャップ幅と冷却材リーク量の関係	脱装荷性 熱流力特性
集合体の構造強度部材	◦ 耐震上のバウンダリー ◦ 燃料交換時耐荷重 ◦ 輸送時保護	◦ グリッド／タイロッド構造強度評価 ◦ オリエンテーション付燃料交換機 ◦ 地震応答とその対策（グリッドの衝突） ◦ 輸送キャスクへの保護治具設置	機械的挙動に対する燃料健全性
エントランスノズルによる集合体の炉心への保持	ハイドロリックホールドダウン（HHD）による保持	◦ 高HHD構造 ◦ 低圧損化	浮上り防止
集合体間破損伝播バウンダリー	溶融伝播や溶融燃料・ナトリウム反応に伴う圧力波伝播に対する障壁	◦ 集合体事故起因事象及び安全理論検討 ◦ CDAへの影響評価	安全性

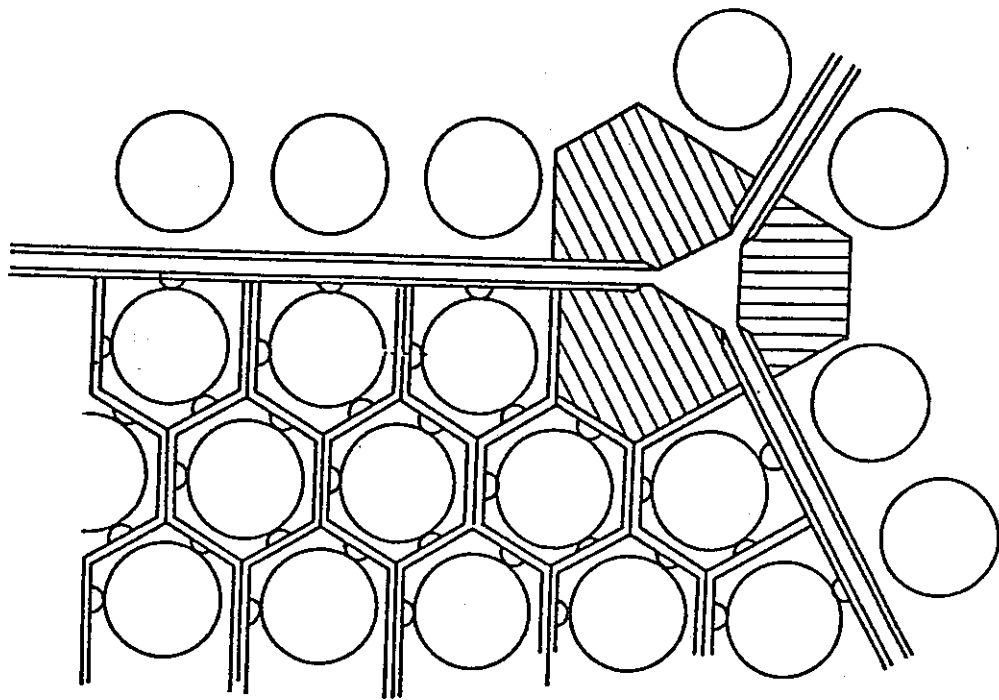
表-2 セミダクトレス集合体とダクトレス集合体の比較

課 題	熱流力特性の向上	脱 装 荷 性 確 保	機 械 的 挙 動 に 対する健全性確保	浮 上 り 防 止	安 全 性
ダ ク ト レ ス 集合体との差異	集合体間ギャップ流量低減に有効なNEST配列は採用できない。	集合体ギャップはダクトレスと同程度。ピン同士の接触の可能性が減じるので脱装荷性はよくなる。	・中間パッドを従来通り設置でき衝突に強い。 ・バンドルーグリッド相互作用は同一。	ダクトレスと同程度か若干よくなる。	ダクトレスと同程度
対策の容易さ	×	○	○	△	△
総 合 評 価	△ 熱流力特性への対策がダクトレスに比較して困難と考えられる点を解決すれば、機械的健全性の点からダクトレスに問題が生じた場合の代替案となる。				

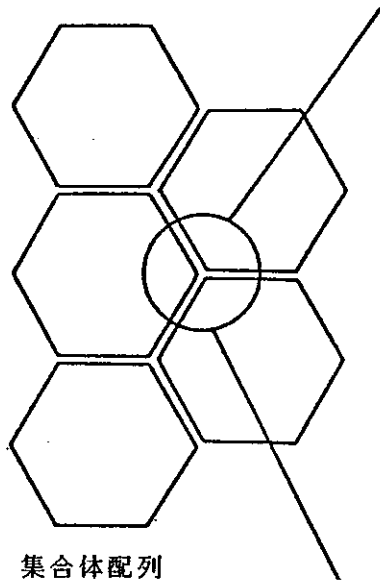


- : ダクトレスより対策容易
△ : ダクトレスと同程度
× : ダクトレスより対策困難

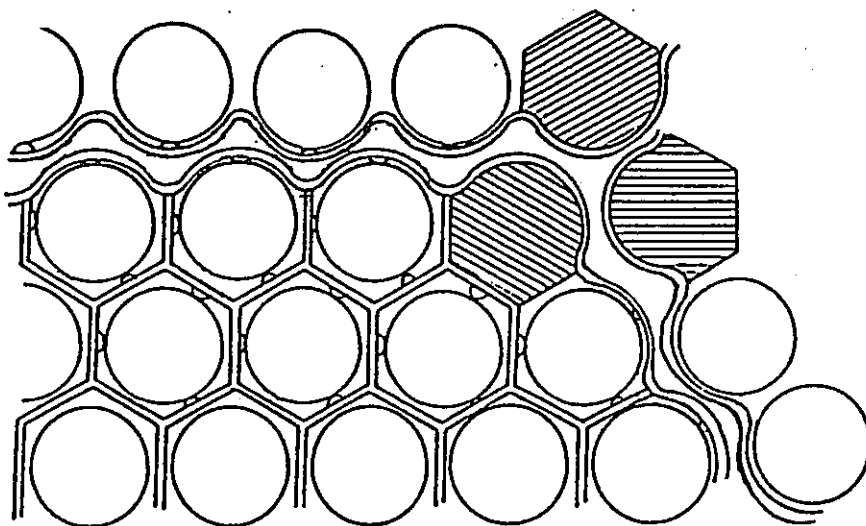
図-1 ダクトレスバンドル配置概念図



NON-Nested 配列



集合体配列



Nested 配列

図-2 照射用特殊リグ

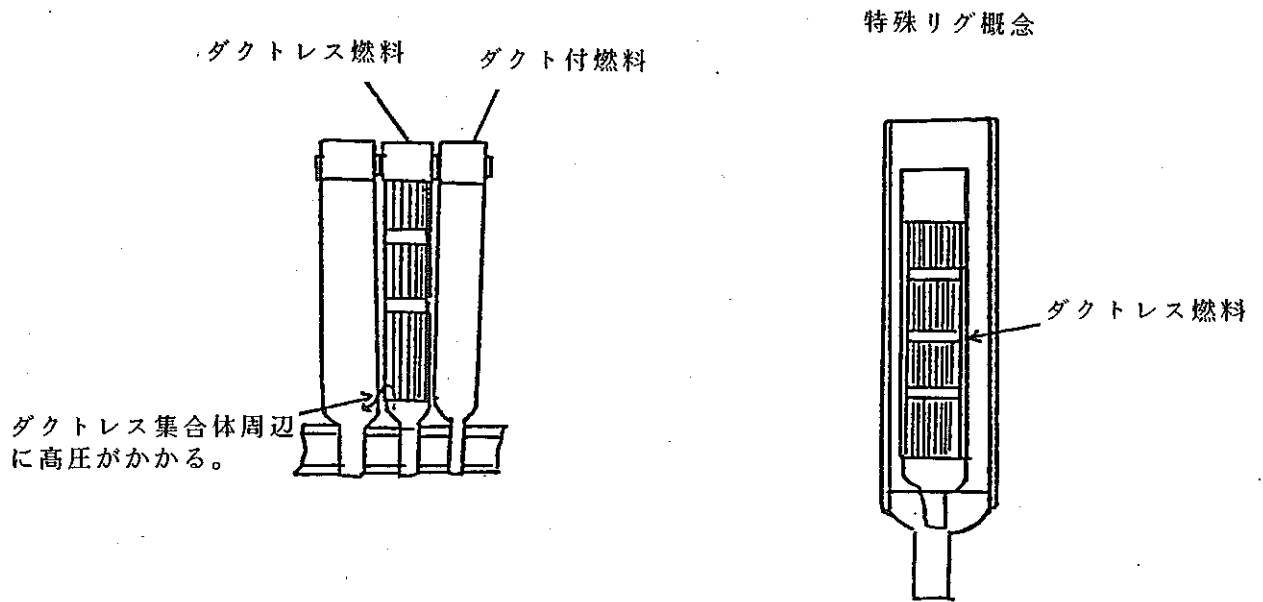
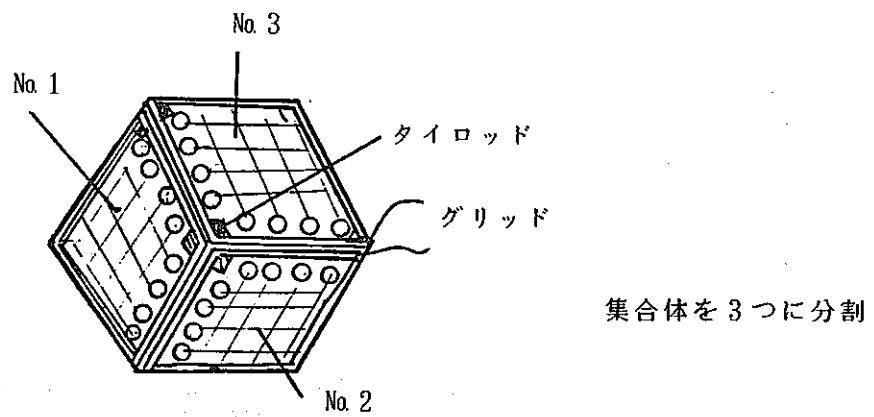
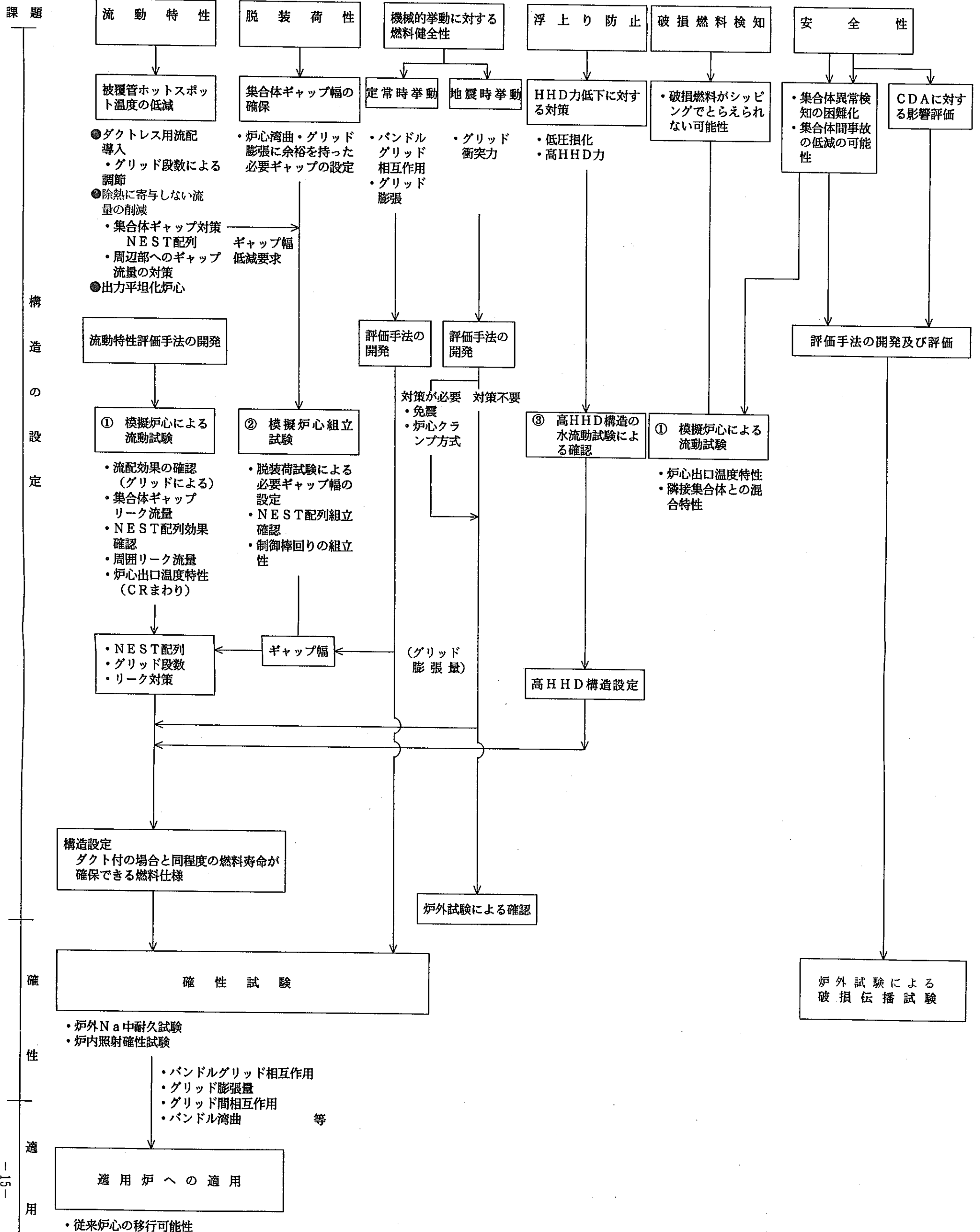


図-3 グリッド相互作用確性用照射集合体断面



ダクトレス集合体



2.2 使用済燃料直接取出し方式

2.2.1 目 的

FBRの使用済燃料の減衰待ち貯蔵には、原子炉容器内で貯蔵する炉内貯蔵方式と原子炉容器外で貯蔵する炉外貯蔵方式があり、これまで我が国では実験炉「常陽」では炉内貯蔵方式が、また、原型炉「もんじゅ」では炉外貯蔵方式が採用されてきた。

また、海外においてもほぼ同様である。

これら両方式の開発成果を踏まえてFBR実用化段階を展望した場合、

- (1) 燃料の高燃焼度化
- (2) 原子炉構造の簡素化
- (3) 燃料貯蔵設備の簡素化
- (4) 燃料交換周期の長期化
- (5) FBR燃料サイクルの高度化

のニーズに対応し、かつ、FBRプラントの建設コスト低減と燃料サイクルコストの低減を計っていくためには、原子炉停止後使用済燃料を直接取り出し、炉外で減衰待ち貯蔵を行う方式、いわゆる「使用済燃料直接取出し方式」の開発が期待される。

2.2.2 全体の概要

使用済燃料直接取出し方式における使用済燃料の減衰待ち貯蔵には、原型炉「もんじゅ」のNa槽内貯蔵方式にかわる方式として下記の2つの方式が考えられる。

- (1) 水プール内貯蔵方式（図－1 参照）
- (2) Naポット内貯蔵方式（図－2 参照）

これら両方式に関する基本開発段階での開発課題としては、FBR大型炉の場合、原子炉停止後使用済燃料取出し時の燃料発熱量が20～30kW程度の高発熱となるために、下記の3項目が重要である。

- (1) 高発熱燃料移送技術の開発
- (2) 高発熱燃料処理技術の開発
- (3) 高発熱燃料貯蔵技術の開発

また、実用化移行段階および完成段階では、燃料交換周期の長期化および定期点検周期の

長期化ニーズがさらに強まるため、共用型燃料取扱および貯蔵技術の開発が必要である。

2.2.3 開発課題と解決策

(1) 基本開発段階

(i) 水プール内貯蔵方式の場合

(a) 高発熱燃料移送技術の開発

原子炉容器から使用済みの高発熱燃料を直接裸の状態で取り出すため、燃料移送中の過熱による燃料破損を防止するための燃料冷却技術の開発が必要である。

燃料冷却の方法としては、燃料集合体内を直接不活性ガスで強制冷却する方式が考えられるが、この場合燃料集合体内の圧損が高くなるため、密閉型の高吐出圧ブロワの開発が必要である。また、燃料に付着するナトリウムの冷却性能に及ぼす影響を把握するため、実寸大規模のナトリウム付着燃料冷却試験により確認を行う。

(b) 高発熱燃料貯蔵技術の開発

① 燃料の高燃焼度化に向けて開発される燃料被覆管材料（酸化物分散強化型フェライト鋼燃料）の水中耐腐食性の把握が必要である。燃料の水中腐食性については長期間にわたるデータを必要とするため、燃料被覆管材料の開発と平行して実験炉「常陽」等の利用による基礎データの集積が望まれる。

② また、高発熱燃料貯蔵中の燃料冷却についても成立性の見通し（評価手法の確立、実証性）を得る必要がある。

(ii) Naポット内貯蔵方式の場合

(a) 高発熱燃料移送技術の開発

原子炉容器からの使用済燃料の取出し方式としては、Naポット内に収納した状態で取り扱うため、燃料冷却の方法としては、Naポット外表面を外部から間接的に冷却を行う。この方法は、原型炉「もんじゅ」で確立された技術であるが、燃料の高発熱化に伴う成立性については、実証試験により確認しておく必要がある。

また、Naポット内貯蔵方式に適合するサイト外への搬出方式は、Naキャスクが考えられるが、Naキャスクの移送時の除熱性、技術基準への適合性が課題である。

(b) 高発熱燃料処理技術の開発

使用済燃料を収納したNaポットは保持筒内で貯蔵されるが、保持筒内にポット外

表面に付着したナトリウムが滴下沈積するのを防止するため、事前にポット外表面を洗浄する必要がある。そのために洗浄廃液を出さず、かつ、簡素な方式としてNaポット表面乾式洗浄技術の開発が必要である。

(c) 高発熱燃料貯蔵技術の開発

高発熱燃料貯蔵中の冷却技術の開発の他に下記の2項目が重要である。

① ポット内Na漏洩対策の確立

貯蔵中のNa漏洩は冷却材喪失による燃料の過熱損傷を招くため、信頼性のあるNa漏洩検知システムの開発が必要である。

② 保持筒漏洩対策の確立

ナトリウム火災、非管理区域化および除熱性に適合する保持筒漏洩防止構造の開発が必要である。

(2) 実用化移行段階および完成段階

(i) 実用化技術の開発

水プール内貯蔵方式あるいはNaポット内貯蔵方式の開発により、軽水炉と経済的に競合しうる見通しが得られれば、さらなる合理化として下記2項目が開発のポイントとなる。

(a) 燃料移送系の高速化

(b) 機器標準化による低コスト、高品質化

(ii) 設備共用化技術の開発

実用化移行段階および完成段階では1サイト複数プラントの建設が想定されるため、燃料取扱および貯蔵設備、共通保修設備、廃棄物処理設備等発電所内での使用頻度が低下するシステムについては共用化を計ることになる。

その場合の共用化プラントにおける原子炉建屋配置の例を図-3に、燃料取扱設備共用プラントにおける燃料取扱設備概念の例を図-4に示す。

図-1 水プール内貯蔵方式全体概念図

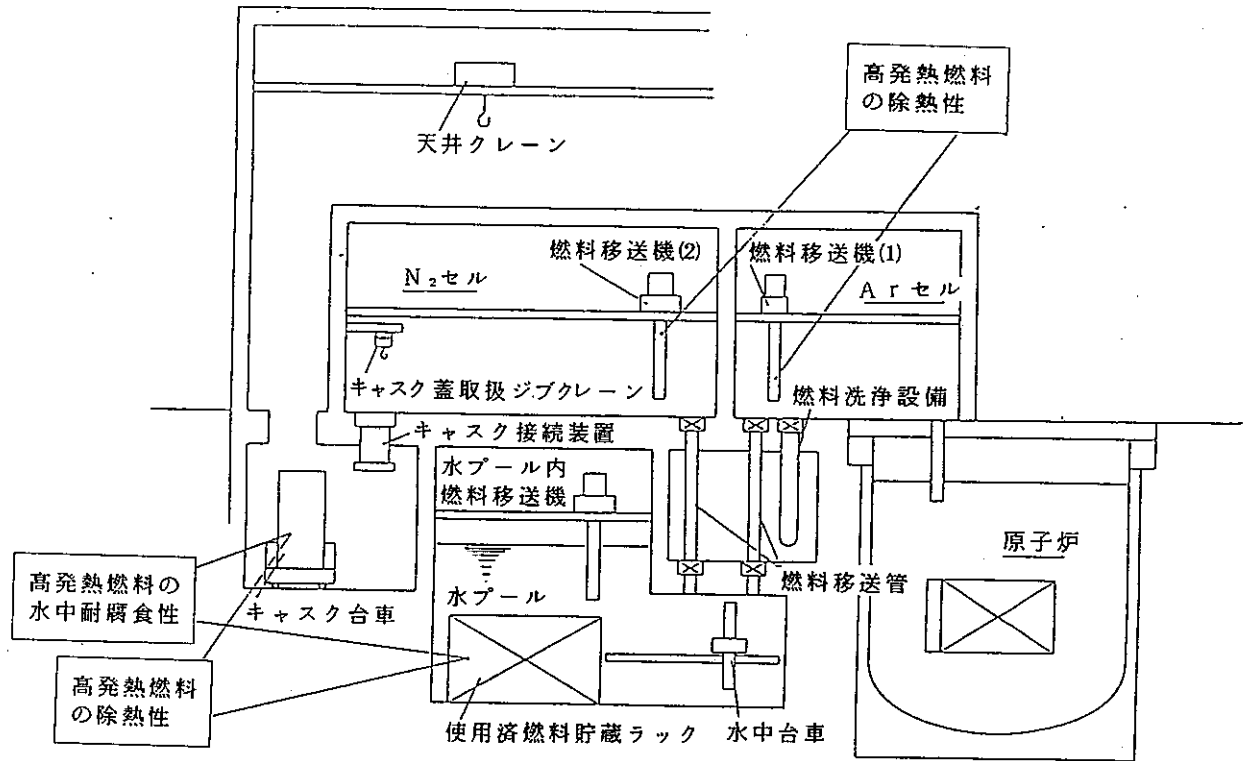
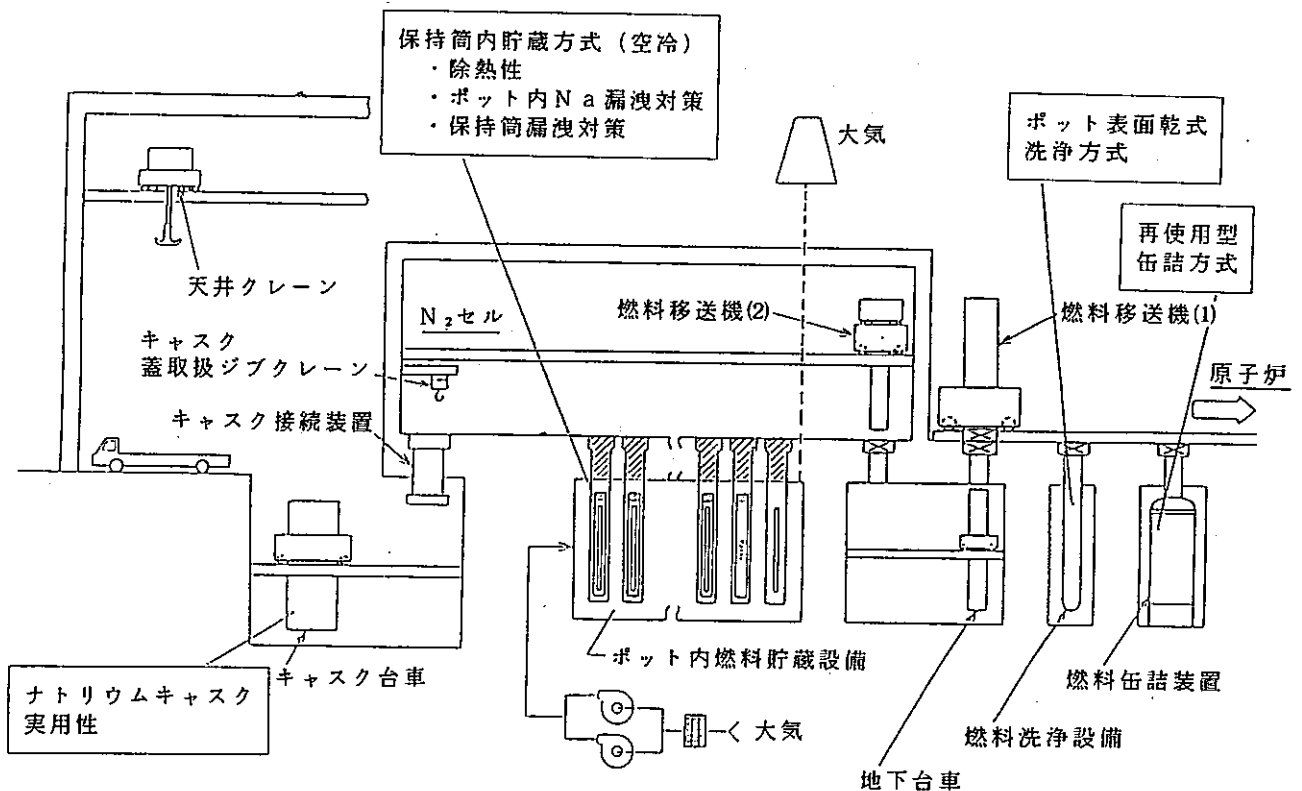
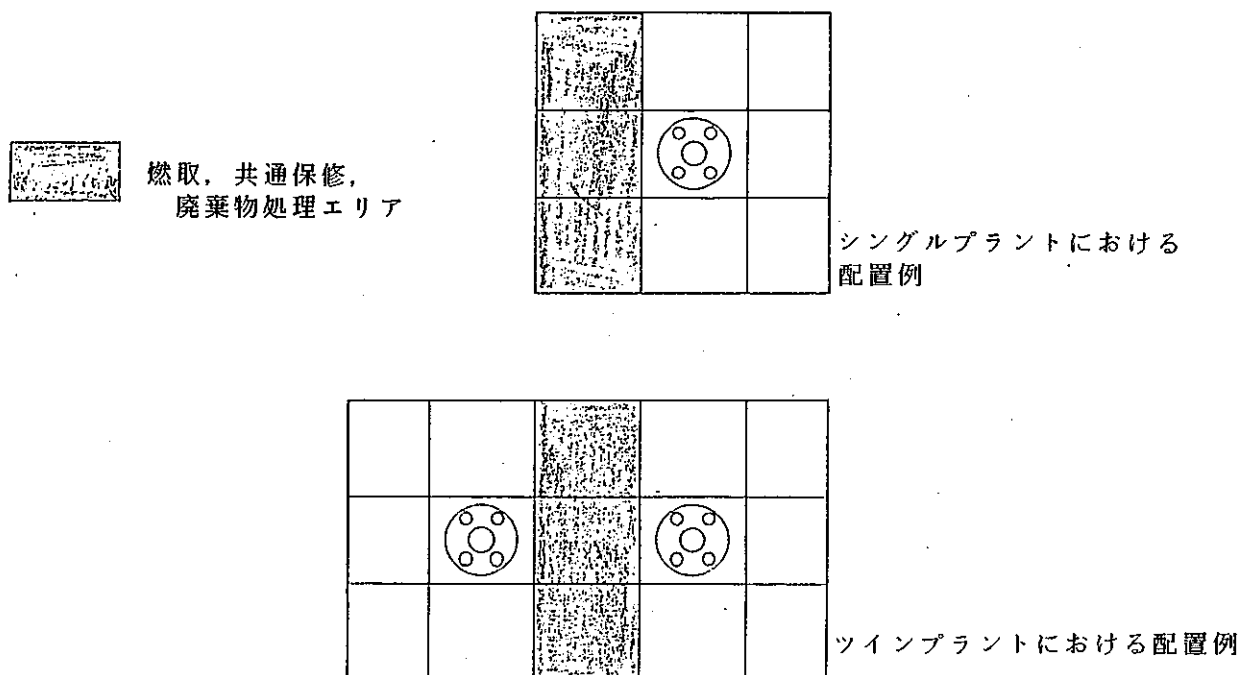


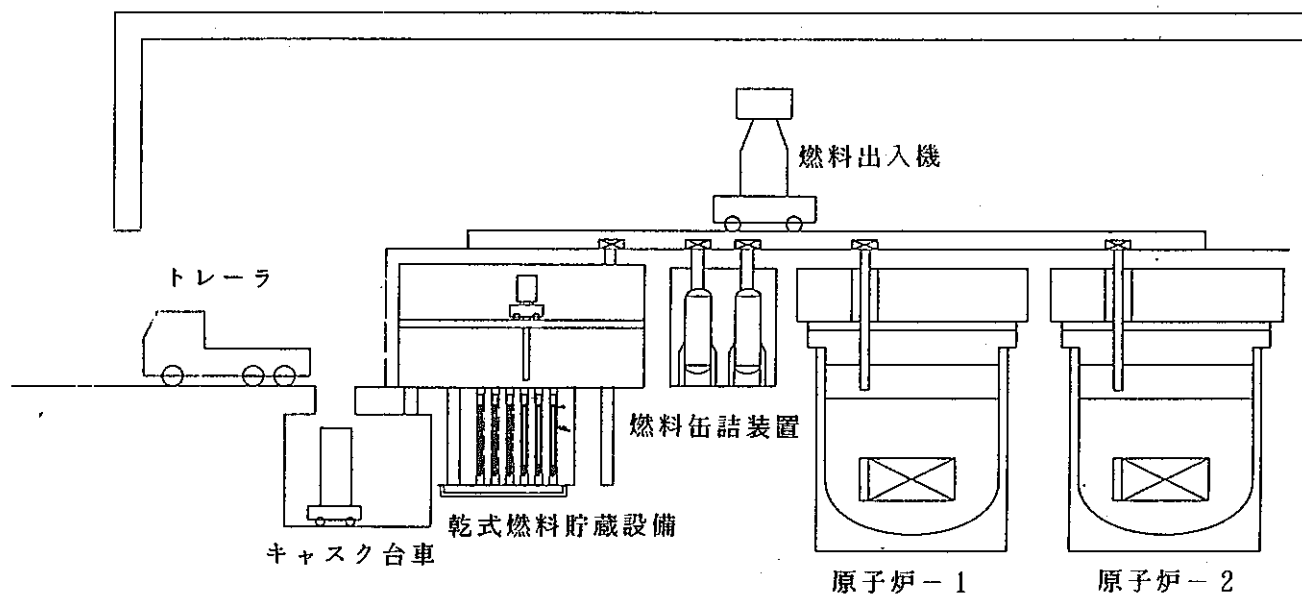
図-2 Naポット内貯蔵方式全体概念図（空冷）



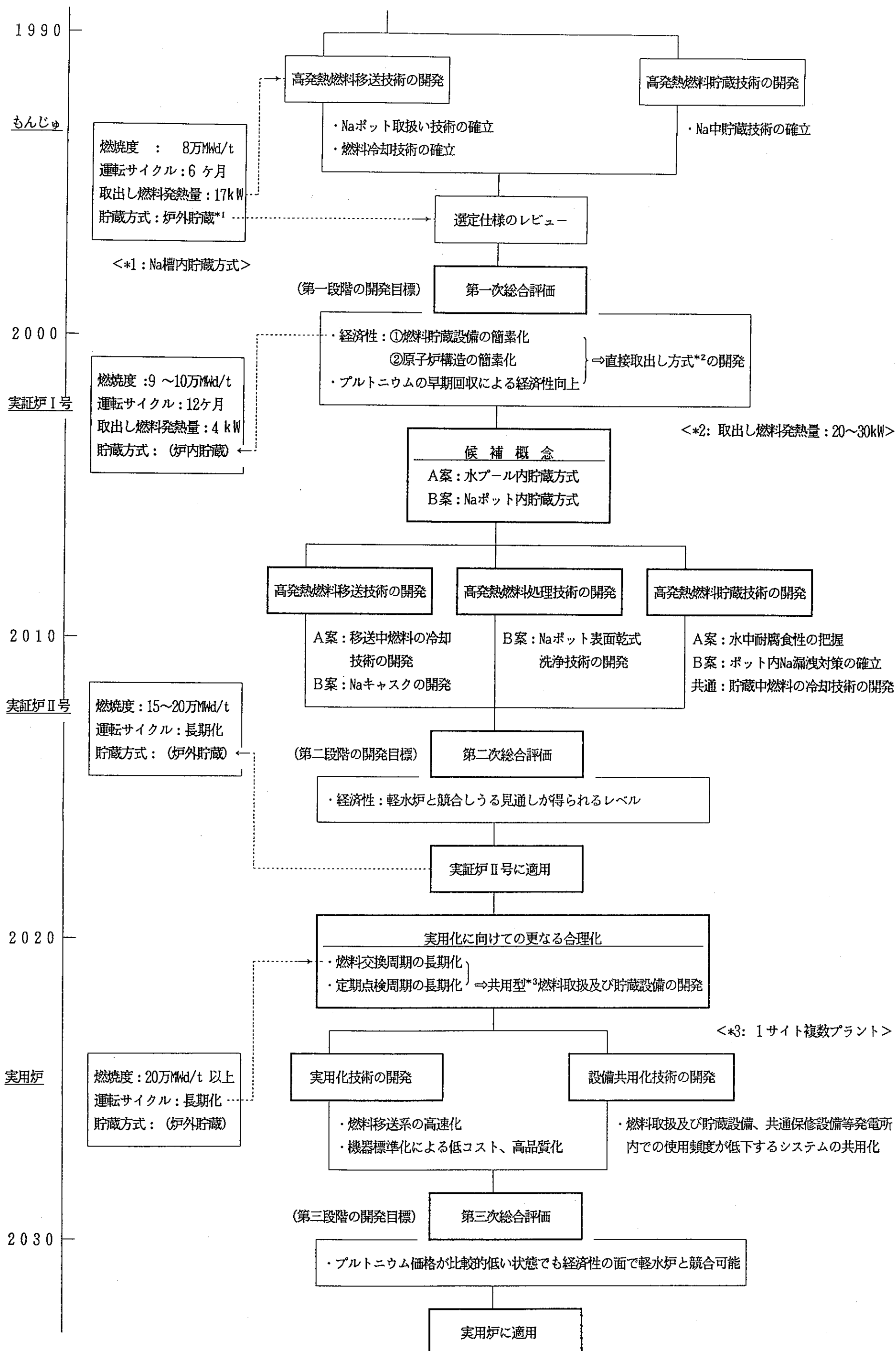
図－3 共用化プラントにおける原子炉建屋配置の例



図－4 燃料取扱設備共用プラントにおける燃料取扱設備概念の例



使用済燃料直接取出し方式



2.3 複合免震

2.3.1 目 的

上下地震動に関する知見が深まるにつれ、耐震設計において従来静的に評価していた上下地震動を動的に評価することが合理的であるとの動向がある。この場合、上下地震動の加速度振幅は水平地震動のその0.5倍程度以上になると言われており、地震活動度の高い地点においては相当なレベルになるものと予想される。また、大型FBRは元来、上下地震に対し十分な配慮が必要である特性（薄肉大型構造）を有している。

このような状況を踏まえると、FBRの実用化に向け構造物へ作用する水平地震力のみならず、上下地震力をも緩和できる複合免震を導入することで、我が国の厳しい地震条件の制約から解放された合理的なFBRプラントの実現と標準化による経済性向上や立地の拡大等に著しい展望が拓けると期待できる。

2.3.2 全体の概要

我が国においては、一般免震建物の建設が30数例に及び、原子力施設への免震技術の適用のための研究も長く続けられてきた。昭和62年度からは国の委託を受け、電力中央研究所がFBR実証炉への免震技術の適用を目指して本格的な確認試験を進めている。一方、日本原子力発電㈱は、FBR実証炉への免震技術の適用性評価研究を進めている。FBR免震では、設計の合理化や標準化そして立地の拡大に向けて、水平地震動も上下地震動も免震し、サイティングフリーとすることが最終目標となる。この目標達成に向けて、技術の成熟度や開発期間等を考慮して、3段階での実用化展開を考える。

第1段階では、FBR実証炉1号に向けて、最も実現性が高く、効果も大きい原子炉建屋を積層ゴム要素により水平方向に免震する技術を実用化する。上記の電中研や原電の研究はこれを対象としたものである。

第2段階では、第1段階で実用化された建屋水平免震に加え、建屋全体または、原子炉1次系や2次系の機器を部分的に上下方向に免震するいわゆる「複合免震」技術を実用化する。

複合免震技術を実用化するためには次の課題を解決し、技術を確立する必要がある。

(1) 上下地震動の設定法

上下地震動の策定法については、軽水炉等に適用される短周期成分についても確立され

ていないのが現状であるが、地震学的な進展は著しく、第1段階レベルでは相当な知見が蓄積、整備されると考えられる。ここではそれに加え、免震系に適用するやや長周期の成分をも含む地震動の設定法を確立する。

(2) 免震機構の開発／適合性検討

水平免震に加えて、上下免震の方法として建屋全体を対象とするか、あるいは重要機器・設備を部分的に対象とするかにつき、免震機構の開発と適用性を評価し、いずれの方式が合理的かを判断する。

(3) 免震機構の信頼性実証

上記で判断した方式について、原子力施設への適用の観点から、その長期信頼性を実証して、設計／製作／品質管理技術を確立する。

(4) 複合免震システムの安全性の実証

複合免震システムでは、被上下免震部分は、水平動との関連でロッキング振動成分が励起される。従って、ロッキング振動の防止技術や3次元的な振動の解析評価技術の確立および免震－非免震部分を渡る配管等の変位吸収技術を確立して、複合免震システムの安全性を実証する。

第3段階は、サイティングフリーを狙って、複合免震技術をより高度化し、合理的なFBR免震プラントの標準化や立地拡大のための技術を確立する。

2.3.3 難易度，開発時期，条件

(1) 複合免震

建屋水平免震技術が実証炉1号で実用化されていることが前提となる。これに上下免震を付加して実証炉2号に適用する。

(i) 上下地震動の設定法の確立

観測記録の蓄積や地震学の進展に負うところが大きく、長期間を要する実証炉2号までには確立可能である。

(ii) 免震機構の開発と信頼性の実証

力学特性や環境の影響等長期的信頼性実証のための試験データベースを整備する。特に被上下免震部分のロッキング防止構造の開発と信頼性実証、およびダンパの信頼性等十分な試験が必要である。

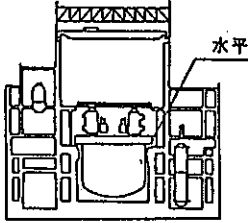
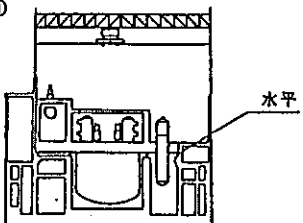
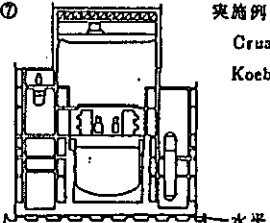
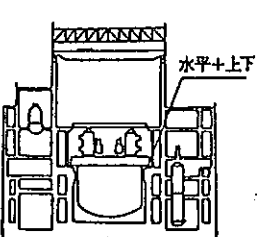
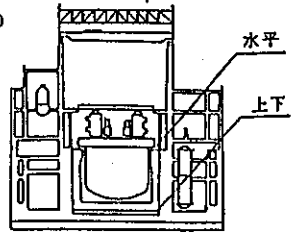
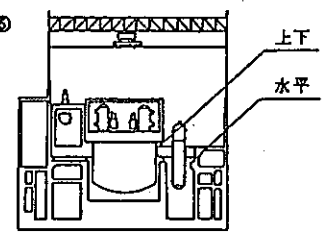
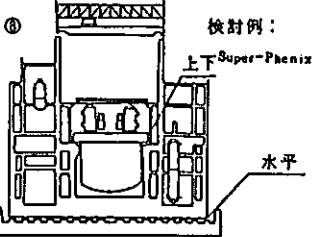
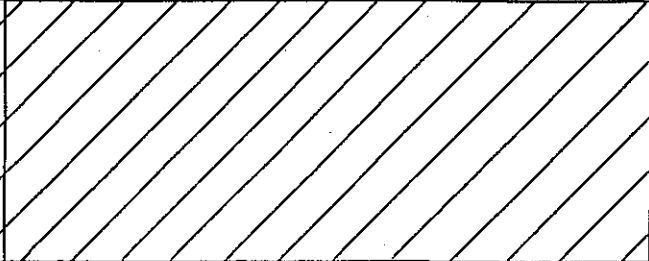
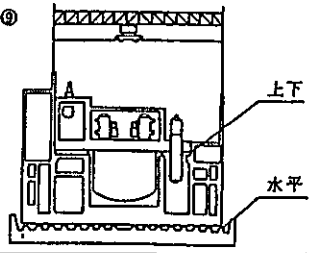
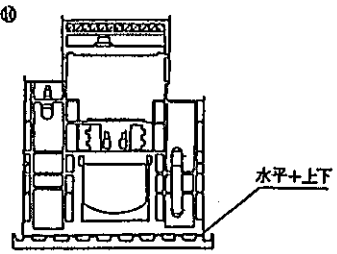
(iii) 複合免震システムの安全性の実証

全体系の振動挙動シミュレーション技術の開発および大型試験等による実証が重要である。

(2) 複合免震の高度化

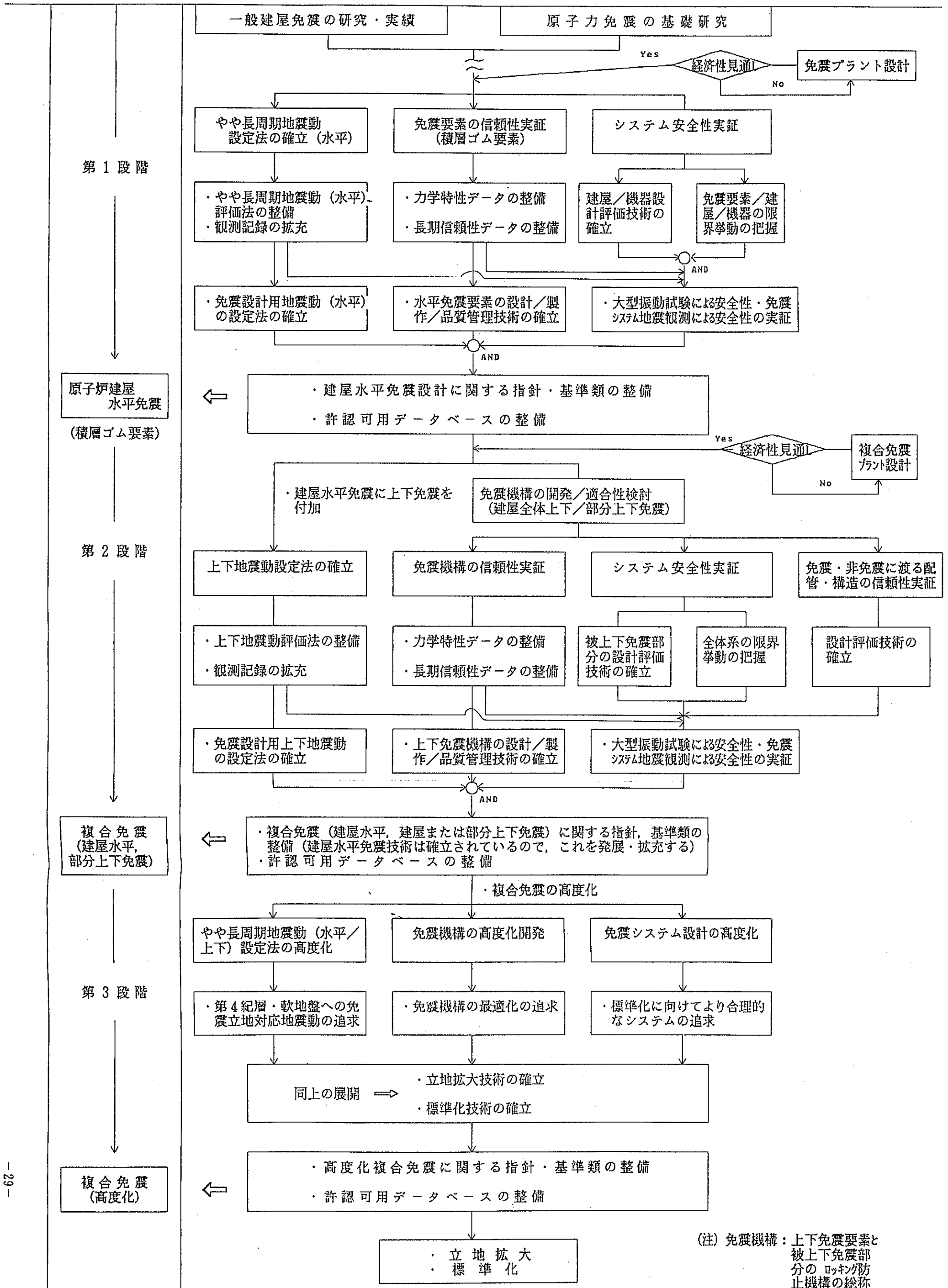
第4紀層立地技術が確立していることを前提にした地震動の整備，さらには，軟質地盤立地を指向した地震動の整備，およびFBR免震システムの最適化等により標準化免震FBRプラントを実用化する（実用炉に適用）。

免震対象範囲による免震方式の分類

水平 上下	免震しない	機 器 免 震		建 屋 免 震
		1 次 系	1 次系 + 2 次系	1 次系 + 2 次系 + 建屋
免震しない	非 免 震 プ ラ ン ト	①  検討例: ・PRISM炉(米) ・LMR炉(米)	④ 	⑦  実施例: Cruas(仏) Koeberg(南ア)
機 器 免 震	一 次 系	②  ③ 	⑤ 	⑧  検討例: 上下 Super-Phoenix II(仏)
	一 次 系 + 二 次 系			⑨ 
	一 次 系 + 二 次 系 + 建 屋			⑩ 

複合免震

複 合 免 震



2.4 使用済燃料乾式貯蔵

2.4.1 目 的

使用済燃料の貯蔵については、「もんじゅ」、実証炉1号では水プール貯蔵方式を採用または計画している。水プール貯蔵方式は、水による放射線遮蔽や熱的マージンが大きい等の利点を有している一方、燃料を水プールに貯蔵する前に付着ナトリウムを除去する設備が必要であり、また、貯蔵中の燃料の健全性を維持するためにプール水冷却・浄化設備が必要である。さらに、上記設備から放射性廃棄物が発生し、これらが水プール貯蔵方式のコスト増加要因となっている。

そこで、使用済燃料貯蔵設備のコスト低減を目的として、水プール貯蔵方式に代わる乾式貯蔵方式の開発を行う。開発に当たっては、実用炉段階では軽水炉と経済的に競合できること、ならびにFBRの特質を生かしたプルトニウムの利用体系を確立することが望まれることから、次の観点で開発を行う。

- (1) プルトニウムの有効利用の観点から、使用済燃料を炉内から直接取り出し、再処理施設に速やかに搬出するシステムに適合する乾式貯蔵設備の開発を行う。
- (2) 燃料サイクルの運用に柔軟性を持たせる観点から、中間貯蔵施設に適合する乾式貯蔵設備の開発を行う。

乾式貯蔵方式は貯蔵雰囲気によって、液体中貯蔵方式とガス中貯蔵方式に大別される。前者はナトリウム、低融点合金、不活性液体等を用い高発熱燃料の貯蔵が可能で、上記(1)に適した方式である。後者はアルゴン、ヘリウムなどを用い低発熱燃料を比較的簡素な設備で貯蔵でき、上記(2)に適した方式である。液体中貯蔵方式については、ナトリウムポット貯蔵方式(図-1参照)が実証炉、実用炉用に、また米国のSAFR炉で検討されている。ガス中貯蔵方式については、ガス中裸燃料貯蔵方式(図-2参照)、ヘリウム缶詰貯蔵方式等が実証炉、実用炉用に検討されている。

2.4.2 全体の概要

使用済燃料乾式貯蔵開発のサクセスツリー展開図を図-3に示す。開発は次の3段階で進める。

- (1) 基本開発段階 : 燃料取扱設備の簡素化、廃棄物量の低減を目指した乾式貯蔵システム

の実現を目標

(2) 実用化移行段階：原子炉構造の簡素化を目指した炉外減衰待ち貯蔵の実現を目標

(3) 完 成 段 階：プルトニウムの有効利用による燃料サイクルコストの低減を目指した
短期貯蔵（早期搬出）の実現を目標

基本開発段階では、まず候補概念の摘出を行い、炉外減衰待ち貯蔵に適合する液体中貯蔵方式と中間貯蔵に適合するガス中貯蔵方式の貯蔵雰囲気、貯蔵形態等の貯蔵設備の基本条件を整理し、研究開発項目の絞り込みを行う。次に、それぞれの方式の安全性と経済性向上に着目し、除熱性能、冷却体系の維持、遠隔保守補修方法、破損燃料の取扱方法に関する研究開発を行う。

実用化移行段階では、未減衰・高発熱燃料の貯蔵に伴う安全性の確保とこれを合理的に達成することに着目し、基本開発段階で構築したシステムの除熱性の向上策と被ばくの抑制策に関する研究開発を行う。

完成段階では、貯蔵技術の確立と未減衰・高発熱燃料の輸送に伴う安全性の確保と社会的な容認を得ることに着目し、信頼性の高い輸送キャスク、輸送方法に関する研究開発を行う。

以上のステップによって、プルトニウムの有効利用を目指し、安全性、経済性に優れた乾式貯蔵システムを確立する。また、中間貯蔵に適した乾式貯蔵システムについては、基本開発段階で確立し、以降の開発段階では再処理施設等の開発動向に合わせて貯蔵施設の立地、建屋構造等の検討を行うものとする。

2.4.3 開発課題と解決方策

使用済燃料乾式貯蔵の開発課題と開発方法、工程等を表－1に示す。表中の難易度は開発項目の量と実現性の見通しから評価し、開発経費は開発期間と必要な開発設備規模から評価した。

(1) 基本開発段階

基本開発段階では、設備の簡素化、廃棄物量の低減を目指した乾式貯蔵の実現を目標とする。まず、候補概念の摘出を行い、炉外減衰待ち貯蔵に適合する液体中貯蔵方式と中間貯蔵に適合するガス中貯蔵方式の貯蔵雰囲気、貯蔵形態等の貯蔵設備の基本条件を整理し、研究開発項目の絞り込みを行う。次に、それぞれの方式の安全性と経済性向上に着目した研究開発を実施する。

(i) 液体中貯蔵方式

(a) 液体の種類に係わらず必要な研究開発

① 除熱性評価手法の開発

燃料の過熱を防止する除熱方法を確立するために、燃料収納容器外面の放射伝熱特性試験（ナトリウムボット貯蔵方式の場合は付着ナトリウムの影響等）、外部流体の流量配分特性試験と解析評価手法の開発を行う。

② 燃料収納容器の破損対策の確立

燃料の除熱体系を構成する機器の破損を防止するための方策、破損時の事故拡大防止対策を確立するために、破損検出方法と事故拡大防止方法の具体化、検出装置の性能確認試験、評価手法の開発を行う。

③ 遠隔保守補修技術の開発

高線量のセル内機器の遠隔保守補修装置を開発するために、機構部要素試験、モックアップによる機能確認試験を行う。

(b) ナトリウム以外の液体を用いる場合に必要な研究開発

① 破損燃料－健全燃料同一ルート取扱の成立性確認

破損燃料専用取扱い設備を不要とするために、液体のFPトラップ効果、燃料と液体との反応による破損口の拡大に関する調査を行い、同一ルートで取り扱うことの成立性を評価する。

② ナトリウム－液体分離技術の開発

ナトリウムからその液体に置換する方法を確立するために、ナトリウム－液体分離基礎試験（分離特性、形状効果）、分離装置の具体化、実機模擬確認試験（運転特性、プロセス条件）を行う。

(ii) ガス中貯蔵方式

以下の研究開発が必要である。

(a) 除熱性評価手法の開発

燃料の過熱を防止する除熱方法を確立するために、燃料または収納容器外の伝熱特性試験、外部流体の流量配分特性試験と解析評価手法の開発を行う。

(b) 遠隔保守補修技術の開発

高線量のセル内機器の遠隔保守補修装置を開発するために、機構部要素試験、モッ

クアップによる機能確証試験を行う。

(c) 破損燃料専用取扱設備の経済性確認

ガス中貯蔵方式では、ナトリウムのFPトラップ効果が期待できないことから、健全燃料とは異なる方法で破損燃料を取り扱う必要がある。従って、ナトリウム缶詰装置等の破損燃料の取扱設備について、経済性を考慮した設備の設計検討を行う。

本段階では、遠隔保守補修技術の開発の難易度、開発経費が大きく、その他の項目は、中または小さいと予想される。

(2) 実用化移行段階

実用化移行段階では、原子炉構造の簡素化を目指した使用済燃料の炉外減衰待ち貯蔵方式の実現を目標とする。

本段階では、未減衰・高発熱燃料の貯蔵に伴う安全性の向上と、これを合理的に達成することが最大の課題である。基本開発段階で開発した液体中貯蔵方式をベースとして、上記課題を解決するために、除熱性の向上対策と被ばく抑制対策について、研究開発を行う。

(i) 除熱性向上策の開発

(a) 高放射率材料の開発

高放射率材料の開発試験を行う。試験は、材料の耐放射線性、耐熱性、ナトリウムとの共存性、付着ナトリウムの影響、ナトリウムの除去方法等に着眼して実施する。

(b) 冷却材流路圧損の低減

燃料収納容器外面を空気等のガスで自然対流によって冷却する方式では、流路の圧力損失を低減し、流量を増加することが除熱性向上に効果的であることから、低圧損エアフィルターの開発試験を行う。また、塩分等の除去効率が低下した場合の流路内機器への影響を検討する。

(c) 除熱性促進構造の開発

伝熱面積の増加による除熱性向上効果が見込めるフィン付き容器等の伝熱流動試験を行う。

(ii) 被ばく抑制対策

(a) 高性能遮蔽材の開発

水素化金属、セラミックス等の遮蔽性能の向上が期待される遮蔽材の開発を行う。

(b) 運転・保守支援システムの開発

高線量率エリアへの運転員、作業員の近接が不要となるように、運転・保守の遠隔自動化をさらに進めるための装置と制御支援システムを開発する。また、保守補修頻度を低減するために、保修計画支援システムの開発を行う。両システムにはAI技術等を取り入れる。

(c) 高気密セルの開発

事故時のFP放出抑制策として、セル漏洩率を極めて小さく維持することが要求される。そこで、貫通部の高気密シール材、構造を開発する。

(d) 高性能浄化設備の開発

セル雰囲気を短時間で浄化する高性能のフィルターの開発を行う。

本段階では、高放射率材料の開発の難易度、開発経費が大きく、その他の項目も中または大きいと予想される。

(3) 完成段階

完成段階では、プルトニウムの有効利用による燃料サイクルコストの低減を目指して、使用済燃料の短期貯蔵（再処理施設への早期搬出）の実現を目標とする。

本段階では、未減衰・高発熱燃料の輸送方法の確立が重要な課題となる。必要な研究開発を以下に示す。

(i) 輸送容器の開発

高発熱の燃料の輸送が可能なキャスクを開発する。必要な研究開発は、除熱性確認試験、構造強度確認試験、取扱い機能試験等である。

(ii) 輸送装置、輸送ルートの開発

未減衰・高発熱のプルトニウム燃料の頻繁な輸送に伴い、社会的に容認され得る高い信頼性と安心感を醸成するような輸送装置、輸送ルートの確立が必要となる。そこで、天候等外部環境の影響が小さく、他の輸送機関との干渉が回避でき、万一の事故時にも放射性物質の地上放散を抑制できる地下輸送方式等の開発を行う。

また、貯蔵設備の保守補修の自律化を図るために、故障診断システムの確立、自動補修ロボットの開発を行う。

本段階の研究開発の難易度、開発経費は中程度と予想される。

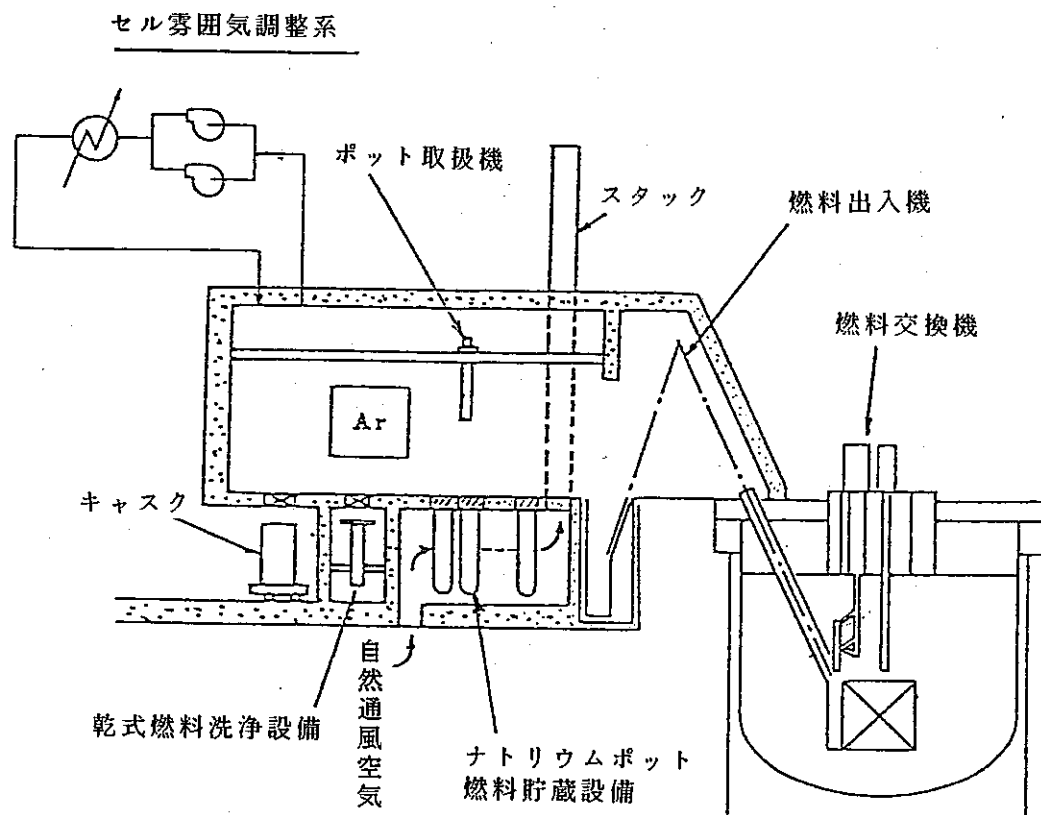
図ー１ ナトリウムポット貯蔵方式

1. システムの概念

原子炉運転停止後、使用済燃料をナトリウム入燃料ポット（ナトリウムポット）に収納して炉外に取り出す。

炉外では、燃料の除熱性確保のためにナトリウムポットに収納した状態で貯蔵を行う。

使用済燃料の搬出条件に応じて、燃料洗浄設備によって洗浄し、キャスクで搬出する。



2. 燃料貯蔵設備の概念

- 1) ナトリウムポットに収納された使用済燃料と新燃料をアルゴンガスセル内で貯蔵ラック（保持筒）に貯蔵し、外面を空気冷却する。

従来の伝熱解析結果によると、低圧損フィルタを用いた場合、

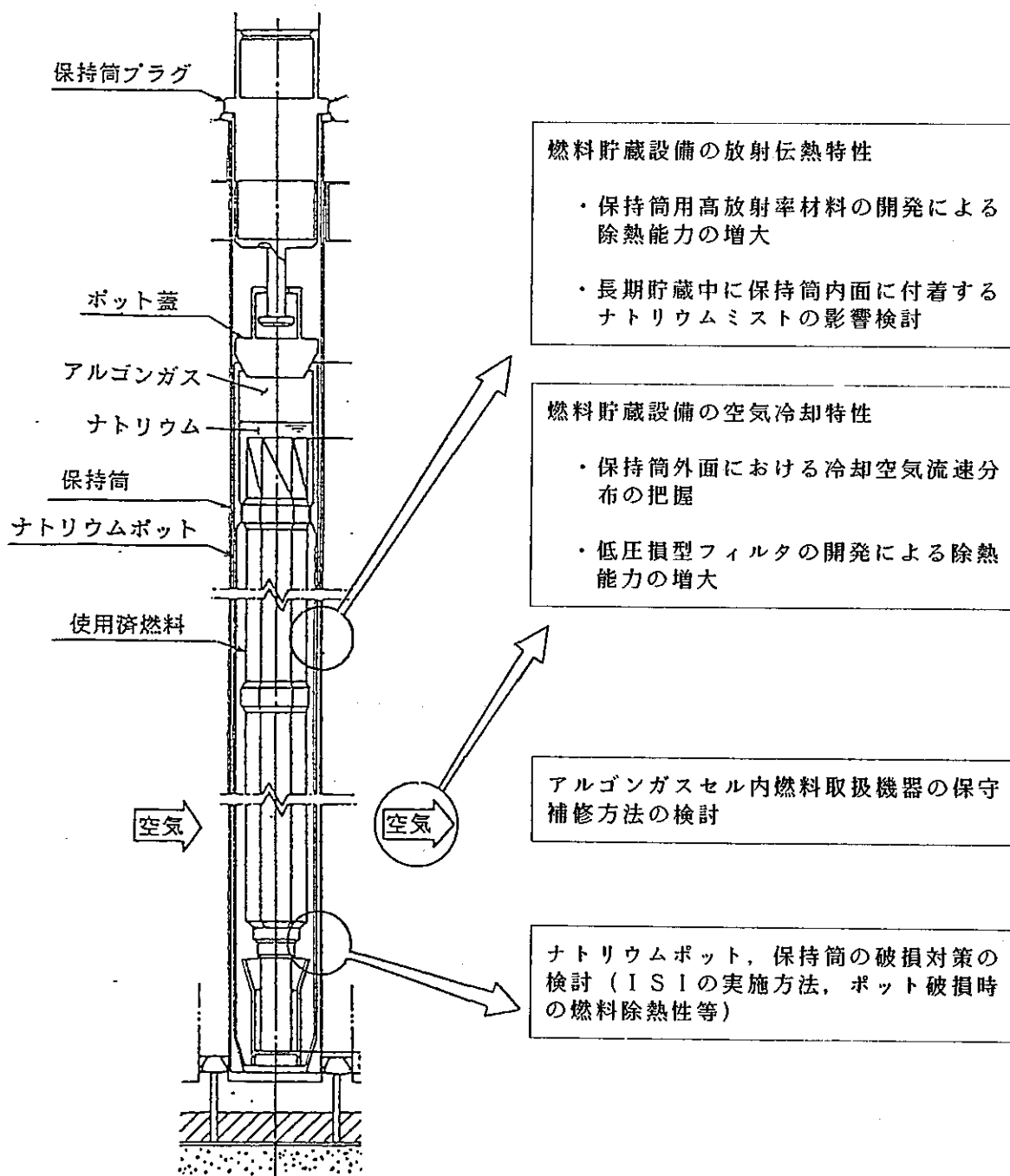
発熱量 18 kW以下のとき；自然通風冷却が可能

18 kW以上のとき；強制通風により冷却

- 2) 水プール浄化系が不要なため燃料貯蔵設備の大幅な合理化が可能である。

- 3) 貯蔵に伴って発生する放射性廃棄物はほとんどない。

3. 技術課題



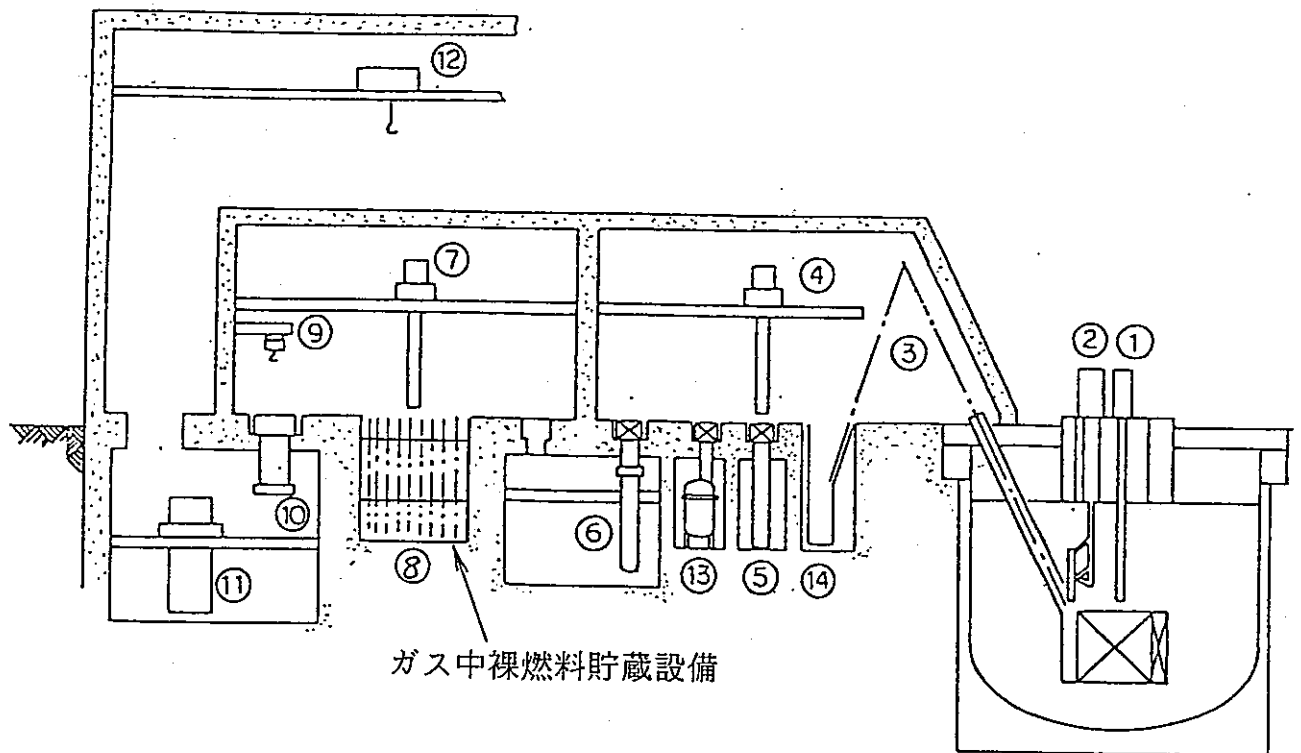
図－２ ガス中裸燃料貯蔵方式

1. システムの概念

原子炉運転停止後、炉内貯蔵した使用済燃料を炉外に取り出し、洗浄した後に空気雰囲気中に設置した貯蔵ラックに裸の状態で燃料を装荷し貯蔵する。

燃料の除熱はセル雰囲気調節系によって行う。

- | | |
|---------------|-----------------|
| ① 直動式燃料交換機 | ⑧ 使用済燃料貯蔵ラック |
| ② 伸縮アーム式燃料交換機 | ⑨ キャスク蓋取扱ジブクレーン |
| ③ 燃料出入機 | ⑩ キャスク接続装置 |
| ④ インセルクレーン | ⑪ キャスク台車 |
| ⑤ 燃料洗浄槽 | ⑫ 天井クレーン |
| ⑥ 燃料移送地下台車 | ⑬ 破損燃料缶詰装置 |
| ⑦ 燃料移送機 | ⑭ 炉外中継槽 |



2. 燃料貯蔵設備の概念

- 1) 裸の状態の使用済燃料と新燃料を空気セル内で貯蔵ラックに貯蔵し、内外面を空気で冷却する。

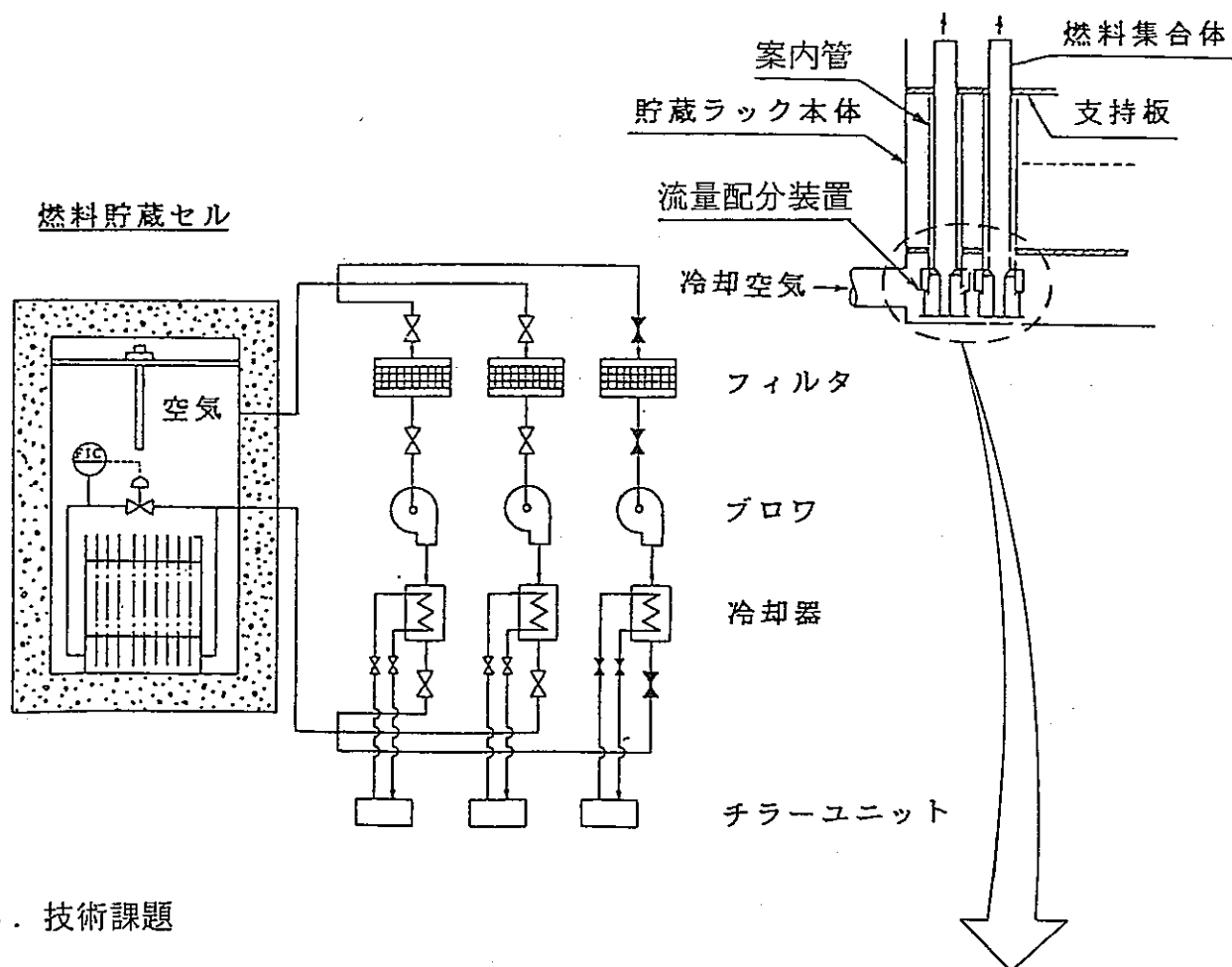
従来の伝熱解析結果によると

発熱量 1.5 kW 以下のとき；自然循環冷却が可能

1.5 kW 以上のとき；強制冷却が必要

- 2) 水プール浄化系が不要なため燃料貯蔵設備の合理化が可能である。

- 3) 貯蔵に伴って発生する放射性廃棄物はほとんどない。



3. 技術課題

セル内燃料取扱機器の保守補修方法の検討

燃料貯蔵設備の空気冷却特性
・ 流量配分機構の開発と確認

図-3 使用済燃料乾式貯蔵のサクセスツリー展開図

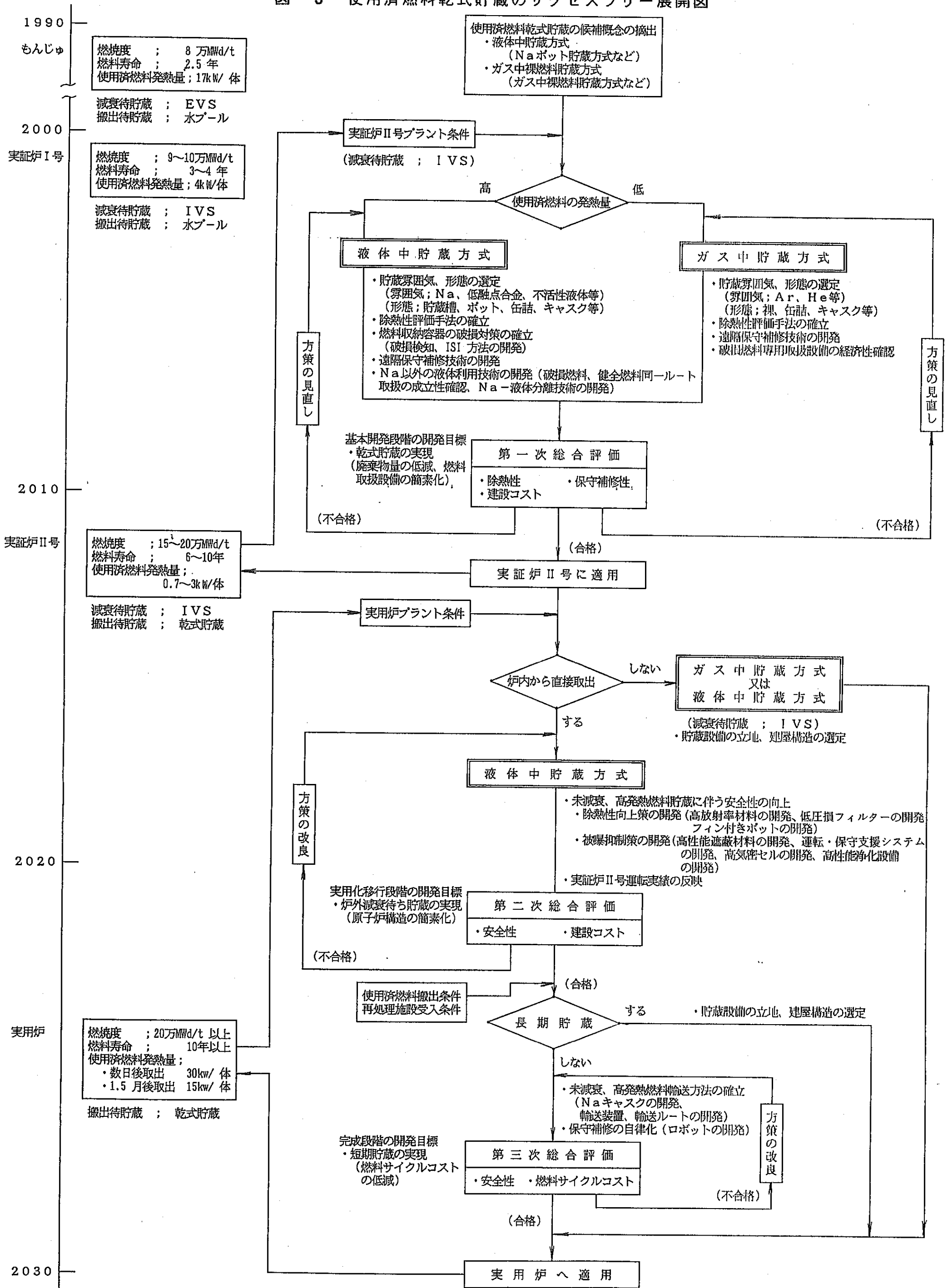


表-1 使用済燃料乾式貯蔵の開発課題と開発手順

開発課題	開発内容と方法	成立条件	難易度	開発経費	開発工程				
1. 基本開発段階	候補概念の抽出 液体中貯蔵方式 ・除熱性評価手法の確立 ・燃料収納容器の破損対策の確立 ・遠隔保守補修技術の開発 ・Na以外の液体利用技術の開発 ・破損燃料、健全燃料同一ルート取扱の成立性確認 ・Na－液体分離技術の開発 ガス中貯蔵方式 ・除熱性評価手法の確立 ・遠隔保守補修技術の開発 ・破損燃料専用取扱設備の経済性確認	－ 燃料の過熱防止 燃料冷却体系の維持 Na火災等の事故拡大防止 保守補修の遠隔化 破損燃料専用取扱設備の削除 高分離効率 燃料の過熱防止 保守補修の遠隔化 低コスト	－ 小 中 大 小 中 小 中 中	－ 中 中 大 小 中 中 小	1990	2000	2010	2020	2030
					総合評価				
2. 実用化移行段階	液体中貯蔵方式 ・未減衰、高発熱燃料貯蔵に伴う安全性の向上 ・除熱性の向上策の開発 ・被曝抑制策の開発 ・運転員の被曝抑制 ・公衆の被曝抑制	高放射率 低圧力損失 伝熱量増加 遮蔽構造の簡素化 保守補修の頻度低減、作業の自動化 セル漏洩率の低減 雰囲気浄化効率の向上	大大中 大大 中中	大中中 中中 中中					
					総合評価				
3. 完成段階	未減衰、高発熱燃料輸送方法の確立 保守補修高度化技術の開発	燃料の過熱防止、高信頼性 保守補修の自律化	中中 中	中中 中					総合評価

2.5 1次系機器合体

2.5.1 目 的

F B R実証炉は、軽水炉と競合するため建設コストの低減を目標に検討を進めてきており、ループ型F B Rプラントにおいては、さらに大幅な合理化が図れる合体型機器を開発することにより、軽水炉と同等以下の建設コストを実現できる可能性がある。ここでは、中間熱交換器、蒸気発生器および2次主循環ポンプの合体型機器概念を構築する。

2.5.2 全体の概要

F B R実証炉における最も重要な課題の1つとして、同世代の軽水炉と競合しうるプラント建設コストの低減が挙げられる。この課題に対しては従来、広範な研究が進められてきているが、ループ型F B Rプラントにおいては、さらに大幅な合理化を図るための有効な一方策として合体型機器の採用が考えられる。

ループ型F B Rプラントにおける合体型機器としては、1次主循環ポンプ、中間熱交換器、蒸気発生器および2次主循環ポンプを複数組合せることが考えられるが、本項では中間熱交換器、蒸気発生器および2次循環ポンプを合体させ、N S S S領域縮小化を行うことによってプラント建設コストの合理化を図ろうとするものである。

上記合体型機器の開発に際しては、次の3段階での実用化展開としている。

(1) 概念検討・評価段階

合体型機器の基本性能評価を目的として、基本構造の設定、振動特性評価、伝熱流動特性評価、システムとの整合性評価および摩耗評価を行う。このとき、評価に際し必要に応じて単体要素試験を実施する。

(2) 組合せ要素試験段階

上述の段階で得られた成果に基づき、実証炉Ⅱ号機への適合性評価を目的として、50MW級合体型機器を設計・製作し、50MW級試験設備にて長時間に亘る組合せ要素試験を行う。

(3) モジュラーユニット実機適用段階

合体型機器の実機（実証炉Ⅱ号機）適用実績の蓄積ならびに実用炉への適用性評価を目的として、合体型機器モジュラーユニットを実証炉Ⅱ号機に適用する。

本段階において、合体型機器適用プラントの運転・制御性等の詳細データを蓄積し、さ

らに、機器合体に対するコンセンサスを確固たるものとした上で、経済性を主眼とした実用炉への適用を図る。

2.5.3 開発課題と解決方法

図-1にサクセスツリーを示す。さらに、表-1にサクセスツリーに示した各検討・評価項目についての概要をとりまとめた。

(1) 概念検討・評価段階

本段階における最大の課題は基本構造の設定である。このとき、最も議論すべき点は機械式ポンプと電磁ポンプのいずれを選択するかという点である。すなわち、既に一定の技術レベル・実績を有している機械式ポンプ（ポンプに起因する振動により伝熱管フレッキング摩耗評価が必要）に対し、今後新たに開発していく必要のある電磁ポンプ（ナトリウム中浸漬・無冷却型）の成立性をいかに判断するかが課題であり、そのため広範なR&Dが必要である。

また、機器合体による伝熱・流動特性については、従来単体機器を開発してきた知見をベースとして、主として機器合体による固有の問題について検討・評価する。この際には、1 MWクラスの試験設備等を有効に活用し、定量的な評価を行う。

経済性（プラント建設コスト低減効果）については、基本構造の設定に際しての重要な判断因子の1つであり、また、合体型機器を実機プラントへ適用していくための推進力ともなる。このため、本段階において、機器合体によるコスト低減効果を定量的に評価する。

本段階では、経済性の面で機器合体の効果を把握することができるとともに、その成立性および基本性能について確認することができる。

(2) 組合せ要素試験段階

50MW級試験設備に合体型機器モデルを設置することにより、前段階で得られた振動特性、伝熱・流動特性、システムとの整合性が50MW級モデルにおいて維持できること、さらに製作・据付性、保守補修性が確保できることを確認する。

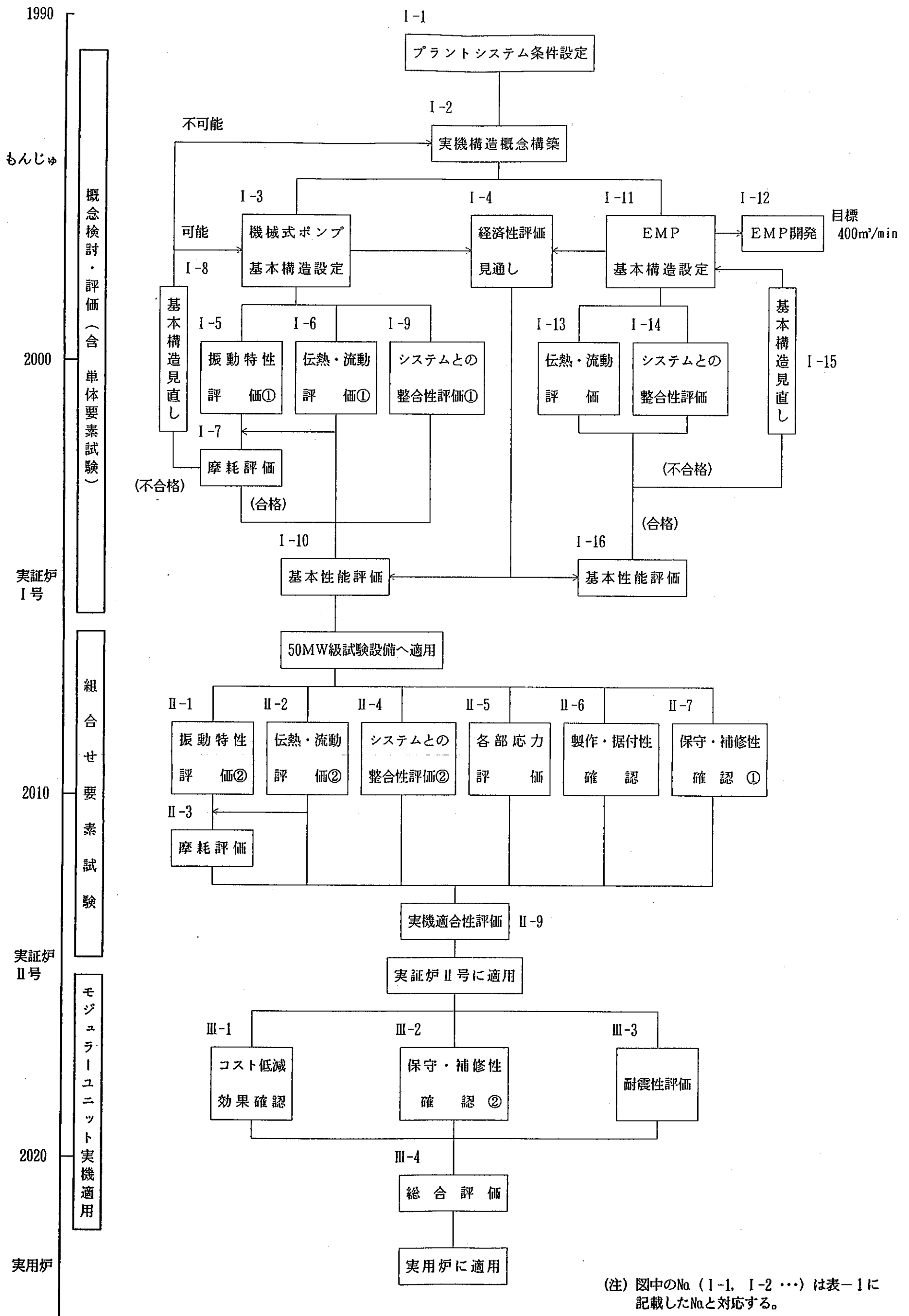
本段階では、機器合体の影響を総合的に検討・評価することにより、実機プラントへの適合性を確認するとともに、機器合体についてのコンセンサスを得る。

(3) モジュラーユニット実機適用段階

実証炉Ⅱ号機に、モジュラー型合体型機器を適用することによって、実機プラントでの

運転実績を蓄積する。このことにより、機器合体による経済性、保守・補修性評価の詳細化を図るとともに、機器合体についてのコンセンサスを確固たるものとすることができる。

図-1 1次系機器合体（ポンプーIHX-SG合体）



表－１（１／４） 主 要 開 発 項 目 の 詳 細

（注）表中のNoは図－１に記載のNoと対応する。

No	項 目	目 的	期 待 す る 効 果	予 算	備 考
I－１	プラントシステム条件の設定 ・ F B R実証炉に関する既往研究等を参考に設定。	・ 合体型機器の構造概念の構築に必要な、基本となるプラントシステム条件を設定する。	・ 対象プラント及びプラントシステム条件の明確化。	小	
I－２	実機構造概念の構築 ・ 合体型機器に採用し得るポンプ、I H X及びS G構造案の検討。 ・ 合体案の摘出及び最適概念の選定。	・ プラントシステム条件に適合するポンプ、I H X及びS G構造案を検討する。 ・ 各機器の構造案による合体案を摘出し、合体型機器としての最適概念を選定する。	・ 各機器の構造概念の確立。 ・ 合体型機器としての最適概念の選定。	小	
I－３	機械式ポンプ案の基本構造設定 ・ 各機器の基本仕様の設定。 ・ 合体型機器としての構造検討。	・ 合体型機器としての構造検討を実施するに当たり、各機器の基本仕様を設定する。 ・ 成立性評価の対象となる合体型機器の構造を検討する。	・ 各機器の設計条件、機能条件の整理及び基本仕様の明確化。 ・ 合体型機器としての基本構造の確立。	小	
I－４	経済性評価の見通し ・ 合体による機器物量及び配置スペース等の合理化効果検討。	・ 合体型機器を採用することによる合理化効果を検討する。	・ 合理化効果の見通しの確認。	小	
I－５	振動特性評価 ① ・ 伝熱管単管の振動特性の把握。 ・ ポンプ励振力による振動特性の把握。	・ 伝熱管摩耗評価に必要な流体振動及びポンプ励振力を把握する。	・ 流体振動及びポンプ励振力による振動特性の把握。	大	
I－６	伝熱・流動評価 ① ・ 伝熱性能及び胴側クロスフロー効果の確認。	・ 合体型機器の構造を伝熱・流動の観点から評価する。	・ 伝熱性能及び胴側クロスフロー効果の確認による機能条件適合性の確認。	中	必要に応じ要素試験実施。
I－７	摩耗評価 ・ 流体振動及びポンプ励振力による伝熱管フレットング摩耗量の評価。	・ 伝熱管フレットング摩耗量による伝熱管肉厚への影響を評価する。	・ 伝熱管健全性の確認。	大	必要に応じ要素試験実施。
I－８	基本構造見直し ・ 伝熱管フレットング摩耗量の検討。 〔 防振構造（止め具、ブッシュ等）、材料及び伝熱管肉厚の検討。〕	・ 摩耗対策の検討を行い、摩耗量を評価することにより伝熱管健全性を評価する。	・ 機械式ポンプ合体型機器の基本構造成立性の確認。	中	必要に応じ要素試験実施。

表-1 (2/4) 主要開発項目の詳細

(注) 表中のNoは図-1に記載のNoと対応する。

No	項 目	目 的	期 待 す る 効 果	予 算	備 考
I-9	システムとの整合性評価 ・ポンプトリップ時の必要GD ² の確認。 ・各機器の寸法制限及び機能要求条件の評価。	・合体型機器としてのシステム要求条件について評価する。	・合体型機器としてのシステム要求条件との適合性の確認。	中	
I-10	基本性能評価 ・基本構造成立性の評価。 ・各機器の基本性能評価。	・基本構造成立性及び基本性能を確認する。	・機械式ポンプ合体型機器の基本構造成立性及び基本性能の総合的確認。	小	
I-11	EMP案の基本構造設定 ・各機器の基本仕様の設定。 ・合体型機器としての構造検討。	・合体型機器としての構造検討を実施するに当たり、各機器の基本仕様を設定する。 ・成立性評価の対象となる合体型機器の構造を検討する。	・各機器の設計条件、機能条件の整理及び基本仕様の明確化。 ・合体型機器としての基本構造の確立。	小	
I-12	EMP開発 ・浸漬型EMPの信頼性の確認。 ・大容量EMPの開発。(目標 400m ³ /min)	・合体型に適合する大容量EMPの開発と信頼性を確立する。	・浸漬型EMPの信頼性の確立。(実績) ・大容量EMPの製作。	大	2005年までの開発目標は、20m ³ /minとし大型化成立性の目度を得る。
I-13	伝熱・流動評価 ・伝熱性能及び胴側クロスフロー効果の確認。	・合体型機器の構造を伝熱・流動の観点から評価する。	・伝熱性能及び胴側クロスフロー効果の確認による機能条件適合性の確認。	大	必要に応じ要素試験実施
I-14	システムとの整合性評価 ・ポンプトリップ時におけるフローコストカーブの確認。 ・各機器の寸法制限及び機能要求条件の評価。	・合体型機器としてのシステム要求条件について評価する。	・合体型機器としてのシステム要求条件との適合性の確認。	中	
I-15	基本構造見直し ・伝熱・流動及びシステムとの整合性評価における不具合部の構造見直し。	・各評価における不具合部の構造を見直し、EMP案の基本構造を再設定する。	・EMP案の基本構造最適化。	中	
I-16	基本性能評価 ・基本構造成立性の評価。 ・各機器の基本性能評価。	・基本構造成立性及び基本性能を確認する。	・EMP合体型機器の基本構造成立性及び基本性能の総合的確認。	小	

表－１（３／４） 主 要 開 発 項 目 の 詳 細

（注）表中のNoは図－１に記載のNoと対応する。

No	項 目	目 的	期 待 す る 効 果	予 算	備 考
Ⅱ－１	振動特性評価 ② ・流体励振力及びポンプ励振力の定量的把握。 ・ポンプ支持剛性の影響評価及び必要剛性の確認。	・伝熱管摩耗評価に必要な流体励振力、ポンプ励振力及びポンプ支持剛性を定量的に把握する。	・流体励振力及びポンプ励振力の定量化。 ・ポンプ支持剛性の明確化。	大	
Ⅱ－２	伝熱・流動評価 ② ・伝熱性能及び胴側クロスフロー効果の確認。 ・過渡時温度分布の把握及び各部断熱構造の評価。	・スケールアップ効果による伝熱性能を確認する。 ・応力評価に必要な過渡時温度分布を把握し、各部断熱構造を評価する。	・機能条件適合性の確認。 ・過渡時温度分布の確認。	中	
Ⅱ－３	摩耗評価 ・伝熱管フレットング摩耗評価及び実証試験。	・伝熱管摩耗量を試験により確認する。	・伝熱管フレットング摩耗量の定量化。	大	
Ⅱ－４	システムとの整合性評価 ② ・カバーガス圧力制御方式の確立。 ・２次純化系、充填ドレン系との整合性評価。 ・建屋配置（保守・補修性含む）の評価。	・周辺設備との整合性を評価し、プラント全体としての整合性を確認する。	・プラント全体としてのシステムとの整合性の確立。	中	
Ⅱ－５	各部応力評価 ・管板、Ｙピース、異材継手部、伝熱管等の応力評価。	・過渡時応力評価を行い、構造健全性を確認する。	・過渡時構造健全性の確認。	中	
Ⅱ－６	製作・据付性確認 ・合体による長尺化機器の製作法の確立。 ・各接続部位置決め及び機器据付精度の確立。	・実機製作時に必要な、製作法を確立する。 ・機能条件を満足させる据付精度を確立する。	・合体型機器製作性の確認。 ・合体型機器据付性の確認。	中	
Ⅱ－７	保守・補修性の確認 ① ・伝熱管リーク管同定及びプラグ手法の確立。 ・ＳＧ伝熱管体積検査装置の開発。 ・据付時保有水の水抜き方法の確立。	・保守・補修における手法及び装置を開発し、保守・補修性を確立する。	・保守・補修性の確認。	大	
Ⅱ－８	実機適合性評価 ・５０ＭＷモデルによる。	・５０ＭＷモデル試験結果により各評価項目を確認する。	・各評価結果の信頼性確認。	小	

表－１（４／４） 主 要 開 発 項 目 の 詳 細

（注）表中のNoは図－１に記載のNoと対応する。

No	項 目	目 的	期 待 す る 効 果	予 算	備 考
Ⅲ－１	コスト低減効果確認 ・機器・配管物量及び配置スペース等の合理化によるコスト低減率の確認。	・合体型機器の採用によるコスト低減効果を把握する。	・コスト低減効果の確認と、項目別コスト低減効果の把握。	小	
Ⅲ－２	保守・補修性の確認 ② ・SG・IHX管束部引抜き方法の確立。 ・２次ポンプ保守・点検手法の確立。 ・管束部及びポンプメンテナンススペースの確認。	・長尺化機器の引抜きを含む保守・補修手法を確立する。	・保守・補修性の確認。	大	
Ⅲ－３	耐震性評価 ・大容量スナバの性能確認。	・長尺化機器の耐震性評価及び大容量スナバの性能を確認する。	・合体型機器全体の耐震性の確認及び構造健全性の確立。	大	
Ⅲ－４	総合評価 ・経済性及び健全性の確認。	・合体型機器としての経済性及び健全性をモジュールユニットにより実証する。	・各評価結果の信頼性確認。 ・実用炉への適用性評価。	中	

2.6 超長寿命高性能炉心

2.6.1 目 的

FBRの経済性向上のためには燃料サイクルコストの低減が重要である。将来のFBRでは燃料サイクルコストの大幅な低減のために、長寿命高性能炉心および超長寿命高性能炉心の開発が考えられる。長寿命高性能炉心は、燃焼度が15～20万MWd/tで燃料寿命は6～10年以上が必要となる。

また、超長寿命高性能炉心は、より燃料寿命を伸ばし10～30年を達成することが望ましい。

本テーマの目的は、前記長寿命高性能炉心および超長寿命高性能炉心の開発段階、その対策について検討することにある。

2.6.2 全体の概要

超長寿命高性能炉心のサクセスツリー展開図を図-1に示す。「もんじゅ」、実証炉Ⅰ号、実証炉Ⅱ号から実用炉への長寿命高性能炉心の開発に対応して、炉心、燃料のそれぞれにおいて図-1に示す技術開発、課題の検討、材料の開発等を実施していく必要がある。

実証炉Ⅰ号炉心では大型均質炉心と改良オーステナイト鋼を使用した燃料により、9～10万MWd/tの燃焼度を達成し、さらにその取替炉心では軸非均質炉心と最適化オーステナイト鋼を使用した燃料により、13万MWd/t程度の燃焼度を達成していくことが望ましい。

実証炉Ⅱ号炉心では安全性、経済性向上のための炉心最適化を実施した長寿命高性能炉心と高強度フェライト鋼を使用した燃料により15～20万MWd/tの燃焼度を達成していくことが望ましい。

実用炉炉心は、長期的エネルギー供給の観点からの炉心最適化を行うとともにダクトレス集合体概念等の新概念炉心を適用する長寿命高性能炉心と高強度、低スエリング材を用いた燃料により20万MWd/t以上の燃焼度を達成することを目標としている。

2.6.3 開発課題と解決方策

(I) 基本開発段階（実証炉Ⅰ号段階）

(i) 初期炉心

(a) 大型均質炉心

大型均質炉心の炉心特性，核計算精度に関しては日米共同の大型臨界実験 J U P I T E R 等によりデータが蓄積されている。炉心核特性 C / E 値の炉心径方向依存性解消が課題として残されており，炉定数調整の検討，J E N D L E - III 適用の検討等を進め，核計算精度をより向上させることが望ましい。また，燃焼効果について「常陽」，「もんじゅ」等の実機データを用いて効果を把握していく必要がある。また，遮蔽計算精度については J A S P E R 実験等によりデータが蓄積されているが今後，さらに精度向上が望ましい。その他の課題としては制御棒の長寿命化，新型遮蔽体（黒鉛，B₄C）の開発がありそれらを進めることが必要である。

(b) 改良オーステナイト鋼燃料

約 $3 \times 10^{23} \text{ n / cm}$ の照射を目標とした高強度・低スエリング材として改良オーステナイト鋼の開発が進められている。今後さらに高照射領域までのデータ蓄積追加が望まれる。燃料の性能，仕様としては線出力 430 W / cm ， $7.5 \sim 9.5 \text{ mm}$ の太径燃料，下部プレナム構造とする大型燃料集合体設計が必要である。

(ii) 取替炉心

(a) 軸非均質炉心

均質炉心と同様に軸非均質炉心の炉心特性，核計算精度に関しては大型臨界実験 J U P I T E R - III によりデータが蓄積されている。C / E 値径方向依存性の課題も均質炉心と同様であり炉定数調整の検討，核定数 J E N D L E - III 適用の検討等も進め，核計算精度をより向上させることが望ましい。また，燃焼効果の把握についても均質炉心と同様に進める必要がある。軸非均質炉心については，安全性に関しても有利な特性が期待され，その解析を進めていくことが望ましい。

(b) 最適化オーステナイト鋼燃料

改良オーステナイト鋼をさらに最適化することにより，約 $4 \times 10^{23} \text{ n / cm}$ の照射量に耐えられる材料を開発することにより燃料の長寿命化を図る必要がある。また，線出力密度の目標も 450 W / cm とする。なお，軸非均質炉心燃料の常陽，Phoenix 等による炉心中にブランケットと炉心の境界のある軸非均質燃料の健全性データが蓄積されているが，さらに解析等によりその健全性データを蓄積することが望ましい。

(2) 導入促進段階（実証炉 II 号）

(i) 長寿命高性能炉心(1)

実証炉Ⅱ号の開発は2010年前後と考えられ、安全性と経済性の両者を向上させた炉心最適化を図る必要がある。内容としては燃焼反応度低減、出力平坦化、集合体出力低減、線出力低減、制御性、自然循環特性の改善等が望まれる。

また、燃料サイクルコストの低減のためにブランケットを削減する方向が望ましいと考えられる。

また、燃焼度15～20万MWd/tに対応した高燃焼度炉心特性の把握が必要である。また、より長寿命の新概念制御棒の開発、自然循環冷却炉心の検討も必要になると考えられる。

(ii) 高強度フェライト鋼燃料

オーステナイト鋼よりも低スエリング特性を有し、高温強度も良好なフェライト系の材料を開発していく必要がある。材料の開発は長期を要するため、現時点から着実に進める必要がある。また、被覆管内面腐食低減対策の開発、中空ペレット燃料の開発、逆ノズル型概念による集合体の短尺化等が必要である。

(3) 本格導入から安定的拡大段階

(i) 長寿命高性能炉心(2)

FBRの本格的導入が開始されると考えられる2020年から2030年においては、エネルギーを継続的に供給する観点から炉心を最適化する必要がある。本格的導入段階では燃料としてのプルトニウムを確保するために高増殖比を必要とすると考えられるが、同時に経済性、安全性に関連する特性も改善することが望ましい。これらの実現のためにはダクトレス炉心、金属、炭化物、窒化物のような新型燃料炉心の実用化が必要になると考えられ、現時点からの着実な開発が望まれる。また、この時点までにはTRU燃焼炉心の実用化が望ましい。

(ii) 高性能・新概念燃料

本格的導入段階では燃料サイクルコスト低減のために燃焼度は20万MWd/t程度まで耐えられる高強度、低スエリング材の開発が必要である。また、ダクトレス燃料の開発実用化、金属材料等の新型燃料の開発実用化が必要と考えられる。

(iii) 超長寿命高性能炉心

FBRの安定的拡大段階においては、経済性をより進めるために運転サイクルを10年以上とし、さらにプラント寿命中に燃料交換の不要な超長寿命炉心の開発が望まれる。この炉心実現のためには高燃料密度でかつ低出力密度型の炉心開発が必要になり、ダク

トレス炉心、新型燃料炉心等の革新概念を統合していく必要がある。

2.6.4 補足説明

超長寿命高性能炉心の開発に対しては、その高性能の内容は開発時点の環境条件に依存する。そこで、FBRに望まれる基本的役割をウラン資源、軽水炉等の背景、Pu国内蓄積量、燃料再処理量から考察し、図－2にまとめる。

図-1 超長寿命高性能炉心のサクセスツリー

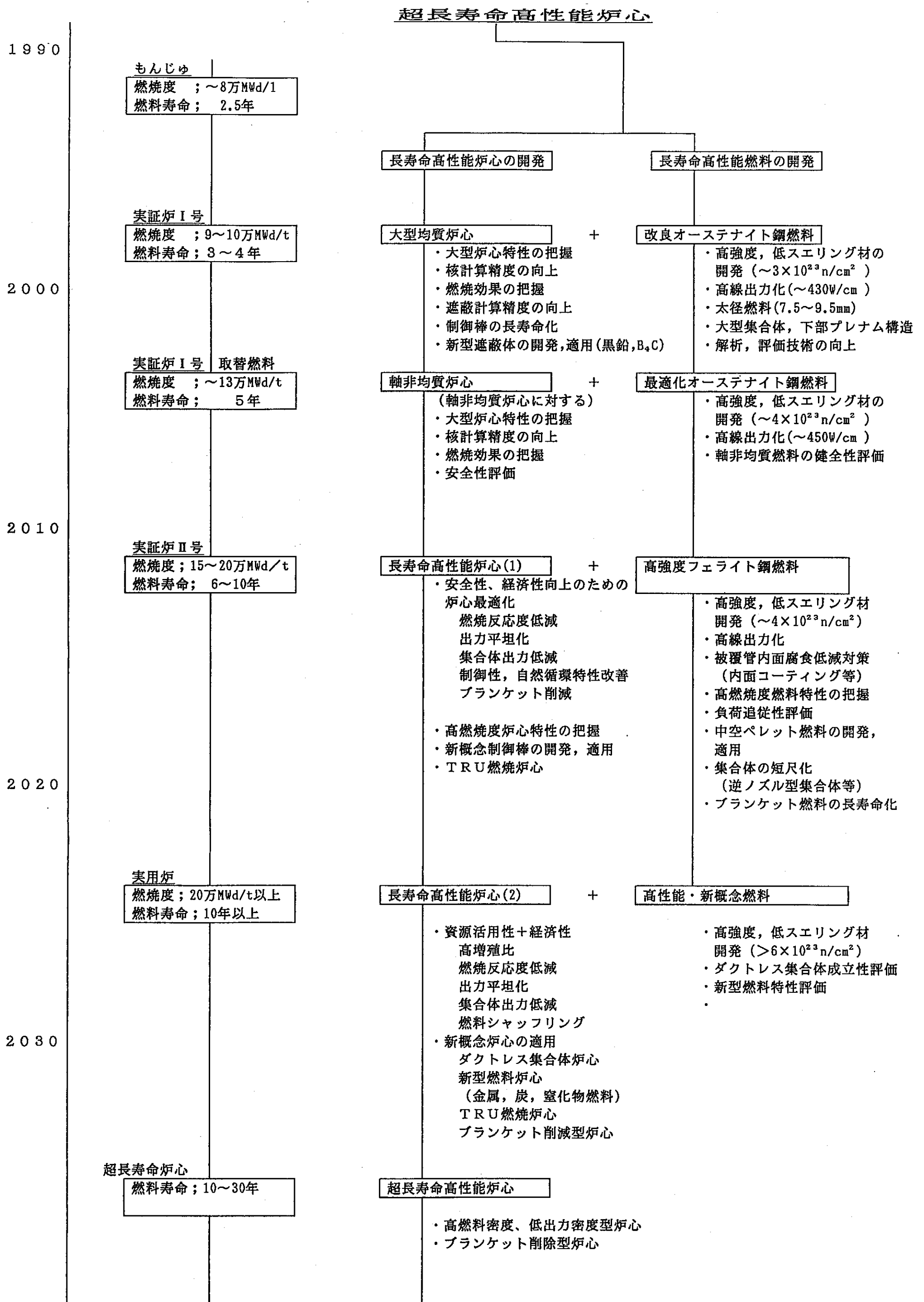
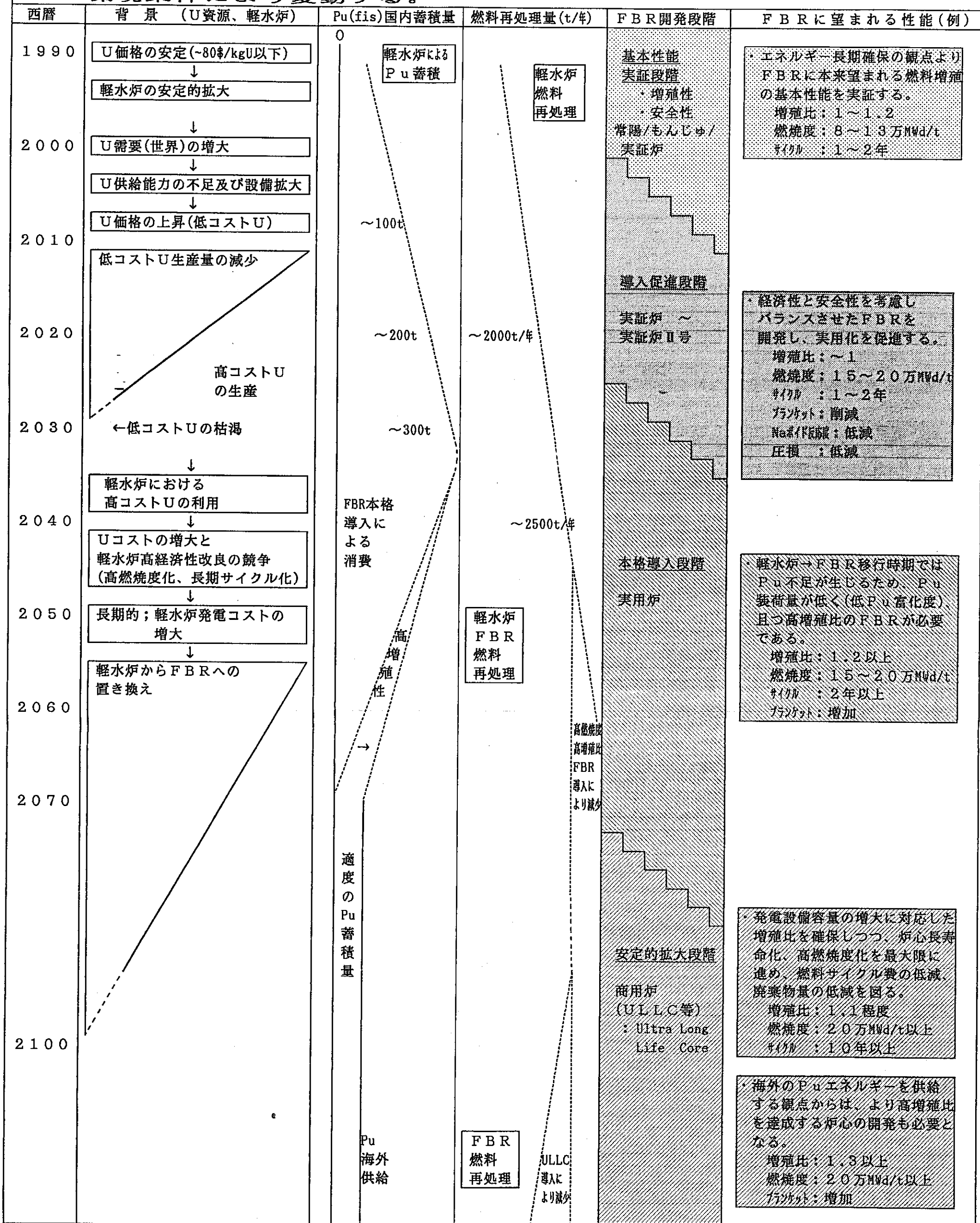


図-2 FBRの役割

テーマ：超長寿命高性能炉心

FBRに望まれる基本的役割及び性能

- ・ エネルギーの長期確保＝基本的役割
(化石燃料、ウランの軽水炉利用→有限)
- ・ ただし、FBRに望まれる性能は
環境条件により変動する。



2.7 ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプ

2.7.1 目 的

FBRの実用化に向けては、安全性、信頼性を確保するとともに徹底した経済性の改善を行い、魅力あるFBRプラントを開発する必要がある。この要件に適合した技術として、電磁ポンプを主冷却系へ適用する構想が考えられる。

電磁ポンプは、機械式ポンプに比較して、可動部がなく完全密封状態で電磁力によりナトリウムを移送できるため、安全性、信頼性の面で優れている。さらに、自由液面がないため設置自由度が大きく、潤滑油系などの補機設備が不要でメンテナンスが容易で運転制御性が良く、小型化が可能であるなどの特徴がある。しかし、従来、FBRプラントの主循環ポンプには、電磁ポンプは効率が低いこと（約45%）、およびコイルの強制冷却が必要であり、機械式ポンプの代替配置の概念では、プラントシステムの簡素化のメリットが少ないことから、主に機械式ポンプが採用されてきた。

一方、最近の新素材の開発進展に伴い、ナトリウムに浸漬して強制冷却なしで使用できる高温電磁ポンプが実現できれば、次の特徴をプラント設計に生かすことができ、FBRの実用化に向けた有望な技術となり得る。

- (1) ポンプの設置自由度が飛躍的に増大し、熱交換器類等他機器との合体が容易となり、プラントの簡素化につながる。
- (2) 強制冷却型電磁ポンプに比べ、コイルで発生した熱（損失）をナトリウム中に回収でき、プラント全体の効率向上につながる。
- (3) 強制冷却系の動的設備が削除され、信頼性、保守性の向上につながる。

このような電磁ポンプの特徴を生かし、プラントの簡素化を指向する工夫および主循環系への適用を考慮した大容量電磁ポンプの開発が近年世界的に注目されている。

米国では、モジュラー型炉PRISMの1次主循環ポンプ（40m³/min）にナトリウム浸漬型ポンプを適用した設計研究および基礎的研究がなされている。

また、仏国では、2次系システムに強制冷却型電磁ポンプを採用すべく、大容量化に向けた中間規模ポンプの流動試験（10m³/min）評価が実施された。

さらに、ソ連ではBH-350プラントの2次系機械式ポンプを強制冷却型電磁ポンプ（約60m³/min）に取り換え、特性試験評価が実施された。

一方、国内では、ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプを適用したプラント概念の検討および要素開発、基礎試験が行われている。

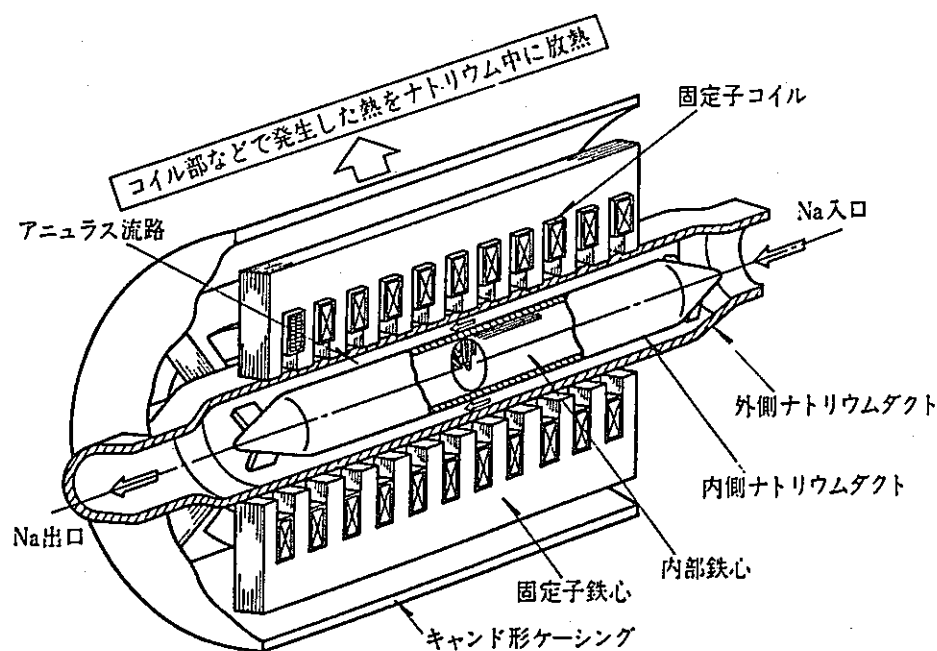
2.7.2 全体の概要

ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの基本構成は、図－１に示すように、固定子鉄心、コイルなどの電磁気構成部品をキャンド型ケーシングで完全密封し、ナトリウムに浸漬して使用するものである。また、このポンプは、冷却媒体をコイルなどの電磁ポンプ機内に循環させることなく、内部で発生した熱は、キャンドケーシングやダクトなどのナトリウム接液部表面から外側のナトリウム雰囲気（約300～400℃）に自然放熱するものである。従って、最も重要な開発課題は電磁気部品の耐熱性である。

ナトリウム浸漬型無冷却主循環ポンプの開発ステップとしては、①ナトリウム浸漬型電磁ポンプの特徴を生かしたプラントシステムの構成、その要求に基づくポンプ概念の構築と成立性評価を含めた適用性研究、②耐熱電磁気部品の開発と小容量ポンプによる機能・性能評価に主眼を置く基礎研究、③大容量および長期健全性に着目した確証試験に大別される。

図－２に「ナトリウム浸漬型無冷却主循環電磁ポンプ」のサクセスツリーを示す。

図－１ ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの基本構成



2.7.3 開発課題と解決方策

(1) プラントへの適用性研究

本研究では、ナトリウム浸漬型主循環電磁ポンプの特徴を分析し、プラントレベルでの用途（導入方策）を明確化し、また、電源制御方式をも含め主循環電磁ポンプシステムの構築、その成立性評価が重要なポイントとなる。以下要点をまとめる。

(i) プラントシステムの構築

安全性・信頼性を確保するとともに経済性を追及したプラントシステムを構築するに当たり、主循環電磁ポンプを1次系へ適用する概念、2次系へ適用する概念が考えられ、単に従来の機械式ポンプの代替というシステム概念ばかりでなく、熱交換器類の他機器との合体等による新たな簡素化を指向したシステムの構築が必要である。その際、以下の事項に着目した総合評価を実施することが重要である。

- ① プラントシステムならびに機器構成
- ② プラント運転制御性
- ③ 安全性・信頼性
- ④ 保守・補修性
- ⑤ 許認可への対応

(ii) 主循環電磁ポンプ概念構築

本研究では、プラントの要求に合致した、小型で信頼性の高い主循環電磁ポンプの概念を構築し、大容量ポンプ特性の評価、主循環ポンプとしての運転制御特性の検討を実施し、成立性を評価するとともに、技術課題を整理し、研究開発の位置づけ、方向性を明確化するものである。

(2) 基礎研究

従来の強制冷却型電磁ポンプに対しては、我が国のFBRの開発当初から並行して開発が行われており、容量数 $l/min \sim 10m^3/min$ の製作・試験により特性評価、健全性評価が実施されてきた。

一方、ナトリウム浸漬型ポンプの場合、従来の冷却型ポンプに比べて高い耐熱性が要求されるため、電磁気部品に最近開発進展の著しい耐熱新素材を適用する基礎研究から始める必要がある。

従って、開発の第1ステップとしては、耐熱コイル・鉄心の開発に着目した電磁気部品

の要素開発とここで開発された電磁気部品を適用した小容量ポンプによるポンプ機能・性能面からの成立性評価が必須となる。

次期ステップの基礎研究としては、高温電磁気部品の大型化に伴う技術開発が必要となる。

(i) 電磁気部品の要素試験

ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプの場合、約300～400℃程度の高温ナトリウムの中に浸され、また、コイル鉄心などでの自己発熱を考慮すると電磁気部品は、500～550℃程度の高温雰囲気中に保持され、安定した機能が要求される。表－1に電磁ポンプの主要部材に要求される機能とその候補材を示す。

ケーシング、ダクトなどのナトリウム接液部の構造材に対しては、従来のFBRプラントで使用実績の多いオーステナイト系ステンレス鋼で対応できる。一方、コイル・鉄心などの電磁気部品に対しては、高温での電気特性・磁気特性・機械強度に優れた材料の選定が必要となり、要素試験にてその特性を把握し、適用する必要がある。また、原子炉容器内で使用するポンプの場合、耐放射線性も考慮する必要がある。

(ii) 小容量ポンプ特性試験

本研究は(1)で適用性を確認した電磁気部品を採用して小容量ポンプを試作し、機能・性能面からの成立性を評価する事に主眼を置くものであり、特に以下の評価を実施す

表－1 主要部材の要求機能と候補材

主要部材	機 能	使用温度（℃）	要求される特性	候 補 材
ケーシング ダクトなど	構造材	500	Naとの適合性 高温強度	SUS材
コ イ ル	導電材	550*	高温導電性 高温強度	Cu合金
	絶縁材	550*	高温絶縁耐力 高温絶縁抵抗 耐摩耗性	マイカテープ セラミック繊維
鉄 心	磁気回路	550*	高温磁気特性 高温絶縁特性	無機質コーティング けい素鋼板

* 自己発熱を考慮した温度

るものである。

① 高温ナトリウム中でのポンプ特性評価

② 高温ナトリウム中でのポンプ機能評価

(iii) 電磁気部品の耐久性評価

(i), (ii) の研究は主として、小容量ポンプの成立性あるいは、候補材の適用性評価に主眼を置いているが、次期ステップとして大容量化を指向するにあたり、電磁気部品として大型化・耐久性に着目した研究が必要となる。

ここでは特に、

① 大型高電圧耐熱コイルの健全性の評価

② 1次系炉内において使用する際の材料の照射試験評価

を実施し、健全性を確認することが重要な項目となる。

(3) 確証試験研究

電磁ポンプの大容量化技術開発としては、Step by Stepで、スケールアップした大容量ポンプの試作・試験を行い、機能・性能および耐久性を確認しつつ開発を進める必要がある。

大容量化のステップとしては、以下の要領で進めることで対応可能と考える。

(i) 20～40m³/minクラスの中容量ポンプの特性試験評価

(a) ポンプ特性評価

- ・ポンプP-Q特性、効率特性
- ・キャビテーション特性
- ・ポンプ内部温度分布評価
- ・機械機能・電気機能の健全性評価

(b) ポンプ運転特性評価

- ・印加電圧/周波数=Const, 条件下でのポンプ特性
- ・ポンプ運転・制御応答特性

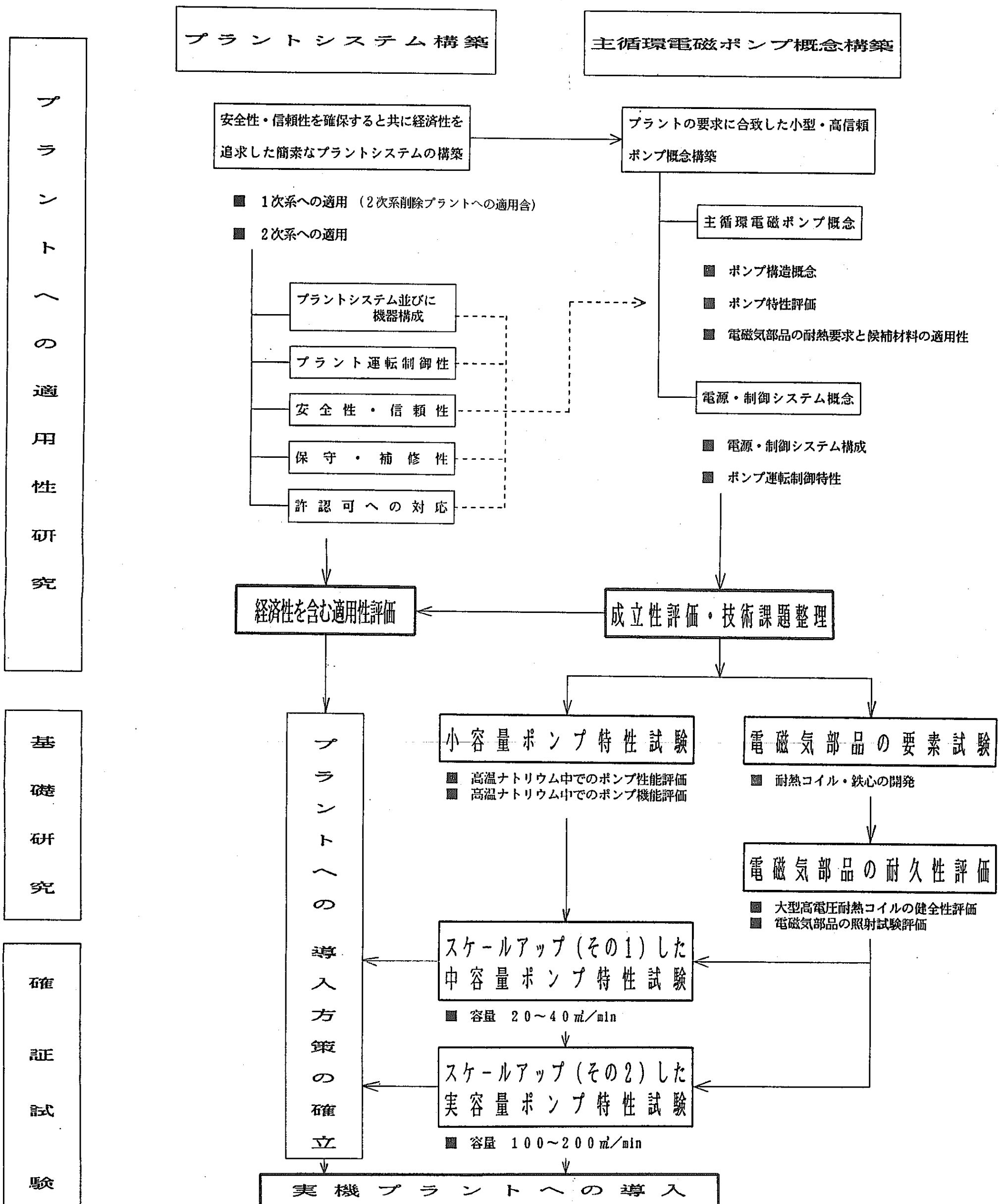
(c) 実容量ポンプへの反映項目の整理

(ii) 容量 100～200m³/minクラスの実容量ポンプの実証試験評価

(a) 実機プラントへの導入のための総合評価

(b) 許認可への対応項目の評価

図-2 ナトリウム浸漬型無冷却電磁ポンプ



2.8 ホットセル方式燃料交換方式

2.8.1 目 的

従来、FBRの燃料交換システムには、回転プラグの回転を燃料交換機のグリッパの位置決めに利用し、燃料の交換をルーフデッキ下部で行うアンダーザプラグ方式の燃料交換システムが、主に用いられてきた。我が国でも、常陽、もんじゅおよび実証炉Ⅰ号にアンダーザプラグ方式が採用されている。

アンダーザプラグ方式は、燃料の交換をルーフデッキの下部で行うため、次の利点を有している。

- (1) ルーフデッキを解放することなく燃料交換できるため、燃料交換準備および後始末が容易で、また、燃料交換時においても、ルーフデッキによりカバーガスバウンダリ、放射線遮蔽層が維持できる。
- (2) 燃料の原子炉容器内での取扱用の燃料交換機と原子炉容器内外での燃料出入用の燃料出入機を個別に設置するため、燃料交換と燃料出入れを並行して実施できることから、燃料交換時間を短くできるポテンシャルがある。

しかし、アンダーザプラグ方式に用いる回転プラグは大型の構造物で、かつ高精度を要求される回転機器であるため、大型のベアリング、可動シール等の複雑な機構を有する事から、製作コストがかかり、また複雑なメンテナンスを必要とする。また、回転プラグが原子炉容器の直径を決める要因の1つとなっている。さらに、アンダーザプラグ方式は、回転プラグに加えて燃料交換機と燃料出入機の2種類の燃料移送機を必要とすることから、これもコスト増加の要因となっている。

そこで、回転プラグを使用せず、また燃料交換と燃料出入れを1基の燃料取扱機で行う事が可能なシステムとして、ホットセル方式燃料交換設備が開発できれば、原子炉容器の小径化、燃料交換設備のコスト低減の上で有効である。

なお、ホットセル方式は、米国のSEFOR炉に採用例があるのみで、大型炉への適用例はなく、実用化に当たっては大型炉への適用性について十分な研究開発を行う必要がある。

2.8.2 全体の概要

ホットセル方式燃料交換方式のサクセスツリー展開図を、図－１に示す。ホットセル方式燃料交換方式の概念図、その特徴および課題を図－２に示す。本方式は、実証炉Ⅱ号での採用を目指し、開発は次の３段階で進め、開発が完了した段階で実機に適用するものとする。

(1) 第１段階

第１段階では、ホットセル方式燃料交換方式の成立性を支配する最も重要な課題である昇降式炉心上部機構を実現させる上での技術課題の解決を目標とし、昇降機構、シール機構等の開発を行うとともに、ルーフデッキを解放する事にともなう安全性の確立を図るための研究開発を実施する。

FBRは、高温のナトリウムを冷却材に用いているため、熱応力を低減して原子炉容器の健全性を保ち、冷却材の漏洩を防止するため、原子炉容器はノズル等ナトリウム中の貫通部の極力少ない構造としている。このため、制御棒駆動機構を炉心上部に設置した炉心上部機構に搭載していることから、燃料交換時には、炉心上部機構を炉心上部より退避させ、燃料交換機がすべての炉心構成要素に到達できるようにする必要がある。回転プラグを用いる場合は炉心上部機構を回転プラグに搭載し、プラグを回転させることにより水平に移動して退避させているが、ホットセル方式の場合は炉心上部機構を上方へ引き抜くことにより退避させる方法が取られる。従って炉心上部機構を昇降させる事に起因する技術課題の解決が、ホットセル方式の成立性上最も重要な課題と言える。

(2) 第２段階

第２段階では、燃料交換設備の大幅な簡素化が期待できるホットセル方式燃料交換方式を実用化するために必要な技術の確立を目指すものとする。特に燃料交換機、燃料移送セルについて重点的に開発を行う。

燃料交換機については、ホットセルから直接、炉心の燃料を取り扱うため、グリッパの位置決め方法、昇降方法、ホールドダウンの方法等について技術の確立が重要である。また、燃料移送セルについては、耐震性を有する支持方法、Naミスト挙動評価手法等の技術の確立が重要である。さらに、セル内機器の保守・補修技術の確立も重要である。

なお、ホットセルより燃料を取り扱う方式に変えて、ナトリウム中またはカバーガス中で作動させる事のできる燃料交換機をルーフデッキ下部に設置し、燃料出入機としては、従来と同様のシュート方式の燃料出入機を用いる炉内燃料交換機方式も、回転プラグによ

らないで燃料交換を行う有力な方法であるので、これをB案と位置づけ、ホットセル方式と並行して開発を進める事を提案している。炉内燃料交換機方式の概念図、その特徴および課題を図-3に示す。この方式は、ナトリウム中またはアルゴンガス中で作動する燃料交換機の成立性が課題となるが、これが実用化されれば、単に燃料交換システムの合理化に寄与するばかりでなく、炉内機器の保守・補修技術への応用も可能である。

(3) 第3段階

第2段階までに確立した技術を集大成して、総合的にホットセル方式燃料交換システムの成立性を確認する。運転操作性、保守・補修性をモックアップにより確認し、実用性が十分有ることを実証する。

以上のステップにより、ホットセル方式の技術を確立し、回転プラグのない簡素で経済性の優れた燃料交換システムを実用化する。

2.8.3 開発課題と解決方策

ホットセル方式燃料交換方式の開発課題と開発方法、工程等を表-1に示す。開発の難易度は開発項目の量と実現の見通しから、開発経費は、開発期間と開発設備の規模から定性的に判断した。

以下に各課題の開発が必要となる背景を示す。

(1) 第1段階

第1段階は、ホットセル方式を実現する上で最も重要な技術課題である昇降式炉心上部機構の開発を重点的に行う。

昇降式炉心上部機構に関する主な開発課題は、次の5項目である。

(i) 炉心上部機構昇降機構の開発

炉心上部機構は制御棒駆動機構、炉心出口温度計等を搭載している安全系としても重要な機構であり、特に制御棒挿入性の観点からその据付精度の維持は重要である。従って、昇降によってもその位置決め精度が変わらない昇降機構を開発しなければならない。また、昇降による炉心上部機構の損傷を避けるため、炉心上部機構に衝撃的な荷重が働かないように昇降させる事も重要である。さらに、燃料交換中の落下防止のための固定方法も重要な課題であり、以上を考慮した炉心上部機構昇降機構の開発が必要である。

(ii) 昇降時のシール機構の開発

炉心上部機構に搭載している制御棒駆動機構等の保守・補修のため、炉心上部機構上部は、ホットセルの雰囲気と隔離することにより汚染を防止する事が望ましい。従って炉心上部機構の昇降に追従し、炉心上部機構上部とセルの雰囲気を昇降中も隔離するシール機構の開発が必要である。

(iii) 炉心上部機構搭載機器の保守・修復技術の開発

ホットセル方式では、炉心上部機構の周囲が遮蔽壁で囲われるため、保守・補修のためのスペースが十分になく、また立入りも困難である事から、制御棒駆動機構等の炉心上部機構搭載機器を無人で、かつ自動的に保守・補修を行う技術の開発、例えば保修ロボットの導入等が必要である。

(iv) 吊上げ時の安全性の確立

炉心上部機構を昇降式とする場合、シール機構は原子炉カバーガスバウンダリの一部を構成する事から、カバーガスの漏洩、セル内への空気等の侵入のない構造とする必要がある。あわせて、万一漏洩があっても、これを微小な段階で検知し、漏洩の拡大を防止しなければならない。従って、上記(ii)のシール機構に適合する漏洩検知手法の開発が必要である。

また、炉心上部機構を吊上げている時にこれが落下した場合には、ルーフデッキ等の重要な構造物のみならず、炉心そのものを損傷させる恐れがある事から、いかなる事象においても落下を防止しなければならない。従って、炉心上部機構昇降機構、固定具の健全性を解析および試験により確認する必要がある。

(v) ナトリウム滴下防止対策の確立

炉心上部機構を吊上げる際に、これに付着したナトリウムが滴下し、セル内を汚染する可能性がある事から、表面を滑らかにし、かつナトリウムの溜りやすい部分のない構造として、短時間にナトリウムが滴下し、セル内へ吊上げた時には滴下が完了しているような工夫が必要である。また、セル内へ吊上げた後に滴下しても、これを回収する事により、セル内の汚染を防止する工夫が必要である。以上のような、ナトリウム滴下防止対策の構造検討と試験による確認が必要である。

(2) 第2段階

第2段階では、昇降式炉心上部機構の成立性を見通しを得て、ホットセル方式燃料交換システムを構成する主要な設備であるセル内設置型燃料交換機および燃料移送セルの開発

を行う。また、ホットセル方式に代わる有効な概念である炉内設置燃料交換機方式についても検討を行い、成立性が見通せる場合には、ホットセル方式と比較し、実用炉への適用を検討するものとする。各設備の開発課題を以下に示す。

(i) ホットセル方式

(a) セル内設置型燃料交換機

① 燃料取扱技術の開発

セル内設置型燃料交換機は、従来の燃料交換機に比べ次の特徴があるため、試験によりその性能を確認する必要がある。

- ・グリッパの位置決めをセル内から行うため、位置決め精度を出しにくい。
- ・グリッパの昇降ストロークが大きい。
- ・ホールドダウン機構を折りたたみ式とする必要がある。
- ・電動機等の駆動装置をNaミストを含むArガス中に設置する。

② 燃料取扱時の安全性の確立

ホットセル方式では、炉心から取出した発熱の大きい使用済燃料をNaポットに入れてセル内を移送する事から、移送中の除熱性、事故時の除熱性について試験による確認が必要である。

(b) 燃料移送セルの開発

① セル支持方式の開発

燃料移送セルは、内部を燃料が移動できる高さが必要である一方、セル外周部に配置する冷却系機器の保守・補修性を考慮した、可能な限りコンパクトな配置とする必要がある事から、床面積に比べ高さが高くなる。また、一部をルーフデッキ上に搭載する等、その支持方法にも工夫を要する。このため、耐震性試験等により、その支持構造の健全性を確認する必要がある。

② セル内ArガスおよびNaミスト挙動評価手法の確立

ホットセル内の雰囲気は原子炉のNa液面に接するほか、ホットセル内には、Naの付着した炉心上部機構を収納しているため、Naミストが発生し、セル内の機器等に付着する事が予想される。このため、ArガスおよびNaミストの挙動を評価する手法を確立し、Naミストの影響を把握する必要がある。

③ セル内機器保守・補修技術の確立

セル内はA r ガス雰囲気である事に加え、セル内収納機器はN a ミストにより汚染されている可能性がある。このため、セル内に収納されている燃料交換機、ドアバルブ等は、作業員がセル内に立入って保守・補修を行うことが容易ではない事から、保守ロボットの導入等により、無人でかつ自動的に保守・補修を行う手法、セル外へ搬出する手法を開発する必要がある。

④ 燃料取扱時の安全性の確立

ホットセルのライナ、貫通孔のシール部は、原子炉カバーガスパウングリの一部を構成する事から、カバーガスの漏洩、セル内への空気等の侵入のない構造とする必要がある。あわせて、万一漏洩があっても、これを微小な段階で検知し、漏洩の拡大を防止しなければならない。ことにセルとルーフデッキとの接続部等については、地震等に相対変位が予想される事から、試験によりその健全性を確認する必要がある。

また、セル内のA r ガスを移送中の燃料の冷却材としているため、セル雰囲気調整系が停止する全電源喪失時等のA r ガスの温度挙動を把握し、燃料の健全性を維持できる事を評価、確認する必要がある。

(ii) 炉内設置型燃料交換機の開発

(a) N a / A r 中作動機構の要素技術確立

炉内設置型燃料交換機を実現させるためには、原子炉容器内のナトリウム中またはカバーガス中で作動する電動機、荷重伝達機構、各種センサー等の要素が必要となる。このような要素は現状では実績不十分であり、今後開発が必要である。

(b) 燃料取扱技術の開発

炉内設置型燃料交換機は、(a)で確立する新しい技術を組合せた装置となるため、ナトリウム中で試験し、性能を実証する必要がある。

(c) 保守・補修技術の確立

炉内設置型燃料交換機は、ルーフデッキ下部で作動するため、炉外への引抜き方法、故障時の補修を遠隔で炉内で行う方法等の保守・補修技術を確立し、実証する必要がある。炉内での補修には、ナトリウム中ロボットの導入等が考えられる。

(3) 第3段階

ホットセル方式は、従来大型炉への適用例がないため、採用に当たっては第2段階まで

に確立した技術を組合せて成立性を確認する必要がある。このため、第3段階では、モックアップによりホットセル方式の総合試験を実施し、運転操作性、保守・補修性等の実証が必要である。

1990

図-1 ホットセル方式燃料交換方式サクセスツリー展開図

もんじゅ

燃料交換方式：
アンダーザラグ方式

回転プラグ：
単回転

炉心上部機構：
固定式

燃料交換機：
パンダグアーム式

ホットセル方式燃料交換方式

昇降式炉心上部機構の開発

- ・炉心上部機構昇降機構の開発
- ・昇降時シール機構の開発（保守・補修技術を含む）
- ・炉心上部機構搭載機器の保守・補修技術の開発
- ・吊上げ時の安全性の確立
カバーガスの健全性（漏洩検知、O₂侵入防止）
落下防止対策
- ・ナトリウム滴下対策の確立

2000

第1段階の開発目標
・昇降式炉心上部機構の実現

成立性評価

- ・構造健全性
- ・カバーガス漏洩対策
- ・保守・補修性
- ・安全性
- ・経済性（建設コスト）

（不合格）

（合格）

燃料交換系の簡素化

（A案）

A案：ホットセル方式
B案：炉内燃料交換機方式

（B案）

ホットセル方式

免震プラント

炉内燃料交換機方式

2010

実証炉II号

燃料交換方式：
ホットセル方式または
炉内燃料交換機方式

回転プラグ：なし

炉心上部機構：
昇降式

燃料交換機：
ホットセル内または
炉内設置

セル内設置型燃料交換機の開発

- ・燃料取扱技術の確立
- ・燃料取扱時の安全性の確立
- ・燃料除熱
- ・燃料の落下防止対策

燃料移送セルの開発

- ・セル支持方式の確立（耐震性）
- ・セル内Arガス／Naミスト挙動
評価手法の確立
- ・セル内機器保守・補修技術の確立
- ・燃料取扱時の安全性の確立
カバーガスの健全性
雰囲気温度の維持

炉内設置型燃料交換機の開発

- ・Na/Ar中作動機構
の要素技術確立
- ・燃料取扱技術の確立
- ・保守・補修技術の確立

（不合格）

成立性評価

（不合格）

- ・機器健全性
- ・Naミスト挙動
- ・運転操作性
- ・保守・補修性
- ・安全性

（合格）

成立性評価

- ・機器健全性
- ・運転操作性
- ・保守・補修性

（合格）

2020

実用炉

燃料交換方式：
ホットセル方式または
炉内燃料交換機方式

回転プラグ：なし

炉心上部機構：
昇降式

燃料交換機：
ホットセル内または
炉内設置

第2段階の開発目標
・燃料交換設備の大巾な簡素化
（概念選定）

総合評価（概念選定）

- ・成立性
- ・経済性（建設コスト、燃交時間）

（不合格）

（合格）

総合試験

第3段階の開発目標
・ホットセル方式の実証

実証炉II号へ適用

2030

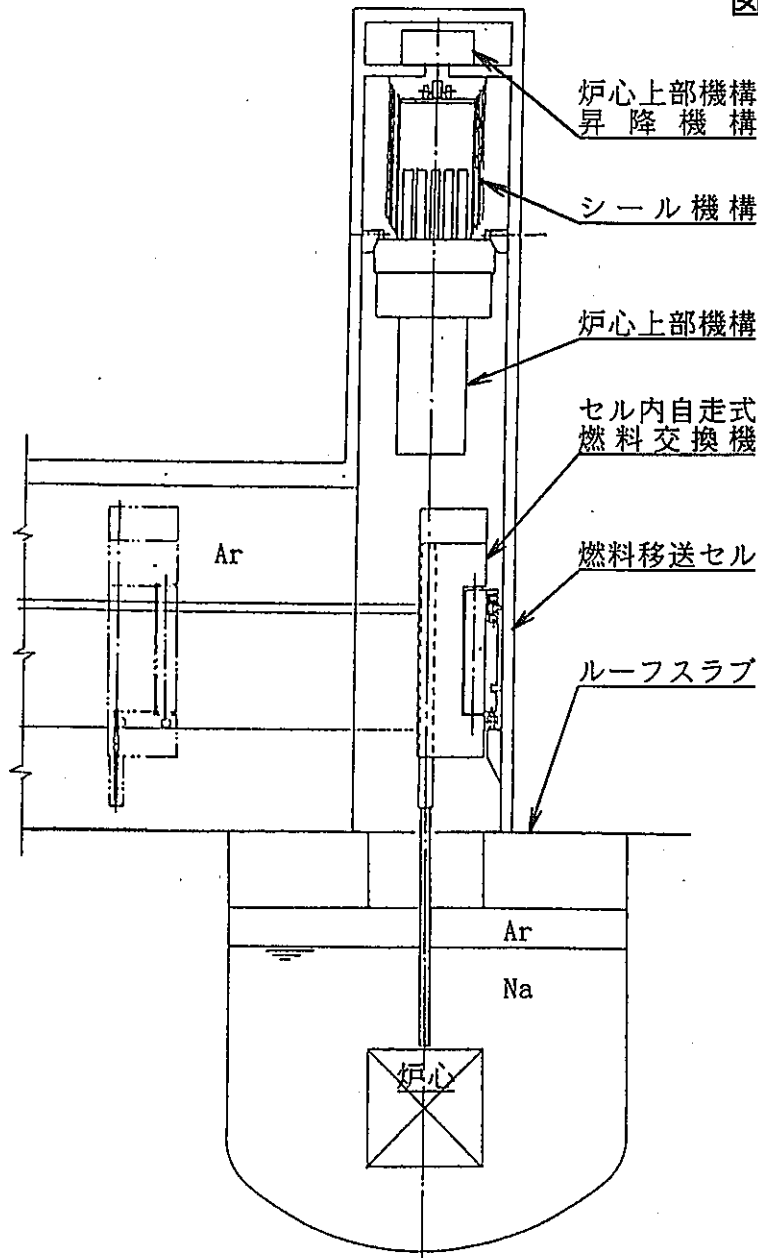
表-1 (1/2) ホットセル方式燃料交換方式の開発課題と開発手順

開発課題	開発内容と方法	成立条件	難易度	開発経費	開発工程					
					1990	2000	2010	2020	2030	
1. 第1段階					第1段階の総合評価					
昇降式炉心上部機構の開発 a) 炉心上部機構昇降機構の開発	炉心上部機構の昇降機構の概念を、下記に留意して構築し、さらに実機を模擬した試験装置を製作し、性能を実証する ・制御棒駆動機構の位置決め精度の確保（下降時） ・昇降時の炉心上部機構の健全性の確保（他機器との衝突防止） ・燃料交換中の炉心上部機構の固定方法（地震時等の損傷、落下防止） ・吊り上げ高さの低減	・制御棒挿入性に許容される炉心上部機構の据付け精度の維持 ・炉心上部機構の昇降時の健全性維持 ・吊り上げ高さ小	大	大						
b) 昇降時シール機構の開発	炉心上部機構の昇降時のシール機構を、下記に留意して構築し、さらにシール機構を模擬した試験装置により、炉心上部機構の昇降を模擬した動作を行った場合の漏洩率を測定し、性能を確認する ・カバーガスバウンダリとしての許容漏洩率の確保 ・シール機構の保守・補修性	・許容漏洩率の維持 ・シール機構の無人、自動保守・補修の実現	大	大						
c) 炉心上部機構搭載機器の保守・補修技術の開発	ホットセル内に設置される炉心上部機構に搭載する制御棒駆動機構等の機器の保守・補修を、ホットセル内に立入ることなく、無人で自動的に行う手法（補修ロボットの導入等）を構築し、コンピュータによるシミュレーションおよびモックアップにより実証する	・炉心上部機構搭載機器の無人、自動保守・補修の実現	中	中						
d) 吊り上げ時の安全性の確立	炉心上部機構を吊り上げた時の下記の安全性を、解析および試験により評価し、成立性を確認する ・カバーガスバウンダリの健全性：漏洩検知手法の開発および実証 セル内への酸素侵入防止対策の開発および実証 ・炉心上部機構落下防止対策：吊り上げ時の固定具の健全性評価、耐震性試験等	・昇降時シール機構からのカバーガス漏洩検知の実現 ・S ₂ 地震時にも炉心上部機構の落下を防止	中	中						
5) ナトリウム滴下対策の確立	炉心上部機構を吊り上げた際に滴下するナトリウムによるセル内の汚染防止のため、ナトリウムの滴下しにくい炉心上部機構の構造を構築し、試験により実証するとともに、滴下するナトリウムについては、セル内を汚染することなく回収する手法を確立する	・炉心上部機構からの滴下Na少 ・滴下Naの確実な回収の実現	中	中						
2. 第2段階 (1) ホットセル方式					第2段階の総合評価					
セル内設置型燃料交換機の開発 a) 燃料取扱技術の確立	セル内に設置する燃料交換機について、下記に留意してその概念を構築し、モックアップによる作動試験を実施して、性能を確認する ・グリッパ位置決め精度の確保 ・グリッパ昇降の滑らかさと挿入引抜き力の確保 ・ホールドダウン力の確保 ・燃料移送時の除熱性 ・Naミスト雰囲気中での電動機等の作動性	・燃料交換時間約30min/体以内 ・グリッパ位置決め精度約25mm以内 ・所定の挿入引抜き力、ホールドダウン力の実現 ・燃料の冷却体系の維持	中	中						
b) 燃料取扱時の安全性の確立	セル内設置型燃料交換機で燃料を取扱う際の下記の安全性を、解析及び試験により評価し、成立性を確認する ・使用済み燃料の除熱性：燃料の冷却方法の開発と実証 ・燃料落下防止対策：落下防止機構の信頼性	・燃料の過熱防止 ・燃料の落下防止	小	中						

表-1 (2/2) ホットセル方式燃料交換方式の開発課題と開発手順

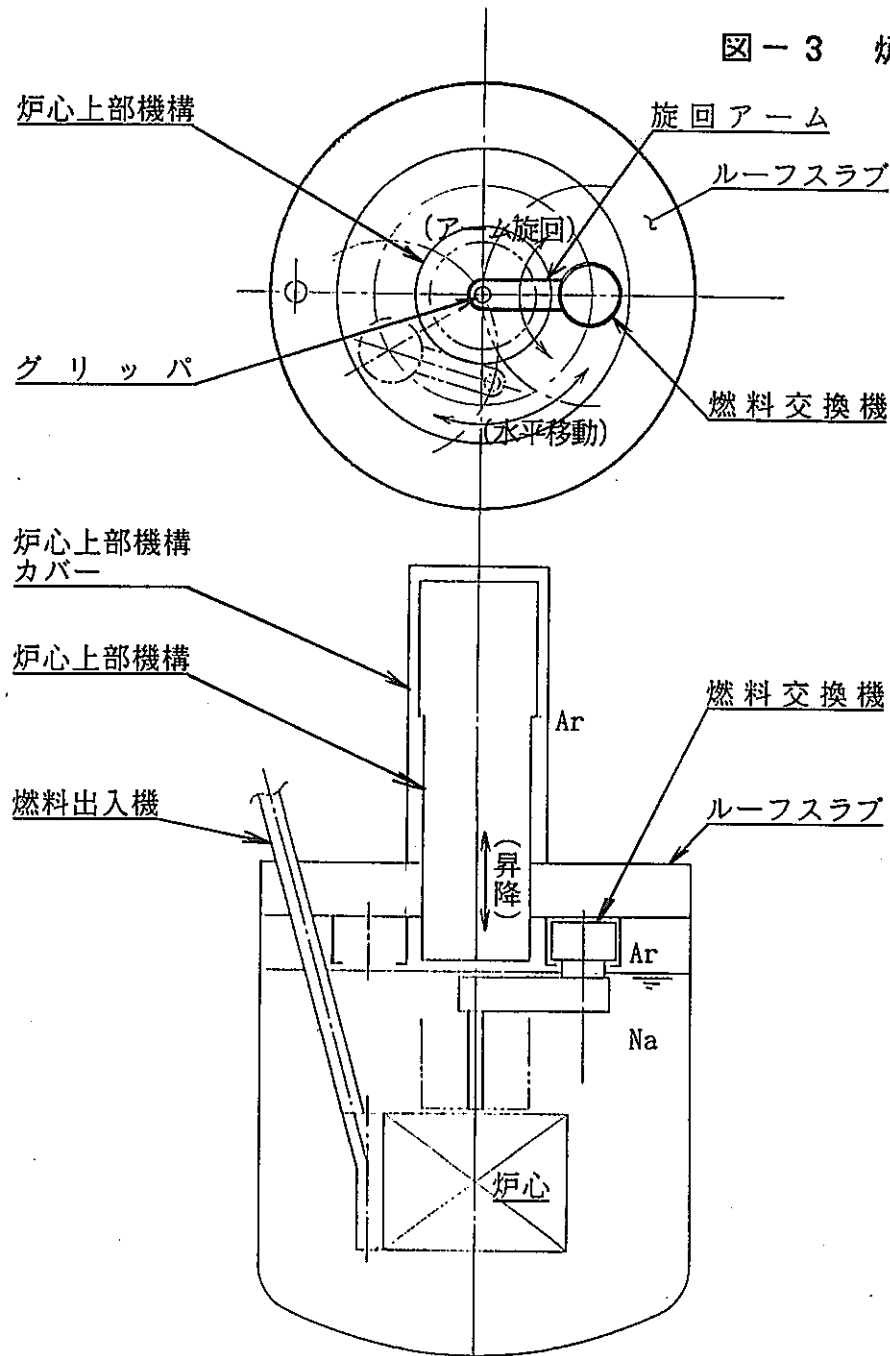
開発課題	開発内容と方法	成立条件	難易度	開発経費	開発工程				
					1990	2000	2010	2020	2030
燃料移送セルの開発 a)セル支持方式の確立	燃料移送セルの支持構造、建屋及びルーフデッキとの接続部の構造概念を、下記に留意して構築し、解析及び試験（耐震性試験）により健全性を確認する ・セルの耐震性の確保 ・セル収納機器（炉心上部機構、燃料交換機等）の地震時の健全性確保 ・建屋、ルーフデッキ等との接続部の相対変位の吸収（気密性の維持）	・S ₂ 地震時の、セル及びセル内収納機器の健全性維持 ・許容漏洩率の維持	中	中					
b)セル内Arガス及びNaミスト挙動評価手法の確立	燃料交換時に原子炉のNa液面、炉心上部機構に付着したNaから発生するミストの挙動をArガスの伝熱流動特性と合わせて評価する解析手法を確立するとともに、試験により評価手法の妥当性を確認する	・評価手法の検証	中	中					
c)セル内機器保守・補修技術の確立	ホットセル内に設置される燃料交換機、ドアバルブ等の機器の保守・補修をホットセル内に立ち入ることなく無人で自動的に行う手法（補修ロボットの導入等）、セル外へ搬出する手法を構築し、コンピュータによるシュミレーションおよびモックアップにより実証する	・セル内機器の無人、自動保守・補修の実証 ・セル外への搬出手法の実証	中	中					
d)燃料取扱時の安全性の確立	セル内で燃料を取扱う際の下記の安全性を、解析及び試験により評価し、成立性を確認する ・カバーガスバウンダリの維持：地震時、事故時等のバウンダリの健全性の実証 ・雰囲気温度の維持：事故時（全電源喪失時等）の使用済み燃料の除熱性の確保の観点からの雰囲気温度の評価、確認	・許容漏洩率の維持 ・燃料の除熱性に影響を与えないセル雰囲気温度の維持	小	中					
(2) 炉内燃料交換機方式 炉内設置型燃料交換機の開発 a)Na/Ar 中作動機構の要素技術確立	炉内設置型燃料交換機を実現させるために必要な、Na/Ar 中で作動する、電動機、荷重伝達機構、各種センサー等の要素を設計、試作し、Na/Ar 中で作動試験を実施し、実機適用の見通しを得る	・Na/Ar 中での作動性実証	大	大					
b)燃料取扱技術の確立	炉内設置型燃料交換機について、下記に留意してその概念を構築し、モックアップによる作動試験を実施して、性能を確認する ・グリッパ位置決め精度の確保 ・グリッパ昇降の滑らかさと挿入引抜き力の確保 ・ホールドダウン力の確保	・燃料交換時間約30min/体以内 ・グリッパ位置決め精度約25mm以内 ・所定の挿入引抜き力、ホールドダウン力の実現	大	大					
c)保守・補修技術の確立	炉内設置型燃料交換機の炉外への引抜き方法、遠隔で炉内で補修する方法（Na中ロボットの導入等）等の保守・補修技術を具体化し、コンピュータによるシュミレーションおよびモックアップにより成立性を実証する	・炉外への搬出手法の実証 ・燃料交換機の炉内での遠隔保守・補修の実証	大	大					
3. 第3段階 総合試験	ホットセルの全体モックアップにより、総合的にホットセル方式燃料交換方式の成立性を確認する 試験後は、ホットセルのモックアップは、運転訓練施設、保守・補修のリハーサル用施設として活用する	・ホットセル方式燃料交換方式の実用性の実証	中	大			総合評価		

図－２ ホットセル方式燃料交換システム



1. システム構成
 - 回転プラグ : なし
 - 炉心上部機構 : 昇降式
 - 燃料交換機 : ホットセル内設置自走式（燃料出入機の機能を統合）
2. 燃料交換方式
 - (1) 炉心上部機構の炉上部よりの退避
炉心上部機構を上方へ移動
 - (2) 燃料交換機グリップの位置決め
燃料交換機セル内自走およびアーム旋回動作による
3. 特徴
 - (1) 回転プラグがない
 - ・原子炉容器の小径化の可能性を有す
 - ・ルーフスラブ構造の簡素化の可能性を有す
 - (2) 燃料取扱機器の数が少ない
 - ・物量の低減が可能
 - ・燃料受け渡し回数が少なく、信頼性が向上
4. 課題
 - (1) 昇降式炉心上部機構の開発
 - ・炉心上部機構昇降機構の開発
 - ・昇降時シール機構の開発（保守・補修技術を含む）
 - ・吊り上げ時の安全性の確立
 - カバースラバウンダリの健全性（漏洩検知、 O_2 侵入防止）
 - 落下防止対策
 - ・ナトリウム滴下対策の確立
 - (2) セル内自走式燃料交換機の開発
 - ・燃料取扱技術の確立
 - ・燃料交換時の安全性の確立
 - 燃料除熱
 - 燃料の落下防止対策
 - (3) 燃料移送セルの開発
 - ・セル支持方式の確立（耐震性）
 - ・セル内Arガス／Naミスト挙動評価手法の確立
 - ・セル内機器保守、補修技術の確立
 - ・燃料交換時の安全性の確立
 - カバースラバウンダリの健全性
 - 雰囲気温度の維持

図-3 炉内燃料交換機方式燃料交換システム



1. システム構成
 - 回転プラグ : なし
 - 炉心上部機構 : 昇降式
 - 燃料交換機 : 炉内設置自走式
2. 燃料交換方式
 - (1) 炉心上部機構の炉上部よりの退避
炉心上部機構を上方へ移動
 - (2) 燃料交換機グリッパの位置決め
燃料交換機水平移動（自走）およびアーム旋回動作による
3. 特徴
 - (1) 回転プラグがない
 - ・原子炉容器の小径化が可能
 - (2) 炉心上部機構昇降ストローク 小
 - ・不活性ガス雰囲気の範囲がせまい
 - (3) 炉内設置型燃料交換機の採用
 - ・ルーフスラブ上面配置の簡素化
4. 課題
 - (1) 昇降式炉心上部機構の開発
 - ・炉心上部機構昇降機構の開発
 - ・昇降時シール機構の開発（保守・補修技術を含む）
 - ・吊り上げ時の安全性の確立
カバーガスバウンダリの健全性（漏洩検知、 O_2 侵入防止）
落下防止対策
 - (2) 炉内設置型燃料交換機の開発
 - ・Na/Ar 中作動機構の要素技術確立
 - ・燃料取扱技術の確立
 - ・保守、補修技術の確立

2.9 2重管SGによる2次系削除システム

2.9.1 目的

2重管SGを用いて2次冷却系を削除した2次系削除システムの研究を行うことにより、軽水炉と競合可能なFBRプラントの新概念を構築する。

2.9.2 全体の概要

2次系削除プラント採用にあたっては、Na-水反応をほとんど生じない適切なリーク検出性能を備えた高い信頼性を有する蒸気発生器システムを開発することが不可欠である。そのために、現在の軽水炉やFBRで使用されている単管のSG伝熱管を2重管構造として、内外伝熱管の間にリーク検出用の第3流体を流し、万一のNa側あるいは水側のリークを早期に検出し、安全にプラントを停止できる2重管SGの概念が有望視されている。

2次系削除プラントではこの2重管SGの伝熱管が貫通リークを生じることがないようにすることを最終目標とし、この目標達成にむけて技術の成熟度や開発期間等を考慮して、次の3段階での実用化展開としている。

(1) 基本開発段階

2次系有りシステムよりコストダウンが図れる2次系削除システムの構築を行うことおよび許認可性を見通しを得ることを目標として、構造設計、信頼性向上、安全性確保の観点から基礎的なR&Dを行うとともに、1MWおよび50MWクラスの試験装置を有効に利用する。

(2) 実用化移行段階

許認可性の確立と2重管SGの信頼性の確立および経済性の面で軽水炉と競合できる見通しを得ることを目標として、常陽プラントの1次系に2重管SG1基を設置するとともに、2重管SG信頼性向上のためのR&Dを実施する。

(3) 完成段階

2重管SGの信頼性データの蓄積（50基年程度を目標）を行い、2次系有りシステムと同等以上の信頼性を確立することおよび経済性の面で軽水炉と競合可能とすることを目標として、原型炉、実証炉のSGに2重管SGを設置するとともに2次系削除システムの信頼性向上のためのR&Dを実施する。

2.9.3 開発課題と解決方策

図－１にサクセスツリーを示す。以下に開発の各段階ごとに記述する。

(1) 基本開発段階

2次系削除システムの構造設計という観点から2重管SGの構造設計・製作技術、ISI技術、プラグ技術の開発に加えてナトリウム中ラプチャディスクと圧力開放装置の開発を行う。

信頼性向上のために内管・外管の同時破損モードがないことを実証するR&Dとしては、試験データによる実証と確率を用いた定量的な評価技術の開発を行う。後者については破壊力学による確率的な信頼性評価手法の開発とSG構造材料（Mod. 9Cr-1Mo鋼）の破断前漏洩特性（LBB特性）の評価と内管・外管リーク検出計および検出システムの開発がある。安全性確保の観点からはBDBEとしての伝熱管破損規模をIDEGと想定し、ナトリウム－水反応時の圧力波伝播および反応生成物による炉心特性の影響評価、反応生成物の炉心への流入防止対策（例えばサイフォンブレイクシステム等）、環境への影響評価と封じ込め対策等の検討を行う。また、2次系削除システムに対応した安全設計方針の見通しが必要である。これらのR&Dを実施する際には1MWおよび50MWクラスの試験装置を用いる。

本段階では経済性の面で2次系有りシステムよりコストダウンが図れる2次系削除システムを構築して許認可性の見通しをたてることができる。

(2) 実用化移行段階

常陽プラントの1次系に2重管SG1基を設置して2次系削除プラントの許認可性を確立する。また50MWクラスの試験装置等により高信頼SGの開発を行うと同時に内管・外管の同時破損モードに関する定量的な評価手法、Na－水反応生成物の炉心への影響評価手法を確立する。

本段階では常陽による許認可性の確立を主眼として、かつ経済性の面で軽水炉と競合できる見通しを得ることができる。

(3) 完成段階

2重管SGの信頼性データの蓄積を行い、長期信頼性の確認として50基年程度の実績を目標とする。

そのために、

(i) 原型炉「もんじゅ」の2次系1ループのSGを2重管SGに取り替える。

(ii) 実証炉I号の2次系2ループのSG2基を2重管SGに取り替える。

(iii) 実証炉II号の2次系2ループには2重管SGを設置する。

同時に2重管ISI技術、リーク検出システム、Na-水反応生成物の封じ込め技術等の高度化を行う。

本段階では2重管SGの運転実績(50基年程度)を蓄積し、信頼性技術の高度化を行うことにより、実用炉を2重管SG伝熱管の貫通リークをDBEで想定する必要がなく、かつ経済性の面でも軽水炉と競合可能な2次系削除プラントとすることができる。

図-1 2重管SGによる2次系削除システム

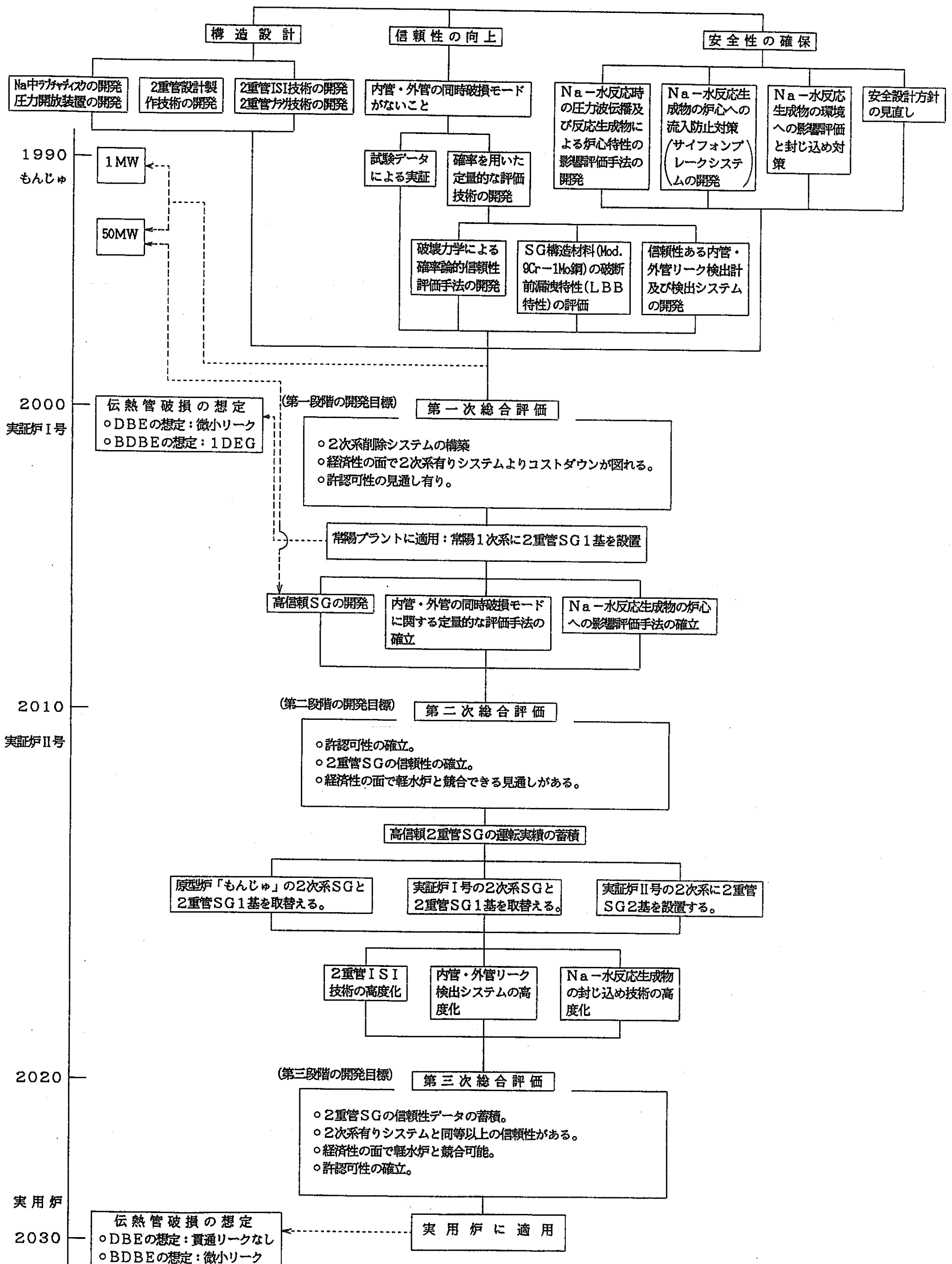
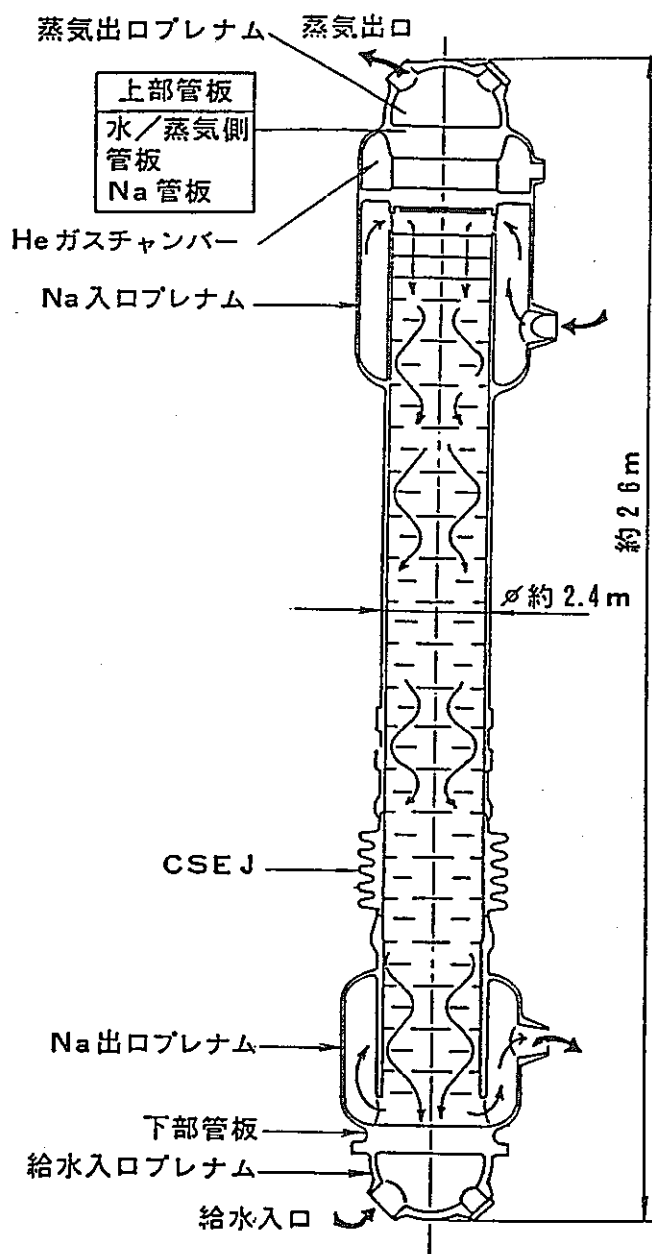
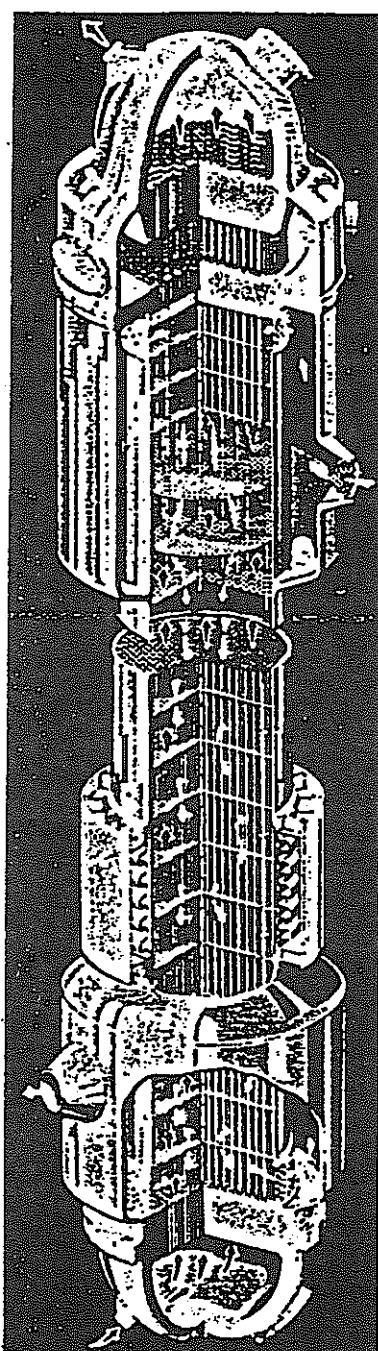


図-2 2重管SG構造概念図



流 動

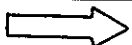
記 号	流 体
	2次Na
	水/蒸気

図-3 2重伝熱管の概念

設計の考え方

○内管のみで内圧に耐える。

○内管が破損した場合に漏洩が検出

されるのに十分な時間、内圧に耐

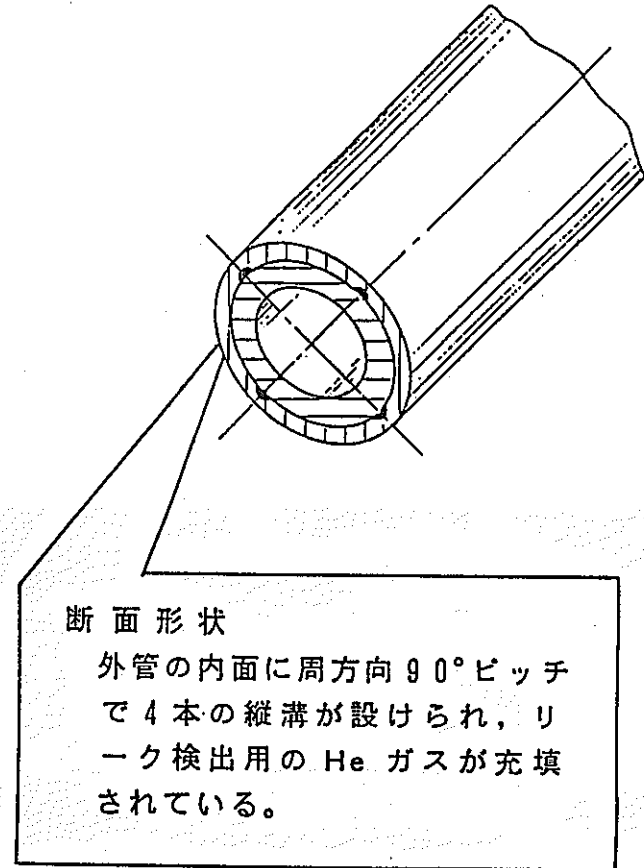
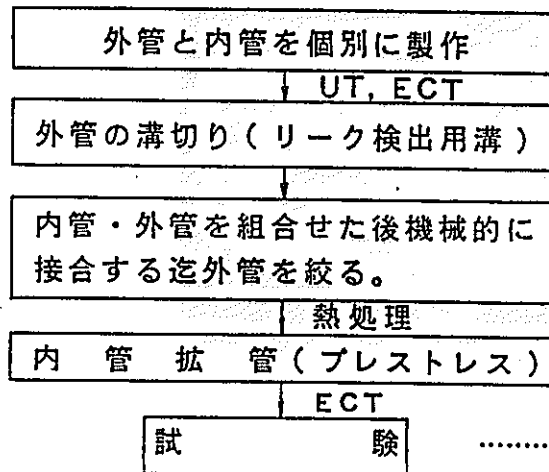
える。

材料・口径の例

○ $2 \frac{1}{4}$ Cr-1M鋼又は, Mod. 9Cr-1Mo鋼

○ 21.0 OD / 11.0 ID (内管: 2.9 t, 外管 2.1 t)

製作



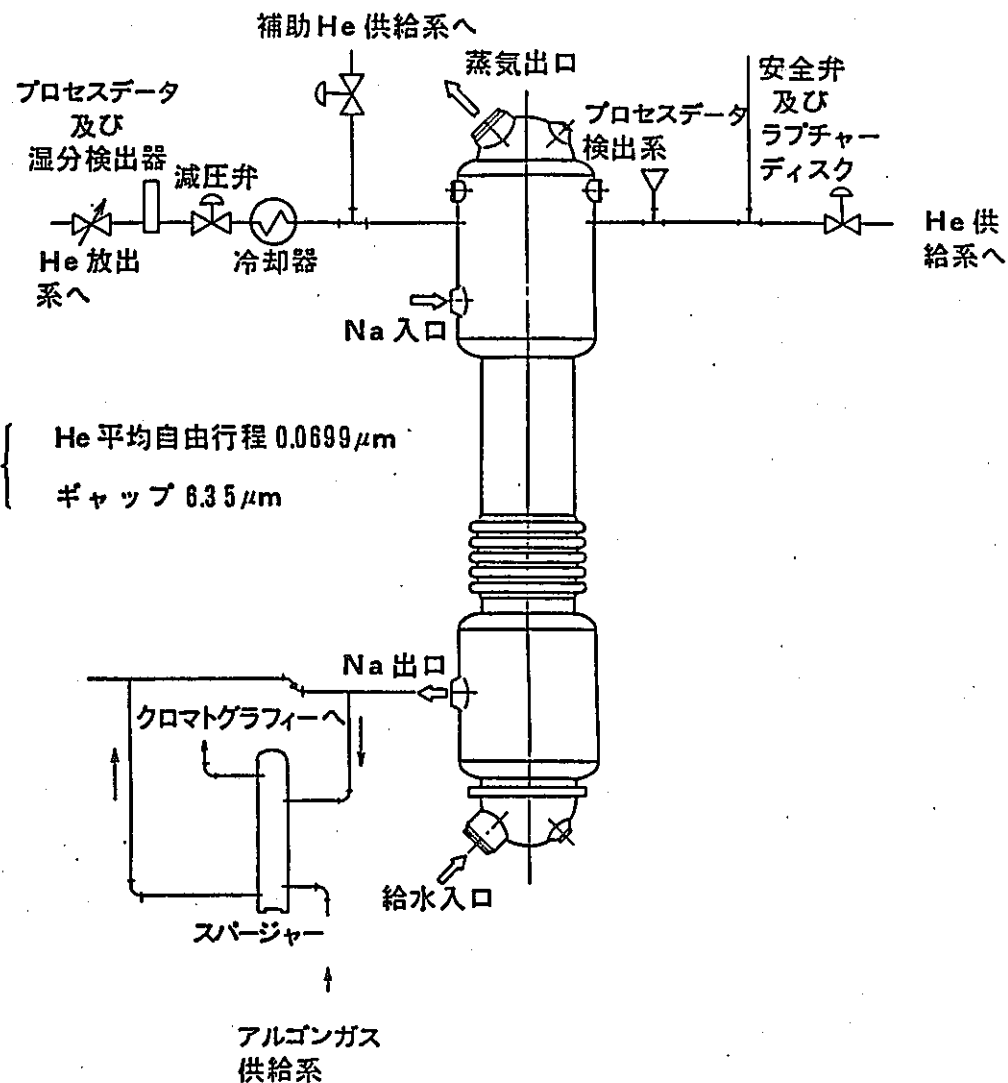
..... 残留応力, 摩耗, 熱抵抗, 漏洩

表-1 伝熱管内管・外管リーク検出原理

	内 管 破 損	外 管 破 損
概 念 図		
検 出 過 程	水／蒸気漏洩 ↓ Heチャンバー内湿分上昇 ↓ 検出(湿分連続監視) (1sec~5secにて検知)	Heガス漏洩 ↓ Na中Heガス濃度上昇 ↓ 検出(Na中Heガス濃度連続監視) (約30時間にて検知)*
問 題 点	—	漏洩管の識別が難しい。

* 溝部 (Groove) 以外での漏洩発生の場合。
(He濃度1PPm以上)

図-4 内管・外管リーク検出系統図



2.10 逆ノズル型短尺集合体

2.10.1 目 的

将来のFBRでは、燃料サイクルコストの大幅低減のために取出燃焼度を15～20万MWd/tまで増大させることが必要になると考えられる。燃焼度増大に伴いFPガスが生成されるため、従来の密封型の燃料の場合、ガスプレナム長の延長が課題となる。ベント型の燃料は実用炉段階以降で導入されることが考えられるために、実証炉から実用炉段階で高燃焼度化を図るためには燃料長を増大させないでプレナム長を延長できる技術開発が望ましい。この方法としては軸方向遮蔽性能の向上（B₄C利用等）による短尺化、逆ノズル型エントランスノズル利用による短尺化があり、本テーマの目的は後者による燃料短尺化の可能性について調査することにある。

2.10.2 全体の概要

逆ノズル型短尺集合体の成立のためには下記の3項目の成立性確認が重要である。逆ノズル型短尺集合体の概要を図-1に示す。また、逆ノズル型短尺集合体のサクセスツリー展開図を図-2に示す。

(1) 集合体入口嵌合部の流動の成立性

- ・流体力学的保持力（HHD）の確認とシール性、耐久性を含めた冷却材の流入機能動の確認が必要である。

(2) 燃料集合体構造の成立性

- ・ノズル部の構造強度、耐久性、脱装荷性、炉心耐震性、誤装荷防止機能について検討、確認が必要である。

(3) 軸方向遮蔽の成立性

- ・逆ノズル型短尺集合体の場合、ノズル部が軸方向遮蔽体側に移動するため、炉心支持板の中性子照射量を従来燃料並みに抑制できることを確認する必要がある。このために、B₄C遮蔽等の上部、下部遮蔽体の改良利用が考えられる。

2.10.3 開発課題と解決方策

(1) 集合体入口嵌合部の流動

FBR燃料集合体の入口ノズル部の重要な機能としては流体力学的保持力（HHD）と冷却材の流入機能がある。

逆ノズル型短尺集合体の場合においても、通常運転時、地震上下動時の燃料集合体の浮き上がりを防止するため、集合体の下部に従来の燃料集合体と同様に低圧部を形成する必要がある。このための逆ノズル部の形状の設定、実験による確認、炉外耐久試験、炉内での実用化試験が必要である。

また、ナトリウムの流入に対してはキャビテーションを生じさせない形状の設定とともに、燃料の冷却を確実にするためのラビリンス、ピストンリング等の高圧、低圧部のシール性の設計、試験確認、炉外耐久試験、および炉内での実用化試験が必要である。

(2) 燃料集合体構造

(1)の流体力学保持力（HHD）と冷却材の流入機能を満足した上で炉心変形時、地震時における集合体入口嵌合部の構造強度、耐久性を確認する必要がある。また、炉心支持板側に設置するノズル部に対しても構造強度、耐久性を確認する必要がある。

また、炉心変形時の脱装荷性、誤装荷防止機能、製作組立性について検討、確認が必要である。

(3) 軸方向遮蔽

逆ノズル型短尺集合体の場合、ノズル部が軸方向遮蔽体側に移動する。炉心支持板および新たに設置する炉心支持板側のノズル部の中性子照射量は従来の燃料並みに抑制する必要がある、逆ノズル型集合体における軸方向の遮蔽性能を確認する必要がある。

なお、短尺遮蔽の実用化のためには、B₄C遮蔽等の上部、下部遮蔽体への改良利用が考えられ逆ノズル型短尺集合体とともに開発が望ましい。

2.10.4 補足説明

(1) 難易度

逆ノズル型短尺集合体は入口ノズルの流動（HHD、耐久性、シール性）および構造強度に関して解析とともに試験により確認する必要があるため難易度は中程度と考えられる。

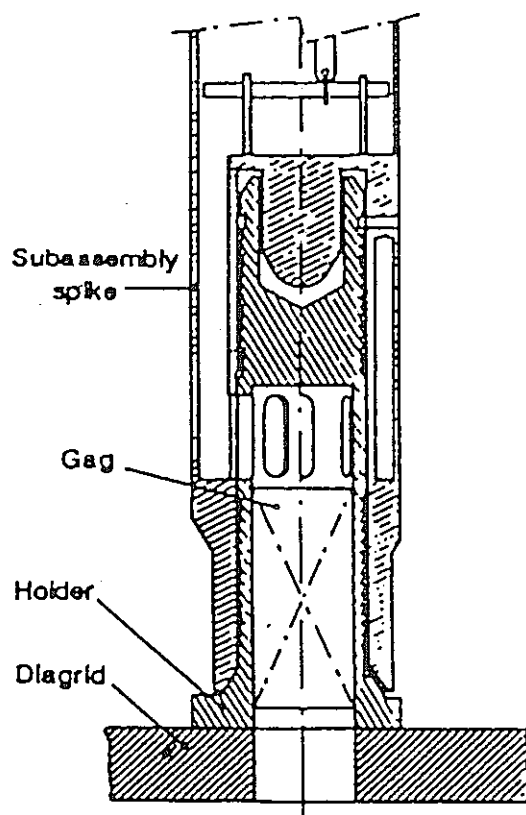
(2) 開発時期

逆ノズル型短尺集合体の基本的成立性確認および実機での試験を考慮すると実証炉Ⅱ号および実用炉段階での実用化と考えられる。

(3) その他の開発

燃料集合体を短尺化する技術としては本テーマ以外に軸方向遮蔽体の高性能化（B、C等）があり従来のエントランスノズル型燃料、本調査テーマの逆ノズル型燃料のいずれに対しても使用でき、別途開発が望ましい。

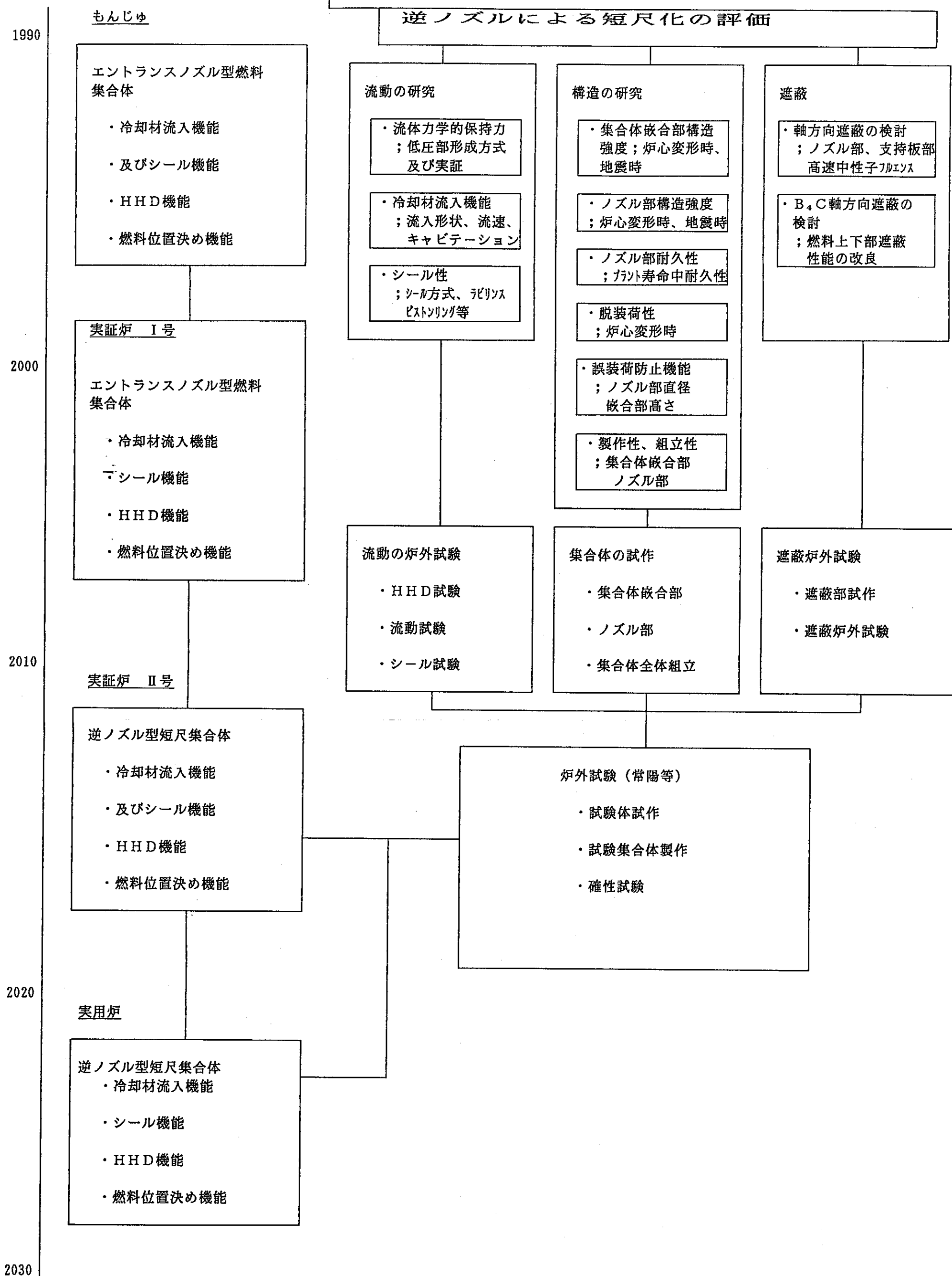
INVERSED SUB-ASSEMBLY SPIKE



図－１ 逆ノズル部の概要（例）

図-2 逆ノズル型短尺集合体のサクセスツリー

逆ノズル型短尺集合体



2.11 プラント高温・高効率化

2.11.1 目 的

FBRは冷却材にナトリウムを使用しているため、加圧することなく約900℃まで高温化が可能である。この特性を利用し、また新材料等の適用によってFBRプラントシステムの高温・高効率化（高燃焼度化）が達成されれば、FBRの一層の経済性向上が期待できる。

2.11.1 全体の概要

従来の火力プラントにおいては、蒸気条件を高温高圧にすることによりタービン効率を上げ、経済性の向上を図ってきた。FBRにおいてもプラントを高温化することは経済性を向上させる1つの方向である。

ここでは、プラントの高温化を図った場合に必要となる開発ステップ（サクセスストーリー検討）の考え方を示す。

現在、高温化あるいは高温時のより一層の健全性を狙って材料開発が進められており、クリープ疲労特性の優れた構造材料、例えばSUS316MNや耐スエリング、照射クリープに優れた改良オーステナイト鋼が有望視されている。

高温化のプラントは、これらの開発レベルをベースにさらなる材料の開発や解析・評価手法の高度化により次の3段階により最終的にさらに高温システムのプラントの実現を展開している。

(1) 実証炉Ⅰ号機段階

“もんじゅ”より大型になる一方、経済性を追求するため、機器設計や炉心設計が厳しくなる。そのため、許容値緩和を主眼に構造材に高速炉構造用SUS316、燃料被覆管材に改良オーステナイト鋼を使用する。

しかしながら、両材料とも材料データは揃うものの使用実績がないため、プラント設計上の評価は従来材で行い、それらの特性は設計裕度の向上として取扱いプラントに採用することにより実績を得ることを図る。

そのため、実証炉Ⅰ号機の炉心出口温度は従来のベースの材料評価で許認可を取得し得る530℃とする。

(2) 実用炉Ⅱ号機段階

新材料のデータ実績が十分に得られたことにより、基準の高度化およびそれに対する解析評価手法の見直しおよび充実を図り、最適な設計を行うことにより炉心出口温度 550℃を達成させる。

なお、炉心の高燃焼度化を図るためにはガスプレナム長や被覆管肉厚を見直す必要があり、経済性を考慮する必要がある。

(3) 実用炉段階

機器については運転条件等何らかの熱応力緩和のための条件を設けることにより、さらなる高温化を可能とし、炉心については実用炉までの運転・製作データの蓄積、R & D結果をもとに評価手法の合理化および革新構造を使用することで 585℃を達成する。

なお、同時に高燃焼度化を狙うためには分散強化フェライト鋼などの新材料の開発が必要である。

2.11.3 開発課題と解決方策

図－1 にサクセスツリーを示す。以下に開発の各段階ごとに記述する。

(1) 実証炉Ⅰ号機段階

機器・炉心の大型化に伴う合理化の必要性から、各々の許容値緩和のため、機器に対しては高速炉構造用SUS316、炉心に対しては改良オーステナイト鋼の新材料の開発を目指し、強度データや照射データ等の環境データを取得する。

そして、設計裕度の向上および実績の蓄積を主眼としてプラントに採用する。さらに、機器設計に関してはその解析・評価手法の“もんじゅ”からの高度化を図り、より一層の経済性向上および設計上の選択幅拡大を目指す。特にひずみ評価手法やクリープ損傷評価手法に対しデータを拡充し、より実際の挙動に近い点で評価を行う。

炉心設計においては大型化に伴いグローバルHSFの抑制のため、炉心出力分布の平坦化、流量配分の適性化を図り、炉心の出力／流量の比の低減を行い、炉心特性の向上を目指す。

(2) 実証炉Ⅱ号機段階

高温化を目指し、また、プラントでの実績をもとに、Ⅰ号機段階で開発された高速炉構造用SUS316、および改良オーステナイト鋼の基準の高度化を図る。

機器設計に対しては、高度化による溶接部の脆化問題を解決する必要がある。また、従

来材のSUS304を使用する場合には、クリープ損傷の問題により採用に際しては運転あるいは構造上の対応が必要となる。解析・評価手法については非弾性解析手法の適用範囲の拡大を目指す。炉心設計においては、改良オーステナイト鋼の基準の高度化を行うとともに、それに伴い最適な設計手法を取り入れる。

また、本段階において高燃焼度化の是非を決定する。高燃焼度化が必要な場合には、さらに耐スエリング、照射クリープの改善を目指した新材料（分散強化フェライト鋼）の開発を実施するか、もしくはガスプレナム長を長くする等の構造対策を考え、検討を進めていく必要がある。

(3) 実証炉段階

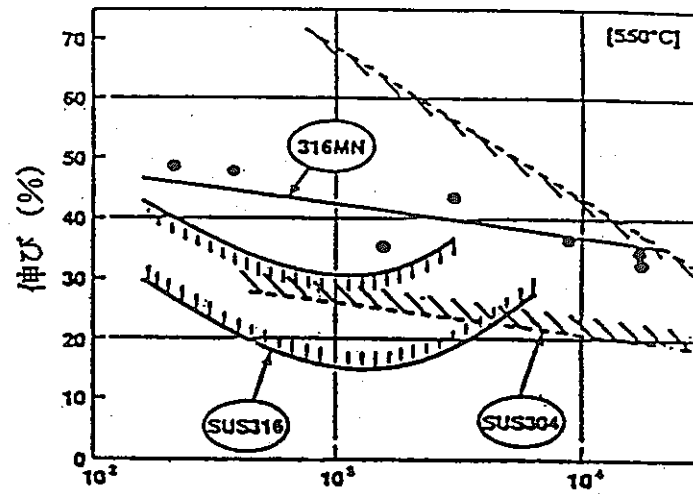
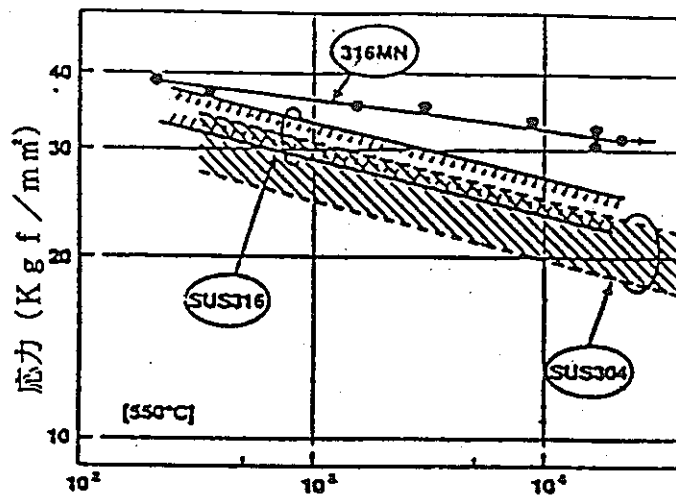
さらなる高温化を目指す。

機器設計については、高速炉構造用改良SUS316鋼を使用し、何らかの熱保護対策（運転制限等）を施して達成する。

炉心設計においては現在までの燃料の製作運転実績に十分基づき、過度の保守性を削除することや、より現実的な評価手法を開発し、さらにR & D等の実績に基づき、革新的な構造を採用することにより達成する。

なお、高燃焼度化を目指した場合には新材料（分散強度フェライト鋼）や新構造（ペント型燃料）の開発が不可欠となる。

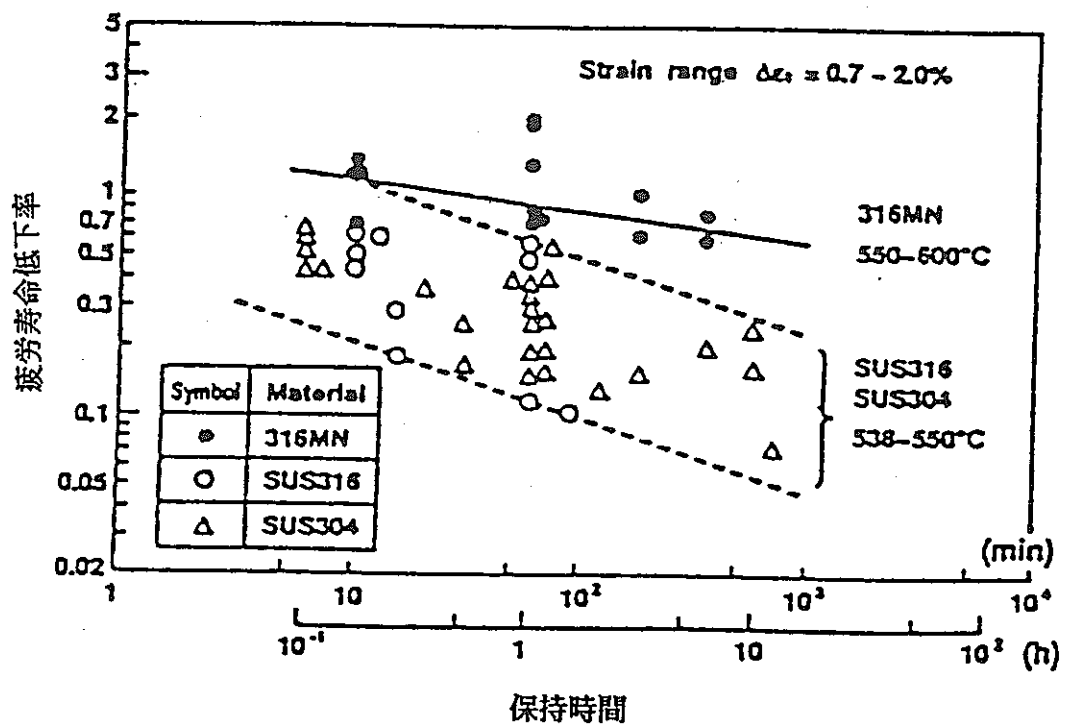
316M N鋼のクリープ破断試験結果



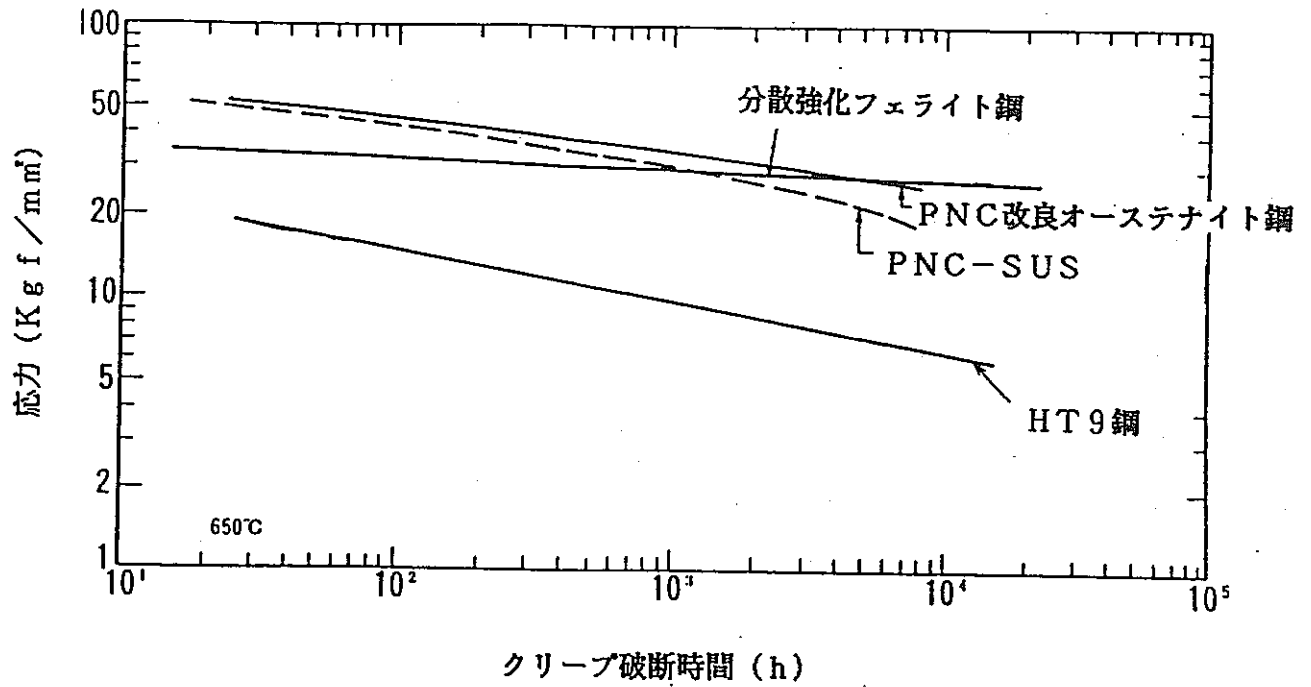
破断時間 (h)

破断時間 (h)

316M N鋼のクリープ疲労特性



改良オーステナイト鋼クリープ破断強度の比較



改良オーステナイト鋼スエリング特性

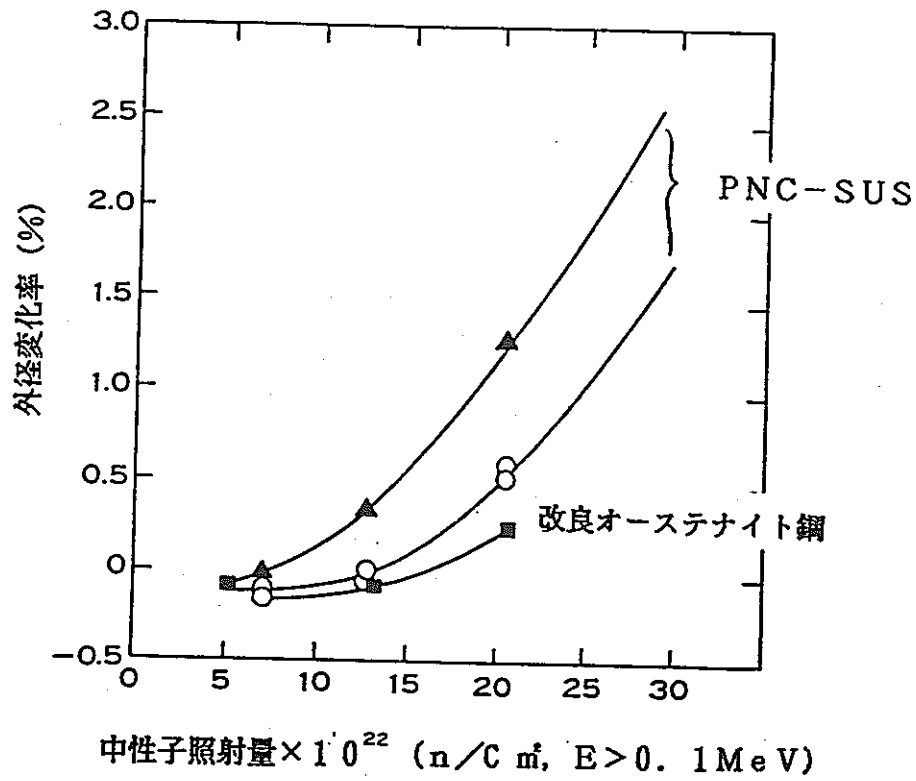
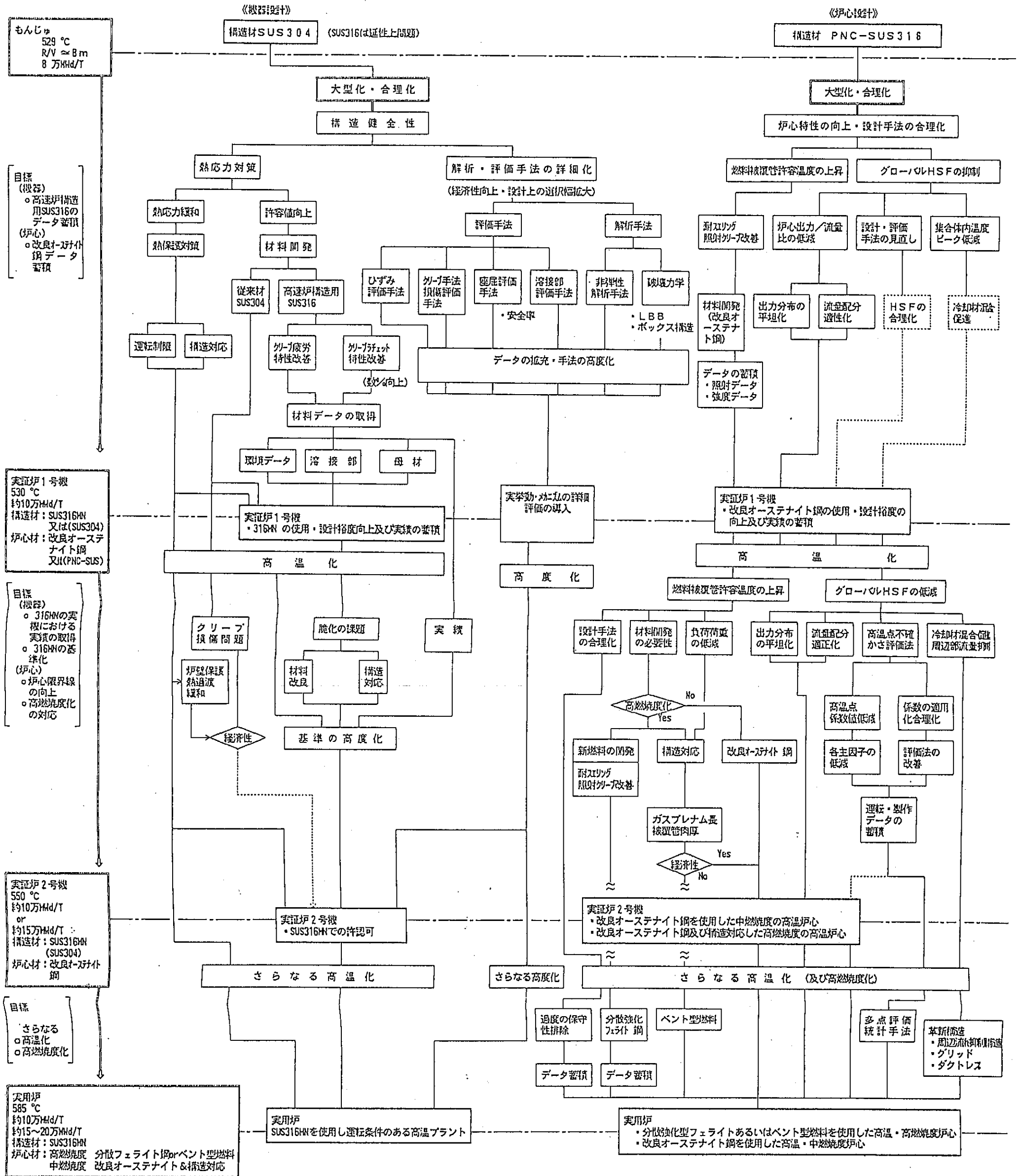


図-1 プラント高温・高効率化サクセス・ストーリー



2.12 人工知能技術の利用によるFBR運転の自律化

2.12.1 目 的

原子炉プラントの運転における課題である人的要因によるミスを排除して運転の信頼性や安全性を高めるため、最近の人工知能（AI）技術を利用して、FBRの運転を自律化させる。

原子炉プラントの運転制御へのAIの導入については、軽水炉を対象に通商産業省補助事業「原子力発電プラントマンマシンシステムの開発」でも取り上げられている。しかしながらこの事業の最終目標は、AI技術を応用したマンマシンインタフェースの高度化であり、AIシステムは運転員に操作ガイダンスを与えるが運転操作はせず、プラントの運転操作は全て運転員により行われる。

これに対し、ここでの研究テーマであるFBR運転の自律化はプラントの運転操作までをAIシステムに行わせようとするものである。

2.12.2 全体の概要

運転員がこれまで果たしていた役割をAIシステムに代替させるには、今後解決しなければならない問題が多い。特にFBRのような複雑、大規模で、安全性への要求が厳しいシステムの自律化の達成のためには、技術的ブレークスルーが必要と考えられている。このため、AI技術の利用によるFBR運転の自律化では、開発の難易度、周辺技術の成熟度および開発期間等を考慮し、開発の過程を3段階に分けた。

第1ステップでは起動、停止を含む通常運転の自動化ならびにトリップ後再起動、出力変更、冷却材充填ドレン、床下N₂/Air置換、燃料交換および異常時、事故時運転の人工知能-人間協調型操作（異常診断は人工知能、運転操作は一部人工知能、一部人間）を目標とする。第1ステップでの重点は、プラントの構造、機能、物理則や経験に基づく運転員の知識ベースレベルのふるまいを人工知能システムで実現するための知識ベースシステムの開発および、知覚、認知の意味で人間の特性と調和した情報の提供が行えるようなマンマシンインタフェースシステムの開発である。

第2ステップの目標は、運転の全自動化であり、ここでは人工知能システムが対応すべき事象（設計想定事象）を予め設定し、これらに対しては運転員が介入することなく、人工知

能システムがプラントの運転制御操作を行えるようにする。設計想定事象を越える範囲の事象に対しては必要に応じて人間の助けを借りることができるものとする。この段階においては、異常時、事故時対応も含め、運転操作の大半が人工知能システムにより行われることから、その信頼性確保のための技術開発が主要な課題となる。

第3ステップの目標は運転の自律化であり、自律化の対象としてはプラントの安全評価上設定される設計基準事象に包絡される異常、事故までをその範囲とする。（設計基準事象に包絡される事故を越える範囲の事故については、人工知能システムが扱う範囲とはしない。）この段階の主要な技術開発項目は、未知事象対応のためのそれである。

2.12.3 開発課題と解決方法

(1) 第1ステップ

第1ステップの開発課題は、運転員の知識ベースレベルでのふるまいを人工知能システムで実現することであり、このため、プラント構造、機能等の設計知識や既存原子炉プラントにおける運転経験を収集し、知識ベースを構築することが必要となる。このため、設計図書や設計データベースからプラントの運転に必要な知識を自動編集するシステムの開発を行う。また、運転経験についても同様に、プラントの運転データベースから経験知識を自動的に抽出編集するシステムの検討を行う。

運転員の特性と調和したマンマシンインターフェースの開発には、まず、プラントの異常の発見から運転操作に至る過程で運転員が異常をいかに認知し、いかに思考し判断するかについて知る必要がある。シュミレータ実験や実プラントにおける運転員の挙動の観察に基づいて運転員の認知モデルや思考モデルを開発し、これらに基づいてマンマシンインターフェースの開発を行う。

(2) 第2ステップ

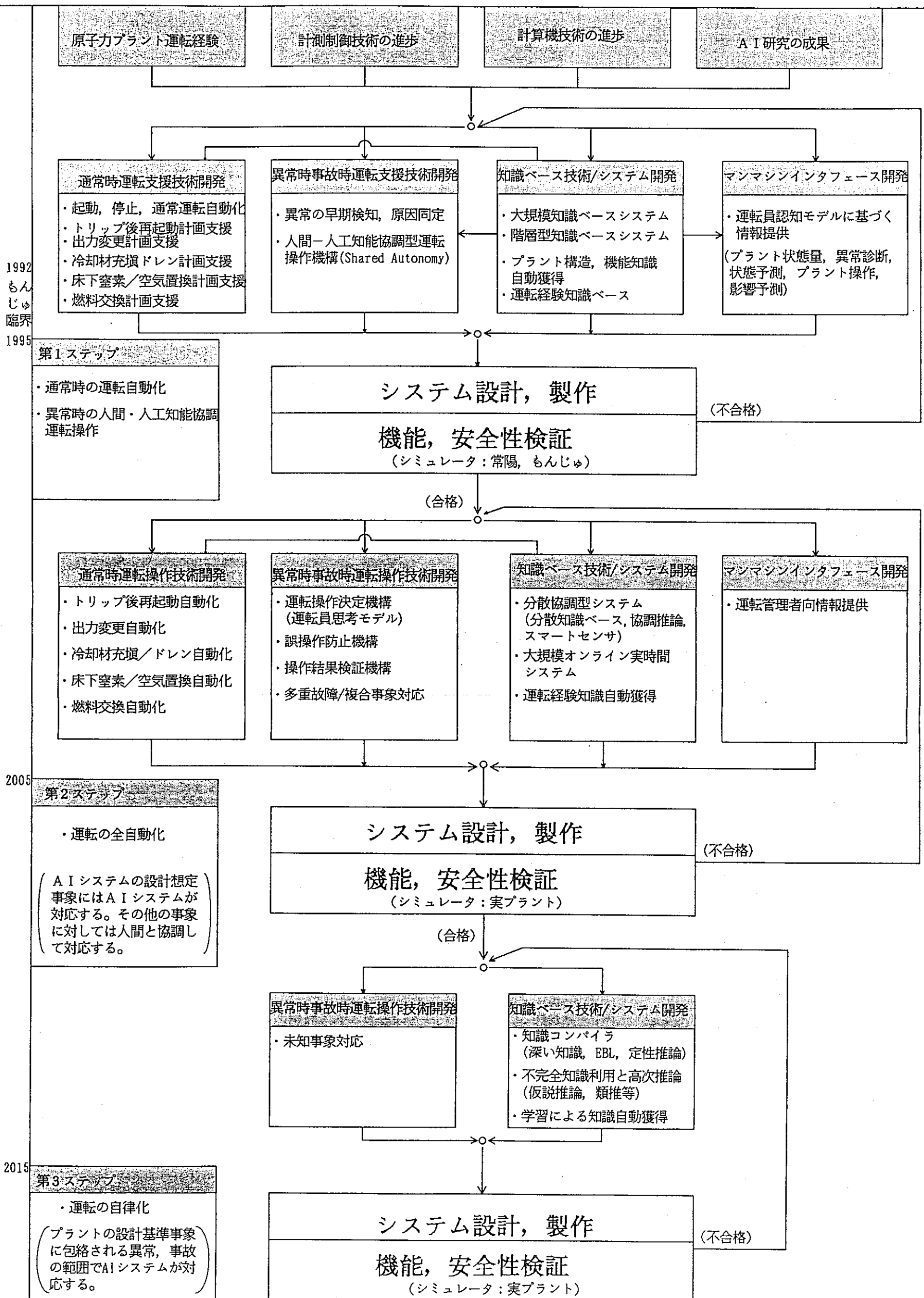
第2ステップの課題は、異常時や事故時の運転操作の信頼性確保であり、このための主要な技術開発としては、運転操作決定機構、誤操作防止機構、操作結果検証機構の開発の外、多重故障対応技術開発があげられる。誤操作防止機構とは、例えば運転操作決定機構で決定された運転操作を入力として高速シュミレータで状態変化を予測し、操作の妥当性を確認するメカニズムである。また、操作結果検証機構とは、運転操作を加えた直後から、操作対象のプラント変数を監視し、期待した修正がなされたことを確認する機能を指し、

異常診断機能の拡張により実現できると考えられる。これらの機能の実現は、分散協調型知識ベースを用いた分散協調推論によるのが適当と考えられている。また、システムが大規模化することから、大規模オンライン実時間システムを実現するためのツールも必要とされる。

(3) 第3ステップ

第3ステップの主要な課題は、未知事象対応であり、FBR運転の自律化の中で最も困難とされているものである。未知事象に対応するには物事の根本原理に立ちかえて思考する必要があり、このため、物理法則やプラントの機能、構造等の深い知識に基づく推論、深い知識を生成するためのEBL、定性推論等に基づく知識コンパイラの開発や不完全知識利用のための仮説推論や類推等、高次推論機構の開発が必要と考えられる。

A I 利用による原子力プラント運転の自律化



3. FBRの利活用・応用

3.1 FBR技術の他分野への波及について

3.1.1 はじめに

本資料は、「高速炉技術波及の可能性と評価」というテーマで実施したアンケート調査に基づくものである。調査は、1985年に行われたものであり、我が国の原子力開発および原子力産業の第一線にいる有識者・専門家約415名を対象に、有効回収数は120を上回った。

アンケートは、次の主要項目に沿って、実質24の設問からなっている。

- (1) 高速増殖炉技術開発の現状と課題
- (2) 高速増殖炉の先端性
- (3) 高速増殖炉技術波及の可能性と内容

以下に主なアンケート結果を表-1から表-10に示す。表-11には、アンケート結果とともに、最新の技術的知見を加えて、高速炉技術の波及（可能性）の事例を示す。

3.1.2 アンケート分析結果

(1) 表-1 高速増殖炉開発の意義

高速炉開発の意義としては、エネルギーセキュリティとプルトニウム利用炉としての位置づけが特に重要であり、次いでウラン価格の抑制、技術先進国として不可欠な技術という観点が重要である。

(2) 表-2 主要機器システム技術の現在の技術レベル

技術によって実用化進展度に差はあるが、実用化レベルを100%とした場合、80%程度と評価する回答者が最も多い。

(3) 表-3 高速増殖炉技術の要素技術構成比

高速炉技術は、広義のソフトウェア技術（設計、解析、システム化等）への依存度が、ハードウェア技術の依存度よりも大きい。

(4) 表-4 主要機器システム技術の使用（環境）条件と開発上のターゲット

ナトリウム、温度、腐食、高中性子束が代表的な使用（環境）条件である。開発のターゲットとしては信頼性が最重視される。

(5) 表－5 高速増殖炉機器システム技術の軽水炉技術に対する先端性

先端性の大きい機器システム技術としては、炉心構造、中間熱交換器、蒸気発生器、主循環ポンプ、燃料取扱機、計測機器、燃料、炉心材料があげられる。

(6) 表－6 高速増殖炉共通基盤技術の軽水炉技術に対する先端性

先端性の大きい技術としては、高温構造設計技術、材料技術、伝熱流動解析技術、安全性評価技術がある。先端性が大きい技術ほど実用化進展度は低くなる傾向にある。

(7) 表－7 共通基盤技術の他分野先端産業技術に対する先端性の関係

基本的傾向は上記と同じである。ただし、追加的に耐震設計、運転、溶接技術等の先端性が大きくなる。

(8) 表－8 共通基盤技術の先端性の特徴

高信頼性、ナトリウム環境条件、温度条件、システム設計、高中性子束、精度、自動化が先端性の特徴としてあげられる。

(9) 表－9 高速増殖炉技術の技術波及の可能性

技術波及性の可能性の大きい技術は、高温設計技術、材料技術、伝熱流動解析技術であり、次いで安全性評価技術、ロボット技術、耐震設計技術である。

(10) 表－10 高速増殖炉技術の技術波及インパクトを受ける産業

化学工業、機械製造、鉄鋼等のいわゆる重厚長大型産業が受ける技術波及インパクトが最も大きい。

3.1.3 まとめ

(1) 高速炉技術は、広義のソフトウェア技術（設計、解析、システム化等）への依存度が、ハードウェア技術への依存度より大きい。

(2) 技術によって実用化進展度に差はあるが、高速炉の各種技術は実用化レベルを 100%とした場合、80%程度という評価が多い。

(3) 先端性の大きい技術としては、高温構造設計技術、材料技術、伝熱流動解析技術、安全性評価技術がある。

(4) 技術波及の可能性の大きい技術は、高温構造設計技術、材料技術、伝熱流動解析技術であり、次いで安全性評価技術、ロボット技術、耐震設計技術である。化学工業、機械製造、鉄鋼等のいわゆる重厚長大型産業が受ける技術波及インパクトが最も大きい。

表－１ 高速増殖炉開発の意義

(単位：回答者%)

高速増殖炉開発の意義	極めて重要	重 要	ある程度重要	重要でない	不 明	平均点 ^(*)
1. エネルギーセキュリティ上重要である。	<u>5 0</u>	3 4	1 4	1	2	2.3 5 (◎)
2. プルトニウムの利用炉として重要である。	3 3	<u>5 0</u>	1 1	3	3	2.1 6 (◎)
3. 炉型多様化の観点から重要である。	4	2 0	<u>4 4</u>	2 9	3	0.9 9 (△)
4. 技術進歩により、将来発電コストが低くなる。	1 4	2 5	<u>4 2</u>	1 7	3	1.3 6 (△)
5. 実用化することがバーゲニングパワーを高める。	1 0	2 6	<u>5 0</u>	8	6	1.4 1 (△)
6. 原子力技術先進国として不可欠な技術である。	2 0	<u>3 6</u>	2 9	1 4	2	1.6 3 (○)
7. 原子力技術の高度化に役立つ。	1 4	<u>4 1</u>	3 5	9	3	1.6 1 (○)
8. 産業技術全般のレベル向上に役立つ。	7	2 6	<u>4 6</u>	1 8	3	1.2 3 (△)
9. ウラン価格の上昇をおさえる。	1 8	<u>3 6</u>	<u>3 5</u>	9	3	1.6 5 (○)

(*) 「極めて重要」を3点、「重要」を2点、「ある程度重要」を1点と評価した時の平均点である。

表－２ 主要機器システム技術の現在の技術レベル

(単位：回答者％)

主要機器システム技術	実 用 化 度						平 均 値
	20％	40％	60％	80％	100％	不 明	
1. 炉心構造	1	7	31	③⑧ (*)	1	22	68％
2. 炉 容 器	1	8	20	④③	7	21	72％
3. 中間熱交換器	0	7	25	④③	3	22	71％
4. 蒸気発生器	1	9	27	③⑦	4	21	69％
5. 配 管 系	1	4	18	④⑥	10	21	75％
6. ナトリウム機器	1	4	27	③①	3	34	69％
6・1 遮蔽プラグ	2	3	24	④②	7	23	73％
6・2 制御棒駆動機構	0	3	23	④②	8	25	74％
6・3 主循環ポンプ	0	3	29	③⑨	7	22	73％
6・4 燃料取扱器	0	8	24	④⑩	5	24	71％
6・5 計測機器	1	5	25	③⑧	8	24	72％
7. プラント冷却システム	0	3	23	③⑦	14	24	76％
8. ナトリウム取扱技術	0	9	20	③⑤	5	31	71％
8・1 ナトリウム純度管理	0	9	23	④②	7	20	72％
8・2 ナトリウム機器洗浄除染	1	14	26	③②	4	23	67％
9. 格納容器	1	4	7	④②	24	22	82％
10. 燃 料	1	10	27	③⑦	3	21	68％
11. 炉心材料(集合体、被覆材料、等)	3	11	30	③①	6	20	67％

(*) ○は、その項目内で最も回答の多かったもの。

表－３ 高速増殖炉技術の要素技術構成比

要素技術分野	割合（平均値）％	標準偏差（％）	範囲（％）
(a) 設計技術	20	10	10～30
(b) 生産・加工技術	14	6	8～20
(c) システム化技術	15	6	9～21
(d) 素材・材料技術	19	11	7～31
(e) ソフトウェア（解析）技術	15	6	9～21
(f) ノウハウ	10	5	5～15
(g) 基礎工学	7	5	2～12
(h) その他	1	3	0～4

表-4 主要機器システム技術の使用（環境）条件と開発上のターゲット

	使用（環境）条件					開発ターゲット						
	ナトリウム	温度	圧力	腐蝕	中性子束	精度	純度	大型・小型化	自動化	信頼性	強度	システム設計
1. 炉心構造	○	◎		△	◎	△		△		○	△	△
2. 炉容器	○	○		△	○			○		○	○	
3. 中間熱交換器	◎	◎		△						◎	△	
4. 蒸気発生器	○	○		◎						◎	△	
5. 配管系	◎	○		○						○	△	△
6. ナトリウム機器	○	△		△						○		
6・1 遮蔽プラグ	○	△			△					○		
6・1 制御棒駆動機構	○	△							△	◎		
6・1 主循環ポンプ	◎	○		△				△		◎		
6・1 燃料取扱機	◎	△							△	◎		△
6・1 計測機器	○	○			△	○			△	◎		△
7. プラント冷却システム	○	○		△						○		○
8. ナトリウム取扱技術	◎			△			△		△	○		
8・1 ナトリウム純度管理	◎			△			○		△	△		
8・2 ナトリウム機器洗浄除染	◎			△					○	△		
9. 格納容器								△		△	△	
10. 燃料	○	○		△	◎	△				◎	△	
11. 炉心材料（集合体、被覆材、 燃料等）	◎	◎		○	◎	△				◎	○	

表-5 高速増殖炉機器システム技術の軽水炉技術に対する先端性

(単位: 回答者%)

主要機器システム技術	軽水炉技術に対する先端性							平均点(*) 記号(***)
	1. 小さい	2. 同程度	3. やや大きい	4. 大きい	5. かなり大	6. 比較でない	7. 不明	
1. 炉心構造	1	11	21	(26)(**)	17	2	22	0.92、○
2. 炉容器	3	15	(26)	24	6	3	23	0.61 △
3. 中間熱交換器	2	9	15	(32)	12	8	23	0.89 ○
4. 蒸気発生器	1	12	17	(25)	19	3	23	0.95 ○
5. 配管系	2	17	(25)	22	9	3	22	0.69 △
6. ナトリウム機器	0	3	13	16	17	(17)	34	1.15 -
6・1 遮蔽プラグ	0	9	18	17	10	(22)	25	0.87 -
6・2 制御棒駆動機構	0	15	(20)	19	9	14	25	0.73 △
6・3 主循環ポンプ	0	13	14	(22)	15	13	24	0.93 ○
6・4 燃料取扱機	0	10	(25)	18	10	13	25	0.80 ○
6・5 計測機器	0	13	(21)	18	14	9	25	0.87 ○
7. プラント冷却システム	1	17	(24)	20	9	7	23	0.70 △
8. ナトリウム取扱技術	1	3	12	13	14	(25)	32	1.06 -
8・1 ナトリウム純度管理	2	5	9	17	14	(30)	24	1.01 -
8・2 ナトリウム機器洗浄除染	1	5	12	18	12	(28)	25	0.98 -
9. 格納容器	8	(36)	13	14	3	3	24	0.26
10. 燃料	2	8	18	(29)	20	3	21	1.01 ○
11. 炉心材料 (集合体, 被覆材料, 等)	1	7	18	(28)	22	3	22	1.06 ○

(*) 「小さい」…1点, 「同程度」…0点, 「やや大きい」…0.5点, 「大きい」…1点, 「かなり大きい」…2点として評価。

(**) 回答者%が最大となるものに○印をつけた。

(***) ○印…0.76以上, △印…0.5~0.75点, 無印…0.5以下, -印…該当せず

表-6 高速増殖炉共通基盤技術の軽水炉技術に対する先端性

(単位: 回答者%)

高速増殖炉共通基盤技術	軽水炉技術に対する先端性							平均点(記号)*
	1. 小さい	2. 同程度	3. やや大きい	4. 大きい	5. かなり大きい	6. 比較できない	7. 不明	
1. 核設計技術	3	19	23	24	9	1	22	0.66△
2. 耐震設計技術	3	36	20	18	4	0	19	0.42
3. 高温構造設計技術	0	10	14	25	(31)	1	20	1.17○
4. 遮蔽設計技術	1	31	27	12	7	0	22	0.49
5. 安全性評価技術	3	16	23	17	15	1	25	0.76○
6. 炉心特性解析技術	2	15	25	20	12	0	26	0.74△
7. 伝熱・流動解析技術	1	9	23	29	14	0	24	0.89○
8. 試験	2	23	21	16	9	2	27	0.61△
9. データ取得評価技術	3	25	25	15	4	1	27	0.47
10. プロセス技術	1	(27)	25	14	6	0	27	0.52△
11. 製造加工技術	0	(25)	(26)	17	9	0	24	0.62△
12. 材料技術(構造・腐蝕)	2	10	22	(25)	18	0	24	0.91○
13. 運転(制御・自動化)技術	3	25	(31)	11	5	0	26	0.46
14. 計装技術(核・プロセス)	1	20	(29)	16	8	1	25	0.61△
15. 検査(検出)技術	2	24	(25)	16	9	0	25	0.59△
16. 保守・補修技術	4	16	20	(25)	9	0	25	0.66△
17. 溶接技術	2	(30)	28	13	4	0	24	0.44
18. 建設・機器据えつけ技術	2	(41)	19	9	4	2	25	0.33
19. エレクトロニクス技術	2	(36)	22	10	4	0	26	0.38
20. ロボット技術	3	(25)	20	18	9	0	25	0.57△
21. 大型化(小型化)技術	0	24	(25)	18	7	1	26	0.60△
22. システムエンジニアリング	2	(25)	21	14	9	1	27	0.58△

(*) ○印…大きい(0.75点以上) △印…「やや大きい」(0.5~0.75点) 無印…同程度(0.5以下)

表－7 共通基盤技術の他分野先端産業技術に対する先端性の関係

		軽水炉技術に対する先端性		
		大きい	やや大きい	同程度
他分野先端産業技術に対する先端性	大きい	・高温構造設計技術 ・安全性評価技術 ・伝熱・流動解析技術 ・材料技術		・耐震設計技術
	やや大きい		・試験 ・プロセス技術 ・製造加工技術 ・計装技術 ・検査技術 ・保守・補修技術 ・ロボット技術 ・大型化技術 ・システムエンジニアリング	・データ取得評価技術 ・運転技術 ・溶接技術
	同程度			・建設・機器据え付け技術 ・エレクトロニクス技術
	比較できない		・核設計技術 ・炉心特性解析技術	・遮蔽設計技術

表-8 共通基盤技術の先端性の特徴

(単位:回答者%)

高速増殖炉 共通基盤技術	高速増殖炉技術の先端性の特徴														
	1. ナ トリ ウム	2. 温 度	3. 圧 力	4. 腐 食	5. 中 性 子 束	6. 精 度	7. 純 度	8. 大 型・ 小 型	9. 自 動 化	10. 信 頼 性	11. 強 度	12. 高 速 性	13. 感 度	14. シ ス テ ム 設 計	15. 不 明
1. 核設計技術	41◎	26△	7	10	48◎	15△	6	7	2	34○	5	10	4	19△	26
2. 耐震設計技術	14	16△	1	7	2	5	0	20△	1	42◎	29△	0	3	14	26
3. 高温構造設計技術	36○	53◎	9	26△	19△	2	2	9	2	41◎	36○	2	0	11	25
4. 遮蔽設計技術	12	3	0	2	48◎	12	0	4	1	25△	2	4	3	13	31
5. 安全性評価技術	47◎	25△	8	16△	20△	10	3	7	9	48◎	14	6	3	25△	31
6. 炉心特性解析技術	38○	30○	8	5	36○	20△	2	7	3	31○	1	10	5	18△	31
7. 伝熱・流動解析技術	54◎	42◎	10	9	5	20△	5	6	2	28△	2	4	3	22△	26
8. 試 験	37○	25△	8	15△	20△	20△	3	7	16△	34○	8	6	9	13	36
9. データ取得評価技術	27△	20△	6	9	14	23△	3	3	10	42◎	3	13	9	10	36
10. プロセス技術	36○	20△	6	13	9	9	9	3	19△	38○	1	5	2	30○	37
11. 製造加工技術	17△	11	0	16△	6	29△	6	18△	14	36○	11	1	2	8	35
12. 材料技術(構造・腐食)	45◎	35○	7	53◎	23△	12	14	8	1	31○	35○	1	0	5	27
13. 運転(制御・自動化)技術	20△	13	6	2	14	11	1	6	36○	45◎	1	14	9	36○	35
14. 計装技術(核・プロセス)	33○	22△	6	8	28△	22△	4	3	26△	50◎	1	17△	21△	29△	32
15. 検査(検出)技術	29△	16△	6	13	14	27△	9	3	25△	43◎	3	8	15△	9	35
16. 保守・補修技術	36○	19△	4	15△	15△	4	4	7	32○	38○	6	7	3	9	37
17. 溶接技術	17△	14	2	23△	9	9	1	10	14	44◎	25△	2	0	3	31
18. 建設・機器据えつけ技術	13	6	1	2	3	18△	0	25△	6	27△	7	3	1	9	40
19. エレクトロニクス技術	11	10	3	3	14	17△	1	5	25△	42◎	1	14	13	25△	37
20. ロボット技術	25△	18△	2	3	24△	10	0	9	37○	42◎	2	6	11	15△	33
21. 大型化(小型化)技術	14	8	1	5	5	9	3	36○	7	35○	15△	1	1	17△	36
22. システムエンジニアリング	15△	11	3	4	10	9	3	10	12	38○	0	5	4	54◎	38
平 均 値	27△	19△	5	11	16△	14	4	9	13	36○	9	6	5	17△	

(注) 回答者%, 40%以上……◎印, 30%~39%……○印, 15%~29%……△印

表-9 高速増殖炉技術の技術波及の可能性

(単位: 回答者%)

高速増殖炉共通基盤技術	技術波及の可能性				平均点*
	1. 大	2. 中	3. 小	4. 不明	
1. 核設計技術	8	27	32	33	1.63
2. 耐震設計技術	22	28	27	23	1.93○
3. 高温構造設計技術	41	26	9	25	2.43◎
4. 遮蔽設計技術	6	32	37	25	1.58
5. 安全性評価技術	19	32	20	30	1.99○
6. 炉心特性解析技術	9	27	31	32	1.67
7. 伝熱・流動解析技術	21	38	14	27	2.10◎
8. 試験	9	25	24	43	1.73△
9. データ取得評価技術	4	25	30	42	1.57
10. プロセス技術	5	32	27	36	1.66
11. 製造加工技術	8	35	25	33	1.75○
12. 材料技術(構造・腐食)	21	42	12	25	2.12◎
13. 運転(制御・自動化)技術	7	28	31	34	1.63
14. 計装技術(核・プロセス)	4	32	32	31	1.59
13. 検査(検出)技術	7	36	24	34	1.74△
16. 保守・補修技術	8	37	24	31	1.77△
17. 溶接技術	9	33	24	35	1.77△
18. 建設・機器据えつけ技術	3	24	36	37	1.49
19. エレクトロニクス技術	3	22	41	35	1.42
20. ロボット技術	14	36	19	31	1.94○
21. 大型化(小型化)技術	6	25	31	38	1.60
22. システムエンジニアリング	6	36	24	34	1.73△

(※) 可能性大……3点 平均点2点以上……◎印 可能性中……2点 平均点1.9~2点……○印

可能性小……1点 平均点1.7~1.9点……△印

表-10 高速増殖炉技術の技術波及インパクトを受ける産業

(単位: 回答者%)

インパクトを受ける産業 高速増殖炉 共通基盤技術	1. 軽水炉技術	2. エレクトロニクス	3. メカトロニクス	4. 新素材	5. 機械製造	6. 鉄鋼	7. 化学工業	8. 精密機械	9. 建設業	10. 造船	11. 電気機器	12. 非鉄金属	13. その他産業	平均値
1. 核設計技術	61◎	1	4	8	3	3	1	1	1	3	2	1	3	7
2. 耐震設計技術	53◎	2	2	3	14	7	14	3	42◎	3	7	3	6	12
3. 高温構造設計技術	34○	2	4	28	21△	32○	31○	3	6	3	3	16	7	15
4. 遮蔽設計技術	56◎	0	0	3△	3	3	3	1	11	1	0	4	4	7
5. 安全性評価技術	59◎	8	6	3	8	5	20△	3	6	5	10	1	5	11
6. 炉心特性解析技術	59◎	4	3	2	3	1	1	0	0	0	2	0	2	6
7. 伝熱・流動解析技術	49◎	4	5	3	13	7	31○	1	1	1	3	4	5	10
8. 試験	41◎	14	12	4	12	9	13	9	5	3	9	3	3	11
9. データ取得評価技術	36○	20△	17	4	9	5	14	8	2	1	8	3	5	10
10. プロセス技術	36○	13	8	6	9	8	36○	3	3	2'	9	3	7	10
11. 製造加工技術	37○	6	8	19	40◎	20△	17	24△	6	7	8	14	9	17
12. 材料技術(構造・腐食)	36○	1	4	43◎	22△	38○	37○	11	7	6	4	28△	9	19
13. 運転(制御・自動化)技術	45◎	28△	19	2	7	6	20△	10	1	1	19	3	6	13
14. 計装技術(核・プロセス)	48◎	34○	10	4	5	4	18	4	1	1	14	3	5	12
15. 検査(検出)技術	46◎	15	18	3	21△	9	24△	17	3	6	18	5	7	15
16. 保守・補修技術	48◎	7	15	2	14	8	20△	8	5	7	9	3	7	12
17. 溶接技術	42◎	1	6	9	36○	30○	24△	6	14	30○	7	11	8	17
18. 建設・機械据えつけ技術	37○	0	1	0	13	8	14	2	43◎	9	5	4	3	11
19. エレクトロニクス技術	32○	56◎	22△	4	8	4	12	11	3	5	17	3	4	14
20. ロボット技術	49◎	25△	44◎	7	25△	14	16	26△	9	9	25△	4	10	20
21. 大型化(小型化)技術	37○	3	7	5	25△	10	11	9	15	14	8	2	5	12
22. システムエンジニアリング	49◎	14	16	3	19	10	30○	8	10	8	12	5	6	15
平均値	43	11	10	7	14	11	18	7	8	5	9	5	6	
順位	1位	4位	6位		3位	4位	2位							

(*) 40%以上.....◎ 30%~39%.....○ 20~29%.....△

表－11 高速増殖炉技術の技術波及（可能性）の事例

原子力（軽水炉・燃料サイクル）技術分野への応用（可能性）事例	他技術分野への応用（可能性）事例
—— プラント全般 —— ・総合的システムエンジニアリング —— 炉心・燃料分野 —— ・炉心設計技術 ・遮蔽設計技術 ・高速中性子に関する計測技術 ・高燃焼度燃料開発 ・MOX燃料の性能評価技術 ・耐放射線（高速中性子）、耐高温材料の開発 ・TRU消滅処理技術 —— 機器・構造・材料分野 —— ・大型薄肉容器製作技術 ・耐放射線，耐高温，耐ナトリウム機器開発技術 - 耐放射線ケーブル - 高温マイクロフォン - 音響漏洩検出器 - 光ファイバーイージセンサー - ロボット - ナトリウム透視装置 - 各種センサー	・ビッグプロジェクトのとりまとめ技術，R&D計画 ・核データの蓄積 ・細径ステンレス鋼パイプの製造，検査技術 ・鉄鋼中の微量成分調整技術 ・極悪条件下使用材料の開発 ・材料の照射効果の評価 ・500℃程度のプロセスの構造健全性設計，評価技術 ・高温構造設計指針，材料データ —— 火力発電，高温化学装置の寿命評価 ・汎用構造解析プログラムの開発 ・高温構造物の熱衝撃解析技術 ・高温構造材料（改良316，高Cr鋼）・機能材料の開発 ・免震構造の研究開発，免震設計技術 ・不可視対象物（ナトリウム浸漬物等）の検査技術 ・ロボット化技術

(続 き)

原子力（軽水炉・燃料サイクル）技術分野への応用（可能性）事例	他技術分野への応用（可能性）事例
・ I S I 技術 ・ 高温構造設計技術／非弾性解析 ・ 熱過渡解析技術 ・ 建屋，機器免震設計・評価技術 ・ 建屋構造の合理化，コンパクト化技術 ・ 高温構造材料の開発，データベース化技術 ・ 高温配管設計技術 ・ 高温，放射線環境下での信頼性の高い計測・制御技術 ・ 高温コンクリート，セラミックス技術 ——— 伝熱流動・ナトリウム取扱技術分野 ——— ・ 液体金属冷却システム—— 核融合炉の液体ブランケット ・ 伝熱流動解析技術／三次元解析等 ——— 安全評価技術分野 ——— ・ A T W S 等の仮想事故評価技術 ・ P R A 評価技術	・ 耐熱鋼（9Cr鋼等）の開発 ・ I S I 技術 —— 細管検査技術（ボイラー） ・ 各種高温センサーの開発 ・ 超電導（ポンプ）技術 ・ ナトリウム製造，取扱い，安全管理技術 ・ ナトリウムを媒体とする伝熱技術 ・ 液体金属応用技術 —— M H D 発電 ・ 液体金属の挙動，特性評価 ・ 液体金属のポンプ，流量計等の応用 ・ ナトリウム等のシール技術 ・ P R A 技術による各種安全性，信頼性評価技術 ・ ナトリウム使用施設の安全性評価技術

(続 き)

原子力（軽水炉・燃料サイクル）技術分野への応用（可能性）事例	他技術分野への応用（可能性）事例
————— 燃料サイクル技術分野 ————— ・MOX燃料製造技術—— P uサーマル燃料製造 - セラミックス燃料製造技術 - P u混合燃料技術 - 燃料製造の自動化技術 ・高速炉再処理技術 —— 軽水炉再処理への反映 - 湿式、乾式再処理技術 - 高性能再処理機器開発（遠心速抽出機等） - 自動化機器の開発（マニプレータ等） ————— その他技術分野 ————— ・遠隔保守補修技術 ・A I適用設計、運転、保守技術	・汚染機器の遠隔補修技術 ・計算機応用技術 ・A I

3.2 FBR技術の核融合分野への応用可能性

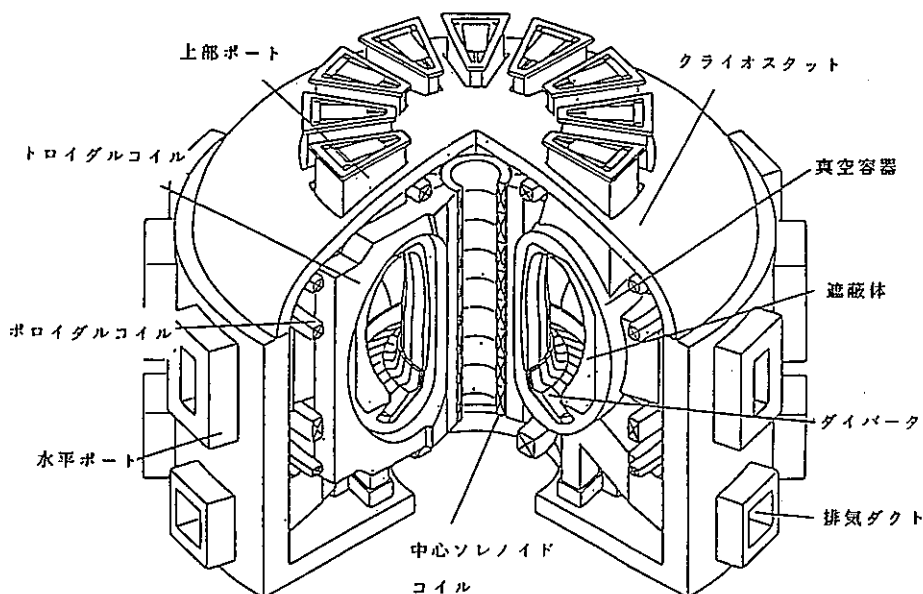
3.2.1 はじめに

我が国の核融合開発について現在のところ、日本原子力研究所が開発を行った臨界プラズマ試験装置（JT-60）の次の段階として核融合実験炉（FER）の設計検討と国際協力研究開発としての国際熱核融合実験炉（ITER）への参加を行っている。もともと核融合と核分裂では原理からして炉心構造が全く異なったものであるが、周辺のプラントシステムとしては共通なものが多く、テーマであるFBRの革新技术は核融合の分野へも大きく貢献するものと考えられる。この資料ではまず、現在考えられている核融合実験炉のための工学R&Dの概要を述べ、次にFBRの革新技术の項目から核融合への応用の考察を述べるものとする。

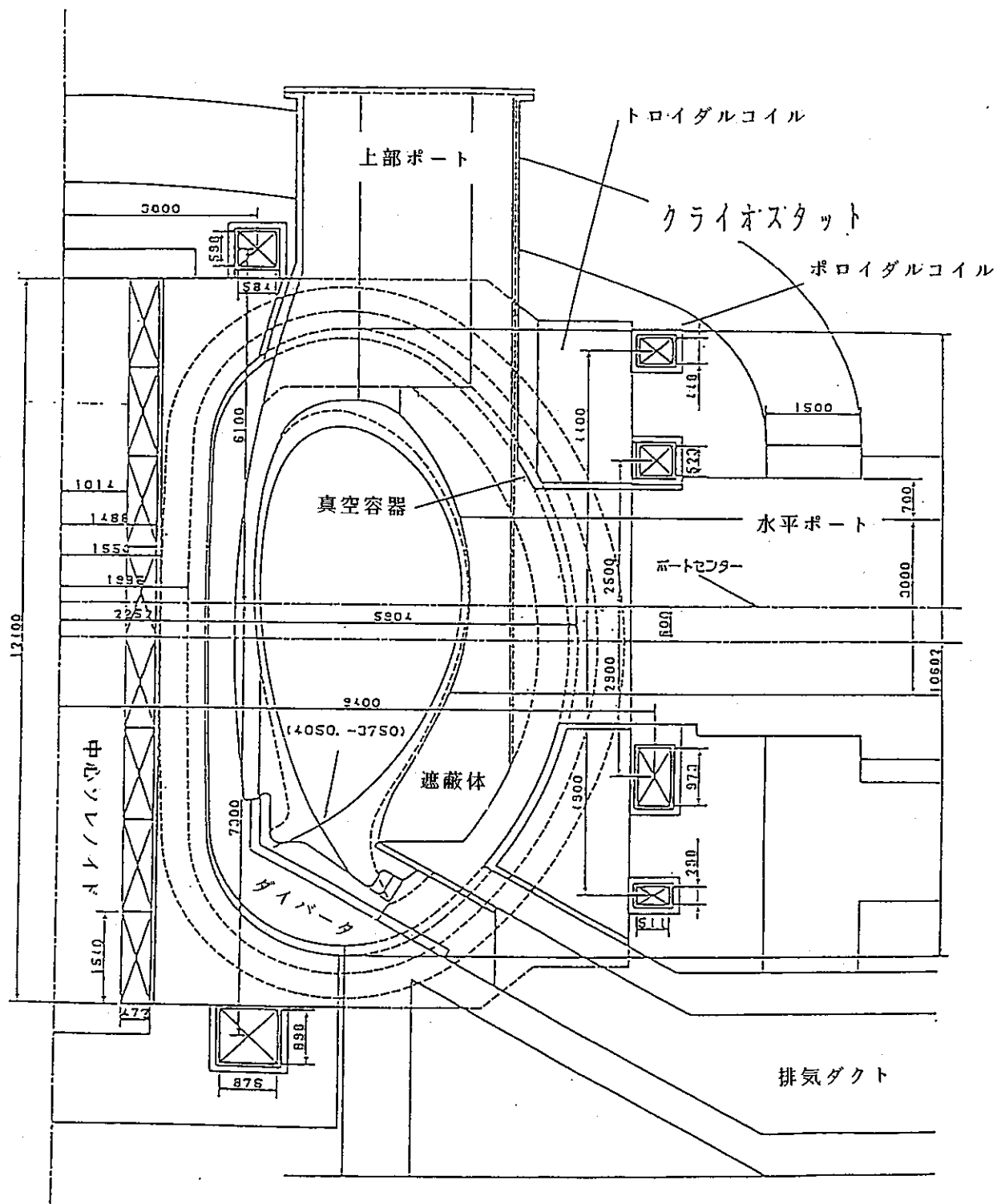
FER炉心構造系

全体構造

- ① クライオスタット 形状：内径22.3mのコンクリート製円筒容器
機能：コイル真空、生体遮蔽および建屋構造物兼用
- ② 上部ポート 形状：内のり寸法で上辺 0.4m、底辺 2.1m、高さ 3.4mの台形
機能：炉内構造物炉外交換、冷却水配管および計測機器のアクセス
- ③ 水平ポート 形状：内のり寸法で横 1.2m、高さ 3 mの矩形
機能：加熱電流駆動装置、計測装置、増殖ブランケットテストモジュールおよび炉内構造物炉内修理・交換機器のアクセス
- ④ 排気ダクト 形状：内のりで横 2 m、高さ 2 mの矩形
機能：真空排気およびダイバー炉外交換機器のアクセス



F E R 全体断面図



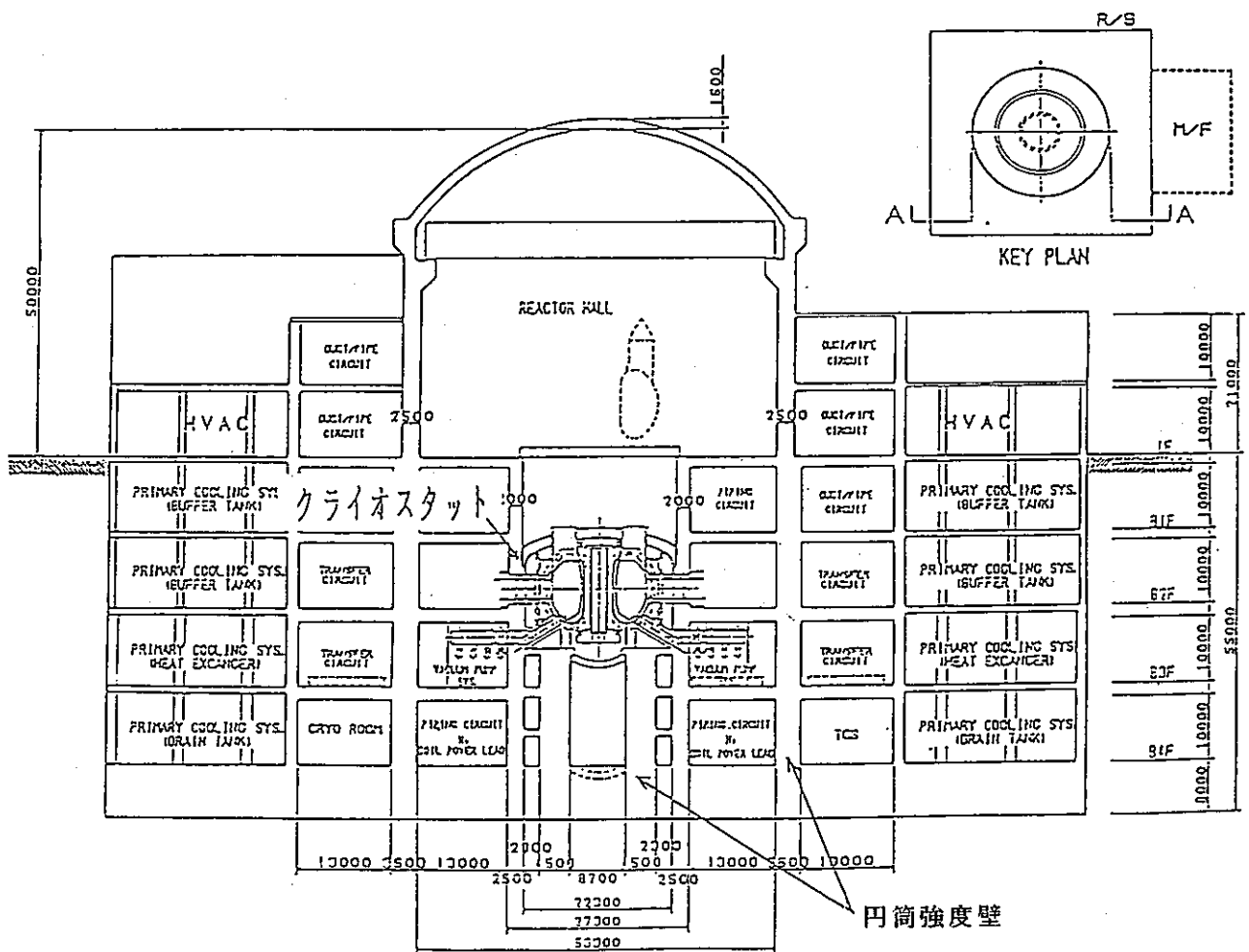
FER炉本体棟

1) 設計条件

- ① 大重量（約14,000トン）構造物の支持
- ② 初期組立および分解保守時の物流経路の確保
- ③ トリチウム格納

2) 設計の特徴・空間使用効率の最適化

- ① 生体遮蔽一体型クライオスタットの採用
- ② 円筒強度壁を中心とした円形建屋



核融合実験炉関連工学 R & D

〔内 容〕

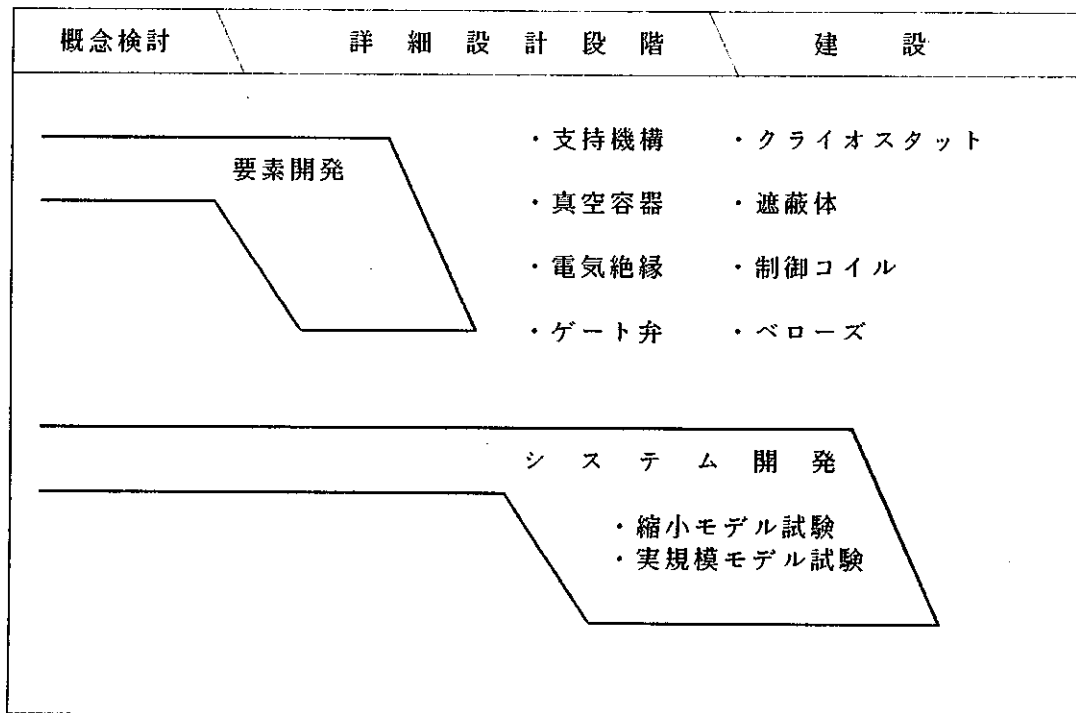
1. 全体開発計画
2. 炉心構造系開発
3. 遠隔機器系開発
4. プラズマ対向機器系開発
5. 超電導コイル系開発
6. 加熱電流駆動系開発
7. 燃料循環系開発
8. ブランケット系開発
9. 計測・制御系開発
10. プラント・安全技術系開発
11. 炉工学基盤技術開発

炉心構造系開発

現状技術と実験炉技術

項 目		現 状	F E R	I T E R
電磁力	真空容器 炉内構造物	10MN —	250 MN 10 MN	500 MN 15 MN
支持構造	形式 支持力 ストローク 核発熱 遠隔操作	溶接, ボルト 100 ton — 無し 必要無し	水圧式等 100ton/m 10-20mm 1-5W/cc 必要	水圧式等 100ton/m 10-20mm 1-5W/cc 必要
炉内構造 構造物	構成	真空容器 対向容器	真空容器 遮蔽体 対向機器	真空容器 増殖ブランケット 対向容器
クライオ スタット	構造 内直径	無し —	コンクリート製 22m	金属製 26m
真空容器	構造 一周抵抗	厚肉／二重容器 1000/200 $\mu\Omega$	薄肉二重容器 20 $\mu\Omega$	厚肉容器 20 $\mu\Omega$

開発計画



開発内容

要素開発

- ① 支持機構 : (対象) 水圧式炉内構造物支持構造機構
(内容) 実機部分モデルでの基本特性, 製作性検証
- ② 真空容器 : (対象) 薄型二重壁容器
(内容) 実機部分モデルでの基本特性, 製作性検証
- ③ 電気絶縁 : (対象) 多層絶縁・摺動コーティング, 機能傾斜型絶縁
(内容) 1 m²規模絶縁コーティング基本技術確立
- ④ ゲート弁 : (対象) 1 m × 3 m 矩形ゲート弁
(内容) 1 m 規模矩形ゲート弁シール機構基本特性, 製作性検証
- ⑤ クライオ : (対象) コンクリート製コイル真空容器
スタット (内容) 1 m 肉厚部分モデルでの製作性検証, 機械的特性評価
- ⑥ 遮蔽体 : (対象) SUS / 水遮蔽構造体
(内容) 1 m²規模部分モデルでの製作性検証, 機械的特性評価
- ⑦ 制御コイル : (対象) 30 kA 級金属被覆絶縁導体
(内容) 10 kA 級導体部分モデルでの製作性, 基本特性検証
- ⑧ ベローズ : (対象) 2 m × 4 m 矩形ベローズ
(内容) 1 m 規模矩形ベローズでの製作性, 基本特性検証

システム開発

① 縮小モデル試験

1/5 縮小モデル (2 - 4 セクタ) を用いて以下の機能確認を実施

- ・熱収縮緩和機構 (ベローズ, 重力支部脚) の健全性確認
- ・分解組立階層化構造の検証
- ・初期組立用支持機構の機能確認
- ・冷却配管経路, コイル配管配線経路および支持方式の検証
- ・炉外物流経路と周辺機器配置の検証

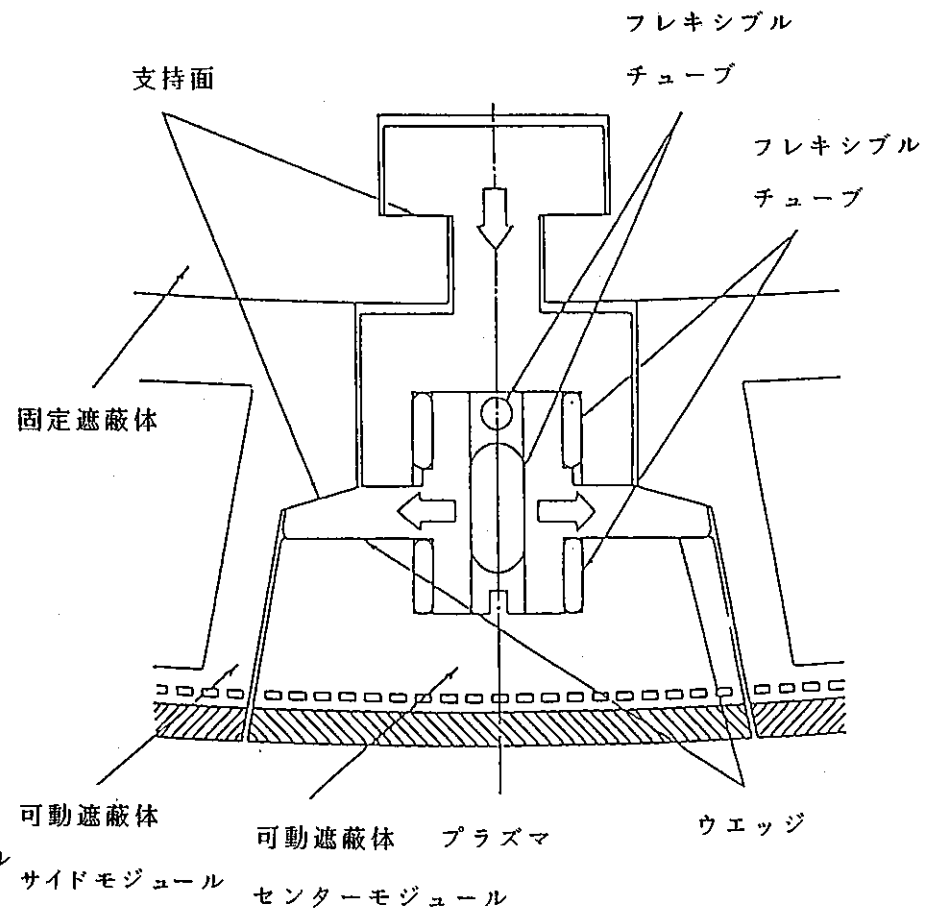
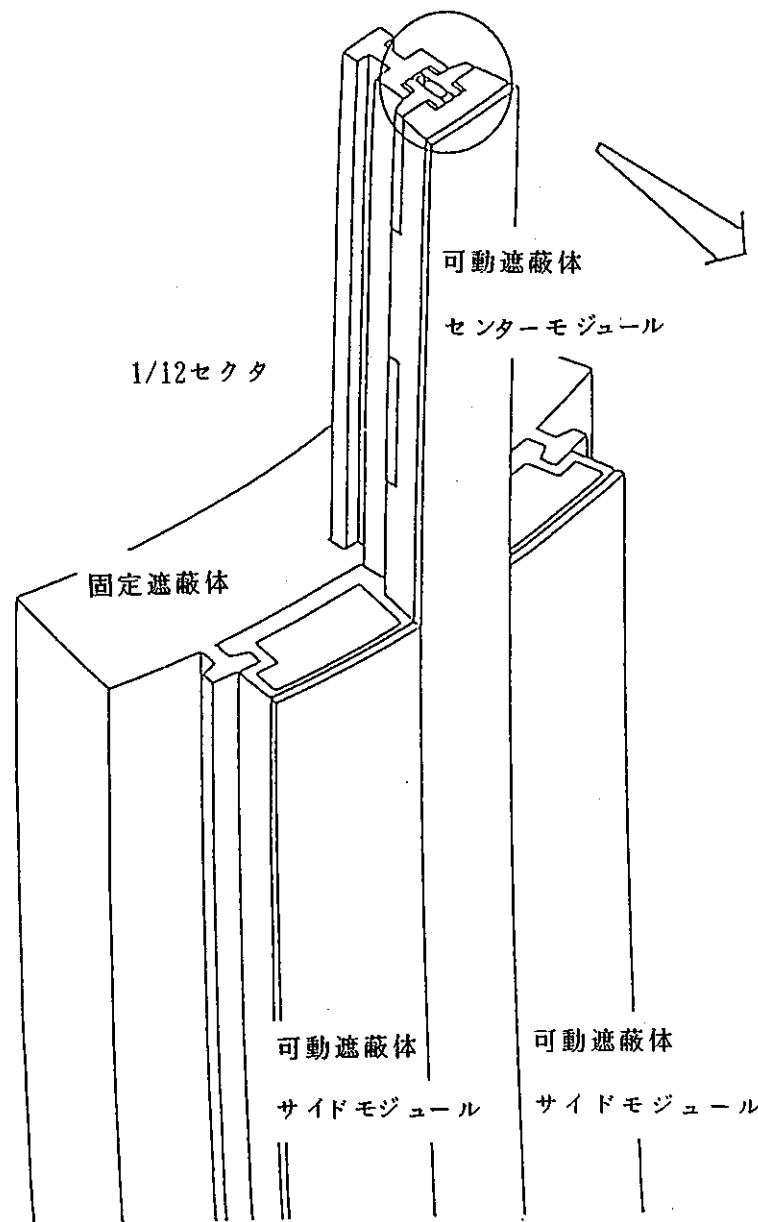
② 実規模モデル試験

1/1 実規模モデル (1 - 3 セクタ) を用いて以下の機能確認を実施

- ・大型構造物および機器製作技術の確立

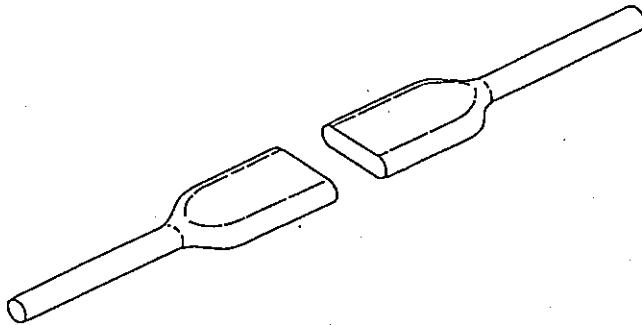
- ・大型構造物および機器加工精度の検証
- ・核融合環境（熱，荷重条件）を模擬しての総合性能確認試験
- ・現地溶接施工技術の確立

F E R 炉内構造物支持方式 水圧フレキシブルチューブ型



炉内構造物の支持機構 駆動機構の試作開発

〔形状可変管型〕



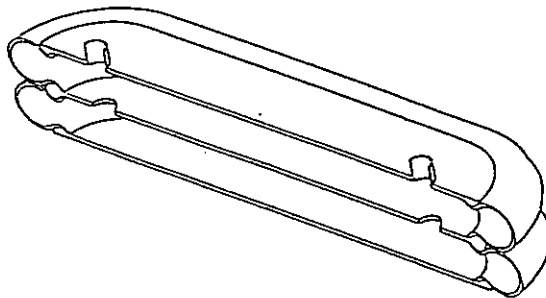
●製作性

- ・偏肉
- ・多層管の層間癒着

●性能試験

- ・耐衝撃性
- ・繰り返し回数

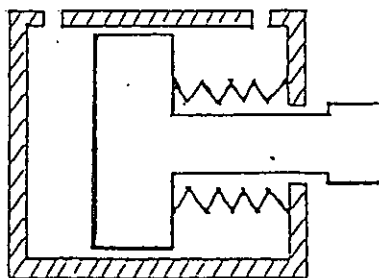
〔フイゴ型〕



●性能試験

- ・耐衝撃性
- ・繰り返し回数
- ・ペロー溶接部の健全性

〔ピストン型〕



●性能試験

- ・シールリングの特性
- ・繰り返し回数
- ・ペロー溶接部の耐圧性

ピストン型駆動機構試作試験条件

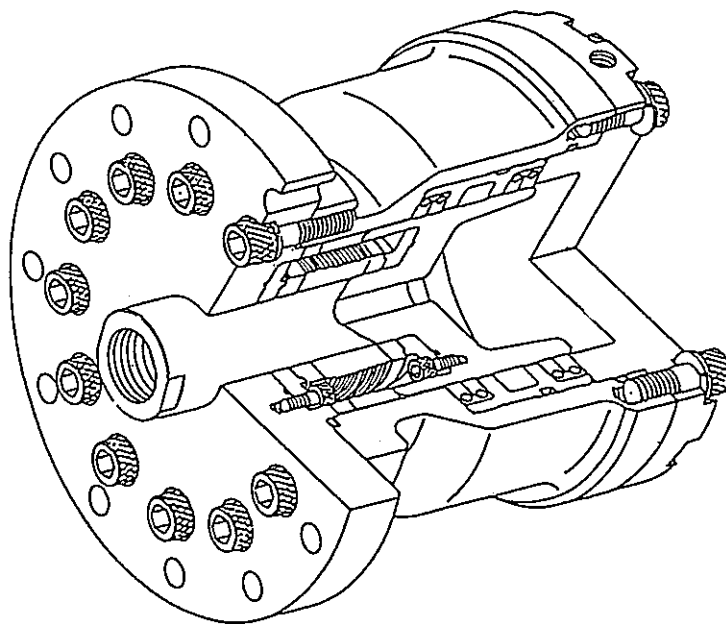
設計条件

使用目的	ダイバーク構造体固定
着脱時	ストローク : 20 mm 駆動力 : 3～4 ton 回数 : 10～20 駆動水圧 : 10 kg/cm ²
デイスラプション時	耐衝撃力 : 30～40 ton 回数 : 1,000 耐水圧 : 100 kg/cm ²

試作機試験結果

項目	試験結果
ストローク	最大 25 mm
駆動力	水圧 100kg/cm ² で駆動力 17.5ton (駆動力は水圧に比例)
耐久性試験	水圧 10kg/cm ² で 1,000回 水圧 100kg/cm ² で 200回

試作機外観 (直径～30cm, 長さ～30cm)



遠隔機器系開発

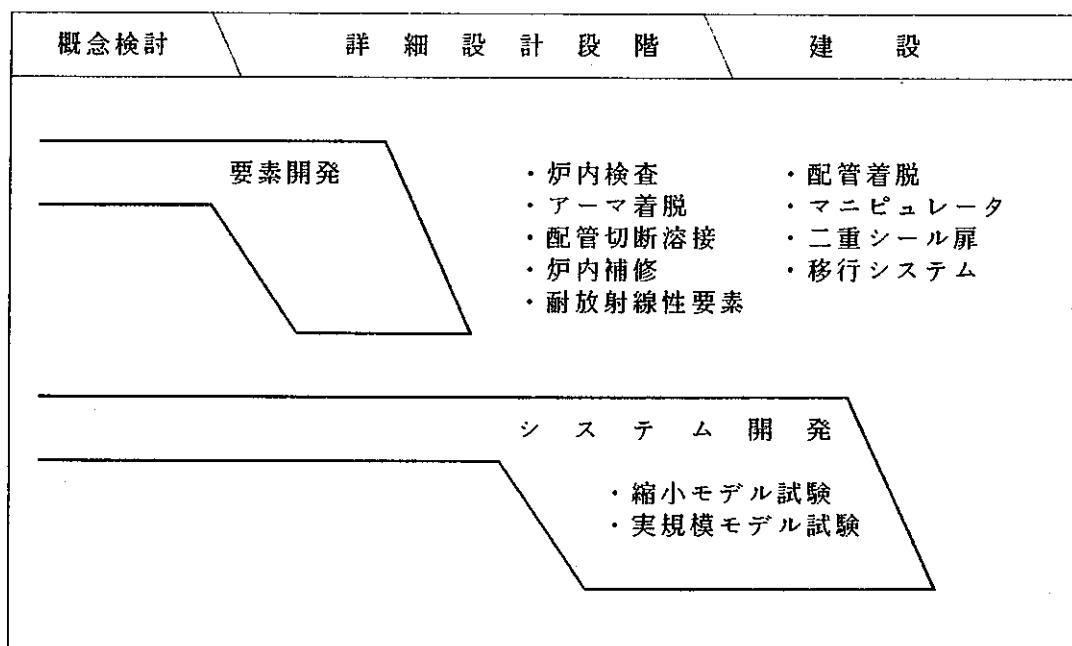
開発目標

遠隔保守項目	作業環境条件	保守対象機器	対象機器重量
初期組立	通常雰囲気	全ての機器	最大 700 ton
炉内検査	γ 線： 10^6 R/h 温度：100 ℃ 圧力：真空および負圧 (GN2)	寸法，形状変化 アーマ表面損耗量 ダスト量 リーク試験検査	
炉内保守	γ 線： 10^6 R/h 温度：100 ℃ 圧力：負圧 (GN2)	アーマ ダイバーク板 第一壁	300 g 1.5 ton
炉外保守	γ 線： 10^6 R/h 温度：50 ℃ 圧力：炉室雰囲気	ダイバーク構造体 遮蔽体 (フランクット含む) 真空容器 TF, PFコイル 加熱，計測周辺装置	4.5 ton 60 ton 200 ton 700 ton
炉外移送	γ 線： 10^6 R/h 温度：50 ℃ 圧力：炉室雰囲気	全ての機器	最大 700 ton

現状技術

項 目	遠隔保守機器	： 雰囲気，放射線環境，重量
炉内検査	① JT-60炉内観察装置	： 真空中，放射線無し
炉内保守	① JET炉内作業多関節マニピュレータ ② TFTR炉内作業多関節マニピュレータ ③ JPDR解体作業遠隔機器 ④ JR-60炉内TiCコーティング機器	： 大気中，数mR/h， 350 kg ： 大気中，数mR/h， 300 g ： 水中， 10^3 R/h ： 真空中，放射線無し
炉外保守	① 動燃炉 固化施設遠隔保守クレーン ② 動燃炉 固化施設遠隔マニピュレータ ③ 軽水炉用燃料棒交換遠隔機器	： 大気中， 5×10^3 R/h ： 大気中， 5×10^3 R/h， 15kg ： 水中／大気， 10^6 R/h， 300kg
炉外移送	通常雰囲気中での一般産業機器のみ	

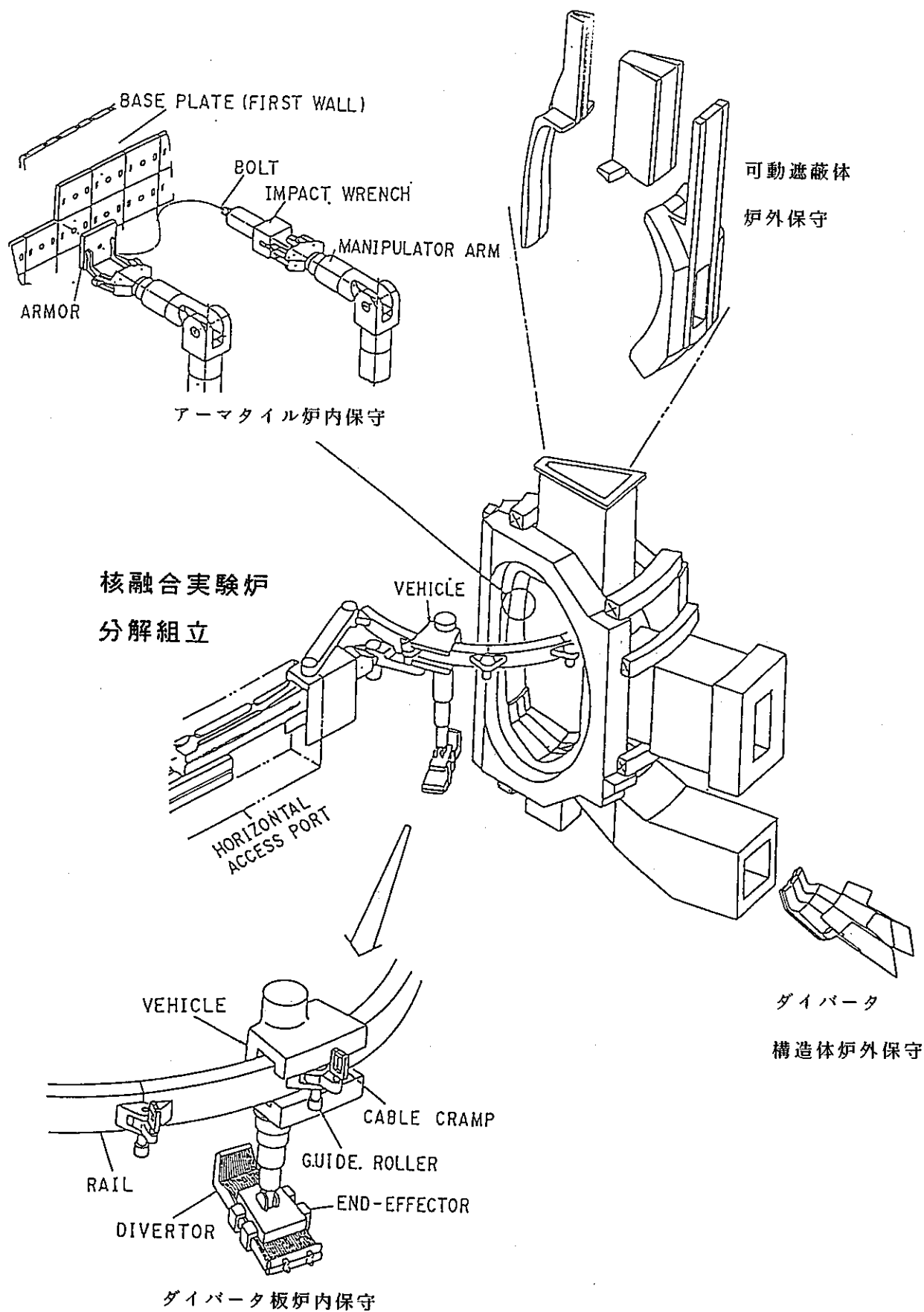
開発計画



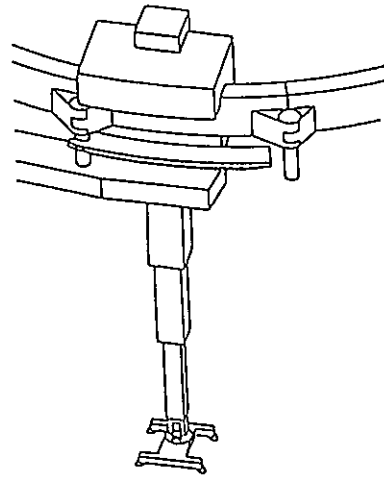
開発内容

1. 要素開発

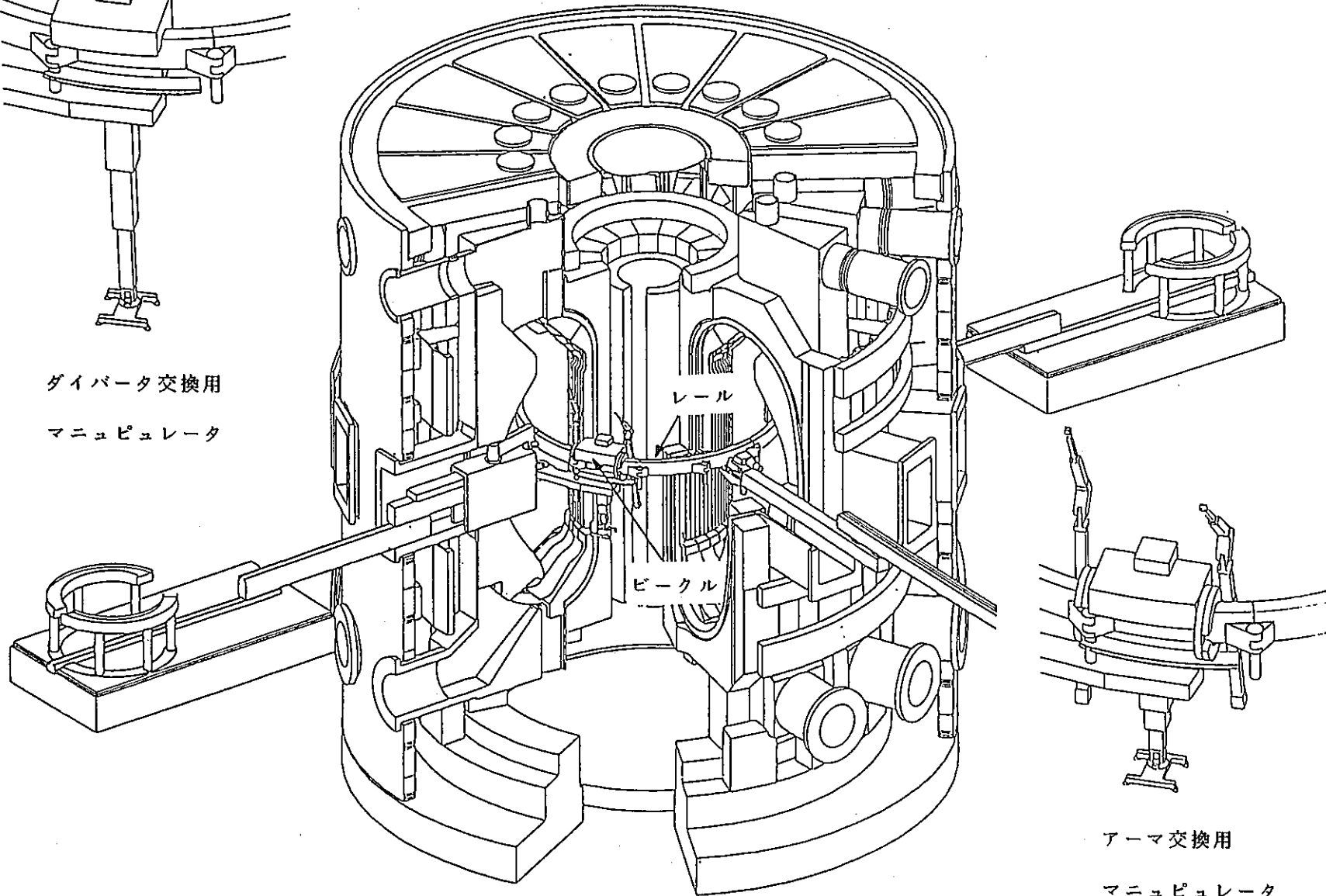
- ① 炉内検査 : (対象) アーマ表面計測, リーク試験
(内容) 真空中での検査機器基本特性検証
- ② アーマ着脱 : (対象) アーマ炉内交換保守
(内容) 機械および冶金接合型アーマ着脱基本特性評価
- ③ 配管切断・溶接 : (対象) 炉内構造物交換保守
(内容) 管内アクセス配管切断溶接機の基本特性評価
- ④ 配管着脱 : (対象) 炉内構造物交換保守
(内容) 200A規模簡易着脱式配管継手の基本特性評価
- ⑤ マニピュレータ : (対象) 炉内検査, 炉内構造物および周辺機器遠隔交換保守
(内容) 縮小部分モデルでの基本特性, 製作性評価
- ⑥ 二重シール扉 : (対象) 炉内構造物保守時のトリチウム格納
(内容) 縮小モデルでの基本特性, 製作性評価
- ⑦ 炉内補修 : (対象) 第一壁, 真空容器等の溶接補修, 切断, 研磨
(内容) 部分モデルでの基本特性評価
- ⑧ 移送システム : (対象) 炉内および炉外構造物移送
(内容) 移送システム駆動源の基本特性評価
- ⑨ 耐放射線性要素 : (対象) 遠隔機器用素子, ケーブル等
(内容) 照射特性および寿命評価



ビークル型炉内遠隔装置全体概念



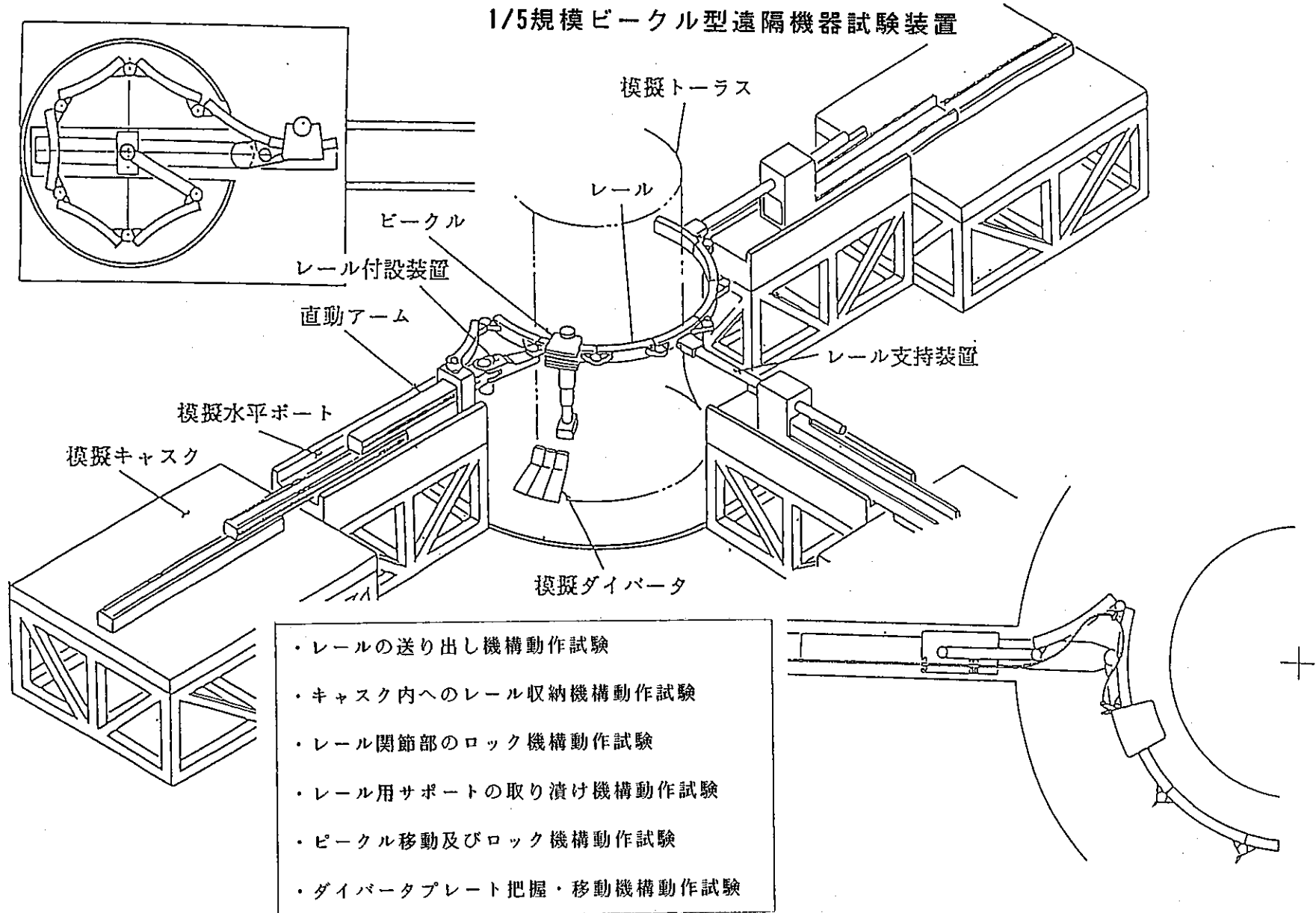
ダイバータ交換用
マニピュレータ



アーマ交換用

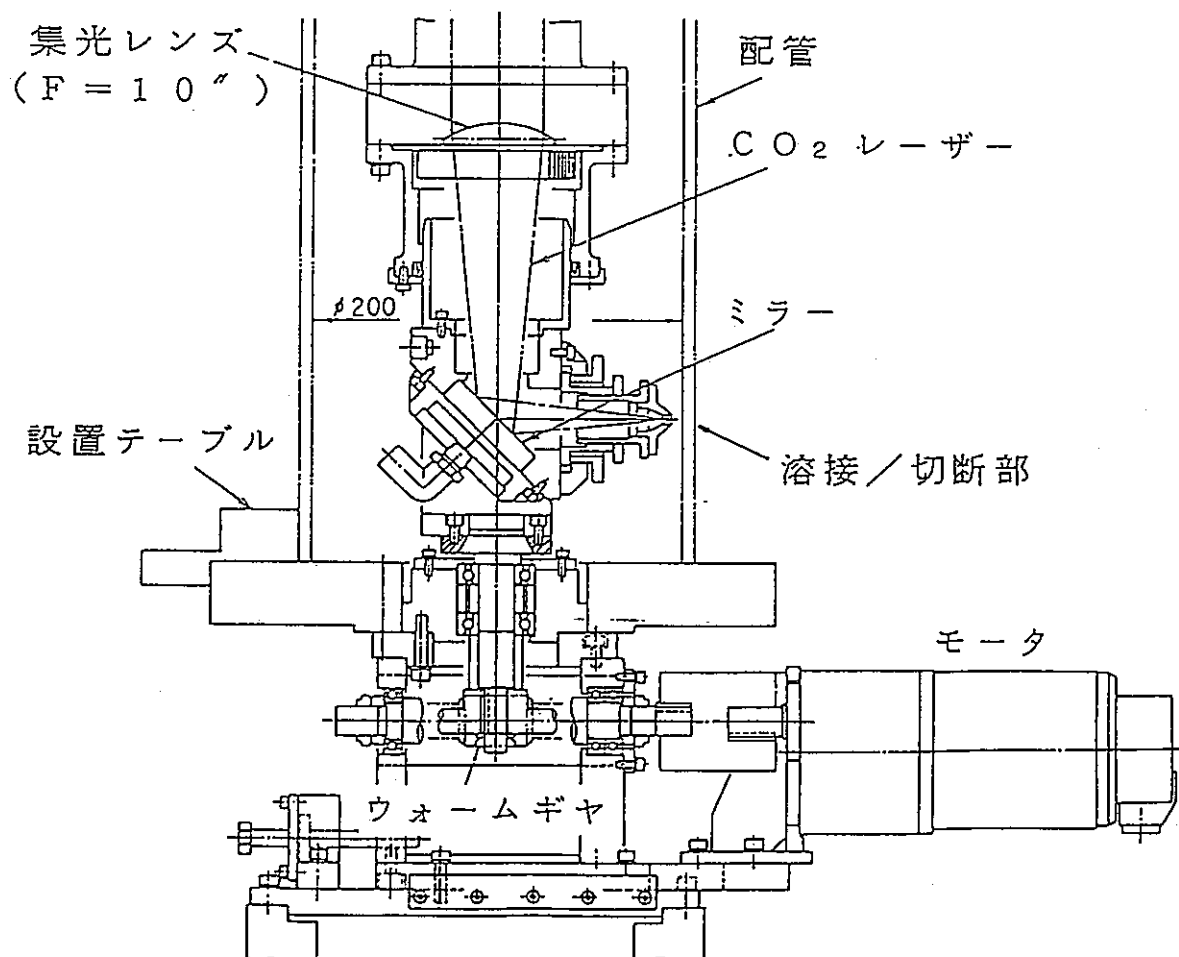
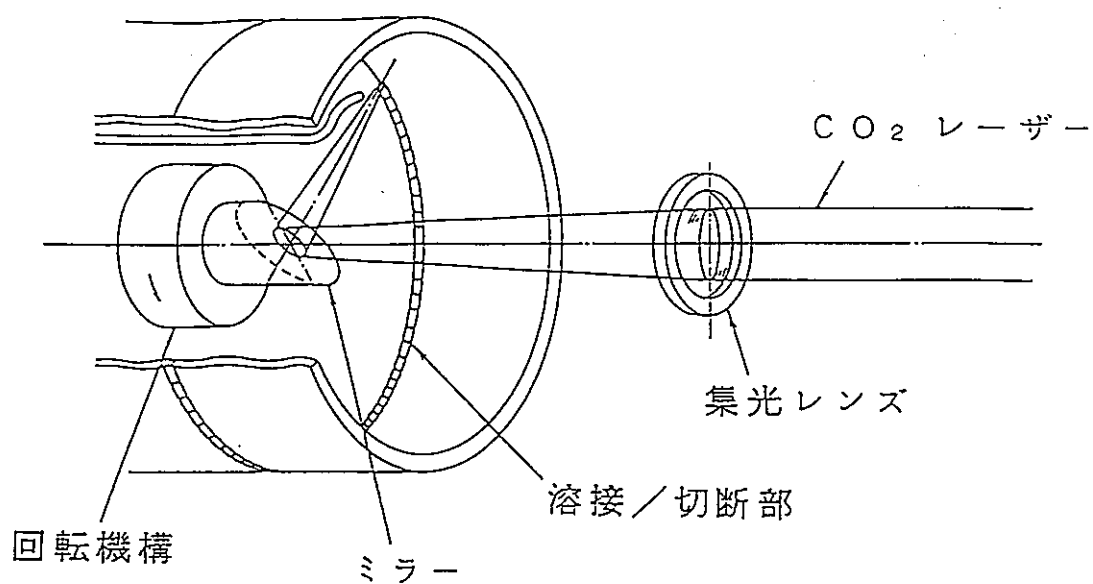
マニピュレータ

1/5規模ビークル型遠隔機器試験装置



管内アクセス配管溶接・切断試作機構造

(200A配管規模)

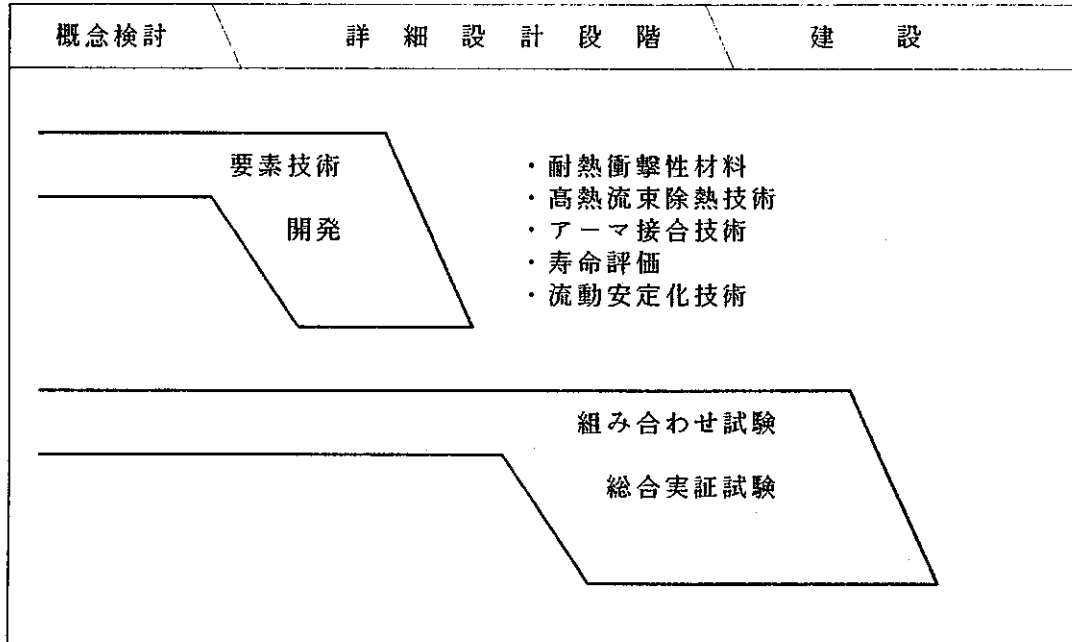


プラズマ対向機器系開発

開発目標

項 目			第一壁	ダイバータ
熱負荷 条 件	通常運転時			
	平均中性子壁負荷	MW/m ²	0.6-1	0.3-0.6
	最大熱流束	MW/m ²	0.6	10-20
	デイスラプション時			
	熱クエンチ			
	時定数	msec	0.1-3	0.1-3
	熱エネルギー	MJ/m ²	2	20
	電流クエンチ			
	時定数	msec	5-20	5-20
	熱エネルギー	MJ/m ²	2	2
	逃走電子 (≤300MeV)	MJ/m ²	100	100
温度 条件	通常時アーマ最大温度	℃	1,800	1,000
	ベーキング温度	℃	350	350

開発計画



開発内容

1. 要素技術

高熱流束試験装置を用いたサンプル照射試験で以下の主要要素技術の開発実施

① 耐熱衝撃性材料開発 : 2-20 MJ/m²を満足する炭素系材料等

② 高熱流束除熱技術開発 : ダイバータ (10-40 MW/m²) および

第一壁 (0.6-1 MW/m²) の除熱技術

③ アーマ接合技術開発 : 高熱流束を可能とする冶金接合, 機械締結技術

④ 寿命評価 : 耐熱応力, 耐食に対する評価

④ 流動安定化技術 : 並列流路安定化技術

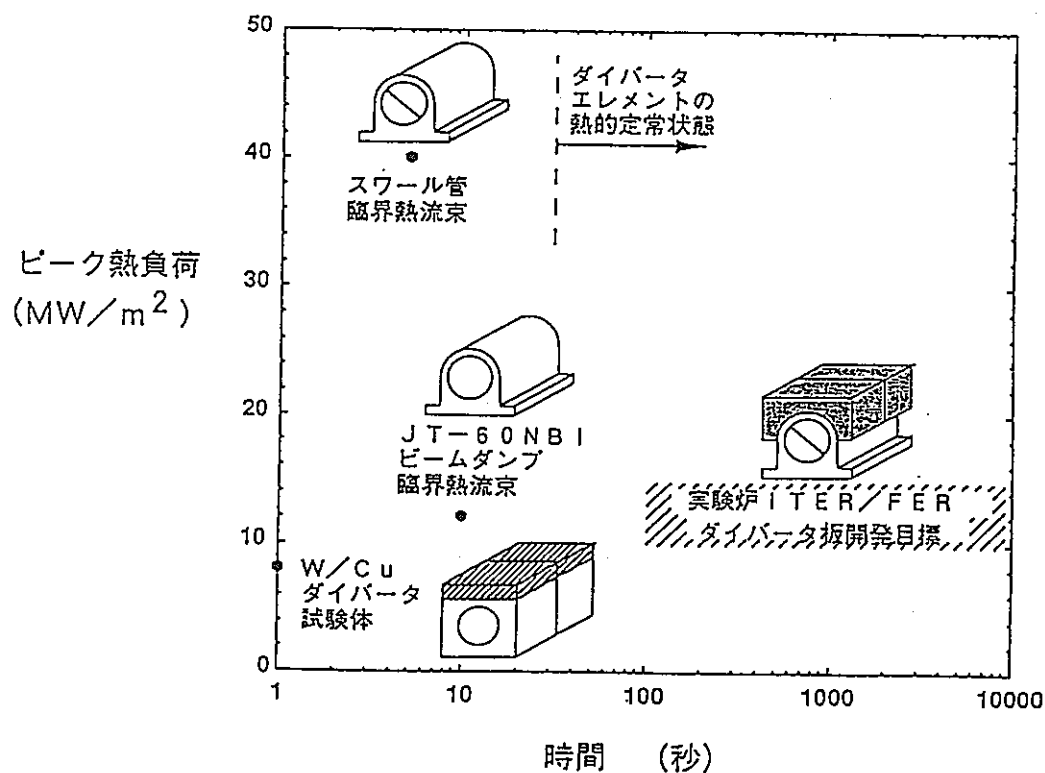
2. 組み合わせ試験

小型構造体 (20cm×60cm) に対して繰り返し熱負荷試験を実施し, 受熱機器の健全性を実証するとともに大型化への製作技術を実証する。

3. 総合実証試験

1 m²規模の大型構造体に対する繰り返し熱負荷試験を実施し, 総合的健全性を実証する。

ダイバータ板の開発状況と目標

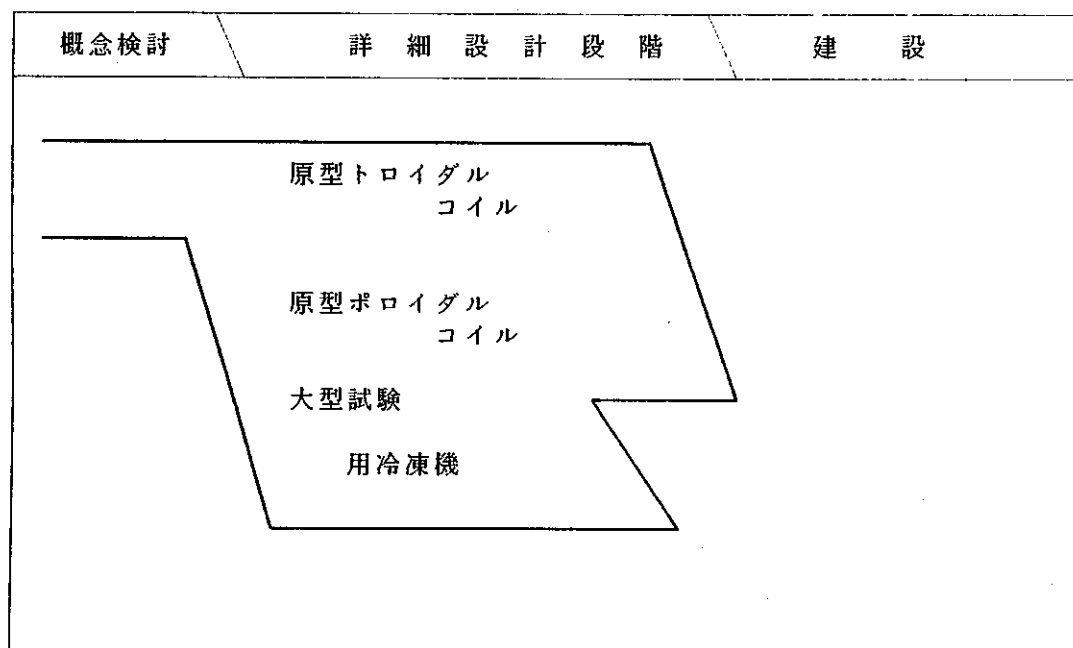


超電導コイル系開発

現状技術と実験炉技術

項 目	現 状	核 融 合 実 験 炉	
トロイダル磁場コイル ① 最大磁界 ② コイル外形寸法 ③ 通電電流値 ④ 冷凍方式	(LCT) (TMC) 8 - 12.2 T 3.5×4.5 - 1.5 m 10 - 6 kA 浸漬冷凍	(FER) 12 T 7.5×12.4 m 30 kA 強制冷凍	(ITER) 11 T 9×17.6 m 40 kA 強制冷凍
中心ソレノイド・コイル ① 最大磁界 ② コイル寸法 外径 ③ パルス磁界 ④ 冷凍方式	(DPC-EX) 設計：10 T, 運転：7 T 1.6 m 7 T/s 強制冷凍	12 T 3 m 4 T/s 強制冷凍	13.5 T 4.1 m 5 T/s 強制冷凍
大口径平衡コイル ① 最大磁界 ② コイル平均直径 ③ パルス磁界	(DPC-U1&U2) 7 T 1.5 m 7 T/s	7 T 19 m 2 T/s	7 T 23 m 3 T/s
大型ヘリウム冷凍機 ① 冷凍能力 ② 液化能力	6.5 kW 1,000 l/h	90 kW 4,500 l/h	130 kW 4,500 l/h

開発計画



開発内容

1. 原型トロイダル・コイル

- ① 12T-30kA級大型実用導体技術の確立
- ② 12T, 6m級(実機の1/2規模)大型トロイダル・コイル製作技術確立
- ③ 高応力、核発熱条件下でのコイル安定性の実証
- ④ 高強度耐放射線性絶縁材料の開発と実証

2. 原型ポロイダル・コイル

- ① 13T-40kA級大型パルス導体製作技術確立
- ② 実規模中心ソレノイド・コイル(CS)製作技術確立
- ③ 7T, 6m級(実機の1/3規模)大口径平衡コイル(EF)製作技術確立
- ④ 高応力条件下での安定性の実証, 寿命評価

3. 大型試験用冷凍機

- ① 10kW級(実機ユニットの1/3規模)大型冷凍機技術の確立
- ② 実規模低温機器(タービン膨張機, 低温ポンプ等)技術の確立
- ③ 大型ヘリウム圧縮機技術の確立

開発現状

1. トロイダル磁場コイル

- ① LCTコイル: 4.5m, 10kA, 8Tの達成
- ② TMCコイル: 2m, 6kA, 12.2Tの達成
- ③ 12T, 30kA実規模導体の試作試験

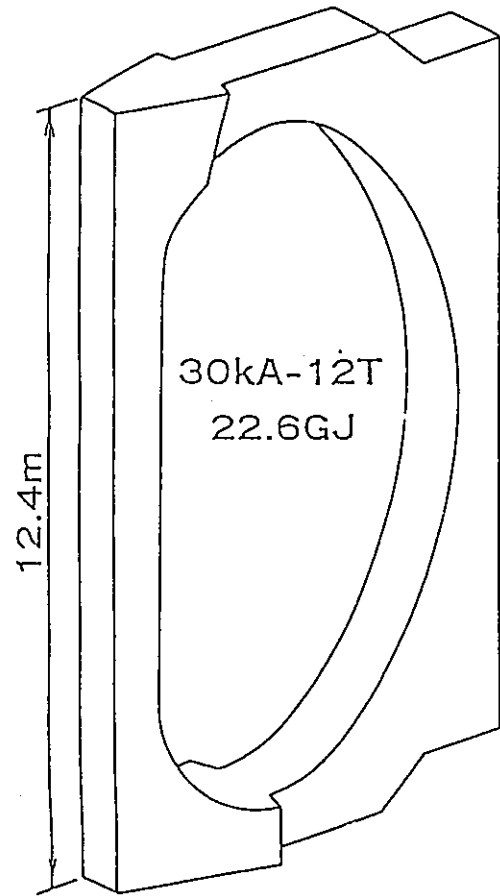
2. ポロイダル磁場コイル

- ① 実証ポロイダル・コイル計画において, NbTiコイル(DPC-U1, U2)を補助コイルとしながらNb₃Snコイル(DPC-EX)を7T, 17kAまで1秒間で立ちあげるパルス動作を達成
- ② Nb₃Snをパルス・コイルに適用する技術を実証し, 今後の12T級高磁界パルス・コイルへのベースを得た。

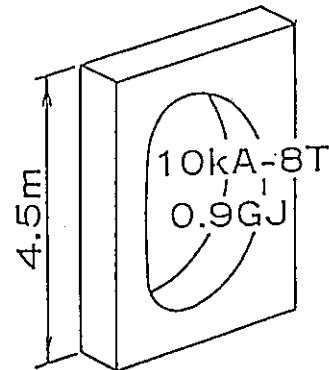
3. 大型冷凍機技術

- ① 実証ポロイダル・コイル計画において, 4K, 500g/sの超臨界圧ヘリウムを長時間安定にコイル系に供給循環する等強制冷凍技術を実証した。
- ② 10kW級タービン膨張機, 低温ヘリウム・ポンプ, 大電流・高電圧電流リード等の大型低温機器の開発に成功し, 実験炉用大型冷凍機器技術のベースを得た。

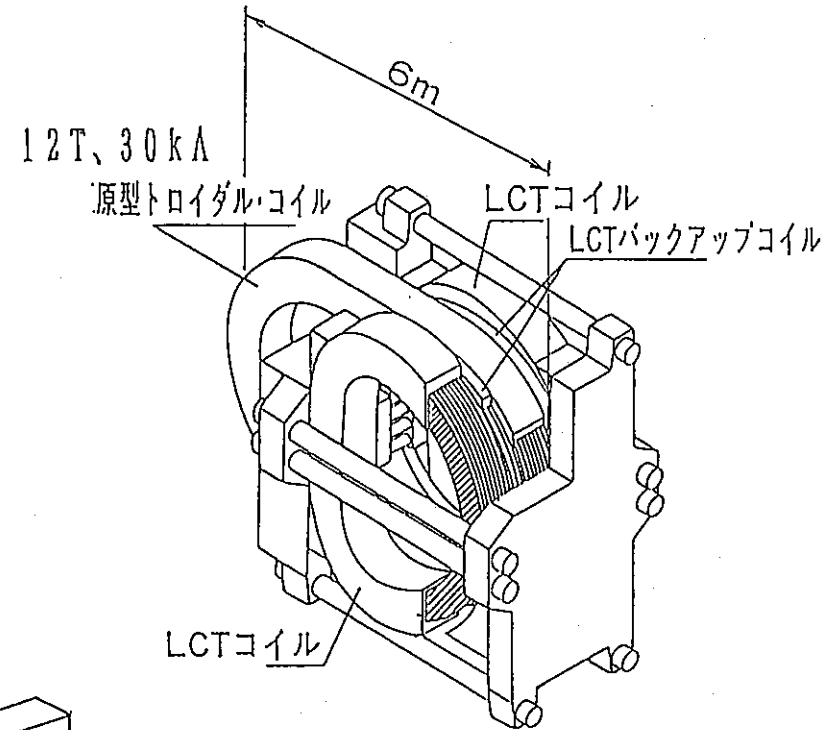
超電導直流コイルー高磁界・高強度



FERトロイダル磁場コイル



LCTコイル



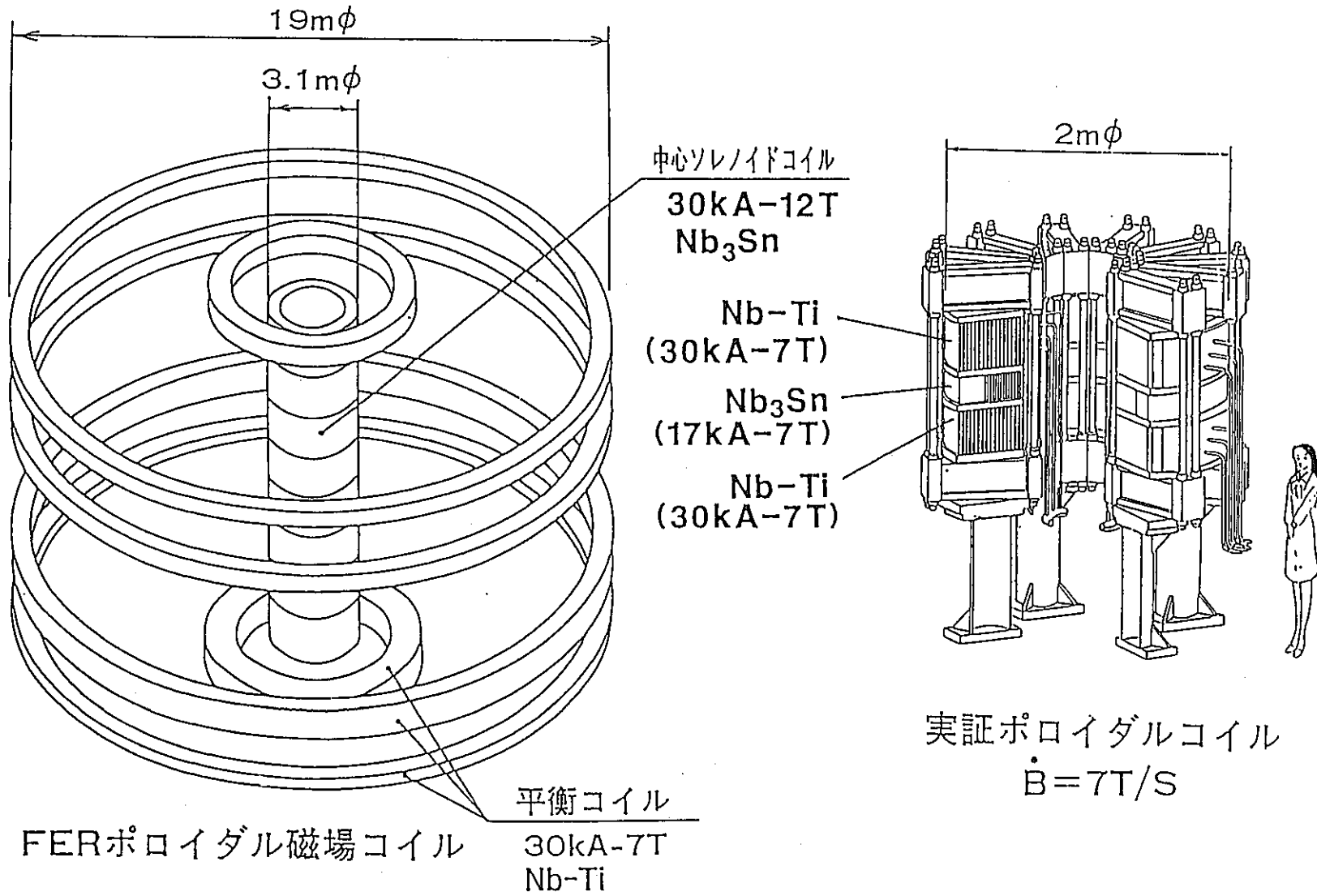
原型トロイダル・コイル



テスト・モジュール・コイル

最大磁界 12T
平均径 1.1m

超電導パルスコイルー低パルス損失導体技術

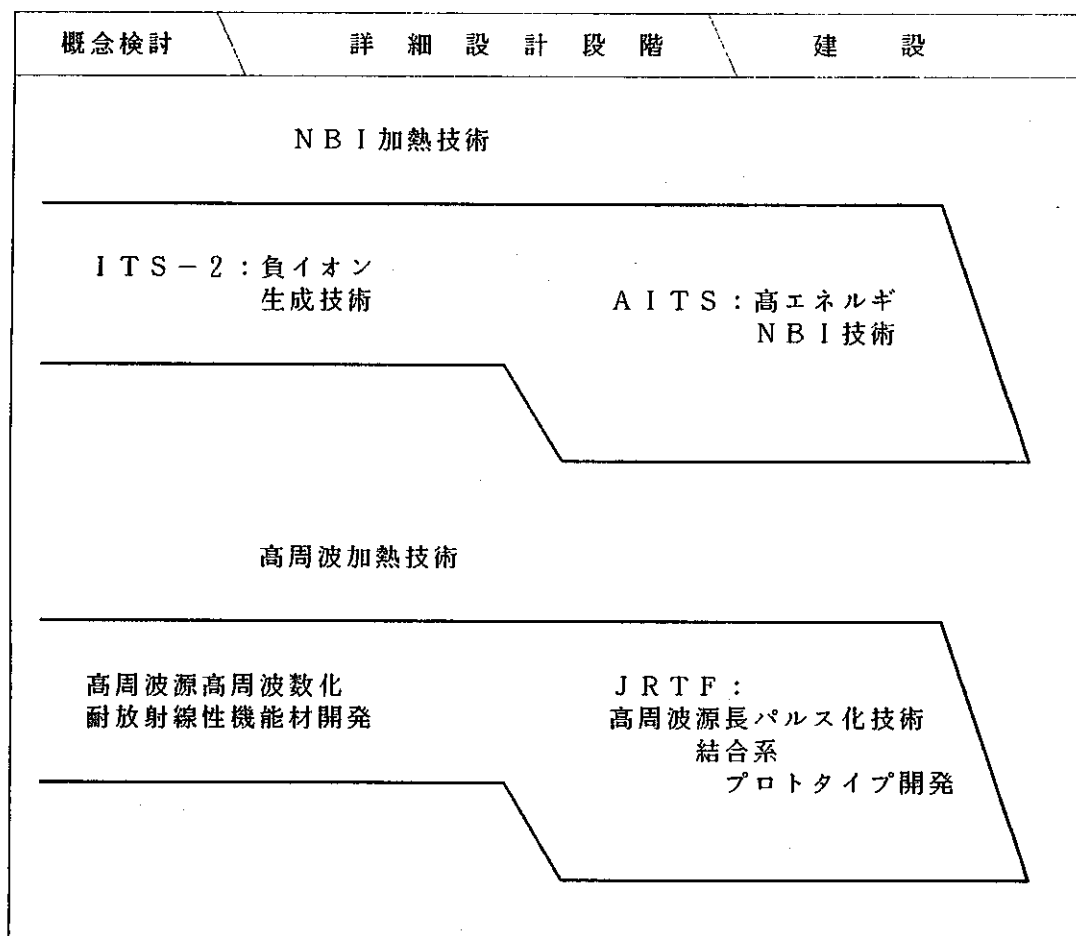


加熱・電流駆動系開発

使用条件

項 目	N B I	L H	E C	I C
入射パワー 負イオンビーム加速器 直流加速電源	50 - 75MW 0.5-1.3Mev 60 - 15 A 0.5-1.3 MW			
入射電力 周波数 高周波源出力／ユニット ユニット数		25 - 50 MW 5GHz 0.7 MW 78 - 100	20 MW 120-140GHz 1 MW 28-25	25 MW 110-160MHz 1.5 MW 24

開発計画



開発内容

1. NBI加熱装置

① ITS-2 : 負イオン生成技術の実証

$75\text{keV} \times 10\text{A} \times 0.2\text{s} \times \text{H}^-$; $350\text{keV} \times 0.1\text{A} \times \text{CW} \times \text{H}^-$

② AITS : 高エネルギーNBI技術の実証

1-1. $3\text{MeV} \times 5\text{A} \times \text{CW} \times \text{D}^-$; $0.1\text{MeV} \times 20\text{A} \times \text{CW} \times \text{D}^-$

ITS : 負イオン源試験スタンド, AITS : 高効率粒子入射装置試験スタンド

2. RF加熱装置

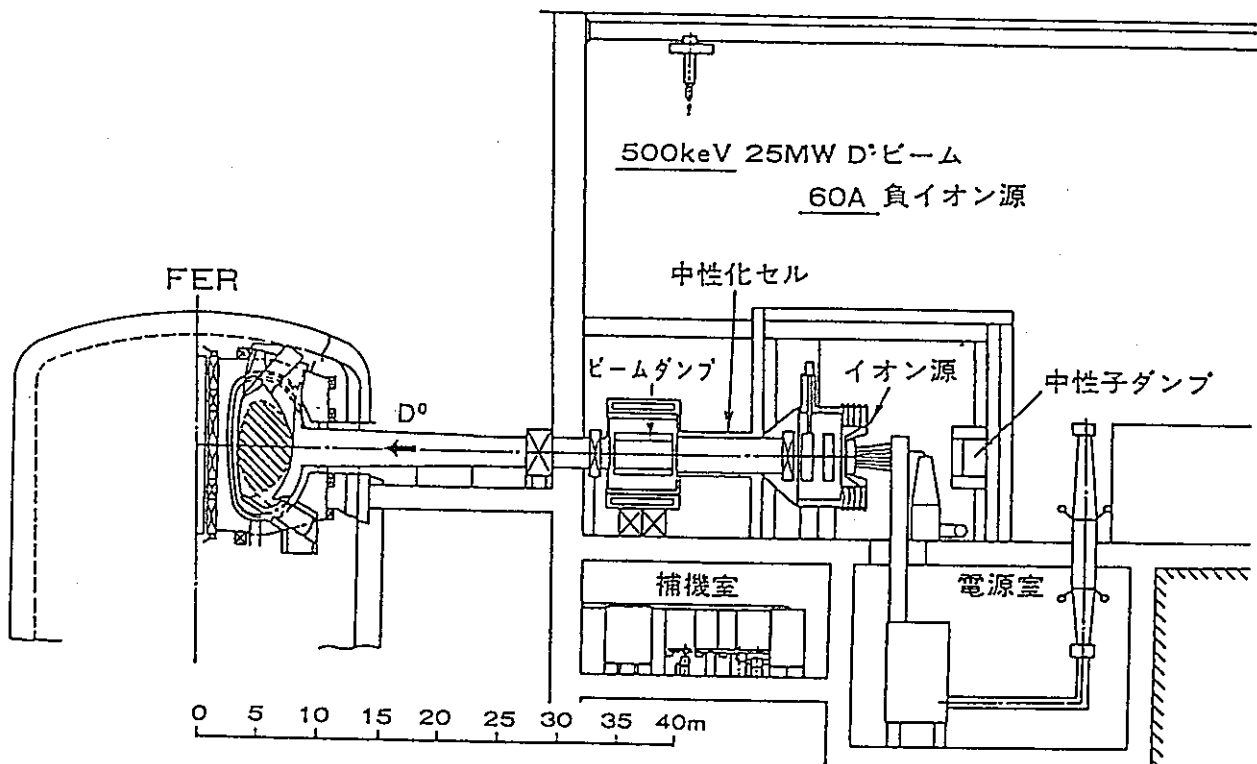
① 高周波源の開発 (高周波開発試験装置)

- ・ LH : 0.7MW , 5GHz , $10\text{--}1,000\text{sec}$ クライストロンの開発
- ・ EC : $0.5\text{--}1\text{MW}$, $120\text{--}140\text{GHz}$, $3\text{--}1,000\text{sec}$ ジャイロトロンの開発
- ・ IC : 1.5MW , $110\text{--}160\text{MHz}$ IC 高周波源の開発

② 結合系の開発

- ・ 高周波特性の評価, 電力密度 (5 kW/cm^2) 以上, $1,000\text{sec}$ エージング効果の評価を実施
- ・ 照射試験 (放射線, 高熱負荷)

中性粒子入射 (NBI) 加熱装置



燃料循環系開発

設計条件

項 目		核 融 合 実 験 炉	
燃料サイクル	燃料循環流量 トリチウム貯蔵量	(FER) 100 g-DT/h ～2 kg	(ITER) 350 g-DT/h ～5 kg
多重格納	炉室容積	10^5 m^3	$2 - 4 \times 10^5 \text{ m}^3$

現状技術

1. 実験炉規模燃料循環システム技術

T P L (16g-T₂) および T S T A (日米協力) により下記を達成

- ① 長時間循環 : 一週間連続運転を10回以上
- ② 総循環量 : 約120kg-DT
- ③ 多重隔壁格納 : 2年以上実施

2. 大型ターボ分子ポンプ技術

25m³/s 油軸受けターボ分子ポンプ技術の実証

開発項目

1. 燃料技術

- ① 燃料ガス注入トリチウム実証 (高速圧電素子弁等)
- ② 高速燃料ペレット技術トリチウム実証 (DTペレット)
- ③ 主排気ポンプトリチウム実証 (25m³/s 磁気軸受け大型ターボ分子ポンプ)
- ④ 燃料循環ループ技術確証 (燃料プロセス, 貯蔵, 流量管理等)

2. 多重隔壁格納技術

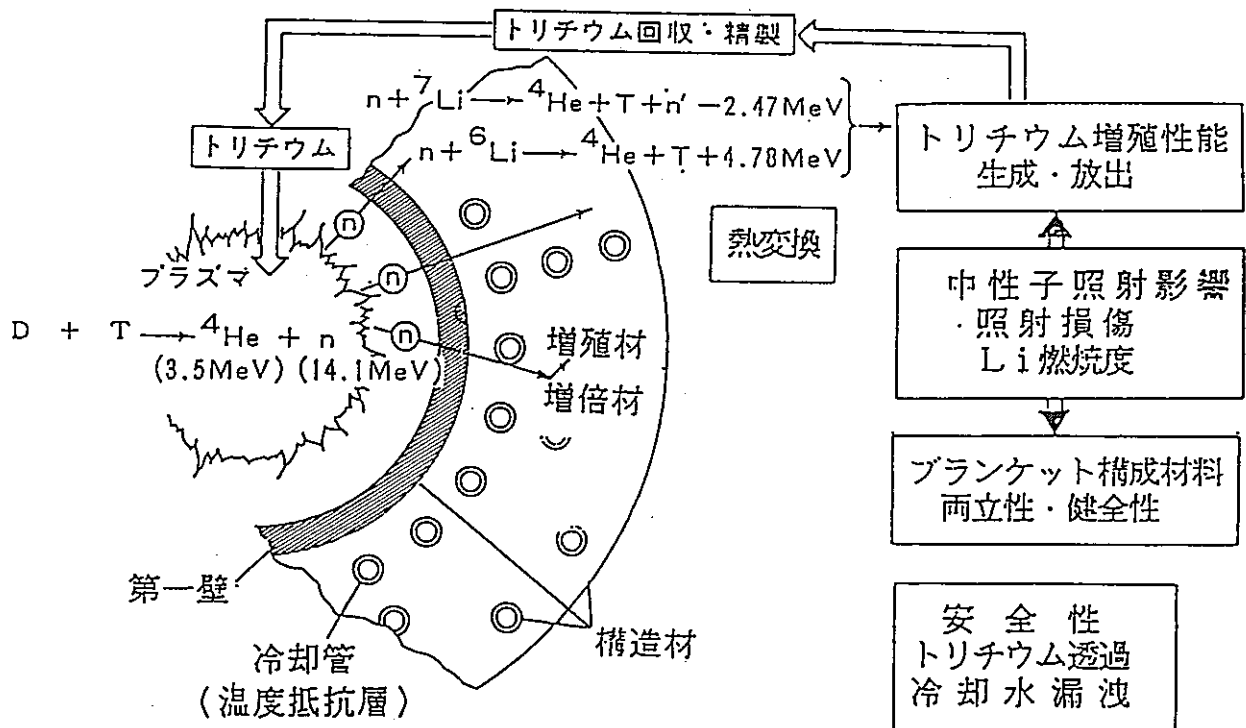
- ① 定常時, 異常時トリチウム漏洩・除去試験
- ② 防護具トリチウム実証試験
- ③ 基盤研究 (トリチウム・材料相互作用等)

ブランケット系開発

設計条件

項 目		核 融 合 実 験 炉	
エネルギー転換・ 回収技術	核融合出力	(FER) 0.4 GW	(ITER) 1 GW
	中性子壁負荷	0.6 MW/m ²	1 MW/m ²
	中性子フルエンス	0.2-0.3 MWa/m ²	1-3 MWa/m ²
トリチウム増殖 回収技術	ブランケット規模	T生産用：	700 m ² (ITER)
	トリチウム生産量	発電用： ～ 1 × 2 m ²	150 g/d (ITER)

開発課題



核融合ブランケットにおける開発課題

(水冷却固体系ブランケット)

計測・制御系開発

開発項目

項 目	現 状	目 的 内 容
耐放射線センサーおよび要素開発 1. 第一壁近傍 磁気センサー マイクロ・フィッション・チェンバー 2. ポート内(クライオ・スタート近傍) 鏡 窓	$10^{21}-10^{22}$ n//cm ² (<1MeV) 試験小片 $10^{28}-10^{21}$ n/cm ² (<1MeV)	ニュートロン・フルーエンス $10^{22}-10^{23}$ n/cm ² (<14MeV) $10^{28}-10^{22}$ n/cm ² (14MeV)
新計測・制御システム開発 1. 核燃焼プラズマ制御用 計測システム開発 (含む、 α 物理解明用 計測システム開発) 2. 定常運転制御用 計測システム開発	損失 α 粒子測定 0.2MeVヘリウムビーム 数10秒放電 センサー試作	主プラズマ α 粒子速度分布関数測定 中性子スペクトラム測定 態動粒子法(0.5MeV ヘリウムビーム) 中性子発生量モニター 中性子空間分布モニター ～1,000秒放電用積分器 定常磁場測定用センサー開発
計測・制御用遠隔保守システム開発	現場での人手による 保守	センサー・ヘッド、鏡、窓およ び光ファイバー等の 遠隔保守システム システムの遠隔保守装置
その場の校正技術の開発	ニュートロン計測 精度 10-15% (JET, TFTR) カリフォルニウム線源	ニュートロン計測 精度 5-10% 14MeV 強力ニュートロン線源 およびその遠隔操作
モニタリング・システムの開発	DH対応のみ	装置健全性・安全性確保 DT対応

開発状況

項 目	基本設計	製 作	試験評価	選 択
耐放射線センサーおよび要素開発				

項 目	基本設計	製 作	性能試験
新計測・制御システム開発			
計測・制御用遠隔保守システム開発			
校正技術の開発			
モニタリング・システムの開発			

プラント・安全技術系開発

開発項目

項 目	目 的 内 容
安全性 トリチウムの挙動解析 放射化生成物の可動化解析 安全性解析・評価手法 黒鉛中のトリチウム挙動解析 ダイバータ冷却水喪失解析 真空容器内冷却水噴出解析 真空容器内空気流入解析	実験炉の安全性の評価 " " " " " "
安全系 雰囲気トリチウム除去・回収システム 冷却水処理系	雰囲気トリチウム除去 分修時、事故時トリチウム除去・回収 トリチウム回収、水質管理
プラント 建屋構造体の開発 建屋付属設備の開発	変動強磁場、 トリチウム閉じこめ 大重量物支持 真空維持 照明器具、制御・分電盤、配線材 大電流母線等および修理技術 モニタリング設備
修理・解体 修理・解体技術	高放射線レベル ($1 \times 10^6 \text{R/h}$) 大型・重量構造物の修理 ・解体
トリチウム汚染廃棄物処理 固体廃棄物処理技術開発 トリチウム廃液濃縮技術開発	炉内除染 炉外除染 固体廃棄物処理 安全系排出トリチウム水処理

3.3 LWRへのFBR技術利・活用について

3.3.1 はじめに

高速増殖炉（FBR）は経済性向上を図るため、タンク型炉容器のコンパクト化、ループ型炉の配管長の短縮化などの開発努力が続けられている。さらに各種革新的炉概念の提案がなされるようになってきた。一方軽水炉（LWR）も現行炉をさらに高度化したり、固有の安全炉の提案がされるようになってきた。

このよに、FBR、LWRともに新しい展開がされようとしているときに、その両者を比較し、相互の技術的特徴を浮き彫りにすることはいろいろな意味で重要なことであろう。

3.3.2 FBRとLWRの各機器技術の対応と利用

両炉ともその開発経緯を見ると大型化とインテグラル化をたどっている。FBRは増殖とNa冷却と特徴を生かして高温、高密度、高効率となっている（表－1）。

炉心評価はFBRが全体的、LWRは局所的である。事故解析はある意味ではFのほうが進んでいると言える（表－2）。

プラント機器は一言で言うとNaと高圧水の違いであるが、Fは経験のない大型機器をシステムテックに開発してきたこと、漏洩にたいしてシビアに対応するようになっている点に特徴がある（表－3、－4）。また液面計のように液体金属の特徴を生かした簡単な構造のものもある。

表－5に示した炉化学再処理はNaとPuの特徴が直接出る分野であるが、相互に学ぶべき点も多い。

表－6にFBR／LWRに共通な基盤技術と考えられるものをあげた。このうち【4】、【5】は表－2にあげたので、【1】を表－7に、【2】と【3】を表－8に示す。

熱流動現象は両炉とも同じように現われるため、設計評価や異常現象解明において、相互交流がはかられ実をあげている。構造強度はFのほうが、その必要性から進んでいる分野といえる。耐震性の点もその構造上の違いから評価法の違っているところがある。

3.3.3 おわりに

FBR技術として開発されたものがLWRに活用されているか、今後利用されうると考え

られるものを表-9のように分類してみた。色々な観点から比較してみると有益であろうとおもわれる。

参考文献

- (1) 宮本, 他: LWRとFBR-その類似と相違, 日刊工業新聞社発行「原子力工業」
第35巻第1号～第36巻第1号(1989～1990年)

表-1 FBR/LWR機器技術の対応と利用

(1) 全般

項目	FBR	LWR	活用利用(可能性)
● 炉型	タンク/ループ	インテグラル化(B)	経済性・信頼性
● 電気出力	～1000MWe	～1000MWe	大型化
● 熱効率	40%	34%(B)	高温化
● 出力密度	～300kW/l	～100kW/l	高出力密度化
● 燃焼度	～20万MWD/T	～5万MWD/T	高燃焼度化

表-2 FBR/LWR機器技術の対応と利用

(2) 炉心・安全性

項目	FBR	LWR	活用利用(可能性)
● 燃料棒径	6～8mm	9～14mm	細径化
● 中性子経済	反射体・遮蔽体	上下端天然ウラン炉心	経済性向上
● 燃料変形	中性子・温度分布	局所的異常	評価法
● 消滅処理	TRU	TRU	炉心活用
● 仮想事故	炉心溶融	炉心溶融	評価法
● 副炉停止系	後備炉停止系	ほう酸水	重力利用
● 格納容器耐圧	0.5気圧、燃焼抑制	～4気圧、圧力抑制	思想

表－３　ＦＢＲ／ＬＷＲ機器技術の対応と利用

(３) プラント・機器

項目	F B R	L W R	活用利用（可能性）
● 燃料交換系	遠隔自動	上蓋取り外し方式	遠隔自動／簡素化
● 配管破損対策	ガードＶ液位確保	スプレイ系	重力利用
● 崩壊熱除去	R V A C S	自然対流格納容器	重力利用
● 蒸気発生器	管内沸騰	管外沸騰	システム開発
● 熱交換器	高性能 I H X	各種熱交換器	システム開発
● 二重壁構造	二重伝熱管	高信頼性圧力境界壁	開発思想

表－４　ＦＢＲ／ＬＷＲ機器技術の対応と利用

(４) 計測システム

項目	F B R	L W R	活用利用（可能性）
● 燃料破損位置検出	F F D L	SHIPPING 法	オンライン化
● 音響検出	S G リーク	バルブリーク	特性評価法
● 液面計	誘導式	水位計システム	簡素化
● 漏洩検出	N a サンプリング検出	ドレン水検出	高信頼化／簡素化

表－５　ＦＢＲ／ＬＷＲ機器技術の対応と利用

(５) 炉化学再処理

項目	F B R	L W R	活用利用（可能性）
● 主要不純物	酸素・水素	全イオン（塩素）	
● 不純物計	ブラギング計	電導度計	概念
● C P 源	炉心	炉外	挙動評価
● C P 除去	炉内 C P トラップ	クラッド除去	被曝低減
● 使用済燃料	高 P u 含有	低 P u 含有	臨界管理

表－6 基盤技術

- 【1】 熱流体評価解析技術
- 【2】 構造強度評価解析
- 【3】 耐震性評価解析技術
- 【4】 炉心解析技術
- 【5】 炉心安全性評価技術

表－7 F B R / L W R 機器技術の対応と利用

(7) 熱流動特性

項目	F B R	L W R	活用利用（可能性）
● ストライピング	炉上部	給水スパージャ等	現象予測
● 熱成層	大口径配管	各種配管	現象予測・定量化
● スロッシング	炉容器液面	燃料貯蔵槽	現象予測・定量化
● 気液分離	ガス巻き込み	自由液面気液分離	現象解明・定量化
● 噴流	S G リーク	配管クラック、L B B	現象定量化
● 流体振動	I H X 伝熱管	燃料棒、S G 伝熱管	現象定量化
● 三次元流動	炉上部等	炉下部（B）等	解析コード
● 2 相流	S G	炉心燃料、S G	現象定量化

表－８ F B R / L W R 機器技術の対応と利用

(8) 構造強度・耐震

項目	F B R	L W R	活用利用 (可能性)
● 構造強度解析	非弾性解析	弾性解析	評価法
● 亀裂進展解析	非線形破壊力学	線形破壊力学	評価法
● 燃料変形	スエリング	照射クリープ	評価法
● 燃料支持法	下端支持	両端支持	
● 燃料耐震解析	高次モード衝突振動	曲げせん断振動	評価法
● 原子炉容器	薄肉大口径	厚肉小口径	
● 炉容器振動解析	塑性座屈	曲げせん断変形	評価法

表－９ F B R 技術の L W R への利用形態

(1) 遠隔自動化

F B R の特殊性から遠隔、自動化が進んでいるもの、燃料交換機など

(2) 簡素化

F B R に使われている機器、システムが簡単なもの、液面計など

(3) システム開発

F B R で大型機器システムが系統的に開発が行なわれているもの

(4) 概念、思想

F B R で採用されている概念、思想；自然循環など

(5) 高度化

F B R の持つ本来的ポテンシャルの活用；温度、密度、効率

(6) 現象評価法

F B R で主として課題となる現象で L W R でも類似な事象が起こるもの

3.4 高温ガス炉技術の現状と将来展望

3.4.1 はじめに

高温ガス炉の開発は、高温熱供給によって発電、化学工業、製鉄等の分野に原子力の利用の拡大を図るとともに、エネルギー源の多様化、安定確保等に寄与することとなり、エネルギー政策上重要な意義がある。

このような観点から、現在我が国では日本原子力研究所により高温工学試験研究炉の開発が行われている。

高温ガス炉の開発では各種燃料・材料の照射試験、炉心の核・熱動特性試験等による炉心の高性能化を図るとともに、高温に関する基礎研究および安全性実証試験等、幅広い技術関連研究開発が必要であり、燃料・材料開発等の先端的基礎研究、各種要素技術の高度化・高性能化、関連技術の確立等の分野において開発目的、開発内容および手法の面から高速増殖炉技術開発と共通あるいは類似している項目が多い。このため、一方での技術研究開発が他方へ応用が可能であるなど相互に技術の波及が図れる分野であるといえる。

本説では、高温ガス炉技術の現状と将来展望について、主としてプラントの特徴と関連技術について紹介することにより、高速増殖炉における技術開発との共通事項の認識に役立てることをねらいとした。

3.4.2 高温ガス炉の特徴

(1) 冷却材温度が高い。

- ・ 高温核熱利用……化学、製鉄等の分野での直接熱利用
- ・ 高効率発電……直接サイクル、高効率蒸気サイクル
- ・ 熱・電併給

(2) 異常・事故時の炉心冷却に関する余裕が大きい。

- ・ 非常用炉心冷却系の簡素化
……強制循環による非常用炉心冷却系の削除

(3) 冷却材中放射能濃度は低く、沈着放射能は剥離しにくい。

- ・ 事故時の放出放射能が少ない。
……格納容器の削除、または格納容器設置によるより高い安全性の確保

(4) 耐震上特殊な構造を有するものがある。

- ・積層構造炉心等

冷却材温度の決定要因と高度化の方向

I. 燃料

1. 被覆層破損

- ・ 高温破損、アメーバ効果……燃料要素冷却特性

改良による温度低下

- ・ F P - 被覆層反応…………… $\text{SiC} \rightarrow \text{ZrC}$

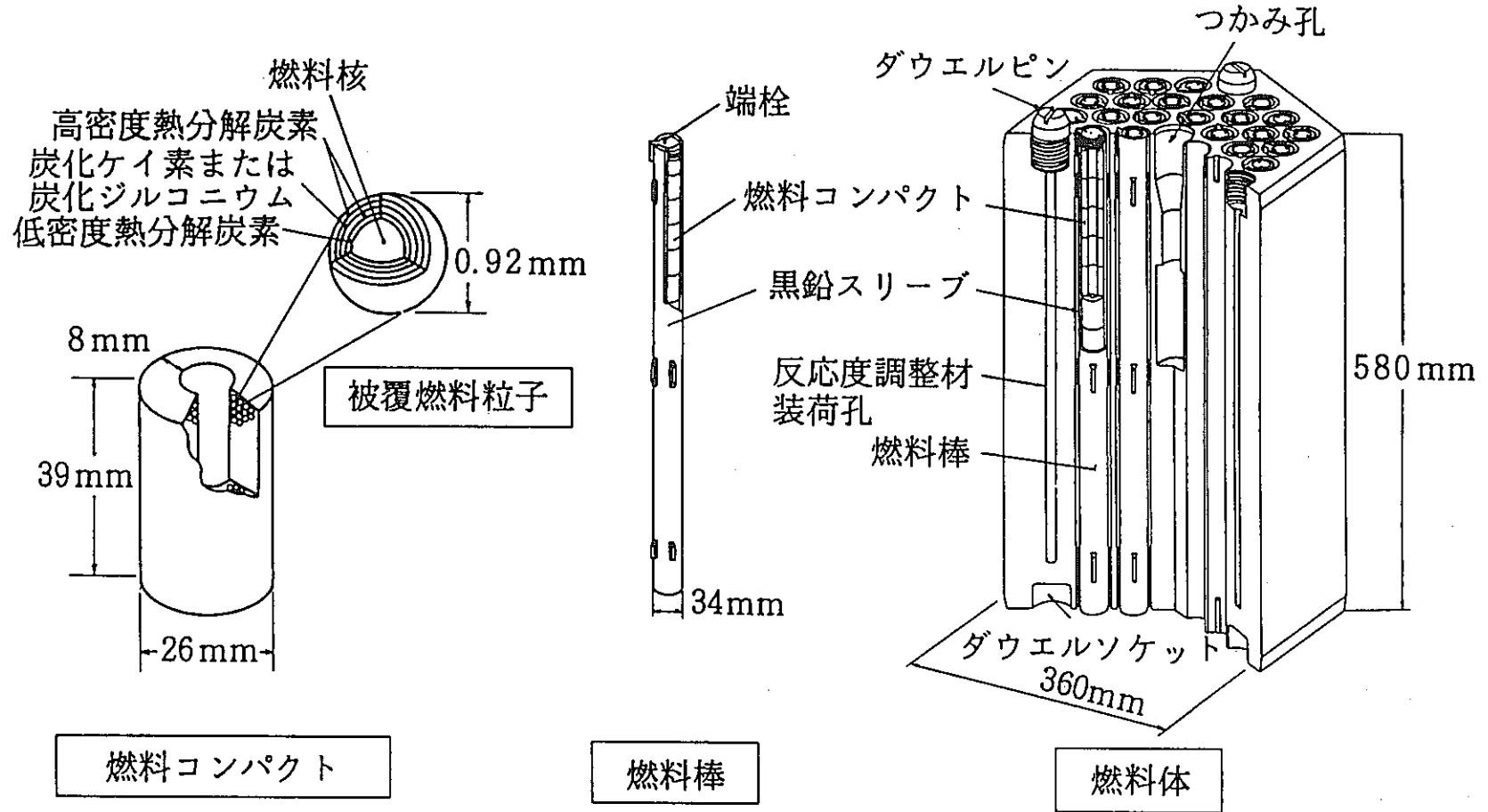
2. F P の被覆層透過

- ・ 被覆層内拡散による透過……燃料要素冷却特性

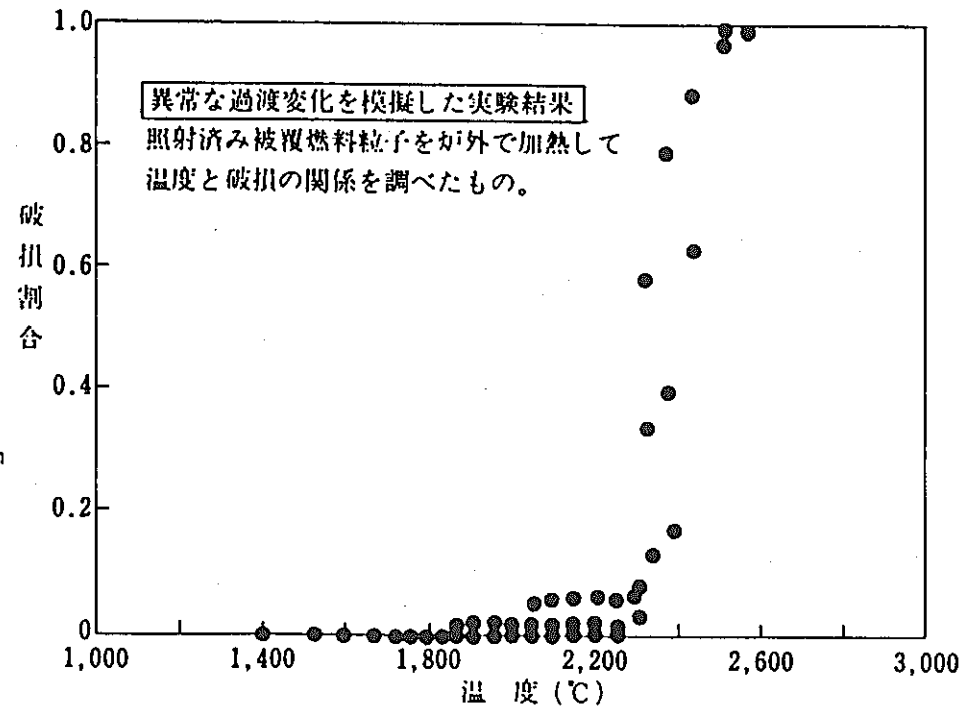
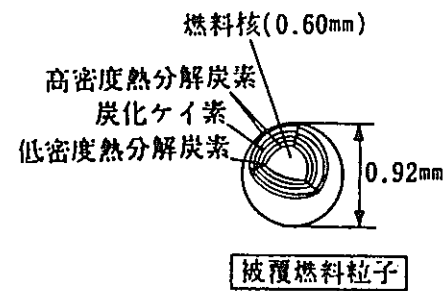
改良による温度低下

燃料核改良

燃料の構造概略図



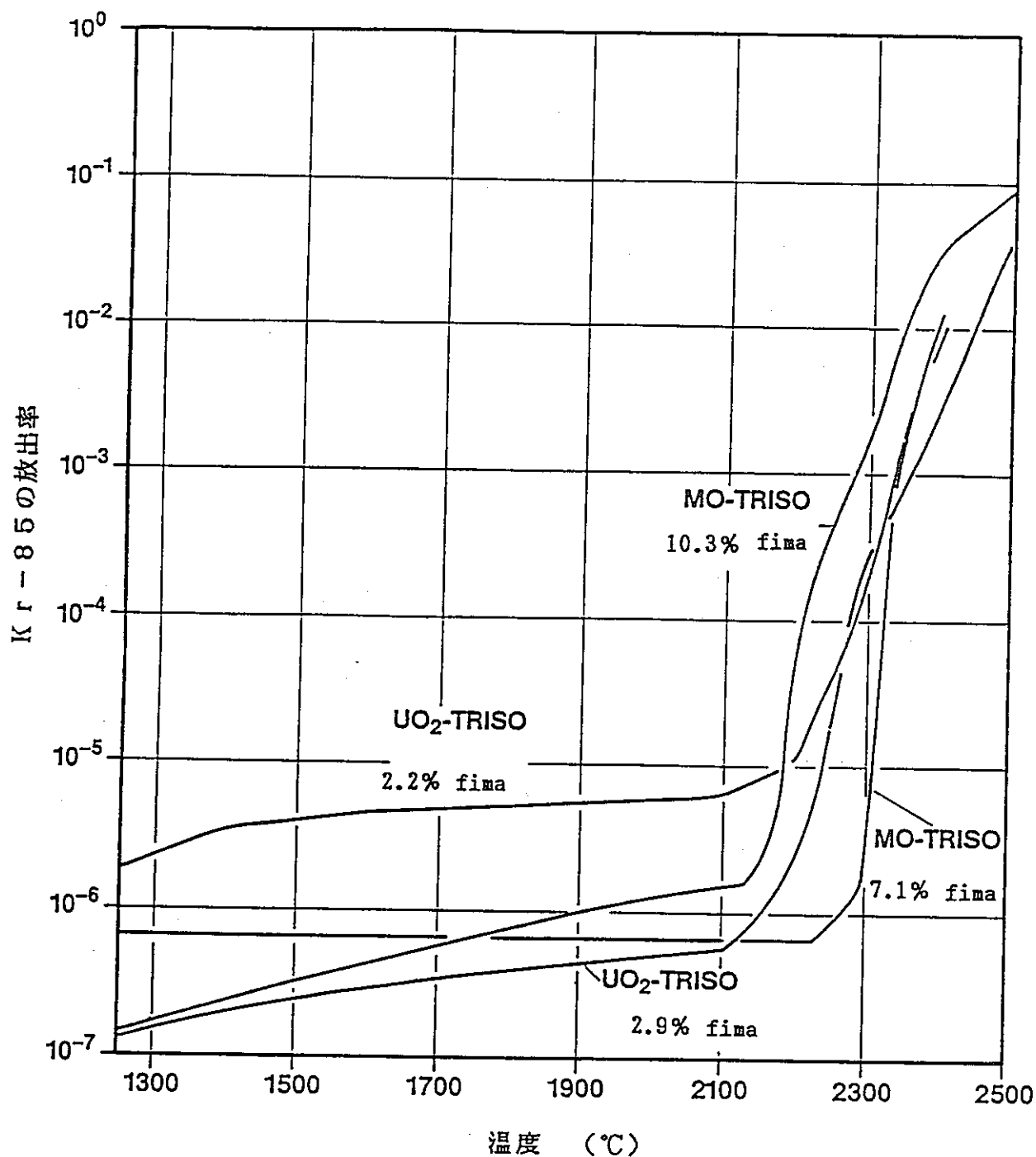
被覆燃料粒子とその高温における健全性



TRISO型被覆燃料粒子を装荷した燃料要素の
昇温加熱（ $\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ）中 ^{85}Kr の放出

（ UO_2 燃料核および（ U ， Th ） O_2 燃料核（ MO ）の
TRISO型燃料粒子；西独Juelich 研究所での結果）

〔fima:fission per initial metal atom
1% fima は約9,000MWd/tである。〕



冷却材温度の決定要因と高度化の方向

II. 炉心黒鉛

1. 炉心黒鉛の破損

- ・ 熱応力、照射クリープ応力

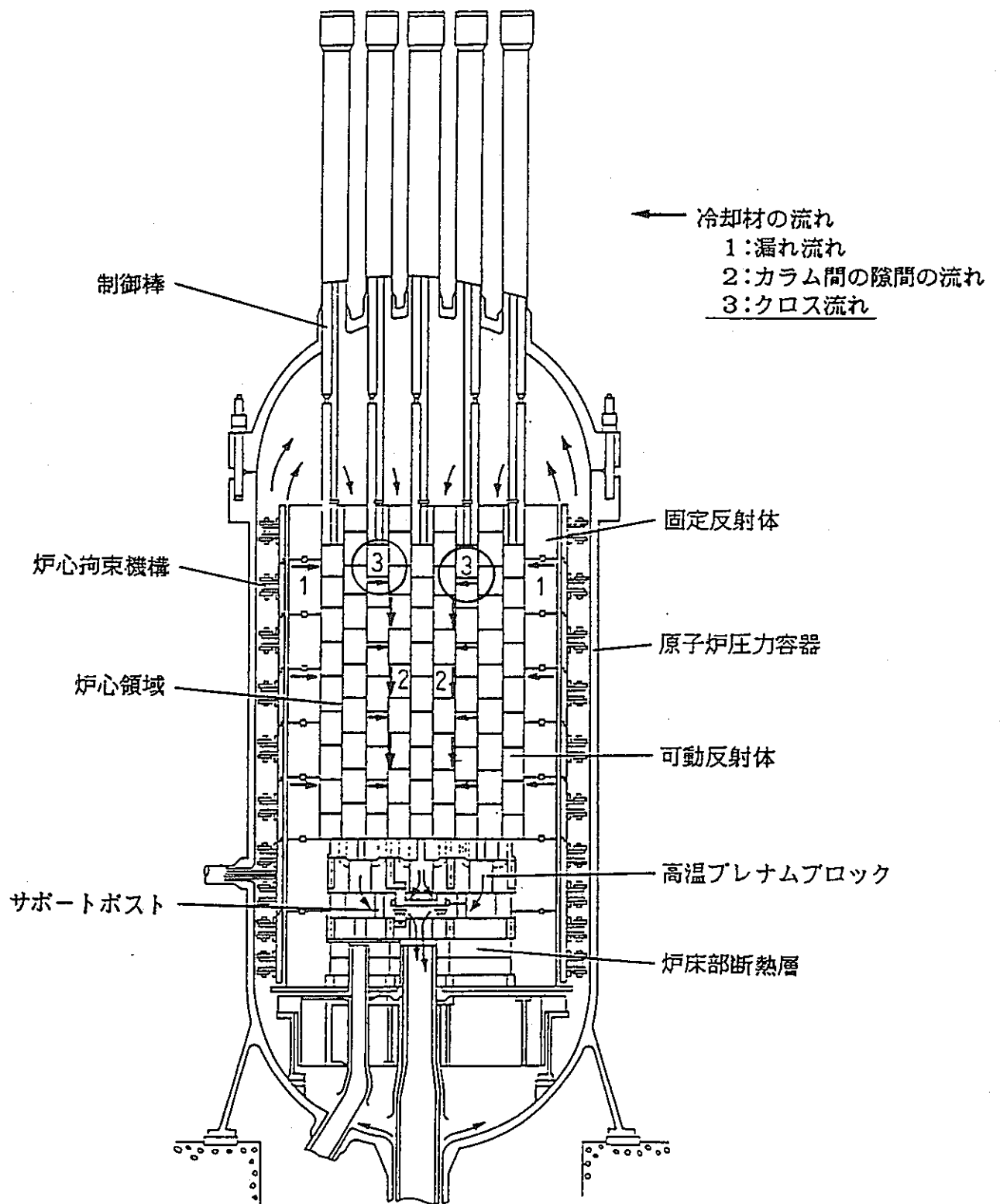
……………構造改良による応力の低減

健全性評価法の改良

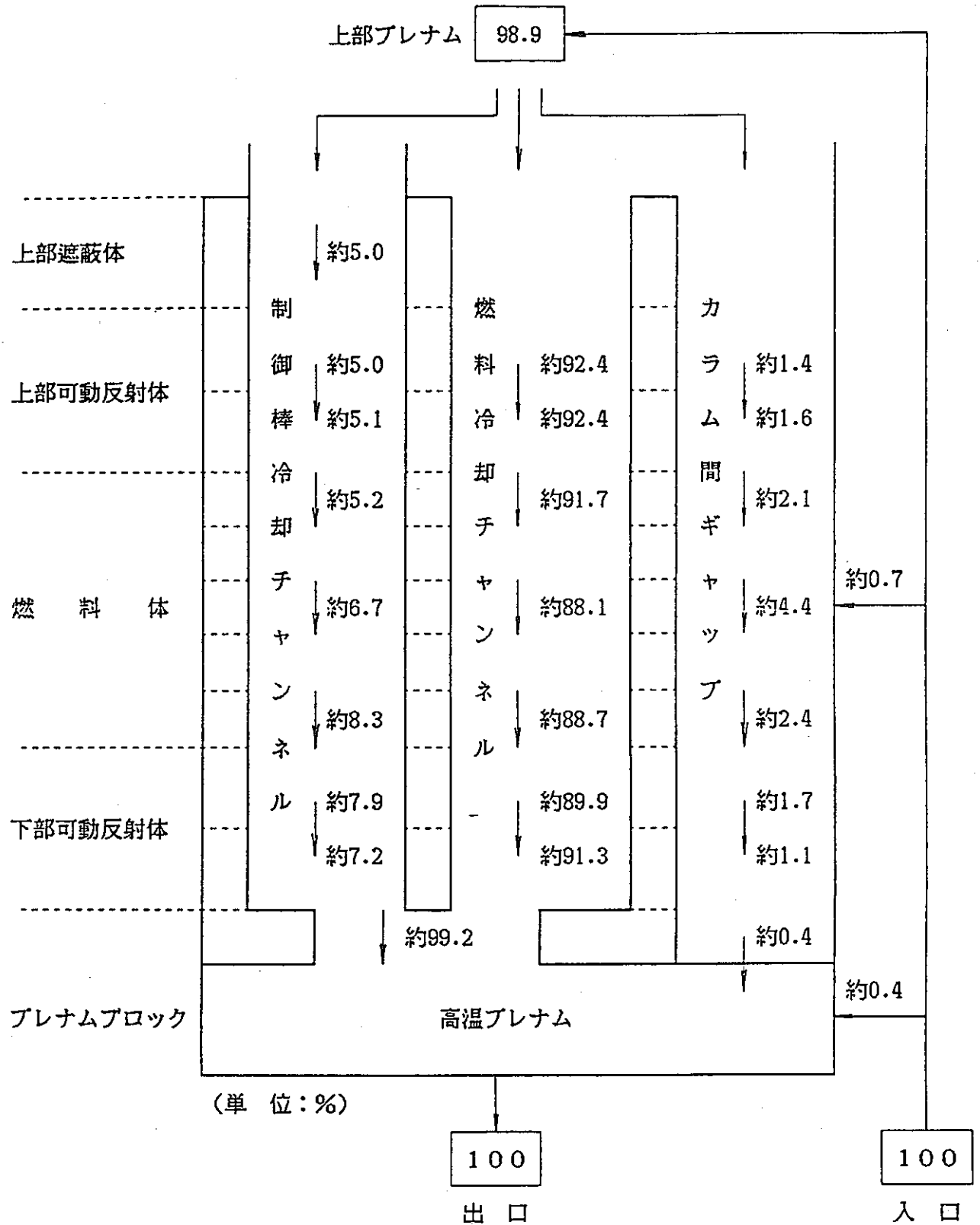
2. 黒鉛の変形による冷却材流量分布の変動

- ・ 熱変形、照射変形……………炉心熱流率設計の改良

冷却に直接関与しない冷却材の流れ



定格運転時の炉内冷却材流量配分



冷却材温度の決定要因と高度化の方向

III. 冷却系

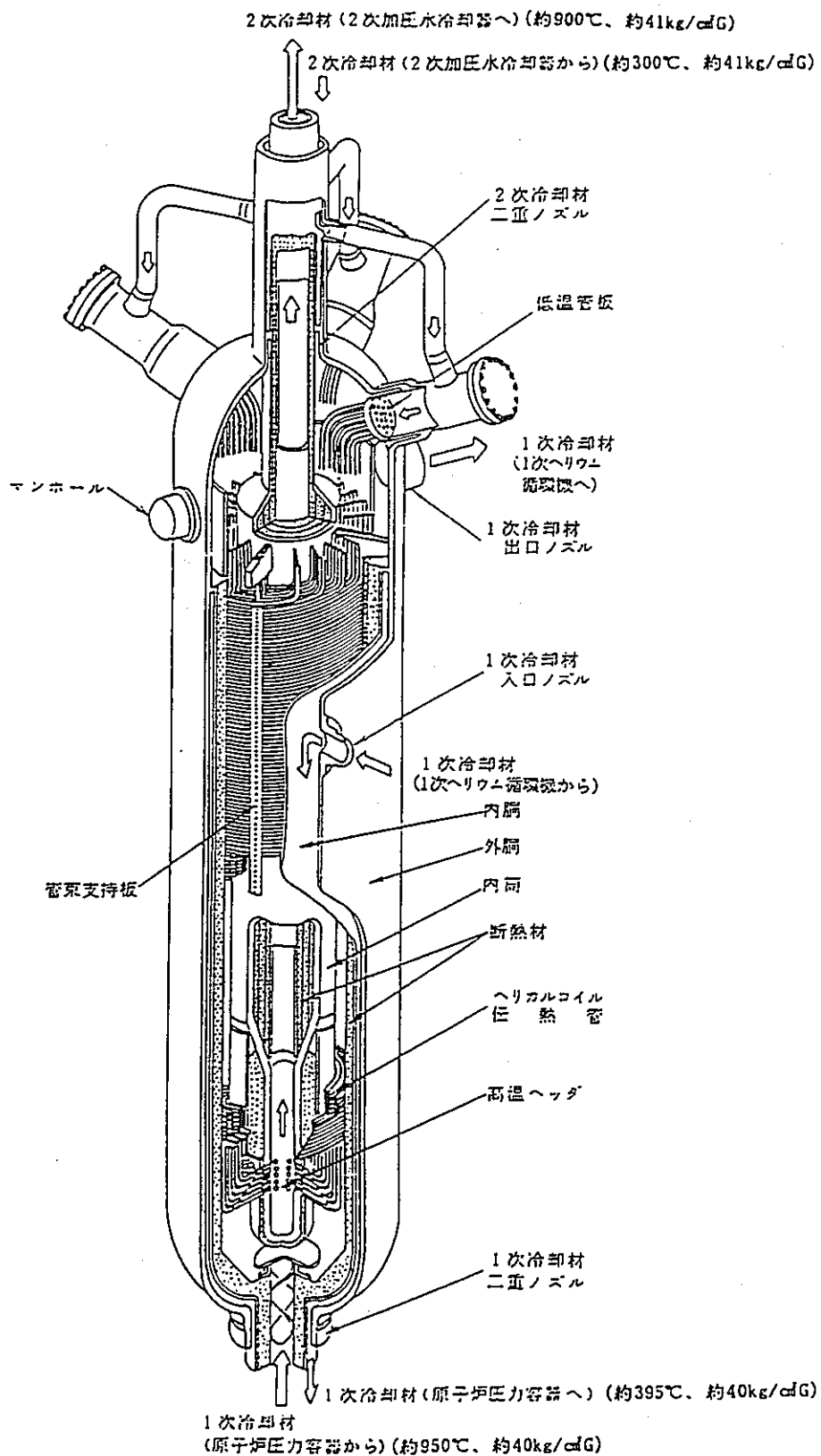
1. 構造材料の高温強度

- ・ 熱交換器伝熱管材料.....超耐熱合金の開発
のクリープ強度
- ・ セラミックス複合材料の開発
- ・ ライナー材料の耐熱性...セラミックス複合材料の開発
- ・ 高温材料の耐食性.....耐食性の良い材料開発
- ・ 表面処理技術開発

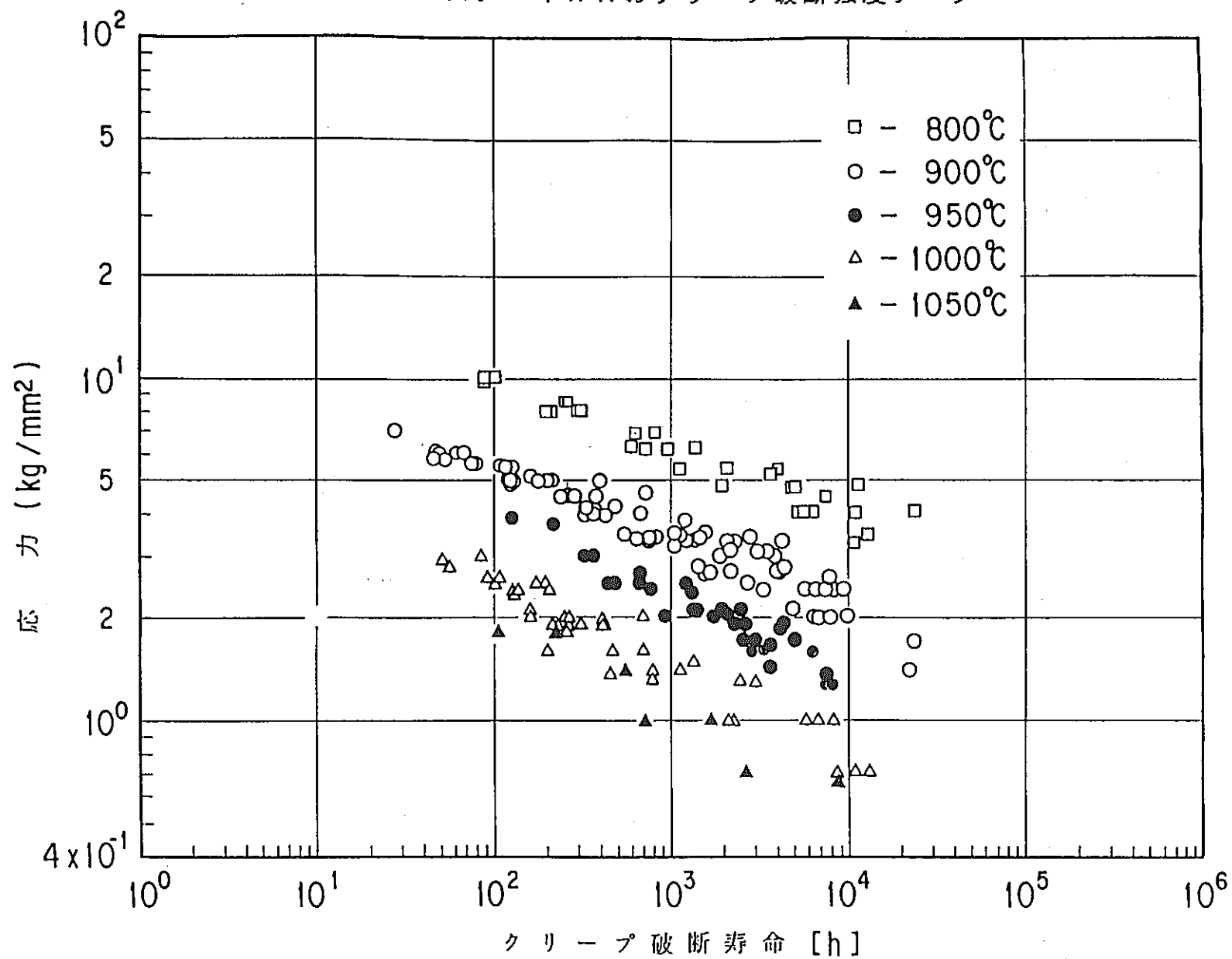
(2. 高温構造設計)

- ・クリープ-疲労損傷評価法の改善

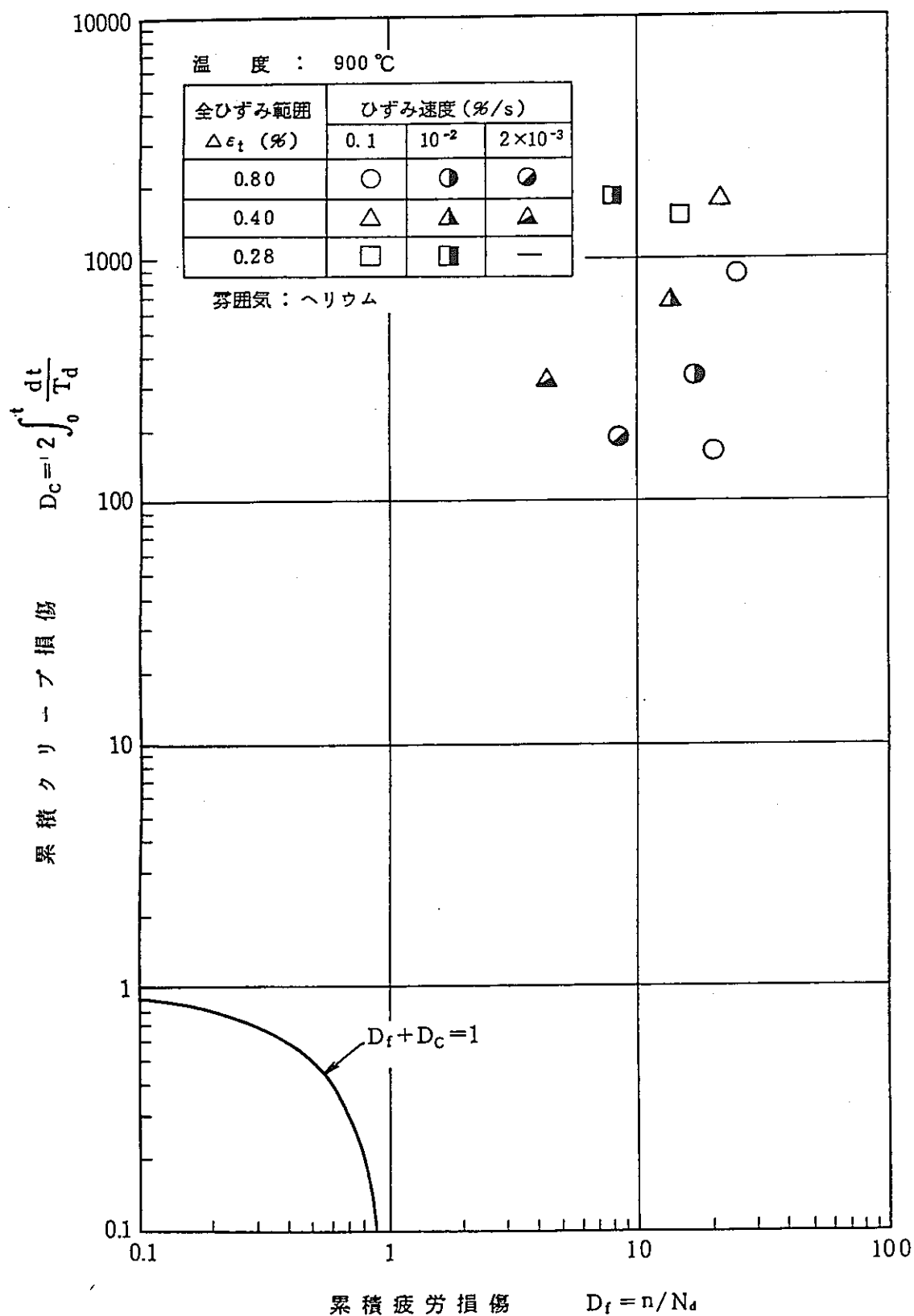
H T T R 中間熱交換器全体構造説明図



ハステロイ X R のクリープ破断強度データ



ハステロイ X R のクリープ疲労相互作用－ひずみ速度効果－



冷却材温度の決定要因と高度化の方向

IV. 計測技術

1. 炉内中性子検出器の耐熱性

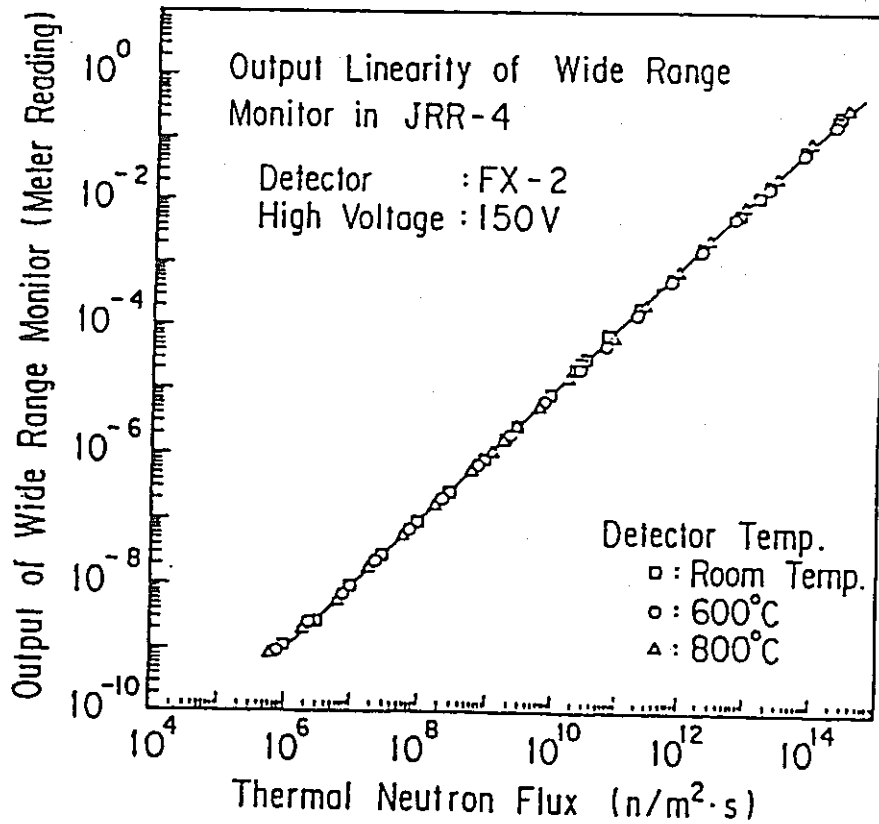
.....検出器構造材、絶縁改良等
による高温検出器開発

2. 温度計の耐熱性、炉内構造物との両立性

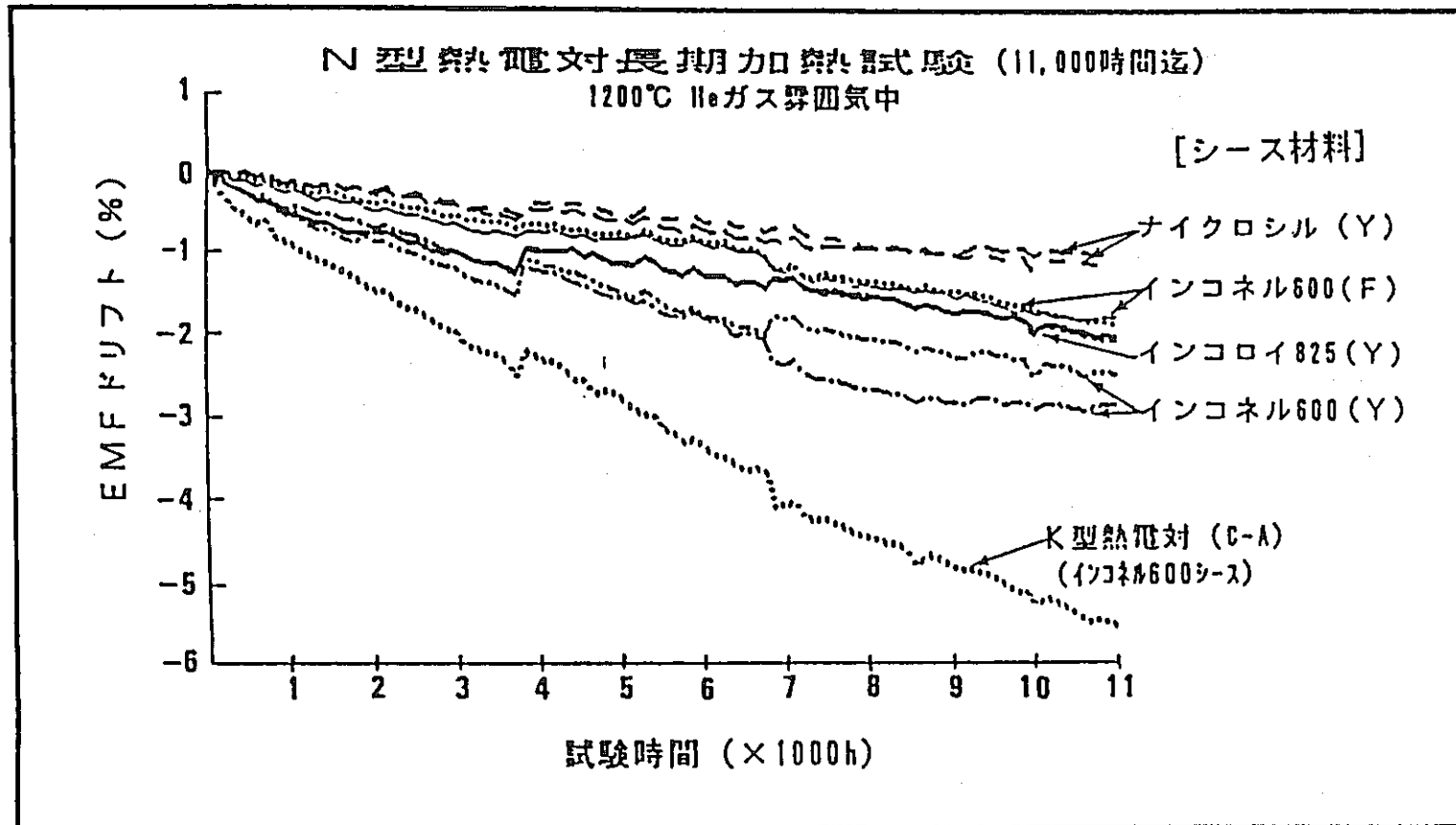
.....素線、シース材等の改良に
高温検出器開発

3. F F Dの感度向上.....ノイズ低減による感度向上

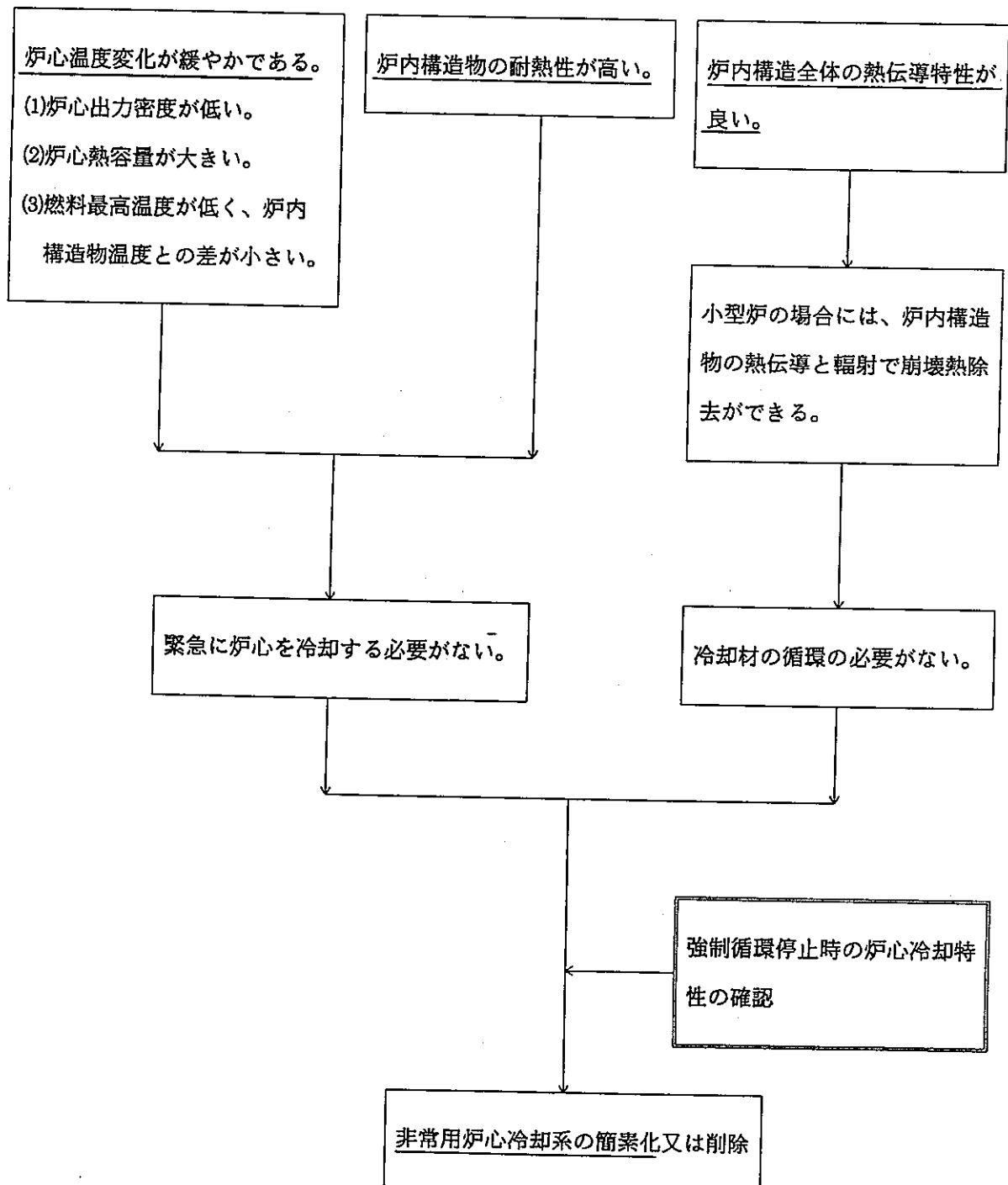
高温核分裂計数管電離箱を用いた起動
 / 中間出力領域用核計装ワイドレンジ
 系の炉内試験結果例（出力直線性）
 （JRR-4，常温，600℃，800℃）

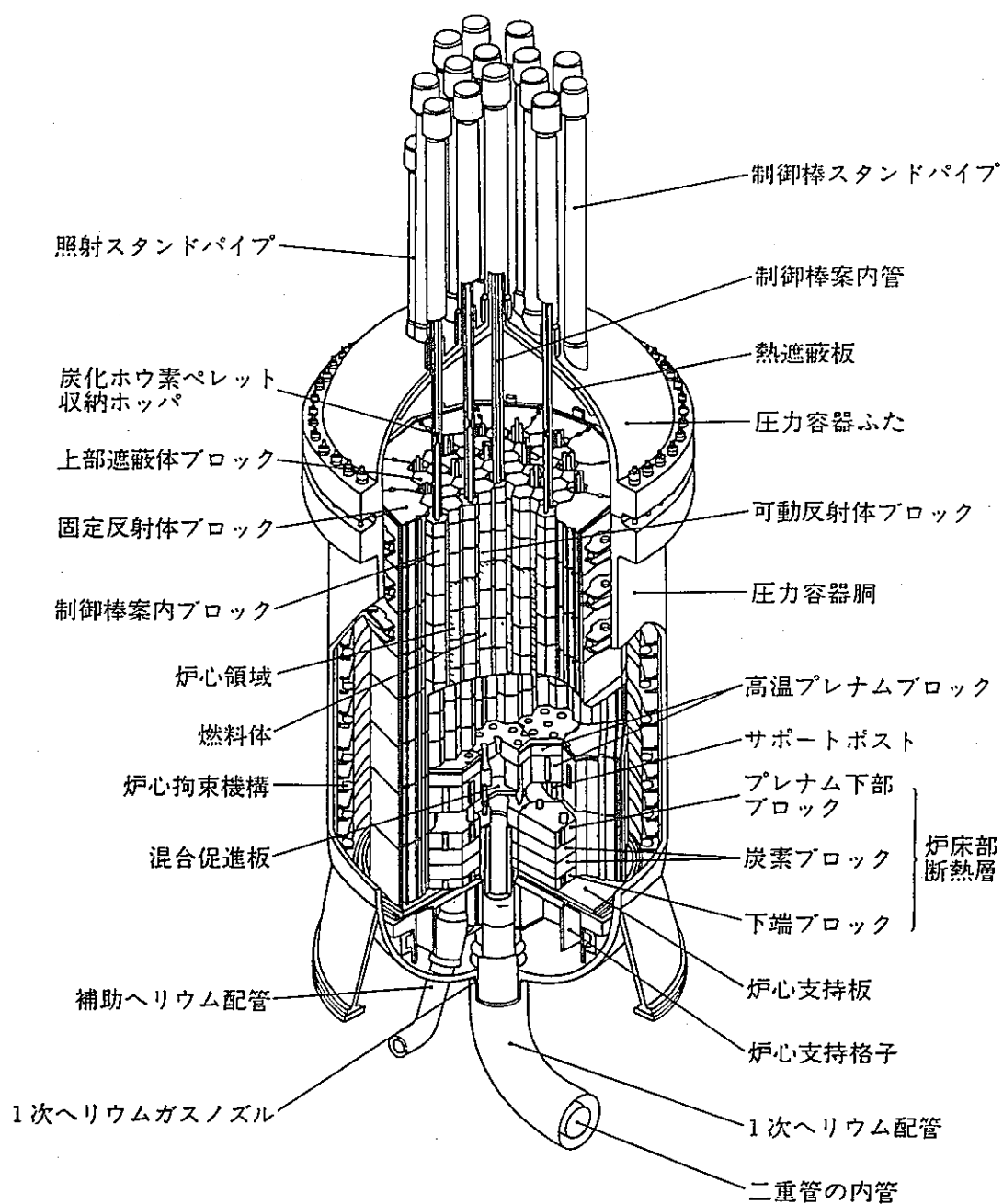


N型シーす熱電対の長期ドリフトに対するシーす材料の影響



異常・事故時の温度変化



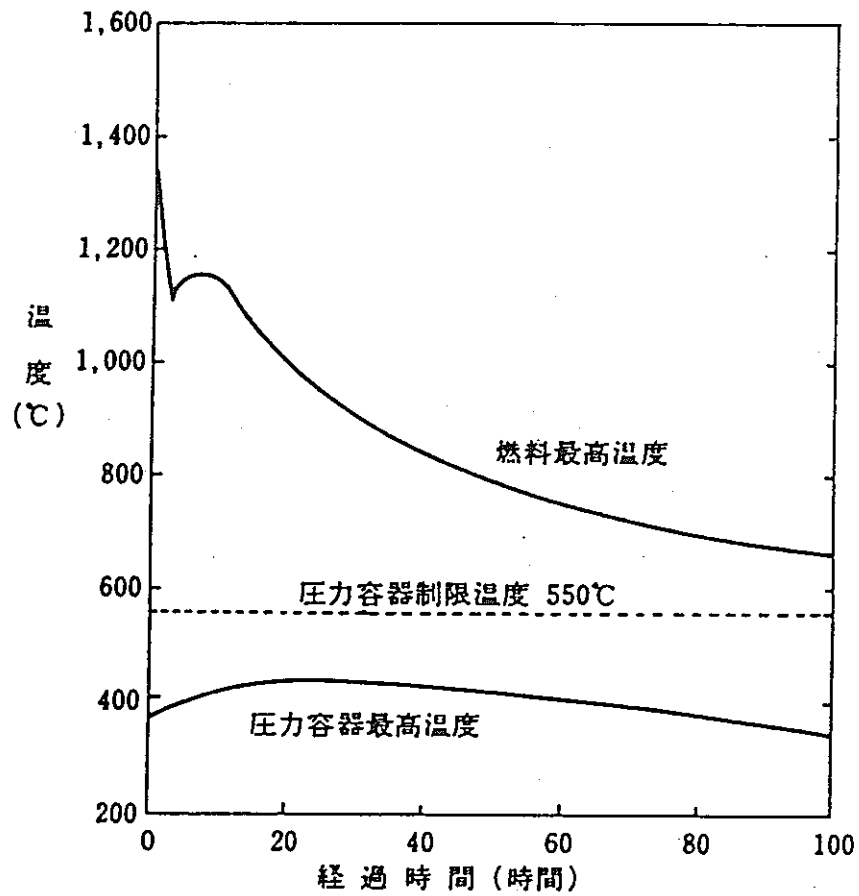


炉心等価直径/高さ : 約2.3m/約2.9m
 原子炉压力容器内径/高さ : 約5.5m/約13.2m
 制御棒スタンドパイプ高さ : 約5.1m

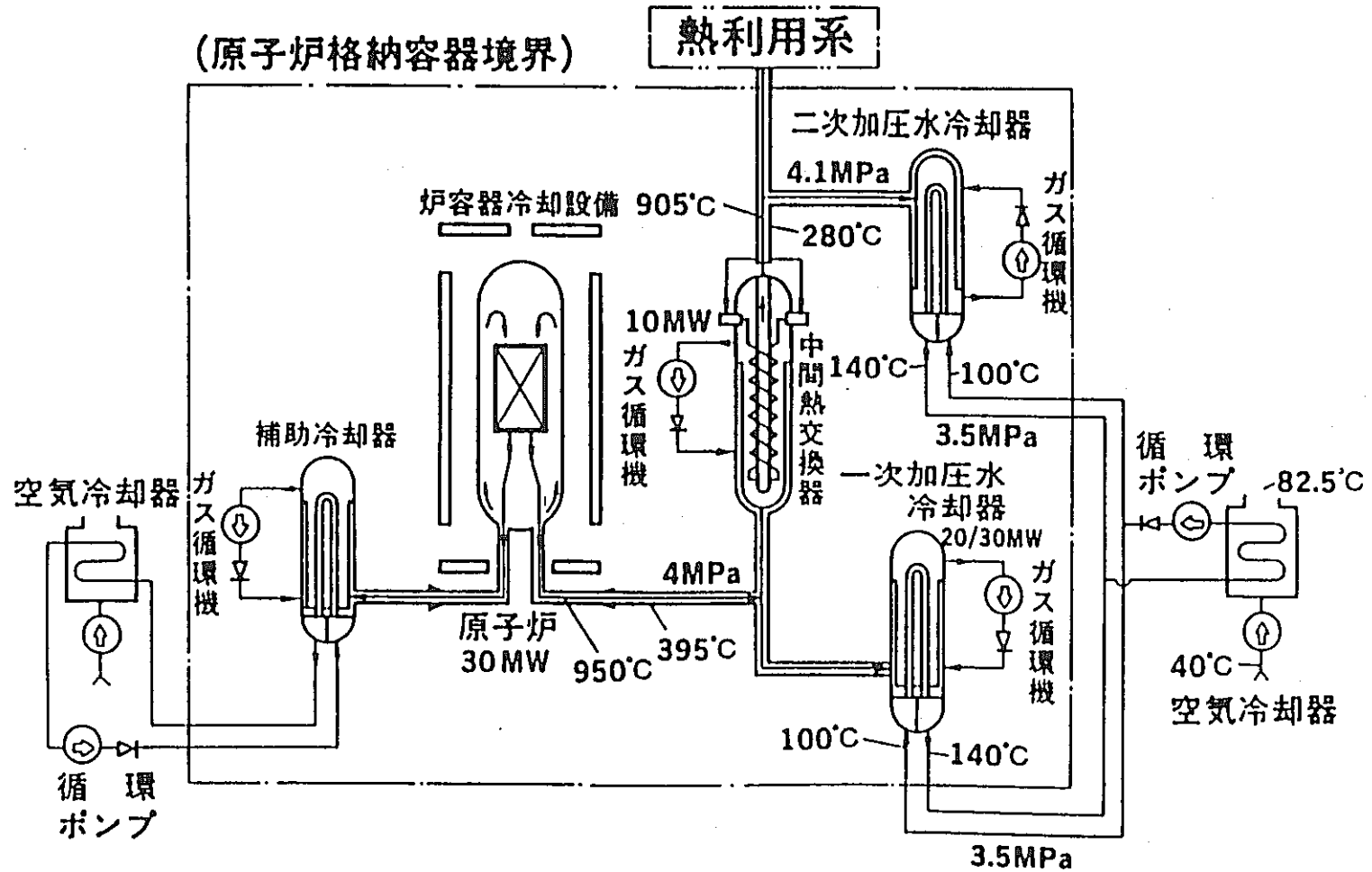
炉心は、六角柱状の黒鉛ブロックである燃料体、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等の炉心構成要素を円柱状に積み上げたものである。

事故時の温度挙動の例

一次冷却設備二重管破断事故

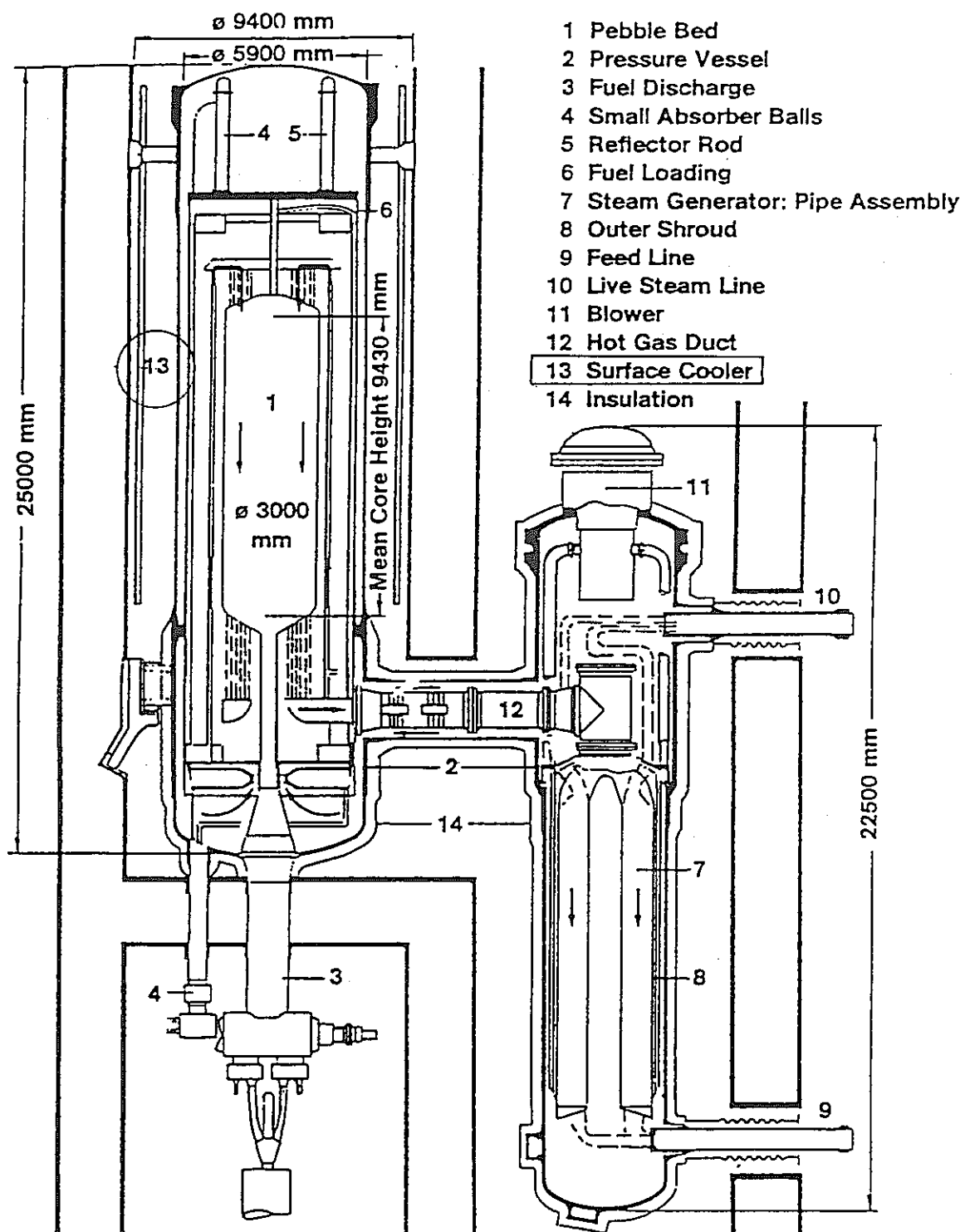


原子炉冷却設備系統図



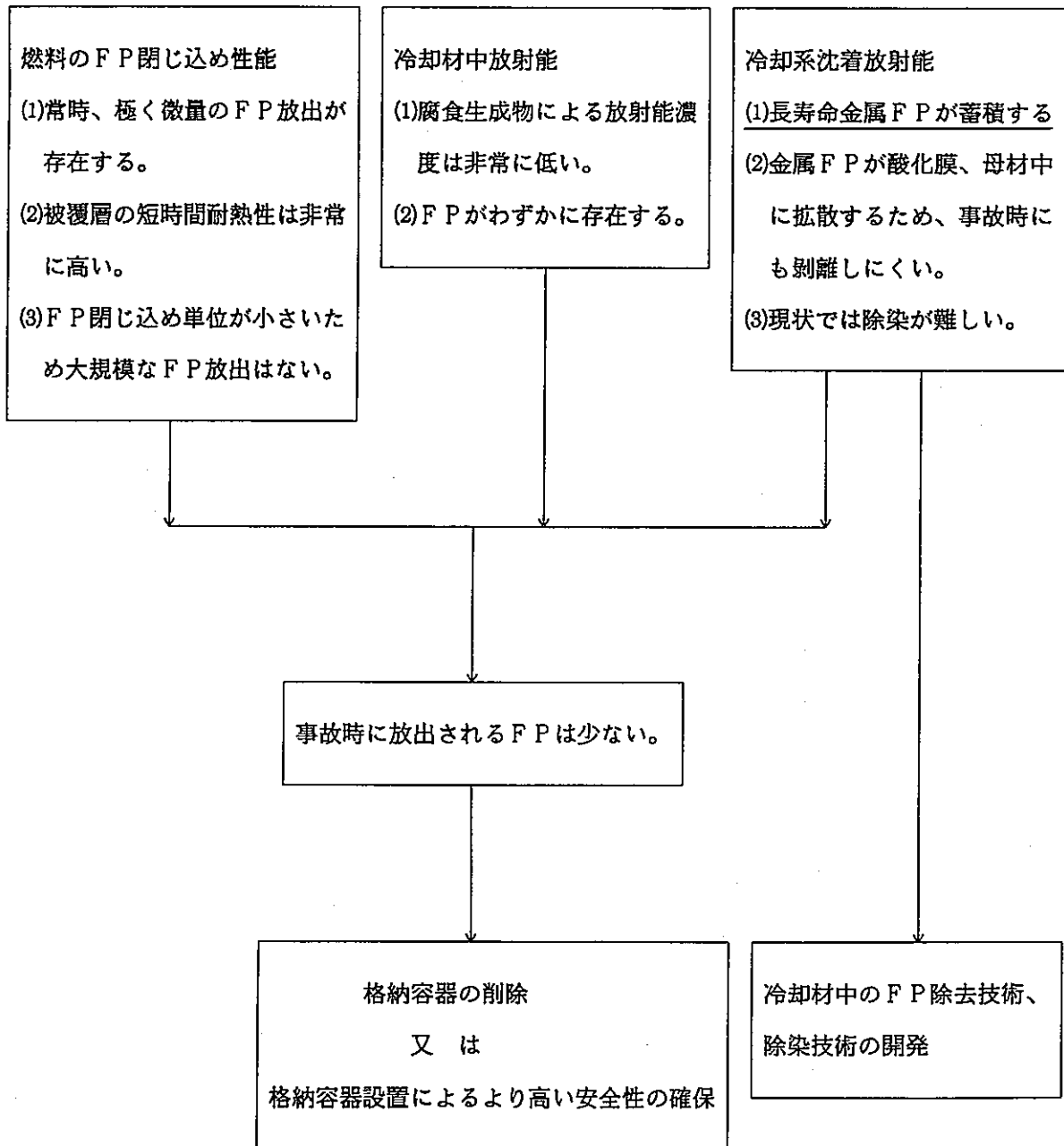
(数字は950°C運転時の温度、圧力を示す)

Primary Circuit of an HTR - Module



89.14-3

放射能挙動



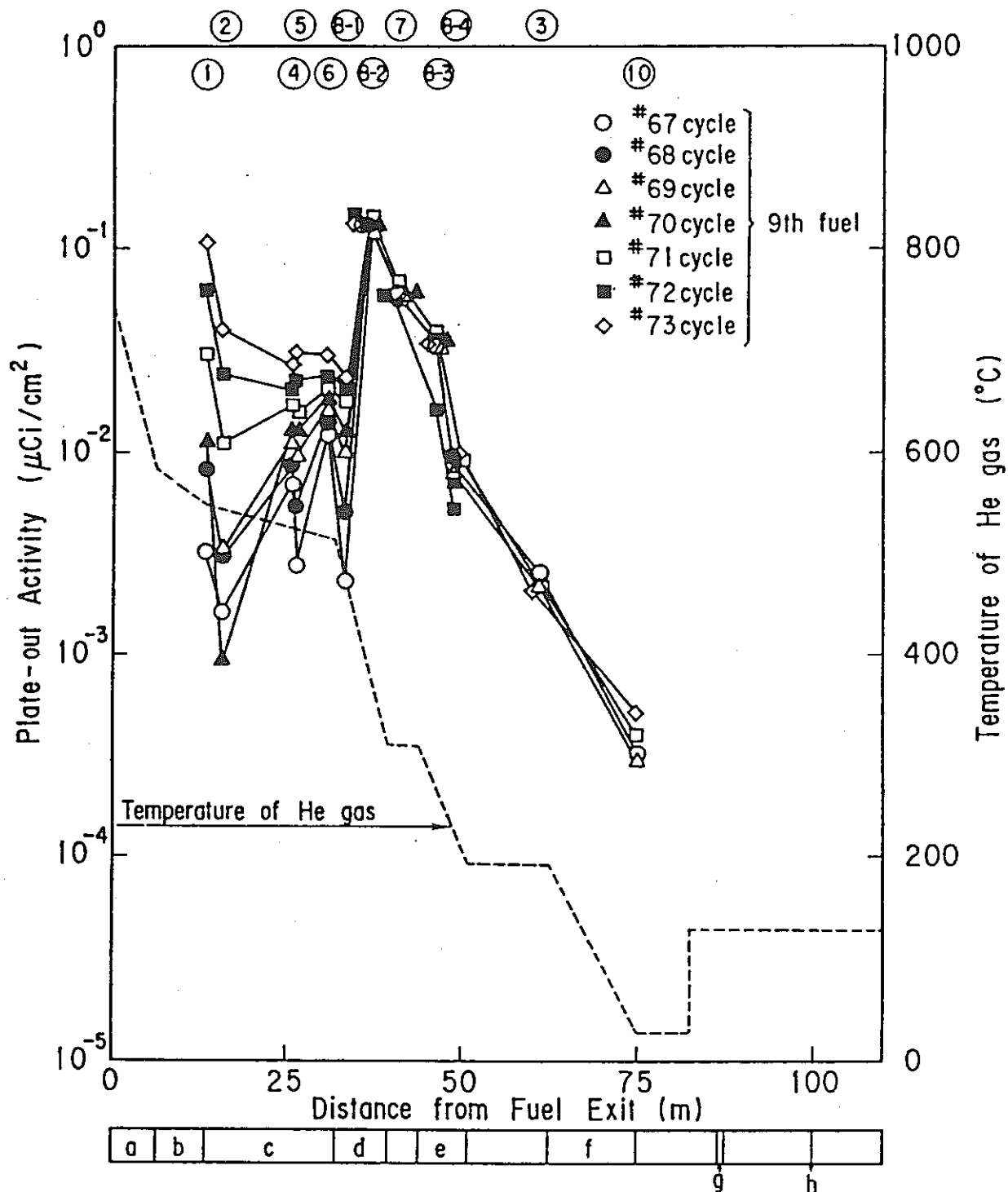
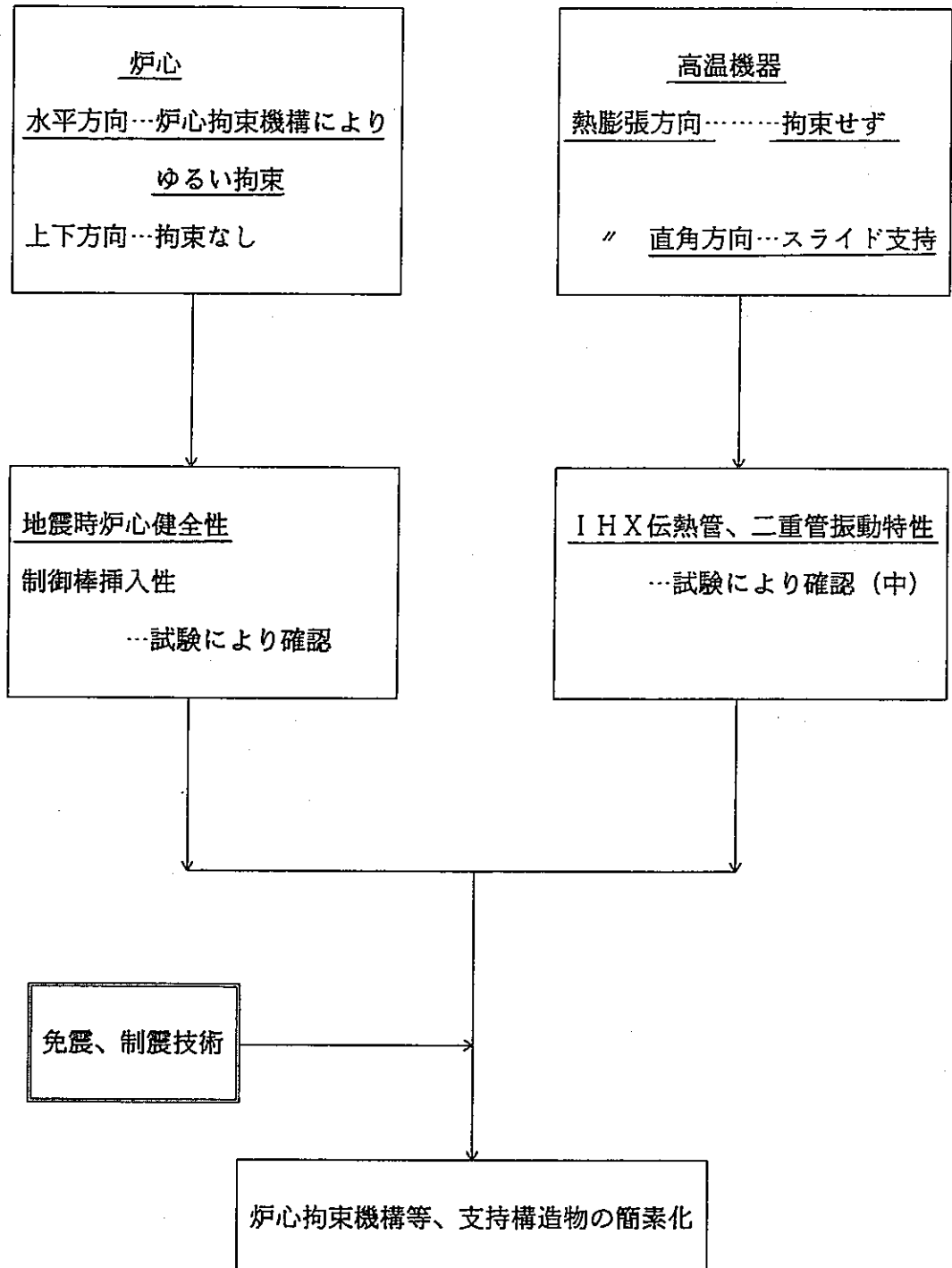
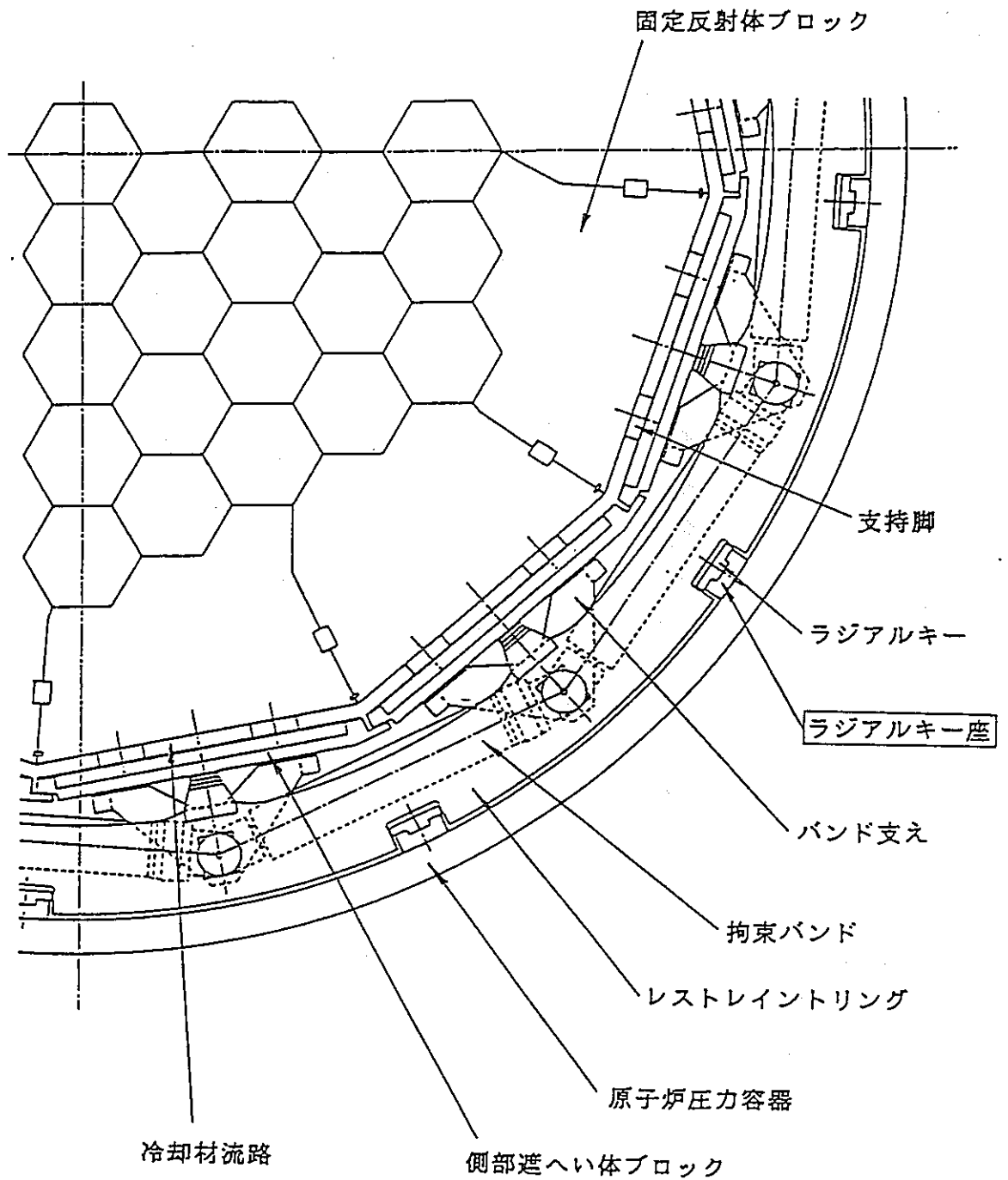


Plate-out Activity of ^{137}Cs in OGL-1 (#67~#73cycle)

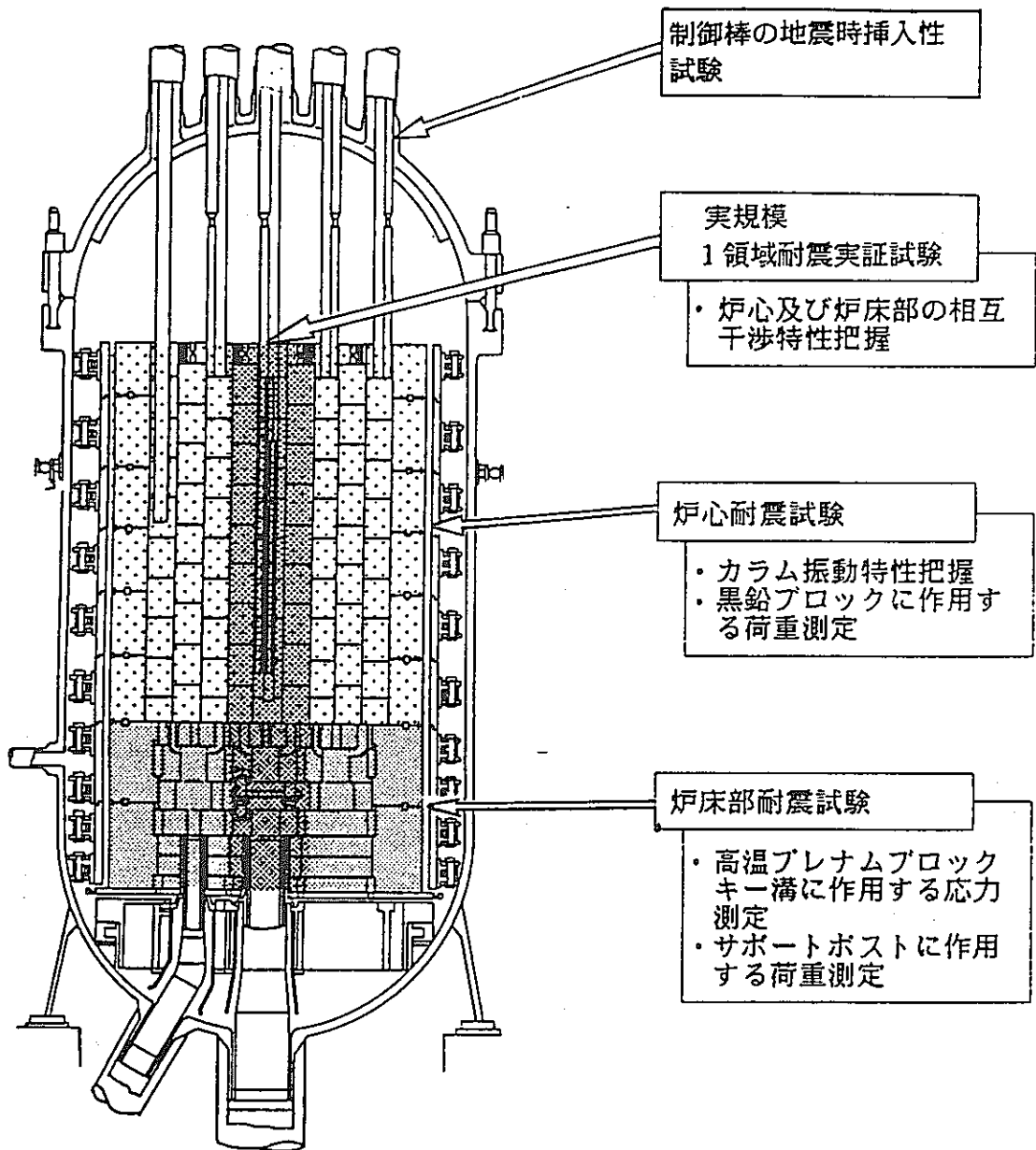
高温ガス炉の耐震設計

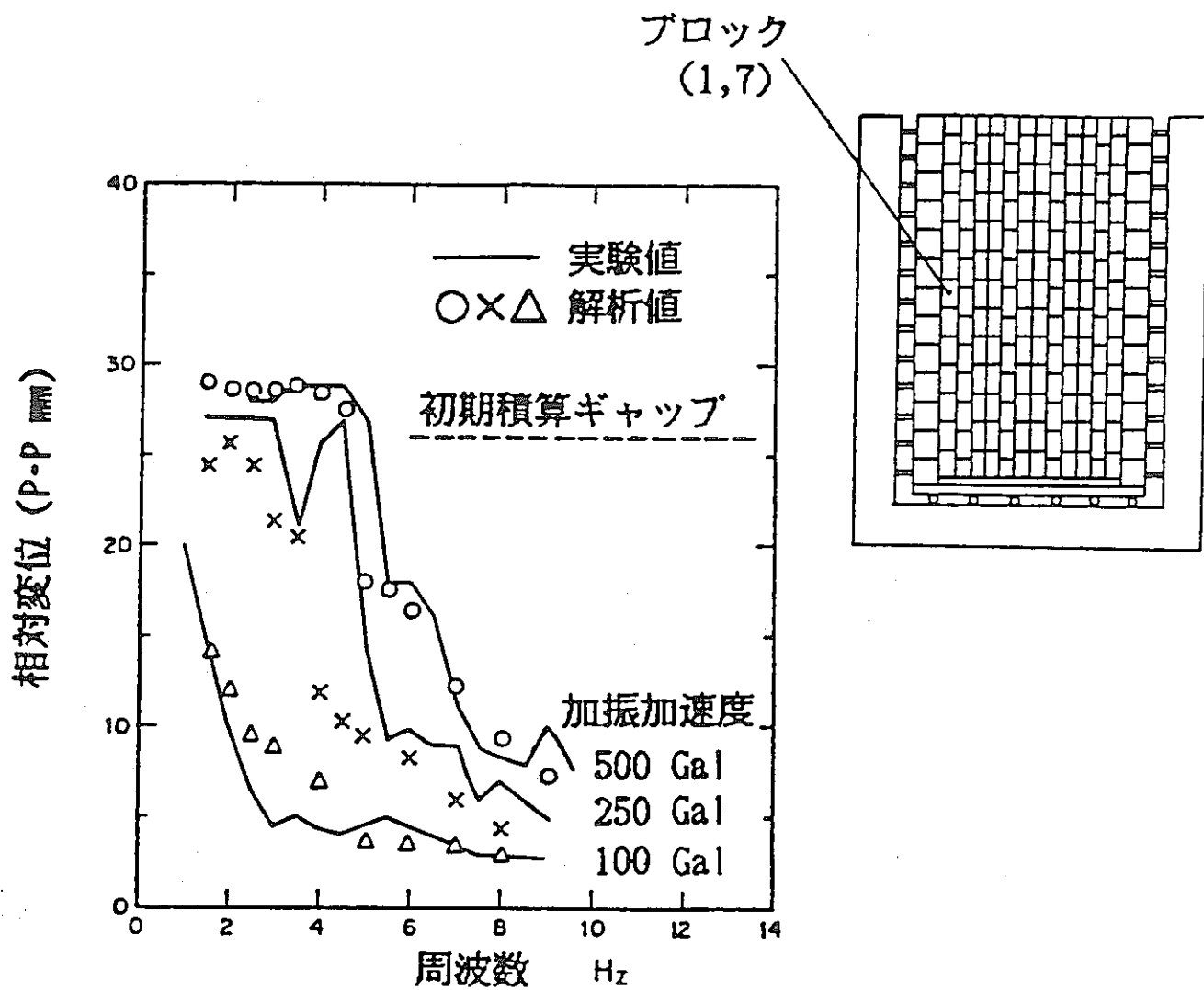


炉心拘束機構構造説明図



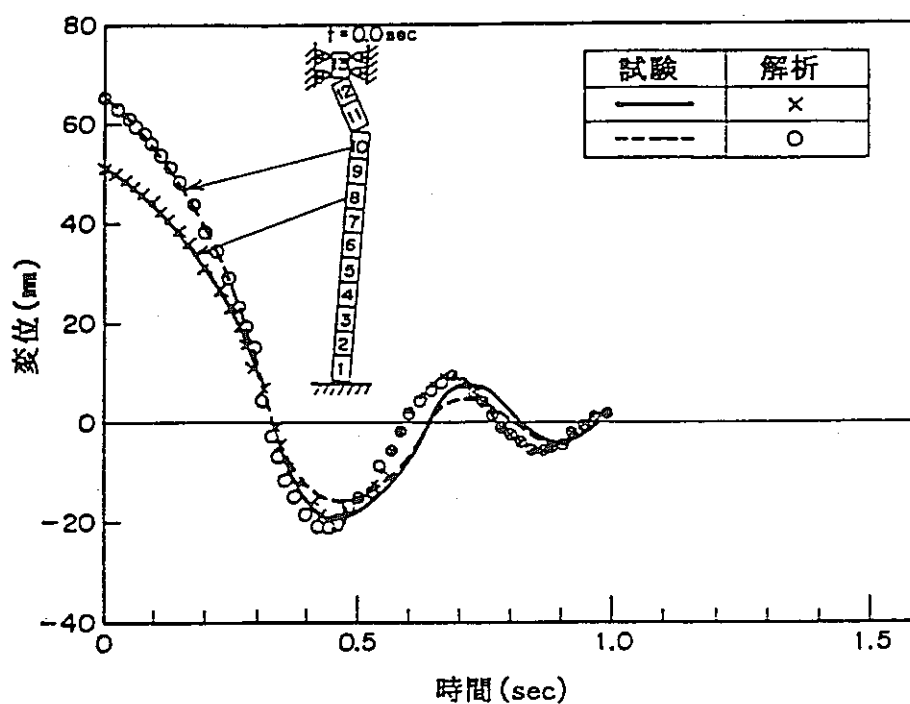
原子炉の耐震試験



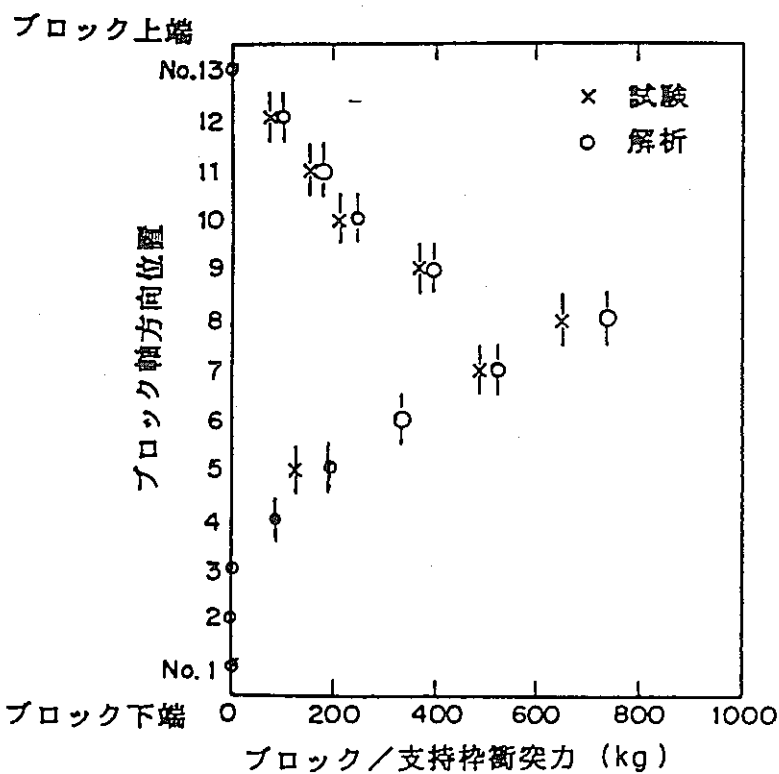


(a) 変位応答特性

1 カラム炉心振動試験データと解析結果の比較

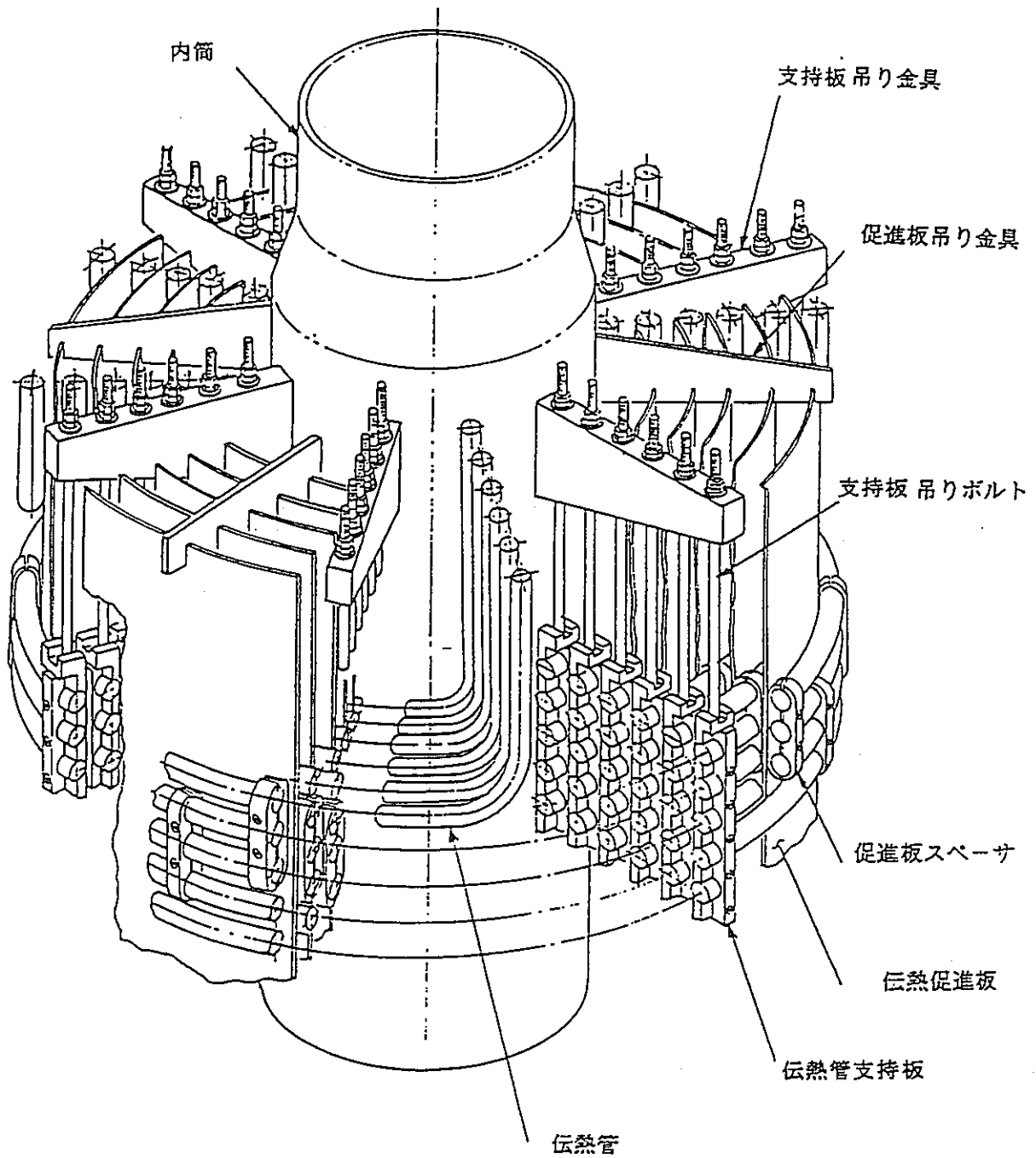


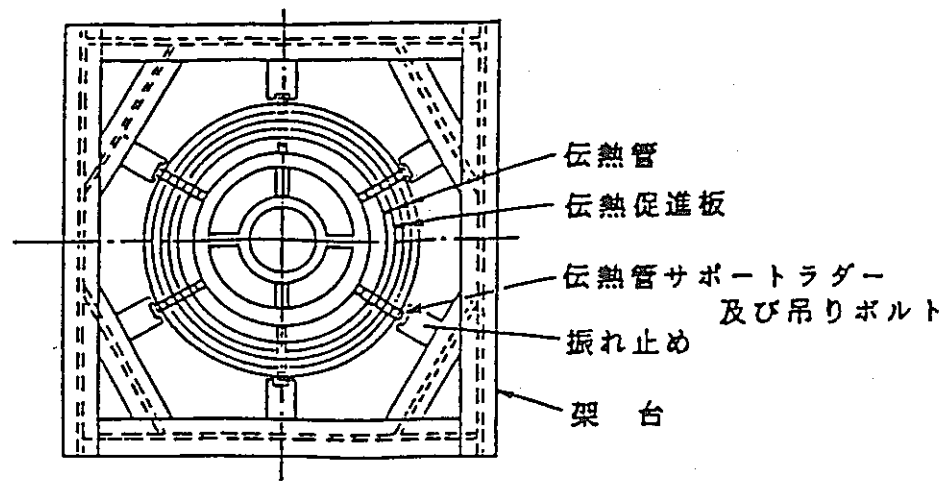
a) カラムの変位応答 (自由振動試験)



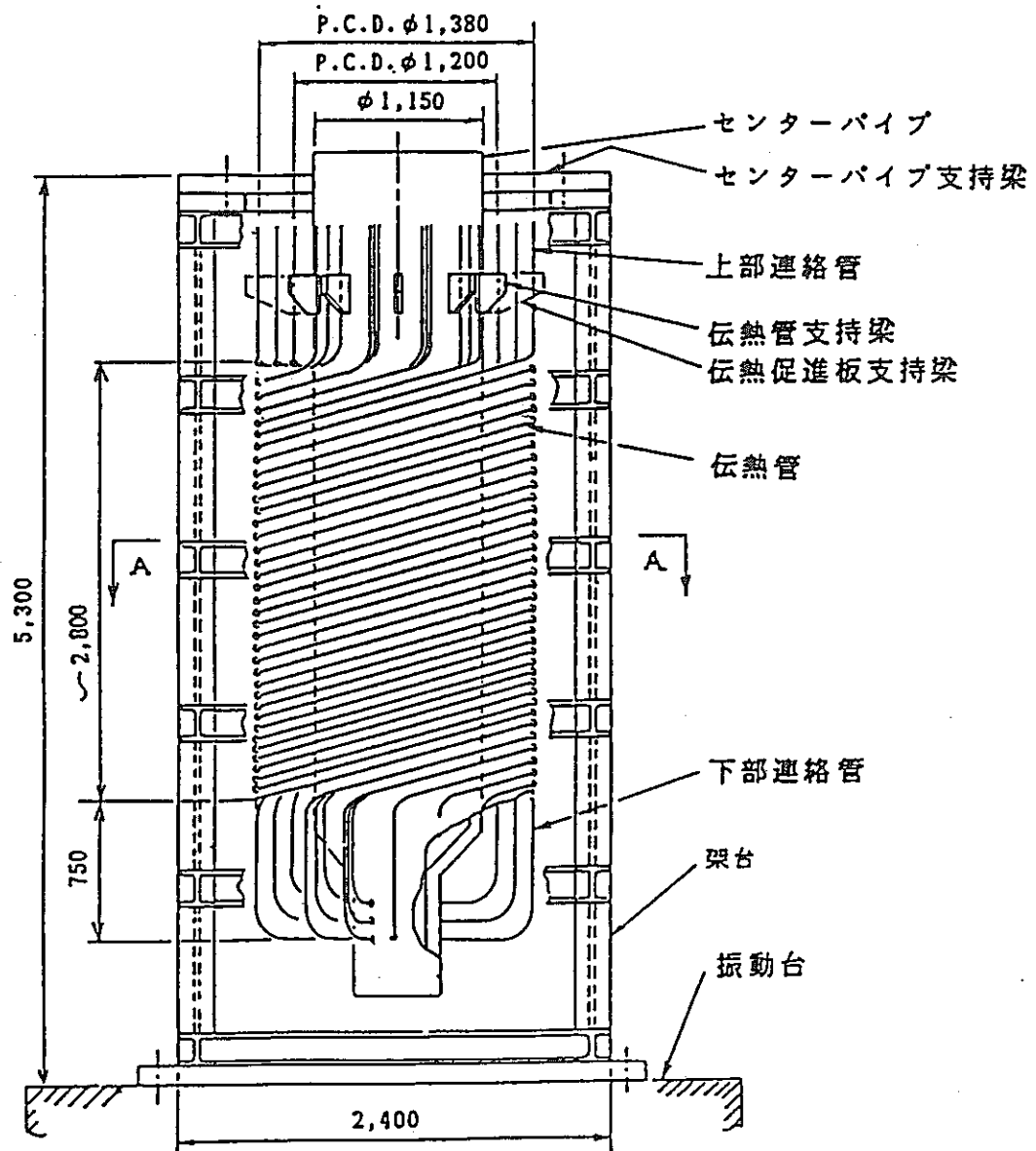
b) ブロック衝突力 (強制振動試験—正弦波 3.5 Hz, 500 Gal)

中間熱交換器上部構造説明図





A - A 断面



4. 結 言

我が国のエネルギーセキュリティのため、高速増殖炉（FBR）を中核とするプルトニウム利用体系の確立は不可欠であり、FBRは、将来の原子力発電の本命と考えられ、動力炉・核燃料開発事業団を中心として、FBRの研究開発がナショナルプロジェクトとして、昭和42年に発足した。そして、高速実験炉「常陽」は昭和52年に初臨界を達成し、それ以来順調に運転されている。高速原型炉「もんじゅ」は、現在約85%が完成され、平成4年に初臨界の予定である。

世界におけるFBR開発の現状を特に実証炉計画を中心として一瞥すると、ヨーロッパにおいては、フランスを中心とする国際協力により「スーパーフェニックス」が建設され、現在EFBR計画が進められている。米国では、従来の混合酸化物燃料を用いた大型炉から金属燃料を用いたモデューラー型にウエイトが移され、開発が進められている。また、ソ連ではBN800が2基建設が開始されており、BN1600の設計が行われている。我が国では電力が中心となり、実証炉計画が進められている。

しかしながら、FBR開発は率直に言って、数年前より世界的に順調に進んではいない。その理由をここで詳述はしないが、現状では、FBRの経済的競合性の達成の困難さが1つの大きな障害である。しかし、核分裂エネルギーによる原子力利用を行う限り、長期的にみればFBRは必須であるので、FBRの実用化が否定されているのではなく、各国とも忍耐強く、その実用化のための努力を続けているのが現状と言える。ただし、FBRの実用化・導入の時期は、以前の予想よりも遅れることとなった。

FBR実用化の課題は、一口に言えば安全性、経済性に優れ、適切な増殖性を有するFBRを開発することである。上述したように、FBRの導入時期が遅れざるを得ないのが現実であるとすれば、そのために生ずる時間的余裕をより優れた特性をもったFBR開発を進めてゆくために、有効に利用すべきである。FBR技術のような巨大技術の技術進歩のためには、そのシステム概念の革新と要素技術におけるブレークスルーが必須である。このための努力が世界的に行われているのが現状である。

上述のようなFBR開発の現実をふまえて、日本原子力産業会議は1989年度に動燃事業団より、「FBR実用化のための革新技术・システムの開発に関する調査研究」を受託した。この調査研究においては上述した観点に立って、広範囲にわたって革新的な技術・システムについ

てアイデアを摘出することに主眼がおかれ、それらの成立性や実現性については、次期以降の調査に委ねられることになった。この調査で摘出されたアイデアは 105項目に達した。これらのアイデアは開発難易度と経済効果の2つを軸として整理されている。詳細については、是非とも前回の報告書の御一読をお願いしたい。

前回の調査研究の結果、経済効果の大きいものは開発難易度の高いものが多いので、その継続的検討が必要であると考えられた。従って、ひきつづき日本原子力産業会議は、動燃事業団より、「FBR実用化のための技術開発に関する調査研究」を受託した。本調査研究においては、前調査研究の成果に基づき、重要開発課題と思われるものを十数項目選出し、これらについて、詳細にその成立性、必要な技術開発等について検討・分析を行った。これと並行して、本調査では、FBRの利活用・応用として、FBR技術の波及効果についても調査を行った。

本調査で検討の対象とした開発課題は、以下のような観点に立って選ばれた。

- 1) 実用化段階において、建設コスト低減への寄与が大きいと考えられるもの。
(設計の簡素化、機器のコンパクト化等)
- 2) 実用化段階において、燃料サイクルコストの低減への寄与が大きいと考えられるもの。
(燃料の高燃焼度化、燃料設計の合理化等)
- 3) 安全性、信頼性、保守性の向上への寄与が大きいと考えられるもの。
(人為ミスの低減化、免震設計等)
- 4) プラントシステムの合理化、高度化への寄与が大きいと考えられるもの。
(システム設計の合理化、発電効率の向上等)

これらの開発課題の成立可能性、開発手順、必要な技術開発等を詳細に検討するために、サクセスツリーを作成して分析が行われた。ここでサクセスツリーについて、簡単に説明をしておこう。サクセスツリーは、所謂「関連樹木法」に類似するものである。関連樹木法は、大規模かつ複雑なプロジェクトの計画立案や技術予測を行うために、よく使用されるシステム的手法の1つである。この手法によって、上位目標を達成するための具体的な下位目標やそのための技術手段・要素等が明らかにできる。その結果、プロジェクトの実行手順やスケジュール等の計画立案に有用である。

本調査で用いられたサクセスツリーは、関連樹木法そのものとは言えないが、その目的とするところは類似している。

個々の技術課題について、サクセスツリーを作成するとともに、その目的、全体の概要、開

発課題と解決方法についても記述されている。個々の技術課題についての検討結果は、報告書に詳細に記述されているので、ここでは全体に共通する幾つかの点について、総括的に述べることにする。

- 1) サクセスツリーによる分析により、その技術課題の完成のために、如何なる下位技術の開発を如何なる手順で行ってゆくべきかが明らかにされた。
- 2) 開発課題の難易度の中味が、かなり具体的に分析された結果、この開発課題のボトルネックが何処にあるかが明らかにされた。
- 3) 開発の各ステップと実証炉から実用炉に到るステップとの対応が示されており、その点で、開発目標時期が、ある程度示されたと言える。しかし、技術の完成時期は、サクセスツリーに示されているものが決定的なものではなく、その完成時期は、開発努力（人材や資金の投入の程度）如何によって左右されるものであることを明記しておく。
- 4) 下位開発技術の中には、さらに詳細にブレークダウンすべきものが残されていると考えられるが、今回は時間的制約もあり、それらについて、さらに掘りさげる余裕はなかった。しかし、目標達成のためにブレークスルーされるべき要素技術が、かなり明らかにされたことは、大変有意義であった。
- 5) また、技術の完成のためにはハード的なもののみならず、ソフト面の開発が大切であることも明らかになった。例えば、安全性や許認可のための基準類の整備、設計や解析手法の確立等があげられる。

F B R 技術の利活用・応用に関しては、所謂先端技術との関連、核融合炉、軽水炉、高温ガス炉の分野の技術との相互関連について検討された。F B R 技術の波及効果、あるいは関連の深い技術分野の主たるものとしては、材料技術（新素材）、遠隔自動化技術（ロボット技術）、高温構造設計技術、耐震、免震設計技術、システム設計技術（合理化手法）、現象評価技術（伝熱流動解析法）、安全設計・評価に関する技術等があげられる。

今後に残された検討課題としては、下記事項が指摘される。

- 1) 技術開発に必要なソフト面について、さらに検討を深めることが望まれる。
- 2) 開発可能性や開発上の隘路について検討し、コスト－ベネフィット的評価が行われることが望まれる。
- 3) 今回の調査の大前提は、混合酸化物燃料、ナトリウム冷却の大型 F B R を対象とすることであった。しかし、F B R にも種々のオプションがある。例えば、金属燃料や窒化

物燃料，小型モジュール炉，アクチナイドバーナー等がある。これらについても検討が進められることが，FBR実用化のために必要である。