

設 計 研 究 概 要

—高速増殖炉の実用化を目指して—

1990年1月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

設計研究概要

—— 高速増殖炉の実用化を目指して ——

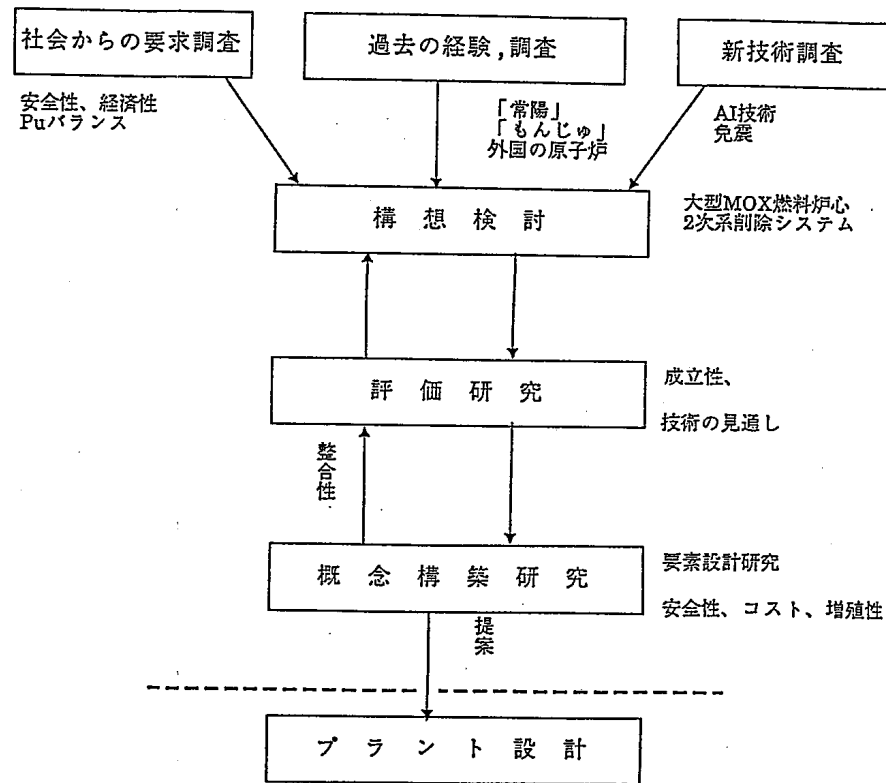
目 次

1. 動燃における設計研究の基本的な考え方	1
2. 大型MOX炉の設計研究	2
3. 研究開発課題	23

動燃における設計研究の基本的な考え方

1. 常陽, もんじゅの開発経験を十分に活用する
2. 社会に受容される実用化プラントを目指す
(安全性, 経済性)
3. 設計研究と研究開発と密接に連携して進める
4. プトニウムサイクルを十分考慮して設計研究を進める
5. 2010年頃実用化の見通しを明確にすることを目指す

設計研究の基本方針



設計研究の流れ

FBR実用化のための開発課題

開発課題	開発の現状	開発の目標	効果
①高性能燃料の開発	改良316鋼燃料により、燃焼度10万MWD/tの技術的見通しを得ている。	FBR実用化ターゲットとして、燃焼度20万MWD/tを保証し得る燃料技術を開発	燃料サイクルコスト約40%低減を可能とし、建設費低減と併せてLWRの発電コストと競合可
②高性能大型炉心の開発	原型炉級の設計実績、大型炉対象の臨界実験(日米共研)等をベースに均質炉心設計技術を取得	均質炉心についての設計精度の向上と、非均質炉心についての特性を把握し、出力150万kw級での高燃焼度達成を可能とする最適炉心概念の創出	燃料、炉構造等の物量、軽減、炉心長寿命化による運転費低減、増殖体系の定着化
③プラントの高温化	原型炉段階(30万kw)の炉容器径に対する原子炉出口温度529°Cの達成、プラントの大型化、高稼働率化達成との整合をとりつつ、高温化に向けた構造評価、基準作成のためのR&D実施中	出力150万kw級プラントにおける原子炉出口温度550°C以上の達成、そのために必要な構造材料等の開発と基準の整備	熱効率が2~3%向上し、建設費および燃料費を低減し、かつ温排水の低減が可能
④配管・機器の合理化、高信頼性化	原型炉段階までの総合的な開発、技術の確立、さらに建設費の低減に向けた配管ベローズ継手のフィージビリティ確認、9Cr系鋼一体貫流型SGの耐久性実証、高吸込比速度ポンプの開発見通し達成	革新技術採用による出力150万kw級大容量、コンパクト高性能、高信頼配管、機器の採用のための技術体系の確立	配管・機器のコンパクト化による配置の合理化、建屋の縮小、それにより~10%の建設費の低減化 燃料取扱システムの合理化による大幅な建設費低減、稼働率向上
⑤合理的格納施設の開発	原型炉における耐圧格納容器の確立、格納系総合安全解析コードCONTAINの開発整備	現実的な事故時影響評価による格納系の低耐圧化、最終的には非耐圧化の達成	矩形非耐圧格納系により、建設費の2~3%低減
⑥免震構造の開発	<ul style="list-style-type: none"> 試験目的での一般建築物の建設による実物での詳細データの取得。 FBRプラント用免震要素の開発、評価手法、基準の検討 	評価手法、基準の整備を含め、FBRプラントへの免震構造採用を可能とする総合的な技術体系の確立	機器、配管、建屋の合理化と建設コストの10%以上を占める耐震設備の合理化が可能
⑦2次系削除システムの開発	設計検討による安全論理、それを満足するシステム概念の評価と実現のための支配的構成機器である2重管型蒸気発生器に関する伝熱管、水リーク検出システム等、要素試験の実施	2次系削除システムの安全論理の構築と、高信頼性2重管蒸気発生器を始めとする総合的な技術体系の確立	FBRプラントにおいて~15%を占める2次系を削除することにより、機器配管の合理化、建屋の縮小等による10%程度の建設費の低減
⑧高信頼性崩壊熱除去系の開発	水流動実験・解析によるDRACSおよびPRACSの除熱性能評価、ならびに炉心、炉内、機器および全系統にわたる各種解析コードの開発整備	自然循環除熱を最大限に利用したパッシブセーフティ崩壊熱除去系の開発	パッシブセーフティ崩壊熱除去系の設置による安全性、信頼性の向上
⑨運転・保守技術の高度化	<ul style="list-style-type: none"> C.Pの挙動解明と実プラント系内での被曝量評価手法の整備 LWRの1/10以下のトータルマンレム達成 LWRの1/50以下の廃液処理量達成 	<ul style="list-style-type: none"> C.Pの制御・除去技術の開発による被曝の低減 廃液リサイクルの達成による系外への廃棄物量の低減 	<ul style="list-style-type: none"> 運転・保守、解体時の被曝極小化 廃棄物量低減による系外設備、作業の簡素化
⑩合理的安全論理の構築	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅの安全設計評価方針、安全評価を通しての安全解析コードの開発・整備 実証炉の安全設計方針(暫定案)の作成ならびにDBA、LBB等についての検討 	高速増殖炉固有の特徴を積極的に活用した合理的な安全設計・評価方針の実現	過度な安全裕度の削減によるコストダウンならびに高速増殖炉の安全性の確立をPAの確立

大型 M O X 炉 の 設 計 研 究

主 要 検 討 事 項

1. 大型炉心・燃料の高度化・最適化

燃焼度15~20万MWd/t,線出力480w/cmの達成
 高速増性炉心(増殖比1.2~1.4)の創成
 燃料の高性能化によるコンパクト炉心の達成
 大型炉心の制御性の最適化・長寿命制御棒の検討
 中性子遮蔽体の軽量化、長寿命化

他

2. 構造・システムの合理化

原子炉構造コンパクト化の検討
 1次系配管合理化の検討
 中間系合理化の検討;2次系削除システム,機器合体方式
 燃料取替システム簡素化の検討
 免震構造の検討

他

3. 合理的な安全論理の構築

設計基準事象の検討
 崩壊熱除去システムの検討
 格納施設・ナトリウム漏洩事象の検討
 原子炉停止システム(新型炉停止機構)の検討
 2次系削除システムの安全評価検討

他

4. 運転性・保守性の検討

稼働率90%を目指した燃料交換サイクル,保守時間の最適化
 主要機器の保守性の検討
 合理的ISI手法及びISI基準の検討

他

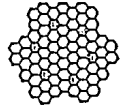
5. 合理的技術基準・評価基準の検討

高温構造設計基準の高度化
 燃料材料設計基準の高度化
 安全設計評価方針の検討
 設計判断基準の検討

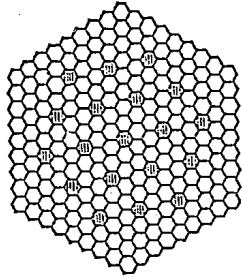
他

大型炉心・燃料の高度化・最適化 その1

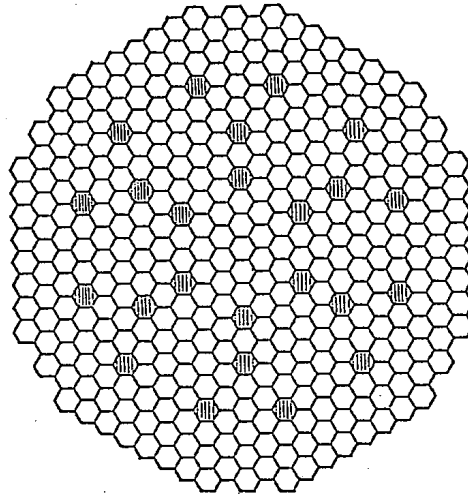
— 大型炉心の検討 —



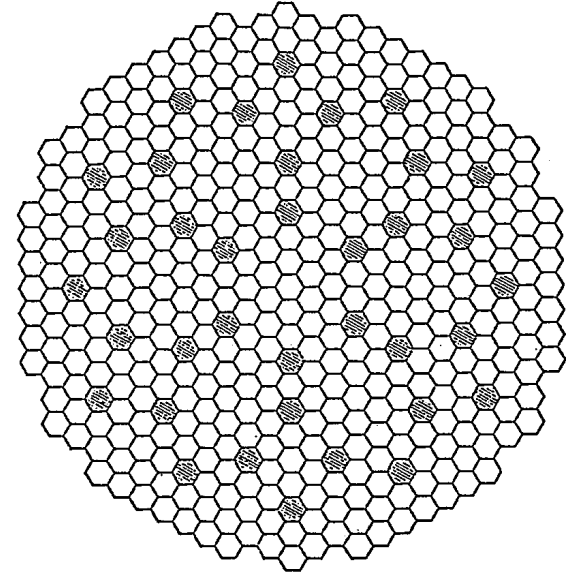
「常陽」MK-II
230ℓ



「もんじゅ」
2,300ℓ



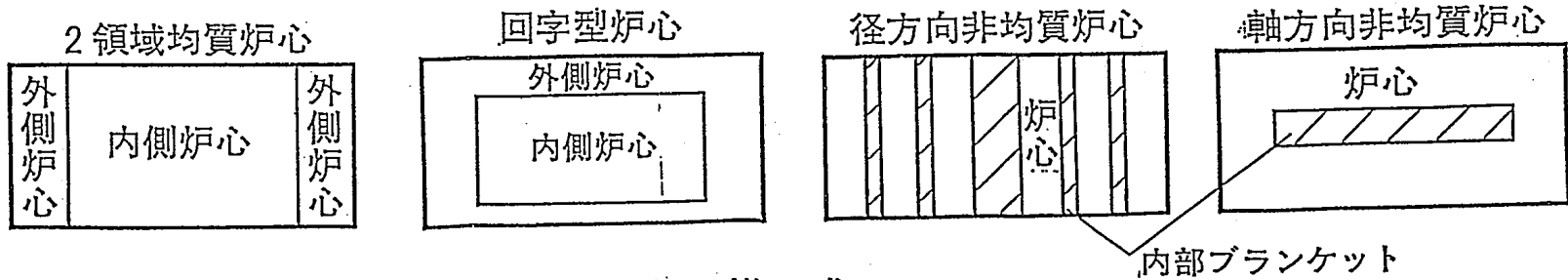
大型炉(1000 MWe)
10,600ℓ



大型炉(1,500MWe)
16,900ℓ

$$\text{炉心体積} = \frac{\text{原子炉出力}}{\text{比出力}} \times f(\text{燃焼度})$$

炉 心 サ イ ズ (イメー ジ)



炉 心 構 成

大型炉心・燃料の高度化・最適化 その2

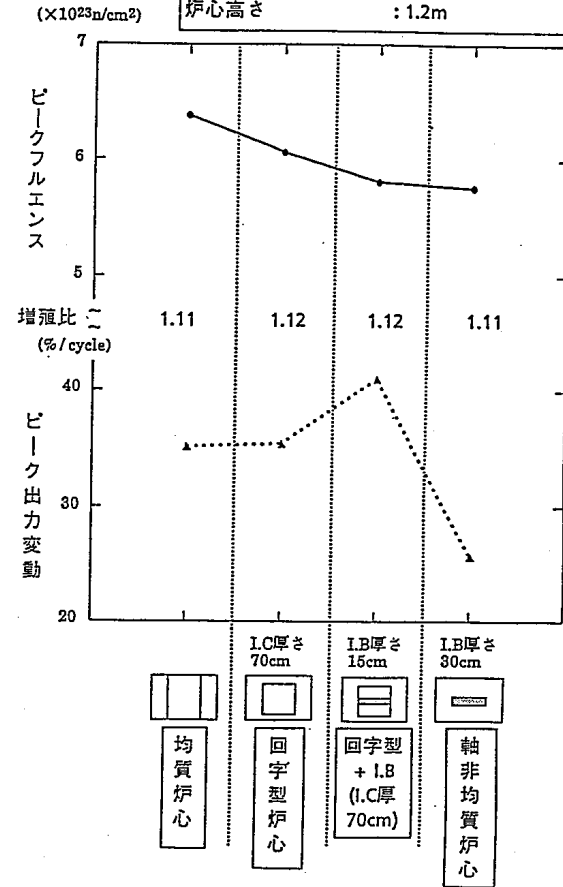
— 炉心核設計 —

炉心核設計の課題

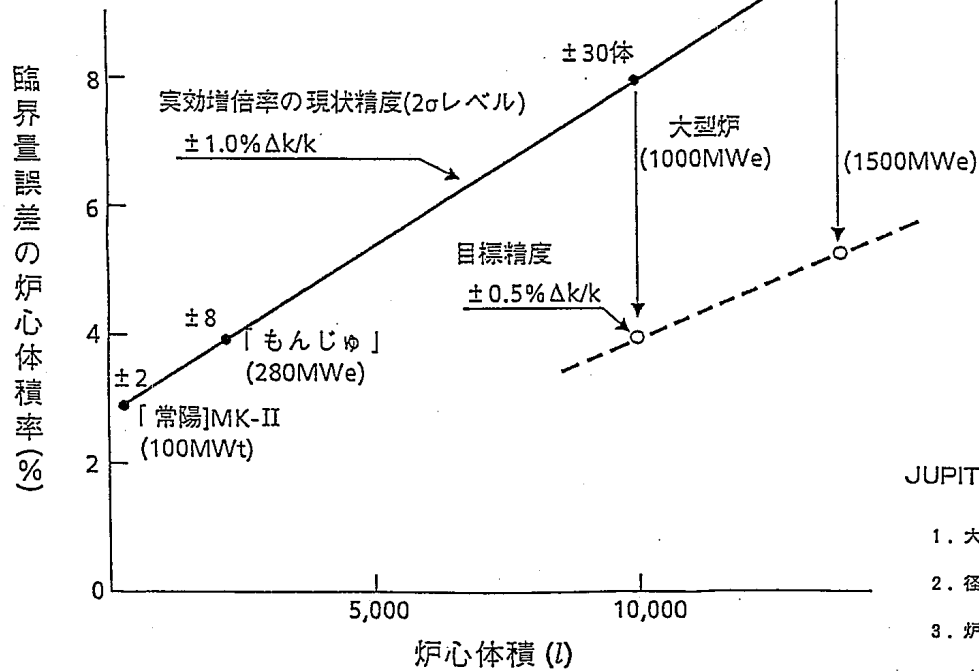
1. 炉心概念 (均質、径非均質、軸非均質 ……)
2. 基本仕様 (範囲)
 - ピン径 6.5~10mm
 - 線出力密度 360~480W/cm
 - 集合体の大きさ 169~331ピン/集合体
3. 炉心配置 (制御棒配置、ブランケット厚、遮蔽体厚 ……)
4. 設計精度 (臨界量、出力分布、制御棒反応度、燃焼特性)

炉心型式の検討

電気出力	: 150万kWe
集合体取出平均燃焼度	: 20万MWD/t
運転サイクル長	: 26ヶ月×4バッチ
燃料ピン径	: 9mm
炉心高さ	: 1.2m



炉心核設計精度 — 臨界性の場合 —



JUPITER-II (径非均質炉心) の成果

1. 大型径非均質炉心の特性把握
2. 径方向出力分布の感性性を確認
3. 炉心配置選定には結合係数の考慮が必要
4. 空間分布予測の系統的ずれの増大を確認

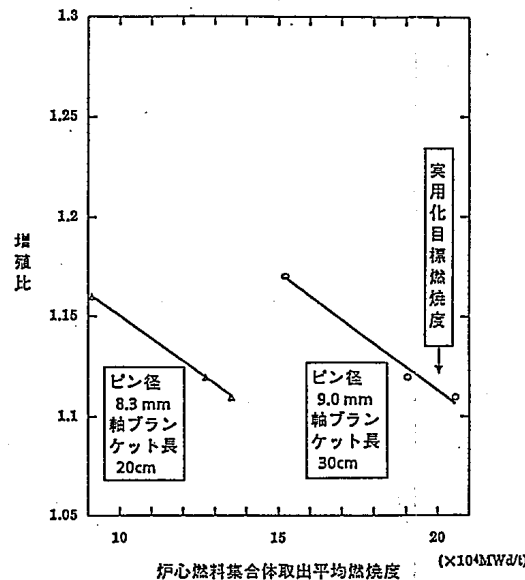
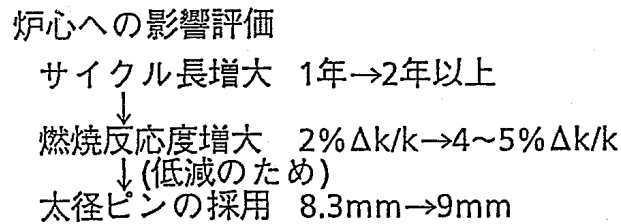
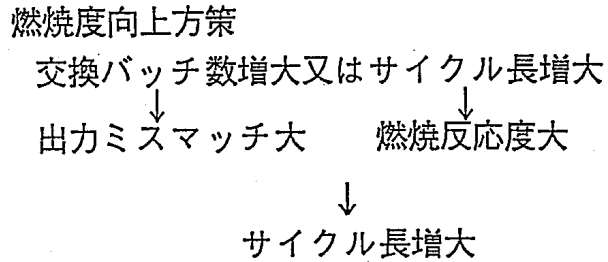
JUPITER-III (軸非均質, 1000MWe均質炉心) の成果

1. 大型軸非均質炉心の核特性把握
2. 軸非均質炉心における出力分布平坦化を確認
3. 内部ブランケット挿入により核設計精度は低下
4. 空間分布予測の系統的ずれを再確認

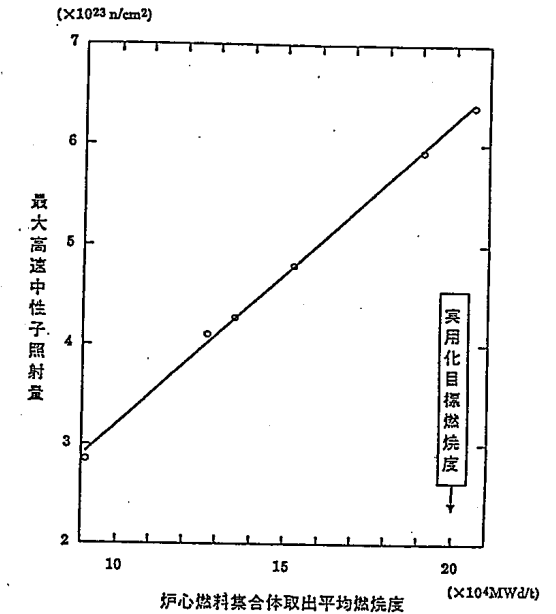
大型炉心・燃料の高度化、最適化の検討 その3

— 燃焼率・稼働率 —

燃焼度・稼働率向上の検討

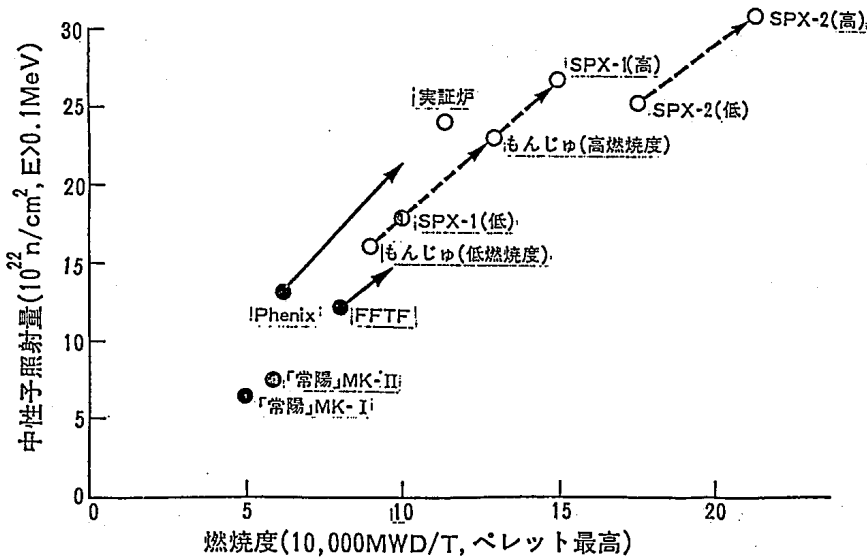


集合体取出平均燃焼度と増殖比



集合体取出平均燃焼度と最大高速中性子照射量

燃焼特性把握と高燃焼度炉心設計



設計燃焼度の現状と高燃焼度化への課題

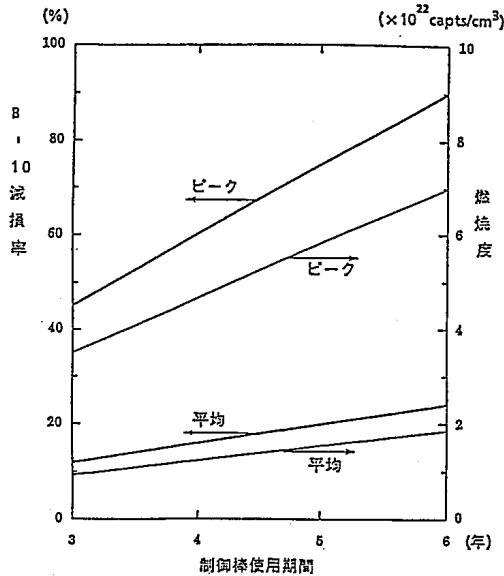
	設計燃焼度	ピーク照射量
改良オーステナイト鋼	9万MWd/t	2.9 × 10 ²³
分散強化型フェライト鋼	20万MWd/t	~6 × 10 ²³

課題：照射量の低減→中性子束平坦化→炉心型式の最適化
 ガスプレナム長の短縮→被覆管温度の低減
 ベント型燃料の開発

大型炉心・燃料の高度化・最適化 その4

— 長寿命制御棒 —

寿命評価



制御棒長寿命化に伴うB-10減損率、燃焼度の増加
 吸収ピンバンドル仕様条件:
 ピン本数: 61本, ピン外径: 15 mm, B-10濃縮度: 90%

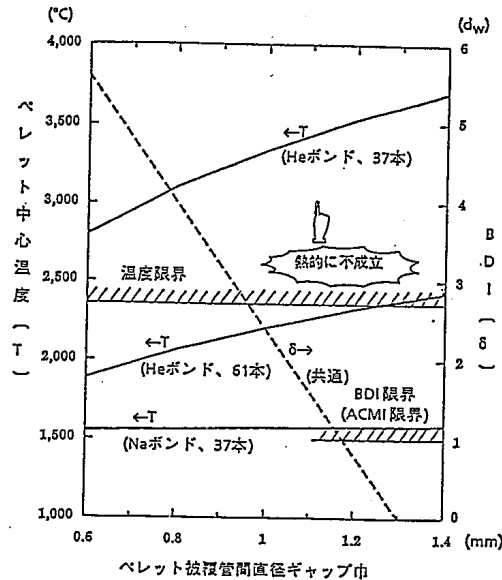
Heボンド方式61本バンドルの評価結果

ペレット被覆管間直径ギャップ巾 (mm)	0.8	0.9	1.0
ペレット最高温度ホットスポット値* (°C)	2231	2313	2389
バンドルと保線管の寸法干渉量 (mm)	3.5	2.6	1.7
¹⁰ B 残存量 (%)	86	86	86
制御棒当たり必要流量 (kg/sec)	5.4	→	5.4
制御棒出口温度(BOC) (°C)	469	→	469
制御棒出口温度(EOC) (°C)	433	→	433
ピーク燃焼度 (x10 ²² capt/cm ³)	3.27	3.32	3.37
高速中性子照射量** (x10 ²³ n/cm ²)	2.0	2.0	2.0

注*) ペレット温度が最高となるのは、第1サイクル初期である。
 **) スタック下端高さにおける被覆管の照射量を示した。

結論

集合体当たり吸収ピン本数を61本とするならば、Heボンド方式で、15ヵ月×3サイクル寿命達成可能性はあるが厳しい。



主系統制御棒長寿命化(15ヵ月×3サイクル)の検討
 吸収ピンバンドル仕様条件: ピン本数: 37 or 61本(ベント型),
 ピン外径: 20 or 15 mm, ワイヤ径: 1.5 mm

Naボンド方式61本バンドルの評価結果

ペレット被覆管間直径ギャップ巾 (mm)	1.0	1.2
ペレット最高温度ホットスポット値* (°C)	1201	1202
バンドルと保線管の寸法干渉量 (mm)	1.7	0.0
¹⁰ B 残存量 (%)	86	86
制御棒当たり必要流量 (kg/sec)	5.4	5.4
制御棒出口温度(BOC) (°C)	469	469
制御棒出口温度(EOC) (°C)	433	433
ピーク燃焼度 (x10 ²² capt/cm ³)	3.37	3.47
高速中性子照射量** (x10 ²³ n/cm ²)	2.0	2.0

注*) ペレット温度が最高となるのは、第2サイクル初期である。
 **) スタック下端高さにおける被覆管の照射量を示した。

結論

制御棒長寿命化の観点で、Naボンド方式の吸収ピン開発が有望であることを確認した。(但し、ペレットトリロケーション対策は必要)

まとめ

(1) 長寿命化

	常陽	もんじゅ	大型炉
寿命	280日 (≧600日)	148×2日	15×3ヵ月
プレナム位置	上部	上部	上部
ベント/シール	ベント	シール	ベント
ボンド方式	Heボンド	Heボンド	Naボンド

(2) 大型化

	常陽	もんじゅ	大型炉
ピン本数/制御棒	7本	19本	37 or 61本

(3) 上部機構(UCS)のサーマルストライピング対策

	常陽	もんじゅ	大型炉
冷却材流量		8.2 kg/sec	5.4 kg/sec
出口温度	約400°C (≧460°C)	420 ~424 °C	433 ~469 °C
出口温度差	< 150 °C (≧90 °C)	< 150 °C	< 150 °C (≧60~70 °C)

課題

(1) Naボンド型制御棒の開発

常陽で研究開発中

(2) 新型制御棒の構想提案と評価

液体Li (⁶Li濃縮)

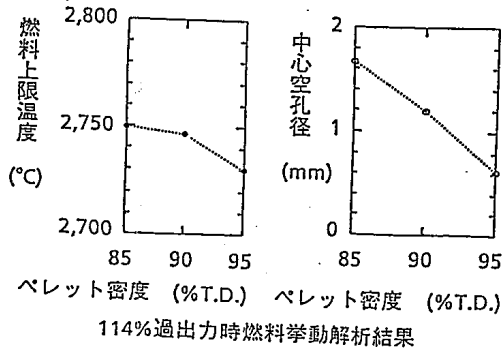
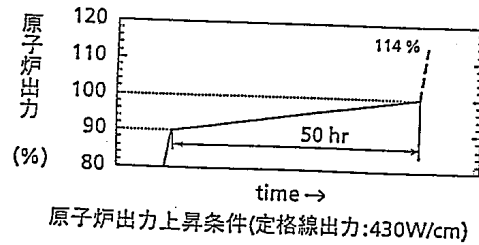
大型炉心・燃料の高度化・最適化 その5

— 高線出力化 —

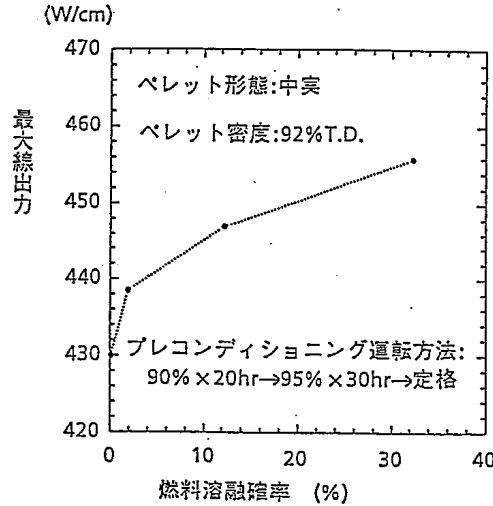
実用化プラント燃料設計
 - 最大線出力の検討 -

1. 目標線出力 480 W/cm
2. 検討内容
 - ① 過出力係数、照射条件不確かさの切詰め目標値
 - ② 燃料溶融確率許容値0.1%の緩和による効果
 - ③ 中空ペレット採用
 - ④ 中実低密度ペレット採用
 - ⑤ [ギャップクロージャ]+[中心空孔成長]

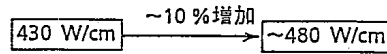
中実低密度ペレット採用の検討



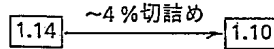
燃料溶融確率許容値0.1%の緩和による効果検討



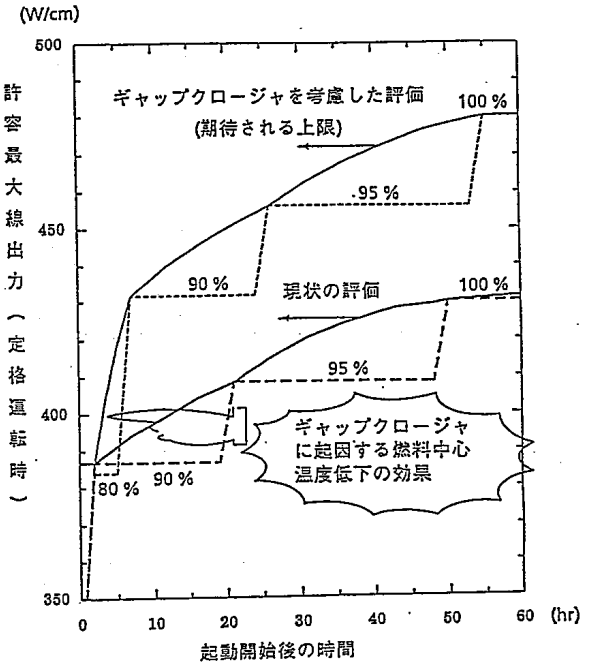
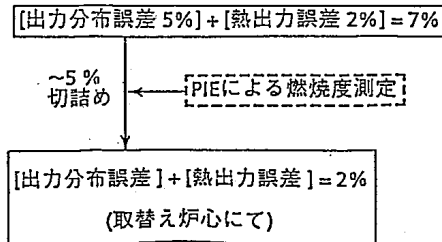
燃料溶融確率と最大線出力の関係
 過出力係数、照射条件不確かさ切詰め目標値検討



(1) 過出力係数の切詰め検討例

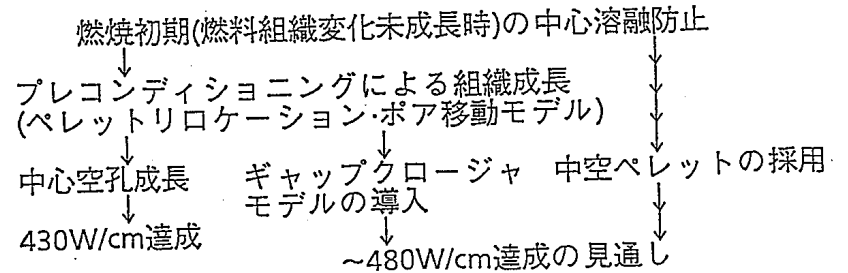


(2) 照射条件不確かさの切詰め目標値



中実ペレットでの480 W/cmの実現見通し
 (実線; 許容最大線出力、破線; プレコンディショニング運転方法)

許容最大線出力の評価



大型炉心・燃料の高度化・最適化 その6 — 炉心コンパクト化 —

炉心コンパクト化の検討

- 集合体長の短縮→逆ノズル集合体の採用
- 炉容器の縮小→3円筒型UCSに対応した制御棒配置
- 炉心構造物量削減→B₄C遮蔽体の採用
炉心拘束枠を削除した自立型炉心

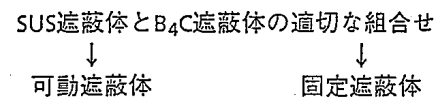
課題：逆ノズル集合体の構造健全性→地震時挙動
炉心変形挙動

集合体群振動解析

<主な解析条件>

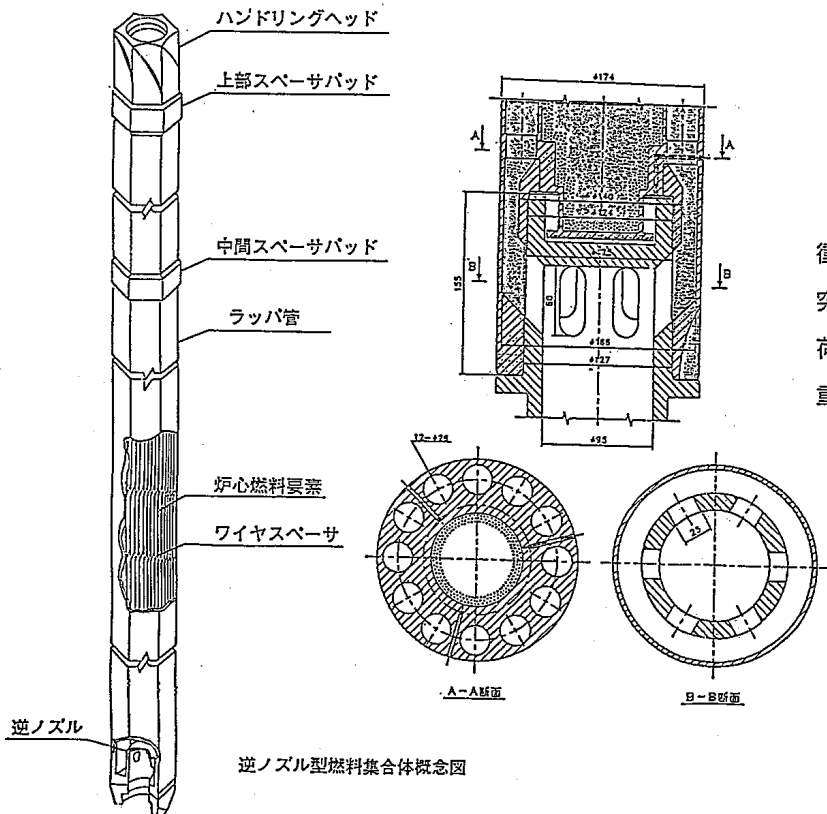
- (1)自立型炉心
- (2)SUS遮蔽体外側に25mmのNa層有り
- (3)集合体長さ 3.5m
- (4)逆ノズル型集合体
- (5)炉容器耐震振れ止め、無し

中性子遮蔽体の軽量化、長寿命化

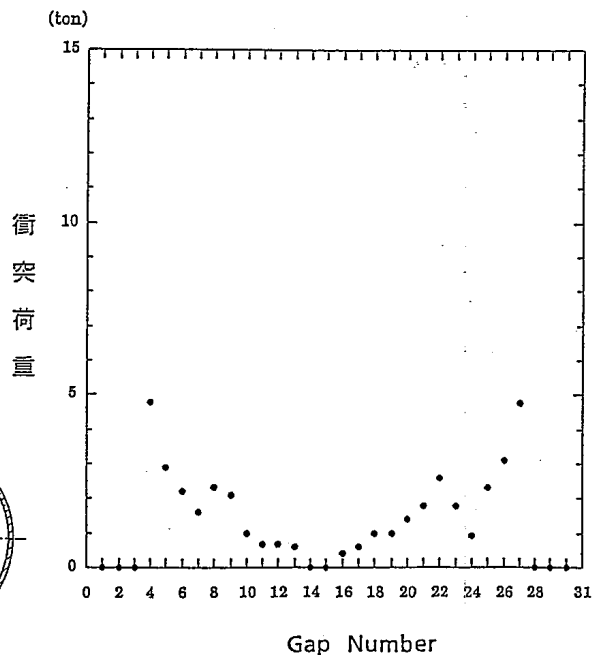


径方向遮蔽構成サーベイ計算例

層数	1	2	3	4	5	6	照射量相対値
ケース 1	径方向 ブランケット	SUS 遮蔽体	B ₄ C 遮蔽体	Na	B	R/V	1
2	1	1	3		C/B	R/V	3.3
3	1	2	2		C/B	R/V	4.7
4	1		4		C/B	R/V	2.2
2'	1	1	3 B ₄ C 70%~90%		C/B	R/V	1.05
5		2	3		C/B	R/V	2.0
6	1		3		C/B	R/V	15



逆ノズル型燃料集合体概念図



自立型炉心の最大衝突力分布
(集合体長さ 3.5m、逆ノズル型、中間Na層あり)

大型炉心・燃料の高度化・最適化 その7 — 遮蔽の合理化 —

JASPER計画の遮蔽実験項目

目的

- (1) 中性子線の放射線遮蔽設計精度を向上し、設計裕度の合理化をはかる。
- (2) 高性能遮蔽体を開発し、原子炉構造のコンパクト化に寄与する。

遮蔽設計精度

(放射線1桁減衰当り)

○ 開発初期 ±50%

R & D実績 { 「常陽」, FFTF遮蔽測定・解析
「もんじゅ」用遮蔽設計手法の開発
JASPER計画

○ 現在 ±20%

R & D実績 { JASPER計画
「常陽」によるB₄C遮蔽体実験
「もんじゅ」遮蔽測定・解析

○ 将来の目標 ±10%

実験項目	設計合理化に対する効果
1) 炉心周り径方向遮蔽体透過実験	B ₄ C黒鉛の遮蔽性能を確認し、炉心周りの遮蔽体軽量化・コンパクト化
2) 燃料集合体内軸方向遮蔽構造ストリーミング実験	炉心上下方向への中性子漏洩量の解析精度向上による軸遮蔽体削減(集合体短尺化)
3) 燃料集合体内ガスプレナム部ストリーミング実験	同上
4) 遮蔽プラグのギャップストリーミング実験	遮蔽プラグの遮蔽体物量削減
5) 炉内貯蔵燃料遮蔽評価実験	炉心外に燃料が局部的に存在する体系の解析精度向上による炉体周り遮蔽の最適化
6) 2次ナトリウム放射化量評価実験	2次主冷却機器配管室の非管理区域化
7) 3次元計算コード評価ベンチマーク実験	複雑形状の遮蔽設計精度向上による過剰遮蔽の排除

炉容器回り遮蔽体の検討

遮蔽要求

●中性子照射量 (E>0.1MeV)

原子炉容器 :

SUS316LCNデータは無い

SUS304ベースでBDS基準準用

→ ● 4×10^{21} n/cm² 以下

但し、高温プレナム、溶接部に対しては

● 1.2×10^{21} n/cm² 以下

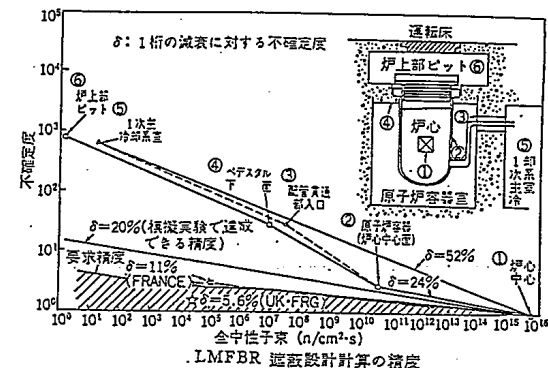
●一次主冷却系貫通部入射線束の低減

●その他

評価結果

●炉内配管の位置で既に中性子照射量は満足されている

→ 炉容器についても満足



まとめ

- (1) 原子炉回り遮蔽体の構成の具体化
・ 軸方向および径方向遮蔽体へのB₄Cの採用
- (2) 生体遮蔽体の構成の具体化
・ B₄C遮蔽体による貫通部ストリーミング低減
⇒ 炉容器小型化、上部流出入配管方式に伴う遮蔽の成立性の見通しを得た。

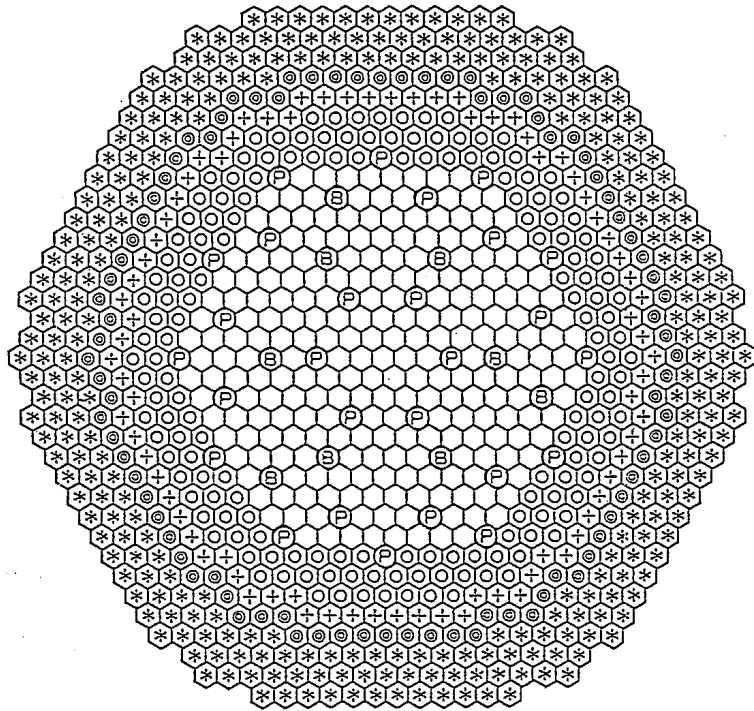
今後の課題

- (1) 遮蔽体構成の詳細化
・ 一次系Naの放射能濃度高(原型炉の5倍程度)
⇒ { 炉心上部機構上部での遮蔽
・ 一次系配管回りの冷却(ガンマ線発熱)
- (2) B₄C遮蔽体の遮蔽性能確認と耐久性評価
・ JASPER実験解析、「常陽」照射等
- (3) 新遮蔽材(ZrH等)の開発

大型炉心・燃料の高度化・最適化 その8

— 現状と課題

炉心主要仕様の比較



- 内側炉心 241本
 - ⊕ 外側炉心 162本
 - Ⓟ 主炉停止系制御棒 27本
 - Ⓟ 後備炉停止系制御棒 9本
 - ⊕ 半径方向ブランケット 78本
 - ⊕ 中性子遮蔽体 (SUS) 84本
 - ⊕ 中性子遮蔽体 (B4C) 288本
- 合計 889本

炉心構成及び制御棒配置

項目	常陽MK-II	もんじゅ	100万kWe大型炉	150万kWe大型炉
出力	100MWt	280MWe	1,000MWe	1,500MWe
原子炉容器				
内径	3.6 m	7.1 m	8 m	9 m
全高	9.89 m	17.8 m	14 m	15.5 m
原子炉出入口温度	500/370 °C	529/397 °C	530/375 °C	550/395 °C
炉心				
炉心高さ	55 cm	93 cm	100 cm	120 cm
等価直径	約0.74 m	約1.8 m	約3.68 m	約4.23 m
容積	約238 l	約2,300 l	約10,600 l	約16,800 l
被覆管				
被覆管材料	SUS316相当鋼	SUS316相当鋼	改良オーステナイト鋼	ODSフェライト鋼
外径	5.5 mm	6.5 mm	8.3 mm	9.0 mm
燃料集合体全長	2.97 m	4.2 m	3.5 m	4.5 m
最大線出力	400 w/cm	360 w/cm	420 w/cm	470 w/cm
運転サイクル	70日 × 5~8/バッチ	148日 × 5/バッチ	15ヶ月 × 3/バッチ	24ヶ月 × 3/バッチ
炉心取出平均燃焼度	約60,000 MWd/t	約80,000 MWd/t	約91,000 MWd/t	約142,000 MWd/t

炉心・燃料設計の現状と課題

項目	目標値	現状設計	課題	解決策
燃焼度	20万MWd/t (集合体取出平均)	~14万MWd/t (集合体取出平均)	<設計課題> (1)出力ピーキングの低減 (2)燃焼反応度の低減 (3)高燃焼度燃料の健全性評価 <R&D課題> (4)高性能炉心材料の開発 (5)設計用物性データの蓄積	(1)出力分布平坦化炉心概念の構築 ・炉心型式の検討 (2)ピン径及び炉心高さの最適化 (3)高燃焼度燃料挙動評価精度の向上 ・PCML、クリープ寿命破損挙動 (4)ODSフェライト鋼の開発 (5)物性データの設計への反映
出口温度	550°C以上	550°C	<設計課題> (1)集合体出力変動の低減 (2)被覆管最高温度の低減 <R&D課題> (3)高強度、耐腐食性材料の開発	(1)出力変動低減炉心概念の構築 ・炉心型式の検討 (2)熱設計手法の高度化 ・最適流配、HSF合理化 (3)ODSフェライト鋼の開発
線出力	480w/cm	~470w/cm	<設計課題> (1)480w/cmの成立性評価 (2)高燃焼度時の挙動解明 <R&D課題> (3)中空ペレットの照射挙動の把握	(1)初期燃料挙動評価精度の向上 ・ギャップクローザー現象の解明 (2)高燃焼度燃料挙動評価精度の向上 ・融点低下、Pu移動、ギャップ幅 (3)中空ペレットの照射試験
増殖比	1.2以上	~1.1	<設計課題> (1)高性能炉心概念の構築 (2)高燃焼度化との両立性 (3)経済性	(1)高性能炉心概念の構築 ・炉心型式及び燃料仕様の検討 ・ダクトレス集合体炉心の成立性評価 ・新型燃料(金属、窒化物)炉心の設計評価 (2)コスト評価 ・ブランケット増大の利害得失評価等
制御棒寿命	6年 (燃料と同等)	~3年	<設計課題> (1)ACMIの低減及び10B減損対策 <R&D課題> (2)Naボンドピンの開発 (3)ペレットリロケーションの防止	(1)高性能制御棒の開発 ・Naボンド方式 ・10B含有率向上構造の検討 ・新材料制御材(ZrH、液体Li etc.) (2)Naボンドピンの照射試験 (3)シュラウド方式機構の照射試験

構造・システムの合理化 その1

—原子炉構造コンパクト化の検討—

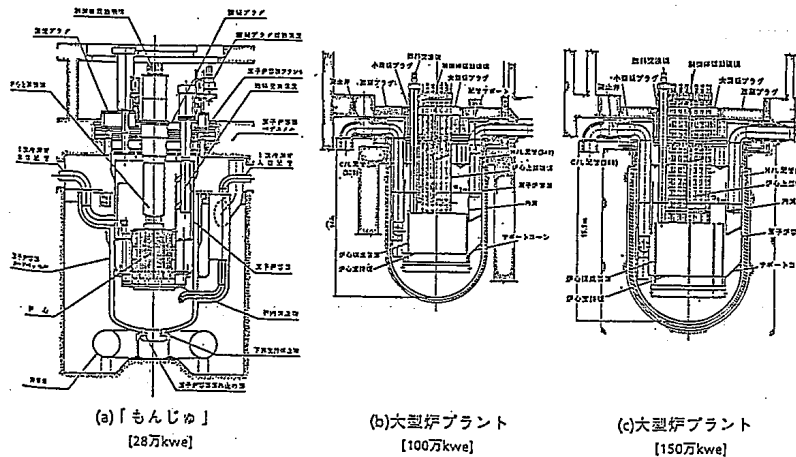
「もんじゅ」との比較

[検討目的]

原子炉構造をコンパクトに配置する観点から、上部流出入配管方式(その2参照)との整合性を考慮した上で、2重回転プラグ、3円筒型炉心上部機構の燃料交換システム、及び逆ノズル型燃料集合体等の合理化概念を用いて、小型原子炉容器を成立させる。

[主な特徴]

- ①上部流出入配管方式
(原子炉容器からノズルを削除)
- ②下部耐震振れ止めの削除
(逆ノズル燃料集合体の採用→原子炉容器短尺化)
- ③炉心槽、及び炉心拘束枠の削除
- ④建屋水平免震の採用 (150万kWeプラント)
- ⑤セラミックライナの採用



原子炉容器形状の比較

項目	「もんじゅ」	大型炉	
電気出力	28万 kWe	100万 kWe (非免震)	150万 kWe (免震)
原子炉出口温度	530 °C	530 °C	550 °C
RV内径	7,100 mm	8,000 mm	9,000 mm
RV軸長	17.8 m	14 m	15.5 m
RV板厚	50 mm	50 mm	30 mm (上部鏡) 40 mm (中間鏡) 60 mm (下部鏡)
構造材重量	284 ton	330 ton	325 ton
Naインベントリ	526 m ³	450 m ³	648 m ³
重量 / 電気出力	10.1 ton/万kWe	3.3 ton/万kWe	2.2 ton/万kWe
Naインベントリ / 電気出力	18.8 m ³ /万kWe	4.5 m ³ /万kWe	4.3 m ³ /万kWe

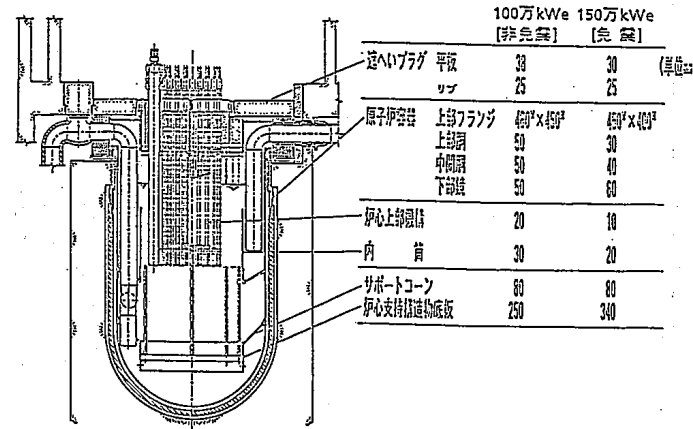
原子炉構造 検討項目

[特徴]

- (1)建屋水平免震の採用
- (2)逆ノズル集合体の採用
- (3)直接炉心冷却系の採用
- (4)ナトリウム・水反応事故の影響低減

[検討項目]

- (1)原子炉容器の検討
 - 基本寸法の設定
 - CR挿入性・座屈評価(フランジ支持構造、UCS板厚)
 - 耐圧設計(各部板厚)
- (2)炉内構造物の検討
 - 耐圧設計 (CSC板厚、炉心支持構造物板厚)
- (3)遮蔽プラグの検討
 - 耐圧設計



主要部板厚の比較 (免震採用の効果)

今後の課題

- (1)原子炉容器軸長短縮化対策
 - 液面近傍熱応力
 - 上部プレナム高さ
燃料交換時の露出対策(フローホール付き集合体)
 - 遮蔽プラグ上面線量率
- (2)炉内構造物の簡素化
 - 炉心支持構造の簡略化
炉心支持板の板厚340mmの削減
 - 直接炉心冷却系流路の確認
 - 流体制振構造の検討

構造・システムの合理化 その2

1次系配管合理化の検討

検討の目的

主冷却系配管引き廻し長さをコンパクト化し、原子炉構造をコンパクト配管し、冷却系の物量を大幅に削減する

[検討項目]

- ① 上部流出配管方式 (原子炉容器からノズルを削除)
- ② 機器フローティング方式
- ③ 配管ベローズ継手方式

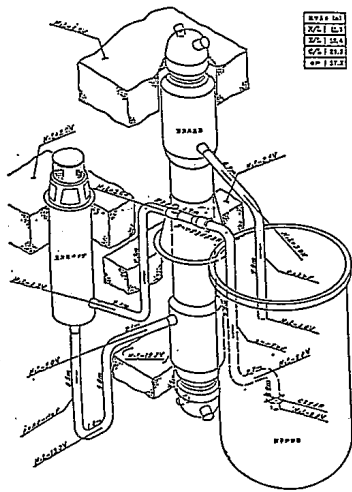
「もんじゅ」との比較 (上部流出入配管方式)

	もんじゅ	大型炉
電気出力	28万KWe	150万KWe
ループ数	3	4
配管サイズ (ホットレグ)	32インチ	36インチ
全配管長さ	336m* (1次系のみ)	235m
配管長さ / 電気出力	12m/万KW	1.57m/万KW
配管方式	上部配管引き廻し	上部流出入

開発課題 (上部流出入配管方式)

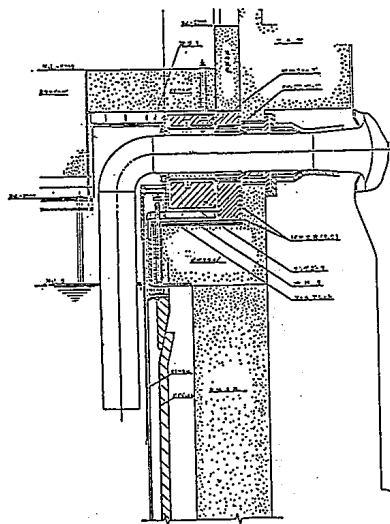
- ① シールベローズ継手の健全性実証
- ② 配管サポート構造の評価
- ③ 遮蔽プラグ断熱手法の開発
- ④ 保守性の検討
- ⑤ 流量計測手法の開発
(整流式渦電流方式流量計)

① 上部流出入配管方式

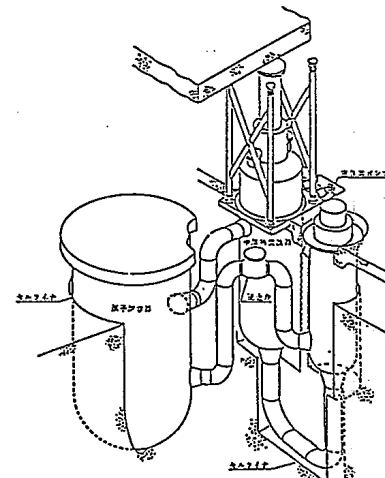


1次系配置鳥瞰図

② 機器フローティング方式



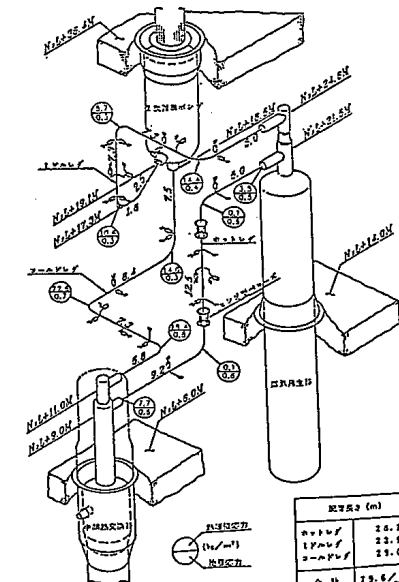
遮蔽プラグ配管貫通部まわり概念図 (ホットレグ配管)



1次系配置鳥瞰図

[設計研究例]

③ 配管ベローズ継手方式



2次熱移送系配管

配管長さ (m)	
ホットレグ	26.7
コールドレグ	23.9
その他	23.9
合計	74.5

構造・システムの合理化 その3

— 中間系合理化の検討 —

検討目的

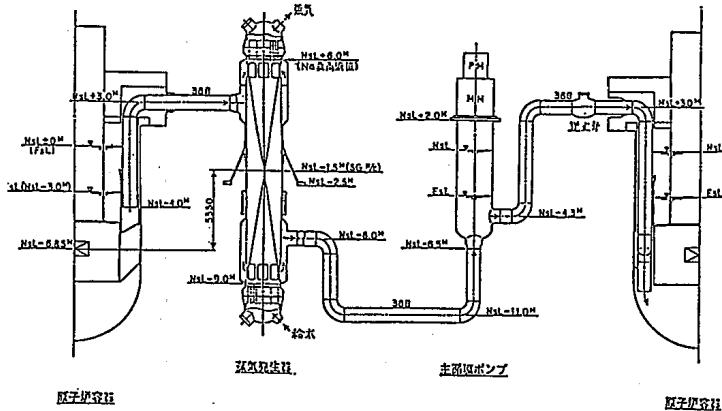
FBR冷却システムの中間系合理化(2次系削除システム)が成立するシステムを提案し、建設コストの削減並びに運転コストの削減に寄与する。

検討項目

- ① 2次系削除システムの構想提案
- ② 2次系削除システムの安全論理構築(後述)
- ③ 要素設計研究
 - 2重管型蒸気発生器の検討
 - 伝熱管破損検出システムの検討
 - 格納容器バウンダリーの検討(後述)
- ④ 崩壊熱除去系の評価(後述)
- ⑤ 伝熱管破損対策 等

設計研究例

1次熱輸送系総合系統図



評価・検討課題

- ① 高信頼性2重伝熱管型蒸気発生器(破損確率含む)
- ② 2重伝熱管ISI手法、補修法
- ③ Na-水反応生成物の炉心混入防止方策
- ④ 伝熱管破損検出システム(検出限界、応答性、信頼性)
- ⑤ 反応生成物収納設備
- ⑥ 水・蒸気系ブロー方式
- ⑦ 崩壊熱除去システムとフローコストダウン(熱過渡現象)

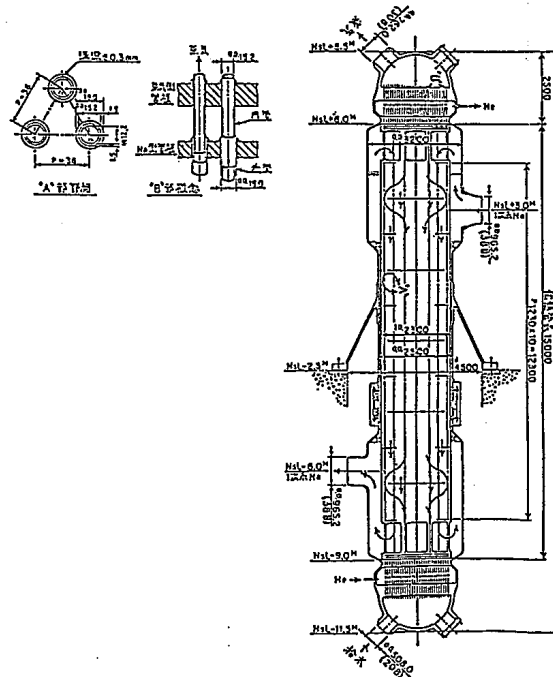
他系統への影響評価

- ① 上部流出入配管システム(シールベローズ等)
- ② 原子炉容器、炉内構造物の耐圧健全性
- ③ ベント型制御棒(Heガス)
- ④ 純化システム(1次系に高クロム鋼使用)

さらなる合理化方策

- ① 主循環ポンプ-蒸気発生器の合体
- ② 2重伝熱管式ヘリカルコイル型蒸気発生器

2重伝熱管型蒸気発生器構造概念図



伝熱管リーク検出システムの検討

リーク検出計の分類

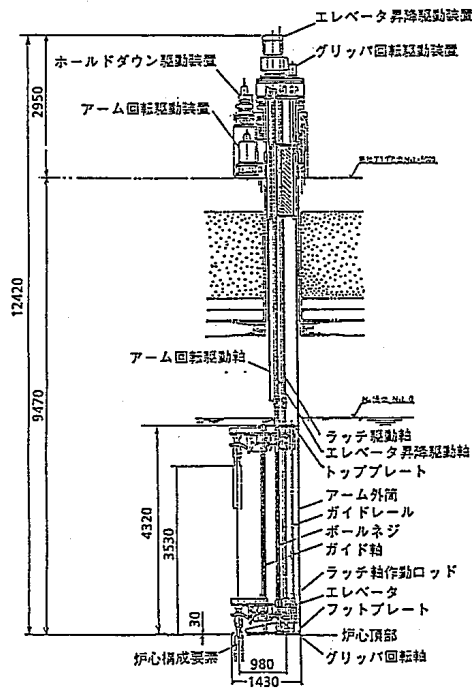
No.	検出計	リーク用目			検出対象とする現象
		内管リーク	外管リーク	伝熱管リーク	
1	ヘリウム中圧力計	0			内管リークからHe系へ蒸気混入
2	ヘリウム圧力計	0	0		内管リーク: 蒸気混入による圧力上昇 外管リーク: He流出によるHe系の圧力低下
3	ナトリウム中He放出計		0		He中へのHeガス混入
4	ナトリウム中水素計	Δ	0		He中への水素混入
5	カバ-ガス中水素計	Δ	0		NaからR/Vのカバ-ガスへの水素混入
6	カバ-ガス圧力計		0		水素ガス発生によるR/Vのカバ-ガス圧力上昇
7	音響計		0		Na-水反応による音響発生
8	ナトリウム中酸素計		Δ		Naへの酸素混入
9	ブライダング計		Δ		Naへの酸素混入、水素混入
10	ラプチャーディスク検出信号 ^{*)}			(O)	Na-水反応による圧力上昇

構造・システムの合理化 その4 —燃料取替システム簡素化の検討—

検討目的

FBR燃料取替システムは、軽水炉に較べて複雑であるため、建設コストを押し上げるだけでなく、運転稼働率も低下する要因となる。燃料取替システムを総合的に検討評価し、建設費削減、運転稼働率向上に資する。

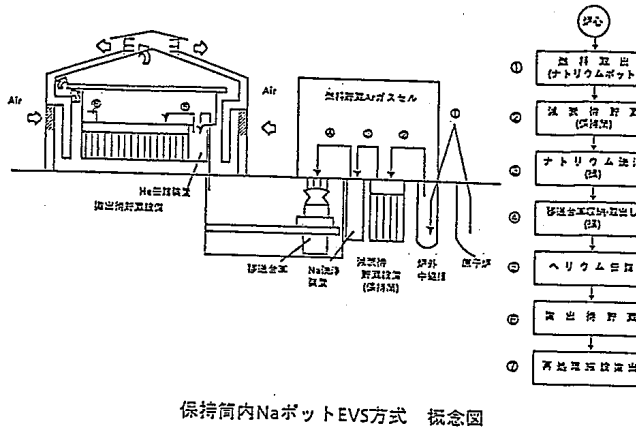
[燃料交換機の検討]



燃料交換機 概念図

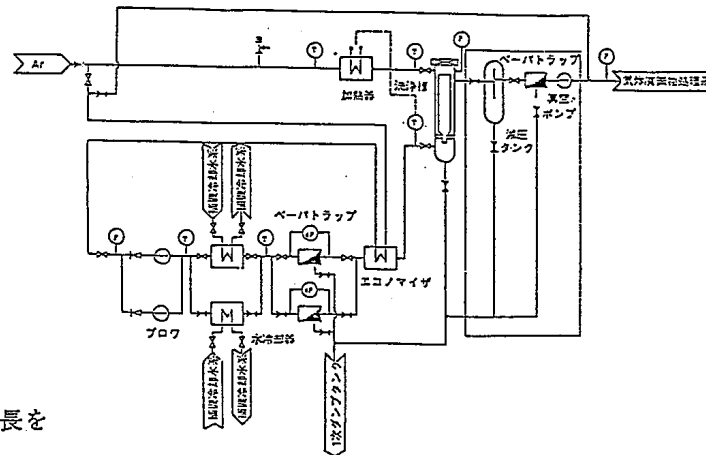
特長: ボールネジ方式とし、回転プラグ上の軸長を大巾に短尺化した。(もんじゅの約1/5)

[乾式燃料貯蔵システムの検討]



保持筒内NaポットEVS方式 概念図

[乾式燃料集合体洗浄法の検討] (例 高温ガス洗浄法)



燃料洗淨設備 系統図

「もんじゅ」との比較

「もんじゅ」との比較

項目	「もんじゅ」	大型炉	
電気出力	28万 kWe	100万 kWe	150万 kWe
燃料交換機方式	固定アーム形 パンタグラフ式	固定アーム形 オフセット式	同左
燃料出入機方式	炉内中継機構/ 走行台車方式	シュート/回転ツ インチェンバ式	同左
燃料貯蔵方式	炉外燃料貯蔵槽 +水プール	保持筒内 Naポット	同左
燃料洗淨方式	湿式洗淨(蒸気洗 浄+水洗済)	高温Arガス洗淨	同左
占有面積	3600 m ²	380 m ²	450 m ²
面積/電気出力	129 m ² /万kWe	3.8 m ² /万kWe	3.0 m ² /万kWe

今後の課題

今後の課題

- (1)燃料交換のカバーガス中露出対策
荷重伝達機構部のスティック防止対策の検討
・荷重伝達機構部までのナトリウム汲上げ
・酸化物が付着しにくい材料の開発
- (2)燃料出入機実証試験
回転ツインチェンバ方式の実証
- (3)保持筒内NaポットEVS方式の成立性評価
○炉心設計の変更点
・運転サイクル長期化、逆ノズル燃料集合体
○輻射伝熱性能の向上
・高輻射率のメッキ材料の開発
○除熱特性評価
・崩壊熱除熱特性、移送・貯蔵時の安全性評価
○耐食性評価
- (4)燃料取出・交換計画の策定
Arガス洗淨効率向上も含め、取出・交換計画の検討

構造・システムの合理化 その5 — 免震技術の応用 —

検討目的

高速炉の実用化にあたっては、経済的成立性と機器構造成立性を満たす観点から、可能な限り機器・配管類の板厚は薄く軽量にして建設費を安くする。板厚が薄ければ耐熱強度は明らかに向上するが、その反面、耐震強度は低下する。このため、耐震設計の大幅な合理化の達成が必要不可欠であり、免震構造の適用によって建物・機器への地震入力低減を図る方法はその有力な手段となり得る。

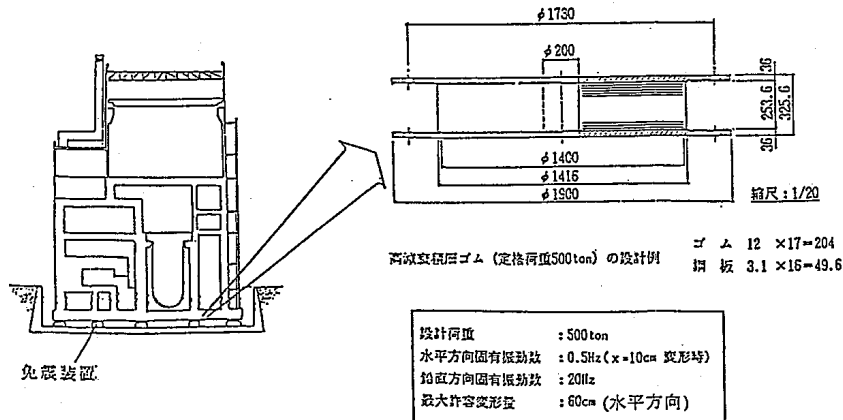
[FBRプラントに適用する場合の開発課題]

- ① 免震構造の選定 …… 建屋免震/機器免震/水平2次元免震/上下免震/3次元免震
- ② 免震装置の選定 …… 高減衰積層ゴム/鉛入り積層ゴム/積層ゴム+鋼材ダンパー/その他
- ③ 免震建屋施工手段、施工工程、メンテナンス
- ④ 経済性評価

[設計研究の現状]

地震動の主な振動方向が水平方向であり、一般建築での実施例が豊富で信頼性、実証性の点で有利な建屋全体を水平方向にのみ免震する方式を現時点では採用している。

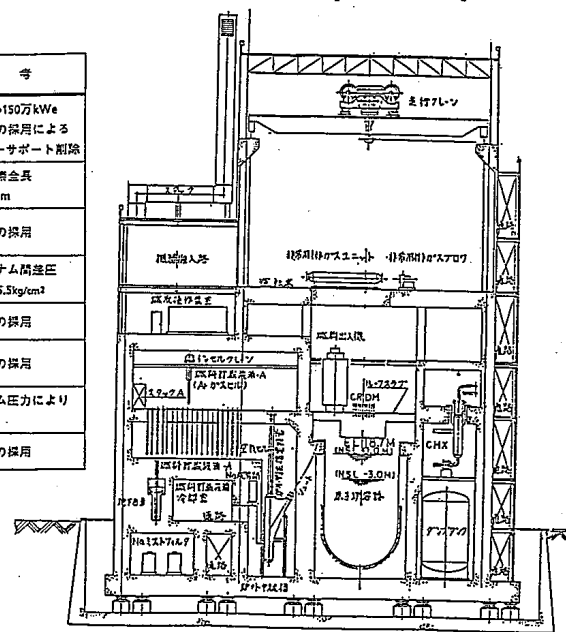
実現性、施工性、メンテナンス性等を考慮して高減衰積層ゴム、或るいは鉛入り積層ゴムを用いることが適切である。



[免震効果]

部 位	100万kW (非免震)	150万kW (免 震)	備 考
RV内径	8,000 mm	9,000 mm	100万kW→150万kW 免震床応答の採用による H/Lハンガーサポート削除
RV軸長	14 m	15.5 m	炉心挿入管全長 3.5m→4.5m
RV (上部鋼)	50 mm	30 mm	免震床応答の採用
RV板厚 (下部鋼・鉄)	50 mm	60 mm	上下部プレナム間差圧 3kg/cm ² →5.5kg/cm ²
内筒板厚	30 mm	20 mm	免震床応答の採用
内筒取付台板厚	60 mm	30 mm	免震床応答の採用
CSC板厚	80 mm	80 mm	下部プレナム圧力により設定
UCS板厚	20 mm	10 mm	免震床応答の採用

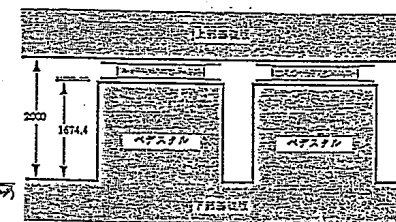
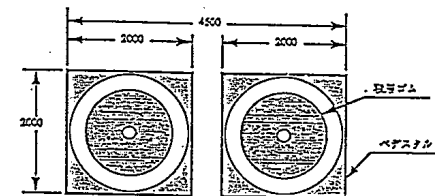
[設計研究例]



上記の設計研究例では

- ① メンテナンス性を考慮したベダスタルの配置を考慮。
- ② 免震装置の設置自由度を考慮。
- ③ 原子炉を中心に対象配置になるよう工夫した。

- ・ 上部構造重量 : 100,000 ton
- ・ 積層ゴム定格荷重 : 500 ton
- ・ 使用積層ゴム総数 : 200 個
- ・ 1 ベダスタルあたりの支持荷重 : 2,000 ton
- ・ ベダスタル総数 : 50 個



積層ゴムのベダスタルへの配置例2 (1ベダスタル1個あたり)

今後の課題

- ① 垂直免震装置及び複合免震(3次元免震)免震手法の研究開発。
- ② 免震・非免震接合部の取合構造・方法の明確化。
- ③ 安全評価研究による免震システムの再検討。

[コスト評価]

建屋建築工事費単独として評価した場合、免震を用いた工事費増は、従来の非免震と比べて約20~35%増となるが、プラント建設費全体として評価した場合は、免震コスト分として高々1%程度に納まるとの見通しが得られている。

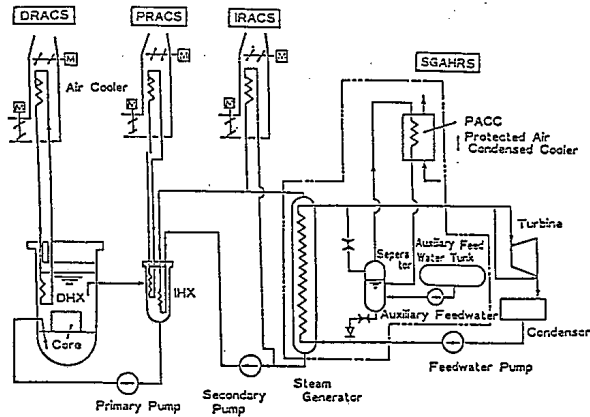
合理的な安全論理の構築 その3

崩壊熱除去システムの検討

検討の目的

大型炉心、2次系削除システムに適した崩壊熱除去システム構想の提案並びに評価を行う

[崩壊熱除去系の種類]



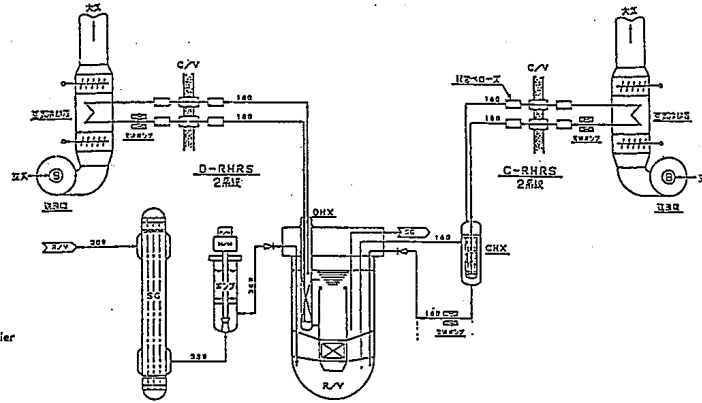
崩壊熱除去系の除熱モード

前提：非常用電源2トレイン

起因事象	(単一)故障	除熱モード	安全評価上 事象区分	備考
外部電源喪失	DG	FF+NF+2NN	運転時の異常な 過渡変化	
ポンプ軸回転 1次冷却材漏洩	ダンパ (DG)	2FF+NF 又は (FF+2NF) FF+NF+2NN	事故	
全動力電源喪失	ダンパ	4NN 3NN	(事故) 設計基準外	信頼度上の要求
外部電源喪失	ダンパ×2	2FF or 2NFor (FF+NF)	(事故)	信頼度上の要求
	DG+ダンパ	(FF+NF+NN) or (FF+2NN) or (NF+2NN)	(事故)	同上
	DG×2	4NN	(事故)	同上

深減型2次系制御機構: NF, 自然循環: NN 浅減型制御機構: FF, 自然循環: NN

崩壊熱除去系概念

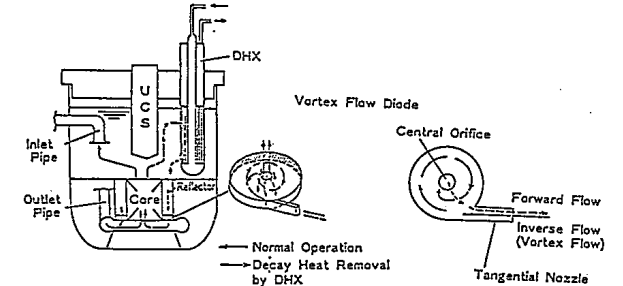


崩壊熱除去系系統概念 (大型炉)

崩壊熱除去系設計上の課題

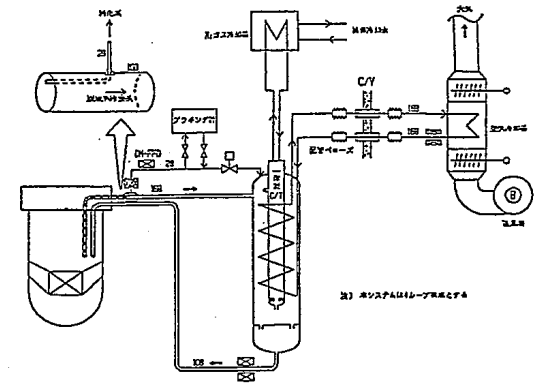
- Ⓐ簡易評価から詳細評価へ…SSC、SuperCOPDコード利用、
- Ⓑ強制循環と自然循環の量重…合理化のため活かしたい
- Ⓒバウンダリ判断基準の時間依存性を取り込んだ評価
- ⒹNa-水反応時の信頼性を高める (実用プラント)

フローパスの検討



Flow Path in Reactor Vessel

純化システムとの合体



純化系追加型崩壊熱除去システム

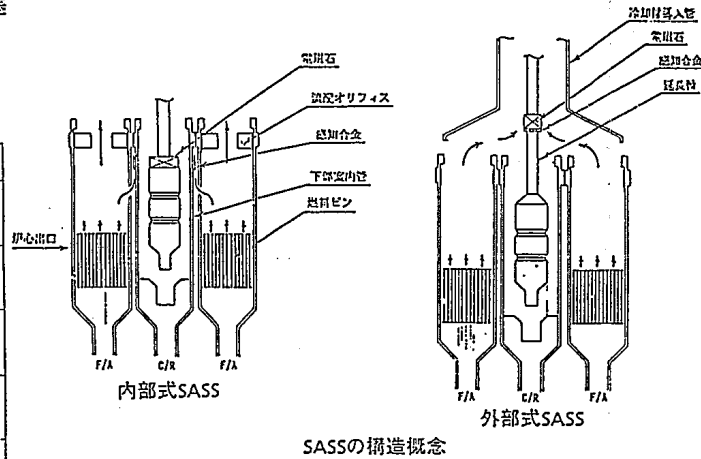
合理的な安全論理の構築 その4 —原子炉停止システム(新型炉停止機構)の検討—

検討目的

大型炉心に適した新型炉停止機構(自己作動型制御棒駆動機構-SASS-)の評価検討を行ない原子炉停止システムの安全論理構築に反映する。

[SASSの型式の選定]

方式	炉心位置	フルパワー以外での動作	リセット	外部操作(UCRD付)	動作チェック	応答	閉鎖点	閉鎖位置
キュリー点方式	TOP (LOF)	○	○	○	△ヒープ型	○	キュリー点電磁石の応答位置	1
流体圧方式	LOF	△圧力増大時動作	○	○	△筒形型	△	炉上安置型	3
電磁石スイッチ方式	TOP (LOF)	○	○	○	△ヒープ型	○	応答位置	2
△駆動方式	TOP (LOF)	○	△時間がかかる	△	△ヒープ型	△	圧力増大トリガ駆動	3
ヒューズ方式	TOP (LOF)	○	×	△	×	△	リセットトリガ	4

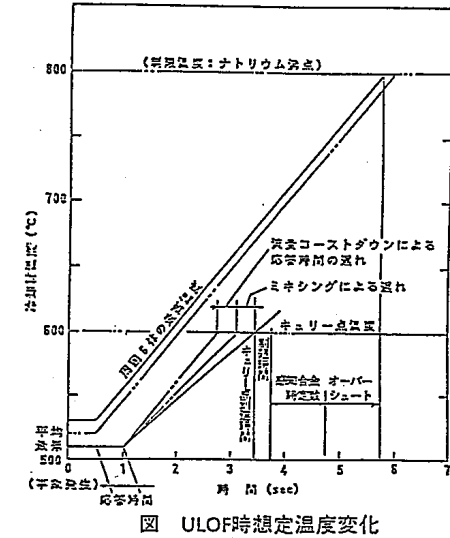


[型式比較]

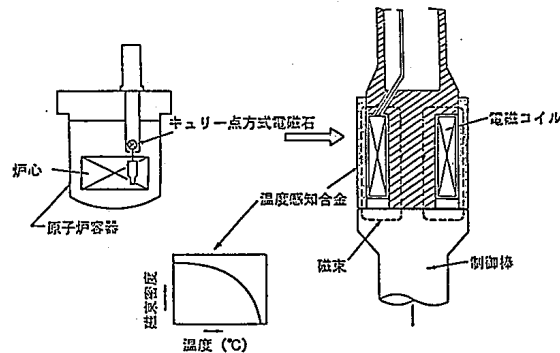
- (1)構造
 - 電磁部の構造は、外部式が簡略
 - 外部式は、UCS内に導入管設置要
- (2)温度感知
 - 応答時間は、内部式が速い。
- (3)CR挿入性
 - 挿入性に有意な差はない。
- (4)電磁部の設計
 - 内部式は、低温雰囲気中にコイルがある。
 - 外部式は、軸方向に余裕があり、コイル長さに制限ない。
- (5)総合評価

内部式、外部式の性能には、有意な差はないが、3分割UCSを採用しているため導入管の設置が困難であり、内部式を選定。

[応答性評価]



[キュリー点方式の作動原理]



キュリー点方式電磁石の原理

新概念SASSの構想提案

原子炉スクラムの必要な異常現象として

- ①異常高温 例 600°C以上
- ②異常流量 例 定格流量の90%以下
- ③異常カバーガス圧 例 定常カバーガス圧の1.2倍以上
- ④異常中性子束 例 通常中性子束の1.2倍以上
- ⑤異常振動

上記異常に自己作動する制御棒駆動機構の構想を提案し、評価する。

※SASS: 信号を介して、制御棒を作動させるのではなく、物理現象により自己作動させる制御棒駆動機構を云う。

合理的な安全論理の構築 その5

—— 2次系削除システムの安全評価検討 ——

2次系削除システムの安全論理の考え方

ケース	設計想定事象	安全論理の考え方
A	Na-水反応事故は、設計基準外事象(BDBE)とする。	(イ) 高信頼性二重管SGを開発する (ロ) 多様性を有する片側破損検出系で單管の破損検出を保証する (ハ) demand failure に対する確率論的評価により片側破損検出失敗及び水蒸気系ブロー失敗が設計上考慮不要であることを示す (ニ) 伝熱管破損モードの評価に基き、破壊力学的手法等を用いた評価及び確率論的評価並びに実験的な裏付けを基に内管・外管の独立性を立証する
B	伝熱管破損拡大のおそれなく、かつプラントにダメージを与えない程度の微小リーク(Non Damage Leak)によるNa-水反応事故を(DBEとして)想定する。	(イ) ノンダメージ領域内でホーニングにより検知し、水蒸気系をブローすることにより、事故拡大を防止できることを示す (ロ) LBB論理に基き、初期貫通クラックは微小リーク相当であることを示す
C	小リーク程度のNa-水反応事故を想定する。(10g/sec以下の水リーク率)	(イ) 水蒸気及び音響計により貫通リークを検知し、水蒸気系をブローすることにより、事故拡大を防止できることを示す (ロ) LBB論理に基き、初期貫通クラックは小リーク相当であることを示す
D	大リーク規模のNa-水反応事故を想定する。(伝熱管一本のギロチン破断)	(イ) 伝熱管一本のギロチン破断を想定しても安全であることを示す (ロ) ウェステージによる破損伝播を考慮しても最大、伝熱管一本相当の破損を想定すればよいことを示す

H₂ガスの炉心への影響

冷却材ボイド反応度 (150万kWeクラス)

炉心ボイド反応度 約12% (S/A値が大きい場合20%)

集合体の最大ボイド反応度 約5%

H₂ガスによる反応度効果

初期水リーク率 (g/sec)	最大水蒸気流量 (kg/sec)	蒸気反応度 (%)
0.1	2.7	0.3
1.0	13	1.4
10	220	24
100	7400	65

許容限界

初期水リーク率 約10g/sec

今後の課題

H₂ガス注入時の除熱能力の検証

Na₂Oの炉心への影響

Na₂Oによる炉心閉塞

初期水リーク率 (g/sec)	炉心注入量 (kg)	1集合体閉塞時間 (cc)
1	0.7	3
10	10.7	43
100	5.1	23

炉心への影響

全炉心に蒸気 → 影響小
局所的に蒸気 → 集合体閉塞

(閉塞の状況に依る)

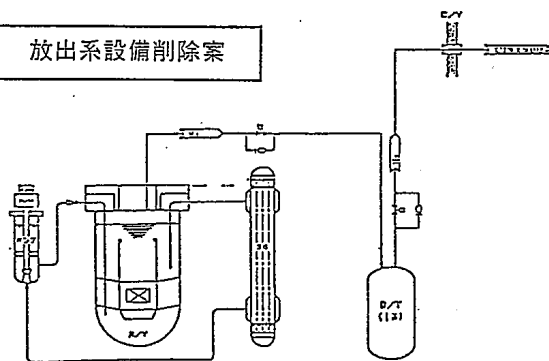
今後の課題

Na₂Oの炉心への移行挙動の検証

伝熱管破損に関する検討結果

- 片側破損検出系は今後の性能向上が必要(特に外管破損検出系)
- 10g/s以下の漏洩率ではカバー圧力は特に問題にはならない
- ブロー60秒なら12B(放出系配管)
- Non Damage Leak以上の破損では破損伝播は避けがたい
- 初期リーク率が数10g/s以上の場合には最大漏洩率は1DEGに相当する
- 10g/s以上の漏洩率は炉心への反応度添加の観点から許容できない
- 反応生成物による炉心閉塞は影響が比較的小さい

放出系設備削除案

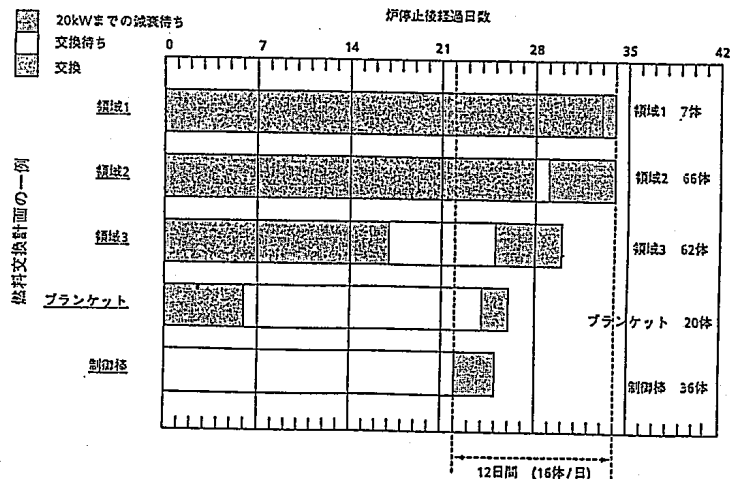


運転性・保守性の検討

運転稼働率の検討

- 稼働率向上方策 (90%以上)
 - 燃料・制御棒の長寿命化 (前述)
運転サイクル 2年、3バッチ
 - 燃料交換システム (スピードアップ)の検討
交換時間 目標 30分/1体
 - 定検時間の短縮
運転定検 (ISI含む)
 - 法令改正
定検のインターバル

2. 燃料交換計画の一例

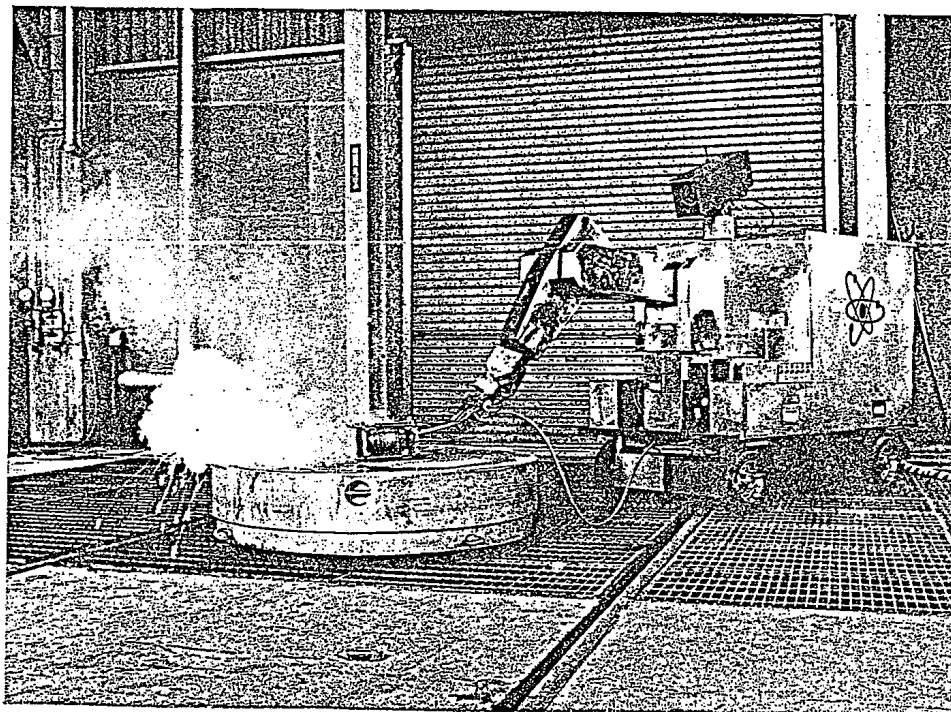


3. 今後の課題

- 燃料交換システムとの整合性評価 (安全評価含む)
- 破損燃料の取扱い
- 高温用ISI機器システムの開発

運転性の検討

- 検討項目
 - AI技術・ロボット技術の導入
目標: 無人化
 - 計装システム
(異常診断システム、安全計装システム含む)



2. 今後の課題

- AI技術について、フロンティア技術開発の研究
成果を反映し、設計研究に反映する。
- FBRに適した合理的計装システムの創出並びに
評価を行う。

保守性の検討

- 検討項目
 - 保守性を考慮したシステム設計
 - 保守場環境調査
放射線量、雰囲気温度等
 - メンテナンス設備
放射性ナトリウム付着機器の洗浄設備

2. 今後の課題

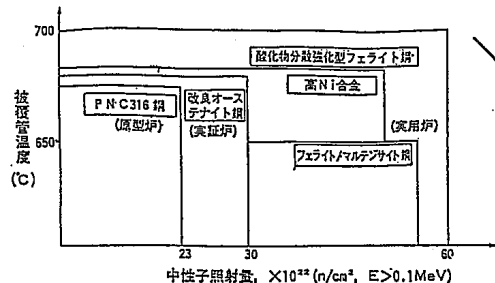
実施項目の検討から始める。

もんじゅ28万kWe → 1988年設計 100万kWe → 実用化プラントコスト低減

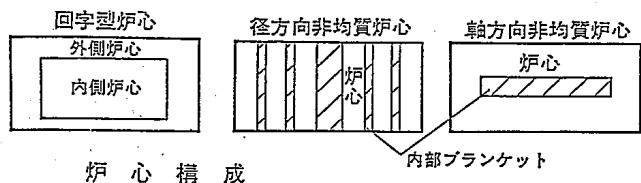
	もんじゅ (28万kWe)	1988年設計 (100万kWe)	実用化プラント (150万kWe) (目標) (2005~2010年に着工を想定したプラント)
狙い	<ul style="list-style-type: none"> エネルギーセキュリティーの観点から、わが国の環境、技術力等の国情に適した高速増殖炉を自主開発する。 高速増殖炉発電所の技術的性能についての見通しを得る。 実用炉開発についての問題点を解明する。 	<ul style="list-style-type: none"> 各種新技術を幅広く導入することによりプラント物量を削減し、建設コストにおいて軽水炉と同等のプラント概念を構築する。 実証炉概念の達成に必要なR&D項目及び開発目標を示す。 	<ul style="list-style-type: none"> FBR実用化への長期開発戦略を策定する。 プラントの高温、高熱効率化を図る。 2次系の削除、機器合体化、免震工法などの各種革新技术を幅広く導入することによりプラント物量を削減する。 建設コスト、発電コストにおいて同時代の軽水炉を凌駕するプラント概念を構築する。
主要仕様	<ul style="list-style-type: none"> 電気出力 280MWe ・原子炉出口温度 529°C 運転日数 5カ月 ・炉心材料 SUS316相当鋼 集合体取出平均燃焼度 8万MWd/T 原子炉容器 7.1mφ×17.8m^H 単回転プラグ・パンタグラフ方式燃料交換機/単円筒炉心上部機構/キャスクカー方式燃料出入機 高所配管引廻し 有液面ヘリカルコイル分離貫流型(伝熱管材料2¹/₄Cr-1Mo鋼/SUS321鋼) 鋼製格納容器 原子炉補助建物 115m×100m ・冷却プール数 3 	<ul style="list-style-type: none"> 電気出力 1,000MWe ・原子炉出口温度 530°C 炉心材料 改良オーステナイト鋼 最大線出力(高線出力化)430W/cm 原子炉容器 8mφ×14m^H (逆ノズル集合体) 3円筒型炉心上部機構 上部流出入方式配管システム 一体貫流型SG(伝熱管材料高クロムフェライト鋼) コンクリート建屋一体型矩形格納施設 ガードベッセル兼用セルライナー 低床応答(建屋埋込) 原子炉補助建物大きさ 59m×57m ・冷却プール数 4 	<ul style="list-style-type: none"> 電気出力 1,500MWe ・原子炉出口温度 550°C 2重管型SGによる2次系削除(原子炉補助建物54m×46.5m) 炉心材料 分散強化型フェライト鋼 一体型機器・システム 新型炉心(超寿命炉心)* 高線出力化 480W/cm 燃料集合体取出平均燃焼度 20万MWd/T ダクトレス燃料* 免震技術の採用(3次元) 高性能電磁ポンプ*(浸漬型EMP) ガードベッセル兼用ファインセラミックス・セルライナー
建設費 (軽水炉比)	約7 (FOAK) 約4 (NOAK)	約2.0 (FOAK) 約1.2 (NOAK)	0.8~0.9 目標
建設費削減の要因	<ol style="list-style-type: none"> ① 使用済燃料貯蔵方式の合理化 (28%) ② 二次系配管へのベローズ継手の採用 (12%) ③ 電気信号系統への多重伝送方式の適用 (9%) ④ コンクリート建屋一体型矩形格納施設の採用 (9%) ⑤ 上部流出入方式配管システム (9%) ⑥ 燃料交換機・出入機の合理化 (6%) ⑦ IHX・ポンプガードベッセルの削除 (5%) ⑧ 原子炉容器の縮小 (5%) 	<ol style="list-style-type: none"> ① 二次系削除 (10%) ② 建屋免震 (5%) ③ 機器システム一体化 (5%) ④ 設計基準、設計・評価手法の合理化、高度化 (5%) ⑤ 建屋縮小化 (2~4%) ⑥ 高温、高熱効率化 (2~3%) 	

大型FBRの実用化を目指した研究開発

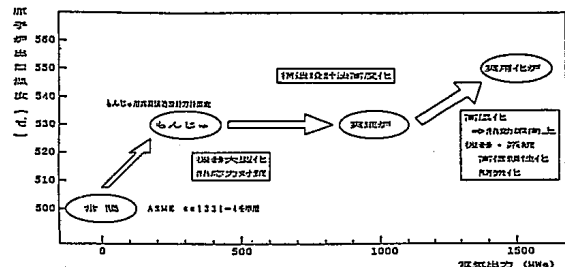
1. 高性能燃料の開発(燃焼度20万MWd/t, 線出力 480w/cm) 5. 合理的格納施設の開発



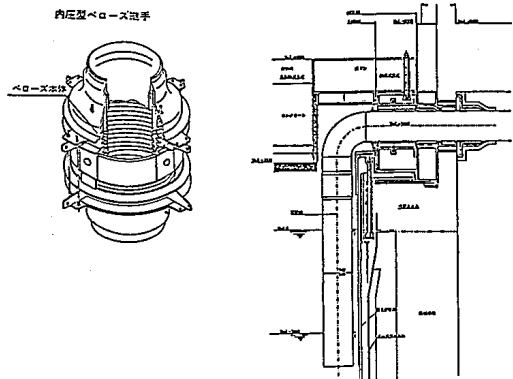
2. 高性能大型炉心の開発(非均質炉心、長期サイクル炉心)



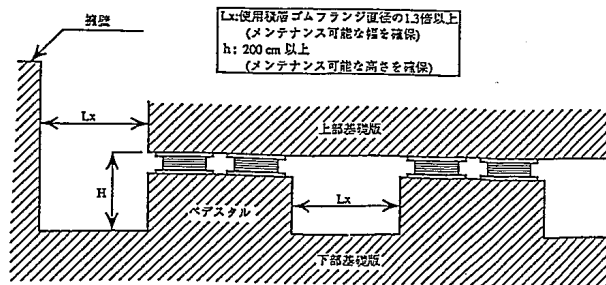
3. プラントの高温度化(原子炉出口温度 550°C)



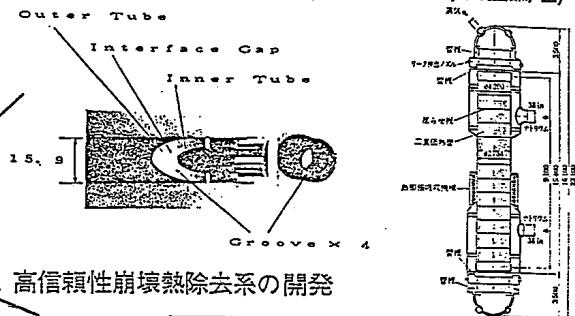
4. 配管・機器の合理化・高信頼化(冷却系配管の簡素化)



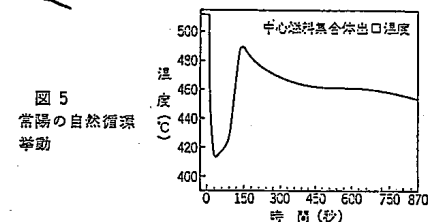
6. 免震構造の開発



7. 2次系削除システムの開発(高信頼性SG, 安全論理)

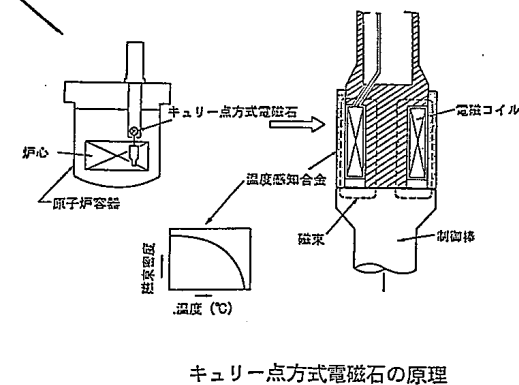


8. 高信頼性崩壊熱除去系の開発



9. 運転保守技術の高度化

10. 合理的な安全論理の構築 (固有安全制、パッシブセーフティ)



実用化のための研究開発課題と施設

開発課題	開発目標	使用施設	
		既設施設	新設施設
高性能燃料の開発	燃焼度 20万MWD/T 線出力 480 W/cm	燃料研究開発施設 「常陽」 (FFTF, FBR-II) (フェニックス)	「常陽」MK-III FMF増設 (「もんじゅ」)
高性能大型炉心の開発	均質、軸非均質炉心、 高燃焼度・長期サイクル 炉心	「常陽」 (FCA) (ZPPR, マルカ炉・ TSF)	(「もんじゅ」)
プラントの高温化	原子炉出口温度 550℃	材料研究開発施設 構造研究開発施設 熱流動研究開発施設 「常陽」 (JHTR, FFTF)	
配管・機器の合理化高 信頼化	冷却系配管系の簡素化 主要構成機器の合理化	機器研究開発施設 材料研究開発施設 構造研究開発施設 熱流動研究開発施設	「常陽」MK-III
合理的格納施設の開発	低耐圧建家一体型格納施設	安全性研究開発施設	高速炉安全性試験炉
免震構造の開発	床応答低減 機器免震 建家免震	構造研究開発施設	
2次系削除システムの 開発	2重管SGの開発 安全設計論理の構築	安全性研究開発施設 機器研究開発施設 熱流動研究開発施設	「常陽」MK-III
高信頼性崩壊熱除去系 の開発	自然循環熱除去系の確立	熱流動研究開発施設	
運転保守技術の高度化	CPの抑制、除去技術の 開発 運転保守支援システムの 開発 自律制御、自動化	機器研究開発施設 「常陽」	「常陽」MK-III (「もんじゅ」)

常陽MK-III計画

1. 照射性能の向上
[高性能炉心燃料の開発のスピードアップ等]
2. 新技術の実証
[自己作動方式制御棒駆動機構等]
3. 新概念システムの実証
[2次系削除システムの実証等]

FBR安全性試験炉の計画 (SERAPH計画)

1. 燃料ピン破損しきい値の決定
[安全裕度を確認し,合理的設計に反映等]
2. 局所事故の検出性実証
[早期検出等]
3. シビアアクシデント終息性の評価
[ATWSシビアアクシデント等]
4. ソースタームに係わるF.P.挙動の解明
[F.P.の放出挙動等]

大型炉の設計研究 (炉心・燃料設計研究)

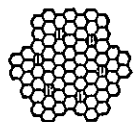
- 1.高性能大型炉心の検討
- 2.高性能燃料の検討
- 3.高性能制御棒・遮蔽体の検討

平成2年1月16日

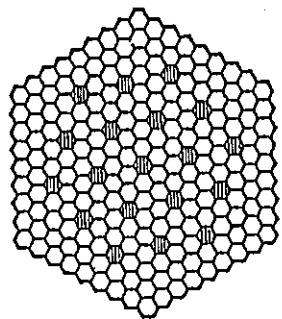
動力炉・核燃料開発事業団

高性能炉心の主要な設計目標

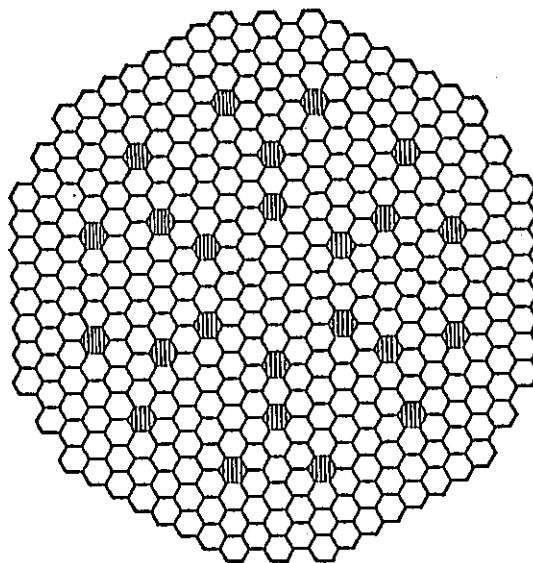
燃焼度	15万MWd/t以上
稼働率 (サイクル長)	90%以上 (2年以上)
出口温度	550°C
最大線出力	480W/cm
増殖比	1.2以上
炉心構成要素の長寿命化、軽量化	
炉心コンパクト化	



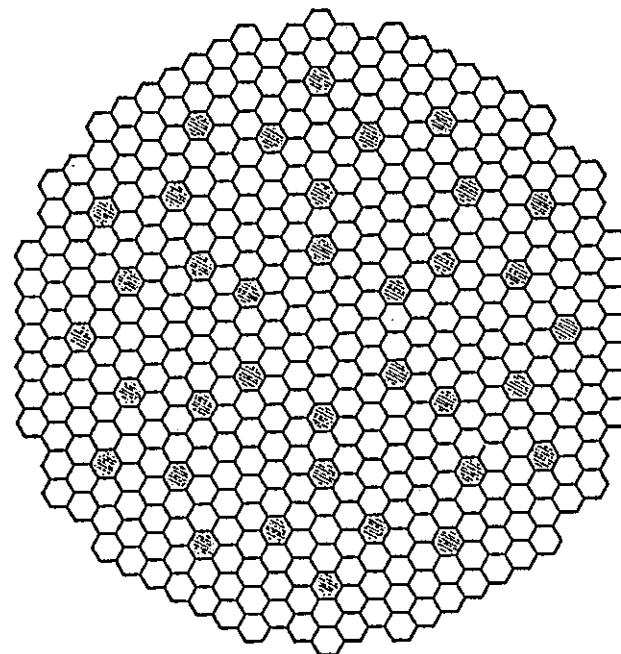
「常陽」MK-II
230ℓ



「もんじゅ」
2,300ℓ



大型炉(1000 MWe)
10,600ℓ



大型炉(1,500MWe)
16,900ℓ

炉心サイズの比較

炉心主要仕様の比較

項目	常陽MK-II	もんじゅ	100万kWe大型炉	150万kWe大型炉
出力	100MWt	280MWe	1,000MWe	1,500MWe
原子炉容器				
内径	3.6 m	7.1 m	8 m	9 m
全高	9.89 m	17.8 m	14 m	15.5 m
原子炉出・入口温度	500 / 370 °C	529 / 397 °C	530 / 375 °C	550 / 395 °C
炉心				
炉心高さ	55 cm	93 cm	100 cm	120 cm
等価直径	約0.73 m	約1.8 m	約3.68 m	約4.23 m
容積	約230 l	約2,300 l	約10,600 l	約16,900 l
被覆管				
被覆管材料	SUS316相当鋼	SUS316相当鋼	改良オーステナイト鋼	ODSフェライト鋼
外径	5.5 mm	6.5 mm	8.3 mm	9.0 mm
燃料集合体全長	2.97 m	4.2 m	3.5 m	4.5 m
最大線出力	400 w/cm	360 w/cm	420 w/cm	470 w/cm
運転サイクル	70日 × 5~8バッチ	148日 × 5バッチ	15ヶ月 × 3バッチ	24ヶ月 × 3バッチ
炉心取出平均燃焼度	約60,000 MWd/t	約80,000 MWd/t	約91,000 MWd/t	約142,000 MWd/t

燃焼度・稼働率向上の検討

燃焼度向上方策

交換バッチ数増大又はサイクル長増大

出力ミス matches 大 燃焼反応度大

稼働率向上方策

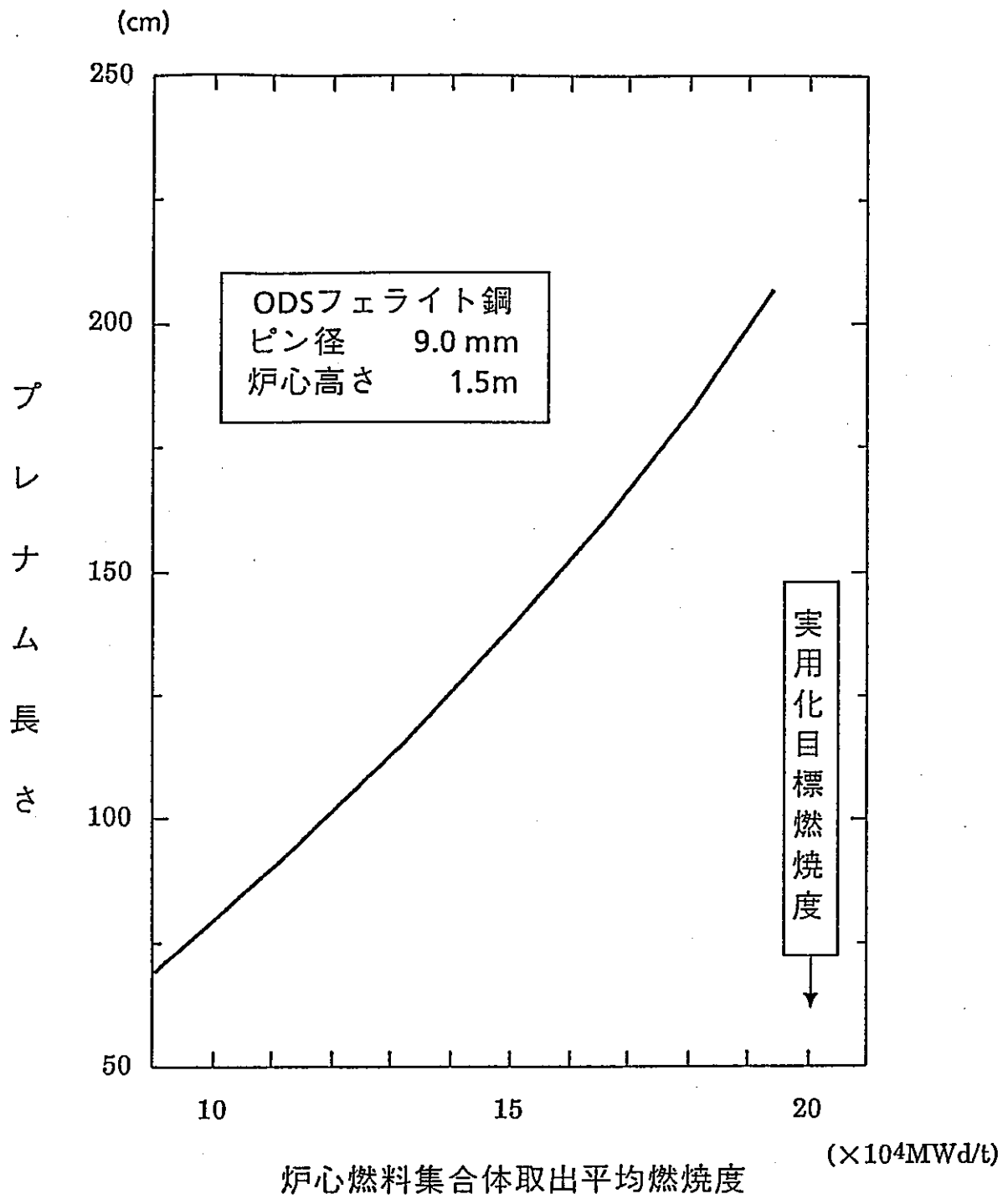
サイクル長増大

炉心への影響評価

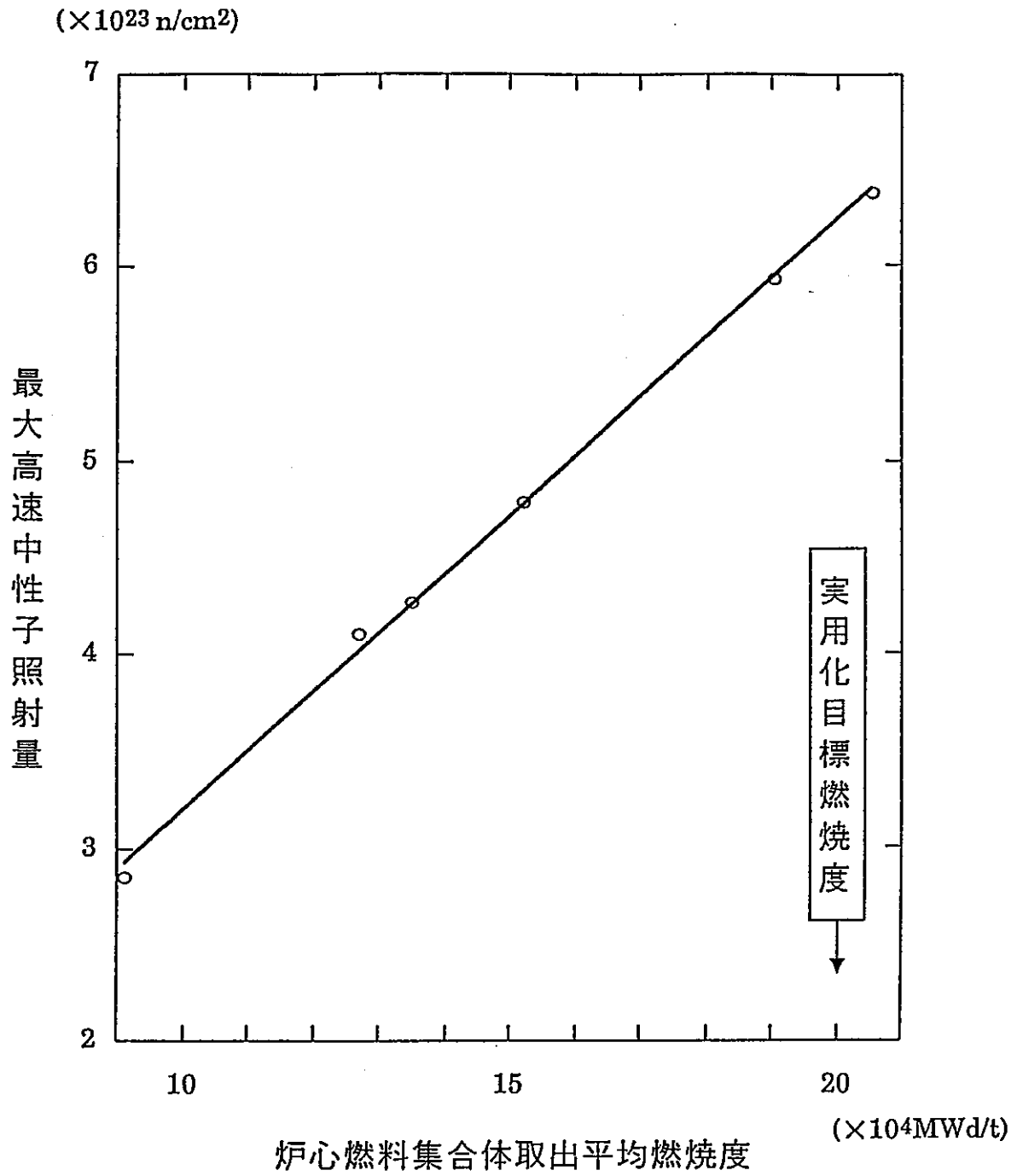
サイクル長増大 1年→2年以上

燃焼反応度増大 2% $\Delta k/k$ → 4~5% $\Delta k/k$

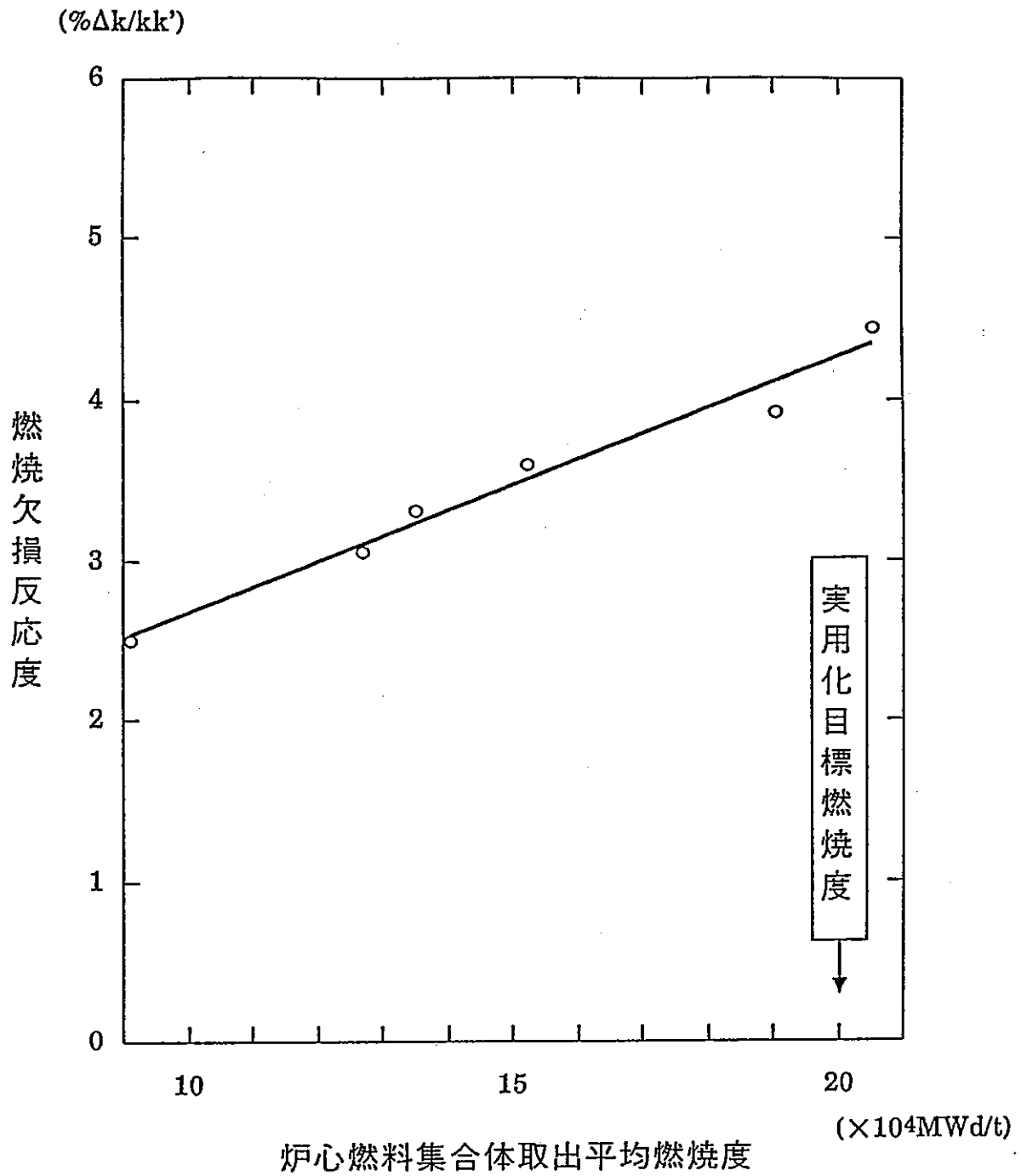
↓ (低減のため)
太径ピンの採用 8.3mm → 9mm



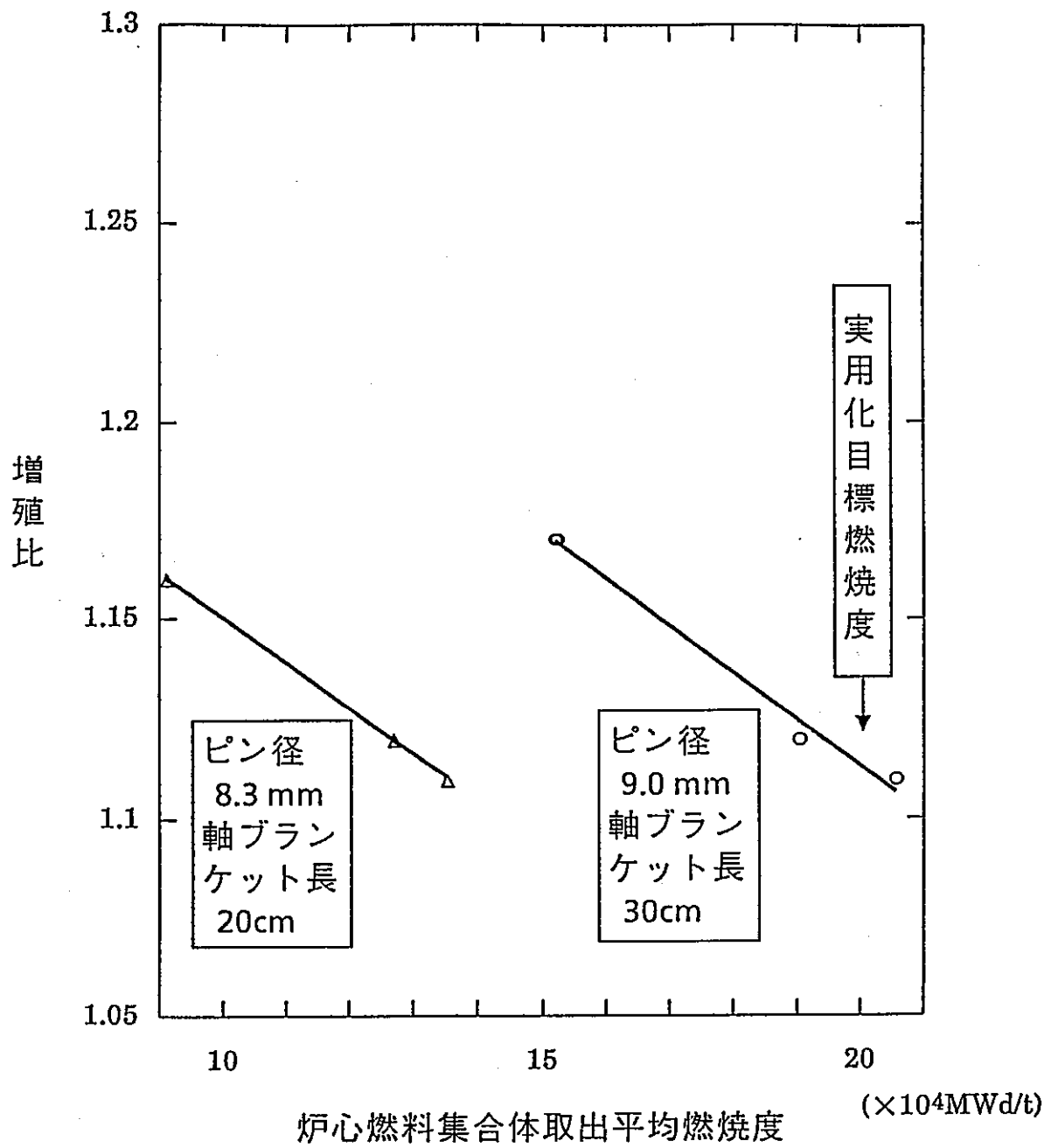
集合体取出平均燃焼度とプレナム容積



集合体取出平均燃烧度と最大高速中性子照射量



集合体取出平均燃焼度と燃燒欠損反応度



集合体取出平均燃焼度と増殖比

設計燃焼度の現状と高燃焼度化への課題

	設計燃焼度	ピーク照射量
改良オーステナイト鋼	9万MWd/t	2.9×10^{23}
ODSフェライト鋼	14万MWd/t	4.4×10^{23}
	(20万MWd/t	$\sim 6 \times 10^{23}$)

課題：照射量の低減→中性子束平坦化→炉心型式の最適化
 ガスプレナム長の短縮→被覆管温度の低減
 ベント型燃料の開発

集合体出口温度向上の検討、被覆管温度低減の検討

集合体間流量配分の適正化→CDF一定流量配分
短時間強度、クリープ強度の確保→被覆管温度700°C以下
集合体内流量配分の適正化→周辺流れ効果の抑制機構

H.S.F.低減

流量配分誤差→ 系統的誤差と統計的誤差の区分
流量領域毎の適用

流路変形効果→ 基本解析への取込み

ワイヤコンタクト効果→グリッドスペーサの評価

出力ピーキング係数の低減

出力平坦化→ 径方向多領域炉心
軸方向非均質炉心

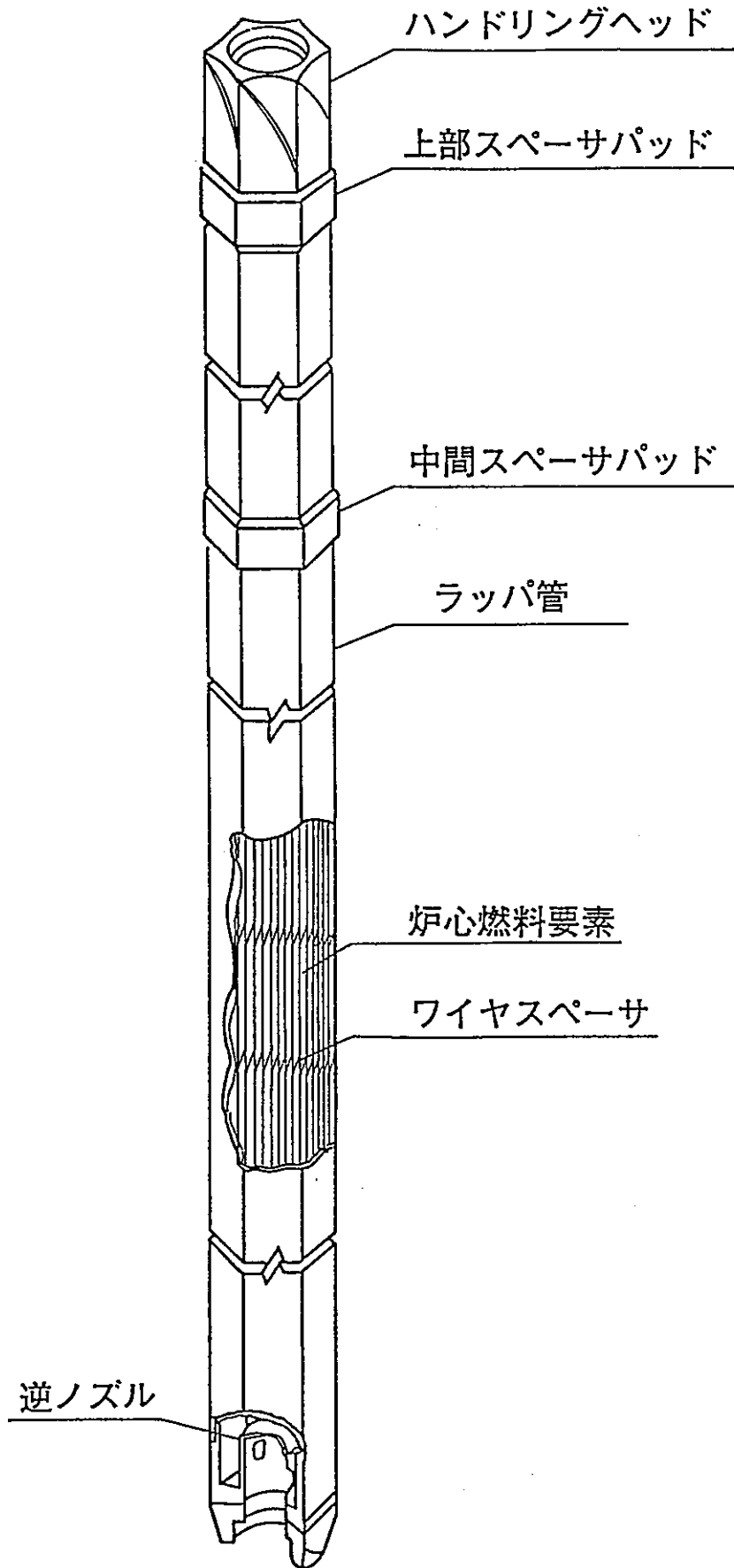
炉心コンパクト化の検討

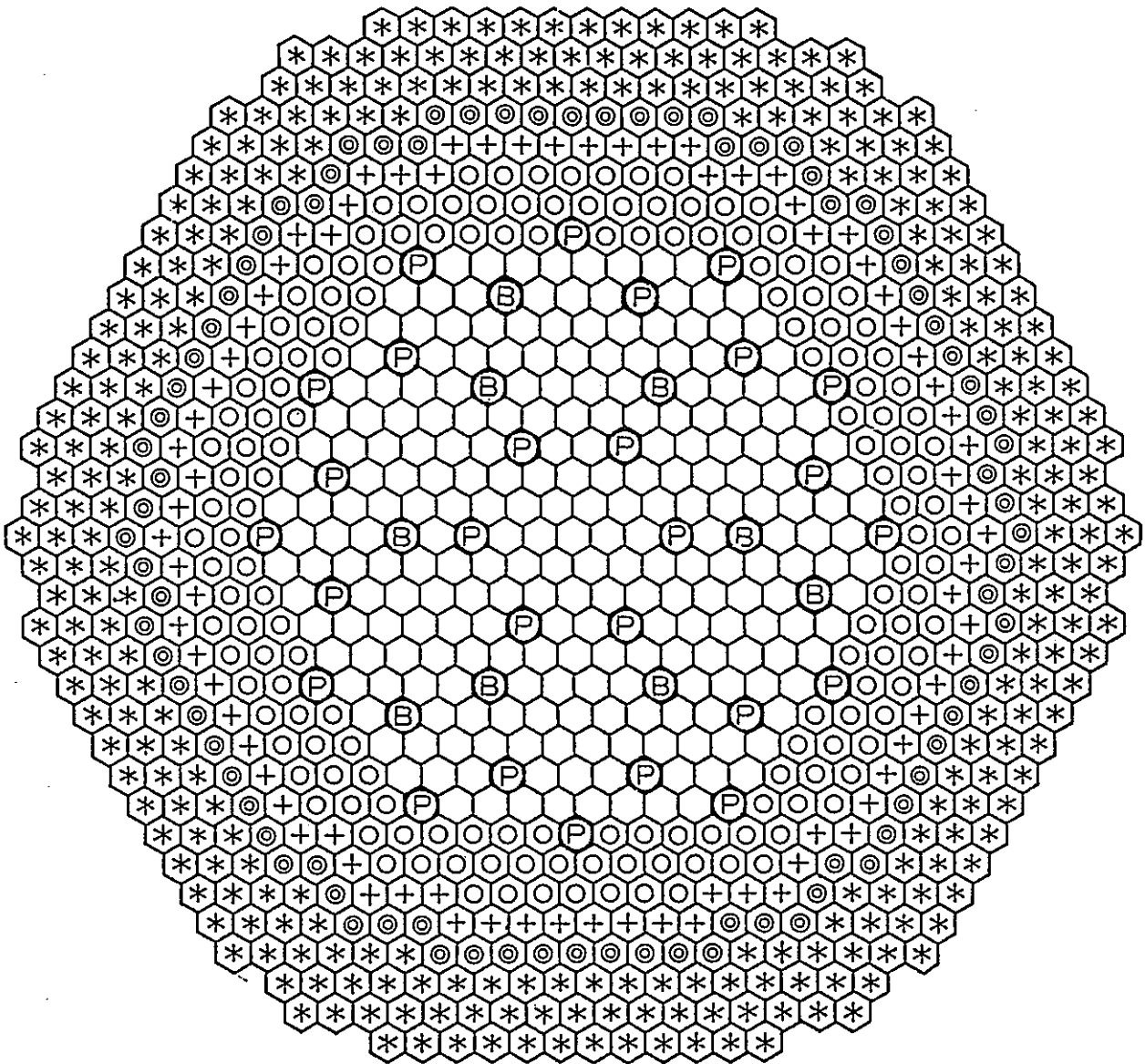
集合体長の短縮→逆ノズル集合体の採用

炉容器の縮小→3円筒型UCSに対応した制御棒配置

炉心構造物量削減→ B₄C遮蔽体の採用
炉心拘束棒を削除した自立型炉心

課題：逆ノズル集合体の構造健全性→ 地震時挙動
炉心変形挙動





○	内側炉心	241本
⊙	外側炉心	162本
P	主炉停止系制御棒	27本
B	後備炉停止系制御棒	9本
+	半径方向ブランケット	78本
⊙	中性子遮蔽体 (SUS)	84本
*	中性子遮蔽体 (B4C)	288本

合 計 889本

150万kWeプラントの炉心構成及び制御棒配置

出力、中性子束平坦化のための炉心型式の検討

炉心選定の考え方

出力平坦化→時間的・空間的な変化が小さいこと

中性子束平坦化→空間的な変化が小さいこと

中性子照射量、ピーク出力変動量を最適化する炉心の選定

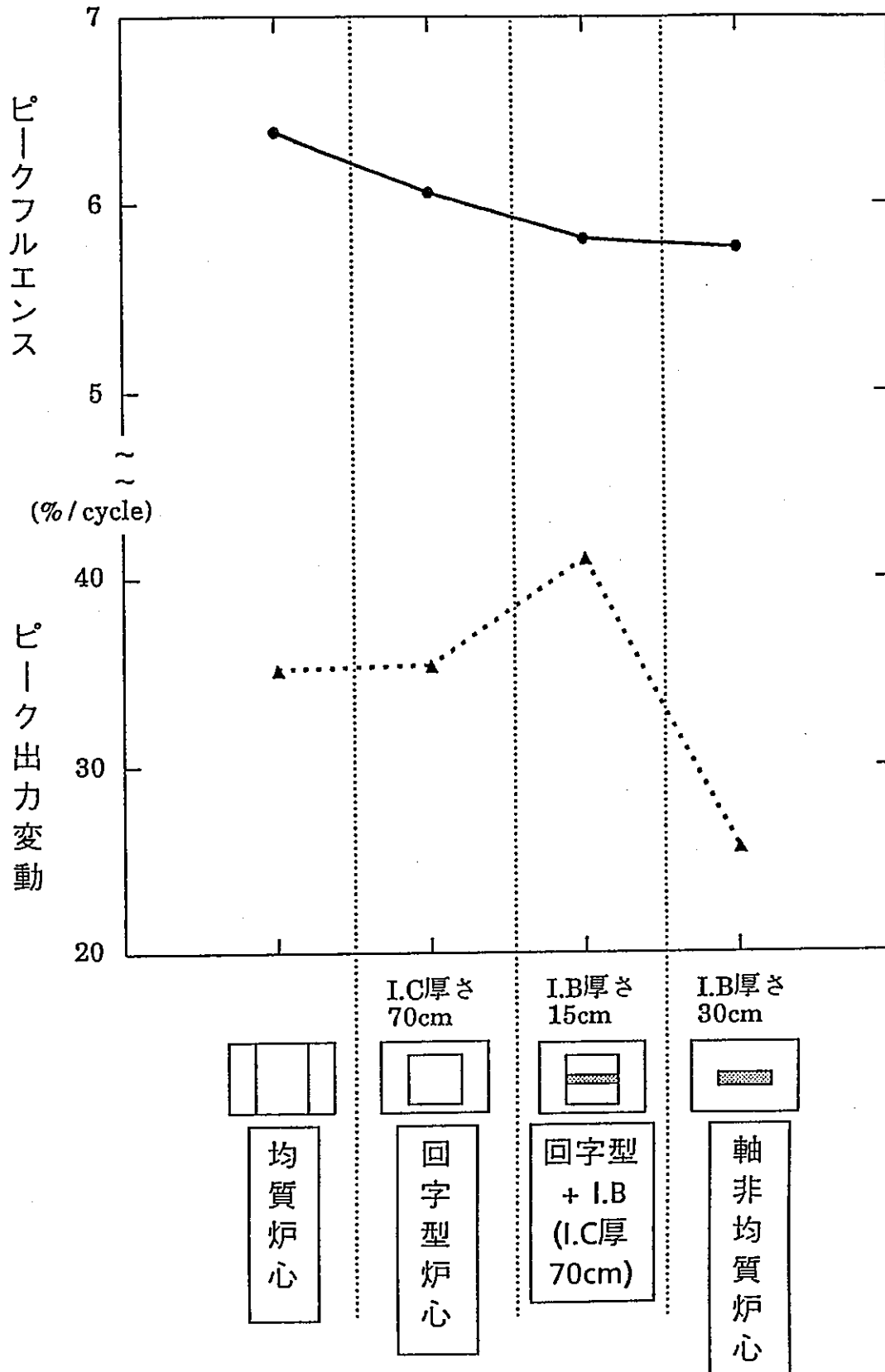
↓
軸非均質炉心

課題：軸非均質炉心の適正化

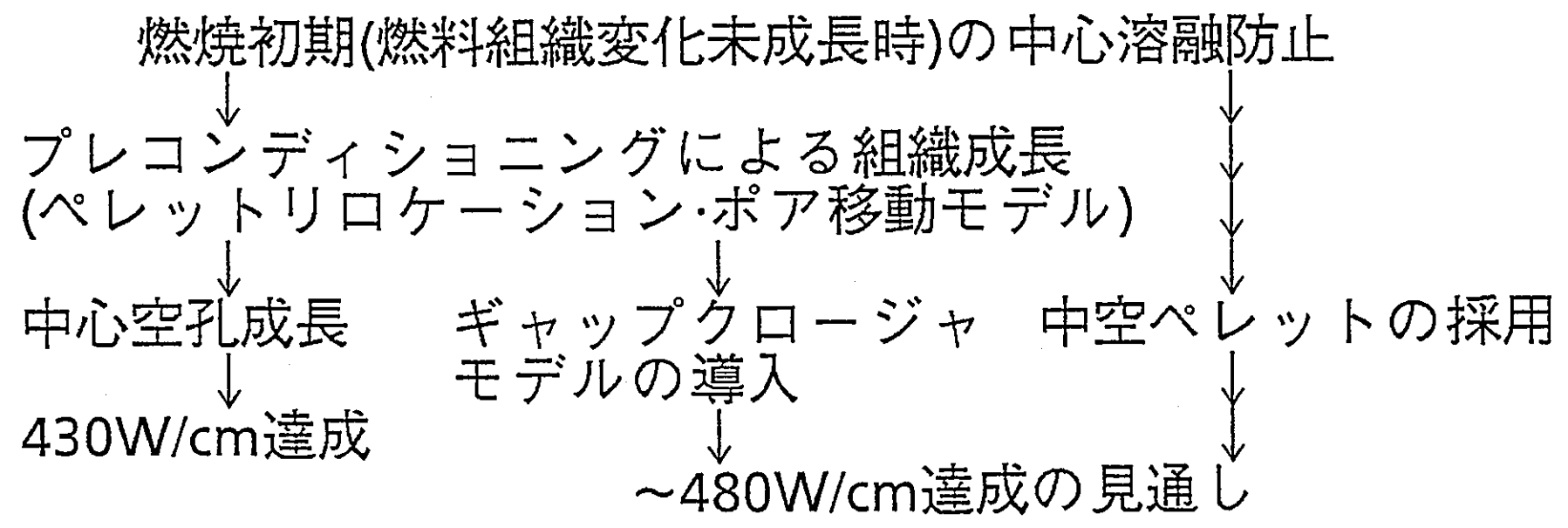
ブランケット出力変動の抑制→ 集合体シャフリング
可変流調機構

電気出力	: 150万kWe
集合体取出平均燃焼度	: 20万MWd/t
運転サイクル長	: 26ヶ月×4バッチ
燃料ピン径	: 9mm
炉心高さ	: 1.2m

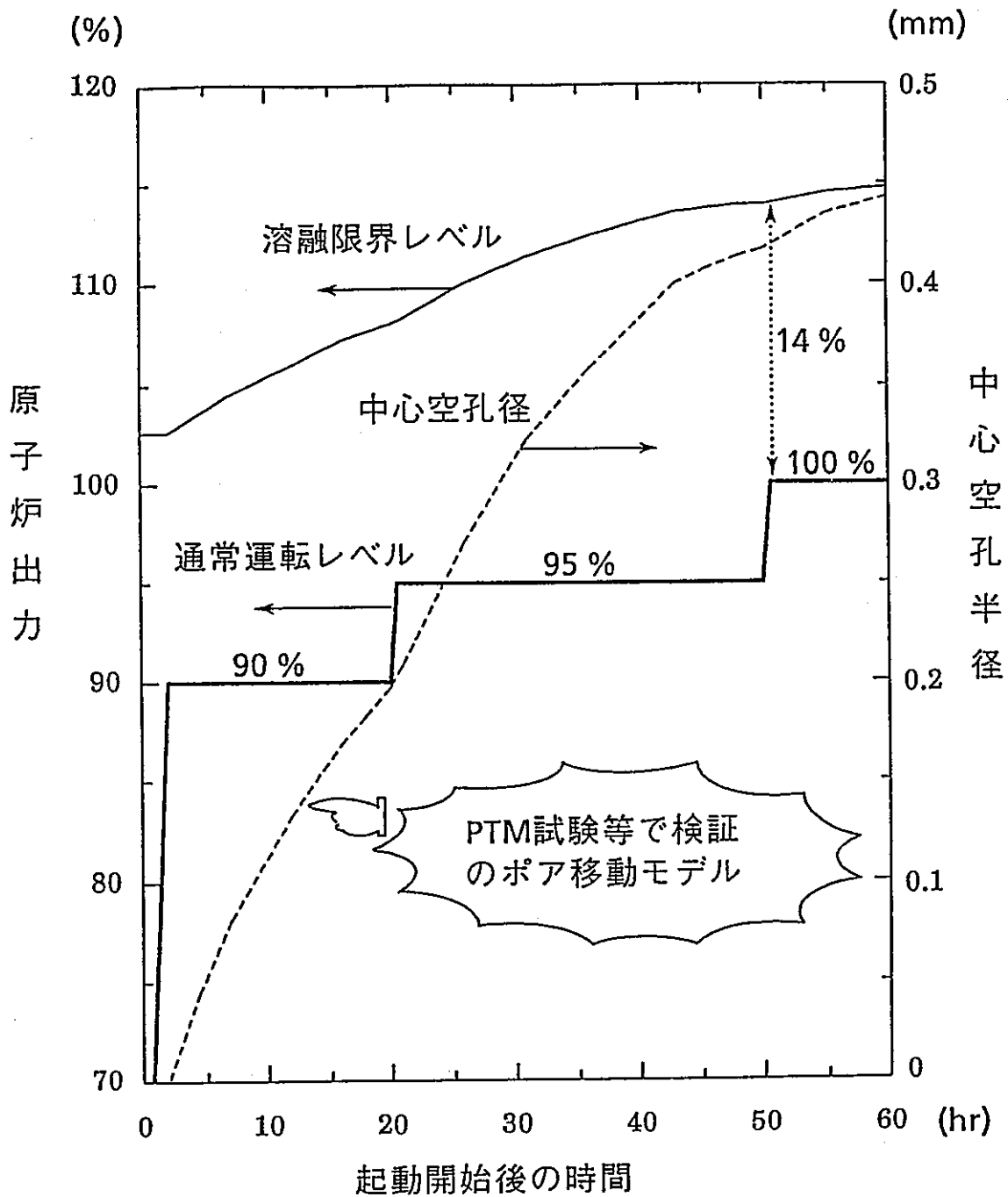
($\times 10^{23}n/cm^2$)



許容最大線出力の評価

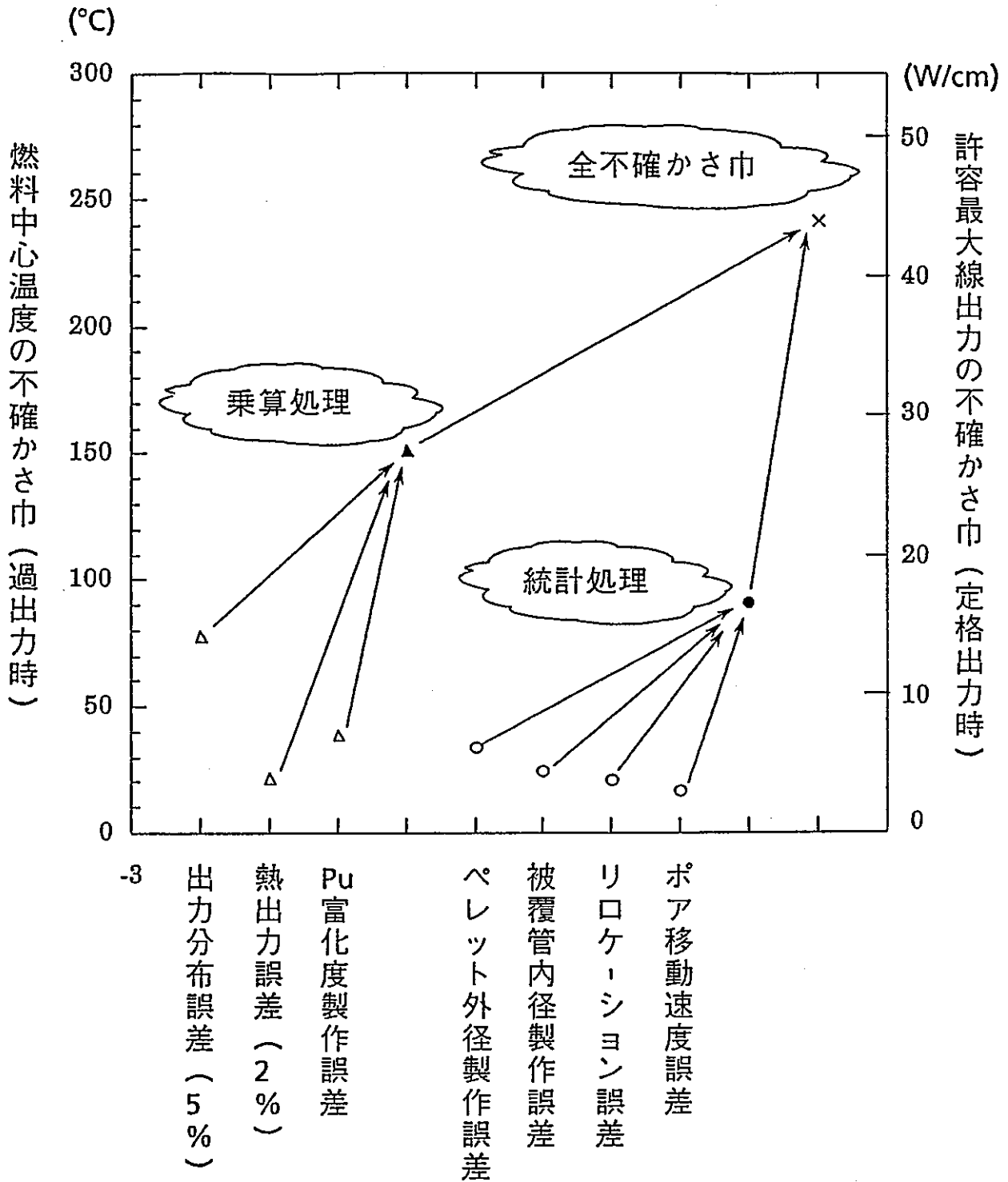


- 課題：
- ギャップクロージャ現象の解明
 - 高燃焼度時の挙動解明
 - 中空ペレットの照射挙動把握

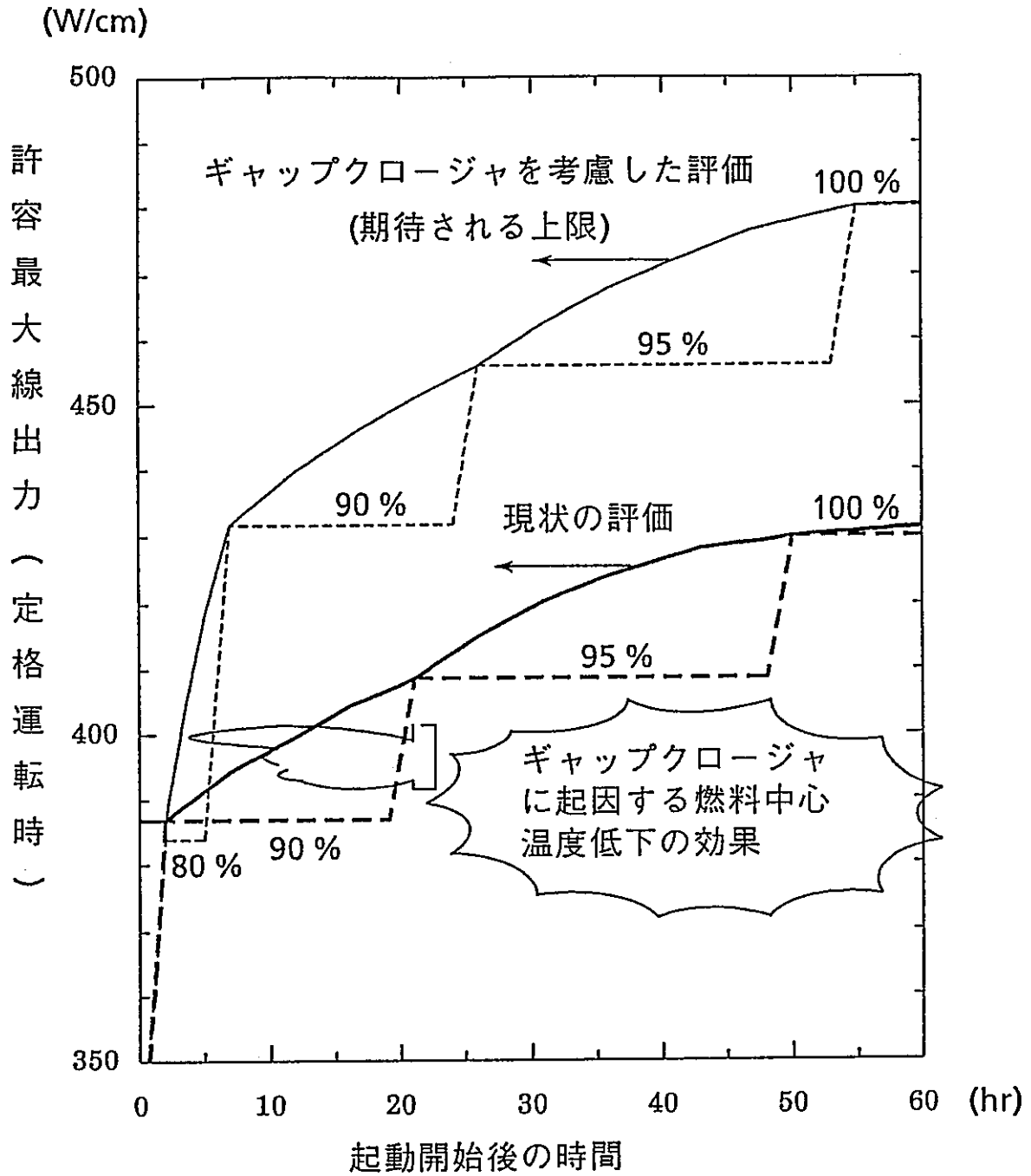


430 W/cmを達成するためのプレコンディショニング運転方法

(上記ポア移動モデルの他に、リロケーションモデルを組込んだ
 燃焼初期用燃料中心温度評価コードSIFTを用いた検討結果)

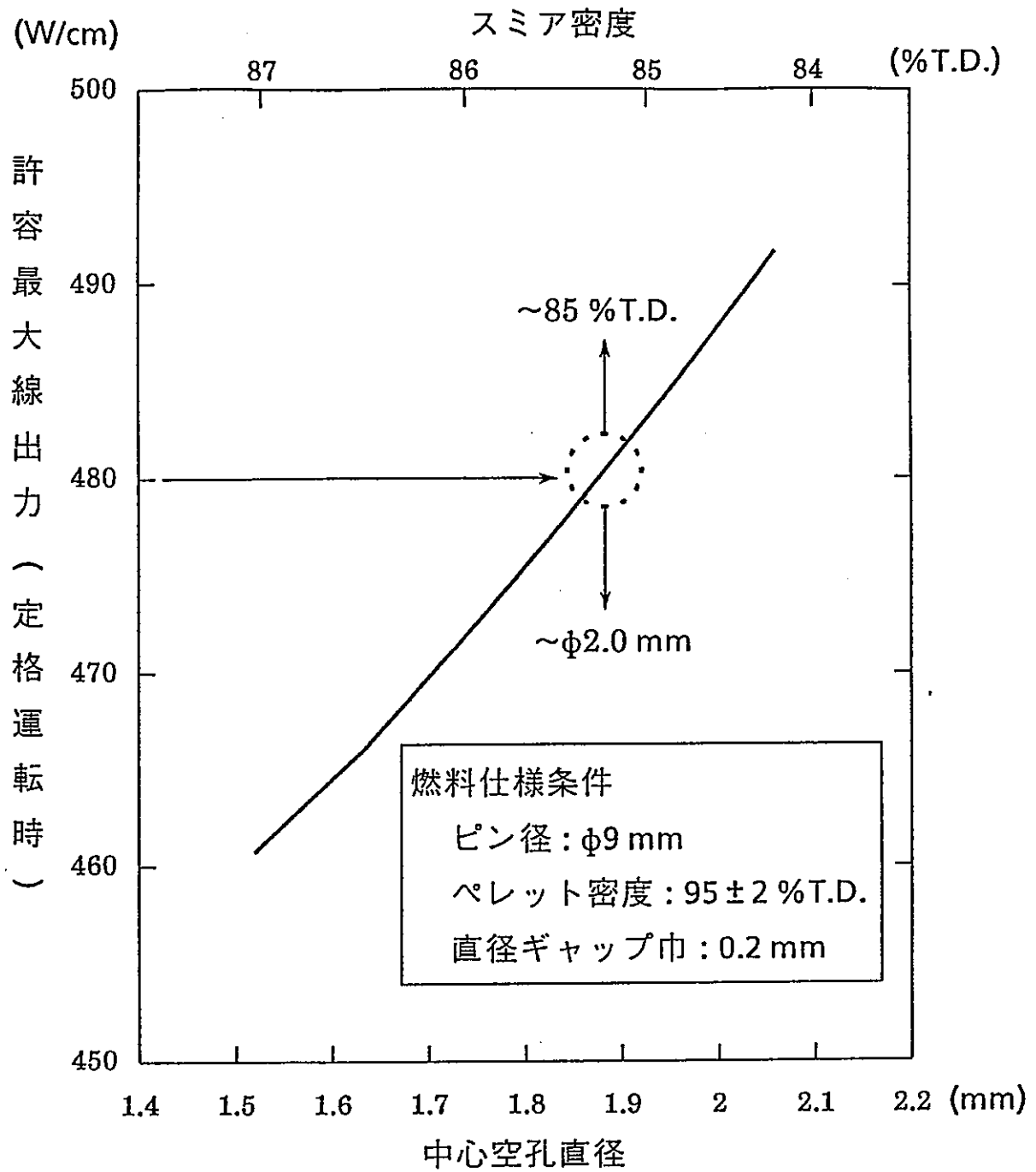


燃料中心温度および許容最大線出力の不確かさ
(プレコンディショニング完了時点)



中実ペレットでの480 W/cmの実現見通し

(実線 ; 許容最大線出力、破線 ; プレコンディショニング運転方法)



中空ペレットでの480 W/cmの実現見通し

(プレコンディショニング運転不要)

燃料寿命限界判断因子の評価

- CDF 燃焼度と被覆管温度、肉厚、ガスプレナム長の関係
- BDI 燃焼度とピン径、ワイヤ径、肉厚の関係
- DDI 燃焼度とダクト肉厚の関係

改良オーステナイト鋼

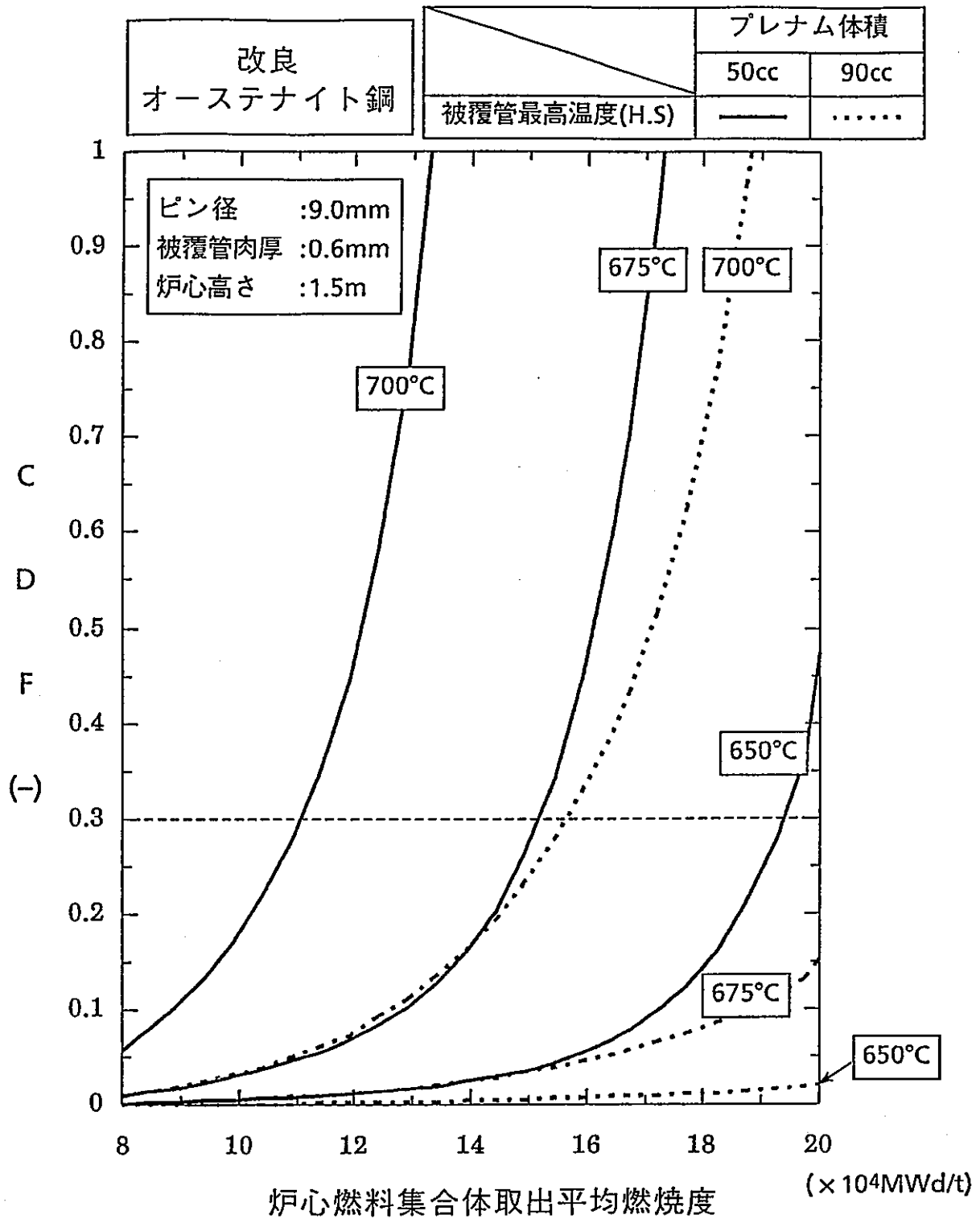
BDIが制限因子(フェライト鋼ダクトの場合)

DDI、湾曲が制限因子(改良オーステナイト鋼ダクトの場合)

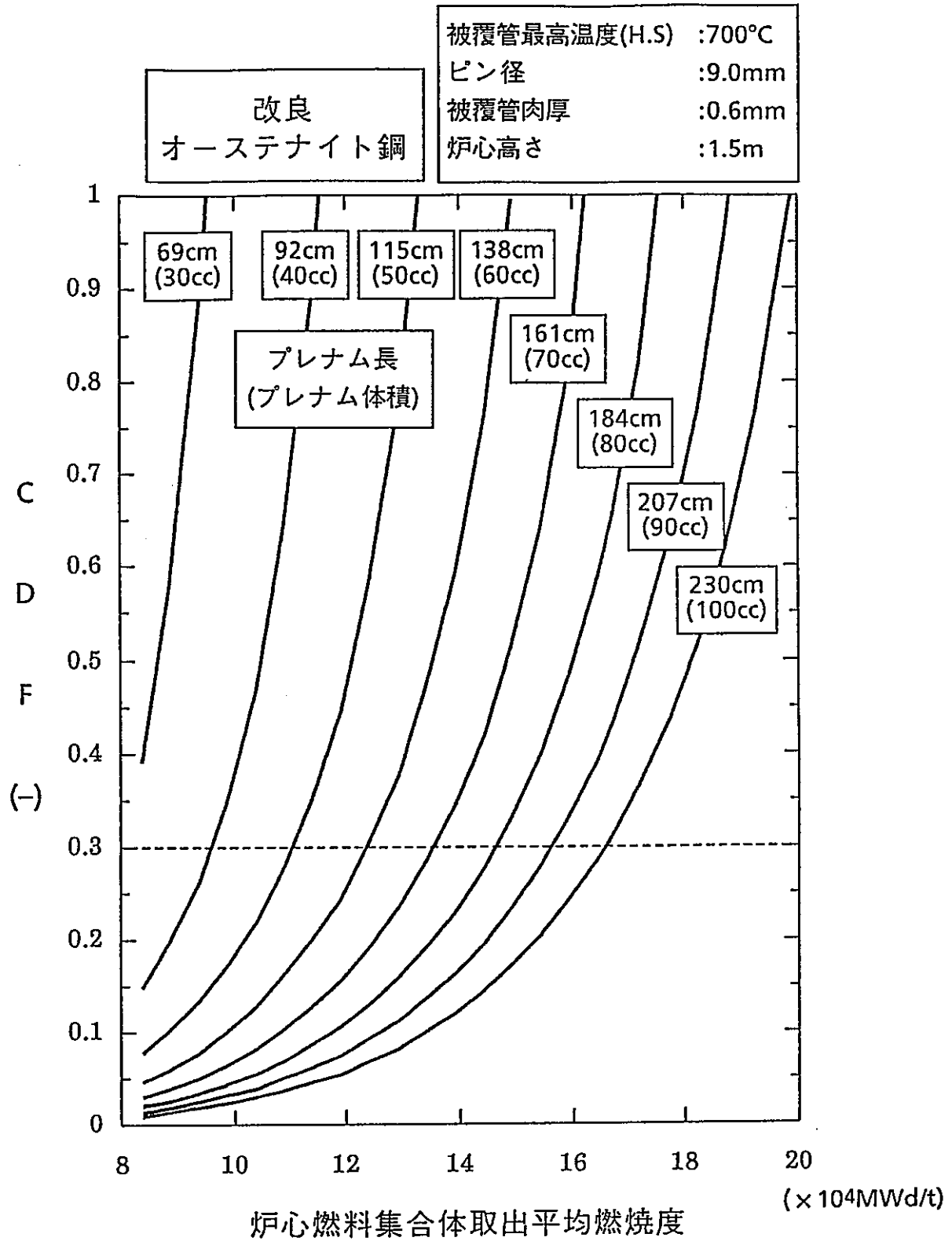
ODSフェライト鋼

CDFが制限因子、PCMIについては別途評価必要

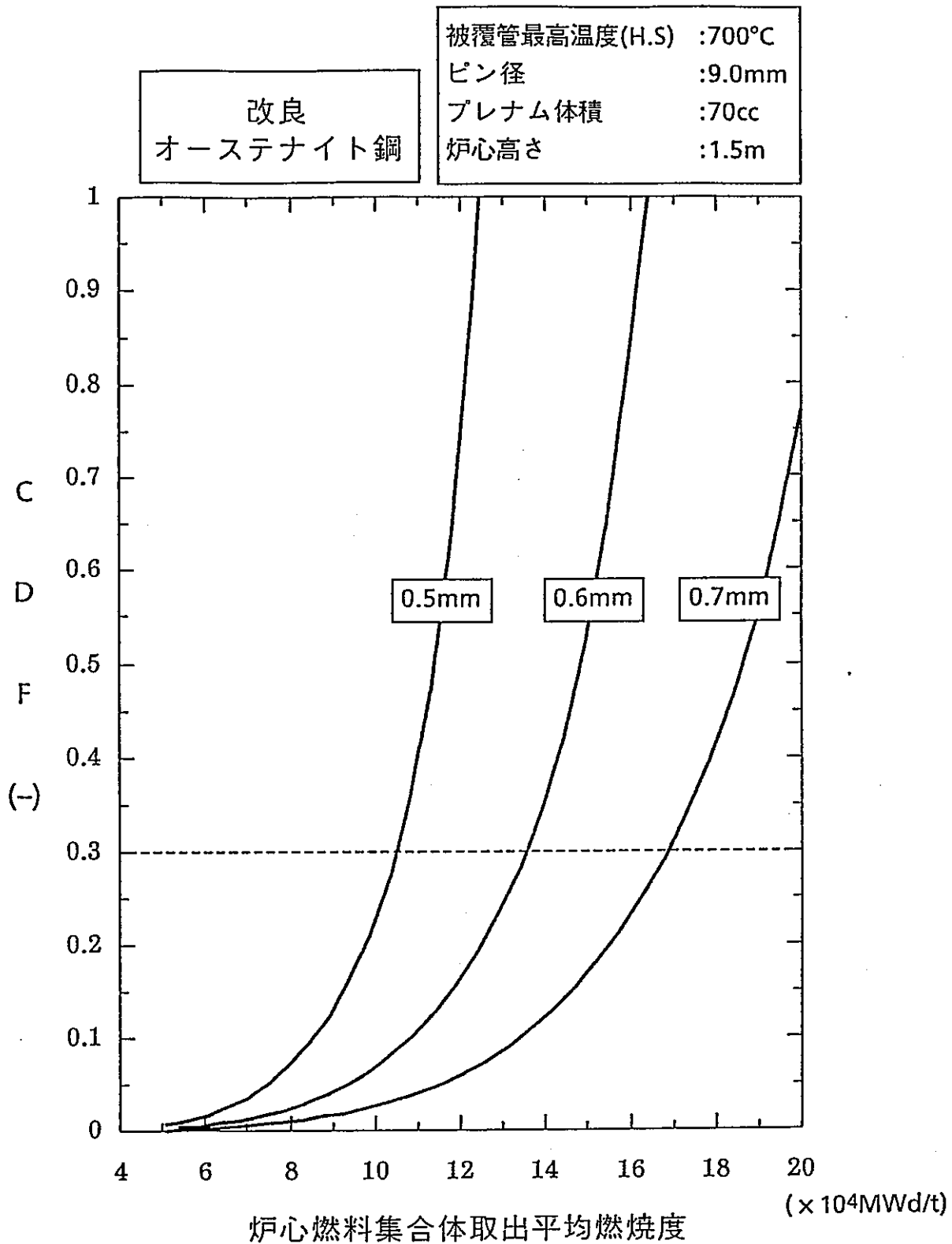
課題： 高燃焼度ペレットの挙動解析、検証
(PCMI、高密度ペレットのスエリング挙動)
設計用物性式、基準の合理化



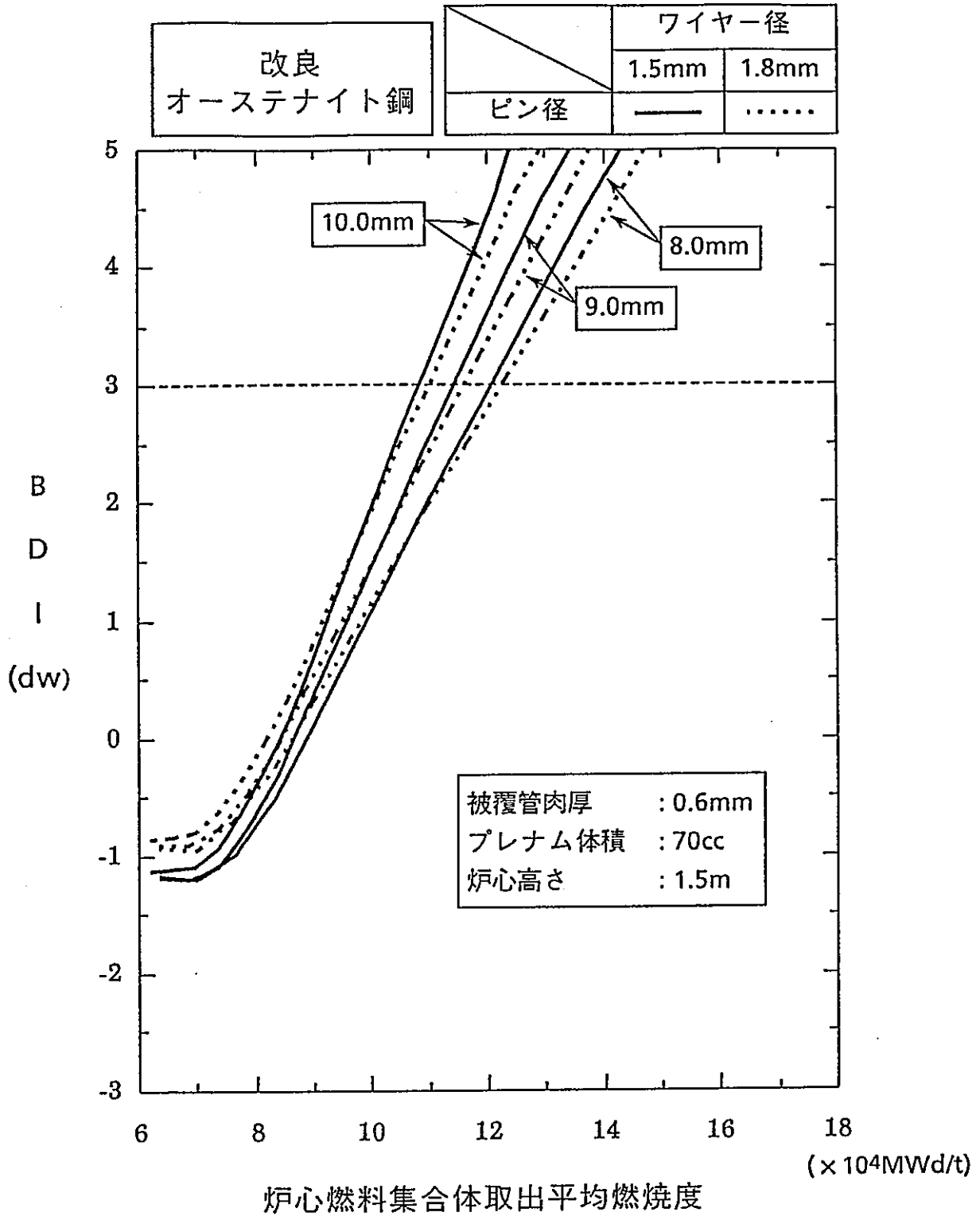
集合体取出平均燃焼度とCDF
(被覆管温度依存性)



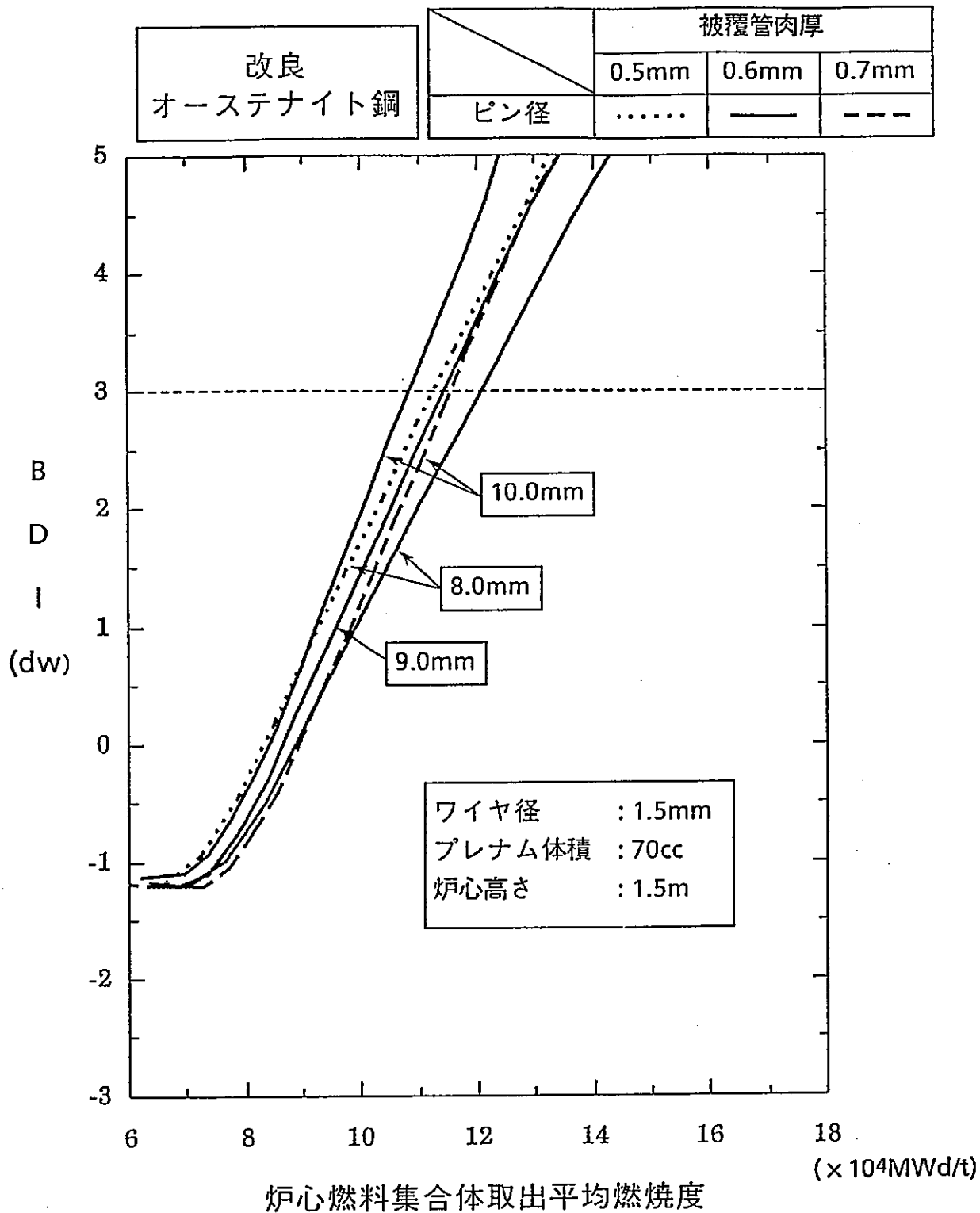
集合体取出平均燃焼度とCDF
(プレナム体積依存性)



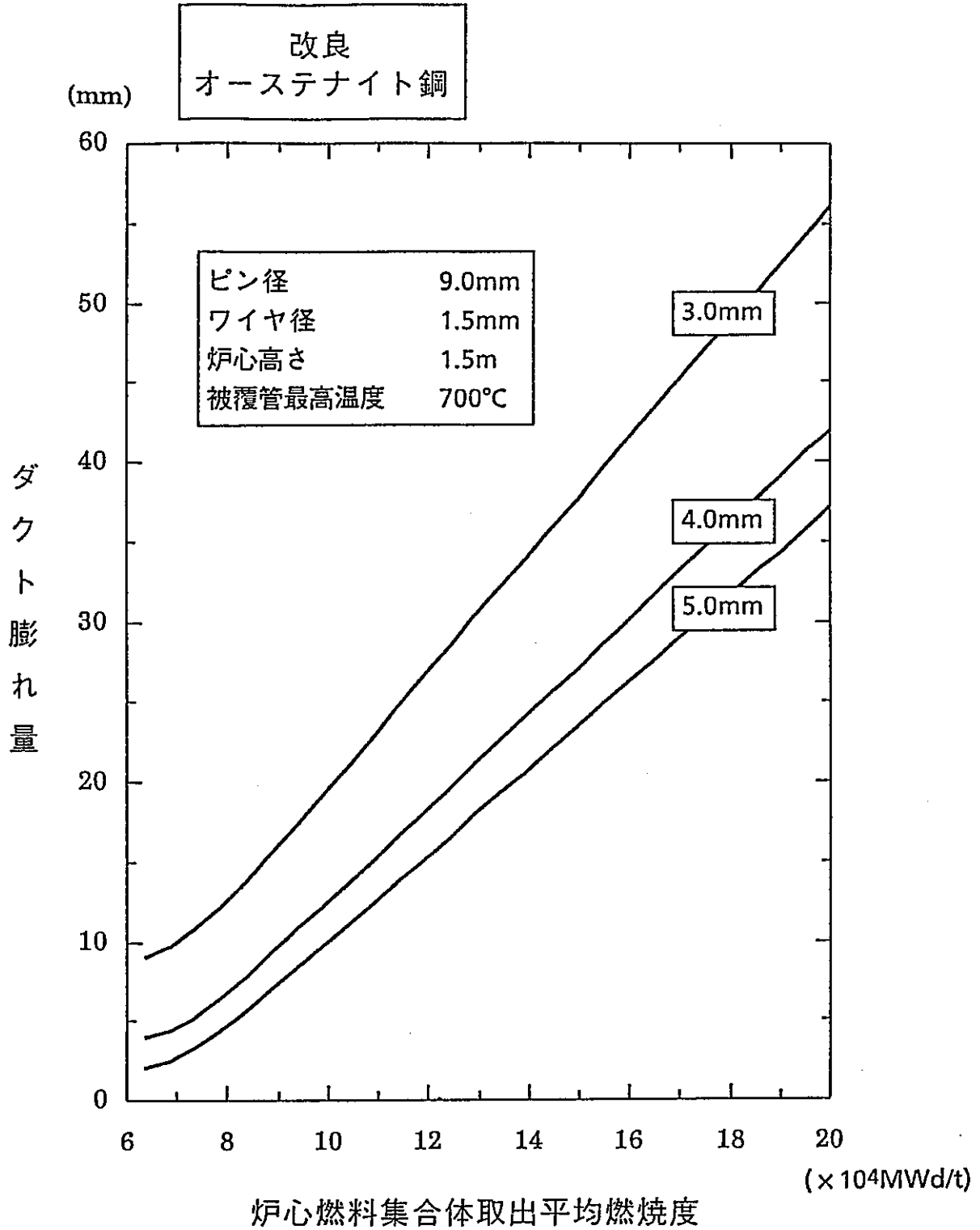
集合体取出平均燃焼度とCDF
(被覆管肉厚依存性)



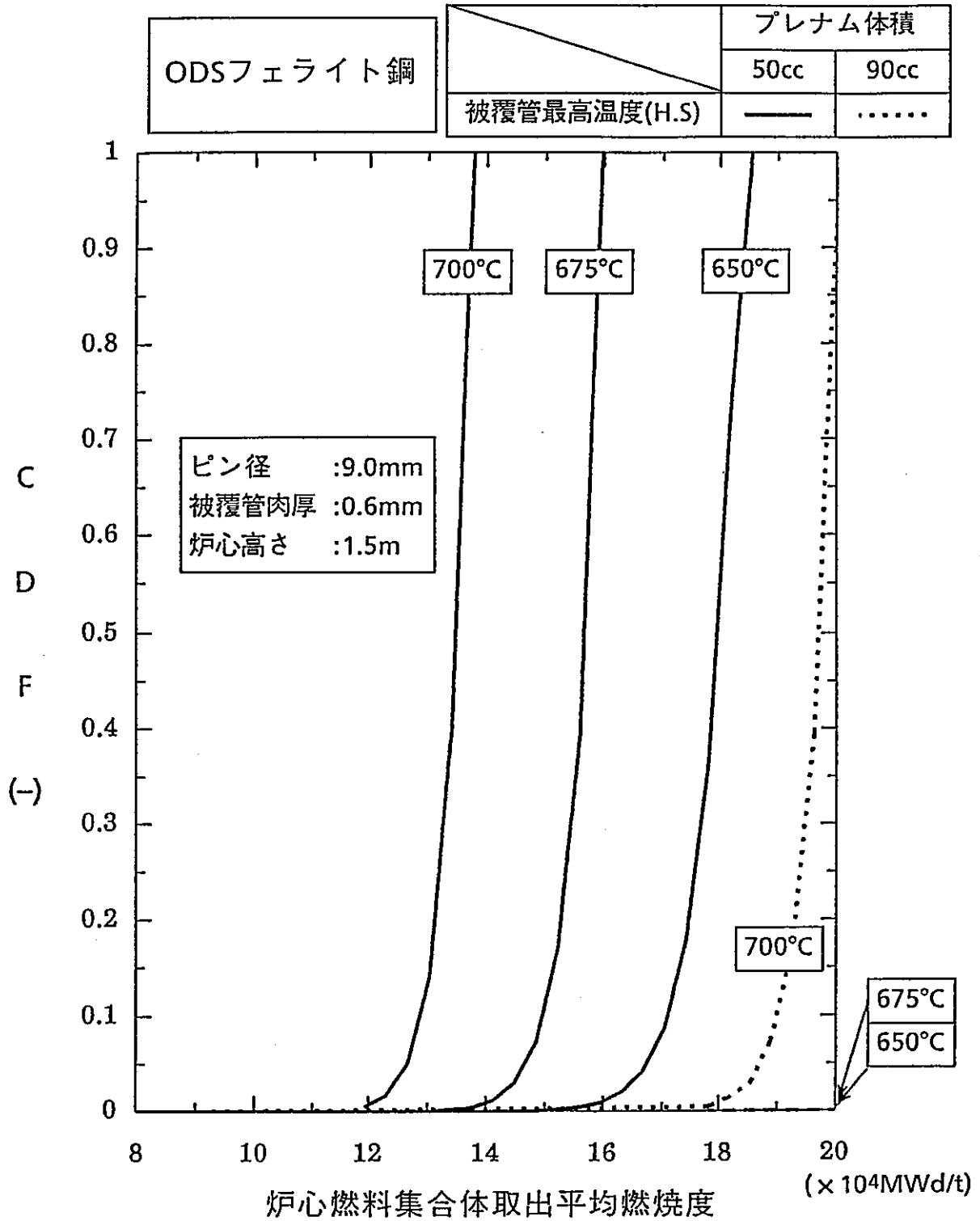
炉心燃料集合体取出平均燃焼度
集合体取出平均燃焼度とBDI
 (ピン径及びワイヤ径依存性)



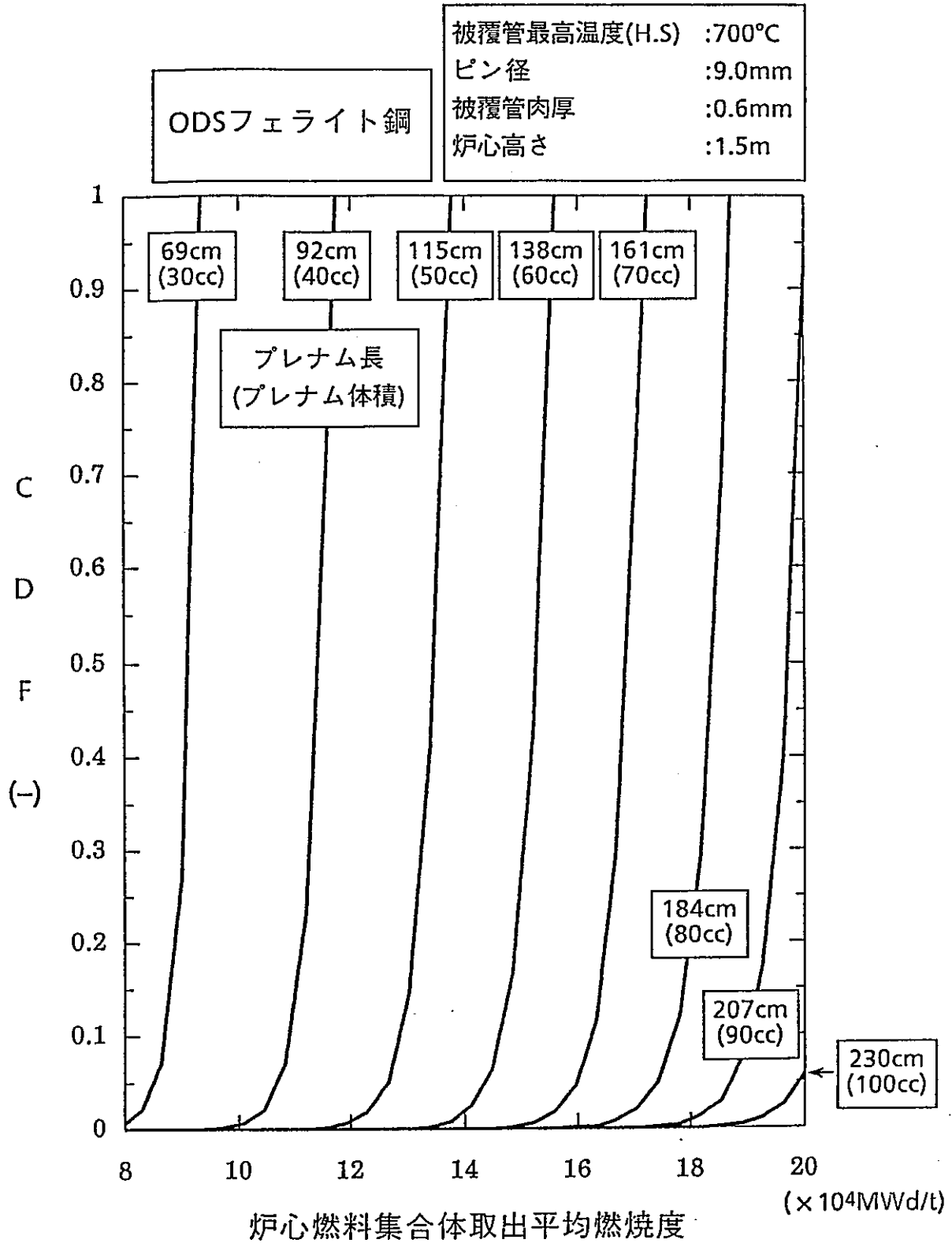
集合体取出平均燃焼度とBDI
(ピン径及び被覆管肉厚依存性)



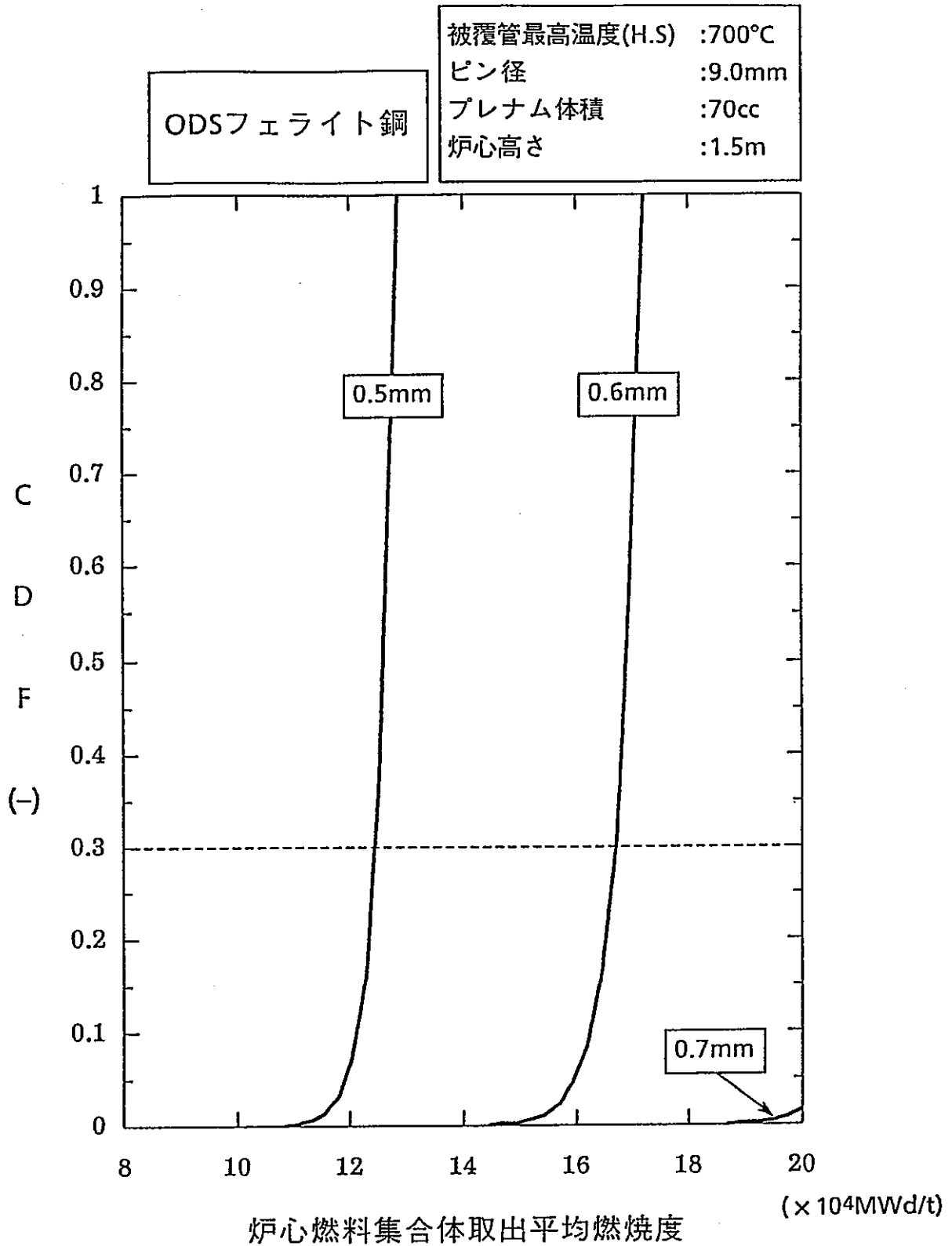
集合体取出平均燃焼度とDDI(ダクト膨れ量)
(ダクト肉厚依存性)



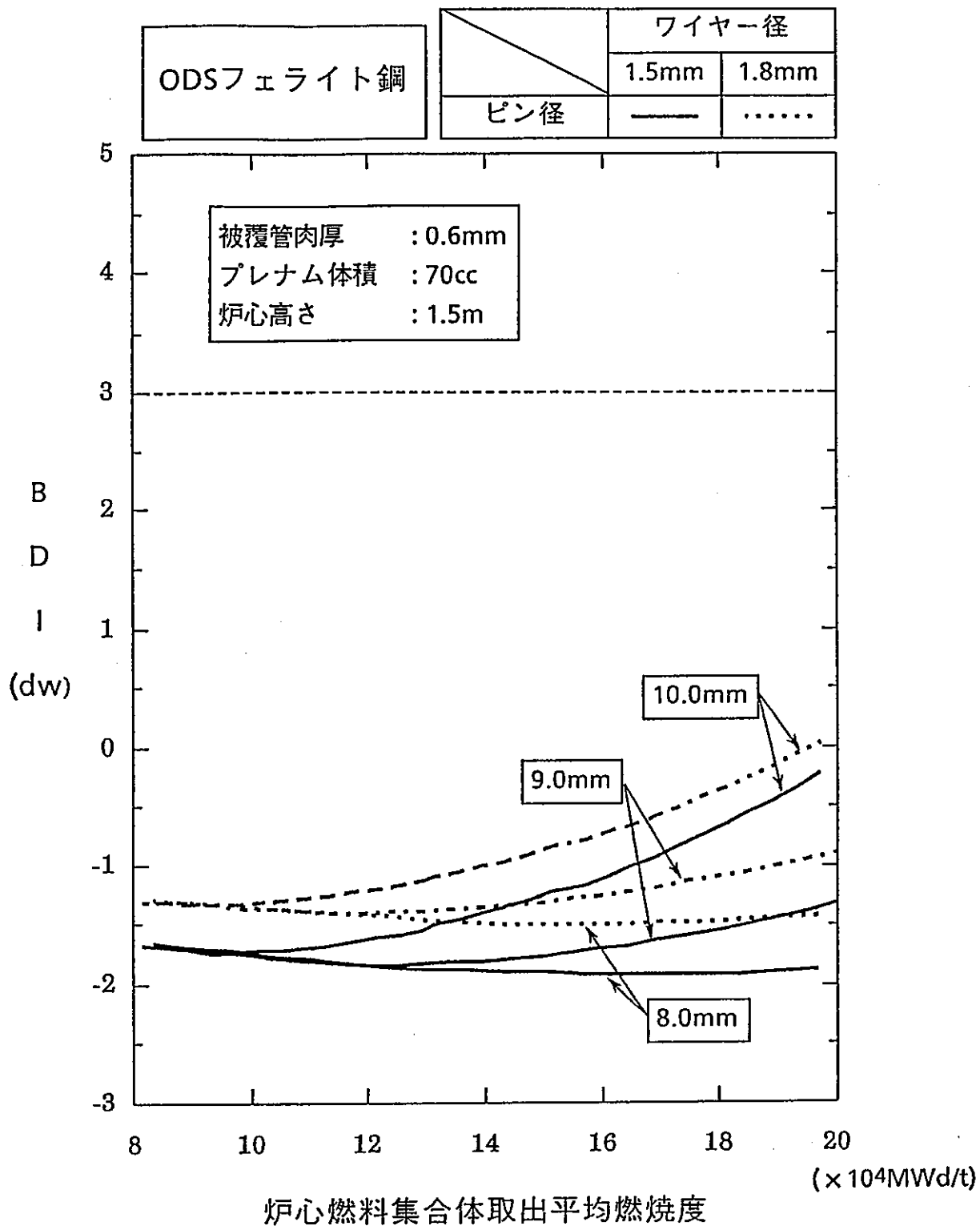
集合体取出平均燃焼度とCDF
(被覆管温度依存性)



集合体取出平均燃焼度とCDF
 (プレナム体積依存性)

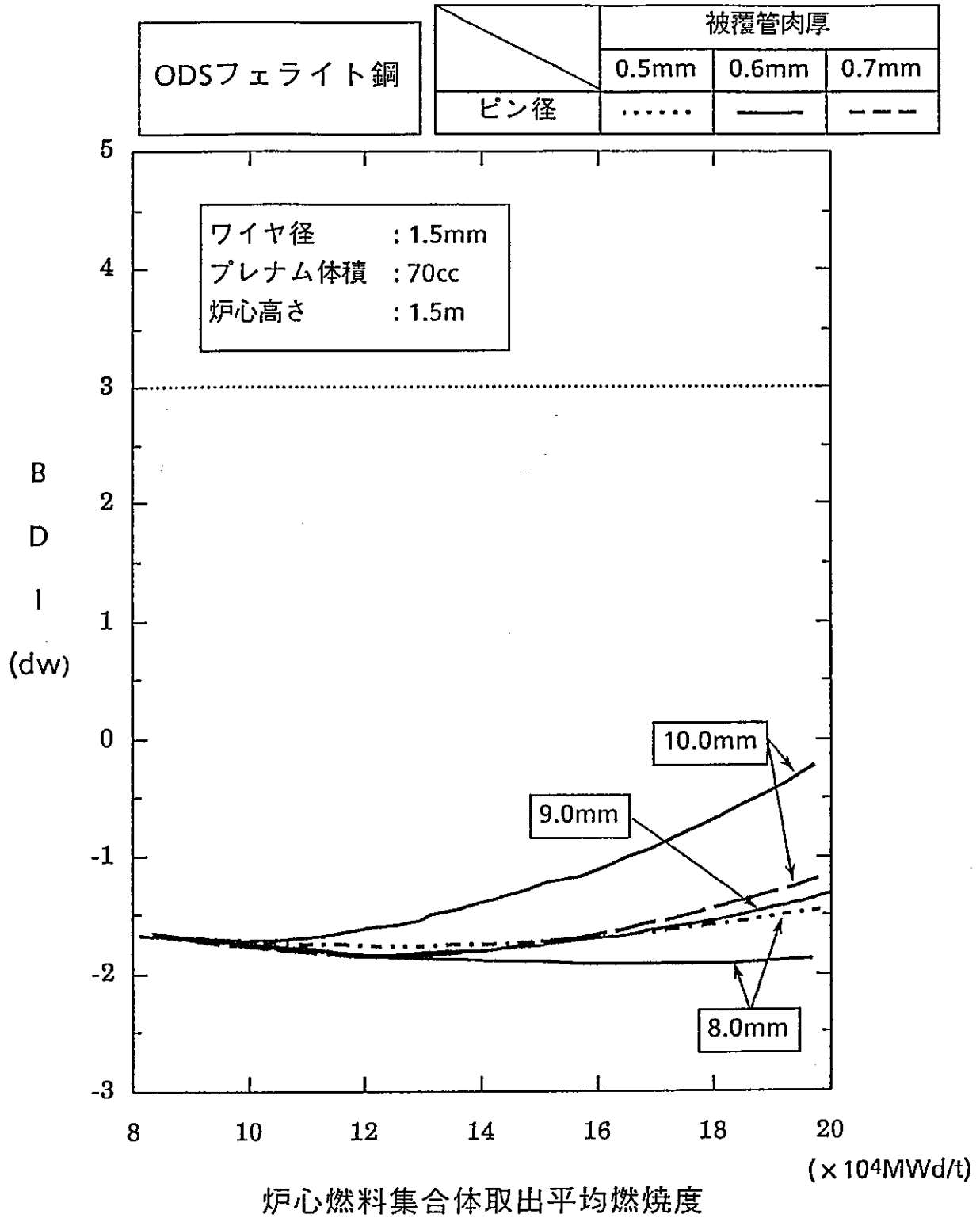


集合体取出平均燃焼度とCDF
(被覆管肉厚依存性)



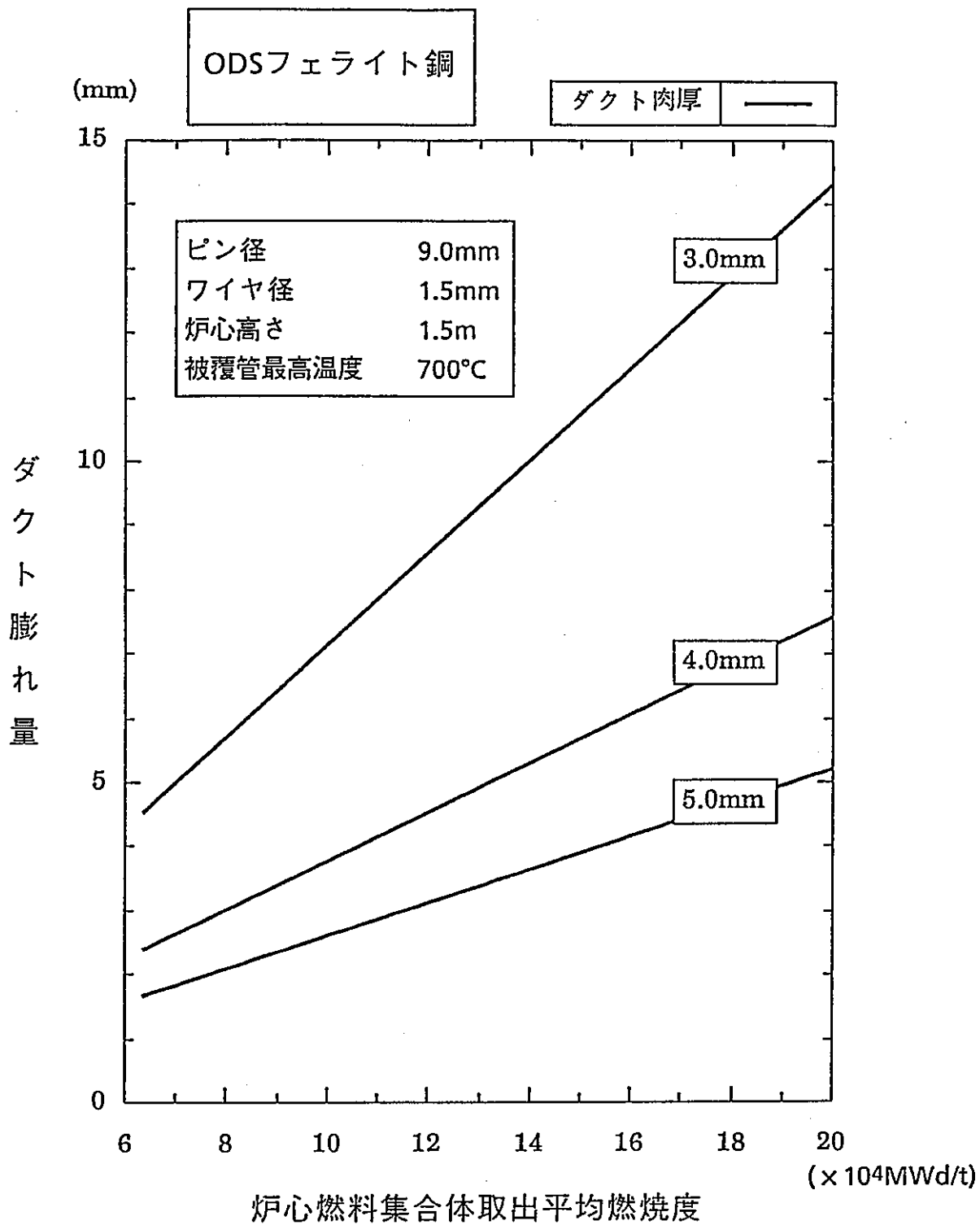
炉心燃料集合体取出平均燃焼度

集合体取出平均燃焼度とBDI
 (ピン径及びワイヤ径依存性)



炉心燃料集合体取出平均燃焼度

集合体取出平均燃焼度とBDI
 (ピン径及び被覆管肉厚依存性)



集合体取出平均燃焼度とDDI(ダクト膨れ量)
 (ダクト肉厚依存性)

高燃焼度炉心(ODS鋼)の評価

(1)炉心取出平均燃焼度

炉心取出平均燃焼度20万MWd/tは、ピン径9mmの仕様を前提とすると、

運転サイクル26ヶ月×4バッチ

で達成される。

(2)燃料健全性

炉心取出平均燃焼度20万MWd/tの炉心の成立性の鍵は燃料健全性にあり、特に、被覆管CDFとPCMI挙動にある。

(3)被覆管最高温度

被覆管CDF値は被覆管温度に強く依存し、集合体長4.5m(炉心高さ1.2m)で、炉心取出平均燃焼度20万MWd/tを成立させるためには、

被覆管最高温度を690°C以下

にする必要がある。

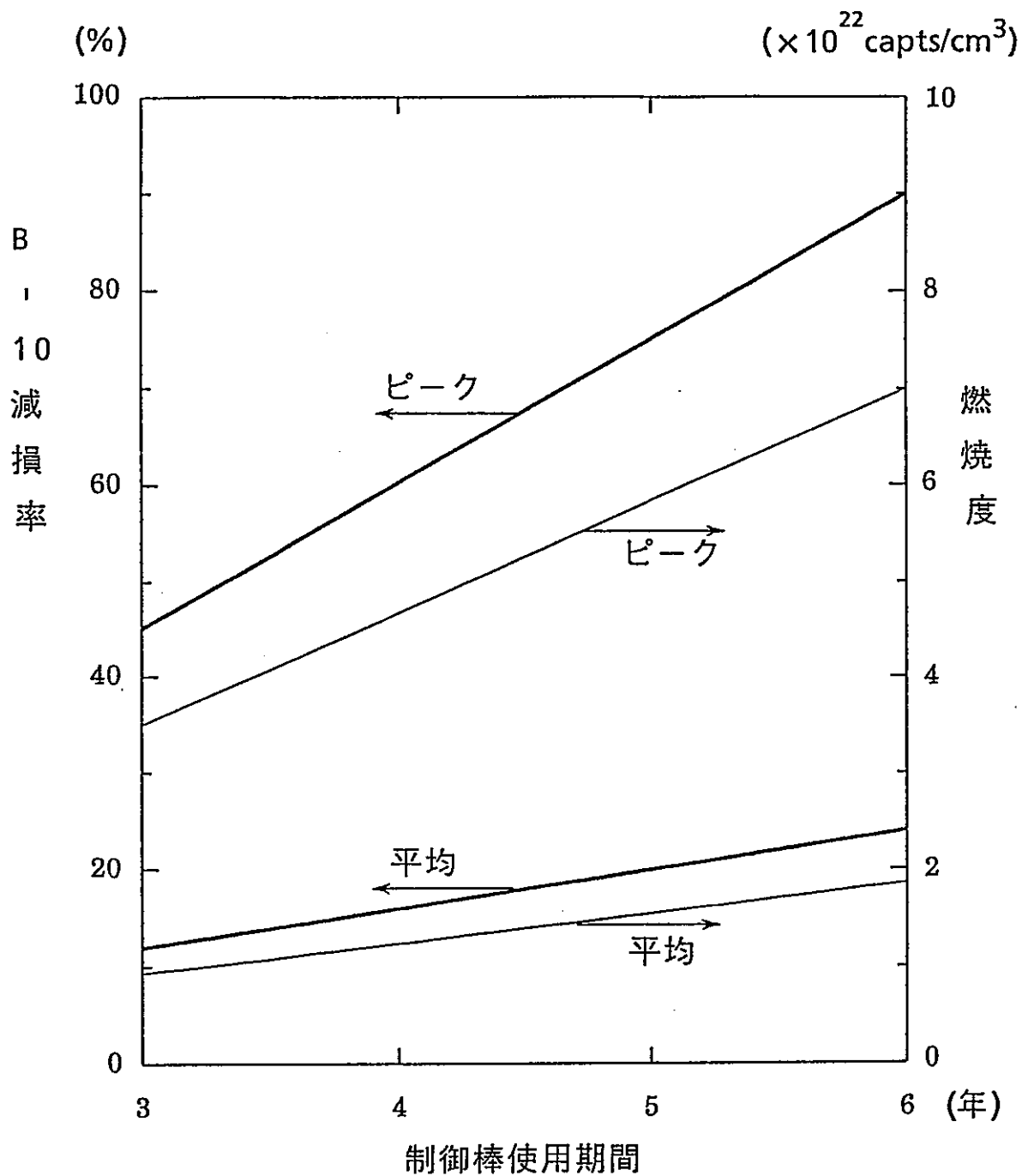
同じ被覆管温度条件の下で、炉心高さを1.5mにした場合には、プレナム長さの増大により、集合体長は約5.5mとなる。

(4)重要課題

i)出力平坦化

ii)HSFの低減を含めた被覆管局所高温点の低減

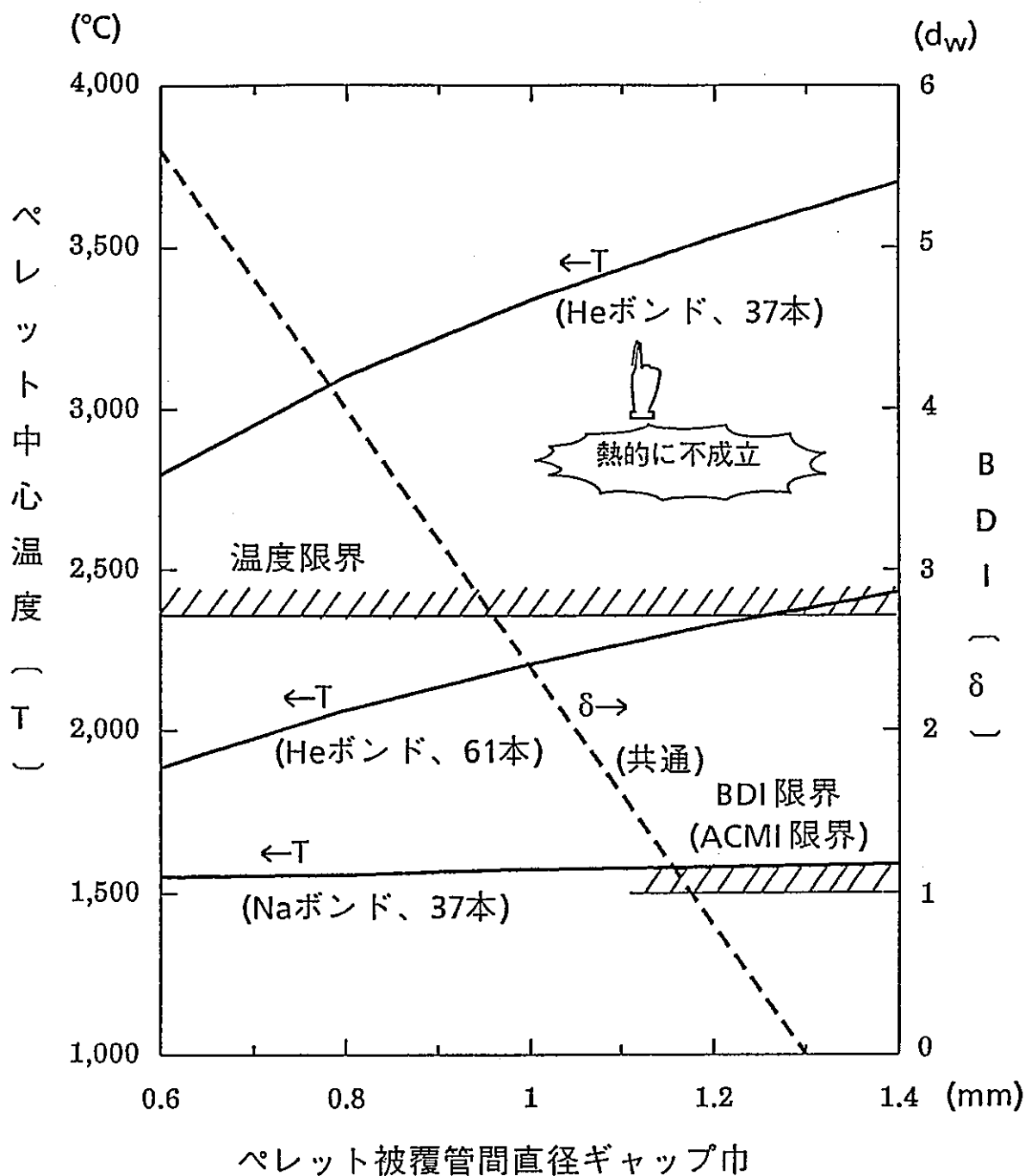
iii)設計用物性式、基準の合理化



制御棒長寿命化に伴う B-10 減損率、燃焼度の増加

[吸収ピンバンドル仕様条件 :

- ①ピン本数 ; 37本, ②ピン外径 ; 20 mm, ③ B-10濃縮度 ; 90%]



主系統制御棒長寿命化(15ヵ月×3サイクル)の検討

- [吸収ピンバンドル仕様条件 : ①ピン本数 ; 37 or 61本(ベント型),
 ②ピン外径; 20 or 15 mm, ③ワイヤ径; 1.5 mm]

中性子遮蔽体の軽量化、長寿命化

SUS遮蔽体とB₄C遮蔽体の適切な組合せ

↓
可動遮蔽体

↓
固定遮蔽体

径方向遮蔽構成サーベイ計算例

ケース	層数						照射量相対値	
	1	2	3	4	5	6		
1	径方向 ブランケット	SUS 遮蔽体	B ₄ C 遮蔽体	Na	C/B	Na	R/V	1
2	1	1	3		C/B		R/V	3.3
3	1	2	2		C/B		R/V	4.7
4	1	4			C/B		R/V	2.2
2'	1	1	3 B ₄ C 70%→90%		C/B		R/V	1.05
5	2	3			C/B		R/V	2.0
6	1	3			C/B		R/V	15

炉心・燃料設計の現状と課題

項目	目標値	現状設計	課題	解決方策
燃焼度	20万MWd/t (集合体取出平均)	~14万MWd/t (集合体取出平均)	<u>< 設計課題 ></u> (1)出力ピーキングの低減 (2)燃焼反応度の低減 (3)高燃焼度燃料の健全性評価 <u>< R&D課題 ></u> (4)高性能炉心材料の開発 (5)設計用物性データの蓄積	(1)出力分布平坦化炉心概念の構築 ・炉心型式の検討 (2)ピン径及び炉心高さの最適化 (3)高燃焼度燃料挙動評価精度の向上 ・PCMI、クリープ寿命破損挙動 (4)ODSフェライト鋼の開発 (5)物性データの設計への反映
出口温度	550°C以上	550°C	<u>< 設計課題 ></u> (1)集合体出力変動の低減 (2)被覆管最高温度の低減 <u>< R&D課題 ></u> (3)高強度、耐腐食性材料の開発	(1)出力変動低減化炉心概念の構築 ・炉心型式の検討 (2)熱設計手法の高度化 ・最適流配、HSF合理化 (3)ODSフェライト鋼の開発
線出力	480w/cm	~470w/cm	<u>< 設計課題 ></u> (1)480w/cmの成立性評価 (2)高燃焼度時の挙動解明 <u>< R&D課題 ></u> (3)中空ペレットの照射挙動の把握	(1)初期燃料挙動評価精度の向上 ・ギャップクローザー現象の解明 (2)高燃焼度燃料挙動評価精度の向上 ・融点低下、Pu移動、ギャップ幅 (3)中空ペレットの照射試験
増殖比	1.2以上	~1.1	<u>< 設計課題 ></u> (1)高燃焼度化との両立性 (2)経済性	(1)高性能炉心概念の構築 ・炉心型式及び燃料仕様の検討 ・ダクトレス集合体炉心の成立性評価 ・新型燃料(金属、窒化物)炉心の設計評価 (2)コスト評価 ・ブランケット増大の利害得失評価等
制御棒寿命	6年 (燃料と同等)	~3年	<u>< 設計課題 ></u> (1)ACMIの低減及び10B減損対策 <u>< R&D課題 ></u> (2)Naボンドピンの開発 (3)ペレットリロケーションの防止	(1)高性能制御棒の開発 ・Naボンド方式 ・10B含有率向上構造の検討 ・新材料制御材(ZrH、液体Li etc.) (2)Naボンドピンの照射試験 (3)シュラウド方式機構の照射試験

大型炉の設計研究

(安全設計研究)

原子炉停止系の検討
崩壊熱除去系の検討
SG伝熱管損傷事象の検討
原子炉格納施設の検討

平成2年1月16日
動力炉・核燃料開発事業団

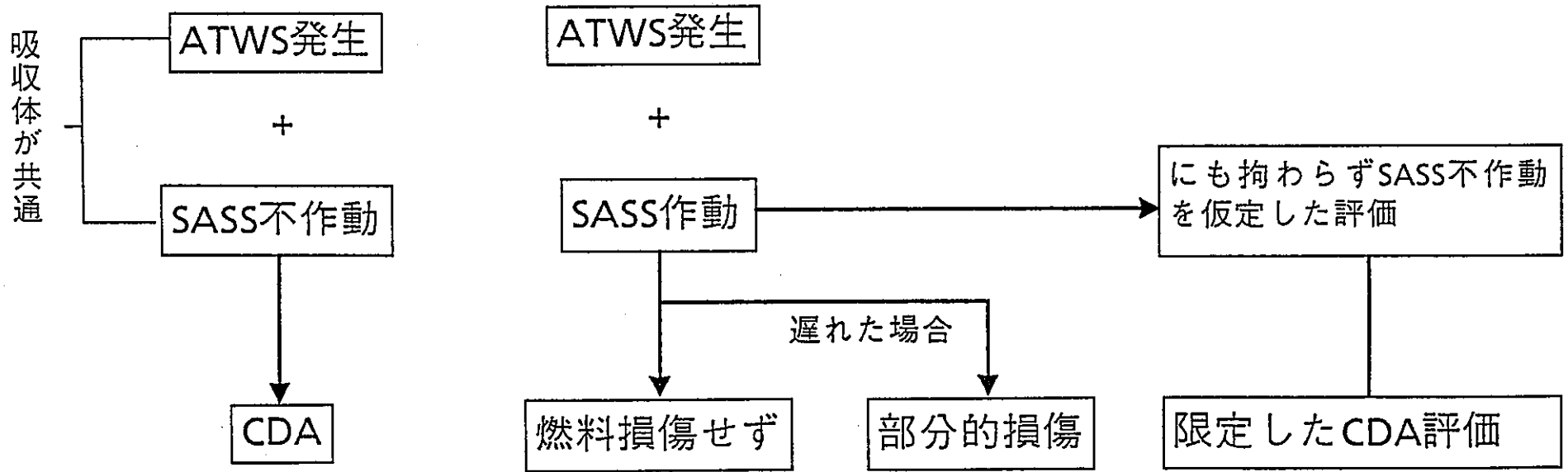
原子炉停止系の比較

	もんじゅ	100万kWe炉心	150万kWe炉心
炉心	炉心燃料集合体数 198	炉心燃料集合体数 355	炉心燃料集合体数 403
システム構成	主炉停止系(制御棒) 13	主炉停止系(制御棒) 18	主炉停止系(制御棒) 27
	後備炉停止系(制御棒) 6	後備炉停止系(制御棒) 6	後備炉停止系(制御棒) 9
安全保護系	2 out of 3	2 out of 4	2 out of 4
スタックロッド マージン	主炉停止系ワンロッド (+後備炉停止系ワンロッド)	主炉停止系ワンロッド (+後備炉停止系ワンロッド)	主炉停止系ワンロッド (+後備炉停止系ワンロッド)
フェイルセーフ	電源喪失に対応	電源喪失に対応	電源喪失に対応
主要な安全設計方針	<p><u>独立性</u>:少なくとも2つの独立した系を有する設計.</p> <p><u>運転時の異常な過渡変化時の停止能力</u>:1系統は燃料許容設計限界内未臨界達成及び未臨界維持、1系統のみで未臨界達成及び維持.</p> <p><u>事故時の維持能力</u>:1系統で未臨界達成及び維持.</p> <p><u>反応度停止余裕</u>:ワンロッドスタック時の未臨界達成及び維持.</p>	同左	同左

SASSの役割

- ・CDAに至る代表的事象であるATWS(安全保護系故障)の反応度抑制設備
- ・Without Scram = 安全保護系故障 + 原子炉停止系故障(主炉停止系 + 後備炉停止系)
- ・SASS = 自己作動切り離し部 + 後備炉停止棒(ATWSを完全には否定できない)

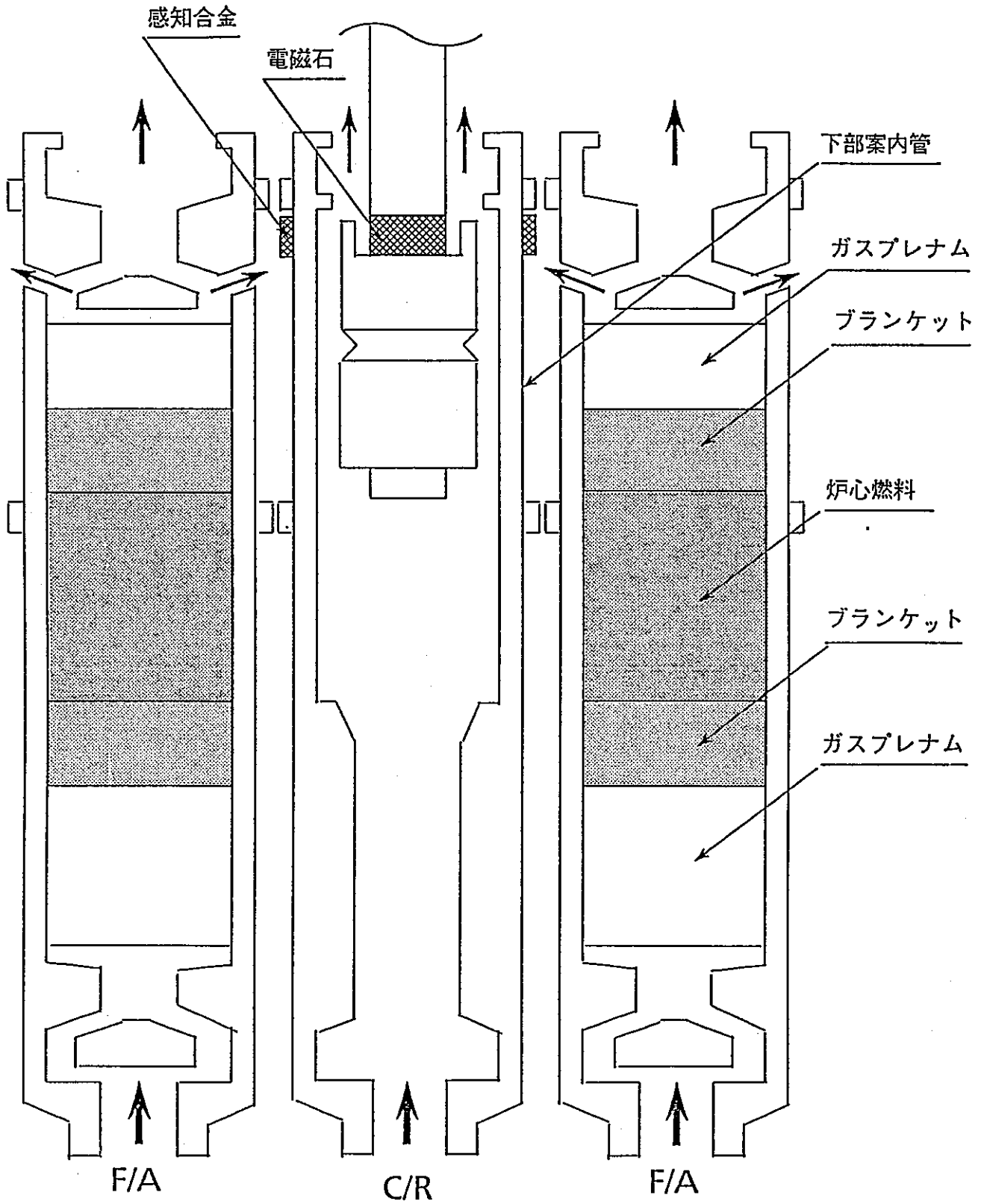
-2-

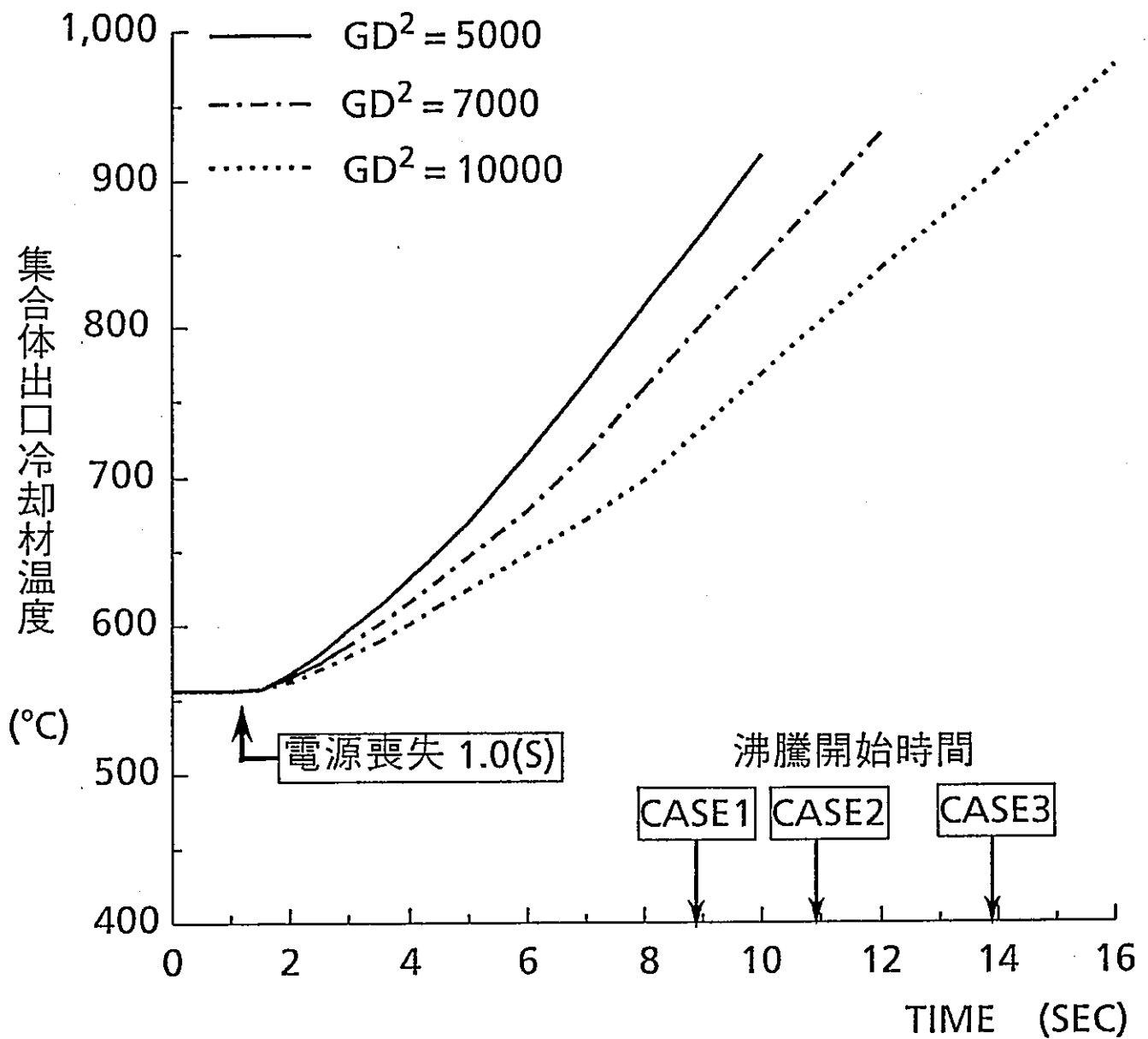


SASSの検討

	内部式	外部式
切り離し位置	制御棒集合体内	制御棒集合体外UCS内
構造	燃料集合体ラッパ管にフローホールを設ける。	炉心上部機構に導入管を設ける 又はチムニー型にする。
応答時間	やや速い	
電磁部の設計	やや複雑 コイル周囲のナトリウム温度がより低い。 コイル長が制限される。 感知合金と電磁部の相対位置に注意が必要。	軸方向寸法に余裕がある。 感知合金が強度部材となる。
制御棒の挿入性	延長軸がなく阻害要因は少ない。	延長軸の影響を受ける 重力落下上は有利。
その他	・3分割UCSと整合性が良い ・燃料集合体上部にフローホールを設け燃料交換時にカバーガス中に頭を出す設計と相性が良い	サーマルストライピング、ストラティフィケーションの検討

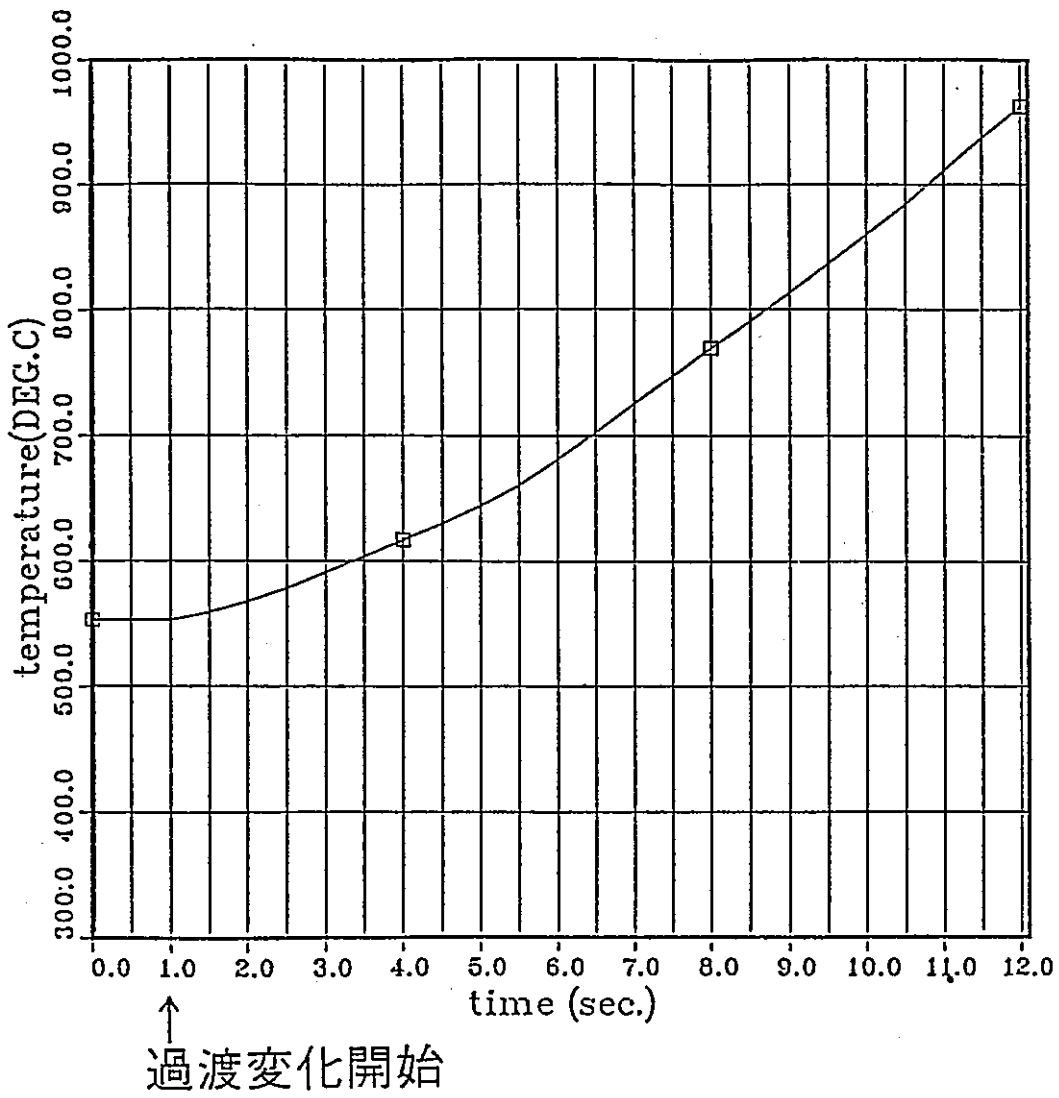
内部式 SASS 構造概念図



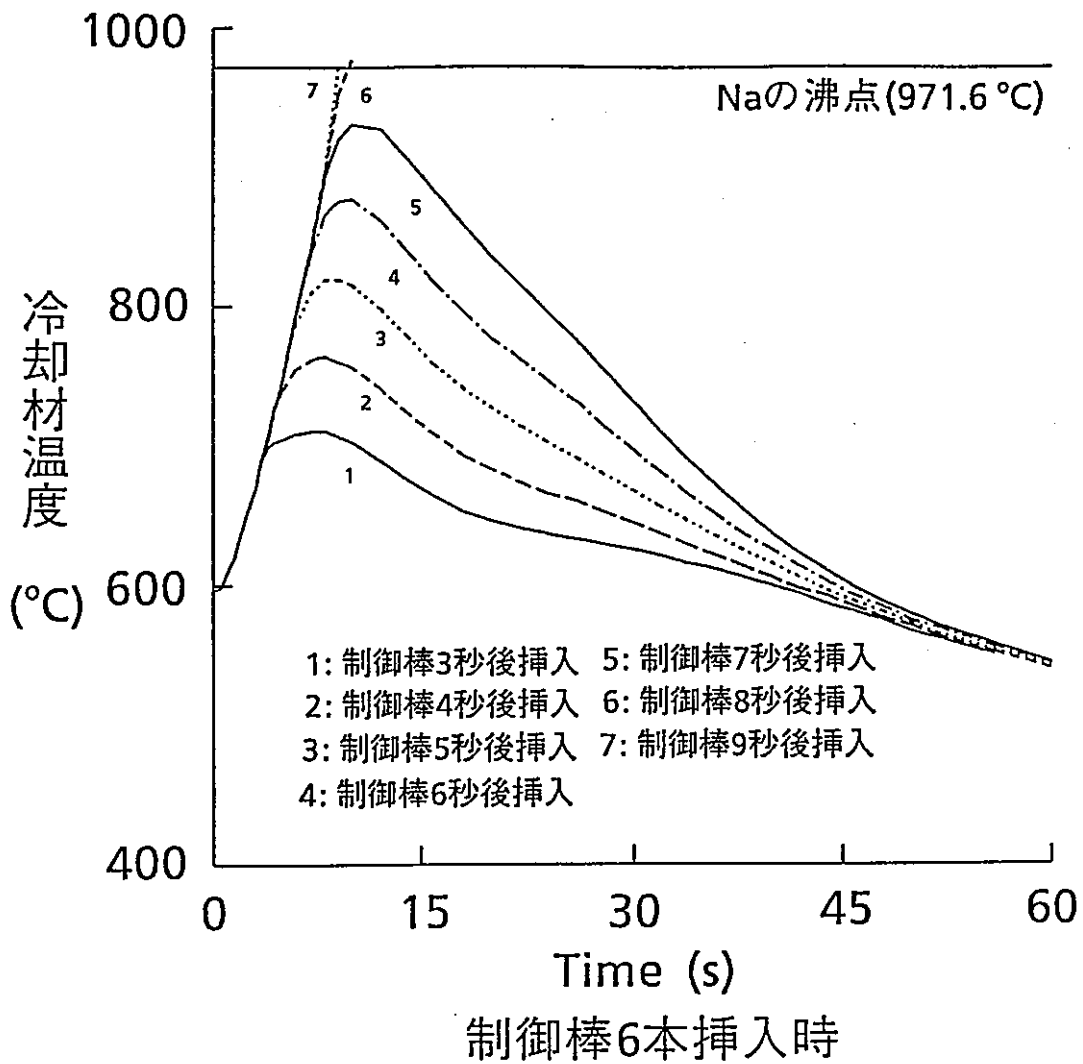


ULOF時の冷却材温度挙動

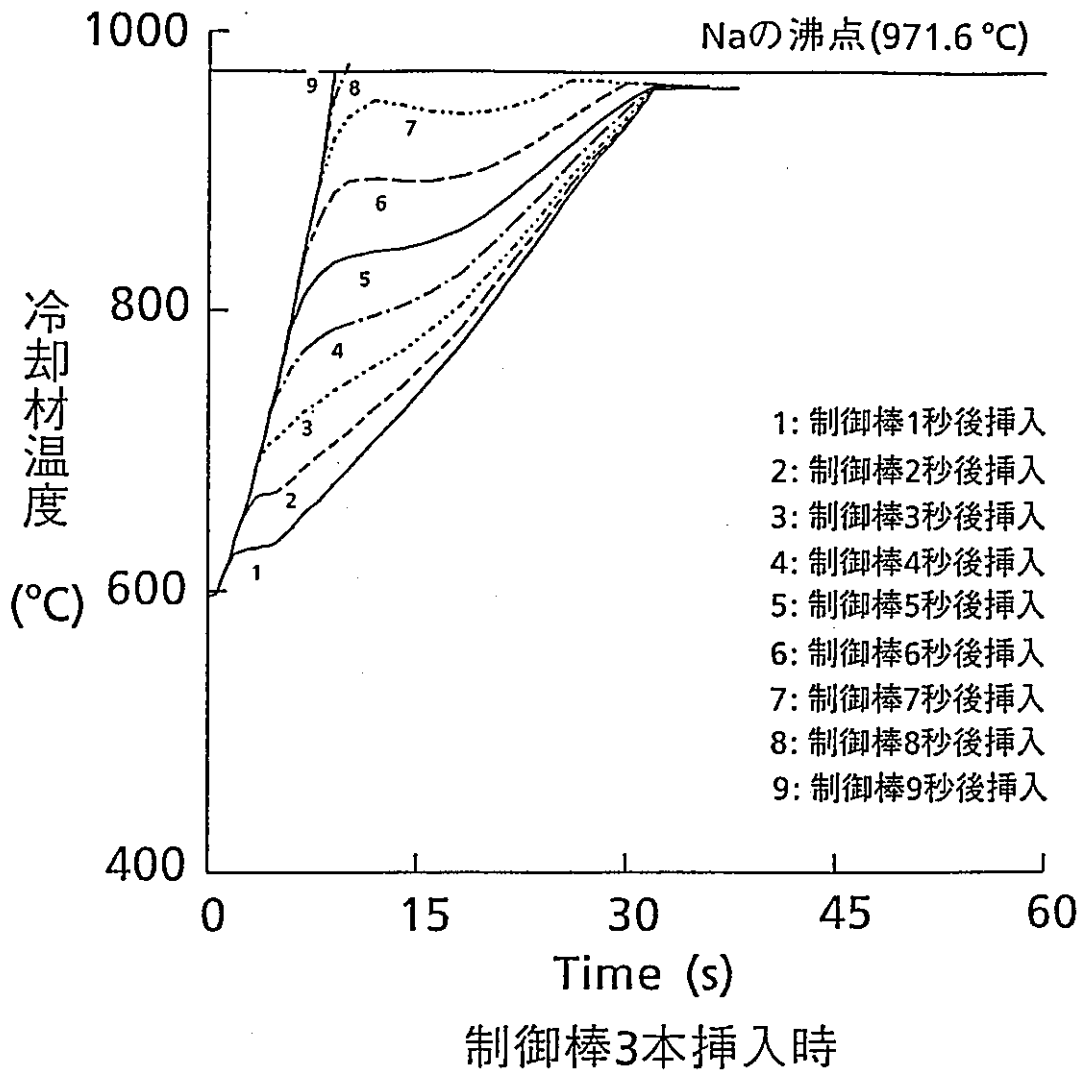
(内側炉心集合体平均出口温度)



ULOF時・SASS感知合金部のナトリウム温度変化例

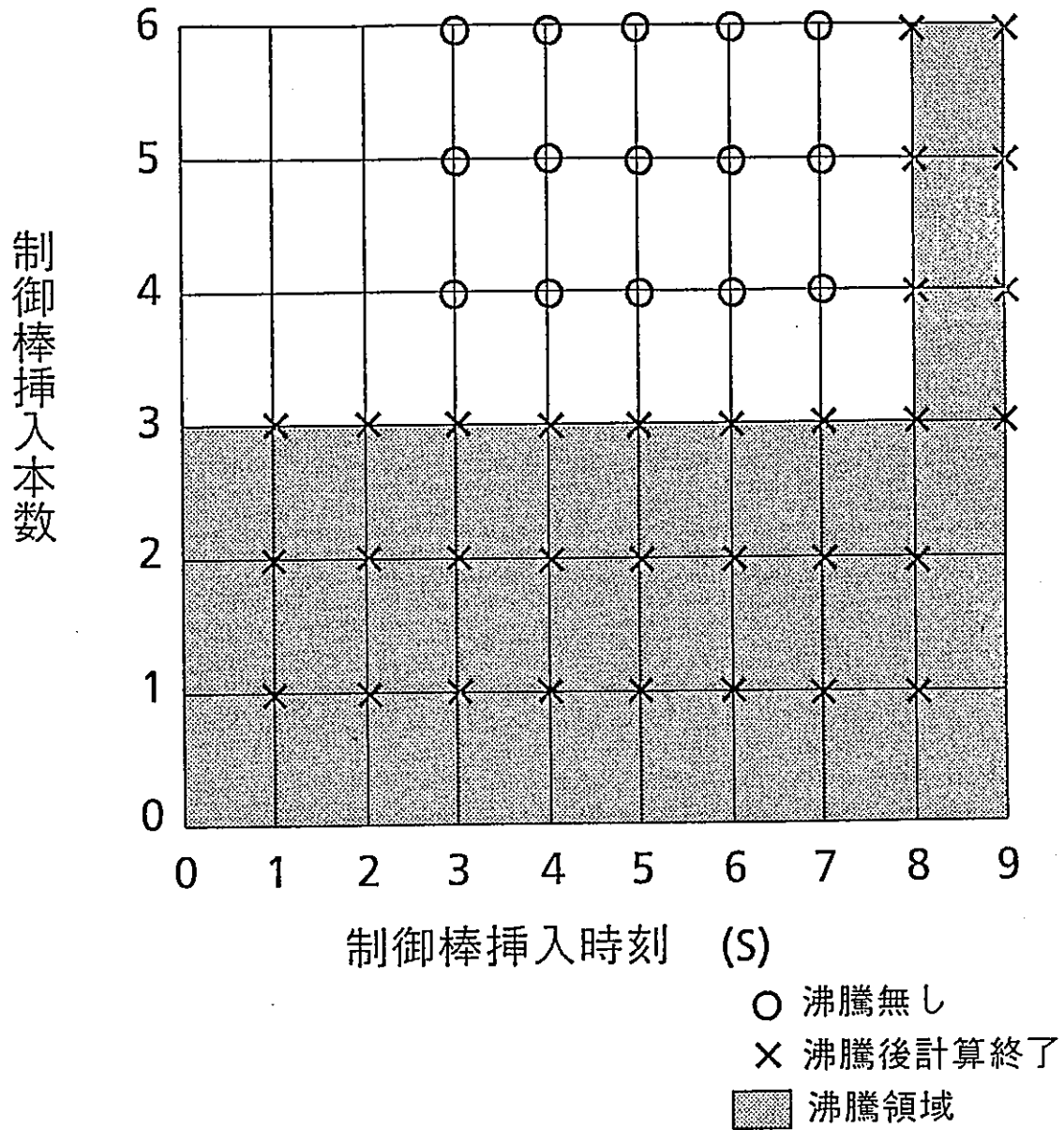


冷却材温度(ホットチャンネル)



冷却材温度(ホットチャンネル)

ホットチャンネル



SASS成功基準例(非沸騰範囲)

SASSに係る課題

安全設計上の位置付け

原子炉停止系と別個の反応度抑制設備

原子炉停止系と独立ではない

BDBEに対する設備対応として認知するか

SASSなし…… ATWS→CDA 広範囲の事象の検討

SASSあり…… 単なる余裕としてか

CDA評価の簡素化

設計上の課題

基本設計への取り込み

設計条件、仕様

設置した場合の影響評価

解析技術

炉心構成要素並みの伝熱流動解析

検証

試験検査、誤作動、地震時、共通原因故障

崩壊熱除去系の比較

	常陽	もんじゅ	大型炉2次系あり	大型炉2次系なし
熱出力	100MW	714MW	2517MW	3750MW
ループ数	2	3	4	4
DHRS型式	IRACS (主冷却系そのもの)	IRACS 3系統	PRACS 4系統 [DRACS]	DRACS 4系統 (浸漬型2系統 循環型2系統)
電源構成	非常用発電機2台	非常用発電機3台	非常用発電機2台	非常用発電機2台
自然循環能力	有	有	有	有
主要な安全設計方針		崩壊熱および他の残留熱の除去 (1)除熱能力:燃料の許容設計限界及び冷却材バウンダリの設計条件を超えないこと。 (2)事故時の能力;燃料の重大な損傷防止。 電源喪失に対する設計上の考慮	同左 (多重性又は多様性及び独立性)	同左
備考			2次系の非安全系化 原子炉容器のコンパクト化	2次系(水・蒸気系)の非安全系化 多様性を陽に配慮

大型炉(2次系なし)の崩壊熱除去の考え方

信頼性	蒸気発生器に負担をかけない	↘
	冷却系配管を共用しない	→DRACS
	冷却材漏洩事故対策としてサイフォンブレーカを使用	↗
	多重性 100%×2	
	多様性 浸漬型2系統及び循環型2系統	
	独立性 非常用電源系2系統	
	単一故障 DRACS1系統又は非常用電源系1系統の故障に対応	
事故時運用	通常トリップ時	循環型強制循環で炉心流量確保 →ポニーモータ不要. 電磁ポンプ利用
	外部電源喪失	自然循環能力の確保
	蒸気発生器伝熱管損傷事象時	圧力波、反応生成物 →共通原因にさらされる→多様性
	HCDA	→共通原因にさらされる→多様性
	経済性	純化系との共用

大型炉(2次系なし)のDRACS

浸漬型2系統、循環型2系統

浸漬型熱交換器 原子炉容器内ホットプレナム、内筒外側に設置(出入管と同一円周上)
 原子炉容器径に影響が少ないよう外形寸法のコンパクト化
 →ヘリカルコイル伝熱管
 外形1.2m、全長11.7m

循環型熱交換器 格納施設内設置
 格納施設内に置くためコンパクト化が望ましい→直管型(無液面平行流)
 外形1.0m、胴長さ5.2m

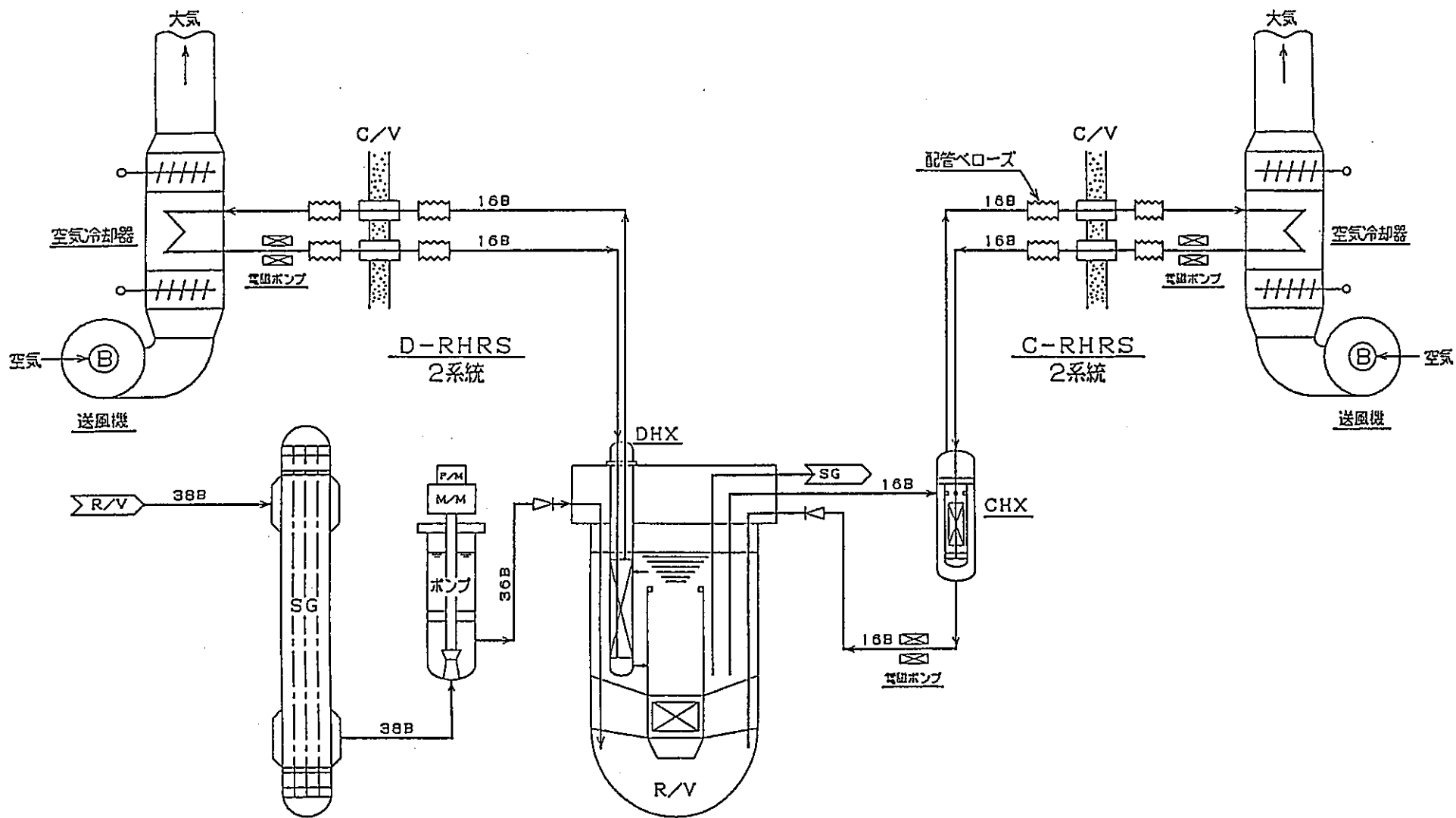
空気冷却器

非常用電源 電磁ポンプ、空気冷却器ブロワ、ダンパ

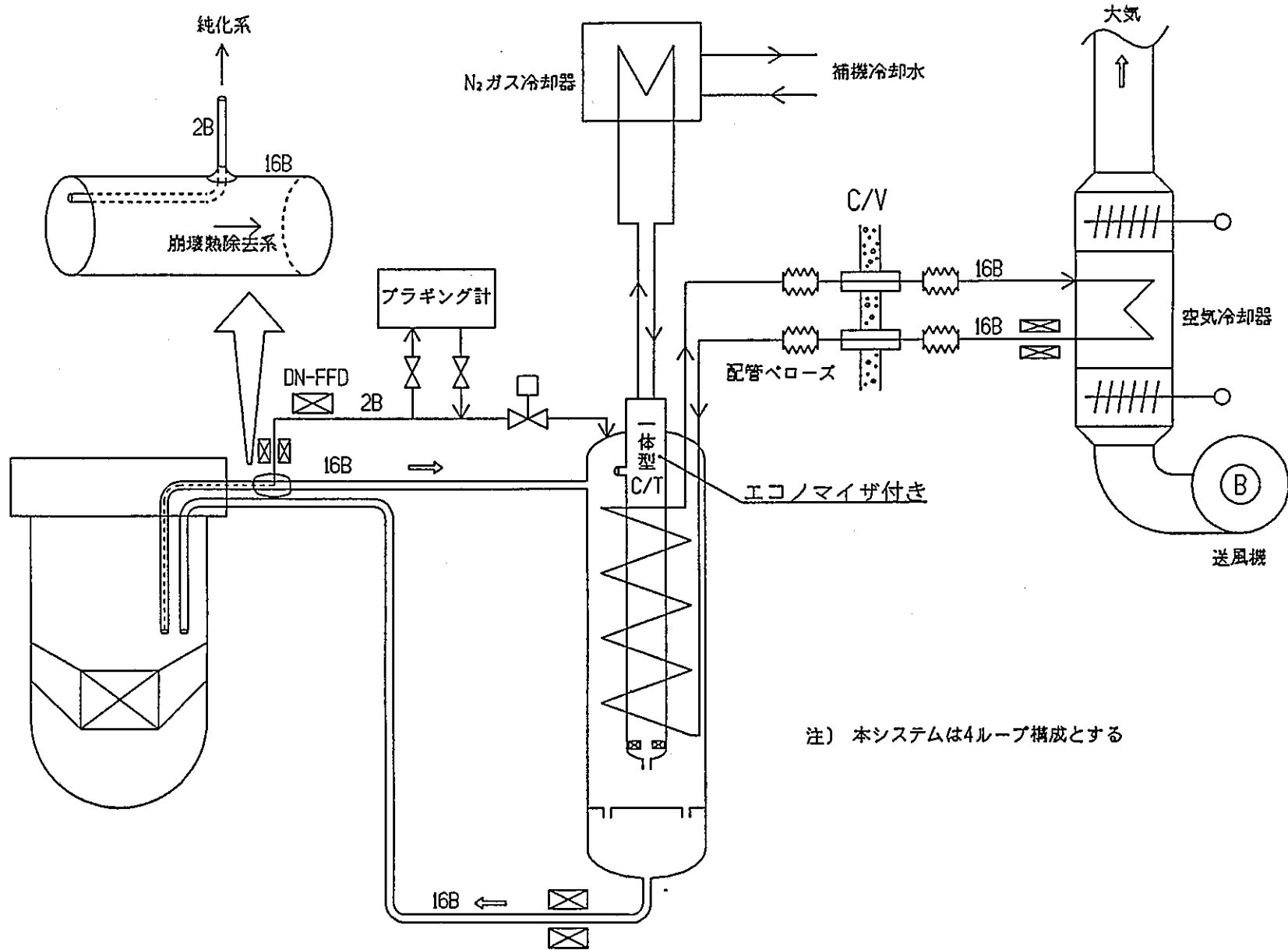
系統構成

系統A — 浸漬型1系統
 — 循環型1系統

系統B — 浸漬型1系統
 — 循環型1系統



大型炉(2次系なし)崩壊熱除去系概念図

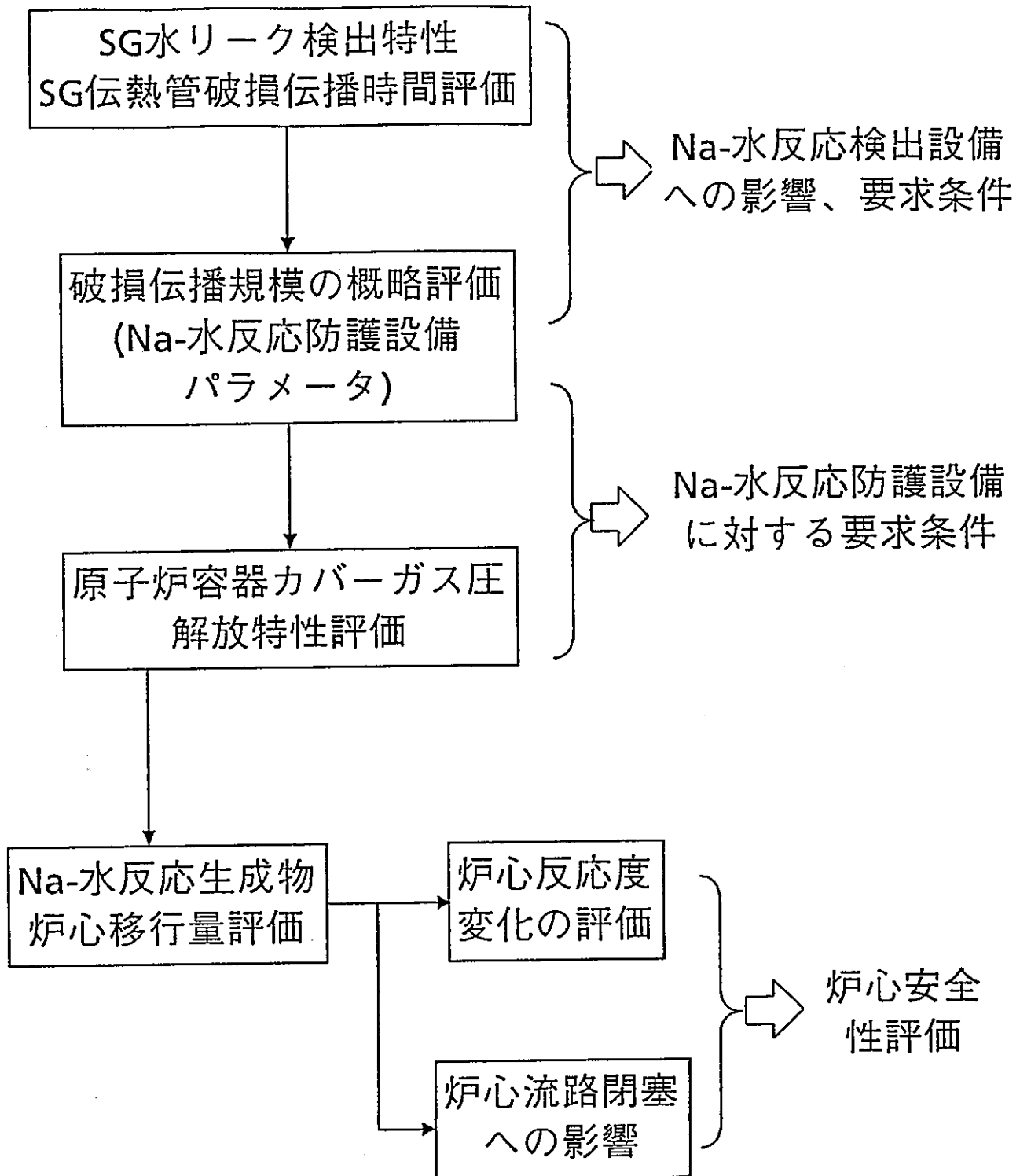


注) 本システムは4ループ構成とする

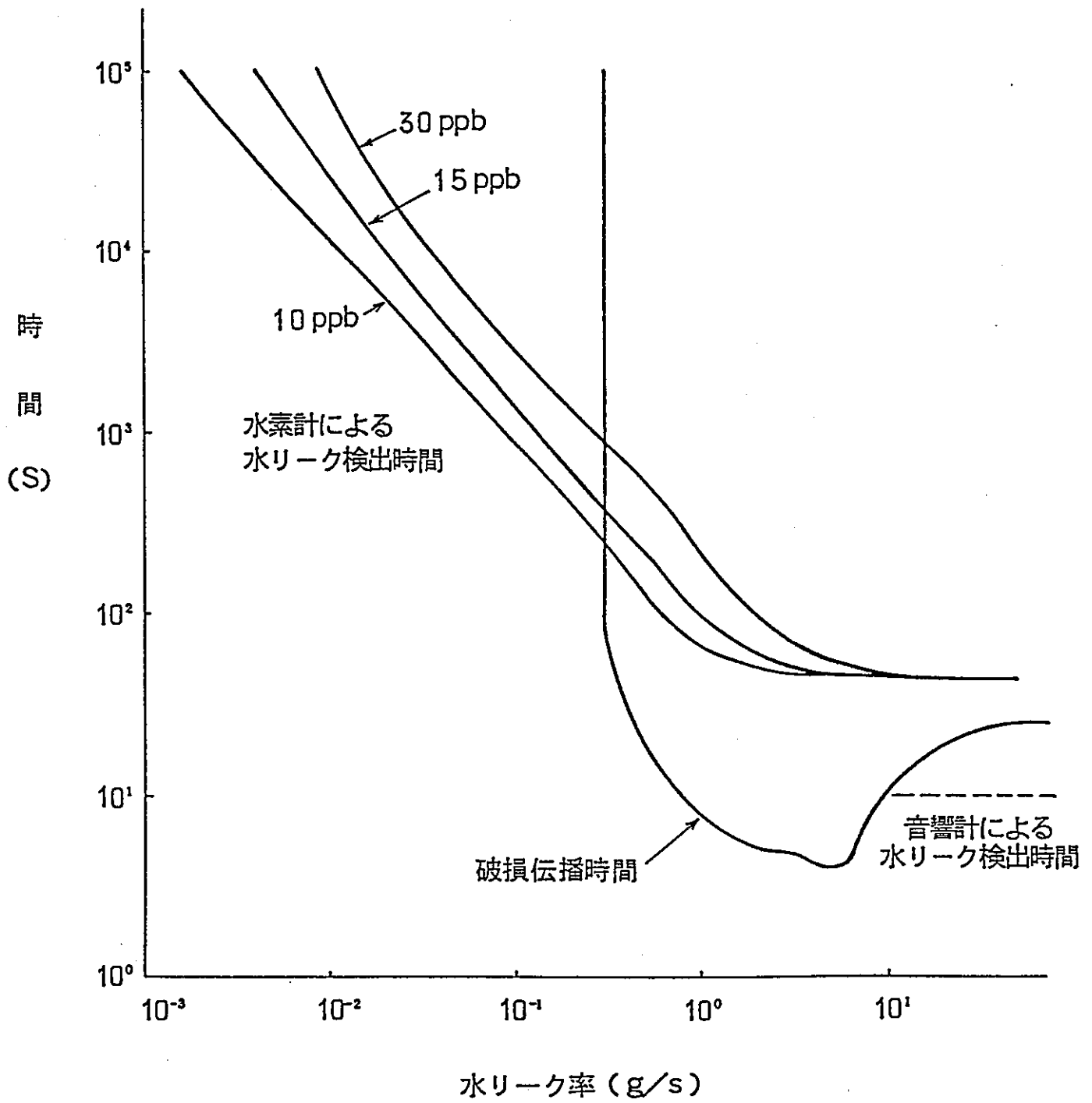
純化系組込型崩壊熱除去システム

2次系削除システムの安全性の考え方

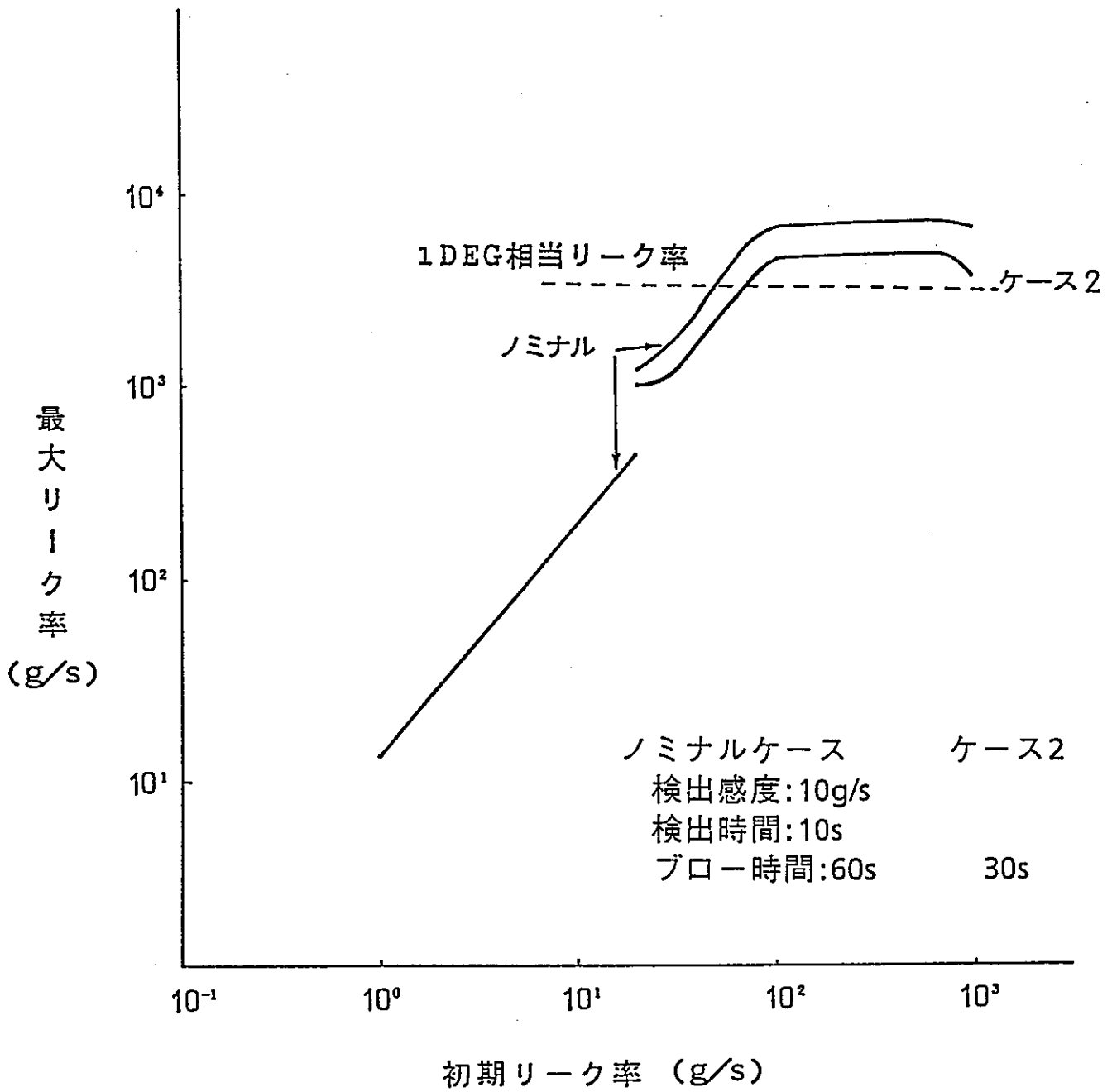
ケース	想定する事象	安全性の考え方
A	貫通リークは発生しない	(イ)高信頼性SGの開発 (ロ)片側破損のすみやかな検出及び処置 (ハ)内外管の独立性確認
B	微小リーク	(イ)初期貫通クラックは最大でも微小リーク相当であることの立証(LBB論理) (ロ)微小リークのすみやかな検出及び処置 (ハ)微小リークがノンダメージリークであることの確認
C	小リーク	(イ)初期貫通クラックは最大でも小リーク相当であることの立証(LBB論理) (ロ)破損拡大挙動の確認 (ハ)小リークのすみやかな検出及び処置 (ニ)プラントの安全確認
D	伝熱管1本両端完全破断	(イ)破損拡大による最大破損口径が1DEG相当であることの確認 (ロ)共通原因破損の排除 (ハ)破損拡大挙動の確認



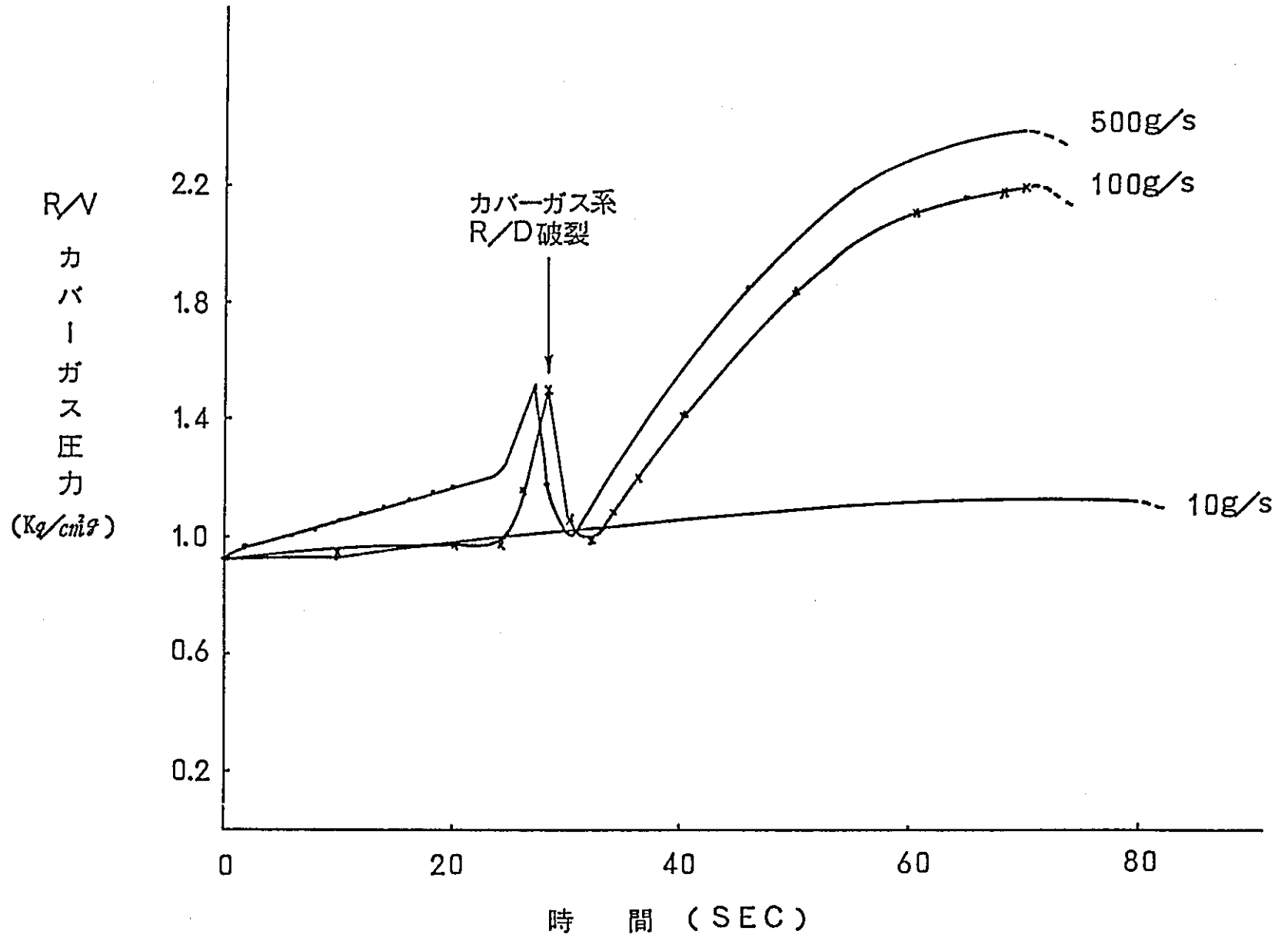
SG伝熱管損傷事象検討フロー



SG水リーク検出特性及び伝熱管破損伝播特性



初期水リーク率と最大リーク率の関係



原子炉容器カバ-ガス圧力変化

水素ガスの炉心への影響

○冷却材ボイド反応度(150万kWeクラス)

炉心部ボイド反応度 約10\$

(集合体間ギャップ含めず)

集合体最大ボイド反応度 約5¢

○水素ガスによる反応度添加

初期水リーク率 (g/s)	最大水素流量 (ℓ/s)	添加反応度(¢)
0.1	2.7	0.3
1.0	13	1.4
10	220	24
100	7400	635

○許容限界

初期水リーク率 約10g/s

○課題

水素ガス流入時の除熱能力

Na₂Oの炉心への影響

○Na₂Oの炉心流入量

初期水リーク率 (g/s)	Na ₂ O炉心流入量 (kg)	1集合体集積時 閉塞厚さ(cm)
1	0.7	3
10	10.7	49
100	5.1	23

○炉心への影響

全炉心に拡散した場合 → 影響は小さい

局所的に集積した場合 → 被覆管損傷の
恐れ

(閉塞の状態に依存)

○課題

Na₂Oの炉心への移行挙動、炉心内挙動

SG伝熱管損傷事象に関する検討結果

- 片側破損検出系は今後の性能向上が必要である(特に外管破損検出系)。
- 水・蒸気ブロー終了が60秒ならば放出系は12Bである。
- Non Damage Leak以上の破損規模では伝熱管破損伝播は避けがたい。
- 初期リーク率が数十g/s以上の場合には最大漏洩率は1degに相当する。
- 初期リーク率10g/s以下の漏洩率ではカバーガス圧力は特に問題にはならない。
- 10g/s以上の漏洩率は炉心への反応度添加の観点から許容しがたい。
- 小リーク以下で反応生成物による炉心流路閉塞は影響が比較的小さい。

SG伝熱管損傷に関する安全論理の構成に向けて

- DBEとして「貫通リークなし」をめざす。
- BDBEとして微小リークを想定する。
- R&Dのターゲットをまとめる。
- R&Dには1MW施設及び50MW施設を活用する。
- ライセンサビリティノ実機実証として常陽を活用する。

原子炉格納施設の考え方

深層防護の第3レベルの設備

事故想定をベースとする DBE……非(微)耐圧性格納施設
 BDBEにより耐圧性付与(安全裕度確保)

免震建屋一体型格納施設

耐震設計条件の制約が緩い 「もんじゅ」では耐震設計条件が安全評価条件を上回った
 遮へい設計条件、安全評価条件

設計条件は遮へい設計が許容される限り安全評価条件より規定するのが合理的と考える
 コンファインメント領域の確保[コンテインメント/コンファインメント格納施設]
 軽水炉並み設備、(事故対策設備についてのALARA)

2次系無しプラント

SG周りの耐圧バウンダリに形成に工夫を要す

設計方針

機能 温度、圧力、漏洩率、漏洩率試験。
 アニュラス浄化系
 バウンダリの伝播型破断防止
 貫通する配管系 隔離能力、隔離弁
 格納施設熱除去系、雰囲気制御系はなし

格納境界の形成比較

(a) SGの外側を囲う形の格納境界

PWRと同様の考え方である。格納境界の形状が単純で信頼感がある。

しかし、蒸気管(または給水管)の破断で格納施設内に水または蒸気が放出され、圧力が上昇するため、FBRの場合には水とNaの分離に関する困難が予想されること、格納施設の設計圧力が高くなりがちな点が困難である。

(b) SGのシェルと蒸気管及び給水管の一部を境界とする

格納境界の面積は最も小さくできる可能性が強い。

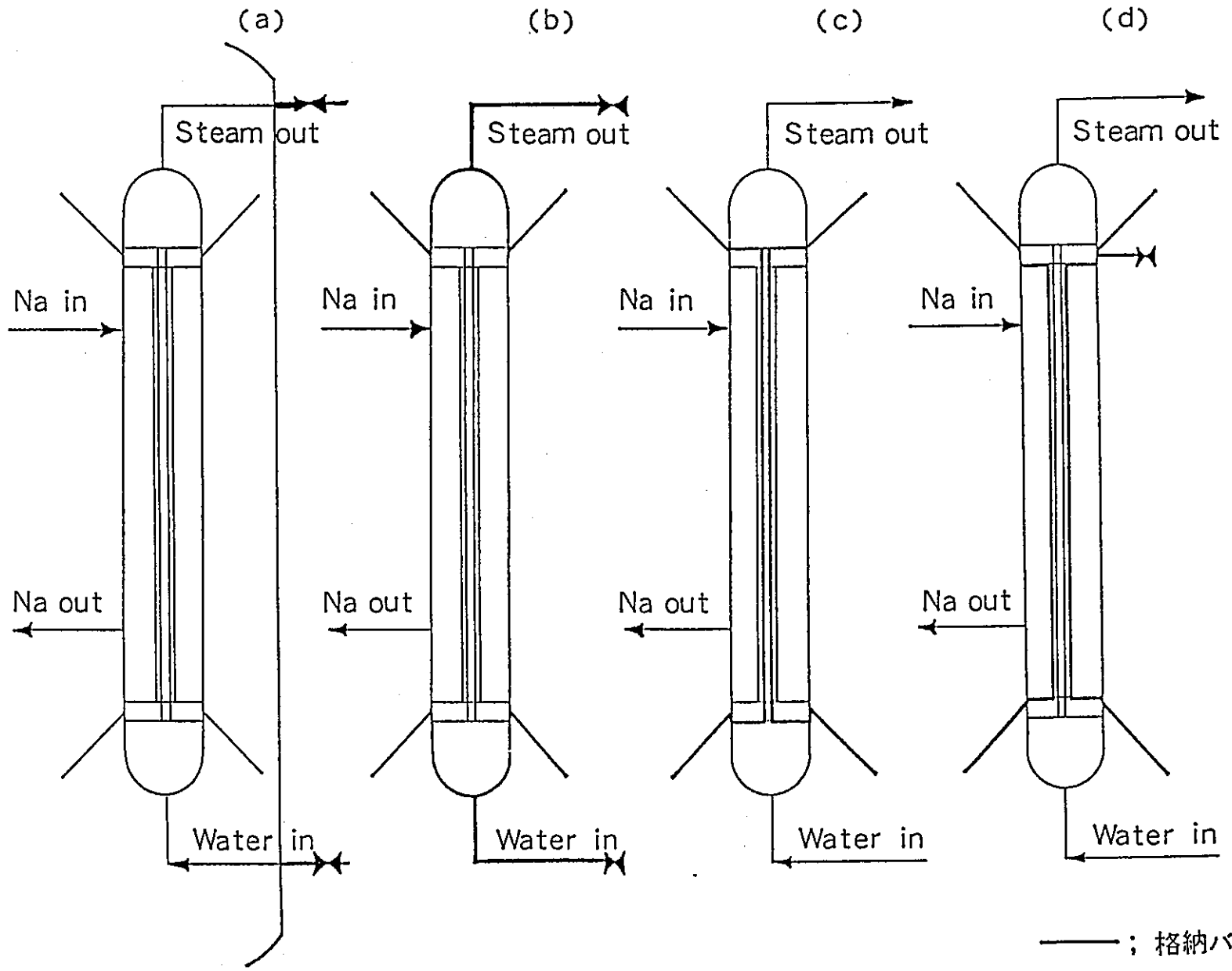
一方、主蒸気管(逃し弁を含めて隔離弁まで)及び主給水管が格納境界となり、クラスアップが必要となる。

(c) SGのシェルの一部、管板及び2重管の内側(水側)を境界とする

伝熱管漏洩(Na-水反応)が冷却材バウンダリ、格納バウンダリの同時破損となるため、伝熱管漏洩を設計基準内事象としている本プラントに適した方式とはいえない。

(d) SGのシェルの一部、管板及び2重管の外側(Na側)を境界とする

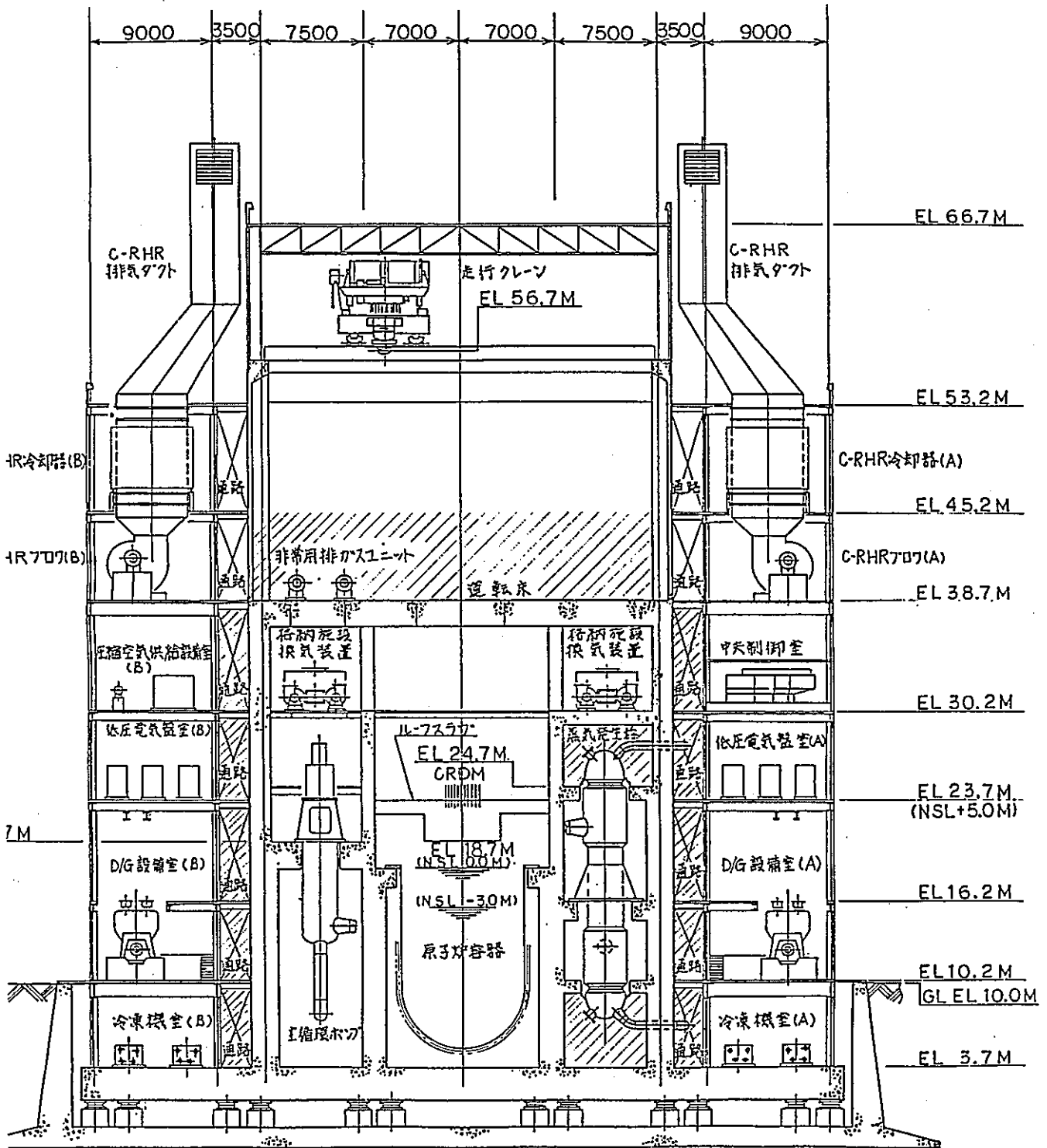
(c)と同じく本プラントに適した方式とはいえない。また、2重管の漏洩検出系配管の一部が格納境界となり、クラスアップが必要となる。




2次系なしプラント格納施設バウンダリの概念比較

大型炉(2次系なし)原子炉格納施設主要目

- 型式 ; 矩形建屋一体型コンクリート格納施設
- 主要寸法 ; 27m×27m×33mH(内のり寸法)
- 主要躯体厚 ; 側部 2.0m
天井部 2.0m
- ライナ厚 ; 6.4mm
- ライナ材質 ; SGV42
- 最高使用圧力 ; 1.0kg/m²g (内圧), 0.2kg/m²g (外圧暫定)
- ” ” 温度 ; 雰囲気温度350°C(但し、コンクリート一般部の長期温度荷重は65°Cとする。)
- 許容漏洩率 ; 1%day
- コンファイメント ; 格納境界貫通部周囲にコンファイメントエリアを設置




 コンファインメントエリア

大型炉(2次系なし)格納施設説明図

原子炉建屋からの渡り配管の検討

渡り配管類	ルート	耐震クラス	課題	対応
補機冷却系海水管 ディーゼル燃料移送管	R/B - 屋外	A _S	S ₂ 地震動による大きな変位に対し健全性確保	大変位を吸収する配管引回し、又は変位吸収継手(ペローズ)
主蒸気管 主給水管	R/B - 補助建屋	C	中小地震対策 財産保護	高温高圧のため配管引回しで対応
気体廃棄物移送管 液体廃棄物移送管 管理区域空調排気ダクト	R/B - 補助建屋	B	Bクラス地震時の変位に対し健全性確保	A _S クラスの対策ができれば可能
ケーブル	R/B - 屋外、 補助建屋 - R/B - タービン 建屋	A, C	Aクラスについては S ₁ 地震時の変位に対して健全性確保	トレイあるいはコンジットにフレキシビリティを持たせる。 ケーブル自体にフレキシビリティがあり、トレイに耐圧性は要求されないので、配管より対応が容易
その他 圧縮空気供給管 濾過水供給管 配水管 アルゴンガス管 等	R/B - 屋外、 補助建屋 - R/B - タービン 建屋	C	小地震対策	フレキシブルチューブの採用 (一般免震ビルでの実績あり)

R/B:原子炉建屋

セラミックスライナに対する設計上の要求条件

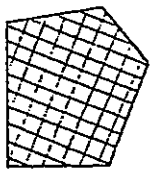
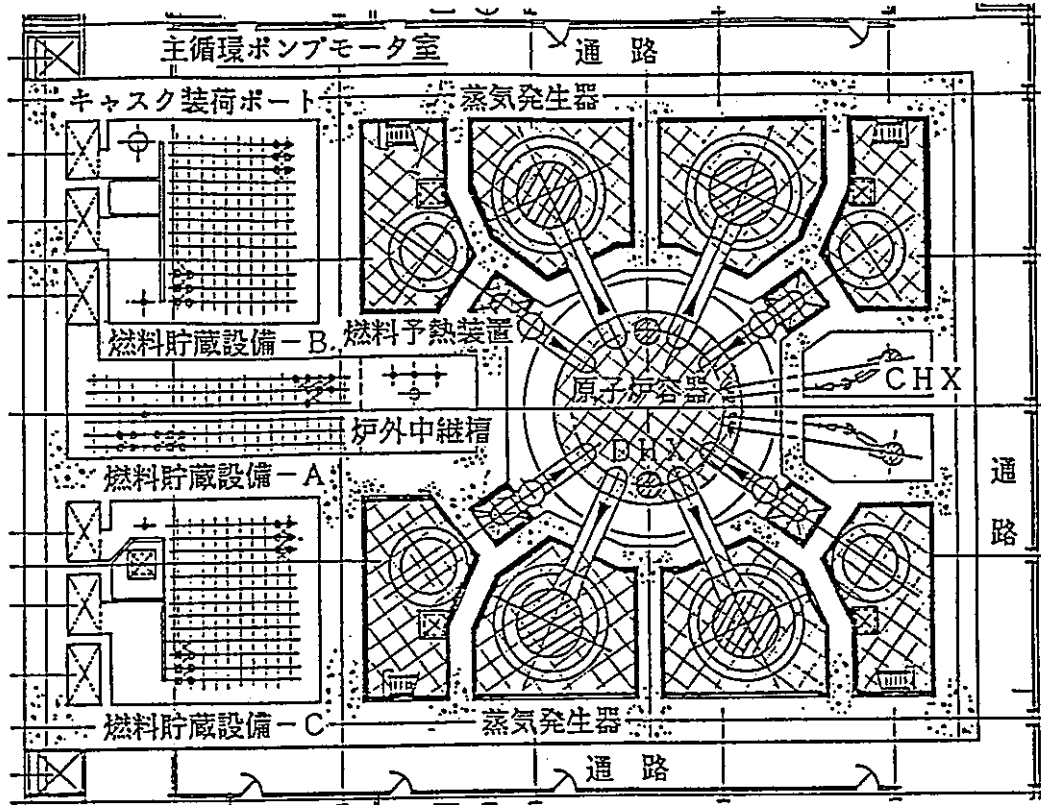
- ① 冷却材漏洩事故時に貯留する高温ナトリウムに対して、長時間の耐食性、耐浸透性があり、水分を含まないこと。
- ② 水蒸気に対して気密性があること。
- ③ 高温ナトリウムに対して耐熱衝撃性があること。
- ④ 加熱による熱応力に耐えること。
- ⑤ 耐震性があること。
- ⑥ 構造が簡単で、施工しやすいこと。
- ⑦ 安価であること。

セラミックスライナの機能

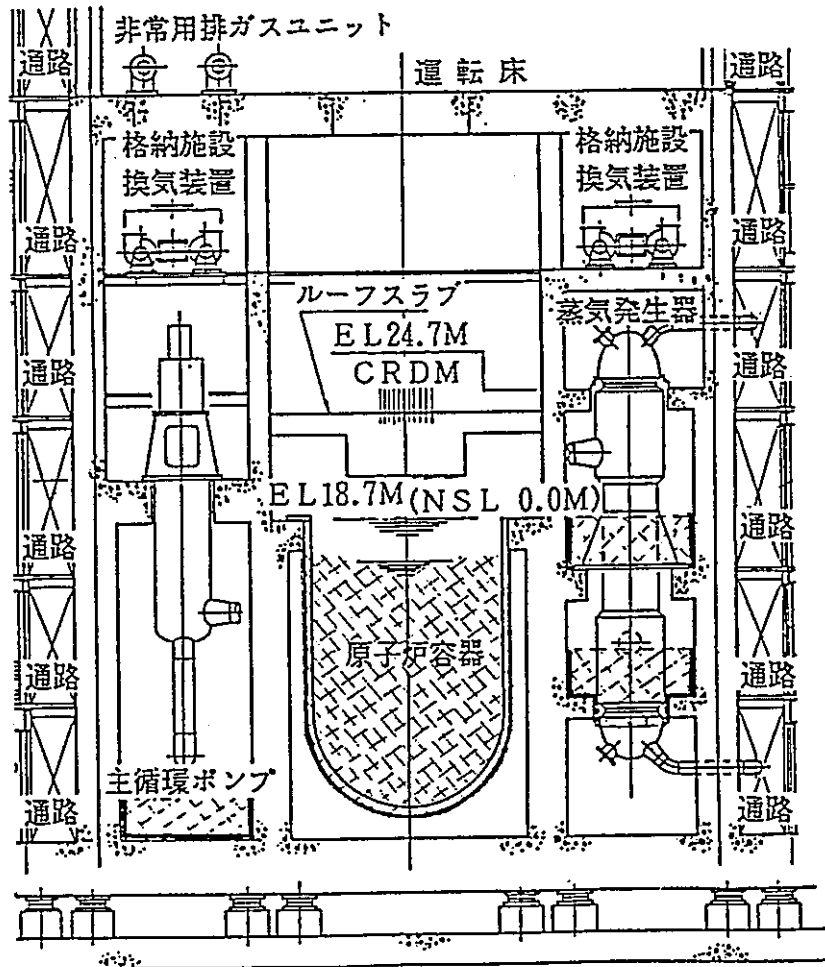
- ①ガードベッセルとしてのNa漏洩量抑制 → ただし原子炉容器のみに限定
- ②漏洩Naの貯留
- ③漏洩Naとコンクリートとの反応防止
- ④漏洩Naの顕熱によるコンクリートの過度の昇温防止



ライナの機能分離	貯留用セルライナ	原子炉容器室及び1次冷却系室の一部
	壁面ライナ	



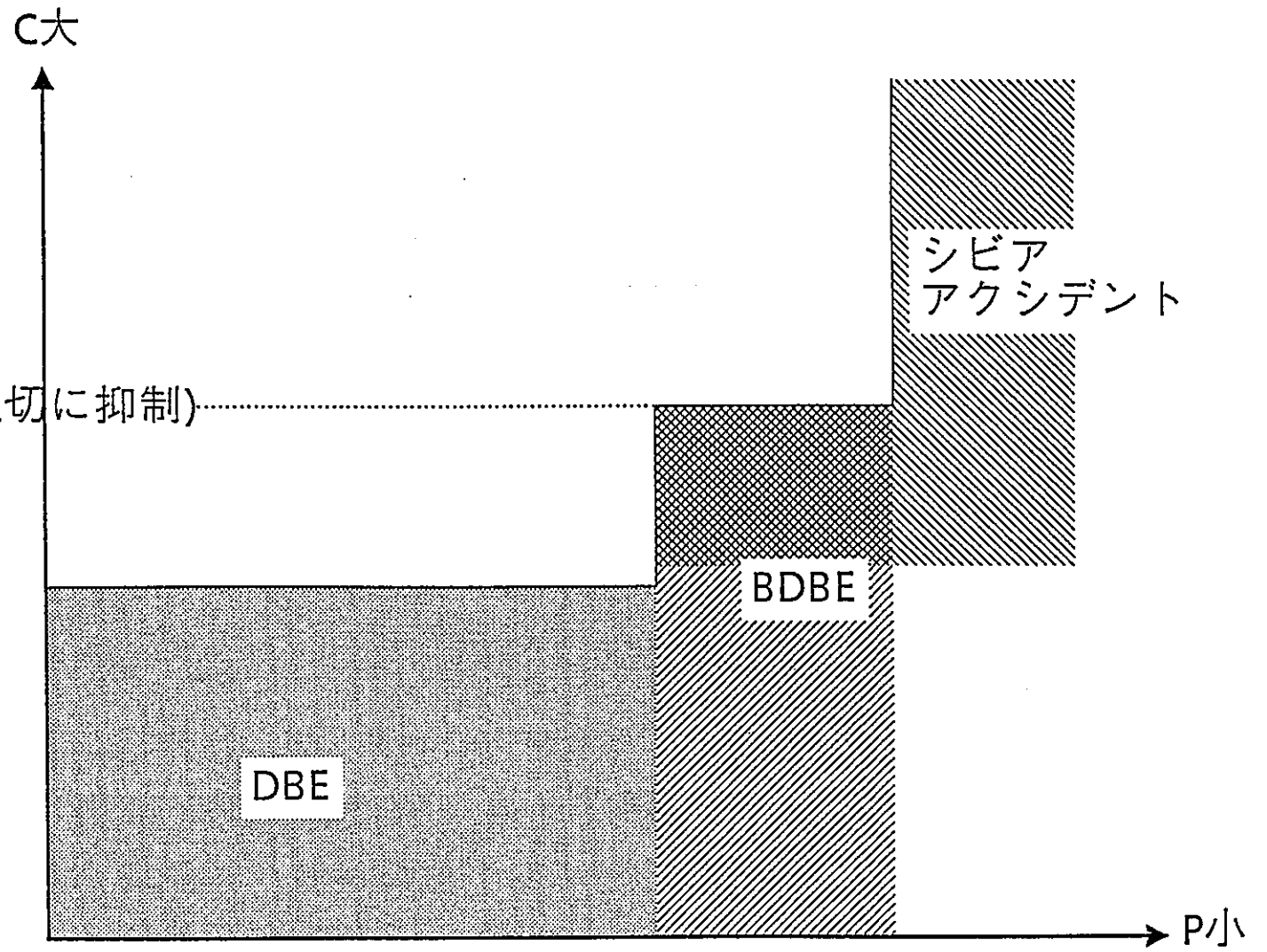
ライナ設置範囲



貯留用セラミックライナ設置範囲

1次冷却材漏洩事故対策設備設計上の課題

- ①コンクリート冷却系の必要性の評価…経済的にノンパクト
- ②セラミックスライナの経済性評価
- ③セラミックスライナの研究開発
- ④セラミックスライナのISI
- ⑤冷却系のサイフォンブレイク



格納施設の健全性が脅かされる

(放射性物質の放散を適切に抑制)

炉心が著しい損傷に至る

炉心は著しい損傷に至ることなく、かつ、十分冷却が可能である

- 35 -

判断のめやす

評価指針案上のBDBE

大型炉の設計研究

(構造・システムの合理化)

1. コンパクト原子炉構造の検討
2. 配管短縮化方策の検討
3. 中間系合理化の検討
4. 燃取システムの簡素化の検討

平成2年1月16日

動力炉・核燃料開発事業団

3.1 コンパクト原子炉構造の検討

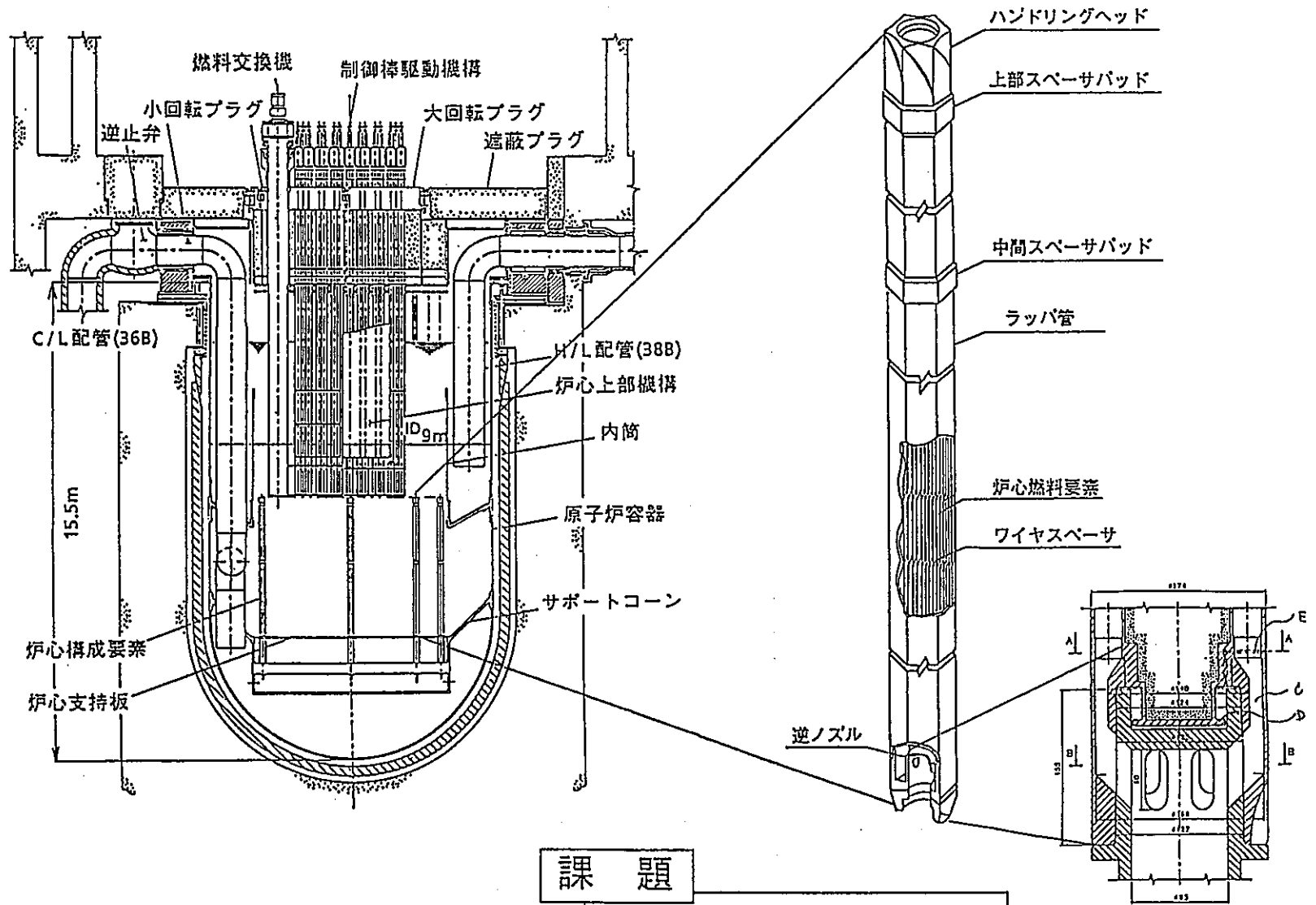
[検討目的]

上部流出入配管方式との整合性を考慮した上で、各種合理化概念を用いて、原子炉容器の小型化を達成する。

[主な特徴]

- ①逆ノズル集合体の採用、下部耐震振れ止めの削除→炉容器短尺化
- ②炉心槽、及び炉心拘束枠の削除
- ③3円筒型炉心上部機構の採用
- ④使用済燃料の炉内貯蔵(IVS)の削除→保持筒内NaポットEVSの採用
- ⑤建屋水平免震の採用
- ⑥上部流出入配管方式→原子炉容器からノズルを削除

逆ノズル型集合体の検討及び課題



課題
支持構造の健全性評価

受けノズル構造

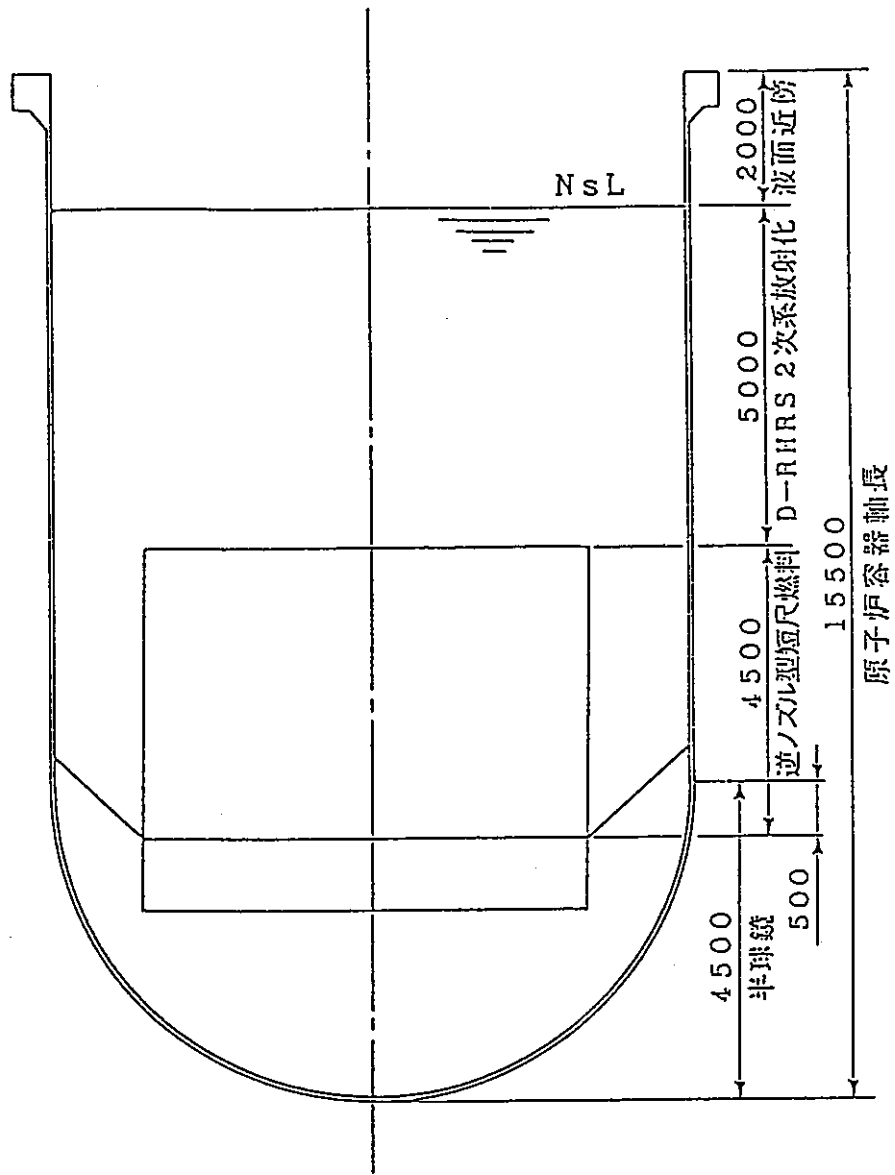
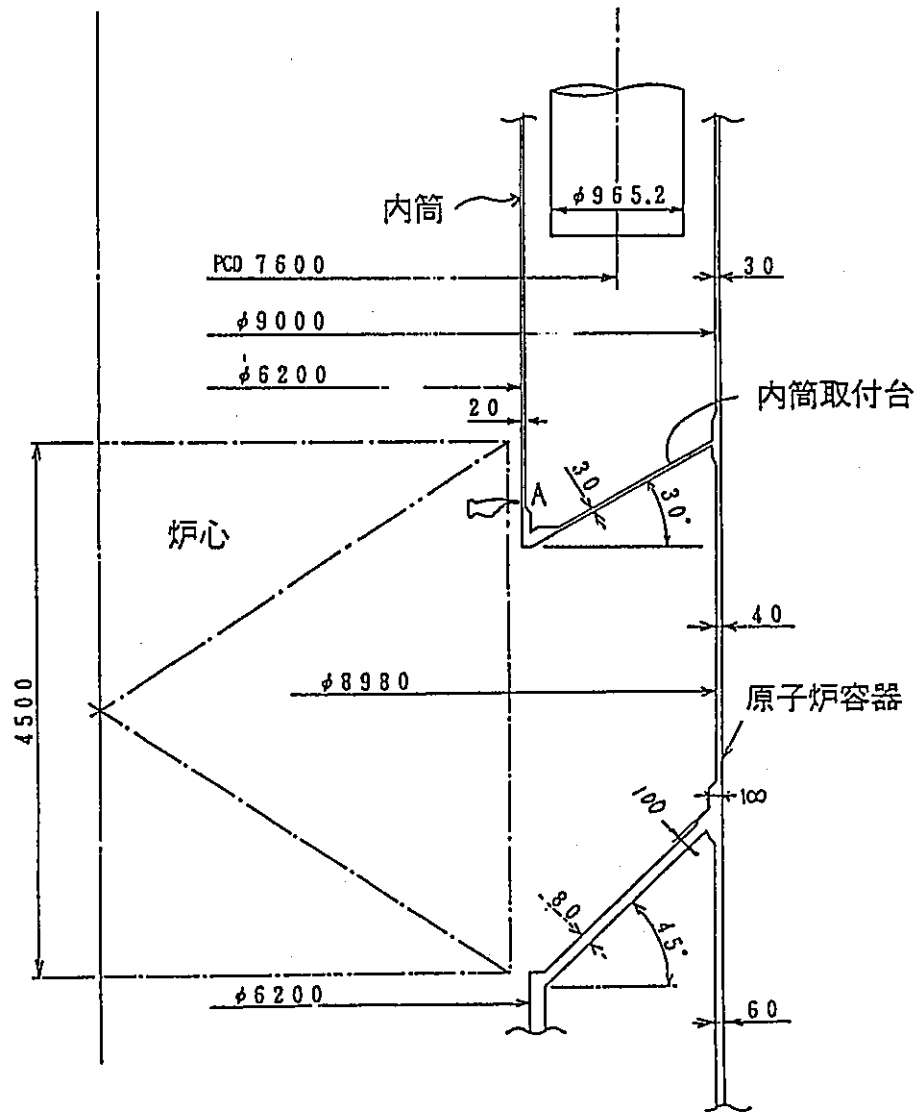


図 原子炉容器軸長の設定

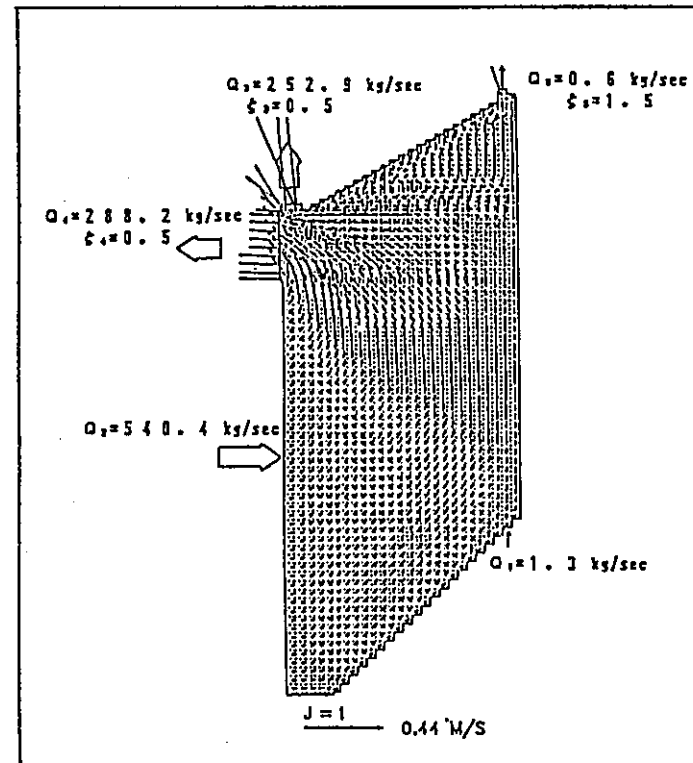
炉心槽及び炉心拘束棒の廃止の検討及び課題



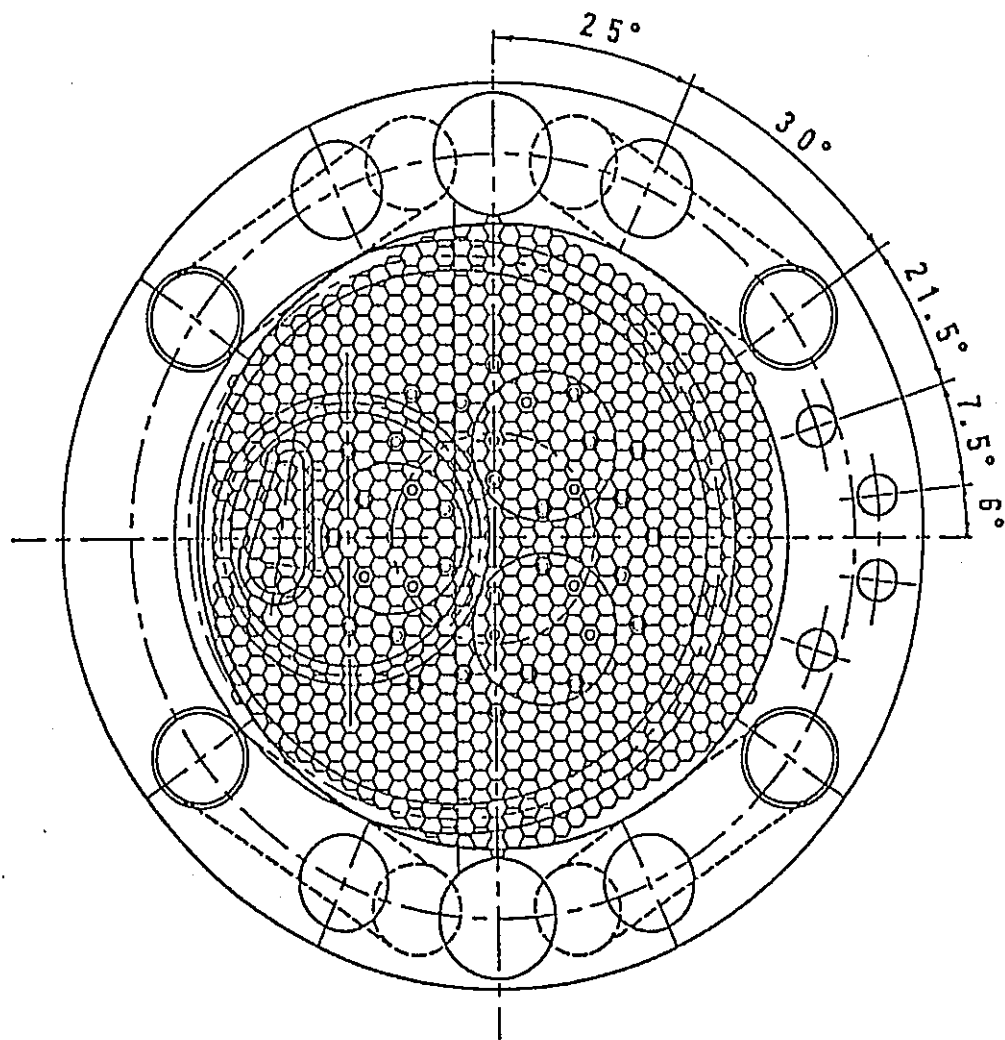
[検討項目]

- ①内筒内径 → 6200mm Φ
- ②B₄C遮蔽体の採用
- ③地震時挙動及び炉心変形挙動
- ④中間プレナムの熱流動

中間プレナム熱流動解析結果



3円筒型炉心上部機構の検討及び課題



課題

サーマルストライピングの検討

1. 炉心上部機構

(1) 円筒胴外径 : $\phi 1500$ mm

(2) 配列ピッチ円半径 : R1047 mm

2. 小回転プラグ

(1) 偏心量 : 1500 mm

(2) 駆動部外径 : $\phi 2900$ mm

3. 大回転プラグ

(1) 偏心量 : 400 mm

(2) 駆動部外径 : $\phi 5900$ mm

4. 原子炉容器

(1) 内径 : $\phi 9000$ mm

使用済燃料炉内貯蔵の廃止の検討及び課題

[炉内貯蔵(IVS)の廃止]

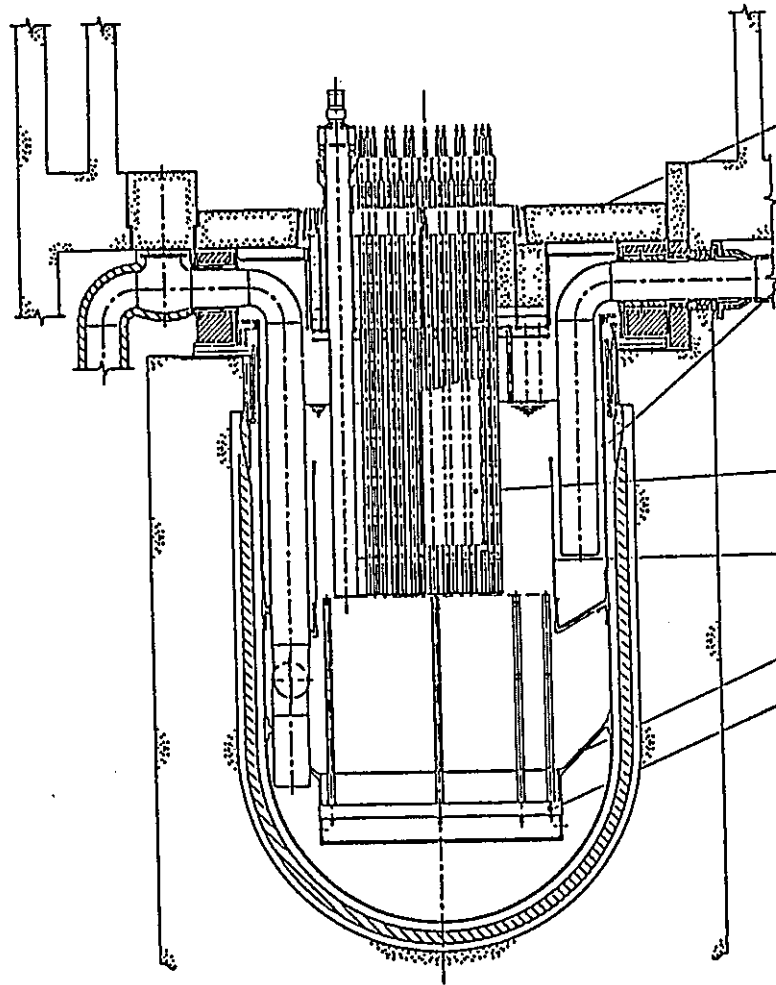
径方向にコンパクトな原子炉構造 → 内筒内径 6,200mm^Φ

使用済燃料貯蔵方式 → 保持筒内NaポットEVS方式の採用

利 点

- ① 「もんじゅ」EVSTに比べ、炉外燃料貯蔵槽、Na補助冷却設備を削減
- ② 炉外中性子検出系の成立性期待
- ③ 水系への雰囲気移行不要

建屋免震採用による原子炉構造の検討及び課題

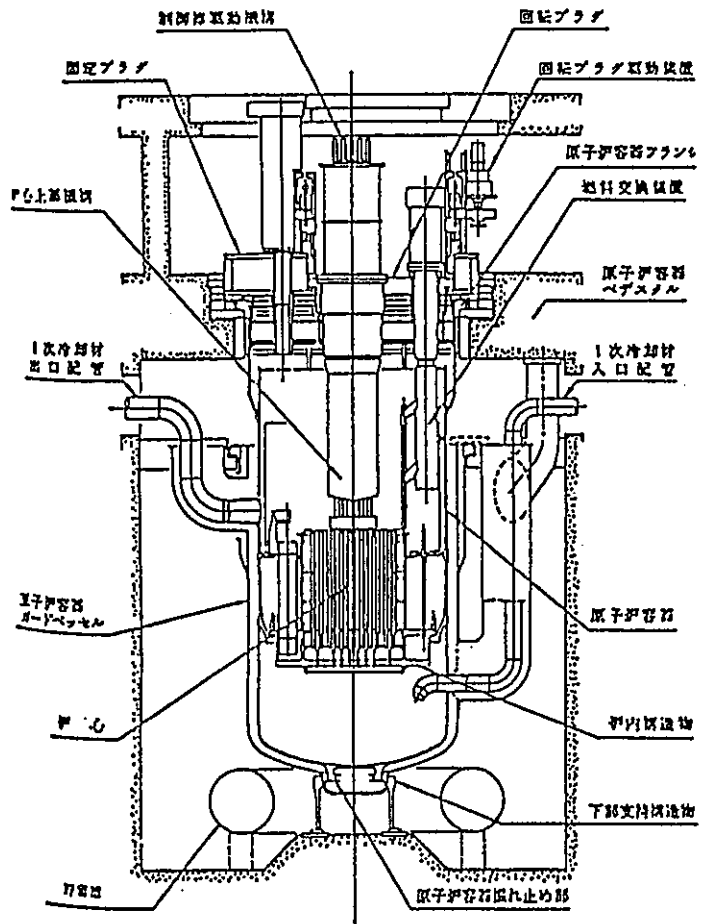


150万kWe [免震] 100万kWe [非免震] (単位mm)

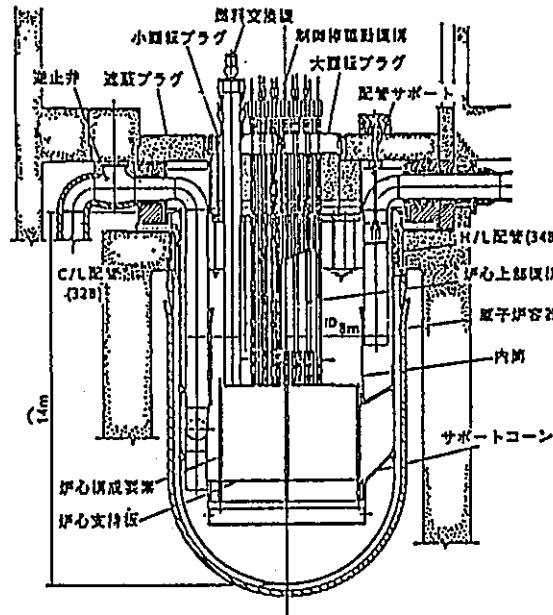
		150万kWe [免震]	100万kWe [非免震]
遮へいプラグ	平板	30	38
	リップ	25	25
原子炉容器	上部フランジ	450 ^x × 400 ^H	460 ^x × 450 ^H
	上部胴	30	50
	中間胴	40	50
	下部鏡	60	50
炉心上部機構	10	20	
内筒	20	30	
サポートコーン	80	80	
炉心支持構造物底板	340	250	

課題

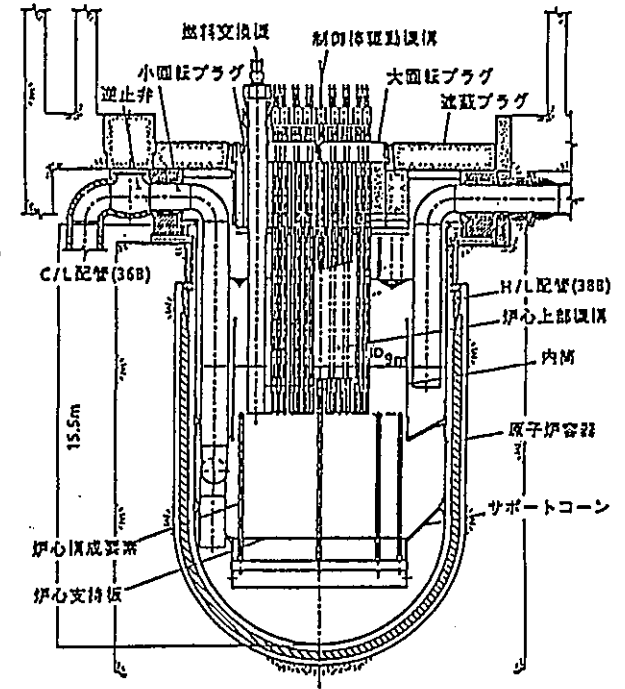
- ① 各部の板厚の詳細評価
- ② 流体連成効果の確認
- ③ 地震による上下動評価



(a) 「もんじゅ」
[28万kwe]



(b) 大型炉
[100万kwe]



(c) 大型炉
[150万kwe]

図 原子炉容器形状の比較

表 「もんじゅ」との比較

項 目	「もんじゅ」	大型炉	
		100万 kWe	150万 kWe
電気出力	28万 kWe	100万 kWe	150万 kWe
原子炉出口温度	530 °C	530 °C	550 °C
RV内径	7,100 mm	8,000 mm	9,000 mm
RV軸長	17.8 m	14 m	15.5 m
RV板厚	50 mm	50 mm	30 mm (上部胴) 40 mm (中間胴) 60 mm (下部鏡)
構造材重量	284 ton	330 ton	325 ton
Naインベントリ	526 m ³	450 m ³	648 m ³
重量 / 電気出力	10.1 ton/万kWe	3.3 ton/万kWe	2.2 ton/万kWe
インベントリ / 電気出力	18.8 m ³ /万kWe	4.5 m ³ /万kWe	4.3 m ³ /万kWe

原子炉構造全体概念の検討及び課題

[成 果]

- ①原子炉容器の小型化達成→ $9.0\text{m}^{\Phi} \times 15.5\text{m}^{\text{L}}$
- ②上部流出入配管方式との整合性確認
- ③DRACS(直接炉心冷却系)との整合性確認
- ④燃料出入設備(回転ツインチェンバ)との整合性確認
- ⑤炉心支持構造物の耐圧性確認 炉心支持板→ 6.2m^{Φ} 、 $210\text{mm}^{\text{t}} \times 2$
- ⑥炉容器液面近傍の構造健全性確認

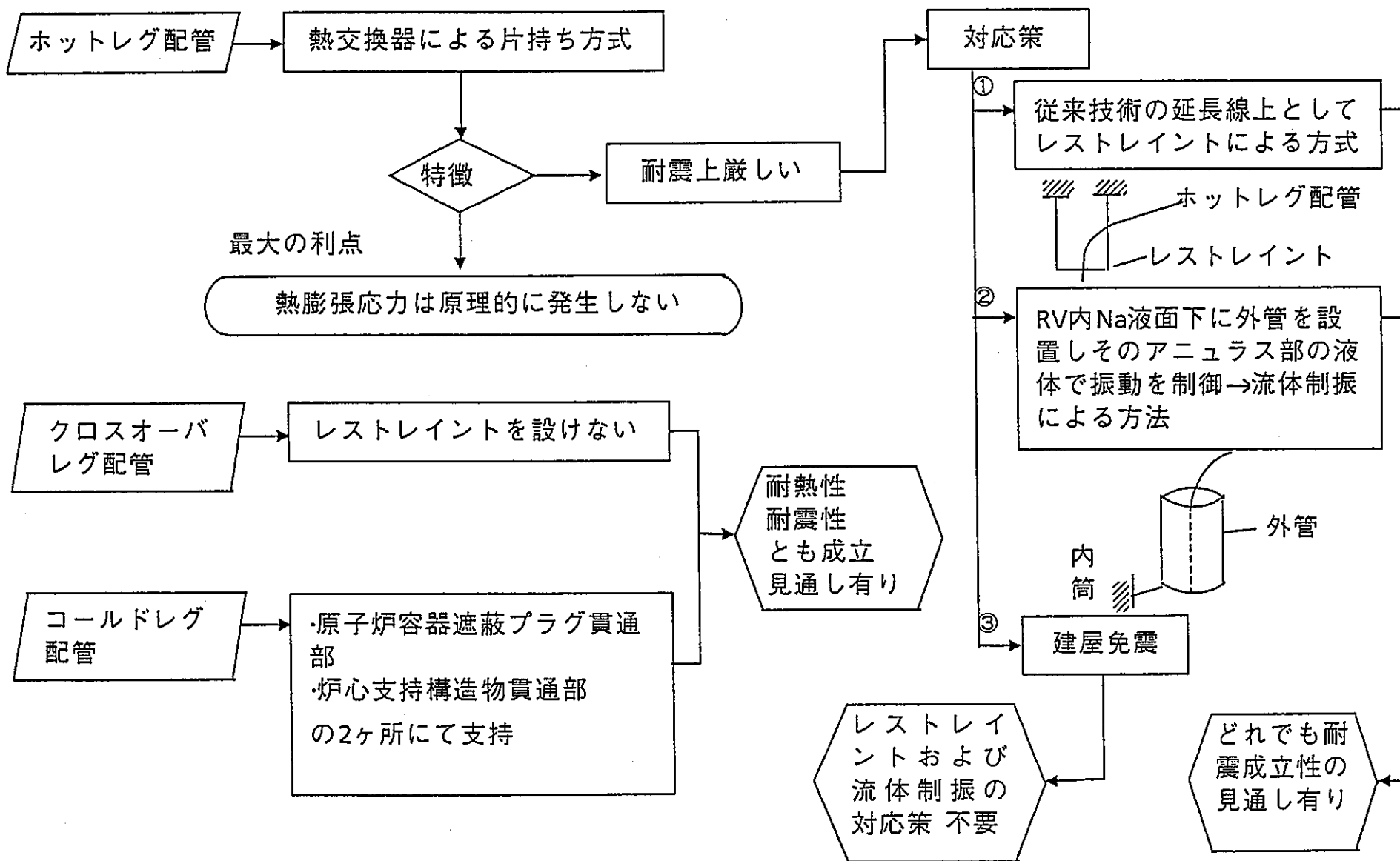
[検討課題]

熱過渡応答の検討

3.2 配管短縮化方策の検討

- ・ 検討目的 ; 機器配置のコンパクト化
- ・ 主な特徴 ;
 - ① 炉外配管長の短縮
 - ② 原子炉容器のノズル削除
 - ③ ホットレグ配管の熱応力緩和

上部流出入配管の耐震性の検討



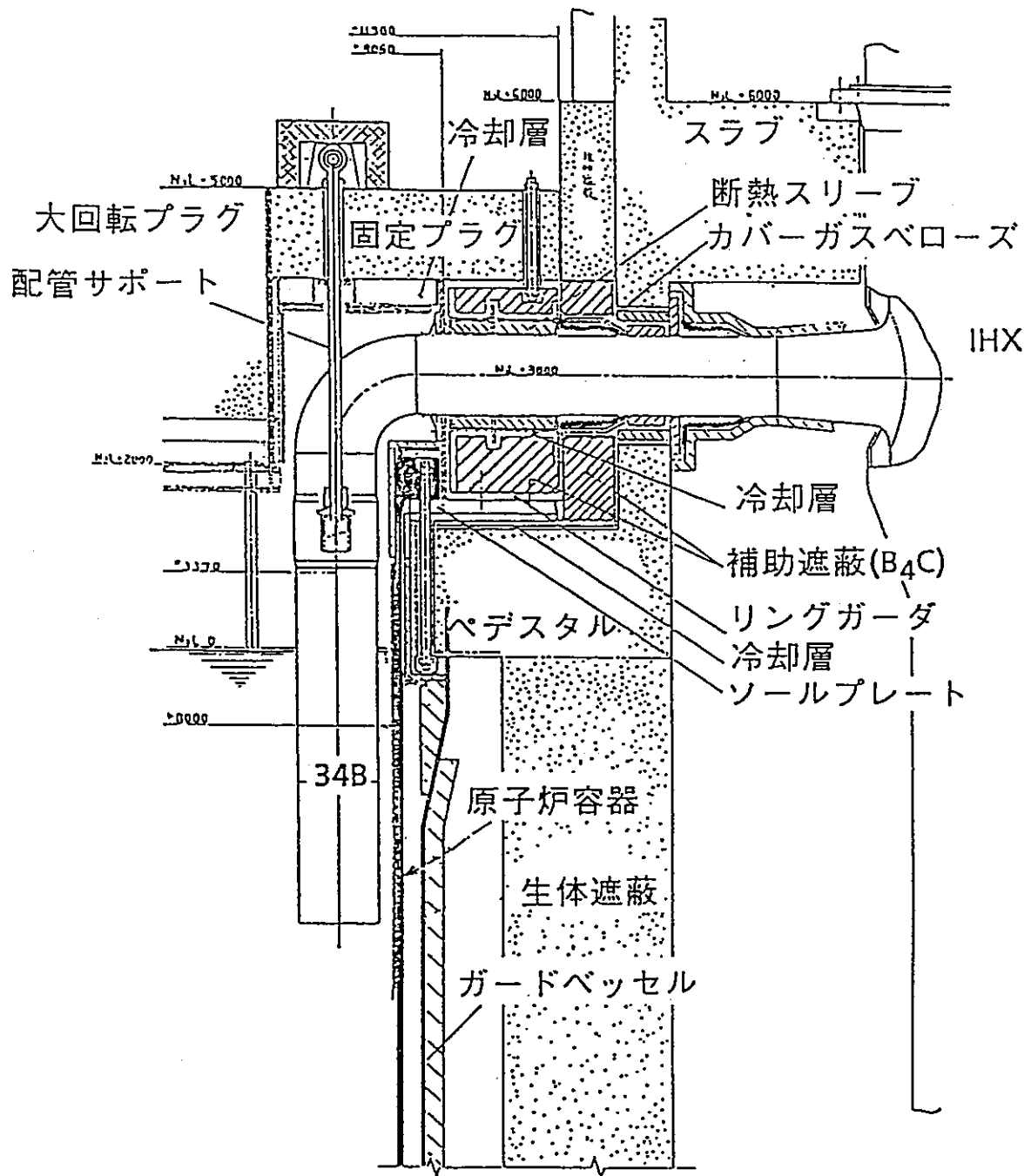


図 原子炉上部構造 (ホットレグ)

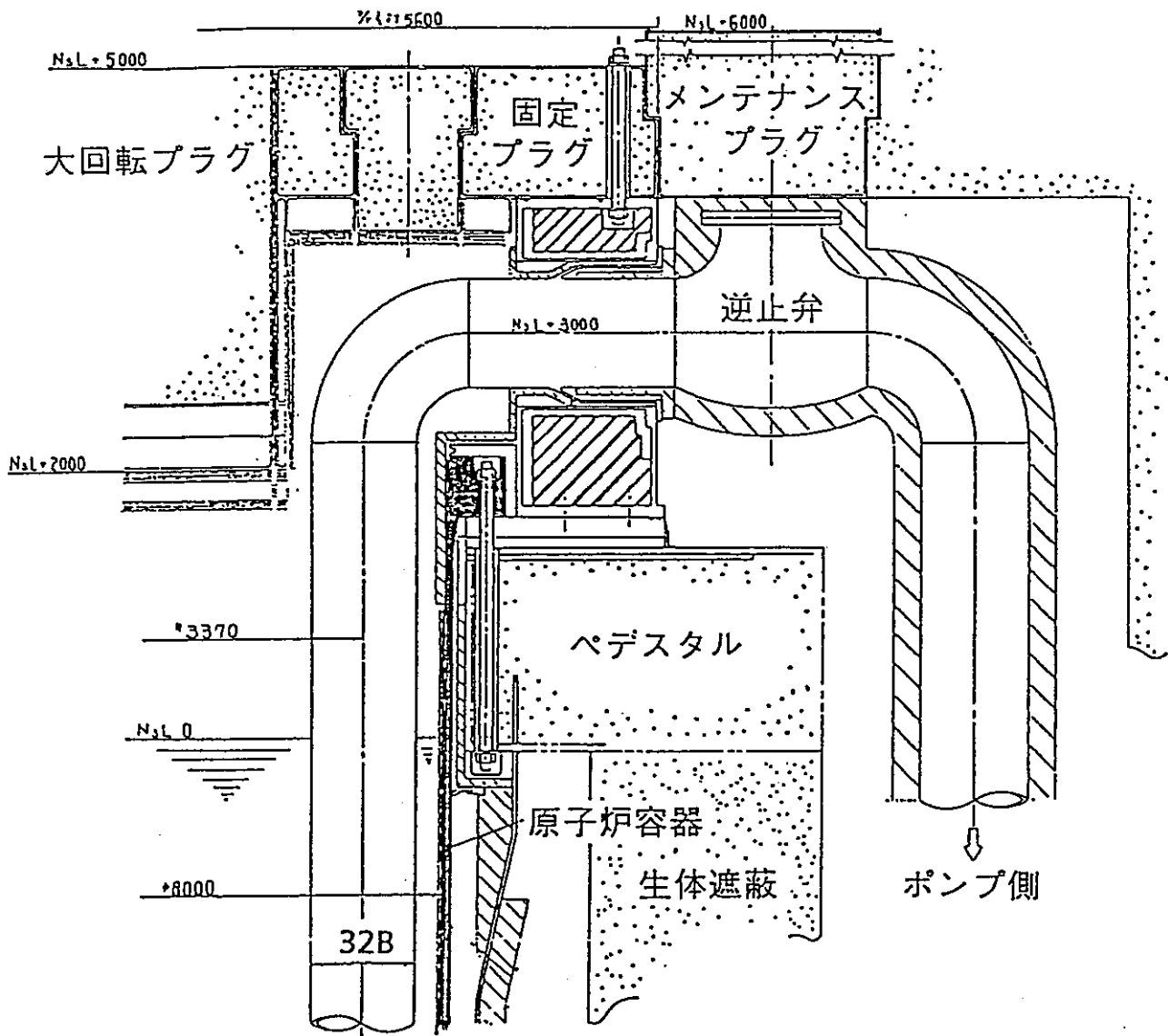


図 原子炉上部構造 (コールドレグ)

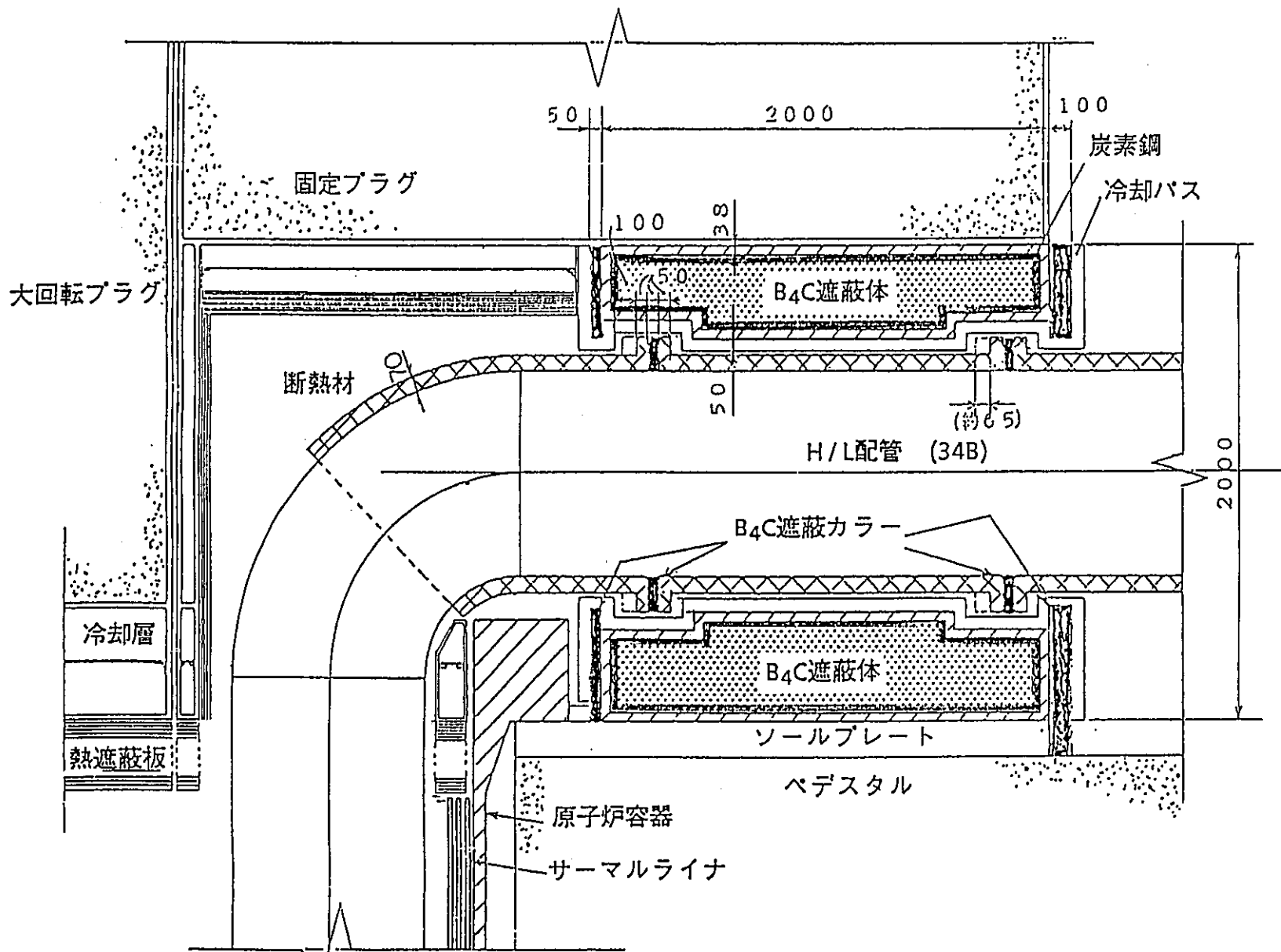
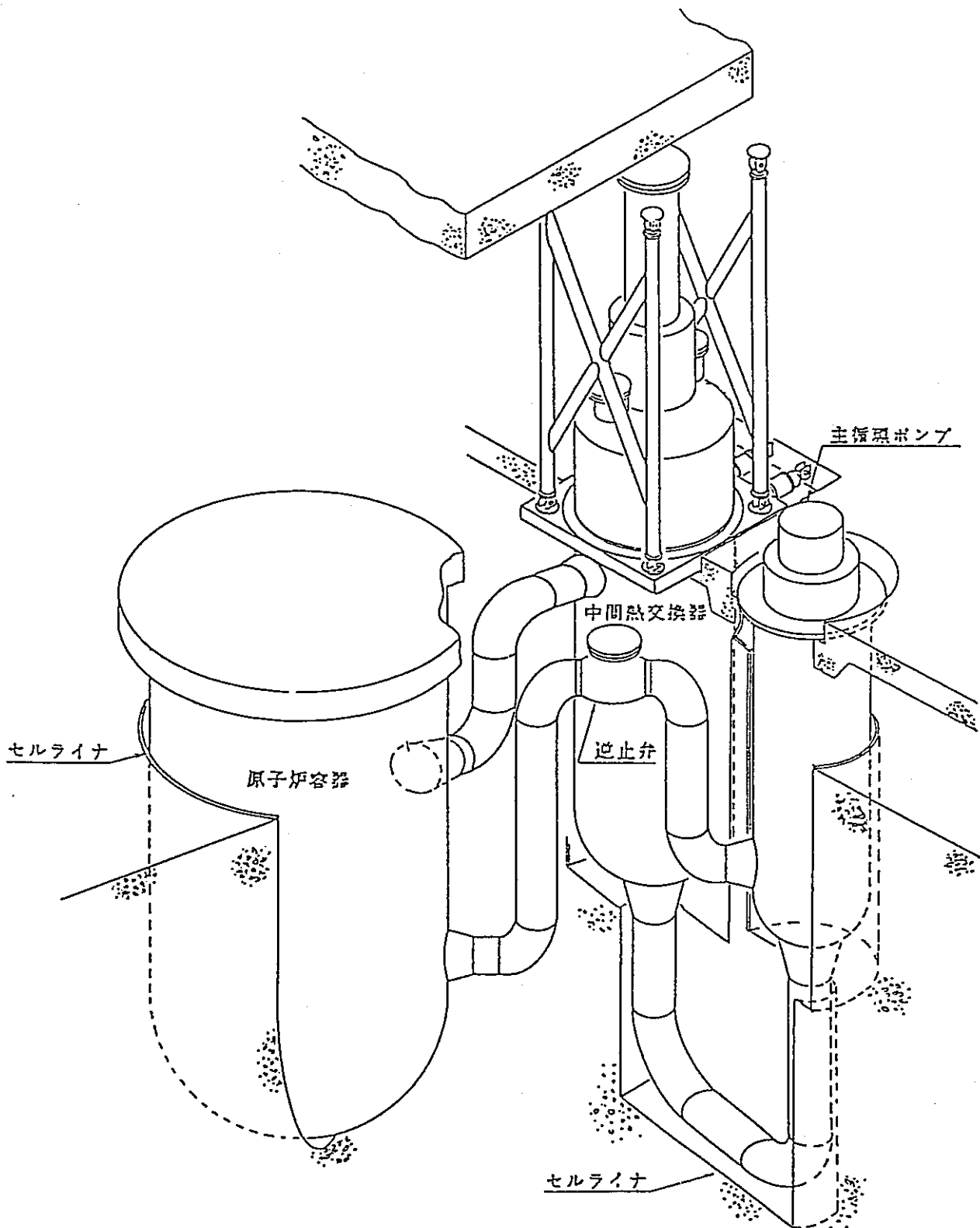
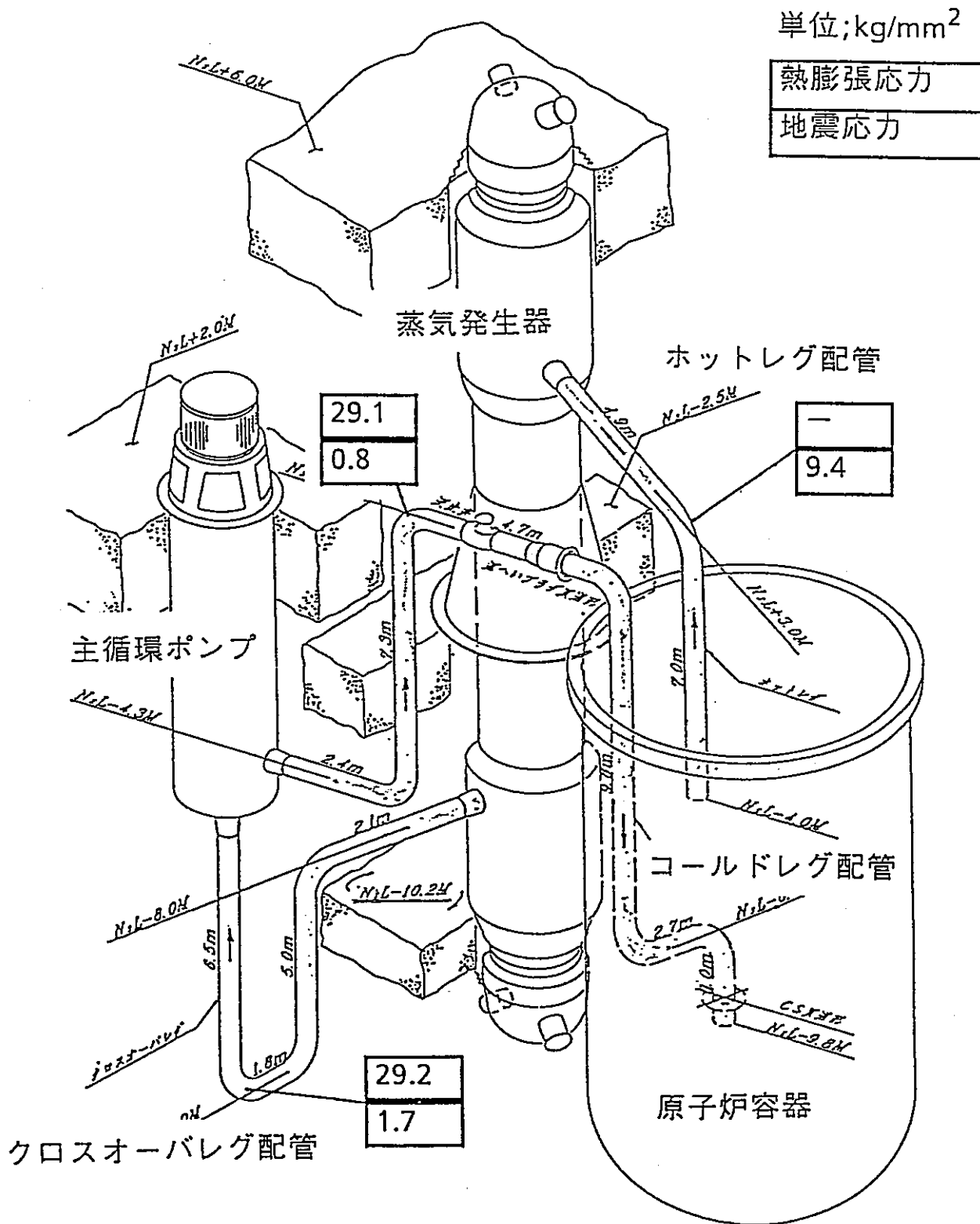


図 遮蔽プラグ貫通部廻り構造 概念図



中間熱交換器フローティングサポート方式1次熱輸送系配置(鳥瞰図)



建屋免震された場合の1次系配置鳥瞰図

150万kWe級プラント

主冷却系配管長さの比較評価

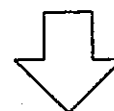
[検討条件]

- ・電気出力 100万KW
- ・ループ数 4
- ・格納施設形状 矩形

[評価] ループ当りの配管長さ

(炉内配管分含む)

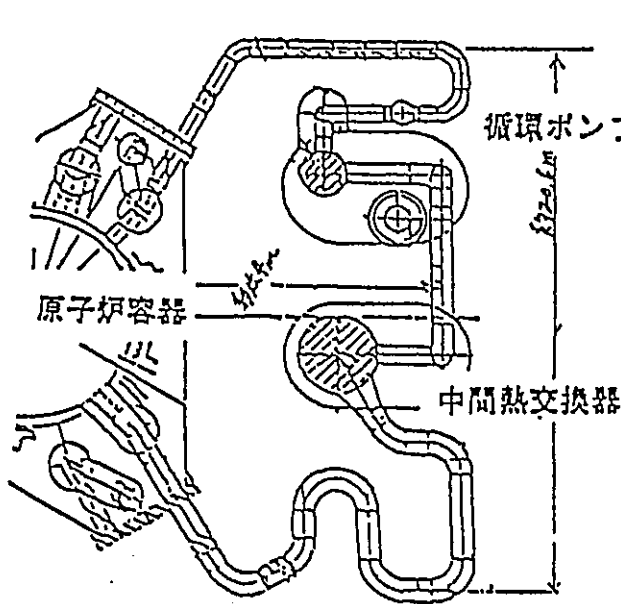
- ・中間熱交換器フローティングサポート方式 →約40m
- ・上部流出入方式 →約54m



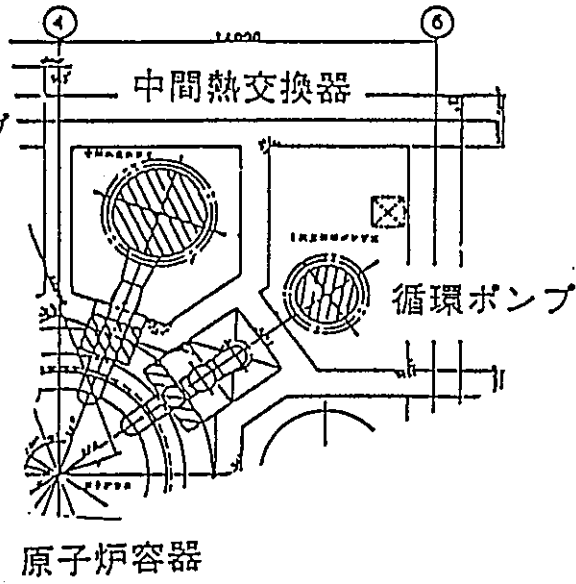
建物面積、容積の拡大の主要因子となる炉外配管長さは

上部流出入方式	→約32m
---------	-------

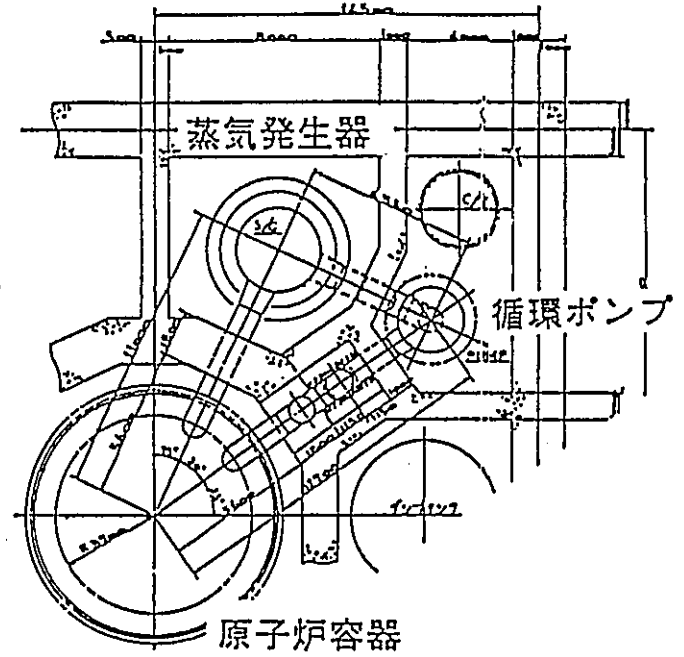
で8m短縮されている。



配管長:112m/ループ
もんじゅ 28万KWe



配管長:約54m/ループ
大型炉 100万KWe



配管長:約57m/ループ
大型炉 150万KWe

1次熱輸送系配管廻りの検討

検 討 課 題

- (1) 原子炉容器デッキ貫通部における遮蔽性能の確保
- (2) 原子炉容器デッキ貫通部における温度分布挙動
- (3) 配管サポート、シールベローズ、SGノズル等の部位における構造健全性評価(熱過渡応力評価)
- (4) 液位変動、ナトリウム漏洩対策
- (5) メンテナンス手法の確立

3.3 中間系合理化の検討

[検討目的]

- 高速増殖炉の実用化方策の検討に資する。
- 熱輸送系をコンパクト化し、高速増殖炉の建設費を削減する。
- 2次系削除システムの概念の成立性見通しを得る。
- 必要な研究開発項目の抽出

[主な特徴]

- 2005～2010年着工を想定した概念
- 機器の小型化、配置のコンパクト化
- 合理的でライセンスブルな安全論理を目標
- 現状までのR&D成果及び開発計画の反映
- 2重直管型SGの採用
- 各種合理化概念との整合
 - ・コンパクト原子炉構造
 - ・上部流出入配管方式
 - ・建屋免震

中間系合理化の検討

検討項目

- 2重管SGの構造概念検討
- 伝熱管破損の検討
- 伝熱管破損検出系の検討
- Na-水反応生成物収納設備の検討

1500MWeプラントの2重管SGの検討

検討項目

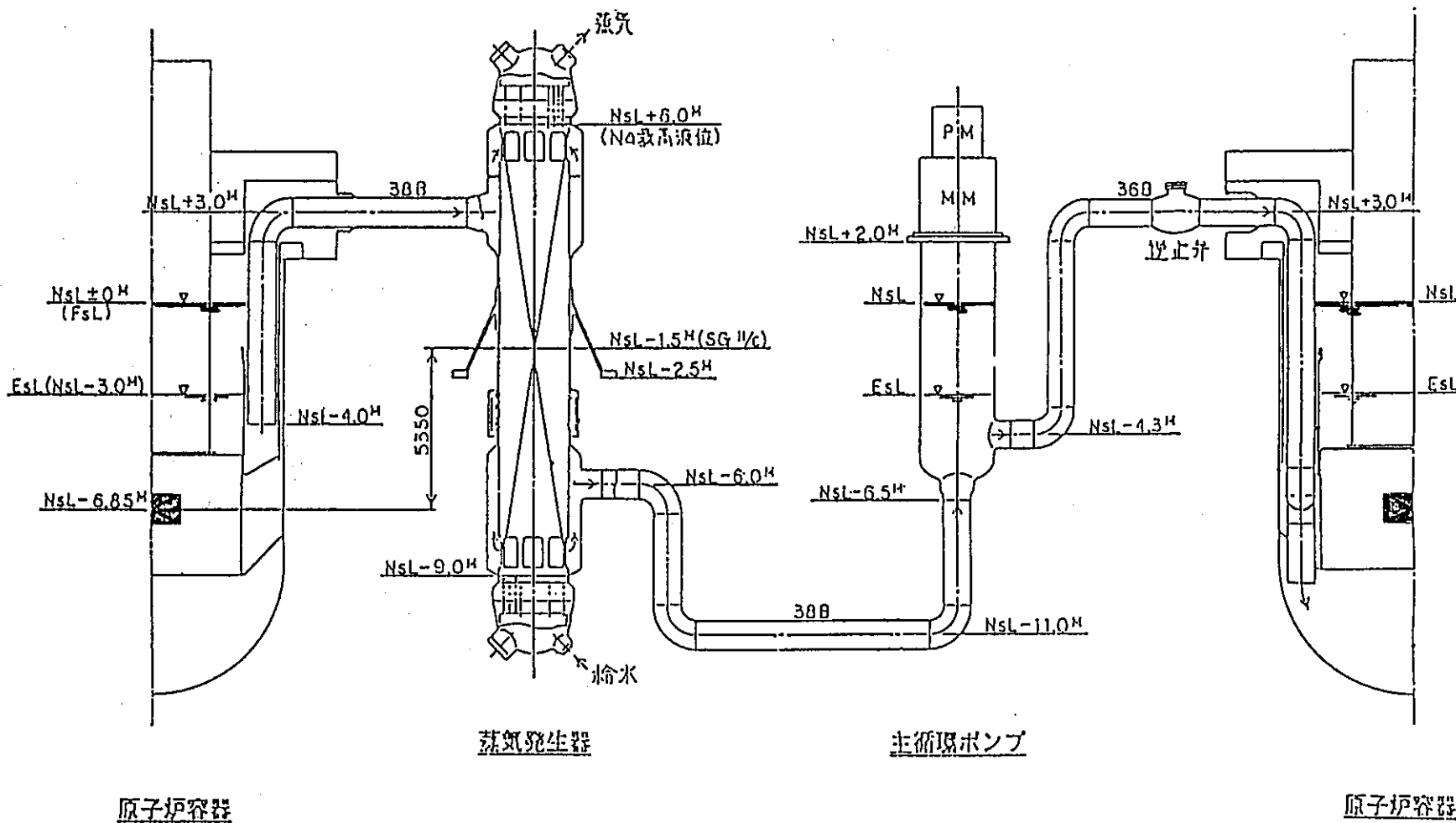
- SG型式
- 1次側圧損
- 伝熱中心高さ
- 2重管方式
- 伝熱管口径,肉厚
- 伝熱管ピッチ
- 伝熱管長さ,本数
- 伝熱管材質
- 水側流速

制限条件

- 製作性,上部流出入配管方式
- ポンプNPSH
- 自然循環力確保,配置
- 小型化(伝熱特性),R&D実績
- R&D実績,強度,本数削減
- 製作性,圧損,小型化
- 製作性,圧損,シュラウド径
- R&D実績
- 従来実績

蒸気発生器 主要目

項 目	仕 様	単 位
形 式	一体貫流無液面式2重直管型	—
朋 創 流 況	ジグザグ式	—
基 数	4	基
設 計 条 件		
交 換 熱 量	937.5	MW t
定 格 温 度		
ナトリウム側 入口/出口	550/355	℃
水・蒸気側 入口/出口	240/503	℃
定 格 蒸 気 圧 力	132	kg/cm ² g
定 格 流 量 ナトリウム側/水・蒸気側	17.2/1.465	×10 ⁴ kg/h
設 計 温 度 ナトリウム側/水・蒸気側	570/520	℃
設 計 圧 力		
ナトリウム側	2.5	kg/cm ² g
水・蒸気側 内管/外管	135/10	kg/cm ² g
設 計 結 果		
有 効 伝 熱 面 積	2800	m ²
伝 熱 管 長	15.0	m
伝 熱 管 寸 法		
伝熱管外径/肉厚 外管	19.0/1.9	mm
内管	15.2/1.5	mm
伝熱管本数	3530	本
伝熱管配列パターン	正三角配列	—
伝熱管配列ピッチ	36.0	mm
圧 力 損 失		
ナトリウム側	0.59	kg/cm ²
水・蒸気側	3.0	kg/cm ²
概 略 寸 法		
外 周 径 ノズル部	3.2	m
管 束 部	2.5	m
高 さ	20.0	m
シュラウド内径	2.3	m
材 質 朋	Mod. 9Cr-1Mo	—
伝熱管	Mod. 9Cr-1Mo	—



2次系削除システムの系統概念

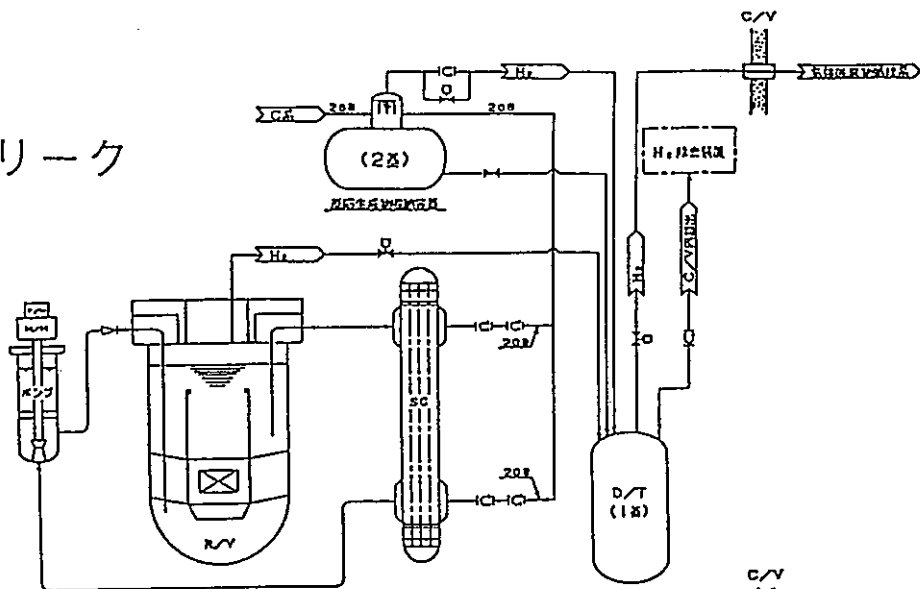
伝熱管破損の検討

- 1.貫通リークなし(伝熱管の片側破損)
内管または外管のみの破損、Na-水反応なし
- 2.微小リーク
ウエステージ等による破損拡大なし
反応生成物の炉心への影響小さい
- 3.小リーク
ウエステージ等による破損拡大小さい
反応生成物の炉心への影響小さい
- 4.大リーク
ウエステージ等による破損拡大
Na-水反応による圧力波発生
反応生成物の炉心への影響大きい

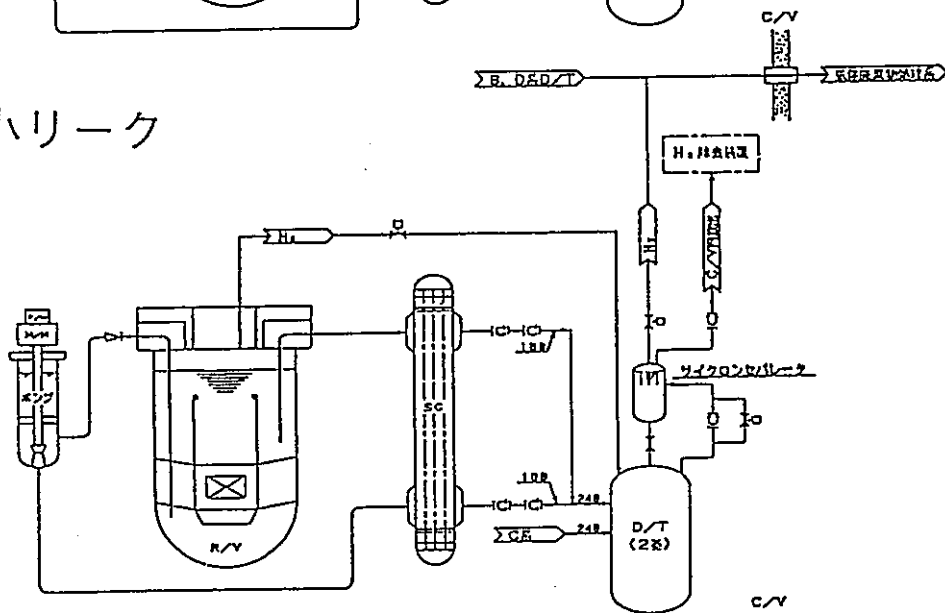
伝熱管破損検出系

検出系	内管破損	外管破損	微小リーク	小リーク	大リーク
ヘリウム中湿分計	○				
ヘリウム圧力計	○	○			
Na中ヘリウム検出器		○			
Na中水素計			○	○	
カバーガス中水素計			○	○	
音響計				○	○
カバーガス圧力計				○	○
ラプチャーディスク 破裂信号					○

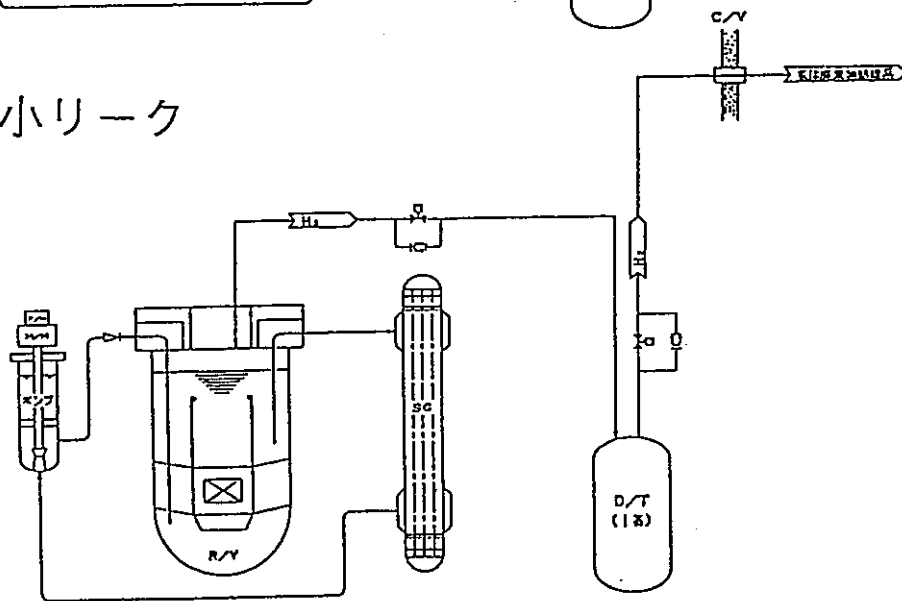
設計基準大リーク



設計基準小リーク



設計基準微小リーク



反応生成物収納設備の検討

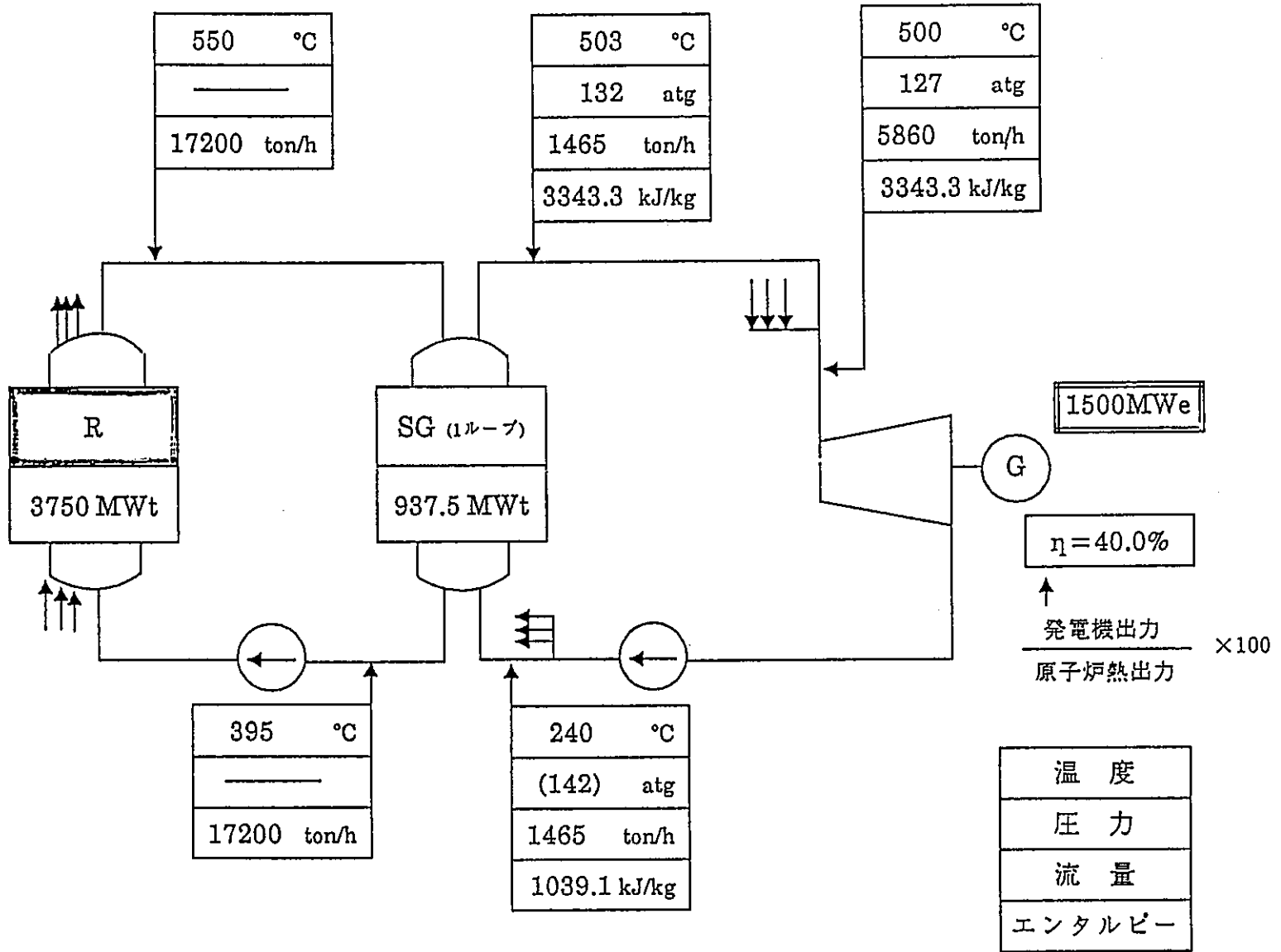


図 2次系削除型プラント ヒートバランス (100%負荷)

検討課題

- ①設計基準事象と安全論理(後述)
- ②高信頼性2重管型蒸気発生器の開発
- ③高信頼性伝熱管破損検出システムの開発
- ④Na-水反応生成物の炉心混入防止と崩壊熱除去
- ⑤Na-水反応生成物の収納・隔離
- ⑥2重伝熱管ISI手法、プラグ法の開発
- ⑦水・蒸気ブローダウン
- ⑧プラント効率の向上
- ⑨更なる合理化(ヘリカル2重管SGとEMPの合体)

3.4 燃取システムの簡素化の検討

[目的] 使用済燃料貯蔵設備の簡素化

[特徴]

①保持筒内NaポットEVS方式の採用

○使用済燃料をNaポットに入れた状態で取出し、炉外にて保持筒による減衰待貯蔵を行う。

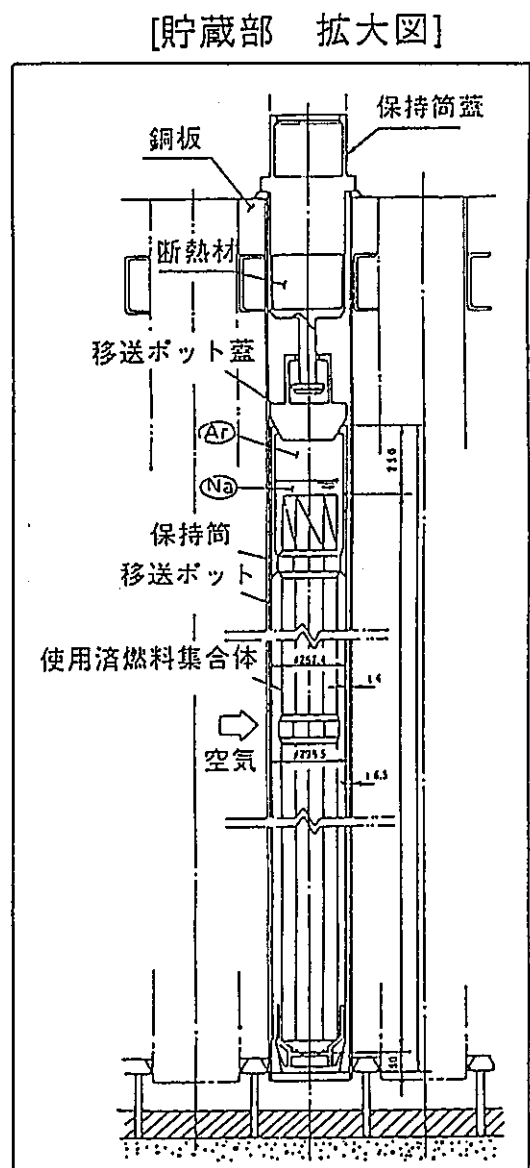
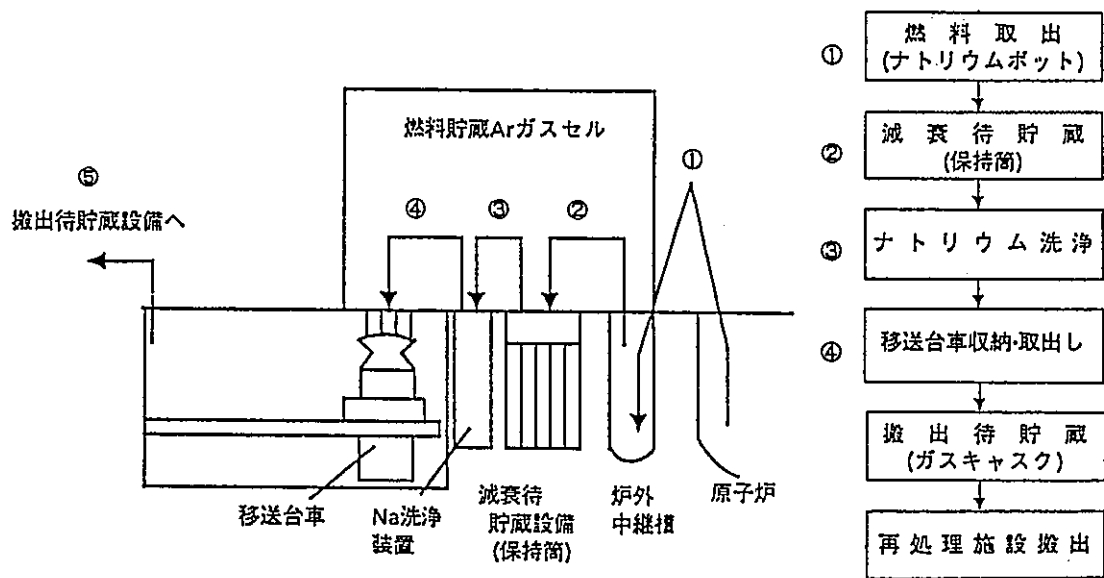
○大型の炉外燃料貯蔵槽、Na補助冷却設備を削減

○原子炉構造のコンパクト化

②空気冷却による崩壊熱除去

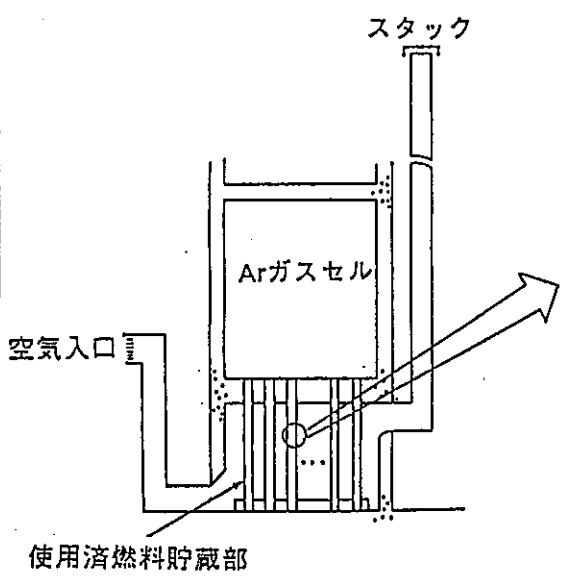
○ガス中搬出待貯蔵との組合せで、水系への雰囲気移行不要

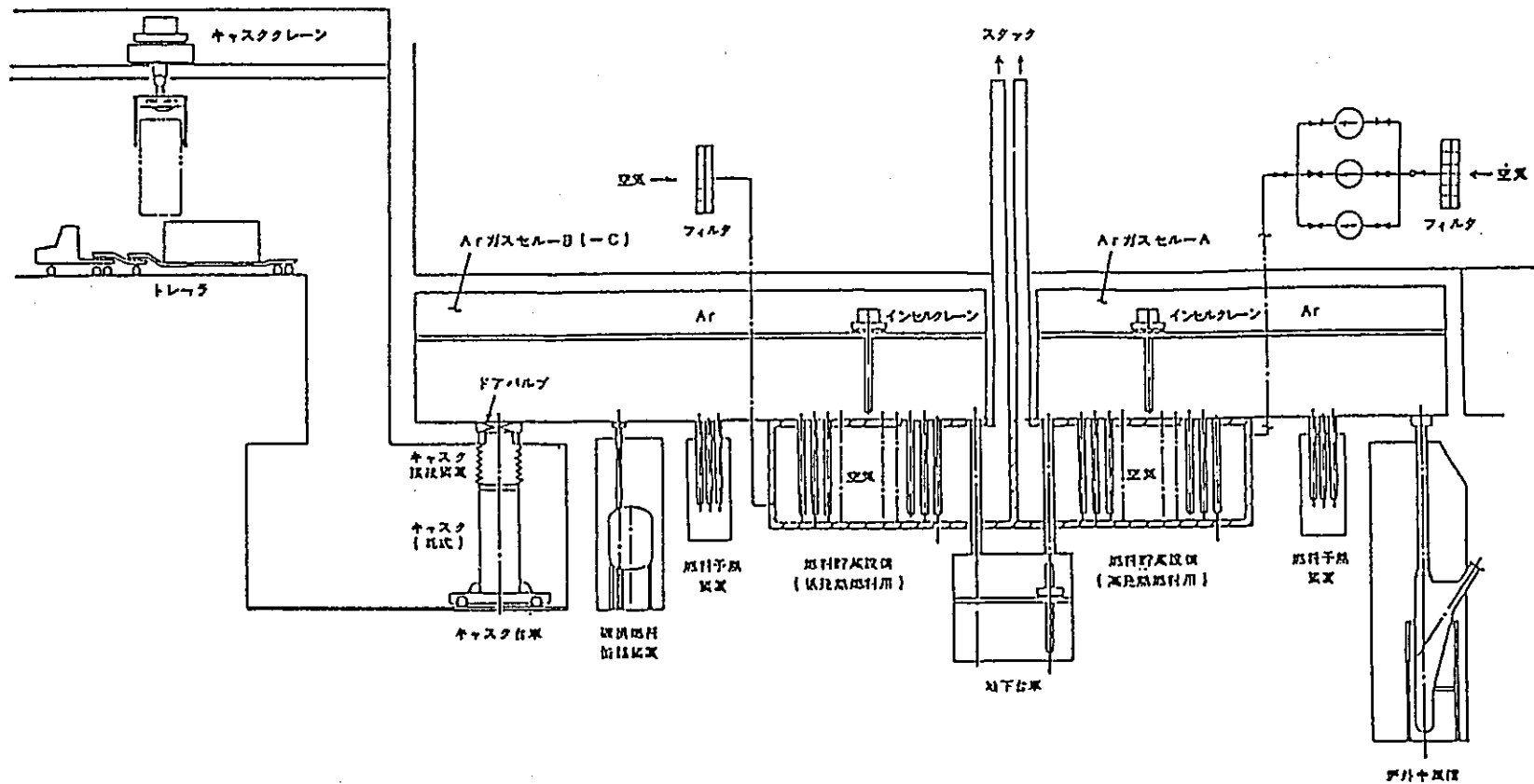
保持筒内NaポットEVS方式の概念



特徴

- 高発熱用：強制通風冷却
- 低発熱用：自然通風冷却
- Naタンク補助設備→削減





ナトリウムポットEVS方式系統概念図
 (保持筒内貯蔵方式一分割セル方式)

燃取システムの簡素化 －その他の検討－

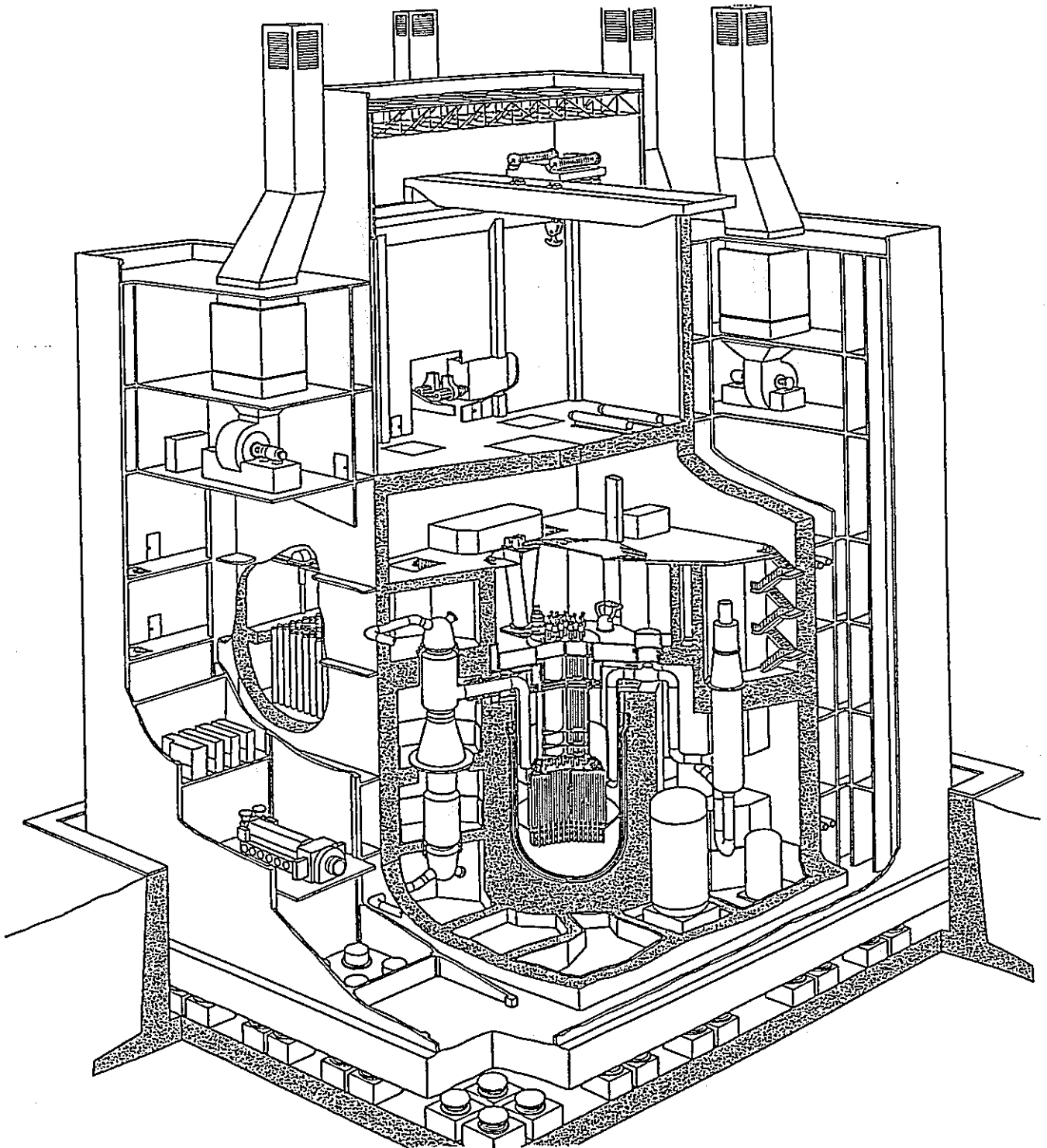
- | | |
|-------------|---------------------|
| 燃料交換方式----- | 固定アーム型オフセット式 |
| 燃料出入方式----- | 曲斜道シュート方式/回転ツイチェーンバ |
| 燃料洗淨方式----- | 高温Arガス洗淨 |

表 「もんじゅ」との比較

項 目	「もんじゅ」	大型炉	
		100万 kWe	150万 kWe
電気出力	28万 kWe	100万 kWe	150万 kWe
燃料交換機方式	固定アーム形 パンタグラフ式	固定アーム形 オフセット式	同左
燃料出入機方式	炉内中継機構/ 走行台車方式	シュート/ 回転ツインチェーンバ	同左
燃料貯蔵方式	炉外燃料貯蔵槽 +水プール	保持筒内 NaポットEVS	同左
燃料洗浄方式	湿式洗浄 (蒸気洗浄 + 水浸漬)	高温Arガス洗浄	同左
占有面積	3600 m ²	380 m ²	450 m ²
面積/電気出力	129 m ² /万kWe	3.8 m ² /万kWe	3.0 m ² /万kWe

燃取システムの簡素化 (検討課題)

1. 燃料交換機カバーガス中露出対策
 - ・荷重伝達部までのNa汲み上げ
 - ・酸化物が付着しにくい材料の開発
2. 燃料出入機の実証試験
 - ・曲斜道シュート方式
 - ・回転ツインチェーンバ型燃料出入機
3. 保持筒内NaポットEVS方式の評価
 - ・高輻射率表面材料の開発
 - ・除熱特性、安全性評価
 - ・貯蔵燃料の耐食性評価
4. Arガス洗浄効率向上等



150万kWe級プラントの概念

大型炉の設計研究 (炉心・燃料設計研究)

- 1.高性能大型炉心の検討
- 2.高性能燃料の検討
- 3.高性能制御棒・遮蔽体の検討

平成2年1月16日

動力炉・核燃料開発事業団