

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討

－酸化物燃料炉心－

(研究報告)

2002年12月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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4-49

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)

2002

2002年12月

ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討

— 酸化物燃料炉心 —

(研究報告)

山館 恵^{*1}、山口浩之^{*1}、永沼正行^{*1}
水野朋保^{*1}、高木直行^{*1*2}

要 旨

FBR サイクル実用化戦略調査研究フェーズⅡの初年度である 2001 年度におけるナトリウム冷却酸化物燃料炉心の炉心・燃料設計についての検討成果を報告する。
主な成果を以下に示す。

(1) 大型炉（出力1,500MWe）

- ABLE型燃料集合体を用いた均質炉心では、燃料サイクルコスト低減の観点からブランケットも含めた実効取出平均燃焼度の向上を目指して検討した。燃料仕様の見直し、径方向ブランケットの削減(2層→1層)等により実効取出平均燃焼度は63GWd/tから77GWd/tまで向上できた。
- 内部ダクト付き集合体を用いた炉心概念では、内部ダクト膨れ量の評価に基づき内部ダクトの肉厚を設定して検討した。その結果から、ABLE型集合体概念に比べた核特性の低下度合いは燃焼反応度で0.6%Δk/kk'程度であることがわかった。
- 径方向非均質炉心では、実効平均燃焼度の向上と同時に熱特性の改善を目指して内部ブランケットをシャーフリングする概念を取り入れた。これにより、増殖比が高いという核特性の優位性が若干薄れる結果となったが、実効平均燃焼度が56GWd/tから80GWd/tまで向上するとともに熱特性を改善できる炉心の成立見通しが得られた。

(2) 中型炉（出力500MWe）

- 魅力ある炉心概念検討の一環として太径ピンを用いた高内部転換型の炉心概念を検討した。その結果、炉容器径の制約条件を10%程度緩和できれば、径方向ブランケットなしで実効平均燃焼度100GWd/t以上で増殖比1.05程度の長期運転サイクル炉心を構築できる可能性があることがわかった。

*1 : 大洗工学センター システム技術開発部 炉心・燃料システムグループ

*2 : 日本原子力発電㈱からの派遣者

December, 2002

Design Study on Core Characteristics of Sodium Cooled Fast Reactors – Mixed oxide fuel cores –

Megumi YAMADATE^{*1}, Hiroyuki YAMAGUTI^{*1}
Masayuki NAGANUMA^{*1}, Tomoyasu MIZUNO^{*1}
Naoyuki TAKAKI^{*1*2}

Abstract

Phase-II of the Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System in Japan (F/S) has been started since April 2001 and the design studies of various FR and recycle concepts are being conducted. In this report the JFY2001 studies of sodium cooled FR with mixed oxide fuel are summarized. The main results are as following.

(1) Large scale reactors (1,500 MWe)

- As for the large scale homogeneous ABLE type fuel core, we aimed to improve the effective average burn-up (that includes contribution of blankets) in order to reduce the fuel cycle cost. The specifications of Phase-I core and fuel were modified, which results in reducing the numbers of radial blanket sub-assemblies. As a result, the effective average burn-up was improved from 63GWd/t to 77GWd/t.
- As for the inner-duct sub-assembly core, the thickness of inner-duct was decided according to the evaluation of inner-duct expansion. As a result, the core reveals greater burn-up swing by about $0.6\%\Delta k/kk'$ than that of the ABLE type fuel core.
- As for the heterogeneous core, the inner-blanket shuffling concept was studied in order to improve the effective average burn-up and the thermal hydraulic characteristics. As a result, though the breeding ratio decreases in some extent, the possible improvement is obtained in the effective average burn-up (from 56GWd/t to 80GWd/t) and core thermal hydraulic design.

(2) Medium scale reactors (500 MWe)

- As for the medium scale core, with the aim of an attractive core concept the high internal conversion ration core was studied. As a result, the obtained typical core concept reveals around 1.05 of breeding ratio with core diameter 10% greater than conventional one and without radial blanket. The core achieves over 100GWd/t of the effective average burn-up with the potential capability of long operation cycle.

^{*1} : Fuel and Core System Engineering Group, Systems Engineering Technology Division, OEC

^{*2} : Attached from JAPC

This report is the outcome of collaborative study between JNC and JAPC(that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC)in the accordance with "The Agreement About The Development of A Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System".

目 次

要旨	i
Abstract	ii
目次	iii
表リスト	iv
図リスト	vi
略語・用語表	viii
検討に当たっての定義、基本条件	x
 1.はじめに	1
2.大型炉心の検討	2
2.1 検討方針及び検討条件	2
2.2 均質炉心の検討	3
2.2.1 ABLE型集合体による均質炉心	3
2.2.2 内部ダクト型集合体による均質炉心	15
2.2.3 まとめ	23
2.3 径方向非均質炉心	24
2.3.1 ABLE型集合体による径方向非均質炉心	24
2.3.2 内部ダクト型集合体による径方向非均質炉心	52
2.3.3 まとめ	60
2.4 大型炉のまとめ	61
 3.中型炉心の検討	63
3.1 検討方針及び検討条件	64
3.2 プラント整合のレファレンス炉心の概要	65
3.2.1 選定炉心配置及び燃料仕様	65
3.2.2 核特性評価	65
3.2.3 热特性及び燃料特性評価	66
3.2.4 まとめ	67
3.3 魅力ある中型炉心の検討	77
3.3.1 候補概念の検討	77
3.3.2 太径ピン型高内部転換炉心	81
3.3.3 太径ピン型上部ナトリウムプレナム付き高内部転換炉心	89
3.4 中型炉のまとめ	101
 4.おわりに	103
参考文献	104
謝辞	105
添付資料	106

表リスト

表 2.2.1-1	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心における燃料仕様	6
表 2.2.1-2	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の主要核特性	7
表 2.2.1-3	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(1/2)	8
表 2.2.1-3	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(2/2)	9
表 2.2.1-4	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の制御棒反応度収支	10
表 2.2.1-5	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心における炉心流量配分と被覆管温度特性及び CDF 値	11
表 2.2.2-1	内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心における燃料仕様	17
表 2.2.2-2	内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の主要核特性	18
表 2.2.2-3	内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(1/2)	19
表 2.2.2-3	内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(2/2)	20
表 2.3.1-1	ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心における燃料仕様	30
表 2.3.1-2	ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の主要核特性	31
表 2.3.1-3	ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(1/2)	32
表 2.3.1-3	ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(2/2)	33
表 2.3.1-4	集合体必要流量計算手法	34
表 2.3.1-5	各集合体の必要流量概略評価結果 (内部ブランケットのシャフリング考慮)	35
表 2.3.1-6(1/2)	1 次冷却材の炉心内流量配分	36
表 2.3.1-6(2/2)	必要流量	36
表 2.3.1-7	流量領域設定後	37
表 2.3.1-8	余剰流量再配分後	37
表 2.3.1-9	解析条件(燃料仕様)、及び、設定の根拠	38
表 2.3.1-10	C D F 解析結果 (各炉心領域の代表ピン対象、照射、末期の値)	39
表 2.3.2-1	内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心における燃料仕様	54
表 2.3.2-2	内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の主要核特性	55
表 2.3.2-3	内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(1/2)	56
表 2.3.2-3	内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(2/2)	57
表 2.4-1	ナトリウム冷却酸化物燃料大型炉心における各炉心概念 主要核特性の比較	62
表 3.2-1	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心における燃料仕様	68
表 3.2-2	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の主要核特性	69
表 3.2-3	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の物量収支(2/2)	70
表 3.2-3	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の物量収支(1/2)	71
表 3.2-4	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の制御棒反応度収支	72
表 3.2-5	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心における炉心流量配分と	

被覆管温度特性及び CDF 値	73
表 3.3.2-1 高内部転換型中型均質炉心における燃料仕様	83
表 3.3.2-2 高内部転換型中型均質炉心の主要核特性	84
表 3.3.2-3 高内部転換型中型均質炉心の物量収支(1/2)	85
表 3.3.2-3 高内部転換型中型均質炉心の物量収支(2/2)	86
表 3.3.3-1 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き中型均質炉心における燃料仕様	92
表 3.3.3-2 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き中型均質炉心の主要核特性	93
表 3.3.3-3 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き中型均質炉心の物量収支(1/2)	94
表 3.3.3-3 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き中型均質炉心の物量収支(2/2)	95
表 3.3.3-4 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き中型均質炉心 中型均質炉心の制御棒反応度収支	96
表 3.3.3-5 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き中型均質炉心における炉心流量配分と被覆管温度特性及び CDF 値	97
表 3.4-1 ナトリウム冷却酸化物燃料中型炉心における各炉心概念主要項目、核特性の比較	102

図リスト

図 2.2.1-1	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の炉心配置	12
図 2.2.1-2	大型均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図	13
図 2.2.1-3	ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の流量領域区分	14
図 2.2.2-1	内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の炉心配置	21
図 2.2.2-2	大型均質炉心内部ダクト型酸化物燃料集合体概念図	22
図 2.3.1-1	ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の炉心配置	40
図 2.3.1-2	大型径方向非均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図	41
図 2.3.1-3	熱設計検討フロー	42
図 2.3.1-4(1/2)	炉心燃料部での必要流量分布及び流量領域区分	43
図 2.3.1-4(2/2)	内部装荷位置ブランケットの必要流量分布と流量領域区分	44
図 2.3.1-5	H13 年度検討大型径方向非均質炉心の流量領域番号 (内部ブランケットのシャーフリング考慮炉心)	45
図 2.3.1-6(1/2)	余剰流量配分前の径方向非均質炉心の隣接出口温度差 最大値 (内部ブランケットのシャーフリング考慮炉心)	46
図 2.3.1-6(2/2)	余剰流量配分後の径方向非均質炉心の隣接出口温度差 最大値 (内部ブランケットのシャーフリング考慮炉心)	47
図 2.3.1-7	隣接集合体冷却材出口間温度差比較	48
図 2.3.1-8	隣接集合体出口温度差 (2000 年度) (内部ブランケット一炉心燃料集合体間出口温度差最大値)	49
図 2.3.1-9	ABLE 型径方向非均質炉心の集合体番号 (内部ブランケットシャーフリング炉心)	50
図 2.3.1-10	被覆管最高温度履歴 (第 1~3 領域代表ピン)	51
図 2.3.2-1	内部ダクト型酸化物燃料大型径方向比非均質炉心の炉心配置	58
図 2.3.2-2	大型径方向非均質炉心内部ダクト型酸化物燃料集合体概念図	59
図 3.2-1	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の炉心配置	74
図 3.2-2	中型均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図	75
図 3.2-3	ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の流量領域区分	76
図 3.3.1-1	実用化戦略調査研究フェーズⅡにおける炉心概念検討の課題	79
図 3.3.1-2	効率のよい炉心の方向性	79
図 3.3.1-3	2001 年度ナトリウム中型炉心概念検討の方向性 : 魅力ある概念の追求	80
図 3.3.2-1	高内部転換型中型均質炉心の炉心配置	87
図 3.3.2-2	高内部転換型中型均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図	88
図 3.3.3-1	高内部転換型ナトリウムプレナム付き中型均質炉心の 炉心配置	98
図 3.3.3-2	高内部転換型ナトリウムプレナム付き中型均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図	99

図 3.3.3-3 高内部転換型ナトリウムプレナム付き中型均質炉心の
流量領域区分

100

略語・用語表

略語	正式表現	説明
AB(A/B)	Axial Blanket	軸(方向) ブランケット
ABLE	Axial Blanket Elimination	軸方向ブランケット(一部) 削除概念
at%	atom per cent	原子数%割合
BOC	Beginning of Cycle	サイクル初期
BOEC	Beginning of Equilibrium Cycle	平衡炉心燃焼サイクル初期
BOL	Beginning of Life	寿命初期
BR	Breeding Ratio	増殖比(転換率)
CIDT	Compound Inventory Doubling Time	複合インベントリ倍増時間
CSDT	Compound System Doubling Time	複合システム倍増時間
CITATION		汎用拡散計算コード<米国>
CDA	Core Disruptive Accident	炉心崩壊事故
CDF	Cumulative Damage Fraction	累積使用分数和(寿命分数和)
DDI	Duct-Duct Interaction	ダクト-ダクト間相互作用
EFPD	Effective Full Power Day	実効定格運転日数
EFPM	Effective Full Power Month	実効定格運転月数
EOC	End of Cycle	サイクル末期
EOEC	End of Equilibrium Cycle	平衡炉心燃焼サイクル末期
EOL	End of Life	寿命末期
FBR	Fast Breeder Reactor	高速増殖炉
FCI	Fuel Coolant Interaction	燃料-冷却材相互作用
FCCI	Fuel Cladding Chemical Interaction	燃料-被覆材化学的相互作用
FCMI	Fuel-Cladding Mechanical Interaction	燃料-被覆管機械的相互作用
FMS	Ferritic-Martainsitic Steels	フェライト-マルテンサイト鋼
FP	Fission Product	核分裂生成物(核種)
GHSF	Global Hot Spot Factor	グローバルホットスポットファクタ(原子炉冷却材温度上昇と被覆管 HS 温度の温度上昇幅との比)
Hex-Z		3次元六角メッシュ(体系)
HM	Heavy Metal	重金属
HS	Hot Spot	ホットスポット(工学的安全係数を考慮した最高温度点)
H/D	Ratio of Core Height to Core Diameter	炉心の直径に対する炉心高さの比
IB(I/B)	Internal Blanket	内部ブランケット
IC(I/C)	Inner Core	内側炉心
JENDL-3.2	Japan Evaluated Nuclear Data Library Version 3.2	評価済み中性子データライブラリ 3.2版
JENDL-3.2ADJ98		JENDL-3.2に基づく統合炉定数
JENDL-3.2ADJ2000		JENDL-3.2に基づく統合炉定数
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute	核燃料サイクル開発機構
LOF	Loss of Flow	流量異常減少事象
LLFP	Long Lived Fission Products	長寿命核分裂生成物
LWR	Light Water Reactor	軽水(冷却)炉
MA	Minor Actinides	マイナーアクチニド(または アクチノイド) 原子番号 89 のアクチニウム(Ac)から 103 のローレンシウム(Lr)をアクチノ

		イド(Actinoids)と称し、アクチニウムを除いてアクチニド元素と称する。このうち半減期が長い α 放射体のNp、Am、Cmの総称
MOC	Middle of Cycle	サイクル中期
MOEC	Middle of Equilibrium Cycle	平衡炉心燃焼サイクル中期
MOSES		3次元拡散燃焼計算コード
MOX	Mixed Oxicide (Fuel)	酸化物(燃料)
nvt		累積(高速)中性子照射量(フルーエンス)
ODS鋼	Oxide Dispersion Strengthened Stainless Steel	酸化物分散強化型ステンレス鋼
OC(O/C)	Outer Core	外側炉心
O/M比	Atomic Ratio of Oxygen to Metal	金属原子数に対する酸素原子数比
PENCIL	Pultonium Enrichment Convenient survey Calculation Code	CITATIONの2次元拡散計算を使用したPu富化度調整計算コード
PERKY		2次元拡散擾動計算コード
PNC	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation	動力炉・核燃料開発事業団(JNCの前身)
PTM	Power to Melt	溶融限界線出力
PWR	Pressurized Water Reactor	加圧水型原子炉
P/D	Pin Pitch to Pin Diameter Ratio	ピン配列ピッチとピン径との比
P/F	Power to Flow Ratio	出力流量比
RB(R/B)	Radial Blanket	径(方向)ブランケット
RDT	Reactor Doubling Time	原子炉倍増時間
RIAR	Research Institute of Atomic Reactors	国立原子炉科学研究所<ロシア>
R-Z		2次元円筒(体系)
SA	Subassembly	燃料集合体
SASS	Self-Actuated Shutdown System	自己作動型炉停止機構(キュリーポイント型制御棒自動切り離し機構)
SUS	Stainless Steel	ステンレス鋼(不銹鋼)
TD	Theoretical Density	理論密度
TOP	Transient OverPower	異常過出力事象
Tri-Z		3次元三角メッシュ(体系)
TRU	Trans Uranium	原子番号が92(ウラン)を超える元素をいい、アクチニド元素に属する人工の放射性核種
UAB	Upper Axial Blanket	上部軸方向ブランケット
UIS	Upper Instrumentation Structure	炉心上部機構
ULOF	Unprotected Loss of Flow	流量低下時スクラム失敗事象
ULOHS	Unprotected Loss Of Heat Sink	除熱源喪失時スクラム失敗事象
UO ₂		ウラン燃料(酸化物)
UTOP	Unprotected Tranjent Over-Power	過渡過出力時スクラム失敗事象
vol%	volume per cent	体積%割合
wt%	weight per cent	重量%割合
ZrH _x	Zirconium Hydrides	水素化ジルコニウム(xはZrに対する水素の原子数割合)
%TD	per cent Theoretical Density	理論密度に対する%割合

検討に当たっての定義、基本条件

項 目	定義又は基本条件																																																
・スミア密度：	燃料の 100%理論密度に対し被覆管内面に燃料を均一にならした時の比率																																																
・ボイド反応度：	ダクトーダクト間、内部ダクト内のナトリウム（冷却材）を残し、炉心部の燃料棒部分（軸方向非均質炉心の場合には、内部ブランケット高さ部分も含む）のナトリウム（冷却材）を 100%除去したときの全投入反応度																																																
・プルトニウム富化度：	ウラン・プルトニウム・MA の重金属インベントリに対するプルトニウム重量の比																																																
	$\frac{Pu}{Pu + U + MA}$																																																
・原子炉倍増時間(RDT)：	1 基の FBR のみで考えた場合の倍増時間。 初装荷核分裂性 Pu インベントリ/年間核分裂性 Pu 利得量																																																
・実効燃料体積割合：	燃料の密度を 100%理論密度としたときの体積割合 燃料体積割合 × 燃料スミア密度																																																
・増殖比（増殖率）：	核分裂性プルトニウムの生成量/消滅量の比（瞬時値/平均値）																																																
	$\frac{\int_{\text{炉心全体}} (\Sigma_c(^{238}U)\phi + \Sigma_c(^{238}Pu)\phi + \Sigma_c(^{240}Pu)) dv}{\int_{\text{炉心全体}} (\Sigma_a(^{239}Pu)\phi + \Sigma_a(^{241}Pu)\phi + \lambda(^{241}Pu)N(^{241}Pu)) dv}$																																																
・体積割合：	燃料集合体断面に対する燃料、構造材、冷却材の体積割合。 燃料体積割合は被覆管内面で定義。																																																
・燃料組成：	以下に示す TRU 組成に FP を随伴させた組成を炉心解析に使用した。 随伴 FP は、新燃料中の FP 存在量として 2vol%とし、随伴 FP の基準元素 (¹⁴³ Nd) 密度から求めた断面積に FP 等価係数(1.5)を乗ずる取り扱いとした。																																																
高速炉多重リサイクル時の TRU (+随伴 FP)																																																	
高速炉での多重リサイクルを考慮した平衡サイクル組成 ^[1] 。 取り出し後の冷却期間：4 年。																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">核種</th><th style="text-align: center;">%</th><th style="text-align: center;">核種</th><th style="text-align: center;">%</th><th style="text-align: center;">核種</th><th style="text-align: center;">%</th><th style="text-align: center;">核種</th><th style="text-align: center;">%</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">²³⁸Pu</td><td style="text-align: center;">1.1</td><td style="text-align: center;">²³⁷Np</td><td style="text-align: center;">0.5</td><td style="text-align: center;">²⁴¹Am</td><td style="text-align: center;">2.0</td><td style="text-align: center;">²⁴⁴Cm</td><td style="text-align: center;">1.0</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">²³⁹Pu</td><td style="text-align: center;">54.1</td><td></td><td></td><td style="text-align: center;">²⁴³Am</td><td style="text-align: center;">1.0</td><td style="text-align: center;">²⁴⁵Cm</td><td style="text-align: center;">0.0</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">²⁴⁰Pu</td><td style="text-align: center;">32.1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">²⁴¹Pu</td><td style="text-align: center;">4.3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">²⁴²Pu</td><td style="text-align: center;">3.9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td style="text-align: center;">合計</td><td style="text-align: center;">100.0</td></tr> </tbody> </table>		核種	%	核種	%	核種	%	核種	%	²³⁸ Pu	1.1	²³⁷ Np	0.5	²⁴¹ Am	2.0	²⁴⁴ Cm	1.0	²³⁹ Pu	54.1			²⁴³ Am	1.0	²⁴⁵ Cm	0.0	²⁴⁰ Pu	32.1							²⁴¹ Pu	4.3							²⁴² Pu	3.9					合計	100.0
核種	%	核種	%	核種	%	核種	%																																										
²³⁸ Pu	1.1	²³⁷ Np	0.5	²⁴¹ Am	2.0	²⁴⁴ Cm	1.0																																										
²³⁹ Pu	54.1			²⁴³ Am	1.0	²⁴⁵ Cm	0.0																																										
²⁴⁰ Pu	32.1																																																
²⁴¹ Pu	4.3																																																
²⁴² Pu	3.9					合計	100.0																																										
・複合システム倍増時間(CSDT)：	複数基の FBR が存在するときに核燃料サイクル全体を考慮して定義した倍増時間。核分裂性プルトニウムの増加量が炉内及び炉外に存在する核分裂性プルトニウムの合計量に等しくなるのに必要な時間で倍増時間短縮																																																

ファクタ (ln2) を考慮したもの。

$\ln2 \times (\text{初装荷核分裂性 Pu インベントリ} \times \text{炉外ファクタ}) / (\text{年間核分裂性 Pu 利得量} \times (1 + \text{炉外核分裂性 Pu 損失率}))$

炉外ファクタ ; $1 + (\text{燃料炉外滞在期間} < 5 \text{ 年}) / \text{燃料炉内滞在期間}$

燃料炉内滞在期間 ; (運転サイクル長・定検期間) × 燃交バッチ数

炉外核分裂性 Pu 損失率 ; 再処理・加工中の核分裂性 Pu 損失率 <2%>

- 平均出力密度 : 炉心体積当たりの発熱量。
炉心部出力/炉心体積
- 平均線出力密度 : 炉心燃料ピンの単位長さ当たりの発熱量。
炉心部出力/炉心燃料ピン総延長
- 炉心部 : MOX 燃料部分 (軸方向非均質炉心の場合には、内部ブランケット高さ部分も含む)
- 炉心部取出平均燃焼度 : バッチ当たり取り出される炉心燃料集合体に対し、炉心部 (軸方向非均質炉心の場合には、内部ブランケット高さ部分も含む) の燃焼度の平均値

$$\frac{\int_{\text{燃料炉心滞在日数}} [P(\text{MOX燃料} + \text{内部ブランケット出力})] \times dt}{\text{MOX及び内部ブランケット初期インベントリ}}$$

- 炉心燃料集合体取出平均燃焼度 :

$$\frac{\int_{\text{燃料炉心滞在日数}} [P(\text{MOX燃料} + \text{内部ブランケット} + \text{軸ブランケット出力})] \times dt}{\text{MOX燃料} + \text{内部ブランケット} + \text{軸ブランケット初期インベントリ}}$$

- 炉心 : 炉心燃料、内部ブランケット、制御棒、希釈集合体を含む。
- 炉心最大外接円径 : 遮蔽体までの外接円直径。
- 炉心上部機構(UIS) : 炉心の上部にあり、制御棒駆動機構延長管、集合体出口温度計装系等を支持している部分
- 炉心等価直径 : 炉心を円柱状に置き換えたときの直径

1. はじめに

1999年度から2000年度の2年間に亘り実施したFBRサイクル実用化戦略調査研究フェーズIの結果、多様なFBRサイクルシステムの技術選択肢の内から、フェーズIIでさらに検討を進める候補概念のひとつとしてナトリウム冷却炉（大型炉；出力1,500MWe、中型炉；出力500MWe）が抽出されている。本報告書は、フェーズIの検討結果を踏まえて検討を開始したフェーズII初年度のナトリウム冷却炉における酸化物燃料炉心の炉心・燃料設計についての検討成果を報告するものである。

調査研究フェーズII初年度においてナトリウム冷却炉酸化物燃料炉心の検討を進めるにあたり、燃料サイクルコスト低減の観点を中心に、フェーズIでの結果から炉心燃料仕様の見直しを実施した。また、フェーズIではほぼ同一の概念を目指していた大型炉と中型炉で若干異なる方向性の検討を行った。

すなわち、大型炉ではフェーズIでの炉心概念検討の延長として、仕様・条件の見直し等により炉心性能向上(実効取出平均燃焼度向上)や課題解決(径方向非均質炉心の熱設計成立性等)を図ることを目指し、ABLE型集合体(ABLE: Axial Blanket Elimination)または内部ダクト付き集合体を用いた均質炉心、径方向非均質炉心概念の組合せ概念の改善検討を実施し、特性を比較した。

一方、中型炉では、プラントとの取り合い条件としていた炉心径などの制約を一部緩和することを仮定して、燃料サイクル費低減や長期運転サイクル等の魅力を追求する炉心概念を検討した。

2章では、大型炉心の検討結果をまとめ、3章では中型炉心の検討結果をまとめた。

検討した炉心の一覧表

炉心規模	出力	炉心型式	集合体形式	備考(その他)
大型	1,500 MWe	均質	ABLE型	
			内部ダクト付	
	500 MWe	径方向非均質	ABLE型	
			内部ダクト付	
中型	500 MWe	均質	ABLE型	従来概念
				太径ピン型
				太径ピン型
				上部Naプロテクタ付

2. 大型炉心の検討

2000 年度までの検討により、ナトリウム冷却炉における大型酸化物燃料炉心は種々のプラント合理化方策が実施された。その結果、本概念は建設コスト低減の効果が得られ、経済性の観点から実用化炉心の有力候補のひとつとなっている。炉心概念は均質炉心と径方向非均質炉心の 2 通りであり、再臨界回避対応としての集合体概念は、ABLE 型（軸ブランケット一部削除）集合体、内部ダクト付集合体の 2 通りが候補となっている。本研究では、これらの概念を組み合わせた炉心概念のフェーズ I での検討結果を一部の仕様条件を見直して、炉心特性を検討した。

2.1 検討方針及び検討条件

大型炉の検討では、フェーズ I での 2000 年度までの検討と同様にコンパクト化を指向したプラント設計に適合する範囲で、均質炉心、径方向非均質炉心ともに燃料サイクルコスト低減を目指す概念を検討することとした。具体的な方針としては、ブランケットも含めた実効的な取出平均燃焼度の向上を目指しブランケットについて物量および交換集合体数を削減する方策を取り込んだ炉心概念を検討する。また、径方向非均質炉心では、フェーズ I での検討結果により熱設計成立性に課題があることからこれを解決する方策として、内部ブランケットのシャフリングを取り込んだ炉心概念の具体化を検討する。

一方、検討条件は、解析評価手法として 2000 年度の報告書^[1]に記載の評価方法(またはこれと同等の手法)を用いる[添付資料-1 を参照]が、断面積ライブラリには JENDL3.2 に基づく統合炉定数の最新版（検討開始時の最新リリース版 ADJ2000.Y0130）を用いる。

大型炉の検討条件、核特性目標等を以下に示す。

- ・炉出力 1,500MWe／3,570MWt (熱効率：約 42%)
- ・原子炉出入口温度 550°C／395°C
- ・運転サイクル長 18 ヶ月程度 (取合い条件は 12～24 ヶ月)
- ・遮蔽体外接円径 6.6m 以下[取合い条件]
- ・燃料バンドル部圧損 0.2MPa 程度[取合い条件]
- ・炉心部取出平均燃焼度 約 150GWd/t
- ・実効取出平均燃焼度 60GWd/t 以上目標(炉心+ブランケットの平均)
- ・ボイド反応度 6 \$ 程度目安
- ・増殖比 1.1～1.2 目標
- ・燃焼反応度 4.5% Δ k/k' 程度以下
- ・定格出力時最大線出力 430W/cm 程度

・燃料組成 高速炉多重リサイクル TRU 組成^{*1} + 隨伴 FP(2Vol%)

$$\begin{aligned} *1 : {}^{238}\text{Pu} / {}^{239}\text{Pu} / {}^{240}\text{Pu} / {}^{241}\text{Pu} / {}^{242}\text{Pu} / {}^{237}\text{Np} / {}^{241}\text{Am} / {}^{243}\text{Am} / {}^{244}\text{Cm} / {}^{245}\text{Cm} \\ = 1.1 / 54.1 / 32.1 / \quad 4.3 / \quad 3.9 / \quad 0.5 / \quad 2.0 / \quad 1.0 / \quad 1.0 / \quad 0.0 \end{aligned}$$

2.2 均質炉心の検討

均質炉心の検討では、はじめに 2000 年度の技術検討書^[2]で報告されている径プランケット 2 層付きの ABLE 型均質炉心の見直しとして、径プランケットを 1 層に削減した炉心の検討を実施した。次に、内部ダクト付き集合体を用いた均質炉心として内部ダクトの膨れ量等に基づく集合体健全性も考慮した炉心・燃料仕様を選定し、その炉心特性の概要を検討した。

なお、均質炉心の検討における炉心解析は、制御棒チャンネルをナトリウムフォロワとした体系で実施した。

2.2.1 ABLE 型集合体による均質炉心

(1) 選定炉心配置及び燃料仕様

2000 年度の技術検討書^[2]で報告されている径プランケット 2 層付きの ABLE 型均質炉心の見直しとして、径プランケットを 1 層に削減した炉心の検討を実施した。検討結果により選定した大型ナトリウム冷却炉における ABLE 型酸化物燃料均質炉心の主な炉心・燃料仕様を以下に示す。

・炉心型式	Pu 富化度 2 領域の均質炉心 (図 2.2.1-1 の炉心配置参照)
・炉心有効長	80 cm
・炉心等価直径	4.87 m(炉心)/5.21 m(径プラ)
・遮蔽体外接円径	6.41 m
・運転サイクル長さ	548 日 (約 18 ヶ月)
・燃料交換バッチ数	炉心 4 / 径プラ 4
・集合体配列ピッチ	181.9mm
・炉心燃料ピン径	8.6mm
・燃料仕様	炉心燃料 271 本バンドル ABLE 型燃料集合体 径プランケット 127 本バンドル集合体(暫定)

(表 2.2.1-1 及び図 2.2.1-2 参照)

燃料仕様の見直しでは、2000 年度の炉心では運転サイクル長さが 17 ヶ月であったため、径プランケット 1 層削除に伴い燃料集合体数を増加すると共に燃料ピン径を 8.5mm → 8.6mm に増加して運転サイクル 18 ヶ月を達成する炉心とした。また、暫定としていた集合体ダクトの仕様についてもダクト膨

れ量の評価結果に基づき適正なダクト肉厚とダクト間ギャップを設定し、圧損約 0.2MPa に対応した集合体仕様を改めて選定したものである。

(2) 核特性評価

まず、前記の選定炉心における核特性評価として、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ反応度特性等を検討した。

以下に評価結果を示す。

表 2.2.1-2 に、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ反応度特性評価結果を示す。また、燃料物質収支を表 2.2.1-3 に示す。表 2.2.1-2 より、運転サイクル長さは約 18 ヶ月を達成しつつ増殖比は約 1.17 となり、径プランケット 1 層炉心でも設計要求を満足する見通しである。また、プランケットを含めた実効的な取出平均燃焼度は約 80GWd/t まで向上しており、燃料サイクルコスト低減への効果が期待される。しかし、ボイド反応度は 6.4 \$ とやや大きめであり、CDA 時の安全シナリオの成立性検討が必要である。

ここで、径プランケットを削減しても増殖性能が確保できた要因は燃料仕様の見直しよりも炉定数の効果によるものであり、添付資料に示すように ADJ98 から ADJ2000 に変更した効果として増殖比は約 5% 向上すると言われている。また、一方では核設計評価において 2 次元解析モデルでは、ボイド反応度を保守側に評価する観点から制御棒領域をナトリウムフォロワとしているが、炉心上部の制御棒による中性子吸収効果が考慮されないため増殖比が過大評価になっている可能性があることにも注意が必要である。

表 2.2.1-4 には、制御棒必要反応度と反応度収支を示す。表 2.2.1-4 より、主炉停止系、後備炉停止系のいずれも必要反応度を制御棒価値が上回り、成立する見通しとなった。

(3) 熱特性及び燃料特性評価

次に選定炉心における熱特性評価として冷却材流量配分を検討し、燃料特性評価として被覆管 CDF(寿命分数和；被覆管直管部では疲労の影響は小さいのでここではクリープ損傷のみを評価した。以下、本報告では同様の取扱い)を評価した。

流量配分の検討および被覆管 CDF の評価は核特性評価による 3 次元出力分布解析結果を用い、それぞれ下記の条件、制限目安で評価した。

<流量配分評価時>

- ・1 次系全流量に対する炉心流量割合 約 91%
- ・周辺流れ効果係数 1.09

・被覆管ホットスポットファクタ	1.26
・被覆管肉厚中心温度制限目安	700°C以下
<被覆管 CDF 評価時>	
・被覆管 CDF 制限目安	0.5 以下
・被覆管腐食式	内外面とも、PNC-FMS の式を適用
・不確かさ	被覆管肉厚公差 $27 \mu\text{m}$
・出力分布誤差	1.05(寿命中のピン出力に 5%上乗せ)
・プレナム容積	内径及び長さより計算されるプレナム容積の 90%とする。

図 2.2.1-3 に流量領域区分を示す。これまでの設計例を勘案して内側炉心 3 領域、外側炉心 4 領域の合計 7 領域である。表 2.2.1-5 に、各流量領域毎の集合体数、集合体流量、及び被覆管最高温度等の炉心熱流動特性を示す。表 2.2.1-5 より、炉心燃料の被覆管最高温度は 694°C である。また、集合体流量の最大値は 33.0kg/s であり、このときの燃料バンドル部圧力損失は 0.19MPa で設計条件を満足する。

上記、流量配分結果に基づく被覆管温度履歴による被覆管 CDF 最大値は 0.34 であり、制限目安値 0.5 を満足している。

(4) まとめ及び今後の課題

以上により、径プランケットを 1 層に削減し運転サイクル期間を 18 ヶ月とした ABLE 型酸化物燃料均質炉心の主要な特性を検討し設計成立の見通しを得た。今後の課題は、ボイド反応度が目標とした 6 \$ を若干超過する結果であったことから、安全シナリオの成立性検討が必要である。

表 2.2.1-1 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心における燃料仕様

項目	炉心燃料	径プランケット (暫定)	
燃料形態	酸化物燃料	←	
炉心材料（被覆管/ラッパ管）	ODS鋼/PNC-FMS	←	
燃料要素	全長 (mm)	2,905	←
	燃料スタック長 (mm)	800	1,500
	軸プランケット厚さ (mm; 上/下)	350/350	—
	ガスプレナム長 (mm; 上/下)	285/1,020	←
	端栓 (mm; 上/中/下)	30/30/40	←
	被覆管外径 (mm)	8.6	13.0
	被覆管内径 (mm)	7.58	12.0
	被覆管肉厚 (mm)	0.51	0.51
	燃料スマア密度 (%TD)	82.0	90.0
集合体	全長 (mm)	4,370	←
	燃料ピン本数 (本)	271 *1	127
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径[P/D] (-)	1.17	1.12
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	←
	ラッパ管外対面距離 (mm)	177.9	←
	集合体間ギャップ (mm)	4.0	←
	集合体配列ピッチ (mm)	181.9	←
	ワイヤ径 (mm)	1.39	1.45
	ワイヤ巻付ピッチ (mm)	200	←
	燃料体積割合 (%) *2	42.7 (35.0)	50.0 (45.0)
	構造材体積割合 (%)	24.1	20.1
	冷却材体積割合 (%)	33.2	30.0

*1: 溶融燃料排出孔として軸プランケットは集合体中央の37本のペレットを削除

*2: 被覆管内側、()内は実効燃料体積割合

表 2.2.1-2 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の主要核特性

原子炉熱出力 (MWth)		3,570
運転サイクル長さ (日)		548
燃料交換バッチ [炉心/径プラ]		4/4
Pu富化度 (wt% : Pu/HM) [内側炉心/外側炉心]		21.0/23.6
取出平均燃焼度 (MWd/t)	炉心部	152,000
	全体	77,000
燃焼反応度 (% Δ k/kk')		2.8
増殖比 (-) [炉心／軸プラ／径プラ／全体]		0.74／0.35／0.08／1.17
炉心平均出力密度 (W/cc ; 平衡中期)		231
炉心部平均線出力密度 (W/cm ; 平衡中期)		244
最大線出力密度 (W/cm) *1 [内側／外側]		421／423
出力分担率 (%) [平均 : 炉心／ブランケット]		88.1／11.9
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{15}$ n/cm ² sec) [E ≥ 0.1 MeV]		2.5
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23}$ n/cm ²) [E ≥ 0.1 MeV]		4.7
初装荷核分裂性Pu重量 (kg)		6,162
平衡サイクル核分裂性Pu重量 (kg)	平衡初期	6,718
	平衡末期	7,032
年間核分裂性Pu利得 (kg/年)		209
原子炉倍増時間 (年)		30
複合システム倍増時間 (年) *2		41
炉心部ボイド反応度 (\$) ; 平衡末期) *3		6.4
炉心部ドップラ係数 ($\times 10^{-3}$ Tdk/dT ; 平衡末期)		-5.1

*1 : 燃焼ミスマッチファクタ及び3次元効果考慮

*2 : 燃料炉外滞在期間 5年、燃交・定検期間 42日、炉外核分裂性物質損失率 2%

*3 : ラッパ管内側のみボイド化、燃料集合体非均質効果補正 (0.9) を考慮

*4 : 燃料物質のみの温度変化時、燃料集合体非均質効果補正 (1.05) を考慮

表 2.2.1-3 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(1/2)

1 バッチ当たりの装荷燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	[kg] 合計
U235	14.1	12.0	26.1	28.6	13.5	42.1	68.2
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	4688.0	3985.2	8673.2	9512.7	4471.3	13984.0	22657.2
U合計	4702.1	3997.2	8699.3	9541.3	4484.8	14026.1	22725.4
Pu238	14.6	14.4	29.0	0.0	0.0	0.0	29.0
Pu239	717.2	709.9	1427.1	0.0	0.0	0.0	1427.1
Pu240	425.6	421.2	846.8	0.0	0.0	0.0	846.8
Pu241	57.0	56.4	113.4	0.0	0.0	0.0	113.4
Pu242	51.7	51.2	102.9	0.0	0.0	0.0	102.9
Pu合計	1266.1	1253.1	2519.2	0.0	0.0	0.0	2519.2
Np237	6.6	6.6	13.2	0.0	0.0	0.0	13.2
Np合計	6.6	6.6	13.2	0.0	0.0	0.0	13.2
Am241	26.5	26.2	52.7	0.0	0.0	0.0	52.7
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	13.3	13.1	26.4	0.0	0.0	0.0	26.4
Am合計	39.8	39.3	79.1	0.0	0.0	0.0	79.1
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	13.3	13.1	26.4	0.0	0.0	0.0	26.4
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm合計	13.3	13.1	26.4	0.0	0.0	0.0	26.4
合計	6027.9	5309.3	11337.2	9541.3	4484.8	14026.1	25363.3

1 バッチ当たりの取出燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	[kg] 合計
U235	3.1	4.9	8.0	15.9	9.9	25.8	33.8
U236	2.0	1.4	3.4	2.9	0.9	3.8	7.2
U238	3815.5	3517.6	7333.1	8838.5	4313.1	13151.6	20484.7
U合計	3820.6	3523.9	7344.5	8857.3	4323.9	13181.2	20525.7
Pu238	15.8	16.6	32.4	0.2	0.0	0.2	32.6
Pu239	565.3	564.8	1130.1	468.7	125.6	594.3	1724.4
Pu240	386.2	391.7	777.9	46.8	7.0	53.8	831.7
Pu241	64.1	58.1	122.2	3.0	0.3	3.3	125.5
Pu242	50.1	49.5	99.6	0.1	0.0	0.1	99.7
Pu合計	1081.5	1080.7	2162.2	518.8	132.9	651.7	2813.9
Np237	3.6	4.3	7.9	0.8	0.2	1.0	8.9
Np合計	3.6	4.3	7.9	0.8	0.2	1.0	8.9
Am241	17.9	24.2	42.1	0.2	0.0	0.2	42.3
Am242m	1.4	1.4	2.8	0.0	0.0	0.0	2.8
Am243	13.9	13.5	27.4	0.0	0.0	0.0	27.4
Am合計	33.2	39.1	72.3	0.2	0.0	0.2	72.5
Cm242	1.4	1.1	2.5	0.0	0.0	0.0	2.5
Cm243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3
Cm244	14.1	12.6	26.7	0.0	0.0	0.0	26.7
Cm245	2.7	1.9	4.6	0.0	0.0	0.0	4.6
Cm合計	18.4	15.7	34.1	0.0	0.0	0.0	34.1
合計	4957.3	4663.7	9621.0	9377.1	4457.0	13834.1	23455.1

表 2.2.1-3 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(2/2)
平衡初期 (BOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計	[kg]
U235	34.8	35.2	70.0	92.7	48.0	140.7	210.7	
U236	4.3	2.6	6.9	5.2	1.4	6.6	13.5	
U238	17385.2	15219.4	32604.6	37019.2	17645.3	54664.5	87269.1	
U合計	17424.3	15257.2	32681.5	37117.1	17694.7	54811.8	87493.3	
Pu238	61.2	60.7	121.9	0.2	0.0	0.2	122.1	
Pu239	2620.7	2596.3	5217.0	814.7	204.9	1019.6	6236.6	
Pu240	1650.5	1645.6	3296.1	46.6	6.6	53.2	3349.3	
Pu241	247.5	231.2	478.7	2.0	0.2	2.2	480.9	
Pu242	204.2	202.2	406.4	0.1	0.0	0.1	406.5	
Pu合計	4784.1	4736.0	9520.1	863.6	211.7	1075.3	10595.4	
Np237	20.9	22.3	43.2	1.2	0.3	1.5	44.7	
Np合計	20.9	22.3	43.2	1.2	0.3	1.5	44.7	
Am241	89.1	101.0	190.1	0.1	0.0	0.1	190.2	
Am242m	3.3	2.7	6.0	0.0	0.0	0.0	6.0	
Am243	54.3	53.1	107.4	0.0	0.0	0.0	107.4	
Am合計	146.7	156.8	303.5	0.1	0.0	0.1	303.6	
Cm242	4.8	3.4	8.2	0.0	0.0	0.0	8.2	
Cm243	0.4	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	
Cm244	54.4	51.5	105.9	0.0	0.0	0.0	105.9	
Cm245	5.5	3.6	9.1	0.0	0.0	0.0	9.1	
Cm合計	65.1	58.7	123.8	0.0	0.0	0.0	123.8	
合計	22441.1	20231.0	42672.1	37982.0	17906.7	55888.7	98560.8	

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計	[kg]
U235	23.9	28.1	52.0	79.9	44.4	124.3	176.3	
U236	6.3	4.0	10.3	8.1	2.3	10.4	20.7	
U238	16513.9	14750.3	31264.2	36338.5	17484.8	53823.3	85087.5	
U合計	16544.1	14782.4	31326.5	36426.5	17531.5	53958.0	85284.5	
Pu238	62.5	62.9	125.4	0.4	0.1	0.5	125.9	
Pu239	2469.1	2450.8	4919.9	1286.4	332.0	1618.4	6538.3	
Pu240	1611.3	1616.0	3227.3	93.6	13.7	107.3	3334.6	
Pu241	254.6	233.0	487.6	5.0	0.6	5.6	493.2	
Pu242	202.6	200.5	403.1	0.2	0.0	0.2	403.3	
Pu合計	4600.1	4563.2	9163.3	1385.6	346.4	1732.0	10895.3	
Np237	17.9	20.1	38.0	2.0	0.5	2.5	40.5	
Np合計	17.9	20.1	38.0	2.0	0.5	2.5	40.5	
Am241	80.5	98.9	179.4	0.3	0.0	0.3	179.7	
Am242m	4.7	4.1	8.8	0.0	0.0	0.0	8.8	
Am243	54.9	53.5	108.4	0.0	0.0	0.0	108.4	
Am合計	140.1	156.5	296.6	0.3	0.0	0.3	296.9	
Cm242	6.2	4.5	10.7	0.0	0.0	0.0	10.7	
Cm243	0.6	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9	
Cm244	55.2	50.9	106.1	0.0	0.0	0.0	106.1	
Cm245	8.2	5.6	13.8	0.0	0.0	0.0	13.8	
Cm合計	70.2	61.3	131.5	0.0	0.0	0.0	131.5	
合計	21372.4	19583.5	40955.9	37814.4	17878.4	55692.8	96648.7	

表 2.2.1-4 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の制御棒反応度収支

項 目	主炉停止系 (ワンロッド・スタック)	後備炉停止系	
		ワンロッド・スタック	全数挿入
I . 計画余剰反応度	5.1	0.8	1.1
1. 温度・出力補償	1.1	0.8	1.1
2. 燃焼補償 ^{*1}	3.8	—	—
4. 運転余裕	0.2	—	—
II . 余剰反応度不確かさ(2σ)	0.5	0.2	0.3
1. 臨界予測誤差	0	—	—
2. 出力補償予測誤差	—	0.16	0.22
3. 燃焼製作予測誤差	0.39	—	—
4. 燃料交換余裕	0.2	—	—
III . 必要制御反応度合計(I+II)	5.6	1.0	1.4
(事故時投入反応度 ^{*2} 考慮時)	—	1.8	2.2
IV . 制御棒価値 ^{*3}	7.0	2.0	2.6
V . 反応度停止余裕(IV-III)	1.4	0.2	0.4

^{*1}: 燃料組成の変動を考慮した値

(B4C体積率:35%、B10濃縮度:90wt%の場合)

^{*2}: 事故時の投入反応度0.8% $\Delta k/kk'$ ^{*3}: 設計余裕10%を見込んだ最小値

表 2.2.1-5 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心における炉心流量配分と被覆管温度特性及びCDF値

炉心領域	流量領域No.	集合体数	集合体流量(kg/s)	領域流量(kg/s)	燃料要素最大出力(kW)	被覆管最高温度(°C)	被覆管CDF値
内側炉心	1	18	33.0	594.0	29.0	669	0.247
	2	262	31.5	8253.0	28.4	677	0.340
	3	36	27.0	972.0	24.7	677	0.188
外側炉心	4	24	30.6	734.4	28.7	685	0.323
	5	112	27.0	3024.0	26.1	693	0.228
	6	88	23.9	2103.2	23.2	694	0.025
合計	7	54	18.0	972.0	17.4	694	0.014
		594		16652.6			

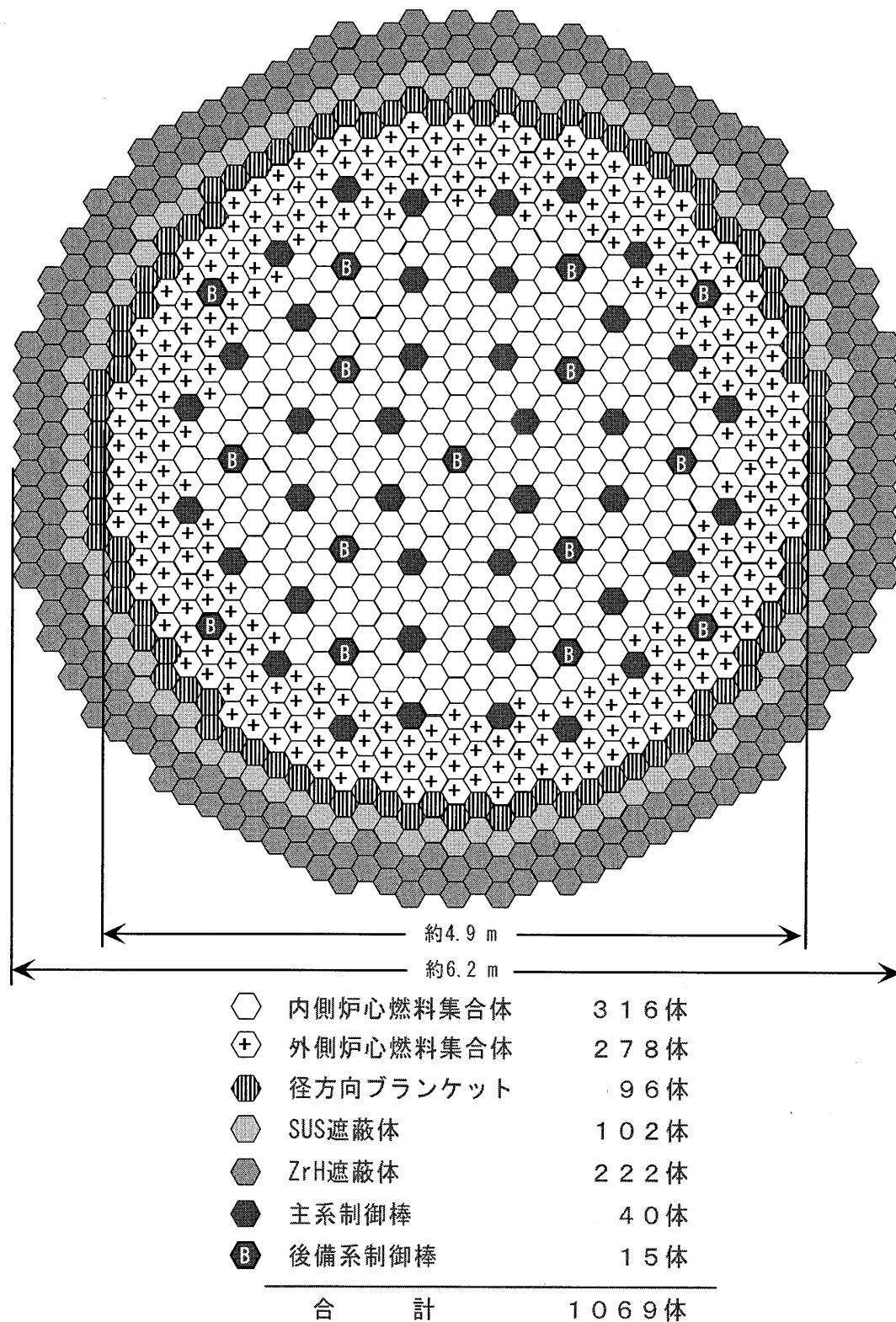


図 2.2.1-1 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の炉心配置

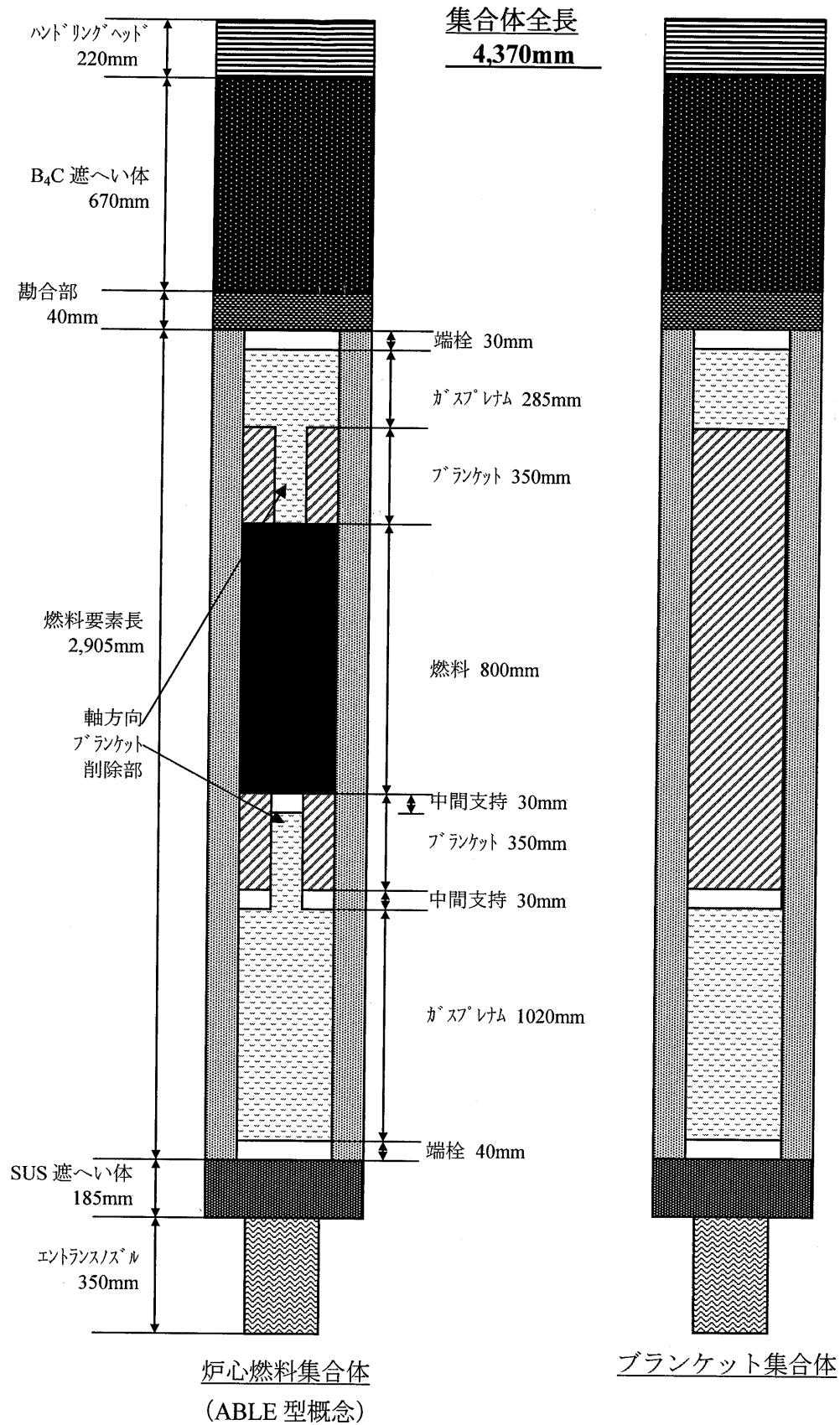
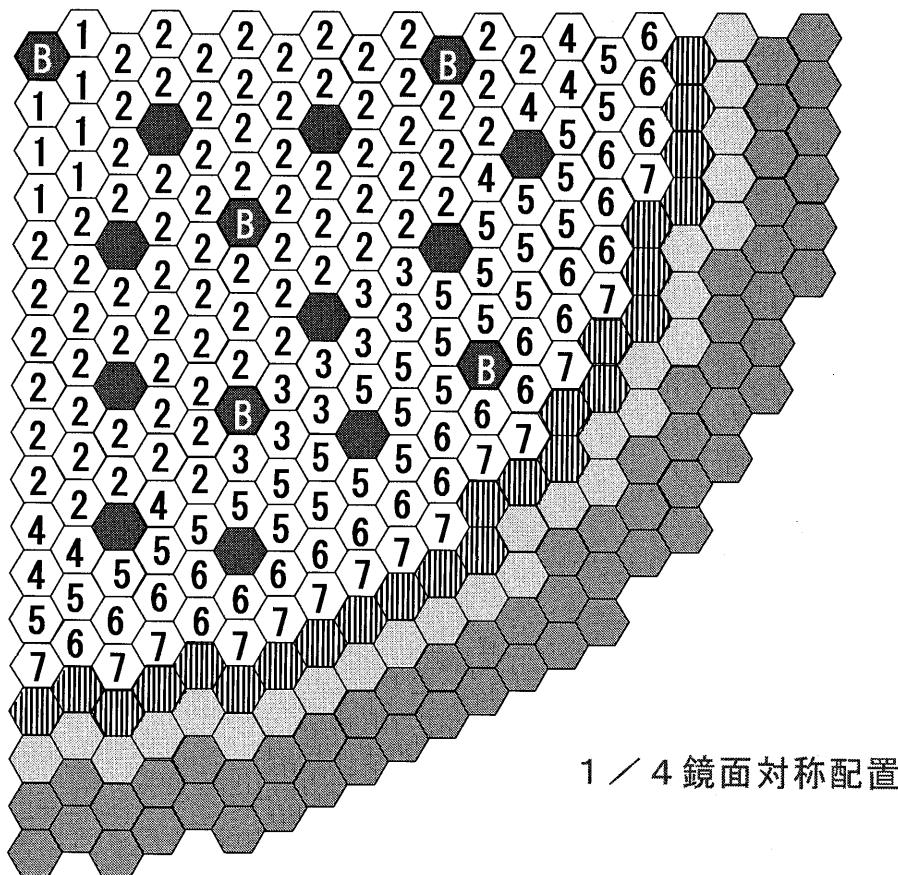


図 2.2.1-2 大型均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図



① 流量領域N0. 1(内側炉心)	18 体
② 流量領域N0. 2(内側炉心)	26 2 体
③ 流量領域N0. 3(内側炉心)	36 体
④ 流量領域N0. 4(外側炉心)	24 体
⑤ 流量領域N0. 5(外側炉心)	11 2 体
⑥ 流量領域N0. 6(外側炉心)	88 体
⑦ 流量領域N0. 7(外側炉心)	54 体
◆◆ 径方向ブランケット	96 体
◆◆ SUS遮蔽体	102 体
◆◆ ZrH遮蔽体	222 体
◆◆ 主系制御棒	40 体
◆◆ 后備系制御棒	15 体
合 計	1069 体

図 2.2.1-3 ABLE 型酸化物燃料大型均質炉心の流量領域区分

2.2.2 内部ダクト型集合体による均質炉心

(1) 選定炉心配置及び燃料仕様

前記の ABLE 型集合体を用いた均質炉心と同様に径プランケットを 1 層配置した内部ダクト型集合体による均質炉心の検討を実施した。ダクト膨れ量による燃料健全性の評価に基づき、内部ダクト型酸化物燃料均質炉心の炉心・燃料仕様は以下のように選定した。

・炉心型式	Pu 富化度 2 領域の均質炉心 (図 2.2.2-1 の炉心配置参照)
・炉心有効長	80 cm
・炉心等価直径	4.94 m(炉心)/5.31 m(径プラ)
・遮蔽体外接円径	6.64 m
・運転サイクル長さ	487 日 (約 16 ヶ月)
・燃料交換バッチ数	炉心 4 / 径プラ 4
・集合体配列ピッチ	195.0mm
・炉心燃料ピン径	8.2mm
・燃料仕様 炉心燃料	294 本バンドル内部ダクト型燃料集合体 [集合体中央部の 37 本分相当に内部ダクト]
プランケット	127 本バンドル集合体(暫定)

(表 2.2.2-1 及び図 2.2.2-2 参照)

燃料仕様選定に当たっては、内部ダクトについては以下のよう考え方で検討した。

すなわち、内部ダクトは設置の本来の目的である溶融燃料排出機能を確保するとともに、通常時の燃料健全性を維持するため、内部ダクトの照射変形を抑制する必要があるので、2001 年度はこれに着目して内部ダクト仕様を検討した。内部ダクトは高圧プレナムに連通する場合を想定する必要があること、新燃料装荷時に内部ダクト内の気体を排出できること、出力運転中に内部ダクト内冷却材流量をほぼゼロとすること、その結果生ずる内部ダクトの内外圧差による膨れなどの変形を抑制することなどが要求される。これらを満足するため図 2.2.2-2 に示すように内部ダクト出口にオリフィスのような小孔を設置するとともに内部ダクトの肉厚を 2mm に設定した。肉厚を 2mm とすることにより、内部ダクトの膨れ量を抑制して燃料健全性を確保することができる。

一方、内部ダクトの肉厚を 2mm とすると、CDA における燃料ピンバンドルの溶融拡大時に内部ダクトと集合体外側ダクトとの破損時間差を確保するために、外側ダクトの肉厚は 2000 年度の設定値である 5mm より厚くする

必要がある。また、内部ダクト設置による燃料体積率の悪化を緩和するため集合体配列ピッチを ABLE 型の場合よりも大きく設定しているので外側ダクトの膨れを抑制するためにも外側ダクト肉厚を厚く設定する必要がある。これらの要求を満足するため、ダクト破損の時間差とダクト膨張量を評価して外側のダクトは ABLE 型の場合よりも 2mm 厚い 7mm に設定した。

(2) 核特性評価

前記の選定炉心における核特性評価として、主要な燃焼特性、ボイド反応度を検討した。

以下に評価結果を示す。

表 2.2.2-2 に、主要な燃焼特性、ボイド反応度特性評価結果を示す。また、燃料物質収支を表 2.2.2-3 に示す。表 2.2.2-2 より、内部ダクト設置により燃料体積が低下するので、取出燃焼度 150GWD/t とすると運転サイクル長さは約 16 ヶ月となり、増殖比は約 1.14 程度である。また、ブランケットを含めた実効的な取出平均燃焼度は約 70GWD/t と ABLE 型炉心と比べると低下している。一方、ボイド反応度は 5.9 \$ と目安としている 6 \$ をわずかではあるが下まわる結果である。

(3) まとめ及び今後の課題

以上により、内部ダクト型酸化物燃料均質炉心について主な炉心核特性が把握でき、ABLE 型炉心よりも炉心性能は劣るものとのボイド反応度が小さくなつて安全性能は向上するとの結果を得た。制御棒反応度特性、熱特性、燃料特性については、2000 年度の検討^[2]における内部ダクト型均質炉心の検討経験から ABLE 型炉心とほぼ同程度の特性を示すことを見込んでいるが、今後の検討課題である。

表 2.2.2-1 内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心における燃料仕様

項目	炉心燃料 ^{*3}	径プランケット (暫定)
燃料形態	酸化物燃料	←
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS	←
燃料要素	全長 (mm)	2,905
	燃料スタック長 (mm)	800
	軸プランケット厚さ (mm; 上/下)	350/350
	ガスプレナム長 (mm; 上/下)	285/1,020
	端栓 (mm; 上/中/下)	30/30/40
	被覆管外径 (mm)	8.2
	被覆管内径 (mm)	7.24
	被覆管肉厚 (mm)	0.48
	燃料スマニア密度 (%TD)	82.0
集合体	全長 (mm)	4,370
	燃料ピン本数 (本)	294 *1
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径[P/D] (-)	1.18
	ラッパ管肉厚 (mm)	7.0
	ラッパ管外対面距離 (mm)	192.3
	集合体間ギャップ (mm)	2.7
	集合体配列ピッチ (mm)	195.0
	ワイヤ径 (mm)	—
	ワイヤ巻付けピッチ (mm)	—
	内部ダクト外径 (mm)	56.4
	内部ダクト肉厚 (mm)	2.0
	燃料体積割合 (%) *2	36.8 (30.1)
	構造材体積割合 (%)	25.2
	冷却材体積割合 (%)	38.1
		49.9 (44.9)
		22.9
		27.2

*1: 溶融燃料排出孔として燃料ピンを37本削除し、内部ダクトを設置

*2: 被覆管内側、()内は実効燃料体積割合

*3: グリッドスペーサを想定

表 2.2.2-2 内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の主要核特性

原子炉熱出力 (MWth)		3,570
運転サイクル長さ (日)		487
燃料交換バッチ[炉心/径プラ]		4/4
Pu富化度 (wt% : Pu/HM) [内側炉心/外側炉心]		23.9/27.3
取出平均燃焼度 (MWd/t)	炉心部	150,000
	全体	70,000
燃焼反応度 (%Δk/kk')		3.4
増殖比 (-) [全体平均値]		0.67／1.14
炉心平均出力密度 (W/cc ; 平衡中期)		224
炉心部平均線出力密度 (W/cm ; 平衡中期)		250
最大線出力密度 (W/cm) *1 [内側／外側]		443／443
出力分担率 (%) [平均 : 炉心／ブランケット]		87.2／12.8
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{15}$ n/cm ² sec) [E ≥ 0.1MeV]		2.3
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23}$ n/cm ²) [E ≥ 0.1MeV]		3.8
初装荷核分裂性Pu重量 (kg)		6,284
平衡サイクル核分裂性Pu重量 (kg)	平衡初期	6,648
	平衡末期	6,869
年間核分裂性Pu利得 (kg/年)		166
原子炉倍増時間 (年)		39
複合システム倍増時間 (年) *2		56
炉心部ボイド反応度 (\$) ; 平衡末期) *3		5.9

*1 : 燃焼ミスマッチファクタ及び3次元効果考慮

*2 : 燃料炉外滞在期間 5年、燃交・定検期間 45日、炉外核分裂性物質損失率 2%

*3 : ラッパ管内側のみボイド化、燃料集合体非均質効果補正 (0.9) を考慮

表 2.2.2-3 内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(1/2)

1 パッチ当たりの装荷燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計	[kg]
U235	12.5	9.7	22.2	29.5	14.5	44.0	66.2	
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
U238	4158.6	3232.2	7390.8	9804.0	4817.4	14621.4	22012.2	
U合計	4171.1	3241.9	7413.0	9833.5	4831.9	14665.4	22078.4	
Pu238	15.3	14.3	29.6	0.0	0.0	0.0	29.6	
Pu239	750.4	704.8	1455.2	0.0	0.0	0.0	1455.2	
Pu240	445.2	418.2	863.4	0.0	0.0	0.0	863.4	
Pu241	59.6	56.0	115.6	0.0	0.0	0.0	115.6	
Pu242	54.1	50.9	105.0	0.0	0.0	0.0	105.0	
Pu合計	1324.6	1244.2	2568.8	0.0	0.0	0.0	2568.8	
Np237	6.9	6.5	13.4	0.0	0.0	0.0	13.4	
Np合計	6.9	6.5	13.4	0.0	0.0	0.0	13.4	
Am241	27.7	26.1	53.8	0.0	0.0	0.0	53.8	
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Am243	13.9	13.0	26.9	0.0	0.0	0.0	26.9	
Am合計	41.6	39.1	80.7	0.0	0.0	0.0	80.7	
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm244	13.9	13.0	26.9	0.0	0.0	0.0	26.9	
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm合計	13.9	13.0	26.9	0.0	0.0	0.0	26.9	
合計	5558.1	4544.7	10102.8	9833.5	4831.9	14665.4	24768.2	

1 パッチ当たりの取出燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	ブラ合計	合計	[kg]
U235	3.5	4.0	7.5	17.2	10.8	28.0	35.5	
U236	1.7	1.1	2.8	2.9	0.9	3.8	6.6	
U238	3494.9	2853.2	6348.1	9173.7	4652.7	13826.4	20174.5	
U合計	3500.1	2858.3	6358.4	9193.8	4664.4	13858.2	20216.6	
Pu238	16.8	16.0	32.8	0.2	0.0	0.2	33.0	
Pu239	558.0	515.0	1073.0	454.8	131.7	586.5	1659.5	
Pu240	406.7	383.5	790.2	40.8	6.8	47.6	837.8	
Pu241	67.3	58.2	125.5	2.4	0.3	2.7	128.2	
Pu242	52.9	49.1	102.0	0.1	0.0	0.1	102.1	
Pu合計	1101.7	1021.8	2123.5	498.3	138.8	637.1	2760.6	
Np237	3.8	4.1	7.9	0.7	0.2	0.9	8.8	
Np合計	3.8	4.1	7.9	0.7	0.2	0.9	8.8	
Am241	19.8	22.8	42.6	0.1	0.0	0.1	42.7	
Am242m	1.4	1.3	2.7	0.0	0.0	0.0	2.7	
Am243	14.5	13.3	27.8	0.0	0.0	0.0	27.8	
Am合計	35.7	37.4	73.1	0.1	0.0	0.1	73.2	
Cm242	1.5	1.2	2.7	0.0	0.0	0.0	2.7	
Cm243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	
Cm244	14.6	12.6	27.2	0.0	0.0	0.0	27.2	
Cm245	2.6	1.9	4.5	0.0	0.0	0.0	4.5	
Cm合計	18.9	15.8	34.7	0.0	0.0	0.0	34.7	
合計	4660.2	3937.4	8597.6	9692.9	4803.4	14496.3	23093.9	

表 2.2.2-3 内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の物量収支(2/2)

平衡初期 (BOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計
U235	32.9	28.6	61.5	97.2	52.0	149.2	210.7
U236	3.5	2.1	5.6	5.0	1.5	6.5	12.1
U238	15600.5	12344.6	27945.1	38253.4	19019.9	57273.3	85218.4
U合計	15636.9	12375.3	28012.2	38355.6	19073.4	57429.0	85441.2
Pu238	63.9	59.6	123.5	0.2	0.0	0.2	123.7
Pu239	2671.2	2493.9	5165.1	778.6	213.8	992.4	6157.5
Pu240	1732.8	1627.7	3360.5	40.1	6.4	46.5	3407.0
Pu241	258.0	230.8	488.8	1.6	0.2	1.8	490.6
Pu242	214.3	200.6	414.9	0.1	0.0	0.1	415.0
Pu合計	4940.2	4612.6	9552.8	820.6	220.4	1041.0	10593.8
Np237	21.9	21.8	43.7	1.0	0.3	1.3	45.0
Np合計	21.9	21.8	43.7	1.0	0.3	1.3	45.0
Am241	95.8	98.2	194.0	0.1	0.0	0.1	194.1
Am242m	3.3	2.6	5.9	0.0	0.0	0.0	5.9
Am243	56.7	52.7	109.4	0.0	0.0	0.0	109.4
Am合計	155.8	153.5	309.3	0.1	0.0	0.1	309.4
Cm242	5.0	3.6	8.6	0.0	0.0	0.0	8.6
Cm243	0.4	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
Cm244	56.6	51.4	108.0	0.0	0.0	0.0	108.0
Cm245	5.2	3.6	8.8	0.0	0.0	0.0	8.8
Cm合計	67.2	58.8	126.0	0.0	0.0	0.0	126.0
合計	20822.0	17222.0	38044.0	39177.3	19294.1	58471.4	96515.4

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計
U235	23.9	22.9	46.8	84.9	48.3	133.2	180.0
U236	5.2	3.2	8.4	7.9	2.4	10.3	18.7
U238	14933.0	11966.0	26899.0	37615.8	18854.2	56470.0	83369.0
U合計	14962.1	11992.1	26954.2	37708.6	18904.9	56613.5	83567.7
Pu238	65.5	61.3	126.8	0.3	0.1	0.4	127.2
Pu239	2478.1	2304.5	4782.6	1237.3	346.1	1583.4	6366.0
Pu240	1694.3	1593.3	3287.6	81.3	13.3	94.6	3382.2
Pu241	265.8	233.0	498.8	3.9	0.5	4.4	503.2
Pu242	213.0	198.9	411.9	0.1	0.0	0.1	412.0
Pu合計	4716.7	4391.0	9107.7	1322.9	360.0	1682.9	10790.6
Np237	18.7	19.3	38.0	1.7	0.5	2.2	40.2
Np合計	18.7	19.3	38.0	1.7	0.5	2.2	40.2
Am241	87.9	94.9	182.8	0.2	0.0	0.2	183.0
Am242m	4.8	3.9	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7
Am243	57.3	53.0	110.3	0.0	0.0	0.0	110.3
Am合計	150.0	151.8	301.8	0.2	0.0	0.2	302.0
Cm242	6.5	4.7	11.2	0.0	0.0	0.0	11.2
Cm243	0.6	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9
Cm244	57.3	51.0	108.3	0.0	0.0	0.0	108.3
Cm245	7.8	5.5	13.3	0.0	0.0	0.0	13.3
Cm合計	72.2	61.5	133.7	0.0	0.0	0.0	133.7
合計	19919.7	16615.7	36535.4	39033.4	19265.4	58298.8	94834.2

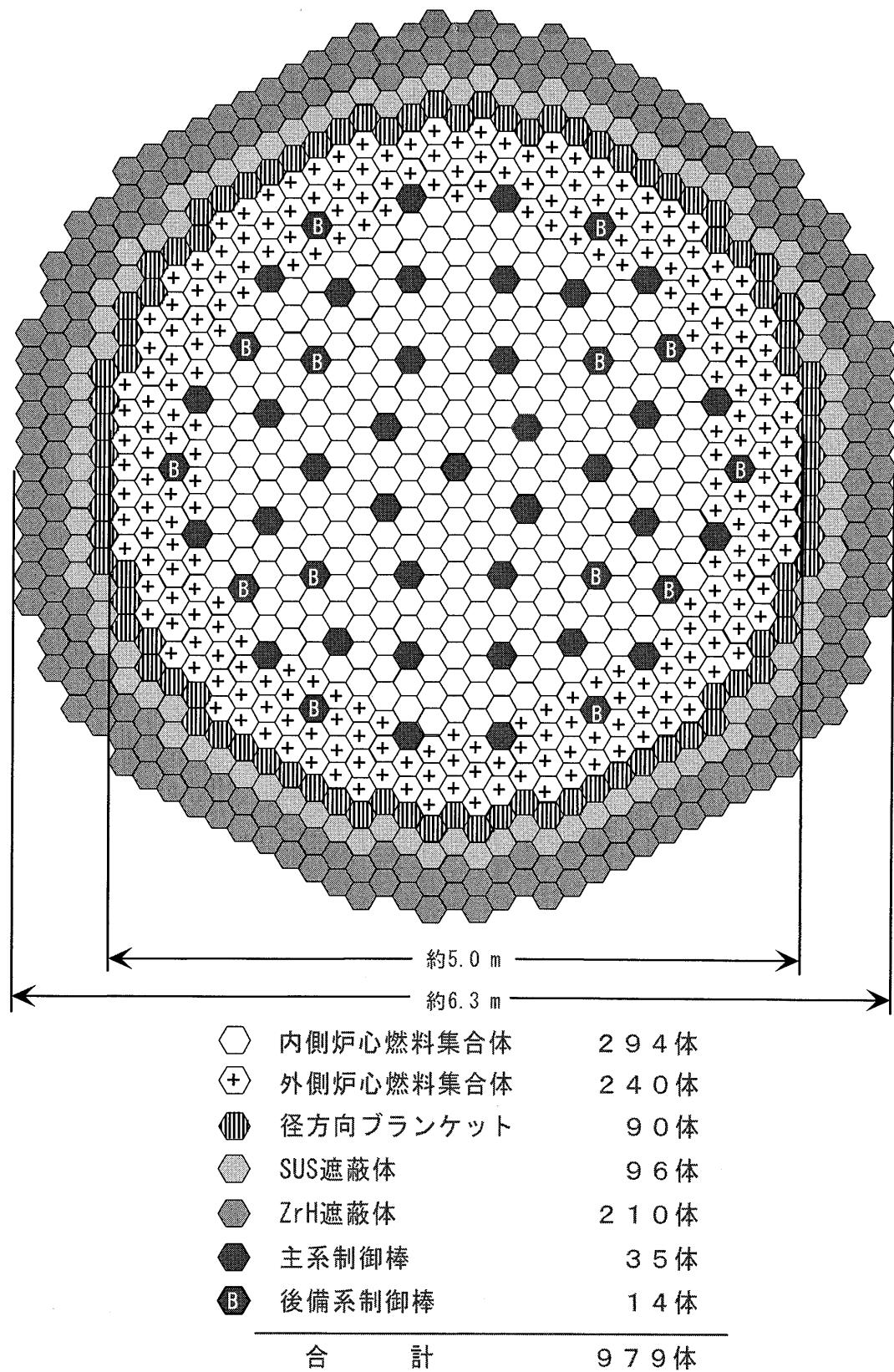


図 2.2.2-1 内部ダクト型酸化物燃料大型均質炉心の炉心配置

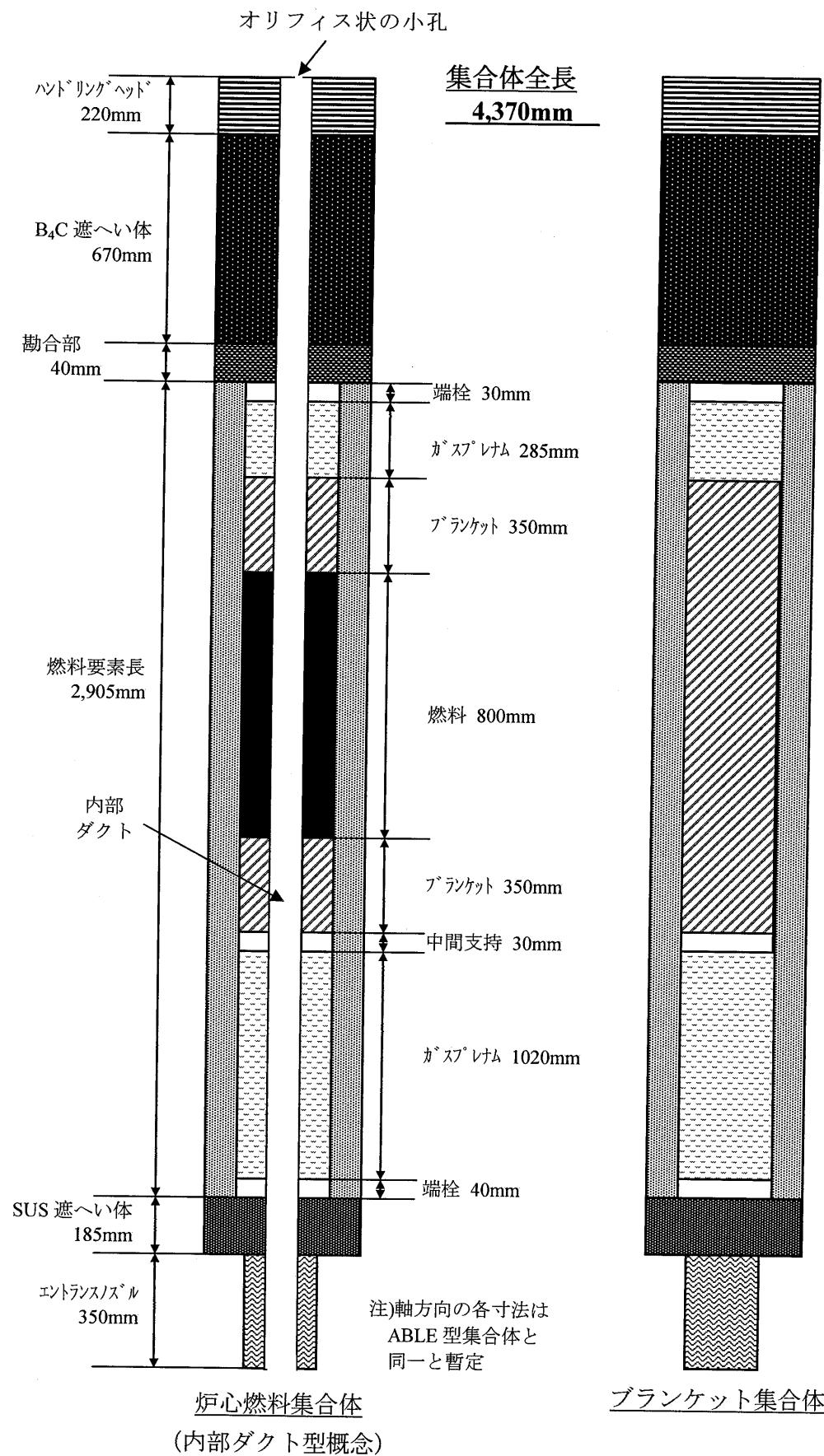


図 2.2.2-2 大型均質炉心内部ダクト型酸化物燃料集合体概念図

2.2.3 まとめ

プラント設計との取合いとして遮蔽体外接円径 6.6m 以下、バンドル部圧力損失 0.2MPa 程度とした条件のもとで、ABLE 型燃料集合体または内部ダクト型集合体を用いた酸化物燃料による大型均質炉心について、燃料サイクルコストの低減を目指して径プランケットを 1 層とし、従来よりもプランケットを含めた実効的な取出平均燃焼度を増加する炉心の特性を検討した。この結果、炉心部の平均燃焼度は約 150GWd/t でプランケットも含めた平均燃焼度は約 70~80GWd/t 程度に向上する炉心を見通すことができた。ただし、ABLE 型炉心ではボイド反応度が 6.4 \$ と大きめであり、内部ダクト型炉心では運転サイクル長さが約 16 ヶ月と短めになる。

2.3 径方向非均質炉心の検討

2000 年度検討の ABLE 型径方向非均質炉心^[2]では、主に内部プランケットの寿命中出力変動が大きい効果により流量条件が厳しく、全体的に被覆管温度が高い条件(被覆管最高温度 710°C程度)となった。このため、CDF(クリープ損傷寿命分数和；ここではクリープ損傷が主体、疲労の効果は小さいため未考慮)は大きくなる結果であり、2000 年度検討炉心では設計上成立の目安である CDF = 0.5 の達成には、さらに仕様の調整等が必要であった。

そこで、まず 2000 年度の技術検討書^[2]に報告されている ABLE 型径方向非均質炉心の見直しとして、内部プランケットをシャフリングする概念を取り入れた炉心の検討を実施し、核特性の確認と共に熱特性改善の効果を検討した。

次に、内部ダクト付き集合体を用いた径方向非均質炉心として、均質炉心での燃料仕様の選定を参考として内部ダクト付き燃料集合体の仕様を選定し、内部プランケットシャフリング概念を取り入れた炉心特性の概要を検討した。

2.3.1 ABLE 型集合体による径方向均質炉心

(1) 選定炉心配置及び燃料仕様

内部プランケットを炉心内にリング状に配置し、炉心を 3 領域に分割するという基本的な配置の考え方はこれまでと同一として、内部プランケットをシャフリングする ABLE 型径方向非均質炉心の見直しを検討した。内部プランケットと径プランケットは同一仕様とし、シャフリングパターンは、炉心の内部装荷位置(1)(2)に装荷し、1 サイクル毎に内部装荷位置(3)、径プランケット装荷位置へと移動して、最後の径プランケット装荷位置では 2 サイクル燃焼後に取り出すこととした。検討結果により選定した大型ナトリウム冷却炉における ABLE 型酸化物燃料径方向非均質炉心の主な炉心・燃料仕様を以下に示す。

・炉心型式	Pu 富化度 1 種類の径方向非均質炉心 (図 2.3.1-1 の炉心配置参照)
・炉心有効長	100 cm
・炉心等価直径	4.77 m(炉心)/5.15 m(径プラ)
・遮蔽体外接円径	6.14 m
・運転サイクル長さ	570 日 (約 19 ヶ月)
・燃料交換バッチ数	炉心 4 / プランケット 4 (内部位置 1+1、径方向位置 2)
・シャフリングパターン	内部位置(1)(2) → 内部位置(3) → 径方向位置

(図 2.3.1-1 の炉心配置参照)

- ・集合体配列ピッチ 201.0mm
- ・炉心燃料ピン径 8.8mm
- ・燃料仕様 炉心燃料 331 本バンドル ABLE 型燃料集合体
プランケット 217 本バンドル集合体(内部プラ、径プラ同一)

(表 2.3.1-1 及び図 2.3.1-2 参照)

燃料仕様の見直しでは、炉心燃料は 2000 年度の検討と同一としており、表 2.3.1-1 に示すようにプランケットを 1 種類に統一した。シャフリングの結果、径方向装荷位置(径プラ位置)には内部装荷位置で Pu が蓄積したプランケット燃料が装荷される。このためプランケットの発熱分担が増えて炉心の発熱分担が減り、炉心燃料体数はシャフリング概念を取り入れていない 2000 年度の炉心 (408 体) よりも少なくなり、390 体となっている。

(2) 核特性評価

まず、前記の選定炉心における核特性評価として、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ反応度特性等を検討した。

以下に評価結果を示す。

表 2.3.1-2 に、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ反応度特性評価結果を示す。また、燃料物質収支を表 2.3.1-3 に示す。表 2.3.1-2 より、運転サイクル長さは約 19 ヶ月を達成しつつ増殖比は約 1.19 となり、内部プランケットシャフリングを入れた径方向非均質炉心でも設計要求を満足する見通しである。また、プランケットを含めた実効的な取出平均燃焼度は約 80GWd/t まで向上しており、燃料サイクルコスト低減への効果が期待される。ボイド反応度は 5.4 \$ であり、均質炉心のような炉心扁平化をしなくてもボイド反応度を抑制できるという径方向非均質炉心の特性が見られる。

なお、制御棒反応度価値、反応度収支については 2000 年度のシャフリングなしの 408 体炉心の場合の検討結果^[2]で成立の見通しを得ていることから、今回は検討していない。

(3) 热特性概略評価

2000 年度の検討結果から、径方向非均質炉心では、内部プランケットの燃焼に伴う出力変動が大きいために、また、炉心燃料における燃焼ミスマッチファクタも均質炉心と比較し若干大きくなっているため、内部プランケットを早期に取り出すことを想定しても熱設計成立性に課題があることがわかった。そこで、2.3.1(1)において課題を解決する手段としての内部プランケットのシャフリングが検討され、その有効性が示された。ここで

は、流量配分、隣接集合体間出口温度差を評価し、熱設計に対しても内部ブランケットのシャフリングが有効であることを確認する。

i. 評価条件

検討条件を以下に示す。

- ・冷却材出入口温度 : 550／395°C ($\Delta T=155^{\circ}\text{C}$)
- ・被覆管最高温度 : 700°C (被覆管工学的安全係数考慮)
- ・想定被覆管 : ODS 鋼
- ・炉心流量 : 18203kg/s
- ・炉心燃料及び内部ブランケットへの配分可能流量
: 炉心流量の 90%→16382kg/s

(制御棒、遮蔽材などへ 4%、径方向ブランケットへ 6% : 表 2.3.1-6 参照)

ii. 評価方法 (評価フローを図 2.3.1-3 に示す。)

流量配分計画設定対象燃料は、炉心燃料集合体（炉心燃料と内部装荷位置ブランケット燃料（以降、本章内にては、内部ブランケットと称す）を対象とし、径方向装荷位置ブランケットは除外している。）とした。

燃料集合体出口（混合）平均冷却材温度、被覆管最高温度、集合体必要流量等を評価するにあたり、表 2.3.1-4 に示す簡易手法を用いた。

iii. 各集合体の必要流量計算

2.3.1(1)において求めた、各燃料集合体の出力とピーキングファクターから、表 2.3.1-4 に示す簡易式にて各集合体の必要流量を概算した。各集合体の必要流量概算結果を表 2.3.1-5 に示す。また、表 2.3.1-6 に必要流量と配分可能流量の検討結果を平成 12 年度のシャフリングなし炉心と比較して示す。表 2.3.1-5 に示すように、各炉心燃料および各内部ブランケットへの必要流量の合計は、15276kg/s で配分可能流量の 93.2% となり、6.8% の余裕が見込まれる結果となっている。2000 年度のシャフリングなし炉心では、必要流量が配分可能流量の 98.0%（出力分布計算見直しケース）であるので、5%程度の必要流量低減が図られた。

理由は、内部ブランケットのシャフリングにより、内部ブランケットのサイクル間出力変動が抑えられたこと、径ブランケット位置に、3, 4 年目の内部ブランケットを装荷したことにより径ブランケット位置の出力が増加し、炉心の出力分布、集合体内出力分布が平坦化したことなどによる。

iv. 流量配分仮設計

炉心燃料集合体の流量領域を最大8領域とすることを目安として、各集合体の冷却材必要流量より流量配分計画を検討した。

図2.3.1-4に炉心燃料と内部ブランケットの各集合体の必要流量分布、および流量領域区分の様子を、図2.3.1-5に炉心の流量領域番号を示す。また、流量配分計画を表2.3.1-7に示す。

流量領域は、炉心燃料部を6領域、内部ブランケット部を2領域とし、計8領域に設定した。流量領域設定後の流量合計は、配分可能流量の94.8%となっており、余剰流量5.2%となっている。

径方向非均質炉心において、内部ブランケットをシャフリングすることにより、被覆管最高温度700°Cを満足するような流量配分を計画できる見通しが得られた。

v. 流量配分設計

余剰流量再配分は、サーマルストライピングに配慮し、内部ブランケット-集合体間出口温度差低減を考慮して実施した。余剰流量再配分後の流量配分計画を表2.3.1-8に示す。また、余剰流量再配分前後の集合体間出口温度差の分布を図2.3.1-6に示す。また、余剰流量再配分前後の各集合体における出口温度差比較を図2.3.1-7に、2000年度のシャフリングなし炉心における内部ブランケット部の出口温度差を図2.3.1-8に示す。

内部ブランケットのシャフリングにより、出口温度差が最大60°C低下している。

vi. まとめ

以下に検討炉心をいくつかの流量領域に分割し、流量配分計画を設定し、隣接集合体間出口温度差を評価した結果をまとめる。

- ・ 内部ブランケット燃料をシャフリングすることにより、径方向非均質炉心での領域総必要流量が、配分可能流量を下回る可能性を確認した。
- ・ 内部ブランケット燃料をシャフリングすることにより、隣接する炉心燃料集合体間（炉心燃料と内部ブランケット燃料を対象）の冷却材出口温度の最大差は、約106°C（シャフリングなしでは約167°C）となり、径方向非均質炉心での隣接する炉心燃料集合体間の冷却材出口温度差が減少する可能性を確認した。

(4) 燃料特性概略評価

2000年度検討のABLE型径方向非均質炉心^[2]では、主に内部ブランケットの寿命中出力変動が大きい効果により流量条件が厳しく、全体的に被覆

管温度が高い条件(被覆管最高温度 710°C程度)となるため、CDF(クリープ損傷寿命分数和；ここではクリープ損傷が主体、疲労の効果は小さいため未考慮)は大きくなる結果となり、2000 年度検討炉心では設計上成立の目安である $CDF = 0.5$ の達成には、さらに仕様の調整等が必要であった(ガスプレナム高さを 1.08 倍程度増加させ、圧力損失に若干程度負荷をかけることで成立の見通しは得ていた)。

本年度検討の結果、前記(3)に示す通り内部プランケットをシャフリングする概念を取り入れることで、本 ABLE 型径方向非均質炉心についても被覆管最高温度 700°Cを下回る流量配分が成立する見通しが得られたことから、CDF 値も緩和されるものと考えられ、そこで、簡易的な被覆管温度履歴等を設定し CDF の評価を行うこととした。

i. 評価条件

検討炉心の体系は図 2.3.1-1 の通りである。炉心の Pu 富化度は 1 種類で同一であるが内部プランケットにより 3 つの領域(第 1 領域：第 1 リングと第 2 リングの間、第 2 領域：第 2 リングと第 3 リングの間、第 3 領域：第 3 リングと径方向プランケット位置の間の各領域)に分割されている。今回の CDF 解析ケースとしては、これらの 3 つの炉心領域について代表ピンを設定して、そのピンを対象に解析を実施することとした。ここで、代表ピンとしては、各領域を構成する集合体のうち被覆管最高温度の照射期間中平均値が最も高い集合体のピンと設定した。各集合体の被覆管温度履歴を評価した結果、代表ピン集合体として以下の結果が得られた(ここで、集合体の位置は、図 2.3.1-9 のマップに対応するものである)。

- ・ 第 1 領域：集合体番号 4
- ・ 第 2 領域：集合体番号 36
- ・ 第 3 領域：集合体番号 61

次に、CDF 解析で設定した燃料に関する解析条件、及び、設定の根拠を表 2.3.1-9 にまとめた。ここで、燃料仕様の不確かさについては、実証炉設定値を参考に、暫定的に内外挿し、各不確かさとも CDF 評価上厳しい側に乗算的に設定した。また、被覆管最高温度履歴については、照射初期を 700°C とし 2 次元計算の結果得られたミスマッチファクタから簡易的に設定した値を用いることとした。図 2.3.1-10 に、各領域代表ピンの被覆管最高温度履歴を示した。

ii. 評価結果

CDF 解析の結果として、各炉心領域(第 1 領域代表ピン、第 2 領域代表

ピン、第3領域代表ピン)の照射末期におけるピン燃焼度、ガスプレナム内圧、FCCI量(内面腐食量)、外面腐食量、照射末期被覆管温度、フープ応力、CDF値を表2.3.1-10にまとめて示した。

いずれの領域においても、照射末期のガスプレナム内圧は 100 kgf/cm^2 程度、フープ応力は 10 kgf/mm^2 程度であり、CDF値は、第1領域で0.343、第2領域で0.094、第3領域で0.077と、2000年度検討炉心で0.5を大きく上回っていた値(参考：2000年度検討炉心CDF値は、第1領域0.158、第2領域0.933、第3領域0.892)が大幅に低減しており、ガスプレナム高さ等の仕様を見直すことなく設計成立上の目安である0.5をクリアしている結果が認められた。

iii. まとめ

熱特性が緩和された内部ブランケットシャッフリング概念を取り入れたABLE型径方向非均質炉心について、CDFに関する成立性評価を行った結果、炉内のいずれの領域においても、CDF値が成立条件の目安である0.5を下回っている結果が得られ、本径方向非均質炉心燃料は十分成立性を見込めることが確認された。

(5) まとめ及び今後の課題

以上により、内部ブランケットと径ブランケットを同一にしてシャッフリングする概念を取り入れたABLE型酸化物燃料径方向非均質炉心の主要な特性を検討し設計成立の見通しを得た。

しかし、ブランケット物量の減少と、シャッフリングによってブランケットの燃焼度が増加したことにより、径方向非均質炉心の特徴のひとつであった高増殖性能が低下する概念となつた。

また、シャッフリング実施の運用面での煩雑さが課題のひとつとなる。

表 2.3.1-1 ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心における燃料仕様

項目	炉心燃料	径プランケット	
燃料形態	酸化物燃料	←	
炉心材料（被覆管/ラッパ管）	ODS鋼/PNC-FMS	←	
燃料要素	全長 (mm)	2,630	←
	燃料スタック長 (mm)	1,000	1,600
	軸プランケット厚さ (mm; 上/下)	300/300	—
	ガスプレナム長 (mm; 上/下)	100/840	←
	端栓 (mm; 上/中/下)	20/30/40	←
	被覆管外径 (mm)	8.8	10.9
	被覆管内径 (mm)	7.6	9.9
	被覆管肉厚 (mm)	0.6	0.5
集合体	燃料スマニア密度 (%TD)	82.0	91.4
	全長 (mm)	4,400	←
	燃料ピン本数 (本)	331 *1	217
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径[P/D] (-)	1.16	1.12
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0	7.0
	ラッパ管外対面距離 (mm)	198.0	←
	集合体間ギャップ (mm)	3.0	←
	集合体配列ピッチ (mm)	201.0	←
	ワイヤ径 (mm)	1.34	1.32
	ワイヤ巻付ピッチ (mm)	200	160
構造材	燃料体積割合 (%) *2	42.9 (35.2)	47.9 (43.8)
	構造材体積割合 (%)	25.5	24.2
	冷却材体積割合 (%)	31.6	27.8

*1: 溶融燃料排出孔として軸プランケットは集合体中央の37本のペレットを削除

*2: 被覆管内側、()内は実効燃料体積割合

表 2.3.1-2 ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の主要核特性

原子炉熱出力 (MWth)		3,570
運転サイクル長さ (日)		548
燃料交換バッチ [炉心/プランケット]		4/4(1+1+2)
Pu富化度 (wt% : Pu/HM) [内側炉心/外側炉心]		25.1
取出平均燃焼度 (MWd/t)	炉心部	149,000
	全体	80,000
燃焼反応度 (% Δ k/kk')		2.0
増殖比 (-) [炉心/軸プラ/内部プラ/径プラ/全体]		0.63/0.18/0.25/0.13/1.19
炉心平均出力密度 (W/cc ; 平衡中期)		224
炉心部平均線出力密度 (W/cm ; 平衡中期)		236
最大線出力密度 (W/cm) *1		約430
出力分担率 (%) [平均 : 炉心/プランケット]		85.5/14.5
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$) [$E \geq 0.1 \text{ MeV}$]		2.1
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23} \text{ n/cm}^2$) [$E \geq 0.1 \text{ MeV}$]		4.2
初装荷核分裂性Pu重量 (kg)		7,033
平衡サイクル核分裂性Pu重量 (kg)	平衡初期	7,806
	平衡末期	8,178
年間核分裂性Pu利得 (kg/年)		248
原子炉倍増時間 (年)		32
複合システム倍増時間 (年) *2		39
炉心部ボイド反応度 (\$) ; 平衡末期) *3		5.4
炉心部ドップラ係数 ($\times 10^{-3} \text{ Tdk/dT}$; 平衡末期)		-3.8

*1 : 燃焼ミスマッチファクタ及び3次元効果考慮

*2 : 燃料炉外滞在期間 5年、燃交・定検期間 42日、炉外核分裂性物質損失率 2%

*3 : ラッパ管内側のみボイド化、燃料集合体非均質効果補正 (0.9) を考慮

*4 : 燃料物質のみの温度変化時、燃料集合体非均質効果補正 (1.05) を考慮

表 2.3.1-3 ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(1/2)

1 バッチ当たりの装荷燃料重量

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ +径プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	3.9	8.6	12.9	25.3	20.6	30.1	50.7	76.0	
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
U238	1295.1	2849.1	4273.7	8417.9	6838.5	10001.9	16840.4	25258.2	
U合計	1299.0	2857.7	4286.6	8443.2	6859.0	10032.0	16891.0	25334.2	
Pu238	5.1	11.2	16.8	33.1	0.0	0.0	0.0	33.1	
Pu239	250.6	551.3	827.0	1628.9	0.0	0.0	0.0	1628.9	
Pu240	148.7	327.1	490.7	966.5	0.0	0.0	0.0	966.5	
Pu241	19.9	43.8	65.7	129.5	0.0	0.0	0.0	129.5	
Pu242	18.1	39.7	59.6	117.4	0.0	0.0	0.0	117.4	
Pu合計	442.4	973.2	1459.9	2875.5	0.0	0.0	0.0	2875.5	
Np237	2.3	5.1	7.7	15.1	0.0	0.0	0.0	15.1	
Np239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Np合計	2.3	5.1	7.7	15.1	0.0	0.0	0.0	15.1	
Am241	9.3	20.4	30.6	60.3	0.0	0.0	0.0	60.3	
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Am243	4.6	10.2	15.3	30.1	0.0	0.0	0.0	30.1	
Am合計	13.9	30.6	45.9	90.4	0.0	0.0	0.0	90.4	
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm244	4.6	10.2	15.3	30.1	0.0	0.0	0.0	30.1	
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm合計	4.6	10.2	15.3	30.1	0.0	0.0	0.0	30.1	
合計	1762.2	3876.8	5815.3	11454.3	6859.0	10032.0	16891.0	28345.3	

1 バッチ当たりの取出燃料重量

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ +径プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	1.5	2.5	4.2	8.1	12.9	15.6	28.4	36.5	
U236	0.5	1.1	1.6	3.3	1.8	3.2	5.0	8.2	
U238	1128.2	2403.4	3656.8	7188.4	6452.5	9176.7	15629.1	22817.6	
U合計	1130.1	2407.1	3662.6	7199.8	6467.1	9195.4	15622.5	22862.3	
Pu238	6.4	13.6	20.3	40.3	0.2	0.5	0.7	40.9	
Pu239	188.3	391.5	596.0	1175.7	287.0	527.6	814.7	1990.4	
Pu240	135.9	290.9	436.1	862.8	20.6	55.6	76.2	939.0	
Pu241	20.8	46.7	67.9	135.4	1.0	3.7	4.7	140.0	
Pu242	16.7	36.3	54.3	107.3	0.0	0.2	0.2	107.5	
Pu合計	367.9	779.0	1174.5	2321.4	308.8	587.6	896.5	3217.9	
Np237	1.6	3.3	5.2	10.1	0.7	1.8	2.6	12.7	
Np239	0.2	0.5	0.7	1.4	0.5	1.4	1.9	3.4	
Np合計	1.8	3.8	6.0	11.6	1.3	3.2	4.5	16.1	
Am241	8.3	16.0	25.2	49.5	0.1	0.4	0.4	49.9	
Am242m	0.6	1.4	2.0	4.0	0.0	0.0	0.0	4.0	
Am243	4.7	10.4	15.5	30.6	0.0	0.0	0.0	30.6	
Am合計	13.6	27.8	42.8	84.1	0.1	0.4	0.4	84.6	
Cm242	0.4	1.1	1.6	3.2	0.0	0.0	0.0	3.2	
Cm243	0.1	0.2	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	
Cm244	5.4	12.1	17.7	35.1	0.0	0.0	0.0	35.1	
Cm245	0.8	2.0	2.8	5.7	0.0	0.0	0.0	5.7	
Cm合計	6.6	15.4	22.3	44.3	0.0	0.0	0.0	44.3	
合計	1520.1	3233.0	4908.1	9661.2	6777.3	9786.6	16563.9	26225.1	

表 2.3.1-3 ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(2/2)

平衡初期 (BOEC) の燃料重量 [kg]

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ +径プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	11.0	22.9	35.3	69.2	69.5	90.7	160.2	229.3	
U236	1.0	2.3	3.3	6.5	3.1	6.6	9.6	16.1	
U238	4914.3	10708.8	16140.1	31763.2	26768.2	38232.7	65000.8	96764.1	
U合計	4926.2	10734.0	16178.7	31838.9	26840.7	38329.9	65170.6	97009.5	
Pu238	22.2	48.9	72.9	144.0	0.1	0.6	0.8	144.8	
Pu239	891.6	1927.5	2907.2	5726.3	479.7	1056.9	1536.6	7262.9	
Pu240	577.3	1261.4	1889.1	3727.8	19.7	72.6	92.3	3820.1	
Pu241	82.8	184.4	271.6	538.9	0.7	3.6	4.3	543.2	
Pu242	69.9	153.3	229.7	452.9	0.0	0.1	0.2	453.1	
Pu合計	1643.8	3575.5	5370.5	10589.8	500.3	1133.9	1634.2	12224.0	
Np237	8.0	17.2	26.3	51.5	1.2	3.2	4.4	55.9	
Np239	0.7	1.7	2.3	4.7	1.7	3.1	4.8	9.5	
Np合計	8.7	18.9	28.6	56.2	2.8	6.3	9.1	65.4	
Am241	34.8	73.4	112.7	220.8	0.0	0.2	0.2	221.0	
Am242m	1.3	3.0	4.3	8.6	0.0	0.0	0.0	8.7	
Am243	18.8	41.3	61.8	121.8	0.0	0.0	0.0	121.9	
Am合計	54.8	117.7	178.7	351.3	0.0	0.3	0.3	351.6	
Cm242	1.6	3.7	4.9	10.2	0.0	0.0	0.0	10.2	
Cm243	0.1	0.3	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7	
Cm244	19.7	43.9	65.1	128.7	0.0	0.0	0.0	128.7	
Cm245	1.5	3.8	5.3	10.6	0.0	0.0	0.0	10.6	
Cm合計	23.0	51.6	75.7	150.2	0.0	0.0	0.0	150.3	
合計	6656.6	14497.8	21832.2	42986.5	27343.8	39470.4	66814.2	109800.7	

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ +径プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	8.5	16.8	26.6	51.9	61.8	76.1	137.9	189.8	
U236	1.4	3.5	4.9	9.8	4.9	9.7	14.6	24.4	
U238	4747.4	10263.1	15523.2	30533.8	26382.2	37407.5	63789.6	94323.4	
U合計	4757.4	10283.4	15554.7	30595.5	26448.8	37493.3	63942.1	94537.6	
Pu238	23.4	51.3	76.4	151.2	0.3	1.2	1.5	152.6	
Pu239	829.2	1767.6	2676.2	5273.0	766.8	1584.5	2351.3	7624.3	
Pu240	564.5	1225.1	1834.5	3624.1	40.3	128.2	168.5	3792.6	
Pu241	83.7	187.3	273.8	544.7	1.7	7.3	9.0	553.7	
Pu242	68.6	149.9	224.3	442.8	0.1	0.3	0.4	443.1	
Pu合計	1569.4	3381.2	5085.2	10035.8	809.1	1721.5	2530.6	12566.4	
Np237	7.3	15.4	23.9	46.6	1.9	5.0	6.9	53.5	
Np239	0.9	2.3	3.0	6.2	2.2	4.5	6.7	12.9	
Np合計	8.2	17.7	26.9	52.8	4.1	9.5	13.6	66.4	
Am241	33.8	69.0	107.3	210.0	0.1	0.6	0.7	210.7	
Am242m	1.9	4.4	6.3	12.7	0.0	0.0	0.0	12.7	
Am243	18.9	41.5	61.9	122.3	0.0	0.0	0.0	122.4	
Am合計	54.5	114.9	175.6	345.0	0.1	0.6	0.7	345.7	
Cm242	2.0	4.8	6.6	13.3	0.0	0.0	0.0	13.3	
Cm243	0.2	0.4	0.5	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1	
Cm244	20.5	45.7	67.5	133.6	0.0	0.0	0.0	133.7	
Cm245	2.4	5.9	8.1	16.3	0.0	0.0	0.0	16.3	
Cm合計	24.9	56.8	82.7	164.4	0.0	0.0	0.0	164.4	
合計	6414.4	13853.9	20925.1	41193.4	27262.1	39225.0	66487.0	107680.4	

表 2.3.1-4 集合体毎必要流量計算手法

計算式
$T_c = (\Delta T_{Na} \times F_b \times RPF + \Delta T_0) \times HFS + T_{in}$
$W_{req} = P_{SA} / C_p / \Delta T_{Na}$
パラメータ
<p>T_c:被覆管最高温度(HS)</p> <p>ΔT_{Na}:集合体出口(混合)平均冷却材温度上昇</p> <p>F_b:バンドル部径方向温度ピーキング係数(周辺流れ効果)相当値=1.1</p> <p>RPF:集合体内径方向出力ピーキング係数</p> <p>ΔT_0:冷却材-被覆管肉厚中心間温度上昇($\Delta T_{film} + 1/2 \Delta T_c$)相当値=20°C</p> <p>HSF:被覆管工学的安全係数(合計)相当値=1.18</p> <p>T_{in}:入口温度</p> <p>P_{SA}:集合体出力</p> <p>C_p:冷却材比熱(温度平均)</p> <p>W_{req}:集合体毎必要流量</p>

表2.3.1-5 集合体毎必要流量概略評価結果(内部プランケットのシャーフリング考慮)

集合体番号 ^{*1}	領域分類 ^{*1}	流配用出力(MW)			集合体番号 ^{*1}	領域分類 ^{*1}	流配用出力(MW)			必要流量(kg/s)
		BOEC	EOEC	最大			BOEC	EOEC	最大	
3	炉心 第1領域	10.37	10.41	10.41	38.02	炉心 第3領域	9.87	7.94	9.87	36.03
4		10.73	10.65	10.73	39.20		8.89	6.98	8.89	32.47
5		10.51	10.52	10.52	38.41		9.68	7.88	9.68	35.37
6		10.51	10.52	10.52	38.41		9.97	8.40	9.97	36.41
7		10.70	10.71	10.71	39.13		10.31	8.70	10.31	37.65
11		9.31	9.77	9.77	35.70		10.31	8.70	10.31	37.65
8		9.73	10.07	10.07	36.79		9.97	8.40	9.97	36.41
10		9.72	10.07	10.07	36.79		9.68	7.90	9.68	35.37
13		8.09	9.00	9.00	32.88		8.89	7.00	8.89	32.47
14		8.09	9.00	9.00	32.88		8.49	6.63	8.49	31.00
17		8.20	9.17	9.17	33.48		9.28	7.29	9.28	33.89
21		8.20	9.18	9.18	33.52		9.53	7.68	9.53	34.82
25		8.59	9.51	9.51	34.74		9.55	7.77	9.55	34.89
26	炉心 第2領域	8.59	9.51	9.51	34.74		9.55	7.77	9.55	34.89
22		9.84	9.98	9.98	36.43		9.53	7.68	9.53	34.82
23		10.07	10.12	10.12	36.97		9.28	7.31	9.28	33.89
28		10.07	10.13	10.13	37.01		8.49	6.65	8.49	31.00
31		9.69	9.86	9.86	36.00	内部プランケット(第1列) (第2列)	1.68	3.52	3.52	12.84
32		9.17	9.79	9.79	35.76		1.39	3.19	3.19	11.66
33		9.22	9.80	9.80	35.80		1.39	3.19	3.19	11.66
34		9.17	9.79	9.79	35.76		1.37	3.17	3.17	11.58
35		9.69	9.87	9.87	36.04		1.17	3.15	3.15	11.50
29		10.44	10.10	10.44	38.11		1.16	2.96	2.96	10.80
30		10.42	10.14	10.42	38.06		1.17	3.15	3.15	11.50
36		10.42	10.16	10.42	38.06		3.29	5.22	5.22	19.08
37		10.33	10.05	10.33	37.72		3.29	5.24	5.24	19.12
39		9.65	9.67	9.67	35.31		3.29	4.80	4.80	17.53
40		9.50	9.69	9.69	35.39		3.14	4.97	4.97	18.17
41		9.36	9.82	9.82	35.85		3.13	5.10	5.10	18.62
42		9.36	9.83	9.83	35.89		3.13	5.10	5.10	18.62
43		9.50	9.70	9.70	35.44		3.14	4.97	4.97	18.17
44		9.65	9.68	9.68	35.35		3.94	3.59	3.94	14.39
47	炉心 第3領域	9.67	8.27	9.67	35.31		2.81	2.57	2.81	10.25
55		9.67	8.28	9.67	35.31		3.85	3.49	3.85	14.07
56		9.88	8.25	9.88	36.10		3.85	3.50	3.85	14.07
57		9.82	8.29	9.82	35.85		2.81	2.59	2.81	10.25
58		9.84	8.35	9.84	35.92		2.54	2.34	2.54	9.26
59		10.19	8.48	10.19	37.21		3.16	2.87	3.16	11.53
60		10.32	8.73	10.32	37.68		3.43	3.14	3.43	12.51
61		10.17	8.89	10.17	37.13		3.53	3.26	3.53	12.91
62		10.18	8.89	10.18	37.17		3.54	3.28	3.54	12.92
63		10.32	8.73	10.32	37.68		3.53	3.28	3.53	12.91
64		10.19	8.49	10.19	37.21		3.43	3.14	3.43	12.51
65		9.84	8.36	9.84	35.92		3.16	2.89	3.16	11.53
66		9.82	8.30	9.82	35.85		2.54	2.34	2.54	9.26
72		10.31	8.90	10.31	37.65					
73		10.10	8.85	10.10	36.90					
74		10.31	8.91	10.31	37.65					

*1: 図2.3.1-9参照

Na冷却FBR設計研究に基づく値

周辺流れ効果: Fb	1.10	(-)
被覆管工学の安全係数(合計)相当値	1.18	(-)
冷却材-被覆管肉厚中心温度上昇相当値	20.0	(deg.C)
Na比熱(温度平均)	1263.0	(J/kg/K)
被覆管肉厚中心最高温度	700	(deg.C)
集合体入口冷却材温度	395	(deg.C)

炉心・内部プランケット燃料集合体への配分可能流量(kg/s) 16,382.3

炉心・内部プランケット燃料集合体の集合体毎必要流量積算値(kg/s) 15,276.4
配分可能流量に対する割合 93.2%

表2.3.1-6(1/2) 1次冷却材の炉心内流量配分

	径方向非均質炉心 (2001年度検討、 シャーフリング考慮)	径方向非均質炉心 (2000年度検討)
熱出力(MW)	3570	3570
1次系冷却材流量(kg/s)	18203	18203
炉心燃料への配分可能流量(kg/s)	16382	16928
1次冷却材の流量配分		
制御棒、径方向遮蔽体、その他	4%	4%
径プランケット集合体	6%	3%
炉心燃料集合体(内部プランケットを含む)	90.0%	93.0%
径プランケット必要流量・その他の領域の必要流量を合理化		

メモ： 径方向非均質炉心H13では、径プランケットのEOEC出力分担率がH12年度の2.6%から5.7%へと増加しているので、この分を勘案し、同様の考え方にて、径プランケットへの配分流量を6%とした。

表2.3.1-6(2/2) 必要流量

	径方向非均質炉心 (2001年度検討、 シャーフリング考慮)	径方向非均質炉心 (2000年度検討) (注1)	径方向非均質炉心 (2000年度検討) (注2)
炉心燃料と内部プランケットに配分可能な流量(kg/s)	16382		16928
配分可能流量に対する必要流量の割合	93.2%	98.0%	101.7%
炉心燃料	85.5%	88.1%	91.5%
内部プランケット	7.7%	9.9%	10.2%

注1:集合体出力分布は、2次元燃焼、3次元拡散計算(平成13年度計算と比較の為、同一計算体系にて再計算)

注2:集合体出力分布は、3次元燃焼、3次元拡散計算(平成12年度報告)

表2.3.1-7 流量領域設定後必要流量

流量領域番号	集合体数 (体)	集合体流量 (kg/s)	被覆管最高温度 (°C)	領域流量 (kg/s)	領域流量合計 (kg/s)	配分可能流量 に対する割合
炉心燃料集合体	1	24	39.20	699.4	940.80	
	2	66	38.11	700.0	2515.26	
	3	72	37.21	700.1	2679.12	14184.06
	4	132	36.10	700.1	4765.20	
	5	48	34.89	700.1	1674.72	
	6	48	33.52	700.1	1608.96	
内部ブランケット集合体	7	42	19.12	700.6	803.04	1342.32
	8	42	12.84	700.1	539.28	
			474			94.8%

集合体間出口温度差を考慮し、流量領域1～3に余剰流量を配分した。

表2.3.1-8 流量配分計画

流量領域番号	集合体数 (体)	流量配分計画 集合体流量 (kg/s)	被覆管最高温度 (°C)	領域流量 (kg/s)	領域流量合計 (kg/s)	配分可能流量 に対する割合
炉心燃料集合体	1	24	44.48	666.1	1067.52	
	2	66	43.39	665.7	2863.74	
	3	72	42.49	665.1	3059.28	15039.42
	4	132	36.10	700.1	4765.20	
	5	48	34.89	700.1	1674.72	
	6	48	33.52	700.1	1608.96	
内部ブランケット集合体	7	42	19.12	700.6	803.04	1342.32
	8	42	12.84	700.1	539.28	
			474			100.0%

表 2.3.1-9 解析条件(燃料仕様)、及び、設定の根拠

	CDF 解析条件 (ノミナル条件から公差等考慮)	燃料仕様 (ノミナル条件)	備考(設定の根拠)
ピン燃焼度	210GWd/t	200GWd/t	軸方向ブランケット分の寄与として 5%を想定
運転サイクル長さ	570 日	570 日	
バッヂ数	4 バッヂ	4 バッヂ	
燃料形態	MOX	MOX	
被覆材	ODS 鋼	ODS 鋼	
燃料ピン外径	8.769 mm	8.8 mm	実証炉の公差(8.5 ± 0.03 mm)を外挿して設定
燃料ピン内径	7.625 mm	7.6 mm	実証炉の公差(7.5 ± 0.03 mm)を外挿して設定
スミア密度	81.46 %TD	82 %TD	ピン内径の公差による増分を考慮し、燃料重量を保存するよう設定
炉心高さ	100 cm	100 cm	
上部ガスプレナム高さ	9.157 cm	10.0 cm	実証炉の公差(炉心 100 ± 0.5 cm、軸フランジト 35 ± 0.2 cm)を内挿して設定
下部ガスプレナム高さ	84.0 cm	84.0 cm	
上部ガスプレナム容積	3.88 cc	4.54 cc	・実証炉の公差(7.5 ± 0.025 mm)から設定される ・内径公差を厳しい側に考慮
下部ガスプレナム容積	35.58 cc	38.11 cc	・揮発性不純物の寄与として 6%を考慮
炉心入口温度	395°C	395°C	
初期被覆管ピーカーク温度 (被覆管肉厚中心)	700°C	700°C	
末期被覆管ピーカーク温度 (被覆管肉厚中心)	654°C	654°C	

表 2.3.1-10 CDF 解析結果(各炉心領域の代表ピン対象、照射末期の値)

炉心領域	ピン燃焼度 (MWd/t)	ガスプレナム 内圧 (kgf/cm ²)	FCCI による 腐食量 (μm)	外面腐食量 (μm)	被覆管温度 (°C)	フープ応力 (kgf/mm ²)	CDF (-)
第1領域 (内部ブランケット第1リングと内部 ブランケット第2リングの間の領域) (代表ピンの集合体番号 : 4)*	171,025	108.74	101.00	79.90	662.3	11.425	<u>0.343</u>
第2領域 (内部ブランケット第2リングと内部 ブランケット第3リングの間の領域) (代表ピンの集合体番号 : 36)*	164,966	104.90	100.98	74.51	654.2	10.878	<u>0.094</u>
第3領域 (内部ブランケット第3リングと径方 向ブランケットの間の領域) (代表ピンの集合体番号 : 61)*	164,547	104.60	100.98	72.69	649.7	10.800	<u>0.077</u>

* 各炉心領域における代表ピン(平均被覆管温度が最高のピン)を対象に解析を実施した。

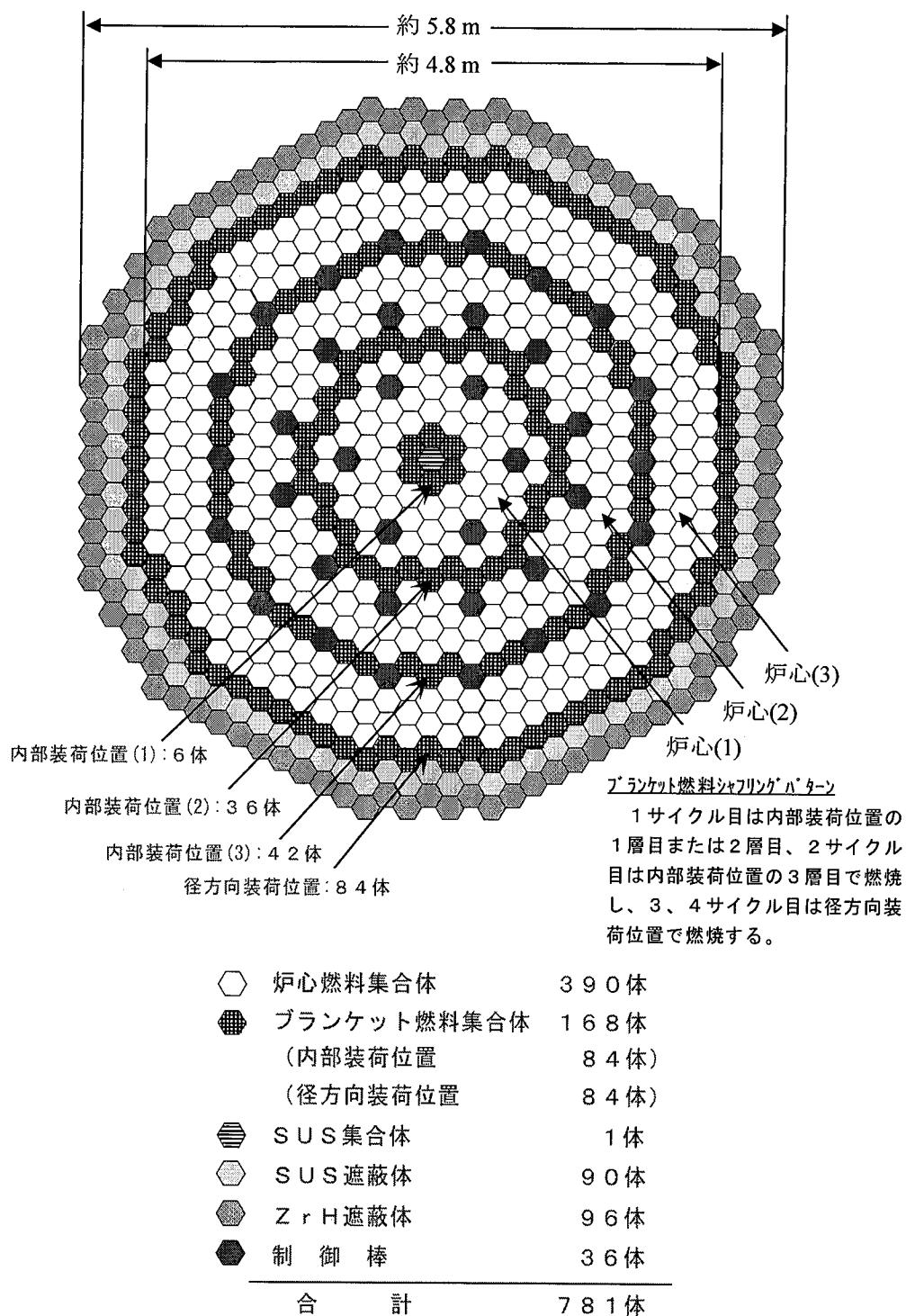


図 2.3.1-1 ABLE 型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の炉心配置

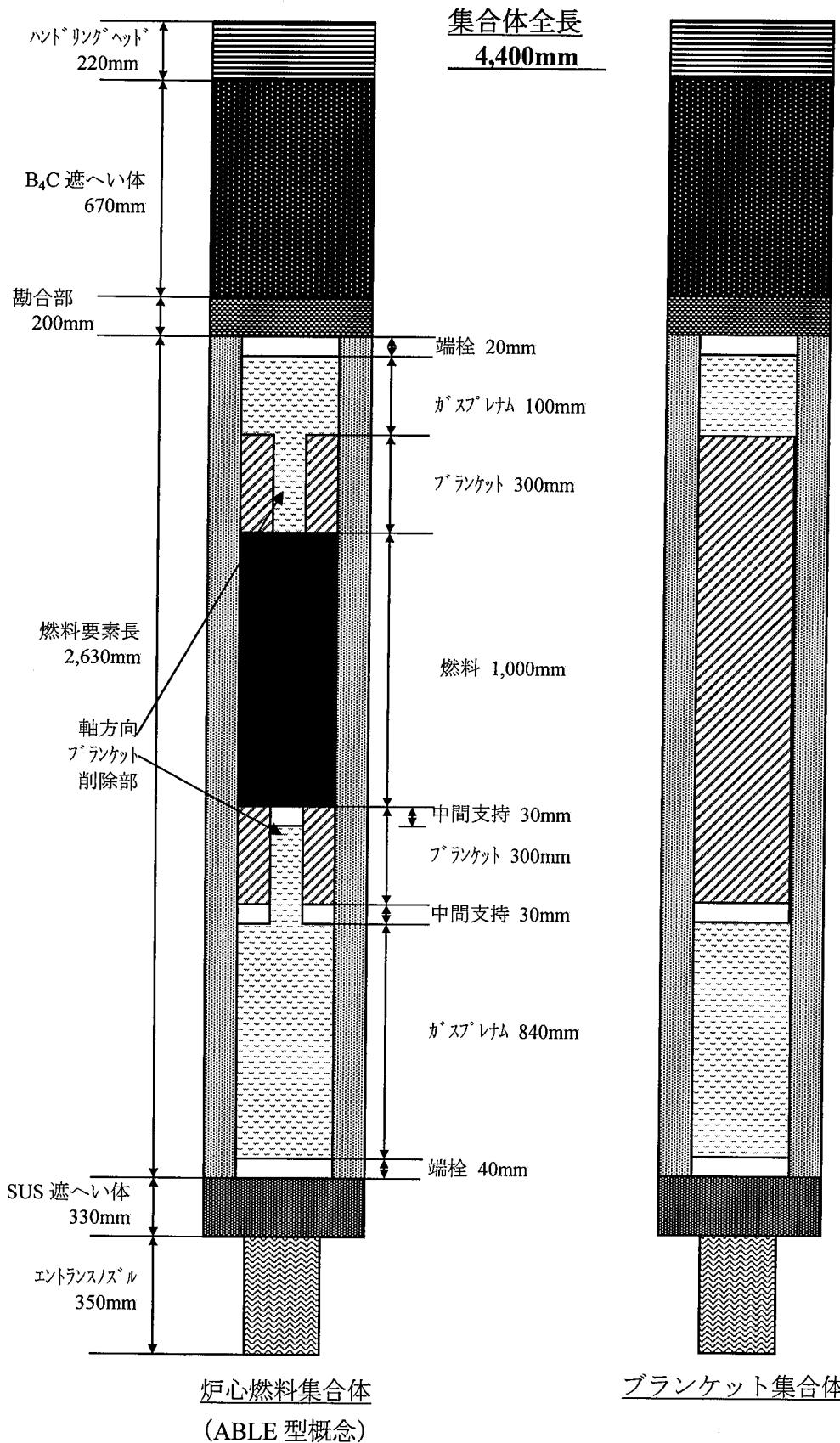


図 2.3.1-2 大型径方向非均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図

他設計分野からの条件

燃料設計分野での設定条件

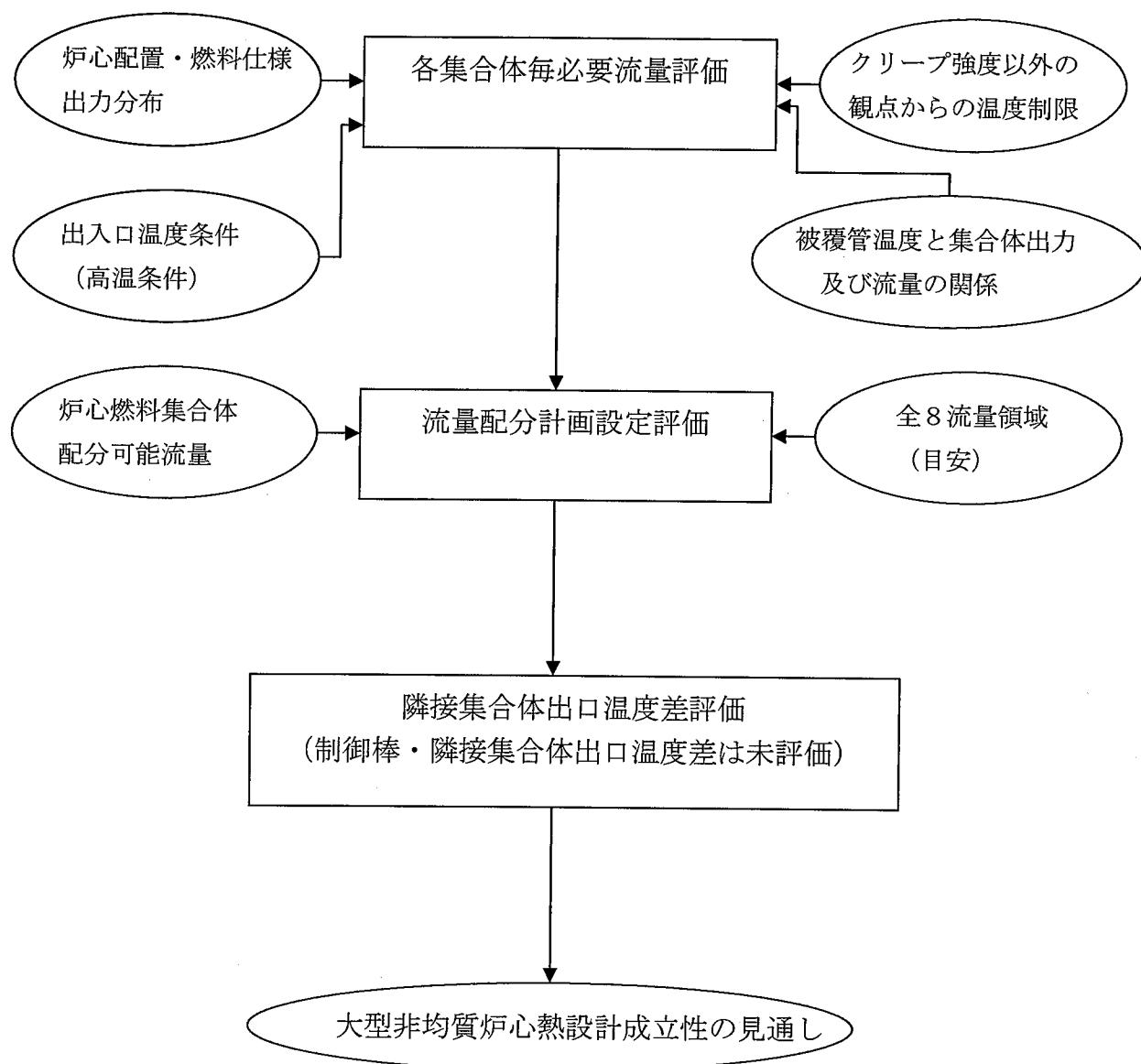


図 2.3.1-3 热設計検討フロー

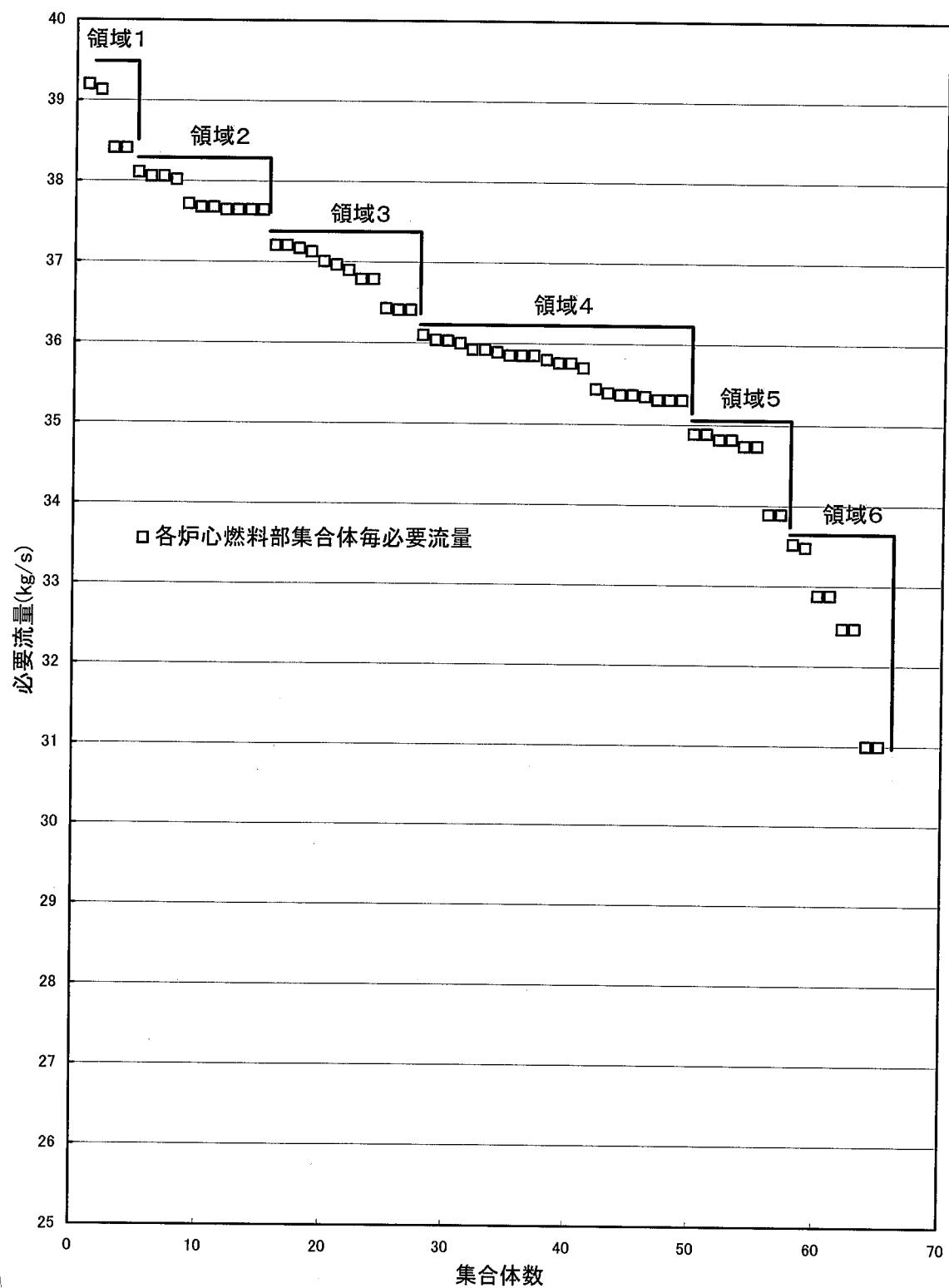


図2.3.1-4(1/2) 炉心燃料部での集合体毎必要流量分布及び流量領域区分

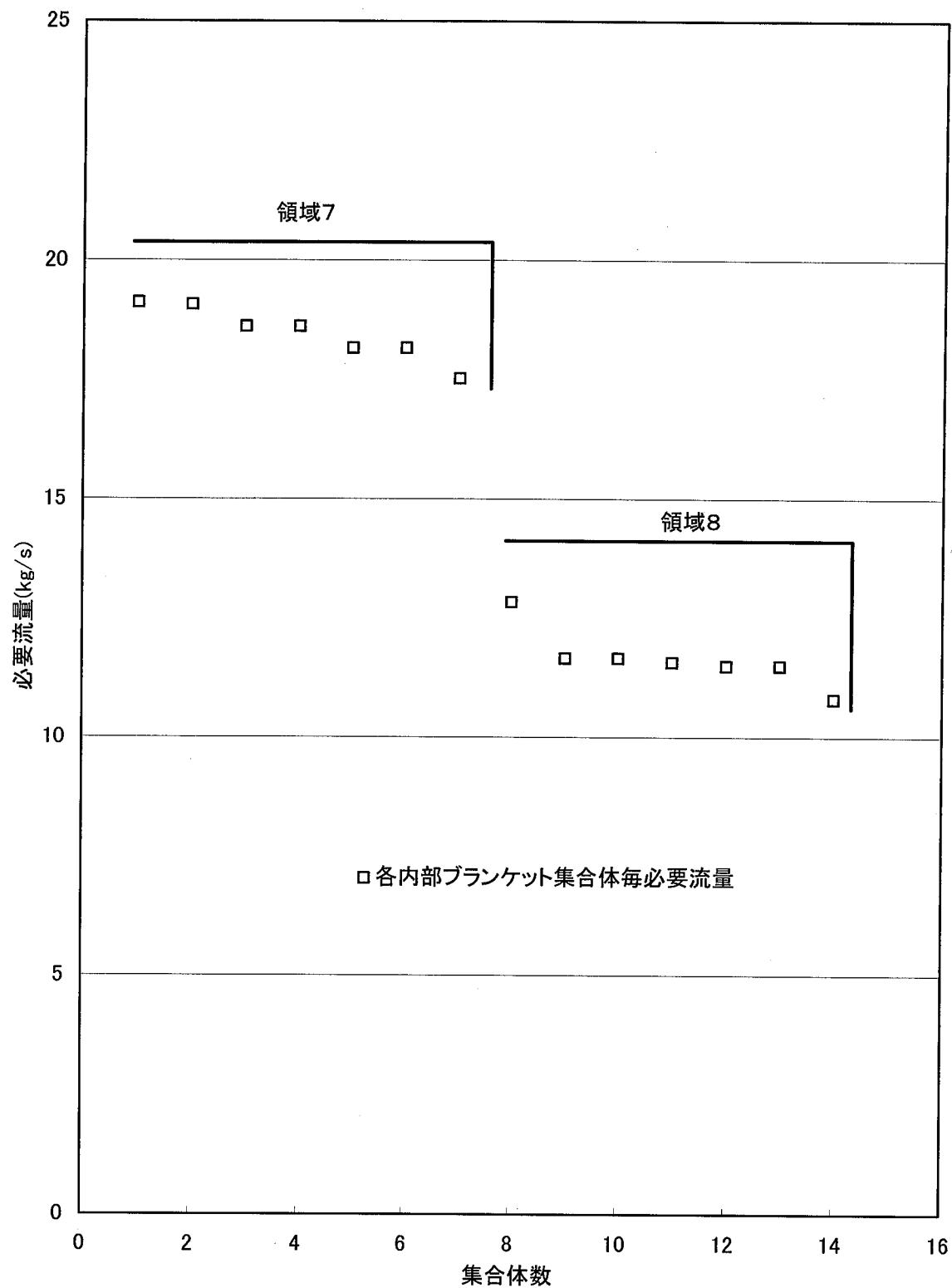


図2.3.1-4(2/2) 内部ブランケットの集合体毎必要流量分布と流量領域区分

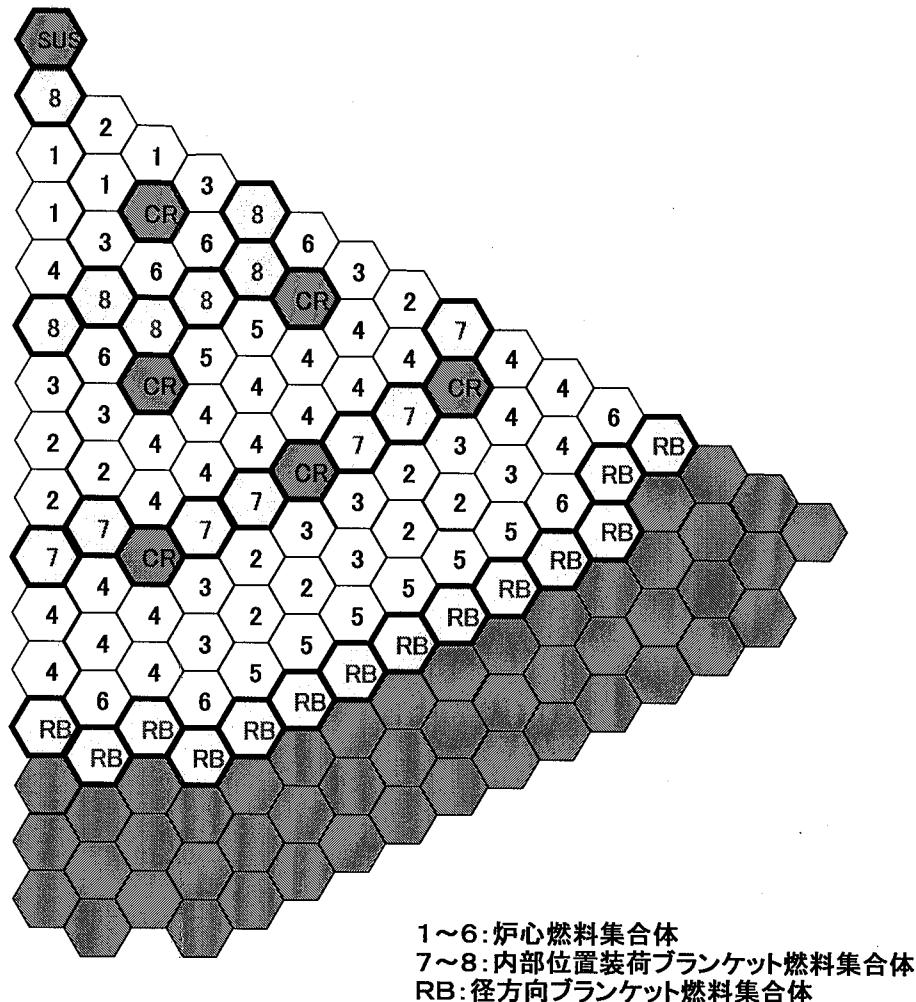
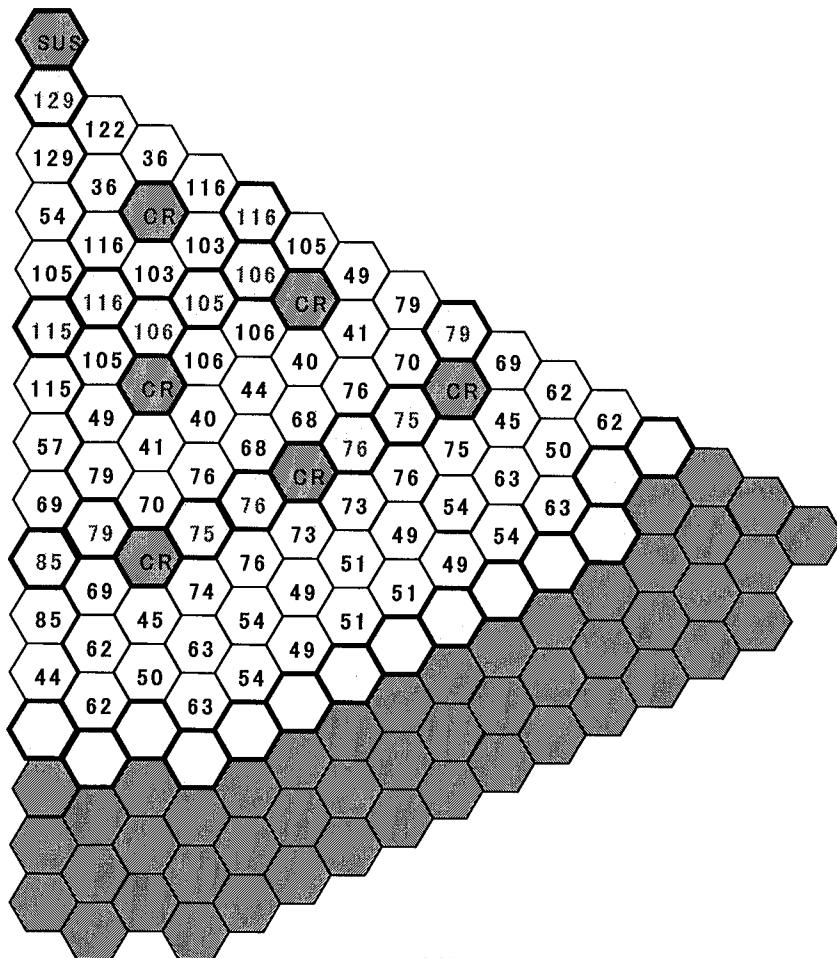
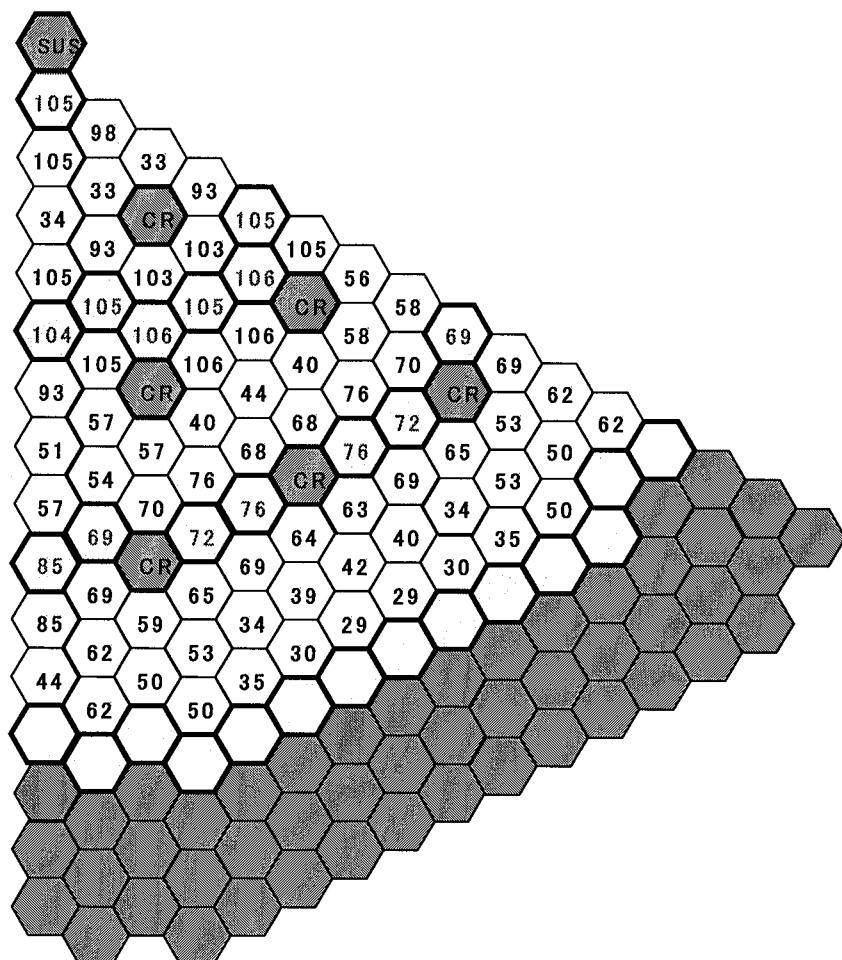


図2.3.1-5 H13年度検討大型径方向非均質炉心の流量領域番号
(内部プランケットのシャフリング考慮炉心)



隣接炉心燃料集合体との寿命中での
最大出口温度差(°C)を示す。

図2.3.1-6(1/2) 余剰流量配分前の径方向非均質炉心の隣接出口温度差最大値
(内部ブランケットのシャーフリング考慮炉心)



**図2.3.1-6(2/2) 余剰流量配分後の径方向非均質炉心の隣接出口温度差最大値
(内部プランケットのシャフリング者虚燃心)**

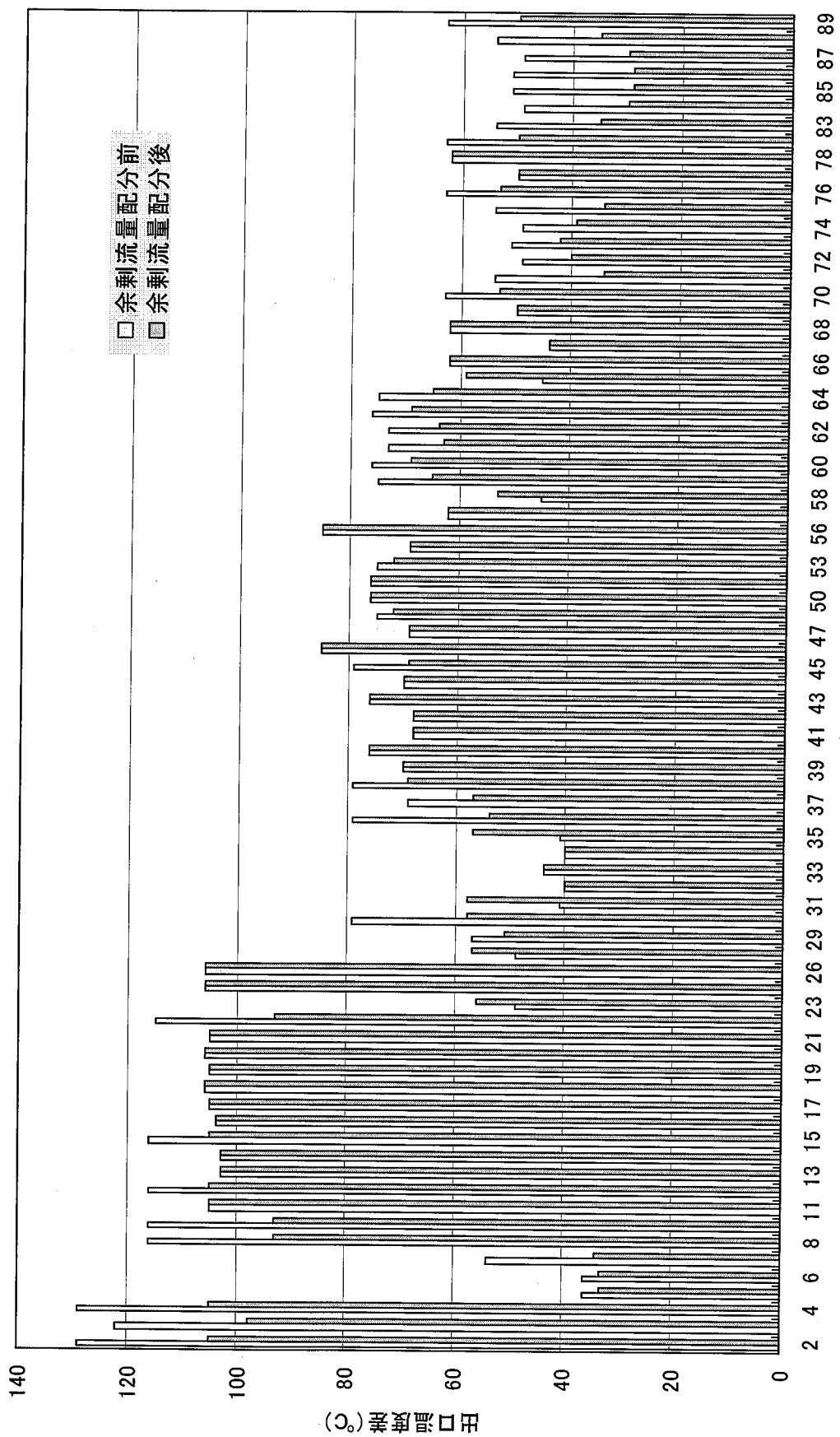
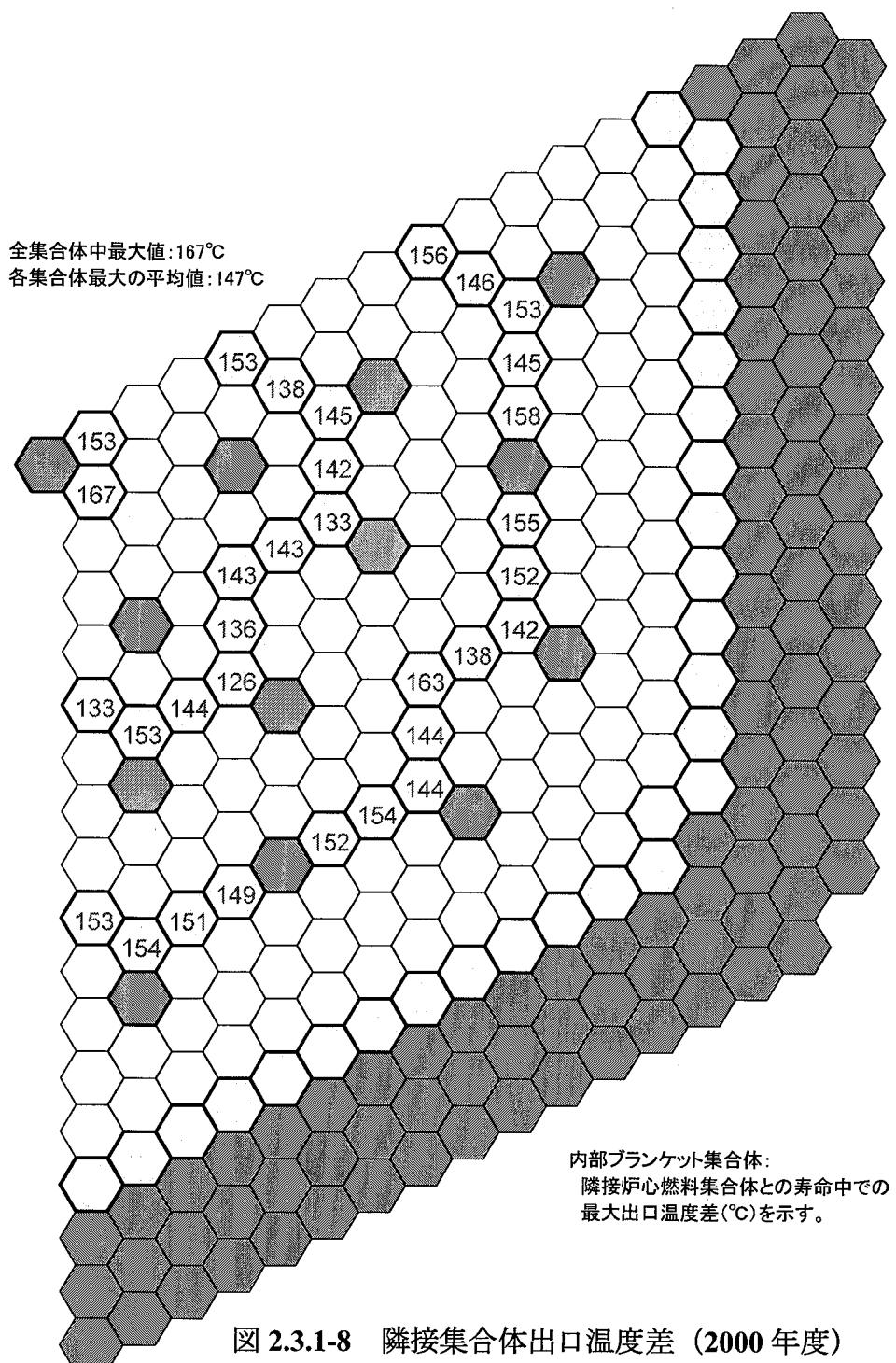


図2.3.1-7隣接集合体冷却材出入口間温度差比較
集合体番号



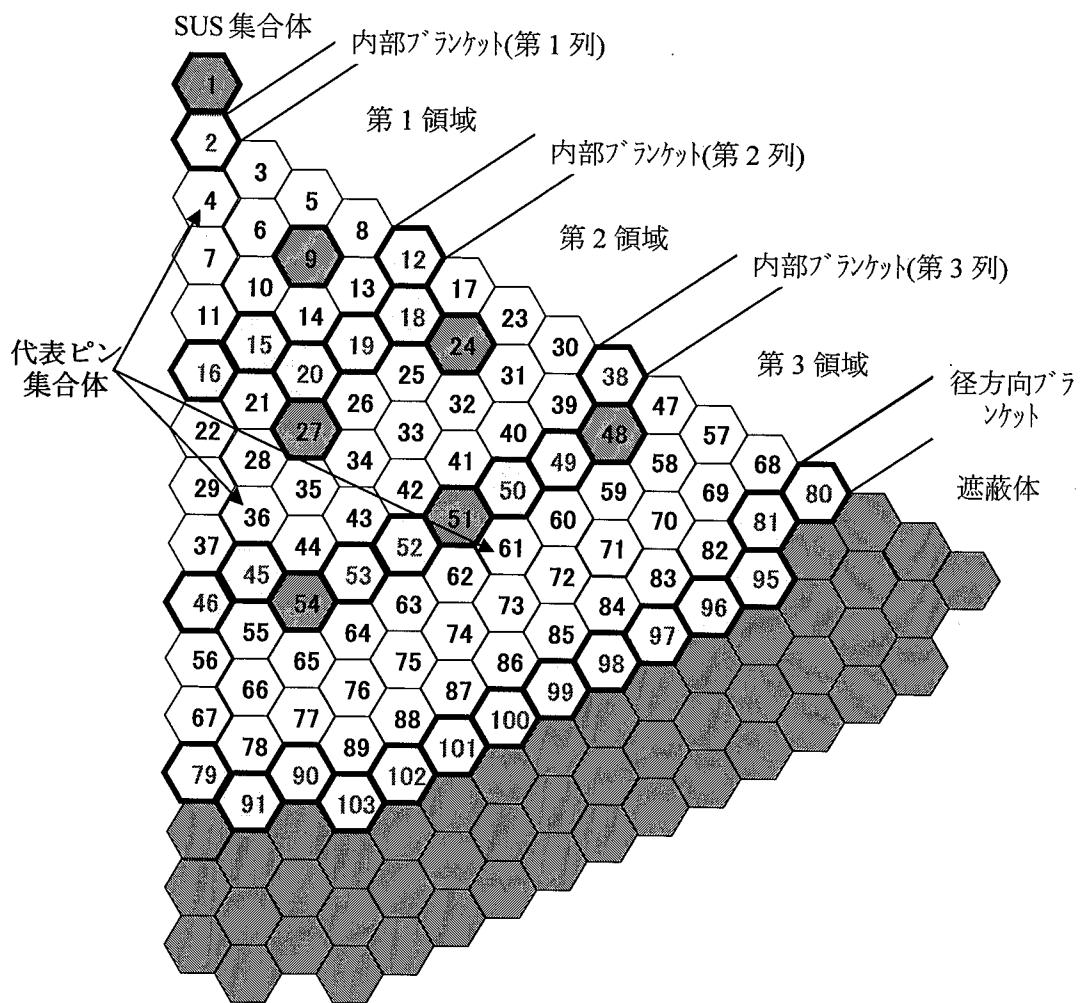


図 2.3.1-9 ABLE 型径方向非均質炉心の集合体番号
(内部プランケットシャッフリング炉心)

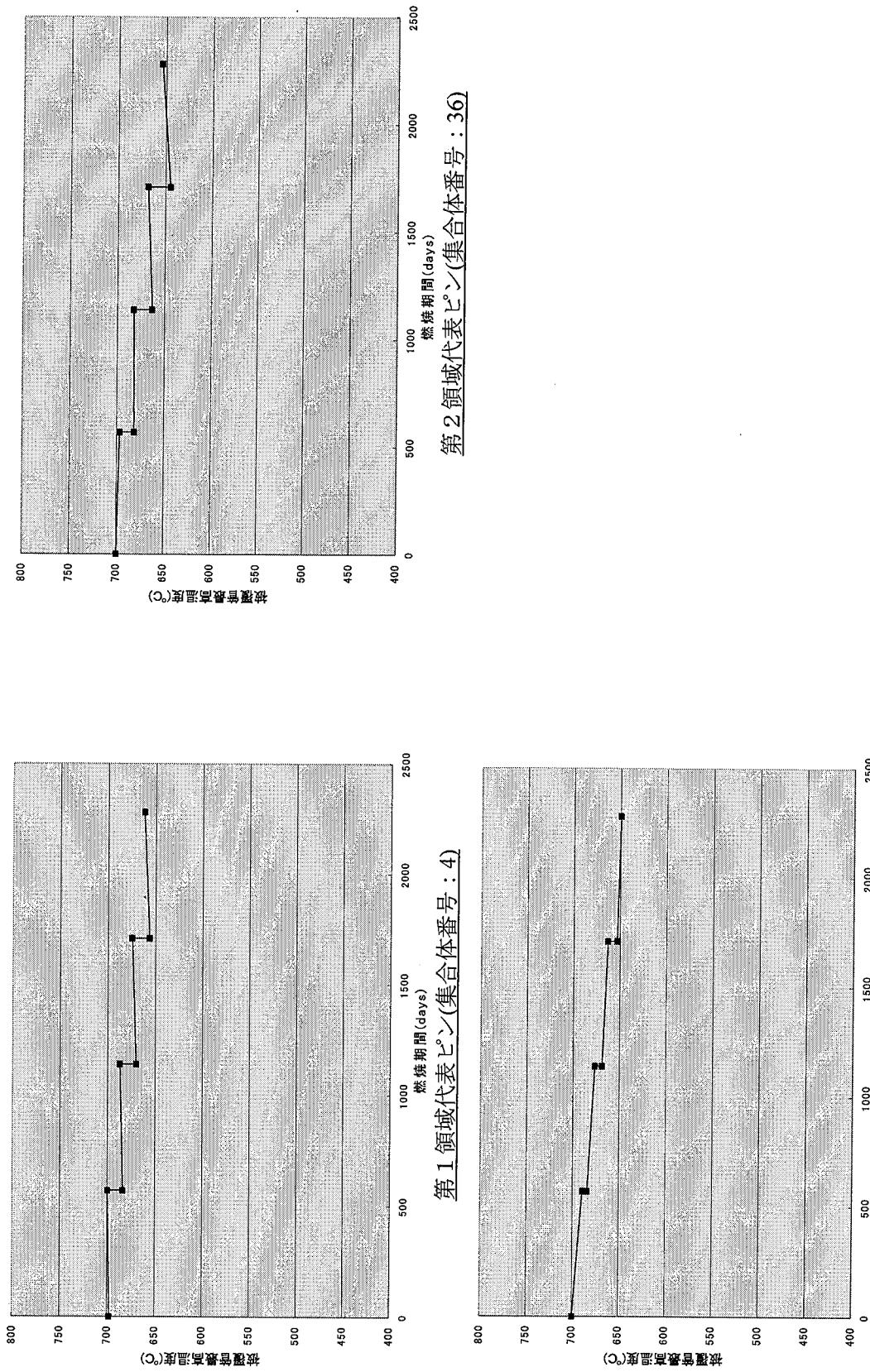


図 2.3.1-10 被覆管最高温度履歴 (第1～3領域代表ピン)

2.3.2 内部ダクト型集合体による径方向非均質炉心

(1) 選定炉心配置及び燃料仕様

前記の ABLE 型集合体を用いた径方向非均質炉心と同様に、内部ブランケットをシャフリングする場合の内部ダクト型集合体による径方向非均質炉心の検討を実施した。ブランケット体数を ABLE 型の場合と同一にしてシャフリングパターンも同一とした。内部ダクト配置による体積率低下を抑制するために ABLE 型の場合よりも燃料ピン層数が 1 層多い 397 本バンドル仕様から 37 本相当分を削除した 360 本バンドルを採用して検討した。検討結果により選定した内部ダクト型酸化物燃料径方向非均質炉心の炉心・燃料仕様を以下に示す。

・炉心型式	Pu 富化度 2 領域の均質炉心 (図 2.3.2-1 の炉心配置参照)
・炉心有効長	100 cm
・炉心等価直径	4.96 m(炉心)/5.55 m(径ブラ)
・遮蔽体外接円径	6.39 m
・運転サイクル長さ	540 日 (約 18 ヶ月)
・燃料交換バッチ数	炉心 4 / 径ブラ 4 (内部位置 1+1、径方向位置 2)
・集合体配列ピッチ	216.6mm
・炉心燃料ピン径	8.2mm
・燃料仕様 炉心燃料	360 本バンドル内部ダクト型燃料集合体 [集合体中央部の 37 本分相当に内部ダクト]
・ブランケット	271 本バンドル集合体 (表 2.3.2-1 及び図 2.3.2-2 参照)

燃料仕様選定に当たっては、2.2 節の均質炉心での検討結果を踏まえて内部ダクトは 2mm の肉厚、外側のダクトは 7mm の肉厚とした。

(2) 核特性評価

前記の選定炉心における核特性評価として、主要な燃焼特性、ボイド反応度特性等を検討した。

以下に検討結果を示す。

表 2.3.2-2 に、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ係数の検討結果を示す。また、燃料物質収支を表 2.3.2-3 に示す。表 2.3.2-2 より、内部ダクト設置により燃料体積が低下することから、取出燃焼度 150GWd/t とすると ABLE 型の場合よりも運転サイクル長さは短くなるが約 18 ヶ月

は達成している。また、増殖比は約 1.16 程度である。ブランケットを含めた実効的な取出平均燃焼度は約 80GWd/t と ABLE 型炉心と比べると若干低下はしているがほぼ同等である。一方、ボイド反応度は目安としている 6 \$ を大きく下まわり、4.5 \$ となる。

(3) まとめ及び今後の課題

以上により、内部ダクト型酸化物燃料径方向非均質炉心について主な炉心核特性が把握でき、ABLE 型炉心よりも炉心性能は劣るもののボイド反応度が小さくなつて安全性能は向上するとの結果を得た。この観点では均質炉心の場合と同様である。制御棒反応度特性、熱特性、燃料特性については、2000 年度の検討^[2]における内部ダクト型均質炉心の検討経験から ABLE 型炉心とほぼ同程度の特性を示すことを見込んでいたが、今後の検討課題である。

また、本炉心概念は内ブランケット採用とそのシャフリング及び内部ダクト型集合体の採用等、開発課題の最も多くなる組合せ概念であり、実現に向けては多くの検討期間を要する。

表 2.3.2-1 内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心における燃料仕様

項目	炉心燃料	径プランケット	
燃料形態	酸化物燃料	←	
炉心材料（被覆管/ラッパ管）	ODS鋼/PNC-FMS	←	
燃料要素	全長 (mm)	2,630	←
	燃料スタック長 (mm)	1000	1,600
	軸プランケット厚さ (mm; 上/下)	300/300	—
	ガスプレナム長 (mm; 上/下)	100/840	←
	端栓 (mm; 上/中/下)	20/30/40	←
	被覆管外径 (mm)	8.5	10.5
	被覆管内径 (mm)	7.4	9.5
	被覆管肉厚 (mm)	0.55	0.5
	燃料スミア密度 (%TD)	82.0	91.4
集合体	全長 (mm)	4,400	←
	燃料ピン本数 (本)	360 *1	271
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径[P/D] (-)	1.16	1.11
	ラッパ管肉厚 (mm)	7.0	←
	ラッパ管外対面距離 (mm)	213.6	←
	集合体間ギャップ (mm)	3.0	←
	集合体配列ピッチ (mm)	216.6	←
	ワイヤ径 (mm)	1.32	1.1
	ワイヤ巻付けピッチ (mm)	200	160
	内部ダクト外径 (mm)	60.0	—
	内部ダクト肉厚 (mm)	2.0	—
	燃料体積割合 (%) *2	38.1 (31.2)	47.3 (43.2)
	構造材体積割合 (%)	25.7	23.4
	冷却材体積割合 (%)	36.2	29.3

*1: 溶融燃料排出孔として燃料ピンを37本削除し、内部ダクトを設置

*2: 被覆管内側、()内は実効燃料体積割合

表 2.3.2-2 内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の主要核特性

原子炉熱出力 (MWth)		3,570
運転サイクル長さ (日)		540
燃料交換バッチ[炉心/プランケット]		4/4(1+1+2)
Pu富化度 (wt% : Pu/HM)		28.5
取出平均燃焼度 (MWd/t)	炉心部	150,000
	全体	77,000
燃焼反応度 (%Δk/kk')		2.6
増殖比 (-) [炉心/軸プラ/内部プラ/径プラ/全体]		0.57/0.18/0.28/0.13/1.16
炉心平均出力密度 (W/cc ; 平衡中期)		222
炉心部平均線出力密度 (W/cm ; 平衡中期)		239
最大線出力密度 (W/cm) *1		440
出力分担率 (%) [平均 : 炉心/プランケット]		85.2/14.8
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$) [E ≥ 0.1 MeV]		2.1
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23} \text{ n/cm}^2$) [E ≥ 0.1 MeV]		3.9
初装荷核分裂性Pu重量 (kg)		7,497
平衡サイクル核分裂性Pu重量 (kg)	平衡初期	8,164
	平衡末期	8,467
年間核分裂性Pu利得 (kg/年)		205
原子炉倍増時間 (年)		37
複合システム倍増時間 (年) *2		50
炉心部ボイド反応度 (\$) ; 平衡末期) *3		4.5

*1 : 燃焼ミスマッチファクタ及び3次元効果考慮

*2 : 燃料炉外滞在期間 5年、燃交・定検期間 45日、炉外核分裂性物質損失率 2%

*3 : ラッパ管内側のみボイド化、燃料集合体非均質効果補正 (0.9) を考慮

表 2.3.2-3 内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(1/2)
1 バッチ当たりの装荷燃料重量

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ +径プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	[kg] 合計
U235	3.8	8.0	10.7	22.6	21.8	34.2	56.0	78.6
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	1272.0	2671.3	3561.7	7505.1	7237.5	11363.6	18601.1	26106.1
U合計	1275.9	2679.3	3572.4	7527.6	7259.3	11397.8	18657.0	26184.7
Pu238	6.0	12.6	16.8	35.3	0.0	0.0	0.0	35.3
Pu239	294.3	618.0	824.0	1736.2	0.0	0.0	0.0	1736.2
Pu240	174.6	366.7	488.9	1030.2	0.0	0.0	0.0	1030.2
Pu241	23.4	49.1	65.5	138.0	0.0	0.0	0.0	138.0
Pu242	21.2	44.6	59.4	125.2	0.0	0.0	0.0	125.2
Pu合計	519.5	1090.9	1454.5	3064.9	0.0	0.0	0.0	3064.9
Np237	2.7	5.7	7.6	16.1	0.0	0.0	0.0	16.1
Np239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np合計	2.7	5.7	7.6	16.1	0.0	0.0	0.0	16.1
Am241	10.9	22.9	30.5	64.3	0.0	0.0	0.0	64.3
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	5.5	11.4	15.3	32.1	0.0	0.0	0.0	32.1
Am合計	16.3	34.3	45.7	96.4	0.0	0.0	0.0	96.4
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	5.5	11.4	15.3	32.1	0.0	0.0	0.0	32.1
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm合計	5.5	11.4	15.3	32.1	0.0	0.0	0.0	32.1
合計	1819.9	3821.7	5095.6	10737.1	7259.3	11397.8	18657.0	29394.1

1 バッチ当たりの取出燃料重量

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ +径プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	[kg] 合計
U235	1.5	2.5	3.9	7.9	14.1	18.6	32.7	40.6
U236	0.5	1.1	1.3	2.8	1.8	3.4	5.2	8.1
U238	1106.1	2275.7	3105.4	6487.2	6859.1	10507.7	17366.8	23854.0
U合計	1108.0	2279.2	3110.7	6497.9	6875.0	10529.8	17404.8	23902.6
Pu238	7.3	15.2	20.2	42.7	0.1	0.5	0.6	43.4
Pu239	204.2	406.6	565.6	1176.4	286.4	566.0	852.3	2028.7
Pu240	157.2	324.4	438.3	919.9	19.3	55.1	74.4	994.4
Pu241	24.3	52.4	67.6	144.3	0.9	3.4	4.3	148.6
Pu242	19.6	40.9	54.6	115.1	0.0	0.2	0.2	115.3
Pu合計	412.7	839.5	1146.3	2398.4	306.7	625.1	931.8	3330.2
Np237	1.8	3.5	5.1	10.4	0.7	1.9	2.6	12.9
Np239	0.2	0.5	0.6	1.3	0.5	1.6	2.2	3.4
Np合計	1.9	4.0	5.7	11.6	1.3	3.5	4.7	16.4
Am241	9.5	18.1	26.3	53.9	0.1	0.3	0.4	54.2
Am242m	0.7	1.5	2.0	4.2	0.0	0.0	0.0	4.2
Am243	5.6	11.7	15.5	32.7	0.0	0.0	0.0	32.7
Am合計	15.7	31.3	43.8	90.8	0.1	0.3	0.4	91.1
Cm242	0.4	1.3	1.7	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3
Cm243	0.1	0.2	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4
Cm244	6.3	13.4	17.4	37.1	0.0	0.0	0.0	37.1
Cm245	1.0	2.2	2.7	5.9	0.0	0.0	0.0	5.9
Cm合計	7.7	17.1	21.9	46.7	0.0	0.0	0.0	46.7
合計	1546.1	3171.0	4328.3	9045.4	7183.0	11158.7	18341.7	27387.1

表 2.3.2-3 内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の物量収支(2/2)

平衡初期 (BOEC) の燃料重量 [kg]

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	10.6	21.9	30.8	63.3	74.4	105.5	179.9	243.2	
U236	1.0	2.1	2.5	5.6	3.1	7.2	10.3	15.8	
U238	4809.4	10078.8	13554.5	28442.7	28375.6	43906.9	72282.5	100725.2	
U合計	4820.9	10102.8	13587.8	28511.5	28453.1	44019.6	72472.6	100984.1	
Pu238	25.9	54.5	72.3	152.7	0.1	0.6	0.7	153.4	
Pu239	1004.6	2101.4	2854.1	5960.1	475.5	1150.9	1626.4	7586.5	
Pu240	673.9	1413.6	1890.2	3977.7	18.4	73.7	92.1	4069.8	
Pu241	98.1	206.5	269.1	573.7	0.6	3.5	4.1	577.8	
Pu242	82.0	172.2	229.9	484.0	0.0	0.1	0.1	484.2	
Pu合計	1884.5	3948.2	5315.5	11148.2	494.6	1228.7	1723.3	12871.6	
Np237	9.1	19.0	26.1	54.2	1.1	3.3	4.4	58.6	
Np239	0.8	1.6	1.8	4.1	1.7	3.4	5.1	9.2	
Np合計	9.8	20.6	27.9	58.3	2.8	6.6	9.5	67.8	
Am241	39.7	82.8	115.0	237.6	0.0	0.2	0.2	237.8	
Am242m	1.6	3.3	4.0	8.9	0.0	0.0	0.0	8.9	
Am243	22.0	46.3	61.5	129.9	0.0	0.0	0.0	129.9	
Am合計	63.3	132.4	180.6	376.3	0.0	0.2	0.3	376.6	
Cm242	1.9	4.1	4.7	10.7	0.0	0.0	0.0	10.7	
Cm243	0.1	0.3	0.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7	
Cm244	23.3	49.0	64.4	136.7	0.0	0.0	0.0	136.7	
Cm245	1.9	4.1	4.8	10.8	0.0	0.0	0.0	10.8	
Cm合計	27.2	57.5	74.2	158.9	0.0	0.0	0.0	158.9	
合計	6805.8	14261.5	19185.9	40253.2	28950.6	45255.2	74205.7	114458.9	

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	炉心(1)	炉心(2)	炉心(3)	炉心合計	軸プラ	内部プラ +径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	8.2	16.4	24.0	48.6	66.7	90.0	156.6	205.2	
U236	1.4	3.2	3.8	8.4	4.9	10.6	15.5	23.9	
U238	4643.4	9683.2	13098.2	27424.8	27997.3	43051.0	71048.2	98473.0	
U合計	4653.0	9702.7	13126.0	27481.7	28068.8	43151.6	71220.4	98702.1	
Pu238	27.3	57.1	75.7	160.1	0.3	1.1	1.4	161.5	
Pu239	914.5	1890.0	2595.7	5400.2	761.9	1716.8	2478.7	7878.9	
Pu240	656.6	1371.4	1839.5	3867.5	37.7	128.8	166.5	4033.9	
Pu241	99.0	209.8	271.3	580.0	1.5	6.9	8.4	588.4	
Pu242	80.4	168.5	225.0	473.9	0.0	0.3	0.3	474.3	
Pu合計	1777.7	3696.8	5007.3	10481.8	801.4	1853.8	2655.2	13136.9	
Np237	8.2	16.8	23.5	48.5	1.8	5.1	7.0	55.4	
Np239	0.9	2.1	2.4	5.4	2.3	5.0	7.2	12.7	
Np合計	9.1	18.9	25.9	53.9	4.1	10.1	14.2	68.1	
Am241	38.4	78.0	110.8	227.2	0.1	0.5	0.6	227.7	
Am242m	2.2	4.8	6.1	13.1	0.0	0.0	0.0	13.1	
Am243	22.1	46.6	61.7	130.4	0.0	0.0	0.0	130.5	
Am合計	62.7	129.4	178.6	370.7	0.1	0.6	0.6	371.3	
Cm242	2.4	5.3	6.4	14.0	0.0	0.0	0.0	14.1	
Cm243	0.2	0.5	0.5	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1	
Cm244	24.1	51.0	66.6	141.7	0.0	0.0	0.0	141.7	
Cm245	2.9	6.3	7.4	16.6	0.0	0.0	0.0	16.6	
Cm合計	29.5	63.1	80.8	173.4	0.0	0.0	0.0	173.4	
合計	6532.0	13610.8	18418.6	38561.4	28874.3	45016.1	73890.4	112451.9	

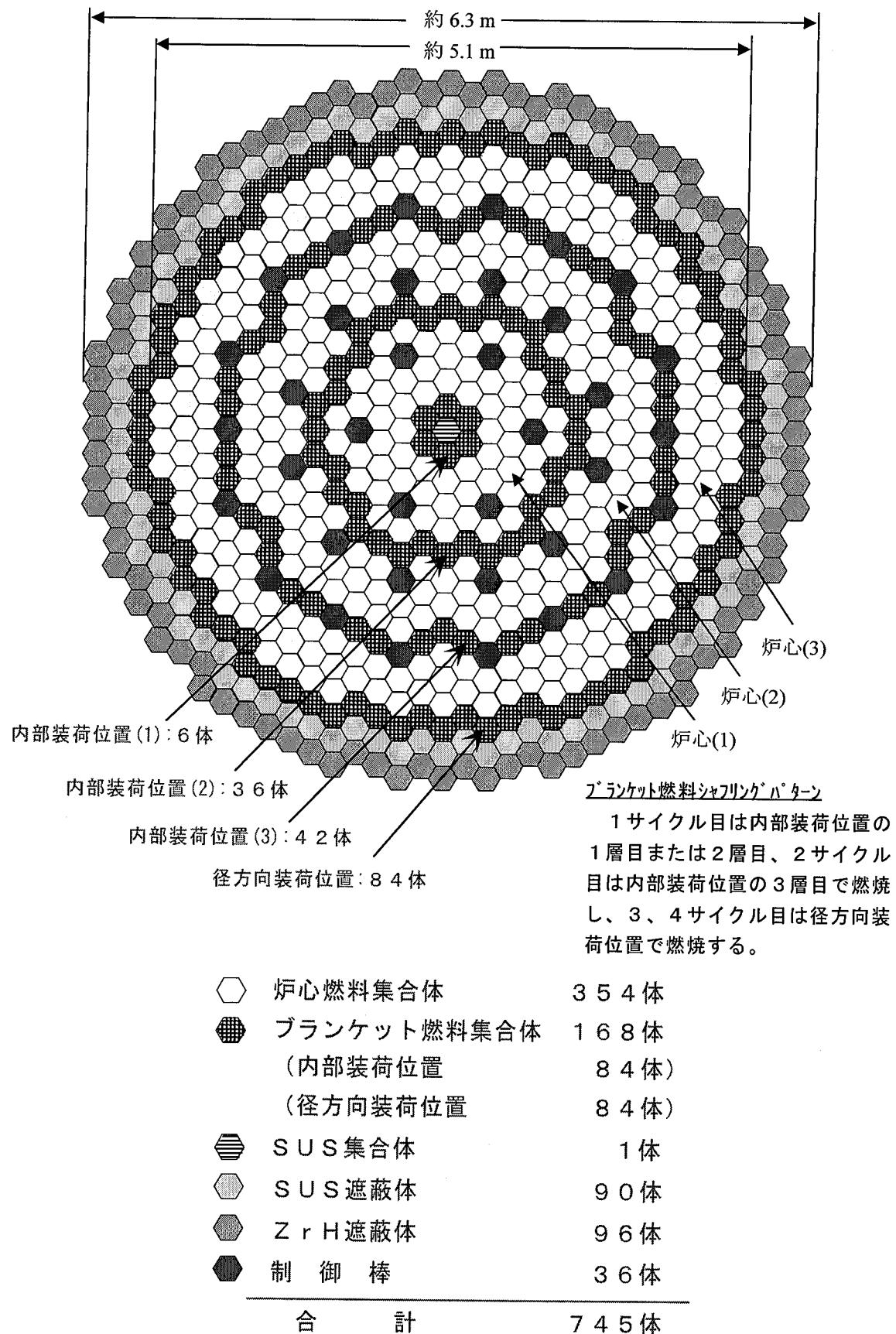


図 2.3.2-1 内部ダクト型酸化物燃料大型径方向非均質炉心の炉心配置

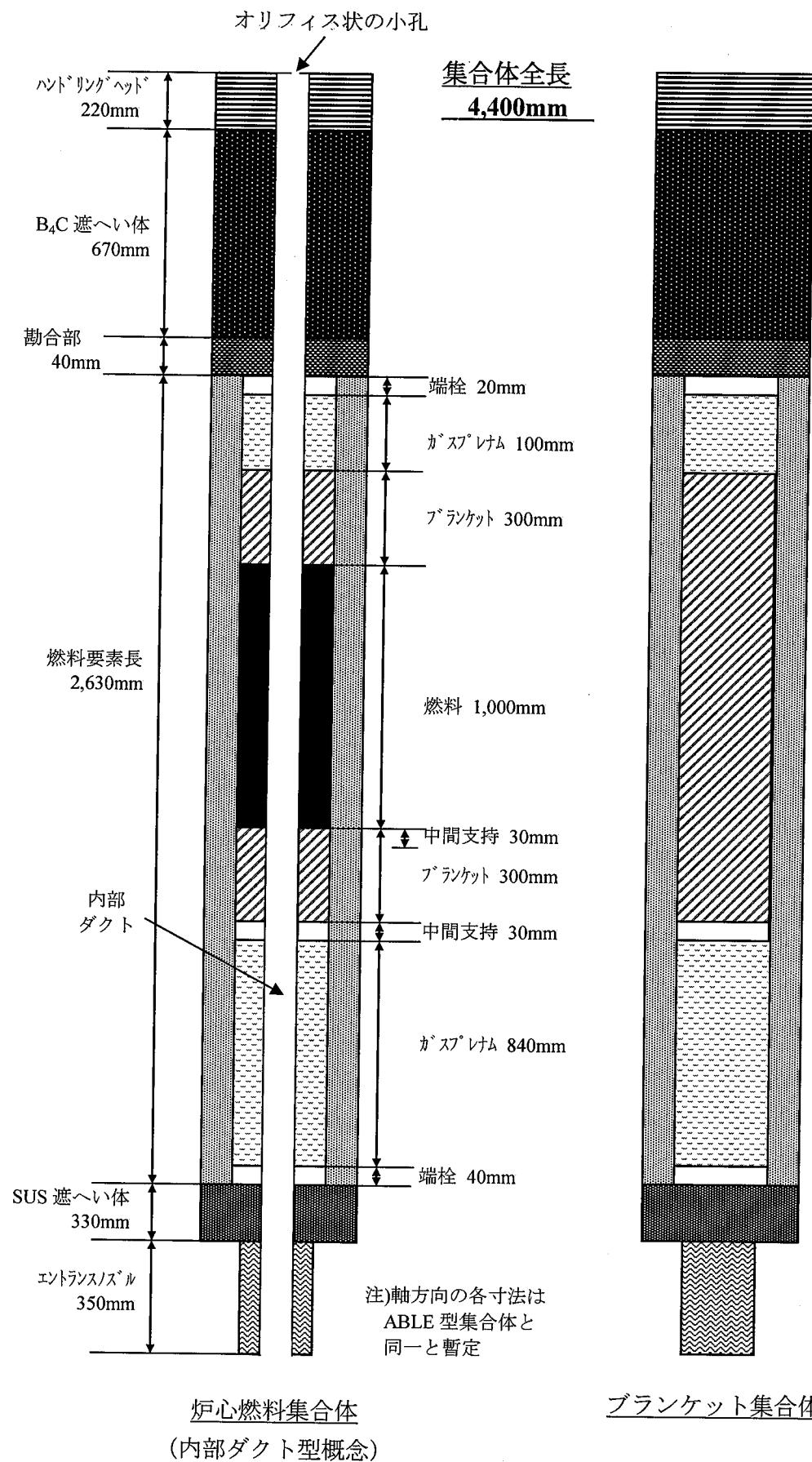


図 2.3.2-2 大型径方向非均質炉心内部ダクト型酸化物燃料集合体概念図

2.3.3 まとめ

プラント設計との取合いとして遮蔽体外接円径 6.6m 以下、バンドル部圧力損失 0.2MPa 程度とした条件のもとで、ABLE 型燃料集合体または内部ダクト型集合体を用いた酸化物燃料による大型径方向非均質炉心について検討した。燃料サイクルコストの低減を目指して内部ブランケットと径ブランケットを同一仕様とし、シャフリングにより内部ブランケットを径ブランケットへと移動していく概念で、従来よりもブランケットを含めた実効的な取出平均燃焼度を増加する炉心の特性を検討した。この結果、炉心部の平均燃焼度は約 150GWd/t でブランケットも含めた平均燃焼度は約 80 GWd/t 程度に向上する炉心を見通すことができた。また、シャフリングによりブランケット燃料の燃焼に伴う出力変動が大きいために径方向非均質炉心の課題となっていた熱設計成立性も解決できる見通しを得た。

しかし、シャフリングは運用の煩雑さを伴い、内部ブランケット採用による炉心性能向上効果も減少させてしまうため、更なる利害得失の検討が必要である。

2.4 大型炉のまとめ

プラント設計との取合いとして遮蔽体外接円径 6.6m 以下、バンドル部圧力損失 0.2MPa 程度とした条件のもとで、ABLE 型燃料集合体または内部ダクト型集合体を用いた酸化物燃料による大型炉心について検討した。2 通りの炉心概念（均質炉心、径方向非均質炉心）と 2 通りの集合体概念（ABLE 型、内部ダクト型）の組合せにより 4 種類の炉心の仕様を選定し、それぞれの炉心特性を概略評価した。

表 2.4-1 に各炉心の主要な核特性をまとめて示す。

表 2.4-1 より、4 通りの炉心概念はいずれも大型炉の設計条件をほぼ満足し、設計成立の見通しは得られたが、集合体概念または炉心概念により下記のような特徴が見られる。

ABLE 型→内部ダクト型の変更による炉心性能の悪化は、燃焼反応度で 0.6% $\Delta k/kk'$ 、運転サイクル日数で 1~2 ヶ月程度、増殖比で 0.03 程度であるが、Na ボイド反応度は 0.5~1.0 \$ 程度低減するという効果がある。

均質炉心→径方向非均質炉心の変更による炉心性能の向上は、燃焼反応度で 0.8% $\Delta k/kk'$ 、運転サイクル日数で 1~2 ヶ月程度、増殖比で 0.02 程度であり、ボイド反応度も内部ブランケットの効果で 1.0~1.5 \$ 低減している。但し、径方向非均質炉心では内部ブランケットのシャフリングを前提として熱特性改善の見通しは得られたものの、運用面での煩雑さと性能向上の度合いを考えると採用に対しては炉心特性以外の面での総合的な判断も必要である。

表 2.4-1 ナトリウム冷却酸化物燃料大型炉心における各炉心概念主要核特性の比較

項目	ABLE型集合体使用炉心概念		内部ダクト型集合体使用炉心概念	
	均質炉心 ^{*4)}	径方向非均質炉心	均質炉心 ^{*4)}	径方向非均質炉心
運転サイクル長さ(日)	548(約18ヶ月)	570(約19ヶ月)	487(約16ヶ月)	540(約18ヶ月)
燃交バッチ(炉心/内部ブラー&径ブラー)	4/4	4/4[1+1+2] ^{*1)}	4/4	4/4[1+1+2] ^{*1)}
Pu富化度(内側/外側)(wt%)	21.0/23.6	25.1	23.8/27.4	28.5
燃焼反応度(%△k/kk')	2.8	2.0	3.4	2.6
増殖比(炉心部/全体)	0.74/1.17	0.64/1.19	0.67/1.14	0.57/1.16
取出平均燃耗度 (GWd/t)	炉心部 全体平均	152 77	149 80	150 70
最大線出力(W/cm)		約420	約430	約440
最大高速中性子 ^{*5)} 照射量(n/cm ²)	4.7E+23	4.2E+23	3.8E+23	3.9E+23
初装荷Pu ^f 重量(ton/GWe)	4.1	4.7	4.2	5.0
倍増時間[RDT/CSDT ^{*2)](年)}	32/41	32/39	39/56	40/50
Naボイド反応度(\$)[EOEC]	6.4 ^{*3)}	5.4	5.9	4.5

*1) 内部ブランケット位置(1)→内部ブランケット位置(2)→径ブランケット位置へとサイクル毎の移動

*2) 戸外時間5年、損失率2%、燃交・定検期間45日で算出

*3) CDA時の安全シナリオの成立性確認が必要

*4) 制御棒チャンネルはNaフオロワとした体系で解析

*5) 高速中性子: 0.1 MeV以上

3. 中型炉心の検討

ナトリウム冷却炉における中型酸化物燃料炉心は、先行設計例の多さ、発電規模、燃料照射実績等の種々の観点からも実用化炉心の有力候補のひとつとなっている。2000年度までの検討では、プラント合理化の効果とモジュール効果による建設コスト低減を図ってきたが、スケールデメリットによってモジュール効果を考慮しても大型炉に比べて割高になることが明らかとなってきた。これは、大型炉と同様の炉心概念により、スケールダウンした均質炉心と径方向非均質炉心に、再臨界回避対応としてABLE型（軸プランケット一部削除）集合体、内部ダクト付集合体の2通りを組み合せたいずれの概念でも共通の課題である。

そこで今年度は、まず大型炉と同様の炉心概念で、プラント設計に整合した(遮蔽体外接円径と燃料バンドル部圧力損失を取合った)レファレンス炉心としてABLE型均質炉心を検討する。また一方では、合理化、コンパクト化を離れて遮蔽体外接円径の取り合い条件を緩和して、建設費コスト合理化以外の面での炉心概念の魅力を検討した。

3.1 検討方針及び検討条件

中型炉の検討では、まずフェーズ I での 2000 年度までの検討と同様にコンパクト化を指向したプラント設計に適合する範囲で ABLE 型均質炉心を検討することとした。径方向非均質炉心や内部ダクト型集合体採用概念の適用については、大型炉での検討結果で把握できるとの判断である。

一方では、発電規模が中型であり炉容器径の制約は大型炉ほど厳しいものではないとの判断から、遮蔽体外接円径の取合い条件の緩和を仮定して炉心の内部転換比を高める等の方向で魅力ある炉心概念を検討した。

検討条件は、解析評価手法として大型炉と同様に 2000 年度の報告書^[1]に記載の評価方法(またはこれと同等の手法)[添付資料-1 を参照]を用い、断面積ライブラリには JENDL3.2 に基づく統合炉定数の最新版(検討開始時の最新リリース版 ADJ2000.Y0130)を用いる。

中型炉の検討条件、核特性目標等を以下に示す。

- ・炉出力 500MWe／1,190MWt (熱効率: 約 42%)
 - ・原子炉出入口温度 550°C／395°C
 - ・運転サイクル長 18 ヶ月程度 (取合い条件は 12～24 ヶ月)
 - ・遮蔽体外接円径 4.0m 程度[レファレンス炉心の取合い条件]
4.4m 程度[10%の緩和を仮定した場合]
 - ・燃料バンドル部圧損 0.2MPa 程度[取合い条件]
 - ・炉心部取出平均燃焼度 約 150GWd/t
 - ・実効取出平均燃焼度 60GWd/t 以上目標(炉心+ブランケットの平均)
 - ・ボイド反応度 6 \$ 程度目安
 - ・増殖比 1.1～1.2 程度を目安
 - ・燃焼反応度 4.5% Δk/k' 程度以下
 - ・定格出力時最大線出力 430W/cm 程度
 - ・燃料組成 高速炉多重リサイクル TRU 組成^{*1}+隨伴 FP(2Vol%)
- *1 : $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{243}\text{Am}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$
 $= 1.1/ 54.1/ 32.1/ \quad 4.3/ \quad 3.9/ \quad 0.5/ \quad 2.0/ \quad 1.0/ \quad 1.0/ \quad 0.0$

3.2 プラント整合のレファレンス炉心の概要検討

プラント設計に整合した炉心の検討として、2000年度の技術検討書^[2]で報告されている径プランケット2層付きのABLE型均質炉心を、核定数の変更等に伴い見直して炉心の概略特性の検討を実施した。

なお、炉心解析の2次元RZモデルにおいては、制御棒チャンネルはナトリウムフォロワとした体系で検討した。

3.2.1 選定炉心配置及び燃料仕様

2000年度の技術検討書^[2]で報告されている径プランケット2層付きのABLE型均質炉心の見直しとして炉心の検討を実施した。検討結果により選定した中型ナトリウム冷却炉におけるABLE型酸化物燃料均質炉心の主な炉心・燃料仕様を以下に示す。

・炉心型式	Pu 富化度2領域の均質炉心 (図3.2-1の炉心配置参照)
・炉心有効長	90 cm
・炉心等価直径	2.73 m(炉心)/3.34 m(径プラ)
・遮蔽体外接円径	4.14 m
・運転サイクル長さ	548日(約18ヶ月)
・燃料交換バッチ数	炉心4/径プラ4
・集合体配列ピッチ	163.6mm
・炉心燃料ピン径	8.5mm
・燃料仕様	炉心燃料 217本バンドルABLE型燃料集合体 径プランケット 127本バンドル集合体(暫定)

(表3.2-1及び図3.2-2参照)

燃料仕様の見直しでは、2000年度の炉心では運転サイクル長さが17ヶ月であったため、燃料集合体数を増加して運転サイクル18ヶ月を達成する炉心とした。また、暫定としていた集合体ダクトの仕様についてもダクト膨れ量の評価結果に基づく適正なダクト肉厚とダクト間ギャップを設定し、圧損約0.2MPaに対応した集合体仕様を改めて選定したものである。

3.2.2 核特性評価

まず、前記の選定炉心における核特性評価として、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ反応度特性等を検討した。

以下に評価結果を示す。

表3.2-2に、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ反応度特性評価結果を示す。また、燃料物質収支を表3.2-3に示す。表3.2-2より、運転

サイクル長さは約 18 ヶ月を達成しつつ増殖比は約 1.20 となり、設計要求を満足する見通しである。しかし、表 3.2-2 に示したようにブランケットが 2 層であることから軸ブランケットと合わせるとその重金属重量は炉心燃料の 2 倍以上あるため、ブランケットを含めた実効的な取出平均燃焼度は約 60GWd/t である。炉心高さが 90cm で大型炉よりも高いが、ボイド反応度は 6.0 \$ と条件を満足し、ドップラ係数は $-4.6 \times 10^{-3} \Delta k/kk'$ である。

表 3.2-4 には、制御棒必要反応度と反応度収支を示す。表 3.2-4 より、主炉停止系、後備炉停止系のいずれも必要反応度を制御棒価値が上回り、成立する見通しとなった。

3.2.3 熱特性及び燃料特性評価

次に選定炉心における熱特性評価として冷却材流量配分を検討し、燃料特性評価として被覆管 CDF(クリープ損傷寿命分数和；ここではクリープ損傷が主体、疲労の効果は小さいため未考慮)を評価した。

流量配分の検討および被覆管 CDF の評価は核特性評価による 3 次元出力分布解析結果を用い、それぞれ下記の条件、制限目安で評価した。

<流量配分評価時>

- ・1 次系全流量に対する炉心流量割合 約 90%
- ・周辺流れ効果係数 1.10
- ・被覆管ホットスポットファクタ 1.26
- ・被覆管肉厚中心温度制限目安 700°C 以下

<被覆管 CDF 評価時>

- ・被覆管 CDF 制限目安 0.5 以下
- ・被覆管腐食式 内外面とも、PNC-FMS の式を適用
- ・不確かさ 被覆管肉厚公差 $27 \mu m$
- ・出力分布誤差 1.05(寿命中のピン出力に 5% 上乗せ)
- ・プレナム容積 内径・長さより計算されるプレナム容積の 90% とする。

図 3.2-3 に流量領域区分を示す。これまでの設計例を勘案して内側炉心 3 領域、外側炉心 4 領域の合計 7 領域である。表 3.2-5 に、各流量領域毎の集合体数、集合体流量、及び被覆管最高温度等の炉心熱流動特性を示す。流量配分にあたっては、被覆管健全性の観点から相対的に燃焼度の高い炉心中心側は被覆管温度を低減すべく配慮した。表 3.2-5 より、炉心燃料の被覆管最高温度は 700°C である。また、集合体流量の最大値は 26.7kg/s であり、このときの燃料バンドル部圧力損失は 0.18MPa で設計条件を満

足する。

上記、流量配分結果に基づく被覆管温度履歴による被覆管 CDF の最大値は 0.38 であり、制限目安値 0.5 を満足している。

3.2.4 まとめ

以上により、現状のプラント設計との取合い条件を満足し、運転サイクル期間を 18 ヶ月とした ABLE 型酸化物燃料均質炉心の主要な特性を検討し設計成立の見通しを得た。

表 3.2-1 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心における燃料仕様

項目	炉心燃料	径プランケット (暫定)
燃料形態	酸化物燃料	←
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS	←
燃料要素	全長 (mm)	3,135
	燃料スタック長 (mm)	900
	軸プランケット厚さ (mm; 上/下)	350/350
	ガスプレナム長 (mm; 上/下)	285/1,150
	端栓 (mm; 上/中/下)	30/30/40
	被覆管外径 (mm)	8.5
	被覆管内径 (mm)	7.5
	被覆管肉厚 (mm)	0.5
集合体	燃料スミア密度 (%TD)	82.0
	全長 (mm)	4,600
	燃料ピン本数 (本)	217 *1
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径[P/D] (-)	1.18
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0
	ラッパ管外対面距離 (mm)	160.5
	集合体間ギャップ (mm)	3.1
	集合体配列ピッチ (mm)	163.6
	ワイヤ径 (mm)	1.48
	ワイヤ巻付ピッチ (mm)	200
	燃料体積割合 (%) *2	41.4 (33.9)
	構造材体積割合 (%)	25.0
	冷却材体積割合 (%)	33.6
		50.0 (45.0)
		18.0
		32.0

*1: 溶融燃料排出孔として軸プランケットは集合体中央の37本のペレットを削除

*2: 被覆管内側、()内は実効燃料体積割合

表 3.2-2 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の主要核特性

原子炉熱出力 (MWth)	1,190	
運転サイクル長さ (日)	548	
燃料交換バッチ [炉心/径プラ]	4/4	
Pu富化度 (wt% : Pu/HM) [内側炉心/外側炉心]	21.6/28.5	
取出平均燃焼度 (MWd/t)	炉心部	150,000
	全体	56,000
燃焼反応度 (% Δ k/kk')	3.4	
増殖比 (-) [炉心/軸プラ/径プラ/全体]	0.68/0.27/0.25/1.20	
炉心平均出力密度 (W/cc; 平衡中期)	222	
炉心部平均線出力密度 (W/cm; 平衡中期)	237	
最大線出力密度 (W/cm) *1 [内側/外側]	433/433	
出力分担率 (%) [平均: 炉心/ブランケット]	88.9/11.1	
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{15}$ n/cm ² sec) [E ≥ 0.1MeV]	2.8	
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23}$ n/cm ²) [E ≥ 0.1MeV]	5.0	
初装荷核分裂性Pu重量 (kg)	2,354	
平衡サイクル核分裂性Pu重量 (kg)	平衡初期	2,546
	平衡末期	2,666
年間核分裂性Pu利得 (kg/年)	80	
原子炉倍増時間 (年)	31	
複合システム倍増時間 (年) *2	40	
炉心部ボイド反応度 (\$) ; 平衡末期) *3	6.0	
炉心部ドップラ係数 ($\times 10^{-3}$ Tdk/dT ; 平衡末期)	-4.6	

*1: 燃焼ミスマッチファクタ及び3次元効果考慮

*2: 燃料炉外滞在期間 5年、燃交・定検期間 30日、炉外核分裂性物質損失率 2%

*3: ラッパ管内側のみボイド化、燃料集合体非均質効果補正 (0.9) を考慮

*4: 燃料物質のみの温度変化時、燃料集合体非均質効果補正 (1.05) を考慮

表 3.2-3 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の物量収支(1/2)

1 パッチ当たりの装荷燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	4.5	4.1	8.6	8.3	15.2	23.5	32.1	
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
U238	1479.3	1346.4	2825.7	2749.2	5063.6	7812.8	10638.5	
U合計	1483.8	1350.5	2834.3	2757.5	5078.8	7836.3	10670.6	
Pu238	4.8	6.3	11.1	0.0	0.0	0.0	11.1	
Pu239	234.8	310.2	545.0	0.0	0.0	0.0	545.0	
Pu240	139.3	184.1	323.4	0.0	0.0	0.0	323.4	
Pu241	18.7	24.7	43.4	0.0	0.0	0.0	43.4	
Pu242	16.9	22.4	39.3	0.0	0.0	0.0	39.3	
Pu合計	414.5	547.7	962.2	0.0	0.0	0.0	962.2	
Np237	2.2	2.9	5.1	0.0	0.0	0.0	5.1	
Np合計	2.2	2.9	5.1	0.0	0.0	0.0	5.1	
Am241	8.7	11.5	20.2	0.0	0.0	0.0	20.2	
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Am243	4.3	5.7	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0	
Am合計	13.0	17.2	30.2	0.0	0.0	0.0	30.2	
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm244	4.3	5.7	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0	
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm合計	4.3	5.7	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0	
合計	1917.8	1924.0	3841.8	2757.5	5078.8	7836.3	11678.1	

1 パッチ当たりの取出燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	1.1	1.7	2.8	4.9	11.7	16.6	19.4	
U236	0.6	0.5	1.1	0.8	0.9	1.7	2.8	
U238	1228.5	1189.6	2418.1	2575.3	4904.6	7479.9	9898.0	
U合計	1230.2	1191.8	2422.0	2581.0	4917.2	7498.2	9920.2	
Pu238	5.3	7.1	12.4	0.0	0.0	0.0	12.4	
Pu239	184.8	220.4	405.2	125.9	128.1	254.0	659.2	
Pu240	127.5	167.1	294.6	11.0	6.2	17.2	311.8	
Pu241	20.8	24.7	45.5	0.6	0.3	0.9	46.4	
Pu242	16.5	21.4	37.9	0.1	0.0	0.1	38.0	
Pu合計	354.9	440.7	795.6	137.6	134.6	272.2	1067.8	
Np237	1.2	1.8	3.0	0.2	0.2	0.4	3.4	
Np合計	1.2	1.8	3.0	0.2	0.2	0.4	3.4	
Am241	6.3	10.5	16.8	0.0	0.0	0.0	16.8	
Am242m	0.5	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1	
Am243	4.5	5.8	10.3	0.0	0.0	0.0	10.3	
Am合計	11.3	16.9	28.2	0.0	0.0	0.0	28.2	
Cm242	0.4	0.5	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9	
Cm243	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	
Cm244	4.5	5.4	9.9	0.0	0.0	0.0	9.9	
Cm245	0.8	0.8	1.6	0.0	0.0	0.0	1.6	
Cm合計	5.8	6.7	12.5	0.0	0.0	0.0	12.5	
合計	1603.4	1657.9	3261.3	2718.8	5052.0	7770.8	11032.1	

表 3.2-3 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の物量収支(2/2)
平衡初期 (BOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	11.4	11.9	23.3	27.4	55.2	82.6	105.9	
U236	1.3	0.9	2.2	1.4	1.4	2.8	5.0	
U238	5525.6	5143.8	10669.4	10731.2	20013.3	30744.5	41413.9	
U合計	5538.3	5156.6	10694.9	10760.0	20069.9	30829.9	41524.8	
Pu238	20.1	26.4	46.5	0.0	0.0	0.0	46.5	
Pu239	856.3	1086.3	1942.6	215.0	207.7	422.7	2365.3	
Pu240	542.0	713.9	1255.9	10.8	5.9	16.7	1272.6	
Pu241	80.3	99.9	180.2	0.4	0.2	0.6	180.8	
Pu242	66.9	88.1	155.0	0.0	0.0	0.0	155.0	
Pu合計	1565.6	2014.6	3580.2	226.2	213.8	440.0	4020.2	
Np237	6.9	9.6	16.5	0.3	0.3	0.6	17.1	
Np合計	6.9	9.6	16.5	0.3	0.3	0.6	17.1	
Am241	30.1	44.2	74.3	0.0	0.0	0.0	74.3	
Am242m	1.1	1.2	2.3	0.0	0.0	0.0	2.3	
Am243	17.7	23.1	40.8	0.0	0.0	0.0	40.8	
Am合計	48.9	68.5	117.4	0.0	0.0	0.0	117.4	
Cm242	1.5	1.4	2.9	0.0	0.0	0.0	2.9	
Cm243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	
Cm244	17.6	22.3	39.9	0.0	0.0	0.0	39.9	
Cm245	1.7	1.5	3.2	0.0	0.0	0.0	3.2	
Cm合計	20.9	25.3	46.2	0.0	0.0	0.0	46.2	
合計	7180.6	7274.6	14455.2	10986.5	20284.0	31270.5	45725.7	

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	8.1	9.5	17.6	24.0	51.7	75.7	93.3	
U236	1.9	1.3	3.2	2.2	2.3	4.5	7.7	
U238	5274.0	4986.5	10260.5	10555.3	19852.3	30407.6	40668.1	
U合計	5284.0	4997.3	10281.3	10581.5	19906.3	30487.8	40769.1	
Pu238	20.7	27.2	47.9	0.1	0.1	0.2	48.1	
Pu239	806.2	996.4	1802.6	342.0	337.3	679.3	2481.9	
Pu240	530.1	696.9	1227.0	21.9	12.2	34.1	1261.1	
Pu241	82.5	100.0	182.5	1.0	0.4	1.4	183.9	
Pu242	66.5	87.1	153.6	0.0	0.0	0.0	153.6	
Pu合計	1506.0	1907.6	3413.6	365.0	350.0	715.0	4128.6	
Np237	6.0	8.6	14.6	0.5	0.5	1.0	15.6	
Np合計	6.0	8.6	14.6	0.5	0.5	1.0	15.6	
Am241	27.7	43.3	71.0	0.1	0.0	0.1	71.1	
Am242m	1.5	1.7	3.2	0.0	0.0	0.0	3.2	
Am243	17.9	23.2	41.1	0.0	0.0	0.0	41.1	
Am合計	47.1	68.2	115.3	0.1	0.0	0.1	115.4	
Cm242	1.9	1.9	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8	
Cm243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	
Cm244	17.8	22.0	39.8	0.0	0.0	0.0	39.8	
Cm245	2.5	2.4	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9	
Cm合計	22.4	26.4	48.8	0.0	0.0	0.0	48.8	
合計	6865.5	7008.1	13873.6	10947.1	20256.8	31203.9	45077.5	

表 3.2-4 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の制御棒反応度収支

項目	主炉停止系 (ワンロッドスタック)	(% $\Delta k/kk'$)	
		後備炉停止系 ワンロッドスタック	全数挿入
I. 計画余剰反応度	5.3	0.8	1.1
1. 温度・出力補償	1.1	0.8	1.1
2. 燃焼補償 ^{*1}	4	—	—
4. 運転余裕	0.2	—	—
II. 余剰反応度不確かさ(2σ)	0.5	0.2	0.3
1. 臨界予測誤差	0	—	—
2. 出力補償予測誤差	—	0.16	0.22
3. 燃焼製作予測誤差	0.39	—	—
4. 燃料交換余裕	0.2	—	—
III. 必要制御反応度合計(I+II)	5.8	1.0	1.4
(事故時投入反応度 ^{*2} 考慮時)	—	1.8	2.2
IV. 制御棒価値 ^{*3}	7.9	3.5	4.7
V. 反応度停止余裕(IV-III)	2.1	1.7	2.5

^{*1}: 燃料組成の変動を考慮した値

(B4C体積率:35%、B10濃縮度:90wt%の場合)

^{*2}: 事故時の投入反応度 0.8% $\Delta k/kk'$ ^{*3}: 設計余裕 10%を見込んだ最小値

表 3.2-5 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心における炉心流量配分と被覆管温度特性及びCDF値

炉心領域 No.	流量領域 No.	集合体数	集合体流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	燃料要素 最大出力 (kW)	被覆管最高温度 (°C)	被覆管 CDF値
内側炉心	1	48	26.7	1281.6	31.9	680	0.377
	2	60	24.5	1470.0	29.3	680	0.171
	3	6	20.6	123.6	25.5	690	0.236
	4	18	24.3	437.4	31.1	700	0.038
	5	39	22.6	881.4	29.0	700	0.092
	6	33	19.2	633.6	24.6	700	0.015
	7	24	16.0	384.0	20.5	700	0.001
合計		228		5211.6			

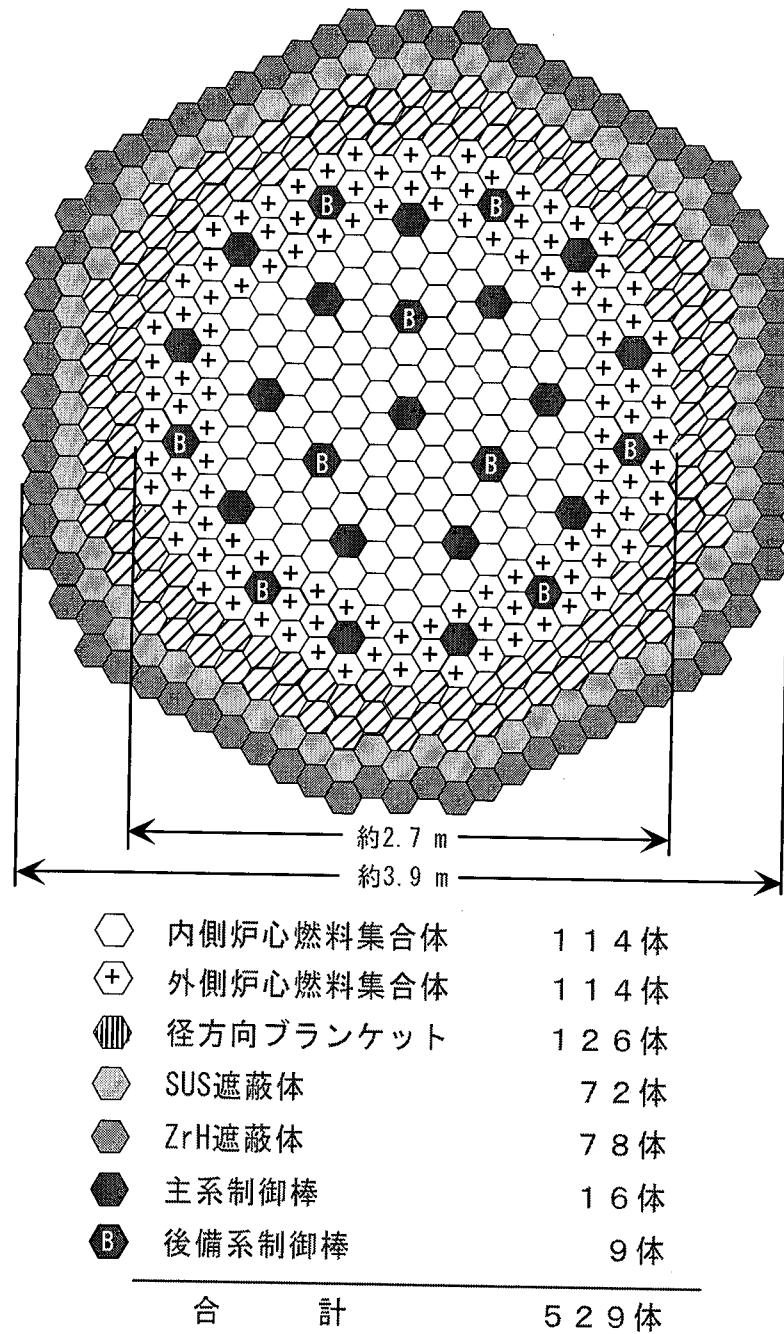


図 3.2-1 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の炉心配置

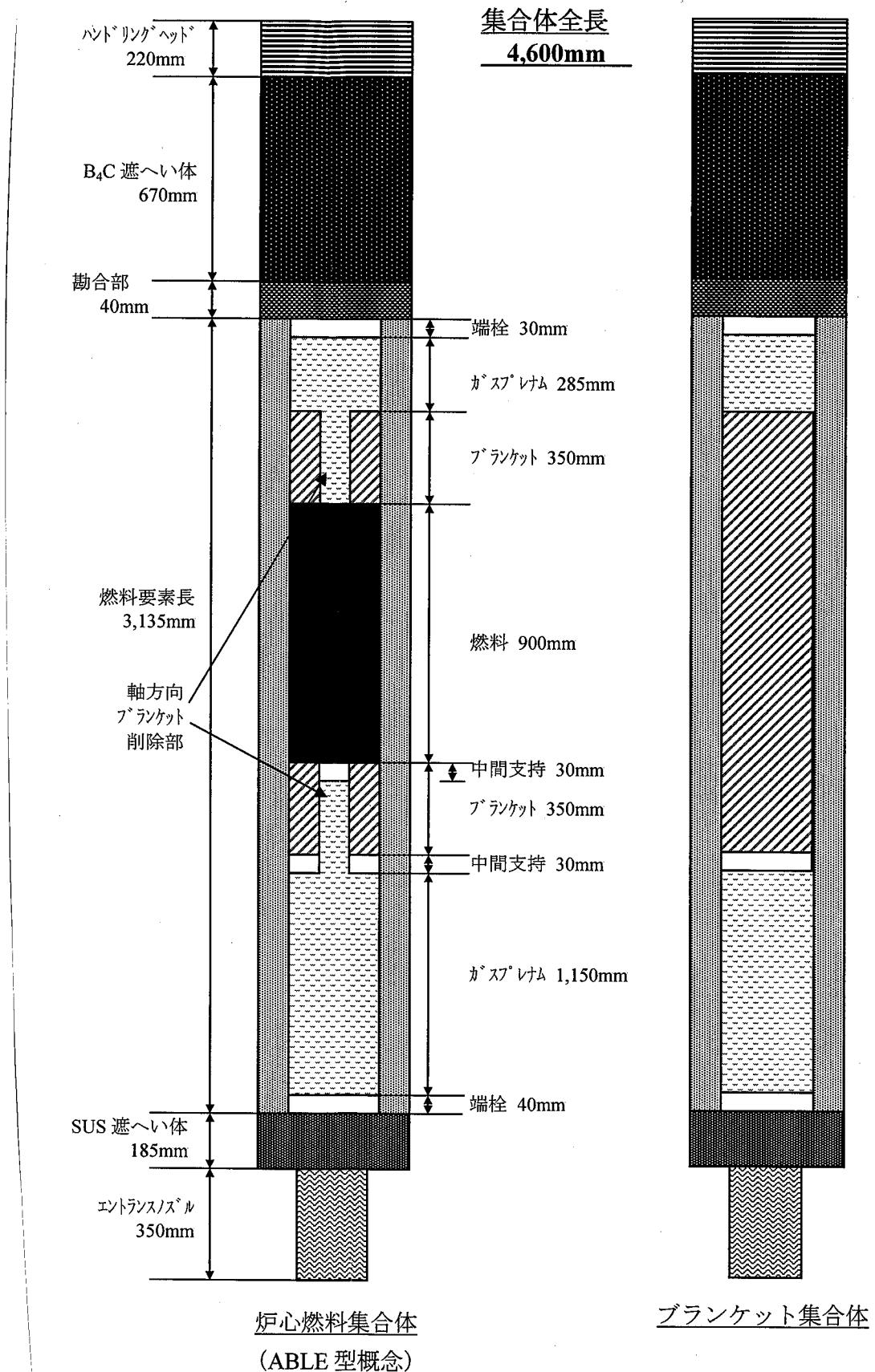
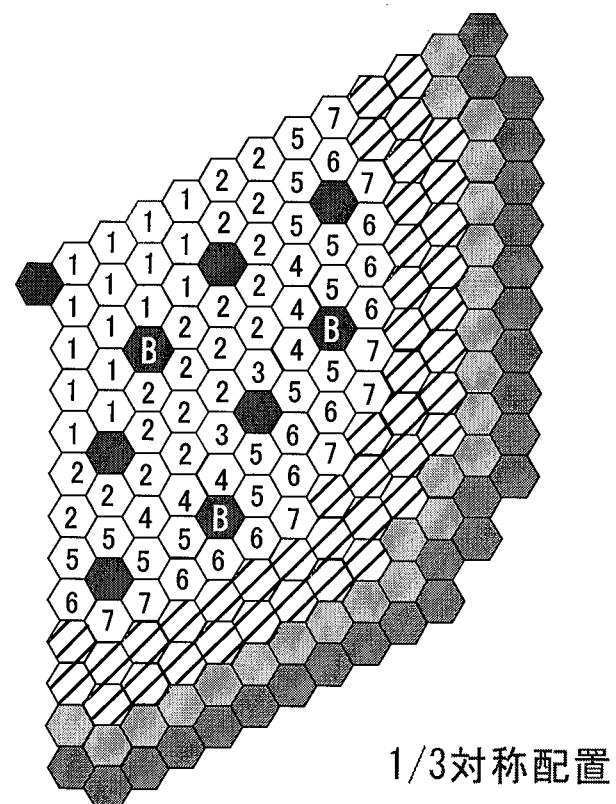


図 3.2-2 中型均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図



	流量領域N0. 1(内側炉心)	4 8 体
	流量領域N0. 2(内側炉心)	6 0 体
	流量領域N0. 3(内側炉心)	6 体
	流量領域N0. 4(外側炉心)	1 8 体
	流量領域N0. 5(外側炉心)	3 9 体
	流量領域N0. 6(外側炉心)	3 3 体
	流量領域N0. 7(外側炉心)	2 4 体
	径方向ブランケット	1 2 6 体
	SUS遮蔽体	7 2 体
	ZrH遮蔽体	7 8 体
	主系制御棒	1 6 体
	後備系制御棒	9 体

合 計 529 体

図 3.2-3 ABLE 型酸化物燃料中型均質炉心の流量領域区分

3.3 魅力ある中型炉心の検討

3.3.1 候補概念の検討

実用化戦略調査研究において、炉心概念検討については、安全性の確保を大前提として、以下を効率よく実現できる概念を構築することが重要課題となっている。

- (1) U238 をエネルギー源として活用することによる U 資源の有効利用
- (2) 高増殖要求に対する柔軟な対応
- (3) MA(マイナーアクチニド)の燃焼
- (4) LLFP(長寿命核分裂生成物)核変換

これらのうち、U 資源の有効利用は MA の燃焼も含んでいるが、利用の主体は U238 を Pu に変換して燃焼させることにある。また、MA の燃焼は、単に U 資源の有効利用だけでなく、LLFP 核変換とともに環境負荷低減の可能性追及の視点を含んでいる。

2000 年度まで実施した実用化戦略調査研究フェーズ I では、高速炉炉心におけるこれらの基本的な受容性を目標達成可能性の視点から評価して示した。フェーズ IIにおいては、これをさらに効率的かつ柔軟に実現する方策を、安全性を大前提とするのはもちろんのこと経済性との両立を考慮しつつ検討することが主要な着眼点となると考えられる。

図 3.3.1-1 に実用化戦略調査研究フェーズ II における炉心概念検討の課題を示し、図 3.3.1-2 には効率のよい炉心の方向性について示す。従来より主張されている事項ではあるが、高速炉炉心において核分裂時に放出される平均 2 個を越える中性子のうち 2 個程度が運転維持に不可欠の連鎖反応と U 資源のエネルギー源化に不可欠の増殖($U238 \rightarrow Pu$ 変換、以下「維持増殖」)に用いられるので、僅かな残余の中性子を、寄生捕獲等を抑制しつつ有効に利用する工夫が重要である。この場合、炉心からの漏洩中性子をうまく活用するには炉心内でできるだけ上述の「維持増殖」を分担し炉心周囲の比較的中性子束の高いブランケット相当位置で「LLFP 核変換」や「高増殖要求」への対応に利用できる領域を確保することが最も有効な具体策である。これを実現するのは内部転換比の高い炉心であって、これにより同等の増殖性能を達成するために必要な重金属取扱い量を低減することができるので、将来の燃料サイクル施設設備容量の抑制にも寄与する利点がある。

上述のように「効率的かつ柔軟な炉心」の概念は経済性との両立を追及する視点が不可欠である。まず、燃料サイクル費に着目すると、内部転換比が高い炉心では、同等の増殖性能とするための必要重金属取扱い量が低減できるので、燃料サイクル費が低減できることは自明である。その意味では「U 資源の効率的な利用」と「経済性追求」とが両立する。また、発電

プラント建設コストを含む発電コスト全体に着目すると、プラント側のコストダウン努力により建設費見積りが大幅に削減されている現状レベルではプラント建設費と燃料サイクルコストが発電コストに占める割合が同等となってきており内部転換比の高い炉心により燃料サイクル費が低減できれば若干のプラント建設費見積りが増大してもそれを相殺してより優れた経済性を達成できる可能性もある。2000年度におけるナトリウム中型炉の検討ではプラント機器等のコンパクト化による建設費削減を目指したが、モジュール効果を取り込んでも出力が小さくスケールメリットが大型炉に比較して劣ることが主要因となってプラント建設コストの経済性は大型炉と比較して劣る可能性が高いとの評価結果が得られた。そこで、2001年度の中型モジュール炉の検討では、プラント設計における「さらなる物量削減や合理化」を追求する検討と並行して燃料サイクル費も含めた発電コストでの経済性追及も視野に入れた炉心概念の検討を行うことを考えており、内部転換比の高い炉心の検討では、炉心寸法の増加によるプラント物量の増加と燃料サイクルコスト削減との関係把握が重要である。また、高速炉導入シナリオへの適合性の観点から高速炉導入期に柔軟な対応が出来るよう Pu フィッサイルインベントリを適切なレベルに抑制しておくことも不可欠であり、これに適合する範囲で炉心概念を検討することとなる。

2001年度のナトリウム冷却中型炉の炉心燃料設計は、以上のように「高内部転換比追求」の視点を一つの標準的な方向性として検討を進めた。図 3.3.1-3 に 2001 年度の概念検討の方向性をまとめて示す。

なお、検討においては、高速炉導入シナリオとの整合性を考慮する必要もあり、現状で概念検討がなされている例としては、高速炉導入期に高増殖性と低 Puf インベントリとし、高速炉の本格運用期には平均燃焼度増加・長期運転サイクルを可能とする互換性を指向した柔軟な炉心概念がある。この概念では、本格運用期では径プランケットを採用しない比較的低出力密度の炉心構成として内部転換比を高め取り出し平均燃焼度を高めると同時に径方向プランケット相当位置の活用の自由度を高めることとし、導入初期には炉心をコンパクト化して出力密度を高め Puf インベントリを低減するとともに径方向プランケットを設置して高増殖比を達成し導入シナリオへの適合性を高めることをねらっている。

以下、3.3.2 項及び 3.3.3 項では酸化物燃料を用いた魅力ある中型炉心として、炉心径の制約を緩和し高内部転換比を指向した具体的な炉心概念の検討結果を述べる。高速炉本格運用期を想定した径プランケットなしで比較的低出力密度の炉心構成による炉心特性についての検討結果である。

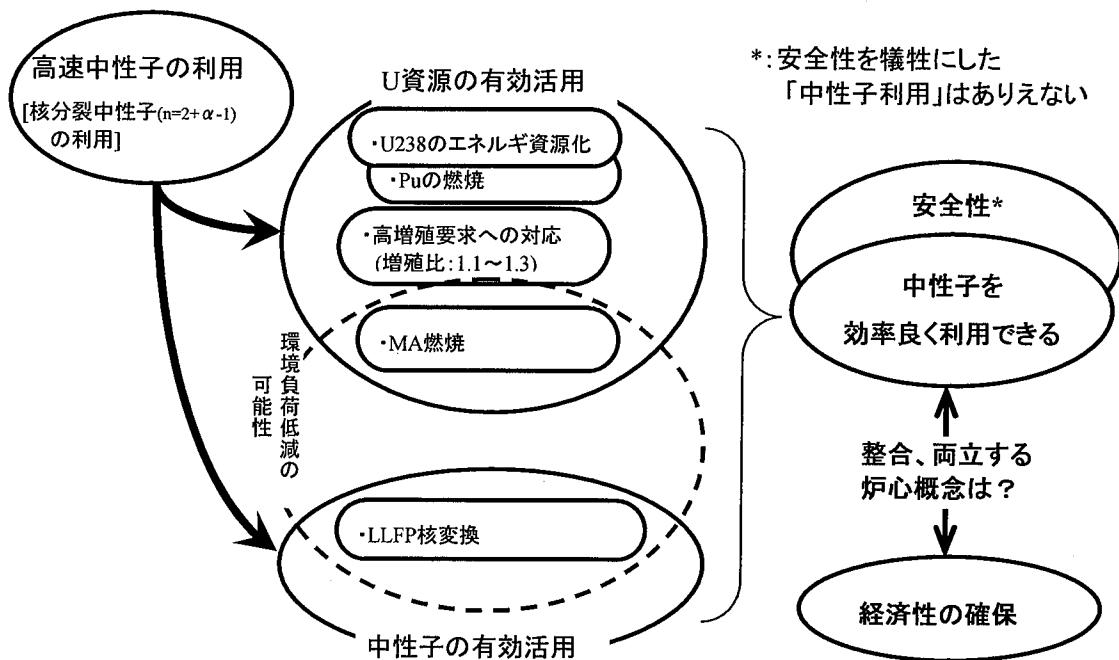


図 3.3.1-1 実用化戦略調査研究フェーズⅡにおける炉心概念検討の課題

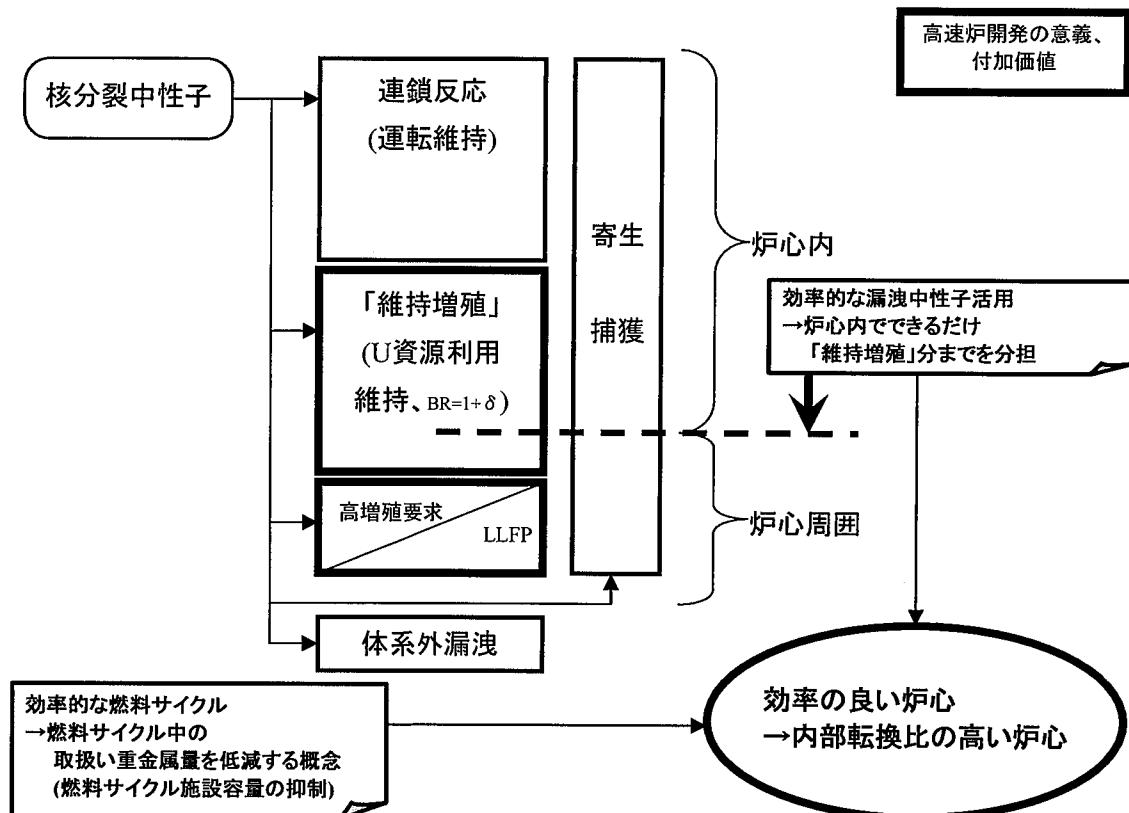


図 3.3.1-2 効率のよい炉心の方向性

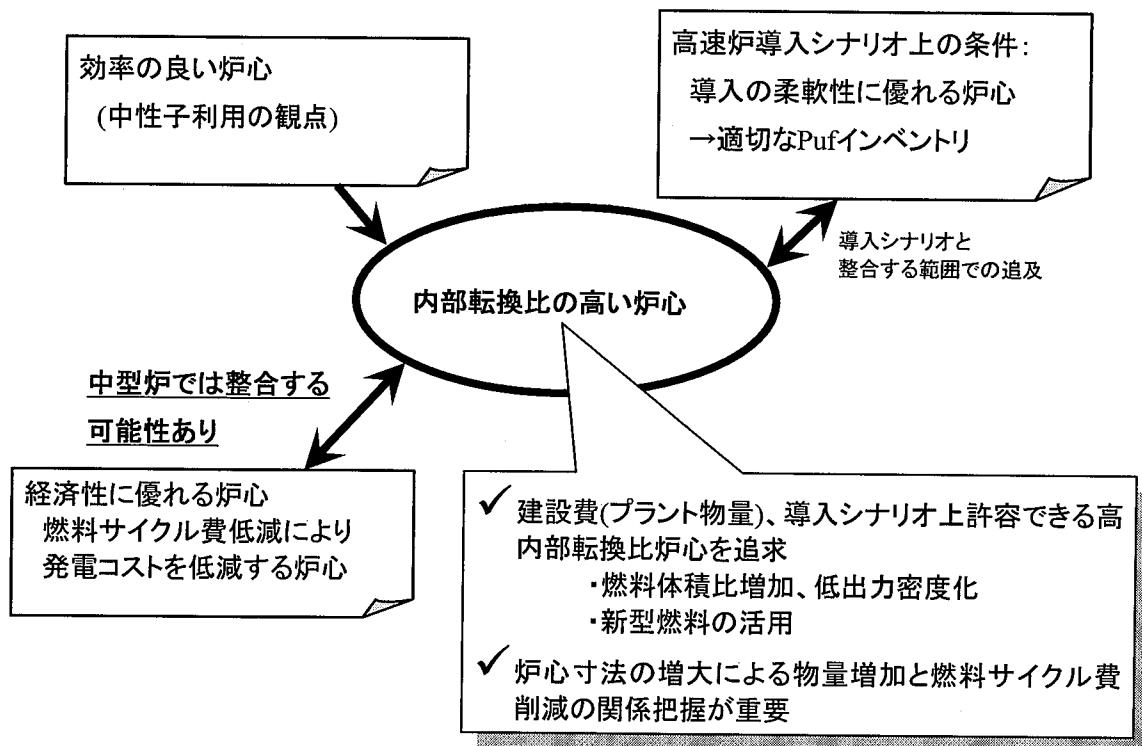


図 3.3.1-3 2001 年度ナトリウム中型炉心概念検討の方向性: 魅力ある概念の追求

3.3.2 太径ピン型高内部転換炉心

魅力ある中型炉心の候補概念のひとつとして炉容器径の制約を緩和して炉心径を大きくし、太径ピンを採用した長期運転サイクル型の高内部転換炉心を検討した。炉心部の転換比を高め、炉心+軸プラで維持増殖分(～1.0以上)を確保し、径プランケットなしすることにより実効平均燃焼度を出来るだけ高める方向で、炉心概念の具体化を検討した。

また、炉心径の制約緩和条件としては、3.1節に示したように10%程度の径の増加を暫定し、遮蔽体外接円径約4.4m程度を目安として検討した。

(1) 選定炉心配置及び燃料仕様

太径ピン型高内部転換炉心の具体化の検討結果により選定した主な炉心・燃料仕様を以下に示す。

・炉心型式	Pu 富化度 2 領域の均質炉心 (図 3.3.2-1 の炉心配置参照)
・炉心有効長	100 cm
・径プランケット	なし
・炉心等価直径	3.25 m
・遮蔽体外接円径	4.45 m
・運転サイクル長さ	912 日 (約 30 ヶ月)
・燃料交換バッチ数	4
・集合体配列ピッチ	175.2mm
・炉心燃料ピン径	11.1mm
・燃料仕様 炉心燃料	169 本バンドル ABLE 型燃料集合体 (表 3.3.2-1 及び図 3.3.2-2 参照)

燃料仕様の検討では、平均線出力を従来並みとして燃料ピン総長さを求め、約4.4mの外接円径に入る集合体数、ピン径の燃料仕様を、バンドル圧力損失約0.2MPaとなるようにサーベイしながら選定した。

(2) 核特性評価

前記の選定炉心における核特性評価として、主要な燃焼特性、ボイド反応度特性を検討した。以下に評価結果を示す。

表3.3.2-2に、主要な燃焼特性、ボイド反応度特性評価結果を示す。また、燃料物質収支を表3.3.2-3に示す。表3.3.2-2より、内部転換比は0.82であり上下軸プラ30cmを付けて増殖比は約1.04となった。内部転換比が高いことから燃焼反応度は約2.7%Δk/kk'であり、約30ヶ月の長期運転サイクルが可能の見込みである。径プランケットなしであることから、

実効的な平均燃焼度は約 100GWd/t を達成しており、燃料サイクルコスト低減への効果が期待される。また、炉心高さが 100cm で従来型の中型炉よりも高いが、ボイド反応度は 5.4 \$ と低くなっている。これは、太径ピンにより燃料体積率を向上させた結果として冷却材体積率が低下したためである。

一方、高内部転換炉心の特徴として、炉心燃料体積が増加しているため、初装荷 Puf 重量は増加し、約 6.9ton/GWe となっている。

(3) 熱特性及び燃料特性について

熱特性（流量配分）と燃料特性（被覆管 CDF）については基本的に均質炉心であり、従来型と同程度の出力流量比を想定しているため成立するものと想定し、ここでは未検討である。

(4) まとめと今後の課題

以上により、現状のプラント設計との取合い条件である炉容器径の制約を約 10%緩和できると仮定して高内部転換比を目指した炉心概念を検討した結果、内部転換比は 0.8 以上まで向上し、運転サイクル長さは約 30 ヶ月を達成の見通しとなった。実効的な取出平均燃焼度は約 100GWd/t まで向上することから燃料サイクルコストの大幅な低減が期待されるが、炉容器径増加のインパクトとの得失差を検討する必要がある。

また、3 次元解析による制御棒反応度価値の検討と共に集合体出力分布を検討し、熱特性、燃料特性についても検討する必要がある。

表 3.3.2-1 高内部転換型中型均質炉心における燃料仕様

項目	炉心燃料
燃料形態	酸化物燃料
炉心材料（被覆管/ラッパ管）	ODS鋼/PNC-FMS
燃料要素	全長 (mm)
	3,135
	燃料スタック長 (mm)
	1,000
	軸プランケット厚さ (mm; 上/下)
	300/300
	ガスプレナム長 (mm; 上/下)
	285/1,150
	端栓 (mm; 上/中/下)
集合体	30/30/40
	被覆管外径 (mm)
	11.1
	被覆管内径 (mm)
	9.58
	被覆管肉厚 (mm)
	0.76
	燃料スマア密度 (%TD)
	82.0
集合体	全長 (mm)
	4,600
	燃料ピン本数 (本)
	169 *1
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径[P/D] (-)
	1.10
	ラッパ管肉厚 (mm)
	5.0
	ラッパ管外対面距離 (mm)
	171.2
	集合体間ギャップ (mm)
	4.0
冷却材	集合体配列ピッチ (mm)
	175.2
	ワイヤ径 (mm)
	1.05
	ワイヤ巻付ピッチ (mm)
	200
構造材	燃料体積割合 (%) *2
	45.8
	(37.6)
冷却材	構造材体積割合 (%)
	27.1
冷却材	冷却材体積割合 (%)
	27.1

*1：溶融燃料排出孔として軸プランケットは集合体中央の31本のペレットを削除

*2：被覆管内側、()内は実効燃料体積割合

表 3.3.2-2 高内部転換型中型均質炉心の主要核特性

項目	選定炉心	
原子炉熱出力 (MWth)	1,190	
運転サイクル長さ (日)	912	
燃料交換バッチ [炉心]	4	
Pu富化度 (wt% : Pu/HM) [内側炉心/外側炉心]	18.8 / 22.7	
取出平均燃焼度 (MWd/t)	炉心部	149,000
	全体	102,000
燃焼反応度 (% Δ k/kk')	2.7	
増殖比 (-) [炉心／軸ブラ／全体]	0.82 / 0.22 / 1.04	
炉心平均出力密度 (W/cc ; 平衡中期)	135	
炉心部平均線出力密度 (W/cm ; 平衡中期)	231	
最大線出力密度 (W/cm) *1	約400	
出力分担率 (%) [平均 : 炉心／軸ブランケット]	94.4 / 5.6	
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{15}$ n/cm ² sec) [E ≥ 0.1MeV]	1.7	
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23}$ n/cm ²) [E ≥ 0.1MeV]	5.3	
初装荷核分裂性Pu重量 (kg)	3,461	
平衡サイクル核分裂性Pu重量 (kg)	平衡初期	3,553
	平衡末期	3,598
年間核分裂性Pu利得 (kg/年)	18	
炉心部ボイド反応度 (\$) ; 平衡末期) *2	5.4	

*1 : 燃焼ミスマッチファクタ及び3次元効果考慮

*2 : ラッパ管内側のみボイド化、燃料集合体非均質効果補正 (0.9) を考慮

表 3.3.2-3 高内部転換型中型均質炉心の物量収支(1/2)

1 パッチ当たりの装荷燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	8.8	7.4	16.2	11.4	0.0	11.4	27.5	
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
U238	2931.0	2443.3	5374.3	3779.4	0.0	3779.4	9153.7	
U合計	2939.8	2450.7	5390.5	3790.8	0.0	3790.8	9181.3	
Pu238	7.9	8.4	16.3	0.0	0.0	0.0	16.3	
Pu239	389.1	412.5	801.6	0.0	0.0	0.0	801.6	
Pu240	230.9	244.8	475.6	0.0	0.0	0.0	475.6	
Pu241	30.9	32.8	63.7	0.0	0.0	0.0	63.7	
Pu242	28.1	29.7	57.8	0.0	0.0	0.0	57.8	
Pu合計	686.9	728.2	1415.1	0.0	0.0	0.0	1415.1	
Np237	3.6	3.8	7.4	0.0	0.0	0.0	7.4	
Np239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Np合計	3.6	3.8	7.4	0.0	0.0	0.0	7.4	
Am241	14.4	15.3	29.7	0.0	0.0	0.0	29.7	
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Am243	7.2	7.6	14.8	0.0	0.0	0.0	14.8	
Am合計	21.6	22.9	44.5	0.0	0.0	0.0	44.5	
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm244	7.2	7.6	14.8	0.0	0.0	0.0	14.8	
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm合計	7.2	7.6	14.8	0.0	0.0	0.0	14.8	
合計	3659.1	3213.2	6872.3	3790.8	0.0	3790.8	10663.1	

1 パッチ当たりの取出燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	1.9	2.6	4.4	6.5	0.0	6.5	10.9	
U236	1.3	0.9	2.2	1.1	0.0	1.1	3.3	
U238	2370.3	2113.9	4484.2	3524.2	0.0	3524.2	8008.4	
U合計	2373.4	2117.4	4490.8	3531.8	0.0	3531.8	8022.6	
Pu238	10.7	11.4	22.1	0.1	0.0	0.1	22.2	
Pu239	336.8	326.9	663.7	181.9	0.0	181.9	845.6	
Pu240	212.2	224.3	436.5	15.9	0.0	15.9	452.4	
Pu241	32.6	31.5	64.1	0.9	0.0	0.9	65.0	
Pu242	25.3	27.1	52.3	0.0	0.0	0.0	52.3	
Pu合計	617.5	621.2	1238.7	198.8	0.0	198.8	1437.5	
Np237	2.6	2.7	5.3	0.5	0.0	0.5	5.8	
Np239	0.4	0.3	0.7	0.2	0.0	0.2	0.9	
Np合計	3.0	3.0	5.9	0.7	0.0	0.7	6.6	
Am241	12.7	16.6	29.3	0.1	0.0	0.1	29.4	
Am242m	1.1	1.2	2.3	0.0	0.0	0.0	2.3	
Am243	7.4	7.8	15.2	0.0	0.0	0.0	15.2	
Am合計	21.2	25.6	46.8	0.1	0.0	0.1	46.9	
Cm242	0.7	0.6	1.4	0.0	0.0	0.0	1.4	
Cm243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	
Cm244	8.9	8.8	17.7	0.0	0.0	0.0	17.7	
Cm245	1.7	1.4	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	
Cm合計	11.3	10.9	22.3	0.0	0.0	0.0	22.3	
合計	3026.5	2778.0	5804.5	3731.4	0.0	3731.4	9535.9	

表 3.3.2-3 高内部転換型中型均質炉心の物量収支(2/2)

平衡初期 (BOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	21.7	20.6	42.3	37.5	0.0	37.5	79.8	
U236	2.7	1.8	4.5	1.9	0.0	1.9	6.4	
U238	10858.2	9264.5	20122.7	14744.9	0.0	14744.9	34867.6	
U合計	10882.6	9287.0	20169.5	14784.3	0.0	14784.3	34953.8	
Pu238	36.6	38.2	74.8	0.1	0.0	0.1	74.9	
Pu239	1485.9	1506.1	2992.1	300.8	0.0	300.8	3292.9	
Pu240	898.1	951.1	1849.2	14.9	0.0	14.9	1864.1	
Pu241	129.2	130.1	259.3	0.6	0.0	0.6	259.9	
Pu242	107.6	114.7	222.3	0.0	0.0	0.0	222.3	
Pu合計	2657.4	2740.2	5397.6	316.5	0.0	316.5	5714.0	
Np237	12.5	13.4	25.9	0.7	0.0	0.7	26.5	
Np239	1.4	0.8	2.2	0.7	0.0	0.7	2.8	
Np合計	13.9	14.2	28.0	1.3	0.0	1.3	29.4	
Am241	54.4	63.7	118.1	0.1	0.0	0.1	118.1	
Am242m	2.5	2.3	4.9	0.0	0.0	0.0	4.9	
Am243	29.3	30.9	60.2	0.0	0.0	0.0	60.2	
Am合計	86.2	96.9	183.1	0.1	0.0	0.1	183.2	
Cm242	2.2	1.8	4.0	0.0	0.0	0.0	4.0	
Cm243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	
Cm244	31.6	32.5	64.1	0.0	0.0	0.0	64.1	
Cm245	3.2	2.5	5.7	0.0	0.0	0.0	5.7	
Cm合計	37.2	36.9	74.2	0.0	0.0	0.0	74.2	
合計	13677.2	12175.2	25852.4	15102.1	0.0	15102.1	40954.5	

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	14.7	15.9	30.5	32.6	0.0	32.6	63.1	
U236	4.0	2.7	6.7	3.0	0.0	3.0	9.7	
U238	10297.5	8935.1	19232.6	14489.6	0.0	14489.6	33722.2	
U合計	10316.2	8953.7	19269.8	14525.2	0.0	14525.2	33795.0	
Pu238	39.4	41.2	80.6	0.2	0.0	0.2	80.8	
Pu239	1433.6	1420.5	2854.1	482.7	0.0	482.7	3336.8	
Pu240	879.5	930.6	1810.0	30.8	0.0	30.8	1840.8	
Pu241	130.8	128.9	259.7	1.5	0.0	1.5	261.2	
Pu242	104.8	112.0	216.8	0.1	0.0	0.1	216.9	
Pu合計	2588.0	2633.2	5221.2	515.3	0.0	515.3	5736.5	
Np237	11.4	12.3	23.7	1.1	0.0	1.1	24.8	
Np239	1.8	1.0	2.8	0.9	0.0	0.9	3.7	
Np合計	13.2	13.3	26.5	2.0	0.0	2.0	28.5	
Am241	52.7	65.0	117.7	0.2	0.0	0.2	117.9	
Am242m	3.7	3.6	7.2	0.0	0.0	0.0	7.2	
Am243	29.5	31.0	60.5	0.0	0.0	0.0	60.5	
Am合計	85.8	99.6	185.4	0.2	0.0	0.2	185.6	
Cm242	2.9	2.4	5.4	0.0	0.0	0.0	5.4	
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	
Cm244	33.3	33.7	67.0	0.0	0.0	0.0	67.0	
Cm245	4.8	3.9	8.7	0.0	0.0	0.0	8.7	
Cm合計	41.4	40.3	81.6	0.0	0.0	0.0	81.6	
合計	13044.6	11740.0	24784.6	15042.7	0.0	15042.7	39827.3	

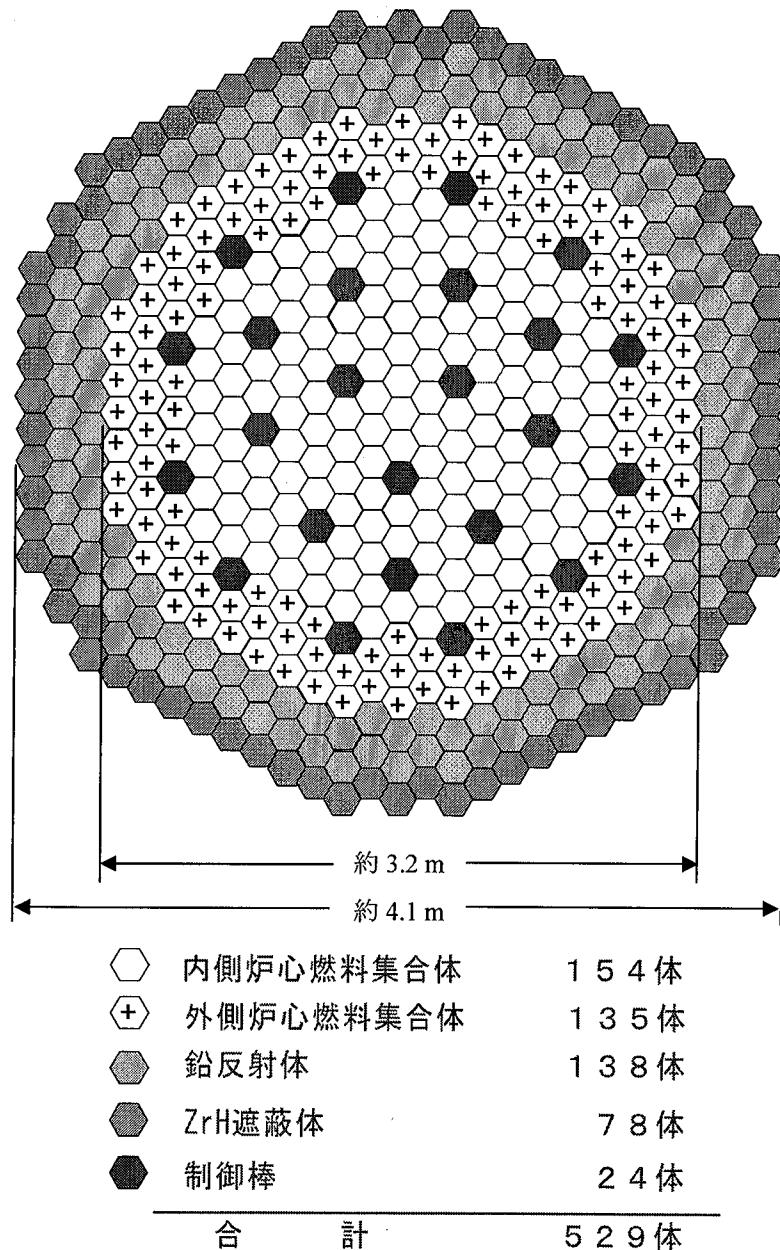


図 3.3.2-1 高内部転換型中型均質炉心の炉心配置

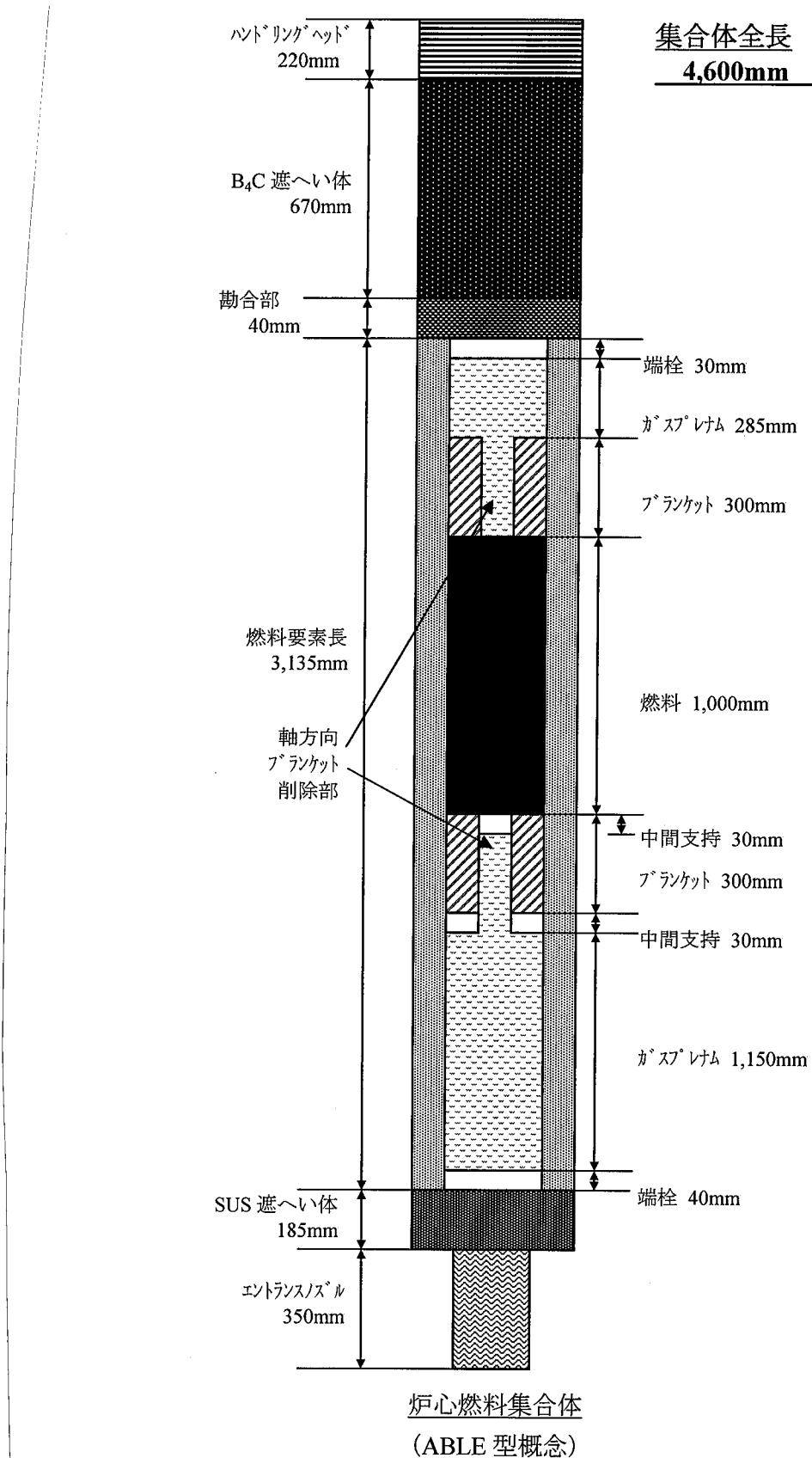


図 3.3.2-2 高内部転換型中型均質炉心 ABLE 型酸化物燃料集合体概念図

3.3.3 太径ピン型上部ナトリウムプレナム付き高内部転換炉心

前記の高内部転換型均質炉心と同様の考え方方に加えて、上部ナトリウムプレナムを付けることによりボイド反応度の低減効果に期待して、炉心領域を軸方向にも拡大する炉心概念を検討した。

炉心径の制約緩和条件は前記と同様に遮蔽体外接円径約4.4m程度を目安とし、軸方向はボイド時のナトリウムプレナムによる負の反応度効果を含めて、ボイド反応度が6\$程度となる炉心高さをサーベイして検討した。

(1) 選定炉心配置及び燃料仕様

太径ピン型上部ナトリウムプレナム付き高内部転換炉心の具体化の検討結果により選定した主な炉心・燃料仕様を以下に示す。

・炉心型式	Pu 富化度 2 領域の均質炉心 (図 3.3.3-1 の炉心配置参照)
・炉心有効長	120 cm
・径プランケット	なし
・炉心等価直径	3.19 m
・遮蔽体外接円径	4.36 m
・運転サイクル長さ	710 日 (約 23 ヶ月)
・燃料交換バッチ数	6
・集合体配列ピッチ	176.8mm
・炉心燃料ピン径	11.1mm
・燃料仕様 炉心燃料	169 本バンドル ABLE 型燃料集合体 (表 3.3.3-1 及び図 3.3.3-2 参照)

燃料仕様の検討では、平均線出力を従来並みよりやや低めとして燃料ピン総長さを求め、約4.4mの外接円径に入る集合体数、ピン径の燃料仕様を、バンドル圧力損失約0.2MPaとなるようにサーベイしながら選定した。

(2) 核特性評価

前記の選定炉心における核特性評価として、主要な燃焼特性、ボイド反応度特性等を検討した。以下に評価結果を示す。

表3.3.3-2に、主要な燃焼特性、ボイド反応度及びドップラ係数評価結果を示す。また、燃料物質収支を表3.3.3-3に示す。表3.3.3-2より、運転サイクル約23ヶ月×6バッチの炉心を基準として選定し、内部転換比は0.92であり下軸ブラ20cmを付けて増殖比は約1.01となった。内部転換比が高いことから燃焼反応度は約1.1%Δk/k'である。また、備考欄に示すように約23ヶ月×6バッチの運転パターンを4バッチとすると燃焼反

応度が $1.8\% \Delta k/kk'$ まで増え、増殖比は若干低下するが約 35 ヶ月のサイクルが可能の見込みである。径プランケットなしで、軸プランケットも下部に 20cm のみであることから、実効的な平均燃焼度は約 130GWd/t まで向上しており、燃料サイクルコスト低減への大きな効果が期待される。また、炉心部のみのボイド反応度は 6.1 \$ となるが、上部ナトリウムプレナム部のボイド反応度が約 -1.0 \$ であり、暫定としてこの負の効果の半分を期待できるとするとボイド反応度は 5.6 \$ となる。

一方、高内部転換炉心の特徴として、炉心燃料体積が増加しているため、初装荷 Puf 重量は増加し、約 7.3ton/GWe となっている。

表 3.3.3-4 には、制御棒必要反応度と反応度収支を示す。表 3.3.3-4 より、主炉停止系、後備炉停止系のいずれも必要反応度を制御棒価値が上回り、成立する見通しとなった。

(3) 热特性及び燃料特性について

次に選定炉心における熱特性評価として冷却材流量配分を検討し、燃料特性評価として被覆管 CDF を評価した。

流量配分の検討および被覆管 CDF の評価は核特性評価による 3 次元出力分布解析結果を用いて、最大出力集合体を対象とした温度評価を行い、それぞれ下記の条件、制限目安で評価した。

<流量配分評価時>

- ・1 次系全流量に対する炉心流量割合 約 95%
- ・被覆管肉厚中心温度制限目安 700°C 以下

<被覆管 CDF 評価時>

- ・被覆管 CDF 制限目安 0.5 以下
- ・被覆管腐食式 内外面とも、PNC-FMS の式を適用

図 3.3.3-3 に流量領域区分を示す。従来型に比べて高内部転換であることから燃焼反応度が小さく燃焼ミスマッチも小さい結果、流量領域区分は内側炉心 1 領域、外側炉心 2 領域の合計 3 領域で流量配分が可能となった。表 3.3.3-5 に、各流量領域毎の集合体数、集合体流量、及び被覆管最高温度等の炉心熱流動特性を示す。表 3.3.3-5 より、内側炉心の燃料の被覆管最高温度は 675°C、外側炉心の燃料の被覆管最高温度は 682°C である。また、集合体流量の最大値は 22.0kg/s であり、このときの燃料バンドル部圧力損失は 0.14MPa で設計条件を満足する。

上記、流量配分結果に基づく被覆管温度履歴による被覆管 CDF 評価結果は最大出力集合体で 0.44 であり、制限目安値 0.5 を満足している。

(4) まとめと今後の課題

以上により、現状のプラント設計との取合い条件である炉容器径の制約を約10%緩和すると仮定して高内部転換比を目指し、炉心上部にナトリウムプレナムを設置することによるボイド反応度の低減効果に期待した炉心概念を検討した結果、内部転換比は0.9以上まで向上し、運転サイクル長さは約35ヶ月を達成する可能性もあるとの見通しとなった。実効的な取出平均燃焼度は約130GWd/tまで向上することから燃料サイクルコストの大幅な低減が期待されるが、炉容器径増加のインパクトとの得失差を検討する必要がある。

また、ボイド反応度低減としてナトリウムプレナムの効果を見込んで炉心高さを120cmまで高くしていることから、CDA解析によるその有効性の検討が必要である。

表 3.3.3-1 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き
中型均質炉心における燃料仕様

項目	炉心燃料	
燃料形態	酸化物燃料	
炉心材料（被覆管/ラッパ管）	ODS鋼/PNC-FMS	
燃料要素	全長 (mm)	2,785
	燃料スタック長 (mm)	1,200
	軸プランケット厚さ (mm; 上/下)	- / 200
	ガスプレナム長 (mm; 上/下)	50 / 1,260
	端栓 (mm; 上/中/下)	20 / 25 / 30
	被覆管外径 (mm)	11.1
	被覆管内径 (mm)	9.74
	被覆管肉厚 (mm)	0.68
	燃料スマア密度 (%TD) [炉心 / 軸プラ]	82.0 / 91.4
集合体	全長 (mm)	4,600
	燃料ピン本数 (本) [炉心 / 軸プラ]	169 / 147 *1
	燃料ピンピッチ / 燃料ピン外径 [P/D] (-)	1.11
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0
	ラッパ管外対面距離 (mm)	172.8
	集合体間ギャップ (mm)	4.0
	集合体配列ピッチ (mm)	176.8
	ワイヤ径 (mm)	1.16
	ワイヤ巻付ピッチ (mm)	200
	上部ナトリウムプレナム厚さ (mm)	400
	燃料体積割合 (%) *2	46.5 (38.1)
	構造材体積割合 (%)	25.3
	冷却材体積割合 (%)	28.2

*1: 溶融燃料排出孔として軸プランケットは集合体中央の22本のペレットを削除

*2: 被覆管内側、()内は実効燃料体積割合

表 3.3.3-2 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き
中型均質炉心の主要核特性

項目	選定炉心	備考 (長期運転サイクル炉心)
原子炉熱出力 (MWth)	1,190	—
運転サイクル長さ (日)	710	1,065
燃料交換バッチ[炉心]	6	4
Pu富化度 (wt% : Pu/HM) [内側炉心/外側炉心]	17.0 / 21.1	17.3 / 21.4
取出平均燃焼度 (MWd/t)	炉心部 全体	152,000 134,000
燃焼反応度 (%Δ k/k')		1.1 1.8
増殖比 (-) [炉心／軸ブラ／全体]		0.92 / 0.09 / 1.01 0.91 / 0.09 / 1.00
炉心平均出力密度 (W/cc ; 平衡中期)		121 121
炉心部平均線出力密度 (W/cm ; 平衡中期)		206 206
最大線出力密度 (W/cm) *1 [内側／外側]		329 / 331 323 / 336
出力分担率 (%) [平均 : 炉心／軸ブランケット]		97.3 / 2.7 97.3 / 2.7
ピーク高速中性子束 ($\times 10^{15}$ n/cm ² sec) [E ≥ 0.1 MeV]		1.4 1.4
ピーク高速中性子フルエンス ($\times 10^{23}$ n/cm ²) [E ≥ 0.1 MeV]		5.3 5.3
初装荷核分裂性Pu重量 (kg)		3,557 —
平衡サイクル核分裂性 Pu重量 (kg)	平衡初期 平衡末期	3,646 3,652 —
年間核分裂性Pu利得 (kg/年)		3 —
炉心部ボイド反応度 (\$) *2 [平衡末期]	炉心部 上部Naプレナム部 合計	6.1 -1.0 5.6 —

*1 : 燃焼ミスマッチファクタ及び3次元効果考慮

*2 : ラッパ管内側のみボイド化、燃料集合体非均質効果補正 (0.9) を考慮、ナトリウムプレナム部は輸送効果補正 (0.85)を考慮し、合計はナトリウムプレナム効果を1/2とした。

表 3.3.3-3 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き
中型均質炉心の物量収支(1/2)

1 パッチ当たりの装荷燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	7.9	5.3	13.2	2.7	0.0	2.7	15.9	
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
U238	2631.0	1763.4	4394.4	887.1	0.0	887.1	5281.5	
U合計	2638.9	1768.7	4407.6	889.8	0.0	889.8	5297.4	
Pu238	6.0	5.2	11.2	0.0	0.0	0.0	11.2	
Pu239	293.1	256.2	549.3	0.0	0.0	0.0	549.3	
Pu240	173.9	152.0	325.9	0.0	0.0	0.0	325.9	
Pu241	23.3	20.4	43.7	0.0	0.0	0.0	43.7	
Pu242	21.1	18.5	39.6	0.0	0.0	0.0	39.6	
Pu合計	517.4	452.3	969.7	0.0	0.0	0.0	969.7	
Np237	2.7	2.4	5.1	0.0	0.0	0.0	5.1	
Np合計	2.7	2.4	5.1	0.0	0.0	0.0	5.1	
Am241	10.8	9.5	20.3	0.0	0.0	0.0	20.3	
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Am243	5.4	4.7	10.1	0.0	0.0	0.0	10.1	
Am合計	16.2	14.2	30.4	0.0	0.0	0.0	30.4	
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm244	5.4	4.7	10.1	0.0	0.0	0.0	10.1	
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Cm合計	5.4	4.7	10.1	0.0	0.0	0.0	10.1	
合計	3180.6	2242.3	5422.9	889.8	0.0	889.8	6312.7	

1 パッチ当たりの取出燃料重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	1.4	1.5	2.9	1.2	0.0	1.2	4.1	
U236	1.1	0.7	1.8	0.3	0.0	0.3	2.1	
U238	2078.5	1488.6	3567.1	804.0	0.0	804.0	4371.1	
U合計	2081.0	1490.8	3571.8	805.5	0.0	805.5	4377.3	
Pu238	2.6	2.9	5.5	0.0	0.0	0.0	5.5	
Pu239	284.3	215.6	499.9	53.1	0.0	53.1	553.0	
Pu240	168.3	141.2	309.5	6.6	0.0	6.6	316.1	
Pu241	25.8	20.2	46.0	0.5	0.0	0.5	46.5	
Pu242	19.2	16.7	35.9	0.0	0.0	0.0	35.9	
Pu合計	500.2	396.6	896.8	60.2	0.0	60.2	957.0	
Np237	0.8	0.9	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7	
Np合計	0.8	0.9	1.7	0.0	0.0	0.0	1.7	
Am241	10.0	10.5	20.5	0.1	0.0	0.1	20.6	
Am242m	0.6	0.5	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1	
Am243	5.6	4.8	10.4	0.0	0.0	0.0	10.4	
Am合計	16.2	15.8	32.0	0.1	0.0	0.1	32.1	
Cm242	0.6	0.4	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	
Cm243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	
Cm244	6.9	5.7	12.6	0.0	0.0	0.0	12.6	
Cm245	1.3	1.0	2.3	0.0	0.0	0.0	2.3	
Cm合計	8.9	7.2	16.1	0.0	0.0	0.0	16.1	
合計	2607.1	1911.3	4518.4	865.8	0.0	865.8	5384.2	

表 3.3.3-3 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き
中型均質炉心の物量収支(2/2)

平衡初期 (BOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	25.8	20.2	46.0	11.7	0.0	11.7	57.7	
U236	4.3	2.4	6.7	1.0	0.0	1.0	7.7	
U238	14339.5	9873.4	24212.9	5112.5	0.0	5112.5	29325.4	
U合計	14369.6	9896.0	24265.6	5125.2	0.0	5125.2	29390.8	
Pu238	26.2	24.9	51.1	0.0	0.0	0.0	51.1	
Pu239	1783.4	1432.3	3215.7	156.0	0.0	156.0	3371.7	
Pu240	1030.0	887.8	1917.8	11.5	0.0	11.5	1929.3	
Pu241	150.2	123.1	273.3	0.6	0.0	0.6	273.9	
Pu242	121.2	106.2	227.4	0.0	0.0	0.0	227.4	
Pu合計	3111.0	2574.3	5685.3	168.1	0.0	168.1	5853.4	
Np237	10.0	9.8	19.8	0.1	0.0	0.1	19.9	
Np合計	10.0	9.8	19.8	0.1	0.0	0.1	19.9	
Am241	61.8	60.0	121.8	0.1	0.0	0.1	121.9	
Am242m	2.2	1.8	4.0	0.0	0.0	0.0	4.0	
Am243	33.3	28.9	62.2	0.0	0.0	0.0	62.2	
Am合計	97.3	90.7	188.0	0.1	0.0	0.1	188.1	
Cm242	3.0	2.1	5.1	0.0	0.0	0.0	5.1	
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	
Cm244	36.7	31.0	67.7	0.0	0.0	0.0	67.7	
Cm245	4.4	3.0	7.4	0.0	0.0	0.0	7.4	
Cm合計	44.4	36.3	80.7	0.0	0.0	0.0	80.7	
合計	17632.3	12607.1	30239.4	5293.5	0.0	5293.5	35532.9	

平衡末期 (EOEC) の燃料重量 [kg]

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	プラ合計	合計	[kg]
U235	19.3	16.4	35.7	10.2	0.0	10.2	45.9	
U236	5.4	3.1	8.5	1.3	0.0	1.3	9.8	
U238	13787.0	9598.6	23385.6	5029.4	0.0	5029.4	28415.0	
U合計	13811.7	9618.1	23429.8	5040.9	0.0	5040.9	28470.7	
Pu238	22.9	22.6	45.5	0.0	0.0	0.0	45.5	
Pu239	1774.7	1391.7	3166.4	209.1	0.0	209.1	3375.5	
Pu240	1024.4	877.0	1901.4	18.1	0.0	18.1	1919.5	
Pu241	152.7	123.0	275.7	1.1	0.0	1.1	276.8	
Pu242	119.3	104.5	223.8	0.0	0.0	0.0	223.8	
Pu合計	3094.0	2518.8	5612.8	228.3	0.0	228.3	5841.1	
Np237	8.2	8.4	16.6	0.1	0.0	0.1	16.7	
Np合計	8.2	8.4	16.6	0.1	0.0	0.1	16.7	
Am241	61.0	61.0	122.0	0.1	0.0	0.1	122.1	
Am242m	2.8	2.3	5.1	0.0	0.0	0.0	5.1	
Am243	33.5	29.0	62.5	0.0	0.0	0.0	62.5	
Am合計	97.3	92.3	189.6	0.1	0.0	0.1	189.7	
Cm242	3.6	2.5	6.1	0.0	0.0	0.0	6.1	
Cm243	0.4	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	
Cm244	38.2	31.9	70.1	0.0	0.0	0.0	70.1	
Cm245	5.7	4.0	9.7	0.0	0.0	0.0	9.7	
Cm合計	47.9	38.6	86.5	0.0	0.0	0.0	86.5	
合計	17059.1	12276.2	29335.3	5269.4	0.0	5269.4	34604.7	

表 3.3.3-4 高内部転換型ナトリウムプレナム付き
中型均質炉心の制御棒反応度収支

項 目	主炉停止系 (ワンロッドスタック)	後備炉停止系		$(\% \Delta k/kk')$
		ワンロッドスタック	全数挿入	
I. 計画余剰反応度	2.3	0.5	0.7	
1.出力補償	0.7	0.5	0.7	
2.燃焼補償 ^{*1}	1.4	—	—	
4.運転余裕	0.2	—	—	
II. 余剰反応度不確かさ(2σ)	0.5	0.1	0.1	
1.臨界予測誤差	0	—	—	
2.出力補償予測誤差	—	0.1	0.14	
3.燃焼製作予測誤差	0.39	—	—	
4.燃料交換余裕	0.20	—	—	
III. 必要制御反応度合計(I+II)	2.8	0.6	0.8	
(事故時投入反応度 ^{*2} 考慮時)	—	0.9	1.1	
IV. 制御棒価値 ^{*3}	4.0	1.6	2.0	
V. 反応度停止余裕(IV-III)	1.2	0.7	0.9	

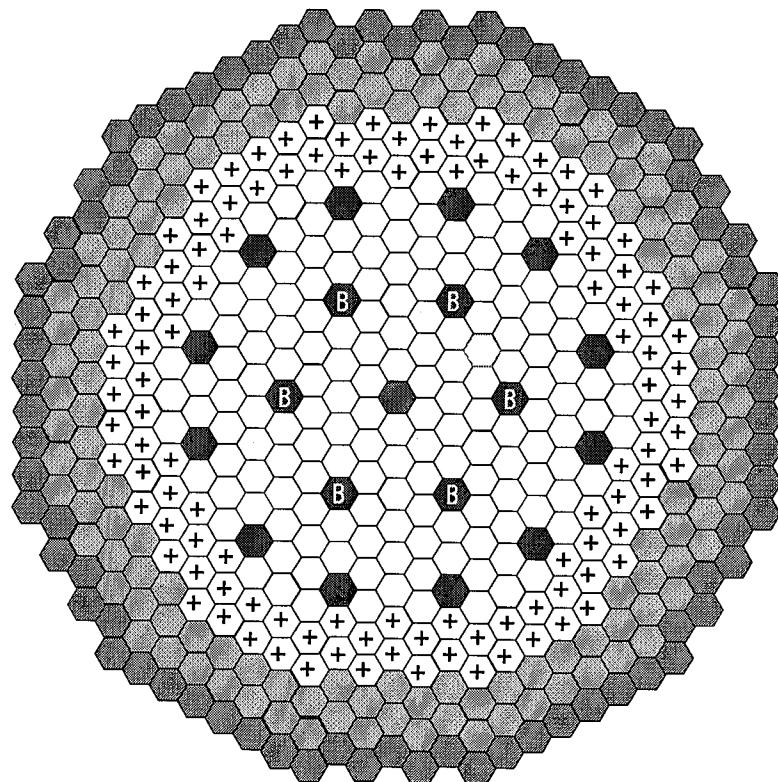
*1:燃料組成の変動を考慮した値

*2:事故時の投入反応度 $0.3\% \Delta k/kk'$

*3:設計余裕10%を見込んだ最小値

表 3.3.3-5 高内部転換型ナトリウムプレナム付き中型均質炉心における炉心流量配分と被覆管温度特性及びCDF値

炉心領域	流量領域			炉心流量配分		集合体最大出力(MW)	被覆管最高温度(°C)	被覆管CDF値
	集合体層NO.	体数	NO.	集合体数	集合体流量(kg/s)			
内側炉心	2	6				5.40	663	0.44
	3	12				5.31	655	—
	4	18				5.23	648	—
	5	18	1	162	22.0	5.10	649	—
	6	30				4.95	640	—
	7	36				4.72	631	—
	8	24				4.51	619	—
	9	18				4.24	613	—
	8	6	2	36	20.5	738.0	5.03	670
外側炉心	9	30				4.80	654	0.01
	10	48	3	78	18.6	1450.8	4.55	672
	11	30	—	276	—	5752.8	—	—
合計	—	276	—				—	—



○	内側炉心燃料集合体	162体
+	外側炉心燃料集合体	114体
◆	鉛反射体	138体
◇	ZrH遮蔽体	78体
●	主炉停止系制御棒	13体
●B	後備炉停止系制御棒	6体
<hr/> 合 計		511体

図 3.3.3-1 高内部転換型ナトリウムプレナム付き
中型均質炉心の炉心配置

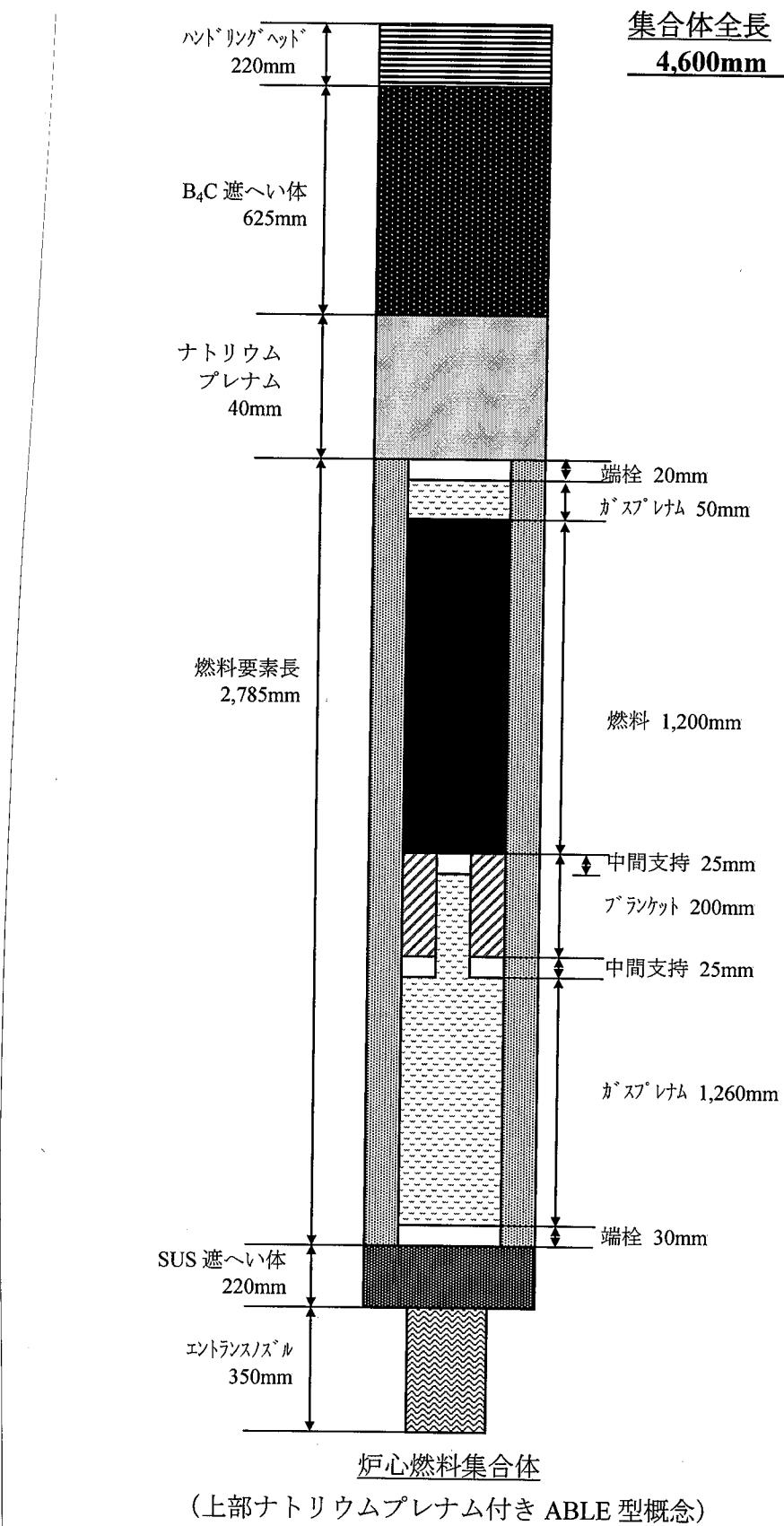
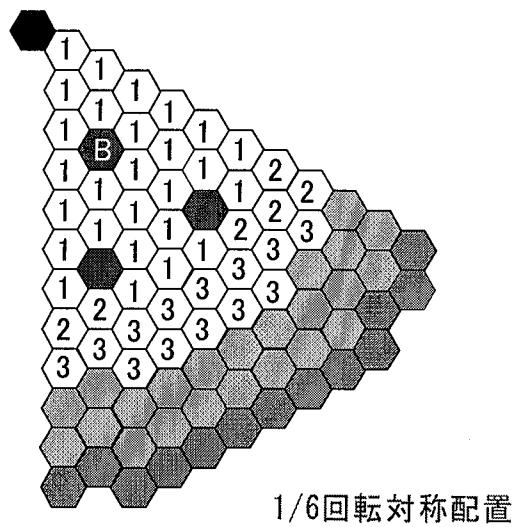


図 3.3.3-2 高内部転換型上部ナトリウムプレナム付き
 中型均質炉心ABLE型酸化物燃料集合体概念図



①	流量領域N0.1(内側炉心)	162体
②	流量領域N0.2(外側炉心)	36体
③	流量領域N0.3(外側炉心)	78体
◆	鉛反射体	138体
▨	ZrH遮蔽体	78体
●	主炉停止系制御棒	13体
B	後備炉停止系制御棒	6体
<hr/> 合 計		511体

図 3.3.3-3 高内部転換型ナトリウムプレナム付き
中型均質炉心の流量領域区分

3.4 中型炉のまとめ

中型炉の検討では、まずレファレンス炉心として、プラント設計との取合いとして遮蔽体外接円径 4m 程度、バンドル部圧力損失 0.2MPa 程度とした条件のもとで、ABLE 型燃料集合体を用いた酸化物燃料による中型炉心について検討した。次に魅力ある炉心概念の提案として、燃料サイクルコストの低減に主眼をおき、遮蔽体外接円径の制約条件を約 10% 緩和した 4.4m 程度の遮蔽体外接円径として、太径ピン採用による高内部転換型の中型炉心を 2 通り検討した。

表 3.4-1 に各炉心の主要な核特性をまとめて示す。

表 3.4-1 より、レファレンス炉心概念は中型炉の設計条件をほぼ満足し、設計成立の見通しは得られているが、炉心とブランケットを合わせた全体の平均燃焼度が約 60GWd/t 程度と小さい。これに対して太径ピンとした高内部転換型の炉心では 100GWd/t 以上となり、燃料サイクルコストの大幅な低減が見込まれる。また、高内部転換型は燃焼反応度も小さくなることから 30 ヶ月程度の長期運転サイクルも可能であり、稼働率の向上にもなる。但し、ブランケットを削減しているため増殖比が 1.0 程度であり、高速炉本格運用期にを念頭においた炉心概念であるため、初装荷 Puf 重量が約 7ton/GWe と大きくなるといった点で、高速炉導入初期には適さない概念となっている。

表 3.4-1 ナトリウム冷却酸化物燃料中型炉心における各炉心概念主要項目、核特性の比較

項 目	従来型レフアレンス炉心 *1	太口径ピン型高内部転換炉心	
	ABLE型均質炉心	ABLE型均質炉心	上部ナトリウムプレナム炉心
炉心高さ(cm)	90	100	120
軸ブラ厚さ(cm) [上／下]	35/35	30/30	-/20
運転サイクル長さ(日)	548(約18ヶ月)	912(約30ヶ月)	710(約23ヶ月)
燃交バッチ(炉心/径ブーラ)	4/4	4/-	6/-
Pu富化度(wt%) [内側/外側]	21.6/28.5	18.8/22.7	17.0/21.1
燃焼反応度(% $\Delta k/k'$)	3.4	2.7	1.1
増殖比(炉心部/全体)	0.68/1.20	0.82/1.04	0.92/1.01
取出平均燃焼度 (GWd/t)	炉心部 全体平均	150 56	149 103
平均出力密度(W/cc)	222	135	152
最大線出力(W/cm)	約430	約400	約330
最大高速中性子 *2 照射量(n/cm ²)	5.0E+23	5.3E+23	5.3E+23
初装荷Pu重量(ton/GWe)	4.7	6.9	7.1
Naボイド反応度 (\\$)[EOEC]	炉心部 上部フレナム部	6.0 -	5.4 - 6.1 -1.0

*1: 制御棒チャンネルはNaフオロワとした体系で解析

*2: 高速中性子は0.1MeV以上

4. おわりに

FBR サイクル実用化戦略調査研究におけるフェーズⅡ初年度のナトリウム冷却酸化物燃料炉心の炉心・燃料設計検討として、大型炉及び中型炉のそれぞれについていくつかの炉心概念を検討した。

大型炉ではフェーズⅠでの炉心概念検討の延長として、条件の見直し等により性能向上や課題解決を図ることを目指し、軸ブランケット一部削除型のABLE型集合体または内部ダクト付き集合体を用いた均質炉心、径方向非均質炉心概念の組合せとして4通りの炉心概念の検討を実施した。均質炉心では径ブランケットを1層に削減して実効平均燃焼度を高める概念、径方向非均質炉心では内部ブランケットをシャーフリングすることにより実効平均燃焼度を高めつつ熱設計課題も解決する概念を検討した。その結果、ブランケットも含めた実効的な取出平均燃焼度がこれまでの50～60GWd/t程度から70～80GWd/tまで向上することが確認できた。今後は、再臨界回避シナリオとの整合を取りつつ設計要求条件にあった炉心概念に絞り込んでいく必要がある。

中型炉では、従来型均質炉心概念の他に、プラントとの取り合い条件としていた径方向サイズの制約を緩和することを仮定して、燃料サイクル費低減や長期運転サイクル等の魅力を追求する太径ピンを用いた高内部転換型の炉心概念を検討した。その結果、径ブランケットなしの炉心で増殖比を1.05程度に抑え、実効的な取出平均燃焼度100GWd/t以上となる炉心概念の設計成立性可能性を見通すことができた。今後は、プラント設計、安全設計との調整により魅力ある中型炉としての炉心仕様を絞り込んでいく必要がある。

参考文献

- [1]山館他、JNC TN9400 2001-113、「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討
—再臨界回避型酸化物燃料炉心の検討—」、2001年9月。
- [2]佐々木他、JNC TY9400 2001-011、「炉心・燃料（燃料形態）の技術検討書 —
実用化戦略調査研究（フェーズI）成果報告書—」、2001年3月

謝 辞

本研究における「大型酸化物燃料の均質炉心」および「中型酸化物燃料の従来來型均質炉心」の検討は筆者の検討方針などを取込んで三菱重工業(株)殿に担当して頂き、「中型酸化物燃料の太径ピン型上部ナトリウムプレナム付き高内部転換炉心」の検討は筆者の検討方針などを取込んで(株)日立製作所殿に担当して頂きました。いずれも、短期間での厳しい工程の中、効率よく検討して頂き、充分な成果を報告して頂きました。ここに感謝の意を表します。

添付資料-1

本研究における炉心設計検討において用いた解析評価手法は、2000年度の報告書^[1]に記載の評価方法(またはこれと同等の手法)である。参考として以下に解析評価手法の概要を示す。

(1) 核設計評価項目

核設計評価項目は大別して下記の4項目が挙げられる。

- 燃焼特性(取出燃焼度、燃焼反応度、増殖比等)
- 制御棒反応度、反応度収支
- 各種反応度特性(ボイド反応度、ドップラ係数等)、動特性パラメータ
- 出力分布特性(最大線出力、集合体出力分布等)

炉心概念のパラメータサーベイでは、2次元RZ計算手法による燃焼特性の解析結果を比較することにより検討し、炉心・燃料仕様を選定する。制御棒反応度収支の検討は、3次元計算により制御棒反応度値を求める燃焼反応度との関係から必要な投入反応度を確保することを確認するものである。また、各種反応度特性、出力分布特性は設計条件や設計目標が達成できることを確認すると同時に、熱設計、燃料設計及び安全設計で必要となるデータを整理するものである。

(2) 断面積ライブラリ

最新の評価済み中性子データライブラリー(JENDL-3.2等)に基づく統合炉定数(ADJ2000等:実験解析による断面積の調整を反映済み)を用いる。統合炉定数は70群のライブラリであるが、評価目的により少数群に縮約して用いる。添付表1-1には70群、18群、7群のエネルギー群構造を示す。

(3) 計算コードと計算モデル体系

○ SLAROM: 高速炉用格子均質化計算コード

70群の炉定数ライブラリ(本研究では統合炉定数)を用いて、炉心の各領域毎の均質化実効断面積をPDSファイルに出力する積分型輸送方程式コード。拡散・燃焼計算用の小数群実効断面積作成、各種反応度計算用の実効断面積作成に用いる。均質モデルの他にも非均質効果の検討等にピンセル体系の非均質モデルを用いる場合もある。

○ JOINT

炉心核設計で用いる各計算コードの入出力インターフェース機能を

もつコード。SLAROM コードにより出力された 70 群実効断面積を CITATION コードや PERKY コードの入力用にフォーマット変換、70 群の中性子スペクトルを用いて 70 群の実効断面積を少数群に縮約する等に用いる。

○ CITATION : 汎用拡散計算コード

汎用の中性子多群拡散計算コードであり 1 次元から 3 次元体系までさまざまな体系を取り扱い可能である。高速炉核設計では JOINT コードとの連携システムにより入出力インターフェースや燃焼機能等を整備した CITATION-FBR を用いるのが一般的となっている。当 Gr. では CITATION-FBR を 2 次元 RZ 拡散・燃焼計算モデルに固定して Pu 富化度サーベイ機能や解析結果編集出力機能を付加した PENCIL コードシステムを用いて燃焼特性を評価している。

○ PERKY : 摂動計算コード

拡散摂動論を用いて、物質反応度価値、反応度変化及び動特性パラメータを 2 次元、3 次元体系で計算するコード。入力データには JOINT コードのインターフェース機能により、SLAROM コードで用意した実効断面積、CITATION コードの出力である中性子束、随伴中性子束を用いる。通常は、2 次元 RZ 体系を用いて炉心の各反応度、反応度係数分布及び動特性パラメータを評価する。

○ MOSES

大型高速炉用に開発された 3 次元拡散・燃焼計算コード。集合体単位で入出力データを取り扱いが可能であり、バッチ分散の燃料交換も模擬出来るためより現実的な 3 次元効果も評価できる。Hex-Z(粗メッシュ、修正粗メッシュ)モデルまたは Tri-Z(詳細メッシュ)モデルがあり、炉心配置の対称性により、1/6 体系、1/3 体系、全炉心体系等を評価目的に合わせて選択できる。通常は、Tri-Z(詳細メッシュ)モデルにより、3 次元出力分布(最大線出力、集合体出力)は 1/3 体系の拡散・燃焼計算を用いて評価し、制御棒反応度価値は全炉心体系の拡散計算を用いて評価する。

(3) 評価条件および概略評価フロー

各評価項目の主な評価条件を下記に示す。また、添付図 1-1～添付図 1-6 に各評価項目毎の計算概略フローを示す。

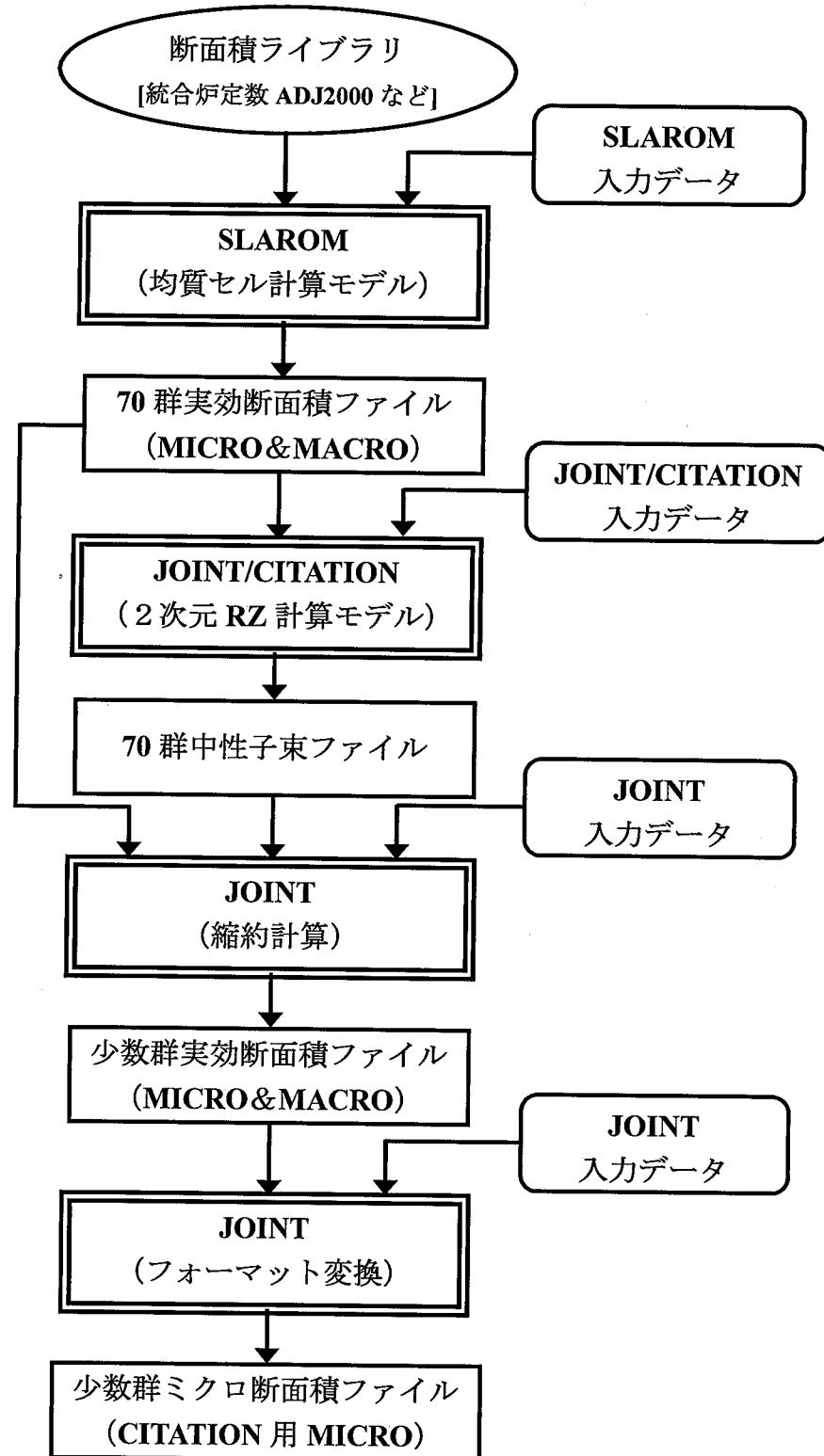
○ 燃焼特性(取出燃焼度、燃焼反応度、増殖比等)

- ・エネルギー群数 : 7 群
- ・解析体系 : 2 次元 RZ 体系(拡散メッシュ幅 5cm 程度)

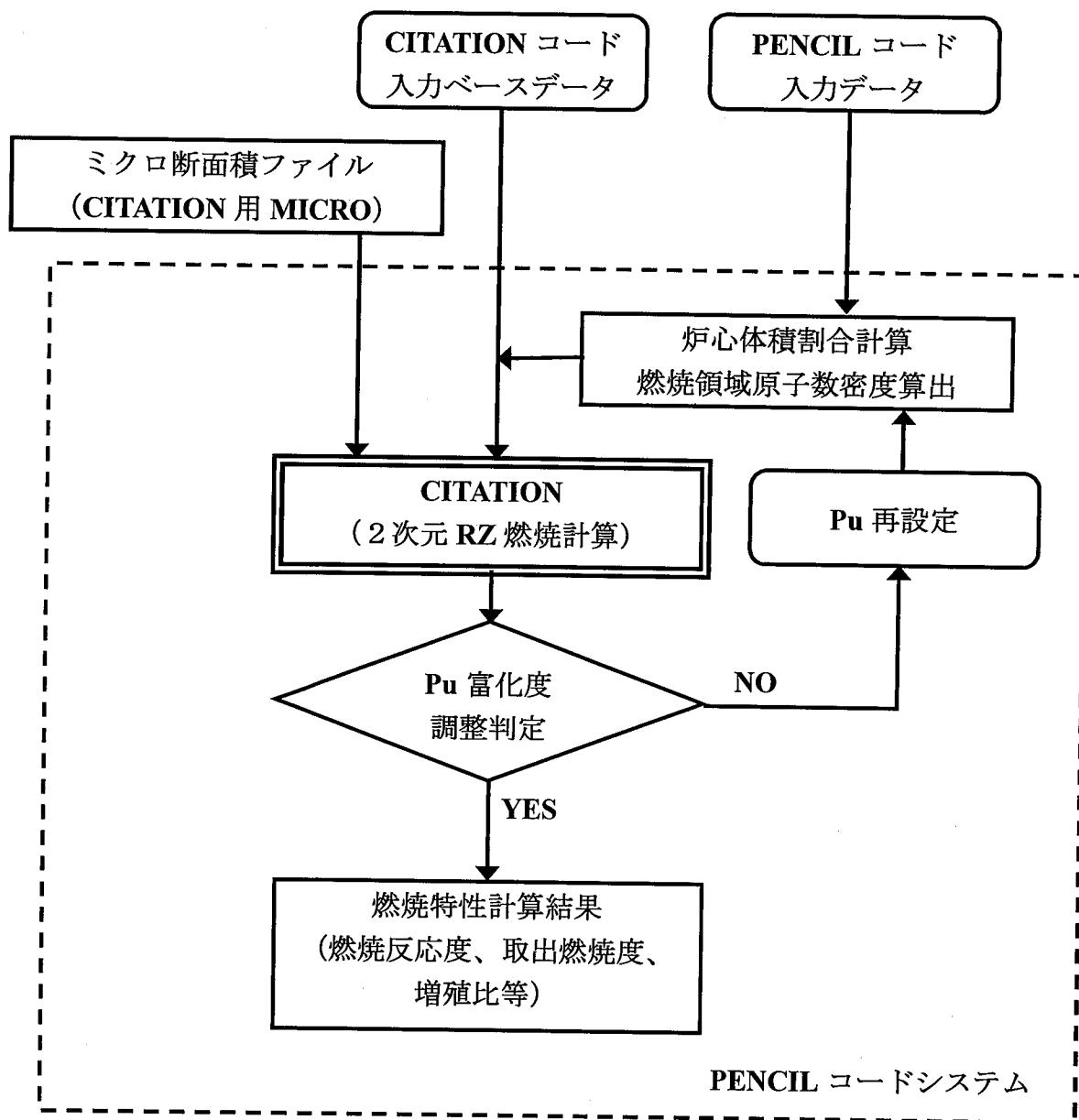
- ・燃焼方法：燃焼領域毎のサブゾーン設定による燃焼計算
- ・Pu 富化度サーベイ判断条件：
 - ① 平衡サイクル末期の実効増倍率～0.994[運転余裕、各種補正考慮]
 - ② 燃焼ミスマッチ考慮時で最大線出力が約 390W/cm 程度
 - ③ 制御棒插入状態はパーク位置(B4C 下端が炉心上端位置)で燃焼計算
- 制御棒反応度、反応度収支
 - ・エネルギー群数：7 群
 - ・解析体系：3 次元 Tr-Z 全炉心体系(軸方向拡散メッシュ幅 5cm 程度)
 - ・炉心時期：平衡サイクル初期
 - ・制御棒插入：最大反応度の制御棒 1 本全引き抜き
- 各種反応度特性(ボイド反応度、ドップラ係数等)
 - ・エネルギー群数：70 群
 - ・解析体系：2 次元 RZ 体系(拡散メッシュ幅 5cm 程度)
 - ・炉心時期：平衡サイクル末期
- 動特性パラメータ
 - ・エネルギー群数：18 群
 - ・解析体系：2 次元 RZ 体系(拡散メッシュ幅 5cm 程度)
 - ・炉心時期：平衡サイクル末期
- 出力分布特性(最大線出力、集合体出力分布等)
 - ・エネルギー群数：7 群
 - ・解析体系：3 次元 Tr-Z 1/3 炉心体系(軸方向拡散メッシュ幅 5cm 程度)
 - ・燃焼方法：分散バッチ考慮による集合体毎の燃焼計算

添付表 1-1 高速炉用断面積ライブラリのエネルギー群構造

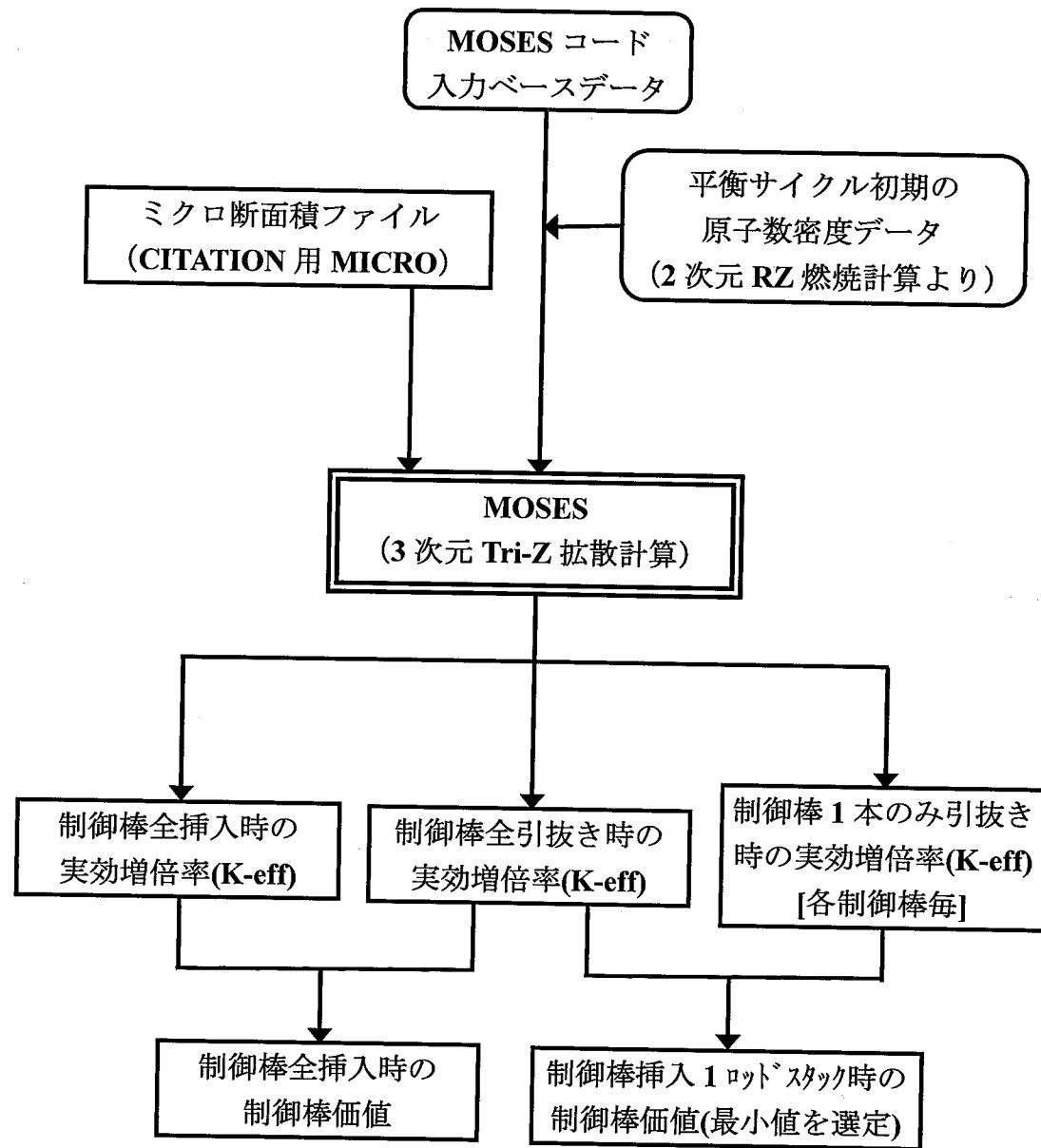
7G	Group		Upper energy	Lower energy	Lethargy Width	Pu-239 Fission Spectrum	
	18G	70G				JENDL-3.2	JENDL-2
1	1	1	10.0 (MeV)	7.7880 (MeV)	0.250	6.7563E-03	8.3498E-03
		2	7.7880	6.0653	0.250	2.0776E-02	2.2710E-02
2	2	3	6.0653	4.7237	0.250	4.5128E-02	4.5869E-02
		4	4.7237	3.6788	0.250	7.5223E-02	7.3294E-02
3	3	5	3.6788	2.8650	0.250	1.0288E-01	9.7428E-02
		6	2.8650	2.2313	0.250	1.1999E-01	1.1210E-01
4	4	7	2.2313	1.7377	0.250	1.2243E-01	1.1520E-01
		8	1.7377	1.3534	0.250	1.1226E-01	1.0837E-01
5	5	9	1.3534	1.0540	0.250	9.5183E-02	9.5137E-02
		10	1.0540	0.82085	0.250	7.7814E-02	7.9137E-02
6	6	11	0.82085	0.63928	0.250	6.0822E-02	6.3114E-02
		12	0.63928	0.49787	0.250	4.5993E-02	4.8710E-02
7	7	13	0.49787	0.38774	0.250	3.3801E-02	3.6643E-02
		14	0.38774	0.30197	0.250	2.4291E-02	2.7021E-02
8	8	15	0.30197	0.23518	0.250	1.7212E-02	1.9618E-02
		16	0.23518	0.18316	0.250	1.2080E-02	1.4072E-02
9	9	17	0.18316	0.14264	0.250	8.4245E-03	9.9987E-03
		18	0.14264	0.11109	0.250	5.8271E-03	7.0524E-03
10	10	19	0.11109 (MeV)	0.086517 (MeV)	0.250	4.0659E-03	4.9459E-03
		20	86.517 (KeV)	67.379 (KeV)	0.250	2.8177E-03	3.4531E-03
11	11	21	67.379	52.475	0.250	1.9453E-03	2.4025E-03
		22	52.475	40.868	0.250	1.3412E-03	1.6671E-03
12	12	23	40.868	31.828	0.250	9.2389E-04	1.1543E-03
		24	31.828	24.788	0.250	6.3601E-04	7.9794E-04
13	13	25	24.788	19.305	0.250	4.3739E-04	5.5087E-04
		26	19.305	15.034	0.250	3.0039E-04	3.7995E-04
14	14	27	15.034	11.709	0.250	2.0594E-04	2.6185E-04
		28	11.709	9.1188	0.250	1.4208E-04	1.8035E-04
15	15	29	9.1188	7.1017	0.250	9.8079E-05	1.2416E-04
		30	7.1017	5.5308	0.250	6.7423E-05	8.5444E-05
16	16	31	5.5308	4.3074	0.250	4.6342E-05	5.8784E-05
		32	4.3074	3.3546	0.250	3.1845E-05	4.0433E-05
17	17	33	3.3546	2.6126	0.250	2.1874E-05	2.7806E-05
		34	2.6126	2.0347	0.250	1.5026E-05	1.9120E-05
18	18	35	2.0347	1.5846	0.250	1.0311E-05	1.3146E-05
		36	1.5846	1.2341	0.250	7.0733E-06	9.0376E-06
19	19	37	1.2341 (KeV)	0.96112 (KeV)	0.250	4.8576E-06	5.3758E-06
		40	961.12 (eV)	748.52 (eV)	0.250	0.0	0.0
20	20	41	748.52	582.95	0.250	0.0	0.0
		42	582.95	454.00	0.250	0.0	0.0
21	21	43	454.00	353.58	0.250	0.0	0.0
		44	353.58	275.36	0.250	0.0	0.0
22	22	45	275.36	214.45	0.250	0.0	0.0
		46	214.45	167.02	0.250	0.0	0.0
23	23	47	167.02	130.07	0.250	0.0	0.0
		48	130.07	101.30	0.250	0.0	0.0
24	24	49	101.30	78.893	0.250	0.0	0.0
		50	78.893	61.442	0.250	0.0	0.0
25	25	51	61.442	47.851	0.250	0.0	0.0
		52	47.851	37.267	0.250	0.0	0.0
26	26	53	37.267	29.023	0.250	0.0	0.0
		54	29.023	22.603	0.250	0.0	0.0
27	27	55	22.603	17.603	0.250	0.0	0.0
		56	17.603	13.710	0.250	0.0	0.0
28	28	57	13.710	10.677	0.250	0.0	0.0
		58	10.677	8.3153	0.250	0.0	0.0
29	29	59	8.3153	6.4760	0.250	0.0	0.0
		60	6.4760	5.0435	0.250	0.0	0.0
30	30	61	5.0435	3.9279	0.250	0.0	0.0
		62	3.9279	3.0590	0.250	0.0	0.0
31	31	63	3.0590	2.3824	0.250	0.0	0.0
		64	2.3824	1.8554	0.250	0.0	0.0
32	32	65	1.8554	1.4450	0.250	0.0	0.0
		66	1.4450	1.1254	0.250	0.0	0.0
33	33	67	1.1254	0.87642	0.250	0.0	0.0
		68	0.87642	0.68256	0.250	0.0	0.0
34	34	69	0.68256	0.53158	0.250	0.0	0.0
		70	0.53158	0.41399	0.250	0.0	0.0
35	35	71	0.41399	0.32242	0.250	0.0	0.0
		72	0.32242 (eV)	10 ⁻⁵ (eV)	10.65	0.0	0.0



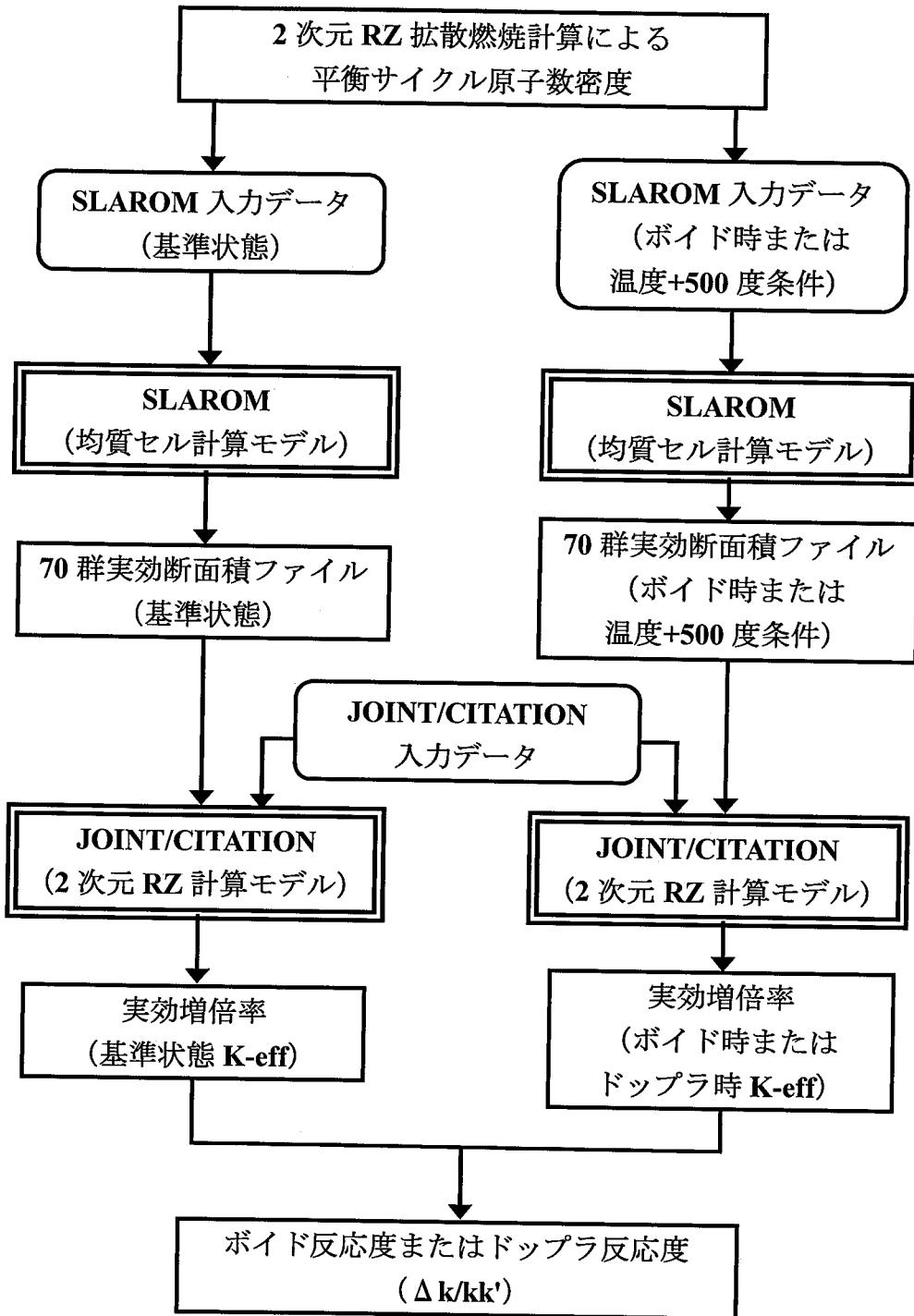
添付図 1-1 少数群ミクロ断面積ファイル作成概略フロー



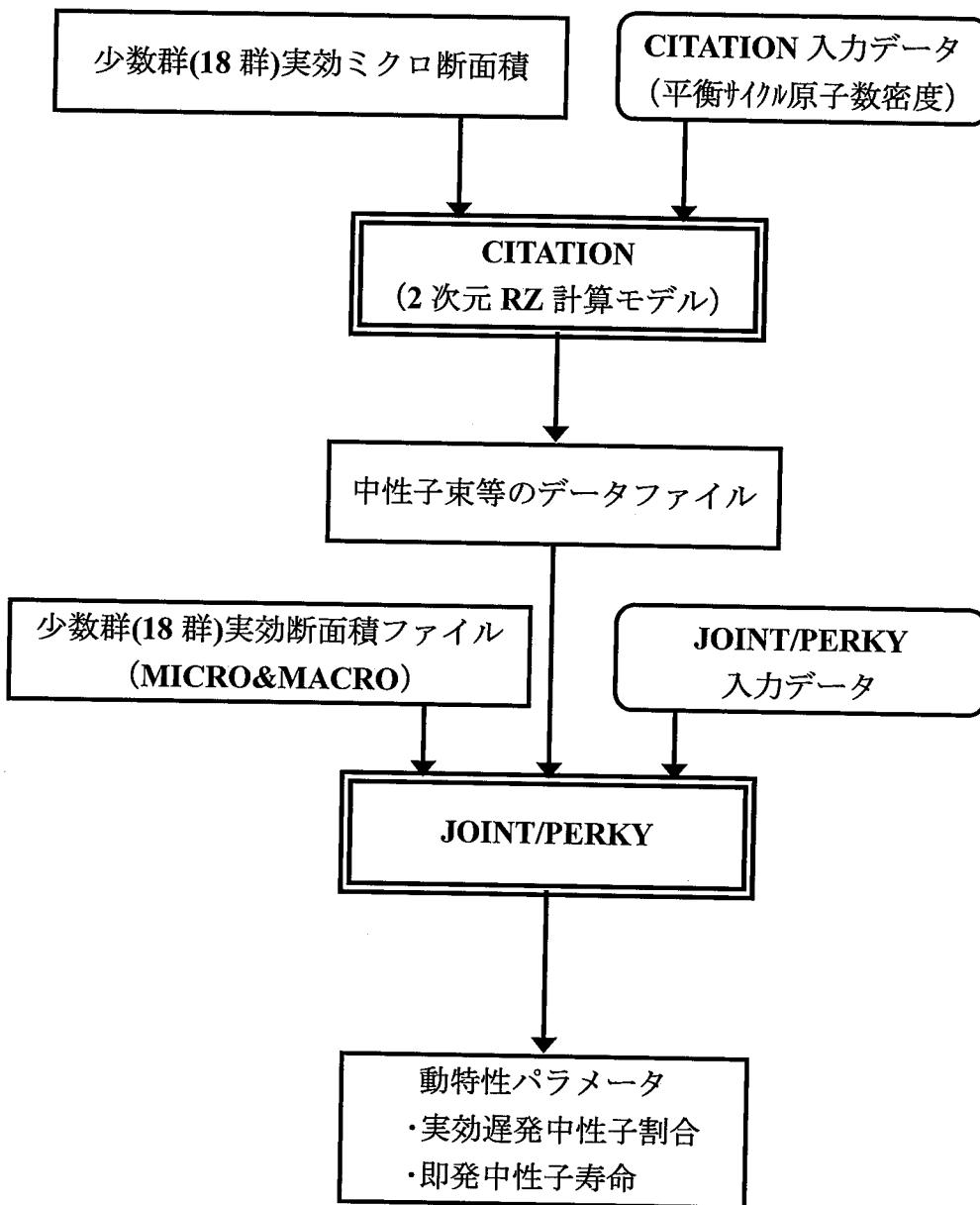
添付図 1-2 燃焼特性解析概略フロー (PENCIL コードシステム)



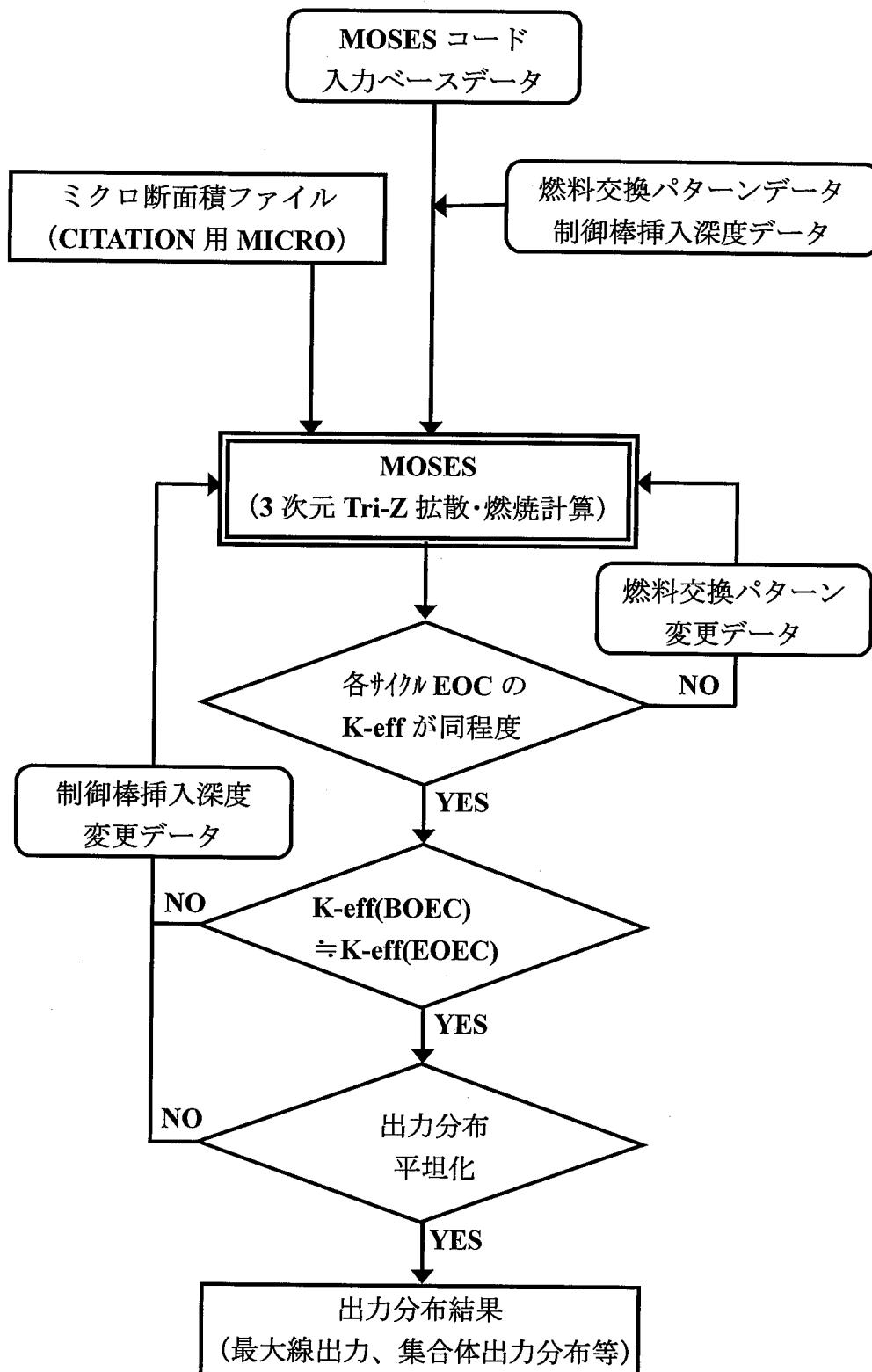
添付図 1-3 制御棒反応度価値計算概略フロー



添付図 1-4 ボイド反応度、ドップラ反応度計算概略フロー



添付図 1-5 動特性パラメータ計算概略フロー



添付図 1-6 出力分布計算概略フロー

添付資料-2

本研究では、断面積ライブラリに検討開始時の統合炉定数の最新リリース版である ADJ2000 を用いている。一方、2000 年度までの検討はそれ以前のリリース版である ADJ98 を用いている。

ADJ98 と ADJ2000 のライブラリ間での主要核特性の相違は別途報告書^{注)}にまとめられていることから、添付表 1 及び添付表 2 に 600MWe 級 FBR 炉心の核設計解析の比較結果を引用して添付する。

ADJ98 から ADJ2000 になったことによる大きな変化として下記が上げられている。

- ①実効増倍率が増加し、Pu 富化度臨界調整をすると Pu 富化度が低減する。
- ②燃焼欠損反応度が $0.4\% \Delta k/kk'$ 前後低減する。
- ③増殖比が 5%前後増加する。
- ④Na ボイド反応度が 7%前後増加する。
- ⑤ドップラ係数が 5%前後増加する。

注)石川眞他、JNC TN9400 2001-071、「高速炉用統合炉定数 ADJ2000 の作成」、2001 年 6 月.

添付表 2-1

JNC TN9400 2001-071

表6.1-1 炉心主要核特性の基準計算値の比較 (Pu富化度調整なし)

ライブラリー	基本炉定数 JFS-3-J3.2 ^{*1}	統合炉定数	
		ADJ98 ^{*2}	ADJ2000 ^{*2}
Pu富化度(%)	16.52/20.52	16.52/20.52	16.52/20.52
実効倍増率 BOEC	1.03089	1.03350 (+0.25%)	1.03868 (+0.76%)
EOEC	1.00473	1.00299 (-0.17%)	1.01109 (+0.63%)
燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')	2.53	2.94 (+16.2%)	2.63 (+4.0%)
増殖比 BOEC	1.105	1.063 (-3.8%)	1.096 (-0.8%)
EOEC	1.107	1.074 (-3.0%)	1.100 (-0.6%)
最大線出力 (W/cm)			
BOEC IC	449.1	447.1 (-0.4%)	448.5 (-0.1%)
OC	454.0	457.1 (+0.7%)	454.1 (+0.0%)
EOEC IC	437.8	433.0 (-1.1%)	436.4 (-0.3%)
OC	424.9	427.0 (+0.5%)	425.0 (+0.0%)
実効遅発中性子割合			
BOEC	3.751E-03	3.772E-03 (+0.6%)	3.808E-03 (+1.5%)
EOEC	3.664E-03	3.703E-03 (+1.1%)	3.726E-03 (+1.7%)
即発中性子寿命 (μ秒)			
BOEC	0.405	0.406 (+0.3%)	0.406 (+0.2%)
EOEC	0.414	0.418 (+1.0%)	0.416 (+0.4%)
ドッブラー係数($10^{-3}Tdk/dT$)			
BOEC	-8.01E-03	-7.77E-03 (-2.9%)	-8.16E-03 (+1.9%)
EOEC	-7.44E-03	-7.25E-03 (-2.6%)	-7.60E-03 (+2.1%)
Naボイド反応度 (\$)			
BOEC	4.57	4.38 (-4.2%)	4.69 (+2.7%)
EOEC	5.43	5.19 (-4.5%)	5.55 (+2.2%)
後備炉停止系制御棒価値(%Δk/kk')			
BOEC 全挿入	3.15	3.17 (+0.5%)	3.16 (+0.2%)
ワンロッドスタック	2.69	2.70 (+0.3%)	2.69 (+0.1%)
EOEC 全挿入	3.59	3.61 (+0.4%)	3.60 (+0.1%)
主炉停止系制御棒価値(%Δk/kk')			
BOEC 全挿入	9.46	9.44 (-0.2%)	9.46 (+0.0%)
ワンロッドスタック	7.96	7.93 (-0.5%)	7.95 (-0.2%)
EOEC 全挿入	9.74	9.71 (-0.3%)	9.74 (+0.0%)

*1：基本炉定数(JFS-3-J3.2)を用いてPu富化度調整

*2：基本炉定数(JFS-3-J3.2)のPu富化度を使用

注：カッコ内は基本炉定数(JFS-3-J3.2)との差

(統合炉定数-基本炉定数) / (基本炉定数) *100

添付表 2-2

JNC TN9400 2001-071

表6.2-1 炉心主要核特性の基準計算値の比較 (Pu富化度調整あり)

ライブラリー	基本炉定数 JFS-3-J3.2	統合炉定数	
		ADJ98	ADJ2000
Pu富化度(%)	16.52/20.52	16.68/20.52 (+1.0%/0.0%)	16.21/20.20 (-1.9%/-1.6%)
実効増倍率 BOEC	1.03089	1.03591 (+0.49%)	1.03043 (-0.04%)
EOEC	1.00473	1.00484 (+0.01%)	1.00475 (+0.00%)
燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')	2.53	2.98 (+17.8%)	2.48 (-2.0%)
増殖比 BOEC	1.105	1.059 (-4.2%)	1.113 (+0.7%)
EOEC	1.107	1.071 (-3.3%)	1.113 (+0.5%)
最大線出力 (W/cm)			
BOEC IC	449.1	455.6 (+1.4%)	447.0 (-0.5%)
OC	454.0	454.2 (+0.0%)	453.3 (-0.1%)
EOEC IC	437.8	436.2 (-0.4%)	436.6 (-0.3%)
OC	424.9	425.8 (+0.2%)	423.6 (-0.3%)
実効遅発中性子割合			
BOEC	3.751E-03	3.747E-03 (-0.1%)	3.754E-03 (+0.1%)
EOEC	3.664E-03	3.672E-03 (+0.2%)	3.677E-03 (+0.3%)
即発中性子寿命 (μ秒)			
BOEC	0.405	0.406 (+0.4%)	0.406 (+0.3%)
EOEC	0.414	0.418 (+1.0%)	0.416 (+0.5%)
ドッpler係数($10^{-3}Tdk/dT$)			
BOEC	-8.01E-03	-7.79E-03 (-2.7%)	-8.20E-03 (+2.4%)
EOEC	-7.44E-03	-7.27E-03 (-2.3%)	-7.63E-03 (+2.5%)
Naボイド反応度 (\$)			
BOEC	4.57	4.46 (-2.4%)	4.83 (+5.8%)
EOEC	5.43	5.35 (-1.6%)	5.73 (+5.5%)
後備炉停止系制御棒価値(%Δk/kk')			
BOEC 全挿入	3.15	3.18 (+0.7%)	3.13 (-0.6%)
ワンロッドスタック	2.69	2.72 (+0.9%)	2.70 (+0.4%)
EOEC 全挿入	3.59	3.60 (+0.1%)	3.63 (+1.1%)
主炉停止系制御棒価値(%Δk/kk')			
BOEC 全挿入	9.46	9.54 (+0.9%)	9.64 (+1.9%)
ワンロッドスタック	7.96	8.04 (+1.0%)	8.17 (+2.6%)
EOEC 全挿入	9.74	9.85 (+1.1%)	9.91 (+1.8%)

注：カッコ内は基本炉定数(JFS-3-J3.2)との差
(統合炉定数-基本炉定数) / (基本炉定数) *100