

分置

強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉の 炉心・燃料設計検討

－平成16年度の研究成果のまとめ－

(研究報告)

2005年8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村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2005

強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料設計検討
－平成 16 年度の研究成果のまとめ－
(研究報告)

山下巧¹⁾, 三田敏男¹⁾, 水野朋保¹⁾

要旨

FBR サイクル実用化戦略調査研究 (FS) においては、様々な冷却材を用いた高速増殖炉が検討されており、その候補の 1 つとして鉛ビスマス冷却炉の設計研究を実施している。本研究では最近の鉛ビスマス中の材料腐食の実験結果を反映して、平成 15 年度に実施した鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料の仕様を見直した。見直しにあたっては、被覆管外面腐食量について新たに提案された評価式を用い、被覆管腐食を抑制する観点から被覆管外面最高温度を 570°C 以下に制限した。

上記の新しい設計条件での強制循環炉心および自然循環炉心の原子炉出入口温度に関する予備解析の結果、強制循環炉心は自然循環炉心に比べて設計条件変更の炉心特性への影響が小さいので有望と判断した。そこで、電気出力 750MWe (熱出力 1980MWt) の強制循環炉について冷却材流速 2m/s 以下、バンドル圧損 0.23MPa 以下などの設計条件を満たすように設計を行った。被覆管外面腐食量の増大により、平成 15 年度設計炉心に比べて被覆管肉厚、燃料ピン外径および燃料ピン配列ピッチが増大し、これに伴い、炉心もまた大きくなかった。設計炉心の主な仕様は、径方向ブランケットなし、被覆管外径 8.0mm、炉心高さ 70cm、炉心等価直径 4.43m、遮へい体外接円径 5.35m となった。

設計炉心の運転サイクル長さは 18 ヶ月、炉心部取出平均燃焼度は 150GWd/t 以上、増殖比は 1.10 (導入期), 1.04 (平衡期) となり、いずれも FS の炉心性能目標を達成した。なお、本設計では、将来の開発を見込んで被覆管の最大高速中性子照射量に上限を設けないが、照射量を ODS 鋼および PNC-FMS 鋼の開発目標の目安値 ($5 \times 10^{23} n/cm^2$, $E > 0.1 MeV$) 以下に止めた場合には、炉心部取出平均燃焼度は 125GWd/t 程度となった。なお、設計炉心の遮へい体外接円径 5.35m は取合設計条件 5.5m 以下を満たしている。これにより、被覆管の腐食および温度に関する新しい設計条件の下でも炉心成立の見通しが得られた。

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
本研究は、実用化戦略調査研究の一環として実施したものである。

Design study of medium size forced circulation lead-bismuth cooled core

Takumi YAMASHITA¹⁾, Toshio SANDA¹⁾, Tomoyasu MIZUNO¹⁾

Abstract

In "Feasibility Studies on Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System (FS)", various types of fast breeder reactor using different coolant have been studied, in which lead-bismuth is one of the subject. In this study, design studies of medium size forced circulation (FC) reactor were carried out using newly proposed correlation in evaluation for clad outside surface corrosion and in restriction on the maximum clad outside surface temperature to 570°C based on the design in JFY 2003.

The influence of changes in foregoing design conditions on core performances of the FC reactor was smaller than that of natural circulation (NC) reactor, and consequently, design of the FC core (outputs were 1980MWt, 750MWe) was performed to meet demands for coolant velocity, bundle pressure loss and so on. The designed core was larger than that designed in JFY 2002 because of increase in fuel pin diameter and fuel pin pitch. The main specifications for the designed core were as follows; with no radial blanket, fuel pin diameter of 8.0mm, core height of 70cm, core equivalent diameter of 4.43m, envelope diameter of radial shielding region of 5.35m.

The main core performances were as follows; operation period of 18 months, burn-up of over 150GWd/t, and breeding ratio of 1.10 for the breeding core and 1.04 for the break even core. They achieved the performance targets in the FS within the condition where envelope diameter of radial shielding region was less than 5.5m. Fast fluence was not restricted in anticipation of improvements on materials in the future. When it was restricted to the development target of ODS steel and PNC-FMS steel ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$), the burn-up was about 125GWd/t. From these results, prospect of possibility of core manufacture was gained within the new design conditions of clad corrosion and temperature.

¹⁾ Fuel and Core System Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center
This study was done as part of "Feasibility Studies on Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System".

目 次

1.はじめに	1
2.設計条件変更による感度解析	2
2.1 設計条件変更の概要	2
2.2 設計条件変更による核特性への影響評価	2
(1) 被覆管最高温度制限、被覆管外面腐食量評価式の変更	3
(2) 随伴FP混入率および等価係数の変更	4
(3) 原子炉出力の変更	5
(4) 燃料スミア密度の変更	5
(5) FPガス放出率の変更	6
(6) まとめ	6
3.炉心設計	20
3.1 炉心仕様選定のためのサーベイ計算	20
(1) 検討条件	20
(2) 検討内容	21
3.2 炉心設計	31
(1) 基本核特性	31
(2) 出力分布	33
(3) 反応度特性	33
(4) 熱特性	36
(5) まとめ	38
4.おわりに	77
謝辞	78
参考文献	79

表リスト

表 2.1.1	平成 16 年度設計の平成 15 年度設計条件からの変更点	7
表 2.2.1	被覆管最高温度と腐食式の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉 窒化物燃料炉心の仕様の比較	8
表 2.2.2	被覆管最高温度と腐食式の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉 窒化物燃料炉心の主要目的比較	9
表 2.2.3	随伴 FP 混入率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物 燃料炉心の仕様の比較	10
表 2.2.4	随伴 FP 混入率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物 燃料炉心の主要目的比較	11
表 2.2.5	原子炉出力の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物燃料 炉心の仕様の比較	12
表 2.2.6	原子炉出力の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物燃料 炉心の主要目的比較	13
表 2.2.7	燃料スミア密度の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物 燃料炉心の仕様の比較	14
表 2.2.8	燃料スミア密度の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物 燃料炉心の主要目的比較	15
表 2.2.9	FP ガス放出率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物 燃料炉心の仕様の比較	16
表 2.2.10	FP ガス放出率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物 燃料炉心の主要目的比較	17
表 3.1.1	炉心主要目および炉心主要核特性	25
表 3.1.2	炉心主要特性のまとめ	26
表 3.2.1	設計炉心の炉心・燃料基本仕様	39
表 3.2.2	設計炉心の主要炉心特性一覧	40
表 3.2.3	設計炉心（導入期炉心）の物質収支	41
表 3.2.4	設計炉心（平衡期炉心）の物質収支	43
表 3.2.5	最大高速中性子照射量制限の有無による鉛ビスマス強制循環 冷却炉窒化物燃料炉心の仕様の比較	45
表 3.2.6	最大高速中性子照射量制限の有無による鉛ビスマス強制循環 冷却炉窒化物燃料炉心の主要目的比較	46
表 3.2.7	設計炉心（導入期炉心）の出力分布特性	47
表 3.2.8	設計炉心（導入期炉心）の制御棒価値評価結果	48
表 3.2.9	設計炉心（導入期炉心）の制御棒反応度収支	49
表 3.2.10	定格出力からの制御棒誤引抜き特性	50
表 3.2.11	低温状態からの制御棒誤引抜き特性	50

表 3.2.12 設計炉心（導入期炉心）の主要な反応度特性	51
表 3.2.13 設計炉心（導入期炉心）の各種反応度係数	52
表 3.2.14 設計炉心（導入期炉心）の燃料集合体仕様	53
表 3.2.15 被覆管温度評価用工学的安全係数	54
表 3.2.16 各流量領域ごとの温度特性	55
表 3.2.17 冷却材および被覆管の温度履歴（第 1 流量領域）	56
表 3.2.18 冷却材および被覆管の温度履歴（第 2 流量領域）	57
表 3.2.19 冷却材および被覆管の温度履歴（第 3 流量領域）	58
表 3.2.20 冷却材および被覆管の温度履歴（第 4 流量領域）	59
表 3.2.21 冷却材および被覆管の温度履歴（第 5 流量領域）	60
表 3.2.22 冷却材および被覆管の温度履歴（第 6 流量領域）	61
表 3.2.23 燃料の温度履歴	62

図リスト

図 2.2.1(a)	平成 15 年度評価式による被覆管腐食量の時間依存性	18
図 2.2.1(b)	平成 16 年度評価式による被覆管腐食量の時間依存性	18
図 2.2.2	被覆管腐食量評価式の相異による被覆管最高温度での被覆管 腐食量の比較	19
図 3.1.1(a)	サーベイ計算における炉心構成図 (Case-1 および Case-3, ピン径 7.3mm)	27
図 3.1.1(b)	サーベイ計算における炉心構成図 (Case-2, ピン径 7.3mm)	28
図 3.1.1(c)	サーベイ計算における炉心構成図 (Case-4, ピン径 8.03mm)	29
図 3.1.1(d)	サーベイ計算における炉心構成図 (Case-5, ピン径 8.5mm)	30
図 3.2.1	設計炉心 (導入期炉心) の炉心構成図	63
図 3.2.2	設計炉心 (導入期炉心) の集合体番号図	64
図 3.2.3	設計炉心 (導入期炉心) の制御棒番号図	65
図 3.2.4	設計炉心 (導入期炉心) の制御棒ストローク曲線	66
図 3.2.5	設計炉心 (導入期炉心) の炉心燃料集合体軸方向概念図	67
図 3.2.6	設計炉心 (導入期炉心) の最大ピン出力分布 (平衡初期 末期の最大値)	68
図 3.2.7	設計炉心 (導入期炉心) の流量領域区分図	69
図 3.2.8	被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴 (内側炉心, 第 1 流量領域)	70
図 3.2.9	被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴 (内側炉心, 第 2 流量領域)	71
図 3.2.10	被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴 (外側炉心, 第 3 流量領域)	72
図 3.2.11	被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴 (外側炉心, 第 4 流量領域)	73
図 3.2.12	被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴 (外側炉心, 第 5 流量領域)	74
図 3.2.13	被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴 (外側炉心, 第 6 流量領域)	75
図 3.2.14	最大線出力ピンの燃料中心ホットスポット温度の履歴	76

略語表

略語	正式表現	説明
B ₄ C	Boron Carbide	四炭化ほう素
DDI	Duct-Duct Interaction	ダクト（ラッパ管）間相互作用
FBR	Fast Breeder Reactor	高速増殖炉
FC	Forced Circulation	強制循環
FMS	Ferritic-Martensitic Steels	フェライト・マルテンサイト鋼
FP	Fission Product	核分裂生成物
FS	Feasibility Studies on Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System	FBR サイクル実用化戦略調査研究
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe	カールスルーエ研究センター
HSF	Hot Spot Factor	ホットスポットファクタ
HM	Heavy Metal	重金属
MOX	Mixed Oxide Fuel	混合酸化物燃料
NC	Natural Circulation	自然循環
ODS	Oxide Dispersion Strengthened	酸化物分散強化
PNC	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation	動力炉・核燃料開発事業団
TRU	Transuranic	超ウラン元素

1. はじめに

FBR 実用化戦略調査研究 (FS) においては、安全性を前提に、経済性、資源の有効利用性、環境負荷低減性、核不拡散性に優れた高速炉システムの開発を目的としている。本研究は、FS において有望な高速炉概念のひとつとして検討している鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料設計の平成 16 年度の成果に関するものである。

FS フェーズⅡ前半（平成 13^[1], 14 年度）において、自然循環方式・強制循環方式の鉛ビスマス冷却中型炉に関して、重金属冷却材条件下での炉心の最適化、炉心性能の向上、建設コスト低減などを図り、炉心・燃料仕様、ヒートバランスを設定し、炉心特性解析・安全解析を実施して炉心成立性の見通しを得た。しかし、高速中性子照射量が高く、燃料健全性を考慮した炉心の検討、鉛ビスマス冷却炉の柔軟性・多様性評価などを課題とした。なお、FS フェーズⅡ前半の炉心設計では DDI（高速中性子照射によるダクト（以後、ラッパ管と記載）の膨れなどにより生ずるラッパ管間相互作用）は考慮しないことについていた。

平成 15 年度^[2]において、DDI を考慮した燃料・炉心設計を進めて、FS の炉心概念としての成立性を確認するとともに、FS フェーズⅡ中間まとめ（平成 15 年度）の代表炉心を提示した。さらに、制御棒浮き上がり対策を施した制御棒仕様を検討すると共に、鉛ビスマス冷却炉における柔軟性・多様性評価として、標準概念の窒化物燃料炉心に対して MOX 燃料および金属燃料炉心の実現性の検討および軽水炉回収 TRU 燃料の適用性の検討を実施した。また、最近の鉛ビスマス中の材料腐食試験の結果から、被覆管外面最高温度について、当時の制限条件である被覆管肉厚中心最高温度 650°C を被覆管外面最高温度 570°C 程度に変更して設計する必要の可能性が出てきたことにより、被覆管最高温度制限の変更が炉心性能へ与える影響を予備評価した。この検討では、自然循環炉心は耐震性の観点からプラント設計の大幅な変更により経済性が劣化するため、設計条件の影響が比較的小さい強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉が有望と判断した。

本研究では、最近の鉛ビスマス中の材料腐食の実験結果を考慮し、被覆管腐食を抑制する観点から被覆管外面最高温度を 570°C 以下と制限して電気出力 750MWe の強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉の炉心設計を行った。なお、本研究では、設計条件として被覆管外面腐食量評価式および被覆管最高温度制限の変更とともに、随伴 FP 混入率、燃料スミア密度および FP ガス放出率などについても平成 15 年度設計からの見直しを行った。

2. 設計条件変更による感度解析

2. 1 設計条件変更の概要

平成 15 年度における鉛ビスマス冷却中型炉代表炉心は、被覆管肉厚中心最高温度 650°C の制限条件で設計されたが、鉛環境下の炉心材料腐食に関するサイクル機構とドイツの FZK にて実施している鉛ビスマス環境下の炉心材料腐食試験による最近の知見^[3]に基づけば、被覆管外面最高温度を 570°C に変更して設計する必要がある可能性が出てきている。また、鉛ビスマス中の被覆管外面の腐食量については、最近の知見では、平成 15 年度に使用した評価式^[4]は腐食量を過小評価するというデータが得られつつあり、最近のデータに基づく新しい評価式^[5]が提案され、平成 16 年度の鉛ビスマス冷却炉の設計式に採用されている。

平成 16 年度窒化物燃料強制循環炉心設計では、平成 15 年度の設計条件に対し、表 2.1.1 に示すような変更を行った。

①被覆管最高温度制限、被覆管外面腐食量評価式の変更：

上述のように最近の知見から被覆管最高温度制限を被覆管肉厚中心最高温度 650°C から被覆管外面最高温度 570°C に変更し、被覆管外面腐食量評価式を文献[5]の式とした。

②随伴 FP 混入率の変更：

平成 16 年度ナトリウム冷却 MOX 炉心設計では随伴 FP 混入率の見直し(2vol.% → 0.2vol.%) が行われ、窒化物燃料炉心の設計でもこの結果を踏襲して設計条件を変更した。

③原子炉出力の変更：

平成 15 年度に予備検討した被覆管 570°C 制限対応炉心（被覆管外面最高温度 570°C）の原子炉熱出力は代表炉心と同じく 1875MWt であるが、代表炉心（電気出力 750MWe, 熱効率 40%）に比べ、原子炉出口温度の低下により、熱効率が 38% に低下して電気出力は 710MWe となった。平成 16 年度設計では、強制循環炉心（被覆管外面最高温度 570°C）の電気出力は平成 15 年度の代表炉心と同じく 750MWe、熱効率は被覆管 570°C 制限対応炉心と同じく 38% とした。

④燃料スミア密度の変更：

燃料健全性の観点から燃料スミア密度を炉心部で 80%TD から 75%TD に、軸方向ブランケット部で 95%TD から 90%TD に変更した。

⑤FP ガス放出率の変更：

FP ガス放出率に関する資料^[6]から、FP ガス放出率の設定を 50% から 60% に変更した。

2. 2 設計条件変更による核特性への影響評価

鉛ビスマス冷却中型炉心について、2. 1 に挙げた設計条件（被覆管最高温度条件、被覆管外面腐食量評価式、随伴 FP 混入率、原子炉出力、燃料スミア密度、FP ガス放出率）の変更による核特性への影響の感度解析を行った。

(1) 被覆管最高温度制限、被覆管外面腐食量評価式の変更

平成 15 年度および 16 年度の設計に用いた被覆管外面腐食評価式を以下に示す。

・平成 15 年度^[4]

$$X = C_{Pb} \cdot t^{1/2} \quad \cdots (2.2.1)$$

$$C_{Pb} = 1.144 \times 10^5 \exp\left(\frac{-1.116 \times 10^4}{T + 273.15}\right) \quad \cdots (2.2.2)$$

X : 被覆管外面腐食量 [μm]

t : 使用時間 [hr]

T : 試験温度 [°C]

・平成 16 年度^[5]

$$\phi = A \cdot t^{1/2} \quad \cdots (2.2.3)$$

$$A = A_0 \exp(-Q / RT) \quad \cdots (2.2.4)$$

ϕ : 被覆管外面腐食量（酸化皮膜厚） [μm]

t : 使用時間 [hr]

A₀ : 定数 8.906×10^4 [μm/ $\sqrt{\text{hr}}$]

Q : 見かけの活性化エネルギー 1.8736×10^4 [cal/mol]

R : 気体定数 ($= 1.987$ [cal·mol⁻¹K⁻¹])

T : 温度 [K] (有効温度範囲 : 570°C 未満)

図 2.2.1(a)と(b)に平成 15 年度の被覆管外面腐食量評価式による腐食量と今回提示された被覆管外面腐食量評価式による腐食量（酸化皮膜成長厚）を比較して示す。例えば、平成 16 年度評価式による腐食量は平成 15 年度評価式によるものに比べて 650°C で約 5 倍、570°C で約 6 倍大きいことが分かる。

次に、使用時間と平成 15 年度評価式による 650°C での被覆管外面腐食量および平成 16 年度評価式による 570°C での被覆管外面腐食量の関係を図 2.2.2 に示す。図より、被覆管最高温度制限および被覆管外面腐食量評価式を見直すと、被覆管外面腐食量は約 2 倍になることがわかる。

被覆管 570°C 制限対応新腐食式炉心(表 2.2.1 の炉心 3)の炉心仕様の設定は、表 2.2.1 の平成 15 年度強制循環代表炉心(炉心 1)をベースにして以下のように行つた。

被覆管外面最高温度 570°C、被覆管内径 (6.46mm) 一定の条件で、燃料取出後 (18 ヶ月 (547.5 日) × 7 バッチ後) の被覆管外面腐食量 (0.376mm) から、以下の式により肉厚 (0.62mm) を定めた。

$$(\text{肉厚}) = 0.025 + (\text{減肉量}) + (0.26 / 9.5) \times (\text{ピン径}) [\text{mm}] \quad \cdots (2.2.5)$$

上式より、被覆管外径は 7.3mm (炉心 1) から 7.7mm (炉心 3) となつた。

次に、燃料集合体内ピン本数を一定にして、平成 15 年度代表炉心の場合と燃料ピンバンドル部の圧損が等しくなるように燃料ピン配列ピッチを変更した。冷却材流量は、炉心出入口温度を平成 16 年度設計条件の 445 / 285°C となるように設定した。ペアバンドル部圧損は Cheng-Todreas 式^[6]、グリッド部圧損は Rehme 式^[7]に基づいて計算した。

計算にあたっては、以下の仮定を用いた。

- ・炉心部流量割合は 0.93 とする。
- ・流量配分効果は 1.2 とする。
- ・グリッドは段数を 10、面積閉塞率を 0.25 とする。

パラメータサーベイの結果、燃料ピン配列ピッチは 8.9mm(炉心 1) から 9.28mm(炉心 3) となった。

以上の変更に基づき定めた炉心仕様(表 2.2.1、炉心 3)で核特性計算を行った。

平成 15 年度代表炉心(炉心 1)、被覆管 570°C 制限対応新腐食式炉心(炉心 3)および比較のために平成 15 年度に予備検討した平成 15 年度被覆管 570°C 制限対応炉心(炉心 2)の核特性計算結果を表 2.2.2 に示す。

炉心 1 と炉心 2 を比較すると、炉心 2 は燃料体積比が増加しているため核特性はやや向上した。

増殖比	: 1.15 → 1.17
燃焼反応度 [%Δk / kk']	: 0.90 → 0.79

一方、被覆管最高温度制限の変更および被覆管外面腐食量の増大を考慮して設計された炉心 3 は、炉心 1 に比べ、炉心が増大したにもかかわらず燃料体積比が減少しているため、増殖比、燃焼反応度が劣化した。

増殖比	: 1.15 → 1.10
燃焼反応度 [%Δk / kk']	: 0.90 → 1.59

これらの結果により、評価式の変更によって被覆管外面腐食量は設計に用いる同一温度では数倍に増大するが、被覆管最高温度制限の変更によって最終的な設計条件の変更による被覆管外面腐食量の増大は 2 倍程度に止まり、核特性への影響は設計対応できる範囲内であると考えられる。

(2) 随伴 FP 混入率および等価係数の変更

平成 16 年度ナトリウム冷却 MOX 炉心設計では、核計算における随伴 FP 混入率と等価係数として燃料再処理法を先進湿式法に対応してそれぞれ 0.2vol.% と 3.0 を設定した。窒化物燃料炉心の設計でもこれを踏襲して設計条件を設定した。

本項では(1)で設定した随伴 FP 混入率 2vol.%、等価係数 1.5 の被覆管 570°C 制限対応新腐食式炉心(炉心 3)(本節では「随伴 FP 混入率 2vol.% 炉心」と称す)に対し、随伴 FP 混入率および等価係数を変更(それぞれ 2vol.% → 0.2vol.%、1.5 → 3.0)した随伴 FP 混入率 0.2vol.% 炉心(炉心 4)について核特性計算を行った。

FP 混入率 0.2vol.% 炉心(炉心 4)の随伴 FP 混入率 2vol.% 炉心(炉心 3)との

仕様の比較を表 2.2.3 に、核特性計算結果の比較を表 2.2.4 に示す。随伴 FP 混入率の低下により、増殖比、燃焼反応度にやや改善が見られた。

増殖比	: 1.10 → 1.13
燃焼反応度 [%Δk / kk']	: 1.59 → 1.24

(3) 原子炉出力の変更

被覆管最高温度を 570°C とした平成 15 年度被覆管 570°C 制限対応炉心（炉心 2）の電気出力は 710MWe であったが、平成 16 年度設計では、被覆管外面最高温度 570°C の強制循環炉心の電気出力は 750MWe である。（1）で設定した原子炉出力 710MWe の被覆管 570°C 制限対応新腐食式炉心（炉心 3）（本節では「原子炉出力 710MWe 炉心」と称す）をベースに、電気出力を平成 16 年度設計条件に合わせて 710MWe から 750MWe に変更した原子炉出力 750MWe 炉心（炉心 5）について炉心仕様を設定した。設定にあたっては、原子炉熱出力は、変更により熱効率は変わらないとして 1875MWt から 1981MWt に変更した。また、（1）と同様の方法で燃料ピンバンドル部の圧損が等しくなるように燃料ピン配列ピッチを変更した。これにより、燃料ピン配列ピッチは 9.35mm となった。さらに、増殖比を 1.1 程度とするために軸方向ブランケットの長さを 35cm から 37cm に変更した。この原子炉出力 750MWe 炉心について炉心核特性計算を行った。

原子炉出力 750MWe 炉心（炉心 5）と原子炉出力 710MWe 炉心（炉心 3）の仕様の比較を表 2.2.5 に、核特性計算結果の比較を表 2.2.6 に示す。原子炉出力の変更による核特性への影響は小さく、両者の核特性はほぼ同じとなった。

(4) 燃料スミア密度の変更

平成 16 年度設計では、燃料健全性の観点から炉心部燃料の燃料スミア密度を 80%TD から 75%TD に、軸方向ブランケット部燃料の燃料スミア密度を 95%TD から 90%TD に変更した。

（3）で仕様を設定した原子炉出力 750MWe 炉心（炉心 5）（本節では「高燃料スミア密度炉心」と称す、炉心部燃料スミア密度 80%TD、軸方向ブランケット部燃料スミア密度 95%TD）をベースに、燃料スミア密度を平成 16 年度設計条件に変更した低燃料スミア密度炉心（炉心 6、炉心部燃料スミア密度 75%TD、軸方向ブランケット部燃料スミア密度 90%TD）について核特性計算を行った。

低燃料スミア密度炉心（炉心 6）の高燃料スミア密度炉心（炉心 5）との仕様の比較を表 2.2.7 に、核特性計算結果の比較を表 2.2.8 に示す。

燃料スミア密度を低下させることにより、核特性がやや劣化することが分かった。

増殖比	: 1.10 → 1.07
燃焼反応度 [%Δk / kk']	: 1.65 → 2.42

(5) FP ガス放出率の変更

平成 16 年度設計においては、FP ガス放出率に関する資料^[8]から、FP ガス放出率の設定を 50% から 60% に変更した。(4) で仕様を設定した低燃料スミア密度炉心(炉心 6) は FP ガス放出率が 50% である。FP ガス放出率の違いによる核特性への影響評価では、低燃料スミア密度炉心(炉心 6)(本節では「FP ガス放出率 50% 炉心」と称す) をベースに暫定的に FP ガス放出率が 80% の FP ガス放出率 80% 炉心(炉心 7) と FP ガス放出率が 100% の FP ガス放出率 100% 炉心(炉心 8) の仕様を設定した。

設定にあたっては、燃焼末期のガスプレナム内の圧力が一定になるよう、ガスプレナムの長さを変更した。これにより、ガスプレナム長さは、上部 410mm、下部 730mm (FP ガス放出率 50% 炉心) から、それぞれ上部 656mm、下部 1168mm (FP ガス放出率 80% 炉心)、上部 820mm、下部 1460mm (FP ガス放出率 100% 炉心) になった。この変更により、燃料要素長もガスプレナム長さの増加分だけ長くなつた。

また、(1) と同様の方法で燃料ピンバンドル部の圧損が等しくなるように燃料ピン配列ピッチを変更した。これにより、燃料ピン配列ピッチはそれぞれ、9.50mm (FP ガス放出率 80% 炉心)、9.58mm (FP ガス放出率 100% 炉心) となつた。設定した炉心について核特性計算を行つた。

それぞれの炉心の仕様の比較を表 2.2.9 に、核特性計算結果の比較を表 2.2.10 に示す。FP ガス放出率の増大とともに核特性が劣化する傾向がみられるが、核特性への影響は比較的小さい。

(6) まとめ

鉛ビスマス冷却中型炉に関して、平成 15 年度設計からの設計条件の変更による核特性への影響を評価した。本評価の結果、平成 16 年度の設計条件では、以下のことことが分かつた。

- ①評価式の変更によって被覆管外面腐食量は設計に用いる同一温度では数倍に増大するが、被覆管最高温度制限の変更によって最終的な設計条件の変更による被覆管外面腐食量の増大は 2 倍程度に止まり、核特性への影響は設計対応できる範囲内であると考えられる。
- ②随伴 FP 混入率の減少により増殖比、燃焼反応度にやや改善が見られる一方、燃料スミア密度の減少により核特性はやや劣化し、両者はほぼ相殺する見通しである。
- ③原子炉出力、FP ガス放出率の変更による核特性への影響は比較的小さい。

これらの点を総合的に判断し、平成 16 年度の設計条件において、FS での炉心性能目標を満たすための設計対応は可能であるとの見通しが得られた。

表 2.1.1 平成 16 年度設計の平成 15 年度設計条件からの変更点

変更項目	平成 15 年度	平成 16 年度
被覆管最高温度制限	650℃ (肉厚中心) (予備検討: 570℃ (外面))	570℃
被覆管腐食量評価	外面: 平成 15 年度設計式 (文献[4]) 内面: 腐食なし	外面: 平成 16 年度設計式 (文献[5]) 内面: 腐食なし
随伴 FP 混入率	2 vol.%	0.2 vol.%
原子炉出力	代表炉心*: 1875MWt, 750MWe (熱効率 40%) 予備検討炉心*: 1875MWt, 710MWe (熱効率 38%)*	1980MWe, 750MWe (熱効率 38%)
燃料スミア密度	炉心	80%TD
	軸ブラ	95%TD
FP ガス放出率	50%	60%

*代表炉心 : 被覆管肉厚中心最高温度 650℃ 以下

*予備検討炉心 : 被覆管外面最高温度 570℃ 以下

表 2.2.1 被覆管最高温度と腐食式の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉室化物燃料炉心の仕様の比較

被覆管最高温度 被覆管外面腐食評価式	設計条件	平成 15 年度代表炉心（炉心 1）		平成 15 年度被覆管 570°C 制限対応炉心（炉心 2）		被覆管 570°C 制限対応 新腐食式炉心（炉心 3）
		650°C	H15 評価式	570°C	H16 評価式	
原子炉熱出力	1875 MWt			1875 MWt		↓
電気出力	750 MWe			710 MWe		↓
炉心型式	均質 2 領域炉心			↓		↓
運転サイクル長さ	18 ヶ月 (547.5 日)			20.2 ヶ月 (614 日)		20.0 ヶ月 (608 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブロック)	7/- バッチ			6/- バッチ		↓
炉心高さ	70 cm			70 cm		↓
軸方向ブロック数 (上部/下部)	0 / 35 cm			0 / 35 cm		↓
炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体			288 / 246 / 534 体		↓
径方向ブロック本数	なし			なし		↓
制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	18 / 6 体			18 / 6 体		↓
径方向遮へい体数 (Pb-Bi 遮へい体)	186 体 (2 層)			186 体 (2 層)		↓
炉心等価直徑	441 cm			438 cm		458 cm
遮へい体外接円径	約 523 cm			約 520 cm		約 544 cm
被覆管形態 ¹⁾ (炉心/軸方向ブロック)	Pu-U 混合塗化物/U 塗化物			↓		↓
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼			↓		↓
燃料ビン外径	7.3 mm			7.16 mm		7.70 mm
被覆管内厚	0.42 mm			0.35 mm		0.62 mm
ガスプレナム長さ (上部/下部) ²⁾	410/730 mm			↓		↓
燃料要素長	2190 mm			↓		↓
集合体全長	3465 mm			↓		↓
燃料スミニア密度 (炉心/軸方向ブロック)	80 / 95 %TD			↓		↓
ボンド材	He			↓		↓
スペーサ形式	クリッド支持			↓		↓
燃料ビン配列ピッチ	8.9 mm			8.85 mm		9.28 mm
集合体当たり燃料ビン本数	331 本			↓		↓
ラッパ管外対面間距離	173.0 mm			172.0 mm		180.0 mm
ラッパ管肉厚	5.0 mm			↓		↓
集合体配列ピッチ	177.5 mm			176.5 mm		184.5 mm
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	39.76 / 21.68 / 38.56 %			40.21 / 19.91 / 39.88 %		36.80 / 25.77 / 37.43 %

¹⁾: 高速多重リサイクル TRU (Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Am244/245 = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/0.0) + FP (2vol%)²⁾: 端栓を含む、核特性計算では端栓もガスブレナム領域としてモデル化

表 2.2.2 被覆管最高温度と腐食式の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉塗化物燃料炉心の主要目的比較

設計条件		H15 代表炉心 (炉心 1)	平成 15 年度被覆管 570°C 制限対応炉心 (炉心 2)	被覆管 570°C 制限対応 新腐食式炉心 (炉心 3)
被覆管最高温度 被覆管外面腐食層評価式		650°C H15 評価式	570°C H16 評価式	570°C H16 評価式
原子炉出力		1875 MWt (750 MWe)	1875 MWt (710 MWe)	←
炉心型式		均質 2 領域炉心	←	←
運転サイクル長さ		18 ヶ月 (547.5 日)	20.2 ヶ月 (614.0 日)	20.0 ヶ月 (608.0 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向アラウト)		7/-バッチ	6/-バッチ	←
炉心高さ		70 cm	←	←
軸方向アラウト厚さ (上部/下部)		0/35 cm	←	←
炉心等面直徑		441 cm	438 cm	458 cm
遮へい体外接円径		約 523 cm	約 520 cm	約 544 cm
燃料形態		塗化物	←	←
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)		ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	←	←
燃料ビシン外径		7.3 mm	7.16 mm	7.70 mm
被覆管肉厚		0.42 mm	0.35 mm	0.62 mm
燃料ビン配列ピッチ		8.9 mm	8.85 mm	9.28 mm
燃料スマニア密度 (炉心/軸方向アラウト/径方向アラウト)		80 / 95 / - %TD	←	←
スペーサ形式		グリッド支持	←	←
集合体配列ピッチ		177.5 mm	176.5 mm	184.5 mm
集合体当たり燃料ビン本数		331 本	←	←
体積比 (燃料/構造材/冷却材)		39.76 / 21.68 / 38.56 %	40.21 / 19.91 / 39.88 %	36.80 / 25.77 / 37.43 %
Pu 密度 (内側/外側)*1		15.2 / 18.2 wt.%	14.7 / 17.8 wt.%	17.1 / 19.6 wt.%
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心)*2		157 / 105 GWd/t	151 / 101 GWd/t	150 / 100 GWd/t
燃焼反応度		0.90 % $\Delta k/kk'$	0.79 % $\Delta k/kk'$	1.59 % $\Delta k/kk'$
過殖比 (炉心/軸方向アラウト/径方向アラウト/全体)		0.88 / 0.27 / - / 1.15	0.90 / 0.27 / - / 1.17	0.84 / 0.26 / - / 1.10
最大線出力 (内側/外側) (ミスマッチファクタ考慮せず)		195 / 196 W/cm	198 / 198 W/cm	193 / 195 W/cm
炉心平均出力密度		165 W/cm ³	167 W/cm ³	153 W/cm ³
要装荷時 Puf 重量		5.8 t/GWe	5.9 t/GWe	6.7 t/GWe
特性		6.4 $\times 10^{23}$ n/cm ²	6.3 $\times 10^{23}$ n/cm ²	5.7 $\times 10^{23}$ n/cm ²
最大高速中性子照射量*3		-3.0 $\times 10^{-3}$	-3.0 $\times 10^{-3}$	-3.0 $\times 10^{-3}$
ドップラ係数 [dk/dT] (平衡末期)*4		4.7 \$^{*5}	4.9 \$^{*6}	4.3 \$^{*5}
ボイド反応度 (平衡末期)*4		48 年*6	42 年*6	78 年*6

*1 : Pu/t/m³ *2 : アラウト燃料を含む全体の平均燃焼度、*3 : E > 0.1 MeV、*4 : 集合体内非均質効果考慮、*5 : 実効遅発中性子割合 0.00342 (H15 代表炉心) 0.00332 (被覆管温度制限対応新腐食式炉心)、*6 : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃文・定検期間 39 日、炉外滞在中の Pu-241 前焼を考慮

表 2.2.3 随伴 FP 混入率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉炉心の仕様の比較

設計条件		随伴 FP 混入率 2vol.% 炉心 (炉心 3)	随伴 FP 混入率 0.2vol.% 炉心 (炉心 4)
隨伴 FP 浸入率、等価係数	隨伴 FP: 2vol.% 等価係数 1.5	隨伴 FP: 0.2vol.% 等価係数 3.0	←
被覆管最高温度	570°C		←
被覆管外面熱流量評価式	H16 評価式		←
原子炉熱出力	1875 MWt	←	
電気出力	710 MWe	←	
炉心型式	均質 2 領域炉心	←	
運転サイクル長さ	20.0 ケ月 (608 日)	←	
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向) ラグカット	6/- バッチ	←	
炉心高さ	70 cm	←	
軸方向アラウト (上部/下部)	0 / 35 cm	←	
炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体	←	
径方向アラウト体数	なし	←	
制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	18 / 6 体	←	
径方向遮へい体数 (Pb-Bi 遮へい体)	186 体 (2 層)	←	
炉心等価直徑	458 cm	←	
遮へい体外接円径	約 544 cm	←	
燃料形態 ¹ (炉心/軸方向アラウト)	Pu-U 混合窒化物/U 窒化物	←	
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	←	
燃料ビン外径	7.70 mm	←	
被覆管肉厚	0.62 mm	←	
ガスブレナム長さ (上部/下部) ²	410/730 mm	←	
燃料要素長	2190 mm	←	
集合体全長	3465 mm	• ←	
炉心燃料仕様	燃料スミニア密度 (炉心/軸方向アラウト)	80 / 95 %TD	←
ボンド材	He	←	
スペーサ形式	グリッド支持	←	
燃料ビン配列ピッチ	9.28 mm	←	
集合体当たり燃料ビン本数	331 本	←	
ラッパ管外対面間距離	180.0 mm	←	
ラッパ管肉厚	5.0 mm	←	
集合体配列ピッチ	184.5 mm	←	
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	36.80 / 25.77 / 37.43 %	←	

¹: 高速多重リサイクル TRU (Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Gm244/245 = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0/0.0) + FP (Nd-143 で代表)²: 端栓を含む、核特性計算では端栓もガスブレナム領域としてモデル化
説明文書 : 変更条件

表 2.2.4 随伴 FP 混入率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉塗化物燃料炉心の主要目との比較

試験条件		随伴 FP 混入率 2vol.% 炉心 (炉心 3)	随伴 FP 混入率 0.2vol.% 炉心 (炉心 4)
注入率、等価係数		随伴 FP: 2vol.%、等価係数 1.5	随伴 FP: 0.2vol.%、等価係数 3.0
原子炉出力		1875 MWe (710 MWe)	↓
炉心型式		均質 2 領域炉心	↓
運転サイクル長さ		20.0 ヶ月 (608.0 日)	↓
燃料交換ピッチ数 (炉心/径方向) ランケット		6/-バッチ	↓
炉心高さ		70 cm	↓
軸方向ランケット厚さ (上部/下部)		0/35 cm	↓
炉心等価直徑		458 cm	↓
遮へい体外接円径		約 544 cm	↓
燃料形態	■	塗化物	↓
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)		ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	↓
燃料ビン外径		7.70 mm	↓
被覆管内厚		0.62 mm	↓
炉心		0.62 mm	↓
燃料ビン配列ピッチ		9.28 mm	↓
燃料スミニア密度 (炉心/軸方向) ランケット/径方向) ランケット		80 / 95/ - %TD	↓
スペーサ形式		グリッド支持	↓
集合体配列ピッチ		184.5 mm	↓
集合体当たり燃料ビン本数		331 本	↓
体積比 (燃料/構造材/冷却材)		36.80 / 25.77 / 37.43 %	↓
Pu 密度 (内側/外側)*1		17.1 / 19.6 wt.%	16.2 / 18.9 wt.%
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心)*2		150 / 100 GWe/t	148 / 98 GWe/t
燃焼反応度		1.59 %Δk/k'	1.24 %Δk/k'
炉心		増殖比 (炉心/軸方向) ランケット/径方向) ランケット/全体	0.84 / 0.26 / - / 1.10
主要特徴		最大線出力 (内側/外側) (ミスマッチファクタ考慮せず)	193 / 195 W/cm
		炉心平均出力密度	153 W/cm ³
		装荷時 PuF 重量	6.7 t/GWe
		最大高速中性子照射量*3	5.7 × 10 ²³ n/cm ²
		ドップラ係数 [Tck/dt] (平衡末期)*4	-3.0 × 10 ⁻³
		ポイド反応度 (平衡末期)*4	4.3 \$ ⁵
		複合システム倍増時間	78 年*6
			60 年*6

*1 : Pu/Hm、*2 : ランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3 : E > 0.1 MeV、*4 : 集合体内非均質効果考慮、

*5 : 実効運行中性子割合 0.00332 (随伴 FP 混入率 2vol.% 炉心)、0.00335 (随伴 FP 混入率 0.2vol.% 炉心)、

*6 : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃文・定検期間 39 日、炉外滞在中の Pu-241 崩壊を考慮

■ : 変更条件

表 2.2.5 原子炉出力の相異なる鉛ビスマス強制循環冷却炉壺心の仕様の比較

	設計条件	原子炉出力 710MWe 炉心 (炉心 3)	原子炉出力 750MWe 炉心 (炉心 5)
被覆管最高温度		570°C	↓
被覆管外面熱食量評価式	H16 評価式	↓	
原子炉熱出力	1875 MWe	1981 MWe	
電気出力	710 MWe	750 MWe	
炉心型式		均質 2 領域炉心	
運転サイクル長さ	20.0 ケ月 (608 日)	18.9 ケ月 (574.9 日)	
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向アラウト)	6/- バッチ	↓	
炉心高さ	70 cm	↓	
軸方向アラウト (上部/下部)	0 / 35 cm	0 / 37 cm	
炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体	↓	
径方向アラウト本数	なし	↓	
制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	18 / 6 体	↓	
径方向遮へい体数 (Pb-Bi 遮へい体)	186 体 (2 層)	↓	
炉心等価直徑	458 cm	461 cm	
遮へい体外接円径	約 544 cm	約 548 cm	
燃料形態 ¹ (炉心/軸方向アラウト)	Pu-U 混合塗化物/U 塗化物	↓	
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	↓	
燃料ビン外径	7.70 mm	↓	
被覆管肉厚	0.62 mm	↓	
ガスブレナム長さ (上部/下部) ²	410/730 mm	↓	
燃料要素長	2190 mm	2210 mm	
集合体全長	3465 mm	3485 mm	
炉心燃料仕様			
燃料スミニア密度 (炉心/軸方向アラウト)	80 / 95 kTD	↓	
ボンド材	He	↓	
スペーサ形式	グリット支持	↓	
燃料ビン配列ピッチ	9.28 mm	9.35 mm	
集合体当たり燃料ビン本数	331 本	↓	
ラッパ管外対面間距離	180.0 mm	181.2 mm	
ラッパ管肉厚	5.0 mm	↓	
集合体配列ピッチ	184.5 mm	185.7 mm	
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	36.80 / 25.77 / 37.43 %	36.33 / 25.50 / 38.17 %	

¹: 高速多量リサイクル TRU (Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Cm244/245 = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0/0.0) + FP (2vol%)²: 端栓を含む、核特性計算では端栓もガスブレナム領域としてモデル化

※ : 変条件

表 2.2.6 原子炉出力の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉塗化物燃料炉心の主要目的の比較

設計条件		原子炉出力 710MWe 炉心 (炉心 3)	原子炉出力 750MWe 炉心 (炉心 5)
炉心型式		均質 2 領域炉心 1375 MWt / 710 MWe ←	198 MWt / 750 MWe ←
基本仕様	運転サイクル長さ	20.0 ケ月 (608.0 日) 6-/バッチ	18.9 ケ月 (574.9 日) ←
炉心構造	燃料交換バッチ数 (炉心/径方向) ランケット	70 cm	70 cm
炉心等価直徑	軸方向ランケット厚さ (上部/下部)	0/35 cm 458 cm	0 / 37 cm 461 cm
爐へい体外接円径	爐へい体外接円径	約 544 cm	約 548 cm
燃料形態	被覆管肉厚	墨化物 ODS 鋼/PNC+MS 鋼	墨化物 ODS 鋼/PNC+MS 鋼
炉心燃料	燃料ビン外径	7.70 mm	7.70 mm
燃料	被覆管肉厚	0.62 mm	0.62 mm
燃料ビン配列ピッチ	燃料スミア密度 (炉心/軸方向) ランケット/径方向) ランケット	9.28 mm 80 / 95/ - %TD	9.35 mm 80 / 95/ - %TD
仕様	スペーサ形式	グリッド支持 184.5 mm	グリッド支持 185.7 mm
集合体	集合体当たり燃料ビン本数	331 本	331 本
体積比	(燃料/導造材/冷却材)	36.80 / 25.77 / 37.43 %	36.33 / 25.50 / 38.17 %
Pu	富化度 (内側/外側) ^{*1}	17.1 / 19.6 wt. %	17.3 / 19.7 wt. %
	取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心) ^{*2}	150 / 100 GWd/t	150 / 97 GWd/t
燃焼反応度	増殖比 (炉心/軸方向) ランケット/径方向) ランケット/全体)	1.59 % Δk/k'	1.65 % Δk/k'
炉心特性	最大線出力 (内側/外側) (ミスマッチファクタ考慮せず)	0.84 / 0.26 / - / 1.10	0.84 / 0.26 / - / 1.10
主特	炉心平均出力密度	193 / 195 W/cm ³	203 / 206 W/cm ³
装荷時 PuF 重量		153 W/cm ³	160 W/cm ³
最大高遠中性子照射量 ^{*3}		6.7 t/gWe	6.4 t/gWe
ドップラ係数 [Tdk/dT] (平衡末期) ^{*4}		5.7 × 10 ⁻³ n/cm ²	5.7 × 10 ⁻³ n/cm ²
ボイド反応度 (平衡末期) ^{*4}		-3.0 × 10 ⁻³	-3.0 × 10 ⁻³
複合システム倍増時間		4.3 \$ ^{*5}	4.4 \$ ^{*5}
		78 年 ^{*6}	75 年 ^{*6}

*1 : Pu/Hm、*2 : ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3 : E > 0.1 MeV、*4 : 集合体内非均質効果考慮、
*5 : 実効遡効中性子割合 0.00332 (原子炉出力 710MWe 炉心)、0.00332 (原子炉出力 750MWe 炉心)、

*6 : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃支・定検期間 39 日、炉外滞在中の Pu-241 崩壊を考慮

■ : 變更条件

表 2.2.7 燃料スミア密度の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉塗化物燃料炉心の仕様の比較

	設計条件	高燃料スミア密度炉心（炉心 5）	低燃料スミア密度炉心（炉心 6）
被覆管最高温度		570°C	↓
被覆管外面腐食量評価式		H16 評価式	↓
原子炉熱出力	1981 MWt	1981 MWt	↓
電気出力	750 MWe	750 MWe	↓
炉心型式	均質 2 領域炉心	↓	↓
運転サイクル長さ	18.9 ケ月 (574.9 日)	21.3 ケ月 (646.5 日)	
燃料交換バッチ数（炉心/径方向ランケット）	6/- バッチ	5/- バッチ	
炉心高さ	70 cm	70 cm	↓
軸方向アシケット（上部/下部）	0 / 37 cm	0 / 37 cm	↓
炉心燃料集合体数（内側/外側/合計）	288 / 246 / 534 体	288 / 246 / 534 体	↓
径方向アシケット体数	なし	なし	↓
制御棒本数（主炉停止系/後備炉停止系）	18 / 6 体	18 / 6 体	↓
径方向遮へい体数（Pb-Bi 遮へい体）	186 体 (2 層)	186 体 (2 層)	↓
炉心等価直徑	461 cm	461 cm	↓
遮へい体外接円径	約 548 cm	約 548 cm	↓
燃料形態*1（炉心/軸方向アシケット）	Pu-U 混合塗化物/ U 塗化物	Pu-U 混合塗化物/ U 塗化物	↓
炉心材料（被覆管/ラッパ管）	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	↓
燃料ビン外径	7.70 mm	7.70 mm	↓
被覆管肉厚	0.62 mm	0.62 mm	↓
ガスブレナム長さ（上部/下部）*2	410/730 mm	410/730 mm	↓
燃料要素長	2210 mm	2210 mm	↓
集合体全長	3485 mm	3485 mm	↓
燃料スミア密度（炉心/軸方向アシケット）	80 / 95 STD	80 / 95 STD	75 / 90 STD
ボンド材	He	He	↓
スペーサ形式	グリッド支持	グリッド支持	↓
燃料ビン配列ピッチ	9.35 mm	9.35 mm	↓
集合体当たり燃料ビン本数	331 本	331 本	↓
ラッパ管外対面間距離	181.2 mm	181.2 mm	↓
ラッパ管肉厚	5.0 mm	5.0 mm	↓
集合体配列ピッチ	185.7 mm	185.7 mm	↓
体積比（燃料/導造材/冷却材）	36.33 / 25.50 / 38.17 %	36.33 / 25.50 / 38.17 %	↓

*1：高速多層リサイクルTRU (Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Cm244/245 = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0/0.0) + FP (2461%)

*2：端栓を含む、核特性計算では端栓もガスプレナム領域としてモデル化

■：変更条件

表 2.2.8 燃料スマニア密度の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物燃料炉心の主要目的比較

設計条件		高燃料スマニア密度炉心(炉心 5)	低燃料スマニア密度炉心(炉心 6)
原子炉出力		1981 MWt (750 MWe)	←
炉心型式		均質 2 領域炉心	←
運転サイクル長さ		18.9ヶ月 (574.9日)	21.3ヶ月 (646.5日)
燃料交換バッチ数(炉心/径方向)ラックト		6/-バッチ	5/-バッチ
炉心高さ		70 cm	←
軸方向ラックト厚さ(上部/下部)		0 / 37 cm	←
炉心等価直徑		461 cm	←
遮へい体外接円径		約 548 cm	←
燃料形態		窒化物	←
炉心材料(被覆管/ラッパ管)		ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	←
燃料ビン外径		7.70 mm	←
被覆管肉厚		0.62 mm	←
燃料ビン配列ピッチ		9.35 mm	←
燃料スマニア密度(炉心/軸方向ラックト/径方向ラックト)		80 / 95 / - %ID	75 / 90 / - %ID
スペーサ形式		グリッド支持	←
集合体配列ピッチ		185.7 mm	←
集合体当たり燃料ビン本数		331 本	←
体積比(燃料/構造材/冷却材)		36.33 / 25.50 / 38.17 %	←
Pu 密度(内側/外側)*1		17.3 / 19.7 wt. %	18.5 / 21.1 wt. %
取出平均燃焼度(炉心部/全炉心)*2		150 / 97 GWd/t	150 / 97 GWd/t
燃焼反応度		1.65 % Δk/kK'	2.42 % Δk/kK'
増殖比(炉心/軸方向ラックト/径方向ラックト/全体)		0.84 / 0.26 / - / 1.10	0.80 / 0.26 / - / 1.07
最大総出力(内側/外側)(ミスマッチファクタ考慮せず)		203 / 206 W/cm ²	200 / 206 W/cm ²
炉心平均出力密度		160 W/cm ³	160 W/cm ³
装荷時 Puf 重量		6.4 t/GWe	6.4 t/GWe
炉心最大遠中性子照射量*3		5.7 × 10 ²³ n/cm ²	5.5 × 10 ²³ n/cm ²
ドップラ係数[T dk/dT](平衡末期)*4		-3.0 × 10 ⁻³	-2.8 × 10 ⁻³
ボイド反応度(平衡末期)*4		4.4 \$ ⁵	4.3 \$ ⁵
複合システム倍増時間		75 年*6	117 年*6

*1 : Pu/HM、*2 : ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3 : E > 0.1 MeV、*4 : 集合体内非均質効果考慮、

*5 : 美効運発中性子割合 0.00332 (高燃料スマニア密度炉心)、0.00328 (低燃料スマニア密度炉心)、

*6 : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 39 日、炉外滞在中の Pu-241崩壊を考慮

■ : 変更条件

表 2.2.9 FP ガス放出率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉室化物燃料炉心の仕様の比較

	設計条件	FP ガス放出率 50% 炉心 (炉心 6)	FP ガス放出率 80% 炉心 (炉心 7)	FP ガス放出率 100% 炉心 (炉心 8)
被覆管最高温度	510°C	510°C	510°C	510°C
被覆管外面熱量評価式	H16 評価式	H16 評価式	H16 評価式	H16 評価式
原子炉熱出力	1981 MWt	1981 MWt	1981 MWt	1981 MWt
電気出力	750 MWe	750 MWe	750 MWe	750 MWe
炉心型式	均質 2 領域炉心	均質 2 領域炉心	均質 2 領域炉心	均質 2 領域炉心
運転サイクル長さ	21.3 ヶ月 (646.5 日)	21.3 ヶ月 (647 日)	21.3 ヶ月 (647 日)	21.3 ヶ月 (647 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向アランクト)	5/- バッチ	5/- バッチ	5/- バッチ	5/- バッチ
炉心高さ	70 cm	70 cm	70 cm	70 cm
軸方向アランクト (上部/下部)	0 / 37 cm			
炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体			
径方向アランクト本数	なし	なし	なし	なし
制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	18 / 6 体			
径方向遮へい体数 (Pb-Bi 遮へい体)	186 体 (2 層)			
炉心等価直径	461 cm	467.5 cm	467.5 cm	471 cm
遮へい体外接円径	約 548 cm	約 555 cm	約 555 cm	約 559 cm
燃料形態*1 (炉心/軸方向アランクト)	Pu-U 混合塗化物/ U 塗化物			
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
燃料ピント外径	7.70 mm	7.70 mm	7.70 mm	7.70 mm
被覆管肉厚	0.62 mm	0.62 mm	0.62 mm	0.62 mm
ガスブレナム長さ (上部/下部)*2	410/730 mm	410/730 mm	410/730 mm	410/730 mm
燃料要素長	2210 mm	2210 mm	2210 mm	2210 mm
集合体全長	3485 mm	3485 mm	3485 mm	3485 mm
燃料スミニア密度 (炉心/軸方向アランクト)	75 / 90 %TD			
ボンド材	He	He	He	He
スペーサー形式	グリッド支持	グリッド支持	グリッド支持	グリッド支持
燃料ピント配列ピッチ	9.35 mm	9.50 mm	9.50 mm	9.58 mm
集合体当たり燃料ピント本数	331 本	331 本	331 本	331 本
ラッパ管外対面間距離	181.2 mm	183.8 mm	183.8 mm	185.2 mm
ラッパ管肉厚	5.0 mm	5.0 mm	5.0 mm	5.0 mm
集合体配列ピッチ	185.7 mm	188.3 mm	188.3 mm	189.7 mm
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	36.33 / 25.50 / 38.17 %	35.33 / 24.95 / 39.72 %	34.81 / 24.66 / 40.53 %	34.81 / 24.66 / 40.53 %

*1：高速多重量リサイクルTRU (Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Cm244/245 = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0/0.0) + FP(2vo%)

*2：端栓を含む、核特性計算では端栓もガスプレナム領域としてモデル化

■：変更条件

表 2.2.10 FP ガス放出率の相異による鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物燃料炉心の主要目の比較

炉心外観 設計条件	FP ガス放出率 50%炉心 (炉心 6)		FP ガス放出率 80%炉心 (炉心 7)		FP ガス放出率 100%炉心 (炉心 8)	
	50%	80%	50%	80%	50%	80%
原子炉出力	1981 MWe (750 MWe)		1981 MWe (750 MWe)		1981 MWe (750 MWe)	
炉心型式	均質 2 領域炉心		均質 2 領域炉心		均質 2 領域炉心	
運転サイクル長さ	21.3 ヶ月 (646.5 日)		21.3 ヶ月 (647 日)		21.3 ヶ月 (647 日)	
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向) ラックト	5-/バッチ		5-/バッチ		5-/バッチ	
炉心高さ	70 cm		70 cm		70 cm	
軸方向ブランケット厚さ (上部/下部)	0 / 37 cm		0 / 37 cm		0 / 37 cm	
ガスプレナム長さ (上部/下部)	410/730 mm		410/730 mm		410/730 mm	
炉心等価直徑	461 cm		467.5 cm		467.5 cm	
遮へい体外接円径	約 548 cm		約 555 cm		約 555 cm	
燃料形態	窒化物		窒化物		窒化物	
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼		ODS 鋼/PNC-FMS 鋼		ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	
燃料ビン外径	7.70 mm		7.70 mm		7.70 mm	
被覆管肉厚	0.62 mm		0.62 mm		0.62 mm	
燃料ビン配列ピッチ	9.35 mm		9.50 mm		9.58 mm	
燃料スミア密度 (炉心/軸方向) ブランケット/径方向ブランケット	75 / 90 / - %TD		75 / 90 / - %TD		75 / 90 / - %TD	
スペーサ形式	グリッド支持		グリッド支持		グリッド支持	
集合体配列ピッチ	185.7 mm		188.3 mm		189.7 mm	
集合体当たり燃料ビン本数	331 本		331 本		331 本	
体積比 (燃料/構造材/余却材)	36.33 / 25.50 / 38.17 %		35.33 / 24.95 / 39.72 %		34.81 / 24.66 / 40.53 %	
Pu 富化度 (内側/外側)*1	18.5 / 21.1 wt. %		18.9 / 21.4 wt. %		19.1 / 21.5 wt. %	
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心)*2	150 / 97 GWe/t		150 / 97 GWe/t		150 / 97 GWe/t	
燃焼反応度	2.42 %Δk/kk'		2.52 %Δk/kk'		2.58 %Δk/kk'	
増殖比 (炉心/軸方向) ブランケット/径方向ブランケット/全体	0.80 / 0.26 / - / 1.07		0.79 / 0.26 / - / 1.06		0.79 / 0.26 / - / 1.05	
最大輸出力 (内側/外側) (ミスマッチファクタ考慮せず)	200 / 206 W/cm		200 / 205 W/cm		198 / 204 W/cm	
炉心平均出力密度	160 W/cm ³		155 W/cm ³		153 W/cm ³	
装荷時 Pu 重量	6.4 t/GWe		6.6 t/GWe		6.6 t/GWe	
最大導速中性子照射量*3	5.5 × 10 ²³ n/cm ²		5.4 × 10 ²³ n/cm ²		5.3 × 10 ²³ n/cm ²	
ドップラ係数 [Tdk/dT] (平衡末期)*4	-2.8 × 10 ⁻³		-2.8 × 10 ⁻³		-2.7 × 10 ⁻³	
ボイド反応度 (平衡末期)*4	4.3 \$*5		4.5 \$*5		4.7 \$*5	
複合システム倍増時間	117 年*6		137 年*6		150 年*6	

■ : 変更条件

*1: Pu/tW、*2: ブランケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3: E > 0.1 MeV、*4: 集合体内非均質効果考慮、

*5: 実効運発中性子割合 0.00328 (FP ガス放出率 50%炉心)、0.00327 (FP ガス放出率 80%炉心)、0.00326 (FP ガス放出率 100%炉心)、

*6: 燃料炉外滞在期間 5 年、燃文・定検期間 39 日、炉外滞在中の Pu-241 崩壊を考慮

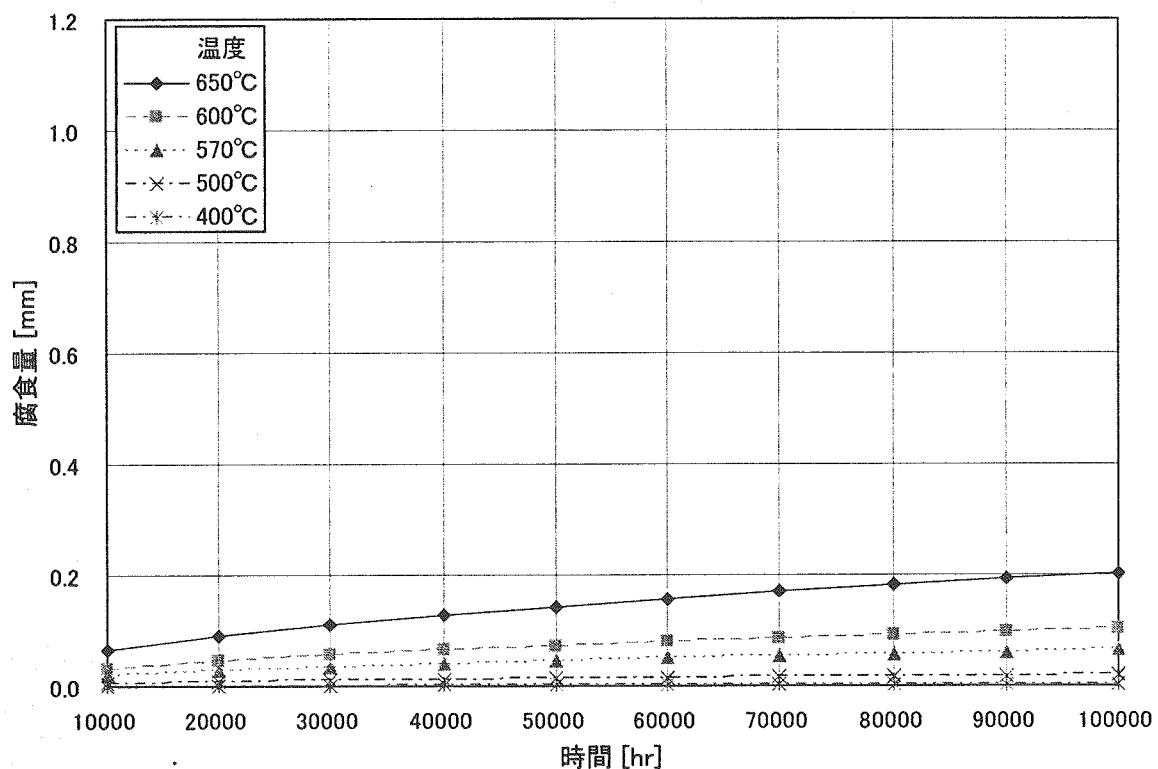


図 2.2.1(a) 平成 15 年度評価式による被覆管腐食量の時間依存性

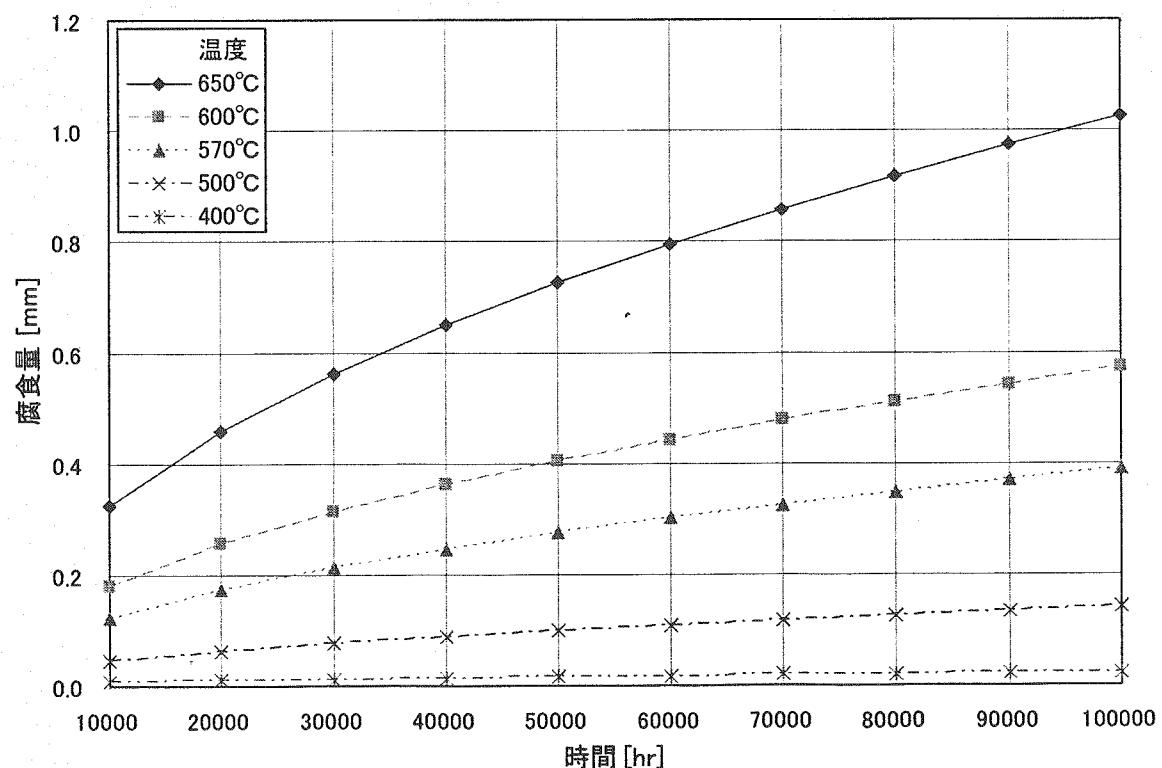


図 2.2.1(b) 平成 16 年度評価式による被覆管腐食量の時間依存性

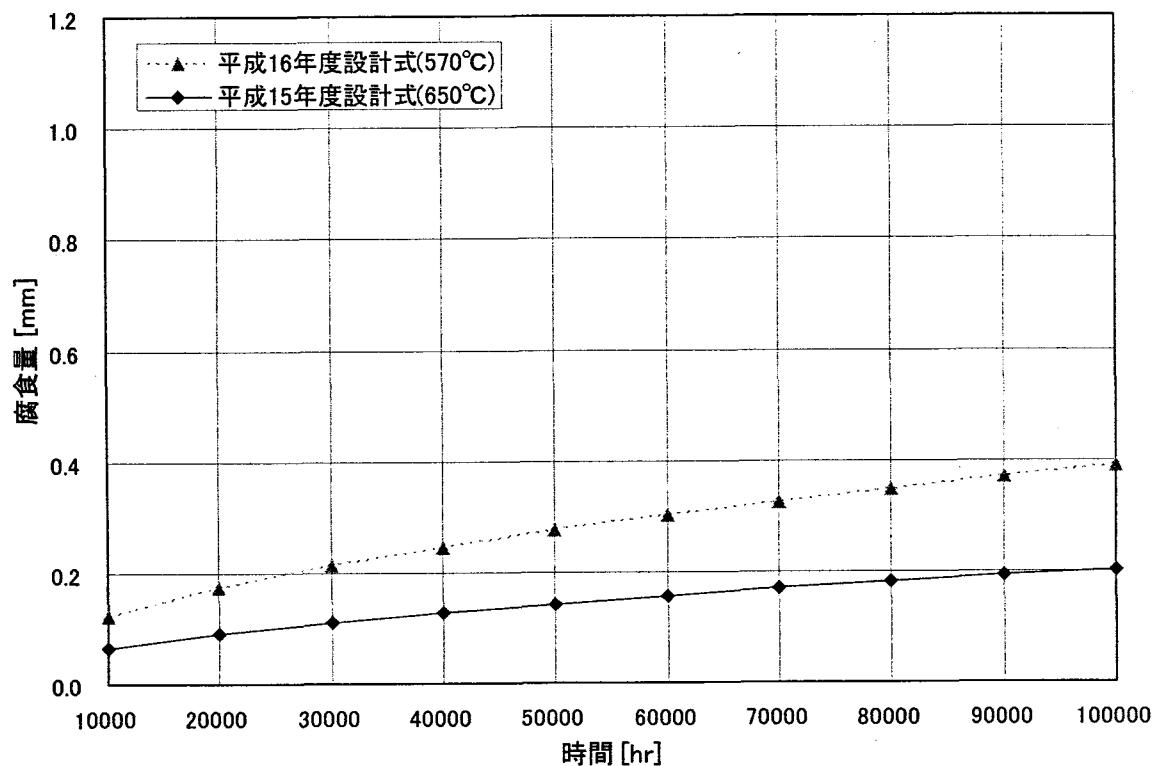


図 2.2.2 被覆管腐食量評価式の相異による被覆管最高温度での被覆管腐食量の比較

3. 炉心設計

3. 1 炉心仕様選定のためのサーベイ計算

(1) 検討条件

強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉を対象として、平成 15 年度に検討した窒化物燃料を用いた高燃焼度炉心（取出平均燃焼度～150GWd/t）を参考して 2.1 節で述べた設計条件の下で炉心設計を行った。

上記の基本的な設計条件の下に、装荷時核分裂性 Pu 重量とボイド反応度の低減を指向した炉心設計を行った。

炉心設計における基本的な検討条件を以下に列挙する。

① プラント並びに炉心基本仕様

- ・原子炉熱出力 : 1980MWt (電気出力 750MWe)
- ・炉心出口温度 : 445°C
- ・炉心入口温度 : 285°C
- ・炉心出入口温度差 : 160°C
- ・1 次系流量 : 305,200t/h (84,778kg/s)
- ・燃料 : Pu-U 混合窒化物燃料
- ・燃料スミア密度 : 75% (炉心), 90% (軸方向ブランケット)
- ・被覆管材料 : ODS フェライト鋼
- ・ラッパ管材料 : PNC-FMS 鋼
- ・TRU 組成 : MOX 燃料高速炉多重リサイクル組成
- ・集合体仕様 : ラッパ管付き
- ・制御棒配置 : 切り込み付きコラム型 UIS 対応

② 炉心性能目標

- ・炉心部取出平均燃焼度 : 150GWd/t 程度
- ・運転サイクル長さ : 18 ヶ月以上
- ・増殖比 : 1.1 程度 (FBR 導入期), 1.03 程度 (FBR 平衡期)

③ 制限条件

- ・被覆管最高温度 : 外面で 570°C 以下
- ・バンドル部圧力損失 : 0.23MPa 程度以下
- ・燃料バンドル部流速 : 2m/s 以下
- ・遮へい体外接円径 : 5.5m 程度以下 (目安)
- ・炉心部ボイド反応度 : 10\$ 程度以下
- ・装荷時核分裂性 Pu 重量 : 7t/GWe 程度以下 (目安)
- ・最大高速中性子照射量 : $5 \times 10^{23} n/cm^2$ ($E > 0.1 MeV$) 以下 (目安)

ここで、最大高速中性子照射量については、将来、制限目安値を超える照射量に

耐え得る材料の開発が期待されるとして、炉心設計に当たってこの制限を除外している。

④被覆管外面腐食量評価式^[5]

$$\varphi = At^{1/2} \quad \cdots \quad (3.1.1)$$

$$A = A_0 \exp(-Q/RT) \quad \cdots \quad (3.1.2)$$

φ : 腐食量 (酸化皮膜厚) (μm)

t : 時間 (hr)

A_0 : 定数 ($= 8.906 \times 10^4 (\mu\text{m}/\sqrt{\text{hr}})$)

Q : 見かけの活性化工エネルギー ($= 1.8736 \times 10^4 (\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1})$)

R : 気体定数 ($= 1.986 (\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1}\text{K}^{-1})$)

T : 温度 (K)

(2) 検討内容

平成 15 年度の強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉の炉心仕様をベースに、3.2.1 項で述べた検討条件に基づき、制限条件を満たしつつ炉心性能目標を達成する炉心仕様をサーベイした。

(i) 炉心特性のサーベイ

平成 15 年度の強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉の主な炉心仕様は、以下の通りである。

・燃料ピン外径	: 7.3mm
・被覆管肉厚	: 0.42mm
・P/D 比	: 1.22
・集合体配列ピッチ	: 177.5mm (ラッパ管間ギャップ : 4.5mm)
・炉心高さ	: 70cm
・軸方向ブランケット厚さ(上部/下部)	: 0 / 35cm
・炉心燃料スミア密度	: 80%
・軸方向ブランケット燃料スミア密度	: 95%

この仕様に基づく炉心特性を炉心仕様とあわせて表 3.1.1 に示した。

なお、この炉心仕様のサーベイにおいては、随伴 FP 割合を燃料体積の 2.0vol% とする条件で解析している。

今年度の検討の主要なポイントである被覆管外面腐食量評価式の見直しに伴い、燃料被覆管の肉厚を設定する必要がある。被覆管肉厚の設定においては、寿命末期の被覆管内圧および周方向応力に対して以下の目安を設定し、それを超えないように配慮した。

- ・被覆管内圧の上限 : 10MPa
- ・被覆管周方向応力の上限 : 120MPa

被覆管内圧および周方向応力の概算にあたっては、以下を考慮した。

- ・ピークピン出力に対し出力分布誤差として 5%を考慮
- ・被覆管肉厚製作公差分として 0.03mm を考慮
- ・揮発性ガス FP 割合として 0.27 を考慮
- ・窒化物燃料の FP 放出割合として 60%を考慮
- ・ガスプレナム有効体積として、長さ×断面積で求まる体積に 0.9 を乗じる。
- ・出力漸減効果は無視
- ・プレナム温度については、下部プレナムは入口温度、上部プレナムは 570℃として、寿命中一定とする

また、寿命末期における被覆管肉厚が、0.2mm 以上を確保するように肉厚を設定する。

上記の条件と、3.2.1 項に記載した基本仕様ならびに制限条件を勘案して、以下のケースについて炉心特性を評価した。各ケースの炉心仕様については表 3.1.1 に示すが、各ケースの概要は以下の通りである。

Case-1：平成 15 年度炉心の炉心構成、ピン径(7.3mm)、炉心高さ(70cm)を同じとし、被覆管肉厚を寿命末期の内圧および応力の制限目安を考慮して設定。軸方向ブランケットは下部のみとし増殖比が 1.10 となるように厚さを調整。

Case-2：Case-1 に対して、炉心部取出平均燃焼度が 150GWd/t となるように集合体数を増加（48 体）させた上で、増殖比が 1.10 となるように軸方向ブランケット厚さを調整。

Case-3：Case-1 に対して、炉心部取出平均燃焼度が 150GWd/t となるように炉心高さを増加（76cm）させた上で、増殖比が 1.10 となるように軸方向ブランケット厚さを調整。

Case-4：燃料体積比増大を狙って Case-1 より太径ピン側を指向したケース。遮へい体外接円径の制限に配慮して炉心構成を設定し、運転サイクル日数 548 日（18 ヶ月）×6 バッチで炉心部取出平均燃焼度が 150GWd/t 程度となるように被覆管外径を設定(8.03mm)。被覆管肉厚は Case1～3 と同じとする。

Case-5：Case-4 に対して、炉心構成は同じのまま被覆管外径を 8.5mm まで太径化したケース。炉心部取出平均燃焼度が 150GWd/t 程度となるように、運転サイクル日数 548 日（18 ヶ月）×7 バッチとし、下部軸方向ブランケットのみで増殖比が 1.10 となるよう軸方向ブランケット厚さを調整。

各ケースの炉心構成図を、図 3.1.1(a)～(d)に示す。

(ii) 解析結果

各ケースの解析結果をまとめて表 3.1.1 に示す。結果の概要は以下の通りである。

- ①Case-1 では、平成 15 年度と比べ、被覆管肉厚が増加していること、燃料スミア密度が低下していることなどから Pu 富化度が増大し、燃焼反応度は $2.21\%\Delta k/kk'$ となる。また、増殖比も低下し、1.10 を確保するためには下部軸方向ブランケット厚さとして 65cm が必要となる。炉心部取出平均燃焼度は、548 日×6 バッチ（平成 15 年度は 7 バッチ）としても 162GWd/t にまで達する。
- ②Case-1 に対し燃料集合体数を 48 体増やした Case-2 では、燃焼反応度は $1.79\%\Delta k/kk'$ まで低下する。また、下部軸方向ブランケット厚さも 44cm で増殖比 1.10 が確保される。
- ③Case-1 に対し炉心高さを 76cm とした Case-3 では、燃焼反応度はさらに僅かに低下し $1.59\%\Delta k/kk'$ となる。また、下部軸方向ブランケット厚さも 43cm で増殖比 1.10 が確保される。
- ④Case-4 は、Case-1 に比べると、ピン径を 8mm 程度まで太径化し燃料集合体数を削減して炉心部取出平均燃焼度を 150GWd/t としたことに相当する。燃焼反応度は、Case-3 とほぼ同等の $1.57\%\Delta k/kk'$ である。下部軸方向ブランケット厚さは 35cm で増殖比 1.10 が確保される。
- ⑤Case-5 は、Case-4 に対し、さらに燃料ピン径を 8.5mm まで太径化し、運転サイクル日数 18 ケ月×7 バッチとして燃焼反応度の低減を意図したものである。燃焼反応度は、 $1.11\%\Delta k/kk'$ まで低減した。しかし、装荷時核分裂性 Pu 重量は Case-4 に比べ増大する結果となった。

表 3.1.2 に、冷却材流速、バンドル圧損、被覆管内圧および周方向応力などの推定値を含めて、各サーベイケースの炉心主要特性をまとめた。

(iii) まとめ

新しい被覆管外面腐食量評価式を基に燃料仕様を検討し、炉心特性のサーベイを行った。被覆管外面腐食量が増大しており被覆管肉厚を増加させる必要があること、および燃料スミア密度が低下していることなどから、従来の炉心に比べて炉心性能は劣化する。

炉心設計では、運転サイクル長さ、炉心部取出平均燃焼度、全炉心平均燃焼度、増殖比の炉心性能目標を満たしつつ、安全設計との関係から、極力、燃焼反応度およびボイド反応度（冷却材温度係数）を低減させる必要がある。

今回サーベイしたケースのうちでは、ピン径 8.5mm のケース（Case-5）の燃焼反応度が $1\%\Delta k/kk'$ 程度の値となっており最も小さく抑えられているが、炉心径は相対的に大きい。

被覆管外径が 7.3～8mm 程度の範囲では、燃焼反応度は 1.5～1.6%Δk/kk' 程度まで増加するが、被覆管外径 8.5mm のものに比べ炉心径は小さい。

ここでのサーベイ範囲で、冷却材温度係数について明確な優劣をつけることは困難と考えられるが、例えば、燃焼反応度の大きさがほぼ同等な Case-3(被覆管外径 7.3mm, 炉心高さ 76cm) と Case-4 (被覆管外径 8.03mm, 炉心高さ 70cm) を比べると、炉心径ならびに冷却材体積比がほとんど変わらないため、冷却材温度係数は、炉心高さの低い Case-4 の方が僅かに小さくなるものと推測される。

また、Case-3, Case-4, Case-5 の装荷時核分裂性 Pu 重量を比べると、Case-4 が最も少ない。

(i) の検討条件に記載したように、「装荷時核分裂性 Pu 重量と冷却材ボイド反応度(冷却材温度係数)ができるだけ低減した炉心設計を指向する」立場から、設計炉心として、被覆管外径 8mm 程度、炉心高さ 70cm の炉心仕様を選定することが妥当と考えられる。

表 3.1.1 炉心主要目および炉心主要核特性

	項目	単位	基準 (H15 年度炉心)	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
基本条件・炉心構成	原子炉熱出力	MWt	1875	1980	←	←	←	←
	電気出力	MWe	750	750	←	←	←	←
	炉心出口温度	°C	520	445	←	←	←	←
	炉心入口温度	°C	352	285	←	←	←	←
	炉心出入口温度差	°C	168	160	←	←	←	←
	運転サイクル長さ	日	547.5	548	←	←	←	←
	燃料交換バッチ数	—	7	6	←	←	←	7
	炉心高さ	cm	70	70	←	76	70	←
	炉心燃料集合体数 (内側/外側)	—	288 / 246	288 / 246	288 / 294	288 / 246	234 / 216	—
	炉心等価直径	cm	441	441	459	441	444	458
	軸方向ブランケット厚さ (上部/下部)	cm	0 / 35	0 / 65	0 / 44	0 / 43	0 / 35	0 / 28
	遮へい体外接円径	cm	523	523	546	523	535	552
炉心燃料仕様	炉心燃料	wt%	Pu・U 混合窒化物	←	←	←	←	←
	²³⁵ U 含有率	%	0.3	←	←	←	←	←
	燃料スミア密度	%	80	75	←	←	←	←
	軸方向ブランケット燃料	wt%	U 窒化物	←	←	←	←	←
	²³⁵ U 含有率	%	0.3	←	←	←	←	←
	燃料スミア密度	%	95	90	←	←	←	←
	集合体当たり燃料ピン本数	—	331	←	←	←	←	←
	被覆管外径	mm	7.3	7.3	←	←	8.03	8.5
	被覆管肉厚	mm	0.42	0.545	←	←	←	0.574
	被覆管内径	mm	6.46	6.21	←	←	6.94	7.35
	燃料ピン配列ピッチ	mm	8.9	8.9	←	←	9.79	10.12
	P/D 比	—	1.22	←	←	←	←	1.19
	ラッパ管内対面間距離	mm	163.0	←	←	←	179.3	185.8
	ラッパ管肉厚	mm	5.0	←	←	←	←	←
	ラッパ管外対面間距離	mm	173.0	←	←	←	189.3	195.8
	集合体配列ピッチ	mm	177.5	←	←	←	193.8	200.3
	体積比	%	39.8	36.7	←	←	38.5	40.5
	燃料体積比	%	21.7	24.7	←	←	22.9	23.1
	構造材体積比	%	38.6	38.6	←	←	38.6	36.4
主要炉心特性	Pu 富化度 (内側/外側)	wt%	15.2 / 18.2	19.1 / 21.1	18.6 / 19.9	17.6 / 19.9	17.7 / 19.8	16.8 / 18.7
	燃焼反応度	%Δk/kk'	0.90	2.21	1.79	1.59	1.57	1.11
	最大線出力 (内側/外側)	W/cm	196	223 / 221	204 / 202	206 / 204	262 / 260	259 / 255
	最大高速中性子束	n/cm ² s	1.9×10^{15}	2.15×10^{15}	1.99×10^{15}	2.07×10^{15}	2.12×10^{15}	1.93×10^{15}
	最大高速中性子照射量	n/cm ²	6.4×10^{23}	6.10×10^{23}	5.66×10^{23}	5.87×10^{23}	6.03×10^{23}	6.41×10^{23}
	取出平均燃焼度 (炉心/軸プラ/全体)	GWD/t	157/18/105	162.5/11.6/82.2	149.2/15.6/91.1	150.7/16.0/95.6	153.6/21.7/103.6	159.1/29.5/116.5
	出力分担率 (BOEC/EOEC)	%	94.2 / 92.1	93.7 / 91.3	93.7 / 91.4	94.2 / 92.1	93.2 / 90.8	92.8 / 90.6
	炉心	%	5.8 / 7.9	6.3 / 8.7	6.3 / 8.6	5.8 / 7.9	6.8 / 9.2	7.2 / 9.4
	軸方向ブランケット	%	—	—	—	—	—	—
	増殖比	—	0.881	0.796	0.816	0.840	0.824	0.843
	炉心	—	0.267	0.304	0.287	0.262	0.277	0.258
	軸方向ブランケット	—	1.148	1.100	1.103	1.102	1.101	1.101
	計	—	—	—	—	—	—	—
	HM 装荷量	t	42.8	37.1	40.4	40.2	39.0	43.8
	炉心	t	25.9	42.1	31.1	27.9	23.9	21.4
	軸方向ブランケット	t	68.7	79.2	71.5	68.1	62.9	65.2
	計	t/GWe	5.8	6.0	6.3	6.1	5.9	6.3
	装荷時核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	t/GWe	—	—	—	—	—	—

表 3.1.2 炉心主要特性のまとめ

項目	Case No.	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
被覆管外径 (mm)	7.3	7.3	7.3	8.03	8.5	
被覆管肉厚 (mm)	0.545	0.545	0.545	0.545	0.574	
P/D 比 (-)	1.219	1.219	1.219	1.219	1.19	
炉心高さ (cm)	70	70	76	70	70	
軸プラ長さ(上部/下部) (cm)	0/65	0/44	0/43	0/35	0/28	
下部プレナム長 (cm)	70	70	76	80	85	
炉心燃料集合体数 (体)	534	582	534	450	450	
炉心等価直径 (cm)	441	459	441	444	458	
遮へい体外接円径 (cm)	523	546	523	535	552	
運転サイクル長さ (日)	548	548	548	548	548	
燃料交換バッチ数 (-)	6	6	6	6	7	
燃焼反応度 (%Δk/kk')	2.21	1.79	1.59	1.57	1.11	
増殖比 (-)	1.100	1.103	1.102	1.101	1.101	
炉心部取出平均燃焼度 (GWd/t)	162.5	149.2	150.7	153.6	159.1	
最大高速中性子照射量 ($10^{23}n/cm^2$)	6.10	5.66	5.87	6.03	6.41	
装荷時核分裂性 Pu 重量 (t/GWe)	6.0	6.3	6.1	5.9	6.3	
*冷却材流速 (m/s)	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	
*バンドル圧損 (MPa)	0.26	0.21	0.25	0.21	0.23	
*被覆管最高温度 (°C)	560	558	557	564	561	
*被覆管内圧 (MPa)	6.3	5.8	6.0	5.4	5.4	
*被覆管周方向応力 (MPa)	119	110	113	114	118	
*炉心上端部線出力 (W/cm)	150	137	138	176	174	
*冷却材温度上昇 ΔT_{cool} (°C)	242	242	242	242	242	
*膜温度上昇 ΔT_{film} (°C)	25.0	23.5	23.0	28.6	25.3	
*被覆管内温度上昇 ΔT_{clad} (°C)	8.0	7.4	7.4	8.5	8.4	

*) 推定値

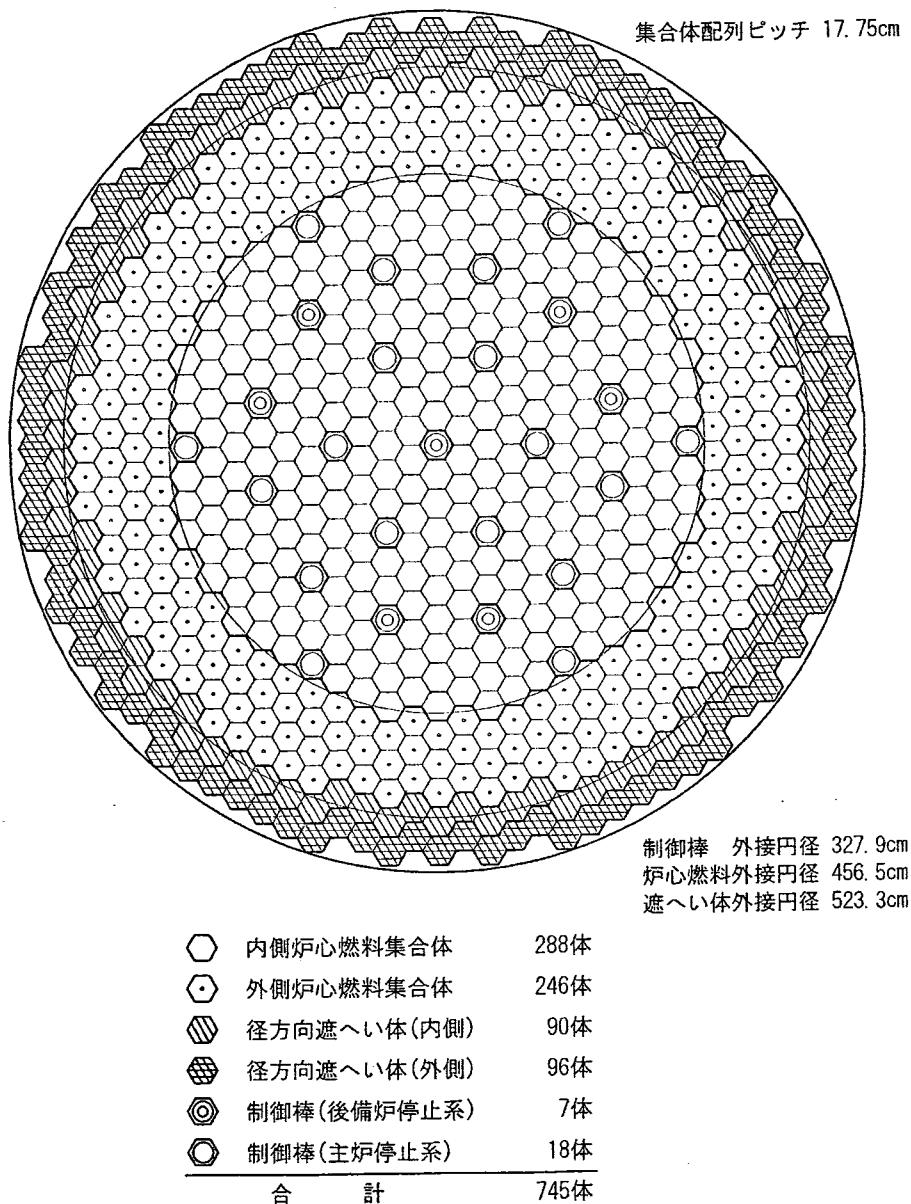


図 3.1.1(a) サーベイ計算における炉心構成図
(Case-1 および Case-3, ピン径 7.3mm)

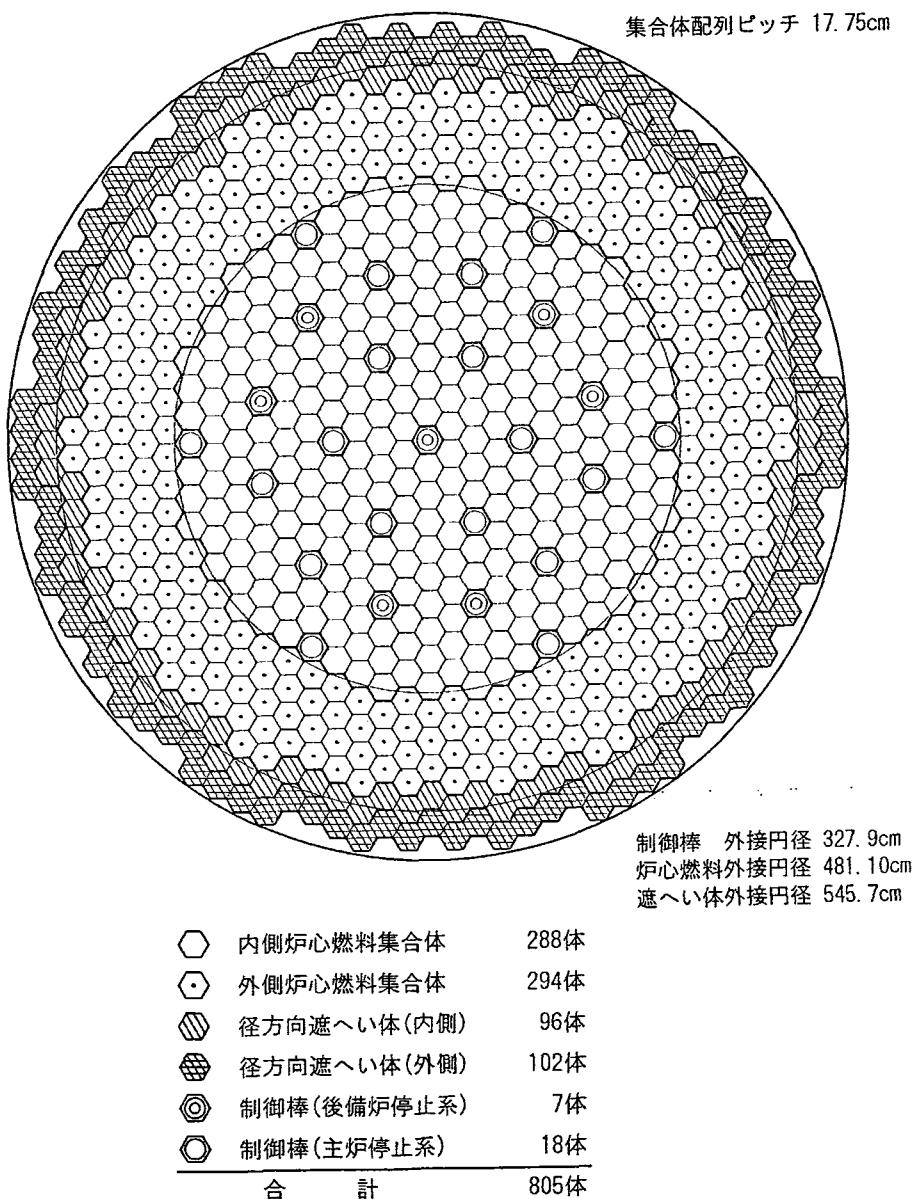


図 3.1.1(b) サーベイ計算における炉心構成図
(Case-2, ピン径 7.3mm)

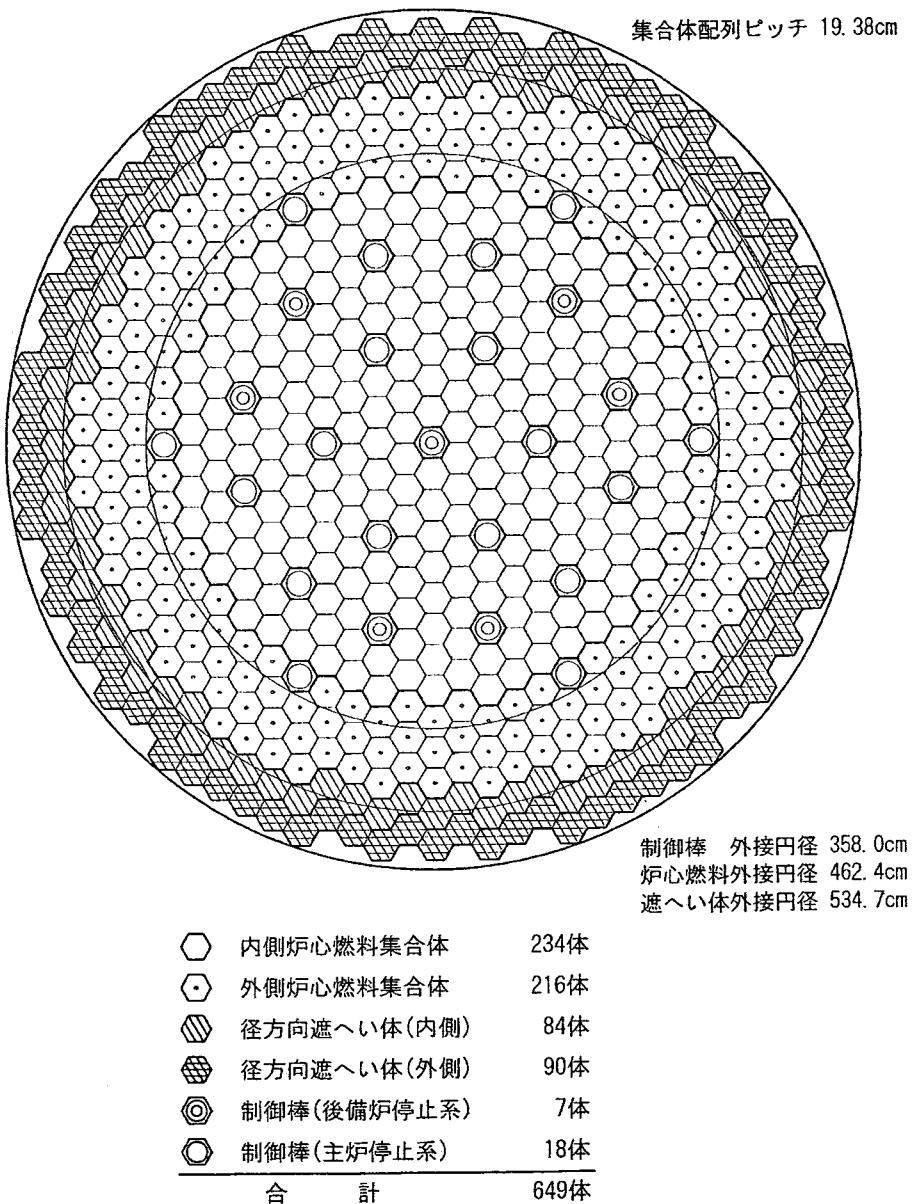


図 3.1.1(c) サーベイ計算における炉心構成図
(Case-4, ピン径 8.03mm)

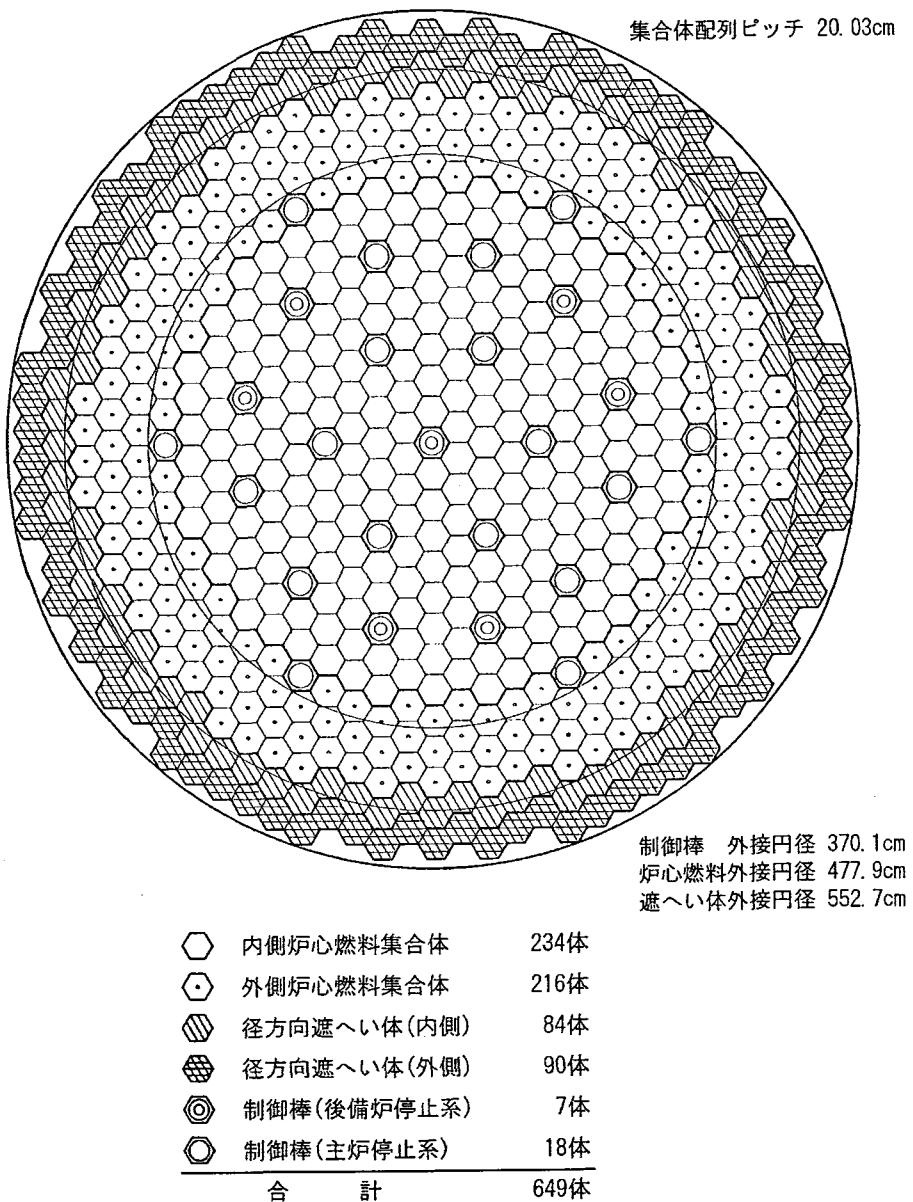


図 3.1.1(d) サーベイ計算における炉心構成図
(Case-5, ピン径 8.5mm)

3. 2 炉心設計

3.1 節の炉心仕様選定のための解析結果に基づき、今年度の設計炉心として、被覆管外径 8.0mm、炉心高さ 70cm の燃料基本仕様を選定した。

選定された燃料仕様による設計炉心を対象に、以下の炉心特性解析を行った。

- ① 基本核特性
- ② 出力分布
- ③ 反応度特性
- ④ 热特性解析

(1) 基本核特性

窒化物燃料炉心（熱出力 1980MWt）の炉心基本仕様、炉心構成に基づき、導入期炉心および平衡期炉心の基本核特性を評価した。

(i) 検討条件

(a) 炉心・燃料集合体仕様

表 3.2.1 に窒化物燃料炉心の炉心・燃料仕様を、図 3.2.1 に炉心構成を示す。

(b) 解析条件など

プラント基本仕様、炉心性能目標、制限条件などについては、3.1 節に記載した条件に基づく。

ここでは、核計算における主な解析条件を記載する。

<解析条件>

- ・ 核設計用炉定数： 統合炉定数 ADJ2000R^[9]
- ・ 燃料組成 : 高速炉多重リサイクル TRU 組成 + 随伴 FP

$$\begin{aligned} & {}^{238}\text{Pu} / {}^{239}\text{Pu} / {}^{240}\text{Pu} / {}^{241}\text{Pu} / {}^{242}\text{Pu} / {}^{237}\text{Np} / {}^{241}\text{Am} / {}^{242}\text{Am} / {}^{243}\text{Am} \\ & / {}^{242}\text{Cm} / {}^{243}\text{Cm} / {}^{244}\text{Cm} / {}^{245}\text{Cm} \\ & = 1.1 / 54.1 / 32.1 / 4.3 / 3.9 / 0.5 / 2.0 / 0.0 / 1.0 \\ & / 0.0 / 0.0 / 1.0 / 0.0 \quad (\text{wt}\%) \end{aligned}$$
- ・ 随伴 FP 割合 : 燃料体積の 0.2vol% (Nd-143 で代表[等価係数 3.0])
 ((注)3.2.1 項の炉心サーベイ計算では、随伴 FP 割合を燃料体積の 2.0vol% としていたが、本炉心解析では 0.2vol%とした。)
- ・ 構造材（被覆管 / ラッパ管）: ODS 鋼/PNC-FMS 鋼の成分データ
 被覆材化学成分データ

[PNC-FMS 鋼]

化学成分データ: C / Si / Mn / P / S / Ni / Cr / Mo / W / V / Nb / N

$$\begin{aligned} & = 0.12 / 0.05 / 0.60 / - / - / 0.40 / 11.00 / 0.50 / \\ & 2.00 / 0.20 / 0.050 / 0.050 \quad (\text{wt}\%) \end{aligned}$$

[ODS 鋼]

暫定的に PNC-FMS 鋼と同一の成分を適用することとした。

- ・ 核設計では構造材(被覆管、ラッパ管)組成比として下記を使用

Fe / Cr / Ni / Mo / Mn / W = 85.5 / 11.0 / 0.4 / 0.5 / 0.6 / 2.0
(wt%)

<計算モデル>

- ・均質組成・拡散計算 : 2 次元 RZ 体系
- ・制御棒挿入 : パーク位置に挿入 (2 次元 RZ 計算)
- ・冷却材ボイド反応度 : ボイド領域はラッパ管内の冷却材を 100% ボイド化する。非均質断面積補正としてナトリウム冷却炉と同じ値 0.904 を乗じた。
- ・ドップラ係数 : 炉心部およびプランケット部の燃料核種を 500°C 上昇させて算出した。非均質断面積補正としてナトリウム冷却炉と同じ値 1.05 を乗じた。

(ii) 解析結果

(a) FBR 導入期向け炉心

表 3.2.2 に主要核特性を示す。導入期炉心の炉心構成は、図 3.2.1 に示したとおり、内側炉心燃料集合体 252 体、外側炉心燃料集合体 192 体、合計 444 体の炉心燃料で構成され、径方向プランケットはない。制御棒は、主炉停止系 24 体、後備炉停止系 7 体の独立 2 系統の制御棒構成としている。炉心の周囲には、鉛ビスマス遮へい体を 2 層設置している。炉心高さは 70cm であり、炉心下部にのみ厚さ 35cm の下部軸方向プランケットを設置した。

炉心燃料の主要仕様は、被覆管外径 8.0mm、被覆管肉厚 0.545mm、燃料ピン配列ピッチ 9.75mm ($P/D = 1.22$) であり、集合体当たり燃料ピン数は 331 本で、燃料ピンのスペーサはグリッドスペーサ方式である。ラッパ管肉厚は 5mm、集合体間ギャップは 4.5mm とし、集合体配列ピッチは 193.7mm である。

表 3.2.2 に示すとおり、下部軸方向プランケット 35cm のみで増殖比は約 1.10 を確保し、炉心部取出平均燃焼度は約 154GWd/t を達成している。

Pu 富化度は、内側炉心、外側炉心で各々、17.5wt%、19.9wt% であり、運転サイクル長さ 18 ヶ月で燃焼反応度は $1.51\Delta k/kk'$ である。

最大線出力は 276W/cm (3 次元解析結果)、最大高速中性子照射量は 6.43×10^{23} n/cm² である。

炉心部ドップラ係数は $-2.84 \times 10^{-3} Tdk/dT$ 、炉心部冷却材ボイド反応度は約 4.5\$ であり、ボイド反応度の制限目安 10\$ 程度以下を余裕を持って満足している。

炉心等価直径は 443.3cm、遮へい体外接円径は 534.5cm であり、遮へい体外接円径の制限目安約 5.5m 程度以下を満足している。

表 3.2.3 に物質収支を示す。装荷時核分裂性 Pu 重量は 5.9 t/GWe であり、制限目安の 7t/GWe 以下を充分下回る。

(b)FBR 平衡期向け炉心

平衡期炉心の炉心構成ならびに炉心・燃料仕様は、導入期炉心と比べ下部軸方向ブランケット厚さが異なるのみで、その他の仕様は同じである。炉心構成を図3.2.1に、炉心・燃料仕様および炉心主要核特性を各々、表3.2.1と表3.2.2に示す。平衡期炉心の増殖比に対する炉心性能目標1.03程度を満たすために、下部軸方向ブランケットの厚さを調整した。増殖比1.03は下部軸方向ブランケット厚さを18cmとすることで達成できた。

Pu富化度は、内側炉心、外側炉心で各々、17.2wt%，19.6wt%であり、運転サイクル長さ18ヶ月で燃焼反応度は1.41%Δk/kk'、炉心部取出平均燃焼度は約155GWd/tである。

最大線出力は284W/cm（2次元解析結果）、最大高速中性子照射量は 6.56×10^{23} n/cm²である。

炉心部ドップラ係数は -2.88×10^{-3} Tdk/dT、炉心部冷却材ボイド反応度は約4.7\$であり、ボイド反応度の制限目安10\$程度以下を余裕を持って満足している。

表3.2.4に物質収支を示す。装荷時核分裂性Pu重量は5.8t/GWeである。

なお、導入期炉心、平衡期炉心とともに炉心部取出平均燃焼度は炉心性能目標（150GWd/t）を達成したが、本研究では今後、被覆管材料の開発が進むことを予想して被覆管の最大高速中性子照射量がODS鋼およびPNC-FMS鋼の開発目標の目安値（ 5×10^{23} n/cm², E>0.1MeV）を上回ることを許容した。これに対し、照射量を目安値以下とした場合（表3.2.5および表3.2.6）は、炉心部取出平均燃焼度は導入期炉心、平衡期炉心とともに125GWd/t程度になった。

（2）出力分布

（i）計算方法

導入期炉心を対象に、平衡炉心初期および末期の炉心出力分布を3次元拡散計算により求め、最大線出力、ピーピング係数等を求めた。また、炉心流量配分検討のため、各燃料集合体ごとの最大ピン出力分布を解析した。

2次元RZ拡散燃焼計算で得られた平衡炉心初期および末期の組成を用いて、3次元7群三角メッシュ拡散計算により出力分布を計算した。新旧燃料の混在による出力変動効果は、2次元燃焼計算で得られる「燃焼因子」を用いて考慮した。また、3次元出力分布計算にあたっては、燃焼に伴う制御棒挿入効果を考慮した。3次元拡散計算の集合体番号配置図を図3.2.2に示す。

（ii）解析結果

表3.2.7に出力分布特性をまとめた。集合体出力の径方向ピーピング係数は、平衡初期で1.26、平衡末期で1.32である。

（3）反応度特性

導入期炉心を対象に、以下の反応度特性を解析した。

- ①制御棒反応度特性
- ②制御棒誤引抜き特性
- ③反応度係数

(i) 制御棒反応度特性

導入期炉心を対象に制御棒価値解析を行い、制御棒反応度収支が成立することを確認した。

(a) 制御すべき反応度

反応度制御系は主炉停止系と後備炉停止系の独立2系統で構成する。制御すべき反応度は、出力補償、燃焼補償、運転余裕、余剰反応度の不確かさなどであり、基本的な考え方は先行のナトリウム冷却炉設計例と同じとした。本炉心の制御すべき反応度を表3.2.9に示す。

なお、出力補償は炉心の膨張反応度およびドップラ係数より算出し、 $0.3\%\Delta k/kk'$ とした。燃焼補償は、2次元燃焼計算による燃焼反応度計算値に余裕を見込んで $2.0\%\Delta k/kk'$ とした。運転余裕と余剰反応度の不確かさについては、先行ナトリウム冷却炉設計例を参考に設定した。

(b) 制御棒価値計算

制御棒価値は、2次元RZ拡散燃焼計算で得られた平衡炉心初期の組成を用いて、3次元7群三角メッシュ拡散計算により評価した。

主炉停止系制御棒および後備系制御棒の ^{10}B 濃縮度は、ともに80%とした。

得られた制御棒価値に対して、先行のナトリウム冷却炉設計例（実証炉）で使用された以下の補正を行い設計ノミナル値とした。

ワンロッドスタック時の反応度については、全数挿入時の解析値が補正係数を考慮したノミナル値と一致するように B_4C を希釈（主系および後備系とともに希釈率44.1%）した条件で評価した。

群縮約効果	:	0.97
ランピング効果	:	0.77
輸送効果	:	0.96
メッシュ補正	:	1.07
合 計	:	0.77

求められたノミナル値に対して、さらに不確かさとして9%（3σ）を考慮して設計最小値を得た。

代表的な制御棒パターンでの制御棒価値計算結果を表3.2.8に示す。表中の制御棒番号は、図3.2.3に示した制御棒番号図に対応する。

(c) 制御棒反応度収支

制御棒反応度収支を表 3.2.9 に示す。主炉停止系はワンロッドスタックの条件下で炉停止余裕 1\$以上を有している。後備炉停止系についても、ワンロッドスタック条件下で、事故時投入反応度を考慮した上で炉停止余裕を確保しており、反応度収支は成立している。

図 3.2.4 に主炉停止系制御棒をバンクで挿入したときの S 字曲線を示す。

(ii) 制御棒誤引抜き特性

導入期炉心を対象に制御棒誤引抜時の安全解析を行うために、主炉停止系 1 本が誤引抜きされたときの印加反応度および出力歪みを求め、安全解析用炉心データをまとめた。

(a) 定格出力からの制御棒誤引抜き

平衡炉心初期の定格出力運転時を対象に、主炉停止系制御棒 1 本の誤引抜時の印加反応度と出力歪みを評価した。

平衡炉心初期の定格出力運転時に、主炉停止系制御棒は、燃焼補償反応度 $2.0\%\Delta k/kk'$ 、運転余裕 $0.2\%\Delta k/kk'$ および余剰反応度不確かさ補償 $0.6\%\Delta k/kk'$ の合計 $2.8\%\Delta k/kk'$ を考慮し、25cm 炉心内に挿入されているとした。後備炉停止系は炉心上端まで引抜かれている。この状態から、代表的な制御棒 1 本が炉心上端まで引抜かれたときの印加反応度と出力歪みを評価した。

結果を表 3.2.10 に示す。印加反応度ノミナル値の最大値は、主炉停止系第 2 リング（制御棒番号 20）の制御棒誤引抜の時で、約 37¢である。表中には、最大線出力の歪み係数（制御棒 1 本誤引抜時の最大線出力の定格出力運転時の最大線出力値との比）を示してある。出力歪みの最大値は、最外周リング制御棒（制御棒番号 21）誤引抜時に隣接する外側炉心燃料集合体で発生し、1.29 である。

(b) 低温状態（極低出力）からの制御棒誤引抜き

平衡炉心初期の低温状態（極低出力）を対象に、主炉停止系制御棒 1 本の誤引抜時の印加反応度と出力歪みを評価した。

低温状態（極低出力）の主炉停止系制御棒の挿入深度は、定格出力状態から低温状態（極低出力）までの反応度変化 $0.3\%\Delta k/kk'$ 、燃焼補償反応度 $2.0\%\Delta k/kk'$ 、運転余裕 $0.2\%\Delta k/kk'$ および余剰反応度の予測誤差 $0.6\%\Delta k/kk'$ の合計 $3.1\%\Delta k/kk'$ を考慮し、32.5cm 炉心内に挿入されているとした。後備炉停止系は炉心上端まで引抜かれている。この状態から、代表的な制御棒 1 本が炉心上端まで引抜かれたときの印加反応度と出力歪みを評価した。

結果を表 3.2.11 に示す。印加反応度ノミナル値の最大値は、主炉停止系最外周リング（制御棒番号 21）の制御棒誤引抜の時で、約 62¢である。出力歪みの最大値は、最外周リング制御棒（制御棒番号 21）誤引抜時に隣接する外側炉心燃料集合体で発生し、1.52 である。

(c) 制御棒駆動軸伸びに伴う反応度

導入期炉心を対象として平衡炉心初期での制御棒挿入状態を想定し、3次元拡散計算により制御棒駆動軸伸びに伴う反応度を評価した。計算では、挿入深度が5cm深くなった場合の反応度変化を算出し、制御棒駆動軸伸び反応度を評価した。

主炉停止系制御棒挿入深度 : 25cm → 30cm

後備炉停止系制御棒挿入深度 : 0cm → 5cm

得られた印加反応度のノミナル値（伸び5cm）は $0.73\%\Delta k/kk'$ であり、単位長さ伸び(1cm)あたり $0.146\%\Delta k/kk'/cm$ (42.5¢/cm)である。

(iii) 反応度係数

導入期炉心の平衡炉心末期を対象として、炉心反応度特性を評価し安全解析などに反映する。評価項目は、ドップラ係数、冷却材ボイド反応度、燃料密度係数、冷却材密度係数、構造材密度係数、形状係数、各種膨張係数、実効遅発中性子割合、遅発中性子崩壊定数などである。

反応度特性値を表3.2.12および表3.2.13に示す。反応度計算は2次元18群RZ拡散計算により実施した。各種膨張係数の算出方法は、先行のナトリウム冷却炉設計で用いられている方法と同じであり、密度係数、形状係数と材質の線膨張係数を用いて算出している。また、低温停止(200°C)から定格出力状態(炉心燃料平均温度765°C、炉心平均冷却材温度365°C、被覆管平均温度385°C、ラッパ管平均温度365°C、炉心支持板温度285°Cとした)までの反応度変化については、各種膨張係数とドップラ係数から算出した。

(4) 热特性

導入期向け設計炉心を対象に、3次元出力分布解析の結果をもとに炉心流量配分計画を検討し、炉心燃料の被覆管最高温度評価を行い、炉心冷却性能を確認した。また、燃料健全性評価のためのデータを整理した。

(i) 検討条件

(a) 炉心・燃料集合体仕様

炉心燃料仕様を表3.2.14に示す。また、燃料集合体の軸方向寸法概念図を図3.2.5に示す。

(b) 出力分布

3次元出力分布解析による各集合体ごとの寿命中の集合体内最大ピン出力分布を図3.2.6に示す。

(c) 流量条件

炉心流量の1次系全流量に対する割合を以下のように設定した。

制御棒および径方向遮へい体への流量を各々2%，その他無効流量を2%と暫定し、炉心への流量は1次系全流量の94%とした。

(d) 被覆管最高温度評価

炉心燃料集合体内の最大発熱ピンを対象に、そのピンに配分されるピンあたりの流量を周辺流れ係数を用いて算出し、冷却材温度上昇を求めた。被覆管温度が最高となる炉心上端における線出力から、フィルム温度上昇および被覆管内温度上昇を算出し、被覆管温度を評価した。各部温度上昇に対する不確かさを HSFとして考慮した。

被覆管温度評価および圧損評価における主な評価条件を以下に列挙する。

- ・周辺流れ係数 : 1.05
- ・被覆管表面ヌッセルト数 : Sleicher の式^[10]
- ・HSF : 表 3.2.15 参照
- ・バンドル圧損評価式 : Cheng-Todreas の式^[6]
- ・グリッド圧損評価式 : Rehme の式^[7]
- ・グリッドスペーサ段数 : 10 段
- ・グリッドスペーサ閉塞率 : 0.2

(e) 燃料ペレット最高温度評価

内側炉心および外側炉心の最大線出力ピンを対象に、燃料ペレット中心温度評価を行った。解析に用いた主な条件は以下のとおりである。

- ・燃料仕様
 - 被覆管内径 : 6.91mm
 - 被覆管-ペレット間直径ギャップ : 0.16mm
 - ペレット外径 : 6.75mm
- ・ギャップ熱伝達率^[11] : He-ボンド

$$h_{gap} = (27.6 + 0.048 \cdot q) / S_0 \quad \dots \quad (3.2.1)$$
 - h_{gap} : ギャップ熱伝達率 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{K}^{-1}$)
 - q : 線出力 (W/cm)
 - S_0 : 初期ギャップ (μm)
- ・ペレット熱伝導率^[11] :

$$K = \frac{1 - P}{1 + P} K^{100} \quad \dots \quad (3.2.2)$$

P : 気孔率 (-)

K^{100} : 100%密度での熱伝導率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

$$K^{100} = 1.15054 \times K^{93} \quad \dots \quad (3.2.3)$$

$$K^{93} = 11.478 + 8.3206 \times 10^{-3} \cdot T_c - 2.032 \times 10^{-6} \cdot T_c^2 \quad \dots \quad (3.2.4)$$

K^{93} : 熱伝導率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T_c : 温度 ($^\circ\text{C}$)

なお、ペレット中心ホットスポット温度評価においては、ペレット中心温度に対する HSF として、1.20 を暫定的に使用して評価することとした。

(ii) 検討結果

(a) 炉心流量配分計画

炉心流量配分の領域区分図を図 3.2.7 に示す。流量配分領域は、内側炉心 2 領域、外側炉心 4 領域の合計 6 領域区分とした。

集合体流量の最大値は、内側炉心第 1 流量領域の 205kg/s である。

(b) 温度特性

表 3.2.16 に各流量領域ごとの温度特性として、冷却材および被覆管肉厚中心のノミナル温度およびホットスポット温度をまとめて示した。表中には冷却材流速、バンドル圧損の値も併記した。また、内側炉心および外側炉心の最大線出力ピンの燃料ペレット中心温度を表中に示した。

被覆管肉厚中心最高温度は 565°C、バンドル部冷却材流速は最大で 1.8m/s、バンドル圧損は 0.20MPa である。被覆管外面温度は被覆管肉厚中心温度より低くなるので、これらは各々の制限値 570°C、2m/s、0.23MPa を満足している。燃料ペレット中心温度のノミナル最高温度は 885°C、ホットスポット温度は 1004°C である。

各流量領域における代表ピンの出力履歴、冷却材および被覆管肉厚中心温度の履歴を表 3.2.17～22 に、被覆管肉厚中心温度履歴図を図 3.2.8～13 に示した。

また、内側炉心および外側炉心の最大線出力ピンの燃料ペレット中心温度履歴を表 3.2.23 および図 3.2.14 に示した。

(5) まとめ

電気出力 750MWe の強制循環方式鉛ビスマス冷却中型炉の炉心設計を行った。熱出力 1980MWt、原子炉出/入口温度 445/285°C の条件の下、被覆管外面腐食を抑制する観点から被覆管外面最高温度を 570°C 以下とし、装荷時核分裂性 Pu 重量と冷却材ボイド反応度を低減した炉心設計を指向した。

3.1 節でのサーベイ計算に基づき、被覆管外径 8.0mm、炉心高さ 70cm の炉心とし、径方向ブランケットを削除した炉心構成で、運転サイクル長さ、炉心部取出平均燃焼度、増殖比の炉心性能目標を満たし、被覆管外面最高温度、冷却材流速およびバンドル圧損の制限条件ならびに冷却材ボイド反応度の制限目安を満足することを確認した。

また、安全解析用の炉心データ、並びに燃料健全性評価用のデータを整備した。

表 3.2.1 設計炉心・燃料基本仕様

	項目	導入期向け炉心	平衡期向け炉心
基本条件 ・炉心構成	原子炉熱出力	1,980 MWt	←
	電気出力	750 MWe	←
	炉心形式	均質2領域炉心	←
	運転サイクル長さ	18カ月 (548日)	←
	燃料交換バッチ数	6バッチ	←
	炉心高さ	70cm	←
	炉心燃料集合体数(内側炉心/外側炉心)	444(252/192) 体	←
	径方向プランケット燃料集合体数	無し	←
	制御棒本数(主/後備炉停止系)	24/7 体	←
	径方向遮へい体数(鉛ビスマス)	174体 (2層)	←
	軸方向プランケット厚(上/下)	0/35 cm	0/18 cm
	炉心等価直径	4.43 m	←
	制御棒外接円径	3.76 m	←
	遮へい体外接円径	5.35 m	←
燃料仕様	燃料材料	(U-Pu)N	←
	構造材材料(被覆管/ラッパ管)	ODS/PNC-FMS	←
	燃料要素本数/集合体	331 本	←
	燃料要素外径	8.0 mm	←
	被覆管肉厚	0.545 mm	←
	燃料要素配列ピッチ	9.75 mm	←
	スミヤ密度		
	炉心燃料	75 %TD	←
	プランケット燃料	90 %TD	←
	ラッパ管肉厚	5.0 mm	←
	集合体間ギャップ	4.5 mm	←
	集合体配列ピッチ	193.7 mm	←
	体積比		
	燃料	38.2 vol%	←
	構造材	22.8 vol%	←
	冷却材(ボイド時)	39.0(4.6) vol%	←

表 3.2.2 設計炉心の主要炉心特性一覧

	項目		導入期向け炉心	平衡期向け炉心
基本条件 ・炉心構成	原子炉熱出力		1,980 MWt	←
	電気出力		750 MWe	←
	炉心形式		均質2領域炉心	←
	運転サイクル長さ		18ヵ月 (548日)	←
	燃料交換バッチ数		6バッチ	←
	炉心高さ		70cm	←
	炉心燃料集合体数(内側炉心/外側炉心)		444(252/192) 体	←
	径方向プランケット燃料集合体数		無し	←
	制御棒本数(主/後備炉停止系)		24/7 体	←
	径方向遮蔽体数(鉛ビスマス)		174体 (2層)	←
	軸方向プランケット厚(上/下)		0/35 cm	0/18 cm
	炉心等価直径		4.43 m	←
	制御棒外接円径		3.76 m	←
	遮へい体外接円径		5.35 m	←
主要炉心特性	Pu富化度[Pu/HM] (wt%) (内側/外側)		17.5 / 19.9	17.2 / 19.6
	燃焼欠損反応度(%Δk/kk')		1.51	1.41
	増殖比	平衡平均	1.102	1.035
	炉心/軸プラ		0.821 / 0.281	0.832 / 0.203
	最大線出力 ^{*1} (W/cm) (内側/外側)		281 / 248 (275 / 276)	284 / 247 (278 / 275) ^{*5}
	出力分担率(%)			
	内側/外側/軸プラ	平衡初期	59.1/33.9/7.0	59.7/34.0/6.3
		平衡末期	58.3/32.1/9.6	59.2/32.4/8.5
	最大高速中性子束[×10 ¹⁵ n/(cm ² ·s)] ^{*2}		2.26	2.31
	最大高速中性子累積照射量[×10 ²³ n/cm ²] ^{*2}		6.43	6.56
	炉心取出平均燃焼度(GWd/t)			
	炉心部/軸プラ		153.7 / 23.1	155.2 / 40.2
	プランケット込み全炉心平均燃焼度		104.7	128
	装荷時重金属インベントリ/1バッチ(t)			
	炉心部/軸プラ		6.5 / 3.9	6.5 / 2.0
	プランケット対炉心重量比		約0.60	約0.31
	初装荷核分裂性Pu重量(t/GWe)	平衡末期	5.9	5.8
	実効遅発中性子割合(β _{eff})		0.00343	0.00343
	炉心部冷却材ボイド反応度 ^{*3} (\$)	平衡末期	4.5	4.7
	炉心部+上部ブーリング冷却材ボイド反応度 ^{*3} (\$)	平衡末期	-1.1	-0.83
	炉心部ドップラ係数 ^{*4} (Tdk/dT)	平衡末期	-2.8E-03	-2.9E-03

*1 上段: 燃焼ミスマッチファクタを考慮した2次元計算結果。補正なしの値。
 下段() : 燃焼ミスマッチファクタを考慮した3次元計算結果。ラッパ管発熱を除き、燃料軸伸びを考慮。

*2 0.1MeV以上、2次元RZ計算結果

*3 燃料集合体非均質効果補正(0.904)を含む

*4 非均質断面積の補正(1.05)を含む

*5 導入期向け炉心の計算結果より推定

表 3.2.3 設計炉心（導入期炉心）の物質収支（1/2）

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			9.0	6.7	15.7	11.7		11.7	27.3	
U236										
U238			2993.9	2210.5	5204.4	3880.5		3880.5	9084.8	
U合計			3002.9	2217.1	5220.0	3892.1		3892.1	9112.2	
Pu238			7.4	6.4	13.8				13.8	
Pu239			363.4	315.2	678.6				678.6	
Pu240			215.6	187.0	402.6				402.6	
Pu241			28.9	25.1	53.9				53.9	
Pu242			26.2	22.7	49.0				49.0	
Pu合計			641.5	556.4	1197.9				1197.9	
Np237			3.4	2.9	6.3				6.3	
Np合計			3.4	2.9	6.3				6.3	
Am241			13.4	11.7	25.1				25.1	
Am242m										
Am243			6.7	5.8	12.5				12.5	
Am合計			20.1	17.5	37.6				37.6	
Cm242										
Cm243										
Cm244			6.7	5.8	12.5				12.5	
Cm245										
Cm合計			6.7	5.8	12.5				12.5	
HM合計			3674.7	2799.8	6474.4	3892.1		3892.1	10366.5	
ランプ化FP										
随伴FP(Nd)			3.9	3.0	6.9				6.9	
FP合計			3.9	3.0	6.9				6.9	

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			1.8	2.3	4.1	6.4		6.4	10.5	
U236			1.2	0.8	2.0	1.1		1.1	3.1	
U238			2426.8	1915.8	4342.6	3595.7		3595.7	7938.3	
U合計			2429.8	1918.8	4348.7	3603.2		3603.2	7951.9	
Pu238			8.0	7.3	15.4	0.1		0.1	15.4	
Pu239			315.5	259.9	575.4	197.2		197.2	772.6	
Pu240			192.3	168.8	361.1	16.9		16.9	378.0	
Pu241			27.8	22.6	50.4	0.9		0.9	51.3	
Pu242			24.3	21.3	45.6	0.0		0.0	45.7	
Pu合計			568.0	479.8	1047.9	215.1		215.1	1263.0	
Np237			2.0	1.9	3.9	0.3		0.3	4.1	
Np合計			2.0	1.9	3.9	0.3		0.3	4.1	
Am241			10.8	11.8	22.6	0.1		0.1	22.7	
Am242m			0.7	0.6	1.4	0.0		0.0	1.4	
Am243			6.9	5.9	12.8	0.0		0.0	12.8	
Am合計			18.4	18.4	36.8	0.1		0.1	36.9	
Cm242			0.5	0.4	0.9	0.0		0.0	1.0	
Cm243			0.1	0.0	0.1	0.0		0.0	0.1	
Cm244			6.3	5.0	11.4	0.0		0.0	11.4	
Cm245			1.2	0.8	2.0	0.0		0.0	2.0	
Cm合計			8.1	6.3	14.4	0.0		0.0	14.4	
HM合計			3026.3	2425.3	5451.5	3818.7		3818.7	9270.2	

ランプ化FP	648.4	374.5	1022.9	73.4	73.4	1096.3
随伴FP(Nd)	3.9	3.0	6.9			6.9
FP合計	652.3	377.5	1029.8	73.4	73.4	1103.2

注) 欄内の空欄は、0.0。

表 3.2.3 設計炉心（導入期炉心）の物質収支（2/2）

平衡初期						(kg)
核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	合計
U235	30.6	26.6	57.2	54.9		112.1
U236	4.4	2.6	7.0	3.4		10.3
U238	16481.4	12508.0	28989.4	22549.2		22549.2
U 合計	16516.4	12537.2	29053.6	22607.5		22607.5
Pu238	46.6	40.7	87.3	0.1		87.4
Pu239	2072.5	1741.2	3813.7	573.5		573.5
Pu240	1235.4	1078.4	2313.7	29.4		29.4
Pu241	173.1	144.1	317.3	1.1		1.1
Pu242	152.4	132.9	285.3	0.0		0.0
Pu合計	3680.0	3137.3	6817.3	604.1		604.1
Np237	15.8	14.5	30.3	0.8		0.8
Np合計	15.8	14.5	30.3	0.8		0.8
Am241	72.4	70.8	143.3	0.1		0.1
Am242m	2.8	2.1	4.9	0.0		0.0
Am243	41.0	35.3	76.3	0.0		0.0
Am合計	116.2	108.3	224.5	0.1		0.1
Cm242	3.0	2.0	5.0	0.0		0.0
Cm243	0.2	0.1	0.4	0.0		0.0
Cm244	39.1	32.6	71.7	0.0		0.0
Cm245	4.1	2.7	6.7	0.0		0.0
Cm合計	46.3	37.4	83.7	0.0		0.0
HM合計	20374.7	15834.6	36209.4	23212.5		23212.5
						59421.8
ランプ化FP	1673.2	963.9	2637.1	140.3		140.3
随伴FP (Nd)	23.5	17.9	41.5			
FP合計	1696.7	981.9	2678.6	140.3		140.3
						2818.9

平衡末期						(kg)
核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	合計
U235	23.4	22.3	45.6	49.5		49.5
U236	5.6	3.4	9.0	4.5		4.5
U238	15913.8	12214.1	28127.9	22250.6		22250.6
U 合計	15942.8	12239.7	28182.5	22304.6		22304.6
Pu238	47.2	41.7	88.9	0.2		0.2
Pu239	2024.6	1686.0	3710.6	777.9		777.9
Pu240	1212.1	1060.2	2272.3	47.2		47.2
Pu241	172.0	141.7	313.7	2.0		2.0
Pu242	150.5	131.5	282.0	0.1		0.1
Pu合計	3606.4	3061.1	6667.4	827.4		827.4
Np237	14.4	13.5	27.9	1.1		1.1
Np合計	14.4	13.5	27.9	1.1		1.1
Am241	69.8	71.0	140.8	0.2		0.2
Am242m	3.5	2.8	6.3	0.0		0.0
Am243	41.2	35.4	76.5	0.0		0.0
Am合計	114.5	109.2	223.6	0.2		0.2
Cm242	3.5	2.4	5.9	0.0		0.0
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0		0.0
Cm244	38.7	31.9	70.5	0.0		0.0
Cm245	5.2	3.5	8.7	0.0		0.0
Cm合計	47.7	37.9	85.6	0.0		0.0
HM合計	19725.7	15461.3	35187.0	23133.2		23133.2
						58320.3

ランプ化FP	2322.2	1337.3	3659.5	219.5		219.5	3879.0
随伴FP (Nd)	23.5	17.9	41.5				41.5
FP合計	2345.7	1355.2	3700.9	219.5		219.5	3920.4

注) 欄内の空欄は、0.0。

表 3.2.4 設計炉心（平衡期炉心）の物質収支（1/2）

装荷燃料(バッチ当り)			(kg)			
核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	合計
U235	9.0	6.7	15.7	6.0		21.7
U236						
U238	3002.3	2217.2	5219.5	1995.7		7215.2
U 合計	3011.4	2223.8	5235.2	2001.7		7236.9
Pu238	7.3	6.3	13.6			13.6
Pu239	358.8	311.6	670.4			670.4
Pu240	212.9	184.9	397.8			397.8
Pu241	28.5	24.8	53.3			53.3
Pu242	25.9	22.5	48.4			48.4
Pu合計	633.4	550.0	1183.5			1183.5
Np237	3.3	2.9	6.2			6.2
Np合計	3.3	2.9	6.2			6.2
Am241	13.3	11.5	24.8			24.8
Am242m						
Am243	6.6	5.8	12.4			12.4
Am合計	19.9	17.3	37.2			37.2
Cm242						
Cm243						
Cm244	6.6	5.8	12.4			12.4
Cm245						
Cm合計	6.6	5.8	12.4			12.4
HM合計	3674.7	2799.8	6474.4	2001.7		8476.1
ランプ化FP						
随伴FP (Nd)	3.9	3.0	6.9			6.9
FP合計	3.9	3.0	6.9			6.9

取出燃料(バッチ当り)			(kg)			
核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸プラ	径プラ	合計
U235	1.8	2.3	4.1	2.4		6.5
U236	1.2	0.8	2.0	0.7		2.8
U238	2425.1	1919.9	4345.0	1782.7		1782.7
U 合計	2428.1	1922.9	4351.0	1785.9		1785.9
Pu238	7.9	7.3	15.2	0.1		0.1
Pu239	314.6	259.0	573.6	129.4		129.4
Pu240	190.4	167.2	357.6	15.7		15.7
Pu241	27.6	22.4	50.0	1.1		1.1
Pu242	24.0	21.1	45.1	0.1		0.1
Pu合計	564.5	476.9	1041.5	146.3		146.3
Np237	1.9	1.9	3.8	0.2		0.2
Np合計	1.9	1.9	3.8	0.2		0.2
Am241	10.5	11.6	22.2	0.1		0.1
Am242m	0.7	0.6	1.3	0.0		0.0
Am243	6.8	5.9	12.7	0.0		0.0
Am合計	18.0	18.1	36.2	0.1		0.1
Cm242	0.5	0.4	0.9	0.0		0.0
Cm243	0.1	0.0	0.1	0.0		0.0
Cm244	6.3	5.0	11.3	0.0		0.0
Cm245	1.2	0.8	2.0	0.0		0.0
Cm合計	8.0	6.2	14.3	0.0		0.0
HM合計	3020.7	2426.1	5446.8	1932.5		1932.5
ランプ化FP	654.0	373.7	1027.7	69.1		69.1
随伴FP (Nd)	3.9	3.0	6.9			6.9
FP合計	657.9	376.7	1034.6	69.1		69.1
HM合計	3020.7	2426.1	5446.8	1932.5		1932.5
ランプ化FP	654.0	373.7	1027.7	69.1		69.1
随伴FP (Nd)	3.9	3.0	6.9			6.9
FP合計	657.9	376.7	1034.6	69.1		69.1
HM合計	3020.7	2426.1	5446.8	1932.5		1932.5

注) 欄内の空欄は、0.0。

表 3.2.4 設計炉心（平衡期炉心）の物質収支（2/2）

平衡初期			(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	30.4	26.7	57.1	25.3		25.3	82.4
U236	4.5	2.6	7.0	2.3		2.3	9.4
U238	16504.2	12541.7	29045.9	11423.3		11423.3	40469.2
U合計	16539.1	12570.9	29110.0	11450.9		11450.9	40560.9
Pu238	46.0	40.3	86.2	0.1		0.1	86.4
Pu239	2058.1	1728.0	3786.1	395.7		395.7	4181.8
Pu240	1220.8	1066.7	2287.5	28.2		28.2	2315.7
Pu241	171.5	142.7	314.2	1.4		1.4	315.6
Pu242	150.5	131.4	281.9	0.1		0.1	282.0
Pu合計	3646.9	3109.1	6756.0	425.6		425.6	7181.5
Np237	15.6	14.3	29.9	0.7		0.7	30.6
Np合計	15.6	14.3	29.9	0.7		0.7	30.6
Am241	71.1	69.9	141.0	0.1		0.1	141.1
Am242m	2.8	2.1	4.9	0.0		0.0	4.9
Am243	40.5	34.9	75.4	0.0		0.0	75.4
Am合計	114.4	106.9	221.3	0.1		0.1	221.4
Cm242	3.0	2.0	5.0	0.0		0.0	5.0
Cm243	0.2	0.1	0.4	0.0		0.0	0.4
Cm244	38.7	32.3	71.0	0.0		0.0	71.0
Cm245	4.1	2.6	6.7	0.0		0.0	6.7
Cm合計	45.9	37.0	83.0	0.0		0.0	83.0
HM合計	20361.8	15838.3	36200.2	11877.3		11877.3	48077.4

ランプ化FP	1686.1	960.3	2646.4	132.8	132.8	2779.2
随伴FP(Nd)	23.5	17.9	41.5			41.5
FP合計	1709.6	978.2	2687.8	132.8	132.8	2820.6

平衡末期			(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	23.2	22.2	45.4	21.6		21.6	67.0
U236	5.7	3.4	9.1	3.1		3.1	12.1
U238	15925.8	12244.5	28170.3	11202.9		11202.9	39373.2
U合計	15954.6	12270.1	28224.8	11227.6		11227.6	39452.4
Pu238	46.6	41.2	87.8	0.2		0.2	88.0
Pu239	2013.8	1675.5	3689.2	527.9		527.9	4217.1
Pu240	1198.2	1049.0	2247.3	44.5		44.5	2291.7
Pu241	170.5	140.4	310.9	2.5		2.5	313.4
Pu242	148.6	130.0	278.6	0.1		0.1	278.8
Pu合計	3577.7	3036.1	6613.8	575.2		575.2	7189.1
Np237	14.2	13.3	27.5	0.9		0.9	28.4
Np合計	14.2	13.3	27.5	0.9		0.9	28.4
Am241	68.4	70.0	138.4	0.2		0.2	138.6
Am242m	3.5	2.8	6.2	0.0		0.0	6.2
Am243	40.7	35.0	75.7	0.0		0.0	75.7
Am合計	112.5	107.8	220.3	0.2		0.2	220.5
Cm242	3.5	2.4	5.9	0.0		0.0	5.9
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0		0.0	0.5
Cm244	38.3	31.5	69.8	0.0		0.0	69.8
Cm245	5.2	3.5	8.7	0.0		0.0	8.7
Cm合計	47.3	37.5	84.9	0.0		0.0	84.9
HM合計	19706.4	15464.9	35171.3	11804.0		11804.0	46975.2

ランプ化FP	2341.6	1333.7	3675.3	206.1	206.1	3881.3
随伴FP(Nd)	23.5	17.9	41.5			41.5
FP合計	2365.1	1351.6	3716.7	206.1	206.1	3922.8

注) 欄内の空欄は、0.0。

表 3.2.5 最大高速中性子照射量制限の有無による鉛ビスマス強制循環冷却炉炉心の仕様の比較

設計条件	平成 16 年度設計炉心（導入期炉心）	照射量制限対応炉心（導入期炉心）	照射量制限対応炉心（平衡期炉心）
被覆管外側食塗評価式	570°C	←	←
原子炉熱出力	H16 評価式	←	←
電気出力	1980 MWe	↓	↓
炉心型式	750 MWe	↓	↓
運転サイクル長さ	均質 2 領域炉心	←	↓
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向アラウト)	18 ヶ月 (548 日)	21.5 ヶ月 (654 日)	↓
炉心高さ	6/- バッチ	4/- バッチ	↓
炉心構成	70 cm	↓	↓
・軸方向アラウト (上部/下部)	0 / 35 cm	0 / 26 cm	0 / 13 cm
炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	252 / 192 / 444 体	↓	↓
径方向アラウト体数	なし	↓	↓
制御棒本数 (主炉停止系/後備炉停止系)	24 / 7 体	↓	↓
径方向遮へい体数 (Pb-Bi 遮へい体)	174 体 (2 層)	↓	↓
炉心等価直徑	413 cm	↓	↓
遮へい体外接円径	約 535 cm	↓	↓
燃料形態* (炉心/軸方向アラウト)	Pu-U 混合塗化物 / U 塗化物	↓	↓
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	↓	↓
燃料ビン外径	8.0 mm	↓	↓
被覆管肉厚	0.545 mm	↓	↓
ガスプレナム長さ (上部/下部)*2	390/800 mm	390/890 mm	390/1020 mm
燃料要素長	2290 mm	↓	↓
集合体全長	3565 mm	↓	↓
炉心燃料仕様	燃料スマ密度 (炉心/軸方向アラウト)	75 / 90 %TD	↓
ボンド材	He	↓	↓
スペーサ形式	グリッド支持	↓	↓
燃料ビン配列ピッチ	9.75 mm	↓	↓
集合体当たり燃料ビン本数	331 本	↓	↓
ラッパ管外対面間距離	189.2 mm	↓	↓
ラッパ管肉厚	5.0 mm	↓	↓
集合体配列ピッチ	193.7 mm	↓	↓
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	38.2 / 22.8 / 39.0 %	↓	↓

*1：高速多量リサイクル TRU (Pu238/239/240/241/242/Np237/Hm241/243/Gm244/245 = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0/0.0 + FP(0.2vol%)

■：変更条件

表 3.2.6 最大高速中性子照射量制限の有無による鉛ビスマス強制循環冷却炉燃料炉心の主要目的比較

設計条件		平成 16 年度設計炉心 (導入期炉心)	照射量制限対応炉心 (導入期炉心)	照射量制限対応炉心 (平衡期炉心)
原子炉出力	(E > 0.1 MeV) 制限なし	1980 MWt (750 MWe)	$5 \times 10^{23} n/cm^2$	$5 \times 10^{23} n/cm^2$
炉心型式	均質 2 領域炉心	↓	↓	↓
運転サイクル長さ	18 ヶ月 (548 日)	21.5 ヶ月 (654 日)	↓	↓
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向アシケット)	6/-バッチ	4/-バッチ	↓	↓
炉心高さ	70 cm	↓	↓	↓
軸方向アシケット厚さ (上部/下部)	0/35 cm	0 / 26 cm	0 / 13 cm	↓
炉心等価直徑	443 cm	↓	↓	↓
遙へい体外接円径	約 535 cm	↓	↓	↓
燃料形態	聖化物	↓	↓	↓
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	↓	↓	↓
燃料ビン外径	8.0 mm	↓	↓	↓
被覆管肉厚	0.545 mm	↓	↓	↓
燃料ビン配列ピッチ	9.75 mm	↓	↓	↓
燃料スミア密度 (炉心/軸方向アシケット/径方向アシケット)	75 / 90 / - %ID	↓	↓	↓
スペーサ形式	グリッド支持	↓	↓	↓
集合体配列ビッチ	193.7 mm	↓	↓	↓
集合体当たり燃料ビン本数	331 本	↓	↓	↓
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	38.2 / 22.8 / 39.0 %	↓	↓	↓
Pu 富化度 (内側/外側)*1	17.5 / 19.9 wt. %	16.7 / 19.1 wt. %	16.5 / 19.1 wt. %	↓
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心)*2	154 / 105 GWd/t	124 / 92 GWd/t	126 / 109 GWd/t	↓
燃焼反応度	1.51 % $\Delta k/kk'$	1.36 % $\Delta k/kk'$	1.30 % $\Delta k/kk'$	↓
炉心増殖比 (炉心/軸方向アシケット/径方向アシケット/全体)	0.82 / 0.28 / - / 1.10	0.85 / 0.25 / - / 1.10	0.87 / 0.17 / - / 1.04	↓
最大線出力 (内側/外側) (ミスマッチファクタ考慮)	281 / 248 (275 / 276) W/cm ^{*3}	282 / 249 (276 / 277) W/cm ^{*3}	285 / 251 (279 / 279) W/cm ^{*3}	↓
炉心平均出力密度	168 W/cm ³	173 W/cm ³	175 W/cm ³	↓
接荷時 PuF 照射量	5.9 t/GWe	5.6 t/GWe	5.6 t/GWe	↓
最大高速中性子照射量*3	$6.4 \times 10^{23} n/cm^2$	$5.3 \times 10^{23} n/cm^2$	$5.3 \times 10^{23} n/cm^2$	↓
ドップラ係数 [Tdk/dT] (平衡末期)*4	-2.8 × 10 ⁻³	-3.1 × 10 ⁻³	-3.1 × 10 ⁻³	↓
ボイド反応度 (平衡末期)*4	4.5 \$*7	4.5 \$*7	4.7 \$*7	↓
複合システム倍増時間	76 年*8	72 年*8	72 年*8	↓

*1 : Pu/tW、*2 : アシケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*3 : E > 0.1 MeV、*4 : 集合体内非均質効果考慮、

*5 : () 内は 3 次元計算結果、*6 : () 内は 3 次元相当、平成 16 年度設計炉心 (導入期炉心) の計算結果から推定

*7 : 実効遲発中性子割合 0.00343 (平成 16 年度設計炉心、導入期炉心)、0.00336 (照射量制限対応炉心、導入期炉心)、0.00337 (照射量制限対応炉心、平衡期炉心)、

*8 : 燃料炉外滞在期間 5 年、燃文・定検期間 39 日、炉外滞在中の Pu-241 前処を考慮

■ : 変更条件

表 3.2.7 設計炉心（導入期炉心）の出力分布特性

		最大発熱集合体		炉心集合体		径方向		ピーク線出力		炉心平均線出力 (W/cm)		集合体内 ピーピング係数 (-)	
		位置*	集合体出力 (MW)	平均出力 (MW)	ピーキング係数 (-)	位置*	線出力 (W/cm)	位置*	線出力 (W/cm)	全ピーキング係数 (-)	位置*	ピーキング係数 (-)	
平衡初期	IC	87	5.63	4.46	1.26	87	275	176	1.56	1.003	1.57	1.092	
	OC	382	5.21	4.46	1.17	262	276	176	1.57				
平衡末期	IC	16	5.89	4.46	1.32	6	274	171	1.60	1.018	1.44	1.069	
	OC	255	4.83	4.46	1.08	255	246	171	1.44				

*）「位置」は、図 3.2.2 に示す集合体番号を表わす。

表 3.2.8 設計炉心（導入期炉心）の制御棒価値評価結果

(単位：%△k/kk')

Case	制御棒挿入パターン	制御棒価値 (ノミナル値) ^{*1}	設計最小値 (不確かさ9%考慮) ^{*2}
1	主炉停止系全数24本	6.1	5.6
2	後備棒全数7本	1.8	1.6
3	主炉停止系ワンロッドスタック ^{*3} (23本挿入、1本引抜き) (¹⁰ B:80%)		
3a	・第2リングの1本 (No. 2)	5.7	5.2
3b	・第3リングの1本 (No. 8)	5.7	5.2
3c	・第4リングの1本 (No. 20)	5.6	5.1
3d	・第4リングの1本 (No. 21)	5.1	4.6
4	後備炉停止系ワンロッドスタック ^{*3} (6本挿入、1本引抜き) (¹⁰ B:80%)		
4a	・第1リングの1本 (No. 1)	1.5	1.3
6a	・第3リングの1本 (No. 9)	1.4	1.3

(注) 制御棒番号は、図4.3.2.3.1-1に示す制御棒番号を表す。

^{*1} 下記の補正係数を考慮した値

群縮約効果	0.97
ランピング(吸収体中心偏在)効果	0.77
輸送効果	0.96
メッシュ補正	1.07
合 計	0.77

実証炉最適化設計研究
に適用した値^{*2} 制御棒価値予測誤差(3σ) 9 %^{*3} ワンロッドスタック時の反応度は、全数挿入時の解析値が補正係数を考慮したノミナル値と一致するようにB₄Cを希釀（主系及び後備系ともに希釀率44.1%）した条件で評価

表 3.2.9 設計炉心（導入期炉心）の制御棒反応度収支

[単位 : %Δk/kk']

項目	主炉停止系 (1ロッド・スタック)	後備炉停止系	
		1ロッド・スタック	全数挿入
(1) 計画余剰反応度	2.50	0.30	0.30
a. 出力補償 ^{*1}	0.30	0.30	0.30
b. 燃焼補償	2.00	—	—
c. 運転余裕	0.20	—	—
(2) 余剰反応度の不確かさ (2σ)	0.60	0.10	0.10
a. 臨界性予測誤差	0.00	—	—
b. 出力補償予測誤差 ^{*2}	—	0.06	0.06
c. 燃焼補償予測誤差 ^{*2}	0.40	—	—
d. 燃料製作公差	0.39	—	—
e. 燃料交換余裕	0.20	—	—
(3) 事故時投入反応度 ^{*3}	—	0.15	0.15
(4) 必要制御反応度 [(1) + (2) + (3)]	3.10	0.55	0.55
(5) 制御棒価値	4.60	1.30	1.60
(6) 反応度停止余裕 [(5) - (4)]	1.50	0.75	1.05

^{*1} 定格出力状態から低温停止までの反応度変化であり、膨張係数とドップラ係数より評価^{*2} 出力補償及び燃焼補償に対して各々20%の予測誤差を考慮^{*3} 制御棒中途挿入（定格）状態から最大価値制御棒が1本誤引抜されたときの投入反応度

表 3.2.10 定格出力からの制御棒誤引抜き特性

引抜き 制御棒 番号 ^{*1}	制御棒 引抜量 (cm)	挿入 反応度 (¢)	内側炉心		外側炉心	
			最大線 出力比 ^{*2}	集合体 番号 ^{*3}	最大線 出力比 ^{*2}	集合体 番号 ^{*3}
2	25	36.8	1.10	66	1.06	338
20	25	26.0	1.09	277	1.18	337
21	25	33.6	1.17	177	1.29	279

*1 制御棒番号は、図 3.2.3 参照

*2 制御棒引抜き前の最大線出力に対する比

*3 集合体番号は、図 3.2.2 参照

表 3.2.11 低温状態からの制御棒誤引抜き特性

引抜き 制御棒 番号 ^{*1}	制御棒 引抜量 (cm)	挿入 反応度 (¢)	内側炉心		外側炉心	
			最大線 出力比 ^{*2}	集合体 番号 ^{*3}	最大線 出力比 ^{*2}	集合体 番号 ^{*3}
2	32.5	55.0	1.13	67	1.10	338
20	32.5	42.2	1.19	277	1.31	337
21	32.5	61.9	1.38	278	1.52	279

*1 制御棒番号は、図 3.2.3 参照

*2 制御棒引抜き前の最大線出力に対する比

*3 集合体番号は、図 3.2.2 参照

表 3.2.12 設計炉心（導入期炉心）の主要な反応度特性
[ドップラー係数、炉心冷却材ボイド反応度]

項目	単位	特性	備考
炉心ドップラー係数	Tdk/dT	-2.84E-03	
炉心冷却材ボイド反応度	$\Delta k/kk'$	0.0156 (約4.5\$)	炉心部の冷却材ボイド化
	$\Delta k/kk'$	0.0134 (約3.9\$)	炉心部と上部プレナム部の冷却材がボイド化した時の炉心部ボイド反応度
	$\Delta k/kk'$	-0.0037 (約-1.1\$)	炉心部と上部プレナム部の冷却材がボイド化した時の炉心部+プレナム部ボイド反応度

[密度係数・形状係数]

項目	単位	特性	備考
密度係数			
・炉心 燃料	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	0.317	
構造材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	-0.0642	
冷却材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	-0.0158	
・下部軸プラ 冷却材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	0.0038	
・上部軸プレナム 冷却材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	0.0107	
・径方向プランケット冷却材	$\Delta k/kk' / (\Delta \rho / \rho)$	なし	
形状係数（炉心部）			
・径方向	$\Delta k/kk' / (\Delta R/R)$	0.0383	
・軸方向	$\Delta k/kk' / (\Delta H/H)$	0.190	

表 3.2.13 設計炉心（導入期炉心）の各種反応度係数

[各種反応度係数]

項目	単位	係数値
燃料軸方向膨張係数(炉心部)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	-1.05E-06
燃料被覆管膨張係数(炉心部)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	1.51E-06
ラッパ管膨張係数(炉心部)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	6.85E-07
炉心支持板膨張係数(全炉心)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	-9.57E-06
冷却材膨張係数(炉心部)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	2.11E-06
(下軸プラ部)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	-5.03E-07
(上プレナム部)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	-1.45E-06
(径プラ部)	$\Delta k/kk'/{\circ}C$	なし
低温停止(200°C)から 定格出力状態までの 反応度変化	$\Delta k/kk'$	-0.0029

動特性パラメータ		
実効遅発中性子割合	β_{eff}	3.43E-03
	β_1	7.94E-05
	β_2	7.19E-04
	β_3	6.36E-04
	β_4	1.25E-03
	β_5	5.77E-04
	β_6	1.72E-04
遅発中性子崩壊定数 [sec ⁻¹]	λ_1	1.30E-02
	λ_2	3.13E-02
	λ_3	1.35E-01
	λ_4	3.46E-01
	λ_5	1.40E+00
	λ_6	3.80E+00
即発中性子寿命 [sec]	lp	3.47E-07

表 3.2.14 設計炉心（導入期炉心）の燃料集合体仕様

項目	単位	仕様
炉心燃料		
ウラン235含有率	w/o	0.3
燃料スミア密度	%	75
軸ブランケット燃料		
ウラン235含有率	w/o	0.3
燃料スミア密度	%	90
炉心高さ	mm	700
軸方向ブランケット厚さ(上/下)	mm	0 / 350
ガスプレナム長さ(上/下)	mm	390 / 800
集合体内燃料ピン数	-	331
被覆管外径	mm	8.0
被覆管肉厚	mm	0.545
被覆管内径	mm	6.91
燃料ペレット外径	mm	6.75
要素配列ピッチ	mm	9.75
p/d比	-	1.219
ラッパ管内対面距離	mm	179.2
ラッパ管肉厚	mm	5.0
ラッパ管外対面距離	mm	189.2
集合体配列ピッチ	mm	193.7
組成体積比		
燃料体積比	%	38.2
構造材体積比	%	22.8
冷却材体積比	%	39

表 3.2.15 被覆管温度評価用工学的安全係数

処理方法	項目	工学的安全係数		
		ΔT_{cool}	ΔT_{film}	ΔT_{clad}
乗算項	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	炉心熱出力較正誤差	—	1.02	1.02
	流路変形効果	1.02	—	—
	集合体間流量配分誤差	1.05	—	—
統計項	原子炉出入口温度誤差	1.02	—	—
	炉内流量配分誤差	1.03	—	—
	物性値誤差	1.02	1.10	1.03
	各部製造誤差	1.03	1.04	1.05
	ペレット偏心効果	—	1.47	1.52

注: — の欄は1

表 3.2.16 各流量領域ごとの温度特性

流量領域 番号	集合体 本数	集合体 流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	最大 ピン出力 (kW)	集合体 番号*	冷却材最高温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	被覆管最高温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	燃料最高温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	冷却材 流速 (m/s)	バンドル 圧損 (MPa)	
内側炉心	1	129	205	26445	17.8	5	491	533	514	564	880	999	1.8	0.20
	2	123	185	22755	16.2	209	493	535	515	564	—	—	1.6	0.17
外側炉心	3	54	188	10152	16.6	382	495	538	516	565	885	1004	1.7	0.17
	4	60	167	10020	14.8	452	496	539	515	563	—	—	1.5	0.14
外側炉心	5	60	133	7980	12.0	386	499	542	515	563	—	—	1.2	0.09
	6	18	116	2088	10.5	387	499	543	514	561	—	—	1.0	0.07
炉心流量合計				79440	(1次系全流量の93.7%)									

(*):集合体番号は、図4.3.2.2-1を参照のこと。

表 3.2.17 冷却材および被覆管の温度履歴（第 1 流量領域）

流量領域1	時期	ピン出力 (kW)	最高温度・最大燃焼度・ピン		
			冷却材温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)
1cy.-BOC	16.5	477	515	499	545
1cy.-EOC	17.7	490	531	513	562
2cy.-BOC	16.7	479	518	502	549
2cy.-EOC	17.8	491	533	514	564
3cy.-BOC	16.8	480	519	503	550
3cy.-EOC	17.7	491	532	514	563
4cy.-BOC	16.8	480	519	502	549
4cy.-EOC	17.6	489	530	512	561
5cy.-BOC	16.6	478	516	500	547
5cy.-EOC	17.4	487	528	510	558
6cy.-BOC	16.4	475	514	497	543
6cy.-EOC	17.2	484	524	506	554

表 3.2.18 冷却材および被覆管の温度履歴（第2流量領域）

流量領域2	最高温度ピン					最大燃焼度ピン				
	ピン出力 (kW)	冷却材温度 HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)	中心温度 HS値 (°C)	ピン出力 (kW)	冷却材温度 HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)	中心温度 HS値 (°C)		
1cy.-BOC	16.0	491	533	513	562	15.5	485	525	506	554
1cy.-EOC	15.3	482	521	502	548	16.0	491	532	512	560
2cy.-BOC	16.1	493	534	515	564	15.7	487	528	509	557
2cy.-EOC	15.3	482	522	502	549	16.1	492	533	513	562
3cy.-BOC	16.2	493	535	515	564	15.8	488	529	510	558
3cy.-EOC	15.3	481	521	502	548	16.1	492	533	513	562
4cy.-BOC	16.1	492	533	514	563	15.8	488	529	509	558
4cy.-EOC	15.2	480	519	500	546	16.0	491	532	512	560
5cy.-BOC	16.0	490	531	512	561	15.7	487	527	508	556
5cy.-EOC	15.0	478	517	498	543	15.9	489	530	510	558
6cy.-BOC	15.8	488	529	510	558	15.5	485	525	506	553
6cy.-EOC	14.8	476	514	495	540	15.7	487	527	507	555

表 3.2.19 冷却材および被覆管の温度履歴（第3流量領域）

流量領域3	時期	最高温度ピン			最大燃焼度ピン		
		ピン出力 (kW)	冷却材温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)	中心温度 HS値 (°C)	冷却材温度 ノミナル値 (°C)
1cy.-BOC	16.6	495	538	516	565	494	536
1cy.-EOC	14.9	474	512	492	535	481	521
2cy.-BOC	16.3	492	533	512	560	491	532
2cy.-EOC	14.6	470	508	488	531	45.2	478
3cy.-BOC	16.0	488	529	508	555	16.0	487
3cy.-EOC	14.4	467	504	485	527	15.0	475
4cy.-BOC	15.7	484	524	503	550	15.7	484
4cy.-EOC	14.1	464	500	481	522	14.7	472
5cy.-BOC	15.4	480	520	499	545	15.4	481
5cy.-EOC	13.9	461	496	478	518	14.5	468
6cy.-BOC	15.1	477	515	495	540	15.2	477
6cy.-EOC	13.6	457	492	474	514	14.2	465

表 3.2.20 冷却材および被覆管の温度履歴（第4流量領域）

流量領域4 時期	最高温度ピン						最大燃焼度ピン					
	ピン出力 (kW)	冷却材温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)	中心温度 HS値 (°C)	ピン出力 (kW)	冷却材温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)	中心温度 HS値 (°C)		
1cy.-BOC	14.8	496	539	515	563	14.3	489	530	507	554		
1cy.-EOC	13.0	470	508	487	529	13.6	479	518	496	541		
2cy.-BOC	14.5	492	534	510	558	14.1	486	526	503	549		
2cy.-EOC	12.8	467	504	483	525	13.4	476	515	493	536		
3cy.-BOC	14.3	488	529	506	553	13.9	482	522	500	545		
3cy.-EOC	12.6	464	500	480	521	13.2	473	511	489	532		
4cy.-BOC	14.0	485	525	503	548	13.6	479	518	496	541		
4cy.-EOC	12.4	461	497	477	517	13.0	470	507	486	528		
5cy.-BOC	13.8	481	521	499	544	13.4	476	514	493	536		
5cy.-EOC	12.2	458	493	473	513	12.7	466	503	482	524		
6cy.-BOC	13.5	478	516	495	539	13.1	472	510	489	532		
6cy.-EOC	11.9	455	489	470	509	12.5	463	499	479	519		

表 3.2.21 冷却材および被覆管の温度履歴（第 5 流量領域）

流量領域5	最高温度・最大燃焼度ピン			
	ピン出力 (kW)	冷却材温度 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)
1cy.-BOC	12.0	499	542	515
1cy.-EOC	11.2	486	527	501
2cy.-BOC	11.8	497	539	513
2cy.-EOC	11.1	484	524	499
3cy.-BOC	11.7	495	537	510
3cy.-EOC	11.0	482	522	496
4cy.-BOC	11.6	493	534	508
4cy.-EOC	10.9	480	519	494
5cy.-BOC	11.5	490	532	506
5cy.-EOC	10.8	478	517	492
6cy.-BOC	11.4	488	529	503
6cy.-EOC	10.7	476	514	490
				532

表 3.2.22 冷却材および被覆管の温度履歴（第 6 流量領域）

流量領域6	最高温度・最大燃焼度ピン				
	ピン出力 (kW)	冷却材 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)	被覆管肉厚 ノミナル値 (°C)	HS値 (°C)
1cy.-BOC	10.5	499	543	514	561
1cy.-EOC	9.7	484	524	497	540
2cy.-BOC	10.3	497	540	511	558
2cy.-EOC	9.6	482	521	495	538
3cy.-BOC	10.2	495	537	509	555
3cy.-EOC	9.5	480	519	492	535
4cy.-BOC	10.1	493	535	507	552
4cy.-EOC	9.4	478	516	490	533
5cy.-BOC	10.0	491	532	504	549
5cy.-EOC	9.3	476	514	488	530
6cy.-BOC	9.9	488	529	502	547
6cy.-EOC	9.2	474	511	486	527

表 3.2.23 燃料の温度履歴

内側炉心 集合体No. 87		被覆管温度ノミナル値			ペレット温度			
時期	線出力 (W/cm)	冷却材温度 ノミナル値 (°C)	外面 (°C)	肉厚中心 (°C)	内面 (°C)	表面ノミナル (°C)	中心ノミナル (°C)	中心HS ^{*1} (°C)
1cy.-BOC	275	406	444	454	465	711	880	999
1cy.-EOC	265	418	453	463	473	710	852	965
2cy.-BOC	269	404	440	451	461	703	869	986
2cy.-EOC	257	414	448	458	468	700	837	948
3cy.-BOC	261	400	436	446	456	693	854	968
3cy.-EOC	249	410	443	453	462	689	823	930
4cy.-BOC	253	397	431	441	451	683	840	951
4cy.-EOC	241	406	438	447	456	678	808	913
5cy.-BOC	244	393	426	436	445	671	823	931
5cy.-EOC	233	395	427	436	445	665	793	895
6cy.-BOC	237	390	422	431	440	662	810	915
6cy.-EOC	226	392	423	432	441	655	781	880
外側炉心 集合体No. 262		被覆管温度ノミナル値			ペレット温度			
時期	線出力 (W/cm)	冷却材温度 ノミナル値 (°C)	外面 (°C)	肉厚中心 (°C)	内面 (°C)	表面ノミナル (°C)	中心ノミナル (°C)	中心HS ^{*1} (°C)
1cy.-BOC	276	408	447	458	468	715	885	1004
1cy.-EOC	246	423	456	465	474	697	845	957
2cy.-BOC	264	403	440	450	460	699	863	978
2cy.-EOC	235	417	449	457	466	682	824	931
3cy.-BOC	253	398	434	443	453	685	843	954
3cy.-EOC	226	412	442	451	459	669	806	910
4cy.-BOC	243	394	428	437	447	672	824	932
4cy.-EOC	217	407	436	444	452	656	788	889
5cy.-BOC	235	390	423	432	441	662	809	914
5cy.-EOC	210	403	431	439	447	646	774	872
6cy.-BOC	226	386	418	427	435	650	792	894
6cy.-EOC	203	399	427	434	442	635	760	855

*1) 燃料中心温度に対するHSFとして、1.20を暫定。

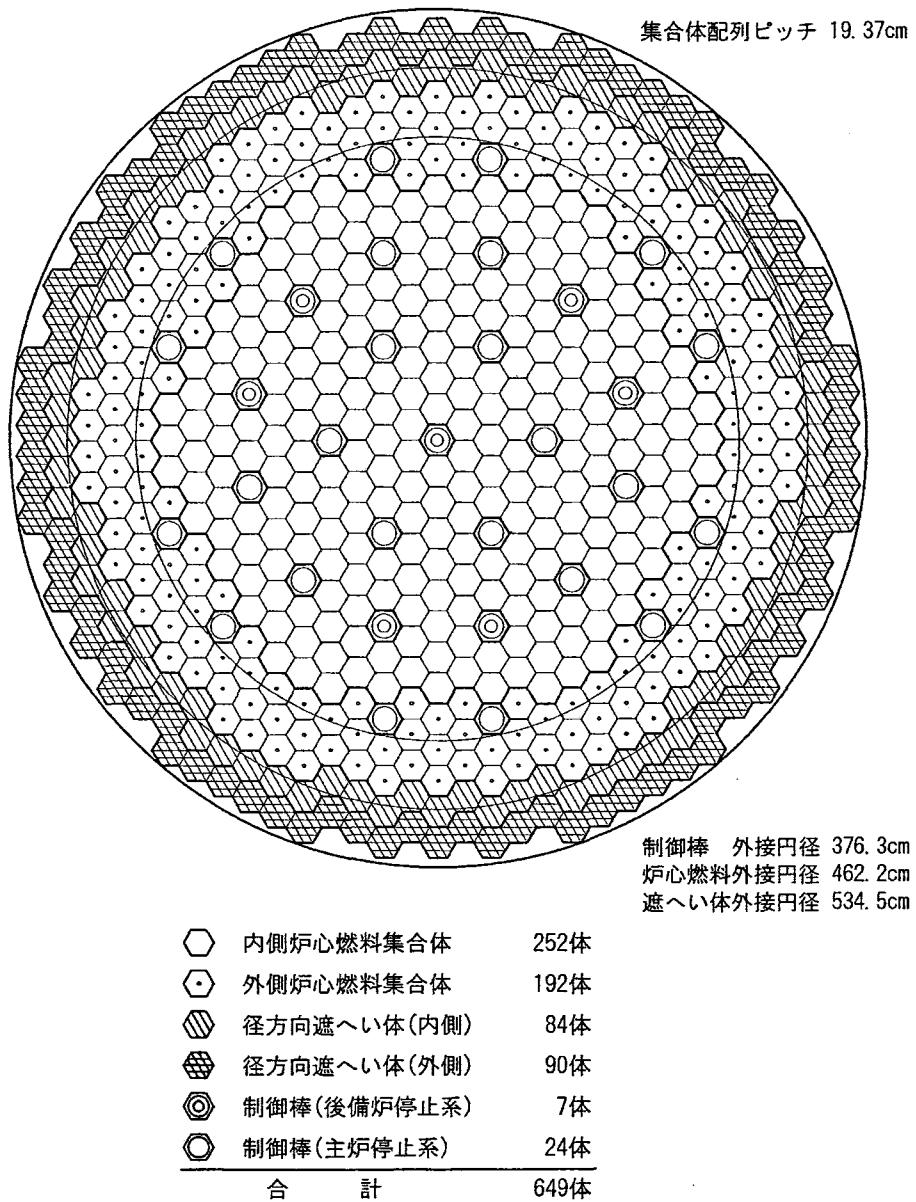


図 3.2.1 設計炉心（導入期炉心）の炉心構成図

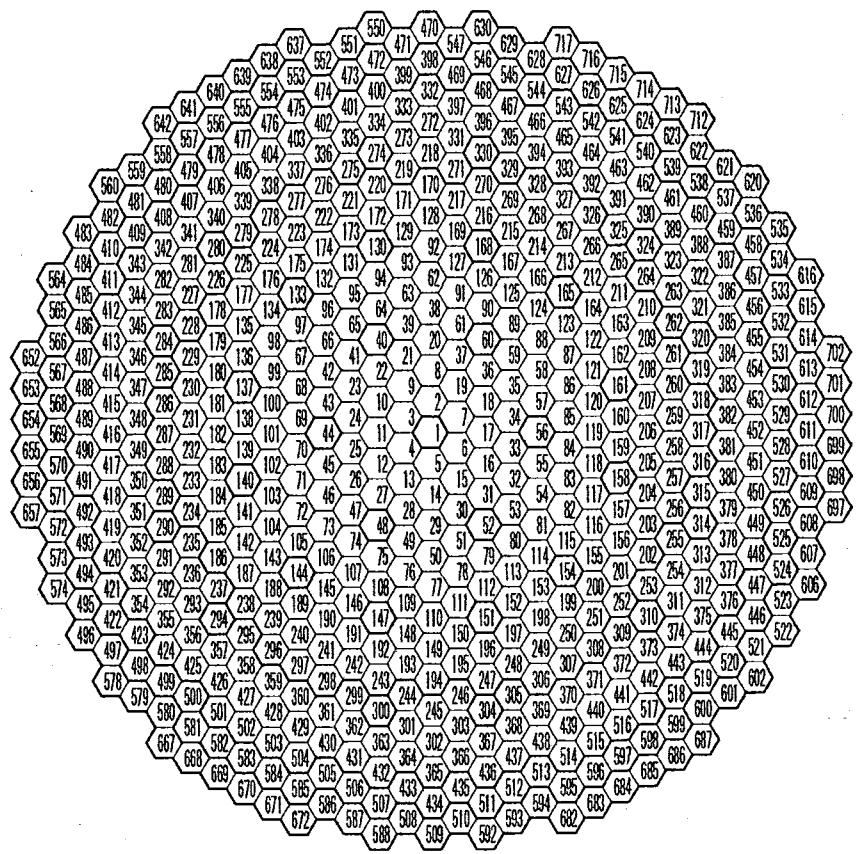


図 3.2.2 設計炉心（導入期炉心）の集合体番号図

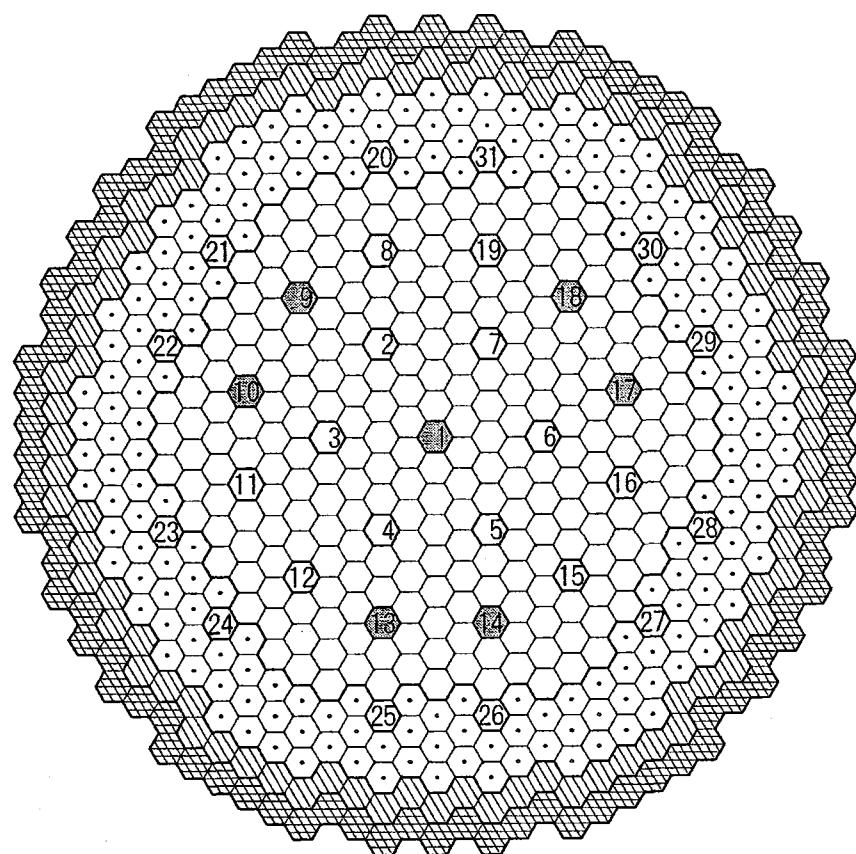


図 3.2.3 設計炉心（導入期炉心）の制御棒番号図

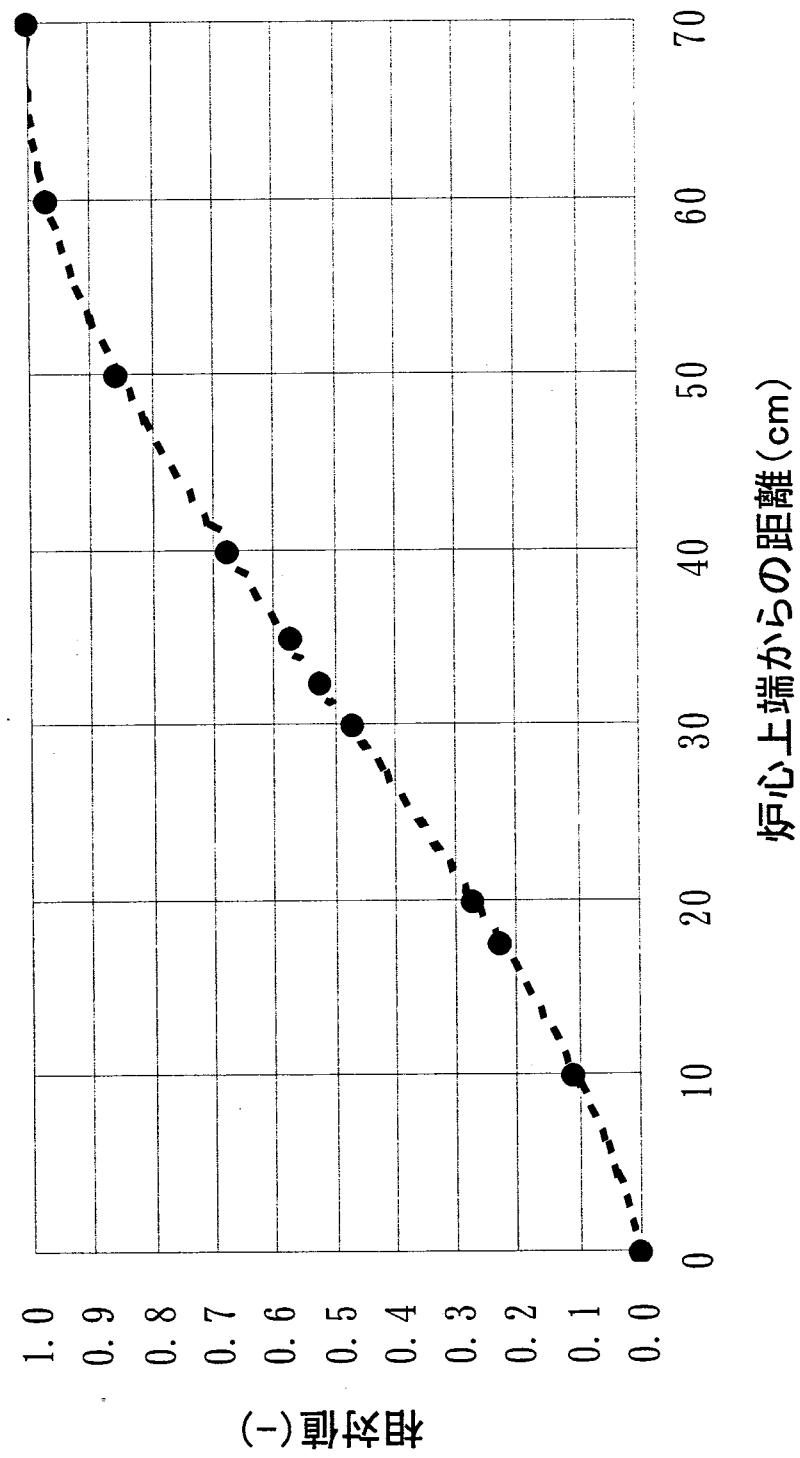
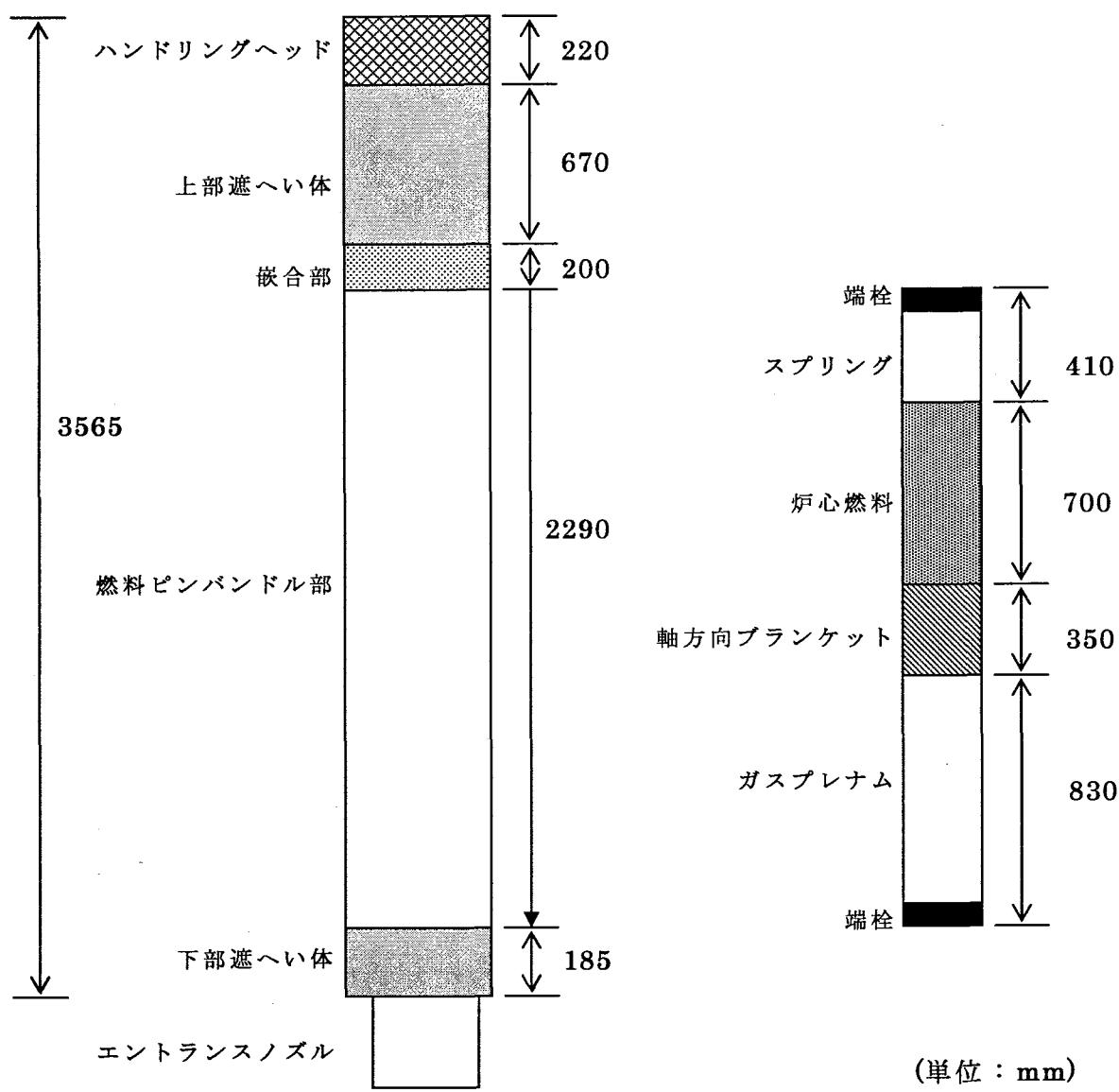


図 3.2.4 設計炉心（導入期炉心）の制御棒ストローカー曲線



集合体全長 : 3565 mm

燃料要素長 : 2290 mm

図 3.2.5 設計炉心（導入期炉心）の炉心燃料集合体軸方向概念図

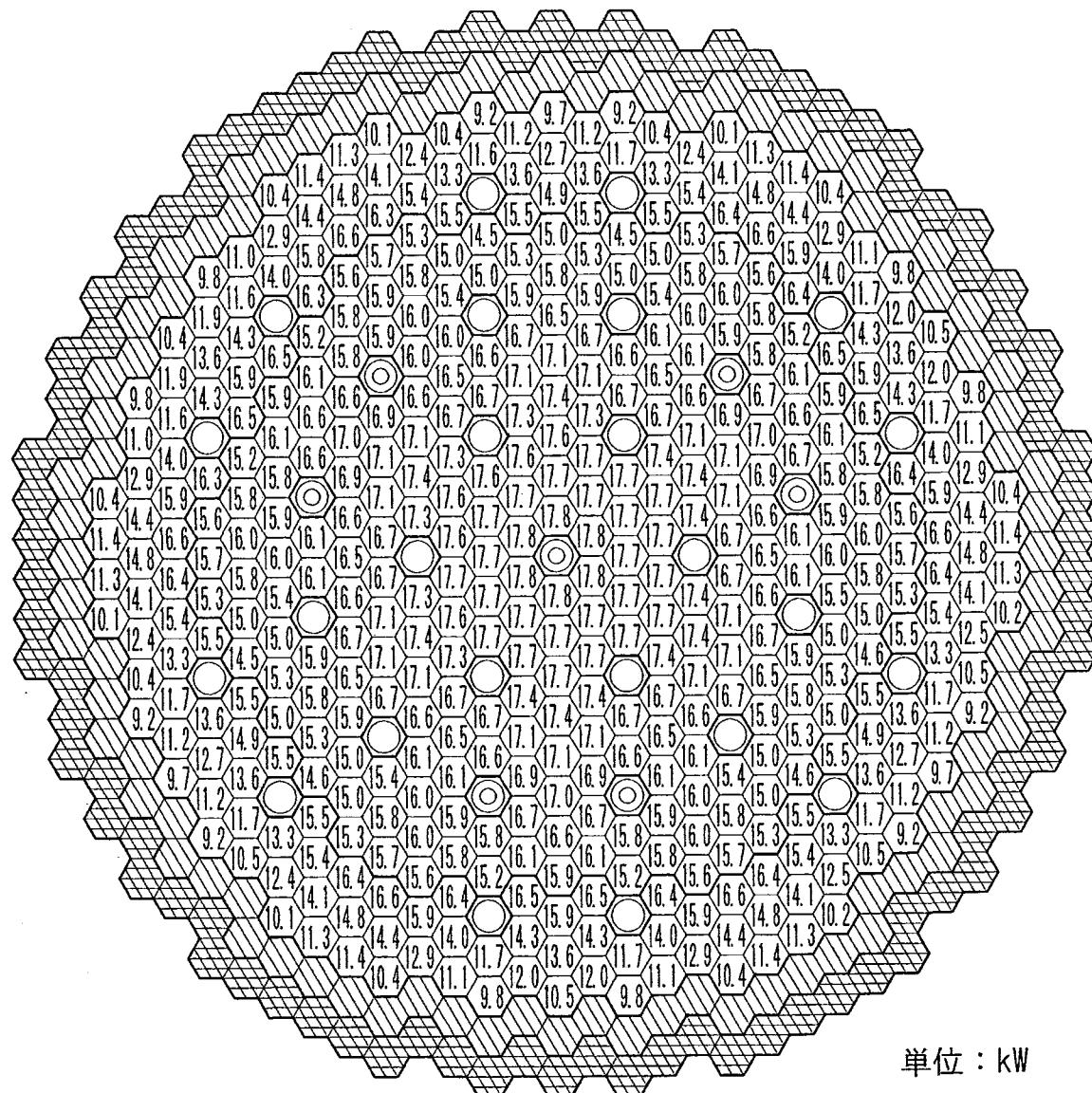


図 3.2.6 設計炉心（導入期炉心）の最大ピン出力分布
(平衡初期・末期の最大値)

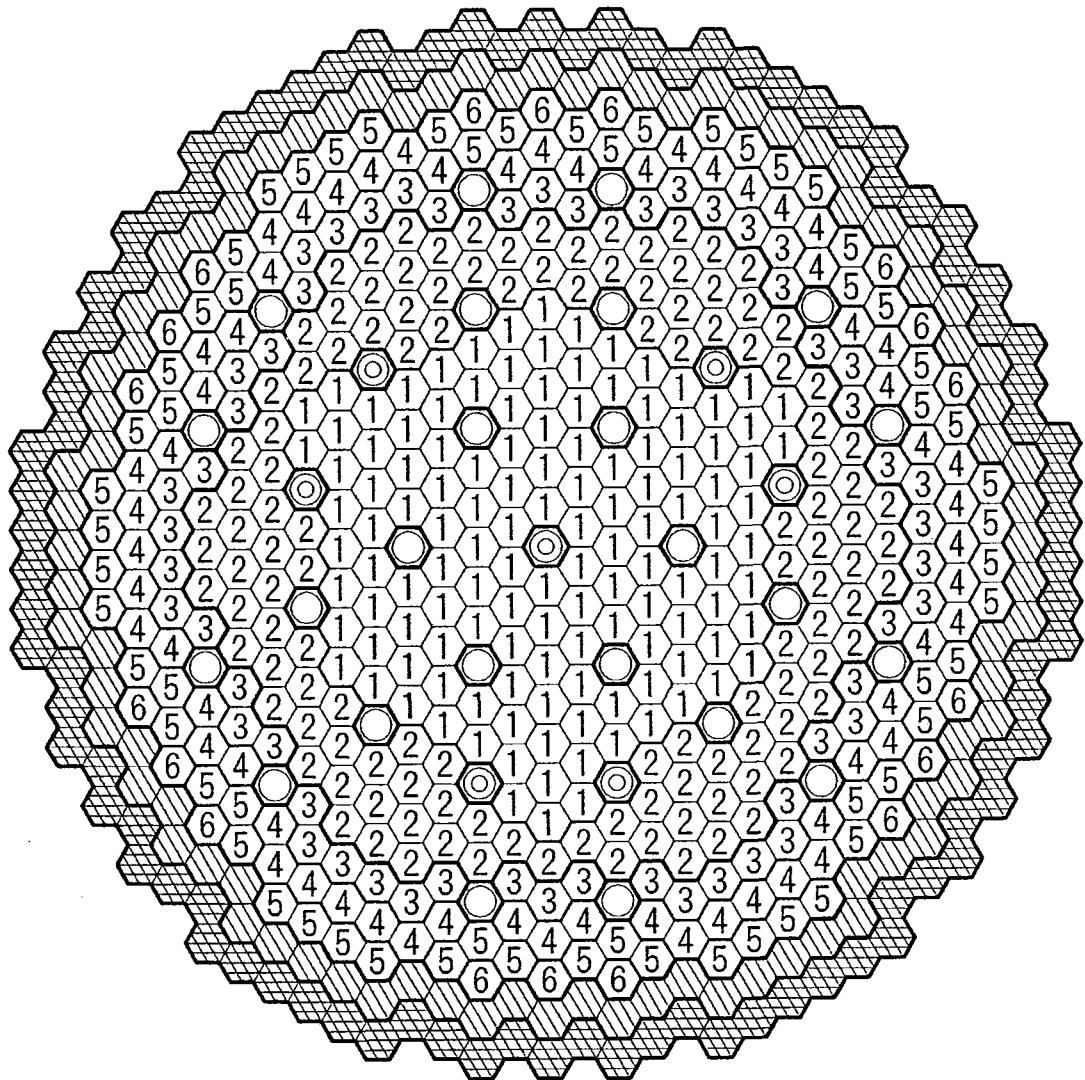


図 3.2.7 設計炉心（導入期炉心）の流量領域区分図

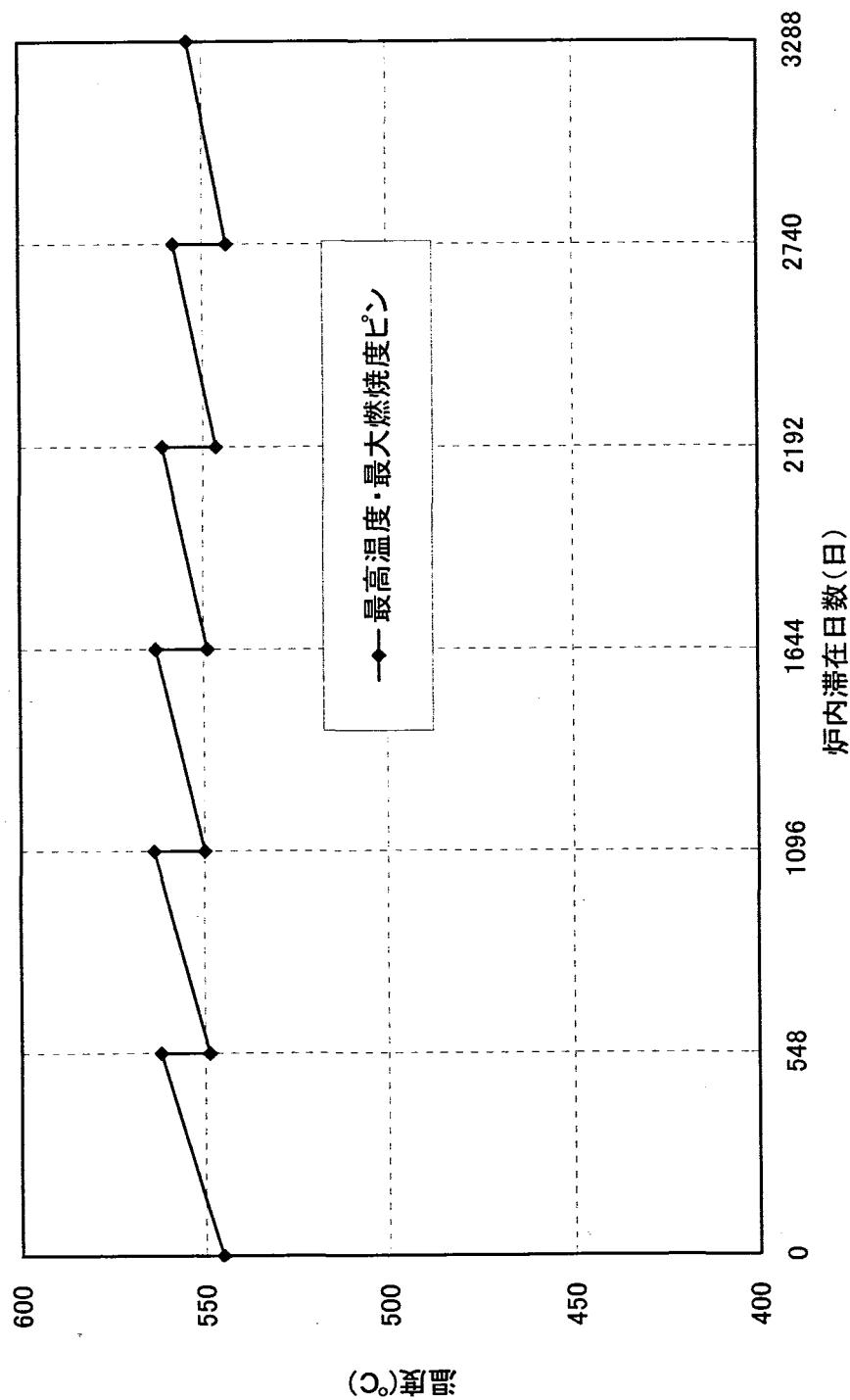


図 3.2.8 被覆管肉厚中心部 SST 測定温度の履歴（内側炉心、第 1 流量領域）

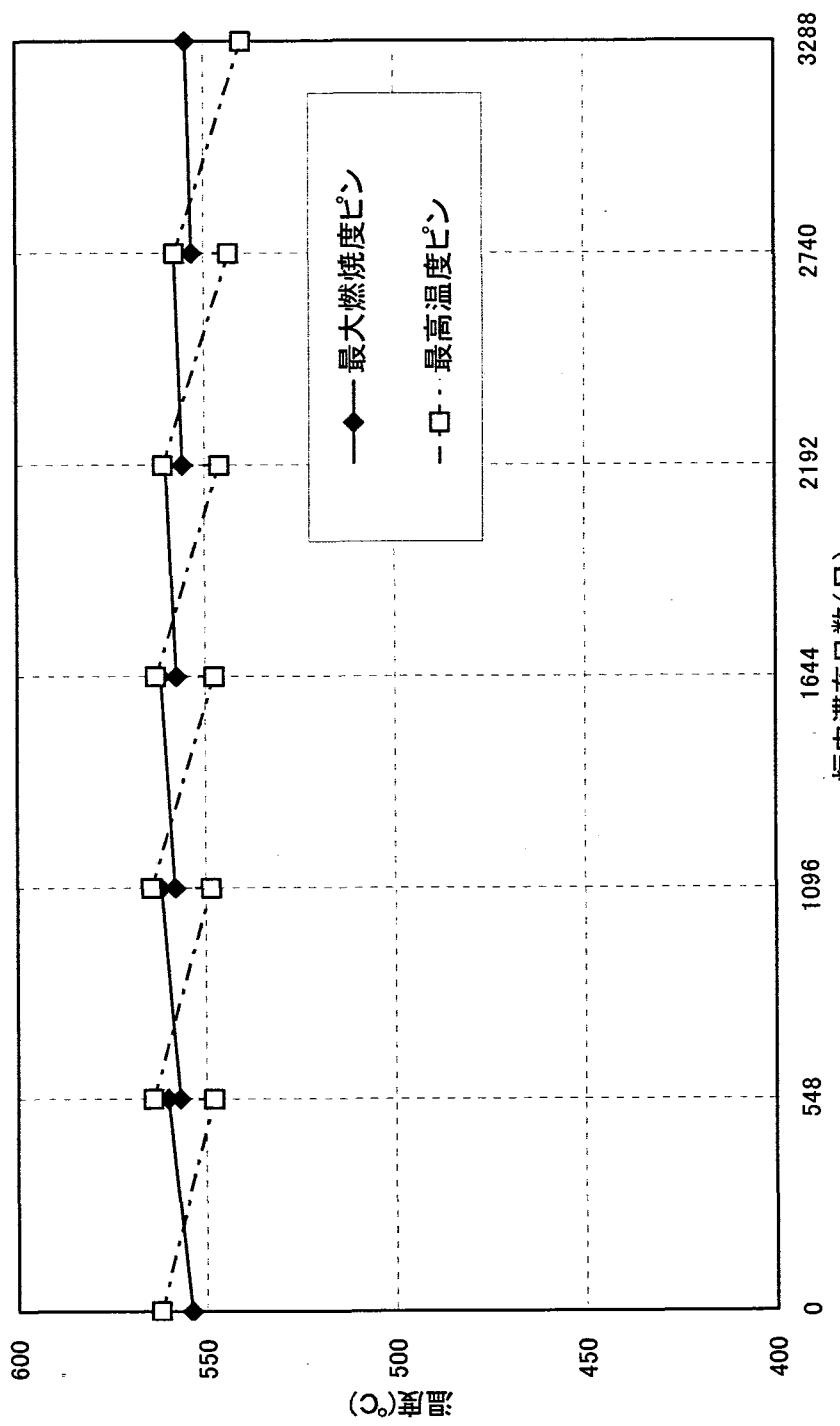


図 3.2.9 被覆管肉厚中心ボットスポット温度の履歴（内側炉心、第 2 流量領域）

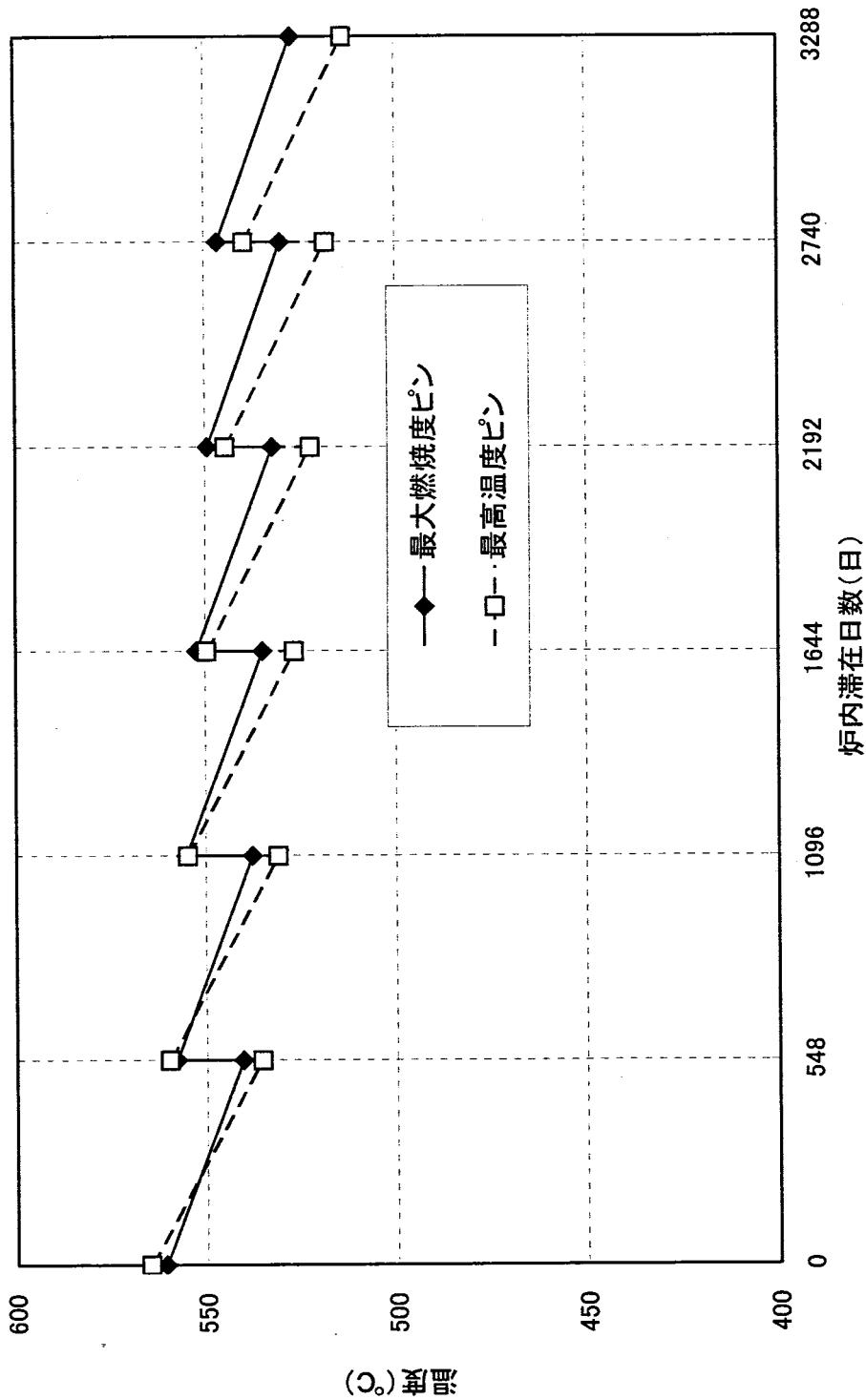


図 3.2.10 被覆管肉厚中心部 SST 温度の履歴 (外側炉心, 第 3 流量領域)

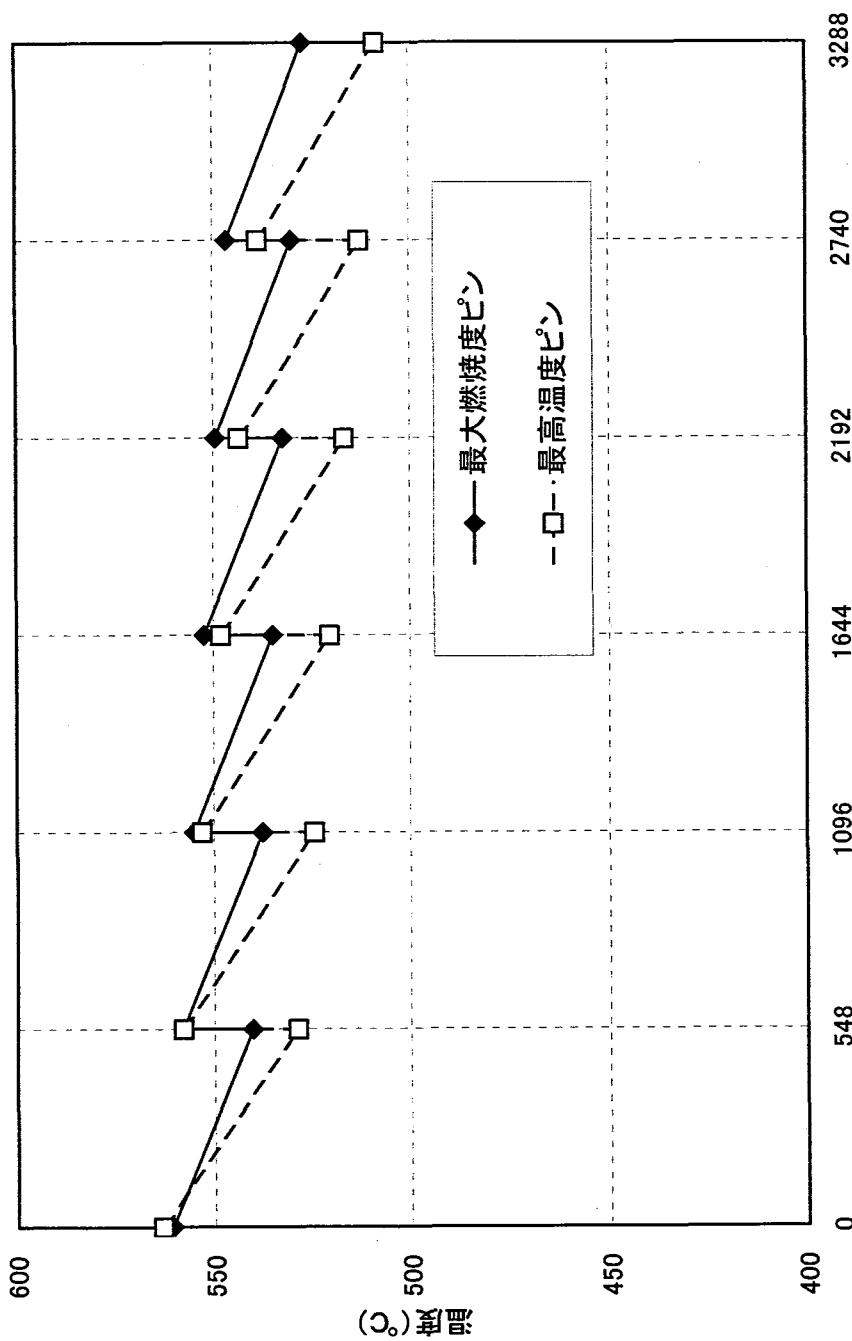


図 3.2.11 被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴（外側炉心、第4流量領域）

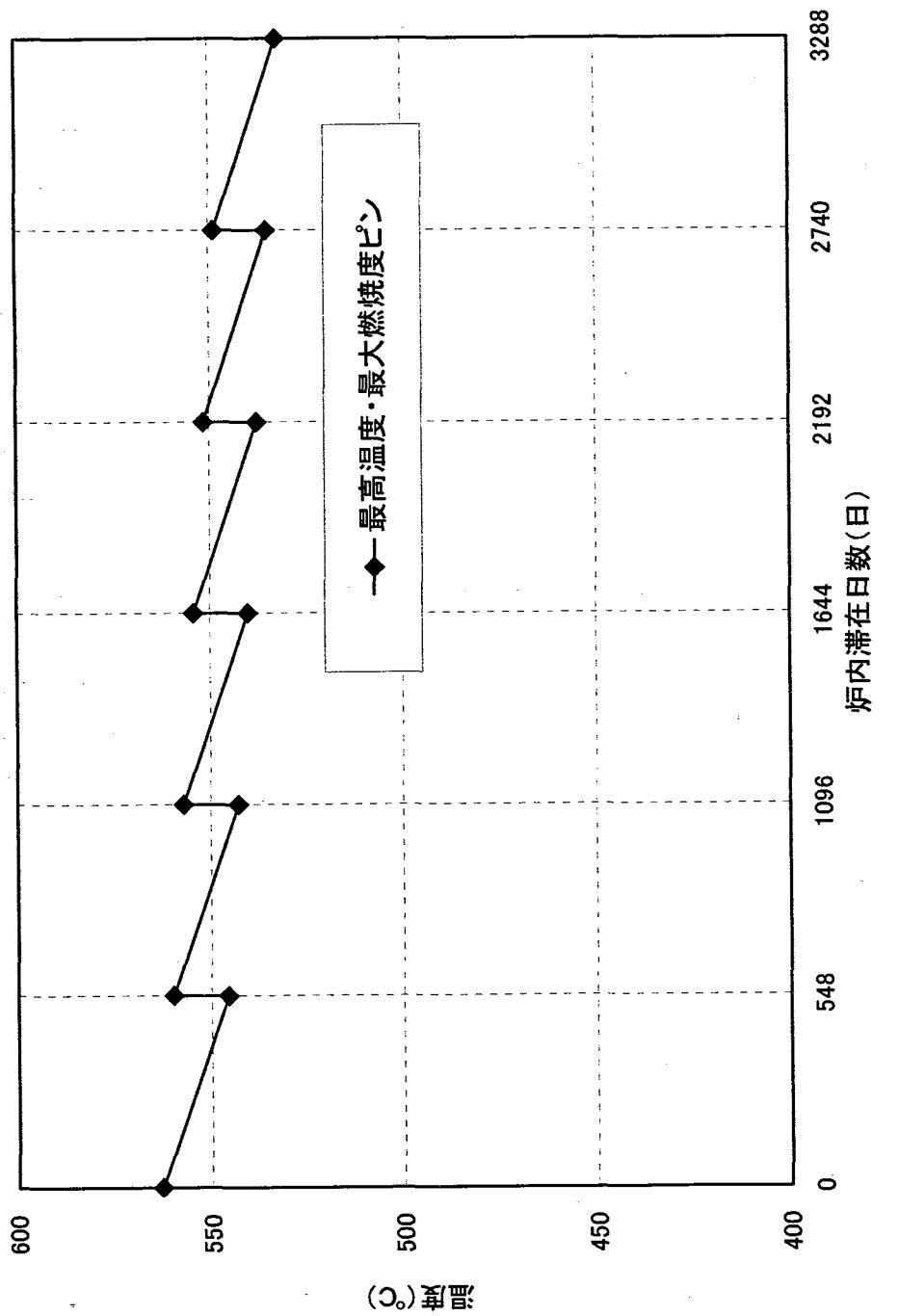


図 3.2.12 被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴 (外側炉心, 第5流量領域)

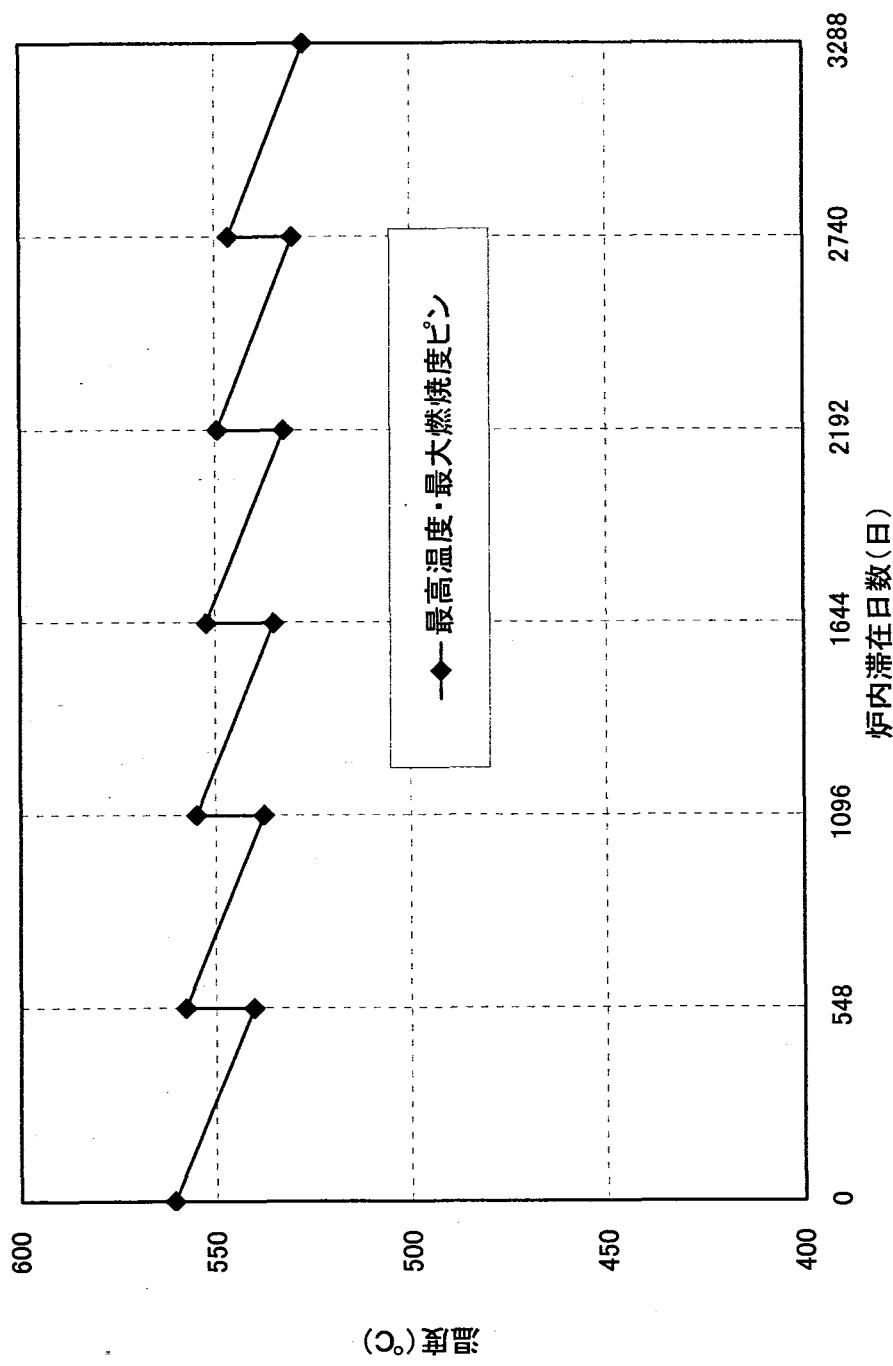


図 3.2.13 被覆管肉厚中心ホットスポット温度の履歴（外側炉心、第 6 流量領域）

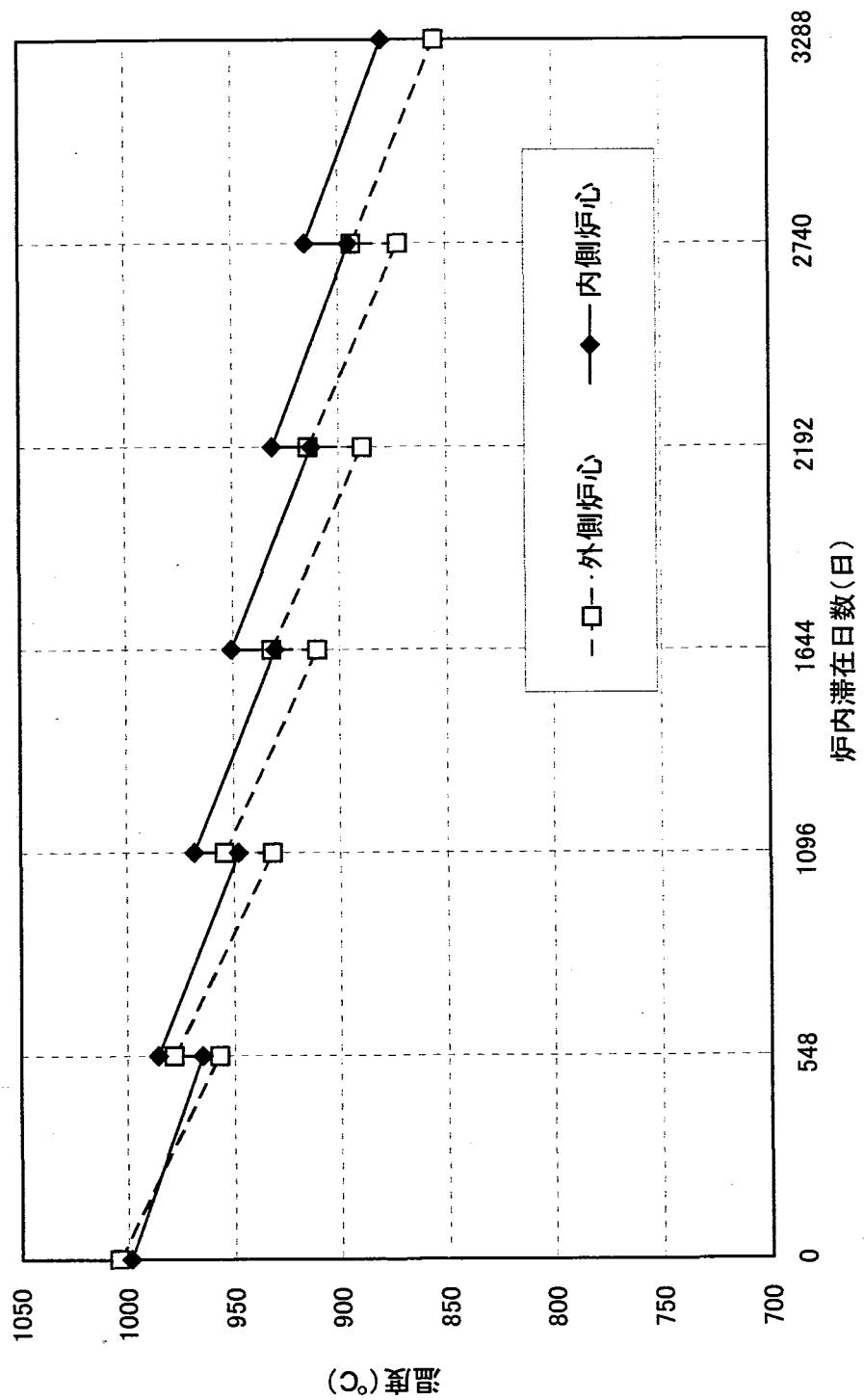


図 3.2.14 最大線出力ピニンの燃料中心ホットスポット温度の履歴

4. おわりに

FBR サイクル実用化戦略調査研究 (FS) においては、様々な冷却材を用いた高速増殖炉が検討されており、その候補の 1 つとして鉛ビスマス冷却炉の設計研究を実施している。本研究では最近の鉛ビスマス中の材料腐食の実験結果を反映して、平成 15 年度に実施した鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料の仕様を見直した。見直しにあたっては、被覆管外面腐食量について新たに提案された評価式を用い、被覆管腐食を抑制する観点から被覆管外面最高温度を 570°C 以下に制限した。

上記の新しい設計条件での強制循環炉心および自然循環炉心の原子炉出入口温度に関する予備解析の結果、強制循環炉心は自然循環炉心に比べて設計条件変更の炉心核特性への影響が小さいので有望と判断した。そこで、電気出力 750MWe (熱出力 1980MWt) の強制循環炉について冷却材流速 2m/s 以下、バンドル圧損 0.23MPa 以下などの設計条件を満たすように設計を行った。被覆管外面腐食量の増大により、平成 15 年度設計炉心に比べて被覆管肉厚、燃料ピン外径および燃料ピン配列ピッチが増大し、これに伴い、炉心もまた大きくなつた。設計炉心の主な仕様は、径方向プランケットなし、被覆管外径 8.0mm、炉心高さ 70cm、炉心等価直径 4.43m、遮へい体外接円径 5.35m となつた。

設計炉心の運転サイクル長さは 18 ヶ月、炉心部取出平均燃焼度は 150GWd/t 以上、増殖比は 1.10 (導入期)、1.04 (平衡期) となり、いずれも FS の炉心性能目標を達成した。なお、本設計では、将来の開発を見込んで被覆管の最大高速中性子照射量に上限を設けないが、照射量を ODS 鋼および PNC-FMS 鋼の開発目標の目安値 ($5 \times 10^{23} n/cm^2$, $E > 0.1 MeV$) 以下に止めた場合には、炉心部取出平均燃焼度は 125GWd/t 程度となつた。なお、設計炉心の遮へい体外接円径 5.35m は取合設計条件 5.5m 以下を満たしている。これにより、被覆管の腐食および温度に関する新しい設計条件の下でも炉心成立の見通しが得られた。

また、導入期炉心を対象に、反応度特性解析により、安全解析用のデータをまとめた。さらに、熱特性解析を行い、最大線出力、ピーキング係数、各燃料集合体ごとの最大ピン出力分布などを求め、被覆管最高温度および燃料ペレット最高温度を評価し、燃料健全性評価用のデータを整備した。

謝辞

本研究における炉心設計に関する解析においては、サイクル機構の検討方針や考え方に基づき、新型炉技術開発株式会社殿に担当して頂きました。厳しいスケジュールの中、効率良くご尽力頂き、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 江沼康弘, 他 : “重金属冷却炉の検討－平成 13 年度成果－（研究報告書）”,
JNC TN9400 2003-073, (2003)
- [2] 山下巧, 他 : “鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料設計検討（研究報告）”,
JNC TN9400 2004-065, (2004)
- [3] 古川智弘, 他 : “酸素濃度制御下停留鉛ビスマス中における国産鉄鋼材料の腐食特性(2)”, 日本原子力学会 2003 年秋の大会, H40, (2003)
- [4] 皆藤威二: “鉛冷却炉における炉心材料の腐食に関する調査・検討（研究報告）”,
JNC TN9400 2000-039, (2000)
- [5] 青砥紀身, 古川智弘 : “鉛ビスマス中におけるマルテンサイト系鋼の腐食代の評価”, 日本原子力学会 2004 年秋の大会, E27, (2004)
- [6] S. K. Cheng and N. E. Todreas : “Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-wrapped Hexagonal Rod Bundles - Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 92, pp.227-251, (1986)
- [7] K. Rehme : “Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers”,
Nuclear Technology, Vol. 17, pp. 15-23, (1973)
- [8] E. K. Storms : “An Equation which Describes Fission Gas Release from UN Reactor Fuel”, Journal of Nuclear Materials, 158, pp. 119-129, (1988)
- [9] 羽様平, 他 : “高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成（研究報告）”,
JNC TN9400 2002-064, (2002)
- [10] C. A. Sleicher et al. : “Temperature and Eddy Diffusivity Profiles in NaK”,
International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, pp. 1565-1575, (1973)
- [11] Hj. Matzke : “Science of Advanced LMFBR Fuels”, North-Holland,
Amsterdam, (1986)