

鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料設計検討

(研究報告)

2004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)
2004

鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料設計検討
(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心燃料概念について設計研究を行ってきた。ここでは、平成 13 年度に実施した鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料設計に対して、DDI(ダクト(ラッパ管)間相互作用)を回避する観点から燃料仕様を見直し、FS フェーズ II 中間取り纏め(平成 15 年度)としての強制循環方式と自然循環方式の代表炉心を設計して、いずれも FS の設計目標を満たす見通しを得た。

750MWe 強制循環炉心(FC)と 550MWe 自然循環炉心(NC)の特性を比較した結果、FC を有望概念に選定した。FC の利点を以下にまとめる。

- (1) 全炉心平均燃焼度(炉心+ブランケット)が大きい(FC : 105GWd/t, NC : 89GWd/t)。
- (2) 装荷時核分裂性 Pu 重量が少ない(FC : 5.8t/GWe, NC : 8.0t/GWe)。
- (3) 出力が大きくても炉心等価直径が小さい(FC : 441cm, NC : 464cm)。
- (4) NC は自然循環力の確保のため、炉容器軸長が長くなり耐震性の観点からは課題が多い。

なお、本検討の代表炉心は炉心取出平均燃焼度の目標値(150GWd/t)を達成したが、被覆管の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 ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$) 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照射量目標対応炉心は、炉心取出平均燃焼度が FC で 129GWd/t, NC で 146 GWd/t となった。さらに、MOX 燃料および金属燃料と軽水炉回収 TRU 燃料の適用性を確認し、鉛ビスマス冷却炉炉心の柔軟性・多様性を示した。

また、最近の鉛ビスマス中の被覆管腐食試験の知見では、現設計で用いた被覆管腐食評価式は非安全側で、かつ現状の制限目安の被覆管最高温度 650℃を 570℃まで下げて設計する必要の可能性があるが出てきている。現行腐食式を用いて被覆管最高温度を低下した場合の影響について予備解析を実施し、炉心特性への影響は小さいという結果を得た。

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 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 are studied, in which lead-bismuth is one of the subject. In JFY 2003 study of FS phase-II, design studies of medium scale forced /natural circulation nitride fuel core (FC/NC core) were carried out considering DDI (duct-duct interaction) which was not considered in JFY 2001 studies. The prospect of satisfying a design target of the core performance was acquired by improved design.

By comparing properties of FC core (750MWe) and NC core (550MWe), we recommended the FC core as a hopeful one to design. The FC core was superior to the NC core in the following points, (1) Larger average burn-up (core and blanket) (2) Less Pu-fissile loaded weight (3) Smaller core equivalent diameter in spite of larger generating power (4) The NC core has much problems from the viewpoint of earthquake-resistant design.

A design target of high burn-up of 150 GWd/t was satisfied, but fast fluence on clad is over the development target of ODS steel and PNC-FMS steel ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$). Cores in which fast fluence was restricted to less than the target were also designed. MOX fuel and metal fuel cores were studied, and the effect of composition of TRU fuel recovered from LWR to core performance was also investigated to show flexibility and diversity in the lead-bismuth cooled core.

In recent studies, it is becoming clear that the present evaluation for the clad corrosion in lead-bismuth gives non-conservative result and lowering the highest clad temperature will be required in core design. The lowering of temperature was permissible according to preliminary analysis using the present corrosion correlation.

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. 検討の経緯	2
(1) フェーズⅠ	2
(2) フェーズⅡ	2
3. 炉心概念の検討	12
3. 1 照射変形を考慮した燃料仕様の設定	12
3. 2 炉心設計	16
3. 2. 1 強制循環炉	17
(1) 代表炉心概念の設計	17
(2) 照射量目標対応炉心（窒化物燃料）の検討	19
(3) MOX 燃料および金属燃料炉心の検討	19
(4) 軽水炉回収 TRU 燃料の適用性の検討	20
(5) まとめ	21
3. 2. 2 自然循環炉	44
(1) 代表炉心概念の設計	44
(2) 照射量目標対応炉心（窒化物燃料）の検討	46
(3) まとめ	46
3. 2. 3 被覆管温度制限対応炉心の検討	65
(1) 予備解析	65
(2) 被覆管温度制限対応炉心の炉心設計	66
(3) まとめ	67
4. おわりに	81
参考文献	84

表リスト

表 2.1	鉛ビスマス自然循環冷却炉（フェーズⅠ）の炉心主要目	4
表 2.2	平成 13 年度設計自然循環炉心の主要目	5
表 2.3	平成 13 年度設計強制循環炉心の主要目	6
表 2.4	鉛ビスマス冷却炉の主要な炉心設計条件	7
表 3.1.1	DDI 回避を考慮した自然循環炉心燃料仕様	13
表 3.1.2	DDI 回避を考慮した強制循環炉心燃料仕様	14
表 3.2.1.1	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心（導入期炉心）の主要目	22
表 3.2.1.2	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心（導入期炉心）の主要な 燃料仕様	23
表 3.2.1.3	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心（導入期炉心）の主要な 炉心特性	24
表 3.2.1.4	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心（平衡期炉心）の主要目	25
表 3.2.1.5	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心（平衡期炉心）の主要な 燃料仕様	26
表 3.2.1.6	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心（平衡期炉心）の主要な 炉心特性	27
表 3.2.1.7	強制循環炉の代表炉心の物質収支	28
表 3.2.1.8	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心の制御棒反応度収支	30
表 3.2.1.9	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	31
表 3.2.1.10	燃料形態の違いによる鉛ビスマス強制循環冷却炉導入期 炉心の主要目の比較（同一仕様）	32
表 3.2.1.11	鉛ビスマス強制循環冷却炉 MOX 燃料炉心の主要目の比較	33
表 3.2.1.12	燃料組成の違いによる鉛ビスマス強制循環冷却炉導入期 炉心の主要目の比較	34
表 3.2.2.1	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心（導入期炉心）の主要目	47
表 3.2.2.2	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心（導入期炉心）の主要な 燃料仕様	48
表 3.2.2.3	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心（導入期炉心）の主要な 炉心特性	49
表 3.2.2.4	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心（平衡期炉心）の主要目	50
表 3.2.2.5	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心（平衡期炉心）の主要な 燃料仕様	51
表 3.2.2.6	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心（平衡期炉心）の主要な 炉心特性	52
表 3.2.2.7	自然循環炉の代表炉心の物質収支	53
表 3.2.2.8	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心の制御棒反応度収支	55

表 3.2.2.9	鉛ビスマス自然循環冷却炉窒化物燃料炉心の主要目の比較	56
表 3.2.3.1	サーベイ計算の集合体仕様	68
表 3.2.3.2	サーベイ結果	69
表 3.2.3.3	被覆管最高温度変更による増殖比への影響評価	70
表 3.2.3.4	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心 (導入期炉心)の主要目	71
表 3.2.3.5	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心 (導入期炉心)の主要な燃料仕様	72
表 3.2.3.6	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心 (導入期炉心)の主要な炉心特性	73
表 3.2.3.7	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心 (平衡期炉心)の主要目	74
表 3.2.3.8	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心 (平衡期炉心)の主要な燃料仕様	75
表 3.2.3.9	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心 (平衡期炉心)の主要な炉心特性	76
表 3.2.3.10	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	77
表 4.1	鉛ビスマス冷却炉の炉心基本仕様と設計根拠	83

図リスト

図 2.1	鉛ビスマス自然循環冷却炉（フェーズ I）の炉心配置図	8
図 2.2	鉛ビスマス自然循環冷却炉（フェーズ I）の燃料軸方向概略図	9
図 2.3	炉心構成図（自然循環冷却炉 平成 13 年度選定炉心） （径方向ブランケット削除炉心）	10
図 2.4	炉心構成図（強制循環冷却炉 平成 13 年度選定炉心） （径方向ブランケット削除炉心）	11
図 3.1.1	ラッパ管肉厚と「ラッパ管肉厚×2+ラッパ管膨れ」の関係	15
図 3.2.1.1	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心の炉心配置図	35
図 3.2.1.2	鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心の炉心燃料構成概略図	36
図 3.2.1.3	強制循環炉の制御棒の縦断面概略図	37
図 3.2.1.4	強制循環炉の制御棒の横断面概略図	38
図 3.2.1.5	強制循環炉の B ₄ C ペレットを細径化した場合の制御棒の横断面概略図	39
図 3.2.1.6	強制循環炉の高速中性子累積照射量の径方向分布	40
図 3.2.1.7	鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物燃料炉心の炉心配置図	41
図 3.2.1.8	鉛ビスマス強制循環冷却炉 MOX 燃料炉心（導入期）の炉心配置図	42
図 3.2.1.9	鉛ビスマス強制循環冷却炉 MOX 燃料炉心（平衡期）の炉心配置図	43
図 3.2.2.1	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心の炉心配置図	57
図 3.2.2.2	鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心の炉心燃料構成概略図	58
図 3.2.2.3	算出した流量再配分効果（係数）	59
図 3.2.2.4	自然循環炉の制御棒の縦断面概略図	60
図 3.2.2.5	自然循環炉の制御棒の横断面概略図	61
図 3.2.2.6	自然循環炉の B ₄ C ペレットを細径化した場合の制御棒の横断面概略図	62
図 3.2.2.7	自然循環炉の高速中性子累積照射量の径方向分布	63
図 3.2.2.8	鉛ビスマス自然循環冷却炉窒化物燃料炉心の炉心配置図	64
図 3.2.3.1	炉心出入口温度差（ ΔT ）と炉心出入口温度の関係	78
図 3.2.3.2	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心の炉心配置図	79
図 3.2.3.3	鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心の炉心燃料構成概略図	80

略 語 表

略語	正式表現	説明
A-LWR	Advanced Light Water Reactor	改良型軽水炉
BDI	Bundle-Duct Interaction	バンドル - ダクト (ラッパ管) 間相互作用
B ₄ C	Boron Carbide	四炭化ほう素
CDF	Cumulative Damage Fraction	損傷寿命分数和
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
JFY	Japanese Financial Year	年度
LMP	Larson-Miller Parameter	ラーソン - ミラーパラメータ
LWR	Light Water Reactor	軽水炉
MA	Minor Actinide	マイナーアクチニド
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
SG	Steam Generator	蒸気発生器
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、実用化戦略調査研究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中型タンク式鉛ビスマス冷却炉の炉心・燃料設計の平成 15 年度の成果に関するものである。

実用化戦略調査研究フェーズⅡ初年度 (平成 13 年度) [1]において、自然循環方式・強制循環方式の中型鉛ビスマス冷却炉に関して、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を見通しを得た。炉心に関しては、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、平成 13 年度の炉心設計では 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) は制約条件としないことにしていた。

本研究の平成 15 年度は、平成 14 年度に検討を開始した 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、2003 年度中間まとめの代表炉心を提示することを目的としている。また、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する。さらに、最近の鉛ビスマス/被覆管共存性試験の結果から、現状の制限目安である被覆管最高温度 650℃を 570℃程度まで下げて設計する必要性の可能性がある出てきており、被覆管最高温度の変動が炉心性能へ与える影響を予備評価する。

2. 検討の経緯

(1) フェーズ I^[2]

フェーズ I における重金属冷却炉の検討においては、重金属炉設計に関する知見が乏しいため、ロシアでの研究実験などの先行例を調査し、プラント側検討による結果を参考にして、最適な電気出力 400MWe (熱出力 1053MWt) を設定して自然循環冷却方式の窒化物燃料炉心を主体に検討した。

フェーズ I で設定した炉心の主要目を表 2.1 に、炉心配置図 (2 領域均質炉心) を図 2.1 に、燃料軸方向概略図を図 2.2 に示す。

本炉心は、炉心出口温度を可能な限り高くしつつ、被覆管最高温度 650℃ を満足するように 67W/cm まで炉心部平均線出力を下げた。本設計では、装荷燃料集合体数は 426 体 (炉心等価直径約 4.9m) であり、大型ナトリウム冷却炉並の体数となっている。炉心高さは低炉心圧損を実現する為に 70 cm と低く、直径 6.8 mm の細径ピンで、P/D 比 (ピンピッチとピン外径の比) を 1.48 と大きい仕様とした。また、燃料寿命は 15.8 年 (10 バッチ, 19 ヶ月運転) と長期化して炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t を達成した。増殖比は 1.2 を達成しているが、ブランケット重金属装荷量は炉心の 2.5 倍以上である。

(2) フェーズ II^[1]

フェーズ I では自然循環冷却方式の炉心 (以下、自然循環炉心と略記) を主体に検討を実施したが、フェーズ II では、強制循環冷却方式の炉心 (以下、強制循環炉心と略記) の検討も実施して、より詳細に両者を比較した。

フェーズ I の重金属冷却中型炉の検討方針は、モジュール炉で S-PRISM(400MWe)、ロシア BREST(300MWe) を経済性と安全性などの観点から凌駕することであったが、フェーズ II では、フェーズ I の検討結果を受け、経済性向上のためスケールアップ効果を追求して、以下の検討条件で炉心設計を実施した。

(a) プラント基本仕様

・ 炉出力

自然循環冷却方式 : 550MWe

強制循環冷却方式 : 750MWe (自然循環方式と同等の炉容器に収まる最大出力)

・ 炉心出入口温度

自然循環冷却方式 : 出口 465℃ / 入口 285℃

(炉容器軸長短縮のため出入口温度差を出来るだけ大きくする)

強制循環冷却方式 : 出口 520℃ / 入口 352℃

(BREST (出口 540℃ / 入口 420℃) 並を目安)

(b) 炉心・燃料の基本仕様

- ・燃料形態：窒化物
- ・炉心材料：ODS 鋼, PNC-FMS 鋼と更なる高性能材料
- ・燃料組成：FBR 多重リサイクル TRU+随伴 FP

(c) 制限条件

- ・燃料健全性：被覆管最高温度 650℃以下（570℃以下で予備検討）, 通常運転時の損傷寿命分数和（CDF）0.5 以下
なお、高速中性子照射量は炉心部取出平均燃焼度 150GWd/t 程度の達成を目指す場合には制限を設けないが、照射量制限を設ける場合には $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) 以下とする。
- ・冷却材流速：2m/s 以下
- ・増殖比：導入期 1.1~1.2 程度, 平衡期 1.04 程度
- ・炉心部取出平均燃焼度：150GWd/t 程度
- ・ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度：60GWd/t 程度以上
- ・運転サイクル長さ：18ヶ月程度以上

なお、冷却材ボイド反応度は 10\$ 程度以下を目安とした。

上記条件の下で平成 13 年度に設計した自然循環炉の主要目と炉心配置を表 2.2 と図 2.3 に、強制循環炉の主要目と炉心配置を表 2.3 と図 2.4 に示す。

フェーズ II 初年度の平成 13 年度の炉心設計では、中性子照射量に対する燃料の健全性の観点から DDI と BDI（高速中性子照射によるラップ管および燃料ピンの膨れなどにより生ずるバンドル（燃料ピン束）-ラップ管間相互作用）の発生に対する制約は設けないことにしていた。本報告では、DDI を回避することを制約条件とすることとし、この観点から最適なラップ管肉厚とラップ管間ギャップを設定して炉心設計を実施した。

主要な炉心設計条件を表 2.4 に示す。

表 2.1 鉛ビスマス自然循環冷却炉（フェーズ I）の炉心主要目

	項目	仕様	備考
基本条件・炉心構成	熱出力(MWt)	1,053	出入口温度差:180°C
	電気出力(MWe)	400	
	炉心出口温度(°C)	492	
	炉心入口温度(°C)	312	
	運転サイクル長さ(月)	19	
	燃料交換バッチ (炉心/径ブランケット)	10/10	
	炉心型式	Pu富化度2領域炉心(均質)	
	炉心高さ(cm)	70	
	軸ブランケット厚さ(cm)(上部/下部)	35/35	
	炉心等価直径(cm)	493	
	燃料集合体数(体) (内側炉心/外側炉心/径ブランケット)	252/174/132	
	制御棒本数(本)(主系/後備系)	30/6	
	径方向遮へい体数(体) (Pb-Bi 遮へい体/B ₄ C 遮へい体)	90/96	
炉心燃料仕様	燃料形態	TRU・U 混合窒化物燃料	
	炉心材料(被覆管/ラップ管)	PNC-FMS(ODS)/PNC-FMS	
	燃料ピン外径(mm)	6.5	
	被覆管肉厚(mm)	0.54	
	燃料スミヤ密度(%TD)	80	
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径(P/D)	1.48	
	集合体当たり燃料ピン本数(本)	469	
	ラップ管内対面間距離(mm)	210.4	
	ラップ管肉厚(mm)	3.0	
	集合体配列ピッチ(mm)	218.4	
炉心主要特性	Pu富化度(wt%)(内側炉心/外側炉心) ^{*1}	22.1/27.3	^{*1} FP混入率2vol%, Pu組成は脚注。 N-15:100%濃縮。 ^{*2} 3次元解析結果。 (参考)2次元RZ: 103W/cm.
	炉心部取出平均燃焼度(GWd/t)	153	
	燃焼反応度(%Δk/k')	1.6	
	最大線出力密度(W/cm)(*2)	118	
	炉心部平均線出力密度(W/cm)[平衡初期]	67	
	ピーク高速中性子束(×10 ¹⁵ n/cm ² sec)	1.08	
	ピーク高速中性子フルエンス(×10 ²³ n/cm ²)	5.5	
	増殖比[平衡中期]	1.19	
	炉心部ドップラ係数(×10 ⁻³ Tdk/dT)	-1.78	
	炉心冷却材ボイド反応度(\$)	6.5	

Pu同位体組成比: ²³⁸Pu/²³⁹Pu/²⁴⁰Pu/²⁴¹Pu/²⁴²Pu/²³⁷Np/²⁴¹Am/²⁴³Am/²⁴⁴Cm = 1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/1.0

表 2.2 平成 13 年度設計自然循環炉心の主要目

	項 目	仕 様	備 考
基本条件・炉心構成	熱出力(MWt)	550	
	電気出力(MWe)	1450	
	炉心出口温度(°C)	465	
	炉心入口温度(°C)	285	
	運転サイクル長さ(月)	18	
	燃料交換バッチ (炉心/径ブランケット)	8/-	
	炉心型式	Pu富化度2領域均質炉心	
	炉心高さ(cm)	70	
	軸ブランケット厚さ(cm)(上部/下部)	30/30	
	炉心等価直径(cm)	453	
	燃料集合体数(体) (内側炉心/外側炉心/径ブランケット)	252/144/-	
	制御棒本数(本)(主系/後備系)	18/6	
	径方向遮へい体数(体) (Pb-Bi遮へい体/B ₄ C遮へい体)	162/-	
炉心燃料仕様	燃料形態	TRU-U混合窒化物燃料	¹⁵ N: 100%濃縮
	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS鋼	
	燃料ピン外径(mm)	8.5	
	被覆管肉厚(mm)	0.46	
	燃料スミヤ密度(%TD)	80	
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径(P/D)	1.47	
	集合体当たり燃料ピン本数(本)	271	
	ラッパ管内対面間距離(mm)	205.3	
	ラッパ管肉厚(mm)	2.0	
集合体配列ピッチ(mm)	210.3		
炉心主要特性	Pu富化度(wt.%(内側炉心/外側炉心)	16.8/20.7	
	炉心部取出平均燃料度(GWd/t)	155	
	燃焼反応度(%Δk/kk)	0.59	
	最大線出力密度(W/cm)	約250	
	ピーク高速中性子束($\times 10^{15}$ n/cm ² sec)	1.66	
	ピーク高速中性子フルエンス($\times 10^{23}$ n/cm ²)	6.3	
	増殖比[平衡中期]	1.22	
	炉心部ドップラ係数($\times 10^{-3}$ Tdk/dT)	-2.11	
炉心冷却材ボイド反応度(\$)	9.9	炉心部100%ボイド化	

表 2.3 平成 13 年度設計強制循環炉心の主要目

	項目	仕様	備考
基本条件・炉心構成	熱出力(MWt)	750	
	電気出力(MWe)	1875	
	炉心出口温度(°C)	520	
	炉心入口温度(°C)	352	
	運転サイクル長さ(月)	18	
	燃料交換バッチ (炉心/径ブランケット)	7/-	
	炉心型式	Pu富化度2領域均質炉心	
	炉心高さ(cm)	70	
	軸ブランケット厚さ(cm)(上部/下部)	-/35	
	炉心等価直径(cm)	437	
	燃料集合体数(体) (内側炉心/外側炉心/径ブランケット)	288/246/-	
	制御棒本数(本)(主系/後備系)	18/6	
径方向遮へい体数(体) (Pb-Bi遮へい体/B ₄ C遮へい体)	186/-		
炉心燃料仕様	燃料形態	TRU-U混合窒化物燃料	¹⁵ N:100%濃縮
	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS鋼	
	燃料ピン外径(mm)	7.3	
	被覆管肉厚(mm)	0.42	
	燃料スミヤ密度(%TD)	80	
	燃料ピンピッチ/燃料ピン外径(P/D)	1.22	
	集合体当たり燃料ピン本数(本)	331	
	ラッパ管内対面間距離(mm)	163.0	
	ラッパ管肉厚(mm)	5.0	
集合体配列ピッチ(mm)	176.0		
炉心主要特性	Pu富化度(wt.%(内側炉心/外側炉心))	14.0/17.2	
	炉心部取出平均燃料度(GWd/t)	153	
	燃焼反応度(%Δk/kk')	0.3	
	最大線出力密度(W/cm)	216	
	ピーク高速中性子束($\times 10^{15}$ n/cm ² sec)	1.9	
	ピーク高速中性子フルエンス($\times 10^{23}$ n/cm ²)	6.3	
	増殖比[平衡中期]	1.19	
	炉心部ドブブラ係数($\times 10^{-3}$ Tdk/dT)	(-2.58)	径ブラがある場合(参考値)
炉心冷却材ボイド反応度(\$)	(約5.3)	径ブラがある場合(参考値)	

表 2.4 鉛ピスマス冷却炉の主要な炉心設計条件

項 目		強制循環炉	自然循環炉	
プラント仕様	電気出力	750MWe	550MWe	
	原子炉熱出力	1,875MWt	1,450MWt	
	原子炉出口/入口温度	520 / 352 °C	465 / 285 °C	
	1次系流量	26,700m ³ /h	19,520m ³ /h	
炉心・燃料基本仕様	燃料形態	窒化物	←	
	炉心型式	均質2領域	←	
	再臨界回避方策	検討中	←	
	燃料	組成	高速炉多重リサイクル組成 *1	←
		FP混入率	2vol%	←
	炉心材料	被覆管	ODS鋼 *2	←
ラッパ管		PNC-FMS鋼 *2	←	
制限条件	安全要求	k _{eff} 反応度	10\$程度以下	←
		燃料健全性	最大線出力	430W/cm 以下
	高速中性子照射量 *3		(5×10 ²³ n/cm ² 以下)	←
	被覆管最高温度 *4		650°C 以下	←
	CDF (通常運転時)		0.5 以下	←
取合条件	炉心燃料スリ密度	80%TD	←	
	遮へい体外接円径	5.5m 程度以下	←	
	制御棒、SASS配置	切込み付きUIS対応	←	
	燃料バンドル部圧損	0.23MPa 程度	0.015MPa 程度	
	流速	2m/s以下	←	
炉心性能目標	増殖比	導入期炉心	1.1~1.2	←
		平衡期炉心	1.04 程度	←
	複合システム倍増時間 (導入期)	50年程度以下	←	
	取出平均 燃焼度	炉心部	150Gwd/t 程度	←
		全炉心 *5	60Gwd/t 程度以上	←
運転サイクル長さ	18ヶ月 以上	←		

*1 高速炉多重リサイクル組成 (wt%)

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245
 = 1.1/54.1/32.1/ 4.3/ 3.9/ 0.5/ 2.0/ 1.0/ 1.0/ 0.0

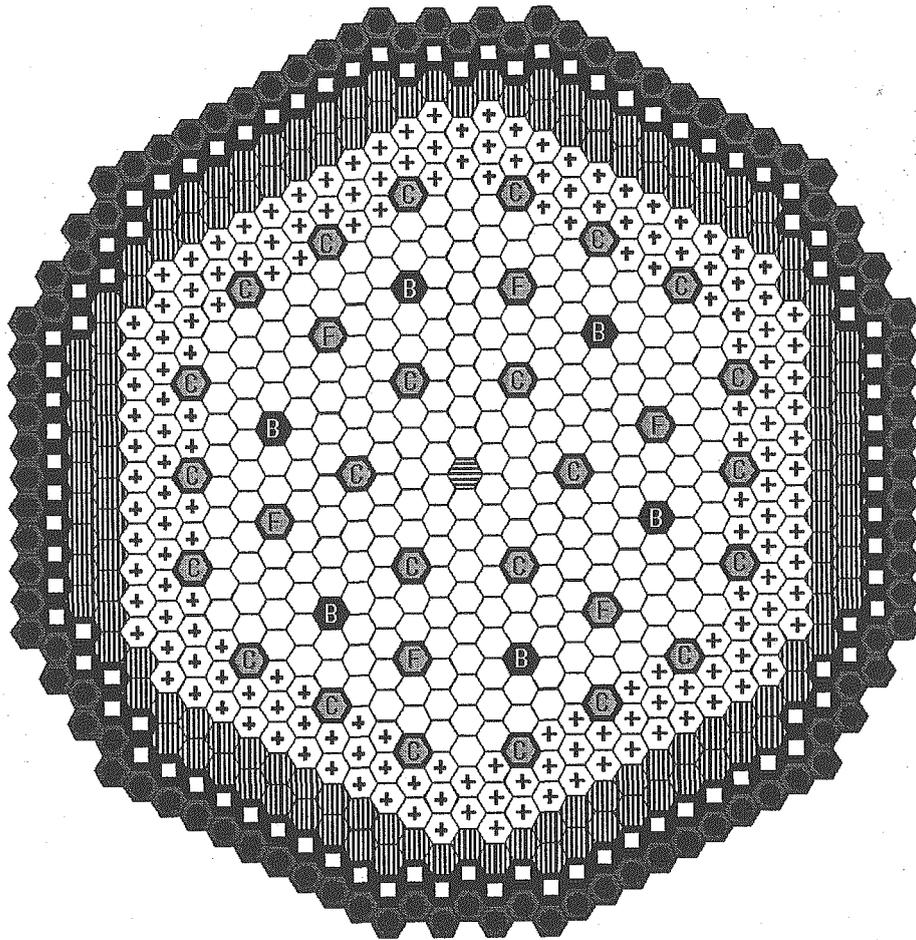
*2 炉心材料組成 [炉心燃料設計用] (wt%)

Fe/Cr/Ni/Mo/Mn/W = 85.5/11.0/0.4/0.5/0.6/2.0

*3 E > 0.1MeV、代表炉心では炉心部取出平均燃焼度150Gwd/t 程度を目指し、照射量制限は設けない。

*4 肉厚中心、被覆最高温度570°C制限対応強制循環炉心も予備検討する。

*5 プラント燃料を含む全炉心取出平均燃焼度



	内側炉心燃料集合体	252 体
	外側炉心燃料集合体	174 体
	径方向ブランケット	132 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒（粗調整棒）	24 体
	制御棒（微調整棒）	6 体
	制御棒（後備炉停止系）	6 体
	鉛ビスマス遮へい体	90 体
	B ₄ C 遮へい体	96 体

合 計 781 体

図 2.1 鉛ビスマス自然循環冷却炉（フェーズ I）の炉心配置図

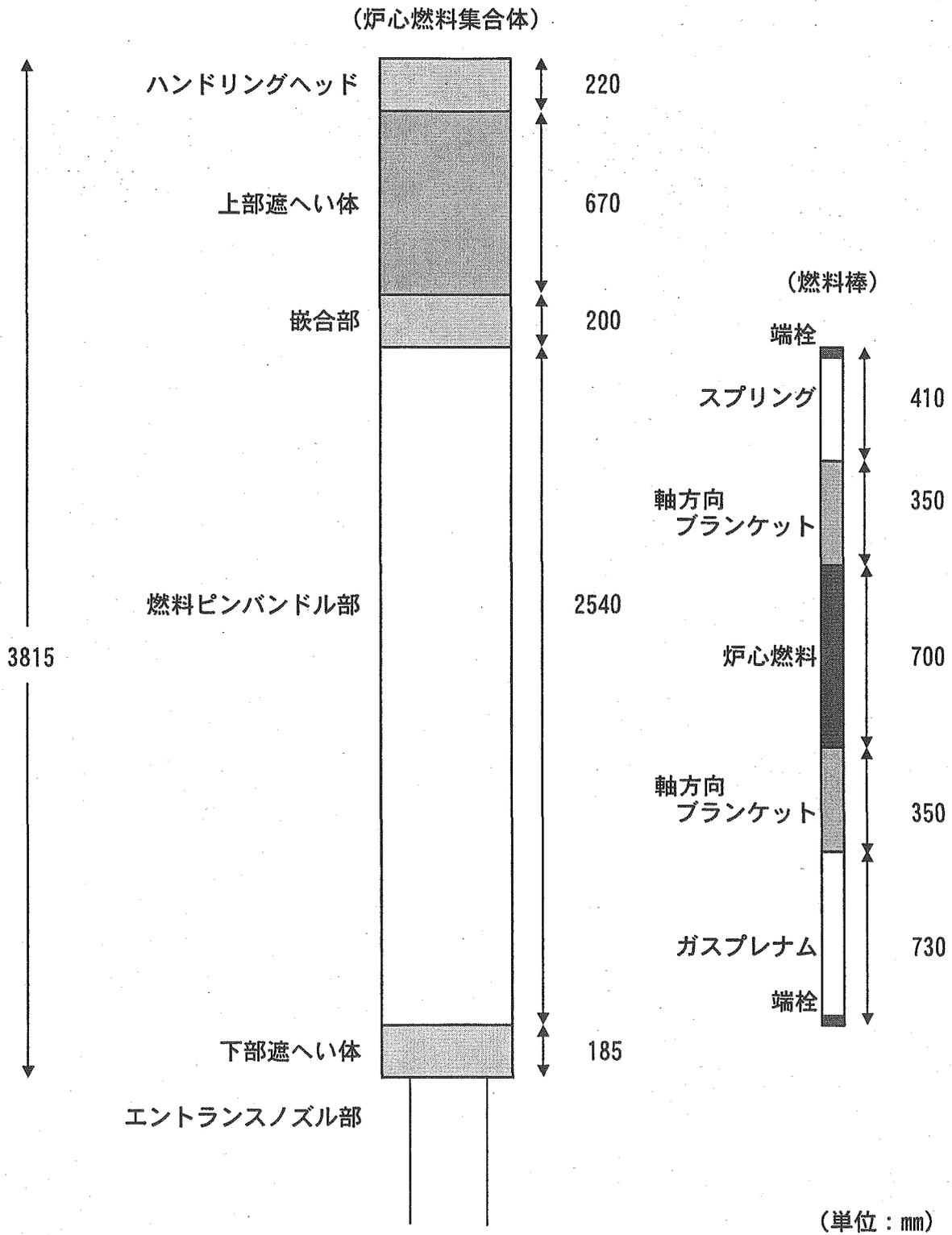
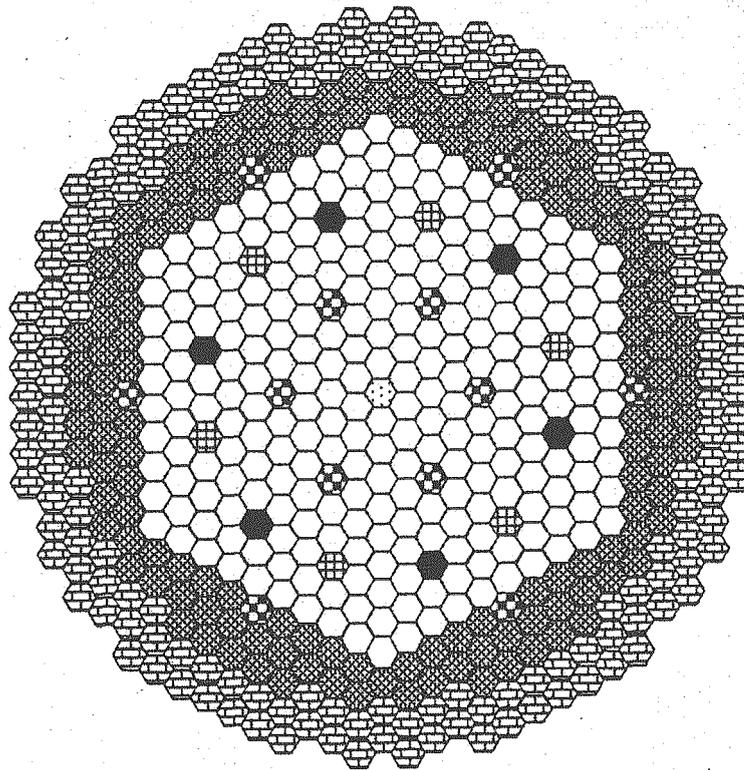


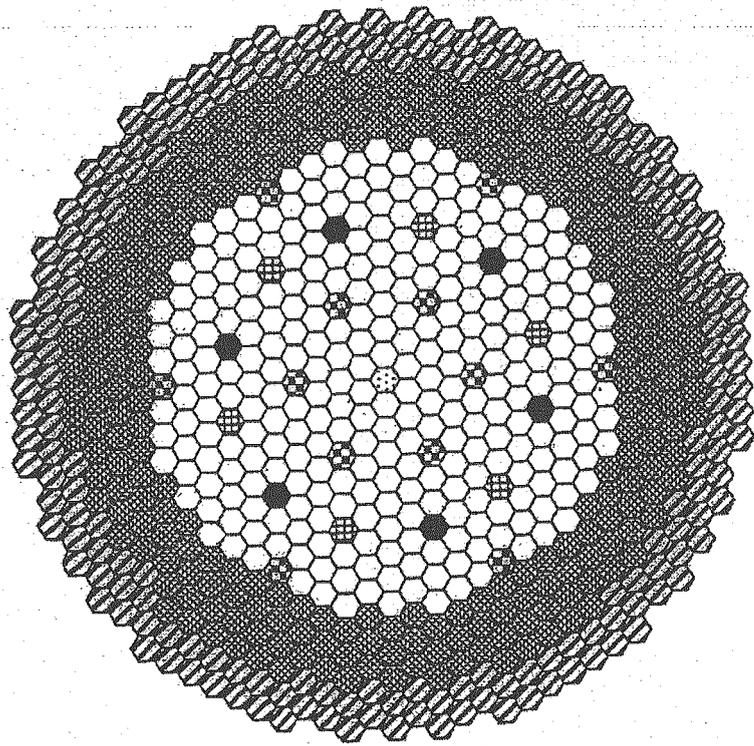
図 2.2 鉛ビスマス自然循環冷却炉 (フェーズ I) の燃料軸方向概略図



○	内側炉心燃料集合体	252 体
◐	外側炉心燃料集合体	144 体
⊙	炉中心スチール集合体	1 体
⊗	制御棒(粗調整棒)	12 体
⊕	制御棒(微調整棒)	6 体
●	制御棒(後備炉停止棒)	6 体
⊗	Pb-Bi遮へい体	162 体
	計	583 体

・集合体配列ピッチ	210.3 mm
・炉心等価径	約 453 cm
・炉心構成要素外接円径	約 549 cm

図 2.3 炉心構成図 (自然循環冷却炉 平成 13 年度選定炉心)
(径方向ブランケット削除炉心)



○ 内側炉心燃料集合体	288 体
● 外側炉心燃料集合体	246 体
⊗ 径ブランケット集合体	0 体
⊙ 炉中心スチール集合体	1 体
⊕ 制御棒（粗調整棒）	12 体
⊖ 制御棒（微調整棒）	6 体
● 制御棒（後備炉停止系）	6 体
⊗ Pb-Bi 遮へい体	186 体
計	745 体
・ 集合体配列ピッチ	176 mm
・ 炉心構成要素外接円径	約515 cm

図 2.4 炉心構成図（強制循環冷却炉 平成 13 年度選定炉心）
（径方向ブランケット削除炉心）

3. 炉心概念の検討

3. 1 照射変形を考慮した燃料仕様の設定

平成 13 年度検討の燃料仕様は、高速中性子照射によるラッパ管の膨れなどにより生ずる DDI を許容している。

本年度は、平成 13 年度検討の設計炉心を基にして、中性子照射に対する DDI の回避を考慮して炉心仕様を設定した。

そこで、まず、炉心構造材への照射量の開発目標の目安値である $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) の中性子照射を受けた場合の DDI の発生を回避した燃料仕様（照射によるラッパ管の膨れに起因する DDI を回避するラッパ管肉厚、ラッパ管間ギャップ）を設定する。

以下に設定条件を列挙する。

- ・最大高速中性子照射量 : $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$)
- ・バンドル部圧力損失 : 0.015MPa (自然循環), 0.23MPa (強制循環)
- ・ラッパ管内対面間距離 : 205.3 mm (自然循環), 163.0 mm (強制循環)
- ・ラッパ管肉厚 : 2~6 mm
- ・燃料要素長 : 2540 mm (自然循環), 2190 mm (強制循環)
- ・集合体間ギャップ : 1~5 mm
- ・集合体流量

平均流量 \times (径方向出力ピーキング : 1.2) $^{1/3} = 142 \text{ kg/s}$ (自然循環)

平均流量 \times (径方向出力ピーキング : 1.2) = 159.8 kg/s (強制循環)

上記設定条件のもと、ラッパ管膨れを評価した結果を図 3.1.1 に示す。

図 3.1.1 は、高速中性子照射量を $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) とした場合のラッパ管肉厚と「ラッパ管肉厚 $\times 2$ + ラッパ管膨れ量」の関係を示している。

DDI を回避するには、ラッパ管同士の間隔を「ラッパ管内対面距離 + ラッパ管肉厚 $\times 2$ + ラッパ管膨れ量」とする必要がある。燃料体積比を高くする観点からは、この距離が小さくなるような設計が望ましい。ラッパ管内対面距離を一定とした場合、ラッパ管同士の間隔を小さくするには、「ラッパ管肉厚 $\times 2$ + ラッパ管膨れ量」を小さくすればよい。ラッパ管が厚くなると膨れ量は減少するため、この値は極小値を持つ。そのときのラッパ管肉厚を設計に用いる。

ラッパ管肉厚を決めたとき、熱膨張および集合体変移によりラッパ管の外壁が 1mm 移動すると考えて、DDI 回避のために「ラッパ管膨れ量 + 1mm」を集合体間ギャップとして設計を行う。

図 3.1.1 より、高速中性子照射量が $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) の条件で DDI を回避するために、自然循環炉心でのラッパ管肉厚は 3 mm とし、集合体間ギャップは 4 mm とする。同様に、強制循環炉心でのラッパ管肉厚は 5 mm とし、集合体間ギャップは 4.5 mm とする。

以上の検討より設定した本年度の燃料仕様を表 3.1.1 (自然循環)、表 3.1.2 (強制循環) に示す。

表 3.1.1 DDI 回避を考慮した自然循環炉心燃料仕様

項目	単位	平成15年度仕様	平成13年度仕様	備考
プラント基本仕様				
炉型	-	中型鉛ピスマス自然循環	←	
電気出力		550MWe	←	熱効率38%
熱出力		1450MWt	←	
炉心出口温度	°C	465	465	
炉心入口温度	°C	285	285	
炉心出入口温度差	°C	180	180	
炉心型式		2領域炉心	←	
炉心高さ	mm	700	←	
軸方向ブランケット	mm	上下各300	←	
径方向ブランケット		なし	←	
燃料材料				
・炉心燃料		Pu-U混合窒化物	←	¹⁵ N:100%濃度
ウラン235含有率	wt%	0.3	←	
被覆管内面スミア密度	%	80	←	
Pu富化度(内側/外側)	wt%	18.1/23.8	16.8/20.7	
・軸ブランケット燃料		U窒化物	←	¹⁵ N:100%濃度
ウラン235含有率	wt%	0.3	←	
被覆管内面スミア密度	%	90	←	
燃料要素数	本/集合体	271	←	
被覆管外径	mm	8.5	←	
被覆管肉厚	mm	0.46	←	
被覆管内径	mm	7.58	←	
要素配列ピッチ	mm	12.5	←	
P/D 比		1.47	←	
スペーサ形式		グリッド支持	←	10段 タイロッド無し
タイロッド	本	なし	←	
ラッパ管内対面距離	mm	205.3	←	
ラッパ管肉厚	mm	3.0	2	
ラッパ管外対面距離	mm	211.3	209.3	
隣接ラッパ管間ギャップ	mm	4.0	1	
集合体配列ピッチ	mm	215.3	210.3	
体積比				
・燃料体積比	%	30.5	32.0	
・構造材体積比	%	13.2	12.0	
・冷却材体積比	%	56.3	56.0	

表 3.1.2 DDI 回避を考慮した強制循環炉心燃料仕様

項目	単位	平成15年度仕様	平成13年度仕様	備考
プラント基本仕様				
炉型	-	中型鉛ピスマス強制循環	←	
電気出力		750MWe	←	熱効率40%
熱出力		1875MWt	←	
炉心出口温度	°C	520	520	
炉心入口温度	°C	352	352	
炉心出入口温度差	°C	168	168	
炉心型式		2領域炉心	←	
炉心高さ	mm	700	←	
軸方向ブランケット	mm	上部なし、下部350	←	
径方向ブランケット		なし	←	
燃料材料				
・炉心燃料		Pu-U混合窒化物	←	¹⁵ N:100%濃度
ウラン235含有率	wt%	0.3	←	
被覆管内面スミア密度	%	80	←	
Pu富化度(内側/外側)	wt%	15.2/18.2	14.0/17.2	
・軸ブランケット燃料		U窒化物	←	¹⁵ N:100%濃度
ウラン235含有率	wt%	0.3	←	
被覆管内面スミア密度	%	95	←	
燃料要素数	本/集合体	331	←	
被覆管外径	mm	7.3	←	
被覆管肉厚	mm	0.42	←	
被覆管内径	mm	6.46	←	
要素配列ピッチ	mm	8.9	←	
P/D 比		1.22	←	
スペーサ形式		グリッド支持	←	10段
タイロッド	本	なし	←	タイロッド無し
ラッパ管内対面距離	mm	163.0	←	
ラッパ管肉厚	mm	5.0	←	
ラッパ管外対面距離	mm	173.0	←	
隣接ラッパ管間ギャップ	mm	4.5	3.0	
集合体配列ピッチ	mm	177.5	176.0	
体積比				
・燃料体積比	%	39.8	40.6	
・構造材体積比	%	21.7	22.4	
・冷却材体積比	%	38.6	37.0	

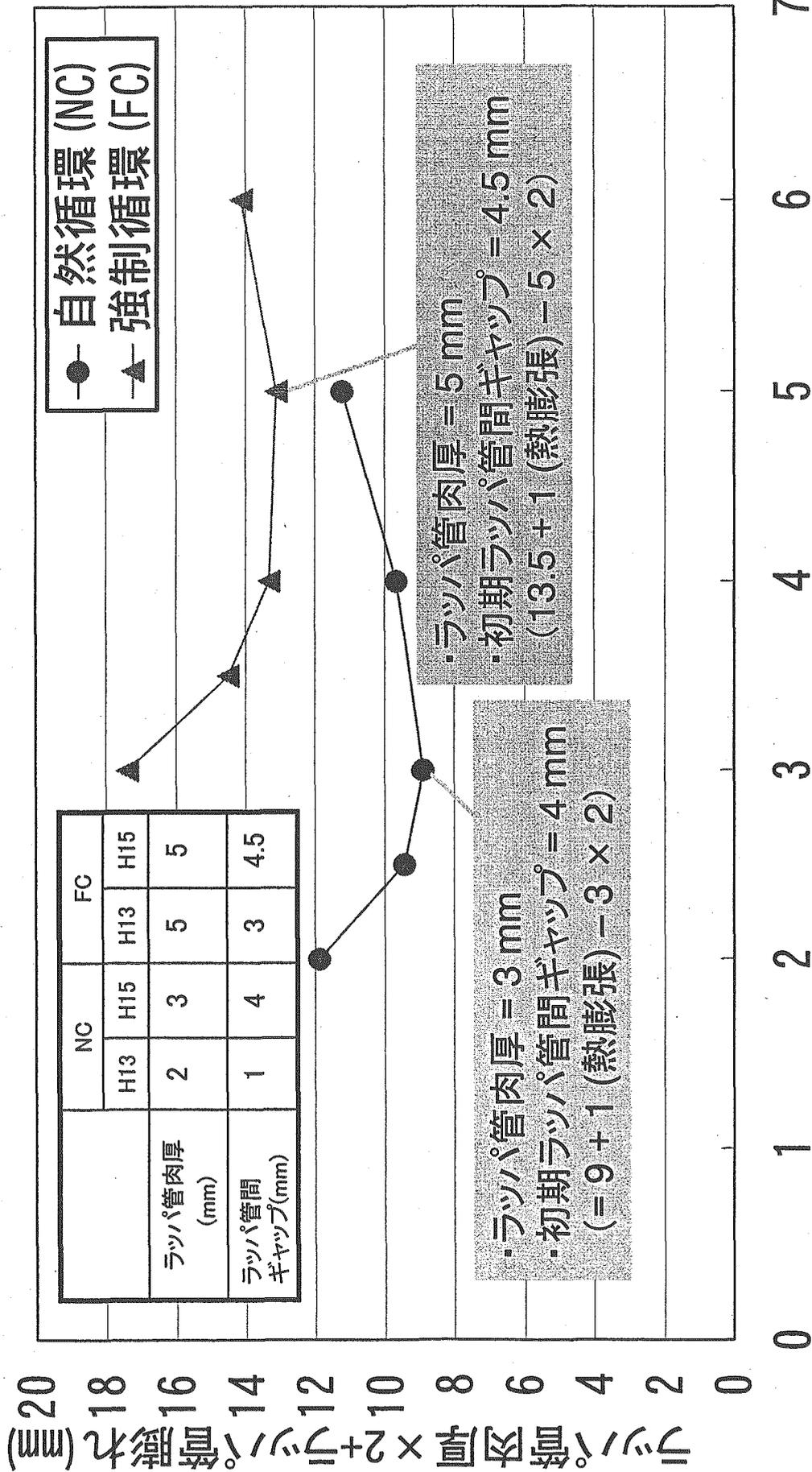


図 3.1.1 ラップ管肉厚と「ラップ管肉厚×2+ラップ管膨れ」の関係

3. 2 炉心設計

前節で設定した炉心仕様を用いて表 2.4 に示す炉心設計条件の下で、強制循環炉と自然循環炉の炉心設計を実施した。なお、燃料健全性は平成 13 年度の仕様に基づき検討した。

一方、最近の鉛ビスマス中の被覆管材料の腐食試験の結果から、現状の制限である被覆管最高温度 650℃を 570℃程度まで下げて設計する必要がある可能性が出てきた。そこで、被覆管温度制限を現状の 650℃から 570℃へ変更した場合について概略評価した。

両冷却方式の炉心について、燃料費削減の観点から 150GWd/t 程度の高燃焼度炉心を代表炉心に設定した。

代表炉心について増殖比 1.1~1.2 程度の導入期炉心と増殖比 1.04 程度の平衡期炉心を設計して炉心特性を評価した。なお、高燃焼度炉心は、後述のように、高速中性子照射量開発目標の目安値 ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$) を超えるため、目安値を満足する照射量目標対応炉心についても検討した。

また、鉛ビスマス冷却炉に装荷する燃料形態としては、窒化物燃料を選定しているが、MOX 燃料および金属燃料を用いたときの影響と、軽水炉回収 TRU 燃料の適用性の検討として軽水炉回収 TRU 燃料の TRU 組成を用いた場合の炉心特性への影響を強制循環炉について評価した。なお、自然循環炉についても同様の効果が得られると考えられる。

両冷却方式の炉心設計の核特性評価の主要な手法（燃料組成を含む）を以下に示す。

- ・ 炉定数 : 統合炉定数 ADJ2000R^[3] (70 群)
 - ・ 燃焼計算 : 2 次元 RZ 体系拡散燃焼計算
 - ・ 出力分布計算 : 3 次元拡散計算
 - ・ 反応度係数計算 : ドップラ係数 1 次近似摂動計算
(集合体内非均質効果は MOX 燃料の 1.05 を流用)
ボイド反応度 厳密摂動計算
(集合体内非均質効果は MOX 燃料の 0.90 を流用)
 - ・ 制御棒価値計算 : 3 次元三角メッシュ拡散計算 (7 群)
- 計算値に以下の補正を施し、更に、9%の不確かさを考慮して評価

- ・ 群縮約効果 0.97
- ・ メッシュ効果 0.90
- ・ B₄C 吸収体マスランピング効果補正 0.87
- ・ 輸送理論補正 0.96

- ・ 燃料組成 : 高速炉多重リサイクル時の TRU 燃料組成
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}$
 $/^{237}\text{Np}/^{241}\text{Am}/^{242\text{m}}\text{Am}/^{242}\text{Am}/^{243}\text{Am}$
 $/^{242}\text{Cm}/^{243}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}$
 = 1.1 / 54.1 / 32.1 / 4.3 / 3.9

/ 0.5 / 2.0 / 0.0 / 0.0 / 1.0
/ 0.0 / 0.0 / 1.0 / 0.0 (wt.%)

3. 2. 1 強制循環炉

(1) 代表炉心概念の設計

(i) 炉心特性

鉛ビスマス強制循環冷却炉の代表炉心の炉心配置図を図 3.2.1.1 に、炉心燃料構成概略図を図 3.2.1.2 に示す。導入期炉心の主要目、主要な燃料仕様および主要な炉心特性を表 3.2.1.1、表 3.2.1.2 および表 3.2.1.3 に示し、平衡期炉心の主要目、主要な燃料仕様および主要な炉心特性を表 3.2.1.4、表 3.2.1.5 および表 3.2.1.6 に示す。また、物質収支を表 3.2.1.7 に示す。これらの炉心は炉心設計目標を満足している。例えば、導入期炉心では運転サイクル長さ 18 ヶ月、炉心部取出平均燃焼度 157GWd/t、増殖比 1.15、また、ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度 105GWd/t と、いずれも導入期炉心の設計目標を満足している。ただし、高速中性子照射量が $6.4 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ (導入期炉心, $E > 0.1 \text{MeV}$)、 $6.6 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ (平衡期炉心, $E > 0.1 \text{MeV}$) と ODS 鋼および PNC-FMS 鋼の開発目標の目安値 ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$) を超えている。これは、実績のない鉛ビスマス冷却窒化物燃料炉の実用化時期はナトリウム酸化物燃料炉と比較して遅くなると予想されるので、今後の開発により炉心材料の耐照射性能の向上を十分期待できるとの判断によるものである。

(ii) 燃料健全性

(a) 被覆管最高温度評価

平衡初期と平衡末期のそれぞれの期間において、内側炉心と外側炉心のそれぞれの領域で出力が最も高くなる集合体を対象として被覆管最高温度の履歴を算出した。全炉心で最大出力を発生する集合体は、平衡初期においては外側炉心、平衡末期においては内側炉心の集合体である。集合体への流量は、炉心出入口温度差 168℃、集合体総数 534 体より、127.7kg/s とし、最大出力集合体への流量は平均流量に対して 1.20 倍と仮定し、153.2 kg/s とした。評価対象となる集合体の出力および線出力履歴を基に被覆管最高温度を算出するが、膜温度上昇におけるヌッセルト数は、下記の Sleicher 式を用いた。なお、工学的安全係数は 1.25 を使用した。

$$\text{Nu} = 6.3 + 0.0167 \cdot \text{Pe}^{0.85} \cdot \text{Pr}^{0.08}$$

Nu: ヌッセルト数 (-)

Pe: ペクレ数 (-)

Pr: プラントル数 (-)

評価の結果、被覆管最高温度 (肉厚中心) は、650℃ 以下となっていることを確認できた。

(b) 被覆管クリープ損傷寿命分数和 (CDF) 評価

求めた被覆管最高温度履歴（各サイクル内での初期・末期の最高温度をサイクル中の温度として使用）および出力履歴より評価対象集合体のピン内圧および被覆管応力を求め、CDF を評価した。

評価に用いるクリープ破断強度 (ODS 鋼) [4]、被覆管外面腐食評価式 [5] を以下に示す。なお、窒化物燃料において He ボンドを想定しているため、被覆管内面腐食はないとしている。

・クリープ破断強度 (ODS 鋼)

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T + 273.15)(35.12 + \log_{10}(3 \cdot t_R)) \times 10^{-3} \\ &= 56.784 - 9.133 \cdot \log_{10} S_R \end{aligned}$$

S_R : 設計クリープ破断応力強さ (MPa)

T : 試験温度 (°C)

t_R : 破断時間 (hr)

・被覆管外面腐食評価式

$$X = C_{Pb} \cdot t^{1/2}$$

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

X : 被覆管外面腐食量 (μm)

t : 使用時間 (hr)

T : 試験温度 (°C)

なお、評価において下記を考慮している。

- ・出力誤差 : 1.033
- ・プレナム温度 : 被覆管 (HSF 込み) と同等
- ・プレナム容積 : 自由空間容積として 90%
- ・被覆管肉厚寸法公差 : 0.03 mm
- ・応力 : 設計応力強さ (S_t) ベース

CDF 評価の結果、内側炉心、外側炉心いずれも CDF 制限値 0.5 以下となっていることを確認できた。

(iii) 制御棒反応度収支

鉛ビスマス強制循環冷却炉の反応度制御系としては、主炉停止系と後備炉停止系の独立 2 系統で構成された制御棒とする。主炉停止系は、粗調整棒と微調整棒で構成する。制御棒の B_4C 組成は、主炉停止系で ^{10}B 濃縮度 30%、後備炉停止系で ^{10}B 濃縮度 80% である。図 3.2.1.3 と図 3.2.1.4 に強制循環冷却炉の制御棒の縦断面概略図と横断面概略図を示す。吸収体上部のタングステンは、鉛ビスマス冷却材が高密度であることによる制御棒の浮き上がりを防止し、確実にスクラムさせる機能を有する。

制御すべき反応度としては、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、運転余裕、余剰反応度の不確かさは、先行ナトリウム冷却炉設計例を参考に設定した。本炉心は表 3.2.1.8 に示すように制御棒反応度収支を満足している。

なお、図 3.2.1.4 に示した制御棒構成では強制循環冷却炉のスクラム時間が数秒になる可能性があり、制御棒の挿入性、制御棒内の冷却材流体抵抗の低減によるスクラム時間短縮を狙って、 ^{10}B 装荷量を変えずに ^{10}B 濃縮度を 90% まで引き上げ、 B_4C ペレットの径を小さくして保護管内の冷却材流路面積を広く取りうる制御棒仕様を検討した。図 3.2.1.5 に B_4C ペレットを細径化した場合の制御棒の横断面概略図を示す。この構造により、制御棒反応度収支を満足しつつ、スクラム時間が主炉停止系と後備炉停止系でそれぞれ 1 秒と 2.5 秒になると評価され、制御棒としての成立の見通しを得ている。

(iv) 遮へい特性

遮へい性能が最も厳しいと考えられる炉心槽について拡散計算により遮へい特性を概略評価した。図 3.2.1.6 に高速中性子 ($E > 0.1\text{MeV}$) の累積照射量の径方向分布を示す。炉心槽はフェライト材料を想定しており、その照射量制限値 $4 \times 10^{22}\text{n/cm}^2$ を上回っている。一般に拡散計算は保守側の値を与えるため、現段階では現設計の鉛ビスマス遮へい体 2 層では遮へい性能が不十分であると判断できないが、参考のため外側の鉛ビスマス遮へい体 1 層を B_4C 遮へい体に変更すると照射量制限値 $4 \times 10^{22}\text{n/cm}^2$ を下回ることが分かった。

(2) 照射量目標対応炉心（窒化物燃料）の検討

上述の炉心は、炉心取出平均燃焼度の目標 (150GWd/t) は満足するが、高速中性子照射量が目標の目安値 ($5 \times 10^{23}\text{n/cm}^2$, $E > 0.1\text{MeV}$) を超えているため、照射量制限を設定する照射量制限対応炉心を検討した。

本検討により得られた照射量目標対応炉心の主要目（炉心・燃料仕様と核特性）を高燃焼度炉心の主要目と共に表 3.2.1.9 に、その炉心配置図を図 3.2.1.7 に示す。中性子照射量を現行の目安値に制約すると、炉心部取出平均燃焼度は 150GWd/t に達せず、約 130GWd/t 程度に止まることになる。

(3) MOX 燃料および金属燃料炉心の検討

鉛ビスマス冷却炉の特性を引き出すには、窒化物燃料が最適であると考えられるが、その確認のため MOX 燃料および金属燃料炉心を装荷した場合を比較評価した。燃料仕様は、上記の窒化物燃料高燃焼度導入期炉心の仕様（燃料ピンは He ボンドで下部ガスプレナム方式）をベースとした。まず、同一の燃料仕様、炉心配置（図 3.2.1.7）を用いた場合の異なる燃料形態の 3 炉心の炉心特性の比較を表 3.2.1.10 に示す。増殖比については、窒化物燃料炉心（燃料スミア密度 80%）で

1.15, MOX 燃料炉心（燃料スミア密度 82%）で 0.95, 金属燃料炉心（燃料スミア密度 75%）で 1.10 となり, 本条件では窒化物燃料が最も優れていることが確認できた。

MOX 燃料炉心は本炉心構成では増殖比が 1 を超えないが, 3 種類の燃料形態で最も実績が多いので, 炉心高さの増加, および径方向ブランケットの追加により増殖比を増加した炉心も検討した。MOX 燃料炉心の主要目（炉心・燃料仕様と核特性）を表 3.2.1.11 に, 炉心構成図を図 3.2.1.8（導入期炉心）と図 3.2.1.9（平衡期炉心）に示す。

金属燃料炉心は燃料ピンがナトリウムボンドであるため上部ガスプレナム方式となる。また窒化物燃料に比べて FP ガス放出率が高いために, ガスプレナム長がより長くなり同一圧損を確保するために燃料体積率が低くなる。このため, 炉心性能は窒化物燃料炉心に比べて, 上記検討結果（ガスプレナム長さを同一に設定）よりさらに劣ることになる。

（4）軽水炉回収 TRU 燃料の適用性の検討

TRU 燃焼に関して, 軽水炉回収 TRU 燃料をリサイクルして使用する場合, 高速炉多重リサイクル想定時の組成より MA の添加割合が多くなることが予想され, その結果, 炉心特性に影響を与えるものと考えられる。そこで, 窒化物燃料高燃焼度導入期炉心について, 軽水炉回収 TRU 燃料の代表的な再処理シナリオケースを想定し, その TRU 組成の変動による炉心特性への影響を評価することで, TRU 燃焼に関し柔軟な対応が可能であるか確認することとした。

また, 軽水炉回収 TRU 燃料組成のケースとしては, 次の「基準ケース」, 「代表ケース」の 2 ケースのシナリオを想定することとした。

[基準ケース]

軽水炉 (LWR) (45~49 GWd/t) から 4 年冷却後に回収した TRU 組成 (MA 合計 10.4 wt.%)

$$\begin{aligned} & {}^{238}\text{Pu}/{}^{239}\text{Pu}/{}^{240}\text{Pu}/{}^{241}\text{Pu}/{}^{242}\text{Pu}/{}^{237}\text{Np}/{}^{241}\text{Am}/{}^{242\text{m}}\text{Am}/{}^{242}\text{Am}/{}^{243}\text{Am} \\ & /{}^{242}\text{Cm}/{}^{243}\text{Cm}/{}^{244}\text{Cm}/{}^{245}\text{Cm} \\ & = 2.2 / 47.0 / 23.2 / 10.7 / 6.5 / 5.6 / 3.1 / 0.0 / 0.0 / 1.3 \\ & / 0.0 / 0.0 / 0.4 / 0.0 \text{ (wt.\%)} \end{aligned}$$

[代表ケース]

改良型軽水炉 (A-LWR) (60 GWd/t) から 4 年冷却後に回収した TRU 組成と 40 年間中間貯蔵した LWR (45~49 GWd/t) から回収した TRU 組成を 5 : 5 の割合で混合 (MA 合計 14.9 wt.%)

$$\begin{aligned} & {}^{238}\text{Pu}/{}^{239}\text{Pu}/{}^{240}\text{Pu}/{}^{241}\text{Pu}/{}^{242}\text{Pu}/{}^{237}\text{Np}/{}^{241}\text{Am}/{}^{242\text{m}}\text{Am}/{}^{242}\text{Am}/{}^{243}\text{Am} \\ & /{}^{242}\text{Cm}/{}^{243}\text{Cm}/{}^{244}\text{Cm}/{}^{245}\text{Cm} \\ & = 2.1 / 46.8 / 23.3 / 6.1 / 6.7 / 6.4 / 6.8 / 0.0 / 0.0 / 1.4 \\ & / 0.0 / 0.0 / 0.3 / 0.0 \text{ (wt.\%)} \end{aligned}$$

評価結果として、表 3.2.1.12 に 2 つのケースの軽水炉回収 TRU 組成による主要な炉心特性を FBR 多重リサイクル時の燃料組成の結果と比較して示した。ここで、各ケースの炉心ともサイクル長さ 18 ヶ月、燃焼度 150 GWd/t、増殖比 1.1~1.2 を概ね満足しており、燃料組成の影響も比較的小さいことが分かる。

以上、強制循環冷却炉の高燃焼度炉心は、想定されるいずれの軽水炉使用済燃料再処理シナリオケースの TRU 組成においても、炉心性能は設計目標を概ね達成しており、TRU の受入性に対して柔軟性を有していることが認められた。

なお、自然循環炉心でも同様の結果が得られると予想される。

(5) まとめ

DDI 回避の観点から平成 13 年度の燃料仕様を見直した。

炉心設計にあたっては、炉心型式は均質 2 領域炉心とし、増殖性能については、高増殖が要求される FBR 導入期と、維持増殖を可能とする FBR 平衡期向けの炉心を検討した。

代表炉心の炉心の取出平均燃焼度は目標 (150GWd/t) を達成したが、そのためには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 ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$) を上回る。

そこで、照射量開発目標の目安値を満足する照射量目標対応炉心 (窒化物燃料) についても検討した。さらに、MOX 燃料および金属燃料炉心、軽水炉回収 TRU 燃料の適用性も検討した。

表 3.2.1.1 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心(導入期炉心)の主要目

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	原子炉熱出力	1875 MWt
	電気出力	750 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)
	燃料交換バッチ数	7バッチ
	炉心高さ	70 cm
	軸方向ブランク厚さ(上部/下部)	0/35 cm
	炉心等価直径	440.7 cm
	遮へい体外接円径	約523cm
	炉心燃料集合体数(内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体
	径方向ブランク体数	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)
炉心燃料仕様	燃料形態 ^{*1}	窒化物
	炉心材料(被覆管/ラッパ管)	ODS鋼/PNC-FMS鋼
	燃料ピン外径	7.3 mm
	被覆管肉厚	0.42 mm
	燃料スミア密度(炉心/軸方向ブランク)	80 / 95 %TD
	スペーサ形式	グリッド支持
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径(P/D)	1.22
	集合体当たり燃料ピン本数	331 本
	ラッパ管外対面間距離	173.0 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
集合体配列ピッチ	177.5 mm	
炉心主要特性	Pu 富化度 ^{*2} (内側/外側)	15.2 / 18.2 wt. %
	炉心部取出平均燃焼度	157 GWd/t
	全炉心平均燃焼度 ^{*3}	105 GWd/t
	燃焼反応度	0.90 %Δk/kk'
	最大線出力(内側/外側)	194.6 / 195.5 W/cm
	炉心平均出力密度	164.7 W/cm ³
	最大高速中性子束 ^{*4}	1.94×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量 ^{*4}	6.4×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.15
	ドップラ係数[Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-3.00×10 ⁻³
ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	4.83\$	

*1: 高速多重リサイクル 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: Pu/HM, *3: ブランク燃料を含む全体の平均燃焼度, *4: E > 0.1 MeV

*5: 集合体内非均質効果考慮, *6: 実効遅発中性子割合 β = 0.00326

表 3.2.1.2 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心(導入期炉心)の主要な燃料仕様

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランク	径方向ブランク
燃料要素	燃料形態	Pu-U 混合窒化物	U 窒化物	なし
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	7.3		—
	被覆管内径 (mm)	6.46		—
	被覆管肉厚 (mm)	0.42		—
	燃料要素全長 (mm)	2190		—
	燃料スタック長 (mm)	700	0 / 350 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	380*/690*		—
	ボンド材	He		—
	燃料スミア密度 (%TD)	80	95	—
集合体	集合体全長 (mm)	3465		—
	燃料ピン本数 (本) (合計)	331		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.9		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.22		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	173.0		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	163.0		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		—
	集合体配列ピッチ (mm)	177.5		—
	スペーサ形式	グリッド支持		—
	体積比 (%)	燃料 (実効)	39.76 (31.81)	← (37.77)
構造材		21.68	←	—
冷却材		38.56	←	—

※フェーズII 中間報告^[6]の値を見直した

表 3.2.1.3 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心(導入期炉心)の主要な炉心特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	18 ヶ月 (547.5 日)
燃料交換バッチ数	7 バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	15.2 / 18.2 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクット)	157 / 18 GWd/t
全炉心平均燃焼度*2	105 GWd/t
燃焼反応度	0.90 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクット)	1.15 0.88 / 0.27
最大線出力 (内側/外側)	194.6 / 195.5 W/cm
炉心平均出力密度	164.7 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクット)	0.94 / 0.06
最大高速中性子束*3	1.94×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量*3	6.4×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランクット)	42769 / 25910 kg
ブランクット/炉心重金属重量比	0.61
装荷時核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	5.8 t/GWe
原子炉倍增時間	44 年
複合システム倍增時間*4	48 年
ポイド反応度*5 (平衡末期)	4.83\$
ドブブラ係数 [Tdk/dT] *5 (平衡末期)	-3.00×10^{-3}

*1 : Pu/HM

*2 : ブランクット燃料を含む全体の平均燃焼度

*3 : $E > 0.1$ MeV

*4 : 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

*5 : 集合体内非均質効果考慮

*6 : 実効遅発中性子割合 $\beta = 0.00326$

表 3.2.1.4 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心(平衡期炉心)の主要目

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	原子炉熱出力	1875 MWt
	電気出力	750 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)
	燃料交換バッチ数	7バッチ
	炉心高さ	70 cm
	軸方向ブラケット厚さ (上部/下部)	0/10 cm
	炉心等価直径	440.7 cm
	遮へい体外接円径	約 523cm
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体
	径方向ブラケット体数	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)
炉心燃料仕様	燃料形態 ^{*1}	窒化物
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	7.3 mm
	被覆管肉厚	0.42 mm
	燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブラケット)	80 / 95 %TD
	スペーサ形式	グリッド支持
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D)	1.22
	集合体当たり燃料ピン本数	331 本
	ラッパ管外対面間距離	173.0 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
集合体配列ピッチ	177.5 mm	
炉心主要特性	Pu 富化度 ^{*2} (内側/外側)	14.7 / 18.0 wt. %
	炉心部取出平均燃焼度	159 GWd/t
	全炉心平均燃焼度 ^{*3}	143 GWd/t
	燃焼反応度	0.70 % $\Delta k/k'$
	最大線出力 (内側/外側)	198.8 / 197.6 W/cm
	炉心平均出力密度	167.0 W/cm ³
	最大高速中性子束 ^{*4}	1.98×10^{15} n/cm ² s
	最大高速中性子照射量 ^{*4}	6.6×10^{23} n/cm ²
	増殖比	1.04
	ドップラ係数 [Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-3.11×10^{-3}
ボイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	5.25\$	

*1: 高速多重リサイクル 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: Pu/HM, *3: ブラケット燃料を含む全体の平均燃焼度, *4: $E > 0.1$ MeV

*5: 集合体内非均質効果考慮, *6: 実効遅発中性子割合 $\beta = 0.00325$

表 3.2.1.5 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心(平衡期炉心)の主要な燃料仕様

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランク	径方向ブランク
燃料要素	燃料形態	Pu-U 混合窒化物	U 窒化物	なし
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	7.3		—
	被覆管内径 (mm)	6.46		—
	被覆管肉厚 (mm)	0.42		—
	燃料要素全長 (mm)	2190		—
	燃料スタック長 (mm)	700	0 / 100 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	380*/940*		—
	ボンド材	He		—
	燃料スミア密度 (%TD)	80	95	—
集合体	集合体全長 (mm)	3465		—
	燃料ピン本数 (本) (合計)	331		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.9		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.22		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	173.0		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	163.0		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		—
	集合体配列ピッチ (mm)	177.5		—
	スペーサ形式	グリッド支持		—
体積比 (%)	燃料 (実効)	39.76 (31.81)	← (37.77)	—
	構造材	21.68	←	—
	冷却材	38.56	←	—

※フェーズII 中間報告^[6]の値を見直した

表 3.2.1.6 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心(平衡期炉心)の主要な炉心特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	18 ヶ月 (547.5 日)
燃料交換バッチ数	7 バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	14.7 / 18.0 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクット)	159 / 50 GWd/t
全炉心平均燃焼度*2	143 GWd/t
燃焼反応度	0.70 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクット)	1.04 0.91 / 0.13
最大線出力 (内側/外側)	198.8 / 197.6 W/cm
炉心平均出力密度	167.0 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクット)	0.95 / 0.05
最大高速中性子束*3	1.98×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量*3	6.6×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランクット)	42768 / 7403 kg
ブランクット/炉心重金属重量比	0.17
装荷時核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	5.6 t/GWe
原子炉倍増時間	—
複合システム倍増時間*4	—
ポイド反応度*5 (平衡末期)	5.25\$
ドブブラ係数 [Tdk/dT]*5 (平衡末期)	-3.11×10^{-3}

*1: Pu/HM

*2: ブランクット燃料を含む全体の平均燃焼度

*3: E > 0.1 MeV

*4: 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

*5: 集合体内非均質効果考慮

*6: 実効遅発中性子割合 $\beta = 0.00325$

表 3.2.1.7 強制循環炉の代表炉心の物質収支(1/2)

装荷燃料、1バッチ当たりの燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	8.31	6.83	15.14	11.10	0.00	11.10	26.24
U236	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U238	2761.07	2270.00	5031.07	3690.39	0.00	3690.39	8721.46
U合計	2769.38	2276.83	5046.21	3701.49	0.00	3701.49	8747.70
Pu238	5.78	5.92	11.70	0.00	0.00	0.00	11.70
Pu239	284.46	290.97	575.43	0.00	0.00	0.00	575.43
Pu240	168.78	172.65	341.43	0.00	0.00	0.00	341.43
Pu241	22.60	23.12	45.72	0.00	0.00	0.00	45.72
Pu242	20.51	20.98	41.49	0.00	0.00	0.00	41.49
Pu合計	502.13	513.64	1015.77	0.00	0.00	0.00	1015.77
Np237	2.63	2.69	5.32	0.00	0.00	0.00	5.32
Np239	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Np合計	2.63	2.69	5.32	0.00	0.00	0.00	5.32
Am241	10.53	10.78	21.31	0.00	0.00	0.00	21.31
Am242m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Am243	5.26	5.38	10.64	0.00	0.00	0.00	10.64
Am合計	15.79	16.16	31.95	0.00	0.00	0.00	31.95
Cm242	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm243	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm244	5.26	5.38	10.64	0.00	0.00	0.00	10.64
Cm245	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm合計	5.26	5.38	10.64	0.00	0.00	0.00	10.64
合計	3295.19	2814.70	6109.89	3701.49	0.00	3701.49	9811.38
ラン化FP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
随伴FP	52.64	44.96	97.60	0.00	0.00	0.00	97.60
FP合計	52.64	44.96	97.60	0.00	0.00	0.00	97.60

取出燃料、1バッチ当たりの燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	1.48	1.96	3.44	5.73	0.00	5.73	9.17
U236	1.15	0.85	2.00	1.15	0.00	1.15	3.15
U238	2210.87	1915.63	4126.50	3408.02	0.00	3408.02	7534.52
U合計	2213.50	1918.44	4131.94	3414.90	0.00	3414.90	7546.84
Pu238	7.35	7.50	14.85	0.11	0.00	0.11	14.96
Pu239	278.06	247.98	526.04	199.76	0.00	199.76	725.80
Pu240	154.28	152.73	307.01	15.58	0.00	15.58	322.59
Pu241	21.83	20.48	42.31	0.69	0.00	0.69	43.00
Pu242	17.74	18.31	36.05	0.03	0.00	0.03	36.08
Pu合計	479.26	447.00	926.26	216.17	0.00	216.17	1142.43
Np237	2.17	2.15	4.32	0.53	0.00	0.53	4.85
Np239	0.37	0.25	0.62	0.25	0.00	0.25	0.87
Np合計	2.54	2.40	4.94	0.78	0.00	0.78	5.72
Am241	8.86	10.78	19.64	0.08	0.00	0.08	19.72
Am242m	0.75	0.78	1.53	0.00	0.00	0.00	1.53
Am243	5.28	5.36	10.64	0.00	0.00	0.00	10.64
Am合計	14.89	16.92	31.81	0.08	0.00	0.08	31.89
Cm242	0.46	0.44	0.90	0.00	0.00	0.00	0.90
Cm243	0.06	0.05	0.11	0.00	0.00	0.00	0.11
Cm244	6.21	6.03	12.24	0.00	0.00	0.00	12.24
Cm245	1.10	0.96	2.06	0.00	0.00	0.00	2.06
Cm合計	7.83	7.48	15.31	0.00	0.00	0.00	15.31
合計	2718.02	2392.24	5110.26	3631.93	0.00	3631.93	8742.19
ラン化FP	576.78	423.87	1000.65	67.22	0.00	67.22	1067.87
随伴FP	52.64	44.96	97.60	0.00	0.00	0.00	97.60
FP合計	629.42	468.83	1098.25	67.22	0.00	67.22	1165.47

表 3.2.1.7 強制循環炉の代表炉心の物質収支(2/2)

平衡初期(BOEC)の燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	31.57	29.08	60.65	60.66	0.00	60.66	121.31
U236	4.98	3.53	8.51	3.81	0.00	3.81	12.32
U238	17633.67	14756.57	32390.24	25027.00	0.00	25027.00	57417.24
U合計	17670.22	14789.18	32459.40	25091.47	0.00	25091.47	57550.87
Pu238	46.16	46.46	92.62	0.17	0.00	0.17	92.79
Pu239	2023.64	1899.25	3922.89	644.21	0.00	644.21	4567.10
Pu240	1135.55	1146.36	2281.91	29.33	0.00	29.33	2311.24
Pu241	157.60	154.17	311.77	0.92	0.00	0.92	312.69
Pu242	134.69	138.30	272.99	0.02	0.00	0.02	273.01
Pu合計	3497.64	3384.54	6882.18	674.65	0.00	674.65	7556.83
Np237	16.81	16.92	33.73	1.41	0.00	1.41	35.14
Np239	2.59	1.58	4.17	1.43	0.00	1.43	5.60
Np合計	19.40	18.50	37.90	2.84	0.00	2.84	40.74
Am241	68.02	75.31	143.33	0.08	0.00	0.08	143.41
Am242m	3.46	3.23	6.69	0.00	0.00	0.00	6.69
Am243	37.23	37.81	75.04	0.00	0.00	0.00	75.04
Am合計	108.71	116.35	225.06	0.08	0.00	0.08	225.14
Cm242	3.10	2.53	5.63	0.00	0.00	0.00	5.63
Cm243	0.26	0.18	0.44	0.00	0.00	0.00	0.44
Cm244	40.03	39.91	79.94	0.00	0.00	0.00	79.94
Cm245	4.33	3.70	8.03	0.00	0.00	0.00	8.03
Cm合計	47.72	46.32	94.04	0.00	0.00	0.00	94.04
合計	21343.69	18354.89	39698.58	25769.04	0.00	25769.04	65467.62
ラン化FP	1720.70	1353.17	3073.87	134.84	0.00	134.84	3208.71
随伴FP	368.45	314.72	683.17	0.00	0.00	0.00	683.17
FP合計	2089.15	1667.89	3757.04	134.84	0.00	134.84	3891.88

平衡末期(EOEC)の燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	24.74	24.21	48.95	55.29	0.00	55.29	104.24
U236	6.13	4.38	10.51	4.96	0.00	4.96	15.47
U238	17083.47	14402.20	31485.67	24744.63	0.00	24744.63	56230.30
U合計	17114.34	14430.79	31545.13	24804.88	0.00	24804.88	56350.01
Pu238	47.73	48.04	95.77	0.28	0.00	0.28	96.05
Pu239	2017.24	1856.26	3873.50	843.97	0.00	843.97	4717.47
Pu240	1121.05	1126.44	2247.49	44.91	0.00	44.91	2292.40
Pu241	156.83	151.53	308.36	1.61	0.00	1.61	309.97
Pu242	131.92	135.63	267.55	0.05	0.00	0.05	267.60
Pu合計	3474.77	3317.90	6792.67	890.82	0.00	890.82	7683.49
Np237	16.35	16.38	32.73	1.94	0.00	1.94	34.67
Np239	2.96	1.83	4.79	1.68	0.00	1.68	6.47
Np合計	19.31	18.21	37.52	3.62	0.00	3.62	41.14
Am241	66.35	75.31	141.66	0.16	0.00	0.16	141.82
Am242m	4.21	4.01	8.22	0.00	0.00	0.00	8.22
Am243	37.25	37.79	75.04	0.00	0.00	0.00	75.04
Am合計	107.81	117.11	224.92	0.16	0.00	0.16	225.08
Cm242	3.56	2.97	6.53	0.00	0.00	0.00	6.53
Cm243	0.32	0.23	0.55	0.00	0.00	0.00	0.55
Cm244	40.98	40.56	81.54	0.00	0.00	0.00	81.54
Cm245	5.43	4.66	10.09	0.00	0.00	0.00	10.09
Cm合計	50.29	48.42	98.71	0.00	0.00	0.00	98.71
合計	20766.52	17932.43	38698.95	25699.48	0.00	25699.48	64398.43
ラン化FP	2297.48	1777.04	4074.52	202.06	0.00	202.06	4276.58
随伴FP	368.45	314.72	683.17	0.00	0.00	0.00	683.17
FP合計	2665.93	2091.76	4757.69	202.06	0.00	202.06	4959.75

表 3.2.1.8 鉛ヒュスマス強制循環冷却炉代表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)	制御系		備考 (% $\Delta k/kk'$)
			粗調整棒	微調整棒	
1. 計画余剰反応度	0.5	0.5			
(1) 出力補償	1.1		1.1	0.5	
(2) 燃焼補償	0.1			0.1	
(3) 運転余裕	1.7	0.5	1.1	0.6	
計					
2. 余剰反応度の不確かさ (2 σ)	0				
(1) 臨界予測誤差	0.1	0.1		0.1	不確かさ: 20%
(2) 出力補償予測誤差	0.2		0.2		Na冷却炉設計例
(3) 燃焼補償予測誤差	0.4		0.4		Na冷却炉設計例
(4) 燃料製作予測誤差	0.2		0.2		
(5) 燃料交換余裕	0.5		0.5	0.1	
計 (2 σ)					
3. 必要制御棒反応度合計 (1.+2.)	2.2	0.6 (0.75) *	1.6	0.7	
4. 制御棒価値最小値	4.03	0.79	3.83	0.80	
5. 反応度停止余裕 (4.-3.)	1.83	0.19 (0.04*)			
反応度制御系の成立性	成立	成立	成立	成立	

* 事故時投入反応度として0.15% $\Delta k/kk'$ を考慮した場合。

表 3.2.1.9 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

項目	高燃焼度炉心		照射量目標対応炉心	
	導入期炉心	平衡期炉心	導入期炉心	平衡期炉心
原子炉出力	1875 MWt (750 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)	←	20.5ヶ月(623.5日)	20.0ヶ月(608.4日)
燃料交換バッチ数(炉心/径方向ブランク)	7/-バッチ	←	5/-バッチ	←
炉心高さ	70 cm	←	←	←
軸方向ブランク厚さ(上部/下部)	0/35 cm	0/10 cm	0/35 cm	0/6 cm
炉心等価直径	441 cm	←	←	←
遮へい体外径	約523 cm	←	←	←
燃料形態	窒化物	←	←	←
炉心材料(被覆管/ラップ管)	ODS鋼/PNC-FMS鋼	←	←	←
燃料ピン外径	7.3 mm	←	←	←
被覆管肉厚	0.42 mm	←	←	←
燃料スミア密度(炉心/軸方向ブランク/径方向ブランク)	80 / 95 / - %TD	←	←	←
スパーサ形式	グリッド支持	←	←	←
集合体当たり燃料ピン本数	331本	←	←	←
Pu 富化度(内側/外側) ^{#1}	15.2 / 18.2 wt.%	14.7 / 18.0 wt.%	15.0 / 17.7 wt.%	14.4 / 17.3 wt.%
取出平均燃焼度(炉心部/全炉心) ^{#2}	157 / 105 GWD/t	159 / 143 GWD/t	129 / 85 GWD/t	129 / 121 GWD/t
燃焼反応度	0.90 %Δk/kk'	0.70 %Δk/kk'	0.75 %Δk/kk'	0.51 %Δk/kk'
増殖比(炉心/軸方向ブランク/径方向ブランク/全体)	0.88 / 0.27 / - / 1.15	0.91 / 0.13 / - / 1.04	0.92 / 0.26 / - / 1.18	0.95 / 0.09 / - / 1.04
最大線出力(内側/外側)	195 / 196 W/cm	199 / 198 W/cm	202 / 202 W/cm	208 / 205 W/cm
炉心平均出力密度	165 W/cm ³	167 W/cm ³	167 W/cm ³	170 W/cm ³
最大高速中性子照射量 ^{#3}	6.4×10 ²³ n/cm ²	6.6×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²
トップラ係数 [Γdk/dT] (平衡末期) ^{#4}	-3.0×10 ⁻³	-3.1×10 ⁻³	-3.2×10 ⁻³	-3.4×10 ⁻³
ポイド反応度(平衡末期) ^{#4}	4.8 \$ ^{#5}	5.2 \$ ^{#5}	4.7 \$ ^{#5}	5.2 \$ ^{#5}
複合システム倍増時間	48年 ^{#6}	-	42年 ^{#6}	-

#1: Pu/M, #2: ブランク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 0.00326 (高燃焼度・導入期炉心), 0.00325 (高燃焼度・平衡期炉心), 0.00330 (照射量目標対応・導入期炉心), 0.00328 (照射量目標対応・平衡期炉心),
 #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

表 3.2.1.10 燃料形態の違いによる鉛ピスマス強制循環冷却炉導入期炉心の主要目の比較 (同一仕様)

項目	窒化物燃料	金属燃料	MOX 燃料
原子炉出力	1875 MWt (750 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)	←	13.7 ヶ月 (418 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向アラケット)	7/-バッチ	←	6/-バッチ
炉心高さ	70 cm	←	←
軸方向アラケット厚さ (上部/下部)	0/35 cm	←	←
炉心等価直径	441 cm	←	←
遮へい体外径	約 523 cm	←	←
燃料形態	窒化物	金属燃料	MOX
炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	←	←
燃料ピン外径	7.3 mm	←	←
被覆管肉厚	0.42 mm	←	0.52 mm
燃料スミア密度 (炉心/軸方向アラケット/径方向アラケット)	80 / 95 / - %TD	75 / 75 / - %TD	82 / 95 / - %TD
スペーサ形式	グリッド支持	←	←
集合体当たり燃料ピン本数	331 本	←	←
Pu 富化度 (内側/外側) *1	15.2 / 18.2 wt. %	13.0 / 16.4 wt. %	23.2 / 25.7 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心)*2	157 / 105 GWd/t	156 / 112 GWd/t	150 / 100 GWd/t
燃焼反応度	0.90 %Δk/kk'	1.05 %Δk/kk'	2.80 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向アラケット/径方向アラケット/全体)	0.88 / 0.27 / - / 1.15	0.84 / 0.26 / - / 1.10	0.72 / 0.24 / - / 0.95
最大線出力 (内側/外側)	195 / 196 W/cm	191 / 192 W/cm	187 / 191 W/cm
炉心平均出力密度	165 W/cm ³	163 W/cm ³	166 W/cm ³
最大高速中性子照射量*3	6.4×10 ²³ n/cm ²	7.6×10 ²³ n/cm ²	4.3×10 ²³ n/cm ²
ドップラ係数 [Tdk/dT] (平衡末期)*4	-3.0×10 ⁻³	-2.2×10 ⁻³	-4.1×10 ⁻³
ポイド反応度 (平衡末期)*4	4.8 \$*5	4.3 \$*5	4.1 \$*5
複合システム倍増時間	48 年*6	70 年*6	-

*1: Pu/HM, *2: アラ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: 実効遅延中性子割合 0.00326 (窒化物燃料)、0.00338 (金属燃料)、0.00306 (MOX 燃料)

*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

表 3.2.1.11 鉛ビスマス強制循環冷却炉 MOX 燃料炉心の主要目の比較

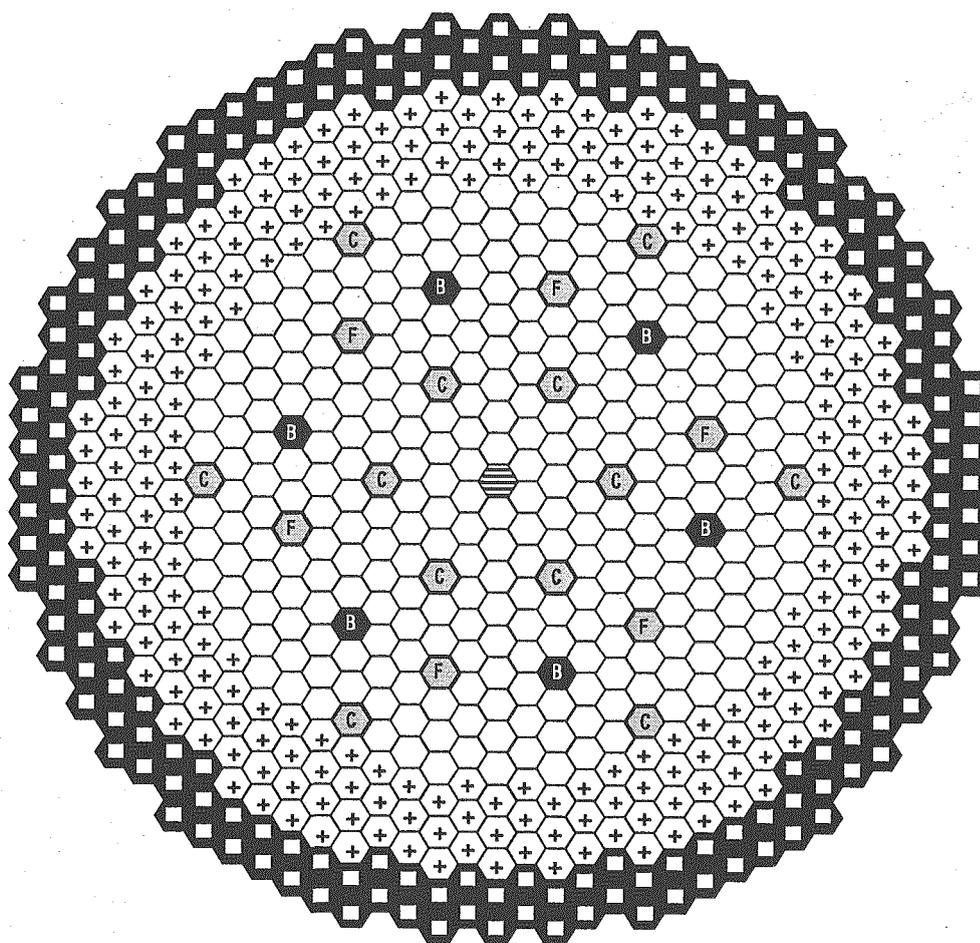
項目	導入期炉心	平衡期炉心
原子炉出力	1875 MWt (750 MWe)	←
炉心型式	均質 2 領域炉心	←
運転サイクル長さ	17.5 ヶ月 (532 日)	←
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ラケット)	6/6 バッチ	←
炉心高さ	90 cm	←
軸方向ラケット厚さ (上部/下部)	0/55 cm	0/35 cm
炉心等価直径	441 cm	←
遮へい体外接円径	約 557 cm	←
燃料形態	MOX	←
炉心材料 (被覆管/ラケット)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	←
燃料ピン外径	7.3 mm	←
被覆管肉厚	0.52 mm	←
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ラケット/径方向ラケット)	82 / 95/ 95 %TD	←
スペーサ形式	グリッド支持	←
集合体当たり燃料ピン本数	331 本	←
Pu 富化度 (内側/外側) ^{*1}	20.5 / 23.8 wt. %	20.3 / 23.7 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心) ^{*2}	149 / 61 GWd/t	148 / 87 GWd/t
燃焼反応度	2.4 %Δk/kk'	2.3 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ラケット/径方向ラケット/全体)	0.79 / 0.19 / 0.13 / 1.10	0.79 / 0.17 / 0.08 / 1.04
最大線出力 (内側/外側)	152 / 157 W/cm	152 / 156 W/cm
炉心平均出力密度	130 W/cm ³	129 W/cm ³
最大高速中性子照射量 ^{*3}	4.7×10 ²³ n/cm ²	4.7×10 ²³ n/cm ²
ドップラ係数 [Td/k/dT] (平衡末期) ^{*4}	-3.7×10 ⁻³	-3.7×10 ⁻³
ポイド反応度 (平衡末期) ^{*4}	4.7 \$ ^{*5}	4.9 \$ ^{*5}
複合システム倍増時間	80 年 ^{*6}	-

*1: Pu/HM、*2: ラ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: 実効遅発中性子割合 0.00311 (導入期炉心)、0.00309 (平衡期炉心) *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

表 3.2.1.12 燃料組成の違いによる鉛ビスマス強制循環冷却炉導入期炉心の主要目の比較

項目	高速炉多重リサイクル TRU ^{#1}	LWR からの回収 TRU (基準) ^{#2}	LWR からの回収 TRU (代表) ^{#3}
原子炉出力	1875 MWt (750 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)	←	←
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランク)	7/-バッチ	←	←
炉心高さ	70 cm	←	←
軸方向ブランク厚さ (上部/下部)	0/35 cm	←	←
炉心等価直径	441 cm	←	←
遮へい体外径	約 523 cm	←	←
燃料形態	窒化物	←	←
炉心材料 (被覆管/ラップ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	←	←
燃料ピン外径	7.3 mm	←	←
被覆管肉厚	0.42 mm	←	←
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランク/径方向ブランク)	80 / 95 / - %TD	←	←
スペーサ形式	グリッド支持	←	←
集合体当たり燃料ピン本数	331 本	←	←
Pu 富化度 (内側/外側) ^{#4}	15.2 / 18.2 wt. %	14.8 / 17.6 wt. %	14.7 / 17.6 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心) ^{#5}	157 / 105 GWd/t	157 / 105 GWd/t	157 / 105 GWd/t
燃焼反応度	0.90 %Δk/kk'	1.30 %Δk/kk'	0.70 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ブランク/径方向ブランク/全体)	0.88 / 0.27 / - / 1.15	0.85 / 0.27 / - / 1.11	0.86 / 0.27 / - / 1.14
最大線出力 (内側/外側)	195 / 196 W/cm	195 / 195 W/cm	197 / 197 W/cm
炉心平均出力密度	165 W/cm ³	165 W/cm ³	165 W/cm ³
最大高速中性子照射量 ^{#6}	6.4 × 10 ²³ n/cm ²	6.4 × 10 ²³ n/cm ²	6.4 × 10 ²³ n/cm ²
トップラ係数 [Tdk/dT] (平衡末期) ^{#7}	-3.0 × 10 ⁻³	-2.8 × 10 ⁻³	-2.6 × 10 ⁻³
ボイド反応度 (平衡末期) ^{#7}	4.8 \$ ^{#5}	4.9 \$ ^{#8}	5.3 \$ ^{#8}
複合システム倍増時間	48 年 ^{#6}	60 年 ^{#9}	49 年 ^{#9}

#1 ²³⁸Pu/²³⁹Pu/²⁴⁰Pu/²⁴¹Pu/²⁴²Pu/²⁴³Pu/²⁴⁴Am/²⁴⁵Am/²⁴⁶Am/²⁴⁷Np/²⁴⁸Np/²⁴⁹Np/²⁵⁰Np/²⁵¹Np/²⁵²Np/²⁵³Np/²⁵⁴Np/²⁵⁵Np/²⁵⁶Np/²⁵⁷Np/²⁵⁸Np/²⁵⁹Np/²⁶⁰Np/²⁶¹Np/²⁶²Np/²⁶³Np/²⁶⁴Np/²⁶⁵Np/²⁶⁶Np/²⁶⁷Np/²⁶⁸Np/²⁶⁹Np/²⁷⁰Np/²⁷¹Np/²⁷²Np/²⁷³Np/²⁷⁴Np/²⁷⁵Np/²⁷⁶Np/²⁷⁷Np/²⁷⁸Np/²⁷⁹Np/²⁸⁰Np/²⁸¹Np/²⁸²Np/²⁸³Np/²⁸⁴Np/²⁸⁵Np/²⁸⁶Np/²⁸⁷Np/²⁸⁸Np/²⁸⁹Np/²⁹⁰Np/²⁹¹Np/²⁹²Np/²⁹³Np/²⁹⁴Np/²⁹⁵Np/²⁹⁶Np/²⁹⁷Np/²⁹⁸Np/²⁹⁹Np/³⁰⁰Np/³⁰¹Np/³⁰²Np/³⁰³Np/³⁰⁴Np/³⁰⁵Np/³⁰⁶Np/³⁰⁷Np/³⁰⁸Np/³⁰⁹Np/³¹⁰Np/³¹¹Np/³¹²Np/³¹³Np/³¹⁴Np/³¹⁵Np/³¹⁶Np/³¹⁷Np/³¹⁸Np/³¹⁹Np/³²⁰Np/³²¹Np/³²²Np/³²³Np/³²⁴Np/³²⁵Np/³²⁶Np/³²⁷Np/³²⁸Np/³²⁹Np/³³⁰Np/³³¹Np/³³²Np/³³³Np/³³⁴Np/³³⁵Np/³³⁶Np/³³⁷Np/³³⁸Np/³³⁹Np/³⁴⁰Np/³⁴¹Np/³⁴²Np/³⁴³Np/³⁴⁴Np/³⁴⁵Np/³⁴⁶Np/³⁴⁷Np/³⁴⁸Np/³⁴⁹Np/³⁵⁰Np/³⁵¹Np/³⁵²Np/³⁵³Np/³⁵⁴Np/³⁵⁵Np/³⁵⁶Np/³⁵⁷Np/³⁵⁸Np/³⁵⁹Np/³⁶⁰Np/³⁶¹Np/³⁶²Np/³⁶³Np/³⁶⁴Np/³⁶⁵Np/³⁶⁶Np/³⁶⁷Np/³⁶⁸Np/³⁶⁹Np/³⁷⁰Np/³⁷¹Np/³⁷²Np/³⁷³Np/³⁷⁴Np/³⁷⁵Np/³⁷⁶Np/³⁷⁷Np/³⁷⁸Np/³⁷⁹Np/³⁸⁰Np/³⁸¹Np/³⁸²Np/³⁸³Np/³⁸⁴Np/³⁸⁵Np/³⁸⁶Np/³⁸⁷Np/³⁸⁸Np/³⁸⁹Np/³⁹⁰Np/³⁹¹Np/³⁹²Np/³⁹³Np/³⁹⁴Np/³⁹⁵Np/³⁹⁶Np/³⁹⁷Np/³⁹⁸Np/³⁹⁹Np/⁴⁰⁰Np/⁴⁰¹Np/⁴⁰²Np/⁴⁰³Np/⁴⁰⁴Np/⁴⁰⁵Np/⁴⁰⁶Np/⁴⁰⁷Np/⁴⁰⁸Np/⁴⁰⁹Np/⁴¹⁰Np/⁴¹¹Np/⁴¹²Np/⁴¹³Np/⁴¹⁴Np/⁴¹⁵Np/⁴¹⁶Np/⁴¹⁷Np/⁴¹⁸Np/⁴¹⁹Np/⁴²⁰Np/⁴²¹Np/⁴²²Np/⁴²³Np/⁴²⁴Np/⁴²⁵Np/⁴²⁶Np/⁴²⁷Np/⁴²⁸Np/⁴²⁹Np/⁴³⁰Np/⁴³¹Np/⁴³²Np/⁴³³Np/⁴³⁴Np/⁴³⁵Np/⁴³⁶Np/⁴³⁷Np/⁴³⁸Np/⁴³⁹Np/⁴⁴⁰Np/⁴⁴¹Np/⁴⁴²Np/⁴⁴³Np/⁴⁴⁴Np/⁴⁴⁵Np/⁴⁴⁶Np/⁴⁴⁷Np/⁴⁴⁸Np/⁴⁴⁹Np/⁴⁵⁰Np/⁴⁵¹Np/⁴⁵²Np/⁴⁵³Np/⁴⁵⁴Np/⁴⁵⁵Np/⁴⁵⁶Np/⁴⁵⁷Np/⁴⁵⁸Np/⁴⁵⁹Np/⁴⁶⁰Np/⁴⁶¹Np/⁴⁶²Np/⁴⁶³Np/⁴⁶⁴Np/⁴⁶⁵Np/⁴⁶⁶Np/⁴⁶⁷Np/⁴⁶⁸Np/⁴⁶⁹Np/⁴⁷⁰Np/⁴⁷¹Np/⁴⁷²Np/⁴⁷³Np/⁴⁷⁴Np/⁴⁷⁵Np/⁴⁷⁶Np/⁴⁷⁷Np/⁴⁷⁸Np/⁴⁷⁹Np/⁴⁸⁰Np/⁴⁸¹Np/⁴⁸²Np/⁴⁸³Np/⁴⁸⁴Np/⁴⁸⁵Np/⁴⁸⁶Np/⁴⁸⁷Np/⁴⁸⁸Np/⁴⁸⁹Np/⁴⁹⁰Np/⁴⁹¹Np/⁴⁹²Np/⁴⁹³Np/⁴⁹⁴Np/⁴⁹⁵Np/⁴⁹⁶Np/⁴⁹⁷Np/⁴⁹⁸Np/⁴⁹⁹Np/⁵⁰⁰Np/⁵⁰¹Np/⁵⁰²Np/⁵⁰³Np/⁵⁰⁴Np/⁵⁰⁵Np/⁵⁰⁶Np/⁵⁰⁷Np/⁵⁰⁸Np/⁵⁰⁹Np/⁵¹⁰Np/⁵¹¹Np/⁵¹²Np/⁵¹³Np/⁵¹⁴Np/⁵¹⁵Np/⁵¹⁶Np/⁵¹⁷Np/⁵¹⁸Np/⁵¹⁹Np/⁵²⁰Np/⁵²¹Np/⁵²²Np/⁵²³Np/⁵²⁴Np/⁵²⁵Np/⁵²⁶Np/⁵²⁷Np/⁵²⁸Np/⁵²⁹Np/⁵³⁰Np/⁵³¹Np/⁵³²Np/⁵³³Np/⁵³⁴Np/⁵³⁵Np/⁵³⁶Np/⁵³⁷Np/⁵³⁸Np/⁵³⁹Np/⁵⁴⁰Np/⁵⁴¹Np/⁵⁴²Np/⁵⁴³Np/⁵⁴⁴Np/⁵⁴⁵Np/⁵⁴⁶Np/⁵⁴⁷Np/⁵⁴⁸Np/⁵⁴⁹Np/⁵⁵⁰Np/⁵⁵¹Np/⁵⁵²Np/⁵⁵³Np/⁵⁵⁴Np/⁵⁵⁵Np/⁵⁵⁶Np/⁵⁵⁷Np/⁵⁵⁸Np/⁵⁵⁹Np/⁵⁶⁰Np/⁵⁶¹Np/⁵⁶²Np/⁵⁶³Np/⁵⁶⁴Np/⁵⁶⁵Np/⁵⁶⁶Np/⁵⁶⁷Np/⁵⁶⁸Np/⁵⁶⁹Np/⁵⁷⁰Np/⁵⁷¹Np/⁵⁷²Np/⁵⁷³Np/⁵⁷⁴Np/⁵⁷⁵Np/⁵⁷⁶Np/⁵⁷⁷Np/⁵⁷⁸Np/⁵⁷⁹Np/⁵⁸⁰Np/⁵⁸¹Np/⁵⁸²Np/⁵⁸³Np/⁵⁸⁴Np/⁵⁸⁵Np/⁵⁸⁶Np/⁵⁸⁷Np/⁵⁸⁸Np/⁵⁸⁹Np/⁵⁹⁰Np/⁵⁹¹Np/⁵⁹²Np/⁵⁹³Np/⁵⁹⁴Np/⁵⁹⁵Np/⁵⁹⁶Np/⁵⁹⁷Np/⁵⁹⁸Np/⁵⁹⁹Np/⁶⁰⁰Np/⁶⁰¹Np/⁶⁰²Np/⁶⁰³Np/⁶⁰⁴Np/⁶⁰⁵Np/⁶⁰⁶Np/⁶⁰⁷Np/⁶⁰⁸Np/⁶⁰⁹Np/⁶¹⁰Np/⁶¹¹Np/⁶¹²Np/⁶¹³Np/⁶¹⁴Np/⁶¹⁵Np/⁶¹⁶Np/⁶¹⁷Np/⁶¹⁸Np/⁶¹⁹Np/⁶²⁰Np/⁶²¹Np/⁶²²Np/⁶²³Np/⁶²⁴Np/⁶²⁵Np/⁶²⁶Np/⁶²⁷Np/⁶²⁸Np/⁶²⁹Np/⁶³⁰Np/⁶³¹Np/⁶³²Np/⁶³³Np/⁶³⁴Np/⁶³⁵Np/⁶³⁶Np/⁶³⁷Np/⁶³⁸Np/⁶³⁹Np/⁶⁴⁰Np/⁶⁴¹Np/⁶⁴²Np/⁶⁴³Np/⁶⁴⁴Np/⁶⁴⁵Np/⁶⁴⁶Np/⁶⁴⁷Np/⁶⁴⁸Np/⁶⁴⁹Np/⁶⁵⁰Np/⁶⁵¹Np/⁶⁵²Np/⁶⁵³Np/⁶⁵⁴Np/⁶⁵⁵Np/⁶⁵⁶Np/⁶⁵⁷Np/⁶⁵⁸Np/⁶⁵⁹Np/⁶⁶⁰Np/⁶⁶¹Np/⁶⁶²Np/⁶⁶³Np/⁶⁶⁴Np/⁶⁶⁵Np/⁶⁶⁶Np/⁶⁶⁷Np/⁶⁶⁸Np/⁶⁶⁹Np/⁶⁷⁰Np/⁶⁷¹Np/⁶⁷²Np/⁶⁷³Np/⁶⁷⁴Np/⁶⁷⁵Np/⁶⁷⁶Np/⁶⁷⁷Np/⁶⁷⁸Np/⁶⁷⁹Np/⁶⁸⁰Np/⁶⁸¹Np/⁶⁸²Np/⁶⁸³Np/⁶⁸⁴Np/⁶⁸⁵Np/⁶⁸⁶Np/⁶⁸⁷Np/⁶⁸⁸Np/⁶⁸⁹Np/⁶⁹⁰Np/⁶⁹¹Np/⁶⁹²Np/⁶⁹³Np/⁶⁹⁴Np/⁶⁹⁵Np/⁶⁹⁶Np/⁶⁹⁷Np/⁶⁹⁸Np/⁶⁹⁹Np/⁷⁰⁰Np/⁷⁰¹Np/⁷⁰²Np/⁷⁰³Np/⁷⁰⁴Np/⁷⁰⁵Np/⁷⁰⁶Np/⁷⁰⁷Np/⁷⁰⁸Np/⁷⁰⁹Np/⁷¹⁰Np/⁷¹¹Np/⁷¹²Np/⁷¹³Np/⁷¹⁴Np/⁷¹⁵Np/⁷¹⁶Np/⁷¹⁷Np/⁷¹⁸Np/⁷¹⁹Np/⁷²⁰Np/⁷²¹Np/⁷²²Np/⁷²³Np/⁷²⁴Np/⁷²⁵Np/⁷²⁶Np/⁷²⁷Np/⁷²⁸Np/⁷²⁹Np/⁷³⁰Np/⁷³¹Np/⁷³²Np/⁷³³Np/⁷³⁴Np/⁷³⁵Np/⁷³⁶Np/⁷³⁷Np/⁷³⁸Np/⁷³⁹Np/⁷⁴⁰Np/⁷⁴¹Np/⁷⁴²Np/⁷⁴³Np/⁷⁴⁴Np/⁷⁴⁵Np/⁷⁴⁶Np/⁷⁴⁷Np/⁷⁴⁸Np/⁷⁴⁹Np/⁷⁵⁰Np/⁷⁵¹Np/⁷⁵²Np/⁷⁵³Np/⁷⁵⁴Np/⁷⁵⁵Np/⁷⁵⁶Np/⁷⁵⁷Np/⁷⁵⁸Np/⁷⁵⁹Np/⁷⁶⁰Np/⁷⁶¹Np/⁷⁶²Np/⁷⁶³Np/⁷⁶⁴Np/⁷⁶⁵Np/⁷⁶⁶Np/⁷⁶⁷Np/⁷⁶⁸Np/⁷⁶⁹Np/⁷⁷⁰Np/⁷⁷¹Np/⁷⁷²Np/⁷⁷³Np/⁷⁷⁴Np/⁷⁷⁵Np/⁷⁷⁶Np/⁷⁷⁷Np/⁷⁷⁸Np/⁷⁷⁹Np/⁷⁸⁰Np/⁷⁸¹Np/⁷⁸²Np/⁷⁸³Np/⁷⁸⁴Np/⁷⁸⁵Np/⁷⁸⁶Np/⁷⁸⁷Np/⁷⁸⁸Np/⁷⁸⁹Np/⁷⁹⁰Np/⁷⁹¹Np/⁷⁹²Np/⁷⁹³Np/⁷⁹⁴Np/⁷⁹⁵Np/⁷⁹⁶Np/⁷⁹⁷Np/⁷⁹⁸Np/⁷⁹⁹Np/⁸⁰⁰Np/⁸⁰¹Np/⁸⁰²Np/⁸⁰³Np/⁸⁰⁴Np/⁸⁰⁵Np/⁸⁰⁶Np/⁸⁰⁷Np/⁸⁰⁸Np/⁸⁰⁹Np/⁸¹⁰Np/⁸¹¹Np/⁸¹²Np/⁸¹³Np/⁸¹⁴Np/⁸¹⁵Np/⁸¹⁶Np/⁸¹⁷Np/⁸¹⁸Np/⁸¹⁹Np/⁸²⁰Np/⁸²¹Np/⁸²²Np/⁸²³Np/⁸²⁴Np/⁸²⁵Np/⁸²⁶Np/⁸²⁷Np/⁸²⁸Np/⁸²⁹Np/⁸³⁰Np/⁸³¹Np/⁸³²Np/⁸³³Np/⁸³⁴Np/⁸³⁵Np/⁸³⁶Np/⁸³⁷Np/⁸³⁸Np/⁸³⁹Np/⁸⁴⁰Np/⁸⁴¹Np/⁸⁴²Np/⁸⁴³Np/⁸⁴⁴Np/⁸⁴⁵Np/⁸⁴⁶Np/⁸⁴⁷Np/⁸⁴⁸Np/⁸⁴⁹Np/⁸⁵⁰Np/⁸⁵¹Np/⁸⁵²Np/⁸⁵³Np/⁸⁵⁴Np/⁸⁵⁵Np/⁸⁵⁶Np/⁸⁵⁷Np/⁸⁵⁸Np/⁸⁵⁹Np/⁸⁶⁰Np/⁸⁶¹Np/⁸⁶²Np/⁸⁶³Np/⁸⁶⁴Np/⁸⁶⁵Np/⁸⁶⁶Np/⁸⁶⁷Np/⁸⁶⁸Np/⁸⁶⁹Np/⁸⁷⁰Np/⁸⁷¹Np/⁸⁷²Np/⁸⁷³Np/⁸⁷⁴Np/⁸⁷⁵Np/⁸⁷⁶Np/⁸⁷⁷Np/⁸⁷⁸Np/⁸⁷⁹Np/⁸⁸⁰Np/⁸⁸¹Np/⁸⁸²Np/⁸⁸³Np/⁸⁸⁴Np/⁸⁸⁵Np/⁸⁸⁶Np/⁸⁸⁷Np/⁸⁸⁸Np/⁸⁸⁹Np/⁸⁹⁰Np/⁸⁹¹Np/⁸⁹²Np/⁸⁹³Np/⁸⁹⁴Np/⁸⁹⁵Np/⁸⁹⁶Np/⁸⁹⁷Np/⁸⁹⁸Np/⁸⁹⁹Np/⁹⁰⁰Np/⁹⁰¹Np/⁹⁰²Np/⁹⁰³Np/⁹⁰⁴Np/⁹⁰⁵Np/⁹⁰⁶Np/⁹⁰⁷Np/⁹⁰⁸Np/⁹⁰⁹Np/⁹¹⁰Np/⁹¹¹Np/⁹¹²Np/⁹¹³Np/⁹¹⁴Np/⁹¹⁵Np/⁹¹⁶Np/⁹¹⁷Np/⁹¹⁸Np/⁹¹⁹Np/⁹²⁰Np/⁹²¹Np/⁹²²Np/⁹²³Np/⁹²⁴Np/⁹²⁵Np/⁹²⁶Np/⁹²⁷Np/⁹²⁸Np/⁹²⁹Np/⁹³⁰Np/⁹³¹Np/⁹³²Np/⁹³³Np/⁹³⁴Np/⁹³⁵Np/⁹³⁶Np/⁹³⁷Np/⁹³⁸Np/⁹³⁹Np/⁹⁴⁰Np/⁹⁴¹Np/⁹⁴²Np/⁹⁴³Np/⁹⁴⁴Np/⁹⁴⁵Np/⁹⁴⁶Np/⁹⁴⁷Np/⁹⁴⁸Np/⁹⁴⁹Np/⁹⁵⁰Np/⁹⁵¹Np/⁹⁵²Np/⁹⁵³Np/⁹⁵⁴Np/⁹⁵⁵Np/⁹⁵⁶Np/⁹⁵⁷Np/⁹⁵⁸Np/⁹⁵⁹Np/⁹⁶⁰Np/⁹⁶¹Np/⁹⁶²Np/⁹⁶³Np/⁹⁶⁴Np/⁹⁶⁵Np/⁹⁶⁶Np/⁹⁶⁷Np/⁹⁶⁸Np/⁹⁶⁹Np/⁹⁷⁰Np/⁹⁷¹Np/⁹⁷²Np/⁹⁷³Np/⁹⁷⁴Np/⁹⁷⁵Np/⁹⁷⁶Np/⁹⁷⁷Np/⁹⁷⁸Np/⁹⁷⁹Np/⁹⁸⁰Np/⁹⁸¹Np/⁹⁸²Np/⁹⁸³Np/⁹⁸⁴Np/⁹⁸⁵Np/⁹⁸⁶Np/⁹⁸⁷Np/⁹⁸⁸Np/⁹⁸⁹Np/⁹⁹⁰Np/⁹⁹¹Np/⁹⁹²Np/⁹⁹³Np/⁹⁹⁴Np/⁹⁹⁵Np/⁹⁹⁶Np/⁹⁹⁷Np/⁹⁹⁸Np/⁹⁹⁹Np/¹⁰⁰⁰Np/¹⁰⁰¹Np/¹⁰⁰²Np/¹⁰⁰³Np/¹⁰⁰⁴Np/¹⁰⁰⁵Np/¹⁰⁰⁶Np/¹⁰⁰⁷Np/¹⁰⁰⁸Np/¹⁰⁰⁹Np/¹⁰¹⁰Np/¹⁰¹¹Np/¹⁰¹²Np/¹⁰¹³Np/¹⁰¹⁴Np/¹⁰¹⁵Np/¹⁰¹⁶Np/¹⁰¹⁷Np/¹⁰¹⁸Np/¹⁰¹⁹Np/¹⁰²⁰Np/¹⁰²¹Np/¹⁰²²Np/¹⁰²³Np/¹⁰²⁴Np/¹⁰²⁵Np/¹⁰²⁶Np/¹⁰²⁷Np/¹⁰²⁸Np/¹⁰²⁹Np/¹⁰³⁰Np/¹⁰³¹Np/¹⁰³²Np/¹⁰³³Np/¹⁰³⁴Np/¹⁰³⁵Np/¹⁰³⁶Np/¹⁰³⁷Np/¹⁰³⁸Np/¹⁰³⁹Np/¹⁰⁴⁰Np/¹⁰⁴¹Np/¹⁰⁴²Np/¹⁰⁴³Np/¹⁰⁴⁴Np/¹⁰⁴⁵Np/¹⁰⁴⁶Np/¹⁰⁴⁷Np/¹⁰⁴⁸Np/¹⁰⁴⁹Np/¹⁰⁵⁰Np/¹⁰⁵¹Np/¹⁰⁵²Np/¹⁰⁵³Np/¹⁰⁵⁴Np/¹⁰⁵⁵Np/¹⁰⁵⁶Np/¹⁰⁵⁷Np/¹⁰⁵⁸Np/¹⁰⁵⁹Np/¹⁰⁶⁰Np/¹⁰⁶¹Np/¹⁰⁶²Np/¹⁰⁶³Np/¹⁰⁶⁴Np/¹⁰⁶⁵Np/¹⁰⁶⁶Np/¹⁰⁶⁷Np/¹⁰⁶⁸Np/¹⁰⁶⁹Np/¹⁰⁷⁰Np/¹⁰⁷¹Np/¹⁰⁷²Np/¹⁰⁷³Np/¹⁰⁷⁴Np/¹⁰⁷⁵Np/¹⁰⁷⁶Np/¹⁰⁷⁷Np/¹⁰⁷⁸Np/¹⁰⁷⁹Np/¹⁰⁸⁰Np/¹⁰⁸¹Np/¹⁰⁸²Np/¹⁰⁸³Np/¹⁰⁸⁴Np/¹⁰⁸⁵Np/¹⁰⁸⁶Np/¹⁰⁸⁷Np/¹⁰⁸⁸Np/¹⁰⁸⁹Np/¹⁰⁹⁰Np/¹⁰⁹¹Np/¹⁰⁹²Np/¹⁰⁹³Np/¹⁰⁹⁴Np/¹⁰⁹⁵Np/¹⁰⁹⁶Np/¹⁰⁹⁷Np/¹⁰⁹⁸Np/¹⁰⁹⁹Np/¹¹⁰⁰Np/¹¹⁰¹Np/¹¹⁰²Np/¹¹⁰³Np/¹¹⁰⁴Np/¹¹⁰⁵Np/¹¹⁰⁶Np/¹¹⁰⁷Np/¹¹⁰⁸Np/¹¹⁰⁹Np/¹¹¹⁰Np/¹¹¹¹Np/¹¹¹²Np/¹¹¹³Np/¹¹¹⁴Np/¹¹¹⁵Np/¹¹¹⁶Np/¹¹¹⁷Np/¹¹¹⁸Np/¹¹¹⁹Np/¹¹²⁰Np/¹¹²¹Np/¹¹²²Np/¹¹²³Np/¹¹²⁴Np/¹¹²⁵Np/¹¹²⁶Np/¹¹²⁷Np/¹¹²⁸Np/¹¹²⁹Np/¹¹³⁰Np/¹¹³¹Np/¹¹³²Np/¹¹³³Np/¹¹³⁴Np/¹¹³⁵Np/¹¹³⁶Np/¹¹³⁷Np/¹¹³⁸Np/¹¹³⁹Np/¹¹⁴⁰Np/¹¹⁴¹Np/¹¹⁴²Np/¹¹⁴³Np/¹¹⁴⁴Np/¹¹⁴⁵Np/¹¹⁴⁶Np/¹¹⁴⁷Np/¹¹⁴⁸Np/¹¹⁴⁹Np/¹¹⁵⁰Np/¹¹⁵¹Np/¹¹⁵²Np/¹¹⁵³Np/¹¹⁵⁴Np/¹¹⁵⁵Np/¹¹⁵⁶Np/¹¹⁵⁷Np/¹¹⁵⁸Np/¹¹⁵⁹Np/¹¹⁶⁰Np/¹¹⁶¹Np/¹¹⁶²Np/¹¹⁶³Np/¹¹⁶⁴Np/¹¹⁶⁵Np/¹¹⁶⁶Np/¹¹⁶⁷Np/¹¹⁶⁸Np/¹¹⁶⁹Np/¹¹⁷⁰Np/¹¹⁷¹Np/¹¹⁷²Np/¹¹⁷³Np/¹¹⁷⁴Np/¹¹⁷⁵Np/¹¹⁷⁶Np/¹¹⁷⁷Np/¹¹⁷⁸Np/¹¹⁷⁹Np/¹¹⁸⁰Np/¹¹⁸¹Np/¹¹⁸²Np/¹¹⁸³Np/¹¹⁸⁴Np/¹¹⁸⁵Np/¹¹⁸⁶Np/¹¹⁸⁷Np/¹¹⁸⁸Np/¹¹⁸⁹Np/¹¹⁹⁰Np/¹¹⁹¹Np/¹¹⁹²Np/¹¹⁹³Np/¹¹⁹⁴Np/¹¹⁹⁵Np/¹¹⁹⁶Np/¹¹⁹⁷Np/¹¹⁹⁸Np/¹¹⁹⁹Np/¹²⁰⁰Np/¹²⁰¹Np/¹²⁰²Np/¹²⁰³Np/¹²⁰⁴Np/¹²⁰⁵Np/¹²⁰⁶Np/¹²⁰⁷Np/¹²⁰⁸Np/¹²⁰⁹Np/¹²¹⁰Np/¹²¹¹Np/¹²¹²Np/¹²¹³Np/¹²¹⁴Np/¹²¹⁵Np/¹²¹⁶Np/¹²¹⁷Np/¹²¹⁸Np/¹²¹⁹Np/¹²²⁰Np/¹²²¹Np/¹²²²Np/¹²²³Np/¹²²⁴Np/¹²²⁵Np/¹²²⁶Np/¹²²⁷Np/¹²²⁸Np/¹²²⁹Np/¹²³⁰Np/¹²³¹Np/¹²³²Np/¹²³³Np/¹²³⁴Np/¹²³⁵Np/¹²³⁶Np/¹²³⁷Np/¹²³⁸Np/¹²³⁹Np/¹²⁴⁰Np/¹²⁴¹Np/¹²⁴²Np/¹²⁴³Np/¹²⁴⁴Np/¹²⁴⁵Np/¹²⁴⁶Np/¹²⁴⁷Np/¹²⁴⁸Np/¹²⁴⁹Np/¹²⁵⁰Np/¹²⁵¹Np/¹²⁵²Np/¹²⁵³Np/¹²⁵⁴Np/¹²⁵⁵Np/¹²⁵⁶Np/¹²⁵⁷Np/¹²⁵⁸Np/¹²⁵⁹Np/¹²⁶⁰Np/¹²⁶¹Np/¹²⁶²Np/¹²⁶³Np/¹²⁶⁴Np/¹²⁶⁵Np/¹²⁶⁶Np/¹²⁶⁷Np/¹²⁶⁸Np/¹²⁶⁹Np/¹²⁷⁰Np/



	内側炉心燃料集合体	288 体
	外側炉心燃料集合体	246 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒 (粗調整棒)	12 体
	制御棒 (微調整棒)	6 体
	制御棒 (後備炉停止系)	6 体
	鉛ビスマス遮へい体	186 体
合 計		745 体

・集合体配列ピッチ 177.5mm

・遮へい体外接円径 約523cm

図 3.2.1.1 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心の炉心配置図

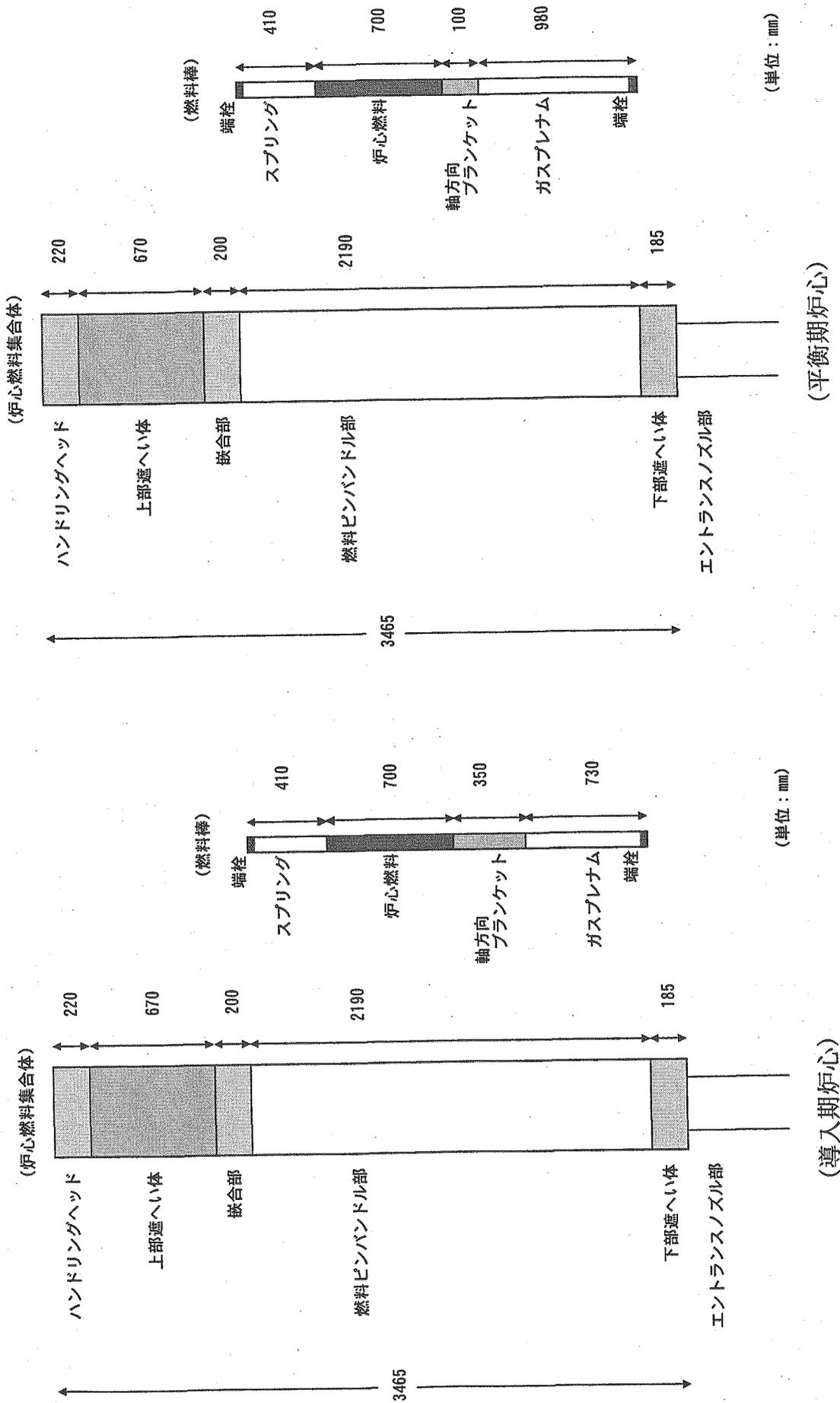


図 3.2.1.2 鉛ビスマス強制循環冷却炉代表炉心の炉心燃料構成概略図

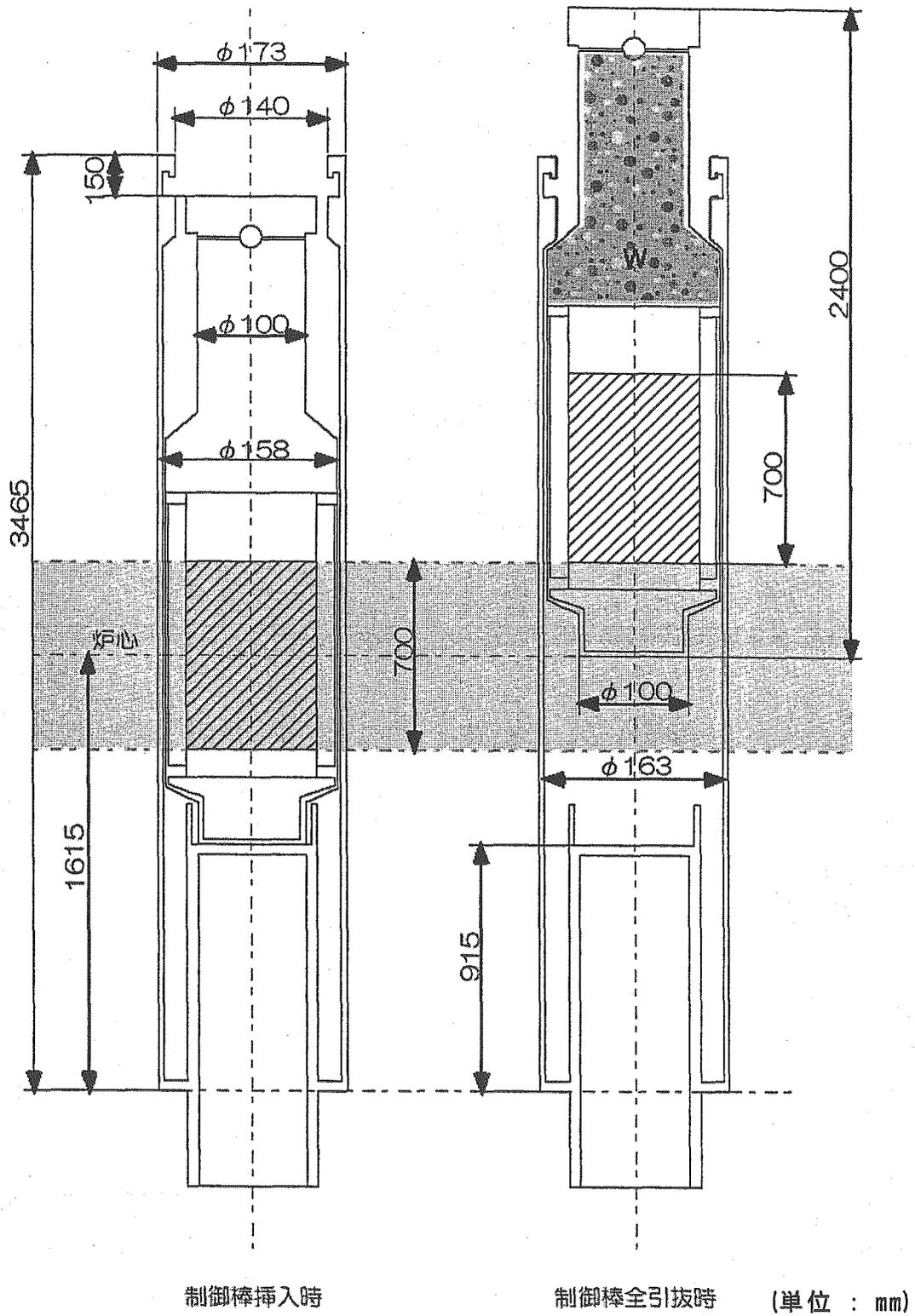


図 3.2.1.3 強制循環炉の制御棒の縦断面概略図

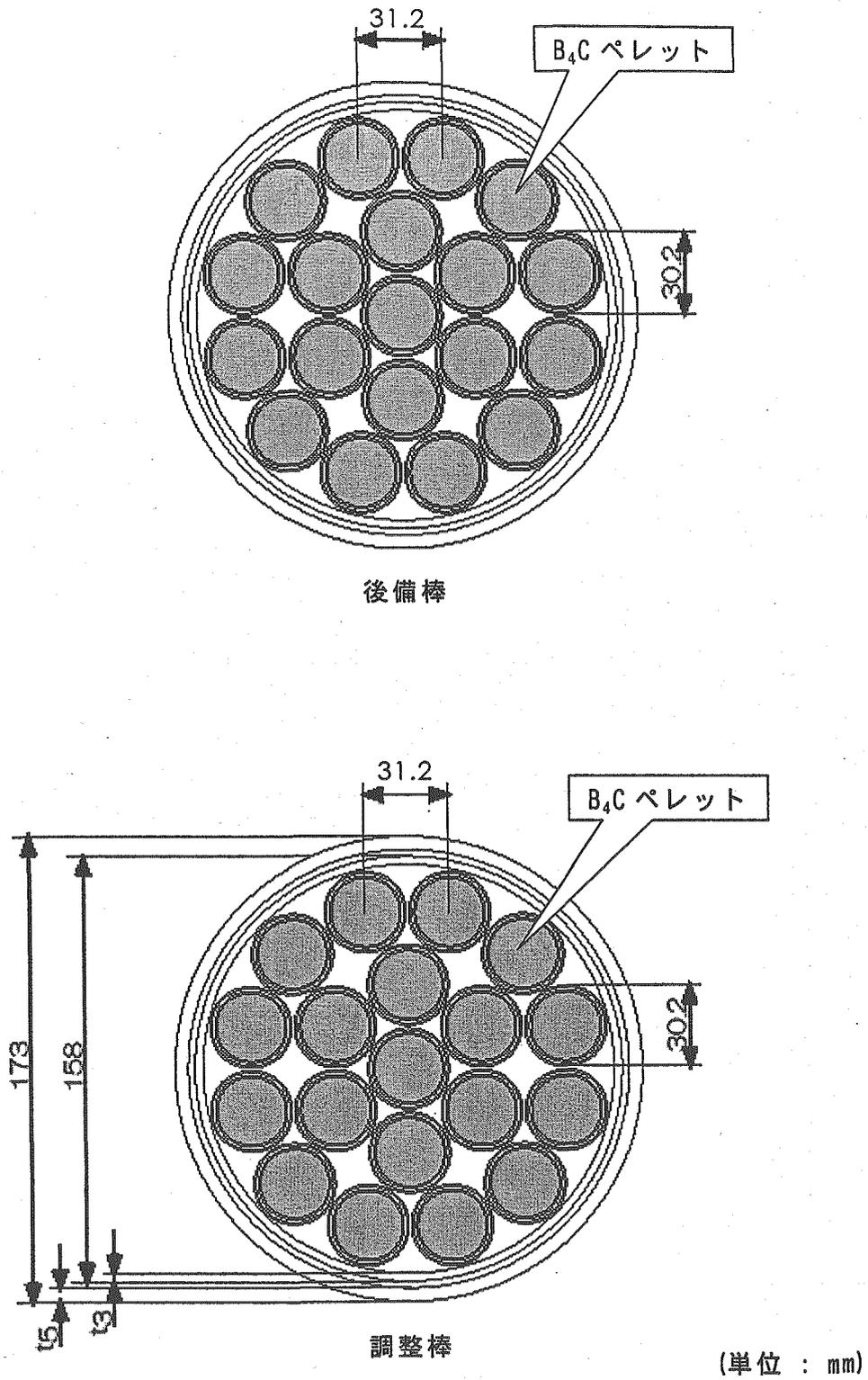


図 3.2.1.4 強制循環炉の制御棒の横断面概略図

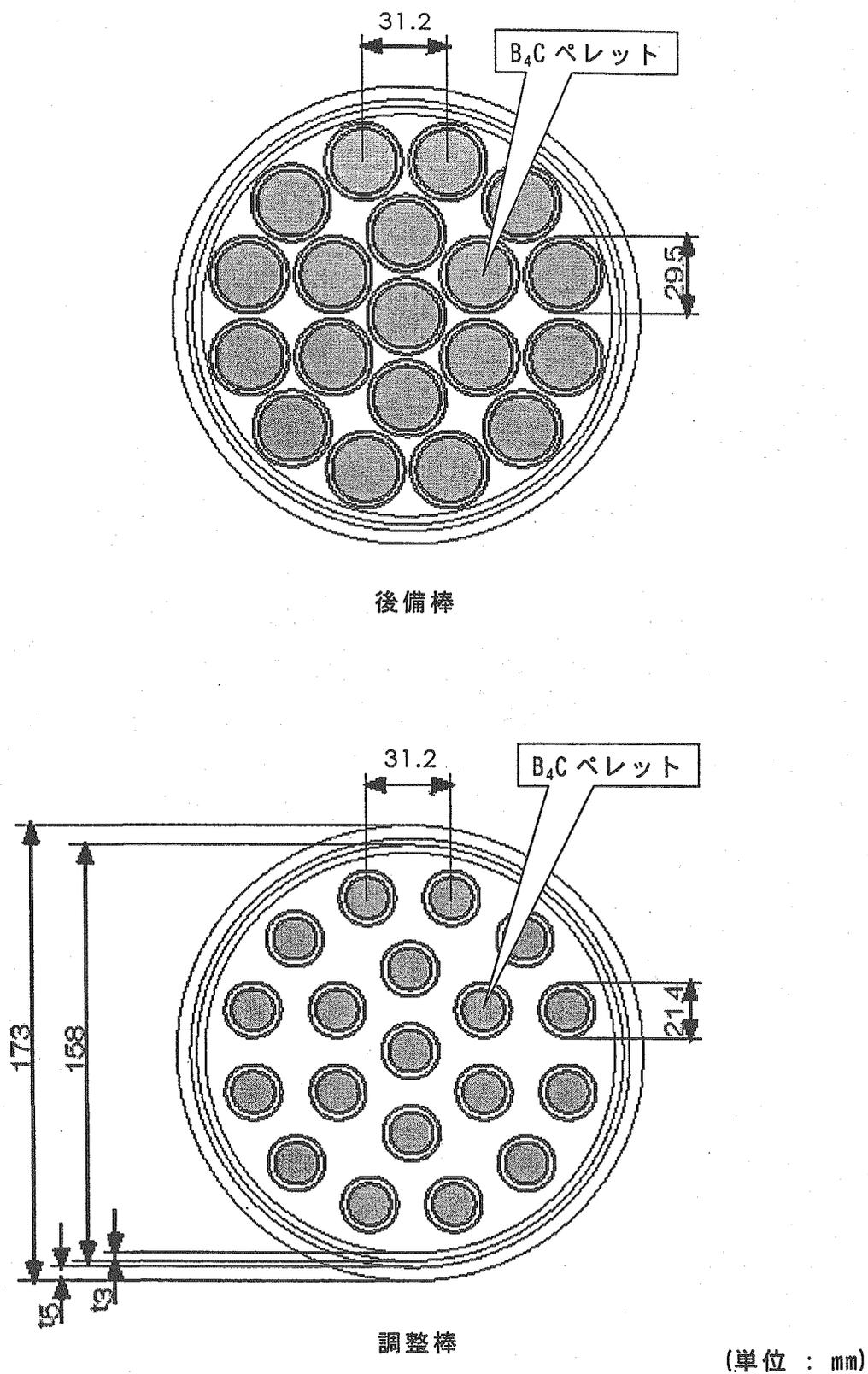


図 3.2.1.5 強制循環炉の B₄C ペレットを細径化した場合の制御棒の横断面概略図

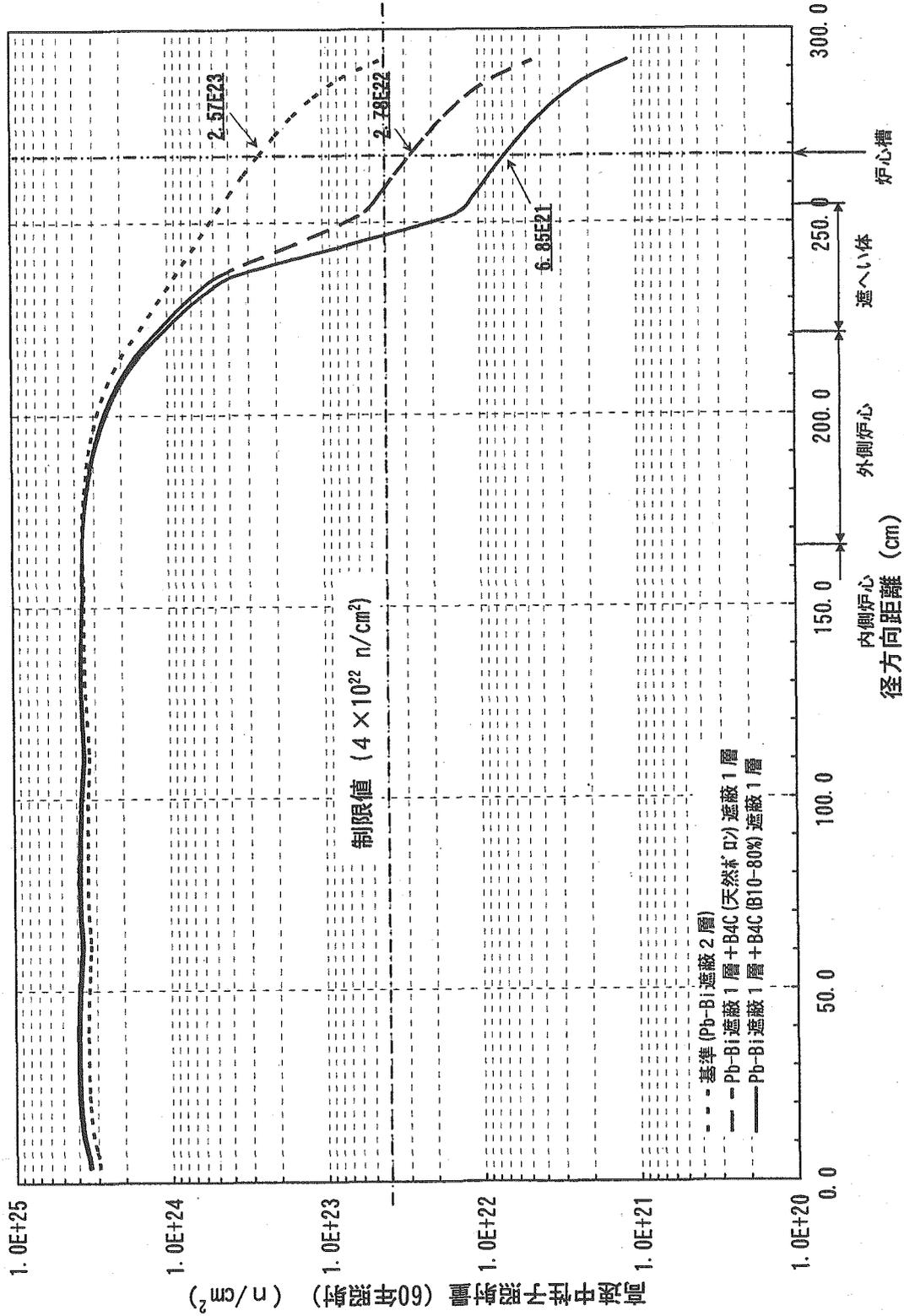
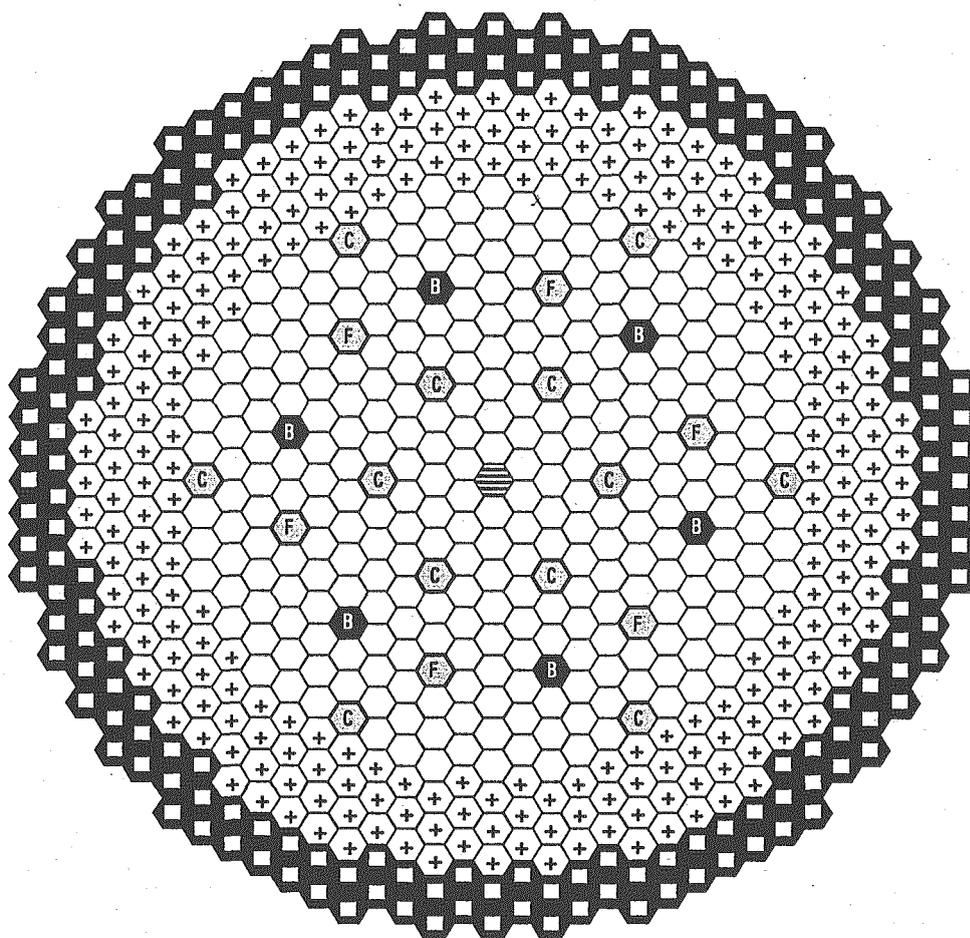


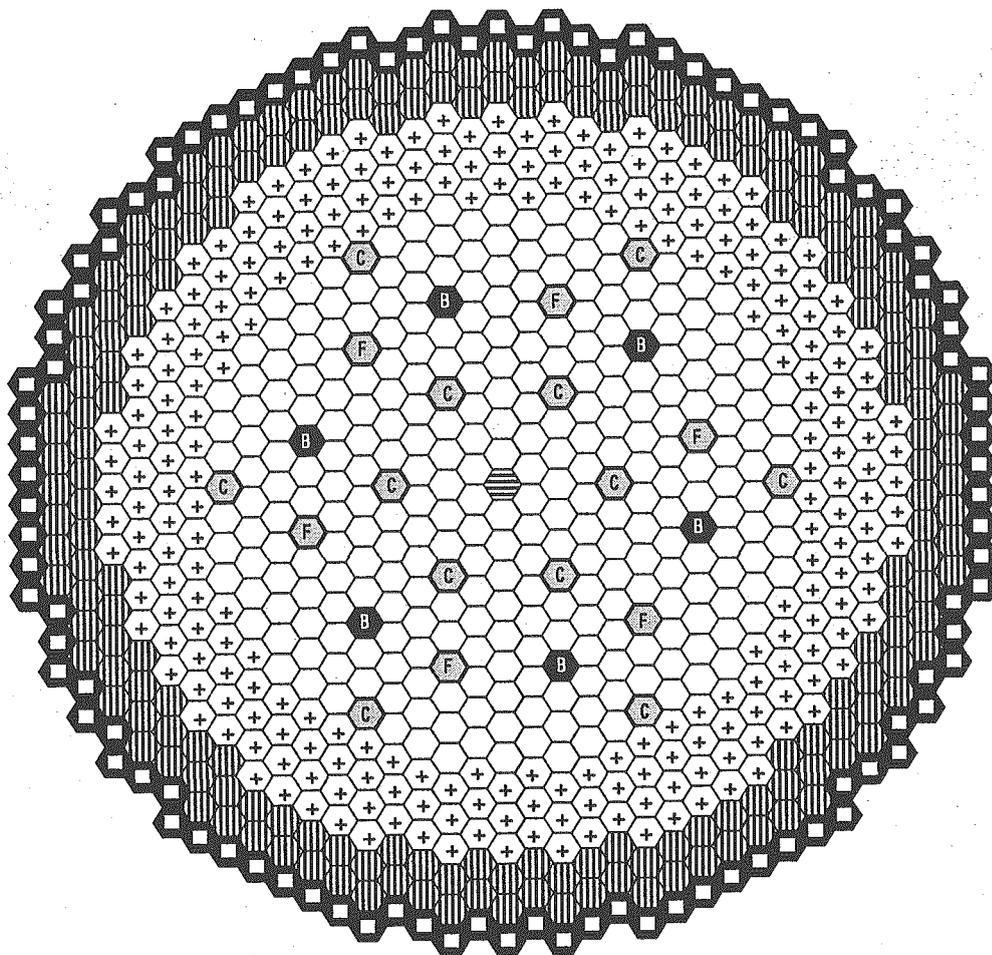
図 3.2.1.6 強制循環炉の高速中性子累積照射量の径方向分布



	内側炉心燃料集合体	288 体
	外側炉心燃料集合体	246 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒 (粗調整棒)	12 体
	制御棒 (微調整棒)	6 体
	制御棒 (後備炉停止系)	6 体
	鉛ビスマス遮へい体	186 体
合 計		745 体

	高燃焼度炉心		照射量目標対応炉心	
	導入期炉心	平衡期炉心	導入期炉心	平衡期炉心
集合体配列 ピッチ (mm)	177.5	←	←	←
炉心構成要素 外接円径 (cm)	約523	←	←	←

図 3.2.1.7 鉛ビスマス強制循環冷却炉窒化物燃料炉心の炉心配置図

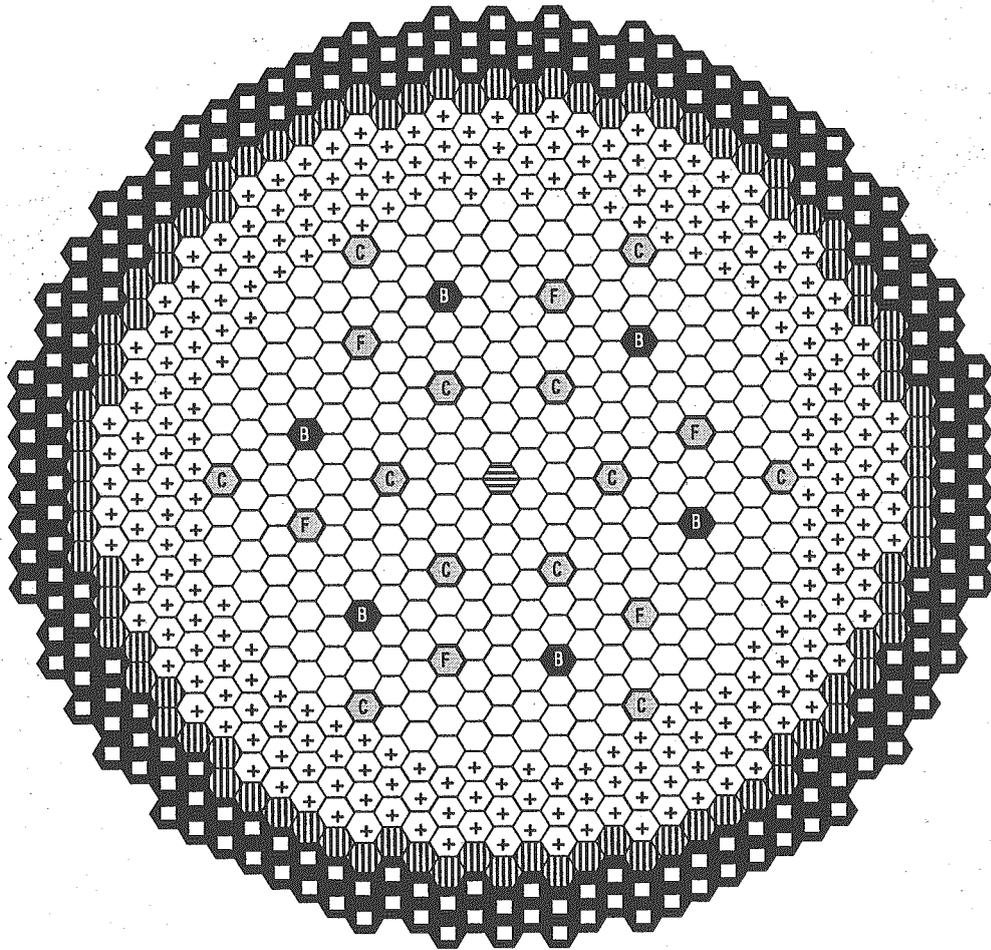


	内側炉心燃料集合体	288 体
	外側炉心燃料集合体	246 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒 (粗調整棒)	12 体
	制御棒 (微調整棒)	6 体
	制御棒 (後備炉停止系)	6 体
	径方向ブランケット	186 体
	鉛ビスマス遮へい体	102 体
合 計		847 体

・ 集合体配列ピッチ 177.5mm

・ 遮へい体外接円径 約557cm

図 3.2.1.8 鉛ビスマス強制循環冷却炉 MOX 燃料炉心 (導入期) の炉心配置図



	内側炉心燃料集合体	288 体
	外側炉心燃料集合体	246 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒 (粗調整棒)	12 体
	制御棒 (微調整棒)	6 体
	制御棒 (後備炉停止系)	6 体
	径方向ブランケット	90 体
	鉛ビスマス遮へい体	198 体
合 計		847 体

・ 集合体配列ピッチ 177.5mm

・ 遮へい体外接円径 約557cm

図 3.2.1.9 鉛ビスマス強制循環冷却炉 MOX 燃料炉心 (平衡期) の炉心配置図

3. 2. 2 自然循環炉

(1) 代表炉心概念の設計

(i) 炉心特性

鉛ビスマス自然循環冷却炉の代表炉心の炉心配置図を図 3.2.2.1 に、炉心燃料構成概略図を図 3.2.2.2 に示す。導入期炉心の主要目、主要な燃料仕様および主要な炉心特性を表 3.2.2.1、表 3.2.2.2 および表 3.2.2.3 に示し、平衡期炉心の主要目、主要な燃料仕様および主要な炉心特性を表 3.2.2.4、表 3.2.2.5 および表 3.2.2.6 に示す。また、物質収支を表 3.2.2.7 に示す。これらの炉心は炉心設計目標を満足している。例えば、導入期炉心では運転サイクル長さ 18 ヶ月、炉心部取出平均燃焼度 156GWd/t、増殖比 1.17、また、ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度 89GWd/t と、いずれも導入期炉心の設計目標を満足している。ただし、高速中性子照射量が $5.7 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ (導入期炉心, $E > 0.1 \text{MeV}$)、 $5.9 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ (平衡期炉心, $E > 0.1 \text{MeV}$) であり、ODS 鋼および PNC-FMS 鋼の開発目標の目安値 ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$) を超えており、今後の高性能材料の開発が必要となる。

(ii) 燃料健全性

(a) 被覆管最高温度評価

平衡初期と平衡末期のそれぞれの期間において、内側炉心と外側炉心のそれぞれの領域で出力が最も高くなる集合体を対象として被覆管最高温度の履歴を算出した。全炉心で最大出力を発生する集合体は、平衡初期においては外側炉心、平衡末期においては内側炉心の集合体である。集合体への流量は、炉心出入口温度差 180℃、集合体総数 396 体より、平均流量は 134kg/s とした。自然循環冷却方式では、浮力により発熱の大きい燃料集合体への流量再配分効果が生じる。その流量再配分効果を簡易式により評価し平均流量にその効果を考慮して対象集合体の流量とする。

なお、流量再配分効果算出において、以下の条件を利用した。

・ ループ一巡圧損	: 0.0222MPa
・ 炉心圧損	: 0.015MPa
・ 集合体平均出力	: 3.66MW
・ 蒸気発生器 (SG) と炉心の伝熱中心間距離	: 1031 cm
・ 炉心高さ	: 70cm
・ 炉心中心-集合体出口間高さ	: 220 cm
・ 集合体出口からの非混合高さ	: 100 cm

上記の条件で算出した簡易計算法による流量再配分係数を図 3.2.2.3 に示す。評価対象となる集合体の出力および線出力履歴を基に、被覆管最高温度を算出するが、膜温度上昇におけるヌッセルト数は、前述の Sleicher 式を用いた。

評価の結果、被覆管最高温度 (肉厚中心) は、650℃ 以下となっていることが確認できた。

(b) 被覆管クリープ損傷寿命分数和 (CDF) 評価

求めた被覆管最高温度履歴 (各サイクル内での初期・末期の最高温度をサイクル中の温度として使用) および出力履歴より評価対象集合体のピン内圧および被覆管応力を求め、CDF を評価した。

評価上用いるクリープ破断強度 (ODS 鋼), 被覆管内外腐食評価式は前述の強制循環冷却炉と同じである。

なお, 評価において, 以下を考慮している。

- ・出力誤差 : 1.033
- ・プレナム温度 : 被覆管 (HSF 込み) と同等
- ・プレナム容積 : 自由空間容積として 90%
- ・被覆管肉厚寸法公差 : 0.03 mm
- ・応力 : 設計応力強さ (St) ベース

上記の条件による CDF 評価の結果, 内側炉心, 外側炉心いずれも CDF 制限値 0.5 以下となっていることが確認できた。

(iii) 制御棒反応度収支

鉛ビスマス自然循環冷却炉の反応度制御系としては, 強制循環冷却炉と同様に主炉停止系と後備炉停止系の独立 2 系統で構成された制御棒とする。主炉停止系は, 粗調整棒と微調整棒で構成する。制御棒の B₄C 組成は, 主炉停止系, 後備炉停止系ともに ¹⁰B 濃縮度 50% である。図 3.2.2.4 と図 3.2.2.5 に自然循環冷却炉の制御棒の縦断面概略図と横断面概略図を示す。本炉心は表 3.2.2.8 に示すように制御棒反応度収支を満足している。

なお, 図 3.2.2.5 の制御棒構成で自然循環冷却炉のスクラム時間が 1 秒程度になる。強制循環冷却炉に比べてスクラム時間が短いのはタングステンを充填するスペースが広いためである。制御棒の挿入性, 制御棒内の冷却材流体抵抗の低減によるスクラム時間短縮を狙って, ¹⁰B 装荷量を変えずに ¹⁰B 濃縮度を 90% まで引き上げ, B₄C ペレットの径を小さくして保護管内の冷却材流路面積を広く取りうる制御棒仕様を検討した。図 3.2.2.6 に強制循環冷却炉と同様に制御棒の挿入性とスクラム時間短縮を狙って B₄C ペレットを細径化した場合 (¹⁰B 装荷量を変えずに ¹⁰B 濃縮度を 90% まで引き上げ) の制御棒の横断面概略図を示す。この構造により, 制御棒反応度収支を満足しつつ, スクラム時間が 1 秒以下と評価され, 制御棒としての成立の見通しを得ている。

(iv) 遮へい特性

遮へい性能が最も厳しいと考えられる炉心槽について拡散計算により概略評価した。図 3.2.2.7 に高速中性子 (E>0.1MeV) の累積照射量の径方向分布を示す。炉心槽はフェライト材料を想定しており, その照射量制限値 $4 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ を上回っている。一般に拡散計算は保守側の値を与えるため, 現段階では現設計の鉛ビス

マス遮へい体 2 層では遮へい性能が不十分であると判断できないが、参考のため外側の鉛ビスマス遮へい体 1 層を B_4C 遮へい体に変更すると照射量制限値 $4 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ を下回ることが分かった。

(2) 照射量目標対応炉心（窒化物燃料）の検討

本検討により得られた自然循環冷却炉の高燃焼度炉心の主要目（炉心・燃料仕様と核特性）を高燃焼度炉心の主要目と共に表 3.2.2.9 に、炉心配置図（高燃焼度炉心と同一）を図 3.2.2.8 に示す。中性子照射量を現行の目安値に制約しても、炉心部取出平均燃焼度は 150GWd/t に近い値を達成できる。

(3) まとめ

DDI 回避の観点から平成 13 年度の燃料仕様を見直した。

炉心設計にあたっては、炉心型式は均質 2 領域炉心とし、増殖性能については、高増殖が要求される FBR 導入期と、維持増殖を可能とする FBR 平衡期向けの炉心を検討した。

代表炉心の炉心の取出平均燃焼度は目標（150GWd/t）を達成したが、そのためには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（ $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$ ）を上回る。

そこで、この目安値を満足する照射量目標対応炉心（窒化物燃料）についても検討した。

表 3.2.2.1 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心(導入期炉心)の主要目

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	原子炉熱出力	1450 MWt
	電気出力	550 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)
	燃料交換バッチ数	8バッチ
	炉心高さ	70 cm
	軸方向ブラケット厚さ(上部/下部)	30/30 cm
	炉心等価直径	463.9 cm
	遮へい体外接円径	約562cm
	炉心燃料集合体数(内側/外側/合計)	252 / 144 / 396 体
	径方向ブラケット体数	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)	162 体(2層)
	炉心燃料仕様	燃料形態 ^{*1}
炉心材料(被覆管/ラッパ管)		ODS鋼/PNC-FMS鋼
燃料ピン外径		8.5 mm
被覆管肉厚		0.46 mm
燃料スミア密度(炉心/軸方向ブラケット)		80 / 90 %TD
スペーサ形式		グリッド支持
燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径(P/D)		1.47
集合体当たり燃料ピン本数		271 本
ラッパ管外対面間距離		211.3 mm
ラッパ管肉厚		3.0 mm
集合体配列ピッチ	215.3 mm	
炉心主要特性	Pu 富化度 ^{*2} (内側/外側)	18.1 / 23.8 wt. %
	炉心部取出平均燃焼度	156 GWd/t
	全炉心平均燃焼度 ^{*3}	89 GWd/t
	燃焼反応度	1.18 %Δk/k'
	最大線出力(内側/外側)	222.4 / 229.2 W/cm
	炉心平均出力密度	108.8 W/cm ³
	最大高速中性子束 ^{*4}	1.50×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量 ^{*4}	5.7×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.17
	ドップラ係数[Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-2.33×10 ⁻³
ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	8.69\$	

*1: 高速多重リサイクル 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: Pu/HM、*3: ブラケット燃料を含む全体の平均燃焼度、*4: E > 0.1 MeV

*5: 集合体内非均質効果考慮、*6: 実効遅発中性子割合 β = 0.00304

表 3.2.2.2 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心(導入期炉心)の主要な燃料仕様

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランケット	径方向ブランケット
燃料要素	燃料形態	Pu-U 混合窒化物	U 窒化物	なし
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	8.5		—
	被覆管内径 (mm)	7.58		—
	被覆管肉厚 (mm)	0.46		—
	燃料要素全長 (mm)	2540*		—
	燃料スタック長 (mm)	700	300 / 300 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	430*/740*		—
	ボンド材	He		—
	燃料スミア密度 (%TD)	80	90	—
集合体	集合体全長 (mm)	3815*		—
	燃料ピン本数 (本) (合計)	271		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	12.5		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.47		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	211.3		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	205.3		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	3.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.0		—
	集合体配列ピッチ (mm)	215.3		—
	スパーサ形式	グリッド支持		—
	体積比 (%)	燃料 (実効)	30.46 (24.37)	← (27.41)
構造材		13.24	←	—
冷却材		56.30	←	—

※フェーズII中間報告^[6]の値を見直した

表 3.2.2.3 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心(導入期炉心)の主要な炉心特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	18 ヶ月 (547.5 日)
燃料交換バッチ数	8 バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	18.1 / 23.8 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランク)	156 / 21 GWd/t
全炉心平均燃焼度*2	89 GWd/t
燃焼反応度	1.18 %Δk/kk'
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランク)	1.17 0.74 / 0.43
最大線出力 (内側/外側)	222.4 / 229.2 W/cm
炉心平均出力密度	108.8 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランク)	0.89 / 0.11
最大高速中性子束*3	1.50×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量*3	5.7×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランク)	35753 / 35177 kg
ブランク/炉心重金属重量比	0.98
装荷時核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	8.0 t/GWe
原子炉倍增時間	49 年
複合システム倍增時間*4	51 年
ボイド反応度*5 (平衡末期)	8.69\$
ドブブラ係数 [Td _k /dT]*5 (平衡末期)	-2.33×10^{-3}

*1: Pu/HM

*2: ブランク燃料を含む全体の平均燃焼度

*3: E > 0.1 MeV

*4: 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

*5: 集合体内非均質効果考慮

*6: 実効遅発中性子割合 β=0.00304

表 3.2.2.4 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心(平衡期炉心)の主要目

項目		仕様
基本仕様・炉心構成	原子炉熱出力	1450 MWt
	電気出力	550 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)
	燃料交換バッチ数	8 バッチ
	炉心高さ	70 cm
	軸方向ブランク厚さ (上部/下部)	14/14 cm
	炉心等価直径	463.9 cm
	遮へい体外接円径	約 562cm
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	252 / 144 / 396 体
	径方向ブランク体数	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)	162 体 (2 層)
炉心燃料仕様	燃料形態 ^{*1}	窒化物
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	8.5 mm
	被覆管肉厚	0.46 mm
	燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランク)	80 / 90 %TD
	スペーサ形式	グリッド支持
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D)	1.47
	集合体当たり燃料ピン本数	271 本
	ラッパ管外対面間距離	211.3 mm
	ラッパ管肉厚	3.0 mm
	集合体配列ピッチ	215.3 mm
炉心主要特性	Pu 富化度 ^{*2} (内側/外側)	17.6 / 23.5 wt. %
	炉心部取出平均燃焼度	160 GWd/t
	全炉心平均燃焼度 ^{*3}	122 GWd/t
	燃焼反応度	1.14 %Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側)	228.5 / 232.9 W/cm
	炉心平均出力密度	111.2 W/cm ³
	最大高速中性子束 ^{*4}	1.55×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量 ^{*4}	5.9×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.04
	ドブプラ係数 [Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-2.45×10 ⁻³
	ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	9.41\$

*1 : 高速多重リサイクル 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 : Pu/HM、*3 : ブランク燃料を含む全体の平均燃焼度、*4 : E > 0.1 MeV

*5 : 集合体内非均質効果考慮、*6 : 実効遅発中性子割合 β=0.00305

表 3.2.2.5 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心(平衡期炉心)の主要な燃料仕様

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブラケット	径方向ブラケット
燃料要素	燃料形態	Pu-U 混合窒化物	U 窒化物	なし
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	8.5		—
	被覆管内径 (mm)	7.58		—
	被覆管肉厚 (mm)	0.46		—
	燃料要素全長 (mm)	2540*		—
	燃料スタック長 (mm)	700	140 / 140 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	590*/900*		—
	ボンド材	He		—
	燃料スミア密度 (%TD)	80	90	—
集合体	集合体全長 (mm)	3815*		—
	燃料ピン本数 (本) (合計)	271		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	12.5		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.47		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	211.3		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	205.3		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	3.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.0		—
	集合体配列ピッチ (mm)	215.3		—
	スペーサ形式	グリッド支持		—
	体積比 (%)	燃料 (実効)	30.46 (24.37)	← (27.41)
構造材		13.24	←	—
冷却材		56.30	←	—

※フェーズII 中間報告^[6]の値を見直した

表 3.2.2.6 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心(平衡期炉心)の主要な炉心特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	18 ヶ月 (547.5 日)
燃料交換バッチ数	8 バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	17.6 / 23.5 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランク)	160 / 37 GWd/t
全炉心平均燃焼度*2	122 GWd/t
燃焼反応度	1.14 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランク)	1.04 0.77 / 0.28
最大線出力 (内側/外側)	228.5 / 232.9 W/cm
炉心平均出力密度	111.2 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランク)	0.91 / 0.09
最大高速中性子束*3	1.55×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量*3	5.9×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランク)	35753 / 16416 kg
ブランク/炉心重金属重量比	0.46
装荷時核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	7.8 t/GWe
原子炉倍增時間	—
複合システム倍增時間*4	—
ポイド反応度*5 (平衡末期)	9.41\$
ドップラ係数 [Tdk/dT]*5 (平衡末期)	-2.45×10^{-3}

*1 : Pu/HM

*2 : ブランク燃料を含む全体の平均燃焼度

*3 : $E > 0.1$ MeV

*4 : 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

*5 : 集合体内非均質効果考慮

*6 : 実効遅発中性子割合 $\beta = 0.00305$

表 3.2.2.7 自然循環炉の代表炉心の物質収支(1/2)

装荷燃料、1バッチ当たりの燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	6.92	3.66	10.58	13.19	0.00	13.19	23.77
U236	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U238	2298.86	1216.53	3515.39	4383.92	0.00	4383.92	7899.31
U合計	2305.78	1220.19	3525.97	4397.11	0.00	4397.11	7923.08
Pu238	5.92	4.46	10.38	0.00	0.00	0.00	10.38
Pu239	291.17	219.09	510.26	0.00	0.00	0.00	510.26
Pu240	172.76	130.00	302.76	0.00	0.00	0.00	302.76
Pu241	23.13	17.41	40.54	0.00	0.00	0.00	40.54
Pu242	20.99	15.79	36.78	0.00	0.00	0.00	36.78
Pu合計	513.97	386.75	900.72	0.00	0.00	0.00	900.72
Np237	2.69	2.02	4.71	0.00	0.00	0.00	4.71
Np239	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Np合計	2.69	2.02	4.71	0.00	0.00	0.00	4.71
Am241	10.78	8.11	18.89	0.00	0.00	0.00	18.89
Am242m	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Am243	5.38	4.05	9.43	0.00	0.00	0.00	9.43
Am合計	16.16	12.16	28.32	0.00	0.00	0.00	28.32
Cm242	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm243	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm244	5.38	4.05	9.43	0.00	0.00	0.00	9.43
Cm245	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cm合計	5.38	4.05	9.43	0.00	0.00	0.00	9.43
合計	2843.98	1625.17	4469.15	4397.11	0.00	4397.11	8866.26
ランプ化FP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
随伴FP	46.35	26.49	72.84	0.00	0.00	0.00	72.84
FP合計	46.35	26.49	72.84	0.00	0.00	0.00	72.84

取出燃料、1バッチ当たりの燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	1.52	1.19	2.71	6.58	0.00	6.58	9.29
U236	0.94	0.44	1.38	1.39	0.00	1.39	2.77
U238	1888.26	1047.17	2935.43	4024.26	0.00	4024.26	6959.69
U合計	1890.72	1048.80	2939.52	4032.23	0.00	4032.23	6971.75
Pu238	7.82	5.77	13.59	0.15	0.00	0.15	13.74
Pu239	248.30	156.07	404.37	246.64	0.00	246.64	651.01
Pu240	152.78	112.03	264.81	20.76	0.00	20.76	285.57
Pu241	20.78	14.28	35.06	1.00	0.00	1.00	36.06
Pu242	18.18	13.79	31.97	0.04	0.00	0.04	32.01
Pu合計	447.86	301.94	749.80	268.59	0.00	268.59	1018.39
Np237	1.96	1.42	3.38	0.66	0.00	0.66	4.04
Np239	0.24	0.11	0.35	0.26	0.00	0.26	0.61
Np合計	2.20	1.53	3.73	0.92	0.00	0.92	4.65
Am241	10.58	9.21	19.79	0.14	0.00	0.14	19.93
Am242m	0.84	0.62	1.46	0.01	0.00	0.01	1.47
Am243	5.41	4.03	9.44	0.00	0.00	0.00	9.44
Am合計	16.83	13.86	30.69	0.15	0.00	0.15	30.84
Cm242	0.43	0.29	0.72	0.01	0.00	0.01	0.73
Cm243	0.05	0.03	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08
Cm244	6.26	4.46	10.72	0.00	0.00	0.00	10.72
Cm245	1.07	0.66	1.73	0.00	0.00	0.00	1.73
Cm合計	7.81	5.44	13.25	0.01	0.00	0.01	13.26
合計	2365.42	1371.57	3736.99	4301.90	0.00	4301.90	8038.89
ランプ化FP	479.50	255.06	734.56	92.53	0.00	92.53	827.09
随伴FP	46.35	26.49	72.84	0.00	0.00	0.00	72.84
FP合計	525.85	281.55	807.40	92.53	0.00	92.53	899.93

表 3.2.2.7 自然循環炉の代表炉心の物質収支(2/2)

平衡初期(BOEC)の燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	31.37	18.54	49.91	80.05	0.00	80.05	129.96
U236	4.53	2.03	6.56	5.59	0.00	5.59	12.15
U238	16915.99	9105.15	26021.14	33832.36	0.00	33832.36	59853.50
U合計	16951.89	9125.72	26077.61	33918.00	0.00	33918.00	59995.61
Pu238	54.75	40.22	94.97	0.31	0.00	0.31	95.28
Pu239	2182.86	1490.61	3673.47	966.56	0.00	966.56	4640.03
Pu240	1313.01	977.36	2290.37	48.49	0.00	48.49	2338.86
Pu241	177.27	127.19	304.46	1.71	0.00	1.71	306.17
Pu242	157.69	119.07	276.76	0.05	0.00	0.05	276.81
Pu合計	3885.58	2754.45	6640.03	1017.12	0.00	1017.12	7657.15
Np237	18.55	13.75	32.30	2.19	0.00	2.19	34.49
Np239	1.98	0.77	2.75	1.86	0.00	1.86	4.61
Np合計	20.53	14.52	35.05	4.05	0.00	4.05	39.10
Am241	86.43	69.93	156.36	0.17	0.00	0.17	156.53
Am242m	4.16	2.80	6.96	0.00	0.00	0.00	6.96
Am243	43.52	32.46	75.98	0.00	0.00	0.00	75.98
Am合計	134.11	105.19	239.30	0.17	0.00	0.17	239.47
Cm242	3.16	1.87	5.03	0.00	0.00	0.00	5.03
Cm243	0.24	0.12	0.36	0.00	0.00	0.00	0.36
Cm244	46.44	33.99	80.43	0.00	0.00	0.00	80.43
Cm245	4.75	2.94	7.69	0.00	0.00	0.00	7.69
Cm合計	54.59	38.92	93.51	0.00	0.00	0.00	93.51
合計	21046.70	12038.80	33085.50	34939.34	0.00	34939.34	68024.84
ラン化FP	1709.27	969.48	2678.75	227.75	0.00	227.75	2906.50
随伴FP	370.84	211.91	582.75	0.00	0.00	0.00	582.75
FP合計	2080.11	1181.39	3261.50	227.75	0.00	227.75	3489.25

平衡末期(EOEC)の燃料重量 [kg]

ELEMENT	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブランケット	径ブランケット	ブランケット合計	合計
U235	25.97	16.07	42.04	73.44	0.00	73.44	115.48
U236	5.47	2.47	7.94	6.98	0.00	6.98	14.92
U238	16505.39	8935.79	25441.18	33472.70	0.00	33472.70	58913.88
U合計	16536.83	8954.33	25491.16	33553.12	0.00	33553.12	59044.28
Pu238	56.65	41.53	98.18	0.46	0.00	0.46	98.64
Pu239	2139.99	1427.59	3567.58	1213.20	0.00	1213.20	4780.78
Pu240	1293.03	959.39	2252.42	69.25	0.00	69.25	2321.67
Pu241	174.92	124.06	298.98	2.71	0.00	2.71	301.69
Pu242	154.88	117.07	271.95	0.09	0.00	0.09	272.04
Pu合計	3819.47	2669.64	6489.11	1285.71	0.00	1285.71	7774.82
Np237	17.82	13.15	30.97	2.85	0.00	2.85	33.82
Np239	2.22	0.88	3.10	2.12	0.00	2.12	5.22
Np合計	20.04	14.03	34.07	4.97	0.00	4.97	39.04
Am241	86.23	71.03	157.26	0.31	0.00	0.31	157.57
Am242m	5.00	3.42	8.42	0.01	0.00	0.01	8.43
Am243	43.55	32.44	75.99	0.00	0.00	0.00	75.99
Am合計	134.78	106.89	241.67	0.32	0.00	0.32	241.99
Cm242	3.59	2.16	5.75	0.01	0.00	0.01	5.76
Cm243	0.29	0.15	0.44	0.00	0.00	0.00	0.44
Cm244	47.32	34.40	81.72	0.00	0.00	0.00	81.72
Cm245	5.82	3.60	9.42	0.00	0.00	0.00	9.42
Cm合計	57.02	40.31	97.33	0.01	0.00	0.01	97.34
合計	20568.14	11785.20	32353.34	34844.13	0.00	34844.13	67197.47
ラン化FP	2188.77	1224.54	3413.31	320.28	0.00	320.28	3733.59
随伴FP	370.84	211.91	582.75	0.00	0.00	0.00	582.75
FP合計	2559.61	1436.45	3996.06	320.28	0.00	320.28	4316.34

表 3.2.2.8 鉛ヒュスマス自然循環冷却炉代表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)	制御系		備考
			粗調整棒	微調整棒	
1. 計画余剰反応度	0.4	0.4			
(1) 出力補償	1.2	-	1.2	0.4	
(2) 燃焼補償	0.2	-		0.2	
(3) 運転余裕	1.8	0.4	1.2	0.6	
計					
2. 余剰反応度の不確かさ (2σ)	0	-			
(1) 臨界予測誤差	0.08	0.08		0.08	不確かさ：20%
(2) 出力補償予測誤差	0.2	-	0.2		Na冷却炉設計例
(3) 燃焼補償予測誤差	0.4	-	0.4		Na冷却炉設計例
(4) 燃料製作予測誤差	0.2	-	0.2		
(5) 燃料交換余裕	0.5	0.1	0.5	0.1	
計 (2σ)					
3. 必要制御棒反応度合計 (1.+2.)	2.3	0.5 (0.7) *	1.7	0.7	
4. 制御棒価値最小値	3.06	1.00	2.56	1.42	
5. 反応度停止余裕 (4.-3.)	0.76	0.5 (0.3) *			
反応度制御系の成立性	成立	成立	成立	成立	

* 事故時投入反応度として0.2%Δk/kk'を考慮した場合。

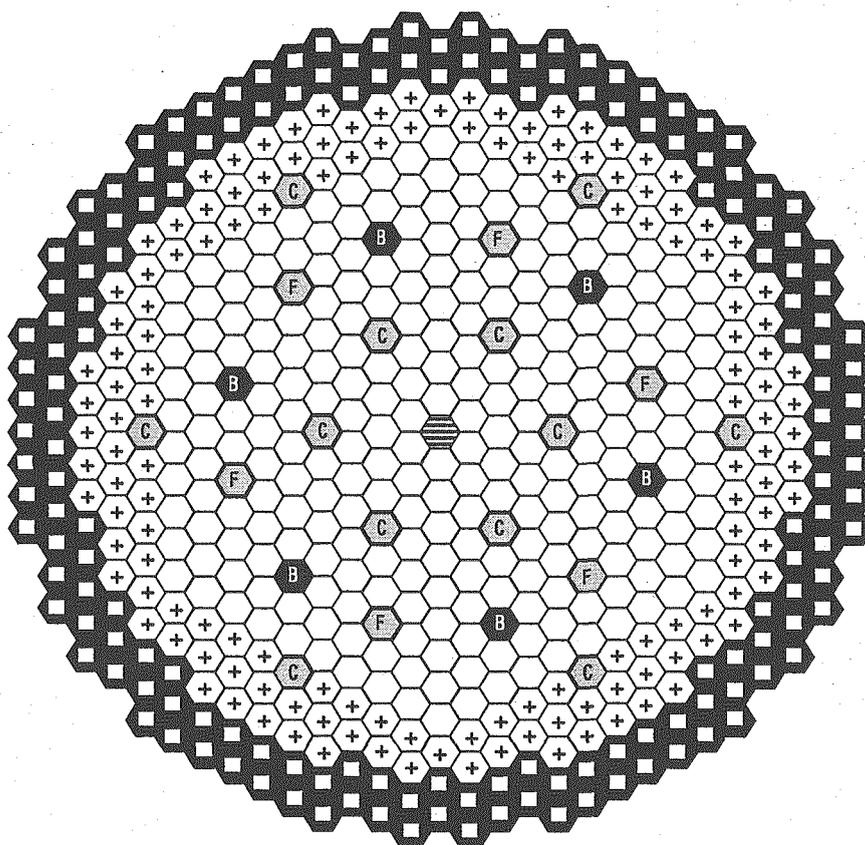
表 3.2.2.9 鉛ピスマス自然循環冷却炉窒化物燃料炉心の主要目の比較

項目	高燃焼炉心		照射量目標対応炉心	
	導入期炉心	平衡期炉心	導入期炉心	平衡期炉心
原子炉出力	1450Mwt (550 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)	←	19.1ヶ月 (580日)	18.5ヶ月 (562.7日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ラケット)	8/-バッチ	←	7/-バッチ	←
炉心高さ	70 cm	←	←	←
軸方向ラケット厚さ (上部/下部)	30/30 cm	14/14 cm	30/30 cm	12/12 cm
炉心等価直径	464 cm	←	←	←
遮へい体外径	約562 cm	←	←	←
燃料形態	窒化物	←	←	←
炉心材料 (被覆管/ラック管)	OP5 鋼/PNC-FMS 鋼	←	←	←
燃料ピン外径	8.5 mm	←	←	←
被覆管肉厚	0.46 mm	←	←	←
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ラケット/径方向ラケット)	80 / 90 / ~ %TD	←	←	←
スペーサ形式	グリッド支持	←	←	←
集合体当たり燃料ピン本数	271 本	←	←	←
Pu 富化度 (内側/外側) #1	18.1 / 23.8 wt. %	17.6 / 23.5 wt. %	17.9 / 23.5 wt. %	17.3 / 23.1 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心) #2	156 / 89 GWd/t	160 / 122 GWd/t	146 / 83 GWd/t	146 / 114 GWd/t
燃焼反応度	1.18 %Δk/kk'	1.14 %Δk/kk'	1.21 %Δk/kk'	1.13 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ラケット/径方向ラケット/全体)	0.74 / 0.43 / - / 1.17	0.77 / 0.28 / - / 1.04	0.75 / 0.43 / - / 1.18	0.79 / 0.25 / - / 1.04
最大線出力 (内側/外側)	222 / 229 W/cm	229 / 233 W/cm	226 / 233 W/cm	234 / 238 W/cm
炉心平均出力密度	109 W/cm ³	111 W/cm ³	110 W/cm ³	113 W/cm ³
最大高速中性子照射量 #3	5.7×10 ²³ n/cm ²	5.9×10 ²³ n/cm ²	5.3×10 ²³ n/cm ²	5.4×10 ²³ n/cm ²
ドップラ係数 [Tok/dT] (平衡末期) #4	-2.3×10 ⁻³	-2.4×10 ⁻³	-2.4×10 ⁻³	-2.6×10 ⁻³
ポイド反応度 (平衡末期) #4	8.7 \$ ^{#5}	9.4 \$ ^{#5}	8.6 \$ ^{#5}	9.3 \$ ^{#5}
複合システム倍増時間	51 年 ^{#6}	-	48 年 ^{#6}	-

#1: Pu/HM, #2: ラ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: 実効燃焼中性子割合 0.00304 (高燃焼度・導入期炉心), 0.00305 (高燃焼度・平衡期炉心), 0.00306 (照射量目標対応・導入期炉心), 0.00308 (照射量目標対応・平衡期炉心),

#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

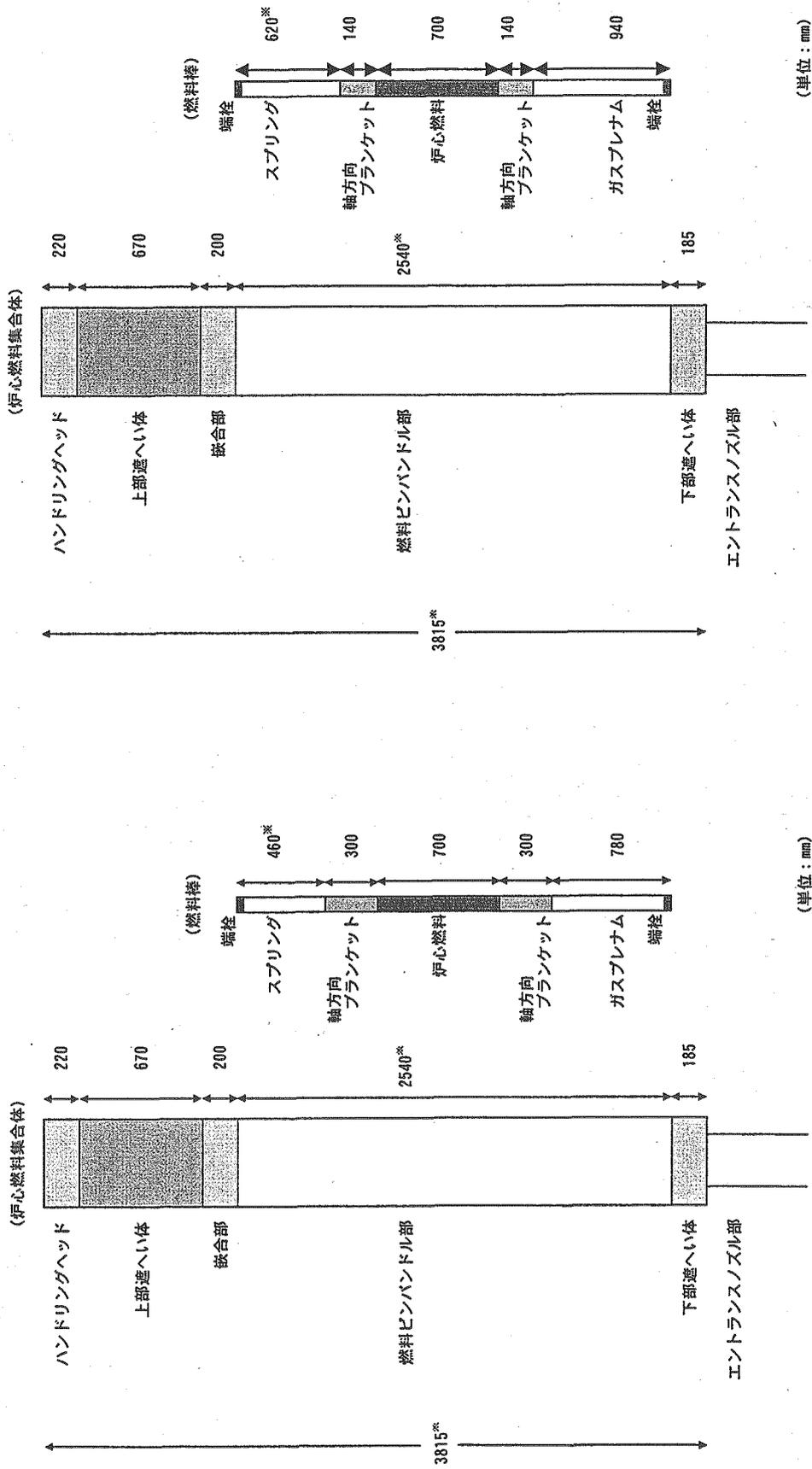


	内側炉心燃料集合体	252 体
	外側炉心燃料集合体	144 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒 (粗調整棒)	12 体
	制御棒 (微調整棒)	6 体
	制御棒 (後備炉停止系)	6 体
	鉛ビスマス遮へい体	162 体
合 計		583 体

・ 集合体配列ピッチ 215.3mm

・ 遮へい体外接円径 約562cm

図 3.2.2.1 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心の炉心配置図



(平衡期炉心)

(導入期炉心)

※フェーズII中間報告同の値を見直した

図 3.2.2.2 鉛ビスマス自然循環冷却炉代表炉心の炉心燃料構成概略図

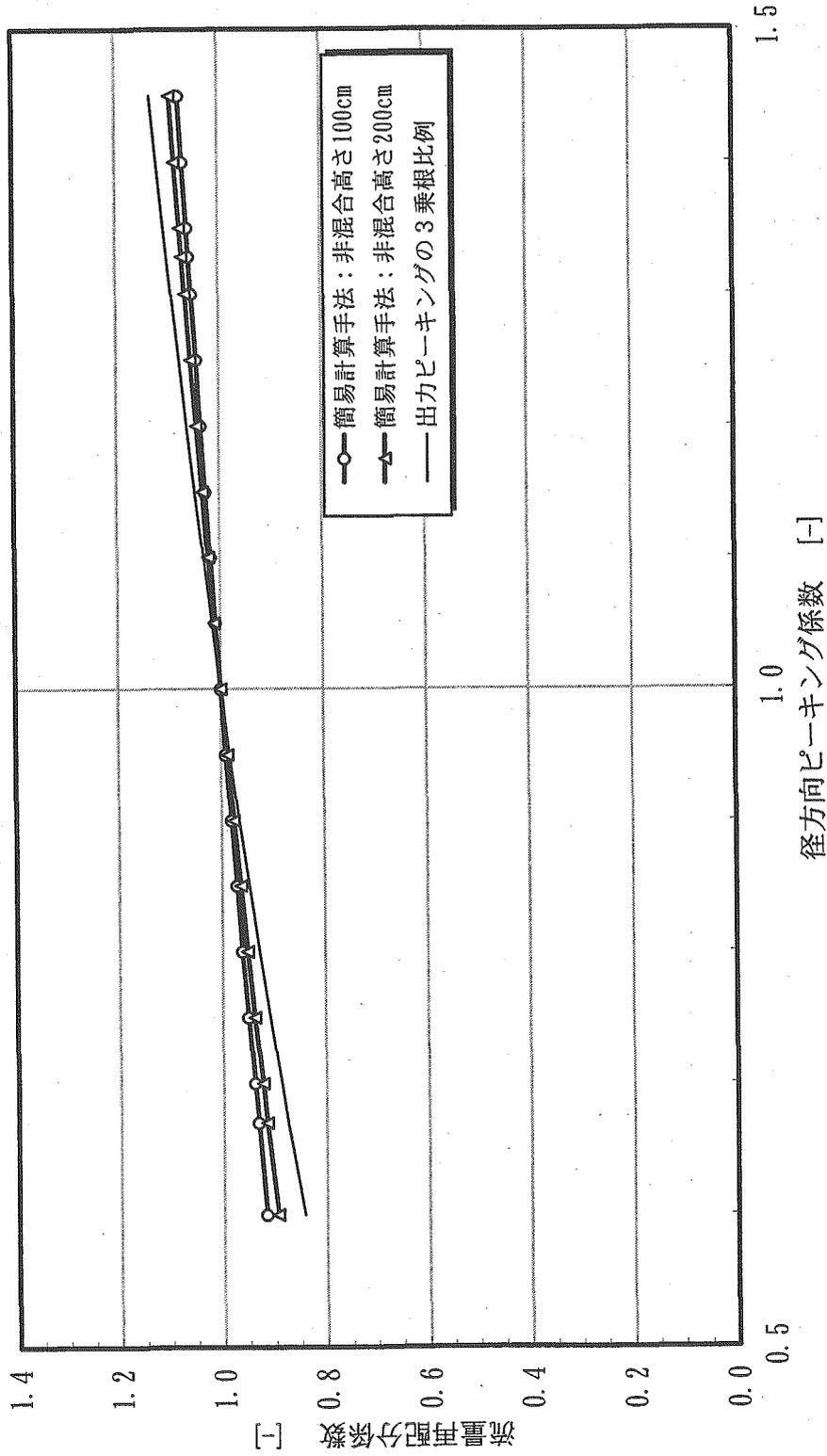


図 3.2.2.3 算出した流量再配分効果 (係数)

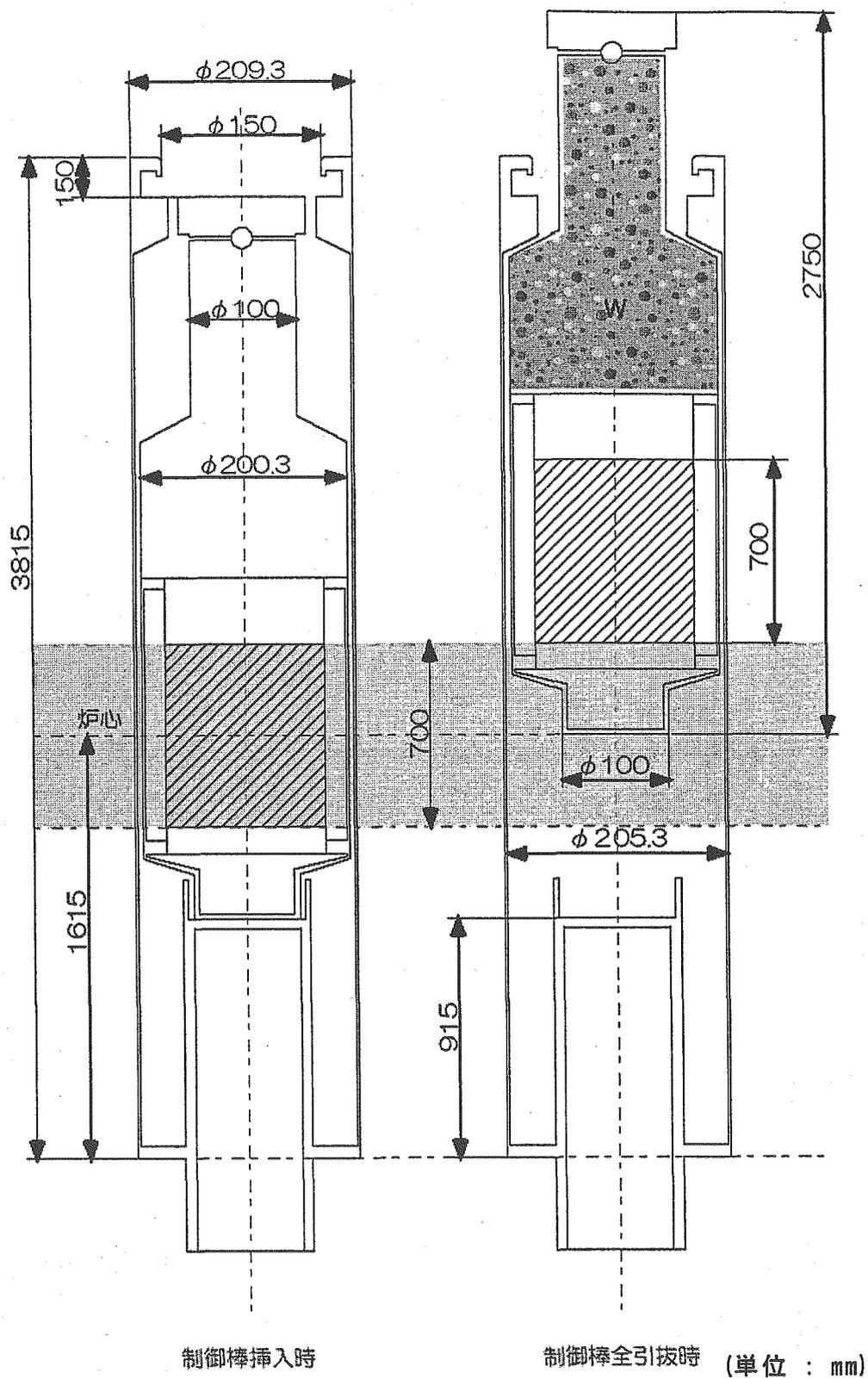


図 3.2.2.4 自然循環炉の制御棒の縦断面概略図

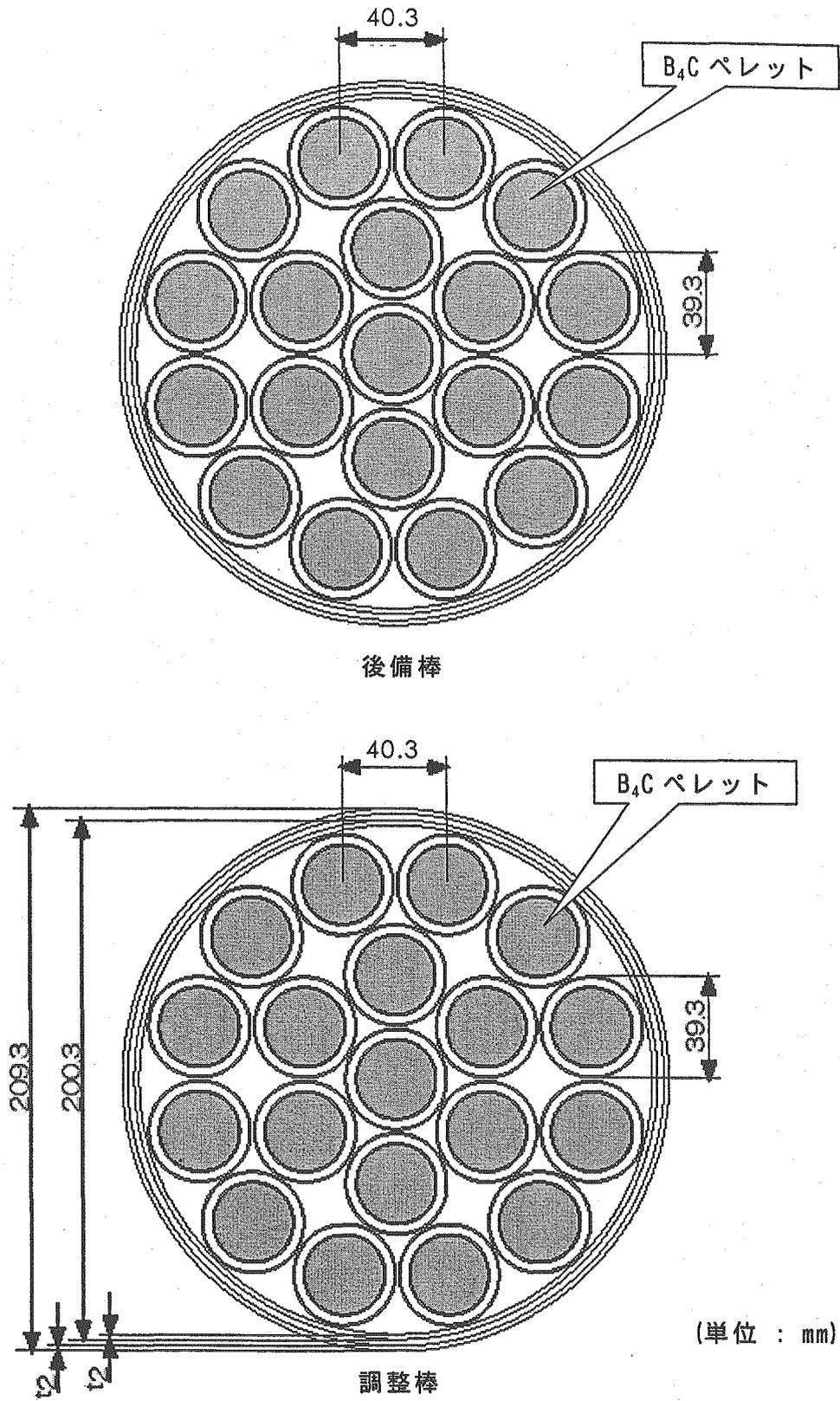


図 3.2.2.5 自然循環炉の制御棒の横断面概略図

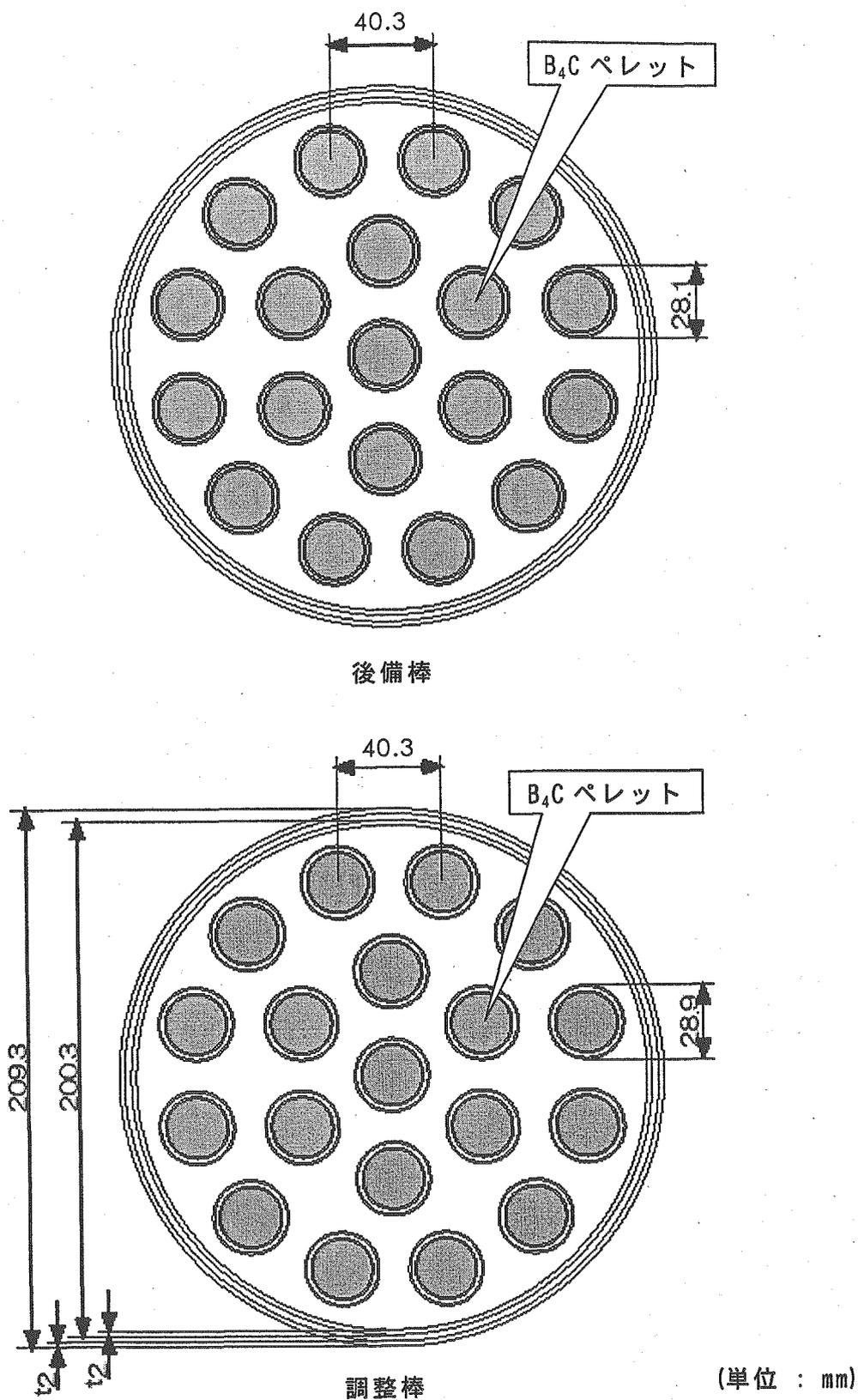


図 3.2.2.6 自然循環炉の B₄C ペレットを細径化した場合の制御棒の横断面概略図

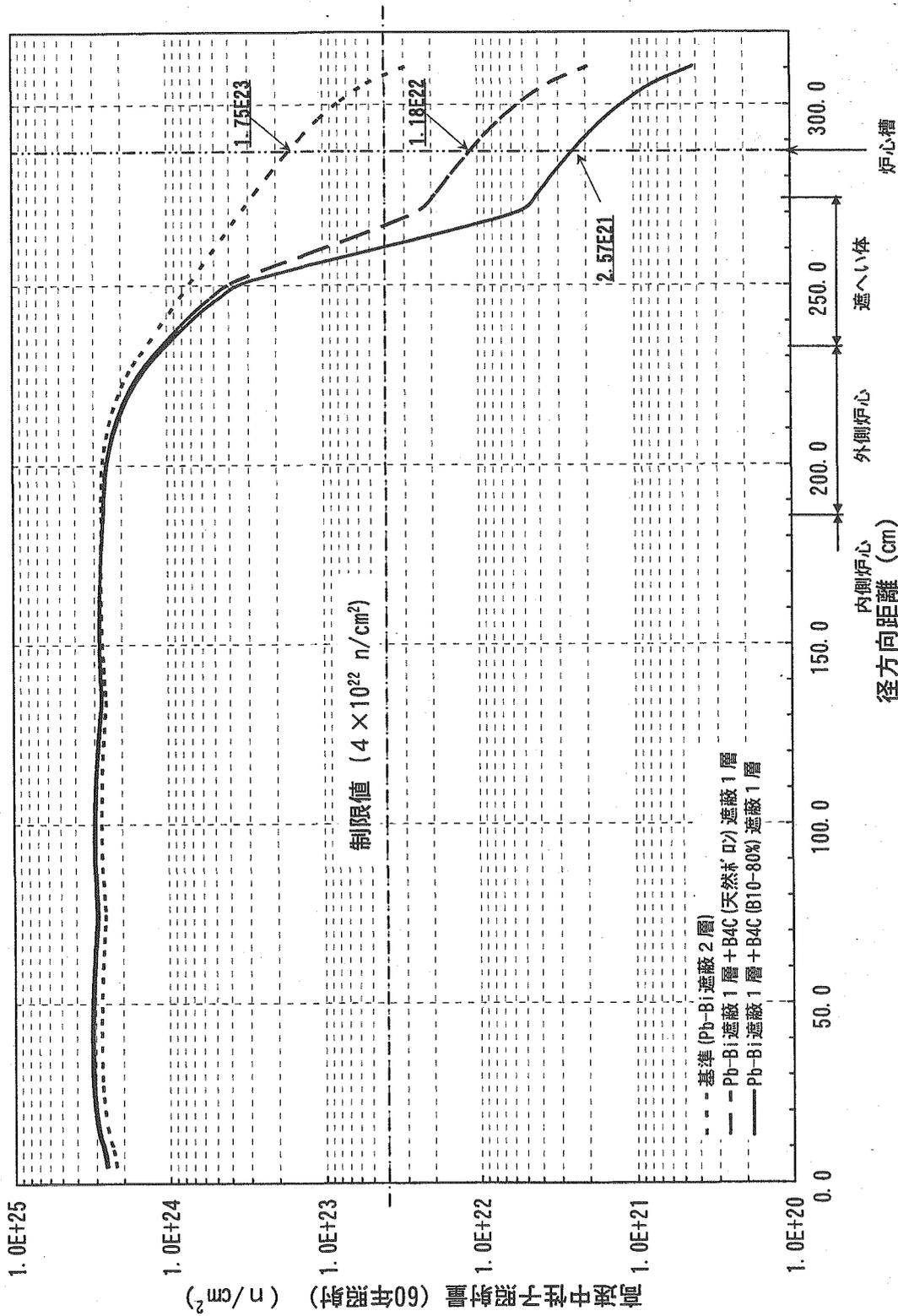
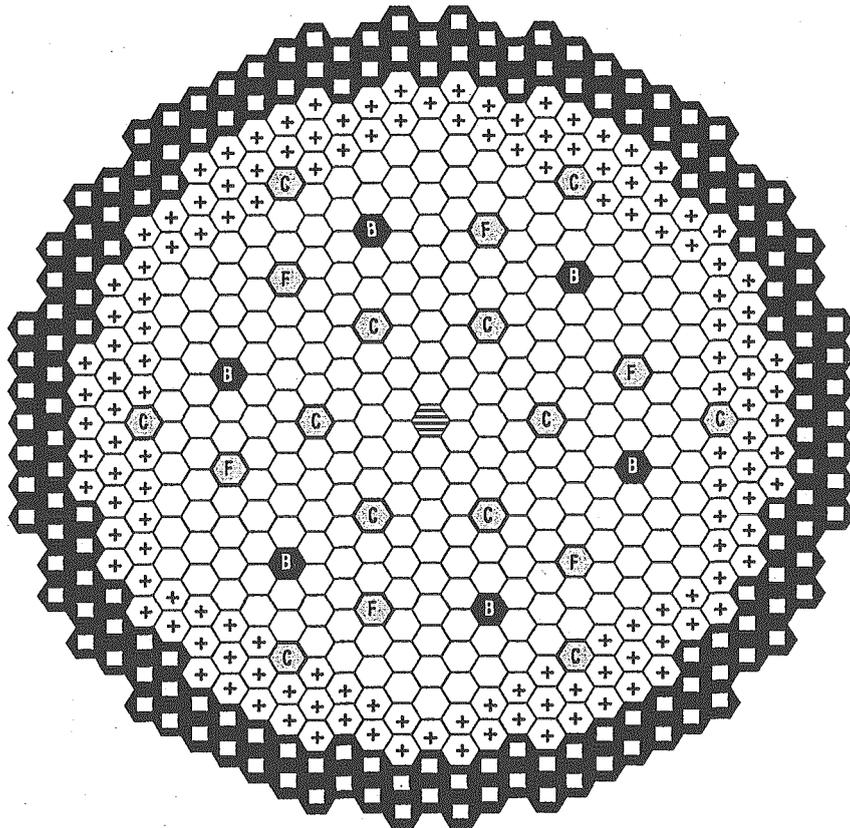


図 3.2.2.7 自然循環炉の高速中性子累積照射量の径方向分布



	内側炉心燃料集合体	252 体
	外側炉心燃料集合体	144 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒 (粗調整棒)	12 体
	制御棒 (微調整棒)	6 体
	制御棒 (後備炉停止系)	6 体
	鉛ビスマス遮へい体	162 体
合 計		583 体

	高燃焼度炉心		照射量目標対応炉心	
	導入期炉心	平衡期炉心	導入期炉心	平衡期炉心
集合体配列 ピッチ (mm)	215.3	←	←	←
遮へい体 外接円径 (cm)	約562	←	←	←

図 3.2.2.8 鉛ビスマス自然循環冷却炉窒化物燃料炉心の炉心配置図

3. 2. 3 被覆管温度制限対応炉心の検討

(1) 予備解析

鉛ビスマス中の被覆管材料の腐食試験の結果から、現状の制限である被覆管最高温度 650℃を 570℃程度まで下げて設計する必要がある可能性が出てきた。そこで、被覆管温度制限を現状の 650℃から 570℃へ変更した場合について、炉心入口温度が 285℃以上であることを目安とした予備検討を実施した。検討は、代表炉心の燃料仕様をベースとし、腐食評価には現設計評価式を用いた。

主要な検討条件を以下に示す。

以下、自然循環炉心を (NC) , 強制循環炉心を (FC) と略記する。

- ・熱出力： 1450MWt(NC), 1875MWt(FC)
- ・バンドル部圧損：0.015MPa(NC), 0.23MPa(FC)
- ・炉心部取出平均燃焼度：150GWd/t (NC, FC)
- ・炉心高さ：70 cm (NC, FC)
- ・被覆管最高温度：570℃以下
- ・炉心入口温度：285℃以上
- ・被覆管腐食量：現設計の腐食評価式
- ・被覆管肉厚：現設計の肉厚評価式

$$\text{肉厚} = 0.025 + \text{腐食減肉量} + 0.26/9.5 \times d \text{ (mm)}$$

(d: ピン径 (mm))

ただし、肉厚評価が 350μm 以下となるので、肉厚を 350μm に固定した。

- ・被覆管最高温度 ($T_{\text{clad}}^{\text{HS}}$) , 炉心入口温度 (T_{in}) 評価式

$$T_{\text{clad}}^{\text{HS}} = T_{\text{in}} + \Delta T \times F_{\text{xy}} \times F_{\text{w}} \times \text{HSF} / (W_{\text{core}} \times W_{\text{orif}} \times W_{\text{red}}) \\ + \Delta T_{\text{film}} \times \text{HSF} + \Delta T_{\text{clad}}(1/2) \times \text{HSF}$$

ここで、

ΔT : 炉心出入口温度差

ΔT_{film} : 膜温度上昇

$\Delta T_{\text{clad}}(1/2)$: 被覆管内温度変化の半分

HSF: 工学的安全係数 (1.14 (NC) , 1.25 (FC))

F_{xy} : 径方向出力ピーキングファクタ (1.26~1.29 (NC) , 1.34 (FC))

F_{w} : 集合体内周辺流れ効果 (1.0 (NC) , 1.05(FC))

W_{core} : 炉心部流量割合 (0.96 (NC) , 0.93(FC))

W_{orif} : 流量配分効果 (1.0 (NC) , 1.2 (FC))

W_{red} : 流量再配分効果 (1.04~1.06 (NC) , 1.0(FC))

被覆管最高温度評価式から分かるように、被覆管最高温度を低下させるには、① ΔT の低減、② ΔT_{film} の低減 の 2 ケースが考えられるが、①のケースは ΔT のみの変更で炉心燃料仕様への影響が小さいので、ここでは①のケースを検討した。

検討にあたっては、炉心出力とバンドル圧損（自然循環炉心では自然循環力）は一定となることを条件とした。評価手順としては、被覆管最高温度を設定し、炉心入口温度の制限目安を満たす炉心出入口温度差を求めた。炉心入口温度が低下すると蒸気発生器伝熱面積が増大し、タンク型の炉容器径が大きくなるので、過大な影響を避けるため、目安として炉心入口温度 285℃程度を下限と設定した。被覆管最高温度 570℃の設定は、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ピスマス環境下の炉心材料腐食試験による最近の知見^[7]に基づくものである。

検討手順をまとめると以下の通りである。

ΔT を決める

- バンドル流量を求める
- バンドル部圧損が被覆管最高温度 650℃炉心（代表炉心）と同等となる燃料仕様（燃焼ピンピッチ，集合体ピッチ）を選定する
- 被覆管最高温度 570℃となる炉心入口温度を求める。

本検討のサーベイ計算の集合体仕様を表 3.2.3.1 に示し、この集合体仕様を基に算出した炉心冷却材温度の変化を図 3.2.3.1 と表 3.2.3.2 に示す。

本図より以下のことが分かる。

- ・自然循環炉心では、ΔT を 140℃程度（現設計から約 40℃の低下）へ下げると被覆管最高温度 570℃，炉心入口温度 285℃，炉心出口温度 430℃程度を実現する見通しである。ただし、ΔT を下げると自然循環力が低下するため、自然循環力を確保するため現設計のプラント仕様を大幅に変更する必要がある。
- ・強制循環炉心では、ΔT を 160℃程度（現設計から約 10℃の低下）へ下げることにより、被覆管最高温度 570℃，炉心入口温度 285℃，炉心出口温度 450℃程度を実現する見通しがある。

次に、上記の燃料仕様に基づき被覆管温度の変更による増殖比への影響を 2 次元 RZ 体系の拡散計算により評価した。結果を表 3.2.3.3 に示すが、表より増殖比への影響は少ないことが分かる。

被覆管最高温度の低下の増殖比に与える影響が少ない理由は、下記の①と②の効果が相殺されたためである。

- ①ΔT が低下し、燃料ピンピッチを大きくするため燃料体積比は減少傾向となる。
- ②被覆管腐食量が減少するので被覆管を薄くでき、燃料体積比は増加傾向となる。

（2）被覆管温度制限対応炉心の炉心設計

熱出力 1875MWt（電気出力 710MWe）の鉛ピスマス強制循環炉を対象として、原子炉出入口温度 445/285℃の条件で被覆管最高温度が 570℃以下となる被覆管温度制限対応炉心を設計して、その性能を概略評価した。被覆管の腐食式には現行の腐食式を用いた。炉心の燃料仕様は（1）項の予備解析結果に基づき設定した。

鉛ビスマス強制循環冷却炉の被覆管温度制限対応炉心の炉心配置図を図 3.2.3.2 に、炉心燃料構成概略図を図 3.2.3.3 に示す。導入期炉心の主要目、主要な燃料仕様および主要な炉心特性を表 3.2.3.4、表 3.2.3.5 および表 3.2.3.6 に示し、平衡期炉心の主要目、主要な燃料仕様および主要な炉心特性を表 3.2.3.7、表 3.2.3.8 および表 3.2.3.9 に示す。また、代表炉心との比較を表 3.2.3.10 に示す。これらの炉心は炉心設計目標を満足している。被覆管温度制限対応炉心は代表炉心とほぼ同じ炉心性能を有しており、例えば、導入期炉心では運転サイクル長さ 20.2 ヶ月、炉心部取出平均燃焼度 151GWd/t、増殖比 1.17、また、ブランケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度 101GWd/t と、いずれも導入期炉心の設計目標を満足している。

ただし、鉛ビスマス中の被覆管の腐食量については、最近の知見^[8]では現設計で用いた被覆管腐食評価式は非安全側であるというデータが得られつつあり、この知見を踏まえると、同一燃料仕様では炉心性能は現設計より悪化することが予想される。

(3) まとめ

被覆管最高温度を 570℃に制限した場合について、現設計の腐食評価式を用いた予備検討および炉心特性の概略評価を行った。被覆管最高温度を変更しても、被覆管温度の変化が被覆管腐食量を増減させ、炉心特性への影響を緩和する傾向があり、被覆管最高温度の変動が炉心性能へ与える影響が軽微であることが分かった。ただし、本解析に用いた腐食評価式は最近の腐食試験の結果を反映したものではないため、今後再評価を行う必要がある。

表 3.2.3.1 サーベイ計算の集合体仕様

	集体内対面距離		燃料棒外径		燃料棒ピッチ		集体内燃料棒数		燃料棒層数		最外周ピンとラツパ管間ギャップ		P/D		ΔT^*		HM装荷量	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	本	層	層	mm	mm	-	°C	t	t			
自然循環	205.3	8.5	12.5	271	19	0.97	1.47	180	36									
	203.3	8.28	12.4	271	19	0.86	1.50	180	36									
	208.2	8.28	12.7	271	19	0.97	1.53	160	36									
	214.4	8.28	13.1	271	19	0.96	1.58	140	36									
	222.2	8.28	13.6	271	19	0.96	1.64	120	36									
	231.6	8.28	14.2	271	19	0.98	1.71	100	36									
	247.2	8.28	15.2	271	19	0.99	1.84	80	36									
	269	8.28	16.6	271	19	0.98	2.00	60	36									
	163	7.3	8.9	331	21	0.77	1.22	168	43.1									
強制循環	161.2	7.16	8.8	331	21	0.81	1.23	168	43.1									
	163	7.16	8.9	331	21	0.84	1.24	155	43.1									

* ΔT : 炉心出入口温度差

表 3.2.3.2 サーベイ結果

自然循環検討結果

項目	単位	基準	ケース1 $\Delta T=180^{\circ}\text{C}$	ケース2 $\Delta T=140^{\circ}\text{C}$
熱出力	MWt	1450	1450	1450
被覆管制限温度	$^{\circ}\text{C}$	650	570	570
炉心出入口温度差	$^{\circ}\text{C}$	180	180	140
炉心出口温度	$^{\circ}\text{C}$	465	416	428
炉心HM装荷量	t	36	36	36
運転サイクル	月	15.06	15.06	15.06
バッチ数		9	9	9
燃料炉内滞在時間	年	11.29	11.29	11.29
必要被覆管肉厚	μm	460	330	330
設定被覆管肉厚	μm	460	350	350
燃料ピン径	mm	8.5	8.28	8.28
平均線出力密度	W/cm	168.70	168.70	168.70
バンドル流量	kg/s	142.00	142.00	182.57
ピンピッチ	mm	12.50	12.40	13.10
P/D		1.47	1.50	1.58
集合体内対面距離	mm	205.3	203.3	214.4
炉心入口温度	$^{\circ}\text{C}$	285	236	288
被覆管温度計算値	$^{\circ}\text{C}$	616	570	570

強制循環検討結果

項目	単位	基準	ケース1 $\Delta T=168^{\circ}\text{C}$	ケース2 $\Delta T=160^{\circ}\text{C}$
熱出力	MWt	1875	1875	1875
被覆管制限温度	$^{\circ}\text{C}$	650	570	570
炉心出入口温度差	$^{\circ}\text{C}$	168	168	160
炉心出口温度	$^{\circ}\text{C}$	520	445	450
炉心HM装荷量	t	43.1	43.1	43.1
運転サイクル	月	14.93	14.93	14.93
バッチ数		8	8	8
燃料炉内滞在時間	年	9.95	9.95	9.95
必要被覆管肉厚	μm	420	277	277
設定被覆管肉厚	μm	420	350	350
燃料ピン径	mm	7.3	7.16	7.16
平均線出力密度	W/cm	132.45	132.45	132.45
バンドル流量	kg/s	159.80	159.80	167.79
ピンピッチ	mm	8.90	8.80	8.85
P/D		1.22	1.23	1.24
集合体内対面距離	mm	163	161.2	162
炉心入口温度	$^{\circ}\text{C}$	352	277	290
被覆管温度計算値	$^{\circ}\text{C}$	643	570	570

表 3.2.3.3 被覆管最高温度変更による増殖比への影響評価

自然 循環	炉心熱出力	1450MWt	1450MWt
	被覆管最高温度	650°C	570°C
	炉心出口温度	465°C	428°C
	炉心入口温度	285°C	288°C
	原子炉出入口温度差	180°C	140°C
	燃料ピン径	8.5mm	8.28mm
	被覆管肉厚	0.46mm	0.35mm
	燃料ピンピッチ	12.5mm	13.1mm
	燃料体積比	30.5%	28.0%
	炉心取出平均燃焼度	120GWd/t	120GWd/t
増殖比	1.22	1.19	
強制 循環	炉心熱出力	1875MWt	1875MWt
	被覆管最高温度	650°C	570°C
	炉心出口温度	520°C	450°C
	炉心入口温度	352°C	290°C
	原子炉出入口温度差	168°C	160°C
	燃料ピン径	7.3mm	7.16mm
	被覆管肉厚	0.42mm	0.35mm
	燃料ピンピッチ	8.9mm	8.85mm
	燃料体積比	39.8%	40.2%
	炉心取出平均燃焼度	114GWd/t	114GWd/t
増殖比	1.20	1.21	

表 3.2.3.4 鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心(導入期炉心)の
主要目

項目		仕様
基本仕様・ 炉心構成	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	20.2 ヶ月 (614 日)
	燃料交換バッチ数	6 バッチ
	炉心高さ	70 cm
	軸方向ブランク厚さ (上部/下部)	0/35 cm
	炉心等価直径	438.2 cm
	遮へい体外接円径	約 520cm
	炉心燃料集集体数 (内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体
	径方向ブランク体数	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)
炉心燃料仕様	燃料形態 ^{*1}	窒化物
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	7.16 mm
	被覆管肉厚	0.35 mm
	燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランク)	80 / 95 %TD
	スペーサ形式	グリッド支持
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D)	1.24
	集集体当たり燃料ピン本数	331 本
	ラッパ管外対面間距離	172.0 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
	集集体配列ピッチ	176.5 mm
炉心主要特性	Pu 富化度 ^{*2} (内側/外側)	14.7 / 17.8 wt. %
	炉心部取出平均燃焼度	151 GWd/t
	全炉心平均燃焼度 ^{*3}	101 GWd/t
	燃焼反応度	0.79 %Δk/k'
	最大線出力 (内側/外側)	198.3 / 198.2 W/cm
	炉心平均出力密度	167.0 W/cm ³
	最大高速中性子束 ^{*4}	1.99×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量 ^{*4}	6.3×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.17
	ドップラ係数 [Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-3.02×10 ⁻³
ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	5.12\$	

*1 : 高速多重リサイクル 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 : Pu/HM、*3 : ブランク燃料を含む全体の平均燃焼度、*4 : E > 0.1 MeV

*5 : 集集体内非均質効果考慮、*6 : 実効遅発中性子割合 β=0.00328

表 3.2.3.5 鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心(導入期炉心)の
 主要な燃料仕様

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブラケット	径方向ブラケット
燃料要素	燃料形態	Pu-U 混合窒化物	U 窒化物	なし
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	7.16		—
	被覆管内径 (mm)	6.46		—
	被覆管肉厚 (mm)	0.35		—
	燃料要素全長 (mm)	2190		—
	燃料スタック長 (mm)	700	0 / 350 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	380*/690*		—
	ボンド材	He		—
	燃料スミア密度 (%TD)	80	95	—
集合体	集合体全長 (mm)	3465		—
	燃料ピン本数 (本) (合計)	331		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.85		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.24		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	172.0		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	162.0		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		—
	集合体配列ピッチ (mm)	176.5		—
	スペーサ形式	グリッド支持		—
	体積比 (%)	燃料 (実効)	40.21 (32.17)	← (38.20)
構造材		19.91	←	—
冷却材		39.88	←	—

※フェーズII 中間報告^[6]の値を見直した

表 3.2.3.6 鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心(導入期炉心)の
主要な炉心特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	20.2 ヶ月 (614 日)
燃料交換バッチ数	6 バッチ
Pu 富化度 ^{*1} (内側/外側)	14.7 / 17.8 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクット)	151 / 17 GWd/t
全炉心平均燃焼度 ^{*2}	101 GWd/t
燃焼反応度	0.79 %Δk/kk'
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクット)	1.17 0.90 / 0.27
最大線出力 (内側/外側)	198.3 / 198.2 W/cm
炉心平均出力密度	167.0 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクット)	0.94 / 0.06
最大高速中性子束 ^{*3}	1.99×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量 ^{*3}	6.3×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランクット)	42768 / 25910 kg
ブランクット/炉心重金属重量比	0.61
装荷時核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	5.9 t/GWe
原子炉倍增時間	38 年
複合システム倍增時間 ^{*4}	42 年
ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	5.12\$
ドブブラ係数 [Tdk/dT] ^{*6} (平衡末期)	-3.02×10^{-3}

*1 : Pu/HM

*2 : ブランクット燃料を含む全体の平均燃焼度

*3 : E > 0.1 MeV

*4 : 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

*5 : 集合体内非均質効果考慮

*6 : 実効遅発中性子割合 $\beta = 0.00328$

表 3.2.3.7 鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心(平衡期炉心)の
主要目

	項目	仕様
基本仕様・ 炉心構成	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	19.7 ヶ月 (600 日)
	燃料交換バッチ数	6 バッチ
	炉心高さ	70 cm
	軸方向ブランク厚さ (上部/下部)	0/7 cm
	炉心等価直径	438.2 cm
	遮へい体外接円径	約 520cm
	炉心燃料集合体数 (内側/外側/合計)	288 / 246 / 534 体
	径方向ブランク体数	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)
炉心燃料仕様	燃料形態 ^{*1}	窒化物
	炉心材料 (被覆管/ラッパ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼
	燃料ピン外径	7.16 mm
	被覆管肉厚	0.35 mm
	燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランク)	80 / 95 %TD
	スペーサ形式	グリッド支持
	燃料ピン配列ピッチ/燃料ピン外径 (P/D)	1.24
	集合体当たり燃料ピン本数	331 本
	ラッパ管外対面間距離	172.0 mm
	ラッパ管肉厚	5.0 mm
集合体配列ピッチ	176.5 mm	
炉心主要特性	Pu 富化度 ^{*2} (内側/外側)	14.1 / 17.5 wt. %
	炉心部取出平均燃焼度	151 GWd/t
	全炉心平均燃焼度 ^{*3}	138 GWd/t
	燃焼反応度	0.55 %Δk/kk'
	最大線出力 (内側/外側)	204.1 / 201.4 W/cm
	炉心平均出力密度	170.3 W/cm ³
	最大高速中性子束 ^{*4}	2.05×10 ¹⁵ n/cm ² s
	最大高速中性子照射量 ^{*4}	6.4×10 ²³ n/cm ²
	増殖比	1.04
	ドップラ係数 [Tdk/dT] ^{*5} (平衡末期)	-3.18×10 ⁻³
ポイド反応度 ^{*5} (平衡末期)	5.54\$	

*1 : 高速多重リサイクル 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 : Pu/HM、*3 : ブランク燃料を含む全体の平均燃焼度、*4 : E > 0.1 MeV

*5 : 集合体内非均質効果考慮、*6 : 実効遅発中性子割合 β=0.00329

表 3.2.3.8 鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心(平衡期炉心)の
主要な燃料仕様

項目		仕様		
		炉心	軸方向ブランク	径方向ブランク
燃料要素	燃料形態	Pu-U 混合窒化物	U 窒化物	なし
	被覆管材料	ODS 鋼		—
	被覆管外径 (mm)	7.16		—
	被覆管内径 (mm)	6.46		—
	被覆管肉厚 (mm)	0.35		—
	燃料要素全長 (mm)	2190		—
	燃料スタック長 (mm)	700	0 / 70 (上部/下部)	—
	ガスプレナム長さ(上/下) (mm)	380*/970*		—
	ボンド材	He		—
燃料スミア密度 (%TD)	80	95	—	
集合体	集合体全長 (mm)	3465		—
	燃料ピン本数 (本) (合計)	331		—
	燃料ピン配列ピッチ (mm)	8.85		—
	燃料ピン配列ピッチ/ピン径比 (P/D)	1.24		—
	ラッパ管材料	PNC-FMS 鋼		—
	ラッパ管外対面間距離 (mm)	172.0		—
	ラッパ管内対面間距離 (mm)	162.0		—
	ラッパ管肉厚 (mm)	5.0		—
	ラッパ管間ギャップ (mm)	4.5		—
	集合体配列ピッチ (mm)	176.5		—
	スペーサ形式	グリッド支持		—
	体積比 (%)	燃料 (実効)	40.21 (32.17)	← (38.20)
構造材		19.91	←	—
冷却材		39.88	←	—

※フェーズII 中間報告⁽⁶⁾の値を見直した

表 3.2.3.9 鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心(平衡期炉心)の
 主要な炉心特性

項目	設計値
運転サイクル長さ	19.7ヶ月 (600日)
燃料交換バッチ数	6バッチ
Pu 富化度*1 (内側/外側)	14.1 / 17.5 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心/軸方向ブランクット)	151 / 50 GWd/t
全炉心平均燃焼度*2	138 GWd/t
燃焼反応度	0.55 % $\Delta k/kk'$
増殖比 (全体) (炉心/軸方向ブランクット)	1.04 0.93 / 0.11
最大線出力 (内側/外側)	204.1 / 201.4 W/cm
炉心平均出力密度	170.3 W/cm ³
出力分担率 (炉心/軸方向ブランクット)	0.96 / 0.04
最大高速中性子束*3	2.05×10^{15} n/cm ² s
最大高速中性子照射量*3	6.4×10^{23} n/cm ²
装荷時重金属インベントリ (炉心/軸方向ブランクット)	42768 / 5922 kg
ブランクット/炉心重金属重量比	0.14
装荷時核分裂性 Pu 重量 (出力当たり)	5.8 t/GWe
原子炉倍増時間	—
複合システム倍増時間*4	—
ポイド反応度*5 (平衡末期)	5.54\$
ドップラ係数 [Tdk/dT] *5 (平衡末期)	-3.18×10^{-3}

*1 : Pu/HM

*2 : ブランクット燃料を含む全体の平均燃焼度

*3 : $E > 0.1$ MeV

*4 : 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

*5 : 集合体内非均質効果考慮

*6 : 実効遅発中性子割合 $\beta = 0.00329$

表 3.2.3.10 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

項目	高燃焼度炉心		被覆管温度制限対応炉心	
	導入期炉心	平衡期炉心	導入期炉心	平衡期炉心
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 日)	19.7 ヶ月 (600 日)
燃料交換バッチ数 (炉心/径方向ブランチ)	7/-バッチ	←	6/-バッチ	←
炉心高さ	70 cm	←	←	←
軸方向ブランチ厚さ (上部/下部)	0/35 cm	0/10 cm	0/35 cm	0/7 cm
炉心等価直径	441 cm	←	438 cm	←
遮へい体外径	約 523 cm	←	約 520 cm	←
燃料形態	窒化物	←	←	←
炉心材料 (被覆管/ラップ管)	ODS 鋼/PNC-FMS 鋼	←	←	←
燃料ピン外径	7.3 mm	←	7.16 mm	←
被覆管肉厚	0.42 mm	←	0.35 mm	←
燃料スミア密度 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ)	80 / 95 / - %TD	←	←	←
スペーサ形式	グリッド支持	←	←	←
集合体当たり燃料ピン本数	331 本	←	←	←
Pu 富化度 (内側/外側) ^{*1}	15.2 / 18.2 wt. %	14.7 / 18.0 wt. %	14.7 / 17.8 wt. %	14.1 / 17.5 wt. %
取出平均燃焼度 (炉心部/全炉心) ^{*2}	157 / 105 GWD/t	159 / 143 GWD/t	151 / 101 GWD/t	151 / 138 GWD/t
燃焼反応度	0.90 %Δk/kk'	0.70 %Δk/kk'	0.79 %Δk/kk'	0.55 %Δk/kk'
増殖比 (炉心/軸方向ブランチ/径方向ブランチ/全体)	0.88 / 0.27 / - / 1.15	0.91 / 0.13 / - / 1.04	0.90 / 0.27 / - / 1.17	0.93 / 0.11 / - / 1.04
最大線出力 (内側/外側)	195 / 196 W/cm	199 / 198 W/cm	198 / 198 W/cm	204 / 201 W/cm
炉心平均出力密度	165 W/cm ³	167 W/cm ³	167 W/cm ³	170 W/cm ³
最大高速中性子照射量 ^{*3}	6.4 × 10 ²³ n/cm ²	6.6 × 10 ²³ n/cm ²	6.3 × 10 ²³ n/cm ²	6.4 × 10 ²³ n/cm ²
ドップラ係数 [σk/dT] (平衡末期) ^{*4}	-3.0 × 10 ⁻³	-3.1 × 10 ⁻³	-3.0 × 10 ⁻³	-3.2 × 10 ⁻³
ポイド反応度 (平衡末期) ^{*4}	4.8 \$ ^{*5}	5.2 \$ ^{*5}	5.1 \$ ^{*5}	5.5 \$ ^{*5}
複合システム倍増時間	48 年 ^{*6}	-	42 年 ^{*6}	-

*1: Pu/U、*2: ブランチ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 0.00326 (高燃焼度・導入期炉心)、0.00325 (高燃焼度・平衡期炉心)、0.00328 (被覆管温度制限対応・導入期炉心)、0.00329 (被覆管温度制限対応・平衡期炉心)、

*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

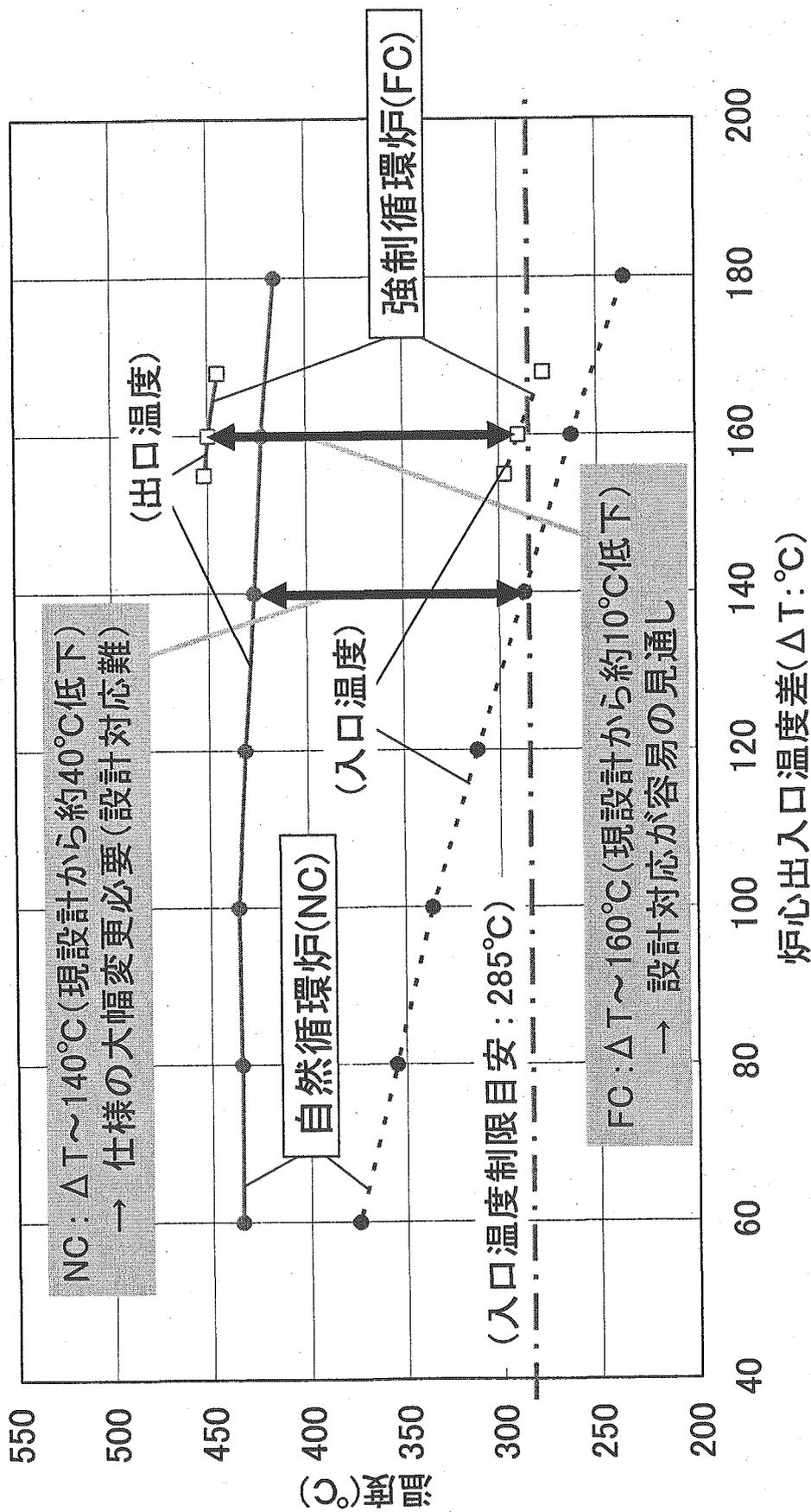
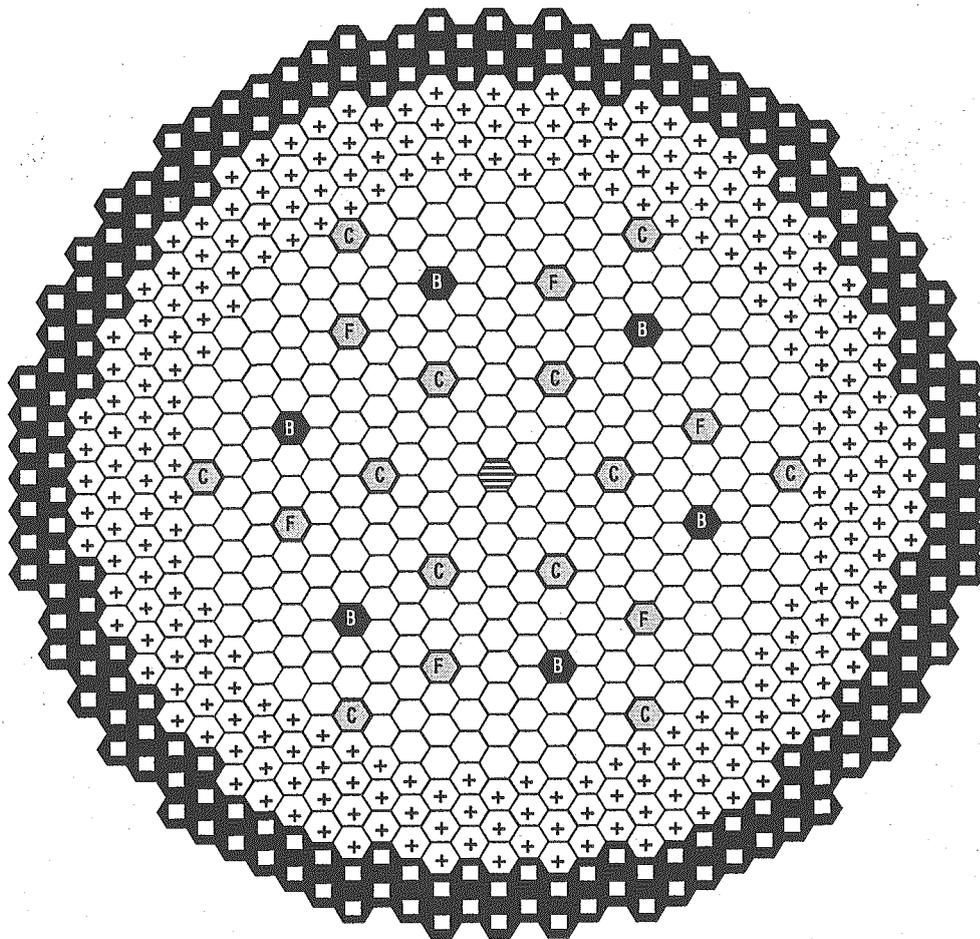


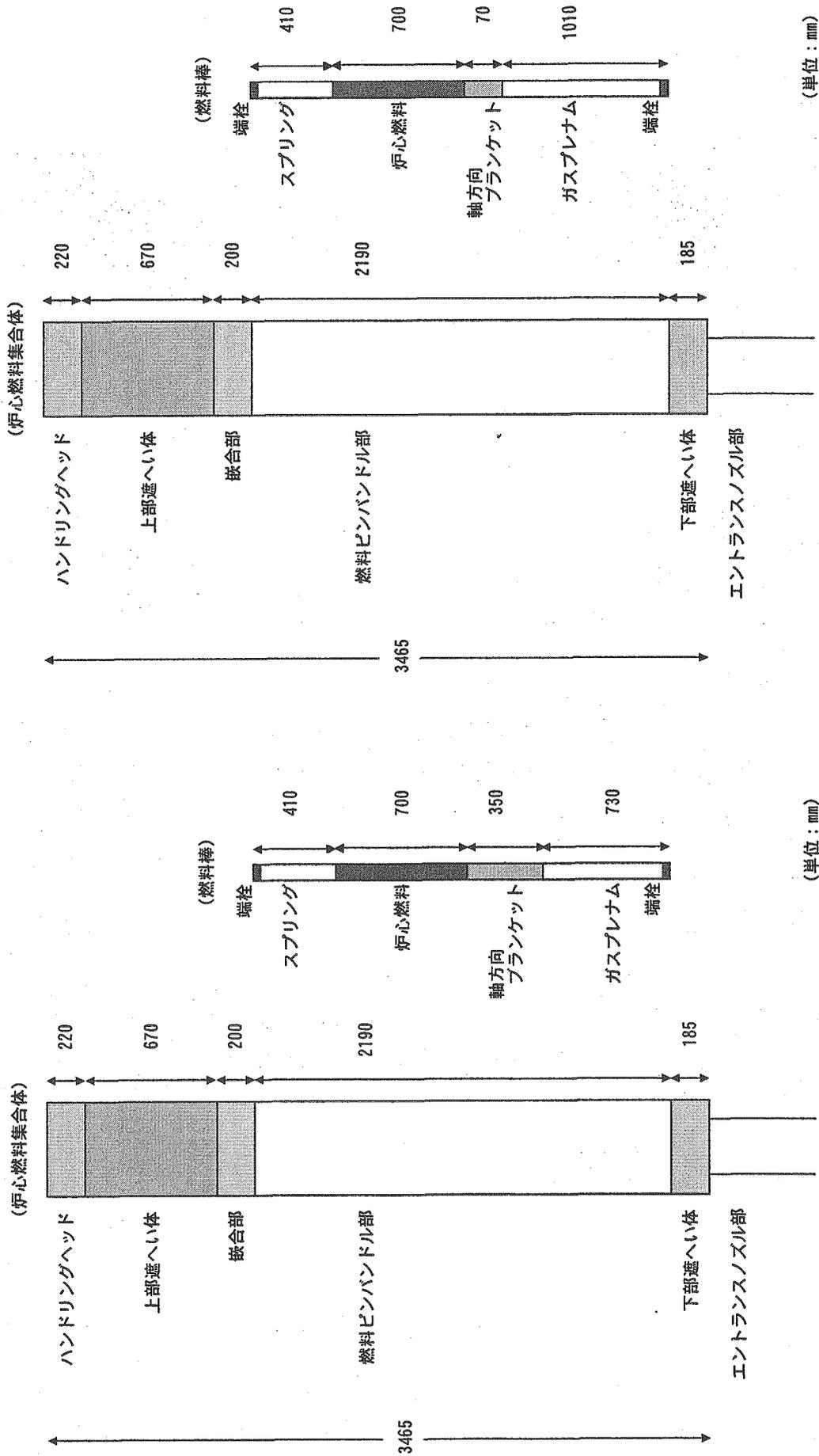
図 3.2.3.1 炉心出入口温度差 (ΔT) と炉心出入口温度の関係



	内側炉心燃料集合体	288 体
	外側炉心燃料集合体	246 体
	炉中心スチール集合体	1 体
	制御棒（粗調整棒）	12 体
	制御棒（微調整棒）	6 体
	制御棒（後備炉停止系）	6 体
	鉛ビスマス遮へい体	186 体
合 計		745 体

- ・ 集合体配列ピッチ 176.5mm
- ・ 遮へい体外接円径 約520cm

図 3.2.3.2 鉛ビスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心の炉心配置図



(単位：mm)

(単位：mm)

(平衡期炉心)

(導入期炉心)

図 3.2.3.3 鉛ピスマス強制循環冷却炉被覆管温度制限対応炉心の炉心燃料構成概略図

4. おわりに

平成 13 年度に実施した鉛ビスマス冷却中型炉の炉心・燃料設計に対して、DDI を回避する観点から燃料仕様を見直し、FS フェーズⅡ中間取り纏め(平成 15 年度)としての強制循環方式と自然循環方式の代表炉心を設計した。750MWe 強制循環冷却炉と 550MWe 自然循環冷却炉の代表炉心の炉心基本仕様と設計根拠を表 4.1 に示す。これらの炉心は前述の表 2.4 に示した設計条件を満足し、FS の設計目標を満たす見通しを得た。

強制循環炉心(FC)と自然循環炉心(NC)の特性を比較した結果、強制循環炉心を有望概念に選定した。強制循環炉心の利点を以下にまとめる。

- (1)全炉心平均燃焼度(炉心+ブランケット)が大きい(FC : 105GWd/t, NC : 89GWd/t)。
- (2)装荷時核分裂性 Pu 重量が少ない(FC : 5.8t/GWe, NC : 8.0t/GWe)。
- (3)出力が大きくても炉心等価直径が小さい(FC : 441cm, NC : 464cm)。
- (4)NC は自然循環力の確保のため、炉容器軸長が長くなり耐震性の観点からは課題が多い。

なお、本検討の代表炉心は炉心取出平均燃焼度の目標値(150GWd/t)を達成したが、被覆管の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 ($5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$)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照射量目標対応炉心は、炉心取出平均燃焼度が FC で 129GWd/t, NC で 146 GWd/t となった。さらに、MOX 燃料および金属燃料と軽水炉回収 TRU 燃料の適用性を確認し、鉛ビスマス冷却炉炉心の柔軟性・多様性を示した。

なお、鉛ビスマス冷却炉の実用化のためには多くの技術課題があるが、以下に炉心・燃料設計関連の課題と今後の予定をまとめる。

- (1)最近の鉛ビスマス中の被覆管腐食試験の知見^{[7][8]}では、現設計で用いた被覆管腐食評価式は非安全側で、かつ現状の制限目安の被覆管最高温度 650℃を 570℃まで下げて設計する必要の可能性が出てきている。現行腐食式を用いて被覆管最高温度を低下した場合の影響について予備解析を実施し、炉心特性への影響は小さいという結果を得た。その後、新しい腐食式が提案されたので、これを用いて炉心設計への影響を評価する予定である。
- (2)炉心燃料材料としての窒化物燃料について、鉛ビスマス冷却材と組み合わせることにより、良好な炉心特性となる見通しは得られたが、高燃焼度における FP 放出率、スエリングなどの特性に関するデータが不足しており、その特性如何によっては炉心特性への影響も大きく、炉心燃料仕様変更および鉛ビスマス冷却炉の炉心特性評価の変更もありうる。今後、照射試験データの蓄積が必要である。
- (3)燃料集合体については、鉛ビスマス冷却炉における良好な炉心特性への一因

として、グリッドスペーサの採用がある。工学的安全係数・周辺流れ効果の低減などの長所があるため、ワイヤスペーサと比較して熱特性を改善させるが、製造性の検討、コストの評価などが必要である。

- (4)自重落下型制御棒の開発については、鉛ビスマス冷却材は高比重であるため、ナトリウム冷却炉と同程度の制御棒仕様では自重では落下せず、浮き上がる可能性がある。そこで、タングステンを制御棒上部のディフューザ部分に装填し自重を高める工夫を施し、スクラム速度に配慮した設計としたが、今後、流動する鉛ビスマス冷却材中での制御棒挿入・落下性能の確認試験が必要である。

表 4.1 鉛ビスマス冷却炉の炉心基本仕様と設計根拠

No.	項 目	強制循環炉		自然循環炉		根拠
		導入期	平衡期	導入期	平衡期	
1	電気出力(MWe)		750		550	直径10m台の原子炉容器に収まるプラント設計より設定
2	原子炉熱出力(MWt)		1,875		1,450	
3	原子炉出口/入口温度(°C)		520 / 352		465 / 285	
4	1次系流量(m ³ /h)		26,700		19,520	鉛ビスマス炉で炉心高性能化を達成できること、先行例を参考にして設定(経済性の観点より径ブランケットは削除)
5	燃料形態		窒化物		←	
6	炉心型式		均質2領域(径ブラなし)		←	高燃焼度化のため低スエリング材を適用
7	炉心材料		被覆管 ツッパ管		←	
			ODS鋼		←	
			PNC-FMS鋼		←	
		導入期	平衡期	導入期	平衡期	
8	増殖比	1.15	1.04	1.17	1.04	FBR導入シナリオ検討より1.1~1.2(導入期)1.04程度(平衡期)
9	複合システム倍増時間(年)	48	—	51	—	FBR導入シナリオ検討より50年程度以下
10	取出平均燃焼度(GWd/t)	157	159	156	160	経済性等の観点より他の基幹電源と共通の設定 取出平均燃焼度:炉心部150GWd/t程度、 全炉心 60GWd/t程度以上 運転サイクル長さ:18ヶ月以上
	燃焼度	105	143	89	122	
11	運転サイクル長さ(ヶ月)	18	←	←	←	
12	トリウム反応度(\$)	4.8	5.2	8.7	9.4	安全性からの目安として10\$程度以下
13	高速中性子照射量(n/cm ²) *2	6.4 × 10 ²³	6.6 × 10 ²³	5.7 × 10 ²³	5.9 × 10 ²³	(ODS鋼等の開発目標として5 × 10 ²³ n/cm ² 以下) *2
14	被覆管最高温度(°C) *3	650	←	←	←	先行例より650°C以下 *3
15	燃料ハンドルの流速(m/s)	1.5	←	0.6	←	被覆管、構造材等の腐食抑制の観点より2m/s以下
16	遮へい体外接円径(m)	5.23	←	5.62	←	直径10m台の原子炉容器より5.5m程度以下

*1 7燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

*2 E > 0.1MeV、代表炉心では炉心部取出平均燃焼度150GWd/t程度を目指し、照射量制限は設けない。

*3 肉厚中心、最近の腐食試験の知見から被覆管最高温度570°C制限対応強制循環炉心(1次系温度445 / 285 °C)も予備検討実施

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)”, JNC TN9400 2003-073, (2003)
- [2] 池上哲雄, 他:”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－ (研究報告)”, JNC TY9400 2001-011, (2001)
- [3] 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)
- [4] 水田俊治, 他:”ODS フェライト鋼被覆管の設計評価用関係式の検討 (研究報告書)”, JNC TN9400 2000-048, (2000)
- [5] 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)
- [6] 此村守, 他:”高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ II 中間報告－原子炉プラントシステム技術検討書－”, JNC TN9400 2004-035, (2004)
- [7] 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)
- [8] 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)