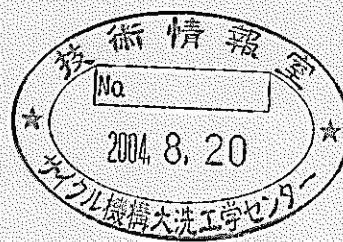


# Na炉、Pb-Bi炉、ガス炉における元素分離 LLFPの核変換特性（その2） (研究報告)

2004年5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](mailto: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-Ken 319-1184, Japan

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

2004

2100

(KO)

## Na 炉、Pb-Bi 炉、ガス炉における元素分離 LLFP の核変換特性（その 2）

(研究報告)

高木直行\*\*、永沼正行\*、水野朋保\*

## 要旨

実用化戦略調査研究で検討している主要な炉心の LLFP 核変換対応能力を核・熱・材料の観点から検討した。検討対象とした炉心は次の 6 種類である。1) 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉心、2) 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉心、3) 大型金属燃料 Na 冷却炉心、4) 強制循環 Pb-Bi 冷却炉心、5) 自然循環 Pb-Bi 冷却炉心、及び 6) 横方向流 He ガス冷却炉。

減速材ピンを含む LLFP 集合体(I 及び Tc)を炉心周辺領域に装荷した各炉型について、LLFP の変換/生成比(=SF: Support Factor)を 1 以上とする条件の下、取り出し核変換率約 30%の達成を目標として評価を行った。今回の検討では、設計条件として LLFP ピンの内圧制限や集合体間冷却材出口温度差制限を新たに考慮し、LLFP 集合体の健全性確保と優れた変換特性を両立するために LLFP 要素のスタック長やスマア密度等の仕様調整を図った。また、冷却材温度の高い He ガス炉については、固有の減速物質や LLFP 化合物形態を設定して変換特性を調べた。主要な結果を箇条書きにまとめる。

- 今回の検討条件と評価技術の下では、いずれの炉も LLFP 集合体の健全性を確保する上で、I ピンの内圧制限及び減速材として用いる水素の減損量制限が主要な設計制約因子となる。
- 大型 MOX 燃料 Na 炉、He ガス炉、強制循環 Pb-Bi 炉そして中型 MOX 高内部転換型 Na 炉について、2003 年度に検討対象とした炉心の LLFP 核変換率は 10~20%程度となる結果を得た。尚、He 炉については高温に耐える SiC 被覆管や、融点の高い Y-H 減速材等、ガス炉特有の課題がある。
- 大型金属燃料 Na 炉及び自然循環 Pb-Bi 炉について、2003 年度に検討対象とした炉心の LLFP 核変換率は目標に近い 30%程度となる結果を得た。集合体装荷体数や仕様の調整等によって、目標変換率を達成しつつ 1.0 以上の SF が得られる可能性がある。Pb-Bi 自然循環冷却炉では、発熱の小さい LLFP 集合体に対しても自然循環力によって十分な冷却材が配分される見通しがある。
- 検討したいずれの炉心も、LLFP 集合体への必要冷却材流量は全流量の 3%程度以下と少なく、大きな炉心設計対応なしに LLFP 集合体を受け入れられる可能性がある。

\*\* 日本原子力発電㈱ 研究開発室より派遣

\* 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

## LLFP Transmutation Performance in Sodium, Pb-Bi and He Cooled Fast Reactors - II

Naoyuki TAKAKI<sup>\*\*</sup>, Masayuki NAGANUMA\*, Tomoyasu MIZUNO<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

The LLFP transmutation performances of some reference fast reactors examined in the feasibility study have been investigated from view points of nuclear, thermal and material characteristics. The evaluations have been made on the following six cores as 1) large-scale MOX fuel sodium-cooled compact core, 2) medium-scale MOX fuel sodium-cooled high internal conversion core, 3) large-scale metal fuel sodium-cooled core, 4) forced circulation Pb-Bi cooled core, 5) natural circulation Pb-Bi cooled core and 6) horizontal radial flow He-cooled core.

For each core loaded with LLFP ( $I$  and  $Tc$ ) assemblies in the peripheral region, design studies have been performed aiming at high transmutation ratio around 30% under a constraint of transmutation / production ratio that is defined as support factor (SF) equal to unity. In this study, design limitations on the inner pressure of LLFP pin and the outlet temperature difference of coolant between LLFP assembly and adjacent fuel assembly were newly taken into account. The specifications of LLFP target elements such as the stack length, smear density etc. were adjusted to achieve superior transmutation performance while keeping the integrity of LLFP assembly. Particular moderator material and LLFP compound were assumed to use in the He cooled gas reactor. Major conclusions are as follows:

- Under the current design constraint and analysis models, key design restrictions in order to assure the integrity of LLFP assemblies are caused by the internal pressure of Iodine pins and the permeation of hydrogen of moderator Zr-H.
- As for the MOX fuel sodium-cooled cores, the He-cooled core and the forced circulation Pb-Bi cooled cores examined in this study showed the transmutation ratio of around 10% for both of  $^{129}I$  and  $^{99}Tc$ . Here the He-cooled core has specific problems to be developed such as SiC cladding and Y-H moderator owing to its high coolant temperature.
- The metal fuel sodium-cooled cores and the natural circulation Pb-Bi cooled cores examined in this study showed high transmutation ratio of around 30% for both  $^{129}I$  and  $^{99}Tc$ . These cores have a potential to obtain SF more than unity by adjusting the number or the specifications of LLFP assemblies. It is found that a LLFP assembly in the Pb-Bi cooled core having much smaller heat production than a fuel assembly is sufficiently cooled only by natural circulation of the coolant.
- Required coolant flow rate ratio for LLFP assemblies is less than around 3% of the total flow for each core, therefore fast reactors examined in this study might be feasible to cope with LLFP transmutation without any severe design modification.

---

<sup>\*\*</sup> Attached from The Japan Atomic Power Company (JAPC)

\* Fuel and Core System Group, System Engineering and Technology Division, O-arai Engineering Center

## 目次

1	はじめに.....	1
2	前提条件の整理.....	2
2.1	核特性に関する前提条件.....	2
2.2	熱流動に関する前提条件.....	5
2.3	LLFP 集合体仕様選定の考え方.....	15
3	Na 冷却炉.....	18
3.1	大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉.....	18
3.1.1	基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様.....	18
3.1.2	LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性.....	19
3.1.3	LLFP 核変換特性.....	19
3.2	中型 MOX 燃料中型高内部転換型 Na 冷却炉.....	27
3.2.1	基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様.....	27
3.2.2	LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性.....	27
3.2.3	LLFP 核変換特性.....	28
3.3	大型金属燃料 Na 冷却炉.....	35
3.3.1	基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様.....	35
3.3.2	LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性.....	35
3.3.3	LLFP 核変換特性.....	36
4	Pb-Bi 冷却炉.....	43
4.1	Pb-Bi 強制循環冷却炉.....	43
4.1.1	基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様.....	43
4.1.2	LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性.....	43
4.1.3	LLFP 核変換特性.....	44
4.2	Pb-Bi 自然循環冷却炉.....	51
4.2.1	基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様.....	51
4.2.2	LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性.....	51
4.2.3	LLFP 核変換特性.....	52
5	横方向流 He ガス冷却炉.....	60
5.1	基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様.....	60
5.2	LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性.....	60
5.3	LLFP 核変換特性.....	62
6	各炉型の核変換能力の比較.....	70
6.1	解析結果の整理.....	70
6.2	核変換率に対する非均質効果を見直した場合の比較.....	72
6.3	各炉型の LLFP 核変換能力の比較考察.....	73

7	おわりに.....	93
8	謝辞.....	95
9	参考文献.....	96

## 表リスト

表 2.2-1 热流动设计制限値の一覧 .....	13
表 3.1.1-1 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の炉心仕様／特性 .....	21
表 3.1.1-2 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様 .....	22
表 3.1.2-1 LLFP 集合体を装荷した大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の主要な核特性 .....	23
表 3.1.3-1 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の LLFP 核变换特性 .....	24
表 3.2.1-1 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の炉心仕様／特性 .....	29
表 3.2.1-2 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様 .....	30
表 3.2.2-1 LLFP 集合体を装荷した中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の主要な核特性 .....	31
表 3.2.3-1 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の LLFP 核变换特性 .....	32
表 3.3.1-1 大型金属燃料 Na 冷却炉の炉心仕様／特性 .....	37
表 3.3.1-2 大型金属燃料 Na 冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様 .....	38
表 3.3.2-1 LLFP 集合体を装荷した大型金属燃料 Na 冷却炉の主要な核特性 .....	39
表 3.3.3-1 大型金属燃料 Na 冷却炉の LLFP 核变换特性 .....	40
表 4.1.1-1 Pb-Bi 強制循環冷却炉の炉心仕様／特性 .....	45
表 4.1.1-2 Pb-Bi 強制循環冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様 .....	46
表 4.1.2-1 LLFP 集合体を装荷した Pb-Bi 強制循環炉心の主要な核特性 .....	47
表 4.1.3-1 Pb-Bi 強制循環冷却炉の LLFP 核变换特性 .....	48
表 4.2.1-1 Pb-Bi 自然循環冷却炉の炉心仕様／特性 .....	54
表 4.2.1-2 Pb-Bi 自然循環冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様 .....	55
表 4.2.2-1 LLFP 集合体を装荷した Pb-Bi 自然循環炉心の主要な核特性 .....	56
表 4.2.3-1 Pb-Bi 自然循環冷却炉の LLFP 核变换特性 .....	57
表 5.1-1 被覆粒子型燃料 He ガス冷却炉の炉心仕様／特性 .....	63
表 5.1-2 よう素化合物の特性比較 .....	64
表 5.1-3 横方向流 He ガス冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様 .....	65
表 5.2-1 LLFP 集合体を装荷した横方向流 He ガス炉心の主要な核特性 .....	66
表 5.3-1 横方向流 He ガス冷却炉の LLFP 核变换特性 .....	67
表 6.1-1 LLFP 核变换炉心概念①の核变换特性の整理 .....	75
表 6.1-2 LLFP 核变换炉心概念②の核变换特性の整理 .....	76
表 6.1-3 LLFP 核变换炉心概念②の热流动特性の整理 .....	77
表 6.1-4 LLFP 核变换炉心概念③の I の核变换特性（第1層と第2層の LLFP 集合体を置換なし） ..	78
表 6.1-5 LLFP 核变换炉心概念③の I の核变换特性（第1層と第2層の LLFP 集合体を置換あり） ..	78
表 6.1-6 LLFP 核变换炉心概念④の I の核变换特性 .....	79
表 6.1-7 LLFP 核变换炉心概念④' の I の核变换特性 .....	79
表 6.1-8 LLFP 核变换炉心概念④の核变换特性の整理 .....	80
表 6.1-9 LLFP 核变换炉心概念④の核变换特性に対する集合体回転の効果 .....	81

表 6.2-1 各炉型の LLFP 核変換変換特性の比較（非均質係数見直し後） .....	82
表 6.2-2 検討条件・結果のまとめ .....	83
表 6.2-3 FS における LLFP 核変換検討の流れ .....	84
表 6.3-1 変換特性に関わる各炉型の仕様 .....	85

## 図リスト

図 2.1-1 LLFP 集合体構成の例.....	14
図 2.2-1 冷却材温度計算方法の概念図 .....	14
図 2.3-1 LLFP 集合体の仕様選定の流れ図（その 1） .....	16
図 2.3-1 LLFP 集合体の仕様選定の流れ図（その 2） .....	17
図 3.1.1-1 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の炉心構成 .....	25
図 3.1.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	26
図 3.1.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	26
図 3.2.1-1 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の炉心構成 .....	33
図 3.2.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	34
図 3.2.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	34
図 3.3.1-1 大型金属燃料 Na 冷却炉の炉心構成 .....	41
図 3.3.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	42
図 3.3.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	42
図 4.1.1-1 Pb-Bi 強制循環冷却炉の炉心構成.....	49
図 4.1.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	50
図 4.1.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	50
図 4.2.1-1 自然循環 Pb-Bi 冷却炉の炉心構成 .....	58
図 4.2.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	59
図 4.2.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係.....	59
図 5.1-1 横方向流 He ガス冷却炉の炉心構成 .....	68
図 5.2-1 YI <sub>3</sub> 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係 .....	69
図 5.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係 .....	69
図 6.2-1 LLFP 集合体を装荷した大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉心の配置図.....	86
図 6.2-2 LLFP 集合体を装荷した中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉心の配置図.....	87
図 6.2-3 LLFP 集合体を装荷した大型金属燃料 Na 冷却炉心の配置図.....	88
図 6.2-4 LLFP 集合体を装荷した強制循環 Pb-Bi 冷却炉心の配置図.....	89
図 6.2-5 LLFP 集合体を装荷した自然循環 Pb-Bi 冷却炉心の配置図.....	90
図 6.2-6 LLFP 集合体を装荷した横方向流 He ガス冷却炉心の配置図.....	91
図 6.3-1 取り出し核変換率の炉型間比較 .....	92

## 1 はじめに

実用化戦略調査研究では、FP の半減期、生成量、処分後の地中での移行性等の観点から I、Tc、Cs の 3 元素を核変換対象元素に選定して、LLFP 核変換技術の検討を開始した。

1999～2000 年度のフェーズ I では、Na 冷却 MOX 燃料大型炉を用いた LLFP 核変換の基礎的検討を行い、<sup>129</sup>I、<sup>99</sup>Tc については減速材の利用により効率的な核変換が核的に可能であること、<sup>135</sup>Cs については有意な核変換は容易でないこと、またマルチサイクル核変換時の廃棄物量を低減するには、核変換率を高めることが重要であること等の結果を得ている。

続くフェーズ II の初年度（2001 年度）にも Cs 変換の可能性について継続検討を行ったが、炉外冷却で先行核（<sup>134</sup>Cs）を減衰させ変換効率を高める等の措置を施しても、<sup>135</sup>Cs の核変換は極めて困難であるとの見通しが得られた。よって、2002 年度以降は、核変換対象核種を I 及び Tc の 2 元素に絞り込み、核・熱・材料の観点から LLFP 装荷炉心の設計検討を行っている。

核変換率効率改善のためには Zr-H 減速材を用いることが有効であるが、この場合、水素の被覆管透過・減損が問題となるため、炉心流量区分の最適化や更なる出力分布平坦化、また特に Zr-H ピンに水素透過抑制策を施すことが必要であるとの結果を得ている。

さらに、MOX 燃料 Na 冷却炉の他、金属燃料 Na 冷却炉、Pb-Bi 冷却炉及び He ガス冷却炉の LLFP 核変換対応能力の評価や、LLFP 集合体の装荷位置の違い（炉内または炉外）による利害得失を検討し、実用化戦略調査研究で検討している複数炉型の LLFP 核変換特性評価を進めている。

本研究では、これまでの検討結果を踏まえて、炉心特性への影響の小さい炉心周辺領域へ LLFP を装荷することを想定し、LLFP の変換/生成比を 1 以上とする条件の下、取り出し核変換率約 30% の達成を目標として、1) 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉心、2) 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉心、3) 大型金属燃料 Na 冷却炉心、4) 強制循環 Pb-Bi 冷却炉心、5) 自然循環 Pb-Bi 冷却炉心、及び 6) 横方向流 He ガス冷却炉の 6 炉型について核変換特性評価を行った。LLFP 集合体の仕様設定や健全性評価においては、LLFP ピン内圧、LLFP 集合体への必要流量、集合体間温度差等、具体的な設計条件を設定し、核・熱・材料の総合的視点からの検討とした。

## 2 前提条件の整理

### 2.1 核特性評価に関する前提条件

核特性評価に関する評価方法及び条件を以下に整理した。今回、評価の対象とした炉心は以下の 6 種類である。

- ① 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉
- ② 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉
- ③ 大型金属燃料 Na 冷却炉
- ④ Pb-Bi 強制循環冷却炉
- ⑤ Pb-Bi 自然循環冷却炉
- ⑥ 横方向流 He ガス冷却炉

炉心核特性評価は 2 次元 7 群 RZ 拡散燃焼計算に基づいて行った。LLFP 集合体は Tc 及び I 集合体共に炉外（径方向ブランケットあるいは遮蔽体位置）に装荷することを想定した。

群定数セットとしては、JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を用い、1 次元拡散燃焼計算により 7 群に縮約した。また、物質の取り扱いは LLFP 集合体を含めて、すべて、集合体平均の均質組成とした。ここで LLFP の同位体組成は、I について  $^{129}\text{I}$  が 73.4%、 $^{127}\text{I}$  が 26.6%、Tc については  $^{99}\text{Tc}$  が 100%である。

核変換量は、平衡サイクル初期及び末期での  $^{99}\text{Tc}$  及び  $^{129}\text{I}$  の原子数密度の差から求めた。ここで、LLFP 集合体の非均質性やエネルギー群数等に関する計算モデル上の補正として、非均質効果の補正因子 0.95 を暫定（I 及び Tc に共通）して 2003 年度中の評価作業を進め、2003 年度末時点でモンテカルロ計算から得られた非均質補正因子に見直し、本報告をまとめた。

$^{99}\text{Tc}$  及び  $^{129}\text{I}$  の炉心での生成量は、全核分裂数と  $^{239}\text{Pu}$  の収率から求めた。ここで、生成した LLFP が燃料中で中性子捕獲反応を起こして減少する反応チェーンを考慮した。

以上により算出される LLFP 核種の核変換量 ( $M_t$ ) と生成量 ( $M_p$ ) から、原子炉一基で何基分の LLFP を変換できるかを示す「サポートファクター」(SF : Support Factor) を定義した。

$$\text{サポートファクター} = \frac{M_t}{M_p}$$

核変換特性のサーベイ計算の結果、Tc 集合体を炉心周辺位置の第 1 層及び 2 層に装荷した場合、内側の第 1 層で中性子が遮蔽され、第 2 層での核変換率は 1 割程度と小さくなることがわかった。すなわち、Tc の第 2 層への装荷は取出変換率を大幅に悪化させることとなり、核変換量への寄与も小さい。従って、Tc に関しては、第 1 層のみへの装荷を想定することとした。また、I 集合体は Tc 集合体の後ろに装荷した場合の核変換率の低下を避けるため、第 1 層と 2 層に一対で装荷されることを仮定した。従って、Tc 集合体数を  $N_{Tc}$ 、I 集合体数を  $N_I$  とすれば、LLFP 集合体装荷体数は以下のようになる。

$$\left( N_{Tc} + \frac{N_I}{2} \right) \leq \text{径方向ブランケット (あるいは遮蔽体) の第 1 層の集合体数}$$

LLFP 集合体の熱流動特性評価用のデータとして、集合体内発熱分布と I の核変換に伴う Xe ガスの放出量を評価した。Xe 放出量は I の核変換量から評価し、<sup>129</sup>I の付随核種である <sup>127</sup>I の核変換率は、MOX 燃料 Na 冷却高速炉や PWR のスペクトル下での <sup>127</sup>I と <sup>129</sup>I の捕獲断面積比に基づき、<sup>129</sup>I 変換率の 1.5 倍であるとして考慮した。

集合体内発熱分布については、昨年度に実施した MCNP による中性子-γ 線カップリング計算の結果を基に、物質量（質量）及び 2 次元 RZ 拡散燃焼計算で得られた全中性子束に比例するものとして評価した<sup>[1]</sup>。LLFP の発熱は核変換時の中性子吸収反応に起因しているため、2 次元拡散計算で得られた吸収反応率から評価した。

LLFP 化合物としては、昨年度までの検討と同様に、材料的成立性や設計検討に必要な物性値の整備状況を判断材料に、CuI、Tc（金属）を想定し、核変換率を改善するための中性子減速材には、高性能遮蔽体としても開発が行われている Zr-H を暫定して用いることとした。LLFP 集合体は、ステンレス鋼製の被覆管に FP を内封した FP ピンと、減速材である Zr-H ピンをラッパ管内に混合配置して、LLFP 集合体を構成した（図 2.1-1）。また CuI ピンと Tc ピンは同じ LLFP 集合体に混載せず、別々の集合体に組み込むものとした。

尚、ガス炉については、冷却材温度が高いために、より融点の高いヨウ素化合物として YI<sub>3</sub>、減速材として YH<sub>1.8</sub>、被覆管には SiC を暫定した。

ここで、YI<sub>3</sub> は核変換用材料として JNC で検討中の候補化合物の中で最も融点が高く、冷却材温度の高いガス炉に適すことから選定した。805°C 位で Ni と共に晶反応を起こすが、被覆管に SiC を想定しており問題なく、また二次放射化生成物生成が無い。Y はコストが高いが、リサイクルすることが前提なので大きな問題にならないと考えられる。

減速材として選定した  $\text{YH}_{1.8}$  は、1000°C 程度の高温まで  $\alpha + \delta$  相の混合された状態であり、水素解離圧は 750°C で 0.1mmHg と Zr-H に比べ 3 衍以上低い。熱伝導率は 400-700°C の範囲で約 25W/m/K と Zr-H の 1.5 倍程度である。

ヨウ素化合物として Y-I、減速材として Y-II 系の組み合わせが利用可能となれば、Y が減速材及びヨウ素化合物に共通の付随リサイクル元素となり、リサイクル上も有利となる可能性がある。

LLFP 核変換炉心の成立性を判断するための、LLFP 核変換特性を含む核特性に対する設計条件として、本検討では以下を設定した。

サポートファクター :	1.0 以上 (自己生成分核変換炉心)
増殖比 :	1.03 以上
高速中性子照射量 :	$5.0 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 以下
最長照射期間 :	60 年 (プラント寿命期間を想定)
取出変換率 :	30%
非均質効果補正因子 :	サーベイ検討時暫定値として 0.95 (I 及び Tc に共通)。 最終結果は下記のモンテカルロ計算値で整理。 I について 1.0 Tc について 0.93

ここで、取出変換率は後述する LLFP 集合体の健全性の観点から制限されるものであり、目標値として設定したものである。

## 2. 2 热流動評価に関する前提条件

検討対象とした各炉心に関して、LLFP 集合体のターゲット要素 (Tc, CuI 及び YI<sub>3</sub>) 及び減速材要素 (Zr-H, Y-H) の熱的成立性あるいは機能確保について、評価する前提条件を以下に示す。

### 2. 2. 1 热的特性評価の前提条件

#### (1) Na 冷却炉の温度評価

Na 冷却炉に装荷する LLFP 集合体の各要素の温度評価は下記の要領で行った。

- ・集合体内の冷却材温度上昇は図 2. 2-1 に示すように発熱量の異なる 3 本の要素に囲まれた流路（サブチャンネル）に着目し、この流路を形成する各要素からの最大入熱量のケースを対象に冷却材温度上昇を保守側に評価した。
- ・サブチャンネル内の流量  $W_s$  は集合体内の周辺流れ効果を考慮して下式より求めた。Na 冷却炉では、周辺流れ効果係数は 1.10 とした。

$$W_s = \frac{W_t}{f_w \cdot 2 \cdot N} \quad (2. 2. 1-1)$$

$W_t$  : 集合体全流量  
 $f_w$  : 周辺流れ効果係数 ( $f_w=1.10$  を想定)  
 $N$  : 集合体構成要素数

- ・被覆管外面の液膜熱伝達率モデルは以下を適用した。

$$h_{film}^{Na} = \frac{K}{D_e} Nu \quad (2. 2. 1-2)$$

$$Nu = 7.0 + 0.025 \cdot (Pr \cdot Re)^{0.8}$$

$h_{film}^{Na}$  : 被覆管外面液膜熱伝達率 [W/cm<sup>2</sup>. K]  
 $K$  : ナトリウム熱伝導度 [W/cm. K]  
 $D_e$  : 水力等価直径 [cm]  
 $Pr$  : プラントル数  
 $Re$  : レイノルズ数

- ・ギャップ熱伝達率は下式で評価した。

$$h_{gap} = \frac{K_{bond}}{\delta_{gap}} \quad (2.2.1-3)$$

$h_{gap}$  : ギャップ熱伝達率 [W/cm<sup>2</sup>.K]

$K_{bond}$  : ボンド材熱伝導度 [W/cm.K]

$\delta_{gap}$  : ギャップ寸法 (製造時寸法) [cm]

ここで、Na ボンドの場合は、ボンド材熱伝導度に Na の熱伝導度を、He ボンドの場合は He ガスの熱伝導度を適用した。また、ヨウ素化合物に関しては変換された Xe の混合効果を考慮して He ガス熱伝導度の 1/10 を適用した。

- ターゲット材 (CuI、Tc) 及び減速材 (Zr-H) の熱伝導度は以下を適用した。

CuI 热伝導度 :

$$K_{CuI} = 0.65 \quad [\text{W/m.K}]$$

Tc 热伝導度 :

$$K_{Tc} = 50.146 + 8.975 \times 10^{-3} \cdot Tc + 3.485 \times 10^{-6} \cdot Tc^2 \quad [\text{W/m.K}]$$

Tc : 温度 [°C]

Zr-H 热伝導度 :

$$K_{ZrH} = 19.0 \quad [\text{W/m.K}]$$

- ターゲット材及び減速材は全てペレット形態を想定した。低スミア密度の仕様となるヨウ素化合物の場合はペレット気孔率 20%と暫定し、熱伝導度の気孔率依存性に関して下式を適用した。

$$K = K_{100} \cdot \frac{(1-P)}{(1+P)}$$

(2.2.1-4)

$K_{100}$  : 理論密度比 1 の場合の熱伝導度

P : 気孔率

- 熱的制限値はそれぞれ以下の値とした。

Tc 2170°C

CuI 605°C

Zr-H 900°C (相安定性の確保)

被覆管最高温度                  700°C

炉心上部構造物の熱的疲労損傷を防止する観点から、隣接集合体間の出口温度差を抑える必要がある。本検討では、下記に示す簡易評価式により集合体出口温度を評価し、隣接集合体の出口温度を原子炉出口温度で代表して、LLFP 集合体出口温度との差を評価した。

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q_{LLFP}}{C_p \cdot W} \quad (2.2.1-5)$$

$T_{in}$  : 集合体入口温度

$Q_{LLFP}$  : LLFP 集合体発热量

$C_p$  : ナトリウム定圧比熱

$W$  : 冷却材流量

Na 冷却炉では隣接集合体の冷却材出口温度を 550°C と仮定した。また、隣接集合体との温度差制限値は、炉心領域における制御棒集合体の制限を参考に 120°C を暫定した。

## (2) Pb-Bi 冷却炉の温度評価の前提条件

Pb-Bi 冷却炉に装荷する LLFP 集合体内各要素の温度評価は下記の前提で行った。

- ・発熱量の異なる要素が混在する集合体内の冷却材温度上昇は、(1)項の Na 冷却炉の評価と同様に 3 本の要素に囲まれた流路（サブチャンネル）に着目し、この流路を形成する各要素からの入熱を考慮して保守側に評価した。
- ・周辺流れ効果係数は、FS で検討中の Pb-Bi 冷却炉心燃料で設定された 1.05 を適用した。
- ・被覆管外面熱伝達率モデルは下式を適用した。

$$h_{film}^{Pb-Bi} = \frac{K}{D_e} Nu \quad (2.2.1-6)$$

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

$h_{film}^{Pb-Bi}$  : 被覆管外面熱伝達率 [W/cm<sup>2</sup>. K]

K : Pb-Bi 热伝導度 [W/cm·k]

D<sub>e</sub> : 水力等価直径 [cm]

Pe : ペクレ数 [-]

Pr : プラントル数 [-]

- ・ギャップ熱伝達率は前述の式 2.2.1-3 で評価した。なお、Pb-Bi ボンド材の場合、ボンド材熱伝導度は Pb-Bi の熱伝導度を適用した。
- ・ターゲット材 (CuI、Tc) 及び減速材 (Zr-H) の熱伝導度は Na 冷却炉と同じ値を適用した。
- ・被覆管温度評価に際しては、工学的安全係数 1.25 を適用した。
- ・被覆管制限温度は腐食減肉を抑制する観点から 650°Cとした。それ以外の熱的制限値は Na 冷却炉と同じ値である。
- ・隣接集合体間の出口温度差は Na 冷却炉の制限値を参考に 120°Cと暫定して評価した。

### (3) ヘリウムガス冷却炉の温度評価の前提条件

ヘリウムガス冷却炉に装荷する LLFP 集合体要素の温度評価は下記の前提条件で行った。

- ・発熱量の異なる要素が混在する集合体内の冷却材温度上昇は、Na 冷却炉の評価と同様に 3 本の要素に囲まれた流路（サブチャンネル）に着目し、この流路を形成する各要素からの入熱を考慮して評価した。
- ・気体冷却材への熱伝達特性を高めるためリップ付被覆管を想定した。リップ付被覆管を採用するため要素束の構成はグリッドで行うものとした。
- ・周辺流れ効果係数は、グリッド型集合体を想定した Pb-Bi 冷却炉心燃料で設定された 1.05 を適用した。
- ・リップ付被覆管の外表面熱伝達率は粗面管に対する以下の式を適用した<sup>[2]</sup>。なお、ヘリウムガスの熱物性は系統圧である 6MPa での値を適用した。

$$h_{film}^{He} = \left( \frac{K_{He}}{De} \right) \cdot Nu \quad (2.2.1-7)$$

$$Nu = St \cdot Re \cdot Pr$$

$$St = \frac{\xi/8}{1 + \sqrt{\xi/8 \cdot [4.5 \cdot (h^+)^{0.28} Pr^{0.57} - 0.95(p/h)^{0.53}]}}$$

$$(2.2.1-8)$$

$$\sqrt{\frac{8}{\xi}} = 2.5 \cdot \ln \left( \frac{De}{2 \cdot h} \right) - 3.75 + 0.95 \left( \frac{p}{h} \right)^{0.53} \quad (2.2.1-9)$$

$$h^+ = \left( \frac{h}{De} \right) \cdot Re \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \quad (2.2.1-10)$$

$h_{film}^{He}$  : 膜熱伝達率 [W/cm<sup>2</sup>.K].

$K_{He}$  : ヘリウムガス熱伝導度 [W/cm.K]

$h$  : リブ高さ [cm]

$p$  : リブピッチ [cm]

$De$  : 流力等価直径 [cm]

$Re$  : レイノルズ数 [-]

$Pr$  : プラントル数 [-]

$St$  : スタントン数

$h^+$  : ラフネスレイノルズ数 [-]

- リブの寸法仕様は以下を想定した。

リブ高さ 0.5 mm

リブピッチ 10.0 mm

リブ幅 0.5 mm

- 要素内部のギャップ熱伝達率は前掲の式 2.2.1-3 で評価した。ヘリウムガス炉の場合、ターゲット要素及び減速材要素のギャップ部のボンド材は He ガスを想定した。

- ターゲット材及び減速材の熱伝導度は以下を適用した。

○ Tc 热伝導度 :

$$K_{Tc} = 50.146 + 8.975 \times 10^{-3} \cdot Tc + 3.485 \times 10^{-6} \cdot Tc^2 \quad [W/m.K]$$

Tc : 温度 [°C]

○ YI<sub>3</sub> 热伝導度 :

$$K_{YI_3} = 0.5 \quad [W/m.K]$$

○ Y-H<sub>1.8</sub> 热伝導度 :

$$K_{Y-H} = 29.0 \quad [W/m.K]$$

- ・SiC被覆管の熱伝導度は以下を適用した。

○ SiC熱伝導度 :

$$K_{SiC} = 78 \quad [W/m.K]$$

- ・被覆管温度評価時の工学的安全係数は、米国GA社のGCFR設計時に検討された以下の値を暫定した。

$\Delta T_{cool}$ に対し 1.289

$\Delta T_{film}$ に対し 1.145

- ・各部の制限温度は以下とした。

SiC被覆管 : 2200°C

Tc : 2170°C

YI<sub>3</sub> : 997°C

Y-H : 相安定性の観点から 1000°C

原子炉構造上、炉心直上に構造物を持たないガス炉では、炉心上部構造物の熱的疲労損傷を防止するための制限は必要ないが、炉心領域に隣接した集合体の機械的健全性を確保する観点から、本検討では隣接集合体間との出口温度差制限を、Na冷却炉の制限値を参考に、150°Cに暫定した。集合体出口温度は前掲の式2.2.1-5により簡易的に評価し、隣接集合体の出口温度を原子炉出口温度で代表して、LLFP集合体出口温度との差を評価した。

## 2.2.2 減速材要素水素透過評価の前提条件

### (1) Na冷却炉の減速材要素水素透過評価

減速材要素からの水素透過に関しては、下記の前提の下で評価した。

- ・減速材要素を軸方向に10メッシュ分割し、各軸領域毎に水素の解離と被覆管からの透過を評価した。なお、Zr-Hペレットスタック軸長と被覆管の軸長は各領域で等しいとし、ガスプレナム部からの水素透過は考慮していない。
- ・Zr-Hから解離した水素はナトリウムボンド中に溶解し、ボンド材中の軸方向への移動はないものとして、被覆管からの水素透過量を評価した。
- ・減速材(Zr-H)のペレット温度は2.2.1項で評価したペレット中心温度を、被覆管は肉厚中心温度(ホットスポット値)を適用した。また、温度は炉内滞在期間を通じて一定を想定した。
- ・水素透過係数は、現段階で達成見通しのある水素透過抑制策(被覆管内面コーティング等)を考慮に入れ、オーステナイト系ステンレス鋼の透過係数の1/10を想定した。
- ・被覆管外面のナトリウム腐食による被覆管肉厚の減少を考慮した。
- ・水素減損割合の制限値(下限)は、照射期間を通じて安定なδ相を維持するた

め、H/Zr 比 1.53 とした。

### (2) Pb-Bi 冷却炉の減速材要素水素透過評価

Pb-Bi 冷却炉における減速材要素からの水素透過に関しては、下記の条件で評価した。

- ・評価体系は前述の Na 冷却炉の場合と同じである。ガスプレナム部からの水素透過も考慮していない。
- ・減速材 (Zr-H) のペレット平均温度は前項で評価したペレット中心温度を、被覆管には肉厚中心温度 (ホットスポット値) を適用した。また、温度は炉内滞在期間を通じて一定を想定した。
- ・水素透過係数はナトリウム炉での扱いと同様に、現段階で達成見通しのある水素透過抑制策 (被覆管内面コーティング等) を考慮に入れ、オーステナイト系ステンレス鋼の透過係数の 1/10 を想定した。
- ・被覆管の肉厚は Pb-Bi 冷却固有の以下の外面腐食により減少するとして評価した。

$$\delta_{corr.} = C_{pb} \cdot t^{1/2} \quad (2.2.2-1)$$

$$C_{pb} = 1.144 \times 10^5 \cdot \exp\left(\frac{-11160}{Tk}\right)$$

$\delta_{corr.}$  : 被覆管外面腐食量 [μm]

t : 時間 [hr]

Tk : 被覆管外面温度 [K]

### (3) ヘリウムガス冷却炉の減速材要素水素透過評価

炉内滞在期間中の減速材 (水素化イットリウム Y-H<sub>1.8</sub>) からの水素透過減損については下記の前提条件で評価した。

- ・Y-H の水素解離圧は水素重量割合 1.8 における 900°C の値 200mmHg を想定した。また、解離圧は水素重量割合の減少と共に低下傾向を示すが、本検討では 200mmHg 一定を想定した。
- ・SiC に関する水素透過率は、現状詳細は不明であるがステンレス鋼に比べ 5 衍程度低いとされていることから、本検討ではオーステナイト系ステンレス鋼の透過係数に  $1 \times 10^{-5}$  を乗じて評価した。
- ・被覆管の軸長は Y-H<sub>1.8</sub> スタック軸長と等しいとした。即ち、ガスプレナムからの水素透過は考慮しないものとした。
- ・減速材のペレット平均温度は 2.2.1 項の条件で評価したペレット中心温度を、被覆管は肉厚中心温度 (ホットスポット値) を適用した。また、各温度は炉内

滞在期間中一定と想定した。

### 2.2.3 被覆管機械的健全性評価の前提条件

ターゲット要素のうち、核変換に伴い Xe ガスが生成されピン内圧が上昇するヨウ素化合物を対象に、下記の条件により内圧評価を行った。

#### (1) Na 冷却炉の被覆管機械的健全性評価

- ・被覆管温度は 2.2.1 項の条件で評価した被覆管肉厚中心温度（ホットスポット値）を適用し、炉内滞在期間中一定であると想定した。
- ・生成された Xe ガスはガスプレナム部へ 100% 放出されるものとした。
- ・被覆管外面腐食を考慮した。
- ・内圧制限値は 11.8MPa (120atm) とした。

#### (2) Pb-Bi 冷却炉の被覆管機械的健全性評価

- ・被覆管温度は前項の被覆管肉厚中心温度（ホットスポット値）を適用し、炉内滞在期間中一定を想定した。
- ・式 2.2.2-1 に示す被覆管外面腐食を考慮した。
- ・生成された Xe ガスはガスプレナム部へ 100% 放出されるものとした。
- ・内圧制限値は 11.8MPa (120atm) とした。

#### (3) ヘリウムガス冷却炉の被覆管機械的健全性評価

- ・被覆管温度は 2.2.1 項の条件で評価した被覆管肉厚中心温度を適用し、炉内滞在中一定を想定した。
- ・生成された Xe ガスはガスプレナム部へ 100% 放出されるものとした。
- ・炉内滞在期間中に要素の内圧が系統圧（外圧支配）を上回らないこととし 5.9MPa (60atm) を内圧制限値とした。

### 2.2.4 制限条件

熱流動評価に適用した制限値を表 2.2-1 にまとめて示す。

表 2.2-1 热流动设计制限値の一覧

項目		ナトリウム 冷却炉	Pb-Bi 冷却炉	ヘリウムガス 冷却炉	備考	
温度 制限	ターゲット材	T <sub>c</sub>	2170°C		融点	
		CuI	605°C		融点	
		YI <sub>3</sub>	—	997°C	融点	
	減速材	ZrH <sub>1.65</sub>	900°C	—	相安定性の観点から制限	
		YH <sub>1.8</sub>	—	1000°C	相安定性の観点から制限	
	被覆管材	ODS フェライト銅	700°C	650°C	内圧クリープ破損防止の観点から制限	
		SiC	—	2500°C	SiC分解温度	
隣接集合体出口温度差制限		120°C	120°C	150°C		
水素減損制限		H/Zr=1.53		H/Y=1.67		
要素内圧制限		11.8MPa(120atm)		5.9MPa(60atm)		

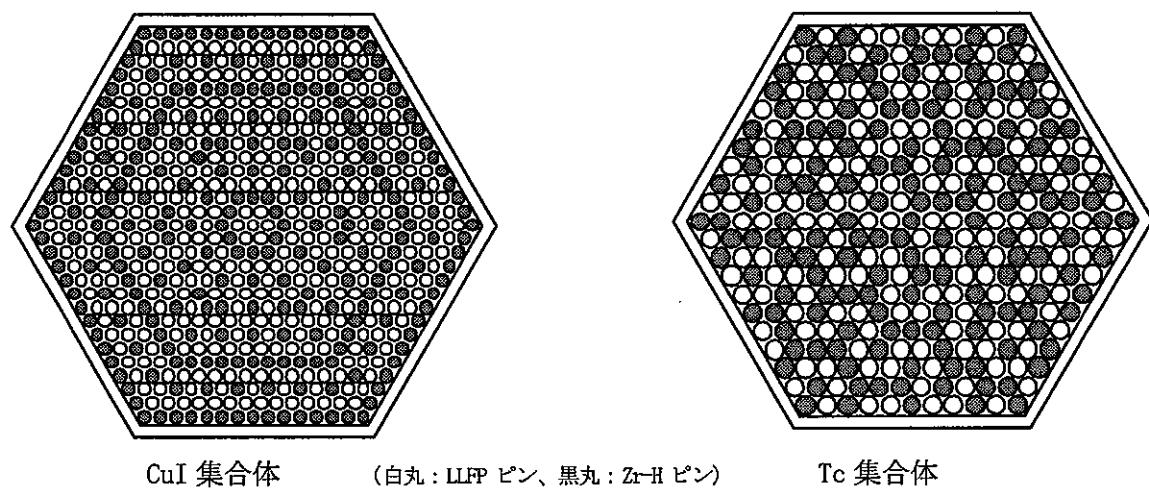


図 2.1-1 LLFP 集合体構成の例

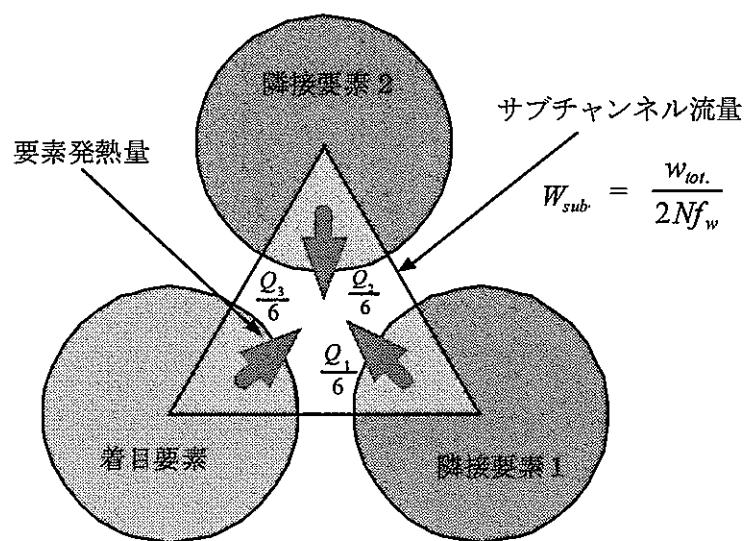


図 2.2-1 冷却材温度計算方法の概念図

## 2.3 LLFP 集合体仕様選定の考え方

LLFP 集合体の仕様選定の流れを図 2.3-1 にまとめた。今年度の検討では、昨年度選定した LLFP 集合体仕様を出発点として、被覆管健全性の制約条件の設定（フープ応力、内圧制限）、取り出し変換率の向上、非均質係数の設定等に応じて、仕様や装荷体数の調整を行った<sup>[1]</sup>。流れ図にそって各概念の考え方を説明する。

### (1) LLFP 核変換炉心概念①

昨年度の検討で選定した LLFP 集合体仕様をベースとしたケースである。炉型間で仕様がほぼ共通しているため、相互比較の観点で利用できる。炉型によっては、サポートファクター1.0 を満たしていない場合もある。

### (2) LLFP 核変換炉心概念②

サポートファクター1.0、取出変換率30%となるよう LLFP 集合体仕様を見直したケース。I 集合体については、その健全性判断の条件の一つとして、過渡時の被覆管温度に対応するフープ応力の制限を暫定して考慮している。

### (3) LLFP 核変換炉心概念③

I 集合体について、LLFP 集合体の仕様は炉心概念②と同じとし、LLFP ピン健全性の判断条件をピン内圧制限とし、炉内滞在期間を短縮して取出変換率を抑えることにより、内圧制限を満足させたケースである。

Tc 集合体については、炉心概念②と同じである。

### (4) LLFP 核変換炉心概念④

I 集合体について、内圧制限下で取出変換率を向上させるため、I 化合物のスミア密度を調整したものである。

Tc 集合体については、炉心概念②と同じである。

### (5) LLFP 核変換炉心概念④'

I 集合体について、内圧制限下で取出変換率を向上させるため、I 化合物のスタッフ長を調整したものである。

Tc 集合体については、炉心概念②と同じである。

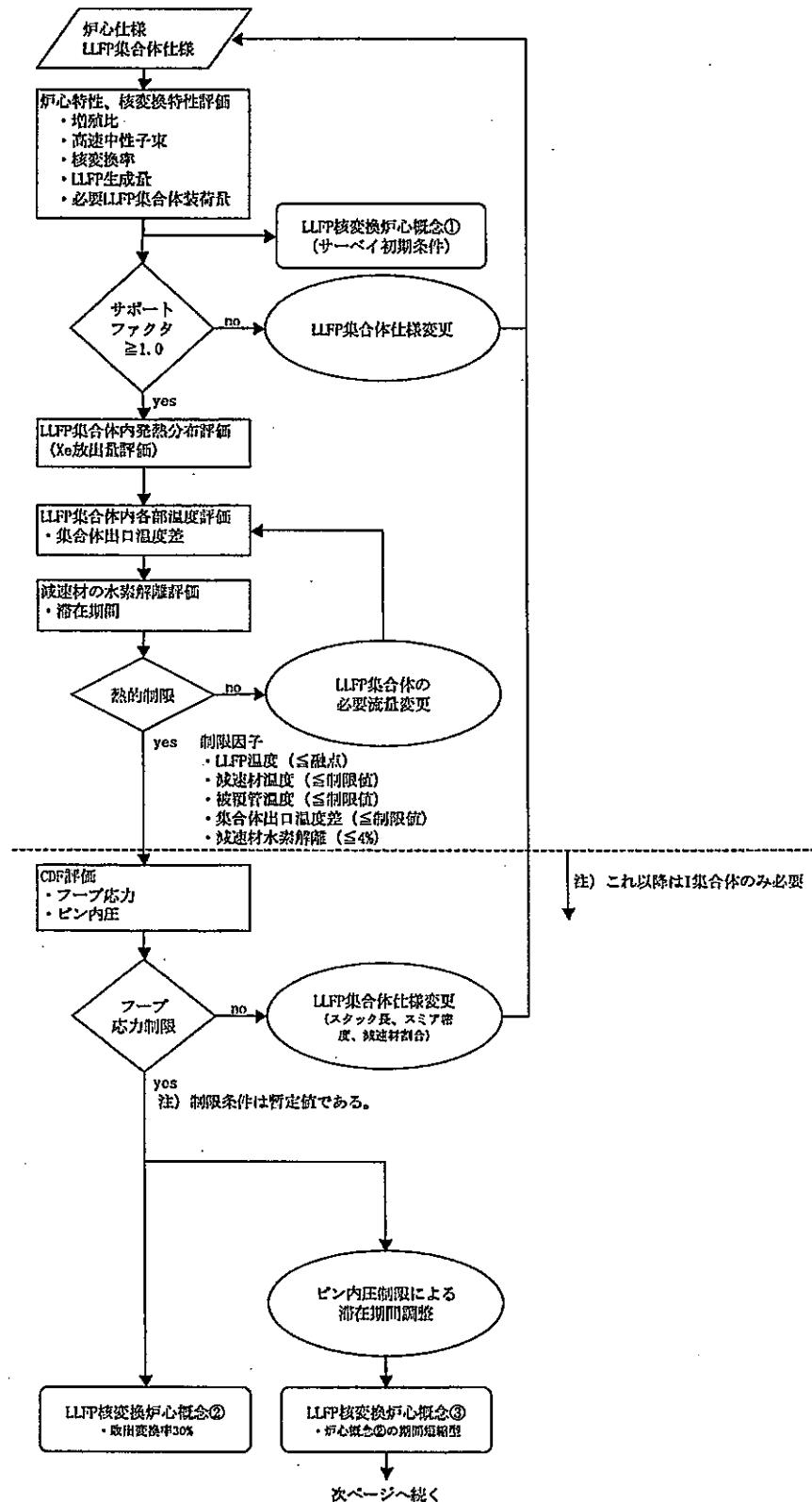


図 2.3-1 LLFP 集合体の仕様選定の流れ図（その 1）

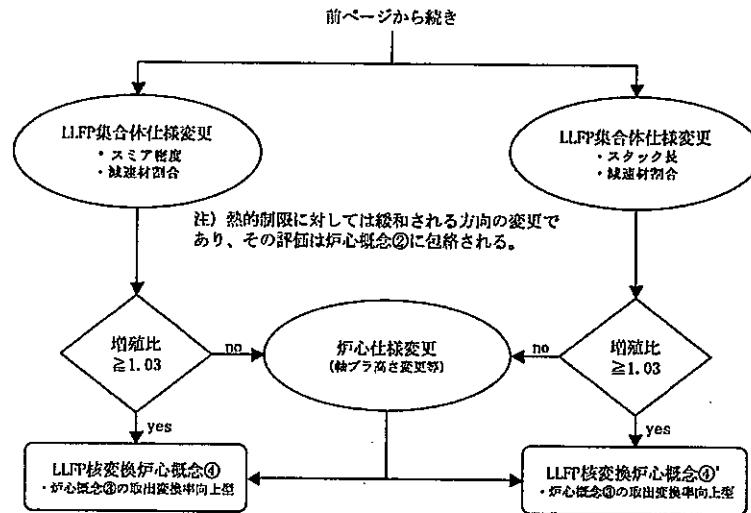


図 2.3-1 LLFP 集合体の仕様選定の流れ図 (その 2)

### 3 Na 冷却炉

#### 3.1 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉

##### 3.1.1 基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様

Na 冷却 MOX 燃料大型炉（3570MWt/1500MWe）を基準炉心として、径方向ブランケット集合体を LLFP 集合体に置き換えた LLFP 装荷炉心を設定し、その核変換特性、炉心特性及び LLFP 集合体の熱流動特性を評価した。表 3.1.1-1 に基準炉心の基本仕様及び主要核特性を、図 3.1.1-1 に炉心構成を示す。

LLFP 集合体の仕様設定に当たっては、減速材割合（減速材ピン本数/全ピン本数）、LLFP スミア密度、LLFP 体積比、LLFP スタック長等を設計パラメータとして、熱的成立性やサポートファクター（「変換量/生成量」の比）1.0 以上達成に配慮して検討した。

表 3.1.1-2 に LLFP 集合体の最終仕様を示す。CuI 集合体は、CuI の溶融防止の観点から線出力を低く抑える必要があるため、CuI ピン外径を 5.5mm とした細径ピンを用い、ピン本数は 631 本である。CuI スタック長は、必要な変換量を得るために、及び内圧上昇抑制のためのプレナム確保のために炉心部(80cm) + 上部軸ブランケット部(30cm) の計 110cm とした。

Tc 集合体のピン径、ピンピッチ等の仕様は燃料集合体と同一とし、ピン本数は 331 本である。Tc スタック長は必要な核変換量を得るために、炉心部(80cm) + 上部軸ブランケット部(30cm) + 下部軸ブランケット部(40cm) の計 150cm とした。

CuI 集合体及び Tc 集合体の Zr-H ピン数比率は、核変換率・量の観点から、それぞれ 20%、48% と設定した。

### 3.1.2 LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性

LLFP 集合体内の熱解析上着目した観点は、各被覆管の最高温度制限、LLFP や Zr-H 要素の溶融、水素透過制限、及び被覆管の機械的健全性である。

LLFP 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係を図 3.1.2-1 及び-2 に示す。図中に示す「設計比」は下記の各制限値との比を表すものである。

CuI 温度制限値	605°C
Tc 温度制限値	2170°C
Zr-H 温度制限値	900°C (相安定性の観点)
被覆管温度制限値	700°C
集合体出口温度差制限値	120°C (隣接集合体との出口温度差)
内圧制限値	11.8MPa(120atm)

CuI 集合体の総発熱量は 110kW であり、CuI の融点が制限因子となって下限流量が定まり、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。CuI 集合体滞在期間は、水素透過制限ではなく内圧制限により律則される。

Tc 集合体の総発熱量は 184kW であり、被覆管最高温度が下限流量を、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。熱的成立性の見込める上限流量の 4.2kg/sec を供給する場合、Tc 集合体の滞在可能期間は水素透過制限から 30 年となる結果を得た。

核変換特性の評価は 2 次元 7 群 RZ 拡散燃焼計算に基づいて行った。群定数セットとして JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を用い、1 次元拡散燃焼計算によって 7 群に縮約した。また、物質組成の取り扱いは、LLFP 集合体を含めて、全て集合体平均の均質組成とした。

表 2.1-311 に LLFP 集合体装荷炉心の主要な核特性（増殖比、高速中性子束等）の評価結果を示す。径方向プランケット集合体を LLFP 集合体に置換したため、増殖比は 1.03 となつたが、平衡期に必要な値をほぼ満足している。LLFP 集合体には減速材が含まれ、中性子スペクトルはやや軟化するため、ボイド反応度は僅かながら改善した。

### 3.1.3 LLFP 核変換特性

CuI 集合体の装荷体数や滞在期間は、内圧制限下でサポートファクターが 1.0 以上

となるよう調整した。CuI 集合体は、径方向ブランケット領域の第一層目装荷に加え、変換量確保の必要性に応じてその外側の第二層目に装荷し、CuI ピンの内圧抑制のため装荷期間中に第 1 層と第 2 層を置換するものとした。Tc 集合体については、Tc の中性子吸収によってその外側（第二層目）では効果的な核変換が期待できないため、第 1 層目のみに装荷するものとし、サポートファクターが 1.0 以上となるよう滞在期間を調整して取出変換率を算出した。

変換特性の評価結果を表 3.1.3-1 にまとめた。大型 MOX 燃料コンパクト型炉心では、70 体の CuI 集合体を 11 サイクル（約 17 年）装荷することにより取出変換率約 14% であり、目標の 30% に比べ低い値となった。Tc 集合体については 53 体、6 サイクル（約 9 年）装荷で変換率は約 21% を得た。

サポートファクターを 1.0 とするのに必要な原子炉熱出力当りの LLFP 装荷量は、<sup>129</sup>I で約 310kg/GWt、<sup>99</sup>Tc で約 1680kg/GWt である。

LLFP 集合体 1 体当たりの必要流量は CuI 集合体で 2.8kg/sec、Tc 集合体で 4.2kg/sec であり、炉心流量に占める全 LLFP 集合体の流量割合はそれぞれの集合体に対し 1.1%、1.2% と小さい。

表 3.1.1-1 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の炉心仕様／特性

項目	単位	仕様/特性
炉心		
原子炉熱出力	MWt	3570
1 次系冷却材流量	kg/s	$1.83 \times 10^4$
原子炉出/入口温度	°C	550/395
運転サイクル長さ	EPPM	18
燃料交換バッチ数	-	4
炉心燃料集合体数（内側炉心/外側炉心）	-	316/278
径方向ブランケット体数	-	198
制御棒本数（主/後備）	-	40/15
径方向遮へい体数 (SUS/ZrH)	-	108/114
炉心高さ	cm	80
軸方向ブランケット厚（上部/下部）	cm	30/40
ガスプレナム長さ（上部/下部）	cm	28.5/102
燃料集合体		
燃料材料	-	MOX
被覆管材料	-	ODS
ラッパ管材料	-	FMS
集合体配列ピッチ	cm	18.32
燃料ピン本数	-	271
燃料ピン外径 (d)	cm	0.88
燃料ピン配列ピッチ (P)	cm	1.012
P/d	-	1.150
被覆管肉厚	cm	0.052
体積比		
燃料	%	44.1
構造材	%	24.2
冷却材	%	31.7
燃料スマア密度	%	82
Pu 富化度*（内側炉心／外側炉心）	w/o	21.5 / 24.1
主要炉心特性		
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	14.8
増殖比	-	1.16
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/kk'$	3.2
$\bar{\nu} - \bar{\nu}$ 高速中性子束	$10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$	2.4
$\bar{\nu} - \bar{\nu}$ 高速中性子照射量	$10^{23} \text{n/cm}^2$	4.6

\* Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

(燃料組成：高速多重リサイクル TRU 組成 Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Cm244/245=1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/0.0)

表 3.1.1-2 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様

集合体		Tc 集合体		CuI 集合体			
充填材	材料	Tc	Zr-H	CuI	Zr-H		
	形態	ペレット					
	内径 [mm]	0.0					
	外径 [mm]	6.98	7.36	4.52	4.6		
	理論密度比 [-]	1.0		0.8	1.0		
	充填材スマア密度 [%]	80	90	70	90		
被覆管	材料	ODS 鋼					
	外径 [mm]	8.42		5.5			
	内径 [mm]	7.76		4.84			
	肉厚 [mm]	0.33					
要素	全長 [mm]	2905					
	直径ギャップ [mm]	0.078	0.40	0.32	0.24		
	ボンド材	He	Na	He	Na		
	充填材スタック高さ [mm]	1500		1100			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	1020 / 285		1420 / 285			
	初期封入ガス	He					
スペーサ	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1					
	形式	ワイヤ型					
	材料	PNC-FMS					
ラッパ管	ワイヤ直径 [mm]	0.7		1.06			
	材料	PNC-FMS					
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	179.2					
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	169.2					
集合体	ラッパ管肉厚 [mm]	5.0					
	バンドル規模 [本]	331		631			
	要素配列ピッチ [mm]	9.2		6.6			
	P/D	1.09		1.20			
集合体配列ピッチ [mm]		183.2					

表 3.1.2-1 LLFP 集合体を装荷した大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の主要な核特性

項目	単位	基準炉心	LLFP 核変換炉心
炉心			
原子炉熱出力	MWt	3570	3570
運転サイクル長さ	EPFM	18	18
燃料交換バッチ数	-	4	4
炉心燃料集合体数（内側/外側炉心）	-	316/278	316/278
径方向ブランケット体数	-	198	0
制御棒本数（主/後備）	-	40/15	40/15
径方向遮へい体数 (SUS/Zr-H)	-	108/114	167/114
LLFP (Tc) 集合体数（炉外）	-	-	53
LLFP (I) 集合体数（炉外）	-	-	86
炉心高さ	cm	80	80
軸方向ブランケット厚（上部/下部）	cm	30/40	30/40
Pu 富化度*（内側／外側炉心）	w/o	21.5/24.1	21.8/25.4
主要炉心特性			
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	14.8	15.1
増殖比	-	1.16	1.03
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/k'$	3.2	3.6
ビーグ高速中性子束	$10^{15} n/cm^2 \cdot s$	2.4	2.6
ビーグ高速中性子照射量	$10^{23} n/cm^2$	4.6	4.9
ナトリウムボイド反応度	\$	5.8	5.7
ドップラ係数	$10^{-3} Tdk/dT$	-4.7	-4.7

\* Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

表 3.1.3-1 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の LLFP 核変換特性

LLFP集合体		大型MOX燃料Na炉	
	I	Tc	
スミア密度	55%	80%	
減速材比	20%	48%	
LLFPスタック長(cm)	110	150	
ガスプレナム長(cm)(下部/上部)	142/28.5	—	
LLFP集合体数	70	53	
LLFP装荷量(kg)	1集合体	15.6	112.9
	全体	1093	5983
出力当たり	kg/GWt	306	1676
核変換率(%/cycle)	第1層	1.7%	0.8%
(非均質補正前の値)	第2層	0.6%	—
取出変換率		14%	21%
滞在期間	cycle	11	6
	year	16.5	9.0
サポートファクタ		1.00	1.00
LLFP集合体への必要流量(kg/sec/集合体)		2.8	4.2
炉心流量比率(%)		1.1	1.2

非均質補正係数 (I : 1.0、Tc : 0.93) を考慮して結果を整理

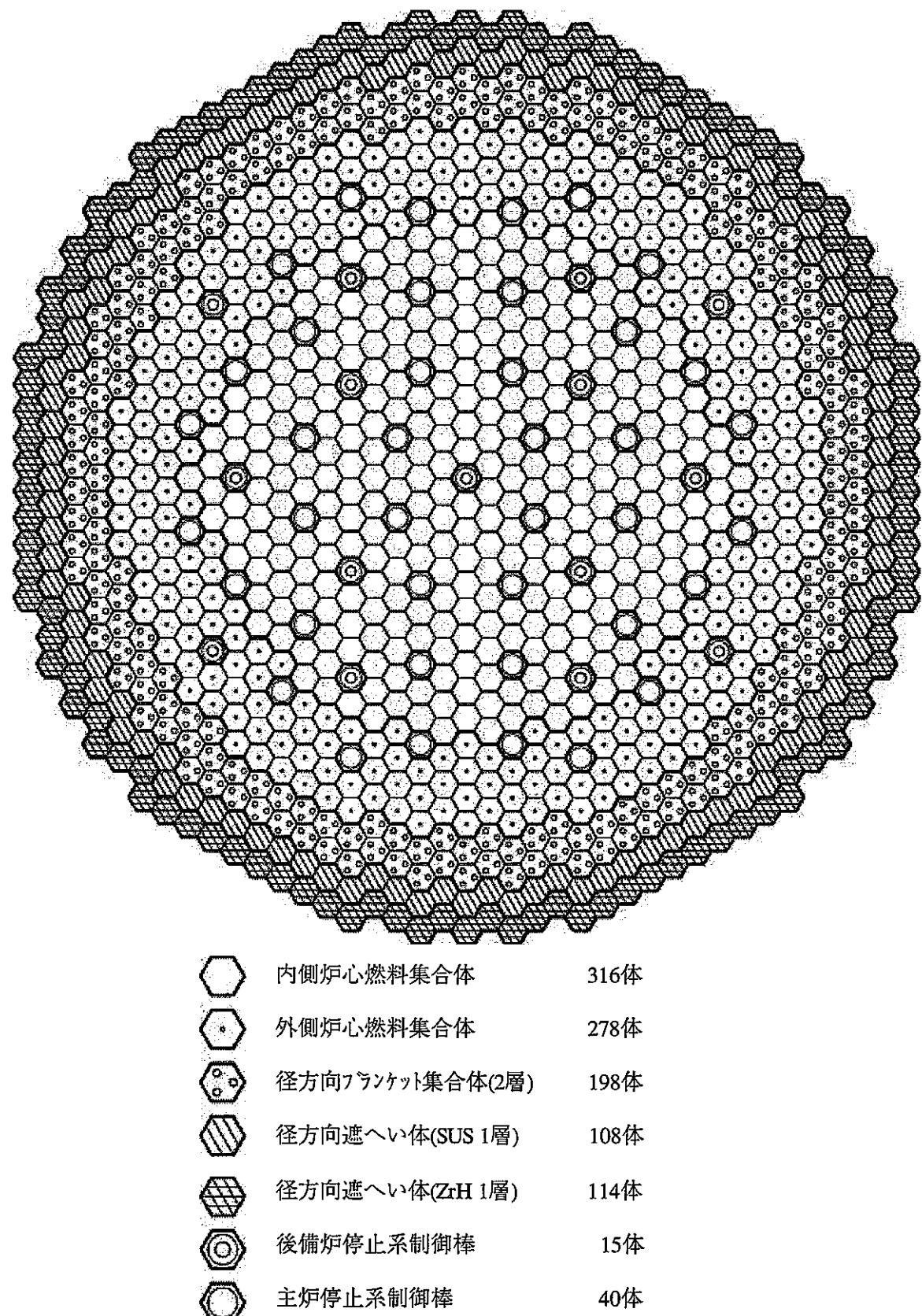


図 3.1.1-1 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉の炉心構成

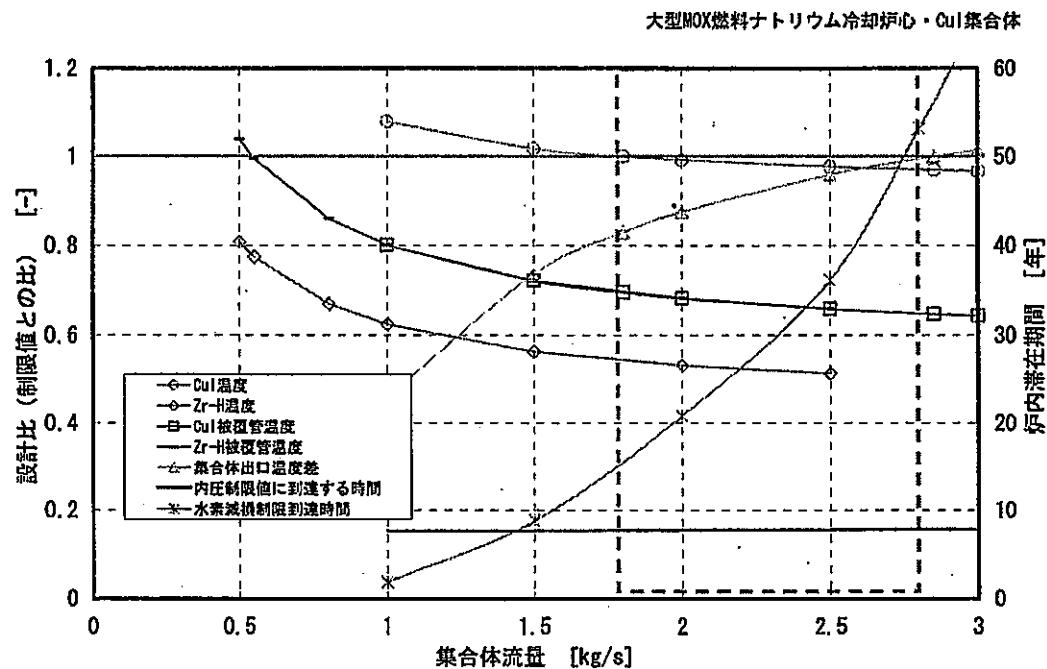


図 3.1.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

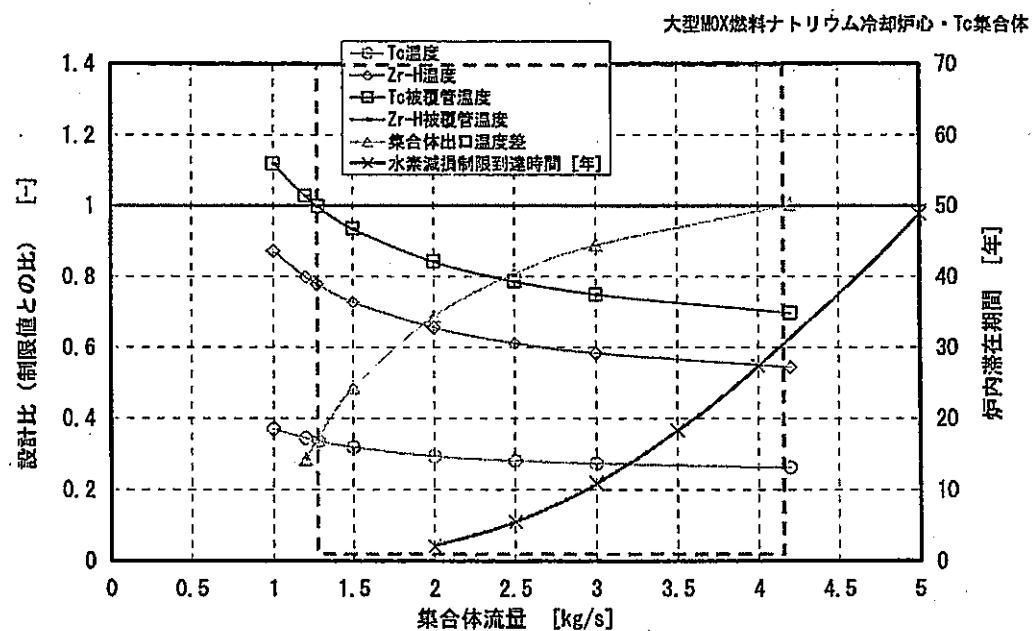


図 3.1.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

### 3.2 中型 MOX 燃料中型高内部転換型 Na 冷却炉

#### 3.2.1 基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様

中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉 (1785MWt/750MWe) を基準炉心として、径方向遮へい体を LLFP 集合体に置き換えた LLFP 装荷炉心を設定し、その核変換特性、炉心特性及び LLFP 集合体の熱流動特性を評価した。表 3.2.1-1 に基準炉心の基本仕様及び主要核特性を、図 3.2.1-1 に炉心構成を示す。

表 3.2-2 に LLFP 集合体の仕様を示す。CuI 集合体は、CuI の溶融防止の観点から線出力を低く抑える必要があるため、CuI ピン外径を 5.5mm とした細径ピンを用い、全ピン本数は 631 本である。Tc 集合体のピン径、ピンピッチ等の仕様は燃料集合体と同一とし、ピン本数は 217 本である。

CuI 集合体及び Tc 集合体の Zr-H ピン数比率は、核変換率・量の観点から、それぞれ 45%、50% と設定した。LLFP スタック長はいずれも炉心部高さと同じ 100cm とした。

#### 3.2.2 LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性

LLFP 集合体内の熱解析上着目した観点は、各被覆管の最高温度制限、LLFP や Zr-H 要素の溶融、水素透過制限、及び被覆管の機械的健全性である。

LLFP 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係を図 3.2.2-1 及び-2 に示す。図中に示す「設計比」は下記の各制限値との比を表すものである。

CuI 温度制限値	605°C
Tc 温度制限値	2170°C
Zr-H 温度制限値	900°C (相安定性の観点)
被覆管温度制限値	700°C
集合体出口温度差制限値	120°C (隣接集合体との出口温度差)
内圧制限値	11.8MPa (120atm)

CuI 集合体の総発熱量は 108kW であり、CuI の融点が制限因子となって下限流量が定まり、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。CuI 集合体滞在期間は、水素透過制限ではなく内圧制限により律則される。

Tc 集合体の総発熱量は 144kW であり、被覆管最高温度が下限流量を、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。

核変換特性の評価は 2 次元 7 群 RZ 拡散燃焼計算によって行った。群定数セットとして JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を用い、1 次元拡散燃焼計算によって 7 群に縮約した。また、物質組成の取り扱いは、LLFP 集合体を含めて、全て集合体平均の均質組

成とした。

表 3.1-332 に LLFP 集合体装荷炉心の主要な核特性の評価結果を示す。径方向ブランケットを LLFP 集合体に置換することにより増殖比は 1.0 以下になったため、上下ブランケットを各々 15cm 延長して 1.03 の増殖比を確保した。LLFP 集合体には減速材が含まれ、中性子スペクトルはやや軟化するため、ドップラー係数やボイド反応度は僅かながら改善した。

### 3.2.3 LLFP 核変換特性

CuI 集合体の装荷体数や滞在期間は、内圧制限下でサポートファクターが 1.0 以上となるよう調整した。CuI 集合体は、径方向遮蔽体領域の第一層目装荷に加え、変換量確保の必要性に応じてその外側の第二層目に装荷し、CuI ピンの内圧抑制のため装荷期間中に第 1 層と第 2 層を置換するものとした。Tc 集合体については、Tc の中性子吸収によってその外側（第二層目）では効果的な核変換が期待できないため、第 1 層目のみに装荷するものとし、サポートファクターが 1.0 以上となるよう滞在期間を調整して取出変換率を算出した。

変換特性の評価結果を表 3.2.3-1 にまとめた。中型 MOX 燃料高内部転換型炉心では、58 体の CuI 集合体を 8 サイクル（約 17 年）装荷することにより取出変換率は約 22%を得た。Tc 集合体については 36 体、8 サイクル（約 17 年）装荷で変換率は約 27% と目標に近い値が得られた。

サポートファクターを 1.0 とするのに必要な原子炉熱出力当りの LLFP 装荷量は、<sup>129</sup>I で約 220kg/GWt、<sup>99</sup>Tc で約 1340kg/GWt であり、大型 MOX 燃料 Na 炉の 310kg/GWt、1680kg/GWt に比べてやや少ない装荷量となった。

LLFP 集合体 1 体当たりの必要流量は CuI 集合体で 2.5kg/sec、Tc 集合体で 3.3kg/sec であり、炉心流量に占める全 LLFP 集合体の流量割合はそれぞれの集合体に対し 1.6%、1.3% と小さい。

表 3.2.1-1 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の炉心仕様／特性

項目	単位	仕様/特性
炉心		
原子炉熱出力	MWt	1785
1次系冷却材流量	kg/s	$9.083 \times 10^3$
原子炉出/入口温度	°C	550/395
運転サイクル長さ	EFPN	約 26
燃料交換バッチ数	-	4
炉心燃料集合体数（内側炉心/外側炉心）	-	183/150
径方向ブランケット体数	-	無し
制御棒本数（主/後備）	-	21/7
径方向遮へい体数 (SUS/B <sub>4</sub> C)	-	150/174
炉心高さ	cm	100
軸方向ブランケット厚（上部/下部）	cm	30/30
ガスプレナム長さ（上部/下部）	cm	10/92
燃料集合体		
燃料材料	-	MOX
被覆管材料	-	ODS
ラッパ管材料	-	FMS
集合体配列ピッチ	cm	18.61
燃料ピン本数	-	217
燃料ピン外径 (d)	cm	1.04
燃料ピン配列ピッチ (P)	cm	1.150
P/d	-	1.106
被覆管肉厚	cm	0.071
体積比		
燃料	%	45.8
構造材	%	26.5
冷却材	%	27.7
燃料スマア密度(炉心/軸プラ)	%	82/91
Pu 富化度*(内側炉心/外側炉心)	w/o	19.1/22.7
主要炉心特性		
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	15.0
増殖比	-	1.04
燃焼欠損反応度	% Δk/kk'	2.9
ビ <sup>+</sup> →高速中性子束	$10^{16} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$	2.0
ビ <sup>+</sup> →高速中性子照射量	$10^{23} \text{n/cm}^2$	5.5

\* Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

(燃料組成 : 高速多重リサイクル TRU 組成 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)

表 3.2.1-2 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様

集合体		Tc 集合体		CuI 集合体			
充填材	材料	Tc	Zr-H	CuI	Zr-H		
	形態	ペレット		ペレット			
	外径 [mm]	8.08	8.52	3.86	4.6		
	充填材スマア密度 [%]	80	90	50	90		
被覆管	材料	ODS 鋼					
	外径 [mm]	10.40		5.50			
	内径 [mm]	8.98		4.84			
	肉厚 [mm]	0.71		0.33			
要素	全長 [mm]	2710					
	直径ギャップ [mm]	0.90	0.46	—	0.24		
	ボンド材	He	Na	He	Na		
	充填材スタック高さ [mm]	1000					
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	1220/400					
	初期封入ガス	He					
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1					
スペーサ	形式	ワイヤ型					
	材料	PNC-FMS					
	ワイヤ直径 [mm]	1.05		1.20			
ラッパ管	材料	PNC-FMS					
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	182.1					
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	172.1					
	ラッパ管肉厚 [mm]	5.0					
集合体	バンドル規模 [本]	217		631			
	要素配列ピッチ [mm]	11.5		6.76			
	P/D	1.11		1.23			
	集合体配列ピッチ [mm]	186.1					

表 3.2.2-1 LLFP 集合体を装荷した中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の主要な核特性

項目	単位	基準炉心	LLFP 核変換炉心
炉心			
原子炉熱出力	MWt	1785	1785
運転サイクル長さ	EFPM	26	26
燃料交換バッチ数	-	4	4
炉心燃料集合体数（内側/外側炉心）	-	183/150	183/150
径方向プランケット体数	-	0	0
制御棒本数（主/後備）	-	21/7	21/7
径方向遮へい体数 (SUS/B <sub>4</sub> C)	-	150/174	108/174
LLFP (Tc) 集合体数（炉外）	-	-	36
LLFP (I) 集合体数（炉外）	-	-	72
炉心高さ	cm	100	100
軸方向プランケット厚（上部/下部）	cm	30/30	45/45 <sup>*2</sup>
Pu 富化度 <sup>*1</sup> （内側／外側炉心）	w/o	19.1/22.7	19.5/24.7
主要炉心特性			
炉心取出平均燃焼度	10 <sup>4</sup> MWd/t	15	15
増殖比	-	1.04	1.03 <sup>*2</sup>
燃焼欠損反応度	% Δk/kk'	2.9	3.3
ビーム高速中性子束	10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> ・s	2.0	2.0
ビーム高速中性子照射量	10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup>	5.5	5.5
ナトリウムボイド反応度	\$	5.8	5.6
ドップラ係数	10 <sup>-3</sup> Tdk/dT	-5.3	-6.5

\*1 \* Pu 富化度 =Pu/HM [w/o]

\*2 軸方向プランケットを上下 15cm づつ延ばすことで増殖比を 1.03 とした。

表 3.2.3-1 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の LLFP 核変換特性

LLFP集合体	中型MOX燃料Na炉		大型MOX燃料Na炉	
	I	Tc	I	Tc
スマ密度	35%	80%	55%	80%
減速材比	40%	48%	20%	48%
LLFPスタック長(cm)	100	100	110	150
ガスプレナム長(cm)(下部/上部)	122/40	-	142/28.5	-
LLFP集合体数	58	36	70	53
LLFP装荷量(kg)	1集合体 全体	6.7 389	66.2 2384	15.6 1093
出力当たり kg/GWt	218	1335	306	1676
核変換率(%/cycle) (非均質補正前の値)	第1層 第2層	3.6% 1.2%	1.4% -	0.8% 0.6%
取出変換率	22%	27%	14%	21%
滞在期間	cycle year	8 17.3	8 17.3	11 16.5
サボートファクタ	1.01	1.00	1.00	1.00
LLFP集合体への必要流量(kg/sec/集合体)	2.5	3.3	2.8	4.2
炉心流量比率(%)	1.6	1.3	1.1	1.2

非均質補正係数 (I : 1.0、Tc : 0.93) を考慮して結果を整理

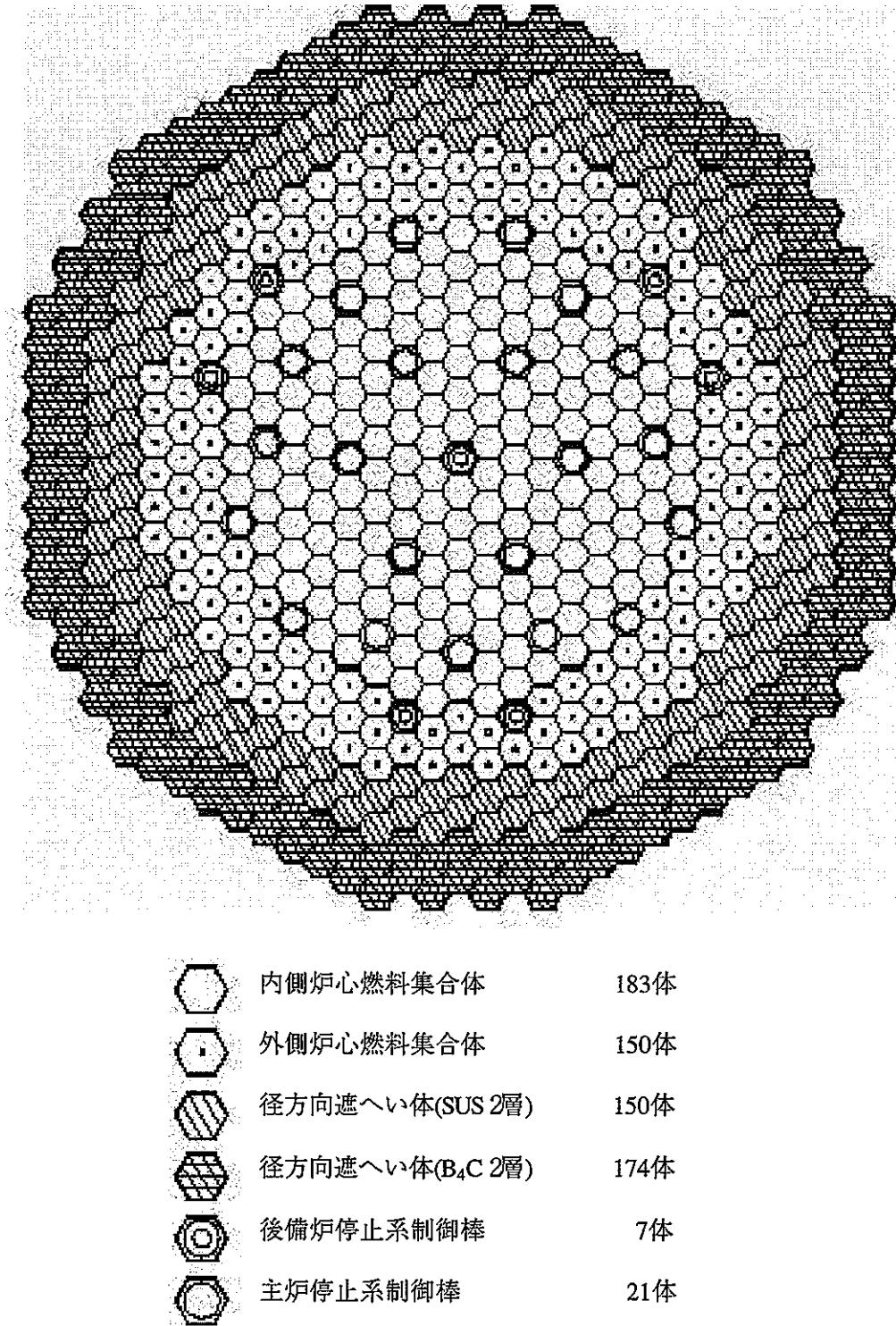


図 3.2.1-1 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉の炉心構成

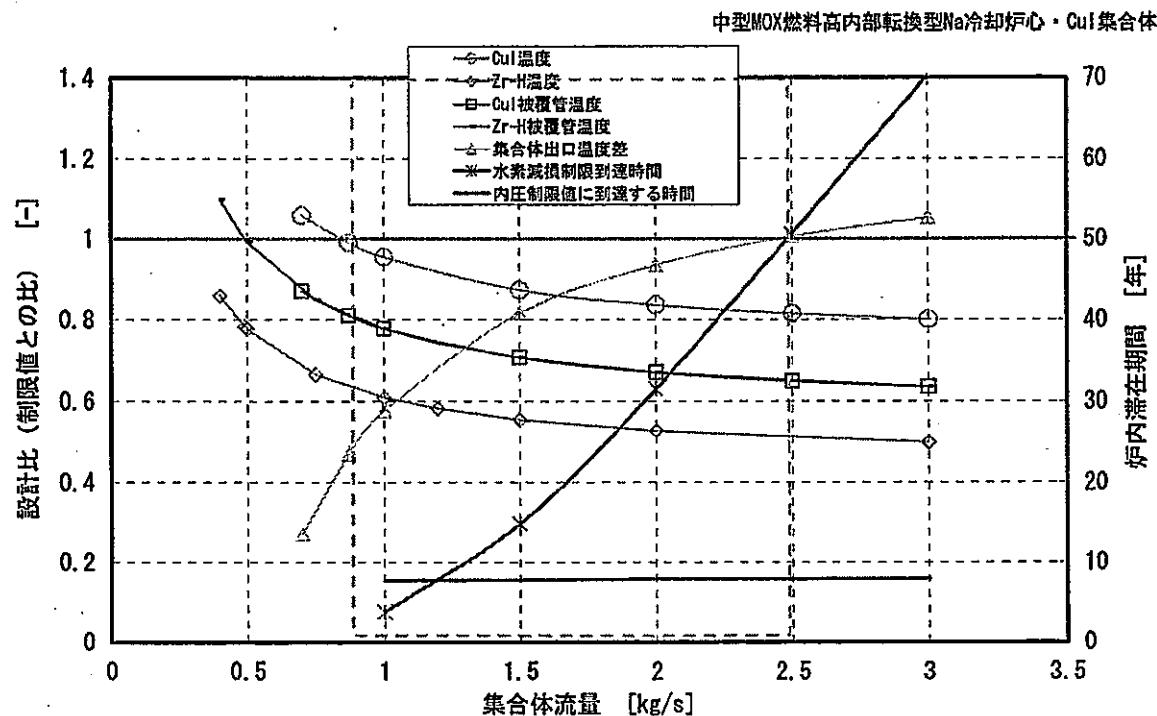


図 3.2.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

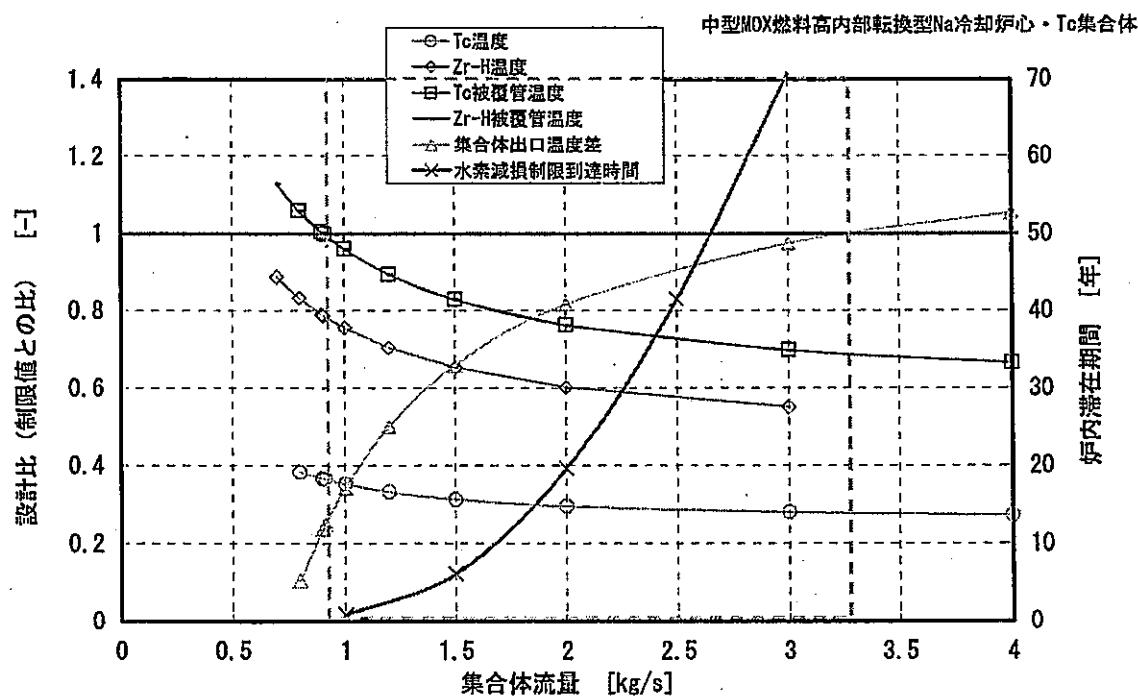


図 3.2.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

### 3.3 大型金属燃料 Na 冷却炉

#### 3.3.1 基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様

2002 年度の FS 検討で仕様設定された大型金属燃料 Na 冷却炉（3570Mwt/1500MWe）を基準炉心として、径方向ブランケット集合体を LLFP 集合体に置き換えた LLFP 装荷炉心を設定し、その核変換特性、炉心特性及び LLFP 集合体の熱流動特性を評価した。表 3.3.1-1 に基準炉心の基本仕様及び主要核特性を、図 3.3.1-1 に炉心構成を示す。

LLFP 集合体の仕様を表 3.3.1-2 示す。CuI 集合体は、CuI の溶融防止の観点から線出力を低く抑える必要があるため、CuI ピン外径を 5.5mm とした細径ピンを用い、全ピン本数は 631 本である。Tc 集合体のピン径、ピンピッチ等の仕様は燃料集合体と同一とし、ピン本数は 271 本である。LLFP スタック長は炉心部高さ(90cm)と同じとした。

CuI 集合体及び Tc 集合体の Zr-H ピン数比率は、核変換率・量の観点から、それぞれ 45%、50% と設定した。

#### 3.3.2 LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性

LLFP 集合体内の熱解析上着目した観点は、各被覆管の最高温度制限、LLFP や Zr-H 要素の溶融、水素透過制限、及び被覆管の機械的健全性である。

LLFP 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係を図 3.3.2-1 及び-2 に示す。図中に示す「設計比」は下記の各制限値との比を表すものである。

CuI 温度制限値	605°C
Tc 温度制限値	2170°C
Zr-H 温度制限値	900°C (相安定性の観点)
被覆管温度制限値	700°C
集合体出口温度差制限値	120°C (隣接集合体との出口温度差)
内圧制限値	11.8MPa (120atm)

金属燃料炉では、MOX 燃料炉心に比べて中性子束が高いために、LLFP 集合体の発熱量も大きい。CuI 集合体の総発熱量は 223kW であり、CuI の融点が制限因子となって下限流量が定まり、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。CuI 集合体滞在期間は、水素透過制限ではなく内圧制限により律則される。

Tc 集合体の総発熱量は 287kW であり、被覆管最高温度が下限流量を、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。

核変換特性の評価は 2 次元 7 群 RZ 拡散燃焼計算によって行った。群定数セットとして JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を用い、1 次元拡散燃焼計算によって 7 群に

縮約した。また、物質組成の取り扱いは、LLFP 集合体を含めて、全て集合体平均の均質組成とした。

表 3.3.2-1 に LLFP 集合体装荷炉心の主要な核特性の評価結果を示す。径方向ブランケット集合体を LLFP 集合体に置換したため、増殖比は 1.05 となったが、平衡期に必要な値をほぼ満足している。LLFP 集合体には減速材が含まれ、中性子スペクトルはやや軟化するため、ボイド反応度は僅かながら改善した。

### 3.3.3 LLFP 核変換特性

CuI 集合体の装荷体数や滞在期間は、内圧制限下でサポートファクターが 1.0 以上となるよう調整した。CuI 集合体は、径方向ブランケット領域の第一層目装荷に加え、変換量確保の必要性に応じてその外側の第二層目に装荷し、CuI ピンの内圧抑制のため装荷期間中に第 1 層と第 2 層を置換するものとした。Tc 集合体については、Tc の中性子吸収によってその外側（第二層目）では効果的な核変換が期待できないため、第 1 層目のみに装荷するものとし、サポートファクターが 1.0 以上となるよう滞在期間を調整して取出変換率を算出した。

変換特性の評価結果を表 3.3.3-1 にまとめた。大型金属燃料コンパクト型炉心では、47 体の CuI 集合体を 5 サイクル（約 8 年）装荷することにより取出変換率は約 27%を得た。Tc 集合体については 45 体、12 サイクル（約 18 年）装荷で変換率は目標値を超える約 42%が得られ、<sup>129</sup>I と <sup>99</sup>Tc ともに優れた変換特性が示された。

サポートファクターを 1.0 とするのに必要な原子炉熱出力当りの LLFP 装荷量は、<sup>129</sup>I で約 80kg/GWt、<sup>99</sup>Tc で約 580kg/GWt であり、大型 MOX 燃料 Na 炉の 310kg/GWt、1680kg/GWt に比べて大幅に少ない装荷量となった。

LLFP 集合体 1 体当たりの必要流量は CuI 集合体で 5.1kg/sec、Tc 集合体で 6.5kg/sec と他の Na 冷却炉より大きいものの、装荷すべき LLFP 集合体の数が少ないので、炉心流量に占める全 LLFP 集合体の流量割合はそれぞれ 1.2%、1.5% と、他の Na 炉と同程度に小さい。

表 3.3.1-1 大型金属燃料 Na 冷却炉の炉心仕様／特性

項目	単位	仕様/特性
炉心		
原子炉熱出力	MWt	3900
1 次系冷却材流量	kg/s	$2.00 \times 10^4$
原子炉出/入口温度	°C	506/352
運転サイクル長さ	EFPMT	18
燃料交換パッチ数	-	3
炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	-	336/198
径方向プランケット体数	-	186
制御棒本数 (主/後備)	-	34/15
径方向遮へい体数 (SUS/ZrH)	-	102/108
炉心高さ	cm	90
軸方向プランケット厚 (上部/下部)	cm	40/5
ガスプレナム長さ (上部/下部)	cm	175/0
燃料集合体		
燃料材料	-	金属
被覆管材料	-	ODS
ラッパ管材料	-	FMS
集合体配列ピッチ	cm	18.72
燃料ピン本数	-	271
燃料ピン外径 (d)	cm	0.85
燃料ピン配列ピッチ (P)	cm	1.022
P/d	-	1.202
被覆管肉厚	cm	0.050
体積比		
燃料	%	39.4
構造材	%	23.3
冷却材	%	37.7
燃料スマア密度	%	75
Pu 富化度 <sup>*1</sup> (内側炉心/外側炉心)	w/o	12.8/17.6
主要炉心特性		
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	9.8
増殖比	-	1.23
燃焼欠損反応度	% Δ k/kk'	0.98
ビーグ高速中性子束 <sup>*2</sup>	$10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$	3.4
ビーグ高速中性子照射量 <sup>*2</sup>	$10^{23} \text{n/cm}^2$	4.8

<sup>\*1</sup> Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]<sup>\*2</sup> 3 次元解析値

(燃料組成 : 高速多重リサイクル TRU 組成 Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Cm244/245=1.1/66.0/25.2/2.4/2.4/0.4/1.6/0.5/0.4/0.1)

表 3.3.1-2 大型金属燃料 Na 冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様

集合体		Tc 集合体		CuI 集合体			
充填材	材料	Tc	Zr-H	CuI	Zr-H		
	形態	ペレット		ペレット			
	外径 [mm]	6.72	7.12	4.10	4.60		
	充填材スマア密度 [%]	80	90	50	90		
被覆管	材料	ODS 鋼					
	外径 [mm]	8.50		5.50			
	内径 [mm]	7.5		4.84			
	肉厚 [mm]	0.05		0.33			
要素	全長 [mm]	3170					
	直径ギャップ [mm]	0.78	0.46	—	0.24		
	ボンド材	He	Na	He	Na		
	充填材スタック高さ [mm]	900					
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	0/2150					
	初期封入ガス	He					
スペーサ	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1					
	形式	ワイヤ型					
	材料	PNC-FMS					
ラッパ管	ワイヤ直径 [mm]	1.67		1.20			
	材料	PNC-FMS					
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	181.2					
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	171.2					
集合体	ラッパ管肉厚 [mm]	5.0					
	バンドル規模 [本]	271		631			
	要素配列ピッチ [mm]	10.22		6.73			
	P/D	1.20		1.22			
集合体配列ピッチ [mm]		187.2					

表 3.3.2-1 LLFP 集合体を装荷した大型金属燃料 Na 冷却炉の主要な核特性

項目	単位	基準炉心	LLFP 核変換炉心
炉心			
原子炉熱出力	MWt	3900	3900
運転サイクル長さ	EPPM	18	18
燃料交換バッチ数	-	3	3
炉心燃料集合体数（内側/外側炉心）	-	336/198	336/198
径方向ブランケット体数	-	186	0
制御棒本数（主/後備）	-	34/15	34/15
径方向遮へい体数（SUS/Zr-II）	-	102/108	153/108
LLFP (Tc) 集合体数（炉外）	-	-	45
LLFP (I) 集合体数（炉外）	-	-	90
炉心高さ	cm	90	90
軸方向ブランケット厚（上部/下部）	cm	40/5	40/5
Pu 富化度*1(内側／外側炉心)	w/o	12.8/17.6	13.0/19.7
主要炉心特性			
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	9.8	10.1
増殖比	-	1.23	1.05
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/kk'$	0.98	1.6
ビーグ高速中性子束*2	$10^{15} n/cm^2 \cdot s$	3.4	3.7
ビーグ高速中性子照射量*2	$10^{23} n/cm^2$	4.8	5.2
ナトリウムボイド反応度	\$	7.5	7.2
ドップラ係数	$10^{-3} T dk/dT$	-4.1	-4.1

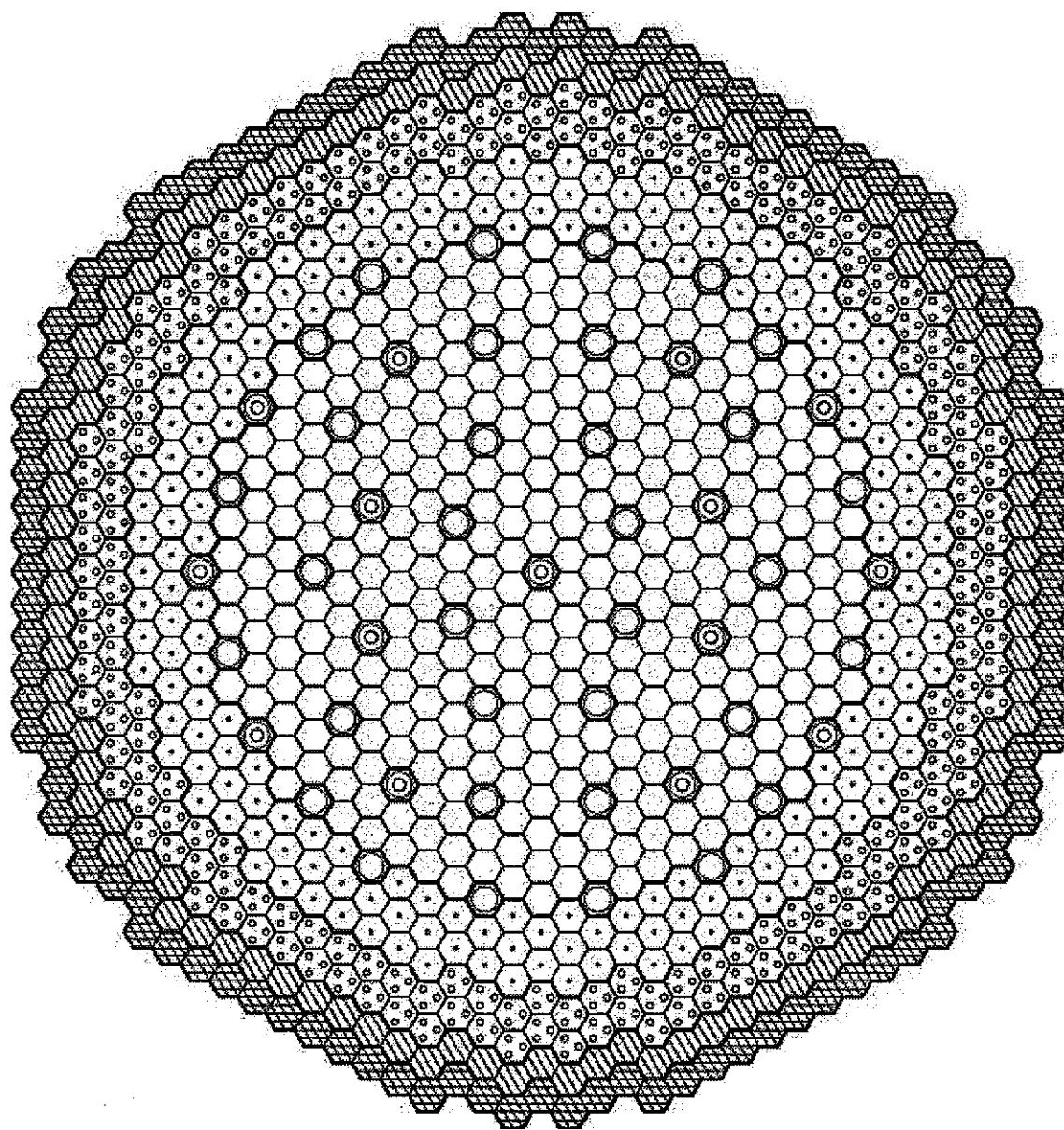
\*1 Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

\*2 3 次元解析値 (LLFP 核変換炉心の値は基準炉心での値を基に外挿)

表 3.3.3-1 大型金属燃料 Na 冷却炉の LLFP 核変換特性

		大型金属燃料Na炉		大型MOX燃料Na炉	
		I	Tc	I	Tc
LLFP集合体		40%	80%	55%	80%
スマ密度		45%	50%	20%	48%
減速材比		90	90	110	150
LLFPスタック長(cm)		5/215	-	142/28.5	-
ガスプレナム長(cm)(下部/上部)		47	45	70	53
LLFP集合体数	1集合体	6.3	50.0	15.6	112.9
LLFP装荷量(kg)	全體	297	2251	1093	5983
出力当たり	kg/GWt	76	577	306	1676
核変換率(%/cycle)	第1層	5.6%	2.6%	1.7%	0.8%
(非均質補正前の値)	第2層	2.3%	-	0.6%	-
取出変換率		27%	42%	14%	21%
滞在期間	cycle	5	12	11	6
	year	7.5	18.0	16.5	9.0
サポートファクタ		1.00	1.00	1.00	1.00
LLFP集合体への必要流量(kg/sec/集合体)		5.1	6.5	2.8	4.2
炉心流量比率(%)		1.2	1.5	1.1	1.2

非均質補正係数 (I : 1.0、Tc : 0.93) を考慮して結果を整理



○	内側炉心燃料集合体	336体
○	外側炉心燃料集合体	198体
○	径方向フランケット集合体	186体
▨	径方向遮へい体(SUS)	102体
▨	径方向遮へい体(ZrH)	108体
◎	後備炉停止系制御棒	15体
●	主炉停止系制御棒	34体

図 3.3.1-1 大型金属燃料 Na 冷却炉の炉心構成

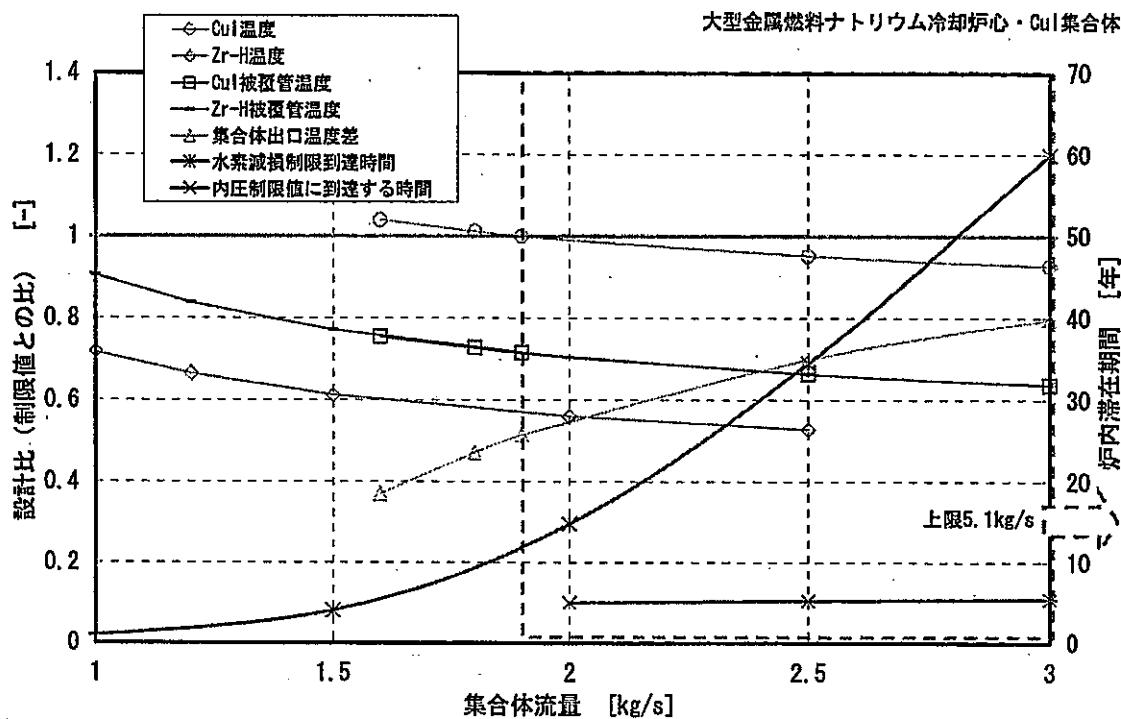


図 2.1.320 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

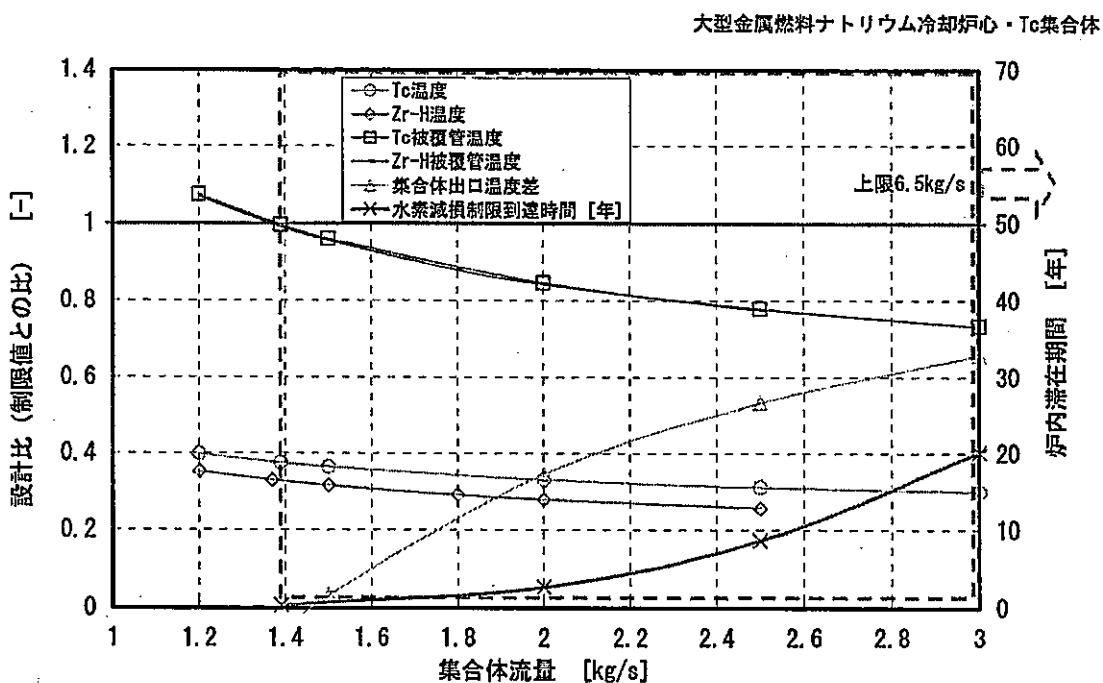


図 2.1.321 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

## 4 Pb-Bi 冷却炉

### 4.1 Pb-Bi 強制循環冷却炉

#### 4.1.1 基準炉心およびLLFP 核変換集合体の仕様

Pb-Bi 強制循環冷却中型炉（出力 1875MWt/750MWe、燃焼度 120GWd/t 仕様）を基準炉心として、径方向遮蔽体を LLFP 集合体に置き換えた LLFP 装荷炉心を設定し、その核変換特性、炉心特性及び LLFP 集合体の熱流動特性を評価した。表 4.1.1-1 に基準炉心の基本仕様及び主要核特性を、図 4.1.1-1 に炉心構成を示す。

LLFP 集合体の仕様を表 4.1.1-2 示す。CuI 集合体は Na 炉での CuI 集合体の仕様を参考として、燃料集合体と同じラッパ管の中に収まるようピン径及びピンピッチを調整したものである。結果として、全ピン本数は 631 本で Na 炉と同じとし、ピン径及びピンピッチが若干小さくなっている。必要な核変換量を得るために LLFP 装荷量を大きくする必要があり、LLFP スタック長は炉心部(70cm) + 軸プランケット部(35cm) の計 105cm とした。

Tc 集合体については、燃料集合体と同一仕様とし、ピン本数は 331 本である。CuI 集合体及び Tc 集合体の Zr-H ピン数比率は、核変換率・量の観点から、それぞれ 20%、40% と設定した。

#### 4.1.2 LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性

LLFP 集合体内の熱解析上着目した観点は、各被覆管の最高温度制限、LLFP や Zr-H 要素の溶融、水素透過制限、及び被覆管の機械的健全性である。

LLFP 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係を図 4.1.2-1 及び-2 に示す。図中に示す「設計比」は下記の各制限値との比を表すものである。

CuI 温度制限値	605°C
Tc 温度制限値	2170°C
Zr-H 温度制限値	900°C (相安定性の観点)
被覆管温度制限値	650°C
集合体出口温度差制限値	120°C (隣接集合体との出口温度差)
内圧制限値	11.8MPa (120atm)

CuI 集合体の総発熱量は 92kW であり、CuI の融点が制限因子となって下限流量が定まり、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。CuI 集合体滞在期間は、水素透過制限ではなく内圧制限により律則される。

Tc 集合体の総発熱量は 101kW であり、被覆管最高温度が下限流量を、隣接集合体出口温度差が上限流量を定め、熱的成立性の見込める流量範囲内である 14kg/sec の流量を供給する

ことにより、滞在期間を 60 年としても水素透過制限を満足できる見通しを得た。

核変換特性の評価は 2 次元 7 群 RZ 拡散燃焼計算によって行った。群定数セットとして JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を用い、1 次元拡散燃焼計算によって 7 群に縮約した。また、物質組成の取り扱いは、LLFP 集合体を含めて、全て集合体平均の均質組成とした。

表 4.1.2-1 に LLFP 集合体装荷炉心の主要な核特性の評価結果を示す。本炉心の増殖比は 1.16 であり、元々径方向ブランケットを持たない本炉心は、LLFP 装荷時にも高い増殖比が得られた。LLFP 集合体には減速材が含まれ、中性子スペクトルはやや軟化するため、ドップラー係数やボイド反応度は僅かながら改善した。

#### 4.1.3 LLFP 核変換特性

CuI 集合体の装荷体数や滞在期間は、内圧制限下でサポートファクターが 1.0 以上となるよう調整した。CuI 集合体は、径方向遮蔽体領域の第一層目装荷に加え、変換量確保の必要性に応じてその外側の第二層目に装荷し、CuI ピンの内圧抑制のため装荷期間中に第 1 層と第 2 層を置換するものとした。Tc 集合体については、Tc の中性子吸収によってその外側（第二層目）では効果的な核変換が期待できないため、第 1 層のみに装荷するものとし、サポートファクターが 1.0 以上となるよう滞在期間を調整して取出変換率を算出した。

変換特性の評価結果を表 4.1.3-1 にまとめた。Pb-Bi 強制循環炉では、56 体の CuI 集合体を 10 サイクル（約 15 年）装荷することにより取出変換率は約 11% となり、Tc 集合体については 55 体、20 サイクル（約 30 年）装荷で変換率約 28% となる結果を得た。

サポートファクターを 1.0 とするのに必要な原子炉熱出力当りの LLFP 装荷量は、<sup>129</sup>I で約 380kg/GWt、<sup>99</sup>Tc で約 1870kg/GWt であり、大型 MOX 燃料 Na 炉に比べてやや多い装荷量が必要である。

Pb-Bi 強制循環炉では、冷却材の比重が大きいために、LLFP 集合体 1 体当たりの必要流量は CuI 集合体で 13.0kg/sec、Tc 集合体で 14.5kg/sec と大きいが、炉心流量に占める全 LLFP 集合体の流量割合としては、それぞれの集合体に対し 1.0%、1.0% と、大型 MOX 燃料 Na 冷却炉の 1.1%、1.2% とほぼ同程度の値となった。

表 4.1.1-1 Pb-Bi 強制循環冷却炉の炉心仕様／特性

項目	単位	仕様/特性
炉心		
原子炉熱出力	MWt	1875
1 次系冷却材流量	kg/s	$7.64 \times 10^4$
原子炉出/入口温度	°C	520/352
運転サイクル長さ	EFPW	18
燃料交換パッチ数	-	5
炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	-	288/246
径方向ブランケット体数	-	0
炉中心スティール集合体	-	1
制御棒本数 (主/後備)	-	18/6
径方向遮へい体数 (Pb-Bi)	-	186
炉心高さ	cm	70
軸方向ブランケット厚 (上部/下部)	cm	0/35
ガスプレナム長さ (上部/下部)	cm	41/73
燃料集合体		
燃料材料	-	Pu/U 壕化物
被覆管材料	-	ODS
ラッパ管材料	-	FMS
集合体配列ピッチ	cm	17.75
燃料ピン本数	-	331
燃料ピン外径 (d)	cm	0.73
燃料ピン配列ピッチ (P)	cm	0.89
P/d	-	1.22
被覆管肉厚	cm	0.042
体積比		
燃料	%	39.8
構造材	%	22.0
冷却材	%	38.2
燃料スミア密度	%	80
Pu 富化度* (内側炉心/外側炉心)	w/o	14.8/17.3
主要炉心特性		
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	11.4
增殖比	-	1.20
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/k'$	0.49
$\bar{\nu}$ →高速中性子束	$10^{16} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$	2.0
$\bar{\nu}$ →高速中性子照射量	$10^{23} \text{n/cm}^2$	4.7

\* Pu 富化度=Pu/HM [w/o]

(燃料組成：高速多重リサイクル TRU 組成 Pu238/239/240/241/242/Np237/Am241/243/Cm244/245=1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/0.0)

表 4.1.1-2 Pb-Bi 強制循環冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様

集合体		Tc 集合体		CuI 集合体	
充填材	材料	Tc	Zr-H	CuI	Zr-H
	形態	ペレット		ペレット	
	外径 [mm]	5.780	6.140	4.4	4.46
	充填材スマア密度 [%]	80	90	70	90
被覆管	材料	ODS 鋼			
	外径 [mm]	7.30		5.30	
	内径 [mm]	6.46		4.70	
	肉厚 [mm]	0.42		0.30	
要素	全長 [mm]	2905			
	直径ギャップ [mm]	0.68	0.32	0.30	0.24
	ボンド材	He	Pb-Bi	He	Pb-Bi
	充填材スタック高さ [mm]	1050			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	730/410			
	初期封入ガス	He			
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
スペーサ	形式	グリッド型			
	材料	PNC-ODS 鋼			
ラッパ管	材料	PNC-FMS			
	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			
集合体	バンドル規模 [本]	331		631	
	要素配列ピッチ [mm]	8.9		6.46	
	P/D	1.22		1.22	
	集合体配列ピッチ [mm]	177.5			

表 4.1.2-1 LLFP 集合体を装荷した Pb-Bi 強制循環炉心の主要な核特性

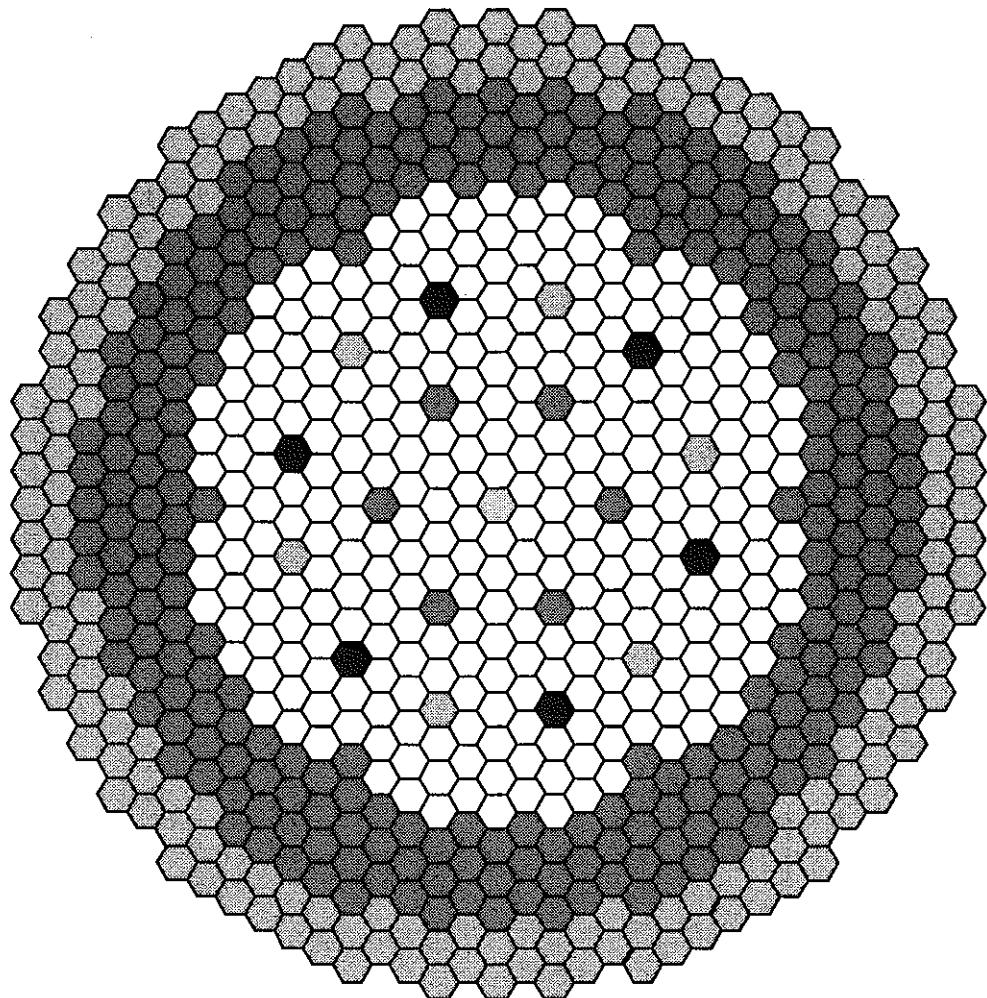
項目	単位	基準炉心	LLFP 核変換炉心
炉心			
原子炉熱出力	MWt	1875	1875
運転サイクル長さ	EFPY	18	18
燃料交換バッチ数	-	5	5
炉心燃料集合体数 (内側/外側炉心)	-	288/246	288/246
径方向ブランケット体数	-	0	0
炉中心スティール集合体	-	1	1
制御棒本数 (主/後備)	-	18/6	18/6
径方向遮へい体数 (Pb-Bi)	-	186	61
LLFP (Tc) 集合体数 (炉外)	-	-	55
LLFP (I) 集合体数 (炉外)	-	-	70
炉心高さ	cm	70	70
軸方向ブランケット厚 (上部/下部)	cm	0/35	0/35
Pu 富化度*(内側／外側炉心)	w/o	14.8/17.3	15.1/18.5
主要炉心特性			
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	11.4	11.4
増殖比	-	1.20	1.16
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/kk'$	0.49	0.83
ビーグ高速中性子束	$10^{15} n/cm^2 \cdot s$	2.0	2.1
ビーグ高速中性子照射量	$10^{23} n/cm^2$	4.7	4.9
ナトリウムボイド反応度	\$	4.7	4.2
ドップラ係数	$10^{-3} Tdk/dT$	-3.3	-3.4

\* Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

表 4.1.3-1 Pb-Bi 強制循環冷却炉の LLFP 核変換特性

		Pb-Bi強制循環炉		大型MOX燃料Na炉	
LLFP集合体		I	Tc	I	Tc
スミア密度		50%	80%	55%	80%
減速材比		20%	40%	20%	48%
LLFPスタック長(cm)		105	105	110	150
ガスブレナム長(cm)(下部/上部)		73/41	-	142/28.5	-
LLFP集合体数		56	55	70	53
LLFP装荷量(kg)	1集合体	12.8	63.7	15.6	112.9
	全体	716	3502	1093	5983
出力当たり	kg/GWt	382	1868	306	1676
核変換率(%/cycle) (非均質補正前の値)	第1層	1.3%	0.7%	1.7%	0.8%
	第2層	0.5%	-	0.6%	-
取出変換率		11%	28%	14%	21%
滞在期間	cycle	10	20	11	6
	year	15.0	30.0	16.5	9.0
サポートファクタ		1.00	1.02	1.00	1.00
LLFP集合体への必要流量(kg/sec/集合体)		13.0	14.5	2.8	4.2
炉心流量比率(%)		1.0	1.0	1.1	1.2

非均質補正係数 (I : 1.0、Tc : 0.93) を考慮して結果を整理



- 内側炉心燃料 : 288体
- 外側炉心燃料 : 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（後備炉停止棒） : 6体
- ◆ Pb-Bi遮へい体 : 186体

図 4.1.1-1 Pb-Bi 強制循環冷却炉の炉心構成

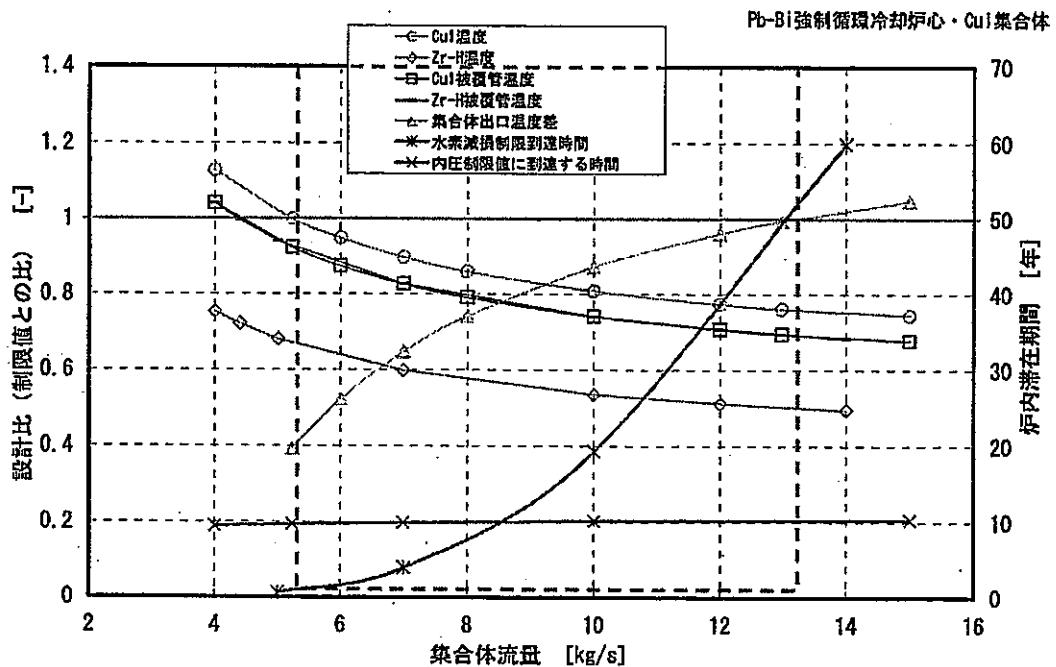


図 4.1.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

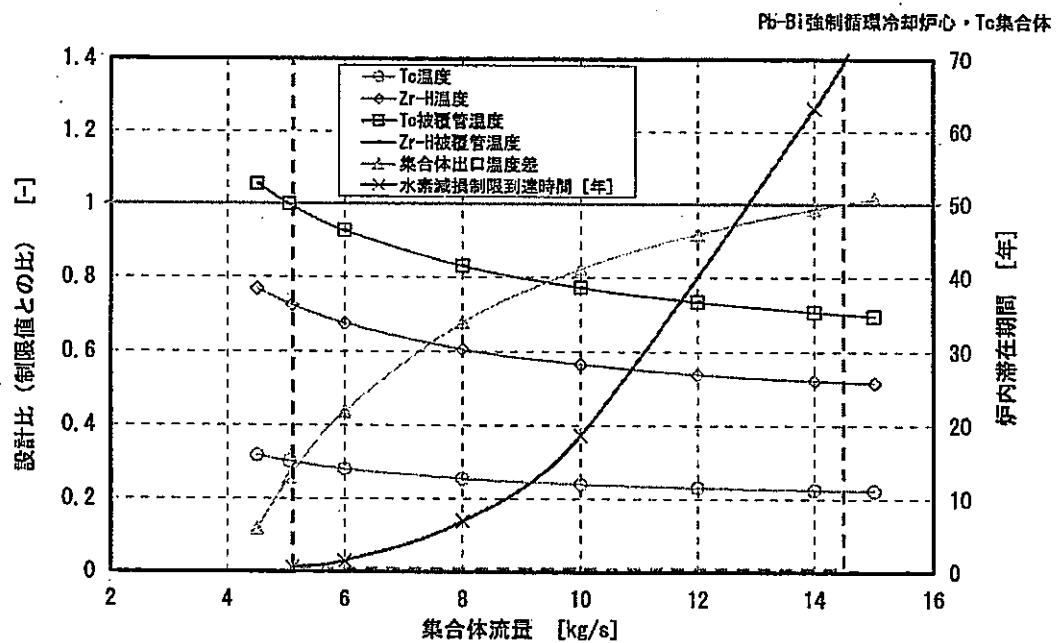


図 4.1.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

## 4.2 Pb-Bi 自然循環冷却炉

### 4.2.1 基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様

Pb-Bi 自然循環冷却中型炉（1450MWt/550MWe、燃焼度 120Gwd/t 仕様）を基準炉心として、径方向遮蔽体を LLFP 集合体に置き換えた LLFP 装荷炉心を設定し、その核変換特性、炉心特性及び LLFP 集合体の熱流動特性を評価した。表 4.2.1-1 に基準炉心の基本仕様及び主要核特性を、図 4.2.1-1 に炉心構成を示す。

LLFP 集合体の仕様を表 4.2.1-2 示す。CuI 集合体は Na 冷却炉での CuI 集合体の仕様（細径ピン）を参考として、P/d が燃料集合体と同じとなるようにピンピッチを調整したものである。Tc 集合体については、燃料集合体と同一仕様であり、ピン本数は 271 本とした。LLFP 集合体中の Zr-H ピン数比率は Na 冷却炉と同じとした。LLFP スタック長は炉心高さと同じ 70cm とした。

CuI 集合体及び Tc 集合体の Zr-H ピン数比率は、核変換率・量の観点から、それぞれ 60%、48% と設定した。

### 4.2.2 LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性

LLFP 集合体内の熱解析上着目した観点は、各被覆管の最高温度制限、LLFP や Zr-H 要素の溶融、水素透過制限、及び被覆管の機械的健全性である。

LLFP 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係を図 4.2.2-1 及び-2 に示す。図中に示す「設計比」は下記の各制限値との比を表すものである。

CuI 温度制限値	605°C
Tc 温度制限値	2170°C
Zr-H 温度制限値	900°C (相安定性の観点)
被覆管温度制限値	650°C
集合体出口温度差制限値	120°C (隣接集合体との出口温度差)
内圧制限値	11.8MPa (120atm)

CuI 集合体の総発熱量は 124kW であり、CuI の融点が制限因子となって下限流量が定まり、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。CuI 集合体滞在期間は、水素透過制限ではなく内圧制限により律則される。

Tc 集合体の総発熱量は 109kW であり、被覆管最高温度が下限流量を、隣接集合体出口温度差が上限流量を定め定め、熱的成立性の見込める流量範囲内である 12kg/sec の流量を供給

することにより、滞在期間を 60 年としても水素透過制限を満足できる見通しを得た。

本炉心は自然循環炉心であるため、LLFP 集合体に対して自然循環力で十分な冷却材流量が配分されることを確認するための概略評価を行った。

集合体平均出力と LLFP 集合体出力の比から LLFP 集合体の流量再配分係数を求め、各ターゲット集合体の発熱量から集合体流量を概算した結果、何れの集合体も平均出力集合体の流量 (132kg/s) の 40%程度以上が配分される結果となり、LLFP 要素の各制限を満たす必要流量を確保できる見通しが得られた。

また一般には、炉心燃料以外の出力が低い炉心構成要素では、炉心の圧力差（下部プレナム圧-上部プレナム圧）に釣り合うような圧損が生じる流量が確保できると考えられ、LLFP 集合体を燃料集合体と同等以下の圧損に設定することで、上記の自然循環力以上のシステム流量が期待できる。実際に LLFP 集合体への必要流量から求められる集合体圧損は、炉心圧損 0.015MPa に対して充分に小さく、LLFP 集合体の必要流量は自然循環炉でも十分に確保できると考えられる。尚、LLFP 集合体の具体的な配置を考慮に入れた詳細な熱流動評価による確認が今後必要である。

核変換特性の評価は 2 次元 7 群 RZ 拡散燃焼計算によって行った。群定数セットとして JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を用い、1 次元拡散燃焼計算によって 7 群に縮約した。また、物質組成の取り扱いは、LLFP 集合体を含めて、全て集合体平均の均質組成とした。

表 4.2.2-2 に LLFP 集合体装荷炉心の主要な核特性の評価結果を示す。本炉心の増殖比は 1.16 であり、元々径方向プランケットを持たない本炉心は、LLFP 装荷時にも高い増殖比が得られた。LLFP 集合体には減速材が含まれ、中性子スペクトルはやや軟化するため、ドップラー係数やボイド反応度は僅かながら改善した。

#### 4.2.3 LLFP 核変換特性

CuI 集合体の装荷体数や滞在期間は、内圧制限下でサポートファクターが 1.0 以上となるよう調整した。CuI 集合体は、径方向遮蔽体領域の第一層目装荷に加え、変換量確保の必要性に応じてその外側の第二層目に装荷し、CuI ピンの内圧抑制のため装荷期間中に第 1 層と第 2 層を置換するものとした。Tc 集合体については、Tc の中性子吸収によってその外側（第二層目）では効果的な核変換が期待できないため、第 1 層目のみに装荷するものとし、サポートファクターが 1.0 以上となるよう滞在期間を調整して取出変換率を算出した。

変換特性の評価結果を表 4.2.3-1 にまとめた。Pb-Bi 自然循環炉では、55 体の CuI 集合体を 12 サイクル（約 18 年）装荷することにより目標の取出変換率に近い約 29% を達し、Tc 集

合体については 44 体、19 サイクル（約 29 年）装荷で変換率は目標値を超える約 37%となる結果を得た。

サポートファクターを 1.0 とするのに必要な原子炉熱出力当りの LLFP 装荷量は、<sup>129</sup>I で約 170kg/GWt、<sup>99</sup>Tc で約 1250kg/GWt であり、大型 MOX 燃料 Na 炉に比べて 30%以上少ない装荷量となった。

LLFP 集合体 1 体当たりの必要流量は、冷却材の比重が大きいために、CuI 集合体で 14.0kg/sec、Tc 集合体で 12.4kg/sec と大きいが、炉心流量に占める全 LLFP 集合体の流量割合はそれぞれの集合体に対し 1.4%、1.0%と、大型 MOX 燃料 Na 冷却炉の 1.1%、1.2%とほぼ同等の値となった。

表 4.2.1-1 Pb-Bi 自然循環冷却炉の炉心仕様／特性

項目	単位	仕様/特性
炉心		
原子炉熱出力	MWt	1450
1次系冷却材流量	kg/s	$5.51 \times 10^4$
原子炉出/入口温度	°C	465/285
運転サイクル長さ	EFPW	18
燃料交換パッチ数	-	6
炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	-	252/144
径方向ブランケット体数	-	0
炉心スティール集合体	-	1
制御棒本数 (主/後備)	-	18/6
径方向遮へい体数 (Pb-Bi)	-	162
炉心高さ	cm	70
軸方向ブランケット厚 (上部/下部)	cm	30/30
ガスプレナム長さ (上部/下部)	cm	46/78
燃料集合体		
燃料材料	-	Pu/U 窒化物
被覆管材料	-	ODS
ラッパ管材料	-	FMS
集合体配列ピッチ	cm	21.53
燃料ピン本数	-	271
燃料ピン外径 (d)	cm	0.85
燃料ピン配列ピッチ (P)	cm	1.25
P/d	-	1.47
被覆管肉厚	cm	0.046
体積比		
燃料	%	30.5
構造材	%	13.2
冷却材	%	56.3
燃料スマア密度	%	80
Pu 富化度* (内側炉心/外側炉心)	w/o	17.6/22.7
主要炉心特性		
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	12.0
増殖比	-	1.21
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/kk'$	1.0
ビーコ高速中性子束	$10^{15} n/cm^2 \cdot sec$	1.6
ビーコ高速中性子照射量	$10^{23} n/cm^2$	4.4

\* Pu 富化度 = Pu/IM [w/o]

(燃料組成 : 高速多重リサイクル TRU 組成 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)

表 4.2.1-2 Pb-Bi 自然循環冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様

集合体		Tc 集合体		CuI 集合体	
充填材	材料	Tc	Zr-H	CuI	Zr-H
	形態	ペレット			
	内径 [mm]	0.0			
	外径 [mm]	6.78	7.19	3.86	4.60
	充填材スマア密度 [%]	80	90	50	90
被覆管	材料	ODS 鋼			
	外径 [mm]	8.50		5.50	
	内径 [mm]	7.58		4.84	
	肉厚 [mm]	0.46		0.33	
要素	全長 [mm]	2540			
	直径ギャップ [mm]	0.80	0.39	0.98	0.24
	ボンド材	He	Pb-Bi	He	Pb-Bi
	充填材スタック高さ [mm]	700			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	780/460			
	初期封入ガス	He			
スペーサ	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
	形式	グリッド型			
ラッパ管	材料	PNC-ODS 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			
集合体	バンドル規模 [本]	271		631	
	要素配列ピッチ [mm]	12.5		8.1	
	P/D	1.47		1.47	
	集合体配列ピッチ [mm]	215.3			

表 4.2.2-1 LLFP 集合体を装荷した Pb-Bi 自然循環炉心の主要な核特性

項目	単位	基準炉心	LLFP 核変換炉心
炉心			
原子炉熱出力	MWt	1450	1450
運転サイクル長さ	EFPm	18	18
燃料交換バッチ数	-	6	6
炉心燃料集合体数（内側/外側炉心）	-	252/144	316/278
径方向ブランケット体数	-	0	0
炉中心スティール集合体	-	1	1
制御棒本数（主/後備）	-	18/6	40/15
径方向遮へい体数（Pb-Bi）	-	162	50
LLFP (Tc) 集合体数（炉外）	-	-	44
LLFP (I) 集合体数（炉外）	-	-	68
炉心高さ	cm	70	70
軸方向ブランケット厚（上部/下部）	cm	30/30	30/30
Pu 富化度*（内側／外側炉心）	w/o	17.6/22.7	17.7/24.8
主要炉心特性			
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	12.0	12.0
増殖比	-	1.21	1.16
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/kk'$	1.04	1.28
$\pi^- \rightarrow$ 高速中性子束	$10^{15} n/cm^2 \cdot s$	1.6	1.6
$\pi^- \rightarrow$ 高速中性子照射量	$10^{23} n/cm^2$	4.4	4.6
ナトリウムボイド反応度	\$	8.1	7.1
ドップラ係数	$10^{-3} Tdk/dT$	-2.6	-2.7

\* Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

表 4.2.3-1 Pb-Bi 自然循環冷却炉の LLFP 核変換特性

		Pb-Bi自然循環炉	大型MOX燃料Na炉
		I	Tc
LLFP集合体	スミア密度	50%	80%
	減速材比	60%	48%
LLFPスタック長(cm)		70	70
ガスフレナム長(cm)(下部/上部)		97/76	-
LLFP集合体数		55	44
LLFP装荷量(kg)	1集合体	4.5	41.2
	全体	246	1813
出力当たり	kg/GWt	170	1250
核変換率(%/cycle)	第1層	3.2%	1.1%
(非均質補正前の値)	第2層	1.3%	-
取出変換率		29%	37%
滞在期間	cycle	12	19
	year	18.0	28.5
サポートファクタ		1.00	1.00
LLFP集合体への必要流量(kg/sec/集合体)		14.0	12.4
炉心流量比率(%)		1.4	1.0

非均質補正係数 (I : 1.0、Tc : 0.93) を考慮して結果を整理

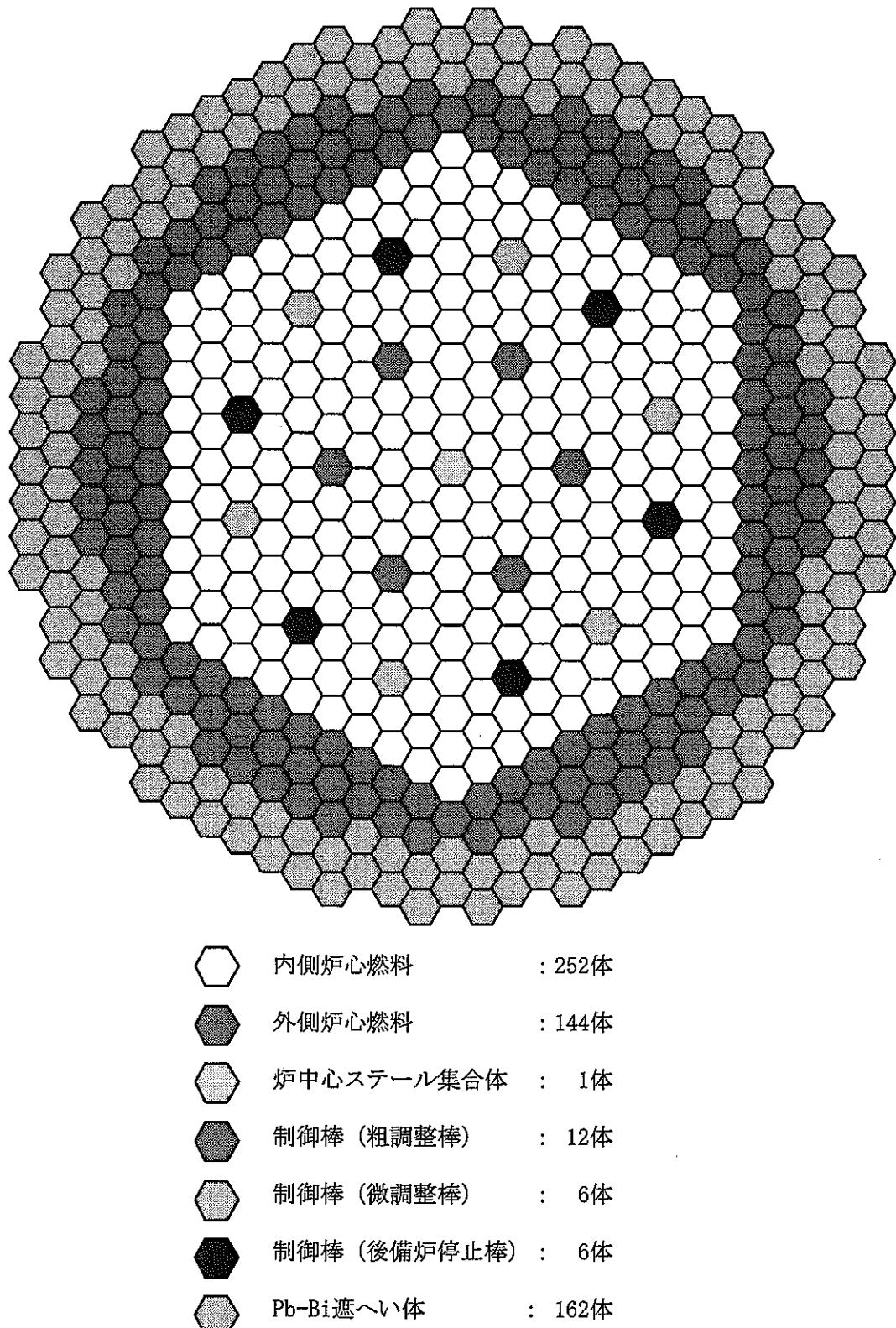


図 4.2.1-1 自然循環 Pb-Bi 冷却炉の炉心構成

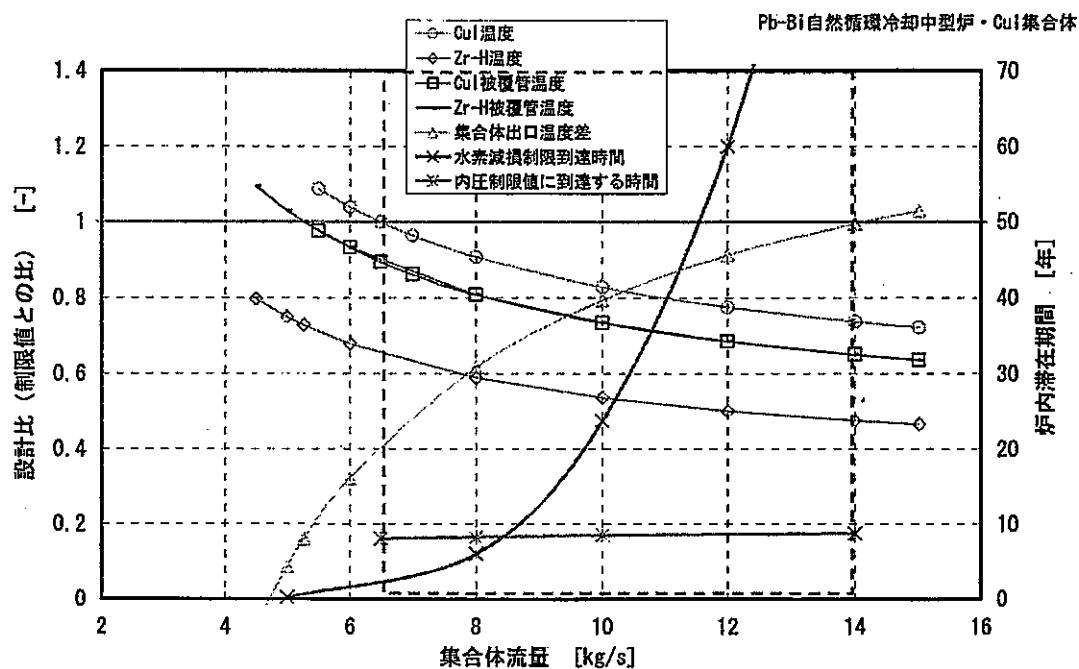


図 4.2.2-1 CuI 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

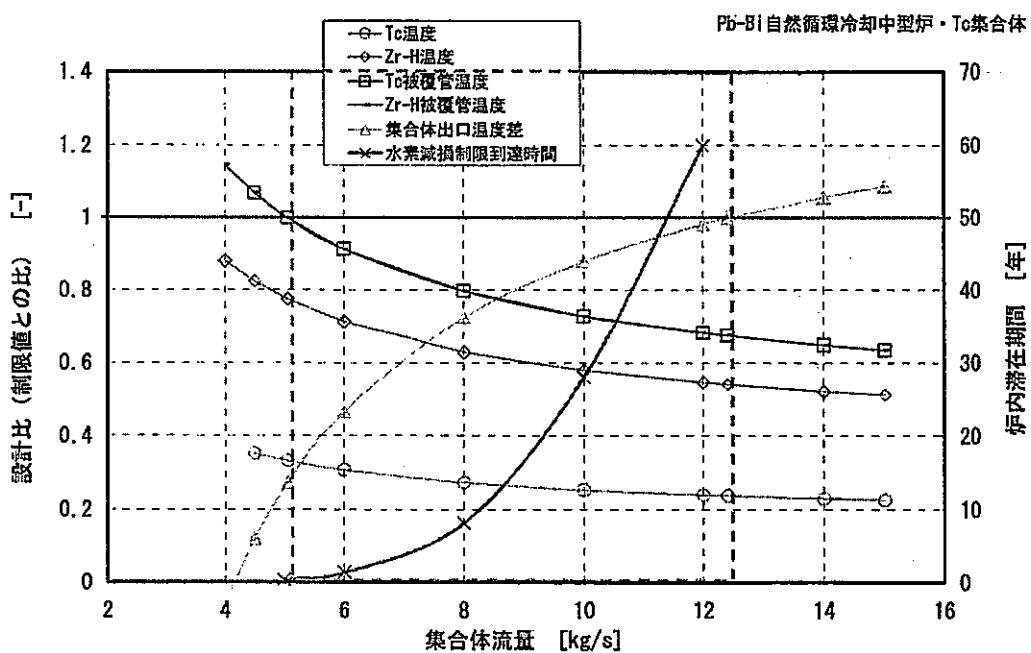


図 4.2.2-2 Tc 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

## 5 横方向流 He ガス冷却炉

### 5.1 基準炉心および LLFP 核変換集合体の仕様

コンパートメント型被覆粒子燃料・横方向流 He ガス冷却炉 (2400Mwt/1124MWe) を基準炉心とした LLFP 集合体装荷炉心について、その核変換特性、炉心特性及び LLFP 集合体の熱流動特性を評価した。また、He ガス冷却炉の LLFP 核変換能力について、大型 Na 冷却炉との比較を行った。表 5.1-1 に基準炉心の基本仕様及び主要核特性を、図 5.1-1 に炉心構成を示す。

He ガス冷却炉における LLFP 集合体の仕様は、2001 年度 FS にて検討を行った耐熱ピン型の燃料集合体を参考として設定した。構造材には耐高温材として SiC を想定した。

He ガス炉の冷却材出口温度は 850°C と高温であるため、ヨウ素化合物として CuI (融点: 605°C) 以外の候補化合物を検討した。CuI より融点が高いよう素化合物をリストアップし、物性や中性子吸収断面積及び中性子効率を整理して表 5.1-2 に示した。その結果、融点が約 1000°C と高いこと、かつ中性子効率や結晶構造安定性 (斜方晶及び六方晶でない) の観点から、 $\text{YI}_3$  を選定した。

中性子減速材については、Na 炉や Pb-Bi 炉で用いた Zr-H では水素解離の観点から制限目標を満足できないことが予想されたため、ガス炉向けの代替減速材として Y-H を選定した。

表 5.1-3 に LLFP 集合体の仕様を示す。Tc 集合体の LLFP スタック長は、炉心高さと同じ 180cm とし、 $\text{YI}_3$  集合体については Xe ガス放出による内圧上昇を系統圧 (60atm) 以下とするためにガスプレナムを長くする必要があり、 $\text{YI}_3$  スタック長を 54cm とした。

燃料集合体と同一仕様とし、 $\text{YI}_3$  集合体及び Tc 集合体のピン本数はそれぞれ 397 本、217 本であり、Zr-H ピン数比率は核変換率・量の観点から、それぞれ 20%、70% と設定した。

### 5.2 LLFP 集合体装荷炉心の核熱特性

LLFP 集合体内の熱解析は、発熱量の異なる 3 本の要素に囲まれた流路 (サブチャンネル) に着目し、この流路を形成する各要素からの入熱を考慮して評価を行った。解析上着目した観点は、各被覆管の最高温度制限、LLFP や Zr-H 要素の溶融、水素透過制限、及び被覆管の機械的健全性である。

Y-H 減速材ピンの初期 Zr/H 比は 1.8 とした。水素透過モデル等、評価方法は大型 Na 炉と同様であり、SiC 被覆管からの水素透過率は詳細は現状で不明ながらステンレス鋼より 5 衍程度低いとされていることから本検討では、オーステナイト系ステンレス鋼の透過係数に  $1 \times 10^{-5}$  を乗じて評価した。

被覆管の温度評価に際しては、工学的安全係数値として米国 GA 社の GCFR 設計時に検討さ

れた値を暫定的に適用した。LLFP 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係を図 5.2-1、-2 に示す。図中に示す「設計比」は下記の各制限値との比を表すものである。

YI <sub>3</sub> 温度制限値	997°C
Tc 温度制限値	2170°C
Y-H 温度制限値	1000°C (相安定性の観点)
SiC 被覆管温度制限値	2200°C
集合体出口温度差制限値	150°C (隣接集合体との出口温度差、暫定値)
内圧制限値	5.9 MPa(60 atm)

内圧制限については、炉内滞在期間中に LLFP ピンの内圧が系統圧（外圧支配）を上回らないこととして制限値を設定した。

YI<sub>3</sub> 集合体の総発熱量は 55kW であり、YI<sub>3</sub> の融点が制限因子となって下限流量が定まり、隣接集合体出口温度差が上限流量を定める。YI<sub>3</sub> 集合体滞在期間は、水素透過制限ではなく内圧制限により律則される。

Tc 集合体の総発熱量は 166kW であり、減速材 Y-H の温度制限が下限流量を、隣接集合体出口温度差が上限流量を定めるが、出口温度差を 150°C 以下にする現在の条件では、熱的制限を満たす流量範囲が存在しない。これについては今後、炉心直上部に炉上部構造物がないこと、あるいはダクトを付帯しない炉心燃料集合体が隣接する等を勘案し、隣接集合体間温度差に関する制限の考え方および制限値の検討が必要である。

核変換特性の評価は 2 次元 7 群 RZ 拡散燃焼計算に基づいて行った。群定数セットとして JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を用い、1 次元拡散燃焼計算によって 7 群に縮約した。また、物質組成の取り扱いは、LLFP 集合体を含めて、全て集合体平均の均質組成とした。

表 5.2-2 に LLFP 集合体装荷炉心の主要な核特性の評価結果を示す。径方向ブランケットを LLFP 集合体に置換することにより増殖比は 1.0 以下になったため、上下ブランケットを各々 10cm 延長して 1.03 の増殖比を確保した。平衡期に必要な値をほぼ満足している。LLFP 集合体には減速材が含まれ、中性子スペクトルはやや軟化するため、ドップラー係数は僅かながら改善した。

### 5.3 LLFP 核変換特性

$\text{YI}_3$ 集合体の装荷体数や滞在期間は、内圧制限下でサポートファクターが 1.0 以上となるよう調整した。 $\text{YI}_3$ 集合体については、径方向ブランケット領域の第一層目装荷に加え、変換量確保の必要性に応じてその外側の第二層目に装荷し、 $\text{YI}_3$ ピンの内圧抑制のため、装荷期間中に第 1 層と第 2 層を置換するものとした。Tc 集合体については、Tc の中性子吸収によってその外側（第二層目）では効果的な核変換が期待できないため、第 1 層目のみに装荷するものとし、サポートファクターが 1.0 以上となるよう滞在期間を調整して取出変換率を算出した。

変換特性の評価結果を表 5.3-1 にまとめた。He ガス炉心では、87 体の  $\text{YI}_3$ 集合体を 10 サイクル（約 16 年）装荷することにより取出変換率は約 17%を得た。Tc 集合体については 41 体、7 サイクル（約 12 年）装荷で変換率は約 23%が得られた。

サポートファクターを 1.0 とするのに必要な原子炉熱出力当りの LLFP 装荷量は、 $^{129}\text{I}$  で約 270kg/GWt、 $^{99}\text{Tc}$  で約 1370kg/GWt であり、大型 MOX 燃料 Na 炉の 310kg/GWt、1680kg/GWt に比べてやや少ない装荷量となった。

LLFP 集合体 1 体当たりの必要流量は  $\text{YI}_3$ 集合体で 0.04kg/sec、Tc 集合体で 0.28kg/sec であり、炉心流量に占める全 LLFP 集合体の流量割合はそれぞれの集合体に対し 0.3%、1.0% と小さい。

表 5.1-1 横方向流 He ガス冷却炉の炉心仕様／特性

項目	単位	仕様/特性
炉心		
原子炉熱出力	MWt	2400
1次系冷却材流量	kg/s	$1.19 \times 10^3$
原子炉出/入口温度	°C	850/460
運転サイクル長さ	EFPN	19.7
燃料交換バッチ数	-	8
炉心燃料集合体数（内側炉心/外側炉心）	-	303/240
径方向プランケット体数	-	181
制御棒本数（主/後備/SASS）	-	30/6/4
可動反射体（SiC）数	-	212
炉心高さ	cm	180
軸方向プランケット厚（上部/下部）	cm	35/35
軸方向遮へい（SiC）厚（上部/下部）	cm	50/70
燃料集合体		
燃料材料	-	Pu/U 塗化物
被覆材料	-	TiN
集合体及びコンパートメント材料	-	SiC コンポジット
集合体配列ピッチ	cm	22.23
被覆粒子充填部体積比	%	58.6
被覆粒子充填率	%	60.0
被覆粒子体積比	%	35.2
体積比		
燃料	%	16.3
被覆材	%	18.9
SiC 構造体	%	8.6
He 冷却材	%	56.2
燃料理論密度	%	95
Pu 富化度*（中央部：内側/外側炉心）	w/o	16.9/21.1
（上下部：内側/外側炉心）	w/o	22.4/27.6
主要炉心特性		
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	12.0
增殖比	-	1.17
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/kk'$	0.82
$\bar{\nu} \rightarrow$ 高速中性子束	$10^{15} n/cm^2 \cdot sec$	0.85
$\bar{\nu} \rightarrow$ 高速中性子照射量	$10^{23} n/cm^2$	3.5

\* Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

(燃料組成：高速多重リサイクル TRU 組成 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)

表 5.1-2 よう素化合物の特性比較

物質	融点 <sup>1)</sup> (°C)	中性子吸收反応 断面積 <sup>2)</sup> (barn)	中性子効率	備考
NaI	651	0.053	63.6%	立方晶
MgI <sub>2</sub>	650	0.003	65.3%	六方晶
KI	680	0.200	59.2%	
CaI <sub>2</sub>	740	0.020	64.7%	<sup>41</sup> Ca生成: T <sub>1/2</sub> =1.03×10 <sup>5</sup> y
ScI <sub>3</sub>	945	0.515	51.5%	
VI <sub>2</sub>	850(昇華)	0.239	58.1%	
CrI <sub>2</sub>	790	0.253	57.7%	
MnI <sub>2</sub>	613	0.762	46.7%	
NiI <sub>2</sub>	797	0.233	58.3%	
CuI	605	0.409	53.8%	
YI <sub>3</sub>	997	0.033	64.3%	BiI <sub>3</sub> 型構造(六方晶系)
CsI	626	10.041	10.4%	
BaI <sub>2</sub>	740	0.191	59.4%	
LaI <sub>3</sub>	778	0.276	57.1%	
CeI <sub>3</sub>	725	0.015	64.9%	斜方晶
<sup>127</sup> I	-	4.440	-	
<sup>129</sup> I	-	1.458	-	

1) 無機化合物・錯体辞典 講談社 (1997)

2) JENDL-Data/Code 99-003 JENDL-3.2に基づくORIGEN2用ライブラリー: ORLIBJ32 (1999)

中性子効率の定義は次のとおり。

$$\frac{\int \int (N_{129} \sigma_{129} \phi) dEdV}{\int \int (N_{129} \sigma_{129} \phi) dEdV + \int \int (N_{127} \sigma_{127} \phi) dEdV + \int \int (N_i \sigma_i \phi) dEdV}$$

ここで、

 $N_{129}$ 、 $N_{127}$ 、 $N_i$ : それぞれ、<sup>129</sup>I、<sup>127</sup>I、Iに化合している核種の原子数密度 $\sigma_{129}$ 、 $\sigma_{127}$ 、 $\sigma_i$ : それぞれ、<sup>129</sup>I、<sup>127</sup>I、Iに化合している核種の微視的断面積 $\phi$ : 中性子束

表 5.1-3 横方向流 He ガス冷却炉装荷用 LLFP 集合体の仕様

集合体		Tc 集合体		YI <sub>3</sub> 集合体			
充填材	材料	Tc	Y-H	YI <sub>3</sub>	Y-H		
	形態	ペレット					
	外径 [mm]	8.77	9.30	5.30	6.36		
	充填材スマア密度 [%]	80	90	50	90		
被覆管	材料	SiC					
	外径 [mm]	11.8		8.7			
	内径 [mm]	9.8		6.7			
	肉厚 [mm]	1.0		1.0			
要素	全長 [mm]	2600					
	直径ギャップ [mm]	1.03	0.50	1.40	0.34		
	ボンド材	He					
	充填材スタック高さ [mm]	1800		540			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	350/350		980/980			
	初期封入ガス	He					
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1					
スペーサ	形式	グリッド型					
	材料	SiC					
タイロッド	タイロッド直径 [mm]	11.8		8.7			
	タイロッド本数	3					
ラッパ管	材料	SiC					
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	215.9					
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	211.6					
	ラッパ管肉厚 [mm]	2.2					
集合体	バンドル規模 [本]	217		397			
	要素配列ピッチ [mm]	14.24		10.55			
	P/D	1.21		1.21			
	集合体配列ピッチ [mm]	222.3					

表 5.2-1 LLFP 集合体を装荷した横方向流 He ガス炉心の主要な核特性

項目	単位	基準炉心	LLFP 核変換炉心
炉心			
原子炉熱出力	MWt	2400	2400
運転サイクル長さ	EFPm	19.7	19.7
燃料交換バッチ数	-	8	8
炉心燃料集合体数 (内側/外側炉心)	-	303/240	303/240
径方向ブランケット体数	-	181	0
制御棒本数 (主/後備/SASS)	-	30/6/4	30/6/4
可動反射体数 (SiC)	-	212	254
LLFP (Tc) 集合体数 (炉外)	-	-	41
LLFP (I) 集合体数 (炉外)	-	-	98
炉心高さ	cm	180	180
軸方向ブランケット厚 (上部/下部)	cm	35/35	45/45 <sup>*2</sup>
Pu 富化度 <sup>*1</sup> (中央部:内側/外側炉心)	w/o	16.9/21.1	17.0/22.9
(上下部:内側/外側炉心)	w/o	22.4/27.6	22.8/29.6
主要炉心特性			
炉心取出平均燃焼度	$10^4 \text{MWd/t}$	12.0	12.4
増殖比	-	1.17	1.03 <sup>*2</sup>
燃焼欠損反応度	% $\Delta k/kk'$	0.82	1.0
ピーコ高速中性子束	$10^{15} n/cm^2 \cdot s$	0.85	0.90
ピーコ高速中性子照射量	$10^{23} n/cm^2$	3.5	3.7
減圧反応度	\$	1.2	1.2
ドップラ係数	$10^{-3} Tdk/dT$	-10	-11

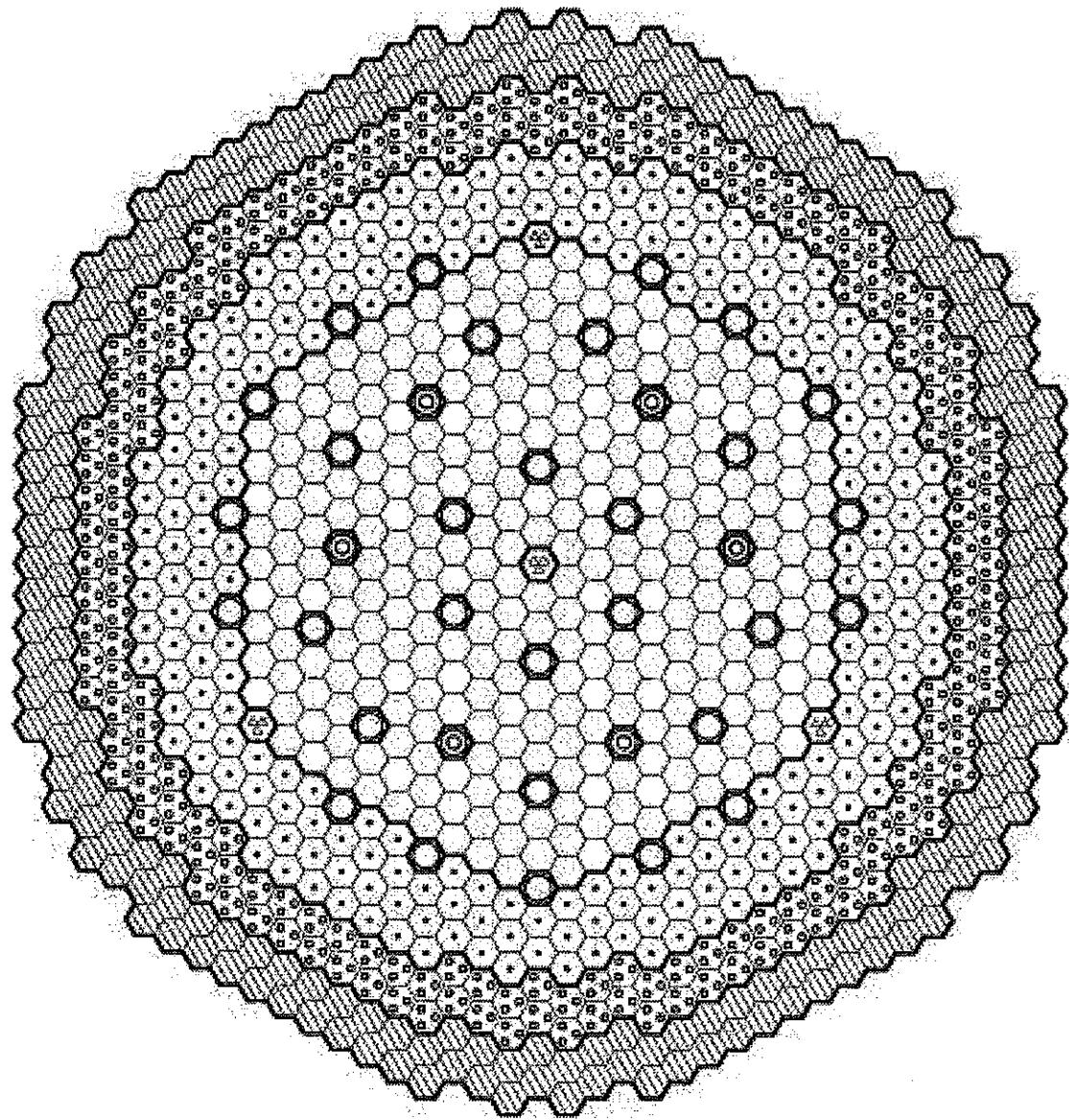
\*1 Pu 富化度 = Pu/HM [w/o]

\*2 軸方向ブランケットを上下 10cm づつ延ばすことで増殖比を 1.03 とした。

表 5.3-1 横方向流 He ガス冷却炉の LLFP 核変換特性

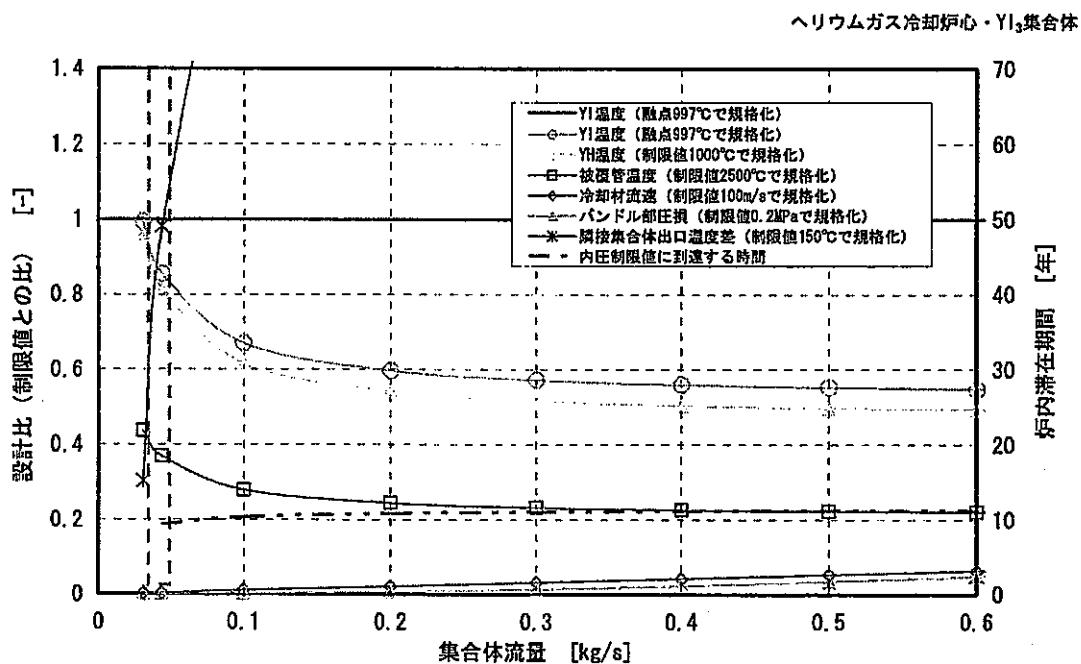
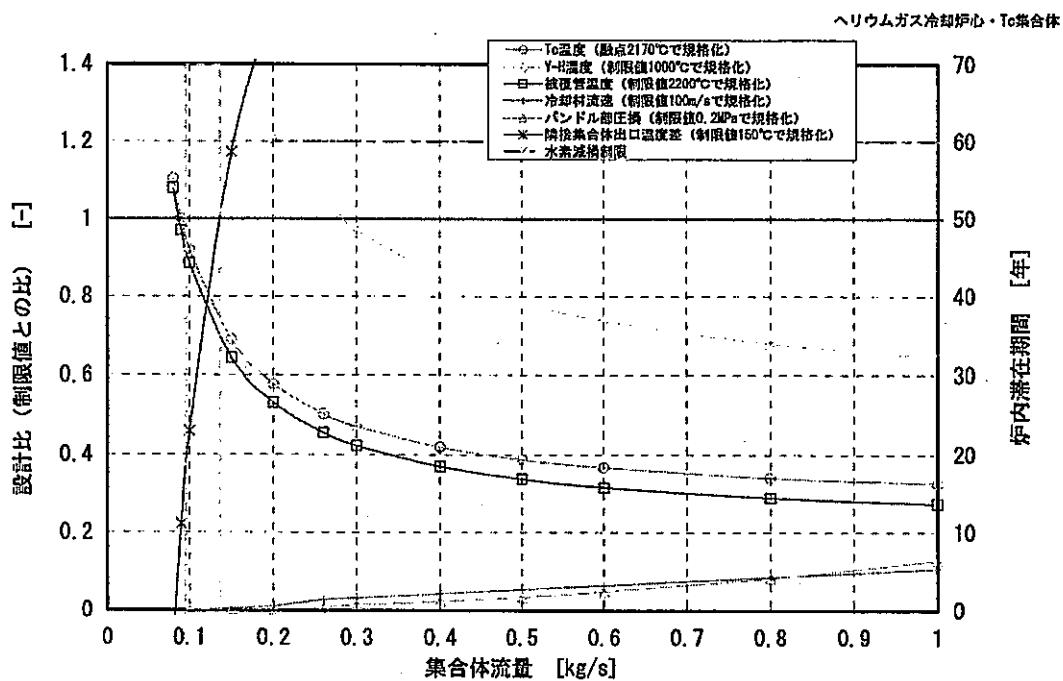
LLFP集合体	Heガス炉		大型MOX燃料Na炉	
	I	Tc	I	Tc
スミア密度	40%	80%	55%	80%
減速材比	20%	70%	20%	48%
LLFPスタック長(cm)	54	180	110	150
ガスプレナム長(cm)(下部/上部)	98/98	-	142/28.5	-
LLFP集合体数	87	41	70	53
LLFP装荷量(kg)	1集合体 全体	7.3 636	80.0 3282	15.6 1093
出力当たり	kg/GWt	265	1367	112.9
核変換率(%/cycle) (非均質補正前の値)	第1層 第2層	1.9% 1.4%	1.0% -	0.8% 0.6%
取出変換率		17%	23%	14% 21%
滞在期間	cycle year	10 16.4	7 11.5	6 9.0
サポートファクタ		1.00	1.00	1.00 1.00
LLFP集合体への必要流量(kg/sec/集合体)	0.04	0.28	2.8	4.2
炉心流量比率(%)	0.3	1.0	1.1	1.2

非均質補正係数 (I : 1.0、Tc : 0.93) を考慮して結果を整理



内側炉心燃料	: 303体	外側炉心燃料	: 240体
径方向ブランケット	: 181体	可動反射体 (SiC)	: 212体
制御棒(主炉停止系)	: 30体	制御棒(後備炉停止系)	: 6体
制御棒(受動的炉停止系)	: 4体		

図 5.1-1 横方向流 He ガス冷却炉の炉心構成

図 5.2-1  $\text{YI}_3$ 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係図 5.2-2  $\text{Tc}$ 集合体の設計制限因子を満たす集合体流量と炉内滞在期間の関係

## 6 各炉型の核変換能力の比較

### 6-1 解析結果の整理

評価対象とした 6 種の炉型の解析結果に基づき、各炉型の核変換対応能力の比較を行う。本節では、非均質効果補正因子として、サーベイ検討時暫定値として設定した 0.95 (I 及び Tc に共通) を想定し、2.3 節の「LLFP 集合体仕様選定の考え方」で示した以下 5 通りの LLFP 集合体設定ケースについて解析結果を整理する。

概念① スミア密度、減速材比を全炉型で統一

概念② 取出変換率 30%で統一

概念③ 内圧制限導入

概念④&④' 内圧制限下で取出変換率を向上させるため I 集合体の仕様を変更

表 6.1-1 に概念①の評価結果を示す。概念①では昨年度に設定した LLFP 集合体仕様を用いて<sup>[1]</sup>スミア密度、減速材比を全炉型で統一し、LLFP スタック長は炉心と同じ高さに設定している。

概念①では、核変換率は大型金属燃料 Na 冷却炉で大きく、また、He ガス冷却炉の Tc で小さいが、その他の炉型では概ね同等の値となっている。

一方、概念①に基づく仕様設定では、大型 MOX 燃料 Na 冷却炉と Pb-Bi 強制循環炉でサポートファクター 1.0 を満足できず、自己生成核変換炉心として成立していない。サポートファクターを改善するには、LLFP の装荷量を増やすように LLFP 集合体の仕様を変更する必要がある。この場合、核変換率は低下することになる。

He ガス炉での Tc については、サポートファクター 1.0 を満足する十分な核変換量を確保できているが、核変換率が低く取出変換率を 30%とするためには 60 年以上の期間が必要となる。これを解消するためには、LLFP 装荷量を減少させる、あるいは、減速材を増やす等の LLFP 集合体仕様の変更を行い、核変換率の向上を図る必要がある。

表 6.1-2 に概念②の結果を示す。ここでは、概念①の結果を基に、取出変換率やサポートファクターの目標値を満足するように、一部の LLFP 集合体の仕様を変更している。

その結果、いずれの炉型も取出変換率 30%、サポートファクター 1.0 を満足している。Na 冷却 MOX 中型高内部転換型炉と He ガス炉の増殖比が 1.0 近傍となり、設計目標の 1.03 を満足していないが、第 3 章、5 章で示した通り、軸方向ブランケット高さを増加させることで対応できる見通しである。

LLFP 集合体の熱流動特性の主な評価結果を表 6.1-3 に整理した。LLFP 集合体全体の必要

流量は、いずれの炉型でも全体の3%程度以下と小さい。Heガス炉での集合体出口温度差が大きめとなっているが、これについては、炉上部構造を持たないガス炉の集合体出口温度差制限設定の考え方と合わせて、今後の検討課題である。

内圧制限を導入した概念③の結果を表6.1-4、表6.1-5に示す。ここでは、概念②のLLFP仕様をベースとして、I集合体にIピンの内圧制限(Heガス冷却炉で60気圧、その他の炉型で120気圧)を課した結果を整理している。

内圧制限を課す場合、I変換後のXeガス生成による内圧増加のため、I集合体を早い段階で取り出す必要があり、Iの取出変換率が制限される。ここで、内圧制限は最大反応率を持つIピンで生じるため、集合体位置の置換等により最大反応率位置に滞在する時間を短くすることで全体の取出変換率を向上させることができる。

表6.1-4及び表6.1-5に内圧制限下での位置置換の有無による核変換特性の評価結果を示した。位置置換については、径方向プランケットあるいは遮蔽体第1層と2層の置き換えを想定し、許容される取出変換率から得られる炉内滞在期間の1/2の時点で行うものとした。内圧制限下での取出変換率は、第1層と第2層の置換により数%向上し、大型金属燃料Na冷却炉及びPb-Bi自然循環冷却炉の取り出し変換率は20%以上となった。I集合体の位置置換は変換率を改善する上で有効な方法と考えられるが、実際の運用・実施可能性についてはLLFP集合体挿入性等の詳細検討が必要である。

内圧緩和のためLLFP集合体仕様を変更した概念④及び④'の結果を、表6.1-6及び表6.1-7に示す。

Iの取出変換率を制限しているIピンの内圧を緩和するに当たり、概念④ではI化合物のスミア密度を低減、概念④'ではスタック長を低減して、1ピン当たりのI装荷量を減じている。これらの表から、2つの方策の効果はほぼ同等であり、取出変換率が若干向上するものの、内圧制限下での取出変換率は、大型金属燃料Na冷却炉及びPb-Bi自然循環冷却炉を除いて10~20%程度に制限される結果となった。

I化合物のスミア密度を低減させた場合の各炉型の核変換特性を表6.1-8にまとめた。ここで、Tcの数値は表6.1-2から転記したものである。

I集合体の内圧緩和方策としては、I集合体の回転(装荷位置は変えず、集合体向きを180°回転)も考えられる。表6.1-9にLLFP核変換炉心概念④に対して、回転を考慮しない場合とした場合におけるIの核変換特性の概略評価結果を示す。ここで、回転の効果は主として集合体内でのLLFPの吸収反応率のピーキングにより決まると考えられるため、集合体の回転により吸収反応率分布が完全に均一になると仮定した。結果として、Iの取出変換率は、回転によりピーキング係数の1.0からの差分である2~4割ほど改善できる結果を得た。

## 6-2 核変換率に対する非均質効果を見直した場合の比較

前節の結果整理では、I 及び Tc の核変換率に対する非均質効果の補正因子として暫定値である 0.95 を用いていた。2003 年度作業の終盤にて、大型 MOX 燃料 Na 冷却炉を対象としたモンテカルロ計算によって非均質効果補正因子（I について 1.0、Tc について 0.93）を算出し、補正值の改訂を行ったため<sup>[3]</sup>、表 6.1-8 の核変換特性整理表を見直し、本研究の最終的な結果として表 6.2-1 をまとめた。

また、修正された LLFP 集合体装荷体数を反映した炉心配置図を図 6.2-1～-7 に示した。

I 集合体については、内圧制限によって制限される最大の取出変換率から滞在可能期間を定めるとともに、サポートファクターを 1.0 とするのに必要な装荷集合体数を定めた。この際、変換量確保の必要性に応じて、径方向ブランケット領域の第一層目装荷に加え、その外側の第二層目にも CuI 集合体を装荷することとした。Tc 集合体については、Tc の中性子吸収によってその外側（第二層目）では効果的な核変換が期待できないため、第 1 層目のみに装荷するものとして、サポートファクターがほぼ 1.0 となるよう滞在期間を調整して取出変換率を算出した。

非均質効果の見直しにより、前節までの整理結果に比べて、I 及び Tc ともに核変換特性は改善され、I 集合体の必要装荷体数は低減し、Tc 集合体は滞在可能期間が延長され、変換率が改善される結果となった。非均質効果を見直した最終結果を要約すると以下の通りとなる。

- 検討した 6 炉型は、達成できる核変換率に差はあるものの、いずれも増殖比>1 を維持しながら自己生成分の I 及び Tc を核変換できる可能性がある。
- 大型金属燃料 Na 炉及び自然循環 Pb-Bi 炉は、I、Tc ともに目標に近い 30%程度の核変換率を達成可能である。両炉とも優れた変換特性を示しているため、集合体装荷体数や仕様の調整等によって、目標変換率を達成しつつ 1.0 以上のサポートファクター（変換/生成）が得られる可能性がある。
- 大型 MOX 燃料 Na 炉、He ガス炉、強制循環 Pb-Bi 炉そして中型 MOX 高内部転換型 Na 炉は、I、Tc ともに 10%前後の変換率を達成できる可能がある。

本検討の前提条件、結果のまとめを表 6.2-2 に示した。また、FS における LLFP 検討の流れを表 6.2-3 に整理した。

## 6-3 各炉型の LLFP 核変換能力の比較考察

各炉型の LLFP 核変換能力を比較することを目的に、変換特性の違いを基本的な因子で整理することを試みた。

本検討で想定した様に、炉心周辺領域へ LLFP 集合体を装荷する場合、LLFP の装荷可能量は炉心の大きさ（炉心径と高さ）に依存し、装荷領域の大きい炉心ほど変換量を大きくできる可能性がある。一方、LLFP 生成量は原子炉熱出力にほぼ比例するため、出力の大きい炉心ほど、サポートファクター 1.0 を満たすために必要な変換量は大きくなくてはならない。また、変換性能を示す LLFP 変換率は、炉心領域から LLFP 集合体へ流れ込む境界での中性子束レベルに依存するため、これらを総合した変換特性を表す一つの指標例として以下が考えられる。

$$S_r \phi_r / P$$

$S_r$  : 炉心側面積 [m<sup>2</sup>] . . . . . LLFP 装荷可能量に関する因子

$\phi_r$  : 径方向境界全中性子束 [n/cm<sup>2</sup>sec] . . . LLFP 変換速度に関する因子

P : 炉心熱出力 [GWt] . . . . . 炉心での LLFP 生成速度に関する因子

ここで指標「 $S_r \phi_r / P$ 」は、「[n/J]」の単位を持ち、「1J のエネルギー生産当たりに何個の中性子が炉心と LLFP 集合体の境界に漏れ出るか」を示す量と言える。各炉の「 $S_r \phi_r / P$ 」と核変換率の評価結果を図 6.3-1 に比較して示した。また表 6.3-1 にはこれらの数値を示した。

Na 冷却炉については、大型金属燃料炉は大型 MOX 燃料炉に比べ炉心側面積  $S_r$  は同等ながらも、境界中性子束  $\phi_r$  が 2 倍近く高いために変換特性が優れている。大型及び中型の MOX 燃料炉の比較では、境界中性子束  $\phi_r$  は大型でやや大きいが、「炉心側面積/熱出力」( $S_r / P$ ) の比は中型炉で 2 倍程度大きく、結果的に「 $S_r \phi_r / P$ 」指標としては中型炉で大きく、変換特性の評価結果も中型で優れている。

Pb-Bi 自然循環炉は Pb-Bi 強制循環炉と同じ炉心高さを持ち、炉心等価直径も 464cm と強制循環炉の 441cm とほぼ同等でありながら、出力 P は 1450MWt と 2 割以上小さい。すなわち、「炉心側面積/熱出力」( $S_r / P$ ) の値は自然循環炉で大きく、強制循環炉に比べて変換特性が優れる結果となっている。

He ガス炉は、炉心高さが 1.8m と高く、「炉心側面積/熱出力」( $S_r / P$ ) は本来大きいが、I ピン内圧の制限より YI<sub>3</sub> 要素のスタック長を短くする必要があるため、I 装荷量を多くできず、現在の設計制約条件下では高い変換性能を達成できていない。図 6.3-1 で He ガス炉の「 $S_r \phi_r / P$ 」指標は金属燃料 Na 炉並に大きいながらも、(b) 評価結果の図で小さい変換率となっているのは、設計制約を反映して LLFP スタック長を短縮した LLFP 仕様となっているた

めと考えられる。

表 6.1-1 LLFP 核変換炉心概念①の核変換特性の整理

炉型	サイクル日数 day/cyc	スピア 密度	減速材 比	LLFP スリック長 (cm)	LLFP 集合体数	LLFP装荷量(kg)			核変換率(%/cyc)			取出 変換率	潜在期間		LLFP 取出量 (kg)	LLFP量(kg/cyc)		サポート ファクタ
						1集合体	全体	第1層	第2層	平均	cyc	year	核変換量	生成量				
Na冷却炉																		
MOX大型	548	80%	48%	80	137	49.3	2712	1.43%	-	1.43%	29.1%	24	36.0	1921	32.9	44.7	0.74	
Tc		50%	60%	80	55	5.1	420	3.30%	1.17%	2.24%	30.4%	16	24.0	293	8.0	14.3	0.56	
I					82													
MOX中型	791	80%	48%	100	107	65.9	2438	1.60%	-	1.60%	29.8%	22	47.6	1711	33.1	32.3	1.03	
Tc		50%	60%	100	37	6.4	447	4.25%	1.40%	2.84%	29.2%	12	26.0	317	10.9	10.4	1.05	
I					70													
金属大型	548	80%	50%	90	139	49.8	2042	2.85%	-	2.85%	29.4%	12	18.0	1442	49.9	49.4	1.01	
Tc		50%	60%	90	41	5.8	564	6.53%	2.75%	4.66%	28.4%	7	10.5	404	22.9	15.9	1.44	
I					98													
Pb-Bi冷却炉																		
強制循環	548	80%	48%	70	126	36.5	1971	1.30%	-	1.30%	29.8%	27	40.5	1384	21.7	23.8	0.91	
Tc		50%	60%	70	54	4.2	305	3.35%	1.26%	2.31%	29.6%	15	22.5	214	6.0	7.7	0.78	
I					72													
自然循環	548	80%	48%	70	114	41.2	1731	1.28%	-	1.28%	29.3%	27	40.5	1223	18.8	18.4	1.02	
Tc		50%	60%	70	42	322	3.43%	1.36%	2.40%	30.5%	15	22.5	224	6.6	5.9	1.11		
I					72	4.5												
Heガス冷却炉	600	80%	48%	180	138	42	165.5	0.57%	-	0.57%	18.6%	36	59.1	5655	36.0	33.3	1.08	
Tc		50%	60%	180	96	15.2	1463	3.39%	2.51%	2.95%	30.2%	12	19.7	1021	36.8	10.7	3.43	
I					96													

注1) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注2) Iは第1層と2層の置換を考慮

注3) Tc集合体の体数はLLFP核変換炉心概念②で必要な体数とし、残りの第1層全てとその後ろの第2層にI集合体を装荷することを想定

表 6.1-2 LLFP 核変換炉心概念②の核変換特性の整理

炉型	サイクル日数 day/cyc	スミア 密度	減速材 比	LLFP スタック長 (cm)	LLFP 集合体数	LLFP 装荷量(kg)		核変換率(%/cyc)			取出 変換率	滞在期間		LLFP 取出量 (kg)	LLFP 量(kg/cyc)		サポート ファクタ	増殖比			
						1集合体	全体	第1層	第2層	平均		cyc	year		核変換量	生成量					
						Tc	I	80%	48%	150	55	112.9	6209	0.85%	-	0.85%	28.9%	40	60.0	4413	44.9
Na冷却炉 MOX大型	548	80%	48%	150	55	112.9	6209	0.85%	-	0.85%	28.9%	40	60.0	4413	44.9	44.7	1.00	1.03			
MOX中型	791	70%	40%	110	82	14.8	1214	2.08%	0.74%	1.41%	29.9%	25	37.5	851	14.5	14.3	1.02	0.99			
Tc	80%	48%	100	37	66.2	2450	1.60%	-	1.60%	29.8%	22	47.6	1719	33.2	32.3	1.03	1.00	1.05			
I	50%	60%	100	68	6.4	435	4.25%	1.40%	2.84%	31.2%	13	28.2	299	10.4	10.4	1.00	1.05	1.05			
金属大型	548	80%	50%	90	41	50.0	2051	2.85%	-	2.85%	29.4%	12	18.0	1449	50.2	49.4	1.02	1.03	1.05		
Tc	50%	60%	90	70	5.8	403	6.53%	2.75%	4.66%	28.4%	7	10.5	288	16.3	15.9	1.03	1.03	1.05	1.05		
Pb-Bi冷却炉 強制循環	548	80%	40%	105	54	63.7	3439	0.83%	-	0.83%	28.4%	40	60.0	2464	24.4	23.8	1.02	1.16	1.16		
I	70%	40%	105	64	13.3	853	1.56%	0.59%	1.07%	30.7%	34	51.0	591	7.7	7.7	1.00	1.16	1.16	1.16		
自然循環	548	80%	48%	70	42	41.2	1731	1.28%	-	1.28%	29.3%	27	40.5	1223	18.8	18.4	1.02	1.02	1.05	1.05	
Tc	50%	60%	70	66	4.5	295	3.43%	1.36%	2.40%	30.5%	15	22.5	205	6.0	5.9	5.9	1.02	1.02	1.05	1.05	
Heガス冷却炉	600	80%	70%	180	42	80.0	3362	1.17%	-	1.17%	29.8%	30	49.3	2361	33.4	33.3	1.00	1.00	1.00	1.00	
I	50%	40%	54	92	6.9	631	2.31%	1.71%	2.01%	29.2%	17	27.9	447	10.8	10.7	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00

注1) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注2) Iは第1層と2層の置換を考慮

表 6.1-3 LLFP 核変換炉心概念②の熱流動特性の整理

炉型	炉心出力 (MWt)	LLFP集合体 発熱量(kW)			炉心流量 (kg/sec)	必要流量(kg/sec)			LLFP集合体内 各部最高温度(°C)			出口温度 差(°C)	水素化物 のH/M	CDF	ガスプローブ長 (cm)	内圧 (atm)
		1集合体	合計	割合		1集合体	合計	割合	LLFP	減速材	被覆管					
Na冷却炉																
MOX大型	3570															
Tc		184	10093	0.3%												
I		110	9012	0.3%												
MOX中型	1785															
Tc		144	5339	0.3%												
I		108	7371	0.4%												
金属大型	3900															
Tc		287	11751	0.3%												
I		223	15617	0.4%												
Pb-Bi冷却炉																
強制循環	1875															
Tc		101	5459	0.3%												
I		92	5901	0.3%												
自然循環	1450															
Tc		109	4565	0.3%												
I		124	8164	0.6%												
Heガス冷却炉	2400															
Tc		166	6989	0.3%												
I		55	5097	0.2%												

\*1 集合体の回転、減速材ピンの肉厚変更を行うことで成立する見通しである。

表 6.1-4 LLFP 核変換炉心概念③の I の核変換特性（第 1 層と第 2 層の LLFP 集合体を置換なし）

炉型	スミア 密度	減速材 比	LLFPスタック長(cm)			ガスブリケト長(cm)			LLFP 集合体数	LLFP装荷量(kg) 集合体	核変換率(%/cyc)			取出 変換率	滞在期間		LLFP取出 量(kg)	LLFP量(kg/cyc)	サポート 生成量	内圧 atm			
			炉心	軸ブリ下	軸ブリ上	合計	下部	上部			全体	第1層	第2層		cyc	year							
Na冷却炉	70%	40%	80	0	30	110	142.0	28.5	170.5	72	14.8	1066	2.08%	0.74%	1.40%	7.5%	5.5	8.3	986	14.4	14.3	1.01	120
	50%	60%	100	0	0	100	122.0	40.0	162.0	62	6.4	396	4.25%	1.40%	2.79%	10.6%	3.9	8.5	354	10.6	10.4	1.02	120
	50%	60%	90	0	0	90	5.0	215.0	220.0	66	5.8	380	6.53%	2.75%	4.59%	16.5%	3.9	5.8	317	16.3	15.9	1.03	120
Pb-Bi冷却炉	70%	40%	70	35	-	105	73.0	41.0	114.0	56	13.3	746	1.56%	0.59%	1.07%	5.2%	5.0	7.5	707	7.8	7.7	1.02	120
	50%	60%	70	0	0	70	108.0	76.0	184.0	64	4.5	286	3.43%	1.36%	2.34%	20.7%	9.8	14.6	227	6.1	5.9	1.02	120
	50%	40%	54	0	0	54	98.0	98.0	196.0	84	6.9	576	2.31%	1.71%	2.01%	11.8%	6.2	10.2	508	11.0	10.7	1.02	60

注1) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注2) 滞在期間は、内圧から決まる取出変換率に合わせて算出（サイクル数として整数化は行っていない。）

表 6.1-5 LLFP 核変換炉心概念③の I の核変換特性（第 1 層と第 2 層の LLFP 集合体を置換あり）

炉型	スミア 密度	減速材 比	LLFPスタック長(cm)			ガスブリケト長(cm)			LLFP 集合体数	LLFP装荷量(kg) 集合体	核変換率(%/cyc)			取出 変換率	滞在期間		LLFP取出 量(kg)	LLFP量(kg/cyc)	サポート 生成量	内圧 atm			
			炉心	軸ブリ下	軸ブリ上	合計	下部	上部			全体	第1層	第2層		cyc	year							
Na冷却炉	70%	40%	80	0	30	110	142.0	28.5	170.5	72	14.8	1066	2.08%	0.74%	1.41%	11.0%	8.2	12.3	949	14.3	14.3	1.00	120
	50%	60%	100	0	0	100	122.0	40.0	162.0	62	6.4	396	4.25%	1.40%	2.84%	15.7%	5.9	12.9	334	10.5	10.4	1.01	120
	50%	60%	90	0	0	90	5.0	215.0	220.0	66	5.8	380	6.53%	2.75%	4.66%	22.9%	5.4	8.2	293	15.9	15.9	1.00	120
Pb-Bi冷却炉	70%	40%	70	35	-	105	73.0	41.0	114.0	56	13.3	746	1.56%	0.59%	1.07%	7.6%	7.3	10.9	690	7.8	7.7	1.01	120
	50%	60%	70	0	0	70	108.0	76.0	184.0	64	4.5	286	3.43%	1.36%	2.40%	28.8%	14.0	21.0	204	5.9	5.9	1.00	120
	50%	40%	54	0	0	54	98.0	98.0	196.0	84	6.9	576	2.31%	1.71%	2.01%	13.4%	7.1	11.7	498	10.9	10.7	1.01	60

注1) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注2) 滞在期間は、第1層と2層の置換を考慮した上で、内圧から決まる取出変換率に合わせて算出（サイクル数として整数化は行っていない。）

表 6.1-6 LLFP 核変換炉心概念④の I の核変換特性

炉型	スミア 密度	減速材 比	LLFPスティック長(cm)			ガスブレム長(cm)			LLFP 集合体数	LLFP装荷量(kg) 全休	核変換率(%/cyc)			取出 変換率	滞在期間		LLFP取出 量(kg)	LLFP量(kg/cyc) 核変換量 生成量	サポート ファクタ	内圧 atm			
			炉心	軸ブリ下	軸ブリ上	合計	下部	上部			第1層	第2層	平均		cyc	year							
Na冷却炉																							
MOX大型	55%	20%	80	0	30	110	142.0	28.5	170.5	82	15.6	1281	1.77%	0.63%	1.20%	13.9%	12.4	18.6	1103	14.3	14.3	1.00	120
MOX中型	35%	40%	100	0	0	100	122.0	40.0	162.0	68	6.7	456	3.82%	1.26%	2.55%	22.4%	9.8	21.3	354	10.4	10.4	1.00	120
金属大型	40%	45%	90	0	0	90	5.0	215.0	220.0	70	6.3	443	5.87%	2.48%	4.19%	28.6%	7.9	11.8	316	16.1	15.9	1.01	120
Pb-Bi冷却炉																							
強制循環	50%	20%	70	35	-	105	73.0	41.0	114.0	66	12.8	844	1.40%	0.53%	0.97%	10.5%	11.4	17.2	755	7.8	7.7	1.01	120
自然循環	50%	60%	70	0	0	70	108.0	76.0	184.0	64	4.5	286	3.43%	1.36%	2.40%	28.8%	14.0	21.0	204	5.9	5.9	1.00	120
Heガス冷却炉	40%	20%	54	0	0	54	98.0	98.0	196.0	94	7.3	687	1.96%	1.45%	1.71%	16.8%	10.7	17.5	572	10.8	10.7	1.01	60

注1) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注2) 滞在期間は、第1層と2層の置換を考慮した上で、内圧から決まる取出変換率に合わせて算出（サイクル数として整数化は行っていない。）

表 6.1-7 LLFP 核変換炉心概念④' の I の核変換特性

炉型	スミア 密度	減速材 比	LLFPスティック長(cm)			ガスブレム長(cm)			LLFP 集合体数	LLFP装荷量(kg) 全休	核変換率(%/cyc)			取出 変換率	滞在期間		LLFP取出 量(kg)	LLFP量(kg/cyc) 核変換量 生成量	サポート ファクタ	内圧 atm			
			炉心	軸ブリ下	軸ブリ上	合計	下部	上部			第1層	第2層	平均		cyc	year							
Na冷却炉																							
MOX大型	70%	20%	80	0	15	95	142.0	43.5	185.5	82	17.0	1398	1.61%	0.57%	1.09%	13.8%	13.5	20.3	1204	14.3	14.3	1.00	120
MOX中型	50%	60%	90	0	0	90	127.0	45.0	172.0	70	5.8	403	4.33%	1.43%	2.89%	18.5%	7.0	15.1	328	10.7	10.4	1.03	120
金属大型	50%	50%	75	0	0	75	12.5	222.5	235.0	74	6.0	443	5.82%	2.45%	4.15%	29.3%	8.2	12.3	313	15.9	15.9	1.00	120
Pb-Bi冷却炉																							
強制循環	70%	40%	63	0	-	63	111.5	44.5	156.0	72	8.0	576	2.18%	0.82%	1.50%	17.3%	12.5	18.8	476	7.9	7.7	1.03	120
自然循環	50%	60%	70	0	0	70	108.0	76.0	184.0	68	4.5	304	3.43%	1.36%	2.40%	28.8%	14.0	21.0	216	6.3	5.9	1.06	120
Heガス冷却炉	50%	20%	46	0	0	46	102.0	102.0	204.0	96	7.8	748	1.82%	1.35%	1.58%	16.4%	11.3	18.5	625	10.9	10.7	1.02	60

注1) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注2) 滞在期間は、第1層と2層の置換を考慮した上で、内圧から決まる取出変換率に合わせて算出（サイクル数として整数化は行っていない。）

表 6.1-8 LLFP 核変換炉心概念④の核変換特性の整理

炉型	サイクル日数 day/cyc	スミア 密度	減速材 比	LLFP スタック長 (cm)	LLFP 集合体数	LLFP装荷量(kg)			核変換率(%/cyc)			取出 変換率	滞在期間		LLFP 取出量 (kg)	LLFP量(kg/cyc)		サポート ファクタ	増殖比
						1集合体	全体	第1層	第2層	平均	cyc		year	核変換量	生成量				
Na冷却炉 MOX大型	548	80% 55%	48% 20%	150 110	137 55 82	112.9	6209	0.85%	-	0.85%	28.9%	40	60.0	4413	44.9	44.7	1.00	1.03	
						15.6	1281	1.77%	0.63%	1.20%	13.5%	12	18.0	1108	14.4	14.3	1.01	1.03 <sup>*1</sup>	
MOX中型	791	80% 35%	48% 40%	100 100	105 37 68	66.2	2450	1.60%	-	1.60%	29.8%	22	47.6	1719	33.2	32.3	1.03	1.03 <sup>*1</sup>	
						6.7	456	3.82%	1.26%	2.55%	20.8%	9	19.5	362	10.5	10.4	1.01	1.05	
金属大型	548	80% 40%	50% 45%	90 90	111 41 70	50.0	2051	2.85%	-	2.85%	29.4%	12	18.0	1449	50.2	49.4	1.02	1.03	
						6.3	443	5.87%	2.48%	4.19%	25.9%	7	10.5	328	16.4	15.9	1.00	1.03 <sup>*1</sup>	
Pb-Bi冷却炉 強制循環	548	80% 50%	40% 20%	105 105	120 54 66	63.7	3439	0.83%	-	0.83%	28.4%	40	60.0	2464	24.4	23.8	1.02	1.16	
						12.8	844	1.40%	0.53%	0.97%	10.1%	11	16.5	759	7.8	7.7	1.01	1.16	
自然循環	548	80% 50%	48% 60%	70 70	106 42 64	41.2	1731	1.28%	-	1.28%	29.3%	27	40.5	1223	18.8	18.4	1.02	1.00	
						4.5	286	3.43%	1.36%	2.40%	28.8%	14	21.0	204	5.9	5.9	1.00	1.03 <sup>*1</sup>	
Heガス冷却炉	600	80% 40%	70% 20%	180 54	136 42 94	80.0	3362	1.17%	-	1.17%	29.8%	30	49.3	2361	33.4	33.3	1.00	1.03 <sup>*1</sup>	
						7.3	687	1.96%	1.45%	1.71%	15.8%	10	16.4	579	10.9	10.7	1.01		

\*1 軸方向ブランケット高さを増加させることを考慮

注1) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注2) Iの滞在期間は、第1層と2層の置換を考慮した上で、Iピンの内圧制限から決まる取出変換率に合わせて算出

表 6.1-9 LLFP 核変換炉心概念④の I の核変換特性に対する集合体回転の効果

炉型	サイクル日数 day/cyc	反応率の ピーキング* 係数	LLFP 集合体数	LLFP装荷量(kg)		取出 変換率	滞在期間		LLFP 取出量 (kg)	LLFP量(kg/cyc)		サポート ファクタ
				1集合体	全体		cyc	year		核変換量	生成量	
Na冷却炉												
MOX大型	548	1.30	82	15.6	1281	13.5%	12	18.0	1108	14.4	14.3	1.01
回転無し		1.00	82	15.6	1281	14.5%	13	19.5	1095	14.3	14.3	1.00
回転有り												
MOX中型	791	1.37	68	6.7	456	20.8%	9	19.5	362	10.5	10.4	1.01
回転無し		1.00	70	6.7	470	26.7%	12	26.0	345	10.4	10.4	1.01
回転有り												
金属大型	548	1.34	70	6.3	443	25.9%	7	10.5	328	16.4	15.9	1.03
回転無し		1.00	74	6.3	468	37.5%	11	16.5	292	16.0	15.9	1.01
Pb-Bi冷却炉												
強制循環	548	1.33	66	12.8	844	10.1%	11	16.5	759	7.8	7.7	1.01
回転無し		1.00	68	12.8	870	13.6%	15	22.5	752	7.9	7.7	1.02
回転有り												
自然循環	548	1.33	64	4.5	286	28.8%	14	21.0	204	5.9	5.9	1.00
回転無し		1.00	70	4.5	313	38.5%	20	30.0	193	6.0	5.9	1.02
回転有り												
Heガス冷却炉	600	1.20	94	7.3	687	15.8%	10	16.4	579	10.9	10.7	1.01
回転無し		1.00	96	7.3	702	20.1%	13	21.4	561	10.8	10.7	1.01
回転有り												

注1) 回転により反応率のピーキング分だけ内圧の最大値が低下すると仮定し、その分取出変換率を増加できるとして評価

注2) 核変換率は非均質効果0.95を考慮

注3) Iの滞在期間は、第1層と2層の置換を考慮した上で、Iピンの内圧制限から決まる取出変換率に合わせて算出

表 6.2-1 各炉型の LLFP 核変換変換特性の比較 (非均質係数見直し後)

		大型MOX燃料Na炉		大型金属燃料Na炉		中型MOX燃料Na炉		Pb-Bi強制循環炉		Pb-Bi自然循環炉		Heガス炉	
LLFP集合体		I	Tc	I	Tc	I	Tc	I	Tc	I	Tc	I	Tc
LLFP集合体数		70	53	47	45	58	36	56	55	55	44	87	41
LLFP装荷量(kg)	1集合体	15.6	112.9	6.3	50.0	6.7	66.2	12.8	63.7	4.5	41.2	7.3	80.0
	全体	1093	5983	297	2251	389	2384	716	3502	246	1813	636	3282
出力当たり	kg/GWt	306	1676	76	577	218	1335	382	1868	170	1250	265	1367
核変換率(%/cycle) (非均質補正前の値)	第1層	1.7%	0.8%	5.6%	2.6%	3.6%	1.4%	1.3%	0.7%	3.2%	1.1%	1.9%	1.0%
	第2層	0.6%	-	2.3%	-	1.2%	-	0.5%	-	1.3%	-	1.4%	-
取出変換率		14%	21%	27%	42%	22%	27%	11%	28%	29%	37%	17%	23%
滞在期間	cycle	11	6	5	12	8	8	10	20	12	19	10	7
	year	16.5	9.0	7.5	18.0	17.3	17.3	15.0	30.0	18.0	28.5	16.4	11.5
サポートファクタ		1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00
LLFP集合体への必要流量 (kg/sec/集合体)		2.8	4.2	5.1	6.5	2.5	3.3	13.0	14.5	14.0	12.4	0.04	0.28
炉心流量比率(%)		1.1	1.2	1.2	1.5	1.6	1.3	1.0	1.0	1.4	1.0	0.3	1.0

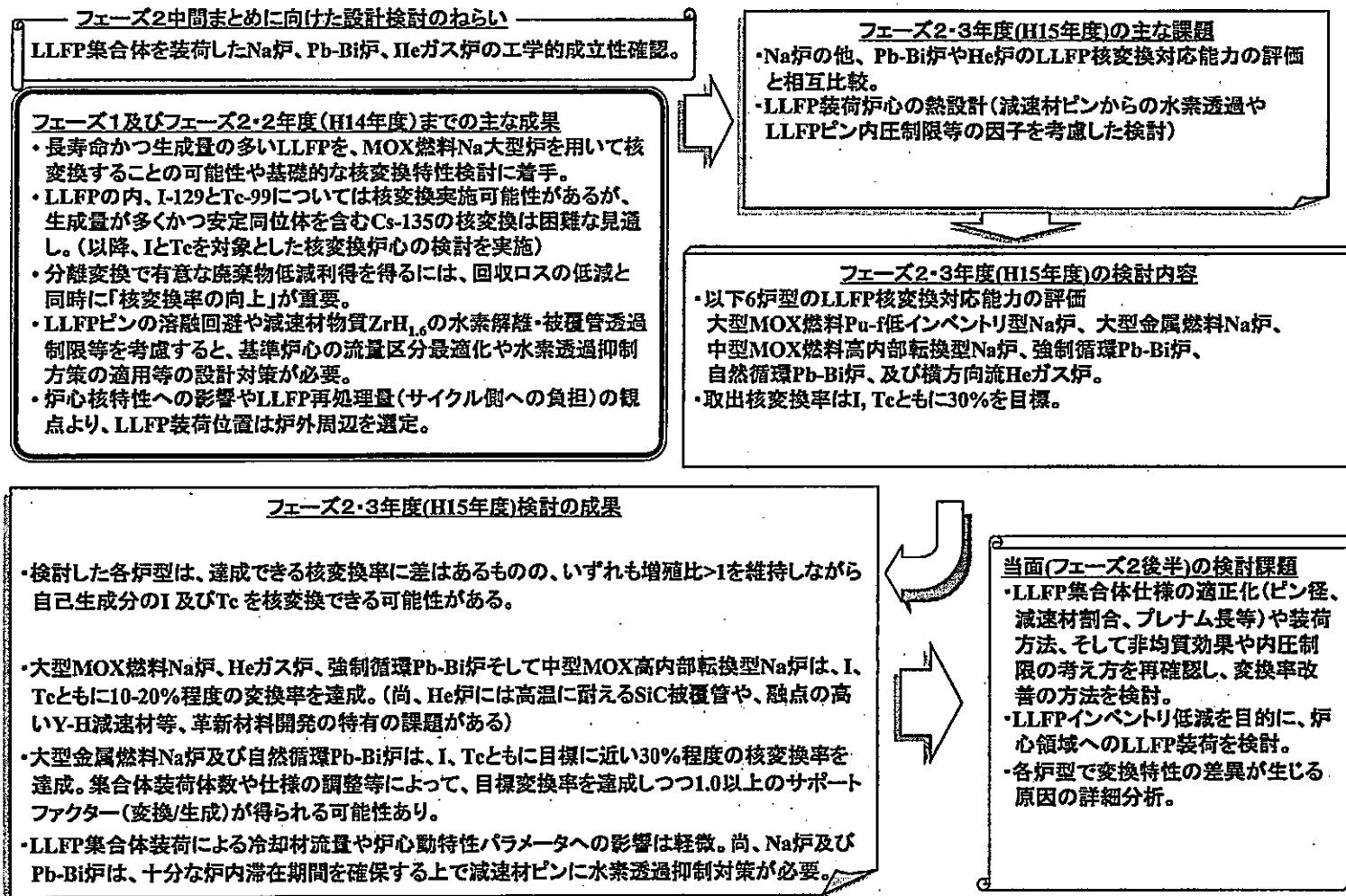
- 非均質補正係数 I : 1.0、Tc : 0.93

- スミア密度、減速材割合等の LLFP 集合体仕様は表 6.1-8 (概念④) に同じ

表 6.2-2 検討条件・結果のまとめ

検討項目	LLFP核変換炉心のまとめ	3. 検討内容・結果																																																																																																																						
1. 検討条件	<table border="1"> <tr> <td>設計条件</td><td>設計パラメータ</td></tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>高い核変換率の達成</li> <li>目標取出変換率: 30% (I=129及びTe=99) 非均質効率を考慮 (I: 1.0, Te: 0.93)</li> <li>自己生成分以上のLLFP変換量 SF (Support Factor, 变換量/生成量の比) &gt; 1</li> <li>LLFP及び减速材要素の健全性確保 LLFP要素・水素化物減速材の溶融回路(最高温度制限) 水素化物解離・過過による水素減損量の制限</li> <li>LLFP及びG减速材被覆管の健全性確保 被覆管最高温度。 内圧(I)ビンは-Ixe交換により内圧上昇)、 フープ力、被覆管クリップ破損</li> <li>LLFP集合体への必要な冷却材流量確保</li> <li>集合体間冷却材出口温度基準</li> </ul> </td><td> <ul style="list-style-type: none"> <li>LLFP集合体仕様 ビン径、スマア密度、スタック長 LLFP集合体内内溶材ビン割合 ボンド材(He, Na, Pb-Bi) 1ビンのガスプレナム長</li> <li>LLFP集合体の潜在期間と装荷体数</li> <li>LLFP装荷位置 (H15年度は炉心周辺に限定)</li> </ul> </td></tr> <tr> <td>LLFP集合体仕様設定上の前提</td><td>液体金属冷却炉については、减速材ビン被覆管に水素透過抑制策を想定し、オーステナイト系ステンレス鋼の水素透過率を「既存報告値の1/10」と仮定して評価。</td><td></td></tr> <tr> <td></td><td>ガス炉については、冷却材温度が高温であることを考慮し、被覆管材としてSiC、水素化物減速材としてY-H、ヨウ素化合物としてY<sub>3</sub>I<sub>9</sub>を想定。</td><td></td></tr> </table>	設計条件	設計パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>高い核変換率の達成</li> <li>目標取出変換率: 30% (I=129及びTe=99) 非均質効率を考慮 (I: 1.0, Te: 0.93)</li> <li>自己生成分以上のLLFP変換量 SF (Support Factor, 变換量/生成量の比) &gt; 1</li> <li>LLFP及び减速材要素の健全性確保 LLFP要素・水素化物減速材の溶融回路(最高温度制限) 水素化物解離・過過による水素減損量の制限</li> <li>LLFP及びG减速材被覆管の健全性確保 被覆管最高温度。 内圧(I)ビンは-Ixe交換により内圧上昇)、 フープ力、被覆管クリップ破損</li> <li>LLFP集合体への必要な冷却材流量確保</li> <li>集合体間冷却材出口温度基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LLFP集合体仕様 ビン径、スマア密度、スタック長 LLFP集合体内内溶材ビン割合 ボンド材(He, Na, Pb-Bi) 1ビンのガスプレナム長</li> <li>LLFP集合体の潜在期間と装荷体数</li> <li>LLFP装荷位置 (H15年度は炉心周辺に限定)</li> </ul>	LLFP集合体仕様設定上の前提	液体金属冷却炉については、减速材ビン被覆管に水素透過抑制策を想定し、オーステナイト系ステンレス鋼の水素透過率を「既存報告値の1/10」と仮定して評価。			ガス炉については、冷却材温度が高温であることを考慮し、被覆管材としてSiC、水素化物減速材としてY-H、ヨウ素化合物としてY <sub>3</sub> I <sub>9</sub> を想定。																																																																																																														
設計条件	設計パラメータ																																																																																																																							
<ul style="list-style-type: none"> <li>高い核変換率の達成</li> <li>目標取出変換率: 30% (I=129及びTe=99) 非均質効率を考慮 (I: 1.0, Te: 0.93)</li> <li>自己生成分以上のLLFP変換量 SF (Support Factor, 变換量/生成量の比) &gt; 1</li> <li>LLFP及び减速材要素の健全性確保 LLFP要素・水素化物減速材の溶融回路(最高温度制限) 水素化物解離・過過による水素減損量の制限</li> <li>LLFP及びG减速材被覆管の健全性確保 被覆管最高温度。 内圧(I)ビンは-Ixe交換により内圧上昇)、 フープ力、被覆管クリップ破損</li> <li>LLFP集合体への必要な冷却材流量確保</li> <li>集合体間冷却材出口温度基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LLFP集合体仕様 ビン径、スマア密度、スタック長 LLFP集合体内内溶材ビン割合 ボンド材(He, Na, Pb-Bi) 1ビンのガスプレナム長</li> <li>LLFP集合体の潜在期間と装荷体数</li> <li>LLFP装荷位置 (H15年度は炉心周辺に限定)</li> </ul>																																																																																																																							
LLFP集合体仕様設定上の前提	液体金属冷却炉については、减速材ビン被覆管に水素透過抑制策を想定し、オーステナイト系ステンレス鋼の水素透過率を「既存報告値の1/10」と仮定して評価。																																																																																																																							
	ガス炉については、冷却材温度が高温であることを考慮し、被覆管材としてSiC、水素化物減速材としてY-H、ヨウ素化合物としてY <sub>3</sub> I <sub>9</sub> を想定。																																																																																																																							
2. 検討フロー	<p>FSの検討対象炉心であるNa炉、Pb-Bi炉(強制循環、自然循環)、及びHeガス炉におけるLLFP核変換特性を核・熱・材料の観点から検討。</p> <p>対象LLFPは、FSフェーズIの検討で核的観点から見通しありと評価されたI, Teの二元素。元素分離を想定。</p> <p>伊心核特性への影響やLLFP再処理量(サイクル側への負担)の観点より、H15年度はLLFP装荷位置を炉心周辺領域のみとして検討。</p>	<p>各炉型毎の検討条件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>I(化学形態)</th> <th>Te(化学形態)</th> <th>被覆管材</th> <th>减速材</th> <th>内圧制限</th> <th>LLFP集合体装荷位置</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>大型MOX燃料Na炉</td> <td>CuI</td> <td>Tc金属</td> <td>ODS鋼*</td> <td>Zr-H</td> <td>120atm以下 径方向ブランケットと置換</td> </tr> <tr> <td>大型金属燃料Na炉</td> <td>CuI</td> <td>Tc金属</td> <td>ODS鋼*</td> <td>Zr-H</td> <td>120atm以下 径方向ブランケットと置換</td> </tr> <tr> <td>中型MOX燃料Na炉</td> <td>CuI</td> <td>Tc金属</td> <td>ODS鋼*</td> <td>Zr-H</td> <td>120atm以下 SUS遮蔽体と置換</td> </tr> <tr> <td>Pb-Bi強制循環炉</td> <td>CuI</td> <td>Tc金属</td> <td>ODS鋼*</td> <td>Zr-H</td> <td>120atm以下 Pb-Bi遮蔽体と置換</td> </tr> <tr> <td>Pb-Bi自然循環炉</td> <td>CuI</td> <td>Tc金属</td> <td>ODS鋼*</td> <td>Zr-H</td> <td>120atm以下 Pb-Bi遮蔽体と置換</td> </tr> <tr> <td>Heガス炉</td> <td>Y<sub>3</sub>I<sub>9</sub></td> <td>Tc金属</td> <td>SIC</td> <td>Y-H</td> <td>60atm以下 径方向ブランケットと置換</td> </tr> </tbody> </table> <p>*:外圧支配とする</p> <p>核変換特性の評価結果</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">単位</th> <th colspan="3">I集合体</th> <th colspan="3">Te集合体</th> </tr> <tr> <th>装荷体数</th> <th>潜在期間</th> <th>取出変換率</th> <th>SF*</th> <th>装荷体数</th> <th>潜在期間</th> <th>取出変換率</th> <th>SF</th> <th>増殖比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>大型MOX燃料Na炉</td> <td>70</td> <td>11</td> <td>14</td> <td>1.00</td> <td>53</td> <td>6</td> <td>21</td> <td>1.00</td> <td>1.03</td> </tr> <tr> <td>大型金属燃料Na炉</td> <td>47</td> <td>5</td> <td>27</td> <td>1.00</td> <td>45</td> <td>12</td> <td>42</td> <td>1.00</td> <td>1.05</td> </tr> <tr> <td>中型MOX燃料Na炉</td> <td>58</td> <td>8</td> <td>22</td> <td>1.00</td> <td>36</td> <td>8</td> <td>27</td> <td>1.00</td> <td>1.03</td> </tr> <tr> <td>Pb-Bi強制循環炉</td> <td>88</td> <td>10</td> <td>11</td> <td>1.00</td> <td>55</td> <td>20</td> <td>28</td> <td>1.02</td> <td>1.16</td> </tr> <tr> <td>Pb-Bi自然循環炉</td> <td>55</td> <td>12</td> <td>29</td> <td>1.00</td> <td>44</td> <td>19</td> <td>37</td> <td>1.00</td> <td>1.16</td> </tr> <tr> <td>Heガス炉</td> <td>87</td> <td>10</td> <td>17</td> <td>1.00</td> <td>41</td> <td>7</td> <td>23</td> <td>1.00</td> <td>1.03</td> </tr> </tbody> </table> <p>*SF: Support Factor = 变換量/生成量</p>	I(化学形態)	Te(化学形態)	被覆管材	减速材	内圧制限	LLFP集合体装荷位置	大型MOX燃料Na炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 径方向ブランケットと置換	大型金属燃料Na炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 径方向ブランケットと置換	中型MOX燃料Na炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 SUS遮蔽体と置換	Pb-Bi強制循環炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 Pb-Bi遮蔽体と置換	Pb-Bi自然循環炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 Pb-Bi遮蔽体と置換	Heガス炉	Y <sub>3</sub> I <sub>9</sub>	Tc金属	SIC	Y-H	60atm以下 径方向ブランケットと置換	単位	I集合体			Te集合体			装荷体数	潜在期間	取出変換率	SF*	装荷体数	潜在期間	取出変換率	SF	増殖比	大型MOX燃料Na炉	70	11	14	1.00	53	6	21	1.00	1.03	大型金属燃料Na炉	47	5	27	1.00	45	12	42	1.00	1.05	中型MOX燃料Na炉	58	8	22	1.00	36	8	27	1.00	1.03	Pb-Bi強制循環炉	88	10	11	1.00	55	20	28	1.02	1.16	Pb-Bi自然循環炉	55	12	29	1.00	44	19	37	1.00	1.16	Heガス炉	87	10	17	1.00	41	7	23	1.00	1.03
I(化学形態)	Te(化学形態)	被覆管材	减速材	内圧制限	LLFP集合体装荷位置																																																																																																																			
大型MOX燃料Na炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 径方向ブランケットと置換																																																																																																																			
大型金属燃料Na炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 径方向ブランケットと置換																																																																																																																			
中型MOX燃料Na炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 SUS遮蔽体と置換																																																																																																																			
Pb-Bi強制循環炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 Pb-Bi遮蔽体と置換																																																																																																																			
Pb-Bi自然循環炉	CuI	Tc金属	ODS鋼*	Zr-H	120atm以下 Pb-Bi遮蔽体と置換																																																																																																																			
Heガス炉	Y <sub>3</sub> I <sub>9</sub>	Tc金属	SIC	Y-H	60atm以下 径方向ブランケットと置換																																																																																																																			
単位	I集合体			Te集合体																																																																																																																				
	装荷体数	潜在期間	取出変換率	SF*	装荷体数	潜在期間	取出変換率	SF	増殖比																																																																																																															
大型MOX燃料Na炉	70	11	14	1.00	53	6	21	1.00	1.03																																																																																																															
大型金属燃料Na炉	47	5	27	1.00	45	12	42	1.00	1.05																																																																																																															
中型MOX燃料Na炉	58	8	22	1.00	36	8	27	1.00	1.03																																																																																																															
Pb-Bi強制循環炉	88	10	11	1.00	55	20	28	1.02	1.16																																																																																																															
Pb-Bi自然循環炉	55	12	29	1.00	44	19	37	1.00	1.16																																																																																																															
Heガス炉	87	10	17	1.00	41	7	23	1.00	1.03																																																																																																															
		<p>Iビンについては、Xeガス放出による内圧制限が最も厳しい設計制約因子。これにより集合体の炉内潜在期間が定まり、取出変換率が規定される。(LLFPビン健全性確保の考え方やLLFP装荷方法を見直すことにより、変換率やSF改善の可能性あり)</p> <p>今年度の設計制約条件下では、各炉型のLLFP核変換対応能力は以下の順となった。</p> <p>大型MOX燃料Na、Heガス、強制循環Pb-Bi、中型MOX燃料Na &lt; 自然循環Pb-Bi、大型金属Na</p>																																																																																																																						
	<p>I, Te: 可能性あり。 Cs: 困難。 (理由: 生成量大且つ安定同位体(Cs-133)からの新たなCs-135生成あり)。</p> <p>IとTeの二元素を対象として、高核変換率を指向した変換炉心、装荷方法を検討</p> <p>・LLFPビンと减速材ビンからなるLLFP集合体を装荷したNa炉心の核・熱特性評価</p> <p>・装荷位置(炉内、炉外)による変換特性の比較</p> <p>・Na炉、Pb-Bi炉(強制循環、自然循環)、及びHeガス炉の核変換特性評価・比較</p>	<p>・検討した各炉型は、達成できる核変換率に差はあるものの、いずれも増殖比&gt;1を維持しながら自己生成分のI及びTeを核変換できる可能性がある。</p> <p>・大型MOX燃料Na炉、Heガス炉、強制循環Pb-Bi炉そして中型MOX高内部転換型Na炉は、I, Teとともに10~20%程度の変換率を達成。(尚、He炉には高温に耐えるSiC被覆管や、融点の高いY-H减速材等、革新材料開発の特有な課題がある)</p> <p>・大型金属燃料Na炉及び自然循環Pb-Bi炉は、I, Teとともに目標に近い30%程度の核変換率を達成。集合体装荷体数や仕様の調整等によって、目標変換率を達成しつつ1.0以上のサポートファクター(変換/生成)が得られる可能性あり。</p> <p>・LLFP集合体装荷による冷却材流量や炉心動特性パラメータへの影響は軽微。尚、Na炉及びPb-Bi炉は、十分な炉内潜在期間を確保する上で减速材ビンに水素透過抑制対策が必要。</p>																																																																																																																						

表 6.2-3 FSにおける LLFP 核変換検討の流れ

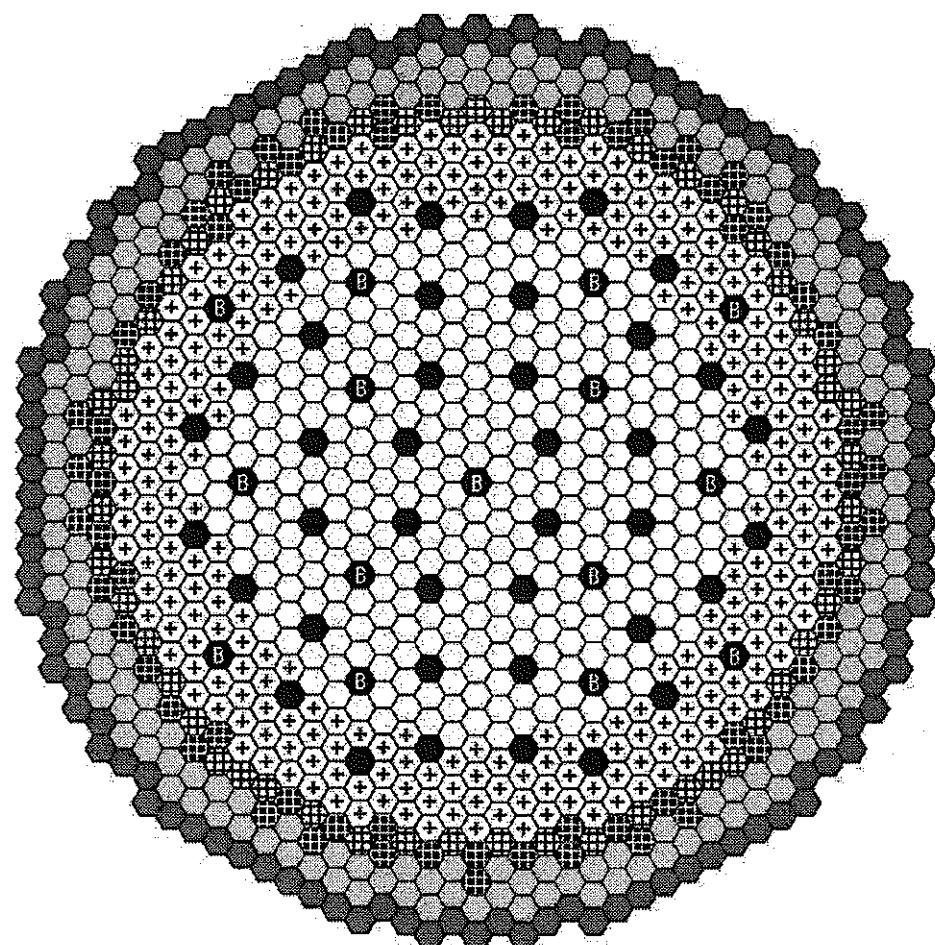


実用化戦略調査研究フェーズ2・3年度(H15年度)におけるLLFP核変換炉心の検討

表 6.3-1 変換特性に関する各炉型の仕様

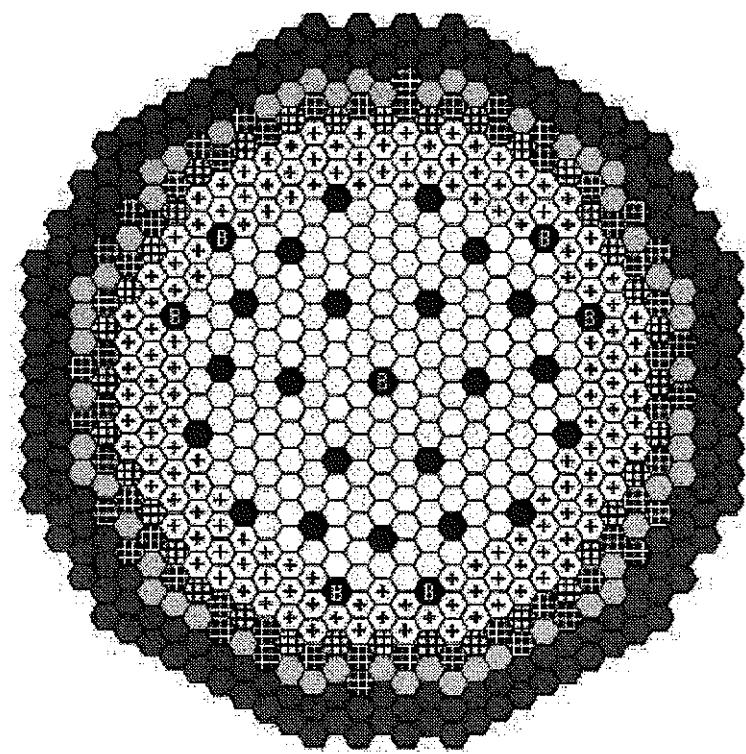
	熱出力 P [GWe]	炉心 等価直径 [m]	炉心 高さ [m]	炉心側面積 $S_r$ [m <sup>2</sup> ]	側面積/出力 $S_r/P$ [m <sup>2</sup> /GWe]	CuI集合体/炉心 境界全中性子束* $\phi_r$ × 10 <sup>18</sup> [n/m <sup>2</sup> /sec]	Tc集合体/炉心 境界全中性子束* $\phi_r$ × 10 <sup>18</sup> [n/m <sup>2</sup> /sec]	$Sr\phi_r/P$ (CuI集合体/炉心境界) × 10 <sup>9</sup> [n/J]	$Sr\phi_r/P$ (Tc集合体/炉心境界) × 10 <sup>9</sup> [n/J]
大型MOX燃料Na炉	3.570	4.90	0.8	12.32	3.45	6.94	6.03	23.9	20.8
大型金属燃料Na炉	3.900	4.72	0.9	13.35	3.42	12.13	11.29	41.5	38.6
中型MOX燃料Na炉	1.785	3.70	1.0	11.62	6.51	5.44	4.88	35.4	31.8
Pb-Bi強制循環炉	1.875	4.41	0.7	9.70	5.17	5.97	5.38	30.9	27.8
Pb-Bi自然循環炉	1.450	4.64	0.7	10.20	7.04	6.13	5.39	43.1	37.9
Heガス炉	2.400	5.64	1.8	31.89	13.29	3.24	2.49	43.1	33.1

\*BOECでの値



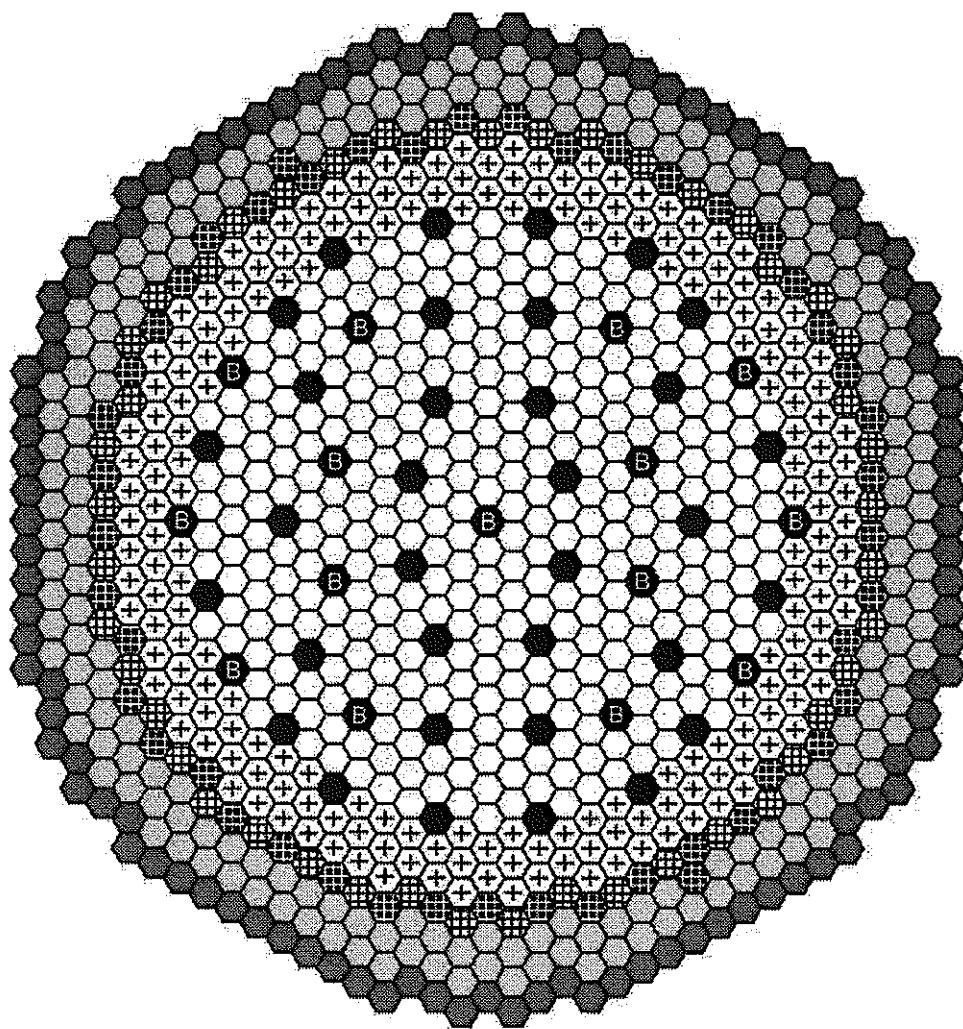
○ 内側炉心燃料集合体	316体
⊕ 外側炉心燃料集合体	278体
▨ LLFPターゲット集合体(Tc)	53体
▨ LLFPターゲット集合体(I)	70体
◆ 主炉停止系制御棒	40体
● 後備炉停止系制御棒	15体
▨ SUS遮へい体	183体
▨ Zr-H遮へい体	114体
合 計	1069体

図 6.2-1 LLFP 集合体を装荷した大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉心の配置図



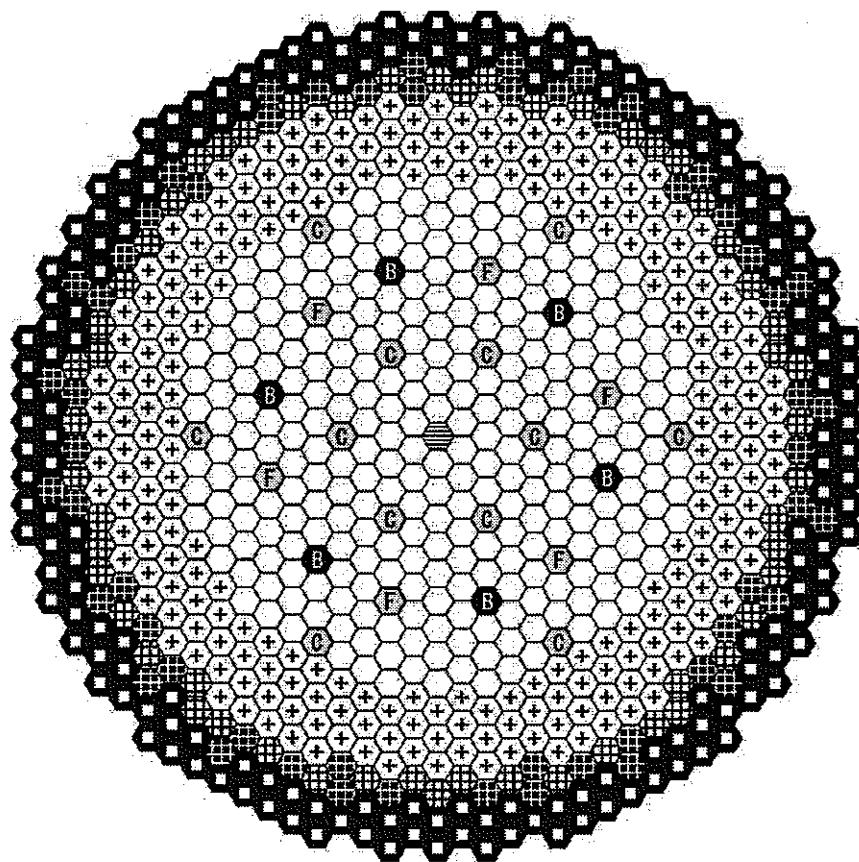
○ 内側炉心燃料集合体	183体
⊕ 外側炉心燃料集合体	150体
● LLFPターゲット集合体(Tc)	36体
● LLFPターゲット集合体(l)	5.8体
◆ SUS遮蔽体	5.6体
● B4C(またはZrH)遮蔽体	17.4体
● 主系制御棒 [暫定]	2.1体
● B 後備系制御棒 [暫定]	7体
合 计	685体

図 6.2-2 LLFP 集合体を装荷した中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉心の配置図



○ 内側炉心燃料集合体	336体
○+ 外側炉心燃料集合体	198体
▨ LLFPターゲット集合体(Tc)	45体
▨ LLFPターゲット集合体(I)	47体
● 主炉停止系制御棒	34体
● B 後備炉停止系制御棒	15体
▨ SUS遮へい体	196体
▨ Zr-H遮へい体	108体
合 計	979体

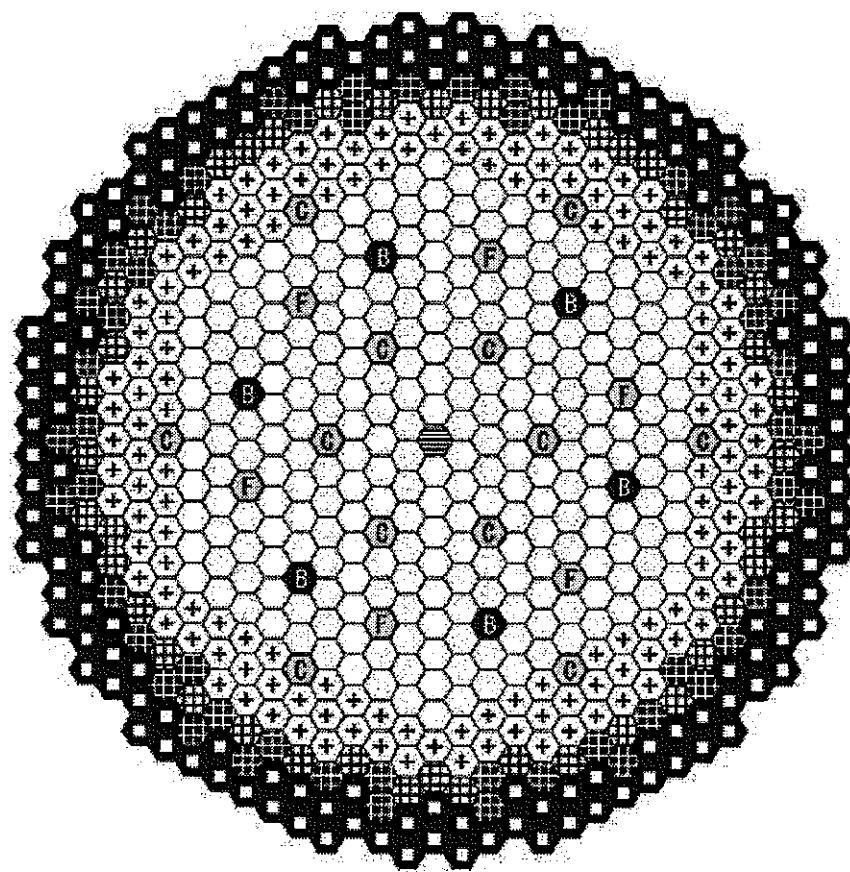
図 6.2-3 LLFP 集合体を装荷した大型金属燃料 Na 冷却炉心の配置図



○ 内側炉心燃料集合体	288体
⊕ 外側炉心燃料集合体	246体
▨ LLFPターゲット集合体 (Tc)	55体
▨ LLFPターゲット集合体 (I)	56体
▨ SASS集合体	1体
▨ Pb-Bi遮へい体	177体
◎ 粗調整棒	12体
□ 微調整棒	6体
■ 後備系制御棒	6体

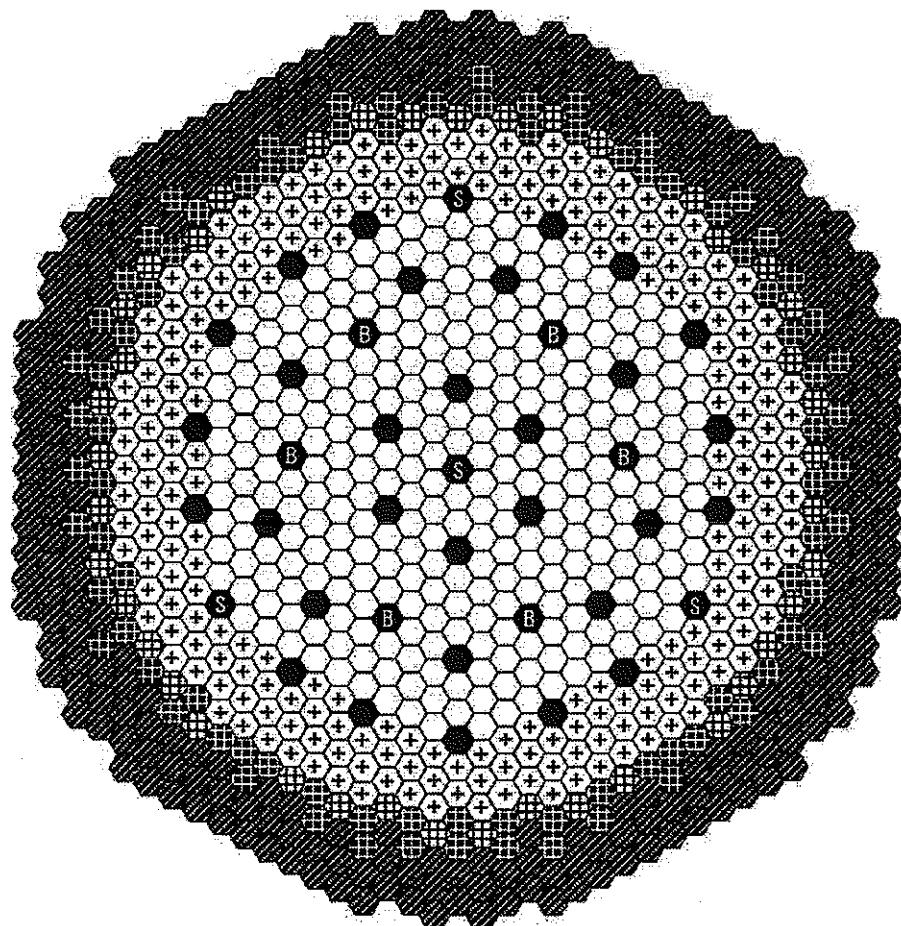
合 計 847体

図 6.2-4 LLFP 集合体を装荷した強制循環 Pb-Bi 冷却炉心の配置図



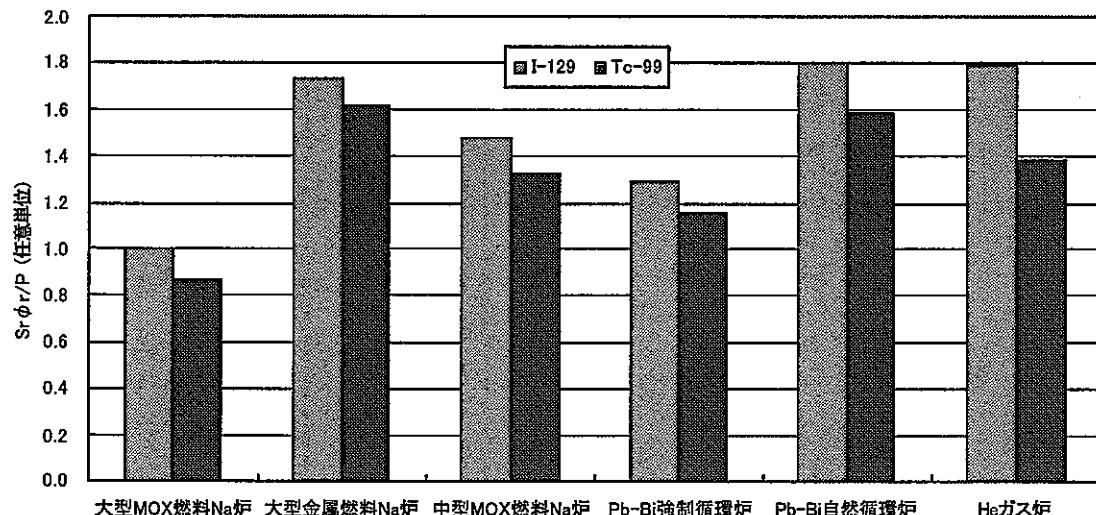
○ 内側炉心燃料集合体	252体
○ 外側炉心燃料集合体	144体
▨ LLFPタ-ゲット集合体(Tc)	44体
▨ LLFPタ-ゲット集合体(I)	55体
▨ SASS集合体	1体
● Pb-Bi遮へい体	153体
◎ 粗調整棒	12体
□ 微調整棒	6体
■ 後備系制御棒	6体
<hr/>	
合 計	673体

図 6.2-5 LLFP 集合体を装荷した自然循環 Pb-Bi 冷却炉心の配置図

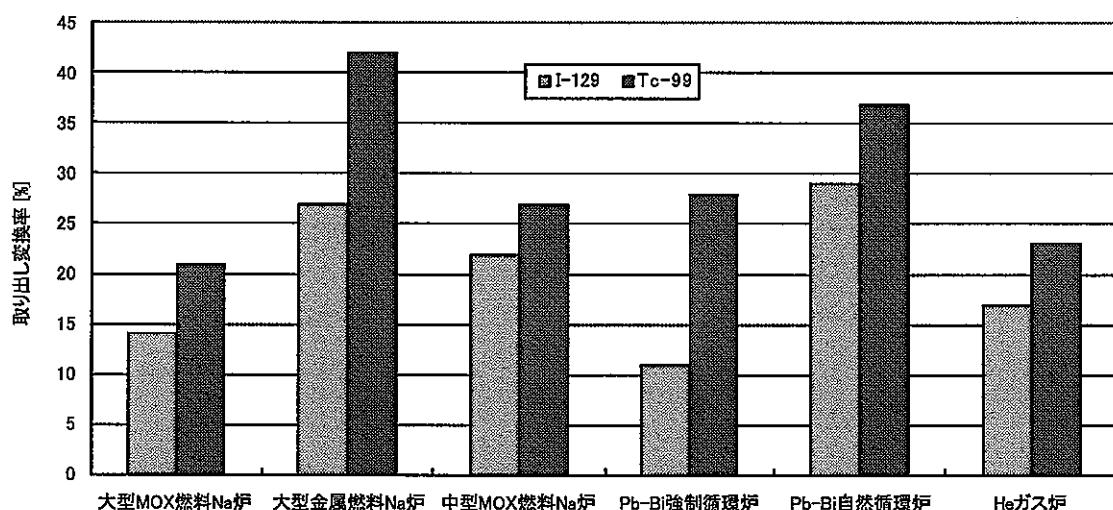


○ 内側炉心燃料集合体	303体
⊕ 外側炉心燃料集合体	240体
▨ LLFPターゲット集合体 (To)	41体
▨ LLFPターゲット集合体 (I)	87体
● SiC遮へい体	268体
◆ 主系制御棒	30体
◆ 後備系制御棒	6体
◆ 制御棒 (受動的炉停止系)	4体
合 计	979体

図 6.2-6 LLFP 集合体を装荷した横方向流 He ガス冷却炉心の配置図



(a) 変換性能指標の例「 $S_r \phi_r / P$ 」



(b) 取り出し変換率の評価値

(表 6.2-1 の数値を図示したもの)

図 6.3-1 取り出し核変換率の炉型間比較

## 7 おわりに

実用化戦略調査研究で検討している主要な炉心の LLFP 核変換対応能力を、核・熱・材料の観点から検討した。対象とした炉心は次の 6 種類であり、LLFP 集合体の装荷位置は、炉心特性への影響の小さい炉心周辺領域とした。

- 1) 大型 MOX 燃料コンパクト型 Na 冷却炉心
- 2) 中型 MOX 燃料高内部転換型 Na 冷却炉心
- 3) 大型金属燃料 Na 冷却炉心
- 4) 強制循環 Pb-Bi 冷却炉心
- 5) 自然循環 Pb-Bi 冷却炉心
- 6) 横方向流 He ガス冷却炉心

核変換対象 LLFP は I と Tc の 2 元素であり、核変換効率改善のための減速材として Zr-H、FP 化合物形態としては CuI と Tc（金属）を想定した。尚、He ガス炉については、冷却材出入り口温度が高いために、減速材として融点の高い Y-H、FP 化合物として YI<sub>3</sub>、Tc（金属）を用いた。

LLFP ピンや減速材ピンの発熱量は連続エネルギーモンテカルロ法による 2 次元 RZ 計算により求めた。熱流動特性評価においては、各被覆管の最高温度、LLFP や減速材要素の溶融、水素透過・減損量、被覆管クリープ破損及び内圧の観点から、LLFP 集合体の健全性評価や必要となる冷却材流量を算出した。

LLFP の変換/生成比 (=SF: Support Factor) を 1 以上とする条件の下、取り出し核変換率約 30% の達成を目標として設計と特性評価を行い、以下の主要結果を得た。

- 今回の検討条件と評価技術の下では、いずれの炉も LLFP 集合体の健全性を確保する上で、I ピンの内圧制限及び減速材として用いる水素の減損量制限が主要な設計制約因子となる。
- 大型 MOX 燃料 Na 炉、He ガス炉、強制循環 Pb-Bi 炉そして中型 MOX 高内部転換型 Na 炉について、2003 年度に検討対象とした炉心の LLFP 核変換率は 10~20%程度となる結果を得た。
- 大型金属燃料 Na 炉及び自然循環 Pb-Bi 炉について、2003 年度に検討対象とした炉心の LLFP 核変換率は目標に近い 30%程度となる結果を得た。集合体装荷体数や仕様の調整等によって、目標変換率を達成しつつ 1.0 以上の SF が得られる可能性がある。Pb-Bi 自然循環冷却炉では、発熱の小さい LLFP 集合体に対しても

自然循環力によって十分な冷却材が配分される見通しがある。

- 検討したいずれの炉心も、LLFP 集合体装荷による冷却材流量や炉心動特性パラメータへの影響は軽微である。また LLFP 集合体への必要冷却材流量は全流量の 3%程度以下と少なく、大きな炉心設計対応なしに LLFP 集合体を受け入れられる可能性がある。

Na 炉及び Pb-Bi 炉については、LLFP 集合体の十分な炉内滞在期間を確保する上で、減速材ピンの水素透過抑制策の適用が必須である。He 炉については高温に耐える SiC 被覆管や、融点の高い Y-H 減速材等の革新材料を想定しており、ガス炉特有の開発課題がある。

今後は、核変換率評価における非均質効果の取り扱いや基準炉心仕様の見直しを反映して、各炉の LLFP 核変換対応能力の評価を進め、炉型間の特性比較を行って、特性差を生じる要因分析や各炉の特徴等について考察を深める予定である。

## 8 謝辞

本研究の実施にあたっては、筆者らの検討方針に基づいて、三菱重工業㈱殿に担当して頂き、核解析には池田一三様、菅太郎様、熱解析には小川伸太様のご協力を賜りました。短期間での厳しい工程の中、効率よくご検討頂き、十分な成果を報告して頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 9 参考文献

- [1] 高木直行、他、“Na 炉、Pb-Bi 炉、ガス炉における元素分離 LLFP の核変換特性”、JNC TN9400 2003-054 (2003)
- [2] 大島宏之、“多様な冷却系システムの熱流動評価”、2000 年 5 月、JNC TN9400 2000-077 (2000)
- [3] 大木繁夫氏、私信