



JAEA-Research

2006-063



JP0650584

## 高速実用炉を用いた長寿命核分裂生成物(LLFP) 核変換に関する検討

—LLFP集合体装荷法、FS検討の各炉型における核変換特性—

Study on Transmutation Technology of Long-Lived-Fission-Products(LLFP)Using Commercial Fast Reactors  
– Loading Type of LLFP Target Assembly and  
Transmutation Performances of Cores Designed in  
FS Phase-II –

永沼 正行 相田 達也\* 林 秀行

Masayuki NAGANUMA,Tatsuya AIDA\* and Hideyuki HAYASHI

次世代原子力システム研究開発部門  
炉心燃料設計グループ

Reactor Core and Fuel Design Group  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

JAEA-RESEARCH

September 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>）  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

高速実用炉を用いた長寿命核分裂生成物(LLFP)核変換に関する検討  
—LLFP集合体装荷法、FS検討の各炉型における核変換特性—

日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門 FBRシステムユニット  
炉心燃料設計グループ  
永沼 正行、相田 達也\*、林 秀行

(2006年7月27日受理)

実用化戦略調査研究(以下、FS)では、環境負荷低減の観点から、高速実用炉を用いた長寿命核分裂生成物(LLFP)核変換に関する検討を行っている。本報告では、LLFP集合体装荷法の選定、FSフェーズⅡ検討の冷却材・燃料形態の異なる各炉型におけるLLFP核変換特性、サポートファクタ(以下、SF)向上炉心の実現性に関する検討を行った(SFとは、LLFP核種の変換/生成量の比で定義され、SF1.0は生成したLLFP核種を自ら変換できることを意味する)。以下に、各項目について検討結果をまとめた。

- ・炉心外装荷・炉心内装荷方式を適用した核変換炉心を対象に設計評価を行い、核・熱特性、核変換特性について定量的な比較を行った。結果として、炉心内装荷方式では、LLFPインベントリが炉心外装荷方式に比べ、 $^{99}\text{Tc}$ で1/7、 $^{129}\text{I}$ で1/3程度まで低減可能となることがわかった。LLFPインベントリの低減は、核変換炉心の導入ペースの向上を導くことから、LLFP集合体の装荷法として、炉心内装荷方式を選定した。
- ・FS検討の各炉型について、フェーズⅡで設定した代表炉心を基準炉心として、炉心内装荷方式を適用し、LLFP核変換炉心の設計評価を行った。結果として、いずれの炉型についても、増殖比1.03以上等の設計条件を確保しつつ、1.0以上のSFを達成する見通しが得られた。
- ・実用炉の設計条件を満たす場合、SFは1.0近傍に制限される可能性が示された。そこで、現状の設計条件のうち、幾つかの項目について制限を緩和することで、どの程度SFの向上が可能か感度評価を行った。結果として、いずれの項目もSFへの感度は小さく、実用炉では、複数基の炉心から生成されるLLFPを処理できるような大幅なSFの向上は困難との結論に達した。

---

大洗研究開発センター(駐在)：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

本報告書には、電力会社9社、電源開発株式会社および日本原子力発電株式会社による電力共通研究の成果の一部を含む

\* 東京電力株式会社

Study on Transmutation Technology of Long-Lived-Fission-Products (LLFP) Using  
Commercial Fast Reactors

— Loading Type of LLFP Target Assembly and Transmutation Performances  
of Cores Designed in FS Phase-II —

Masayuki NAGANUMA, Tatsuya AIDA\* and Hideyuki HAYASHI

Reactor Core and Fuel Design Group, FBR System Engineering Unit  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 27, 2006)

In the Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System in Japan (FS), transmutation technology of Long-Lived Fission Products (LLFP) using commercial fast reactors have been studied to reduce the environmental burden of radio-active waste. In this report, the following contents, "loading type of LLFP target assembly", "transmutation performances of the cores designed in FS phase-II" and "capability of transmutation core with high support factor (SF, that is defined as transmutation/ production ratio for LLFP nuclide)", were studied. Those results are summarized below.

- Design studies for two loading types of transmutation cores (in-core and ex-core loading type cores) were conducted to give quantitative comparison of those performances. As a result, in the in-core loading type core, LLFP inventories were found to be decreased to 1/7 for  $^{99}\text{Tc}$  and 1/3 for  $^{129}\text{I}$  compared with those of the ex-core loading core. The small inventory leads fast introduction pace of transmutation cores, therefore, we selected the in-core loading type as the reference of FS phase-II.
- LLFP transmutation performances were evaluated for typical FS phase-II designed cores by applying the above in-core loading method. As a result, every core was confirmed to have the capability to attain  $\text{SF} > 1.0$  in keeping design conditions of commercial fast reactor (such as breeding ratio of over 1.03).
- In keeping the design conditions of commercial fast reactor, SF was found to be limited to around 1.0. Thus, we carried out sensitivity evaluations to SF to examine how much SF was improved by relaxation of some design conditions. As a result, since sensitivities of every condition to SF were found to be very small, we concluded that large SF to transmute LLFP amount generated in plural cores may be impossible for the commercial reactors.

Keywords : Long-Lived Fission Products, LLFP, Technetium, Iodine, Zirconium Hydride, Transmutation, Fast Reactor, Feasibility Study, FS

---

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

\* Tokyo Electric Power Company

## 目次

1.はじめに .....	1
2.検討の背景	
2.1 これまでの検討・成果 .....	2
2.2 LLFP 核変換炉心検討の課題 .....	2
2.3 今回の検討内容の概略 .....	3
3. LLFP 集合体装荷法の選定	
3.1 LLFP 集合体装荷法の特長 .....	4
3.2 評価条件	
3.2.1 LLFP ターゲット・減速材 .....	4
3.2.2 基準炉心 .....	4
3.2.3 設計条件・目標 .....	4
3.3 解析手法の概略 .....	5
3.4 炉心外装荷炉心の検討	
3.4.1 LLFP 集合体仕様の設定 .....	6
3.4.2 LLFP 核変換炉心の設定 .....	7
3.4.3 核変換特性の評価 .....	7
3.4.4 核特性の評価 .....	7
3.4.5 LLFP 集合体の健全性評価 .....	7
3.4.6 热特性の評価 .....	8
3.5 炉心内装荷炉心の検討	
3.5.1 LLFP 集合体仕様の設定 .....	8
3.5.2 LLFP 核変換炉心の設定 .....	9
3.5.3 核変換特性の評価 .....	9
3.5.4 核特性の評価 .....	10
3.5.5 LLFP 集合体の健全性評価 .....	10
3.5.6 热特性の評価 .....	10
3.6 LLFP 集合体装荷方法の比較 .....	11
4. 各炉型における LLFP 核変換特性の評価	
4.1 評価条件	
4.1.1 LLFP ターゲット・減速材 .....	12
4.1.2 各炉型の基準炉心 .....	12
4.1.3 設計条件・目標 .....	13
4.2 解析手法の概略 .....	14
4.3 LLFP 核変換炉心の検討	
4.3.1 ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心 (高内部転換型) .....	15
4.3.2 ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉心 (高内部転換型) .....	17
4.3.3 ナトリウム冷却大型金属燃料炉心 (高出口温度型) .....	19

4.3.4 鉛・ビスマス冷却中型炉心（強制循環型）	20
4.3.5 ヘリウムガス冷却大型炉心（六角ブロック型）	22
4.4 各炉型における LLFP 核変換特性の比較	25
 5. サポートファクタ向上炉心の実現性検討	
5.1 評価条件	
5.1.1 LLFP ターゲット・減速材	27
5.1.2 基準炉心	27
5.1.3 設計条件・目標	27
5.1.4 解析手法の概略	27
5.2 サポートファクタ向上のための感度評価	
5.2.1 感度評価項目の設定	28
5.2.2 感度評価	28
5.3 サポートファクタ向上炉心に関するまとめ	29
6. まとめ	31
7. 今後の課題	32
謝辞	33
参考文献	34
付録 1 2 次元 RZ モデル簡易評価手法の手順	87
付録 2 FS フェーズⅡにおける LLFP 集合体開発の状況概略	91

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Background of this study	
2.1	Summary of our past studies .....	2
2.2	Current issues of LLFP transmutation core design .....	2
2.3	Objectives and outlines of this study .....	3
3.	Selection of loading type of LLFP target assembly in FS	
3.1	About loading type of LLFP target assembly .....	4
3.2	Conditions of this evaluation	
3.2.1	LLFP target and moderator .....	4
3.2.2	Reference core .....	4
3.2.3	Design conditions and targets .....	4
3.3	Outline of evaluation method .....	5
3.4	Design study of ex-core loading type core	
3.4.1	Specifications of LLFP target assembly .....	6
3.4.2	Arrangement of LLFP transmutation core .....	7
3.4.3	Evaluation of transmutation performance .....	7
3.4.4	Evaluation of nuclear characteristics .....	7
3.4.5	Integrity of LLFP target assembly .....	7
3.4.6	Evaluation of thermal characteristics .....	8
3.5	Design study of in-core loading type core	
3.5.1	Specifications of LLFP target assembly .....	8
3.5.2	Arrangement of LLFP transmutation core .....	9
3.5.3	Evaluation of transmutation performance .....	9
3.5.4	Evaluation of nuclear characteristics .....	10
3.5.5	Integrity of LLFP target assembly .....	10
3.5.6	Evaluation of thermal characteristics .....	10
3.6	Comparison of both loading type cores .....	11
4.	LLFP transmutation performances for FS phase-II designed cores	
4.1	Conditions of this evaluation	
4.1.1	LLFP target and moderator .....	12
4.1.2	Reference cores of each FS phase-II designed core .....	12
4.1.3	Design conditions and targets .....	13
4.2	Outline of evaluation method .....	14
4.3	Design studies of LLFP transmutation cores for each FS phase-II designed core	
4.3.1	Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type) .....	15
4.3.2	Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type) .....	17
4.3.3	Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type) .....	19

4.3.4 Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type) .....	20
4.3.5 Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type) .....	22
4.4 Comparison of LLFP transmutation performances in each FS phase-II designed core .....	25
5. Capability of transmutation core with high support factor	
5.1 Conditions of this evaluation	
5.1.1 LLFP target and moderator .....	27
5.1.2 Reference core .....	27
5.1.3 Design conditions and targets .....	27
5.1.4 Outline of evaluation method .....	27
5.2 Sensitivity evaluations to SF for improvement of that	
5.2.1 Items of sensitivity evaluations to SF .....	28
5.2.2 Results of the sensitivity evaluations .....	28
5.3 Summary of sensitivity evaluations to SF .....	29
6. Conclusions .....	31
7. Further issues .....	32
Acknowledgment .....	33
Reference .....	34
Appendix 1 Procedure of the simplified evaluation method about nuclear and thermal characteristics and transmutation performance based on 2-dimensional R-Z calculation .....	87
Appendix 2 Current status of R&D for LLFP target and moderator in FS phase-II .....	91

## 1. はじめに

実用化戦略調査研究（以下、FS）では、環境負荷低減の観点から、高速実用炉を用いた LLFP 核変換に関する検討を行っている。これまでの検討から、対象核種として  $^{129}\text{I} \cdot ^{99}\text{Tc}$  が有効であること、LLFP 集合体を炉心外周（径方向ブランケット位置）に装荷した核変換炉心について、設計条件（プラント取扱条件・炉心性能要求）を満足しつつ、1.0 以上のサポートファクタ（以下、SF）を達成できる見通しを有することがわかった（ここで、SF とは、LLFP 核種の変換量と生成量の比で定義され、SF 1.0 は生成した LLFP 核種を自ら変換できることを意味する）。

一方、LLFP 集合体を炉心外周に装荷した核変換炉心では、核変換率が低く制限され、1.0 以上の SF を確保するには、LLFP インベントリが過大となつた。そのため、その改善方策として、LLFP 集合体を炉心内に装荷した核変換炉心の検討を行い、炉心外装荷・炉心内装荷炉心両者の特性を定量的に把握して、FS フェーズⅡにおける LLFP 装荷法の代表方式を選定することとした。次に、選定された LLFP 装荷法を適用し、FS フェーズⅡまとめで設定された各炉型の代表炉心について核変換炉心の設計評価を行い、各炉型の核変換特性の比較を行うものとした。また、FS では、FBR 導入シナリオ検討上、LLFP 核変換の要求に柔軟に対応できるよう、SF を大きく向上した核変換炉心の構築も望まれることから、SF 向上の可能性を把握するため、現状の設計条件の幾つかの項目について、SF に対する感度評価を行うこととした。

## 2. 検討の背景

### 2.1 これまでの検討・成果

FS フェーズ I (1999~2000 年) では、LLFP 核変換技術について、LLFP 化合物・減速材の影響、核変換特性、不純物の影響、放射化生成物の有無や廃棄物低減利得等、主に核的な観点から検討を行った<sup>[1]</sup>。

FS フェーズ II 初年度 (2001 年) には、フェーズ I の結果を踏まえ、各核変換対象核種 ( $^{129}\text{I}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ ) の核変換特性に関する詳細検討を行うとともに、LLFP 集合体やそれを装荷した核変換炉心の工学的設計検討に着手した<sup>[2]</sup>。核変換対象核種のうち、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  については、減速材の利用により効率的な核変換が可能であることがわかった。一方、 $^{135}\text{Cs}$  については、もともと生成量が極めて大きいこと、安定同位体 ( $^{133}\text{Cs}$ ) からのビルドアップにより  $^{135}\text{Cs}$  が生成されること等の効果により、生成量以上の変換量を得ることは困難な見通しが得られた。そのため、FS 検討では、 $^{135}\text{Cs}$  については、核変換対象核種から除外することとした。また、LLFP 集合体や核変換炉心の工学的設計検討について、設計評価上、減速材として用いる水素化合物 (Zr-H 等) の水素解離、および、解離水素の被覆管透過による水素化合物の安定性が問題となることがわかった。

FS フェーズ II 中間まとめ (~2003 年) では、上記の結果を受け、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  の 2 核種を対象に、FS で検討中の各炉型について、LLFP 核変換特性の検討を行った<sup>[3, 4]</sup>。具体的には、フェーズ II で設計検討を実施した各炉型 (① ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心 (コンパクト型)、② ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉心 (高内部転換型)、③ ナトリウム冷却大型金属燃料炉心 (コンパクト型)、④ 鉛-ビスマス冷却中型炉 (強制循環型)、⑤ 鉛-ビスマス冷却中型炉 (自然循環型)、⑥ ヘリウムガス冷却大型炉心 (横方向冷却型) ) について、LLFP 集合体の健全性評価も含めた核変換炉心の設計検討を行った。ここで、核変換炉心としては、核・熱設計への影響を極力低減すべく、LLFP 集合体を径方向ブランケット位置に装荷する炉心 (炉心外装荷炉心) を適用した。検討の結果、いずれの炉型についても、炉心外装荷方式により、設計条件 (プラント取合条件・炉心性能要求) を満足しつつ、1.0 以上の SF を達成できる見通しが示された。ここで、SF とは、LLFP 核種の変換量と生成量の比で定義され、1.0 は生成した LLFP 核種を自ら変換できることを意味するものである。

### 2.2 LLFP 核変換炉心検討の課題

上記の FS フェーズ II 中間まとめ (~2003 年) までの検討結果を踏まえ、今回の検討に先立ち、以下の課題が指摘されている。

- LLFP 集合体の装荷法について、核・熱設計への影響を極力小さくするという観点から炉心外装荷炉心が採用され、設計条件・目標を満足する核変換炉心構築の見通しを得た。その一方、フェーズ II 中間まとめの FBR 導入シナリオ検討の結果、現状の炉心外装荷炉心では、単位期間当たりの核変換率が低く制限され、1.0 以上の SF を確保するためには、LLFP インベントリが過大となる傾向にある<sup>[5]</sup>。過大な LLFP インベントリは、核変換炉心立上げ時に必要となる LLFP 量の蓄積に長期間を要すため、核変換炉心への移行ペースが制限され、FBR 導入シナリオ上問題となる可能性を有する。
- FS で検討中の各炉型について、フェーズ II 中間まとめ時 (2003 年) から最終まとめ (2005

年) までに、代表炉心は見直されており、最終的なフェーズⅡ代表炉心について、LLFP 核変換特性を把握する必要がある。

- ・ LLFP 核変換炉心の検討において、実用炉の設計条件を満たす場合、SF は 1.0 近傍となる見通しである。他方、FBR 導入シナリオ上、LLFP 核変換の要求に柔軟に対応できるよう、SF を大幅に向上した核変換炉心（例えば、複数基の炉心から生成される LLFP を処理できるなど）の実現性について把握する必要がある。

### 2.3 今回の検討内容の概略

上記の課題を受け、今回の検討内容として、下記の 3 項目について検討を行うこととした。

#### (1) LLFP 集合体装荷法の選定

炉心外装荷炉心では、単位期間当たりの核変換率が低く制限され、1.0 以上の SF を確保するためには、LLFP インベントリが過大となる課題を有する。そこで、核変換率を向上すべく、LLFP 集合体を炉心内に分散配置する炉心内装荷方式を採用した炉心（炉心内装荷炉心）について設計評価を行う。設計評価は、炉心内装荷炉心とともに、炉心外装荷炉心についても、再度、同一の条件で行い、核・熱特性、核変換特性を比較した上で、FS フェーズⅡにおける最終的な LLFP 装荷の代表方式を選定する。

#### (2) 各炉型における LLFP 核変換特性の評価

FS で検討中の各炉型について、フェーズⅡ中間まとめ（2003 年）から最終まとめ（2005 年）までに、代表炉心が見直されている。そこで、各炉型のフェーズⅡ代表炉心を対象に、(1) で選定された LLFP 集合体の装荷法を適用し、LLFP 核変換特性の設計評価を行う。具体的には、① ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉（高内部転換型）、② ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉（高内部転換型）、③ ナトリウム冷却大型金属燃料炉（高出口温度型）、④ 鉛-ビスマス冷却中型炉（強制循環型）、⑤ ヘリウムガス冷却大型炉（六角ブロック型）について、LLFP 核変換炉心の設計評価を行い、それらの炉心の核変換特性について比較評価を行う。

#### (3) サポートファクタ向上炉心の実現性検討

実用炉の設計条件を満たす場合、SF は 1.0 近傍となる見通しである。FBR 導入シナリオ上、LLFP 核変換の要求に柔軟に対応できるよう、SF を 1.0 から大きく向上した核変換炉心にも置換可能であることが望まれる。そこで、SF 向上の可能性を把握すべく、現状の設計条件（プラント取合条件・炉心性能要求）のうち、幾つかの項目の制限を緩和することで、どの程度 SF に向上がるか感度評価を行う。

### 3. LLFP 集合体装荷法の選定

#### 3.1 LLFP 集合体装荷法の特長

LLFP 集合体の装荷法として、本検討では、「炉心内装荷方式」と「炉心外装荷方式」を対象として比較評価を行う。「炉心内装荷方式」は、LLFP 集合体を炉心内に分散装荷する方式であり、一方、「炉心外装荷方式」は、炉心外周部、すなわち、径方向ブランケット位置に装荷する方式である。両装荷法とも、核・熱特性、核変換特性上、一長一短が存在する。

具体的には、「炉心内装荷方式」では、LLFP 集合体を炉心内に装荷することから、中性子束レベルが高く、大きな核変換率が期待できる一方、減速材を内包する LLFP 集合体が炉心内に装荷されることから、核・熱設計への影響は大きくなるものと考えられる。特に、LLFP 集合体中に減速された中性子の流入により、隣接するドライバ燃料集合体の外周部で局所的な出力ピーク（減速された中性子との反応による出力ピーク。以下、サーマルスパイク）が発生することが問題になる可能性が考えられる。それに対し、「炉心外装荷方式」では、LLFP 集合体を炉心の外部に装荷することから、核・熱設計への影響は小さいものの、中性子束レベルが低いことから、核変換率が低く制限されることが問題になるとと考えられる。以下の検討では、これらの点を踏まえて、両装荷方式を採用した炉心の設計評価を行い、両者について、定量的に比較を行う。

#### 3.2 評価条件

##### 3.2.1 LLFP ターゲット・減速材

LLFP ターゲット・減速材について、まず、LLFP 元素としては、これまでの検討<sup>[2]</sup>に基づき、ヨウ素とテクネチウムを対象とすることとした。同位体組成としては、ヨウ素について、<sup>129</sup>I 73.4 %、<sup>127</sup>I 26.6 %、テクネチウムについては、<sup>99</sup>Tc 100%とした。LLFP ターゲットの装荷形態としては、ヨウ素について、炉心外装荷炉心では、海外での照射実績を有する CuI、炉心内装荷炉心では、ターゲットの出力・温度条件が炉心外装荷時と比べ高くなることから、高融点 (997°C) を有する YI<sub>3</sub>を想定することとした<sup>[6]</sup>。減速材としては、これまでの検討同様<sup>[4]</sup>、Zr-H を採用し、製造時の H/Zr 比は 1.65 とした。

##### 3.2.2 基準炉心

本 LLFP 集合体装荷法の検討では、ナトリウム冷却 MOX 燃料炉心を対象として評価を行うこととし、基準炉心としては、FS フェーズⅡ中間まとめの代表炉心である「コンパクト型炉心 (導入期、ABLE 型集合体採用)」を適用することとした<sup>[5, 7]</sup>。コンパクト型炉心の炉心配置図と主要な仕様・特性を Fig. 3-1 に示す。

##### 3.2.3 設計条件・目標

###### (1) プラント取合条件・炉心性能要求

プラント取合条件・炉心性能要求について、基本的には、基準炉心の条件を保存することとする。ただし、増殖比については、LLFP 核変換炉心の導入時期は FBR 平衡期であることを想定し 1.03 とした。また、LLFP 核変換炉心については、LLFP 核変換の需要に柔軟に対応できるよう、基準炉心の配置から置換可能であることを前提とし、集合体配列ピッチ、集

合体総数、制御棒配置等を保存することとした。

## (2) 核変換特性

核変換特性の目標としては、 $^{129}\text{I}$ ・ $^{99}\text{Tc}$  核種について、サポートファクタ（以下、SF）が 1.0 以上を満足することとした。ここで、SF とは、LLFP 核種の変換量/生成量の比で定義される値であり、 $\text{SF} > 1.0$  は、自ら生成する LLFP 量を変換できることを意味するものである。また、LLFP の取出核変換率については、従来の検討<sup>[5]</sup>を参考に 30 %を暫定的な目標目安値とした。

## (3) LLFP 集合体設計条件

LLFP 集合体の設計条件として、健全性の観点から、LLFP ターゲット・減速材温度、被覆管温度を制限するとともに、ヨウ素ピンについては、核変換により Xe ガスが生成されることから、ガス内圧・クリープ損傷寿命分数和（以下、CDF）を考慮することとした。また、減速材ピンについては、Zr-H の水素解離・透過が相安定性に影響を与えることから、H/Zr 比を 1.53 以上に制限することとした。LLFP 集合体出口温度については、サーマルストライピングの観点から、隣接するドライバ燃料集合体との温度差を制限することとした。ここでは、暫定的に、出口温度差として 120°C を目標値とした。健全性の各項目について、Table 3-1 に制限条件・因子をまとめた。

## 3.3 解析手法の概略

### (1) 核計算

核特性について、LLFP 集合体と燃料集合体を均質で扱い、2 次元 RZ モデルで計算を行うこととした。群定数セットについては、JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を縮約して用いた。

核変換特性についても、同様に、2 次元 RZ モデルで計算を行うこととした。ただし、炉心外装荷炉心では、リング状に体系を組み均質に扱うことで計算を行えるが、炉心内装荷炉心では、LLFP 集合体を炉心内に非均質に分散して装荷するので、2 次元 RZ モデルで直接的な評価が困難であり、本検討では、核変換評価用に暫定的な簡易評価手法を設定した。具体的には、2 次元 RZ モデルで炉中心位置に LLFP 集合体 1 体を装荷した計算を行い、各炉心径方向位置での核変換率は、各位置での中性子照射量に比例すると仮定して、炉心全体の核変換率を評価することとした。（2 次元 RZ モデル簡易評価手法の詳細は、巻末の付録 1 を参照。参考として、本簡易評価手法と 3 次元計算の比較評価を行った。結果として、両手法の差は 10 %程度であり、本簡易評価手法の方が核変換率を小さく見積もるが、概ね妥当な結果となることを確認した（4.3.1 項参照）。）

核変換率の評価においては、LLFP 集合体内の非均質効果を考慮することとした。非均質効果の補正係数としては、テクネチウム 0.93、ヨウ素 1.00 を適用した。この値は、炉心外装荷炉心の LLFP 集合体に関して、連続エネルギーモンテカルロ計算から評価したものであり<sup>[8]</sup>、暫定的に、炉心内装荷・炉心外装荷の両炉心について適用することとした。

## (2) LLFP 集合体の健全性

LLFP 集合体の健全性について、Table 3-1 の各項目を対象に評価を行うこととした。以下に、評価モデル<sup>[4]</sup>の概略を示す。

熱特性については、3 本の要素に囲まれたチャンネルを想定し、このチャンネルを形成する各要素からの入熱を考慮して評価を行った。隣接集合体出口温度差については、隣接ドライバ燃料集合体の出口温度を炉心出口温度 550°C と仮定して評価を行うとした。

減速材ピンの H/Zr 比については、これまでにオーステナイト鋼、フェライト鋼の水素透過率の評価結果が報告されており<sup>[9]</sup>、フェライト鋼では水素の透過率が大きく、減速材ピン設計上の課題であることが知られている<sup>[3, 4]</sup>。そこで、本検討では、表面処理により被覆管内面に水素透過率の低い材料をライニングするなどの低減方策を適用し、暫定的に、水素透過率としてオーステナイト鋼の 1/10 の値とすることを想定した（水素透過率の低減方策の成立性については、現在、炉外試験を行い確認中であり、一部、成果が報告されている<sup>[10]</sup>）。

ヨウ素ピンの照射末期ガス内圧・CDF については、核変換で発生する Xe ガスの放出率として、暫定的に 100 % を想定した。ヨウ素による内面腐食については、現状、腐食挙動に関する知見が十分でないことから、暫定的に考慮しないこととした。

## 3.4 炉心外装荷炉心の検討

### 3.4.1 LLFP 集合体仕様の設定

炉心外装荷炉心では、核変換特性向上の観点から、ヨウ素とテクネチウムについて、別々のターゲット集合体に装荷し、減速材割合・ピン径等に関し、それぞれの集合体で仕様の最適化を行うこととした。ヨウ素ターゲットの形態としては、融点は低いものの海外での照射実績を有する CuI を適用することとした。また、テクネチウムターゲットの形態については金属とし、減速材については、従来検討に基づき Zr-H を適用することとした。

ヨウ素集合体の仕様について、まず、減速材割合については、核変換特性の最適化に関するサーベイの結果、40 % に設定した。また、ピン径については、熱的制限（ヨウ素ターゲット溶融）に関するサーベイを行った結果、線出力を低減する必要があることがわかり、ピン径を細径化することで対応することとした。そのため、現状の製造実績の範囲で最も細い 5.5 mm と設定し、このピン径で溶融を回避するよう、発熱量を制限すべくスミア密度は 70 % とした。減速材のピン径についても、ヨウ素ピン同様 5.5 mm とした。ヨウ素ターゲットは、ドライバ燃料の炉心高さ + 下部軸方向ブランケット領域に装荷することとし、カラム長 110 cm とした。

テクネチウム集合体の仕様についても、核変換特性の最適化サーベイの結果、減速材割合を 48 % と設定した。ピン径については、テクネチウム金属は融点・熱伝導度が高く、熱設計に余裕があることから、集合体当たりの装荷量を増加するよう太径化することとし、8.42 mm と設定した。減速材のピン径についても、テクネチウムピンと同一の 8.42 mm とした。テクネチウムターゲットは、ドライバ燃料の炉心高さ + 上部・下部軸方向ブランケット領域に装荷することとし、カラム長 150 cm とした。

以上、サーベイの結果設定されたヨウ素集合体、テクネチウム集合体の仕様を Table 3-2 に示すとともに、両集合体の断面図を Fig. 3-2、Fig. 3-3 に示した。

### 3.4.2 LLFP 核変換炉心の設定

仕様を設定した LLFP 集合体（ヨウ素集合体、テクネチウム集合体）について、 $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  の SF を 1.0 以上とする LLFP 集合体の体数と配置の検討を行った。LLFP 集合体の装荷位置として、ヨウ素集合体は、炉心外周の 1 層目と 2 層目に並べて装荷することとした。一方、テクネチウム集合体では、減速材割合が大きく、2 層目に装荷する場合、核変換率が大幅に低下することから、1 層目のみに装荷することとした。また、1・2 層目に装荷するヨウ素集合体については、取出核変換率を向上させるため、照射期間中に 1 層目と 2 層目の集合体を置換することとした。評価の結果、 $\text{SF} > 1.0$  を満足するには、ヨウ素集合体について 70 体、テクネチウム集合体について 53 体が必要となる結果が得られた。LLFP 核変換炉心の炉心配置を Fig. 3-4 に示す。

### 3.4.3 核変換特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核変換特性の評価結果を Table 3-3 に示した。サイクル当たりの核変換率は、 $^{99}\text{Tc}$  で 0.83 %、 $^{129}\text{I}$  で 1 层目 1.87 %、2 层目 0.66 % であった。取出核変換率については、LLFP 集合体健全性評価の結果、可能な照射期間に依存するが、テクネチウム集合体の照射期間は 20 サイクルで、取出変換率 15.4 %、ヨウ素集合体の照射期間は 8 サイクルで、取出変換率 10.7 % であった。

### 3.4.4 核特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核特性の評価結果を Table 3-3 に示した。同表に示されるように、増殖比は 1.03 以上を達成しており、本炉心外装荷炉心において、FS の設計条件である、 $\text{SF} > 1.0$  と増殖性を満足することが認められた。

核特性については、炉心外に LLFP 集合体を装荷したことにより、影響は小さく、Pu 富化度は、内側炉心で 21.8 wt.%、外側炉心で 25.4 wt.%、燃焼反応度についても  $3.6\%/\text{k}/\text{kk}'$  と、基準炉心と概ね同等であった。ただし、最大線出力については、径方向ブランケットが LLFP 集合体に置換され、その分の発熱を炉心で補うことから、447 W/cm と基準炉心より増加する傾向であった。

### 3.4.5 LLFP 集合体の健全性評価

LLFP 集合体（ヨウ素集合体・テクネチウム集合体）の健全性に関する評価を行い、健全性を満足する LLFP 集合体流量、および、照射期間を設定する。

まず、ヨウ素集合体について、集合体流量と各部温度の評価結果を Fig. 3-5 に示す。ここで、グラフは、Table 3-1 に示した各制限温度に対する相対値で示した。流量が少ないと各部の温度は上昇する傾向にあり、ヨウ素ターゲット温度が、熱的に最も厳しいことがわかる。そのため、ヨウ素ターゲット温度を満足するよう集合体の下限流量 1.8 kg/s が決まる。一方、流量を多く流すと、隣接ドライバ集合体との出口温度差は増加することになり、その制限から、LLFP 集合体流量の上限 2.8 kg/s が決まる。このように、LLFP 集合体の流量としては、この範囲内に制限されることになる。次に、ヨウ素集合体の照射期間と制限条件の関係を Fig. 3-6 に示す。ここで、グラフは、炉心外周 1 层目への装荷を想定した場合の関係を示しており、その場合、照射期間は、ガス内圧により 8 年に制限されることがわかる。照射期間中の装荷位置は、1 层目と 2 层目を中間時点で置き換えることを想定しており、2 层目装荷時に核

変換率が低下する効果を考慮すると、(同一のガス内圧でも) 実際の照射期間は 12 年程度、つまり、8 サイクルとなる。本炉心の燃料は、下部ガスプレナムを採用していることから、集合体流量によるガス温度、すなわち、ガス内圧への影響は小さく、集合体流量の照射期間への感度は極めて小さい。そのため、集合体流量としては、下限流量の 1.8 kg/s に設定することとした。

次に、テクネチウム集合体について、集合体流量と各部の温度の評価結果を Fig. 3-7 に示す。ここでは、テクネチウムピンの被覆管温度が熱的に最も厳しく、制限温度を満足するよう集合体の下限流量 1.3 kg/s が決まる。一方、LLFP 集合体流量の上限は、ヨウ素集合体同様、ドライバ燃料集合体との出口温度差により決まり 4.2 kg/s であった。テクネチウム集合体の照射期間と制限条件の関係を Fig. 3-8 に示す。ここで、H/Zr 比は集合体流量、つまり、被覆管温度により影響を受けることがわかる。そこで、集合体流量として上限の 4.2 kg/s に設定し、照射期間は 20 サイクルとすることとした。

以上、ヨウ素集合体については、集合体流量 1.8 kg/s、照射期間 8 サイクル、テクネチウム集合体については、集合体流量 4.2 kg/s、照射期間 20 サイクルに設定することとした。

### 3.4.6 热特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、1 次系必要流量の概略評価を行う。ここで、炉心部の必要流量については、2 次元計算の結果をベースに、基準炉心と LLFP 核変換炉心の包絡熱出力の比から、基準炉心の流量を外挿し見積もることとした。LLFP 集合体の必要流量については、上記の LLFP 集合体流量の評価結果を用いた。また、それ以外の流量（制御棒・遮へい体領域等）としては、1 次系流量の 3.7 % を想定した。

評価の結果、本 LLFP 核変換炉心の 1 次系必要流量は 100.5 % と見積もられ、炉心外装荷炉心では、熱特性への影響は小さいことが確認された。ただし、本評価は概略評価であり、設計成立性を見通すためには、今後、熱設計の最適化検討を行うとともに、詳細な設計評価が必要であると考えられる。

## 3.5 炉心内装荷炉心の検討

### 3.5.1 LLFP 集合体仕様の設定

LLFP 集合体を炉心内に装荷する場合、主に、以下の 2 つの問題が考えられる。1 つは、隣接するドライバ燃料集合体の周辺領域で、局所的な出力ピークが発生すること、もう 1 つは、ヨウ素ターゲットの溶融に対する制限である。前者は、LLFP 集合体中の減速材で減速された中性子の流入により、隣接ドライバ燃料集合体の周辺領域で、局所的な出力ピーク（減速された中性子との反応による出力ピーク。以下、サーマルスパイク）が発生するものである。後者は、炉心内装荷では、ヨウ素ピン自体の発熱が大きくなるとともに、一般にヨウ素化合物の熱伝導度・融点が低いことから生じるものである。

隣接ドライバ燃料集合体のサーマルスパイクを低減するための方策として、LLFP 集合体中の減速材ピン割合を調整し、熱設計への影響が問題にならないレベルまで減速材割合を低下することとした。減速材割合に関するサーベイとして、減速材割合 30 %・15 % の 2 ケースの隣接ドライバ燃料集合体内出力分布を評価した結果を Fig. 3-9 に示した。この図で、横軸は、隣接ドライバ燃料集合体内の径方向相対位置、縦軸は、通常時（ドライバ燃料集合体

に隣接する場合)の出力分布との比を表している。図より、減速材ピン割合は15%程度まで低減されれば、サーマルスパイクへの影響は大幅に改善されていることがわかる。そのため、炉心内装荷炉心では、減速材割合として15%を採用することとした。次に、ヨウ素ペレットの溶融を回避するための方策としては、融点の高いヨウ素化合物<sup>[6]</sup>を採用することとした。具体的には、997℃の融点を有するYI<sub>3</sub>を暫定的に採用することとした。ただし、このYI<sub>3</sub>の適用性については、吸湿性による製造時の扱いにくさや、被覆材であるODS鋼との共存性に課題を有する等の結果が炉外試験により一部得られており<sup>[11, 12]</sup>、今後、適用性について詳細な調査を行う必要がある。

次に、LLFPターゲットの仕様について設定を行う。炉心内装荷炉心では、上記の通り、減速材ピン割合は、LLFP核種によらず隣接ドライバ集合体への影響で制限されることから、ヨウ素・テクネチウムの集合体を分けず、同一の集合体に混在させることとした。ピン径については、ヨウ素ピンの発熱が厳しくなる可能性があることから、炉心外装荷炉心のヨウ素集合体ピン仕様と同様、ピン径5.5mmの細径ピンを適用することとし、スミア密度も、炉心外装荷炉心と同様に50%とした。ターゲットカラム長としては、ヨウ素・テクネチウムピンとも、ドライバ燃料の炉心高さと同等の80cmとした。以上、設定されたLLFP集合体の仕様をTable 3-4に示した。

また、LLFP集合体内のヨウ素・テクネチウム・減速材ピン配置については、核変換特性の観点から、最適化に向けた検討を行った。具体的には、各ピンを均質に装荷するケースと、Fig. 3-10のように、テクネチウムピンを最外周に装荷し減速材ピンを内側に集中的に配置するケースの比較を行った。比較評価の結果をTable 3-5に示す。ここで、両者の比較は、減速材ピン割合30%で行い、減速材ピン割合15%のケースも参考として示した。表より、減速材ピンを内側に集中的に配置するケースの方が、減速が効率的に行われ、<sup>99</sup>Tcで10%、<sup>129</sup>Iで30%程度核変換率が大きくなることがわかった。このことから、炉心内装荷炉心では、減速材ピンを内側に集中的に配置することとした。

### 3.5.2 LLFP核変換炉心の設定

設定されたLLFP集合体について、<sup>99</sup>Tcと<sup>129</sup>IのSFを1.0以上とするLLFP集合体の体数と配置の検討を行い、LLFP核変換炉心の評価を行った。評価の結果、LLFP集合体の体数について、SF > 1.0を満足するには40体が必要となる結果が得られた。設定された炉心配置をFig. 3-11に示す。

### 3.5.3 核変換特性の評価

設定されたLLFP核変換炉心について、主要な核変換特性の評価結果をTable 3-6に示した。サイクル当たりの核変換率は、<sup>99</sup>Tcで6.2%、<sup>129</sup>Iで5.0%と、炉心外装荷炉心に比べ、顕著に大きい結果を示している。そのため、1.0以上のSFを確保するためのLLFPインベントリも大幅に低減され、炉心外装荷炉心と比較すると、<sup>99</sup>Tcで1/7、<sup>129</sup>Iで1/3程度となる結果であった。取出核変換率については、LLFP集合体健全性評価で設定される照射期間に依存するが、結果として、照射期間は3サイクルに制限され、核変換率は、<sup>99</sup>Tcで17.5%、<sup>129</sup>Iで14.3%と、炉心外装荷炉心より若干大きくなるレベルであった。これは、主にヨウ素ピンのガスプレナム長の相違によるものと考えられる。つまり、炉心外装荷炉心では、ターゲットカラムとして、炉心+上部軸方向ブランケット領域を想定しているのに対し、炉心内装荷炉心では、炉心領域のみであり、上部軸方向ブランケット領域はガスプレナムに供し、同一

のガス生成量に対してもガス内圧が低下することによると考えられる。

### 3.5.4 核特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核特性の評価結果を Table 3-6 に示した。同表に示されるように、増殖比は 1.03 以上を達成しており、本炉心内装荷炉心において、FS の設計条件である、 $SF > 1.0$  と増殖性を満足することが認められた。

Pu 富化度については、炉心内に LLFP 集合体を装荷した効果により、内側炉心で 24.8 wt.%、外側炉心で 27.3 wt.% と、基準炉心から 3 wt.% 程度増加する結果となった。そのため、燃焼反応度は  $4.1 \%/\text{kk'}$  と、基準炉心より 1 %程度増加しており、燃焼ミスマッチの増加を導き、熱設計に影響するものと考えられる。

### 3.5.5 LLFP 集合体の健全性評価

LLFP 集合体の健全性に関する評価を行い、健全性を満足する LLFP 集合体流量、および、照射期間を設定する。

LLFP 集合体流量と各部温度の評価結果を Fig. 3-12 に示す。ここで、グラフは、Table 3-1 に示した各制限温度に対する相対値で示した。流量が少ないと各部の温度は上昇し、テクネチウムピンの被覆管温度が熱的に最も厳しいことがわかる。そのため、テクネチウムピンの被覆管温度を満足するよう LLFP 集合体の下限流量 3.5 kg/s が決まる。一方、流量を増加すると、隣接ドライバ集合体との出口温度差は増加することになり、その制限から、LLFP 集合体流量の上限 15.5 kg/s が決まる。このように、LLFP 集合体の流量としては、この範囲内に制限されることになる。

次に、LLFP 集合体の照射期間と制限条件の評価結果を Fig. 3-13 に示す。照射期間は、ガス内圧により制限され、ドライバ燃料並みの照射期間（4 サイクル）を達成することは、困難であることがわかった。本炉心の燃料は、下部ガスプレナムを採用していることから、集合体流量によるガス温度、すなわち、ガス内圧への影響は小さく、集合体流量の照射期間への感度は極めて小さい。そのため、照射期間は、3 サイクルに制限することとし、その範囲で H/Zr 比の制限を満足する集合体流量として 8.0 kg/s を設定することとした。

以上、LLFP 集合体流量を 8.0 kg/s、照射期間を 3 サイクルに設定することとした。

### 3.5.6 热特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、1 次系必要流量の概略評価を行う。ここで、炉心部の必要流量については、2 次元計算の結果をベースに、基準炉心と LLFP 核変換炉心の包絡熱出力の比から、基準炉心の流量を外挿し見積もることとした。LLFP 集合体の必要流量については、上記の LLFP 集合体流量の評価結果を用いた。また、それ以外の流量（制御棒・遮へい体領域等）としては、1 次系流量の 3.7 %を想定した。

評価の結果、1 次系必要流量は 104.1 %と見積もられ、炉心内装荷炉心では、熱特性への影響は大きいことが認められた。この要因としては、Pu 富化度の増加による内部転換比の低下により、燃焼ミスマッチが増加したためと考えられる。ただし、本評価は概略評価であり、今後、熱設計の最適化検討を行うとともに、詳細な設計評価が必要と考えられる。

### 3.6 LLFP 集合体装荷方法の比較

以上の炉心内装荷・炉心外装荷炉心の設計評価に基づき、両炉心における核・熱・核変換特性に関する比較を行う。Table 3-7 に両炉心の主要な核・熱・核変換特性を基準炉心と比較してまとめた。

核特性について、炉心内装荷炉心では、LLFP 集合体装荷による影響が大きく、Pu 富化度・燃焼反応度が増加する傾向が示された。その結果、熱特性についても、燃焼ミスマッチ増加の効果により、1 次系必要流量の増加を招く結果となった。一方、核変換特性については、炉心内装荷炉心では、サイクル当たりの核変換率が大きく、LLFP インベントリは、炉心外装荷炉心に比べ、<sup>99</sup>Tc で 1/7、<sup>129</sup>I で 1/3 程度まで低減可能となる結果が得られた。取出核変換率については、両者で顕著な相違はなく、炉心内装荷炉心の方が若干大きい程度であった。このように、炉心外装荷炉心では、核・熱設計への影響は小さいものの、LLFP インベントリが増加し、一方、炉心内装荷炉心では、LLFP インベントリは低減可能であるが、1 次系冷却材必要流量が増加することが分かった。

初期に装荷する LLFP インベントリが増加することは、LLFP 核変換炉心の立上げ時に必要な LLFP 量が増加することを意味し、LLFP 核変換炉心の導入ペースを低下させるものと考えられる<sup>[5]</sup>。このように、LLFP インベントリの問題は、FBR 導入シナリオ上、本質的な問題であり設計対応が困難であるが、一方、1 次系冷却材必要流量については、現状のレベルであれば、仕様・設計条件の見直し等により改善される見込みが考えられる。

以上のことから、FS フェーズ II における、LLFP 集合体の装荷法として、LLFP インベントリを極力低減可能な炉心内装荷法を代表方式に選定することとした。ただし、炉心内装荷については、高融点のヨウ化物 ( $\text{YI}_3$ ) の適用が前提であり、今後、その適用性を見極める必要がある。(ヨウ素ターゲットの適用性については、現在、炉外試験による評価を実施中であり<sup>[11], [12]</sup>、フェーズ II における開発状況を減速材ピンの状況<sup>[10]</sup>と併せて、巻末の付録 2 に示す。)

#### 4. 各炉型における LLFP 核変換特性の評価

FS で検討している各炉型について、フェーズⅡで選定した代表炉心を基準炉心として、LLFP 集合体を装荷した核変換炉心の設計検討を行い、各炉型における LLFP 核変換特性に関する評価を行う。ここで、LLFP 集合体の装荷法としては、3 章の LLFP 集合体装荷法に関する検討結果に基づき、LLFP インベントリの低減を指向した「炉心内装荷方式」を採用することとする。

##### 4.1 評価条件

###### 4.1.1 LLFP ターゲット・減速材

LLFP ターゲット・減速材について、まず、LLFP 元素としては、これまでの検討<sup>[2]</sup>に基づき、ヨウ素とテクネチウムを対象とすることとした。同位体組成としては、ヨウ素について、<sup>129</sup>I 73.4 %、<sup>127</sup>I 26.6 %、テクネチウムについては、<sup>99</sup>Tc 100%とした。LLFP ターゲットの装荷形態としては、ヨウ素について、炉心内装荷炉心では、ターゲットの出力・温度条件が高いことから、高融点 (997°C) を有する YI<sub>3</sub> を想定することとした<sup>[6]</sup>。一方、減速材としては、比較的低温条件であるナトリウム冷却炉と鉛-ビスマス冷却炉については、Zr-H を採用することとし、高温条件となるヘリウムガス冷却炉については、Y-H を採用することとした。製造時の水素割合については、Zr-H では H/Zr 比 1.65、Y-H では H/Y 比 1.8 とした。

LLFP 集合体の構造としては、3.5.1 項の検討に基づき、高い核変換率を達成できることから、減速材ピンを内側に集中的に配置するピン配置を採用することとした (Fig. 3-10 参照)。

###### 4.1.2 各炉型の基準炉心

###### (1) ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心

FS フェーズⅡの代表炉心としては、経済性の観点から、プランケットを含めた全炉心の取出平均燃焼度を高めた「高内部転換型」炉心を選定した<sup>[13,14]</sup>。本代表炉心では、高内部転換達成のため、従来より太径の燃料ピンを採用している。また、集合体としては、再臨界回避の観点から、改良内部ダクト型集合体を採用した。この集合体は、従来の内部ダクト型集合体 (内部ダクトを集合体中央に配置)<sup>[5]</sup>と異なり、主に製作性・構造成立性の観点から、菱形の内部ダクトを六角ラッパ管のコーナーに設置した構造となっている。本代表炉心の炉心配置図と主要な仕様・特性を Fig. 4.1-1 に示す。

###### (2) ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉心

中型炉についても、大型炉と同様の理由により、FS フェーズⅡの代表炉心として、「高内部転換型」炉心を選定し、改良内部ダクト型集合体を採用した<sup>[14]</sup>。本代表炉心の炉心配置図と主要な仕様・特性を Fig. 4.1-2 に示す。

###### (3) ナトリウム冷却大型金属燃料炉心

FS フェーズⅡの代表炉心としては、MOX 燃料炉と同程度の高出口温度 (550°C) を指向した、「高出口温度型」炉心を選定した<sup>[14]</sup>。本代表炉心では、炉心出口温度 550°C 達成のため、出力分布の時間的・空間的平坦化に向け、単一 Pu 富化度、重金属量 2 領域としている。ここで、重金属量の 2 領域化に向けては、燃料のスミア密度と Zr 含有率を調整する方式を採用

している。本代表炉心の炉心配置図と主要な仕様・特性を Fig. 4.1-3 に示す。

#### (4) 鉛-ビスマス冷却中型炉心

FS フェーズⅡ中間まとめ以降、最近の鉛ビスマス中の材料腐食の実験結果を反映して、被覆管制限温度が 650°C から 570°C に見直された。フェーズⅡ中間まとめでは、「自然循環型」と「強制循環型」の検討を行っていたが、被覆管温度制限低下に伴い、炉心出口温度も低下する必要があり、設計の見直し評価を行った。その結果、「強制循環型」炉心は「自然循環型」炉心に比べて、炉心特性への影響が小さい結果が得られたことから、FS フェーズⅡの代表炉心として、「強制循環型」炉心を選定した<sup>[14]</sup>。本代表炉心の炉心配置図と主要な仕様・特性を Fig. 4.1-4 に示す。

#### (5) ヘリウムガス冷却大型炉

FS フェーズⅡ中間まとめでは、「横方向冷却コンパートメント型」と「六角ブロック型」の検討が行われていた。その後の検討で、「六角ブロック型」は、FP 等の閉じ込め性に関して 2 重のバウンダリを有するとともに、「横方向冷却コンパートメント型」と同程度の安全特性が達成できる見通しが得られ、結果として、FS フェーズⅡの代表炉心として、「六角ブロック型」を選定した<sup>[14]</sup>。本代表炉心の炉心配置図と主要な仕様・特性を Fig. 4.1-5 に示す。

### 4.1.3 設計条件・目標

#### (1) プラント取合条件・炉心性能要求

プラント取合条件・炉心性能要求について、基本的には、基準炉心の条件を保存することとする。ただし、増殖比については、LLFP 核変換炉心の導入時期は FBR 平衡期であることを想定し 1.03 とした。また、LLFP 核変換炉心については、LLFP 核変換の需要に柔軟に対応できるよう、基準炉心の配置から置換可能であることを前提とし、集合体配列ピッチ、集合体総数、制御棒配置等を保存することとした。

#### (2) 核変換特性

核変換特性の目標としては、<sup>129</sup>I・<sup>99</sup>Tc 核種について、サポートファクタ (SF) が 1.0 以上を満足することとした。ここで、SF とは、LLFP 核種の変換量/生成量の比で定義される値であり、SF > 1.0 は、自ら生成する LLFP 量を変換できることを意味するものである。また、LLFP の取出核変換率については、従来検討<sup>[5]</sup>を参考に 30 % を暫定的な目標目安値とした。

#### (3) LLFP 集合体設計条件

LLFP 集合体の設計条件として、健全性の観点から、LLFP・減速材温度、被覆管温度を制限とともに、ヨウ素ピンについては、核変換により Xe ガスが生成されることから、ガス内圧・CDF を考慮することとした。また、減速材ピンについては、水素化合物 (Zr-H、Y-H) の水素解離・透過が相安定性に影響を与えることから、H/Zr 比を 1.53 以上に、H/Y 比を 1.67 以上に制限することとした。LLFP 集合体出口温度については、サーマルストライピングの観点から、隣接するドライバ燃料集合体との温度差を制限することとした。ここで、出口温度差制限としては、ナトリウム冷却炉・鉛-ビスマス冷却炉では 120°C、ヘリウムガス

冷却炉では 150°Cを暫定的な目標値とした。各健全性項目の制限条件については、炉型毎で値が異なるので、以下の各炉型の項において、それぞれの制限条件を示すこととする。

## 4.2 解析手法の概略

### (1) 核計算

核特性評価では、LLFP 集合体と燃料集合体を均質で扱い、2 次元 RZ モデルで計算を行うこととした。群定数セットについては、JENDL-3.2 ベースの 70 群統合炉定数 ADJ2000R を縮約して用いた。

核変換特性についても、同様に、2 次元 RZ モデルで計算を行うこととした。炉心内装荷炉心では、LLFP 集合体を炉心内に非均質に分散して装荷するので、2 次元 RZ モデルでは直接的な評価が困難であり、本検討では、核変換評価用に、暫定的な簡易評価手法を設定した。具体的には、2 次元 RZ モデルで炉中心位置に LLFP 集合体 1 体を装荷した計算を行い、各炉心径方向位置での核変換率は、各位置での中性子照射量に比例すると仮定して、炉心全体の核変換率を評価することとした。(2 次元 RZ モデル簡易評価手法の詳細は、巻末の付録 1 を参照。確認のため、本簡易評価手法と 3 次元計算の比較評価を行った。その結果、両手法の差は 10 %程度であり、本簡易評価手法の方が核変換率を小さく見積もるが、概ね妥当な結果となることを確認した(4.3.1 項参照)。)

また、核変換率の評価においては、LLFP 集合体内の非均質効果を考慮することとした。非均質効果の補正係数としては、各炉型それぞれについて、連続エネルギーモンテカルロ計算から評価した非均質補正係数を適用した。具体的な値は、各項において示すこととする。

### (2) LLFP 集合体の健全性

LLFP 集合体の健全性について、各健全性評価項目(ターゲット・被覆管温度、水素割合、CDF、ガス内圧等)を対象に評価を行うこととした。以下に、評価モデル<sup>[4]</sup>の概略を示す。

熱特性については、3 本の要素に囲まれたチャンネルを想定し、このチャンネルを形成する各要素からの入熱を考慮して評価を行った。隣接集合体出口温度差については、隣接ドライバ燃料集合体の出口温度を炉心出口温度と仮定して評価を行うとした。

減速材ピンの水素割合(H/Zr 比、H/Y 比)については、ナトリウム冷却炉・鉛-ビスマス冷却炉では、減速材ピンの被覆材として ODS 鋼が適用されており、水素透過率が大きいことが課題であることから<sup>[3, 4]</sup>、水素透過率低減の方策(表面処理により被覆管内面に水素透過率の低い材料をライニングするなど)を適用し、暫定的に、水素透過率としてオーステナイト鋼の 1/10 とすることを想定した(水素透過率の低減方策の成立性については、現在、炉外試験を行い確認中であり、一部、成果が報告されている<sup>[10]</sup>)。一方、ヘリウムガス冷却炉については、減速材ピンの被覆材として、SiC/SiC 複合材を想定しており、SiC の水素透過率は、現状詳細について不明であるが、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、オーステナイト鋼の  $10^{-5}$  と想定することとした。

ヨウ素ピンの照射末期ガス内圧・CDF については、核変換で発生する Xe ガスの放出率として、暫定的に 100 %を想定した。ヨウ素による内面腐食については、現状、腐食挙動に関する知見が十分でないことから、暫定的に考慮しないこととした。

#### 4.3 LLFP 核変換炉心の検討

##### 4.3.1 ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心（高内部転換型）

###### (1) 設計条件・解析手法

主要な設計条件・解析手法については、4.1・4.2 節で説明した条件・手法を用いた。核変換率の評価においては、LLFP 集合体内の非均質効果を考慮することとし、本核変換炉心をベースに、連続エネルギーモンテカルロ計算に基づき評価した非均質補正係数を適用した。

Table 4.3.1-1 に、今回の検討で用いた非均質補正係数を示す。また、LLFP 集合体の健全性に関しては、Table 4.3.1-2 に項目、および、制限条件を示す。

###### (2) LLFP 集合体仕様の設定

LLFP 集合体の仕様については、3.5.1 項で設定した炉心内装荷用の LLFP 集合体の構造をベースに設定することとした。具体的には、減速材割合について、減速材割合を 15 %程度にまで低下すれば、隣接ドライバ燃料集合体出力への影響（サーマルスパイク）は小さく抑制できる見通しが得られたことから、本炉心についても 15 %と設定した。Fig. 4.3.1-1 に、本炉心を対象に、減速材割合 15 %の場合の隣接ドライバ燃料集合体の出力分布を評価した結果を示すが、周辺部に中性子減速による出力ピークは発生しているものの、LLFP 集合体に隣接することで集合体出力自体が低下する効果から、影響は小さく抑制できることが確認された。また、集合体のピン総数も同様（631 本）とし、ピン径の調節を行った。結果として、ピン径は 6.23 mm に設定した。集合体中のテクネチウムピン・ヨウ素ピン・減速材ピンの配置については、核変換率を高めるため、減速材ピンを内側に集中的に配置するピン配置を採用することとした。以上、検討の結果得られた LLFP 集合体の仕様を Table 4.3.1-3 に示すとともに、LLFP 集合体の断面図を Fig. 4.3.1-2 に示す。

###### (3) LLFP 核変換炉心の設定

仕様を設定した LLFP 集合体について、 $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  の SF を 1.0 以上とする LLFP 集合体の体数と配置の検討を行い、LLFP 核変換炉心の評価を行った。評価の結果、LLFP 集合体の体数について、3 次元計算の結果、 $\text{SF} > 1.0$  を満足するには 28 体が必要となる結果が得られた。設定された炉心配置を Fig. 4.3.1-3 に示す。

###### (4) 核変換特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核変換特性の評価結果を Table 4.3.1-4 に示した。ここで、核変換特性については、本検討用に設定した 2 次元 RZ 簡易評価モデルと 3 次元計算を行い、結果を比較して示した。

3 次元計算の結果、1 サイクル当たりの核変換率は、 $^{129}\text{I}$  6.2 %、 $^{99}\text{Tc}$  7.7 %と評価され、取出核変換率は、3 サイクル後で  $^{129}\text{I}$  21.4 %、 $^{99}\text{Tc}$  17.4 %と目標の目安値である 30 %を若干下回る結果であった。一方、2 次元 RZ 簡易評価モデルの結果は、 $^{129}\text{I}$  と  $^{99}\text{Tc}$  の 1 サイクル当たりの核変換率は、それぞれ、5.6 %、6.9 %と評価された。これらの値は、3 次元計算の結果より 10 %程度低い結果であるものの、2 次元 RZ 簡易評価モデルを用いた場合でも、3 次元計算の結果と比較的良好な一致を示すことが認められた。

### (5) 核特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核特性の評価結果を Table 4.3.1-4 に基準炉心の核特性と比較して示した。ここで、核特性評価については、2 次元計算 (LLFP 集合体と燃料集合体を均質で扱う) と 3 次元計算で行い、結果を比較して示した。

LLFP 核変換炉心では、LLFP 集合体を装荷した分、(集合体総数保存の条件から) 径方向 プランケット集合体が削除されるため、軸方向プランケットを増加する必要があることがわかった。軸方向プランケットの厚さ (上下含む) を 40 cm から 45 cm まで増加させれば、増殖比 1.03 を満足する結果が得られた。また、LLFP 集合体を炉心内に装荷することにより、Pu 富化度は 2~3 %程度増加し、それに伴い、燃焼ミスマッチも増加し、熱設計に影響を与えるものと考えられる。

2 次元計算と 3 次元計算の結果を比較すると、比較的良好な一致が見られることがわかった。ただし、最大線出力・高速中性子照射量については、3 次元計算の結果で判断する必要がある。

### (6) LLFP ピン・集合体の健全性評価

LLFP 集合体の健全性に関する評価を行い、健全性を満足する LLFP 集合体流量、および、照射期間を設定する。

評価結果として、LLFP 集合体流量と各部温度の評価結果を Fig. 4.3.1-4 に示す。ここで、グラフは、Table 4.3.1-2 に示した各制限温度に対する相対値で示した。流量が少ないと各部の温度は上昇し、テクネチウムピンの被覆管温度が熱的に最も厳しいことがわかる。そのため、テクネチウムピンの被覆管温度を満足するよう LLFP 集合体の下限流量 3.7 kg/s が決まる。一方、流量が多いと、隣接ドライバ集合体との出口温度差は増加することになり、その制限から、LLFP 集合体流量の上限 16.0 kg/s が決まる。このように、LLFP 集合体の流量としては、この範囲内に制限されることになる。次に、LLFP 集合体の照射期間と制限条件の評価結果を Fig. 4.3.1-5 に示す。照射期間は、ガス内圧により制限され、ドライバ燃料並みの照射期間 (4 サイクル) を達成することは、困難であることがわかった。そのため、照射期間は、3 サイクルに制限することとし、その場合、8.5 kg/s の集合体流量を想定すると H/Zr 比の制限も満足することから、集合体流量として 8.5 kg/s とした。

以上、LLFP 集合体流量として 8.5 kg/s、照射期間として 3 サイクルに設定することとした。

### (7) 热特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、1 次系必要流量の概略評価を行う。ここで、炉心部の必要流量については、2 次元計算の結果をベースに、基準炉心と LLFP 核変換炉心の包絡熱出力の比から、基準炉心の流量を外挿して見積もることとした。LLFP 集合体の必要流量については、上記の LLFP 集合体流量の評価結果を用いた。また、それ以外の流量 (制御棒・遮へい体領域等) としては、1 次系流量の 3.7 %を想定した。

評価の結果、1 次系必要流量は 97.4 %と見積もられ、流量配分は成立する見通しが示された。ただし、本評価は概略評価であり、今後、熱設計の最適化検討を行うとともに、詳細な設計評価が必要であると考えられる。

## (8) まとめ

以上、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心は、炉心内装荷法を採用し LLFP 核変換炉心に置換することにより、プラント取合条件（原子炉容器径等）、炉心性能要求（増殖比等）を満たしつつ、1.0 以上の SF を達成できる可能性を有することが示された。ただし、炉心内装荷炉心では、高融点のヨウ化物 ( $\text{YI}_3$ ) の適用が前提であり、今後、その適用性を見極める必要がある。（ヨウ素ターゲットの適用性については、現在、炉外試験による評価を実施中であり<sup>[11, 12]</sup>、フェーズⅡにおける開発状況を減速材ピンの状況<sup>[10]</sup>と併せて、巻末の付録 2 に示す。）

### 4.3.2 ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉心（高内部転換型）

#### (1) 設計条件・解析手法

主要な設計条件・解析手法については、4.1・4.2 節で説明した条件・手法を用いた。核変換率の評価においては、LLFP 集合体内の非均質効果を考慮することとし、本核変換炉心をベースに、連続エネルギーモンテカルロ計算で評価した非均質補正係数を適用した。Table 4.3.2-1 に、今回の検討で用いた非均質補正係数を示す。また、LLFP 集合体の健全性に関しては、Table 4.3.2-2 に項目、および、制限条件を示す。

#### (2) LLFP 集合体仕様の設定

LLFP 集合体の仕様のうち、減速材割合については、4.3.1 項のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様の傾向を示すと考えられ、本炉心でも 15 %と設定した。確認のため、Fig. 4.3.2-1 に減速材割合 15 %の場合の隣接ドライバ燃料集合体内出力分布評価結果を示した。集合体のピン総数も、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様（631 本）とし、減速材ピンを内側に集中的に配置するピン配置を採用することとした。以上、検討の結果得られた LLFP 集合体の仕様を Table 4.3.2-3 に示すとともに、LLFP 集合体の断面を Fig. 4.3.2-2 に示す。

#### (3) LLFP 核変換炉心の設定

仕様を設定した LLFP 集合体について、 $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  の SF を 1.0 以上とする LLFP 集合体の体数と配置の検討を行い、LLFP 核変換炉心の評価を行った。評価の結果、LLFP 集合体の体数について、 $\text{SF} > 1.0$  を満足するには 21 体が必要となる結果が得られた。設定された炉心配置を Fig. 4.3.2-3 に示す。

#### (4) 核変換特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核変換特性の評価結果を Table 4.3.2-4 に示した。核計算の結果、1 サイクル当たりの核変換率は、 $^{129}\text{I}$  4.5 %、 $^{99}\text{Tc}$  5.3 %と評価され、取出核変換率は、3 サイクル後で  $^{129}\text{I}$  12.9 %、 $^{99}\text{Tc}$  15.1 %と目標の目安値である 30 %を下回る結果であった。ただし、本評価では、2 次元 RZ 簡易評価モデルを用いており、4.3.1 項より、3 次元計算を適用した場合には、核変換率は 10 %程度増加することが示されていることから、本炉心についても 10 %程度改善されることが予測される。

### (5) 核特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核特性の評価結果を Table 4.3.2-4 に基準炉心の核特性と比較して示した。LLFP 核変換炉心では、LLFP 集合体を装荷した分、(集合体総数保存の条件から) 径方向プランケット集合体が削除されるため、軸方向プランケットを増加する必要があることがわかった。軸方向プランケットの厚さ(上下含む)を 40 cm から 75 cm まで増加させれば、増殖比 1.03 を満足する結果が得られた。また、LLFP 集合体の炉心内装荷により、Pu 富化度は 3~4 %程度増加し、それに伴い、燃焼ミスマッチも増加し、熱設計に影響を与えるものと考えられる。

### (6) LLFP ピン・集合体の健全性評価

LLFP 集合体の健全性に関する評価を行い、健全性を満足する LLFP 集合体流量、および、照射期間を設定する。

LLFP 集合体流量と各部温度の評価結果を Fig. 4.3.2-4 に示すが、4.3.1 項のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様の傾向を示し、LLFP 集合体流量としては、下限流量 3.9 kg/s、上限 17.0 kg/s の範囲内に制限される結果であった。次に、LLFP 集合体の照射期間と制限条件の評価結果を Fig. 4.3.2-5 に示すが、ドライバ燃料の照射期間(4 サイクル)の達成は困難であることがわかる。そのため、照射期間は 3 サイクルにすることとし、その場合、9.3 kg/s の集合体流量を想定すると H/Zr 比の制限も満足することから、集合体流量として 9.3 kg/s とした。

### (7) 热特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、1 次系必要流量の概略評価を行う。ここで、炉心部の必要流量については、2 次元計算の結果をベースに、基準炉心と LLFP 核変換炉心の包絡熱出力の比から、基準炉心の流量を外挿して見積もることとした。LLFP 集合体の必要流量については、上記の LLFP 集合体流量の評価結果を用いた。また、それ以外の流量(制御棒・遮へい体領域等)としては、1 次系流量の 4.0 %を想定した。

評価の結果、1 次系必要流量は 103.7 %と見積もられ、熱特性は厳しくなる見通しが示された。ただし、本評価は概略評価であり、今後、熱設計の最適化検討を行うとともに、詳細な設計評価が必要であると考えられる。

### (8) まとめ

以上、ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉心は、炉心内装荷法を採用し LLFP 核変換炉心に置換することにより、プラント取合条件(原子炉容器径等)、炉心性能要求(増殖比等)を満たしつつ、1.0 以上の SF を達成できる可能性を有することが示された。ただし、炉心内装荷炉心では、高融点のヨウ化物(YI<sub>3</sub>)の適用が前提であり、今後、その適用性を見極める必要がある。(ヨウ素ターゲットの適用性については、現在、炉外試験による評価を実施中であり[11, 12]、フェーズⅡにおける開発状況を減速材ピンの状況[10]と併せて、巻末の付録 2 に示す。)

ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と比較すると、核変換特性については、概ね同等であった。ただし、核特性に関しては、中型炉では、増殖比 1.03 を満足するため、軸方向プランケットを 40 cm から 75 cm まで 1.9 倍程度延長する必要があり、これは大型炉の増加割合(1.1 倍)より大きく、結果として、(プランケットを含む) 全体の取出平均燃焼度が 74 GWd/t

と、より低下する傾向となった。

#### 4.3.3 ナトリウム冷却大型金属燃料炉心（高出口温度型）

##### (1) 設計条件・解析手法

主要な設計条件・解析手法については、4.1・4.2 節で説明した条件・手法を用いた。核変換率の評価においては、LLFP 集合体内の非均質効果を考慮することとし、本核変換炉心をベースに、連続エネルギーモンテカルロ計算で評価した非均質補正係数を適用した。Table 4.3.3-1 に、今回の検討で用いた非均質補正係数を示す。また、LLFP 集合体の健全性に関しては、Table 4.3.3-2 に項目、および、制限条件を示す。

##### (2) LLFP 集合体仕様の設定

LLFP 集合体の仕様のうち、減速材割合については、4.3.1 項のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様の傾向を示すと考えられ、本炉心でも 15 %と設定した。確認のため、Fig. 4.3.3-1 に減速材割合 15 %の場合の隣接ドライバ燃料集合体内出力分布評価結果を示した。集合体のピン総数も、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様（631 本）とし、減速材ピンを内側に集中的に配置するピン配置を採用することとした。以上、検討の結果得られた LLFP 集合体の仕様を Table 4.3.3-3 に示すとともに、LLFP 集合体の断面を Fig. 4.3.3-2 に示す。

##### (3) LLFP 核変換炉心の設定

仕様を設定した LLFP 集合体について、 $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  の SF を 1.0 以上とする LLFP 集合体の体数と配置の検討を行い、LLFP 核変換炉心の評価を行った。評価の結果、LLFP 集合体の体数について、 $\text{SF} > 1.0$  を満足するには 30 体が必要となる結果が得られた。設定された炉心配置を Fig. 4.3.3-3 に示す。

##### (4) 核変換特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核変換特性の評価結果を Table 4.3.3-4 に示した。核計算の結果、1 サイクル当たりの核変換率は、 $^{129}\text{I}$  7.6 %、 $^{99}\text{Tc}$  9.1 %と評価され、取出核変換率は、2 サイクル後で  $^{129}\text{I}$  14.6 %、 $^{99}\text{Tc}$  17.4 %と目標である 30 %を下回る結果であった。ただし、本評価では、2 次元 RZ 簡易評価モデルを用いており、4.3.1 項より、3 次元計算を適用した場合には、核変換率は 10 %程度増加することが示されていることから、本炉心についても 10 %程度改善されることが予測される。

##### (5) 核特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核特性の評価結果を Table 4.3.3-4 に基準炉心の核特性と比較して示した。LLFP 集合体を炉心内に装荷した結果、内部転換比が若干減少し、（基準炉心はブランケット無しであったが）軸方向ブランケットを装荷する必要があることがわかった。検討の結果、軸方向ブランケット 20 cm を装荷することで、増殖比 1.03 を満足する結果が得られた。また、LLFP 集合体を炉心内に装荷することにより、Pu 富化度は 1.5 %増加している。それに伴い、燃焼ミスマッチも増加し、熱設計に影響を与えるものと考えられる。

### (6) LLFP ピン・集合体の健全性評価

LLFP 集合体の健全性に関する評価を行い、健全性を満足する LLFP 集合体流量、および、照射期間を設定する。

LLFP 集合体流量と各部温度の評価結果を Fig. 4.3.3-4 に示すが、4.3.1 項のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様の傾向を示し、LLFP 集合体流量としては、下限流量 4.2 kg/s、上限 18.5 kg/s の範囲内に制限される結果であった。次に、LLFP 集合体の照射期間と制限条件の評価結果を Fig. 4.3.3-5 に示すが、照射期間はガス内圧により制限され、ドライバ燃料の照射期間（3 サイクル）の達成は困難であることがわかる。そのため、照射期間は 2 サイクルにすることとし、その場合、9.2 kg/s の集合体流量を想定すると H/Zr 比の制限も満足することから、集合体流量として 9.2 kg/s とした。

### (7) 热特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、1 次系必要流量の概略評価を行う。ここで、炉心部の必要流量については、2 次元計算の結果をベースに、基準炉心と LLFP 核変換炉心の包絡熱出力の比から、基準炉心の流量を外挿して見積もることとした。LLFP 集合体の必要流量については、上記の LLFP 集合体流量の評価結果を用いた。また、それ以外の流量（制御棒・遮へい体領域等）としては、1 次系流量の 4.0 %を想定した。

評価の結果、1 次系必要流量は 104.3 %と見積もられ、熱特性は厳しくなる見通しが示された。ただし、本評価は概略評価であり、今後、熱設計の最適化検討を行うとともに、詳細な設計評価が必要であると考えられる。

### (8) まとめ

以上、ナトリウム冷却大型金属燃料炉心は、炉心内装荷法を採用し LLFP 核変換炉心に置換することにより、プラント取合条件（原子炉容器径等）、炉心性能要求（増殖比等）を満たしつつ、1.0 以上の SF を達成できる可能性を有することが示された。ただし、炉心内装荷炉心では、高融点のヨウ化物 ( $\text{YI}_3$ ) の適用が前提であり、今後、その適用性を見極める必要がある。（ヨウ素ターゲットの適用性については、現在、炉外試験による評価を実施中であり<sup>[11], [12]</sup>、フェーズⅡにおける開発状況を減速材ピンの状況<sup>[10]</sup>と併せて、巻末の付録 2 に示す。）

ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉と比較すると、核変換特性について、年当たりの核変換率では 50 %程度大きく、核変換性能は優れることが示された。ただし、取出核変換率では、ガス内圧で照射期間が制限されるため、むしろ、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉より低下する傾向であった。

### 4.3.4 鉛-ビスマス冷却中型炉心（強制循環型）

#### (1) 設計条件・解析手法

主要な設計条件・解析手法については、4.1・4.2 節で説明した条件・手法を用いた。核変換率の評価においては、LLFP 集合体内の非均質効果を考慮することとし、本核変換炉心をベースに、連続エネルギーモンテカルロ計算で評価した非均質補正係数を適用した。Table 4.3.4-1 に、今回の検討で用いた非均質補正係数を示す。また、LLFP 集合体の健全性に関しては、Table 4.3.4-2 に項目、および、制限条件を示す。

## (2) LLFP 集合体仕様の設定

LLFP 集合体の仕様のうち、減速材割合については、4.3.1 項のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様の傾向を示すと考えられ、本炉心でも 15 %と設定した。確認のため、Fig. 4.3.4-1 に減速材割合 15 %の場合の隣接ドライバ燃料集合体内出力分布評価結果を示した。集合体のピン総数も、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様（631 本）とし、減速材ピンを内側に集中的に配置するピン配置を採用することとした。以上、検討の結果得られた LLFP 集合体の仕様を Table 4.3.4-3 に示すとともに、LLFP 集合体の断面を Fig. 4.3.4-2 に示す。

## (3) LLFP 核変換炉心の設定

仕様を設定した LLFP 集合体について、 $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  の SF を 1.0 以上とする LLFP 集合体の体数と配置の検討を行い、LLFP 核変換炉心の評価を行った。評価の結果、LLFP 集合体の体数について、 $\text{SF} > 1.0$  を満足するには 27 体が必要となる結果が得られた。設定された炉心配置を Fig. 4.3.4-3 に示す。

## (4) 核変換特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核変換特性の評価結果を Table 4.3.4-4 に示した。核計算の結果、1 サイクル当たりの核変換率は、 $^{129}\text{I}$  4.3 %、 $^{99}\text{Tc}$  5.0 %と評価され、取出核変換率は、5 サイクル後で  $^{129}\text{I}$  19.5 %、 $^{99}\text{Tc}$  22.8 %と目標である 30 %を若干下回る結果であった。ただし、本評価では、2 次元 RZ 簡易評価モデルを用いており、4.3.1 項より、3 次元計算を適用した場合には、核変換率は 10 %程度増加することが示されていることから、本炉心についても 10 %程度改善されることが予測される。

## (5) 核特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核特性の評価結果を Table 4.3.4-4 に基準炉心の核特性と比較して示した。本鉛・ビスマス冷却中型炉の導入期炉心では、径方向ブランケットを装荷しなくても、軸方向ブランケットを 35 cm とすることで、増殖比 1.1 を達成している。しかし、LLFP 集合体を炉心内に装荷する場合、内部転換比が低下するため、軸方向ブランケットを増加する必要があることがわかった。軸方向ブランケットの厚さ（下部）を 35 cm から 60 cm まで増加させれば、増殖比 1.03 を満足する結果が得られた。また、LLFP 集合体の炉心内装荷により、Pu 富化度は 2~4 %程度増加し、それに伴い、燃焼ミスマッチも増加し、熱設計に影響を与えるものと考えられる。

## (6) LLFP ピン・集合体の健全性評価

LLFP 集合体の健全性に関する評価を行い、健全性を満足する LLFP 集合体流量、および、照射期間を設定する。

LLFP 集合体流量と各部温度の評価結果を Fig. 4.3.4-4 に示すが、4.3.1 項のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様の傾向を示し、LLFP 集合体流量としては、下限流量 38.0 kg/s、上限 105.0 kg/s の範囲内に制限される結果であった。次に、LLFP 集合体の照射期間と制限条件の評価結果を Fig. 4.3.3-5 に示すが、照射期間はガス内圧により制限され、ドライバ燃料の照射期間（6 サイクル）の達成は困難であることがわかる。そのため、照射期間は 5 サイクルに制限することとし、その場合、62.7 kg/s の集合体流量を想定すると H/Zr 比の制限も満

足することから、集合体流量として 62.7 kg/s とした。

#### (7) 热特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、1 次系必要流量の概略評価を行う。ここで、炉心部の必要流量については、2 次元計算の結果をベースに、基準炉心と LLFP 核変換炉心の包絡熱出力の比から、基準炉心の流量を外挿して見積もることとした。LLFP 集合体の必要流量については、上記の LLFP 集合体流量の評価結果を用いた。また、それ以外の流量（制御棒・遮へい体領域等）としては、1 次系流量の 6.0 %を想定した。

評価の結果、1 次系必要流量は 104.6 %と見積もられ、熱特性は厳しくなる見通しが示された。ただし、本評価は概略評価であり、今後、熱設計の最適化検討を行うとともに、詳細な設計評価が必要であると考えられる。

#### (8) まとめ

以上、鉛-ビスマス冷却中型炉心は、炉心内装荷法を採用し LLFP 核変換炉心に置換することにより、プラント取合条件（原子炉容器径等）、炉心性能要求（増殖比等）を満たしつつ、1.0 以上の SF を達成できる可能性を有することが示された。ただし、炉心内装荷炉心では、高融点のヨウ化物 ( $\text{YI}_3$ ) の適用が前提であり、今後、その適用性を見極める必要がある。（ヨウ素ターゲットの適用性については、現在、炉外試験による評価を実施中であり<sup>[11, 12]</sup>、フェーズ II における開発状況を減速材ピンの状況<sup>[10]</sup>と併せて、巻末の付録 2 に示す。）

ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と比較すると、核変換特性について、年当たりの核変換率、取出核変換率とも概ね同レベルであることがわかった。

#### 4.3.5 ヘリウムガス冷却大型炉心（六角ブロック型）

##### (1) 設計条件・解析手法

主要な設計条件・解析手法については、4.1・4.2 節で説明した条件・手法を用いた。核変換率の評価においては、LLFP 集合体内の非均質効果を考慮することとし、本核変換炉心をベースに、連続エネルギーモンテカルロ計算で評価した非均質補正係数を適用した。Table 4.3.5-1 に、今回の検討で用いた非均質補正係数を示す。また、LLFP 集合体の健全性に関しては、Table 4.3.5-2 に項目、および、制限条件を示す。

##### (2) LLFP 集合体仕様の設定

LLFP 集合体について、4.3.1 項のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心の構造ベースに、（ドライバ燃料の六角ブロック型とは異なるが）ピン型集合体を採用することとした。ここで、ヘリウムガス冷却炉は、高温条件となることから、ターゲットピン・減速材ピンの被覆材として、SiC/SiC 複合材を想定することとした。

減速材ピン割合については、他の炉型と異なりドライバ燃料に SiC が多量に含まれていることから、その影響も異なり、隣接ドライバ燃料集合体への影響（サーマルスパイク）は大きくなる傾向であった。そのため、減速材割合についてパラメータサーベイを行い、結果として 5 %に設定することとした。確認のため、Fig. 4.3.5-1 に、減速材割合 5 %の場合の隣接ドライバ燃料集合体内出力分布評価結果を示した。また、ヨウ素ピンのガスプレナムについて

は、ドライバ燃料が六角ブロック型でガスプレナムが無い構造となっているため、軸方向ブランケット領域と、ターゲットカラム長を炉心高さの 100 cm から低減し、その領域をガスプレナムに配分する構造とした。ターゲットカラム長については、核変換量とのバランスから 70 cm に設定した。集合体のピン総数については、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と同様 (631 本) とし、減速材ピンを内側に集中的に配置するピン配置を採用することとした。

以上、検討の結果得られた LLFP 集合体の仕様を Table 4.3.5-3 に示すとともに、LLFP 集合体の断面を Fig. 4.3.5-2 に示す。

### (3) LLFP 核変換炉心の設定

仕様を設定した LLFP 集合体について、 $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  の SF を 1.0 以上とする LLFP 集合体の体数と配置の検討を行い、LLFP 核変換炉心の評価を行った。評価の結果、LLFP 集合体の体数について、 $\text{SF} > 1.0$  を満足するには 36 体が必要となる結果が得られた。設定された炉心配置を Fig. 4.3.5-3 に示す。

### (4) 核変換特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核変換特性の評価結果を Table 4.3.5-4 に示した。核計算の結果、1 サイクル当たりの核変換率は、 $^{129}\text{I}$  2.6 %、 $^{99}\text{Tc}$  3.3 % と他の炉型より小さい結果となった。これは、本炉心の中性子束が他の炉型と比べ小さいことによるものである。また、取出核変換率は、ヨウ素ピンのガスプレナム領域が十分に確保できず、かつ、ガス内圧制限も 6 MPa と小さいことから、照射期間が 1 サイクルに制限されるため、上記の通り 3 %程度と大幅に制限される結果となった。

### (5) 核特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、主要な核特性の評価結果を Table 4.3.5-4 に基準炉心の核特性と比較して示した。LLFP 核変換炉心では、LLFP 集合体を装荷した分、(集合体総数保存の条件から) 径方向ブランケット集合体が削除されるため、軸方向ブランケットを増加する必要があることがわかった。軸方向ブランケットの厚さ(上下含む)を 50 cm から 60 cm まで増加させれば、増殖比 1.03 を満足する結果が得られた。また、LLFP 集合体の炉心内装荷により、Pu 富化度は 2~4 %程度増加し、それに伴い、燃焼ミスマッチも増加し、熱設計に影響を与えるものと考えられる。

### (6) LLFP ピン・集合体の健全性評価

LLFP 集合体の健全性に関する評価を行い、健全性を満足する LLFP 集合体流量、および、照射期間を設定する。(ここで、SiC/SiC 複合材の水素透過率については、現状詳細は不明であるが、SiC 焼結材の知見からオーステナイト鋼の  $10^{-5}$  と暫定した。)

評価結果として、LLFP 集合体流量と各部温度の評価結果を Fig. 4.3.5-4 に示す。流量が少ないと各部の温度は上昇し、減速材 Y-H の温度が熱的に最も厳しいことがわかる。そのため、減速材 Y-H 温度を満足するよう LLFP 集合体の下限流量 0.53 kg/s が決まる。一方、上限流量については、隣接集合体出口温度差 150°C とした場合、上限流量が 0.36 kg/s となり、上記の下限流量を下回り、解が存在しない結果となった。ここで設定している隣接集合体出口温度差 150°C は、ナトリウム冷却炉の条件 (120°C) をベースに暫定した値であり、炉上部構造

物が存在しないガス炉のサーマルストライピングによる制限条件については検討の余地を有することから、本検討では下限流量  $0.53 \text{ kg/s}$  を集合体流量として暫定した（その場合、隣接集合体出口温度差は  $230^\circ\text{C}$  程度と見積もられる）。上記の集合体流量を想定した場合、ガス内圧の制限から照射期間は、ドライバ燃料の照射期間 6 サイクルに対し 1 サイクルと極めて短い期間に制限される結果であった。これは、LLFP ピンのガス内圧制限が外圧支配の圧縮力条件で運用することを想定しており、系統圧  $6 \text{ MPa}$  以下に制限されること、および、現状の LLFP 集合体構造を想定した場合、ヨウ素ピンのガスプレナム領域が十分に確保できないことによるものである。

以上、LLFP 集合体流量として  $0.53 \text{ kg/s}$ 、照射期間として 1 サイクルに設定することとした。

#### (7) 热特性の評価

設定された LLFP 核変換炉心について、1 次系必要流量の概略評価を行う。ここで、炉心部の必要流量については、2 次元計算の結果をベースに、基準炉心と LLFP 核変換炉心の包絡熱出力の比から、基準炉心の流量を外挿して見積もることとした。LLFP 集合体の必要流量については、上記の LLFP 集合体流量の評価結果を用いた。また、それ以外の流量（制御棒・遮へい体領域等）としては、1 次系流量の  $2.0\%$  を想定した。

評価の結果、1 次系必要流量は  $105.2\%$  と見積もられ、熱特性は厳しくなる見通しが示された。ただし、本評価は概略評価であり、今後、熱設計の最適化検討を行うとともに、詳細な設計評価が必要であると考えられる。

#### (8) まとめ

以上、ヘリウムガス冷却大型炉心は、炉心内装荷法を採用し LLFP 核変換炉心に置換することにより、プラント取合条件（原子炉容器径等）、炉心性能要求（増殖比等）を満たしつつ、 $1.0$  以上の SF を達成できる可能性を有することが示された。ただし、本六角ブロック型炉心では、他炉型の炉心と比べ、照射期間が極めて短く制限されることから、取出核変換率も大幅に制限される結果となった。LLFP 集合体構造については、現状、暫定的に、他の炉型と同様にピンバンドル型を採用しているが、ヘリウムガス冷却炉では、今後、LLFP 集合体構造・装荷法に関する抜本的な見直しを含む検討が必要と考えられる。また、高温条件でのヨウ化物 ( $\text{YI}_3$ )・減速材 (Y-H) の適用性、および、水素透過特性を含む  $\text{SiC/SiC}$  複合材の適用性についても、今後、詳細な検討が必要と考えられる。

#### 4.4 各炉型における LLFP 核変換特性の比較

各炉型の LLFP 核変換炉心について、主要な仕様、核・熱特性、および、核変換特性を Table 4.4-1 に比較してまとめた。表より、いずれの炉型についても、増殖比 1.03 以上を確保しつつ、1.0 以上の SF を満足しており、FS で想定している設計条件・目標について達成の見通しが得られた。ただし、LLFP インベントリ（単位熱出力当たり（kg/GWt））を比較すると、核変換性能の相違により各炉型で差が見られ、ナトリウム冷却大型金属燃料炉心で最も小さく、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心の 0.7 倍程度、反対に最も大きいのは、ヘリウムガス冷却大型炉で、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心の 1.6 倍程度となっていることがわかる。また、取出核変換率については、ほとんどの炉型については 15 %～20 % と FS の目標目安値 30 % を若干下回る程度であったが、ヘリウムガス冷却炉については、3 % と目安値を大幅に下回る結果であった。

このように、いずれの炉型も設計条件・目標は達成するものの、核変換性能については、各炉型で特長に差が認められる。そのため、核変換性能として、「単位期間当たり核変換率」と「取出核変換率」について、以下に概略的な比較を行う。

##### (1) 単位期間当たり核変換率

単位期間当たり核変換率として、年当たりの核変換率を Table 4.4-1 に比較して記載している。年当たりの核変換率は、炉心内装荷炉心の場合、概ね、炉心部平均中性子束で説明でき、炉心部平均中性子束が  $2.9 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$  と最も大きいナトリウム冷却大型金属燃料炉心で最も大きく、テクネチウムで 5.1 %、ヨウ素で 4.2 % であった。炉心部平均中性子束が  $2.0 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$  程度のナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心と鉛-ビスマス冷却中型炉心では、核変換率はテクネチウムで 3.5 %、ヨウ素で 2.8 % 程度と、中性子束に概ね比例していることがわかる。

一方、ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉とヘリウムガス冷却炉では、上記の比例関係から外れており、核変換率は、外挿値より小さい値となっている。この理由として、ナトリウム冷却中型 MOX 燃料炉については、Fig. 4.3.2-3 に炉心配置を示しているが、制御棒配置の関係で、他の炉型より LLFP 集合体の装荷位置が全体的に外周側にズレ、LLFP 集合体位置の中性子束が低くなつたためである。この様に、中型炉では、LLFP 集合体の装荷位置が大型炉より制限され、その影響が生じる可能性は考えられるものの、今回見られた核変換率の低下は、大型・中型の出力規模の相違による本質的な問題ではないと考えられる。ヘリウムガス冷却炉心で核変換率が小さい理由としては、本炉では、構造材として SiC の装荷量が大きく、中性子スペクトルが他の炉型と異なるため、LLFP 集合体中の減速材割合が 5 % と少なく制限されるためである。この核変換率の低下は、ブロック型集合体を採用したヘリウムガス冷却炉心にとって、(材料の選択に依存するが) 本質的な問題と考えられる。

単位期間当たり核変換率は、LLFP インベントリに大きく影響する因子であり、この値が大きい炉型ほど、LLFP インベントリを低減できる。FBR 導入シナリオ上、LLFP 核変換炉心導入ペースの点では、単位期間当たり核変換率の大きい炉心が有望であり、その観点からは、ナトリウム冷却大型金属燃料炉心が優れているといえる。

##### (2) 取出核変換率

取出核変換率を比較すると、単位期間当たり核変換率に依らず、多くの炉型で～20 % 程度であることがわかる。これは、取出核変換率は、単位期間当たり核変換率のみならず、照射期間に大きく依存するためである。LLFP 集合体の照射期間は、前節までの各炉型における

健全性評価の結果から、概ねヨウ素の核変換で生成されるキセノンガスの内圧で制限されている。そのため、ガスプレナム容積が相対的に少なく、照射期間が短いヘリウムガス冷却炉やナトリウム冷却大型金属燃料炉では、取出核変換率が制限される結果となった。

これらの炉型で、ガスプレナム容積が相対的に少なくなる理由として、まず、ヘリウムガス冷却炉については、ドライバ燃料で（ガスプレナム領域を有しない）六角ブロック型を採用しているのに対し、LLFP 集合体は、（他の炉型と横並びで）ピンバンドル型を採用しているためである。具体的には、現状、ヨウ素のカラム長を炉心高さより低減し、その分をガスプレナムとして確保しているが、ヨウ素カラム長を大幅に低減すると LLFP 集合体数が増加し、その分径方向ブランケット集合体の体数が減り増殖性を確保できなくなる。そのため、現炉心では、照射期間が 1 サイクルに制限されることになった。ナトリウム冷却大型金属燃料炉心については、被覆材の照射量制限の観点から、現状、取出平均燃焼度が 100 MWd/t に制限されており、もともと他の（取出平均燃焼度が 150 MWd/t の）炉型よりガスプレナム長が短く設定されていることによる。

取出核変換率が低下すると、LLFP ターゲットの再処理時に、ロスとして廃棄物側に移行する LLFP の量が増加することになり、現状、30 %程度を目安値としている。ヘリウムガス冷却炉については、取出核変換率が 3 %と極めて小さく、現実的でないレベルである。そのため、ヘリウムガス冷却炉の LLFP 集合体構造については、今後、抜本的な見直しを含む検討が必要と考えられる。

## 5. サポートファクタ向上炉心の実現性検討

本報告における LLFP 核変換炉心の検討では、核変換特性として SF 1.0 以上を条件に設計評価を実施してきたが、実用炉としての設計条件（プラント取合条件・炉心性能要求）を満たす制限から、実際は、SF は 1.0 近傍に留まる結果であった。SF 1.0 というのは、自ら生成した分の LLFP を核変換できることを意味するものであり、FBR 導入シナリオ上は、LLFP 核変換の要求に柔軟に対応できるよう、SF を 1.0 から大きく向上した核変換炉心にも置換可能であることが望まれる。そこで、SF 向上の可能性を把握すべく、現状のプラント取合条件・炉心性能要求のうち、幾つかの項目の制限を緩和することで、どの程度 SF に向上が見込めるか感度評価を行うこととした。

なお、本検討において、LLFP 集合体の装荷法としては、3 章の結果に基づき、FS フェーズ II の代表装荷法に選定された炉心内装荷法を適用することとした。

### 5.1 評価条件

#### 5.1.1 LLFP ターゲット・減速材

LLFP ターゲット・減速材について、LLFP 元素としては、ヨウ素とテクネチウムを対象とした。同位体組成としては、ヨウ素について、 $^{129}\text{I}$  73.4 %、 $^{127}\text{I}$  26.6 %、テクネチウムについては、 $^{99}\text{Tc}$  100%とした。ターゲットの装荷形態としては、ヨウ素では、高融点 (997°C) を有する  $\text{YI}_3$ 、テクネチウムでは、テクネチウム金属を想定した。減速材としては、Zr-H を採用した。

#### 5.1.2 基準炉心

本 SF 向上炉心の検討では、ナトリウム冷却 MOX 燃料炉を対象として評価を行うこととし、基準炉心としては、3 章の LLFP 集合体装荷法の検討同様、FS フェーズ II 中間まとめの代表炉心である「コンパクト型炉心（導入期、ABLE 型集合体採用）」を適用することとした<sup>[5, 7]</sup>。コンパクト型炉心の炉心配置図と主要な仕様・特性は Fig. 3-1 で示した通りである。

#### 5.1.3 設計条件・目標

##### (1) プラント取合条件・炉心性能要求

プラント取合条件・炉心性能要求について、感度評価項目以外の条件は、基準炉心の条件（集合体配列ピッチ、制御棒配置、増殖比等）を保存することとした。

##### (2) 核変換特性

核変換特性の目標としては、 $^{129}\text{I} \cdot ^{99}\text{Tc}$  核種について、上記のプラント取合条件・炉心性能要求を満足する範囲で、可能な限り大きな SF を目指すこととした。また、LLFP の取出核変換率については、30 %を暫定的な目標目安値とした。

#### 5.1.4 解析手法の概略

核特性・核変換特性について、炉心内装荷炉心用に設定した 2 次元 RZ モデル簡易評価手法を適用することとした（簡易評価手法の詳細は、付録 1 参照）。核変換率の評価において、

非均質効果の補正係数としては、3章の解析同様、テクネチウム 0.93、ヨウ素 1.00とした。

## 5.2 サポートファクタ向上のための感度評価

### 5.2.1 感度評価項目の設定

これまでの検討の結果、実用炉としての設計条件（プラント取合条件・炉心性能要求）を満たす条件では、SFは1.0近傍に留まる結果であった。そこで、現状の設計条件のうち、幾つかの項目を緩和することで、どの程度 SF に向上が見込めるか、感度評価を行う。ここで、感度評価の項目としては、SFへの感度が大きいと考えられる以下の3項目を対象としたこととした。

- ① 炉心熱出力
- ② 最大線出力制限
- ③ 炉心サイズ

①では、炉心熱出力の低下に応じて燃料集合体体数を減らし、LLFP 集合体の装荷体数を確保するとともに、生成される LLFP 生成量を低下させ、どの程度 SF に影響があるか見ることとする。②では、最大線出力制限の緩和に伴い、燃料集合体当たりの発熱量を増加させ、燃料集合体数を減らすことで、LLFP 集合体の装荷体数を増加させた影響を見ることとする。③では、これまでの検討から、増殖比 1.03 以上の制限による径方向ブランケット集合体と LLFP 集合体の体数配分が重要であると考えられ、炉心サイズを緩和しブランケット体数を増やした場合の SF への影響を見ることとする。ここで、各感度評価項目のパラメータの幅については、それぞれ現実的な範囲で設定することとした。

### 5.2.2 感度評価

#### (1) 炉心熱出力

炉心熱出力について、基準炉心から 10 %程度の低減を想定し、燃料集合体 52 体を LLFP 集合体に置換することとした（結果として、炉心熱出力は 3,570 MWt から 3,260 MWt ((1 - 52/594) × 3,570 MWt) まで低減）。基準炉心の燃料集合体 52 体を LLFP 集合体に置換した炉心（以下、炉心出力緩和炉心）の炉心配置図を Fig. 5-1 に、主要な核特性・核変換特性を Table 5-1 に、実用炉の設計条件を保存した SF 1.0 近傍の炉心（3.5 節で設定した炉心内装荷炉心と同様であり、以下、設計条件保存炉心と呼ぶ）と比較して示した。

結果として、設計条件保存炉心と比較し、炉心・軸方向ブランケット領域での増殖比は低下するが、径方向ブランケット集合体数は基準炉心と同様で、設計条件保存炉心より 40 体多く、全体の増殖比は 1.03 を確保するレベルであった。これ以上の炉心熱出力の低減は、他の設計条件を保存する場合、増殖比 1.03 確保の観点から困難と考えられる。SF については、設計条件保存炉心より LLFP 集合体装荷体数が増加していることから、変換量が増加するとともに、燃料集合体数の低減により、LLFP 生成量が低下するので、<sup>99</sup>Tc で 1.47、<sup>129</sup>I で 1.52 まで向上可能であることがわかった。

以上、炉心熱出力については、他の設計条件を保存する場合、出力 10 %程度の低減が限界であり、その場合でも、SF の向上は 1.5 程度に留まることがわかった。

## (2) 最大線出力制限

(1)で設定した炉心熱出力を 3,260 MWt まで低減した炉心出力緩和炉心について、炉心配置はそのままで、熱出力を 3,570 MWt とするまで最大線出力の制限を緩和することとした。ここで、線出力は増加させるが、取出平均燃焼度は保存することとし、運転サイクル長を短縮することで対応することとした。この最大線出力制限を緩和した炉心（以下、線出力制限緩和炉心）の炉心配置図については、炉心出力緩和炉心と同様であり、Fig. 5-1 の通りである。主要な核特性・核変換特性については、Table 5-1 に、設計条件保存炉心と比較して示した。

検討の結果、本炉心の最大線出力は、基準炉心の 430 W/cm から 480 W/cm まで 10 % 程度増加することがわかった。運転サイクル長については、取出平均燃焼度保存のため、548 日から 500 日に短縮された。本炉心では、出力密度の増加に伴い中性子束は増加するが、運転サイクル長の短縮に伴い照射期間は低下するので、結果として、SF は炉心出力緩和炉心と同様であり、 $^{129}\text{I}$ ・ $^{99}\text{Tc}$  とも 1.5 度が上限であることがわかった。また、増殖比についても、炉心出力緩和炉心と概ね同等となる結果であった。

以上、最大線出力制限について、480 W/cm 程度（10 % 増加）まで緩和しても、SF の向上は 1.5 度に留まることがわかった。

## (3) 炉心サイズ（炉容器径）

設計条件保存炉心をベースに、径方向ブランケットを（全周にわたり）2 層分確保するまで炉心サイズを増加することとした（径方向ブランケット集合体を 3 層目まで装荷する対応も考えられるが、増殖比への寄与は低下し、ブランケットを含む全体の取出平均燃焼度の顕著な低下を導くので、2 層目までとした）。径方向ブランケットを 2 層分確保した炉心（以下、炉心サイズ緩和炉心）の炉心配置図を Fig. 5-1 に、主要な核特性・核変換特性を Table 5-1 に、設計条件保存炉心と比較して示した。

結果として、径方向ブランケット体数は、設計条件保存炉心の 158 体から 210 体まで、52 体増加している。この炉心の増殖比は 1.061 と 1.03 に対し余裕があるので、その分、径方向ブランケット集合体数を減らし、LLFP 集合体数を増加させることとした。Fig. 5-2 に、設計条件保存炉心について、LLFP 集合体数をパラメータ（40 体、46 体、52 体）として、増殖比を評価した結果をプロットした。ここで、LLFP 集合体数と増殖比の関係は線形であることから、炉心サイズ緩和炉心についても、同様の線形関係があると仮定して、増殖可能な LLFP 集合体数を外挿した。その結果、増殖比 1.03 度となる LLFP 集合体数は 52 体程度となることがわかった。LLFP 集合体 52 体の炉心の SF は、(1)(2) の結果より、 $^{129}\text{I}$  と  $^{99}\text{Tc}$  とも 1.5 度に留まるものと考えられる。

以上、炉心サイズを径方向ブランケット集合体 2 層分相当まで増加（炉心 + 径方向ブランケット等価直径で 3 % 程度の増加に対応）しても、SF の向上は 1.5 度に留まることがわかった。

## 5.3 サポートファクタ向上炉心に関するまとめ

SF 向上の可能性を把握すべく、現状の設計条件のうち、SF への影響が大きいと考えられる項目（炉心熱出力、最大線出力制限、炉心サイズ）の制限を緩和することで、どの程度 SF 向上

が見込めるか感度評価を行った。結果として、炉心熱出力について、出力 10 %程度の低減が限界であり、その場合でも、SF の向上は 1.5 程度に留まること、最大線出力制限について、480 W/cm 程度 (10 %増加) まで緩和しても、SF の向上は 1.5 程度に留まることがわかった。また、炉心サイズを径方向ブランケット集合体 2 層分相当まで増加 (炉心+径方向ブランケット等価直徑で 3 %程度の増加に対応) しても、SF の向上は 1.5 程度に留まることがわかった。

このように主要な設計条件項目の SF への感度は小さいレベルに留まり、設計条件を現実的な範囲で緩和しても、複数基の炉心から生成される LLFP を処理できるような大幅な SF の向上 (SF 2.0 以上) は困難との結論に達した。もし、1 基の核変換炉心で 2.0 以上の大きな SF を達成するには、実用炉の設計条件を離れ、専焼炉的な炉心が要求されるものと考えられる。

## 6. まとめ

実用化戦略調査研究(FS)における、LLFP 核変換技術の検討として、LLFP 集合体装荷法の選定、フェーズⅡ検討の各炉型における LLFP 核変換特性、サポートファクタ向上炉心の実現性に関する検討を行った。以下に、各項目について検討結果をまとめた。

### (1) LLFP 集合体装荷法の選定

LLFP 集合体装荷法として、炉心外装荷・炉心内装荷炉心を対象に設計評価を行い、核・熱特性、核変換特性について定量的な比較を行った。結果として、炉心外装荷炉心では、核・熱設計への影響は小さいものの、LLFP インベントリは増加すること、炉心内装荷炉心では、1 次系冷却材必要流量は増加するが、LLFP インベントリは、炉心外装荷炉心に比べ、<sup>99</sup>Tc で 1/7、<sup>129</sup>I で 1/3 程度まで低減可能となることがわかった。LLFP インベントリの増加は、核変換炉心の導入ペースを低下させ、導入シナリオに影響を与える可能性が考えられる。このことから、FS フェーズⅡにおける LLFP 集合体の装荷法として、LLFP インベントリを極力低減可能な炉心内装荷法を代表方式に選定することとした。

### (2) 各炉型における LLFP 核変換特性の評価

FS で検討している各炉型について、フェーズⅡで設定した代表炉心を基準炉心として、(1) で選定した装荷法を適用し、LLFP 核変換炉心の設計評価を行った。結果として、いずれの炉型についても、増殖比 1.03 以上等の設計条件を確保しつつ、1.0 以上の SF を達成する見通しが得られた。ただし、核変換特性については、各炉型で差があり、核変換率はナトリウム冷却大型金属燃料炉心で最も大きく、LLFP インベントリ低減の観点からは有望であることがわかった。また、ヘリウムガス冷却炉(六角ブロック型)については、今回、LLFP 集合体としてピンバンドル型を採用したが、十分なガスプレナムが確保できない等の問題があり、取出核変換率は 3 %と大幅に制限される結果であった。ヘリウムガス冷却炉の LLFP 集合体構造については、今後、抜本的な見直しを含む検討が必要と考えられる。

### (3) サポートファクタ向上炉心の実現性検討

SF 向上炉心の実現性を把握すべく、現状の設計条件のうち、SF への影響が大きいと考えられる項目(炉心熱出力、最大線出力制限、炉心サイズ)の制限を緩和することで、どの程度 SF 向上が見込めるか感度評価を行った。結果として、これらの項目の SF への感度は小さく、設計条件を現実的な範囲で緩和しても SF は 1.5 程度に留まることがわかった。そのため、複数基の炉心から生成される LLFP を処理できるような大幅な SF の向上(SF 2.0 以上)は困難との結論に達した。

## 7. 今後の課題

- ・今回の検討では、炉心内装荷炉心の核変換特性、核・熱特性について、暫定的に、2次元RZモデル簡易評価手法を設定し、概略的な評価を行った。今後、詳細検討に向けては、3次元計算による評価が必要と考えられる。特に、熱特性として評価した1次系必要冷却材流量については、2次元計算の包絡出力から簡易的に評価したものであり、3次元計算による集合体出力分布に基づき、詳細に評価を行い、(設計対応も含めた) 設計成立性検討を行う必要がある。
- ・今回の検討では、炉心内装荷炉心の設計評価について、高融点のヨウ化物 ( $\text{YI}_3$ ) の適用が前提であり、今後、その適用性を見極める必要がある。ヨウ素ターゲットの適用性については、現在、原子力機構において、 $\text{YI}_3$ を含む複数の候補材について、炉外試験（基本的な物性、被覆管との共存性等）による評価を実施中であり<sup>[11, 12]</sup>、今後、その結果を受け、最終的なヨウ化物の選定を行うとともに、設計評価に反映する必要がある。(参考として、FS フェーズIIにおける、ヨウ素ターゲットの開発状況を付録2にまとめた。)
- ・今回の検討では、減速材ピンについて、ODS鋼の水素透過率として、低水素透過率の材料を被覆管内面に表面処理する等の抑制方策が成立することを前提に、オーステナイト鋼の1/10を暫定していた。その成立性については、現在、種々の抑制方策を対象に炉外試験（製造性、水素透過率等）による評価を実施中であり<sup>[10]</sup>、今後、その結果を踏まえ成立性を確認するとともに、設計評価に反映する必要がある。(参考として、FS フェーズIIにおける、減速材ピンの開発状況を付録2にまとめた。)
- ・今回の検討では、ヘリウムガス冷却炉について、ドライバ燃料では（ガスプレナム領域を有しない）六角ブロック型を採用しているのに対し、LLFP集合体では、(他の炉型と横並びで)ピンバンドル型を採用した。そのため、ヨウ素ピンのガスプレナムが十分確保できない等の構造上の問題があり、照射期間が1サイクルに制限され、取出核変換率は極めて低いレベルに留まった。ヘリウムガス冷却炉のLLFP集合体構造については、今後、抜本的な見直しを含む検討が必要と考えられる。また、LLFP集合体の材料についても、ヘリウムガス冷却炉では、その高温条件に起因し、被覆管のSiC/SiC複合材や減速材のY-Hなど他の炉型と異なる材料の適用を想定しており、これらの適用性についても、今後、検討が必要と考えられる。

謝辞

本 LLFP 核変換炉心の検討に関する主要な解析作業のうち、核設計に関する解析作業は、三菱重工業 菅 太郎 氏に、燃料設計に関する解析作業は、NDC 小川 伸太 氏に担当して頂きました。また、連続エネルギーモンテカルロ計算による LLFP 集合体内の非均質効果の解析作業は、原子力システム 神 智之 氏に、ナトリウム冷却大型 MOX 燃料炉心の 3 次元計算に関する解析作業は、原子力システム 萩田 宏 氏に担当して頂きました。上記の方々には、厳しいスケジュールの中ご尽力頂きました。この場を借りて、感謝の意を込めてお礼を申し述べさせて頂きます。

## 参考文献

- [1] 池上 哲雄, 他, 「炉心・燃料(燃料形態)の技術検討書 一実用化戦略調査研究(フェーズI)成果報告一」, JNC TY9400 2001-011, 2001年3月.
- [2] 高木 直行, 他, 「実用化戦略調査研究における高速炉を用いた LLFP 核変換技術の検討」, JNC TN9400 2002-067, 2002年8月.
- [3] 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 2004-028, 2003年7月.
- [4] 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(その2)」, JNC TN9400 2004-028, 2004年5月.
- [5] 此村 守, 他, 「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズII中間報告 一原子炉プラントシステム技術検討書一」, JNC TN9400 2004-035, 2004年6月.
- [6] 堂野前 貴子, 他, 「分離・変換技術開発における LLFP 化合物の選定ー文献調査に基づくヨウ素化合物の選定ー」, TN9420 2002-003, 2002年3月.
- [7] 永沼 正行, 他, 「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討(MOX 燃料炉心)ー2003年度報告ー」, TN9400 2004-039, 2004年6月.
- [8] 神 智之, 大木 繁夫, 「LLFP 核変換率に対する補正因子の評価」, TN9400 2005-012, 2005年3月.
- [9] 井上 賢紀, 他, 「高速炉炉心構成要素用オーステナイト系およびフェライト系ステンレス鋼の水素透過特性評価」, TN9400 2002-056, 2002年11月.
- [10] Masaki INOUE, Shigeharu Ukai, "Research and development of neutron moderators with metal hydrides for sodium cooled fast breeder reactors", Proceedings of International Conference Global2005, Tsukuba, Ibaraki, Japan, October 9-13, 2005, Paper No.591 (2005).
- [11] 館 義昭、他, 「長寿命核分裂生成物(LLFP)核変換要素の検討」, JNC TN9400 2004-063, (2004).
- [12] 館 義昭, 他, 「長寿命核分裂生成物(LLFP)核変換ターゲットの検討(3)ーヨウ素化合物と被覆材との長時間の共存性評価ー」, 日本原子力学会 2006 年春の年会 要旨集 F49, (2006).
- [13] 永沼 正行, 他, 「ナトリウム冷却炉の炉心・燃料設計検討(MOX および金属燃料炉心)ー2004年度報告ー」, TN9400 2005-051, 2005年9月.
- [14] 早船 浩樹, 他, 「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズII技術検討書ー(1)原子炉プラントシステムー」, JNC TN9400 2006-042, 2006年4月.

## 表リスト

- Table 3-1 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly
- Table 3-2 Specifications of LLFP target assembly in ex-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Table 3-3 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in ex-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Table 3-4 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Table 3-5 Effect of LLFP target assembly specifications on transmutation performance (In-core loading type core)(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Table 3-6 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Table 3-7 Comparison of in-core loading and ex-core loading type cores in nuclear and thermal characteristics and transmutation performances (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Table 4.3.1-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.1-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.1-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.1-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.2-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.2-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.2-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.2-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Table 4.3.3-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to

- transmutation rate (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Table 4.3.3-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Table 4.3.3-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Table 4.3.3-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Table 4.3.4-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Table 4.3.4-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Table 4.3.4-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Table 4.3.4-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Table 4.3.5-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Table 4.3.5-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Table 4.3.5-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Table 4.3.5-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Table 4.4-1 Comparison of FS phase-II designed cores in transmutation performance
- Table 5-1 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in SF sensitivity evaluation cores
- Table Appendix 2-1 Summary of out-pile tests to iodide candidates

## 図リスト

- Fig. 3-1 Configuration, specifications and characteristics of Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type) (reference core)
- Fig. 3-2 Configurations of iodine target assembly (ex-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-3 Configurations of technetium target assembly (ex-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-4 Configuration of LLFP transmutation core (ex-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-5 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly (ex-core loading type core, iodine target assembly) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-6 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (ex-core loading type core, iodine target assembly) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-7 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly (ex-core loading type core, technetium target assembly) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-8 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H (ex-core loading type core, technetium target assembly) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-9 Comparison of horizontal power distribution inside adjacent driver assembly  
(Moderator pin ratio : 30 %, 15 %) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-10 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-11 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-12 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 3-13 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))
- Fig. 4.1-1 Configuration, specifications and characteristics of Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type) (reference core)
- Fig. 4.1-2 Configuration, specifications and characteristics of Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type) (reference core)
- Fig. 4.1-3 Configuration, specifications and characteristics of Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type) (reference core)

- Fig. 4.1-4 Configuration, specifications and characteristics of Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type) (reference core)
- Fig. 4.1-5 Configuration, specifications and characteristics of Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type) (reference core)
- Fig. 4.3.1-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type)
- Fig. 4.3.1-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.1-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.1-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.1-5 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.2-1 horizontal power distribution inside adjacent driver assembly (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.2-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.2-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core) (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.2-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.2-5 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))
- Fig. 4.3.3-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Fig. 4.3.3-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Fig. 4.3.3-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Fig. 4.3.3-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))
- Fig. 4.3.3-5 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

- Fig. 4.3.4-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Fig. 4.3.4-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core) (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Fig. 4.3.4-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core) (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Fig. 4.3.4-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Fig. 4.3.4-5 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))
- Fig. 4.3.5-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Fig. 4.3.5-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core) (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Fig. 4.3.5-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core) (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Fig. 4.3.5-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Fig. 4.3.5-5 Relationships between irradiation period and criteria for Hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))
- Fig. 5-1 Configurations of SF sensitivity evaluation cores
- Fig. 5-2 Relationships between the number of LLFP transmutation assembly and breeding ratio in the core-size-relaxed core
- Fig. Appendix 1-1 Correction of fuel pin powers in the driver assembly adjacent to LLFP target assembly
- Fig. Appendix 2-1 Outline of sintering tests to iodide candidates in FS phase-II
- Fig. Appendix 2-2 Outline of compatibility tests between cladding materials and iodide candidates in FS phase-II
- Fig. Appendix 2-3 Outline of thermal conductivity tests to iodide candidates in FS phase-II
- Fig. Appendix 2-4 Hydrogen permeation barrier by calorizing on cladding materials (in optimum condition)

Table 3-1 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly

Items		Criteria	
		Value	Viewpoints
Temperature	LLFP	T <sub>c</sub>	2,170 °C Melting point
		YI <sub>3</sub>	997 °C Melting point
		CuI	605 °C Melting point
	Moderator	Zr-H	900 °C Phase stability
	Cladding	ODS	700 °C Structural integrity
	Outlet temperature difference of LLFP target assemblies and the adjacent assemblies		120 °C (target) Thermal striping
Hydrogen ratio of Zr-H (H/Zr)		1.53	Phase stability
CDF		0.5	Structural integrity
Inner gas pressure		11.8 MPa	

Table 3-2 Specifications of LLFP target assembly in ex-core loading type core  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

Items	T <sub>c</sub> target assembly		I target assembly	
	T <sub>c</sub> pin	Moderator pin	I pin	Moderator pin
Material of element	T <sub>c</sub> (metal)	ZrH <sub>1.65</sub>	YI <sub>3</sub>	ZrH <sub>1.65</sub>
Number of pins in a assembly	172	159	379	252
Ratio of pin (%)	52.0	48.0	60.1	39.9
Material of cladding	ODS	ODS	ODS	ODS
Pin outer diameter (mm)	8.42	8.42	5.5	5.5
Cladding thickness (mm)	0.33	0.33	0.33	0.33
Smear density (%TD)	80	90	70	90
Bond material	He	Na	He	Na
Pin pitch (mm)	9.2	6.6	9.2	6.6
Column height (cm)	150	150	110	110
Gas plenum length (upper/lower) (cm)	-	-	28.5/142	-

Table 3-3 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in ex-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

Items	Reference core	Transmutation core (2 dimensional R-Z simplified model)	
Core column length (cm)	80	←	
Number of driver assembly (inner/outer core)	594 (316 / 278)	←	
Number of radial blanket assembly	198	0	
Number of LLFP target assembly	-	53 / 70	
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	70 (30 / 40)	←	
Core equivalent diameter (cm)	490	←	
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	21.5 / 24.1	21.8 / 25.4	
Burn-up reactivity (%Δk/kk')	3.2	3.6	
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*1)	148 / 63	151 / 90	
Breeding ratio (-)	1.16	1.03	
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	420 / 419	447 / 440*2	
Peak fast neutron fluence (E>0.1MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	4.6×10 <sup>23</sup>	4.9×10 <sup>23</sup>	
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	2.4×10 <sup>15</sup>	2.6×10 <sup>15</sup>	
Required total coolant flow rate*3 (%)	100.0	100.5	
	-	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Irradiation period	(cycle)	-	20
	(year)	-	30
Transmutation rate	(% per cycle)	-	0.83
	(% at discharge)	-	15.4
LLFP inventory	(kg)	-	5,983
	(kg/GWt)	-	1,676
Support factor (-)	-	1.03	1.02
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	-	4.2	1.8

\*1 : Average burn-up including blanket

\*2 : 3D correction is considered. LHR of 3D model to that of 2D model ratio in the reference core is tentatively applied as the correction factor.

\*3 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 3-4 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

Items	Tc pin	I pin	Moderator pin
Material of element	Tc (metal)	YI <sub>3</sub>	ZrH <sub>1.65</sub>
Number of pins in a assembly	154	378	99
Ratio of pin (%)	24.4	59.9	15.7
Material of cladding	ODS	ODS	ODS
Pin outer diameter (mm)	5.5	5.5	5.5
Cladding thickness (mm)	0.33	0.33	0.33
Smear density (%TD)	80	50	90
Bond material	He	He	Na
Pin pitch (mm)	6.6	6.6	6.6
Column height (cm)	80	80	80
Gas plenum length (upper/lower) (cm)	-	55.5 / 135.0	-

Table 3-5 Effect of LLFP target assembly specifications on transmutation performance  
(In-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

	Case 1		Case 2		Case 3	
	Tc	I	Tc	I	Tc	I
Arrangement of target and moderator pins in LLFP target assembly	Homogeneous		Tc pins surrounding (to concentrate moderator pins)		Tc pins surrounding (to concentrate moderator pins)	
Ratio of moderator pin (%)	30		30		15	
I pin to Tc pin ratio (-)	2.50		2.26		2.45	
LLFP inventory (kg)	16.66	6.89	17.87	6.69	20.85	8.48
LLFP transmutation rate (% per cycle)	9.0	6.7	9.8 (1.09)*1	9.0 (1.34)*1	7.7	6.2
LLFP transmutation amount (kg per cycle)	1.50	0.46	1.76	0.60	1.61	0.53
I to Tc ratio of LLFP transmutation amount*2 (-)	0.81		0.84		0.33	

\*1 : Ratio to LLFP transmutation rate of case 1(homogeneous arrangement)

\*2 : Ratio <sup>129</sup>I to <sup>99</sup>Tc of yield is about 0.33. Thus, to attain SF > 1.0 for <sup>129</sup>I and <sup>99</sup>Tc simultaneously, it is necessary for this ratio to approximate to 0.33.

Table 3-6 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

Items	Reference core	Transmutation core (2 dimensional R-Z simplified model)	
Core column length (cm)	80	←	
Number of driver assembly (inner/outer core)	594 (316 / 278)	594 (296 / 298)	
Number of radial blanket assembly	198	158	
Number of LLFP target assembly	-	40	
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	70 (30 / 40)	70 (30 / 40)	
Core equivalent diameter (cm)	490	505	
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	21.5 / 24.1	24.8 / 27.3	
Burn-up reactivity (%Δk/kk')	3.2	4.1	
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total <sup>*1</sup> )	148 / 63	150 / 67	
Breeding ratio (-)	1.16	1.05	
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	420 / 419	441 / 440 <sup>*2</sup>	
Peak fast neutron fluence (E>0.1MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	4.6×10 <sup>23</sup>	4.2×10 <sup>23</sup>	
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	2.4×10 <sup>15</sup>	2.4×10 <sup>15</sup>	
Required total coolant flow rate <sup>*3</sup> (%)	100.0	104.0	
	-	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Irradiation period	(cycle)	-	3
	(year)	-	4.5
Transmutation rate	(% per cycle)	-	6.2
	(% at discharge)	-	17.5
LLFP inventory	(kg)	-	834
	(kg/GWt)	-	234
Support factor (-)	-	1.08	1.11
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	-	8.0	

\*1 : Average burn-up including blanket

\*2 : 3D correction is considered. LHR of 3D model to that of 2D model ratio in the reference core is tentatively applied as the correction factor.

\*3 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 3-7 Comparison of in-core loading and ex-core loading type cores in nuclear and thermal characteristics and transmutation performances (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

Items	Transmutation core			Reference core
	In-core loading type core		Ex core loading type core	
	Tc	I	Tc	I
Number of LLFP target assembly	40		53	70
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	24.8 / 27.3		21.8 / 25.4	21.5 / 24.1
Burn-up reactivity (%Δk/k <sup>r</sup> )	4.1		3.6	3.2
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total)*1	150 / 67		151 / 90	148 / 63
Breeding ratio (-)	1.05		1.03	1.16
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	441 / 440		447 / 440	420 / 419
Peak fast neutron fluence (E>0.1MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	4.2×10 <sup>23</sup>		4.9×10 <sup>23</sup>	4.6×10 <sup>23</sup>
Required total coolant flow rate*2 (%)	104.1		100.5	100
	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Irradiation period	(cycle) (year)	3 4.5	20 30	8 12
Transmutation rate	(% per cycle)	6.2	5.0	0.83
	(% at discharge)	17.5	14.3	1.87 (1 <sup>st</sup> layer) 0.66 (2 <sup>nd</sup> layer)
LLFP inventory (kg)	834	339	5,983	1,093
Support factor (-)	1.08	1.11	1.03	1.02
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	8.0		4.2	1.8

\*1 : Average burn-up including blanket

\*2 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 4.3.1-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

LLFP target assembly loading position		<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Inner core		0.90	0.99
Outer core	11 <sup>th</sup> layer	0.93	1.02
	12 <sup>th</sup> layer	0.91	1.00
	13 <sup>th</sup> layer	0.90	0.99
	14 <sup>th</sup> layer	0.89	0.98

Table 4.3.1-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

Items	Criteria		
	Value	Viewpoints	
Temperature	LLFP	Tc	2,170 °C Melting point
		YI <sub>3</sub>	997 °C Melting point
	Moderator	Zr-H	900 °C Phase stability
	Cladding	ODS	700 °C Structural integrity
	Outlet temperature difference of LLFP target assembly and the adjacent assemblies		120 °C (target) Thermal striping
Hydrogen ratio of Zr-H (H/Zr)		1.53	Phase stability
CDF		0.5	Structural integrity
Inner gas pressure		11.8 MPa	

Table 4.3.1-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

Items	Tc pin	I pin	Moderator pin
Material of element	Tc (metal)	YI <sub>3</sub>	ZrH <sub>1.65</sub>
Number of pins in a assembly	154	378	99
Ratio of pin (%)	24.4	59.9	15.7
Material of cladding	ODS	ODS	ODS
Pin outer diameter (mm)	6.23	6.23	6.23
Cladding thickness (mm)	0.375	0.375	0.375
Smear density (%TD)	80	50	90
Bond material	He	He	Na
Pin pitch (mm)	7.47	7.47	7.47
Column height (cm)	100	100	100
Gas plenum length (upper/lower) (cm)	-	37/143	-

Table 4.3.1-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in in-core loading type core  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

Items	Reference core	Transmutation core (3 dimensional model)	Transmutation core (2 dimensional R-Z simplified model)
Core column length (cm)	100	←	←
Number of driver assembly (inner/outer core)	562 (288 / 274)	562 (272 / 290)	←
Number of radial blanket assembly	96	68	←
Number of LLFP target assembly	-	28	←
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	40 (20 / 20)	45 (20 / 25)	←
Core equivalent diameter (cm)	538	550	←
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	18.3 / 20.9	21.0 / 23.0	←
Burn-up reactivity (%Δk/kk)	2.3	3.4	3.4
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total)*1	147 / 90	149 / 92	148 / 92
Breeding ratio (-)	1.10	1.03	1.03
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	398 / 396	417 / 407	370 / 394*2
Peak fast neutron fluence ( $E > 0.1\text{ MeV}$ ) (n/cm <sup>2</sup> )	$5.0 \times 10^{23}$	$5.4 \times 10^{23}$	$4.6 \times 10^{23}$
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	$1.8 \times 10^{15}$	$2.0 \times 10^{15}$	$1.7 \times 10^{15}$
Required total coolant flow rate*3 (%)	95.8	-	97.4
Irradiation period	(cycle) (year)	$^{99}\text{Tc}$ $^{129}\text{I}$ -            3	$^{99}\text{Tc}$ $^{129}\text{I}$ -            3
Transmutation rate	(% per cycle) (% per year) (% at discharge)	7.7      6.2      6.9 3.5      2.8      3.1 21.4      17.4      19.3	5.6 2.5 15.7
LLFP inventory	(kg) (kg/GWt)	937      381      937 262      107      262	381 107
Support factor (-)	-	1.00      1.02      0.90	0.92
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	-	8.5	←

\*1 : Average burn-up including blanket, \*2 : 3D correction is considered. LHR of 3D model to that of 2D model ratio in the reference core is tentatively applied as the correction factor, \*3 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 4.3.2-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate  
(Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

LLFP target assembly loading position	$^{99}\text{Tc}$	$^{129}\text{I}$
Inner core	0.90	1.01
Outer core	9 <sup>th</sup> layer	0.94
	10 <sup>th</sup> layer	0.90

Table 4.3.2-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly  
(Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

Items	Criteria		
	Value	Viewpoints	
Temperature	Tc	2,170 °C	Melting point
	YI <sub>3</sub>	997 °C	Melting point
	Moderator	Zr-H	Phase stability
	Cladding	ODS	Structural integrity
	Outlet temperature difference of LLFP target assembly and the adjacent assemblies	120 °C (target)	Thermal striping
Hydrogen ratio of Zr-H (H/Zr)	1.53	Phase stability	
CDF	0.5	Structural integrity	
Inner gas pressure	11.8 MPa		

Table 4.3.2-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core  
(Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

Items	Tc pin	I pin	Moderator pin
Material of element	Tc (metal)	YI <sub>3</sub>	ZrH <sub>1.65</sub>
Number of pins in a assembly	154	378	99
Ratio of pin (%)	24.4	59.9	15.7
Material of cladding	ODS	ODS	ODS
Pin outer diameter (mm)	6.23	6.23	6.23
Cladding thickness (mm)	0.38	0.38	0.38
Smear density (%TD)	80	50	90
Bond material	He	He	Na
Pin pitch (mm)	7.47	7.47	7.47
Column height (cm)	100	100	100
Gas plenum length (upper/lower) (cm)	-	45/139	-

Table 4.3.2-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in  
in-core loading type core  
(Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

Items	Reference core	Transmutation core (2 dimensional R-Z simplified model)	
Core column length (cm)	100	←	
Number of driver assembly (inner/outer core)	286 (157 / 129)	286 (145 / 141)	
Number of radial blanket assembly	66	45	
Number of LLFP target assembly	-	21	
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	40 (20 / 20)	75 (35 / 40)	
Core equivalent diameter (cm)	383	396	
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	18.8 / 23.7	21.9 / 27.5	
Burn-up reactivity (%Δk/kk')	2.8	3.9	
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*1)	150 / 86	150 / 74	
Breeding ratio (-)	1.10	1.03	
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	409 / 402	427 / 421*2	
Peak fast neutron fluence ( $E>0.1\text{MeV}$ ) (n/cm <sup>2</sup> )	$5.4\times10^{23}$	$5.0\times10^{23}$	
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	$1.9\times10^{15}$	$1.7\times10^{15}$	
Required total coolant flow rate*3 (%)	100.0	103.7	
	-	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Irradiation period	(cycle)	-	3
	(year)	-	6.9
Transmutation rate	(% per cycle)	-	5.3
	(% per year)	-	2.3
	(% at discharge)	-	15.1
LLFP inventory	(kg)	-	702
	(kg/GWt)	-	393
Support factor (-)	-	1.04	1.12
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	-	9.3	

\*1 : Average burn-up including blanket

\*2 : 3D correction is considered. LHR of 3D model to that of 2D model ratio in the reference core is tentatively applied as the correction factor.

\*3 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 4.3.3-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate  
(Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

LLFP target assembly loading position	$^{99}\text{Tc}$	$^{129}\text{I}$
Inner core	0.91	1.00
Outer core	12 <sup>th</sup> layer	0.91
	14 <sup>th</sup> layer	0.92
		1.01

Table 4.3.3-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly  
(Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

Items	Criteria		
	Value	Viewpoints	
Temperature	LLFP	Tc	2,170 °C
		YI <sub>3</sub>	997 °C
	Moderator	Zr-H	900 °C
	Cladding	ODS	700 °C
	Outlet temperature difference of LLFP target assembly and the adjacent assemblies		120 °C (target)
Hydrogen ratio of Zr-H (H/Zr)		1.53	Phase stability
CDF		0.5	Structural integrity
Inner gas pressure		11.8 MPa	

Table 4.3.3-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core  
(Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

Items	Tc pin	I pin	Moderator pin
Material of element	Tc (metal)	YI <sub>3</sub>	ZrH <sub>1.65</sub>
Number of pins in a assembly	154	378	99
Ratio of pin (%)	24.4	59.9	15.7
Material of cladding	ODS	ODS	ODS
Pin outer diameter (mm)	5.05	5.05	5.05
Cladding thickness (mm)	0.30	0.30	0.30
Smear density (%TD)	80	50	90
Bond material	He	He	Na
Pin pitch (mm)	6.18	6.18	6.18
Column height (cm)	95	95	95
Gas plenum length (upper/lower) (cm)	-	192/0	-

Table 4.3.3-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in  
in-core loading type core  
(Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

Items	Reference core	Transmutation core (2 dimensional R-Z simplified model)	
Core column length (cm)	95	←	
Number of driver assembly (inner/outer core)	645 (297 / 348)	645 (312 / 333)	
Number of radial blanket assembly	0	←	
Number of LLFP target assembly	-	30	
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	0 (0 / 0)	17 (17 / 0)	
Core equivalent diameter (cm)	470	480	
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	12.4 / 12.4	13.9 / 13.9	
Burn-up reactivity (%Δk/kk')	0.55	1.5	
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*1)	99 / 99	98 / 85	
Breeding ratio (-)	1.03	1.03	
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	265 / 280	257 / 235*2	
Peak fast neutron fluence (E>0.1MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	5.3×10 <sup>23</sup>	5.0×10 <sup>23</sup>	
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	3.1×10 <sup>15</sup>	2.9×10 <sup>15</sup>	
Required total coolant flow rate*3 (%)	100.0	104.3	
	-	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Irradiation period	(cycle)	-	2
	(year)	-	3.6
Transmutation rate	(% per cycle)	-	9.1
	(% per year)	-	5.1
	(% at discharge)	-	17.4
LLFP inventory	(kg)	-	629
	(kg/GWt)	-	176
Support factor (-)	-	1.01	1.07
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	-	9.2	

\*1 : Average burn-up including blanket

\*2 : 3D correction is considered. LHR of 3D model to that of 2D model ratio in the reference core is tentatively applied as the correction factor.

\*3 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 4.3.4-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate  
 (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

LLFP target assembly loading position		$^{99}\text{Tc}$	$^{129}\text{I}$
Inner core		0.89	1.00
Outer core	10 <sup>th</sup> layer	0.89	1.00
	11 <sup>th</sup> layer	0.89	1.00

Table 4.3.4-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly  
 (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

Items	Criteria		
	Value	Viewpoints	
Temperature	LLFP	Tc YI <sub>3</sub>	Melting point Melting point
	Moderator	Zr-H	Phase stability
	Cladding	ODS	Pb-Bi corrosion
	Outlet temperature difference of LLFP target assembly and the adjacent assemblies	120 °C (target)	Thermal striping
	Hydrogen ratio of Zr-H (H/Zr)	1.53	Phase stability
CDF		0.5	Structural integrity
	Inner gas pressure	11.8 MPa	

Table 4.3.4-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core  
 (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

Items	Tc pin	I pin	Moderator pin
Material of element	Tc (metal)	YI <sub>3</sub>	ZrH <sub>1.65</sub>
Number of pins in a assembly	154	378	99
Ratio of pin (%)	24.4	59.9	15.7
Material of cladding	ODS	ODS	ODS
Pin outer diameter (mm)	5.83	5.83	5.83
Cladding thickness (mm)	0.33	0.33	0.33
Smear density (%TD)	80	50	90
Bond material	He	He	Pb-Bi
Pin pitch (mm)	7.10	7.10	7.10
Column height (cm)	70	70	70
Gas plenum length (upper/lower) (cm)	-	10/120	-

Table 4.3.4-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in  
in-core loading type core  
(Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

Items	Reference core	Transmutation core (2 dimensional R-Z simplified model)	
Core column length (cm)	70	←	
Number of driver assembly (inner/outer core)	444 (252 / 192)	444 (231 / 213)	
Number of radial blanket assembly	0	←	
Number of LLFP target assembly	-	27	
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	35 (0 / 35)	60 (0/60)	
Core equivalent diameter (cm)	443	456	
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	17.5 / 19.9	21.7 / 22.0	
Burn-up reactivity (%Δk/kk')	1.51	2.7	
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*1)	154 / 105	156 / 83	
Breeding ratio (-)	1.10	1.03	
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	281 / 248	286 / 287*2	
Peak fast neutron fluence (E>0.1MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	6.4×10 <sup>23</sup>	5.4×10 <sup>23</sup>	
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	2.3×10 <sup>15</sup>	1.9×10 <sup>15</sup>	
Required total coolant flow rate*3 (%)	100.0	104.6	
	-	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I
Irradiation period	(cycle)	-	5
	(year)	-	7.5
Transmutation rate	(% per cycle)	-	5.0
	(% per year)	-	3.3
	(% at discharge)	-	22.8
LLFP inventory	(kg)	-	562
	(kg/GWt)	-	284
Support factor (-)	-	1.02	1.10
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	-	62.7	

\*1 : Average burn-up including blanket

\*2 : 3D correction is considered. LHR of 3D model to that of 2D model ratio in the reference core is tentatively applied as the correction factor.

\*3 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 4.3.5-1 Correction factors of heterogeneous effect inside LLFP target assembly to transmutation rate  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

LLFP target assembly loading position	$^{99}\text{Tc}$	$^{129}\text{I}$
Inner core	0.95	1.02
Outer core	10 <sup>th</sup> layer	0.96
	11 <sup>th</sup> layer	0.92
		0.98

Table 4.3.5-2 Criteria for LLFP target pin, moderator pin and assembly  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

Items	Criteria		
	Value	Viewpoints	
Temperature	LLFP	Tc $\text{YI}_3$	2,170 °C 997 °C
	Moderator	Y-H	1,000 °C
	Cladding	SiC	2,200 °C
	Outlet temperature difference of LLFP target assembly and the adjacent assemblies		150 °C (target)
	Hydrogen ratio of Zr-H (H/Zr)		Thermal striping Phase stability
	Inner gas pressure	5.9 MPa	Less than primary loop pressure (compressed stress is retained in SiC cladding)

Table 4.3.5-3 Specifications of LLFP target assembly in in-core loading type core  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

Items	Tc pin	I pin	Moderator pin
Material of element	Tc (metal)	$\text{YI}_3$	$\text{YH}_{1.8}$
Number of pins in a assembly	125	472	31
Ratio of pin (%)	19.9	75.2	4.9
Material of cladding	SiC/SiC	SiC/SiC	SiC/SiC
Pin outer diameter (mm)	7.5	7.5	7.5
Cladding thickness (mm)	1.0	1.0	1.0
Smear density (%TD)	80	50	90
Bond material	He	He	He
Pin pitch (mm)	9.10	9.10	9.10
Column height (cm)	100	70	100
Gas plenum length (upper/lower) (cm)	-	45/45	-

Table 4.3.5-4 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in  
in-core loading type core  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

Items	Reference core	Transmutation core (2 dimensional R-Z simplified model)		
Core column length (cm)	100	←		
Number of driver assembly (inner/outer core)	414 (222 / 192)	414 (201 / 213)		
Number of radial blanket assembly	84	48		
Number of LLFP target assembly	0	36		
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	50 (25 / 25)	60 (30 / 30)		
Core equivalent diameter (cm)	543	564		
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	22.2 / 24.0	26.8 / 26.1		
Burn-up reactivity (%Δk/kk')	1.4	2.0		
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*1)	121 / 69	120 / 70		
Breeding ratio (-)	1.11	1.04		
Peak power density (W/cm <sup>3</sup> ) (inner/outer core)	166 / 161	167 / 161*2		
Peak fast neutron fluence (E>0.1MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	3×10 <sup>23</sup>	2.7×10 <sup>23</sup>		
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	0.9×10 <sup>15</sup>	0.9×10 <sup>15</sup>		
Required total coolant flow rate*3 (%)	100.0	105.2		
	-	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I	
Irradiation period	(cycle)	-	1	
	(year)	-	1.5	
Transmutation rate	(% per cycle)	-	3.3	2.6
	(% per year)	-	2.2	1.7
	(% at discharge)	-	3.3	2.6
LLFP inventory	(kg)	-	984	431
	(kg/GWt)	-	410	179
Support factor (-)	-	1.05	1.11	
LLFP assembly coolant flow rate (kg/s)	-	0.53		

\*1 : Average burn-up including blanket

\*2 : 3D correction is considered. Power density of 3D model to that of 2D model ratio in the reference core is tentatively applied as the correction factor.

\*3 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

Table 4.4-1 Comparison of FS phase-II designed cores in transmutation performance

Items	Na-cooled large-scale MOX fuel core	Na-cooled medium-scale MOX fuel core	Na-cooled large-scale metal fuel core	Pb-Bi-cooled medium-scale core	He gas-cooled large-scale core
Core column length (cm)	100	100	95	70	100
Axial blanket length (cm) (upper/lower)	45 (20 / 25)	75 (35 / 40)	17 (17 / 0)	60 (0/60)	60 (30 / 30)
Number of assembly (core/radial blanket/LLFP)	562 / 68 / 28	286 / 45 / 21	645 / 0 / 30	444 / 0 / 27	414 / 48 / 36
Ratio of moderator pin (%)	15	15	15	15	5
Target column height (cm) (Tc/I)	100 / 100	100 / 100	95 / 95	70 / 70	100 / 70
Gas plenum length (cm) (upper/lower)	37 / 143	45 / 139	192 / 0	10 / 120	45 / 45
Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	21.0 / 23.0	21.9 / 27.5	13.9 / 13.9	21.7 / 22.0	26.8 / 26.1
Burn-up reactivity (%Δk/k')	3.4* <sup>3</sup>	3.9	1.5	2.7	2.0
Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total)* <sup>1</sup> )	149 / 92* <sup>3</sup>	150 / 74	97.7 / 85.3	156 / 83	120 / 70
Breeding ratio (-)	1.03* <sup>3</sup>	1.03	1.03	1.03	1.04
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer	411 / 407* <sup>3</sup>	427 / 421	257 / 235	286 / 287	—
Peak fast neutron fluence (E>0.1MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	5.4×10 <sup>28</sup> * <sup>3</sup>	5.0×10 <sup>28</sup>	5.0×10 <sup>23</sup>	5.4×10 <sup>23</sup>	2.7×10 <sup>23</sup>
Average neutron flux (average in cycle) (n/cm <sup>2</sup> s)	2.0×10 <sup>15</sup> * <sup>3</sup>	1.7×10 <sup>15</sup>	2.9×10 <sup>15</sup>	1.9×10 <sup>15</sup>	0.9×10 <sup>15</sup>
Required total coolant flow rate* <sup>2</sup> (%)	97.4	103.7	104.3	104.6	105.2
Irradiation period	(cycle) (year)	<sup>99</sup> Tc <sup>129</sup> I 3 6.6	<sup>99</sup> Tc <sup>129</sup> I 3 6.9	<sup>99</sup> Tc <sup>129</sup> I 2 3.6	<sup>129</sup> I <sup>99</sup> Tc 5 7.5
Transmutation rate	(% per cycle) (% per year) (% at discharge)	7.7* <sup>3</sup> 3.5* <sup>3</sup> 21.4* <sup>3</sup>	6.2* <sup>3</sup> 2.8* <sup>3</sup> 17.4* <sup>3</sup>	5.3 2.3 15.1	4.5 2.0 12.9
LLFP inventory	(kg) (kg/GWt)	937* <sup>3</sup> 262* <sup>3</sup>	381* <sup>3</sup> 107* <sup>3</sup>	702 393	285 160
	Support factor (-)	1.00* <sup>3</sup>	1.02* <sup>3</sup>	1.04 1.12	1.01 1.07

\*1 : Average burn-up including blanket, \*2 : Ratio to potential primary coolant flow rate (in rough evaluation)

\*3 : Results based on 3 dimensional model

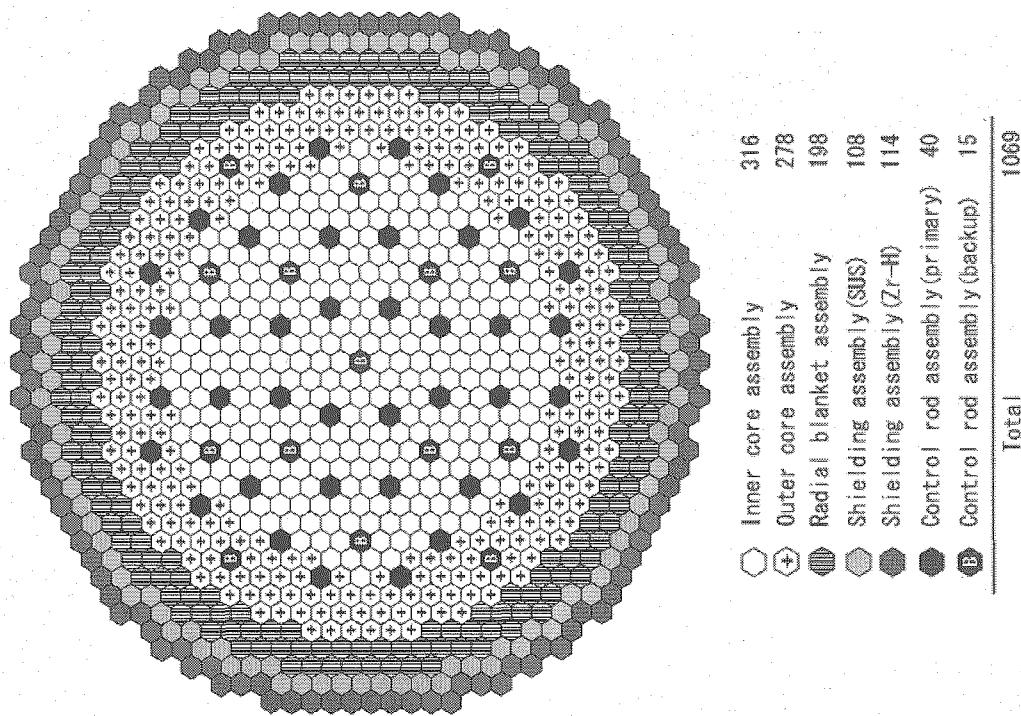
Table 5-1 Nuclear and thermal characteristics and transmutation performances in SF sensitivity evaluation cores

	Current design condition core	Thermal power-relaxed core	Peak-LHR-relaxed core	Core-size-relaxed core
Features	Current design conditions are satisfied. SF is limited to be close to 1.0.	About 10% of driver assemblies are replaced to LLFP assemblies in the reference core. Accordingly, the thermal power is decreased by about 10%.	From the thermal-power-relaxed core the peak LHR is relaxed to satisfy the thermal power of the reference core.	Core size is relaxed to have 2 layers of radial blanket in the current design condition core. After that, the number of LLFP assemblies is adjusted over a range of BR 1.03.
Core thermal power (MWt)	3,570	<u>3,260</u>	3,570	3,570
Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer core)	441 / 440	440/440	482/480	—
Number of assembly			LLFP non-adjusted	LLFP adjusted
Driver fuel	594	<u>542</u>	542	594
Radial blanket	158	198	198	<u>210</u>
Control rod (primary+backup)	55	55	55	55
Shielding (SUS+Zr-H)	222	222	222	234
LLFP	40	52	52	52
Total	1,069	1,069	1,069	<u>1,133</u>
Breeding ratio (BR)	Core Axial blanket Radial blanket	0.673 0.277 0.100	0.648 0.266 0.112	0.673 0.277 0.110
Support factor (SF)	<sup>99</sup> Tc <sup>129</sup> I	1.08 1.11	1.52 1.56	1.08 1.11

	Items	Specifications characteristics
Core Specifications	Core power (MWt/MWe)	3570/1500
	Core outlet/inlet temperature (°C)	550/395
	Cycle period (month)	18
	Batch number (core/radial blanket)	4/4
	Core column length (cm)	80
	Axial blanket length (cm) (upper/lower)	30/40
Fuel Specifications	Core equivalent diameter (cm)	490
	Shielding circumscript diamter (cm)	645
	Fuel type	MOX (pellet)
	Smear density (%TD)	82
	Pin diameter (mm)	8.8
	Cladding thickness (mm)	0.52
Fuel Specifications	Driver assembly type (-)	ABLE type
	Gas plenum length (cm) (upper/lower)	29/102
	Structure material (cladding/wrapper tube)	ODS/PNC-FMS
	Assembly pitch (cm)	18.32
	Number of pins per an assembly	271
	Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	21.5/24.1
Nuclear characteristics	Burn up reactivity (%Δk/kk')	3.2
	Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*)	148/63
	Breeding ratio (-)	1.16
	Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer)	420/419
	Peak fast neutron fluence (E>0.1 MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	4.6×10 <sup>23</sup>
Total		1069

\* Average burn-up including blanket

Fig. 3-1 Configuration, specifications and characteristics of Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type)  
(reference core)



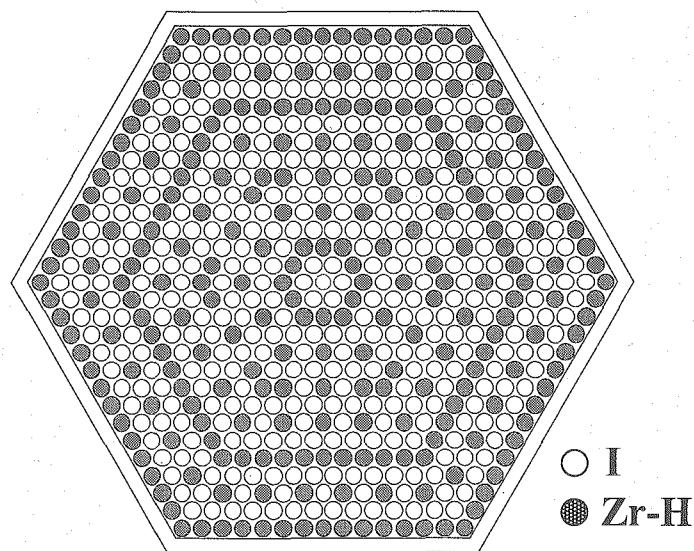


Fig. 3-2 Configurations of iodine target assembly (ex-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

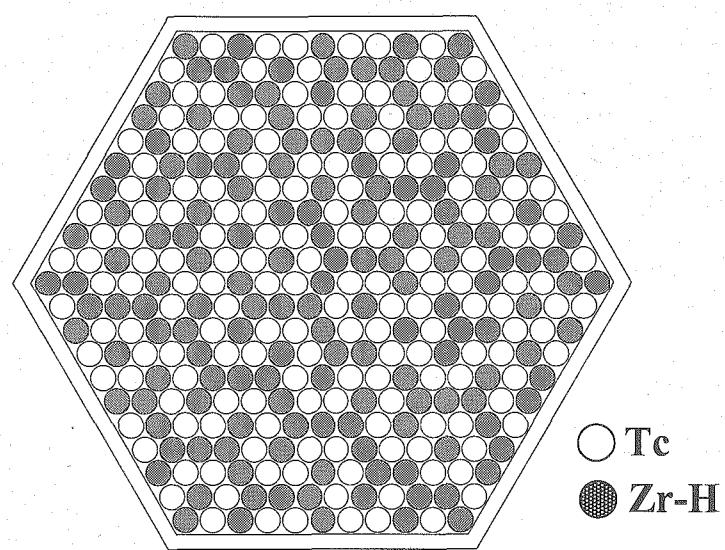


Fig. 3-3 Configurations of technetium target assembly (ex-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

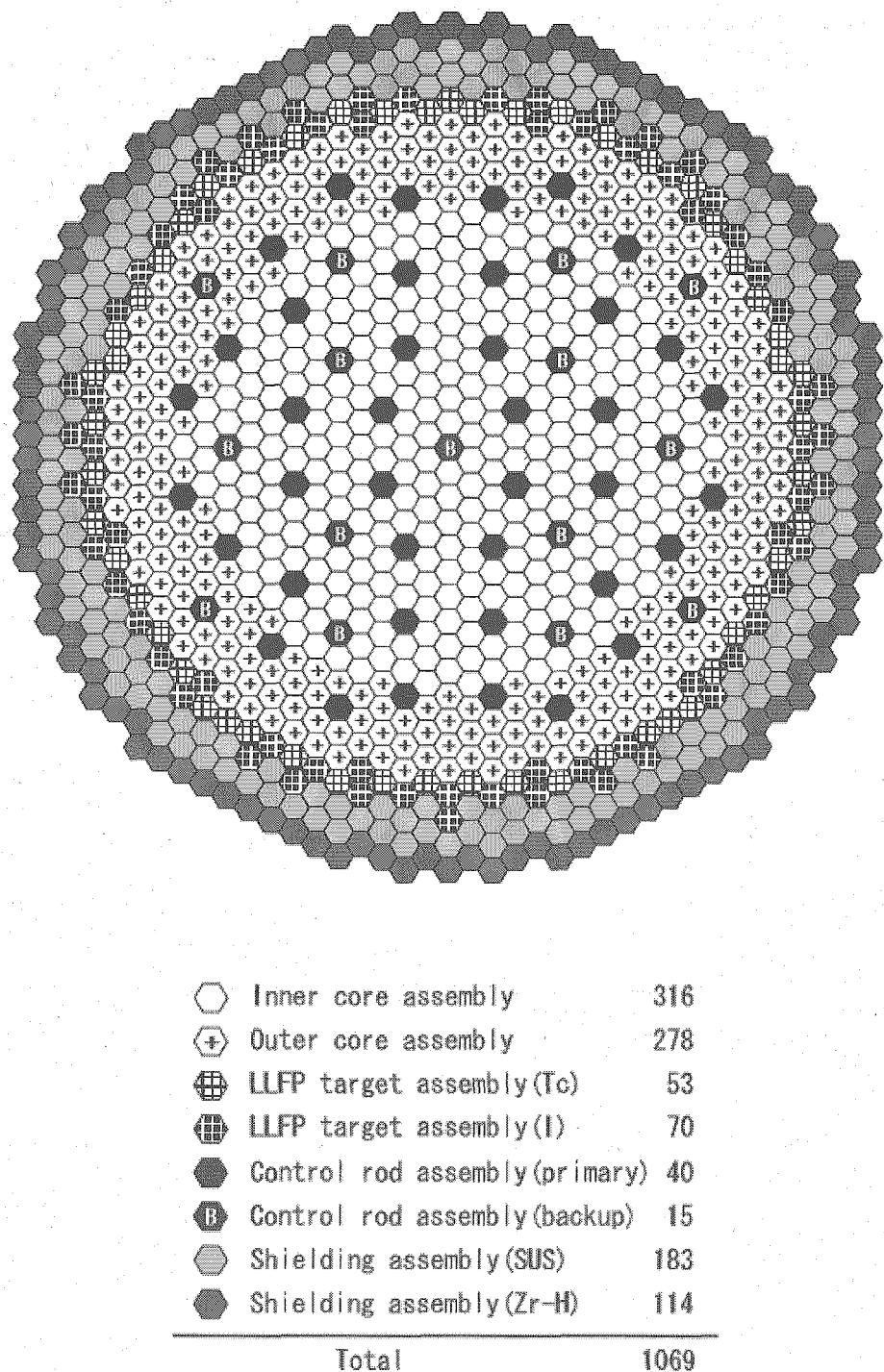


Fig. 3-4 Configuration of LLFP transmutation core (ex-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

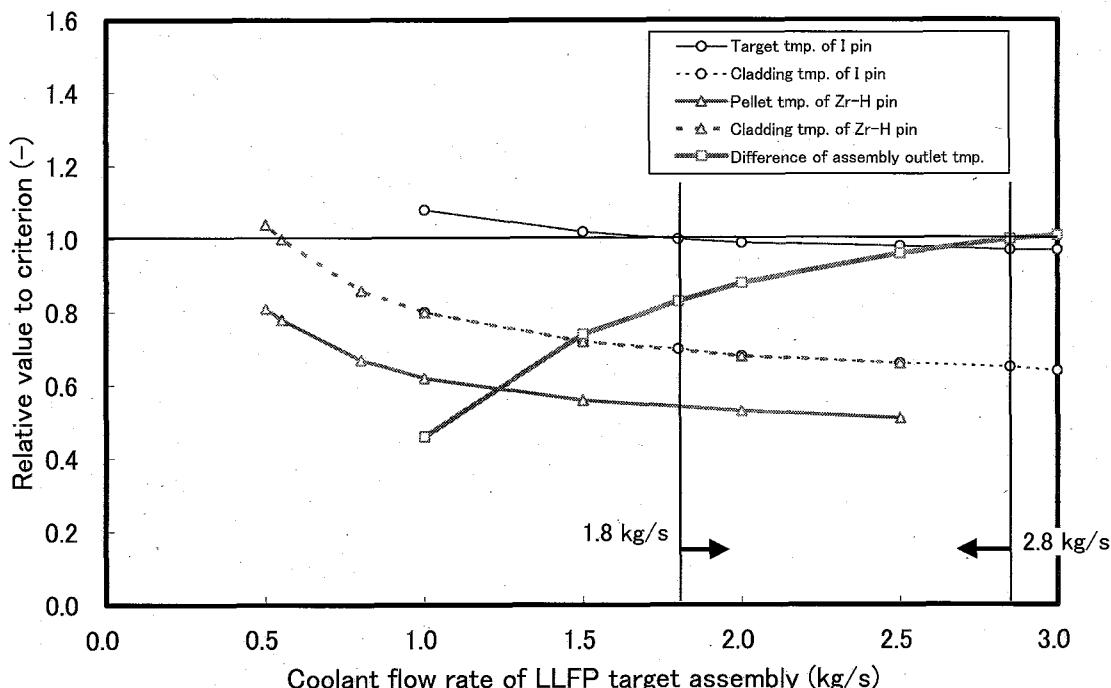


Fig. 3-5 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (ex-core loading type core, iodine target assembly)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

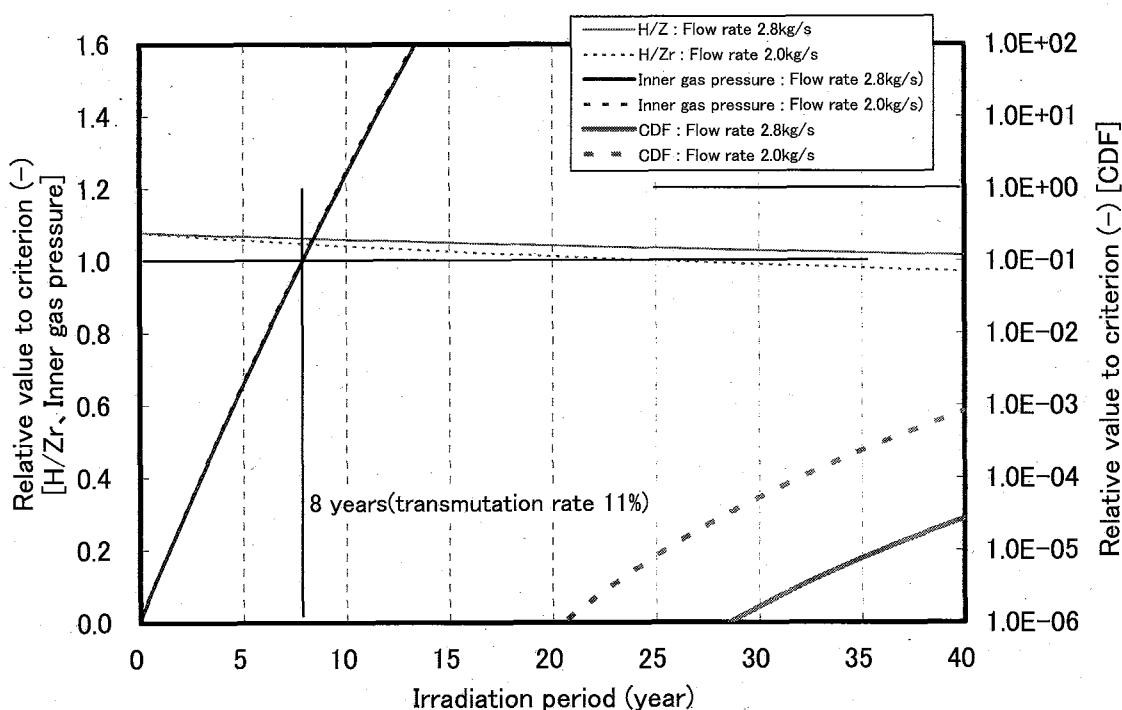


Fig. 3-6 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (ex-core loading type core, iodine target assembly)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

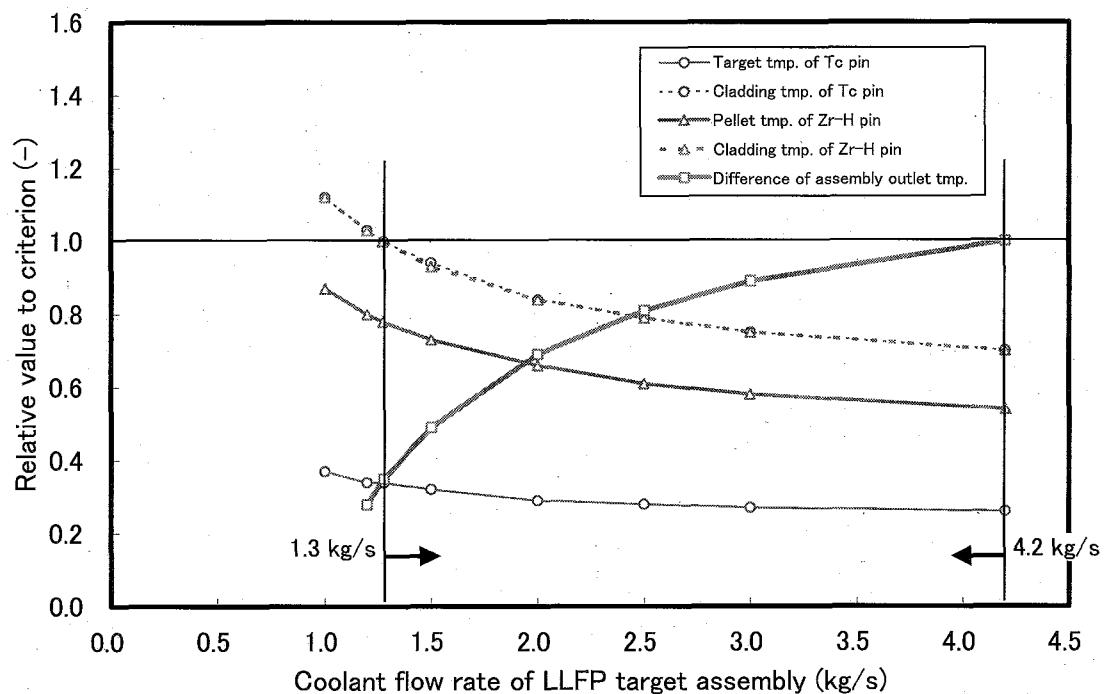


Fig. 3-7 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (ex-core loading type core, technetium target assembly)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

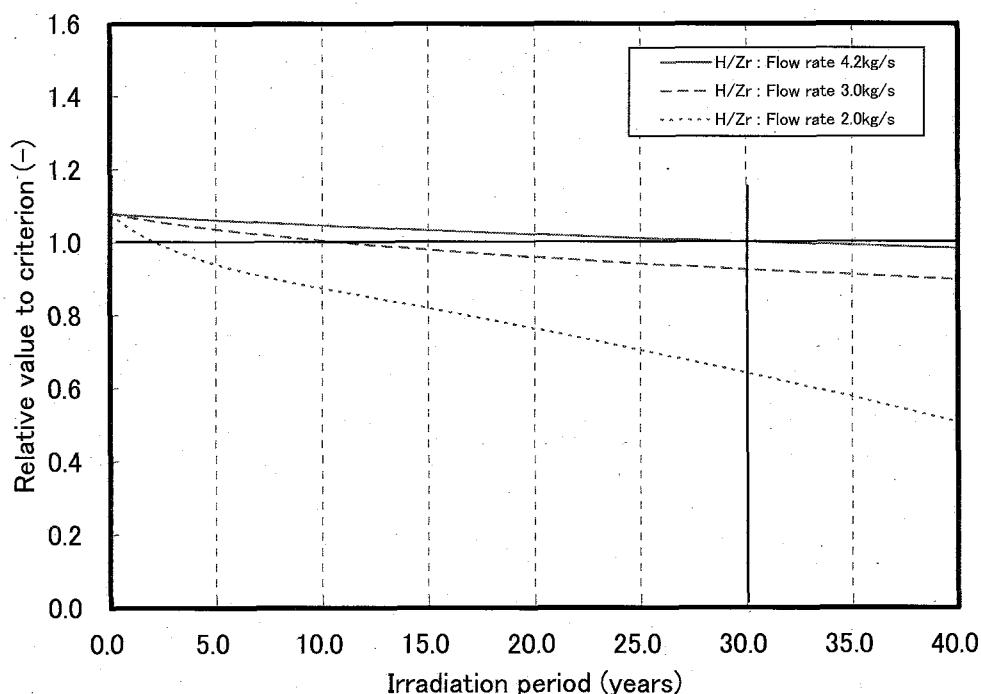


Fig. 3-8 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H (ex-core loading type core, technetium target assembly)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

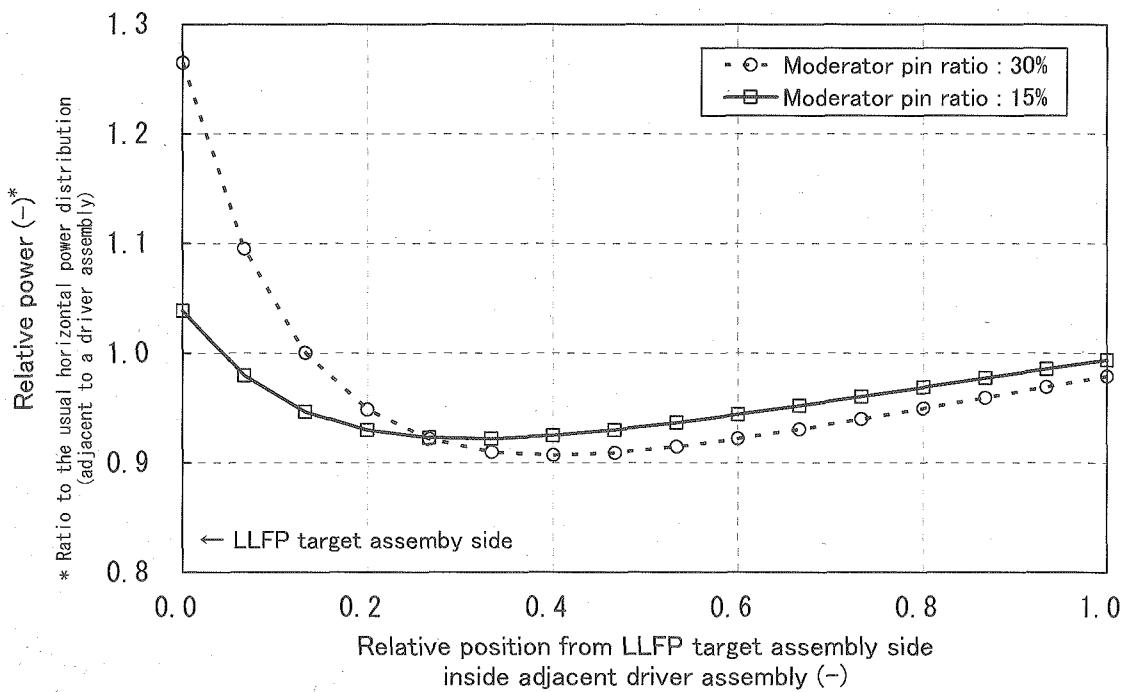


Fig. 3-9 Comparison of horizontal power distribution inside adjacent driver assembly  
(Moderator pin ratio : 30 %, 15 %)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

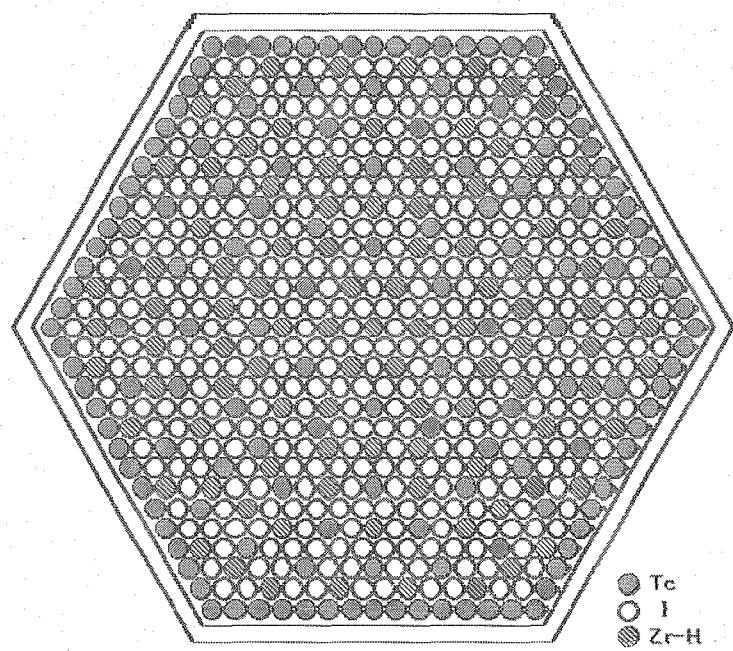
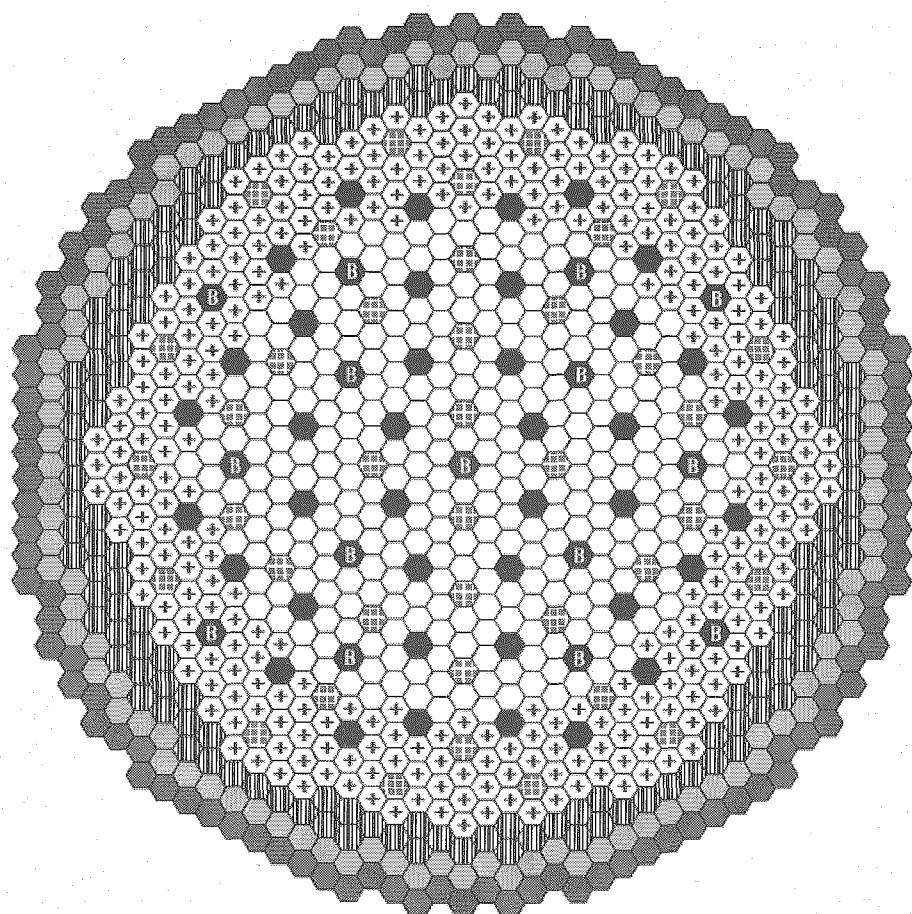


Fig. 3-10 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))



○	Inner core assembly	296
⊕	Outer core assembly	298
▨	Radial blanket assembly	158
■	Control rod assembly (primary)	40
●	Control rod assembly (backup)	15
▨	Shielding assembly (SUS)	108
■	Shielding assembly (Zr-H)	114
⊕	LLFP target assembly	40
<hr/>		
Total		1069

Fig. 3-11 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

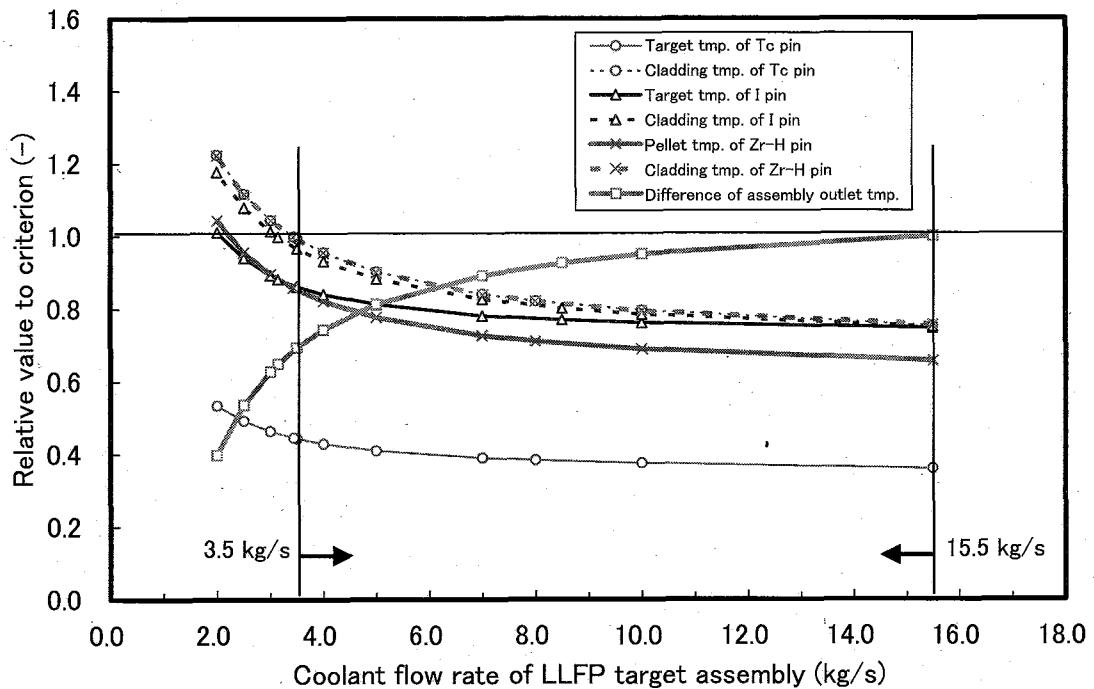


Fig. 3-12 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

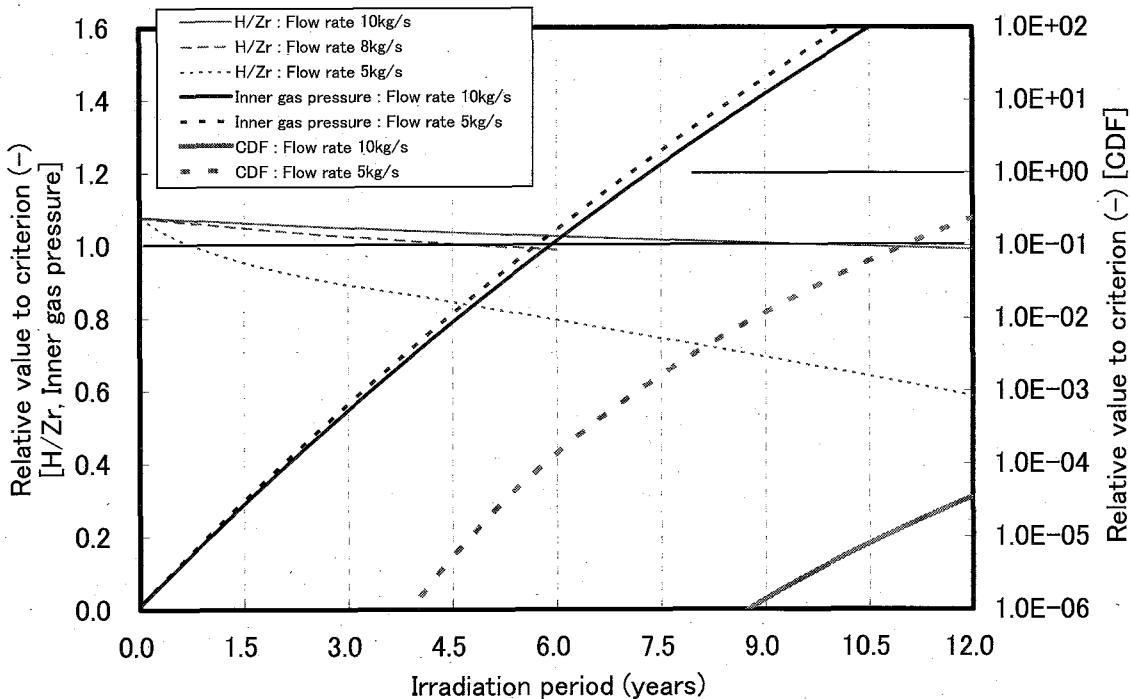
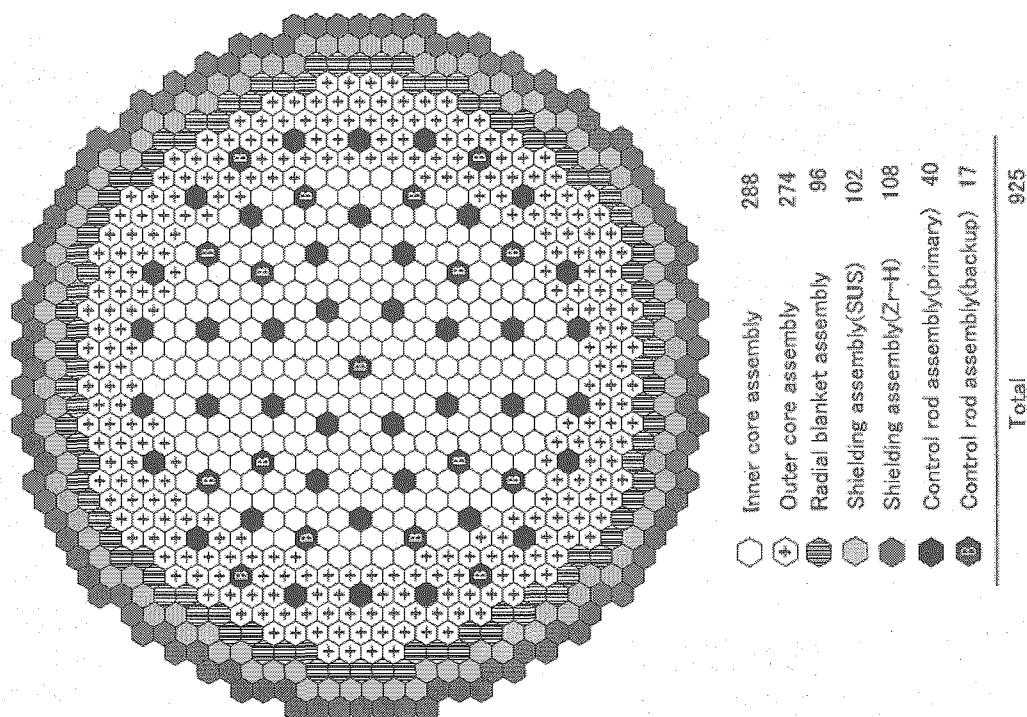


Fig. 3-13 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (compact type))

	Items	Specifications characteristics
Core Specifications	Core power (MWt/MWe)	3570/1500
	Core outlet/inlet temperature (°C)	550/395
	Cycle period (month)	26.3
	Batch number (core/radial blanket)	4/4
	Core column length (cm)	100
	Axial blanket length (cm) (upper/lower)	20/20
	Core equivalent diameter (cm)	538
	Shielding circumscription diameter (cm)	677
	Fuel type	MOX (pellet)
	Smear density (%TD)	82
Fuel Specifications	Pin diameter (mm)	10.4
	Cladding thickness (mm)	0.71
	Driver assembly type (-)	Advanced inner duct type
	Gas plenum length (cm) (upper/lower)	10/110
	Structure material (cladding/wrapper tube)	ODS/PNC-FMS
	Assembly pitch (cm)	20.60
	Number of pins per an assembly	255
	Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	18.3/20.9
	Burn-up reactivity (%Δk/kk*)	2.3
	Nuclear Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*)	147/90
Characteristics	Breeding ratio (-)	1.10
	Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer)	398/396
	Peak fast neutron fluence ( $E>0.1$ MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	5.0×10 <sup>23</sup>
	Total	925

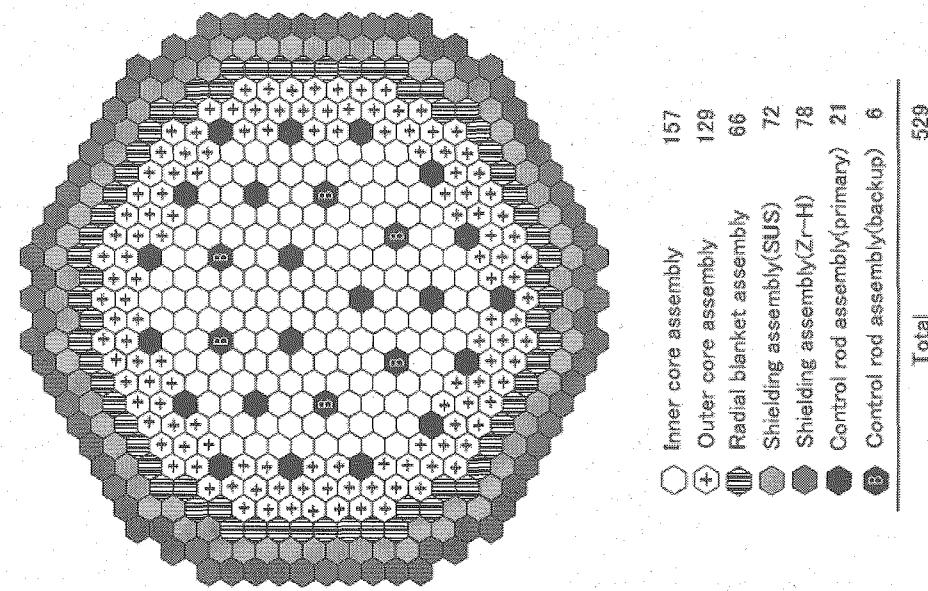
\* Average burn-up including blanket

Fig. 4.1-1 Configuration, specifications and characteristics of Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type)  
(reference core)



	Items	Specifications characteristics
Core Specifications	Core power (MWt/MWe)	1785/750
	Core outlet/inlet temperature (°C)	550/395
	Cycle period (month)	27.4
	Batch number (core/radial blanket)	4/4
	Core column length (cm)	100
	Axial blanket length (cm) (upper/lower)	20/20
	Core equivalent diameter (cm)	383
	Shielding circumscripted diameter (cm)	522
Fuel Specifications	Fuel type	MOX (pellet)
	Smear density (%TD)	82
	Pin diameter (mm)	10.4
	Cladding thickness (mm)	0.71
	Driver assembly type (-)	10/99
	Gas plenum length (cm) (upper/lower)	Advanced inner duct type
Structure material (cladding/wrapper tube)	Assembly pitch (cm)	ODS/PNC-FMS
	Number of pins per an assembly	255
Nuclear characteristics	Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	18.8/23.7
	Burn-up reactivity (%Δk/kk)	2.8
	Average discharge burn-up (GWD/t) (core/total)*	150/86
	Breeding ratio (-)	1.10
	Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer)	409/402
	Peak fast neutron fluence ( $E > 0.1$ MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	5.4 × 10 <sup>28</sup>

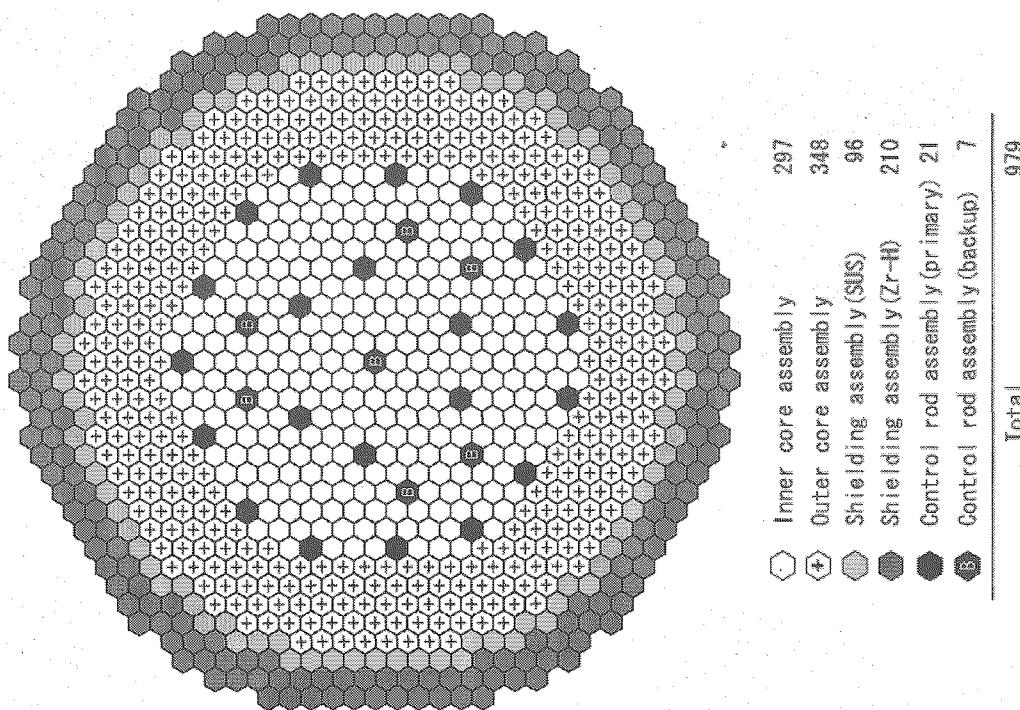
\* Average burn-up including blanket  
(reference core)



	Items	Specifications characteristics
Core Specifica tions	Core power (MWt/MWe)	3570/1500
	Core outlet/inlet temperature (°C)	550/395
	Cycle period (month)	21.5
	Batch number (core/radial blanket)	5/-
	Core column length (cm)	95
	Axial blanket length (cm) (upper/lower)	0/0
	Core equivalent diameter (cm)	470
	Shielding circumscription diameter (cm)	588
Fuel Specifica tions	Fuel type	U-Pu-Zr
	Smear density (%TD) (inner/outer core)	70/75
	Zr content (wt.%) (inner/outer core)	10/6
	Cladding thickness (mm)	7.2
	Cladding thickness (mm)	0.42
	Gas plenum length (cm) (upper/lower)	172/0
	Structure material (cladding/wrapper tube)	ODS/PNC-FMS
	Assembly pitch (cm)	17.24
	Number of pins per an assembly	331
Nuclear characte ristics	Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	12.4/12.4
	Burn-up reactivity (%Δk/kk')	0.55
	Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*)	99.2/99.2
	Breeding ratio (-)	1.03
	Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer)	265/280
	Peak fast neutron fluence ( $E > 0.1$ MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	$5.3 \times 10^{23}$
	Total	979

\* Average burn up including blanket

Fig. 4.1-3 Configuration, specifications and characteristics of Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type)  
(reference core)



	Items	Specifications characteristics
Core Specifications	Core power (MWt/MWe)	1980/750
	Core outlet/inlet temperature (°C)	445/285
	Cycle period (month)	18.0
	Batch number (core/radial blanket)	6/0
	Core column length (cm)	70
	Axial blanket length (cm) (upper/lower)	0/35
	Core equivalent diameter (cm)	443
	Shielding circumscriptioin diameter (cm)	535
	Fuel type	Mixed nitride (pellet)
	Smear density (%TD)	75
Fuel Specifications	Pin diameter (mm)	8.0
	Cladding thickness (mm)	0.545
	Gas plenum length (cm) (upper/lower)	10/60
	Structure material (cladding/wrapper tube)	ODS/PNC-FMS
	Assembly pitch (cm)	19.37
	Number of pins per an assembly	331
	Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	17.5/19.9
Nuclear characteristics	Burn-up reactivity (%Δk/kk*)	1.51
	Average discharge burn-up (GWd/t) (core/total*)	154/105
	Breeding ratio (-)	1.10
	Peak linear heat rating (W/cm) (inner/outer)	281/248
	Peak fast neutron fluence ( $E > 0.1$ MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	$6.4 \times 10^{23}$

\* Average burn-up including blanket

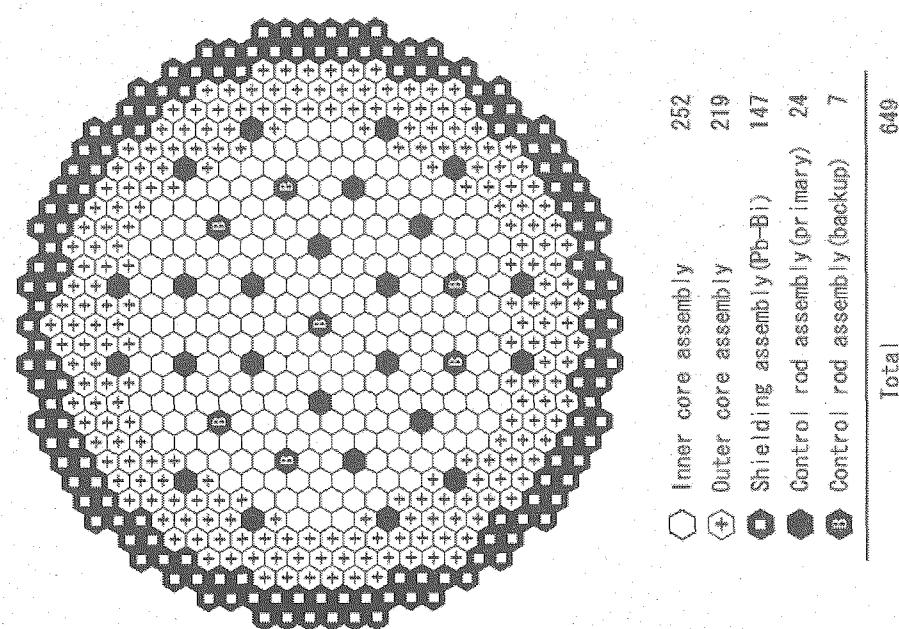
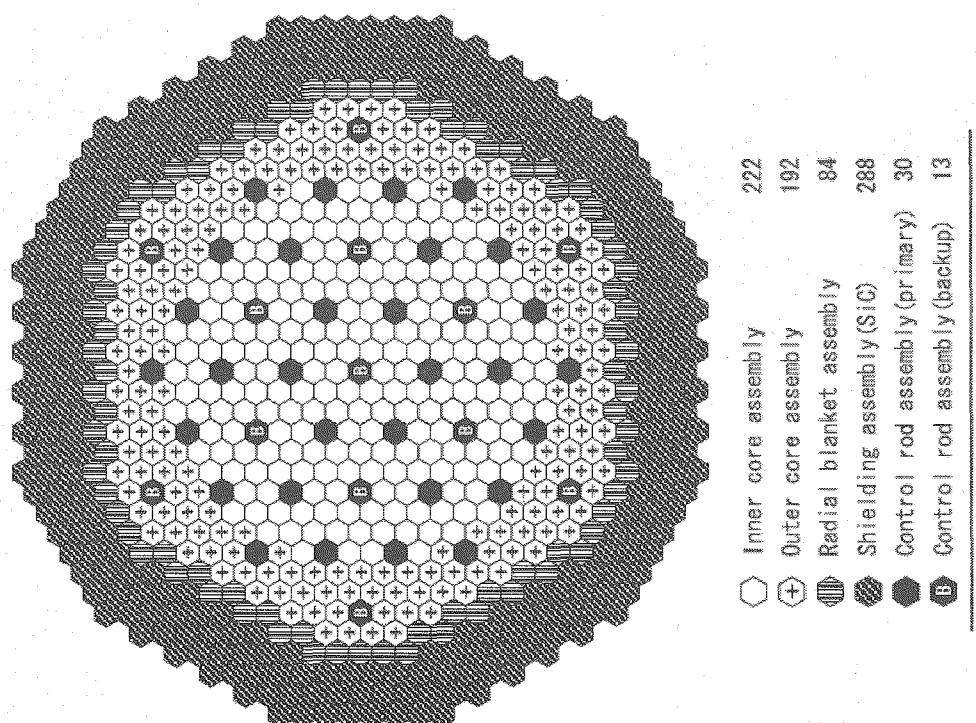


Fig. 4.1-4 Configuration, specifications and characteristics of Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type)  
(reference core)

	Items	Specifications characteristics
Core Specifications	Core power (MWt/MWe)	2400/1124
	Core outlet/inlet temperature (°C)	850/460
	Cycle period (month)	18.0
	Butch number (core/radial blanket)	6/6
	Core column length (cm)	100
	Axial blanket length (cm) (upper/lower)	25/25
	Core equivalent diameter (cm)	543
	Shielding circumscription diameter (cm)	760
	Assembly type (-)	Hexagonal block
	Fuel type (-)	Mixed nitride (coated particle)
Fuel Specifications	Structure material (coating layer/block)	TiN/SiC
	Density (%TD) (fuel kernel/coating layer/block)	95/50/100
	Fuel diameter (mm) (coated particle/kernel)	1.0/0.86
	Filling ratio of coated particle fuel (%)	50
	Cooling tube inner diameter (mm)	15.17
	Number of cooling tubes per assembly	61
	Assembly pitch (cm)	24.19
	Pu enrichment (wt.%) (inner/outer core)	22.2/24.0
	Burn-up reactivity (%Δk/kk')	1.4
	Nuclear characteristics	Average discharge burn-up (GWdt) (core/total*)
Control rod assembly	Shielding assembly (SiC)	121/69
	Breeding ratio (-)	1.11
	Peak power density (W/cm <sup>3</sup> ) (inner/outer) core	166/161
Control rod assembly	Peak fast neutron fluence (E>0.1 MeV) (n/cm <sup>2</sup> )	3.0×10 <sup>23</sup>
	Total	829

\* Average burn-up including blanket

Fig. 4.1-5 Configuration, specifications and characteristics of Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type)  
(reference core)



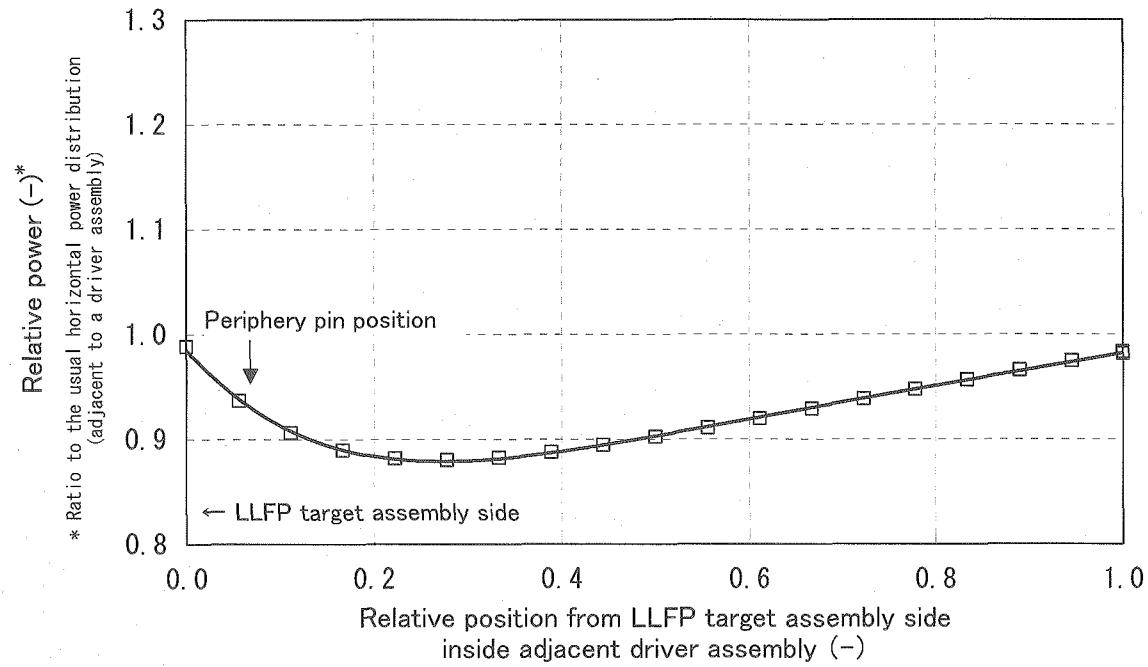


Fig. 4.3.1-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly  
Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type)

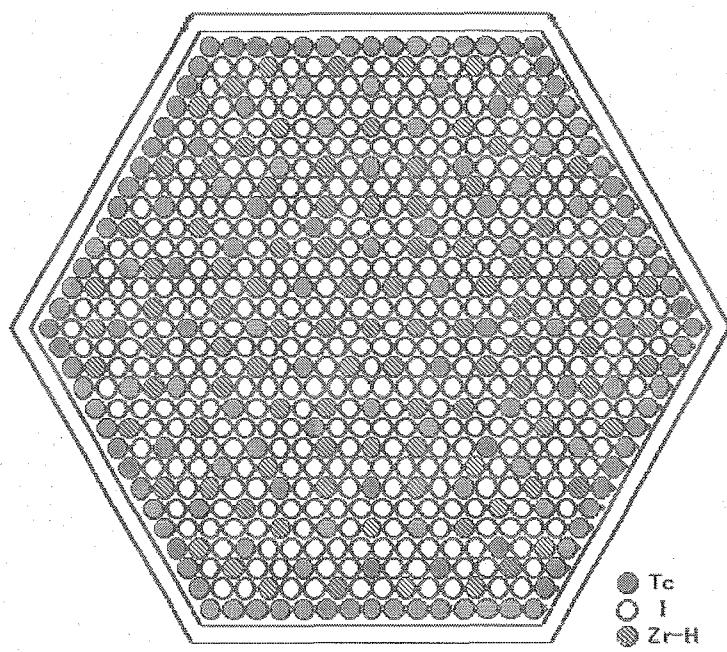
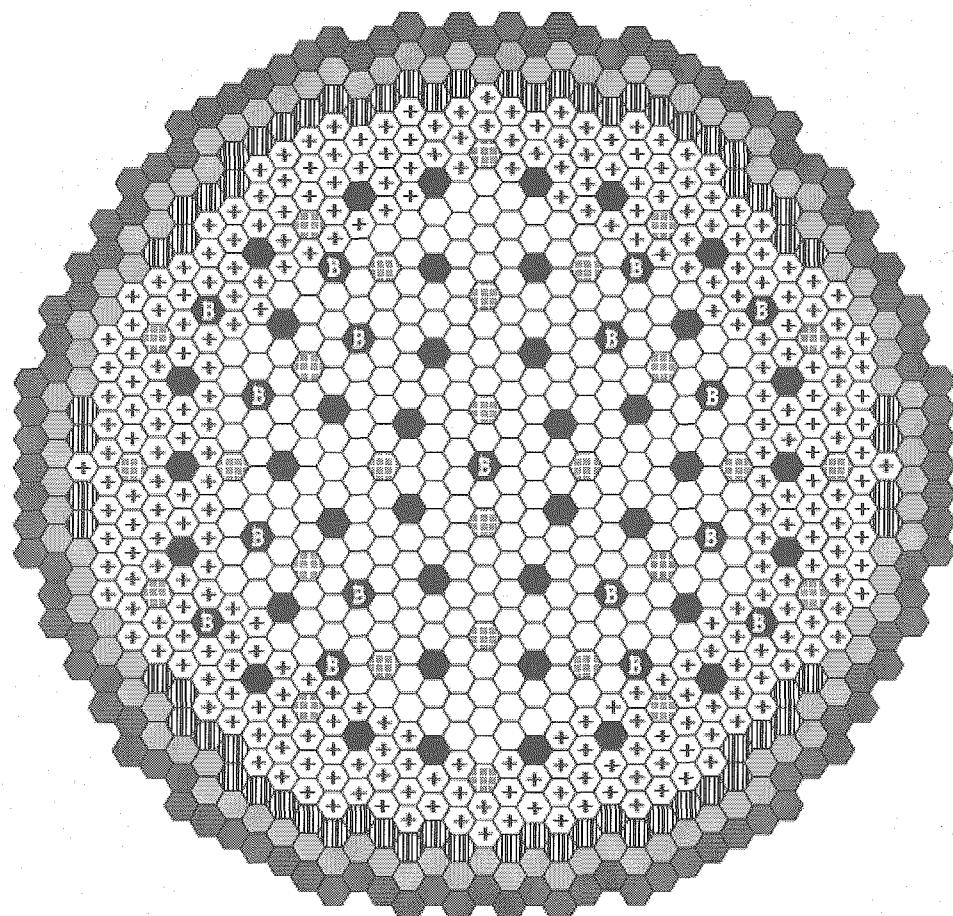


Fig. 4.3.1-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))



	Inner core assembly	272
	Outer core assembly	290
	LLFP target assembly	28
	Radial blanket assembly	68
	Shielding assembly(SUS)	102
	Shielding assembly(Zr-H)	108
	Control rod assembly(primary)	40
	Control rod assembly(backup)	17
<hr/>		
Total		925

Fig. 4.3.1-3 Configuration of LLFP transmutation core (in core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

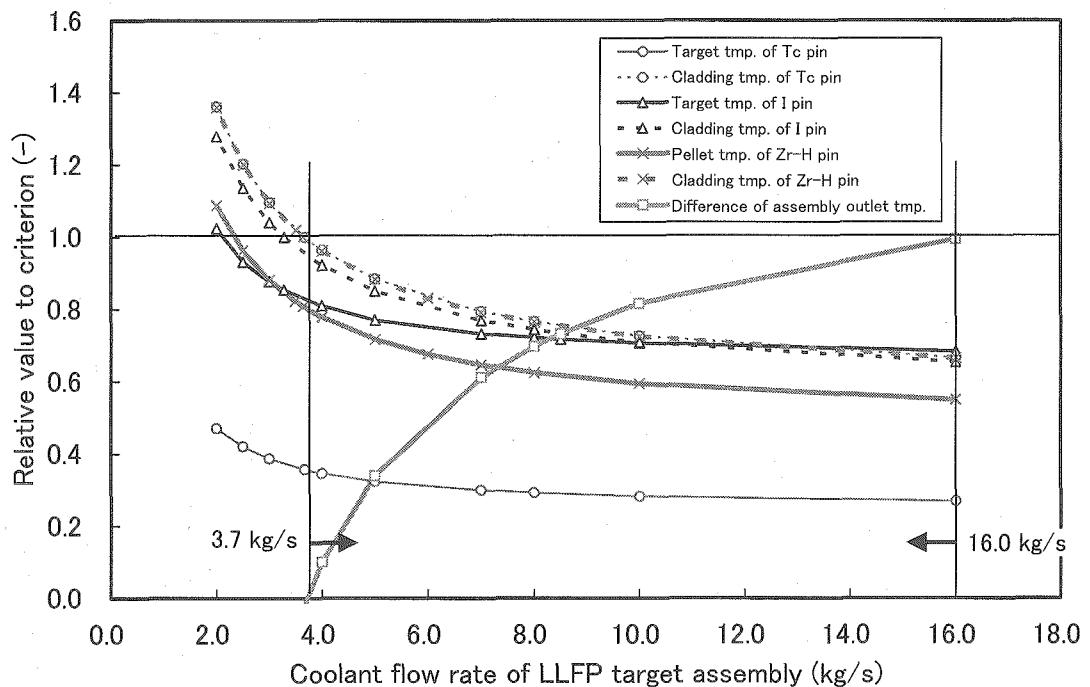


Fig. 4.3.1-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

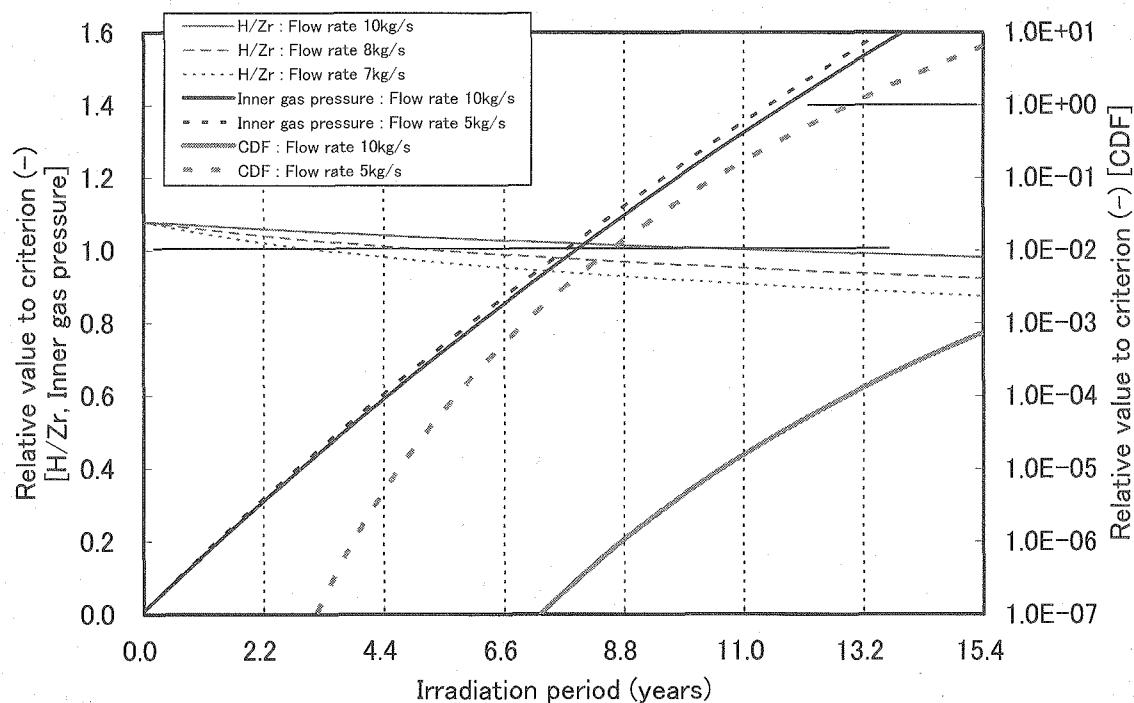


Fig. 4.3.1-5 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

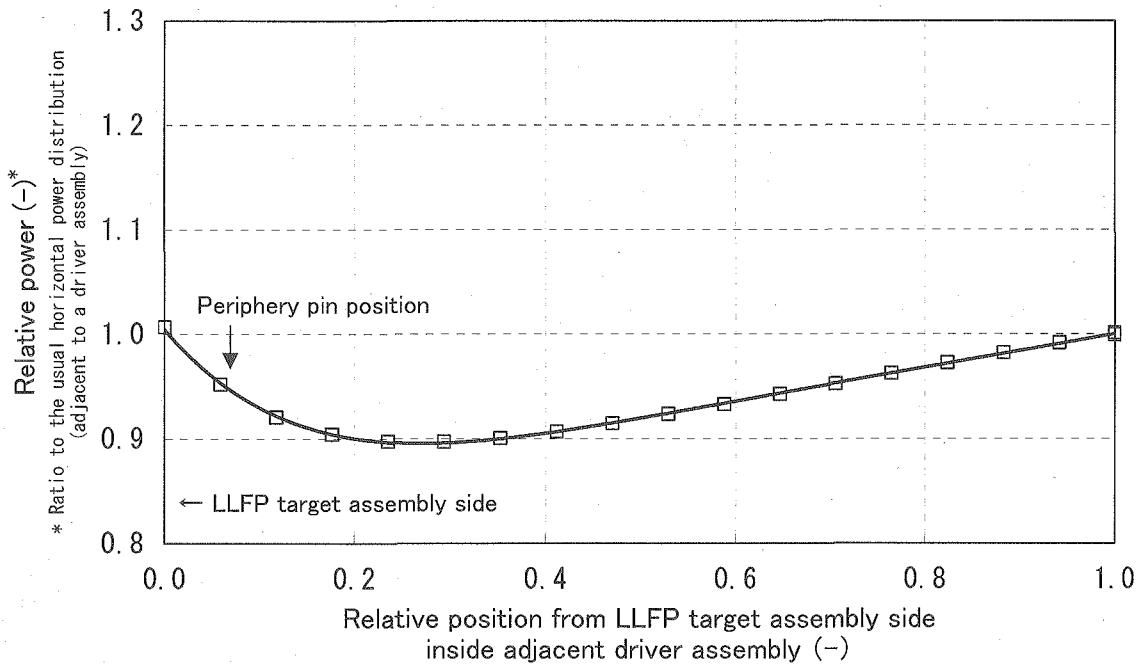


Fig. 4.3.2-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly  
(Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

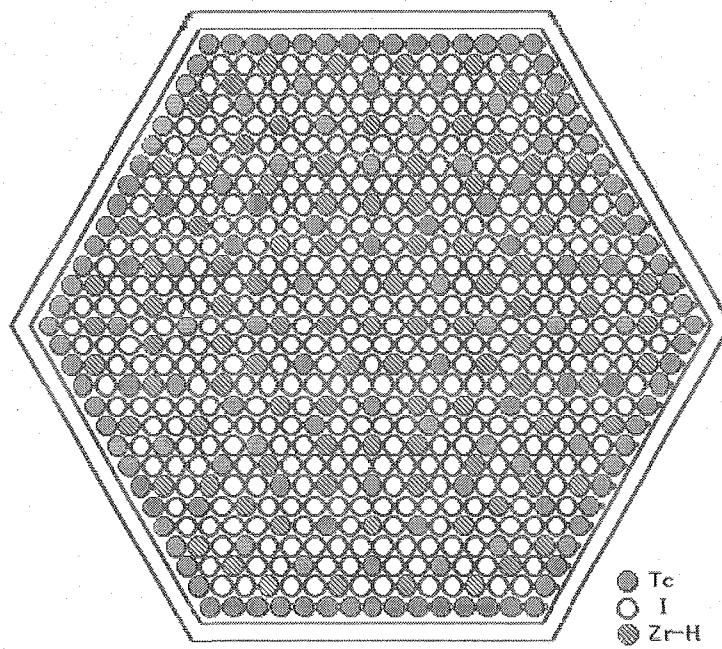
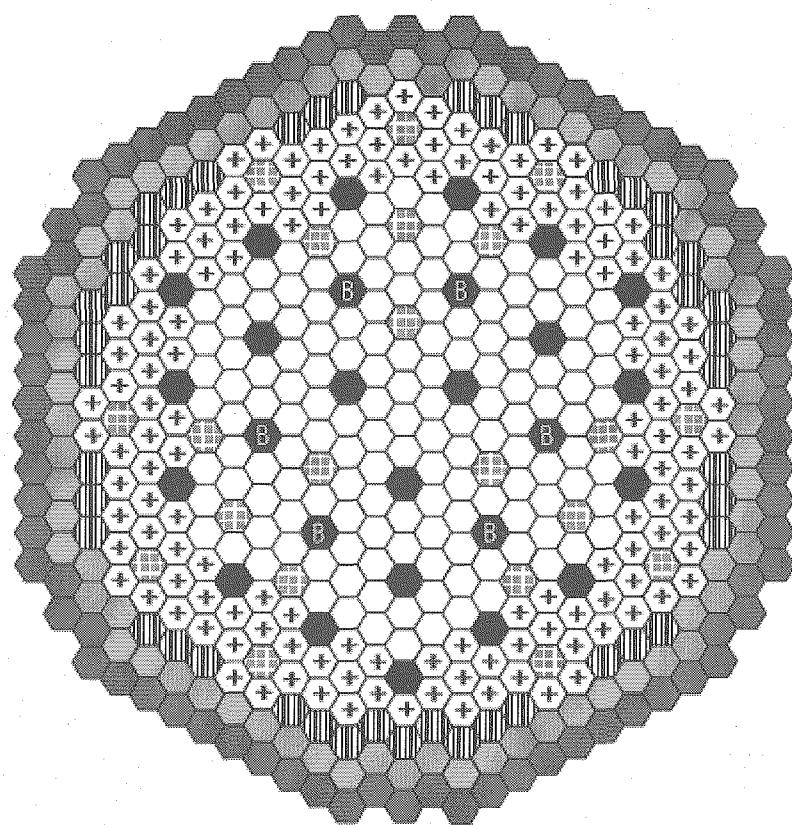


Fig. 4.3.2-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))



	Inner core assembly	145
	Outer core assembly	141
	Radial blanket assembly	45
	Shielding assembly(SUS)	72
	Shielding assembly(Zr-H)	78
	Control rod assembly(primary)	21
	Control rod assembly(backup)	6
	LLFP target assembly	21
<b>Total</b>		<b>529</b>

Fig. 4.3.2-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

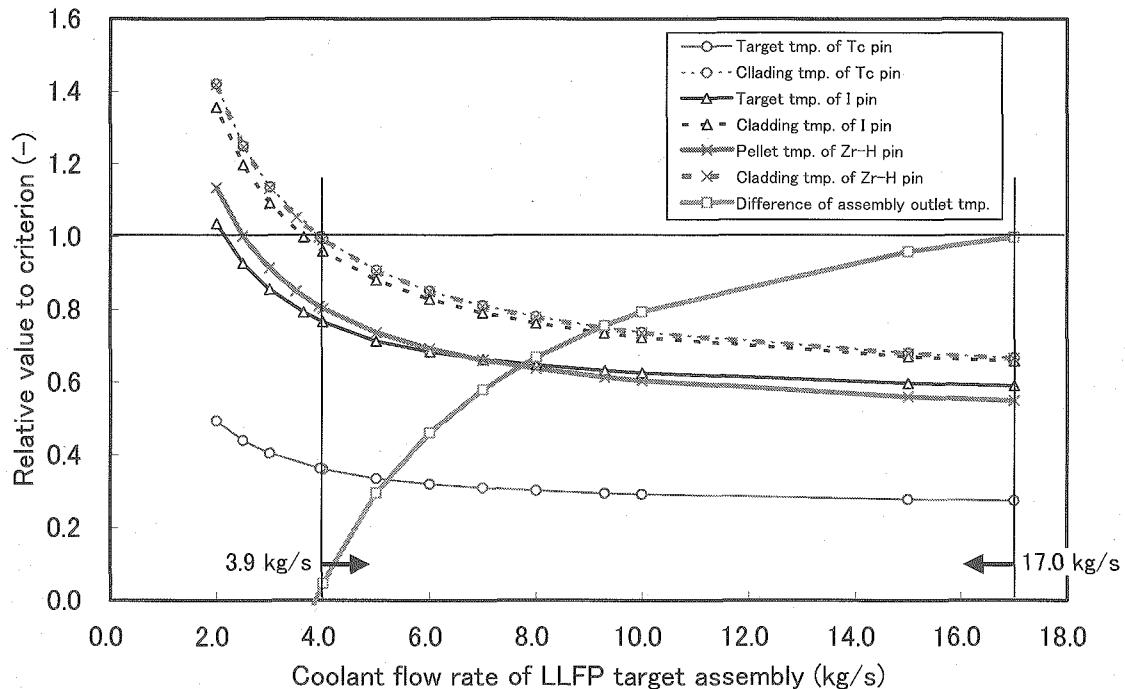


Fig. 4.3.2-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

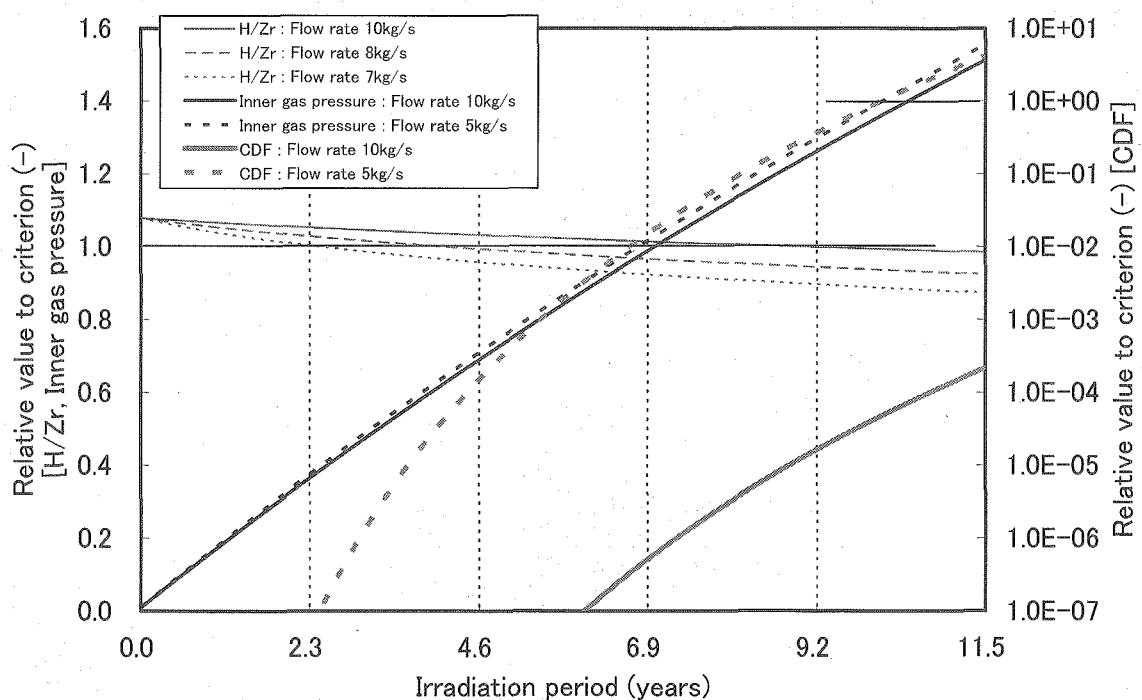


Fig. 4.3.2-5 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled medium-scale MOX fuel core (high inner conversion type))

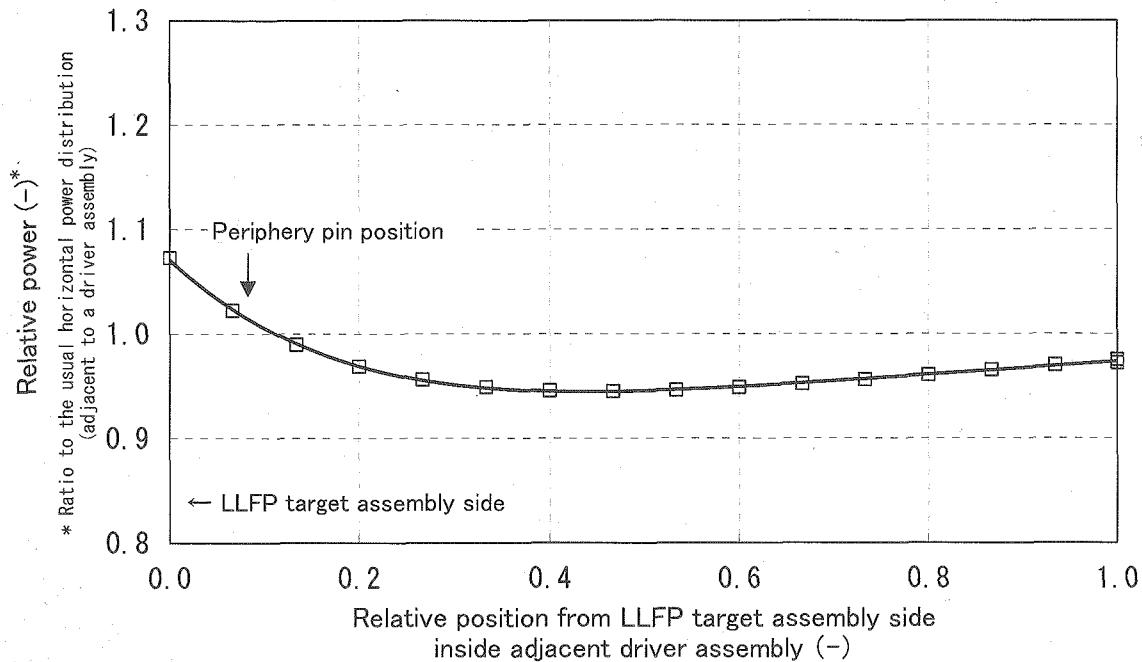


Fig. 4.3.3-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly  
(Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

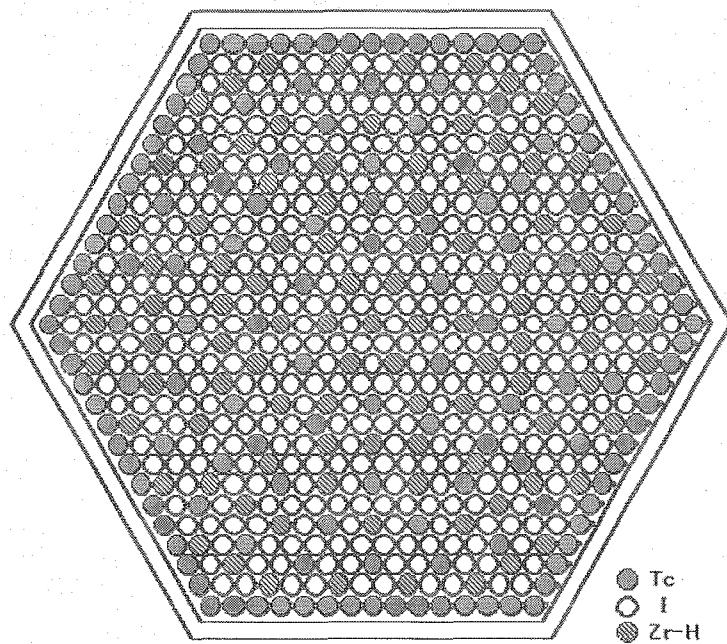
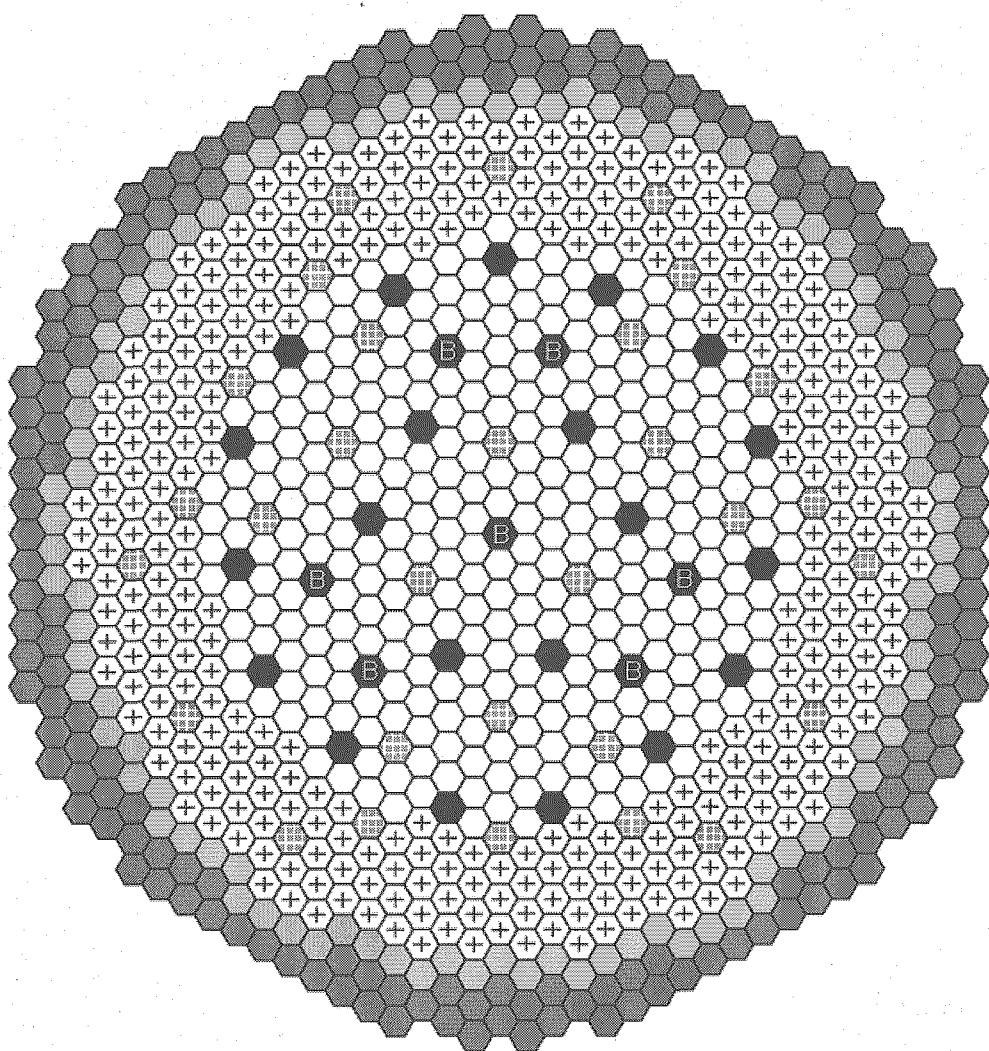


Fig. 4.3.3-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))



○ Inner core assembly	312
○ + Outer core assembly	333
○ ◻ Shielding assembly (SUS)	102
○ ◻ Shielding assembly (Zr-H)	174
○ ◼ Control rod assembly (primary)	21
○ ◻ Control rod assembly (backup)	7
○ ◻ LLFP target assembly	30
Total	979

Fig. 4.3.3-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core)  
(Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

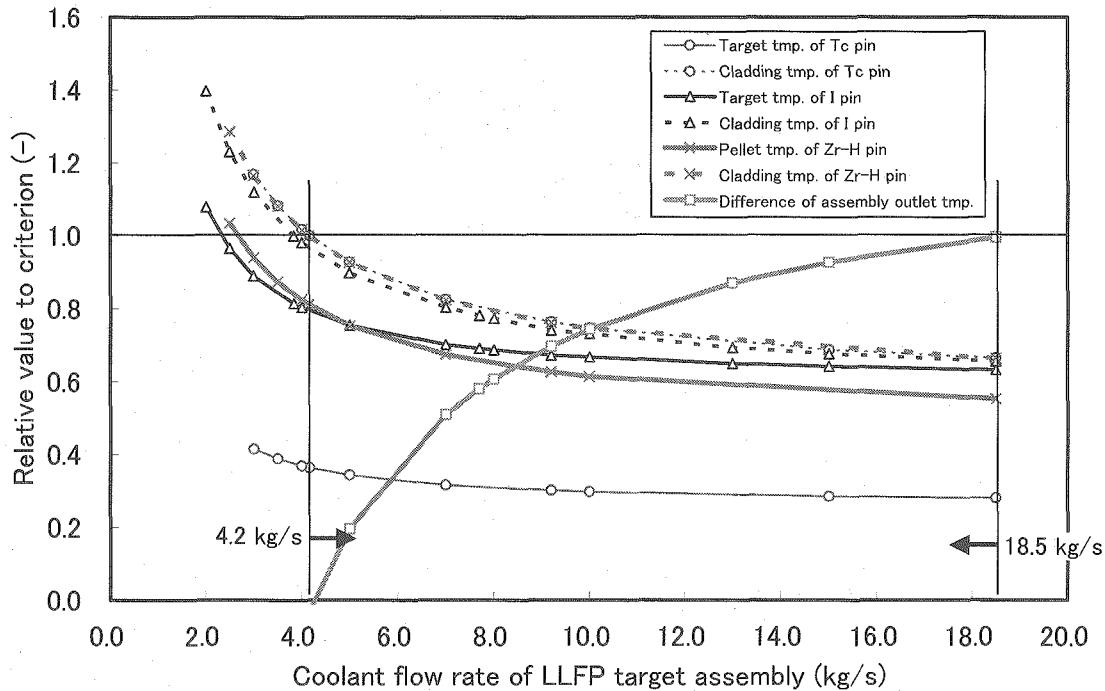


Fig. 4.3.3-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

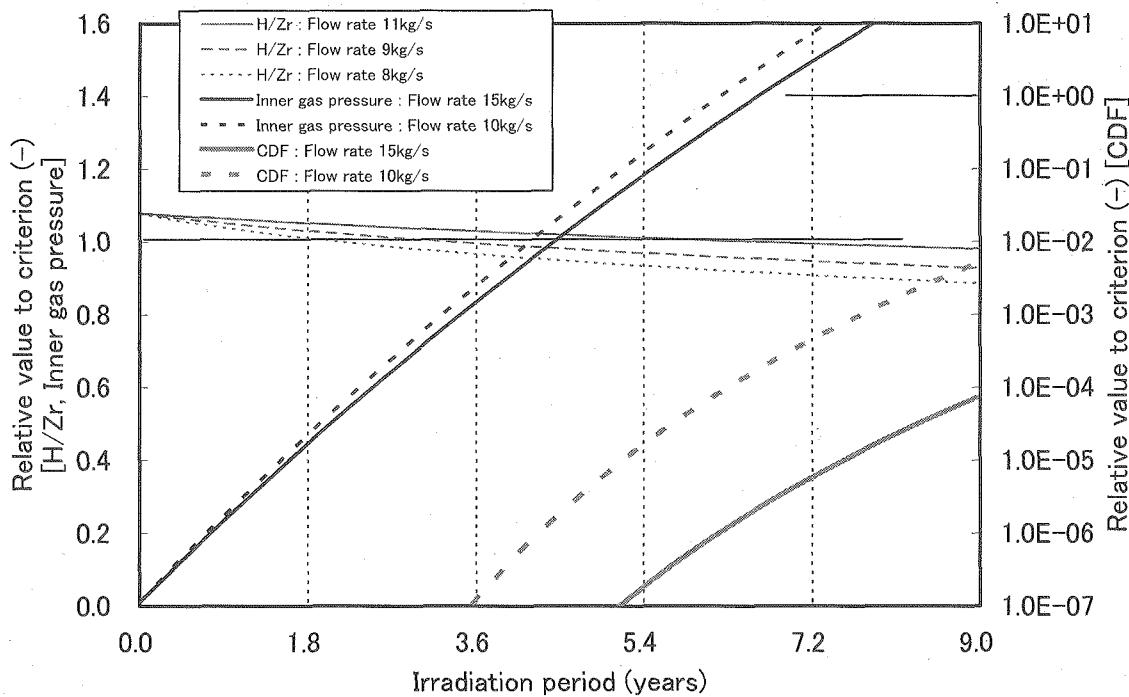


Fig. 4.3.3-5 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Sodium-cooled large-scale metal fuel core (high outlet temperature type))

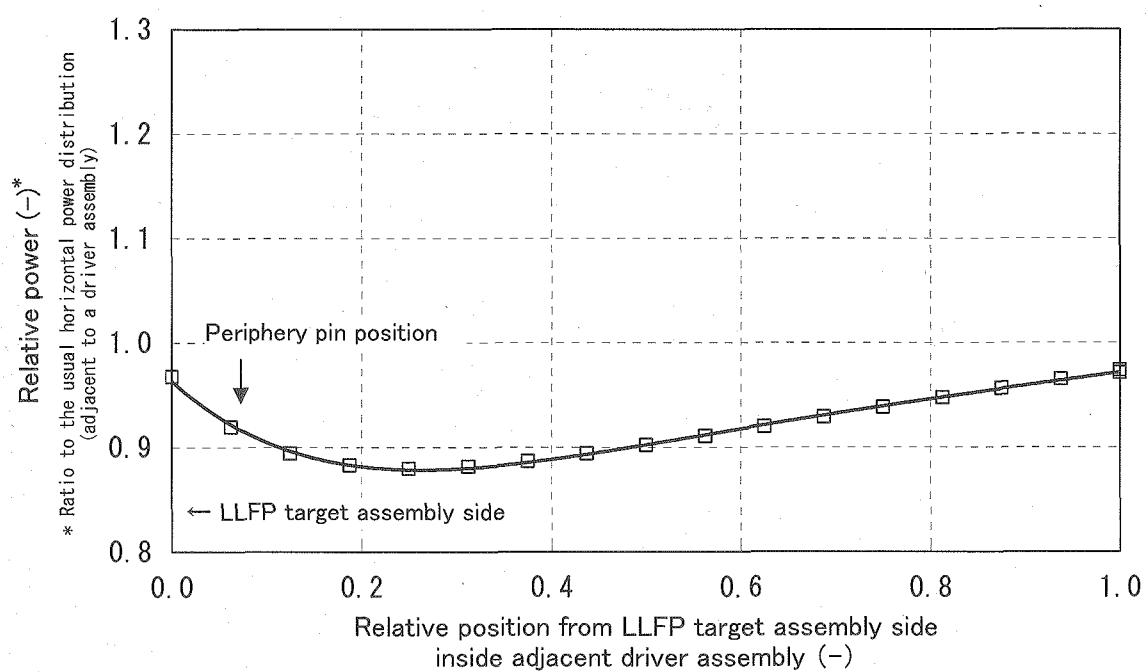


Fig. 4.3.4-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly  
(Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

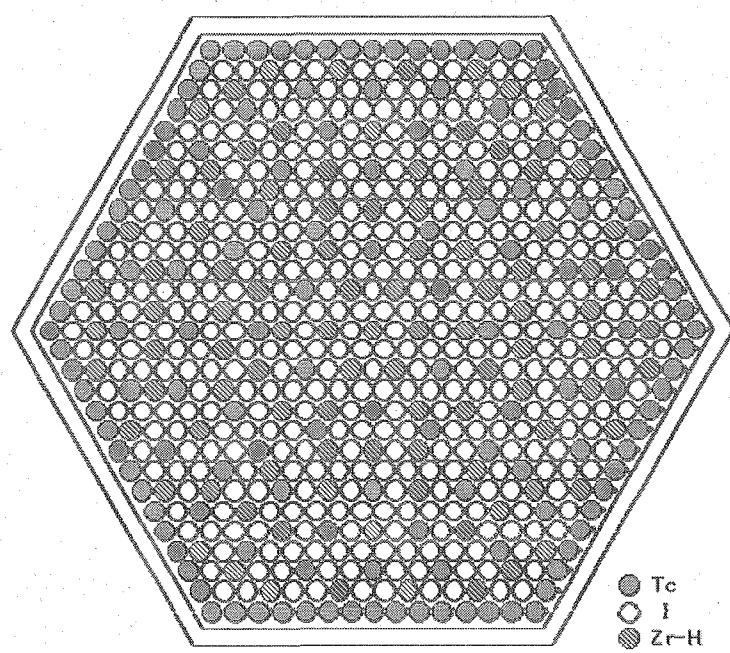
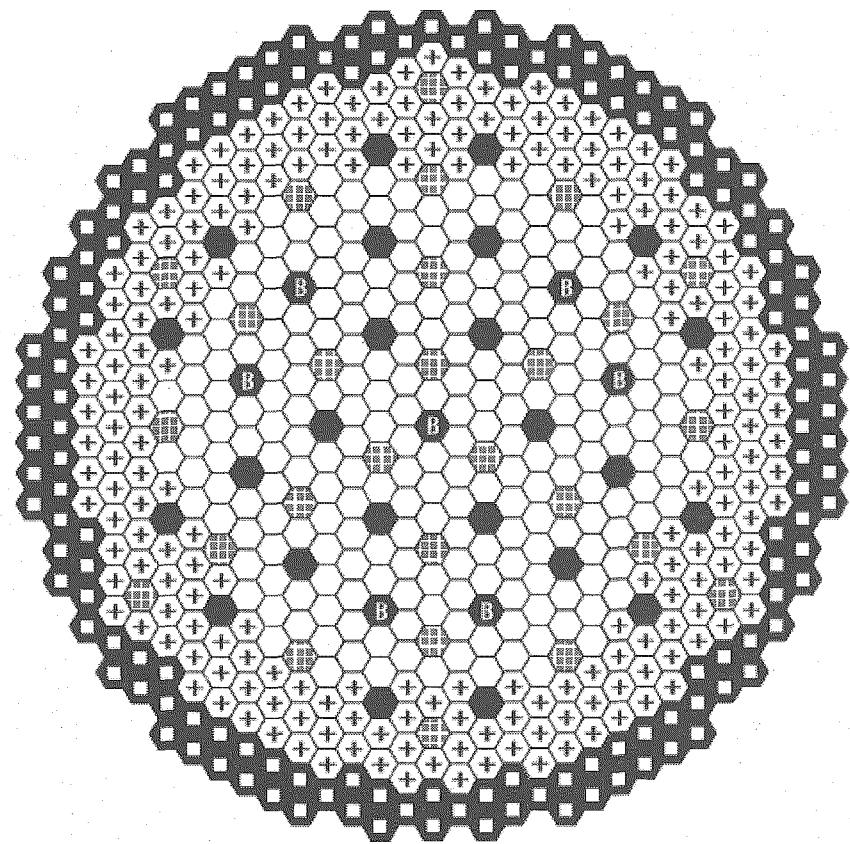


Fig. 4.3.4-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core)  
(Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))



○ Inner core assembly	231
+ Outer core assembly	213
■ Shielding assembly (Pb-Bi)	147
● Control rod assembly (primary)	24
● Control rod assembly (backup)	7
◆ LLFP target assembly	27
Total	649

Fig. 4.3.4-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core)  
(Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

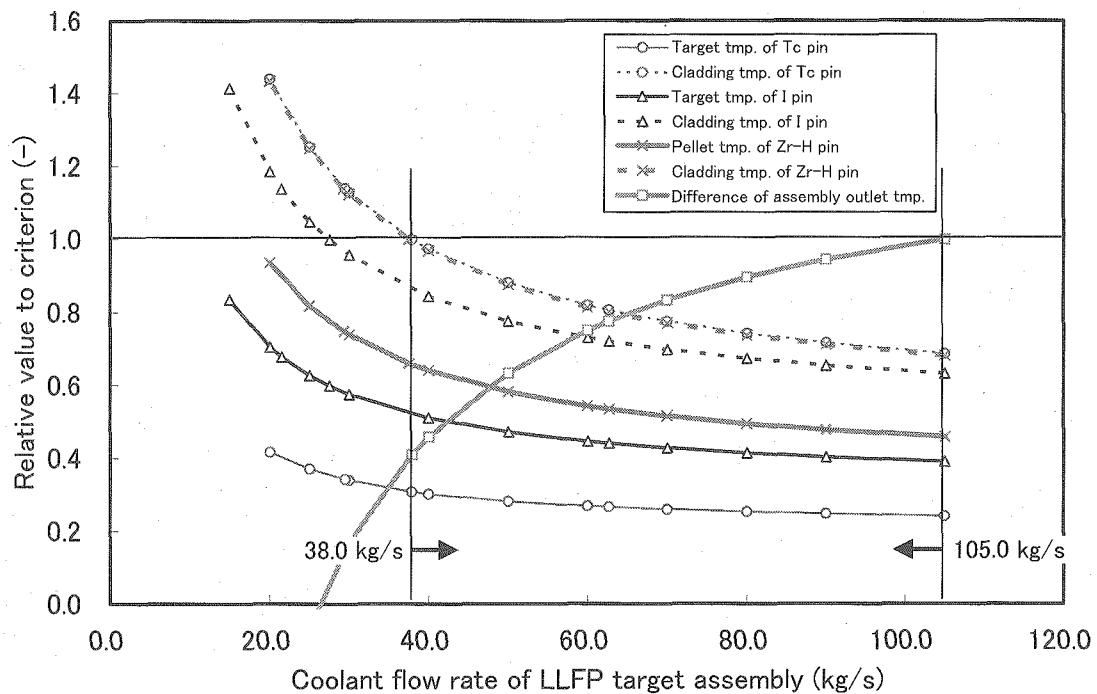


Fig. 4.3.4-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core) (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

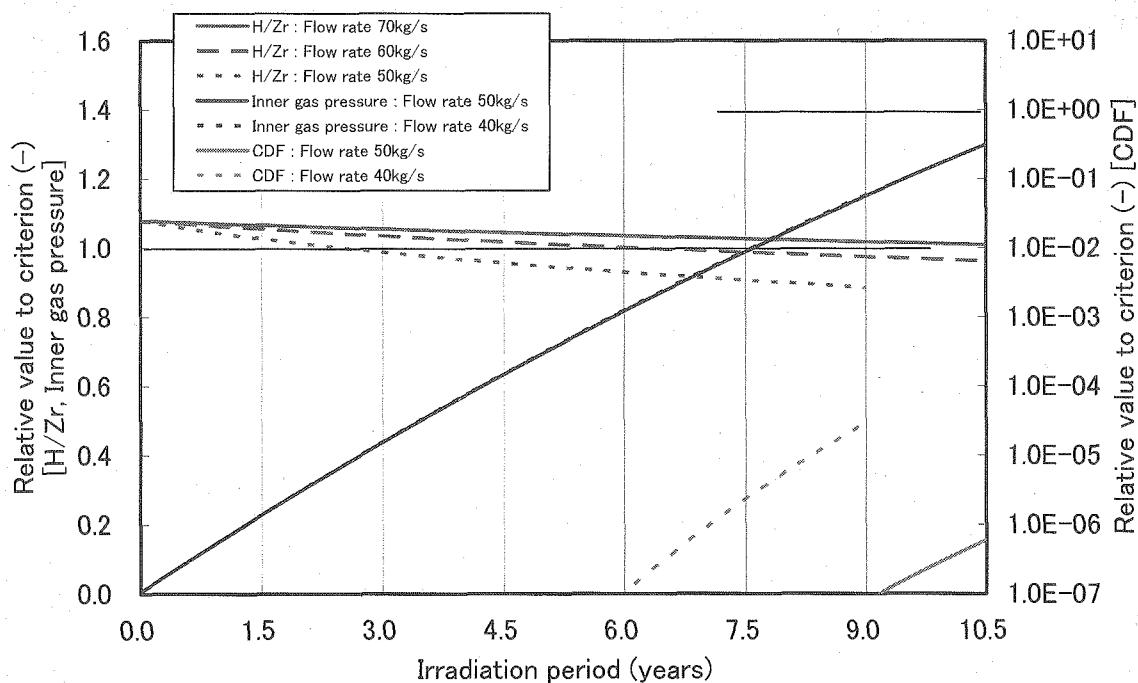


Fig. 4.3.4-5 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core) (Lead-Bismuth-cooled medium-scale core (forced circulation type))

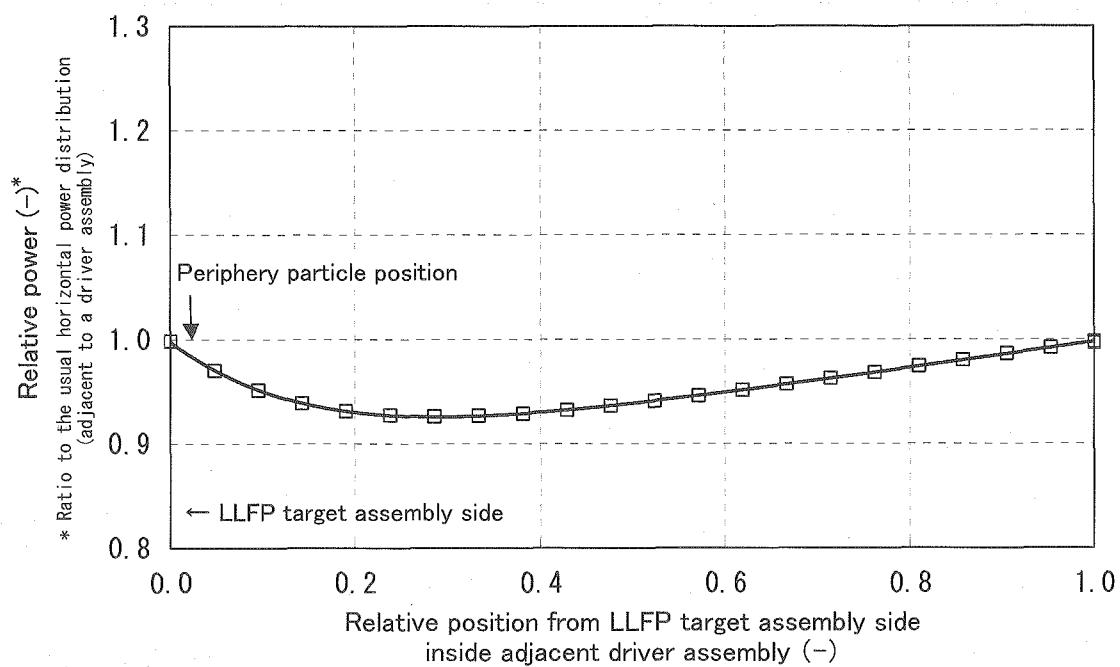


Fig. 4.3.5-1 Horizontal power distribution inside adjacent driver assembly  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

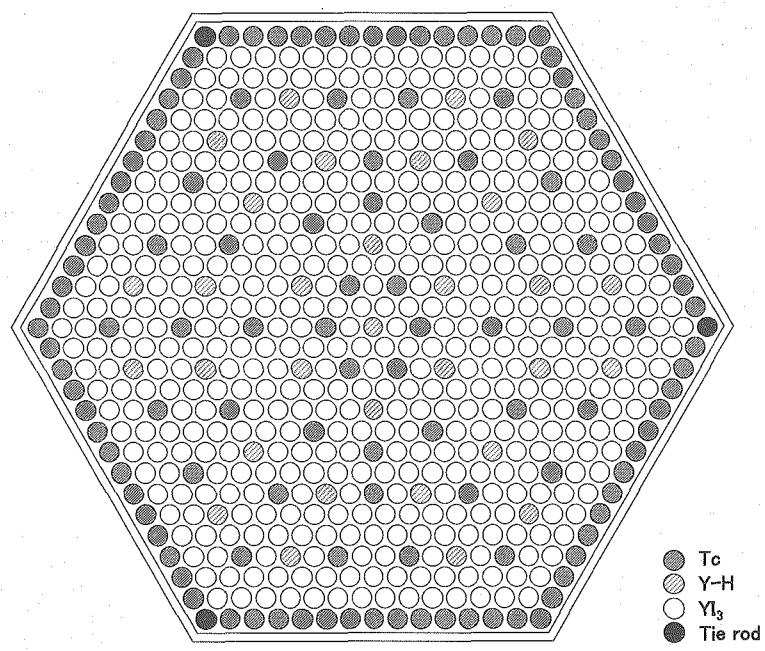
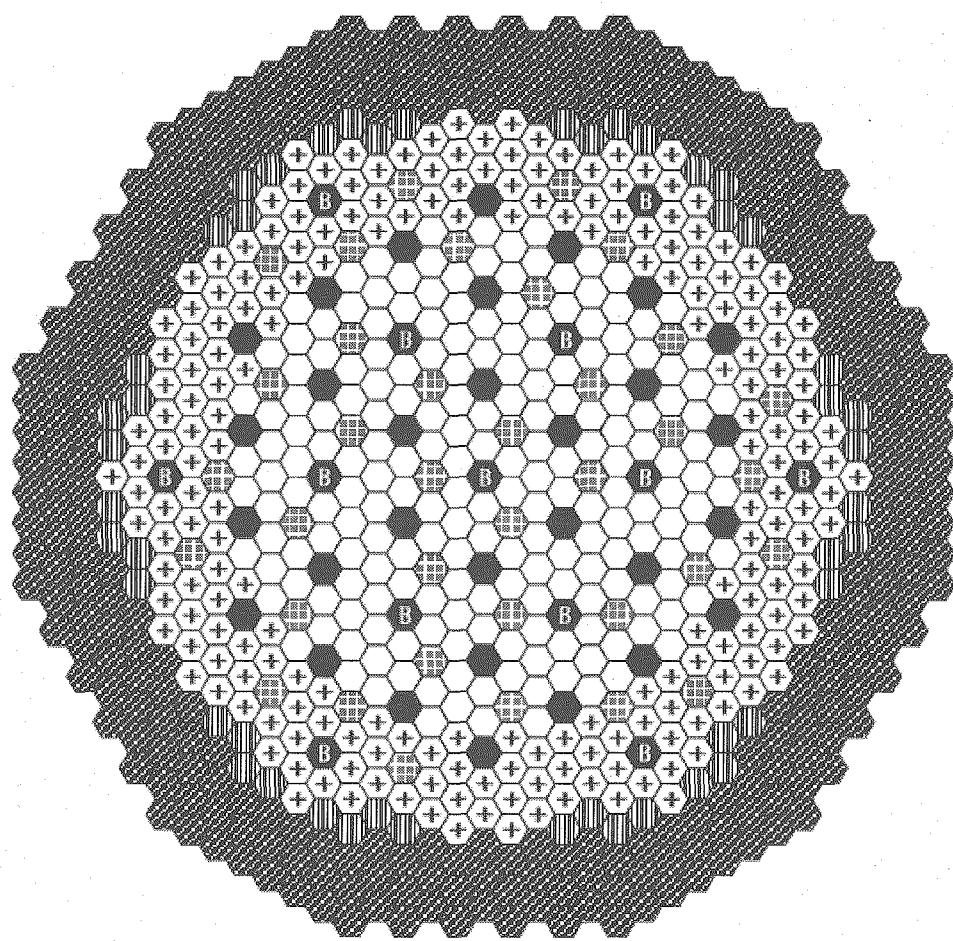


Fig. 4.3.5-2 Configuration of LLFP target assembly (in-core loading type core)  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))



○ Inner core assembly	201
⊕ Outer core assembly	213
▨ Radial blanket assembly	48
▨ LLFP target assembly	36
◆ Shielding assembly(SiC)	288
▨ Control rod assembly(primary)	30
▨ Control rod assembly(backup)	13
Total	829

Fig. 4.3.5-3 Configuration of LLFP transmutation core (in-core loading type core)  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

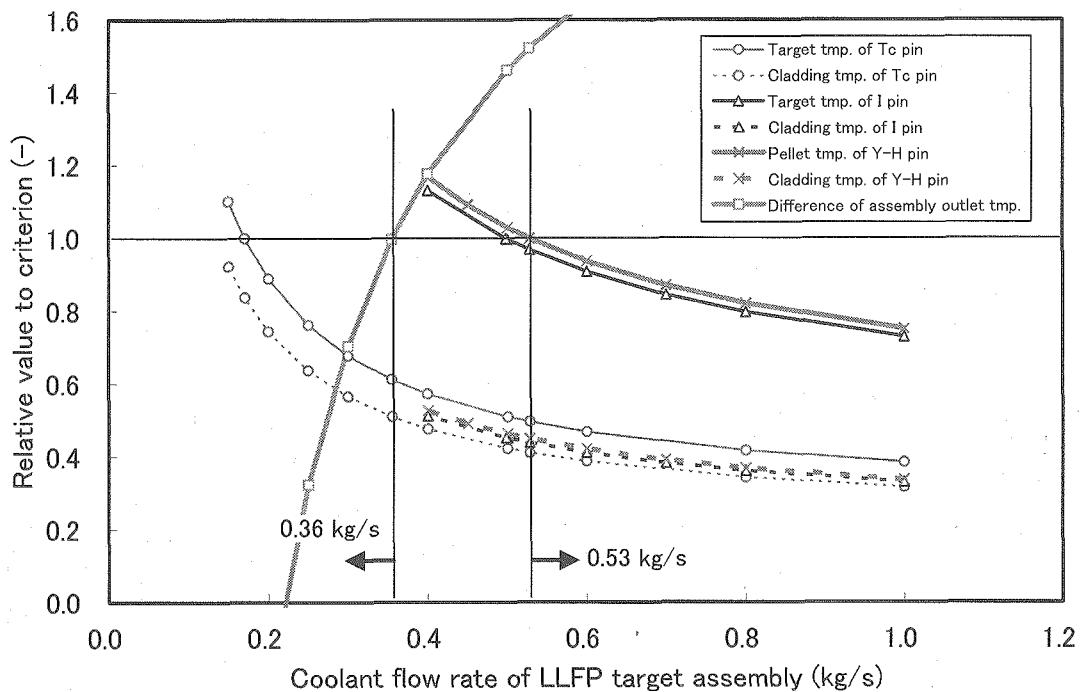


Fig. 4.3.5-4 Relationships between assembly coolant flow rate and criteria of LLFP target pin, moderator pin and assembly (in-core loading type core)  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

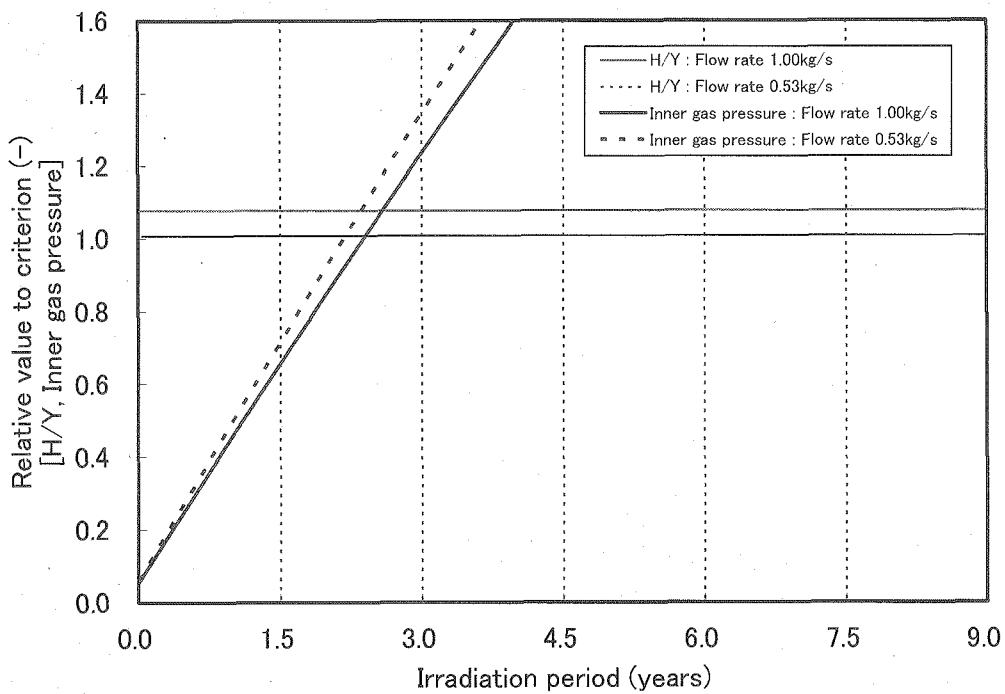


Fig. 4.3.5-5 Relationships between irradiation period and criteria for hydrogen ratio of Zr-H, inner gas pressure and CDF (in-core loading type core)  
(Helium gas-cooled large-scale core (hexagonal block type))

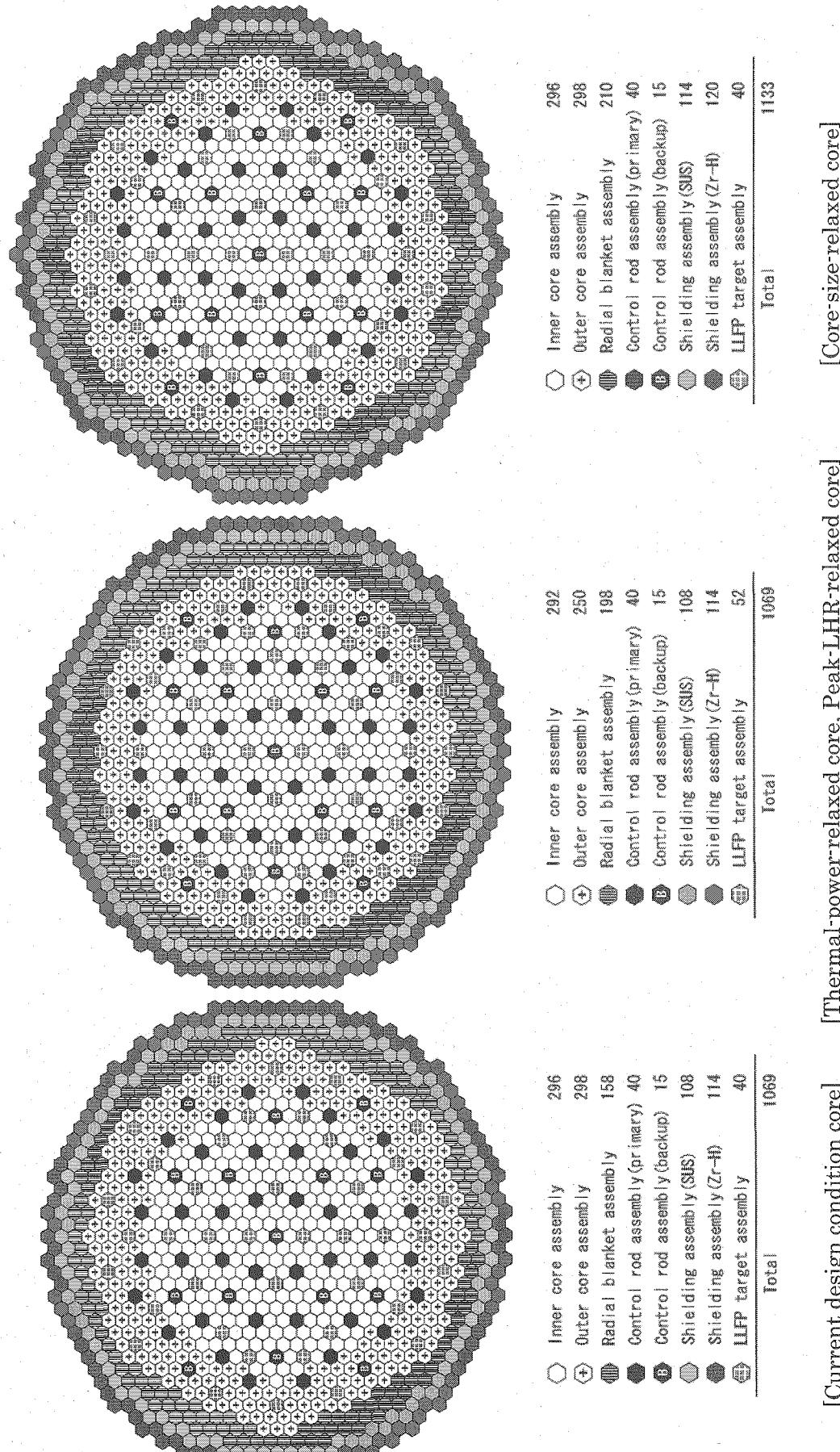


Fig. 5-1 Configurations of SF sensitivity evaluation cores

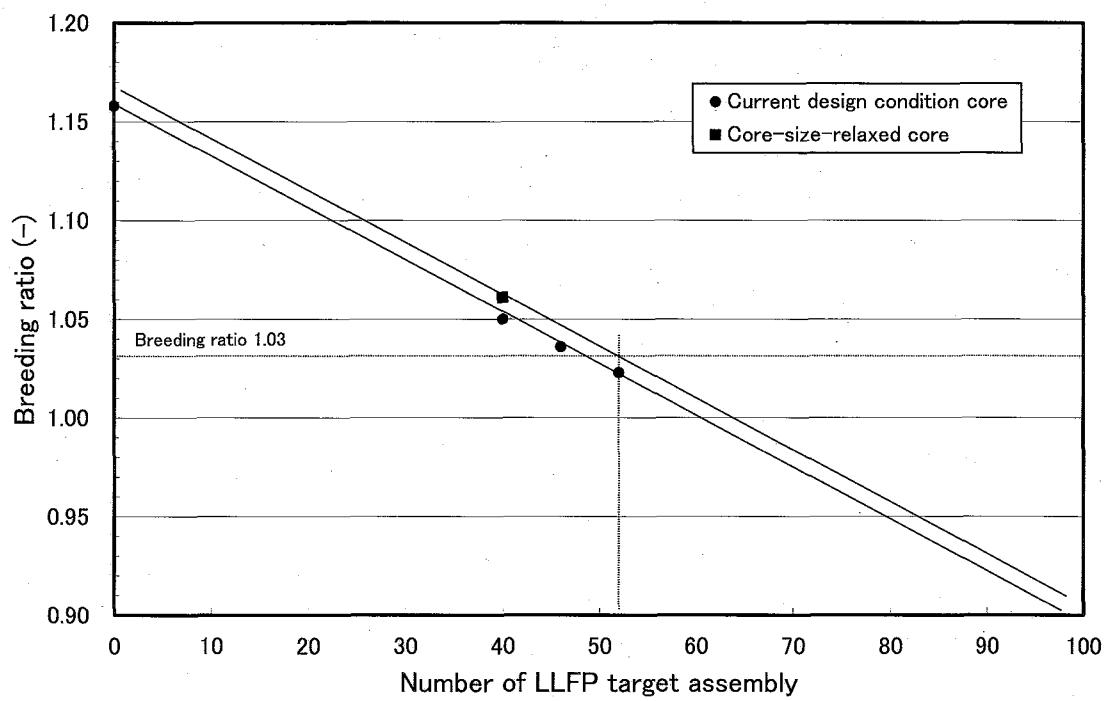


Fig. 5-2 Relationships between the number of LLFP transmutation assembly and breeding ratio in the core-size-relaxed core

## 付録1 2次元RZモデル簡易評価手法の手順

LLFP集合体を炉心内に装荷した炉心(炉心内装荷炉心)の核変換特性、核・熱特性の評価を2次元計算に基づき簡易的に行うため、今回、暫定的に2次元RZモデル簡易評価手法を設定した。以下に、その手法の手順を説明する。

## ① LLFP核変換率と隣接する燃料集合体のサーマルスパイク\*評価用データの算出

第1ステップとして、基準炉心(BOEC)において、炉中心(Na フォロワ等)をLLFP集合体に置換した場合の計算から、

- ・核変換率( $x_0$ )
- ・径方向燃料ピン出力分布( $P_{LLFP}(r)$ )

を求める。

第2ステップとして、基準炉心(BOEC)において、炉中心(Na フォロワ等)を燃料集合体1体に置換した場合の計算を行い、

- ・径方向燃料ピン出力分布( $P_{fuel}(r)$ )

を求める。

第3ステップとして、基準炉心(BOEC)の計算から、

- ・RZ体系のリング毎の平均全中性子束( $\phi_i$ )

を求める。

## ② 炉心各位置での核変換率

①で得られた、核変換率 $x_0$ 及び基準炉心での炉中心位置(Na フォロワ等)に隣接する燃料集合体位置相当のリング1の全中性子束 $\phi_1$ との比を、基準炉心のRZ体系におけるリング毎の平均全中性子束 $\phi_i$ に掛けることで、炉心各位置の核変換率を求める。

$$x_i = \frac{x_0}{\phi_1} \phi_i$$

## ③ LLFP集合体の装荷体数の算出

②の結果を用いて、サポートファクタが1.0若しくはそれ以上となるようRZ体系のリング毎のLLFP集合体装荷体数を設定する。

## ④ 炉心特性の計算

LLFP核変換炉心の評価のため、③の装荷パターンでRZ体系のリング毎にLLFP集合体と燃料集合体を均質化させた形でモデル化する。この計算で、Pu富化度を調整の上、増殖比等の核特性を求める。今回は、特に、サーマルスパイクの影響を評価するため、

- ・径方向燃料ピン出力分布( $P(r)$ )

を求める。

\* 減速された中性子との反応による局所的な出力ピーク。

## ⑤ 出力分布（最大線出力及び最大ピン出力）の算出

④で得られた径方向燃料ピン出力分布に対して、LLFP 集合体に隣接した場合のサーマルスパイクの影響を、①で得られた結果を用いて補正して評価する。

### a. 出力変動の要因

- ・局所効果

LLFP に隣接するピンが局所的にピークを生じる効果

- ・全体分布の効果

LLFP に隣接する集合体出力が下がり、離れた位置の出力が上がる効果

局所効果だけを考慮する場合、保守的であるが過大となる。このため、2 つの効果を考慮した補正因子を求める。

### b. 補正因子の算出 (Fig. Appendix 1-1 参照)

基本的には、燃料集合体を LLFP 集合体に置換した場合の変動を求めれば良いので、①で得られた炉中心位置に LLFP 集合体を置いた場合と燃料集合体をおいた場合の出力分布の比が補正因子となる。

$$f(r) = \frac{P_{LLFP}(r)}{P_{fuel}(r)}$$

しかし、炉中心 1 体のみの LLFP 集合体装荷モデルでは、LLFP から離れた位置の燃料はわずかな出力上昇であるのに対し、隣接集合体の集合体出力は大きく下がり、隣接集合体のサーマルスパイクはマイナスとなり、出力変動の全体分布の効果を過大に評価する。

実際には、サポートファクタ 1.0 を満足させるための LLFP 集合体数  $N_{LLFP}$  は数十体であることを考慮するため、LLFP 集合体 1 体当たりの燃料集合体数（全燃料集合体数  $N_{fuel} / N_{LLFP}$ ）分の炉中心領域を切り出し、その範囲で再規格化したものを補正因子とする。

$$f'(r) = \frac{f(r)}{\int_0^{r1} f(r) dr} : r1 \text{ は } (1 + N_{fuel} / N_{LLFP}) \text{ 体の集合体の径方向断面等価半径}$$

補正因子はフィッティングによって位置の関数として求め、ピン位置に内挿した。ここで、ピン位置は、Fig. Appendix 1-1 で模式的に示す様に、集合体配列ピッチで定義される六角形の LLFP に隣接する 1 辺からの距離で定義した。得られた補正因子は LLFP 集合体が内側にある燃料集合体の値となるが、外側にある場合は位置を逆転させて同じ補正因子を適用する。また、同一列内で隣接している場合は、内側隣接と同じとした。

### c. 補正因子の適用

④で得られた核変換炉心の径方向燃料ピン出力分布  $P(r)$  に補正因子を適用し、LLFP 集合体に隣接した場合の燃料集合体の燃料ピン出力を求める。

$$P'(r) = P(r) \times f'(r)$$

⑥ 必要流量の変動

⑤で得られたピン出力分布で、LLFP 集合体 1 体当たり、内側、同一列及び外側の隣接集合体をそれぞれ 2 体ずつとして、RZ 体系の径方向層毎の燃料寿命中最大ピン出力を評価し、集合体数で積算することで必要流量への影響を概算する。

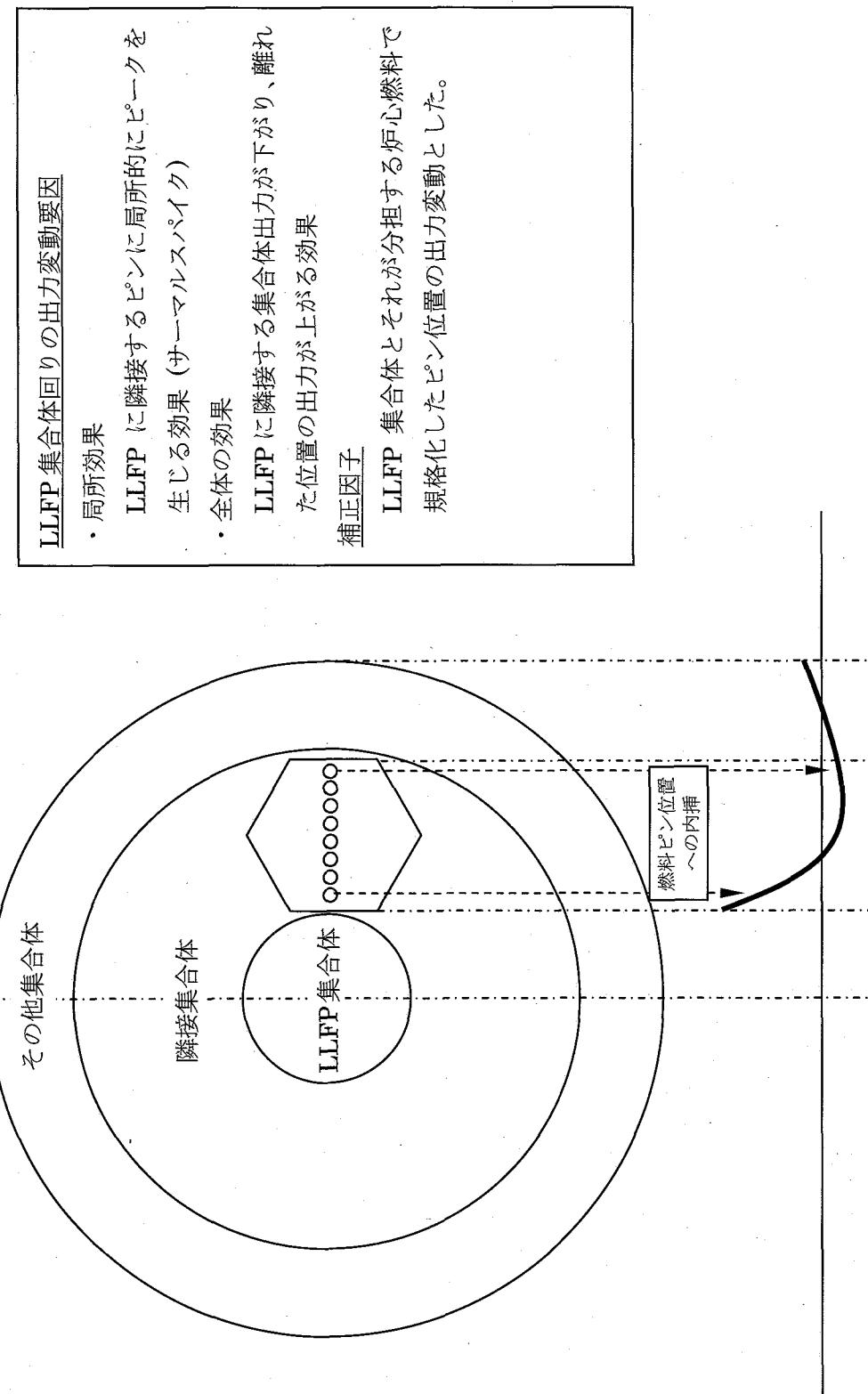


Fig. Appendix 1-1 Correction of fuel pin powers in the driver assembly adjacent to LLFP target assembly

## 付録2 FS フェーズIIにおける LLFP 集合体開発の状況概略

LLFP 集合体は、LLFP ターゲットピンと減速材ピンから構成され、原子力機構では、それについて、適用性・実現性を把握するための炉外試験等を実施している。以下に、FS フェーズ IIにおける、それぞれの開発状況について概略をまとめた。

### 1. LLFP ターゲットピン

LLFP ターゲットに関し、フェーズIIの LLFP 核変換炉心検討では、ヨウ素について、炉心内装荷の観点から高融点(997°C)を有する  $\text{YI}_3$ 、テクネチウムについて、 $\text{Tc}$ (金属)を暫定的に想定し設計評価を行った。そのうち、ヨウ素化合物については、基本的な特性に関する十分な知見が存在しないことから、現状の範囲で文献調査を行い有望と判断された候補化合物 5 種類( $\text{BaI}_2$ 、 $\text{CuI}$ 、 $\text{RbI}$ 、 $\text{MgI}_2$ 、 $\text{YI}_3$ )を対象に炉外試験を実施し<sup>[1, 2, 3]</sup>、LLFP ターゲットとしての適用性評価を行った。

具体的には、各候補材について、原料粉末の焼結性試験、被覆材との共存性試験、熱伝導度測定等を行い、以下の結果を得た。

- ・焼結性試験結果の概略を Fig. Appendix 2-1 に示した。各候補材について、焼結によるペレット製作が可能であることを確認したが、 $\text{MgI}_2$ 、 $\text{YI}_3$ については、大気下で著しい吸湿性が認められた。これらの材料は、大気下での取扱が不可であり、製造・保管施設についてコスト高になる可能性が考えられる。
- ・共存性試験として、PNC316 鋼、PNC-FMS 鋼(フェライト鋼)との高温共存性試験(600 °C × ~1,000 h)、および、ODS 鋼(フェライト鋼)との高温共存性試験(600 °C × 3,000 h)を実施した。試験結果の概略を Fig. Appendix 2-2 に示すが、PNC-FMS 鋼と PNC316 鋼を比べると、PNC-FMS 鋼(フェライト鋼)の方が共存性に劣ること、ODS 鋼では、 $\text{BaI}_2$ 、 $\text{CuI}$ 、 $\text{YI}_3$ との共存性に課題があることがわかった。
- ・熱伝導度測定として、レーザーフラッシュ法により、 $\text{BaI}_2$ 、 $\text{CuI}$ 、 $\text{RbI}$ の 500 ~ 600 °Cまでの熱伝導度を取得した( $\text{MgI}_2$ 、 $\text{YI}_3$ については、試料の性状(色、吸湿性)のため測定ができなかった)。試験結果を Fig. Appendix 2-3 に示すが、いずれのヨウ素化合物も高温での熱伝導度が 0.18 ~ 0.32 W/mK と非常に低い値となることが認められた。

各候補材の炉外試験の結果を Table Appendix 2-1 に比較して整理したが、結論として、現状想定している  $\text{YI}_3$ は、大気中で顕著な吸湿性が認められるとともに、ODS 鋼との共存性に課題を有することがわかった。また、今回の限られた試験の範囲ではあるが、材料特性の観点からは  $\text{BaI}_2$ が有望であるとの結果が得られた。 $\text{YI}_3$ については、今後、詳細な検討を実施し、適用性を判断することが必要と考えられる。また、 $\text{BaI}_2$ を採用する場合には、 $\text{BaI}_2$ 融点が 740 °Cと  $\text{YI}_3$ に比べ 250 °C程度低下することから、炉心内装荷を採用する場合には、設計評価を行い設計への影響を把握することが必要である。

### 2. 減速材ピン

次に、LLFP 核変換用の減速材については、文献調査の結果、金属水素化物(Zr-H、Y-H 等)が有望との結論に至り、フェーズII検討では、そのうち比較的多くの知見を有する Zr-H を採

用して設計検討を行った。金属水素化物については、高性能遮へい体の開発でも検討されており、設計上留意すべき点としては、水素解離と解離した水素の透過放出が重要である。高性能遮へい体設計では、水素解離は 500 °Cまではごく僅かであることから、暫定的に Zr-H 温度 500 °Cを制限条件としていた。一方、LLFP 集合体の減速材として Zr-H ピンを用いる場合、炉心内装荷を採用していることから、Zr-H ピンの発熱量が大きく、Zr-H 温度 500°Cを下回ること困難である。その場合、解離した水素の透過を抑制するため、水素バリヤー材を被覆材として採用することが必須となる。フェーズⅡの設計評価では、バリヤー材の効果の目標値として、PNC-FMS 鋼の水素透過率が 100 分の 1 程度（オーステナイト鋼の 10 分の 1 に相当）まで低減することを仮定して評価を行っていた。

水素バリヤー材の効果については、被覆管内部へのカロライズ処理+酸化処理プロセスが有望であり（カロライズ処理とは、金属表面にアルミニウムを高温（800°C程度）で拡散浸透させる処理）、炉外試験の結果、Fig. Appendix 2-4 で示したように、カロライズ処理+酸化処理プロセスを施すことにより、（あくまで、水素バリヤー効果の最高到達条件の結果ではあるが）PNC-FMS 鋼の透過速度を約 100 分の 1 程度まで低減できる可能性が示された<sup>[4]</sup>。このように、水素バリヤー材を採用することで、現状の減速材設計について成立の可能性を有するものと考えられる。

今後の課題としては、水素バリヤー付長尺被覆管の製管等の実用技術開発が必要であるとともに、水素バリヤー効果をさらに高めるための要素技術開発を継続して行う必要がある。また、Zr-H や Y-H を使用した高速炉環境における照射特性に関する知見は非常に少ないとから、照射試験によって照射安定性を確認していく必要がある。

### 3. 参考文献

- [1] 堂野前 貴子, 他, 「分離・変換技術開発における LLFP 化合物の選定」, JNC TN9420 2002-003, (2002).
- [2] 館 義昭, 他, 「長寿命核分裂生成物 (LLFP) 核変換要素の検討」, JNC TN9400 2004-063, (2004).
- [3] 館 義昭, 他, 「長寿命核分裂生成物 (LLFP) 核変換ターゲットの検討 (3) –ヨウ素化合物と被覆材との長時間の共存性評価–」, 日本原子力学会 2006 年春の年会 要旨集 F49, (2006).
- [4] Masaki INOUE, Shigeharu Ukai, "Research and development of neutron moderators with metal hydrides for sodium cooled fast breeder reactors", Proceedings of International Conference Global2005, Tsukuba, Ibaraki, Japan, October 9-13, 2005, Paper No.591 (2005).

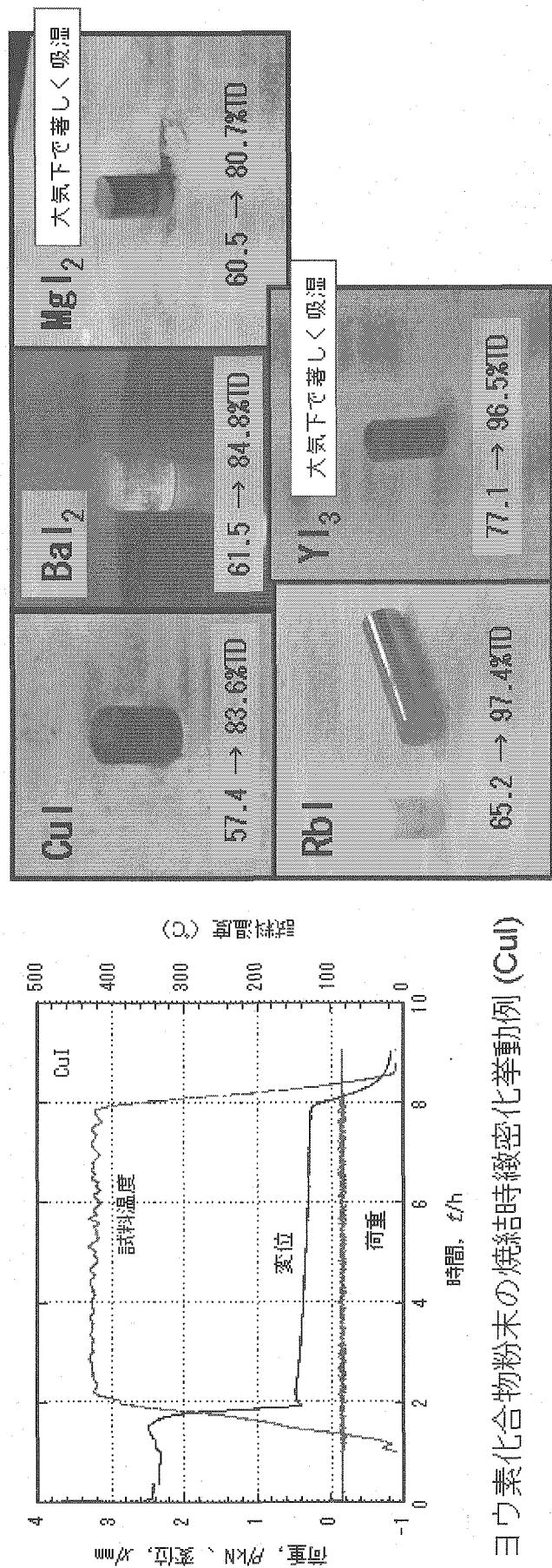
Table Appendix 2-1 Summary of out-pile tests to iodide candidates

	焼結性	共存性		高溫安定性 (融点)	熱伝導率	大気下安定性	課題	総合評価
		SUS316 鋼	ODS 鋼					
BaI <sub>2</sub>	◎	○	△	○ (740°C)	△	○	・ODS 鋼との反応有り ・熱伝導率低～	・低熱伝導率だが、ODS 鋼との共存性を改善できれば有望
CuI	◎	△	△	△ (605°C)	△	◎	・変態点にてヨウ素の遊離 ・高温熱伝導率低～	・大気下で安定だが、変態点で分離、気化するヨウ素による被覆管内圧上昇の可能性大
RbI	○	○	○	○ (647°C)	△	◎	・熱伝導率低 ・Rb は融点が 39°C のため、核変換後の单体 Rb は融解	・核変換後の单体 Rb が融解するため、ピン内での形態が不安定となる可能性大
MgI <sub>2</sub>	○	○	○	○ (637°C)	—	△	・大気下での吸湿性大 ・熱伝導率データ無し	・大気下での取扱が不可であり、製造・保管施設のコスト高の可能性大
YI <sub>3</sub>	○	△	△	○ (997°C)	—	△	・SUS316 鋼、ODS 鋼との反応有り ・大気下での吸湿性大 ・熱伝導率データ無し	・被覆管素材の Fe との反応(共晶)有り ・大気下での取扱が不可であり、製造・保管施設のコスト高の可能性大

判定基準

◎：良好      △：課題有り (解決すべき課題有り)  
 ○：概ね良好    -：データ無し

## 焼結性試験

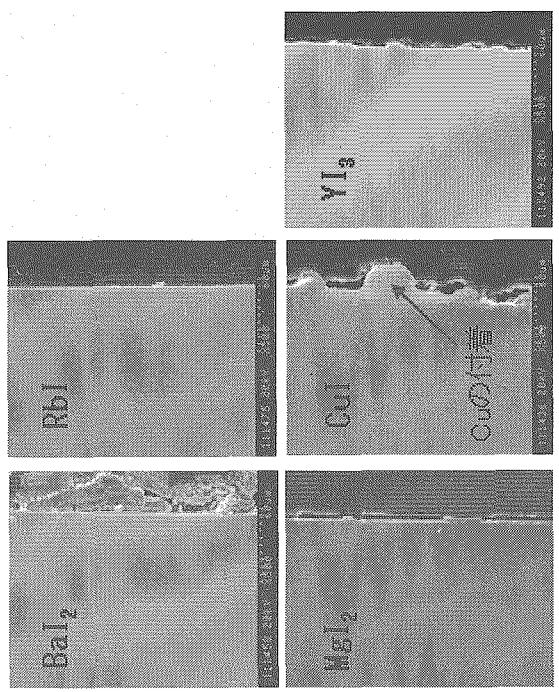


ヨウ素化合物粉末の焼結時緻密化挙動例 (CuI)

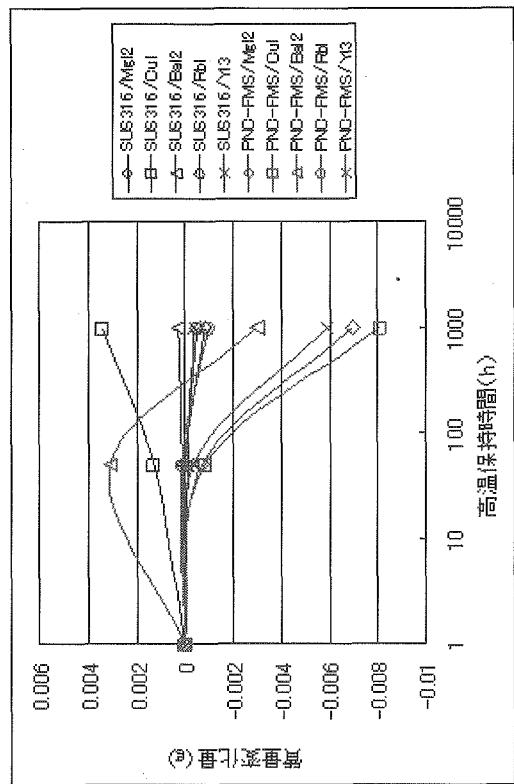
- ヨウ素化合物ごとに粉末の収縮挙動は異なるが、CuIの場合、昇温開始とともに収縮が始まり、比較的短時間で収縮過程のほとんどが終了する。
- 焼結性試験により得られた試料の外観
- MgI<sub>2</sub>, CuI, RbI, YI<sub>3</sub>, BaI<sub>2</sub>について、粉末の焼結によるペレット製作が可能であることを確認した。
- MgI<sub>2</sub>, YI<sub>3</sub>について高い吸湿性が認められた。

Fig. Appendix 2-1 Outline of sintering tests to iodide candidates in FS phase-II

## 被覆材との共存性試験



600°C × 1000hの試験結果 (SUS316鋼；無負荷)  
・CuI, YI<sub>3</sub>と試験を行ったSUS316鋼では表面の変質が  
認められた。



共存性試験前後の被覆材試料の質量変化  
・PNC-FMS鋼(フェライト鋼)(はいすれのヨウ素化合物にお  
いても質量減を示し、オーステナイト鋼と比較して共存性  
に劣っていると考えられる。

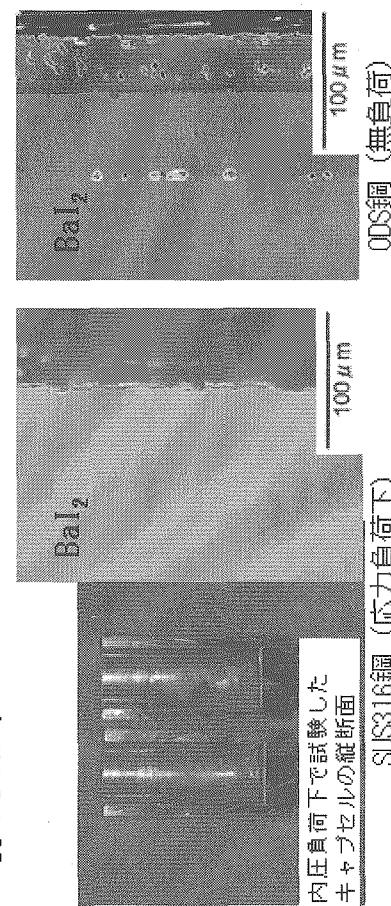
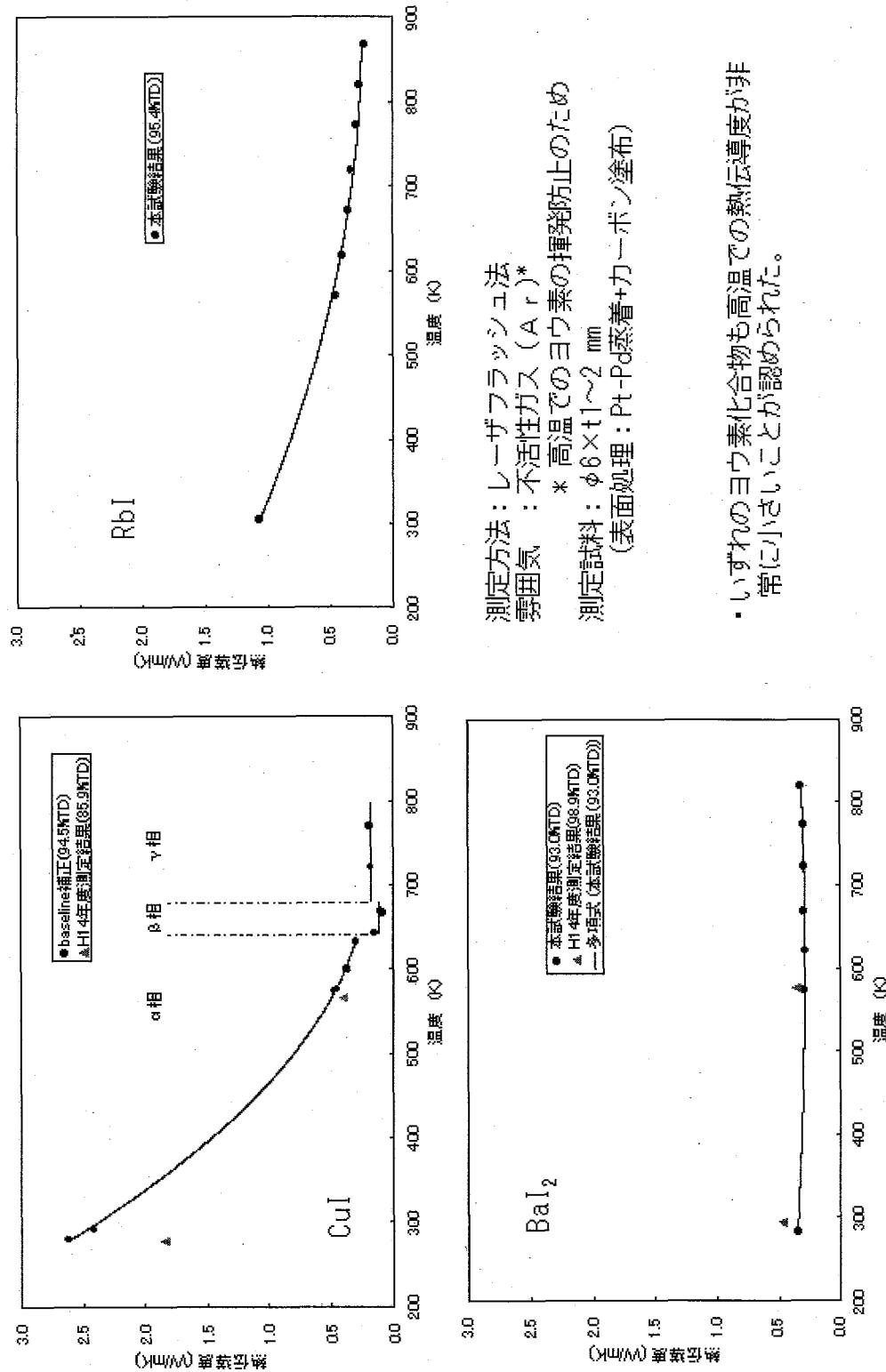


Fig. Appendix 2-2 Outline of compatibility tests between cladding materials and iodide candidates in FS phase-II

- SUS316鋼：キャブセルの内面には大きな劣化は認められなかった。
- ODS鋼：600°C × 3000h(無負荷)では、表面に層状の変質層ができ劣化が認められた。

## 熱伝導度測定



測定方法：レーザフラッシュ法  
 雰囲気：不活性ガス ( $A_r$ )\*  
 \* 高温でのヨウ素の揮発防止のため  
 測定試料： $\phi 6 \times t 1 \sim 2 \text{ mm}$   
 (表面処理：Pt-Pd蒸着+カーボン塗布)

- ・いずれのヨウ素化物も高温での熱伝導度が非常(に)小さいことが認められた。

Fig. Appendix 2-3 Outline of thermal conductivity tests to iodide candidates in FS phase-II

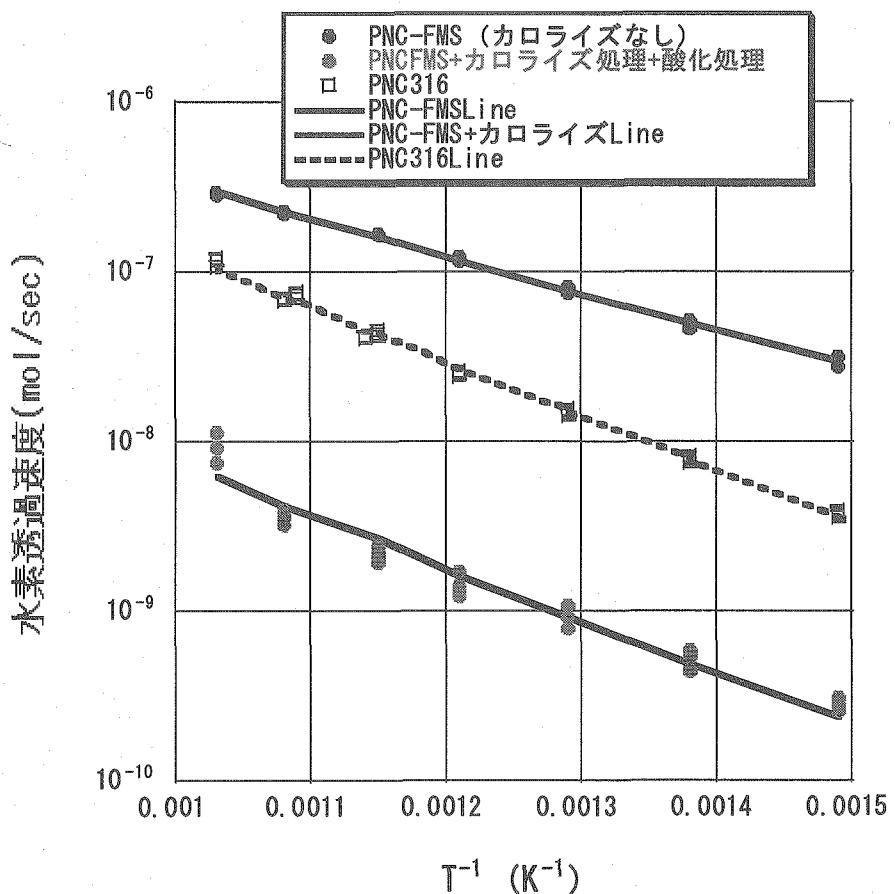


Fig. Appendix 2-4 Hydrogen permeation barrier by calorizing on cladding materials (in optimum condition)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
物体	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム每立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)	1

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
平面角	ラジアン(a)	rad
立体角	ステラジアン(a)	sr <sup>(c)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz
力	ニュートン	N
圧力、応力	パスカル	Pa
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J
工作效率、放射束	ワット	W
電荷、電気量	クーロン	C
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V
静電容量	ファラード	F
電気抵抗	オーム	Ω
コマダクタンス	ジーメンス	S
磁磁束密度	テスラ	T
インダクタンス	ヘンリ	H
セルシウス温度	セルシウス度	°C
光束	ルーメン	lm
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量		

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号 “1” は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 m°C のように SI 接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む SI 組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
粘度	パスカル秒	Pa·s
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)
質量エントロピー	毎ケルビン	J/K
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m·K)
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>
誘電率	フアラド毎メートル	F/m
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol·K)
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s
放射射度	ワット毎スチラジアン	W/sr
放射輝度	ワット毎平方メートル	W/(m <sup>2</sup> ·sr)
	毎スチラジアン	

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用される他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dm <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バーン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表 9. 固有の名称を含む CGS 組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイニ	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ボアズ	P	1 P=1 dyn·s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa·s
ストーカス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>-4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチール	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホルト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レンチゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジヤンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W·m <sup>-2</sup> ·Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
ト標準大気圧	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
カロリ	cal	1 atm=101 325 Pa
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m