



JAEA-Research

2006-087



JP0750014

**振動充填燃料採用による炉心・燃料設計
への影響に関する検討**

Study on Influence to Core and Fuel Design by Adopting
Vibro-Packed Fuel and Sphere-Pac Fuel

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

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

February 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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っ
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 +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

振動充填燃料採用による炉心・燃料設計への影響に関する検討

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 設計統括ユニット

永沼 正行、相田 達也*、林 秀行⁺

(2006年11月24日受理)

実用化戦略調査研究(以下、FS)におけるナトリウム冷却 MOX 燃料炉心の炉心・燃料設計では、ペレット燃料を採用した炉心を中心に設計評価を実施している。一方、FS では、燃料形態として、ペレット燃料のみならず、振動充填燃料も検討対象としている。振動充填燃料を採用した炉心では、ペレット燃料との燃料挙動の相違を反映した設計検討が必要であると考えられるが、これまで十分な検討がなされていない状況である。そこで、本検討では、振動充填燃料の設計評価上重要と考えられる燃料熱設計モデルについて検討を行い、現状の知見の範囲で、照射後試験結果との整合性の点から好適と判断されるモデルを選定した。更に、この結果を用いて、FS で検討した炉心を対象に、炉心・燃料仕様、核特性への影響を評価した。評価の結果、以下の結果が得られた。

- ・燃料熱設計モデルに関しては、組織変化開始温度、組織変化領域密度等の組織変化モデル条件の設定が重要であり、振動充填燃料について、照射後試験結果との整合性に基きモデルの定数を選定した。このモデルでは、過出力時にペレット燃料と同等の温度上昇条件を採用する場合、設計線出力(定格時線出力制限)が 390 W/cm 程度まで低下する可能性があることがわかった。この線出力は、ペレット燃料に対する FS の制限条件より 10%程度低い値であり、炉心・燃料仕様の変更が必要となる。
- ・FS フェーズIIの代表炉心を対象に、ペレット燃料から振動充填燃料に変更した場合の炉心・燃料仕様、核特性に対する影響評価を行った。結果として、線出力について上記程度の低下の範囲では、燃料ピン径、炉心配置等の仕様の一部に見直しは要求されるものの、核特性に与える影響は小さく、FS の設計条件、炉心性能目標を満足できる設計が可能であることがわかった。

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同研究の成果の一部を含む

⁺ 次世代原子力システム研究開発部門

* 東京電力株式会社

Study on Influence to Core and Fuel Design by Adopting
Vibro-Packed Fuel and Sphere-Pac Fuel

Masayuki NAGANUMA, Tatsuya AIDA* and Hideyuki HAYASHI⁺

FBR Cycle System Design Synthesis Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 24, 2006)

In the core and fuel design of sodium-cooled MOX fuel FR of the Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle System in Japan (FS), core designs with pellet fuel have been mainly evaluated. However, vibro-packed fuel and sphere-pac fuel are also considered one of the candidates as well as a pellet fuel in FS. Besides, in adopting vibro-packed fuel and sphere-pac fuel, the design must be affected by difference of the fuel behavior, however, the influence had not yet been evaluated adequately. Thus, authors concentrated on the fuel thermal design model for vibro-packed fuel and sphere-pac fuel and evaluated the proper model as far as our current knowledge. Then, by reflecting the model, the influences to the core and fuel specifications and nuclear performance were evaluated quantitatively on the FS reference cores. The results of this study are summarized as follows :

- In the fuel thermal design model, selection of restructuring conditions such as a restructuring starting temperature and a restructuring region density was found to be important. Proper values were evaluated for those conditions from the viewpoint to fit PIE results. In applying those values and assuming a same fuel temperature rise condition as that of pellet fuel at transient, limitation of the stationary linear heat rating was reduced to 390 W/cm. This is 10 % lower than the current limitation of the FS reference cores, therefore, the core and fuel specifications have to be changed by adoption of those fuels.
- For the FS phase-II reference cores, the influences to core and fuel specifications and nuclear performances by adoption of vibro-packed fuel and sphere-pac fuel were evaluated. As a result, though it is required to modify specifications such as the fuel pin diameter and core configuration because of the decrease of linear heat rating, the influence to nuclear performance is found to be benign. Therefore, the design that can meet the requirements and targets of FS is possible for those fuels.

Keywords : Vibro-Packed Fuel, Sphere-Pac Fuel, Restructuring Model, Fuel Design, Core Design, 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".

⁺ Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

* Tokyo Electric Power Company

目次

1. はじめに	1
2. 検討の背景	
2.1 バイパック燃料とスフェアパック燃料の特長	2
2.2 ペレット燃料と振動充填燃料の燃料評価モデル	2
3. 検討の方針	3
4. 設計線出力への影響に関する検討	
4.1 組織変化モデルの設定	4
4.2 評価条件	5
4.3 設計線出力の評価	
4.3.1 ペレット燃料条件ケース	6
4.3.2 RIAR モデル条件ケース	8
4.4 設計線出力評価のまとめ	9
5. 振動充填燃料採用による FS フェーズ II 代表炉心への影響	
5.1 評価条件	10
5.2 バイパック燃料採用による影響評価	
5.2.1 バイパック燃料の基本仕様	11
5.2.2 大型炉に対する影響評価	11
5.2.3 中型炉に対する影響評価	12
5.3 スフェアパック燃料採用による影響評価	
5.3.1 スフェアパック燃料の基本仕様	14
5.3.2 大型炉に対する影響評価	14
5.3.3 中型炉に対する影響評価	15
6. まとめ	16
7. 今後の課題	16
謝辞	17
参考文献	17

Contents

1 . Introduction	1
2 . Background of this study	
2.1 Features of vibro-packed fuel and sphere-pac fuel	2
2.2 Fuel evaluation models of pellet, vibro-packed and sphere-pac fuels	2
3 . Course of this study	3
4 . Study on influence to the linear heat rating limitation	
4.1 Setting of restructuring models	4
4.2 Evaluation conditions	5
4.3 Evaluation of the linear heat rating limitation	
4.3.1 Pellet fuel condition case	6
4.3.2 RIAR model condition case	8
4.4 Summary of this chapter	9
5 . Influence to FS phase-II reference core designs by adopting vibro-packed fuel and sphere-pac fuel	
5.1 Evaluation condition	10
5.2 Evaluation of influence by adopting vibro-packed fuel	
5.2.1 Main specifications of vibro-packed fuel	11
5.2.2 Influence evaluation to the large-scale reference core	11
5.2.3 Influence evaluation to the medium-scale reference core	12
5.3 Evaluation of influence by adopting sphere-pac fuel	
5.3.1 Main specifications of sphere-pac fuel	14
5.3.2 Influence evaluation to the large-scale reference core	14
5.3.3 Influence evaluation to the medium-scale reference core	15
6 . Conclusions	16
7 . Further issues	16
Acknowledgment	17
Reference	17

1. はじめに

実用化戦略調査研究^{[1][2][3]} (以下、FS) におけるナトリウム冷却 MOX 燃料炉心の炉心・燃料設計では、ペレット燃料を採用した炉心を中心に設計評価を実施してきた。一方、FS では、燃料形態として、従来のペレット燃料のみならず、製造性工程に簡素化が期待できる振動充填燃料 (バイパック燃料、スフェアパック燃料) も検討対象としている。振動充填燃料を採用した炉心の炉心・燃料設計評価に関しては、ペレット燃料との燃料挙動の相違による影響について十分な検討がなされていない状況である。

そこで、今回、振動充填燃料の設計評価において重要と考えられる燃料熱設計モデルについて検討を行い、その炉心・燃料設計への影響について評価を行うこととした。具体的には、燃料熱設計モデルは、温度評価用物性モデルと組織変化モデルで構成されることから、これらをペレット燃料用のモデルから変更するとともに、設計に大きく影響する燃料熱設計モデル条件 (組織変化開始温度、組織変化領域密度) について、現状の知見の範囲で、照射後試験結果との整合性の観点から好適な条件を選定し、設計線出力 (定格時線出力制限) への影響について評価を行った。そして、その結果を反映し、FS フェーズ II の代表炉心を対象に、炉心・燃料仕様、および、核特性への影響について評価を行い、FS の炉心性能目標の達成見通しを確認することとした。

2. 検討の背景

2.1 バイパック燃料とスフェアパック燃料の特長

一般に振動充填燃料は、充填する粒子の形態により、バイパック燃料とスフェアパック燃料に区別される。両燃料の製造状態の概略図を Fig. 2-1 に比較して示した。バイパック燃料は、粒子として粉体のままを使用するのに対し、スフェアパック燃料では、粒子は球状に成形されている。また、スフェアパック燃料では、充填密度を稼ぐため、粒子の粒径は 2~3 種（大粒子、小粒子）で構成され、大粒子径は 400~800 μm 程度、小粒子径は 1 オーダー程度低い粒子径となっている。

バイパック燃料は、現在、主にロシアの RIAR (Scientific Research Institute of Atomic Reactor) で開発されており^[4]、RIAR 型のバイパック燃料では、燃料中の O/M 比の調整のため、酸素ゲッターとして金属ウラン粒子を添加する方式を採用している。これは、RIAR では、バイパック燃料の再処理法に乾式の酸化電解法を採用しており、酸化電解プロセスで低 O/M 燃料を得るには非常に複雑なプロセスを経なければならないこと、また、高放射性燃料の加工において低 O/M 燃料の取扱いは複雑化するためである。一方、スフェアパック燃料については、スイスの PSI (Paul Scherrer Institute) などでの開発が行なわれている^[5]。スフェアパック燃料については、通常、湿式再処理が適用されることから、金属ウランゲッタを添加せず、製造時に O/M 比を直接調整する方式としている。

2.2 ペレット燃料と振動充填燃料の燃料評価モデル

ペレット燃料と振動充填燃料について、照射後の状態の概略図を Fig. 2-2 に比較して示した。燃料の組織変化は、あるしきい温度以上で生じることから、図中、燃料中央付近の高温側の領域で生じる。ペレット燃料、振動充填燃料ともに組織変化は生じ、組織変化後の燃料の状態は同様である。一方、周辺の低温領域では、組織変化は生じず、製造時の状態が維持されるため、両燃料で状態が異なっている。振動充填燃料では、粒子が充填されたままの状態であるので、ペレット燃料と比較し、熱伝導度は低く、一方、燃料-被覆管の熱伝達は粒子と被覆管が接触しているため大きくなる。

このように、ペレット燃料と振動充填燃料では、照射後の組織変化の領域、状態に相違が認められ、燃料熱設計モデルを変更する必要が生ずる。燃料熱設計モデルは、温度評価用物性モデルと組織変化モデルから構成される。現在、一般的に利用されている両燃料の代表的な燃料熱設計モデルの例を Table 2-1 に比較してまとめた。ペレット燃料では、温度評価用物性モデルについて、燃料熱伝導度は「もんじゅ」設計式^[6]、燃料-被覆管熱伝達は Ross & Stoute 式^[7]等が代表的なモデルとして挙げられる。組織変化モデルについては、組織変化領域密度は土井-桂川モデル^[8]が挙げられ、組織変化開始温度は 1,400 $^{\circ}\text{C}$ が一般的に適用されている。一方、バイパック燃料については、RIAR より、燃料熱設計モデルが報告されている^[4]。具体的には、温度評価用物性モデルについて、粉体部（未変化領域）の熱伝導度や燃料-被覆管熱伝達式が報告されており、組織変化モデルについても、柱状晶領域密度 97 %TD、組織変化開始温度 1,100 $^{\circ}\text{C}$ という値が報告されている。スフェアパック燃料については、温度評価用物性モデルとして、PSI から SPACON モデルが報告されている^[9]。

ここで、組織変化モデルの条件である、組織変化領域密度、組織変化開始温度については、中心空孔径や組織変化領域径を通じて燃料熱設計に大きく影響するものの、その値について、

両燃料で異なる値が適用されていることがわかる。これらの定数については、両燃料で共通の値となることが妥当とも考えられるが、これまで、特定するのに十分な検討がなされていない状況である。

3. 検討の方針

今回の検討の方針を Fig. 3-1 にフロー図を用いて示した。検討内容としては、① 設計線出力への影響評価、② 炉心・燃料設計への影響評価の2段階に分けられる。

①では、振動充填燃料の燃料評価モデルを適用し、設計線出力への影響評価を行う。評価は、バイパック燃料、スフェアパック燃料の両燃料それぞれについて実施する。ここで、組織変化モデルの条件である組織変化開始温度、組織変化領域密度については、前章で述べたように、現時点で検討が十分でないことから、パラメータとして2種類の条件ケースを想定することとした。一つは、ペレット燃料の条件を適用するケース、もう一つは、RIAR から報告されているモデルの条件を適用するケースとし、両ケースによる設計線出力について比較を行うこととした。他方、現状把握している振動充填燃料の照射後試験結果に基づき、両条件ケースを用いた再現計算の比較を行い、試験結果との整合性の点から好適と判断されるケースを選定し、次の炉心・燃料設計評価に適用することとした。

②では、①の設計線出力、および、スミア密度、FP 混入率等の振動充填燃料採用で見直される条件を考慮し、燃料仕様、核特性への影響について評価を行う。ここで、検討を行う基準炉心としては、FS フェーズⅡで検討された大型炉と中型炉を対象とすることとし、バイパック燃料、スフェアパック燃料それぞれを採用した炉心について評価を行い、FS の炉心性能目標の達成見通しを確認することとした。

4. 設計線出力への影響に関する検討

4.1 組織変化モデルの設定

バイパック燃料、スフェアパック燃料の設計線出力への影響を評価するため、両燃料について、燃料温度解析を行う。前章で説明した通り、振動充填燃料の評価では、組織変化モデル条件（組織変化開始温度、組織変化領域密度）の設定が重要であることから、ここでは、これらの条件をパラメータとして、以下の2ケースを対象に検討を行う。

・RIAR モデル条件ケース

- 組織変化開始温度 : 1,100 [°C]
- 組織変化領域密度 : 柱状晶密度 $\rho_C = 0.97$ [理論密度比]
 等軸晶密度 $\rho_E = (\rho_C + \rho)/2$
 製造時密度 ρ

・ペレット燃料条件ケース

- 組織変化開始温度 : 1,400 [°C]
- 組織変化領域密度 : 柱状晶密度 $\rho_C = 0.379 \times \rho + 0.621$ [理論密度比]
 (土井-桂川モデル^[8])
 等軸晶密度 $\rho_E = (\rho_C + \rho)/2$
 製造時密度 ρ

他方、バイパック燃料、スフェアパック燃料の照射後試験については、一部データを入手している。そこで、組織変化モデル条件の検討に資するため、両条件ケースを適用し、JAEA 所有の燃料設計コード SIMPLE-II^[10]を用いて再現計算を行った^[11]。中心空孔径と組織変化領域径における試験結果と解析結果の関係を Fig. 4.1-1、Fig. 4.1-2 に示した。ここで、Fig. 4.1-1 はバイパック燃料、Fig. 4.1-2 はスフェアパック燃料の結果であり、RIAR モデル条件ケースとペレット燃料条件ケースの結果を比較してプロットしている。

結果として、中心空孔径、組織変化領域径は、それぞれ、組織変化領域密度、組織変化開始温度の寄与が支配的であるが、バイパック燃料、スフェアパック燃料とも、むしろペレット燃料条件ケースの方が、照射後試験で得られた結果をより適切に表現できていることがわかる。このことから、現時点の検討の範囲では、ペレット燃料条件の方が、照射後試験結果との整合性の点で好適と考えられる。そのため、組織変化モデル条件ケースについて、ペレット燃料条件ケースを基準ケースとし、RIAR モデル条件ケースについては、影響比較のための参考ケースの位置づけとした。

また、温度評価用物性モデル（熱伝導度、ギャップコンダクタンス等）については、両燃料とも従来適用されているモデル（バイパック燃料:RIAR モデル^[4]、スフェアパック燃料:SPACON モデル^[9]）を適用することとした。

4.2 評価条件

燃料仕様、照射条件、組織変化条件、設計線出力評価条件の代表的な項目について、以下に示す。燃料仕様に関しては、FS フェーズⅡのナトリウム冷却 MOX 燃料代表炉心^[9]の条件をベースに設定することとし、詳細を Table 4.2-1 に示した。また、比較のため、基準ケースを対象に、同様の仕様、照射条件の下、中実ペレット燃料、中空ペレット燃料についても温度解析を実施することとした。中実・中空ペレット燃料の仕様、条件についても、Table 4.2-1 に併せて示した。

また、今回の検討では、燃料温度計算コードとして、JAEA 所有の燃料設計評価コード SIMPLE-II^[10]を使用した。

(1) 燃料仕様

- ・燃料ピン外径 : 10.4 mm
- ・被覆管肉厚 : 0.71 mm
- ・スミア密度 : バイパック燃料 82 %TD
スフェアパック燃料 80 %TD

(2) 照射条件

- ・線出力条件 : 一定の定常線出力で照射し組織変化が成熟した後に、過出力が生じることとした。ここで、定常時の組織変化の状態が熔融限界線出力評価に大きく影響することから、定常時線出力として以下の3ケースを想定し、解析を行うこととした。
① 400 W/cm、② 450 W/cm、③ 500 W/cm

(3) 組織変化条件

- ・組織変化モデル : ① ペレット燃料条件ケース (基準ケース)
② R IAR モデル条件ケース (参考ケース)
- ・過渡時組織変化 : 定常照射時の組織変化後、過渡は瞬時に発生し、組織変化の進行はないものとした。

(4) 設計線出力評価条件

- ・過出力係数 : 1.223 (FS 検討炉心、NIS 8 基設置を想定^[11])
- ・不確かさ : 設計線出力評価における不確かさとして、燃料仕様・照射条件の不確かさ、解析コードの予測誤差、燃料熔融試験の誤差を想定する。これらの項目について、基本的には統計処理で扱うこととするが、照射条件の不確かさのうち、定常時線出力の不確かさについては、乗算処理で扱うこととする。各不確かさ項目の具体的な内容については、以下の通りとする。
 - 燃料仕様・照射条件の不確かさ : 解析に基づき設定
 - 解析コードの予測誤差 : 35 W/cm (JAEA の知見に基づく値として設定)
 - 燃料熔融試験の誤差 : 6 % (3 σ 相当)
 - 定常時線出力の不確かさ : 5 %

4.3 設計線出力の評価

4.3.1 ペレット燃料条件ケース

ペレット燃料の組織変化モデル条件を適用し、バイパック燃料、スフェアパック燃料の設計線出力への影響を評価する。評価の手順としては、まず、各燃料について溶融限界線出力を評価し、その溶融限界線出力に過出力係数、各種不確かさを考慮し設計線出力の設定を行う。また、比較のため、中実ペレット燃料、中空ペレット燃料についても同様の評価を行った。

(1) 溶融限界線出力評価

バイパック燃料、スフェアパック燃料について、過出力時の燃料中心温度の評価結果を Fig. 4.3-1、Fig. 4.3-2 にそれぞれ示した。グラフは、定格時線出力 400 W/cm、450 W/cm、500 W/cm のケースに分けて表し、いずれのグラフとも、比較のため中実ペレット燃料の解析結果を併せてプロットした。

過出力時の燃料中心温度上昇の勾配を比較すると、バイパック燃料、スフェアパック燃料、中実ペレット燃料で傾向が異なり、中実ペレット燃料と比較し、バイパック燃料では勾配が大きく、スフェアパック燃料では勾配が小さくなる結果が得られた。その原因を調査すべく、それぞれ定格時線出力 400 W/cm のケースについて、組織変化-未変化領域境界部の温度を併せて示した。図中、燃料中心温度上昇勾配の相違は、概ね境界部の温度上昇勾配によるものであり、バイパック燃料で勾配が大きい原因は、RIAR の未変化領域の熱伝導度式 (粉体熱伝導度式)⁴⁾ に起因するものと考えられる。つまり、この熱伝導度式は、RIAR が組織変化開始温度としている 1,100°C 以下での適用を想定しているため、輻射の寄与を全く考慮しておらず、過出力時のような高温では、熱伝導度を実際よりも小さく評価するためと考えられる。一方、スフェアパック燃料については、逆に勾配は小さく、これは SPACON モデルでは、逆に、輻射による伝熱効果を大きく見積もっている可能性があるものと推測される。

以上のことから、バイパック燃料、スフェアパック燃料双方の熱伝導度モデルとも、過出力時の適用性に問題を有する可能性が考えられる。そのため、今回の検討では、暫定的な対応として、中実ペレット燃料の中心温度上昇カーブを両燃料の過出力時に適用することとした。グラフ中、点線のカーブが中実ペレット燃料の温度上昇カーブを適用した結果であり、この線が燃料融点を越えた時の線出力として、溶融限界線出力を求めた。

上記の方法により得られたバイパック燃料、スフェアパック燃料の溶融限界線出力について、中実ペレット燃料、中空ペレット燃料の溶融限界線出力と併せて以下に示す。

	400W/cm ケース	450W/cm ケース	500W/cm ケース
・バイパック燃料	549 W/cm	569 W/cm	592 W/cm
・スフェアパック燃料	557 W/cm	576 W/cm	599 W/cm
・中実ペレット燃料	587 W/cm	601 W/cm	617 W/cm
・中空ペレット燃料	729 W/cm	729 W/cm	747 W/cm

バイパック燃料、スフェアパック燃料では、未変化領域の熱伝導度が低い効果により、溶融限界線出力はペレット燃料より低くなる傾向にある。ただし、スフェアパック燃料については、スミア密度が 80 %TD とバイパック燃料の 82 %TD より低く、組織変化成熟時に中心空孔径が大きくなるため、バイパック燃料よりは溶融限界線出力が大きくなる結果

であった。

これらの燃料について、定常時線出力 400 W/cm と 500 W/cm ケースにおける溶融限界線出力の差を比較すると、Fig. 4.3-3 に示すように、中実ペレット燃料で 30 W/cm であるのに対し、バイパック燃料では 43 W/cm、スフェアパック燃料では 42 W/cm と 1.4 倍程度大きくなる傾向にあることがわかる。これは、振動充填燃料では、未変化領域の熱伝導度が低い効果により、定常線出力の組織変化に対する感度が大きく、定常時線出力が低いと溶融限界線出力はより低くなることを意味するものである。そのため、過出力係数が大きく、定常時線出力が低く制限される炉心の設計では、振動充填燃料を採用する影響はより大きくなる傾向を示すものと考えられる。

(2) 設計線出力評価

Table 4.3-1～Table 4.3-4 に、バイパック燃料、スフェアパック燃料、中実ペレット燃料、中空ペレット燃料について、各定常時線出力ケースにおける溶融限界線出力、各種不確かさ、過出力係数を考慮した定常時線出力の評価値を示した。ここで、バイパック燃料、スフェアパック燃料の燃料仕様・照射条件の不確かさについては、SIMPLE-II コードによる解析値であり、その内訳については、Table 4.3-5、Table 4.3-6 に別途示した（不確かさ評価では、ノミナルケースとの差に着目するので、中心温度上昇カーブは、簡易的にバイパック燃料、スフェアパック燃料ままとした解析結果を用いた）。中実ペレット燃料、中空ペレット燃料の燃料仕様・照射条件の不確かさは、過去の検討例をベースに設定した。ここで、ペレット燃料の燃料仕様・照射条件の不確かさは、振動充填燃料の値より大きくなる傾向を示している。これは、ペレット燃料では、ペレット-被覆管ギャップ幅や中心空孔径などの形状の不確かさが、燃料温度に大きく影響することによるものである。

これらの結果において、定格時線出力の相違により溶融限界線出力は異なり、この溶融限界線出力から評価した値と定格時線出力の値とが一致するところが定格時線出力の制限値となる。そこで、Fig. 4.3-4 に示すように、各定常時線出力ケースの結果を内挿することにより各燃料の定格時線出力制限値を求めた。評価の結果得られた値を以下に示す。

- ・バイパック燃料 : 393 W/cm
- ・スフェアパック燃料 : 400 W/cm
- ・中実ペレット燃料 : 409 W/cm
- ・中空ペレット燃料 : 519W/cm

設計線出力としては、上記の定格時線出力制限値を小さい側にまるめることとし、バイパック燃料、スフェアパック燃料とも 390 W/cm と設定することとした。このように、組織変化モデルの条件としてペレット燃料条件を適用する場合、バイパック燃料、スフェアパック燃料とも同様の設計線出力となり、その値は、従来の FS の制限条件 (430 W/cm) より 10 %程度小さく制限されることがわかった。

4.3.2 RIAR モデル条件ケース

RIAR の組織変化モデル条件を適用し、バイパック燃料、スフェアパック燃料の設計線出力への影響を評価する。評価の手順は、前項 (4.3.1 項) と同様である。

(1) 熔融限界線出力評価

バイパック燃料、スフェアパック燃料について、過出力時の燃料中心温度の評価結果を Fig. 4.3-5、Fig. 4.3-6 にそれぞれ示した。グラフは、定格時線出力 400 W/cm、450 W/cm、500 W/cm のケースに分けて表した。ここで、過出力時の燃料温度上昇としては、4.3.1 項同様、暫定的に中実ペレット燃料の上昇カーブを適用することとし、熔融限界線出力の評価を行った。バイパック燃料、スフェアパック燃料の熔融限界線出力の評価結果を以下に示す。

	400W/cm ケース	450W/cm ケース	500W/cm ケース
・バイパック燃料	603 W/cm	619 W/cm	634 W/cm
・スフェアパック燃料	584 W/cm	607 W/cm	634 W/cm

RIAR モデル条件ケースとペレット燃料条件ケースの結果を比較すると、バイパック燃料、スフェアパック燃料とも、RIAR モデル条件ケースの方が、熔融限界線出力を 30~50 W/cm 程度大きく評価する結果となった。この原因としては、RIAR モデル条件ケースでは、組織変化開始温度が低く密度の高い組織変化領域径が大きくなること、また、組織変化領域密度が大きく中心空孔径が大きくなることによるものである。以上のように、組織変化モデル条件の熔融限界線出力に対する感度は、非常に大きいことが認められた。

(2) 設計線出力評価

Table 4.3-7、Table 4.3-8 に、バイパック燃料、スフェアパック燃料について、各定常時線出力ケースにおける熔融限界線出力、各種不確かさ、過出力係数を考慮した定常時線出力の評価値を示した。ここで、燃料仕様・照射条件の不確かさについては、SIMPLE-II コードによる解析値であり、その内訳については、Table 4.3-9、Table 4.3-10 に別途示した (4.3.1 項同様、中心温度上昇カーブは、簡易的にバイパック燃料、スフェアパック燃料ままとした解析結果を用いた)。

バイパック燃料、スフェアパック燃料の定格時線出力制限値は、4.3.1 項と同様の手法を用い、Fig. 4.3-7 に示すように、各定常時線出力ケースの結果を内挿することにより求めた。評価の結果得られた値を以下に示す。

・バイパック燃料	: 445 W/cm (393 W/cm)*
・スフェアパック燃料	: 436 W/cm (400 W/cm)*

* 括弧内に比較のためペレット燃料条件モデルの結果を示した。

設計線出力としては、上記の定格時線出力制限値を小さい側にまらめ、バイパック燃料、スフェアパック燃料とも 430 W/cm に設定することとした。このように、RIAR 条件モデルを適用する場合、ペレット燃料条件モデルより 40 W/cm 程度設計線出力が大きく見積もられる結果となった。このことは、RIAR 条件モデルを適用した場合には、振動充填燃料を採用してもペレット燃料と同等の線出力が達成可能となることを意味し、燃料形態を変更しても炉心・燃料設計への影響は非常に小さいことが認められた。

4.4 設計線出力評価のまとめ

振動充填燃料を採用した場合の燃料熱設計モデル条件（組織変化開始温度、組織変化領域密度）の設計線出力への影響について、バイパック燃料、スフェアパック燃料とも、RIAR モデル条件を適用すると 430 W/cm とペレット燃料と同等となるが、ペレット燃料条件を適用した場合には、390 W/cm まで低減される結果が得られた。このように、設計線出力は、組織変化モデルの条件に大きく依存することが認められた。他方、両条件ケースを用いて、照射後試験結果に対する再現計算の比較を行ったところ、ペレット燃料条件ケースの方が、試験結果との整合性の点で好適な結果が得られた。このことから、現時点の検討の範囲では、振動充填燃料の燃料熱設計モデル条件として、ペレット燃料条件を選択することが妥当と考えられ、振動充填燃料を採用する場合、設計線出力が従来のペレット燃料より 10 %程度低減される可能性が示された。

また、振動充填燃料を採用した場合の燃料熱設計上の特性として、ペレット燃料より定格時線出力の溶融限界線出力に対する感度が大きい傾向にあることがわかった。この原因としては、組織未変化領域における熱伝導度が低いこと、スミア密度が低いことにより、定格時線出力の組織変化に対する影響が大きいことによるものと考えられる。そのため、振動充填燃料を採用する場合、今回の FS 検討炉心のように過出力係数が大きめに設定されている炉心では、定常時の線出力が低く抑えられ、溶融限界線出力はより低くなる傾向を示す点に留意する必要がある。

5. 振動充填燃料採用による FS フェーズ II 代表炉心への影響

4章の設計線出力への影響評価の結果、設計線出力は組織変化モデルの条件に大きく依存し、振動充填燃料を採用した場合には 390 W/cm まで低減される可能性が示された。FS の炉心・燃料設計では、従来の設計例を参考に 430 W/cm を暫定的な目安として設計評価を行っている。そこで、FS における振動充填燃料の適用性評価に資するため、設計線出力として 390 W/cm を想定し、バイパック燃料、スフェアパック燃料それぞれを採用した炉心について設計評価を行い、炉心・燃料仕様、核特性にどの程度の影響を与えるかを定量的に評価するものとした。振動充填燃料の採用に付随して、スミア密度、FP 混入率等の条件も見直すものとした。

5.1 評価条件

(1) 炉心・燃料仕様変更の考え方

本検討では、FS フェーズ II の代表炉心をベースに、設計線出力、スミア密度等変更による影響を評価する。設計線出力、スミア密度以外の設計条件、炉心性能目標等については、FS の条件を満足することとした。Table 5.1-1 に、FS のナトリウム冷却 MOX 燃料炉心における設計条件、炉心性能目標設計の一覧を示す。

燃料仕様の設定において、炉心熱出力保存の条件で設計線出力を低減する場合、燃料ピンの総長（炉内燃料ピン総数 × 燃料ピン長）を従来仕様より増加させる必要がある。これを炉容器径、炉心高さ保存の条件で達成するには、燃料ピン径については細径化させる必要がある。そこで、本検討では、炉心・燃料仕様変更の方向性として、FS の条件を満足する程度まで燃料ピンを細径化することとした。また、集合体あたりの燃料ピン本数は従来仕様と同様とし、炉内燃料ピン総数の増加は燃料集合体数を増加させることで対応することとした。

(2) 基準炉心

FS フェーズ II では、大型炉、中型炉とも、代表炉心として高内部転換型を選定している^[9]。高内部転換型炉心とは、燃料サイクルコスト低減の観点から、ブランケットを含む全炉心取出平均燃焼度を増加すべく、内部転換比を高めた炉心概念である。そのため、燃料ピン径は 10.4 mm と太径ピンを採用している。また、燃料集合体としては、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ている。この集合体は、通常の内ダクト型集合体（六角内ダクトを集合体中央に配置）と異なり、製作性、構造成立性の観点から、菱形の内ダクトを六角ラップ管のコーナーに設置した構造を採用している。

本検討の基準炉心としては、この高内部転換型炉心を対象とすることとした。大型炉の炉心配置図、炉心燃料仕様、核特性を Fig. 5.1-1、Table 5.1-2、Table 5.1-3 に、中型炉の同項目を Fig. 5.1-2、Table 5.1-4、Table 5.1-5 に示した。

(3) 解析手法

本検討の核計算で使用した解析手法、燃料同位体組成を以下に示す。

- ・炉定数 : 統合炉定数 ADJ2000R^[12]
- ・燃焼計算 : 2次元 RZ 体系 7群拡散燃焼計算

- ・反応度係数計算 : 2次元 RZ 体系 70 群拡散燃焼計算 (直接計算)
- ・燃料同位体組成 : 高速炉多重リサイクル TRU 同位体組成
 $^{238}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu} / ^{240}\text{Pu} / ^{241}\text{Pu} / ^{242}\text{Pu} / ^{237}\text{Np} / ^{241}\text{Am} / ^{243}\text{Am} / ^{244}\text{Cm} / ^{245}\text{Cm}$
 $= 1.1 / 54.1 / 32.1 / 4.3 / 3.9 / 0.5 / 2.0 / 1.0 / 1.0 / 0.0 \text{ wt\%}$

5.2 バイパック燃料採用による影響評価

5.2.1 バイパック燃料の基本仕様

バイパック燃料としては、金属ウランゲッタを添加し実効的な O/M 比を調整する RIAR 型のバイパック燃料を採用することとした⁴⁾。スミア密度については、炉心部と軸方向ブランケット部では 82%TD、径方向ブランケット部では、太径ピンを採用することを前提に 85%TD とした。燃料中の FP 混入率については、乾式再処理法を適用することから 2.0 vol% とした。また、金属ウランゲッタの添加割合としては、RIAR での照射実績から 7% とした。

5.2.2 大型炉に対する影響評価

(1) 炉心配置と燃料集合体仕様

基準炉心をベースに、設計線出力、スミア密度を見直した炉心の設計検討を行う。基準炉心の最大線出力は約 400 W/cm あることから、最大線出力を 390 W/cm 以下にするには、集合体当たりのピン本数保存の条件では、燃料集合体数を 3% 程度増加させる必要がある。そのため、炉心配置の設定では、1/6 対称性等を考慮した上で、燃料集合体 30 体を増加させることとした。制御棒配置については、暫定的に基準炉心と同様とすることとし、内側炉心と外側炉心の体数比についても、基準炉心と同様とした。径方向ブランケット体数については、ブランケット部のスミア密度が、基準炉心の 90%TD から 85%TD に低減されるため、増加させる必要がある。そのため、遮へい体外接円径の制限である 7 m を満足する範囲で 90 体増加させ、増殖比の目標値 1.1 を達成できない分は、軸方向ブランケット長を延長することで対応することとした。ここで、集合体の総体数は基準炉心より増加するが、下記に示す通り集合体配列ピッチが低減するため、遮へい体外接円径は 6.98 m と制限条件を満足している。

次に、燃料集合体の仕様について、燃料ピン径は、炉心熱出力、炉心高さ、遮へい体外接円径を保存するため細径化させ、結果として、基準炉心の 10.4 mm から 9.9 mm まで低減することがわかった。ピン径への影響は比較的小さいが、これは代表炉心の最大線出力がもともと 430 W/cm の制限に対し約 400 W/cm と低いことによるものである。燃料ピンの配列ピッチについては、集合体バンドル圧損が約 0.2 MPa を満たすよう設定した。ラッパ管の肉厚、集合体間ギャップは、暫定的に基準炉心の 5.0 mm、4.4 mm と同一とした。その結果、集合体配列ピッチは、基準炉心の 206.0 mm から 198.0 mm まで短縮されることとなった。

検討の結果得られた炉心配置を Fig. 5.2-1 に示すとともに、燃料仕様を Table 5.2-1 に代表炉心と比較して示した。

(2) 主要な核特性

検討の結果得られた主要な核特性を Table 5.2-1 に代表炉心と比較して示した。

燃料ピンの細径化による実効燃料体積比の低下は 0.7 %程度であった。また、バイパック燃料では乾式再処理を採用することから、FP 混入率が、基準炉心の 0.2 vol%から 2.0 vol%に増加する。これらの効果により、Pu 富化度は平均で 1.6 wt%増加（相対値で 8%に相当）し、内部転換比は 0.05 低下する結果となった。内部転換比の低下に伴い、増殖比を確保するため、ブランケット装荷量を増加させる必要がある。遮へい体外接円径の制限値 7.0 m を満足する範囲で径方向ブランケットを 90 体増加したが、増殖比の目標値 1.1 を達成できなかったため、下部軸方向ブランケットを 10 cm 増加することとした。また、燃焼反応度については、内部転換の低下により、基準炉心の 2.3 % $\Delta k/kk'$ から 3.3 % $\Delta k/kk'$ まで増加しており、制御棒反応度収支に影響することが予想される。

初装荷炉心重金属インベントリについては、燃料体積比の低下により、炉心部では 6 %程度低下するが、増殖比確保のため、径方向ブランケットの装荷量は 80 %程度増加する結果となった。そのため、燃料サイクルコストに影響する全炉心取出平均燃焼度は、基準炉心の 90 GWd/t から 79 GWd/t まで 12 %程度低下するが、炉心性能目標の 60 GWd/t は上回ることが認められた。本炉心の詳細な重金属インベントリについては、Table 5.2-2 にまとめた。また、反応度特性について、ナトリウムボイド反応度は 2 %程度増加して 5.4 \$となるが、制限条件の 6 \$は満足している。ドップラ係数についても、影響は比較的小さく、絶対値で 10 %程度の低下に留まった。

以上、本炉心は FS の主要な設計条件、炉心性能目標を満足しており、FS の大型代表炉心にバイパック燃料を適用した場合、設計上成立する見通しを有することがわかった。

(3) 制御棒反応度収支

本炉心では、制御棒配置について基準炉心の配置を保存しているが、内部転換比の低下、集合体数の増加により、制御棒反応度収支は厳しくなる方向に影響を受ける。そこで、本炉心の制御棒反応度収支について、基準炉心の収支を参考として概略評価を行う。

Table 5.2-3 に、基準炉心の制御棒反応度収支を示す。Table 5.2-1 の核特性の結果、燃焼反応度は基準炉心から 1.0 % $\Delta k/kk'$ 増加している。そのため、主炉停止系の必要制御反応度は、基準炉心の燃焼補償にこの分が追加される。一方、燃料集合体数は 562 体から 592 体に増加しており、制御棒価値は低下する。この効果については、暫定的に、基準炉心の制御棒価値に、燃料集合体数の比を補正係数として乗じることとした。これらの効果を考慮した制御棒反応度収支の概略評価結果を Table 5.2-4 に示す。主炉停止系の必要反応度は 6.1 % $\Delta k/kk'$ となる一方、ワンロードスタック時の制御棒反応度価値は 7.5 % $\Delta k/kk'$ となり、反応度停止余裕は 1.4 % $\Delta k/kk'$ と見積もられた。また、後備炉停止系についても、反応度停止余裕は 1.2 % $\Delta k/kk'$ であった。以上、本炉心の原子炉停止系は、現状の制御棒本数、配置でも成立の見通しを有することが示された。

5.2.3 中型炉に対する影響評価

i) 炉心配置と燃料集合体仕様

基準炉心をベースに、設計線出力、スミア密度を見直した炉心の設計検討を行う。中型炉についても、炉心配置と燃料集合体仕様設定の基本的な方針は、大型炉と同様である。

結果として、燃料集合体は 24 体、径方向ブランケットは 72 体増加されたが、集合体配列ピッチが低減するため、遮へい体外接円径は 5.42 m と制限条件の 5.5 m を満足している。燃料集合体の仕様について、燃料ピン径は、基準炉心の 10.4 mm から 9.8 mm まで低減され、集合体配列ピッチは、基準炉心の 206.3 mm から 196.4 mm まで短縮されることとなった。

検討の結果得られた炉心配置を Fig. 5.2-2 に示すとともに、燃料仕様を Table 5.2-5 に代表炉心と比較して示した。

ii) 主要な核特性

検討の結果得られた主要な核特性を Table 5.2-5 に代表炉心と比較して示した。

核特性への影響の傾向も大型炉と同様であり、燃料ピン径の細径化、FP 混入率の増加の効果により、Pu 富化度は平均で 1.6 wt% 増加 (相対値で 8 % に相当)、内部転換比は 0.04 低下する結果となった。内部転換比は低下するものの、下部軸方向ブランケットを 4 cm 増加することで、遮へい体外接円径制限 5.5 m を満足する範囲で、増殖比の目標値 1.1 を達成することがわかった。燃焼反応度については、基準炉心の 2.8 % $\Delta k/k'$ から 3.6 % $\Delta k/k'$ まで増加しており、制御棒反応度収支に影響することが予想される。初装荷炉心重金属インベントリについては、炉心部では 5 % 程度低下するが、径方向ブランケットの装荷量は 80 % 程度増加する結果となった。そのため、燃料サイクルコストに影響する全炉心取出平均燃焼度は、基準炉心の 86 GWd/t から 74 GWd/t まで 14 % 程度低下するが、炉心性能目標の 60 GWd/t は上回ることが認められた。本炉心の詳細な重金属インベントリについては、Table 5.2-6 にまとめた。反応度特性についても、大型炉同様、影響は比較的小さいことがわかった。

以上、本炉心は FS の主要な設計条件、炉心性能目標を満足しており、FS の中型代表炉心にバイバック燃料を適用した場合、設計上成立する見通しを有することがわかった。

iii) 制御棒反応度収支

制御棒反応度収支は、大型炉同様、厳しくなる方向に影響を受けるため、制御棒反応度収支について概略評価を行う。

Table 5.2-7 に、基準炉心の制御棒反応度収支を示す。Table 5.2-5 の核特性の結果、燃焼反応度は基準炉心から 0.8 % $\Delta k/k'$ 増加しており、また、燃料集合体数は 286 体から 310 体に増加している。これらの効果を考慮した制御棒反応度収支の概略評価結果を Table 5.2-8 に示す。主炉停止系の必要反応度は 6.39 % $\Delta k/k'$ となる一方、ワンロードスタック時の制御棒反応度値は 5.8 % $\Delta k/k'$ となり、反応度停止余裕は負値となった。一方、後備炉停止系については、反応度停止余裕は 0.53 % $\Delta k/k'$ であった。このように、後備炉停止系については成立の見通しを有するが、主炉停止系については、制御棒値が不足する結果となった。従って、現状、暫定的に基準炉心と同様の制御棒配置を想定しているが、今後、炉心設計の進捗に応じて、制御棒体数の増加や B₄C 体積比の増加、若しくは、燃料交換バッチの増加による運転サイクル長の短縮等の対策が必要と考えられる。

5.3 スフェアパック燃料採用による影響評価

5.3.1 スフェアパック燃料の基本仕様

スフェアパック燃料としては、2 粒径の粒子（大粒径 800 μm 、小粒径 80 μm 程度）を採用することとした。スミア密度については、これまでの実績から、炉心部、ブランケット部とも 80%TD とした。また、燃料中の FP 混入率としては、湿式再処理法を適用することから、基準炉心と同様の 0.2 vol% とした。

5.3.2 大型炉に対する影響評価

(1) 炉心配置と集合体仕様

基準炉心をベースに、設計線出力、スミア密度を見直した炉心の設計検討を行う。スフェアパック燃料の設計線出力は、バイパック燃料と同様、390 W/cm である。両燃料の炉心部スミア密度を比較すると、バイパック燃料が 82 %TD であるのに対して、スフェアパック燃料は 80 %TD である。また、FP 混入率は、バイパック燃料で 2.0 vol%、スフェアパック燃料で 0.2 vol% と、バイパック燃料で FP に占有されている燃料体積は、スフェアパック燃料より 2 %程度大きいことになる。このことから、両燃料の炉心部の重金属密度は同程度となるため、結果として、スフェアパック燃料炉心の炉心配置、および、燃料ミート部以外の燃料仕様は、バイパック燃料炉心と同様となった。

検討の結果得られた炉心配置を Fig. 5.2-1 に示した。これは、バイパック燃料炉心と同一のものである。また、燃料仕様について、Table 5.3-1 に代表炉心と比較して示した。

(2) 主要な核特性

検討の結果得られた主要な核特性を Table 5.3-1 に代表炉心と比較して示した。

核特性への影響の傾向は、バイパック燃料炉心と概ね同様であり、燃料ピン細径化の効果により、Pu 富化度は平均で 1.3 wt% 増加（相対値で 7 %に相当）、内部転換比は 0.04 低下する結果となった。燃焼反応度については、基準炉心の 2.3 % $\Delta k/kk'$ から 3.2 % $\Delta k/kk'$ まで増加した。ただし、バイパック燃料炉心と比較すると、FP 混入率が 0.2 vol% と少ない効果により、核特性の劣化の程度は小さいことが認められた。増殖比 1.10 を満足するには下部軸方向ブランケットを 7 cm 延長する必要がある、この値は、バイパック燃料炉心より 3 cm 短い値である。全炉心取出平均燃焼度は、基準炉心の 90 GWd/t から 83 GWd/t まで 8 %程度低下するが、炉心性能目標の 60 GWd/t は上回ることが認められた。本炉心の詳細な重金属インベントリについては、Table 5.3-2 にまとめた。反応度特性についても、バイパック燃料炉心同様、影響は比較的小さい結果であった。ドップラ係数については、絶対値の低下が、バイパック燃料炉心の 10 %に対してスフェアパック燃料炉心では 5 %と、FP 混入率が少ないため影響は低減されていた。

以上、本炉心は FS の主要な設計条件、炉心性能目標を満足しており、FS の大型代表炉心にスフェアパック燃料を適用した場合、設計上成立する見通しを有することがわかった。

(3) 制御棒反応度収支

制御棒反応度収支の概略評価結果を Table 5.3-3 に示す。結果として、バイパック燃料炉心と燃焼反応度が 0.1 % $\Delta k/kk'$ 異なる以外は同じであり、主炉停止系の反応度停止余裕は 1.5 % $\Delta k/kk'$ 、後備炉停止系の反応度停止余裕は 1.2 % $\Delta k/kk'$ と見積もられた。本炉心の原

子炉停止系は、現状の制御棒本数、配置でも成立の見通しを有することが示された。

5.3.3 中型炉に対する影響評価

(1) 炉心配置と集合体仕様

基準炉心をベースに、設計線出力、スミア密度を見直した炉心の設計検討を行う。大型炉同様、炉心配置、および、燃料ミート部以外の燃料仕様は、バイパック燃料炉心と同様となった。検討の結果得られた炉心配置を Fig. 5.2-2 に示した。また、燃料仕様について、Table 5.3-4 に代表炉心と比較して示した。

(2) 主要な核特性

検討の結果得られた主要な核特性を Table 5.3-4 に代表炉心と比較して示した。

核特性への影響の傾向は、大型炉と同様であり、燃料ピン細径化の効果により、Pu 富化度は平均で 1.3 wt% 増加（相対値で 6% に相当）、内部転換比は 0.04 低下する結果となった。燃焼反応度については、基準炉心の 2.8 % $\Delta k/kk'$ から 3.5 % $\Delta k/kk'$ まで増加した。増殖比 1.10 を満足するには、軸方向ブランケットを 2 cm 延長する必要がある、この値は、バイパック燃料炉心より 2 cm 短い値である。全炉心取出平均燃焼度は、基準炉心の 86 GWd/t から 78 GWd/t まで 9% 程度低下するが、炉心性能目標の 60 GWd/t は上回ることが認められた。本炉心の詳細な重金属インベントリについては、Table 5.3-5 にまとめた。反応度特性についても、大型炉同様、影響は比較的小さいことがわかった。

以上、本炉心は FS の主要な設計条件、炉心性能目標を満足しており、FS の大型代表炉心にスフェアパック燃料を適用した場合、設計上成立する見通しを有することがわかった。

(3) 制御棒反応度収支

制御棒反応度収支の概略評価結果を Table 5.3-6 に示す。結果として、バイパック燃料炉心と燃焼反応度が 0.1 % $\Delta k/kk'$ 異なる以外は同じであり、主炉停止系の反応度停止余裕は -0.49 % $\Delta k/kk'$ 、後備炉停止系の反応度停止余裕は 0.53 % $\Delta k/kk'$ と見積もられた。このように、主炉停止系については制御棒値が不足する結果となり、現状、暫定的に基準炉心と同様の制御棒配置を想定しているが、今後、炉心設計の進捗に応じて、制御棒体数の増加や B₄C 体積比の増加、若しくは、燃料交換バッチの増加による運転サイクル長の短縮等の対策が必要と考えられる。

6. まとめ

- 振動充填燃料として、バイパック燃料、スフェアパック燃料を採用した場合の燃料熱設計への影響について評価を行った。その結果、組織変化開始温度、組織変化領域密度等の組織変化モデル条件の設定が重要であることがわかり、現状の知見の範囲で、照射後試験結果との整合性が好適な定数を選定した。このモデルでは、過出力時にペレット燃料と同等の温度上昇条件を採用する場合、設計線出力（定格時線出力制限）が 390 W/cm 程度まで低減される可能性があることがわかった。この線出力は、ペレット燃料に対する FS の制限条件より 10 % 程度低い値であり、炉心・燃料仕様の変更が必要となる。
- 振動充填燃料を採用した場合の燃料熱設計上の特性として、ペレット燃料に比べて、定格時線出力の溶融限界線出力に対する感度が大きい傾向が示された。そのため、過出力係数が大きく、定格時の線出力が低く制限されるような炉心においては、設計線出力はより低く制限される傾向を有することがわかった。
- FS 検討炉心を対象に、ペレット燃料からバイパック燃料、スフェアパック燃料に変更した場合の炉心・燃料仕様、核特性に対する影響評価を行った。結果として、大型炉、中型炉とも、燃料ピン径、炉心配置等の仕様の一部に見直しは要求されるものの、核特性に与える影響は小さく、FS の設計条件、炉心性能目標を満足できる設計が可能であることがわかった。

7. 今後の課題

- 今回の検討から、振動充填燃料の燃料熱設計においては、組織変化モデル条件（組織変化開始温度、組織変化領域密度）の設定が重要であるという結論が得られた。そのため、今後、振動充填燃料の照射後試験のデータを拡充するとともに、継続的に適切なモデル条件の設定に向けた検討を実施していくことが必要と考えられる。
- 振動充填燃料について、より信頼性の高い温度評価モデルの構築に向け、振動充填燃料についてもペレット燃料同様、燃料溶融試験（PTM 試験）等の燃料温度評価に供する試験を実施することが必要と考えられる。（スフェアパック燃料については、PSI と JAEA の共同で一部 PTM 試験が実施されており、現在、JAEA 内部で評価モデルの検討に着手されている。）
- 振動充填燃料の温度評価モデルについて、現状のモデルは定常時用であるため、溶融限界線出力評価の様な高温条件への適用には問題を有する。今回の検討では、過渡時に対して暫定的な方策を設定し対応を行ったが、信頼性の高い溶融限界線出力の評価を行うためには、高温側まで適用可能な過渡時用の温度評価モデルの開発が必要と考えられる。

謝辞

本報告における主要な解析作業について、燃料挙動解析は、東芝 坪井 靖 殿、松山 慎一郎 殿に、核特性解析は、東芝 森木 保幸 殿にご担当頂きました。諸氏には、厳しいスケジュールの中、ご尽力頂くとともに、評価・設計作業全般につきましても、多くの知見をご教示頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 池上 哲雄, 他, 「炉心・燃料 (燃料形態) の技術検討書 - 実用化戦略調査研究 (フェーズ I) 成果報告 -」, JNC TY9400 2001-011, 2001 年 3 月.
- [2] 此村 守, 他, 「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズ II 中間報告 - 原子炉プラントシステム技術検討書 -」, JNC TN9400 2004-035, 2004 年 6 月.
- [3] 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 - (1) 原子炉プラントシステム -」, JNC TN9400 2006-042, 2006 年 4 月.
- [4] A.A.Mayorshin, et al., "Calculated-Experimental Justification of Using Vibropack UO₂ and PuO₂ in PWR", Proceedings of Gloval'97, Yokahama, (1997).
- [5] 森平 正之, 他, 「振動充填燃料開発に関するスイス PSI・オランダ NRG との共同研究成果報告書 (I) - 基本計画・燃料設計・照射燃料ピン製造 -」, JNC TN8400 2004-014, 2004 年 7 月
- [6] Evaluation of Material Property Correlations Used in LIFE-II, GEAP-13967, (1973).
- [7] A.M.Ross, R.L.Stoute, "Heat Transfer Coefficient between UO₂ and Zircaloy-2", AECL-1552, (1962).
- [8] 井上 賢紀, 浅賀 健男, 「高速炉用ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料ピンの伝熱特性に及ぼす燃焼効果の評価 - 燃料組織変化に及ぼす照射条件の影響とギャップリオープン現象 -」, JNC TY9400 2001-081, (2001).
- [9] F.Botta, C.Hellwig, "SPACON - A Theoretical Model for Calculating the Heat Transport Properties in Sphere-Pac Fuel Pins", Nucl. Sci. Eng., Vol. 135, p.165, (2000).
- [10] 中村 雅弘, 他, 「振動充てん燃料設計コードの開発」, JNC TN-1340 2002-001, サイクル機構技報, No.15, p.47, (2002).
- [11] 永沼 正行, 水野 朋保, 「振動充填 MOX 燃料の採用による線出力・燃料仕様・核特性への影響に関する検討」, 日本原子力学会「2004 年春の年会」予稿集 O42 (2004).
- [12] 羽様 平, 他, 「高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成 (研究報告)」, JNC TN9400 2002-064, (2002).
- [13] R.Herbig, et al., "Vibrocompacted fuel for the liquid metal reactor BOR-60", Journal of Nuclear Materials, 204, (1993).

表リスト

Table 2-1	Comparison of typical fuel thermal design models (pellet fuel, vibro-packed fuel and sphere-pac fuel)
Table 4.2-1	Specifications and conditions of each type fuel evaluated in this study (Vibro-packed fuel, sphere-pac fuel, solid pellet fuel and annular pellet fuel)
Table 4.3-1	Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)
Table 4.3-2	Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)
Table 4.3-3	Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Solid pellet fuel; Pellet fuel condition case)
Table 4.3-4	Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Annular pellet fuel; Pellet fuel condition case)
Table 4.3-5	Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)
Table 4.3-6	Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)
Table 4.3-7	Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)
Table 4.3-8	Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)
Table 4.3-9	Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)
Table 4.3-10	Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)
Table 5.1-1	Main design conditions of sodium-cooled MOX fuel core in FS phase-II
Table 5.1-2	Main fuel specifications of the FS phase-II reference core (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.1-3	Main nuclear performances of the FS phase-II reference core (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.1-4	Main fuel specifications of the FS phase-II reference core (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.1-5	Main nuclear performances of the FS phase-II reference core (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.2-1	Influence to specifications and nuclear performances by adopting vibro-packed fuel (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.2-2	Heavy metal inventories of the vibro-packed fuel core (Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Table 5.2-3	Control reactivity balance of the FS phase-II reference core (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.2-4	Control reactivity balance of the vibro-packed fuel core (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.2-5	Influence to specifications and nuclear performances by adopting vibro-packed fuel (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.2-6	Heavy metal inventories of the vibro-packed fuel core (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.2-7	Control reactivity balance of the FS phase-II reference core (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.2-8	Control reactivity balance of the vibro-packed fuel core (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.3-1	Influence to specifications and nuclear performances by adopting sphere-pac fuel (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.3-2	Heavy metal inventories of the sphere-pac fuel core (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.3-3	Control reactivity balance of the sphere-pac fuel core (Large-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.3-4	Influence to specifications and nuclear performances by adopting sphere-pac fuel (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.3-5	Heavy metal inventories of the sphere-pac fuel core (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)
Table 5.3-6	Control reactivity balance of the sphere-pac fuel core (Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

図リスト

- Fig. 2-1 Comparison of figures of vibro-packed fuel and sphere-pac fuel
- Fig. 2-2 Comparison of restructuring states of pellet fuel and vibro-packed fuel
- Fig. 3-1 Flow of this study
- Fig. 4.1-1 Influence to irradiation behavior by conditions of restructuring model (Vibro-packed fuel)
- Fig. 4.1-2 Influence to irradiation behavior by conditions of restructuring model (Sphere-pac fuel)
- Fig. 4.3-1(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm) (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-1(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm) (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-1(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm) (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-2(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm) (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-2(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm) (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-2(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm) (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-3 Comparison of relationships between stationary linear heat ratings and power-to-melt linear heat ratings (Vibro-packed fuel, sphere-pac fuel and solid pellet fuel) (Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-4(1) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-4(2) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-4(3) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Solid pellet fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-4(4) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Annular pellet fuel; Pellet fuel condition case)
- Fig. 4.3-5(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm) (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)
- Fig. 4.3-5(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm) (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)
- Fig. 4.3-5(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm) (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)
- Fig. 4.3-6(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm) (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)
- Fig. 4.3-6(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm)

- (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)
- Fig. 4.3-6(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm)
(Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)
- Fig. 4.3-7(1) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Vibro-packed fuel;
RIAR model condition case)
- Fig. 4.3-7(2) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Sphere-pac fuel;
RIAR model condition case)
- Fig. 5.1-1 Configuration of the FS phase-II reference core (Large-scale MOX fuel high
conversion type core)
- Fig. 5.1-2 Configuration of the FS phase-II reference core (Medium-scale MOX fuel high
conversion type core)
- Fig. 5.2-1 Configuration of the vibro-packed fuel core and the sphere-pac fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)
- Fig. 5.2-2 Configuration of the vibro-packed fuel core and the sphere-pac fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Table 2-1 Comparison of typical fuel thermal design models (pellet fuel, vibro-packed fuel and sphere-packed fuel)

	Pellet fuel	Vibro-packed fuel	Sphere-pac fuel
Fuel temperature evaluation model	<ul style="list-style-type: none"> - Thermal conductivity - Expression for MONJU^[6], etc - Gap conductance - Ross & Stoute model^[7], etc 	<ul style="list-style-type: none"> - Thermal conductivity - RIAR model^[4]: Thermal conductivity for powder region is evaluated. That for restructuring region is equivalent to that of the pellet fuel. - Gap conductance - RIAR model^[4]: Gap conductance between fuel powder and cladding is evaluated. 	<ul style="list-style-type: none"> - Thermal conductivity - Gap conductance - SPACON model^[9]: Thermal conductivity and gap conductance are evaluated by modeling of fuel particles. Here, the growing behavior of fuel particles is modeled based on the mechanism.
Fuel restructuring model	<ul style="list-style-type: none"> - Restructuring region density - Doi-Katsuragawa model^[8], etc - Restructuring starting temperature - 1,400 °C, etc 	<ul style="list-style-type: none"> - Restructuring region density - RIAR model^[4]: 97 %TD (columnar grain region density) - Restructuring starting temperature - RIAR model^[4]: 1,100°C 	

Table 4.2-1 Specifications and conditions of each type fuel evaluated in this study
(Vibro-packed fuel, sphere-pac fuel, solid pellet fuel and annular pellet fuel)

	Vibro-packed fuel	Sphere-pac fuel	Solid pellet fuel	Annular pellet fuel
Cladding outer diameter (mm)	10.4	10.4	10.4	10.4
Cladding thickness (mm)	0.71	0.71	0.71	0.71
Pellet outer diameter (mm)	-	-	8.78	8.78
Pellet inner diameter (mm)	-	-	-	2.74
Fuel column length (cm)	100	100	100	100
Pu enrichment (wt%)	25	25	24	24
²³⁵ U concentration (wt%)	0.3	0.3	0.3	0.3
OM (-)	1.95	1.95	1.95	1.95
Pellet density at fabrication (%TD)	-	-	91	95
Smear density (%TD)	82	80	87	82
Additive rate of U metal getter (wt%)	7	-	-	-
Diameter of fuel particle (μ m)	-	Coarse particle : 800 Fine particle : 80	-	-
Filling rate of fuel particle (-)	-	Coarse particle : 0.620 Fine particle : 0.533	-	-
Maximum cladding temperature (at mid-wall) (°C)	700	700	700	700
Reactor outlet / inlet temperature (°C)	550 / 395	550 / 395	550 / 395	550 / 395
Thermal conductivity of fuel	Non-restructuring region	SPACON model	MONJU expression	MONJU expression
	Restructuring region	MONJU expression		
Gap conductance	RIAR model (Diameter of fuel particle : 30 μ m)	SPACON model	Modified Ross & Stoute model	Modified Ross & Stoute model

Table 4.3-1 Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)

	400W/cm case	450W/cm case	500W/cm case	Notes
PTM LHR (nominal) (W/cm)	549	569	592	
Uncertainty of specifications and irradiation conditions	5	7	9	Results by SIMPLE-II
Calculation error of code	35	35	35	Based on JAEA experience (tentative value)
Error of PTM test	33	34	36	6 % (equivalent to 3σ)
Total (uncertainty and error)	48	49	51	Statistical handling for uncertainty and error
Limitation of LHR for each stationary LHR case* (W/cm)	409	425	443	Over-power coefficient : 1.223
Limitation of stationary LHR (W/cm)	414			LHR in accord with stationary LHR is applied as the limitation.
Limitation of stationary LHR (W/cm) (Uncertainty of power is considered)	393			Uncertainty of power : 5 %

* ((Nominal) – (Uncertainty and error)) / (Over-power coefficient)

Table 4.3-2 Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)

	400W/cm case	450W/cm case	500W/cm case	Notes
PTM LHR (nominal) (W/cm)	557	576	599	
Uncertainty of specifications and irradiation conditions	11	13	14	Results by SIMPLE-II
Calculation error of code	35	35	35	Based on JAEA experience (tentative value)
Error of PTM test	33	35	36	6 % (equivalent to 3σ)
Total (uncertainty and error)	50	51	52	Statistical handling for uncertainty and error
Limitation of LHR for each stationary LHR case* (W/cm)	415	429	447	Over-power coefficient : 1.223
Limitation of stationary LHR (W/cm)	421			LHR in accord with stationary LHR is applied as the limitation.
Limitation of stationary LHR (W/cm) (Uncertainty of power is considered)	400			Uncertainty of power : 5 %

* ((Nominal) – (Uncertainty and error)) / (Over-power coefficient)

Table 4.3-3 Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Solid pellet fuel; Pellet fuel condition case)

	400W/cm case	450W/cm case	500W/cm case	Notes
PTM LHR (nominal) (W/cm)	587	601	617	
Uncertainty of specifications and irradiation conditions	47	48	49	8 % (this is referred to previous studies)
Calculation error of code	35	35	35	Based on JAEA experience (tentative value)
Error of PTM test	35	36	37	6 % (equivalent to 3σ)
Total (uncertainty and error)	68	70	71	Statistical handling for uncertainty and error
Limitation of LHR for each stationary LHR case* (W/cm)	424	434	447	Over-power coefficient : 1.223
Limitation of stationary LHR (W/cm)	430			LHR in accord with stationary LHR is applied as the limitation.
Limitation of stationary LHR (W/cm) (Uncertainty of power is considered)	409			Uncertainty of power : 5 %

* ((Nominal) – (Uncertainty and error)) / (Over-power coefficient)

Table 4.3-4 Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Annular pellet fuel; Pellet fuel condition case)

	400W/cm case	450W/cm case	500W/cm case	Notes
PTM LHR (nominal) (W/cm)	729	729	747	
Uncertainty of specifications and irradiation conditions	73	73	75	10 % (this is referred to previous studies)
Calculation error of code	35	35	35	Based on JAEA experience (tentative value)
Error of PTM test	44	44	45	6 % (equivalent to 3σ)
Total (uncertainty and error)	92	92	94	Statistical handling for uncertainty and error
Limitation of LHR for each stationary LHR case* (W/cm)	521	521	534	Over-power coefficient : 1.223
Limitation of stationary LHR (W/cm)	546			LHR in accord with stationary LHR is applied as the limitation.
Limitation of stationary LHR (W/cm) (Uncertainty of power is considered)	519			Uncertainty of power : 5 %

* ((Nominal) – (Uncertainty and error)) / (Over-power coefficient)

Table 4.3-5 Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)

400 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		527	-		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	530	2	4	Results by SIMPLE-II
	-0.02	523	-4		
Smear density 82 %	+5 %	525	-2	3	Results by SIMPLE-II
	-5 %	530	3		
Uncertainty of flow	+8 %	529	1	1	Results by SIMPLE-II
	-8 %	527	-1		
Statistical handling				5	

450 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		559	-		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	562	3	6	Results by SIMPLE-II
	-0.02	554	-6		
Smear density 82 %	+5 %	556	-3	4	Results by SIMPLE-II
	-5 %	563	4		
Uncertainty of flow	+8 %	560	1	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	558	-2		
Statistical handling				7	

500 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		587	-		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	590	4	7	Results by SIMPLE-II
	-0.02	579	-7		
Smear density 82 %	+5 %	581	-5	5	Results by SIMPLE-II
	-5 %	591	5		
Uncertainty of flow	+8 %	587	1	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	585	-2		
Statistical handling				9	

Table 4.3-6 Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)

400 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		571	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	576	5	9	Results by SIMPLE-II
	-0.02	562	-9		
Smear density 80 %	+2 %	577	6	6	Results by SIMPLE-II
	-2 %	565	-6		
Uncertainty of flow	+8 %	573	2	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	569	-2		
Statistical handling				11	

450 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		594	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	600	5	11	Results by SIMPLE-II
	-0.02	583	-11		
Smear density 80 %	+2 %	601	7	7	Results by SIMPLE-II
	-2 %	588	-6		
Uncertainty of flow	+8 %	596	1	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	592	-2		
Statistical handling				13	

500 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		587	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	590	6	7	Results by SIMPLE-II
	-0.02	579	-12		
Smear density 80 %	+2 %	581	7	7	Results by SIMPLE-II
	-2 %	591	-7		
Uncertainty of flow	+8 %	587	1	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	585	-2		
Statistical handling				14	

Table 4.3-7 Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)

	400W/cm case	450W/cm case	500W/cm case	Notes
PTM LHR (nominal) (W/cm)	603	619	634	
Uncertainty of specifications and irradiation conditions	9	11	14	Results by SIMPLE-II
Calculation error of code	35	35	35	Based on JAEA experience (tentative value)
Error of PTM test	36	37	38	6 % (equivalent to 3σ)
Total (uncertainty and error)	51	52	54	Statistical handling for uncertainty and error
Limitation of LHR for each stationary LHR case* (W/cm)	451	463	475	Over-power coefficient : 1.223
Limitation of stationary LHR (W/cm)	468			LHR in accord with stationary LHR is applied as the limitation.
Limitation of stationary LHR (W/cm) (Uncertainty of power is considered)	445			Uncertainty of power : 5 %

* ((Nominal) – (Uncertainty and error)) / (Over-power coefficient)

Table 4.3-8 Evaluations of power-to-melt linear heat rating and limitation at the stationary operation (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)

	400W/cm case	450W/cm case	500W/cm case	Notes
PTM LHR (nominal) (W/cm)	584	607	634	
Uncertainty of specifications and irradiation conditions	10	11	12	Results by SIMPLE-II
Calculation error of code	35	35	35	Based on JAEA experience (tentative value)
Error of PTM test	35	36	38	6 % (equivalent to 3σ)
Total (uncertainty and error)	51	52	53	Statistical handling for uncertainty and error
Limitation of LHR for each stationary LHR case* (W/cm)	436	454	475	Over-power coefficient : 1.223
Limitation of stationary LHR (W/cm)	459			LHR in accord with stationary LHR is applied as the limitation.
Limitation of stationary LHR (W/cm) (Uncertainty of power is considered)	436			Uncertainty of power : 5 %

* ((Nominal) – (Uncertainty and error)) / (Over-power coefficient)

Table 4.3-9 Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)

400 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		547	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	548	2	3	Results by SIMPLE-II
	-0.02	544	-3		
Smear density 82 %	+5 %	540	-7	8	Results by SIMPLE-II
	-5 %	555	8		
Uncertainty of flow	+8 %	548	1	1	Results by SIMPLE-II
	-8 %	546	-1		
Statistical handling				9	

450 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		583	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	585	2	4	Results by SIMPLE-II
	-0.02	579	-4		
Smear density 82 %	+5 %	573	-10	10	Results by SIMPLE-II
	-5 %	593	10		
Uncertainty of flow	+8 %	583	1	1	Results by SIMPLE-II
	-8 %	581	-1		
Statistical handling				11	

500 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		614	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	616	3	5	Results by SIMPLE-II
	-0.02	609	-5		
Smear density 82 %	+5 %	601	-13	13	Results by SIMPLE-II
	-5 %	626	13		
Uncertainty of flow	+8 %	614	0	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	612	-2		
Statistical handling				14	

Table 4.3-10 Evaluations on uncertainty of specifications and irradiation conditions to power-to-melt linear heat rating (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)

400 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		608	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	612	4	8	Results by SIMPLE-II
	-0.02	600	-8		
Smear density 80 %	+2 %	614	7	7	Results by SIMPLE-II
	-2 %	602	-5		
Uncertainty of flow	+8 %	609	2	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	606	-2		
Statistical handling				10	

450 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		634	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	638	4	9	Results by SIMPLE-II
	-0.02	625	-9		
Smear density 80 %	+2 %	641	7	7	Results by SIMPLE-II
	-2 %	629	-5		
Uncertainty of flow	+8 %	636	2	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	632	-2		
Statistical handling				11	

500 W/cm

		PTM LHR (W/cm)	Difference from nominal value (W/cm)		Notes
Nominal		657	—		Results by SIMPLE-II
O/M ratio 1.95	+0.02	662	5	10	Results by SIMPLE-II
	-0.02	647	-10		
Smear density 80 %	+2 %	664	6	6	Results by SIMPLE-II
	-2 %	652	-5		
Uncertainty of flow	+8 %	659	2	2	Results by SIMPLE-II
	-8 %	655	-2		
Statistical handling				12	

Table 5.1-1 Main design conditions of sodium-cooled MOX fuel core in FS phase-II

Items		Large-scale core	Medium-scale core	
Primary specifications of plant	Electric power	1,500 MWe	750 MWe	
	Thermal power	3,570 MWt	1,785 MWt	
	Reactor outlet / input temperature	550 / 395 °C	←	
	Coolant flow rate of primary loop	18,200 kg/s	9,083 kg/s	
Primary specifications of core and fuel	Fuel type	MOX	←	
	Core type	Homogeneous 2 region	←	
	Measure to avoid re-criticality	Advanced inner-duct assembly	←	
	Fuel composition	FBR multi-recycle composition *1	←	
	Structural material	Cladding	ODS*2	←
Duct		PNC-FMS*2	←	
Limitations	Safety requirement	Sodium void reactivity	Less or equal 6 \$	←
		Core height	Less or equal 100 cm	←
		Core average specific power	Less or equal about 40 kW/kg-MOX	←
	Fuel integrity	Maximum linear heat rating	Less or equal 430 W/cm	←
		Fast neutron fluence*3	Less or equal 5×10^{23} n/cm ²	←
		Maximum cladding temperature*4	Less or equal 700°C	←
		CDF (normal operation)	Less or equal 0.5	←
Plant conditions	Shielding circumscription diameter	Less or equal about 7 m	Less or equal 5.5 m	
	Arrangement of control rod assemblies	Response to shell-less column-type UIS	←	
	Pressure drop of fuel bundle	Less or equal about 0.2 MPa	←	
Nuclear performance targets	Breeding ratio	Breeding core	1.1	←
		Break even core	1.03	←
	Initial fissile Pu inventory	Less or equal about 7 t/GWe	←	
	Average discharge burn-up	Core	Greater or equal about 150 GWd/t	←
		Total*5	Greater or equal about 60 GWd/t	←
Operation cycle length	Greater or equal 18 months	←		

*1 : FBR multi-recycle TRU composition (wt%)

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

*2 : Structural material composition [for core calculation] (wt%)

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

*3 : $E > 0.1$ MeV, *4 : At mid-wall of cladding *5 : Average burn-up including blanket

Table 5.1-2 Main fuel specifications of the FS phase-II reference core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Items		Specifications		
		Core	Axial blanket	Radial blanket
Fuel element	Fuel type	(Pu,U)O ₂ (Annular pellet)	UO ₂ (Solid pellet)	UO ₂ (Solid pellet)
	Cladding material	ODS		←
	Cladding outer diameter (mm)	10.4		11.7
	Cladding inner diameter (mm)	8.98		10.86
	Cladding thickness (mm)	0.71		0.42
	Total fuel pin length (mm)	2690		←
	Fuel column length (mm)	1000	200 / 200 (upper/lower)	1400
	Gas plenum length (upper/lower) (mm)	100 / 1100		←
	Bonded material	He		←
	Smear density (%TD)	82	90	90
Assembly	Total assembly length (mm)	4570		←
	Number of pins per a assembly (-)	255		217
	Fuel pin pitch (mm)	11.5		12.8
	Pin pitch to diameter ratio (P/D)	1.11		1.10
	Outer side length of inner duct (mm)	46.0		—
	Inner duct wall thickness of (mm)	2.0		—
	Duct material	PNC-FMS		←
	Outer flat to flat distance of outer duct (mm)	201.6		←
	Inner flat to flat distance of outer duct (mm)	191.6		←
	Outer duct wall thickness (mm)	5.0		←
	Gap between assemblies (mm)	4.4		←
	Assembly pitch (mm)	206.0		←
	Spacer wire diameter (mm)	1.03		1.07
	Helical pitch of spacer wire (mm)	200.0		←
	Volume fraction (%)	Fuel (effective)	43.9 (36.0)	43.9 (39.6)
Structure		25.8	←	18.5
Coolant		30.3	←	26.7

Table 5.1-3 Main nuclear performances of the FS phase-II reference core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Items	Performances
Operation cycle length	26.3 months (800days)
Refueling butch (core / radial blanket)	4 / 4
Pu enrichment* ¹ (inner core / outer core)	18.3 / 20.9 wt%
Average discharge burn-up (core / axial blanket / radial blanket)	147 / 21 / 8 GWd/t
Total average discharge burn-up* ²	90 GWd/t
Burn-up reactivity	2.3 %Δk/k'
Breeding ratio (Total) (core / axial blanket / radial blanket)	1.10 0.84 / 0.19 / 0.07
Core average specific power	41 kW/kg-MOX
Maximum linear heat rating (inner core / outer core)	398 / 396 W/cm
Core average power density	145 W/cm ³
Power share rate (core / axial blanket / radial blanket)	0.926 / 0.058 / 0.016
Maximum fast neutron flux* ³	1.8×10 ¹⁵ n/cm ² s
Maximum fast neutron fluence* ³	5.0×10 ²³ n/cm ²
Initial heavy metal inventories (core / axial blanket / radial blanket)	71.8 / 31.6 / 23.5 t
Heavy metal inventory ratio of blanket to core	About 0.77
Initial fissile Pu inventory	5.7 t/GWe
Sodium void reactivity* ⁴ (EOEC)	5.3 \$* ⁵
Doppler coefficient [Tdk/dT]* ⁴ (EOEC)	-5.7×10 ⁻³

*1 : Pu/HM

*2 : Average burn-up including blanket

*3 : E > 0.1 MeV

*4 : Heterogeneous effect in assembly is considered.

*5 : Effective delayed neutron fraction : 0.00342 (All parent nuclides are considered)

Table 5.1-4 Main fuel specifications of the FS phase-II reference core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Items		Specifications		
		Core	Axial blanket	Radial blanket
Fuel element	Fuel type	(Pu,U)O ₂ (Annular pellet)	UO ₂ (Solid pellet)	UO ₂ (Solid pellet)
	Cladding material	ODS		←
	Cladding outer diameter (mm)	10.4		11.7
	Cladding inner diameter (mm)	8.98		10.87
	Cladding thickness (mm)	0.71		0.415
	Total fuel pin length (mm)	2630		←
	Fuel column length (mm)	1000	200 / 200 (upper/lower)	1400
	Gas plenum length (upper/lower) (mm)	100 / 990		←
	Bonded material	He		←
	Smear density (%TD)	82	90	←
Assembly	Total assembly length (mm)	4300		←
	Number of pins per a assembly (-)	255		217
	Fuel pin pitch (mm)	11.50		12.84
	Pin pitch to diameter ratio (P/D)	1.11		1.10
	Outer side length of inner duct (mm)	46.0		—
	Inner duct wall thickness of (mm)	2.0		—
	Duct material	PNC-FMS		←
	Outer flat to flat distance of outer duct (mm)	201.8		←
	Inner flat to flat distance of outer duct (mm)	191.8		←
	Outer duct wall thickness (mm)	5.0		←
	Gap between assemblies (mm)	4.5		←
	Assembly pitch (mm)	206.3		←
	Spacer wire diameter (mm)	1.04		1.08
	Helical pitch of spacer wire (mm)	200.0		200
Volume fraction (%)	Fuel (effective)	43.8 (35.9)	← (39.4)	54.6 (49.2)
	Structure	25.7	←	18.5
	Coolant	30.4	←	26.9

Table 5.1-5 Main nuclear performances of the FS phase-II reference core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Items	Performances
Operation cycle length	27.4 months (832 days)
Refueling butch (core / radial blanket)	4 / 4
Pu enrichment*1 (inner core / outer core)	18.8 / 23.7 wt%
Average discharge burn-up (core / axial blanket / radial blanket)	150 / 19.3 / 8.9 GWd/t
Total average discharge burn-up*2	86 GWd/t
Burn-up reactivity	2.8 %Δk/k'
Breeding ratio (Total) (core / axial blanket / radial blanket)	1.10 0.80 / 0.19 / 0.11
Core average specific power	40 kW/kg-MOX
Maximum linear heat rating (inner core / outer core)	417 / 401 W/cm
Core average power density	143 W/cm ³
Power share rate (core / axial blanket / radial blanket)	0.924 / 0.052 / 0.024
Maximum fast neutron flux*3	1.9×10 ¹⁵ n/cm ² · s
Maximum fast neutron fluence*3	5.4×10 ²³ n/cm ²
Initial heavy metal inventories (core / axial blanket / radial blanket)	36.5 / 16.1 / 16.2 t
Heavy metal inventory ratio of blanket to core	About 0.88
Initial fissile Pu inventory	6.3 t/GWe
Sodium void reactivity*4 (EOEC)	5.1 \$*5
Doppler coefficient [Tdk/dT]*4 (EOEC)	-5.3×10 ⁻³

*1 : Pu/HM

*2 : Average burn-up including blanket

*3 : E > 0.1 MeV

*4 : Heterogeneous effect in assembly is considered.

*5 : Effective delayed neutron fraction : 0.00335 (All parent nuclides are considered)

Table 5.2-1 Influence to specifications and nuclear performances by adopting vibro-packed fuel
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Items	Reference core (Pellet fuel)	LHR 390W/cm core (Vibro-packed fuel)
Core height	100 cm	←
Axial blanket height (upper / lower / total)	20 / 20 / 40 cm	20 / 30 / 50 cm
Core equivalent diameter	538 cm	530 cm
Shielding circumference diameter	677 cm	698 cm
Number of fuel assemblies (inner core / outer core / total)	288 / 274 / 562	300 / 292 / 592
Number of radial blanket assemblies	96	186
Number of control rod assemblies (primary / backup / total)	40 / 17 / 57	←
Cladding outer diameter	10.4 mm	9.9 mm
Cladding thickness	0.71 mm	0.68 mm
Smear density (core / axial blanket / radial blanket)	82 / 90 / 90 %TD	82 / 82 / 85 %TD
FP content rate	0.2 vol%	2.0 vol%
Spacer wire diameter	1.03 mm	1.05 mm
Number of pins per a assembly	255	←
Assembly pitch	206.0 mm	198.0 mm
Effective fuel volume fraction	36.0 %	35.3 %
Operation cycle length	26.3 months (800days)	←
Refueling butch (core / radial blanket)	4 / 4	←
Pu enrichment*1 (inner core / outer core)	18.3 / 20.9 wt%	20.0 / 22.5 wt%
Average discharge burn-up (core / total)*2)	147 / 90 GWd/t	157 / 79 GWd/t
Burn-up reactivity	2.3 %Δk/kk'	3.3 %Δk/kk'
Breeding ratio (core / axial blanket / radial blanket / total)	0.84 / 0.19 / 0.07 / 1.10	0.79 / 0.21 / 0.10 / 1.10
Maximum linear heat rating (inner core / outer core)	398 / 396 W/cm	387 / 387 W/cm
Maximum fast neutron fluence*3	5.0×10 ²³ n/cm ²	5.1×10 ²³ n/cm ²
Initial heavy metal inventories (core / axial blanket / radial blanket)	71.8 / 31.6 / 23.5 t	67.2 / 34.3 / 42.6 t
Initial fissile Pu inventory	5.7 t/GWe	5.8 t/GWe
Sodium void reactivity*4 (EOEC)	5.3 \$*5	5.4 \$*5
Doppler coefficient [Tdk/dT]*4 (EOEC)	-5.7×10 ⁻³	-5.2×10 ⁻³

*1 : Pu/HM, *2 : Average burn-up including blanket, *3 : E > 0.1 MeV, *4 : Heterogeneous effect in assembly is considered.

*5 : Effective delayed neutron fraction : 0.00342 (All parent nuclides are considered)

Table 5.2-2(1/2) Heavy metal inventories of the vibro-packed fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Nuclides	Loading fuel inventory per 1 batch [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	20.2	19.0	39.2	25.7	32.0	57.7	96.9
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	6,710.2	6,320.4	13,030.6	8,542.1	10,624.3	19,166.3	32,196.9
Total U	6,730.3	6,339.4	13,069.8	8,567.8	10,656.3	19,224.0	32,293.8
Pu238	19.6	21.5	41.2	0.0	0.0	0.0	41.2
Pu239	964.9	1,058.6	2,023.4	0.0	0.0	0.0	2,023.4
Pu240	572.5	628.1	1,200.6	0.0	0.0	0.0	1,200.6
Pu241	76.7	84.1	160.8	0.0	0.0	0.0	160.8
Pu242	69.6	76.4	146.0	0.0	0.0	0.0	146.0
Total Pu	1,703.3	1,868.7	3,572.0	0.0	0.0	0.0	3,572.0
Np237	8.9	9.8	18.7	0.0	0.0	0.0	18.7
Total Np	8.9	9.8	18.7	0.0	0.0	0.0	18.7
Am241	35.7	39.2	74.9	0.0	0.0	0.0	74.9
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	17.9	19.6	37.4	0.0	0.0	0.0	37.4
Total Am	53.6	58.7	112.3	0.0	0.0	0.0	112.3
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	17.9	19.6	37.4	0.0	0.0	0.0	37.4
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Cm	17.9	19.6	37.4	0.0	0.0	0.0	37.4
Total HM	8,514.0	8,296.3	16,810.3	8,567.8	10,656.3	19,224.0	36,034.3
FP*1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP*2	112.1	109.1	221.2	0.0	0.0	0.0	221.2
Total FP	112.1	109.1	221.2	0.0	0.0	0.0	221.2

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Nuclides	Discharge fuel inventory per 1 batch [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	4.0	6.8	10.8	13.8	25.1	38.9	49.7
U236	2.8	2.3	5.1	2.7	1.7	4.4	9.5
U238	5,355.5	5,451.7	10,807.2	7,923.6	10,330.5	18,254.1	29,061.3
Total U	5,362.4	5,460.7	10,823.1	7,940.1	10,357.2	18,297.4	29,120.5
Pu238	25.3	28.2	53.5	0.3	0.1	0.4	53.9
Pu239	776.6	837.0	1,613.6	422.0	242.2	664.2	2,277.7
Pu240	527.0	580.8	1,107.9	43.9	11.1	55.0	1,162.8
Pu241	84.7	83.7	168.5	2.9	0.4	3.3	171.7
Pu242	63.5	69.9	133.4	0.2	0.0	0.2	133.6
Total Pu	1,477.1	1,599.7	3,076.8	469.2	253.8	723.0	3,799.8
Np237	5.9	7.1	13.0	1.1	0.5	1.6	14.6
Total Np	5.9	7.1	13.0	1.1	0.5	1.6	14.6
Am241	28.2	39.9	68.1	0.3	0.0	0.3	68.5
Am242m	2.6	2.9	5.5	0.0	0.0	0.0	5.5
Am243	18.6	20.1	38.7	0.0	0.0	0.0	38.7
Total Am	49.4	62.9	112.4	0.3	0.0	0.4	112.7
Cm242	1.9	1.7	3.6	0.0	0.0	0.0	3.6
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm244	22.2	22.6	44.8	0.0	0.0	0.0	44.8
Cm245	4.3	3.6	7.8	0.0	0.0	0.0	7.8
Total Cm	28.6	28.1	56.7	0.0	0.0	0.0	56.7
Total HM	6,923.5	7,158.5	14,082.0	8,410.8	10,611.6	19,022.3	33,104.3
FP*1	1,594.4	1,144.4	2,738.8	146.1	42.6	188.7	2,927.5
FP*2	112.1	109.1	221.2	0.0	0.0	0.0	221.2
Total FP	1,706.5	1,253.5	2,960.1	146.1	42.6	188.7	3,148.8

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.2-2(2/2) Heavy metal inventories of the vibro-packed fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Nuclides	Fuel inventory at BOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	48.2	53.5	101.7	82.4	116.9	199.3	301.0
U236	6.4	4.6	11.0	4.8	2.7	7.5	18.5
U238	24,701.6	23,940.6	48,642.2	33,223.1	42,056.2	75,279.3	123,921.5
Total U	24,756.2	23,998.6	48,754.8	33,310.3	42,175.8	75,486.1	124,240.9
Pu238	89.5	96.5	186.0	0.3	0.1	0.3	186.3
Pu239	3,563.4	3,862.4	7,425.9	737.2	386.5	1,123.8	8,549.6
Pu240	2,233.5	2,451.6	4,685.1	44.0	10.2	54.1	4,739.2
Pu241	330.2	340.0	670.3	2.0	0.2	2.2	672.5
Pu242	267.6	295.2	562.8	0.1	0.0	0.1	562.8
Total Pu	6,484.2	7,045.8	13,530.0	783.6	397.0	1,180.5	14,710.5
Np237	30.1	34.4	64.5	1.8	0.7	2.6	67.1
Total Np	30.1	34.4	64.5	1.8	0.7	2.6	67.1
Am241	127.3	157.8	285.1	0.1	0.0	0.2	285.3
Am242m	6.2	5.8	12.0	0.0	0.0	0.0	12.0
Am243	73.2	79.5	152.7	0.0	0.0	0.0	152.7
Total Am	206.7	243.1	449.8	0.1	0.0	0.2	449.9
Cm242	6.2	5.1	11.3	0.0	0.0	0.0	11.3
Cm243	0.6	0.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9
Cm244	78.8	83.3	162.0	0.0	0.0	0.0	162.0
Cm245	8.4	6.6	15.0	0.0	0.0	0.0	15.0
Total Cm	94.0	95.3	189.2	0.0	0.0	0.0	189.2
Total HM	31,571.2	31,417.2	62,988.3	34,095.8	42,573.6	76,669.3	139,657.7
FP*1	2,494.7	1,781.2	4,275.8	156.2	48.1	204.4	4,480.2
FP*2	448.5	436.5	885.0	0.0	0.0	0.0	885.0
Total FP	2,943.1	2,217.7	5,160.8	156.2	48.1	204.4	5,365.2

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Nuclides	Fuel inventory at EOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	32.0	41.0	73.0	70.2	109.6	179.8	252.8
U236	9.2	6.9	16.2	7.5	4.5	12.0	28.1
U238	23,338.3	23,057.3	46,395.6	32,579.4	41,743.3	74,322.7	120,718.3
Total U	23,379.5	23,105.3	46,484.8	32,657.0	41,857.4	74,514.5	120,999.2
Pu238	95.1	103.3	198.4	0.6	0.1	0.8	199.2
Pu239	3,374.4	3,637.8	7,012.2	1,172.2	643.2	1,815.4	8,827.6
Pu240	2,187.6	2,404.1	4,591.8	89.1	21.9	111.0	4,702.8
Pu241	338.2	340.3	678.4	5.0	0.6	5.6	684.0
Pu242	261.5	288.6	550.1	0.2	0.0	0.2	550.3
Total Pu	6,256.8	6,774.1	13,031.0	1,267.1	665.8	1,932.9	14,963.9
Np237	27.1	31.6	58.7	3.1	1.3	4.4	63.1
Total Np	27.1	31.6	58.7	3.1	1.3	4.4	63.1
Am241	119.7	158.1	277.8	0.4	0.1	0.5	278.3
Am242m	8.8	8.7	17.5	0.0	0.0	0.0	17.6
Am243	74.0	80.0	154.0	0.0	0.0	0.0	154.0
Total Am	202.5	246.9	449.3	0.5	0.1	0.5	449.8
Cm242	8.1	6.9	15.0	0.0	0.0	0.0	15.0
Cm243	0.9	0.6	1.4	0.0	0.0	0.0	1.4
Cm244	83.2	86.4	169.5	0.0	0.0	0.0	169.5
Cm245	12.7	10.2	22.9	0.0	0.0	0.0	22.9
Total Cm	104.8	104.0	208.8	0.0	0.0	0.0	208.8
Total HM	29,970.7	30,261.8	60,232.5	33,927.8	42,524.6	76,452.3	136,684.8
FP*1	4,099.0	2,943.2	7,042.3	312.4	94.7	407.1	7,449.4
FP*2	448.5	436.5	885.0	0.0	0.0	0.0	885.0
Total FP	4,547.5	3,379.8	7,927.2	312.4	94.7	407.1	8,334.4

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.2-3 Control reactivity balance of the FS phase-II reference core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

[Unit : % $\Delta k/kk'$]

Items	Primary system*1	Backup system*1
I. Planned excess reactivity	4.2	0.6
(1) Power compensation	0.8	0.6
(2) Burn-up compensation*2	3.2	—
(3) Allowance for operation	0.2	—
II. Uncertainty (2 σ)	0.5	0.2
(1) Criticality prediction	0.0	—
(2) Power compensation prediction	—	0.12
(3) Fuel tolerance prediction	0.39	—
(4) Allowance for refueling	0.2	—
III. Accidental reactivity	—	0.2
IV. Requirement of reactivity (I + II + III)	5.1*3	1.0
V. Control rod worth (one rod stuck)	7.9*4	2.3*4
VI. Allowance of reactivity (V - IV)	2.8	1.3

*1 : ¹⁰B enrichment 80 %

*2 : Considering change of fuel composition

*3 : Considering 1\$ (0.4% $\Delta k/kk'$) as allowance for shutdown

*4 : Considering 11 % of correction factors (mesh effect, group collapsing effect, lumping effect, transport effect, etc) and 9 % of design prediction error

Table 5.2-4 Control reactivity balance of the vibro-packed fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

[Unit : % $\Delta k/kk'$]

Items	Primary system	Backup system
I. Planned excess reactivity	5.2	0.6
(1) Power compensation	0.8	0.6
(2) Burn-up compensation	4.2*1	—
(3) Allowance for operation	0.2	—
II. Uncertainty (2 σ)	0.5	0.2
(1) Criticality prediction	0.0	—
(2) Power compensation prediction	—	0.12
(3) Fuel tolerance prediction	0.39	—
(4) Allowance for refueling	0.2	—
III. Accidental reactivity	—	0.2
IV. Requirement of reactivity (I + II + III)	6.1	1.0
V. Control rod worth (one rod stuck)	7.5*2	2.2*2
VI. Allowance of reactivity (V - IV)	1.4	1.2

*1 : Adding increase of burn-up reactivity (1.0 % $\Delta k/kk'$) to the burn-up compensation of the reference core

*2 : Multiplying 0.95 (= 562/592) to the control rod worth of the reference core as effect of increase of total fuel assemblies

Table 5.2-5 Influence to specifications and nuclear performances by adopting vibro-packed fuel
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Items	Reference core (Pellet fuel)	LHR 390W/cm core (Vibro-packed fuel)
Core height	100 cm	←
Axial blanket height (upper / lower / total)	20 / 20 / 40 cm	20 / 24 / 44 cm
Core equivalent diameter	383 cm	379 cm
Shielding circumscription diameter	522 cm	542 cm
Number of fuel assemblies (inner core / outer core / total)	157 / 129 / 286	169 / 141 / 310
Number of radial blanket assemblies	66	138
Number of control rod assemblies (primary / backup / total)	21 / 6 / 27	←
Cladding outer diameter	10.4 mm	9.8 mm
Cladding thickness	0.71 mm	0.67 mm
Smear density (core / axial blanket / radial blanket)	82 / 90 / 90 %TD	82 / 82 / 85 %TD
FP content rate	0.2 vol%	2.0 vol%
Spacer wire diameter	1.04 mm	1.05 mm
Number of pins per a assembly	255	←
Assembly pitch	206.3 mm	196.4 mm
Effective fuel volume fraction	35.9 %	35.2 %
Operation cycle length	27.4 months (832days)	←
Refueling butch (core / radial blanket)	4/4	←
Pu enrichment*1 (inner core / outer core)	18.8 / 23.7 wt%	20.3 / 25.3 wt%
Average discharge burn-up (core / total)*2)	150 / 86 GWd/t	158 / 74 GWd/t
Burn-up reactivity	2.8 %Δk/kk'	3.6 %Δk/kk'
Breeding ratio (core / axial blanket / radial blanket / total)	0.80 / 0.19 / 0.11 / 1.10	0.76 / 0.18 / 0.17 / 1.10
Maximum linear heat rating (inner core / outer core)	417 / 401 W/cm	377 / 377 W/cm
Maximum fast neutron fluence*3	5.4×10 ²³ n/cm ²	5.2×10 ²³ n/cm ²
Initial heavy metal inventories (core / axial blanket / radial blanket)	36.5 / 16.1 / 16.2 t	34.6 / 15.5 / 29.8 t
Initial fissile Pu inventory	6.3 t/GWe	6.4 t/GWe
Sodium void reactivity*4 (EOEC)	5.1 \$*5	5.3 \$*5
Doppler coefficient [TdK/dT]*4 (EOEC)	-5.3×10 ⁻³	-4.9×10 ⁻³

*1 : Pu/HM, *2 : Average burn-up including blanket, *3 : E > 0.1 MeV, *4 : Heterogeneous effect in assembly is considered.

*5 : Effective delayed neutron fraction : 0.00335 (All parent nuclides are considered)

Table 5.2-6(1/2) Heavy metal inventories of the vibro-packed fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Loading fuel inventory per 1 batch [kg]

Nuclides	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	11.1	8.7	19.8	11.6	22.3	33.9	53.7
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	3,694.1	2,884.3	6,578.4	3,861.9	7,416.6	11,278.6	17,857.0
Total U	3,705.3	2,893.0	6,598.2	3,873.6	7,439.0	11,312.5	17,910.7
Pu238	11.0	11.5	22.5	0.0	0.0	0.0	22.5
Pu239	541.5	563.9	1,105.4	0.0	0.0	0.0	1,105.4
Pu240	321.3	334.6	655.9	0.0	0.0	0.0	655.9
Pu241	43.0	44.8	87.9	0.0	0.0	0.0	87.9
Pu242	39.1	40.7	79.8	0.0	0.0	0.0	79.8
Total Pu	956.0	995.4	1,951.4	0.0	0.0	0.0	1,951.4
Np237	5.0	5.2	10.2	0.0	0.0	0.0	10.2
Total Np	5.0	5.2	10.2	0.0	0.0	0.0	10.2
Am241	20.0	20.9	40.9	0.0	0.0	0.0	40.9
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	10.0	10.4	20.5	0.0	0.0	0.0	20.5
Total Am	30.1	31.3	61.4	0.0	0.0	0.0	61.4
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	10.0	10.4	20.5	0.0	0.0	0.0	20.5
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Cm	10.0	10.4	20.5	0.0	0.0	0.0	20.5
Total HM	4,706.3	3,935.3	8,641.6	3,873.6	7,439.0	11,312.5	19,954.1
FP*1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP*2	62.0	51.7	113.7	0.0	0.0	0.0	113.7
Total FP	62.0	51.7	113.7	0.0	0.0	0.0	113.7

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Discharge fuel inventory per 1 batch [kg]

Nuclides	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	2.4	3.2	5.6	6.3	16.7	23.0	28.6
U236	1.5	1.0	2.6	1.2	1.3	2.5	5.1
U238	2,993.8	2,502.8	5,496.6	3,581.5	7,165.6	10,747.0	16,243.6
Total U	2,997.8	2,507.0	5,504.8	3,588.9	7,183.6	10,772.6	16,277.4
Pu238	14.5	15.0	29.4	0.1	0.1	0.2	29.7
Pu239	434.2	411.5	845.7	193.8	201.2	395.1	1,240.8
Pu240	295.4	302.9	598.2	19.2	10.6	29.7	627.9
Pu241	46.5	42.9	89.4	1.2	0.4	1.6	91.0
Pu242	35.5	36.9	72.4	0.1	0.0	0.1	72.4
Total Pu	826.0	809.1	1,635.1	214.4	212.3	426.7	2,061.8
Np237	3.4	3.7	7.1	0.5	0.4	1.0	8.0
Total Np	3.4	3.7	7.1	0.5	0.4	1.0	8.0
Am241	16.9	21.9	38.7	0.1	0.0	0.2	38.9
Am242m	1.5	1.6	3.1	0.0	0.0	0.0	3.1
Am243	10.4	10.6	21.0	0.0	0.0	0.0	21.0
Total Am	28.8	34.0	62.8	0.1	0.0	0.2	62.9
Cm242	1.0	0.9	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
Cm243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm244	12.3	11.8	24.1	0.0	0.0	0.0	24.1
Cm245	2.3	1.8	4.1	0.0	0.0	0.0	4.1
Total Cm	15.8	14.6	30.4	0.0	0.0	0.0	30.4
Total HM	3,871.7	3,368.5	7,240.2	3,804.0	7,396.4	11,200.4	18,440.6
FP*1	839.8	573.8	1,413.5	65.1	40.7	105.8	1,519.3
FP*2	62.0	51.7	113.7	0.0	0.0	0.0	113.7
Total FP	901.7	625.5	1,527.2	65.1	40.7	105.8	1,633.0

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.2-6(2/2) Heavy metal inventories of the vibro-packed fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Nuclides	Fuel inventory at BOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	27.3	24.6	51.9	37.3	80.3	117.6	169.5
U236	3.4	2.0	5.4	2.1	2.2	4.3	9.7
U238	13,674.7	10,948.9	24,623.5	15,019.3	29,288.2	44,307.5	68,931.0
Total U	13,705.3	10,975.5	24,680.9	15,058.8	29,370.7	44,429.4	69,110.3
Pu238	50.4	51.2	101.6	0.1	0.1	0.2	101.8
Pu239	1,993.6	1,992.6	3,986.2	336.7	325.5	662.2	4,648.5
Pu240	1,252.4	1,297.0	2,549.4	19.1	9.8	29.0	2,578.4
Pu241	182.7	178.0	360.7	0.9	0.2	1.1	361.8
Pu242	150.1	156.7	306.8	0.0	0.0	0.0	306.9
Total Pu	3,629.3	3,675.5	7,304.8	356.8	335.7	692.5	7,997.3
Np237	17.0	18.2	35.2	0.9	0.7	1.5	36.8
Total Np	17.0	18.2	35.2	0.9	0.7	1.5	36.8
Am241	73.6	85.4	159.0	0.1	0.0	0.1	159.1
Am242m	3.5	3.0	6.5	0.0	0.0	0.0	6.5
Am243	41.0	42.2	83.2	0.0	0.0	0.0	83.2
Total Am	118.1	130.6	248.7	0.1	0.0	0.1	248.8
Cm242	3.3	2.5	5.9	0.0	0.0	0.0	5.9
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm244	43.9	44.0	87.9	0.0	0.0	0.0	87.9
Cm245	4.5	3.4	7.8	0.0	0.0	0.0	7.8
Total Cm	52.0	50.1	102.1	0.0	0.0	0.0	102.1
Total HM	17,521.7	14,849.9	32,371.6	15,416.5	29,707.1	45,123.6	77,495.2
FP*1	1,313.5	903.9	2,217.4	70.1	45.6	115.7	2,333.1
FP*2	247.9	206.8	454.7	0.0	0.0	0.0	454.7
Total FP	1,561.4	1,110.7	2,672.1	70.1	45.6	115.7	2,787.8

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Nuclides	Fuel inventory at EOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	18.5	19.1	37.5	31.9	74.5	106.4	143.9
U236	5.0	3.1	8.0	3.3	3.5	6.9	14.9
U238	12,963.3	10,562.8	23,526.1	14,728.5	29,026.3	43,754.7	67,280.8
Total U	12,986.7	10,584.9	23,571.7	14,763.7	29,104.3	43,868.0	67,439.7
Pu238	53.9	54.8	108.6	0.3	0.1	0.4	109.0
Pu239	1,885.0	1,839.1	3,724.1	535.8	534.5	1,070.2	4,794.3
Pu240	1,226.0	1,265.6	2,491.6	38.8	20.7	59.5	2,551.1
Pu241	186.3	176.4	362.7	2.1	0.6	2.8	365.4
Pu242	146.5	152.9	299.4	0.1	0.0	0.1	299.5
Total Pu	3,497.6	3,488.8	6,986.4	577.0	555.9	1,133.0	8,119.4
Np237	15.4	16.6	32.0	1.5	1.2	2.6	34.6
Total Np	15.4	16.6	32.0	1.5	1.2	2.6	34.6
Am241	70.3	86.2	156.5	0.2	0.1	0.3	156.7
Am242m	5.0	4.6	9.6	0.0	0.0	0.0	9.6
Am243	41.4	42.4	83.7	0.0	0.0	0.0	83.7
Total Am	116.6	133.2	249.8	0.2	0.1	0.3	250.1
Cm242	4.3	3.4	7.8	0.0	0.0	0.0	7.8
Cm243	0.4	0.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7
Cm244	46.2	45.5	91.7	0.0	0.0	0.0	91.7
Cm245	6.8	5.2	12.0	0.0	0.0	0.0	12.0
Total Cm	57.8	54.4	112.2	0.0	0.0	0.0	112.2
Total HM	16,674.2	14,277.9	30,952.1	15,342.4	29,661.5	45,003.9	75,956.0
FP*1	2,166.4	1,482.8	3,649.2	139.5	89.1	228.6	3,877.8
FP*2	247.9	206.8	454.7	0.0	0.0	0.0	454.7
Total FP	2,414.3	1,689.6	4,103.9	139.5	89.1	228.6	4,332.5

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.2-7 Control reactivity balance of the FS phase-II reference core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

[Unit : % $\Delta k/kk'$]

Items	Primary system*1	Backup system*1
I. Planned excess reactivity	4.69	0.64
(1) Power compensation	0.81	0.64
(2) Burn-up compensation*2	3.68	—
(3) Allowance for operation	0.20	—
II. Uncertainty (2 σ)	0.50	0.13
(1) Criticality prediction	0.00	—
(2) Power compensation prediction	—	0.13
(3) Fuel tolerance prediction	0.39	—
(4) Allowance for refueling	0.20	—
III. Accidental reactivity	—	0.3
IV. Requirement of reactivity (I + II + III)	5.59*3	1.07
V. Control rod worth (one rod stuck)	6.2*4	1.7*4
VI. Allowance of reactivity (V - IV)	0.61	0.63

*1 : ¹⁰B enrichment 90 %

*2 : Considering change of fuel composition

*3 : Considering 1\$ (0.4% $\Delta k/kk'$) as allowance for shutdown

*4 : Considering 11 % of correction factors (mesh effect, group collapsing effect, lumping effect, transport effect, etc) and 9 % of design prediction error

Table 5.2-8 Control reactivity balance of the vibro-packed fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

[Unit : % $\Delta k/kk'$]

Items	Primary system	Backup system
I. Planned excess reactivity	5.49	0.64
(1) Power compensation	0.81	0.64
(2) Burn-up compensation	4.48*1	—
(3) Allowance for operation	0.20	—
II. Uncertainty (2 σ)	0.50	0.13
(1) Criticality prediction	0.00	—
(2) Power compensation prediction	—	0.13
(3) Fuel tolerance prediction	0.39	—
(4) Allowance for refueling	0.20	—
III. Accidental reactivity	—	0.3
IV. Requirement of reactivity (I + II + III)	6.39	1.07
V. Control rod worth (one rod stuck)	5.8*2	1.6*2
VI. Allowance of reactivity (V - IV)	-0.59	0.53

*1 : Adding increase of burn-up reactivity (0.8 % $\Delta k/kk'$) to the burn-up compensation of the reference core

*2 : Multiplying 0.92 (= 286/310) to the control rod worth of the reference core as effect of increase of total fuel assemblies

Table 5.3-1 Influence to specifications and nuclear performances by adopting sphere-pac fuel
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Items	Reference core (Pellet fuel)	LHR 390W/cm core (Sphere-pac fuel)
Core height	100 cm	←
Axial blanket height (upper / lower / total)	20 / 20 / 40 cm	20 / 27 / 47 cm
Core equivalent diameter	538 cm	530 cm
Shielding circumscription diameter	677 cm	698 cm
Number of fuel assemblies (inner core / outer core / total)	288 / 274 / 562	300 / 292 / 592
Number of radial blanket assemblies	96	186
Number of control rod assemblies (primary / backup / total)	40 / 17 / 57	←
Cladding outer diameter	10.4 mm	9.9 mm
Cladding thickness	0.71 mm	0.68 mm
Smear density (core / axial blanket / radial blanket)	82 / 90 / 90 %TD	80 / 80 / 80 %TD
FP content rate	0.2 vol%	0.2 vol%
Spacer wire diameter	1.03 mm	1.05 mm
Number of pins per a assembly	255	←
Assembly pitch	206.0 mm	198.0 mm
Effective fuel volume fraction	36.0 %	34.4 %
Operation cycle length	26.3 months (800days)	←
Refueling butch (core / radial blanket)	4 / 4	←
Pu enrichment* ¹ (inner core / outer core)	18.3 / 20.9 wt%	19.6 / 22.2 wt%
Average discharge burn-up (core / total)* ²	147 / 90 GWD/t	158 / 83 GWD/t
Burn-up reactivity	2.3 %Δk/kk'	3.2 %Δk/kk'
Breeding ratio (core / axial blanket / radial blanket / total)	0.84 / 0.19 / 0.07 / 1.10	0.80 / 0.20 / 0.10 / 1.10
Maximum linear heat rating (inner core / outer core)	398 / 396 W/cm	386 / 386 W/cm
Maximum fast neutron fluence* ³	5.0×10 ²³ n/cm ²	5.2×10 ²³ n/cm ²
Initial heavy metal inventories (core / axial blanket / radial blanket)	71.8 / 31.6 / 23.5 t	66.7 / 31.4 / 39.3 t
Initial fissile Pu inventory	5.7 t/GWe	5.7 t/GWe
Sodium void reactivity* ⁴ (EOEC)	5.3 \$* ⁵	5.4 \$* ⁵
Doppler coefficient [TdK/dT]* ⁴ (EOEC)	-5.7×10 ⁻³	-5.4×10 ⁻³

*1 : Pu/HM, *2 : Average burn-up including blanket, *3 : E > 0.1 MeV, *4 : Heterogeneous effect in assembly is considered.

*5 : Effective delayed neutron fraction : 0.00342 (All parent nuclides are considered)

Table 5.3-2(1/2) Heavy metal inventories of the sphere-pac fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Loading fuel inventory per 1 batch [kg]

Nuclides	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	20.1	19.0	39.1	23.6	29.5	53.0	92.1
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	6,691.0	6,299.3	12,990.3	7,824.8	9,799.3	17,624.1	30,614.4
Total U	6,711.1	6,318.2	13,029.4	7,848.4	9,828.8	17,677.1	30,706.5
Pu238	19.1	21.1	40.2	0.0	0.0	0.0	40.2
Pu239	939.5	1,035.3	1,974.8	0.0	0.0	0.0	1,974.8
Pu240	557.5	614.3	1,171.8	0.0	0.0	0.0	1,171.8
Pu241	74.7	82.3	157.0	0.0	0.0	0.0	157.0
Pu242	67.8	74.7	142.5	0.0	0.0	0.0	142.5
Total Pu	1,658.6	1,827.7	3,486.2	0.0	0.0	0.0	3,486.2
Np237	8.7	9.6	18.3	0.0	0.0	0.0	18.3
Total Np	8.7	9.6	18.3	0.0	0.0	0.0	18.3
Am241	34.8	38.3	73.1	0.0	0.0	0.0	73.1
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	17.4	19.2	36.5	0.0	0.0	0.0	36.5
Total Am	52.1	57.5	109.6	0.0	0.0	0.0	109.6
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	17.4	19.2	36.5	0.0	0.0	0.0	36.5
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Cm	17.4	19.2	36.5	0.0	0.0	0.0	36.5
Total HM	8,447.9	8,232.1	16,680.0	7,848.4	9,828.8	17,677.1	34,357.1
FP*1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP*2	10.9	10.6	21.6	0.0	0.0	0.0	21.6
Total FP	10.9	10.6	21.6	0.0	0.0	0.0	21.6

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Discharge fuel inventory per 1 batch [kg]

Nuclides	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	3.8	6.6	10.5	12.2	22.6	34.9	45.4
U236	2.8	2.3	5.2	2.5	1.7	4.2	9.3
U238	5,310.3	5,419.8	10,730.0	7,226.6	9,508.2	16,734.9	27,464.9
Total U	5,316.9	5,428.7	10,745.6	7,241.4	9,532.5	16,773.9	27,519.6
Pu238	24.6	27.7	52.3	0.3	0.1	0.4	52.6
Pu239	766.0	824.6	1,590.6	399.9	238.3	638.2	2,228.8
Pu240	516.0	569.4	1,085.4	44.1	11.5	55.6	1,141.0
Pu241	83.5	82.5	166.0	3.1	0.4	3.5	169.5
Pu242	62.0	68.4	130.4	0.2	0.0	0.2	130.6
Total Pu	1,452.0	1,572.6	3,024.6	447.6	250.3	697.9	3,722.6
Np237	5.8	6.9	12.7	1.1	0.5	1.6	14.3
Total Np	5.8	6.9	12.7	1.1	0.5	1.6	14.3
Am241	27.1	38.8	65.8	0.3	0.0	0.4	66.2
Am242m	2.5	2.8	5.4	0.0	0.0	0.0	5.4
Am243	18.2	19.7	37.9	0.0	0.0	0.0	37.9
Total Am	47.8	61.3	109.1	0.3	0.0	0.4	109.4
Cm242	1.9	1.7	3.6	0.0	0.0	0.0	3.6
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm244	21.8	22.2	44.0	0.0	0.0	0.0	44.0
Cm245	4.2	3.6	7.8	0.0	0.0	0.0	7.8
Total Cm	28.1	27.6	55.8	0.0	0.0	0.0	55.8
Total HM	6,850.6	7,097.2	13,947.8	7,690.5	9,783.4	17,473.8	31,421.6
FP*1	1,599.9	1,141.0	2,740.9	146.7	43.3	190.0	2,930.9
FP*2	10.9	10.6	21.6	0.0	0.0	0.0	21.6
Total FP	1,610.8	1,151.7	2,762.5	146.7	43.3	190.0	2,952.5

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.3-2(2/2) Heavy metal inventories of the sphere-pac fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

Nuclides	Fuel inventory at BOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	47.6	53.0	100.6	74.6	107.1	181.6	282.2
U236	6.5	4.6	11.1	4.6	2.7	7.3	18.3
U238	24,580.9	23,839.7	48,420.6	30,384.2	38,760.5	69,144.7	117,565.3
Total U	24,635.0	23,897.3	48,532.3	30,463.3	38,870.3	69,333.6	117,865.8
Pu238	87.2	94.6	181.8	0.3	0.1	0.4	182.2
Pu239	3,492.8	3,789.6	7,282.4	704.6	381.2	1,085.8	8,368.2
Pu240	2,179.1	2,399.8	4,578.9	44.6	10.6	55.2	4,634.1
Pu241	323.6	333.8	657.4	2.2	0.3	2.4	659.9
Pu242	260.7	288.7	549.4	0.1	0.0	0.1	549.5
Total Pu	6,343.5	6,906.5	13,250.0	751.8	392.1	1,143.9	14,393.9
Np237	29.3	33.7	63.0	1.8	0.7	2.5	65.5
Total Np	29.3	33.7	63.0	1.8	0.7	2.5	65.5
Am241	122.9	153.8	276.7	0.2	0.0	0.2	276.9
Am242m	6.1	5.7	11.8	0.0	0.0	0.0	11.8
Am243	71.4	77.8	149.1	0.0	0.0	0.0	149.1
Total Am	200.3	237.3	437.7	0.2	0.0	0.2	437.8
Cm242	6.2	5.0	11.2	0.0	0.0	0.0	11.2
Cm243	0.6	0.4	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0
Cm244	77.0	81.6	158.5	0.0	0.0	0.0	158.5
Cm245	8.3	6.5	14.9	0.0	0.0	0.0	14.9
Total Cm	92.1	93.5	185.6	0.0	0.0	0.0	185.6
Total HM	31,300.2	31,168.3	62,468.4	31,217.0	39,263.1	70,480.1	132,948.6
FP*1	2,498.9	1,772.4	4,271.3	156.8	48.5	205.4	4,476.7
FP*2	43.7	42.5	86.2	0.0	0.0	0.0	86.2
Total FP	2,542.6	1,814.9	4,357.6	156.8	48.5	205.4	4,562.9

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Nuclides	Fuel inventory at EOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	31.3	40.5	71.8	63.0	99.9	162.9	234.6
U236	9.3	7.0	16.3	7.1	4.4	11.5	27.8
U238	23,192.8	22,946.9	46,139.7	29,764.3	38,451.7	68,215.9	114,355.6
Total U	23,233.4	22,994.4	46,227.7	29,834.4	38,556.0	68,390.4	114,618.1
Pu238	92.7	101.3	194.0	0.6	0.1	0.8	194.7
Pu239	3,318.8	3,576.2	6,895.0	1,115.1	632.8	1,747.9	8,642.9
Pu240	2,137.2	2,354.8	4,491.9	89.7	22.7	112.4	4,604.3
Pu241	332.2	334.7	666.9	5.3	0.7	6.0	672.9
Pu242	254.9	282.4	537.3	0.3	0.0	0.3	537.5
Total Pu	6,135.7	6,649.3	12,785.0	1,211.1	656.3	1,867.4	14,652.4
Np237	26.4	30.9	57.3	3.1	1.3	4.3	61.6
Total Np	26.4	30.9	57.3	3.1	1.3	4.3	61.6
Am241	115.2	153.8	269.0	0.5	0.1	0.5	269.5
Am242m	8.6	8.6	17.2	0.0	0.0	0.0	17.2
Am243	72.1	78.4	150.5	0.0	0.0	0.0	150.5
Total Am	195.9	240.7	436.7	0.5	0.1	0.6	437.2
Cm242	8.0	6.8	14.8	0.0	0.0	0.0	14.8
Cm243	0.9	0.6	1.4	0.0	0.0	0.0	1.4
Cm244	81.4	84.7	166.0	0.0	0.0	0.0	166.0
Cm245	12.6	10.2	22.7	0.0	0.0	0.0	22.7
Total Cm	102.8	102.2	205.0	0.0	0.0	0.0	205.0
Total HM	29,694.2	30,017.5	59,711.7	31,049.1	39,213.6	70,262.6	129,974.3
FP*1	4,107.5	2,929.3	7,036.8	312.9	95.6	408.5	7,445.3
FP*2	43.7	42.5	86.2	0.0	0.0	0.0	86.2
Total FP	4,151.2	2,971.9	7,123.1	312.9	95.6	408.5	7,531.5

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.3-3 Control reactivity balance of the sphere-pac fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)

[Unit : % $\Delta k/kk'$]

Items	Primary system	Backup system
I. Planned excess reactivity	5.1	0.6
(1) Power compensation	0.8	0.6
(2) Burn-up compensation	4.1 ^{*1}	—
(3) Allowance for operation	0.2	—
II. Uncertainty (2 σ)	0.5	0.2
(1) Criticality prediction	0.0	—
(2) Power compensation prediction	—	0.12
(3) Fuel tolerance prediction	0.39	—
(4) Allowance for refueling	0.2	—
III. Accidental reactivity	—	0.2
IV. Requirement of reactivity (I + II + III)	6.0	1.0
V. Control rod worth (one rod stuck)	7.5 ^{*2}	2.2 ^{*2}
VI. Allowance of reactivity (V - IV)	1.5	1.2

*1 : Adding increase of burn-up reactivity (0.9 % $\Delta k/kk'$) to the burn-up compensation of the reference core

*2 : Multiplying 0.95 (= 562/592) to the control rod worth of the reference core as effect of increase of total fuel assemblies

Table 5.3-4 Influence to specifications and nuclear performances by adopting sphere-pac fuel
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Items	Reference core (Pellet fuel)	LHR 390W/cm core (Sphere-pac fuel)
Core height Axial blanket height (upper / lower / total) Core equivalent diameter Shielding circumference diameter Number of fuel assemblies (inner core / outer core / total) Number of radial blanket assemblies Number of control rod assemblies (primary / backup / total)	100 cm 20 / 20 / 40 cm 383 cm 522 cm 157 / 129 / 286 66 21 / 6 / 27	← 20 / 22 / 42 cm 379 cm 542 cm 169 / 141 / 310 138 ←
Cladding outer diameter Cladding thickness Smear density (core / axial blanket / radial blanket) FP content rate Spacer wire diameter Number of pins per a assembly Assembly pitch Effective fuel volume fraction	10.4 mm 0.71 mm 82 / 90 / 90 %TD 0.2 vol% 1.04 mm 255 206.3 mm 35.9 %	9.8 mm 0.67 mm 80 / 80 / 80 %TD 0.2 vol% 1.05 mm ← 196.4 mm 34.3 %
Operation cycle length Refueling butch (core / radial blanket) Pu enrichment*1 (inner core / outer core) Average discharge burn-up (core / total)*2 Burn-up reactivity Breeding ratio (core / axial blanket / radial blanket / total) Maximum linear heat rating (inner core / outer core) Maximum fast neutron fluence*3 Initial heavy metal inventories (core / axial blanket / radial blanket) Initial fissile Pu inventory Sodium void reactivity*4 (EOEC) Doppler coefficient [Tdk/dT]*4 (EOEC)	27.4 months (832days) 4 / 4 18.8 / 23.7 wt% 150 / 86 GWD/t 2.8 %Δk/kk' 0.80 / 0.19 / 0.11 / 1.10 417 / 401 W/cm 5.4×10 ²³ n/cm ² 36.5 / 16.1 / 16.2 t 6.3 t/GWe 5.1 \$*5 -5.3×10 ⁻³	← ← 20.0 / 25.1 wt% 159 / 78 GWD/t 3.5 %Δk/kk' 0.76 / 0.18 / 0.16 / 1.10 376 / 376 W/cm 5.3×10 ²³ n/cm ² 34.3 / 14.4 / 27.6 t 6.2 t/GWe 5.2 \$*5 -5.1×10 ⁻³

*1 : Pu/HM, *2 : Average burn-up including blanket, *3 : E > 0.1 MeV, *4 : Heterogeneous effect in assembly is considered.
*5 : Effective delayed neutron fraction : 0.00335 (All parent nuclides are considered)

Table 5.3-5(1/2) Heavy metal inventories of the sphere-pac fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Loading fuel inventory per 1 batch [kg]

Nuclides	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	11.1	8.6	19.7	10.8	20.7	31.5	51.3
U236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U238	3,682.1	2,871.8	6,553.9	3,592.1	6,888.0	10,480.2	17,034.1
Total U	3,693.2	2,880.5	6,573.7	3,603.0	6,908.8	10,511.7	17,085.4
Pu238	10.7	11.3	22.0	0.0	0.0	0.0	22.0
Pu239	528.1	554.1	1,082.2	0.0	0.0	0.0	1,082.2
Pu240	313.4	328.8	642.1	0.0	0.0	0.0	642.1
Pu241	42.0	44.0	86.0	0.0	0.0	0.0	86.0
Pu242	38.1	40.0	78.1	0.0	0.0	0.0	78.1
Total Pu	932.3	978.1	1,910.4	0.0	0.0	0.0	1,910.4
Np237	4.9	5.1	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
Total Np	4.9	5.1	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0
Am241	19.5	20.5	40.0	0.0	0.0	0.0	40.0
Am242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am243	9.8	10.3	20.0	0.0	0.0	0.0	20.0
Total Am	29.3	30.8	60.1	0.0	0.0	0.0	60.1
Cm242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm244	9.8	10.3	20.0	0.0	0.0	0.0	20.0
Cm245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total Cm	9.8	10.3	20.0	0.0	0.0	0.0	20.0
Total HM	4,669.5	3,904.7	8,574.2	3,603.0	6,908.8	10,511.7	19,085.9
FP*1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP*2	6.0	5.0	11.1	0.0	0.0	0.0	11.1
Total FP	6.0	5.0	11.1	0.0	0.0	0.0	11.1

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Discharge fuel inventory per 1 batch [kg]

Nuclides	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	2.3	3.1	5.4	5.7	15.2	20.9	26.4
U236	1.6	1.0	2.6	1.1	1.3	2.5	5.0
U238	2,970.2	2,486.1	5,456.3	3,320.6	6,639.8	9,960.3	15,416.7
Total U	2,974.1	2,490.2	5,464.4	3,327.4	6,656.3	9,983.7	15,448.1
Pu238	14.1	14.7	28.8	0.1	0.1	0.2	29.1
Pu239	428.4	405.4	833.8	184.6	197.4	382.0	1,215.8
Pu240	289.4	297.8	587.1	19.2	10.9	30.1	617.2
Pu241	45.8	42.4	88.3	1.3	0.4	1.7	90.0
Pu242	34.7	36.2	70.9	0.1	0.0	0.1	71.0
Total Pu	812.4	796.6	1,608.9	205.3	208.8	414.1	2,023.0
Np237	3.3	3.6	6.9	0.5	0.4	1.0	7.9
Total Np	3.3	3.6	6.9	0.5	0.4	1.0	7.9
Am241	16.2	21.3	37.5	0.1	0.0	0.2	37.7
Am242m	1.5	1.5	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0
Am243	10.2	10.4	20.6	0.0	0.0	0.0	20.6
Total Am	27.9	33.3	61.1	0.1	0.0	0.2	61.3
Cm242	1.0	0.9	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9
Cm243	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2
Cm244	12.1	11.7	23.7	0.0	0.0	0.0	23.7
Cm245	2.3	1.8	4.1	0.0	0.0	0.0	4.1
Total Cm	15.5	14.4	29.9	0.0	0.0	0.0	29.9
Total HM	3,833.2	3,338.1	7,171.2	3,533.3	6,865.6	10,398.9	17,570.2
FP*1	840.9	573.4	1,414.4	65.2	41.2	106.3	1,520.7
FP*2	6.0	5.0	11.1	0.0	0.0	0.0	11.1
Total FP	847.0	578.4	1,425.4	65.2	41.2	106.3	1,531.7

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.3-5(2/2) Heavy metal inventories of the sphere-pac fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

Nuclides	Fuel inventory at BOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	26.9	24.4	51.3	34.4	74.0	108.5	159.8
U236	3.4	2.0	5.5	2.1	2.2	4.2	9.7
U238	13,607.2	10,892.5	24,499.7	13,953.3	27,178.2	41,131.5	65,631.3
Total U	13,637.6	10,919.0	24,556.6	13,989.8	27,254.4	41,244.2	65,800.7
Pu238	49.2	50.4	99.6	0.1	0.1	0.2	99.8
Pu239	1,955.4	1,959.9	3,915.3	322.8	320.3	643.2	4,558.5
Pu240	1,223.4	1,274.8	2,498.2	19.3	10.2	29.5	2,527.7
Pu241	179.2	175.4	354.7	0.9	0.3	1.2	355.8
Pu242	146.4	154.0	300.4	0.0	0.0	0.0	300.5
Total Pu	3,553.8	3,614.5	7,168.3	343.2	330.8	674.0	7,842.3
Np237	16.6	17.9	34.5	0.9	0.7	1.5	36.0
Total Np	16.6	17.9	34.5	0.9	0.7	1.5	36.0
Am241	71.3	83.6	154.9	0.1	0.0	0.1	155.0
Am242m	3.4	3.0	6.4	0.0	0.0	0.0	6.4
Am243	40.0	41.5	81.5	0.0	0.0	0.0	81.5
Total Am	114.7	128.1	242.8	0.1	0.0	0.1	242.9
Cm242	3.3	2.5	5.8	0.0	0.0	0.0	5.8
Cm243	0.3	0.2	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
Cm244	42.9	43.3	86.2	0.0	0.0	0.0	86.2
Cm245	4.5	3.3	7.8	0.0	0.0	0.0	7.8
Total Cm	51.0	49.3	100.3	0.0	0.0	0.0	100.3
Total HM	17,373.7	14,728.8	32,102.4	14,333.9	27,585.9	41,919.8	74,022.2
FP*1	1,313.3	902.4	2,215.7	70.1	45.9	116.0	2,331.7
FP*2	24.2	20.2	44.3	0.0	0.0	0.0	44.3
Total FP	1,337.4	922.6	2,260.0	70.1	45.9	116.0	2,376.0

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Nuclides	Fuel inventory at EOEC [kg]						
	Inn. core	Out. core	Total core	Axi. blk	Rad. blk.	Total blk.	Total
U235	18.1	18.8	36.9	29.2	68.4	97.6	134.5
U236	5.0	3.1	8.1	3.2	3.5	6.7	14.8
U238	12,884.5	10,502.8	23,387.3	13,672.6	26,920.2	40,592.8	63,980.0
Total U	12,907.5	10,524.7	23,432.2	13,705.0	26,992.0	40,697.1	64,129.3
Pu238	52.6	53.9	106.5	0.3	0.1	0.4	106.9
Pu239	1,854.4	1,810.4	3,664.8	511.8	524.5	1,036.4	4,701.1
Pu240	1,198.9	1,244.2	2,443.1	38.9	21.3	60.2	2,503.3
Pu241	183.1	174.1	357.3	2.2	0.7	2.9	360.2
Pu242	143.0	150.3	293.3	0.1	0.0	0.1	293.4
Total Pu	3,432.0	3,432.9	6,864.9	553.4	546.7	1,100.0	7,964.9
Np237	15.0	16.3	31.3	1.4	1.2	2.6	33.9
Total Np	15.0	16.3	31.3	1.4	1.2	2.6	33.9
Am241	67.8	84.3	152.1	0.2	0.1	0.3	152.4
Am242m	4.9	4.6	9.5	0.0	0.0	0.0	9.5
Am243	40.4	41.7	82.1	0.0	0.0	0.0	82.1
Total Am	113.1	130.5	243.6	0.2	0.1	0.3	243.9
Cm242	4.3	3.4	7.7	0.0	0.0	0.0	7.7
Cm243	0.4	0.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7
Cm244	45.3	44.8	90.0	0.0	0.0	0.0	90.0
Cm245	6.8	5.2	12.0	0.0	0.0	0.0	12.0
Total Cm	56.8	53.6	110.4	0.0	0.0	0.0	110.4
Total HM	16,524.4	14,158.0	30,682.4	14,260.0	27,539.9	41,799.9	72,482.4
FP*1	2,167.3	1,480.0	3,647.2	139.2	89.8	229.0	3,876.2
FP*2	24.2	20.2	44.3	0.0	0.0	0.0	44.3
Total FP	2,191.4	1,500.1	3,691.5	139.2	89.8	229.0	3,920.5

*1 FP formed by burn-up, *2 FP contained at reprocessing

Table 5.3-6 Control reactivity balance of the sphere-pac fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

[Unit : % $\Delta k/kk'$]

Items	Primary system	Backup system
I . Planned excess reactivity	5.39	0.64
(1) Power compensation	0.81	0.64
(2) Burn-up compensation	4.38* ¹	—
(3) Allowance for operation	0.20	—
II . Uncertainty (2 σ)	0.50	0.13
(1) Criticality prediction	0.00	—
(2) Power compensation prediction	—	0.13
(3) Fuel tolerance prediction	0.39	—
(4) Allowance for refueling	0.20	—
III . Accidental reactivity	—	0.3
IV . Requirement of reactivity (I + II + III)	6.29	1.07
V . Control rod worth (one rod stuck)	5.8* ²	1.6* ²
VI . Allowance of reactivity (V -IV)	-0.49	0.53

*1 : Adding increase of burn-up reactivity (0.7 % $\Delta k/kk'$) to the burn-up compensation of the reference core

*2 : Multiplying 0.92 (= 286/310) to the control rod worth of the reference core as effect of increase of total fuel assemblies

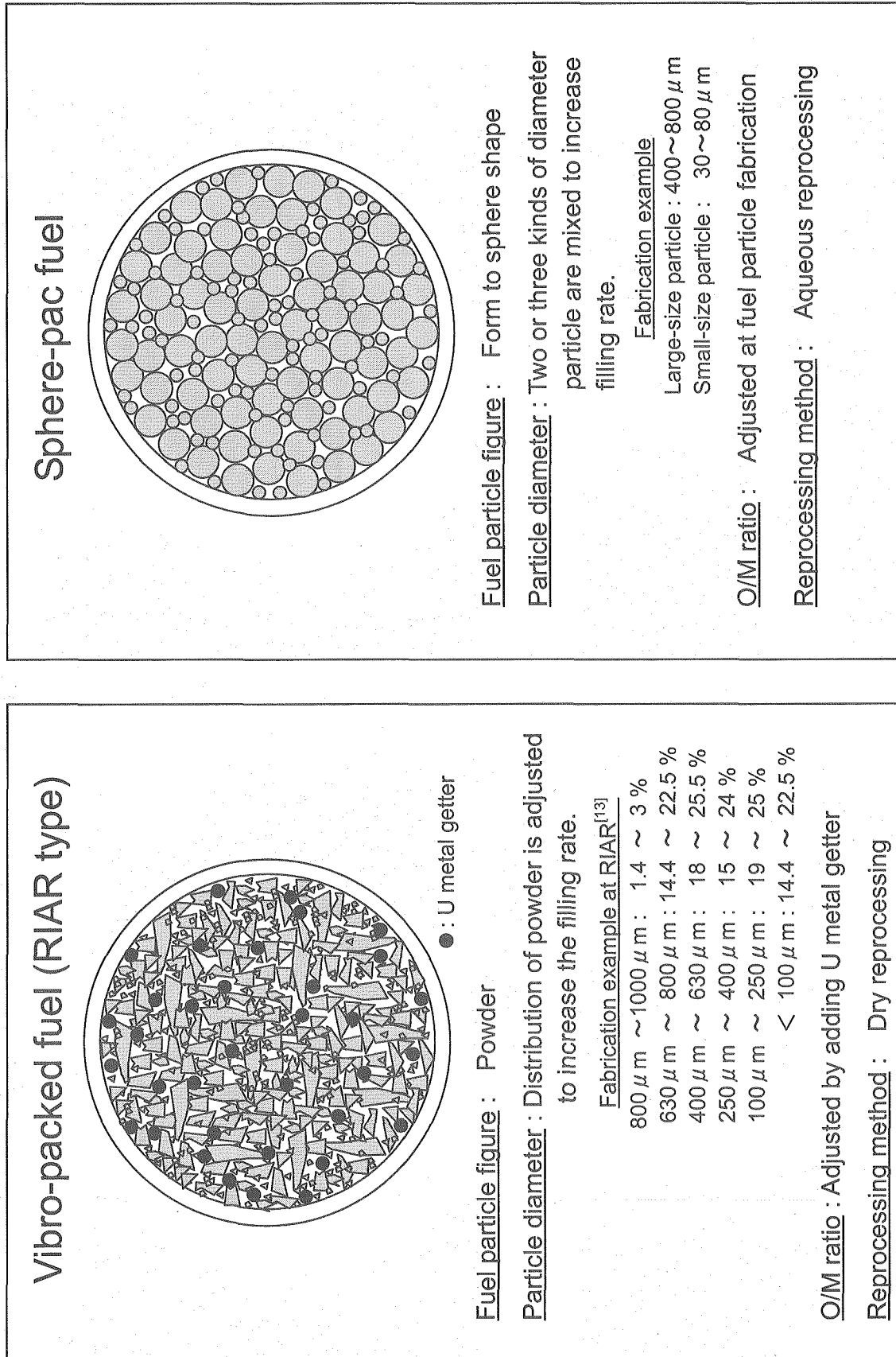


Fig. 2-1 Comparison of figures of vibro-packed fuel and sphere-pac fuel

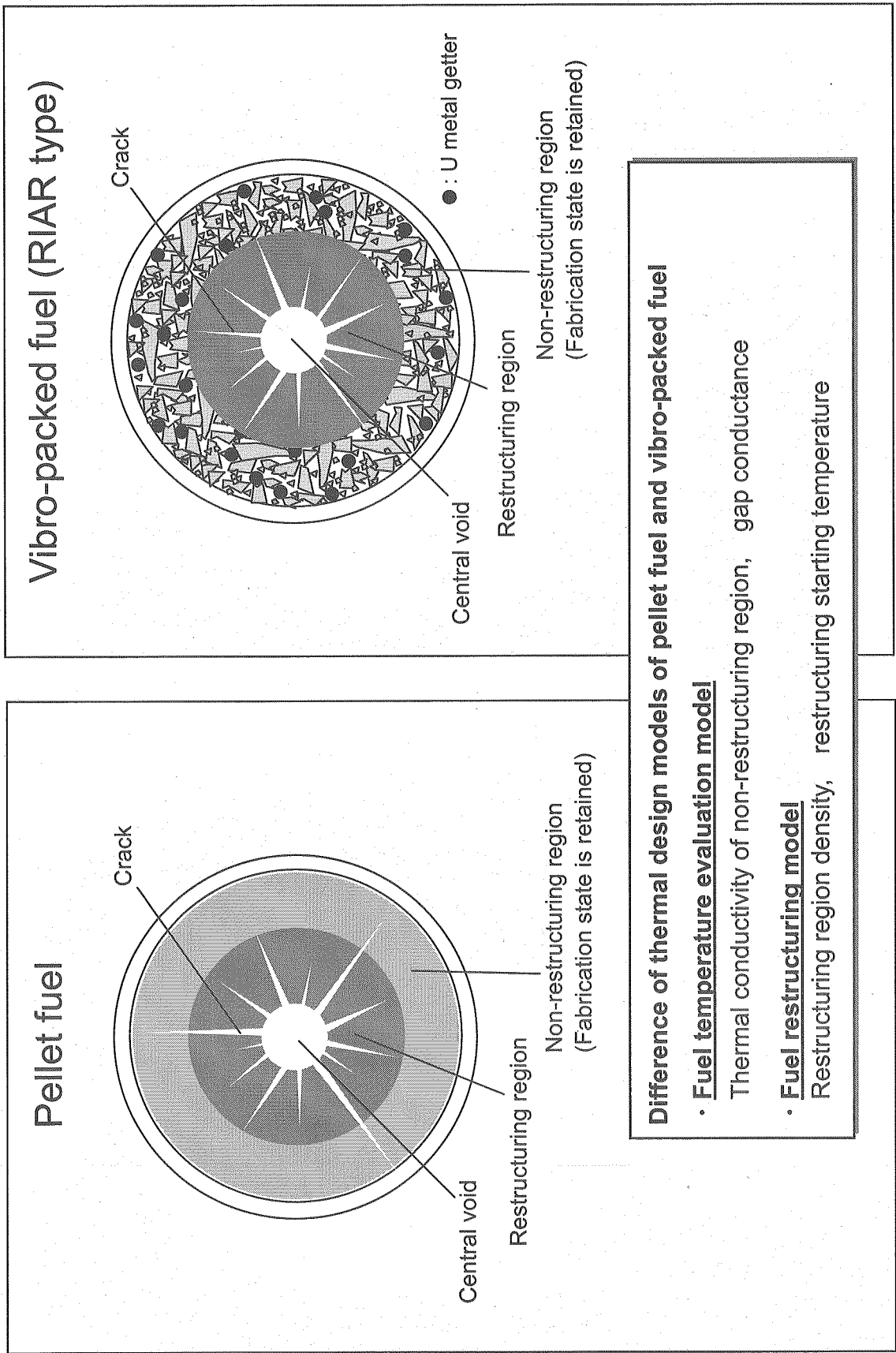


Fig. 2-2 Comparison of restructuring states of pellet fuel and vibro-packed fuel

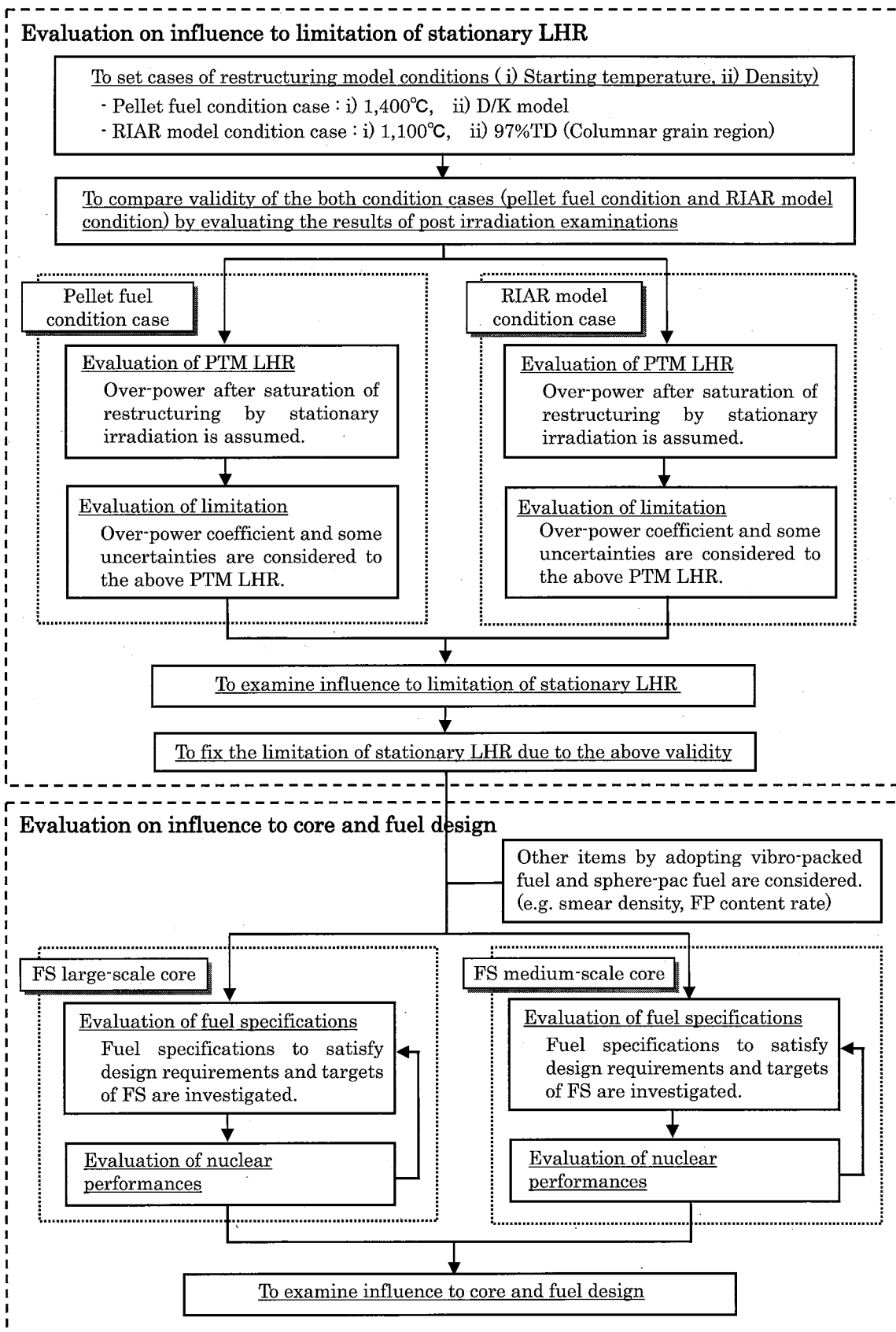


Fig. 3-1 Flow of this study

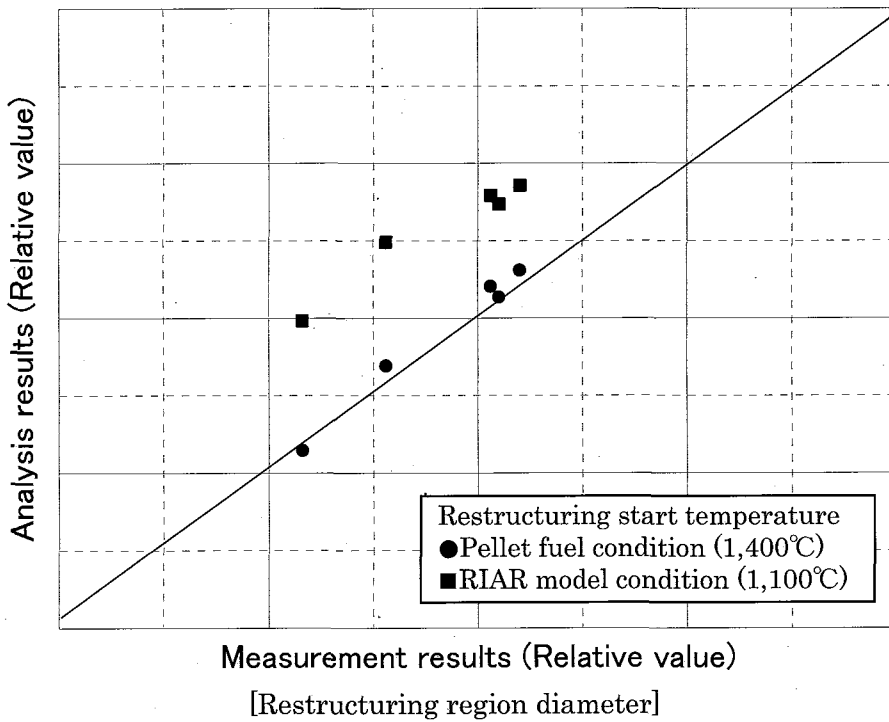
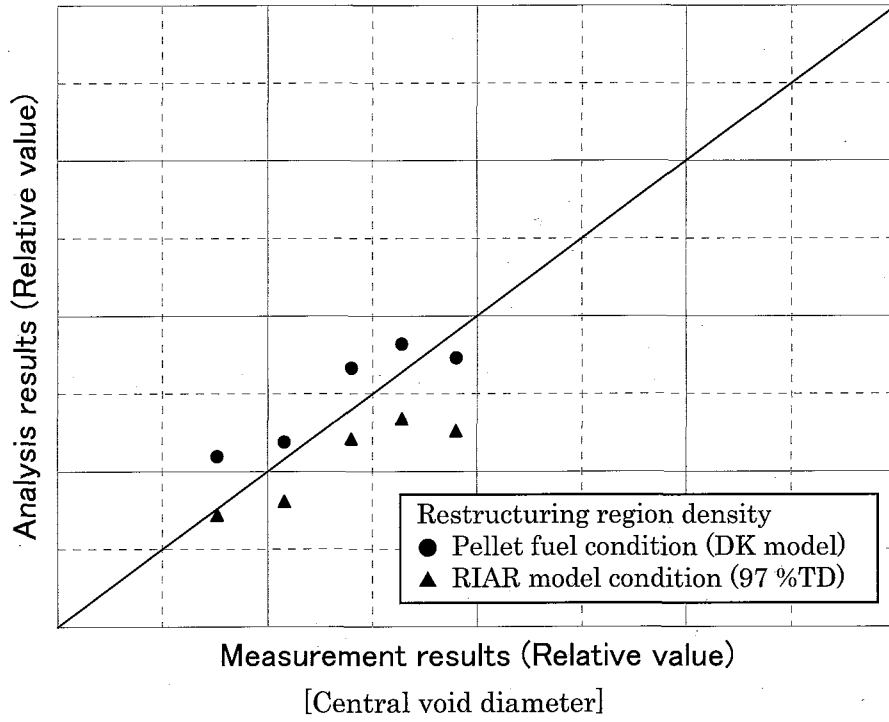


Fig. 4.1-1 Influence to irradiation behavior by conditions of restructuring model (Vibro-packed fuel)

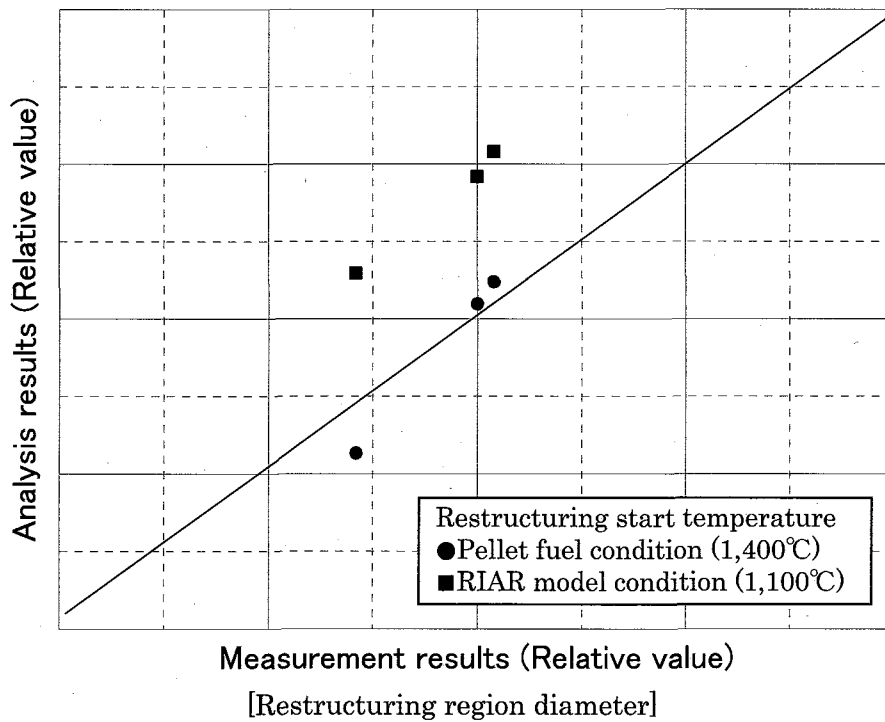
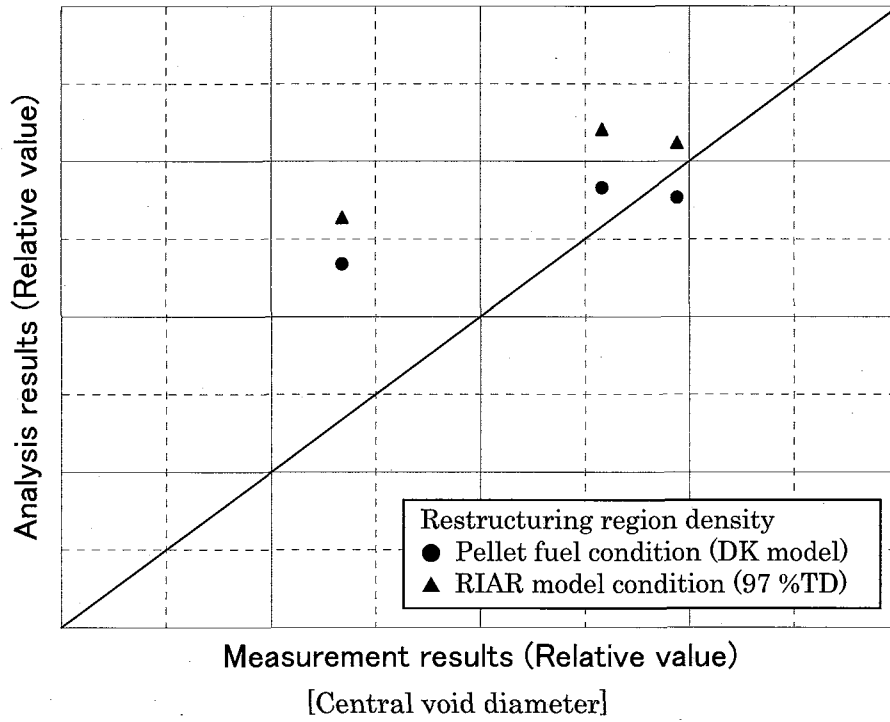


Fig. 4.1-2 Influence to irradiation behavior by conditions of restructuring model (Sphere-pac fuel)

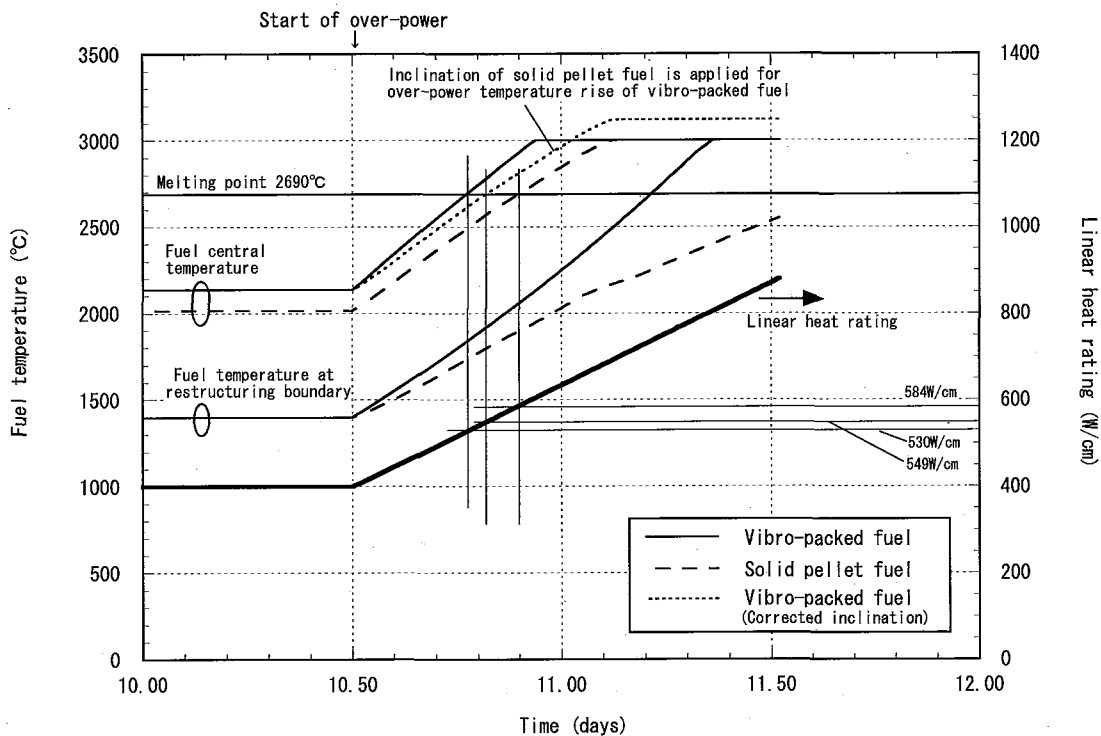


Fig. 4.3-1(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm)
(Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)

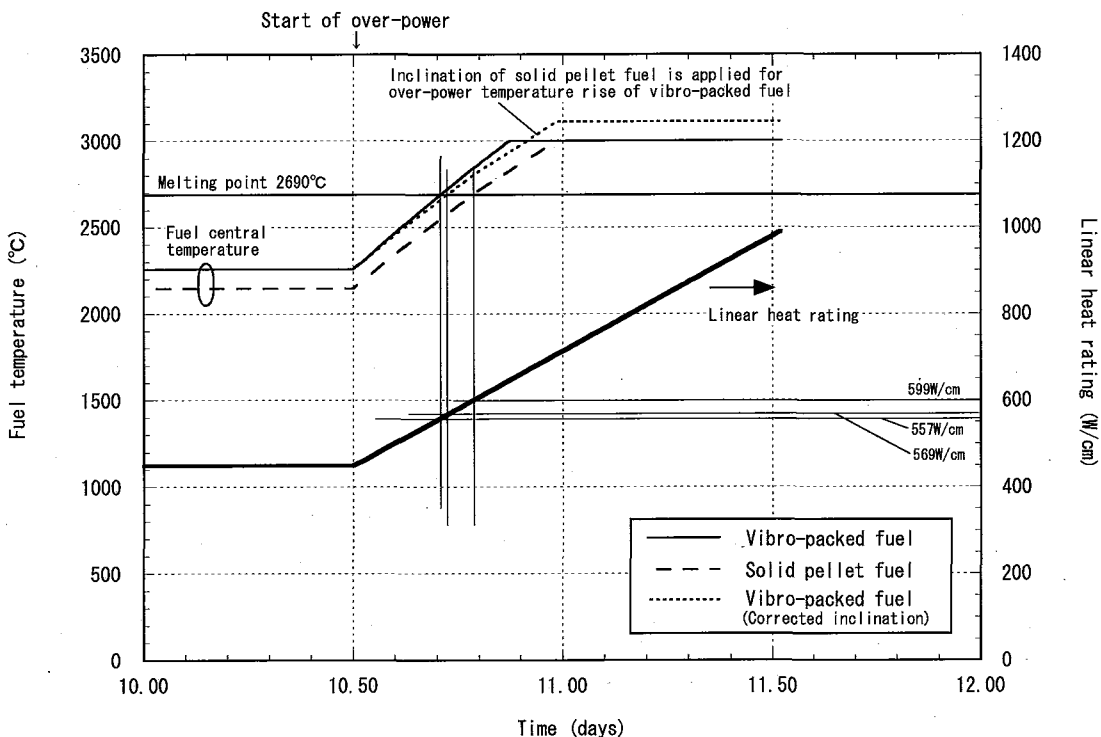


Fig. 4.3-1(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm)
(Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)

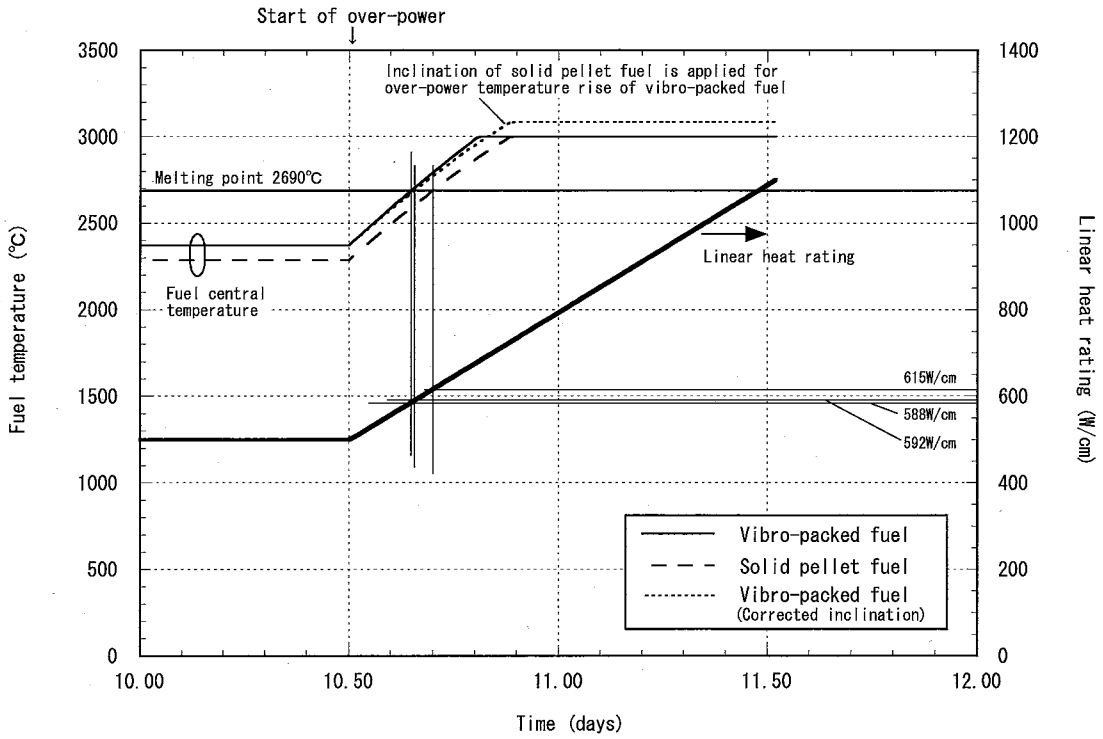


Fig. 4.3-1(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm)
(Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)

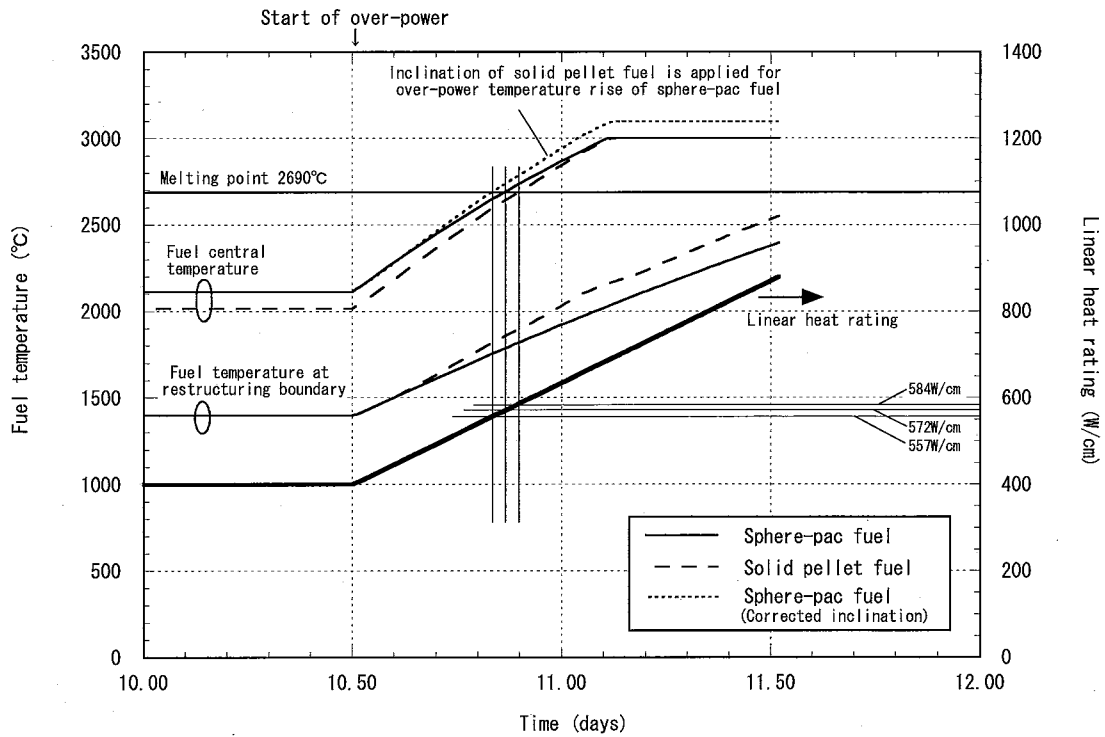


Fig. 4.3-2(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm)
(Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)

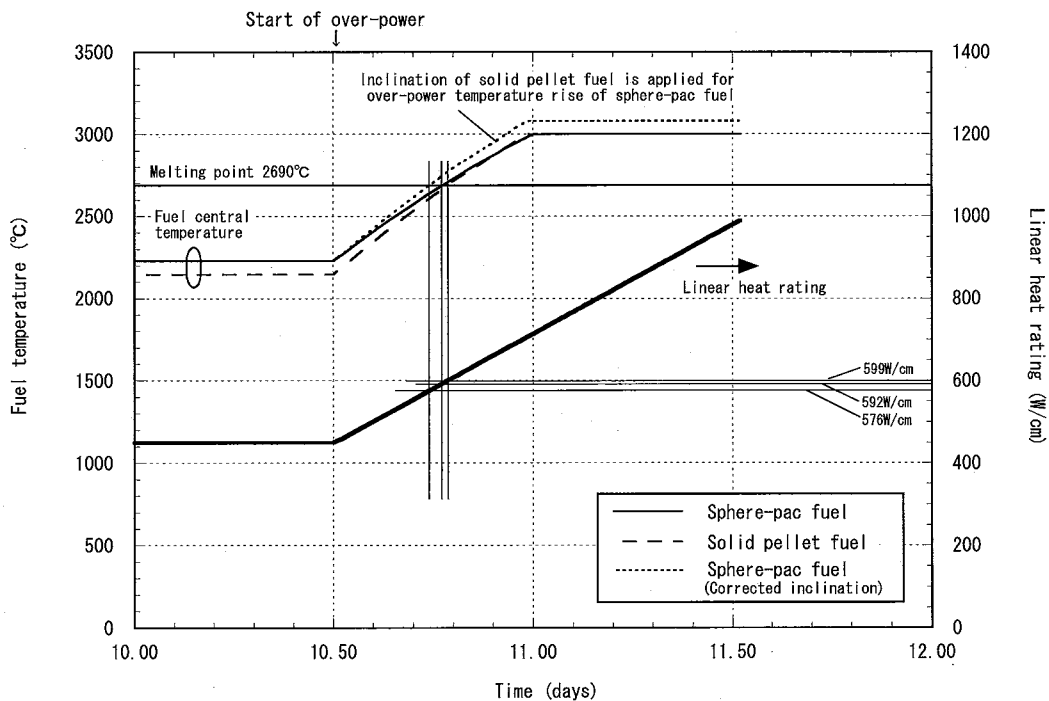


Fig. 4.3-2(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm)
(Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)

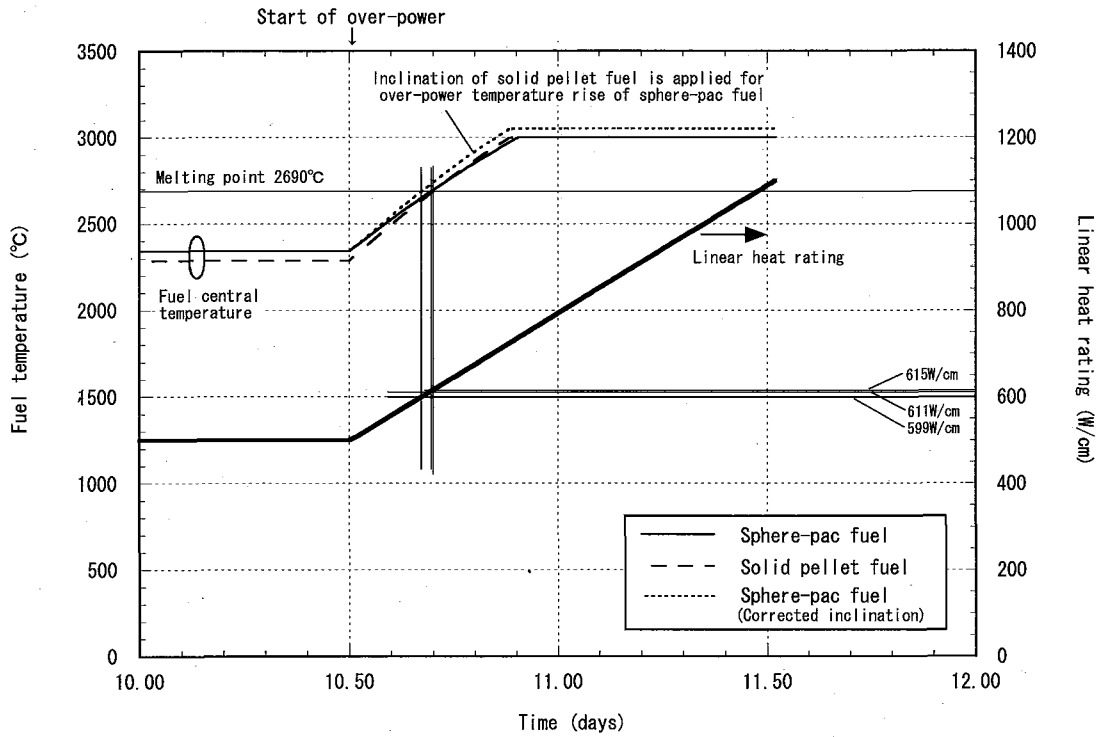


Fig. 4.3-2(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm)
(Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)

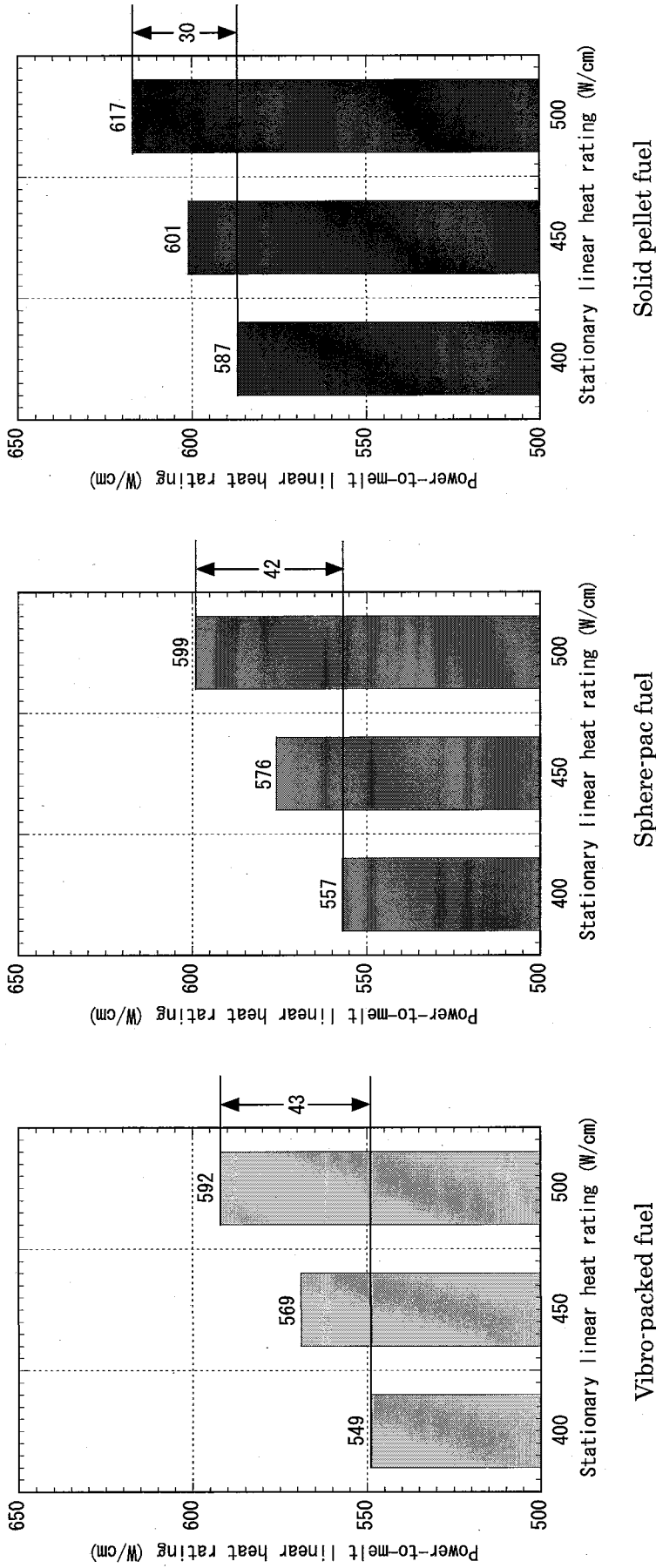


Fig. 4.3-3 Comparison of relationships between stationary linear heat ratings and power-to-melt linear heat ratings (Vibro-packed fuel, sphere-pac fuel and solid pellet fuel) (Pellet fuel condition case)

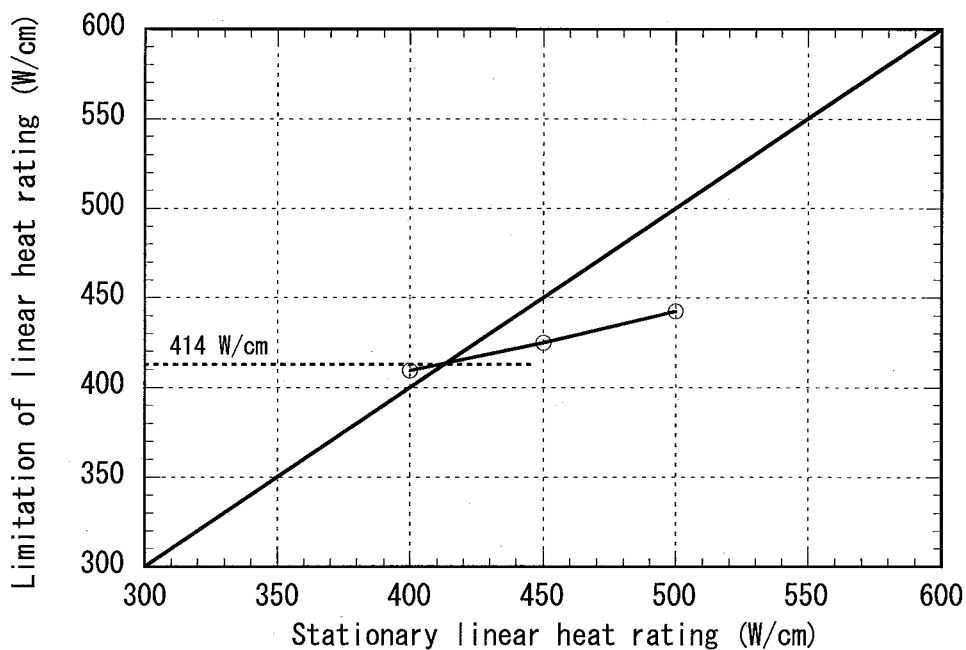


Fig. 4.3-4(1) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Vibro-packed fuel; Pellet fuel condition case)

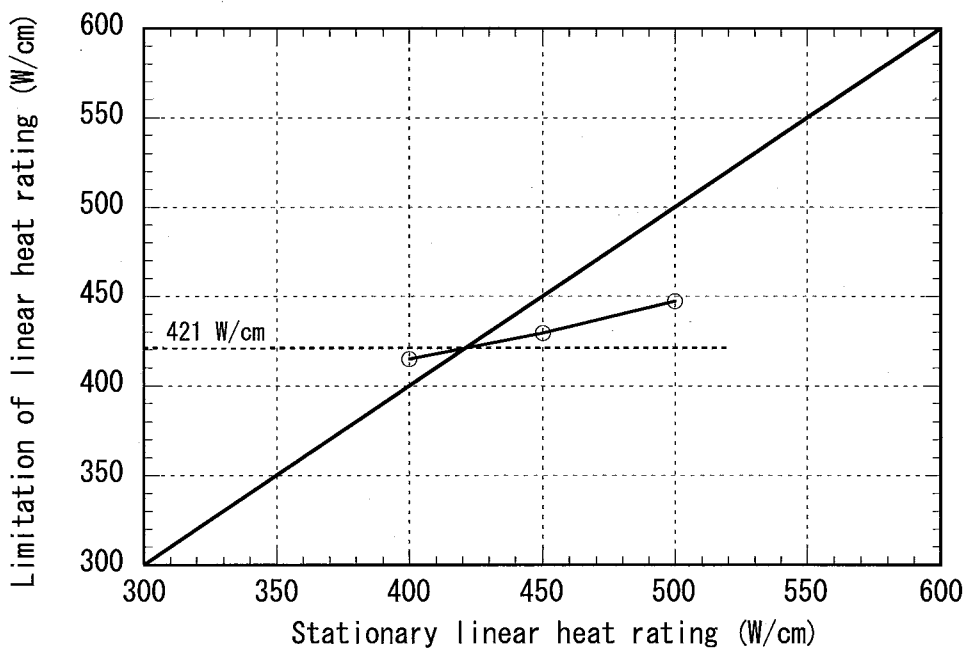


Fig. 4.3-4(2) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Sphere-pac fuel; Pellet fuel condition case)

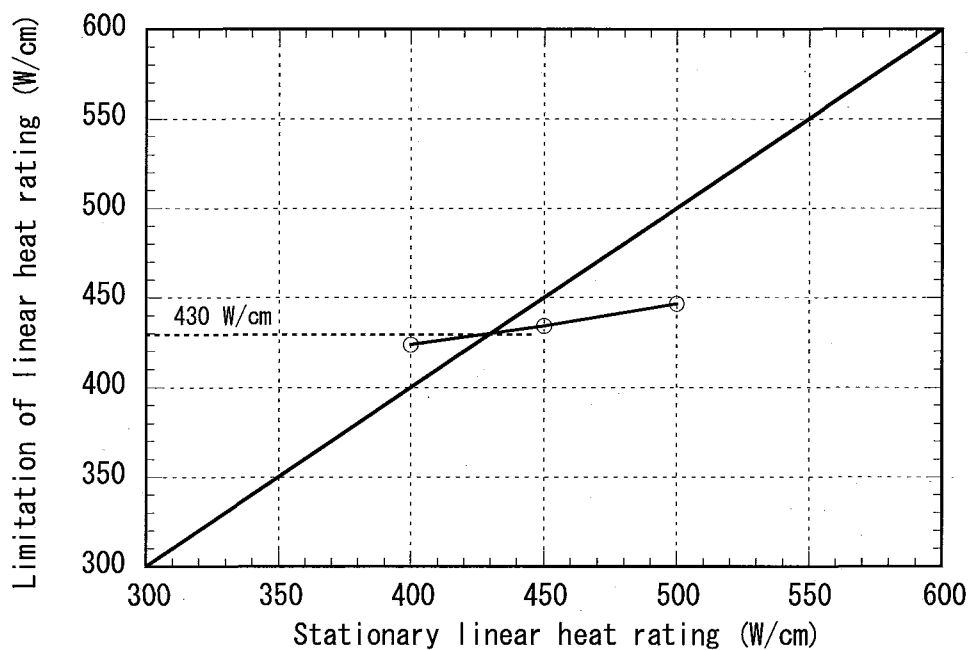


Fig. 4.3-4(3) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating
(Solid pellet fuel; Pellet fuel condition case)

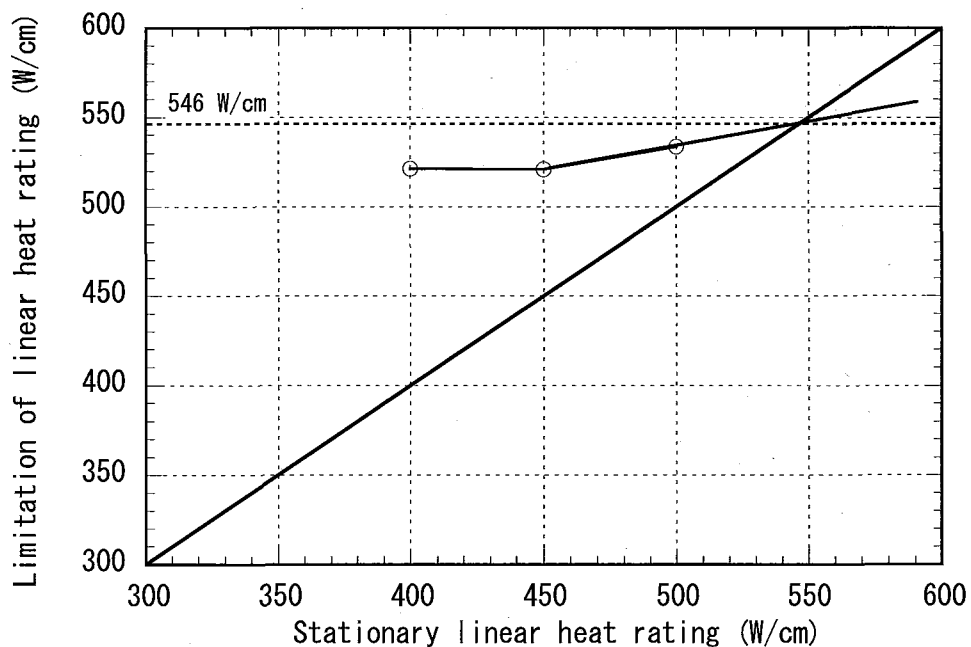


Fig. 4.3-4(4) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating
(Annular pellet fuel; Pellet fuel condition case)

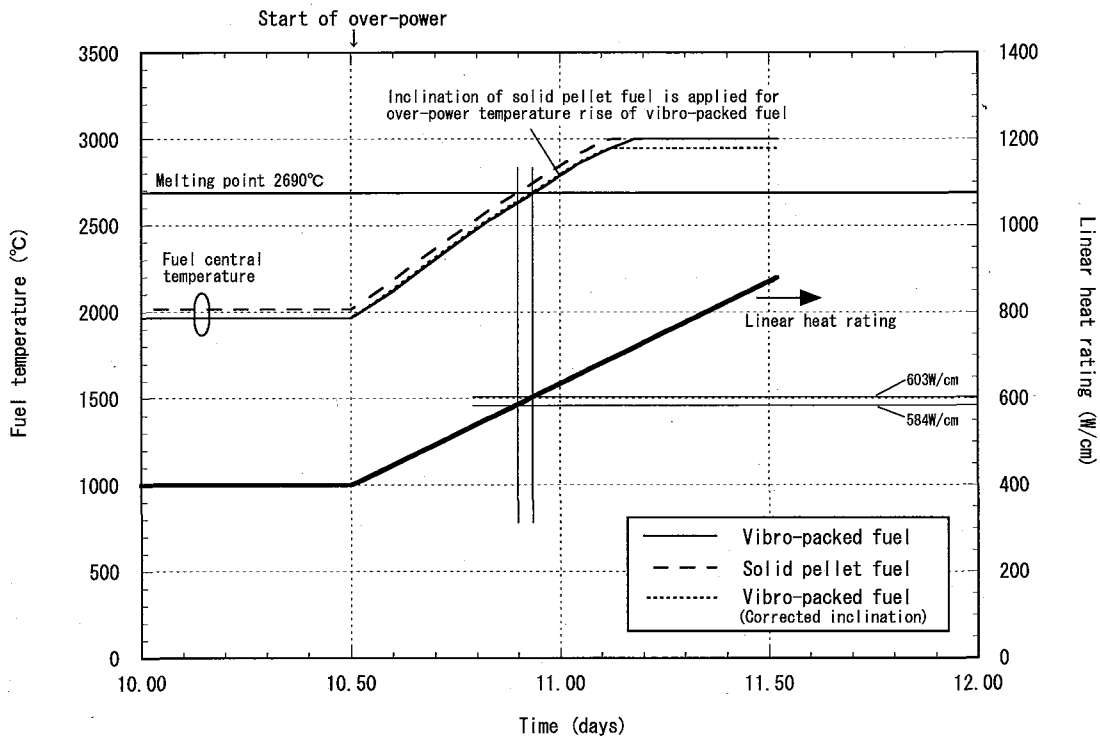


Fig. 4.3-5(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm)
(Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)

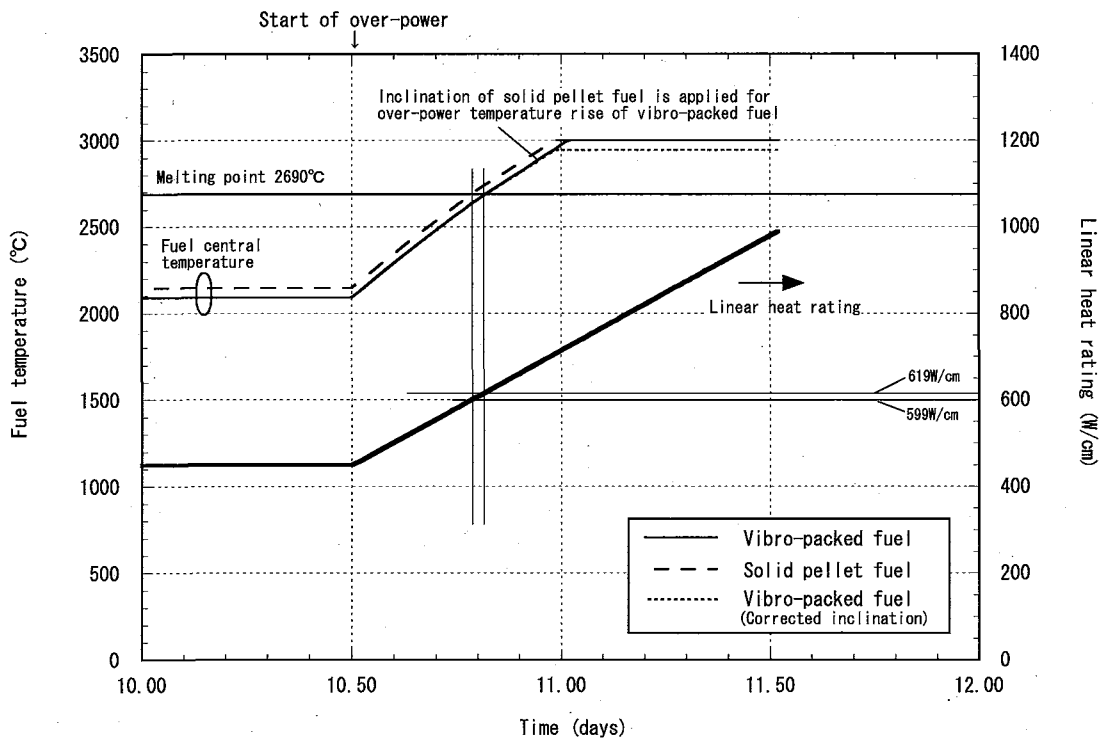


Fig. 4.3-5(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm)
(Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)

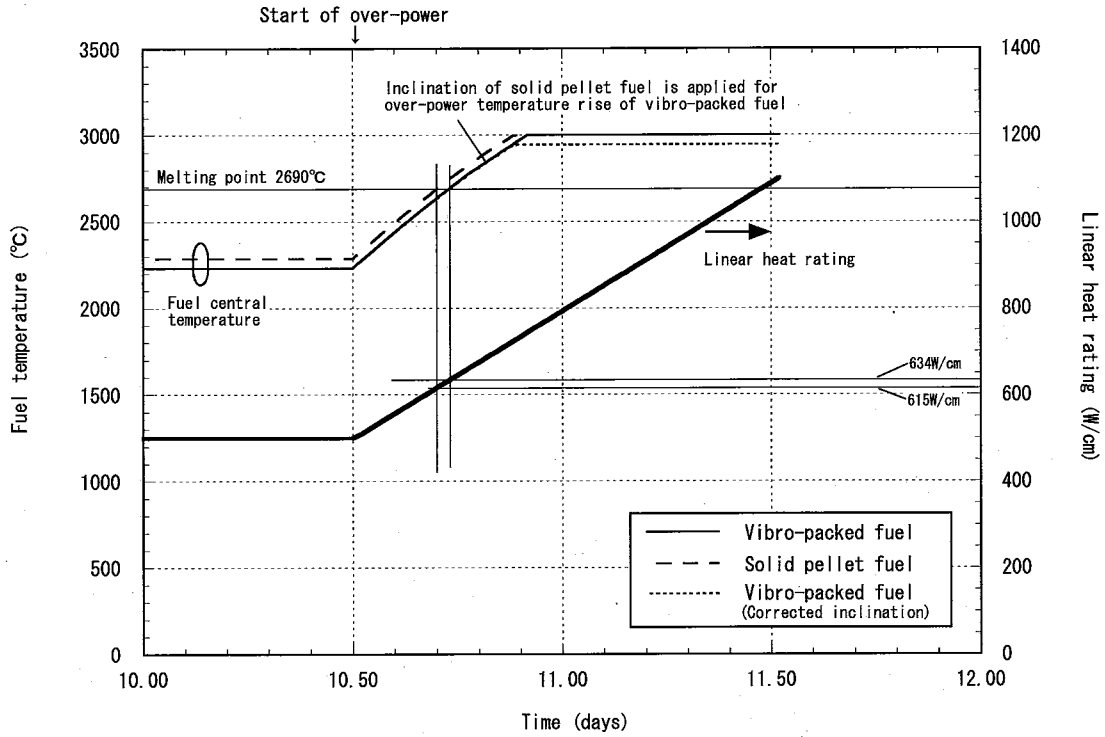


Fig. 4.3-5(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm)
(Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)

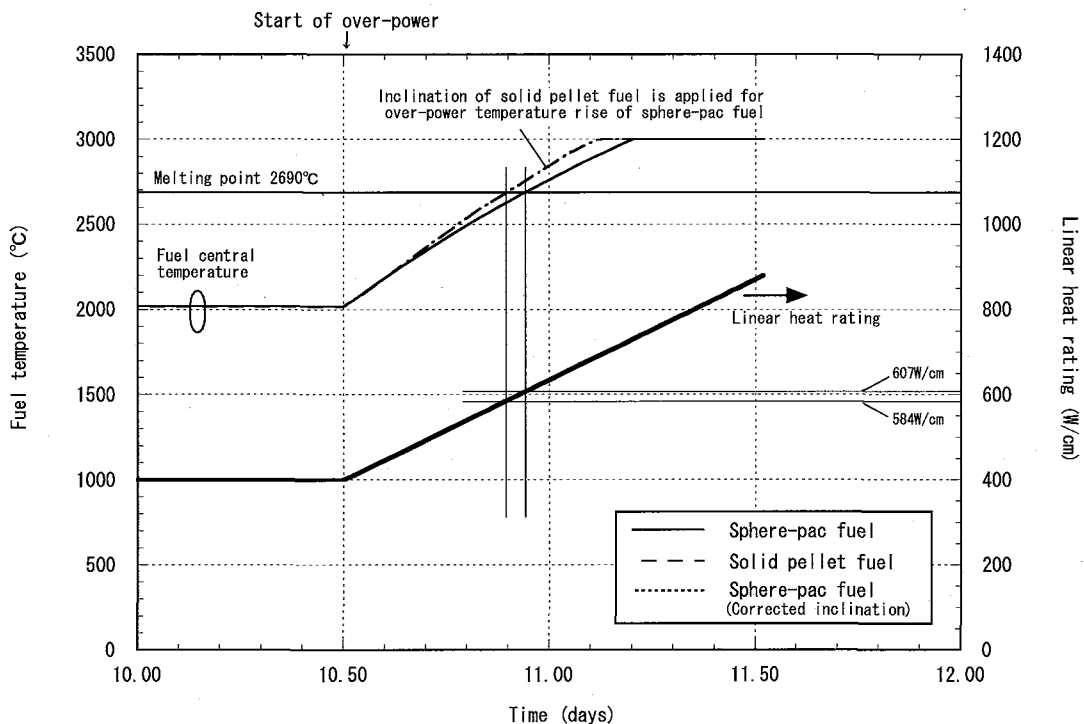


Fig. 4.3-6(1) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 400 W/cm) (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)

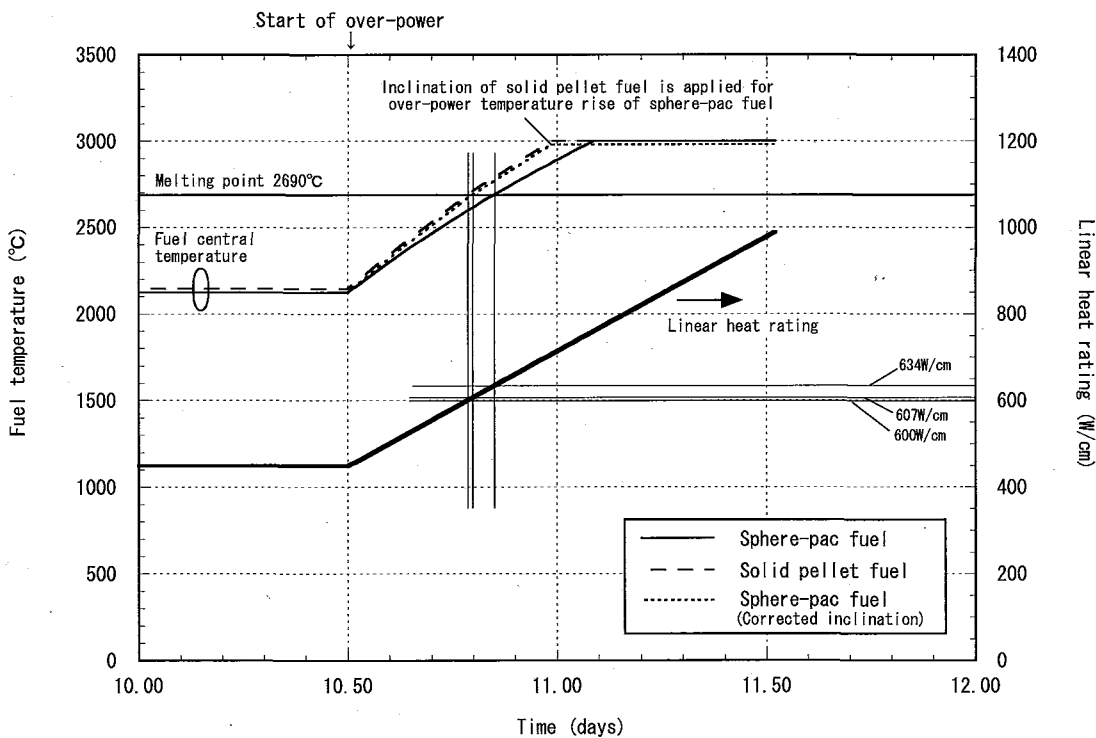


Fig. 4.3-6(2) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 450 W/cm) (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)

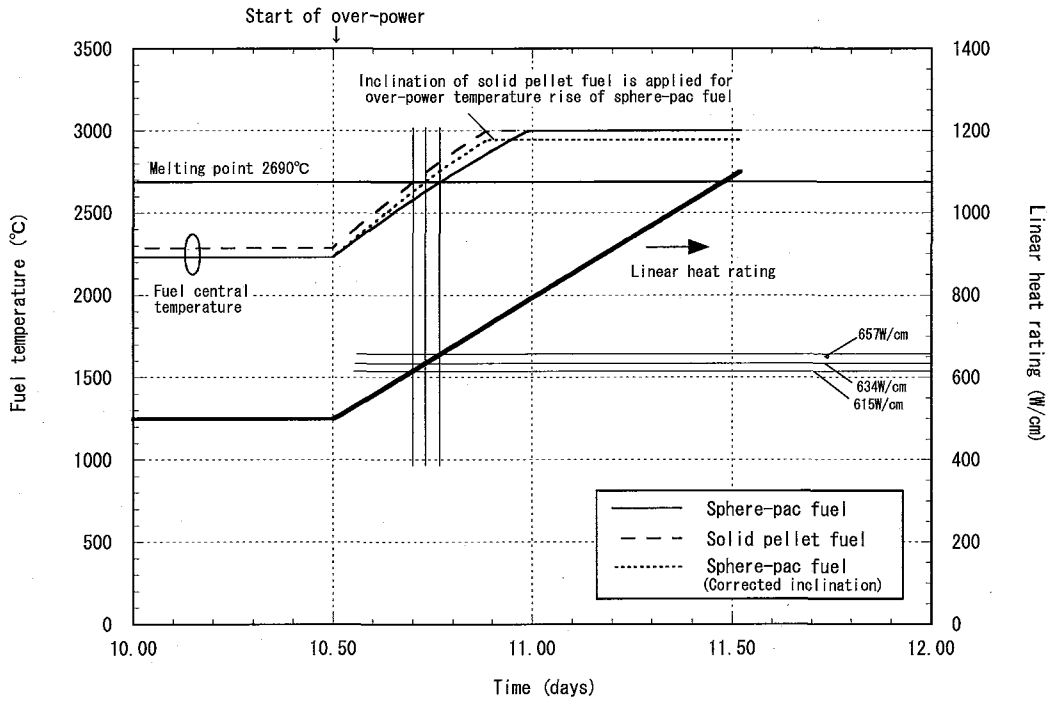


Fig. 4.3-6(3) History of fuel central temperatures at over-power (Stationary LHR 500 W/cm)
 (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)

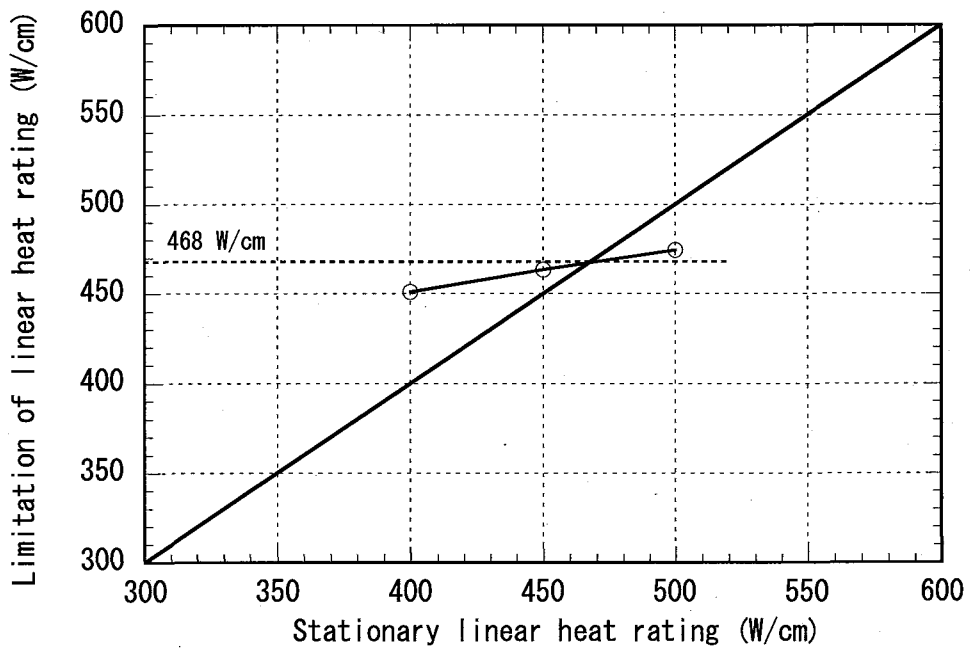


Fig. 4.3-7(1) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Vibro-packed fuel; RIAR model condition case)

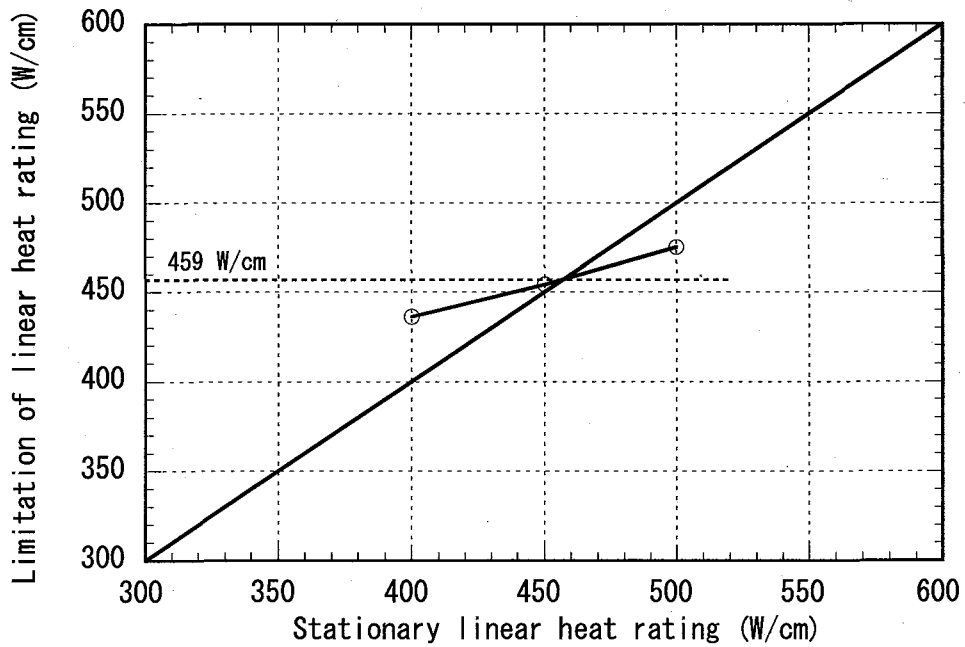
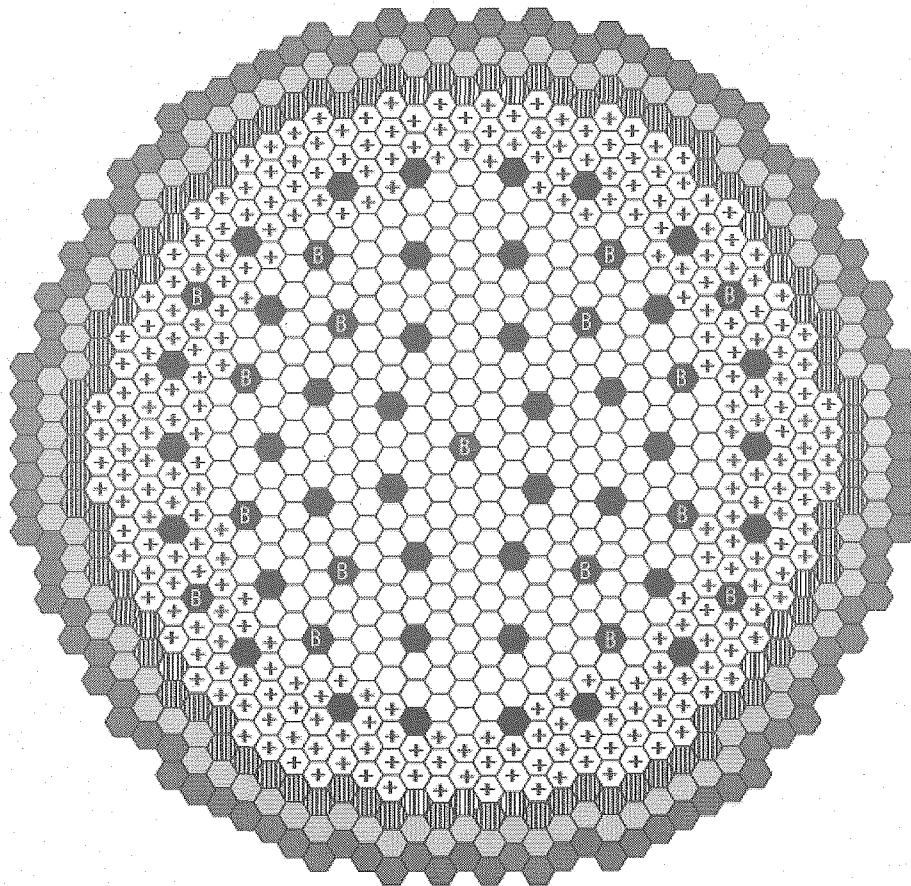


Fig. 4.3-7(2) Evaluation of limitation of stationary linear heat rating (Sphere-pac fuel; RIAR model condition case)










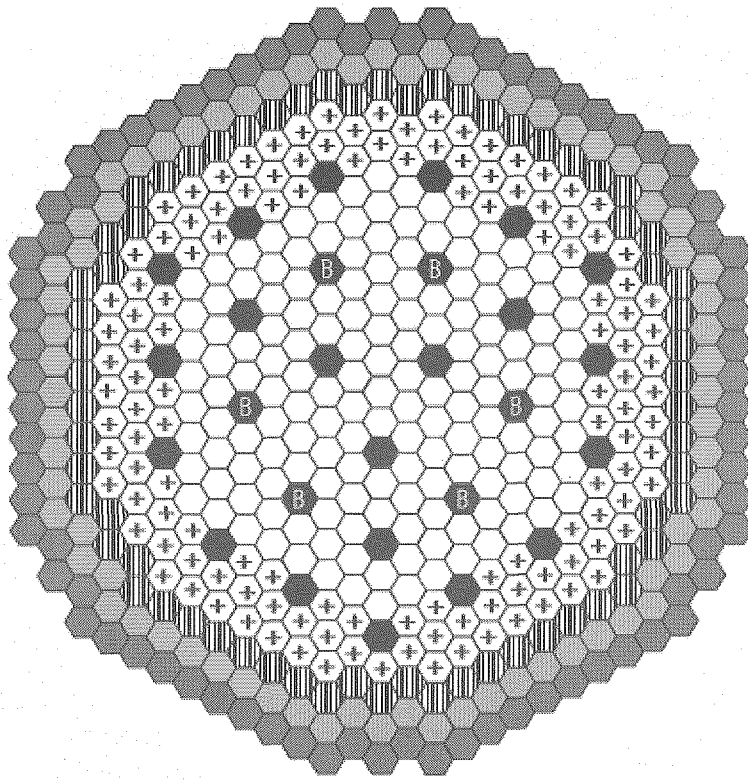
	Inner core assembly	288
	Outer core assembly	274
	Radial blanket assembly	96
	Shielding assembly(SUS)	102
	Shielding assembly(Zr-H)	108
	Control rod assembly(primary)	40
	Control rod assembly(backup)	17
<hr/>		
Total		925

Fig. 5.1-1 Configuration of the FS phase-II reference core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)










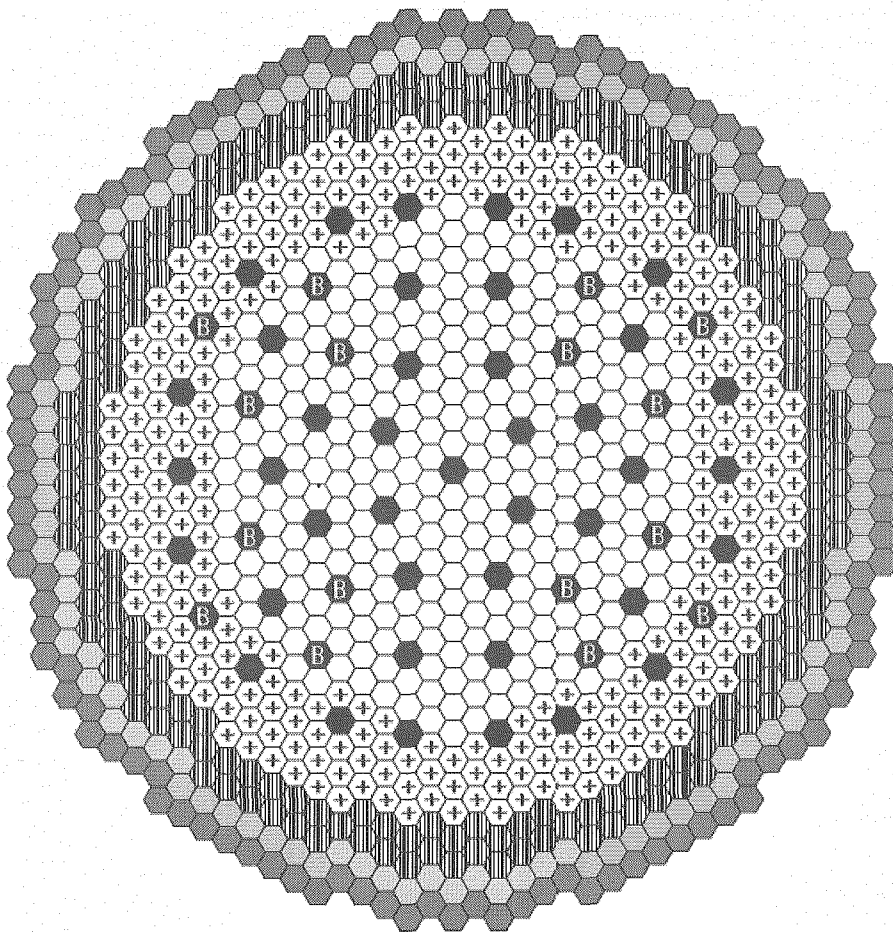
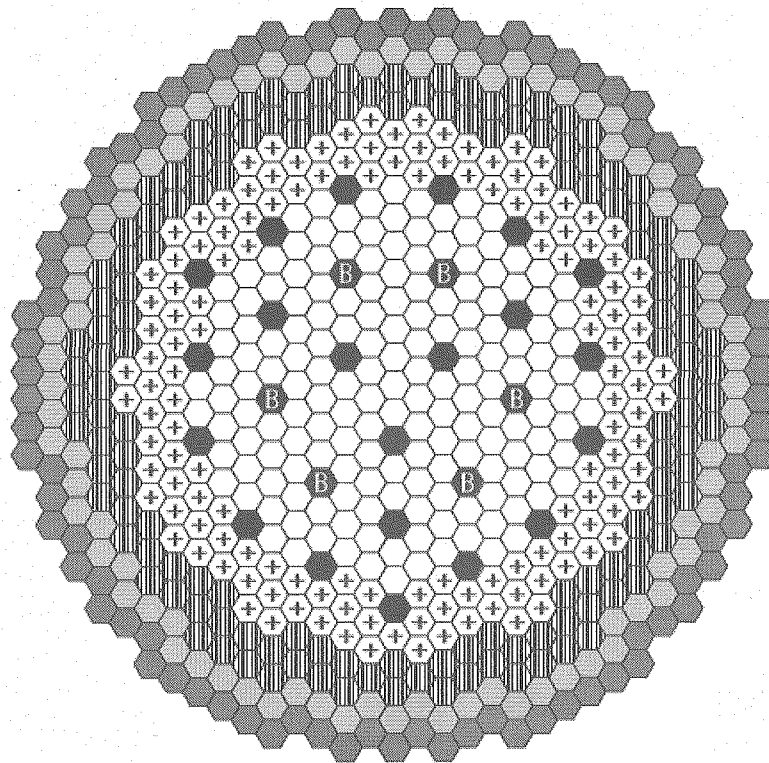
	Inner core assembly	157
	Outer core assembly	129
	Radial blanket assembly	66
	Shielding assembly(SUS)	72
	Shielding assembly(Zr-H)	78
	Control rod assembly(primary)	21
	Control rod assembly(backup)	6
Total		529

Fig. 5.1-2 Configuration of the FS phase-II reference core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)



⬡	Inner core assembly	300
⊕	Outer core assembly	292
▨	Radial blanket assembly	186
◐	Shielding assembly (SUS)	108
◑	Shielding assembly (Zr-H)	114
●	Control rod assembly (primary)	40
⊖	Control rod assembly (backup)	17
Total		1057

Fig. 5.2-1 Configuration of the vibro-packed fuel core and the sphere-pac fuel core
(Large-scale MOX fuel high conversion type core)



○	Inner core assembly	169
⊕	Outer core assembly	141
▨	Radial blanket assembly	138
◐	Shielding assembly (SUS)	84
●	Shielding assembly (Zr-H)	90
●	Control rod assembly (primary)	21
⬛	Control rod assembly (backup)	6
Total		649

Fig. 5.2-2 Configuration of the vibro-packed fuel core and the sphere-pac fuel core
(Medium-scale MOX fuel high conversion type core)

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
物質の量	モル	mol
光の強度	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 ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強度 (物質の) 濃度	アンペア毎メートル (モル毎立方メートル)	A/m (mol/m ³)
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

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

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	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光の強度 (放射線種の) 放射能	ベクレル	Bq	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
吸収線量, 質量エネルギー当量	グレイ	Gy	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹

- (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った性質をもっ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	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ²
表面張力	ニュートン毎メートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	rad/s ²	m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
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・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	W/(m・K)	m ³ ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強度	ボルト毎メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
体積電荷	クーロン毎立方メートル	V/m	m ³ ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
透磁率	ヘンリー毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	H/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ²
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
放射強度	ワット毎ステラジアン	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/sr	m ¹ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻³

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	1 h=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, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(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	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ 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その他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100fm=10 ⁻²⁸ m ²

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 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	B	1 B=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m