

JENDL-3.2に基づく高速炉遮へい計算用
ランプ化 FP 断面積の作成
(研究報告)

2001年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

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

2001

JENDL-3.2に基づく高速炉遮へい計算用ランプ化FP断面積の作成 (研究報告)

田渕士郎* 吉田昌宏* 青山卓史*

要　旨

従来の JASPER (日米共同高速炉遮へい実験) 等の遮へい実験解析においては FP の蓄積を考慮する必要がなかった。しかし、ある程度燃焼が進んだ炉心の遮へい解析では、FP の蓄積を考慮する必要があるが、既存の遮へい用断面積セットには FP の断面積が作成されていないため、FP の効果を考慮することができなかった。そこで今回、これを作成し、FP が遮へい計算に与える影響を評価した。

ORIGEN2 による高速炉用 MOX 燃料の燃焼計算では約 880 核種の FP を取扱っているが、このうち、評価済核データライブラリ JENDL-3.2 には 165 の FP 核種に関するデータが収録されている。これ以外の FP 核種による中性子吸収への寄与は十分に小さいので、これら 165 核種からランプ化 FP 断面積を作成することとした。

まず、JENDL-3.2 を NJOY-94 で処理して無限希釈断面積を作成した。エネルギー群は従来の遮へい計算用の断面積セット JSD-J2 と同じ 100 群構造とし、高次非等方散乱は P3 近似とした。次に、燃焼度 10, 40, 63, 90 GWd/t について ORIGEN2 で計算した ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu 及び ^{241}Pu からの各 FP 核種の生成量を重みとして、ランプ化 FP 断面積を作成した。作成したランプ化 FP 断面積には燃焼度依存性はみられず、断面積カーブは核計算用の炉定数 JFS-3-J3.2 のランプ化 FP 断面積とよく一致した。

FP が遮へい計算に与える影響を評価するために、作成したランプ化 FP 断面積を JSD-J2 に追加し、「常陽」を対象として DORT により 2 次元 RZ 及び XY-Rθ 体系で輸送計算を行った。その結果、炉内燃料貯蔵ラックに置かれた使用済燃料で FP 考慮の有無による中性子束及び共鳴反応系の反応率の差は約 7%、それ以外の炉心領域及び炉心外の領域の中性子束、 γ 線束、反応率及び γ 線発熱率の差は約 2% であった。これより、従来の FP を考慮していない場合では、中性子束は最大約 2% 過大評価であるものの、計算結果は概ね妥当であることがわかった。

*核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

照射施設運転管理センター 実験炉部技術課

Lumped Group Constants of FP Nuclides for Fast Reactor Shielding Calculation Based on JENDL-3.2

Shiro TABUCHI*, Akihiro YOSHIDA* and Takafumi AOYAMA*

ABSTRACT

Fission Products (FPs) were not considered in conventional fast reactor shielding analyses that were predominantly developed in clean core experiments like the JASPER program. However, in power reactors with high burn-up, the accumulation of FP affects the neutron balance so it cannot be neglected in the neutron flux calculation. In this study, the lumped group constants of FP nuclides were computed based on the JENDL-3.2 nuclear data library and these were compiled to the JSD-J2 set. Using the constants, the effect of the FP nuclides on shielding calculation was evaluated in the JOYO experimental fast reactor.

Generation and depletion for nearly 880 FP nuclides can be computed with the ORIGEN2 burn-up calculation. The calculation uses the specification and material contents of the JOYO Mk-II driver as an example of fast reactor MOX fuel. About 99.8% of the total FP neutron absorption comes from 165 major nuclides. The cross section data for these nuclides are stored in the JENDL-3.2 library. The contributions of other FP nuclides were found to be negligible so the calculation used only these 165 FP nuclides.

The lumped group constants for the FP nuclides were generated as follows. The 100 group infinite dilution cross section of each individual FP nuclide was computed with the NJOY-94 code. The energy group structure is the same as the JSD-J2 set and the scattering anisotropy is considered up to P3 components of Legendre expansion. Atomic number densities of FP nuclides generated from ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu and ^{241}Pu were independently computed by ORIGEN2 as a function of fuel burn-up. The lumped FP constants were then obtained by averaging the infinite dilution cross sections with the atomic number densities based on the assumption that one fission produces one lumped FP. To verify the calculated lumped FP constants, the absorption microscopic cross section data were compared with the JFS-3-J3.2 group constants used for the fast reactor core calculation. Both cross section curves agree well.

In order to evaluate the effect of FP nuclides on the JOYO shielding analysis, the neutron flux distributions were calculated using the DORT two-dimensional transport code in the RZ and XY-R θ geometry. By comparing calculated results with and without FP nuclides, the total neutron flux and resonance reactions decreased by about 7% in spent fuels in in-vessel storage rack region when considering FP, where moderated neutrons would be captured by FP nuclides. Note that at the core center and the position furthest away from the in-vessel spent fuel storage rack, the total and fast neutron flux decreased by only 2% when considering FP.

As a result of this study, the effect of FP nuclides in the shielding analysis of small size fast reactor was evaluated, and the conventional calculations without considering FP overestimated the neutron flux by about 2%.

*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,
Oarai Engineering Center, JNC

目 次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1 はじめに | 1 |
| 2 ランプ化 FP 断面積の作成 | 2 |
| 2.1 ランプ化 FP 断面積の作成方針 | 2 |
| 2.2 取扱い核種の選定 | 2 |
| 2.3 燃料核種毎の FP 生成量の算出 | 3 |
| 2.4 FP 核種の多群中性子断面積の作成 | 3 |
| 2.5 ランプ化 FP 断面積の作成 | 3 |
| 3 ランプ化 FP 断面積の作成結果 | 10 |
| 4 評価 | 16 |
| 4.1 FP を考慮した場合の巨視的断面積 | 16 |
| 4.2 中性子束・ γ 線束 | 16 |
| 4.3 中性子スペクトル | 17 |
| 4.4 ドシメータ核種の反応率・ γ 線発熱率 | 17 |
| 5 おわりに | 35 |
| 謝辞 | 36 |
| 参考文献 | 37 |
| 付録A ランプ化 FP 断面積の使用方法 | |

表リスト

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 表2. 1 | MK-II炉心燃料の初期組成 | 4 |
| 表2. 2 | ランプ化FPの燃焼度及び照射期間 | 4 |
| 表2. 3 | 燃焼度毎のFP核種による中性子吸収割合 | 5 |
| 表2. 4 | FP核種の断面積作成に用いたNJOY-94の計算条件 | 8 |
| 表4. 1 | 輸送計算の計算条件 | 18 |
| 表4. 2 | 第34サイクルの2次元RZモデルの領域名 | 19 |
| 表4. 3 | 反応率計算を行った核反応 | 20 |

図リスト

| | | |
|--------|---|----|
| 図2. 1 | ランプ化FP核種断面積作成の流れ | 9 |
| 図3. 1 | ^{235}U のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度90GWd/t） | 11 |
| 図3. 2 | ^{238}U のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度90GWd/t） | 11 |
| 図3. 3 | ^{239}Pu のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度90GWd/t） | 12 |
| 図3. 4 | ^{241}Pu のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度90GWd/t） | 12 |
| 図3. 5 | 燃焼度90GWd/tにおけるランプ化FP断面積（吸収断面積）の親核種依存性 | 13 |
| 図3. 6 | ^{235}U を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性 | 14 |
| 図3. 7 | ^{238}U を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性 | 14 |
| 図3. 8 | ^{239}Pu を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性 | 15 |
| 図3. 9 | ^{241}Pu を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性 | 15 |
| 図4. 1 | 第34サイクル炉心構成図 | 21 |
| 図4. 2 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の巨視的吸収断面積 | 22 |
| 図4. 3 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の巨視的全断面積 | 22 |
| 図4. 4 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の巨視的吸収断面積及び全断面積の比 | 23 |
| 図4. 5 | 輸送計算の流れ | 24 |
| 図4. 6 | 「常陽」の垂直断面図 | 25 |
| 図4. 7 | 第34サイクルのRZ計算体系（全体） | 26 |
| 図4. 8 | 第34サイクルのXY計算体系（炉心部） | 27 |
| 図4. 9 | 第34サイクルのRθ計算体系（内側遮蔽・炉心槽～グラウト） | 28 |
| 図4. 10 | FPを考慮した場合としない場合の中性子束の比の径方向分布（RZ計算値） | 29 |
| 図4. 11 | FPを考慮した場合としない場合の中性子束の比の径方向分布（XY-Rθ計算値） | 29 |
| 図4. 12 | 第34サイクルにおける高速中性子束分布（FP核種を考慮したRZ計算値） | 30 |
| 図4. 13 | RZ、XY、Rθ計算で得られた全中性子束の比較 | 31 |
| 図4. 14 | FPを考慮した場合としない場合のγ線束の比の径方向分布（RZ計算値） | 31 |
| 図4. 15 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の領域平均スペクトルの比較： 炉心燃料第1列（RZ計算値） | 32 |
| 図4. 16 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の領域平均スペクトルの比較： 炉心燃料（Mk-II）第5列（RZ計算値） | 33 |
| 図4. 17 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の領域平均スペクトルの比較： 外側反射体(A)（RZ計算値） | 33 |
| 図4. 18 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の反応率 (共鳴反応)の比の径方向分布（RZ計算値） | 34 |
| 図4. 19 | FP核種を考慮した場合と無視した場合の炉心中心高さでの反応率 (しきい反応)の比の径方向分布（RZ計算値） | 34 |

1 はじめに

これまでの JASPER*実験解析⁽¹⁾等の遮へい実験解析においては FP の蓄積を考慮する必要がなく、また、もんじゅや大型炉の遮へい設計においては、計算の不確かさを考慮した補正因子により安全側の設計評価を行っており、FP を考慮していなかった。FBR 実機における照射試験やサベイランス試験では、中性子フリエンス及びスペクトルを精度よく評価することが重要である。しかし、燃焼が進んだ炉心の遮へい解析では、FP の蓄積を考慮する必要があるが、既存の遮へい用断面積セットにはこれらの断面積が作成されていないため、考慮することができなかった。そこで今回、これを作成し、FP が遮へい計算に与える影響を評価した。

* Japanese-American Shielding Program for Experimental Research : 日米共同高速炉遮へい実験

2 ランプ化 FP 断面積の作成

2.1 ランプ化 FP 断面積の作成方針

本研究では燃焼が進んだ炉心の遮へい解析において FP を考慮できるようにするために、既存の遮へい用断面積セット JSD-J2⁽²⁾ あるいは JSSTD⁽³⁾で作成されていないランプ化 FP 断面積を作成することとした。従来、「常陽」の炉心周り、炉体周りの中性子照射量評価では、JENDL-2⁽⁴⁾に基づく遮へい計算用 100 群定数 JSD-J2 を用いて遮へい設計手法に基づく輸送計算により中性子束を計算してきた。JENDL-2 は収録されている FP 核種数が少なく、評価が不十分であったが、JENDL-3.2⁽⁵⁾では FP のデータが再評価され、また、FP 核種数が大幅に追加されているため、JENDL-3.2 から FP のランプ化断面積を作成することとした。さらにこれまでの評価との整合をとるために従来から「常陽」の遮へい計算で用いてきた群定数 JSD-J2 にランプ化 FP 断面積を追加して、これを用いて中性子照射量評価を行うこととした。

2.2 取扱い核種の選定

図 2. 1 にランプ化 FP 核種断面積作成の流れを示す。

ランプ化に用いる FP 核種を選定するため ORIGEN2⁽⁶⁾を用いて燃焼計算を行い、燃料中の FP 核種毎の中性子吸収割合を算出した。計算条件を下記に示す。なお、燃焼度は 10GWd/t (1 サイクル燃焼相当)、40GWd/t (MK-II 炉心平均燃焼度相当)、63GWd/t (MK-II 取出平均燃焼度相当) 及び 90GWd/t (MK-III 許可最大燃焼度相当) とする。

| | |
|------------------|---|
| 燃料 | ：「常陽」MK-II 炉心燃料 (PFD 549) |
| 初期燃料組成 | ：表 2. 1 |
| 組成計算燃焼度及び照射期間 | ：表 2. 2 |
| 照射履歴 | ：連続照射 |
| ORIGEN2 用 1 群断面積 | ：「常陽」炉心第 1 列のスペクトルで作成した断面積 ⁽⁷⁾ |

ORIGEN2 による各燃焼度毎の中性子吸収割合を表 2. 3 に示す。ORIGEN2 では高速炉の MOX 燃料の燃焼計算では約 880 核種の FP を取扱っているが、このうち JENDL-3.2 に収録されている核種は表 2. 3 に示す 165 核種である。「常陽」MK-II 炉心の炉心平均燃焼度に相当する 40GWd/t における、これら 165FP 核種の中性子吸収割合の合計は全 880FP 核種による中性子吸収の 99.81%に相当する。それ以外の FP 核種による中性子吸収の寄与は 0.2%以下であり、十分小さいことから、表 2. 3 に示す 165 核種をランプ化に用いる FP 核種として選定し、燃焼度 10、40、63、90GWd/t について ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 及び ^{241}Pu を親核種としたランプ化 FP 断面積を作成することとした。

2.3 燃料核種毎の FP 生成量の算出

各燃料核種 (^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 及び ^{241}Pu) から生成される FP の核種割合を計算するため、着目する燃料核種以外のすべての核種の核分裂収率をゼロとした 4 ケースの計算を表 2.2 に示す。燃焼期間毎に ORIGEN2 を用いて行った。

上記 4 核種について一つの燃料核種以外の核分裂収率をゼロとした場合について、各々表 2.2 に示す 4 ケースの燃焼度の計 16 ケースの ORIGEN2 による燃焼計算を行い、各燃料核種から生成した FP 核種の存在量（原子数密度）を燃焼度毎に算出した。

2.4 FP 核種の多群中性子断面積の作成

JENDL-3.2 から、NJOY-94⁽⁸⁾を用いて 2.2 で選定した 165 核種の多群中性子断面積を作成した。NJOY-94 の計算条件を表 2.4 に示す。多群断面積は JSD-J2 と同じ 100 群構造とし、非等方散乱は P3 近似とした無限希釈断面積とした。

2.5 ランプ化 FP 断面積の作成

2.4 で作成した多群断面積から 2.3 で求めた FP 核種の組成を重みとして、次の(2.1)式によりランプ化 FP 断面積を作成した。

$$\sigma_{\text{Lamped FP}}^X(B) = \frac{\sum_i N_{FPi}^X(B) \cdot \sigma_i}{\sum_i N_{FPi}^X(B)} \quad (2.1)$$

ここで、 $N_{FPi}^X(B)$ は、燃焼度 $B[\text{MWd/t}]$ における燃料核種 X から生成した FP 核種 i の存在量 (mol)、 σ_i [barn] は FP 核種 i の断面積である。

表 2.2 に示した 4 点の燃焼度について、以下の 6 種類のランプ化 FP 断面積を作成した。

- ①FP(U) ^{235}U 、 ^{238}U からの FP 核種のランプ化断面積
- ②FP(Pu) ^{239}Pu 、 ^{241}Pu からの FP 核種のランプ化断面積
- ③FP(U-235) ^{235}U からの FP 核種のランプ化断面積
- ④FP(U-238) ^{238}U からの FP 核種のランプ化断面積
- ⑤FP(Pu-239) ^{239}Pu からの FP 核種のランプ化断面積
- ⑥FP(Pu-241) ^{241}Pu からの FP 核種のランプ化断面積

作成したランプ化 FP 断面積を既存の群定数 JSD-J2/JFT-J2⁽²⁾ に追加し、これを RADHEAT-V3⁽⁹⁾システムで処理できるよう整備した。使用方法を付録 A に示す。また、「常陽」の燃焼度の範囲では FP による自己遮へい効果は無視できるので自己遮へい因子は 1 とした。

表2. 1 MK-II炉心燃料の初期組成

| 核種 | 原子量 | 重量割合 | アクチノイド 1トン当たり 重量 g/ton-HM | アクチノイド 1トン当たり モル数 g-atom/ton-HM |
|--------|----------|--------|------------------------------------|--|
| U-235 | 235.0439 | 18.37% | 1.311E+05 | 5.579E+02 |
| U-238 | 238.0508 | 81.63% | 5.827E+05 | 2.448E+03 |
| Pu-239 | 239.0522 | 63.74% | 1.824E+05 | 7.630E+02 |
| Pu-240 | 240.0538 | 24.59% | 7.038E+04 | 2.932E+02 |
| Pu-241 | 241.0568 | 8.03% | 2.298E+04 | 9.533E+01 |
| Pu-242 | 242.0587 | 3.64% | 1.041E+04 | 4.302E+01 |

表2. 2 ランプ化FPの燃焼度及び照射期間

| 燃焼期間(日) | 燃焼度(MWd/t) | 備考 |
|---------|------------|-------------------|
| 59.2 | 10,000 | MK-II 1サイクル燃焼相当 |
| 236.8 | 40,000 | MK-II 炉心平均(実績) |
| 373.0 | 63,000 | MK-II 取出平均(実績) |
| 532.9 | 90,000 | MK-III 要素最高値(許可値) |

比出力: 168.9MW/t (MK-II炉心、第3列相当)

表2. 3 燃焼度毎のFP核種による中性子吸収割合 (1/4)

| 番号 | 核種 | 核種毎中性子吸収割合 | | | | 累積中性子吸収割合 | | | | JENDL-3.2 MAT No. |
|----|--------|------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|----------------------|
| | | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | |
| 1 | Ru-101 | 9.26% | 8.93% | 8.83% | 8.73% | 9.26% | 8.93% | 8.83% | 8.73% | 4440 |
| 2 | Pd-105 | 7.94% | 7.90% | 7.83% | 7.77% | 17.20% | 16.83% | 16.66% | 16.49% | 4634 |
| 3 | Tc-99 | 6.90% | 7.06% | 7.03% | 6.99% | 24.10% | 23.89% | 23.69% | 23.48% | 4331 |
| 4 | Rh-103 | 3.09% | 6.02% | 6.60% | 6.89% | 27.19% | 29.91% | 30.28% | 30.38% | 4525 |
| 5 | Cs-133 | 5.22% | 5.72% | 5.74% | 5.73% | 32.40% | 35.63% | 36.02% | 36.11% | 5525 |
| 6 | Pd-107 | 4.83% | 4.65% | 4.59% | 4.54% | 37.24% | 40.29% | 40.62% | 40.65% | 4640 |
| 7 | Mo-97 | 4.63% | 4.54% | 4.50% | 4.47% | 41.87% | 44.83% | 45.12% | 45.13% | 4240 |
| 8 | Sm-149 | 4.43% | 4.39% | 4.30% | 4.19% | 46.29% | 49.21% | 49.42% | 49.31% | 6240 |
| 9 | Pm-147 | 3.32% | 3.77% | 3.63% | 3.43% | 49.61% | 52.98% | 53.04% | 52.74% | 6149 |
| 10 | Nd-145 | 3.47% | 3.37% | 3.33% | 3.30% | 53.08% | 56.35% | 56.37% | 56.04% | 6034 |
| 11 | Cs-135 | 2.79% | 2.74% | 2.72% | 2.71% | 55.87% | 59.09% | 59.09% | 58.75% | 5531 |
| 12 | Nd-143 | 1.99% | 2.64% | 2.71% | 2.74% | 57.86% | 61.73% | 61.80% | 61.49% | 6028 |
| 13 | Xe-131 | 2.06% | 2.38% | 2.40% | 2.41% | 59.92% | 64.11% | 64.20% | 63.90% | 5446 |
| 14 | Ru-102 | 2.25% | 2.21% | 2.22% | 2.24% | 62.16% | 66.31% | 66.42% | 66.13% | 4443 |
| 15 | Sm-151 | 2.26% | 2.19% | 2.15% | 2.10% | 64.42% | 68.51% | 68.57% | 68.24% | 6246 |
| 16 | Mo-95 | 0.39% | 2.15% | 2.88% | 3.34% | 64.81% | 70.66% | 71.45% | 71.57% | 4234 |
| 17 | Mo-98 | 1.94% | 1.89% | 1.89% | 1.89% | 66.75% | 72.55% | 73.34% | 73.46% | 4243 |
| 18 | Ag-109 | 1.84% | 1.80% | 1.79% | 1.78% | 68.58% | 74.35% | 75.12% | 75.24% | 4731 |
| 19 | Ru-104 | 1.74% | 1.69% | 1.69% | 1.69% | 70.32% | 76.04% | 76.81% | 76.93% | 4449 |
| 20 | Mo-100 | 1.63% | 1.58% | 1.57% | 1.57% | 71.95% | 77.63% | 78.38% | 78.49% | 4249 |
| 21 | Eu-153 | 1.58% | 1.56% | 1.53% | 1.50% | 73.53% | 79.19% | 79.92% | 79.99% | 6331 |
| 22 | Zr-93 | 1.29% | 1.27% | 1.26% | 1.25% | 74.82% | 80.45% | 81.17% | 81.25% | 4034 |
| 23 | Ru-103 | 3.26% | 1.19% | 0.78% | 0.55% | 78.08% | 81.65% | 81.95% | 81.79% | 4446 |
| 24 | Pr-141 | 0.57% | 1.03% | 1.11% | 1.15% | 78.65% | 82.67% | 83.06% | 82.94% | 5925 |
| 25 | I-129 | 0.93% | 0.97% | 0.98% | 0.98% | 79.58% | 83.65% | 84.03% | 83.92% | 5331 |
| 26 | Zr-95 | 1.88% | 0.88% | 0.59% | 0.42% | 81.46% | 84.53% | 84.63% | 84.34% | 4040 |
| 27 | Zr-96 | 0.77% | 0.75% | 0.74% | 0.74% | 82.23% | 85.28% | 85.37% | 85.08% | 4043 |
| 28 | Nd-146 | 0.72% | 0.70% | 0.70% | 0.71% | 82.95% | 85.98% | 86.08% | 85.79% | 6037 |
| 29 | Xe-132 | 0.66% | 0.69% | 0.69% | 0.70% | 83.61% | 86.67% | 86.77% | 86.49% | 5449 |
| 30 | Pd-108 | 0.68% | 0.68% | 0.69% | 0.70% | 84.29% | 87.35% | 87.45% | 87.19% | 4643 |
| 31 | Nb-95 | 0.70% | 0.67% | 0.48% | 0.35% | 84.98% | 88.02% | 87.94% | 87.54% | 4131 |
| 32 | Ce-141 | 1.86% | 0.62% | 0.39% | 0.27% | 86.85% | 88.63% | 88.33% | 87.81% | 5840 |
| 33 | Zr-91 | 0.26% | 0.61% | 0.70% | 0.75% | 87.11% | 89.24% | 89.03% | 88.57% | 4028 |
| 34 | Zr-92 | 0.50% | 0.48% | 0.48% | 0.48% | 87.61% | 89.72% | 89.51% | 89.04% | 4031 |
| 35 | Xe-134 | 0.49% | 0.48% | 0.47% | 0.47% | 88.10% | 90.20% | 89.99% | 89.52% | 5455 |
| 36 | Ru-106 | 0.57% | 0.48% | 0.42% | 0.37% | 88.67% | 90.68% | 90.41% | 89.89% | 4455 |
| 37 | Sm-152 | 0.48% | 0.48% | 0.49% | 0.50% | 89.15% | 91.16% | 90.90% | 90.39% | 6249 |
| 38 | Nd-148 | 0.47% | 0.46% | 0.46% | 0.46% | 89.62% | 91.62% | 91.36% | 90.85% | 6043 |
| 39 | Cd-111 | 0.39% | 0.44% | 0.45% | 0.45% | 90.01% | 92.06% | 91.80% | 91.29% | 4840 |
| 40 | Rb-85 | 0.44% | 0.43% | 0.43% | 0.42% | 90.46% | 92.49% | 92.23% | 91.72% | 3725 |
| 41 | I-127 | 0.38% | 0.42% | 0.43% | 0.43% | 90.84% | 92.91% | 92.66% | 92.15% | 5325 |
| 42 | La-139 | 0.43% | 0.42% | 0.42% | 0.42% | 91.27% | 93.33% | 93.07% | 92.56% | 5728 |
| 43 | Pd-106 | 0.11% | 0.41% | 0.60% | 0.79% | 91.38% | 93.74% | 93.67% | 93.36% | 4637 |
| 44 | Eu-155 | 0.37% | 0.35% | 0.34% | 0.33% | 91.75% | 94.08% | 94.01% | 93.68% | 6337 |
| 45 | Zr-94 | 0.33% | 0.32% | 0.32% | 0.32% | 92.08% | 94.40% | 94.32% | 94.00% | 4037 |
| 46 | Sm-147 | 0.06% | 0.31% | 0.48% | 0.65% | 92.13% | 94.71% | 94.80% | 94.65% | 6234 |
| 47 | Ce-142 | 0.30% | 0.29% | 0.29% | 0.29% | 92.43% | 95.00% | 95.09% | 94.94% | 5843 |
| 48 | Nd-150 | 0.29% | 0.28% | 0.28% | 0.28% | 92.72% | 95.28% | 95.37% | 95.22% | 6049 |
| 49 | Nd-147 | 1.08% | 0.26% | 0.17% | 0.12% | 93.80% | 95.54% | 95.53% | 95.33% | 6040 |
| 50 | Cs-137 | 0.26% | 0.25% | 0.25% | 0.25% | 94.06% | 95.80% | 95.78% | 95.58% | 5537 |
| 51 | Y-91 | 0.45% | 0.20% | 0.14% | 0.09% | 94.51% | 96.00% | 95.92% | 95.68% | 3931 |
| 52 | Nd-144 | 0.05% | 0.19% | 0.27% | 0.34% | 94.57% | 96.19% | 96.19% | 96.02% | 6031 |
| 53 | Kr-83 | 0.19% | 0.19% | 0.18% | 0.18% | 94.76% | 96.37% | 96.37% | 96.20% | 3640 |

表2. 3 燃焼度毎のFP核種による中性子吸収割合 (2/4)

| 番号 | 核種 | 核種毎中性子吸収割合 | | | | 累積中性子吸収割合 | | | | JENDL-3.2 MAT No. |
|-----|---------|------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|----------------------|
| | | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | |
| 54 | Ce-144 | 0.23% | 0.18% | 0.16% | 0.13% | 94.99% | 96.56% | 96.53% | 96.33% | 5849 |
| 55 | Gd-157 | 0.18% | 0.18% | 0.17% | 0.17% | 95.17% | 96.73% | 96.70% | 96.51% | 6440 |
| 56 | Pd-110 | 0.14% | 0.14% | 0.14% | 0.14% | 95.31% | 96.87% | 96.84% | 96.65% | 4649 |
| 57 | Mo-99 | 0.58% | 0.14% | 0.09% | 0.06% | 95.89% | 97.01% | 96.93% | 96.71% | 4246 |
| 58 | Gd-156 | 0.09% | 0.13% | 0.13% | 0.14% | 95.98% | 97.14% | 97.06% | 96.85% | 6437 |
| 59 | Cd-113 | 0.11% | 0.11% | 0.11% | 0.11% | 96.09% | 97.25% | 97.17% | 96.96% | 4846 |
| 60 | Cs-134 | 0.03% | 0.11% | 0.17% | 0.24% | 96.12% | 97.35% | 97.34% | 97.20% | 5528 |
| 61 | Eu-154 | 0.03% | 0.10% | 0.16% | 0.23% | 96.15% | 97.46% | 97.50% | 97.42% | 6334 |
| 62 | Ce-140 | 0.08% | 0.10% | 0.10% | 0.11% | 96.22% | 97.56% | 97.60% | 97.53% | 5837 |
| 63 | Sb-125 | 0.10% | 0.10% | 0.09% | 0.09% | 96.33% | 97.66% | 97.70% | 97.61% | 5137 |
| 64 | Tb-159 | 0.10% | 0.10% | 0.10% | 0.09% | 96.43% | 97.75% | 97.79% | 97.71% | 6525 |
| 65 | Sm-154 | 0.10% | 0.10% | 0.10% | 0.10% | 96.53% | 97.85% | 97.89% | 97.81% | 6255 |
| 66 | Sr-90 | 0.10% | 0.10% | 0.10% | 0.09% | 96.63% | 97.95% | 97.99% | 97.90% | 3843 |
| 67 | I-131 | 0.37% | 0.09% | 0.06% | 0.04% | 97.00% | 98.04% | 98.04% | 97.94% | 5337 |
| 68 | Y-89 | 0.04% | 0.09% | 0.10% | 0.10% | 97.04% | 98.12% | 98.14% | 98.04% | 3925 |
| 69 | Ba-138 | 0.08% | 0.08% | 0.08% | 0.08% | 97.12% | 98.20% | 98.22% | 98.12% | 5649 |
| 70 | Pr-143 | 0.31% | 0.08% | 0.05% | 0.03% | 97.43% | 98.28% | 98.27% | 98.16% | 5931 |
| 71 | Br-81 | 0.08% | 0.08% | 0.08% | 0.08% | 97.51% | 98.36% | 98.35% | 98.23% | 3531 |
| 72 | Te-130 | 0.08% | 0.08% | 0.08% | 0.08% | 97.59% | 98.44% | 98.42% | 98.31% | 5255 |
| 73 | In-115 | 0.07% | 0.08% | 0.08% | 0.08% | 97.66% | 98.51% | 98.50% | 98.39% | 4931 |
| 74 | Te-128 | 0.08% | 0.07% | 0.07% | 0.07% | 97.74% | 98.59% | 98.57% | 98.46% | 5249 |
| 75 | Cd-112 | 0.07% | 0.07% | 0.07% | 0.07% | 97.80% | 98.65% | 98.64% | 98.53% | 4843 |
| 76 | Te-129m | 0.20% | 0.07% | 0.04% | 0.03% | 98.00% | 98.72% | 98.68% | 98.56% | 5253 |
| 77 | Rb-87 | 0.06% | 0.06% | 0.06% | 0.06% | 98.06% | 98.78% | 98.74% | 98.62% | 3731 |
| 78 | Kr-84 | 0.06% | 0.06% | 0.06% | 0.06% | 98.12% | 98.84% | 98.80% | 98.67% | 3643 |
| 79 | Xe-133 | 0.22% | 0.05% | 0.03% | 0.02% | 98.33% | 98.89% | 98.83% | 98.70% | 5452 |
| 80 | Sb-121 | 0.05% | 0.05% | 0.05% | 0.05% | 98.38% | 98.94% | 98.88% | 98.75% | 5125 |
| 81 | Te-127m | 0.08% | 0.05% | 0.04% | 0.03% | 98.46% | 98.99% | 98.92% | 98.77% | 5247 |
| 82 | Pm-148m | 0.02% | 0.05% | 0.05% | 0.06% | 98.48% | 99.03% | 98.97% | 98.83% | 6153 |
| 83 | Se-79 | 0.05% | 0.05% | 0.05% | 0.05% | 98.53% | 99.08% | 99.02% | 98.88% | 3440 |
| 84 | Rh-105 | 0.20% | 0.05% | 0.03% | 0.02% | 98.72% | 99.13% | 99.05% | 98.90% | 4531 |
| 85 | Sm-150 | 0.01% | 0.04% | 0.07% | 0.10% | 98.73% | 99.17% | 99.12% | 99.00% | 6243 |
| 86 | Sb-123 | 0.04% | 0.04% | 0.04% | 0.04% | 98.77% | 99.21% | 99.16% | 99.04% | 5131 |
| 87 | Gd-155 | 0.01% | 0.03% | 0.05% | 0.07% | 98.78% | 99.24% | 99.21% | 99.11% | 6434 |
| 88 | Sn-117 | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 98.81% | 99.28% | 99.24% | 99.14% | 5040 |
| 89 | Pm-149 | 0.13% | 0.03% | 0.02% | 0.01% | 98.94% | 99.31% | 99.26% | 99.15% | 6155 |
| 90 | Xe-136 | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 98.98% | 99.34% | 99.29% | 99.19% | 5461 |
| 91 | Pd-104 | 0.00% | 0.03% | 0.06% | 0.10% | 98.98% | 99.37% | 99.35% | 99.28% | 4631 |
| 92 | Gd-158 | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 99.01% | 99.40% | 99.38% | 99.31% | 6443 |
| 93 | Ru-100 | 0.01% | 0.03% | 0.05% | 0.08% | 99.02% | 99.43% | 99.43% | 99.39% | 4437 |
| 94 | Kr-85 | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 0.03% | 99.05% | 99.46% | 99.46% | 99.42% | 3646 |
| 95 | Sr-89 | 0.06% | 0.03% | 0.02% | 0.01% | 99.11% | 99.49% | 99.48% | 99.43% | 3840 |
| 96 | Cd-114 | 0.03% | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 99.14% | 99.51% | 99.50% | 99.45% | 4849 |
| 97 | Sr-88 | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 99.16% | 99.54% | 99.53% | 99.48% | 3837 |
| 98 | Sn-119 | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 99.18% | 99.56% | 99.55% | 99.50% | 5046 |
| 99 | Sm-148 | 0.00% | 0.02% | 0.03% | 0.05% | 99.18% | 99.58% | 99.58% | 99.55% | 6237 |
| 100 | Se-82 | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 99.20% | 99.59% | 99.60% | 99.57% | 3449 |
| 101 | Ba-136 | 0.01% | 0.02% | 0.02% | 0.02% | 99.21% | 99.61% | 99.62% | 99.59% | 5643 |
| 102 | Ag-110m | 0.00% | 0.02% | 0.02% | 0.03% | 99.22% | 99.62% | 99.64% | 99.62% | 4735 |
| 103 | Se-77 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.23% | 99.64% | 99.65% | 99.63% | 3434 |
| 104 | Kr-86 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.24% | 99.65% | 99.66% | 99.64% | 3649 |
| 105 | Eu-156 | 0.04% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.28% | 99.66% | 99.67% | 99.65% | 6340 |
| 106 | Se-80 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.30% | 99.67% | 99.68% | 99.66% | 3443 |

* Te-127mはJENDL-3.2をNJOY-94で処理する際のエラーのためにランプ化FPから除いた。

表2. 3 燃焼度毎のFP核種による中性子吸収割合 (3/4)

| 番号 | 核種 | 核種毎中性子吸収割合 | | | | 累積中性子吸収割合 | | | | JENDL-3.2 MAT No. |
|-----|--------|------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|----------------------|
| | | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | |
| 107 | Eu-151 | 0.00% | 0.01% | 0.02% | 0.02% | 99.30% | 99.68% | 99.70% | 99.68% | 6325 |
| 108 | Cd-116 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.31% | 99.69% | 99.71% | 99.69% | 4855 |
| 109 | Sn-118 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.32% | 99.70% | 99.72% | 99.70% | 5043 |
| 110 | Cd-110 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 99.32% | 99.71% | 99.73% | 99.72% | 4837 |
| 111 | Se-78 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.33% | 99.72% | 99.74% | 99.73% | 3437 |
| 112 | Xe-130 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 99.33% | 99.72% | 99.75% | 99.74% | 5443 |
| 113 | Ba-137 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 99.33% | 99.73% | 99.76% | 99.76% | 5646 |
| 114 | Gd-160 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.34% | 99.74% | 99.77% | 99.77% | 6449 |
| 115 | Ba-140 | 0.02% | 0.01% | 0.00% | 0.00% | 99.36% | 99.74% | 99.77% | 99.77% | 5655 |
| 116 | Sn-126 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.37% | 99.75% | 99.78% | 99.77% | 5067 |
| 117 | Te-125 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.37% | 99.76% | 99.78% | 99.79% | 5240 |
| 118 | Sn-120 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 99.37% | 99.76% | 99.79% | 99.79% | 5049 |
| 119 | Sm-153 | 0.02% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.40% | 99.77% | 99.79% | 99.79% | 6252 |
| 120 | Mo-96 | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 99.40% | 99.77% | 99.80% | 99.81% | 4237 |
| 121 | Cs-136 | 0.01% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.41% | 99.77% | 99.81% | 99.81% | 5534 |
| 122 | Sn-122 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.41% | 99.78% | 99.81% | 99.82% | 5055 |
| 123 | Sn-124 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.41% | 99.78% | 99.81% | 99.82% | 5061 |
| 124 | Pm-148 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.42% | 99.79% | 99.82% | 99.82% | 6152 |
| 125 | As-75 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.42% | 99.79% | 99.82% | 99.83% | 3325 |
| 126 | Xe-128 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 99.42% | 99.79% | 99.82% | 99.83% | 5437 |
| 127 | Ba-134 | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 99.42% | 99.79% | 99.83% | 99.84% | 5637 |
| 128 | Xe-135 | 0.01% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.83% | 99.84% | 5458 |
| 129 | Zr-90 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.83% | 99.85% | 4025 |
| 130 | Nd-142 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.85% | 6025 |
| 131 | Sn-115 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.85% | 5034 |
| 132 | Te-126 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 5243 |
| 133 | Sr-86 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 3831 |
| 134 | Gd-154 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 6431 |
| 135 | Eu-152 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 6328 |
| 136 | Sb-124 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 5134 |
| 137 | Te-122 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 5231 |
| 138 | Kr-82 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 3637 |
| 139 | Ge-76 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 3243 |
| 140 | Ge-73 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 3234 |
| 141 | Sn-116 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.43% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 5037 |
| 142 | Te-124 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.84% | 99.86% | 5237 |
| 143 | Ge-74 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.86% | 3237 |
| 144 | La-138 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.87% | 5725 |
| 145 | Ge-72 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.87% | 3231 |
| 146 | In-113 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.87% | 4925 |
| 147 | Gd-152 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.87% | 6425 |
| 148 | Ba-135 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.87% | 5640 |
| 149 | Xe-129 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.87% | 5440 |
| 150 | Se-76 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.80% | 99.85% | 99.87% | 3431 |
| 151 | Ru-99 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 4434 |
| 152 | Nb-94 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 4128 |
| 153 | Cd-108 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 4831 |
| 154 | Te-123 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 5234 |
| 155 | Sr-87 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 3834 |
| 156 | Kr-80 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 3631 |
| 157 | Br-79 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 3525 |
| 158 | Sn-114 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 5031 |
| 159 | Li-6 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 325 |

表2. 3 燃焼度毎のFP核種による中性子吸収割合 (4/4)

| 番号 | 核種 | 核種毎中性子吸収割合 | | | | 累積中性子吸収割合 | | | | JENDL-3.2 MAT No. |
|-----------------------------|--------|------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|----------------------|
| | | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | 10GWd/t | 40GWd/t | 63GWd/t | 90GWd/t | |
| 160 | Ag-107 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 4725 |
| 161 | Be-9 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 425 |
| 162 | Nb-93 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 4125 |
| 163 | Ga-71 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 3131 |
| 164 | Li-7 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 328 |
| 165 | Ga-69 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | 3125 |
| 上記165核種のFPの中性子吸収への寄与 | | | | | | 99.44% | 99.81% | 99.85% | 99.87% | |
| Te-127mを除く164核種の中性子FP吸収への寄与 | | | | | | 99.36% | 99.76% | 99.81% | 99.84% | |

表2. 4 FP核種の断面積作成に用いた NJOY-94 の計算条件

| パラメータ | 計算に使用した値 | | | NJOY モジュール名 |
|---------------|------------------------------|---|--|-------------------|
| 評価済み断面積ライブラリー | JENDL-3.2 (0Kにおけるポイントデータ) | | | — |
| 温度 | 800K | | | BROADR, UNRESR |
| バックグラウンド断面積 | 10^{10} barn(無限希釈) | | | UNRESR |
| 中性子エネルギー群数 | 100 群 (JSD-J2 群構造) | | | GROUPR |
| 縮約スペクトル | スペクトル | Thermal Maxwellian+1/E+Fission Thermal <0.10eV 1/E 0.10eV~820.3keV Fission >820.3keV | | |
| | 熱中性子 の温度 | 300K (0.025eV) | | |
| | 核分裂 スペクトル | 1.4MeV の Maxwellian | | |

注：共鳴核種については JENDL-3.2 の 0K におけるポイントデータを使用したため、分離共鳴の処理(RECONR)は行っていない。

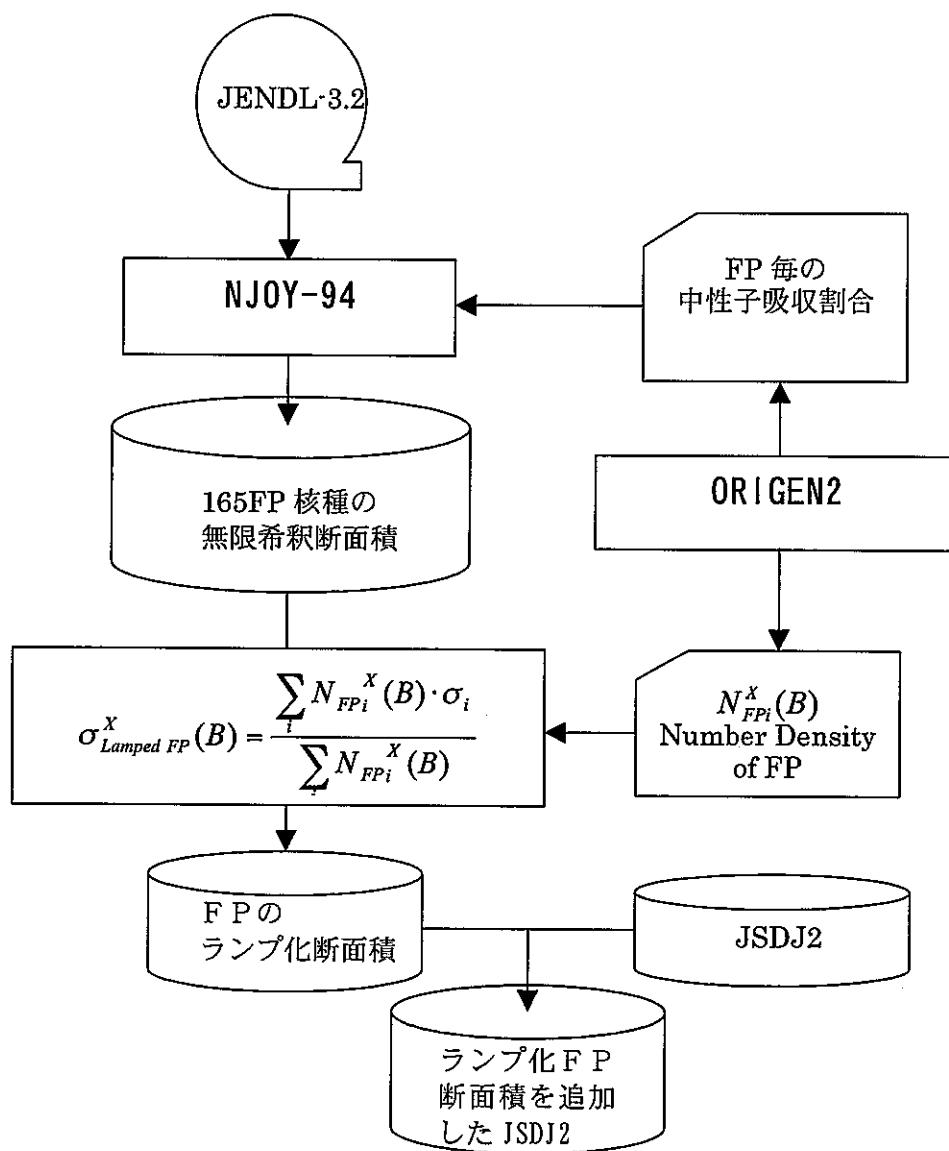


図2. 1 ランプ化FP核種断面積作成の流れ

3 ランプ化 FP 断面積の作成結果

図3. 1～3. 4に燃焼度 90GWd/t について作成したランプ化 FP 核種の中性子吸収断面積を JFS-3-J3.2⁽¹⁰⁾のランプ化 FP 断面積と比較して示す。これらより、両者はよく一致しており、ランプ化断面積が正しく作られていることを確認した。

図3. 5にランプ化 FP 核種の中性子吸収断面積(燃焼度 90GWd/t)の燃料核種による相違を、図3. 6～3. 9に各燃料核種毎のランプ化 FP 吸收断面積の燃焼度依存性を示す。これらより、ランプ化 FP 断面積の燃焼度依存性はほとんどみられないことがわかった。これは、ランプ化断面積では熱群を除いて安定核種または長半減期核種の寄与が支配的であり、FP 核種の生成率が中性子吸収による消滅率に比べて大きく、FP 核種の存在比率がその核分裂収率(短半減期の燃料核種を持つ核種は、その燃料核種の収率)にほぼ比例しているためである。

一方、ランプ化した吸収断面積のエネルギー分布は燃料核種の種類に大きく依存し、特に ^{239}Pu を燃料核種とするランプ化 FP 断面積は、1keV 以上のエネルギー領域で他の燃料核種よりも数 10% 大きい。これは、FP 核種の収率分布は燃料核種の原子量が大きいほど原子量・原子番号が大きくなる方向に変化するためである。

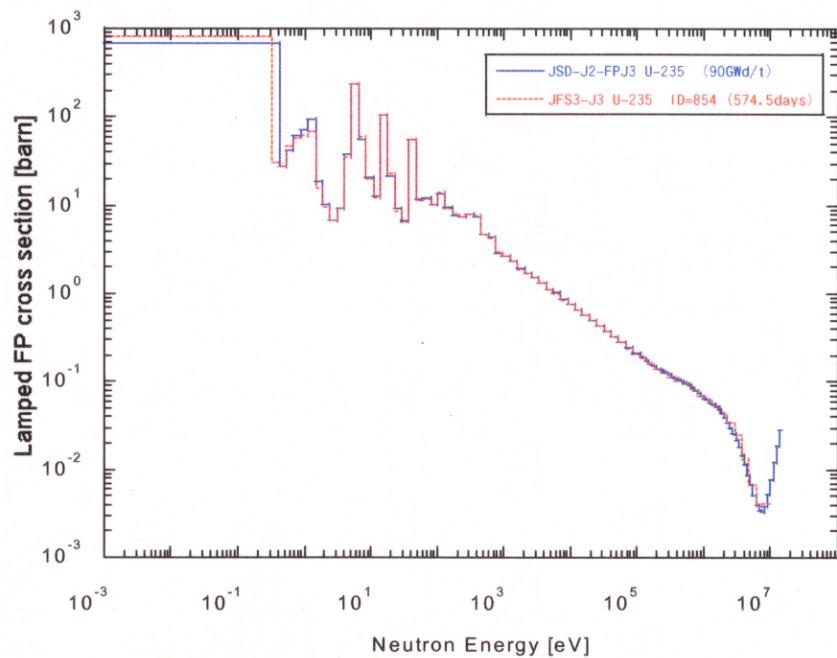


図3. 1 ^{235}U のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度 90Gwd/t）

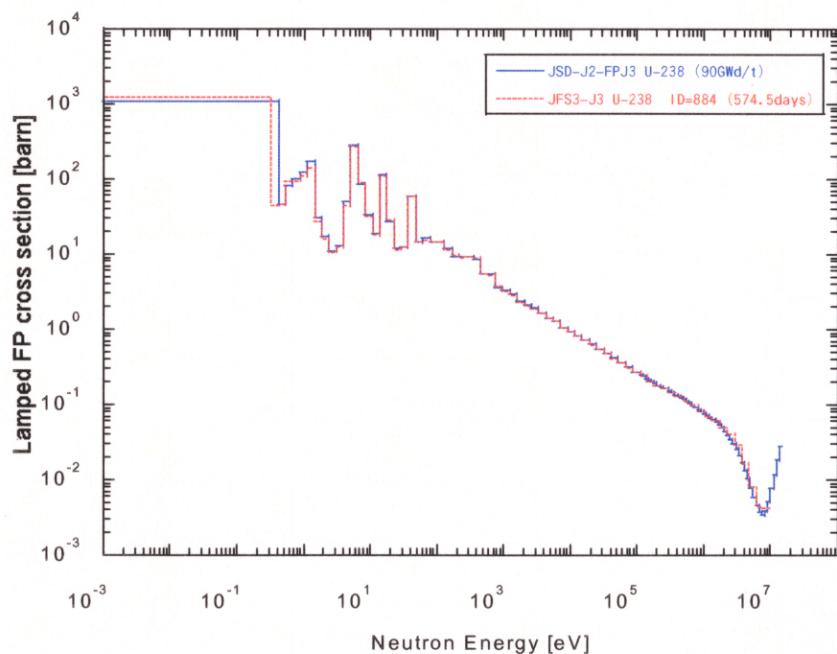


図3. 2 ^{238}U のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度 90Gwd/t）

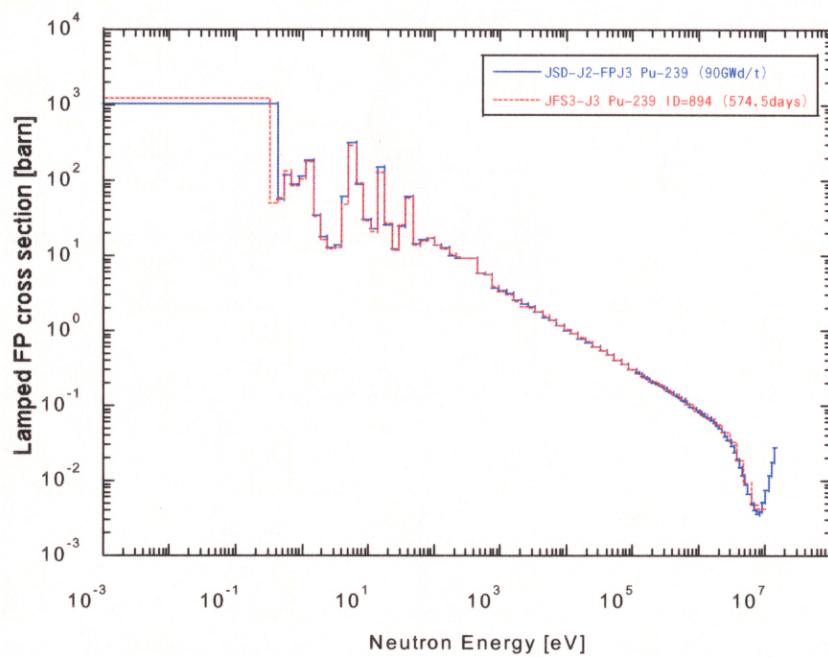


図3. 3 ^{239}Pu のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度 90Gwd/t）

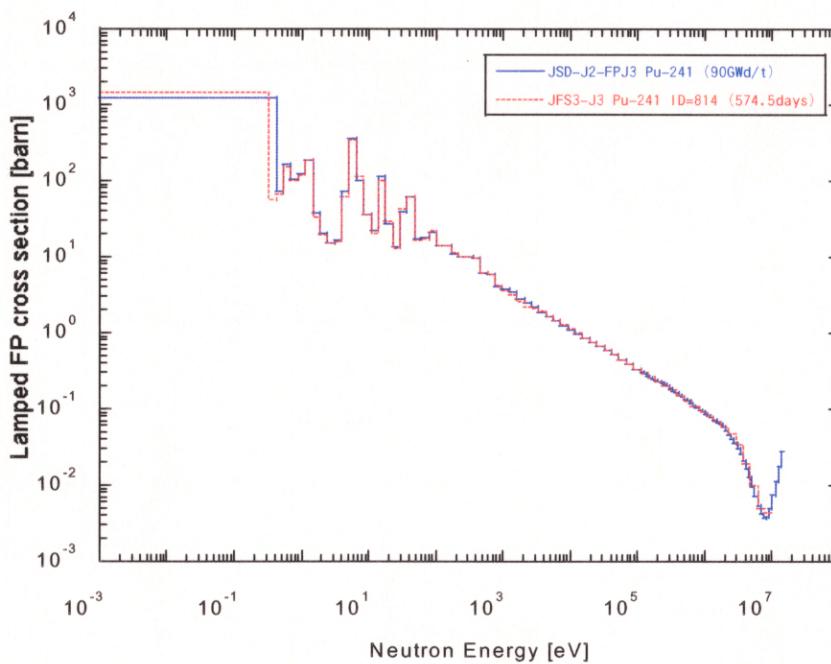


図3. 4 ^{241}Pu のランプ化FP断面積（吸収断面積）の比較（燃焼度 90Gwd/t）

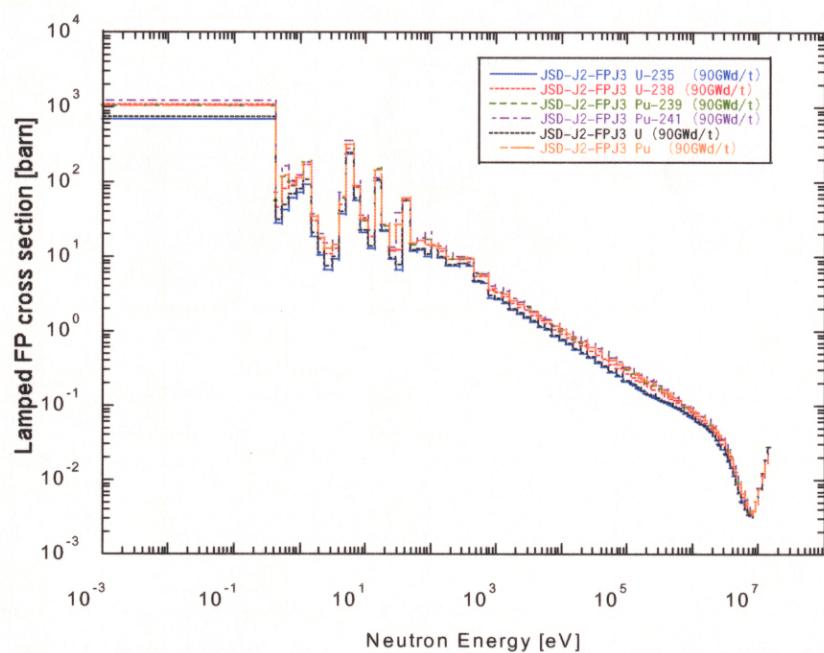


図3. 5 燃焼度 90GWe/t におけるランプ化FP 断面積（吸収断面積）の親核種依存性

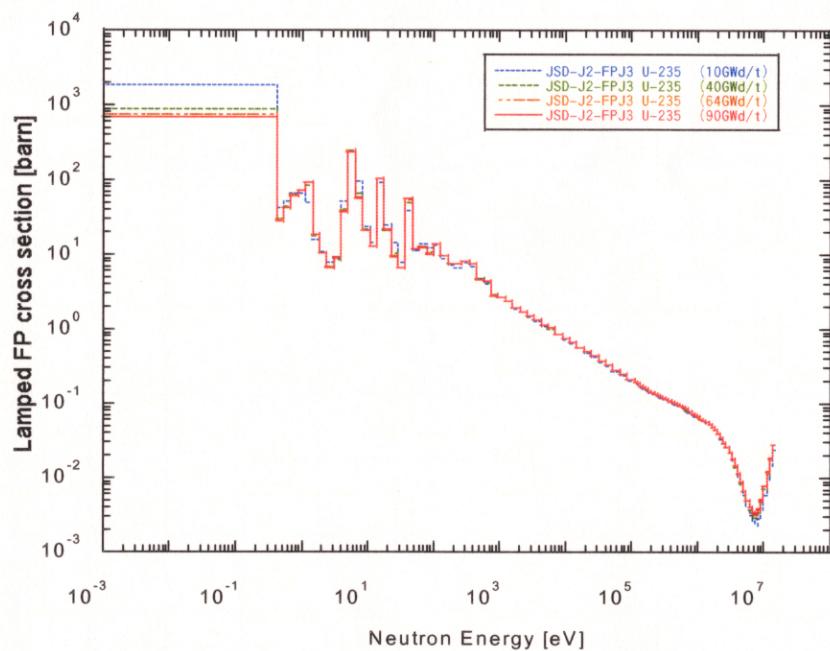


図3. 6 ^{235}U を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性

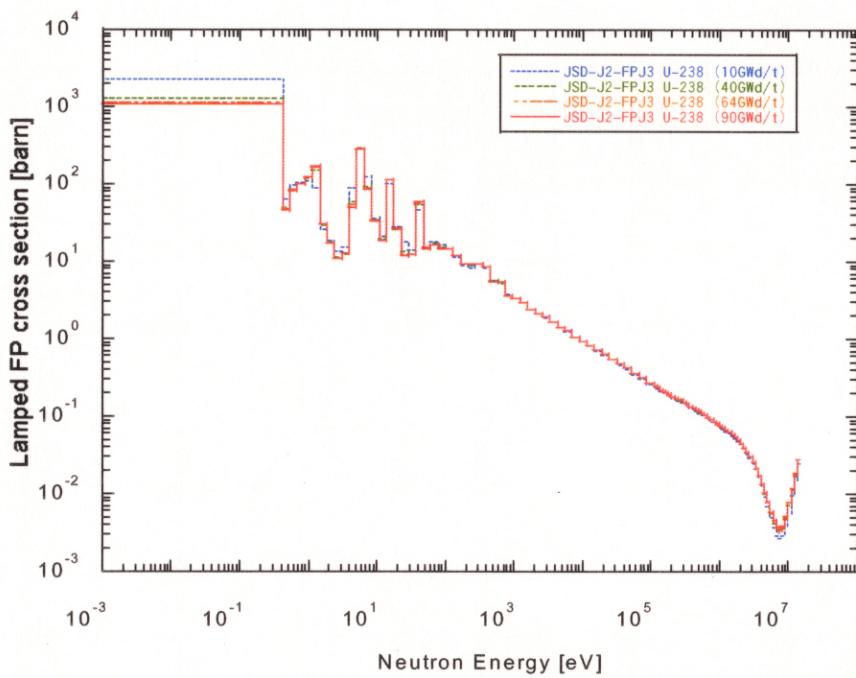


図3. 7 ^{238}U を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性

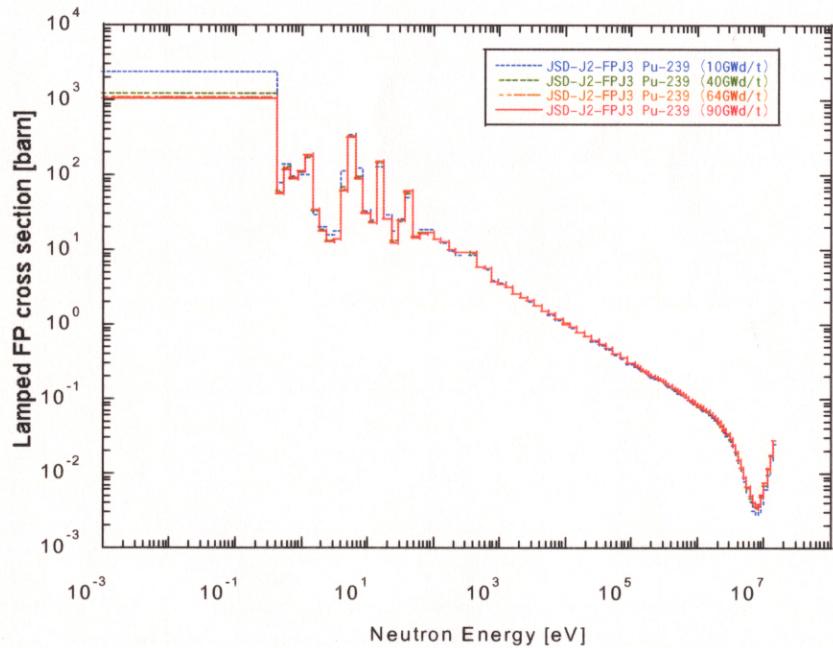


図3. 8 ^{239}Pu を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性

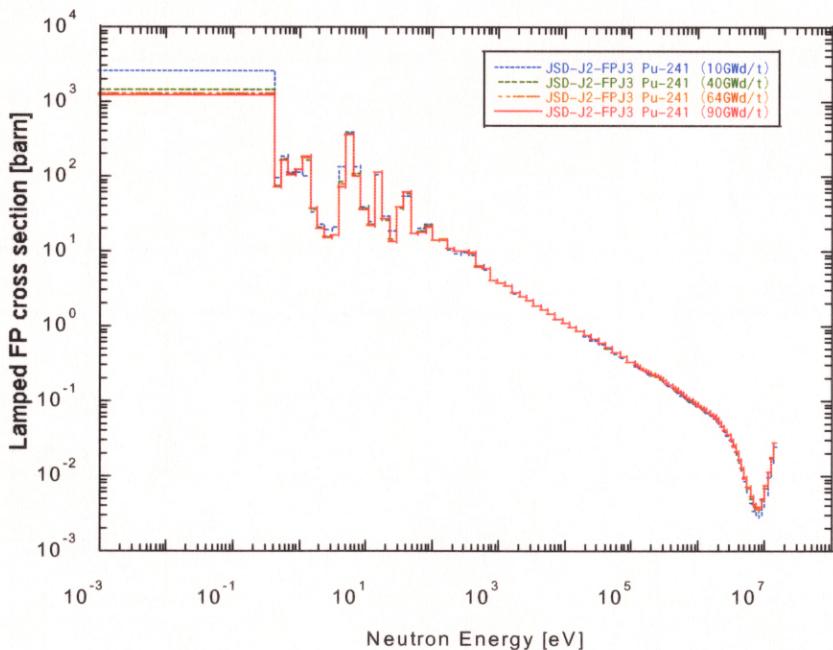


図3. 9 ^{241}Pu を親核種とするランプ化FP断面積（吸収断面積）の燃焼度依存性

4 評価

4.1 FP を考慮した場合の巨視的断面積

3章で作成したランプ化FPの断面積を追加したJSD-J2と、遅発 γ 線の生成を考慮した γ 線生成データライブラリ修正New-POPOP4⁽¹¹⁾を用いて、RADHEAT-V3により、図4. 1に示す「常陽」MK-II第34サイクル炉心の各領域の中性子100群、 γ 線20群のANISN MOT形式の中性子 γ 線結合実効マクロ断面積を作成した。ランプ化FP断面積は炉心平均燃焼度に近い値として、40000MWd/tの燃焼度のものを用いた。

FPを考慮した場合としない場合の「常陽」MK-II炉心第1列の燃料領域のマクロ吸収断面積及びマクロ全断面積をそれぞれ図4. 2及び図4. 3に示す。また、FPを考慮した場合としない場合のマクロ断面積の比を図4. 4に示す。FPを考慮することにより、吸収断面積は1keV以上のエネルギー領域で1~3%、全断面積は全てのエネルギー領域で約1%の差がみられた。

4.2 中性子束・ γ 線束

2次元S nコードDORT⁽¹²⁾を用いて、「常陽」炉心周りの輸送計算を行い、FPを考慮した場合と無視した場合の中性子束及び γ 線束を計算し、比較した。輸送計算の計算条件を表4. 1に示す。計算では、拡散理論に基づく炉心管理計算コードシステムMAGI⁽¹³⁾で得られた中性子発生個数分布($\nu \sum f \phi$)を固定中性子線源とし、Sn分点はS30、高次非等方散乱はP3近似とした。中性子束計算の流れを図4. 5に示す。図4. 6に示す「常陽」の垂直断面を2次元RZ体系及びXY-Rθ体系でモデル化し、輸送計算を行う。2次元RZ体系を図4. 7に、2次元XY体系、Rθ体系をそれぞれ図4. 8及び図4. 9に、2次元RZ体系の領域と物質との対応を表4. 2に示す。2次元RZ計算で求めた炉心中心面から上下2.5cmの領域の中性子束の軸方向漏洩量(拡散係数×バックリング)をXY-Rθ計算において、領域毎の吸収断面積に加え、擬似吸収項として考慮した。

2次元RZ計算及びXY-Rθ計算によるFP核種を考慮した場合としない場合の中性子束の比の径方向分布をそれぞれ図4. 10及び図4. 11に示す。ここでRZ計算値は炉心中心面における計算値、XY-Rθ計算値は集合体平均の値である。いずれの結果からも炉心層より内側の領域の中性子束は、熱中性子束を除いてFP核種を考慮した場合の方が約1.5%、小さくなった。これは、4.1で述べた燃料領域の巨視的断面積の差と同程度であった。

集合体の個々の組成を入力したRθ計算結果より、炉内燃料貯蔵ラックに置かれた使用済燃料位置では、FPの考慮により、全中性子束が約4~5%、0.1MeV以上の高速中性子束が約6~8%、小さくなった。

また、炉内燃量貯蔵ラックより外側の領域では、RZ計算の結果では、FPの考慮による全中性子束の差は約1.3%であり、Rθ計算では、グラファイトの領域で全中性子束、高速中性子束の差はRZ計算結果より大きく、ともに約8~10%となった。ただし、これはRθ計算でバックリング補正による中性子の軸方向の漏洩を過大評価している可能性があり、詳細な検討が今後の課題である。RZ計算で得られた高速中性子束の等高線分布を図4. 12に示す。これより上部ガスプレナム部

や下部空間部からまわり込む中性子の影響が見られるが、図4. 1 3に示すように Rθ 計算による中性子束は RZ 計算値よりも反射体の外側で小さくなることからも XY-Rθ 計算では、前述の中性子の漏洩を過大評価していることが考えられる。

2次元 RZ 計算による炉心中心面における FP 核種を考慮した場合としない場合の γ 線束の比を図4. 1 4に示す。炉心層より内側の領域の γ 線束は、全中性子束と同様に約 2%、FP 核種を考慮した場合の方が小さくなつた。

4.3 中性子スペクトル

第1列に装荷された炉心燃料（平均燃焼度：37,000Mwd/t）の中性子スペクトル及びFPを考慮した場合としない場合の比を図4. 1 5に示す。FPの考慮により 1MeV 以上のエネルギーの中性子束が約 2% 小さくなつた。燃料領域最外周にあたる第5列及び外側反射体(A)における中性子スペクトルをそれぞれ図4. 1 6 及び4. 1 7に示す。炉心燃料中（平均燃焼度：37,000Mwd/t）ではFPを考慮した場合としない場合で若干の差がみられるものの、反射体領域ではほとんど差がみられない。

4.4 ドシメータ核種の反応率・ γ 線発熱率

ドシメータ核種の反応率及び γ 線発熱率を計算し、FP の影響を調べた。4.2 で計算した 100 群中性子束（上限エネルギー 14MeV）に ^{239}Pu の核分裂スペクトルで外挿した 3 群（14～20MeV）を加えた 103 群中性子束を用い、表4. 3 に示すドシメータ核種の反応率を求めた。各核種の反応率の径方向分布を図4. 1 7 及び図4. 1 8 に示す。 (n, γ) 反応等のエネルギーの低い熱中性子による共鳴反応系の核種は反射体外側（半径 100cm 付近）で約 2～3.5% の差がみられた。エネルギーの高い高速中性子によるしきい反応系の核種はその差が小さく、約 1.5～2% であった。 γ 発熱率の差は最大でも 1.5% 程度であった。

表 4. 1 輸送計算の計算条件

| | |
|-----------------|---|
| 輸送計算コード | DORT |
| 断面積作成コード | RADHEAT-V3 |
| 中性子断面積ライブラリ | JSDJ2 |
| 自己遮へい因子ファイル | JFTJ2 |
| γ 線生成断面積 | 修正 New-POPOP4 ⁽¹⁾ (遅発核分裂 γ 線を含む) |
| Sn次数 | S30 |
| P1展開次数 | P3 |

表4. 2 第3 4サイクルの2次元RZモデルの領域名

| 番号 | 領域名 | 番号 | 領域名 | 番号 | 領域名 |
|----|-------------------|----|--------------------|-----|-------------------|
| 1 | S V I R (0列) | 47 | 連結管 | 93 | Arガス |
| 2 | 炉心燃料 (1列) | 48 | ナトリウム (370°C) | 94 | ベデスタル 下部保温材 |
| 3 | 炉心燃料 (2列) | 49 | 側枠 | 95 | SUS304 |
| 4 | 炉心燃料 (3列) | 50 | ナトリウム (370°C) | 96 | ベデスタルコンクリート |
| 5 | 炉心燃料 (3列) | 51 | ラック (ハンドリングヘッド) | 97 | 炉容器 |
| 6 | 制御棒アダプタ (3列) | 52 | ラック (ガスプレナム) | 98 | 炭素鋼 |
| 7 | 特燃-C | 53 | ラック (上部反射体1) | 99 | ベデスタル横グラファイト |
| 8 | 炉心燃料 (4列) | 54 | ラック (インシュレータベレット上) | 100 | 炭素鋼 |
| 9 | 炉心4列 (MK-III燃料) | 55 | ラック (インシュレータベレット下) | 101 | 中心孔プラグ |
| 10 | 炉心燃料 (5列) | 56 | ラック (下部空間1) | 102 | SUS304 |
| 11 | 制御棒アダプタ (5列) | 57 | ラック (下部反射体1) | 103 | SUS304 |
| 12 | S M I R | 58 | ラック (エントランスノズル) | 104 | SUS304 |
| 13 | 内側反射体中央 | 59 | 制御棒駆動機構 | 105 | SUS304 |
| 14 | 外側反射体 (A) | 60 | UCS (フィンガー部) | 106 | SUS304 |
| 15 | 外側反射体 (B) | 61 | UCS (フィンガー部) | 107 | 熱遮蔽 |
| 16 | ナトリウム (370°C) | 62 | ナトリウム (500°C) | 108 | 熱遮蔽 |
| 17 | 内側中性子遮蔽 | 63 | UCS (熱遮蔽板) | 109 | 熱遮蔽 |
| 18 | ラック (燃料1) | 64 | UCS (熱遮蔽板) | 110 | SUS304 |
| 19 | 炉心パレル | 65 | UCS (SUS316) | 111 | SUS304 |
| 20 | ナトリウム (370°C) | 66 | UCS (SUS316) | 112 | 熱遮蔽 |
| 21 | 外側中性子遮蔽 | 67 | UCS (SUS316) | 113 | 熱遮蔽中グラファイト |
| 22 | ナトリウム (370°C) | 68 | ナトリウム (500°C) | 114 | 熱遮蔽中グラファイト |
| 23 | ナトリウム (370°C) | 69 | 制御棒駆動機構 | 115 | C M I R (3列) |
| 24 | 熱遮蔽板 | 70 | ナトリウム (500°C) | 116 | A M I R |
| 25 | 炉容器 | 71 | UCS (円筒 Na 中) | 117 | 中性子源 |
| 26 | N ₂ ガス | 72 | ナトリウム (500°C) | 118 | 制御棒上部 (5列) |
| 27 | リークジャケット | 73 | 制御棒駆動機構 | 119 | 制御棒B4C上部 (5列) |
| 28 | 炉容器保温材 | 74 | ナトリウム (500°C) | 120 | 制御棒引き抜き (5列) |
| 29 | N ₂ ガス | 75 | UCS (円筒 Na 中) | 121 | A M I R 下部 |
| 30 | グラファイト | 76 | ナトリウム (500°C) | 122 | A M I R 上部 |
| 31 | インシュレータベレット (下) | 77 | ナトリウム (500°C) | 123 | 中性子源下部 |
| 32 | インシュレータベレット (上) | 78 | 制御棒駆動機構 | 124 | 中性子源上部 |
| 33 | 制御棒上部 (3列) | 79 | ナトリウム (500°C) | 125 | ラック (下部反射体2) |
| 34 | 制御棒B4C上部 (3列) | 80 | UCS (円筒 Na 中) | 126 | ラック (下部空間2) |
| 35 | 制御棒引き抜き (3列) | 81 | ナトリウム (500°C) | 127 | ラック (燃料2) |
| 36 | S U S 3 1 6 | 82 | ディッププレート | 128 | ラック (上部反射体2) |
| 37 | ハンドリングヘッド | 83 | ディッププレート | 129 | 炉心5列 (MK-III燃料) |
| 38 | ガスプレナム | 84 | ディッププレート | 130 | グラファイト |
| 39 | 上部反射体 | 85 | ナトリウム (500°C) | 131 | グラファイト |
| 40 | 下部空間 | 86 | ナトリウム (500°C) | 132 | N ₂ ガス |
| 41 | 下部反射体 | 87 | ナトリウム (500°C) | 133 | 炭素鋼 |
| 42 | エントランスノズル | 88 | ナトリウム (500°C) | 134 | N ₂ ガス |
| 43 | 内側反射体上部 | 89 | Arガス | 135 | 炭素鋼 |
| 44 | 内側反射体下部 | 90 | 制御棒駆動機構 | 136 | 炭素鋼 |
| 45 | 炉心下部支持板 | 91 | Arガス | 137 | 普通コンクリート |
| 46 | 下部支持板 | 92 | UCS (円筒 Arガス中) | | |

表4. 3 反応率計算を行った核反応

| No. | 核反応 |
|-----|-----------------------------------|
| 1 | ^{45}Sc (n, γ) |
| 2 | ^{46}Ti (n, p) |
| 3 | ^{59}Co (n, γ) |
| 4 | ^{58}Ni (n, p) |
| 5 | ^{235}U (n, f) |
| 6 | ^{237}Np (n, f) |
| 7 | ^{63}Cu (n, α) |
| 8 | ^{10}B (n, α) |
| 9 | ^{58}Fe (n, γ) |
| 10 | ^{54}Fe (n, p) |
| 11 | ^{181}Ta (n, γ) |
| 12 | ^{93}Nb (n, n') |
| 13 | ^9Be (n, ^4He) |

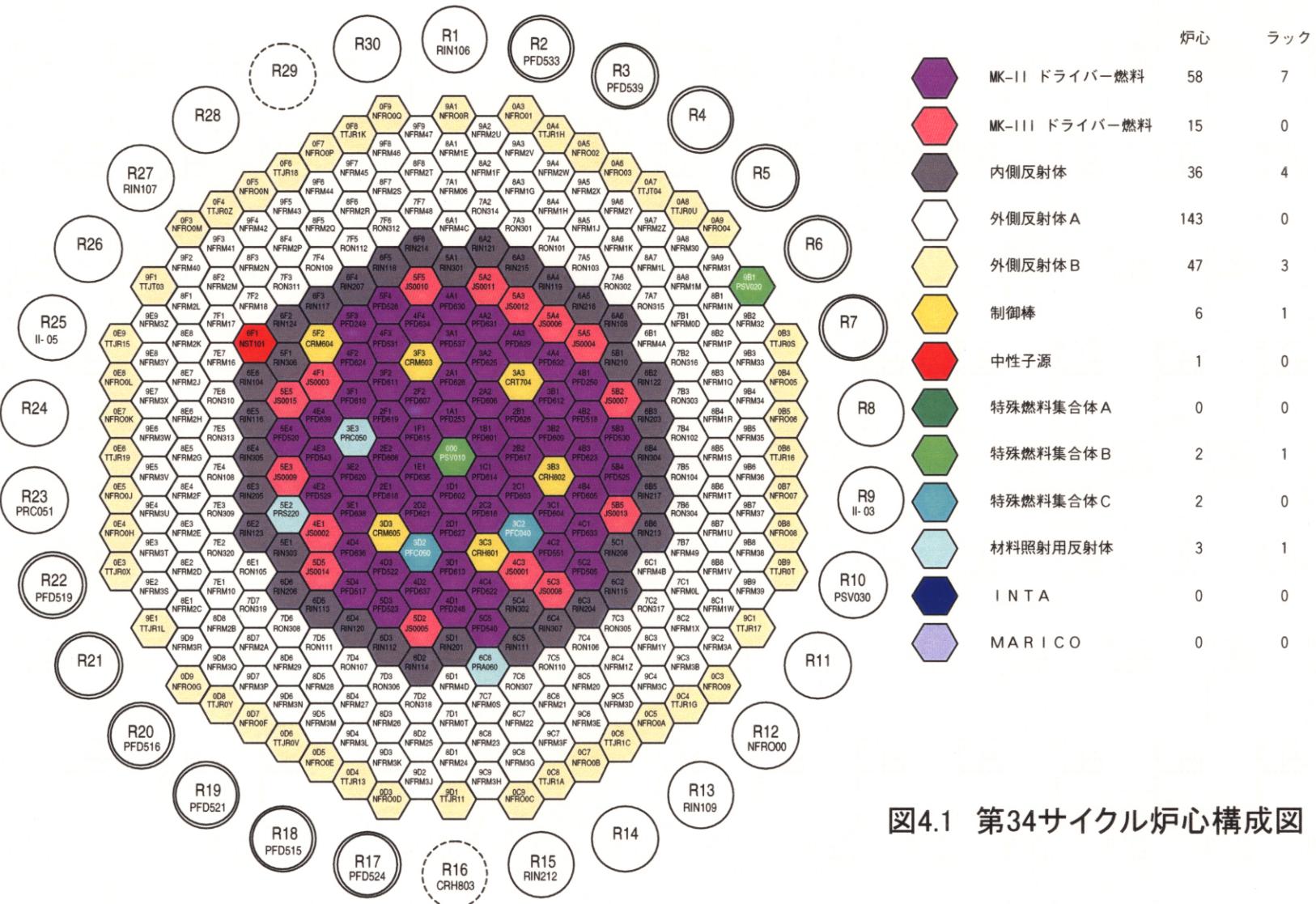


図4.1 第34サイクル炉心構成図

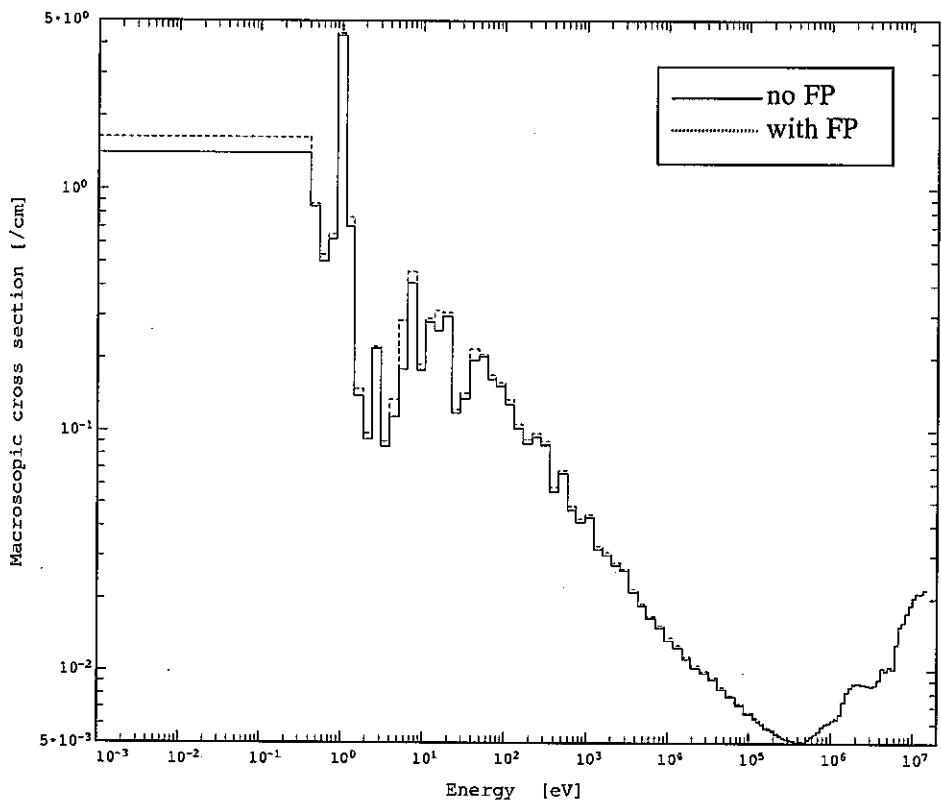


図4. 2 FP核種を考慮した場合と無視した場合の巨視的吸収断面積

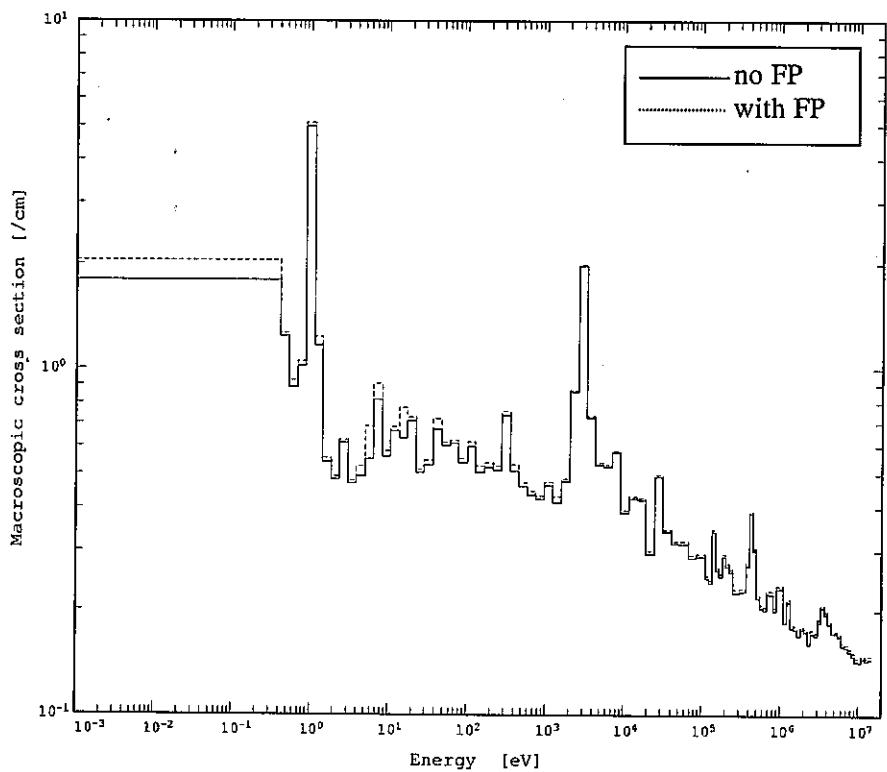


図4. 3 FP核種を考慮した場合と無視した場合の巨視的全断面積

(FP考慮／FP無視)

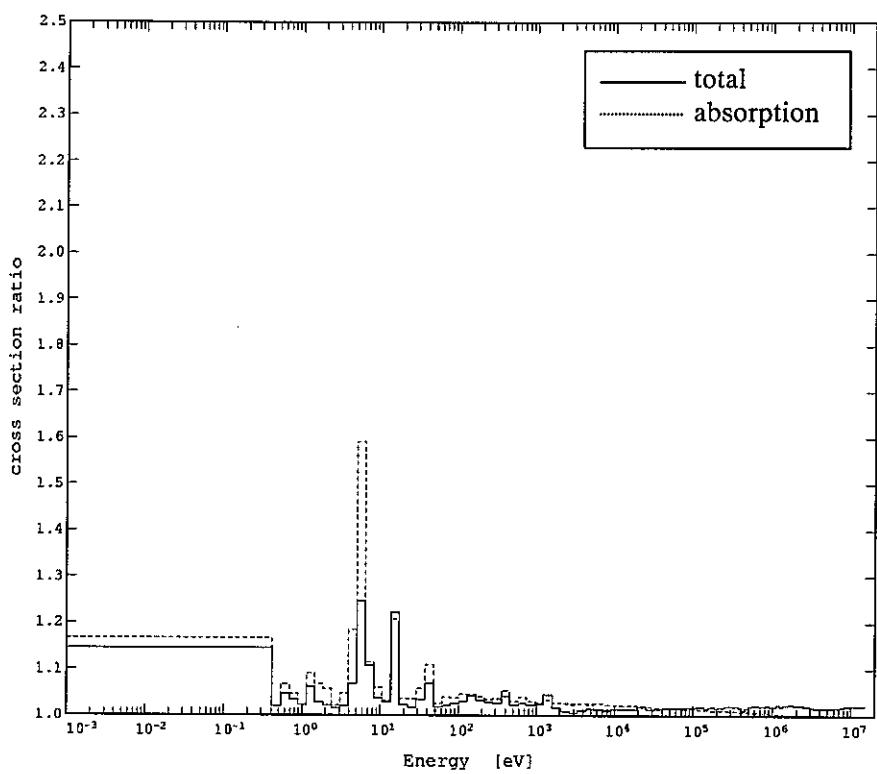


図4. 4 FP核種を考慮した場合と無視した場合の巨視的吸収及び全断面積の比

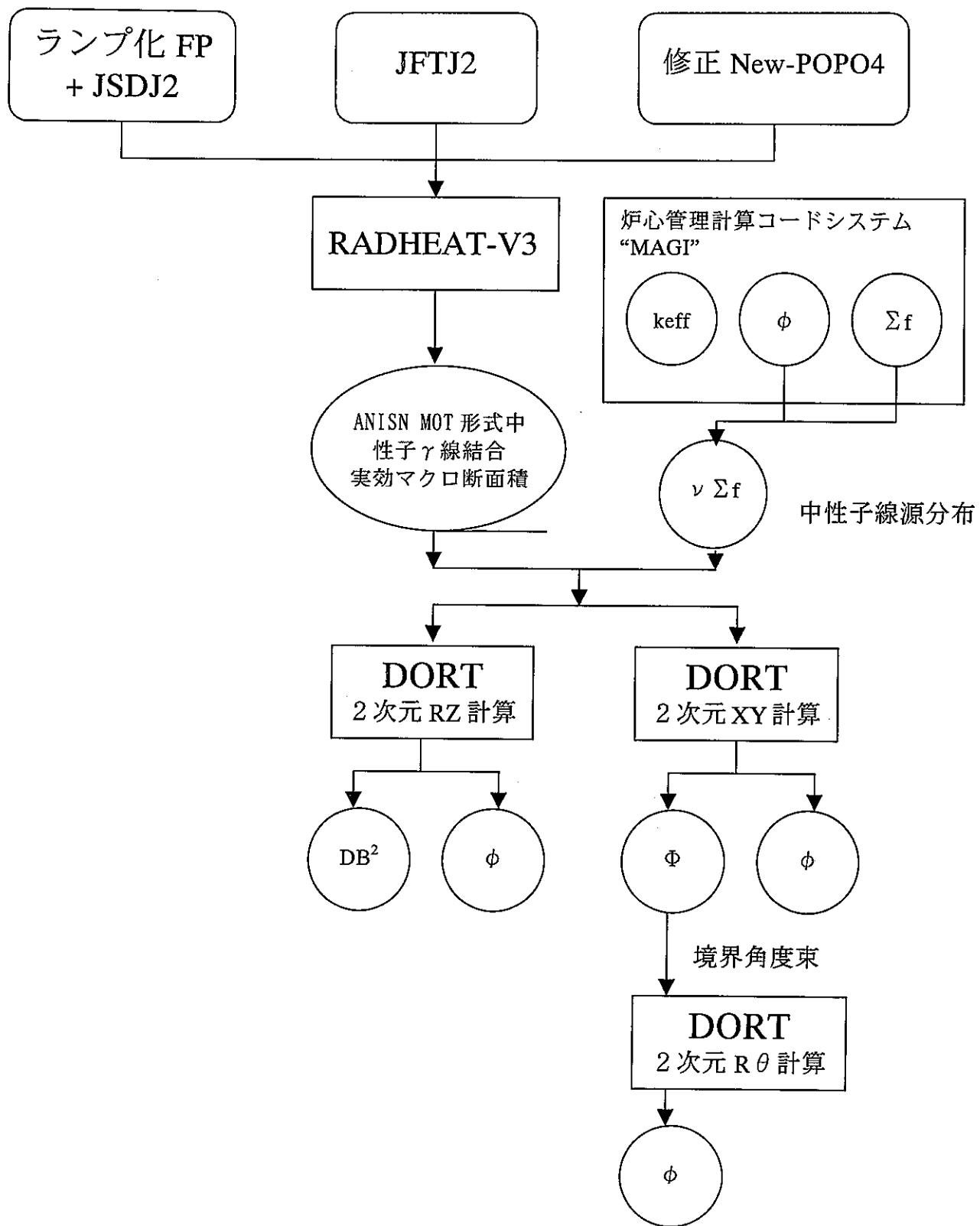


図 4. 5 輸送計算の流れ

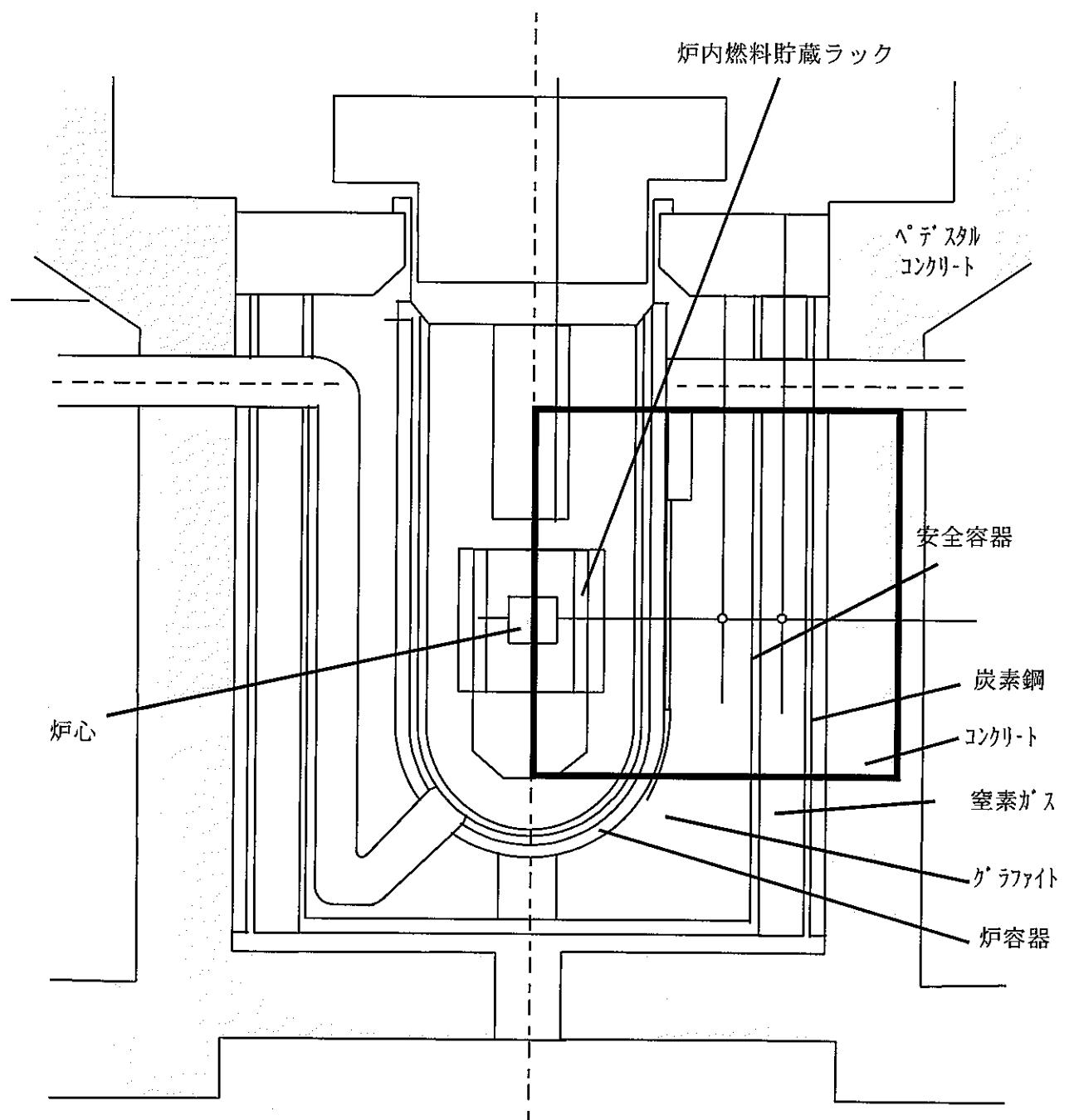


図4. 6 「常陽」の垂直断面図

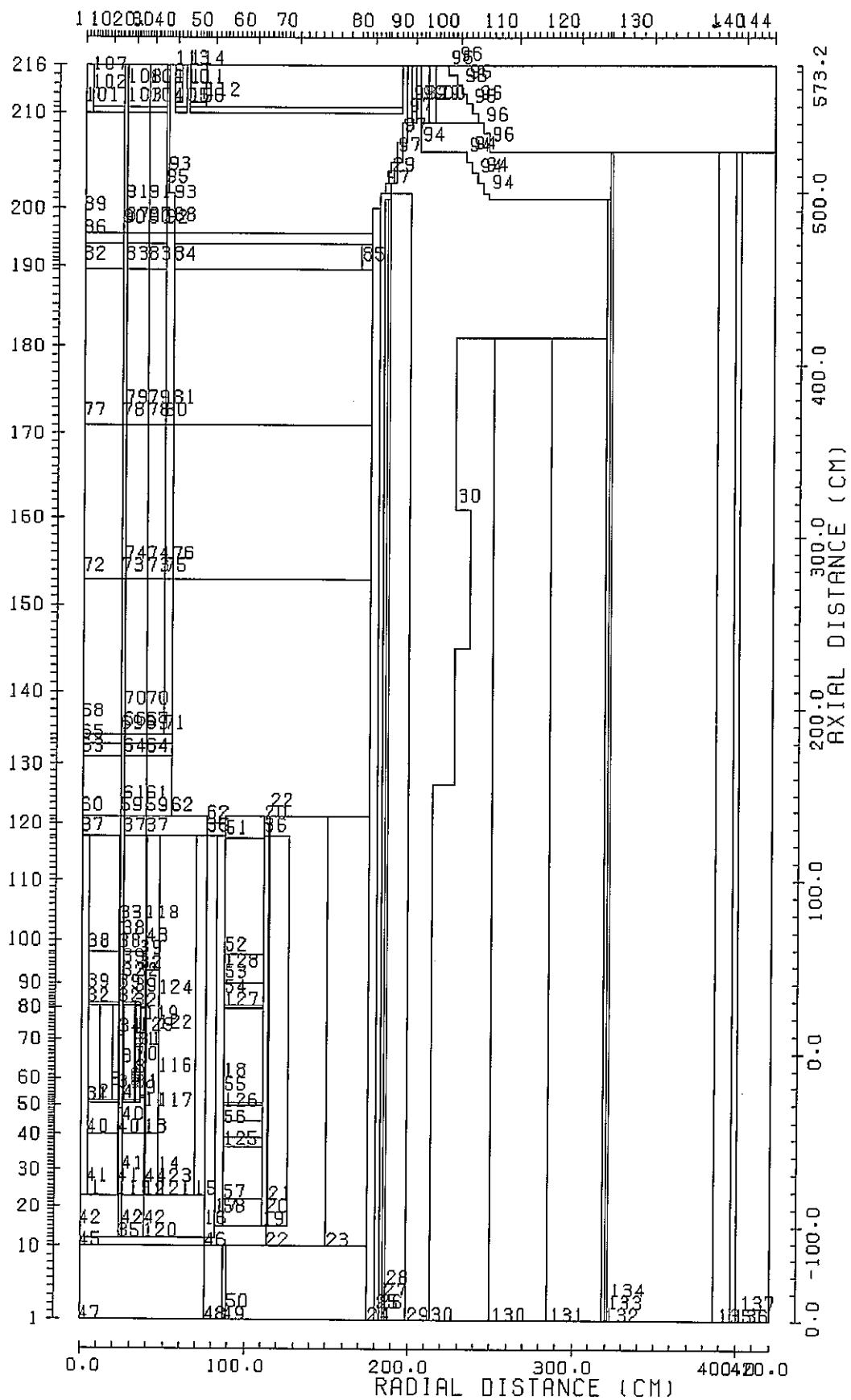


図4.7 第34サイクルのRZ計算体系（全体）

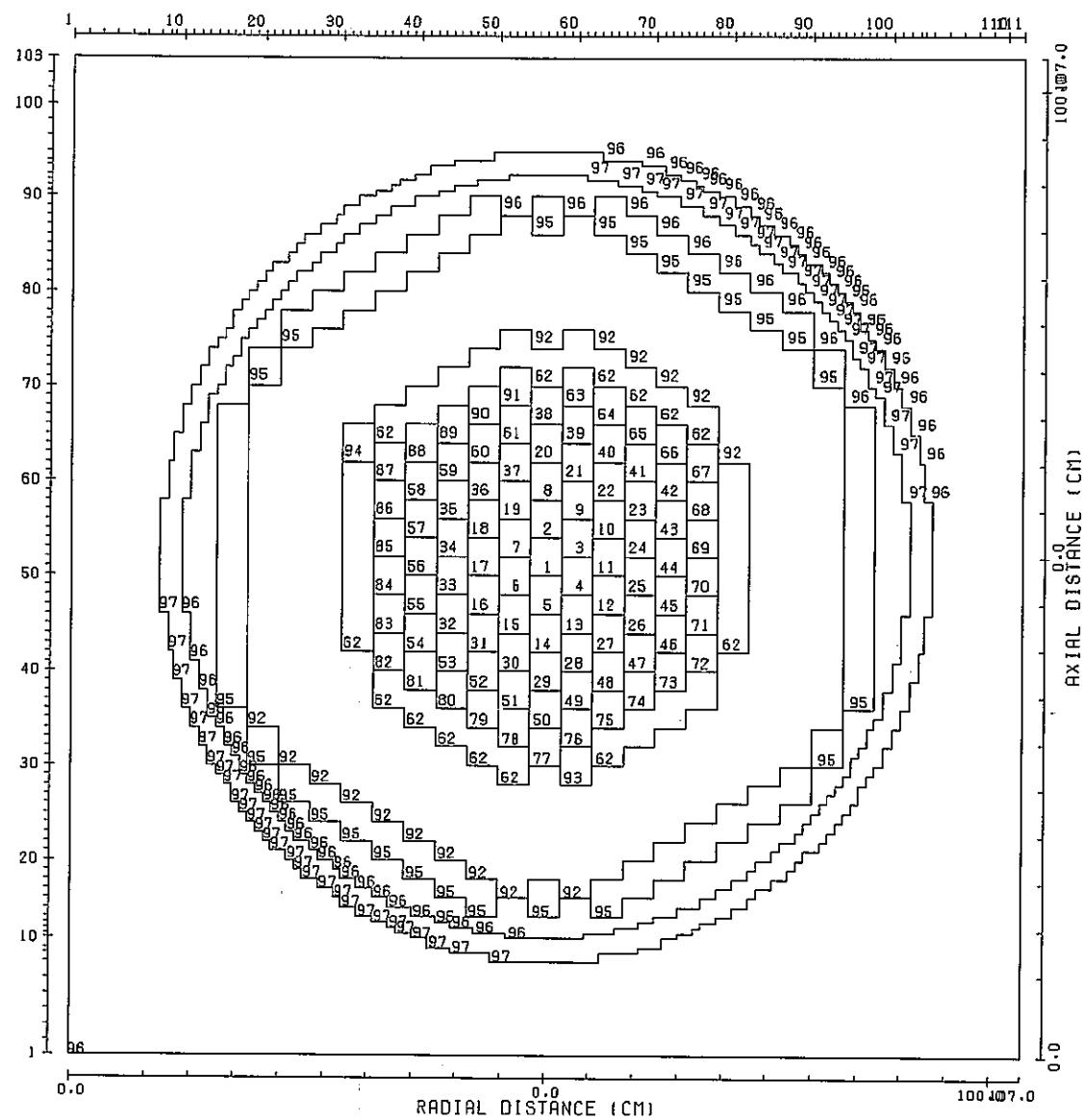


図4.8 第34サイクルのXY計算体系（炉心部）

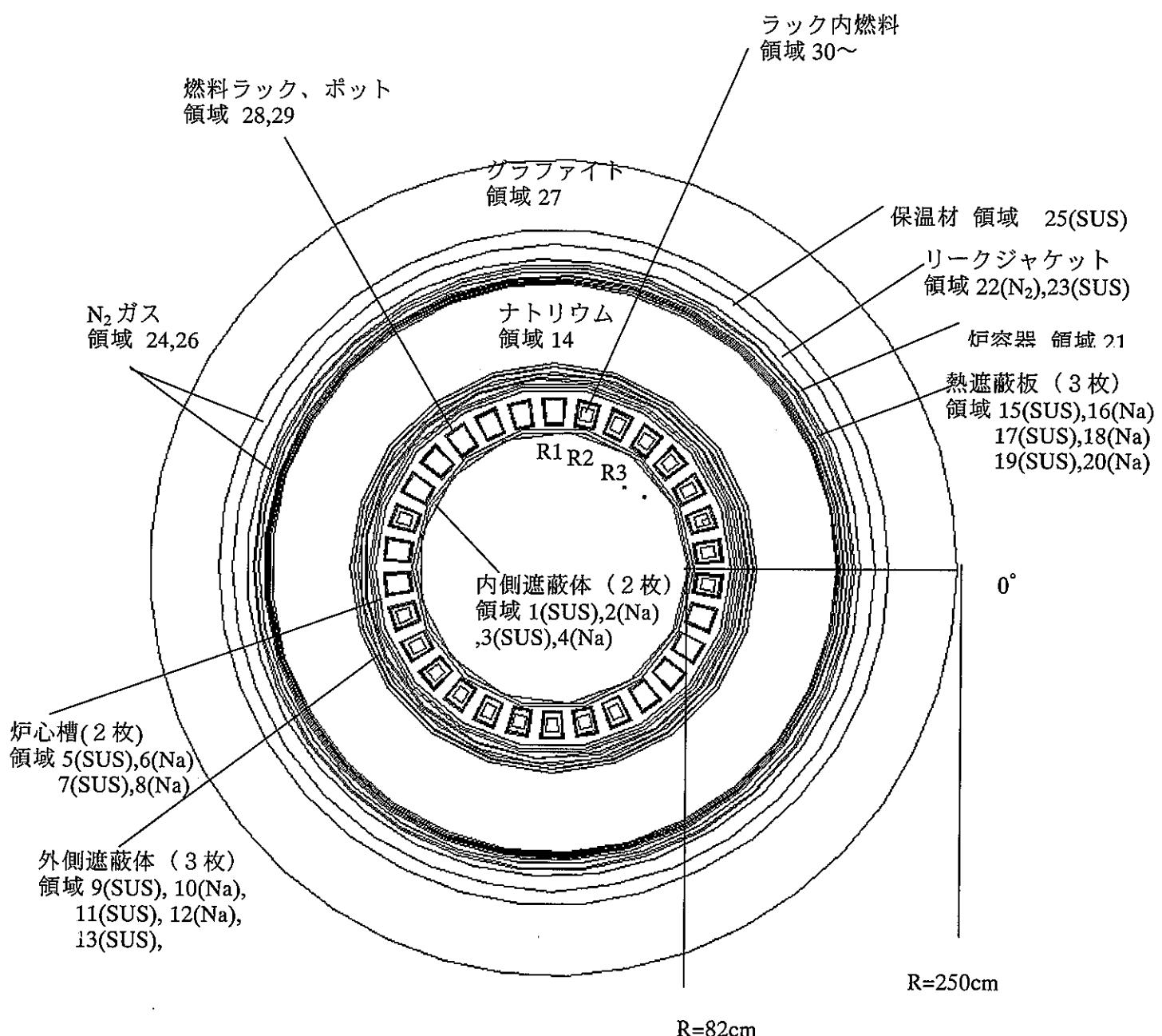


図4. 9 第34サイクルの $R\theta$ 計算体系 (内側遮蔽・炉心槽～グラファイト)

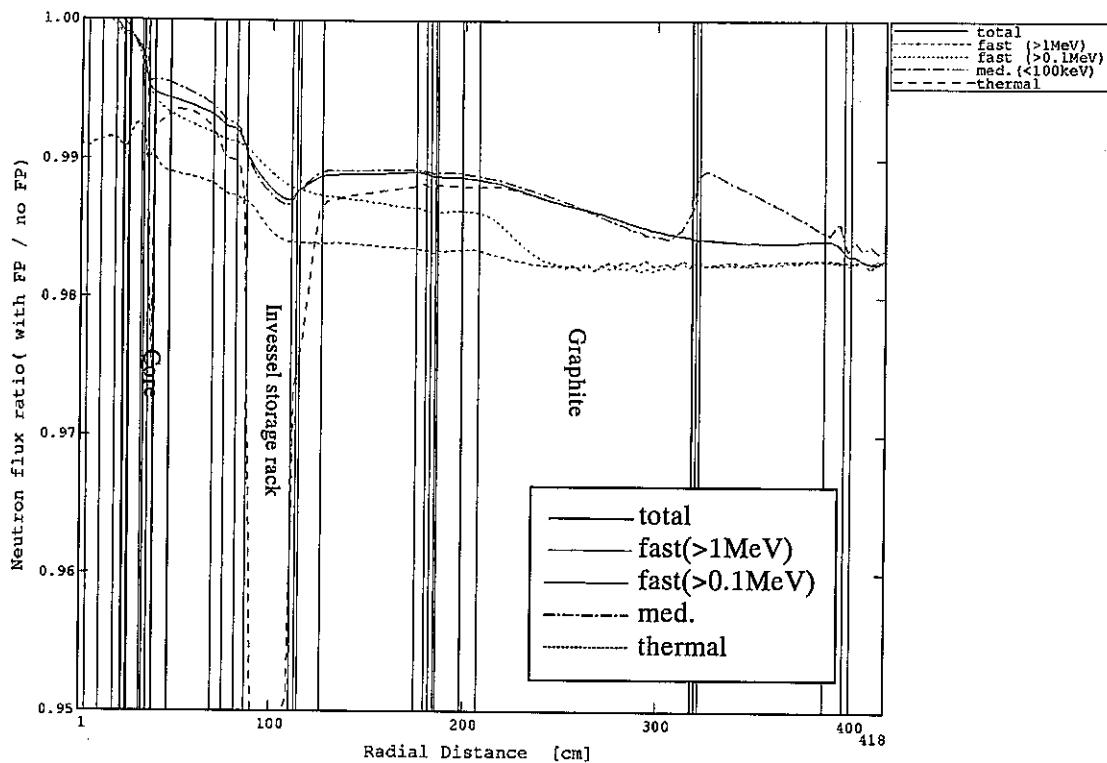


図4.10 FPを考慮した場合としない場合の中性子束の比の径方向分布
(R Z 計算値)

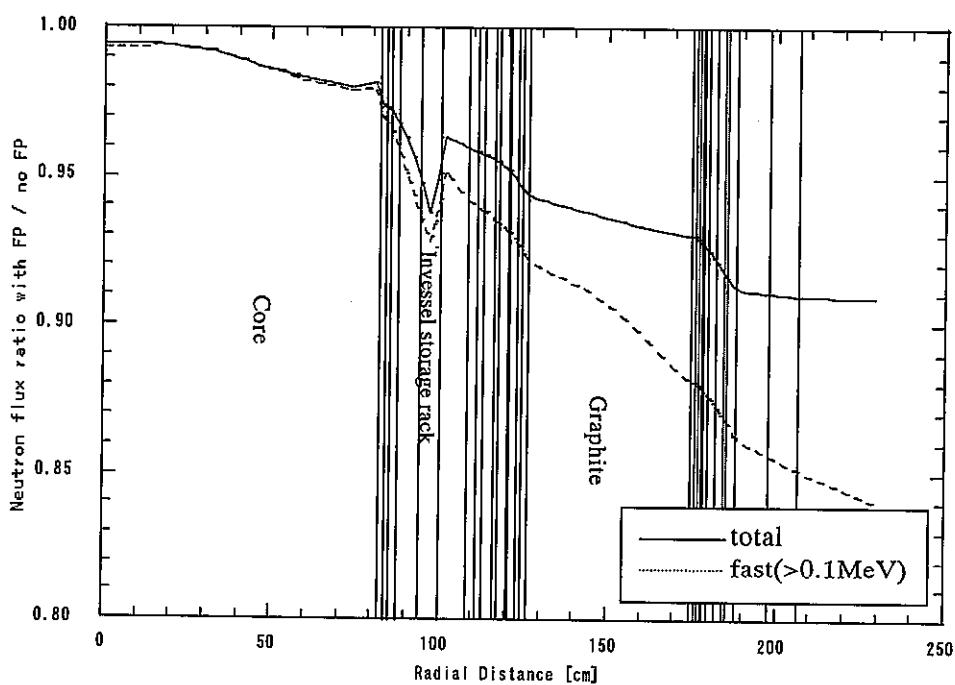


図4.11 FPを考慮した場合としない場合の中性子束の比の径方向分布
(X Y - R θ 計算値)

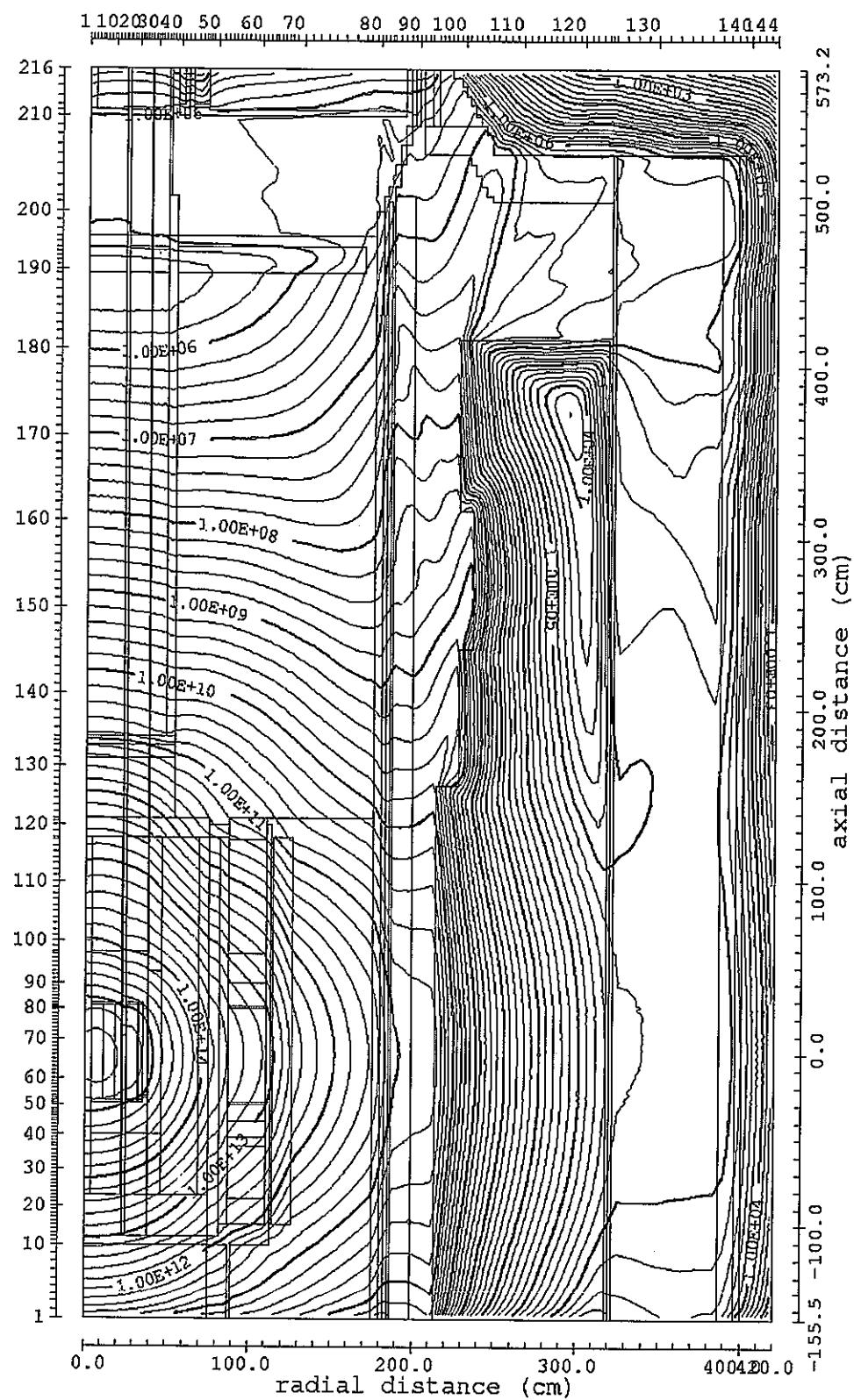


図 4. 12 第 34 サイクルにおける高速中性子束分布 (F P 核種を考慮した R Z 計算値)

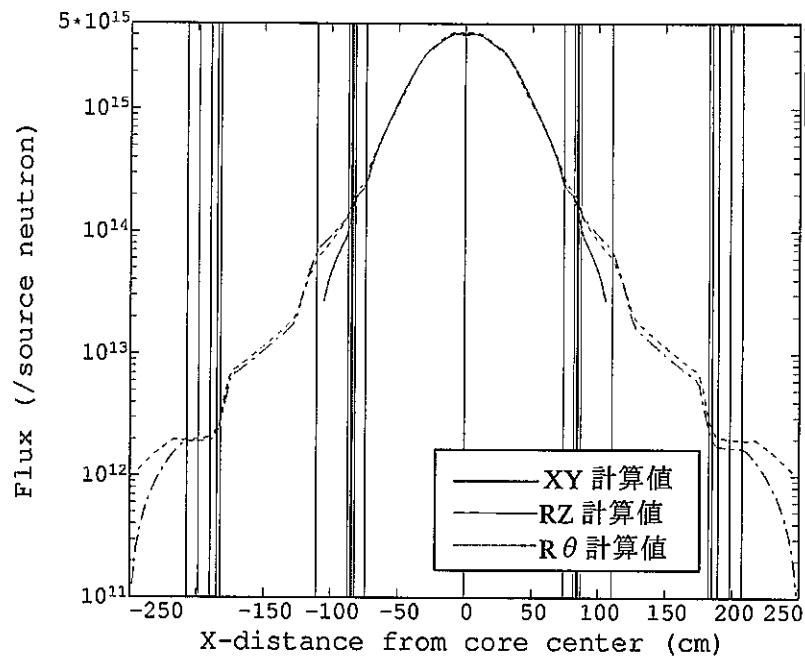


図4. 13 R Z、XY、R θ 計算で得られた全中性子束の比較
(第34サイクルB O C、F P核種を考慮した場合、XY-R θ 計算はX軸方向の分布)

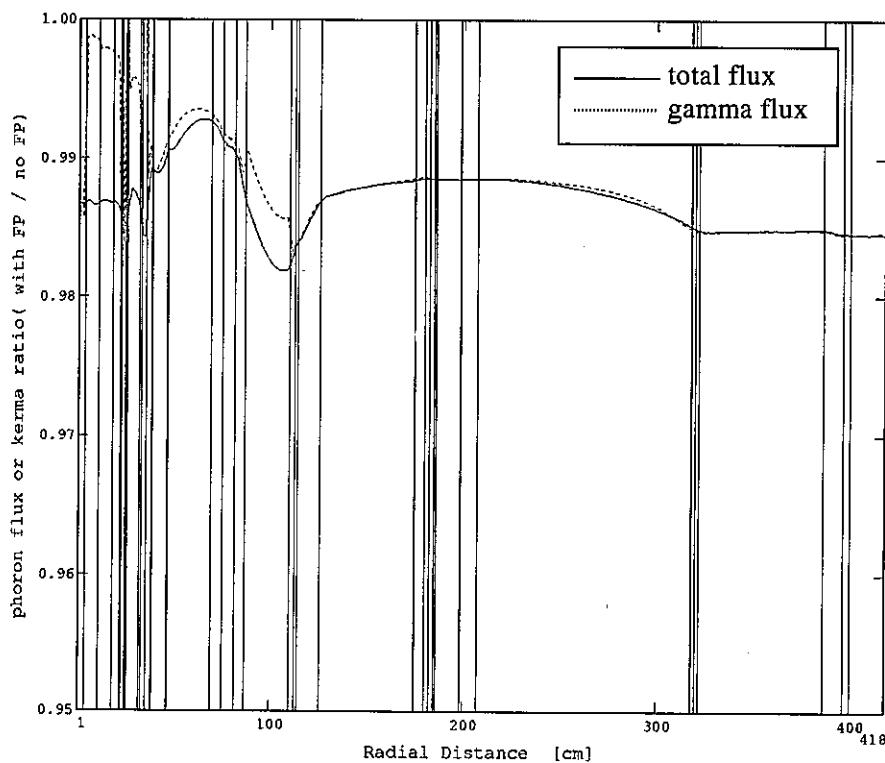


図4. 14 F Pを考慮した場合としない場合の γ 線束の比の径方向分布
(R Z 計算値)

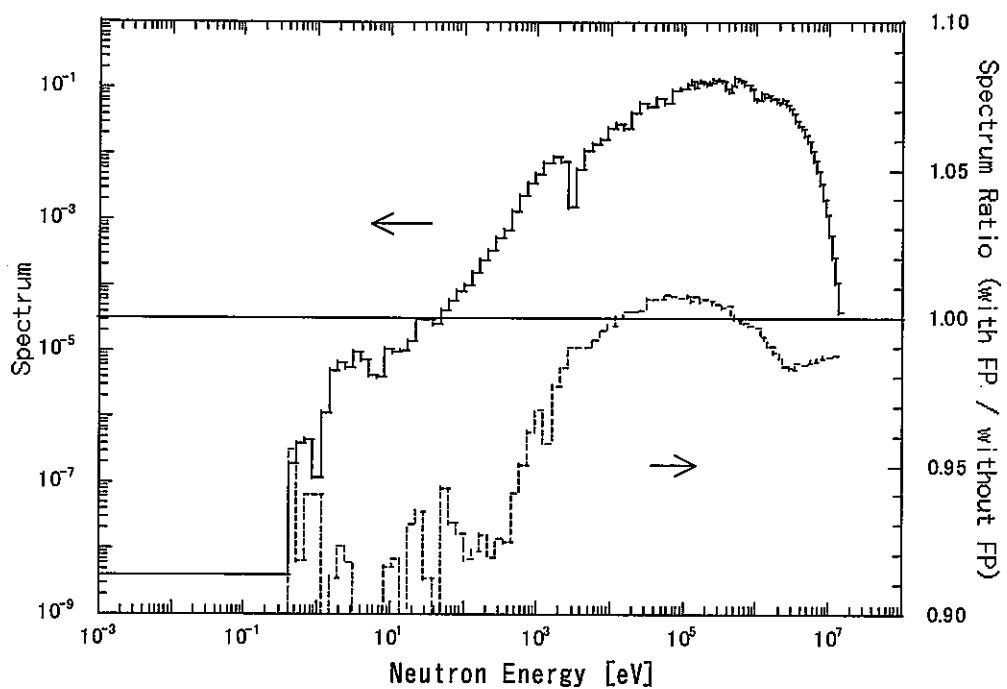


図4. 15 F P核種を考慮した場合と無視した場合の領域平均スペクトルの比較
：炉心燃料第1列（RZ 計算値）

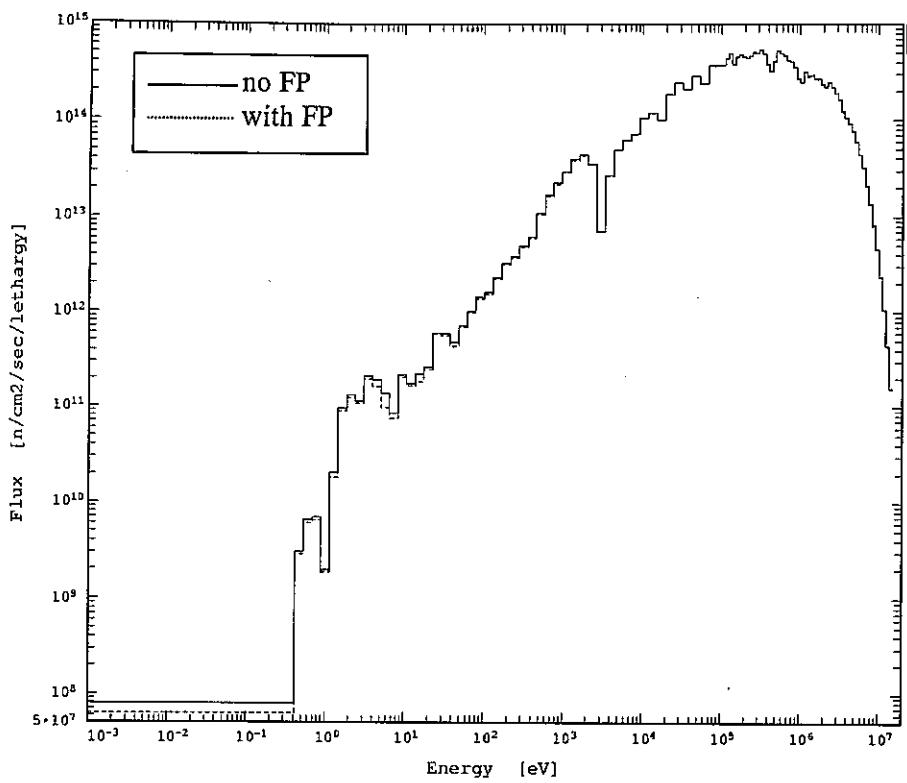


図4.16 FP核種を考慮した場合と無視した場合の領域平均スペクトルの比較：
炉心燃料 (Mk-II) 第5列 (R Z 計算値)

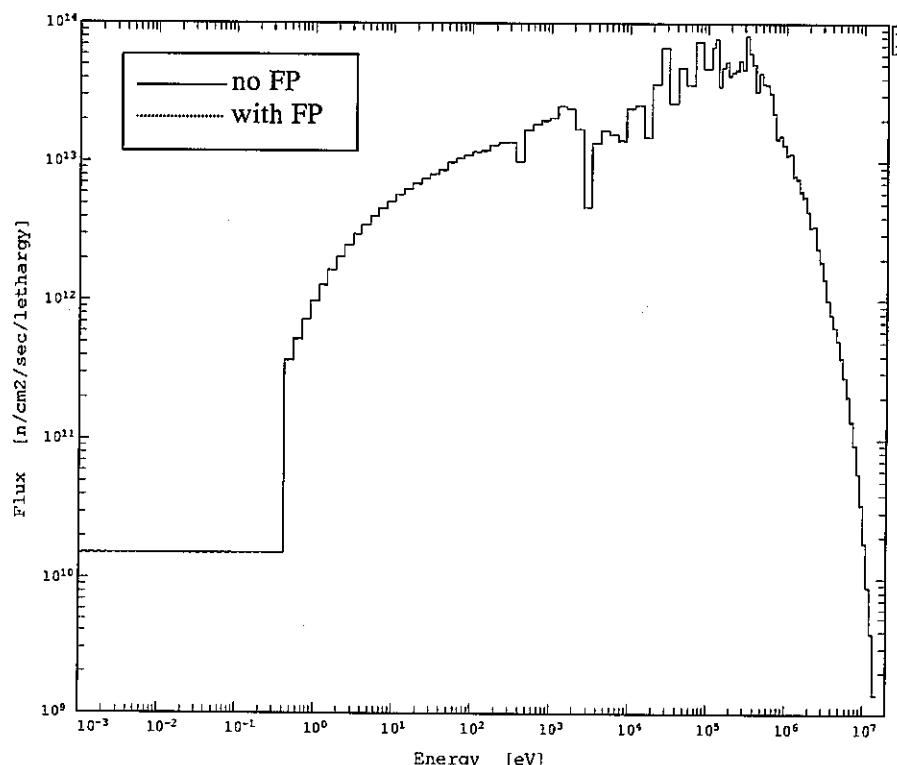


図4.17 FP核種を考慮した場合と無視した場合の領域平均スペクトルの比較：外側反射体(A)
(R Z 計算値)

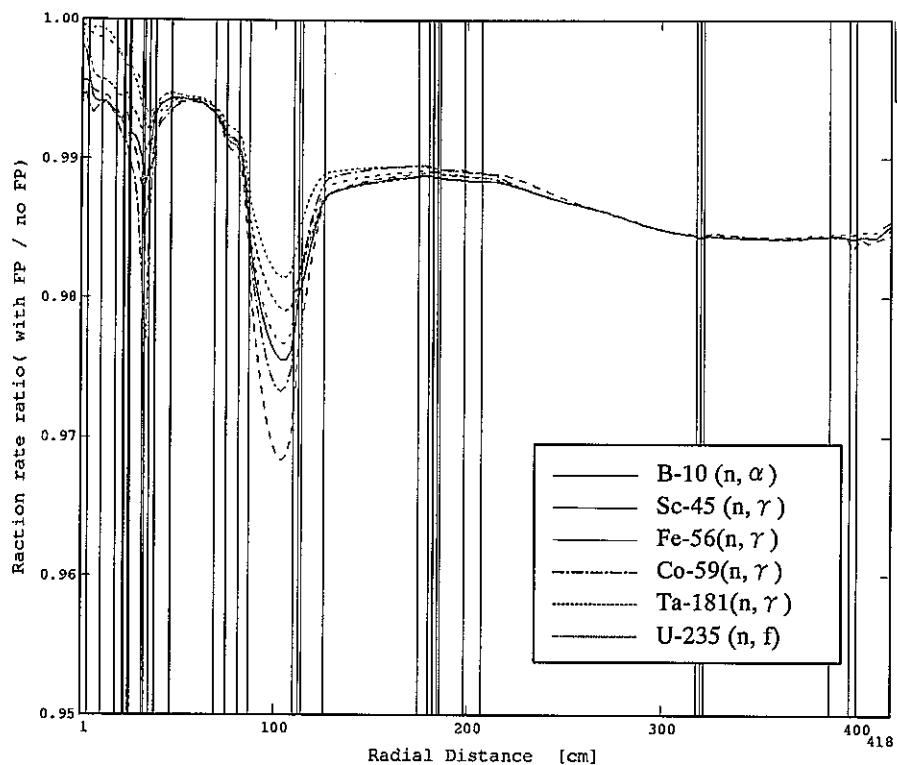


図4.18 F P核種を考慮した場合と無視した場合の反応率
(共鳴反応) の比の径方向分布 (R Z 計算値)

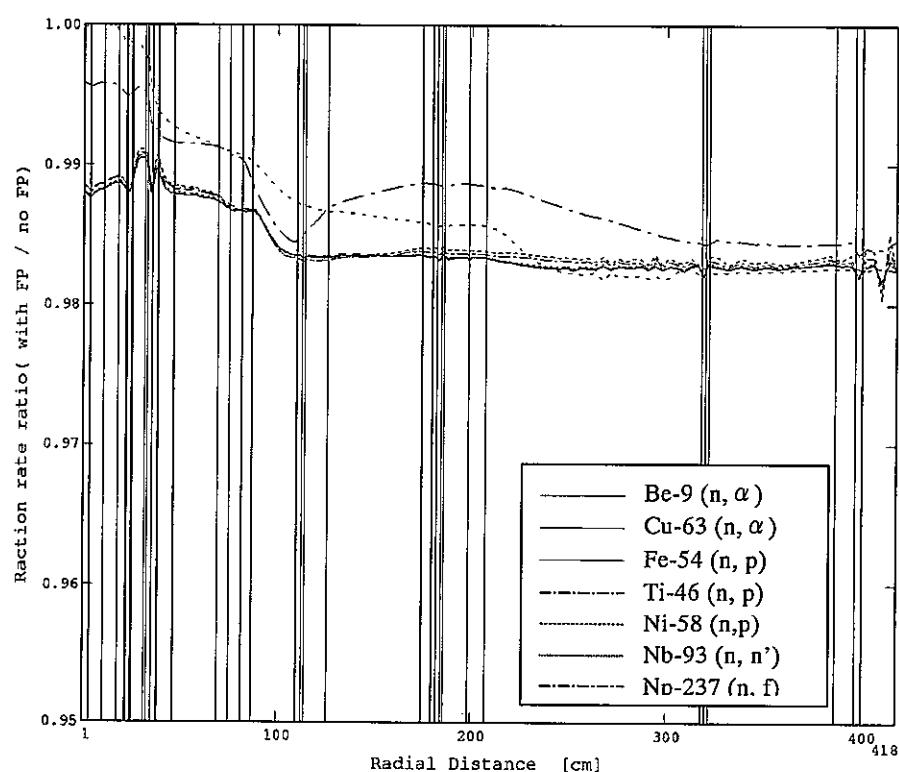


図4.19 F P核種を考慮した場合と無視した場合の炉心中心高さでの反応率
(しきい反応) の比の径方向分布 (R Z 計算値)

5. おわりに

従来の遮へい解析や遮へい設計では考慮されていなかったランプ化のFP断面積を作成した。NJOY-94 コードを用いて JENDL-3.2 に収録されている 165 核種の FP の 100 群無限希釈断面積を作成し、これを燃焼度毎・親核種毎の FP 核種の組成を重みとしてランプ化した。

作成したランプ化 FP 断面積を用いて、「常陽」MK-II 炉心第 34 サイクルについて、2 次元 RZ 体系及び XY-Rθ 体系の輸送計算を行い、中性子束、 γ 線束、反応率及び γ 線発熱率に与える FP の影響を調べた。その結果、炉内燃料貯蔵ラックに置かれた使用済燃料では中性子束及び共鳴反応系の反応率に約 7%の影響を与えるが、それ以外の炉心領域及び炉心外の領域の中性子束、 γ 線束、反応率及び γ 線発熱率に与える影響は約 2%で、FP を考慮していない従来の計算は約 2% 過大評価であるものの、概ね妥当であることがわかった。

謝辞

本研究の実施にあたって、ランプ化 FP 断面積の作成と中性子束、 γ 線束、反応率及び γ 線発熱率の計算に関して(株)三菱総合研究所の佐藤理氏に多大な協力をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 庄野、他：「大型高速炉遮蔽実験解析手法の開発 JASPER（日米共同遮蔽実験）実験解析の成果」，日本原子力学会誌 Vol.38, No.9, p.760 (1996).
- (2) 竹村、他：日本原子力学会「1987年秋の大会」 A61
- (3) A. Hasegawa, et. al.: "JSSTDL-300:Standard Shielding Cross Section Library Based on JENDL-3.2", J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 1, p.723-727 (2000)
- (4) T.Nakagawa : "Summary of JENDL-2 General Purpose File", JAERI-M 84-103, JAERI (1984)
- (5) T.Nakagawa, et. al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2 : JENDL-3.2", J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 32, 1259 (1995).
- (6) A.G.Croff, : "ORIGEN2, A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code", ORNL-5621 (1980).
- (7) 大河内、他：JENDL-3. 2に基づく高速炉用 ORIGEN2 断面積ライブラリー作成ツールの開発, JNC TN9400 99-051 (1999)
- (8) R.E.MacFarlane, D.W.Muir,: "The NJOY Nuclear Data Processing System Version 91", LA-12740-M (1994).
- (9) K.Koyama, et. al.: "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport", JAERI-M 7155 (1977).
- (10) H.Takano, et al.: "Revision of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2", JAERI-M 89-141, JAERI (1989)
- (11) 関根、他：「高速中性子照射場としての高速実験炉「常陽」のキャラクタリゼーション－照射条件評価技術の現状と今後－」，サイクル機構技報 No.6 p.19 (2000).
- (12) W. A. Rhoades, R. L. Childs,: "RSIC Computer Code Collection, DORT Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Codes", CCC-484 (1989).
- (13) 有井、他：「高速実験炉「常陽」 MK-II 炉心の炉心・燃料管理経験」，日本原子力学会誌, Vol.39, No.4, pp.315 (1997).

付録 A ランプ化 FP 断面積の使用方法

RADHEAT-V3 システムを用いて作成したランプ化 FP 断面積を含む実効断面積を作成する方法について以下に示す。サンプル入力データを図 A. 1 に示す。

- (1) ランプ化 FP 断面積は無限希釈断面積として取り扱う。すなわち、共鳴自己遮蔽因子ファイル(JFT-J2 ファイル)の核種 ID 番号の入力 (7\$\$) のランプ化 FP 核種に相当する変数には、0 を入力して、無限希釈断面積のまま使用することを指定する。参照すべき核種 ID を表 A. 1 に示す。
- (2) 修正 new POPOP4 ライブライアリではランプ化 FP 核種からの二次 γ 線の生成は扱えないとため、13\$\$の入力 IPATH を-1 として、これを用いないものとする。
- (3) γ 線輸送断面積は GAMLEG-N コードで原子番号を与えることにより計算される。ただし、現状では既存の JSD-J2 に収録された原子の原子番号のみを取り扱えるようになっているため、FP 核種の平均原子番号（ウランでは約 46、プルトニウムでは約 47）に最も近い Mo の原子番号（42）を与えるものとする。
- (4) FP 核種は核分裂 1 回につき約 2 個生成するが、通常の炉心計算ではランプ化 FP が 1 個生成するとして計算を実行しているので、ランプ化 FP の個数は実際の FP 核種の総原子個数の約 1 / 2 となっており、炉心計算用群定数 JFS-3-J3.2 のランプ化 FP 断面積は FP 核種 1 個当たりのミクロ断面積の 2 倍の値として与えられている。「常陽」の炉心管理計算コードシステム MAGI でも同様にウラン及びプルトニウムからの FP 核種の総原子個数はアクチノイド核種の燃焼による減少とバランスをとって、FP 核種の原子個数を累積核分裂数に等しいとして総原子個数が保存されるように計算されているので、MAGI に基づく燃料組成をそのまま用いて実効断面積を作成することができる。

表 A. 1 ランプ化 F P 核種の核種 ID 番号
 (RADHEAT-V3 の 5\$\$に入力する値)

| JFS-J2 ID 番号 | 親核種、燃焼度 |
|--------------|--------------------|
| 9251 | U-235 ,10,000MWD/t |
| 9254 | U-235 ,40,000MWD/t |
| 9256 | U-235 ,63,000MWD/t |
| 9259 | U-235 ,90,000MWD/t |
| 9281 | U-238 ,10,000MWD/t |
| 9284 | U-238 ,40,000MWD/t |
| 9286 | U-238 ,63,000MWD/t |
| 9289 | U-238 ,90,000MWD/t |
| 9491 | Pu-239,10,000MWD/t |
| 9494 | Pu-239,40,000MWD/t |
| 9496 | Pu-239,63,000MWD/t |
| 9499 | Pu-239,90,000MWD/t |
| 9411 | Pu-241,10,000MWD/t |
| 9414 | Pu-241,40,000MWD/t |
| 9416 | Pu-241,63,000MWD/t |
| 9419 | Pu-241,90,000MWD/t |
| 9201 | U ,10,000MWD/t |
| 9204 | U ,40,000MWD/t |
| 9206 | U ,63,000MWD/t |
| 9209 | U ,90,000MWD/t |
| 9401 | Pu ,10,000MWD/t |
| 9404 | Pu ,40,000MWD/t |
| 9406 | Pu ,63,000MWD/t |
| 9409 | Pu ,90,000MWD/t |