

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. -6

[技術情報室]

社内一般

F P 消 滅 炉 の 研 究

1990年5月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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大字村松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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



F P 消滅炉の研究

早瀬 保^(*)、高下 浩文^(**)
小無 健司^(**)、笹尾 信之^(**)
中丸 昇一^(***)

要 旨

目 的

長寿命放射性核分裂生成物 (F P) を原子炉で消滅処理することを考え、F P 消滅炉の検討を行い、消滅炉の核特性、燃焼特性及び消滅特性を調べた。更に、消滅炉心の熱及び動特性の予備検討を行った。

方 法

核特性、燃焼特性、消滅特性は拡散計算コード CITATION を用いて行った。熱及び動特性計算は SPARK コードを用いた。

結 果

F P 消滅炉の核特性、燃焼特性が判り、また消滅効率に対する種々のパラメータ依存性が判った。消滅効率は Cs 装荷量に関して極大値を持つこと、消滅効率向上には炉の出力密度が最も有力なパラメータであることなどが判った。更に、燃流動特性に関しては、燃料被覆温度の条件を満たすために冷却材の Na の流速として現状の 2 ~ 3 倍の性能向上が必要であることが判った。

結 論

核的計算から Cs 消滅処理用原子炉を設計することは可能であることが判った。但し、熱的には通常の燃料の条件を越えており、より熱流動特性の優れたシステムの検討が必要である。

(*) 核開部 先端技術開発室 客員研究員

日立エネルギー研究所 (現 日立情報システム工場)

(**) 核開部 先端技術開発室

(***) ㈱ C S K

注) この報告書は早瀬 保氏が昭和 63 年 9 月から平成 2 年 3 月まで客員研究員として事業団で行った研究の報告である。

目 次

1. 研究概要	-----	1
2. 研究内容		
2.1 FBR技術適用による消滅炉心の検討	-----	1
2.2 消滅炉心のパラメータサーベイ	-----	2
2.3 熱流動特性及び核動特性の予備検討	-----	4
3. まとめ	-----	6
Appendix A	-----	15
Appendix B	-----	27
Appendix C	-----	31

1. 研究概要

F P 消滅用原子炉に関し、以下の研究及び指導を実施した。

- 1) F B R 技術適用による消滅炉心の検討 (昭和63年 9月～平成1年3月)
- 2) 消滅炉心のパラメータサーベイ (平成 1年 4月～平成1年9月)
- 3) 消滅炉心の熱及び動特性の予備検討 (平成 1年10月～平成2年3月)

2. 研究内容

2.1 F B R 技術適用による消滅炉心の検討 (S63/9～H1/3)

現在の F B R の炉心設計研究で検討されているダクトレス集合体及び金属燃料炉心等の最新の实用可能な炉心概念を適用し、F P 消滅炉の概念検討を実施した。本検討の熱流動特性に関しては、現 F B R の技術を流用するとして、出力密度制限 500 W/cc を課すことで対処している。

検討結果の詳細は、Appendix A (PNC N4410 89-002より)にまとめ、主要な結果を以下にまとめる。

(1) F P 消滅炉の炉心特性の向上

炉心特性として重要な燃焼特性と出力分布特性の向上を検討した。F B R 設計研究で検討されている各種炉心概念及び技術を F P 消滅炉に適用し、以下の結果を得た。

(a) 燃焼反応度劣化幅の低減 (運転可能期間の増大)

金属燃料 F B R 炉心とダクトレス燃料集合体の適用により、当初の運転可能期間～2週間より1年程度へと長期運転達成の見通しを得た。

(b) 出力分布の平坦化 (最大出力密度の低減)

2領域炉心 (F P 炉心境界燃料の低密度化) の適用により、出力ピーキングを5以下に低減できる見通しを得た。

(2) F P 消滅性能の向上

F P の消滅性能を高めるため、種々のパラメータの消滅効率への影響を検討し、重要な因子を摘出した。消滅効率は、消滅炉の (正味の F P 消滅量 * / 装荷 F P 量 **) で評価した。

* F P 領域消滅量 + β 崩壊 - 消滅炉発生量、

** 一定装荷 (供給なし)

図 1 に、消滅効率のパラメータ依存性を示す。

(a) F P 消滅炉の出力密度依存性

消滅効率は、炉の出力密度の増加に対しほぼ線型に増大する。これは出力密度が増加すると単位体積当りの核分裂数が増えるので、発生中性子数が増加し、中性子束が増加するからである。発生中性子数は出力密度に対して線型に増加する。従って、出力密度は消滅効率向上には最も有力なパラメータである。

(b) F P の密度依存性

F P 領域の化合物形態として F P の密度が高くなるものが有利である。

(c) 炉心当り装荷 F P 量 (F P 体積) 依存性

消滅効率は、R e f 炉心規模で最も良い値を示す。しかしながら、さらに装荷量を増やしても効率への影響は小さく、炉心建設費の観点からは炉基数の少なくなる大量装荷型炉心が有利である。

2.2 消滅炉心のパラメータサーベイ (H1/4 ~ H1/9)

2.1 節では、熱流動と運転制御の面で現在の F B R 技術の流用を想定し、出力密度の上限 500W/cc、燃焼反応度の上限 $2\% \Delta k/k$ の条件を課し検討した。しかし、F P の効果的な消滅という観点からは、これらの制限のため有効とはいえない。本節の検討では、このような熱流動と運転上の制約は将来において克服できるものとして想定し、“F P 消滅炉の核特性がどのようなものか”という観点より、種々のパラメータサーベイを行った。

以下、消滅効率に関するパラメータサーベイ結果をまとめる。

原子炉で F P を消滅する場合、消滅炉自身からも F P が発生するため、正味の消滅量は、消滅炉による消滅量から消滅炉自身からの発生量を差し引いたものである。そのことを考慮した単位時間あたりの ^{137}Cs の消滅効率 F は次式で与えられる。

$$F = \lambda + \sigma \cdot \phi_{th} - w / (\rho \cdot V_{cs}) \dots \dots \dots (1)$$

λ : ^{137}Cs の崩壊定数

σ : ^{137}Cs の (n, γ) 反応断面積

ϕ_{th} : Cs 領域の平均熱中性子束

w : 単位時間当りの消滅炉から発生する ^{137}Cs 量

ρ : Cs 領域中の ^{137}Cs 密度

V_{cs} : 消滅炉の Cs 領域の体積

(1)式で λ, σ, ρ は定数であるが、 ϕ_{th}, w は炉心パラメータによる。 V_{cs} は炉心パラメータである。

消滅炉設計の重要なパラメータとしては、燃料種類、出力規模、燃料体積比、Pu 富化度、Cs 領域の体積などがある。このうち今回は、金属燃料で出力 3.5G W_{th}、燃料体積比を 35% にした場合の消滅効率を Cs 領域の体積 V_{cs} と Pu 富化度の関数として調べた。この際、臨界炉となるように燃料体積 V_F を調整パラメータとした。計算には CITATION コードを用いて図 2 に示す体系で行った。

図 3 に示す通り、消滅効率 F は V_{cs} に関して極大値を持つことが判った。 V_{cs} が増加すると Cs 領域の中性子吸収が増えトータルの消滅量は増えるが (図 4 参照)、臨界を維持するために V_F を増加させねばならず、出力一定の条件から出力密度が減少し、従って、 ϕ_{th} は下がり (図 5 参照) F は減少する。一方、 V_{cs} が非常に小さい領域では (1) 式の第 3 項の影響が大きくなり、 F は減少する。このことは図 4 から判る。即ち、図 4 より V_{cs} が非常に小さくなると Cs の中性子吸収率が急激に減少するので、Cs 消滅量が減り消滅効率は悪くなる。結局、ある V_{cs} で F は極大値をとることになる。

Pu 富化度に関しては、Pu 富化度を上げると出力密度が大きくなり、消滅効率は良くなる。また、低富化度ほど ^{238}U の量が多くなりそれに吸収される中性子が増えるので、臨界にするためにはより多く燃料体積を増やさなければならない。低富化度ほど臨界にするための燃料体積変化率が大きく、従って、出力密度の変化も大きくなり、 F も大きく変化するようになる。つまり、低富化度ほど Pu 富化度の増加に対する F の増加率は大きい (図 6 参照)。

2.3 熱流動特性及び核動特性の予備検討 (H1/9～H2/3)

前節の検討より、FPの消滅効率が出力密度に大きく依存していることが示された。よつて、消滅効率のキーポイントは、いかに炉心の熱除去が効果的にできるかにある。一方、このような炉心の核動特性を把握することも重要である。

本節では、この熱除去の特性及び炉心の核動特性を把握するため、現FBRのピン集合体を用いる方式でそれぞれの特性を検討した。

解析コードとしては、英国で開発された核熱結合の動特性解析コードSPARKを用いた。熱流動特性はSPARKによる初期状態の解析値、核動特性はSPARKによる過渡状態の解析値で評価した。

(1) 熱流動特性

FP消滅炉の2次元RZモデルでの体系構成を図7に示す。この炉心は2.1節で検討した金属燃料炉心(出力3.5GW_{th}、燃料体積比35%、Pu富化度7.4%、入口温度355℃)である。集合体の単位ピンのRZ断面図を図8に示す。この集合体構成は、T.Nisimura et.alの金属燃料の集合体構成(Proceedings of 1988 Int. Reactor Phys. Conf., I-177, Jackson, USA)に基づく。熱流動特性に関する物性データは、Appendix Bに示す値を用いた。

熱流動特性の判断指標として、現FBRの構造材ステンレスと冷却材Naを用いるシステムの以下の制限値を目安とした。

- | | | | | |
|-------------|---|------|--------------------|-------------------|
| 1) 燃料被覆温度 | : | 700 | ℃ | (被覆のクリープ強度低下より) |
| 2) 燃料中心温度 | : | 1162 | ℃ | (U-8Pu-10Zrの融点より) |
| 3) 冷却材Naの温度 | : | 881 | ℃ | (定圧でのNaの沸点より) |
| 4) 冷却材Naの流速 | : | 7 | m/s | (炉心部構造支持の強度より) |
| 5) 圧力損失 | : | 5 | kg/cm ² | (通常ポンプの能力) |

制御パラメータとしては冷却材Naの流速とし、各出力密度の炉内温度を1)-3)項目と比較した。図9に、Naの流速に対する、燃料被覆最高温度、燃料中心最高温度、Naの最高温度の依存性を示す。上記条件のうち燃料被覆温度の条件が最も厳しく、また冷却材Naの流速として、現状の2-3倍の性能向上が必要である。

(2) 核動特性

前項(1)の核熱条件で、炉内にランプ状の反応度が投入された時の特性を検討した。動特性解析に用いたデータをAppendix Cに示す。図10に炉心出力変化率の時間変化の解析例を示す。炉心の温度上昇に伴う、軸方向構造材及び燃料の膨張反応度とドップラー反応度による負のフィードバックにより、出力上昇率は抑えられる。

今後、基準の金属燃料炉心(T.Nisimura et. al の金属燃料の集合体等、Proceedings of 1988 Int. Reactor Phys. Conf., I-177, Jackson, USA)と比較し、本炉心の動特性の面での位置づけを明確化することが必要である。

3. ま と め

本研究の結論は、「核特性としてはFP消滅炉のポテンシャルは高いが、熱流動特性の面でそれに対処する技術とのギャップが大きい」である。これの解決策として、最も有望な炉心概念は、Taubeが検討した熔融塩炉と考えられる（M. Taube, Nuclear Science and Engineering 61, 212(1976)）。構造材および炉容器の食の問題があるが、燃料が液体であり高出力密度が可能、連続燃料供給方式であり燃焼反応度の制御が容易、の特長がある。

一方、本研究のような固体燃料を用いる炉心概念での検討では、現在、FP消滅炉の核特性の概要を把握した段階にあり、次のステップとして、高出力密度炉心の熱除去対策のための研究が上げられる。TRU消滅炉でも同様な課題があり、チューブインセル型燃料集合体、粒子燃料（Coated Fuel Particle）等の検討がなされている。本研究でも、従来のピン型燃料集合体方式に変わる、より熱流動特性の優れたシステムの検討が必要と考える。

さらに、本研究の次のフェーズとして以下の項目が上げられる。

- (1) FP消滅炉の具体化
 - (a) 燃料集合体仕様の最適化
 - (b) FP領域部構造の具体化
 - (c) FP-燃料領域境界部構造の具体化
- (2) 解析方法の精度向上
 - (a) FP-燃料領域境界のFPランプ化定数（熱中性子効果の反映）
 - (b) FP（Cs-137, Sr-90）の核断面積の精度向上
 - (c) 中性子輸送理論による炉心体系計算
- (3) FP消滅炉の運転方式の具体化
- (4) FP消滅炉の安全性の評価

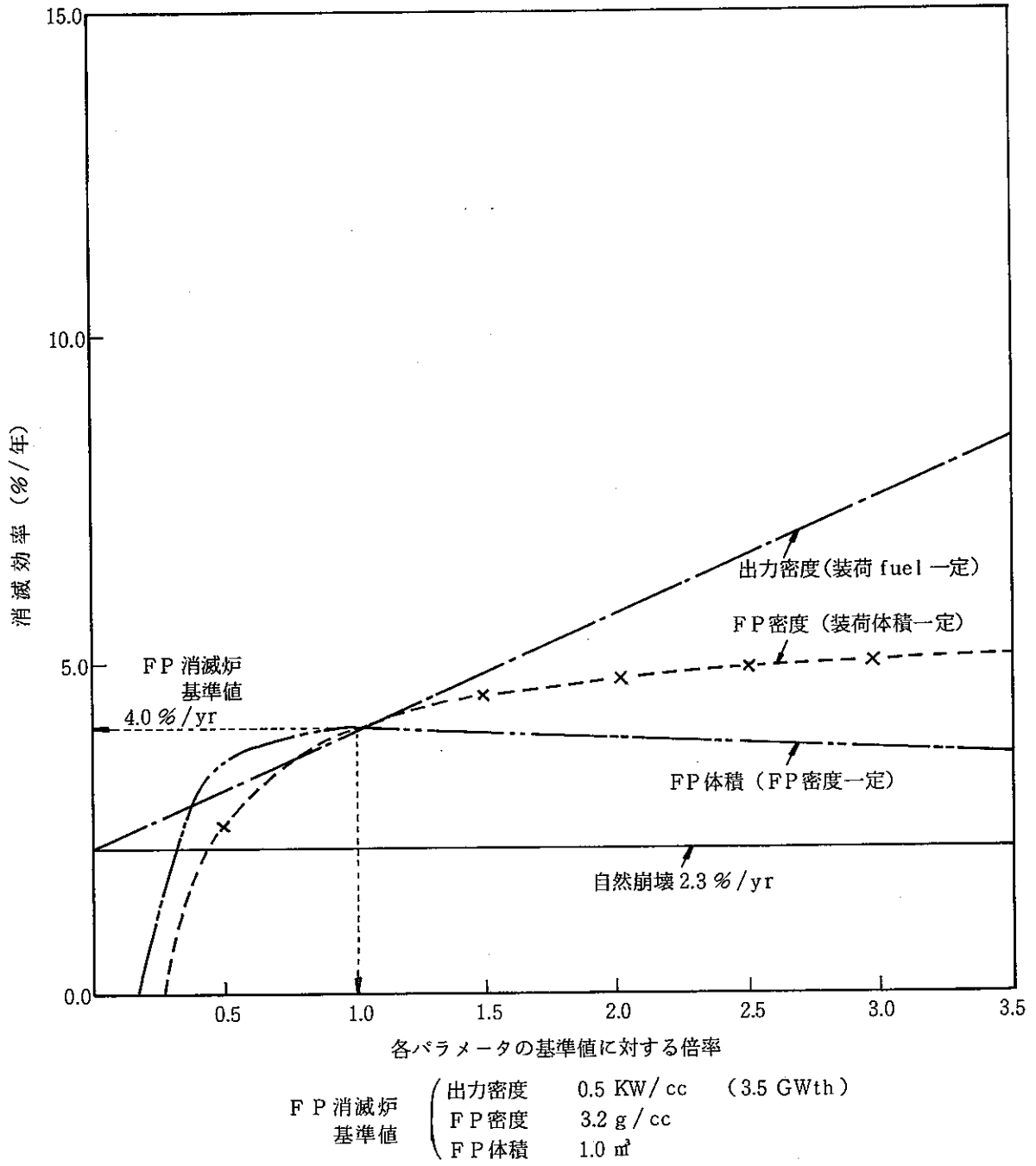


図1 FP消滅効率の各パラメータ依存性

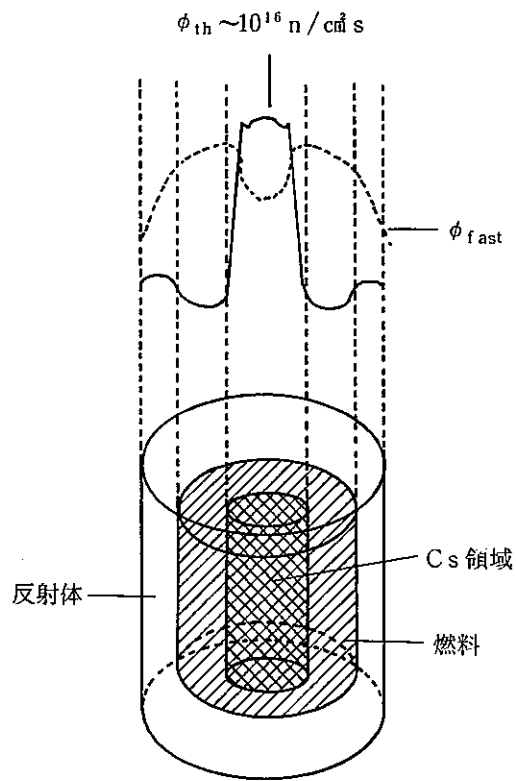


図2 消滅炉の概略図

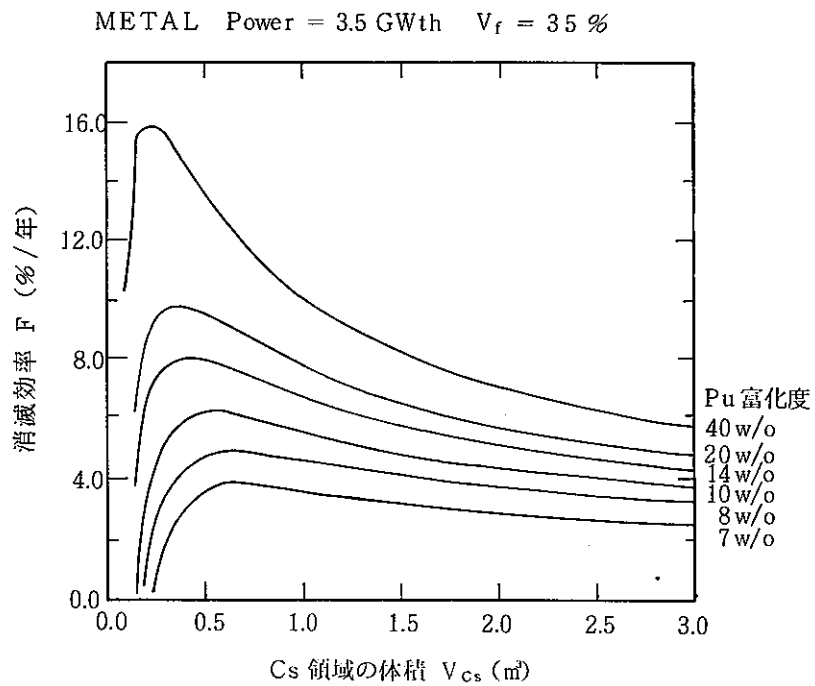


図3 Cs領域の体積と消滅効率の関係

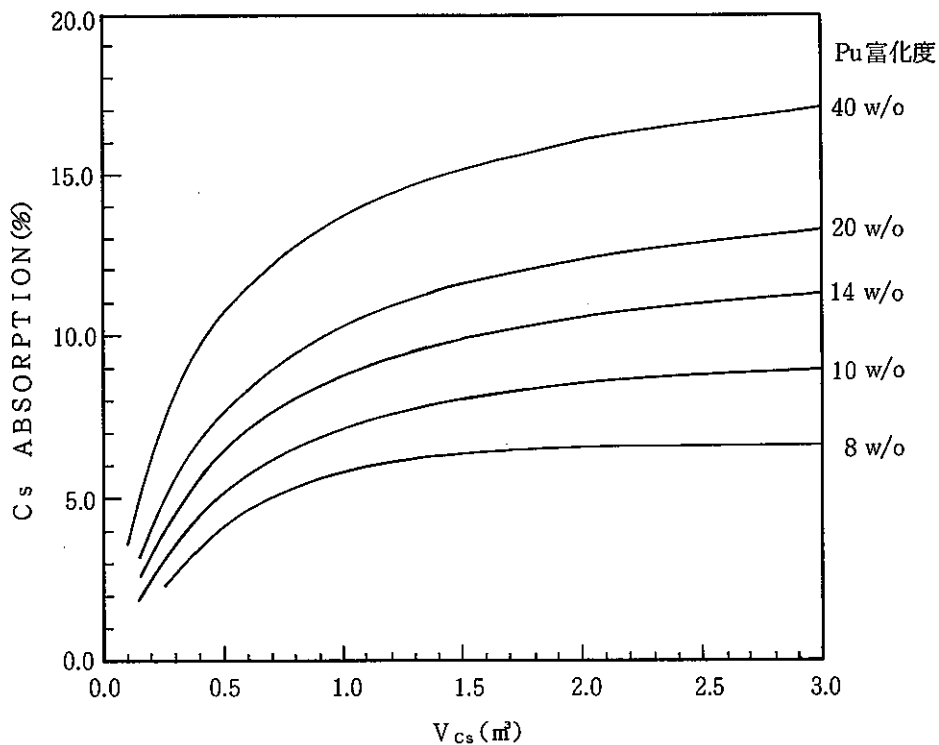


図4 Cs領域の体積とCs領域の中性子吸収との関係

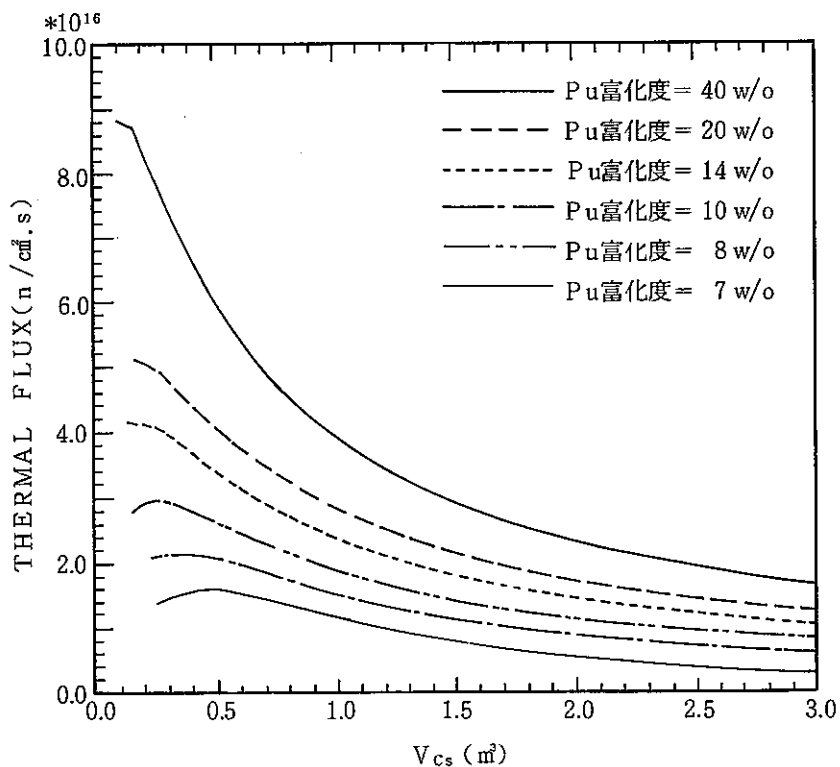


図5 Cs領域の体積と熱中性子束との関係

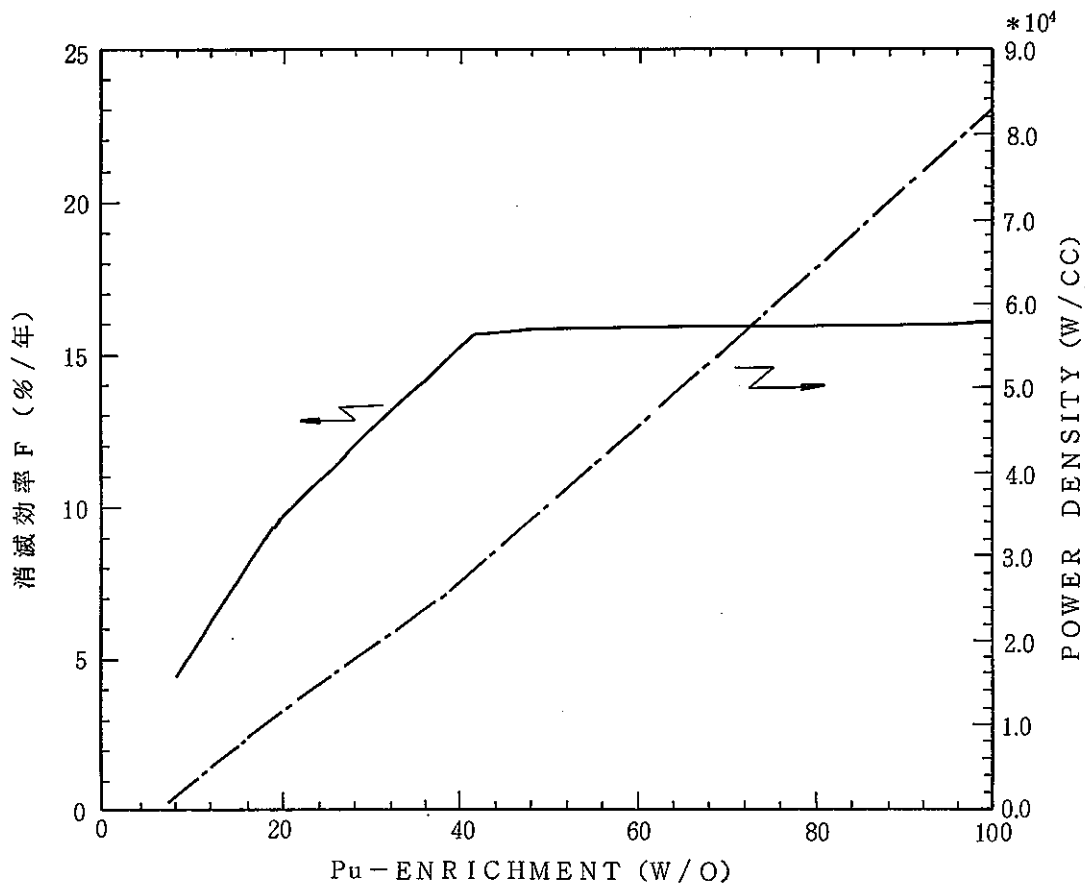


図6 Pu 富化度と消滅効率F 及び出力密度の関係
 (Cs 領域の体積は消滅効率最大の値)

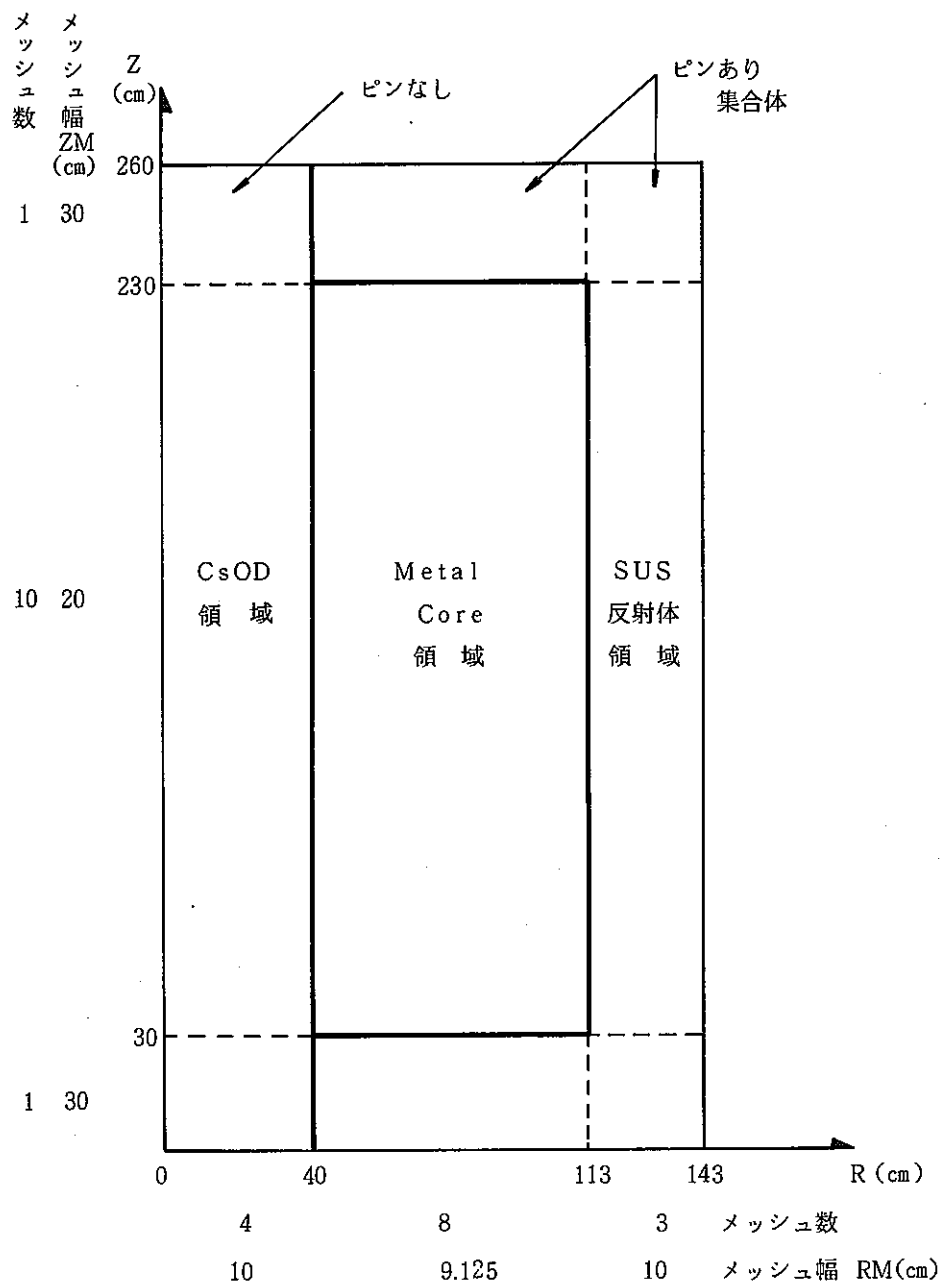


図7 F P 消滅炉の2次元R Z 簡略モデル

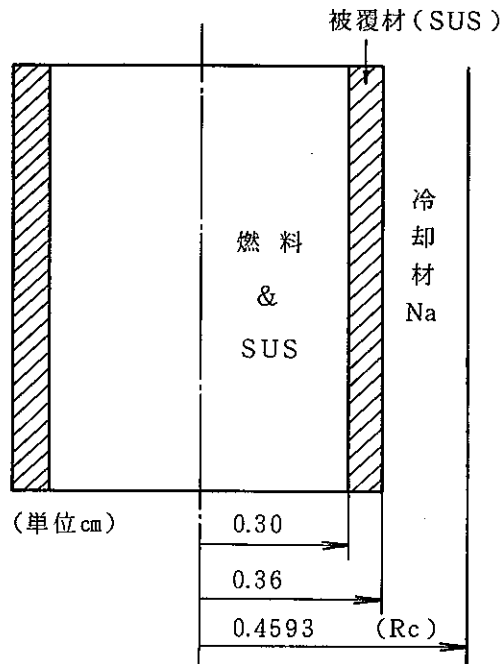
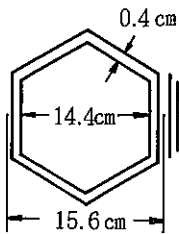


図8 燃料ピンのRZ断面モデル

(参 考) 集合体寸法



$$S_A^{IN} = 7.2 \times \left(\frac{7.2}{\sqrt{3}/2} \times \frac{1}{2} \right) \times 6 = 179.579 \text{ cm}^2 \quad \text{集合体内部}$$

$$S_A^{OT} = 7.6 \times \left(\frac{7.6}{\sqrt{3}/2} \times \frac{1}{2} \right) \times 6 = 200.089 \text{ cm}^2 \quad \text{集合体}$$

$$S_A^{Tot} = 7.8 \times \left(\frac{7.8}{\sqrt{3}/2} \times \frac{1}{2} \right) \times 6 = 210.800 \text{ cm}^2 \quad \text{集合体単位 (すきま含む)}$$

$$S_p = (0.36)^2 \times \pi = 0.4071 \text{ cm}^2 \quad \text{Pin}$$

$$S_p^{Tot} = 271 \times 0.4071 = 110.3345 \text{ cm}^2$$

* 1 Pin 当り 冷却材 : $(S_A^{IN} - S_p^{Tot}) / 271 = 0.2555 \text{ cm}^2$

$$\pi R_c^2 - \pi (0.36)^2 = 0.2555 \rightarrow$$

$$S_T = 210.800 \text{ cm}^2$$

$$S_{fuel} = (0.3)^2 \times \pi \times 271 = 76.621 \text{ cm}^2 (36.3\%)$$

$$S_{st} = (110.3345 - 76.621) + (200.089 - 179.579) = 54.224 \text{ cm}^2 (25.8\%)$$

$$S_{cool} = 79.955 \text{ cm}^2 (37.9\%)$$

出力 3.5 GWth

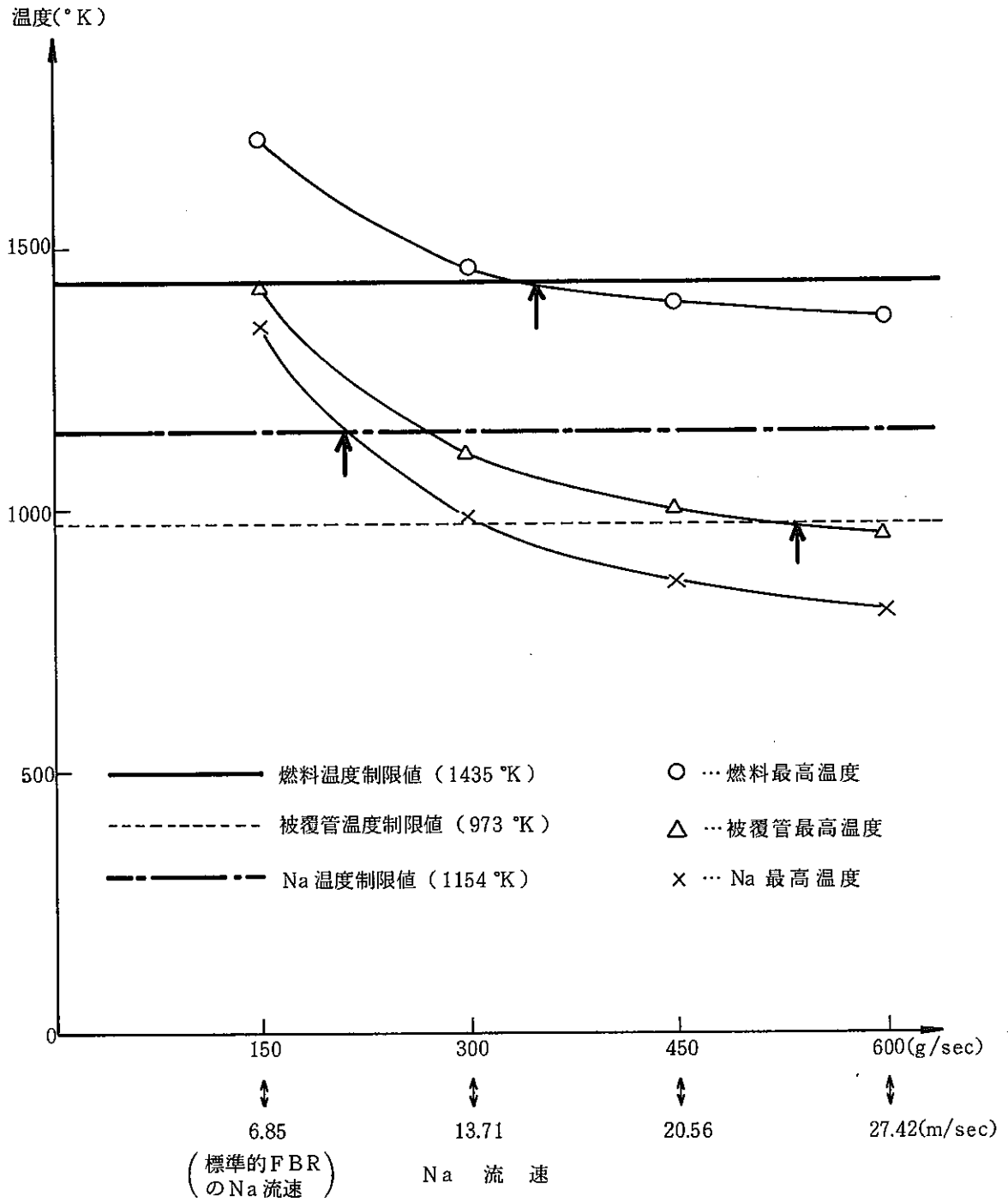


図9 Na流速に対する各炉心領域最高温度の依存性

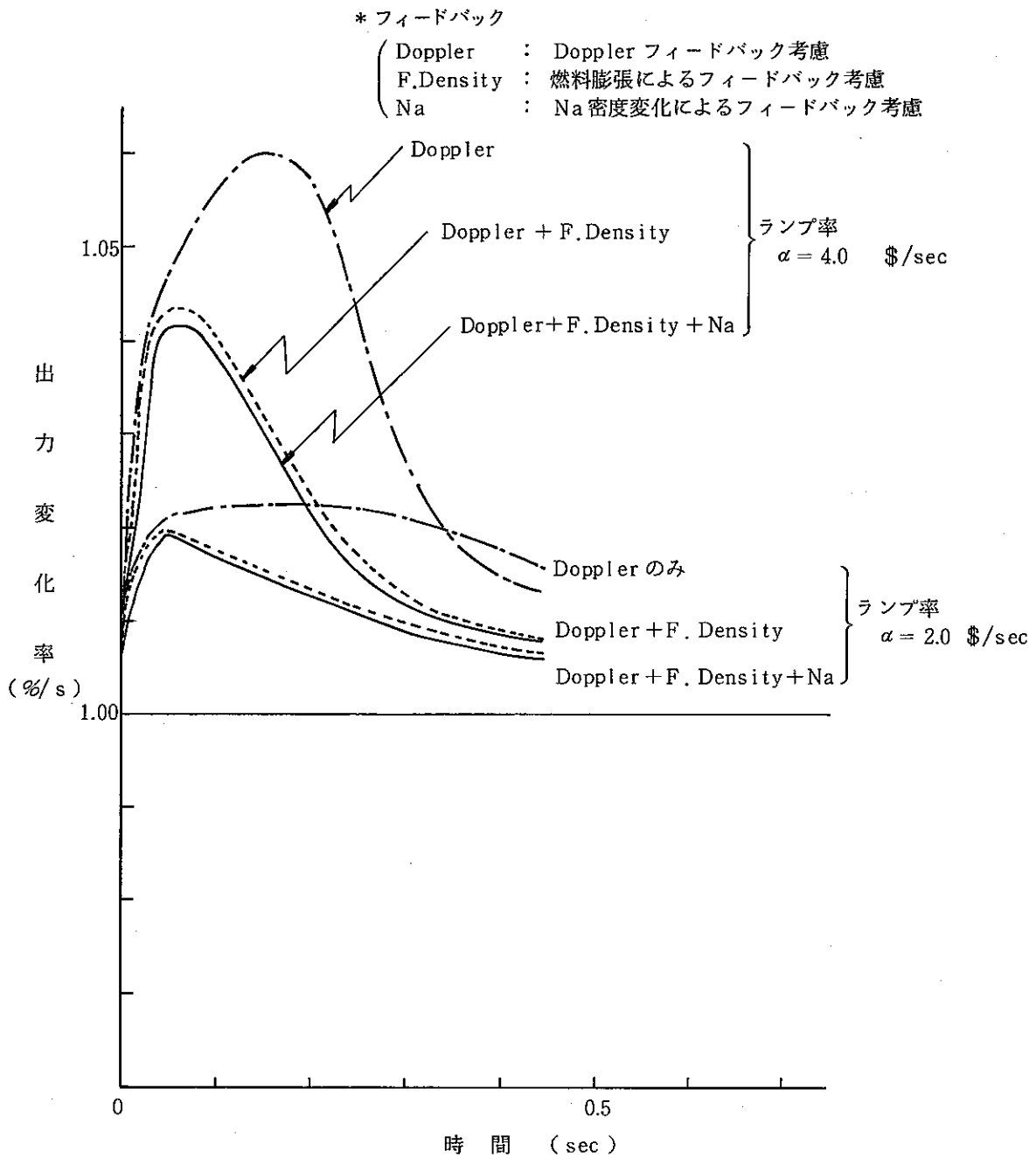


図10 炉心出力変化率の時間変化の解析例

Appendix A

A-1 ^{137}Cs 消滅処理用原子炉

原子炉の燃料部分で発生した中性子を ^{137}Cs に当てて、 (n, γ) 反応で ^{137}Cs 消滅処理することを考える。消滅処理を行う原子炉をターゲット炉と呼ぶことにする。ターゲット炉は内部に多量に処理すべき ^{137}Cs を蓄えているので、通常の原子炉に比べ、さらに厳しく安全性を考慮することが必要である。そこで、加速器・ターゲット炉からなるハイブリッド炉を考慮して、 $k_{\text{eff}}=0.983$ の未臨界のターゲット炉を検討した。

通常の原子炉では燃料領域の中心部分が一番熱中性子束が高いので、燃料領域の中心部分に消滅処理すべき ^{137}Cs を置いた図A-1のようなターゲット炉の形状を考えた。具体的な組成と寸法を表A-1、2及び図A-2に示す。燃料としては熔融燃料や板状燃料などの特殊燃料は使わずに、現在の高速炉で一般に使用され、実績のあるMOX燃料を用いた。熱出力は通常の原子炉の規模に近い 3.5GW_{th} にし、出力密度は実現性の高い $500\text{W}/\text{cc}$ にした。 ^{137}Cs は $^{137}\text{CsOD}$ にして装荷するものとした。これは ^{137}Cs より $^{137}\text{CsOD}$ の方が密度が高く、より多くの ^{137}Cs を装荷することができるからである(表A-1参照)。さらに、重水素Dは減速材として働き、発生中性子を熱中性子にし、より多くの中性子を ^{137}Cs に吸収させる役割を果たす。 $^{137}\text{CsOH}$ では中性子吸収断面積が大きいので重水素Dを用い、 $^{137}\text{CsOD}$ とした。また、中性子の漏れが少なくなるように高さと同直径がほぼ等しい炉を考えた。

計算にはCITATIONコードを用い、各核種の中性子断面積はJFS-3-J2のデータを使用した。しかし、これには ^{137}Cs 及び重水素Dの断面積データは存在しない。そこで、それらの断面積のうち、中性子吸収断面積と輸送断面積はENDF/B-IVのデータを用い(図A-3参照)、残りの断面積はJFS-3-J2の ^{151}Eu と ^1H のデータで代用した。

このターゲット炉1基には ^{137}Cs が約 3.4ton 装荷され、年間 ^{137}Cs 消滅量は 190kg である。 ^{137}Cs はターゲット炉自身の燃料からも生じ、出力 3.5GW_{th} のとき年間 50kg である。したがって、ターゲット炉1基で自分から生じる ^{137}Cs 50kg の他に、外部原子炉からの ^{137}Cs を年間 140kg 処理できることになる。(このうち 79kg は自然

崩壊によるものであり、 (n, γ) 反応による消滅量は111kgである。(表A-3参照) この量は、出力9.7GW_{th}の原子炉から一年間に生ずる¹³⁷Cs量に相当する。表A-4はターゲット炉の中性子収支である。ターゲット炉の燃料の核分裂と加速器による (γ, n) 反応から生じる中性子のうち、¹³⁷Csの消滅処理に使用されるのはわずか5%でしかない。これは¹³⁷Csの中性子吸収断面積が非常に小さいからであり、¹³⁷Csの消滅処理の難しさを示している。断面積が小さいので、効果的な消滅を行うには熱中性子束を $10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度に上げる必要がある。現在ある原子炉(ILL, HFIR)の最高熱中性子束は $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ のオーダーであり、 $10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ を目指して研究開発が行われているが、本ターゲット炉の熱中性子束は $1.3 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ である。

次にターゲット炉の炉心特性について報告する。上で述べたターゲット炉(MOX燃料、出力3.5GW_{th}、燃料体積比35%など)の炉心特性計算を行ったところ次のような問題点があることがわかった。

- (1) 燃焼による反応度劣化が大きい。
- (2) ピーキング係数が大きい。

(1)に関しては、 k_{eff} が10%も落ちることがわかった。このことはターゲット炉を長く運転させるには、中性子発生源としての加速器のPowerを非常に大きくする必要のあることを意味し、エネルギーバランスの成立が難しくなる。(2)に関して、出力密度のピーク値はCs領域と燃料領域の境界部分で起こることがわかった。これは、燃料領域で発生した中性子が、一部はCs領域で¹³⁷Csに吸収され核変換に利用されるが、吸収されずに残った中性子がCs領域で減速され、再び燃料領域に戻ってくるときに、境界部分の燃料によく吸収され、その部分の出力密度が高くなるために生ずると考えられる。これらの問題点を改善するために、いくつかのパラメータを変化させた計算を行った。ただし、出力密度は常に500W/ccで一定とした。

(1) 燃焼特性

図A-4にMOX燃料で出力3.5GW_{th}、燃料体積比 V_f を変えたときの k_{eff} の時間的変化を示す。図の実線が初めに述べたターゲット炉に対応する。 V_f を大きくするほど、反応度劣化は小さくなることがわかる。燃料体積比 V_f は、炉心構造の幾何学的形状から制限を受け、 $V_f = 55\%$ (ダクトレス炉心に相当)が現在の最大

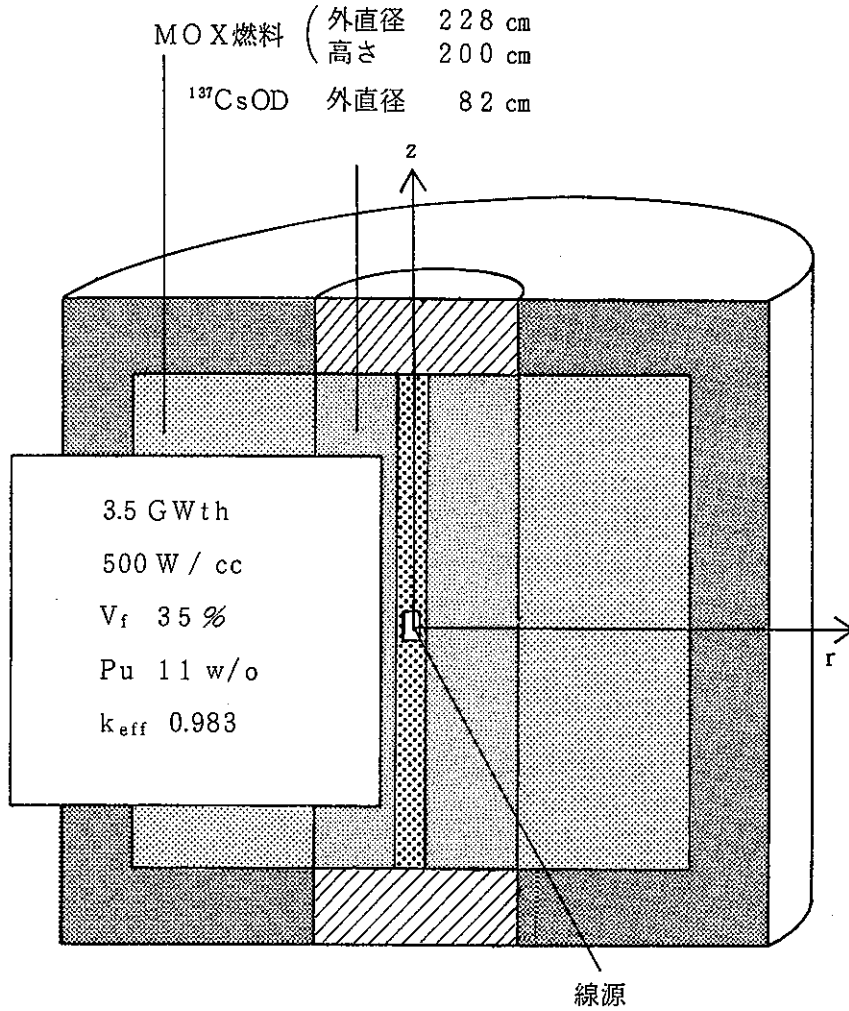
値と考えられている。そこで $V_f = 55\%$ に固定し、MOX燃料で燃料体積を（今、出力密度一定だから出力規模を）変化させた結果を図A-5に示す。燃料体積を大きくすると、中性子の洩れ方が小さくなるので、反応度劣化が小さく抑えられる。

金属燃料に対しても同じように計算した（図A-6, 7）。パラメータの変化に対する反応度劣化の傾向はMOX燃料と変わらないが、金属燃料の方が反応度劣化は小さく抑えられている。これは、金属燃料の方がMOX燃料に比べ密度が高く、増殖率が高いからである。結局、燃料に金属燃料を用い燃料体積（出力規模）、燃料体積比を大きくすると反応度劣化を小さくできることがわかった。

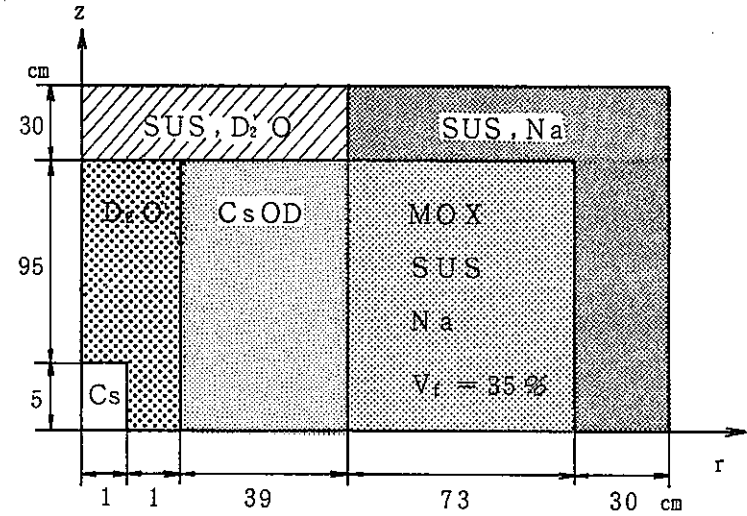
(2) 出力ピーキング

次に出力ピーキングの問題の改良について述べる。既述したように図A-2に示す炉心では、燃料とCs領域との境界で非常に出力密度が高くなる。これを改善するためには、境界部分を燃えにくくすればよい。そこで、境界部分に燃料体積比の小さい燃料を図A-8に示すように入れ、燃料部分を2領域にした。図A-9は、改良前の1領域の炉心と改良後の2領域の炉心にした場合の出力密度分布の比較である。明らかに2領域炉心にして内側の燃料体積比を下げた方が出力密度分布は平坦化する。

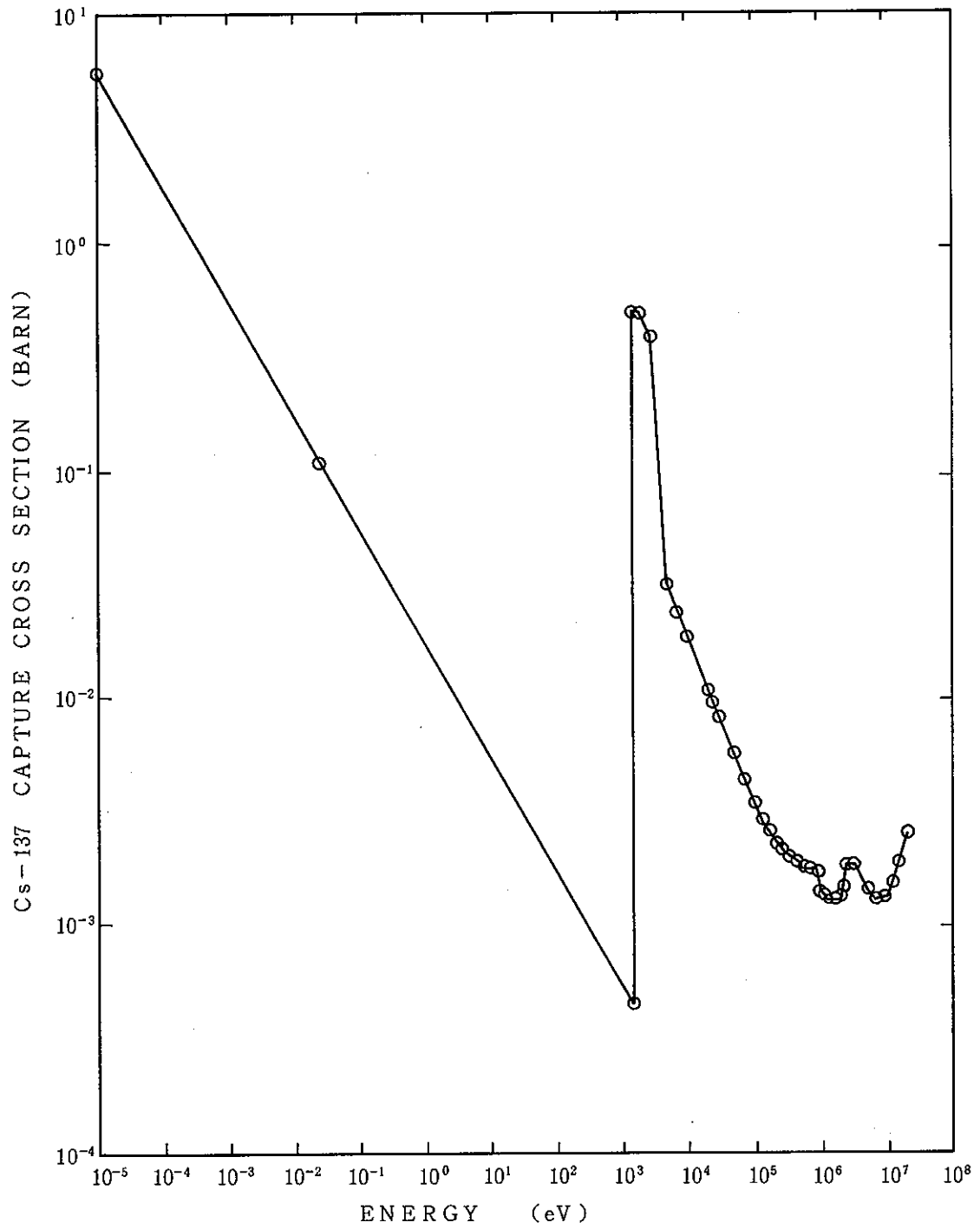
現状のターゲット炉の形状、組成を改良すれば、炉心特性を良くすることができることがわかった。今後は、消滅効率についても最適化を行い、さらに、消滅効率、炉心特性が共に向上するようなターゲット炉を検討する予定である。



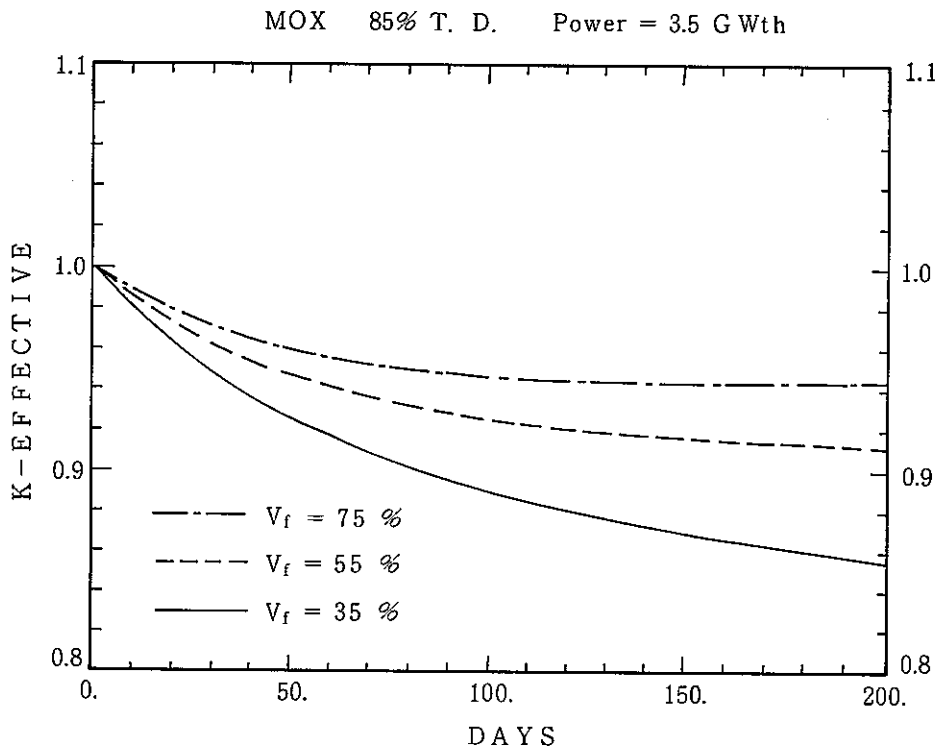
図A-1 ターゲット炉の断面



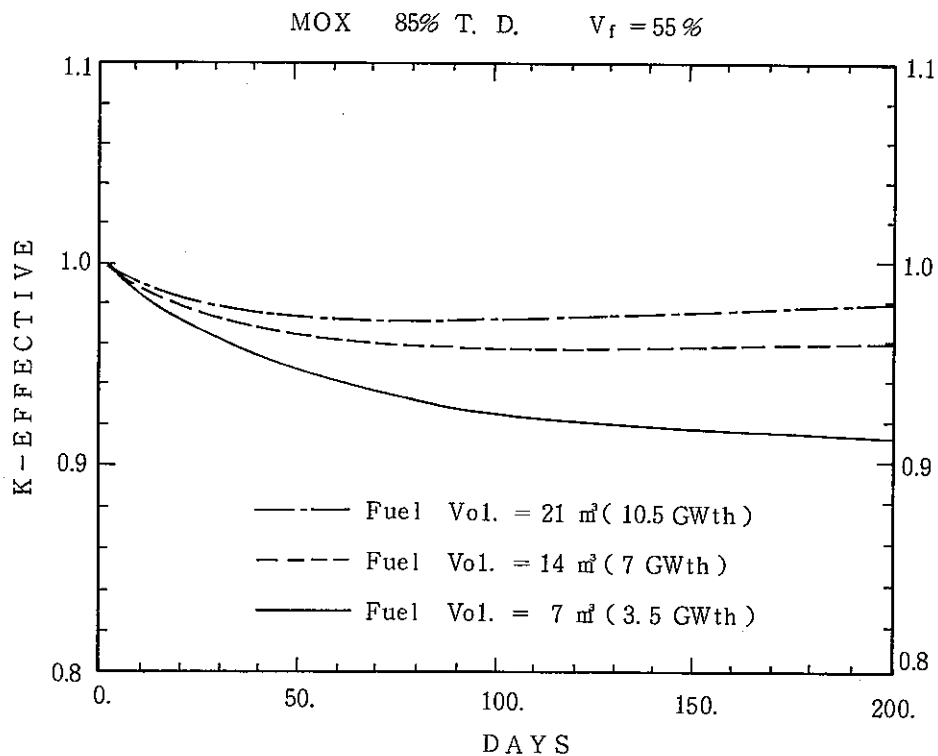
図A-2 ターゲット炉の1/4断面の組成と寸法
(図A-1 参照)



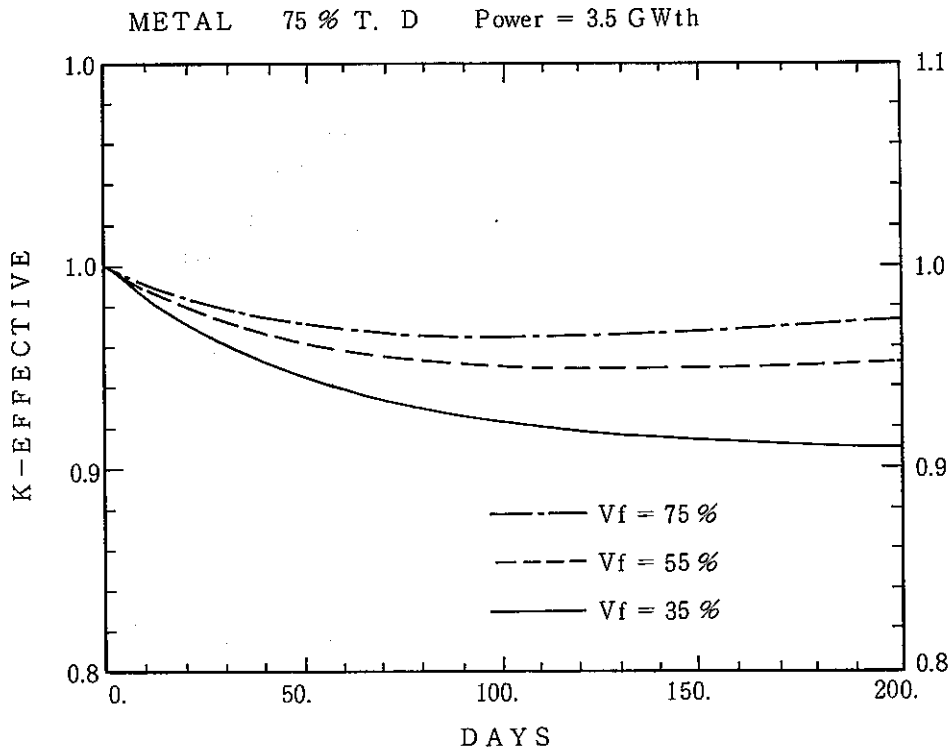
図A-3 ¹³⁷Cs の中性子吸収断面積 (ENDF/B-IV)



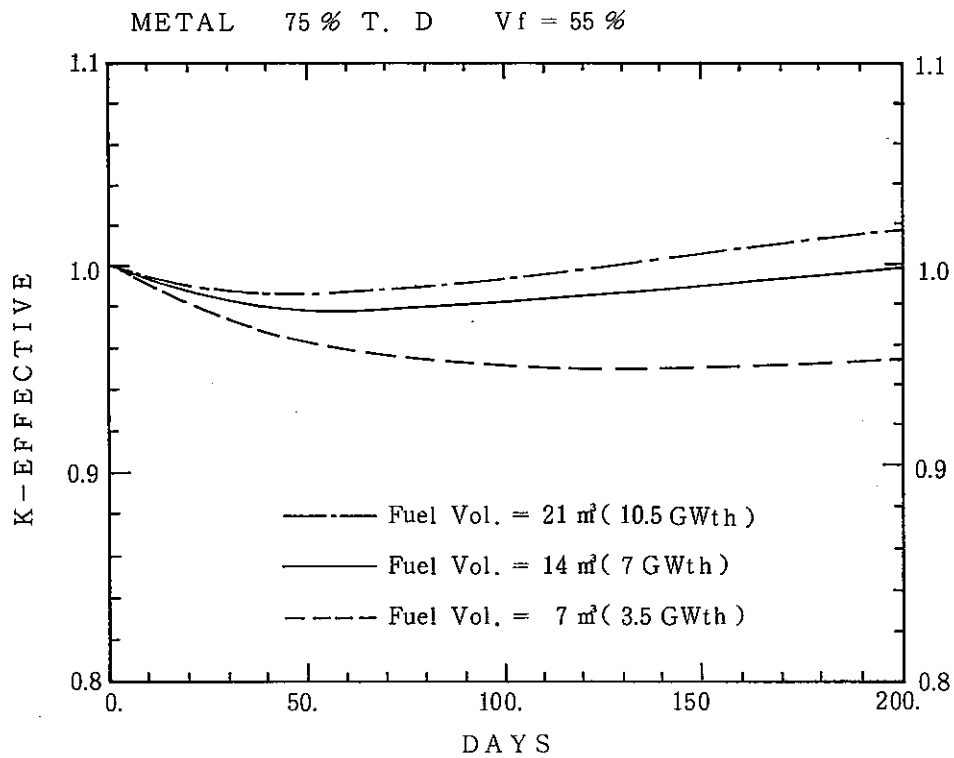
図A-4 MOX燃料, 熱出力 3.5 GW_{th} のターゲット炉における燃料体積比 V_f の変化に対する k_{eff} の時間変化



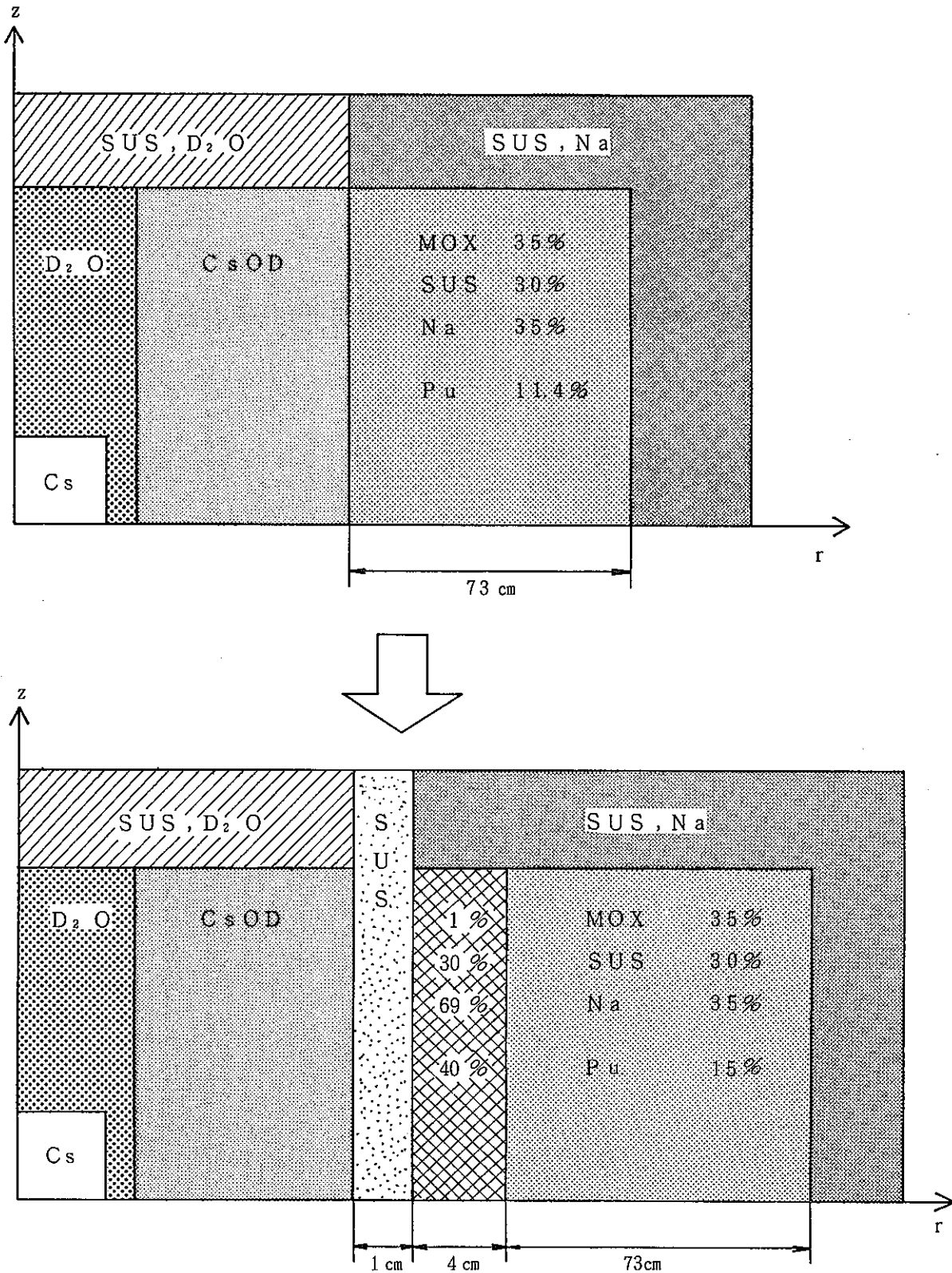
図A-5 MOX燃料, 燃料体積比 (V_f) 55% のターゲット炉における燃料体積 (出力規模) の変化に対する k_{eff} の時間変化



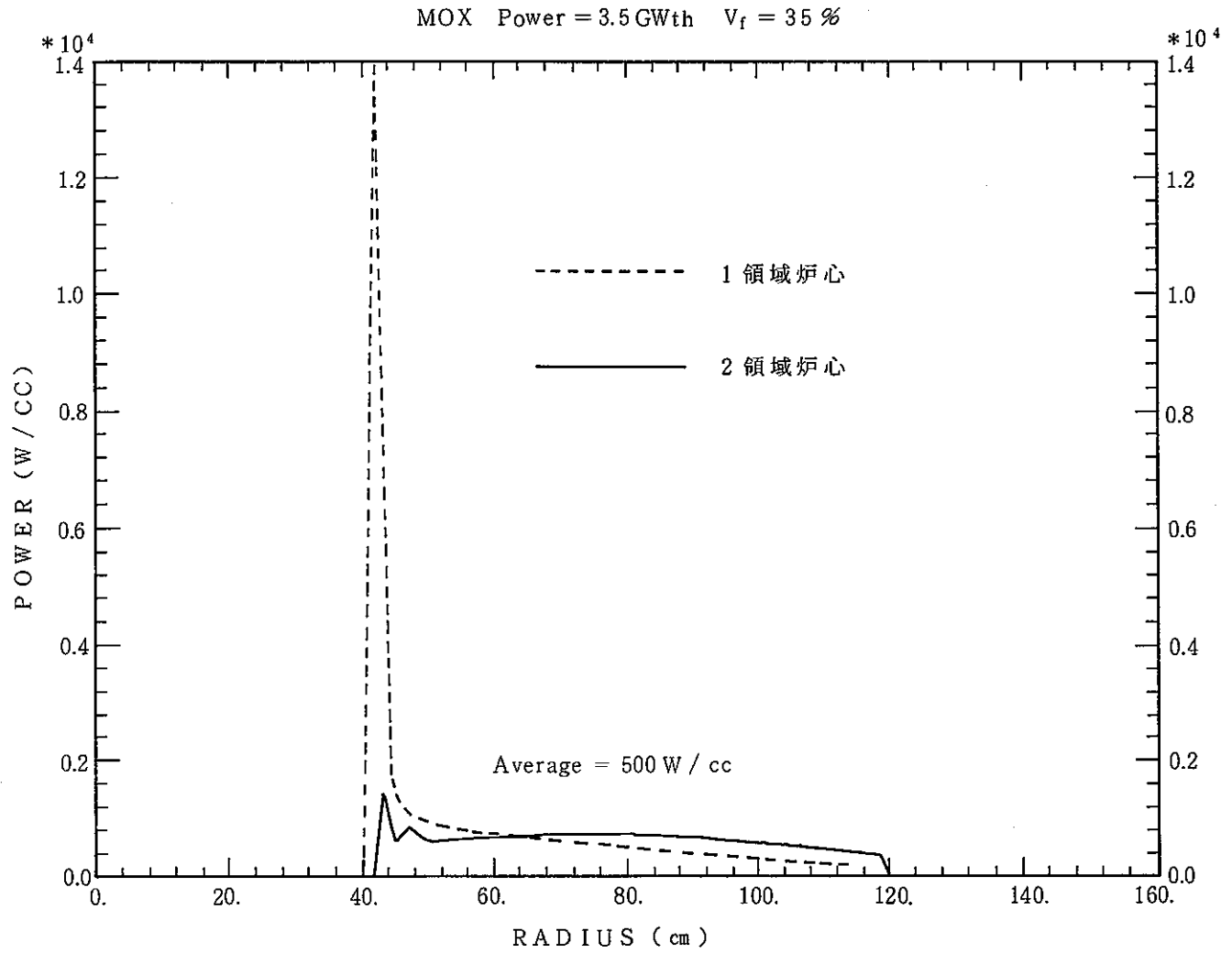
図A-6 金属燃料，熱出力3.5 GW_{th}のターゲット炉における燃料体積比 V_f の変化に対する k_{eff} の時間変化



図A-7 金属燃料，燃料体積比(V_f)55%のターゲット炉における燃料体積(出力規模)の変化に対する k_{eff} の時間変化



図A-8 ピーキング係数減少のためのターゲット炉の改良



図A-9 1 領域炉心と 2 領域炉心の出力密度分布

表 A - 1 ターゲット炉の組成

領域	材 料	重 量 %	密度 g/cc
Cs	Cs	100	1.88
D ₂ O	D ₂ O	100	1.105
CsOD	CsOD	100	3.675
燃 料	M O X	35	
	SUS 316	30	7.98
	Na	35	0.97
SUS / D ₂ O	SUS 316	80	7.98
	D ₂ O	20	1.105
SUS / Na	SUS 316	80	7.98
	Na	20	0.97

(*) M O X 燃料の組成

スミア密度	85% T. D.
Pu富化度	11.4 w/o
U234	0.006 w/o
U235	0.711 w/o
U238	99.283 w/o
Pu239	80.0 w/o
Pu240	10.0 w/o
Pu241	10.0 w/o

(* *) SUS 316の組成

密 度	7.98g/cc
Fe	67.0 w/o
Cr	17.0 w/o
Ni	12.0 w/o
Mo	2.0 w/o
Mn	2.0 w/o

表 A - 2 ターゲット炉の寸法

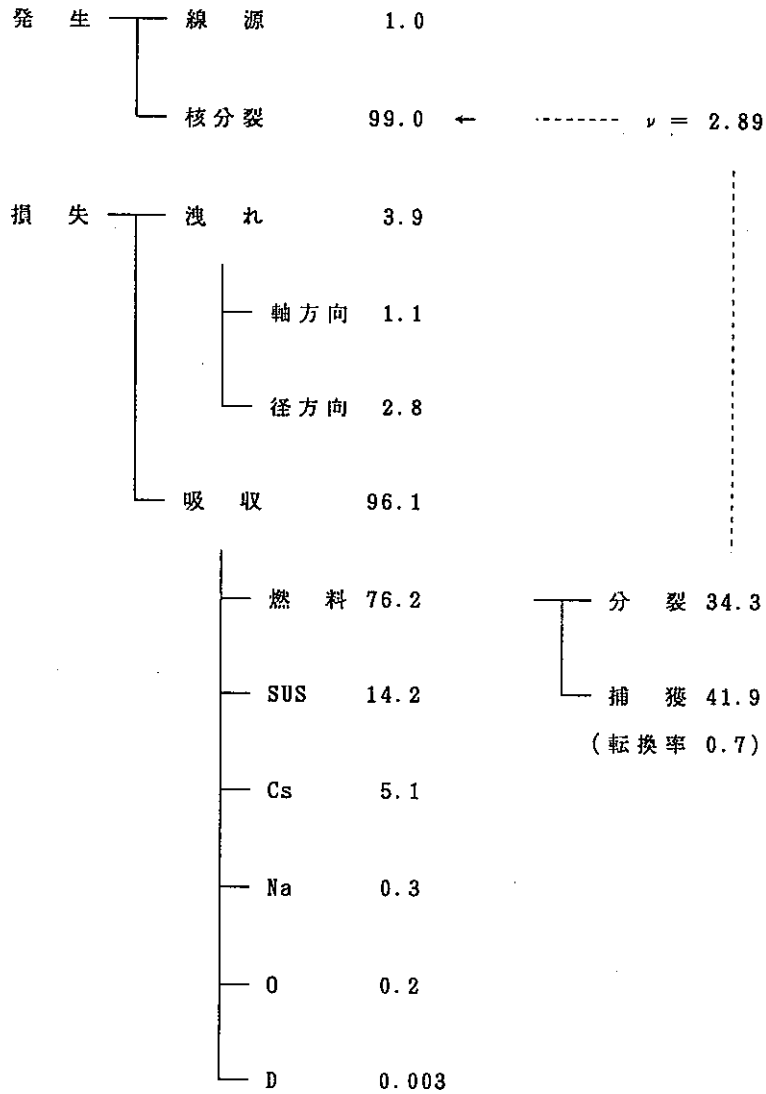
領域	外直径 (cm)	高さ (cm)	体積 (ℓ)
Cs	2	10	0.03
D ₂ O	4	200	2
CsOD	82	200	1054
燃料	228	200	7109
SUS / D ₂ O	82	(厚さ 30)	317
SUS / Na	258	(厚さ 30)	5110

表 A - 3 ターゲット炉の特性と¹³⁷Cs 消滅量

k_{eff}	0.983
熱出力	3.5GW _{th}
平均出力密度	500W / cc
転換率	0.688
線源強度	$3.02 \times 10^{18} \text{ n / s}$
CsOD領域における熱中性子束	$1.3 \times 10^{16} \text{ n / cm}^2 \cdot \text{s}$
¹³⁷ Cs 装荷量	3423 kg
(n, γ) 反応による ¹³⁷ Cs消滅量	111 kg / year
β 崩壊による ¹³⁷ Cs消滅量	79 kg / year
¹³⁷ Cs 消滅量	190 kg / year
ターゲット炉からの ¹³⁷ Cs発生量	50 kg / year
外部原子炉からの ¹³⁷ Cs消滅量	140 kg / year
¹³⁷ Cs 実効半減期	12.5 year

表 A - 4 ターゲット炉の中性子収支

全発生量 = 全損失量 = 1.5×10^{20} n/s を 100 とする。



燃料の分裂・捕獲の内訳

	分 裂	捕 獲
U234	0.001	0.004
U235	1.4	0.5
U238	3.6	27.7
Pu239	24.9	11.0
Pu240	0.4	1.8
Pu241	4.0	1.0
計	34.3	41.9

Appendix B

1. 密 度

物 質	領 域	値	条 件	参 照 文 献
CsOD	F P 領 域	3.675 (g/cm ²)	室 温、固 体 CsOH 値	①
U-Pu-10Zr	燃 料	11.85 (g/cm ²)	室 温, 15.8g/cm ³ (75%SD)	②
SUS316 (オーステナイト)	被 覆、反 射 体	8.0 (g/cm ³)	室 温	③
Na	冷 却 材	0.8563 (g/cm ³)	400℃	④

① Handbook of Chemistry and Physics 1st CRC Press(1988)

② 金属燃料FBR CRIEPIパンフレット(1986)

③ 原子炉材料ハンドブック(1977)

④ 高速増殖炉 安氏 P.66(1982)

2. 比熱と比熱温度係数 (比熱の基準点 873°K (600°C)とする)

物質	領域	比熱	比熱温度係数	条件	参考文献
CsOD	F P 領域				
U-Pu-10Zr	燃料	0.1858 (J/g·°K)	1.572×10^{-4} (J/g·°K)	600°C ウラン メタル代用	①
SUS316 (オーステナイト)	被覆、 反射体	0.5016 (J/g·°K)		0~100°C 値代用	②
Na	冷却材	1.2531 (J/g·°K)	-5.797×10^{-4} (J/g·°K)	600°C	③

① 原子炉燃料 2 菅野他 (1976)p.86

$$C_p = 2.61 + 8.95 \times 10^{-3} T + 1.17 \times 10^5 \times T^{-2} \quad \text{cal/mol}^\circ\text{C}$$

$$\text{cal/mol}^\circ\text{C} \rightarrow (4.18/238) \text{J/g} \cdot ^\circ\text{K} \quad (298 \sim 941^\circ\text{K} (25 \sim 668^\circ\text{C}))$$

$$T = 873^\circ\text{K} (600^\circ\text{C}) \quad C_p = 10.5769 \text{ cal/mol} \cdot ^\circ\text{K} = 0.1858 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\text{比熱温度係数} \quad 0.1572 \times 10^{-3} \text{ (J/g} \cdot \text{K}^2)$$

② 原子炉材料ハンドブック (1977)p.549

$$C_p = 0.12 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$= 0.5016 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{K}$$

③ 原子炉材料ハンドブック (1977)p.482

$$C_p = 0.34324 - 1.3868 \times 10^{-4} t + 1.1044 \times 10^{-7} t^2 \quad t_{\text{mp}} \leq t \leq 900^\circ\text{C}$$

$$T = 600^\circ\text{C} \quad C_p = 0.2998 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$= 1.2531 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\text{比熱温度係数} \quad -0.5797 \times 10^{-3} \text{ (J/g} \cdot ^\circ\text{K)}$$

3. 熱伝達係数

(1) 熱伝導度

物質	領域	値	条件	参照文献
CsOD	F P 領域	————	————	————
U-Pu-10Zr	燃料	0.263 (W/cm °K)	600°C	①
SUS 316 (オーステナイト)	被覆、反射体	0.209 (W/cm °K)	500°C	②
Na	冷却材	0.772 (W/cm °K)	400°C	③

① 金属燃料 FBR CRIEPI パンフレット (1986)

② 原子炉材料ハンドブック (1977) P.549

$$\lambda = 0.05 \text{ cal/cm.S.}^\circ\text{C at } 500^\circ\text{C}$$

$$= 0.209 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

③ 原子炉材料ハンドブック (1977) P.484

$$\lambda = 0.918 - 4.9 \times 10^{-4} t \quad (t_{mp} \leq t \leq 832^\circ\text{C}) \quad (\text{W/cm}^\circ\text{C})$$

$$t = 400^\circ\text{C} \quad \lambda = 0.722 \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$$

(2) 熱伝達係数変換式 (SPARKでの熱伝達係数)

伝熱工学資料 熱伝達序-B-a (9)、(10)式

$$\alpha = 2\pi \cdot L \cdot K \quad (\text{W/cm}^\circ\text{K})$$

L : 管長 (cm)

K : 熱通過率 (W/cm°K)

$$\frac{1}{K} = \sum_i \frac{1}{\alpha_i r_i} + \sum_j \frac{\log_e(r_{j+1}/r_j')}{\lambda_j}$$

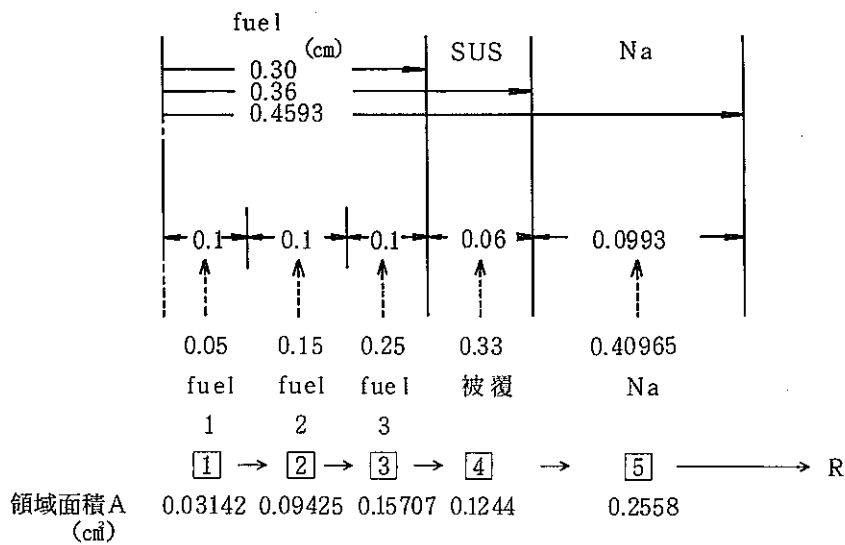
$$i' < j < j'+1$$

(α_i : 熱伝達係数
 λ_j : 熱伝導度

(3) 熱伝達係数

$$\begin{aligned}
 \text{Na - SUS 間熱伝達係数} &= 2.0 \times 10^4 \text{ (kcal / m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C)} \\
 &= 2.0 \times 10^4 \text{ (} 4.18 \times 10^3 / 10^4 \times 3600 \text{) (W / cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K)} \\
 &= 2.326 \text{ (W / cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K)}
 \end{aligned}$$

(4) SPARK用熱伝達係数試算例



$$K_{\boxed{1} \rightarrow \boxed{2}} = \frac{0.263}{\log_e(0.15/0.05)} = 0.23939 \text{ (W / cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K)}$$

$$K_{\boxed{2} \rightarrow \boxed{3}} = \frac{0.263}{\log_e(0.25/0.15)} = 0.51485 \text{ (W / cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K)}$$

$$K_{\boxed{3} \rightarrow \boxed{4}} = \frac{1}{\frac{\log_e(0.30/0.25)}{0.263} + \frac{\log_e(0.33/0.30)}{0.209}} = 0.87009 \text{ (W / cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K)}$$

$$\begin{aligned}
 K_{\boxed{4} \rightarrow \boxed{5}} &= \frac{1}{\frac{\log_e(0.36/0.33)}{0.209} + \frac{1}{2.326 \times 0.36} + \frac{\log_e(0.40965/0.36)}{0.722}} \\
 &= 0.55882 \text{ (W / cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K)}
 \end{aligned}$$

以上 $K_{\boxed{n} \rightarrow \boxed{n+1}}$ に $2\pi L$ をかけ算出

Appendix C

1. エネルギー群

群数： 2

構造： 下表参照。

表 動特性解析に用いた群構造

群	群エネルギー中点 (eV)
1	5.0046×10^6
2	4.5594×10^3

2. 体系のメッシュ分割： 本文図 7 参照。

3. 炉心各領域の原子数密度

表 原子数密度

領域 核種	C s O D	F U E L	S U S 反射体
U 2 3 4	0.0	6.67×10^{-7}	0.0
U 2 3 5	0.0	8.43×10^{-5}	0.0
U 2 3 8	0.0	1.16×10^{-2}	0.0
P u 2 3 9	0.0	7.81×10^{-4}	0.0
P u 2 4 0	0.0	9.72×10^{-5}	0.0
P u 2 4 1	0.0	9.68×10^{-5}	0.0
N a	0.0	8.89×10^{-3}	5.08×10^{-3}
F e	0.0	1.73×10^{-2}	4.62×10^{-2}
C r	0.0	5.07×10^{-3}	1.35×10^{-2}
N i	0.0	2.81×10^{-3}	7.49×10^{-3}
M o	0.0	1.75×10^{-4}	4.67×10^{-4}
M n	0.0	5.34×10^{-4}	1.42×10^{-3}
C s	1.43×10^{-2}	0.0	0.0
O	1.43×10^{-2}	0.0	0.0
D	1.43×10^{-2}	0.0	0.0

4. 遅発中性子割合及び崩壊定数

日本原子力学会誌 Vol. 14, No. 7 (1972) データに基づく。

表 遅発中性子割合及び崩壊定数

グループ	割合	崩壊定数 (1 / s)
1	0.000075	0.0129
2	0.000560	0.0311
3	0.000432	0.134
4	0.000656	0.331
5	0.000206	1.26
6	0.000070	3.21
合計	0.001999	—

5. 遅発中性子スペクトル

各グループとも、4と同じ参考文献より、下表値を用いた。

表 遅発中性子スペクトル

群	スペクトル
1	1.0
2	0.0