

F P 消滅処理用原子炉の研究

1991年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。(注)

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 -33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 (Tokai Works)

技術協力部 技術管理室

(Technology Management Section)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatu Ooaza, Tokai, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1991

FP消滅処理用原子炉の研究

高下浩文(*), 川島克之(**), 小無健司(**)
笹尾信之(***) , 岸本洋一郎(**)

要 旨

目 的

前報(PNC N8410 90-057)でFP消滅炉の消滅率と炉心パラメータの関係を報告した。本報告書ではその結果を踏まえ、消滅炉を改良し、核計算、燃焼計算を行い、FP消滅炉の最適化を目指した。

方 法

FPとして ^{137}Cs を選び、燃焼反応度、出力ピーキング係数を通常の高速炉並に設定し、その範囲内で消滅率の高い炉心をサーチした。核定数には高速炉用群定数JFS-3-J2を、炉心計算には拡散計算コードCITATIONを用いた。

結 果

燃焼反応度、出力ピーキング係数及び消滅率の最適化された消滅炉の構成と特性が判った。Cs領域で平均熱中性子束 $3 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ が得られた。 ^{137}Cs の消滅量は年間220.5kgである。消滅率は3.84%/yで自然崩壊の約1.7倍である。

結 論

現行の高速炉の条件範囲内でFP消滅炉の最適化を行った。その結果、平均熱中性子束 $3 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の消滅領域を得ることが可能であることが判った。しかし、 ^{137}Cs は中性子吸収断面積が小さい($\sigma_c = 0.25\text{b}$)ので、本消滅炉でも十分な消滅率は得られなかった。 ^{137}Cs をより効率的に消滅するには、現行の高速炉の範囲を越えた革新的な炉心を考える必要がある。また、本消滅炉は ^{137}Cs よりも中性子吸収断面積の大きい ^{129}I や ^{99}Tc などのFP核種であれば有効であると考えられる。

(*) 核開部 先端技術開発室

(**) 核開部 先端技術開発室 客員研究員 (平成2年4月~平成3年3月)

日立エネルギー研究所

(***) 東海事業所 副所長

目 次

1. 緒言	1
2. 従来の高中性子束炉研究	3
3. 改良型消滅炉炉心の検討	12
3.1 炉心概念	12
3.1.1 炉心構成	13
3.1.2 消滅率の定義	14
3.1.3 炉心特性の目標	15
3.2 解析手法	15
3.3 炉心特性のパラメータ解析	17
3.3.1 炉心設計パラメータ	17
3.3.2 出力密度及びCs領域の体積割合依存性	20
3.3.3 B ₄ C, SUSの効果	21
3.3.4 燃料領域2領域炉心	23
3.3.5 FP消滅炉心の特性	24
3.4 その他の炉心概念	25
3.4.1 共鳴吸収を利用した ¹³⁷ Cs消滅炉の検討	25
3.4.2 炉心外側にCs領域を設けた計算	26
4. 消滅炉炉心における解析手法の検討	69
4.1 熱中性子炉用FPランプ化定数の効果	69
4.2 輸送計算と拡散計算の比較	71
4.3 将来のFP消滅炉炉心計算コードシステム	72
5. 結言	90
5.1 炉心概念	90
5.2 解析手法	92
6. 謝辞	94
7. 参考文献	95
Appendix A. 熱中性子炉用FPランプ化定数の作成	97

1. 緒言

原子炉の運転に伴い、放射性廃棄物が発生し、現在、その処理・処分が重要な課題となっている。特に、長寿命の高レベル放射性廃棄物の処理・処分技術開発は、原子力における最重要課題の1つとして精力的に研究が進められている。わが国における高レベル放射性廃棄物の処理・処分についての基本的な方針は、ガラス固化し、30年から50年間貯蔵を行い、その後深地層中に処分することである。その際、廃棄物の放射能レベルの減衰は、その自然崩壊によっている。しかし、何らかの方法で放射性核種の半減期を短縮化できれば、処分の効率化とともに、長寿命核種の長期にわたる潜在的有害性を著しく軽減できる可能性がある。

消滅処理とは、長寿命核種を核分裂、核破砕、光核反応等の核反応により、短半減期または非放射性的の核種に変換する放射性廃棄物処理技術である。この消滅処理技術研究開発の必要性は、昭和62年に決定された原子力委員会の「原子力開発利用長期計画」においても謳われている。そして、現在は国際協力を含んだオメガ計画の下で、積極的に研究が進められている。このような状況の中で、動燃においても加速器、原子炉、核融合炉等を用いた消滅処理研究が行われている。このうち本報告書は原子炉によるFP（核分裂生成物 Fission Product）消滅処理研究をまとめたものである。

消滅処理において考慮すべき重要な要素は、消滅速度と多量処理及びエネルギー収支である。このうち原子炉による消滅処理方法は、多量処理とエネルギー収支に関して有利である。しかし、現状の炉では中性子のflux levelが低いため、消滅速度が遅いという問題がある。消滅速度を上げるためには、high flux reactor にすることが必要である。

本研究において、現状の技術またはその延長上において達成できる技術を用いた high flux のFP消滅処理用原子炉（FP消滅炉）の核特性を研究した。この炉は炉心を熱中性子主体のFP装荷領域と高速中性子主体の燃料領域に分け、FP領域における熱中性子とFP核種の吸収反応により、FP核種を消滅させることが特徴である。これまでは、消滅炉の核特性、燃焼特性、消滅特性などの各特性の全体の傾向を把握することに重点を置き、研究を進めてきた¹⁻⁴⁾。その結果、FP消滅炉の長期運転達成には、金属燃料とダクトレス燃料集合体の適用が有利であることが判った。また、FP消滅炉の消滅特性を評価するために定義した消

減率 (transmutation rate) と出力密度や Pu 富化度などの炉心パラメータとの関係が判った。更に、FP 装荷領域と燃料領域の境界で FP 装荷領域からの熱中性子の影響により鋭い出力ピークが生ずること、高い消滅特性 (高中性子束) を得るためには高出力密度が必要となり、反応度劣化の問題が生じること等の問題点を摘出した。そこで、本研究では現状の高速炉における出力ピーキング係数や燃焼反応度の制限値を考慮し、出力ピークの問題を解決した上で、数々のパラメータ解析を実施し、この制限内で最も消滅特性の良い炉心を示した。

ここで行った研究は、今後のさらに進んだ革新的な消滅炉の概念を考える上で基礎となる。また、原子炉以外の装置を用いた消滅処理研究も別途進められており、中性子束の計算及び熱出力問題の検討等は共通しているので、ここでの研究の成果はそれらの研究においても参考となると考えられる。

2. 従来的高中性子束炉研究

F P の消滅速度を上げるには、high flux reactor であることが必要であるので、high flux の F P 消滅炉の参考とするために従来的高中性子束炉研究を調査した。

現存する世界で最も高い水準の flux level を供給している炉は、HFIR, HFBR 及び FGHFR である。これらは全て照射用の研究炉である。これらの主要仕様を Table 2-1 に示した⁵⁾。3 つの炉に共通した特徴は、flux を上げるために出力密度を高くしており、それに伴って発生する熱を効率的に除去するために板状燃料を使用していることである。供給する熱中性子束は大体 $10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ のオーダーである。

計画中の high flux reactor として米国の Advanced Neutron Source プロジェクトにおける照射炉（以下、ANS 炉と呼ぶ）がある。ANS が目標とする熱中性子束は $10^{16} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ である。ANS 炉の炉心形状を Fig. 2-1 に、主要特性を Table 2-2 に示した。炉心は上下に分割した分割型炉心で、燃料は 93% 濃縮 U_3Si_2 -Al 板状燃料とし、involute 型と呼ばれる現存の HFIR 炉で採用されている形状としている。炉心の燃料体積比は 35% に採っている。燃料装荷密度は、軸方向、径方向共に勾配をつけて変化させている。冷却は 2.7 m/s 流速の重水で行う。出力 325 MW_{th}、出力密度 1.2 kW/cc で反射体(重水)における熱中性子束のピーク値は $1 \times 10^{16} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ を有する。以上の数値は '88, '89 年の文献^{6, 7)}を参考にしたが、その後、工学的理由から仕様が若干変わり、最高熱中性子束、冷却材流速が下がっていると聞いている⁸⁾。

Powell らは high flux reactor として、粒子燃料を用いた high flux particle bed reactor (HFPBR) を提案している (Table 2-3, Fig. 2-2 参照)⁹⁾。直径約 500 μm の被覆燃料粒子を多孔性の金属フリットの中に詰め、重水で直接冷却する。粒子燃料が詰められたベッドの中は、熱伝達表面積が大きいので ($\sim 100 \text{cm}^2/\text{cm}^3$)、1.0 kW/cc もの高出力密度が可能である。HFPBR のピーク熱中性子束は、 $1 \sim 2 \times 10^{16} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ である。この値は形状と減速材の選択に依存する (Fig. 2-2 参照)。Be と重水減速が最もよい flux 性能を与える。使用済燃料粒子は 1 ~ 2 回毎に水力で取り除かれ、新しい燃料が再装荷される。燃料サイクルが短いので、燃料装荷量を低くすることができ (^{235}U は約 2 kg)、核分裂生成物は現在の high flux reactor の 1/10 になる。HFPBR は部分的に 20% ^{235}U 濃縮燃料を flux あるいは反

応度の低下なしに使うことができる。

以上述べた high flux reactor は照射用の原子炉であり、照射領域はそれ程大きくないので、そこにFPを装荷しても多量の消滅処理は望めない。更に、炉心がコンパクトであるので、中性子のもれが大きく、燃焼による反応度劣化は大きい。そのため1サイクルは短く、ANS炉で14日間である。但し、HFPBRに関しては、運転をしながら燃料交換をすることは可能であると考えられる。多量処理が可能で運転期間を増大させるには、大型炉が有利である。

次にTaubeが検討した ^{137}Cs 及び ^{90}Sr の消滅処理用原子炉を紹介する¹⁰⁾。炉心形状は球状であり、同心球の中心部に ^{137}Cs ODまたは $^{90}\text{Sr}(\text{OD})_2$ を循環させ、その外側に塩化物熔融燃料を循環させる (Table 2-4, Fig.2-3参照)。全出力は7GW_{th}で大型炉であり、多量のFPを装荷できる。出力密度は10.5kW/ccでFP装荷領域の熱中性子束は $2 \times 10^{16}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ である。高出力密度における熱及び燃焼劣化の問題を回避するため熔融燃料を採用し、平均12m/sの速さで循環させる。熔融燃料は未だ実用化されていないが、Taubeは加速器や核融合炉による消滅処理よりも熔融燃料の方が実現性が高いと主張している。彼はまたFig.2-3のCentral Regionの重水素を水素に変え、その効果を見たり、Beの厚さ、Pu富化度、出力、反射体の種類等を変化させてその効果を調べている¹⁰⁾。Taubeは結論でエネルギーバランスは正であり、自然崩壊よりも速く消滅処理が行える (半減期が ^{137}Cs で30年から8.95年に短縮される) が、炉の事故のリスクがあることを指摘している。

Table 2-1 HFPBR, HFIR, FGHFRの主要仕様一覧⁵⁾

名称	HFPBR	HFIR	FGHFR	
場所	BNL	ORNL	GRENOBLE	
公称出力	40 MW	100 MW	60 MW	
臨界	1964	1964	1971	
目的	中性子物理, 固体物理	RI生産, 工学試験, 中性子物理	核物理, 固体物理	
形式	タンク型, 高濃縮ウラン(93%) 重水減速, 重水冷却, 重水反射	タンク型, 高濃縮ウラン(93%) 軽水減速, 軽水冷却, Be反射	スライミングプール内タンク型 高濃縮ウラン(93%)重水減速, 重水冷却	
中性子束	$\phi_{th}\cdot\text{max.}: 7.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$ $\phi_{fast}\cdot\text{max.}: 1.6 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$	$\phi_{th}\cdot\text{av.}: 2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$ $\phi_{th}\cdot\text{max.}: 5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$ $\phi_{fast}\cdot\text{max.}: 4 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$	$\phi_{th}\cdot\text{av.}: 2.2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$ (燃料内) $\phi_{th}\cdot\text{max.}: 1.5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$ (反射体内) $\phi_{th}\cdot\text{max.}: 5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\cdot\text{sec}$ (燃料内)	
炉	形状・寸法	円筒形 直径: 20 in. 高さ: 21 in.	中央部にフラックスストラップを持つ環状形 内径: 5.068 in. 外径: 17.126 in. 高さ: 20 in.	円筒形 内径: 14 cm 外径: 19.5 cm 高さ: 80 cm
	臨界乱	~ 8.5 K γ U ²³⁵		
	²³⁵ U 被荷量	~ 7.8 K γ	9.4 K γ	8.57 K γ
	出力密度	Av. 470 KW/l Max. 1310 KW/l	2000 KW/l	1140 KW/l
心	燃焼度	Av. 20% パーンアップ	20% パーンアップ	Av. 80%, Max. 60% パーンアップ
	減速材	50% D ₂ O Av. Temp. 55°C Max. Temp. 182°C	軽水	15 ml D ₂ O 炉心入口 30°C 炉心出口 50°C
	ブランケットガス	He, 196 psig	なし	N ₂
燃料	形状・構成	MTR型, 平行板 93%濃縮, ウランアルミ合金	渦巻状二重円筒形 93%濃縮, U ₂ O ₃ アルミサノット 1部 B ₄ C, Cd-glass入り	渦巻状円筒形 (HFIR型)
	板厚	0.015 in. 6061型 アルミ合金	0.01 in. 6061型 アルミ合金	0.38**アルミ合金 (1% Fe, 1% Ni, 1% Mg, 0.4% Mn, 0.3% Cr)
	燃料要素	1要素当りの燃料板数: 19枚	内側 171枚 369枚	280枚

Table 2-2 A N S 炉の主要仕様

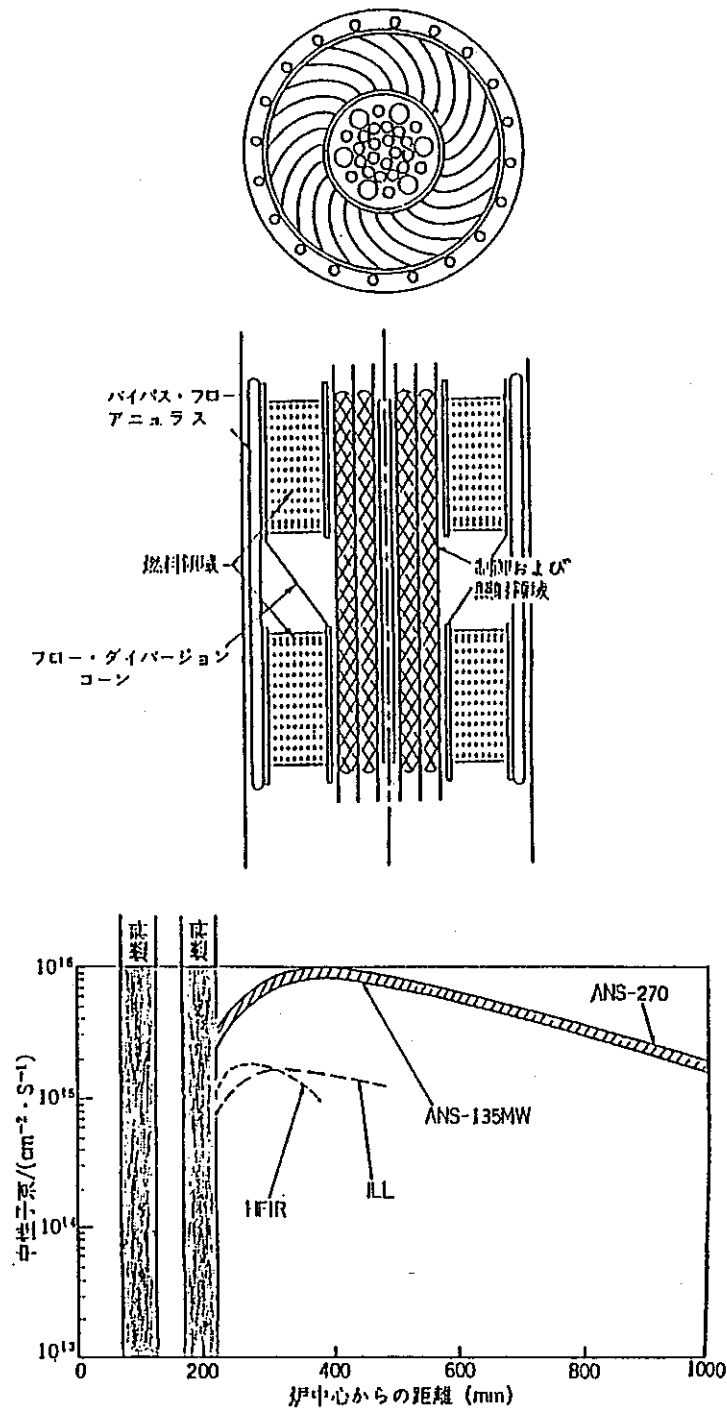
燃 料	$U_3Si_2 - \Lambda 1$
^{235}U 濃縮度	93%
炉心外径	40.0cm
炉心内径	20.0cm
炉心高さ (上下共)	20.0cm
冷却材流路幅	1 mm
冷却材流速	27 m / s
冷却材入口圧力	4.1 MPa
燃料サイクル	14日
出 力	325 MW _{th}
平均出力密度	12 kW / cm ³
最高熱中性子束	$1 \times 10^{16} \text{ n / cm}^2 \cdot \text{s}$
最高から80%以上の熱中性子束をもつ反射体体積	270 ℓ

Table 2-3 HFPBRの炉心パラメータ

<i>Fuel particles</i>	
Type	TRISO
Diameter (μm)	750
Kernel	UO ₂
Enrichment (% ²³⁵ U)	20
<i>Fuel beds</i>	
Shape	rectangular
Width (cm)	6.06
Thickness (cm)	3.0
Height (cm)	50.0
Number	18
Placement	One per pressure tube
<i>Fuel region</i>	
Shape	annular ring of pressure tubes
Equivalent ID (cm)	45.2
Equivalent OD (cm)	52.4
Height (cm)	50.0
<i>Frits</i>	
Material	zircaloy
Porosity	50%
Thickness (cm)	0.2
<i>Moderators</i>	
Inner	Be and/or D ₂ O
Outer	Be and/or D ₂ O
<i>Thermal-hydraulics</i>	
Coolant	D ₂ O
Bed power density, (MW/l)	10
Reactor power (MW(th))	163
D ₂ O inlet temp. (°C)	30
D ₂ O outlet temp. (°C)	130
D ₂ O pressure (atm)	80
D ₂ O flow rate (l/s)	400
Film ΔT (°C)	10
Pressure drop (atm)	6
<i>Pressure tubes</i>	
OD (cm)	8.6
Wall thickness (cm)	0.3
Material	zircaloy
Internal pressure (atm)	80
Tube stress (psi)	16 300

Table 2-4 T a u b e の消滅炉

炉の形状	同心球
全出力	7 GW _{th}
出力密度	10.5 kW/cm ²
F P 領域の熱中性子束	2.05×10^{16} n/cm ² ·s
燃 料	熔融塩 (PuCl ₃ · 6 NaCl)
入口直径	1.2m
入口流速	15m/s
平均流速	12m/s
入口温度	720℃
出口温度	930℃
F P 化学形態	¹³⁷ CsOD , ⁹⁰ Sr (OD) ²
装荷量	¹³⁷ Cs 5342kg
	⁹⁰ Sr 485kg
消滅量	¹³⁷ Cs 291kg/年
	⁹⁰ Sr 170kg/年
実効半減期	¹³⁷ Cs 8.95年
	⁹⁰ Sr 1.85年



出力 325 MW_{th}
 出力密度 12 kW/cc
 最高熱中性子束 10¹⁶ n/cm²・s

Fig. 2-1 ANS炉の炉心形状⁷⁾

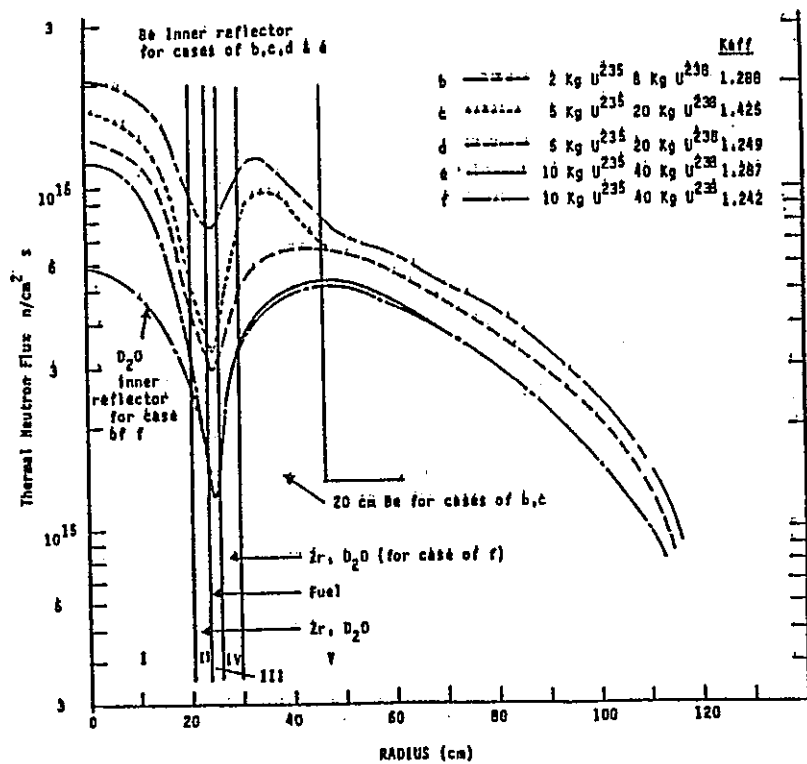
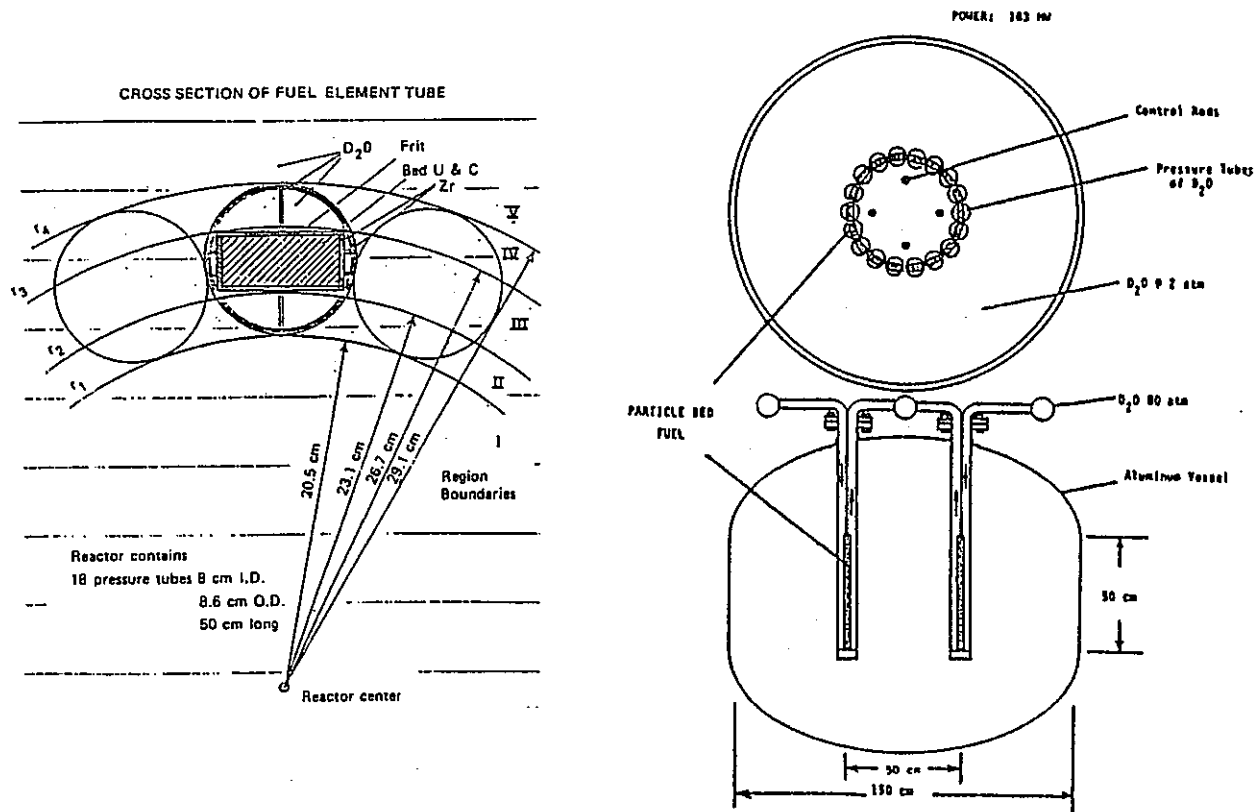
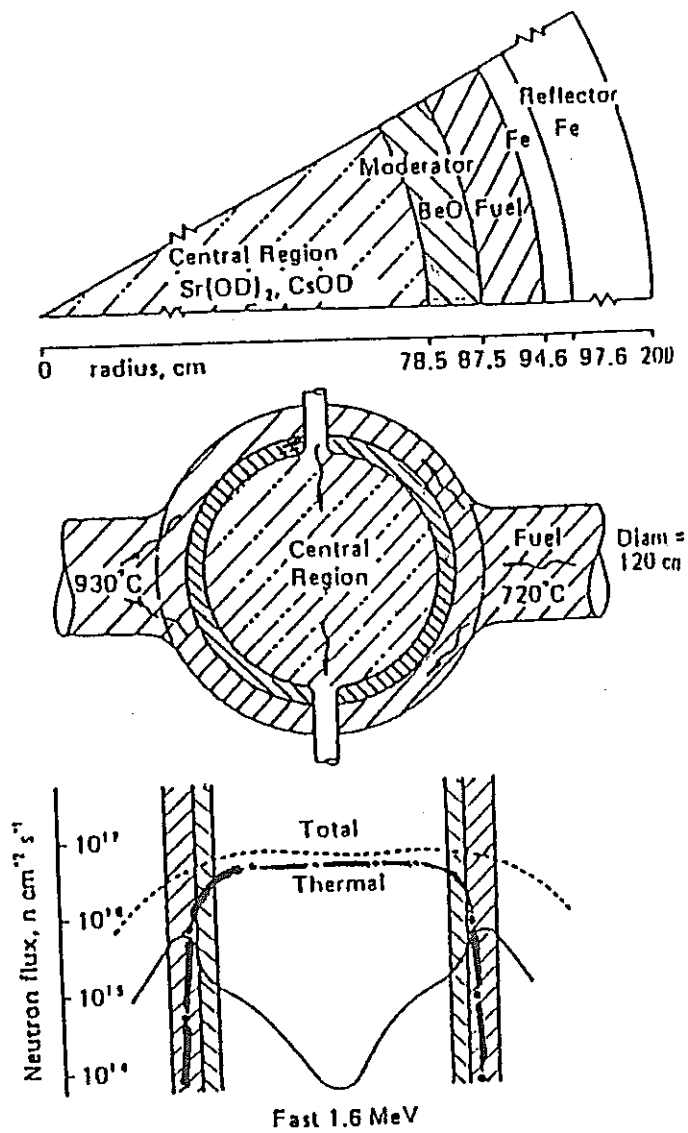


Fig. 2-2 HFBRの形状と熱中性子束分布⁹⁾



出力 7 GW_{th}
 出力密度 10.5 kW/cc
 熱中性子束 $2.05 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$

Fig. 2-3 Taubeの消滅炉¹⁰⁾

3. 改良型消滅炉炉心の検討

原子炉による消滅処理では、核分裂によって発生する中性子を利用するが、核分裂によって新たにFPが生じてくる。即ち、消滅炉でFPを処理すると同時に、消滅炉自身からFPが発生する。この発生量の方が消滅量より多いと消滅炉の意味をなさない。FP発生量は消滅炉の出力に比例して増加するので、炉の出力はなるべく小さい方が消滅炉自身のFP発生量は少なく抑えられる。しかし、小型炉ではFP装荷量が少なくなり、したがって、消滅量は減少する。更に、燃焼による反応度劣化が大きい。

われわれの消滅炉研究においては、原子炉による消滅処理の長所である多量処理を生かすため、炉は実証炉規模の大型炉に設定し、検討を続けてきた。本年度は前年度までの炉心に改良を加え、炉心特性のパラメータ解析を実施した。3.1で改良型消滅炉の炉心概念を紹介し、3.2で解析手法を説明する。3.3でパラメータ解析の結果を示す。更に、3.4で炉心概念を変えたときの消滅特性を検討したので報告する。

3.1 炉心概念

消滅炉で効率的にFPを消滅処理するには、消滅炉で発生する中性子数を増やし、それを有効に利用することである。中性子発生数を増やすには高出力密度にすればよい。また1回の核分裂で発生する中性子が多い方が有利である。発生中性子を有効に利用するには燃料や構造材等の吸収効果による中性子損失を抑えることである。以上の点を考慮して高速炉と熱中性子炉を比較すると、高速炉の方が高出力密度が可能で、且つ、核分裂による実効中性子が多く、更に、吸収効果による中性子損失が少ないので、高速炉の方が有利であると考え、消滅炉は高速炉とした。しかし、FPの中性子吸収断面積は、一般に高速中性子より熱中性子の方が大きいので、炉心を燃料領域とFPを装荷し消滅処理を行う領域の2領域に分け、燃料領域で発生した高速中性子を減速、熱化してFPに照射することにした。具体的な炉心構成を次に述べ、消滅率の定義をした後、炉心特性の目標についてふれる。

3.1.1 炉心構成

Taubeの炉を参考にしてF P消滅炉の形状を決定した。Taubeの炉は球状であるが、通常の炉心と同様、円柱状にした。そして、炉心の内部にF P装荷領域、その外側に燃料領域を設けた。Fig.3-1にこれまで検討してきた従来のF P消滅炉¹⁾と今回検討した改良型消滅炉の断面図を示す。従来の消滅炉は、構造上の理由（燃料棒の取り出し等）から、F P領域の外側円周に沿って燃料領域を設けた。（それ故、上下には燃料はない。）改良型消滅炉では、fluxをできるだけ上げる観点からF P領域を完全に燃料で囲んだ。更に、従来の消滅炉の問題点であるF P領域と燃料領域の境界部分における鋭い出力ピークを抑えるため、境界部分にF P領域からの熱中性子をカットする吸収材としてB₄Cを置いた。但し、Bは天然のBとした。したがって、¹⁰Bの存在比は19.8w/o、¹¹Bのそれは80.2w/oである。

Table 3-1に消滅炉の組成を示す。消滅対象F P核種は原子炉からの発生量が多く、放射能レベルが高い¹³⁷Csとした。¹³⁷Csはチェルノブイリ事故で問題となった核種であり、また、ガラス固化体にしたときの発熱源になる核種である。¹³⁷Csは中性子数がmagic numberであるため、中性子反応断面積が小さく、消滅が最も難しい核種と考えられている。もし、¹³⁷Csが効率的に消滅可能であることを示せたならば、他のF P核種（¹³⁷Csより断面積が大きい）は容易に消滅できるだろう。

¹³⁷Csは¹³⁷CsODとして装荷するものとした。これは¹³⁷Cs単独よりも¹³⁷CsODの方が密度が大きく、より多くの¹³⁷Csを装荷することができ、更に、重水素Dは減速材として働くので、燃料領域で発生した高速中性子を減速するのに新たな領域を設ける必要がないからである。水素Hの方が重水素Dより減速能は大きい、中性子吸収断面積が大きい、中性子損失が多くなるので、¹³⁷CsODとした（Table 3-1参照）。

燃料は前年度までの検討の結果、金属燃料U-Pu-10Zrが有利であることが判明したので、それを用いることにした。燃料形態は板状、粒子状や熔融塩などにせず、通常のピン形状を考えた。反射体はSUS316とした。

3.1.2 消滅率の定義

ここで消滅率を定義する。消滅炉で ^{137}Cs を消滅処理する場合、消滅炉自身からも ^{137}Cs 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により発生する ^{137}Cs 量を差し引いたものである。消滅炉の消滅率 F を単位時間の正味の消滅量を ^{137}Cs 装荷量で除したもので定義する。即ち、

$$\text{消滅率 } F = \frac{\text{単位時間の正味の消滅量}}{^{137}\text{Cs 装荷量}} \quad \text{-----} \quad (1)$$

である。消滅炉一基当たりに装荷される ^{137}Cs 量を N 、 ^{137}Cs 量の崩壊定数及び (n, γ) 反応断面積をそれぞれ λ, σ 、 Cs 領域の平均熱中性子束を ϕ_{th} 、単位時間に消滅炉から発生する ^{137}Cs 量を w (Table 3-2参照) とすると、単位時間の正味の消滅量 T は、

$$T = N\lambda + N\sigma\phi_{th} - w \quad \text{-----} \quad (2)$$

と表せる。(2)式右辺第1項は自然崩壊による ^{137}Cs 消滅量、第2項は (n, γ) 反応による消滅量である。その2つの和より消滅炉からの発生量 w を引けば正味の消滅量になる。消滅量を上げるためには、 ^{137}Cs は常に消滅炉に満杯である方がよい。したがって、 N は定数とし、 ^{137}Cs の減少分は常に外部から補うものとする。

(1), (2)式より消滅率 F は次式で与えられる。

$$F = \frac{T}{N} = \lambda + \sigma\phi_{th} - w / (\rho \cdot V_{cs}) \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$\text{但し、} N = \rho \cdot V_{cs} \quad \text{-----} \quad (4)$$

で、 ρ は Cs 領域中の ^{137}Cs の密度、 V_{cs} は Cs 領域の体積である。(3)式で λ, σ, ρ は定数であるが、 ϕ_{th}, w, V_{cs} は炉心パラメータによる。

Cs 領域のfluxがいくら高くても、 Cs 領域が小さく Cs 装荷量が少なければ、消滅量は少ないので効率的な消滅炉とは言えない。一方、 Cs 領域が大きいと、

一般にCs領域のfluxは低下するが、装荷量が多いので消滅量は増加する。しかし、この場合の消滅量は自然崩壊によるものが多く、消滅炉自身から発生する ^{137}Cs 量を考慮すると、消滅炉は単に貯蔵容器の役割しか持たなくなる。消滅量やflux, ^{137}Cs 装荷量や消滅炉自身からの発生量を考慮して定義されたのが消滅率Fであり、これによって消滅炉の消滅特性を適切に評価できる。

3.1.3 炉心特性の目標

3.1.2の(3)式において、自然崩壊のみによる消滅率Fは、 $\phi_{th} = w = 0$ とみると

$$F_{nat} = \lambda \cong 2.3 \% / y \text{ ----- (5)}$$

である。この値よりも消滅炉の消滅率ができるだけ大きくなることが望ましい。

従来の消滅炉は、消滅率Fが良いときは燃焼反応度劣化 Δk や出力ピーキング係数Pe悪かったり、逆に Δk , Peが良いときはFが悪かったりした。F及び Δk , Peが共に良い消滅炉が望ましいが、これらは互いに相反する傾向にあるので、今回これらのパラメータに目標値を設け、パラメータ解析を実施した(3.3参照)。

目標値は消滅炉に関しては自然崩壊の1.5倍以上、燃焼反応度劣化と出力ピーキング係数は高速炉並とした。設定した目標値は次の通りである(Table 3-2)。

$$\left\{ \begin{array}{l} F \geq 3.5 \% / y \\ \Delta k \leq 3 \% / y \\ Pe \leq 1.7 \end{array} \right. \text{ ----- (6)}$$

3.2 解析手法

FP消滅炉の炉心計算で用いた核定数は、JENDL-2ライブラリーから作成された高速炉用群定数JFS-3-J2である。これを26群に縮約し、拡散計算コードCITATIONにて炉心計算を実施した。Table 3-3にJFS-3-J2の70群構造を示す¹¹⁾。Table 3-4に本解析で用いた26群のエネルギー群構造を示す。

Fig.3-2は本解析で使用した炉心解析コードシステムの流れ図である。これは、以前動燃で大型炉炉心解析用に整備されたコードシステムである。まず、マイクロ断面積と、共鳴自己遮蔽因子をf-テーブルの形で考慮しているUser Library(JAERI FAST SET-3)を、1次元拡散コードEXPANDA-GSⅡで処理する。これによって、詳細群(70群)の中性子束と実効マイクロ断面積を求める。この2つの物理量を用いて、MICLIB-Ⅱコードで、CITATION用少数群実効マイクロ断面積を縮約することによって求める。MICLIB-Ⅱコードの出力ファイルは、縮約実効マイクロ断面積ファイルISOTXSと動特性パラメータファイルDLAYXSである。この2つのファイルを、PRECITコードに入力して、CITATION用のマイクロ断面積ファイルを作成する。この断面積のうち ^{151}Eu と ^1H の捕獲及び輸送断面積をENDF/B-IVから作成した26群の ^{137}Cs と ^2D の断面積にSUBSTコードで置き換える。こうしてできた断面積ファイルを拡散コードCITATIONに入力して炉心計算を行った。

ここでSUBSTコードによって ^{151}Eu と ^1H の中性子捕獲及び輸送断面積を ^{137}Cs と ^2D のものと置き換えているが、これはJFS-3-J2に消滅炉炉心計算で必要となる ^{137}Cs 及び ^2D の断面積データが存在しないためであり、現在、ENDF/B-IVよりNJOYコードを使ってこれらの核種の断面積を処理し、これらの核種を含んだJFS-3-J2の改訂版を作成中である。したがって、本解析では ^{137}Cs と ^2D の中性子吸収断面積及び輸送断面積は正確なデータを使用しているが、それ以外はJFS-3-J2の近傍の核種である ^{151}Eu と ^1H のデータで代用していることになる。

最近、原田らによって ^{137}Cs の熱中性子吸収断面積が測定された^{12,13)}。それによると断面積は0.25 barnであり、1960年にStupegiaによって測定され¹⁴⁾、現在広く核データに用いられている値0.11 barnよりも2.3倍大きい値となった。原田らは測定に高エネルギー分解能のGe検出器を用い、更に、測定試料の化学分離を行って不純物を除去しているため、測定値は精度が良く、信頼性が高いと考えられる^{12,13)}。一方、Stupegiaは分解能の悪いNaI検出器を使用し、化学分離も行っていない。

現在、 ^{137}Cs の断面積に関しては、新しい測定値を持つものも作成中であり、それもJFS-3-J2に追加の予定である。今回の炉心計算においては、 ^{137}Cs の熱中性子吸収断面積は0.11 barnを使用しているが、新しい測定結果を反映させるために消滅率を計算する際には、断面積 σ を0.25 barnとして計算した。炉心計算

では ^{137}Cs の熱中性子吸収断面積に0.11 barnを使用しているため、0.25 barnを使用したときよりCs領域のfluxをoverestimateしている可能性が高いが、今回は消滅率の上限を把握する意味で消滅率の計算には0.25 barnを使用した。今後、新しい断面積を持つ ^{137}Cs のデータを整備した後、それを用いて炉心計算を実施する予定である。

燃焼計算は稼働率80%で1年間運転するものとして行った。タイムステップは、0, 20, 40, 82, 124, 166, 208, 250, 292日である。また、燃焼計算においては、核分裂で発生するFPの断面積も重要となってくる。JFS-3-J2ではFPの断面積は親核種毎に、そして、燃焼度毎にランプ化されて収納されている。このランプ化定数は高速炉用のものであるが、FP消滅炉のFP領域は熱中性子主体のスペクトルであるので、FP領域との境界近傍の燃料はその影響でスペクトルが軟らかくなっている。高速炉体系の硬いスペクトルの下で作られたFPランプ化定数には、熱中性子吸収断面積が大きいXeやSmなどが大きな重みでランプ化されている。(これらの核種は熱中性子炉では熱中性子を吸ってかなりなくなるが、高エネルギーの中性子吸収断面積はそれ程大きくないので、高速炉では残っている。)したがって、高速炉用FPランプ化定数を消滅炉体系に使用し、燃焼計算を行うと、実際より反応度劣化が大きく評価されることが予想される。そこで、熱中性子炉用FPランプ化定数を作成し、JFS-3-J2に追加した。そして、FP領域に近い燃料領域には作成した熱中性子炉用FPランプ化定数を使用した。熱中性子炉用FPランプ化定数の作成に関してはAppendix Aに記述した。燃焼計算におけるFPランプ化定数の違いによる実効増倍率の変化の相違は4章で述べる。

3.3 炉心特性のパラメータ解析

この節では消滅炉の炉心特性のパラメータ解析を実施した結果について述べる。3.1で述べた炉心構成を基準として炉心設計パラメータを選び、それを変化させて炉心特性を調べた。変化させた炉心パラメータは出力密度、Cs領域の炉心による体積割合、B₄C領域の厚さ等である。3.1.1でも述べたようにB₄C領域は出力ピークの原因となるCs領域からの熱中性子を吸収するために設けた。その熱中

中性子吸収材としてのB₄CをSUSに変えた場合についてその効果を調べた。更に、燃料領域を2領域に分け、Pu富化度を変えた場合の特性を調べた。今回変化させなかったパラメータ（燃料種類、燃料体積比など）は、前年度までの成果を反映させて固定した。以上のパラメータ解析で得られた結果のうち、3.1.3で設定した炉心特性の目標を満足し、かつ、消滅率が最も良いケースをoptimizeしたFP消滅炉心としてその構成と特性をまとめた。

3.3.1 炉心設計パラメータ

炉心設計において重要となるパラメータは、出力、出力密度、燃料種類、燃料体積比、Pu富化度等である。消滅炉設計においては、FP装荷量も重要なパラメータである。この項では、消滅炉の炉心設計パラメータについて述べる。

従来の消滅炉体系で行った燃焼計算の結果、燃焼による反応度劣化は、MOX燃料より金属燃料の方が抑えられ、燃料体積比はできるだけ大きい方が有利であることが判った。そこで、改良型消滅炉の炉心パラメータとして、燃料種類は金属燃料に、燃料体積比は現在の炉心構造の幾何学的制限内で最大と考えられる55%（ダクトレス集合体に相当する）に選んだ。金属燃料はスエリングが大きいので、スミア密度を75%TDと低くした。また、被覆管の燃料との共晶反応物の融点の向上を図るため、10%のジルコニウムを添加するものとした^{15, 16)}。Pu富化度は初期炉心が臨界となるように決めた。

出力は従来型と同じく3.5GW_{th}とした。この値はoptimizeして決めた訳ではないが、FP装荷量を増やし、燃焼反応度的に不利とならず、技術的にも無理のない範囲であるという観点から設定した。ここで注意してほしいのは、出力密度一定の下で出力を上げ炉を大型化すると、FP装荷量を増やすことができ、また、中性子のもれが少なくなるので、燃焼反応度的に有利になるが、出力の増加に伴い、消滅炉自身から発生するFP量も増加するので、消滅特性的に必ずしも有利になるとは限らないことである。出力密度(Pd)は消滅炉のFP消滅性能の向上には最も有力なパラメータであるので¹⁾、1つの値に固定せず、パラメータとして変化させた。

前年度までの研究で、3.1.2で定義した消滅率はCs装荷量に関して極大値を持

つことが判った^{1, 3, 4)}。Cs 装荷量はCs 領域の体積に依存するので、本解析ではCs 装荷量に対応するパラメータとして、Cs 領域の炉心に対する体積割合 (Ra) を選んだ。

消滅炉の寸法は次のようにして決めた。まず、炉心の外径と高さを等しくした。これによって同じ炉心体積の円柱状炉心では、中性子のもれが最も少なくなることが期待できる。Cs 領域など各領域の外径と高さも等しくおいた。このとき出力、出力密度、Cs 領域の炉心に対する体積割合、B₄C 領域の厚さを定めると、消滅炉の寸法は一意的に決まる。Fig.3-3のように r_A, r_B, Rを決めると、それらは

$$\left\{ \begin{array}{l} V_F = \pi R^2 \cdot 2R - \pi r_B^2 \cdot 2r_B = P / Pd \\ V_{Cs} = \pi r_A^2 \cdot 2r_A = Ra \times \pi R^2 \cdot 2R \quad \text{-----} \quad (7) \\ r_B - r_A = \Delta \end{array} \right.$$

を解くことによって求まる。ここで、

- P : 出力
- Pd : 出力密度
- V_{Cs} : Cs 領域の体積
- V_F : 燃料領域の体積
- Ra : Cs 領域の炉心に対する体積割合
- Δ : B₄C 領域の厚さ

である。Table 3-5にB₄C 領域の厚さが2 cmと1 cmの場合のいくつかのPd, Raに対する r_A, r_B, Rの具体的な数値を示す。但し、出力は3.5 GW_{th}, 反射体の厚さは40 cmとした。

以上述べた消滅炉の炉心設計パラメータをTable 3-6にまとめた。

3.3.2 出力密度及びCs領域の体積割合依存性

B₄C領域の厚さが2cmのときの消滅炉の炉心特性に対する出力密度及びCs領域の体積割合依存性を調べた。Fig.3-4にCs領域の炉心に対する体積割合(R_a)と消滅率(F)の関係を示す。R_aが大きい程、Fは増加しているが、増加の仕方は鈍っていることが判る。更にR_aを増やすとFは減少に転じる。その理由をFig.3-5を用いて説明する。

Fig.3-5はCs領域の体積割合(R_a)に関する消滅率への自然崩壊(λ)、(n, γ)反応($\sigma\phi$)、消滅炉自身からの¹³⁷Cs発生率(w/N)の寄与である。 λ はR_aに依存せず一定である。Cs領域の中性子束 ϕ は、一般にR_aが増加するとCsの中性子吸収が増えるので減少する。 σ はR_aに依らないので、 $\sigma\phi$ はR_aに関して単調に減少する。R_aが増加すると¹³⁷Cs装荷量Nは増加するので、w/Nは減少する。したがって、負の寄与(-w/N)は減少し、消滅率Fを増加させる働きをする。R_aが小さいところでは、R_aの増加に対する(-w/N)の増加の方が $\sigma\phi$ の減少より大きく、Fは増加するようになる。ところが、R_aが大きいところでは、Nは十分大きくなり、w/Nの寄与は無視できるようになるので、 $\sigma\phi$ の減少の効果が効いて、Fは減少するようになる。結局、FはR_aに関して極大値を持つようになる。

Fig.3-6にCs領域の炉心に対する体積割合(R_a)と燃焼反応度(Δk)の関係を示す。出力、出力密度一定の条件の下では、燃料体積は一定であるからR_aが大きくなると燃料は外に押しやられるようになるので、燃料領域の厚さは薄くなる。そうなるに相対的に表面積が大きくなるので、中性子のもれが増え、反応度は悪くなる。

Fig.3-7,8に出力密度(P_d)と消滅率(F)及び燃焼反応度(Δk)の関係を示す。一般に、出力密度が高くなれば消滅に利用できる中性子数が増えるので、消滅率は良くなる。しかし、R_a = 10%のケースはかえって悪くなっている。これは、Cs領域の体積割合(R_a)が一定でも、出力密度が増加すれば出力一定の条件では炉心は小さくなるので、Cs装荷量は減少するが、R_a = 10%のようにR_aが小さいところでは、Cs装荷量の減少に伴う消滅率Fの(-w/N)の負の寄与の方が出力密度の増加に伴う $\sigma\phi$ の増加よりも効くためである(Fig.3-

5参照)。

Fig. 3-8から判るように燃焼反応度は、出力密度が高くなるとそれだけ燃料がよく燃えるので悪くなる。今、 Δk の目標値は $3\%/y$ 以下であるから (Table 3-2参照)、それを満たすものは、 $R_a = 10\%$ の場合は $P_d = 900W/cc$ 以下、 $R_a = 20\%$ の場合は、 $P_d = 600W/cc$ 以下である。 $R_a = 30\%$ の場合は、計算を行った範囲では該当するものはない。Fig. 3-7で明らかのように $R_a = 10\%$ のケースの消滅率は悪い。したがって、 $R_a = 20\%$ 、 $P_d = 600W/cc$ が $\Delta k \leq 3\%/y$ を満たし、かつ、消滅率の最もよいケースである。しかし、出力密度が $600W/cc$ のピン状燃料の原子炉の設計は技術的に難しく、将来技術を期待しても実現はかなり先になるものと予想される。一方、出力密度 $500W/cc$ は、常陽のMK-IIが約 $470W/cc$ であることを考えると近い将来達成できる可能性の高い出力密度である。また、Fig. 3-7から判るよう出力密度を $500W/cc$ から $600W/cc$ に上げててもそれほど消滅率は増加しない。以上のことから技術的達成度を考慮した燃焼反応度 $3\%/y$ 以下を満たす消滅率の良い体系は $P_d = 500W/cc$ 、 $R_a = 20\%$ であることが判った。しかし、このとき消滅率は $3.168\%/y$ で目標値 $3.5\%/y$ 以上を満たしておらず、消滅率向上のための改良が必要である。

出力ピークに関しては、 B_4C を $2cm$ もまけば十分抑えられ、計算した全てのケースで出力ピーキング係数は 1.5 以下である。Fig. 3-9に $P_d = 500W/cc$ 、 $R_a = 20\%$ の場合の改良型消滅炉の径方向の出力分布を示す。比較としてFig. 3-10に従来の消滅炉の典型的な出力分布を示す。Fig. 3-10から従来型消滅炉ではCs領域で熱化された中性子が燃料領域に戻って来るので、境界付近で鋭い出力のピークが生じていることが判る。改良型消滅炉では熱中性子は B_4C に吸収されるので、境界での出力ピークは生じない。燃料領域での出力分布は通常の原子炉と同様である。

以上述べた改良型消滅炉の特性をTable 3-7にまとめた。

3.3.3 B_4C 、SUSの効果

Cs領域からの熱中性子の吸収材として挿入した B_4C は、わずかではあるが高速中性子も吸収する。したがって、 B_4C 領域が薄ければ、燃料領域で発生した高

速中性子がCs領域に流入する割合は多くなり、その結果、Cs領域の中性子束は上がることが期待できる。そこで、消滅率を上げるためB₄C領域の厚さを2cmから1cmに変えて計算を行った。Table 3-8にB₄C領域の厚さが1cmの場合の改良型消滅炉の特性を示す。また、Fig.3-11にPd=500W/cc, Ra = 20%のときのB₄C領域の厚さと消滅率及びCs領域の平均熱中性子束の関係を示す。Table 3-8とTable 3-7を比較すると、B₄C領域の厚さが1cmの場合の方が2cmの場合に比べCs領域の熱中性子束が上がっているため、消滅率は良くなっていることが判る。燃焼反応度、出力ピーキング係数はあまり変わっていない。B₄C = 1cmの場合も2cmの場合と同様、Pd=500W/cc, Ra = 20%の場合が燃焼反応度と出力ピーキング係数の目標値（制限値）を満たし、かつ、消滅率の良い体系である。しかも、このとき消滅率は3.607%/yで目標値の3.5%/yを越えている。したがって、改良型消滅炉で出力密度を500W/cc, Cs領域の炉心に対する体積割合を20%, B₄C領域の厚さを1cmとすれば、消滅炉の炉心特性の目標値（Table 3-2参照）を全て満足する。

Fig.3-12はB₄C領域の厚さが1cmと2cmの場合の径方向の出力分布である。B₄Cは強い熱中性子吸収体なので、Cs領域からの熱中性子は十分吸収され、境界付近の出力ピークはB₄C領域の厚さを1cmとしても生じていない。2つの場合で出力分布はほぼ同じで、通常の高速炉と同様に燃料領域の中心付近が一番出力が高い。若干のずれは寸法の違いによる。しかし、消滅処理の観点からすると出力はCs領域に近い部分で高くなることを望ましい。というのは、Cs領域の中性子は主に境界付近の燃料で発生したものである。境界付近の出力を上げるために3.3.4で燃料領域を2領域に分け、Cs領域に近い部分の燃料のPu富荷度を上げることによって、Cs領域のfluxを上げることを試みる。しかし、その前にここではB₄Cより熱中性子吸収断面積の小さいSUSを熱中性子吸収材として用いたときの効果を調べる。

Fig.3-13にSUSの厚さを変えたときの径方向と軸方向の出力分布を示す。但し、出力密度、Cs領域の体積割合はそれぞれ500W/cc, 20%である。SUSはB₄Cほど強い熱中性子吸収体ではないので、SUSの厚さが1cmと薄いとCs領域からの熱中性子を十分吸収できず、出力ピークが生じていることが判る。しかし、SUSを8cmと厚くすると熱中性子は十分吸収され、出力ピーク

は生じず、出力分布はB₄Cのときと同じになる (Fig.3-12参照)。出力ピーク的位置もSUSの厚さを厚くするにつれて、Cs領域との境界から燃料領域の中心に移行する (Fig.3-14参照)。

Fig.3-15にSUS領域の厚さとCs領域の平均熱中性子束及び出力ピーキング係数との関係を示す。SUSはCs領域からの熱中性子を吸収するほかに、燃料領域からの高速中性子も吸収する。そのためSUSの厚さを厚くするとCs領域に流れ込む高速中性子が少なくなり、その結果、熱中性子束は減少する。fluxが下がるので、消滅率もSUS領域の厚さの増加とともに減少する (Fig.3-16参照)。Fig.3-15から出力ピーキング係数の目標値1.7以下を満足させるには、SUS領域の厚さは2.6 cm以上必要であることが判る。しかし、このとき消滅率の目標値3.5%/y以上を満足しない (Fig.3-16参照)。燃焼反応度に関しては、Fig.3-17から目標値3.0%/yを十分満たしていることが判る。以上よりB₄Cの代わりにSUSをまいた体系では目標値を全て満足させることはできないことが判る。SUSの厚さに対する消滅炉の核特性をTable 3-9にまとめた。

3.3.4 燃料領域2領域炉心

3.3.3で出力密度 $Pd=500\text{ W/cc}$, Cs領域の炉心に対する体積割合 $Ra=20\%$ でB₄C領域の厚さを1 cmとすれば、消滅炉の炉心特性の目標値を全て満足することが判った。ここではさらに消滅率を上げるために燃料領域を2領域に分け、Cs領域に近い側のPu富化度を上げることによってCs領域のfluxを上げることが試みる。

Fig.3-18に燃料領域2領域炉心のr zモデルを示す。但し、 $Pd=500\text{ W/cc}$, $Ra=20\%$, B₄C領域の厚さ=1 cmである。燃料領域をCs領域に近いINとそれ以外のOUTの領域に分け、INのPu富化度をOUTより高くする。はじめINの厚さを5 cmに固定してINのPu富化度を10, 15, 20 w/oと変化させた。OUTのPu富化度は体系が臨界になるように調整した (大体10 w/o程度)。Fig.3-19にPu富化度比 (IN/OUT) と出力ピーキング係数及び消滅率との関係を示す。Pu富化度比が増加すれば、即ち、INのPu富化度が増加すれば、INの領域の出力は上昇し、出力ピーキング係数は増加す

るようになる。それにつれてC s領域のfluxは上がり、消滅率は増加する。出力ピーキング係数が制限値1.7となるときのPu富化度比は約1.72であり、そのときの消滅率は3.81%/yである。

次に、内側燃料領域INのPu富化度を15w/oに固定し、INの厚さを変化させた。その結果をFig.3-20に示す。INの厚さが増加するとその領域の出力が上昇するので(Fig.3-21参照)、出力ピーキング係数は増加する。INの出力が増加すれば、そこからCs領域に流入する中性子束が増えるので、消滅率は増加する。制限値1.7のときのINの厚さは、7.5cmで、このとき消滅率は3.84%/yである。この値はPu富化度を変えたときの出力ピーキング係数の制限内での最大値3.81%/yよりも大きい。

燃焼反応度に関しては、いずれも目標値の3%/y以下になることを確認した。内側燃料領域INのPu富化度を上げるとINの燃料はそれだけよく燃えるので燃焼反応度は悪くなると思われるが、初期炉心で臨界となるために外側燃料領域OUTのPu富化度を変えており、INのPu富化度を上げたり、INの厚さを厚くするとOUTのPu富化度は下がるので、 ^{238}U が増加する分、燃焼反応度は良くなる。つまり、燃焼反応度はINでは悪くなるが、OUTでは良くなる。全体として、INのPu富化度や厚さを変えても燃焼反応度はあまり変わらずほぼ1.8%/yであった。

3.3.5 FP消滅炉心の特性

3.3.4で燃料領域を2領域に分け、Cs領域に近い燃料領域のPu富化度を上げることによって消滅率の向上を試みた。その結果、出力ピーキング係数及び燃焼反応度の制限内で最も消滅率の良い体系は、内側燃料領域のPu富化度が15w/oで厚さが7.5cmのときであることが判った。そこで、この炉心をoptimizeされたFP消滅炉心とし、その構成をTable 3-10にその特性をTable 3-11にまとめた。

^{137}Cs 装荷量は5750kgであり、 ^{137}Cs 消滅量は年間220.5kgである。この消滅量は消滅炉自身からの発生量を差し引いた正味の消滅量である。即ち、optimizeされたFP消滅炉心は自分自身から生ずる ^{137}Cs 以外に外部原子

炉からの ^{137}Cs を年間220.5kg消滅できる。この量は100万kW。軽水炉約7基分からの発生量である。それ故、100万kW。級の軽水炉7基に消滅炉1基を作れば、発生した ^{137}Cs は全て消滅できることになる。

FP消滅炉心の消滅率は3.84%/yで自然崩壊の約1.7倍である。Cs領域の平均熱中性子束は、 $3.05 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、燃焼反応度は1.83%/y、出力ピーキング係数は1.7である。

3.4 その他の炉心概念

これまでは炉心の中央にCs領域を設け、燃料領域で発生した高速中性子を減速、熱化してCsに照射し消滅させることを考えた。熱中性子にする理由は、 ^{137}Cs の中性子吸収断面積のエネルギー依存性が $1/v$ 則を示すので、高速中性子より熱中性子の方が断面積が大きいからである。しかし、 ^{137}Cs には3keV付近に共鳴領域が存在する。共鳴吸収の断面積は熱中性子のそれより大きい。そこで、共鳴吸収を利用した ^{137}Cs の消滅処理を考察した。それについて3.4.1で述べる。

Cs領域を炉心の中央に設けたのは、回りが全て燃料領域なので流入する中性子が多くなり、fluxを上げることができると考えたからである。しかし、この体系はあまりCs装荷量を増やすことはできない。なぜなら、Cs領域を大きくすると反応度的に悪くなるからである。これに対してCs領域を炉心の外側に設けた体系では、Cs装荷量を多くすることができ、Cs領域を大きくしても炉心の外なので、反応度的に不利にならない。3.4.2で外側Cs領域消滅炉について検討する。

3.4.1 共鳴吸収を利用した ^{137}Cs 消滅炉の検討

ENDF/B-IVのデータを見ると ^{137}Cs の中性子吸収断面積には、中性子エネルギーが数keVのところ共鳴領域が存在する（Fig.3-22参照）。核分裂で発生した高速中性子をうまく減速してこの領域のfluxを高くすると、効率的な ^{137}Cs の消滅が期待できる。

核分裂で発生した中性子は炉内の原子核と弾性散乱を繰り返すことによってエネルギーを失う。はじめに持っていたエネルギーをあるエネルギーまで下げるの

に必要な平均衝突回数の解析的な式が最近導出された¹⁷⁾。この式を用いて中性子のエネルギーを共鳴領域に持つていくための平均衝突回数が計算できる。しかし、実際問題として衝突回数を制御することは非常に困難である。そこで、ここでは減速材をいろいろ変えてみて共鳴領域のfluxが高くないかどうかを調べてみた。

Fig.3-23に示す体系でCs領域の減速材をいくつか変えたときのCs領域の中性子スペクトルを計算した。減速材と言っても減速材領域を設けたり、Cs領域に新たに減速材を入れたりせず、 ^{137}Cs 装荷の化学形態を変えることで対処した。行った計算は、 ^{137}Cs の化学組成を $^{137}\text{CsOD}$ とし、Dの割合を人為的に変えた場合と ^{137}Cs にO, C, Beをそれぞれ混ぜた場合である。

Fig.3-24にCs領域に $^{137}\text{CsOD}$ を装荷し、Dの割合を人為的に変えたときのスペクトルの変化を示す。Dを0%から増やしていくと、スペクトルの山が形を崩さずに低エネルギー側にshiftするのではなく、全体的に広がってしまうことが判る。そして、熱中性子束が急激に増加することが判る。共鳴吸収が起こる3 keVでは、fluxは $10^{14}\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$ のオーダーでまだまだ低い。

Fig.3-25はCs領域に $^{137}\text{Cs}\cdot\text{O}$, $^{137}\text{Cs}\cdot\text{C}$, $^{137}\text{Cs}\cdot\text{Be}$ をそれぞれ装荷したときのスペクトルである。 $^{137}\text{Cs}\cdot\text{O}$ ではスペクトルの山の位置が共鳴ピーク位置 $E_n=3\text{keV}$ より大きいので、もっと減速させるつもりで減速のよいCやBeを入れた。しかし、その結果、山の位置は変わらず、単にスペクトルが広がり、若干共鳴位置でのfluxが上がっただけだった。

Table 3-12,13に上記のケースにおける3 keV中性子束及び熱中性子束、そして3 keV中性子と熱中性子が吸収される割合を示す。更に、発生中性子の何%が ^{137}Cs に吸収されたかも示した。

以上の解析から減速材を変えて共鳴領域のfluxのみを高くすることは困難であることが判った。Fig.3-23のような単純な体系では、共鳴領域を利用するよりも熱中性子で ^{137}Cs を消滅する方が有利であると思われる。

3.4.2 炉心外側にCs領域を設けた計算

これまでは炉心の中央にCs領域を設けた消滅炉の炉心計算を行ってきた。こ

ここでは炉心の外側にCs領域を設け、消滅率やCs領域の熱中性子束がどうなるかを検討する。

検討した外側Cs領域消滅炉の体系は、Fig.3-26に示す通りである。出力は3.5 GW_{th}、出力密度は500 W/ccとし、¹³⁷Csは¹³⁷CsODとして装荷するものとした。Cs領域の厚さを変化させて消滅率とCs領域の平均熱中性子束を調べた。Fig.3-27にその結果を示す。平均熱中性子束は 10^{14} n/cm²·sのオーダーであり、消滅率は自然崩壊のみによるときの値2.3より小さい。これは中性子束が低いので、消滅量よりも消滅炉自身から発生してくる¹³⁷Csの方が多いうことを意味する。Cs領域の厚さが厚い程、熱中性子束が高くなるのは、減速材としての重水素Dの量が増えるからである。熱中性子束が高くなるので、消滅率は良くなる。しかし、良くてせいぜい自然崩壊程度である。

Cs領域の厚さが20 cmのとき¹³⁷Cs装荷量は16 tonもある。炉心外側にCs領域を設けるメリットは、¹³⁷Cs装荷量を増やすことができることである。しかし、中性子束が上がらないので、(n, γ)反応による消滅量は少なく、消滅炉自身からの発生量と同程度である。したがって、¹³⁷Csの消滅は自然崩壊によるものとほぼ等しくなり、消滅炉は単なる貯蔵容器の意味しか持たなくなる。

以上の解析は、出力3.5 GW_{th}の大型炉に対する解析結果であるが、一般に小型炉の方が中性子のもれが多いので、Cs領域を燃料領域の外側に設けた体系では、小型炉の方がCs領域の中性子束が上がり有利であると考えられる。しかし、小型炉は燃焼による反応度劣化が大きくなり、燃焼反応度に関して不利になる。出力規模を変化させることにより中性子束や燃焼反応度に関してoptimizeされた体系が判り、その体系における消滅率は上記の結果より良いことが期待されるが、上記の結果から出力3.5 GW_{th}の大型の消滅炉に関しては、¹³⁷Csの消滅の観点からCs領域を炉心の外側に設けるのは得策ではないように思われる。

Table 3-1 消滅炉の組成

領域	材料	体積比 (%)	密度 (g/cm ³)
Cs領域	¹³⁷ CsOD	100	3.675
B ₄ C領域	B ₄ C	100	2.52
燃料領域	Metal*	55	15.9
	SUS316**	15	7.98
	Na	30	0.85
反射体領域	SUS316**	80	7.98
	Na	20	0.85

(*) Metal燃料の組成

(**) SUS316の組成

U-Pu-10w/oZr	密度	7.98 g/cm ³
密度	15.9 g/cm ³	
スミア密度	75 %T.D.	
U234	0.0056 w/o	Fe
U235	0.7110 w/o	Cr
U238	99.2834 w/o	Ni
		Mo
		Mn
Pu239	80.0 w/o	
Pu240	10.0 w/o	
Pu241	10.0 w/o	

Table 3-2 消滅炉の炉心特性の目標値

消滅率 F	3.5 % / y	以上
燃焼反応度 Δk	3.0 % / y	以下
出力ピーキング係数 Pe	1.7	以下

$$\text{消滅率 } F = \frac{\text{単位時間の正味の消滅量}}{^{137}\text{Cs 装荷量}}$$

$$F = \lambda + \sigma(n, \gamma)\phi_{th} - w / N$$

λ : ^{137}Cs の崩壊定数

$\sigma(n, \gamma)$: ^{137}Cs の (n, γ) 反応断面積

ϕ_{th} : Cs 領域の平均熱中性子束

w : 単位時間当りに消滅炉から発生する ^{137}Cs 量*)

N : ^{137}Cs 装荷量

$$\Delta k = (k_{eff}^{max} - k_{eff}^{min}) / (k_{eff}^{max} \cdot k_{eff}^{min})$$

$$Pe = (\text{最大出力密度}) / (\text{平均出力密度})$$

*) $w (s^{-1}) = Y \times P (GW_{th}) / [E_{fiss} (MeV) \times 1.60219 \times 10^{-22} (GJ/MeV)]$

Y : ^{137}Cs の核分裂収率 (~6%)

P : 消滅炉の熱出力

E_{fiss} : 1 回の核分裂で放出されるエネルギー (~200MeV)

Table 3-3 JFS-3-J2の70群構造¹⁾

Group	Upper energy	Lower energy	Lethargy width
1	10.0 (MeV)	7.7880 (MeV)	0.250
2	7.7880	6.0653	0.250
3	6.0653	4.7237	0.250
4	4.7237	3.6788	0.250
5	3.6788	2.8650	0.250
6	2.8650	2.2313	0.250
7	2.2313	1.7377	0.250
8	1.7377	1.3534	0.250
9	1.3534	1.0540	0.250
10	1.0540	0.82085	0.250
11	0.82085	0.63928	0.250
12	0.63928	0.49787	0.250
13	0.49787	0.38774	0.250
14	0.38774	0.30197	0.250
15	0.30197	0.23518	0.250
16	0.23518	0.18316	0.250
17	0.18316	0.14264	0.250
18	0.14264	0.11109	0.250
19	0.11109 (MeV)	0.086517 (MeV)	0.250
20	86.517 (keV)	67.379 (keV)	0.250
21	67.379	52.475	0.250
22	52.475	40.868	0.250
23	40.868	31.828	0.250
24	31.828	24.788	0.250
25	24.788	19.305	0.250
26	19.305	15.034	0.250
27	15.034	11.709	0.250
28	11.709	9.1188	0.250
29	9.1188	7.1017	0.250
30	7.1017	5.5308	0.250
31	5.5308	4.3074	0.250
32	4.3074	3.3546	0.250
33	3.3546	2.6126	0.250
34	2.6126	2.0347	0.250
35	2.0347 (keV)	1.5846 (keV)	0.250

Table 3-3 (続き)

Group	Upper energy	Lower energy	Lethargy width
36	1.5846	1.2341	0.250
37	1.2341 (keV)	0.96112 (keV)	0.250
38	961.12 (eV)	748.52 (eV)	0.250
39	748.52	582.95	0.250
40	582.95	454.00	0.250
41	454.00	353.58	0.250
42	353.58	275.36	0.250
43	275.36	214.45	0.250
44	214.45	167.02	0.250
45	167.02	130.07	0.250
46	130.07	101.30	0.250
47	101.30	78.893	0.250
48	78.893	61.442	0.250
49	61.442	47.851	0.250
50	47.851	37.267	0.250
51	37.267	29.023	0.250
52	29.023	22.603	0.250
53	22.603	17.603	0.250
54	17.603	13.710	0.250
55	13.710	10.677	0.250
56	10.677	8.3153	0.250
57	8.3153	6.4760	0.250
58	6.4760	5.0435	0.250
59	5.0435	3.9279	0.250
60	3.9279	3.0590	0.250
61	3.0590	2.3824	0.250
62	2.3824	1.8554	0.250
63	1.8554	1.4450	0.250
64	1.4450	1.1254	0.250
65	1.1254	0.87642	0.250
66	0.87642	0.68256	0.250
67	0.68256	0.53158	0.250
68	0.53158	0.41399	0.250
69	0.41399	0.32242	0.250
70	0.32242 (eV)	10^{-5} (eV)	10.650

Table 3-4 26群のエネルギー群構造

Group	Upper energy	Lower energy
1	10.0 (MeV)	6.0653 (MeV)
2	6.0653	4.7237
3	4.7237	2.8650
4	2.8650	1.3534
5	1.3534	0.82085
6	0.82085	0.38774
7	0.38774	0.18316
8	0.18316 (MeV)	0.11109 (MeV)
9	111.09 (keV)	52.475 (keV)
10	52.475 (keV)	24.788
11	24.788	9.1188
12	9.1188	4.3074
13	4.3074	2.0347
14	2.0347 (keV)	0.96112 (keV)
15	961.12 (eV)	454.00 (eV)
16	454.00	214.45
17	214.45	101.30
18	101.30	47.851
19	47.851	22.603
20	22.603	10.677
21	10.677	5.0435
22	5.0435	2.3824
23	2.3824	1.1254
24	1.1254	0.41399
25	0.41399	0.32242
26	0.32242 (eV)	10^{-5} (eV)

Table 3-5 B₄Cつき消滅炉の寸法

単位は c m

		B ₄ Cの厚さ 2 c m		
Pd(W/cc) \ Ra(%)		1 0	2 0	3 0
5 0 0	r_A	50.070	65.825	79.048
	r_B	52.070	67.825	81.048
	R	107.873	112.560	118.082
1 0 0 0	r_A	39.791	52.358	62.933
	r_B	41.791	54.358	64.933
	R	85.728	89.531	94.009
1 5 0 0	r_A	34.792	45.809	55.096
	r_B	36.792	47.809	57.096
	R	74.958	78.332	82.303
2 0 0 0	r_A	31.634	41.671	50.145
	r_B	33.634	43.671	52.145
	R	68.154	71.257	74.907

		B ₄ Cの厚さ 1 c m		
Pd(W/cc) \ Ra(%)		1 0	2 0	3 0
5 0 0	r_A	49.951	65.561	78.596
	r_B	50.951	66.561	79.596
	R	107.617	112.107	117.406
1 0 0 0	r_A	39.671	52.090	62.474
	r_B	40.671	53.090	63.474
	R	85.468	89.072	93.323
1 5 0 0	r_A	34.670	45.538	54.633
	r_B	35.670	46.538	55.633
	R	74.695	77.868	81.610
2 0 0 0	r_A	31.511	41.398	49.678
	r_B	32.511	42.398	50.678
	R	67.888	70.789	74.210

Table 3-6 消滅炉の炉心設計パラメータ

出力	3.5 GW _{th}
出力密度	Pd = 500, 1000, 1500, 2000 W/cc
燃料	金属燃料 (U-Pu-10Zr)
燃料体積比	55%
燃料スミア密度	75% T.D.
Pu富化度	初期炉心で $k_{eff} = 1$ となるように設定
炉心外径	2 R [*] (136~236cm)
炉心高さ	2 R [*] (136~236cm)
Cs領域の炉心に 対する体積割合	Ra = 10, 20, 30%
B ₄ C領域の厚さ	1, 2 cm
反射体領域の厚さ	40 cm
冷却材	Na
構造材	SUS316

*) Table 3-5参照。

Table 3-7 改良型消滅炉の特性 (B₄C領域の厚さ2cmの場合)

Pd(W/cc)	Ra(%)	Δk (%)	F(%/y)	Pe	$\phi_{th}[CsOD](n/cm^2 \cdot s)$ at t=0
500	10	0.042	2.324	1.35	2.514×10^{15}
	20	2.057	3.168	1.36	2.193×10^{15}
	30	3.541	3.331	1.41	1.939×10^{15}
1000	10	3.882	2.301	1.29	4.950×10^{15}
	20	7.155	4.085	1.29	4.435×10^{15}
	30	9.298	4.437	1.33	3.960×10^{15}
1500	10	8.457	2.035	1.25	7.067×10^{15}
	20	12.823	4.834	1.25	6.455×10^{15}
	30	15.403	5.408	1.28	5.804×10^{15}
2000	10	13.504	1.558	1.23	8.907×10^{15}
	20	18.894	5.443	1.23	8.292×10^{15}
	30	21.845	6.268	1.26	7.502×10^{15}

Pd: 出力密度, Ra: Cs領域の炉心に対する体積割合,

Δk : 反応度劣化幅, F: 消滅率, Pe: 出力ピーキング係数,

$\phi_{th}[CsOD]$ at t=0: 時刻 t=0のときのCs領域における平均熱中性子束

Table 3-8 改良型消滅炉の特性 (B,C領域の厚さ1cmの場合)

Pd(W/cc)	Ra(%)	Δk (%)	F (%/y)	Pe	$\phi_{th}[CsOD](n/cm^2 \cdot s)$ at t=0
	10	0.122	2.842	1.36	3.188×10^{15}
500	20	1.947	3.607	1.36	2.763×10^{15}
	30	3.453	3.715	1.42	2.436×10^{15}
	10	3.565	3.302	1.29	6.264×10^{15}
1000	20	6.918	4.958	1.29	5.576×10^{15}
	30	9.112	5.204	1.33	4.960×10^{15}

Pd: 出力密度, Ra: Cs領域の炉心に対する体積割合,

Δk : 反応度劣化幅, F: 消滅率, Pe: 出力ピーキング係数,

$\phi_{th}[CsOD]$ at t=0: 時刻 t=0 のときの Cs 領域における平均熱中性子束

Table 3-9 SUSの厚さに対する消滅炉の核特性

厚さ(cm)	Pe(boundary)	Pe(inner)	$\phi_{th}[\text{CsOD}](\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{s})$	$\Delta k(\%)$	F(%/y)
1	<u>3.13</u>	1.20	3.305×10^{15}	1.551	4.035
3	<u>1.46</u>	1.30	2.326×10^{15}	1.711	3.284
4	1.29	<u>1.31</u>	2.182×10^{15}	1.745	3.181
8	1.21	<u>1.32</u>	1.816×10^{15}	1.887	2.938

Pe(boundary) : Cs領域との境界における出力ピーキング係数

Pe(inner) : 燃料領域内部における出力ピーキング係数

(消滅炉全体の出力ピーキング係数は下線を引いた値である。)

$\phi_{th}[\text{CsOD}](\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{s})$: Cs領域における熱中性子束

Δk : 燃焼反応度

F : 消滅率

Table 3-10 F P 消滅炉心の構成

出力	3.5 GW _{th}
出力密度	500 W/cc
燃料	金属燃料 (U-Pu-10Zr)
燃料体積比	55%
燃料スミア密度	75% T.D.
燃料領域	2領域 (内側, 外側)
Pu富化度 (内側燃料領域)	15 w/o
Pu富化度 (外側燃料領域)	9.76 w/o
内側燃料領域の厚さ	7.5 cm
外側燃料領域の厚さ	38.0 cm
炉心外径	224.2 cm
炉心高さ	224.2 cm
B, C領域の厚さ	1 cm
反射体領域の厚さ	40 cm
Cs領域の外径	131.1 cm
Cs領域の高さ	131.1 cm
Cs領域の炉心に対する体積割合	20%

Table 3-11 F P 消滅炉心の特性

^{137}Cs 装荷量	5 7 5 0 k g
^{137}Cs 消滅量	2 2 0 . 5 k g / y (100万kWe軽水炉7基分)
消滅率	3 . 8 4 % / y
C s 領域の平均熱中性子束	$3 . 0 5 \times 1 0^{15} \text{ n} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$
燃焼反応度	1 . 8 3 % / y
出力ピーキング係数	1 . 7

c.f. 目標値 ; 消滅率 3 . 5 % / y 以上

燃焼反応度 3 . 0 % / y 以下

出力ピーキング係数 1 . 7 以下

Table 3-12(a) CsODのDの個数密度を人為的に減らしたときの中性子束

Dの割合 (%)	$\phi_{E=3\text{keV}} (\text{n/cm}^2 \cdot \text{s})$	$\phi_{\text{th}} (\text{n/cm}^2 \cdot \text{s})$	Csの中性子吸収率 (%)
100	2.662×10^{14}	1.280×10^{16}	3.85
70	3.012×10^{14}	9.750×10^{15}	3.13
50	3.314×10^{14}	7.260×10^{15}	2.54
30	3.711×10^{14}	4.304×10^{15}	1.85
5	4.365×10^{14}	2.721×10^{14}	0.94
0	3.924×10^{14}	3.262×10^{10}	0.84

注) fluxはCs領域での平均fluxである。

CsOD 100%の個数密度は $1.42856 \times 10^{-2} \text{n/b} \cdot \text{cm}$

Table 3-12(b) Cs領域での中性子吸収のうち3 keV中性子と熱中性子の割合 (%)

Dの割合 (%)	3 keV中性子	熱中性子
100	10.21	85.52
70	14.19	79.91
50	19.18	73.04
30	29.40	59.21
5	68.07	7.36
0	68.60	0.001

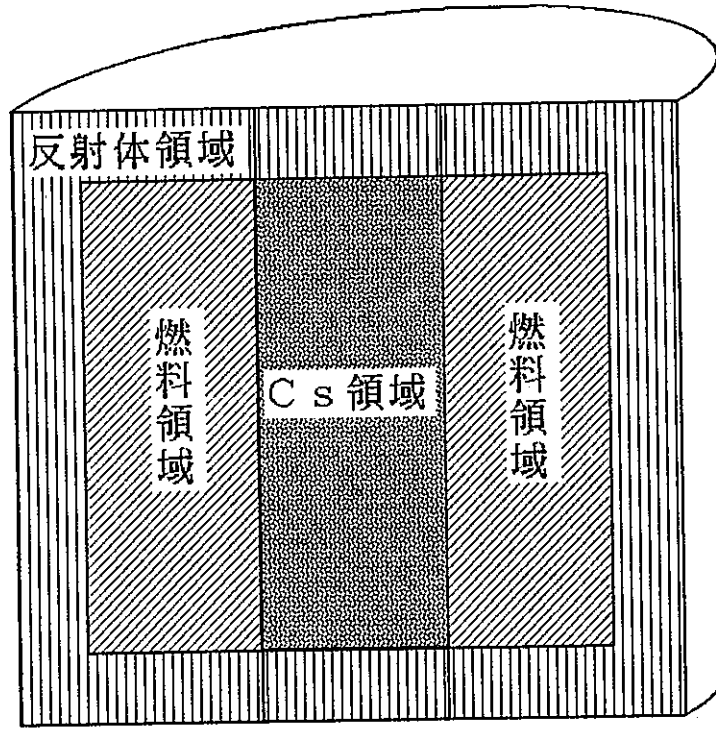
Table 3-13(a) Cs領域にCsだけ, Cs・O, Cs・C, Cs・Beを入れたときのflux

Cs領域	$\phi_{E=3\text{keV}}(\text{n/cm}^2\cdot\text{s})$	$\phi_{\text{th}}(\text{n/cm}^2\cdot\text{s})$	Csの中性子吸収率(%)
Csだけ	1.259×10^{14}	4.653×10^6	0.22
Cs・O	3.924×10^{14}	3.262×10^{10}	0.84
Cs・C	4.820×10^{14}	1.175×10^{12}	0.97
Cs・Be	5.697×10^{14}	3.730×10^{13}	1.10

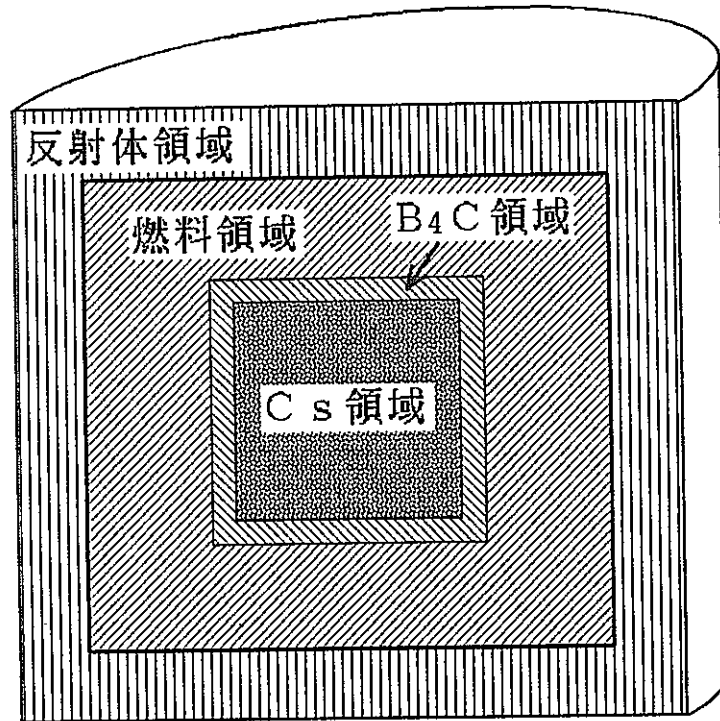
注) Csだけのときの個数密度 $Cs = 8.26297 \times 10^{-3} \text{ n/b}\cdot\text{cm}$
 それ以外、 $Cs = O = C = Be = 1.42856 \times 10^{-2} \text{ n/b}\cdot\text{cm}$

Table 3-13(b) Cs領域での中性子吸収のうち3 keV中性子と熱中中性子の割合(%)

Cs領域	3 keV中性子	熱中中性子
Csだけ	48.26	3.1×10^{-7}
Cs・O	68.60	9.9×10^{-4}
Cs・C	73.66	0.03
Cs・Be	83.67	1.04



(a) 従来の F P 消滅炉



(b) 改良型消滅炉

Fig. 3-1 F P 消滅炉の断面図

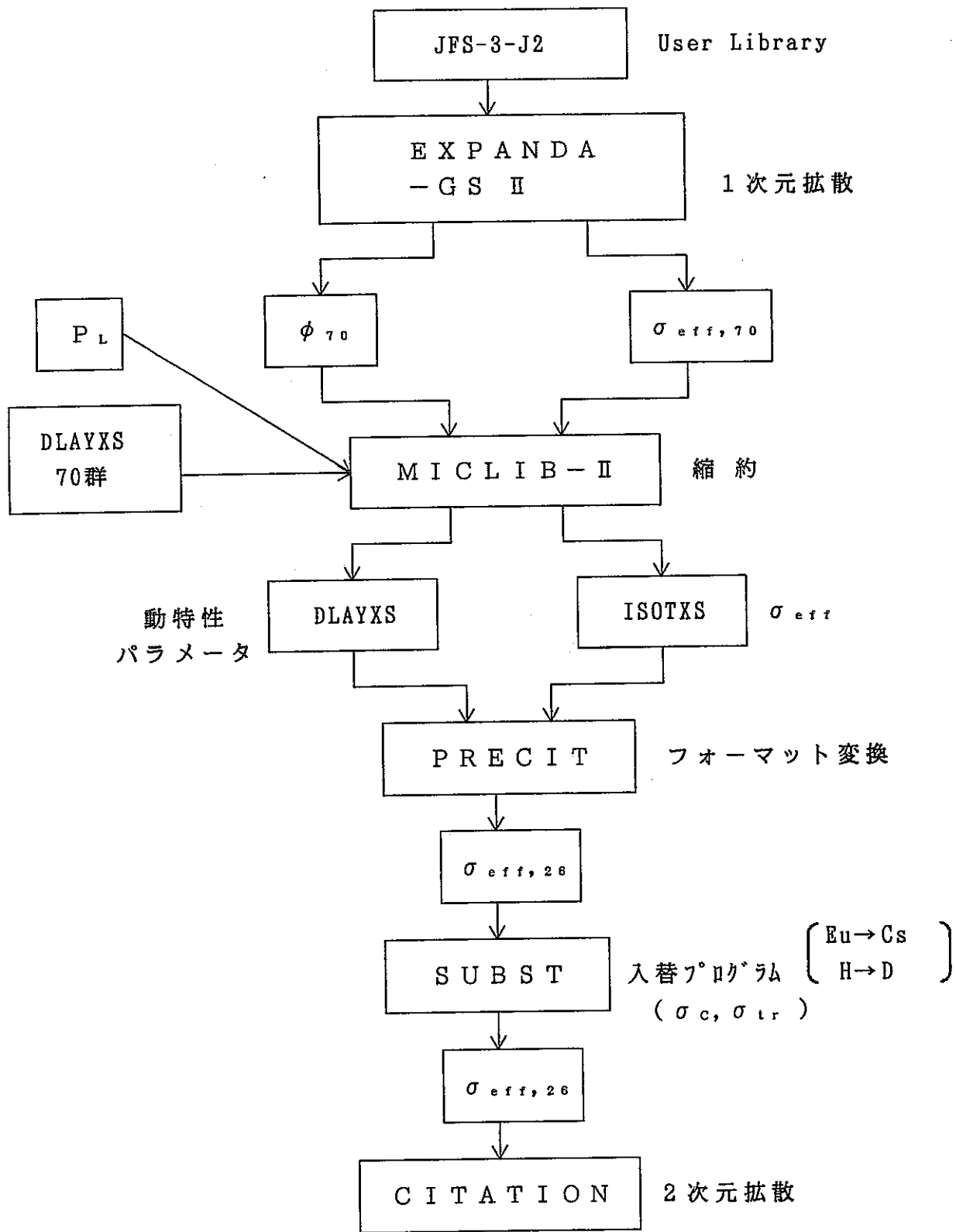


Fig.3-2 消滅炉心解析コードシステム

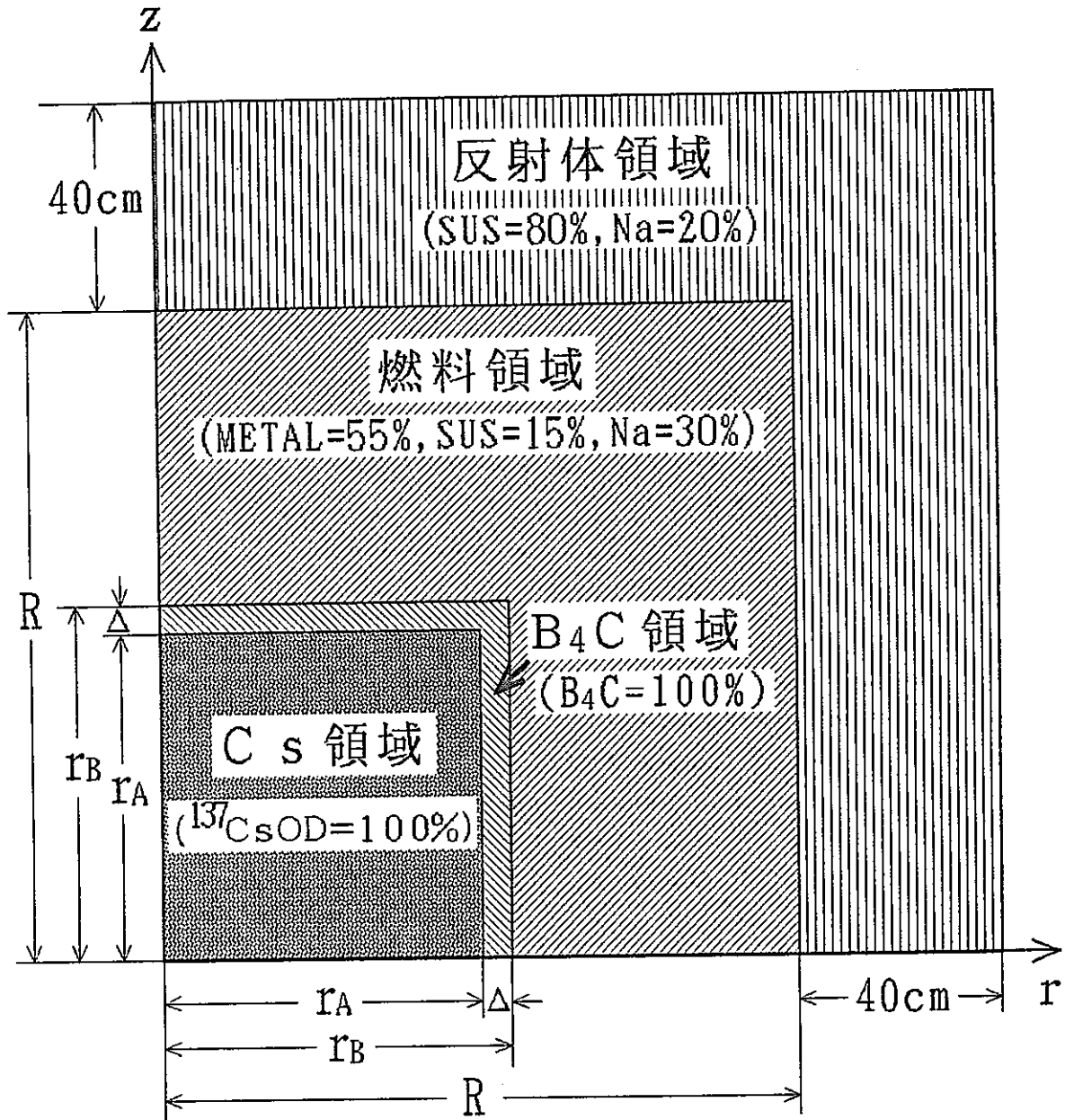


Fig. 3-3 消滅炉のR Zモデル

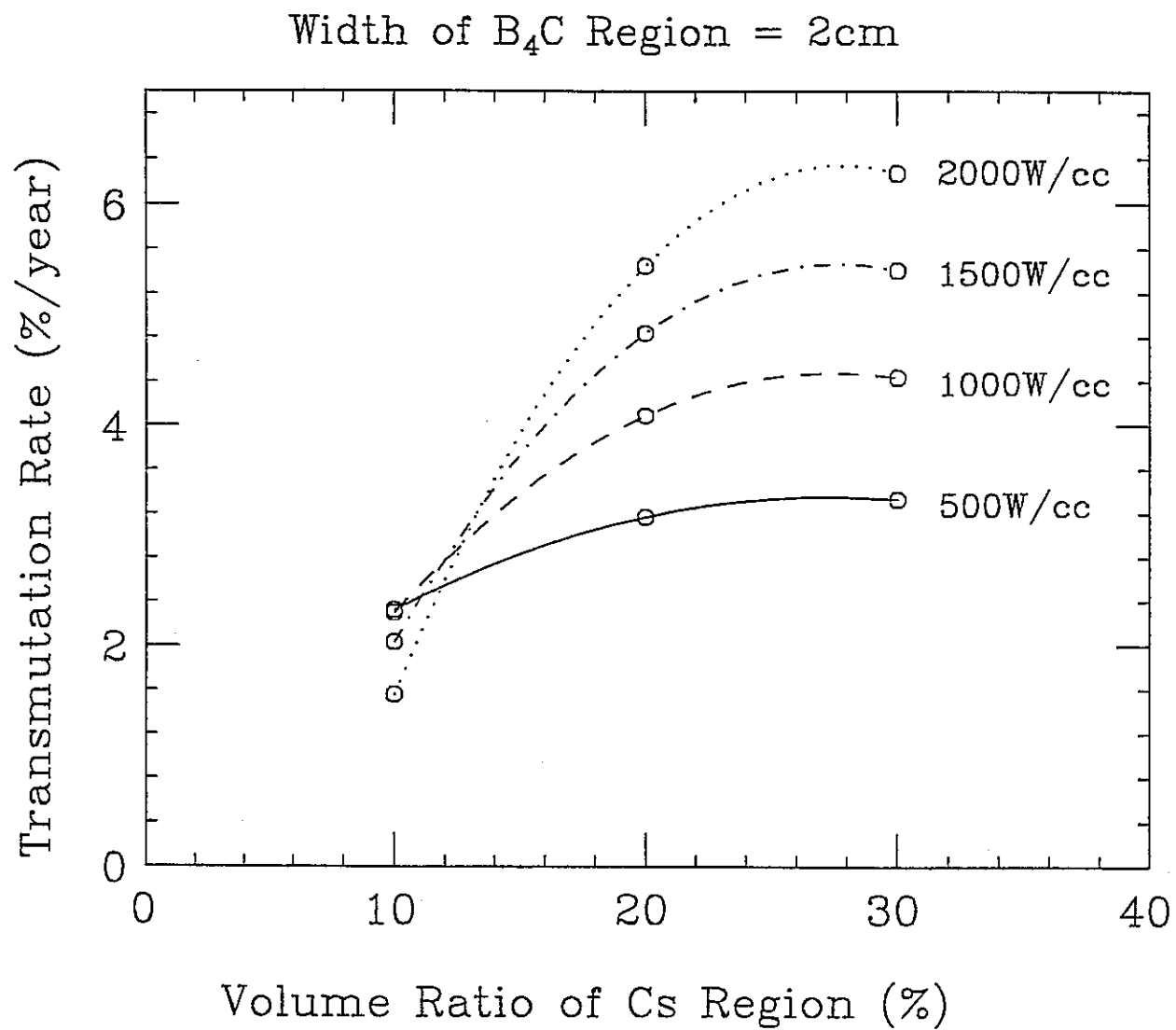


Fig.3-4 Cs領域の炉心に対する体積割合と消滅率の関係

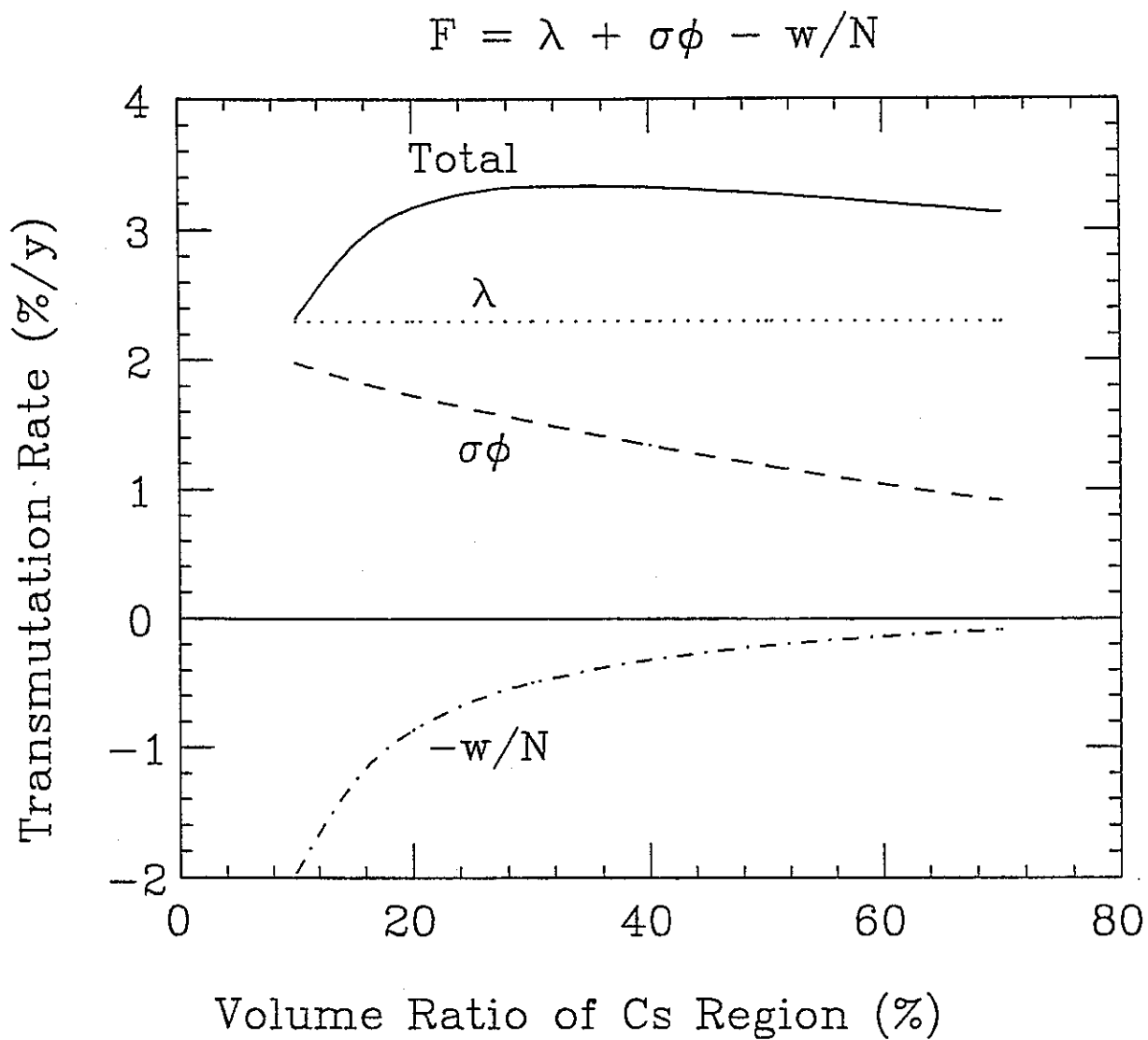


Fig.3-5 消滅率への各項からの寄与

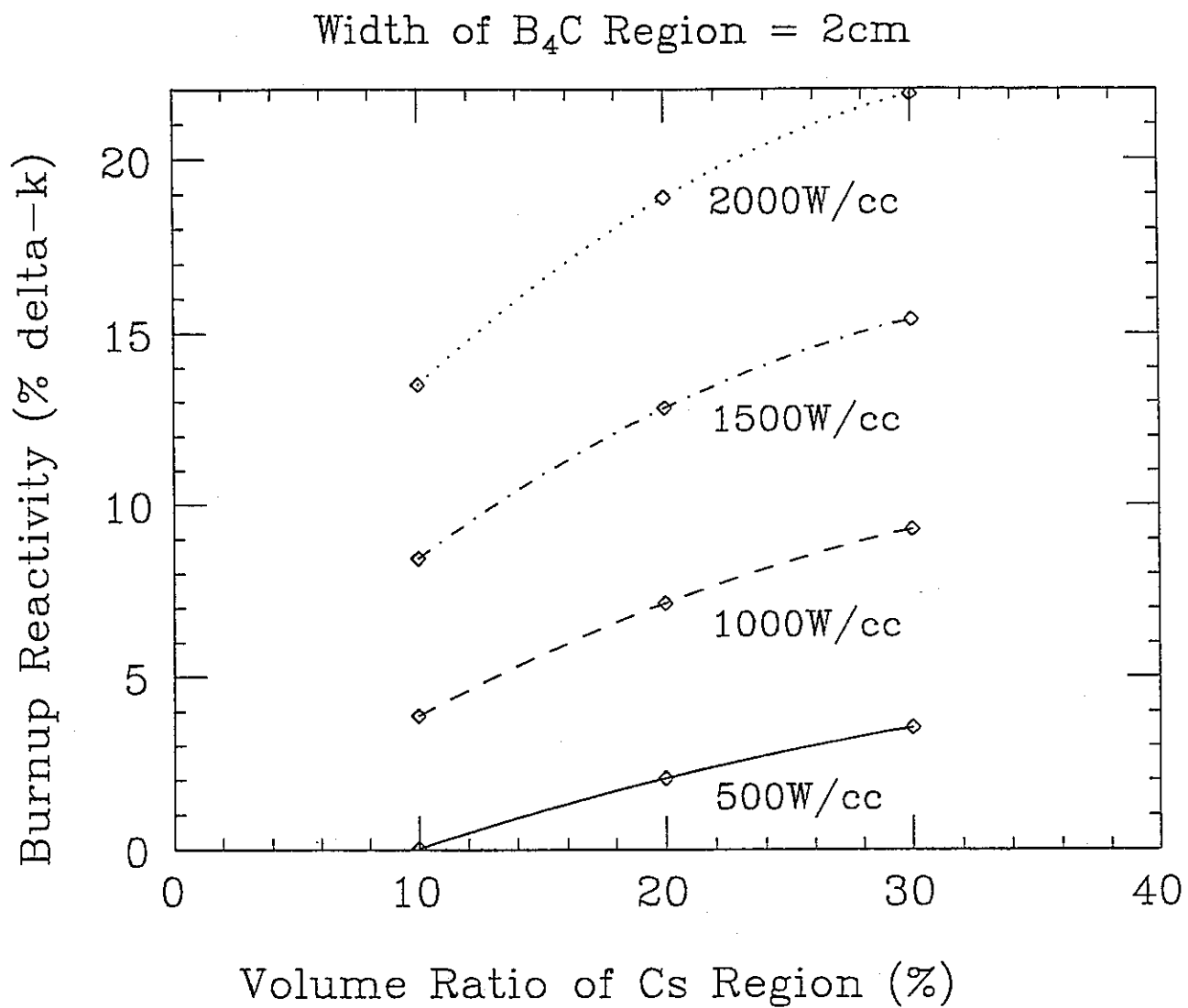


Fig.3-6 Cs領域の炉心に対する体積割合と燃焼反応度の関係

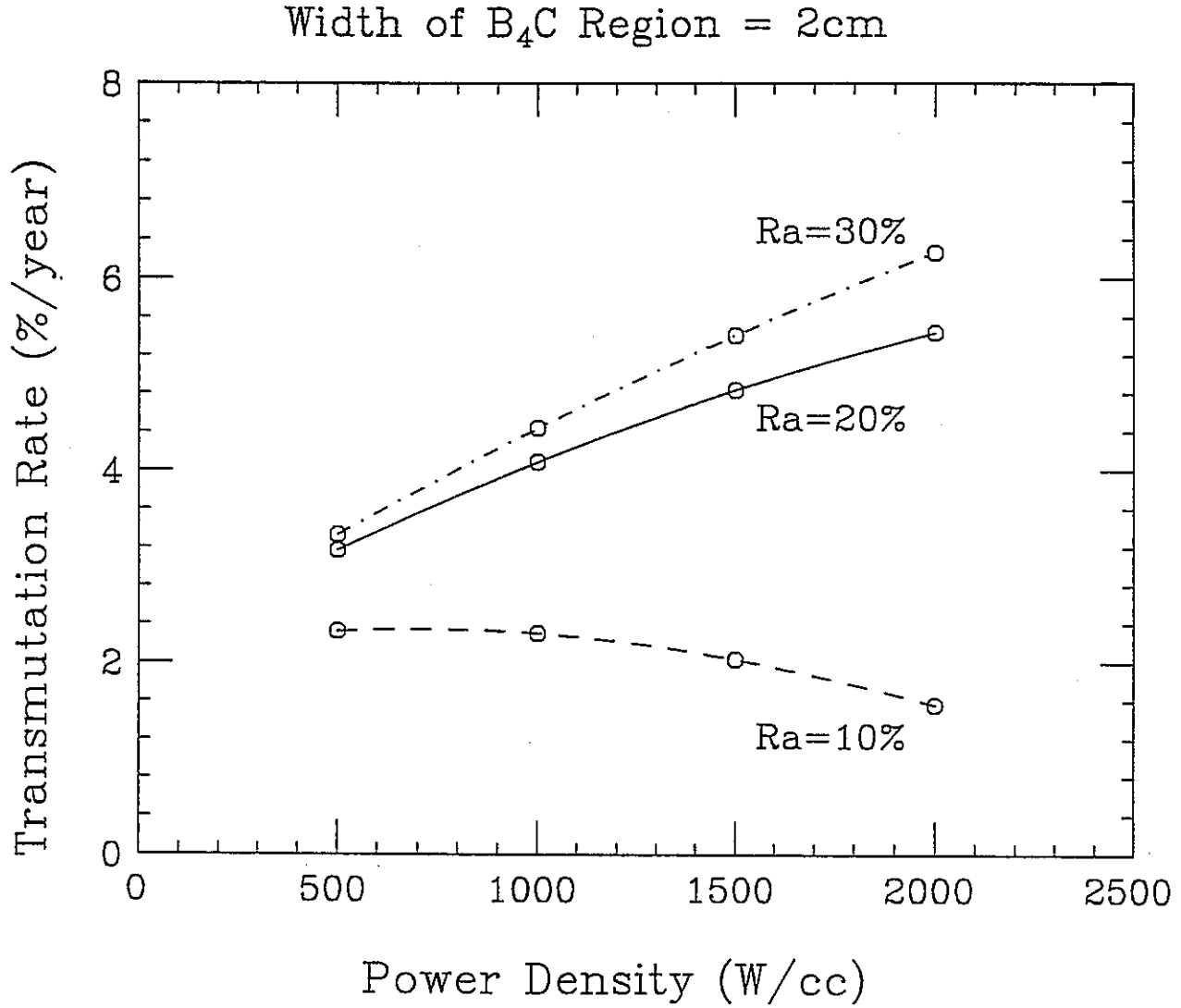


Fig.3-7 出力密度と消滅率の関係

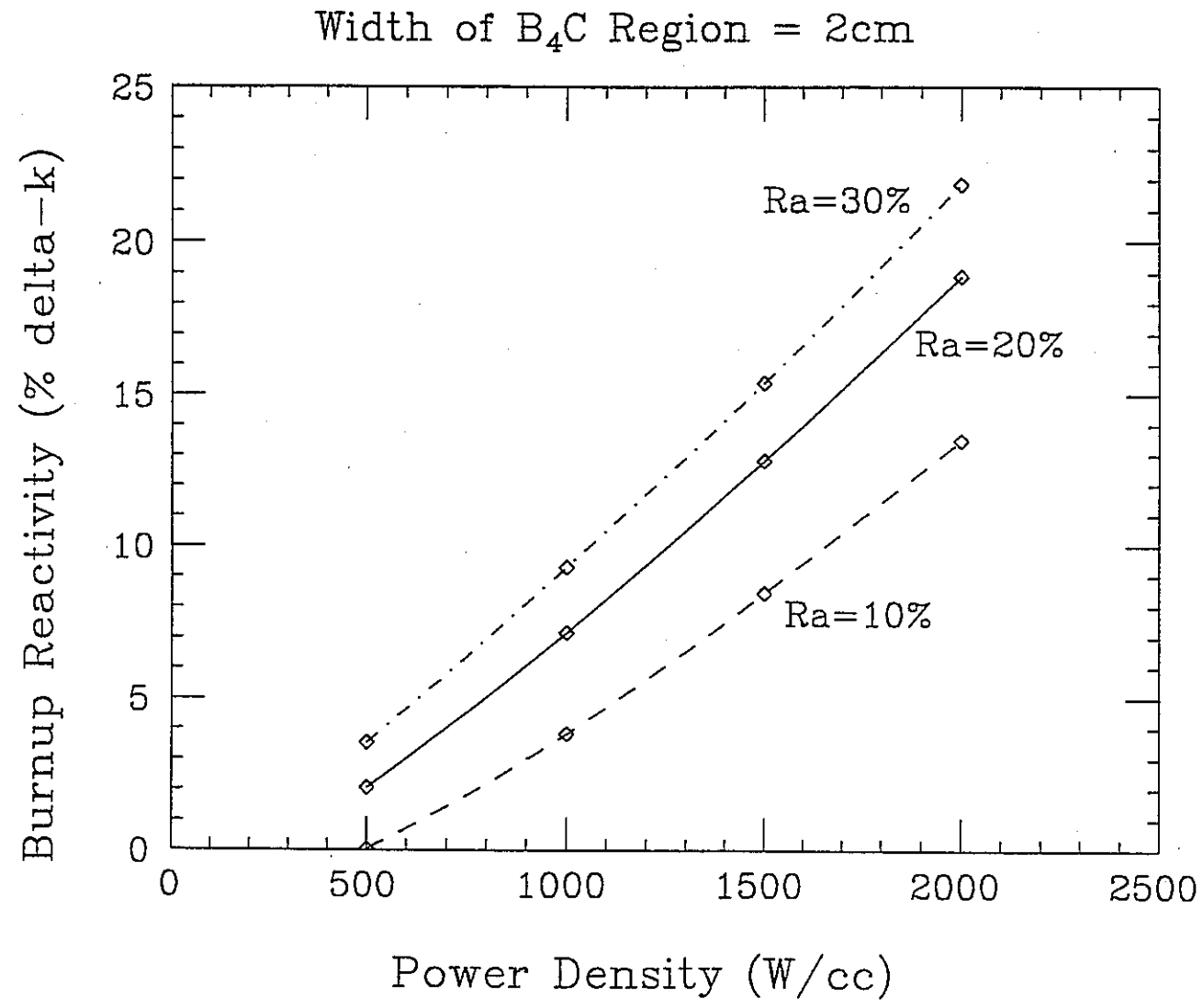


Fig.3-8 出力密度と燃焼反応度の関係

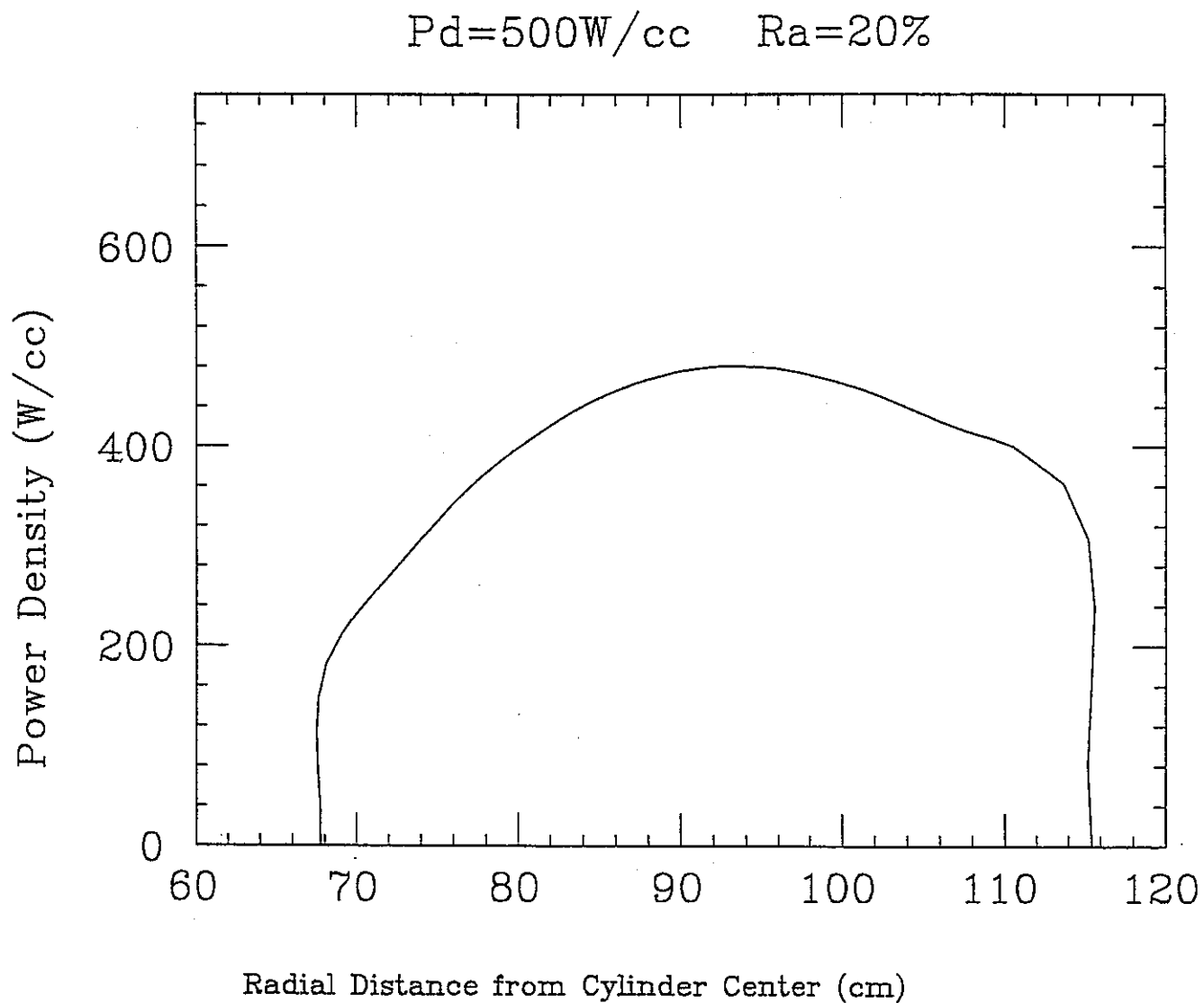


Fig.3-9 改良型消滅炉の径方向の出力分布 ($P_d=500\text{W/cc}$, $R_a=20\%$, $B,C=2\text{cm}$)

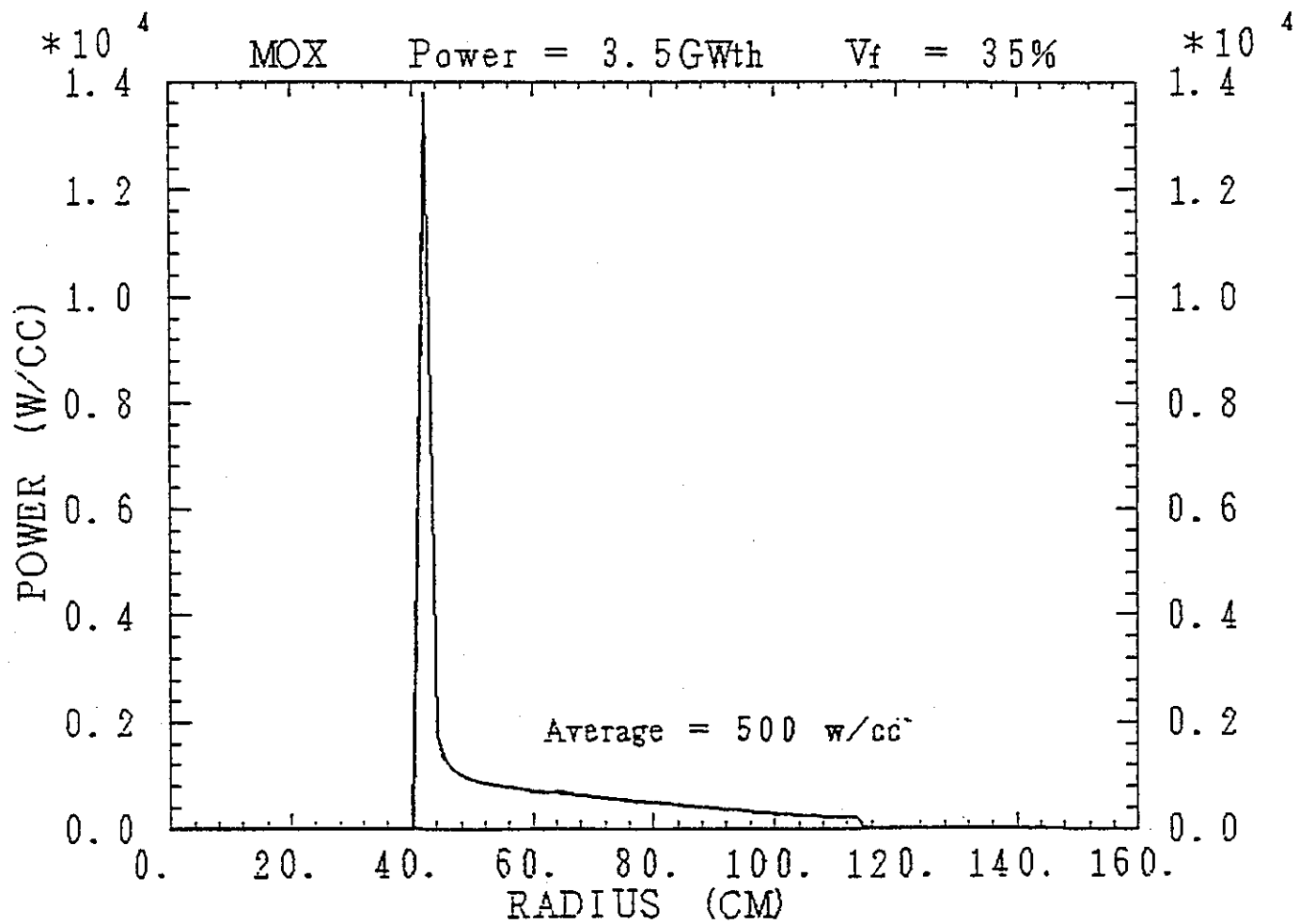
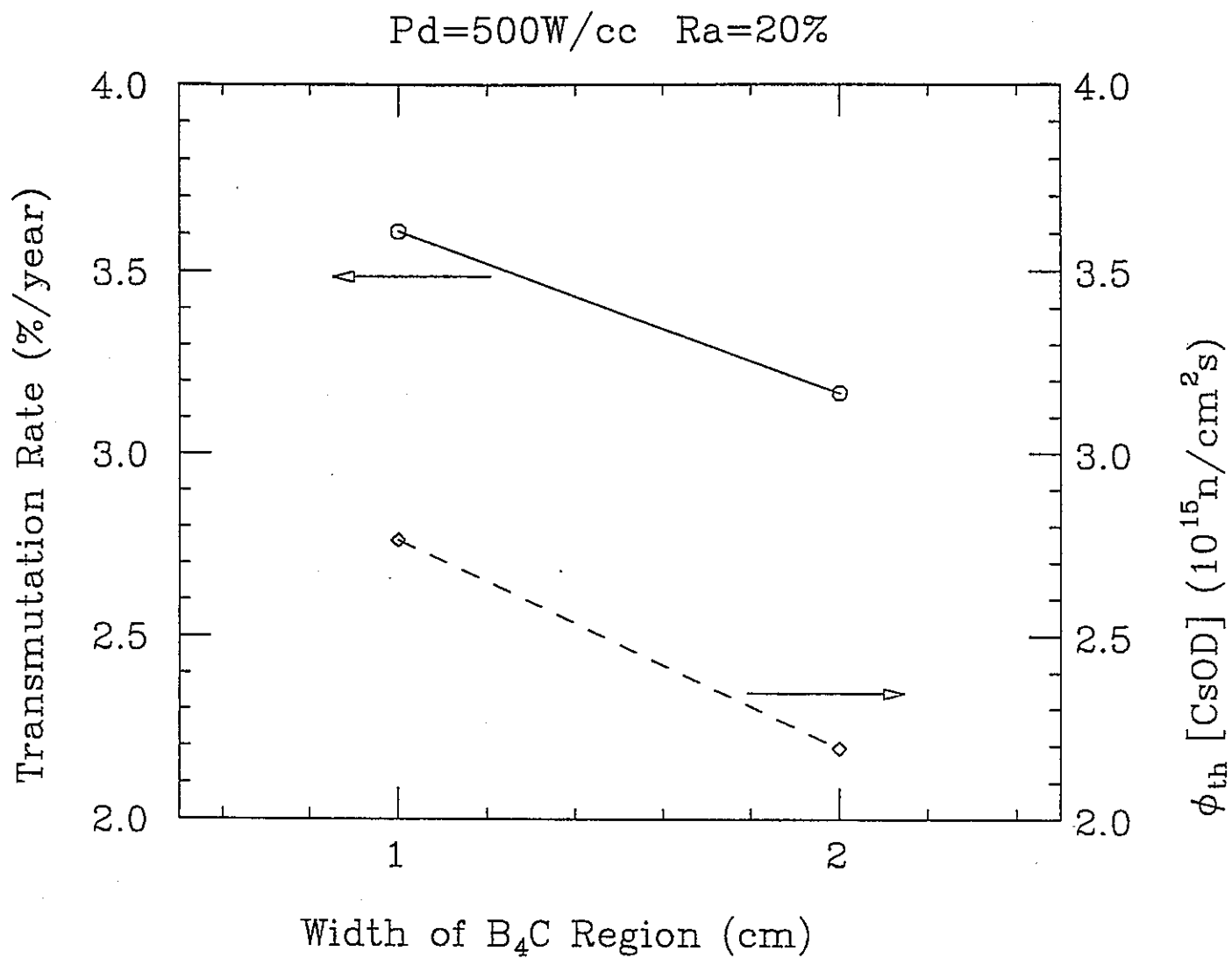
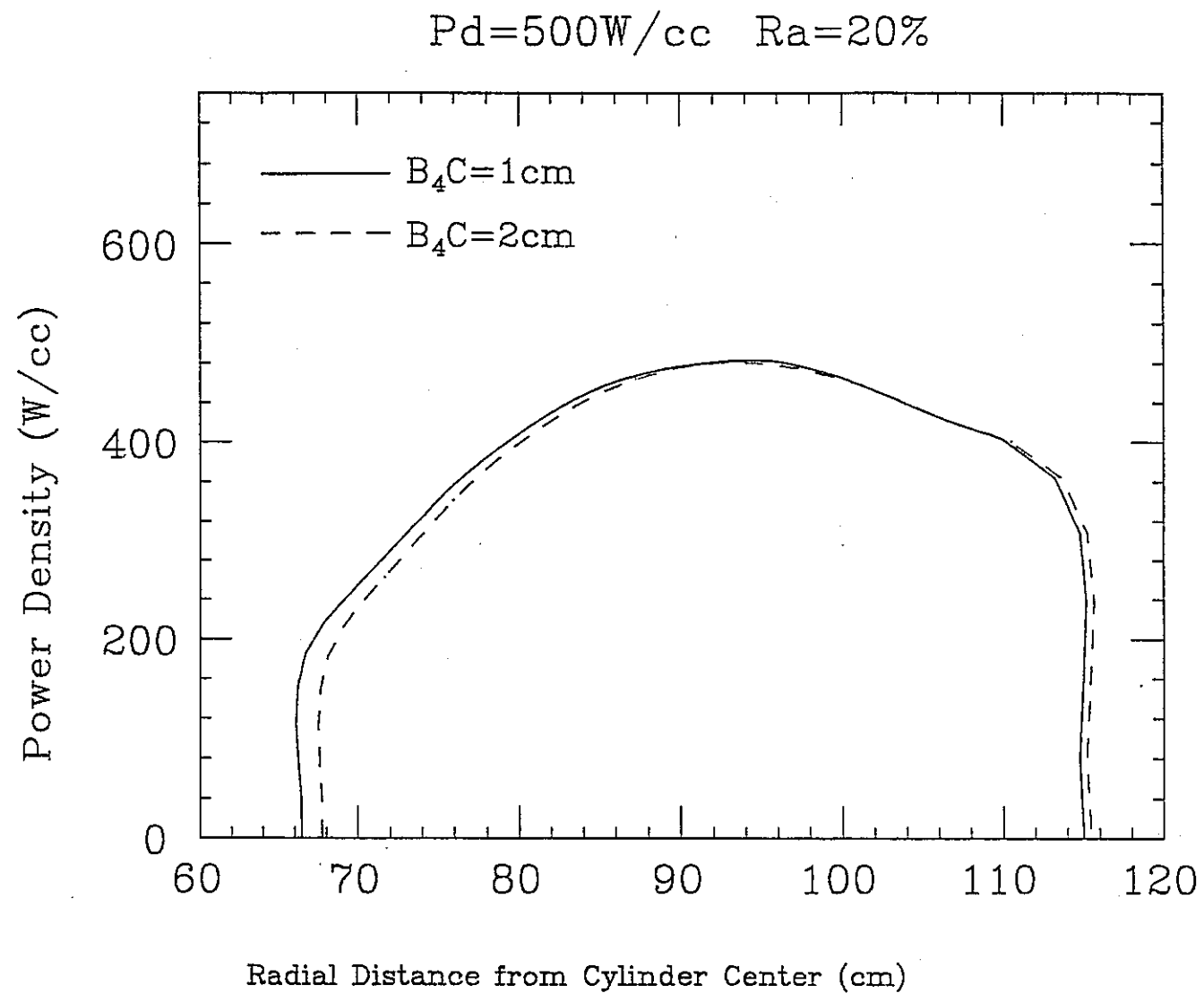
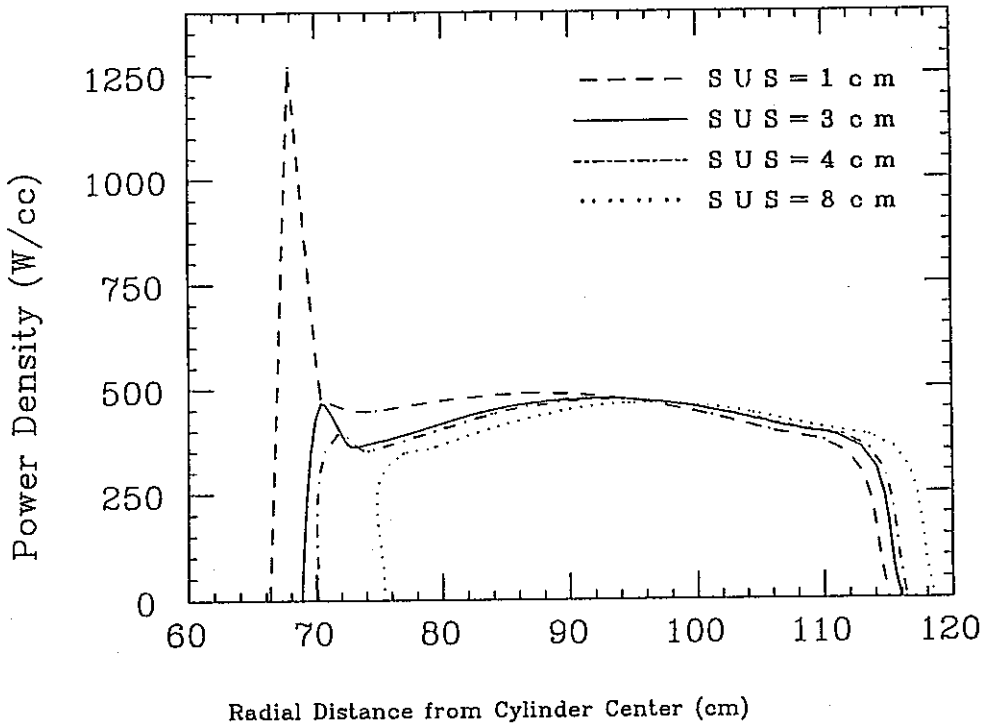


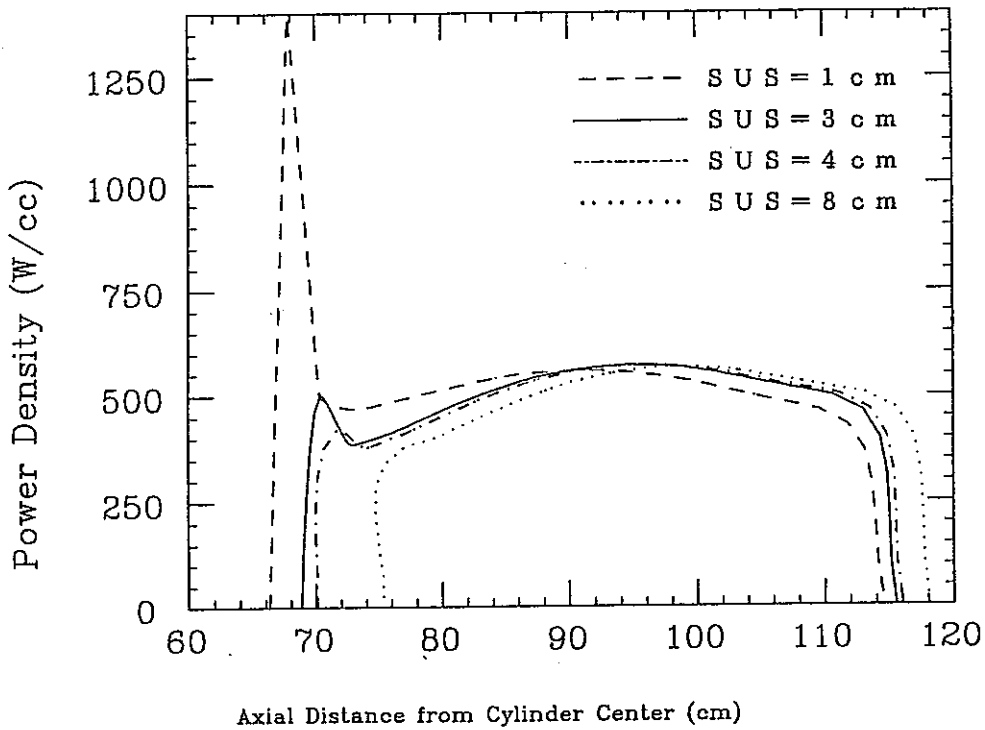
Fig.3-10 従来の消滅炉の径方向の出力分布

Fig.3-11 B₄C領域の厚さと消滅率及びCs領域の平均熱中性子束の関係

Fig.3-12 B_4C 領域の厚さが1 cmと2 cmの場合の消滅炉の径方向の出力分布



(a) 径方向



(b) 軸方向

Fig.3-13 SUS領域の厚さを変えたときの出力分布 (Pd=500W/cc, Ra=20%)

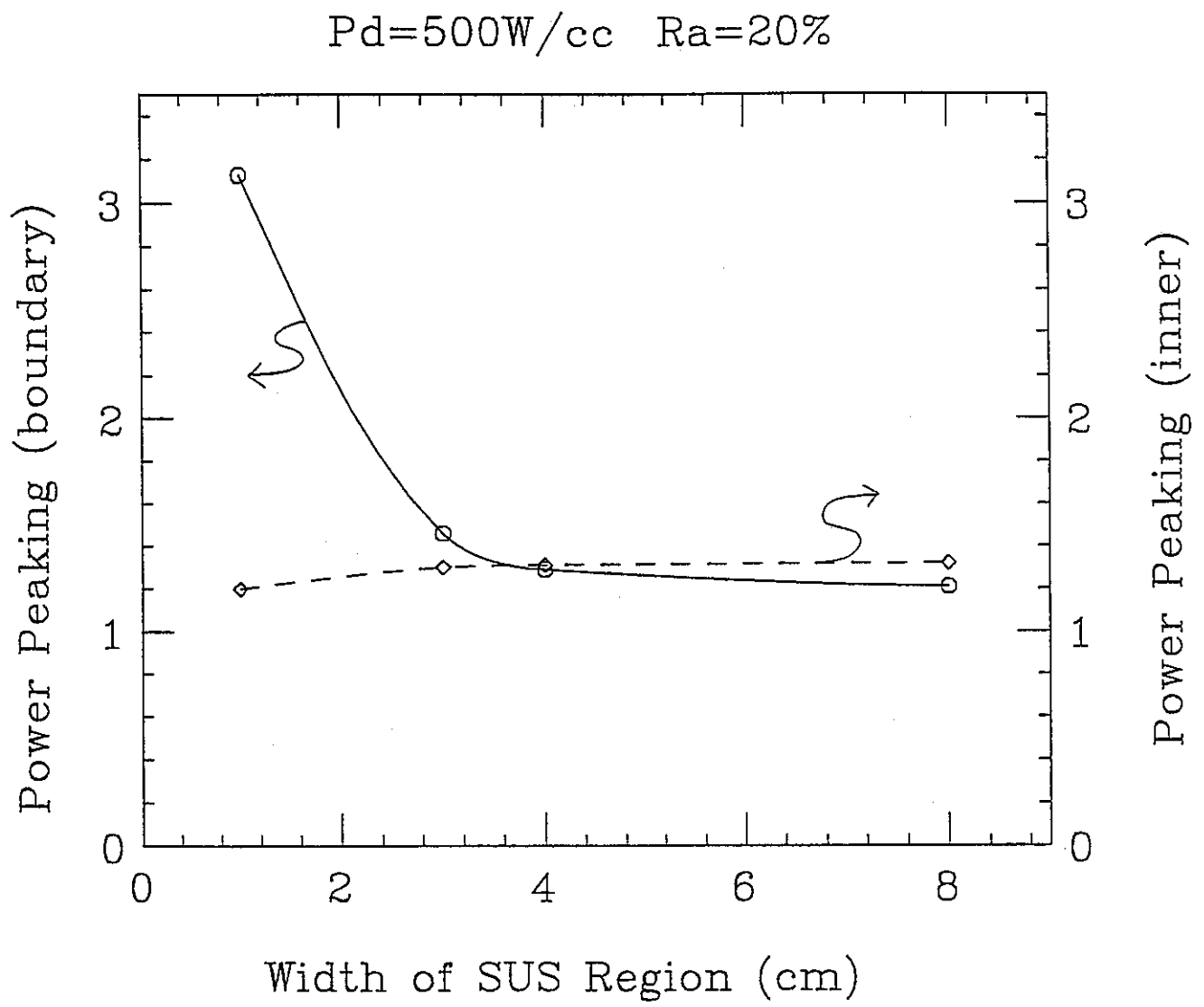


Fig.3-14 SUS領域の厚さに対する出力ピーキング係数（境界，中心）の変化

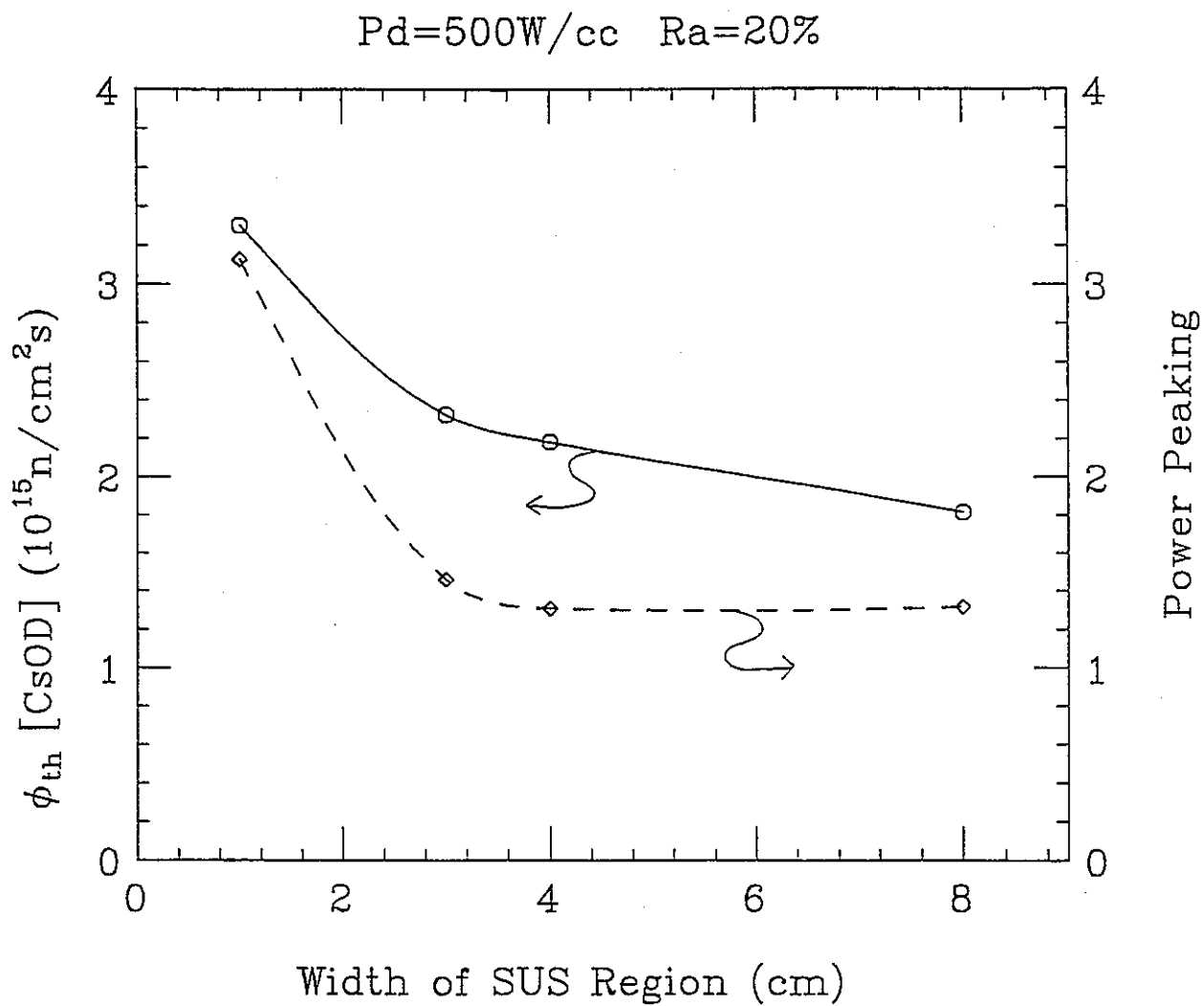


Fig.3-15 SUS領域の厚さとCs領域の平均熱中性子束及び出力ピーキング係数との関係

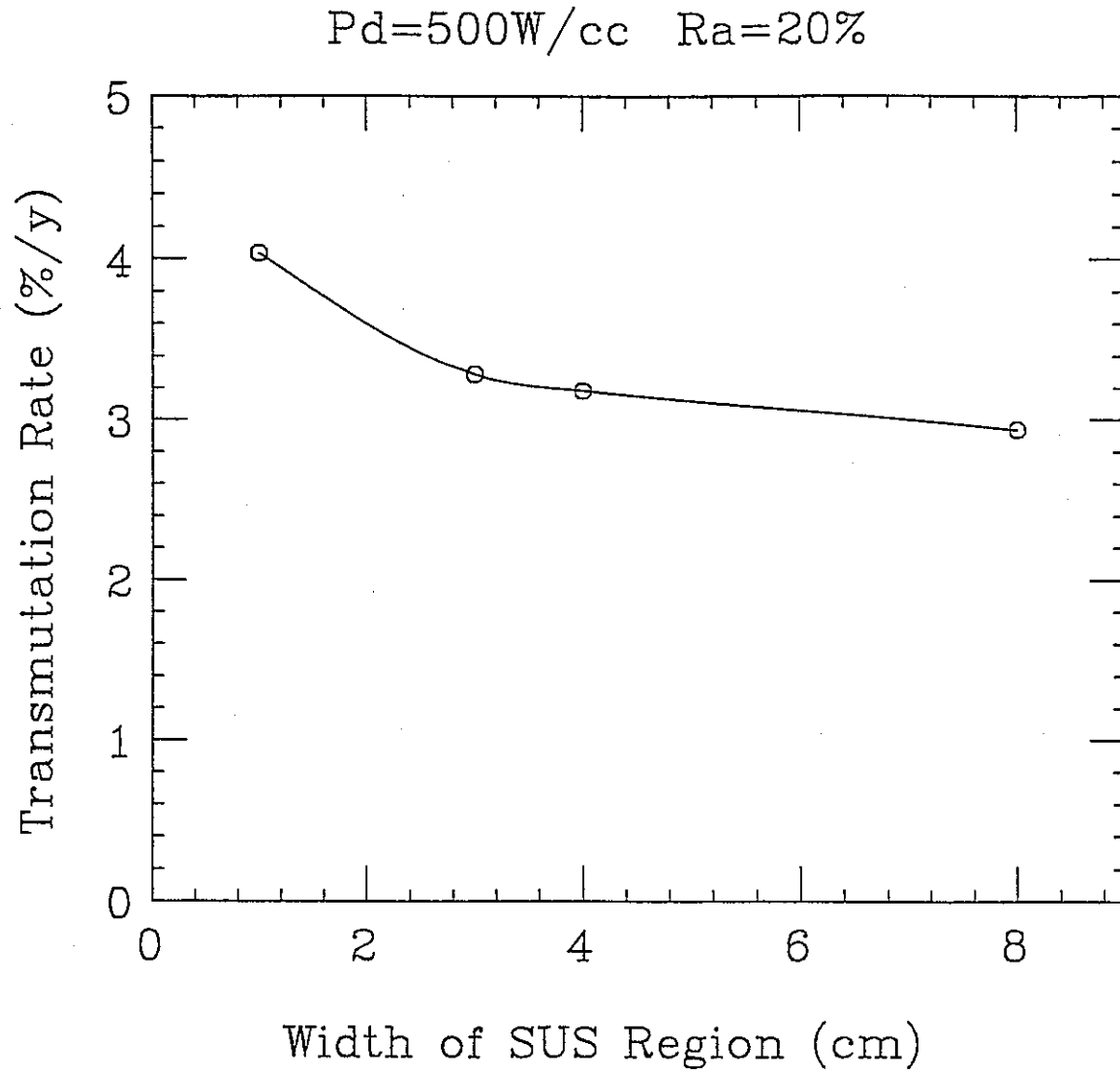


Fig. 3-16 SUS領域の厚さと消滅率の関係

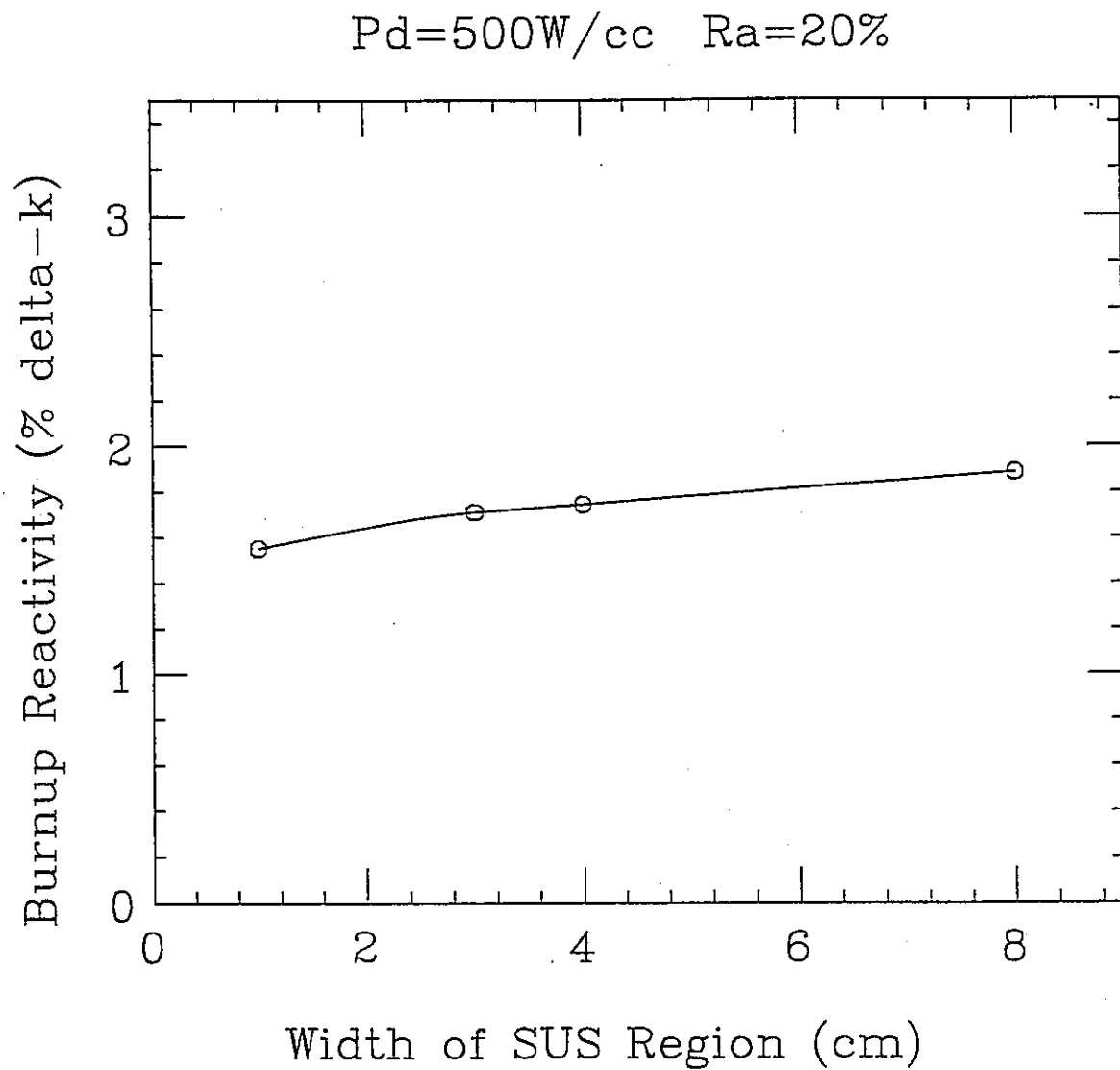


Fig.3-17 SUS領域の厚さと燃焼反応度の関係

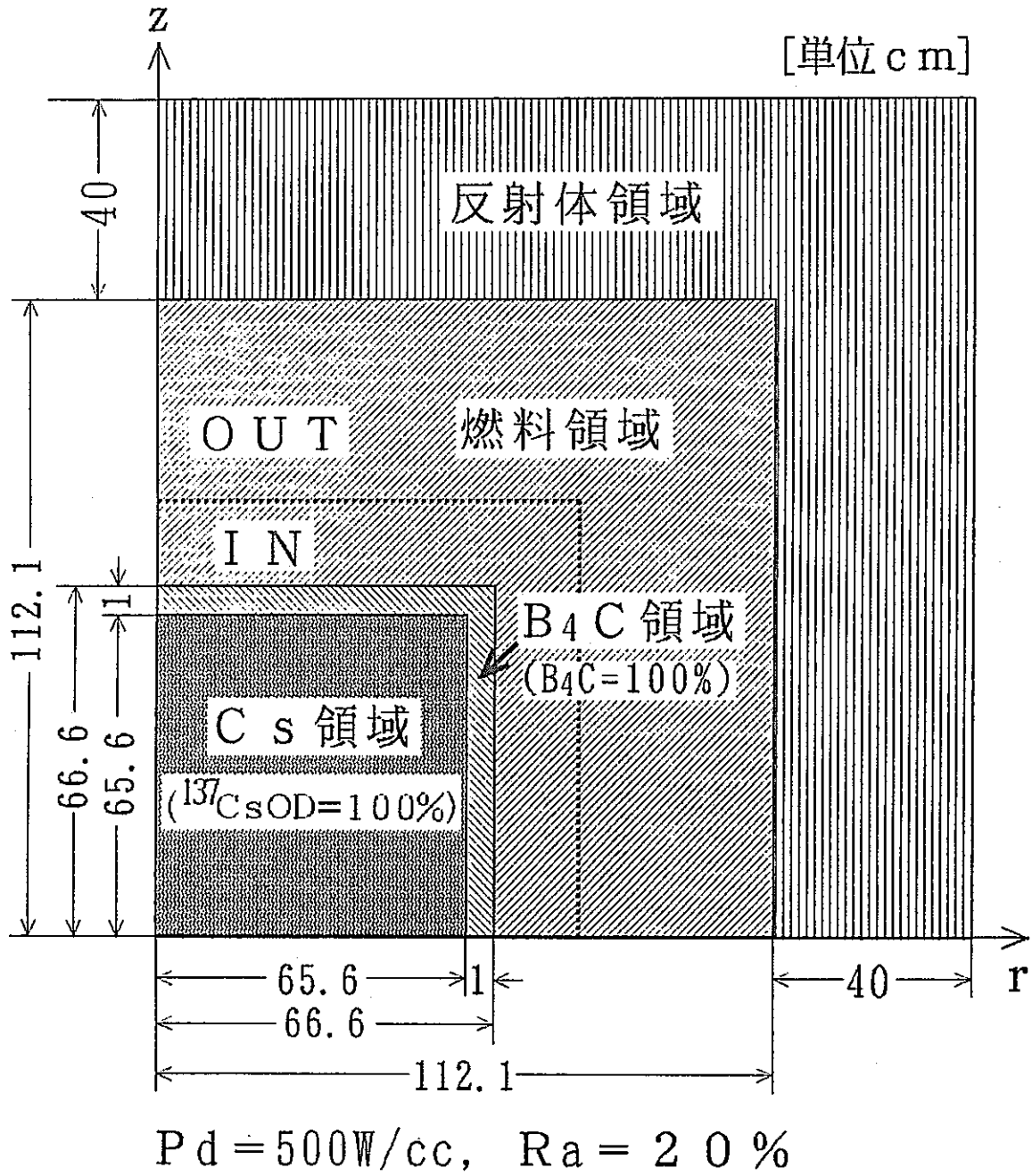


Fig. 3-18 燃料領域 2 領域炉心

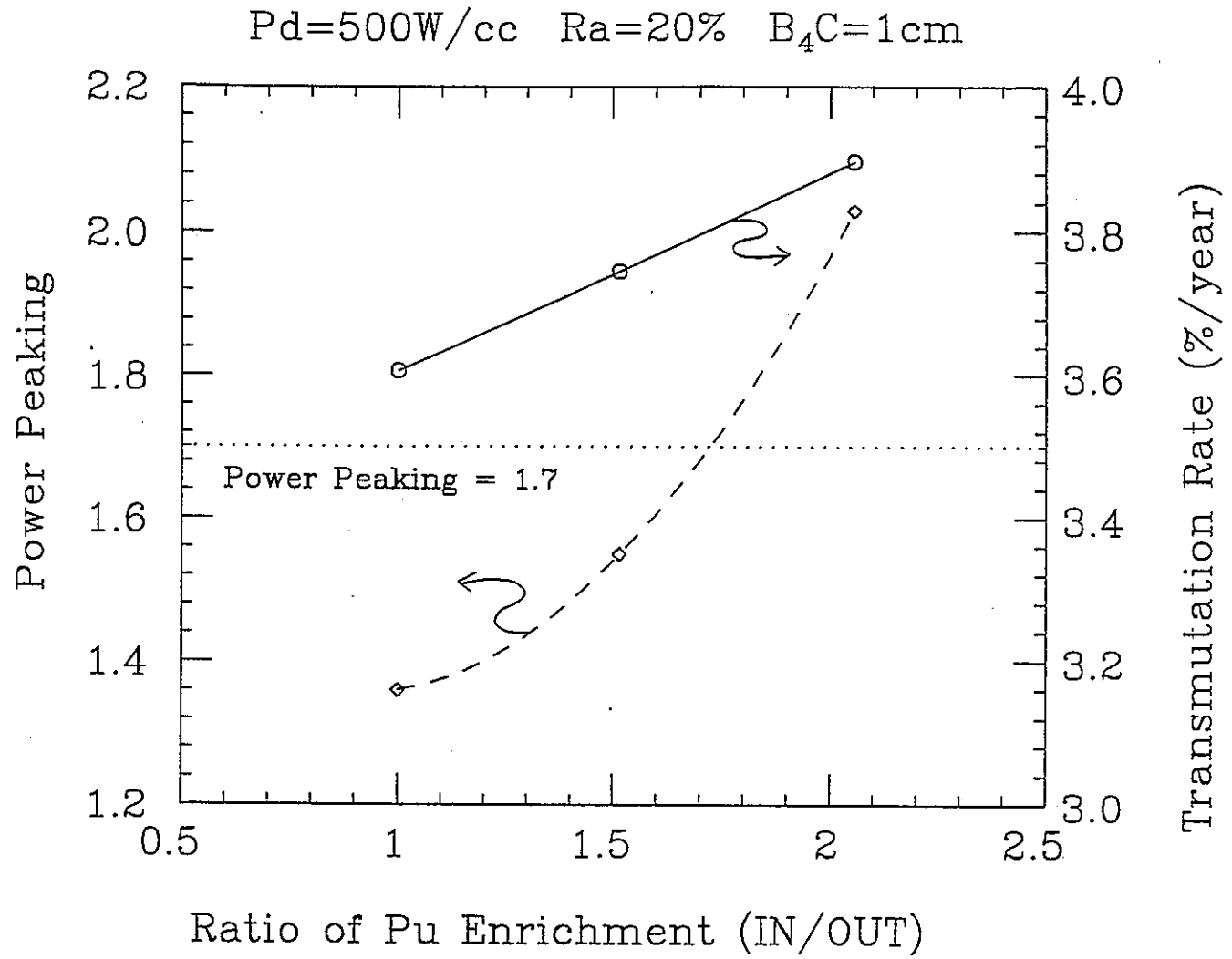


Fig.3-19 Pu 富化度比 (IN/OUT) と出力ピーキング係数及び消滅率との関係

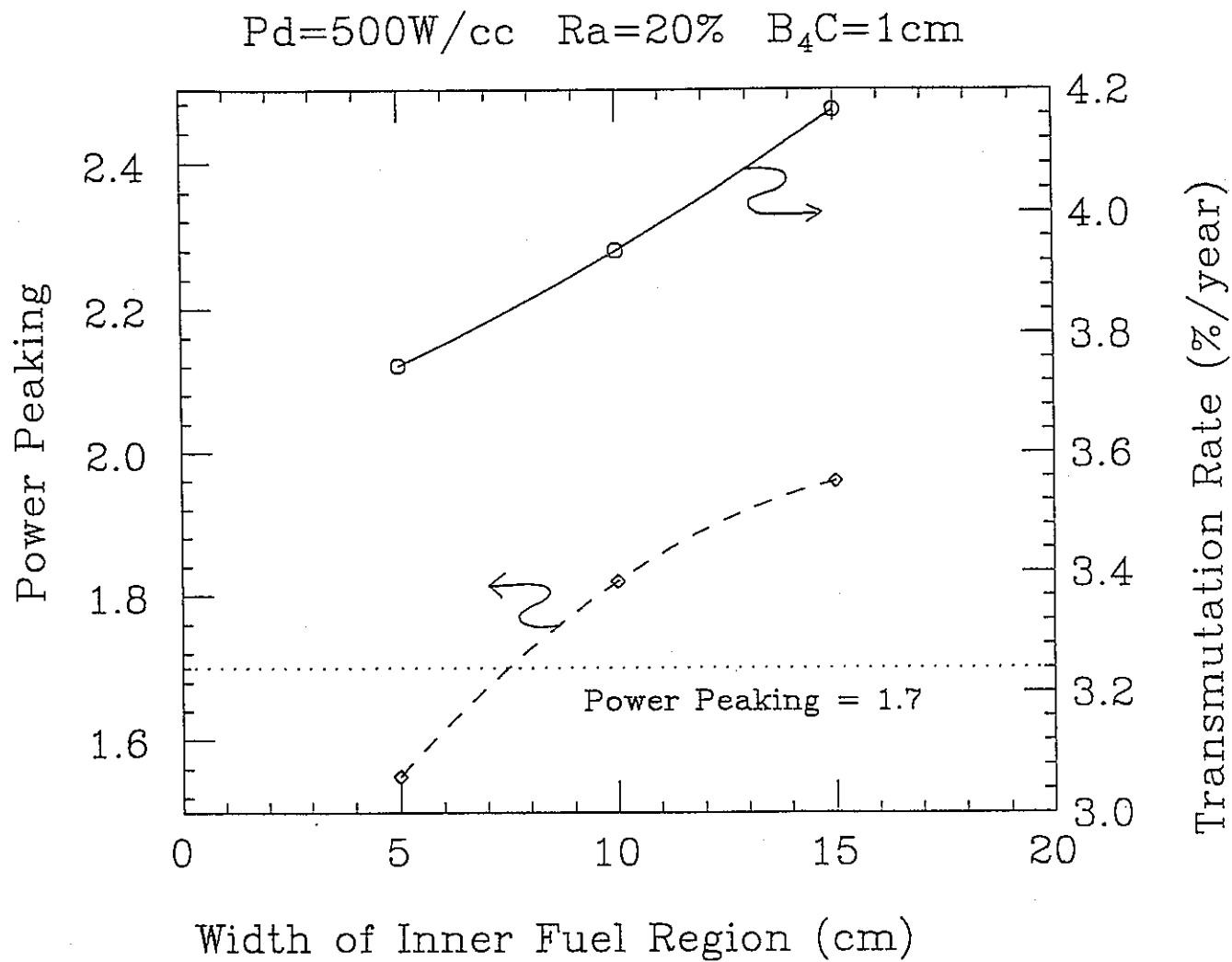
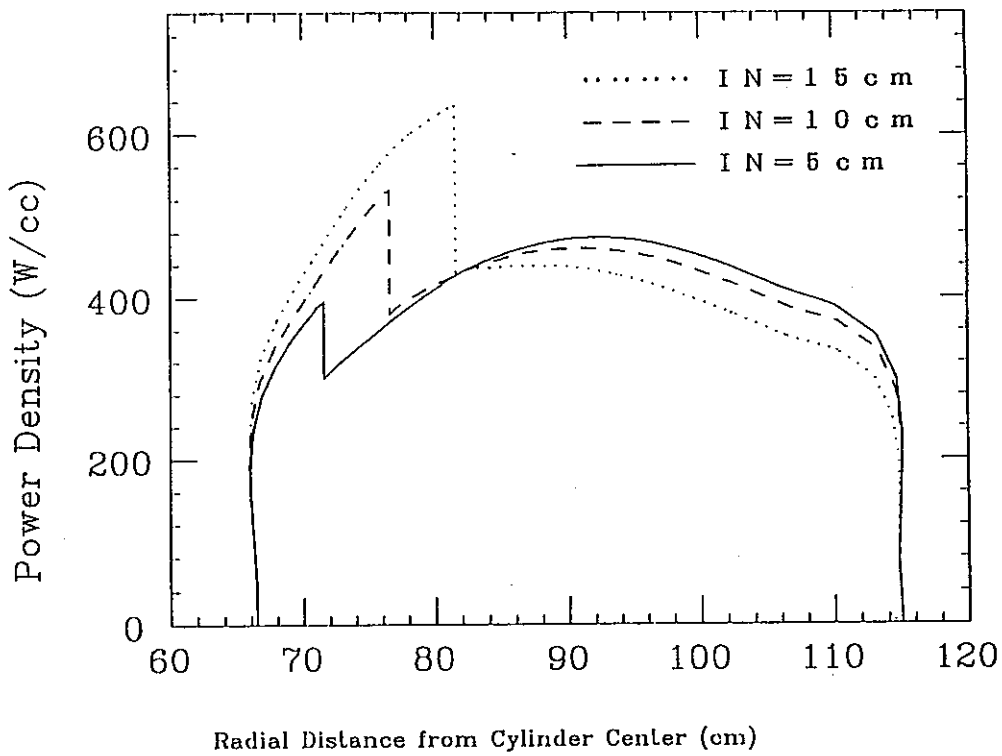
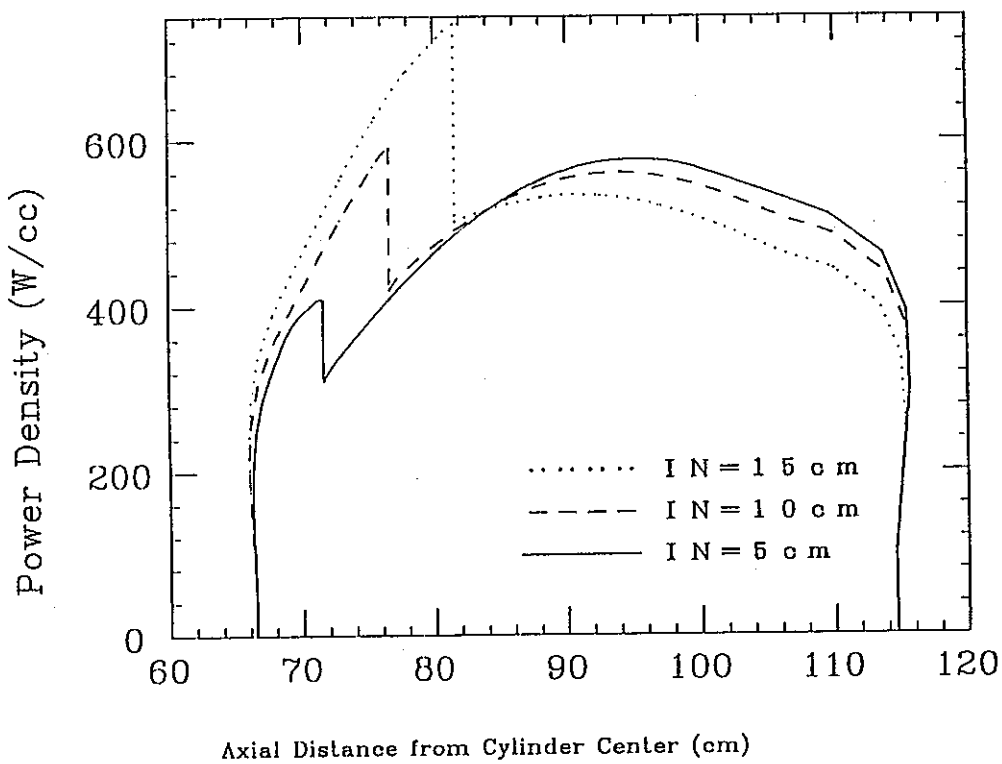


Fig.3-20 内側燃料領域の厚さと出力ピーキング係数及び消滅率との関係



(a) 径方向



(b) 軸方向

Fig.3-21 2領域炉心で内側燃料領域の厚さを変えたときの出力分布

CAPTURE CROSS SECTION OF Cs137

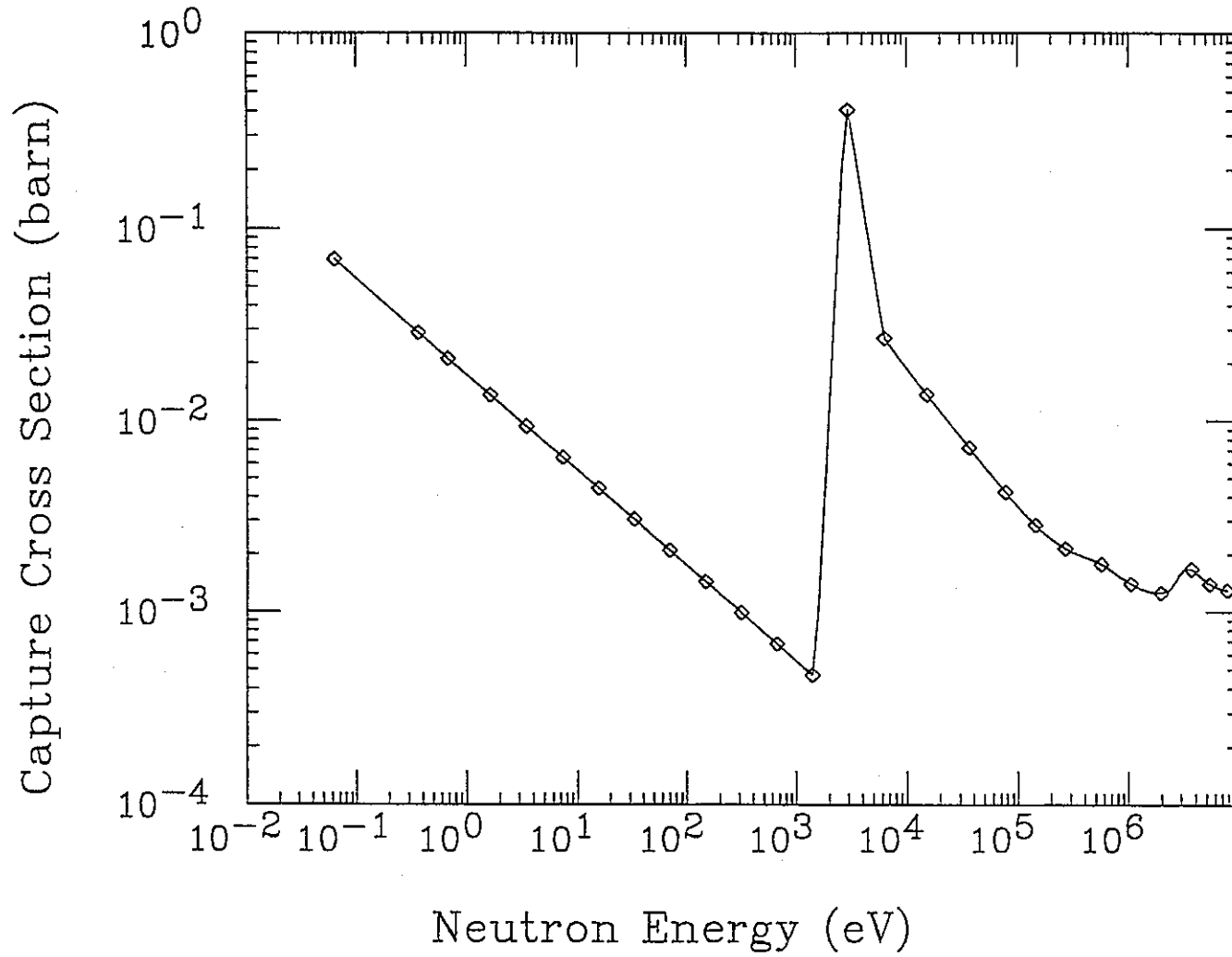


Fig.3-22 Cs-137 の中性子吸収断面積

出力 3.5 GW_{th}, 出力密度 500 W / c c
 Cs 領域 / 炉心体積 = 10 %

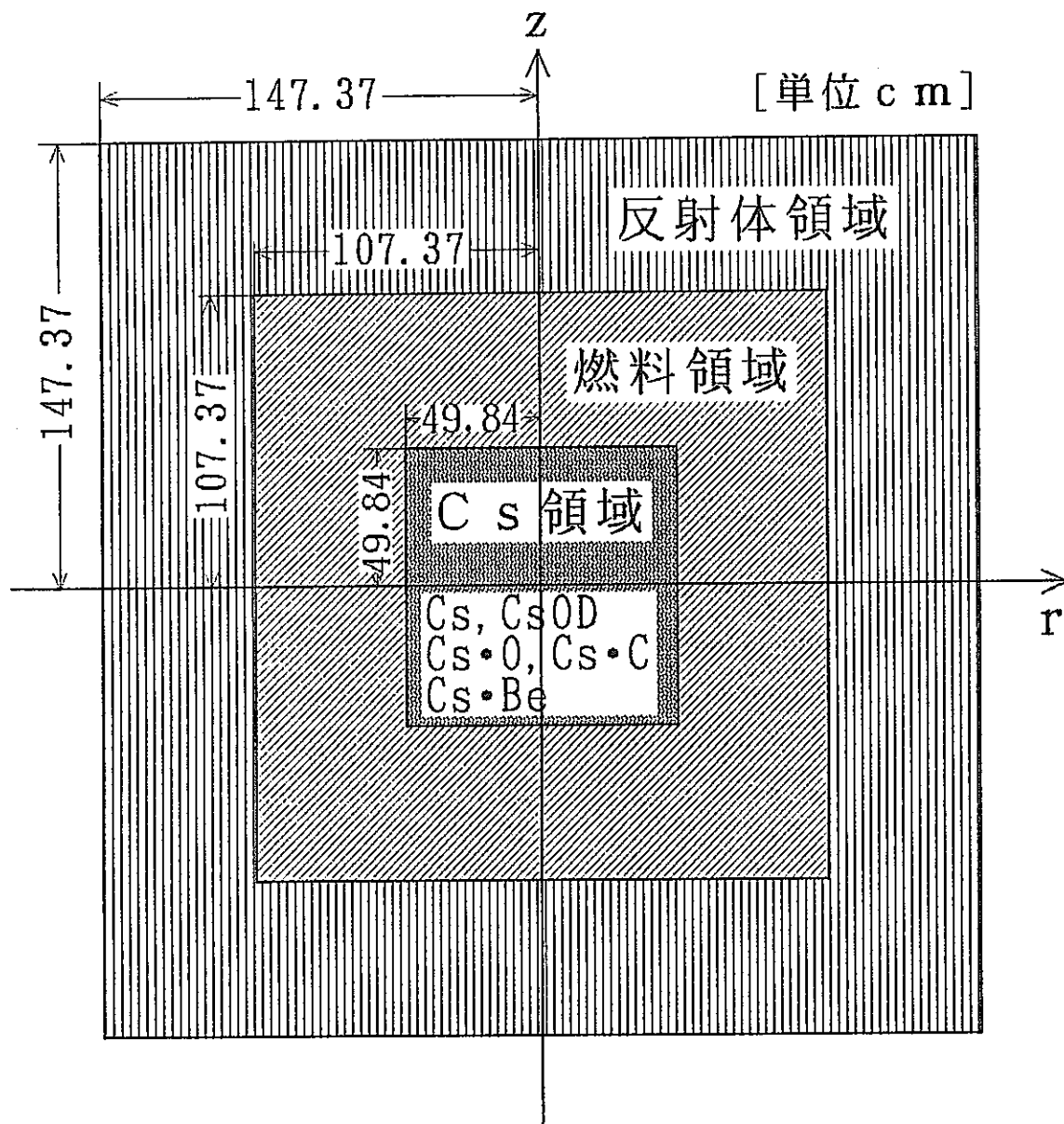


Fig. 3-23 共鳴吸収利用消滅炉の体系

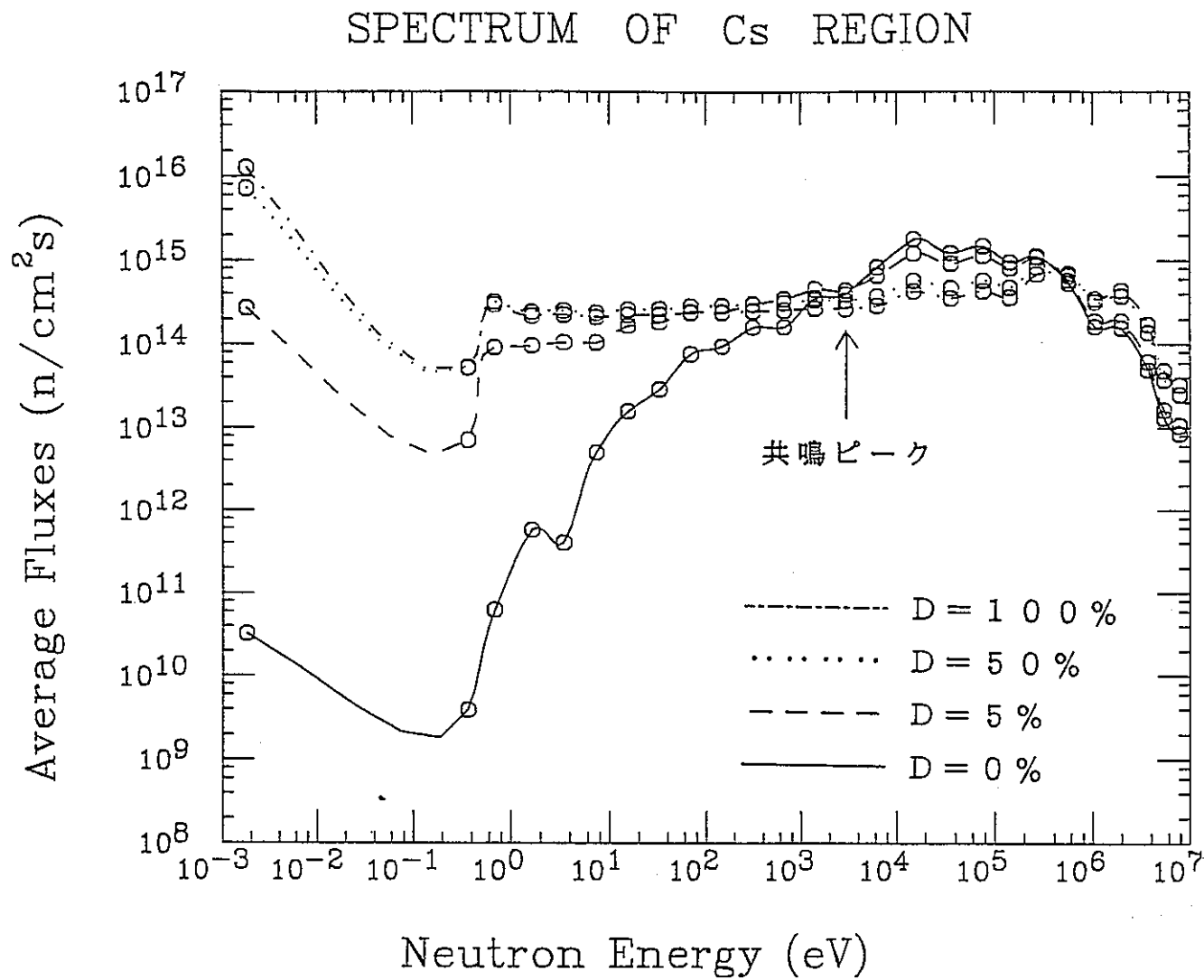


Fig.3-24 Dの割合を変えたときのCs領域の中性子スペクトルの変化

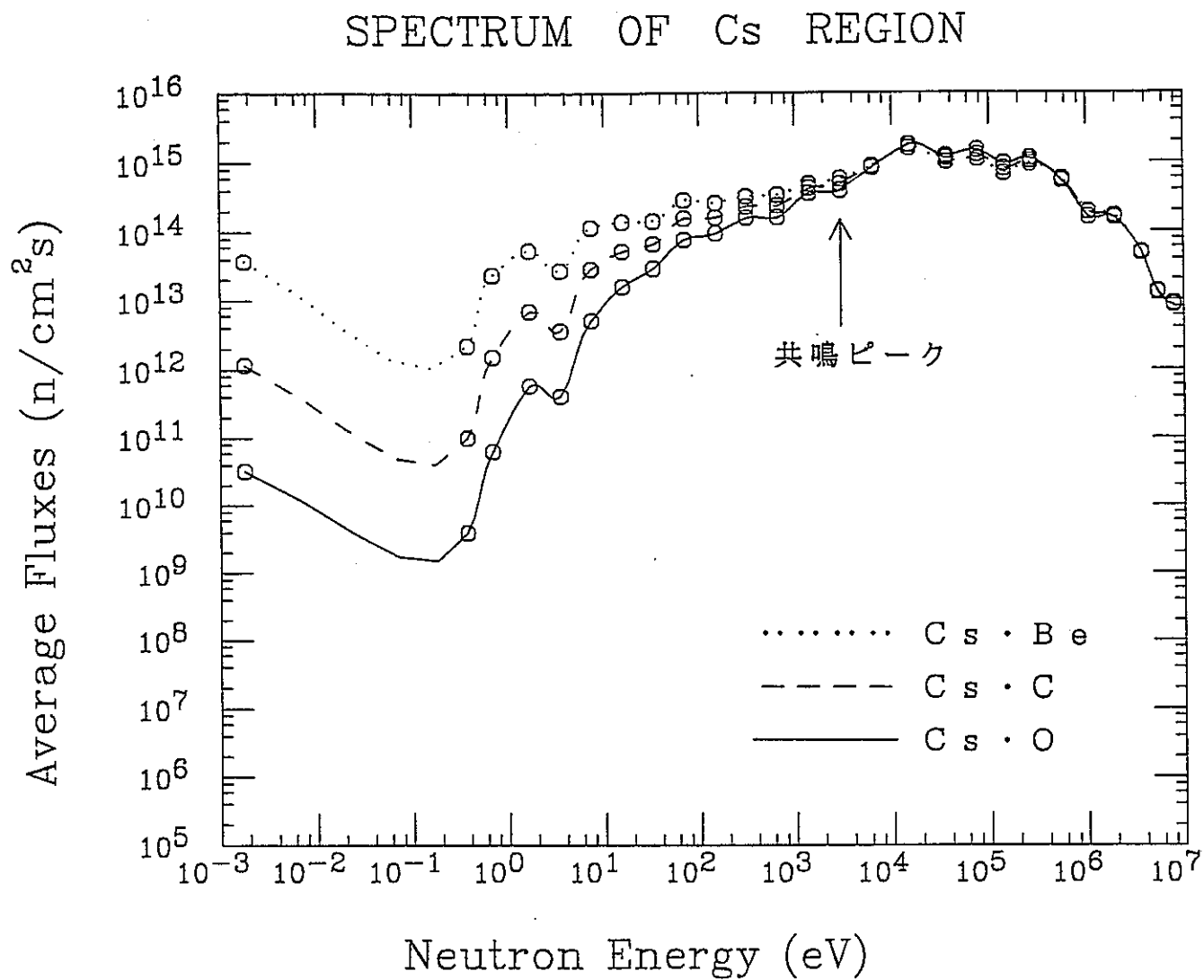


Fig.3-25 減速材を変えたときのCs領域の中性子スペクトルの比較

出力 3.5 GW_{th}

出力密度 500 W/cc

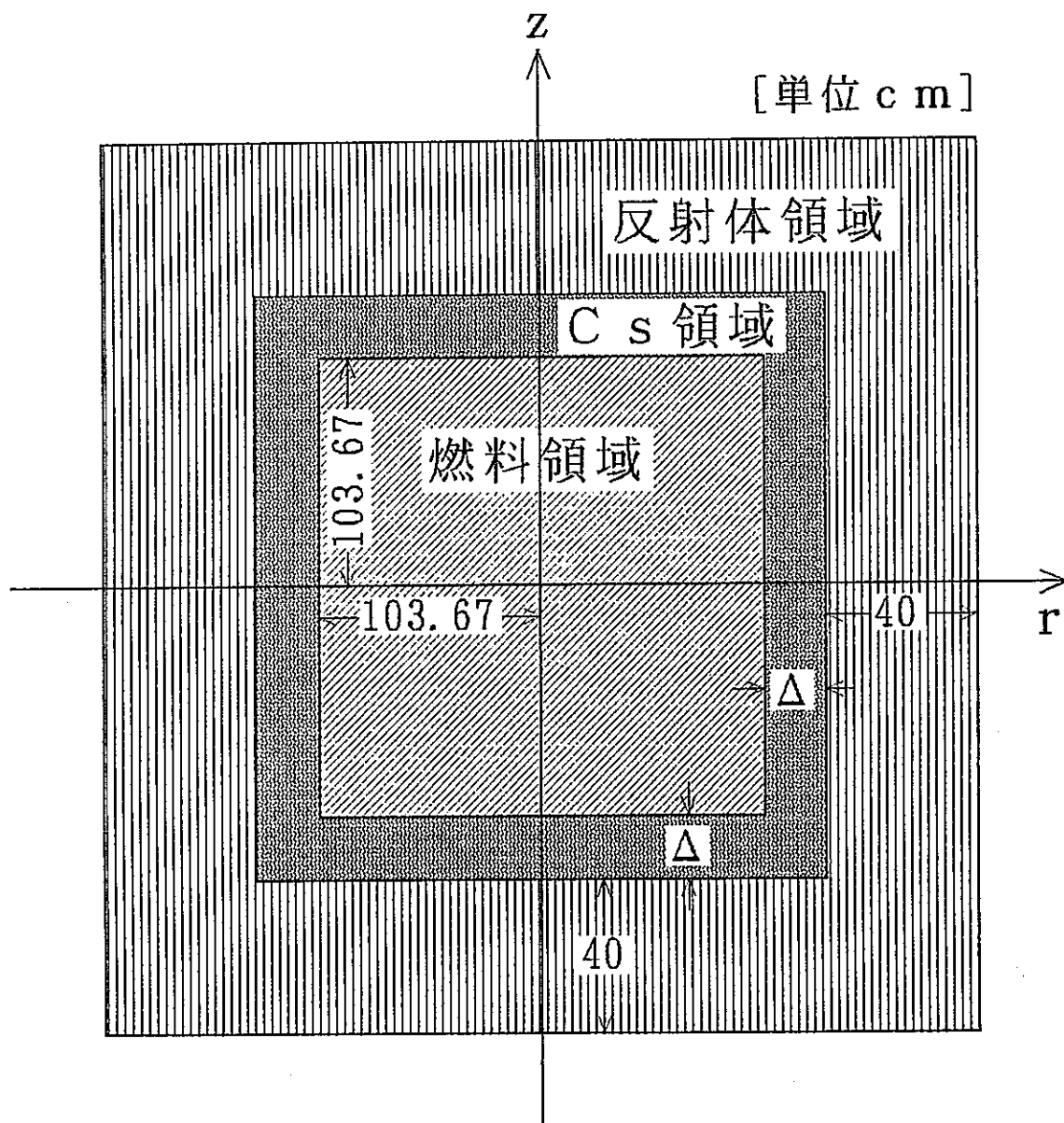


Fig. 3-26 外側 Cs 領域消滅炉

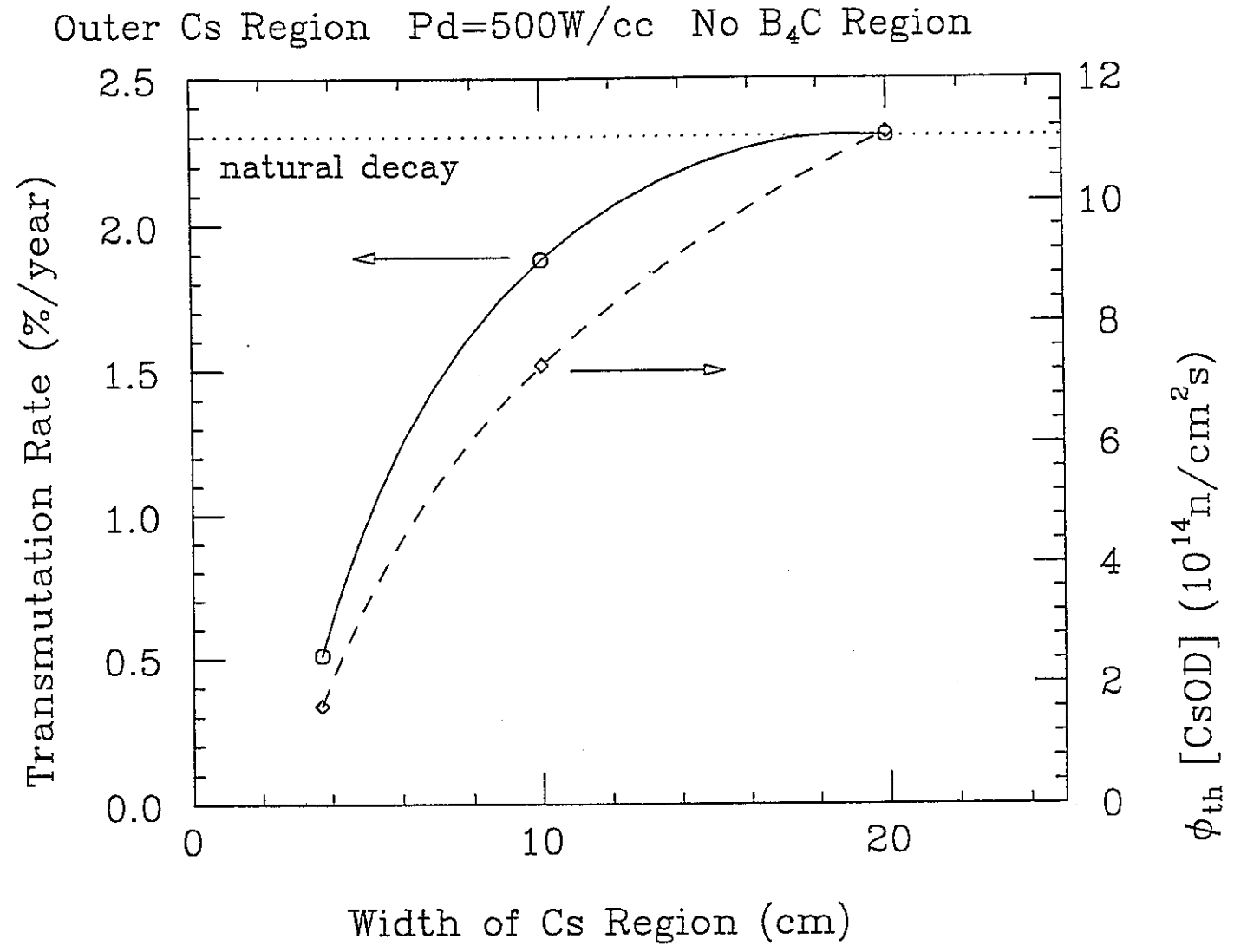


Fig.3-27 Cs領域の厚さと消滅率及びCs領域の平均熱中性子束との関係

4. 消滅炉炉心における解析手法の検討

本研究で検討している消滅炉は高速炉であるが、燃料領域で発生した高速中性子を減速、熱化して ^{137}Cs に照射するため、Cs領域では熱中性子主体となっている。即ち、本消滅炉は高速中性子主体と熱中性子主体のスペクトルを合わせ持つ極めて特殊な体系である。このような体系に対して従来の炉心解析手法の妥当性を検討する。

3.2でも述べたように本研究の炉心解析には、ライブラリーとして高速炉用のJFS-3-J2を、計算コードとして拡散計算コードCITATIONを用いた。燃焼計算においてFPの蓄積は反応度劣化に影響するが、JFS-3-J2ではFPの断面積はランプ化されて収納されている。このランプ化定数は高速炉体系でランプ化されている。しかし、消滅炉のCs領域に近い燃料部分は、B、Cなどの熱中性子吸収材がないと、Cs領域からの熱中性子の影響を受けて、スペクトルは軟らかくなり、熱中性子炉のスペクトルに近くなる。一般に、高速炉と熱中性子炉では炉心のスペクトルが違うので、蓄積されるFPも違い、ランプ化したときの断面積も異なる。4.1で消滅炉体系に対して高速炉用と熱中性子炉用のFPランプ化定数の違いによって燃焼反応度がどれだけ違ってくるかを調べる。

本消滅炉の炉心は中性子スペクトルの空間依存性が強い炉心である。空間依存性の強い炉心に対しては、従来から拡散近似の限界が指摘され、輸送補正が施されてきた。今回は消滅炉炉心計算に高速炉用核定数を用いた2次元拡散計算コードを使用したが、今後、熱中性子炉用核定数も考慮できる2次元輸送計算コードシステムを導入、整備し、炉心核特性量や消滅量などの評価精度の向上を図る予定である。ここでは予備解析として、消滅炉体系に対して1次元輸送計算と1次元拡散計算を行った結果について報告する。4.2でそれについて述べ、4.3で将来のFP消滅炉炉心計算システムについて述べる。

4.1 熱中性子炉用FPランプ化定数の効果

FPランプ化定数はFP核種の生成量を重みとして作成されるが、高速炉と熱中性子炉では、ある燃焼度におけるFP生成量は異なる。例えば、熱中性子吸収

断面積の大きい ^{135}Xe や ^{149}Sm などは、熱中性子炉では熱中性子を吸収してどんどん減って行くが、高速炉では熱中性子が少ないので存在し続けるためそれらの生成量は異なる。特に、 ^{135}Xe や ^{149}Sm は高速炉用の方が熱中性子炉用に比べ重みが大きいと考えられる。その結果、高速炉用FPランプ化定数の方が熱中性子炉用FPランプ化定数より熱中性子吸収断面積は大きい（Fig.4-1参照）。

われわれは熱中性子炉用FPランプ化定数を作成し、Fig.4-2に示す消滅炉の体系で燃焼計算を行い、JFS-3-J2の高速炉用FPランプ化定数を用いたときと熱中性子炉用FPランプ化定数を用いたときとで実効増倍率の変化がどのように違うかを調べた。燃焼計算において、燃料領域をCs領域との境界から5cmの内側燃料領域とそれ以外の外側燃料領域に分け、FPの種類を次のように分けて計算した。

- ・ 内側、外側燃料領域とも高速炉用FPランプ化定数（以下、高FPと記す）を使用
- ・ 内側、外側燃料領域とも熱中性子炉用FPランプ化定数（以下、熱FPと記す）を使用
- ・ 内側燃料領域に熱FP、外側燃料領域に高FPを使用
- ・ FPは蓄積しない

Cs領域の種類は $^{137}\text{CsOD}$ と ^{137}Cs にした。

はじめにCs領域に $^{137}\text{CsOD}$ を装荷した場合について議論する。このときの内側及び外側燃料領域の中性子スペクトルをFig.4-3に示す。Fig.4-2の体系はCs領域で熱化された中性子が燃料領域に戻るのをカットする熱中性子吸収材がないので、熱中性子がかなりの割合で燃料領域に戻ってくるため、内側燃料領域のスペクトルはかなり軟らかくなっていることが判る。

このような体系で異なるFPランプ化定数を用いたときの k_{eff} の変化の相違がFig.4-4である。Fig.4-4を見るとFPランプ化定数の違いによる k_{eff} の変化の違いは非常に大きいことが判る。特に、燃焼初期が大きい。この原因はFig.4-3から判るように内側燃料領域の中性子スペクトルが軟らかく、低エネルギーでのFPランプ化定数の捕獲断面積の違いが大きく効いてくるからだと思われる（Fig.4-1参照）。外側燃料領域はスペクトルが硬いので、この部分を熱FPから高FPに

変えても k_{eff} はほとんど変わらない (Fig. 4-4 の熱 FP と熱 + 高 FP の比較)。
 高 FP を使用した場合の k_{eff} の振舞は、燃焼初期で急激に k_{eff} が落ち、その後徐々に上がって行く。燃焼初期の急激な k_{eff} の減少は、低エネルギーの中性子吸収面積が大きい高 FP に熱中中性子が吸収されるからである。その後の k_{eff} の上昇は、ランプ化 FP が一種の Cs 領域からの熱中中性子吸収材になり、内側燃料の急激な燃焼を抑えるからである。(Fig. 4-1 の体系の消滅炉の転換比は 1 以上である。)
 一方、熱 FP を使用した場合は、低エネルギーの中性子吸収断面はそれ程大きくないので、燃焼初期の急激な k_{eff} の減少はなく、FP 蓄積なしの場合と同じようになだらかに変化する。Table 4-1 から判るように、時刻 $t = 20$ days では高 FP は熱 FP より 20 倍多く中性子を吸収している。特に内側燃料領域の吸収が大きい。この吸収の違いが k_{eff} に大きく影響を与えている。

Fig. 4-5 は $^{137}\text{Cs O D}$ を ^{137}Cs に置き換えたときの k_{eff} の変化だが、 ^{137}Cs に変えたことによって Cs 領域で中性子はあまり減速されず、したがって、燃料領域に熱中中性子が戻ってくる割合も少なくなる。即ち、燃料領域の中性子スペクトルは硬い (Fig. 4-6 参照)。この場合は中・高エネルギーでのランプ化定数の断面の違いが効いてくるのだが、Fig. 4-1 を見るとこの領域で若干高 FP の断面が大きいだけであまり差はない。よって、 k_{eff} もあまり差はなく、やや高 FP 使用の方が小さいだけである。

以上の解析により、Cs 領域から燃料領域への熱中中性子のもれが多い体系の消滅炉では、Cs 領域との境界付近の燃料は中性子スペクトルが軟らかいので、燃焼計算において熱中中性子炉用 FP ランプ化定数を使うべきであることが判った。しかし、熱中中性子吸収材 (B_4C など) を入れてもれを少なくすれば、 ^{137}Cs を装荷した場合の結果からの類推で内側燃料領域の中性子スペクトルはそれ程軟らかくならず、FP ランプ化定数の違いの効果は大きくないと考えられる。しかし、第 3 章の計算は全て内側燃料領域に熱中中性子炉用 FP ランプ化定数を、外側燃料領域に高速炉用 FP ランプ化定数を使用した。

4.2 輸送計算と拡散計算の比較

FP 消滅炉心では、炉心中央領域 (FP 装荷領域) で熱中中性子主体のスペクト

ルが形成されるが、その外側の炉心燃料領域では高速中性子主体のスペクトルとなっている。中性子スペクトルの空間依存性が強い炉心に対しては、従来から拡散近似の限界が指摘され、輸送計算の適用が望まれてきた。また、今回改良型消滅炉心ではFP領域で発生した熱中性子束が炉心領域へ漏れてthermal spikeを形成するので、それを防ぐため熱中性子吸収断面積の大きいB₄C領域をFP領域と燃料領域の間に設けている。この場合、中性子束分布はこのB₄C領域の前後で大きく変化することになり、これに関する拡散近似の妥当性を検討する必要がある。以下では、1次元輸送計算コードXSDRNPMを用いて輸送計算と拡散計算を行い、その結果を比較し、拡散近似の妥当性を検討する。

計算モデルをFig.4-7に示す。計算体系は1次元球モデルとした。1次元輸送計算の解析条件をTable 4-2に示す。1次元拡散計算はXSDRNPMコードの拡散計算オプションを用いて行った。断面積はSCALEシステム中の中性子27群断面積ライブラリーを使用した。27群断面積ライブラリーの群構造をTable 4-3に示す。また、中性子吸収材が炉内中性子束分布及びCs領域の中性子束に及ぼす影響を評価するためにB₄CをSUSに置換した場合についても解析を行った。

計算結果をFig.4-8~11に示す。これらの図を見ると、中性子吸収材がB₄CとSUSのどちらの場合も中性子エネルギーが熱外以上では、輸送計算と拡散計算の結果はほぼ等しいことが判る。しかし、熱中性子束分布の違いは大きい。今回は予備解析であるのでこの理由は詳細に調べていないが、消滅炉体系に対する拡散近似の限界を示しているように思われる。消滅率の計算にはCs領域の平均中性子束を用いた。Fig.4-11を見るとCs領域の熱中性子束は輸送計算の方が拡散計算より高くなっている。したがって、輸送補正を行うと消滅率が上がる可能性がある。その効果はSUSよりB₄Cの方が大きいと思われる。

4.3 将来のFP消滅炉炉心計算コードシステム

今後、FP消滅炉心の解析を進めていく上で、必要な炉心核計算コードシステムの概要を以下に記す。

現在使用している核計算コードシステムについては3.2節に述べた通りであるが、改良が必要なところは次の2点である。

①熱中性子主体のスペクトルが形成される領域の核種の断面積の整備。

②FP装荷領域と燃料領域の間の領域における急激な中性子スペクトル及び中性子束分布の変化に対応するための輸送計算コードの導入。

①に関しては、現在使用している断面積ライブラリーJFS-3-J2は高速炉用であり、熱中性子の上方散乱が取り扱われておらず、また、熱群に対するエネルギーメッシュが粗く、熱中性子に対する精度が良くないと考えられる。そこで、熱エネルギーに対して詳細な群を持つライブラリーから上方散乱を考慮した断面積を整備する必要がある。

②に関しては、本消滅炉の体系は中性子スペクトル及び中性子束分布の空間依存性が大きく、4.2節で述べた予備解析で拡散計算の熱中性子に対する精度が良くないことが判ったので、輸送計算コードを導入し、精度を上げる必要がある。

①、②を取り込んだ将来のFP消滅炉炉心計算コードシステムの概要をFig.4-12に示す。このコードシステムは原研で開発されたSRACコードシステム¹⁸⁾を基礎に置いている。SRACにはPublic Libraryと呼ばれる断面積ライブラリーが用意されており、高速群定数は74群、熱中性子群定数は48群である。(15群重なっているためPublic Libraryは全部で107群である。)これからユーザーの目的にあったUser Libraryを作成し、セル燃焼計算を実行し、実効断面積を作成する。その実効断面積を用いて炉心計算を行う。更に、SRACには炉心計算用に1次元 S_N 輸送計算コードANISN, 2次元 S_N 輸送計算コードTWOTRAN, 1次元拡散計算コードTUD, 多次元拡散計算コードCITATIONが用意されている。したがって、SRACコードを導入すれば②の問題は解決できる。しかし、燃焼計算には多次元拡散計算コードCOREBNを使用するため、FP消滅炉体系に対する燃焼計算結果の精度は良くないことが予想される。そこで、2次元輸送計算コードTWOANTに燃焼ルーチンを付加した輸送燃焼計算コードを作成し、燃焼計算にはこのコードを使用する。①の問題に対しては、SRACには48群の詳細な熱中性子群定数が用意されているので、これから上方散乱を考慮した断面積を作ることが可能である。

JFS-3-J2には燃料からの高速中性子を減速する役割を果たす重水素と消滅処理核種である¹³⁷Csの断面積が含まれていないが、SRACのPublic Libraryにはそれらが含まれているので、その問題についてもSRACを導入すれば解決する。但し、

熱中性子用FPランプ化定数は含まれていないので、それを使用するためにはJFS-3-J2形式の断面積をSRACのUser Libraryに変換するためのプログラムを作成する必要がある。

将来のFP消滅炉炉心計算コードシステムの計算の流れは、まず、SRACのPublic Libraryから高速69群、熱1群のJFS群構造を持つUser Libraryを作成する。必要とあらば熱群定数を増やす。そして、セル計算を実行し、実効断面積を作成する。これを用いて炉心計算にはSRAC付属のコードあるいはTWODANTコードを使用し、燃焼計算には新たに作成する2次元輸送燃焼計算コードを使用する。このコードシステムによって、炉心核特性量やFP消滅量などの評価精度が向上するものと期待される。

Table 4-1 時刻 $t = 20$ days の高速炉用及び熱中性子炉用ランプ化 F P の中性子
吸収割合 (%)

	高速炉用ランプ化 F P	熱中性子炉用ランプ化 F P
内側燃料領域	5.02	0.23
外側燃料領域	0.03	0.02
合計	5.05	0.25

Table 4-2 1次元輸送計算解析条件

輸送計算コード	XSDRNPMS
中性子断面積ライブラリー	SCALE付属27群
中性子群数	27群
S _n 分点数	S8
P ₁ 次数	P3
収束判定条件	中性子束 1×10^{-4} 核分裂中性子源 1×10^{-4}
計算体系	1次元球体系

Table 4-3 S C A L E 2 7 群中性子断面積ライブラリーの群構造

群	上限エネルギー	下限エネルギー	レサジー幅
1	20.000 MeV	6.434 MeV	1.13
2	6.434 MeV	3.000 MeV	0.76
3	3.000 MeV	1.850 MeV	0.48
4	1.850 MeV	1.400 MeV	0.28
5	1.400 MeV	900.000 keV	0.44
6	900.000 keV	400.000 keV	0.81
7	400.000 keV	100.000 keV	1.39
8	100.000 keV	17.000 keV	1.77
9	17.000 keV	3.000 keV	1.73
10	3.000 keV	550.000 eV	1.70
11	550.000 eV	100.000 eV	1.70
12	100.000 eV	30.000 eV	1.20
13	30.000 eV	10.000 eV	1.10
14	10.000 eV	3.050 eV	1.19
15	3.050 eV	1.770 eV	0.54
16	1.770 eV	1.300 eV	0.31
17	1.300 eV	1.130 eV	0.14
18	1.130 eV	1.000 eV	0.12
19	1.000 eV	0.800 eV	0.22
20	0.800 eV	0.400 eV	0.69
21	0.400 eV	0.325 eV	0.21
22	0.325 eV	0.225 eV	0.37
23	0.225 eV	0.100 eV	0.81
24	0.100 eV	0.050 eV	0.69
25	0.050 eV	0.030 eV	0.51
26	0.030 eV	0.010 eV	1.10
27	0.010 eV	1.0E-05 eV	6.91

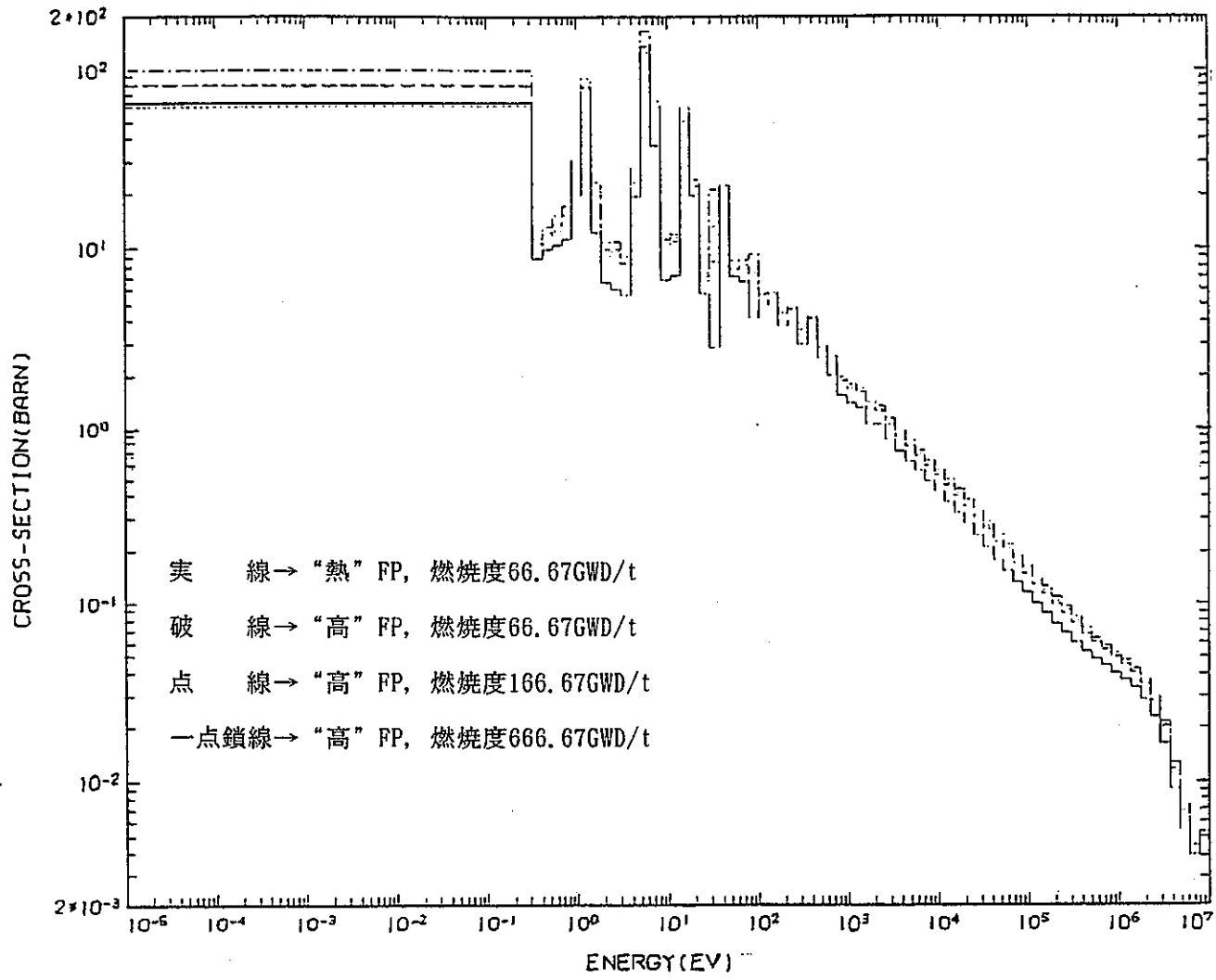
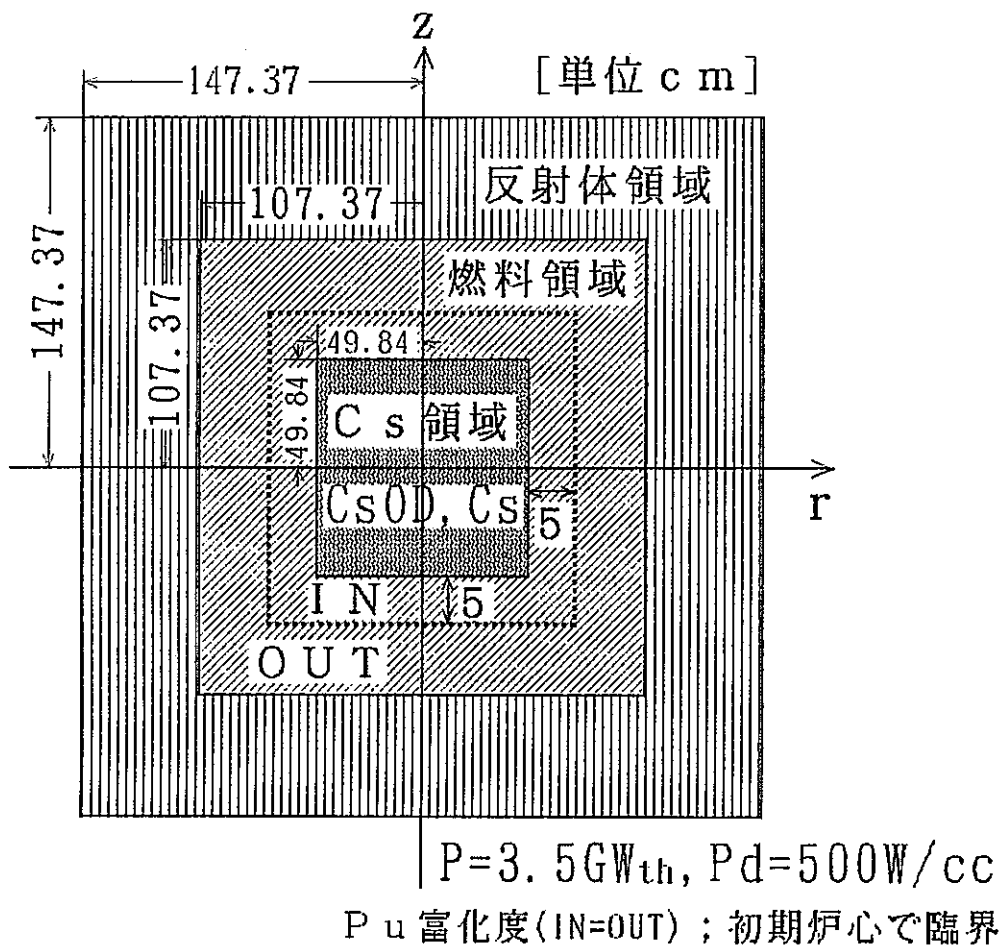


Fig.4-1 熱中性子炉用FPランプ化定数と高速炉用FPランプ化定数との比較
(Pu-239, 捕獲断面積)



ランプ化定数の種類 ;

(IN, OUT)=(高, 高), (熱, 高), (熱, 熱), (なし, なし).

Cs領域の種類 ; $^{137}\text{CsOD}, ^{137}\text{Cs}$



燃 焼 計 算

Fig. 4-2 熱中性子炉用FPランプ化定数の効果を見るための計算条件

Spectra of Fuel Region (CsOD in Cs Region)

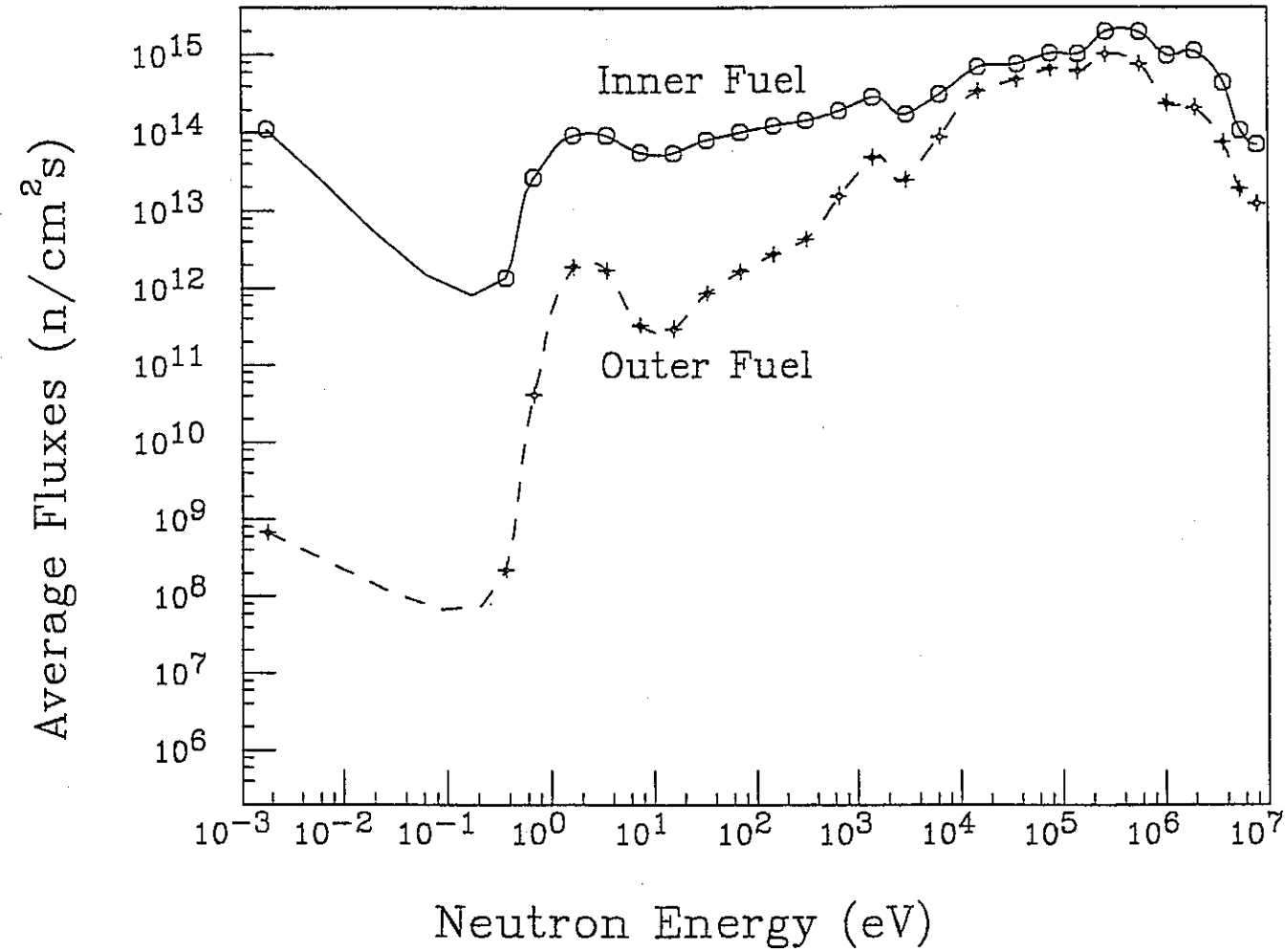


Fig.4-3 Cs領域に¹³⁷CsODを装荷したときの内側及び外側燃料領域の中性子スペクトル

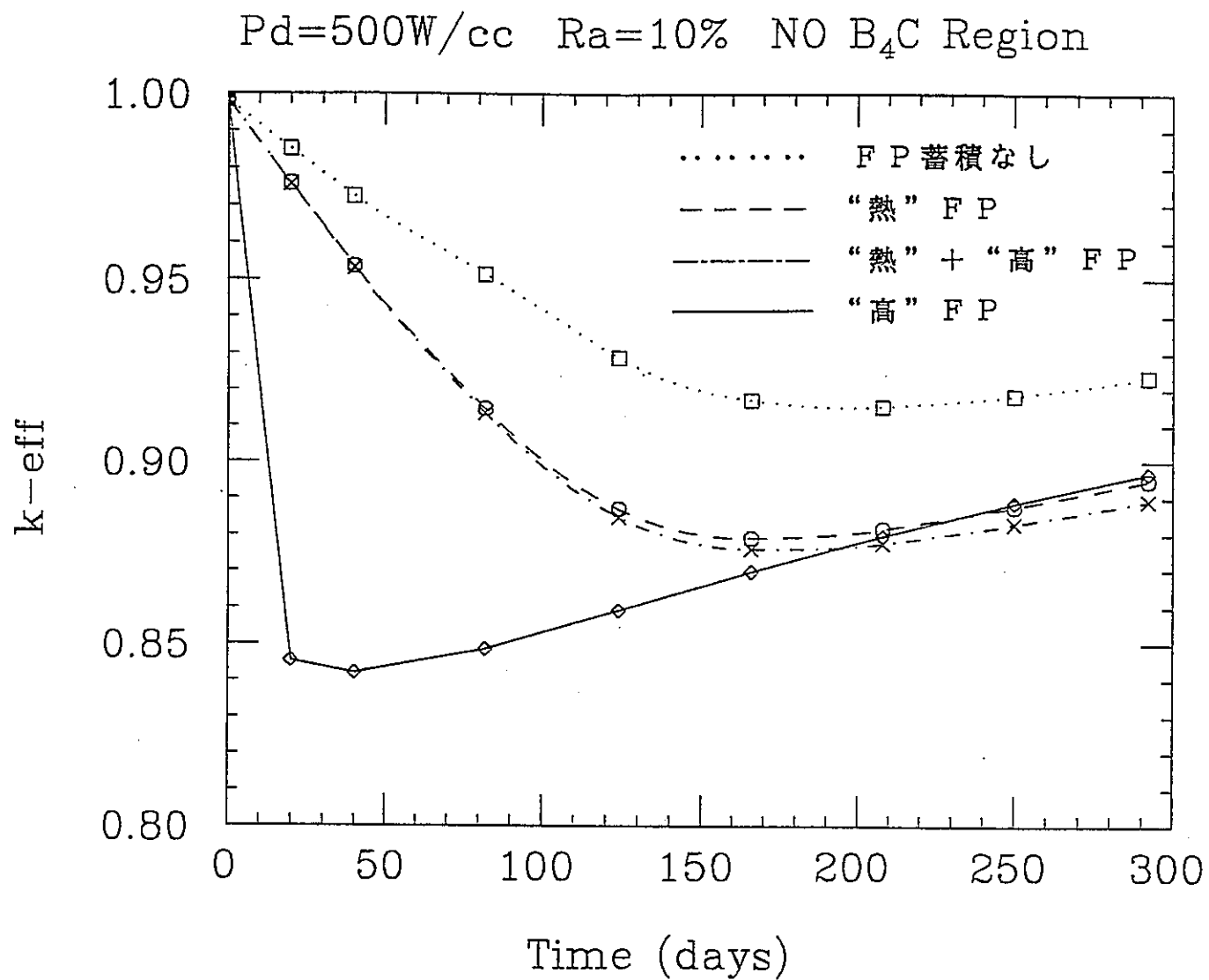


Fig.4-4 Cs領域に¹³⁷CsODを装荷したときのFPランプ化定数の違いによるk_{eff}の変化の相違

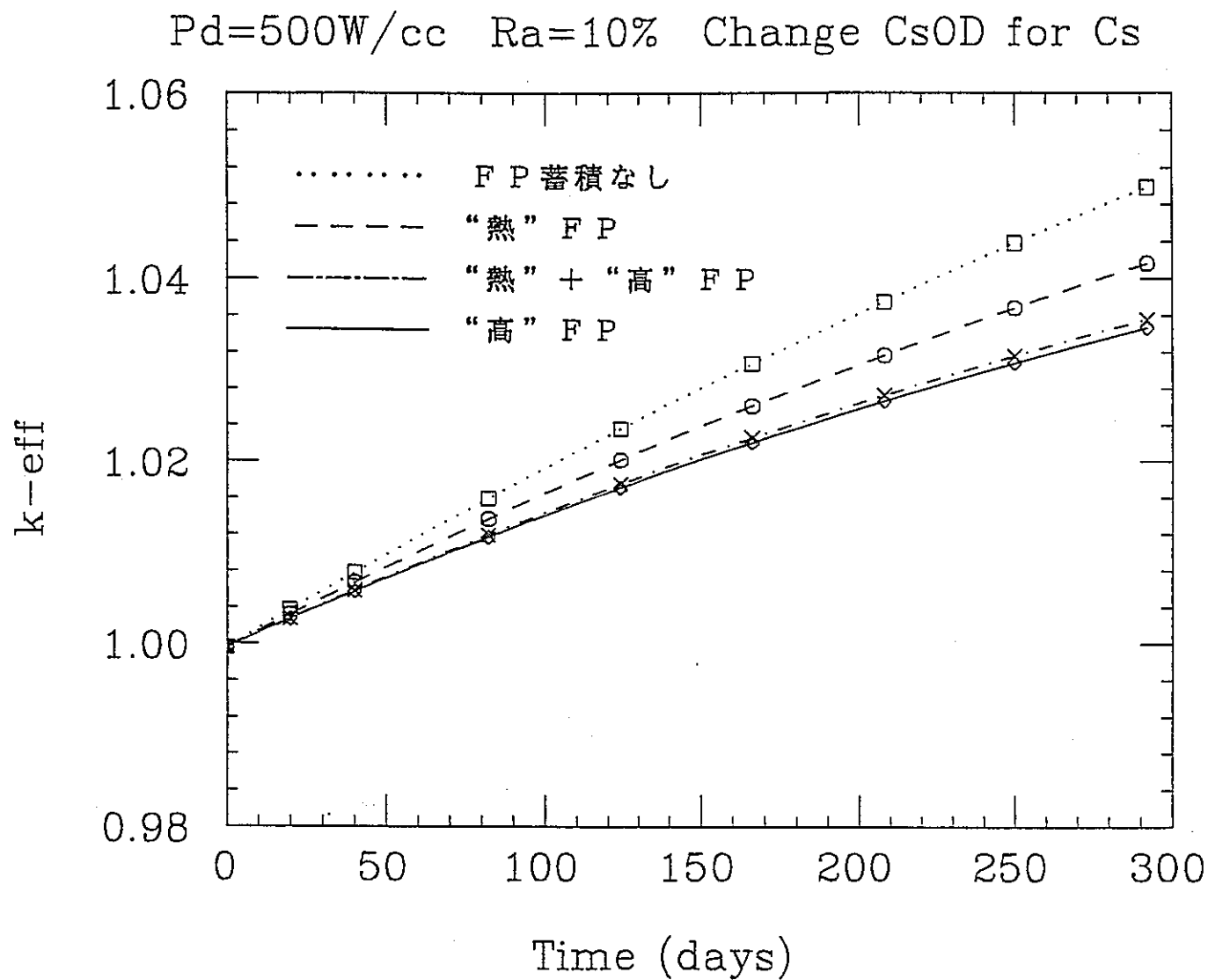


Fig. 4-5 Cs領域に ^{137}Cs を装荷したときのFPランプ化定数の違いによる k_{eff} の変化の相違

Spectra of Fuel Region (Cs in Cs Region)

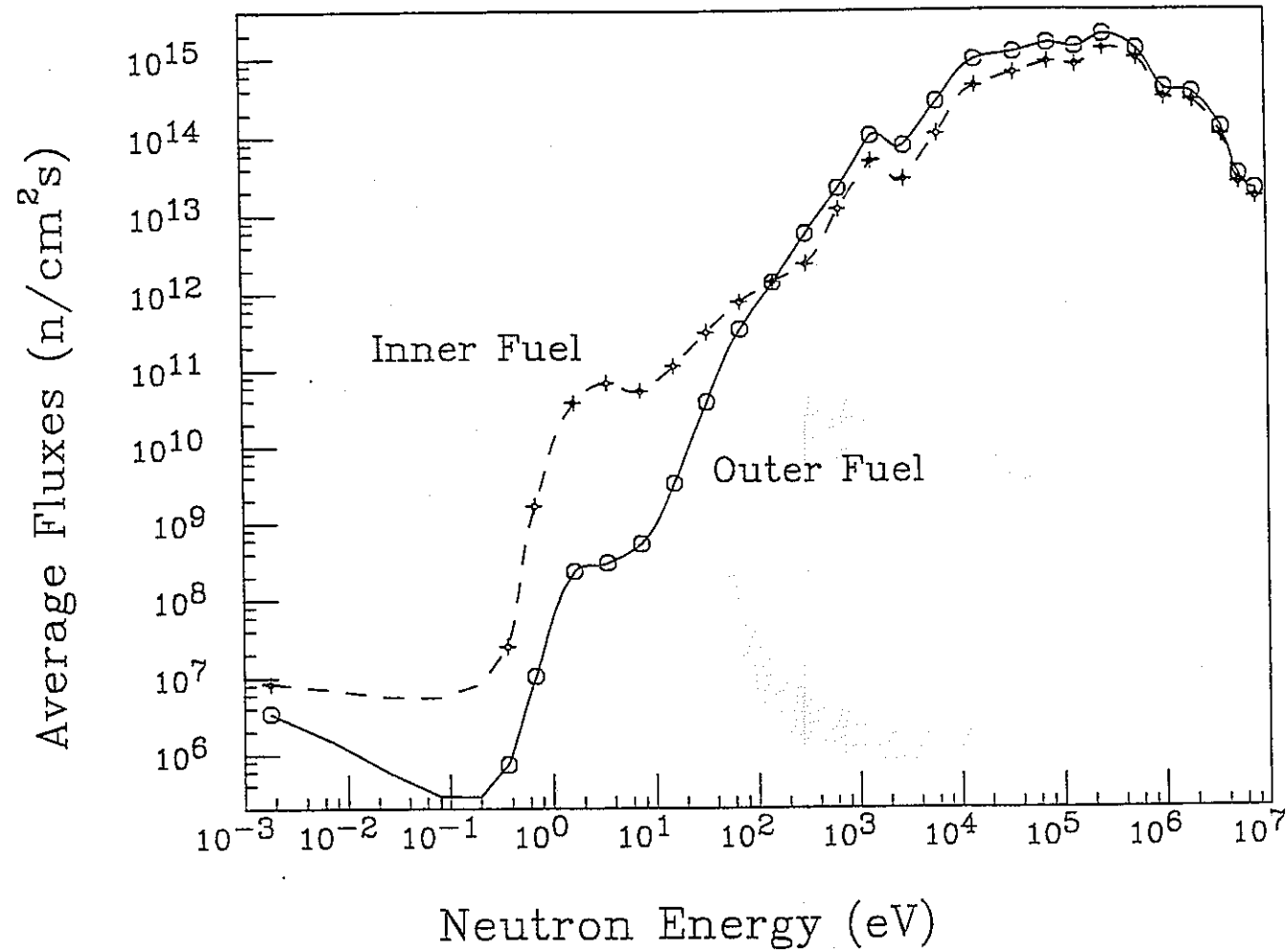
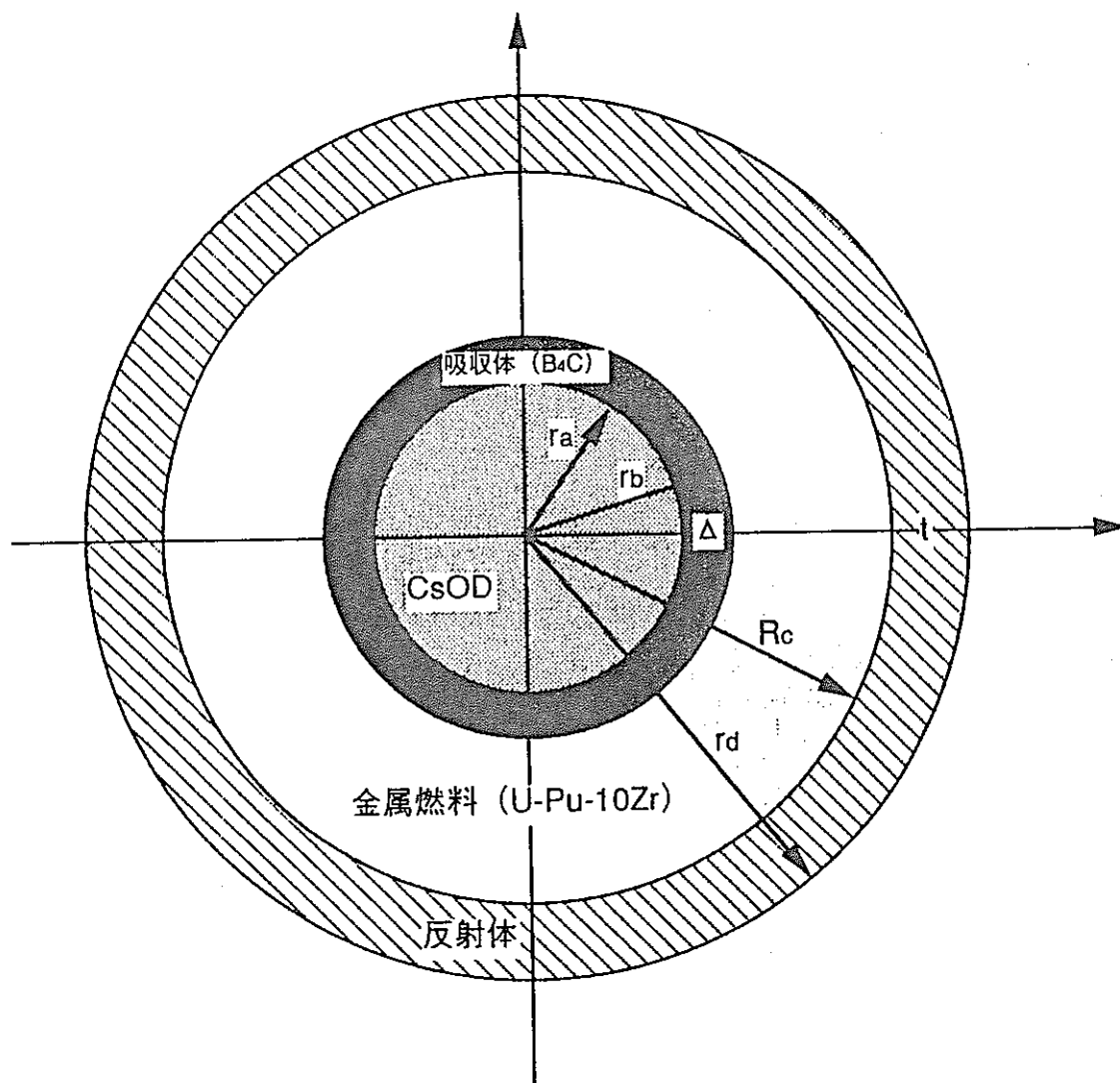


Fig.4-6 Cs領域に¹³⁷Csを装荷したときの内側及び外側燃料領域の中性子スペクトル



$r_a = 75.3513\text{cm}$

$r_b = 77.3513\text{cm}$

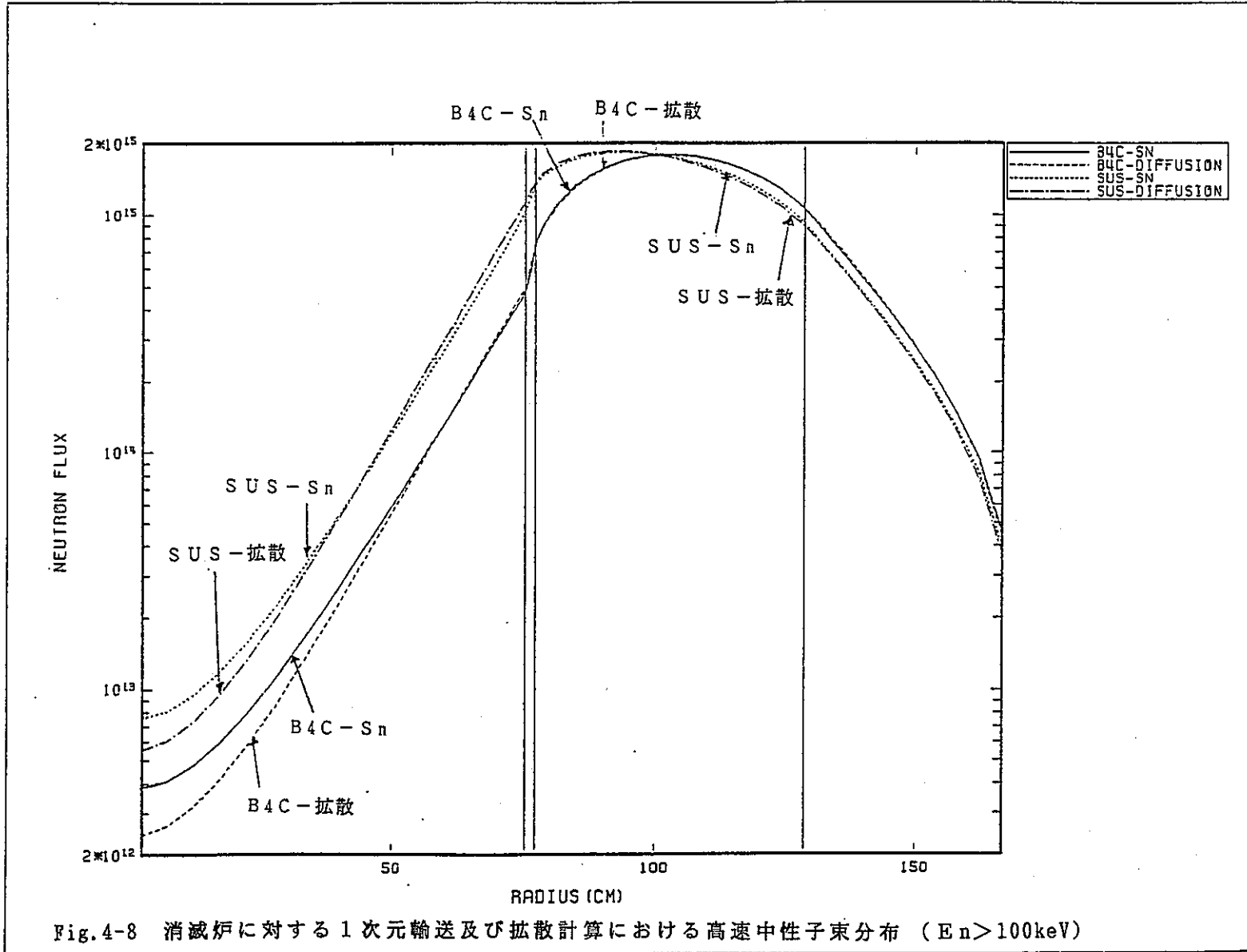
$R_c = 128.7443\text{cm}$

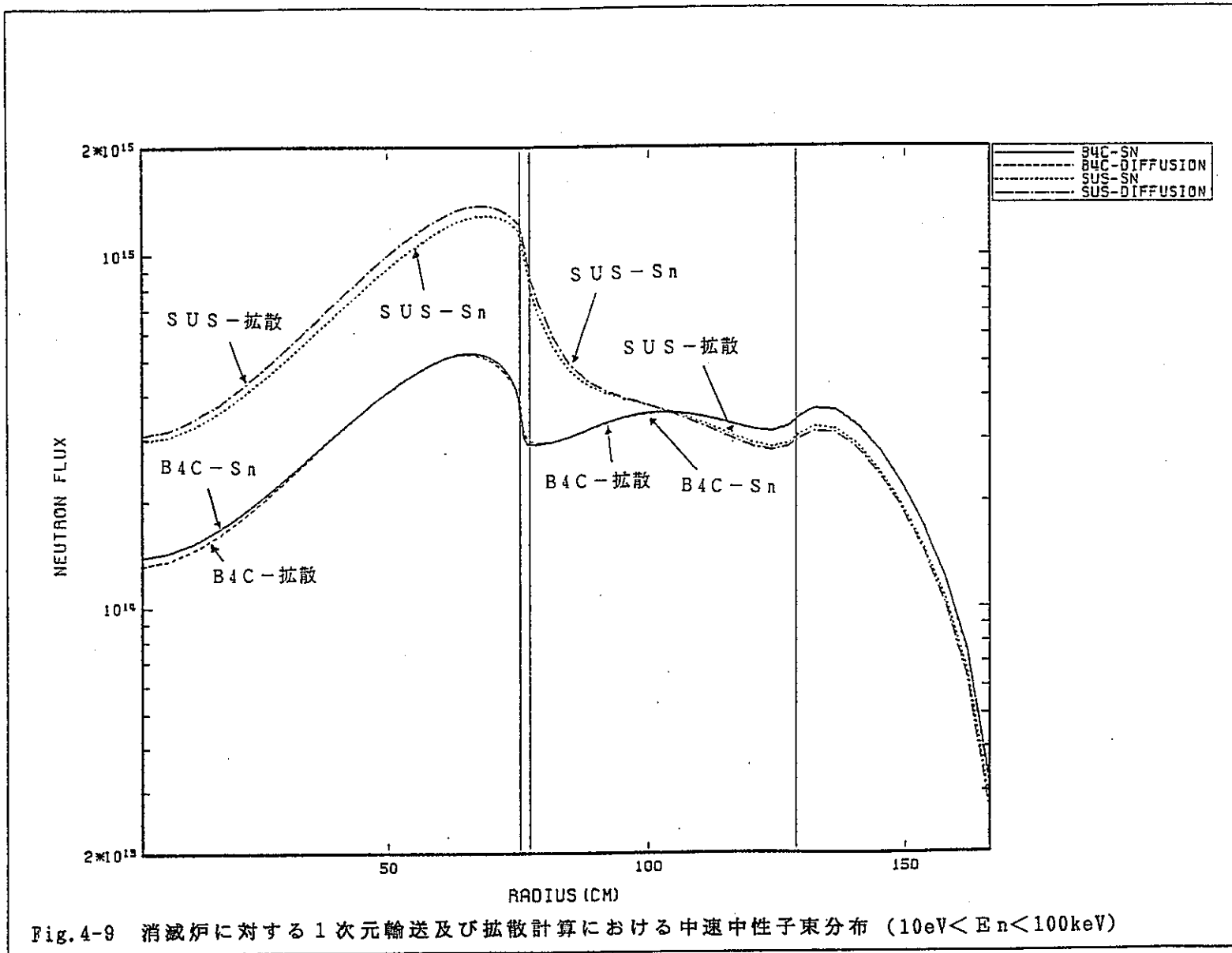
$\Delta = 2.0\text{cm}$

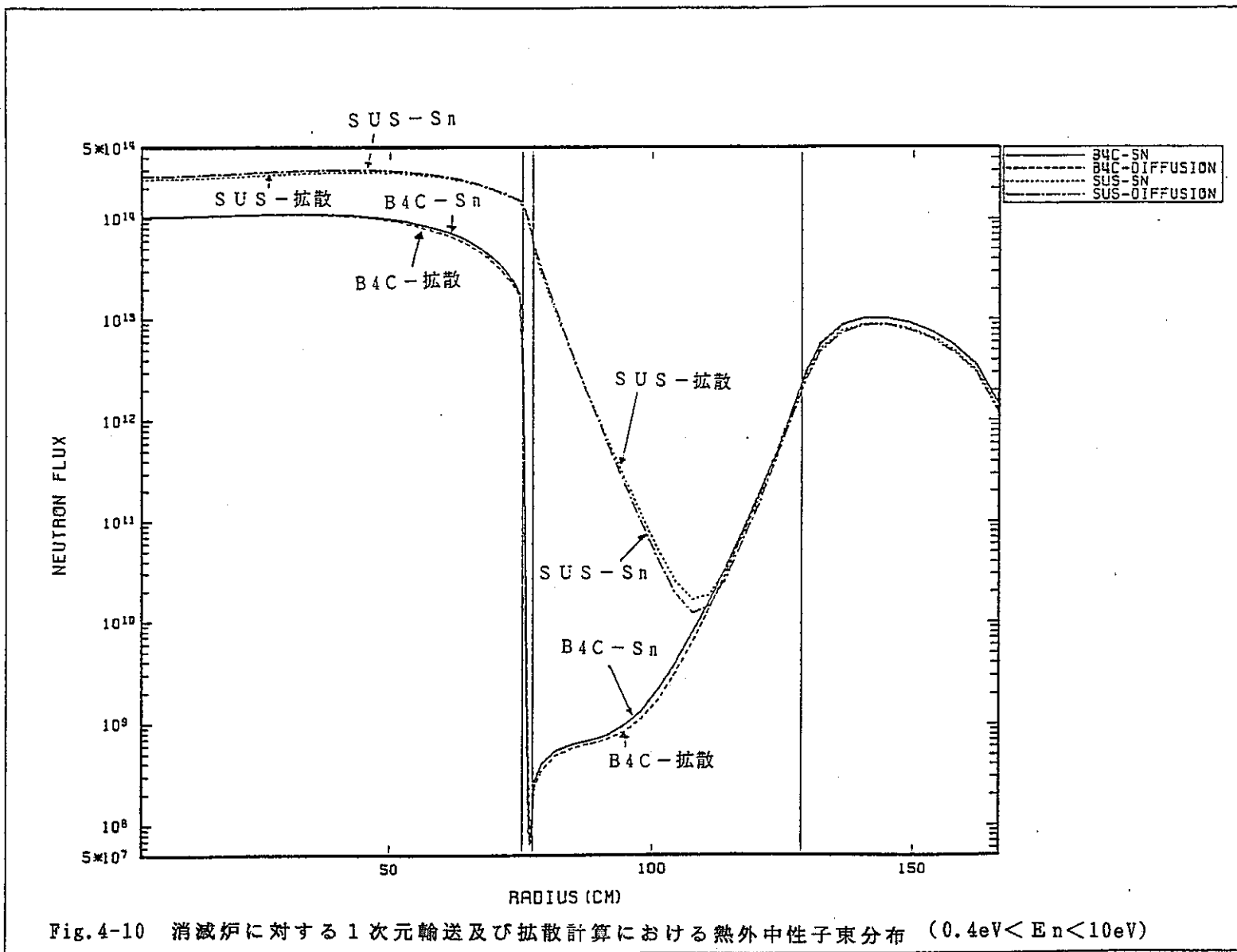
$t = 40.0\text{cm}$

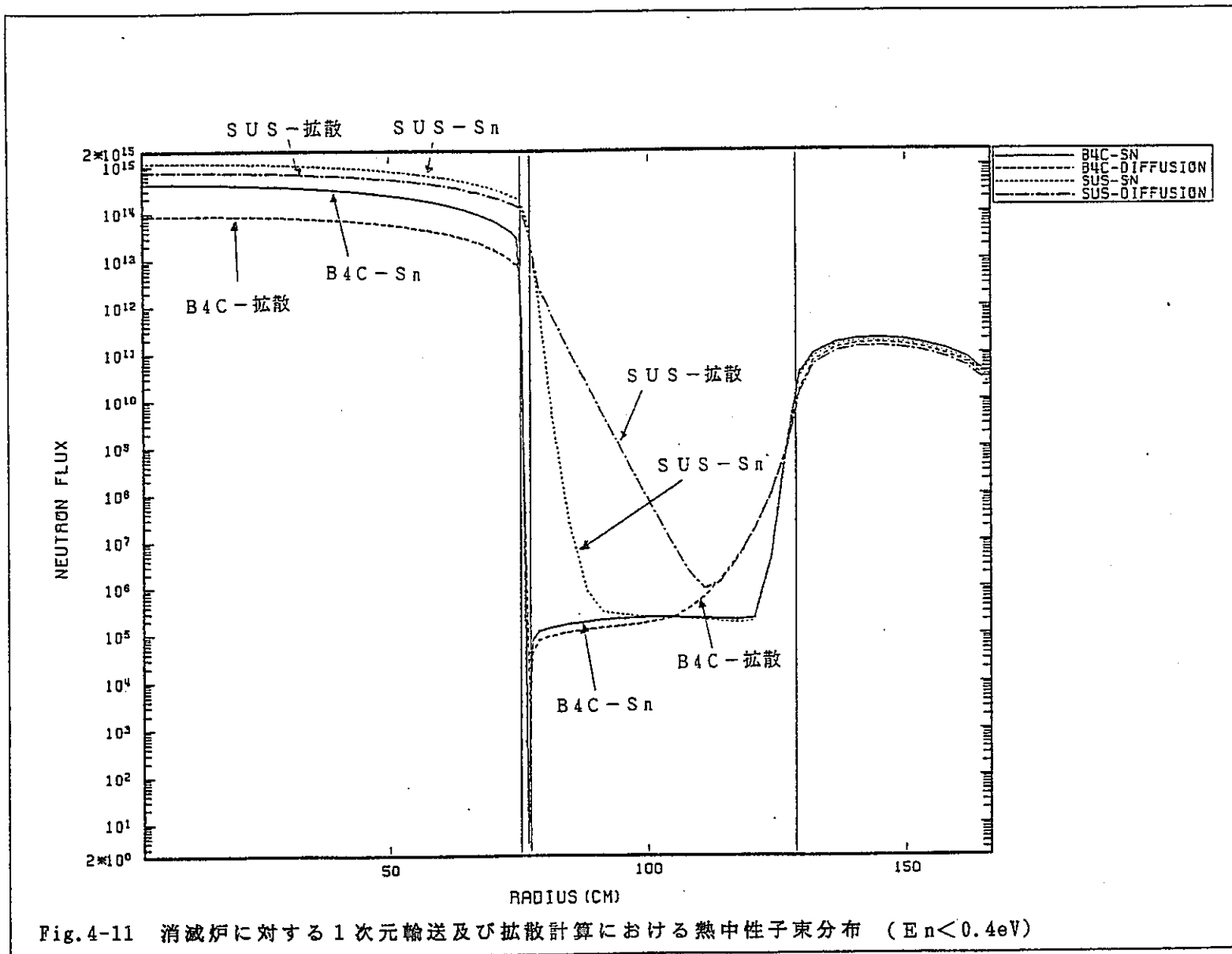
CsOD領域の炉心に対する割合 20%

Fig.4-7 改良型消滅炉心に対する1次元解析モデル









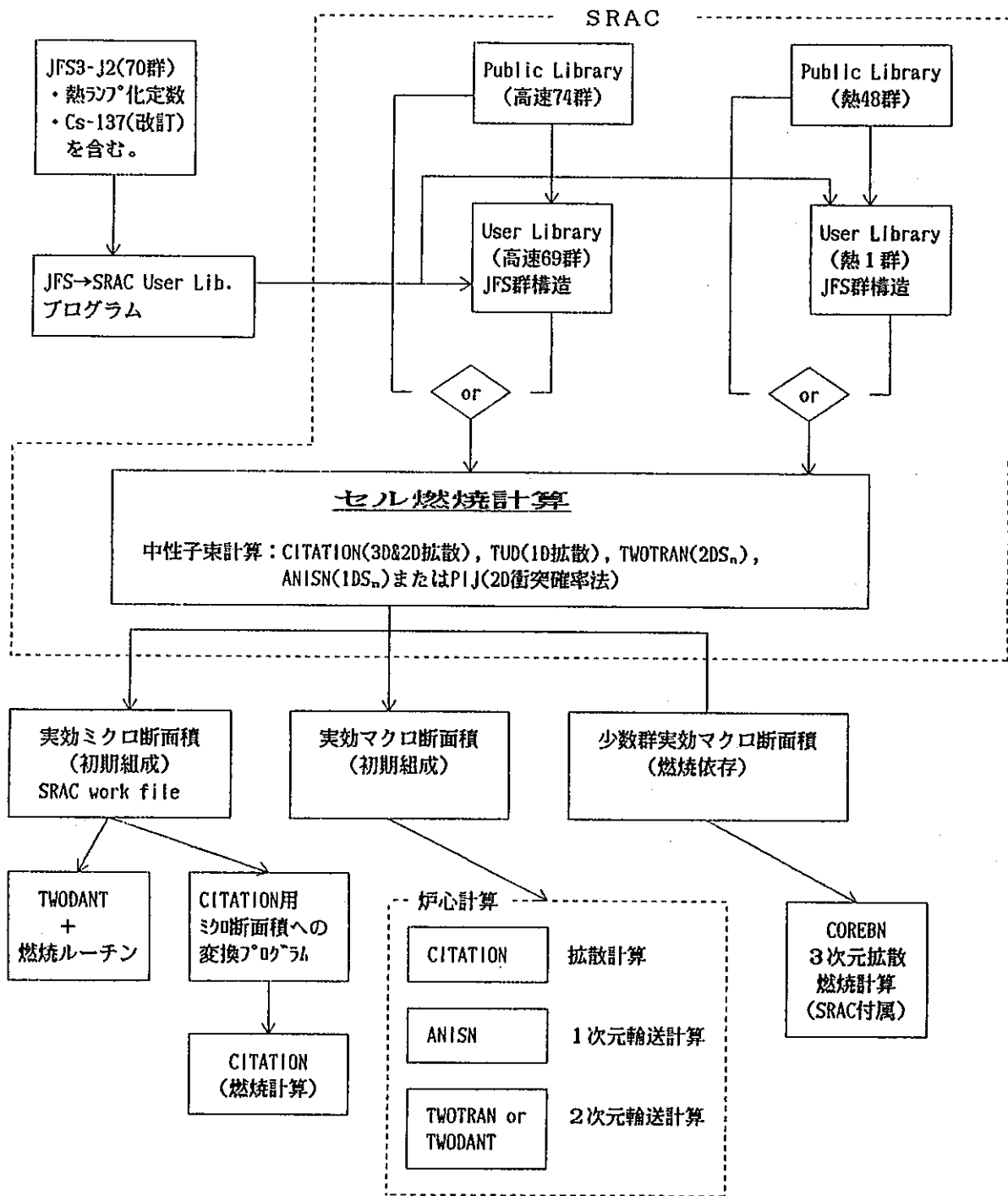


Fig. 4-12 将来のFP消滅炉炉心計算コードシステム

5. 結言

5.1 炉心概念

改良型FP消滅処理用原子炉を考え、その核特性及び消滅特性を調べた。従来のFP消滅炉には、FP領域と燃料領域の境界付近に鋭い出力ピークが生じていたが、それを抑えるために改良型消滅炉では、FP領域と燃料領域の間にB₄C領域を設けた。更に、FP領域の中性子束を上げるためにFP領域の回り全てを燃料で囲んだ体系を考えた。中性子の体系外へのもれを少なくするために外径と高さを等しくした。そして、消滅率、燃焼反応度及び出力ピークキング係数に目標値を定め、種々のパラメータ解析を実施した。

FPとして原子炉から多量に発生し、しかも、消滅の困難とされる¹³⁷Csを選んだ。燃料は前年度までの燃焼解析で有利であることが判明した体積比55%の金属燃料U-Pu-10Zrを使用した。パラメータとして変化させたものは、出力密度、Cs領域の炉心に対する体積割合、B₄C領域の厚さ等である。

パラメータ解析として、まず、B₄C領域の厚さを2cmと固定し、出力密度(Pd)及びCs領域の炉心に対する体積割合(Ra)依存性を調べた。技術的達成度を考慮した結果、Pd=500W/cc, Ra=20%の場合が燃焼反応度、出力ピーキング係数の目標値を達成し、消滅率の良い体系であることが判った。しかし、この体系でも消滅率の目標値を達成することはできなかった。そこで、B₄C領域の厚さを2cmから1cmに薄くしたところ3つの目標値を達成することができた。

次に、更に消滅率の向上を目指し、燃料領域を2領域(内側燃料領域と外側燃料領域)とし、Cs領域に近い部分の燃料(内側燃料)のPu富化度を上げることによってCs領域における中性子束の向上を図った。その結果、Cs領域で平均熱中性子束 $3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、消滅率3.84%/yの値が得られた(消滅率の目標値は3.5%/y)。

¹³⁷Csの中性子吸収断面積には中性子エネルギーが3keV付近に共鳴領域が存在する。この領域の断面積は熱中性子のそれより大きいので、¹³⁷Csの共鳴吸収を利用した消滅炉を検討した。減速材を変え、共鳴領域のfluxを上げることを試

みた。しかし、共鳴領域のみのfluxを上げることは困難であることが判り、今回の体系では熱中性子を利用した方が有利であるように思われた。

更に、 ^{137}Cs 装荷量を増やすために炉心の外側にCs領域を設けた体系の消滅炉を検討した。この場合、燃料領域の大きさを固定したままでCs領域の厚さを変えることにより ^{137}Cs 装荷量を増やすことが可能である。Cs領域は燃料領域の外側にあるので、Cs領域の厚さが薄くても多量に ^{137}Cs を装荷することができる。しかし、炉心内部にCs領域を設けたときと比べ、Cs領域のfluxが上がり、十分な消滅率を得ることができなかつた。本解析では出力3.5 GW_{th}の大型の消滅炉に対する結果を示したが、小型の消滅炉にすれば中性子のもれが多くなり、Cs領域のfluxの向上が期待できる。しかし、燃焼反応度が悪くなり、長期運転は困難となる恐れがある。Cs領域の位置に関しては、動特性を含め、さらに詳細な解析が必要であるが、大型の消滅炉に関しては、Cs領域を炉心の外側より内部に設けた体系の方が消滅率に関して有利であると考えられる。

結局、種々のパラメータ解析の結果、FP消滅炉の炉心概念は、炉心内部にFP領域を持ち、その回りに熱中性子吸収材としてのB₄C領域、更にその外側に燃料領域を持ち、燃料領域で発生した高速中性子を減速し、熱中性子で消滅する体系が有利であることが判った。Cs領域のflux向上のためにCs領域近傍の燃料のPu富化度を上げることが有効であることが判った。

今回、燃焼反応度、出力ピーキング係数を通常の高速炉並に設定した。その条件範囲内でFP消滅炉の最適化を行い、消滅率の最も良い炉心の仕様が判ったが、optimizeされたFP消滅炉心でも消滅率は自然崩壊の約1.7倍であった。この値から十分速く ^{137}Cs が消滅できるとは言い難い。しかし、 ^{137}Cs は中性子吸収断面積が小さいので、現行の高速炉の範囲内ではこの値が限界のように思われる。もっと消滅率を上げるにはfluxを上げる必要があり、そのためには出力密度を高くする必要がある。しかし、出力密度を高くすると熱除去の問題と燃焼による反応度劣化の問題が生じる。この問題を回避するためには、粒子燃料などの特殊な燃料を用いた革新的な炉心を考える必要があるように思われる。

5.2 解析手法

本消滅炉は高速炉であるので、核データには高速炉用群定数セットJFS-3-J2を、炉心計算には拡散計算コードCITATIONを使用した。また、燃焼計算において、FP領域近傍の燃料領域は、FP領域からの熱中性子の影響を受けてスペクトルが軟らかくなる可能性があったので、その領域に熱中性子炉のスペクトルで作成したFPランプ化定数を使用した。

消滅炉体系に対してFPランプ化定数の効果を調べるために、高速炉用及び熱中性子炉用FPランプ化定数をそれぞれあるいは組み合わせて使用し、燃焼計算を実施した。その結果、燃料領域のスペクトルがFP領域からの熱中性子の影響を受けて軟らかくなっていると、ランプ化定数の種類によって燃焼による k_{eff} の変化がかなり違うことが判った。

また、予備解析として1次元輸送計算コードXSDRNPMを用いて輸送計算と拡散計算を行い、中性子束分布を比較した。その結果、高速、中速、熱外中性子束分布の一致は良いが、熱中性子束分布の一致はあまり良くないことが判った。このことから熱中性子が支配的なFP領域におけるFP消滅量や核特性量を精度良く評価するには、輸送計算を行う必要があることが判った。。

輸送計算の必要性の他に、熱中性子群定数の整備も必要である。群定数セットJFS-3-J2は高速炉用に作られたものなので、熱中性子群の取扱いは粗く、熱中性子の上方散乱も取り扱われていないからである。

以上より、消滅炉の核特性や消滅特性を精度良く評価するには、上方散乱を考慮した詳細な熱中性子群を持つライブラリーを使用し、輸送計算コードで計算を行う必要があることが判った。

上記の問題はSRACコードシステムを導入することで解決することが判った。SRACコードには断面積ライブラリーが用意されており、熱中性子群は48群と詳細なので、これから上方散乱を考慮した断面積を作ることが可能である。更に、SRACには炉心計算用に輸送計算コードが用意されているので、輸送計算が可能である。しかし、燃焼計算は拡散計算コードで行うので、輸送計算コードに燃焼ルーチンを付加した輸送燃焼計算コードを作成し、それとSRACを組み合わせることで将来のFP消滅炉炉心計算コードシステムとすることにした。

F P 消滅炉は空間的に高速中性子主体の領域と熱中性子主体の領域を合わせ持つ極めて特殊な炉である。このような炉に対して、従来の高速炉及び熱中性子炉単独の解析手法を用いることには問題がある。特に、群定数作成には注意が必要である。今後、F P 消滅炉体系に対する有効な解析手法を詳細に調べる必要がある。

6. 謝辞

本研究に関して御協力頂いた核燃料サイクル技術開発部フロンティア研究推進室に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、日本原子力研究所の土橋敬一郎氏にANS計画に関する情報を提供して頂きました。更に、SRACコードシステムに関する質問等に親切に答えて頂き、大変お世話になりました。心から感謝致します。また、高中性子炉に関して議論して下さい、有益な助言をして頂いた東京工業大学の関本博教授及び(株)データ工学の大竹巖氏に深く感謝致します。計算コード、核データを整備して下さい、また、計算機関係で問題が生じたとき親切に教えて下さった(株)CSKの中丸昇一氏に心から感謝の意を表します。熱中性子炉用FPランプ化定数の作成及びFP消滅炉体系に対する1次元輸送計算と1次元拡散計算の比較は、(株)三菱総合研究所の佐藤理氏と藪田尚宏氏に全面的に行って頂きました。心から感謝致します。最後に、多くの計算結果を整理しまとめて下さった安藤恭子さんに心からお礼申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 早瀬 保 他：“F P 消滅炉の研究”，PNC N8410 90-057(1990).
- 2) 高下浩文 他：1989年日本原子力学会年会 L 5 7.
- 3) 高下浩文 他：1990年日本原子力学会年会 K 6 4.
- 4) 高下浩文 他：“原子炉によるF.P.消滅処理”（核変換技術開発ワーキンググループ平成元年度報告書），PNC ZN8410 91-017(1991).
- 5) 木村逸郎，山本修二：“高中性子束研究用原子炉（HFIR, HFBR, FGHFR）の概要と文献調査”，KURRI-TR-130(1974).
- 6) 土橋敬一郎 他：日本原子力学会誌，Vol.30, No11, 979(1988).
- 7) 大竹 巖，下桶敬則：原子力工業，第35巻，第4号，45(1989).
- 8) 土橋敬一郎：私信.
- 9) Powell, J.R., et al.: Nucl. Instrum. Methods, A249, 66(1986).
- 10) Taube, M.: Nucl. Sci. Eng., 61, 212(1976).
- 11) 高野秀機，石黒幸雄：JAERI-M82-135(1982).
- 12) Harada, H., et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 27, 577(1990).
- 13) 加藤敏郎：PNC J1603 90-002(1990).
- 14) Stupegia, D.C.: J. Nucl. Energy, A12, 16(1960).
- 15) (財)電中研FBRプロジェクトチーム：“金属燃料FBR”，第5回エネルギー未来技術フォーラム技術パンフレット(1986).

- 16) Nishimura, T., et al. : Proceedings of 1988 Int. Reactor Phys. Conf.,
I-177, Jackson, USA.
- 17) Narita, M. and Narita, K. : J. Nucl. Sci. Technol. 26, 819(1989).
- 18) 土橋敬一郎 他 : JAERI 1302(1986).

Appendix A. 熱中性子炉用FPランプ化定数の作成

A-1 概要

① FP核種の生成割合の計算

ORIGEN-2コードを用いてFP核種の生成割合を計算し、ランプ化定数作成に必要なFP核種を選定した。 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu を親核種とし、4つの親核種別にFP核種の生成割合を算出した。炉型は熱中性子炉とし、燃焼度は66.67GWD/Tとした。FP核種は ^{135}Xe 、 ^{149}Sm の他、巨視的吸収断面積もしくは生成割合の大きいものを中心にENDF/B-IVおよびENDF/B-Vライブラリーに収納されている核種から100核種程度を選定した。選定したFP核種は4つの親核種に共通とした。

② FPランプ化定数の作成

①で選定したFP核種について、ENDF/B-IVあるいはENDF/B-Vから核データ処理コードNJOYを用いて各FP核種の群定数を求めた。それをランプ化して4つの親核種に対するFPランプ化定数を作成し、JFS-3-J2に追加した。

群定数の群構造はJFS-3-J2と同じ70群とし、1/E+核分裂スペクトル+マックスウェル熱中性子スペクトルを重みとして作成した。自己遮蔽因子については個々のFP核種の濃度が非常に希薄であるため考えず、無限希釈断面積を炉定数として用いるものとした。

A-2 炉定数を作成する核種を選定と生成割合の計算

A-2.1 選定基準

ランプ化定数に含めるFP核種を100核種程度、以下の選定基準で選定した。

- ・熱中性子炉の体系で指定した燃焼条件において、中性子吸収率（生成量×ミクロ中性子吸収断面積）が大きい順に選定する。
- ・ENDF/B-IVもしくはENDF/B-Vに中性子断面積が含まれている核種とする。
- ・選定した核種について中性子吸収率の総和がほぼ100%となる数の核種

を選ぶ。

A-2.2 核種の選定のための燃焼計算条件

核種選定のために以下の条件で燃焼計算を行い、炉心中での中性子吸収率を求めた。

計算コード	ORIGEN-2 / 86
炉心組成	体積率35%、Pu富化度7.44% (Table A-1参照)
燃焼度	66.67 GWD/ton metal
比出力	0.1825 GW/ton metal
照射年数	1年
照射条件	連続照射
燃焼計算用1群中性子断面積	ORIGEN-2 付属自己生成Pu再 利用PWR用断面積

A-2.3 核種選定と生成割合の計算結果

上記の条件で行った燃焼計算の結果得られたFP核種毎のマクロ中性子吸収断面積が、燃焼によって生成する全FP核種のマクロ中性子吸収断面積に占める割合を上位150核種についてTable A-2に示す。

ORIGEN-2で中性子吸収量が出力される核種(金属燃料1トンあたり0.01n/sec以上の中性子吸収率の核種)は266核種である。上位100核種で中性子吸収量の合計は全266核種の合計の99.9%以上を占める。そこで、Table A-2中の上位100核種を選定して、これらの生成割合を重みとしたランプ化定数を作成した。

選定したFP核種の ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu の核分裂による生成割合を同じ条件の燃焼計算結果から求めた。その結果をTable A-3に示す。この生成割合を重みとして、 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu のそれぞれの核種の核分裂によって生じるFPのランプ化定数を作成した。

A-3 F P ランプ化定数の作成

A-3.1 F P ランプ化定数の作成方法

F P ランプ化定数は、次式により各 F P 核種の無限希釈断面積から計算した。

$$\overline{\sigma}_{r,g} = \frac{\sum_i N_i^j \sigma_{r,i,g}}{\sum_i N_i^j} \quad (A-1)$$

ここで、 $\overline{\sigma}_{r,g}$: 反応 r の第 g 群のランプ化無限希釈断面積
 $\sigma_{r,i,g}$: F P 核種 i の反応 r の第 g 群の無限希釈断面積
 N_i^j : 親核種 j (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) の核分裂
 によって生じる F P 核種 i の生成量 (相対値)

(A-1) 式において、F P 核種 i と N_i^j の値は Table A-3 に示した 100 核種とその生成割合を用いた。また、燃料中の個々の F P 核種の原子個数密度は燃料核種に較べて $1/1000$ 以下であることから無限希釈の状況に近いと考えられる。このため、共鳴自己遮蔽効果は考えないものとした。JFS3 では、共鳴自己遮蔽因子テーブルを持たない核種については共鳴自己遮蔽因子を 1 としている (すなわち、無限希釈断面積を実効断面積として用いる) ので、F P ランプ化定数については共鳴自己遮蔽因子テーブルを与えないものとした。従来の JFS3 (JFS-3-J2/FP2) の高速炉用 F P ランプ化定数にも共鳴自己遮蔽因子テーブルは与えられていない。

A-3.2 F P 核種毎の群定数の計算

A-2 で選定した 100 核種について、ENDF/B-IV および ENDF/B-V から JFS-3-J2 の構造を持つ 70 群無限希釈断面積を NJOY87 コードを用いて作成した。多群

断面積を作成する際のバックグラウンド断面積は 10^6 barn (無限希釈に相当)、温度は燃料ピン中心温度として 1200K とした。また多群化の際に重みとする中性子スペクトルは、温度 0.025eV のマックスウェル分布 (<0.1 eV)、 $1/E$ スペクトル (0.1~820.8keV) および ^{239}Pu の中性子入射 (核温度 1.33MeV) 核分裂スペクトル (>820.8 keV) とした。

NJOYコードで多群断面積を作成するには、用いる ENDF/Bライブラリーに以下のファイルが含まれている必要がある。

- ① コメント (MF=1) : 全ての核種について存在する
- ② 共鳴パラメータ (MF=2)
- ③ ポイント断面積 (MF=3, MT=1/2/4/102 = $\sigma_{tot}/\sigma_{el}/\sigma_{in}/\sigma_{sc}$ 等が必要)
- ④ 2次中性子角度分布 (MF=4) : $\bar{\mu}$ の計算に必要

ENDF/B-IVの場合はテープ番号 (Tape) 401~411 (General Purpose Evaluations) 中に存在する核種のほとんどについては上記のファイルが存在するが、Tape=414~419 (FP) については全断面積のみが記されているものが多く、本作業の目的とする群定数の作成に用いることはできない。また、ENDF/B-Vの場合は、FPファイル (Tape=509, 510, 541~546) に多くのFP核種の評価済断面積が収められており、群定数作成に必要な情報が含まれている。

A-2で選択した100核種について、ENDF/B-IVまたはENDF/B-Vからの群定数作成の現状をTable A-4に示す。ENDF/B-IVからは15核種、ENDF/B-Vからは89核種の群定数が作成できた。ENDF/B-IVからのみ作成できたのは ^{164}Dy (ENDF/B-VはActivation Tape532) だけであり、その他はENDF/B-Vからも作成できた。

ENDF/B-IVとENDF/B-Vのいずれを用いても群定数が作成できなかった10核種と、ENDF/B-Vから作成できない原因をTable A-5に示す。これらの核種については、全く断面積データが存在せず、コメント (MF=1, MT=451) のみが記録されている。このうち、 ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{96}Zr , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd の7核種についてはGeneral Purpose Evaluation Tape (Tape=501~508) に断面積データが記載されていると考えられる。これらの群定数が作成できなかった核種が全FP核種のマクロ熱中性子断面積に占める割合は合計1.06%である。

A-3.3 親核種毎のFPランプ化定数の作成

現状でFP核種毎の群定数を作成できた90核種 (Table A-6参照) から熱中性子炉用FPランプ化定数を4つの親核種 (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) について作成した。Fig. A-1に ^{239}Pu の弾性散乱断面積, 非弾性散乱断面積, 弾性除去断面積及び $(n, 2n)$ 反応断面積を従来の高速炉用FPランプ化定数と比較して示す (捕獲断面積に関してはFig. 4-1参照)。捕獲断面積を除いて熱中性子炉用FPランプ化定数と高速炉用FPランプ化定数の差異は少ない。弾性除去断面積及び非弾性散乱断面積に関しては、両者はほとんど一致している。しかし、捕獲断面積に関しては、全ての親核種について低エネルギー領域 (約1eV) で熱中性子炉用定数が高速炉用定数に比べ、約20~50%小さくなっている。これは、熱中性子炉の場合の方が、 $1/v$ 断面積を持つ熱中性子吸収核種の炉内での燃焼による減少が多いためであると考えられる。したがって、熱中性子炉の体系で燃焼計算を行う際、高速炉用FPランプ化定数を使用すると、FPの吸収が大きくなり、反応度劣化を過大に評価することになる。FP消滅炉は高速炉であるが、FP領域と燃料領域の間に熱中性子吸収材を設けないとFP領域近傍の燃料のスペクトルは軟らかくなるので、この場合FP領域近傍の燃料部分には熱中性子炉用FPランプ化定数を使う必要がある。

Table A-1 F P核種の生成割合の計算のための燃焼計算に用いた燃料組成

核種	原子個数密度 atom/barn/cm	重量割合 wt%	1t当り重量 g/ton	グラム原子数 g-atom/ton
U -234	6.6749E-07	0.0052%	5.17E+01	2.210E-01
U -235	8.4318E-05	0.6561%	6.56E+03	2.792E+01
U -238	1.1625E-02	91.6141%	9.16E+05	3.849E+03
Pu -239	7.8089E-04	6.1797%	6.18E+04	2.586E+02
Pu -240	9.7205E-05	0.7725%	7.72E+03	3.219E+01
Pu -241	9.6800E-05	0.7725%	7.72E+03	3.205E+01
total			1.00E+06	

Table A-2 F P核種のマクロ中性子吸収断面積割合 (上位150核種)

核種	吸収断面積への寄与			核種	吸収断面積への寄与			核種	吸収断面積への寄与	
	割合	累積割合	順位		割合	累積割合	順位		割合	累積割合
XE 135	19.1059%	19.106%	51	MO 100	0.0769%	98.661%	101	TB 160	0.0057%	99.912%
RH 103	9.5771%	28.683%	52	PM 149	0.0768%	98.738%	102	ZR 94	0.0057%	99.917%
SM 149	6.2564%	34.939%	53	CD 110	0.0735%	98.812%	103	MO 99	0.0050%	99.922%
PM 147	6.1862%	41.126%	54	ZR 96	0.0728%	98.884%	104	MO 96	0.0048%	99.927%
XE 131	5.5824%	46.708%	55	PD 104	0.0597%	98.944%	105	EU 151	0.0048%	99.932%
CS 133	5.2416%	51.950%	56	GD 155	0.0572%	99.001%	106	BA 134	0.0043%	99.936%
SM 152	4.7259%	56.675%	57	ND 150	0.0523%	99.054%	107	Y 91	0.0042%	99.940%
SM 151	4.3142%	60.990%	58	ND 144	0.0462%	99.100%	108	TE 130	0.0042%	99.944%
AG 109	4.2253%	65.215%	59	SM 148	0.0458%	99.146%	109	AG 111	0.0039%	99.948%
ND 143	4.0828%	69.298%	60	PD 106	0.0438%	99.189%	110	GD 154	0.0038%	99.952%
TC 99	3.9554%	73.253%	61	ND 146	0.0414%	99.231%	111	KR 82	0.0037%	99.956%
EU 153	2.8139%	76.067%	62	XE 132	0.0400%	99.271%	112	ND 142	0.0031%	99.959%
RH 105	1.8273%	77.894%	63	NB 95	0.0397%	99.310%	113	EU 152	0.0030%	99.962%
ND 145	1.7371%	79.632%	64	TB 159	0.0390%	99.349%	114	CE 143	0.0029%	99.965%
PD 108	1.5181%	81.150%	65	ZR 91	0.0354%	99.385%	115	TE 127M	0.0029%	99.968%
PM 148M	1.5147%	82.664%	66	SM 154	0.0332%	99.418%	116	SN 117	0.0026%	99.970%
EU 155	1.4975%	84.162%	67	BR 81	0.0286%	99.447%	117	I 131	0.0026%	99.973%
RU 101	1.3398%	85.502%	68	GD 158	0.0263%	99.473%	118	SN 116	0.0022%	99.975%
SM 150	1.3192%	86.821%	69	RU 106	0.0244%	99.497%	119	SN 124	0.0021%	99.977%
EU 154	1.3013%	88.122%	70	CE 142	0.0242%	99.522%	120	BA 137	0.0019%	99.979%
PM 148	1.2903%	89.412%	71	DY 161	0.0224%	99.544%	121	HO 165	0.0017%	99.981%
PD 105	1.2448%	90.657%	72	CE 144	0.0221%	99.566%	122	SN 118	0.0016%	99.982%
MO 95	0.8262%	91.483%	73	XE 134	0.0214%	99.588%	123	SE 77	0.0013%	99.984%
PD 107	0.7422%	92.226%	74	PM 151	0.0212%	99.609%	124	XE 130	0.0012%	99.985%
GD 157	0.5902%	92.816%	75	SB 121	0.0210%	99.630%	125	EU 157	0.0010%	99.986%
CD 113	0.5781%	93.394%	76	RU 100	0.0209%	99.651%	126	KR 85	0.0010%	99.987%
CS 134	0.5770%	93.971%	77	PD 110	0.0201%	99.671%	127	TE 125	0.0009%	99.987%
MO 98	0.4446%	94.415%	78	DY 162	0.0197%	99.690%	128	SR 89	0.0008%	99.988%
PR 141	0.4240%	94.839%	79	ZR 95	0.0195%	99.710%	129	XE 128	0.0007%	99.989%
CS 135	0.3099%	95.149%	80	CE 140	0.0162%	99.726%	130	CS 136	0.0007%	99.990%
LA 139	0.2916%	95.441%	81	SB 123	0.0139%	99.740%	131	BA 136	0.0007%	99.991%
I 129	0.2883%	95.729%	82	CD 112	0.0139%	99.754%	132	CD 115M	0.0007%	99.991%
ZR 93	0.2831%	96.012%	83	CD 114	0.0127%	99.767%	133	GD 152	0.0007%	99.992%
IN 115	0.2695%	96.282%	84	ZR 92	0.0114%	99.778%	134	TE 122	0.0006%	99.992%
MO 97	0.2552%	96.537%	85	CS 137	0.0109%	99.789%	135	SE 79	0.0005%	99.993%
KR 83	0.2407%	96.778%	86	XE 136	0.0108%	99.800%	136	KR 86	0.0005%	99.993%
SM 147	0.2297%	97.008%	87	BA 140	0.0106%	99.810%	137	SE 80	0.0005%	99.994%
RU 103	0.1886%	97.196%	88	BA 138	0.0092%	99.820%	138	CD 116	0.0005%	99.994%
XE 133	0.1654%	97.362%	89	AG 110M	0.0091%	99.829%	139	GD 160	0.0004%	99.995%
PR 143	0.1484%	97.510%	90	RB 85	0.0088%	99.837%	140	TE 129M	0.0004%	99.995%
I 127	0.1451%	97.655%	91	DY 163	0.0086%	99.846%	141	SN 115	0.0004%	99.996%
ND 147	0.1356%	97.791%	92	Y 89	0.0078%	99.854%	142	SE 78	0.0004%	99.996%
RU 104	0.1269%	97.917%	93	SR 90	0.0072%	99.861%	143	ER 167	0.0004%	99.996%
EU 156	0.1164%	98.034%	94	DY 164	0.0071%	99.868%	144	KR 87	0.0004%	99.997%
ND 148	0.1137%	98.148%	95	KR 84	0.0070%	99.875%	145	SN 119	0.0003%	99.997%
RU 102	0.1050%	98.253%	96	LA 140	0.0065%	99.882%	146	SN 126	0.0003%	99.997%
GD 156	0.0887%	98.341%	97	DY 160	0.0064%	99.888%	147	TE 123	0.0003%	99.998%
CE 141	0.0828%	98.424%	98	TE 128	0.0062%	99.894%	148	AS 75	0.0002%	99.998%
SM 153	0.0808%	98.505%	99	RB 87	0.0059%	99.900%	149	SN 120	0.0002%	99.998%
CD 111	0.0795%	98.584%	100	SB 125	0.0058%	99.906%	150	ER 166	0.0002%	99.998%

Table A-3(a) ^{235}U からのFP核種生成割合

番号	核種	原子個数 割合	番号	核種	原子個数 割合
1	XE 135	1.025E-05	51	MO 100	3.134E-02
2	RH 103	1.066E-02	52	PM 149	5.615E-05
3	SM 149	1.064E-04	53	CD 110	9.156E-05
4	PM 147	4.756E-03	54	ZR 96	3.128E-02
5	XE 131	1.103E-02	55	PD 104	2.866E-03
6	CS 133	2.952E-02	56	GD 155	1.082E-06
7	SM 152	2.125E-03	57	ND 150	3.237E-03
8	SM 151	4.650E-04	58	ND 144	1.311E-02
9	AG 109	2.223E-04	59	SM 148	2.996E-03
10	ND 143	2.446E-02	60	PD 106	1.235E-03
11	TC 99	2.716E-02	61	ND 146	1.621E-02
12	EU 153	1.708E-03	62	XE 132	2.461E-02
13	RH 105	2.383E-05	63	NB 95	4.074E-03
14	ND 145	1.802E-02	64	TB 159	7.965E-06
15	PD 108	5.218E-04	65	ZR 91	2.285E-02
16	PM 148M	7.974E-05	66	SM 154	4.112E-04
17	EU 155	1.780E-04	67	BR 81	1.047E-03
18	RU 101	2.486E-02	68	GD 158	8.936E-05
19	SM 150	6.179E-03	69	RU 106	1.548E-03
20	EU 154	4.590E-04	70	CE 142	2.923E-02
21	PM 148	9.068E-05	71	DY 161	8.023E-07
22	PD 105	4.656E-03	72	CE 144	1.749E-02
23	MO 95	1.990E-02	73	XE 134	3.849E-02
24	PD 107	1.047E-03	74	PM 151	8.504E-06
25	GD 157	1.036E-06	75	SB 121	1.155E-04
26	CD 113	2.986E-06	76	RU 100	2.588E-03
27	CS 134	2.843E-03	77	PD 110	2.048E-04
28	MO 98	2.906E-02	78	DY 162	5.267E-07
29	PR 141	2.568E-02	79	ZR 95	7.366E-03
30	CS 135	8.583E-03	80	CE 140	3.088E-02
31	LA 139	3.192E-02	81	SB 123	1.313E-04
32	I 129	3.586E-03	82	CD 112	1.282E-04
33	ZR 93	3.184E-02	83	CD 114	2.311E-04
34	IN 115	3.332E-05	84	ZR 92	2.985E-02
35	MO 97	2.922E-02	85	CS 137	3.010E-02
36	KR 83	2.400E-03	86	XE 136	5.615E-02
37	SM 147	7.204E-04	87	BA 140	1.368E-03
38	RU 103	2.228E-03	88	BA 138	3.381E-02
39	XE 133	5.861E-04	89	AG 110M	2.949E-06
40	PR 143	1.339E-03	90	RB 85	5.056E-03
41	I 127	8.200E-04	91	DY 163	4.023E-07
42	ND 147	4.314E-04	92	Y 89	1.943E-02
43	RU 104	9.671E-03	93	SR 90	2.809E-02
44	EU 156	3.744E-05	94	DY 164	9.235E-08
45	ND 148	8.548E-03	95	KR 84	5.468E-03
46	RU 102	2.205E-02	96	LA 140	1.830E-04
47	GD 156	2.927E-04	97	DY 160	4.482E-07
48	CE 141	3.402E-03	98	TE 128	2.164E-03
49	SM 153	3.005E-05	99	RB 87	1.281E-02
50	CD 111	1.569E-04	100	SB 125	2.103E-04
選択核種の原子個数割合合計					0.9123388

Table A-3(b) ^{238}U からのFP核種生成割合

番号	核種	原子個数 割合	番号	核種	原子個数 割合
1	XE 135	1.189E-05	51	MO 100	2.897E-02
2	RH 103	1.782E-02	52	PM 149	8.929E-05
3	SM 149	1.685E-04	53	CD 110	1.176E-03
4	PM 147	5.078E-03	54	ZR 96	2.575E-02
5	XE 131	1.386E-02	55	PD 104	4.664E-03
6	CS 133	2.766E-02	56	GD 155	2.803E-06
7	SM 152	4.061E-03	57	ND 150	6.103E-03
8	SM 151	8.835E-04	58	ND 144	9.424E-03
9	AG 109	2.944E-03	59	SM 148	3.000E-03
10	ND 143	1.769E-02	60	PD 106	5.780E-03
11	TC 99	2.650E-02	61	ND 146	1.694E-02
12	EU 153	3.493E-03	62	XE 132	2.848E-02
13	RH 105	1.085E-04	63	NB 95	3.425E-03
14	ND 145	1.645E-02	64	TB 159	8.339E-05
15	PD 108	4.816E-03	65	ZR 91	1.430E-02
16	PM 148	8.427E-05	66	SM 154	1.220E-03
17	EU 155	4.642E-04	67	BR 81	1.115E-03
18	RU 101	2.969E-02	68	GD 158	5.360E-04
19	SM 150	8.414E-03	69	RU 106	9.299E-03
20	EU 154	9.405E-04	70	CE 142	2.342E-02
21	PM 148	9.675E-05	71	DY 161	1.839E-05
22	PD 105	1.699E-02	72	CE 144	1.342E-02
23	MO 95	1.565E-02	73	XE 134	3.469E-02
24	PD 107	7.443E-03	74	PM 151	2.122E-05
25	GD 157	5.486E-06	75	SB 121	1.752E-03
26	CD 113	7.349E-05	76	RU 100	2.431E-03
27	CS 134	2.571E-03	77	PD 110	3.062E-03
28	MO 98	2.733E-02	78	DY 162	1.557E-05
29	PR 141	2.032E-02	79	ZR 95	6.571E-03
30	CS 135	7.938E-03	80	CE 140	2.480E-02
31	LA 139	2.762E-02	81	SB 123	1.907E-03
32	I 129	7.856E-03	82	CD 112	2.654E-03
33	ZR 93	2.353E-02	83	CD 114	4.285E-03
34	IN 115	7.725E-04	84	ZR 92	2.048E-02
35	MO 97	2.640E-02	85	CS 137	2.696E-02
36	KR 83	2.319E-03	86	XE 136	5.240E-02
37	SM 147	7.223E-04	87	BA 140	1.340E-03
38	RU 103	4.286E-03	88	BA 138	2.738E-02
39	XE 133	6.878E-04	89	AG 110	3.793E-05
40	PR 143	1.172E-03	90	RB 85	3.307E-03
41	I 127	4.008E-03	91	DY 163	1.527E-05
42	ND 147	5.440E-04	92	Y 89	1.136E-02
43	RU 104	2.480E-02	93	SR 90	1.554E-02
44	EU 156	1.156E-04	94	DY 164	4.565E-06
45	ND 148	1.028E-02	95	KR 84	4.671E-03
46	RU 102	3.171E-02	96	LA 140	1.788E-04
47	GD 156	1.045E-03	97	DY 160	4.676E-06
48	CE 141	3.154E-03	98	TE 128	6.515E-03
49	SM 153	6.327E-05	99	RB 87	7.976E-03
50	CD 111	2.709E-03	100	SB 125	2.447E-03
選択核種の原子個数割合合計					0.9133656

Table A-3(c) ^{239}Pu からのFP核種生成割合

番号	核種	原子個数 割合	番号	核種	原子個数 割合
1	XE 135	9.018E-06	51	MO 100	3.444E-02
2	RH 103	2.363E-02	52	PM 149	5.008E-05
3	SM 149	9.494E-05	53	CD 110	2.476E-03
4	PM 147	4.051E-03	54	ZR 96	2.553E-02
5	XE 131	1.411E-02	55	PD 104	6.794E-03
6	CS 133	3.038E-02	56	GD 155	3.062E-06
7	SM 152	3.851E-03	57	ND 150	4.951E-03
8	SM 151	6.492E-04	58	ND 144	1.007E-02
9	AG 109	5.484E-03	59	SM 148	2.873E-03
10	ND 143	1.882E-02	60	PD 106	9.765E-03
11	TC 99	2.751E-02	61	ND 146	1.380E-02
12	EU 153	3.524E-03	62	XE 132	3.056E-02
13	RH 105	9.326E-05	63	NB 95	2.880E-03
14	ND 145	1.412E-02	64	TB 159	1.166E-04
15	PD 108	1.072E-02	65	ZR 91	1.013E-02
16	PM 148M	6.867E-05	66	SM 154	1.455E-03
17	EU 155	4.967E-04	67	BR 81	7.804E-04
18	RU 101	2.915E-02	68	GD 158	7.474E-04
19	SM 150	7.016E-03	69	RU 106	1.491E-02
20	EU 154	1.011E-03	70	CE 142	2.496E-02
21	PM 148	7.734E-05	71	DY 161	2.141E-05
22	PD 105	2.360E-02	72	CE 144	1.187E-02
23	MO 95	1.609E-02	73	XE 134	3.689E-02
24	PD 107	1.560E-02	74	PM 151	1.218E-05
25	GD 157	5.240E-06	75	SB 121	1.927E-04
26	CD 113	8.392E-06	76	RU 100	2.817E-03
27	CS 134	3.120E-03	77	PD 110	3.136E-03
28	MO 98	2.898E-02	78	DY 162	1.552E-05
29	PR 141	2.401E-02	79	ZR 95	4.903E-03
30	CS 135	9.790E-03	80	CE 140	2.780E-02
31	LA 139	2.801E-02	81	SB 123	2.219E-04
32	I 129	7.095E-03	82	CD 112	6.406E-04
33	ZR 93	1.940E-02	83	CD 114	6.876E-04
34	IN 115	6.222E-05	84	ZR 92	1.515E-02
35	MO 97	2.723E-02	85	CS 137	3.228E-02
36	KR 83	1.343E-03	86	XE 136	6.117E-02
37	SM 147	6.851E-04	87	BA 140	9.587E-04
38	RU 103	4.067E-03	88	BA 138	2.911E-02
39	XE 133	4.668E-04	89	AG 110M	7.849E-05
40	PR 143	8.150E-04	90	RB 85	2.255E-03
41	I 127	2.267E-03	91	DY 163	1.351E-05
42	ND 147	3.066E-04	92	Y 89	7.226E-03
43	RU 104	3.034E-02	93	SR 90	1.038E-02
44	EU 156	1.213E-04	94	DY 164	3.292E-06
45	ND 148	8.557E-03	95	KR 84	2.649E-03
46	RU 102	3.138E-02	96	LA 140	1.292E-04
47	GD 156	1.379E-03	97	DY 160	7.394E-06
48	CE 141	2.559E-03	98	TE 128	4.210E-03
49	SM 153	5.399E-05	99	RB 87	4.916E-03
50	CD 111	1.417E-03	100	SB 125	5.837E-04
選択核種の原子個数割合合計					0.9412395

Table A-3(d) ^{241}Pu からのFP核種生成割合

番号	核種	原子個数 割合	番号	核種	原子個数 割合
1	XE 135	1.808E-05	51	MO 100	3.072E-02
2	RH 103	2.033E-02	52	PM 149	1.056E-04
3	SM 149	1.989E-04	53	CD 110	3.131E-03
4	PM 147	5.468E-03	54	ZR 96	2.196E-02
5	XE 131	1.262E-02	55	PD 104	4.263E-03
6	CS 133	2.971E-02	56	GD 155	3.842E-06
7	SM 152	4.856E-03	57	ND 150	5.914E-03
8	SM 151	1.095E-03	58	ND 144	8.032E-03
9	AG 109	9.854E-03	59	SM 148	2.418E-03
10	ND 143	1.843E-02	60	PD 106	1.049E-02
11	TC 99	2.814E-02	61	ND 146	1.445E-02
12	EU 153	4.036E-03	62	XE 132	2.603E-02
13	RH 105	2.237E-04	63	NB 95	3.072E-03
14	ND 145	1.485E-02	64	TB 159	2.576E-04
15	PD 108	1.960E-02	65	ZR 91	6.434E-03
16	PM 148M	8.957E-05	66	SM 154	1.946E-03
17	EU 155	6.517E-04	67	BR 81	3.370E-04
18	RU 101	2.956E-02	68	GD 158	1.248E-03
19	SM 150	7.806E-03	69	RU 106	2.360E-02
20	EU 154	9.684E-04	70	CE 142	2.363E-02
21	PM 148	1.039E-04	71	DY 161	4.166E-05
22	PD 105	2.718E-02	72	CE 144	1.461E-02
23	MO 95	1.024E-02	73	XE 134	4.054E-02
24	PD 107	2.642E-02	74	PM 151	2.947E-05
25	GD 157	1.310E-05	75	SB 121	2.097E-04
26	CD 113	4.002E-05	76	RU 100	2.104E-03
27	CS 134	2.299E-03	77	PD 110	6.200E-03
28	MO 98	2.601E-02	78	DY 162	2.234E-05
29	PR 141	1.980E-02	79	ZR 95	6.214E-03
30	CS 135	9.270E-03	80	CE 140	2.782E-02
31	LA 139	3.061E-02	81	SB 123	1.914E-04
32	I 129	4.214E-03	82	CD 112	1.563E-03
33	ZR 93	1.495E-02	83	CD 114	1.523E-03
34	IN 115	1.665E-04	84	ZR 92	1.143E-02
35	MO 97	2.330E-02	85	CS 137	3.205E-02
36	KR 83	9.794E-04	86	XE 136	6.315E-02
37	SM 147	6.016E-04	87	BA 140	2.008E-03
38	RU 103	6.402E-03	88	BA 138	3.178E-02
39	XE 133	9.454E-04	89	AG 110M	1.066E-04
40	PR 143	1.591E-03	90	RB 85	1.497E-03
41	I 127	1.274E-03	91	DY 163	1.475E-05
42	ND 147	6.747E-04	92	Y 89	4.470E-03
43	RU 104	3.490E-02	93	SR 90	7.488E-03
44	EU 156	1.935E-04	94	DY 164	3.238E-06
45	ND 148	9.780E-03	95	KR 84	1.967E-03
46	RU 102	3.273E-02	96	LA 140	2.671E-04
47	GD 156	1.571E-03	97	DY 160	1.130E-05
48	CE 141	4.178E-03	98	TE 128	2.206E-03
49	SM 153	8.404E-05	99	RB 87	3.851E-03
50	CD 111	3.032E-03	100	SB 125	2.761E-04
選択核種の原子個数割合合計					0.9537096

Table A-4 F Pランプ化定数作成の現状

順位	核種	吸収割合	ENDF/B-IV			ENDF/B-V			順位	核種	吸収割合	ENDF/B-IV			ENDF/B-V		
			MAT	MF	現状	MAT	MF	現状				MAT	MF	現状	MAT	Tape	現状
1	XE 135	19.11%	1294	404	○	1294	509	○	51	MO 100	0.08%	270	415	×	9287	542	○
2	RH 103	9.58%	1125	403	○	1310	510	○	52	PM 149	0.08%	736	418	×	9786	546	○
3	SM 149	6.26%	755	418	○	1319	510	○	53	CD 110	0.07%	417	416	×	9444	543	○
4	PM 147	6.19%	733	418	×	9783	546	○	54	ZR 96	0.07%	222	415	×	9235	542	×
5	XE 131	5.58%	1175	402	○	1351	509	○	55	PD 104	0.06%	358	415	×	9381	543	○
6	CS 133	5.24%	1141	403	○	1355	510	○	56	GD 155	0.06%	792	419	×	9846	546	×
7	SM 152	4.73%	758	418	×	9811	546	○	57	ND 150	0.05%	721	418	×	9771	546	○
8	SM 151	4.31%	757	418	×	9810	546	○	58	ND 144	0.05%	715	418	×	9765	545	○
9	AG 109	4.23%	1139	403	○	1373	510	○	59	SM 148	0.05%	754	418	×	9807	546	○
10	ND 143	4.08%	714	418	×	9764	545	○	60	PD 106	0.04%	360	415	×	9383	543	○
11	TC 99	3.96%	1137	403	×	1308	510	○	61	ND 146	0.04%	717	418	×	9767	545	○
12	EU 153	2.81%	1291	410	○	1359	509	○	62	XE 132	0.04%	1176	402	○	1352	509	○
13	RH 105	1.83%	334	415	×	9355	542	○	63	NB 95	0.04%	240	415	×	9253	542	○
14	ND 145	1.74%	716	418	×	9766	545	○	64	TB 159	0.04%	803	419	×	9857	546	○
15	PD 108	1.52%	363	415	×	9386	543	○	65	ZR 91	0.04%	217	415	×	9230	542	○
16	PM 148M	1.51%	735	418	×	9785	546	○	66	SM 154	0.03%	760	418	×	9813	546	○
17	EU 155	1.50%	778	419	×	9832	546	○	67	BR 81	0.03%	112	414	×	9117	541	○
18	RU 101	1.34%	310	415	×	9330	542	○	68	GD 158	0.03%	795	419	×	9849	546	×
19	SM 150	1.32%	756	418	×	9809	546	○	69	RU 106	0.02%	315	415	×	9335	542	○
20	EU 154	1.30%	1293	410	○	1293	509	○	70	CE 142	0.02%	676	417	×	9726	545	○
21	PM 148	1.29%	734	418	×	9784	546	○	71	DY 161	0.02%	812	419	×	9865	546	○
22	PD 105	1.24%	359	415	×	9382	543	○	72	CE 144	0.02%	678	417	×	9728	545	○
23	MO 95	0.83%	265	415	×	9282	542	○	73	XE 134	0.02%	1177	402	○	1354	509	○
24	PD 107	0.74%	361	415	×	9384	543	○	74	PM 151	0.02%	738	418	×	9788	546	○
25	GD 157	0.59%	794	419	×	9848	546	×	75	SB 121	0.02%	511	416	×	9548	544	○
26	CD 113	0.58%	1282	411	○	1318	510	○	76	RU 100	0.02%	309	415	×	9329	542	○
27	CS 134	0.58%	614	417	×	9663	545	○	77	PD 110	0.02%	366	415	×	9389	543	○
28	MO 98	0.44%	268	415	×	9285	542	○	78	DY 162	0.02%	813	419	×	9866	546	○
29	PR 141	0.42%	692	418	×	9742	545	○	79	ZR 95	0.02%	221	415	×	9234	542	○
30	CS 135	0.31%	616	417	×	9665	545	○	80	CE 140	0.02%	674	417	×	9724	545	○
31	LA 139	0.29%	657	417	×	9707	545	○	81	SB 123	0.01%	514	416	×	9551	544	○
32	I 129	0.29%	567	416	×	9608	544	○	82	CD 112	0.01%	420	416	×	9447	543	○
33	ZR 93	0.28%	219	415	×	9232	542	○	83	CD 114	0.01%	423	416	×	9450	543	○
34	IN 115	0.27%	449	402	×	9477	543	○	84	ZR 92	0.01%	218	415	×	9231	542	×
35	MO 97	0.26%	267	418	×	9284	542	○	85	CS 137	0.01%	619	417	×	9669	545	○
36	KR 83	0.24%	1184	402	○	9142	541	○	86	XE 136	0.01%	1178	402	○	1356	509	○
37	SM 147	0.23%	753	418	×	9806	546	○	87	BA 140	0.01%	643	417	×	9693	545	○
38	RU 103	0.19%	312	415	×	9332	542	○	88	BA 138	0.01%	641	417	×	9691	545	×
39	XE 133	0.17%	595	417	×	9643	544	○	89	AG 110M	0.01%	390	415	×	9414	543	×
40	PR 143	0.15%	695	418	×	9744	545	×	90	RB 85	0.01%	153	414	×	9160	541	○
41	I 127	0.15%	6414	412	×	9606	544	○	91	DY 163	0.01%	814	419	×	9867	546	○
42	ND 147	0.14%	718	418	×	9768	545	○	92	Y 89	0.01%	192	414	×	9202	542	○
43	RU 104	0.13%	313	415	×	9333	542	○	93	SR 90	0.01%	177	414	×	9187	541	○
44	EU 156	0.12%	779	419	×	9833	546	○	94	DY 164	0.01%	1031	402	○	7664	532	×
45	ND 148	0.11%	719	418	×	9769	545	○	95	KR 84	0.01%	137	414	○	9144	541	○
46	RU 102	0.10%	311	415	×	9331	542	○	96	LA 140	0.01%	658	417	×	9708	545	○
47	GD 156	0.09%	793	419	×	9847	546	×	97	DY 160	0.01%	811	419	×	9864	546	○
48	CE 141	0.08%	675	417	×	9725	545	○	98	TE 128	0.01%	547	416	×	9588	544	○
49	SM 153	0.08%	759	418	×	9812	546	○	99	RB 87	0.01%	156	414	×	9163	541	○
50	CD 111	0.08%	418	416	×	9445	543	○	100	SB 125	0.01%	518	416	×	9555	544	○

○ 群定数作成可能
 × 群定数作成不可

Table A-5 ENDF/B-IVおよびENDF/B-Vから群定数を作成できない核種と原因

核種			ENDF/B-Vから群定数を作成できない原因	全FPマクロ熱中性子断面積に占める割合
核種名	ENDF/B-V			
	Tape	MAT		
Zr ⁹¹	542	9230	ENDF/B-Vに断面積データが存在しない。 (コメント: MF=1, MT=451のみ) →General Purpose Evaluation (Tape 501~508)に存在する可能性がある。	0.04%
Zr ⁹²	543	9414		0.01%
Zr ⁹⁶	542	9235		0.07%
Gd ¹⁵⁵	546	9846		0.06%
Gd ¹⁵⁶	546	9847		0.09%
Gd ¹⁵⁷	546	9848		0.59%
Gd ¹⁵⁸	546	9849		0.03%
Ag ^{110m}	543	9414		0.01%
Pr ¹⁴³	545	9744		0.15%
Ba ¹³⁸	545	9691		0.01%
合計				1.06%

Table A-6 熱中性子炉用FPランプ化定数に含まれる核種(90核種)

順位	核種	割合	ENDF/B-IV		ENDF/B-V		順位	核種	割合	ENDF/B-IV		ENDF/B-V	
			MAT	MF	MAT	MF				MAT	MF	MAT	MF
1	XE 135	19.11%	1294	404			51	MO 100	0.08%			9287	542
2	RH 103	9.58%	1125	403			52	PM 149	0.08%			9786	546
3	SM 149	6.26%	755	418			53	CD 110	0.07%			9444	543
4	PM 147	6.19%			9783	546							
5	XE 131	5.58%	1175	402			55	PD 104	0.06%			9381	543
6	CS 133	5.24%	1141	403									
7	SM 152	4.73%			9811	546	57	ND 150	0.05%			9771	546
8	SM 151	4.31%			9810	546	58	ND 144	0.05%			9765	545
9	AG 109	4.23%	1139	403			59	SM 148	0.05%			9807	546
10	ND 143	4.08%			9764	545	60	PD 106	0.04%			9383	543
11	TC 99	3.96%			1308	510	61	ND 146	0.04%			9767	545
12	EU 153	2.81%			1359	509	62	XE 132	0.04%	1176	402		
13	RH 105	1.83%			9355	542	63	NB 95	0.04%			9253	542
14	ND 145	1.74%			9766	545	64	TB 159	0.04%			9857	546
15	PD 108	1.52%			9386	543	65	ZR 91	0.04%			9230	542
16	PM 148M	1.51%			9785	546	66	SM 154	0.03%			9813	546
17	EU 155	1.50%			9832	546	67	BR 81	0.03%			9117	541
18	RU 101	1.34%			9330	542							
19	SM 150	1.32%			9809	546	69	RU 106	0.02%			9335	542
20	EU 154	1.30%	1293	410			70	CE 142	0.02%			9726	545
21	PM 148	1.29%			9784	546	71	DY 161	0.02%			9865	546
22	PD 105	1.24%			9382	543	72	CE 144	0.02%			9728	545
23	MO 95	0.83%			9282	542	73	XE 134	0.02%	1177	402		
24	PD 107	0.74%			9384	543	74	PM 151	0.02%			9788	546
25	GD 157						75	SB 121	0.02%			9548	544
26	CD 113	0.58%	1282	411			76	RU 100	0.02%			9329	542
27	CS 134	0.58%			9663	545	77	PD 110	0.02%			9389	543
28	MO 98	0.44%			9285	542	78	DY 162	0.02%			9866	546
29	PR 141	0.42%			9742	545	79	ZR 95	0.02%			9234	542
30	CS 135	0.31%			9665	545	80	CE 140	0.02%			9724	545
31	LA 139	0.29%			9707	545	81	SB 123	0.01%			9551	544
32	I 129	0.29%			9608	544	82	CD 112	0.01%			9447	543
33	ZR 93	0.28%			9232	542	83	CD 114	0.01%			9450	543
34	IN 115	0.27%			9477	543	84	ZR 92					
35	MO 97	0.26%			9284	542	85	CS 137	0.01%			9669	545
36	KR 83	0.24%	1184	402			86	XE 136	0.01%	1178	402		
37	SM 147	0.23%			9806	546	87	BA 140	0.01%			9693	545
38	RU 103	0.19%			9332	542							
39	XE 133	0.17%			9643	544							
40							90	RB 85	0.01%			9160	541
41	I 127	0.15%			9606	544	91	DY 163	0.01%			9867	546
42	ND 147	0.14%			9768	545	92	Y 89	0.01%			9202	542
43	RU 104	0.13%			9333	542	93	SR 90	0.01%			9187	541
44	EU 156	0.12%			9833	546	94	DY 164	0.01%	1031	402		
45	ND 148	0.11%			9769	545	95	KR 84	0.01%	137	414		
46	RU 102	0.10%			9331	542	96	LA 140	0.01%			9708	545
47							97	DY 160	0.01%			9864	546
48	CE 141	0.08%			9725	545	98	TE 128	0.01%			9588	544
49	SM 153	0.08%			9812	546	99	RB 87	0.01%			9163	541
50	CD 111	0.08%			9445	543	100	SB 125	0.01%			9555	544

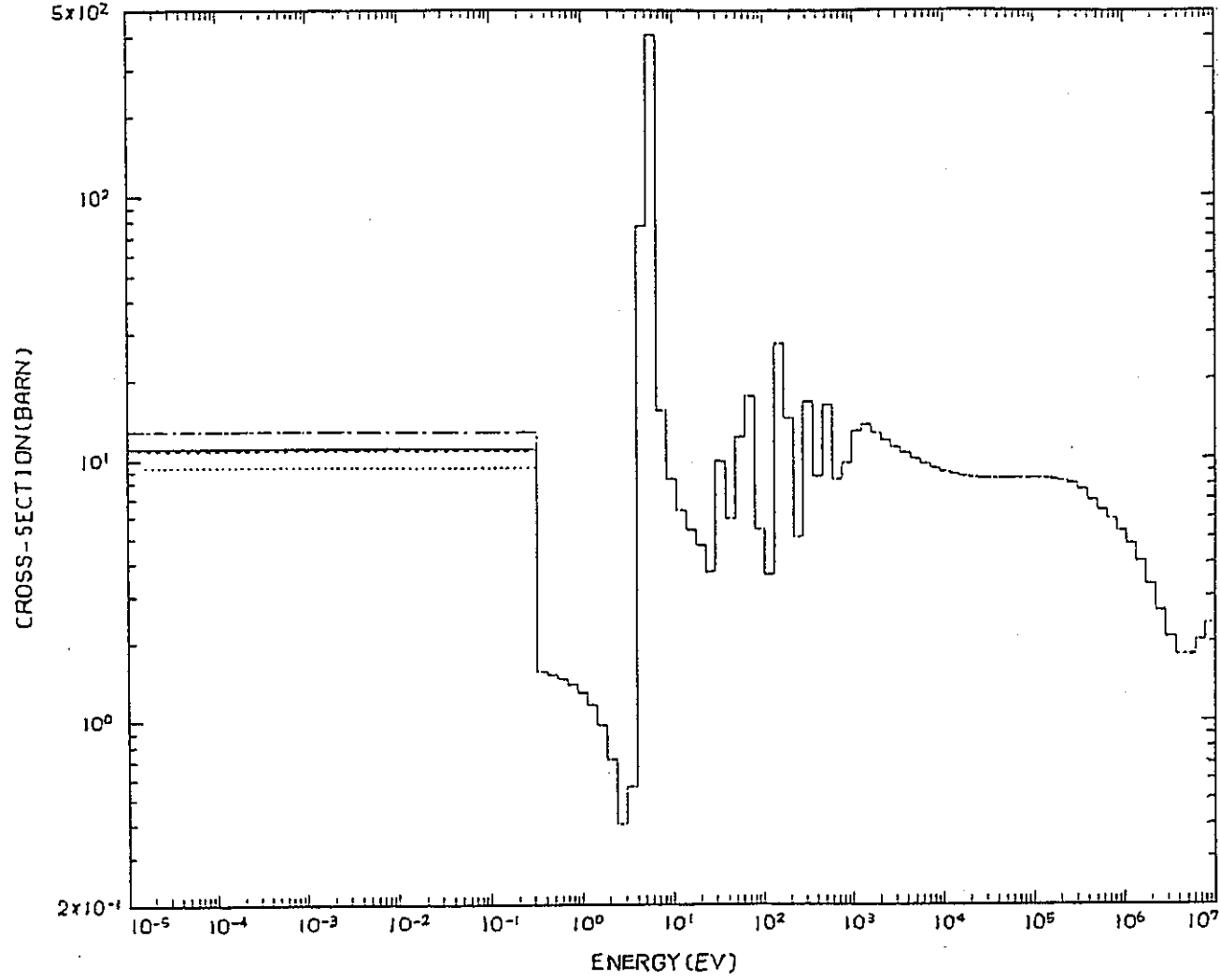


Fig.A-1(a) 熱中性子炉用FPランプ化定数と高速炉用FPランプ化定数の比較
 (^{239}Pu , 弾性散乱断面積)

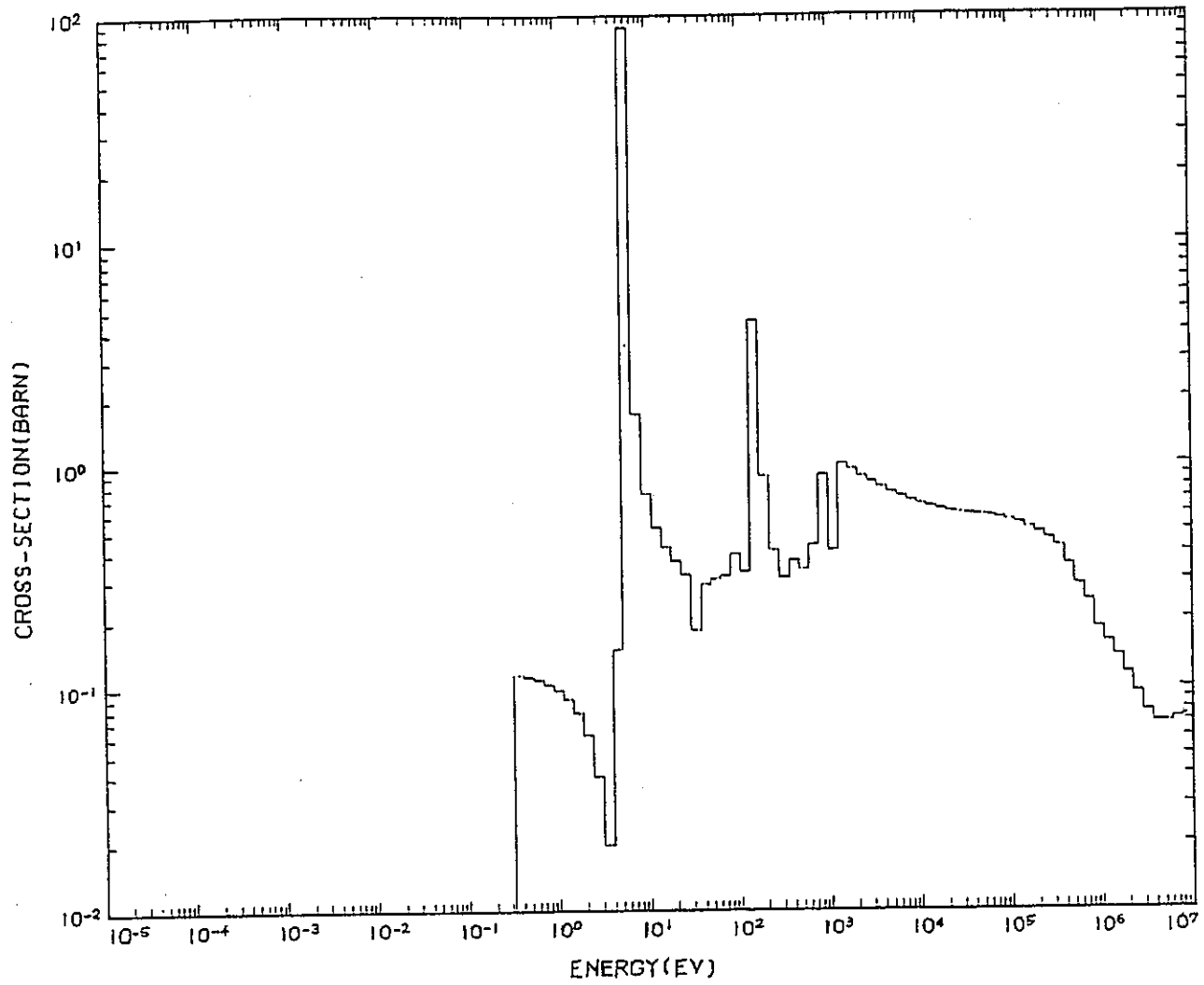


Fig.A-1(b) 熱中性子炉用FPランプ化定数と高速炉用FPランプ化定数の比較
 (^{239}Pu , 弾性除去断面積)

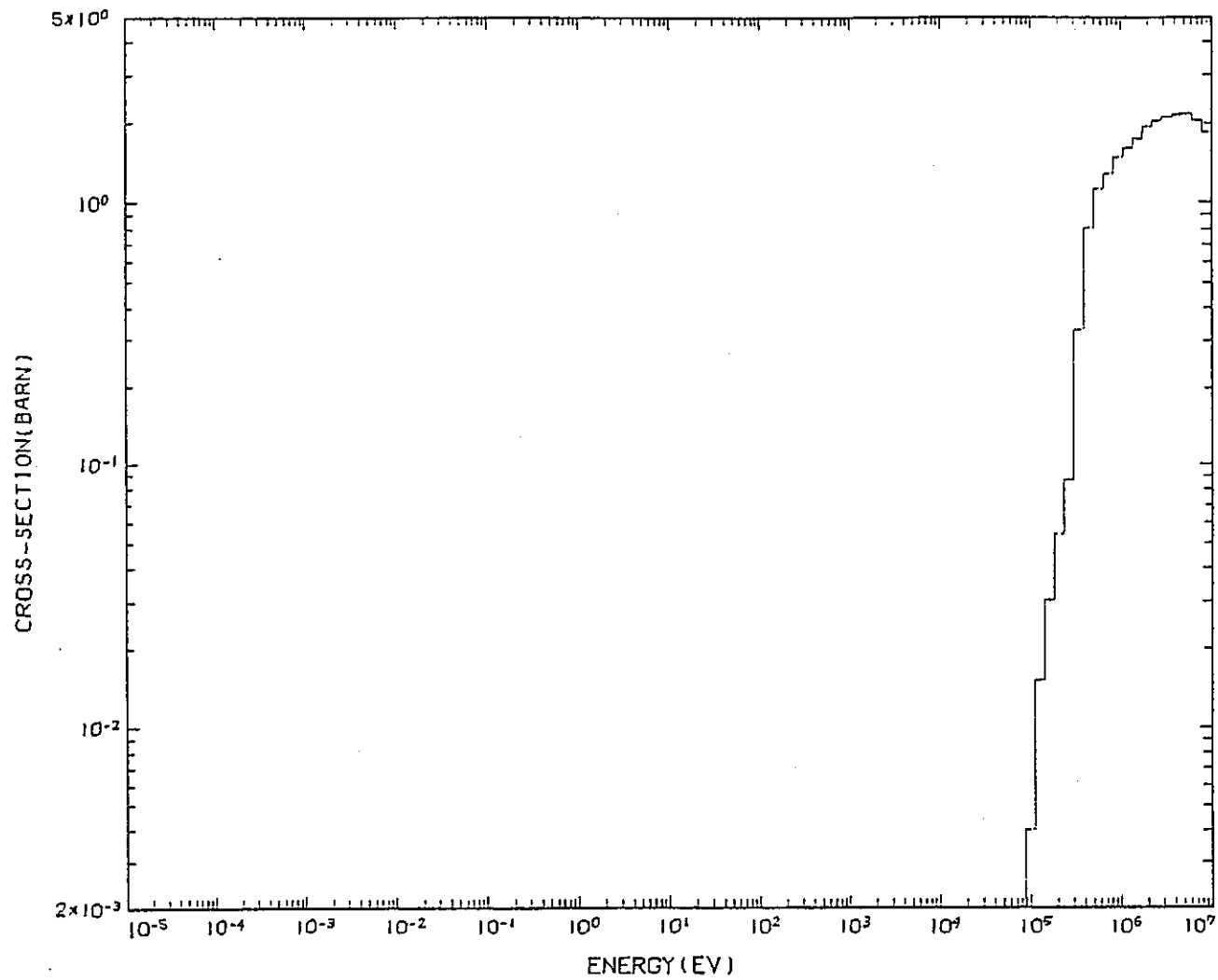


Fig.A-1(c) 熱中性子炉用FPランプ化定数と高速炉用FPランプ化定数の比較
(^{238}Pu , 非弾性散乱断面積)

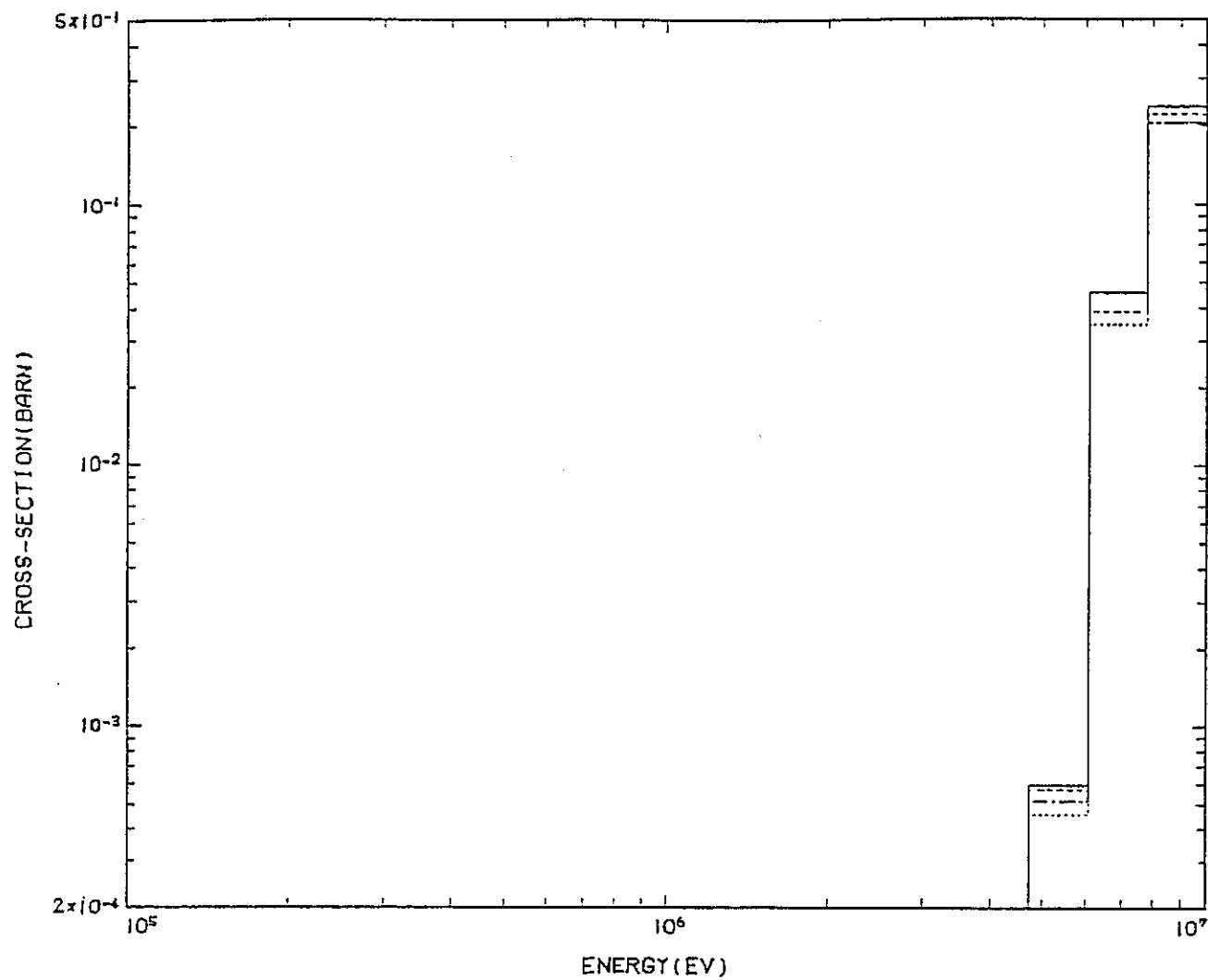


Fig.A-1(d) 熱中性子炉用FPランプ化定数と高速炉用FPランプ化定数の比較
(^{239}Pu , (n, 2n)反応断面積)