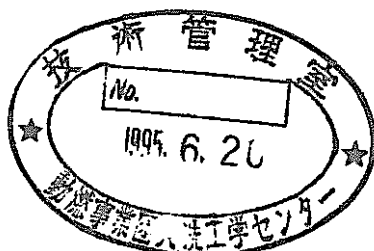


長半減期 F P の消滅特性計算

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

平成 7 年 3 月



株式会社 東芝

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ください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

長半減期FPの消滅特性計算

山岡 光明*、飯田 正明*

要 旨

使用済燃料中に含まれる核分裂生成物（FP）には、TRU核種と同様にきわめて長半減期のものが存在している。中性子束の高い高速炉では、これらFPを消滅できるポテンシャルがある。FPの断面積は低エネルギーで増大する傾向があるので、消滅効率を上げるために、FPを含むピンの他に水素化ジルコニウム（ZrHx）等の中性子減速材ピンを装荷したターゲット集合体による消滅が考えられる。

本研究では、長半減期FPであるTc-99、I-129の高速炉における消滅特性解析を行った。解析は主として、非均質性の強いターゲット集合体におけるTc-99やI-129の共鳴吸収効果を厳密に扱うために有効と考えられる連続エネルギーモンテカルロコードを用いて実施した。これにより、FPピン配列の効果・ピン径の効果等のFP消滅ターゲット集合体仕様の効果を評価し、効率の良い消滅を行うためのターゲット集合体の仕様について検討した。今回は、ターゲット集合体は炉心領域内に配置することを前提とした。また、均質モデル化の影響、従来の決定論的手法との違い等、計算手法に関する検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) Tc-99またはI-129のFPピンとZrHxピンの割合を変化させた場合、FPピン割合が増大するにつれて、消滅率は単調減少するが、消滅量は途中でピークを持つ。消滅量をほぼ最大とする場合、消滅率は年間約1-2%である。
- (2) 消滅量をほぼ最大としたターゲット仕様の場合、FP消滅量へのターゲット集合体の非均質効果は非常に大きく、完全に均質化した場合の約30%減である。これは共鳴吸収への非均質効果である。
- (3) FPピンとZrHxピンの本数を固定した場合、FPピンの配列によっても消滅量が数10%変化する。FPピンをできるだけ分散させることが望ましい。
- (4) モンテカルロ法と決定論的手法（輸送・拡散）の差については、計算モデルが同じならば消滅量は10%以内の差である。計算手法間の差は、共鳴吸収の顕著な数KeVから数eVにおいて大きい。
- (5) ターゲット集合体においてZrHxピンが最外周にあると、これに接した炉心燃料の出力密度は平均の数倍にもなる。各ピンの配列にはこの点を考慮する必要がある。

炉心特性、特に出力分布に影響を与えずに消滅する方法として、径ブランケットでの消滅が考えられる。今後は、径ブランケットでの効率的な消滅をも含めて検討する必要がある。

本報告書は株式会社東芝が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

事業団担当部課：大洗工学センター・基盤技術開発部・炉心技術開発室

契約番号：06C3265

事業団担当者：大木 繁夫

*) 東芝・原子力技術研究所・システム解析技術担当

March 17, 1995

Study on Characteristics of Transmutation of Long-Lived FPs

Mitsuaki YAMAOKA*, Masaaki IIDA*

Abstract

Some of fission products (FPs) in spent fuels have very long half lives as transuranic nuclides. Fast reactors have a potential to transmute these FPs into short-lived ones because of high neutron flux. As neutron capture cross sections of FPs increase in low energy region, one of the effective means to transmute them is to irradiate them using target assemblies that contain pins loaded with neutron moderating material such as ZrHx as well as FP loading pins.

A study has been performed on transmutation of long-lived FPs, Tc99 and I129 in fast reactors using target assemblies. The Monte Carlo method (MC method) with continuous-energy cross section was mainly employed to analyze rigorously resonance absorption of FPs in target assemblies with large heterogeneity. Specifications of target assemblies were investigated with a aim to transmute FPs effectively. The target assemblies were assumed to be located in the core region. Also, comparison of calculation methods was carried out, where results from deterministic methods (diffusion and transport calculations) were compared with those from the MC method. Further, the effect of heterogeneity upon resonance absorption was analyzed.

The results are as follows :

- (1) As the number of FP pins increases with total number of FP pins and ZrHx pins kept constant, transmutation rate decreases monotonously, whereas amount of transmutation decreases after it shows its peak value. The transmutation rate is about 1-2%/year at the case with maximum transmutation amount.
- (2) Heterogeneity effect upon transmutation rate is very large ; the rate for heterogeneous geometry is 30% smaller than that for homogeneous geometry with the same average composition. This is caused by heterogeneity effect upon resonance absorption.
- (3) Amount of transmutation vary by about 20-30% with arrangement variation of FP pins.
Dispersing FP pins increases transmutation rate.
- (4) The difference between absorption rates from the MC method and the deterministic methods is at most 10% if calculation model is the same. The difference is large in energy region with resonance absorption.
- (5) Power density of core fuels adjacent to target assembly is several times larger than the average when ZrHx pins are located at the outermost ring in target assembly. This should be taken into account in setting pin arrangement.

Radial blanket region is a candidate for locating target assemblies without affecting power distribution. It is necessary to investigate FP loading method in both core and blanket regions for effective transmutation without affecting core performances.

This work was performed by Toshiba Corporation under contract with Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract Number ; 06C3265

PNC Liaison ; Shigeo Ooki, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

* Systems Analysis Group, Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation

目次

1. はじめに	1
2. 計算条件	2
3. 減速材とFPターゲットピンの仕様及び装荷法のサーベイ	11
3.1 集合体仕様及び装荷法の検討	11
3.1.1 サーベイの考え方	11
3.1.2 決定論的手法による検討	12
3.1.3 モンテカルロ法による検討	36
3.2 燃焼計算	59
3.3 温度分布の評価	65
3.4 まとめ	75
4. 計算手法の比較検討	78
4.1 計算体系と計算手法	78
4.2 検討結果	80
4.2.1 モンテカルロ計算と衝突確率法輸送計算の比較	80
4.2.2 モンテカルロ計算、衝突確率法輸送計算と拡散計算の比較	99
4.3 まとめ	110
5. まとめ	112
6. 参考文献	115

1. はじめに

使用済燃料中に含まれる長半減期の核種としては、TRU核種が代表的であるが、一部のFPにもきわめて長半減期のものが存在している。例えば、 $Tc99$ （半減期約21万年）、 $I129$ （半減期約1570万年）は非常に半減期が長い。TRU核種とともに、これら長半減期のFPの消滅処理を行うことは、廃棄物処理・処分における負荷の低減・リスク低減の上から重要と考えられる。中性子束の高い高速炉では、これらFPを消滅できるポテンシャルがある。FPの断面積は低エネルギーで増大する傾向があるので、消滅効率を上げるために、FPを含むピンの他に水素化ジルコニウム（ZrH）等の中性子減速材ピンを装荷したターゲット集合体による消滅が考えられる。

本研究では、長半減期FPである $Tc99$ 、 $I129$ の高速炉における消滅特性解析を、主として連続エネルギーモンテカルロコードを用いて実施した。モンテカルロコードは、非均質性の強いターゲット集合体における $Tc99$ や $I129$ の共鳴吸収効果を、厳密なモデル化により取り扱うためにきわめて有効であると考えられる。これを用いてFPピン配列の効果・ピン径の効果等のFP消滅ターゲット集合体仕様の効果を評価し、効率の良い消滅を行うためのターゲット集合体の仕様について検討した。また、均質モデル化の影響、従来の決定論的手法との違い等、計算手法に関する検討を行った。

本研究では、上記FPと消滅効率を増大させるための水素化ジルコニウム（ZrH）を含むピンからなるターゲット集合体を炉心内に配置させることを想定した。計算コードとしては、連続エネルギーモンテカルロコードとしてMCNP-3B⁽¹⁾、決定論的手法によるコードとして輸送計算コードのSLAROM⁽²⁾、拡散計算コードを使用した。

以下、第2章には計算条件、第3章にはターゲット集合体仕様と装荷法のサーベイ結果、第4章にはモンテカルロ法と決定論的手法の比較検討結果を示す。また、第5章には本研究のまとめを示す。

2. 計算条件

本研究における計算条件を以下に示す。

(1)対象 F P

T c - 9 9 , I - 1 2 9

化学形態は、T c ; T c 金属

I ; C e I₃

T c、I の同位体組成と密度は下記とした。

T c ; 密度 11.5 g/cc

T c 9 9 100%

I ; 密度 5.7 g/cc

I 1 2 7 23.3%

I 1 2 9 76.7%

(2)減速材

Z r H_{1.7} ; 密度 5.64 g/cc

(3)集合体周囲の中性子場

大型M O X燃料F B R (60万K W e均質炉心)の中性子場を利用する。炉心の仕様と炉心配置を表2-1、図2-1にそれぞれ示す。

ターゲット集合体は炉心内部に配置することを前提とする。

(4)ターゲット集合体仕様

減速材およびF Pターゲットピンのピン径、配置、集合体内割合をパラメータとする。

本研究における基準のターゲット集合体仕様を表2-2、集合体断面図を図2-2に示す。

その構造はF Pを装荷したターゲットピンを束ねたもので、その一部がZ r H_{1.7}ピンとなっている。幾何学的には通常の燃料ピンと同一であるが、燃料ピンよりも太径である。ピン径はどちらのピンも同一とする。

仕様を決めるパラメータは下記である。

- ・ Z r H_{1.7}ピンの体積割合 $Z r H_{1.7} / (Z r H_{1.7} + F P)$
- ・ 両ピンのピン径

・両ピンの配置

分散型、ゾーン型

これらのパラメータについては、第3章でサーベイを行う。

(5)核断面積ライブラリー

JENDL-3.1をベースとした下記のライブラリー

決定論的手法；JENDL-3.1 70群ライブラリー⁽³⁾

モンテカルロ法；FSXLIB⁽⁴⁾ (JENDL-3.1をベースとした連続エネルギー断面積)

なお、今回の検討では水素によりかなりの低エネルギーまで中性子が存在すると考えられる。上記FSXLIBには低エネルギーでの原子核熱運動の影響は取り入れられていない。MCNP-3B⁽¹⁾コードには、軽い核種を含む代表的な化合物に対して原子核熱運動を考慮するThermal ($S\alpha$ 、 β) tableが付属している。そこで、今回の検討では、ZrH_{1.7}に対する上記tableを使用した。ただし、これを使用しても、しなくても、消滅特性にはほとんど影響がなかったことを記しておく。

70群ライブラリーのエネルギー構造を表2-3に示す。

(6)計算コード

決定論的手法；SLAROM⁽²⁾ (輸送計算)

拡散計算コード (CITATION相当)

モンテカルロ法；MCNP-3B⁽¹⁾

(7)消滅特性の考え方

消滅特性としては、消滅量(kg/year)と消滅率(%/year)が考えられる。減速材を使用する場合には、減速材により消滅率は向上する可能性があるが、FP装荷量の減少が消滅量の低下につながる可能性もある。どちらを優先するかで、集合体仕様の選定も変わるものと考えられる。

ここでは、消滅率の点からは最適でなくとも良いとし、消滅量に重きをおいた検討とする。

(8) 体系温度

現在、使用可能なモンテカルロコード用の断面積が、現状 300 K となっているため、300 K で統一する。

表2-1

電気出力60万kW炉心の炉心主要目

項 目	仕 様
熱出力, MW t	1 6 0 0
炉心燃料形態	P u O ₂ U O ₂
炉心型式	均質2領域
炉心燃料(内側/外側)、体	1 0 8 / 1 3 8
径ブランケット	なし
炉心高さ, c m	1 0 0
炉心等価直径, c m	2 7 5
軸ブランケット厚さ, c m	3 5
ペレット密度, % T D	9 6
ペレット中心孔体積比, v %	7 . 4
P u 同位元素比, w %	
Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242	3 / 5 3 / 2 5 / 1 2 / 7
組成体積比(v/o)	
	燃料 ギャップ 構造材 冷却材 吸収材
a)炉心燃料集合体	38.2* 5.1 22.4 34.3 — *ボア含む
b)主炉停止系制御棒	— 5.2 15.6 45.6 33.6 吸収体部
c)後備炉停止系制御棒	— 5.2 15.6 45.6 33.6 吸収体部
d)SUS遮蔽体(暫定値)	
第1層	— — 70.0 20.0
第2層	— — 80.0 20.0
e)B ₄ C遮蔽体(暫定値)	— — 20.0 20.0 60.0
P u 富化度, w %	
(本計算で使用了なもの)	
(内側/外側)	1 5 . 3 / 1 8 . 9

表2-2

ターゲット集合体の仕様

項 目	仕 様
ピン本数、本	37
ピン外径、mm	23.5
ピン内径、mm	21.5
被覆管肉厚、mm	1.0
ペレット径、mm	21.0
ラッパ管形状	六角形
ラッパ管内対面間距離、mm	147.7
ラッパ管肉厚、mm	4.0
集合体配列ピッチ、mm	160.7
体積比、v %	
ペレット／冷却材／構造材	57.3／18.8／21.1
／ギャップ	／2.8

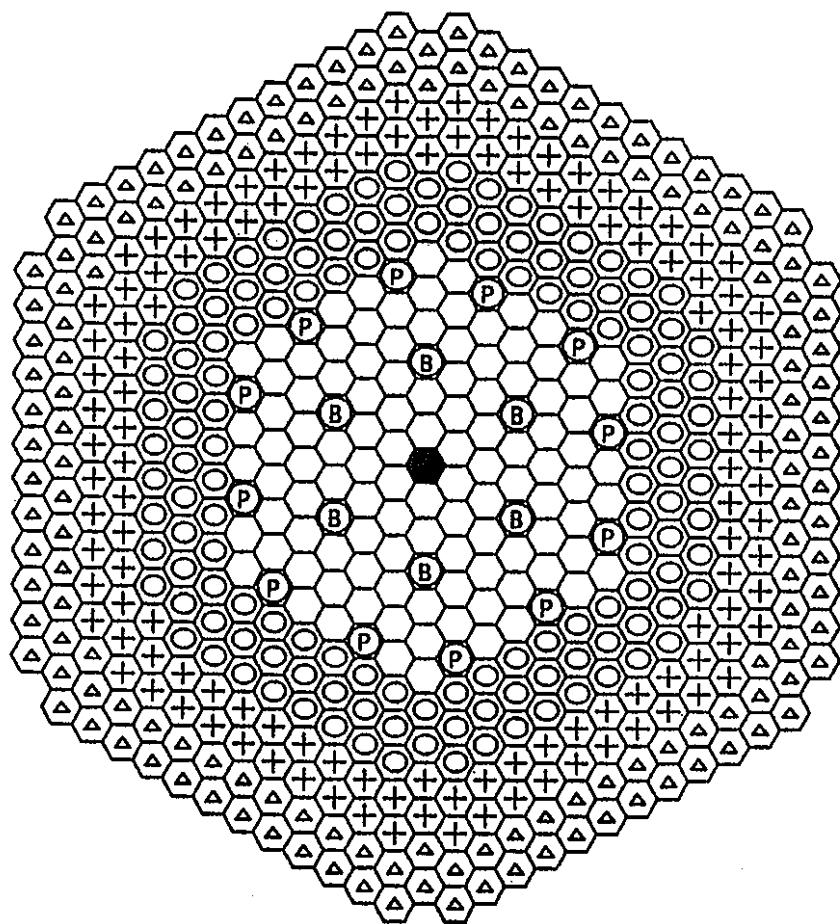
表2-3 JFS-3-J2炉定数のエネルギー群構造及び核分裂スペクトル (1/2)

Group			Upper Energy	Lower Energy	Lethargy Width	Fission Spectra*)
1	1	1 2	10.0 (MeV) 7.7880	7.7880 (MeV) 6.0653	0.250 0.250	8.3498e-03 2.2710e-02
	2	3 4	6.0653 4.7237	4.7237 3.6788	0.250 0.250	4.5869e-02 7.3294e-02
	3	5 6	3.6788 2.8650	2.8650 2.2313	0.250 0.250	9.7428e-02 1.1210e-01
	4	7 8	2.2313 1.7377	1.7377 1.3534	0.250 0.250	1.1520e-01 1.0837e-01
2	5	9 10	1.3534 1.0540	1.0540 0.82085	0.250 0.250	9.5137e-02 7.9137e-02
	6	11 12 13	0.82085 0.63928 0.49787	0.63928 0.49787 0.38774	0.250 0.250 0.250	6.3114e-02 4.8710e-02 3.6643e-02
3	7	14 15 16	0.38774 0.30197 0.23518	0.30197 0.23518 0.18316	0.250 0.250 0.250	2.7021e-02 1.9618e-02 1.4072e-02
	8	17 18 19	0.18316 0.14264 0.11109 (MeV)	0.14264 0.11109 86.517 (keV)	0.250 0.250 0.250	9.9987e-03 7.0524e-03 4.9459e-03
4	9	20 21 22	86.517 (keV) 67.379 52.475	67.379 (keV) 52.475 40.868	0.250 0.250 0.250	3.4531e-03 2.4025e-03 1.6671e-03
	10	23 24 25	40.868 31.828 24.788	31.828 24.788 19.305	0.250 0.250 0.250	1.1543e-03 7.9794e-04 5.5089e-04
	11	26 27 28	19.305 15.034 11.709	15.034 11.709 9.1188	0.250 0.250 0.250	3.7995e-04 2.6185e-04 1.8035e-04
5	12	29 30 31	9.1188 7.1017 5.5308	7.1017 5.5308 4.3074	0.250 0.250 0.250	1.2416e-04 8.5444e-05 5.8784e-05
	13	32 33 34	4.3074 3.3546 2.6126	3.3546 2.6126 2.0347	0.250 0.250 0.250	4.0433e-05 2.7806e-05 1.9120e-05
	14	35 36 37	2.0347 1.5846 1.2341 (keV)	1.5846 1.2341 961.12 (eV)	0.250 0.250 0.250	1.3146e-05 9.0376e-06 5.3758e-06

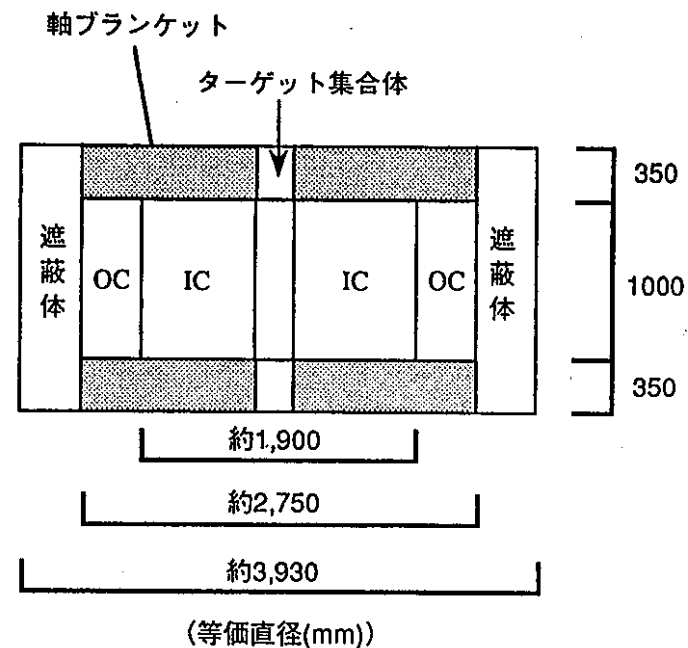
*) ^{239}Pu

表2-3 JFS-3-J2炉定数のエネルギー群構造及び核分裂スペクトル (2/2)

Group			Upper Energy	Lower Energy	Lethargy Width	Fission Spectra
6	15	38	961.12 (eV)	748.52 (eV)	0.250	0.0
		39	748.52	582.95	0.250	0.0
		40	582.95	454.00	0.250	0.0
	16	41	454.00	353.58	0.250	0.0
		42	353.58	275.36	0.250	0.0
		43	275.36	214.45	0.250	0.0
	17	44	214.45	167.02	0.250	0.0
		45	167.02	130.07	0.250	0.0
		46	130.07	101.30	0.250	0.0
7	18	47	101.30	78.893	0.250	0.0
		48	78.893	61.442	0.250	0.0
		49	61.442	47.851	0.250	0.0
	19	50	47.851	37.267	0.250	0.0
		51	37.267	29.023	0.250	0.0
		52	29.023	22.603	0.250	0.0
	20	53	22.603	17.603	0.250	0.0
		54	17.603	13.710	0.250	0.0
		55	13.710	10.677	0.250	0.0
	21	56	10.677	8.3153	0.250	0.0
		57	8.3153	6.4760	0.250	0.0
		58	6.4760	5.0435	0.250	0.0
	22	59	5.0435	3.9279	0.250	0.0
		60	3.9279	3.0590	0.250	0.0
		61	3.0590	2.3824	0.250	0.0
	23	62	2.3824	1.8554	0.250	0.0
		63	1.8554	1.4450	0.250	0.0
		64	1.4450	1.1254	0.250	0.0
	24	65	1.1254	0.87642	0.250	0.0
		66	0.87642	0.68256	0.250	0.0
		67	0.68256	0.53158	0.250	0.0
	25	68	0.53158	0.41399	0.250	0.0
		69	0.41399	0.32242	0.250	0.0
		70	0.32242 (eV)	0.00001 (eV)	10.650	0.0



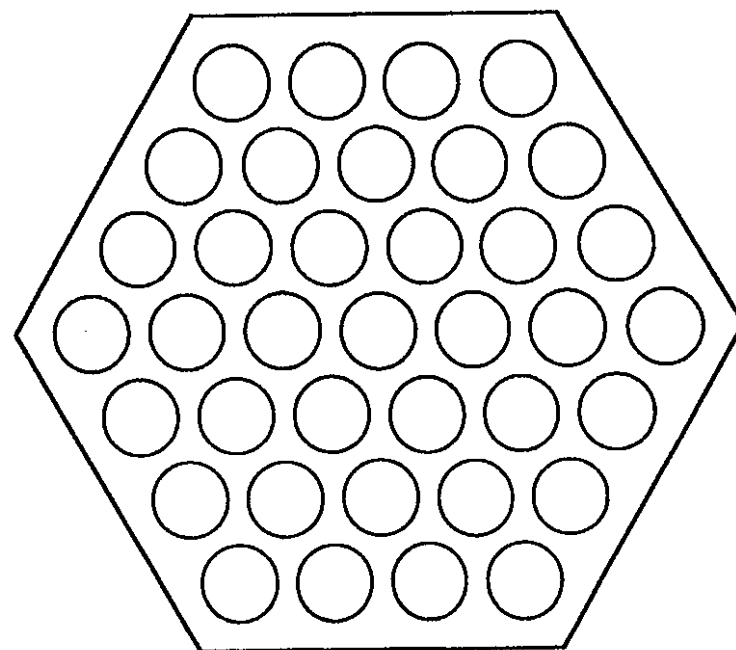
注) 本図は拡散計算によるターゲット集合体の消滅特性計算を行う炉心体系を示す。
 炉中心のスペクトル場を利用するため、60万KWe高速炉の炉中心にターゲット集合体を装荷した。
 ターゲット集合体の装荷に伴う、制御棒配置と本数の見直しは行っていない。



⬡	内側炉心	108本
⬢	外側炉心	138本
⊕	SUS遮蔽体	126本
△	B ₄ C遮蔽体	150本
Ⓟ	主炉停止系制御棒	12本
Ⓟ	後備炉停止系制御棒	6本
●	ターゲット集合体	1本

合計 541本

図2-1 ターゲット集合体装荷炉心の炉心構成図



○ 集合体要素（ピン）
 ($ZrH_{1.7}$, Tc金属, CeI_3 等が挿入される)

図2-2 37本ピン構成のターゲット集合体

3. 減速材とF Pターゲットピンの仕様及び装荷法のサーベイ

特殊な減速材領域を持つ集合体に、長半減期F Pを装荷して消滅処理を行った場合の消滅特性計算を集合体単位で実施し、ターゲット集合体仕様と消滅効率の関係を拡散計算コード及びモンテカルロ計算コードを用いてサーベイした。次に、燃焼計算を実施し、F P組成の時間的变化に伴う消滅特性を計算した。また、ターゲットピンの温度分布を計算し、熱的裕度を評価した。

3.1 集合体仕様及び装荷法の検討

3.1.1 サーベイの考え方

本研究では、決定論的手法の簡便さとモンテカルロ法の厳密性を考慮し、これらを組み合わせて効率よくサーベイを行うこととした。このため、初期の段階では予備的に決定論的手法・拡散計算により減速材体積割合についてサーベイを行い、減速材の効果、必要性についての知見を得た後に、モンテカルロ法により非均質性を考慮しながらサーベイを行うこととした。

決定論的手法によるサーベイの段階では、集合体内部は減速材とF Pを均質化した体系で、拡散手法により減速材体積割合と消滅特性の関係を調べる。このサーベイは、T c 9 9 と I 1 2 9 を対象とする。これより、減速材体積割合をある程度限定し、モンテカルロ法による非均質解析を行う集合体仕様をいくつか設定する。

モンテカルロ法による解析においては、拡散計算の結果をもとに、解析対象とする集合体仕様を設定した上で、集合体形状を厳密に扱った解析を行う。連続エネルギーモンテカルロ法によりターゲット集合体内のT c ピンやZ r Hピンの非均質性や共鳴領域の自己遮蔽効果など、体系の非均質性・中性子スペクトルや断面積の微細なエネルギー構造を正確に扱って、ターゲット集合体の消滅特性を解析する。検討項目は、減速材の体積比効果、ピン径の効果、減速材・FPの配置の効果とする。この検討は、T c 9 9 に限定して行った。これらの結果より、消滅特性の良い集合体仕様を選定する。

3.1.2 決定論的手法による検討

(1) 計算方法

ターゲット集合体（F P 装荷集合体）の中性子束場を決めるために、炉心燃料の P u 富化度を調整した。これは炉心中心に炉心燃料を装荷して、K e f f が 1. 0 0 2 になるように設定したものである。この様にして設定した P u 富化度を既に示した表 2 - 1 に記した。この P u 富化度は全ての F P 消滅計算で固定されている。

ターゲット集合体の 3 7 本ピンのうち、F P 消滅計算に用いたピンの本数は、1, 3, 6, 7, 1 3, 2 4 及び 3 7 本のそれぞれであり、この 7 ケースに対して消滅計算を実施した。また、残りのピンには水素化ジルコニウムが挿入された。F P が挿入されたピンは長さが 1 m である。

F P 消滅計算に使用したターゲット集合体の組成は均質化したものである。

T c 9 9 の組成は T c 金属の 1 0 0 % を T c 9 9 とし、また、I 1 2 9 は C e I₃ のよう素の内、I 1 2 9 は 7 6. 7 %、I 1 2 7 は 2 3. 3 %（軽水炉使用済み燃料中の生成割合）として計算した。

計算は上記ターゲット集合体 1 体が炉心中心に装荷された炉心に対して、R - Z 体系の 8 群拡散近似で行ったものである。エネルギー分割は 7 0 群表示で、8 / 1 6 / 2 8 / 3 7 / 4 6 / 5 8 / 6 7 / 7 0 / で、水素化ジルコニウムが挿入されことを考慮して低エネルギー側をやや多く取った。第 8 群は熱群である。また、使用した群定数は J E N D L - 3. 1 7 0 群ライブラリーである。エネルギー群構造は第 2 章に示した。

(2) 計算結果

a. T c 9 9 消滅計算

T c 9 9 の消滅率及び消滅量の計算結果を表 3. 1. 2 - 1 に記した。この表の数値を図示したものが図 3. 1. 2 - 1 と図 3. 1. 2 - 2 である。これらの図表から分かることは以下の通りである。

T c 9 9 の消滅率は 1 ピン装荷では 6. 2 % / 年と高いが T c ピンの装荷本数を増大させると一様に減少し、3 7 ピンでは 0. 2 9 % / 年とかなり小さい。一方、

消滅量ではTcピン本数を増大させると消滅量は増大し13ピンから24ピン(Tcピン装荷割合(体積比)で35%から65%)辺りで最高の0.52kg/年を示しており、この装荷割合より増大するとその消滅量はやや減少する。

この様に、Tcピンの装荷本数が少ない場合、即ち水素化ジルコニウムの装荷量が多い場合の方が、Tc99の消滅率が高くなる理由は次の様である。図3. 1. 2-3に示したようにTc99の吸収断面積は低エネルギー側、特に熱エネルギー群で大きくなり、かつ、水素化ジルコニウムの装荷量が多い場合は図3. 1. 2-4に示したように中性子スペクトルが軟化する(熱群で大きくなる)ため、Tc99の実効断面積が大きくなるからである。表3. 1. 2-2には消滅計算に使用したTc99の吸収断面積とTc装荷集合体領域の平均中性子束を記した。この表からTcピンの装荷体積比が増大(水素化ジルコニウムの装荷ピン本数の減少)すると、Tc99の吸収断面積は、例えばTc1ピンと37ピンで比較すると1/20に減少し、一方、中性子束レベルはあまり変化ない(最大で35%程度)ことが分かるので、水素化ジルコニウムを多く装荷してTc99の実効断面積を大きくする方がTc99の消滅率が高まる事が分かる。

また、Tc99の消滅量については、Tcピン装荷本数が増大するとその消滅量が増大する理由は、Tc99装荷量の増大率がTc99の実効断面積の減少率より大きいからである。例えば、Tc99の装荷量が1ピンから24ピンへ24倍増大してもTc99の実効断面積は1/9程度しか減少しないからである。Tcピン装荷本数が更に増大するとTc99の実効断面積の減少率の方がより大きくなり、

Tc99の消滅量はやや減少する。

ここで、Tc13ピン装荷の場合でTc装荷集合体領域の平均中性子束が、表3. 1. 2-2に記したように、最小になった理由を考える。Tc装荷集合体領域のマクロ吸収断面積について記したものが表3. 1. 2-3である。この表からTc装荷集合体領域のマクロ吸収断面積はTc13ピン装荷の場合が最大で、水素化ジルコニウムの装荷量が多く(Tc1ピン装荷)ても、また、無く(Tc37本装荷)ても小さいことが分かる。そのため、表3. 1. 2-4及び図3. 1. 2-5に示した中性子束の径方向分布からも分かるように、Tc13ピン装荷の場合のTc装荷集合体領域の中性子束が最も減少した。

水素化ジルコニウムが装荷されたTc装荷集合体に隣接する炉心燃料（第1列）ではその接したわずかな領域（1-2cm程度）で通常よりも高い出力が計算される。これは核分裂性核種の実効核分裂断面積が中性子スペクトルの軟化により局所的に大きくなったためである。その計算結果を炉心中心に炉心燃料が装荷された場合と比較して示したものが表3. 1. 2-5であり、これを図示したものが図3. 1. 2-6である。これらの図表からTc1ピン装荷、即ち水素化ジルコニウム36ピン装荷の場合が最大で、通常出力より約7倍高く、また、Tcピンと水素化ジルコニウムピンがほぼ同数の装荷の場合で通常とほぼ同じ出力となることが分かる。そこで、Tc装荷集合体とこれに隣接する炉心燃料との間の距離を変化させた場合のその炉心燃料の最大出力の変化を計算した。その間の領域には体積比でNa80%及び構造材20%の組成の物質を挿入した。この場合のTc装荷集合体はTcピンが1本と水素化ジルコニウムが37ピンで構成されいおり、本検討で最も水素化ジルコニウムの装荷されたケースに対して計算した。その計算結果を通常出力と比較して表3. 1. 2-6及び図3. 1. 2-7に示した。その結果、14cm程度、即ち集合体1列程度離さないと通常出力にならない事が分かった。この様にTc装荷集合体とこれに隣接する炉心燃料との間の距離を14cmも取るとTc99の消滅量に影響がでるものと予想されるので14cm離した場合のTc99の消滅量及び消滅率の計算を行った。その計算結果を表3. 1. 2-7に記した。この表からTc99の消滅量及び消滅率は離さない場合に比べて16%減少したことが分かる。これはTc装荷領域の平均中性子束が35%減少したが、中性子スペクトルの軟化によりTc99の吸収断面積が28%増大した結果である。従って、隣接する炉心燃料との間の距離を14cm離した場合と離さない場合とのTc99消滅量消滅率に与える影響はあまり大きく無い事が分かった。

b. I129消滅計算

I129の消滅率及び消滅量の計算結果を表3. 1. 2-8に記した。この表の数値を図示したものが図3. 1. 2-8と図3. 1. 2-9である。これらの図表から分かることは以下の通りである。

I129の消滅率は1ピン装荷では6.0%/年と高いが装荷ピン本数を増大さ

せるとTc99の場合と同じように一様に減少し、37ピンでは0.32%/年とかなり小さくなる。一方、消滅量は、I129の装荷ピン本数を増大させると増大し13ピン（I129ピン装荷割合（体積比）35%）辺りで最高の0.38kg/年を示しており、更にこのピン装荷割合が増大すると減少する。

この様に、I129ピン装荷が少ない場合、即ち水素化ジルコニウムの装荷量が多い場合、I129消滅率が高くなる理由はTc99の場合と同じである。即ち、水素化ジルコニウムの装荷量が多い場合は中性子スペクトルが軟化（熱群で大きい）することと、I129の吸収断面積が熱群で大きい（図3.1.2-10参照）ことから、I129の実効断面積が大きくなるからである。表3.1.2-9には消滅計算に使用したI129の吸収断面積とI129装荷集合体領域の平均中性子束を記した。この表からTcピンの場合と同様にI129の装荷体積比が増大（水素化ジルコニウムの装荷ピン本数の減少）すると、I129吸収断面積は減少（例えば、1ピンから37ピンに増大すると1/20に減少）し、一方、中性子束レベルはあまり変化ない（最大で20%程度）ことが分かるので、水素化ジルコニウムを多く装荷してI129の実効断面積を大きくする方がI129の消滅率が高まる事が分かる。

また、I129の消滅量についてはI129ピン装荷本数が増大するとTc99の場合よりも凸型の曲線を描く。この理由は、I129ピンの装荷割合（体積比）が50%辺りまではI129装荷量の増大率がI129の実効断面積の減少率より大きい（例えば、I129の装荷量が1ピンから13ピンへ13倍増大するとI129の実効断面積は1/3程度しか減少しない）し、更に増大するとその増大率よりもI129の実効断面積の減少率の方がより大きくなるためである。

表 3. 1. 2 - 1 T c 9 9 の消滅量及び消滅率の計算結果

装荷ピン (本)	体積比(*) (%)	装荷重量 (k g)	消滅量 (k g / 年)	消滅率 (% / 年)
1	2. 7	3. 9 8	0. 2 5	6. 2
3	8. 1	1 1. 9	0. 4 0	3. 3
6	1 6. 2	2 3. 9	0. 4 7	2. 0
7	1 8. 9	2 7. 9	0. 4 9	1. 8
1 3	3 5. 1	5 1. 8	0. 5 2	1. 0
2 4	6 4. 9	9 5. 6	0. 5 1	0. 5 3
3 7	1 0 0. 0	1 4 7. 4	0. 4 2	0. 2 9

(*) 体積比 = $Tc / (Tc + ZrH)$

表 3. 1. 2 - 2 計算に使用した T c 9 9 吸収断面積と T c 装荷集合体平均中性子束
及び T c 9 9 消滅率

T c 9 9 装荷ピン (本)	Z r H 装荷ピン (本)	T c 9 9 吸収断面積, A (barn)	平均中性子束 B (E15 n/s/cm ²)	A X B 相対値	T c 9 9 消滅率 (%/Y)
1	36	7.42(1.00)	2.74(1.00)	1.00	6.2 (1.00)
3	34	4.84(0.65)	2.21(0.81)	0.53	3.3 (0.53)
6	31	3.27(0.44)	1.95(0.71)	0.31	2.0 (0.32)
7	30	2.94(0.40)	1.91(0.70)	0.28	1.8 (0.28)
13	24	1.76(0.24)	1.82(0.66)	0.16	1.0 (0.16)
24	13	0.86(0.12)	1.96(0.72)	0.09	0.53(0.09)
37	0	0.38(0.05)	2.37(0.86)	0.04	0.29(0.05)

(NOTE) 括弧内の数値は相対値である。

表 3. 1. 2 - 3 炉心平均中性子束及び T c 装荷集合体領域での平均中性子束と
マクロ吸収断面積

T c ピン 装荷本数 (本)	領域平均中性子束 ($E15 \text{ n/s/cm}^2$)		T c 装荷集合体領域 マクロ吸収断面積 ($1 / \text{cm}$)
	炉心領域	T c 装荷集合体領域	
1	3. 4 6	2. 7 4 (1.00)	1. 7 2 E - 2 (1.00)
1 3	3. 4 8	1. 8 2 (0.66)	2. 7 2 E - 2 (1.58)
3 7	3. 4 9	2. 3 7 (0.86)	1. 5 7 E - 2 (0.91)

(NOTE) 括弧内の数値は相対値である。

表 3. 1. 2 - 4 各領域での平均中性子束

T c ピン 装荷本数 (本)	平均中性子束 (E 1 5 n / s / c m 2)			
	T c 装荷集合体	炉心第 1 列	炉心第 2 列	炉心第 3 列
1	2. 7 4	3. 2 6	3. 7 2	3. 9 1
1 3	1. 8 2	2. 8 1	3. 4 6	3. 7 5
3 7	2. 3 7	3. 2 1	3. 6 9	3. 8 9

表 8. 1. 2 - 5 炉心中心にターゲット集合体又は炉心燃料をそれぞれ装荷した際の隣接炉心燃料（第 1 列）の最大出力

炉心中心での炉心燃料 又は T c ピン装荷本数 (本)	隣接炉心燃料の最大出力 (w / c c)	炉心燃料装荷（炉心中心） の場合に対する相対値
炉心燃料	4 2 9	1 . 0 0
1	2 9 2 0	6 . 8 1
3	1 7 2 0	4 . 0 1
6	1 0 7 0	2 . 4 9
7	9 5 4	2 . 2 2
1 3	5 7 8	1 . 3 5
2 4	3 4 9	0 . 8 1
3 7	3 2 0	0 . 7 5

表 3.1.2-6 ターゲット集合体-隣接炉心燃料間の距離を変えた際の隣接炉心燃料
の最大出力
--Tc-1ピン, ZrH-36ピンのターゲット集合体装荷の場合

ターゲット集合体-隣接炉心燃料間の距離 (c m)	隣接炉心燃料の最大出力	
	(w / c c)	相対値
0 (炉心中心に炉心燃料装荷)	4 2 9	1. 0 0
0	2 9 2 0	6. 8 1
5	1 0 4 0	2. 4 2
1 0	5 3 0	1. 2 4
1 4	3 9 0	0. 9 1

(N o t e) 炉心中心に装荷したターゲット集合体とこの集合体に隣接する炉心燃料との間にはN a 8 0 %と構造材 2 0 % (体積比)の組成のものが存在するものとした。

表 3. 1. 2 - 7 T c 装荷集合体 - 隣接炉心燃料間の距離を変えた際の
T c 9 9 の消滅量と消滅率
―― T c 1 ピン装荷集合体の炉心装荷の場合

	T c 装荷集合体 - 隣接炉心燃料 間の距離 (cm)	T c 装荷集合体 領域の 平均中性子束 (E15 n/s/cm ²)	T c 9 9		
			吸収断面積 ($\text{A}^{\circ}\text{-}\gamma$)	消滅量 (kg/Y)	消滅率 (%/Y)
a.	0	2. 7 4	7. 4 2	0. 2 5	6. 2
b.	1 4	1. 7 7	9. 4 7	0. 2 1	5. 2
b / a	—	0. 6 5	1. 2 8	0. 8 4	0. 8 4

表 3. 1. 2 - 8 I 1 2 9 の消滅量及び消滅率の計算結果

装荷ピン (本)	体積比(*) (%)	装荷重量 (k g)	消滅量 (k g / 年)	消滅率 (% / 年)
1	2. 7	1. 4 5	0. 0 8 7	6. 0
3	8. 1	4. 3 6	0. 2 1	4. 7
6	1 6. 2	8. 7 3	0. 3 0	3. 5
7	1 8. 9	1 0. 2	0. 3 3	3. 2
1 3	3 5. 1	1 8. 9	0. 3 8	2. 0
2 4	6 4. 9	3 4. 9	0. 3 4	0. 9 6
3 7	1 0 0. 0	5 3. 8	0. 1 7	0. 3 2

(*) 体積比 = $\text{CeI3} / (\text{CeI3} + \text{ZrH})$

表 3.1.2-9 計算に使用した I 1 2 9 吸収断面積と C e I 3 装荷集合体平均中性子束
及び I 1 2 9 消滅率

I 1 2 9 装荷ピン (本)	Z r H 装荷ピン (本)	I 1 2 9 吸収断面積, A (barn)	平均中性子束 B (E15 n/s/cm2)	A X B 相対値	I 1 2 9 消滅率 (%/Y)
1	36	5.73(1.00)	3.42(1.00)	1.00	6.0 (1.00)
3	34	4.83(0.84)	3.14(0.92)	0.77	4.7 (0.78)
6	31	3.81(0.66)	2.93(0.86)	0.57	3.5 (0.58)
7	30	3.53(0.62)	2.89(0.85)	0.53	3.2 (0.53)
13	24	2.27(0.40)	2.84(0.83)	0.33	2.0 (0.33)
24	13	0.95(0.17)	3.20(0.94)	0.16	0.96(0.16)
37	0	0.28(0.05)	3.73(1.09)	0.05	0.32(0.05)

(NOTE) 括弧内の数値は相対値である。

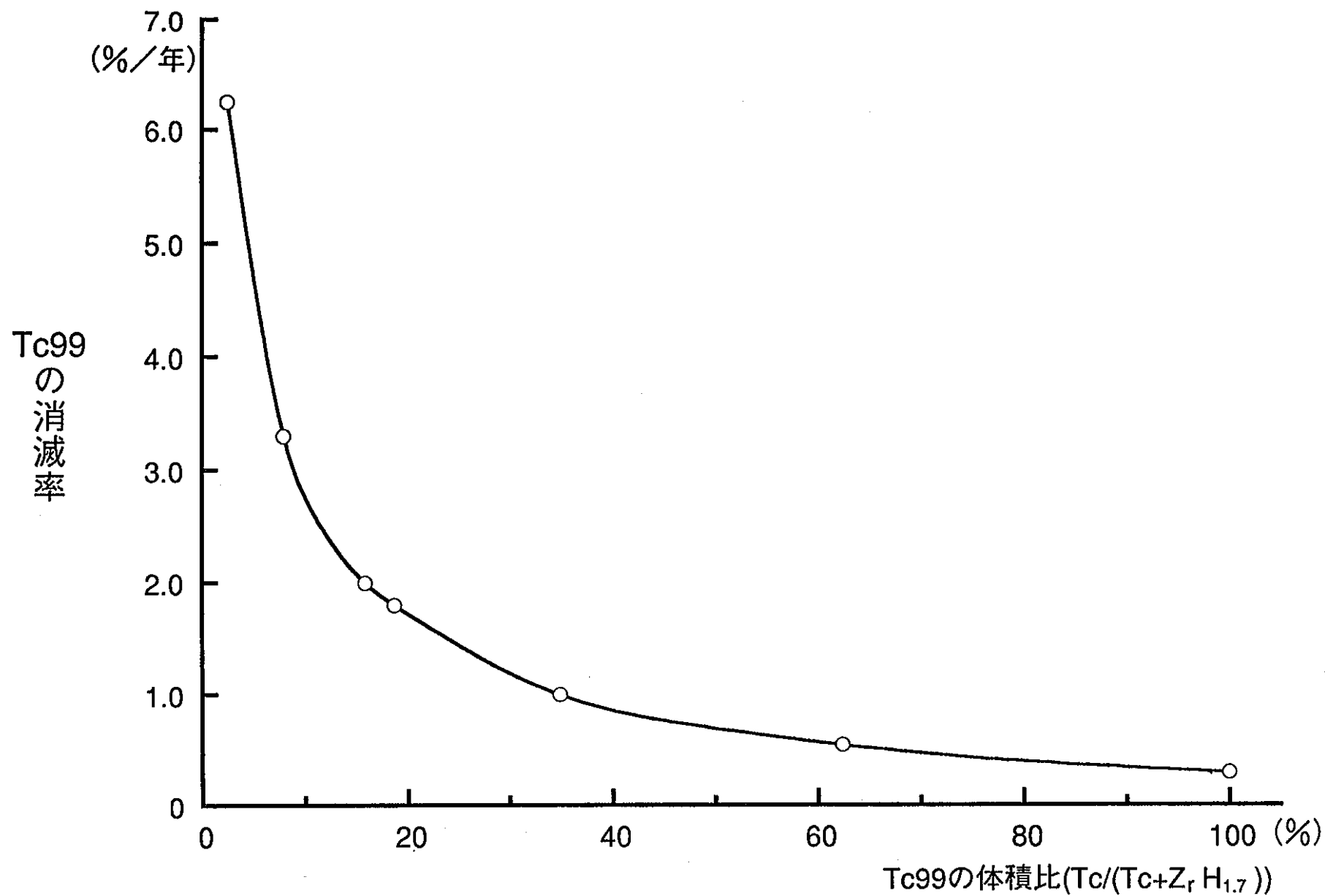


図 3.1.2-1

Tc99の体積比に対するTc99消滅率変化

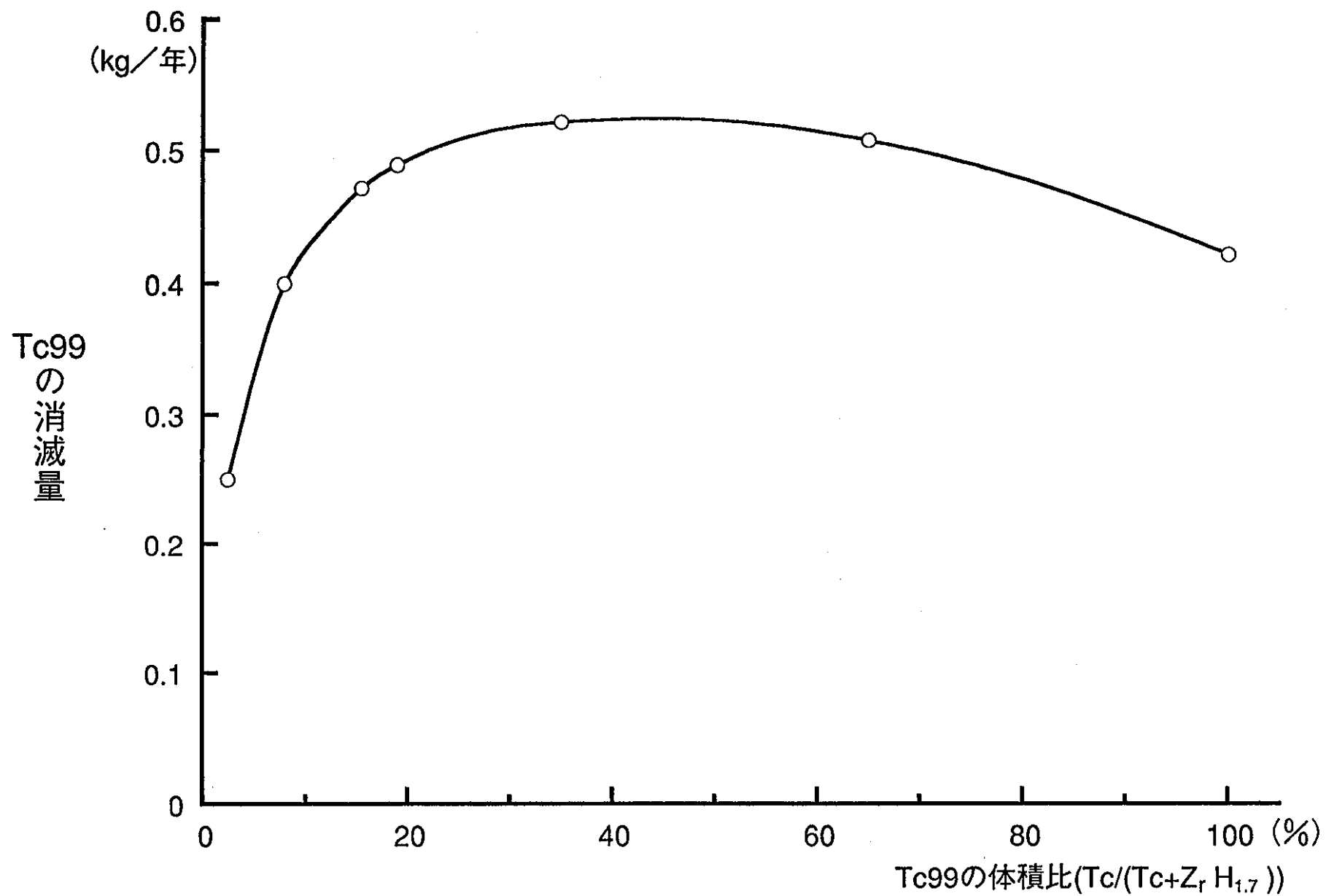


図 3.1.2-2

Tc99の体積比に対するTc99消滅量変化

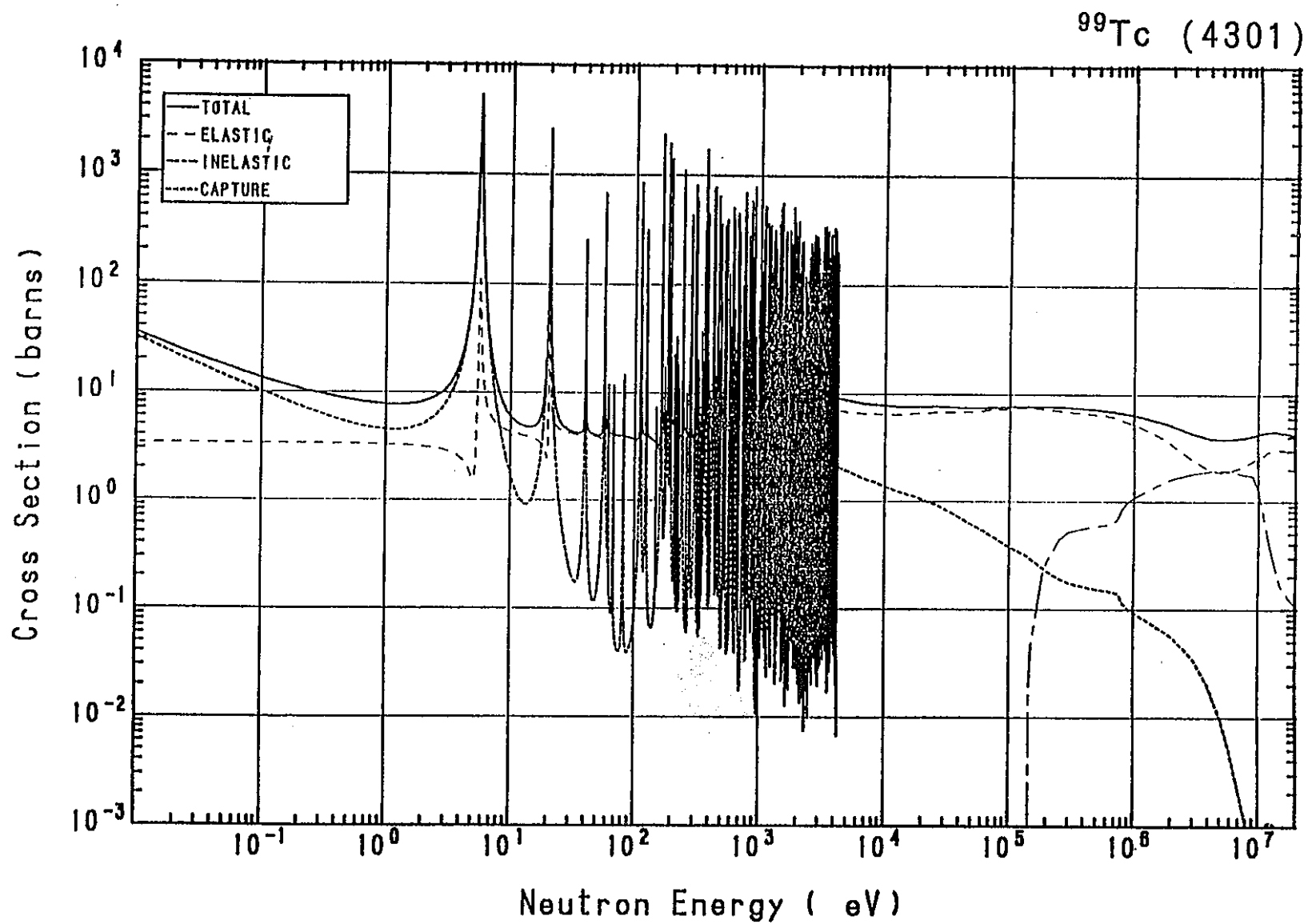


図 3.1.2-3

Tc 99 の核断面積

中性子束(任意単位)

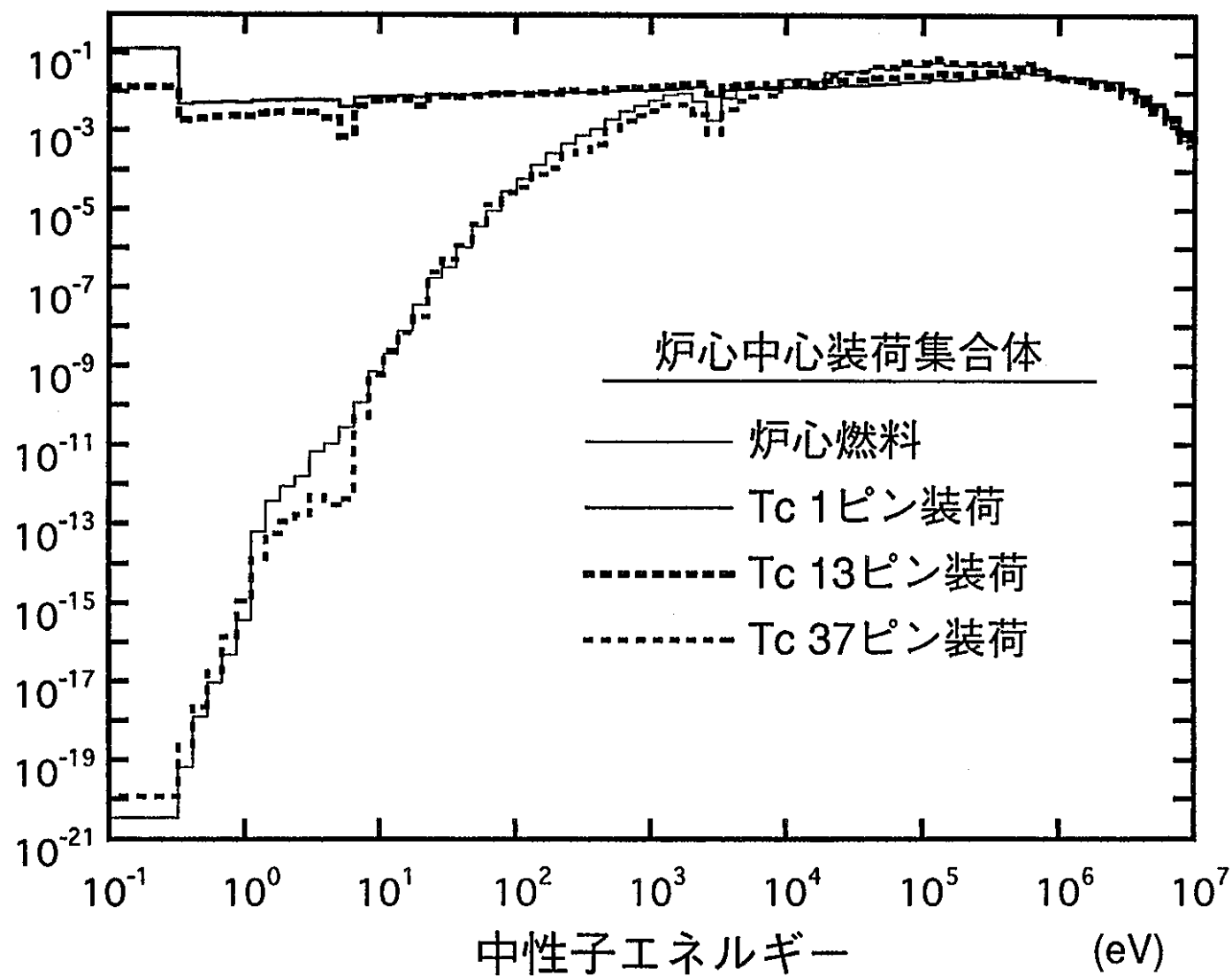


図 3.1.2-4

炉心中心集合体領域での70群中性子スペクトル

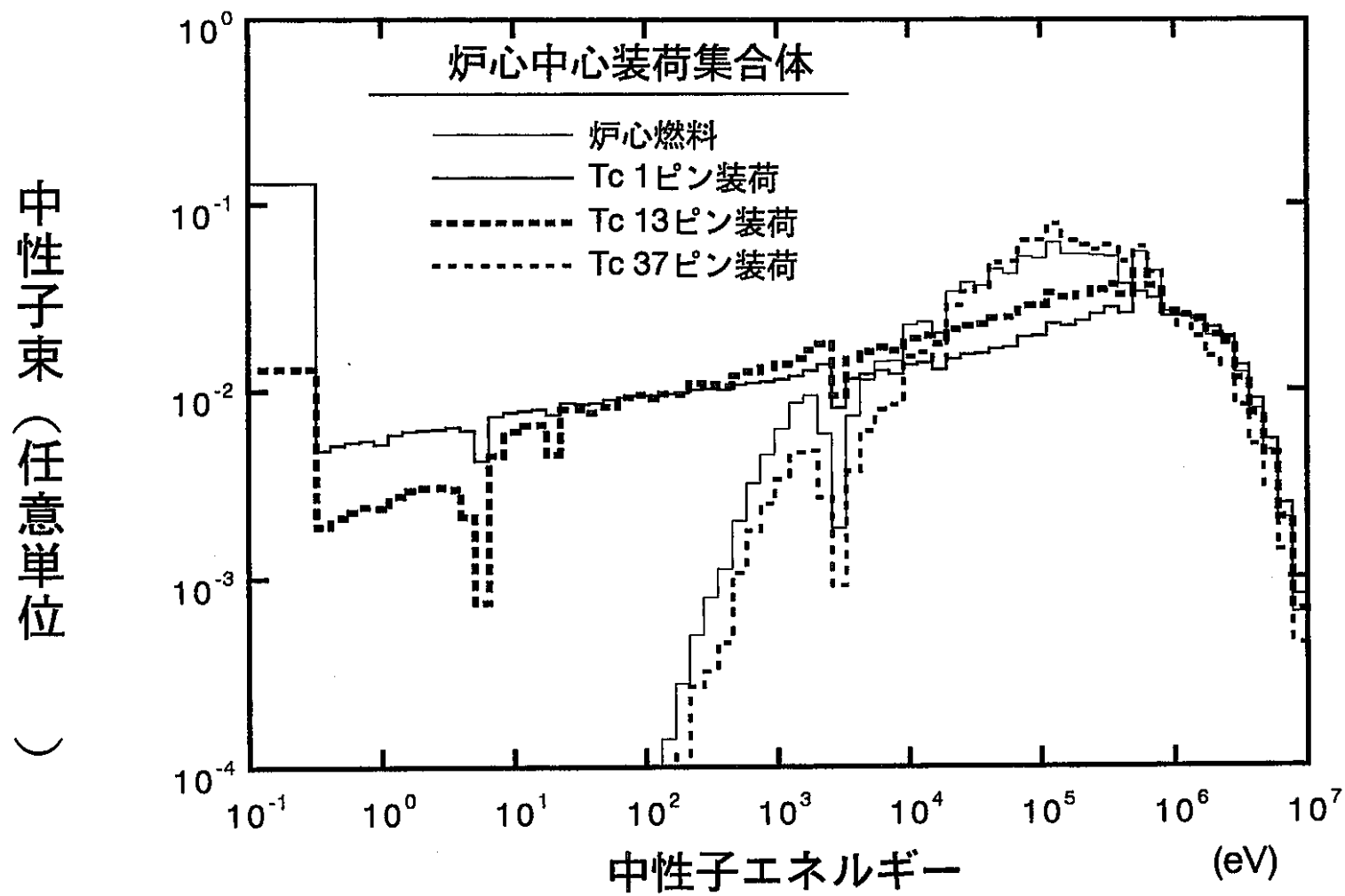


図3.1.2-4 炉心中心集合体領域での70群中性子スペクトル(2)

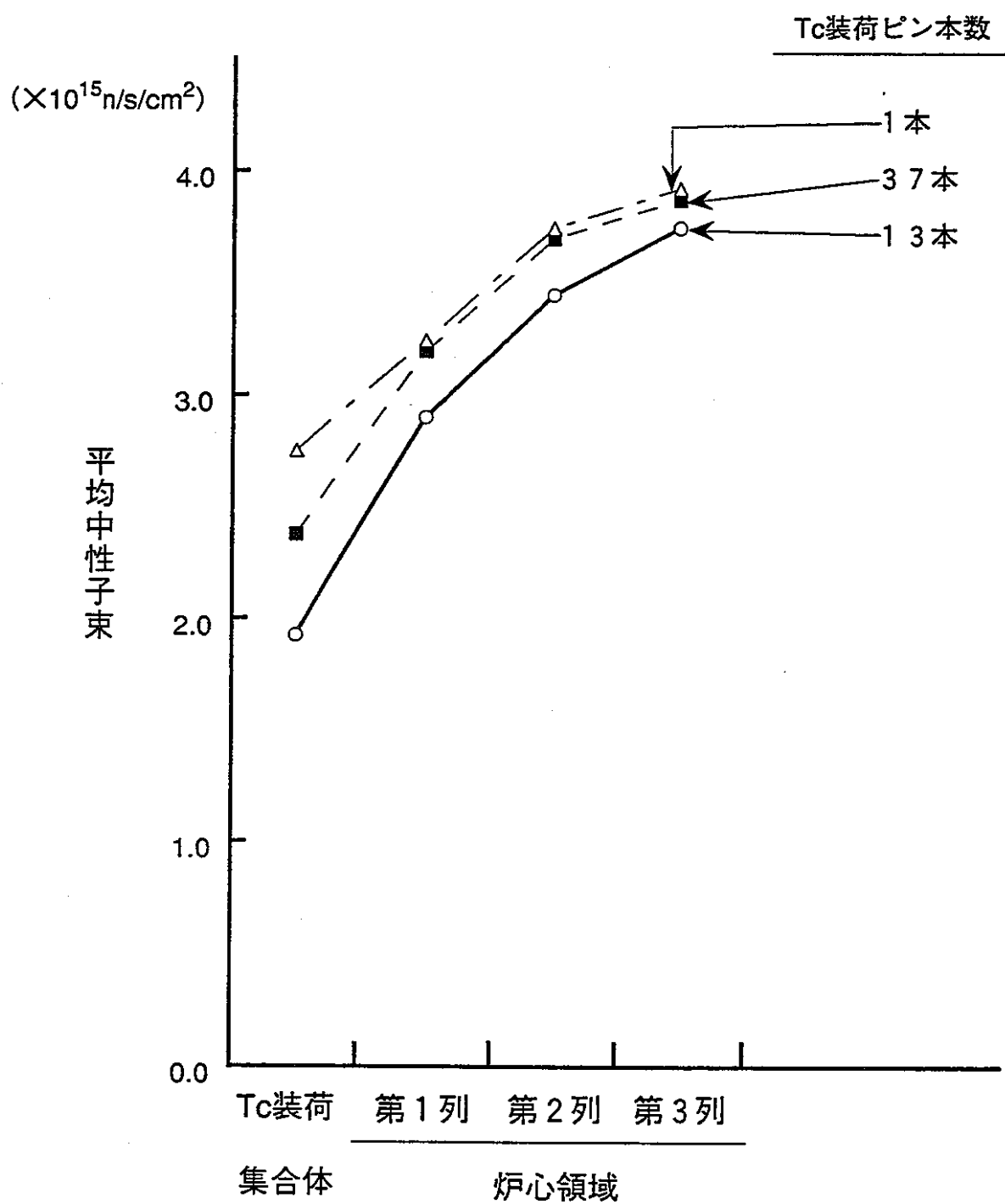


図 3.1.2-5

Tc装荷集合体装荷炉心での領域平均
中性子束の径方向分布

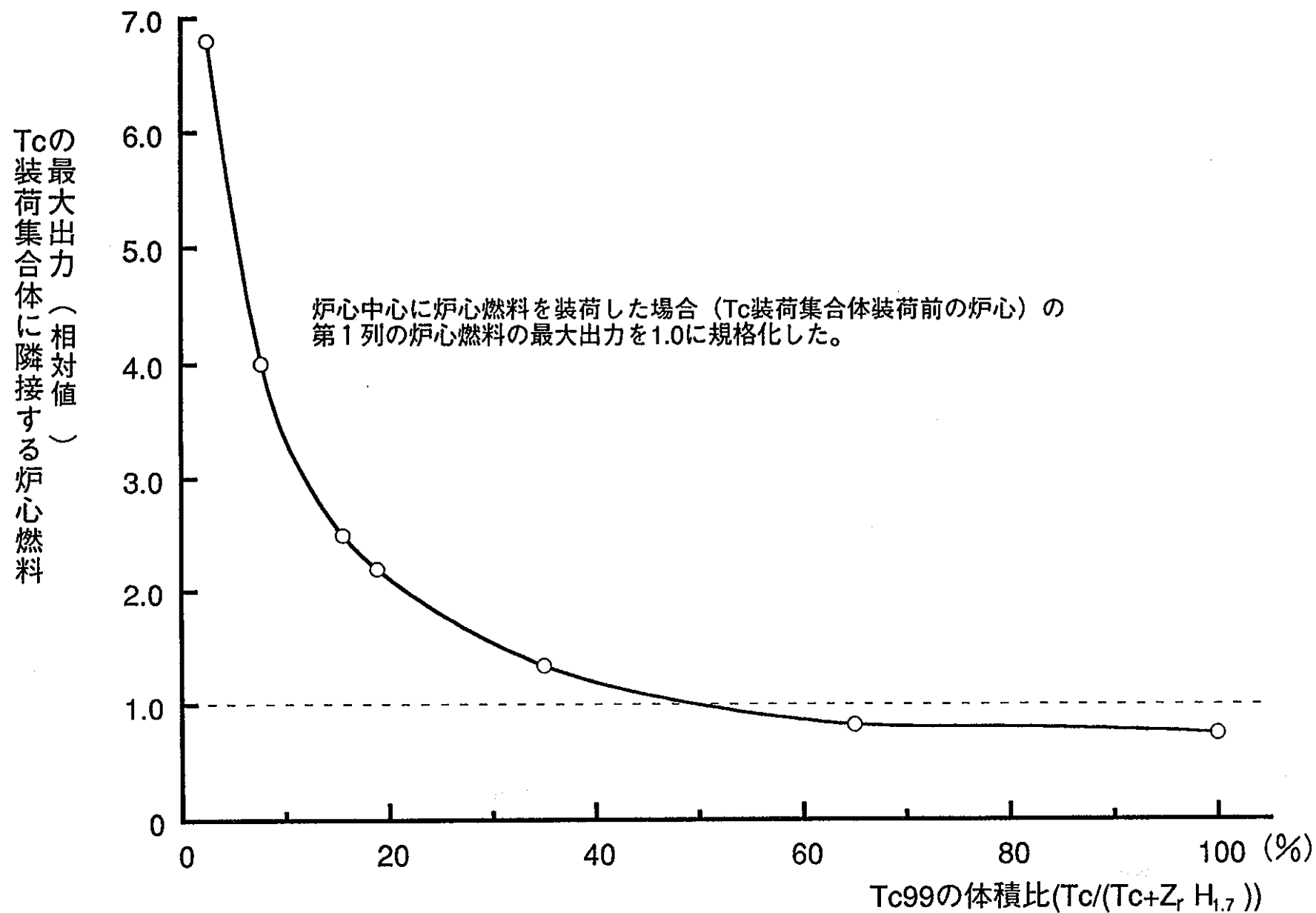


図 3.1.2-6

Tc99の体積比に対するTc装荷集合体に隣接する
炉心燃料の最大出力（相対値）

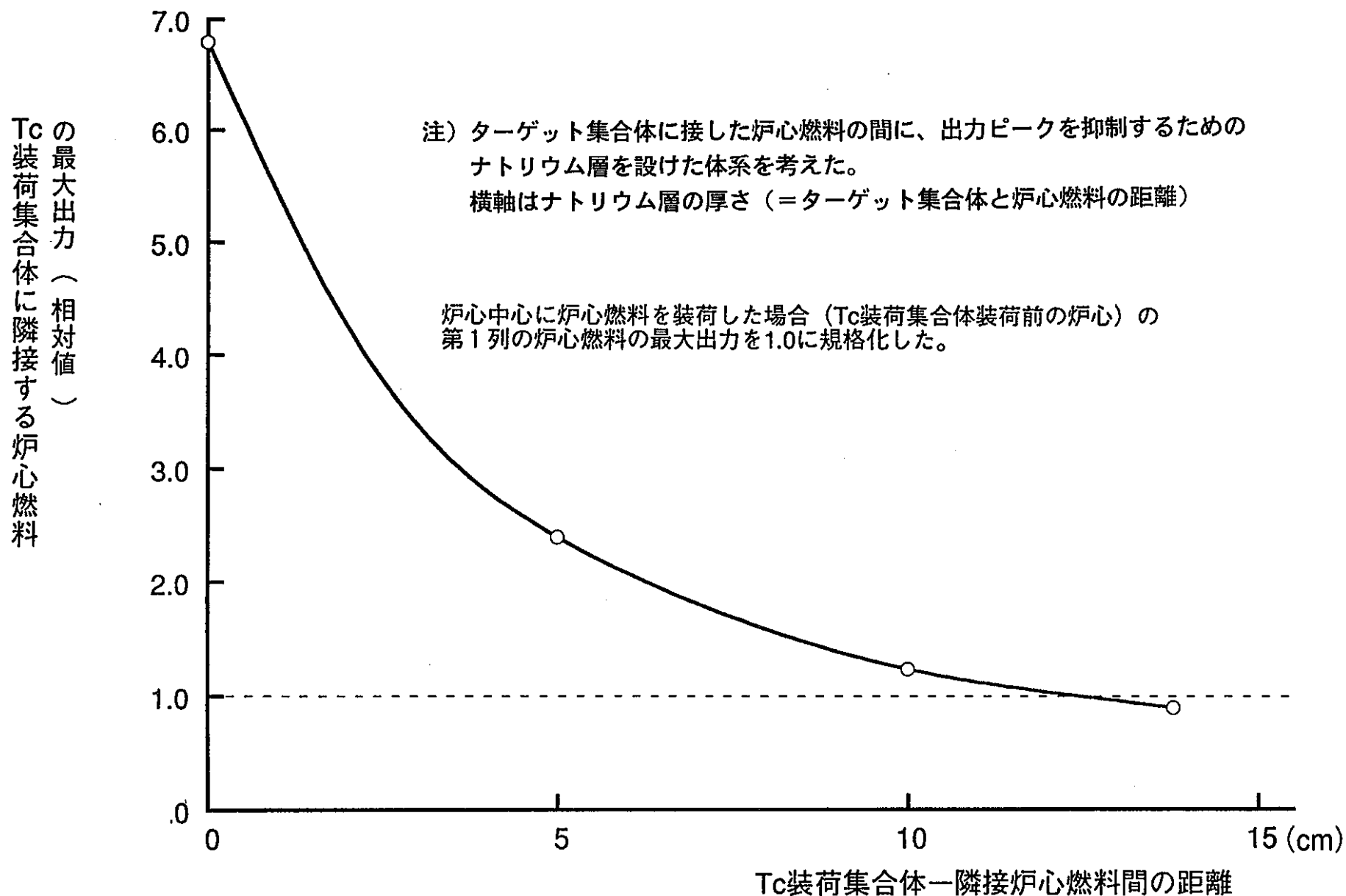


図 3.1.2-7 Tc装荷集合体一隣接炉心燃料間の距離に対する隣接炉心燃料の最大出力 (相対値)
 ...Tc装荷集合体(Tc 1ピン、 $\text{ZrH}_{1.7}$ 36ピン)装荷の場合

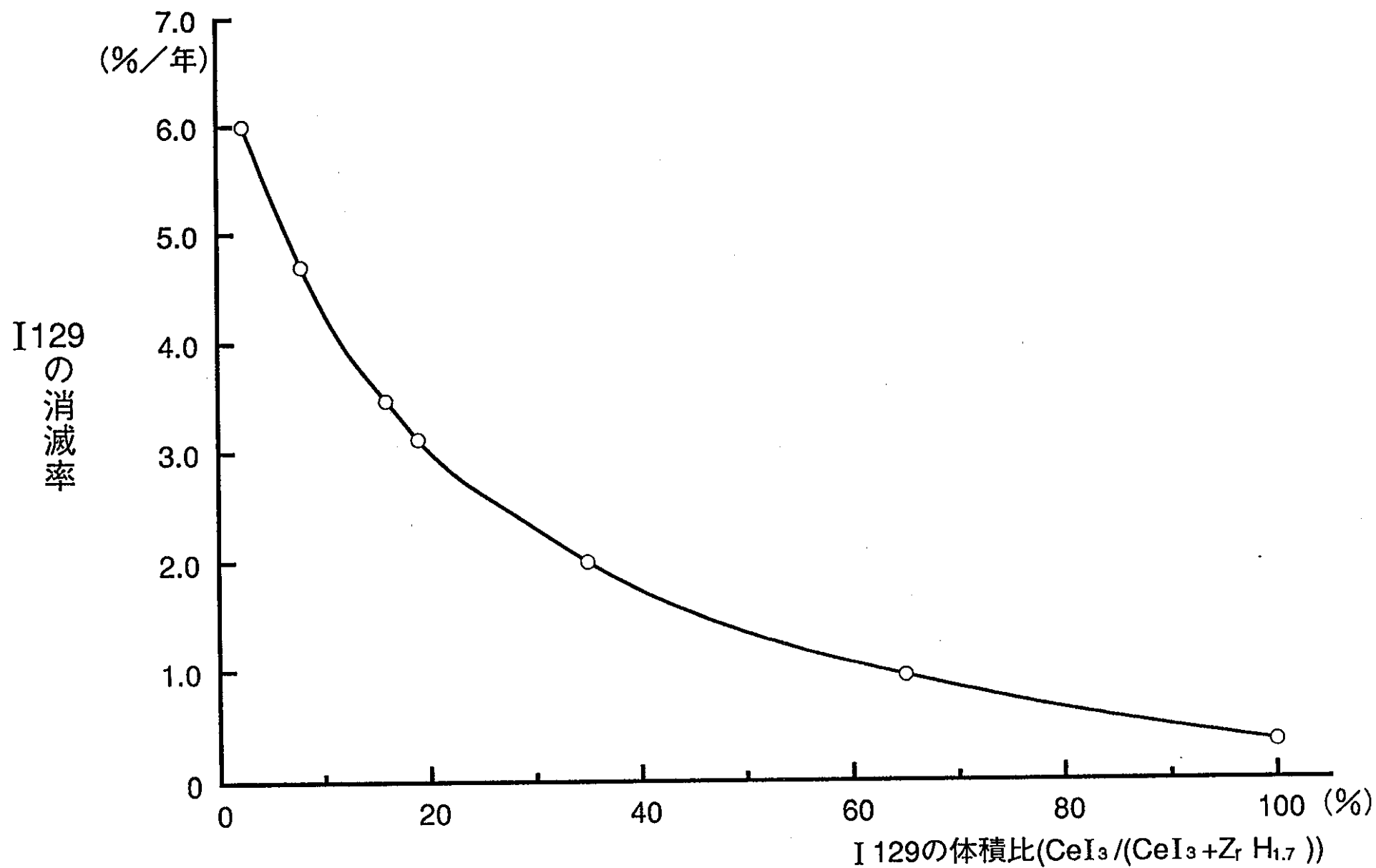


図 3.1.2-8

I129の体積比に対する I129消滅率変化

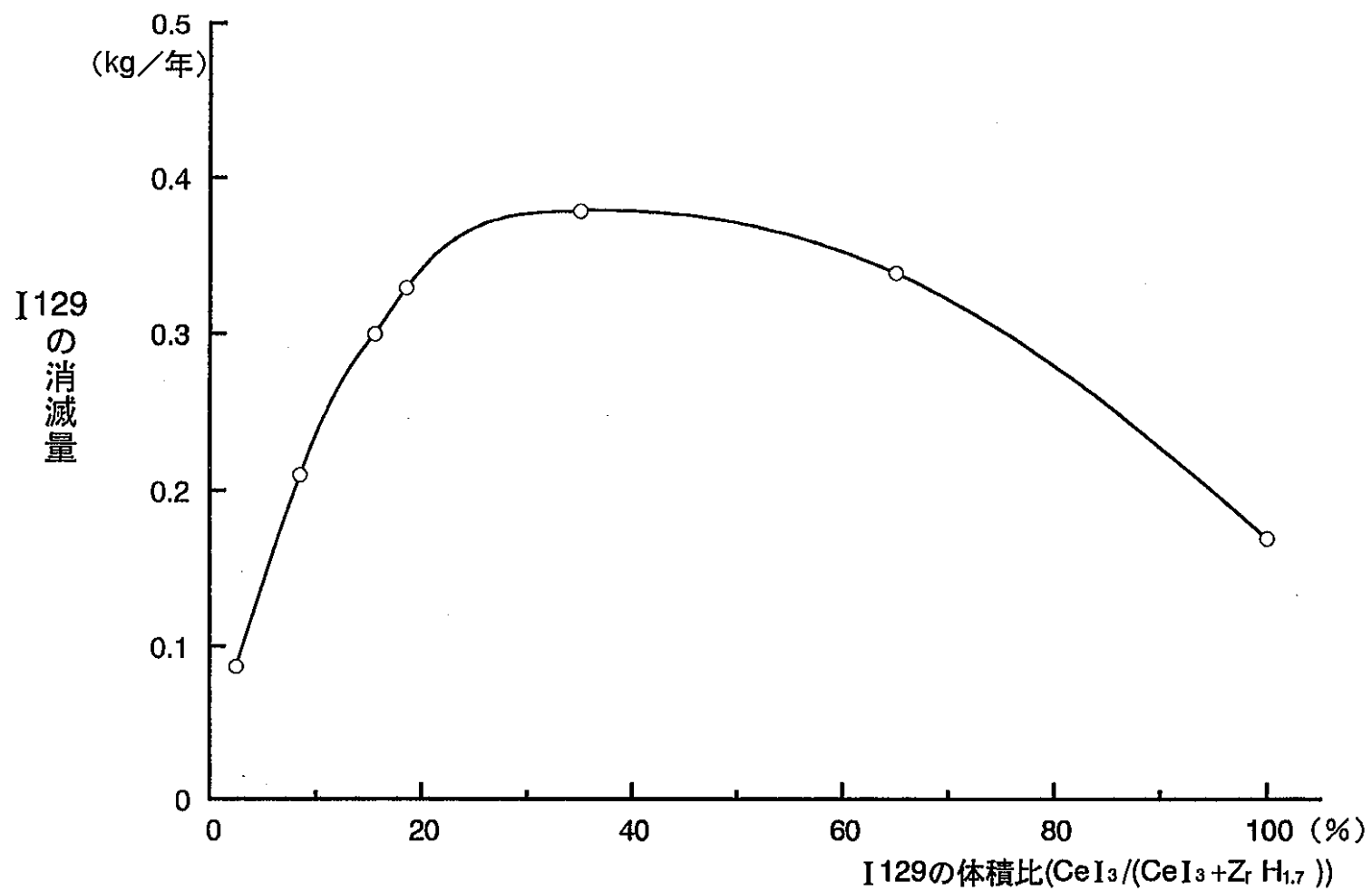


図 3.1.2 - 9

I129の体積比に対する I129消滅量変化

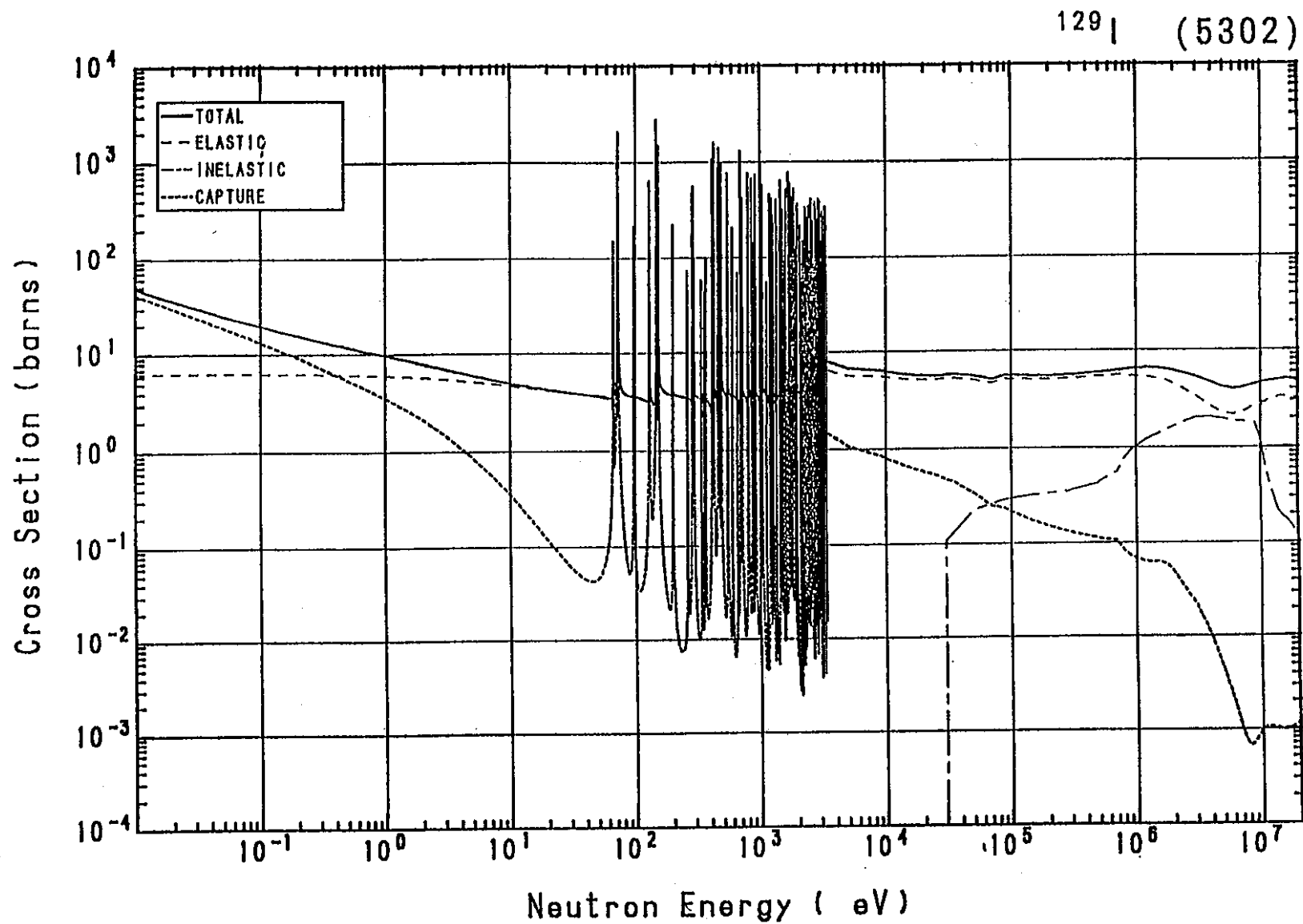


図 3.1.2-10

I 1 2 9 の核断面積

3.1.3 モンテカルロ法による検討

(1)ねらいとターゲット集合体仕様の設定

ここでは、連続エネルギーモンテカルロ法によりターゲット集合体内のTcピンやZrHピンの非均質性や共鳴領域の自己遮蔽効果など、体系の非均質性・中性子スペクトルや断面積の微細なエネルギー構造を正確に扱って、ターゲット集合体の消滅特性を解析する。解析対象とした37本ピンのターゲット集合体仕様は、拡散計算によるサーベイ結果をもとに、TcピンとZrHピンの内訳をTc 7本、ZrHピン 30本のケースに設定した。これを基準集合体とする。この選定の理由は、消滅率はTc 1本の場合よりも小さいが、消滅量が多く、消滅率と消滅量の両方の観点から比較的バランスが良いためである。ただし、拡散計算の結果ではターゲット集合体に隣接した燃料の出力が増大することが示され、総合的には必ずしも最適な仕様とは限らないが、この検討でのベースとした。

拡散計算では、ターゲット集合体内を均質化したが、ここではTcピン、ZrHピンを厳密に非均質に扱う。各ピンの配列として、代表的な分散配置と集中配置を考えた。これを図3.1.3-1に示す。これにより、ピン配列がTc消滅特性へ及ぼす影響を検討する。拡散計算と同様にターゲット集合体を完全に均質化した場合についても計算し、均質化の影響も検討する。これら基準ターゲット集合体ではTc・ZrHそれぞれの平均原子数密度は同一となり、配置や非均質性の効果のみが検討できる。

また、基準ターゲット集合体の他に、ピン径の効果を検討するために、61本ピン・ターゲット集合体を設定した。これにより、細径化ピンとなりTcの自己遮蔽が弱まり消滅率が増大する可能性がある。このターゲット集合体では、TcとZrHの体積比の他、構造材や冷却材の体積比が基準集合体と同一となり、消滅率の比較が容易となるようにした。各ピンの配置は分散型とし、基準集合体の分散型との比較を行えるようにした。この配置を図3.1.3-2に示す。37本ピンの仕様と比較したものを表3.1.3-1に示す。61本のうち、13本がTcピン、48本がZrHピンである。この本数比は厳密に基準集合体と一致させられない。そこで、TcとZrHの原子数密度を調整し、TcとZrHそれぞれの均質化原子数密度が基準集合体と一致するようにした。

さらに、基準集合体と同じ37本ピン集合体において消滅率が最大となるTc1本ピンのケースについても検討した。これは拡散計算の結果よりもっとも消滅率が高いケースである。

(2) 計算体系

基準ターゲット集合体(Tc7ピン・ZrH30ピン)のモデル化としては、分散配置と集中配置を厳密に扱った非均質モデルの他、形状モデル化の効果を調べるために、均質モデルと分散配置に対応するリングモデルとを設定した。リングモデルは1次元モデルとなり、二次元モデルとなる厳密非均質モデルより簡易であり、衝突確率法でも模擬できる。この結果は、第4章で示す衝突確率法による結果と比較できる。

基準ターゲット集合体(Tc7ピン・ZrH30ピン)、Tc1本ピン・集合体、61本ピン・集合体に対して、合計以下の6ケースを設定した。

[37本ピン・基準ターゲット集合体；Tc7ピン・ZrH30ピン]

- ・Case 1 均質モデル(ターゲット集合体内を完全均質化)
- ・Case 2 非均質モデル、各ピンをリング化

(Case3の分散配置をリング化、図3.1.3-3)

- ・Case 3 非均質モデル、Tcピン7本を分散配置(図3.1.3-1)
- ・Case 4 非均質モデル、Tcピン7本を集中配置(図3.1.3-1)

[37本ピン・ターゲット集合体；Tc1ピン・ZrH36ピン]

- ・Case 5 非均質モデル、Tcピン1本を中心に配置

[61本ピン・ターゲット集合体；Tc13ピン・ZrH48ピン]

- ・Case 6 非均質モデル、Tcピンを分散配置(図3.1.3-2)

図3.1.3-3は、Case2の計算体系であるが、他のケースにおいても、ターゲット集合体の内部のモデル化を除き、炉心領域も含めた計算体系はCase2と同一である。本体系で上下方向は無限としている。

ターゲット集合体内の核種ごとの集合体平均原子数密度は、Tc1本ピンのCase5を除いて同一である。

(3) 計算手法

計算はモンテカルロ法MCNPコードにより、JENDL-3.1に基づく連続エネルギーのFSXLIBライブラリーを用いて実施した。各ケースの中性子のヒストリー数は、160000(4000ソース、40世代)とした。ヒストリー数の影響をみるために、上記Case 3 についてヒストリー数を4倍(統計誤差は半分となる。)の640000ヒストリーとした場合(4000ソース、160世代)も計算した。

(4)計算結果

a. 基準集合体におけるピン配列および均質化の効果

基準集合体におけるピン配列および均質化によるTc99消滅特性への影響を以下に検討した。検討ケースは前記Case 1,2,3,4である。

(a)Tc99消滅特性

・ Tc99消滅率 表3.1.3-2

・ 中性子吸収反応率 表3.1.3-3

Tc99消滅率(消滅量も同じ、以下同)に対して、非均質モデル化の影響が大きく、分散配置では均質モデルの約30%減、集中配置では均質モデルの約50%減となっている。分散配置におけるリング化の影響は小さい。

エネルギーごとの中性子吸収率およびスペクトルを以下の図に示した。実際の結果は連続エネルギーであるが、ここでは、JENDL70群ライブラリーと同一のエネルギー分割で離散化している。

・ Tc99中性子吸収率(リングと均質) --- 図3.1.3-4

・ 中性子スペクトル(リングと均質) --- 図3.1.3-5

・ Tc99中性子吸収率(リングと均質の比) --- 図3.1.3-6

・ Tc99中性子吸収率(リングと分散) --- 図3.1.3-7

・ 中性子スペクトル(リングと分散) --- 図3.1.3-8

・ Tc99中性子吸収率(リングと分散の比) --- 図3.1.3-9

・ Tc99中性子吸収率(分散と集中) --- 図3.1.3-10

・ 中性子スペクトル(分散と集中) --- 図3.1.3-11

・ Tc99中性子吸収率(分散と集中の比) --- 図3.1.3-12

リングモデルや分散配置モデルの非均質モデルと均質モデルとの中性子

吸収率を比べると、数keVから数eVで、非均質モデルの中性子吸収率が大幅に下回っている。一方、それより低いエネルギーでは、非均質モデルの中性子吸収率が上回っている。これは、非均質体系では、共鳴を逃れて減速し低エネルギーで吸収される中性子が多いことを示す。結果として、全体の吸収量は、共鳴領域での差が影響して非均質モデルで小さくなる。同じ非均質モデルの分散配置モデルと集中配置モデルでは、比較的幅広いエネルギー範囲で後者の中性子吸収率が小さくなっている。これは、後者ではTcピンが集中しているため、中性子束の空間的な減衰が大きいためである。

(b) 中性子束分布

基準ターゲット集合体・分散配置の場合のターゲット集合体の中性子束分布を図3.1.3-13に示す。低エネルギーでは、Tcピンで中性子束が落ち込み、ZrHピンで増大していることがわかる。

(c) 出力分布

ターゲット集合体近傍の炉心燃料出力分布を以下に示す。

・ターゲット集合体近傍出力分布（各モデル） --- 図3.1.3-14

ターゲット集合体に接した領域で出力密度が平均の4、5倍に上昇していることがわかる。体系間では、集中モデルでの出力密度が高くなっている。中性子を減速させ核分裂断面積の大きいエネルギー領域での中性子束を増大させて出力密度増大の原因となっているZrHが炉心燃料側に片寄っており、ターゲット集合体に接した領域での低エネルギー中性子束が他の体系よりも大きいためである。

b. 燃料ピン径の効果

37本ピン基準集合体と61本ピン集合体の比較を行い、ピン径がTc消滅特性へ及ぼす効果を検討した。集合体平均のTやZrHの原子数密度は同一とした。検討ケースは前記Case 3,6であり、どちらもTcピンが分散された体系である。

T c 消滅特性を下記の表に比較した。

・ T c 9 9 消滅率 表3.1.3-4

・ 中性子吸収反応率 表3.1.3-5

ピン径は、37本ピンで23.5mm、61本ピンで18.3mmとなり面積比では、約1.6 : 1である。

61本ピンの場合のT c 9 9 消滅率は、37本ピンの場合よりも約7%増大している。1群化中性子吸収断面積は約15%増大しており、細径化するほどT c ピン内のスペクトルが軟化して吸収率が高まっていることがわかる。ただし、1群化中性子束は逆に7%低下しているが、両者の積では1群化中性子吸収断面積の増大効果が勝っている。

以上から、T c ピンを細径化するほど消滅率が高まることがわかるが、その効果は大きなものではない。ただし、細径化した場合、T c ピンの集合体位置が変わっているので、厳密な細径化効果を求めるのは難しい。これによる不確かさが若干あるとしても、基準ピン径から細径化することは大きな消滅率の増大にならないと考えられる。

c. T c ピン本数の効果

37本ピン集合体における、T c ピン7本と1本の比較を行い、T c ピン本数の効果を検討した。検討ケースは前記Case 3,5である。すなわち、比較するT c 7本ピンは消滅率が高い分散型とした。

T c 消滅特性を下記の表に比較した。

・ T c 9 9 消滅率 表3.1.3-6

・ 中性子吸収反応率 表3.1.3-7

これよりわかるように、集合体あたりの消滅量は装荷量が多いためT c 7ピンの方が大きいが、消滅率はT c 1本ピンの方が約1.5倍高い。これは、T c 7本ピンに比べて中性子束レベルが高く、またスペクトルが柔らかいためである。

T c 1本ピンの結果を拡散計算の結果と比べると、消滅率は約3分の1である。この理由は、拡散計算では均質化されているため自己遮蔽効果が小さいこと、モンテカルロ計算ではT c ピンが中心にあり炉心部から遠いため中

中性子束が相対的に弱まるためと考えられる。このように、Tcピンがもっとも局在した本ケースでは非均質効果が大きく、モンテカルロ法による解析が必要である。また、第3章の拡散計算によるサーベイでは、完全に均質化した場合の最大値が示されていることになり、各ケースの実際の集合体の非均質性に応じて、消滅率が低下することを念頭におく必要がある。

d. 中性子ヒストリー数の影響

Case 3 において、ヒストリー数を基準の160000から640000とした場合の影響を検討した。

中性子吸収率への影響を以下の表に示す。

・ 中性子吸収反応率 表3.1.3-8

ここには、統計誤差も示されている。ヒストリー数を上げた場合、Tc99吸収率の変化は約0.2%であり、この時の統計誤差は0.5%である。

また、表3.1.3-9 には、中性子スペクトルへの影響を示す。各群のスペクトルは、ヒストリーを上げることにより最大10%程度変動し、全中性子束では約2%変動（減少）している。ただし、1群化吸収断面積は約2%増大して、吸収反応率への影響は小さい。

以上のことから、基準のヒストリー数160000でも、Tc99消滅特性は十分な精度で評価できるといえる。このヒストリー数は決して多くはないが、計算体系が径方向・軸方向の各境界とも反射条件であり、また、軸方向には均質1領域であるために、統計精度の上で有利であるためである。

表3.1.3-1 ターゲット集合体の仕様（37本ピン／61本ピン）

項 目	仕 様	
	37本ピン	61本ピン
ピン本数、本	37	61
ピン外径、mm	23.5	18.3
ピン内径、mm	21.5	16.74
被覆管肉厚、mm	1.0	0.78
ペレット径、mm	21.0	16.36
ラッパ管形状	六角形	六角形
ラッパ管内対面間距離、mm	147.7	同左
ラッパ管肉厚、mm	4.0	同左
集合体配列ピッチ、mm	160.7	同左
体積比、v %		
ペレット	57.3	同左
冷却材	18.8	同左
構造材	21.1	同左
ギャップ	2.8	同左

表3.1.3-2 Tc99消滅量の計算体系間での比較結果 (MCNP)

体系モデル	計算手法	Tc消滅量 kg/Y	Tc消滅率 %/Y	均質モデル との比
7本ピン集中型		0.239	0.86	0.48
7本ピン分散型		0.346	1.24	0.70
7本ピン分散型	リングモデル	0.359	1.29	0.72
7本ピン	均質モデル	0.497	1.78	-

注) 37本ピン集合体 Tc装荷7ピン、Tc装荷重量 27.9 kg

表3.1.3-3 Tc99吸収反応率の計算体系間での比較結果

計算手法	T c 装荷集合体 1 群化中性子束 (n/cm ² sec)	T c 9 9 1 群化吸収断面積 (barn)	T c 9 9 吸収反応率 (1/cm ³ sec)
7 本ピン集中型	1.578E+15	1.720	2.714E+15
7 本ピン分散型	1.851E+15	2.122	3.928E+15
7 本ピン分散型 リングモデル	1.728E+15	2.354	4.068E+15
7 本ピン 均質モデル	1.889E+15	2.987	5.642E+15

注) 37本ピン集合体 Tc装荷7ピン

表3.1.3-4 T c 9 9 消滅量へのピン径の影響 (MCNP)

体系モデル	計算手法	T c 消滅量 k g / Y	T c 消滅率 % / Y	均質モデル との比
3 7 本ピン集合体 (T c 装荷 7 ピン)		0 . 3 4 6	1 . 2 4	0 . 7 0
6 1 本ピン集合体 (T c 装荷 1 3 ピン)		0 . 3 7 0	1 . 3 2	0 . 7 4
均質モデル		0 . 4 9 7	1 . 7 8	-

注) T c 装荷重量 2 7 . 9 k g に統一

表3.1.3-5 T c 9 9 吸収反応率へのピン径の影響 (MCNP)

計算手法	T c 装荷集合体 1 群化中性子束 (n/cm ² sec)	T c 9 9 1 群化吸収断面積 (barn)	T c 9 9 吸収反応率 (1/cm ² sec)
3 7 本ピン集合体 (T c 装荷 7 ピン)	1.851E+15	2.122	3.928E+15
6 1 本ピン集合体 (T c 装荷 1 3 ピン)	1.715E+15	2.448	4.197E+15
均質モデル	1.889E+15	2.987	5.642E+15

注) T c 装荷重量 2 7 . 9 k g に統一

表3.1.3-6 Tc99消滅量へのTcピン本数の影響 (MCNP)

体系モデル	計算手法	Tc 消滅量 kg/Y	Tc 消滅率 %/Y
Tc 装荷 7 ピン ; 分散型		0.346	1.24
Tc 装荷 1 ピン ; 中心位置に配置		0.0763	1.91

注) 37本ピン集合体

表3.1.3-7 Tc99吸収反応率へのTcピン本数の影響 (MCNP)

計算手法	Tc 装荷集合体 1 群化中性子束 (n/cm ² sec)	Tc99 1 群化吸収断面積 (barn)	Tc99 吸収反応率 (1/cm ³ sec)
Tc 装荷 7 ピン ; 分散型	1.851E+15	2.122	3.928E+15
Tc 装荷 1 ピン ; 中心位置に配置	2.403E+15	2.523	6.063E+15

注) 37本ピン集合体

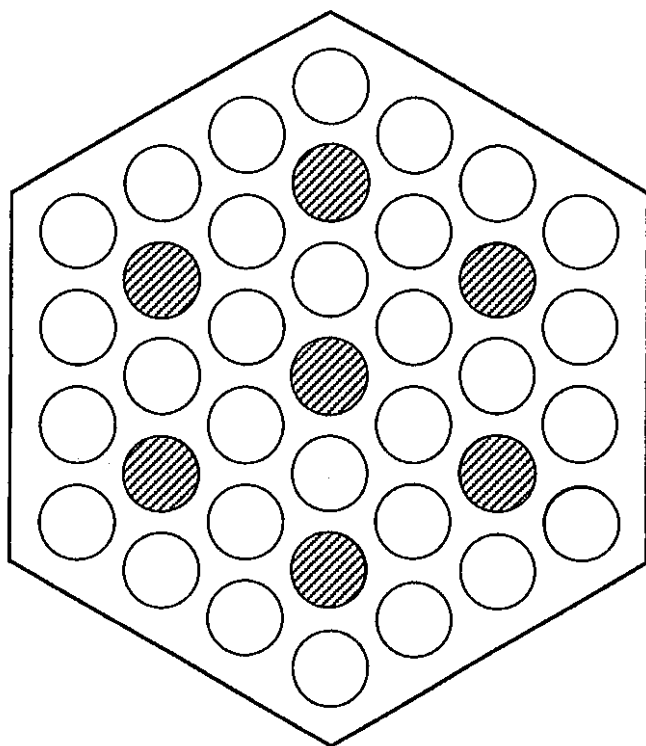
表3.1.3-8 T c 9 9 吸収反応率への中性子ヒストリー数の影響 (M C N P)



ヒストリー数	T c 装荷集合体 1 群化中性子束 (n/cm ² sec)	T c 9 9 1 群化吸収断面積 (barn)	T c 9 9 吸収反応率 (1/cm ² sec)
1 6 0 0 0 0	1.851E+15 (±0.88%)	2.122 (±1.4%)	3.928E+15 (±1.1%)
6 4 0 0 0 0	1.814E+15 (±0.44%)	2.160 (±0.69%)	3.919E+15 (±0.53%)

注) 3 7 本ピン集合体 T c 装荷 7 ピン ; 分散型

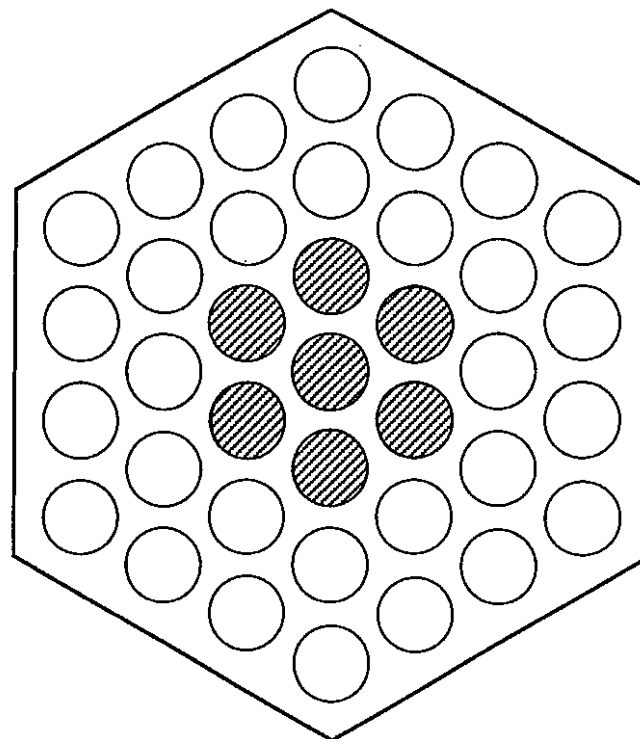
表3.1.3-9 中性子スペクトルとその統計誤差、ヒストリー依存性



エネルギー (MeV)	スペクトルと統計誤差 ヒストリー数160000	ヒストリー数640000
1.0000E+01	8.62267E-07 0.2978	8.36137E-07 0.1484
7.7880E+00	2.14981E-06 0.1763	2.28211E-06 0.0856
6.0653E+00	6.06236E-06 0.1114	5.34826E-06 0.0571
4.7237E+00	7.69786E-06 0.1002	7.36421E-06 0.0485
3.6788E+00	1.11711E-05 0.0779	1.10851E-05 0.0391
2.8650E+00	1.58734E-05 0.0651	1.79554E-05 0.0312
2.2313E+00	2.23300E-05 0.0587	2.13067E-05 0.0293
1.7377E+00	2.79901E-05 0.0511	2.68193E-05 0.0257
1.3534E+00	2.91549E-05 0.0497	2.92421E-05 0.0252
1.0540E+00	3.13595E-05 0.0481	2.92522E-05 0.0245
8.2085E-01	3.89861E-05 0.0424	3.86106E-05 0.0213
6.3928E-01	4.57893E-05 0.0393	4.47810E-05 0.0197
4.9787E-01	3.81208E-05 0.0415	3.74185E-05 0.0213
3.8774E-01	3.82338E-05 0.0410	3.83955E-05 0.0208
3.0197E-01	3.87696E-05 0.0409	3.77912E-05 0.0207
2.3518E-01	3.38134E-05 0.0437	3.26366E-05 0.0220
1.8316E-01	3.29317E-05 0.0432	3.21468E-05 0.0219
1.4264E-01	3.46050E-05 0.0432	3.26898E-05 0.0219
1.1109E-01	2.64266E-05 0.0449	2.70189E-05 0.0229
8.6517E-02	2.77640E-05 0.0460	2.68760E-05 0.0232
6.7379E-02	2.47087E-05 0.0471	2.44408E-05 0.0242
5.2475E-02	2.54633E-05 0.0460	2.34043E-05 0.0240
4.0868E-02	2.17266E-05 0.0483	2.19103E-05 0.0243
3.1828E-02	1.78074E-05 0.0529	1.80785E-05 0.0271
2.4788E-02	2.01453E-05 0.0475	1.93633E-05 0.0247
1.9305E-02	1.73445E-05 0.0546	1.69553E-05 0.0271
1.5034E-02	1.95524E-05 0.0504	1.74037E-05 0.0263
1.1709E-02	1.88553E-05 0.0504	1.80483E-05 0.0254
9.1188E-03	1.59787E-05 0.0528	1.51758E-05 0.0276
7.1017E-03	1.66022E-05 0.0509	1.72103E-05 0.0260
5.5308E-03	1.47075E-05 0.0557	1.48048E-05 0.0273
4.3074E-03	1.55340E-05 0.0565	1.45995E-05 0.0285
3.3546E-03	9.29409E-06 0.0693	9.68777E-06 0.0350
2.6126E-03	1.92556E-05 0.0507	1.88696E-05 0.0262
2.0347E-03	1.97051E-05 0.0501	1.77995E-05 0.0257
1.5846E-03	1.64183E-05 0.0537	1.64283E-05 0.0272
1.2341E-03	1.49308E-05 0.0539	1.42131E-05 0.0281
9.6112E-04	1.32885E-05 0.0581	1.42997E-05 0.0286
7.4852E-04	1.56475E-05 0.0547	1.51942E-05 0.0283
5.8295E-04	1.48160E-05 0.0547	1.43651E-05 0.0288
4.5400E-04	1.35222E-05 0.0587	1.26326E-05 0.0291
3.5358E-04	1.32810E-05 0.0606	1.24381E-05 0.0322
2.7536E-04	1.43399E-05 0.0588	1.47408E-05 0.0285
2.1445E-04	1.26305E-05 0.0621	1.24226E-05 0.0305
1.6702E-04	1.33550E-05 0.0606	1.31081E-05 0.0301
1.3007E-04	1.27665E-05 0.0591	1.27336E-05 0.0300
1.0130E-04	1.53652E-05 0.0564	1.54392E-05 0.0286
7.8893E-05	1.57111E-05 0.0559	1.49584E-05 0.0289
6.1442E-05	1.35284E-05 0.0566	1.27479E-05 0.0299
4.7851E-05	1.16143E-05 0.0607	1.27471E-05 0.0308
3.7267E-05	1.43022E-05 0.0580	1.37289E-05 0.0298
2.9023E-05	1.36927E-05 0.0599	1.33291E-05 0.0300
2.2603E-05	5.31724E-06 0.0739	5.18496E-06 0.0365
1.7603E-05	1.22077E-05 0.0597	1.24339E-05 0.0297
1.3710E-05	1.36969E-05 0.0597	1.27294E-05 0.0305
1.0677E-05	1.05627E-05 0.0617	1.09141E-05 0.0297
8.3153E-06	6.21589E-06 0.0648	5.66238E-06 0.0337
6.4760E-06	4.06095E-07 0.1041	4.52104E-07 0.0534
5.0435E-06	2.38631E-06 0.0842	2.23148E-06 0.0417
3.9279E-06	4.88404E-06 0.0733	4.86059E-06 0.0369
3.0590E-06	7.24239E-06 0.0686	6.74982E-06 0.0344
2.3824E-06	7.53374E-06 0.0672	7.30739E-06 0.0334
1.8554E-06	6.99531E-06 0.0711	7.67070E-06 0.0338
1.4450E-06	7.45092E-06 0.0669	7.51073E-06 0.0333
1.1254E-06	8.57125E-06 0.0646	7.51596E-06 0.0340
8.7642E-07	8.47289E-06 0.0655	7.90193E-06 0.0328
6.8256E-07	6.69338E-06 0.0686	6.99876E-06 0.0337
5.3158E-07	7.03115E-06 0.0658	6.94892E-06 0.0335
4.1399E-07	7.27575E-06 0.0636	7.09315E-06 0.0325
3.2232E-07	1.04663E-04 0.0160	1.05810E-04 0.0080
1.0000E-11	0.00000E+00 0.0000	0.00000E+00 0.0000
TOTAL	1.25368E-03 0.0088	1.22911E-03 0.0044



 FPピン : 7
 減速材ピン : 30

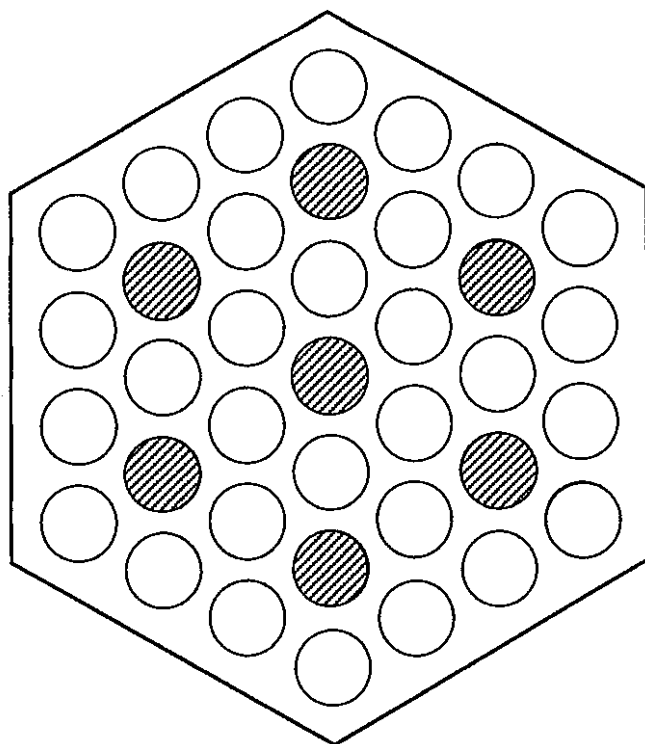
FPピン分散型 (FP 7本ピン)



 FPピン : 7
 減速材ピン : 30

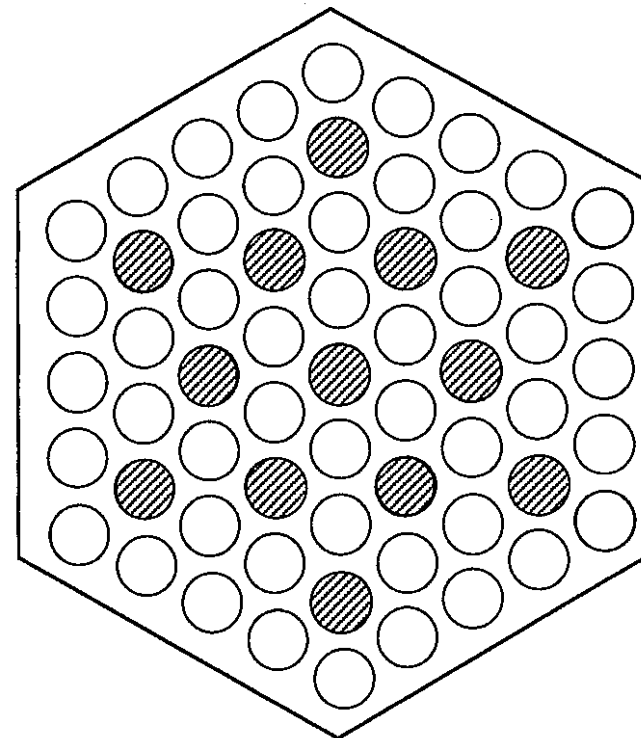
FPピン集中型 (FP 7本ピン)

図3.1.3-1 ターゲット集合体のピン配列



● FPピン : 7
 ○ 減速材ピン : 30

FPピン分散型 (FP 7本ピン)



● FPピン : 13
 ○ 減速材ピン : 48

FPピン分散型 (FP 13本ピン)

図3.1.3-2 37本ピンおよび61本ピンターゲット集合体

Tc99分散7本ピンを模擬

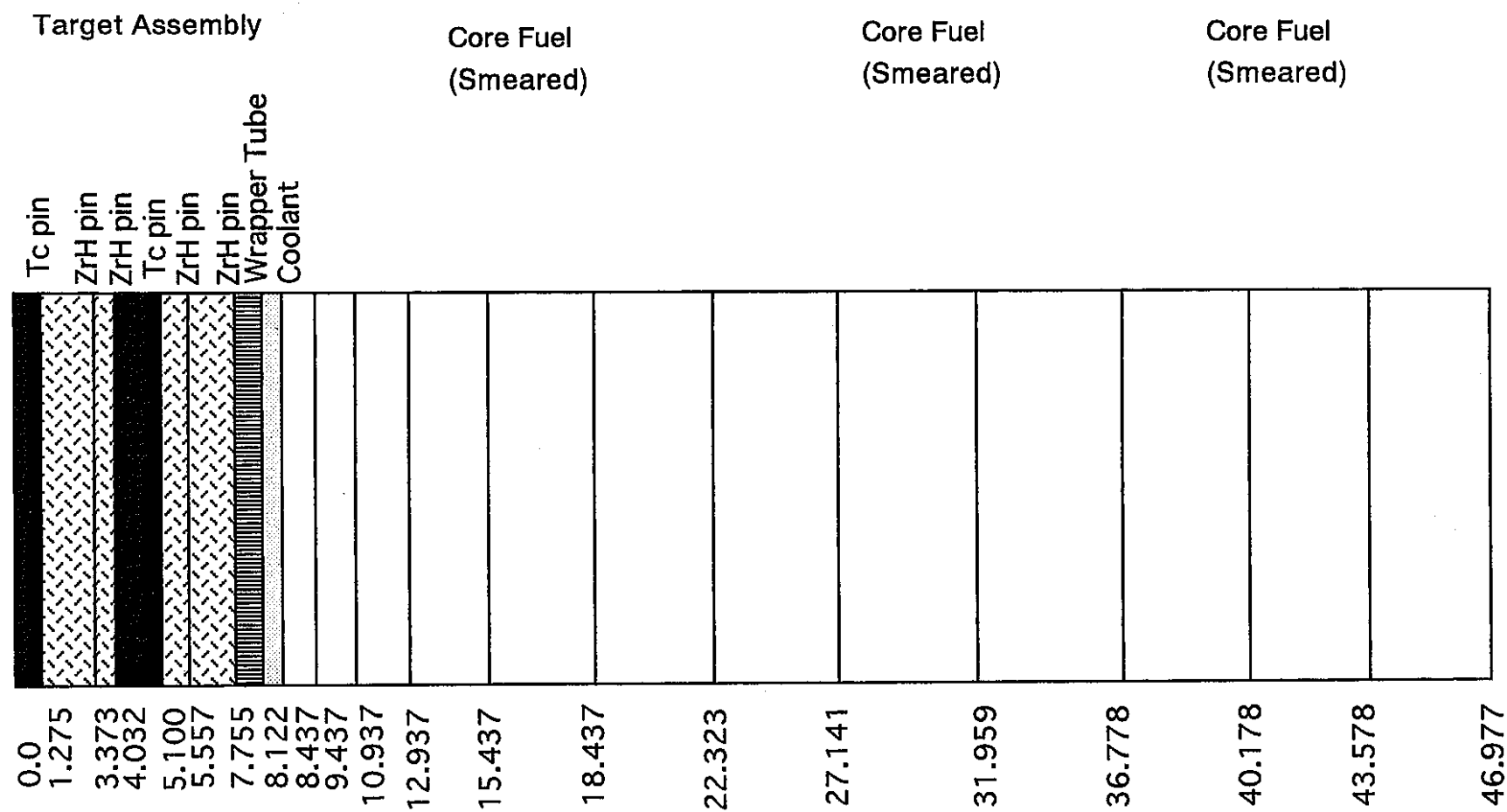


図3.1.3-3 ターゲット集合体の1次元非均質リングモデル
(基準ターゲット集合体; Tc7ピン、ZrH30ピン)

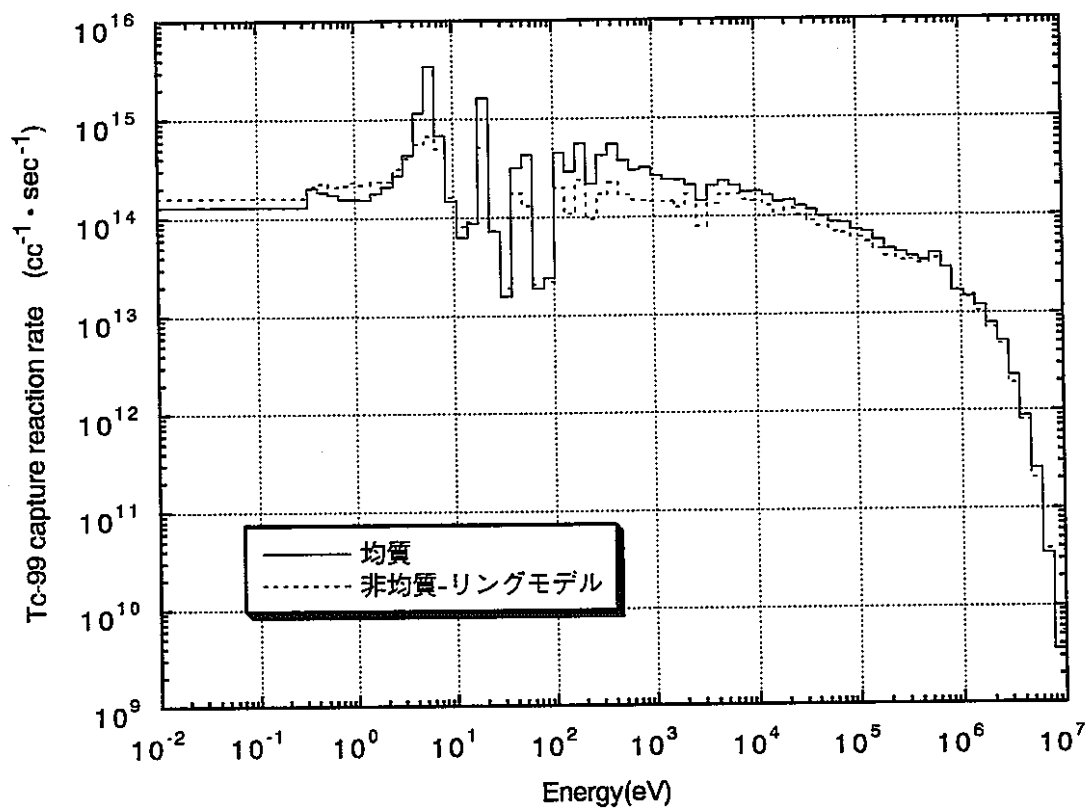


図3.1.3-4 Tc99中性子吸収反応率の比較 (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

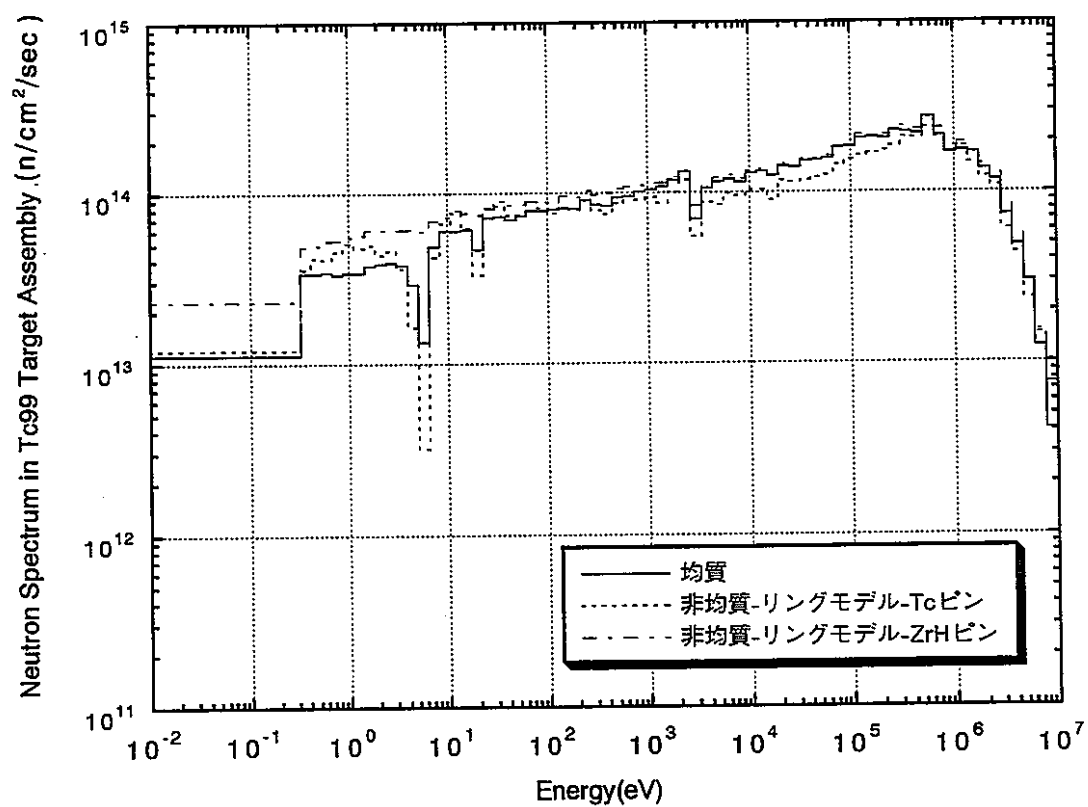


図3.1.3-5 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

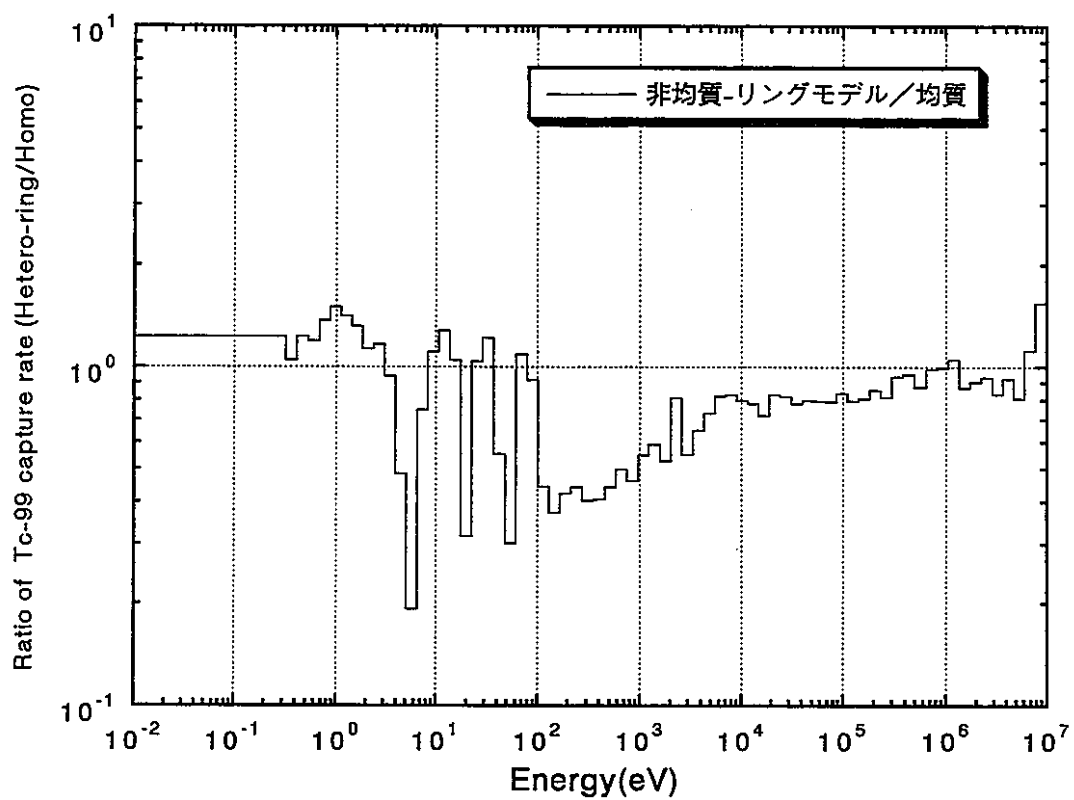


図3.1.3-6 Tc99中性子吸収率の比 (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

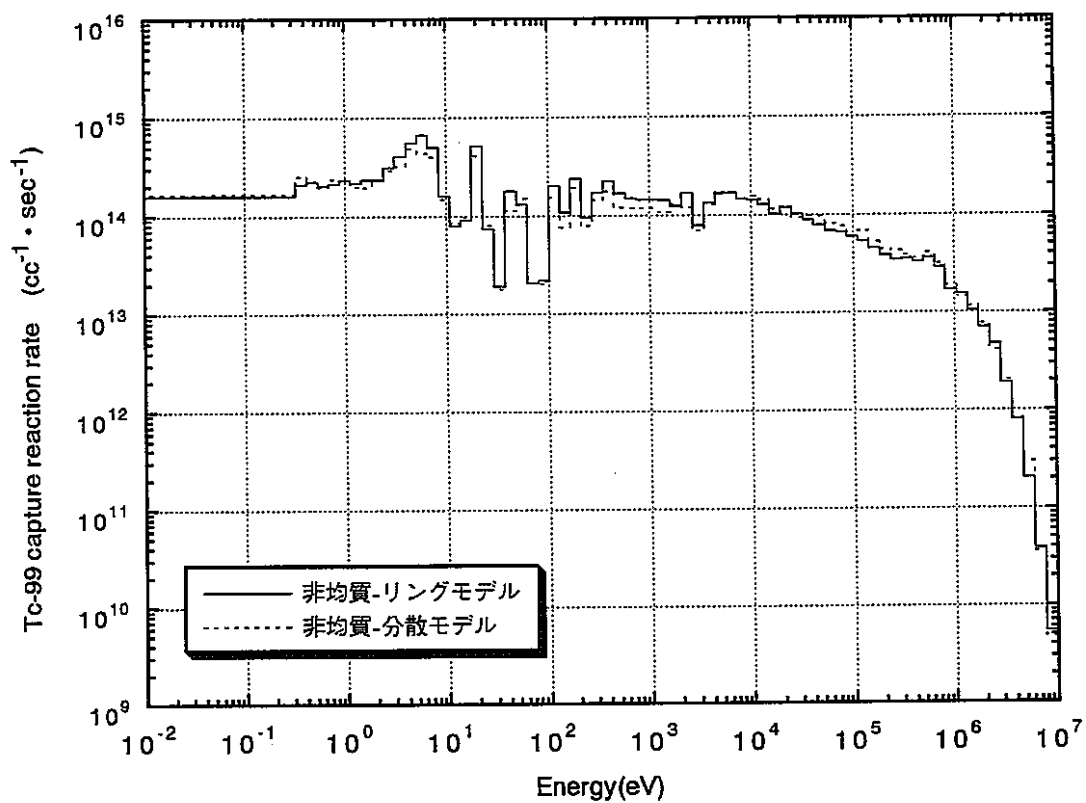


図3.1.3-7 Tc99中性子吸収反応率の比較 (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

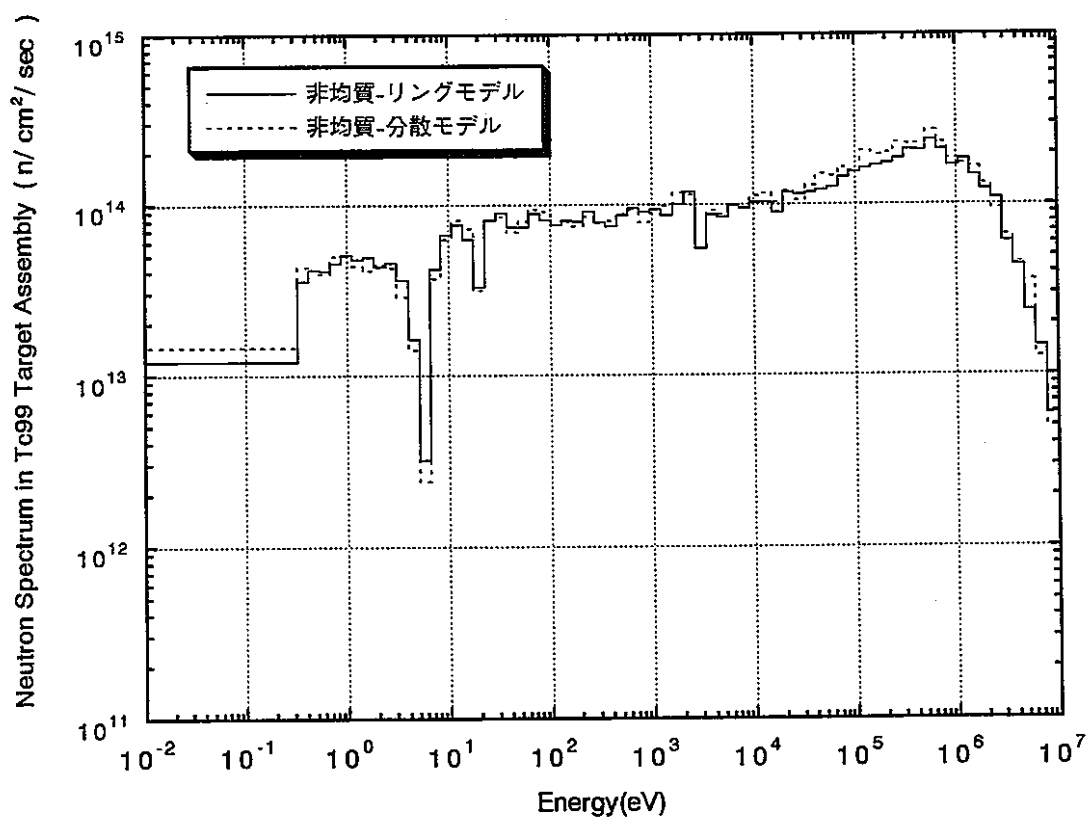


図3.1.3-8 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

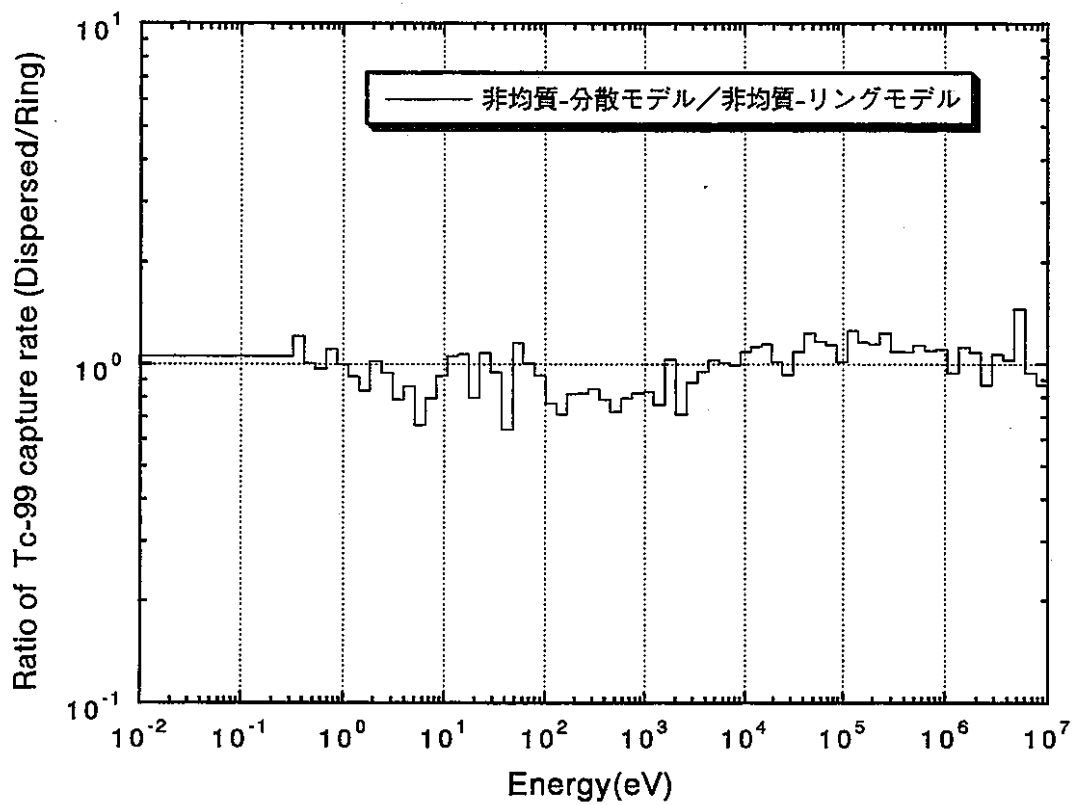


図3.1.3-9 Tc99中性子吸収率の比；非均質（分散モデル）／非均質（リングモデル）、
（Tc99-7本ピンのケース）

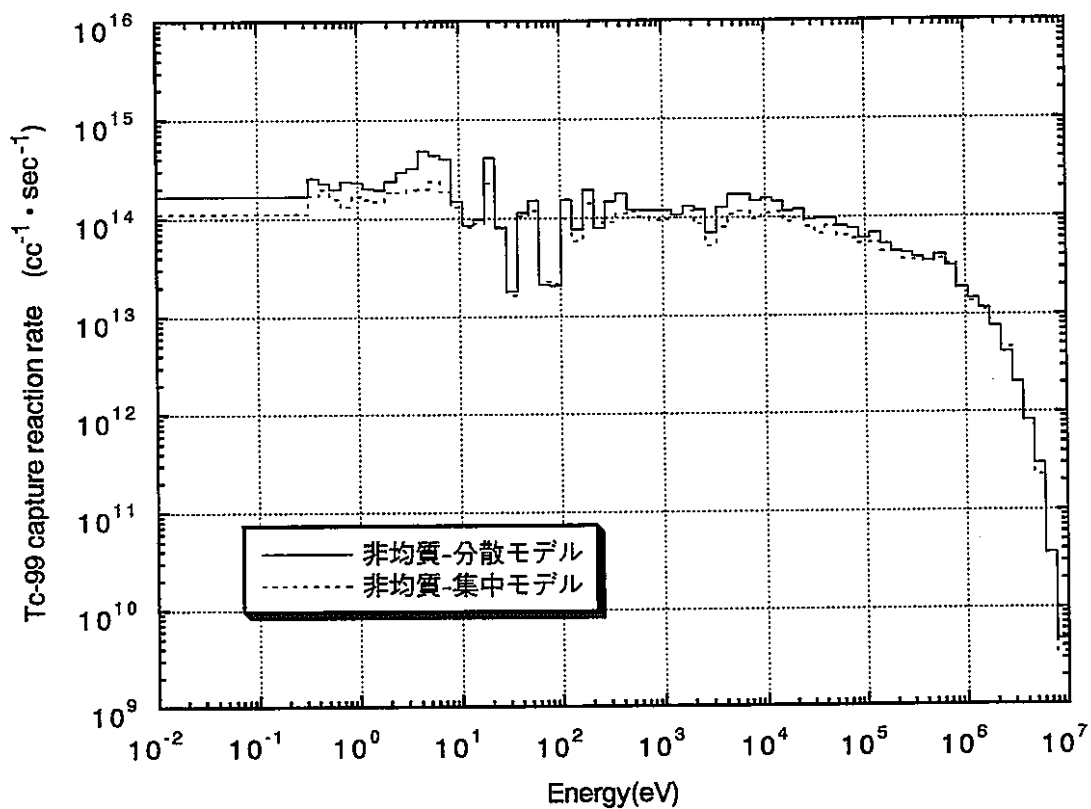


図3.1.3-10 Tc99中性子吸収反応率の比較 (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

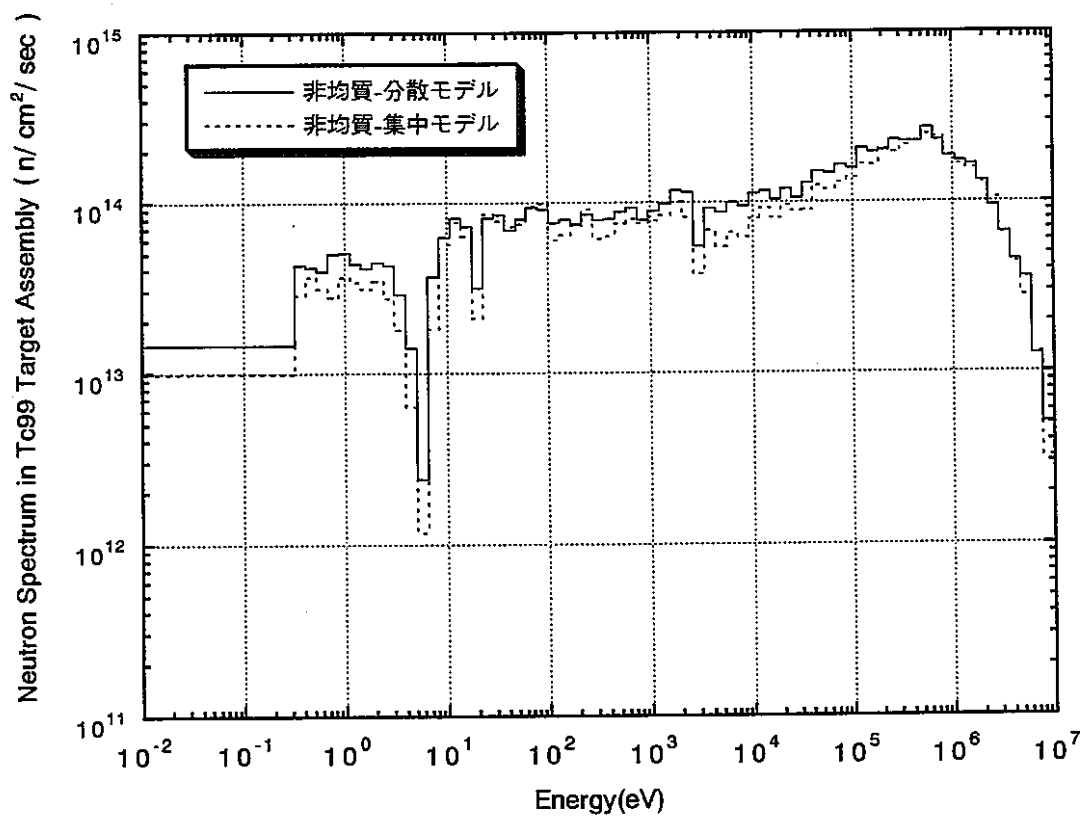


図3.1.3-11 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

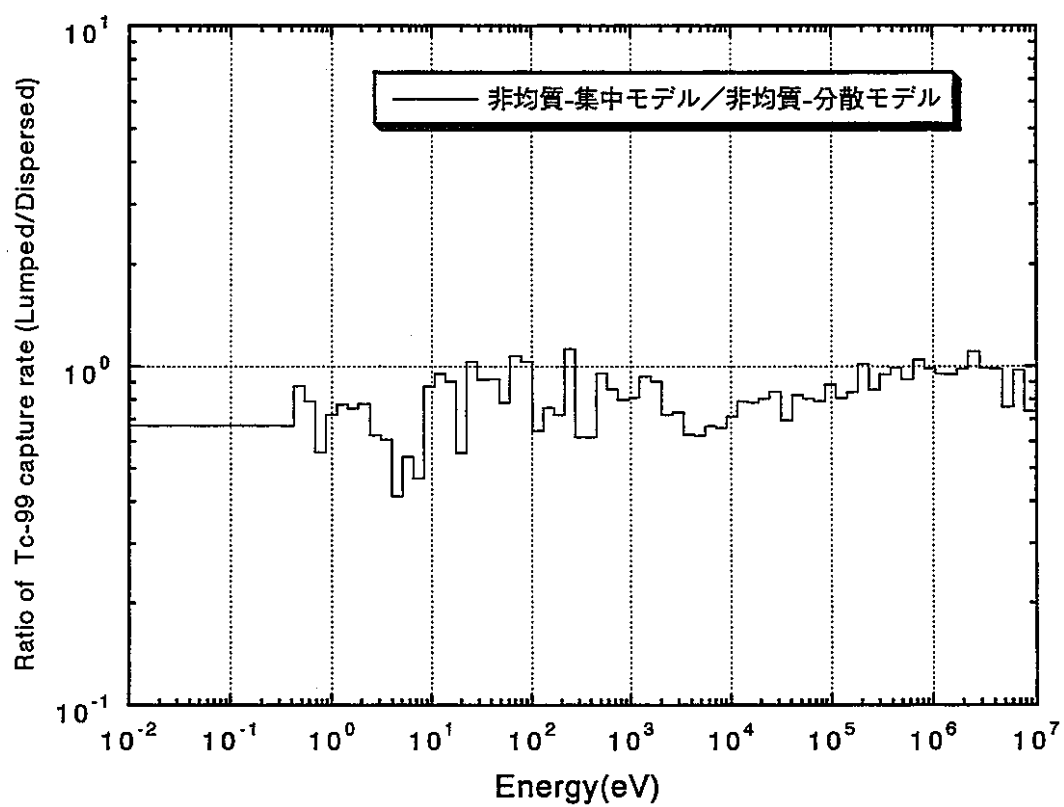


図3.1.3-12 Tc99中性子吸収率の比；非均質（ランプモデル）／非均質（分散モデル）、
（Tc99-7本ピンのケース）

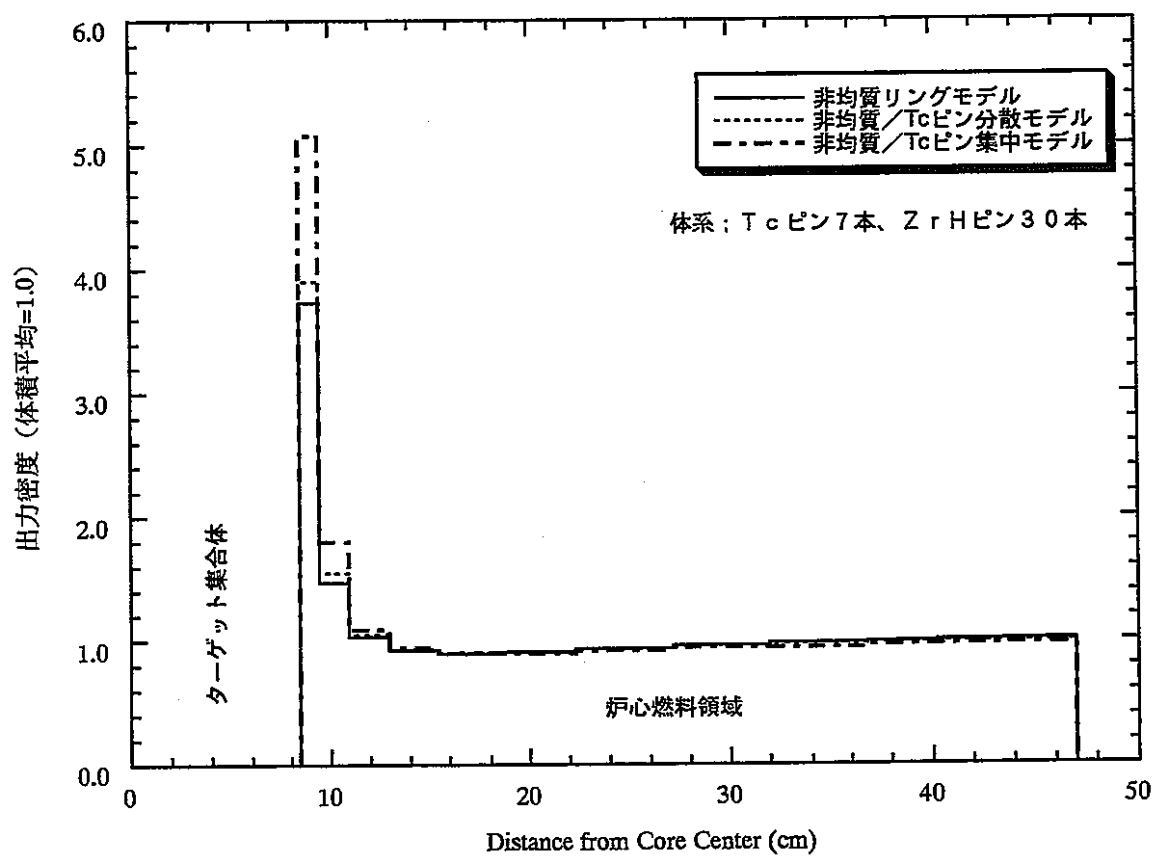


図3.1.3-13 ターゲット集合体近傍の径方向出力分布

エネルギー

Group 1 ; 10MeV-4KeV

Group 2 ; 4KeV-200eV

Group 3 ; 200eV-2eV

Group 4 ; 2eV-

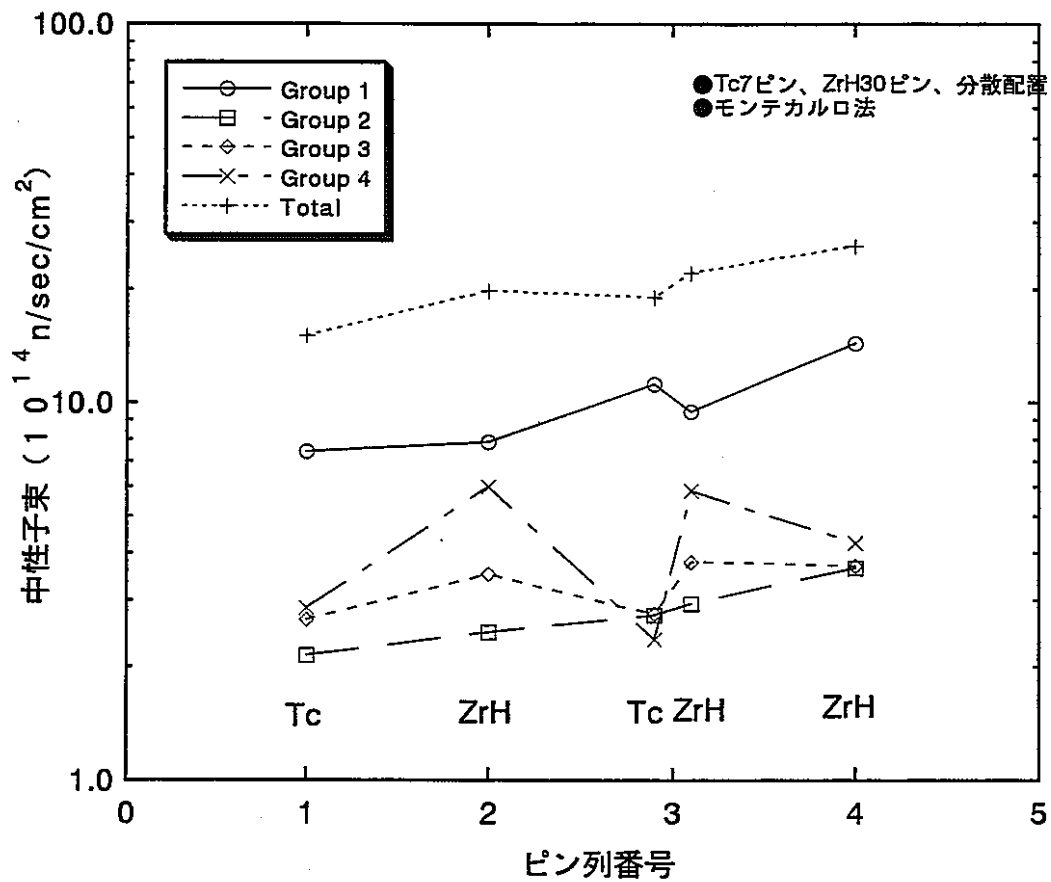


図3.1.3-14 ターゲット集合体内中性子束分布

3.2 燃焼計算

Tc 金属及び Ce I 3 等の FP 試料に含まれる核種が中性子照射を受けると、他の核種に変換するが、この変換核種を含む FP 試料の炉心装荷反応度は中性子照射以前の FP 試料の炉心装荷反応度とは異なる事が予想される。そこで、その効果を計算した。計算条件及び方法は以下の通りである。

3. 1 節で記した FP 試料 37 本ピンで構成される集合体 1 体に相当する量の FP 試料含入核種が炉心燃料全体に均一に混入し、かつその FP 試料含入核種が炉心平均中性子束 $3.48 \times 10^{15} \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$ で 5 年間及び 10 年間照射されるものとした。そして、その FP 試料含入核種の重量変化による K_{∞} を ORIGEN 2⁽⁵⁾ コードを用いて計算し、上記反応度効果 (dk/kk' で算出する) を求めたものである。

なお、ORIGEN 2 計算で用いた炉心燃料の組成は 3. 1 節で用いた内側炉心及び外側炉心の平均の組成を用いた。また、核データは ORIGEN 2 コード内蔵の LMFBR 用のもので、水素化ジルコニウム混入の効果は模擬されていない。更に、Tc 金属及び Ce I 3 等の FP 試料に含まれる核種の燃焼チェーンを図 3. 2-1 に記した。

まず最初に、FP 試料装荷反応度の ORIGEN 2 計算の精度を得るために、2次元 RZ 拡散計算を行い、ORIGEN 2 計算と比較した。それを表 3. 2-1 に記した。この表から ORIGEN 2 計算は 2次元 RZ 拡散計算より 7% 小さい事が分かる。この結果を用いて、Tc 金属及び Ce I 3 等の FP 試料を均質装荷した炉心燃料の ORIGEN 2 計算結果を補正し、拡散計算で得たのと等価な反応度を得た。その結果を表 3. 2-2 に記した。この表から分かる事は以下の通りである。

Tc 金属試料装荷の場合については、その装荷反応度は $-1\% \Delta k/kk'$ 程あり、5 年照射では初期よりも $0.2\% \Delta k/kk'$ 程小さくなり、10 年照射でも初期よりも $0.3\% \Delta k/kk'$ 程小さくなる事が分かる。この様に、Tc 試料 (Tc 99 のみ) が長期間中性子照射を受けるとその装荷反応度がやや小さくなる理由は、表 3. 2-3 に記した FP 試料含入核種の重量の中性子照射変化の計算結果と FP の捕獲断面積の大きさから定性的に理解する事ができる。即ち、Tc 99 の主要な娘核種は Ru 100 (安定核種) であり、Ru 100 の捕獲断面積は Tc 99 より小さい ($1/3$ 程の大きさ) からである。

Ce I 3 試料装荷の場合については、その装荷反応度は $-0.4\% \Delta k/kk'$ あり、5

年照射では初期よりも $0.06\% \Delta k/k'$ 小さくなり、10年照射でも初期よりも $0.1\% \Delta k/k'$ 程小さくなる事が分かる。この様に、 CeI_3 試料が長期に渡って中性子照射を受けるとその装荷反応度がわずかに小さくなる理由は、 Tc 試料の場合と同様に既に述べた表 3. 2-3 に記したことから定性的に理解する事ができる。即ち、 $I127$ の主要な娘核種は $Xe128$ (安定核種) であり、 $Xe128$ の捕獲断面積は $I127$ より小さい ($1/3$ 程の大きさ)。 $I129$ の主要な娘核種は $Xe130$ (安定核種) であり、 $Xe130$ の捕獲断面積は $I129$ より小さい ($1/3$ 程の大きさ)。また、 $Ce140$ 及び $Ce141$ は捕獲断面積がかなり小さいため核変換がほとんど行われぬ。これらのことから CeI_3 試料が長期間中性子照射を受けるとその装荷反応度はわずかに小さくなる事が分かる。

これまでの検討は 37 本ピンの場合であったが、以下では 7 本ピンの場合について考える。この検討は水素化ジルコニウムが炉心に装荷された場合を模擬した粗い検討である。 $Tc99$ 金属装荷の場合を例に取る。

Tc 7 本ピン装荷集合体一体に相当する重量が炉心全体に均一に混入している状態を考える。その時の中性子束レベルと $Tc99$ の捕獲断面積は 3. 1. 3 節でモンテカルロコードを用いて行われた $Tc99$ 消滅計算 (7 本ピン分散型) によるものを用いる。そうすると、この場合の装荷反応度は、37 本ピンの場合を基にして、装荷反応度は摂動論的に考えて中性子束レベルと $Tc99$ 捕獲断面積及び $Tc99$ 装荷量等に比例する (インポートランスは中性子束程は変化しないので一定と仮定する) ものとして計算すると、 $-0.5\% \Delta k/k'$ 程になる。これは 37 本ピン装荷の場合の $-1.13\% \Delta k/k'$ と比べて小さい。7 本ピン装荷の場合の中性子束レベルが 37 本ピン装荷の場合の炉心平均のものとすると、その装荷反応度は約 2 倍の $-1\% \Delta k/k'$ となり、37 本ピン装荷の場合と同じになる。また、この Tc 7 本ピン相当の重量が 10 年間で中性子照射を受けるとすると、 $Tc99$ の存在量は 28 kg から 7 kg に減少し、その時の装荷反応度は $-0.2\% \Delta k/k'$ となる。これは 37 本ピン装荷の場合の $-0.87\% \Delta k/k'$ より小さい。10 年間の中性子照射による装荷反応度変化は $0.3\% \Delta k/k'$ になり、この反応度変化量は Tc 37 本ピン装荷の場合の $0.26\% \Delta k/k'$ と同程度である事が分かる。これらの粗い検討から、 Tc 7 本ピン装荷の場合の装荷反応度は Tc 37 本ピン装荷の場合と比べて、小さいかあるいは同程度であり、中性子照射した場合の装荷反応度変化は同程度になるものと予想される。

表 3. 2 - 1 T c 9 9 均質装荷時の反応度計算
 -- 拡散計算と O R I G E N 2 計算との比較

	拡散計算		O R I G E N 2 計算		反応度比
	K e f f	反応度 %dk/kk'	K ∞	反応度 %dk/kk'	(DIFF/ORIGEN2)
基準炉心	1.0021	-	1.3055	-	-
T c 9 9 均質装荷	0.9909	-1.13	1.2877	-1.06	1.07

(NOTE) T c 9 9 装荷集合体 1 体 (3 7 本ピン) の量の T c 9 9 が炉心燃料全体に均一に混入した際の計算結果である。

表 3. 2 - 2 F P 試料均質装荷反応度の F P 中性子照射時間変化

F P 中性子照射時間	F P 試料装荷反応度(%dk/kk')	
	T c 金属	C e I 3
ゼロ	- 1. 1 3 (0. 0)	- 0. 4 0 (0. 0)
5 年	- 0. 9 8 (0. 1 5)	- 0. 3 4 (0. 0 6)
1 0 年	- 0. 8 7 (0. 2 6)	- 0. 2 9 (0. 1 1)

(NOTE) F P 試料装荷集合体 1 体 (3 7 本ピン) の量の F P 試料 (T c 金属及び C e I 3) が炉心燃料全体に均一に混入し、かつその F P 試料のみが中性子照射を受けた際の F P 試料装荷反応度計算結果である。
また、括弧内の数値は中性子照射以前の F P 試料装荷反応度からの差異である。

表3. 2-3 F P 試料含入核種の重量の中性子照射変化 (ORIGEN2計算)
と捕獲断面積

(単位: k g)

	中性子照射時間 (年)			捕獲断面積 (b a r n)
	0	5	1 0	
T c 金属試料				
T c 9 9	147	115	90	0.449
R u 1 0 0	0.0	31	53	0.154
R u 1 0 1	0.0	1.3	4.2	0.494
R u 1 0 2	0.0	0.1	0.8	0.176
C e I 3 試料				
I 1 2 7	16	12	9.2	0.509
X e 1 2 8	0.0	3.6	6.0	0.162
X e 1 2 9	0.0	0.1	0.5	0.388
I 1 2 9	54	44	35	0.354
X e 1 3 0	0.0	12	18	0.105
X e 1 3 1	0.0	0.3	1.1	0.200
C e 1 4 0	23	22	22	0.017
P r 1 4 1	0.0	0.2	0.4	0.148
C e 1 4 2	3.0	2.9	2.9	0.032

(NOTE) F P 試料装荷集合体1体 (37本ピン) の量のF P 試料 (T c 金属及び
C e I 3) が炉心平均中性子束 $3.48 \times 10^{15} \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$ で照射
された際のF P 試料含入核種の重量変化のO R I G E N 2 計算結果である。
また、これらの核種の内、T c 9 9 及び I 1 2 9 を除いて全て安定な核種
である。

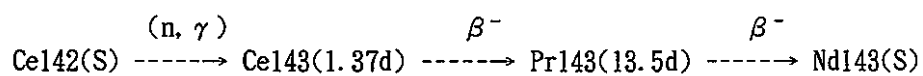
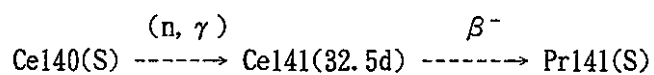
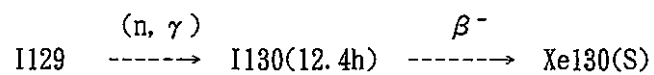
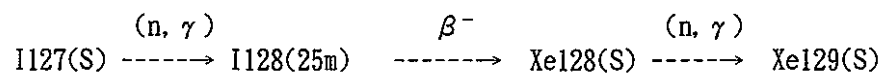
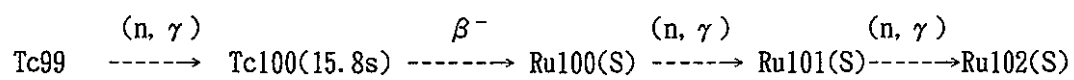


図 3. 2 - 1 T c 9 9 及び C e 1 3 の 燃 焼 チ ェ ー ン

3.3 温度分布の評価

Tc99 金属及びCeI₃等のFP 試料ピンのペレット中心の最高温度を本節の終わりに記す簡易式を用いて計算した。これらの計算式はペレット中心の最高温度は炉心中心面で発生しているものとして用いた。

ペレット温度計算に用いたFP 装荷集合体及びピン等の仕様、冷却材流量、原子炉入口温度等を表3. 3-1に記した。FP 装荷集合体及びピン等の仕様は既に第2章で記したものと同一である。冷却材流量は次のようにして決めた。即ち、炉心燃料の一体当たりの流量は約30 kg/s（動燃殿設計書）であるので、FP 装荷集合体にもこれだけの冷却材が流れるものとし、更に、FP 装荷集合体は37本ピンで構成されており、かつ全ピンに同じ流量が流れるものとする、FP ピン一本当たりの流量は約1 kg/sとなる。ここでは暫定的にFP ピン一本当たり1 kg/sと取った。原子炉入口温度380℃は動燃殿設計書から取った。

Tc99 金属、CeI₃、Na 及びSUS等の物性値（390℃付近）については表3. 3-2にまとめて記した。これらの物性値の内、この検討で特に調査したものは、CeI₃の熱伝導度である。今回の調査では該当するものがなかったためにCe₂S₃の熱伝導度を暫定的に代用するものとした。500℃付近で約1 W/m/Kであるので、1 W/m/Kの値を用いた。

FP ピンのペレット最大線出力は次のようにして得た。

まず最初に、3. 2節で用いた炉心平均中性子束 $3.48 \times 10^{15} \text{ n/s/cm}^2$ とFP ピン37本装荷のFP 装荷集合体一体の量に相当するFP 試料の重量とを用いてORIGEN2⁽⁵⁾コードにより中性子照射計算を行い、FP 装荷集合体一体当たりの発熱量を計算した。この計算での諸核データはORIGEN2コード内蔵のもの（LMFBR用核断面積を使用）である。その計算結果を表3. 3-3に記した。この表から、Tc99 試料では中性子照射直後がTc100（半減期15.8 s）の崩壊により最大の熱出力を出し、またCeI₃試料の場合は中性子照射1年後のI130（半減期12.36 h）の崩壊により最大の熱出力を出す事が分かる。この表3. 3-3の計算結果に基づいてFP 消滅計算に使用した計算条件（中性子束レベル及びFP 捕獲断面積）でのピン平均線出力を次のようにして計算した。その方法は、FP 消滅計算

から得られた平均中性子束と熱出力における主要核種（表 3. 3-3 から Tc 金属試料の場合は Tc 99、Ce I₃ 試料の場合は I 129）の捕獲断面積等についての上記計算の場合からの差異（捕獲断面積と中性子束の積の比）を考慮して算出するものである。その時の FP 37 本ピン装荷と FP 1 本ピン装荷の場合の平均中性子束と主要核種の捕獲断面積は 3. 1. 2 節で記した FP 消滅計算（拡散計算）時のものであり、また、FP 7 本ピン装荷の場合は 3. 1. 3 節で記した FP 消滅計算（モンテカルロ計算で FP ピンは分散したもの）時のものである。最大線出力はこれらの平均線出力と中性子束の軸方向ピーキング係数（FP 1 本ピン装荷の場合が 1. 27 であり、この値を他の場合にも用いた。）とを用いて得たものである。最大線出力は炉心中心面で発生している。FP 試料ピンの最大線出力の計算結果をまとめたものが表 3. 3-4 である。この表で特徴的な事は FP 1 本ピン装荷の場合の最大線出力が Tc 試料で 744 W/cm、Ce I₃ 試料の場合で 789 W/cm とかなり大きな線出力を出している事である。その理由の一つはこれらのペレットが通常の炉心燃料ペレットより 10 倍程度（断面積で見て）太い事があげられる。

FP 試料ピンの炉心中心面での温度計算について表 3. 3-4 の最大線出力を用いて行った結果を表 3. 3-5 に記した。この表 3. 3-5 の計算結果から、FP ピンのペレットの最高温度についてまとめたものが表 3. 3-6 である。これらの表から以下の事が分かる。

Tc 99 金属試料の場合は融点（2170℃）よりも十分低く、最大の線出力を出す FP 1 本ピン装荷の場合（最大線出力で 744 W/cm）でも 766℃と融点まで十分余裕がある。この理由は Tc 99 金属の熱伝導度が大きいことから来ているものと考えられる。

Ce I₃ 試料の場合は FP 37 本ピン装荷の場合（730℃）だけ融点（760℃）より低いことが分かる。他の試料ではペレット中心は溶融していることが分かる。これは Ce I₃ の熱伝導度が小さいことと融点あまり高くないことから来ているものと考えられる。また、冷却材流量を 5 倍（流量 5 kg/s - ピン）多く流した場合、

FP 1 本ピン装荷の場合のペレット中心温度は約 20℃下がる程度であるので、冷却材流量を増やす事によりペレット中心温度を下げる事は非常に困難である。線出力が高いのが問題と考えられる。従って、Ce I₃ 試料の場合のペレット中心温度を融点

以下に抑えるためには、その平均線出力は高々 30 W/cm 程度が望ましいものと考えられる。このことは、FP 1 本ピン装荷の場合ではそのピンの太さは直径で 5 mm 程度にする必要があることを示している。

FP 試料ピンの温度計算に用いた簡易計算式は以下の通りである。炉心中心面での冷却材温度計算からペレット中心温度計算までの計算手順に沿って記す。

(1) 炉心中心面での Na 温度

$$Q_a * H_c / 2 = C_p * W * (T_1 - T_0)$$

但し、 Q_a : ピン平均線出力, W/cm

H_c : 炉心高さ, cm

C_p : Na 比熱, $\text{W} \cdot \text{sec} / \text{g} / \text{K}$

W : ピン当たりの Na 流量, g/sec

T_1 : 炉心中心面での Na 温度, $^{\circ}\text{C}$

T_0 : 原子炉入口温度, $^{\circ}\text{C}$

(2) 被覆管外面の温度

$$T_2 = T_1 + Q / (\pi d_o * h)$$

但し、 T_2 : 被覆管外面の温度, $^{\circ}\text{C}$

Q : 炉心中心面でのピン線出力, W/cm

d_o : 被覆管外径, cm

h : 被覆管表面熱伝達率, $\text{W/cm}^2 / \text{K}$

$$h = Nu * \lambda / D$$

Nu : ヌセルト数, $Nu = 7 + 0.025 (Re * Pr)^{0.8}$

λ : Na の熱伝導度, W/cm/K

D : 流路等価直径, $D = 4S/L$

Re : レイノルズ数, $Re = v * D / (\mu / \rho)$

P_r : プラントル数, $P_r = C_p * \mu / \lambda$

S : ピン当たりの流路面積, cm^2

L : 被覆管のNaぬれ長さ, cm

v : Naの流速, cm / sec

μ : Naの粘性係数, $\text{g} / \text{cm} / \text{sec}$

ρ : Naの密度, g / cm^3

(3) 被覆管内面の温度

$$T_3 = T_2 + Q * \ln(d_o / d_i) / 2 \pi K$$

但し、 T_3 : 被覆管内面の温度, $^{\circ}\text{C}$

d_o, d_i : 被覆管の外径、内径, cm

K : SUSの熱伝導度, $\text{W} / \text{cm} / \text{K}$

(4) ペレット外面温度

$$T_4 = T_3 + Q / (\pi d_i * H_g)$$

但し、 T_4 : ペレット外面温度, $^{\circ}\text{C}$

H_g : ギャップ熱伝達率, $\text{W} / \text{cm}^2 / \text{K}$

(5) ペレット中心温度

$$K_p (T_5 - T_4) = Q / 4 \pi$$

但し、 T_5 : ペレット中心温度, $^{\circ}\text{C}$

K_p : ペレット熱伝導度, $\text{W} / \text{cm} / \text{K}$

表 3. 3 - 1 温度計算に使用したターゲット集合体の仕様、冷却材流量
及び原子炉入口温度

項 目	仕 様
ピン本数、本	3 7
ピン外径、mm	2 3. 5
ピン内径、mm	2 1. 5
被覆管肉厚、mm	1. 0
ペレット径、mm	2 1. 0
ラッパ管形状	六角形
ラッパ管内対面間距離、mm	1 4 7. 7
冷却材流路面積、mm ² /ピン	7 6. 9
ぬれ長さ、mm/ピン	3 6. 9
流路等価直径、mm/ピン	8. 3 4
流量 , g / s / ピン	1 0 0 0
流速 , m / s	1 5. 1
炉心高さ、cm	1 0 0
原子炉入口温度、℃	3 8 0

表 3. 3 - 2 温度計算に使用した冷却材 (Na)、被覆管 (SUS) 及び
FP 試料の物性値

物 性	物 性 値
Na 冷却材	
密度 , g/cm^3	0.86
比熱 , $W \cdot s / g / K$	1.28
粘性係数 , $g/cm \cdot s$	0.0029
熱伝導度 , $W/cm \cdot K$	0.72
表面熱伝達率 , $W/cm^2 \cdot K$	15.2
ヌセルト数 Nu	17.6
プラントル数 Pr	0.0051
レイノルズ数 Re	3.7E5
SUS 被覆管	
熱伝導度 , $W/cm \cdot K$	0.182
Tc99 金属	
融点 , $^{\circ}C$	2170
熱伝導度 , $W/cm \cdot K$	0.561
CeI3	
融点 , $^{\circ}C$	760
熱伝導度 , $W/cm \cdot K$	0.01(*)
ペレット-被覆管ギャップ	
熱伝達率 , $W/cm^2 \cdot K$	0.5677

(NOTE) これらの物性値には温度依存性があるが、この表では 390 $^{\circ}C$ 付近のものを代表として記した。

(*) Ce2S3の熱伝導度を暫定的に使用した。

表 3. 3 - 3 F P 試料の中性子照射による熱出力の時間変化
 (O R I G E N 2 計算)
 -- F P 集合体 1 体 (3 7 本 F P ピン)

(単位 : k W / 体)

	中性子照射時間			
	照射直後	1 年	5 年	1 0 年
T c 金属試料				
T c 9 9	0 . 0	0 . 0	0 . 0	0 . 0
T c 1 0 0	1 6 7	1 5 9	1 3 0	1 0 2
合 計	1 6 7	1 5 9	1 3 0	1 0 2
C e I 3 試料				
I 1 2 7	0 . 0	0 . 0	0 . 0	0 . 0
I 1 2 8	1 8	1 7	1 4	1 0
I 1 2 9	0 . 0	0 . 0	0 . 0	0 . 0
I 1 3 0	1 6	1 2 6	1 0 6	8 6
I 1 3 0 m	2	2	1	1
C e 1 4 1	0 . 0	0 . 0	0 . 0	0 . 0
合 計	3 6	1 4 5	1 2 1	9 7

(NOTE) F P 試料装荷集合体 1 体 (3 7 本 F P ピン) を炉心平均中性子束 $3.48 \times 10^{15} \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$ で照射した際の F P 試料装荷集合体 1 体当たりの熱出力の O R I G E N 2 計算結果である。この時の核データは O R I G E N 2 コード内蔵のもの (L M F B R 用) を使用している。

表 3. 3 - 4

F P 試料ピンの平均及び最大の線出力

		中性子照射時間 年	平均線出力 W / c m	最大線出力 W / c m
T c 金属試料				
F P 3 7 本ピン装荷	照射直後		2 6	3 3
F P 7 本ピン装荷	照射直後		1 1 3	1 4 4
F P 1 本ピン装荷	照射直後		5 8 6	7 4 4
C e I 3 試料				
F P 3 7 本ピン装荷	1		3 3	4 2
F P 7 本ピン装荷	1		2 4 1	3 0 7
F P 1 本ピン装荷	1		6 2 1	7 8 9

(NOTE) これらの平均線出力は最大の熱出力放出時のものであり、また、表 3. 3 - 3 の計算値に基づいて得た平均線出力に平均中性子束と主要核種の捕獲断面積 (T c 金属試料の場合は T c 9 9、C e I 3 試料の場合は I 1 2 9 等の捕獲断面積) の差異を考慮して算出した。また、最大線出力は炉心中心面のものである。

表 3. 3 - 5 F P 試料ピンの炉心中心面での温度計算結果

(単位 : °C)

	ペレット		被覆管		冷却材
	中心	外端	内側	外側	
T c 金属試料					
FP 37 本ピン装荷	3 9 7	3 9 2	3 8 4	3 8 1	3 8 1
FP 7 本ピン装荷	4 5 5	4 3 4	3 9 7	3 8 6	3 8 4
FP 1 本ピン装荷	7 6 6	6 6 0	4 6 6	4 0 9	4 0 3
C e I 3 試料					
FP 37 本ピン装荷	7 3 0	3 9 6	3 8 5	3 8 2	3 8 1
FP 7 本ピン装荷	(2 9 4 0)	4 9 6	4 1 6	3 9 2	3 8 9
FP 1 本ピン装荷	(6 9 6 0)	6 7 7	4 7 1	4 1 1	4 0 4

表 3. 3 - 6 F P 試料ピンの最高温度計算結果

	F P 試料ピンの最高温度 ℃	融点 ℃
T c 金属試料		2 1 7 0
F P 3 7 本ピン装荷	3 9 7	
F P 7 本ピン装荷	4 5 5	
F P 1 本ピン装荷	7 6 6	
C e I 3 試料		7 6 0
F P 3 7 本ピン装荷	7 3 0	
F P 7 本ピン装荷	(2 9 4 0)	
F P 1 本ピン装荷	(6 9 6 0)	

3.4 まとめ

ターゲット集合体を炉心内に配置させることを想定し、減速材とF Pターゲットピンの仕様及び装荷法のサーベイを行った。基準ターゲット集合体仕様として設定された37本ピン集合体に対して、拡散計算およびモンテカルロ計算を行った。まず、拡散計算によりターゲット集合体内を均質化したモデルにより、もっとも基本的なパラメータであるT cピンとZ r Hピンの本数比の消滅特性への影響をサーベイした。モンテカルロ計算では体系模擬の厳密性を生かしてさらに詳細なターゲット仕様に関する検討、すなわち、ピン配列の効果、非均質性の効果、ピン径の効果などを検討した。また、F Pの燃焼計算、温度計算を行った。

その結果、以下のことがわかった。

(1) 拡散計算からの知見

(i) T c 99またはI 129のF PピンとZ r Hピンの割合を変化させた場合、

F Pピン割合が増大するにつれて、消滅率は単調減少するが、消滅量は途中でピークを持つ。消滅量がピークを持つのは、F Pピンが増えると、Z r Hピンの中性子減速効果が小さくなる効果と、F Pそのものの重量が増大する効果があるが、F Pピンが少ないうちは前者が勝るが、F Pピンが多くなると後者が勝るためである。消滅量が最大となるのは、どちらのF Pの場合も、 $F P / (F P + Z r H)$ の体積比が30% - 60%近辺の場合である。この場合、消滅率は約1%程度である。本検討では、体積比がこれより小さく20%で消滅率が2%程度とやや高くなる仕様(F P 7ピン、Z r Hピン30ピン)を基準仕様として設定した。

(ii) 上記基準仕様のT c装荷ターゲット集合体に接した炉心燃料では、ターゲット集合体がない場合の約7倍近い局所出力となる。これは、Z r Hによる中性子減速効果である。T c装荷ピンの割合が増えたとこの出力は低下し、T c装荷ピンが半分程度では影響はほぼなくなる。

(2) モンテカルロ計算からの知見

(i) 消滅量への非均質効果・ピン配列効果は、T c装荷基準ターゲット仕様(T cピン7本、Z r Hピン30本)の場合、以下であった。

・ターゲット内を均質化したモデルでは、消滅率は約1.8%/年となり、

拡散計算の結果と良く一致した。

- ・ T c 消滅量へのターゲット集合体の非均質効果は非常に大きく、完全に均質化した場合に比べ、非均質計算による消滅量は約30%小さい。これは、主として共鳴吸収への非均質効果である。
- ・ T c ピン7本を分散して配置した集合体仕様に対して、これらを中心からの距離を保存してリング化したモデルと、実際のピン配列を模擬したモデルとの消滅特性の差は小さかった。すなわち、より簡単なリングモデルは非均質性を比較的良い精度で模擬できる。
- ・ T c ピンと Z r H ピンの本数を固定した場合、T c ピンを分散させるか集中させるかで消滅量が大きく異なる。中心に T c ピンを集中させると、分散させた場合よりも、消滅率は約30%の減少となった。
- ・ 基準ターゲット仕様において、T c や Z r H の重量を保存しながらピン径を基準ピン径 (23.5 mm) より細い 18.3 mm とした場合、消滅率は約7%程度向上する。それでも、完全に均質化した場合よりも20%程度消滅率は小さい。消滅率を向上させるにはさらに大幅に細径化する必要がある。
- ・ 37本ピン集合体でT c ピンを中心に1本のみ配置したターゲット仕様では、消滅率は約2%/年となった。これは、均質化した拡散計算の対応する計算結果の消滅率約6%/年の3分の1である。この理由は、非均質配置による影響と、炉心燃料より遠い場所に配置した影響による。これは、非均質効果や配列の効果が顕著に現れた一つの例である。

(3) 燃焼計算からの知見

T c および C e I₃ を照射すると、これらが変換してできる主な核種は安定核種であり、また、変換前と比べて中性子吸収断面積が小さくなる。このため、燃焼によりやや反応度増加効果があるが、37ピン装荷集合体1体を炉心に装荷し、5年間で約-0.1%程度の反応度である。消滅特性は照射により特に変化しないと考えられる。

(4) 温度計算からの知見

ターゲット F P の中性子吸収にともなう発熱を基にして、ターゲット F P ピンの中心温度を評価した。ターゲット F P ピンは基準の23 mm 径とした。

Tc ピンの場合、Tc 金属の熱伝導度が高く、また、融点も高い（約 2170℃）ので中心温度は大幅に余裕がある。一方、CeI₃では、融点が低いこと（約 760℃）、熱伝導度が小さい（と予想される。データがないので類似化合物からの類推）ことのため、基準ピン径では中心温度が融点を越える可能性が高い。細径化が必要である。

以上から、消滅量の観点からはFPピンの割合はかなり広い範囲で選択できるが、消滅率をも高くするにはFPピンをできるだけ少なくする必要がある。FPピンの割合を約20%とした上記基準仕様は両方の特性を考慮した一つの仕様例である。ただし、消滅特性への非均質効果は顕著であり、均質化した場合に比べ、実際のピン形状の場合、自己遮蔽効果により消滅特性はこれより低下する。ピン径が20mm程度では、FPピンが分散して自己遮蔽効果が小さい場合でも、消滅率は30%程度低下する。これより、ピン径は細いほど消滅効率が良いが、かなりの細径化が必要である。

さらに、FPピン中心温度の観点からもCeI₃の場合、ピン径は細い方が良い。ただし、Tcの場合、中心温度には余裕がある。

4. 計算手法の比較検討

連続エネルギーのモンテカルロ計算コードは、F P の中性子吸収断面積の大きい中速および共鳴エネルギー領域での微細な中性子スペクトル・断面積変化を扱うため、またターゲット集合体の複雑な空間的構造を扱うために有効と考えられる。一方、従来の決定論的手法に基づくコードでは、あらかじめ群定数化されたライブラリーを使用して、体系も均質化またはリング領域化など近似を行って計算を行う。そこで、モンテカルロ計算コードと決定論的計算コードによるF P 消滅特性の違いを比較検討し、これらの手法の違いがF P 消滅特性へ及ぼす影響を把握した。

4.1 計算体系と計算手法

(1) 計算体系

ターゲット集合体仕様は第3章での基準仕様のT c 7本、Z r Hピン30本のケースとした。ピンの配置は分散型である。非均質計算モデルはこれをリング化したものとした。

計算モデルは、非均質リングモデルの他に均質モデルとした。

- ・非均質モデル---図4.1-1に示す1次元Rモデル
- ・均質モデル---上記でターゲット内を単純均質化

(2) 計算手法

計算手法として、モンテカルロ法の他に、決定論的手法として衝突確率法による輸送計算と拡散計算を考え比較検討した。それぞれの手法の計算コードは下記である。

- ・モンテカルロ法計算コード MCNP-3B⁽¹⁾
- ・決定論的手法計算コード 衝突確率法輸送計算コードSLAROM⁽²⁾
拡散計算コードCITATION(相当)

ライブラリーは、JENDL 3.1をベースとして統一し、モンテカルロ法計算コードではFSXLIB⁽⁴⁾，決定論的手法計算コードではJENDL 3.1ベース70群ライブラリー⁽³⁾とした。70群エネルギー構造などの詳細は第2章に示した。

Tc99分散7本ピンを模擬

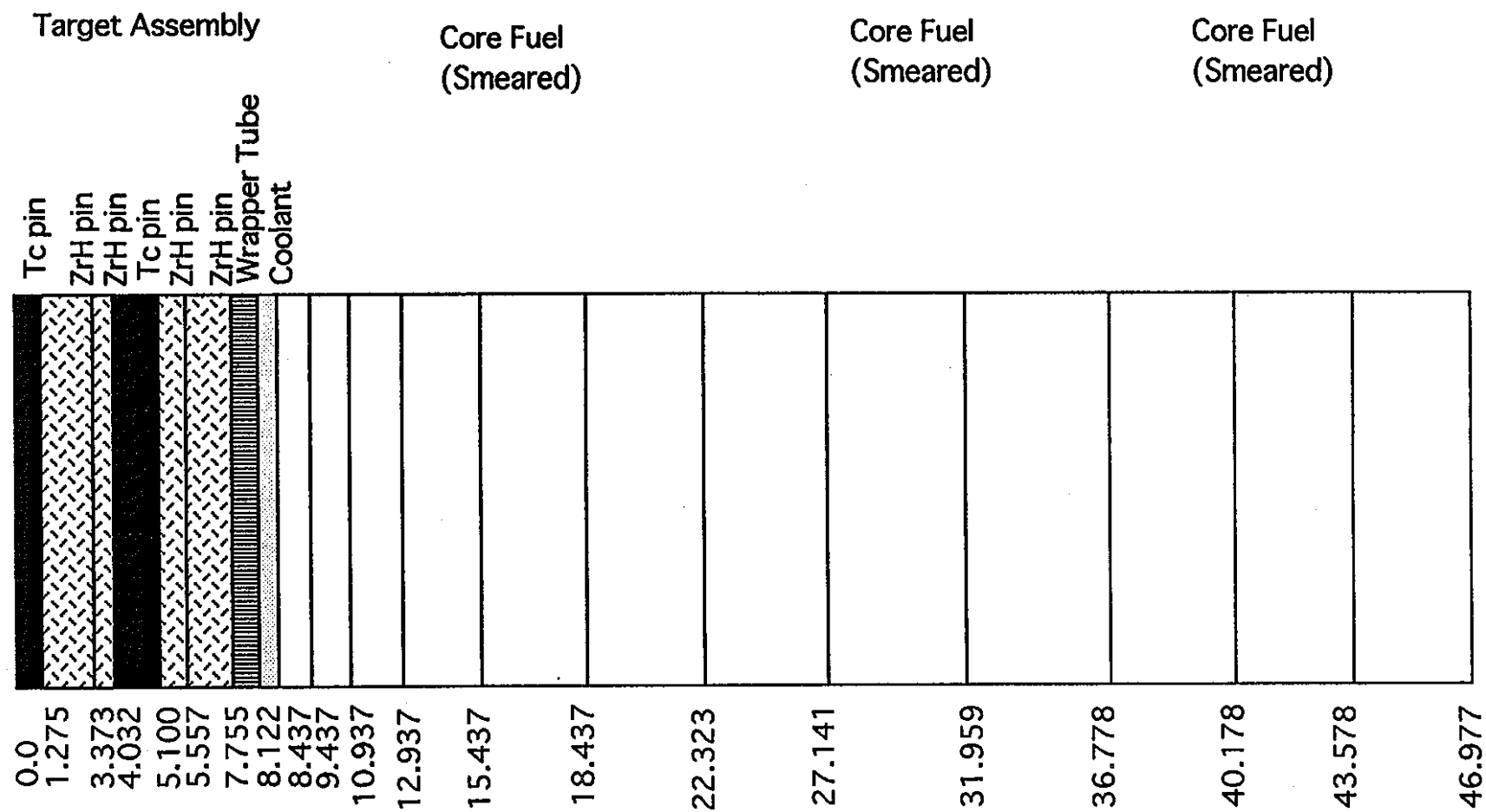


図4.1-1 ターゲット集合体の1次元非均質モデル（リングモデル）

4.2 検討結果

4.2.1 モンテカルロ計算と衝突確率法輸送計算の比較

(1) 計算ケース

モンテカルロ計算 (MCNPコード) と衝突確率法輸送計算 (SLAROMコード)、それぞれの計算における非均質効果の違いを中心に比較検討した。検討ケースは以下である。

- ・モンテカルロ計算 均質モデル／非均質モデル (リングモデル)
- ・衝突確率法輸送計算 均質モデル／非均質モデル (リングモデル)

なお、MCNPのヒストリー数、統計誤差は以下である。

- ・ヒストリー数 160000 (4000source×40generation)
- ・統計誤差 (非均質／均質)
 - 中性子束；エネルギー積分値 約1%／約1%
 - エネルギーごと 5-10%／5%以下
 - 中性子吸収率 中性子束に準じた統計誤差
 - 出力密度 1.5%以下／1.5%以下

(2) Tc99 消滅特性

両手法による消滅特性を以下に比較した。

- ・Tc99 消滅率 表4.2.1-1
- ・中性子吸収反応率 表4.2.1-2、表4.2.1-3、表4.2.1-4

表4.2.1-1は、消滅率の非均質効果や手法間の違いを比較したものである。表4.2.1-2は、1群化した場合の中性子束、吸収断面積、吸収反応率を比較したものである。吸収反応率を4つのエネルギー区間に分けて比較したものが表4.2.1-3である。また、各エネルギー区間の吸収反応率の非均質／均質の比をとって示したものが表4.2.1-4である。以下、これらの表をもとに結果を述べる。

a. 均質モデルにおける比較

ターゲット集合体内は均質であるので、両手法の差は、主としてエネルギーごとの実効断面積、特にTc99吸収断面積の自己遮蔽効果の扱いにあると考えられる。SLAROM/JENDL3-7

0 群ライブラリーの組み合わせによる計算では、T c 9 9 ライブラリーに自己遮蔽因子が含まれている。これを表4.2.1-5 に示す。ターゲット均質組成に対しては、バックグラウンドのポテンシャル散乱断面積は約110 bであり、自己遮蔽の大きい特定のエネルギー群、例えば、45群、53群、58群で自己遮蔽因子が大きく変化しているバックグラウンドのポテンシャル散乱断面積の領域にある。しかも自己遮蔽因子は約0.2から0.3で大きな遮蔽効果がある領域である。このため、連続エネルギーによる実効断面積との誤差が大きくなる可能性がある。これに対して、モンテカルロ計算では、ほぼ連続エネルギーであり自己遮蔽効果が正確に扱われる。

S L A R O Mによる消滅率はM C N Pによる消滅率よりも約11%大きく、消滅率を過大評価していることが表4.2.1-1よりわかる。表4.2.1-2より、1群化吸収断面積はM C N Pによるものよりも大幅に大きくなっている。エネルギーごとにみると、吸収反応率は4 keV-2 eVの共鳴領域でS L A R O Mの方が大きく、逆に2 eVの熱領域ではM C N Pの方が大きい。共鳴領域の吸収はS L A R O Mが過大評価しており、その結果、熱領域への供給中性子が少なくなったためと考えられる。

T c 9 9 反応率とスペクトルのエネルギー変化を下記に示す。

・中性子吸収率、中性子スペクトルの手法間比較（均質モデル）

--- 図4.2.1-1～図4.2.1-2

モンテカルロ計算では、エネルギーはほぼ連続であるが、これらの図では70群エネルギーに結果を編集している。

これより、吸収反応率は数keV-数10eVの共鳴領域でS L A R O Mの方が大きく、逆に数eV以下の熱領域ではM C N Pの方が大きいこと、スペクトルは200eV以下でM C N Pが大きくなっていることがわかる。

b. 非均質モデルにおける比較

このモデルでは、均質モデルで現れる微細な中性子スペクトルによ

る自己遮蔽効果の他に、非均質性による空間的な自己遮蔽効果が加わる。SLAROMでは、円柱体系の場合に、自己遮蔽因子が断面積セッットに含まれている核種について、中心領域以外にあるものについては非均質効果を取り入れた形での自己遮蔽効果は扱われず、均質とした場合の自己遮蔽効果のみ考慮される。従って、今回の体系では、SLAROMによる計算は均質体系での自己遮蔽因子を用いて70群レベルでの空間的な中性子束分布の変化のみが取り入れられる。一方、MCNPによる計算では、非均質体系における中性子スペクトルのエネルギー的、空間的な微細な構造を扱うことができる。

非均質モデルにおけるSLAROMによる消滅率はMCNPによる消滅率よりも約5%大きく、消滅率を過大評価していることが表4.2.1-1よりわかる。表4.2.1-2より、1群化吸収断面積はMCNPによるものよりも大幅に大きくなっている。エネルギーごとにみると、吸収反応率は4 keV-2 eVの共鳴領域でSLAROMの方が大きく、逆に2 eV以下の熱領域ではMCNPの方が大きい。共鳴領域の吸収はSLAROMが過大評価しており、その結果、熱領域への供給中性子が少なくなったためと考えられる。これらは均質モデルの場合と同様である。

Tc99反応率とスペクトルのエネルギー変化を下記に示す。

・中性子吸収率、中性子スペクトルの手法間比較（非均質モデル）

--- 図4.2.1-3～図4.2.1-5

これより、吸収反応率は数keV-数10eVの共鳴領域でSLAROMの方が大きく、逆に約10eV以下の領域ではMCNPの方が大きいこと、Tcピン、ZrHピンともスペクトルは数keV以下でMCNPが大きくなっている。非均質モデルの共鳴領域において、吸収率はSLAROMの方が高いのに対して、中性子スペクトルはMCNPの方が高くなっている。この理由は、SLAROMにおいて前述の理由で共鳴への非均質効果が入っていないため、実効吸収断面積を過大評価しており、その影響で吸収量が増大しようとするが、吸収が増える場合、中性子束は減少しようすることに起因している。結果として、吸収量＝実効吸収断面積と中性子束の積がMCNPよりも大きくなっている

ものの、中性子束そのものはMCNPよりもやや低減した。すなわち、MCNPとの比較において、実効吸収断面積の増大（＝MCNPに比べての過大評価）が中性子束の低減（＝MCNPに比べての過小評価）を上回るために、吸収量が増大（＝MCNPに比べての過大評価）している。

SLAROMによるTc吸収反応率の過大評価は、均質モデルの場合よりも緩和されている。これについては、次に述べる。

c. 各手法における非均質効果の比較

以上のように、SLAROMによるTc吸収反応率の過大評価は、非均質モデルよりも均質モデルの場合の方が顕著である。共鳴自己遮蔽は非均質モデルの方が顕著になるので、非均質体系での自己遮蔽を扱っていないSLAROMの過大評価は非均質モデルで顕著となると予想されるが、上記の結果はそれと逆の結果である。これを反映して、吸収量の非均質効果（非均質モデルの吸収量／均質モデルの吸収量）は、MCNPでは0.72、SLAROMでは0.67と、SLAROMの方がやや大きくなっている。

詳細に調べると、表4.2.1-3および表4.2.1-4より、MCNPによると、4 keV-200eV、および200eV-2 eVの分離共鳴領域の吸収量の非均質効果（非均質／均質の比）は、0.4－0.5の範囲である。これは、共鳴自己遮蔽の非均質効果である。一方、SLAROMでは、200eV-2 eVの分離共鳴領域の吸収量の非均質効果は0.4程度と同様であるが、4 keV-200eVの領域は0.67とMCNPの場合より1に近いことがわかる。この領域では、SLAROMにより非均質効果が十分に扱えていないことが示されている。しかしながら、これ以下のエネルギーでは、非均質効果は両手法で同程度である。結果として、非均質効果はSLAROMの方が大きくなっている。この原因は、共鳴への非均質効果が顕著でない低いエネルギーでの吸収量が大部分であるため、自己遮蔽因子に起因する非均質効果が表面上、現れていないと考えられる。

各手法での中性子吸収率、中性子スペクトルの非均質モデル、均質モデルの比較を下記の図に示す。

- ・ 中性子吸収率、中性子スペクトルの非均質／均質の比較（MCNP）

----- 図4.2.1-6, 7

- ・ 中性子吸収率の非均質／均質の比（MCNP）----- 図4.2.1-8

- ・ 中性子吸収率、中性子スペクトルの非均質／均質の比較（SLAROM）----- 図4.2.1-9, 10

- ・ 中性子吸収率の非均質／均質の比（SLAROM）-- 図4.2.1-11

- ・ 中性子吸収率のMCNP／SLAROMの比（非均質体系、均質体系の比較）----- 図4.2.1-12

これよりわかることは、0.1 MeVから100eVまでの吸収率の非均質／均質の比が、SLAROMではあまり大きく変わらないのに対して、MCNPでは明らかに数keV-100eVでは大きく低下している、すなわち、自己遮蔽効果が大きくなっていることである。これは非均質体系での自己遮蔽効果と考えられる。この数keV-100eV以外での非均質／均質の比は両手法で大きく変わっていない。

d. まとめ

これより、両手法で消滅率への非均質効果が約30%あることがわかる。非均質モデルでは、共鳴エネルギー領域で吸収量が減少するが、熱群では逆に吸収率が増大する。結果として、吸収量は非均質モデルの方が減少している。

手法間の差は約10%前後である。MCNPによる結果の方が低い消滅率、吸収率を示す。SLAROMによる結果の方が、数keV-数eVでの共鳴領域での吸収が大きく、逆にそれ以下の低エネルギーで吸収が小さいが、全体として吸収量は大きい。SLAROMでは、今回のモデルのようにリングモデルにおいて、中心以外の領域では非均質体系での共鳴自己遮蔽効果を扱えない。これは吸収量の過大評価となる。しかし、熱群での吸収量の割合が大きく、共鳴領域での過大評価はそれほど大きく影響せず、結果的にはMCNPとの大きな差はなか

った。

中性子減速状態の異なる体系、例えば、ZrHがない、またはその割合が少なく、全吸収に占める共鳴領域での吸収割合が高い体系では、MCNPとSLAROMに系統的な差が生じると考えられる。

(3) ターゲット集合体近傍出力分布

ターゲット集合体近傍出力分布への影響を以下に検討した。

・ターゲット集合体近傍出力分布 --- 図4.2.1-13

これより、非均質モデルにおいてターゲット集合体近傍の出力分布が大幅に増大するのは両計算とも同じであるが、MCNPによる結果の方が10%程度ピーク値が大きくなっている。これは、ターゲット集合体の中性子スペクトルよりわかるように、MCNPによる結果の方が中性子スペクトルが軟らかく実効核分裂断面積が大きいと考えられる。これは、MCNPによる結果の方が共鳴領域での吸収が小さく、低エネルギーでの中性子が増加しているためである。

表4.2.1-1 T c 9 9 消滅量の計算手法間での比較結果

体系モデル	計算手法	T c 消滅量 k g / Y	T c 消滅率 % / Y	(比)
非均質モデル	MCNP	0.359	1.29	
	SLAROM	0.377	1.35	
	比 (M / S)			0.952
均質モデル	MCNP	0.497	1.78	
	SLAROM	0.561	2.01	
	比 (M / S)			0.886
非均質効果 (非均質 / 均質)	MCNP			0.722
	SLAROM			0.672

*)本結果は、T c ピン7本、Z r H ピン30本を含むターゲット集合体の結果
T c 装荷重量 27.9 k g
非均質モデル ; リング化モデル
SLAROM ; 70群エネルギー

表4.2.1-2 T c 装荷集合体での T c 9 9 吸収反応率の比較結果

計算手法		T c 装荷集合体 1 群化中性子束 (n/cm ² sec)	T c 9 9 1 群化吸収断面積 (barn)	T c 9 9 吸収反応率 (1/cm ³ sec)
非均質モデル	MCNP	1.728E+15	2.354	4.068E+15
	SLAROM	1.461E+15	2.924	4.272E+15
均質モデル	MCNP	1.889E+15	2.987	5.642E+15
	SLAROM	1.744E+15	3.651	6.367E+15

*)本結果は、T c ピン7本、Z r H ピン30本を含むターゲット集合体の結果

表4.2.1-3 T c 装荷集合体での T c 9 9 吸収反応率の比較結果 (2)

計算体系	エネルギー	MCNP	SLAROM
非均質モデル	10MeV-4KeV	4.630E+14 (0.114)	4.354E+14 (0.102)
	4KeV-200eV	4.455E+14 (0.110)	8.261E+14 (0.193)
	200eV-2eV	1.063E+15 (0.261)	1.338E+15 (0.313)
	2eV-	2.095E+15 (0.515)	1.673E+15 (0.392)
	合計	4.068E+15	4.272E+15
均質モデル	10MeV-4KeV	5.790E+14 (0.103)	5.586E+14 (0.088)
	4KeV-200eV	9.070E+14 (0.161)	1.227E+15 (0.193)
	200eV-2eV	2.460E+15 (0.436)	3.235E+15 (0.508)
	2eV-	1.696E+15 (0.301)	1.347E+15 (0.212)
	合計	5.642E+15	6.367E+15

*)本結果は、T c ピン7本、Z r Hピン30本を含むターゲット集合体の結果

表4.2.1-4 T c 装荷集合体での T c 9 9 吸収反応率の比較結果 (3)

エネルギー	吸収率の比；非均質／均質		吸収率の差；非均質－均質	
	MCNP	SLAROM	MCNP	SLAROM
10MeV-4KeV	0.800	0.779	-1.16E+14	-1.23E+14
4KeV-200eV	0.491	0.673	-4.62E+14	-4.01E+14
200eV-2eV	0.432	0.414	-1.40E+15	-1.90E+15
2eV-	1.235	1.242	+3.99E+14	+3.26E+14
合計	0.721	0.671	-1.57E+15	-2.10E+15

*)本結果は、T c ピン7本、Z r Hピン30本を含むターゲット集合体の結果

表4.2.1-5 Tc 99 吸収断面積の自己遮蔽因子 (その1)
(JENDL 3.1 70群)

table of self-shielding factors

material name = Tc-99

reaction = capture

for 1th r-parameter
page 1 of 2

group	temp. (sig0)	1.0E-01	1.0E+00	1.0E+01	1.0E+02	1.0E+03	1.0E+04	1.0E+05	1.0E+06
1	300.	0.9953	0.9962	0.9986	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	300.	1.0013	1.0011	1.0004	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3	300.	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4	300.	0.9978	0.9982	0.9994	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	300.	0.9968	0.9974	0.9990	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
6	300.	0.9974	0.9978	0.9992	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
7	300.	0.9980	0.9983	0.9993	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
8	300.	0.9987	0.9989	0.9995	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
9	300.	0.9990	0.9992	0.9996	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10	300.	0.9990	0.9991	0.9996	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
11	300.	0.9991	0.9992	0.9996	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
12	300.	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
13	300.	0.9998	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
14	300.	0.9999	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
15	300.	0.9999	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
16	300.	0.9999	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
17	300.	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
18	300.	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
19	300.	0.8836	0.9024	0.9676	0.9969	0.9995	1.0000	1.0000	1.0000
20	300.	0.7973	0.8284	0.9394	0.9935	0.9990	0.9998	1.0000	1.0000
21	300.	0.7842	0.8155	0.9303	0.9917	0.9989	0.9998	1.0000	1.0000
22	300.	0.7680	0.7995	0.9195	0.9896	0.9986	0.9997	1.0000	1.0000
23	300.	0.7450	0.7774	0.9054	0.9869	0.9984	0.9997	1.0000	1.0000
24	300.	0.7183	0.7516	0.8884	0.9835	0.9980	0.9996	1.0000	1.0000
25	300.	0.6941	0.7279	0.8715	0.9797	0.9976	0.9995	1.0000	1.0000
26	300.	0.6720	0.7058	0.8543	0.9755	0.9971	0.9995	1.0000	1.0000
27	300.	0.6468	0.6806	0.8339	0.9700	0.9964	0.9994	1.0000	1.0000
28	300.	0.6103	0.6442	0.8042	0.9614	0.9953	0.9993	1.0000	1.0000
29	300.	0.5702	0.6039	0.7695	0.9504	0.9939	0.9991	0.9999	1.0000
30	300.	0.5241	0.5571	0.7263	0.9343	0.9917	0.9988	0.9998	1.0000
31	300.	0.4736	0.5055	0.6764	0.9135	0.9886	0.9985	0.9996	1.0000
32	300.	0.4836	0.5101	0.6564	0.8888	0.9837	0.9981	0.9998	1.0000
33	300.	0.4161	0.4464	0.6105	0.8770	0.9824	0.9982	0.9998	1.0000
34	300.	0.4577	0.4896	0.6637	0.9142	0.9895	0.9986	0.9999	1.0000
35	300.	0.3308	0.3562	0.5066	0.8122	0.9690	0.9967	0.9997	1.0000
36	300.	0.2812	0.3052	0.4552	0.7822	0.9638	0.9960	0.9996	1.0000
37	300.	0.2440	0.2658	0.4103	0.7624	0.9623	0.9961	0.9996	1.0000
38	300.	0.2001	0.2171	0.3345	0.6784	0.9410	0.9935	0.9994	0.9999
39	300.	0.1864	0.2055	0.3353	0.6990	0.9253	0.9945	0.9994	0.9999
40	300.	0.1973	0.2159	0.3433	0.7070	0.9510	0.9945	0.9994	0.9999
41	300.	0.1148	0.1242	0.1925	0.4653	0.8498	0.9804	0.9986	0.9998
42	300.	0.1374	0.1502	0.2426	0.5809	0.9149	0.9904	0.9991	0.9999
43	300.	0.1165	0.1250	0.1843	0.4351	0.8431	0.9806	0.9980	0.9998
44	300.	0.0900	0.0957	0.1373	0.3337	0.7597	0.9663	0.9964	0.9996
45	300.	0.0481	0.0529	0.0887	0.2648	0.7043	0.9559	0.9954	0.9995

to be continued

表4.2.1-5 Tc 99 吸収断面積の自己遮蔽因子 (その2)
(JENDL 3.1 70群)

table of self-shielding factors									
material name - Tc-99			reaction - capture			for 1th r-parameter page 2 of 2			
group	temp. (sig0)	1.0E-01	1.0E+00	1.0E+01	1.0E+02	1.0E+03	1.0E+04	1.0E+05	1.0E+06
46	300.	0.1024	0.1126	0.1888	0.4906	0.8734	0.9849	0.9984	0.9998
47	300.	0.6617	0.6999	0.8583	0.9773	0.9976	0.9997	1.0000	1.0000
48	300.	0.7815	0.8086	0.9139	0.9867	0.9986	0.9999	1.0000	1.0000
49	300.	0.1017	0.1109	0.1792	0.4676	0.8682	0.9844	0.9984	0.9998
50	300.	0.1628	0.1779	0.2864	0.6491	0.9390	0.9935	0.9993	0.9999
51	300.	0.9987	0.9989	0.9996	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
52	300.	0.8791	0.8934	0.9509	0.9923	0.9992	0.9999	1.0000	1.0000
53	300.	0.0887	0.0922	0.1200	0.2528	0.6192	0.9293	0.9922	0.9992
54	300.	0.9753	0.9787	0.9910	0.9987	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
55	300.	0.9948	0.9956	0.9982	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
56	300.	0.9534	0.9585	0.9800	0.9968	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000
57	300.	0.7300	0.7399	0.8066	0.9418	0.9926	0.9992	0.9999	1.0000
58	300.	0.2198	0.2208	0.2305	0.2989	0.5464	0.8787	0.9851	0.9985
59	300.	0.7351	0.7394	0.7746	0.8971	0.9830	0.9982	0.9998	1.0000
60	300.	0.9697	0.9715	0.9819	0.9961	0.9996	1.0000	1.0000	1.0000
61	300.	0.9941	0.9945	0.9970	0.9995	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
62	300.	0.9987	0.9988	0.9994	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
63	300.	0.9998	0.9998	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
64	300.	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
65	300.	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
66	300.	0.9999	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
67	300.	0.9998	0.9998	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
68	300.	0.9996	0.9997	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
69	300.	0.9995	0.9996	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
70	300.	0.7916	0.7978	0.8399	0.9371	0.9893	0.9987	0.9999	1.0000

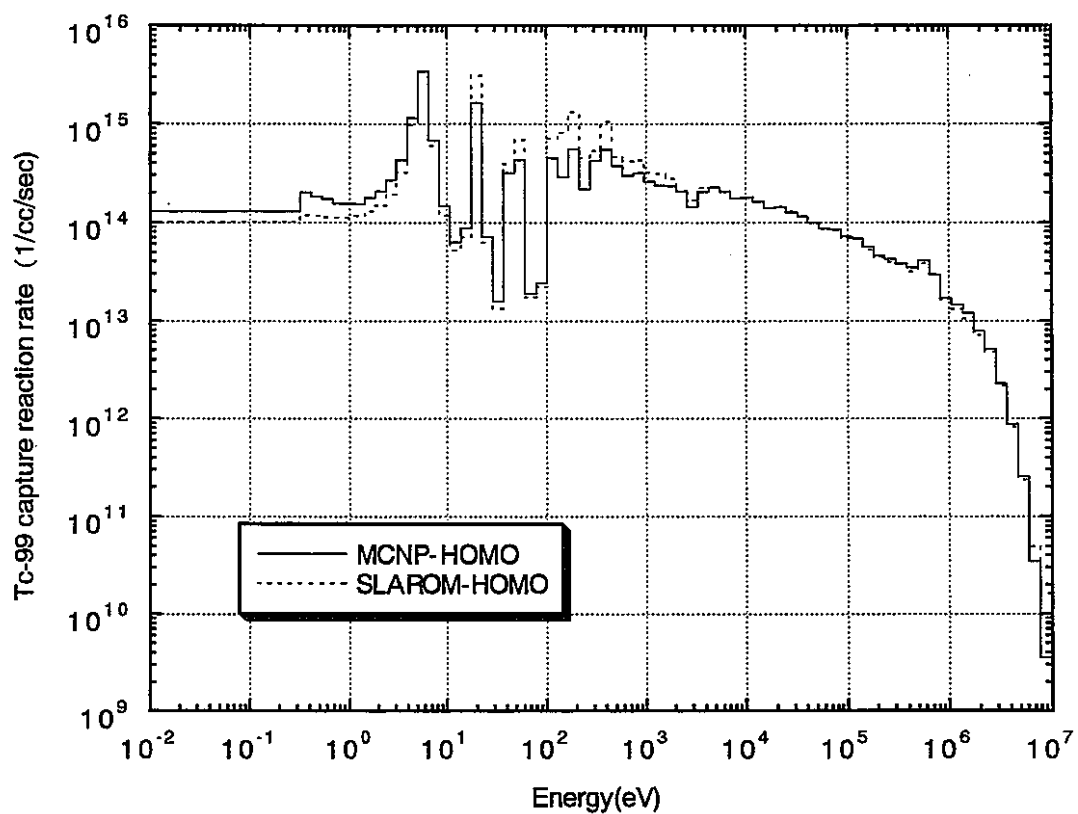


図4.2.1-1 Tc99中性子吸収反応率の比較 (Tc7ピン/ZrH30ピン)

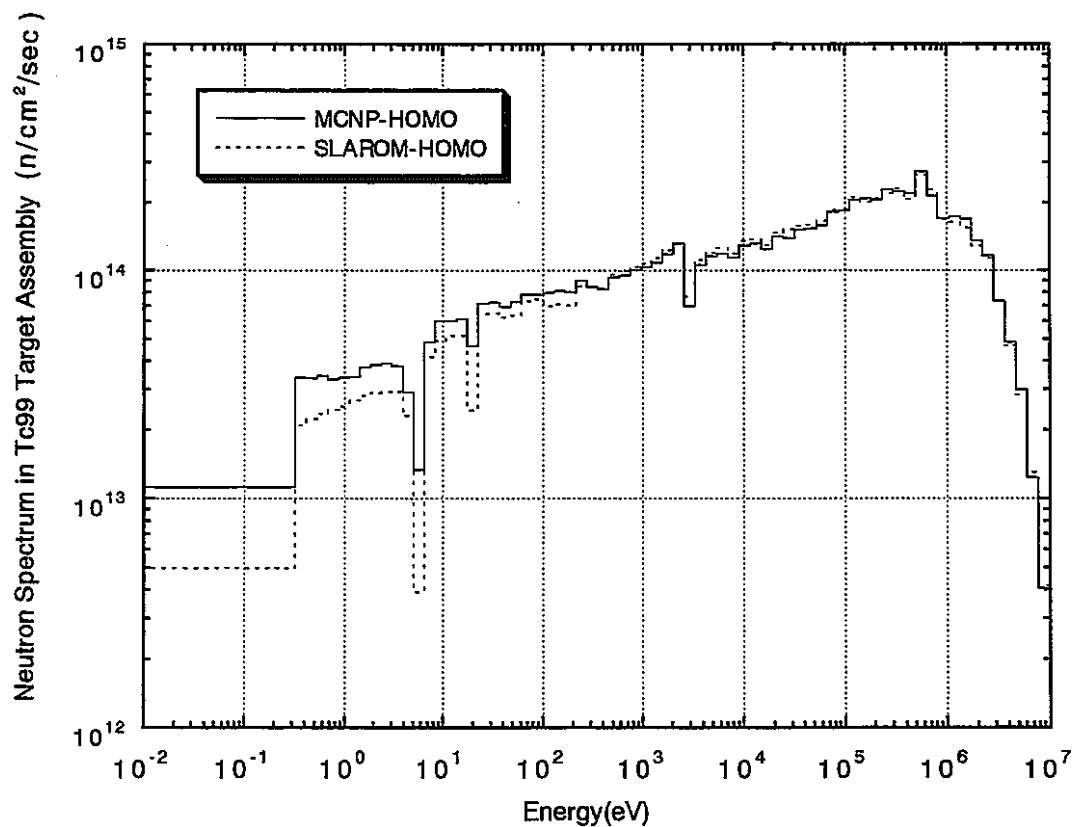


図4.2.1-2 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン)

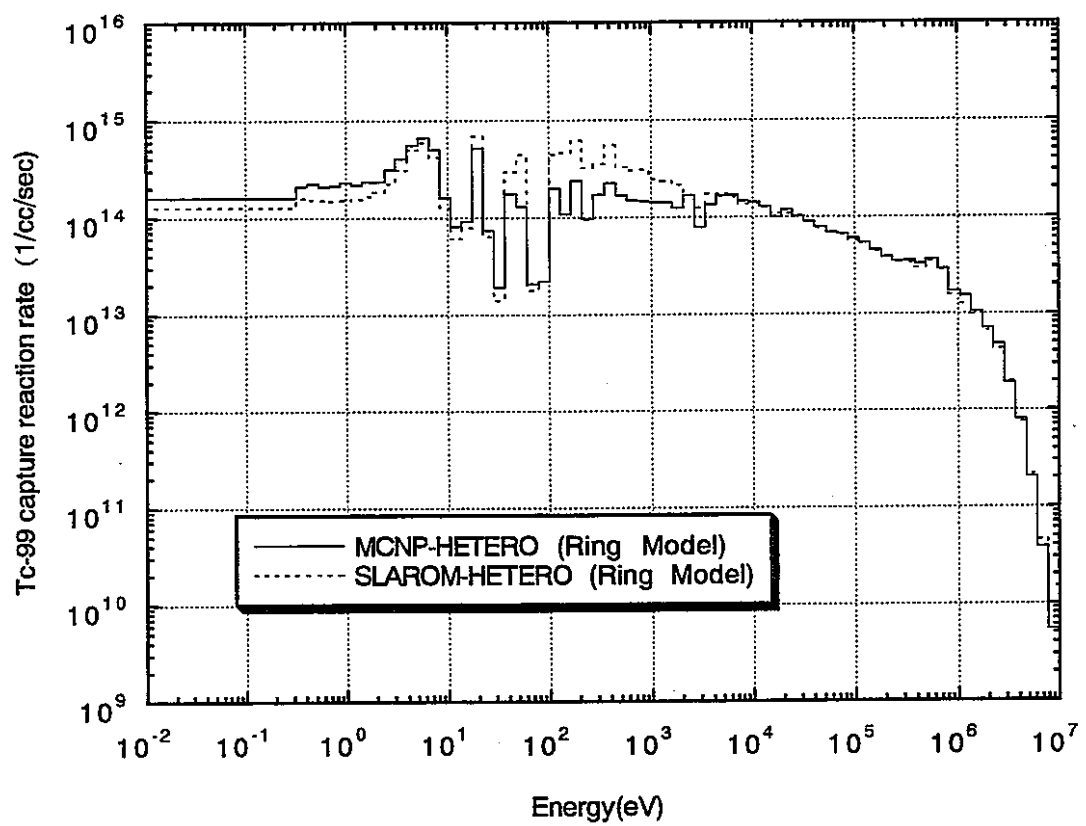


図4.2.1-3 Tc99中性子吸収反応率の比較 (Tc7ピン/ZrH30ピン)

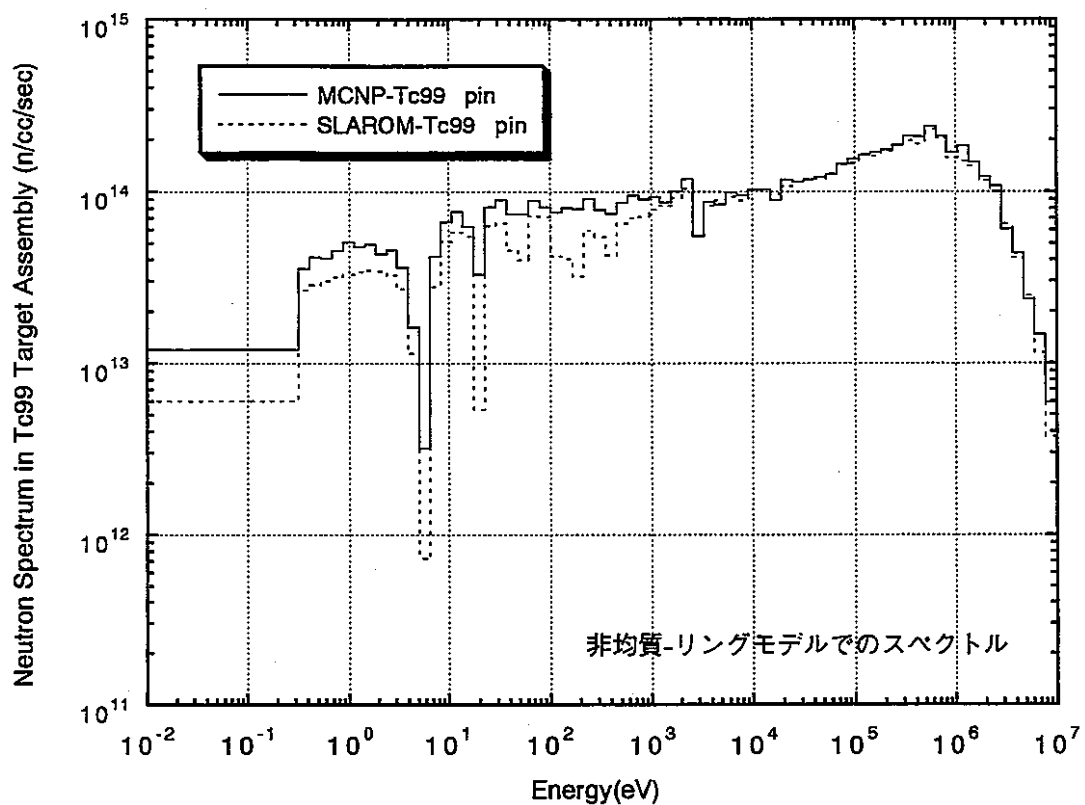


図4.2.1-4 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン)

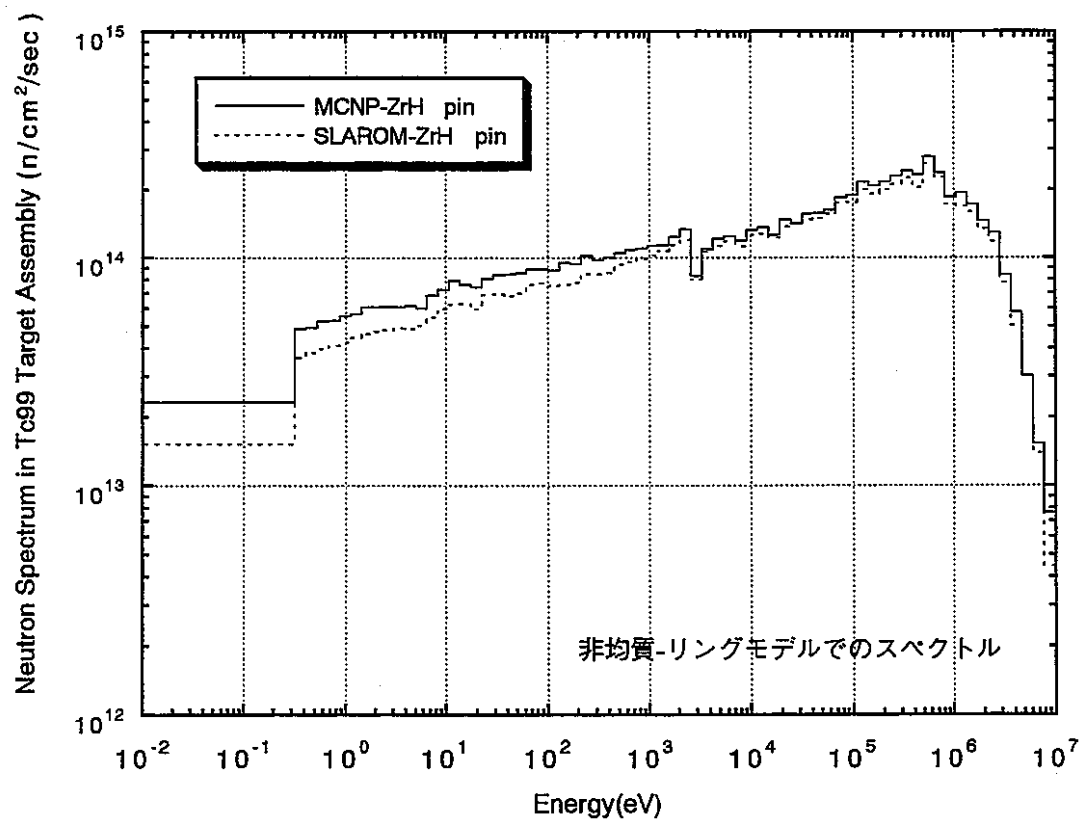


図4.2.1-5 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン)

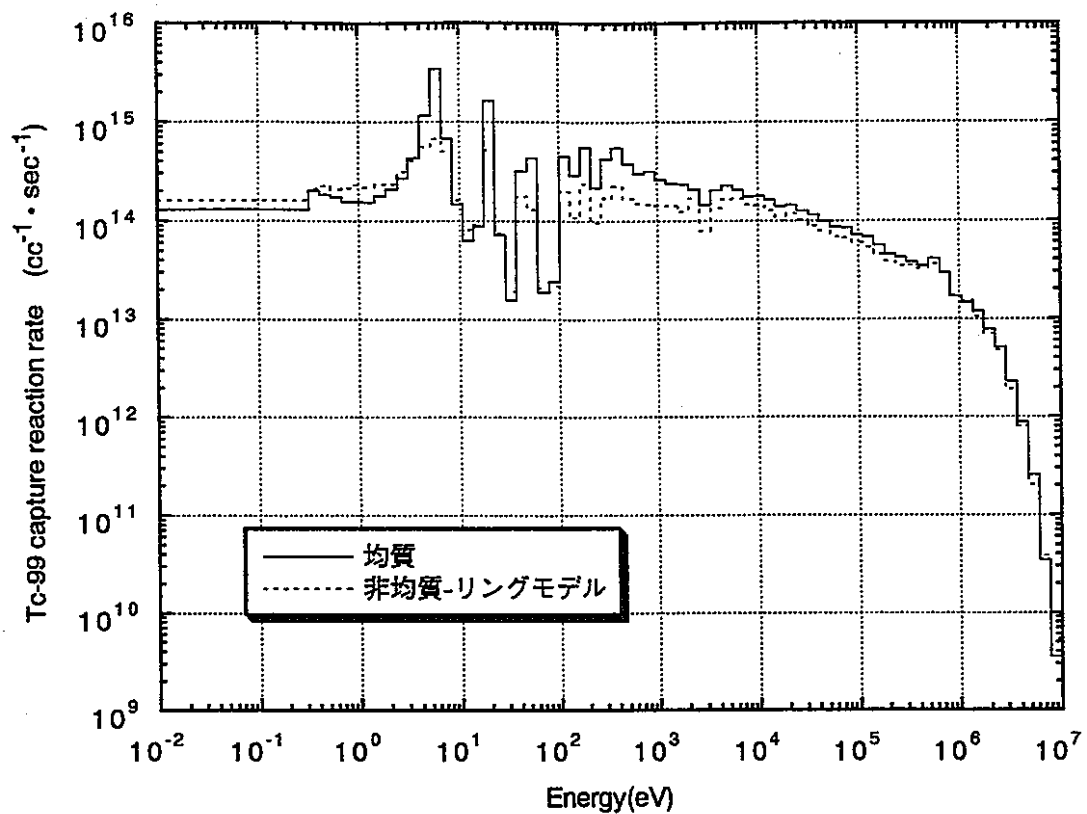


図4.2.1-6 Tc99中性子吸収反応率の比較 (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

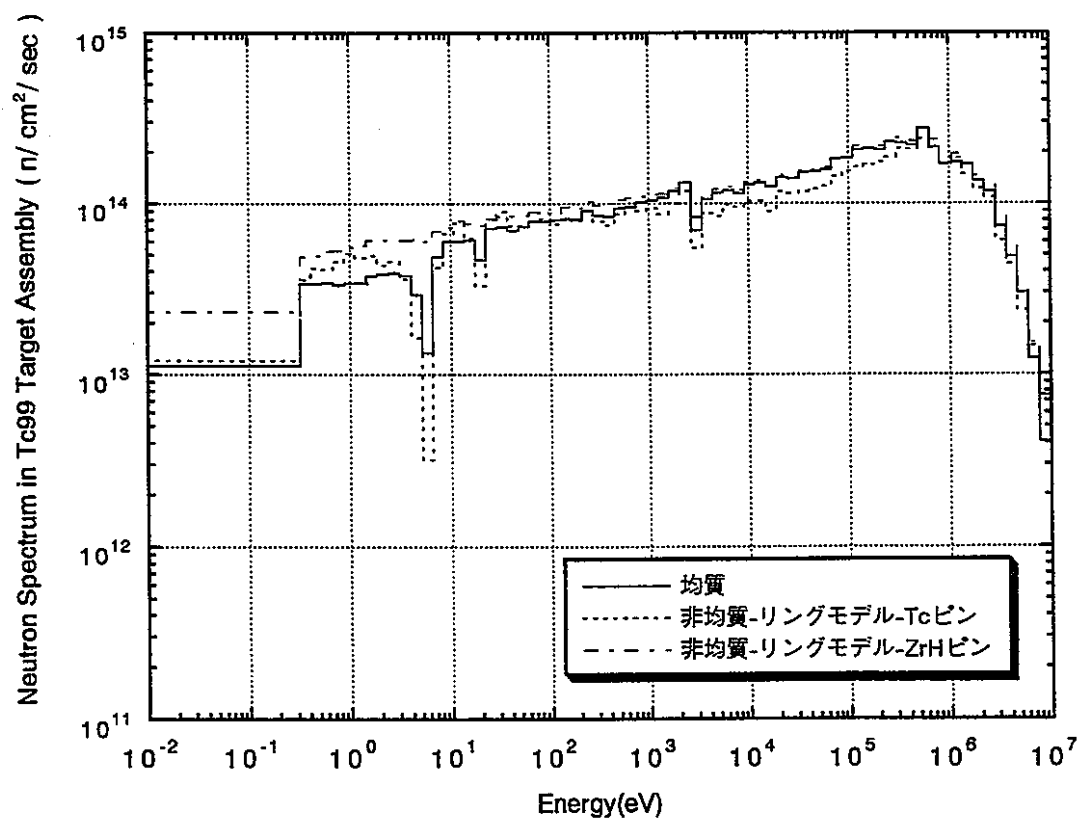


図4.2.1-7 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

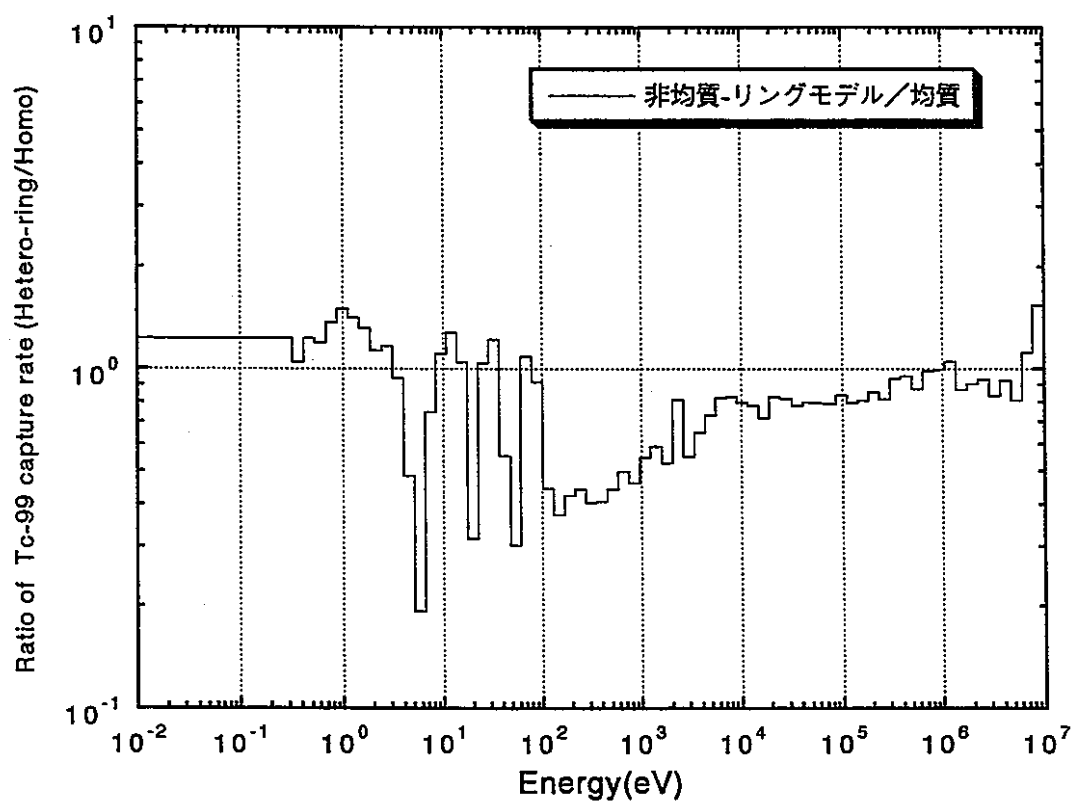


図4.2.1-8 Tc99中性子吸収率の比 (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP)

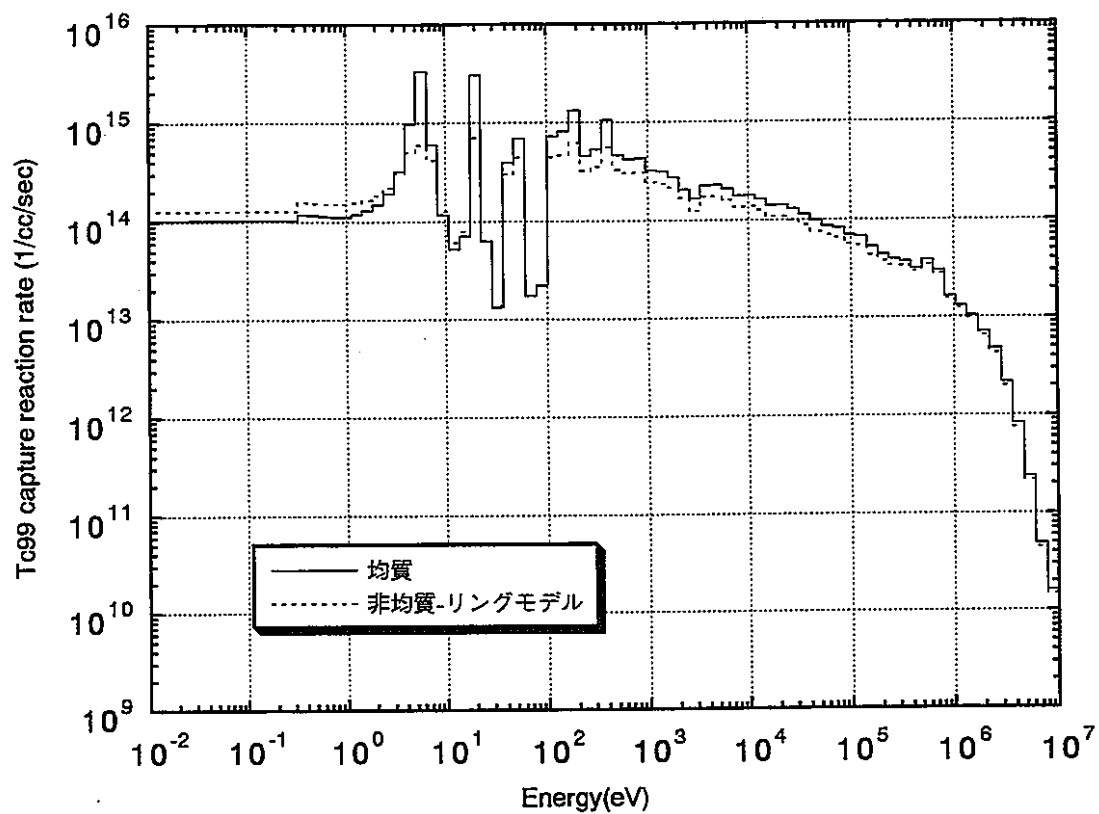


図4.2.1-9 Tc99中性子吸収反応率の比較 (Tc7ピン/ZrH30ピン、SLAROM)

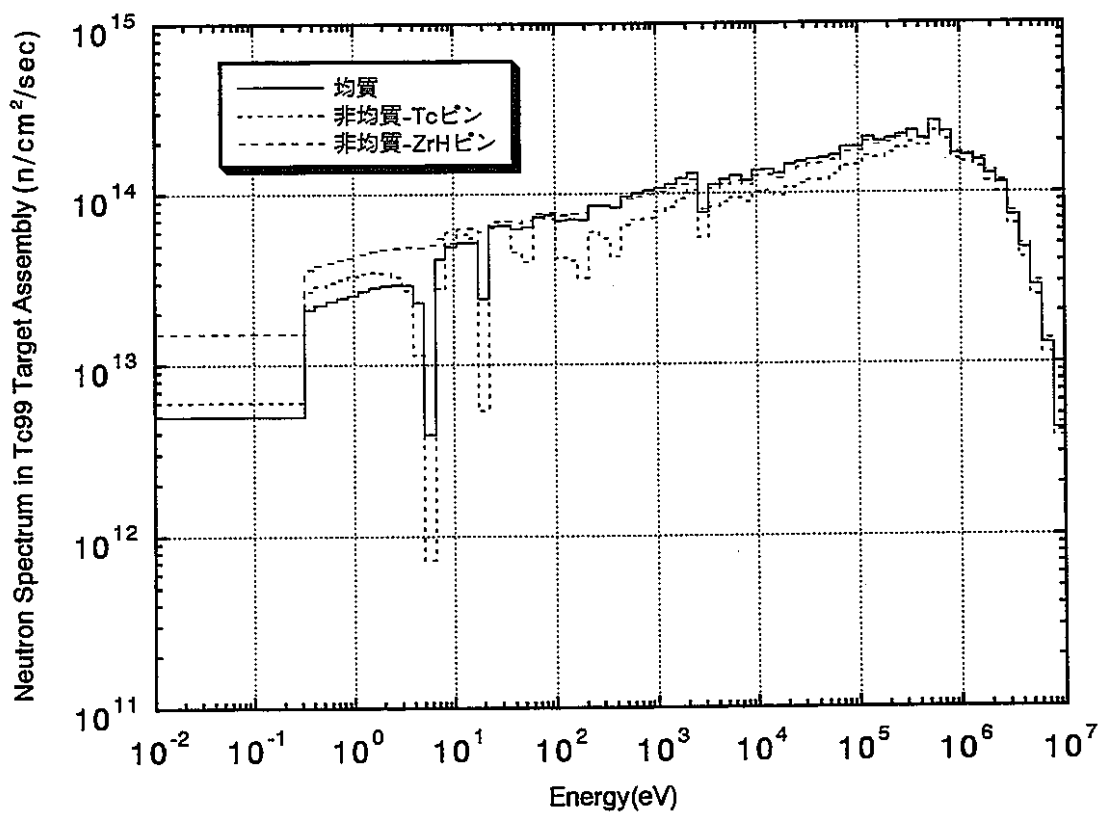


図4.2.1-10 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル (Tc7ピン/ZrH30ピン、SLAROM)

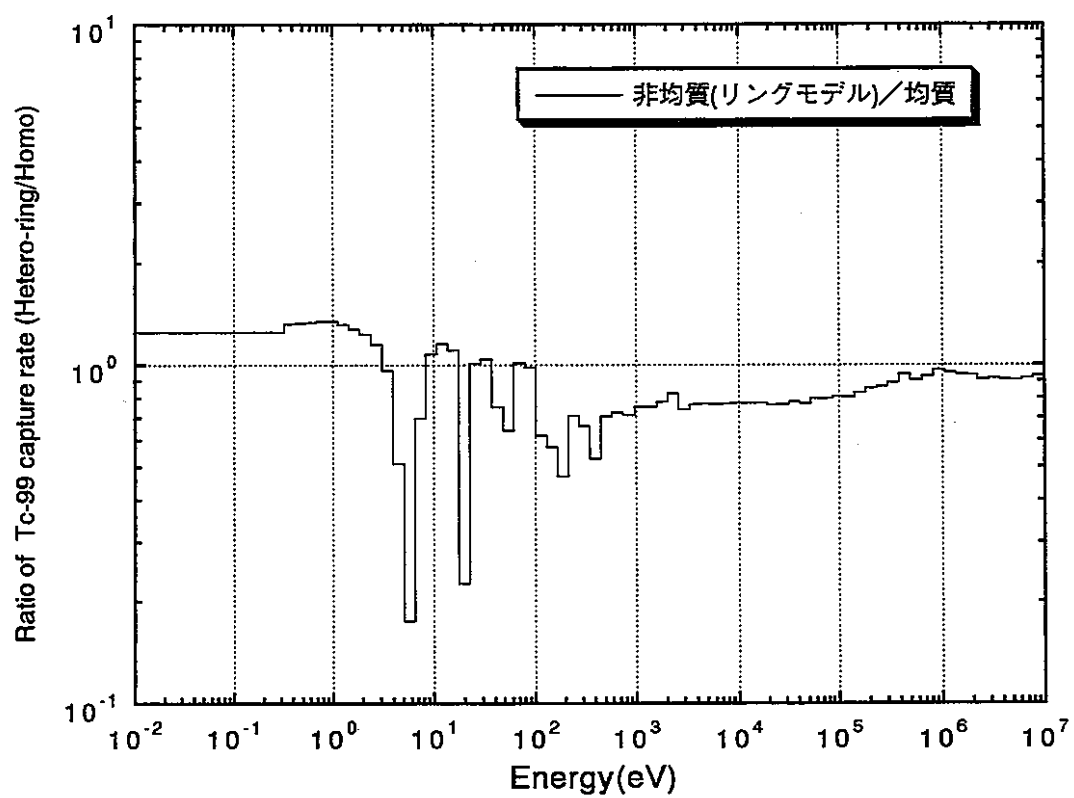


図4.2.1-11 Tc99中性子吸収率の比 (Tc7ピン/ZrH30ピン、SLAROM;Hetero/Homo)

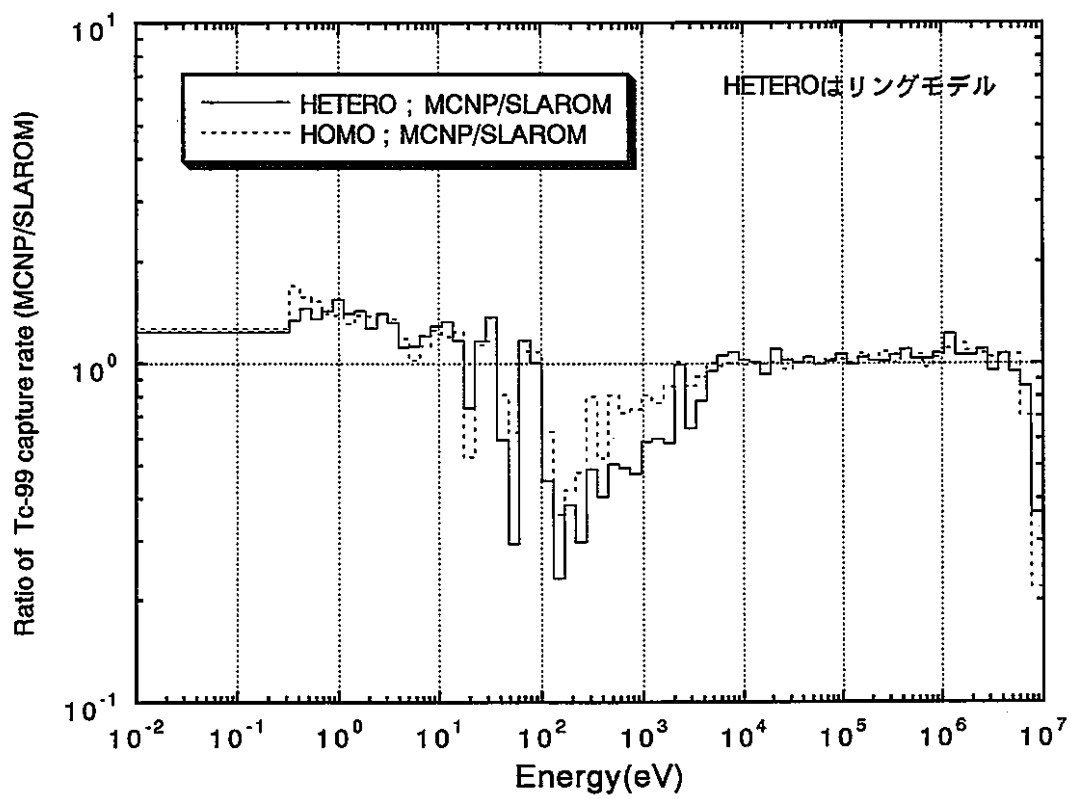


図4.2.1-12 Tc99中性子吸収率の比 (Tc7ピン/ZrH30ピン、MCNP/SLAROM)

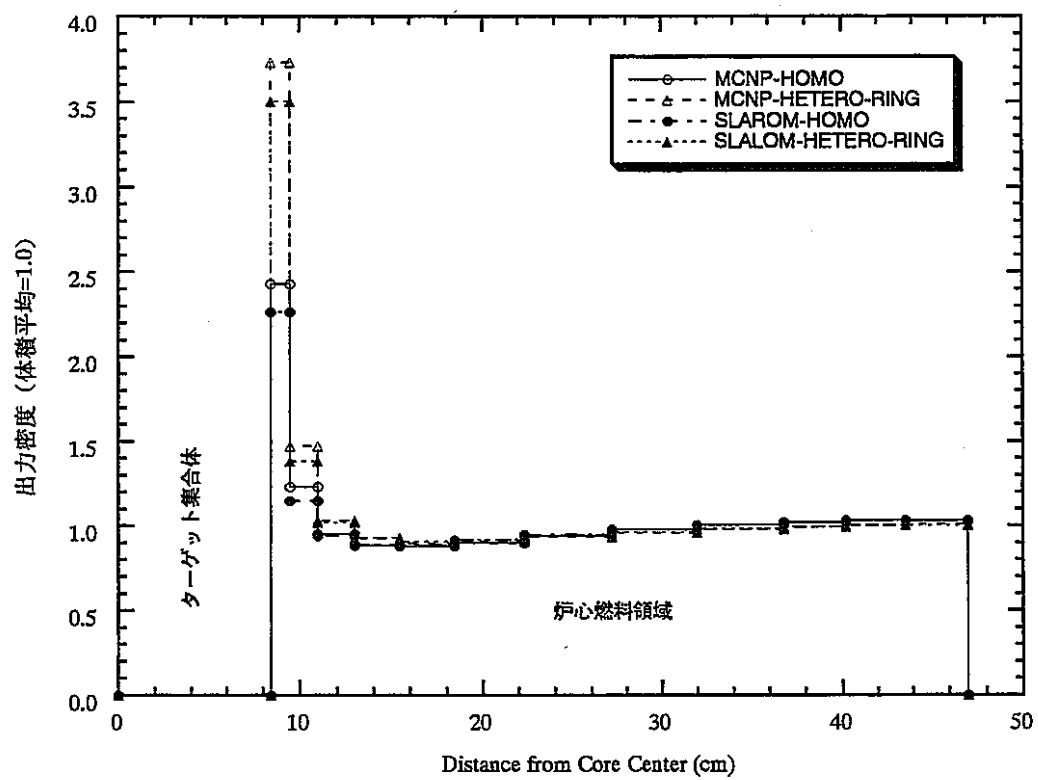


図4.2.1-13 ターゲット集合体近傍の径方向出力分布

4.2.2 モンテカルロ計算、衝突確率法輸送計算と拡散計算の比較

第3章では、拡散計算とモンテカルロ計算によりターゲット集合体の仕様を検討した。拡散計算は簡易な手法として使用されることが多い。ここでは、拡散計算の精度を把握しておくために、拡散計算と、より精度が高いモンテカルロ計算、衝突確率法輸送計算の消滅特性の比較を行う。さらに、これらの手法について、一般の炉心燃料における中性子スペクトルや重核の反応率を比較する。

(1) 計算ケース

ここでは、均質モデルに統一した条件で、モンテカルロ計算（MCNPコード）、衝突確率法輸送計算（SLAROMコード）と拡散計算の比較を行った。検討ケースは以下である。

- ・モンテカルロ計算 均質モデル、連続エネルギー
- ・衝突確率法輸送計算 均質モデル、70群ライブラリー
- ・拡散計算 均質モデル、70群ライブラリー

モンテカルロ計算と衝突確率法輸送計算は4.2.1項でのそれぞれの均質モデル計算と同じ計算である。MCNPのヒストリー数、統計誤差も同一である。衝突確率法輸送計算と拡散計算では、同一の各領域70群実効断面積を使用して計算を行う。拡散計算における拡散係数は均質組成に対する拡散係数（ $1 / (3 \times \text{輸送断面積 (均質組成)})$ ）とした。

(2) Tc99 消滅特性

各手法による消滅特性を以下に比較した。

- ・Tc99 消滅率 表4.2.2-1
- ・中性子吸収反応率 表4.2.2-2、表4.2.2-3
- ・ターゲット集合体中性子吸収率 --- 図4.2.2-1
- ・ターゲット集合体中性子スペクトル --- 図4.2.2-2

各手法による消滅率は約10%以内の差で一致している。MCNPの結果が最も消滅率は小さく、ついで、拡散計算コードの結果、SLAROMの結果の順で大きくなっている。

SLAROMの結果では、共鳴領域（約4KeV-2eV）において吸収量が

他の計算結果より大きくなっている。

(3) ターゲット集合体近傍出力分布

ターゲット集合体近傍出力分布への影響を以下に検討した。

・ターゲット集合体近傍出力分布 --- 図4.2.2-3

これより、ターゲット集合体近傍の出力分布が大幅に増大するのは各計算とも同じであり、ピーク出力は10%程度の差で一致している。

(4) 炉心燃料におけるスペクトル、反応率の比較

炉心燃料におけるスペクトル、反応率の比較を以下に示す。炉心燃料としては、ターゲット集合体から約40cm離れ、影響の少ない領域を考えた。

・炉心燃料中性子スペクトル --- 図4.2.2-4

・炉心燃料 Pu^{239} 核分裂率 --- 図4.2.2-5

・炉心燃料 U^{238} 中性子捕獲率 --- 図4.2.2-6

これより、各手法ではスペクトル、反応率が良く一致していることがわかる。数100eV以下ではMCNPによるスペクトル、反応率が他の計算の値よりも大きくなっているが、全体への寄与は大きくないと考えられる。

表4.2.2-1 T c 9 9 消滅量の計算手法間での比較結果（均質モデル）

体系モデル	計算手法	T c 消滅量 k g / Y	T c 消滅率 % / Y	(比)
均質モデル	M C N P	0.497	1.78	
	S L A R O M	0.561	2.01	
	D I F F U S I O N	0.528	1.89	

*)本結果は、T c ピン7本、Z r Hピン30本を含むターゲット集合体の結果
T c 装荷重量 27.9 k g
S L A R O M、D I F F U S I O N ; 70群エネルギー

表4.2.2-2 T c 装荷集合体での T c 9 9 吸収反応率の比較結果

計算手法	T c 装荷集合体 1 群化中性子束 (n/cm ² sec)	T c 9 9 1 群化吸収断面積 (barn)	T c 9 9 吸収反応率 (1/cm ² sec)	
均質モデル	M C N P	1.889E+15	2.987	5.642E+15
	S L A R O M	1.744E+15	3.651	6.367E+15
	D I F F .	1.971E+15	3.042	5.997E+15

*)本結果は、T c ピン7本、Z r Hピン30本を含むターゲット集合体の結果

表4.2.2-3 T c 装荷集合体での T c 9 9 吸収反応率の比較結果（2）

エネルギー	M C N P	S L A R O M	D I F F U S I O N
10MeV-4KeV	5.790E+14 (0.103)	5.586E+14 (0.088)	5.881E+14 (0.098)
4KeV-200eV	9.070E+14 (0.161)	1.227E+15 (0.193)	9.095E+14 (0.152)
200eV-2eV	2.460E+15 (0.436)	3.235E+15 (0.508)	2.642E+15 (0.441)
2eV-	1.696E+15 (0.301)	1.347E+15 (0.212)	1.857E+15 (0.310)
合計	5.642E+15	6.367E+15	5.997E+15

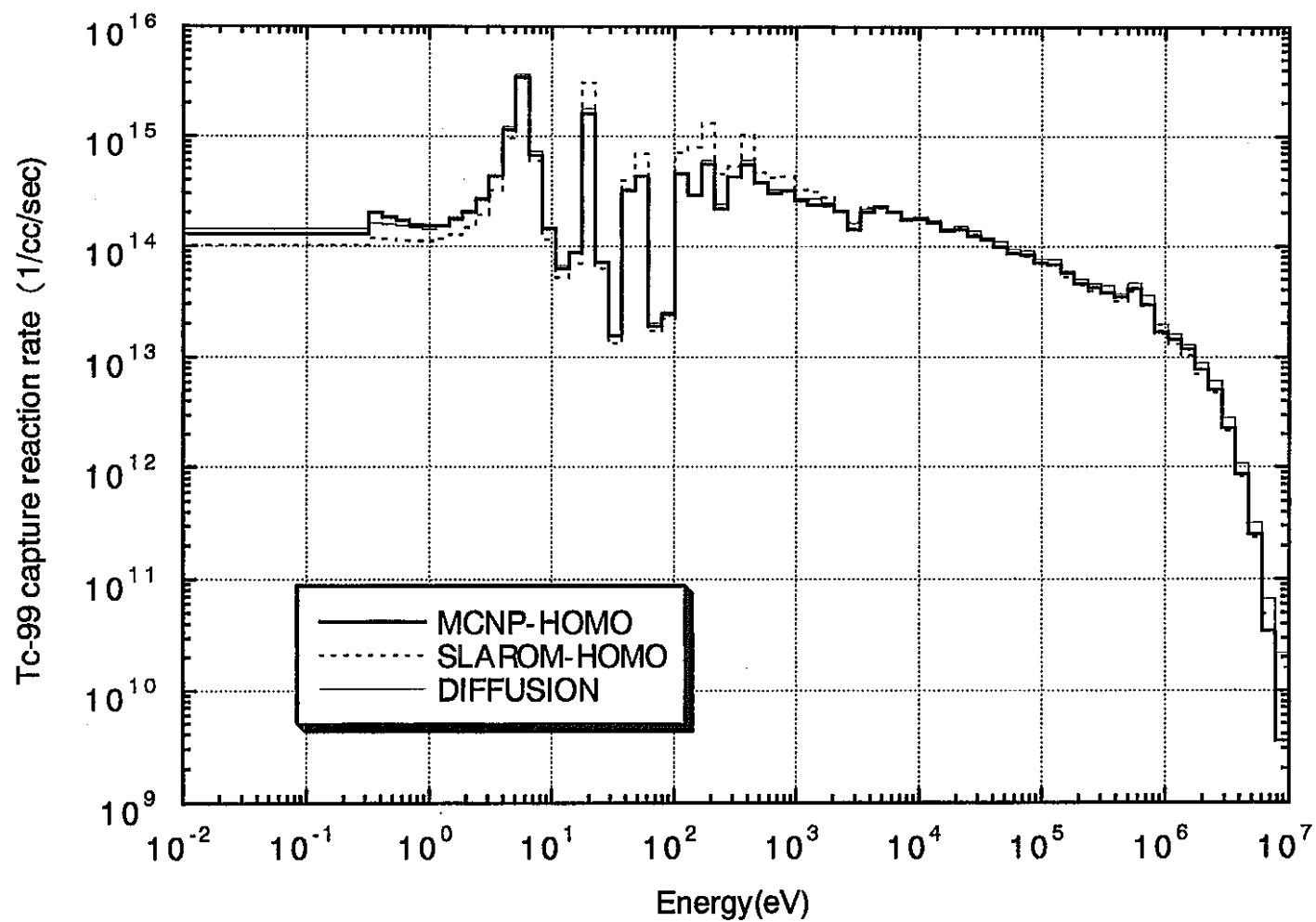


図4.2.2-1 Tc99中性子吸収反応率の比較

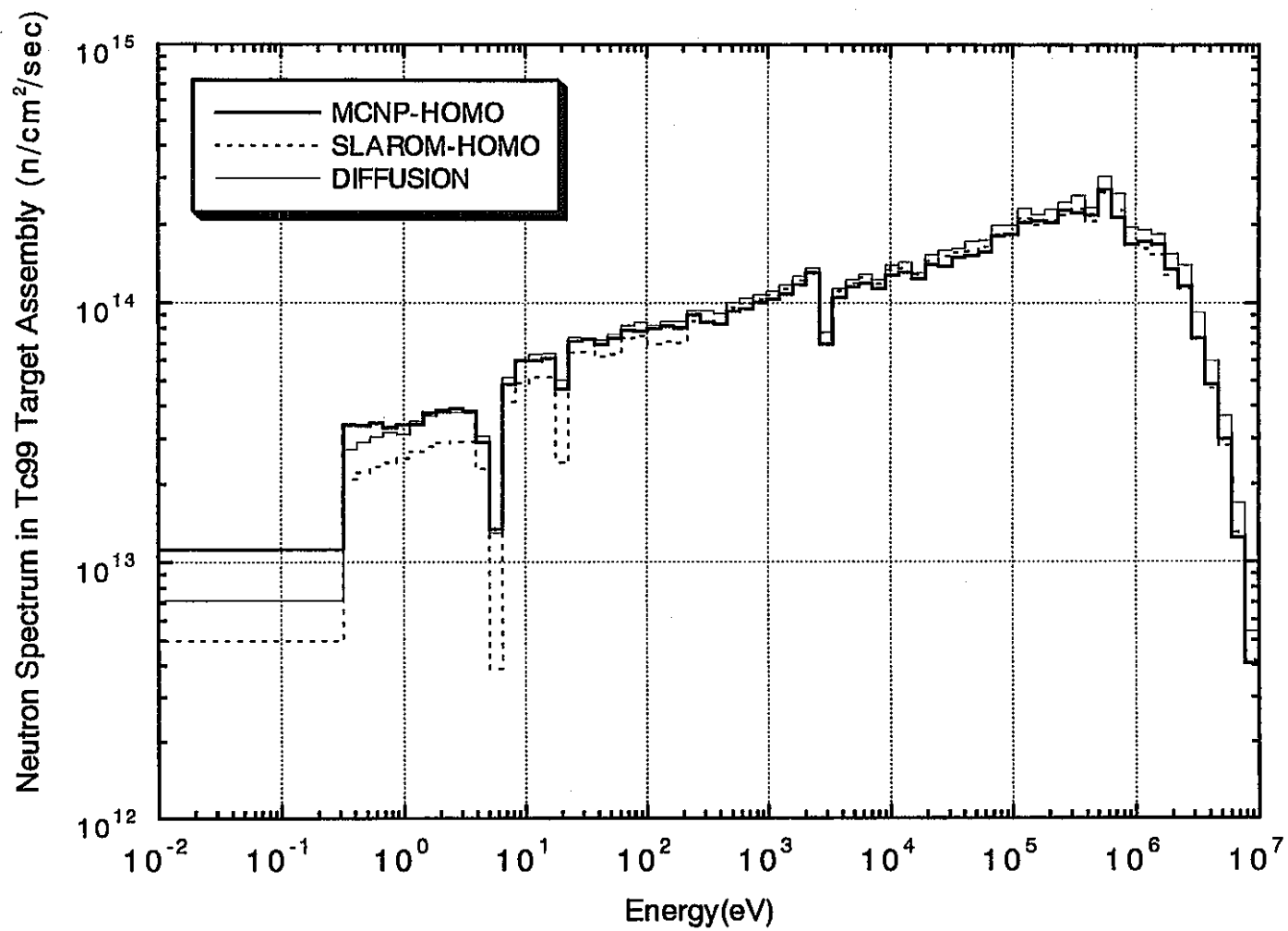


図4.2.2-2 Tc99ターゲット集合体での中性子スペクトル

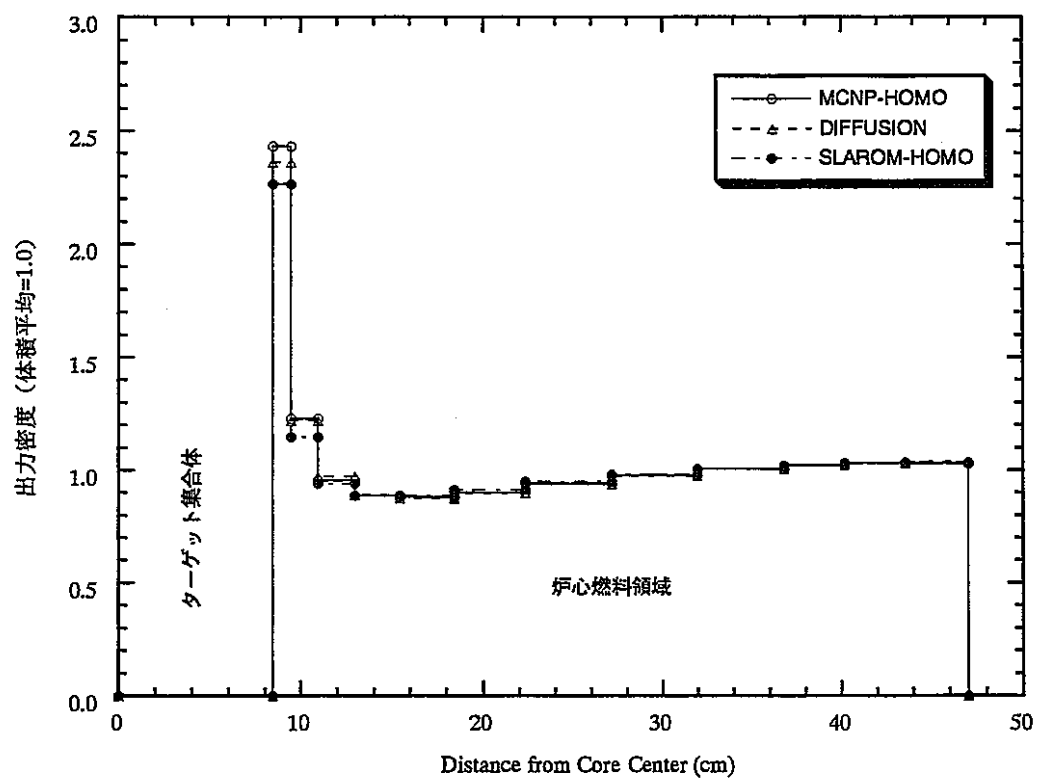


図4.2.2-3 ターゲット集合体近傍の径方向出力分布

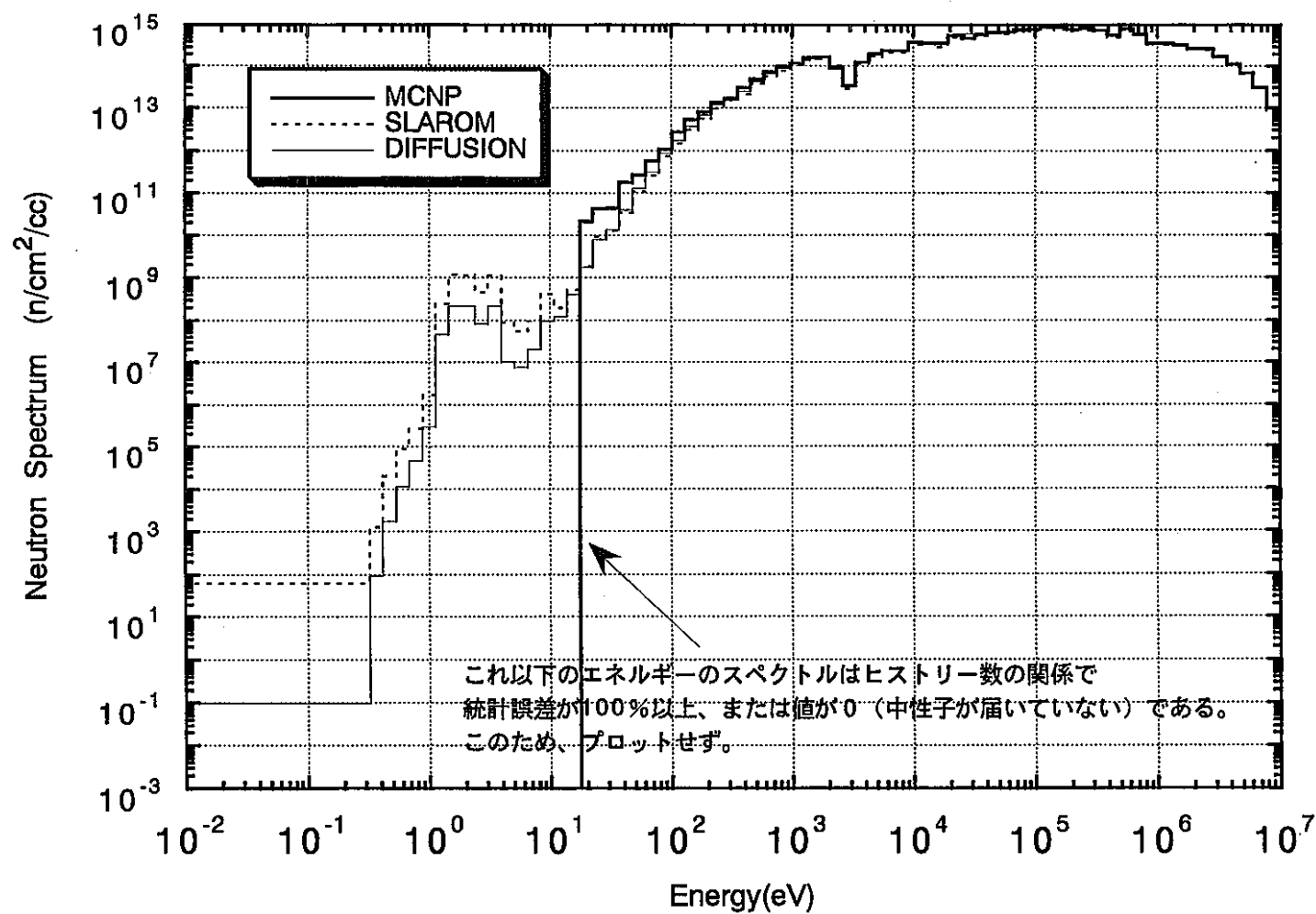


図4.2.2-4 炉心燃料での中性子スペクトルの比較(1)

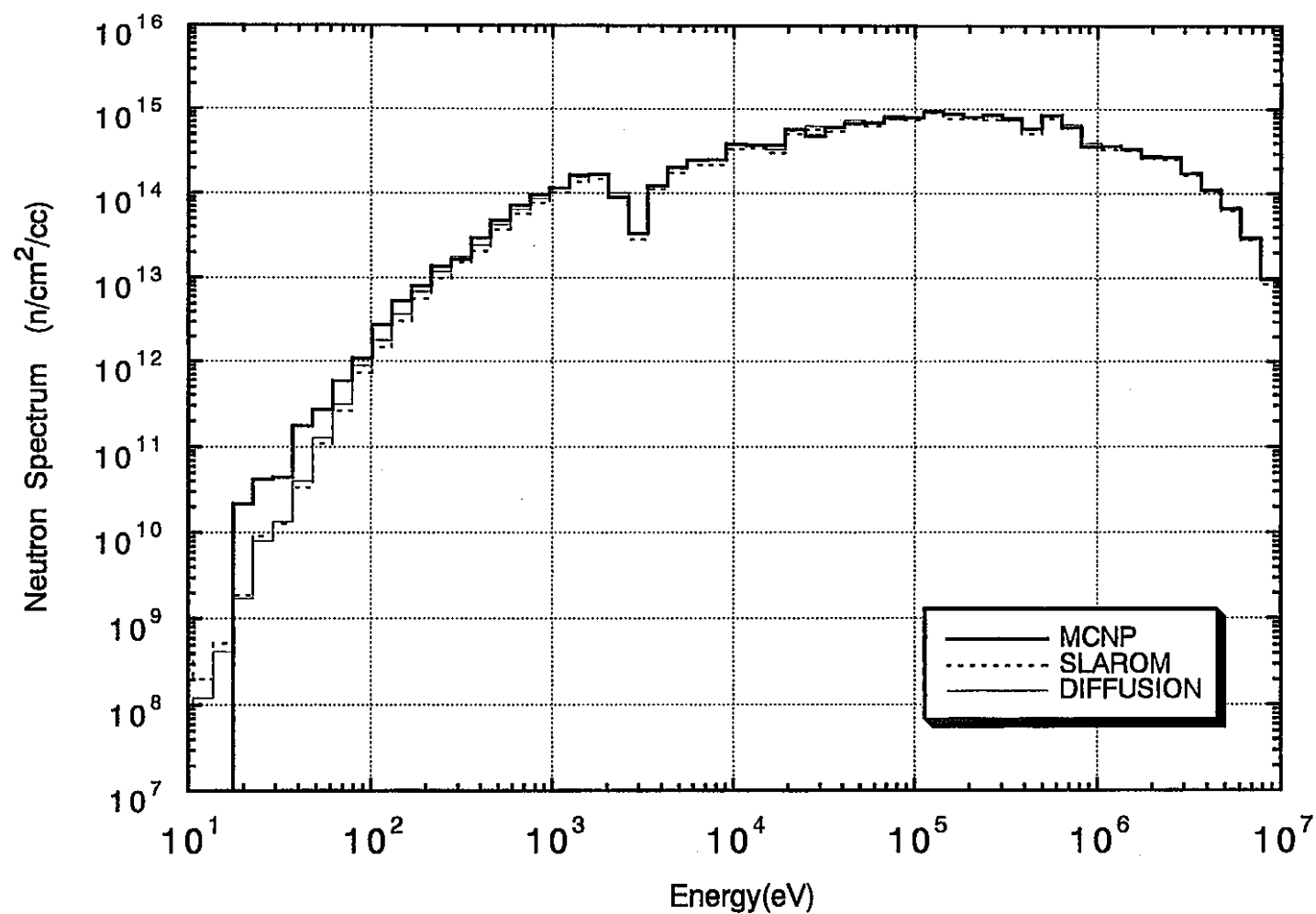


図4.2.2-4 炉心燃料での中性子スペクトルの比較(2)

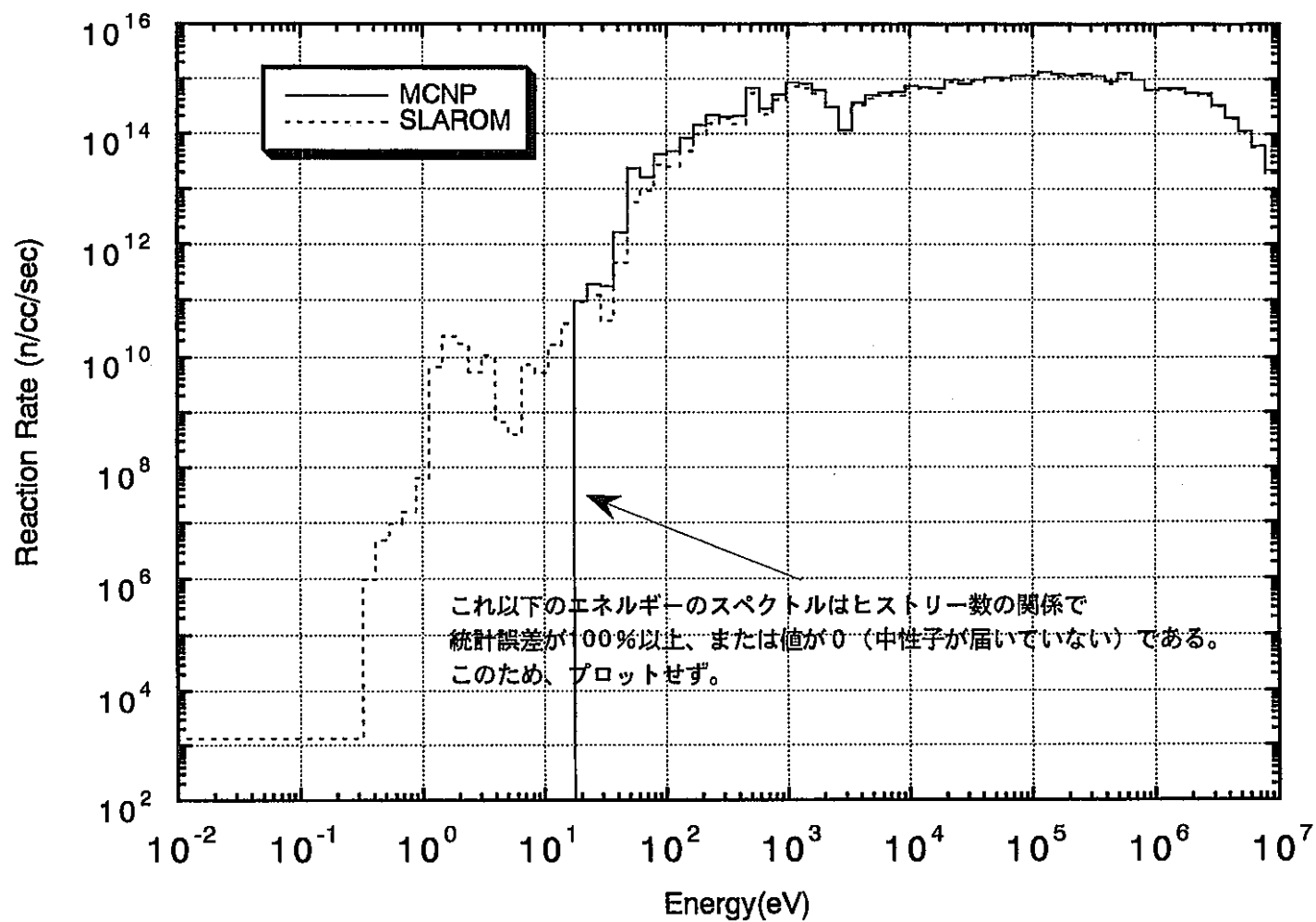


図4.2.2-5 炉心燃料でのPu239 核分裂反応率の比較

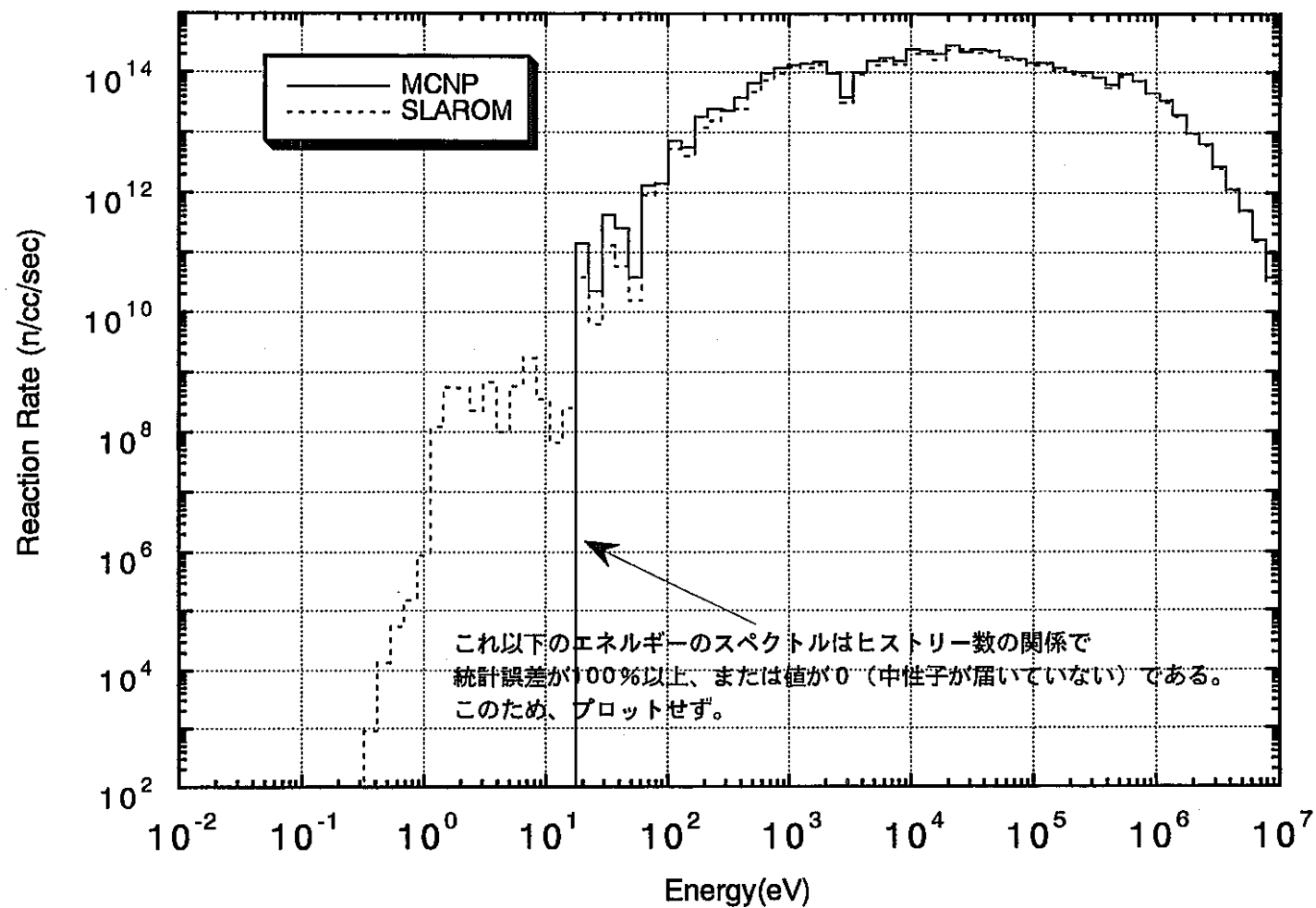


図4.2.2-6 炉心燃料でのU238捕獲反応率の比較(1)

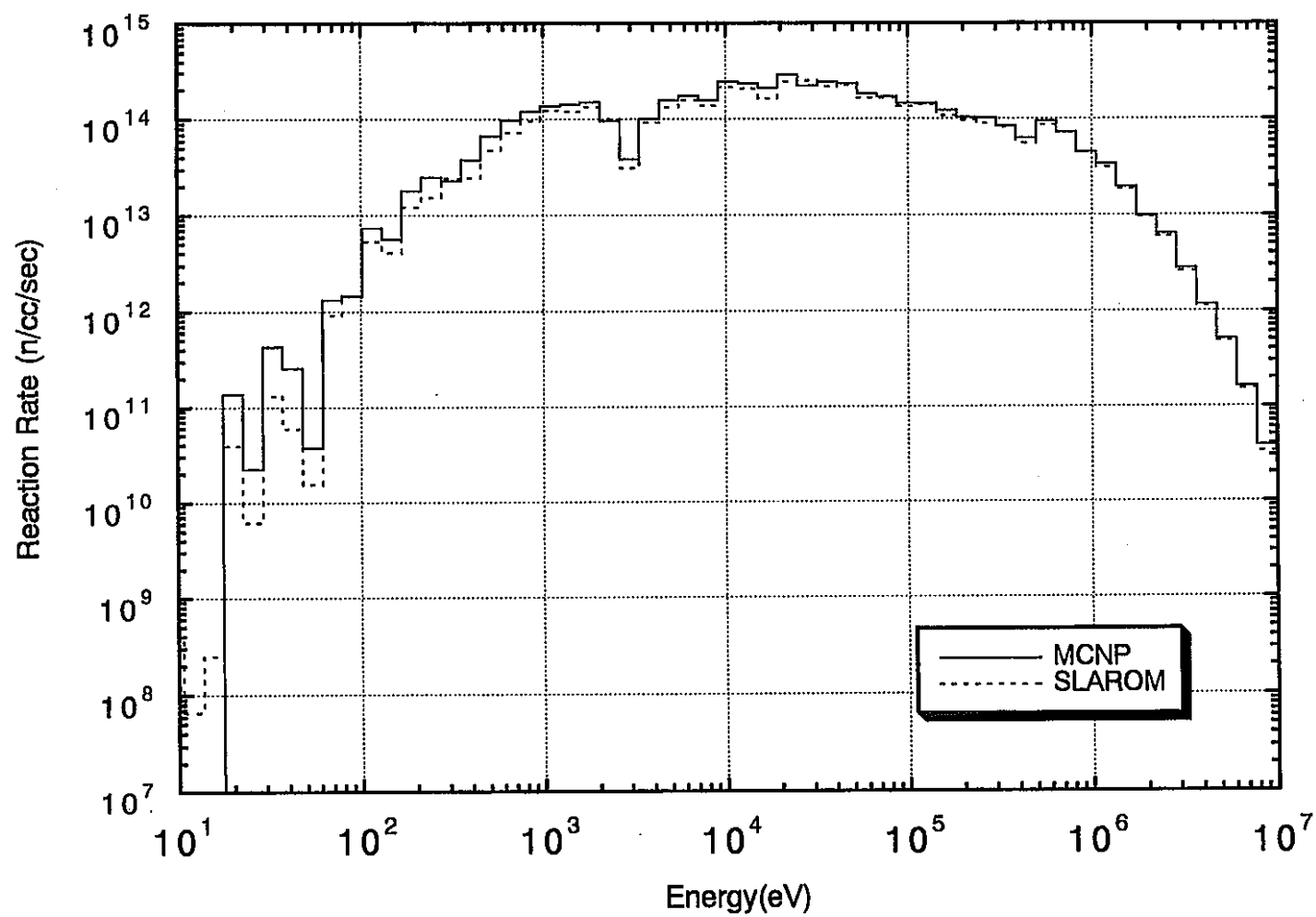


図4.2.2-6 炉心燃料でのU238捕獲反応率の比較(2)

4.3 まとめ

Tc99の消滅特性、共鳴自己遮蔽効果などの特性評価における決定論的手法による計算とモンテカルロ計算の比較検討を行った。決定論的手法はSLAROMによる衝突確率法輸送計算および拡散計算を考えた。これら決定論的手法で用いる70群ライブラリーにはTc99自己遮蔽因子が含まれているが、SLAROMでは今回対象としたリングモデルでの非均質な自己遮蔽効果を考慮できない。

70群ライブラリーを用いたSLAROMによる結果では、共鳴領域の数keV-数10eVでのTc99吸収量を過大評価する。この傾向は非均質体系により顕著である。これは、今回のターゲット集合体の組成・構造における自己遮蔽効果を正確に考慮できていないことによる。しかし、全体の吸収量に占める割合は半分以下であり、均質モデルでは全吸収量の差は10%程度である。SLAROMによる結果の方が、数keV-数eVでの共鳴領域での吸収が大きく、逆にそれ以下の低エネルギーで吸収が小さいが、全体として吸収量はやや大きい。

両手法とも消滅率への非均質効果が約30%あり、均質モデルより消滅率は低下する。非均質モデルでは、共鳴エネルギー領域で吸収量が減少するが、熱群では逆に吸収率が増大する。結果として、吸収量は非均質モデルの方が減少している。非均質モデルでは両手法の差は5%程度となり、均質モデルの場合よりも小さいが、これは2つの手法の全エネルギー領域での吸収量において、共鳴領域での非均質効果の扱いの差は埋もれてしまい現れなかったためと考えられる。

簡易な手法として良く使用される拡散計算についても、上記の二つの手法との比較を行った。この比較は均質モデルに統一し、Tc99消滅特性の他、炉心燃料のスペクトル・重核反応率も比較した。3つの手法によるTc99消滅特性は、おおむね10%以内で一致した。決定論に基づく2つの手法ではTc99自己遮蔽効果が考慮されないが、全体の吸収量への影響は小さい。炉心燃料のスペクトル・重核反応率も3者でおおむね一致している。

上記の結果から、SLAROM/70群ライブラリーによる決定論的手法では共鳴領域でのTc99吸収量を過大評価するが、熱群などの吸収量も大

きく全体の吸収量には大きく影響しない。結果として、ターゲット集合体のモデル化が同一であれば、3つの手法の消滅率は10%程度の差で一致する。非均質体系とする効果は大きく、非均質効果は30%消滅量を小さくする方向である。これらの結果はターゲット集合体のスペクトルに依存していると考えられる。例えば、 Z_{rH} が少なく熱群の寄与が小さい場合は自己遮蔽効果の扱いの差がもっと顕著になると考えられる。

5. まとめ

高速炉においては、長半減期FPの消滅効率を上げるため、FPを含むピンの他に水素化ジルコニウム等の減速材ピンを装荷したターゲット集合体による消滅が考えられる。

本研究では、長半減期FPであるTc99、I129を含むピンの他に水素化ジルコニウム等の減速材ピンを装荷したターゲット集合体を考え、高速炉に装荷した場合の消滅特性解析を、主として連続エネルギーモンテカルロコードを用いて実施した。モンテカルロコードは、非均質性の強いターゲット集合体におけるTc99やI129の共鳴吸収効果を、厳密なモデル化により取り扱うためにきわめて有効である。これを用いてFPピン配列の効果・ピン径の効果等のFP消滅ターゲット集合体仕様の効果を評価し、効率の良い消滅を行うためのターゲット集合体の仕様について検討した。また、均質モデル化の影響、従来の決定論的手法との違い等、計算手法に関する検討を行った。

本研究では、上記ターゲット集合体を炉心内に配置させることを想定した。計算コードとしては、連続エネルギーモンテカルロコードとしてMCNP、決定論的手法によるコードとして輸送計算コードのSLAROM、拡散計算コードと70群ライブラリーを使用した。両手法ともJENDL3.1に基づいているが、モンテカルロ計算では連続エネルギーである。

その結果、以下のことがわかった。

- (1) Tc99またはI129のFPピンとZrHピンの割合を変化させた場合、FPピン割合が増大するにつれて、消滅率は単調減少するが、消滅量は途中でピークを持つ。消滅量がピークを持つのは、FPピンが増えると、ZrHピンの中性子減速効果が小さくなる効果と、FPそのものの重量が増大する効果があるが、FPピンが少ないうちは後者が勝るが、FPピンが多くなると前者が勝るためである。消滅量をほぼ最大とするならば、消滅率は約1-2%/年である。
- (2) 消滅量への非均質効果・ピン配列効果は、消滅量をほぼ最大としたターゲット仕様（FPピン7本、ZrHピン30本）の場合、以下であった。
 - ・FP消滅量へのターゲット集合体の非均質効果は非常に大きく、完全に均質化した場合に比べ、非均質計算による消滅量は約30%小さい。こ

れは、共鳴吸収への非均質効果である。リングモデルと実際のピン配列を模擬したモデルとの差は小さかった。

- ・ F P ピンと Z r H ピンの本数を固定した場合、F P ピンを分散させるか集中させるかで消滅量が大きく異なる。中心に F P ピンを集中させると分散させた場合よりも、消滅率は約30%の減少となった。

- (3) モンテカルロ法と決定論的手法の差については、計算モデルが同じならば消滅量は10%以内の差である。すなわち、均質化モデルでは拡散計算コード、S L A R O M、M C N P の差は10%以内、非均質リングモデルでは、S L A R O M、M C N P の差は5%である。M C N P の結果は常に最も低い消滅量を与える。M C N P の結果を正とすれば、決定論的手法でも大きな誤差がないといえる。計算手法間の差は、共鳴吸収の大きい数 KeV から数 eV において大きく、決定論的手法では吸収量を過大評価するが、全体の吸収量への影響は小さい。これは、Z r H による中性子減速により熱群の吸収がかなりの割合に達しており、熱群では手法間の吸収量の傾向が逆となり、共鳴領域での差と相殺するためである。
- (4) Z r H を含むターゲット集合体周囲の炉心燃料の出力密度は、ターゲット集合体に隣接した数 c m の領域で平均出力密度に比べ高くなる。これは、中性子減速によりエネルギー平均の核分裂断面積が大きくなるためである。消滅量がほぼ最大となるターゲット仕様（F P ピン7本、Z r H ピン30本、分散配列）の場合、平均の4～5倍の出力密度を示した。これは、ターゲット集合体内のピン配列に依存し、Z r H ピンが外側に固まっているとこの影響が大きくなる。これを緩和するには、F P ピン割合をさらに増加する、F P ピンを炉心燃料側に配置する等が考えられる。計算手法による違いは大きなものではなかった。
- (5) T c および C e I Ⅲ を照射すると、これらが変換してできる主な核種は安定核種であり、また、変換前と比べて中性子吸収断面積が小さくなる。このため、燃焼によりやや反応度増加効果があるが、37ピン装荷集合体1体を炉心に装荷し、5年間で約-0.1%程度の反応度である。消滅特性は照射により特に変化しないと考えられる。
- (6) ターゲット F P の中性子吸収にともなう発熱を基にして、ターゲット F P

ピンの中心温度を評価した。ターゲットFPピンは基準の23mm径とした。Tcピンの場合、Tc金属の熱伝導度が高く、また、融点も高い(約2170℃)ので中心温度は大幅に余裕がある。一方、CeI₃では、融点が高いこと(約760℃)、熱伝導度が小さい(と予想される。データがないので類似化合物からの類推)ことのため、基準ピン径では中心温度が融点を越える可能性が高い。細径化が必要である。

以上の結果をもとに、消滅効率の良いターゲット仕様としては以下のものが考えられる。

- ・FPピンとZrHピンを混在させる。FPピンはかためずに、できるだけZrHピンの間に一様に分散させた配置とする。
- ・FPピン径は体積比が小さくならない範囲で細径とする。

ただし、炉心内に配置する場合、ZrHに接した炉心燃料の出力ピークの問題がある。これを回避または緩和する一つの方法は、径ブランケット位置へ装荷することである。ただし、軟化したスペクトルによる中性子吸収率の増大の可能性のあるものの、中性子束の減衰も大きいので配置の工夫がかなり必要と考えられる。ZrHの配置の仕方も異なる可能性がある。

今回の検討では、効率的な消滅方法を考えると同時に、非均質性・連続エネルギー効果等、手法による影響にも重きをおいた検討を行った。しかし、消滅方法については、まだ、検討すべき問題が残っている。

径ブランケットでの消滅は炉心特性への影響を小さくするための方策であるが、いかにして効率的に消滅させるかの検討は今後の課題である。

また、炉心内での消滅を行う場合についても、出力分布等、炉心特性に大きな影響を与えないで効率的にするための方法をさらに検討する必要がある。

6. 参考文献

- (1)RSIC COMPUTER CODE COLLECTION, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3B", CCC-200, ORNL Radiation Shielding Information Center(1989).
- (2)M.Nakagawa and K.Tsuchihashi:"SLAROM:A Code for Cell Homogenization Calculation of Fast Reactor", JAERI 1294(1984).
- (3)高野：JENDL3.1に基づく70群ライブラリー、private communication(1991).
- (4)子迫他："FSXLIB-J3：JENDL-3に基づくMCNP用連続エネルギー断面積ライブラリー"、JAERI-M 91-187(1991).
- (5)RSIC COMPUTER CODE COLLECTION,"ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code - Matrix Exponential Method", CCC-371, ORNL Radiation Shielding Information Center(1981).