

高速炉による長半減期核分裂生成物の消滅特性の検討

1996年11月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, 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)1996

高速炉による長半減期核分裂生成物の消滅特性の検討

日向野直美*、 若林利男*

要旨

高レベル廃棄物として処理される核種のうち、 ^{99}Tc 及び ^{129}I はそれぞれ半減期 $2.13 \times 10^5\text{y}$ 、 $1.57 \times 10^7\text{y}$ の長半減期核分裂生成物であり、 10^6 年以上の長期にわたりその毒性が問題となる。この2核種は熱及び共鳴エネルギー領域での中性子吸収断面積が大きいため中性子束の高い高速炉で減速された領域を作り、この位置で安定核種に変換して消滅をはかる方法が考えられる。よって本報告では高速炉内における ^{99}Tc 及び ^{129}I の消滅特性について検討した。

60万kWe級高速炉のブランケット第1層目の位置にFP核種を減速材入りターゲット集合体として装荷することを検討した。これらの核種の消滅には熱-共鳴エネルギー領域での反応を重視するため、連続エネルギーモンテカルロコードであるMVPコードを使用した。MVPコードではターゲット内の形状を忠実にモデル化して解析を行うことが可能であるため、ターゲット仕様やピン仕様による消滅特性への影響を詳細に調べることも可能である。本検討では第1段階として ^{99}Tc に重点をおいて、パラメーターサーベイを行った。この結果をもとに数ケースの体系を選択し ^{129}I の消滅についても検討を行った。

解析結果から減速材種類や減速材の量が中性子スペクトルをかなり変えるため、同等の消滅率を得る場合にも ^{99}Tc の消滅に支配的なエネルギー領域が異なることがわかった。 ^{99}Tc の消滅の場合、エネルギーの一番小さい5.6eVの共鳴ピークの効果が非常に大きいこと、第1共鳴ピーク位置で自己遮蔽効果が大きいために ^{99}Tc 100%の金属で装荷した場合このエネルギーを持つ中性子は ^{99}Tc ピンのごく表層部までしか届かないことがわかった。よって、 ^{99}Tc の体積に対する表面積の割合を高めるために細いFP部分を減速材で巻いた2重の構造を持つDuplexピンやRingピンを用いること、自己遮蔽効果を緩和させる目的で原子数密度を低減させることにより目標として設定した年間の消滅率10%を達成した。商用の100万kWe級PWR1基から生成される ^{99}Tc は年間約24kgであるのに対し、消滅量を重視するケースでは年間40kg程度を処理できる。 ^{129}I の場合はNaIとして装荷するため原子数密度が低減され同一条件下での消滅率は改善される。今回解析を行ったケースでは年間あたりの ^{129}I 消滅量18kgであるが、PWR1基からの ^{129}I の年間生成量が5kg程度と少ないためPWR3基分程度の消滅は容易であり有意な効果が得られるという結果を得た。

炉心特性としては減速材付きのターゲット集合体であるために炉心に隣接した部分でかなり熱化された中性子スペクトル場となり、大きな出力ピークを生じる。燃料領域に装荷する場合よりは改善されたが、何らかの対処が必要である。また、このターゲットの装荷によりNaボイド反応度が15%弱低減された。

* 大洗工学センター 基盤技術開発部 炉心技術開発室

Feasibility Study on Transmutation of Long Lived Fission Products in a Fast Reactor

Naomi Higano* and Toshio Wakabayashi*

ABSTRACT

In spent fuel there are many kinds of long-lived fission products. ^{99}Tc and ^{129}I are contained as fission products in HLW: they have comparatively long half lives and their toxicity remains for more than 1000 years, when the efficacy of the engineered barrier is uncertain.

Fortunately, these two nuclides have large capture cross-sections in the thermal-resonance neutron energy region, so they have a good potential to be changed to stable nuclides in such a neutron flux. We tried to reduce the amount of these nuclides using a fast reactor. The neutron spectrum of a FR is too hard for effective transmutation of these nuclides, but the flux of a FR is much higher than in other commercial reactors, and the hard spectrum of a FR can be changed locally into a moderated spectrum by the addition of some moderator materials. We tried to make a good neutron flux for transmutation of these long lived fission products and to get high transmutation rates.

In this survey, 60 moderated target subassemblies were modeled on the core periphery of a 600MWe fast reactor. Using a continuous energy Monte-Carlo code (MVP), some parametric surveys have been done, examining the effects on transmutation performances of : moderator fraction; pin and subassembly arrangements; moderating materials. The code system allowed us to investigate the effects of self-shielding.

For ^{99}Tc , the best transmutation rate is about 10%/y in the case of Duplex pin -the FP region is surrounded by moderator material-. With the best arrangement to maximize the amount transmuted, we can transmute 40kg ^{99}Tc in a year.

With the present case, the transmutation rate and transmuted amount of ^{129}I are inferior to those of ^{99}Tc . In the most effective case, the ^{129}I transmutation rate is 5.2% and the transmuted amount is 18kg in a year. But the produced amount of ^{129}I from a PWR is small - about 5kg from a 100MWe PWR in a year -, so the transmuted amount of ^{129}I is equal to the output from 3 PWRs.

*Core Physics Research Section, Advanced Technology Division , O-arai Engineering Center, PNC

目次

第1章	緒言	1
第2章	解析手法及び計算条件	4
第3章	集合体内の幾何形状の消滅特性への影響	7
3.1	基準ターゲット集合体の選定	7
3.2	^{99}Tc 及び減速材の割合と消滅特性の関係	8
3.3	ターゲット集合体内における ^{99}Tc ピンの位置と消滅特性の関係	9
第4章	減速材選択の効果	24
4.1	減速材変更による ^{99}Tc 消滅特性の変化	24
4.2	減速材変更によるターゲット集合体内の寄生吸収の変化	25
第5章	特殊ピンの採用の効果	29
5.1	Duplexピンの採用	29
5.2	自己遮蔽効果	30
5.3	リングピンの採用	31
5.4	原子数密度の効果	32
第6章	^{129}I の消滅特性の解析	43
第7章	炉心特性の解析	50
第8章	まとめ	53
第9章	今後の課題	55
	参考文献	57
	謝辞	58
	付録	59

図表リスト

表リスト

表3.1.1	ターゲット集合体仕様 - 集合体内ピン本数の選定 -	10
表3.1.2	ターゲット集合体仕様の変更による消滅特性への影響	10
表3.2.1	ターゲット集合体仕様 - 消滅率に対する減速材量の影響 -	10
表3.2.2	減速材量の消滅特性への影響	10
表3.3.1	ターゲット集合体内の ⁹⁹ Tcピン位置と消滅特性の関係	11
表4.1.1	異なる減速材を用いた場合の消滅特性	26
表5.1.1	Duplexピンを使用した場合の消滅特性	33
表5.2.1	⁹⁹ Tcピン表層部からの深さと消滅特性（吸収反応率）	34
表5.2.2	共鳴ピークエネルギー領域近傍の中性子束と統計誤差	34
表5.3.1	リングピンを用いた場合の消滅特性	35
表5.4.1	原子数密度を変更した場合の消滅特性の変化	35
表6.1	NaI 装荷ケースの仕様	45
表6.2	NaI として装荷した場合の ¹²⁹ Iの消滅特性	45
表7.1	⁹⁹ Tcを装荷した場合の炉心特性	51

図リスト

図1.1	^{99}Tc 及び ^{129}I の断面積図	2
図1.2	^{99}Tc 及び ^{129}I の中性子吸収反応による安定化	3
図2.1	FP消滅炉心の炉心構成及び炉心・燃料仕様(600MWe高速炉)	6
図3.1.1	ターゲット集合体仕様 -集合体内ピン本数の選定-	12
図3.1.2	FP消滅炉心各領域の中性子スペクトル	13
図3.1.3	総本数37ピンターゲット集合体内の 中性子スペクトルと吸収反応率	14
図3.1.4	総本数127ピンターゲット集合体内の 中性子スペクトルと吸収反応率	15
図3.1.5	総本数217ピンターゲット集合体内の 中性子スペクトルと吸収反応率	16
図3.1.6	各ケースの ^{99}Tc ピン内の中性子スペクトルと吸収反応率	17
図3.2.1	ターゲット集合体仕様 -減速材量の消滅率への寄与のサーベイ-	18
図3.2.2	減速材量と消滅率の関係	19
図3.2.3	減速材量の異なるターゲット集合体内の 中性子スペクトルと吸収反応率	20
図3.3.1	ピン配置図 -ターゲット集合体内の ^{99}Tc ピン位置と消滅率の関係-	21
図3.3.2	Case 1 (^{99}Tc 37本)における各領域の 中性子スペクトルと吸収反応率	22
図3.3.3	Case 2 (^{99}Tc 27本)における各領域の 中性子スペクトルと吸収反応率	23
図4.1.1	減速材の異なるターゲット集合体内の 中性子スペクトルと吸収反応率	27
図4.2.1	減速材の異なるケースの領域毎の中性子吸収量の比較	28
図5.1.1	Duplex ピンのモデル	36
図5.1.2	消滅率へのDuplexピン採用の効果 -ピン径と消滅率との関係-	36
図5.2.1	HFRで行われた ^{99}Tc 照射実験結果 - ^{100}Ru 生成量評価-	37
図5.2.2	自己遮蔽効果を確認するためのリングモデル	37
図5.2.3	^{99}Tc ピン表層部からの深さと中性子スペクトル及び 吸収反応率 (Duplex127本)	38
図5.2.4	^{99}Tc 共鳴ピークエネルギー領域(3.297eV~8.315eV) の自己遮蔽による中性子束の低下	39
図5.3.1	リングピンのモデル	40

図5.4.1	原子数密度を変更した場合の ⁹⁹ Tcピン表層部からの距離と 中性子スペクトル及び吸収反応率	41
図5.4.2	原子数密度を1/10にした場合の ⁹⁹ Tc共鳴ピークエネルギー領域 (3.297eV~8.315eV)の自己遮蔽による中性子束の低下	42
図6.1	ターゲット集合体内各領域の中性子スペクトルと吸収反応率 (総ピン本数127、NaIピン本数27、BeO減速)	46
図6.2	ターゲット集合体内各領域の中性子スペクトルと吸収反応率 (総ピン本数127、NaIピン本数27、ZrH _{1.7} 減速)	47
図6.3	ターゲット集合体内各領域の中性子スペクトルと吸収反応率 (総ピン本数127、Duplex、NaI径2.0mm、BeO減速)	48
図6.4	NaIピン表層からの深さと中性子吸収反応率	49
図6.5	NaIピンの炉心からの距離と ¹²⁹ Iの中性子吸収反応率の関係	49
図7.1	ターゲット集合体を装荷した炉心の出力分布	52
付録2-1	⁹⁹ Tcの吸収反応で生成される核種の断面積	60
付録2-2	¹²⁹ Iの吸収反応で生成される核種の断面積	61

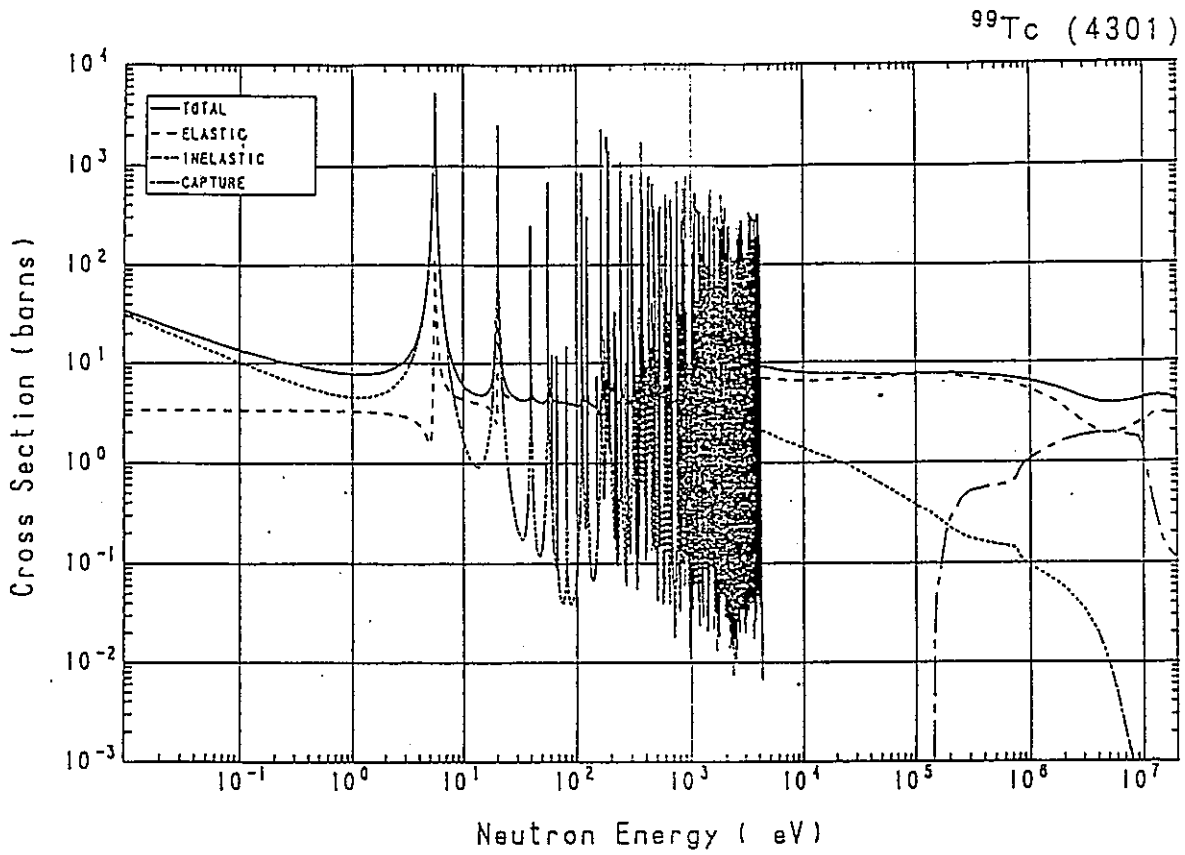
第1章 緒言

高レベル廃棄物としてガラス固化して処分される核種のうち、 ^{99}Tc 及び ^{129}I はそれぞれ $2.13 \times 10^5 \text{y}$ 、 $1.57 \times 10^7 \text{y}$ の半減期を持つ⁽¹⁾長半減期の核分裂生成物である。これらの核種の軽水炉中の ^{235}U からの累積核分裂収率はそれぞれ6.1%、0.7%程度⁽²⁾であり、商用の100万kWe級(3410MWt) PWRからは年間23.4kg、5.0kg程度が生成される⁽³⁾。確率的にはごくわずかではあるものの、水に溶ける性質を持っており、地層処分の際長年月を経る間に TcO_4^- 等のイオンのかたちで障壁から溶け出すことも懸念される。また ^{129}I は固定化して地層処分を行うにはいくつかの問題を持っている⁽⁴⁾。よって、これらの核種は最終処分を行う前に何らかの方法で安定な核種へ変換することが望まれる。

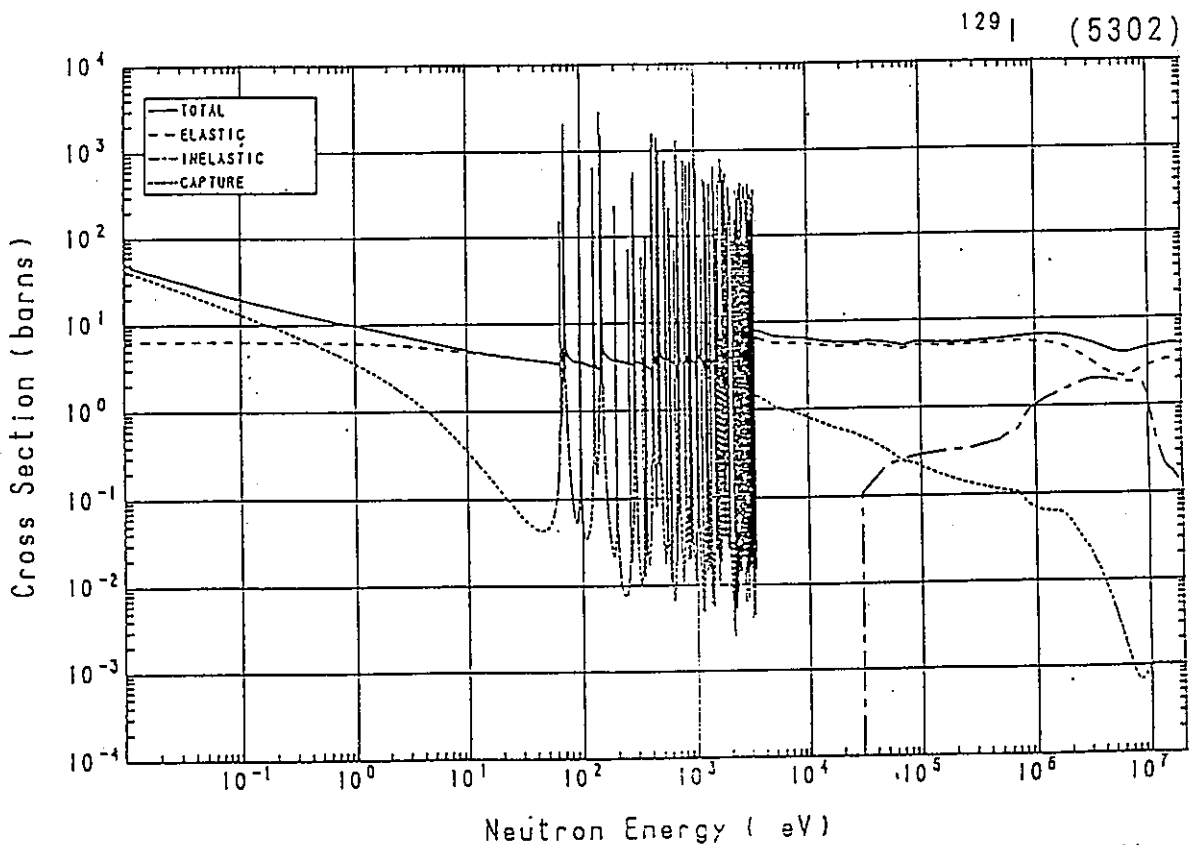
これらの核種を中性子フラックスの高い高速炉での吸収反応を用い安定核種へ変換して消滅することを検討した。吸収反応を利用して消滅をはかる場合には低エネルギーの中性子が効果的であるため、減速材入りのターゲット集合体を使用する。

^{99}Tc 及び ^{129}I については、図1.1に示すように熱領域及び共鳴領域での中性子吸収断面積が比較的大きく、 ^{99}Tc 及び ^{129}I は中性子を吸収した後図1.2に示す反応で安定核に至る。さらに ^{99}Tc や ^{129}I が数回中性子吸収を繰り返すことによって生成される核種も安定核である(核変換後の安定核の断面積について巻末の付録に参考として掲載した)。そこで、高速炉の高い中性子束を利用し、減速材の装荷によって中性子吸収を起こすために効果的なエネルギースペクトルをつくりだして安定核種へと核変換することが有効と考えられる。

本件では ^{99}Tc の消滅率10%/yを得ることを第1目標とし、さらにこの条件下でより多くの消滅量を得る方法を検討した。



Unresolved Resonance Region : 4.219keV ~ 100keV



Unresolved Resonance Region : 3.391keV ~ 100keV

図1.1 ^{99}Tc 及び ^{129}I の断面積図 (JENDL-3.1)

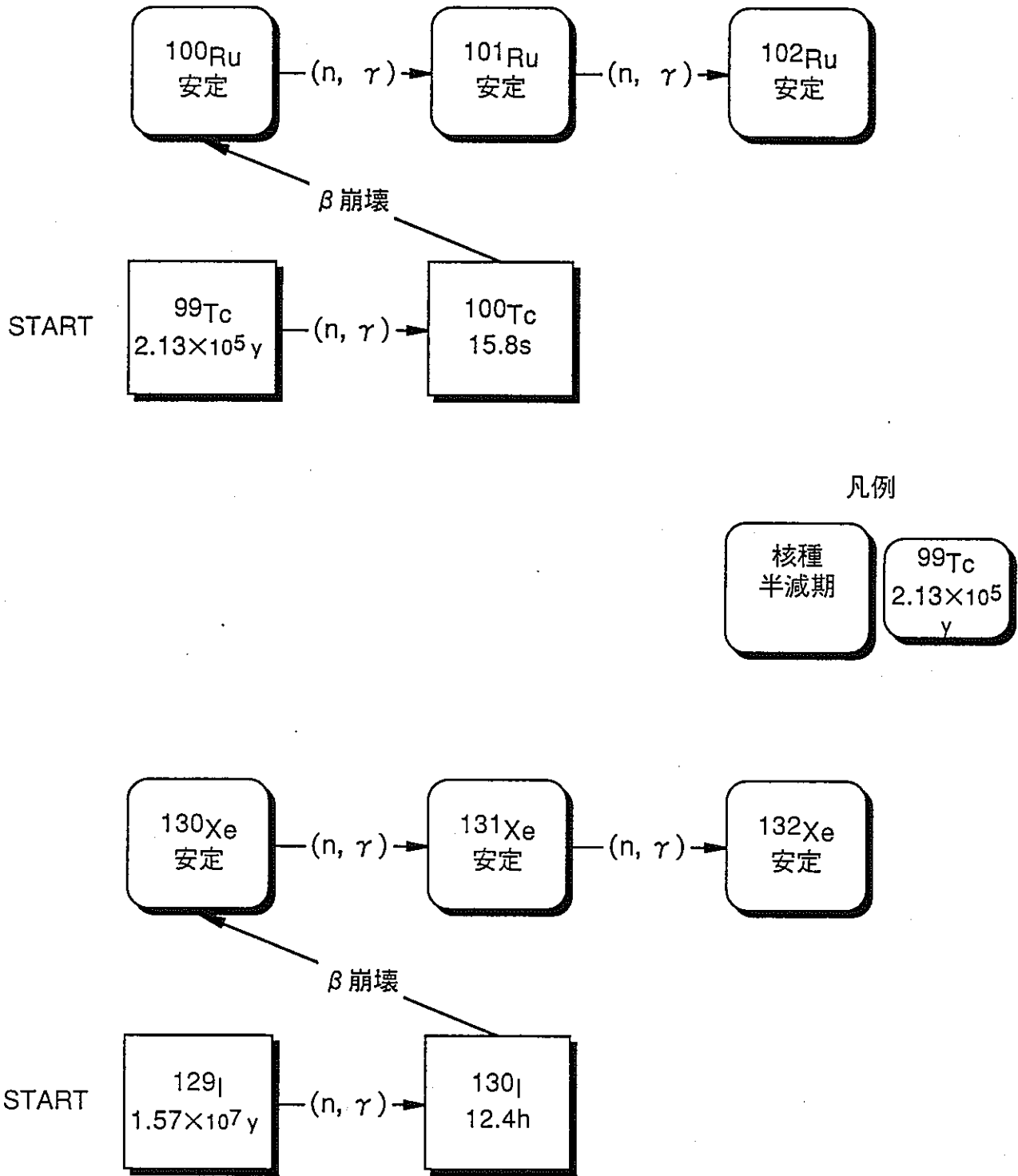


図1.2 99Tc及び129Iの中性子吸収反応による安定化

第2章 解析手法及び計算条件

決定論による予備的な検討を行って消滅率、消滅量をともに向上させることは困難であることがわかった。よって本検討では消滅率をあげる方法に着目して検討をすすめる。現時点では米国の解析結果でFFTFを対象炉心として消滅率年10%程度があげられているため⁽⁵⁾、年間の消滅率で10%を達成することを目標とする。

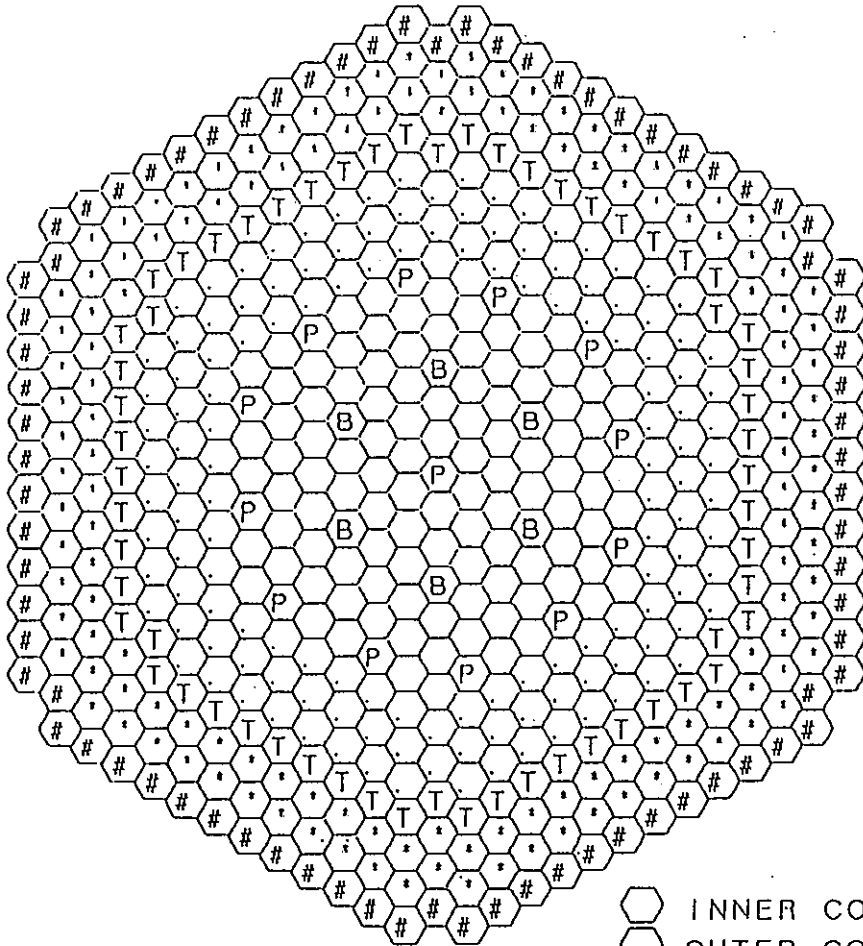
ターゲット核種の消滅特性のみに着眼すればより高い中性子束の得られる燃料領域部分への装荷も効果的であると考えられるが、本検討では60万kWeの炉心の径ブランケット1層目にあたる60体をターゲット集合体とした。径ブランケット部に装荷する目的は、炉心核特性に与える影響を最小限にすること、同一の列に多くのターゲット集合体を装荷し、ターゲット装荷量を増やすことにある。ただし、炉心中心から離れることで高速炉の持つ高い中性子フラックスが小さくなるというデメリットがある。この対策としてはターゲット集合体の再装荷等による照射期間の延長や、内側の列への装荷も考えられる。

ここで注目したい反応は熱-共鳴領域での吸収反応であるため本検討では連続エネルギーのライブラリを持つMVPコード⁽⁶⁾を使用した。MVPコードのライブラリは連続エネルギーモンテカルロコードの中でも非分離共鳴領域を取り扱っていることから適当である。ただし、現段階で公開されているMVPコードは燃焼計算を扱っていないため、初期組成の燃料で構成された炉心における反応率から消滅率を算出した。本検討では第1段階としてより吸収反応の大きな⁹⁹Tcの消滅に主眼をおいて解析を行った。炉心・燃料仕様は図2.1に示す通りであり、ターゲット仕様は各項目毎に記す。

解析条件

対象核種	⁹⁹ Tc : ⁹⁹ Tc-Metal (⁹⁹ Tc 100%、半減期 2.13×10 ⁵ y) 密度 11.5g/cc m.p.2430±30K ⁽⁷⁾
	¹²⁹ I : NaI (ヨウ素同位体組成 (軽水炉取り出し)) I-127 23.5% (stable) I-129 76.5% (半減期 1.57×10 ⁷ y) 密度 3.667g/cc m.p. 934K
減速材	ZrH _{1.7} , BeO, Al ₂ O ₃ , SiC
炉心・燃料仕様	600MWe高速炉 (図2.1参照)
燃料組成	600MWe高速炉炉心初期組成 (現状のMVPコードでは燃焼を考慮した経過を追うことができないため、初期組成に統一して計算を行った。本検討の目的に対してはここで初期組成を用いることは影響しない。ターゲット集合体以外はスミアして計算を実施した。 固有値はターゲットを装荷する影響でばらつきがあるが、0.995前後、統計誤差は大きいもので0.05%であった。)

使用コード	連続エネルギーモンテカルロコード MVP
体系温度	燃料核種 1500K, 構造材及びターゲット核種 300K (モンテカルロコードでは温度毎に断面積が作成されており、一通りの核種について揃っている300Kのライブラリの使用を検討したが、メモリの容量の関係上燃料核種について1500Kのライブラリを使用した。1500 Kのデータを用いることでドップラー効果のために共鳴領域のデータ量を小さくできるためである。消滅率に対してこの効果が小さいことは確認した。)
断面積ライブラリ	JENDL-3.2 (断面積図は公開文献よりJENDL3.1の図を引用。図1.1)
ヒストリー数	1,000,000histories
消滅率の誤差 (1σ)	吸収反応率の誤差で1%程度。



- INNER CORE 108
- OUTER CORE 138
- PRIMARY CR 13
- BACKUP CR 6
- TARGET ASSEMBLY 60
- SUS SHIELD 138
- B4C SHIELD 78

炉心仕様

出力	1600MWth
炉心高さ	100cm
軸方向 ブランケット	35cm
炉心直径	275cm
燃料	MOX
Pu富化度 (内/外)	15.30/18.90
Pu 組成 8/9/0/1/2	3/53/25/12/7
集合体ピッチ	160.7mm

体積比 (ターゲット以外はスミア)

	Fuel	Gap	SUS	Sodium	Absorber
Core	38.2	5.1	22.4	34.3	-
PCR	-	5.2	15.6	45.6	33.6
BCR	-	5.2	15.6	15.6	33.6
Shielding	-	-	80.0	20.0	-

図2.1 FP消滅炉心の炉心構成及び炉心・燃料仕様(600MWe高速炉)

第3章 集合体内の幾何形状の消滅特性への影響

決定論による予備解析から、減速材量を多くするほど消滅率は良くなるもののFP装荷量が少なくなるために消滅量が減少してしまうという結果が得られた。ターゲットとなるFPと減速材の量のバランスをとることが望まれる。本章ではターゲット集合体の仕様と減速材量の与える影響を調査した。減速材は減速能が大きいこと及び実用性の観点から全て $ZrH_{1.7}$ を使用した。ターゲットとしたFP核種は ^{99}Tc である。

3.1 基準ターゲット集合体の選定

以降のパラメーターサーベイに使用するターゲット集合体の基本仕様を決定するために、3種の集合体を用いて消滅特性を比較した。

1) 解析条件

太径の37本ピンの集合体、60万kWeクラスの燃料・ブランケット集合体仕様を参考にした217本、127本ピンの集合体を選択して消滅特性の比較を行った。それぞれターゲット内のピン体積に占める ^{99}Tc の体積が3割程度になるように ^{99}Tc ピンの本数を決定し、図3.1.1に示すようにターゲット内に均一に分散するよう配置した。表3.1.1に各集合体の仕様を示す。また、217本ピンのケースと減速材量をそろえた127本ピンのケースを参考に示す。

2) 解析結果

本概念を用いたFP燃焼炉心の代表的なケースの中性子スペクトルとして総本数127本のケースのスペクトルを図3.1.2に示す。

表3.1.2に消滅特性を、図3.1.3～図3.1.5に各ケースのFP領域の中性子スペクトルと吸収反応率を示す。

吸収反応率はどのケースも消滅（吸収反応）に大きく寄与するのは5.6eV付近の ^{99}Tc の大きな共鳴ピーク部分であることがわかる。また、図3.1.6には3つのケースのFP領域の中性子スペクトルと吸収反応率を比較した。図3.1.6よりケース毎の消滅量の違いは主に共鳴ピーク位置での吸収反応率の違いに起因することがわかる。

これら3つのケースでは消滅率の大きな順に217本、127本、37本の集合体ケースであり、それぞれ消滅率は2.29%、1.83%、1.20%であった。ただし、 ^{99}Tc の装荷量自体の違いがあるため、消滅量にすると順に年間41.0kg、41.1kg、36.2kgであった。

減速材量を統一した127本と217本のケースから、127本ピンの方が ^{99}Tc ピン径が大きくなるため消滅率が落ちることがわかる。しかし、127本ピンに ^{99}Tc ピンを52本装荷して装荷量が多いため、消滅量としては46.7kgとなり本報告書で用いた解析ケースの中で一番多くなった。

各ケースの中性子スペクトルが極端に変わることもなかったため、これら3ケースから本検討で使用するターゲットの基本仕様を決定した。 ^{99}Tc 装荷量を調整するためにピン本数の自由度が十分であること、直径1cm程度のため特殊ピンを検討する際にピンの太さが十分にあることから127本ケースを選定して以降パラメーターサーベイを行うこととした。

3.2 ^{99}Tc 及び減速材の割合と消滅特性の関係

減速材量により消滅率が変わることが考えられるため、 ^{99}Tc ピンと $\text{ZrH}_{1.7}$ ピンの本数を変え、減速材量の効果を調べた。

1) 解析条件

ピン本数127本のターゲット集合体を選択して減速材の占める本数を変え、 ^{99}Tc の消滅特性の変化を調べた。表3.2.1.及び図3.2.1にそのターゲット集合体の仕様を示す。減速材の多い方が消滅率は改善される傾向となるが、減速材を増やすことは全体としての ^{99}Tc 装荷量を減らすことに繋がる。 ^{99}Tc ピン本数が52本のケースは前節の217本のターゲット集合体のモデルと減速材量が同等になるように設定した。また、 ^{99}Tc ピン本数22本のケースは第5章で行う特殊ピンのケースと比較するため、 ^{99}Tc と減速材量の調整が必要となり、ピン半径の若干細いものを用いた。

2) 解析結果

表3.2.2及び図3.2.2に各ケースの消滅特性をまとめる。各ケースの ^{99}Tc ピン内での中性子スペクトルと吸収反応率を図3.2.3に示す。

図3.2.2に示すように、減速材量の増加にほぼ比例して消滅率は増大していく。しかし消滅率の向上よりも ^{99}Tc 装荷量の減少の方が大きいため、減速材を増やすと消滅量は減少した。4ケースのうち減速材量の調整のために直径を1mm小さくした ^{99}Tc ピン22本のケースのみ、他より消滅率が良くなった。ただしピン径を細くしたことによって消滅量は他のケースと比較して減少してしまう。

図3.2.3の吸収反応率のグラフから減速材量を増やすことにより中性子のスペクトルが軟化していくことが確認でき、主に5.6eVの共鳴ピークエネルギー領域の中性子が消滅率の相違に影響していることがわかる。

52本の ^{99}Tc ピンを持つケースの消滅率は1.48%/yであり、同等の減速材量を持つ前節の217ピン集合体ケースの2.29%/yよりも悪い。これはピン径が太くなった効果によるものと考えられる。

3.3 ターゲット集合体内における⁹⁹Tcピンの位置と消滅特性の関係

ターゲット集合体内部では減速材を入れているために中性子スペクトルが軟化されるが、ターゲット集合体中のピン配置の選択によってはピンの最外周にTcピンが配置されるケースもあり、この場合炉心に隣接したTcピンには硬いスペクトルの中性子が直接入る。このため炉心に隣接したターゲットピンでは消滅特性や損傷の程度が異なることが予測される。そこで、ピンの位置による中性子スペクトル及び中性子束の変化と消滅特性の違いを知るための解析を行った。

1) 解析条件

ピン本数127本の集合体で⁹⁹Tcピンを37本、27本持つケースを選択してターゲット集合体内のピン位置による消滅特性の違いを検討した。それぞれ、Case 1, Case 2 とした。統計をとるピン本数が少ない場合は誤差が増大していくことが懸念されるため、ターゲットの中を図3.3.1に示すように炉心からの距離でそれぞれ4領域、3領域に分割し、領域毎の消滅特性を比較した。炉心に近い順で各領域に番号をつけた。特に、Case1の⁹⁹Tcピン37本のケースの一番炉心側の領域はターゲット内の最外周に⁹⁹Tcピンがあり炉心からの硬いスペクトルを持った中性子が直接入ってくるため、他の部分と消滅特性が変わることが予測される。

2) 解析結果

表3.3.1に消滅特性を示す。消滅率は炉心燃料に隣接したCase1の第1領域を除くと炉心からの距離に従って低下していく。Case1の第1領域は第2領域とほぼ変わらぬ消滅率であった。

それぞれの領域の中性子スペクトルを図3.3.2、図3.3.3に示す。炉心に接したCase1の第1領域を除き炉心からの距離が遠くなるに従って中性子束が徐々に小さくなっていくが、そのスペクトルの形はさほど変わらなかった。

Case1の第1領域は炉心燃料ほどではないものの他よりも硬い中性子スペクトルを持っている。1keVよりも高速の領域では第1領域の中性子束が他の領域よりも大きい。低いエネルギー領域の中性子束では第2領域と優劣が逆転する。これによってCase1では第1、第2領域では吸収反応を起こしていたエネルギー領域が異なるものの全体としての消滅率がほぼ同じになっていたということがわかる。Case1では各領域の⁹⁹Tcピンの本数をほぼ等しくして分割したために図3.3.1に示したように第1領域に減速材を通して軟化した中性子の流れ込むピンが1本含まれる。よって実際には炉心からの中性子が直接入ったピンのみに着目すればより硬いスペクトルであると考えられ、炉心に隣接したピンでは装荷期間が長くなると他のターゲットの入ったピンに比べて消滅率がおちることや高速中性子による損傷の程度が大きくなることが考えられる。

表3.1.1 ターゲット集合体仕様 - 集合体内ピン本数の選定 -

総ピン本数	ピン半径(cm)	被覆管厚 (cm)	Tcピン本数 (ZrH _{1.7} 本数)	V _{Tc} /V _{pin}	炉心あたりの 減速材装荷量 (cc)
37	1.075	0.1	12 (25)	0.32	545000
127	0.530	0.045	37 (90)	0.29	477000
217	0.368	0.048	61(156)	0.28	398000
127	0.530	0.045	52 (75)	0.41	397000

表3.1.2 ターゲット集合体仕様の変更による消滅特性への影響

Tcピン本数 / 総ピン本数	ピン半径 (cm)	減速材量 (cc)	Tc装荷量 (kg)	消滅率 (%/y) (吸収反応の誤 差 1σ %)	消滅量 (kg/y)
12 / 37	1.075	545000	3000	1.20%(0.428)	36.2
37 / 127	0.530	477000	2250	1.83%(0.529)	41.1
61 / 217	0.368	398000	1790	2.29%(0.457)	41.0
52 / 127	0.530	397000	1790	1.48%(0.568)	46.9

表3.2.1 ターゲット集合体仕様
- 消滅率に対する減速材量の影響 -

Tcピン本 数	ピン半径 (cm)	減速材体積 (cc)	Tc 体積(cc)	V _{Tc} / V _{pin}	Tc装荷量(kg)
52	0.53	397000	275000	0.693	3170
37	0.53	477000	196000	0.411	2250
27	0.53	529000	143000	0.270	1640
22	0.48	577000	95740	0.166	1100

表3.2.2 減速材量の消滅特性への影響

Tcピン本 数	ピン半径 (cm)	減速材体積 (cc)	Tc装荷量 (kg)	消滅率 (%/y) (吸収反応の 誤差1σ %)	消滅量(kg/y)
52	0.53	397000	3170	1.48 (0.586)	47.0
37	0.53	477000	2250	1.83 (0.529)	41.1
27	0.53	529000	1640	2.09 (0.554)	34.4
22	0.48	577000	1100	2.47 (0.619)	27.2

表3.3.1 ターゲット集合体内の⁹⁹Tcピン位置
と消滅特性の関係

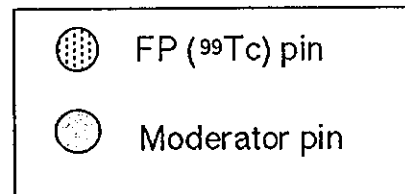
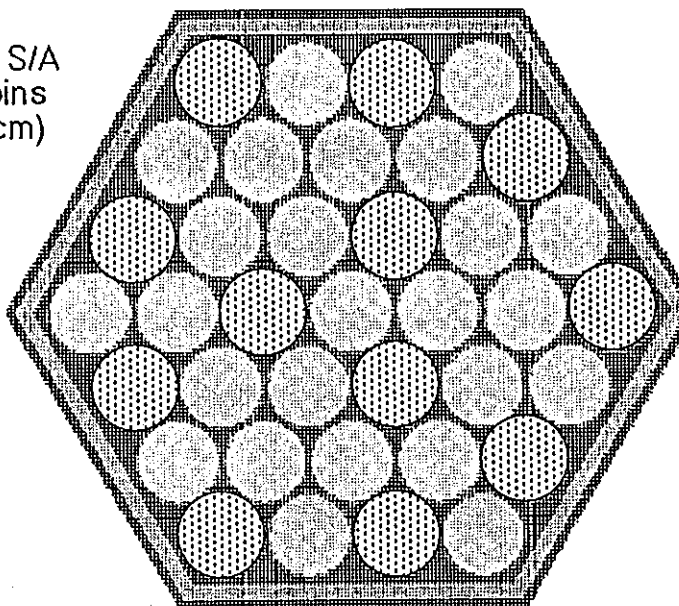
1) ケース1 (127ピン中Tcピン37本)

領域番号 (ピン本数)	消滅率(%/y) (吸収反応の 誤差1σ %)	Tc装荷量 (kg)	Tc消滅量 (kg/y)
1(8)	2.35(0.749)	487	11.4
2(9)	2.39(0.869)	548	13.1
3(10)	1.72(1.067)	608	10.5
4(10)	1.01(1.489)	608	6.17
Total (37)	1.83(0.529)	2252	41.1

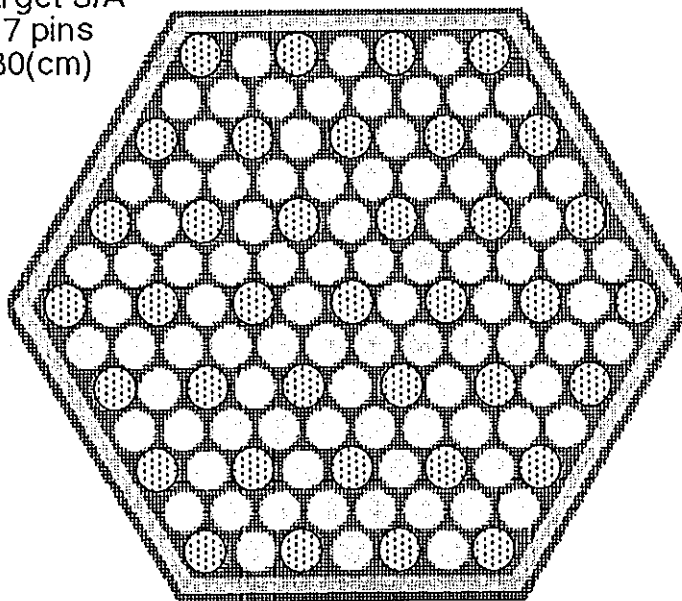
2) ケース2 (127ピン中Tcピン27本)

領域番号 (ピン本数)	消滅率(%/y) (吸収反応の 誤差1σ %)	Tc装荷量 (kg)	Tc消滅量 (kg/y)
1(9)	2.93(0.601)	548	16.1
2(9)	2.08(0.783)	548	11.4
3(9)	1.38(0.858)	548	7.56
Total (27)	2.13(0.554)	1644	35.0

37 pins Target S/A
 Tc pins = 12 pins
 $r_{pin} = 1.075(\text{cm})$



127 pins Target S/A
 Tc pins = 37 pins
 $r_{pin} = 0.530(\text{cm})$



217 pins Target S/A
 Tc pins = 61 pins
 $r_{pin} = 0.368(\text{cm})$

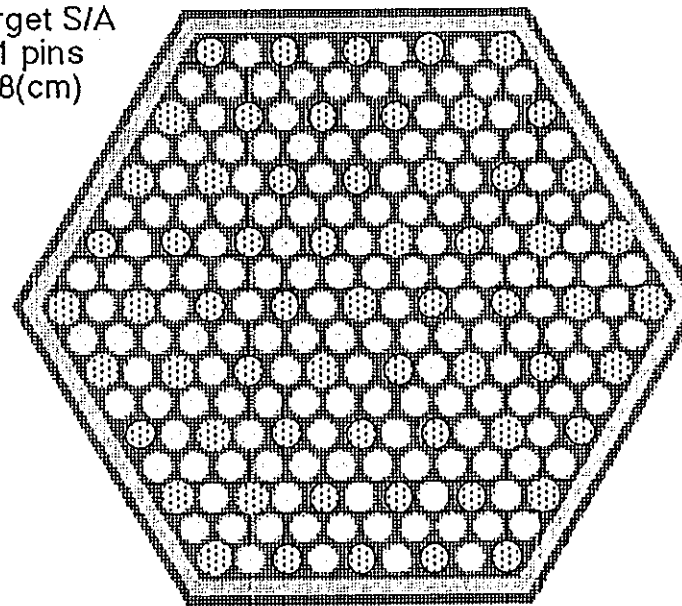


図3.1.1 ターゲット集合体仕様 - 集合体内ピン本数の選定 -

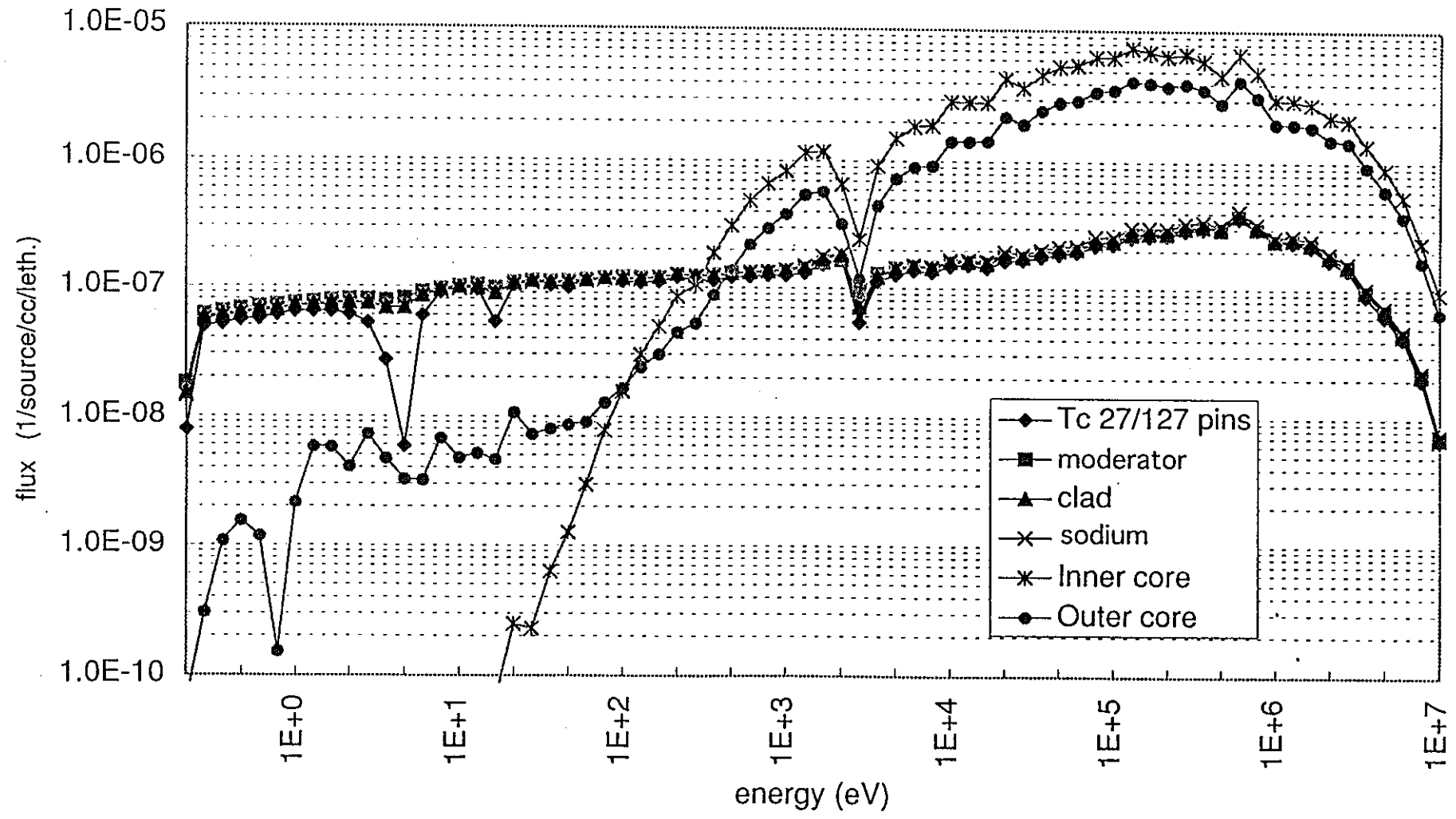


図3.1.2 FP消滅炉心各領域の中性子スペクトル (ZrH_{1.7}減速ケース)

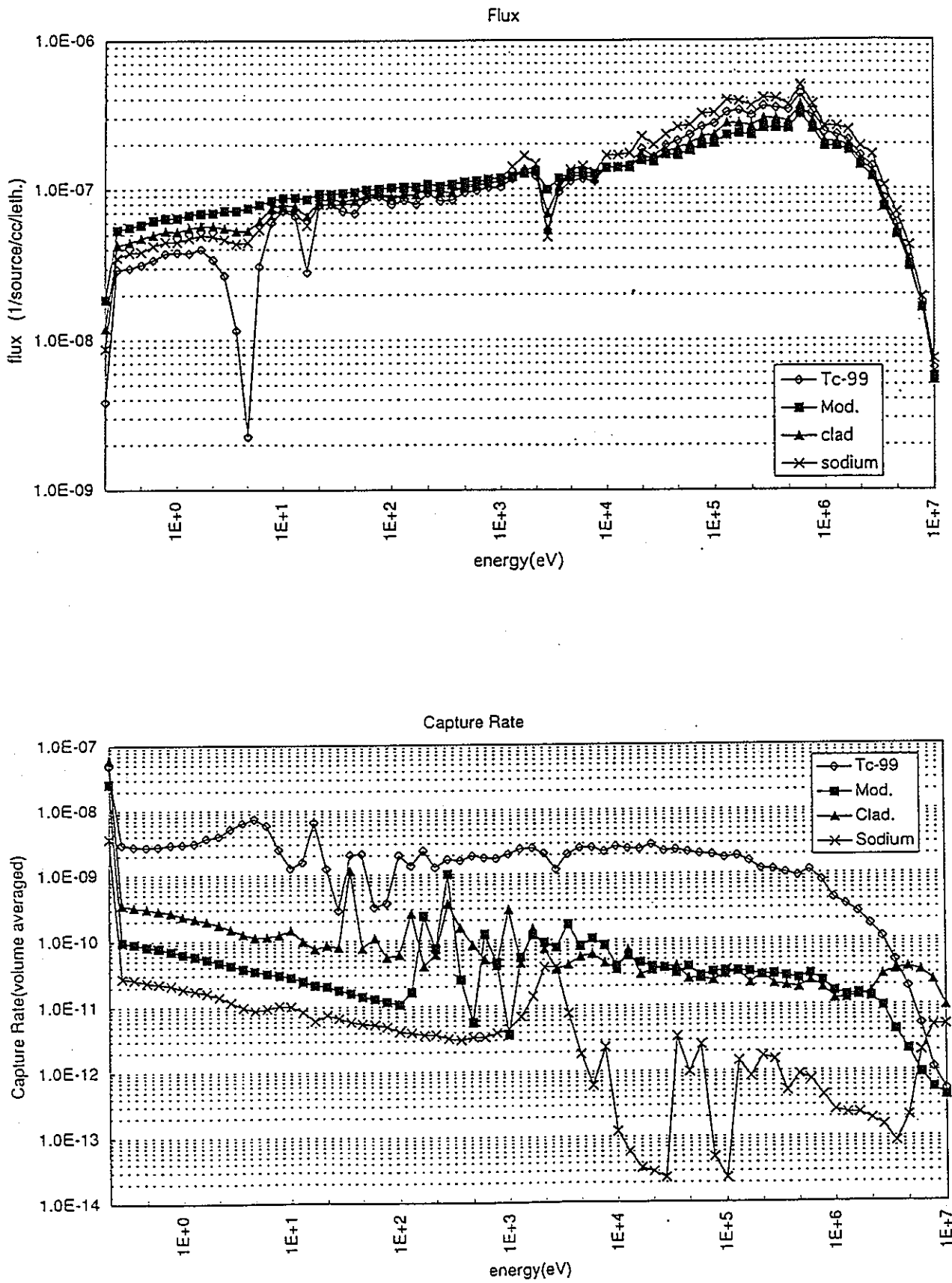


図3.1.3 総本数37ピンターゲット集合体内の
中性子スペクトルと吸収反応率

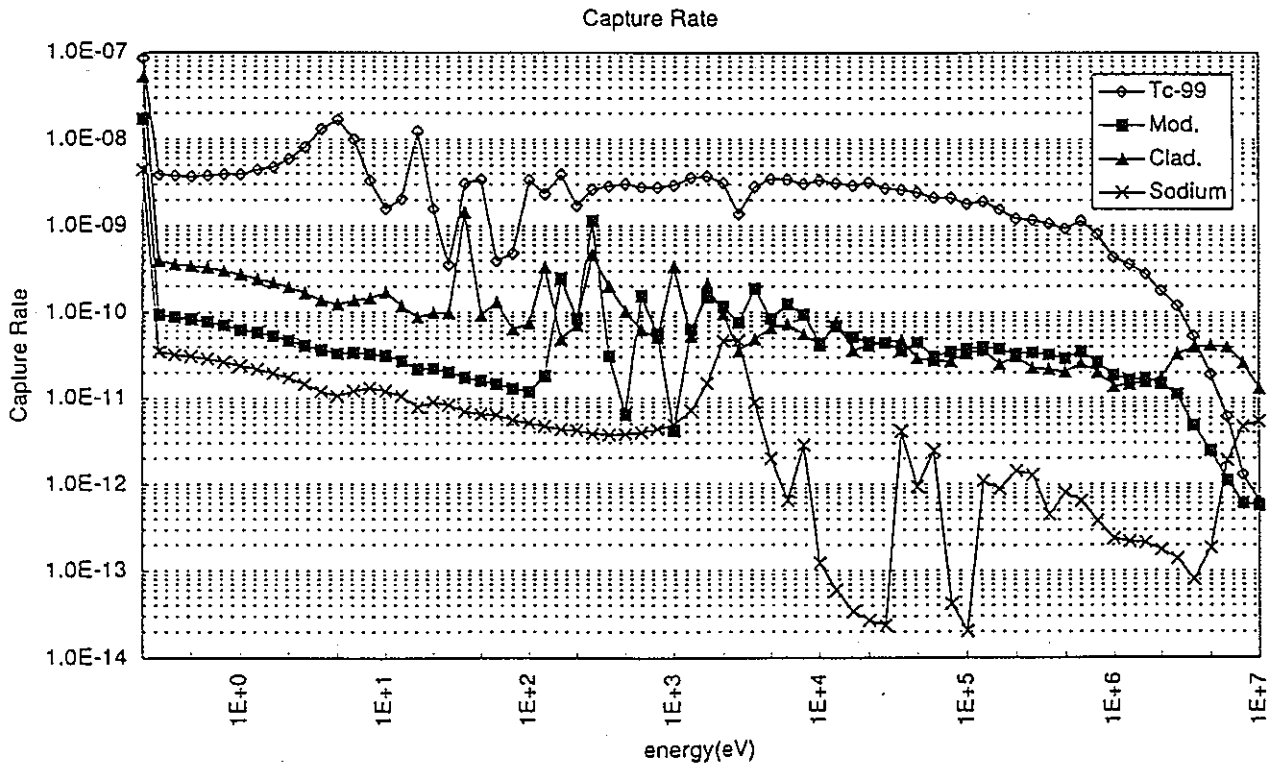
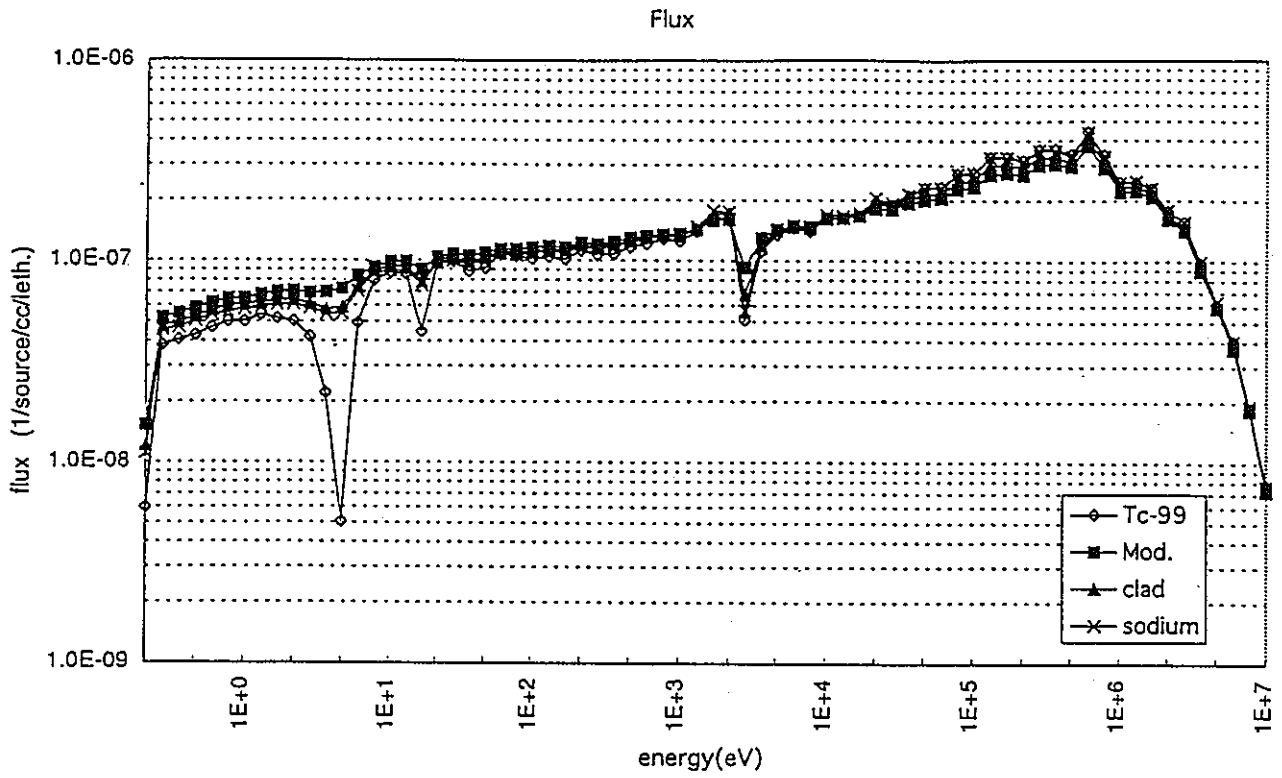


図3.1.4 総本数127ピンターゲット集合体内の
中性子スペクトルと吸収反応率

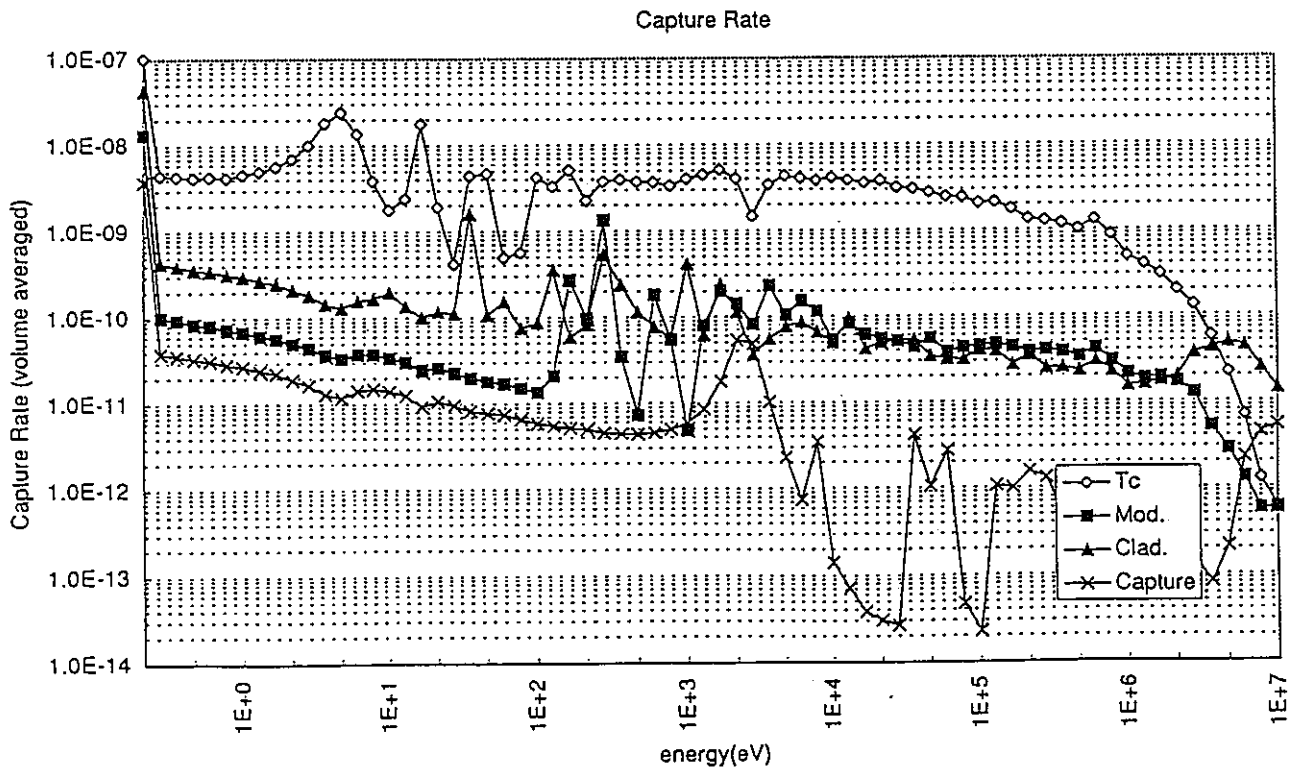
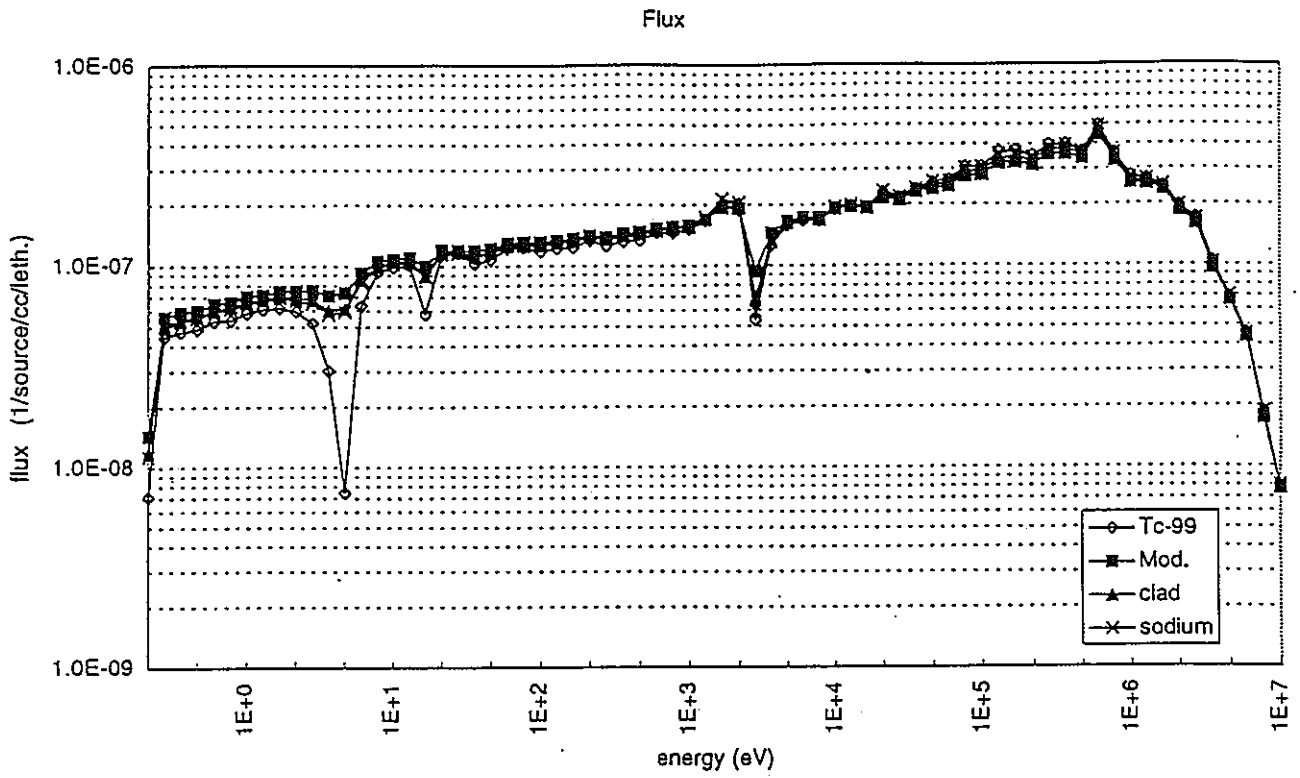


図3.1.5 総本数217ピンターゲット集合体内の
中性子スペクトルと吸収反応率

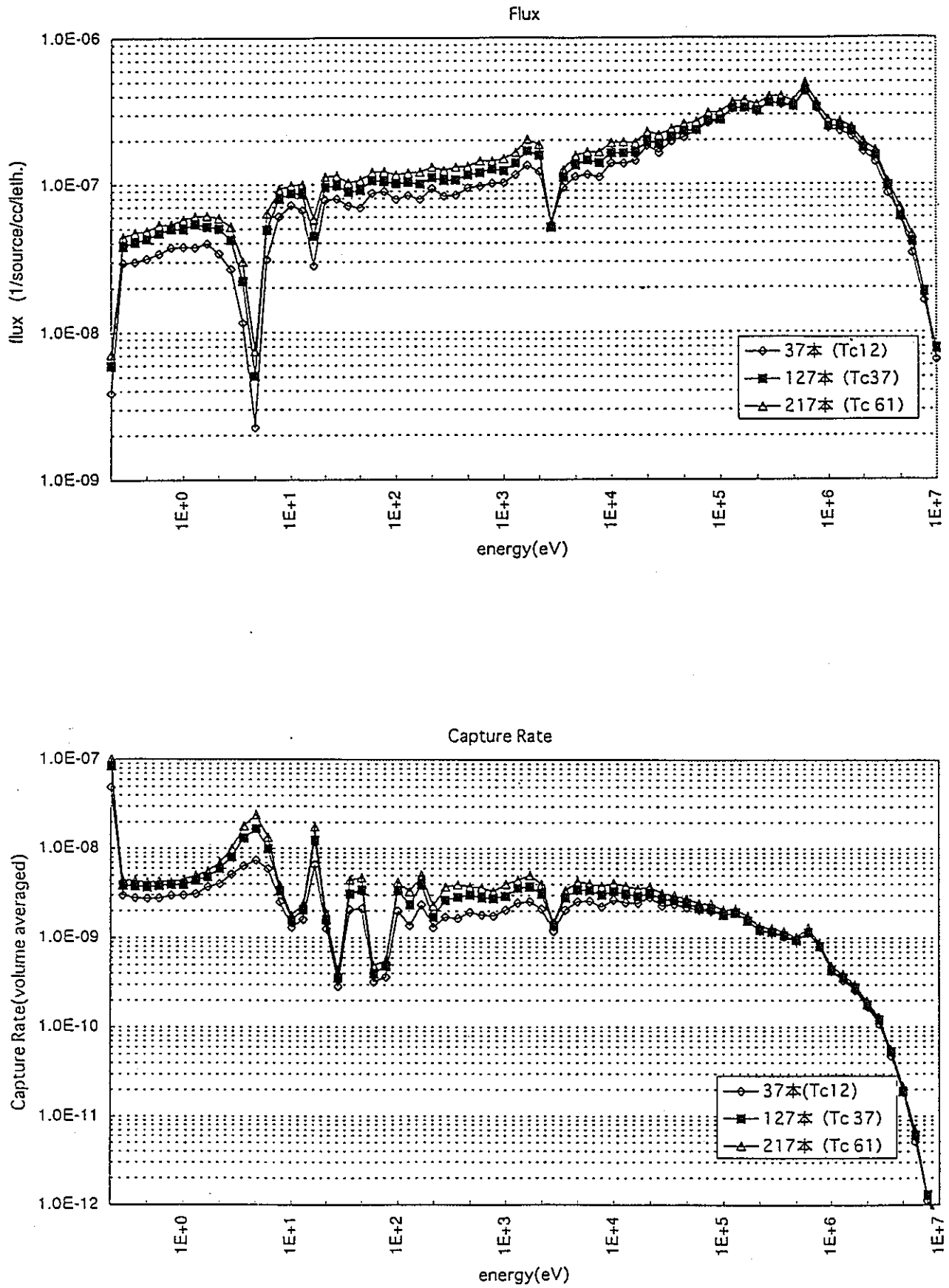
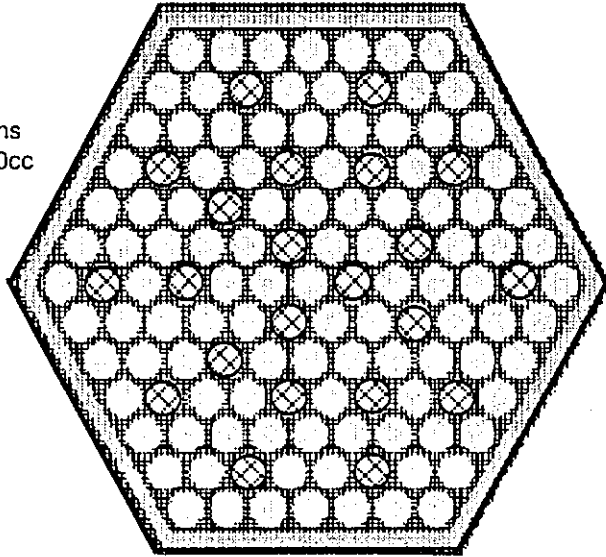
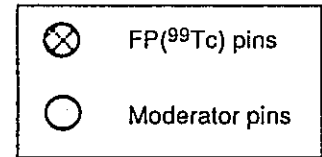
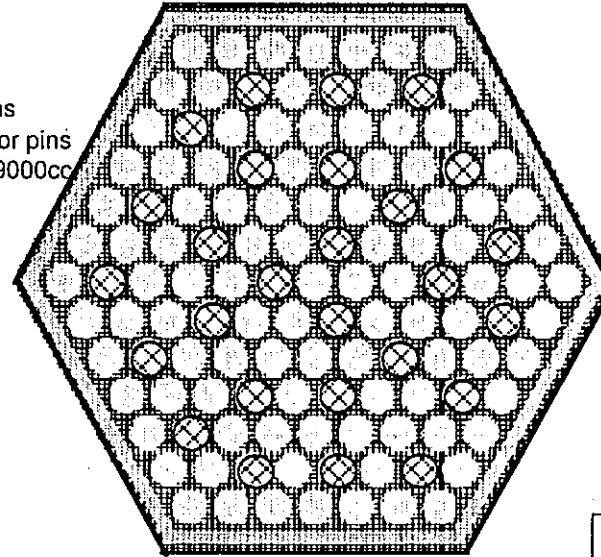


図3.1.6 各ケースの⁹⁹Tcピン内の中性子スペクトルと吸収反応率

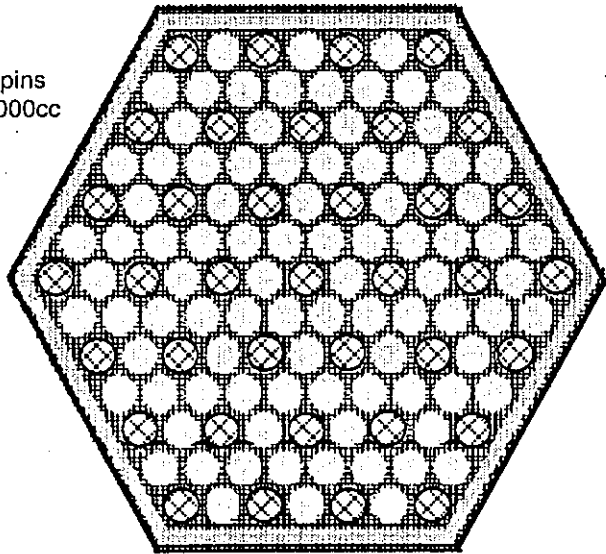
22 FP pins
105 moderator pins
Vmod = 577000cc



27 FP pins
100 moderator pins
Vmod = 529000cc



37 FP pins
90 moderator pins
Vmod = 477000cc



52 FP pins
75 moderator pins
Vmod = 397000cc

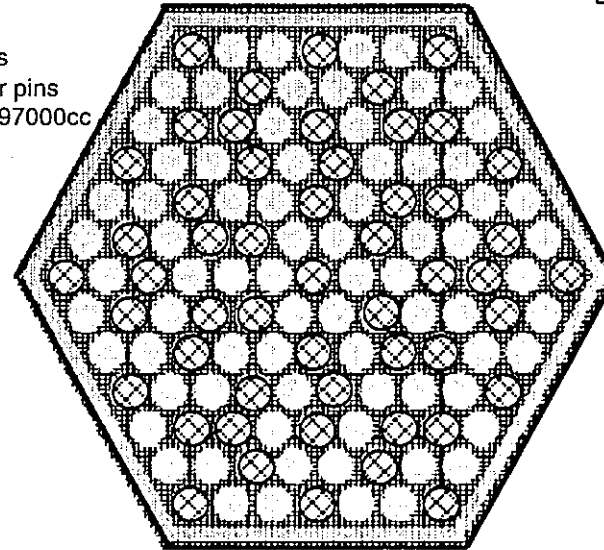


図. 3.2.1 ターゲット集合体仕様 - 減速材量の消滅率への寄与のサーベイ -

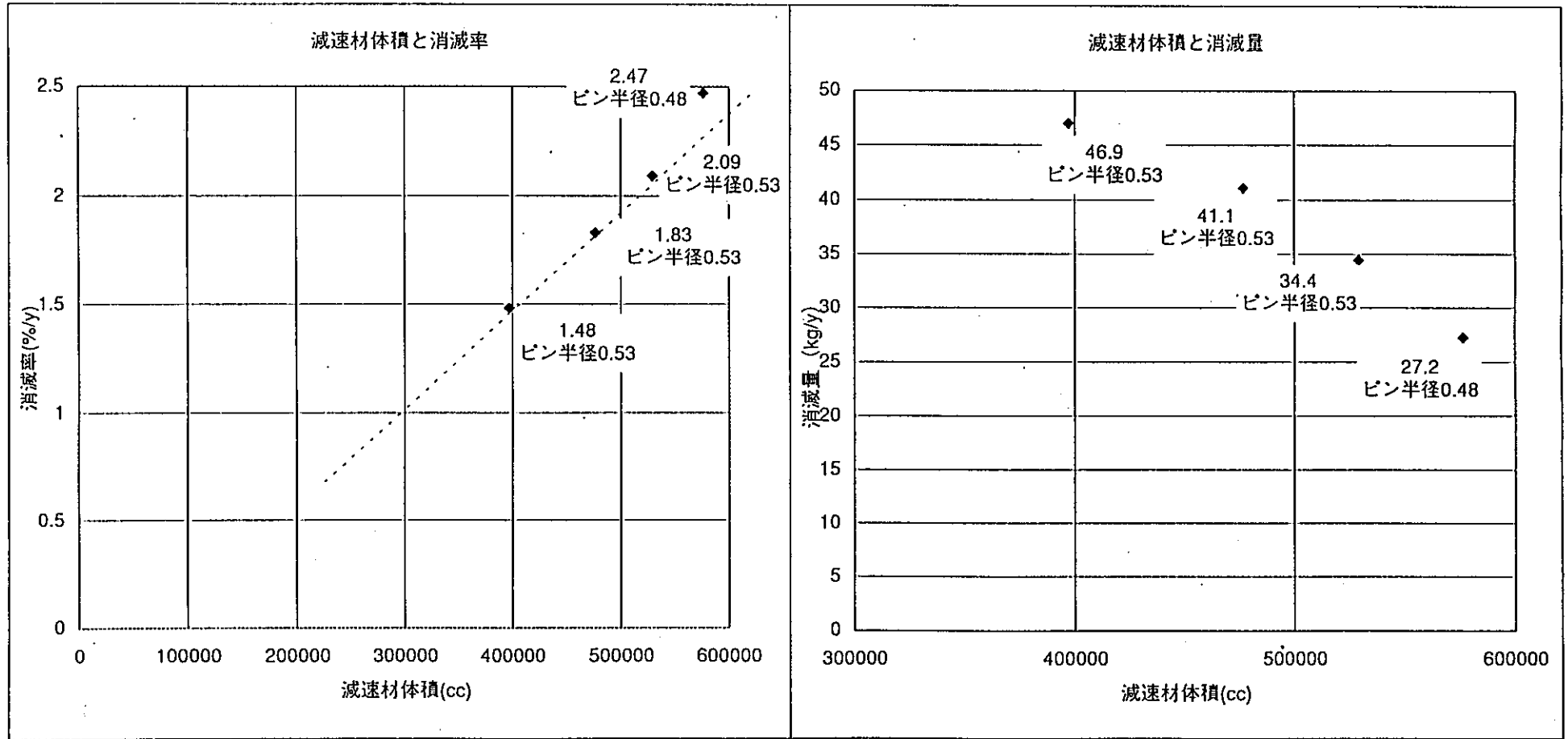


図3.2.2 減速材量と消滅率の関係

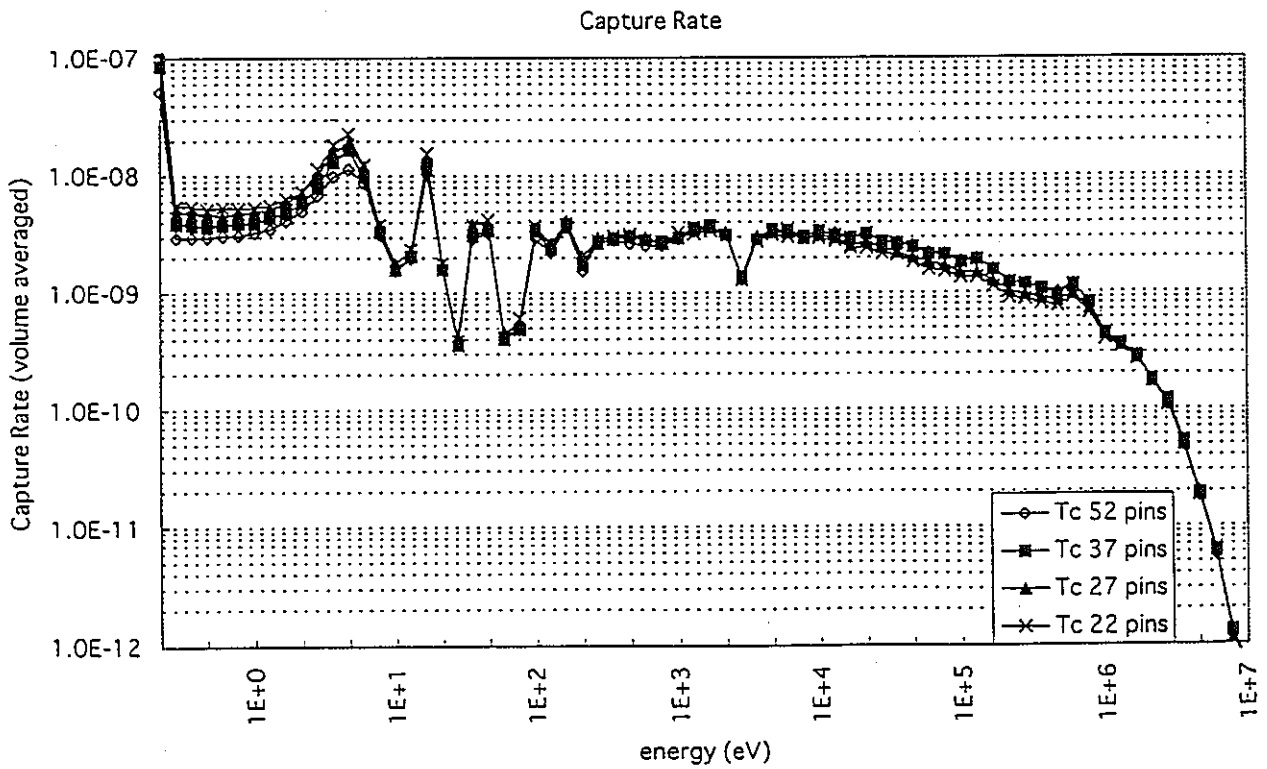
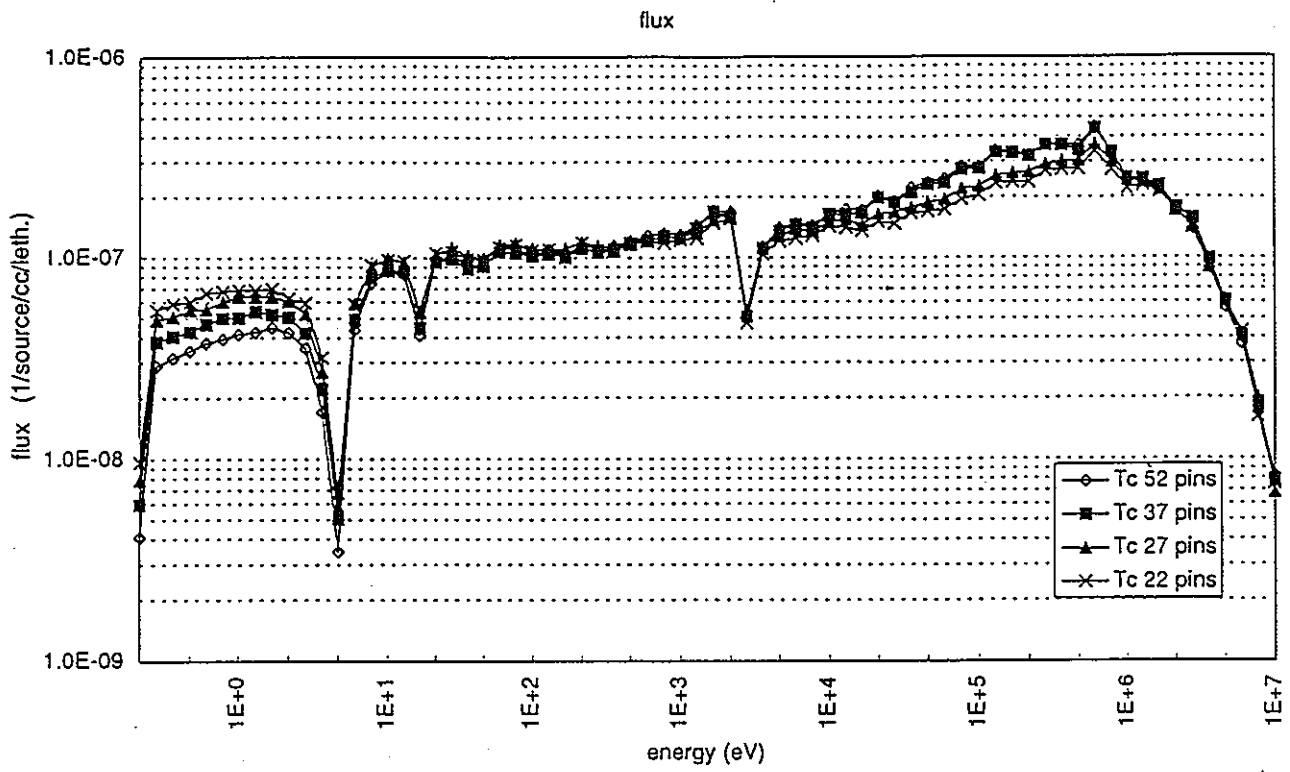
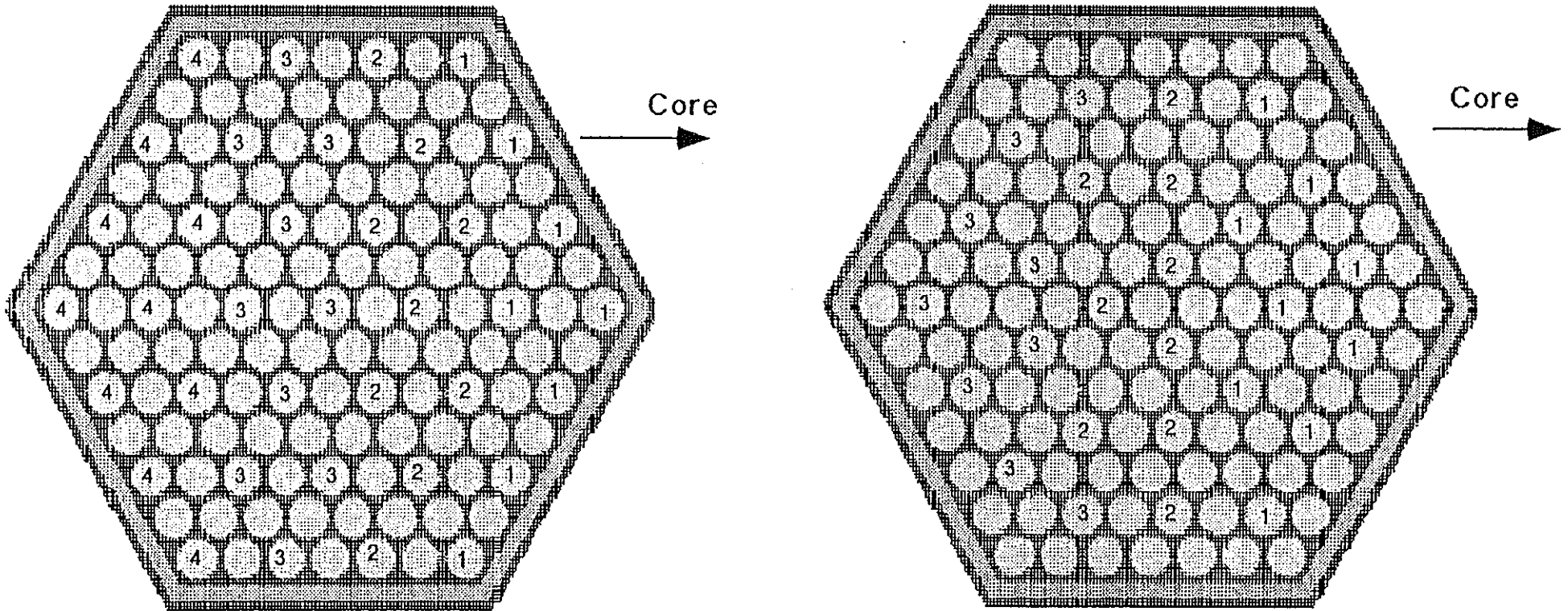


図3.2.3 減速材量の異なるターゲット集合体内の中性子スペクトルと吸収反応率

Case 1 37 FP pins

Case 2 27 FP pins



-21-

図3.3.1 ピン配置図

- ターゲット集合体内の⁹⁹Tcピン位置と消滅率の関係 -

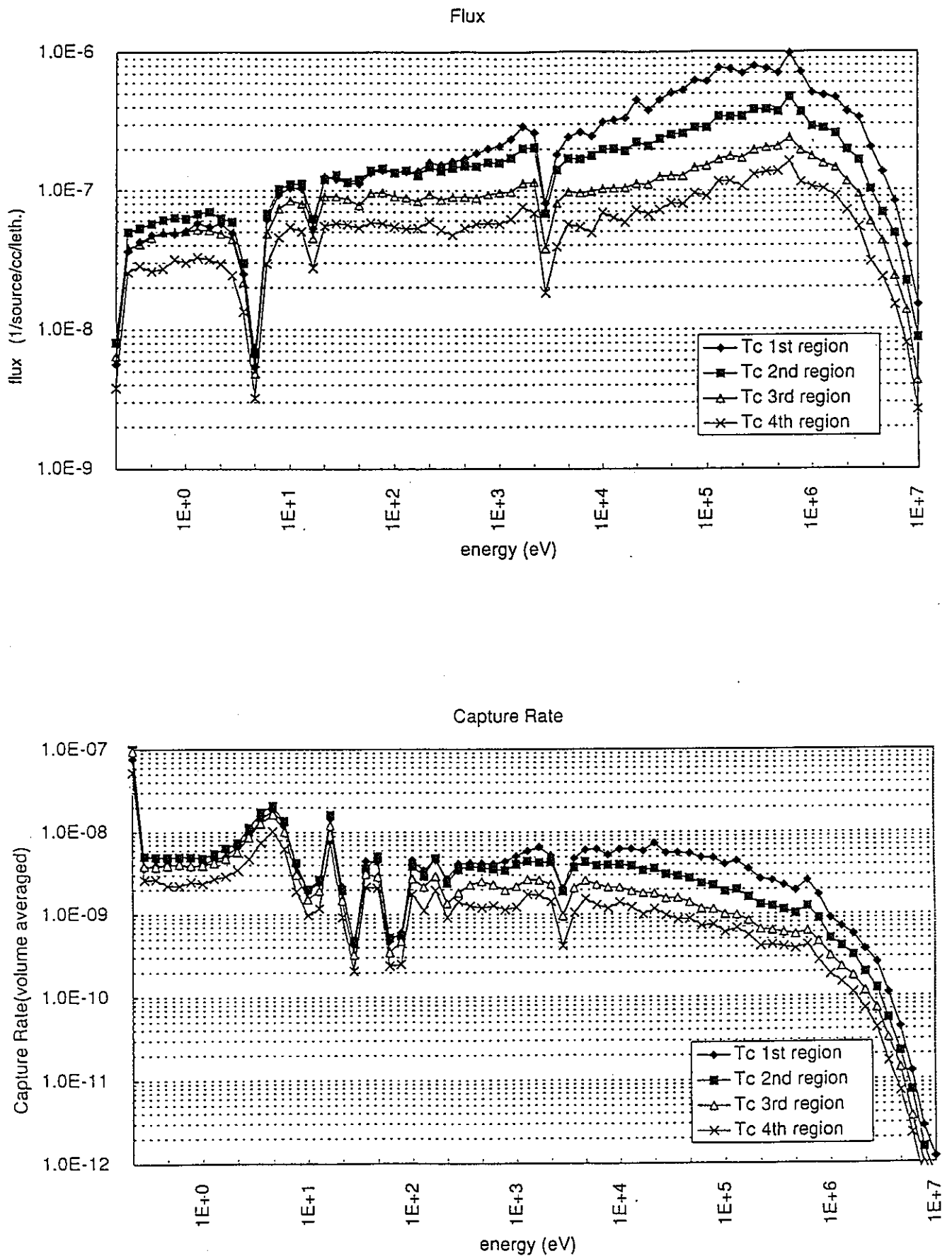


図3.3.2 Case 1 (^{99}Tc 37本) における各領域の
中性子スペクトルと吸収反応率

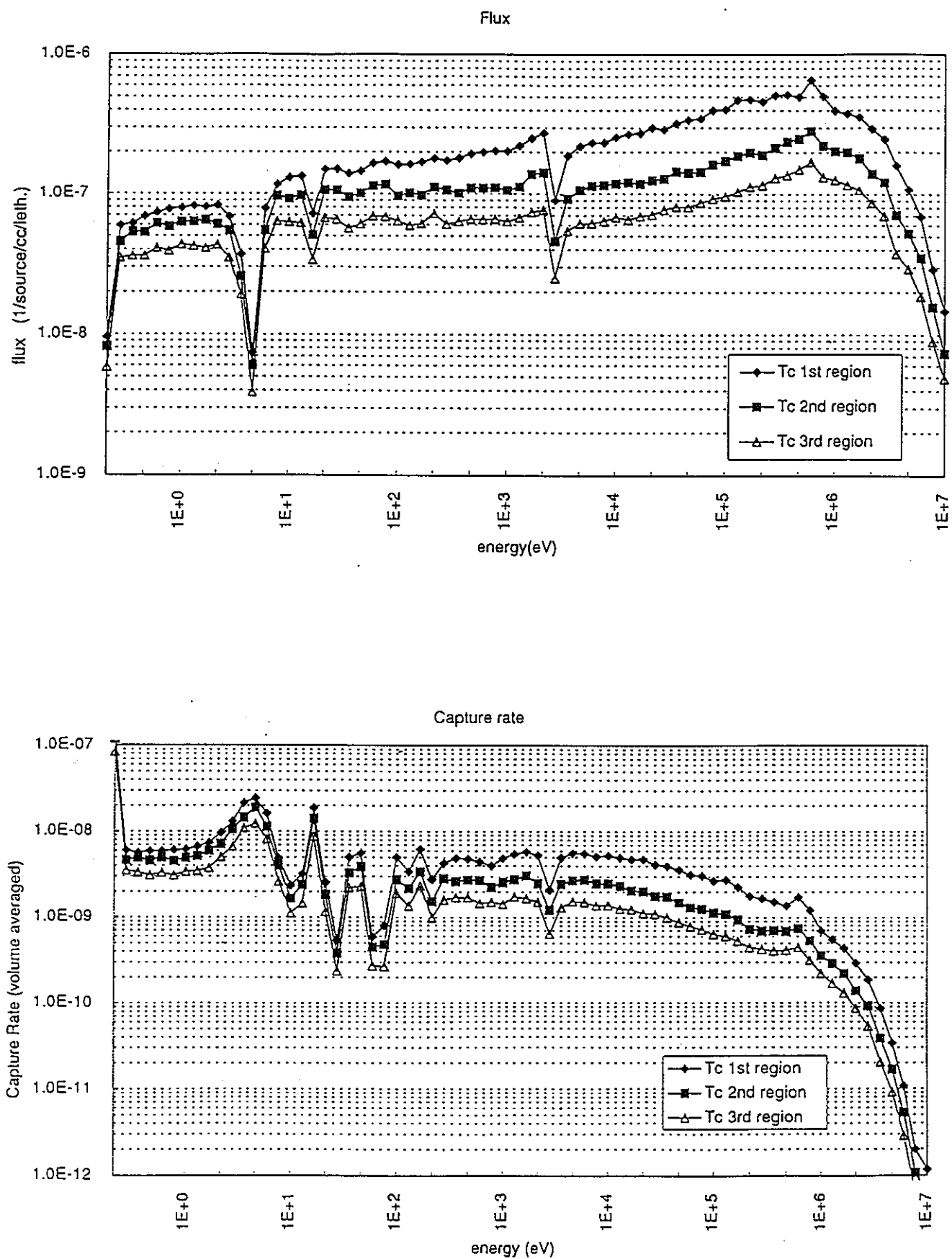


図3.3.3 Case 2 (^{99}Tc 27本) における各領域の
中性子スペクトルと吸収反応率

第4章 減速材選択の効果

ここでは減速材の種類を変えることによる消滅特性への影響を調査した。

4.1 減速材変更による⁹⁹Tc消滅特性の変化

1) 解析条件

3.2節で使用した127ピンのターゲット集合体に27本の⁹⁹Tcピンを配置した場合を選択し、減速能の異なる4種類の減速材を入れて消滅特性を比較した。減速能の大きい順にZrH_{1.7}、BeO、Al₂O₃、SiCと考えられ、減速能が小さくなるにつれて消滅特性が悪くなっていくと予測した。

2) 解析結果

表4.1.1に各ケースの消滅特性を比較した。ZrH_{1.7}とBeOのケース、Al₂O₃とSiCのケースで消滅率はほぼ等しい結果となった。

図4.1.1に各ケースの⁹⁹Tc領域内での中性子スペクトルと吸収反応率を比較した。減速材の種類を変更することにより、減速材量を変えるよりもかなり大きなターゲット内スペクトルの変化が起きることがわかった。消滅率のみを比較した場合はZrH_{1.7}とBeOのケースで減速能が同程度であることも予想されたが、このグラフから各ケースで作られるスペクトルの形がかなり異なり、消滅に有効なエネルギー領域が違っていることがわかった。

具体的にはZrH_{1.7}の場合はかなりスペクトルが軟化されており、低いエネルギー領域での吸収反応率が高い。BeOの方が硬いスペクトルを持っており、100eV程度よりも高いエネルギー領域ではZrH_{1.7}よりも大きな中性子束をもつ。ZrH_{1.7}減速の場合の熱量域での吸収とBeO減速の場合の分離-非分離共鳴領域全体での吸収反応が同程度となった結果としてこれら2ケースがほぼ同等の消滅率を示したことがわかった。

Al₂O₃とSiCのケースに関しては、スペクトルも似ているために消滅率が同程度となったこともわかった。

4.2 減速材変更によるターゲット集合体内の寄生吸収の変化

前節より減速材種類によりスペクトルがかなり異なることが明らかになったため、ケース毎の各領域の吸収率の違いを図4.2.1に比較した。中性子1個に対して ^{99}Tc 、減速材、被覆管、冷却材、SUSの5つの領域において吸収反応のおきる割合をグラフに表した。各ケースともターゲット集合体内の幾何学形状は全て同じであるため、単位体積での規格化は行っていない。

$\text{ZrH}_{1.7}$ を使用した場合、低エネルギーの中性子が増えているため構造材等による寄生吸収が多くなっていることがわかる。 ^{99}Tc からはガス状の物質が生成されず、また、放射化の観点からも構造材の中性子吸収量は少ない方が良いため被覆管を可能な限り薄くする方がより有効に中性子を利用できると考えられる。 $\text{ZrH}_{1.7}$ 以外の3ケースでは図4.1.1に示したように BeO と、 Al_2O_3 と SiC でスペクトルの軟らかさが異なったが、 ^{99}Tc 領域以外における寄生吸収の量に大きな差はなかった。

本検討では基本ケースの減速材として減速能の大きな $\text{ZrH}_{1.7}$ を選定したが、スペクトルが非常に軟らかくなるため他の減速材よりも寄生吸収が大きくなることがわかった。寄生吸収量を改善することを考えて減速材を BeO に変更して検討することも考慮すべきである。ただし、スペクトルを軟化させるためには BeO は相当量を要するので装荷できる ^{99}Tc 量が限られる。よって、各減速材によりつくりだされるスペクトルも考慮し、目的に応じて減速能の異なる減速材を使用することが効果的であると考えられる。

表4.1.1 異なる減速材を用いた場合の消滅特性
 (127ピン中Tcピン27本のケース
 $V_{\text{mod}}=529000\text{cc}$ $V_{\text{Tc}}=143000\text{cc}$)

減速材	消滅率(%/y) (吸収反応の誤 差 1σ %)	Tc装荷量 (kg)	Tc消滅量 (kg/y)
ZrH _{1.7}	2.09 (0.601,0.783,0.858)	1640	34.4
BeO	2.16 (0.530,0.594,0.695)	1640	35.5
Al ₂ O ₃	1.68 (0.558,0.510,0.550)	1640	27.6
SiC	1.63 (0.480,0.514,0.604)	1640	26.8

*) ターゲット内のTcピンを炉心に近い順で3つの領域に分割した場合の各領域における吸収反応率の誤差

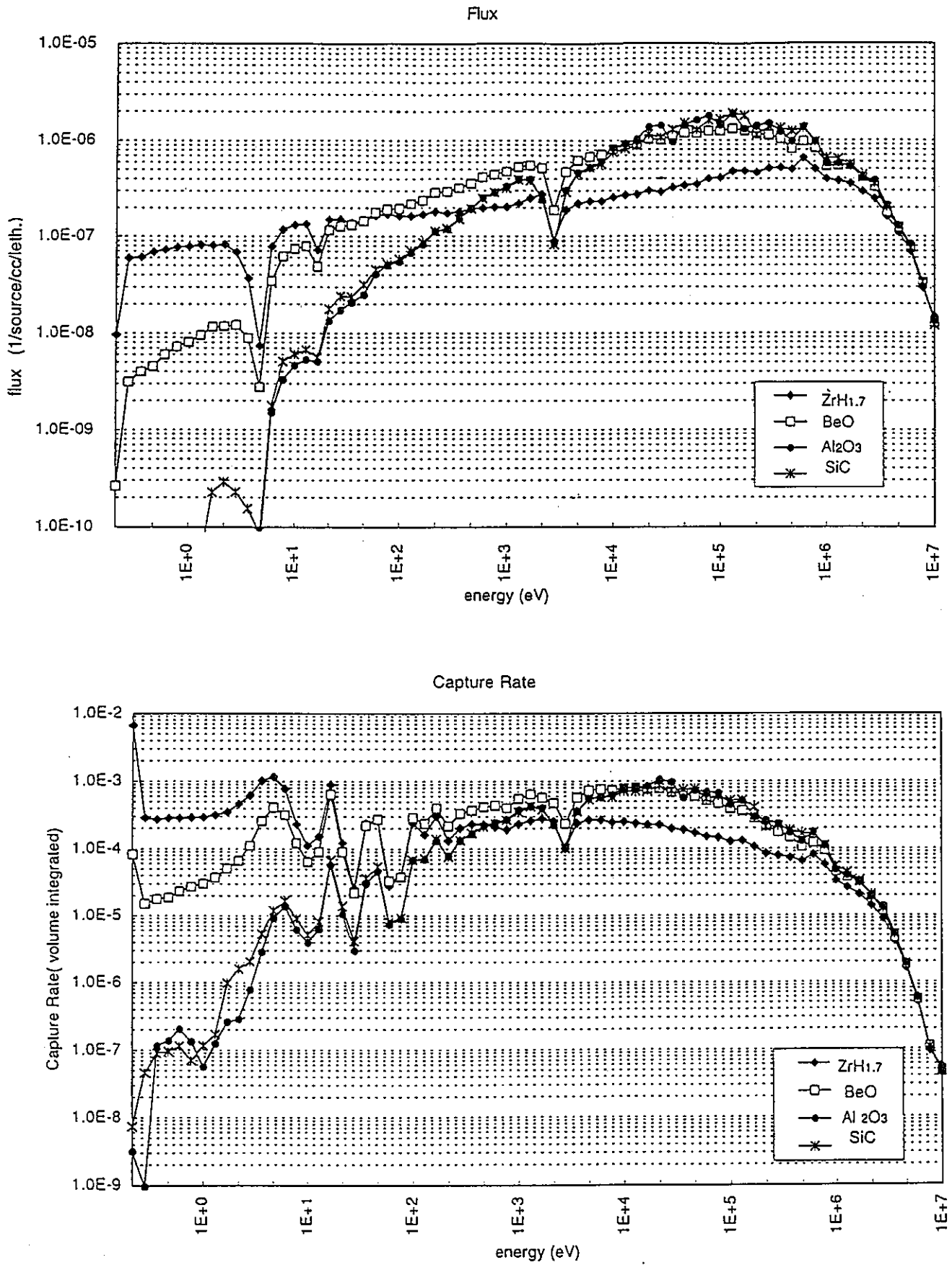


図4.1.1 減速材の異なるターゲット集合体内の
中性子スペクトルと吸収反応率

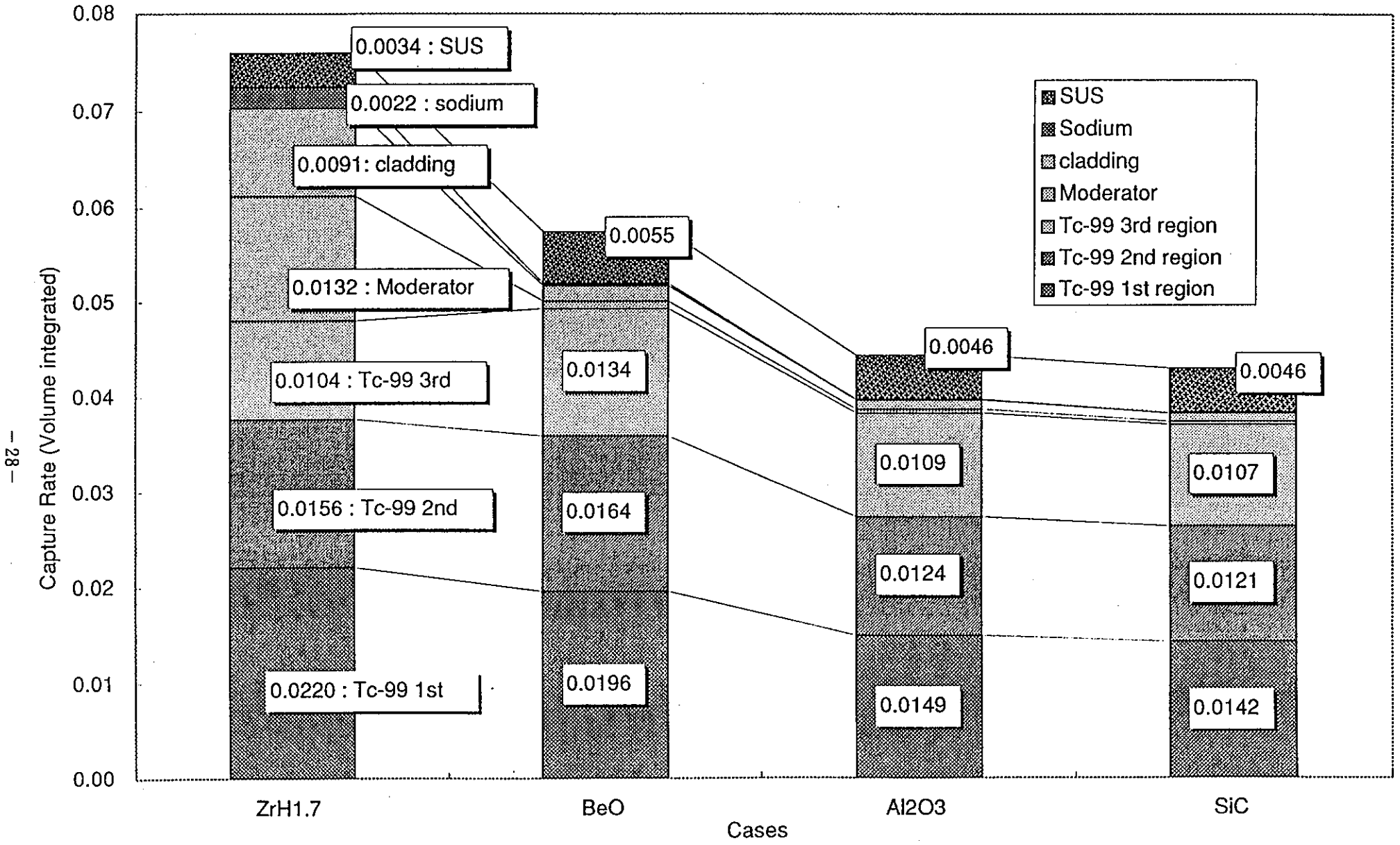


図4.2.1 減速材の異なるケースの領域毎の中性子吸収量の比較

第5章 特殊ピンの採用の効果

5.1 Duplexピンの採用

3.2節より ^{99}Tc の消滅特性は ^{99}Tc ピンの径に敏感であることがわかった。そこで ^{99}Tc 領域の径を細くするように図5.1.1に示すようなDuplexピンの適用について検討を行った。減速材と ^{99}Tc との共存性等、物性に関する調査検討はまだ行っていない。

1) 解析条件

図5.1.1に示したように、中空の減速材ペレットの中にワイヤー等のかたちで ^{99}Tc を装荷する効果を調べた。 ^{99}Tc 部分の半径が2mmの場合と、この場合に比べて ^{99}Tc 部分の体積が1/10となる0.63mmの場合についてピン本数37本、127本、217本の各ターゲットで消滅特性を求めた。また、ピン本数37本の場合ピン全体の径が太いために減速材量はほぼ保存しつつ ^{99}Tc 部分の半径が5.3mmであるケースを加えた。

2) 解析結果

表5.1.1に消滅特性をまとめる。 ^{99}Tc の体積に対する表面積の割合(2/r)で消滅率を整理した。これを図5.1.2に示す。どのケースも内側の ^{99}Tc 部分の径を小さくし、 ^{99}Tc の装荷体積に対して表面積の割合を増やすことにより消滅率を改善することができた。37本、127本、217本のケースの違いは減速材の量であり、減速材量の多い方が消滅率が良い。これは3章で得られた結果と一致する。ただし、127本のケースと37本のケースでの減速材量の違いはさほど大きくないが消滅率は37本のケースの方が比較的良い。これは、37本ピンのケースは全体として ^{99}Tc の装荷量が少なく、炉心から遠い位置にあるピンにまで ^{99}Tc を効率の良く消滅するエネルギーをもった中性子が届くためではないかと考えられる。

^{99}Tc の径が太いことが影響すると考えられるが、37本ピンケースの内、FP装荷量の多い半径5.3mmのケースは消滅率が特に低かった。

装荷量が小さくなってしまふものの、 ^{99}Tc 部分のごく細いDuplexピンを採用することで本解析において目標とした年間10%/yの消滅率を得ることができた。

5.2 自己遮蔽効果

前節より⁹⁹Tcピンの体積に対する表面積の割合が消滅率に影響することがわかった。⁹⁹Tcの消滅には自己遮蔽による効果が大きいと考えられる。'94にオランダのHFRで行われた⁹⁹Tc照射実験の評価ではごく表層部での中性子の吸収が大きいとの結果が発表されている⁽⁸⁾ (図5.2.1参照)。このため⁹⁹Tcピン内部をさらに分割してピン内部での中性子束の変化や消滅特性を調べた。

1) 解析条件

127本のDuplexピンのケースを選択し、⁹⁹Tcの部分をさらに同心円状の4層に分割して計算を行った。解析の精度を保持するため、中性子束が高いと予想される表層部の領域は細分化し、内側については大きく分割した。具体的にはHFRでの分析結果を参考に表面から50 μ m、50~150 μ mと非常に薄い2領域を設定し、残りの部分を体積を等分するように分割した。この概略図を図5.2.2に示す。外側から順番にLayer 1~Layer 4とする。

2) 解析結果

表5.2.1に各領域での消滅特性を示す。各層での吸収反応率の誤差も小さく、ピン内の分割の仕方は妥当であったと考えられる。図5.2.3に各層の中性子スペクトルと吸収反応率を比較した。これよりピン内での中性子束、吸収反応率の違いは主に熱領域と5.6eV付近の共鳴ピークに依存しており、それ以外のエネルギー領域の中性子はピン中心の領域まで到達することがわかる。この共鳴ピーク付近のエネルギーにおける中性子束とその誤差を表5.2.2に示す。ここに示すように計算による中性子束の統計誤差は中性子束の低い共鳴ピークエネルギー位置でも2~4%程度であり、結果の信頼性は十分あると考えられる。また、図5.2.4に⁹⁹Tcの共鳴ピーク付近の中性子束の減少のようすを図示する。解析結果の精度を保つためにピンの中心の領域は細分化していないが、ピンの中心においてさらに中性子束が低下するであろうことが考えられる。HFRにおける実験と同様にピンのごく表層部での消滅特性が良好であり、装荷する体積に対して表面積の割合を多くした方がよいことがわかった。

5.3 リングピンの採用

1) 解析条件

前節の結果より⁹⁹Tc領域の極表層での消滅が多いということで、図5.3.1に示すようにペレットに⁹⁹Tc箔を入れるという構想で消滅特性を解析した。この場合、リングの内側に減速材を充填するため減速材の量も増やすことが可能である。太径の37本ピンに内径5mm、厚みが0.3mmの⁹⁹Tcを装荷した。加工の可能性等の現実的な問題については未検討である。

2) 解析結果

結果を表5.3.1に示す。リングピンを採用したケースと⁹⁹Tc領域の半径が5.3mm及び0.6mmのDuplexピン（37本ケース）での消滅特性と比較した。リングピンを使用した場合の消滅率は9.15%消滅量22.7kg/yであった。⁹⁹Tc部分の外径が等しいDuplexのケースは1.85%、消滅率の低くなる部分を極力排除した半径0.6mmのケースは10.06%であった。消滅率としては半径0.6mmのDuplexのケースが良い値を示したが、⁹⁹Tc装荷量が32kgであり、消滅量3.5kg/yであるためリングピンの方が現実的である。また、装荷量は太径のDuplexピンが一番多いが、消滅率が低い。

ここで使用した箔は一般に市販されているアルミ箔程度の厚さのものである。さらにこの箔の厚みを2等分して消滅率の低下を解析した。外側で9.34%、内側で8.95%であり、この程度の厚さであれば試料内の⁹⁹Tcをほぼ平均的に安定核種に変換している。よってリングピンの採用は⁹⁹Tcの消滅率を向上させ、均一に核変換させるために効果的と考えられる。

5.4 原子数密度の効果

^{99}Tc をターゲットとする場合、実際はTc金属のクリープ特性の改善の観点からTcを主成分とする合金とする可能性が高い。前述のHFRでの照射実験⁽⁸⁾ではTc金属のクリープ量が予測したよりも少ないという報告もあるが、現段階では照射期間が短いので結論は出されておらず何らかの合金として装荷することになるであろうという見通しは変わっていない。また、ターゲット核種を減速材に均一に混入するなどの方法を取り原子数密度を下げ、自己遮蔽効果を低減させることも考えられる。よって、ここでは試行的な計算として極端ではあるが単純に ^{99}Tc の原子数密度を1/10にした計算を行った。

1) 解析条件

127本のDuplexのケースのうち、半径が2.0mmの ^{99}Tc 領域を持つケースについて原子数密度を1/10に下げ、消滅特性を調べた。 ^{99}Tc の装荷量としては ^{99}Tc 領域の体積を1/10とした半径0.63mmのケースと同等になる。原子数密度を下げた代わりに他の物質を投入するなどの操作は行っていない。

2) 解析結果

表5.4.1に示すように、 ^{99}Tc の消滅率は原子数密度を小さくしたことによって3.43%から13.9%に改善した。消滅量は37.8kg/yから15.3kg/yに減少した。前節の原子数密度と減速材量を保存して体積を1/10にした場合は消滅率9.81%であり、実際装荷される ^{99}Tc の量は同じであっても原子数密度を下げた方が効果的である。ただし、本ケースは ^{99}Tc の原子数密度を下けた代わりに何らかの他の核種を混入させるという操作は行っていないため、実際には本ケースの場合にも他の核種の吸収による中性子束の減少により多少消滅率が下がると考えられる。

^{99}Tc 領域を5.2節同様に表層からの距離に従い4領域に分割し、図5.4.1に各領域での中性子スペクトル及び吸収反応率を比較した。図5.2.3の基準としたケースのような自己遮蔽効果による共鳴ピーク位置での顕著な中性子束の低下は起こっていない。図5.4.2に ^{99}Tc 表層からの距離による共鳴ピークエネルギー領域での中性子束の変化を示す。基準ケースの図5.2.4ほど中性子束の低下がおきていないことがわかる。

以上より、 ^{99}Tc を希釈するための他の核種が中性子吸収等に大きく影響しなければ合金の使用、もしくは減速材中への ^{99}Tc の混入による原子数密度低減は消滅特性に対して良い効果を期待できることがわかった。

^{99}Tc について1年間あたり10%の消滅率を得ることを目標とし、特殊ピンの適用殊にごく細いDuplexピンもしくは原子数密度1/10のピンの適用により目標を達成することができた。しかし年間あたりの消滅量が1000MWeクラスPWRからの生成量(約25kg)にも満たないという結果になった。消滅量、消滅率ともに比較的良好な結果が得られたのは減速材ピンの中に ^{99}Tc をリング状に装荷したもので消滅率9.2%、消滅量は23kgであった。ただし、減速材とターゲット核種の共存性や加工性には未検討である。

今後は各特殊ピンの実現性の検討や炉心特性への影響の検討ももすすめつつ、最適化を行う必要がある。

表5.1.1 Duplexピンを使用した場合の消滅特性

ターゲット 内ピン本数	⁹⁹ Tcピン径 (mm)	減速材体積 (cc)	⁹⁹ Tc装荷量 (kg)	消滅率(%/y) (吸収反応の 誤差1σ %)*)	消滅量 (kg)
217	2.00	390318	1880	2.48 (0.792,0.610, 0.543)	46.7
217	0.63	390318	188	9.10 (0.727,0.608, 0.631)	17.1
127	2.00	576688	1100	3.46 (0.714,0.510, 0.567)	38.1
127	0.63	576989	110	9.81 (1.016,1.006, 1.172)	10.8
37	5.30	610062	2250	1.85 (0.577分割ナ)	41.8
37	2.00	609512	321	4.99 (1.244,0.834, 0.963)	16.0
37	0.63	604318	32.1	10.9 (1.660,1.592, 2.000)	3.50

*) ⁹⁹Tc表層部から3領域に分割した場合の各層における吸収反応率の誤差。
最外層から順に記載。どのケースについても最外層は表層から0.05mm、
他2領域は残りの体積を2等分。

表5.2.1 ^{99}Tc ピン表層部からの深さと消滅特性 (吸収反応率)

	^{99}Tc 体積 (cc)	^{99}Tc 装荷量 (kg)	消滅率 (%/y)	吸収反応率の 誤差 1σ (%)	消滅量 (kg/y)
Tc layer 1	4730	54.4	7.46	0.808	4.06
Tc layer 2	9100	105	5.17	0.664	5.41
Tc layer 3	41000	471	3.50	0.549	16.5
Tc layer 4	41000	471	2.52	0.541	11.9
Total	95800	1100	3.43	-	37.8

表5.2.2 共鳴ピークエネルギー領域近傍の中性子束と統計誤差

upper energy	57群 8.315 eV	58群 6.476 eV	59群 5.043eV
FP内の領域	Flux 1σ (%)	Flux 1σ (%)	Flux 1σ (%)
Layer 1	7.6758E-08 (1.647)	3.31054E-08 (2.086)	5.63107E-08 (1.581)
Layer 2	7.5771E-08 (1.442)	2.25140E-08 (2.309)	5.25575E-08 (1.542)
Layer 3	7.2128E-08 (1.267)	1.32061E-08 (2.376)	4.64800E-08 (1.614)
Layer 4	6.6940E-08 (1.602)	7.07986E-09 (3.794)	3.91494E-08 (2.031)

Fluxの単位(1/cc/source/leth.)

表5.3.1 リングピンを用いた場合の消滅特性

ケース名	減速材体積 (cc)	Tc体積 (cc)	Tc装荷量 (kg)	消滅率 (%/y)	吸収反応率の誤差 1 σ (%)	消滅量 (kg/y)
リングピン layer 1 (外側0.15mm厚)	-	10932	126	9.34	0.654	11.8
layer 2 (内側0.15mm厚)	-	10618	122	8.95	0.627	11.0
total	784000	21551	248	9.15	-	22.7
Duplex Tc 5.3mm	610062	196000	2253	1.85	(1.016,1.006, 1.172)	41.8
Duplex Tc 0.63mm	604318	2789	32	10.90	(1.660,1.592, 2.000)	3.5

表5.4.1 原子数密度を変更した場合の消滅特性の変化
(127本ピン集合体 Duplex ピン FP部分0.2mm 減速材体積 577000cc)

ケース	Tc装荷量 (kg)	消滅率 (%/y)	吸収反応の誤差 1 σ (%)	Tc消滅量 (kg/y)
希釈なし Layer-1	54.4	7.46	0.808	4.06
Layer-2	105	5.17	0.664	5.41
Layer-3	471	3.50	0.549	16.5
Layer-4	471	2.52	0.541	11.9
Total	1101	3.43	-	37.8
1/10希釈 Layer-1	5.44	18.2	0.781	0.99
Layer-2	10.5	16.8	0.683	1.75
Layer-3	47.1	14.4	0.562	6.76
Layer-4	47.1	12.3	0.588	5.81
Total	110.1	13.9	-	15.3

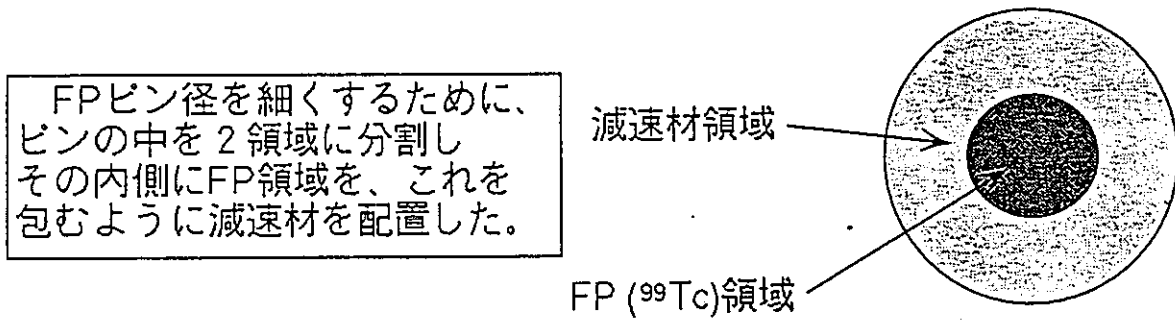


図5.1.1 Duplex ピンのモデル

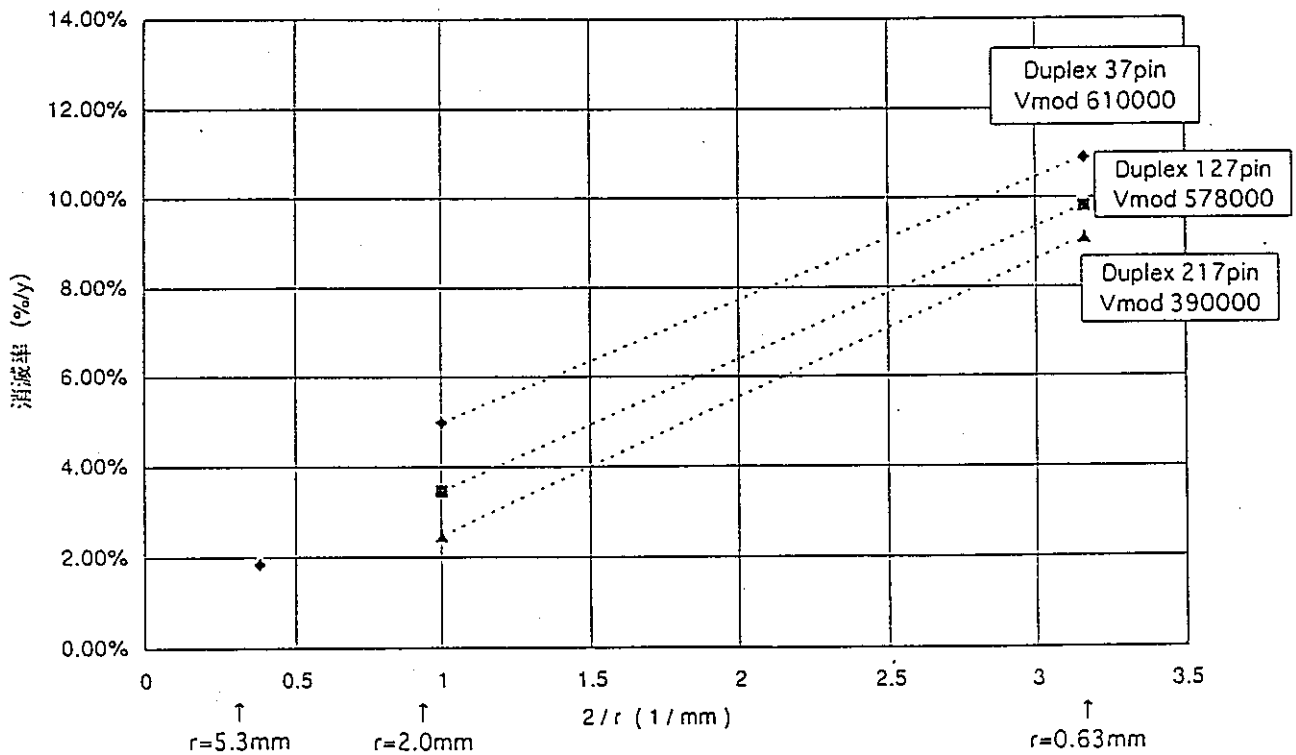


図5.1.2 消滅率へのDuplexピン採用の効果
(ピン径と消滅率との関係)

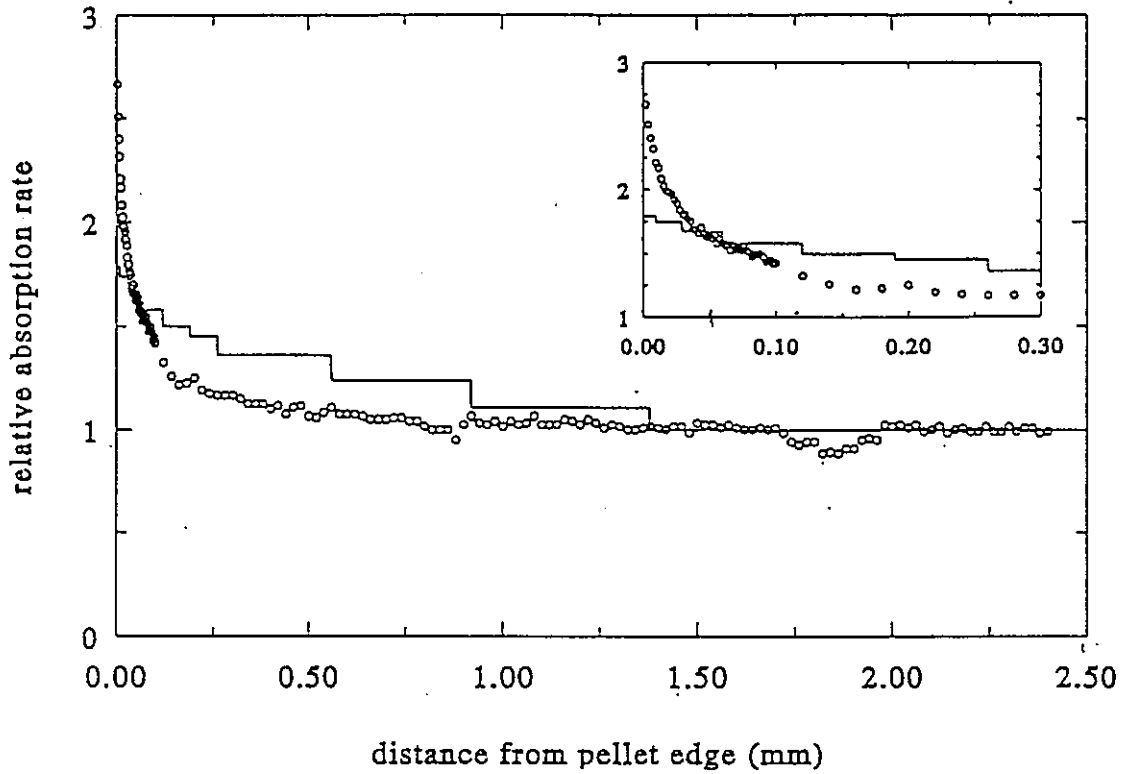


Figure 6: The radial distribution of ruthenium in the technetium at 5 mm from the top of the pellet. Solid line, calculated curve; symbols, experimental data.

図5.2.1 HFRで行われた⁹⁹Tc照射実験結果 (¹⁰⁰Ru生成量評価)

⁹⁹Tc領域を分割 (ベース: Duplex127本 ⁹⁹Tc径 2mm)

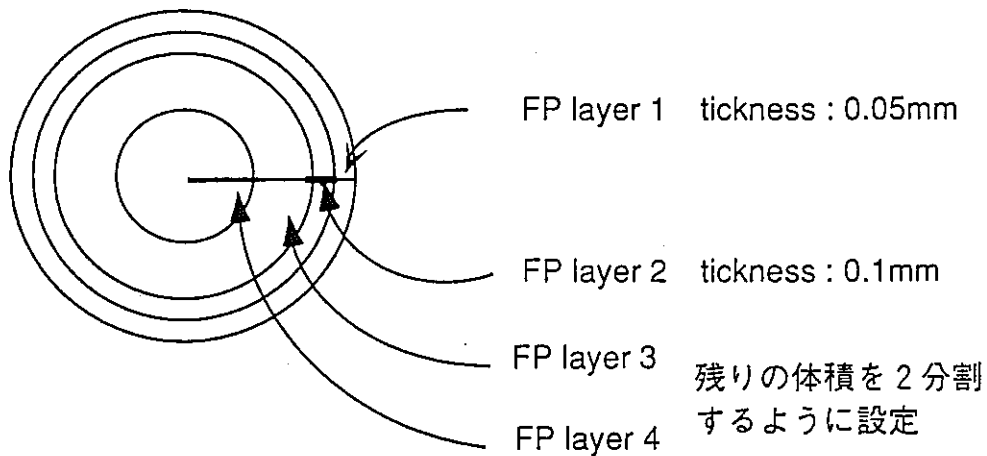


図5.2.2 自己遮蔽効果を確認するためのリングモデル

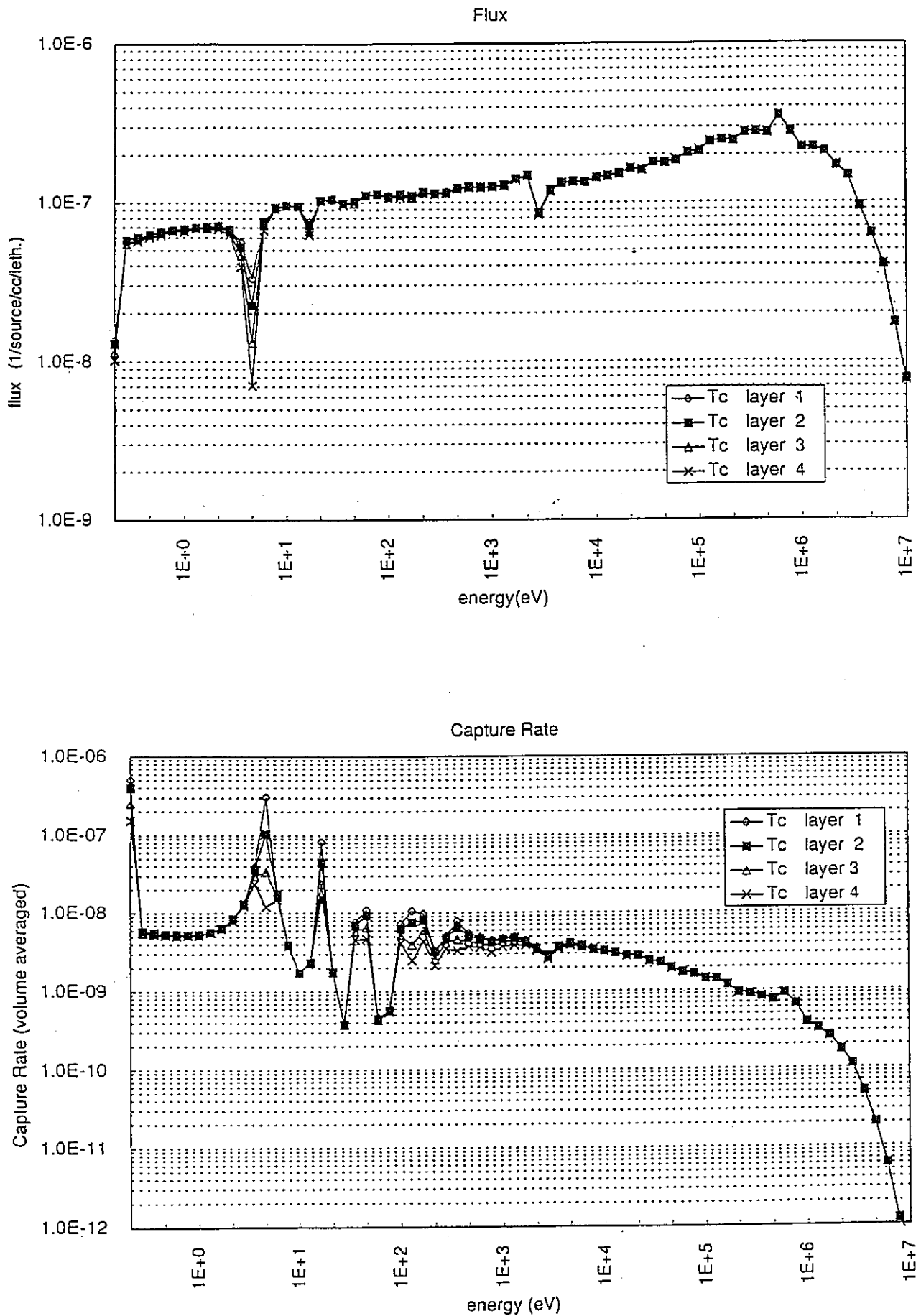


図5.2.3 ⁹⁸Tcピン表層部からの深さと中性子スペクトル及び
吸収反応率 (Duplex127本)

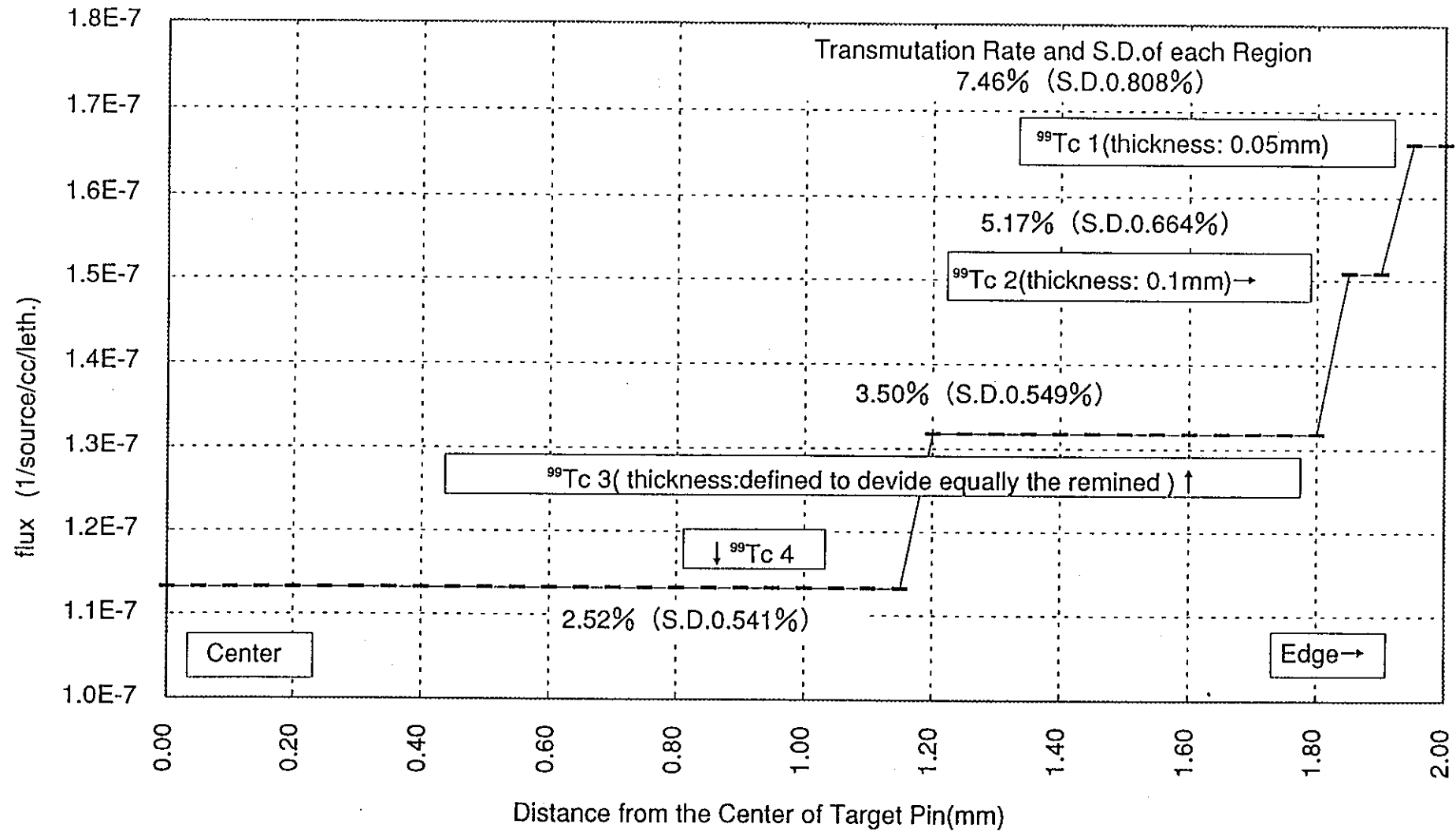
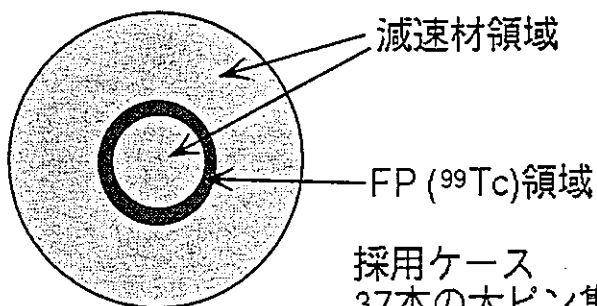


図5.2.4 ⁹⁹Tc共鳴ピークエネルギー領域(3.297~8.315eV)
の自己遮蔽による中性子束の低下

FP領域の極表層部にて消滅率が高いという結果に基づき、
効率の悪くなる領域を排除し、かつ装荷量を多くとるために
以下のようなリングモデルの採用を検討した。



採用ケース
37本の太ピン集合体
ピン半径10.75mm、FP半径（外側）5.3mm
FPリング厚0.3mm
（自己遮蔽効果の確認のため
さらに0.15mmずつに二分）

図5.3.1 リングピンのモデル

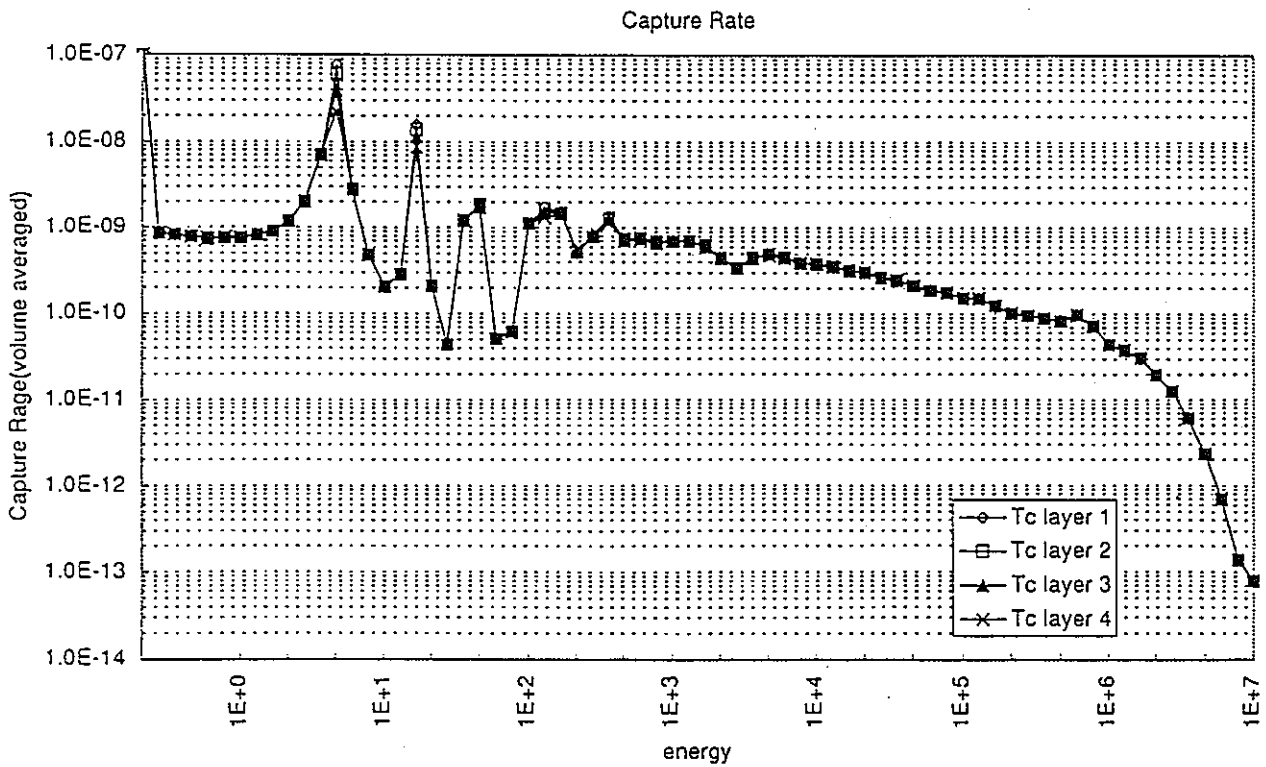
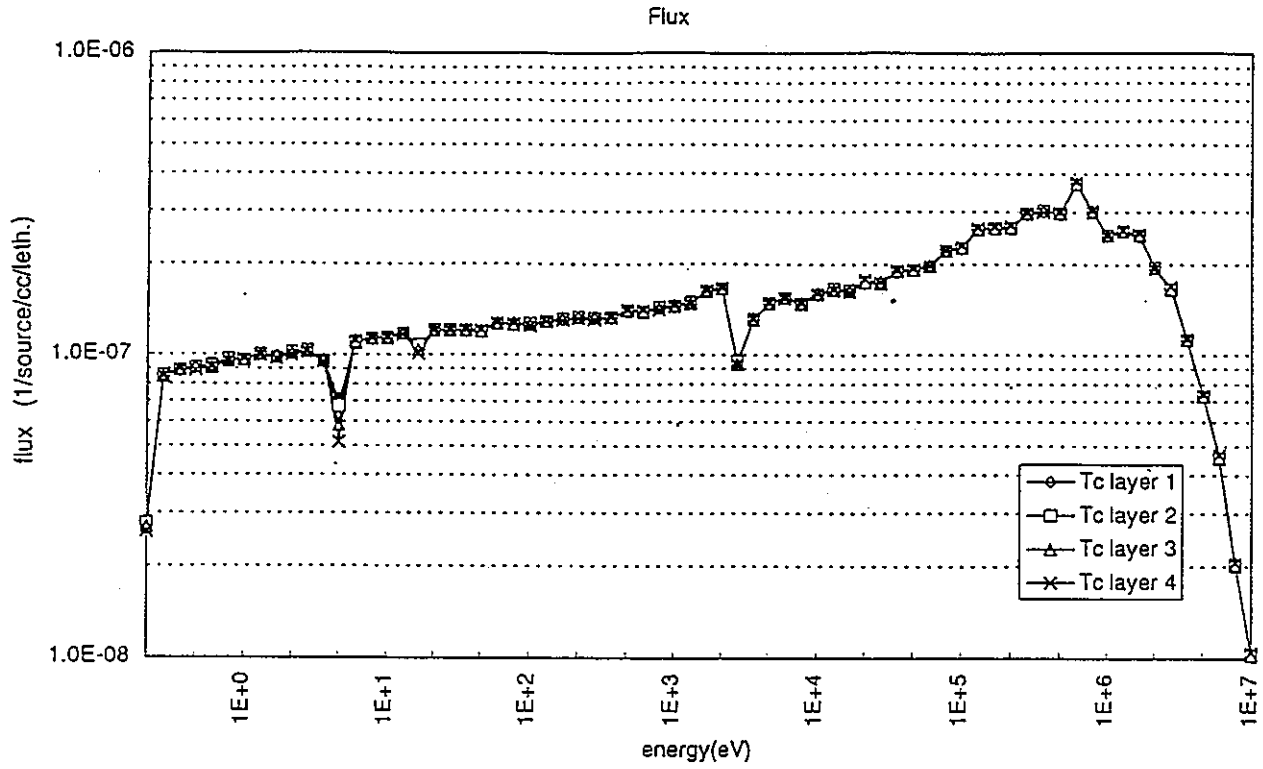


図5.4.1 原子数密度を変更した場合の⁹⁹Tcピン表層部からの距離と中性子スペクトル及び吸収反応率

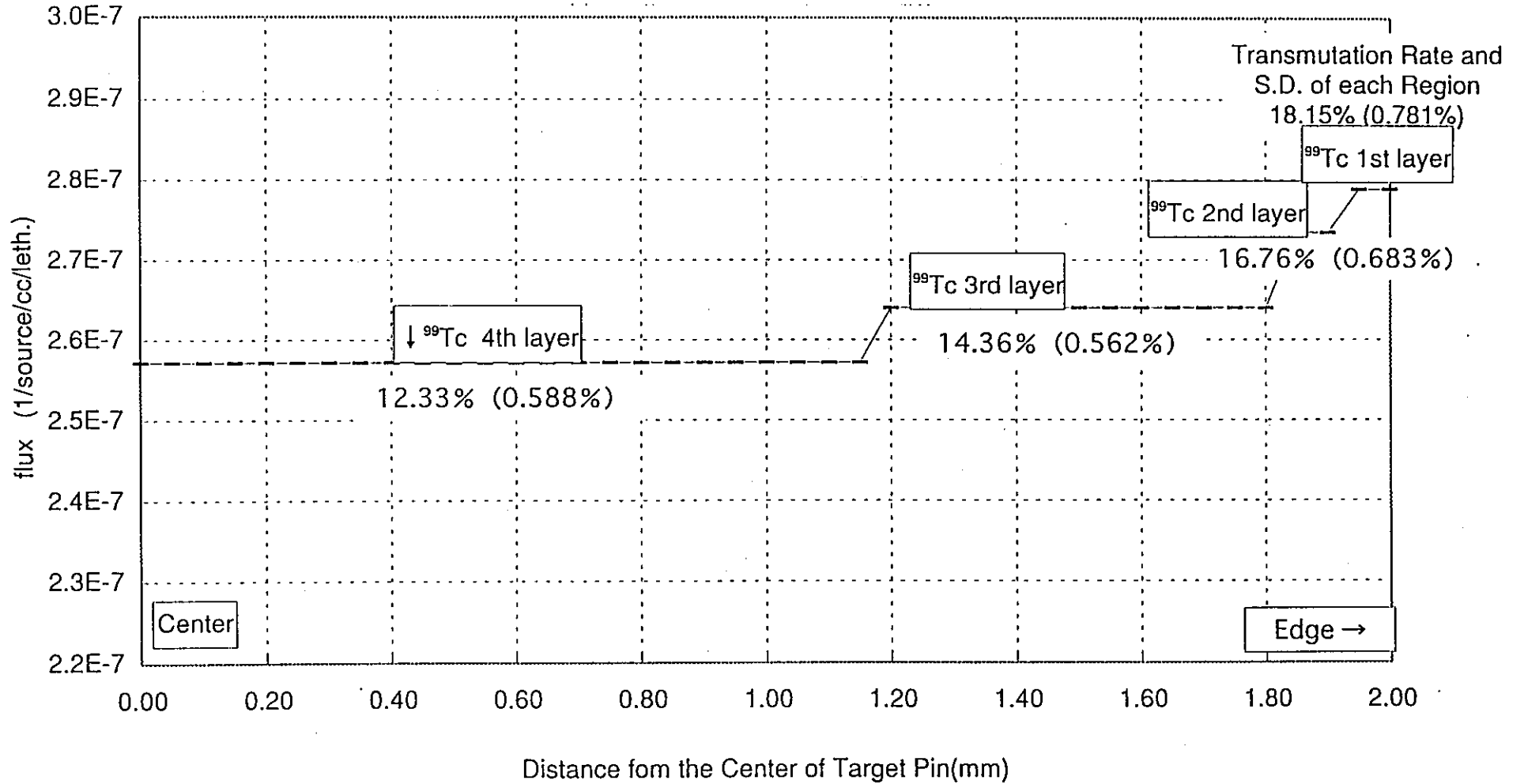


図5.4.2 原子数密度を1/10にした場合の
⁹⁹Tc共鳴ピークエネルギー領域(3.297~8.315eV)の
 自己遮蔽による中性子束の低下

第6章 ^{129}I の消滅特性の解析

ここまで ^{99}Tc の消滅を目的とし、集合体やピンの仕様を変更してパラメーターサーベイを行った。この結果として得られた知見をもとに3ケース選択し、 ^{129}I の消滅特性を解析した。

1) 解析条件

4.1節と同様に図3.2.1に示した127本ピン中27本がFP(NaI)ピンであるケースに、 $\text{ZrH}_{1.7}$ 及び BeO を減速材として装荷したケース、また、5章にて評価したDuplexピンのうち、1集合体あたり127本、FP領域の径が2.0mmというケース合計3つのケースについて ^{129}I の消滅特性を比較した。表6.1に仕様をまとめる。ターゲットの性質は以下の通り。

化学形態	: NaI
	ヨウ素の同位体組成 (軽水炉取り出し)
	I-127 23.5% (stable)
	I-129 76.5% (半減期 $1.6 \times 10^7 \text{y}$)
密度	: 3.667g/cc
融点	: 934K

HFRを用いて'94に行われた照射実験⁽⁸⁾ではターゲットの化学形態として CeI_3 (m.p.1033K)、 NaI (m.p.934K)、 PbI_2 (m.p.683K)が使用された。各々710K程度で照射実験が行われたが、 PbI_2 はこの条件下ですでに融点を越えているために溶融して被覆管を腐食し小さな穴があいた。また、ターゲット用の CeI_3 精製は現状では高温で昇華させて行っていること、 CeI_3 をはじめとする三価の希土類のヨウ化物は容易に酸化ヨウ素を形成してしまうこと、以上2点から CeI_3 の工業レベルでの適用は困難と見られている。

よって、ここではヨウ化物の化学形態としてはNaIを選択した。図2.1に示すように ^{129}I は共鳴領域が ^{99}Tc よりも高いエネルギー領域にある。 ^{99}Tc と ^{129}I の吸収断面積を比較すると、熱中性子による吸収反応断面積は ^{99}Tc で19.7b、 ^{129}I で27.0b、また、共鳴積分でそれぞれ312b及び29.4bである(JENDL-3)^{*}。 ^{129}I については軟らかいスペクトルの方が効率がよいと考えられるが、寄生吸収を避けるためにも共鳴領域での吸収にも着目した。 ^{129}I の共鳴吸収による消滅の場合には10~300eV程度の中性子束を高くした方が有効と考えた。 ^{129}I の共鳴領域での中性子フラックスも高く、同時に熱領域減速された中性子もある BeO 減速で2ケース、熱領域での中性子フラックスの高い $\text{ZrH}_{1.7}$ 減速で1ケース選択して ^{129}I の消滅特性を解析した。

*) 現在の基本核データライブラリ評価で対象としている ^{129}I の断面積の測定結果は1960年のものまでしか存在しないということ。評価にあたっては測定結果だけでなく理論的な評価も加えられるが、その後新たな ^{129}I の励起状態が発見されていることもあり昨今断面積の測定が行われた⁽⁹⁾。この測定結果は過去のデータと比べて熱領域では大きく、共鳴積分値では多少小さく報告されている。

2) 解析結果

^{129}I の消滅特性を表6.2に示す。各ケースの中性子スペクトルと吸収反応率を図6.1～図6.3に示す。4.1節の結果から共鳴領域の断面積も利用して ^{129}I の消滅率を上げるにはBeOが有効と考えたが、熱領域の中性子の多い $\text{ZrH}_{1.7}$ のケースほど良くならなかった。同じ体系を用いて、BeO減速の場合は3.44%、 $\text{ZrH}_{1.7}$ 減速の場合は5.21%であった。これは、図6.1及び図6.2より共鳴領域における吸収反応率は広いエネルギー範囲にわたってBeO減速のほうが優れているものの、これを積分しても $\text{ZrH}_{1.7}$ 減速ケースの熱領域における吸収反応率の優位性の方が勝ったためと考えられる。

4.2節の結果から熱領域での消滅の場合には寄生吸収が大きくなるため中性子が無駄になり、かつピンの放射化に対する配慮が必要となる点で好ましくないが、 ^{129}I の場合、Xe発生や照射挙動等について調査検討が必要であり、今回はこれら3ケースで傾向を把握するまでにとどめた。無駄な中性子吸収を低減すること、また共鳴領域での ^{129}I の自己遮蔽による中性子束の低下が小さいことを考えると、減速の強い $\text{ZrH}_{1.7}$ を少量使用してNaIの装荷量を増やし、効率よく消滅することもできると考えられる。

また、図6.3からDuplexピンのNaI表層からの深さによる消滅率の相違も図5.2.3に示した ^{99}Tc のケースほど大きくないことがわかった。自己遮蔽効果による顕著な中性子束の減衰がみられない。このため図6.4に示すようにNaI部分表層からの深さによる ^{129}I の中性子吸収反応率の違いはほとんど見られない。また、表6.2のNaI-2のケースや図3.3.3と図6.5を比較すると、 ^{99}Tc の同一条件における消滅の場合よりもターゲット集合体内のピン位置による消滅率の相違の小さいことがわかる。これらはヨウ素と同数のNaを含み、加えて2割程度の同位体を含んでいて ^{129}I としての原子数密度が小さいこと、 ^{129}I には ^{99}Tc のような巨大な共鳴ピークが存在しないことが中性子束の減衰を避けるために良い方向に影響したためと考えられる。

NaIの消滅の場合、Duplexピンは最適消滅特性を得るための減速材量調整には有効であるが、 ^{99}Tc の消滅の場合のような自己遮蔽効果の回避を目的とした使用は必要ないことがわかった。

BeOで減速した2つのケースの違いは表6.1に示すように減速材量とピン径にある。Duplexピンケースの方が減速材量が多くわずかではあるがスペクトルが軟らかいため、吸収反応がおきやすい。また、 ^{99}Tc の場合ほど顕著ではないものの ^{129}I 部分の中心に近づくにつれ消滅率が低下し、ピン径の細いDuplexのケースの方が消滅率がよくなったと考えられる。

原子数密度が下がっているために消滅量は年間11kg～17kg程度で ^{99}Tc の消滅量と比較すると小さいが、100万kWe級PWRからの生成量が年間あたり5kg程度であるため効率としてはPWR3基分の ^{129}I を核変換する見込みがあることがわかった。今回はこれら3ケースにとどめたが、NaIでの ^{129}I 消滅に適したピン形状や減速材量を調整することにより、さらに消滅特性を向上できると考えられる。

表6.1 NaI 装荷ケースの仕様

ケース名	ピンタイプ	ピン半径(cm)	減速材種類	減速材量 (cc)	NaI体積 (cc)
NaI-1	Normal	0.53	BeO	529000	143000
NaI-2	Normal	0.53	ZrH _{1.7}	529000	143000
NaI-3	Duplex	外径0.53 (¹²⁹ I部分0.2)	BeO	577000	95760

表6.2 NaI として装荷した場合の¹²⁹Iの消滅特性

ケース名	減速材種類	減速材体積(cc)	¹²⁹ I装荷量(kg)	消滅率(%/y) (吸収反応の 誤差 1σ %)	¹²⁹ I消滅量 (kg/y)	参考) 同一条件下の Tc消滅率(%/y)
NaI-1 領域 1	-	-	115	3.61(0.762) ^{*1)}	4.14	-
領域 2	-	-	115	3.59(0.743) ^{*1)}	4.11	-
領域 3	-	-	115	3.10(0.929) ^{*1)}	3.56	-
TOTAL	BeO	529000	344	3.44%	11.8	-
NaI-2 領域 1	-	-	115	6.22(1.22) ^{*1)}	7.12	2.93
領域 2	-	-	115	5.49(1.14) ^{*1)}	6.29	2.08
領域 3	-	-	115	3.95(1.28) ^{*1)}	4.53	1.38
TOTAL	ZrH _{1.7}	529000	344	5.21%	17.9	2.13%
NaI-3 Layer-1	-	-	11.4	5.16(0.801) ^{*2)}	0.59	7.46
Layer-2	-	-	21.9	5.02(0.462) ^{*2)}	1.10	5.17
Layer-3	-	-	98.5	4.72(0.695) ^{*2)}	4.65	3.5
Layer-4	-	-	98.5	4.45(0.473) ^{*2)}	4.38	2.52
TOTAL	BeO	577000	230	4.66%	10.7	3.43%

* 1) 炉心から3つの領域に分割 (NaIピン9本づつ) した場合の統計誤差

* 2) 5.2節のモデルと同じ幾何形状に設定した場合の各領域の統計誤差

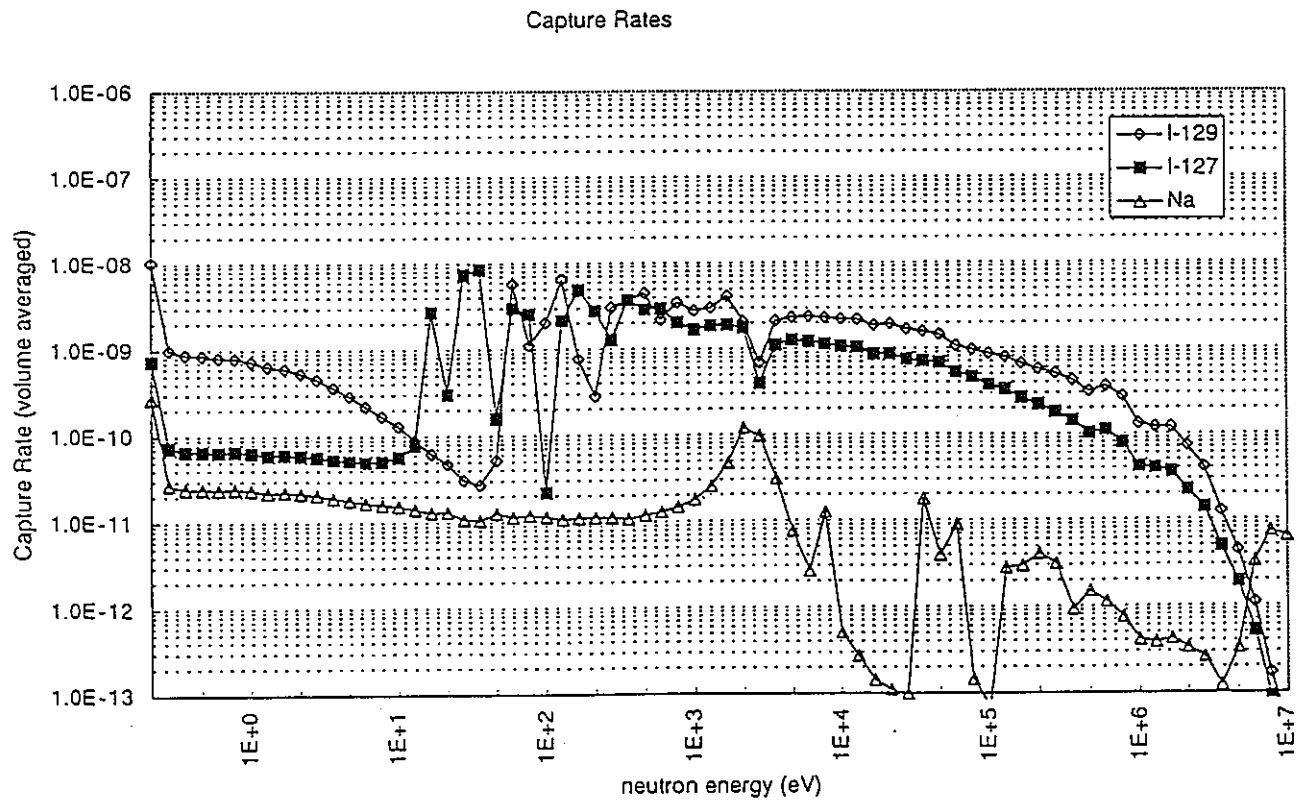
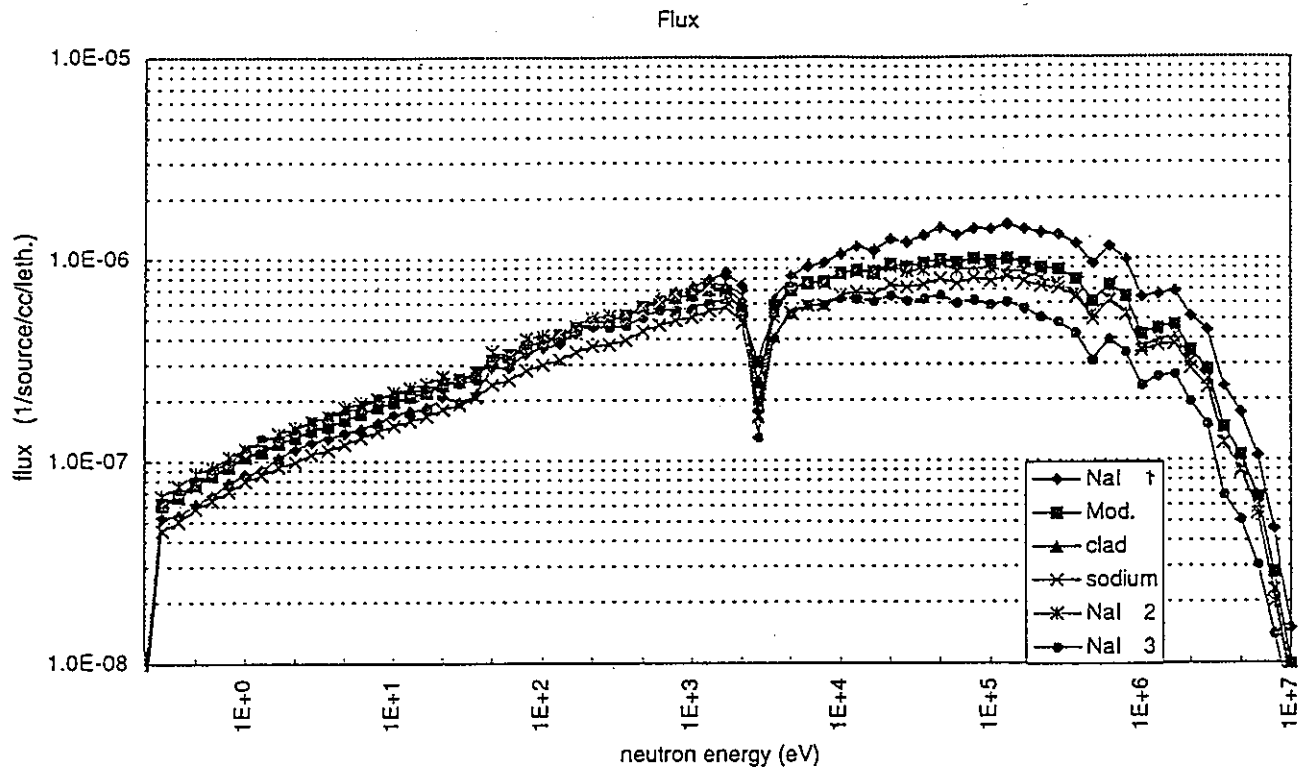


図6.1 ターゲット集合体内各領域の中性子スペクトルと吸収反応率
(総ピン本数127、NaIピン本数27、BeO減速)

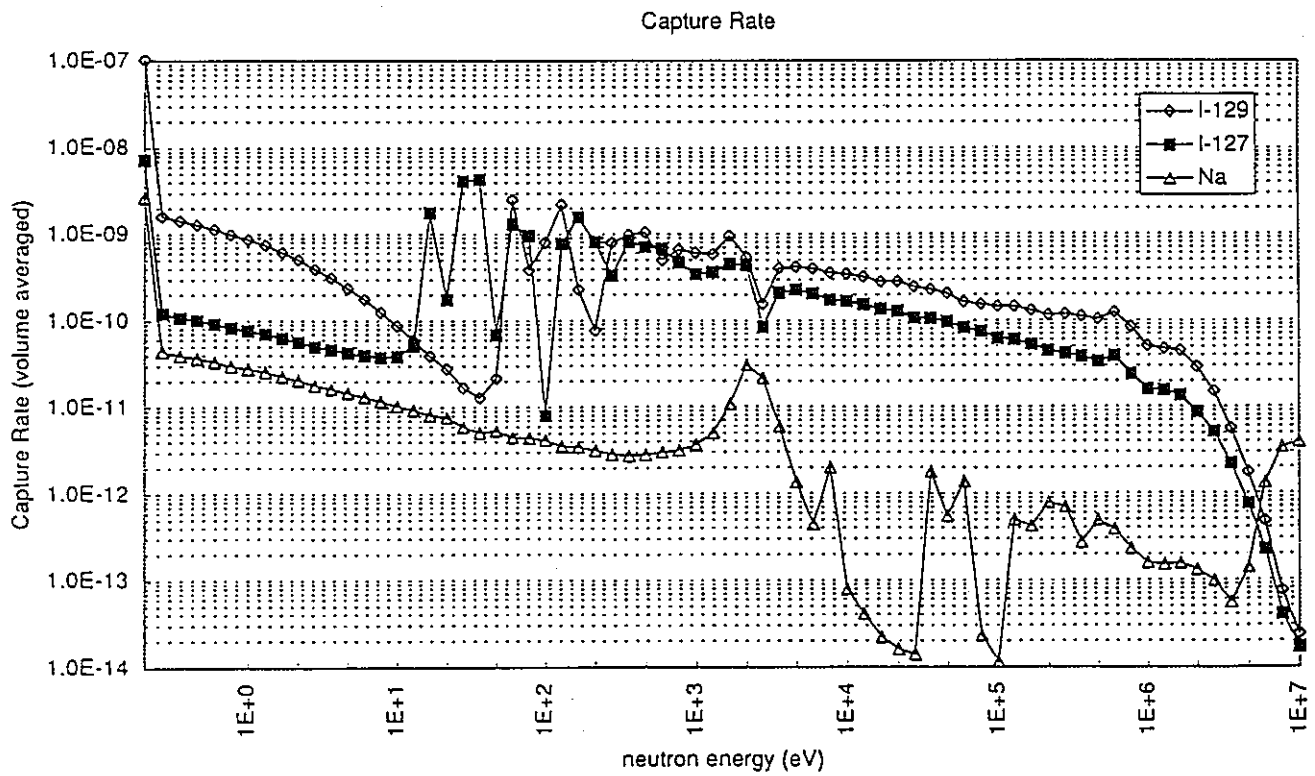
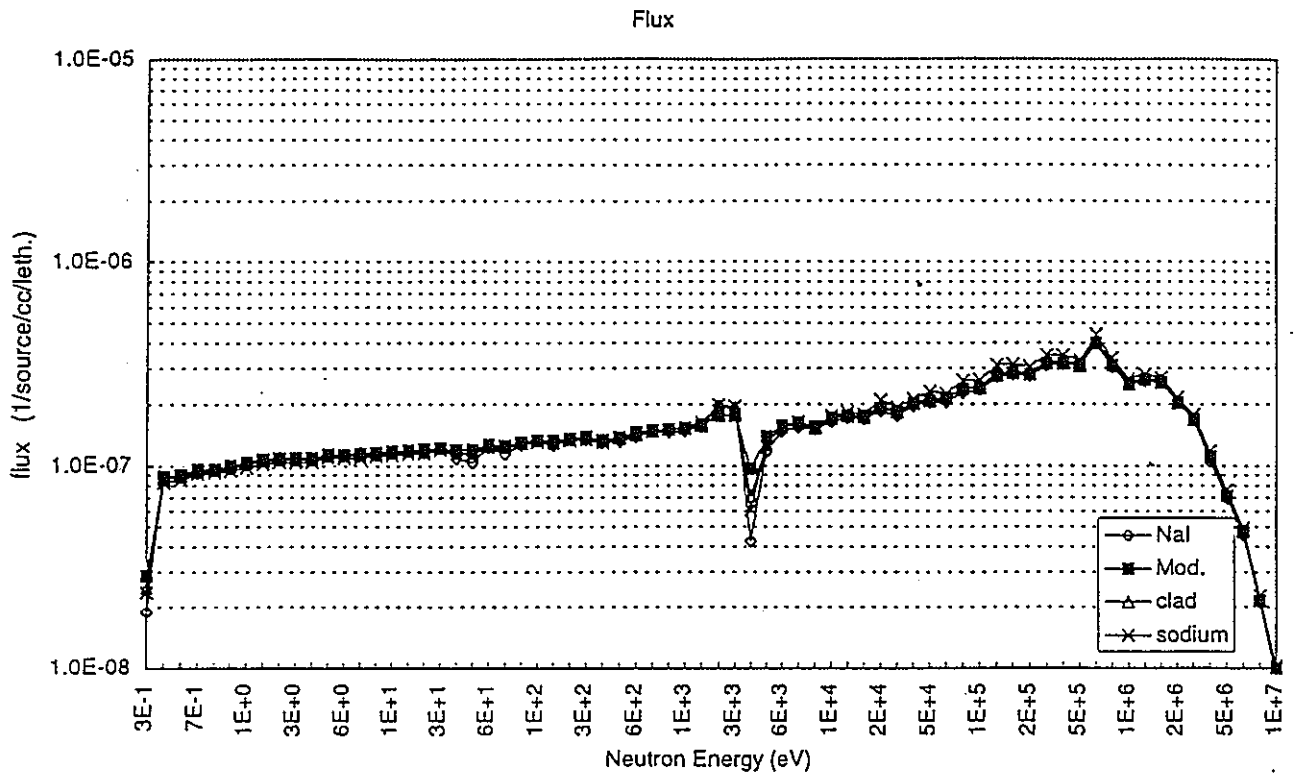


図6.2 ターゲット集合体内各領域の中性子スペクトルと吸収反応率
(総ピン本数127、NaIピン本数27、ZrH_{1.7}減速)

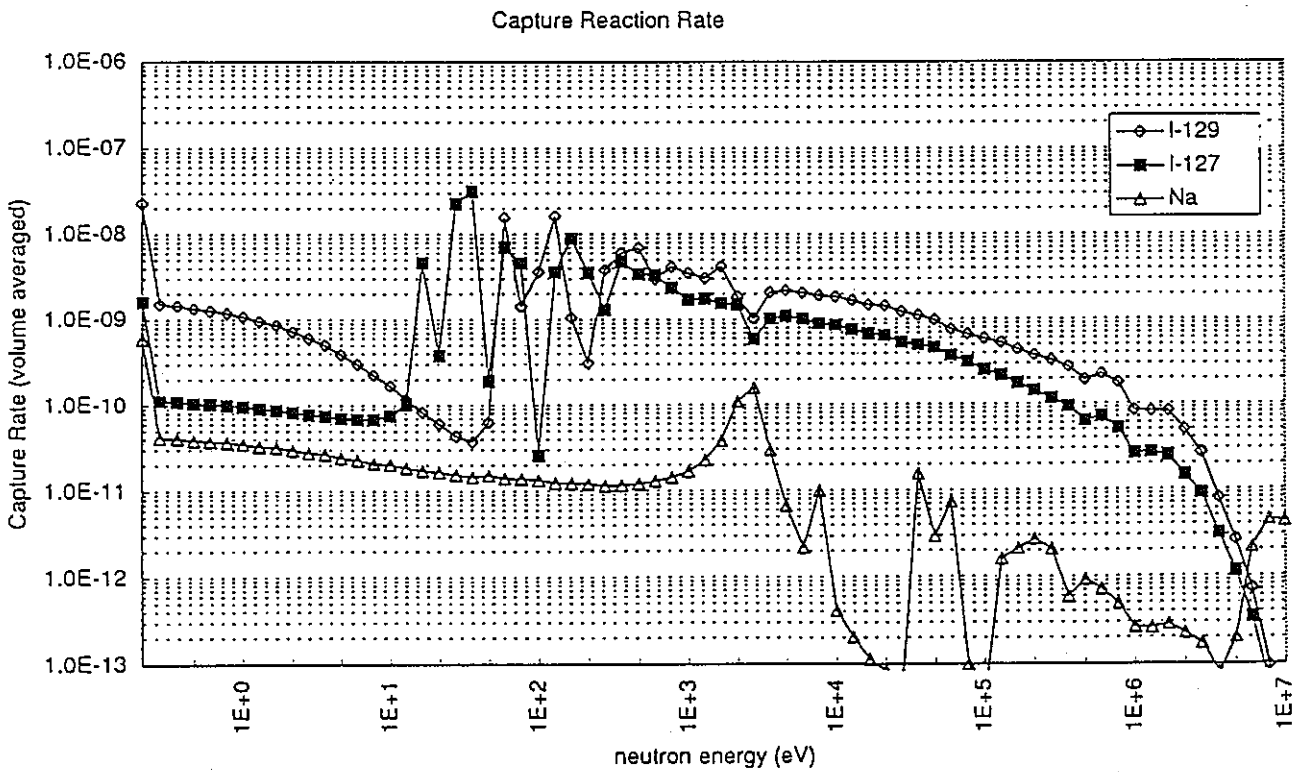
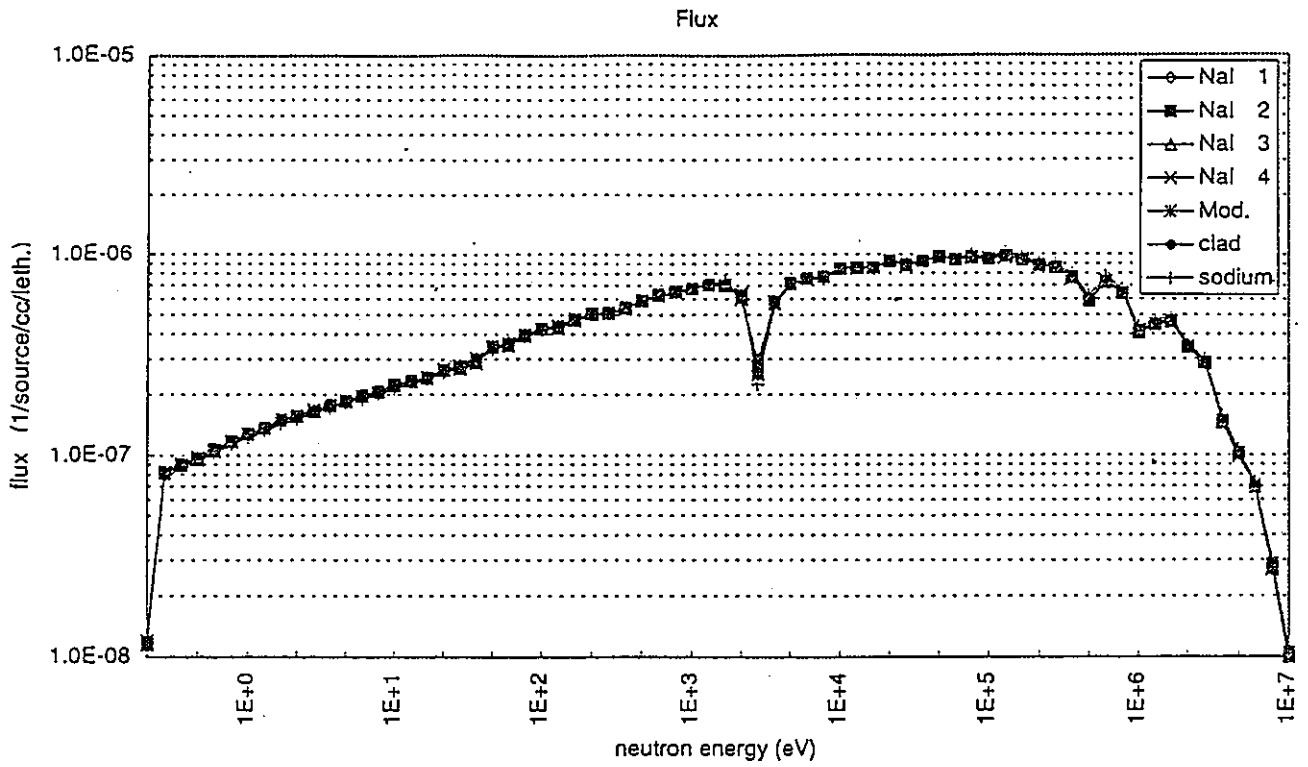


図6.3 ターゲット集合体内各領域の中性子スペクトルと吸収反応率
(総ピン本数127、Duplex、NaI径2.0mm、BeO減速)

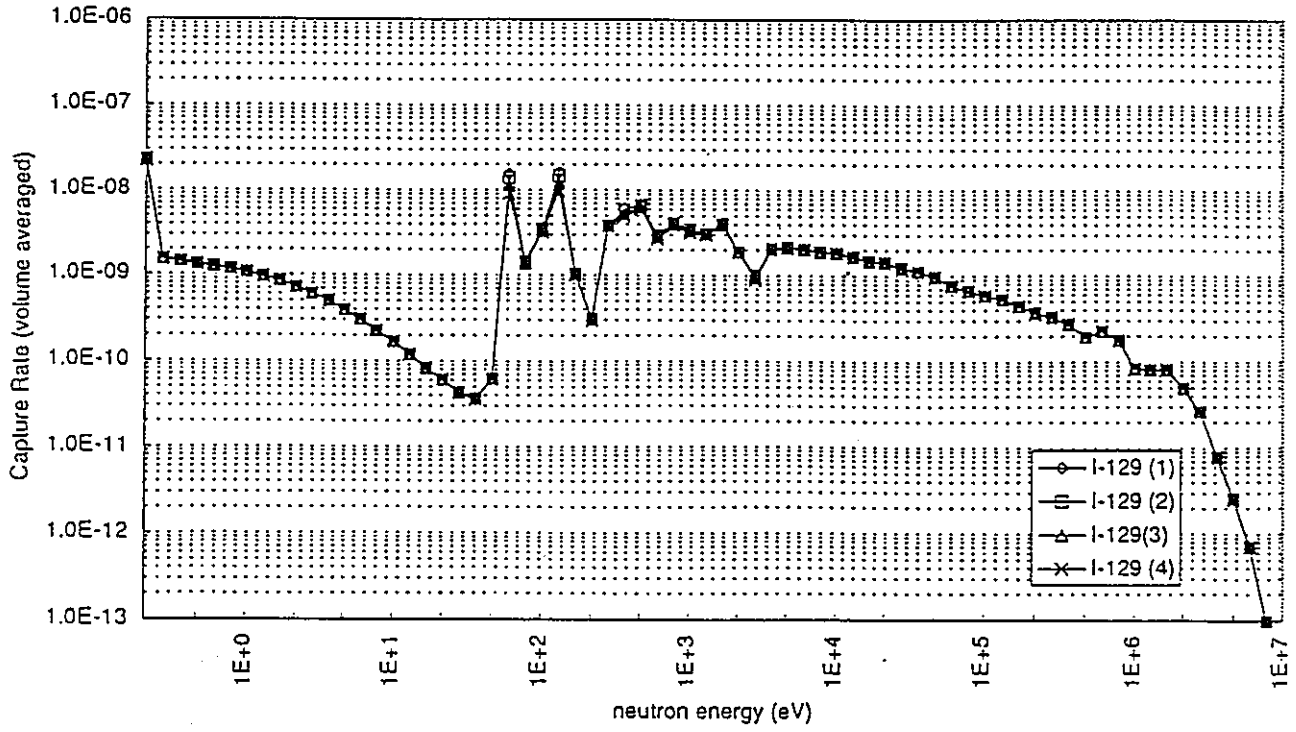


図6.4 NaIピン表層からの深さと中性子吸収反応率

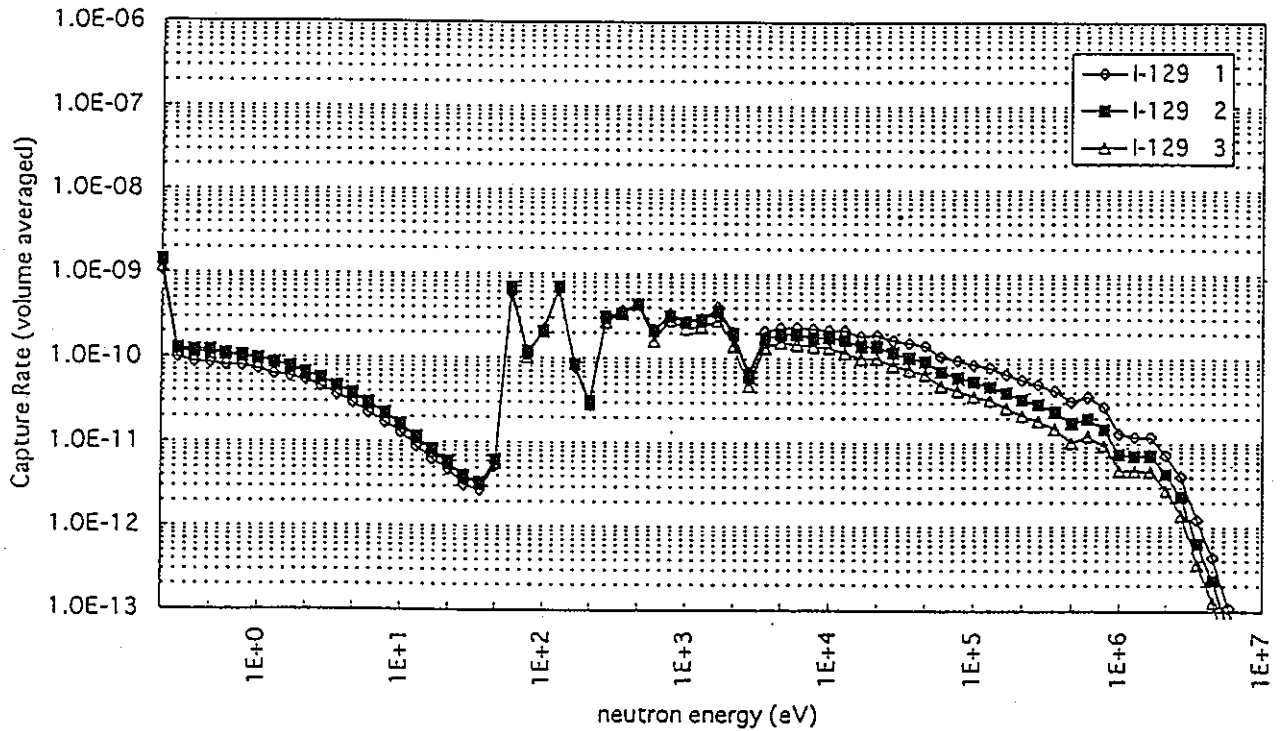


図6.5 NaIピンの炉心からの距離と¹²⁹Iの中性子吸収反応率の関係

第7章 炉心特性の解析

通常使用している高速炉の炉心特性解析コードシステムを用い、影響があると考えられるいくつかの炉心特性について解析を行った。特に燃料集合体に隣接した位置で減速材を使用するため、出力のピークが生じることが考えられる。また、 ^{99}Tc の消滅の目的にとどまらず ^{99}Tc の装荷によってNaボイド反応度の低減をねらった研究も行われているため⁽¹⁰⁾、 ^{99}Tc 装荷によるNaボイド反応度低減の効果にも着目した。

(1) 解析条件

解析コードにはCITATIONを使用し、2次元R-Zモデルで計算を行った。 ^{99}Tc をブランケット部に約300kg装荷し、減速材には $\text{ZrH}_{1.7}$ を使用した。解析項目はPu富化度、燃焼反応度、Naボイド反応度、出力密度である。CITATIONでの計算には7群の断面積を使用した。Naボイド反応度の算出にあたっては初期炉心を対象にし、70群の群定数を用いた。 ^{99}Tc 非装荷ケースはターゲット位置にSUS遮蔽体を設置した基底増殖炉心である。

(2) 解析結果

表7.1に ^{99}Tc を含むターゲット集合体を装荷した場合と非装荷の場合の炉心特性を示す。

Pu富化度は減速材付のターゲット集合体を装荷したことにより0.6-0.7%増加させる必要がある。また、燃焼反応度は0.2% $\Delta k/k$ 大きくなった。

ターゲット集合体の装荷により15%程度Naボイド反応度が低下した。この原因については今後詳細に解析を行って究明することが必要であるが、1つにはターゲット集合体を装荷したために炉心周囲での中性子束の漏れが大きくなり、ボイド化したことによる摂動が小さくなることが考えられる。また、炉心外周部の減速材の影響でスペクトルが軟化しターゲット集合体に隣接する部分の出力分担率があがる。このため正の反応度への寄与を持つ炉心中心部での中性子インポートランスが低下し、結果としてNaボイド反応度が低下することも考えられる。

図7.1 a)にターゲットを炉心中央に装荷した場合の出力分布を、同じくb)に炉心周囲に装荷した場合の出力分布を示す。

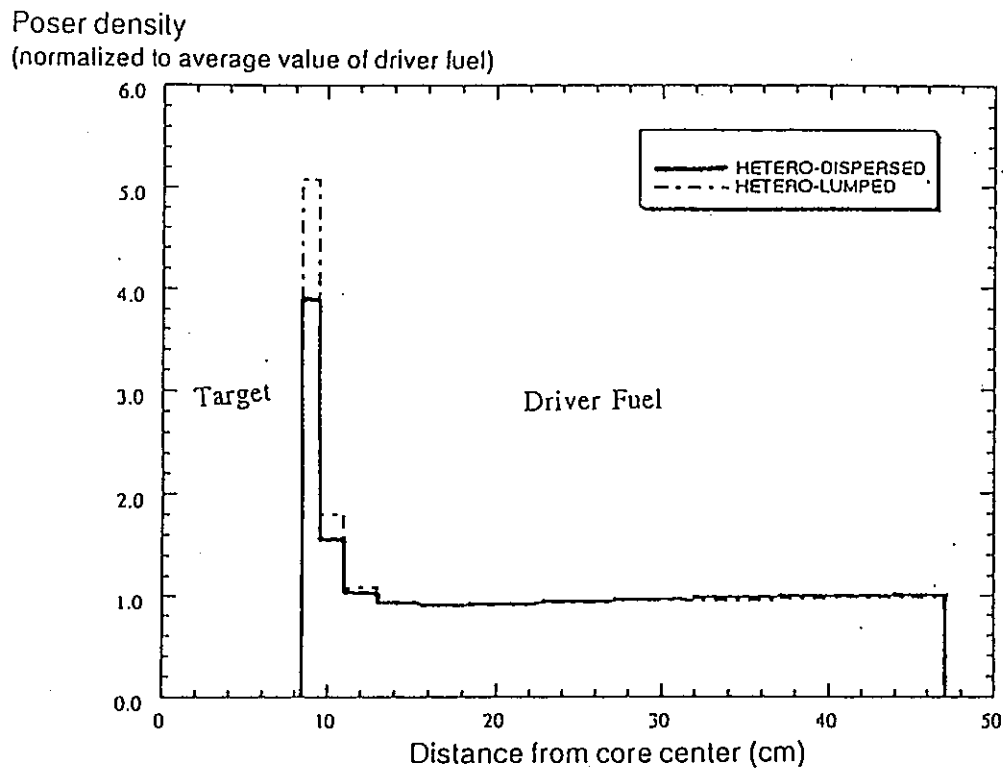
炉心中心に減速材付ターゲットを装荷する場合の炉心特性上の問題はこの局所的な出力の上昇にある。炉心周囲に装荷した場合にもターゲットに隣接する位置で出力のピークが生じたが、このピーク位置での出力密度は炉心中心での出力密度程度であるため、流量配分を調整するなどして対処可能であると考えられる。

文献10)で調査した通り ^{99}Tc を装荷することによってNaボイド反応度が低下する傾向が確認でき、炉心中心での出力ピークほどではないものの、炉心隣接部分にスペクトルの軟化のために核分裂が盛んになり出力のピークが形成されることがわかった。今後、FP消滅炉心の炉心特性については炉心周囲に減速材を装荷した本体系により適合したシステムも用いて詳細に解析を行う必要がある。

表7.1 ^{99}Tc を装荷した場合の炉心特性

	ターゲット 非装荷体系	ターゲット 装荷体系
Pu 富化度 (内側 / 外側)	17.01 / 21.05	17.58 / 21.75
燃焼欠損反応度	3.1% $\Delta\text{k/k}$	3.3% $\Delta\text{k/k}$
Naボイド反応度	1.19% $\Delta\text{k/k}$	1.02% $\Delta\text{k/k}$

(a) 炉心中心に1体装荷したケース



(b) 炉心周囲に60体装荷したケース

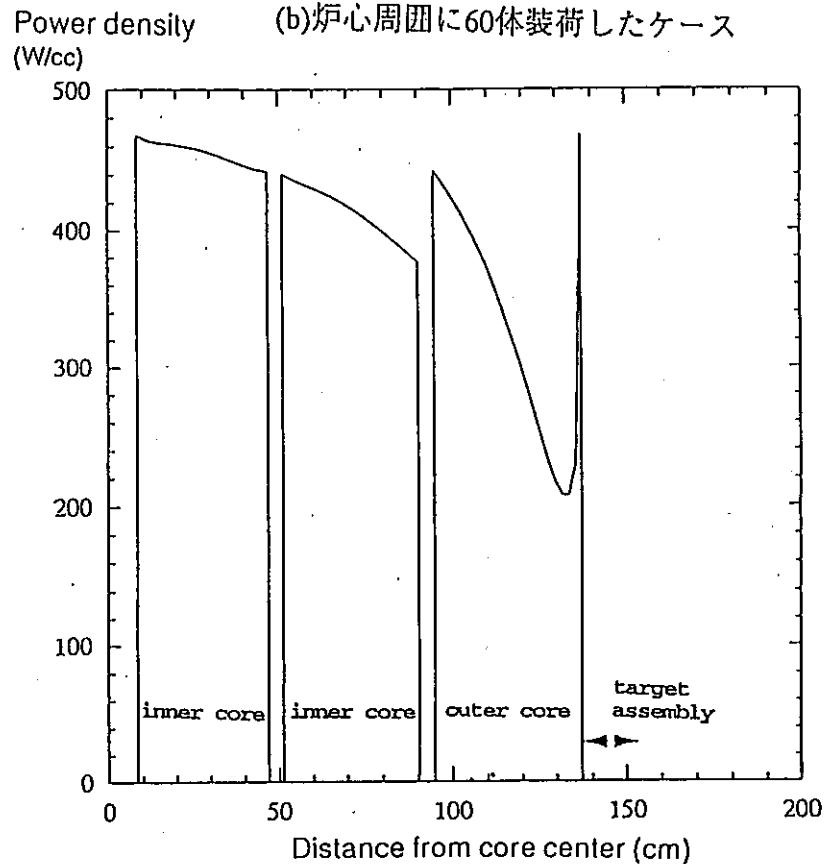


図7.1 ターゲット集合体を装荷した炉心の出力分布

第8章 まとめ

連続エネルギーモンテカルロコードMVPを用いて長半減期FP核種のうち ^{99}Tc 及び ^{129}I の高速炉における消滅の可能性を検討した。

^{99}Tc について1年間あたり10%の消滅率を得ることを目標とし、ごく細いDuplexピンとしてもしくは原子数密度を1/10にしたピンで装荷することにより目標を達成することができた。しかし年間あたりの消滅量が100万kWeクラスPWRからの生成量(約25kg)に満たないという結果になった。消滅量、消滅率ともに比較的よい結果が得られたのは減速材ピンの中に ^{99}Tc をリング状に装荷したもので消滅率9.2%、消滅量は23kgであった。ただし、減速材とターゲット核種の共存性や加工性については未検討である。消滅量が一番良かったケースで47kg/yであった(127本ピンのターゲット集合体に52本の ^{99}Tc ピンを装荷したケース。消滅率1.48%)。

MVPは非分離共鳴領域も考慮に入れた連続エネルギーのライブラリを持つために減速材付きのターゲット集合体を使用したFP消滅の解析に適用し、 ^{99}Tc の共鳴領域での吸収を的確に扱った解析を行うことができた。また、このコードを用いることにより減速材の種類や量、および集合体やピンの形状を詳細かつ容易に変更でき対象核種の消滅に適した中性子スペクトルをもつ体系をサーベイするにあたり非常に有効であった。

ターゲット集合体内の形状を厳密に扱うことが可能であるため、集合体やピンの形状が消滅率に与える影響を明らかにすることができた。

一つには同一の集合体内においても炉心からの距離によって消滅率が異なることがわかった。減速されることなくダイレクトに炉心からの中性子が流れ込む場合はスペクトルが硬いために中性子束が高い割に消滅率は良くない。また、その他のピンについてはスペクトルの形はあまり変わらずに炉心からの距離に依存して中性子束が低下するために消滅率が徐々に低下していくことが確認できた。ターゲット集合体全体としては図3.1.2に示したようにならかなりスペクトルが軟らかくなり高速中性子による構造材の損傷が少ないと考えられる。このため炉内滞在期間を長くして装荷期間中の消滅量を多くすることが可能になる。平均的に良い消滅率を得、特にターゲットの入ったピンの被覆管の損傷を少なくするためには集合体内最外周ピンには減速材を持ってきた方がよいと考えられる。ただし、この減速材の配置が局所的な出力ピークに与える影響にも注意が必要である。

^{99}Tc の自己遮蔽による効果で ^{99}Tc ピンの極表層部にて主たる吸収反応がおきていることが確認できた。これは、欧州のHFRでの照射実験の傾向とも一致する。よって、 ^{99}Tc ピンの表面積を多くとることが効果的である。また、この自己遮蔽効果をひきおこす主なエネルギー領域は熱領域及び5.6eV付近の巨大共鳴ピークであることもわかった。

この特性をふまえてDuplexピンを採用し、ピンの細径化により消滅率を向上させることができた。Duplexピン、Ringピンの採用及び原子数密度低減により消滅率10%を得ることができた。

消滅特性を改善するために減速材の種類や量の調整が重要であることが確認できた。また、熱中性子エネルギー領域では構造材の寄生吸収も大きいため、特に ^{99}Tc の場合は5.6eVの大きな共鳴ピークの部分にスペクトルをあわせることが有効であることが分かった。現時点でのターゲットピンの被服管厚は燃料ピンと同等のものを使用しているが、 ^{99}Tc から発生する核種にはガス状の有為な量をもつ核種がないため被覆管の厚さを減じることで中性子をより有効に利用することが可能と考えられる。

炉心特性としては炉心周囲に ^{99}Tc ターゲット集合体を装荷することによりNaボイド反応度が低減されたことが確認できた。採用したケースでは15%弱低減された。また、ターゲット集合体に隣接する部分で出力ピークが生じる。炉心中心にターゲット集合体を配置した場合には対処できないほどのピークが生じたが、炉心周囲に装荷すればその出力のギャップを小さくすることができ、何らかの配慮により減速材付FP消滅用ターゲット集合体を装荷できる見通しを得た。

^{129}I の消滅に関しては、化学形態としてNaIを選択しているため原子数密度が下がり自己遮蔽による中性子束の減衰が小さい。このため同一の幾何形状では ^{99}Tc を金属で装荷した場合よりも消滅率はよく、自己遮蔽効果回避の目的でDuplex等の特殊なピンを使用する必要性はないことがわかった。通常のパイン形状のターゲットで $\text{ZrH}_{1.7}$ を用いて減速したケースでは消滅率5.2%、消滅量として18kg/yを得た。化合物で装荷するために ^{129}I の装荷量が小さくなるものの100万kWe級PWRからの生成量は ^{99}Tc の1/4程度で5kgである。よって、高速炉1基ではPWR約3基分の ^{129}I を処理できることがわかった。

第9章 今後の課題

本検討はMVPコードを導入し、詳細にFPの消滅特性を解析した第一段階の解析であった。現段階では以下に示す改良点が残されている。大きく解析手法の改善及び消滅特性の向上が挙げられる。

<解析手法の改善>

本検討では連続エネルギーモンテカルロコードMVPを用いて長半減期FP核種の高速炉における消滅の可能性を検討した。本炉心概念では炉心燃料に隣接して減速材を大量に装荷したターゲット集合体が装荷され極端に中性子スペクトルが軟化した燃料領域が存在し、対象核種の消滅には高速炉では重要視しない共鳴領域での吸収反応が重要になることから従来使用してきた高速炉の炉心解析用のコードシステムは適しているとはいえない可能性がある。よって、FP消滅特性を評価する第1段階として非分離共鳴までを考慮した連続エネルギーのライブラリを持つMVPコードを適用した。

従来使用している高速炉の解析システムでは熱群については比較的軽視している。今後は、高速炉内のスペクトルよりも軟化したスペクトル場を扱えるようなSRAC95¹¹⁾等のコードシステムを導入し、より低エネルギー側も考慮した決定論での燃焼計算や炉心特性の解析を実施できるようにする必要がある。これと同時に従来高速炉で使用している決定論での解析結果との比較検討も必要である。また、原研では燃焼計算の機能を持った改良版MVPを開発しているということであり、これを利用して消滅特性の解析手法を改善することも検討していく。

消滅率は炉心の出力（核分裂率）と対象核種の吸収反応率の比から求めている（付録1）。減速材付きの集合体における消滅率の算出へのこの方法の妥当性を確認する必要がある。MVPコードによる解析の妥当性及び減速材付きのターゲット内でのFP消滅の解析精度を検証するために今後Phenixでの⁶⁰Coの生成実験との比較を行う予定である。

<消滅特性の向上>

上記の解析システム整備に平行して、消滅率をさらに向上させるための検討を行う。また、WH社のFFTFを対象にした解析には炉心燃料とターゲット集合体との間に減速能の弱いSiCで構成された減速材集合体が用意されている。このアイデアが出力分布の改善に影響するのではないかと考えられこの効果を調査する。また、このアイデアは長期間にわたりターゲットを照射する場合の集合体の健全性を保証するためにも有効と考えられる。

⁹⁹Tcによる自己遮蔽効果を低減するために、DuplexやRingのピンを用いたり⁹⁹Tcを薄めて装荷することが有効であると考えられ、減速材に混入してターゲットピンをつくるなどの方法も考えられる。ターゲットピンをつくる場合のFPの化学形態、物性およびターゲットの製造方法について調査検討する。

HFRにおける⁹⁹Tc及びヨウ素の化合物の照射実験は現在も継続されている。また、

Phenixの運転再開を待つて高速炉におけるこれらの照射実験も行われる予定である。消滅特性のみならずこれらの実験から得られる⁹⁹Tcのスエリング特性、ヨウ素化合物の健全性等の照射挙動の実験結果が期待される。

また、¹²⁹Iについては核変換後Xeに変わるためにガス発生量、化学的影響の明確化やそれらへの対策の検討も重要と考えられる。

参考文献

- (1) T. Horiguchi T. Tachibana and T. Tamura : Chart of the Nuclides , Japanese Nuclear Data Committee and Nuclear Data Center (1992)
- (2)K. Tasaka et al : JNDC Nuclear Data Library of Fission Products - second version -, JAERI 1320 (1990.9)
- (3)向山 武彦 : 消滅処理研究の現状, 日本原子力学会, p1 (1994)
- (4)加瀬 健 他訳 : 廃棄物の群分離 / 核変換が放射性廃棄物処分に与える影響に関する歴史的概観、経済的分析、及び、法規的分析 PNC TN8510 92-003(1992.8.)
- (5)D.W.Wootan and J.V.Nelson : Transmutation of selected fission products in a fast reactor, Proceeding of GLOBAL'93 p1282(1993)
- (6)M.Nakagawa and T.Mori : J.Nucl.Sci.Technol., 30(7), p692(1993)
- (7)R.J.M.Konings, K.Abrahams, et al : Technorogical Aspects of Transmutation of Technetium and Iodine, Proceeding of GLOBAL'93 p1260(1993)
- (8)T.J.M.Konings, et al : Irradiation Tests of Transmutation of the Fission Products Technetium and Iodine. Proc. of GLOBAL '95 p.1631 (1995)
- (9)S. Nakamura , H. Harada et al : Measurement of Thermal Neutron Capture Cross Section and Resonance Integral of the $^{129}\text{I} (n, \gamma) ^{130}\text{I}$ Reaction. , J. Nucl. Sci. Technol., vol 33, no.4 p283-289 (1996)
- (10)S. F. Kessler : Reduction of the Sodium void coefficient of reactivity by using a technetium-99 layer, Proc. of GLOBAL '93 p1289 (1993)
- (11)奥村啓介 他 : SRAC95 ; 汎用核計算コードシステム, JAERI-Data/Code 96-015 (1996)

謝辞

本検討をすすめるにあたり、MVPの開発者である日本原子力研究所原子炉システム研究室（現科学技術庁）森貴正氏にMVP利用方法、ライブラリの作成等に関して丁寧にご指導いただきました。深く感謝いたします。

また、断面積の測定に関する情報については東海核燃料技術開発部先端技術開発室の重留義明氏を通じて同じく原田秀郎氏、中村詔司氏にご提供いただきました。ここにあらためて感謝いたします。

最後になりましたが、ISA（株）桧山一夫氏にはデータの処理に関して多くのご助言をいただきました。ありがとうございました。

付録1 MVP解析結果からの消滅率の算出方法

現行のMVPでは燃焼計算ができない。よって、炉心における1秒あたりの反応率から（MVPの計算結果）、以下の方法で消滅率を算出した。

実際の炉心と解析結果の間には以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} & (\text{実際の全炉心のFis.Rate; } F_r) : (\text{実際のTc 1個あたりのCap.Rate; } C_r) \\ & = (\text{計算上の全炉心のFis.Rate; } F_c) : (\text{計算上のTc 1個あたりのCap.Rate; } C_c) \end{aligned}$$

$$F_r : C_r = F_c : C_c$$

$$C_r = F_r \times C_c / F_c \text{ (1/sec)}$$

ここで、

$$F_r = \text{Power(MWth)} / (210 \times 1.6 \times 10^{-19}) \text{ (MW} \cdot \text{sec)}$$

1fis.あたり210MeV=210×1.6×10⁻¹⁹MJが放出されるとした。

F_c : MVPの体積積分の核分裂率

C_c : (MVPの体積積分の吸収反応率) / 体積 / N.D.

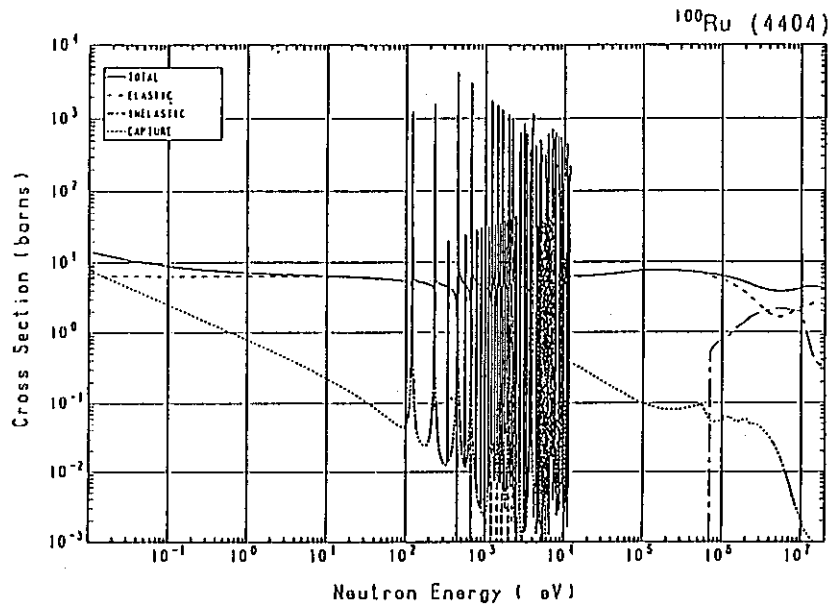
1年を秒換算すると

$$T = 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 3.1536 \times 10^7 \text{ 秒}$$

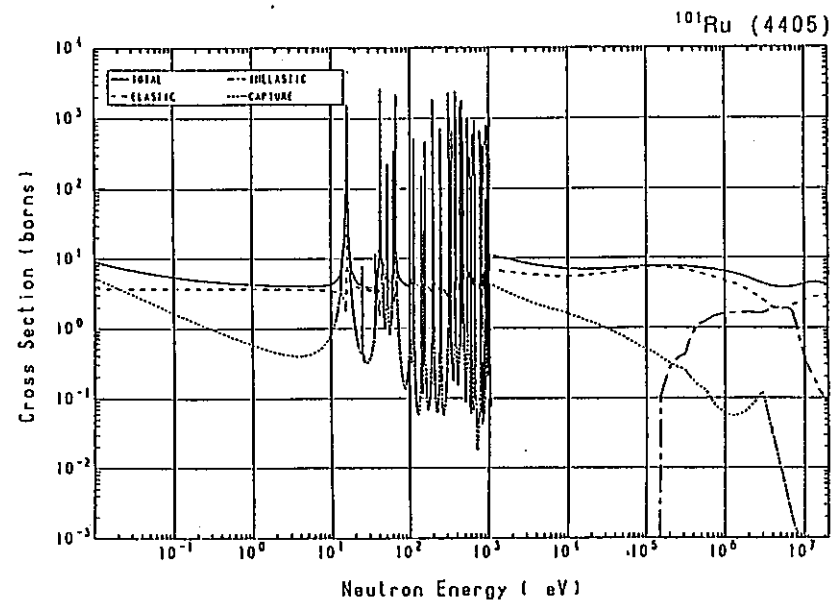
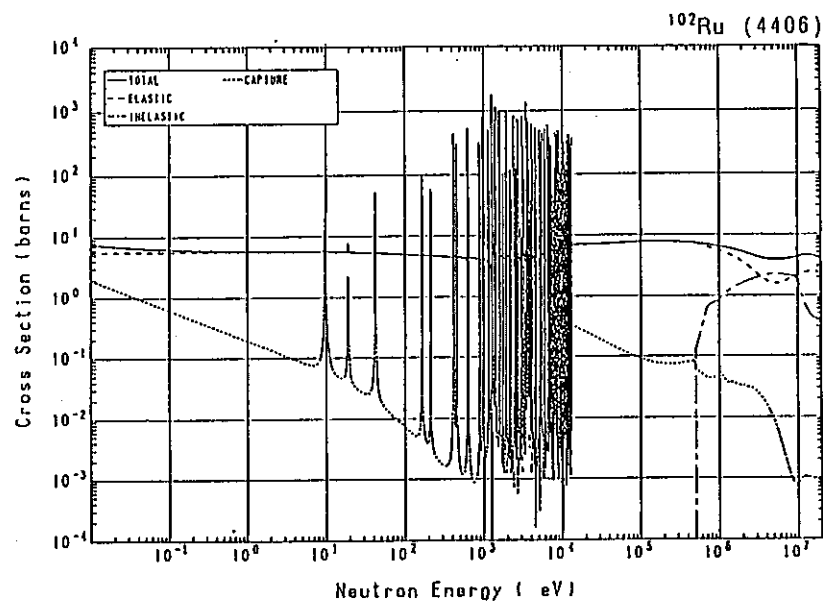
$C_r \times T$ を年間あたりの消滅率としている。

化合物のときのMVPアウトプットからの消滅率算出方法

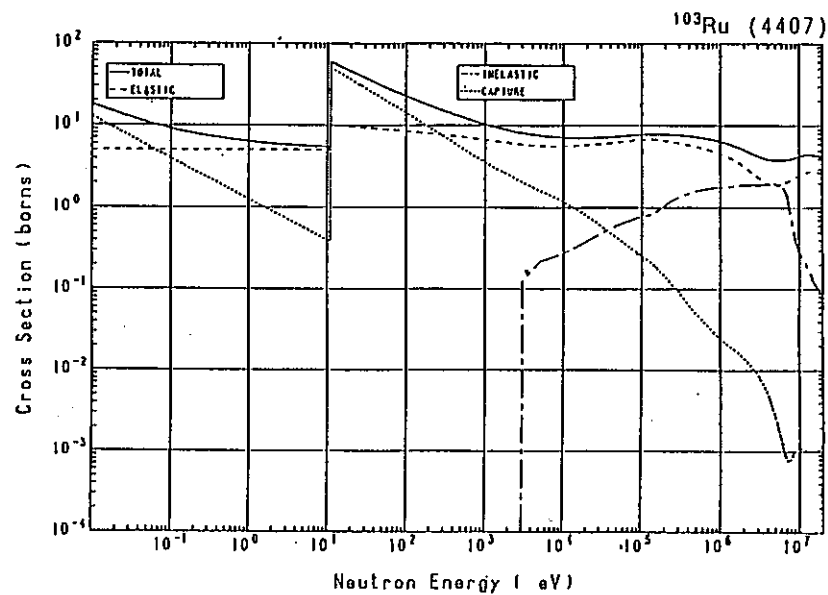
MVPのミクロの反応率（体積積分）をたしあわせたものがマクロの体積積分の値となっている。よって、対象核種のミクロ（体積積分）の反応率と原子数密度を用いて算出した。



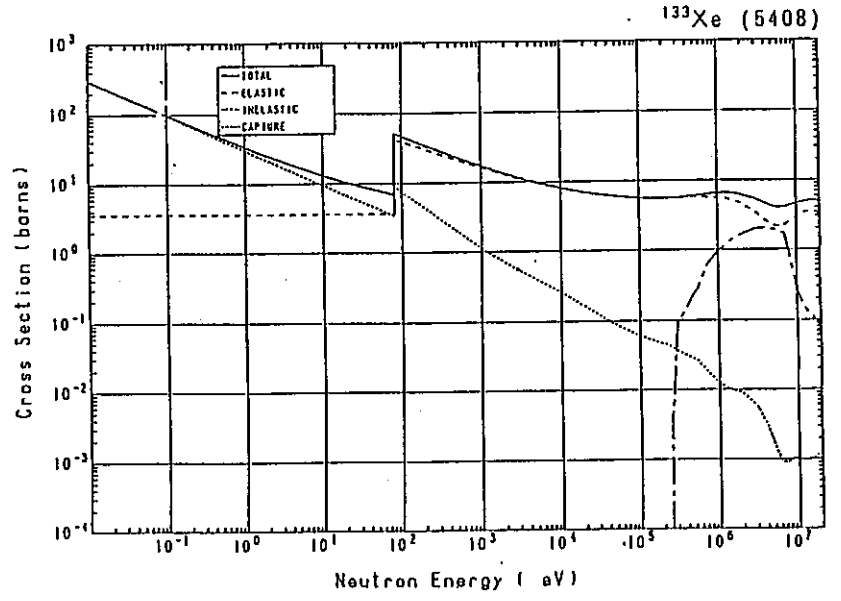
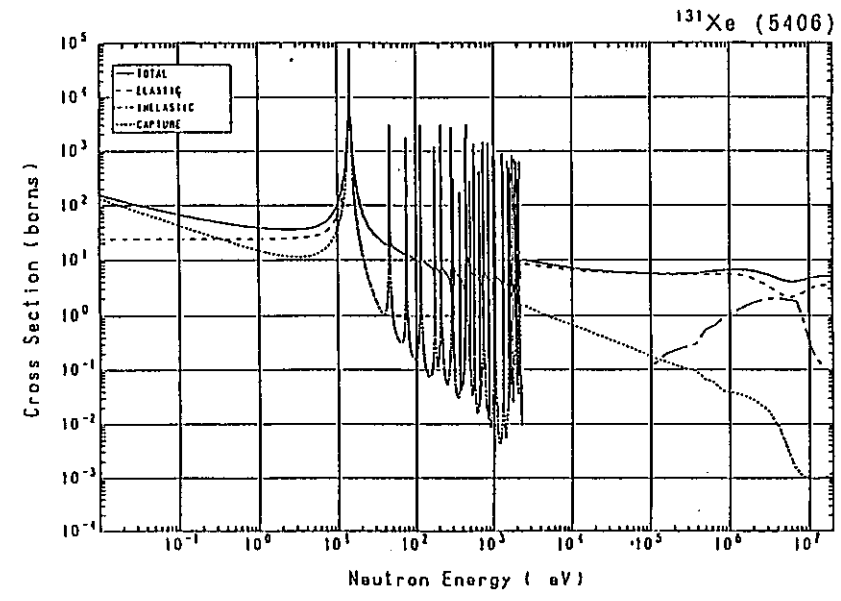
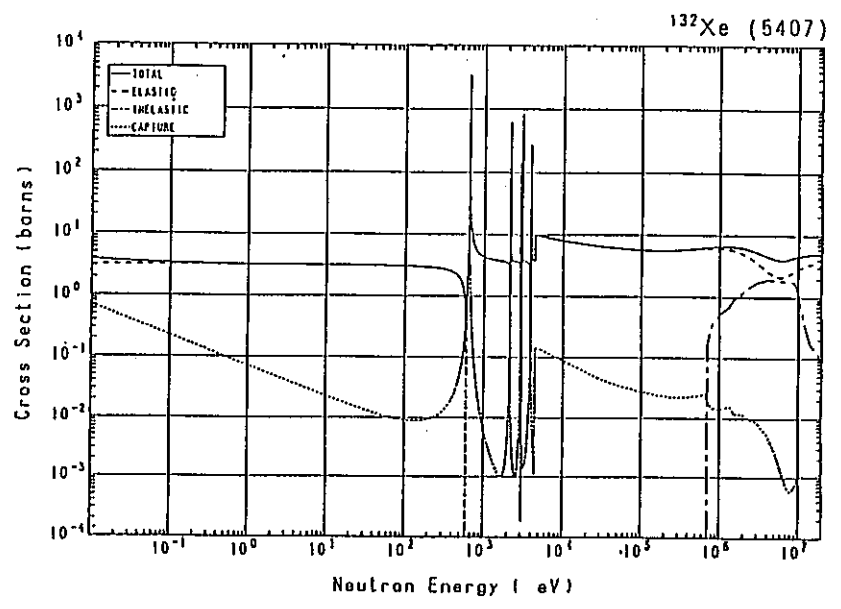
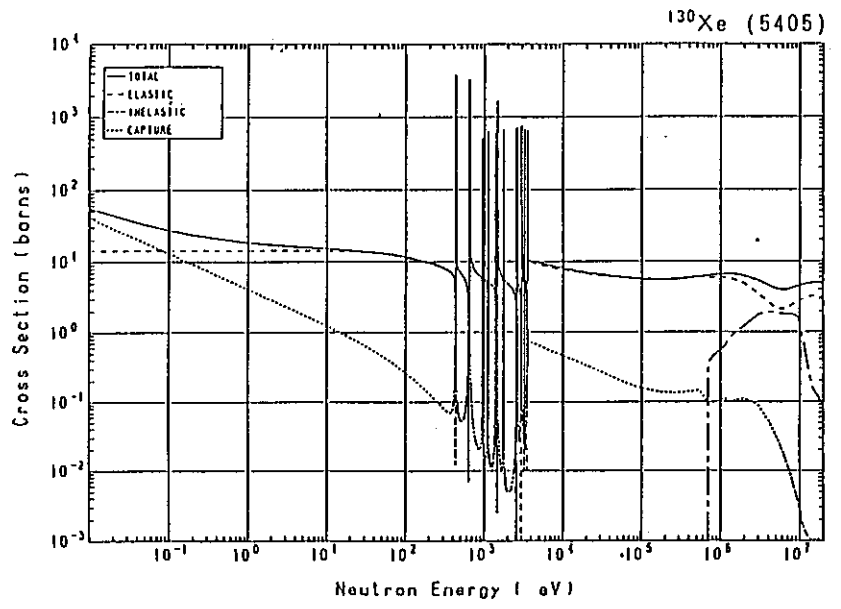
JAERI-M 92-07



JAERI-M 92-07



付録2-1 ⁹⁹Tcの吸収反応で生成される核種の断面積(JENDL-3.1)



付録2-2 ¹²⁹Iの吸収反応で生成される核種の断面積(JENDL-3.1)