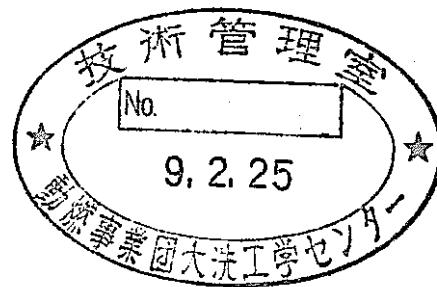


閾値反応を利用したナトリウムボイド 反応度低減炉心及びドップラー反応度 改善炉心に関する解析

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



1996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)

1996 年 3 月

閾値反応を利用したナトリウムボイド反応度低減炉心
及びドップラー反応度改善炉心に関する解析

横山 次男*、川島 正俊**、川合 将義**
山岡 光明**、藤田 玲子***

要 旨

高速炉では、MAのリサイクルに伴ってナトリウムボイド反応度及び冷却材温度反応度が大きくなり、また、ドップラー係数も小さくなる傾向がある。安全上これらの反応度を改善することが重要である。本解析作業では、ナトリウムボイド時に増加する高エネルギー中性子に対して、大きな中性子吸収反応を生じる核種を混在させた炉心を解析することにより、炉心性能を大きく低下せずにナトリウムボイド反応度を低減できる核種についてそのボイド低減効果を調べた。また、ドップラー係数の改善方法として高次Puの利用及び共鳴物質の利用が考えられ、パラメータサーベイによりその効果を調べた。

閾値反応を利用したナトリウムボイド反応度低減炉心の解析では、中性子スペクトル変化の影響調査として炉心部へのMA装荷の有無及び炉心サイズをパラメータとして炉心部中性子スペクトルを解析し、ボイド反応度上重要なエネルギー領域を同定した。次にボイド反応度低減のための候補核種として、上記の重要なエネルギー領域以上で閾値反応による中性子吸収断面積の増大する核種を調査した。更に上記スペクトル場において、ボイド反応度低減効果を吸収核種装荷量と種類をパラメータとして解析した。その結果、候補候補として摘出された酸素17を用いた大型酸化物燃料炉心のボイド反応度は天然酸素による炉心のボイド反応度の約1/2以下となることが分かった。

ドップラー反応度改善炉心の解析では、PuN燃料をベースとして、高次Pu及び共鳴吸収物質を装荷した場合のドップラー係数改善効果について解析した。また、不活性母材候補材料について、その適合性、炉心特性解析に必要な物性値を調査し、それらの材料を用いた燃料材の物性値等について予備調査を行なった。その結果、構造材核種を金属形態で装荷する事でドップラ係数等の特性を改善できることが分かった。

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基づいて実施した業務の成果である。

契約番号：07C5896

事業団担当部課：大洗工学センター、炉心技術開発室

事業団担当者： 日向野 直美

*) (株) 東芝 磐子エンジニアリングセンター 動力炉開発部

**) (株) 東芝 原子力技術研究所 原子炉技術担当

***) (株) 東芝 原子力技術研究所 化学・材料技術担当

March, 1996

Analysis of Reduced Sodium Void Reactivity Core and Improved Doppler Reactivity Core by Utilizing the Threshold Reaction

Tsugio Yokoyama*, Masatoshi Kawashima**, Masayoshi Kawai**
Mitsuaki Yamaoka**, Reiko Fujita***

Abstract

In the fast reactor, sodium void reactivity and sodium coolant temperature reactivity are increased, and Doppler coefficient is decreased when MA is recycled. It is important to improve these reactivities in terms of safety features. In the study, Analysis was conducted of the effect on the sodium void reduction without deteriorating the core performance by mixing nuclides that give large absorption reactions in the higher energy region, where neutrons are increased at the neutron spectrum is hardened. Effect of higher Pu isotopes was also analyzed with parameters for improving Doppler coefficient.

In the analysis of reduced sodium void reactivity core using the threshold reaction, dominant energy region was identified for the sodium void reactivity by analyzing the core neutron spectra with parameters of MA mixing and core size. Furthermore, effect on reducing void reactivity was analyzed with parameters of inventory amounts and kinds of absorber nuclides. As a result, it was found that the sodium void reactivity of the MOX core with oxide-17 was about half of that of the core with natural oxide.

In the analysis of reduced Doppler reactivity core, effect of improving the Doppler effect was analyzed for the nitride fuel core with higher Pu isotopes and resonance absorbers. Applicability and properties required for core analysis were also examined for candidates of base inert material, and the properties of fuel with those materials were preliminary surveyed. As a result, it was found that characteristics including Doppler coefficients can be improved with nuclides of structure material as metal form.

Work performed by Toshiba corporation under contract with Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract Number; 07C 5896

PNC Liaison ; Advanced Technology Division, Reactor Physics Research Section
Naomi Higano

*) Advanced Engineering Department, Nuclear Energy Division, Toshiba Corporation

**) Reactor Technology Group, Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation

***) Chemical and Material Technology Group, Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation

全体目次

第Ⅰ部 閾値反応を利用したナトリウムボイド反応度低減炉心の検討

1. 概 要
2. サーベイ用基準炉心の特性解析
3. ボイド時中性子スペクトルの解析
4. 候補核種の調査
5. ボイド低減効果の評価
6. 酸化物燃料炉心におけるボイド反応度低減効果
7. まとめ

第Ⅱ部 ドップラー反応度改善炉心に関する解析

1. はじめに
2. 候補材の検討
3. サーベイ解析による主要パラメータの影響度解析
4. おわりに

第Ⅰ部 閾値反応を利用したナトリウムボイド反応度低減炉心の検討

第Ⅰ部：閾値反応を利用したナトリウムボイド反応度低減炉心の検討

目 次

1. 概 要	6
2. サーベイ用基準炉心の特性解析	7
2.1 サーベイ解析	7
2.2 サーベイ用基準炉心の炉心仕様	7
2.3 解析結果	8
3. ボイド時中性子スペクトルの解析	22
3.1 解析対象炉心	22
3.2 炉心特性及び中性子スペクトル解析結果	22
4. 候補核種の調査	30
4.1 調査範囲の検討	30
4.2 断面積の調査結果	30
5. ボイド低減効果の評価	46
5.1 評価方法	46
5.2 吸収効果の評価結果	46
6. 酸化物燃料炉心におけるボイド反応度低減効果	59
6.1 解析の目的	59
6.2 酸化物燃料炉心の炉心仕様	59
6.3 解析結果	60
7. まとめ	68

第 I 部 図リスト(1/2)

図 2.2-1	基準炉心配置	1 8
図 2.2-2	R Z 計算モデル図	1 9
図 2.3-1	N - 1 4 中性子反応断面積	2 0
図 2.3-1	N - 1 5 中性子反応断面積	2 1
図 3.2-1	基準炉心 中性子スペクトル	2 5
図 3.2-2	MA無し炉心 中性子スペクトル	2 6
図 3.2-3	MA 5 %炉心 中性子スペクトル	2 7
図 3.2-4	ピッチ 2倍炉心 中性子スペクトル	2 8
図 3.2-5	ピッチ 1 / 2 倍炉心 中性子スペクトル	2 9
図 4.2-1	O - 1 7 中性子反応断面積	3 1
図 4.2-2	C u - 6 3 中性子反応断面積	3 2
図 4.2-3	P - 3 1 中性子反応断面積	3 3
図 4.2-4	S - 3 2 中性子反応断面積	3 4
図 4.2-5	K - 4 0 中性子反応断面積	3 5
図 4.2-6	P u - 2 3 9 中性子反応断面積	3 6
図 4.2-7	O - 1 7 (n, α) 反応断面積	3 7
図 4.2-8	C u - 6 3 (n, p) 反応断面積	3 8
図 4.2-9	C u - 6 3 (n, α) 反応断面積	3 9
図 4.2-10	P - 3 1 (n, p) 反応断面積	4 0
図 4.2-11	P - 3 1 (n, α) 反応断面積	4 1
図 4.2-12	S - 3 2 (n, p) 反応断面積	4 2
図 4.2-13	S - 3 2 (n, α) 反応断面積	4 3
図 4.2-14	K - 4 0 (n, p) 反応断面積	4 4
図 4.2-15	K - 4 0 (n, α) 反応断面積	4 5
図 5.2-1	基準炉心における各候補核種の吸収効果	5 4

第 I 部 図リスト(2/2)

- 図 5.2-2 MA 無し炉心における各候補核種の吸収効果 5 5
図 5.2-3 MA 5 % 炉心における各候補核種の吸収効果 5 6
図 5.2-4 ピッチ 2 倍炉心における各候補核種の吸収効果 5 7
図 5.2-5 ピッチ 1 / 2 倍炉心における各候補核種の吸収効果 5 8

第I部 表リスト

表 2.2-1	燃料組成条件	9
表 2.2-2	想定した再処理前LWR使用済燃料の組成	10
表 2.2-3	想定したアクチニド燃料の組成	10
表 2.2-4	想定したMA（マイナーアクチニド）の組成	11
表 2.2-5	ボイド反応度検討用窒化物燃料炉心基本条件	12
表 2.2-6	ボイド反応度検討用炉心の仕様	13
表 2.3-1	核設計サーベイ計算のための解析方法	16
表 2.3-2	ボイド反応度検討用炉心特性	17
表 3.1-1	解析対象炉心	23
表 3.2-1	ボイド反応度検討用炉心特性	24
表 5.2-1	基準炉心 Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率	48
表 5.2-2	MA無し炉心 Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率	49
表 5.2-3	MA 5%炉心、Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率	50
表 5.2-4	ピッチ2倍炉心、Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率	51
表 5.2-5	ピッチ1/2倍炉心、Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率	52
表 5.2-6	各炉心における閾値反応吸收効果の比	53
表 6.2-1	燃料組成条件	61
表 6.2-2	想定した酸化物燃料炉心Pu同位体組成	62
表 6.2-3	酸化物燃料炉心基本条件	63
表 6.2-4	酸化物燃料炉心の仕様	64
表 6.3-1	酸化物燃料炉心の特性とボイド反応度低減	67

1. 概要

プルトニウムを用いる大型高速炉炉心では冷却材のボイド化や温度上昇に伴う反応度変化即ちナトリウムボイド反応度及び冷却材温度反応度は一般に正の値であり、最近検討されているマイナアクチニド（MA）の混入によりさらに大きな値となる傾向がある。安全上これらの反応度を改善することは重要な炉心設計上の課題である。本検討では、ナトリウムボイド時に増加する高エネルギー中性子に対して、大きな中性子吸収反応を生じる核種を混在させた炉心を解析することにより、炉心性能を大きく低下せずにナトリウムボイド反応度を低減する核種の効果を調べた。

中性子スペクトル変化の影響調査として炉心部へのMA装荷の有無及び炉心サイズをパラメータとして炉心部中性子スペクトルを解析し、ボイド反応度上重要なエネルギー領域を同定した。次に影響度解析の対象パラメータとしてMA装荷量、炉心サイズ等を選び、ボイド反応度低減のための候補核種として、上記の重要なエネルギー領域以上で閾値反応による中性子吸収断面積の増大する核種を調査した。更に上記スペクトル場において、ボイド反応度低減効果を吸収核種装荷量と種類をパラメータとして解析した。その結果、酸素17（O-17）をボイド低減効果の大きい候補核種として摘出し、酸素17を用いた大型酸化物燃料炉心の解析を行った結果、ボイド反応度は天然酸素による炉心のボイド反応度の約1/2となることが分かった。

2. サーベイ用基準炉心の特性解析

2. 1 サーベイ解析

閾値反応を利用したナトリウムボイド反応度低減炉心の検討のため、まずパラメータサーベイの基準となる炉心について下記解析を行い、閾値反応の可能性を整理した。

- ・サーベイ用基準炉心の特性解析
- ・N-14 (n, p) 反応効果の検討

2. 2 サーベイ用基準炉心の炉心仕様

ボイド反応度低減効果を窒化物大型炉心を対象として評価するために、基準炉心仕様を下記のように設定した。

(1) 燃料組成条件

表2. 2-1, 表2. 2-2に各々燃料材質、組成条件を示す。窒化物燃料のスマア密度は、諸外国の設計例を参考に、顆粒燃料形態を想定して、酸化物ペレット燃料のスマア密度（従来約84%）より低めの80%と設定した。また、装荷燃料に使用する燃料の組成条件、MAの同位体組成条件を表2. 2-3、表2. 2-4に示す。軽水炉燃料の高速炉へのリサイクルを想定し、MAはPu富化度に比例してPuに付随する全量が混入されたとした。MAに付随して混入するレアアース(REE)元素は除染係数(DF)を5と想定して混入量を設定し、その微視的断面積は核分裂生成物平均断面積(ランプFP断面積)で模擬した。

(2) 炉心仕様

炉心サイズは原子炉熱出力1600MWt、炉心径約3mの実証炉級大型炉心を想定した。表2. 2-5に採用した窒化物燃料炉心の基本条件、表2. 2-6に設定した炉心仕様を示す。

炉心高さは窒化物燃料炉心が高線出力が可能であること、ボイド反応度を従来酸化物燃料炉心と同等の6\$程度とすることから従来酸化物燃料炉心(1m程度)より低減した。

被覆管と燃料のボンド材及び窒素濃縮については従来窒化物炉心検討例にならった。

サーベイ用基準炉心の炉心配置及び採用したRZ計算モデルを図2. 2-1及び図2. 2-2に示す。

2.3 解析結果

表2.3-1に今回採用した解析方法を、表2.3-2にサーベイ用基準炉心の主要炉心特性を示す。
比較炉心としては、

- (1) 天然N (N-14 99.635%、N-15 0.365%) 使用窒化物炉心
(富化度は平衡末期で $K_{eff}=1.002$ となる値)
- (2) N-15 99%濃縮炉心 (富化度は天然N炉心と同じ)
- (3) N-15 99%濃縮炉心 (富化度は天然N炉心と同じ条件で設定)

の3ケースを検討した。

その結果、ボイド反応度は天然N炉心がN-15 99%濃縮炉心より10%程度低減しており、閾値反応ではないがN-14 (n, p) 反応によりボイド反応度を低減する可能性があることが分かった。

参考にN-14及びN-15の断面積を図2.3-1、2に示す。

表2.2-1 燃料組成条件

項目	窒化物燃料炉心
燃料材質	窒化物
燃料スマア密度	80%
MA混入	全量混入 (Puに付隨する分)
Vアース混入	DF = 5

表2.2-2 想定した再処理前LWR使用済燃料の組成(45GWD/t、5年冷却)

元素	重量割合(%)	備考
U	94.26	
Pu	0.97	
Np	0.073	
Am	0.057	
Cm	0.0065	
希土類	1.39	
その他	3.24	
合計	100	

表2.2-3 想定したアクチニド燃料の組成(ウランを除いた分の内訳)

元素	重量割合(%)	備考
Pu	70.2	
Np	5.2	
Am	4.1	
Cm	0.47	
希土類	20.0	F Pで模擬する。 D F(除染係数) = 5を想定
合計	100	

表2.2-4 想定したMA（マイナーアクチニド）の組成

元素	同位体	元素の重量割合（%）	同位体の重量割合（%）
Np	Np237	53.4	100.0
	Am241	41.9	66.5
	Am242m		0.2
	Am243		33.3
Cm	Cm243	4.8	1.1
	Cm244		93.2
	Cm245		4.9
	Cm246		0.9
合計		100	

表2.2-5 ボイド反応度検討用窒化物燃料炉心基本条件

項目	パラメータ
原子炉熱出力	1600MWt
平均燃焼度	約10万MWd/t
炉心径	3m
炉心高さ	80cm
ボンド材	Naボンド
窒素組成	N-15 (99%濃縮)

表2.2-6 ボイド反応度検討用炉心の仕様 (1/3)

項目	単位	窒化物 燃料炉心
1. 原子炉熱出力	MW	1600
2. 炉心構成		
(1)炉心形式		
炉心概念		均質炉心
炉心領域数		2
(2)構成要素数		
炉心燃料 (内側/外側)	体	301(205/96)
制御棒	体	24
半径方向ブランケット	体	138
(3)炉心寸法		
高さ	mm	800
等価直径	mm	2993
高さ/直径	mm	0.267
容積	l	5625
(4)ブランケット寸法		
軸方向厚さ (上/下)	mm	350/350
半径方向等価厚さ	mm	290
(5)集合体等価ピッチ	mm	158.1

表2.2-6

ボイド反応度検討用炉心の仕様（2／3）

項目	単位	窒化物 燃料炉心
3. 炉心燃料集合体		
(1) 燃料要素		
燃料材質	%	窒化物
炉心燃料スマア理論密度比	%	80 (実効密度11.44g/cc、MA含む)
軸プランケットスマア理論密度比	%	80 (0.3%劣化U、実効密度11.44g/cc)
炉心高さ	mm	800
軸方向プランケット厚さ (上／下)	mm	350/350
被覆管内径	mm	6.72
被覆管外径	mm	7.6
被覆管肉厚	mm	0.44
燃料要素全長	mm	3100
ワイヤ直径	mm	1.1
ガスプレナム位置		上部
(2) 燃料集合体		
燃料要素数	本	271
ラッパ管内対面幅	mm	146.2
ラッパ管肉厚	mm	3.5
集合体全長	mm	4600
4. 燃料交換		
燃焼日数	月	18
バッチ数		
炉心		3
半径方向プランケット		3

表2.2-6 ボイド反応度検討用炉心の仕様（3／3）

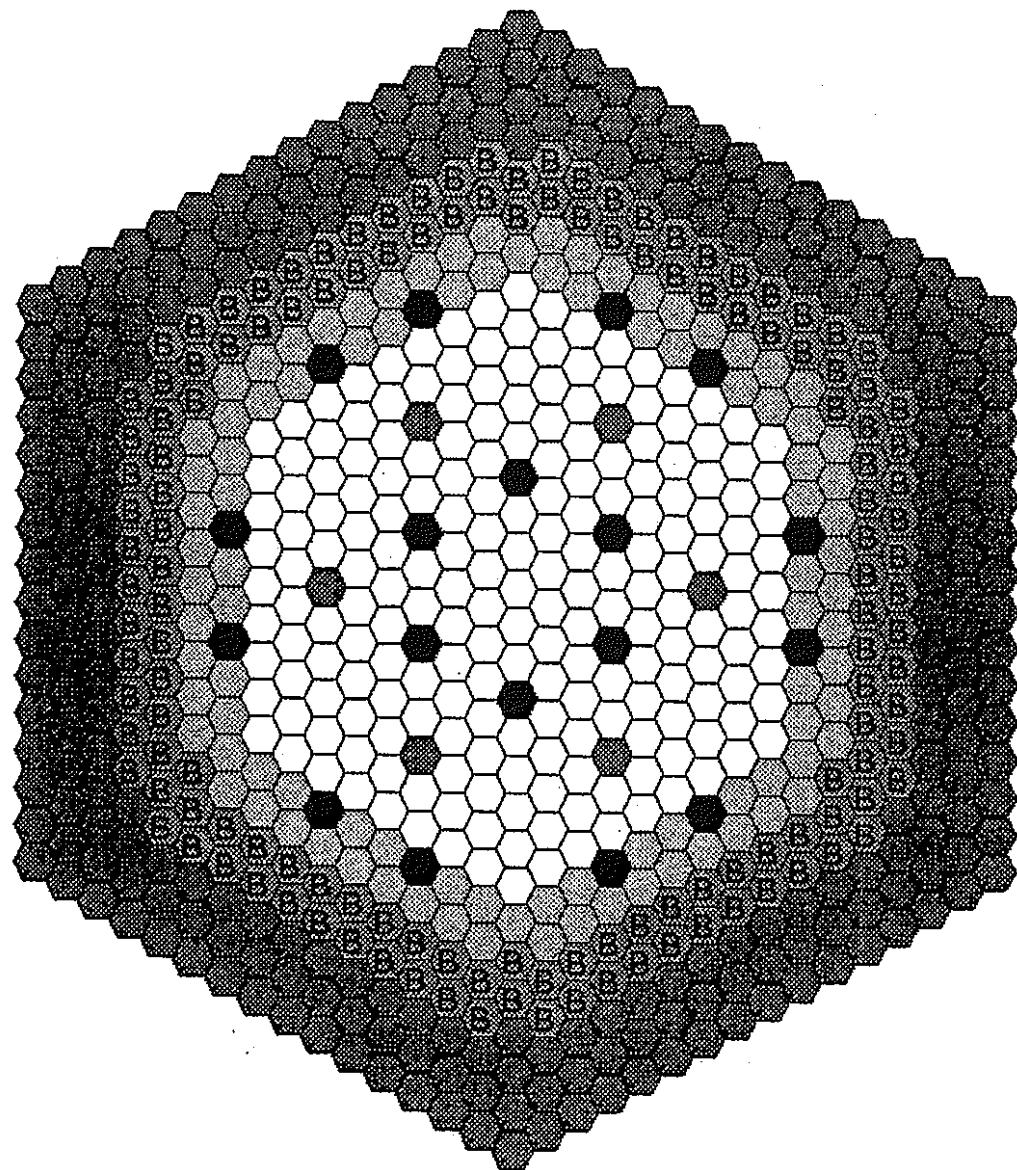
項目	単位	窒化物 燃料炉心
5. 炉心構成要素体積比		(被覆管内／ボンドを含む冷却材／構造材／B4C吸収体)
炉心燃料		.4442/.4109/.2105/-
径プランケット		.4889/.3839/.1798/-
遮蔽体		-/.2000/.8000/-
制御棒下部		-/.9160/.0840/-
制御棒吸収体部		-/.407/.232/.345
6. 径プランケット燃料	mm	
スタック長	mm	1500
燃料材質		0.3%劣化ウラン窒化物
スメア密度	%	80 (実効密度11.44g/cc)
7. 制御棒吸収体組成		
スタック長	mm	1000 (パーク位置として 炉心上端想定)
材質		92%B-10濃縮B4C

表2.3-1 核設計サーベイ計算のための解析方法

項目	条件
・核断面積ライブラリ	JENDL-3 (基準)
・基準解析手法	燃料・制御棒・遮蔽体等すべての領域は均質モデル 拡散係数：等方拡散係数
・エネルギー群数	25群
・原子数密度計算温度	ナトリウム以外：20°C ナトリウム：475°C
・計算体系寸法計算温度	20°C
・自己遮蔽因子計算温度	
・炉心	炉心燃料1150K、プランケット燃料900K
・燃焼計算モデル	二次元RZモデル (燃料の完全分散装荷方式を模擬。制御棒位置は全数 (主炉停止系・後備炉停止系とも) パーク位置(吸収 体下端が上部軸プランケット下端と一致)とする。
・Pu富化度設定条件	平衡末期余剰反応度 0.2% $\Delta k/kk'$ 平衡中期の内外炉心出力が平坦となるように Pu富化 度比を設定。

表 2.3-2 ボイド反応度検討用炉心特性

項目	単位	(1) 天然N	(2) N15=99% (天然Nでの 富化度)	(3) N15=99% (サーベイ用 基準炉心)
(1)燃料富化度				
内側炉心	%	15.74	15.74	13.78
外側炉心	%	24.33	24.33	22.10
(2)燃焼反応度	% $\Delta \rho$	2.5	2.3	1.1
(3)増殖比				
炉心		0.770	0.775	0.846
半径方向プランケット		0.160	0.159	0.172
軸方向プランケット		0.288	0.290	0.313
合計		1.218	1.224	1.332
(4)炉心部燃焼度	万MWd/t	9.7	9.8	9.7
(5)最大線出力				
平衡初期				
内側炉心	W/cm	298	298	290
外側炉心	W/cm	331	332	334
平衡末期				
内側炉心	W/cm	311	313	321
外側炉心	W/cm	284	284	275
(6)平均線出力				
平衡初期	W/cm	228	229	227
平衡末期	W/cm	220	220	218
(7)ボイド反応度				
炉心部 初装荷	% $\Delta \rho$	1.66	1.95	2.09
炉心部 平衡末期	% $\Delta \rho$	2.43	2.67	2.83
(8)最大照射量	* 10 ²³ nvt	3.61	3.63	3.77



○	内側炉心燃料集合体	205本
○	外側炉心燃料集合体	96本
●	主炉停止系制御棒集合体	18本
●	後備炉停止制御棒集合体	6本
■	ブランケット燃料集合体	138本
■	SUS遮蔽体	258本

図2.2-1 基準炉心配置

高さ(cm)

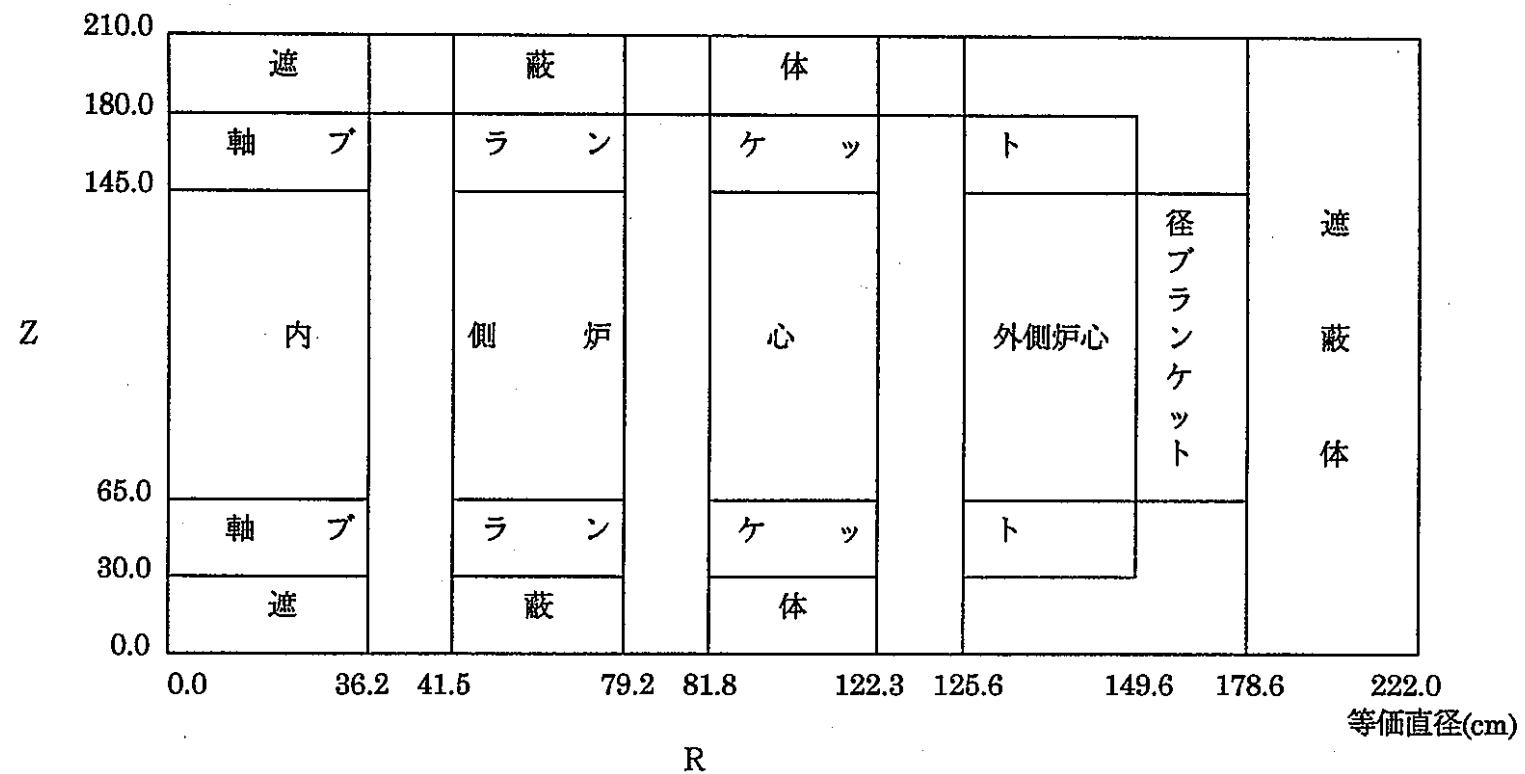


図2.2-2 R Z計算モデル図

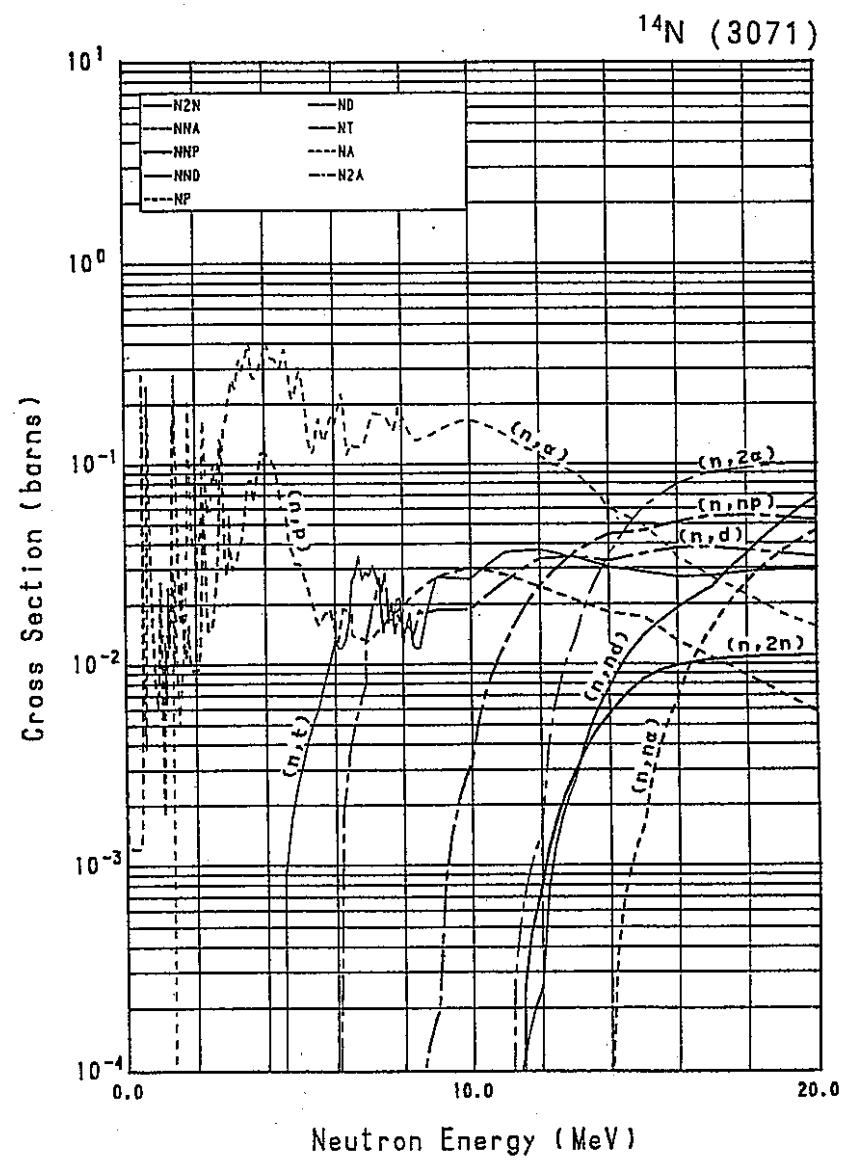
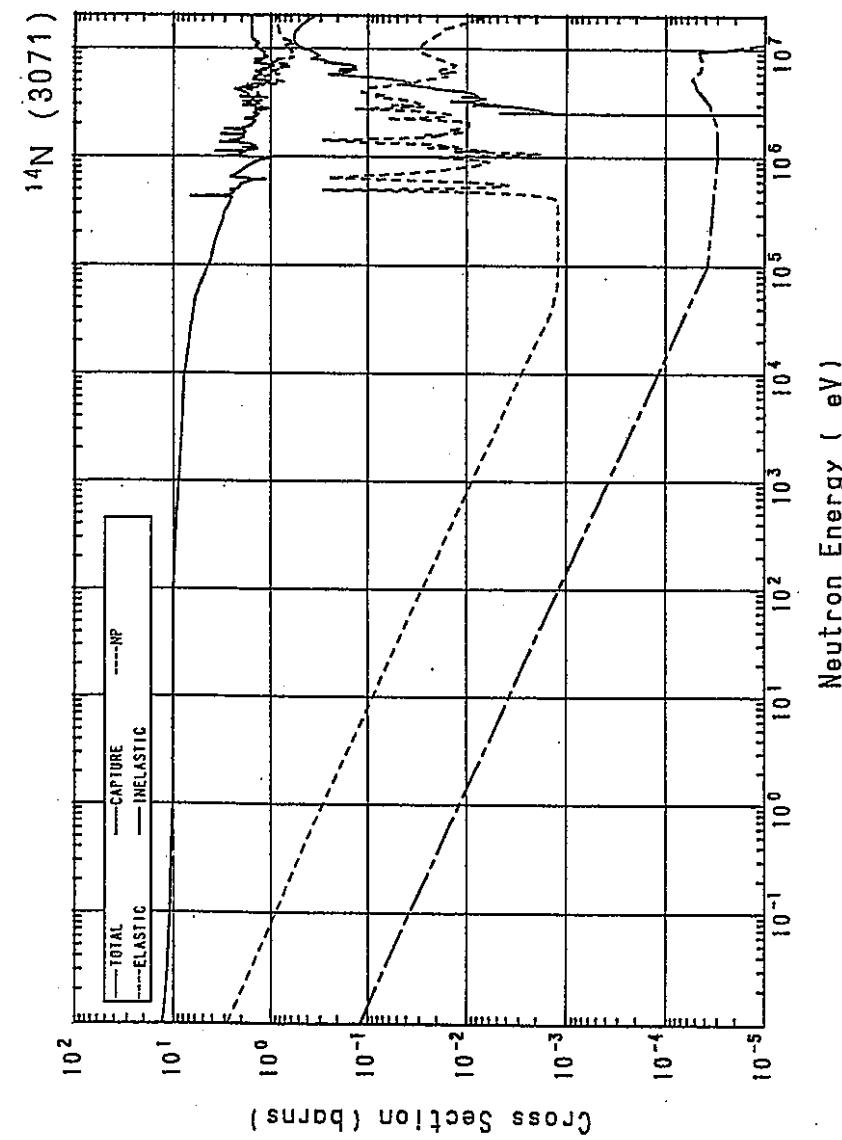


図2.3-1 N-14 中性子反応断面積

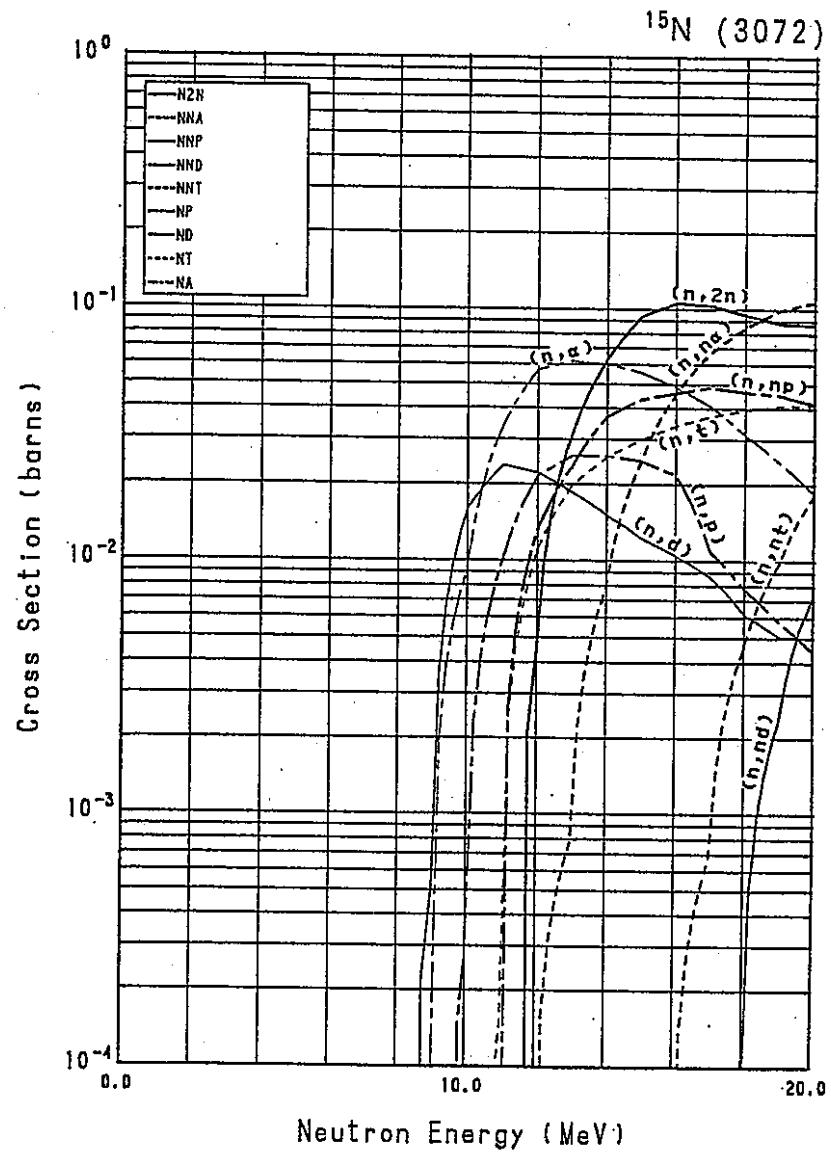
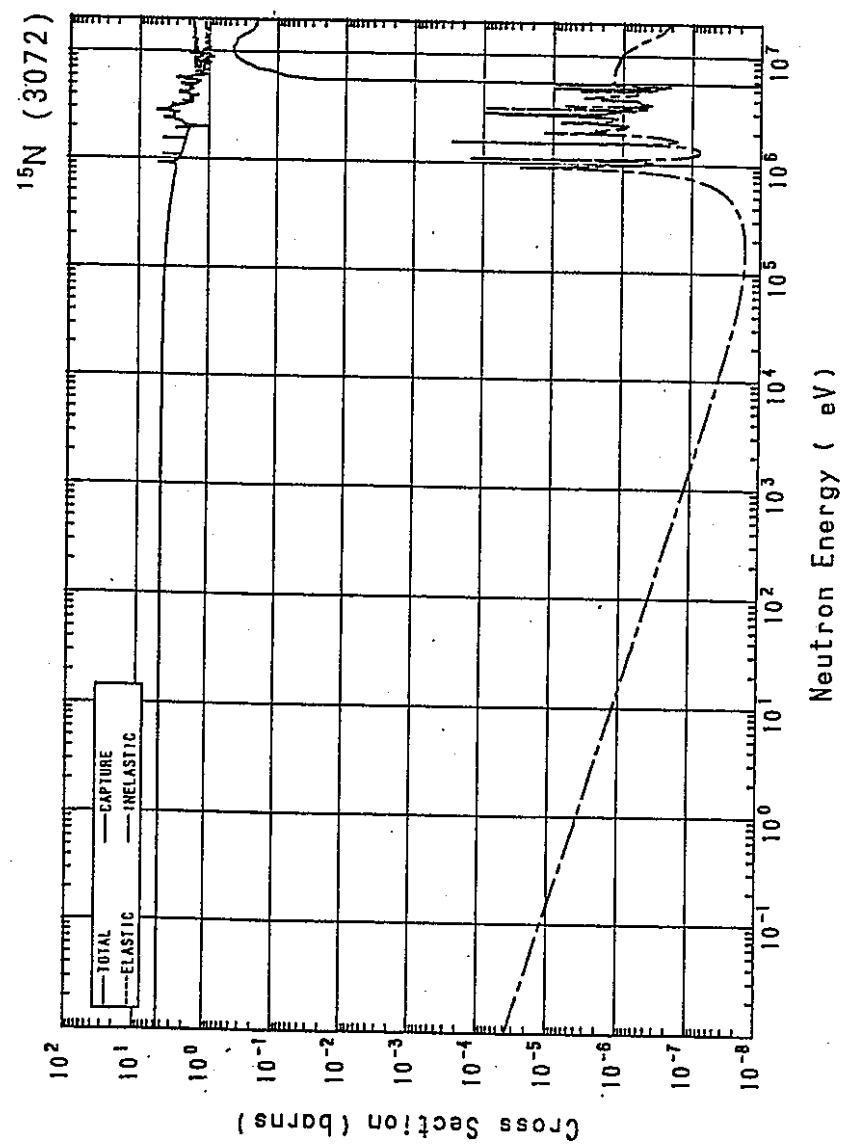


図2.3-1 N-15中性子反応断面積

3. ボイド時中性子スペクトルの解析

上記サーベイ用基準炉心を基準としてMA装荷量や炉心サイズを変更した場合の炉心特性のパラメータ解析を行い、ボイド時の中性子スペクトルの変化を解析した。

3.1 解析対象炉心

サーベイ用基準炉心を含め表3.1-1に示す下記の5炉心を対象とした。

- (1) 基準炉心 (MA重量割合約2.4%)
- (2) MAなし炉心 (基準炉心サイズ)
- (3) MA 5%炉心 (基準炉心サイズ)
- (4) 集合体ピッチ2倍炉心 (MA重量割合は基準炉心相当)
- (5) 集合体ピッチ1/2倍炉心 (MA重量割合は基準炉心相当)

3.2 炉心特性及び中性子スペクトル解析結果

表3.2-1に各炉心の主要特性評価結果を示す。(基準炉心は表2.3-1参照)

ボイド反応度はMA装荷量の増大または炉心サイズの増大により数10%増大しており、基準炉心のボイド反応度は各炉心の中間的な特性となっている。

各炉心のボイド前後の中心部中性子スペクトルを図3.2-1~5に示す。
これらの図より炉心に依存せずにボイド後には100keV~1MeVの範囲の中性子が増大することが分かる。

表3.1-1 解析対象炉心

炉心	炉出力 (MW t)	炉心径 m	MA重量割合 %	備考
(1)基準炉心	1 6 0 0	3	2. 4	
(2)MAなし炉心 (基準サイズ)	1 6 0 0	3	0	
(3)MA 5 %炉心 (基準サイズ)	1 6 0 0	3	5	
(4)集合体ピッチ 2倍炉心	6 4 0 0	6	2.2	MAはPu付隨 量装荷
(5)集合体ピッチ 1／2倍炉心	4 0 0	1. 5	2. 8	同上

表3.2-1

ボイド反応度検討用炉心特性

項目	単位	(2) (MA無し)	(3) (MA 5%)	(4) ($\frac{E}{E_0}$ 2倍)	(5) ($\frac{E}{E_0}$ 1/2倍)
(1)燃料富化度					
内側炉心	%	13.11	10.98	13.00	16.62
外側炉心	%	21.63	19.81	17.59	29.84
(2)燃焼反応度	% $\Delta \rho$	0.6	-1.4	0.5	3.0
(3)増殖比					
炉心		0.906	0.917	0.929	0.692
半径方向ブランケット		0.168	0.200	0.101	0.207
軸方向ブランケット		0.349	0.335	0.342	0.254
合計		1.423	1.452	1.371	1.153
(4)炉心部燃焼度	万MWd/t	9.6	9.5	9.8	9.7
(5)最大線出力					
平衡初期					
内側炉心	W/cm	286	267	316	322
外側炉心	W/cm	334	347	381	332
平衡末期					
内側炉心	W/cm	322	326	310	309
外側炉心	W/cm	271	267	263	297
(6)平均線出力					
平衡初期	W/cm	225	222	228	226
平衡末期	W/cm	212	213	221	218
(7)ボイド反応度					
炉心部 初装荷	% $\Delta \rho$	1.58	3.04	2.07	1.43
炉心部 平衡末期	% $\Delta \rho$	2.47	3.23	3.17	2.01
(8)最大照射量	$* 10^{23} \text{nvt}$	3.69	3.84	4.11	3.80

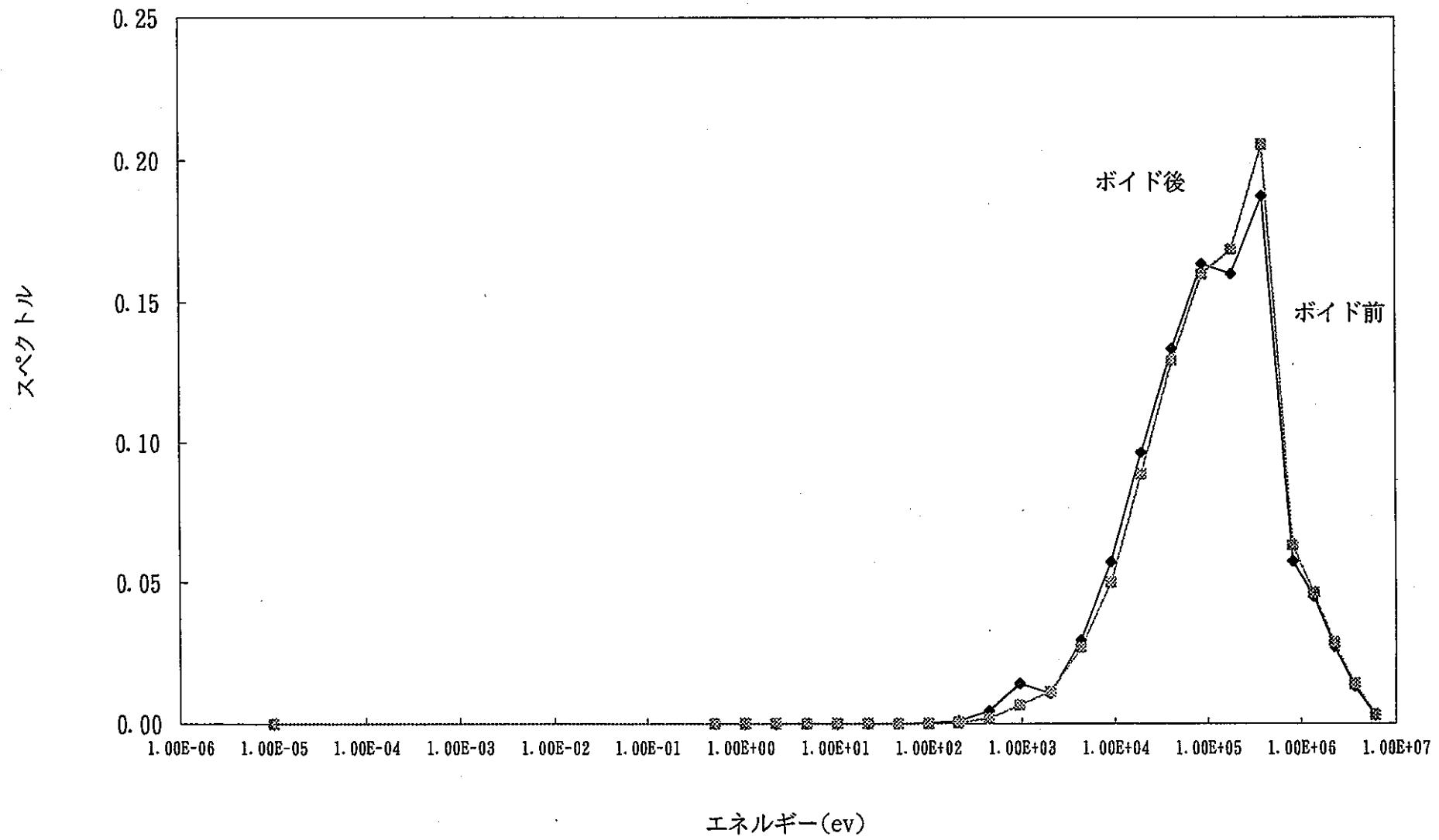


図3.2-1 基準炉心 中性子スペクトル

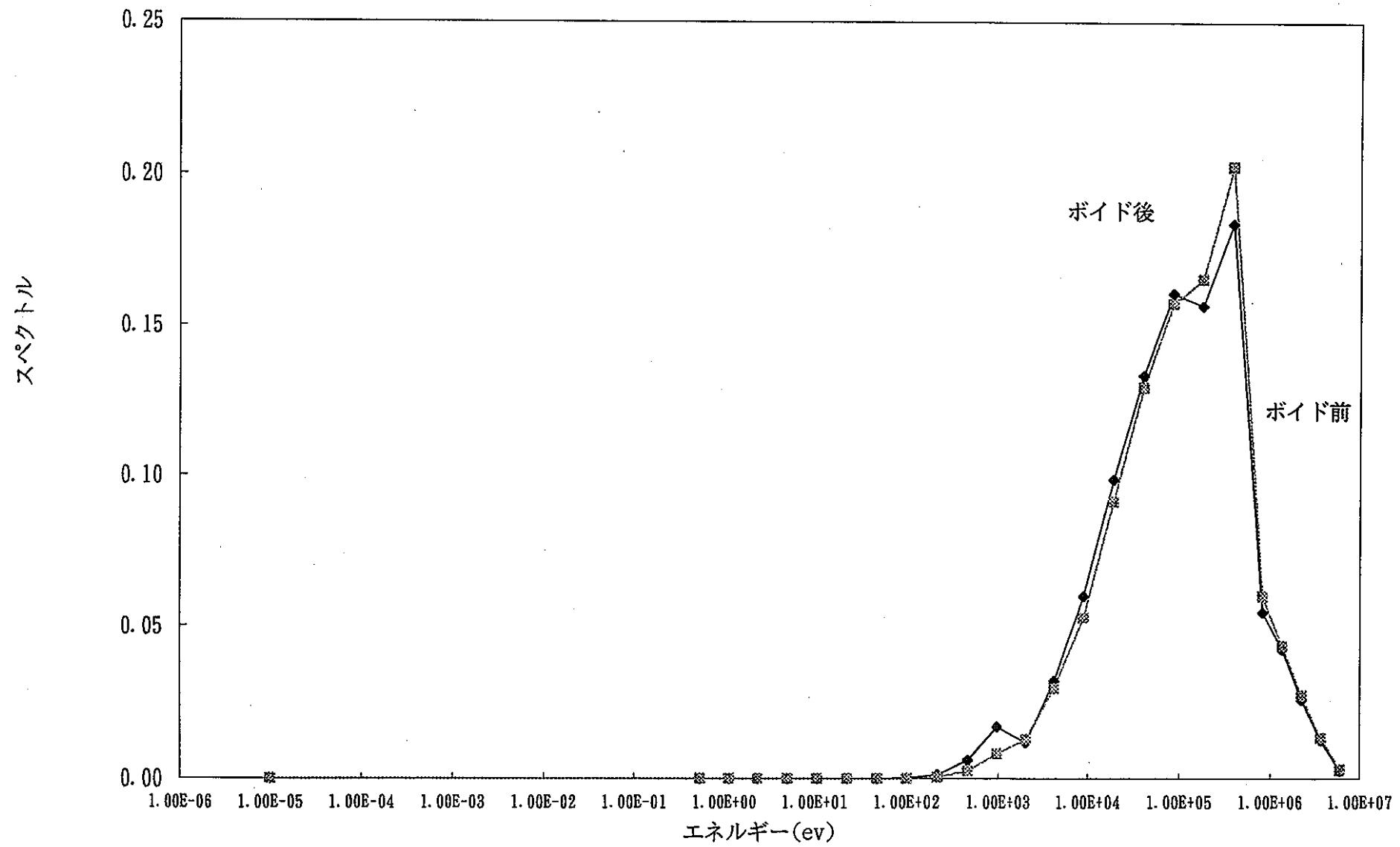


図3.2-2 MA無し炉心 中性子スペクトル

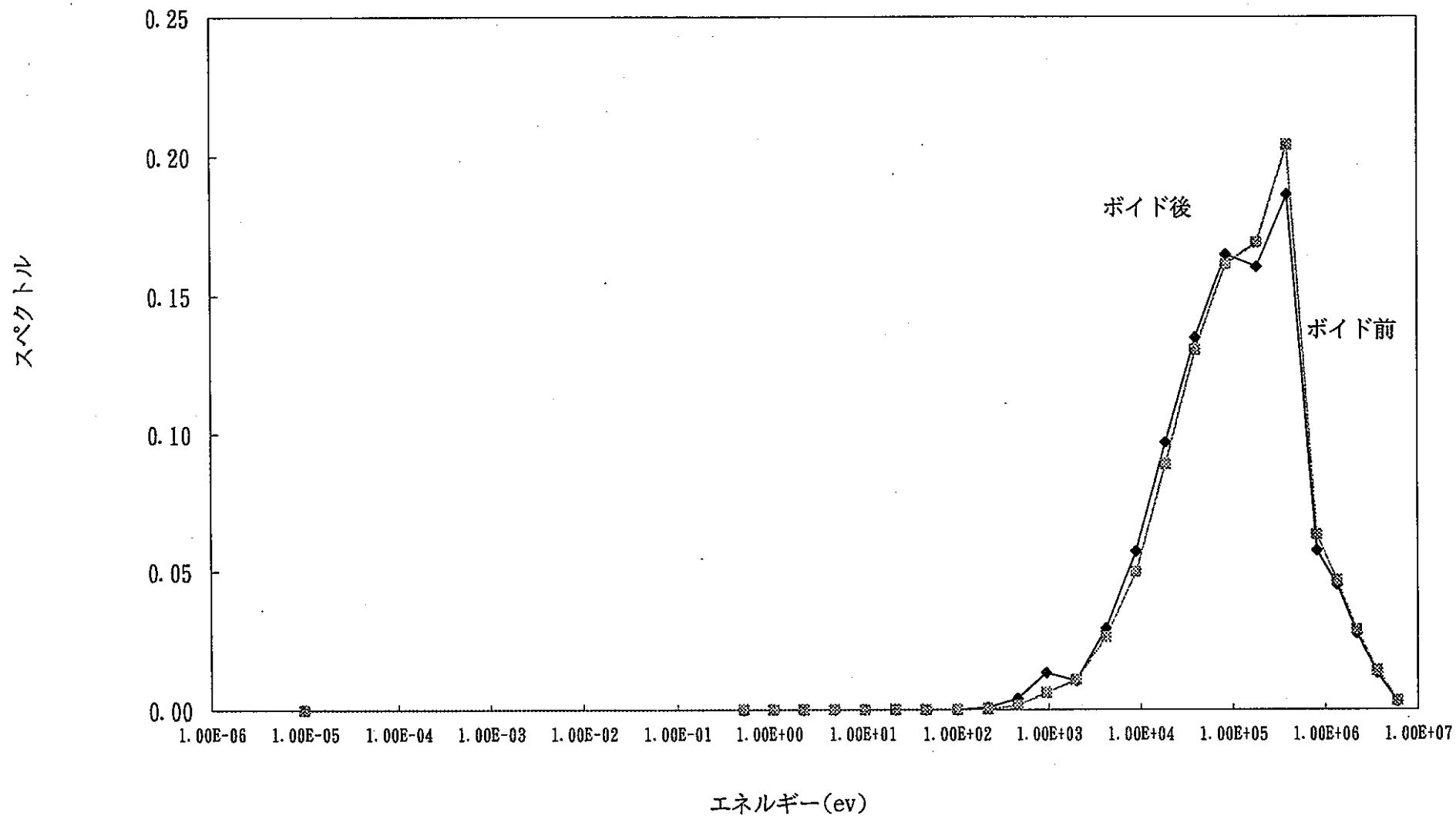


図3.2-3 MA 5%炉心 中性子スペクトル

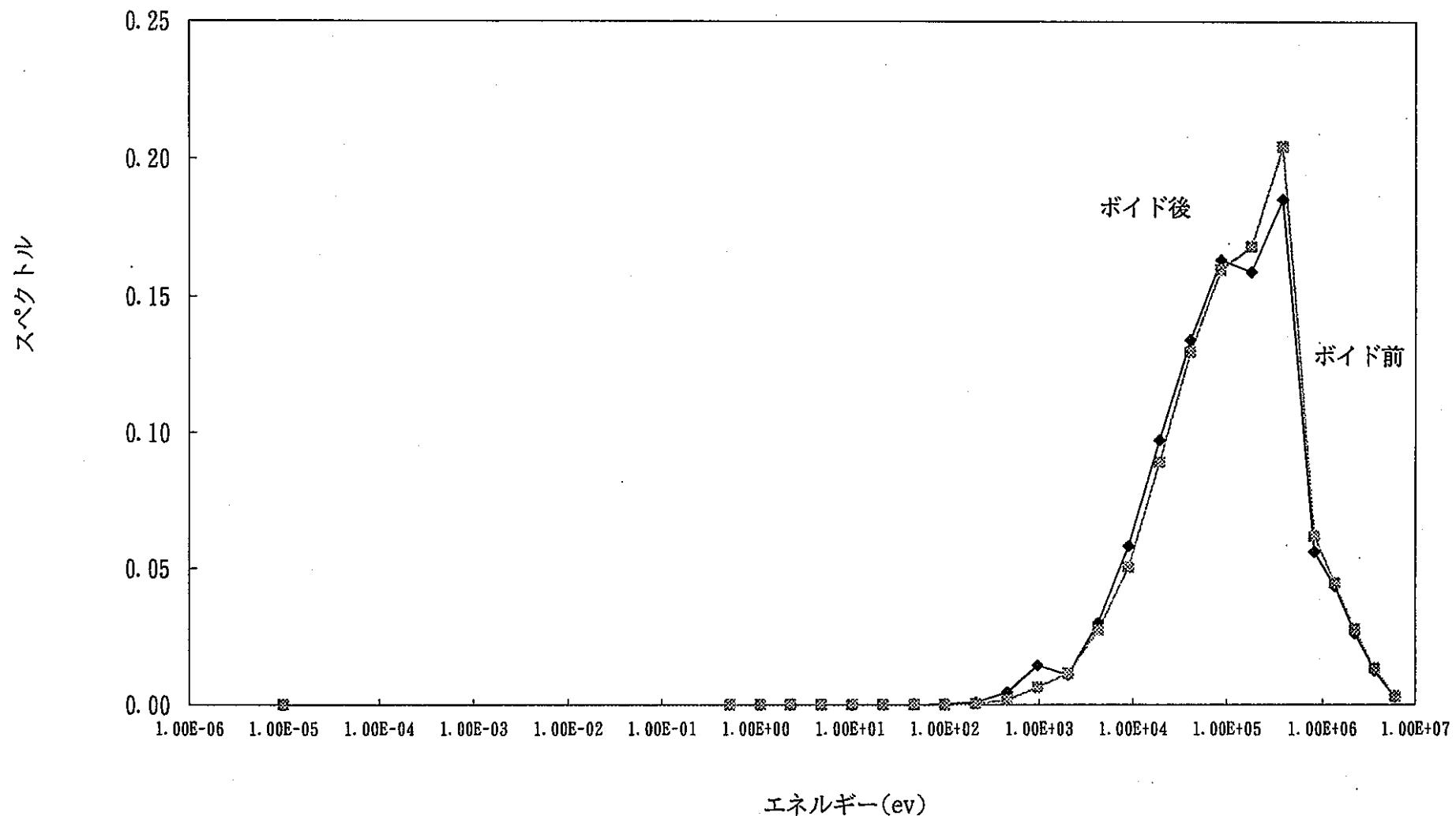


図3.2-4 ピッヂ2倍炉心 中性子スペクトル

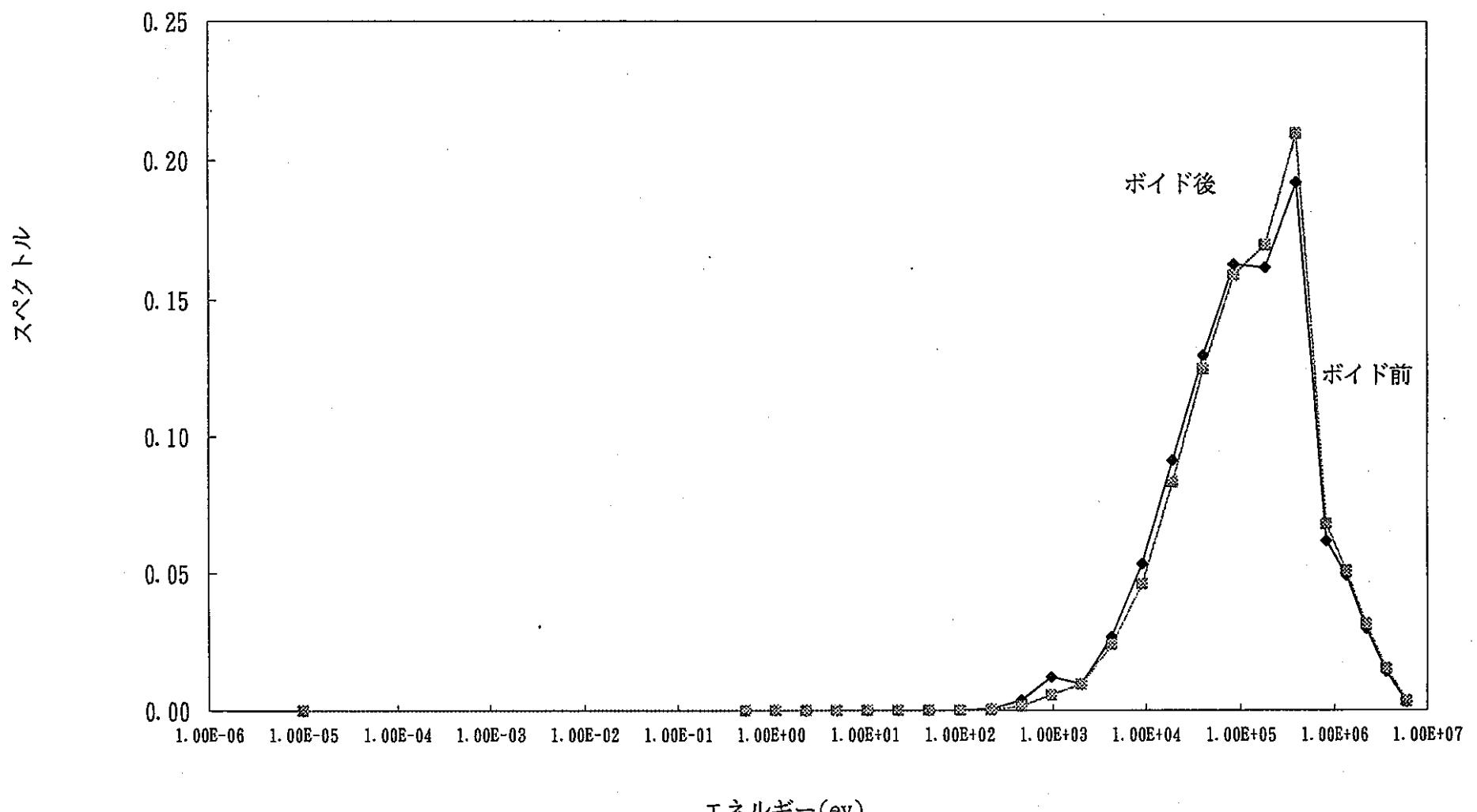


図3.2-5 ピッチ1／2倍炉心 中性子スペクトル

4. 候補核種の調査

4.1 調査範囲の検討

各炉心の中性子スペクトルの評価結果より 100 keV~1 MeV範囲で閾値反応断面積の大きいと思われる核種を調査した。

まず、核分裂スペクトル平均で 0.1 barn 程度の (n, p)、(n, α)、(n, d)、(n, t) 反応断面積を有する核種を抽出した。(参照文献 J E F - R e p o r t 14 "Table of simple integral neutron cross section data from JEF-2.2, ENDF/B-6, JENDL-3.2, BROND-2 and CENDL-2")

その結果、(n, d)、(n, t) 反応には大きいもの見当たらず、下記 5 核種の (n, p) 又は (n, α) 核種が大きい可能性があることが分かった。

O-17

Cu-63

P-31

S-32

K-40

4.2 断面積の調査結果

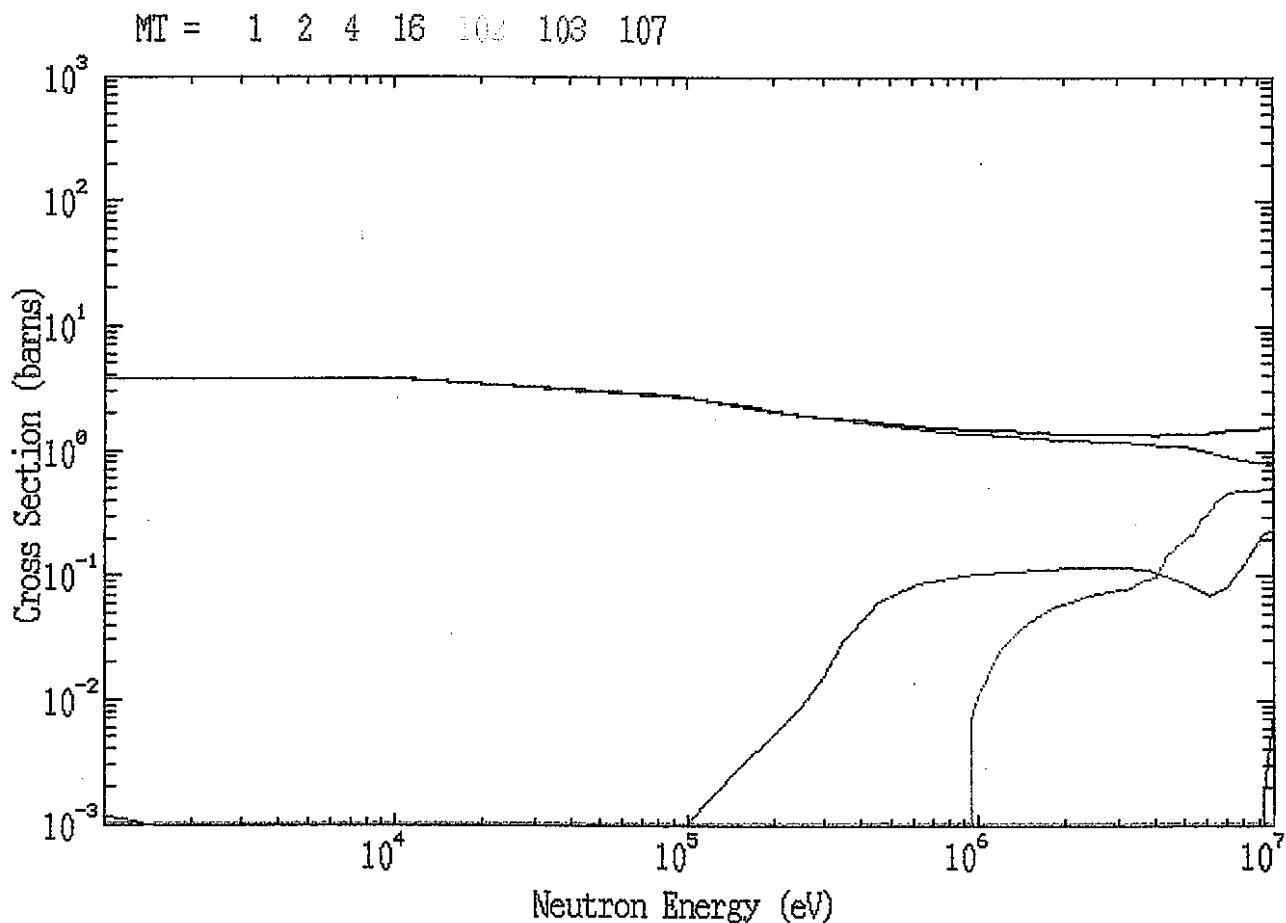
上記核種の高速エネルギーでの断面積を調査した。P-31 以下は J E N D L - 3. 2 に含まれて いるが、O-17 及び Cu-63 は ENDF/B を用いた。

各核種の全反応断面積を図3.2-1~5に示す。

また、高速炉のナトリウムボイド反応度の主要因である Pu-239 断面積を図3.2-6に示す。

上記核種の閾反応の内、O-17 のみ (n, p) 断面積は小さいが、他の核種は (n, α) も大きい。高エネルギー領域での (n, p)、(n, α) 各反応断面積を図4.1-7~15に示す。

(O-17=1,2,4,16,102,103,107)



MT Description

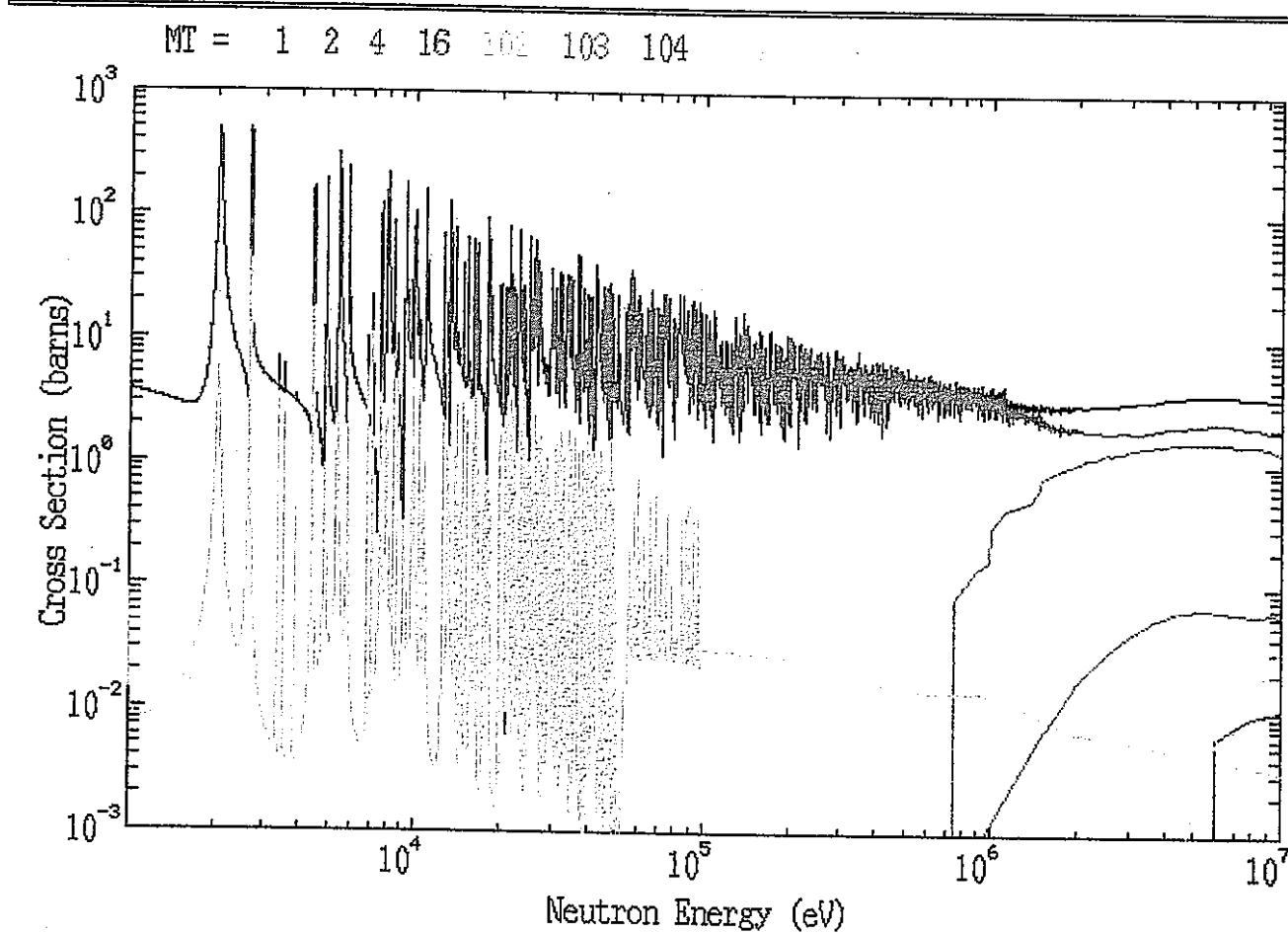
- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 ($z, 2n$) XS for producing two neutrons and a residual.

- 102 (z, g) Radiative capture XS.
- 103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.
- 105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.
- 107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-1 O-17 中性子反応断面積

(Cu-63=1,2,4,16,102,103,104,107)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 ($z, 2n$) XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

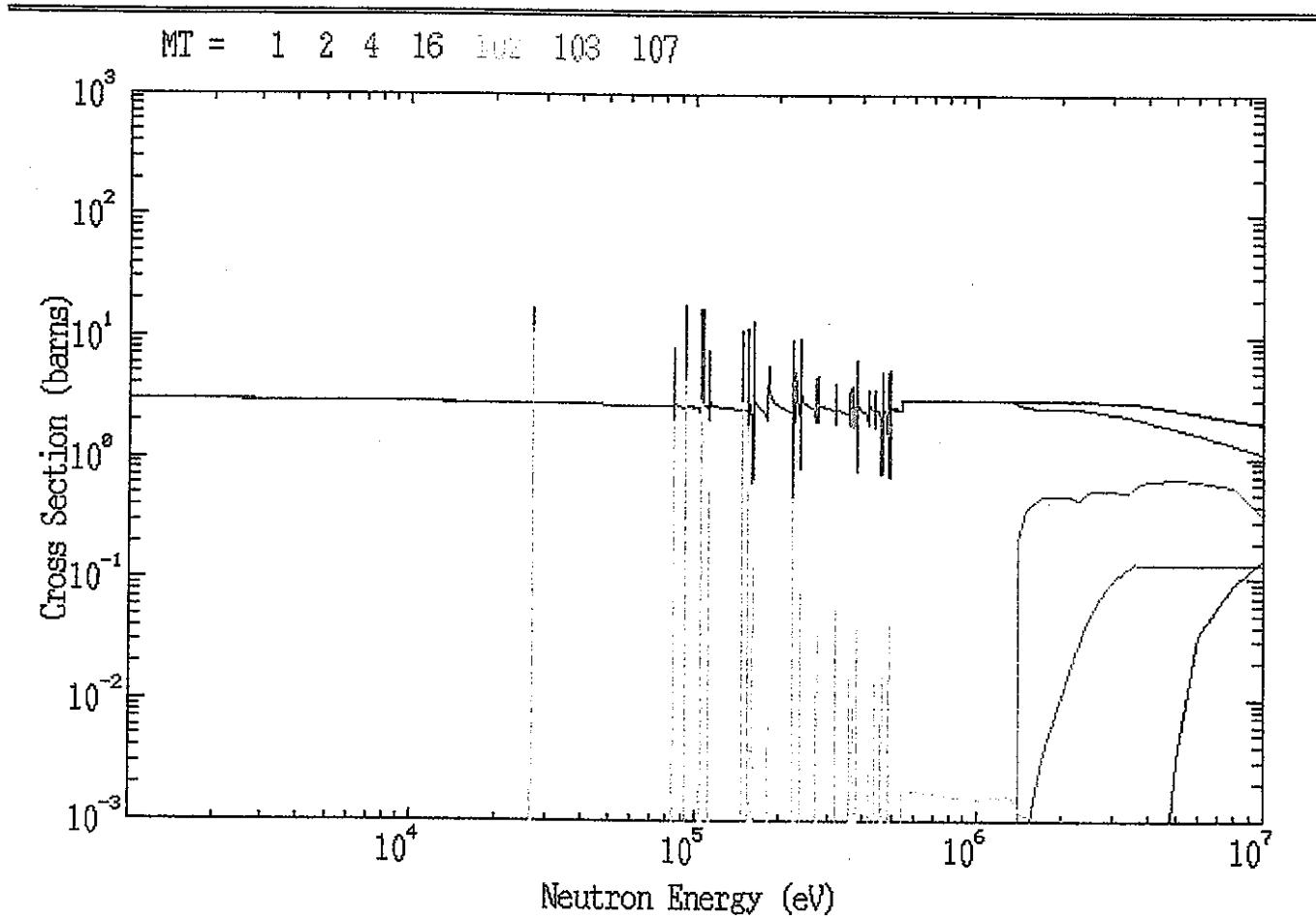
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-2 Cu-63 中性子反応断面積

(P-31=1,2,4,16,102,103,107)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

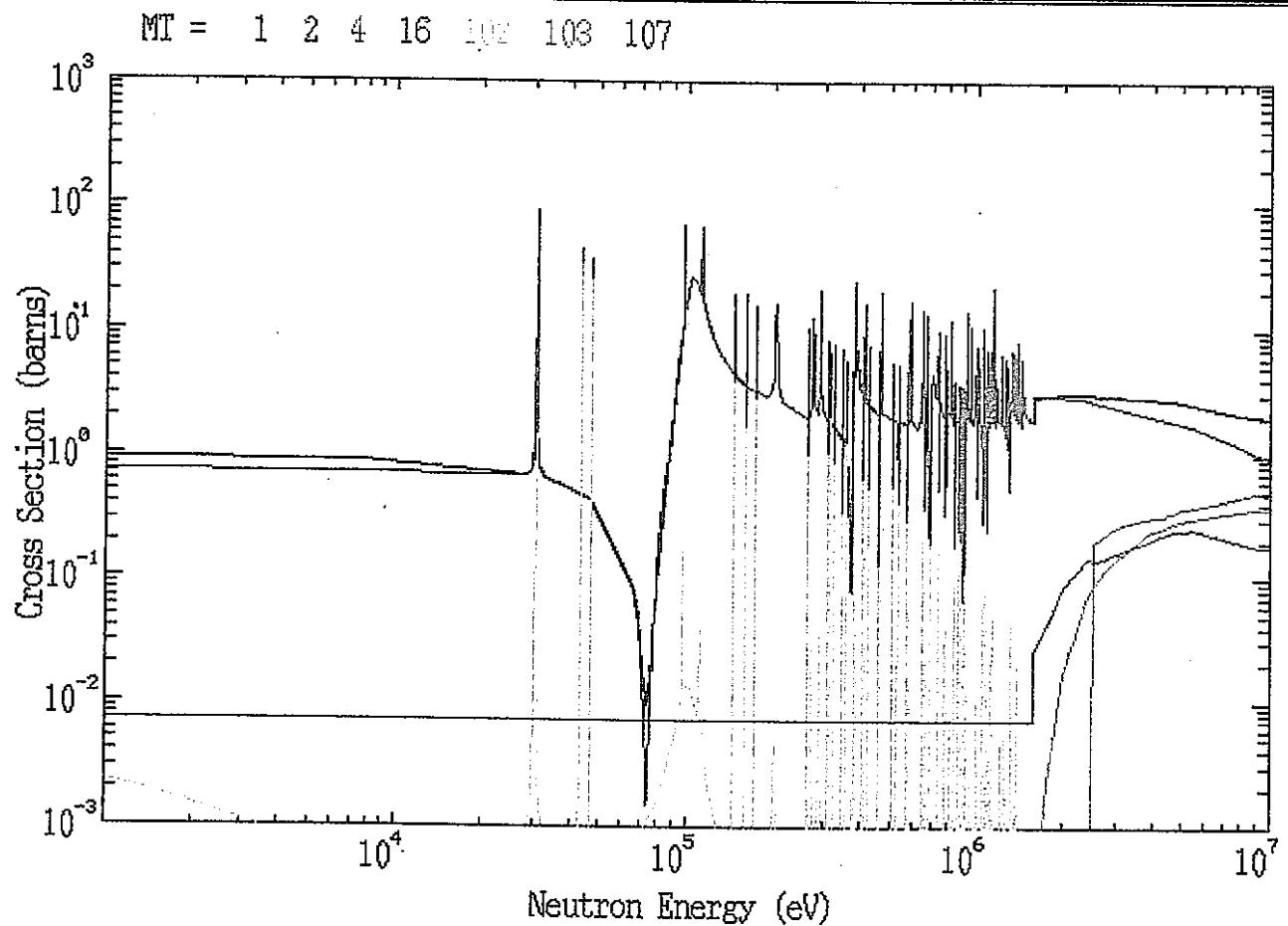
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, a) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-3 P-31 中性子反応断面積

(S-32=1,2,4,16,102,103,107)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

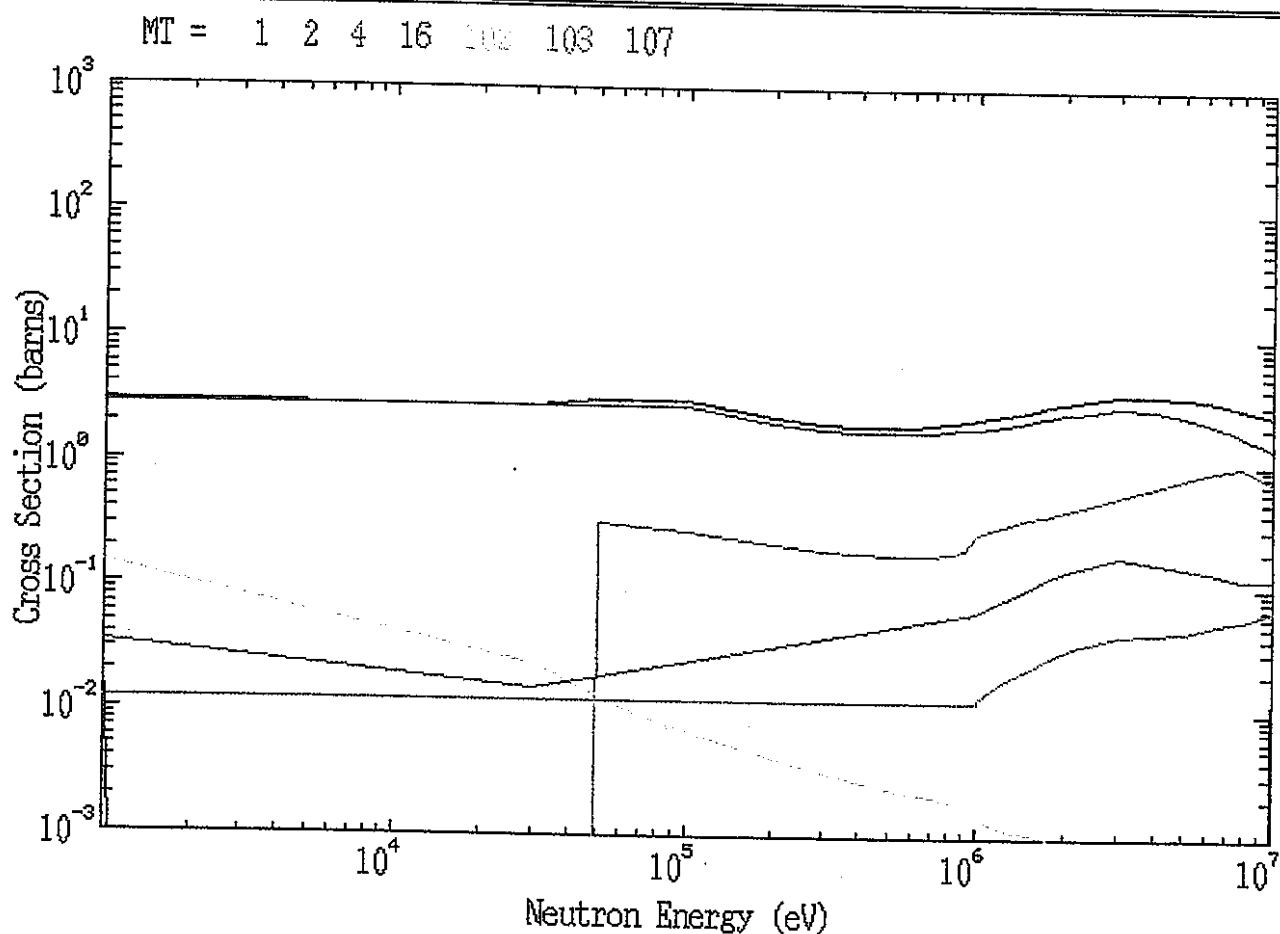
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-4 S-32 中性子反応断面積

(K-40=1,2,4,16,102,103,107)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 $(z, z0)$ elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

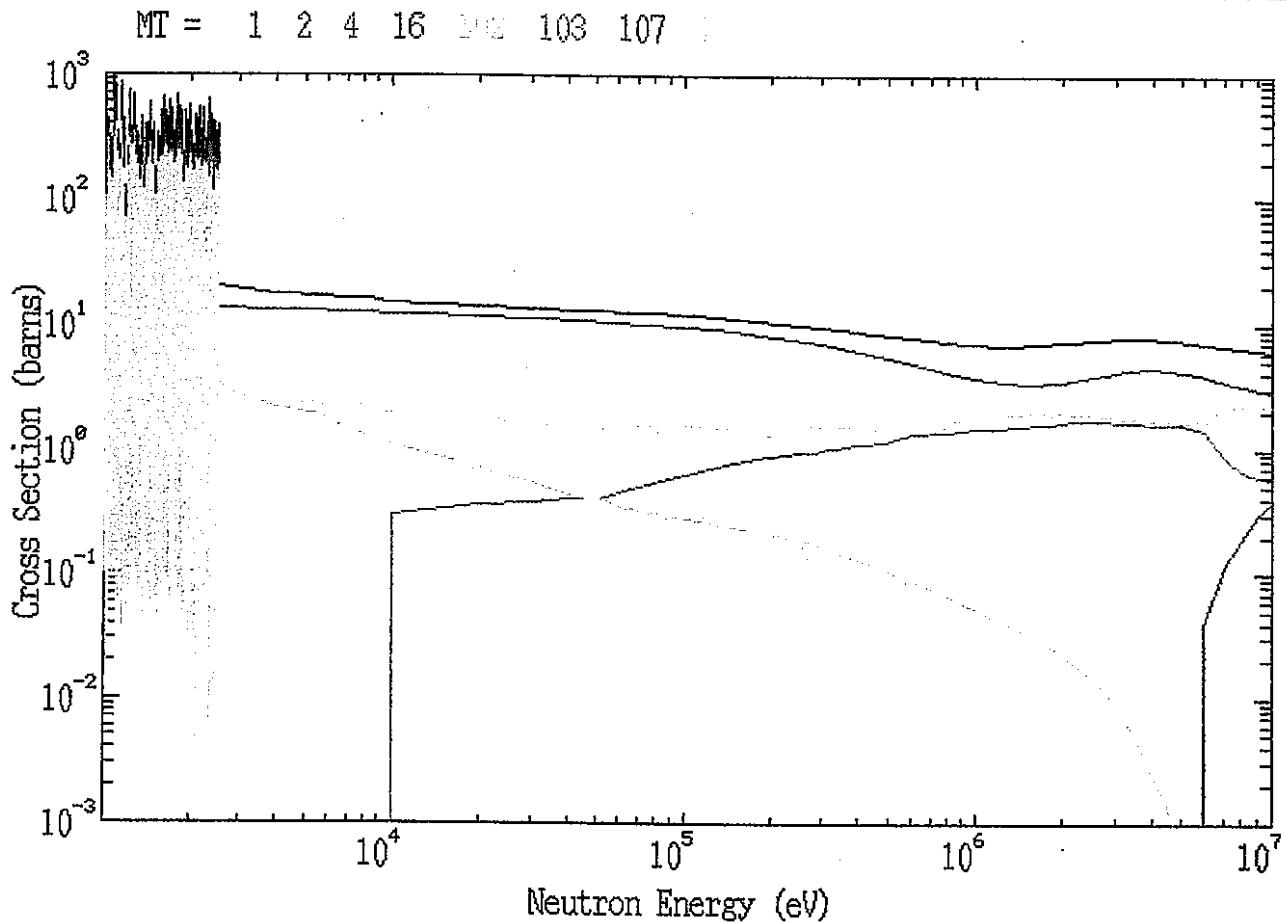
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-5 K-40 中性子反応断面積

(Pu-239=1,2,4,16,102,103,107,18)



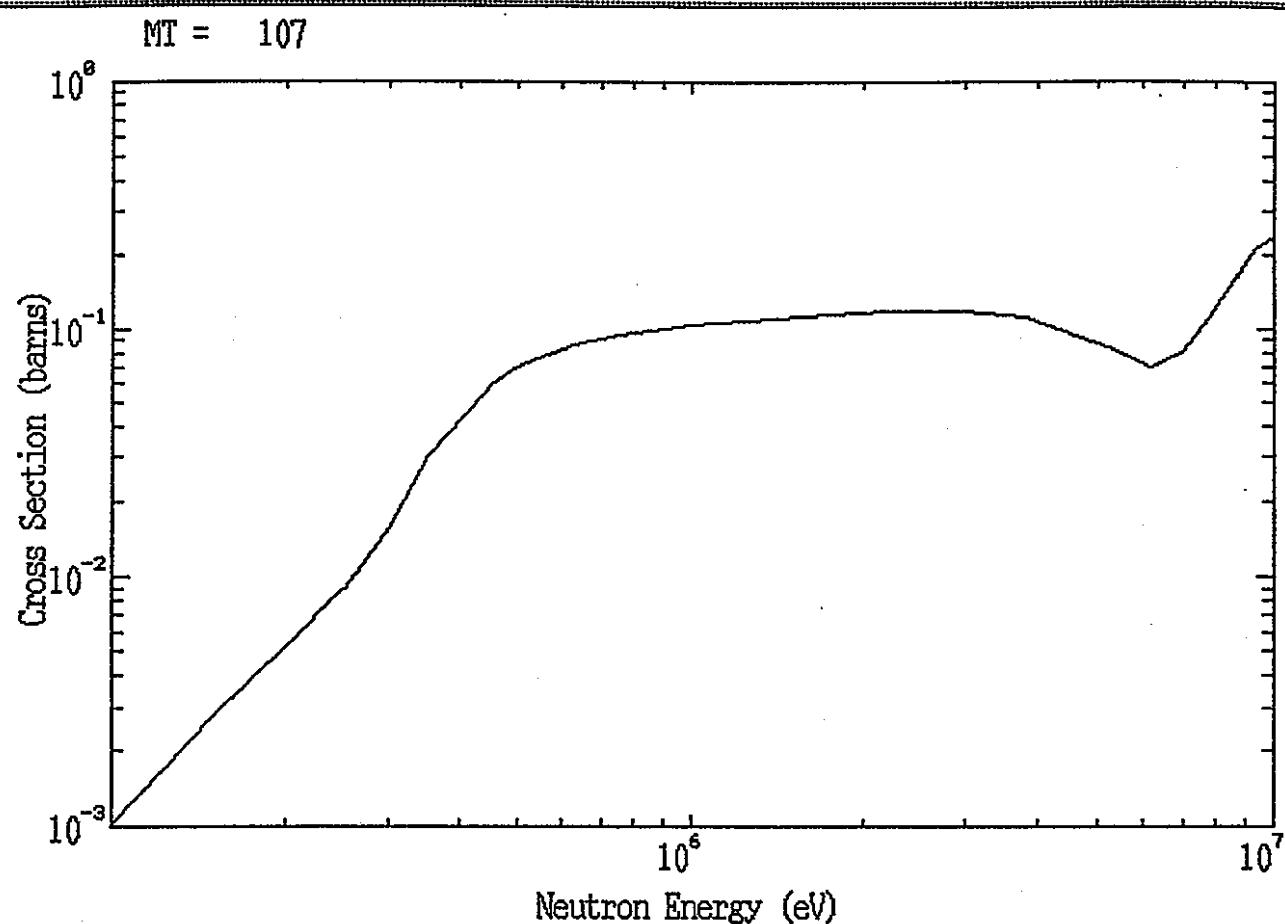
MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 ($z, 2n$) XS for producing two neutrons and a residual.
- 18 (z, F) Total fission XS
- 102 (z, g) Radiative capture XS.
- 103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.
- 105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.
- 107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-6 Pu-239中性子反応断面積

(0-17=107)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 $(z, z0)$ elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

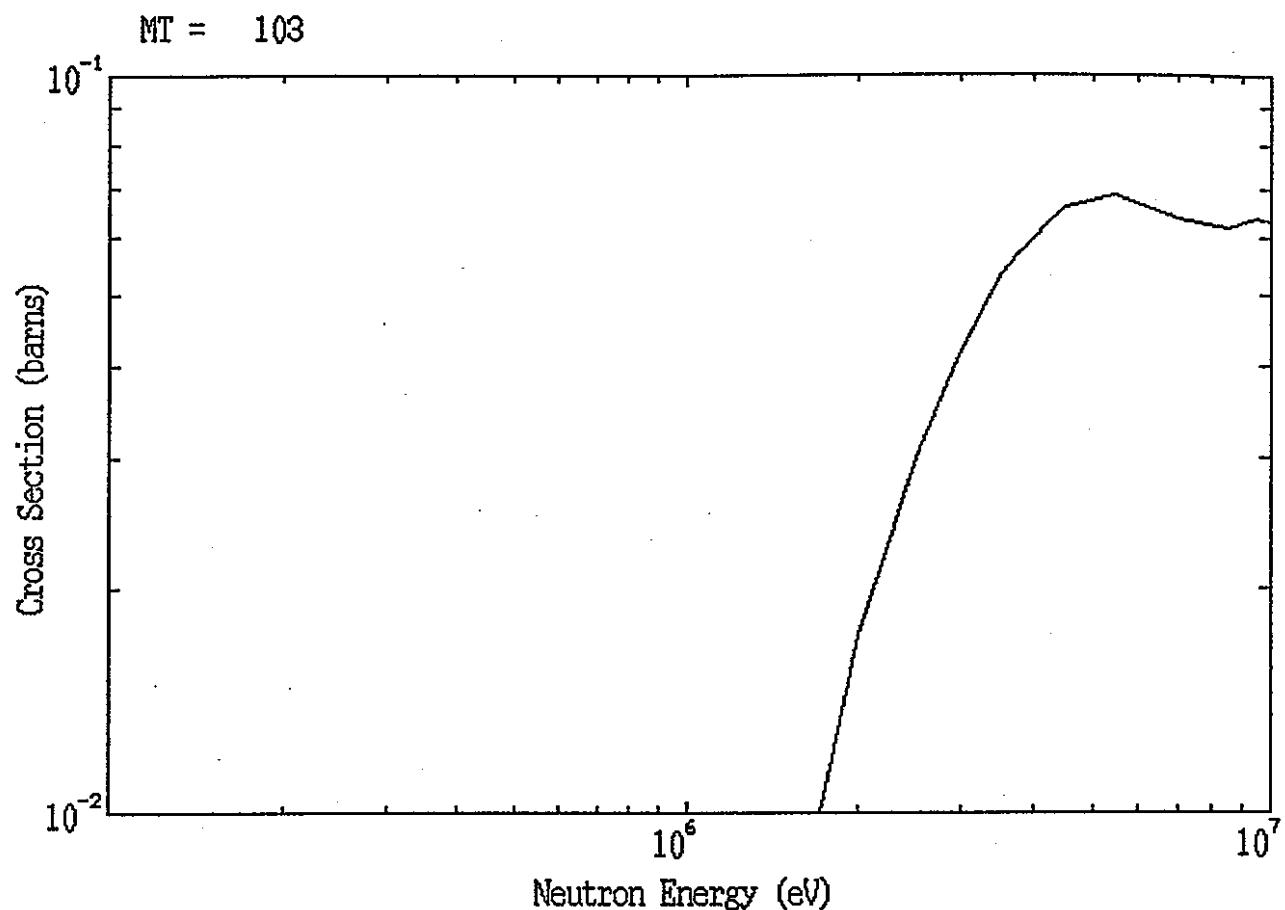
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-7 O-17 (n, α) 反応断面積

(Cu-63=103)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 ($z, 2n$) XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

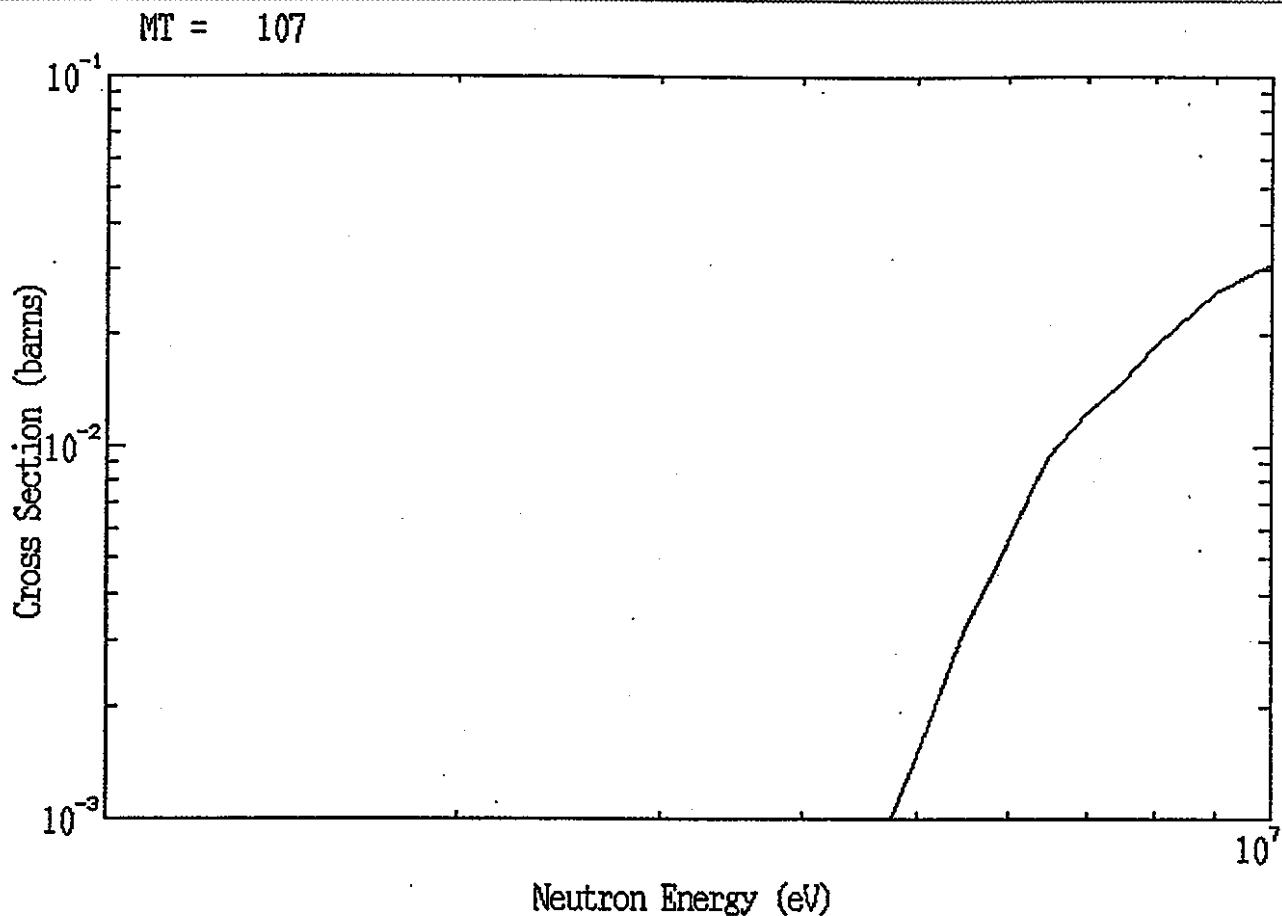
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-8 Cu-63 (n, p) 反応断面積

(Cu-63=107)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

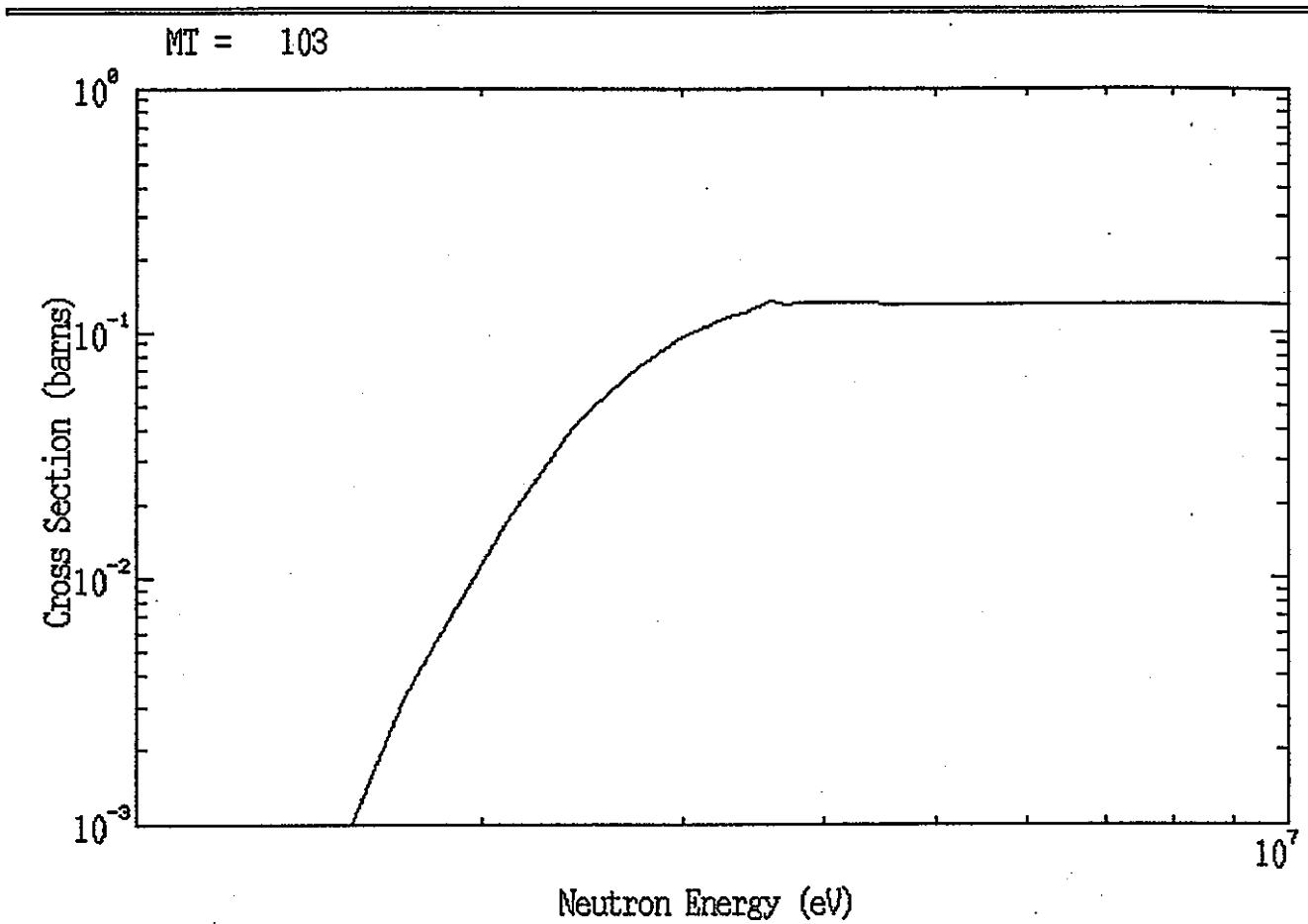
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-9 Cu-63 (n, α) 反応断面積

(P-31=103)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 $(z, z0)$ elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

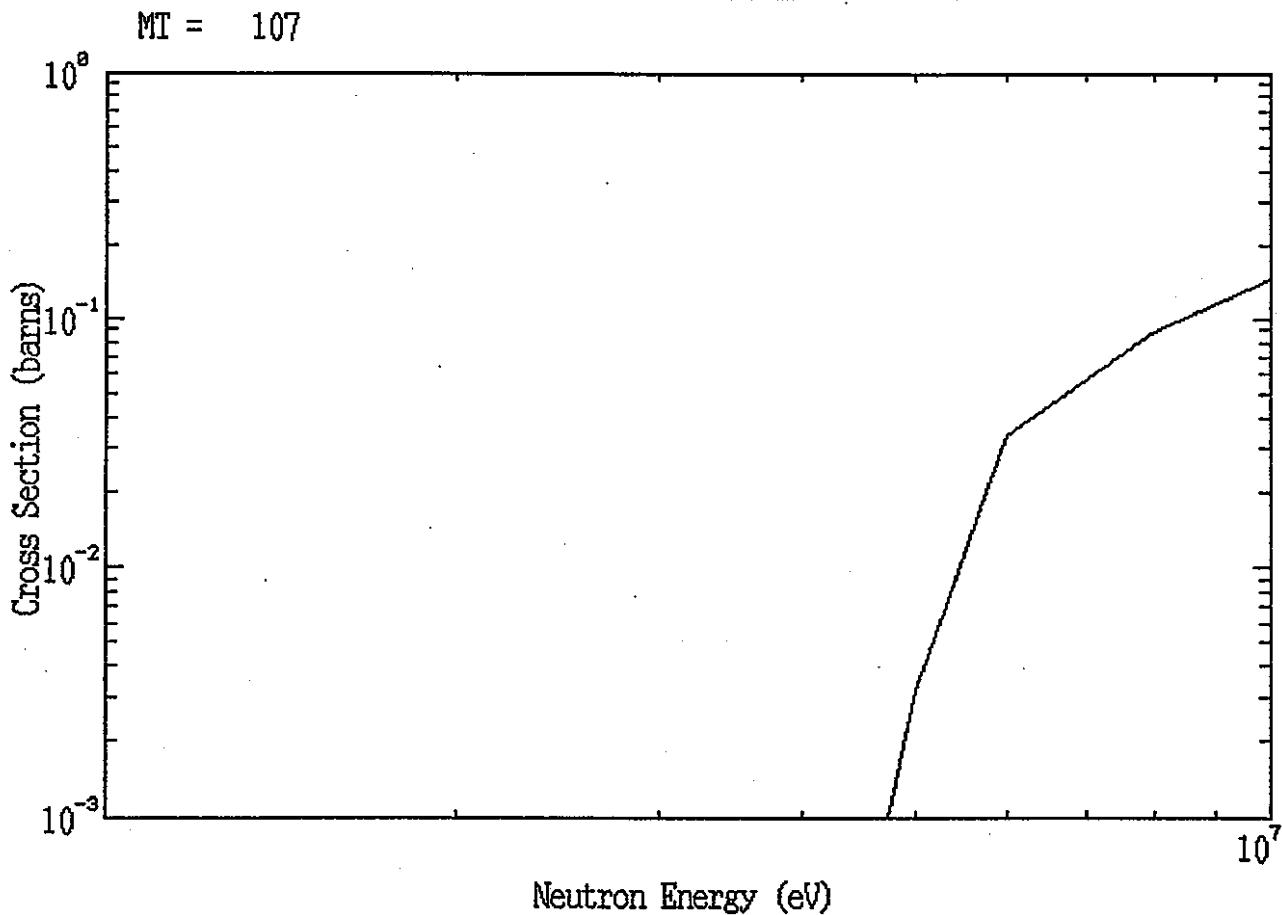
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, a) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-10 P-31 (n, p) 反応断面積

(P-31=107)



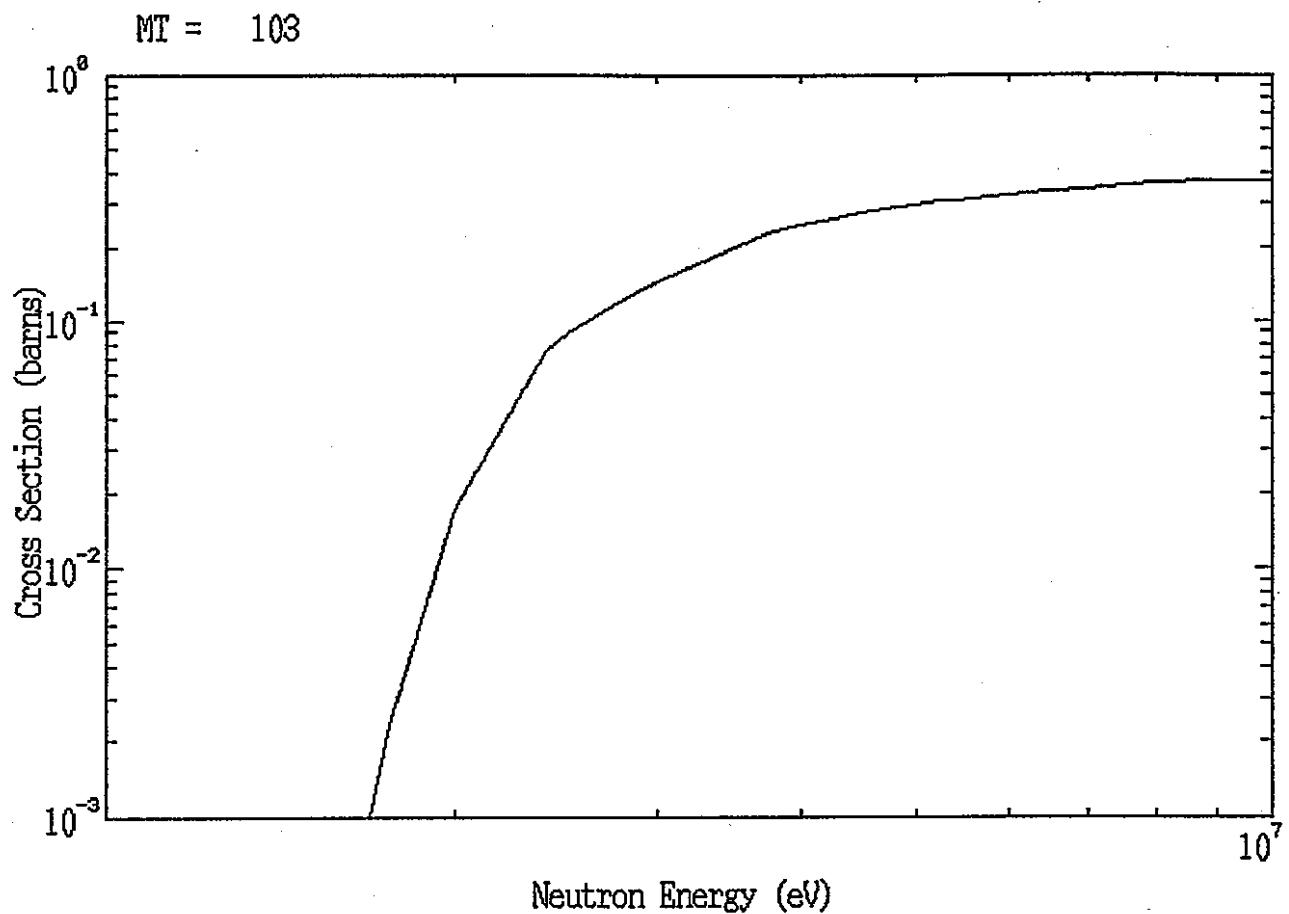
MT Description
1 Neutron total cross section
2 (z, z_0) elastic
4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
16 ($z, 2n$) XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.
103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.
107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-11 P-31 (n, α) 反応断面積

(S-32=103)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

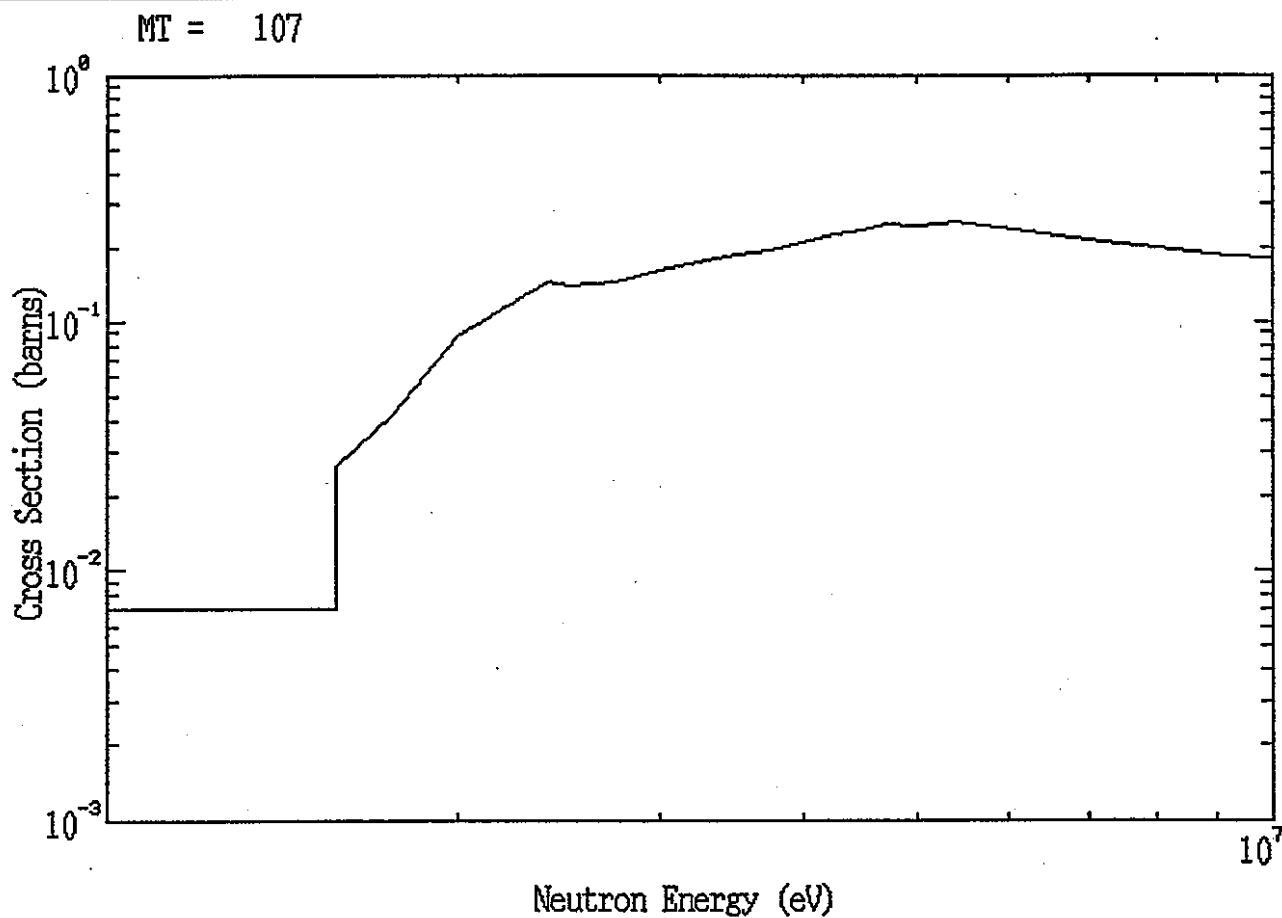
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-12 S - 3 2 (n, p) 反応断面積

(S-32=107)



MT Description

- 1 Neutron total cross section
- 2 (z, z_0) elastic
- 4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
- 16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

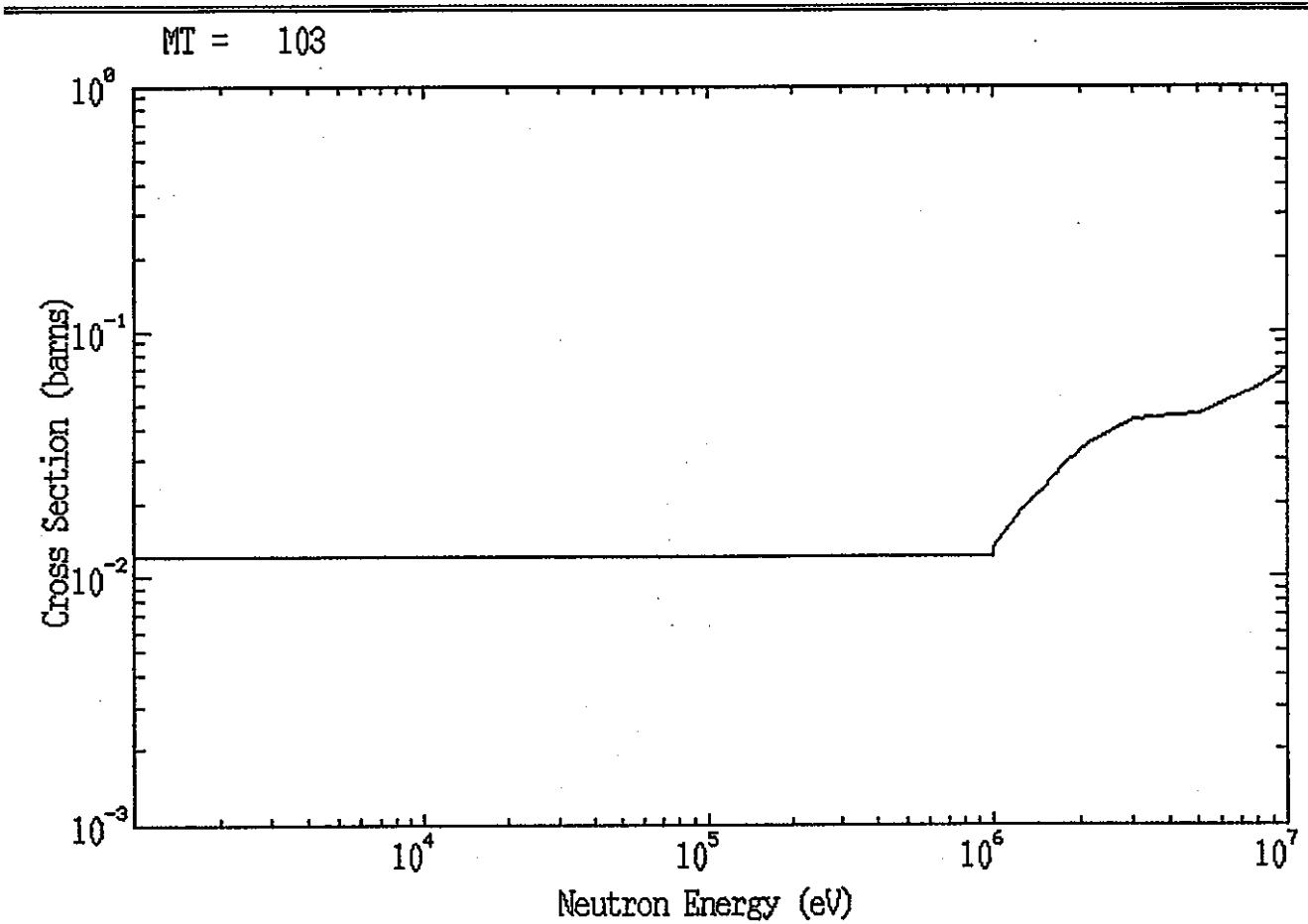
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-13 S-32 (n, α) 反応断面積

(K-40=103)



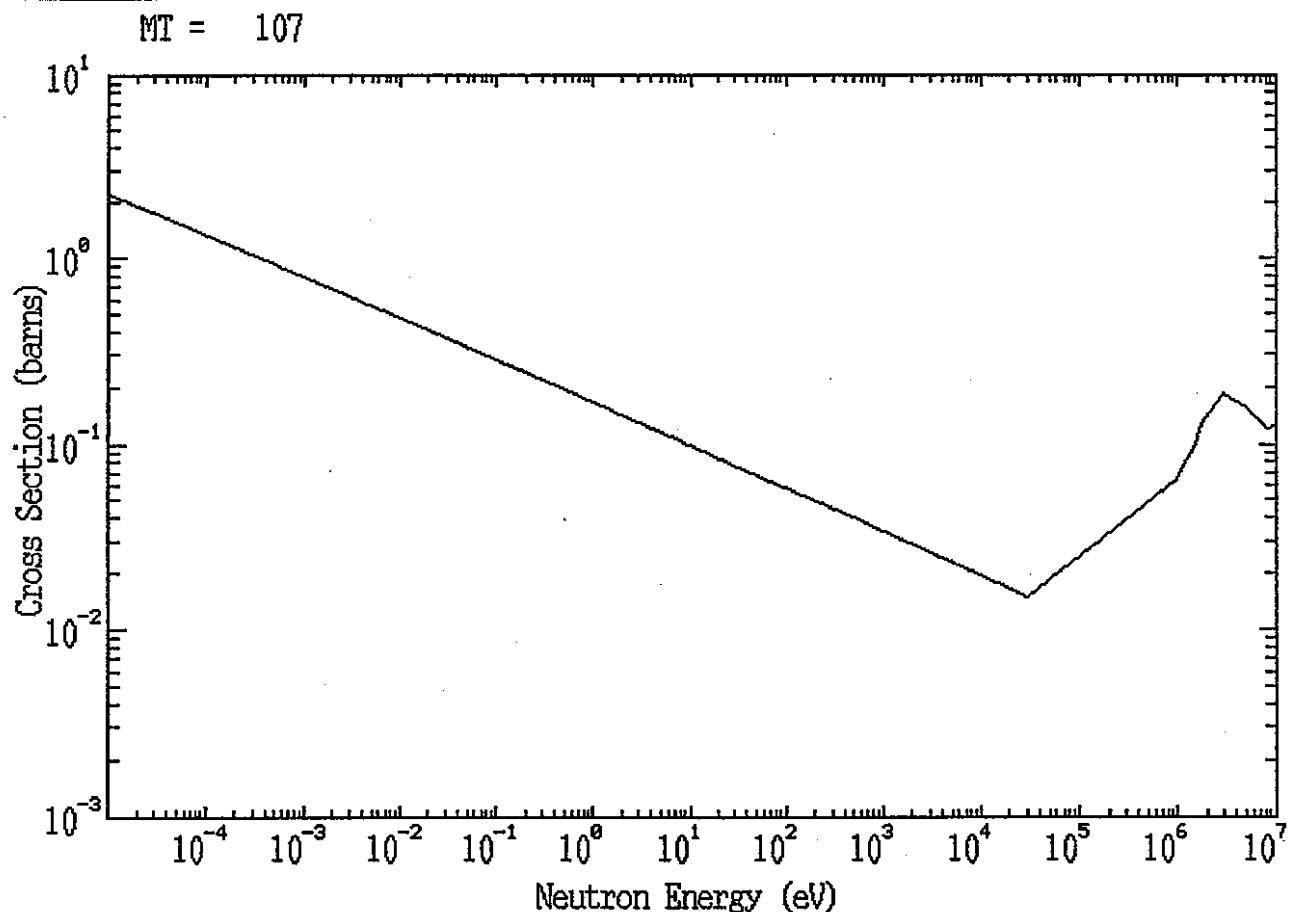
MT Description
1 Neutron total cross section
2 (z, z_0) elastic
4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.
16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.
103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.
105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.
107 (z, a) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-14 K-40 (n, p) 反応断面積

(K-40=107)



MT Description

1 Neutron total cross section

2 $(z, z0)$ elastic

4 (z, n) XS for the production of one neutron in the exit channel.

16 $(z, 2n)$ XS for producing two neutrons and a residual.

102 (z, g) Radiative capture XS.

103 (z, p) XS for the production of a proton and a residual.

105 (z, t) XS for the production of a triton plus a residual.

107 (z, α) XS for the production of an alpha particle plus a residual.

MT: Reaction type as defined in ENDF

図4.2-15 K-40 (n, α) 反応断面積

5. ボイド低減効果の評価

5.1 評価方法

以上の核種の断面積は一部は日本での評価対象に含まれておらず、また、含まれているものも群定数化されていないため、通常の核計算は難しい。従って、ここではボイド前後の闇反応による中性子吸收効果の変化を評価し、Puの反応率の変化と比較することで、ボイド反応度への効果を調べた。

図4.1-6に示したように、ボイド反応度の主要因であるPu-239の高エネルギー断面積は核分裂断面積は変化が小さく、一方、捕獲断面積が100KeV以上で急激に減少する。ボイド時にはボイド前に比べて中性子スペクトルが硬くなるためにこの捕獲反応が減少し、正の反応度として現れる。従って、この捕獲反応の減少量と闇反応による中性子スペクトル硬化時の吸収反応増大量が同程度であれば、ボイド反応度が大きく減少できる。3章で検討した各炉心の中性子スペクトルの変化を対象にこれらの吸収反応率の変化を比較するものとした。

5.2 吸收効果の評価結果

表5.2-1上欄に基準炉心でのボイド前後の炉心中心部中性子スペクトルとPu-239捕獲反応率の変化をエネルギー積分した値を示す。下欄には同じくO-17(n, α)反応率の変化を示す。Pu-239の原子数密度は大型炉心の平均的な値である $10^{-3}/\text{barn} \cdot \text{cm}$ とし、O-17の原子数密度は大型酸化物燃料炉心のOの原子数密度 $1.97 \times 10^{-2}/\text{barn} \cdot \text{cm}$ とした。その結果、Pu-239捕獲反応による吸収は規格化中性子束に対して、ボイド前後で

$$0.00044 \rightarrow 0.000373$$

と減少するが、O-17(n, α)反応による吸収は

$$0.000596 \rightarrow 0.000643$$

と同程度のレベルで増大し、中性子束増大を抑制する。

表5.2-2~5には3章の各炉心での中性子スペクトルでの同じ吸収効果の比較を示したが、基準炉心の場合と同じ傾向にある。

表5.2-6、図5.2-1~5には同様の方法で他の闇反応核種の吸収効果をPu-239の捕獲反応の変化と比較した結果を示した。ここで、闇反応各核種の原子数密度は単純にO-17と同一とした。

これらの図、表よりO-17はPu-239捕獲反応の現象とほぼ同等のレベルの正の吸収効果があるが、他の核種は1桁程度小さい。K-40は比較的大きいが、液体カリウム密度は0.86

程度で原子数密度は体積100%としても 1.3×10^{-2} /barn・cm程度であり、吸収反応増大は困難と考えられる。

従って、O-17がこれらの核種の中で最有力と考えられる。

表5.2-1 基準炉心 Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率

群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル		Pu-239 (n, γ)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
		非ボイド時	ボイド時					
1	6.07E+06	2.81E-03	3.04E-03	8.81E-05	1.00E-03	8.81E-08	2.47E-10	2.68E-10
2	3.68E+06	1.29E-02	1.37E-02	2.69E-03	1.00E-03	2.69E-06	3.46E-08	3.70E-08
3	2.23E+06	2.70E-02	2.85E-02	1.76E-02	1.00E-03	1.76E-05	4.76E-07	5.02E-07
4	1.35E+06	4.47E-02	4.60E-02	4.50E-02	1.00E-03	4.50E-05	2.01E-06	2.07E-06
5	8.21E+05	5.73E-02	6.30E-02	6.56E-02	1.00E-03	6.56E-05	3.76E-06	4.13E-06
6	3.88E+05	1.87E-01	2.05E-01	1.02E-01	1.00E-03	1.02E-04	1.91E-05	2.09E-05
7	1.83E+05	1.60E-01	1.68E-01	1.90E-01	1.00E-03	1.90E-04	3.03E-05	3.20E-05
8	8.65E+04	1.63E-01	1.60E-01	2.81E-01	1.00E-03	2.81E-04	4.58E-05	4.48E-05
9	4.09E+04	1.33E-01	1.29E-01	3.93E-01	1.00E-03	3.93E-04	5.23E-05	5.06E-05
10	1.93E+04	9.59E-02	8.81E-02	6.07E-01	1.00E-03	6.07E-04	5.82E-05	5.35E-05
11	9.12E+03	5.70E-02	4.96E-02	9.89E-01	1.00E-03	9.89E-04	5.64E-05	4.91E-05
12	4.31E+03	2.94E-02	2.67E-02	1.67E+00	1.00E-03	1.67E-03	4.91E-05	4.46E-05
13	2.03E+03	1.05E-02	1.11E-02	2.84E+00	1.00E-03	2.84E-03	2.99E-05	3.14E-05
14	9.61E+02	1.39E-02	6.31E-03	4.01E+00	1.00E-03	4.01E-03	5.57E-05	2.53E-05
15	4.54E+02	4.34E-03	1.73E-03	6.17E+00	1.00E-03	6.17E-03	2.68E-05	1.07E-05
16	2.14E+02	8.12E-04	2.91E-04	1.01E+01	1.00E-03	1.01E-02	8.20E-06	2.94E-06
17	1.01E+02	9.55E-05	3.09E-05	1.38E+01	1.00E-03	1.38E-02	1.32E-06	4.27E-07
18	4.79E+01	6.02E-06	1.82E-06	2.93E+01	1.00E-03	2.93E-02	1.76E-07	5.35E-08
19	2.26E+01	1.41E-07	4.19E-08	4.46E+01	1.00E-03	4.46E-02	6.30E-09	1.87E-09
20	1.07E+01	3.88E-09	1.45E-09	6.17E+01	1.00E-03	6.17E-02	2.39E-10	8.97E-11
21	5.04E+00	2.72E-10	2.04E-10	1.70E+01	1.00E-03	1.70E-02	4.62E-12	3.47E-12
22	2.38E+00	3.12E-12	2.09E-12	1.30E+00	1.00E-03	1.30E-03	4.05E-15	2.71E-15
23	1.13E+00	2.80E-13	1.65E-13	3.05E+00	1.00E-03	3.05E-03	8.55E-16	5.04E-16
24	5.32E-01	1.49E-15	7.77E-16	3.20E+01	1.00E-03	3.20E-02	4.78E-17	2.49E-17
25	1.00E-05	6.89E-17	3.11E-17	2.04E+02	1.00E-03	2.04E-01	1.41E-17	6.34E-18
合計		1.00E+00	1.00E+00				4.40E-04	3.73E-04
群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル		O-17 (n, α)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
		非ボイド時	ボイド時					
1	6.07E+06	2.81E-03	3.04E-03	7.15E-02	1.97E-02	1.41E-03	3.96E-06	4.29E-06
2	3.68E+06	1.29E-02	1.37E-02	9.53E-02	1.97E-02	1.88E-03	2.42E-05	2.59E-05
3	2.23E+06	2.70E-02	2.85E-02	1.20E-01	1.97E-02	2.37E-03	6.40E-05	6.75E-05
4	1.35E+06	4.47E-02	4.60E-02	1.23E-01	1.97E-02	2.43E-03	1.09E-04	1.12E-04
5	8.21E+05	5.73E-02	6.30E-02	9.50E-02	1.97E-02	1.88E-03	1.07E-04	1.18E-04
6	3.88E+05	1.87E-01	2.05E-01	6.70E-02	1.97E-02	1.32E-03	2.48E-04	2.71E-04
7	1.83E+05	1.60E-01	1.68E-01	1.33E-02	1.97E-02	2.63E-04	4.19E-05	4.42E-05
8	8.65E+04	1.63E-01	1.60E-01		1.97E-02	0	0	0
9	4.09E+04	1.33E-01	1.29E-01		1.97E-02	0	0	0
10	1.93E+04	9.59E-02	8.81E-02		1.97E-02	0	0	0
11	9.12E+03	5.70E-02	4.96E-02		1.97E-02	0	0	0
12	4.31E+03	2.94E-02	2.67E-02		1.97E-02	0	0	0
13	2.03E+03	1.05E-02	1.11E-02		1.97E-02	0	0	0
14	9.61E+02	1.39E-02	6.31E-03		1.97E-02	0	0	0
15	4.54E+02	4.34E-03	1.73E-03		1.97E-02	0	0	0
16	2.14E+02	8.12E-04	2.91E-04		1.97E-02	0	0	0
17	1.01E+02	9.55E-05	3.09E-05		1.97E-02	0	0	0
18	4.79E+01	6.02E-06	1.82E-06		1.97E-02	0	0	0
19	2.26E+01	1.41E-07	4.19E-08		1.97E-02	0	0	0
20	1.07E+01	3.88E-09	1.45E-09		1.97E-02	0	0	0
21	5.04E+00	2.72E-10	2.04E-10		1.97E-02	0	0	0
22	2.38E+00	3.12E-12	2.09E-12		1.97E-02	0	0	0
23	1.13E+00	2.80E-13	1.65E-13		1.97E-02	0	0	0
24	5.32E-01	1.49E-15	7.77E-16		1.97E-02	0	0	0
25	1.00E-05	6.89E-17	3.11E-17		1.97E-02	0	0	0
合計		1.00E+00	1.00E+00				5.98E-04	6.43E-04

表5.2-2 MA無し 炉心 Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率

群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル 非ボイド時	中性子スペクトル ボイド時	Pu-239 (n, γ)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
1	6.07E+06	2.70E-03	2.92E-03	8.81E-05	1.00E-03	8.81E-08	2.38E-10	2.58E-10
2	3.68E+06	1.24E-02	1.32E-02	2.69E-03	1.00E-03	2.69E-06	3.33E-08	3.55E-08
3	2.23E+06	2.58E-02	2.72E-02	1.76E-02	1.00E-03	1.76E-05	4.55E-07	4.78E-07
4	1.35E+06	4.24E-02	4.35E-02	4.50E-02	1.00E-03	4.50E-05	1.91E-06	1.96E-06
5	8.21E+05	5.47E-02	6.01E-02	6.56E-02	1.00E-03	6.56E-05	3.59E-06	3.94E-06
6	3.88E+05	1.84E-01	2.03E-01	1.02E-01	1.00E-03	1.02E-04	1.88E-05	2.07E-05
7	1.83E+05	1.57E-01	1.66E-01	1.90E-01	1.00E-03	1.90E-04	2.98E-05	3.15E-05
8	8.65E+04	1.61E-01	1.58E-01	2.81E-01	1.00E-03	2.81E-04	4.52E-05	4.43E-05
9	4.09E+04	1.34E-01	1.30E-01	3.93E-01	1.00E-03	3.93E-04	5.25E-05	5.09E-05
10	1.93E+04	9.88E-02	9.14E-02	6.07E-01	1.00E-03	6.07E-04	5.99E-05	5.55E-05
11	9.12E+03	6.01E-02	5.29E-02	9.89E-01	1.00E-03	9.89E-04	5.94E-05	5.23E-05
12	4.31E+03	3.19E-02	2.95E-02	1.67E+00	1.00E-03	1.67E-03	5.32E-05	4.93E-05
13	2.03E+03	1.16E-02	1.27E-02	2.84E+00	1.00E-03	2.84E-03	3.31E-05	3.61E-05
14	9.61E+02	1.68E-02	7.96E-03	4.01E+00	1.00E-03	4.01E-03	6.74E-05	3.19E-05
15	4.54E+02	5.93E-03	2.48E-03	6.17E+00	1.00E-03	6.17E-03	3.66E-05	1.53E-05
16	2.14E+02	1.33E-03	5.01E-04	1.01E+01	1.00E-03	1.01E-02	1.35E-05	5.06E-06
17	1.01E+02	1.82E-04	6.16E-05	1.38E+01	1.00E-03	1.38E-02	2.51E-06	8.50E-07
18	4.79E+01	1.33E-05	4.16E-06	2.93E+01	1.00E-03	2.93E-02	3.91E-07	1.22E-07
19	2.26E+01	3.94E-07	1.15E-07	4.46E+01	1.00E-03	4.46E-02	1.76E-08	5.12E-09
20	1.07E+01	1.09E-08	3.35E-09	6.17E+01	1.00E-03	6.17E-02	6.74E-10	2.07E-10
21	5.04E+00	5.78E-10	3.45E-10	1.70E+01	1.00E-03	1.70E-02	9.83E-12	5.87E-12
22	2.38E+00	8.04E-12	4.28E-12	1.30E+00	1.00E-03	1.30E-03	1.04E-14	5.56E-15
23	1.13E+00	1.42E-12	6.70E-13	3.05E+00	1.00E-03	3.05E-03	4.33E-15	2.04E-15
24	5.32E-01	8.31E-15	3.45E-15	3.20E+01	1.00E-03	3.20E-02	2.66E-16	1.10E-16
25	1.00E-05	5.44E-16	1.96E-16	2.04E+02	1.00E-03	2.04E-01	1.11E-16	4.00E-17
合計		1.00E+00	1.00E+00				4.78E-04	4.00E-04
群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル 非ボイド時	中性子スペクトル ボイド時	O-17 (n, α)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
1	6.07E+06	2.70E-03	2.92E-03	7.15E-02	1.97E-02	1.41E-03	3.82E-06	4.13E-06
2	3.68E+06	1.24E-02	1.32E-02	9.53E-02	1.97E-02	1.88E-03	2.33E-05	2.48E-05
3	2.23E+06	2.58E-02	2.72E-02	1.20E-01	1.97E-02	2.37E-03	6.12E-05	6.44E-05
4	1.35E+06	4.24E-02	4.35E-02	1.23E-01	1.97E-02	2.43E-03	1.03E-04	1.06E-04
5	8.21E+05	5.47E-02	6.01E-02	9.50E-02	1.97E-02	1.88E-03	1.03E-04	1.13E-04
6	3.88E+05	1.84E-01	2.03E-01	6.70E-02	1.97E-02	1.32E-03	2.43E-04	2.68E-04
7	1.83E+05	1.57E-01	1.66E-01	1.33E-02	1.97E-02	2.63E-04	4.12E-05	4.35E-05
8	8.65E+04	1.61E-01	1.58E-01		1.97E-02	0	0	0
9	4.09E+04	1.34E-01	1.30E-01		1.97E-02	0	0	0
10	1.93E+04	9.88E-02	9.14E-02		1.97E-02	0	0	0
11	9.12E+03	6.01E-02	5.29E-02		1.97E-02	0	0	0
12	4.31E+03	3.19E-02	2.95E-02		1.97E-02	0	0	0
13	2.03E+03	1.16E-02	1.27E-02		1.97E-02	0	0	0
14	9.61E+02	1.68E-02	7.96E-03		1.97E-02	0	0	0
15	4.54E+02	5.93E-03	2.48E-03		1.97E-02	0	0	0
16	2.14E+02	1.33E-03	5.01E-04		1.97E-02	0	0	0
17	1.01E+02	1.82E-04	6.16E-05		1.97E-02	0	0	0
18	4.79E+01	1.33E-05	4.16E-06		1.97E-02	0	0	0
19	2.26E+01	3.94E-07	1.15E-07		1.97E-02	0	0	0
20	1.07E+01	1.09E-08	3.35E-09		1.97E-02	0	0	0
21	5.04E+00	5.78E-10	3.45E-10		1.97E-02	0	0	0
22	2.38E+00	8.04E-12	4.28E-12		1.97E-02	0	0	0
23	1.13E+00	1.42E-12	6.70E-13		1.97E-02	0	0	0
24	5.32E-01	8.31E-15	3.45E-15		1.97E-02	0	0	0
25	1.00E-05	5.44E-16	1.96E-16		1.97E-02	0	0	0
合計		1.00E+00	1.00E+00				5.78E-04	6.23E-04

表5.2-3 MA5% 炉心 Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率

群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル		Pu-239 (n, γ)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
		非ボイド時	ボイド時					
1	6.07E+06	2.80E-03	3.04E-03	8.81E-05	1.00E-03	8.81E-08	2.47E-10	2.68E-10
2	3.68E+06	1.28E-02	1.38E-02	2.69E-03	1.00E-03	2.69E-06	3.45E-08	3.70E-08
3	2.23E+06	2.70E-02	2.85E-02	1.76E-02	1.00E-03	1.76E-05	4.75E-07	5.02E-07
4	1.35E+06	4.46E-02	4.60E-02	4.50E-02	1.00E-03	0.000045	2.01E-06	2.07E-06
5	8.21E+05	5.69E-02	6.27E-02	6.56E-02	1.00E-03	6.56E-05	3.73E-06	4.11E-06
6	3.88E+05	1.86E-01	2.04E-01	1.02E-01	1.00E-03	1.02E-04	1.90E-05	2.08E-05
7	1.83E+05	1.60E-01	1.69E-01	1.90E-01	1.00E-03	1.90E-04	3.04E-05	3.21E-05
8	8.65E+04	1.65E-01	1.61E-01	2.81E-01	1.00E-03	2.81E-04	4.63E-05	4.53E-05
9	4.09E+04	1.35E-01	1.30E-01	3.93E-01	1.00E-03	3.93E-04	5.29E-05	5.11E-05
10	1.93E+04	9.65E-02	8.83E-02	6.07E-01	1.00E-03	6.07E-04	5.85E-05	5.36E-05
11	9.12E+03	5.69E-02	4.93E-02	9.89E-01	1.00E-03	9.89E-04	5.62E-05	4.87E-05
12	4.31E+03	2.89E-02	2.60E-02	1.67E+00	1.00E-03	1.67E-03	4.83E-05	4.35E-05
13	2.03E+03	1.02E-02	1.06E-02	2.84E+00	1.00E-03	2.84E-03	2.91E-05	3.01E-05
14	9.61E+02	1.31E-02	5.83E-03	4.01E+00	1.00E-03	4.01E-03	5.25E-05	2.34E-05
15	4.54E+02	3.90E-03	1.52E-03	6.17E+00	1.00E-03	6.17E-03	2.41E-05	9.40E-06
16	2.14E+02	6.83E-04	2.39E-04	1.01E+01	1.00E-03	1.01E-02	6.90E-06	2.41E-06
17	1.01E+02	7.51E-05	2.38E-05	1.38E+01	1.00E-03	1.38E-02	1.04E-06	3.28E-07
18	4.79E+01	4.49E-06	1.34E-06	2.93E+01	1.00E-03	2.93E-02	1.32E-07	3.92E-08
19	2.26E+01	1.01E-07	2.99E-08	4.46E+01	1.00E-03	4.46E-02	4.50E-09	1.33E-09
20	1.07E+01	2.89E-09	1.13E-09	6.17E+01	1.00E-03	6.17E-02	1.79E-10	7.00E-11
21	5.04E+00	1.61E-10	1.21E-10	1.70E+01	1.00E-03	1.70E-02	2.73E-12	2.07E-12
22	2.38E+00	1.73E-12	1.16E-12	1.30E+00	1.00E-03	1.30E-03	2.25E-15	1.51E-15
23	1.13E+00	1.09E-13	6.44E-14	3.05E+00	1.00E-03	3.05E-03	3.33E-16	1.97E-16
24	5.32E-01	6.82E-16	3.55E-16	3.20E+01	1.00E-03	3.20E-02	2.18E-17	1.14E-17
25	1.00E-05	2.64E-17	1.19E-17	2.04E+02	1.00E-03	2.04E-01	5.39E-18	2.44E-18
合計		1.00E+00	1.00E+00				4.32E-04	3.67E-04
群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル		O-17 (n, α)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
		非ボイド時	ボイド時					
1	6.07E+06	2.80E-03	3.04E-03	7.15E-02	1.97E-02	1.41E-03	3.95E-06	4.29E-06
2	3.68E+06	1.28E-02	1.38E-02	9.53E-02	1.97E-02	1.88E-03	2.41E-05	2.59E-05
3	2.23E+06	2.70E-02	2.85E-02	1.20E-01	1.97E-02	2.37E-03	6.39E-05	6.76E-05
4	1.35E+06	4.46E-02	4.60E-02	1.23E-01	1.97E-02	2.43E-03	1.08E-04	1.12E-04
5	8.21E+05	5.69E-02	6.27E-02	9.50E-02	1.97E-02	1.88E-03	1.07E-04	1.18E-04
6	3.88E+05	1.86E-01	2.04E-01	6.70E-02	1.97E-02	1.32E-03	2.46E-04	2.70E-04
7	1.83E+05	1.60E-01	1.69E-01	1.33E-02	1.97E-02	2.63E-04	4.21E-05	4.44E-05
8	8.65E+04	1.65E-01	1.61E-01		1.97E-02	0	0	0
9	4.09E+04	1.35E-01	1.30E-01		1.97E-02	0	0	0
10	1.93E+04	9.65E-02	8.83E-02		1.97E-02	0	0	0
11	9.12E+03	5.69E-02	4.93E-02		1.97E-02	0	0	0
12	4.31E+03	2.89E-02	2.60E-02		1.97E-02	0	0	0
13	2.03E+03	1.02E-02	1.06E-02		1.97E-02	0	0	0
14	9.61E+02	1.31E-02	5.83E-03		1.97E-02	0	0	0
15	4.54E+02	3.90E-03	1.52E-03		1.97E-02	0	0	0
16	2.14E+02	6.83E-04	2.39E-04		1.97E-02	0	0	0
17	1.01E+02	7.51E-05	2.38E-05		1.97E-02	0	0	0
18	4.79E+01	4.49E-06	1.34E-06		1.97E-02	0	0	0
19	2.26E+01	1.01E-07	2.99E-08		1.97E-02	0	0	0
20	1.07E+01	2.89E-09	1.13E-09		1.97E-02	0	0	0
21	5.04E+00	1.61E-10	1.21E-10		1.97E-02	0	0	0
22	2.38E+00	1.73E-12	1.16E-12		1.97E-02	0	0	0
23	1.13E+00	1.09E-13	6.44E-14		1.97E-02	0	0	0
24	5.32E-01	6.82E-16	3.55E-16		1.97E-02	0	0	0
25	1.00E-05	2.64E-17	1.19E-17		1.97E-02	0	0	0
合計		1.00E+00	1.00E+00				5.95E-04	6.41E-04

表5.2-4 ピッチ2倍 炉心 Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率

群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル 非ボイド時	Pu-239 (n, γ)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
1	6.07E+06	2.72E-03	2.95E-03	8.81E-05	1.00E-03	8.81E-08	2.40E-10
2	3.68E+06	1.25E-02	1.33E-02	2.69E-03	1.00E-03	2.69E-06	3.35E-08
3	2.23E+06	2.62E-02	2.76E-02	1.76E-02	1.00E-03	1.76E-05	4.61E-07
4	1.35E+06	4.34E-02	4.46E-02	4.50E-02	1.00E-03	4.50E-05	1.95E-06
5	8.21E+05	5.59E-02	6.17E-02	6.56E-02	1.00E-03	6.56E-05	3.67E-06
6	3.88E+05	1.86E-01	2.05E-01	1.02E-01	1.00E-03	1.02E-04	1.89E-05
7	1.83E+05	1.59E-01	1.68E-01	1.90E-01	1.00E-03	1.90E-04	3.03E-05
8	8.65E+04	1.64E-01	1.60E-01	2.81E-01	1.00E-03	2.81E-04	4.60E-05
9	4.09E+04	1.34E-01	1.30E-01	3.93E-01	1.00E-03	3.93E-04	5.28E-05
10	1.93E+04	9.73E-02	8.92E-02	6.07E-01	1.00E-03	6.07E-04	5.91E-05
11	9.12E+03	5.81E-02	5.04E-02	9.89E-01	1.00E-03	9.89E-04	5.75E-05
12	4.31E+03	3.01E-02	2.73E-02	1.67E+00	1.00E-03	1.67E-03	5.03E-05
13	2.03E+03	1.08E-02	1.14E-02	2.84E+00	1.00E-03	2.84E-03	3.07E-05
14	9.61E+02	1.44E-02	6.43E-03	4.01E+00	1.00E-03	4.01E-03	5.79E-05
15	4.54E+02	4.57E-03	1.77E-03	6.17E+00	1.00E-03	6.17E-03	2.82E-05
16	2.14E+02	8.69E-04	2.99E-04	1.01E+01	1.00E-03	1.01E-02	8.77E-06
17	1.01E+02	1.04E-04	3.22E-05	1.38E+01	1.00E-03	1.38E-02	1.44E-06
18	4.79E+01	6.72E-06	1.94E-06	2.93E+01	1.00E-03	2.93E-02	1.97E-07
19	2.26E+01	1.59E-07	4.47E-08	4.46E+01	1.00E-03	4.46E-02	7.11E-09
20	1.07E+01	4.35E-09	1.52E-09	6.17E+01	1.00E-03	6.17E-02	2.68E-10
21	5.04E+00	2.80E-10	2.04E-10	1.70E+01	1.00E-03	1.70E-02	4.76E-12
22	2.38E+00	3.30E-12	2.13E-12	1.30E+00	1.00E-03	1.30E-03	4.29E-15
23	1.13E+00	3.03E-13	1.72E-13	3.05E+00	1.00E-03	3.05E-03	9.23E-16
24	5.32E-01	1.70E-15	8.55E-16	3.20E+01	1.00E-03	3.20E-02	5.46E-17
25	1.00E-05	8.19E-17	3.56E-17	2.04E+02	1.00E-03	2.04E-01	1.67E-17
合計			1.00E+00	1.00E+00			4.48E-04
							3.78E-04
群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル 非ボイド時	O-17 (n, α)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
1	6.07E+06	2.72E-03	2.95E-03	7.15E-02	1.97E-02	1.41E-03	3.84E-06
2	3.68E+06	1.25E-02	1.33E-02	9.53E-02	1.97E-02	1.88E-03	2.34E-05
3	2.23E+06	2.62E-02	2.76E-02	1.20E-01	1.97E-02	2.37E-03	6.20E-05
4	1.35E+06	4.34E-02	4.46E-02	1.23E-01	1.97E-02	2.43E-03	1.05E-04
5	8.21E+05	5.59E-02	6.17E-02	9.50E-02	1.97E-02	1.88E-03	1.05E-04
6	3.88E+05	1.86E-01	2.05E-01	6.70E-02	1.97E-02	1.32E-03	2.46E-04
7	1.83E+05	1.59E-01	1.68E-01	1.33E-02	1.97E-02	2.63E-04	4.18E-05
8	8.65E+04	1.64E-01	1.60E-01		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
9	4.09E+04	1.34E-01	1.30E-01		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
10	1.93E+04	9.73E-02	8.92E-02		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
11	9.12E+03	5.81E-02	5.04E-02		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
12	4.31E+03	3.01E-02	2.73E-02		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
13	2.03E+03	1.08E-02	1.14E-02		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
14	9.61E+02	1.44E-02	6.43E-03		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
15	4.54E+02	4.57E-03	1.77E-03		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
16	2.14E+02	8.69E-04	2.99E-04		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
17	1.01E+02	1.04E-04	3.22E-05		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
18	4.79E+01	6.72E-06	1.94E-06		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
19	2.26E+01	1.59E-07	4.47E-08		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
20	1.07E+01	4.35E-09	1.52E-09		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
21	5.04E+00	2.80E-10	2.04E-10		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
22	2.38E+00	3.30E-12	2.13E-12		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
23	1.13E+00	3.03E-13	1.72E-13		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
24	5.32E-01	1.70E-15	8.55E-16		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
25	1.00E-05	8.19E-17	3.56E-17		1.97E-02	0.00E+00	0.00E+00
合計			1.00E+00	1.00E+00			5.87E-04
							6.33E-04

表5.2-5 ピッチ1/2倍 炉心 Pu-239(n, γ)反応率、O-17(n, α)反応率

群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル 非ボイド時	Pu-239 (n, γ)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
1	6.07E+06	3.07E-03	3.33E-03	8.81E-05	1.00E-03	8.81E-08	2.70E-10
2	3.68E+06	1.41E-02	1.51E-02	2.69E-03	1.00E-03	2.69E-06	3.79E-08
3	2.23E+06	2.97E-02	3.15E-02	1.76E-02	1.00E-03	1.76E-05	5.23E-07
4	1.35E+06	4.88E-02	5.05E-02	4.50E-02	1.00E-03	4.50E-05	2.19E-06
5	8.21E+05	6.14E-02	6.76E-02	6.56E-02	1.00E-03	6.56E-05	4.03E-06
6	3.88E+05	1.92E-01	2.10E-01	1.02E-01	1.00E-03	1.02E-04	1.96E-05
7	1.83E+05	1.62E-01	1.70E-01	1.90E-01	1.00E-03	1.90E-04	3.07E-05
8	8.65E+04	1.63E-01	1.59E-01	2.81E-01	1.00E-03	2.81E-04	4.57E-05
9	4.09E+04	1.30E-01	1.25E-01	3.93E-01	1.00E-03	3.93E-04	5.09E-05
10	1.93E+04	9.09E-02	8.28E-02	6.07E-01	1.00E-03	6.07E-04	5.52E-05
11	9.12E+03	5.30E-02	4.57E-02	9.89E-01	1.00E-03	9.89E-04	5.25E-05
12	4.31E+03	2.68E-02	2.39E-02	1.67E+00	1.00E-03	1.67E-03	4.47E-05
13	2.03E+03	9.43E-03	9.50E-03	2.84E+00	1.00E-03	2.84E-03	2.68E-05
14	9.61E+02	1.20E-02	5.50E-03	4.01E+00	1.00E-03	4.01E-03	4.83E-05
15	4.54E+02	3.64E-03	1.51E-03	6.17E+00	1.00E-03	6.17E-03	2.25E-05
16	2.14E+02	6.45E-04	2.43E-04	1.01E+01	1.00E-03	1.01E-02	6.52E-06
17	1.01E+02	7.12E-05	2.45E-05	1.38E+01	1.00E-03	1.38E-02	9.83E-07
18	4.79E+01	4.15E-06	1.35E-06	2.93E+01	1.00E-03	2.93E-02	1.22E-07
19	2.26E+01	9.42E-08	3.08E-08	4.46E+01	1.00E-03	4.46E-02	4.20E-09
20	1.07E+01	2.69E-09	1.18E-09	6.17E+01	1.00E-03	6.17E-02	1.66E-10
21	5.04E+00	2.49E-10	1.98E-10	1.70E+01	1.00E-03	1.70E-02	4.23E-12
22	2.38E+00	2.61E-12	1.85E-12	1.30E+00	1.00E-03	1.30E-03	3.39E-15
23	1.13E+00	2.19E-13	1.37E-13	3.05E+00	1.00E-03	3.05E-03	6.69E-16
24	5.32E-01	9.76E-16	5.36E-16	3.20E+01	1.00E-03	3.20E-02	3.12E-17
25	1.00E-05	3.93E-17	1.87E-17	2.04E+02	1.00E-03	2.04E-01	8.02E-18
合計		1.00E+00	1.00E+00				4.11E-04
							3.51E-04

群番号	中性子 エネルギー (eV)	中性子スペクトル 非ボイド時	O-17 (n, α)断面積 (barn)	想定原子数 密度 (/barn.cm)	巨視的 断面積 (/cm)	反応率 非ボイド時	反応率 ボイド時
1	6.07E+06	3.07E-03	3.33E-03	7.15E-02	1.97E-02	1.41E-03	4.33E-06
2	3.68E+06	1.41E-02	1.51E-02	9.53E-02	1.97E-02	1.88E-03	2.65E-05
3	2.23E+06	2.97E-02	3.15E-02	1.20E-01	1.97E-02	2.37E-03	7.04E-05
4	1.35E+06	4.88E-02	5.05E-02	1.23E-01	1.97E-02	2.43E-03	1.18E-04
5	8.21E+05	6.14E-02	6.76E-02	9.50E-02	1.97E-02	1.88E-03	1.15E-04
6	3.88E+05	1.92E-01	2.10E-01	6.70E-02	1.97E-02	1.32E-03	2.54E-04
7	1.83E+05	1.62E-01	1.70E-01	1.33E-02	1.97E-02	2.63E-04	4.25E-05
8	8.65E+04	1.63E-01	1.59E-01		1.97E-02	0	0
9	4.09E+04	1.30E-01	1.25E-01		1.97E-02	0	0
10	1.93E+04	9.09E-02	8.28E-02		1.97E-02	0	0
11	9.12E+03	5.30E-02	4.57E-02		1.97E-02	0	0
12	4.31E+03	2.68E-02	2.39E-02		1.97E-02	0	0
13	2.03E+03	9.43E-03	9.50E-03		1.97E-02	0	0
14	9.61E+02	1.20E-02	5.50E-03		1.97E-02	0	0
15	4.54E+02	3.64E-03	1.51E-03		1.97E-02	0	0
16	2.14E+02	6.45E-04	2.43E-04		1.97E-02	0	0
17	1.01E+02	7.12E-05	2.45E-05		1.97E-02	0	0
18	4.79E+01	4.15E-06	1.35E-06		1.97E-02	0	0
19	2.26E+01	9.42E-08	3.08E-08		1.97E-02	0	0
20	1.07E+01	2.69E-09	1.18E-09		1.97E-02	0	0
21	5.04E+00	2.49E-10	1.98E-10		1.97E-02	0	0
22	2.38E+00	2.61E-12	1.85E-12		1.97E-02	0	0
23	1.13E+00	2.19E-13	1.37E-13		1.97E-02	0	0
24	5.32E-01	9.76E-16	5.36E-16		1.97E-02	0	0
25	1.00E-05	3.93E-17	1.87E-17		1.97E-02	0	0
合計		1.00E+00	1.00E+00				6.32E-04
							6.79E-04

表5.2-6 各炉心における閾値反応吸収効果の比

基準炉心 核種	反応	反応率 非ボイド	反応率 ボイド時	反応率の変化 (吸収効果)
Pu-239	(n, γ)	0.000440	0.000373	-0.0000667
O-17	(n, α)	0.000598	0.000643	0.0000455
Cu-63	(n, α)	0.000000	0.000000	0.0000000
Cu-63	(n, p)	0.000028	0.000030	0.0000018
P-31	(n, α)	0.000002	0.000002	0.0000002
P-31	(n, p)	0.000056	0.000060	0.0000038
S-32	(n, α)	0.000258	0.000266	0.0000076
S-32	(n, p)	0.000090	0.000096	0.0000061
K-40	(n, α)	0.000756	0.000771	0.0000155
K-40	(n, p)	0.000283	0.000284	0.0000016
MA無し炉心 核種	反応	反応率 非ボイド	反応率 ボイド時	反応率の変化 (吸収効果)
Pu-239	(n, γ)	0.000478	0.000400	-0.0000781
O-17	(n, α)	0.000578	0.000623	0.0000448
Cu-63	(n, α)	0.000000	0.000000	0.0000000
Cu-63	(n, p)	0.000027	0.000028	0.0000017
P-31	(n, α)	0.000002	0.000002	0.0000002
P-31	(n, p)	0.000054	0.000058	0.0000036
S-32	(n, α)	0.000253	0.000260	0.0000071
S-32	(n, p)	0.000086	0.000092	0.0000058
K-40	(n, α)	0.000748	0.000761	0.0000128
K-40	(n, p)	0.000282	0.000283	0.0000015
MA 5%炉心 核種	反応	反応率 非ボイド	反応率 ボイド時	反応率の変化 (吸収効果)
Pu-239	(n, γ)	0.000432	0.000367	-0.0000643
O-17	(n, α)	0.000595	0.000641	0.0000461
Cu-63	(n, α)	0.000000	0.000000	0.0000000
Cu-63	(n, p)	0.000028	0.000030	0.0000019
P-31	(n, α)	0.000002	0.000002	0.0000002
P-31	(n, p)	0.000056	0.000060	0.0000040
S-32	(n, α)	0.000258	0.000266	0.0000080
S-32	(n, p)	0.000090	0.000096	0.0000064
K-40	(n, α)	0.000754	0.000770	0.0000166
K-40	(n, p)	0.000283	0.000284	0.0000017
ピッチ2倍炉心 核種	反応	反応率 非ボイド	反応率 ボイド時	反応率の変化 (吸収効果)
Pu-239	(n, γ)	0.000448	0.000378	-0.0000705
O-17	(n, α)	0.000587	0.000633	0.0000465
Cu-63	(n, α)	0.000000	0.000000	0.0000000
Cu-63	(n, p)	0.000027	0.000029	0.0000017
P-31	(n, α)	0.000002	0.000002	0.0000002
P-31	(n, p)	0.000055	0.000058	0.0000037
S-32	(n, α)	0.000255	0.000262	0.0000073
S-32	(n, p)	0.000087	0.000093	0.0000059
K-40	(n, α)	0.000749	0.000764	0.0000151
K-40	(n, p)	0.000282	0.000283	0.0000015
ピッチ0.5倍炉心 核種	反応	反応率 非ボイド	反応率 ボイド時	反応率の変化 (吸収効果)
Pu-239	(n, γ)	0.000411	0.000351	-0.0000604
O-17	(n, α)	0.000632	0.000679	0.0000474
Cu-63	(n, α)	0.000000	0.000000	0.0000000
Cu-63	(n, p)	0.000031	0.000033	0.0000021
P-31	(n, α)	0.000002	0.000002	0.0000002
P-31	(n, p)	0.000062	0.000066	0.0000045
S-32	(n, α)	0.000270	0.000279	0.0000090
S-32	(n, p)	0.000098	0.000106	0.0000072
K-40	(n, α)	0.000777	0.000795	0.0000185
K-40	(n, p)	0.000285	0.000287	0.0000019

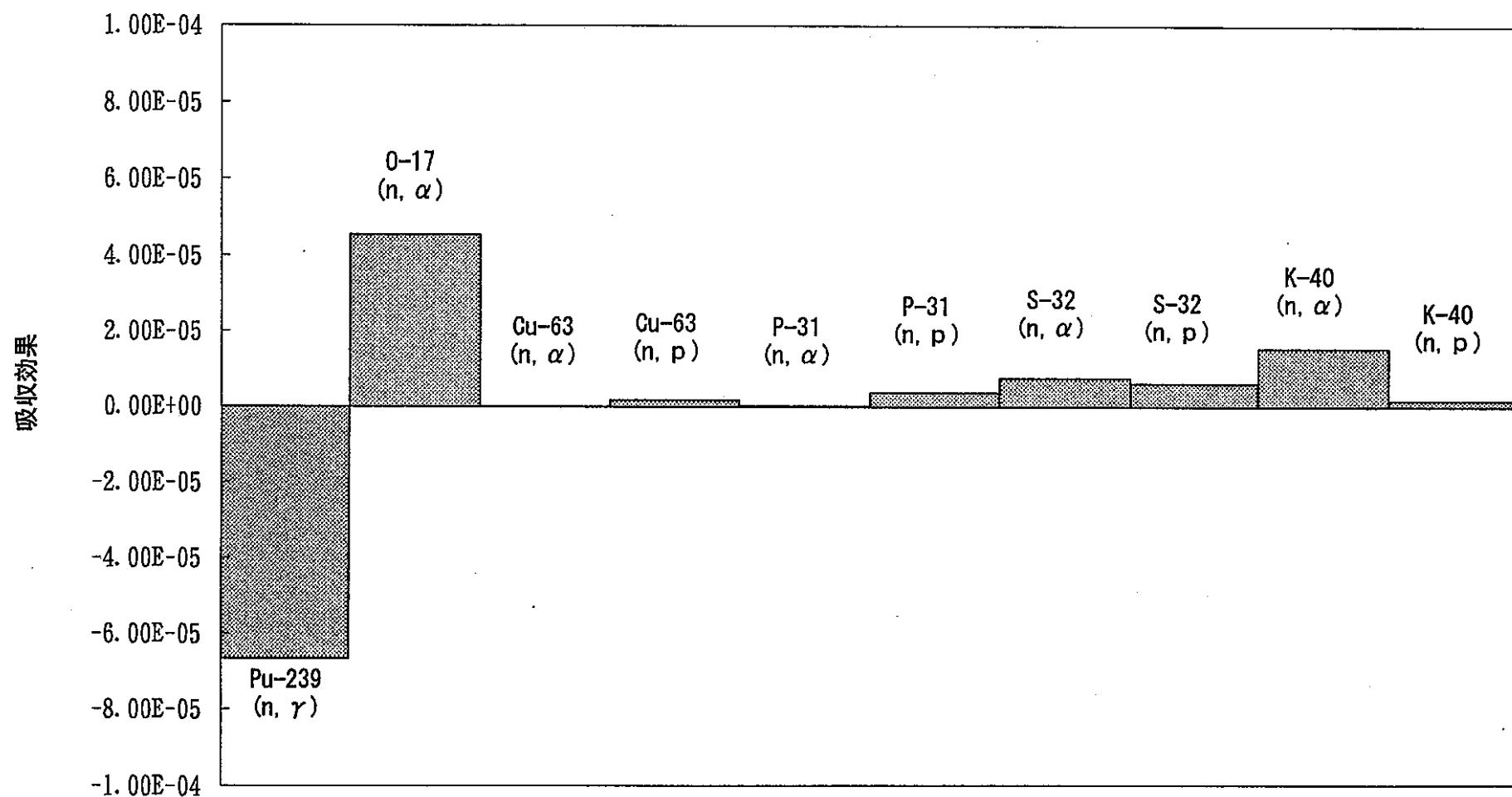


図5.2-1 基準炉心における各候補核種の吸収効果

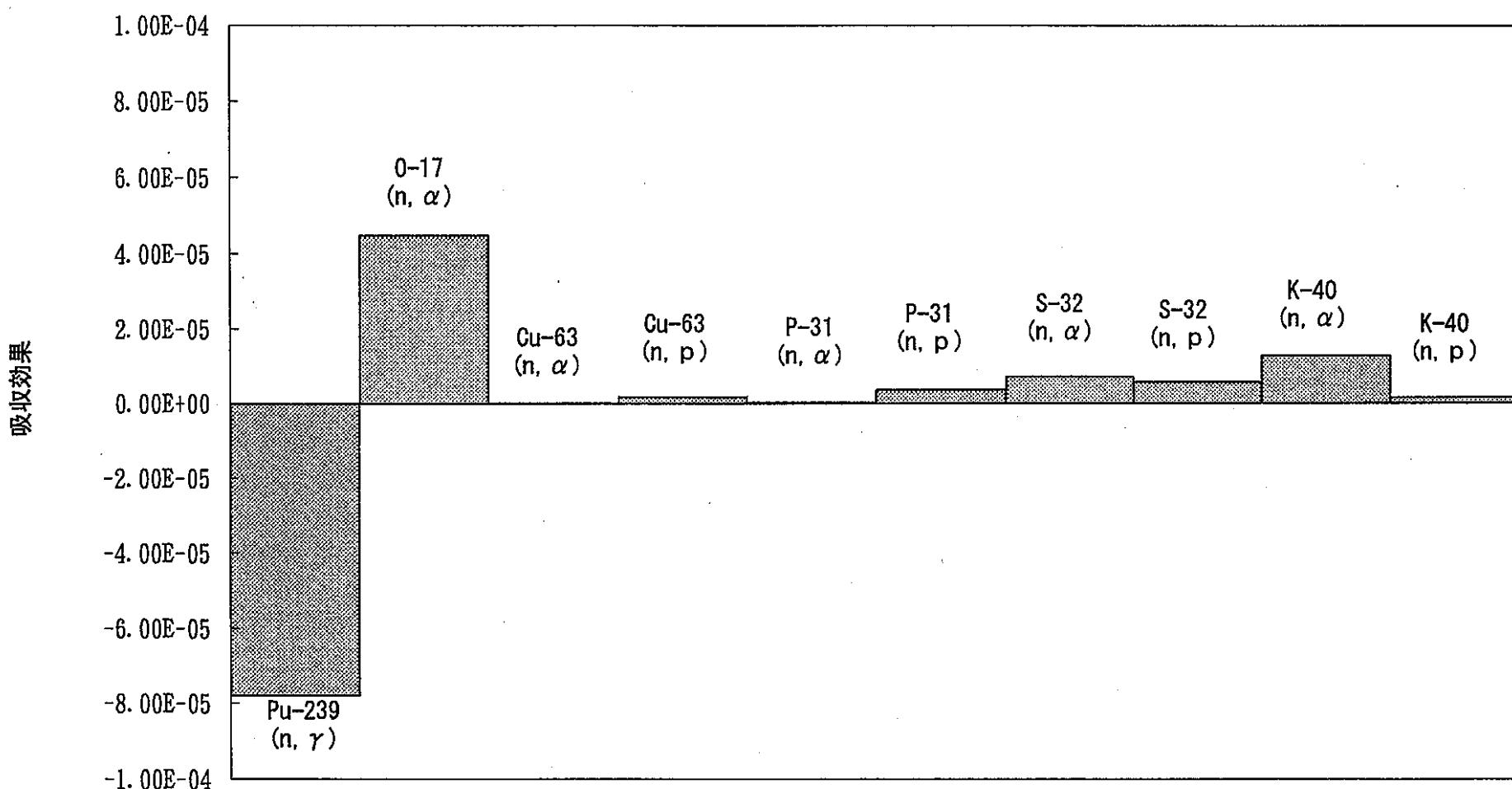


図5.2-2 MA無し炉心における各候補核種の吸収効果

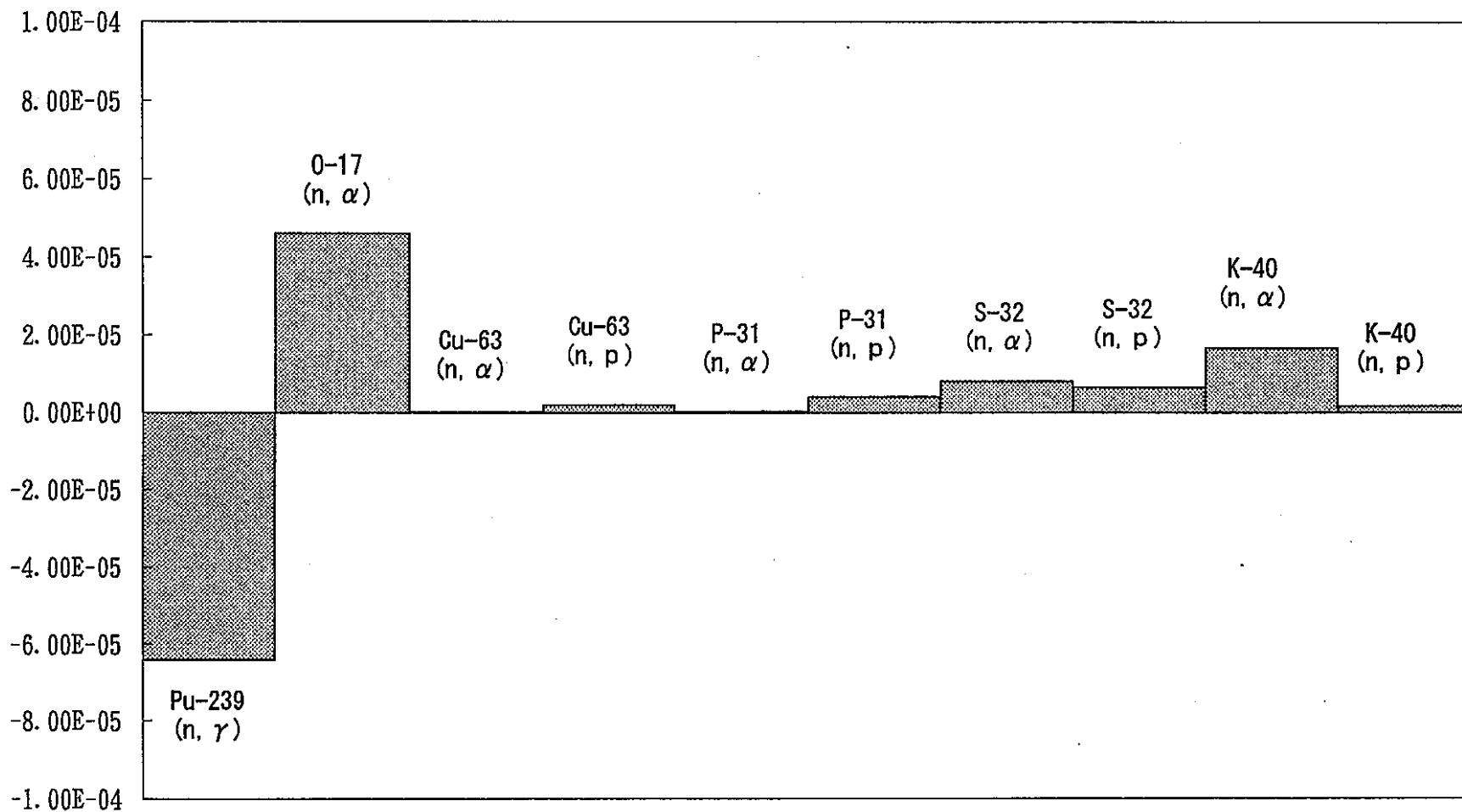


図5.2-3 MA 5%炉心における各候補核種の吸収効果

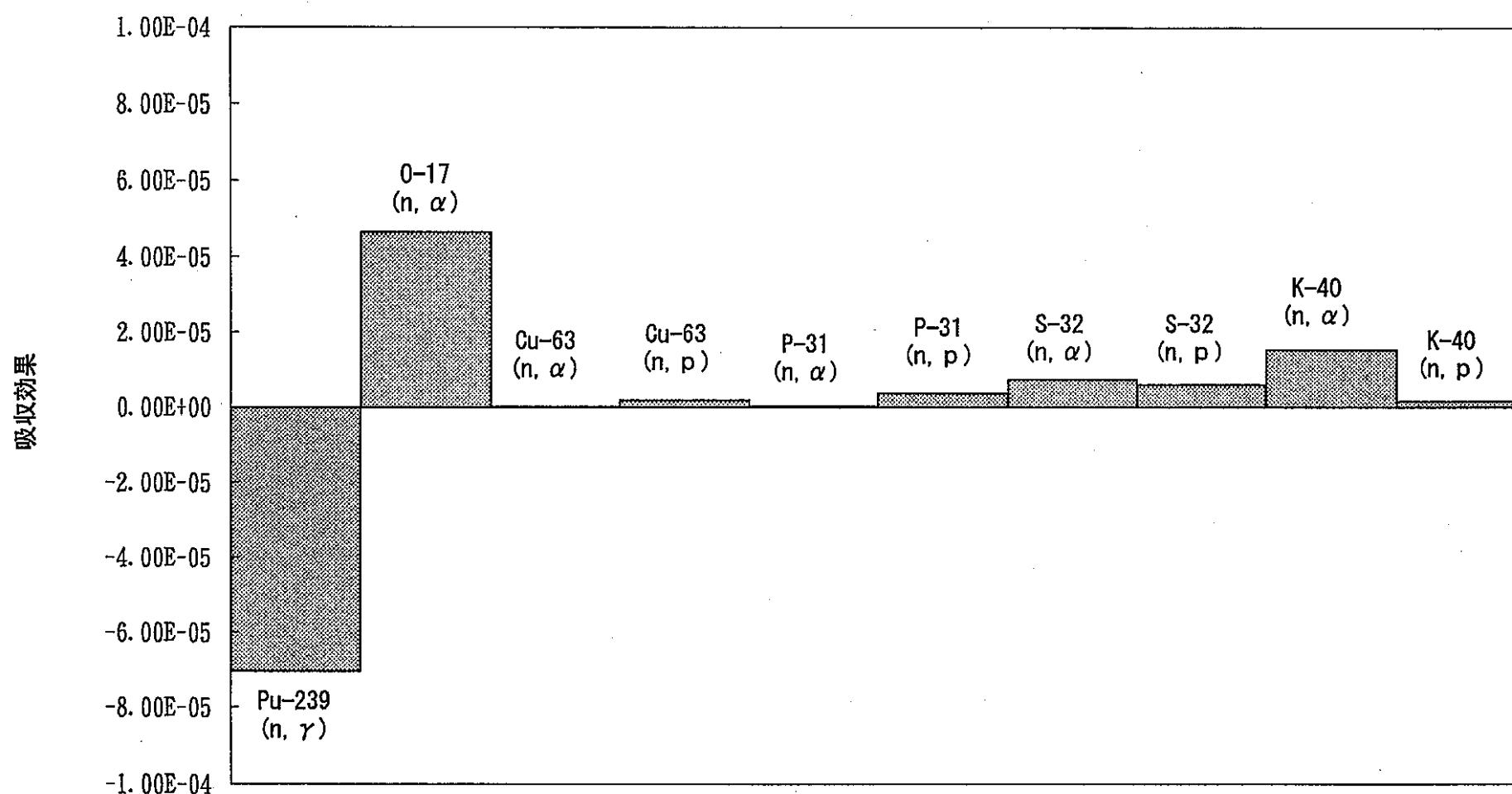


図5.2-4 ピッチ2倍炉心における各候補核種の吸収効果

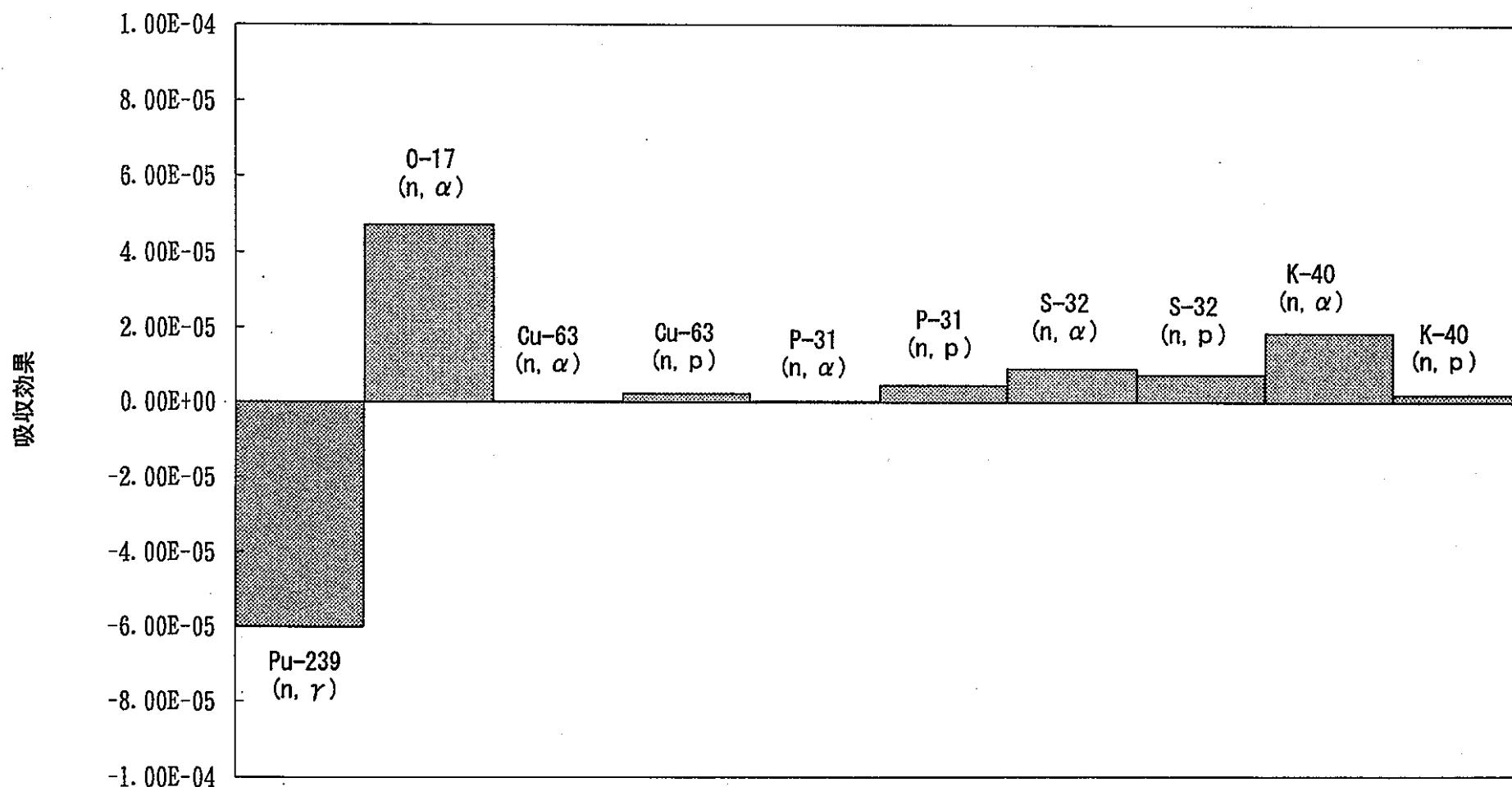


図5.2-5 ピッチ1／2倍炉心における各候補核種の吸収効果

6. 酸化物燃料炉心におけるボイド反応度低減効果

6.1 解析の目的

O-17によるナトリウムボイド反応度の低減効果を通常の解析により確認するために酸化物燃料炉心を想定してその酸素を天然酸素からO-17に変えた場合のボイド反応度の変化を評価した。但し、O-17は群定数化がされていないため、簡易的に吸収断面積のみをENDF/B-6より読み取り群定数ファイルを書き換えて計算する方法を用いた。

6.2 酸化物燃料炉心の炉心仕様

酸化物燃料炉心でのボイド反応度低減効果を大型炉心を対象として評価するために、炉心仕様を下記のように設定した。

(1)燃料組成条件

表6.2-1、表6.2-2に各々燃料材質、Pu組成条件を示す。Pu組成は原型炉基準組成とし、MAは含まれないものとした。スマア密度は酸化物ペレット燃料を想定した値とした。O-17の天然酸素中存在比は0.037%程度であるが軽元素であることを考慮し、100%濃縮が可能であると仮定した。

(2)炉心仕様

炉心サイズは原子炉熱出力1600MWt、炉心径約3mの実証炉級大型炉心を想定した。

表6.2-3に採用した酸化物燃料炉心の基本条件、表6.2-4に設定した炉心仕様を示す。

炉心高さは比較のためにサーベイ用窒化物燃料基準炉心と同じ80cmとした。

6.3 解析結果

解析方法はO-17の吸収断面積を除き、サーベイ用基準炉心と同様とした。但し、計算の容易さのために燃焼条件として1バッチ炉心として8万Mw d/t燃焼炉心特性を評価した。

表6.3-1に天然酸素酸化物炉心とO-17酸化物燃料炉心の主要炉心特性を示す。

本表に示すように、O-17による酸化物燃料炉心のボイド反応度は天然酸素炉心に比べ0.6倍と大きく減少することが通常の拡散計算で確認された。

表6.2-1 燃料組成条件

項目	酸化物燃料炉心
燃料材質	窒化物
燃料スマア密度	83.7%
MA混入	なし (原型炉と同様)
VFA-As混入	なし (原型炉と同様)

表6.2-2 想定した酸化物燃料炉心Pu同位体組成（原型炉基準組成）

同位体	重量割合(%)	備考
Pu-239	58	
Pu-240	24	
Pu-241	14	
Pu-242	4	
合計	100	

表6.2-3 酸化物燃料炉心基本条件

項目	パラメータ
原子炉熱出力	1 6 0 0 MWd/t
平均燃焼度	約 8 万MWd/t
炉心径	3 m
炉心高さ	8 0 c m
ボンド材	H e ボンド
酸素組成	天然 及び O - 1 7 100%濃縮)

表6.2-4 酸化物燃料炉心の仕様（1／3）

項目	単位	酸化物 燃料炉心
1. 原子炉熱出力	MW	1600
2. 炉心構成		
(1)炉心形式		
炉心概念		均質炉心
炉心領域数		2
(2)構成要素数		
炉心燃料（内側／外側）	体	301(205/96)
制御棒	体	24
半径方向プランケット	体	138
(3)炉心寸法		
高さ	mm	800
等価直径	mm	2993
高さ／直径	mm	0.267
容積	l	5625
(4)プランケット寸法		
軸方向厚さ（上／下）	mm	350/350
半径方向等価厚さ	mm	290
(5)集合体等価ピッチ	mm	158.1

表6.2-4

酸化物燃料炉心の仕様（2／3）

項目	単位	酸化物 燃料炉心
3. 炉心燃料集合体		
(1) 燃料要素		
燃料材質		酸化物
炉心燃料スメア理論密度比	%	83.7
軸ブランケットスメア理論密度比	%	92.7
炉心高さ	mm	800
軸方向ブランケット厚さ (上／下)	mm	350/350
被覆管内径	mm	6.72
被覆管外径	mm	7.6
被覆管肉厚	mm	0.44
燃料要素全長	mm	3100
ワイヤ直径	mm	1.1
ガスプレナム位置		下部
(2) 燃料集合体		
燃料要素数	本	271
ラッパ管内対面幅	mm	146.2
ラッパ管肉厚	mm	3.5
集合体全長	mm	4600
4. 燃料交換		(8万MWd/t達成のための計算条件として仮定)
燃焼日数	月	36
バッチ数		
炉心		1
半径方向ブランケット		1

表6.2-4

酸化物燃料炉心の仕様（3／3）

項目	単位	酸化物 燃料炉心
5. 炉心構成要素体積比		(被覆管内／ボンドを含む冷却材／構造材／B4C吸收体)
炉心燃料		.4442/.4109/.2105/-
径プランケット		.4889/.3839/.1798/-
遮蔽体		-/.2000/.8000/-
制御棒下部		-/.9160/.0840/-
制御棒吸收体部		-/.407/.232/.345
6. 径プランケット燃料		
スタック長	mm	1500
燃料材質		0.3%劣化ウラン酸化物
スマア密度	%	95 (実効密度11.44g/cc)
7. 制御棒吸收体組成		
スタック長	mm	1000 (パーク位置として 炉心上端想定)
材質		92%B-10濃縮B4C

表 6.3-1 酸化物燃料炉心の特性とボイド反応度低減

項目	単位	(1) 天然酸素 酸化物炉心	(2) O-17 酸化物炉心
(1)燃料富化度			
内側炉心	%	18.3	22.2
外側炉心	%	27.3	30.4
(2)燃焼反応度	% $\Delta \rho$ /年	4.0	5.1
(3)増殖比			
炉心		0.68	0.60
半径方向プランケット		0.21	0.19
軸方向プランケット		0.33	0.29
合計		1.22	1.08
(4)炉心部燃焼度	万MWd/t	8.6	8.6
(5)最大線出力			
内側炉心	W/cm	270	280
外側炉心	W/cm	295	286
(6)平均線出力	W/cm	216	222
(7)ボイド反応度			
炉心+軸プランケット			
平衡末期	% $\Delta \rho$	1.53 (3.8\$)	0.95 (2.4\$)
初装荷初期	% $\Delta \rho$	1.03 (2.6\$)	0.65 (1.6\$)

注) 特性値は燃料富化度、燃焼反応度以外は燃焼末期値。

ボイド反応度 \$ 値は遅発中性子割合を0.4%と仮定。

7. まとめ

吸収反応断面積のみを模擬した拡散計算によりO-17濃縮酸化物燃料炉心ではボイド反応度は約2.5%で天然酸化物燃料炉心の約60%となることが分かった。但し、今回考慮できなかった非弾性散乱反応がO-16では6.5MeV以上で生じるのに対し、O-17では950KeVで生じておりこれを含めるとボイド反応度は天然酸素の場合の1/2以下となると考えられる。また、O-17濃縮酸化アルミニウムピン等による酸素混入量の増大によりゼロボイド反応度炉心の達成の可能性がある。

なお、将来MAリサイクルを行った場合の燃料への混入によるボイド反応度の増大効果はMA 2.5%混入で20%程度であり、O-17混入により十分抑制できると考えられる。

本検討結果より、ボイド反応度を低減し、冷却材反応度係数を低下させるには今後以下の検討を行う必要がある。

核データの整備による詳細核計算等による反応度変化の確認。

O-17濃縮技術の開発。

O-17燃料製造、再処理時の課題の確認。

炉心内酸素混入量増大方策の開発。

C-14生成による影響検討（前述のO-17濃縮大型炉では36ヶ月運転により、全炉心で約 3.6×10^{15} Bq、約22kgのC-14が生成される。）

また、今回の調査方法（主にENDF/B-6及びJEF-2の核分裂スペクトル平均断面積による絞り込み）で摘出した候補核種以外にボイド反応度を低減できる核種がないか核データの整備による系統的な検討が必要である。

付録

核種の質量と存在比

(1⁴C=12.000000)

原子番号	核種	存在比(%)	質量	原子番号	核種	存在比(%)	質量	原子番号	核種	存在比(%)	質量
1	¹ H	99.985	1.0078252	48	⁴⁸ Ti	73.99	47.947951	57	⁵⁷ Rb	27.85	86.909186
	² H	0.015	2.0141022	49	⁴⁹ Ti	5.46	48.947870	38	⁸⁴ Sr	0.56	83.913430
2	³ He	1.3×10 ⁻⁴	3.0160296	50	⁵⁰ Ti	5.25	49.944786	56	⁸⁶ Sr	9.86	85.909285
	⁴ He	100	4.0026032	23	⁵⁰ V	0.25	49.947164	57	⁸⁷ Sr	7.02	86.908892
3	⁶ Li	7.42	6.015124	51	⁵¹ V	99.75	50.943961	58	⁸⁸ Sr	82.56	87.905664
	⁷ Li	92.58	7.016004	24	⁵⁰ Cr	4.31	49.946055	39	⁸⁹ Zr	100	88.905872
4	⁹ Be	100	9.012186	52	⁵² Cr	83.76	51.940481	40	⁹⁰ Zr	51.46	89.904700
5	¹⁰ B	19.6-19.8	10.012939	53	⁵³ Cr	9.55	52.940653	51	⁹¹ Zr	11.23	90.905642
	¹¹ B	80.2-80.4	11.0093053	54	⁵⁴ Cr	2.38	53.938881	52	⁹² Zr	17.11	91.905031
6	¹² C	98.892	12.0000000	55	⁵⁵ Mn	100	54.938050	55	⁹⁴ Zr	17.40	93.906314
	¹³ C	1.108	13.003355	56	⁵⁶ Fe	5.84	53.939617	56	⁹⁶ Zr	2.80	95.908286
7	¹⁴ N	99.635	14.0030744	57	⁵⁶ Fe	91.68	55.934937	41	⁹⁸ Nb	100	92.906381
	¹⁵ N	0.365	15.000107	58	⁵⁷ Fe	2.17	56.935397	42	⁹² Mo	15.86	91.906811
8	¹⁶ O	99.759	15.9949150	59	⁵⁸ Fe	0.31	57.933281	59	⁹⁴ Mo	9.12	93.905090
	¹⁷ O	0.037	16.999133	60	⁵⁹ Co	100	58.933189	60	⁹⁵ Mo	15.70	94.905839
9	¹⁸ O	0.204	17.9991601	61	⁶⁰ Ni	67.76	57.93534	61	⁹⁶ Mo	16.50	95.904674
10	¹⁹ F	100	18.998415	62	⁶¹ Ni	26.16	59.930787	62	⁹⁷ Mo	9.45	96.906022
	²⁰ Ne	90.92	19.992440	63	⁶² Ni	1.25	60.93106	63	⁹⁸ Mo	23.75	97.905409
	²¹ Ne	0.257	20.993849	64	⁶³ Ni	3.66	61.92834	64	⁹⁹ Mo	9.62	99.907475
	²² Ne	8.82	21.9913847	65	⁶⁴ Ni	1.16	63.92795	65	⁹⁶ Ru	5.46	95.90760
11	²³ Na	100	22.98977	66	⁶⁵ Cu	69.1	62.929593	66	⁹⁸ Ru	1.868	97.905288
12	²⁴ Mg	78.60	23.985042	67	⁶⁶ Cu	30.9	64.92778	67	⁹⁹ Ru	12.63	98.905936
	²⁵ Mg	10.11	24.985839	68	⁶⁷ Zn	48.89	63.92915	68	¹⁰⁰ Ru	12.53	99.904218
	²⁶ Mg	11.29	25.982593	69	⁶⁸ Zn	27.81	65.92605	69	¹⁰¹ Ru	17.02	100.905577
13	²⁷ Al	100	26.981539	70	⁶⁹ Zn	4.11	66.92715	70	¹⁰² Ru	31.6	101.904348
14	²⁸ Si	92.18	27.976929	71	⁷⁰ Zn	18.56	67.92486	71	¹⁰⁴ Ru	18.87	103.905430
	²⁹ Si	4.71	28.976495	72	⁷⁰ Zn	0.62	69.92533	72	¹⁰⁵ Rh	100	102.905512
	³⁰ Si	3.12	29.973763	73	⁶⁹ Ga	60.2	68.925574	73	¹⁰² Pd	0.96	101.90561
15	³¹ P	100	30.973764	74	⁷¹ Ga	39.8	70.924706	74	¹⁰⁴ Pd	10.97	103.90401
16	³² S	95.0	31.972073	75	⁷⁰ Ge	20.55	69.924252	75	¹⁰⁵ Pd	22.2	104.90507
	³³ S	0.76	32.971462	76	⁷² Ge	27.37	71.922082	76	¹⁰⁶ Pd	27.3	105.90348
	³⁴ S	4.22	33.967864	77	⁷³ Ge	7.67	72.923463	77	¹⁰⁸ Pd	26.7	107.90389
	³⁵ S	0.014	35.96708	78	⁷⁴ Ge	36.74	73.921180	78	¹¹⁰ Pd	11.8	109.90516
17	³⁶ Cl	75.53	34.968851	79	⁷⁶ Ge	7.67	75.921406	79	¹⁰⁷ Ag	51.35	106.905094
	³⁷ Cl	24.47	36.965898	80	⁷⁷ As	100	74.921597	80	¹⁰⁹ Ag	48.65	108.904757
18	³⁸ Ar	0.337	35.967544	81	⁷² Ge	0.87	73.922476	81	¹⁰⁶ Cd	1.22	105.906463
	³⁹ Ar	0.063	37.962728	82	⁷⁶ Se	9.02	75.91920	82	¹⁰⁸ Cd	0.88	107.904187
	⁴⁰ Ar	99.600	39.962385	83	⁷⁷ Se	7.58	76.91991	83	¹¹⁰ Cd	12.39	109.903012
19	³⁹ K	93.22	38.963710	84	⁷⁸ Se	23.52	77.917313	84	¹¹¹ Cd	12.75	110.904189
	⁴⁰ K	0.0118	39.964000	85	⁷⁹ Se	49.82	79.916528	85	¹¹² Cd	24.07	111.902762
	⁴¹ K	6.77	40.961833	86	⁸⁰ Se	9.19	81.91670	86	¹¹³ Cd	12.26	112.904409
20	⁴⁰ Ca	96.97	39.962589	87	⁷⁹ Br	50.52	78.918329	87	¹¹⁴ Cd	28.86	113.903360
	⁴² Ca	0.64	41.958625	88	⁸¹ Br	49.48	80.91629	88	¹¹⁶ Cd	7.58	115.904762
	⁴³ Ca	0.145	42.958780	89	⁷⁸ Kr	0.354	77.92041	89	¹¹³ In	4.23	112.90409
	⁴⁴ Ca	2.06	43.955490	90	⁸⁰ Kr	2.27	79.91638	90	¹¹⁵ In	95.77	114.90387
	⁴⁵ Ca	0.0033	45.95370	91	⁸² Kr	11.56	81.913483	91	¹¹² Sn	0.95	111.90484
	⁴⁶ Ca	0.185	47.95253	92	⁸³ Kr	11.55	82.914131	92	¹¹³ Sn	0.65	113.902768
21	⁴⁵ Sc	100	44.955919	93	⁸⁴ Kr	56.90	83.911503	93	¹¹⁵ Sn	0.34	114.90335
22	⁴⁶ Ti	7.99	45.952631	94	⁸⁵ Kr	17.37	85.910616	94	¹¹⁶ Sn	14.24	115.901746
	⁴⁷ Ti	7.32	46.951768	95	⁸⁶ Kr	72.15	84.91180	95	¹¹⁷ Sn	7.57	116.902959

原子番号	核種	存在比(%)	質量	原子番号	核種	存在比(%)	質量	原子番号	核種	存在比(%)	質量
115	¹⁵⁰ Nd	5.60	149.92091	178	¹⁷⁹ Hf	.13.75	178.9460	116	¹⁴⁴ Sm	3.16	143.91199
116	¹¹⁹ Sn	8.58	118.903313	179	¹⁸⁰ Hf	35.22	179.9469	117	¹⁴⁷ Sm	15.07	146.91487
117	¹²⁰ Sn	32.97	119.902199	180	¹⁸⁰ Ta	0.0123	179.94755	118	¹⁴⁸ Sm	11.27	147.91479
118	¹²¹ Sn	4.71	121.903441	181	¹⁸¹ Te	99.9877	180.94801	119	¹⁴⁹ Sm	13.82	148.91718
119	¹²⁴ Sn	5.98	123.905272	182	¹⁸² W	0.135	179.94700	120	¹²¹ Sn	57.25	120.903817
120	¹²¹ Sn	42.75	122.904213	183	¹⁸³ W	26.4	181.94830	121	¹⁴⁵ Sm	26.63	151.91975
121	¹²⁰ Te	0.089	119.90402	184	¹⁸⁴ W	30.6	183.95102	122	¹²² Te	2.46	121.903037
122	¹²² Te	0.87	122.90428	185	¹⁸⁵ Re	37.07	184.95305	123	¹²³ Te	4.61	123.90284
123	¹²⁴ Te	6.99	124.90442	186	¹⁸⁶ Os	0.018	183.9528	124	¹²⁵ Te	9.99	124.90442
124	¹²⁵ Te	18.71	125.90333	187	¹⁸⁷ Os	1.64	186.95583	125	¹²⁶ Te	31.79	127.90447
125	¹²⁶ Te	34.49	129.90624	188	¹⁸⁸ Os	13.3	187.95608	126	¹²⁷ I	100	126.904470
126	¹²⁴ Xe	0.096	123.9061	189	¹⁸⁹ Os	16.1	188.9583	127	¹²⁵ Xe	0.99	125.90429
127	¹²⁶ Xe	1.919	127.90354	190	¹⁹⁰ Pt	0.017	189.95074	128	¹²⁷ Xe	26.44	128.904784
128	¹²⁷ Xe	4.08	129.90351	191	¹⁹¹ Pt	0.78	191.9611	129	¹²⁸ Xe	21.18	130.905085
129	¹²⁸ Xe	26.89	131.904161	192	¹⁹² Pt	32.9	193.96273	130	¹²⁹ Xe	10.4	133.905397
130	¹²⁸ Xe	8.87	135.90722	193	¹⁹³ Pt	25.2	195.96497	131	¹³² Cs	100	132.90535
131	¹³² Ba	0.101	129.90625	194	¹⁹⁴ Hg	0.146	196.96654	132	¹³¹ Ba	0.097	131.9051
132	¹³³ Ba	2.42	133.90461	195	¹⁹⁵ Hg	10.02	197.96675	133	¹³⁵ Ba	6.59	134.9055
133	¹³⁶ Ba	7.81	135.9043	196	¹⁹⁶ Hg	16.84	198.96828	134	¹³⁷ Ba	11.32	136.9055
134	¹³⁸ Ba	71.66	137.9050	197	¹⁹⁷ Hg	13.22	200.97031	135	¹³⁸ Ba	0.089	137.9069
135	¹³⁹ Ba	99.911	138.90614	198	¹⁹⁸ Hg	29.80	201.97054	136	¹³⁹ Ba	14.31	170.9364
136	¹⁴⁰ Ba	0.193	135.9070	199	¹⁹⁹ Hg	21.7	202.97236	137	¹⁴¹ Ba	11.07	141.90914
137	¹⁴² Ba	0.250	137.9058	200	²⁰⁰ Pb	51.7	207.97665	138	¹⁴⁰ Pr	100	140.90760
138	¹⁴³ Ba	27.13	141.90766	201	²⁰¹ Pb	1.40	203.97304	139	¹⁴² Nd	27.13	142.90978
139	¹⁴⁴ Ba	12.20	142.90978	202	²⁰² Pb	25.2	205.97446	140	¹⁴³ Nd	23.87	143.91004
140	¹⁴⁵ Ba	8.29	144.91254	203	²⁰³						

第Ⅱ部 ドップラー反応度改善炉心に関する解析

第II部：ドップラー反応度改善炉心に関する解析

目 次

1.はじめに	78
2.候補材料の検討	78
2.1 候補材の核的特徴	79
2.2 候補材の化学的特徴	86
2.3 候補材の可能性	92
3.サーベイ解析による主要パラメータの影響度解析	94
3.1 検討体系	94
3.2 サーベイ対象燃料	101
3.3 計算方法	103
3.4 初期炉心における特性値のサーベイ結果	105
3.5 平衡サイクル炉心の特性値と分析結果	175
4.おわりに	182

第Ⅱ部 図リスト(1/3)

図 2.1-1 Cr の断面積のエネルギー依存性概要図	8 1
図 2.1-2 Fe の断面積のエネルギー依存性概要図	8 2
図 2.1-3 Ni の断面積のエネルギー依存性概要図	8 3
図 2.1-4 Mo の断面積のエネルギー依存性概要図	8 4
図 2.1-5 Nb93 の断面積のエネルギー依存性概要図	8 5
図 2.2-1 Fe-Nb 状態図	8 9
図 2.2-2 Ni-Nb 状態図	8 9
図 2.2-3 Cr-Nb 状態図	9 0
図 2.2-4 Fe-Mo 状態図	9 0
図 2.2-5 Ni-Mo 状態図	9 1
図 2.2-6 Cr-Mo 状態図	9 1
図 2.3-1 窒化物燃料候補物質と金属の基礎特性調査結果	9 3
図 3.1-1 1600MWth ウラン不使用型炉心 炉心配置図 (270 日運転・ 6 バッチ燃料交換炉心)	9 8
図 3.1-2 2 次元 R Z モデル・燃焼計算体系	9 9
図 3.4-1 レファレンス炉心における Pu 同位体組成比とドップラー係数の関係 —初期炉心—	115
図 3.4-2 ドップラー係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (1) —初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Cr の場合—	116
図 3.4-3 ドップラー係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (2) —初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Fe の場合—	117
図 3.4-4 ドップラー係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (3) —初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Ni の場合—	118
図 3.4-5 ドップラー係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (4) —初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Mo の場合—	119

第II部 図リスト(2/3)

図 3.4-6 ルアレス炉心における Pu 同位体組成比とナトリウムド ²³ 反応度の関係 ——初期炉心——	120
図 3.4-7 ナトリウムド ²³ 反応度に対する共鳴吸収物質混在効果 (1) ——初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Cr の場合——	121
図 3.4-8 ナトリウムド ²³ 反応度に対する共鳴吸収物質混在効果 (2) ——初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Fe の場合——	122
図 3.4-9 ナトリウムド ²³ 反応度に対する共鳴吸収物質混在効果 (3) ——初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Ni の場合——	123
図 3.4-10 ナトリウムド ²³ 反応度に対する共鳴吸収物質混在効果 (4) ——初期炉心；共鳴吸収体混在効果 Mo の場合——	124
図 3.5-1 炉心中央領域の中性子スペクトルの比較(BOEC)	158
図 3.5-2 炉心中央領域の中性子スペクトルの比較(EOEC)	159
図 3.5-3 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの比の比較(EOEC)	160
図 3.5-4 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの差の比較(BOEC) ——Φ _i (1500K)-Φ _i (800K)	161
図 3.5-4 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの差の比較(EOEC) ——Φ _i (1500K)-Φ _i (800K)	162
図 3.5-6 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(BOEC)	163
図 3.5-7 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)	164
図 3.5-8 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(BOEC)	165
図 3.5-9 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)	166
図 3.5-10 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(BOEC)	167

第II部 図リスト(3/3)

図 3.5-11 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)	168
図 3.5-12 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(BOEC)	169
図 3.5-13 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(EOEC)	170
図 3.5-14 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(BOEC)	171
図 3.5-15 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(EOEC)	172
図 3.5-16 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(BOEC)	173
図 3.5-17 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(EOEC)	174
図 A1-1 Pu238 の断面積のエネルギー依存性概要図	184
図 A1-2 Pu239 の断面積のエネルギー依存性概要図	185
図 A1-3 Pu240 の断面積のエネルギー依存性概要図	186
図 A1-4 Pu241 の断面積のエネルギー依存性概要図	187
図 A1-5 Pu242 の断面積のエネルギー依存性概要図	188
図 A1-6 Am241 の断面積のエネルギー依存性概要図	189

第II部 表リスト(1/3)

表 2.2-1	窒化物の基礎物性値（測定値）	8 8
表 3.1-1	基本プラント仕様	9 5
表 3.1-2	炉心燃料基本仕様	9 6
表 3.3-1	中性子 18 群構造	1 0 0
表 3.4-1	P u 同位体組成比と燃料富化度の関係サーベイ結果 (1) ——初期炉心——	1 0 9
表 3.4-2	P u 同位体組成比と燃料富化度の関係サーベイ結果 (2) ——初期炉心における共鳴吸収物質混在効果——	1 1 0
表 3.4-3	P u 同位体組成比と燃料富化度の関係サーベイ結果 (3) ——初期炉心における共鳴吸収物質混在効果——	1 1 1
表 3.4-4	P u 同位体組成比とドップラー係数・ナトリウムイド反応度の関係(1) ——初期炉心——	1 1 2
表 3.4-5	P u 同位体組成比とドップラー係数・ナトリウムイド反応度の関係(2) ——初期炉心；共鳴吸収体混在効果——	1 1 3
表 3.4-6	P u 同位体組成比とドップラー係数・ナトリウムイド反応度の関係(3) ——初期炉心；共鳴吸収体混在効果——	1 1 4
表 3.5-1	平衡サイクル炉心の燃焼特性	1 2 5
表 3.5-2	平衡サイクル炉心の反応度係数 (1) —— 70g 直接拡散計算による結果 ——	1 2 6
表 3.5-3	平衡サイクル炉心の反応度係数 (2) —— 18g 直接拡散計算による参考結果 ——	1 2 7
表 3.5-4	平衡サイクル炉心の遅発中性子割合 —— 18g 拡散計算による結果 ——	1 2 8
表 3.5-5	炉心中央領域の中性子スペクトルの比較 (規格化)	1 2 9
表 3.5-6	重核の炉心部 1 群化断面積の比較 (EOC)	1 3 0
表 3.5-7	3 つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの差の比較	1 3 1

第Ⅱ部 表リスト(2/3)

表 3.5-8 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの比の比較	132
表 3.5-9 (欠番)	
表 3.5-10 PuN-AlN 炉心における K-eff に対する密度係数(BOEC)	133
表 3.5-11 PuN-AlN 炉心における K-eff に対する密度係数(EOEC)	134
表 3.5-12 PuN-AlN-50%Fe 炉心における K-eff に対する密度係数(BOEC)	135
表 3.5-13 PuN-AlN-50%Fe 炉心における K-eff に対する密度係数(EOEC)	136
表 3.5-14 PuN-AlN-50%Mo 炉心における K-eff に対する密度係数(BOEC)	137
表 3.5-15 PuN-AlN-50%Mo 炉心における K-eff に対する密度係数(EOEC)	138
表 3.5-16 (欠番)	
表 3.5-17 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与(BOEC)	139
表 3.5-18 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(BOEC)	140
表 3.5-19 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与(EOEC)	141
表 3.5-20 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)	142
表 3.5-21 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与(BOEC)	143
表 3.5-22 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(BOEC)	144
表 3.5-23 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与(EOEC)	145
表 3.5-24 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)	146
表 3.5-25 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与(BOEC)	147
表 3.5-26 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(BOEC)	148
表 3.5-27 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与(EOEC)	149
表 3.5-28 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)	150
表 3.5-29 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(BOEC)	151

第Ⅱ部 表リスト(3/3)

表 3.5-30 PuN-AlN 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(EOEC)	152
表 3.5-31 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(BOEC)	153
表 3.5-32 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(EOEC)	154
表 3.5-33 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(BOEC)	155
表 3.5-34 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与(EOEC)	156
表 3.5-35 核種毎の ドップラー効果潜在能力の比較—平衡サイクル炉心(EOEC) —	157

1. はじめに

ウラン不使用型高速炉の特性解析（PNC ZJ9164 94-008, PNC PJ9164 95-009）の検討から、これらの希釀型燃料を使用する炉心では負のドップラー係数を確保することが特に重要なことが示されている。

負のドップラー係数を確保するためには、中性子スペクトルをある程度軟らかくすることが必要であること、およびPu同位体組成比が重要である。中性子スペクトルをある程度軟らかくすることは、酸素または窒素などの軽い核種を使用する燃料形態では希釀材の選定により、臨界性の調整とともに達成できることは前述の報告にも示されている。また、Pu同位体組成比については、Pu240, Pu242割合の大きいことが望ましいことが示唆されている。

したがって、本検討では、Pu燃焼能力を一層増大させる炉心概念としてのウラン不使用型炉心では、ドップラー係数の改善方法として高次Puの利用及び共鳴吸収物質の利用が考えられ、パラメータサーベイによりその効果を調べることを目的とした。

本検討では、プルトニウム燃料として窒化物(PuN)を対象に選定し、希釀材選定をドップラーフィードバック係数を増大させる候補材について核的な検討を行った。

ドップラー効果の改善は、核的にドップラー係数の負を確保することおよびその絶対値を増大させることを目標とした。

まず、前述の検討結果をもとに、プルトニウム窒化物を希釀する不活性母材として窒化アルミニウム(AlN)を想定した。この希釀材は熱伝導度が良好であること、溶融温度が比較的高いことが特徴である。この燃料をレファレンスとして、ドップラー反応度を増大させるために、燃料に均質に混在する非核分裂性共鳴吸収物質を数種類想定して、ドップラー効果に対する影響を調べた。

燃料体の一部として、混在させるためには温度安定性が重要になる。そこで、第2章では、物質の基本特性の観点からの予備調査を行い、候補材の大まかな選択を行った。その結果を考慮して、第3章ではサーベイ解析による主要パラメータの影響度解析をおこなった。これをもとに特徴の分析等を行った。

2. 候補材料の検討

2.1 候補材の核的特徴

代表的なウラン・プルトニウム混合酸化物燃料大型炉心では、被覆管・ラッパ管に使用されている構造材核種によるドップラー係数は、燃料のドップラー係数の約10%程度の大きさを有している。おおよそ、 $-0.7 \times 10^{-3} T^* dK/dT$ 程度の大きさである。このように、構造材系の材料は高速炉系中性子スペクトルのもとで、共鳴吸収物質としてドップラー効果の改善に寄与する可能性がある。

このような構造材系の材料は、高中速エネルギー領域で共鳴吸収断面積を有し、入手しやすい物質である。

本検討では、Cr, Fe, Ni, Mo, Nbが核的に候補と考えられるのでこれらを第一ステップの検討候補とした。

これらの共鳴吸収物質の中性子吸収反応断面積を図2.1-1～図2.1-5に示す。ドップラー効果の改善に寄与すると予想されるエネルギー範囲はつぎのように考えられる。

Cr ; 共鳴吸収断面積 10keV--500keV 領域が寄与する。

Fe ; 共鳴吸収断面積 1keV--500keV 領域が寄与する。

Ni ; 共鳴吸収断面積 1keV--500keV 領域が寄与する。

Mo ; 共鳴吸収断面積 100eV-- 50keV 領域が寄与する。

Nb ; 共鳴吸収断面積 100eV-- 10keV 領域が寄与する。

これらの構造材系の吸収反応がドップラー効果に寄与する場合の特徴は、つぎの傾向をもつことが予想される。

Cr, Fe, Niについては、比較的エネルギーが高い範囲で効果を持つ可能性がある。しかし、一般的には中性子エネルギーが大きくなると吸収断面積自身が減少するので、大量に混在する必要がある。

Mo, Nbについては、上記のCr, Fe, Niに比べて、低いエネルギー領域で大きな共鳴断面積をもっている。したがって、大量に混在すると低エネルギー領域の中性子が吸収され全体として、中性子スペクトルは硬くなる傾向をすることになると考えられる。また、混在量と効果の関係が線形からずれ、飽和傾向

を示すと予想される。

炉心特性との関係では、燃料材料の選択・不活性母材の組み合わせ・炉心仕様などにより、活用される核種・反応がと効果が決まることになる。

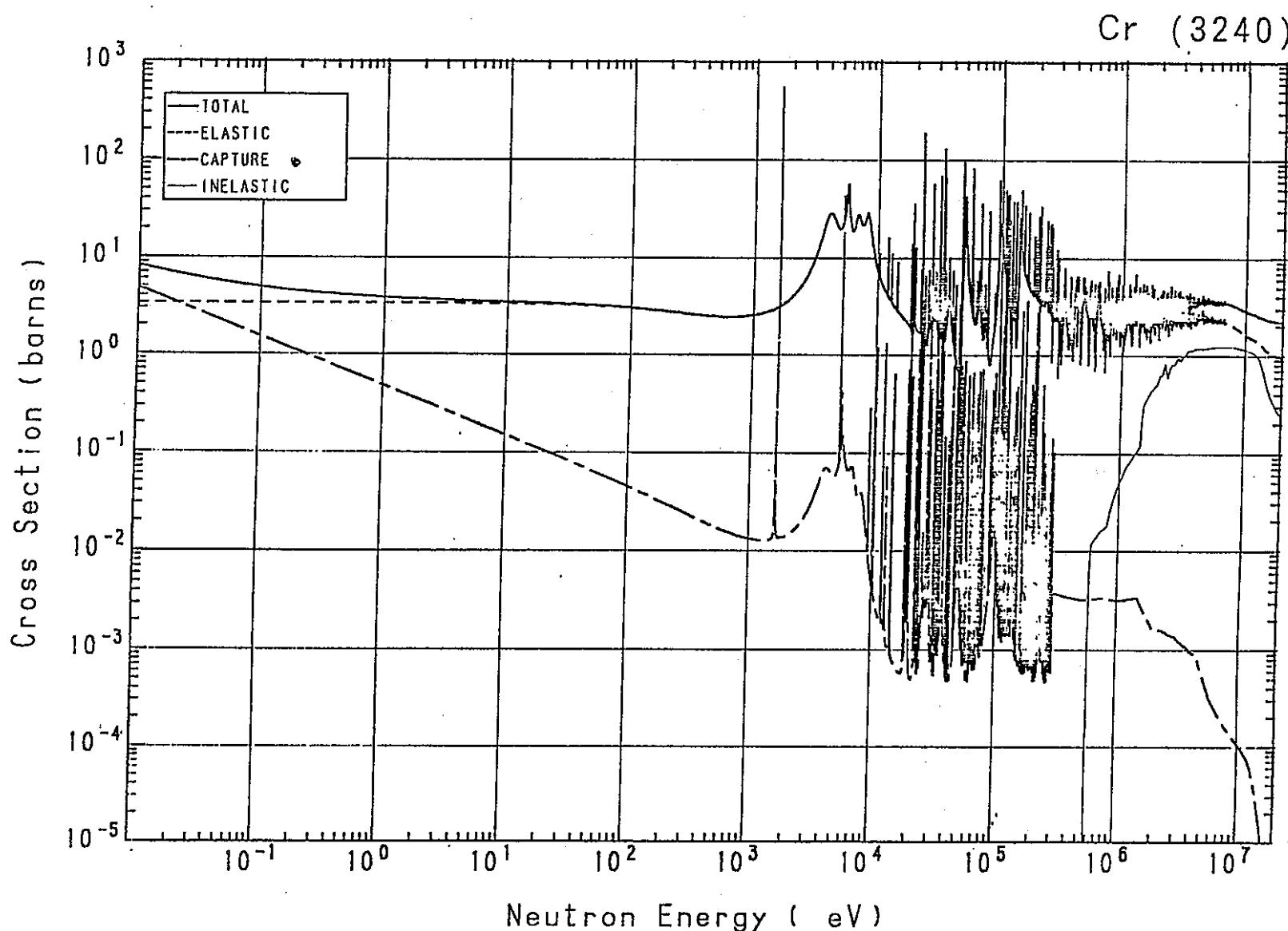


図2.1-1 Crの断面積のエネルギー依存性概要図

Fe (3260)

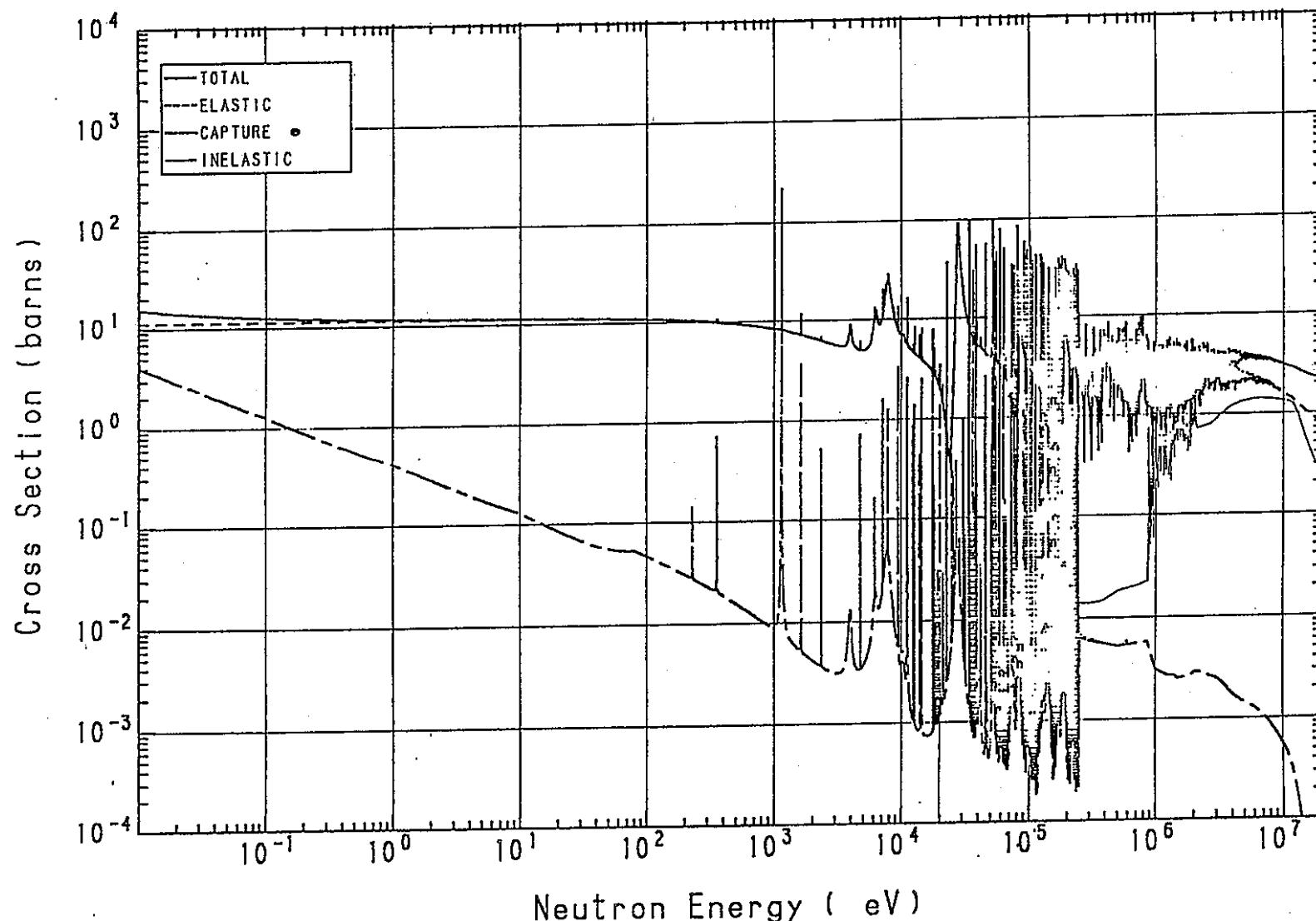


図 2.1-2 Fe の断面積のエネルギー依存性概要図

Ni (3280)

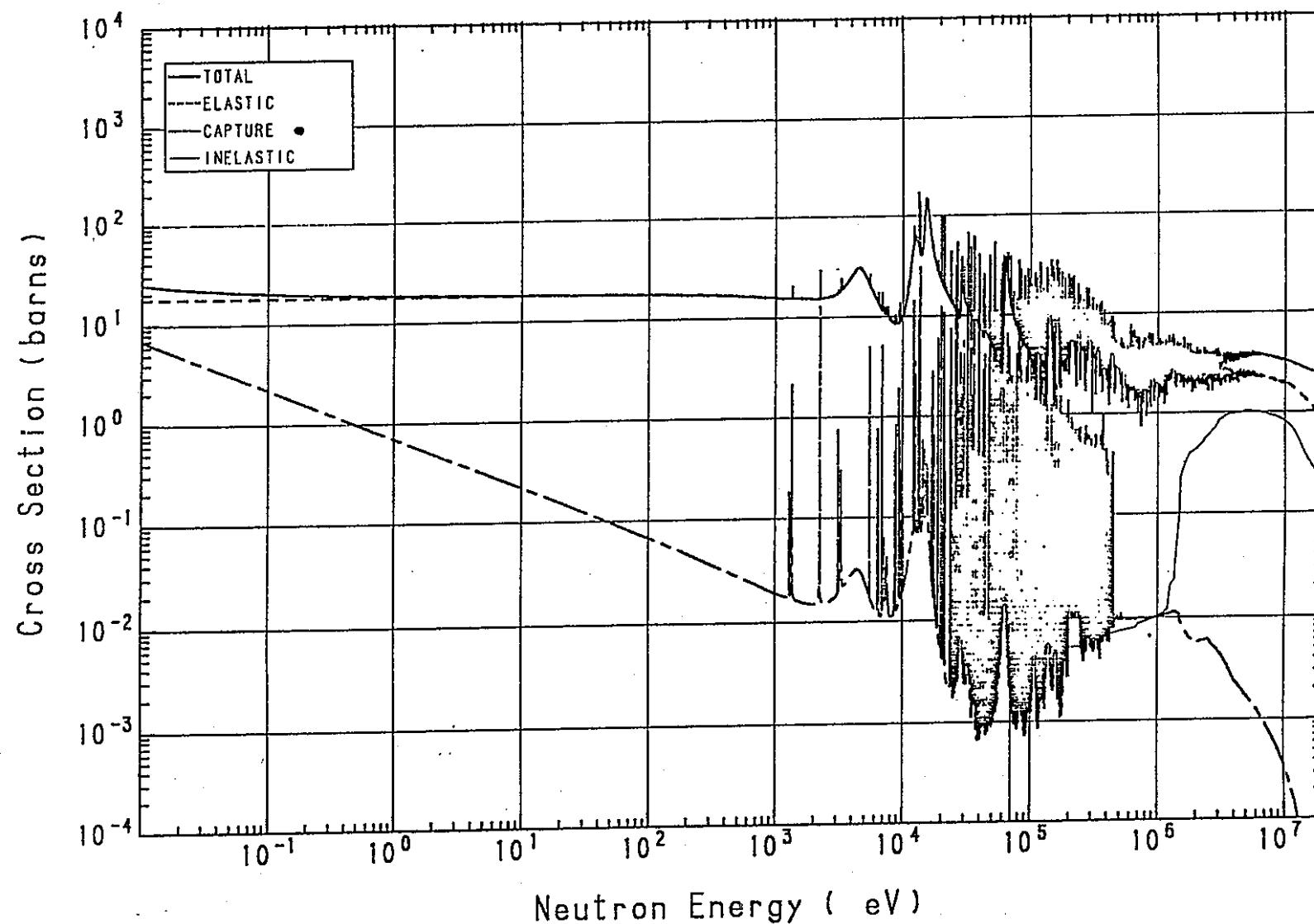


図 2.1-3 Ni の断面積のエネルギー依存性概要図

Mo (3420)

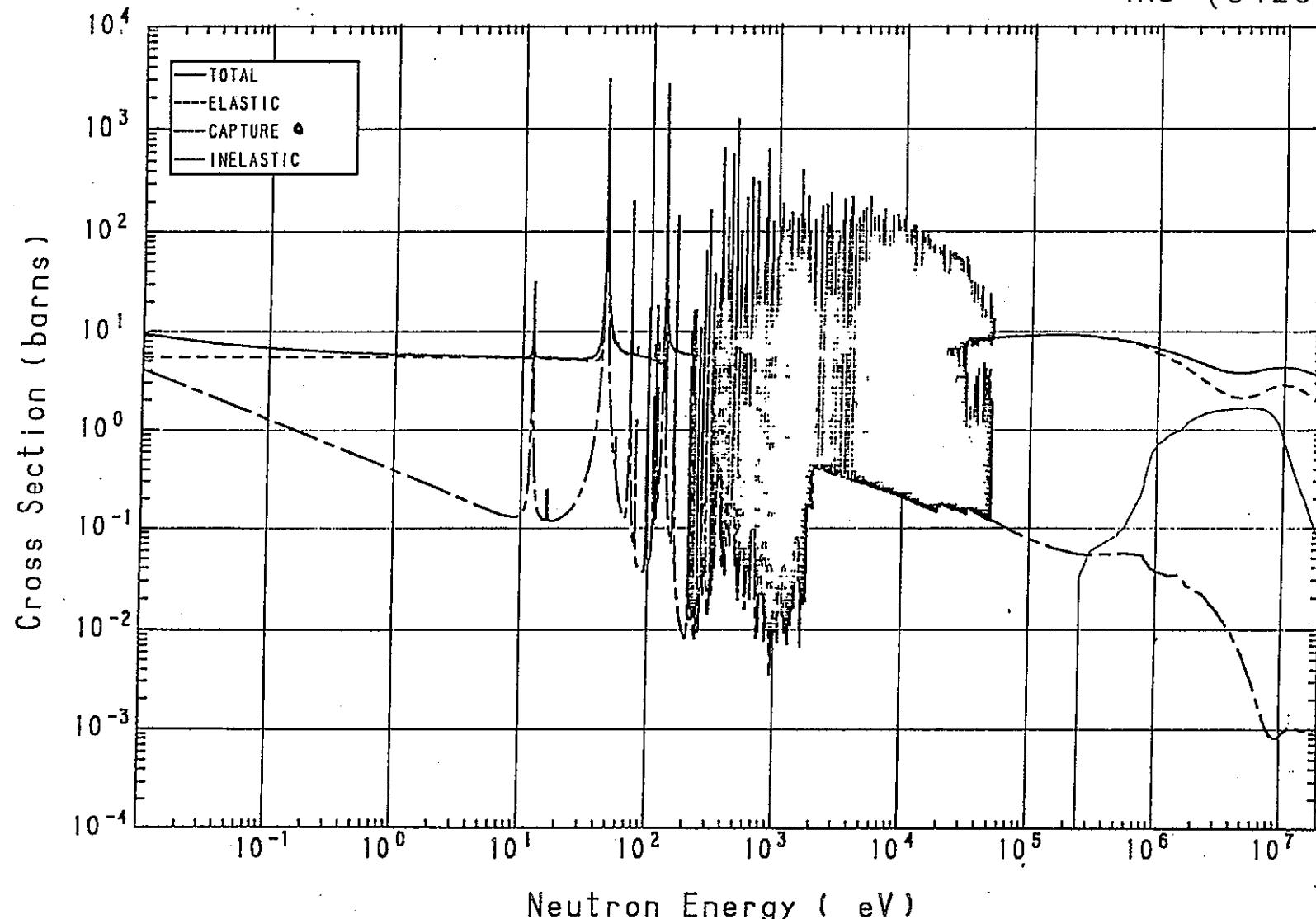


図 2.1-4 Mo の 断面積のエネルギー依存性概要図

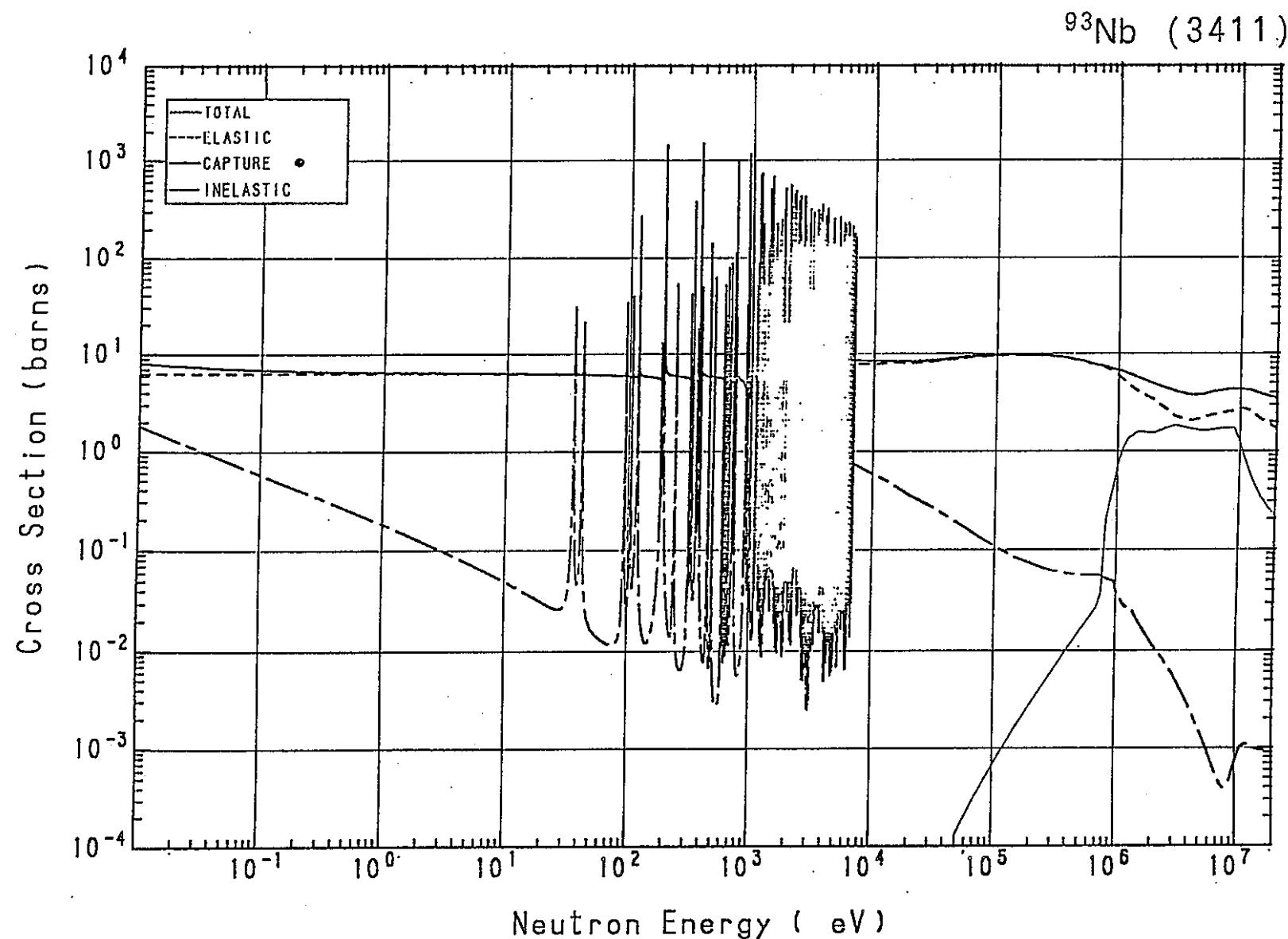


図 2.1-5 Nb93の断面積のエネルギー依存性概要図

2.2 候補材の化学的特徴

共鳴吸収物質として、選定した Fe, Ni, Nb, Mo の金属、窒化物の性質および PuNとの反応性、被覆管との反応性について調査した。その結果を表2.2-1に示す。

1) Fe

金属Feの融点は1535°Cであり、基本的には安定である。金属Feは高温でも直接窒素と反応しないので安定である。

Feの窒化物としては、 Fe_2N および Fe_4N があるが、いずれも600 °C前後で相互変化する。しかしながら、窒化物はアンモニアとの反応で生成するもので、金属Feと窒素との反応では生成しないので、PuNとの反応性は問題ない。

また、被覆管材料との反応性はステンレス鋼の構成成分であるので問題ない。

2) Ni

金属Niの融点は1455°Cであり、不活性雰囲気では安定である。金属Niは窒素ガスを吸収しやすいのでPuNと反応する可能性がある。

Niの窒化物としては、 Ni_3N および Ni_3N_2 がある。 Ni_3N_2 は120 °C以上でNiと窒素に分解するので極めて不安定である。

また、被覆管材料との反応性はステンレス鋼の構成成分であるので問題ない。

3) Nb

金属Nbの融点は1950°Cであり、不活性雰囲気では安定である。金属Nbは100°Cで窒素と反応するので、PuNと反応する可能性がある。

Nbの窒化物としてNbNがあるが、金属Nbと直接窒素と反応させて合成する。

また、被覆管材料との反応性ではステンレス鋼の構成成分であるNiと1000°C以下で固溶体を作る可能性がある（図2.2-1、図2.2-2、図2.2-3 参照）。

4) Mo

金属Moの融点は2622°Cであり、基本的に安定である。金属Moは窒素と900°Cまで反応せず、それ以上でもあまり反応しない。

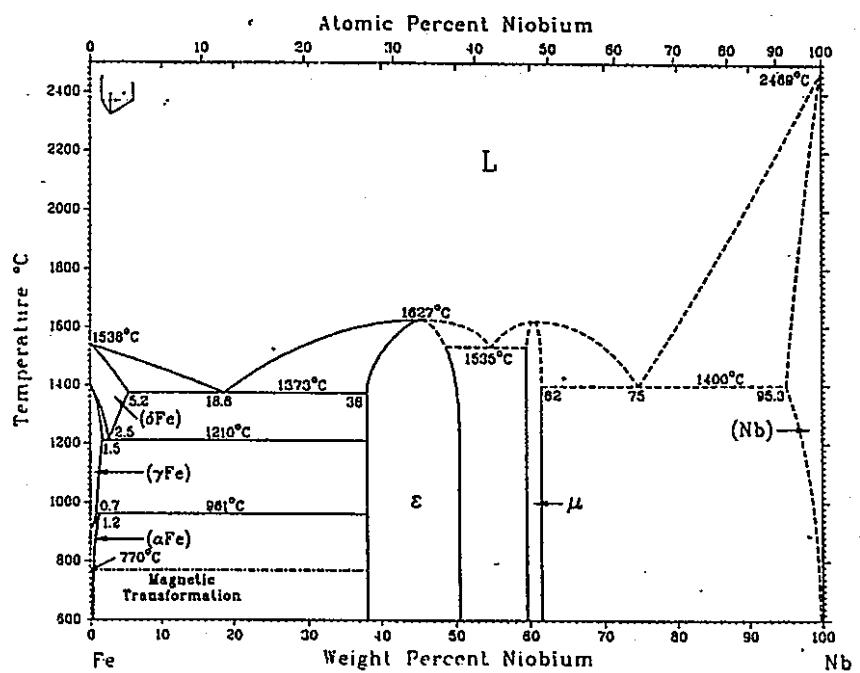
窒化物としては、 Mo_3N , Mo_2N , MoN があるが、いずれもハロゲン化物に高温でアンモニアを反応させて合成する。金属Moと窒素の直接反応は古くから研究さ

れているが、700 °C, 1400°C, 2000°C～2400°Cにおいて反応生成物は見いだされていないので、PuNとの反応性は問題ない。

また、被覆管材料の構成元素でもある。1000°C以下で固溶体を作る可能性がある（図2.2-4、図2.2-5、図2.2-6 参照）。

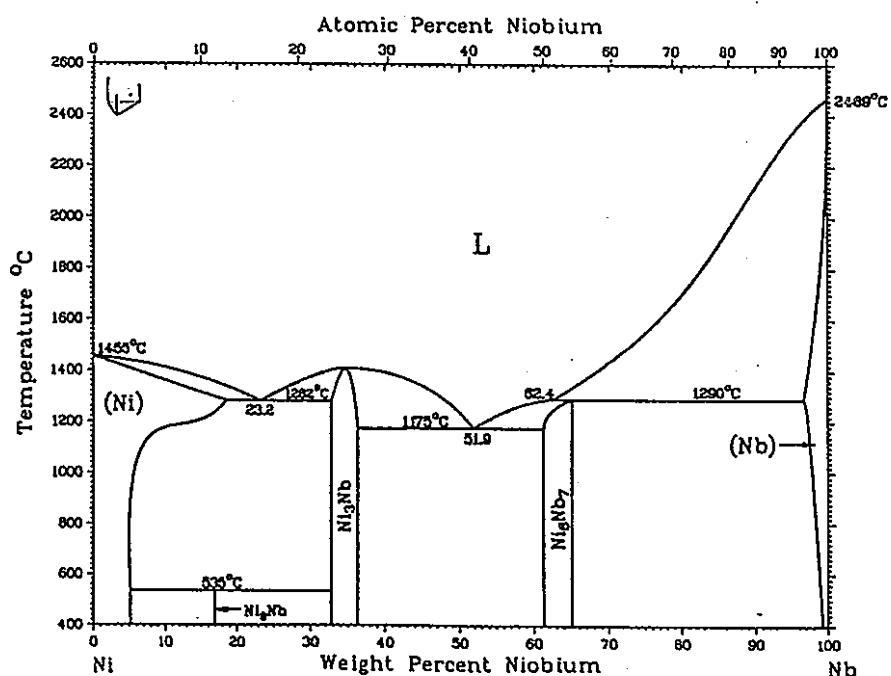
表2.2-1 窒化物の基礎物性値（測定値）

	融点 (°C)	密度 (g/ml)	熱容量 (J/mol·K)	熱伝導率 (W/m·K)	
P u N	2843	14.24			
A l N	2150~2200	3.05 (3.27)			
Z r N	2700	7.09			
M i x e d N i t r i d e	~2700	13.50		18.5	



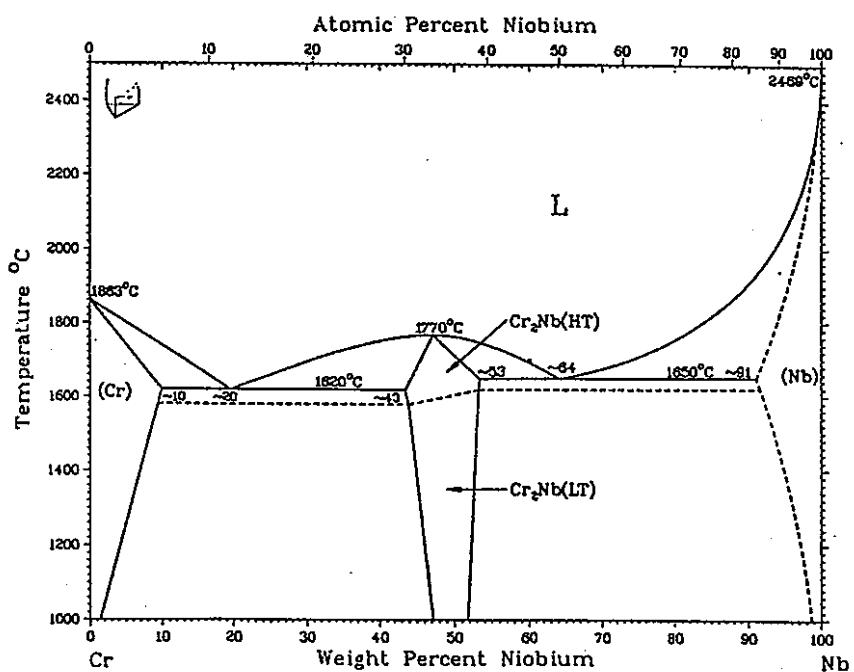
E. Paul and L.J. Swartzendruber, submitted to the APD Program.

図 2.2-1 Fe-Nb 状態図



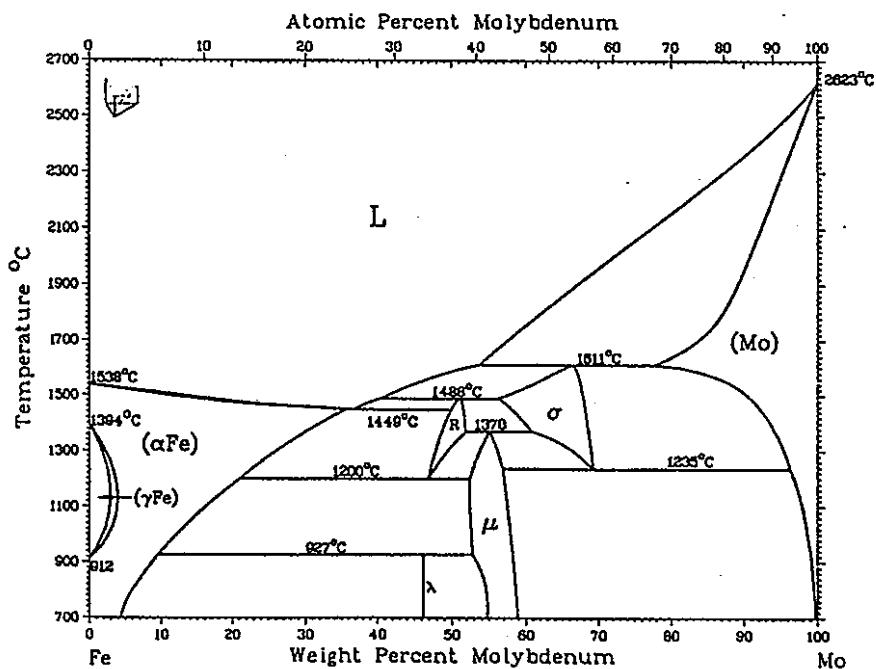
P. Nash and A. Nash, 1986.

図 2.2-2 Ni-Nb 状態図



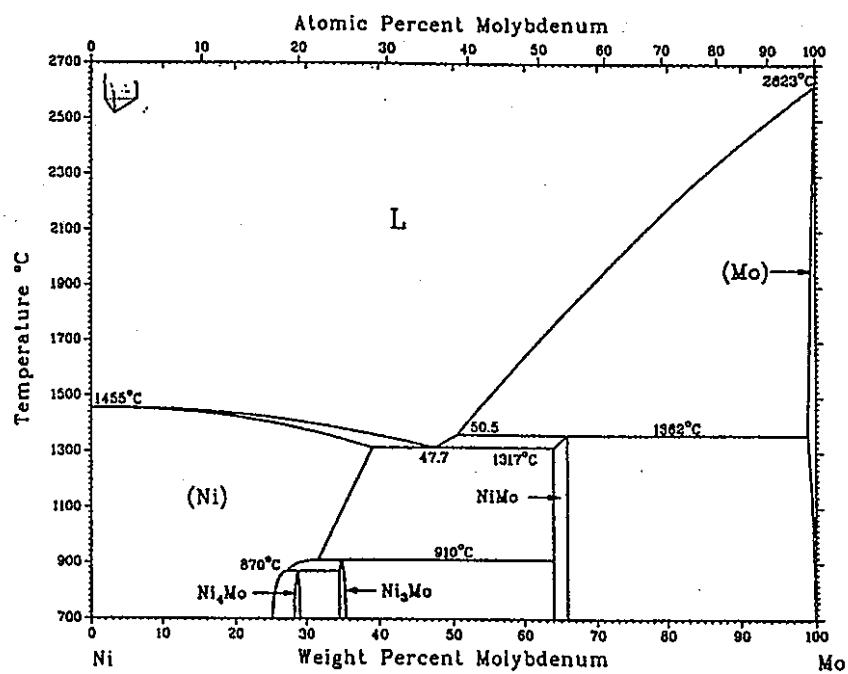
M. Venkatraman and J.P. Neumann, submitted to the APD Program.

図 2.2-3 Cr-Nb 状態図



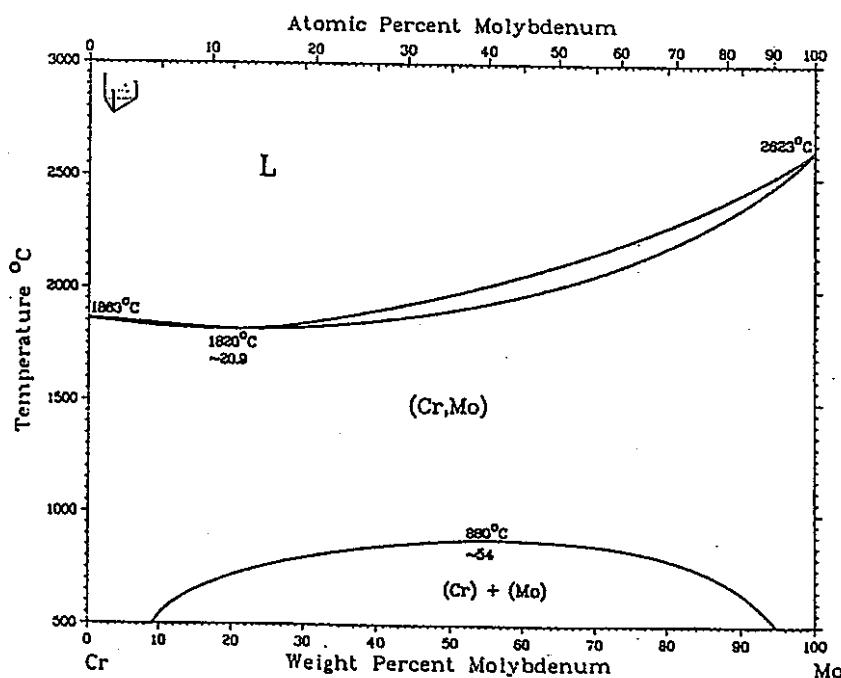
The numerical values shown are the assessed values. The drawn curves are from thermodynamic calculations and are not always identical to the assessed values.
A. Fernández Guillermot, 1982.

図 2.2-4 Fe-Mo 状態図



M.F. Singleton and P. Nash, submitted to the APD Program.

図 2.2-5 Ni-Mo 状態図



M. Venkatraman and J.P. Neumann, submitted to the APD Program.

図 2.2-6 Cr-Mo 状態図

2.3 候補材の可能性

表 2.3-1に窒化物燃料と希釈材についての基礎特性を示してある。これらの融点と、前項で調査した混合物としては金属形態が有望と予想される。共鳴吸収物質の燃料との混合形態は燃料自身の化学形態との関連が大きい。例えば、酸化物形態では、共鳴吸収物質り形態の選択も変化する。

窒化プルトニウムと窒化アルミニウムの混合燃料と共存する可能性のある構造材系窒化物は期待できないので、金属を想定する。金属は融点が燃料よりも低いので、炉心の線出力などの制約となる可能性がある。一方、構造材系金属と窒化プルトニウムはナトリウムとの共存性があるので、炉心への装荷形態はナトリウムボンドの形態をとることができると、燃料線出力に大きな制約を与えずに炉心仕様を選択できる可能性がある。この場合、1000°C以下で運転できる可能性があるので、温度により化学的性質が変動すること回避できる。

ナトリウムボンド燃料の効果については、これまでにナトリウムボンド燃料高速炉の炉心検討結果の公開文献などからも予想できる。

図2.3-1 窒化物燃料候補物質と金属の基礎特性調査結果

		融点 (°C)	密度 (g/ml)	熱伝導率 (W/m·K)	備考
窒化物	Fe ₂ N		6.35		
	Fe ₄ N				
	Ni ₃ N		d 25 7.66	0.73 × 10 ⁻³	20°C
	Ni ₃ N ₂	120°Cで分解			
	Cr ₂ N				
	CrN	1500°Cで融解	d 16 5.39		
	NbN	2573	8.4		
	Mo ₃ N(β態)	850°Cでγ態			
	Mo ₂ N(γ態)	1168Kで解離			
	MoN(δ態)				
	AlN	2150～2200	3.05		
	ZrN	2700	7.09		
金属	Zr ₃ N ₂		6.75		
	Fe	1535	d ²⁰ 7.86		
	Ni	1455	8.85		
	Cr	1905	d ²⁰ 7.19		
	Nb	1950	8.55		
	Mo	2622 ± 10	10.28		

3. サーベイ解析による主要パラメータの影響度解析

3.1 検討体系

ウラン不使用型ナトリウム冷却炉とし、表 3.1-1に基本仕様を示す熱出力は1600MW_{th}クラスの均質型2領域炉心体系においてサーベイ解析を行った。

炉心燃料仕様は表 3.1-2に示されているものを使用した。炉心配置は図 3.1-1に示される高さ 90 cm の炉心である。

具体的なサーベイは、図 3.1-2に示す2次元R Z 炉心体系でおこなった。

炉心燃料材質はPuNを燃料とし、この燃料は窒素14(N14)および窒素15(N15)が使用されているものとした。AlNを不活性母材として、共鳴吸収物質との均一混合の燃料を想定した。共鳴物質を燃料と均質に混合することについては、下記の考え方による。

燃料集合体は、スペクトル調整用にAlN(ZrN)のみからなる希釈材ピンまたは共鳴吸収物質ピンと燃料ピンを非均質配置することが考えられる。一方、すべての材質を均質混合することも考えられる。

燃料と共に吸収物質は均質化されていることが、ドップラー係数だけでなく、共鳴吸収物質の温度変化を燃料温度変化と同様に変動をもたらすことになり、出力上昇に伴う負のドップラーフィードバック自身の大きさを増大させることになる。更に、燃料の線出力の低減の観点から均質燃料とすることが望ましいものとなる。これらを考慮して、本サーベイ解析では、ドップラー効果の増大を目的としていることから、燃料ピンはPuNと共に吸収物質および不活性母材を均質混合するものとした。

表3.1-1 基本プラント仕様

項目	ウラン不使用炉心	
1. 基本プラント仕様		
1) 原子炉熱出力 (MWt)	1600	
2) 炉心型式	均質2領域炉心	
3) 炉心高さ 軸方向ブランケット厚さ(上部／下部)(mm)	900	---/---
4) 冷却材		
a) 原子炉入口温度 (°C)	390	
b) 原子炉出口温度 (°C)	510	
2. 燃料交換		
1) 燃料交換方式		
a) 炉心燃料集合体 内側炉心 外側炉心	6パッチ分散方式 6パッチ分散方式	
b) ブランケット燃料集合体	(反射体で構成)	
2) 燃焼期間 (EFPD)	270	
3. 炉心構成要素の本数		
1) 炉心燃料集合体 a) 内側炉心 b) 外側炉心	(体)	492 294 198
2) ブランケット燃料集合体	(体)	---
3) 制御棒集合体 a) 主炉停止棒 b) 後備炉停止棒	(体)	49 43 6
4. 目標性能		
1) 最大線出力 (W/cm)	約320以下	
2) 取出平均燃焼度 (a-%)	約40	

表3.1-2 炉心燃料基本仕様(1/2)

項目	ウラン不使用炉心
1) 燃料要素	
a) 炉心燃料ペレット	
① 材質	PuN/AlN/Res. Abs
② プルトニウム同位元素比 ^{*1)} 948/949/940/941/942/951 (wt%)	2/58/22/11/6/1
③ ウラン同位元素比 ^{*2)} 925/928 (wt%)	---/---
④ 燃料スタック長 (mm)	900
⑤ 外径 (mm)	6.66
⑥ 密度 (%TD)	80
⑦ O/M比	---
⑧ 中心空孔径 (mm)	---
b) 軸プランケット燃料ペレット	
① 材質	---
② ウラン同位元素比 ^{*2)} 925/928 (wt%)	---
③ 燃料スタック長	
④ 上部プランケット (mm)	---
⑤ 下部プランケット (mm)	---
⑥ 外径 (mm)	---
⑦ 密度 (%TD)	---
⑧ O/M比	---
c) 被覆管	
① 材質	改良オーステナイト鋼
② 外径 (mm)	7.5
③ 内径 (mm)	6.66
④ 肉厚 (mm)	0.42
⑤ ペレット間ギャップ (mm)	---
d) スペーサワイヤ	
① 材質	改良オーステナイト鋼
② 外径 (mm)	1.25
③ ワイヤ巻きピッチ (mm)	---

*1) 948/949/940/941/942/951=Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241

*2) 925/928=U235/U238

表3.1-2 炉心燃料基本仕様(2/2)

項目	ウラン不使用炉心
2) 燃料集合体	
a) 燃料集合体	
① 要素配列	正三角配列
② 要素配列ピッチ (mm)	8.85
③ 要素数 (本)	271
④ 集合体配列ピッチ (mm)	160.7
b) ラッパ管	
① 材質	改良オーステン鋼
② 外対面間距離 (mm)	155.7
③ 内対面間距離 (mm)	147.7
④ 肉厚 (mm)	4.0
c) 体積比	
① 燃料 (スメア) (%)	42.2
② 構造材 (%)	22.2
③ 冷却材 (%)	35.6

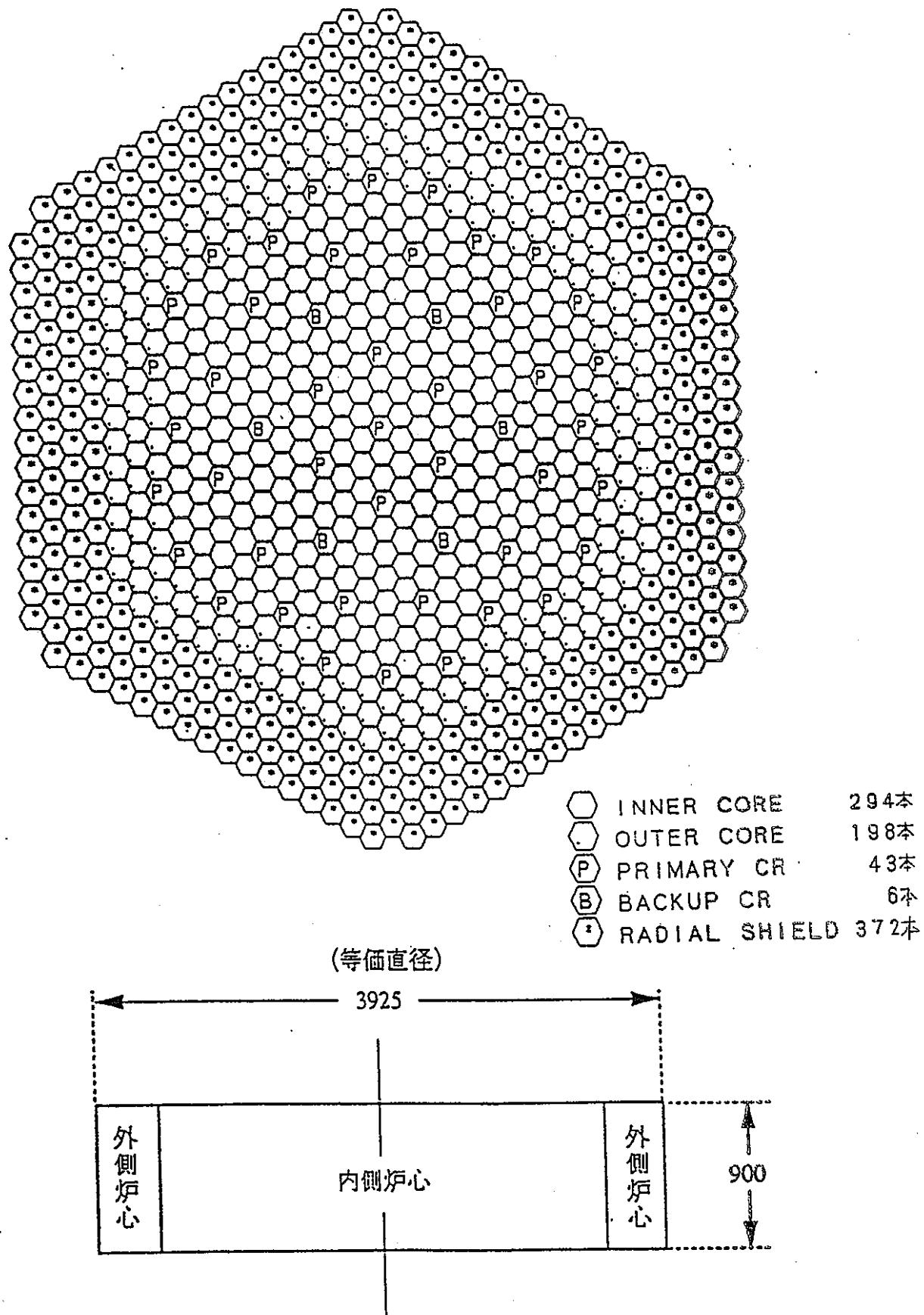


図3.1-1 1600MWthウラン不使用型炉心 炉心配置図
(270日運転・6バッチ燃料交換炉心)

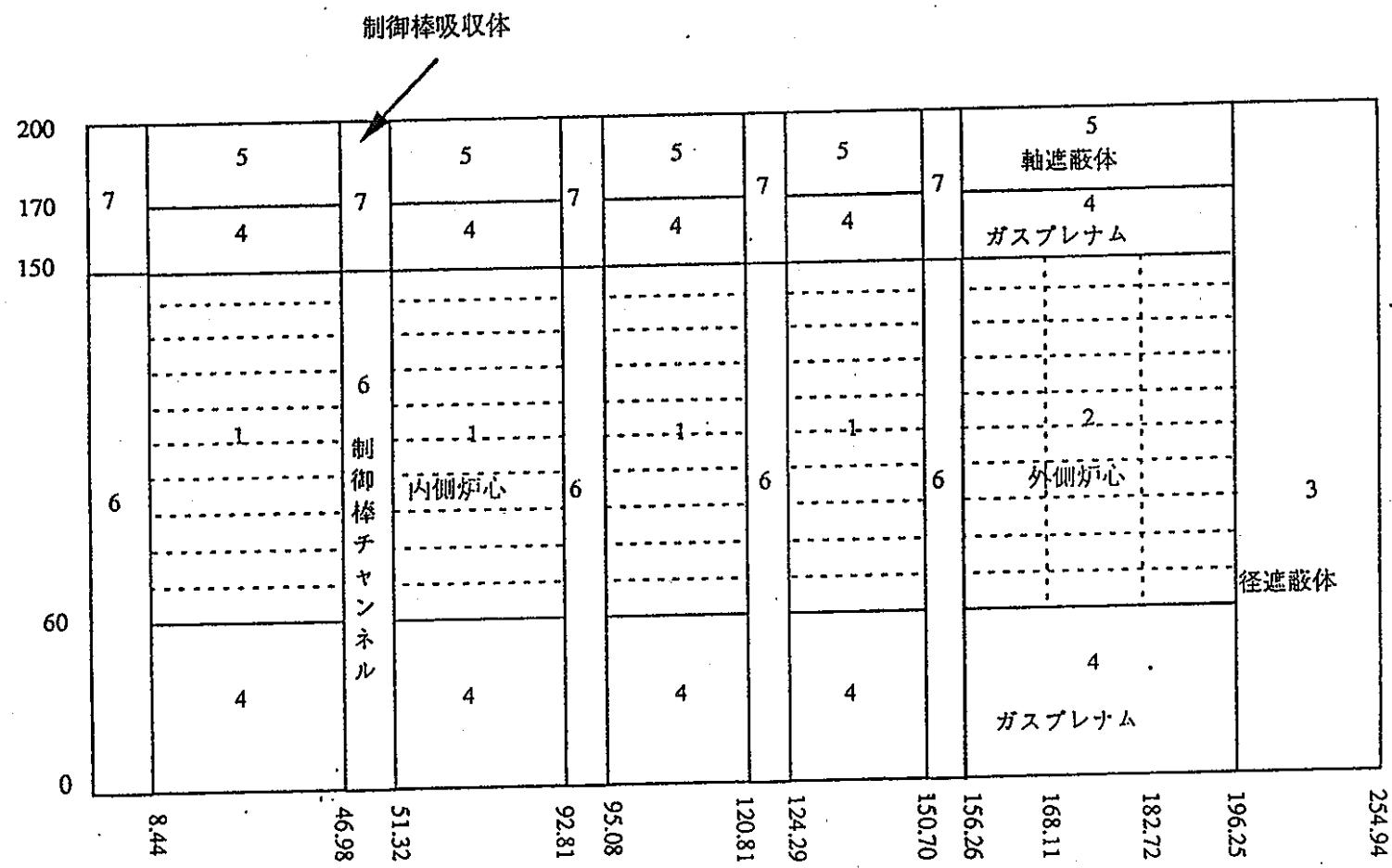


図 3.1-2 2 次元 R-Z モデル・燃焼計算体系

表3.3-1 中性子18群構造

Group	エネルギー領域範囲		レサジー幅
1	10.0	MeV--	6.0653 MeV 0.500
2	--	3.6788	0.500
3	--	2.2313	0.500
4	--	1.3534	0.500
5	--	820.85 keV	0.500
6	--	387.74	0.750
7	--	183.16	0.750
8	--	86.517	0.750
9	--	40.868	0.750
10	--	19.305	0.750
11	--	9.1188	0.750
12	--	4.3074	0.750
13	--	2.0347	0.750
14	--	961.12 eV	0.750
15	--	454.0	0.750
16	--	214.45	0.750
17	--	101.30	0.750
18	--	0.00001	16.4

3.2 サーベイ対象燃料

サーベイ対象燃料の混合割合はつきの2通りとした。

a)燃料と共に吸収物質と不活性母材の均質混合

b)燃料PuNと共に吸収物質の均質混合

燃料ピン中の共鳴吸収物質の体積割合は0、50、約100%近傍としてサーベイした。燃料密度は、いずれのサーベイにおいても、80%SDとした。

燃料同位体組成比は、Pu同位体組成比はつきの3種類とした。

a)レファレンス組成 ; (standard Pu composition)

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241 (wt%)

= 1.8/58.2/22.3/11.1/ 5.5/ 1.1

これは、ウラン燃料軽水炉の使用済燃料から取り出されるプルトニウム同位体組成比の例に相当する。

b)高フィッサイルPu組成 ; (High Pu-fiss)

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241 (wt%)

= 0.0/95.0/ 4.5/ 0.5/ 0.0/ 0.0

この同位体組成比は、大型酸化物燃料高速炉の使用済プランケットから取り出されるプルトニウムの例である。

c)低フィッサイルPu組成 ; (Low-fissile Pu-composition)

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241 (wt%)

= 2.7/33.1/37.9/11.1/12.2/ 3.0

この組成比は、軽水炉使用済ウラン燃料から取り出されるプルトニウムを再度軽水炉の混合酸化物燃料として使用した後に、再処理されて取り出されるプルトニウム同位体組成比の例として設定したものである。

非核分裂物質の共鳴吸収物質は、前章の調査結果から、FeとMoを中心にサーベイすることとした。NiとCrは参考として初期炉心におけるサーベイでは評価対象に含めた

第一ステップの候補材のうち、Nbについては、化学的性質の調査結果から判

断して窒化物燃料 PuNとの共存性がないので、サーベイ対象からはずした。

本サーベイでは、燃料が窒化物であることを考慮し、第一段階として、いずれも金属形態を想定して核計算をした。

- a) Fe
- b) Ni (参考用)
- c) Cr (参考用)
- d) Mo

3.3 計算方法

群定数として、JENDL-3.1 をもとにした高速炉解析用 JFS-3-J3.1 70群セットを使用した。

燃焼特性は 7群に縮約して 2次元 R Z モデルにより求めた。7群分割はつきのものである。

群	エネルギー範囲
1	10.0 MeV ~ 1.3534 MeV
2	~ 387.74 keV
3	~ 86.517
4	~ 9.1188
5	~ 961.12 eV
6	~ 101.30
7	~ 0.00001

群	エネルギー範囲
1	10.0 MeV ~ 1.3534 MeV
2	~ 387.74 keV
3	~ 86.517
4	~ 9.1188
5	~ 961.12 eV
6	~ 101.30
7	~ 0.00001

サーベイ計算は初期炉心体系と燃焼炉心である平衡サイクル炉心で、それぞれつぎのように 2次元 R Z 拡散計算により解析した。

1) 初期炉心におけるサーベイ計算

初期炉心体系では、構造材系の共鳴吸収物質を混合した燃料による影響の傾向を広く把握するために、燃料の種類と混在率をパラメータに 2次元 R Z 拡散 70群直接計算により、ドップラー係数とナトリウムボイド反応度を調べた。

実効断面積は、3種類の Pu 同位体組成比と窒素 N14, N15 の組合せによる Pu N 組成、不活性母材、構造材、冷却材のそれぞれの組成に対する均質断面積としてマクロ断面積としてもとめた。これは実効的なミクロ断面積を一定として扱うことに相当する。この扱いについては、燃料核種のうち Pu240, Pu242などのドップラー係数、ナトリウムボイド反応度に大きく影響するものについては、共鳴領域の自己遮蔽効果が強く反映することになる。

次に、それぞれのマクロ断面積を各物質の体積割合を重みとして集合体平均断面積を拡散計算用に作成する方法をとり、下記のサーベイを行った。

- ・Pu同位体組成比 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度
- ・共鳴物質種類 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度
- ・共鳴物質割合 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度
- ・窒素同位体の選択 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度

初期炉心では、幅広い範囲で共鳴吸収物質の混合によるドップラー係数とナトリウムボイド反応度への影響を調べた。

2) 平衡サイクル特性の計算方法

初期炉心を対象にした共鳴吸収物質によるドップラー係数とナトリウムボイド反応度への影響サーベイから、構造材系の候補材としてFeとMoが特徴のある候補であることが次章で示される。

そこで、FeとMoを利用するケースについて、燃料中の共鳴吸収物質の体積割合を50%として、平衡サイクルの燃焼特性をもとめドップラー係数への影響を分析検討した。

平衡サイクルの特性は、1サイクルの運転長さ270日・均質分散6バッチ燃料交換により求めた。この燃焼計算により得られた組成をもとに、サイクル初期と末期において、18群の一次摂動および直接計算によりドップラー効果に対する核種毎の寄与能力と寄与するエネルギー範囲などの特徴を調べた。

この検討は18群で行い図表もこれにもとづいて整理してある。この18群エネルギー構造は表3.3-1に示す。

検討対象；Pu同位体組成比はレファレンス組成

レファレンス燃料炉心；PuN-AlN炉心

共鳴吸収物質利用炉心；PuN-AlN-50%Fe炉心

PuN-AlN=50%Mo炉心

なお、燃焼炉心の実効断面積は、70群段階で均質燃料組成に対する自己遮蔽因子をそれぞれ求め、それぞれの平衡炉心の70群中性子スペクトルにより、18群へ縮約して使用している。

3.4 初期炉心における特性値のサーベイ結果

初期炉心の余剰反応度が約 4~10%ΔK の範囲になり、また同時に内外炉心の最大線出力がほぼ一致するように、均質 2 領域炉心の内外燃料富化度（燃料、不活性母材、共鳴吸収物質の均質化燃料全体の中の燃料（PuN）の体積割合とする）を設定した。それらの体系で炉心部のドップラー係数とナトリウムボイド反応度を求めた。

これらの計算は 70 群拡散直接計算から求めた。燃料平均温度は基準を 800K と想定し、燃料温度上昇状態は 1500K としてドップラー係数を算出した。

主に、以下の項目について、影響を調べた。

- ・ Pu 同位体組成比 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度
- ・ 共鳴物質種類 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度
- ・ 共鳴物質割合 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度
- ・ 窒素同位体の選択 vs. 燃料体積割合、ドップラー係数、ナトリウムボイド反応度

このように、幅広い範囲で共鳴吸収物質の混合によるドップラー係数とナトリウムボイド反応度への影響を調べた結果は、表 3.4-1～表 3.4-5 および図 3.4-1～図 3.4-10 に示されている。以下は、これらのサーベイ計算結果が示す傾向をまとめた。

1) 燃料体積富化度（実効増倍率）

表 3.4-1 にレファレンス燃料（PuN-AlN）炉心における、Pu 同位体組成比の影響を示す。燃料富化度の設定値と実効増倍率の関係は “ $k =$ ” として示してある。燃料富化度は、この炉心体系で PuN-AlN 燃料を使用する場合の目安値である。以下に示す反応度係数についての全体傾向を把握するために使用した。

この結果から、つきの傾向が示されている。

(a) Pu 同位体組成比と燃料富化度の関係は敏感である。後述するように核種ごとの密度係数において、Pu241 は Pu239 よりも反応度価値が約 1.7 倍ある。これを考慮すると、3 種類の組成比の Pu については、実効的に Pu239 割合がつぎのようになる。この割合を利用した炉心の P_{uf} 富化度がほぼ一致することが分かる。

Pu組成	Pu239実効割合	Puf富化度
Standard	78%	1.87% / 3.04%
High Puf	96%	1.91% / 2.94%
Low Puf	53%	2.00% / 3.10%

実効増倍率の若干の相違を考慮する必要があるが、Pu239実効割合をパラメータとして利用することができることを示している。

(b) PuN-AlNに窒素15を使用することは、炉心の反応度への影響が大きいことが確認される。

表 3.4-2および表 3.4-3には共鳴吸収物質の混在の影響を調べた結果である。この例は不活性母材 AlNを使用しない場合で、PuN-Moなどの組成を想定している。その結果はつぎのようにまとめられる。

(c)共鳴吸収物質の混在割合により、燃料富化度は変化するが、Moでは影響が大きく、Cr, Fe, Niでは比較的ゆるやかである。

2) ドップラー係数およびナトリウムボイド反応度

反応度係数（ドップラー係数およびボイド反応度）は表 3.4-4～表 3.4-6、および図 3.4-1～図 3.4-10にサーベイ計算結果を示した。

炉心部のドップラー係数（図 3.4-1～図 3.4-5）については、つぎの傾向が示されていることが分かった。

(d)ウラン不使用型高速炉において負のドップラー係数を確保するために重要な核種はPu240, Pu242があるので、Pu同位体組成比のなかでこれらの核種が占める割合には敏感である。

(e)共鳴吸収物質を使用しない体系では、ここで参考としたStandard, Low Puf組成については大きな違いは与えないことが示されている。

(f)High Puf組成についてはPu240割合がすくないので負のドップラー係数の絶

対値が小さい。しかし、これまでの知見として、PuN-AlN炉心では不活性母材が多く、減速材の割合が大きいので中性子スペクトルが、混合酸化物燃料炉心のスペクトルよりも軟らかくなることが分かっている。中性子を吸収する核分裂生成物が存在しない未燃焼初期炉心では、スペクトル軟化効果は強調されていると考えられる。したがって、High Pu組成においても、混合酸化物燃料炉心のドップラー係数 $-8 \times 10^{-3} T^* DK/K$ の半分程度の値となっている。

(g)燃料と結合する窒素の同位体の影響はあまり大きくない。N14使用燃料では、燃料富化度が増大するのでPu240量が相対的に増大するためと考えられる。

共鳴吸収物質を混在させた場合は図3.4-2～図3.4-5に、それぞれCr, Fe, Ni, Moの混在率をパラメータにドップラー係数への影響が示されている。これによると、初期炉心ではつきの傾向が示されている。

(h)構造材系の共鳴吸収物質の混在率が増大すると、ドップラー係数は減少することが示されている。

(i)減少の程度は、Cr, Moが大きく、Fe, Niがやや少ない。

(j)この傾向は、共鳴吸収物質が炉心に混在することにより、中性子スペクトルが硬くなること、および燃料インベントリーの増大が、Pu240の中性子吸収増大よりも大きく影響することによる効果と考えられる。これらの分析は、次節の燃焼炉心体系でさらに分析する。

ナトリウムボイド反応度は炉心領域について求めた。炉心部のナトリウムボイド反応度(図3.4-6～図3.4-10)については、つきの傾向が示されていることが分かった。

(k)ウラン不使用型高速炉において、初期炉心では負のナトリウムボイド反応度となっている。ただし、Pu同位体組成比には敏感である。

(l)共鳴吸収物質を使用しない体系では、ここで参考としたStandard, Low Pu組成についても大きな違いは与えている。

(m)共鳴吸収物質を使用する場合は、混在核種により混在率依存性が異なっている。

る。Cr, Fe, Niでは大きな変動はなく、混在率との関係が複雑になっているが、Moでは混在率はナトリウムボイド反応度の増大に敏感である。

(n) Cr, Fe, Niでは、Low PuF組成とStandard組成の場合で混在率依存性が異なっている。

表3.4-1 Pu 同位体組成比と燃料富化度の関係サーベイ結果 (1)

---初期炉心---

---Diffusion RZ-70g-calculations with JFS-3-J3.1---

Coolant $V_n=0.356$ Structure $V_s=0.222$ Fuel $V_f=0.3368$ (smeared; PuN/AlN/Mo...)

a) N14 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用の場合（未燃焼炉心）

燃料組成	Pu組成	燃料体積富化度(%)		出力ピーグ値比	
		IC	OC	(OC/IC)	
PuN+AlN	Standard	2.39	3.90	$k=1.0704$	1.04
	High Puf	2.01	3.06	$k=1.0813$	0.92
	Low Puf	3.77	5.86	$k=1.0594$	1.06

b) N15 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用の場合（未燃焼炉心）

燃料組成	Pu組成	燃料体積富化度(%)		出力ピーグ値比	
		IC	OC	(OC/IC)	
PuN+AlN	Standard	2.17	3.52	$k=1.0910$	0.99

表3.4-2 Pu同位体組成比と燃料富化度の関係サーベイ結果(2)

---初期炉心における共鳴吸収物質混在効果---

---Diffusion RZ-70g-calculations with JFS-3-J3.1---

Coolant $V_n=0.356$

Structure $V_s=0.222$

Fuel $V_f=0.3368$ (smeared; PuN/AlN/Mo...)

a) N14 窒化物燃料・希釈母材 AlN不使用・構造材核種混在(~100%)の場合

(未燃焼炉心)

燃料組成	Pu組成	燃料体積富化度(%)		出力比- κ 値比 (OC/IC)
		IC	OC	
PuN+Mo	Standard	5.02	6.37 $k=1.0663$	1.02
PuN+Cr	Standard	2.85	4.26 $k=1.0903$	0.99
PuN+Ni	Standard	2.98	4.47 $k=1.0611$	1.00
PuN+Fe	Standard	2.98	4.47 $k=1.0895$	1.00

表3.4-3 Pu 同位体組成比と燃料富化度の関係サーベイ結果 (3)
 —初期炉心における共鳴吸収物質混在効果—
 ---Diffusion RZ-70g-calculations with JFS-3-J3.1---

Coolant $V_n=0.356$
 Structure $V_s=0.222$
 Fuel $V_f=0.3368$ (smeared; PuN/AlN/Mo...)

a) N14 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用・構造材核種混在(50%)の場合
 (未燃焼炉心)

燃料組成	Pu組成	燃料体積富化度(%)		出力ピーアク値比	
		IC	OC	(OC/IC)	
PuN+AlN+Mo (Mo;50%)	Standard	4.09	5.45	$k=1.0514$	1.01
PuN+AlN+Cr (Cr;50%)	Standard	2.58	4.04	$k=1.0739$	1.02
PuN+AlN+Ni (Ni;50%)	Standard	2.58	4.04	$k=1.0474$	1.02
PuN+AlN+Fe (Fe;50%)	Standard	2.58	4.04	$k=1.0658$	1.01
<hr/>					
PuN+AlN+Mo (Mo;50%)	Low-fiss Pu	6.29	8.11	$k=1.0829$	0.96
PuN+AlN+Cr (Cr;50%)	Low-fiss Pu	3.99	5.94	$k=1.0678$	1.00
PuN+AlN+Ni (Ni;50%)	Low-fiss Pu	3.99	5.94	$k=1.0414$	1.02
PuN+AlN+Fe (Fe;50%)	Low-fiss Pu	3.99	5.94	$k=1.0582$	1.00
<hr/>					

b) N14 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用・構造材核種混在(50%)の場合
 (未燃焼炉心)

燃料組成	Pu組成	燃料体積富化度(%)		出力ピーアク値比	
		IC	OC	(OC/IC)	
PuN+AlN+Mo (Mo;50%)	Standard	3.80	4.99	$k=1.0307$	0.96

表3.4-4 Pu同位体組成比とドップラー係数・ナトリウムボイド反応度の関係(1)

---初期炉心---

---Diffusion RZ-70g-calculations with JFS-3-J3.1---

a) N14 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用の場合（未燃焼炉心）

燃料組成	Pu組成	ドップラー係数 (T*dK/dT)	ナトリウムボイド反応度 (%Δ ρ)
PuN+AlN	Standard	-9.27-03	-2.64
	High Puf	-5.06-03	-3.32
	Low Puf	-9.75-03	-1.53

b) N15 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用の場合（未燃焼炉心）

燃料組成	Pu組成	ドップラー係数 (T*dK/dT)	ナトリウムボイド反応度 (%Δ ρ)
PuN+AlN	Standard	-8.30-03	-2.64

表3.4-5 Pu同位体組成比とドップラー係数・ナトリウム・リド反応度の関係(2)

—初期炉心；共鳴吸収体混在効果—

---Diffusion RZ-70g-calculations with JFS-3-J3.1---

a) N14 窒化物燃料・希釈母材 AlN不使用・構造材核種混在(～100%)の場合

(未燃焼炉心)

燃料組成	Pu組成	ドップラー係数 (T*dK/dT)	ナトリウム・リド反応度 (%Δρ)
PuN+Mo	Standard	-3.71-03	+1.59
PuN+Cr	Standard	-4.69-03	-2.43
PuN+Ni	Standard	-7.02-03	-2.42
PuN+Fe	Standard	-6.51-03	-2.64

表3.4-6 Pu同位体組成比とドップラー係数・ナトリウム・イド反応度の関係(3)

---初期炉心；共鳴吸収体混在効果---

---Diffusion RZ-70g-calculations with JFS-3-J3.1---

a) N14 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用・構造材核種混在(50%)の場合

(未燃焼炉心)

燃料組成	Pu組成	ドップラー係数 (T*dK/dT)	ナトリウム・イド反応度 (%Δρ)
PuN+AlN+Mo (Mo;50%)	Standard	-7.84-03	-0.367
PuN+AlN+Cr (Cr;50%)	Standard	-7.22-03	-2.85
PuN+AlN+Ni (Ni;50%)	Standard	-8.57-03	-2.97
PuN+AlN+Fe (Fe;50%)	Standard	-8.77-03	-2.93
<hr/>			
PuN+AlN+Mo (Mo;50%)	Low-fiss Pu	-6.27-03	-0.834
PuN+AlN+Cr (Cr;50%)	Low-fiss Pu	-7.29-03	-1.10
PuN+AlN+Ni (Ni;50%)	Low-fiss Pu	-8.84-03	-1.21
PuN+AlN+Fe (Fe;50%)	Low-fiss Pu	-8.54-03	-1.26

b) N15 窒化物燃料・希釈母材 AlN使用・構造材核種混在(50%)の場合

(未燃焼炉心)

燃料組成	Pu組成	ドップラー係数 (T*dK/dT)	ナトリウム・イド反応度 (%Δρ)
PuN+AlN+Mo (Mo;50%)	Standard	-7.67-03	-0.046

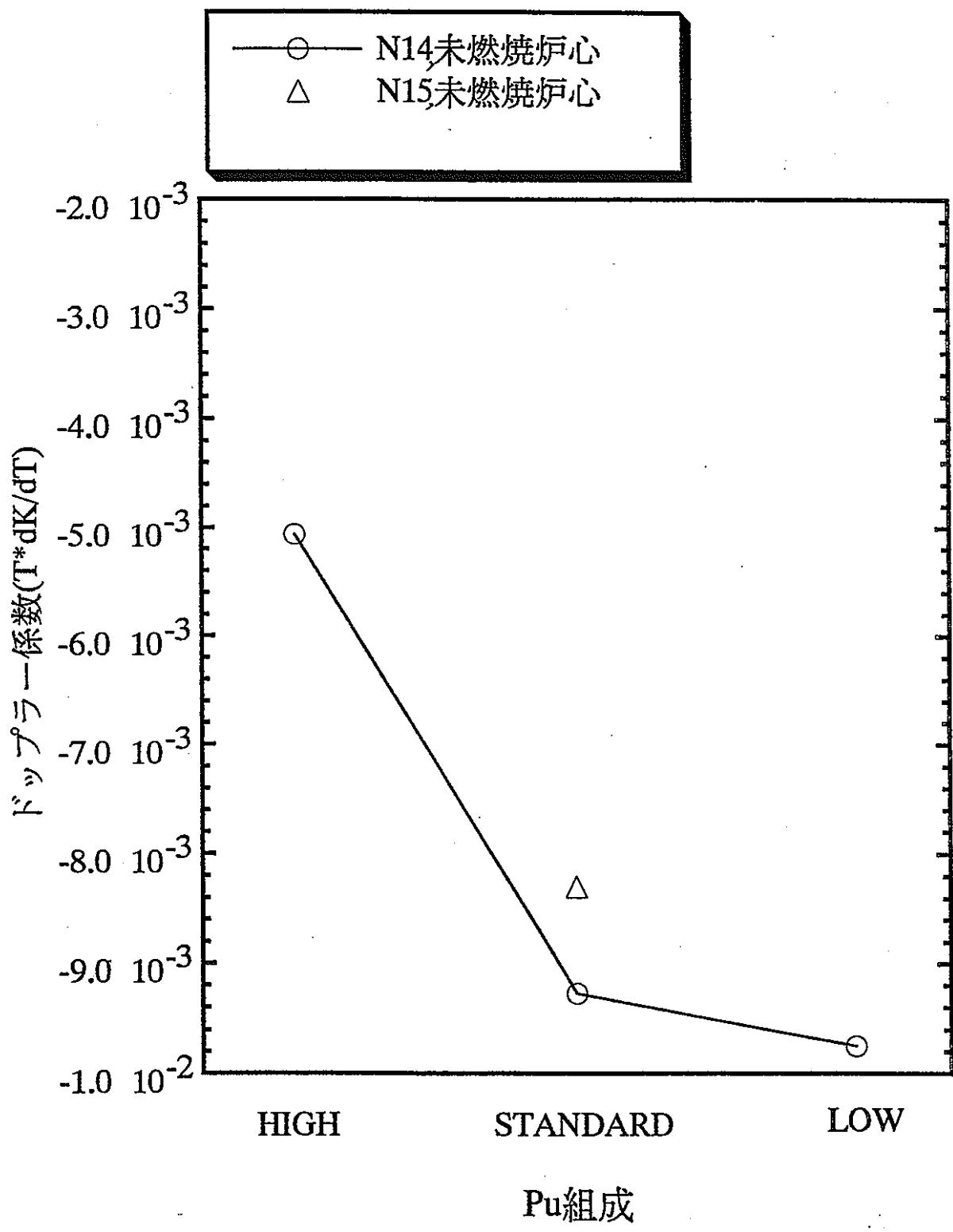


図 3.4-1 レファレンス炉心におけるPu同位体組成比とドッペラー係数の関係
— 初期炉心 —

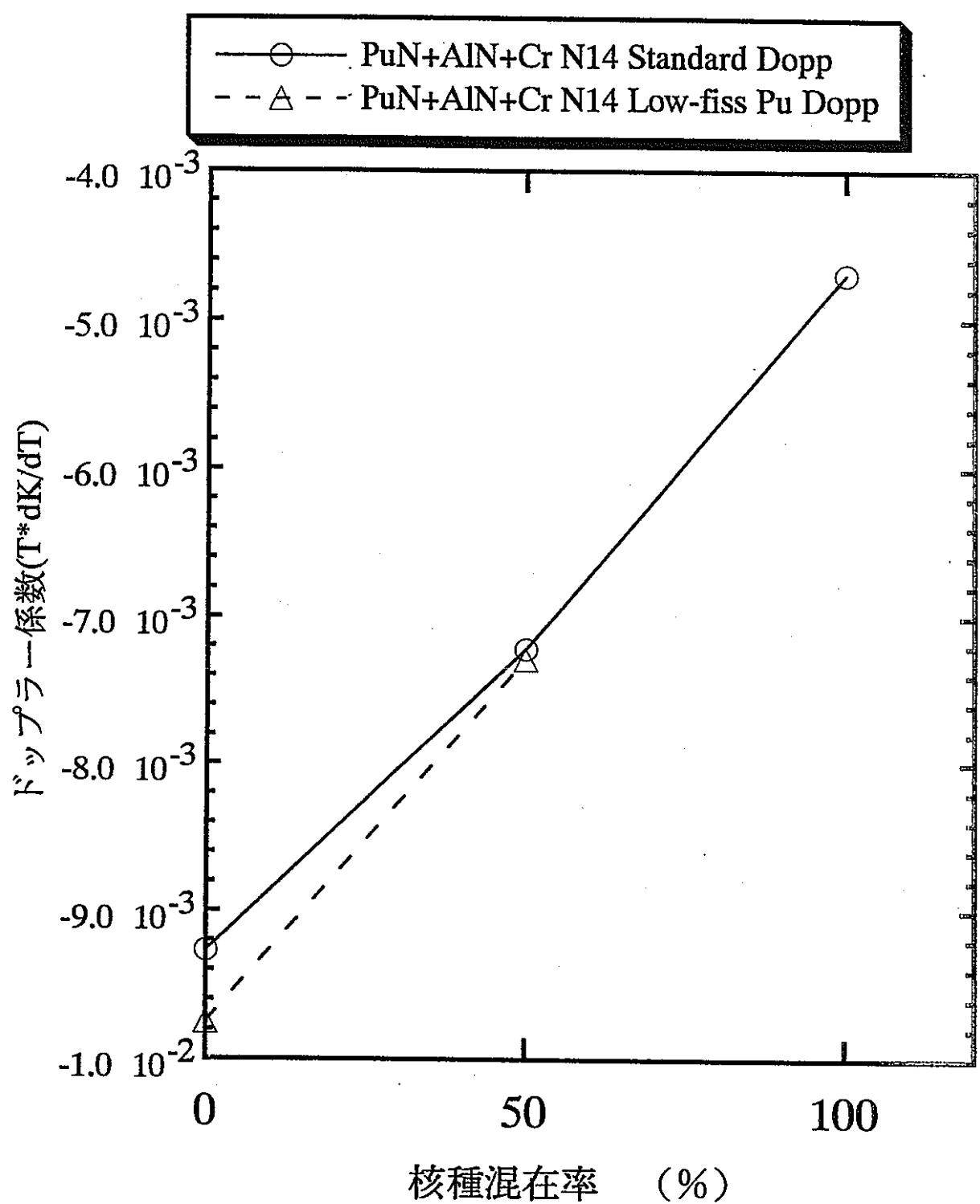


図 3.4-2 ドッペル係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (1)

— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Cr の場合 —

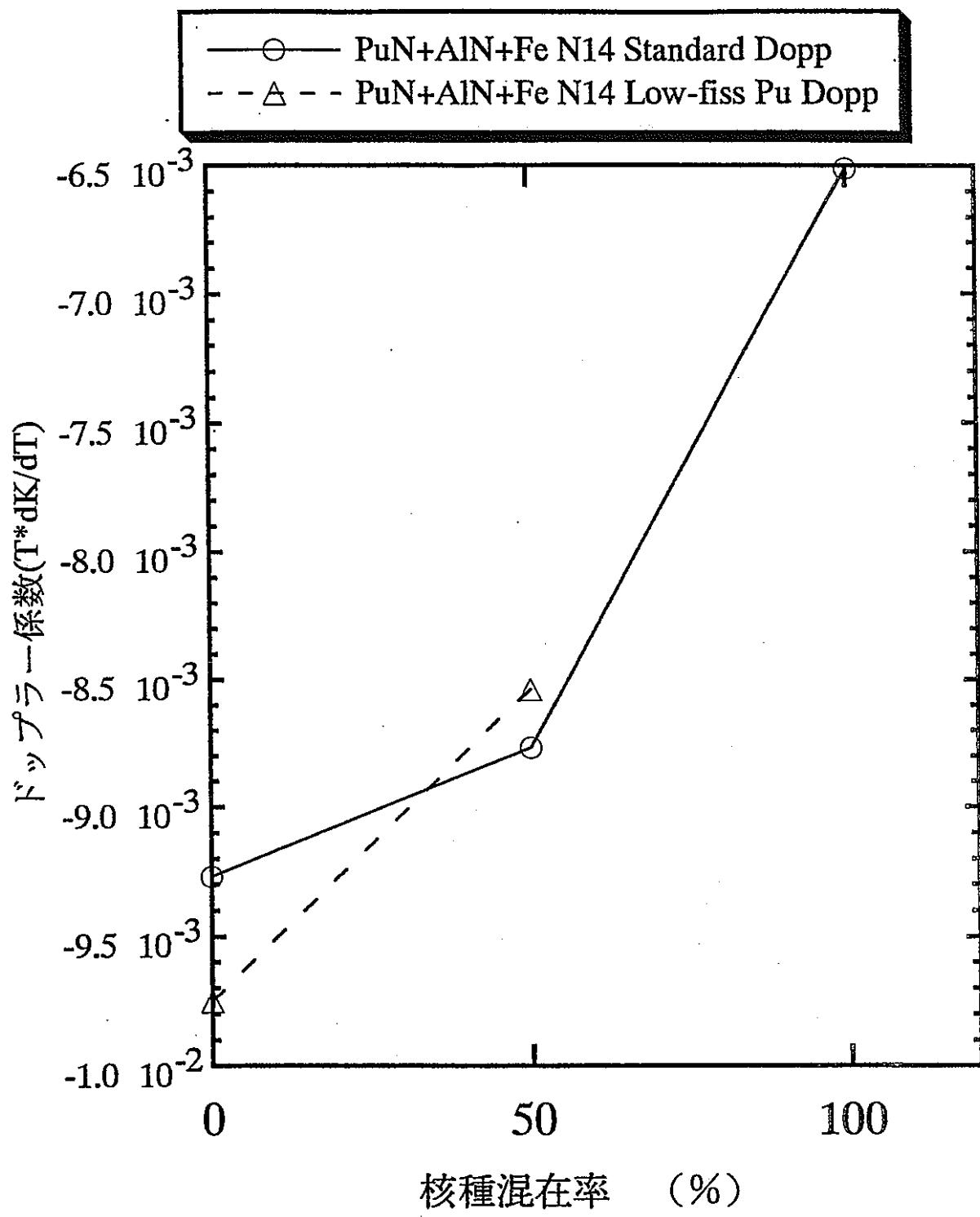


図 3.4-3 ドッpler係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (2)
— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Fe の場合 —

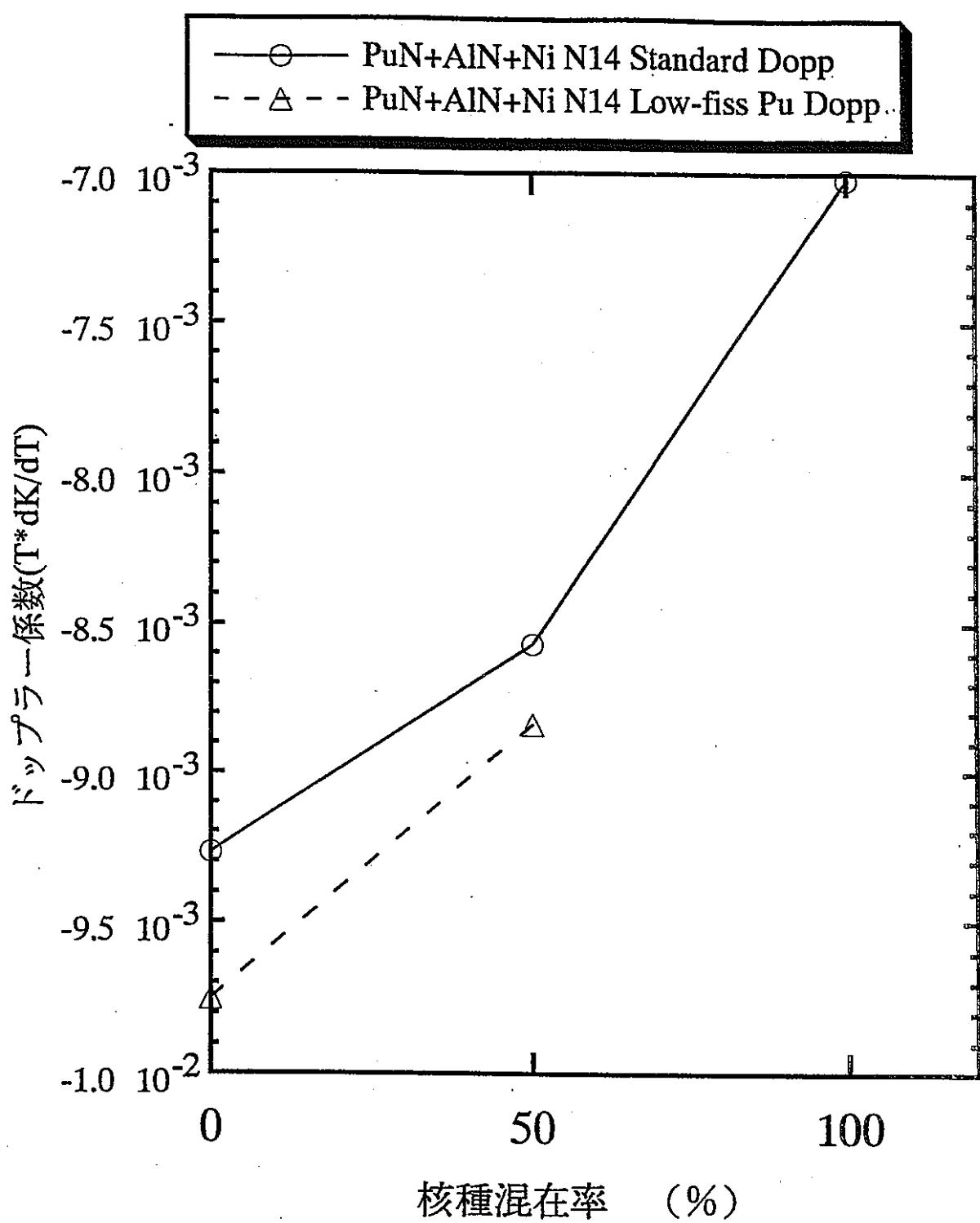


図 3.4-4 ドッペラー係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (3)
— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Ni の場合 —

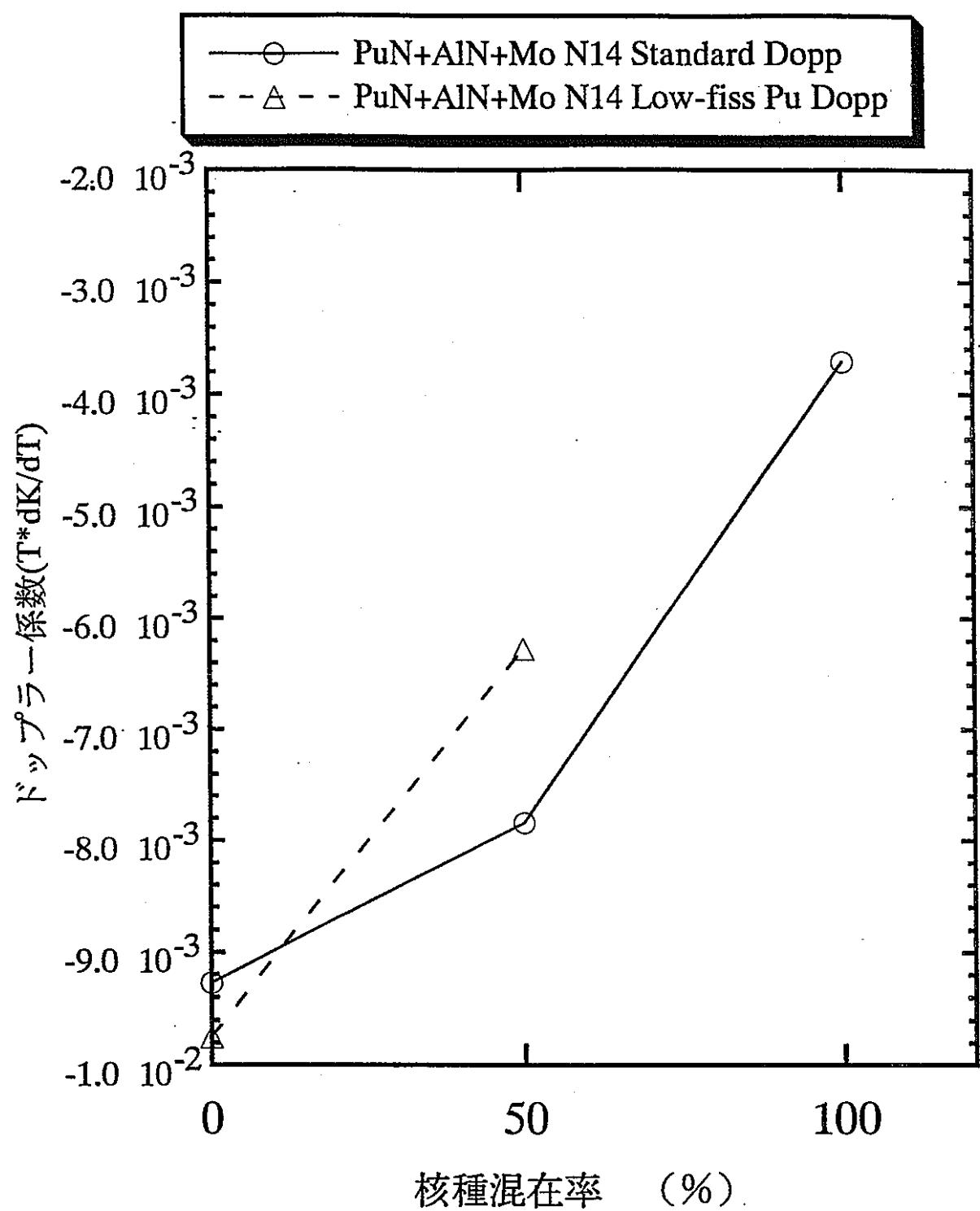


図 3.4-5 ドッペラー係数に対する共鳴吸収物質混在効果 (4)
— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Mo の場合 —

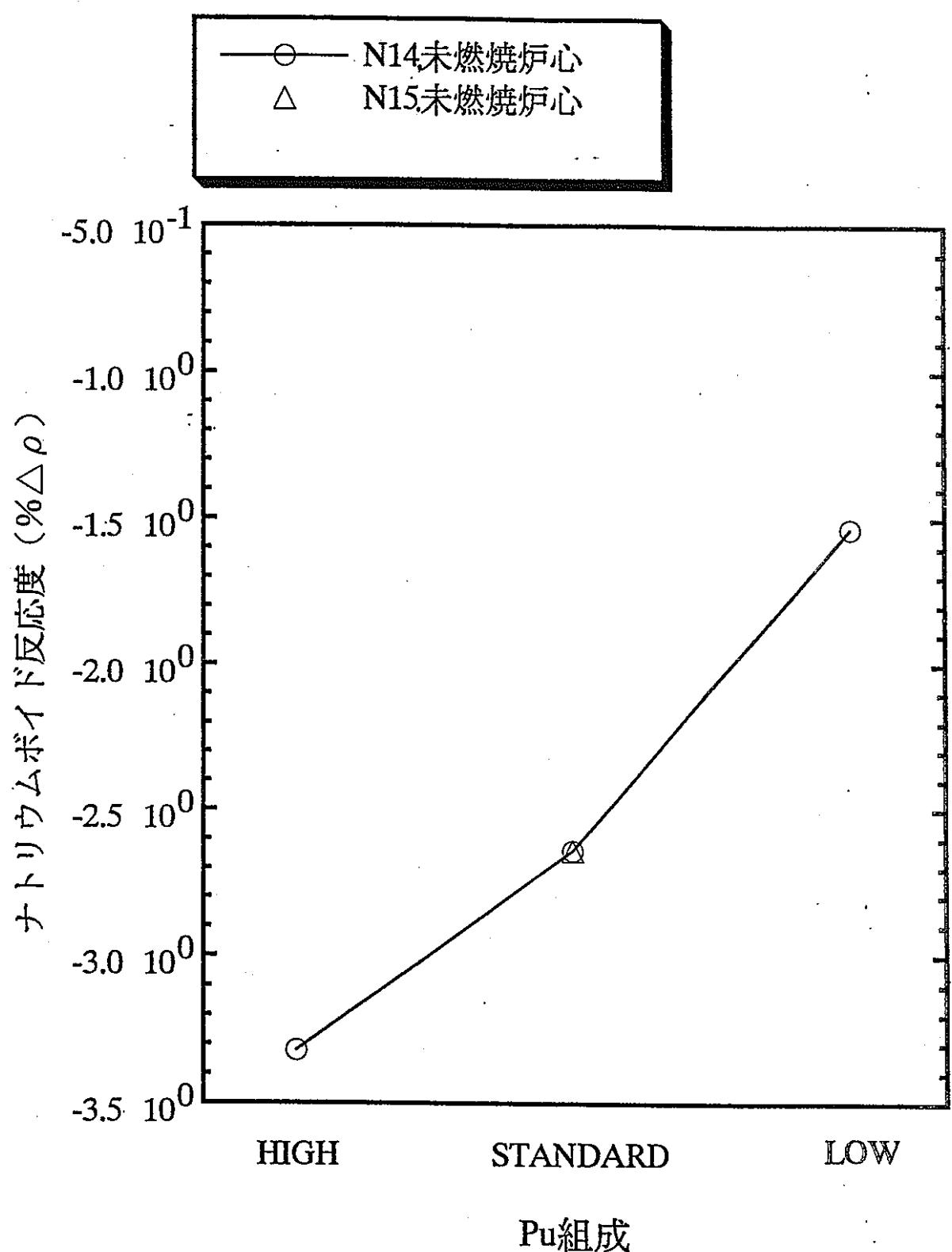


図 3.4-6 ルアレス炉心における Pu 同位体組成比とナトリウムボイド反応度の関係
— 初期炉心 —

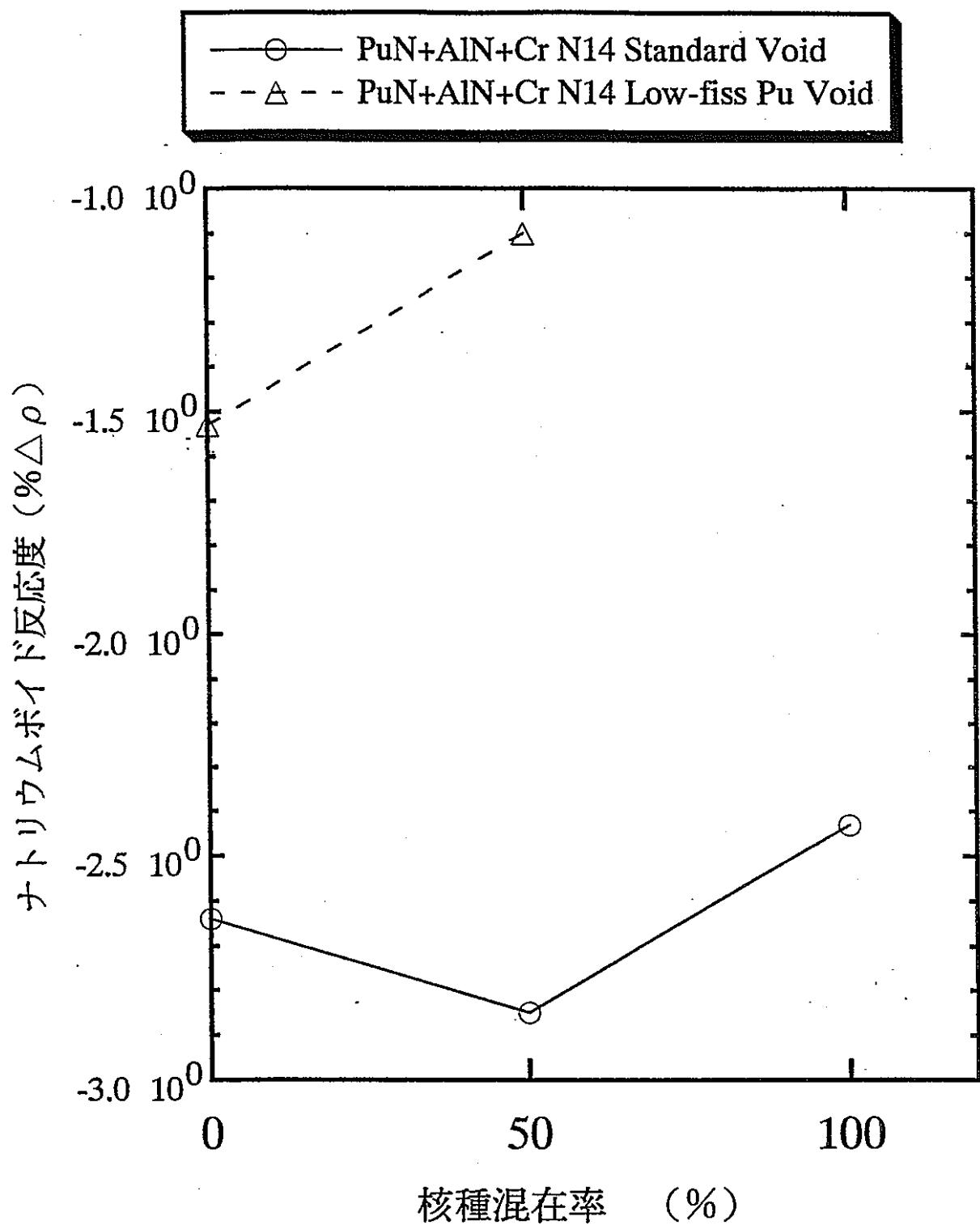


図 3.4-7 ナトリウムボイド反応度に対する共鳴吸収物質混在効果 (1)
— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Cr の場合 —

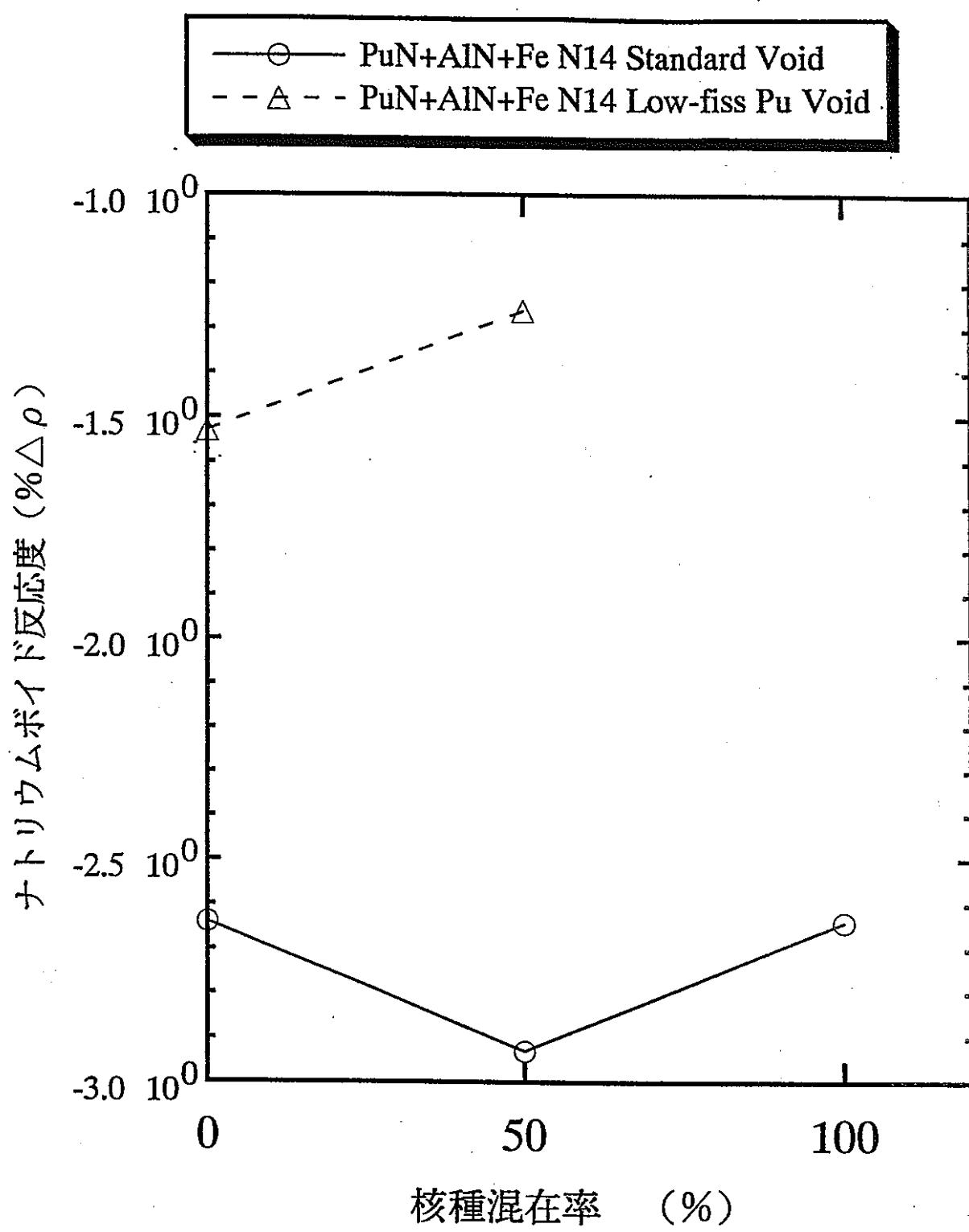


図 3.4-8 ナトリウムボイド反応度に対する共鳴吸収物質混在効果 (2)
— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Fe の場合 —

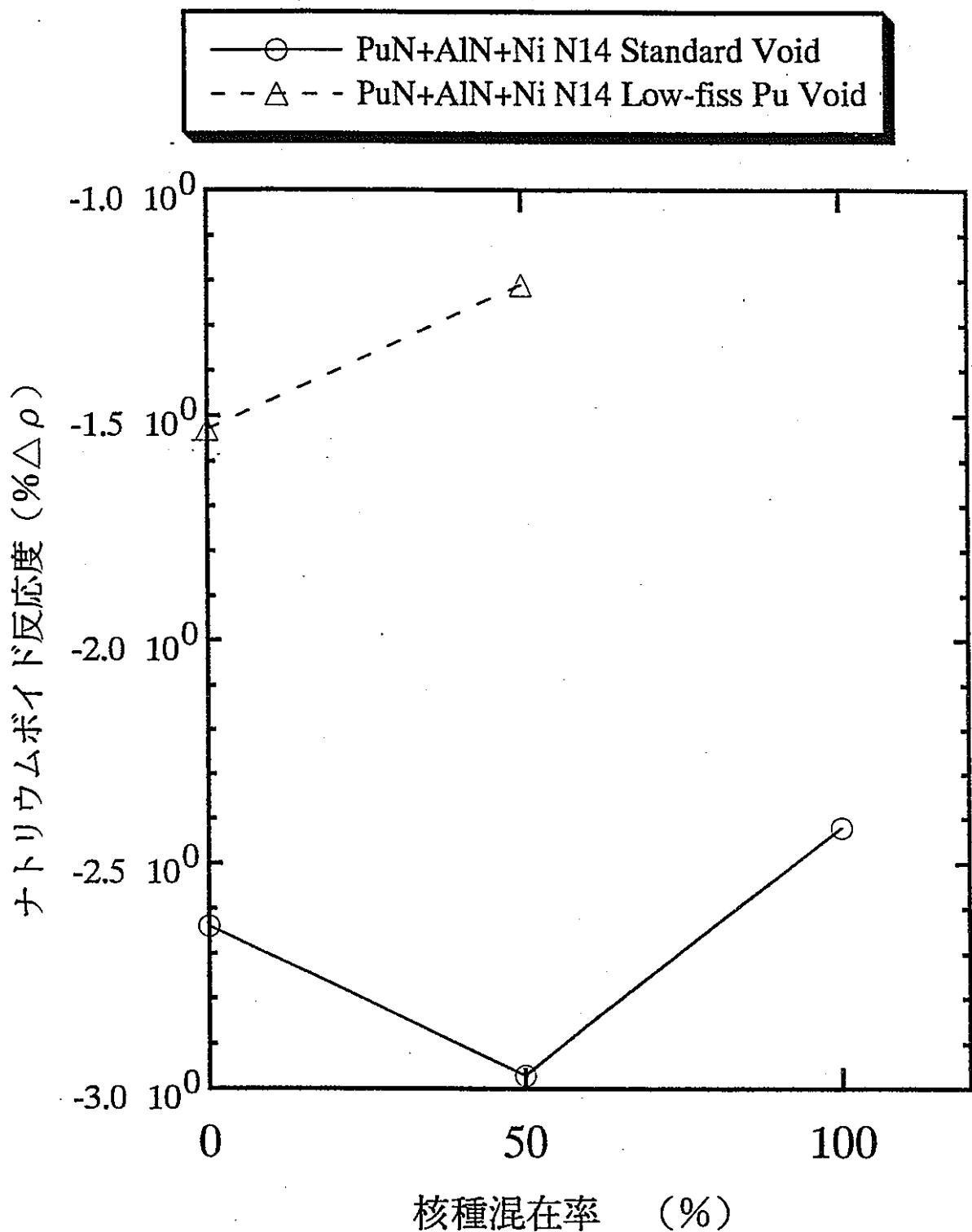


図3.4-9 ナトリウムボイド反応度に対する共鳴吸収物質混在効果(3)
— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Ni の場合 —

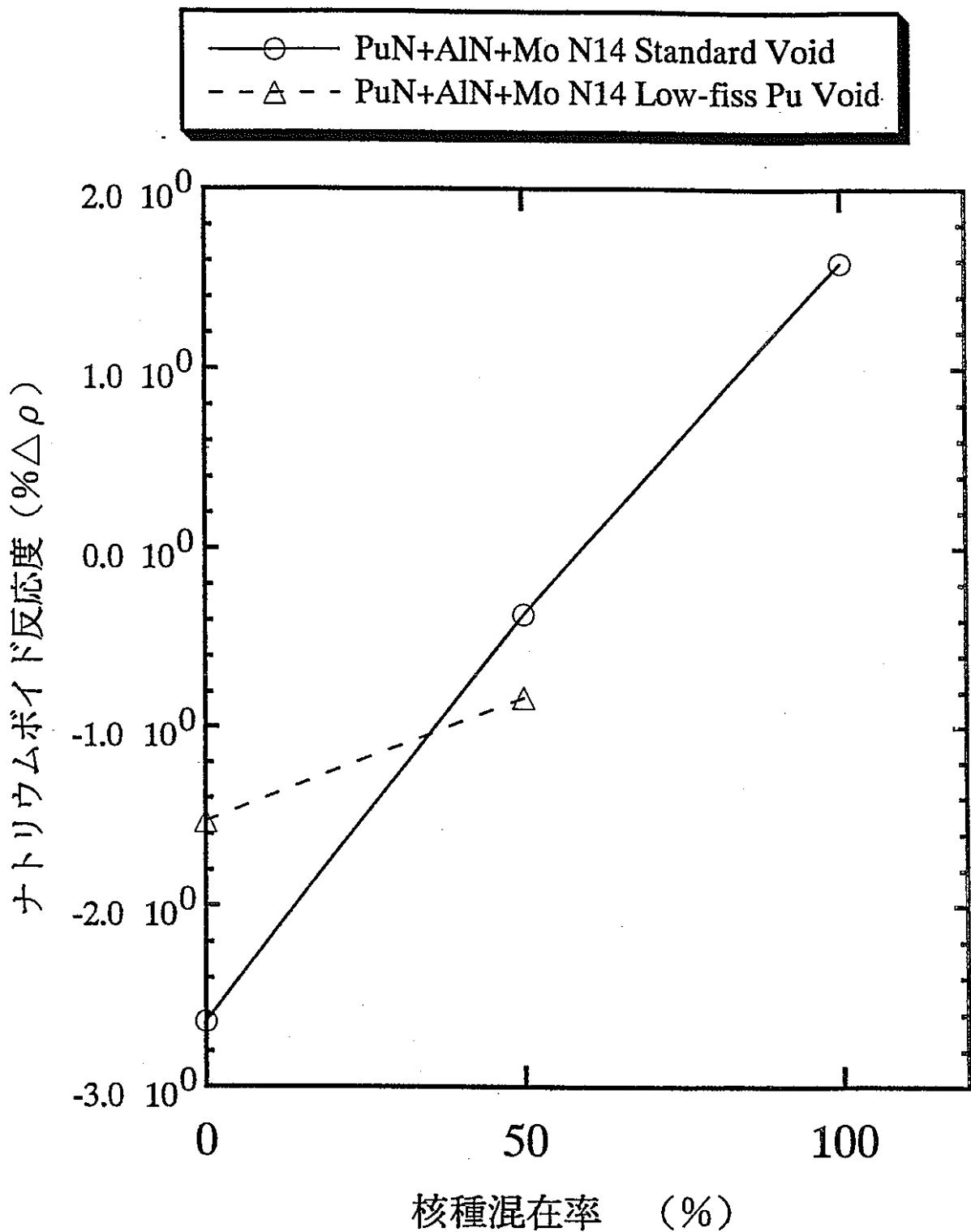


図 3.4-10 ナトリウムヨード反応度に対する共鳴吸収物質混在効果 (4)
— 初期炉心 ; 共鳴吸収体混在効果 Mo の場合 —

表3.5-1 平衡サイクル炉心の燃焼特性
(1600MW_{th}, 炉心高さ90cm)

項目	レファレンス炉心	50%Fe混合	50%Mo混合
燃料(N15 nitride)	PuN/AlN	PuN/AlN/50%Fe	PuN/AlN/50%Mo
平衡サイクル運転長さ (days)	270	270	270
燃料交換バッチ数 (分散均一)	6	6	6
Pu富化度(Am241を含む)			
内側炉心／外側炉心 (vol%)	4.73/5.68	4.87/6.37	6.54/7.21
平均 (vol%)	5.11	5.47	6.81
富化度比(内側／外側)	0.83	0.76	0.91
燃焼欠損反応度 (%Δρ)	8.88	8.50	6.90
転換比 [MOEC]			
炉心	0.16	0.14	0.10
最大線出力 [BOEC/EOEC]			
内側炉心 (W/cm)	259 / 207	254 / 210	264 / 214
外側炉心 (W/cm)	256 / 261	251 / 256	205 / 214
ピークフルエンス [$\geq 0.1\text{MeV}$]			
内側炉心 (nvt)	2.30×10^{23}	2.57×10^{23}	2.76×10^{23}
外側炉心 (nvt)	2.19×10^{23}	2.11×10^{23}	2.36×10^{23}
平衡サイクルPu-fissile (tons)			
BOEC	3.256	3.428	4.623
EOEC	2.808	2.984	4.182
Pu-fissile投入量 (t/y)	1.026	1.060	1.318
Pu-fissile減少量 (t/y)	0.606	0.600	0.596
Pu-fissile減少量 (Kg/TWh)	108.	107.	106.
Pu-fissile減少率 (%) (=減少量/投入量)	0.59	0.57	0.45

*1) JFS-3-J3.1高速炉解析用群定数セット使用。

*2) Pu同位体組成比；レファレンス組成。

表3.5-2 平衡サイクル炉心の反応度係数(1)
--- 70g 直接拡散計算による結果 ---

項目	レファレンス燃料	50%Fe混合	50%Mo混合
ドップラー係数 ($-T \cdot dk/dT \times 10^{-3}$)			
B O E C	1.40 (3.78)	2.13 (4.67)	2.73 (3.48)
E O E C	1.75 (4.24)	3.13 (5.28)	2.95 (3.92)
ナトリウムボイド反応度 (% $\Delta \rho$)			
B O E C	+0.0028	+0.0890	+1.78
E O E C	+0.0568	+0.135	+1.96

*1) JFS-3-J3.1高速炉解析用群定数セット使用。

*2) Pu 同位体組成比；レファレンス組成。

*3) ドップラー係数計算は800K-1500Kの範囲。

*4) 燃料部分のドップラー係数

()内のドップラー係数には、構造材（被覆管とラッパ管）の寄与を含むので等温ドップラー係数に相当する。

*5) ナトリウムボイド反応度は、炉心部の値。

表3.5-3 平衡サイクル炉心の反応度係数(2)
--- 18g 直接拡散計算による参考結果 ---

項目	レファレンス燃料	50%Fe混合	50%Mn混合
ドップラー係数 ($-T \cdot dk/dT \times 10^{-3}$)			
B O E C	1.45 (3.78)	2.05 (4.50)	2.50 (3.19)
E O E C	1.81 (4.38)	3.03 (5.11)	2.71 (3.60)
ナトリウムボイド反応度 (% $\Delta \rho$)			
B O E C	-0.128	-0.0626	+1.53
E O E C	-0.121	-0.0328	+1.69

*1) JFS-3-J3.1高速炉解析用群定数セット使用。

*2) Pu同位体組成比；レファレンス組成。

*3) ドップラー係数計算は800K-1500Kの範囲。

*4) 燃料部分のドップラー係数

()内のドップラー係数には、構造材(被覆管とラッパ管)の寄与を含むので等温ドップラー係数に相当する。

*5) ナトリウムボイド反応度は、炉心部の値。

表3.5-4 平衡サイクル炉心の遅発中性子割合
--- 18g 拡散計算による結果 ---

項目	レファレンス燃料	50%Fe混合	50%Mn混合
遅発中性子割合 (%)			
BOEC	0.295	0.292	0.288
EOEC	0.298	0.295	0.288

*1) JFS-3-J3.1高速炉解析用群定数セット使用。

*2) Pu同位体組成比；レファレンス組成。

*3) Yield ;Tuttle1979, Spectrum Data; Saphier1977

表3.5・5 炉心中央領域の中性子スペクトルの比較

(規格化)

BOEC

group	ref. bc. norm	f5. bc. norm	m5. bc. norm
1	2.01E-03	1.71E-03	2.25E-03
2	9.88E-03	8.44E-03	1.07E-02
3	2.46E-02	2.23E-02	2.56E-02
4	4.91E-02	4.23E-02	4.64E-02
5	5.83E-02	5.38E-02	5.89E-02
6	1.21E-01	1.31E-01	1.48E-01
7	1.31E-01	1.54E-01	1.71E-01
8	1.12E-01	1.33E-01	1.55E-01
9	1.24E-01	1.40E-01	1.51E-01
10	1.02E-01	9.74E-02	9.73E-02
11	8.02E-02	6.82E-02	5.71E-02
12	5.53E-02	4.04E-02	3.08E-02
13	2.40E-02	2.79E-02	1.64E-02
14	5.07E-02	4.08E-02	1.92E-02
15	3.45E-02	2.42E-02	7.90E-03
16	1.49E-02	9.52E-03	1.83E-03
17	6.23E-03	3.74E-03	6.18E-04
18	1.80E-03	1.03E-03	2.18E-04

EOEC

group	ref. ec. norm	f5. ec. norm	m5. ec. norm
1	1.93E-03	1.64E-03	2.17E-03
2	9.50E-03	8.10E-03	1.03E-02
3	2.37E-02	2.15E-02	2.47E-02
4	4.75E-02	4.08E-02	4.49E-02
5	5.66E-02	5.21E-02	5.72E-02
6	1.18E-01	1.28E-01	1.45E-01
7	1.28E-01	1.51E-01	1.69E-01
8	1.10E-01	1.32E-01	1.54E-01
9	1.24E-01	1.40E-01	1.52E-01
10	1.02E-01	9.86E-02	9.93E-02
11	8.13E-02	6.97E-02	5.90E-02
12	5.65E-02	4.16E-02	3.21E-02
13	2.48E-02	2.89E-02	1.73E-02
14	5.29E-02	4.31E-02	2.06E-02
15	3.70E-02	2.63E-02	8.69E-03
16	1.65E-02	1.07E-02	2.05E-03
17	7.25E-03	4.40E-03	7.05E-04
18	2.20E-03	1.25E-03	2.45E-04

表3.5-6 重核の炉心部1群化断面積の比較(EOEC)

unit;barns

Element & Reactions		レファレンス燃料	50%Fe混合	50%Mn混合
Np237	Capture	2.689	2.267	1.550
	Fission	0.3391	0.3257	0.353
Pu238	Capture	1.178	0.9763	0.6315
	Fission	1.280	1.215	1.146
Pu239	Capture	0.977	0.7957	0.4772
	Fission	2.287	2.099	1.790
Pu240	Capture	0.9945	0.833	0.5457
	Fission	0.3964	0.3791	0.3987
Pu241	Capture	0.7598	0.6493	0.4574
	Fission	3.424	3.065	2.4580
Pu242	Capture	0.7709	0.6520	0.4501
	Fission	0.2794	0.2647	2.458
Am241	Capture	2.854	2.412	1.650
	Fission	0.3027	0.2791	0.2979
FP(Pu239)	Capture	0.8708	0.7174	0.4590

表3.5-7 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの差の比較

BOEC

group	rf. bc. dpl	f5. bc. dpl	m5. bc. dpl
1	2.40E-06	2.40E-06	2.50E-06
2	1.14E-05	1.06E-05	1.10E-05
3	2.90E-05	3.10E-05	2.80E-05
4	6.00E-05	6.10E-05	5.20E-05
5	7.20E-05	7.70E-05	6.60E-05
6	1.50E-04	2.10E-04	1.70E-04
7	1.70E-04	2.20E-04	1.90E-04
8	1.20E-04	1.10E-04	1.20E-04
9	1.50E-04	1.40E-04	1.40E-04
10	1.10E-04	6.60E-05	1.00E-05
11	7.70E-05	4.40E-05	-4.70E-05
12	4.90E-05	1.21E-03	-7.20E-05
13	1.90E-05	-7.27E-04	-4.10E-05
14	-2.33E-04	-3.91E-04	-1.17E-03
15	-2.57E-04	-2.72E-04	-2.42E-04
16	-1.55E-04	-1.59E-04	-7.65E-05
17	-1.94E-04	-1.17E-04	-3.43E-05
18	-0.00012	-6.3E-05	-1.5E-05

温度変化； 800K-1500K

EOEC

group	rf. ec. dpl	f5. ec. dpl	m5. ec. dpl
1	2.10E-06	2.10E-06	2.40E-06
2	1.04E-05	9.80E-06	1.10E-05
3	2.60E-05	2.90E-05	2.70E-05
4	5.50E-05	5.70E-05	5.10E-05
5	6.70E-05	7.30E-05	6.50E-05
6	1.50E-04	2.00E-04	1.80E-04
7	1.60E-04	2.30E-04	1.90E-04
8	1.10E-04	1.20E-04	1.40E-04
9	1.50E-04	1.50E-04	1.60E-04
10	1.10E-04	7.80E-05	2.00E-05
11	8.40E-05	8.40E-05	-4.10E-05
12	5.50E-05	3.10E-05	-7.10E-05
13	2.10E-05	1.80E-05	-4.10E-05
14	-2.30E-04	-4.06E-04	-2.80E-04
15	-2.46E-04	-2.79E-04	-2.62E-04
16	-1.94E-04	-1.60E-04	-8.33E-05
17	-1.97E-04	-1.24E-04	-3.77E-05
18	-1.37E-04	-7.12E-05	-1.64E-05

温度変化； 800K-1500K

rf; PuN-AlN炉心
f5; PuN-AlN-50%Fe炉心
m5; PuN-AlN-50%Mo炉心

表3.5-8 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの比の比較

BOEC

group	bc. f5/ref	bc. m5/ref
1	8.50E-01	1.12E+00
2	8.54E-01	1.08E+00
3	9.07E-01	1.04E+00
4	8.61E-01	9.43E-01
5	9.23E-01	1.01E+00
6	1.09E+00	1.23E+00
7	1.18E+00	1.31E+00
8	1.19E+00	1.39E+00
9	1.13E+00	1.22E+00
10	9.59E-01	9.58E-01
11	8.51E-01	7.12E-01
12	7.31E-01	5.58E-01
13	1.16E+00	6.84E-01
14	8.05E-01	3.79E-01
15	7.03E-01	2.29E-01
16	6.39E-01	1.23E-01
17	6.00E-01	9.91E-02
18	5.70E-01	1.21E-01

度変化； 800K-1500K

EOEC

group	ec. f5/ref	ec. m5/ref
1	8.48E-01	1.13E+00
2	8.52E-01	1.08E+00
3	9.05E-01	1.04E+00
4	8.59E-01	9.45E-01
5	9.20E-01	1.01E+00
6	1.09E+00	1.23E+00
7	1.18E+00	1.32E+00
8	1.20E+00	1.40E+00
9	1.13E+00	1.23E+00
10	9.65E-01	9.73E-01
11	8.57E-01	7.25E-01
12	7.36E-01	5.68E-01
13	1.17E+00	6.99E-01
14	8.14E-01	3.89E-01
15	7.12E-01	2.35E-01
16	6.45E-01	1.24E-01
17	6.07E-01	9.73E-02
18	5.67E-01	1.11E-01

度変化； 800K-1500K

rf; PuN-AlN炉心

f5; PuN-AlN-50%Fe炉心

m5; PuN-AlN-50%Mo炉心

表3.5-10 PuN-AlN 炉心におけるK-effに対する密度係数
全炉心

BOEC

core nb	delta-k	k (signf)	k (siga)	k (el+in)	k (diff)
157	4.04E-01	0.00E+00	-2.25E-04	-4.53E-01	8.57E-01
11	3.84E-01	0.00E+00	-2.40E-01	-2.68E-01	8.91E-01
13	3.75E-01	0.00E+00	-2.43E-01	-1.28E-01	7.46E-01
24	-8.33E-01	0.00E+00	-1.46E+00	-2.63E-01	8.91E-01
25	-1.12E+01	0.00E+00	-1.22E+01	-4.24E-01	1.48E+00
26	-1.10E+00	0.00E+00	-1.54E+00	-3.66E-01	8.00E-01
28	-2.02E+00	0.00E+00	-3.29E+00	-2.04E-01	1.48E+00
42	-2.26E+01	0.00E+00	-2.33E+01	-8.40E-01	1.54E+00
948	1.11E+02	3.65E+02	-2.55E+02	-5.89E-01	2.22E+00
949	3.07E+02	6.42E+02	-3.36E+02	-1.03E+00	1.98E+00
940	-3.10E+01	1.12E+02	-1.44E+02	-1.16E+00	2.14E+00
941	5.44E+02	9.74E+02	-4.31E+02	-8.73E-01	1.97E+00
942	-2.80E+01	8.03E+01	-1.09E+02	-1.18E+00	2.20E+00
951	-2.26E+02	1.00E+02	-3.27E+02	-1.46E+00	2.06E+00
999	-8.94E+01	0.00E+00	-9.03E+01	-1.82E+00	2.71E+00

各核種が単位体積あたり 1 モル分増加する場合の反応度への影響
と反応別寄与

表3.5-11 PuN-AlN 炉心におけるK-effに対する密度係数
全炉心 EOEC

rfcore ne	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(el+in)	k(diff)
157	4.41E-01	0.00E+00	-2.25E-04	-4.36E-01	8.76E-01
11	3.73E-01	0.00E+00	-2.47E-01	-2.92E-01	9.12E-01
13	3.75E-01	0.00E+00	-2.46E-01	-1.42E-01	7.63E-01
24	-8.75E-01	0.00E+00	-1.50E+00	-2.90E-01	9.13E-01
25	-1.19E+01	0.00E+00	-1.30E+01	-4.60E-01	1.52E+00
26	-1.16E+00	0.00E+00	-1.58E+00	-4.02E-01	8.20E-01
28	-2.03E+00	0.00E+00	-3.33E+00	-2.25E-01	1.52E+00
42	-2.36E+01	0.00E+00	-2.43E+01	-9.15E-01	1.57E+00
948	1.43E+02	4.05E+02	-2.63E+02	-6.29E-01	2.27E+00
949	3.74E+02	7.22E+02	-3.50E+02	-1.09E+00	2.02E+00
940	-2.60E+01	1.22E+02	-1.49E+02	-1.25E+00	2.19E+00
941	6.52E+02	1.10E+03	-4.46E+02	-9.42E-01	2.01E+00
942	-2.44E+01	8.72E+01	-1.13E+02	-1.26E+00	2.25E+00
951	-2.30E+02	1.09E+02	-3.40E+02	-1.54E+00	2.11E+00
999	-9.39E+01	0.00E+00	-9.47E+01	-1.96E+00	2.77E+00

各核種が単位体積あたり 1 モル分増加する場合の反応度への影響
と反応成分の寄与

表3.5-12 PuN-AlN-50%Fe炉心におけるK-effに対する密度係数
全炉心 BOEC

core nb	delta-k	k(signf)	k(sig a)	k(e1+in)	k(diff)
157	3.39E-01	0.00E+00	-2.11E-04	-6.44E-01	9.83E-01
11	4.66E-01	0.00E+00	-2.76E-01	-2.84E-01	1.03E+00
13	5.62E-01	0.00E+00	-2.53E-01	-1.20E-01	9.35E-01
24	-6.17E-01	0.00E+00	-1.35E+00	-2.49E-01	9.86E-01
25	-8.22E+00	0.00E+00	-9.17E+00	-4.42E-01	1.39E+00
26	-7.68E-01	0.00E+00	-1.18E+00	-3.51E-01	7.68E-01
28	-1.81E+00	0.00E+00	-3.15E+00	-1.91E-01	1.54E+00
42	-1.91E+01	0.00E+00	-2.00E+01	-8.29E-01	1.78E+00
948	1.30E+02	3.61E+02	-2.33E+02	-6.23E-01	2.44E+00
949	3.08E+02	6.12E+02	-3.04E+02	-1.11E+00	2.20E+00
940	-1.50E+01	1.12E+02	-1.28E+02	-1.22E+00	2.35E+00
941	5.15E+02	9.04E+02	-3.91E+02	-9.03E-01	2.19E+00
942	-1.72E+01	7.93E+01	-9.77E+01	-1.23E+00	2.41E+00
951	-1.87E+02	9.60E+01	-2.83E+02	-1.63E+00	2.31E+00
999	-7.38E+01	0.00E+00	-7.49E+01	-1.87E+00	2.98E+00

各核種が単位体積あたり 1 モル分増加する場合の反応度への影響
と反応成分の寄与

表3.5-13 PuN-AlN-50%Fe炉心におけるK-effに対する密度係数
全炉心

EOEC

core nb	delta-k	k (signf)	k (siga)	k (el+in)	k (diff)
157	3.71E-01	0.00E+00	-2.11E-04	-6.30E-01	1.00E+00
11	4.51E-01	0.00E+00	-2.86E-01	-3.08E-01	1.05E+00
13	5.63E-01	0.00E+00	-2.56E-01	-1.33E-01	9.52E-01
24	-6.62E-01	0.00E+00	-1.39E+00	-2.73E-01	1.01E+00
25	-8.89E+00	0.00E+00	-9.84E+00	-4.77E-01	1.43E+00
26	-8.20E-01	0.00E+00	-1.22E+00	-3.84E-01	7.83E-01
28	-1.83E+00	0.00E+00	-3.19E+00	-2.10E-01	1.57E+00
42	-2.00E+01	0.00E+00	-2.09E+01	-9.00E-01	1.81E+00
948	1.61E+02	3.99E+02	-2.40E+02	-6.60E-01	2.48E+00
949	3.70E+02	6.85E+02	-3.16E+02	-1.18E+00	2.24E+00
940	-9.54E+00	1.22E+02	-1.33E+02	-1.30E+00	2.39E+00
941	6.13E+02	1.02E+03	-4.04E+02	-9.70E-01	2.22E+00
942	-1.36E+01	8.59E+01	-1.01E+02	-1.31E+00	2.45E+00
951	-1.90E+02	1.04E+02	-2.95E+02	-1.72E+00	2.35E+00
999	-7.77E+01	0.00E+00	-7.88E+01	-2.01E+00	3.03E+00

各核種が単位体積あたり 1 モル分増加する場合の反応度への影響
と反応成分の寄与

表3.5-14 PuN-A1N-50%Mo炉心におけるK-effに対する密度係数
全炉心 BOEC

m5corenb	delta-k	k(signf)	k(sigga)	k(el+in)	k(diff)
157	-1.49E+00	0.00E+00	-2.30E-04	-2.23E+00	7.39E-01
11	1.45E-01	0.00E+00	-1.31E-01	-4.69E-01	7.44E-01
13	3.41E-01	0.00E+00	-1.91E-01	-1.91E-01	7.23E-01
24	-4.01E-01	0.00E+00	-7.43E-01	-4.03E-01	7.45E-01
25	-2.62E+00	0.00E+00	-2.69E+00	-7.97E-01	8.66E-01
26	-7.39E-01	0.00E+00	-8.12E-01	-5.71E-01	6.44E-01
28	-1.67E+00	0.00E+00	-2.40E+00	-3.05E-01	1.03E+00
42	-8.90E+00	0.00E+00	-8.86E+00	-1.35E+00	1.31E+00
948	1.49E+02	2.91E+02	-1.43E+02	-1.29E+00	1.74E+00
949	2.67E+02	4.46E+02	-1.78E+02	-2.17E+00	1.60E+00
940	2.43E+01	1.01E+02	-7.59E+01	-2.30E+00	1.71E+00
941	3.91E+02	6.16E+02	-2.25E+02	-1.62E+00	1.57E+00
942	1.31E+01	7.30E+01	-5.93E+01	-2.35E+00	1.74E+00
951	-6.29E+01	8.79E+01	-1.49E+02	-3.39E+00	1.66E+00
999	-3.47E+01	0.00E+00	-3.35E+01	-3.34E+00	2.19E+00

各核種が単位体積あたり 1 モル分増加する場合の反応度への影響
と反応成分の寄与

表3.5-15 PuN-AlN-50%Mo炉心のK-effに対する密度係数

全炉心

EOEC

core ne	delta-k	k(signf)	k(sig)	k(e1+in)	k(diff)
157	-1.97E-01	0.00E+00	-5.81E-05	-5.00E-01	3.02E-01
11	1.52E-01	0.00E+00	-3.31E-02	-1.18E-01	3.03E-01
13	2.00E-01	0.00E+00	-4.68E-02	-4.90E-02	2.96E-01
24	2.08E-02	0.00E+00	-1.81E-01	-1.03E-01	3.04E-01
25	-5.37E-01	0.00E+00	-6.75E-01	-1.97E-01	3.35E-01
26	-8.10E-02	0.00E+00	-1.98E-01	-1.44E-01	2.61E-01
28	-2.55E-01	0.00E+00	-5.90E-01	-7.80E-02	4.13E-01
42	-1.97E+00	0.00E+00	-2.16E+00	-3.41E-01	5.33E-01
948	4.14E+01	7.62E+01	-3.52E+01	-3.11E-01	6.98E-01
949	7.24E+01	1.16E+02	-4.38E+01	-5.26E-01	6.42E-01
940	7.98E+00	2.67E+01	-1.88E+01	-5.60E-01	6.94E-01
941	1.05E+02	1.60E+02	-5.53E+01	-4.00E-01	6.26E-01
942	4.84E+00	1.94E+01	-1.47E+01	-5.72E-01	7.03E-01
951	-1.36E+01	2.34E+01	-3.68E+01	-8.11E-01	6.65E-01
999	-8.30E+00	0.00E+00	-8.35E+00	-8.28E-01	8.83E-01

各核種が単位体積あたり 1 モル分存在するときの反応度への影響
と反応成分寄与

表3.5-17 PuN-AlN 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与(BOEC)

全炉心		BOEC				
core dopl	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(e1+in)	k(dr)	k(dz)
1	3.30E-09	0.00E+00	1.00E-09	0.00E+00	1.16E-09	2.10E-09
2	-8.00E-09	0.00E+00	0.00E+00	-1.40E-10	-1.29E-09	-7.00E-09
3	6.60E-08	0.00E+00	-1.00E-08	-7.00E-09	2.77E-08	8.20E-08
4	1.03E-06	0.00E+00	1.00E-08	-1.10E-08	2.63E-07	7.63E-07
5	5.88E-07	0.00E+00	1.00E-08	-4.38E-07	2.45E-07	7.67E-07
6	2.21E-06	0.00E+00	3.40E-07	-4.21E-07	5.21E-07	1.79E-06
7	-1.85E-05	0.00E+00	-2.19E-05	-5.42E-07	8.55E-07	3.08E-06
8	-5.65E-05	0.00E+00	-6.21E-05	-1.52E-06	1.55E-06	5.54E-06
9	-9.49E-05	0.00E+00	-9.95E-05	-2.79E-07	1.07E-06	3.87E-06
10	-5.65E-05	1.13E-05	-7.03E-05	-4.00E-09	5.65E-07	1.97E-06
11	-5.66E-05	2.22E-05	-8.02E-05	1.35E-08	2.88E-07	8.96E-07
12	-4.25E-05	3.05E-05	-7.40E-05	1.07E-07	1.98E-07	6.46E-07
13	-5.88E-06	1.98E-05	-2.58E-05	-1.74E-10	2.16E-08	7.91E-08
14	-1.20E-03	3.60E-04	-1.56E-03	2.19E-06	2.21E-07	2.04E-06
15	-1.92E-04	5.29E-04	-7.21E-04	-7.61E-07	5.49E-08	8.79E-07
16	-2.58E-04	5.53E-04	-8.11E-04	1.00E-08	-2.59E-07	-1.07E-07
17	-4.19E-04	5.53E-04	-9.70E-04	-1.54E-08	-9.55E-07	-1.62E-06
18	-4.48E-04	4.58E-04	-8.99E-04	0.00E+00	-2.52E-06	-4.88E-06
total	-2.85E-03	2.54E-03	-5.40E-03	-1.71E-06	2.17E-06	1.57E-05

温度変化； 800K--1500K

表3.5-18 PuN-AlN 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与 相対値(BOEC)
全炉心

spectrum	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(e1+in)	k(dr)	k(dz)	BOEC
1	1.16E-06	0.00E+00	3.51E-07	0.00E+00	4.06E-07	7.37E-07	
2	-2.81E-06	0.00E+00	0.00E+00	-4.91E-08	-4.53E-07	-2.46E-06	
3	2.32E-05	0.00E+00	-3.51E-06	-2.46E-06	9.73E-06	2.88E-05	
4	3.61E-04	0.00E+00	3.51E-06	-3.86E-06	9.24E-05	2.68E-04	
5	2.06E-04	0.00E+00	3.51E-06	-1.54E-04	8.60E-05	2.69E-04	
6	7.74E-04	0.00E+00	1.19E-04	-1.48E-04	1.83E-04	6.26E-04	
7	-6.49E-03	0.00E+00	-7.68E-03	-1.90E-04	3.00E-04	1.08E-03	
8	-1.98E-02	0.00E+00	-2.18E-02	-5.33E-04	5.44E-04	1.94E-03	
9	-3.33E-02	0.00E+00	-3.49E-02	-9.80E-05	3.76E-04	1.36E-03	
10	-1.98E-02	3.97E-03	-2.47E-02	-1.40E-06	1.98E-04	6.90E-04	
11	-1.99E-02	7.80E-03	-2.81E-02	4.74E-06	1.01E-04	3.14E-04	
12	-1.49E-02	1.07E-02	-2.60E-02	3.75E-05	6.94E-05	2.27E-04	
13	-2.06E-03	6.94E-03	-9.04E-03	-6.11E-08	7.56E-06	2.78E-05	
14	-4.21E-01	1.26E-01	-5.49E-01	7.68E-04	7.75E-05	7.16E-04	
15	-6.75E-02	1.85E-01	-2.53E-01	-2.67E-04	1.92E-05	3.08E-04	
16	-9.06E-02	1.94E-01	-2.85E-01	3.51E-06	-9.09E-05	-3.76E-05	
17	-1.47E-01	1.94E-01	-3.40E-01	-5.40E-06	-3.35E-04	-5.70E-04	
18	-1.57E-01	1.61E-01	-3.15E-01	0.00E+00	-8.83E-04	-1.71E-03	
Total	-9.99E-01	8.90E-01	-1.89E+00	-6.00E-04	7.60E-04	5.52E-03	

表3.5-19 PuN-AlN 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与(EOEC)

全炉心				EOEC		
core dopl	delta·k	k(signf)	k(siga)	k(e1+in)	k(dr)	k(dz)
1	4.60E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.15E-09	1.50E-09
2	-7.00E-09	0.00E+00	1.00E-09	-3.00E-11	-2.12E-09	-6.00E-09
3	7.10E-08	0.00E+00	-4.30E-08	-7.00E-09	2.68E-08	8.30E-08
4	1.03E-06	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-08	2.92E-07	7.76E-07
5	5.71E-07	0.00E+00	1.00E-08	-4.70E-07	2.63E-07	7.82E-07
6	2.21E-06	0.00E+00	3.40E-07	-4.70E-07	5.51E-07	1.78E-06
7	-1.83E-05	0.00E+00	-2.18E-05	-4.91E-07	9.00E-07	3.11E-06
8	-5.63E-05	0.00E+00	-6.21E-05	-1.35E-06	1.62E-06	5.62E-06
9	-9.52E-05	0.00E+00	-1.00E-04	-2.19E-07	1.14E-06	3.92E-06
10	-5.73E-05	9.58E-06	-6.97E-05	9.92E-08	5.89E-07	2.01E-06
11	-5.80E-05	1.85E-05	-7.78E-05	7.42E-08	3.03E-07	9.07E-07
12	-4.53E-05	2.39E-05	-7.01E-05	1.19E-07	2.07E-07	6.60E-07
13	-5.67E-06	1.71E-05	-2.29E-05	-6.16E-09	2.11E-08	8.06E-08
14	-1.25E-03	3.16E-04	-1.57E-03	2.22E-06	1.47E-07	2.12E-06
15	-1.72E-04	4.85E-04	-6.57E-04	-7.99E-07	-5.10E-08	9.60E-07
16	-2.46E-04	4.96E-04	-7.41E-04	1.30E-08	-3.57E-07	-1.87E-08
17	-4.48E-04	5.28E-04	-9.73E-04	-1.29E-08	-1.19E-06	-1.43E-06
18	-4.93E-04	4.92E-04	-9.77E-04	0.00E+00	-3.14E-06	-4.86E-06
total	-2.94E-03	2.39E-03	-5.34E-03	-1.37E-06	1.25E-06	1.65E-05

表3.5-20 PuN-AlN 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)

全炉心

EOEC

spectrum	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(e1+in)	k(dr)	k(dz)
1	1.56E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.91E-07	5.10E-07
2	-2.38E-06	0.00E+00	3.40E-07	-1.02E-08	-7.21E-07	-2.04E-06
3	2.41E-05	0.00E+00	-1.46E-05	-2.38E-06	9.13E-06	2.82E-05
4	3.52E-04	0.00E+00	0.00E+00	-3.40E-06	9.93E-05	2.64E-04
5	1.94E-04	0.00E+00	3.40E-06	-1.60E-04	8.95E-05	2.66E-04
6	7.51E-04	0.00E+00	1.16E-04	-1.60E-04	1.87E-04	6.06E-04
7	-6.22E-03	0.00E+00	-7.41E-03	-1.67E-04	3.06E-04	1.06E-03
8	-1.91E-02	0.00E+00	-2.11E-02	-4.58E-04	5.51E-04	1.91E-03
9	-3.24E-02	0.00E+00	-3.40E-02	-7.44E-05	3.86E-04	1.33E-03
10	-1.95E-02	3.26E-03	-2.37E-02	3.37E-05	2.00E-04	6.84E-04
11	-1.97E-02	6.30E-03	-2.65E-02	2.52E-05	1.03E-04	3.09E-04
12	-1.54E-02	8.12E-03	-2.38E-02	4.05E-05	7.04E-05	2.24E-04
13	-1.93E-03	5.82E-03	-7.79E-03	-2.10E-06	7.17E-06	2.74E-05
14	-4.26E-01	1.07E-01	-5.35E-01	7.55E-04	4.99E-05	7.20E-04
15	-5.86E-02	1.65E-01	-2.24E-01	-2.72E-04	-1.73E-05	3.27E-04
16	-8.36E-02	1.69E-01	-2.52E-01	4.42E-06	-1.22E-04	-6.37E-06
17	-1.52E-01	1.80E-01	-3.31E-01	-4.39E-06	-4.04E-04	-4.88E-04
18	-1.68E-01	1.67E-01	-3.32E-01	0.00E+00	-1.07E-03	-1.65E-03
total	-1.00E+00	8.11E-01	-1.82E+00	-4.66E-04	4.25E-04	5.62E-03

表3.5-21 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与(BOEC)

全炉心				BOEC		
core dop	delta-k	k(signf)	k(sigα)	k(e1+in)	k(dr)	k(dz)
1	2.59E-08	0.00E+00	0.00E+00	-1.10E-10	6.85E-09	1.87E-08
2	-2.74E-06	0.00E+00	-1.62E-06	3.13E-07	-3.82E-07	-1.06E-06
3	2.61E-07	0.00E+00	-5.00E-08	-1.90E-08	8.15E-08	2.33E-07
4	1.45E-06	0.00E+00	0.00E+00	-9.80E-08	3.88E-07	1.17E-06
5	2.71E-06	0.00E+00	1.00E-08	-8.35E-07	8.48E-07	2.67E-06
6	9.54E-06	0.00E+00	5.70E-07	-9.13E-07	2.22E-06	7.59E-06
7	-5.25E-05	0.00E+00	-5.82E-05	-1.20E-06	1.52E-06	5.50E-06
8	-1.55E-04	0.00E+00	-1.60E-04	-3.48E-06	1.78E-06	6.56E-06
9	-2.54E-04	0.00E+00	-2.62E-04	-9.26E-07	1.85E-06	6.73E-06
10	-1.22E-04	1.25E-05	-1.38E-04	1.08E-07	7.13E-07	2.66E-06
11	-8.66E-05	1.99E-05	-1.08E-04	-3.04E-08	2.36E-07	8.00E-07
12	-1.90E-05	2.29E-05	-4.24E-05	5.85E-08	7.87E-08	2.91E-07
13	-3.63E-06	2.23E-05	-2.59E-05	-1.41E-07	3.54E-08	8.62E-08
14	-1.81E-03	2.67E-04	-2.09E-03	7.44E-06	-1.86E-07	7.74E-07
15	-1.22E-04	3.41E-04	-4.62E-04	-6.08E-07	-2.37E-07	-8.79E-08
16	-1.53E-04	3.32E-04	-4.85E-04	-6.50E-09	-3.05E-07	-4.23E-07
17	-2.34E-04	3.17E-04	-5.50E-04	-2.90E-09	-7.16E-07	-1.27E-06
18	-2.54E-04	2.83E-04	-5.31E-04	0.00E+00	-1.76E-06	-3.18E-06
total	-0.00326	0.001618	-0.00491	-4E-07	6.19E-06	2.91E-05

温度変化； 800K-1500K

表3.5-22 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与
相対値(BOEC)

全炉心

spectrum	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(el+in)	k(dr)	BOEC k(dz)
1	7.94E-06	0.00E+00	0.00E+00	-3.37E-08	2.10E-06	5.74E-06
2	-8.42E-04	0.00E+00	-4.96E-04	9.60E-05	-1.17E-04	-3.24E-04
3	8.01E-05	0.00E+00	-1.53E-05	-5.83E-06	2.50E-05	7.15E-05
4	4.45E-04	0.00E+00	0.00E+00	-3.01E-05	1.19E-04	3.59E-04
5	8.31E-04	0.00E+00	3.07E-06	-2.56E-04	2.60E-04	8.20E-04
6	2.93E-03	0.00E+00	1.75E-04	-2.80E-04	6.80E-04	2.33E-03
7	-1.61E-02	0.00E+00	-1.78E-02	-3.67E-04	4.67E-04	1.69E-03
8	-4.75E-02	0.00E+00	-4.90E-02	-1.07E-03	5.46E-04	2.01E-03
9	-7.80E-02	0.00E+00	-8.03E-02	-2.84E-04	5.67E-04	2.06E-03
10	-3.74E-02	3.84E-03	-4.23E-02	3.32E-05	2.19E-04	8.16E-04
11	-2.66E-02	6.10E-03	-3.30E-02	-9.33E-06	7.24E-05	2.45E-04
12	-5.84E-03	7.03E-03	-1.30E-02	1.79E-05	2.41E-05	8.94E-05
13	-1.11E-03	6.84E-03	-7.95E-03	-4.32E-05	1.09E-05	2.64E-05
14	-5.56E-01	8.18E-02	-6.40E-01	2.28E-03	-5.70E-05	2.37E-04
15	-3.75E-02	1.05E-01	-1.42E-01	-1.87E-04	-7.27E-05	-2.69E-05
16	-4.70E-02	1.02E-01	-1.49E-01	-1.99E-06	-9.37E-05	-1.30E-04
17	-7.18E-02	9.74E-02	-1.69E-01	-8.90E-07	-2.20E-04	-3.90E-04
18	-7.78E-02	8.68E-02	-1.63E-01	0.00E+00	-5.41E-04	-9.75E-04
total	-9.99E-01	4.96E-01	-1.51E+00	-1.23E-04	1.90E-03	8.91E-03

温度変化； 800K-1500K

表3.5-23 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与(EOEC)

全炉心

EOEC

core dop	delta-k	k(signf)	k(sigα)	k(el+in)	k(dr)	k(dz)
1	2.71E-08	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-10	7.54E-09	1.88E-08
2	-2.76E-06	0.00E+00	-1.60E-06	3.17E-07	-4.19E-07	-1.06E-06
3	2.61E-07	0.00E+00	-4.20E-08	-3.20E-08	8.92E-08	2.34E-07
4	1.50E-06	0.00E+00	0.00E+00	-1.20E-07	4.21E-07	1.17E-06
5	2.68E-06	0.00E+00	0.00E+00	-9.20E-07	8.98E-07	2.69E-06
6	9.61E-06	0.00E+00	6.70E-07	-9.90E-07	2.31E-06	7.61E-06
7	-5.22E-05	0.00E+00	-5.82E-05	-1.14E-06	1.57E-06	5.52E-06
8	-1.55E-04	0.00E+00	-1.60E-04	-3.18E-06	1.82E-06	6.61E-06
9	-2.56E-04	0.00E+00	-2.64E-04	-8.04E-07	1.91E-06	6.86E-06
10	-1.24E-04	1.10E-05	-1.39E-04	2.71E-07	7.20E-07	2.72E-06
11	-8.91E-05	1.67E-05	-1.07E-04	4.20E-09	2.43E-07	8.23E-07
12	-2.10E-05	1.85E-05	-3.99E-05	6.94E-08	7.70E-08	3.00E-07
13	-3.32E-06	1.99E-05	-2.32E-05	-1.52E-07	3.70E-08	8.78E-08
14	-1.92E-03	2.39E-04	-2.17E-03	7.81E-06	-2.69E-07	8.66E-07
15	-1.10E-04	3.19E-04	-4.29E-04	-6.50E-07	-3.11E-07	-1.62E-08
16	-1.50E-04	3.03E-04	-4.52E-04	-3.00E-09	-3.65E-07	-3.56E-07
17	-2.54E-04	3.10E-04	-5.62E-04	-3.00E-10	-8.51E-07	-1.18E-06
18	-2.81E-04	3.04E-04	-5.80E-04	0.00E+00	-2.15E-06	-3.21E-06
total	-3.40E-03	1.54E-03	-4.98E-03	4.60E-07	5.71E-06	2.97E-05

温度変化； 800K--1500K

表3.5-24 PuN-AlN-50%Fe 廉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与
相対値(EOEC)

全炉心

spectrum	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(el+in)	k(dr)	EOEC k(dz)
1	7.97E-06	0.00E+00	0.00E+00	2.94E-08	2.22E-06	5.53E-06
2	-8.13E-04	0.00E+00	-4.71E-04	9.33E-05	-1.23E-04	-3.11E-04
3	7.68E-05	0.00E+00	-1.24E-05	-9.41E-06	2.62E-05	6.88E-05
4	4.40E-04	0.00E+00	0.00E+00	-3.53E-05	1.24E-04	3.44E-04
5	7.87E-04	0.00E+00	0.00E+00	-2.71E-04	2.64E-04	7.90E-04
6	2.83E-03	0.00E+00	1.97E-04	-2.91E-04	6.80E-04	2.24E-03
7	-1.54E-02	0.00E+00	-1.71E-02	-3.36E-04	4.61E-04	1.62E-03
8	-4.55E-02	0.00E+00	-4.71E-02	-9.34E-04	5.35E-04	1.95E-03
9	-7.53E-02	0.00E+00	-7.76E-02	-2.37E-04	5.62E-04	2.02E-03
10	-3.64E-02	3.23E-03	-4.07E-02	7.98E-05	2.12E-04	8.01E-04
11	-2.62E-02	4.92E-03	-3.14E-02	1.24E-06	7.14E-05	2.42E-04
12	-6.17E-03	5.43E-03	-1.17E-02	2.04E-05	2.27E-05	8.84E-05
13	-9.76E-04	5.86E-03	-6.83E-03	-4.47E-05	1.09E-05	2.58E-05
14	-5.64E-01	7.03E-02	-6.37E-01	2.30E-03	-7.91E-05	2.55E-04
15	-3.24E-02	9.39E-02	-1.26E-01	-1.91E-04	-9.15E-05	-4.76E-06
16	-4.42E-02	8.90E-02	-1.33E-01	-8.82E-07	-1.07E-04	-1.05E-04
17	-7.47E-02	9.12E-02	-1.65E-01	-8.82E-08	-2.50E-04	-3.46E-04
18	-8.27E-02	8.94E-02	-1.70E-01	0.00E+00	-6.31E-04	-9.43E-04
total	-1.00111	0.453471	-1.465	0.000135	0.001681	0.008747

温度変化； 800K--1500K

表3.5-25 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与(BOEC)

全炉心							BOEC
core dop	delta-k	k(signf)	k(sigα)	k(e1+in)	k(dr)	k(dz)	
1	7.00E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.00E-10	
2	-1.00E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.57E-09	-5.30E-09	
3	6.10E-08	0.00E+00	-3.10E-08	-2.30E-08	2.55E-08	7.70E-08	
4	7.64E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.82E-07	5.76E-07	
5	3.41E-07	0.00E+00	0.00E+00	-3.88E-07	1.71E-07	5.47E-07	
6	1.57E-06	0.00E+00	4.00E-07	-7.70E-07	4.65E-07	1.58E-06	
7	-2.13E-05	0.00E+00	-2.16E-05	-2.97E-06	7.36E-07	2.55E-06	
8	-6.60E-05	0.00E+00	-6.56E-05	-8.76E-06	1.84E-06	6.36E-06	
9	-8.78E-05	0.00E+00	-9.14E-05	-2.00E-06	1.27E-06	4.47E-06	
10	-1.20E-04	1.51E-05	-1.35E-04	-4.70E-06	9.32E-07	3.38E-06	
11	-1.61E-04	2.58E-05	-1.89E-04	-1.06E-06	7.63E-07	2.62E-06	
12	-1.90E-04	3.11E-05	-2.26E-04	3.70E-06	2.74E-07	1.02E-06	
13	-1.12E-04	2.14E-05	-1.34E-04	1.71E-07	2.96E-08	1.98E-07	
14	-7.22E-04	2.10E-04	-9.31E-04	1.18E-06	-8.92E-07	-1.14E-06	
15	-4.80E-04	1.69E-04	-6.47E-04	1.53E-06	-6.67E-07	-2.12E-06	
16	-1.74E-04	1.17E-04	-2.89E-04	6.10E-09	-4.63E-07	-1.41E-06	
17	-6.70E-05	9.31E-05	-1.58E-04	2.39E-08	-6.07E-07	-1.57E-06	
18	-7.46E-05	9.07E-05	-1.62E-04	0.00E+00	-1.14E-06	-2.37E-06	
total	-2.27E-03	7.72E-04	-3.05E-03	-1.39E-05	2.89E-06	1.48E-05	

温度変化； 800K--1500K

表3.5-26 PuN-AlN-50%Mo 庫心の Doppler反応度の群別・反応別寄与
相対値(BOEC)

全炉心

spectrum	delta-k	k(signf)	k(sig)	k(el+in)	k(dr)	k(dz)	BOEC
1	3.08E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.32E-07	
2	-4.41E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.13E-06	-2.33E-06	
3	2.69E-05	0.00E+00	-1.37E-05	-1.01E-05	1.12E-05	3.39E-05	
4	3.37E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.03E-05	2.54E-04	
5	1.50E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.71E-04	7.52E-05	2.41E-04	
6	6.91E-04	0.00E+00	1.76E-04	-3.39E-04	2.05E-04	6.96E-04	
7	-9.38E-03	0.00E+00	-9.53E-03	-1.31E-03	3.24E-04	1.12E-03	
8	-2.91E-02	0.00E+00	-2.89E-02	-3.86E-03	8.10E-04	2.80E-03	
9	-3.87E-02	0.00E+00	-4.03E-02	-8.82E-04	5.60E-04	1.97E-03	
10	-5.28E-02	6.66E-03	-5.93E-02	-2.07E-03	4.10E-04	1.49E-03	
11	-7.08E-02	1.13E-02	-8.31E-02	-4.69E-04	3.36E-04	1.15E-03	
12	-8.36E-02	1.37E-02	-9.95E-02	1.63E-03	1.21E-04	4.50E-04	
13	-4.95E-02	9.41E-03	-5.91E-02	7.53E-05	1.30E-05	8.71E-05	
14	-3.18E-01	9.25E-02	-4.10E-01	5.20E-04	-3.93E-04	-5.04E-04	
15	-2.11E-01	7.43E-02	-2.85E-01	6.74E-04	-2.94E-04	-9.32E-04	
16	-7.65E-02	5.15E-02	-1.27E-01	2.69E-06	-2.04E-04	-6.21E-04	
17	-2.95E-02	4.10E-02	-6.96E-02	1.05E-05	-2.67E-04	-6.91E-04	
18	-3.28E-02	4.00E-02	-7.13E-02	0.00E+00	-5.02E-04	-1.04E-03	
total	-1.00E+00	3.40E-01	-1.34E+00	-6.13E-03	1.27E-03	6.50E-03	

温度変化； 800K--1500K

表3.5-27 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与(EOEC)

金炉心				EOEC		
core dop	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(el+in)	k(dr)	k(dz)
1	5.00E-10	0.00E+00	0.00E+00	1.00E-10	1.00E-11	2.00E-10
2	-1.20E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.39E-09	-8.00E-09
3	7.30E-08	0.00E+00	-4.00E-08	-1.00E-09	2.79E-08	7.70E-08
4	7.87E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.96E-07	5.89E-07
5	3.10E-07	0.00E+00	0.00E+00	-4.40E-07	1.77E-07	5.59E-07
6	1.58E-06	0.00E+00	3.10E-07	-8.10E-07	4.83E-07	1.58E-06
7	-2.13E-05	0.00E+00	-2.15E-05	-3.00E-06	7.54E-07	2.55E-06
8	-6.62E-05	0.00E+00	-6.56E-05	-8.77E-06	1.89E-06	6.46E-06
9	-8.85E-05	0.00E+00	-9.23E-05	-1.99E-06	1.30E-06	4.54E-06
10	-1.22E-04	1.41E-05	-1.36E-04	-4.60E-06	9.17E-07	3.48E-06
11	-1.65E-04	2.38E-05	-1.92E-04	-8.82E-07	7.48E-07	2.73E-06
12	-1.97E-04	2.82E-05	-2.31E-04	3.97E-06	2.40E-07	1.08E-06
13	-1.18E-04	1.94E-05	-1.38E-04	1.83E-07	2.34E-08	2.10E-07
14	-7.69E-04	2.00E-04	-9.68E-04	1.25E-06	-1.21E-06	-9.96E-07
15	-5.15E-04	1.68E-04	-6.82E-04	1.78E-06	-8.89E-07	-2.04E-06
16	-1.87E-04	1.18E-04	-3.03E-04	8.30E-09	-5.88E-07	-1.37E-06
17	-7.27E-05	9.74E-05	-1.68E-04	2.93E-08	-7.63E-07	-1.54E-06
18	-8.12E-05	1.01E-04	-1.78E-04	0.00E+00	-1.47E-06	-2.45E-06
total	-2.40E-03	7.70E-04	-3.18E-03	-1.34E-05	1.84E-06	1.54E-05

温度変化; 800K-1500K

表3.5-28 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与
相対値(EOEC)

全炉心

spectrum	delta-k	k(signf)	k(sig)	k(e1+in)	k(dr)	EOEC	k(dz)
1	2.08E-07	0.00E+00	0.00E+00	4.17E-03	4.17E-09	8.33E-08	
2	-5.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.41E-06	-3.33E-06	
3	3.04E-05	0.00E+00	-1.67E-05	-4.17E-07	1.16E-05	3.21E-05	
4	3.28E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.15E-05	2.45E-04	
5	1.29E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.83E-04	7.36E-05	2.33E-04	
6	6.57E-04	0.00E+00	1.29E-04	-3.38E-04	2.01E-04	6.59E-04	
7	-8.87E-03	0.00E+00	-8.97E-03	-1.25E-03	3.14E-04	1.06E-03	
8	-2.76E-02	0.00E+00	-2.73E-02	-3.65E-03	7.86E-04	2.69E-03	
9	-3.69E-02	0.00E+00	-3.85E-02	-8.27E-04	5.42E-04	1.89E-03	
10	-5.09E-02	5.85E-03	-5.67E-02	-1.92E-03	3.82E-04	1.45E-03	
11	-6.89E-02	9.93E-03	-7.99E-02	-3.67E-04	3.12E-04	1.14E-03	
12	-8.22E-02	1.18E-02	-9.62E-02	1.65E-03	9.99E-05	4.52E-04	
13	-4.92E-02	8.06E-03	-5.74E-02	7.62E-05	9.75E-06	8.73E-05	
14	-3.20E-01	8.35E-02	-4.04E-01	5.23E-04	-5.04E-04	-4.15E-04	
15	-2.15E-01	7.01E-02	-2.84E-01	7.40E-04	-3.70E-04	-8.50E-04	
16	-7.81E-02	4.90E-02	-1.26E-01	3.46E-06	-2.45E-04	-5.70E-04	
17	-3.03E-02	4.06E-02	-7.00E-02	1.22E-05	-3.18E-04	-6.40E-04	
18	-3.38E-02	4.19E-02	-7.41E-02	0.00E+00	-6.14E-04	-1.02E-03	
total	-1.00E+00	3.21E-01	-1.32E+00	-5.57E-03	7.66E-04	6.43E-03	

温度変化； 800K--1500K

表3.5.-29 PuN-AlN炉心のDoppler反応度への核種別寄与

全炉心

BOEC

core dop	delta-k	k(signf)	k(sigα)	k(el+in)	k(diff)
N15	-3.87E-04	0.00E+00	-1.00E-10	-1.00E-07	-3.87E-04
Na	-3.35E-04	0.00E+00	-1.18E-04	0.00E+00	-2.19E-04
Al	-2.11E-03	0.00E+00	-1.78E-03	0.00E+00	-3.33E-04
Cr	-1.69E-02	0.00E+00	-1.71E-02	0.00E+00	2.04E-04
Mn	-2.90E-02	0.00E+00	-2.84E-02	0.00E+00	-5.13E-04
Fe	-6.77E-02	0.00E+00	-6.81E-02	0.00E+00	3.69E-04
Ni	-1.46E-02	0.00E+00	-1.51E-02	0.00E+00	5.39E-04
Mo	-1.60E-01	0.00E+00	-1.59E-01	0.00E+00	-9.56E-04
Pu238	-4.60E-03	2.50E-03	-6.40E-03	0.00E+00	-5.09E-04
Pu239	5.09E-02	2.26E+00	-2.20E+00	0.00E+00	-3.48E-03
Pu240	-2.05E+00	1.28E-01	-2.18E+00	0.00E+00	-4.25E-03
Pu241	1.62E-01	3.71E-01	-2.09E-01	0.00E+00	5.20E-05
Pu242	-6.15E-01	9.15E-03	-6.21E-01	0.00E+00	-3.25E-03
Am241	-5.06E-02	7.50E-04	-5.12E-02	0.00E+00	-1.23E-04
FP lumped	-4.30E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.90E-04

各核種が単位体積あたり1モル分存在するときの潜在寄与
温度変化； 800K--1500K

表3.5-30 PuN-AlN炉心のDoppler反応度への核種別寄与
全炉心

EOEC

total cor	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(e1+in)	k(diff)
N15	-3.61E-04	0.00E+00	-6.88E-08	8.55E-04	-2.10E-06
Na	-2.87E-04	0.00E+00	-1.40E-04	-9.10E-05	-1.46E-04
Al	-2.29E-03	0.00E+00	-1.87E-03	-1.68E-04	-3.33E-04
Cr	-1.71E-02	0.00E+00	-1.74E-02	-6.53E-05	-2.05E-05
Mn	-2.79E-02	0.00E+00	-2.09E-02	1.04E-05	-2.55E-04
Fe	-7.10E-02	0.00E+00	-7.04E-02	6.60E-06	-1.38E-04
Ni	-1.54E-02	0.00E+00	-1.50E-02	-5.53E-05	2.54E-04
Mo	-1.71E-01	0.00E+00	-1.72E-01	6.72E-04	-7.84E-04
Pu238	3.30E-02	-1.10E-01	-4.24E-02	4.13E-04	4.18E-04
Pu239	1.49E-01	2.79E+00	-2.18E+00	2.81E-04	-3.86E-03
Pu240	-2.30E+00	1.80E-01	-2.59E+00	4.05E-04	-4.19E-03
Pu241	1.47E+00	9.14E-01	-2.43E-02	7.21E-04	6.33E-04
Pu242	-7.03E-01	4.34E-02	-6.95E-01	5.53E-05	-3.41E-03
Am241	-8.26E-02	-6.46E-02	8.76E-02	1.28E-03	-8.10E-05
FP lumped	-3.56E-02	0.00E+00	-1.98E-02	1.88E-04	1.04E-03

各核種が単位体積あたり1モル分増加する場合の潜在寄与
と反応成分の寄与

温度変化； 800K--1500K

表3.5-31 PuN-AlN-50%Fe炉心のDoppler反応度への核種別寄与
全炉心 BOEC

core dop	delta-k	k(signf)	k(sig-a)	k(el+in)	k(diff)
N15	-8.42E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-07	-8.41E-04
Na	-6.76E-04	0.00E+00	-1.25E-04	0.00E+00	-5.51E-04
Al	-2.35E-03	0.00E+00	-1.56E-03	0.00E+00	-7.92E-04
Cr	-1.46E-02	0.00E+00	-1.47E-02	0.00E+00	7.57E-05
Mn	-2.12E-02	0.00E+00	-2.03E-02	0.00E+00	-8.23E-04
Fe	-5.46E-02	0.00E+00	-5.47E-02	0.00E+00	7.97E-05
Ni	-1.47E-02	0.00E+00	-1.50E-02	0.00E+00	3.07E-04
Mo	-9.27E-02	0.00E+00	-9.08E-02	0.00E+00	-1.91E-03
Pu238	-3.32E-03	9.00E-04	-2.80E-03	0.00E+00	-1.74E-03
Pu239	5.67E-02	1.35E+00	-1.29E+00	0.00E+00	-4.31E-03
Pu240	-1.20E+00	9.01E-02	-1.29E+00	0.00E+00	-5.73E-03
Pu241	9.67E-02	2.18E-01	-1.21E-01	0.00E+00	-1.40E-03
Pu242	-3.69E-01	5.78E-03	-3.71E-01	0.00E+00	-4.30E-03
Am241	-2.97E-02	3.30E-04	-2.85E-02	0.00E+00	-1.53E-03
FP_lumped	-1.90E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.91E-03

各核種が単位体積あたり1モル分存在するときの潜在寄与
温度変化範囲； 800K--1500K

表3.5-32 PuN-AlN-50%Fe炉心のDoppler反応度への核種別寄与
全炉心 EOEC

core dop	delta·k	k(signf)	k(siga)	k(el+in)	k(diff)
N15	-8.50E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.10E-06	-8.50E-04
Na	-6.80E-04	0.00E+00	-1.26E-04	0.00E+00	-5.54E-04
Al	-2.40E-03	0.00E+00	-1.60E-03	0.00E+00	-7.98E-04
Cr	-1.51E-02	0.00E+00	-1.52E-02	0.00E+00	8.43E-05
Mn	-2.23E-02	0.00E+00	-2.14E-02	0.00E+00	-8.42E-04
Fe	-5.72E-02	0.00E+00	-5.73E-02	0.00E+00	9.01E-05
Ni	-1.49E-02	0.00E+00	-1.52E-02	0.00E+00	3.29E-04
Mo	-1.03E-01	0.00E+00	-1.01E-01	0.00E+00	-1.98E-03
Pu239	-3.50E-03	1.00E-03	-2.80E-03	0.00E+00	-1.74E-03
Pu239	1.57E-01	1.45E+00	-1.29E+00	0.00E+00	-4.59E-03
Pu240	-1.36E+00	1.05E-01	-1.46E+00	0.00E+00	-6.20E-03
Pu241	1.15E-01	2.35E-01	-1.20E-01	0.00E+00	-1.37E-03
Pu242	-4.20E-01	6.85E-03	-4.22E-01	0.00E+00	-4.64E-03
Am241	-3.48E-02	8.20E-04	-3.41E-02	0.00E+00	-1.53E-03
FP lumped	-1.76E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.89E-03

各核種が単位体積あたり1モル分存在するときの潜在寄与
温度範囲 ; 800K--1500K

表3.5-33 PuN-A1N-50%Mo炉心のDoppler反応度への核種別寄与
全炉心 BOEC

core dop	delta-k	k(signf)	k(sig a)	k(e1+in)	k(diff)
N15	-3.48E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-06	-3.48E-04
Na	-2.45E-04	0.00E+00	-9.85E-05	0.00E+00	-1.47E-04
A1	-1.15E-03	0.00E+00	-7.41E-04	0.00E+00	-4.08E-04
Cr	-6.30E-03	0.00E+00	-6.39E-03	0.00E+00	8.75E-05
Mn	-6.45E-03	0.00E+00	-7.03E-03	0.00E+00	5.84E-04
Fe	-2.13E-02	0.00E+00	-2.16E-02	0.00E+00	3.14E-04
Ni	-8.90E-03	0.00E+00	-9.18E-03	0.00E+00	2.76E-04
Mo	-9.44E-02	0.00E+00	-9.39E-02	0.00E+00	-5.06E-04
Pu238	-9.40E-04	7.00E-04	-1.77E-03	0.00E+00	-1.83E-04
Pu239	9.86E-02	4.51E-01	-3.50E-01	0.00E+00	-2.61E-03
Pu240	-2.52E-01	3.91E-02	-2.87E-01	0.00E+00	-3.93E-03
Pu241	4.58E-02	8.48E-02	-3.80E-02	0.00E+00	-8.60E-05
Pu242	-9.53E-02	2.30E-03	-9.49E-02	0.00E+00	-2.62E-03
Am241	-6.75E-03	2.50E-04	-6.65E-03	0.00E+00	-6.90E-05
FP lumped	1E-05	0	0	0	6E-06

各核種が単位体積あたり 1 モル分存在するときの潜在寄与
温度変化 800K -- 1500K に対する反応度変化分

表3.5-34 PuN-AlN-50%Mo炉心のDoppler反応度への核種別寄与
全炉心 EOEC

core dop	delta-k	k(signf)	k(siga)	k(e1+in)	k(diff)
N15	-3.44E-04	0.00E+00	0.00E+00	-1.00E-06	-3.47E-04
Na	-2.42E-04	0.00E+00	-1.00E-04	0.00E+00	-1.43E-04
Al	-1.18E-03	0.00E+00	-7.67E-04	0.00E+00	-4.12E-04
Cr	-6.55E-03	0.00E+00	-6.65E-03	0.00E+00	9.65E-05
Mn	-6.81E-03	0.00E+00	-7.44E-03	0.00E+00	6.35E-04
Fe	-2.23E-02	0.00E+00	-2.26E-02	0.00E+00	3.39E-04
Ni	-9.02E-03	0.00E+00	-9.32E-03	0.00E+00	3.07E-04
Mo	-1.01E-01	0.00E+00	-1.00E-01	0.00E+00	-5.12E-04
Pu238	-1.03E-03	6.00E-04	-1.54E-03	0.00E+00	-1.16E-04
Pu239	1.28E-01	4.91E-01	-3.60E-01	0.00E+00	-2.80E-03
Pu240	-2.77E-01	4.45E-02	-3.17E-01	0.00E+00	-4.30E-03
Pu241	5.05E-02	8.91E-02	-3.81E-02	0.00E+00	1.16E-05
Pu242	-1.06E-01	2.66E-03	-1.06E-01	0.00E+00	-2.85E-03
Am241	-8.04E-03	5.00E-05	-8.36E-03	0.00E+00	-6.60E-06
FP lumped	9.00E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.40E-05

各核種が単位体積あたり1モル分存在するときの潜在寄与
温度範囲 ; 800K~1500K

表3.5-33 核種毎のドップラー効果潜在能力の比較－平衡サイクル炉心(EOEC)－

核種	温度変化 800Kから 1500Kに対する反応度変化 (核種はどれも 1モル分存在するように規格化)		
	PuN-AlN炉心	PuN-AlN-50%Fe炉心	PuN-AlN-50%Mo炉心
N15	-3.60E-04	-8.50E-04	-3.44E-04
Na	-2.87E-04	-6.80E-04	-2.42E-04
Al	-2.29E-04	-2.40E-04	-11.88E-04
Cr	-1.71E-02	-1.51E-02	-0.655E-02
Mn	-2.79E-02	-2.23E-02	-0.681E-02
Fe	-7.10E-02	-5.72E-02	-2.23E-02
Ni	-1.54E-02	-1.49E-02	-0.902E-02
Mo	-1.71E-01	-1.03E-01	-1.01E-01
Pu238	+3.30E-02	-0.35E-02	-0.103E-02
Pu239	+1.49E-01	+1.57E-01	+1.28E-01
Pu240	-2.30	-1.36	-0.277
Pu241	+1.47	+0.115	+0.0505
Pu242	-7.03E-01	-4.20E-01	-1.06E-01
Am241	-8.26E-02	-3.48E-02	-8.04E-02
FP lumped	-3.56E-02	-0.176E-02	+0.009E-02

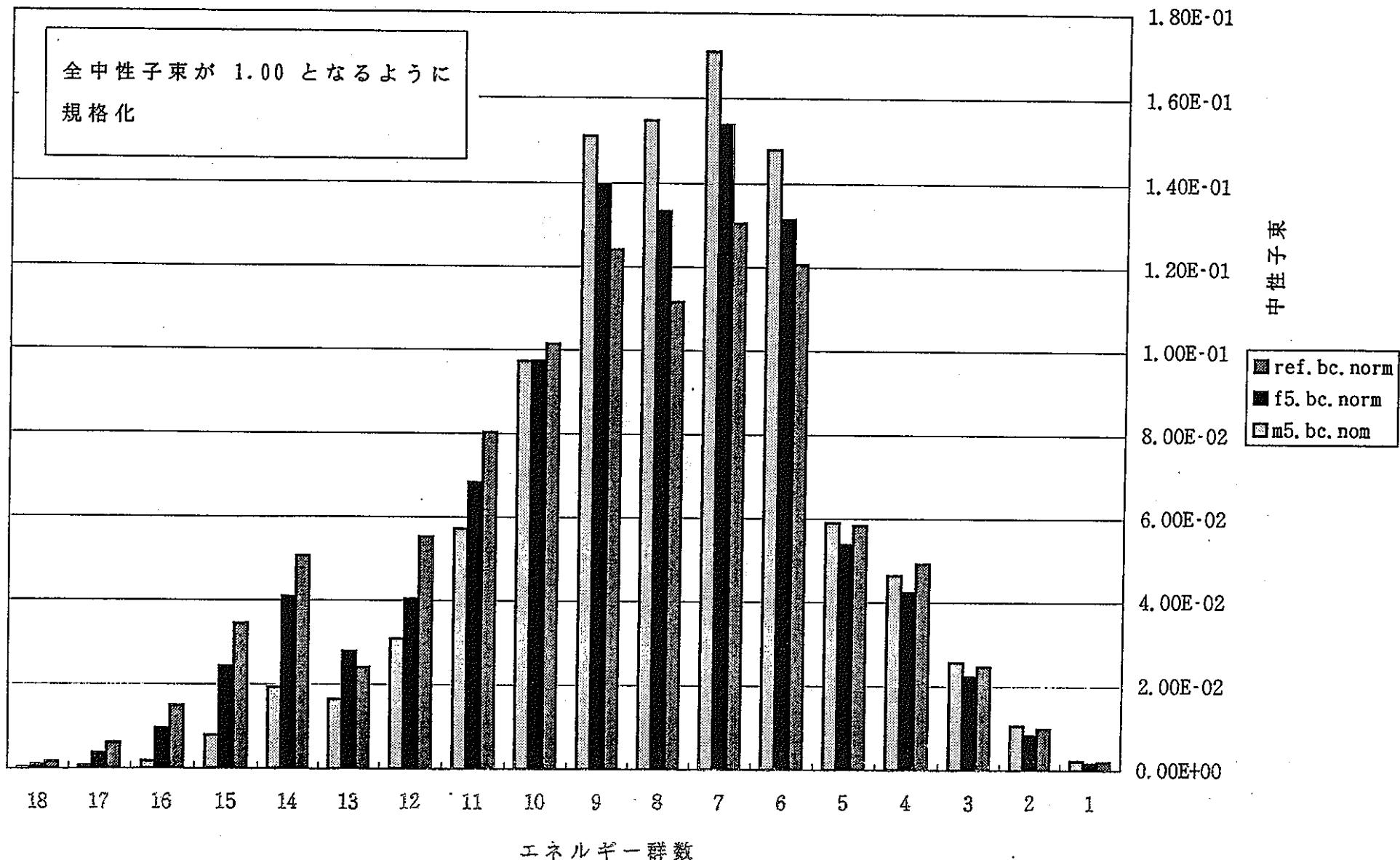


図3.5-1 炉心中央領域の中性子スペクトルの比較(BOEC)

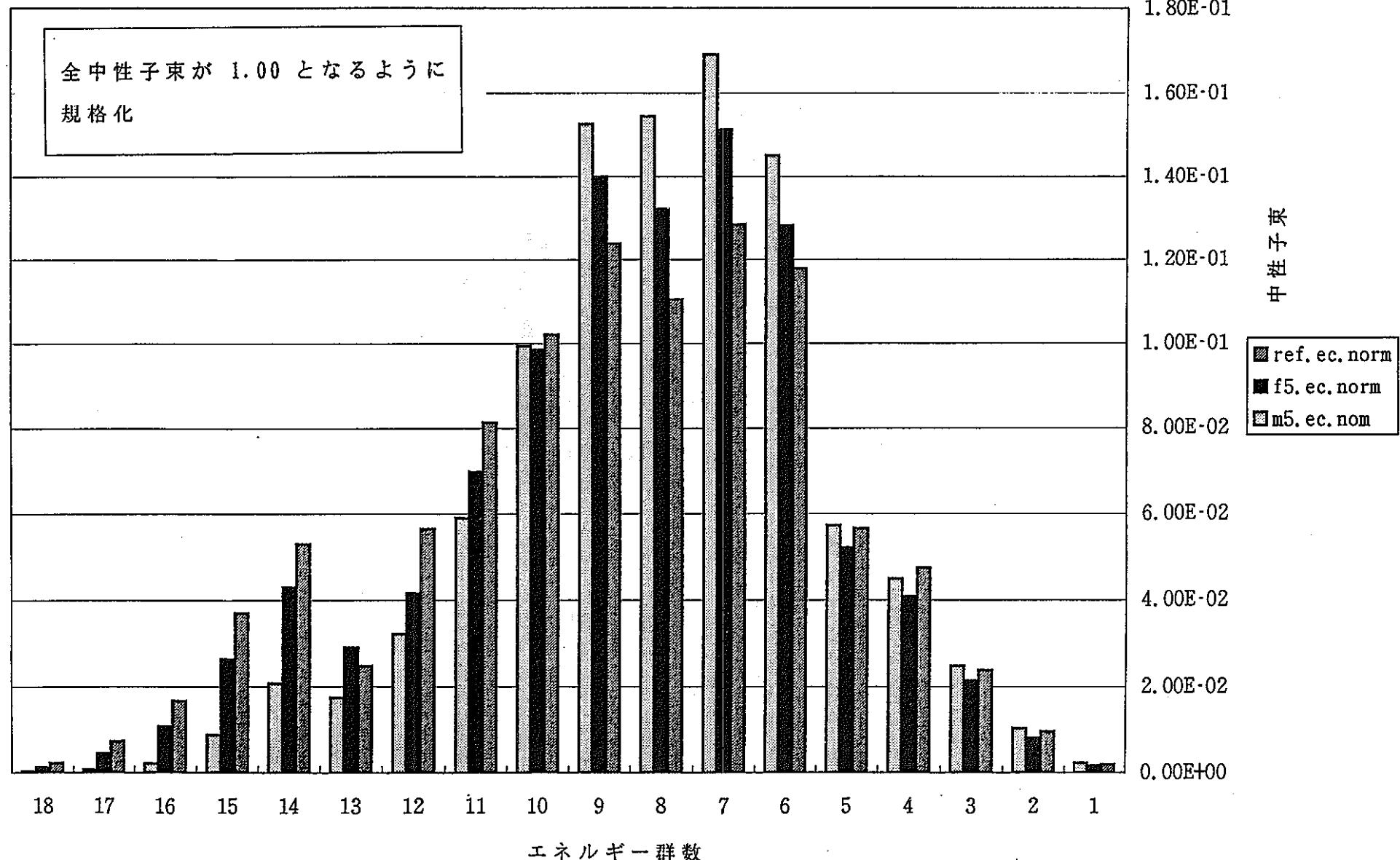


図3.5-2 炉心中央領域の中性子スペクトルの比較(EOEC)

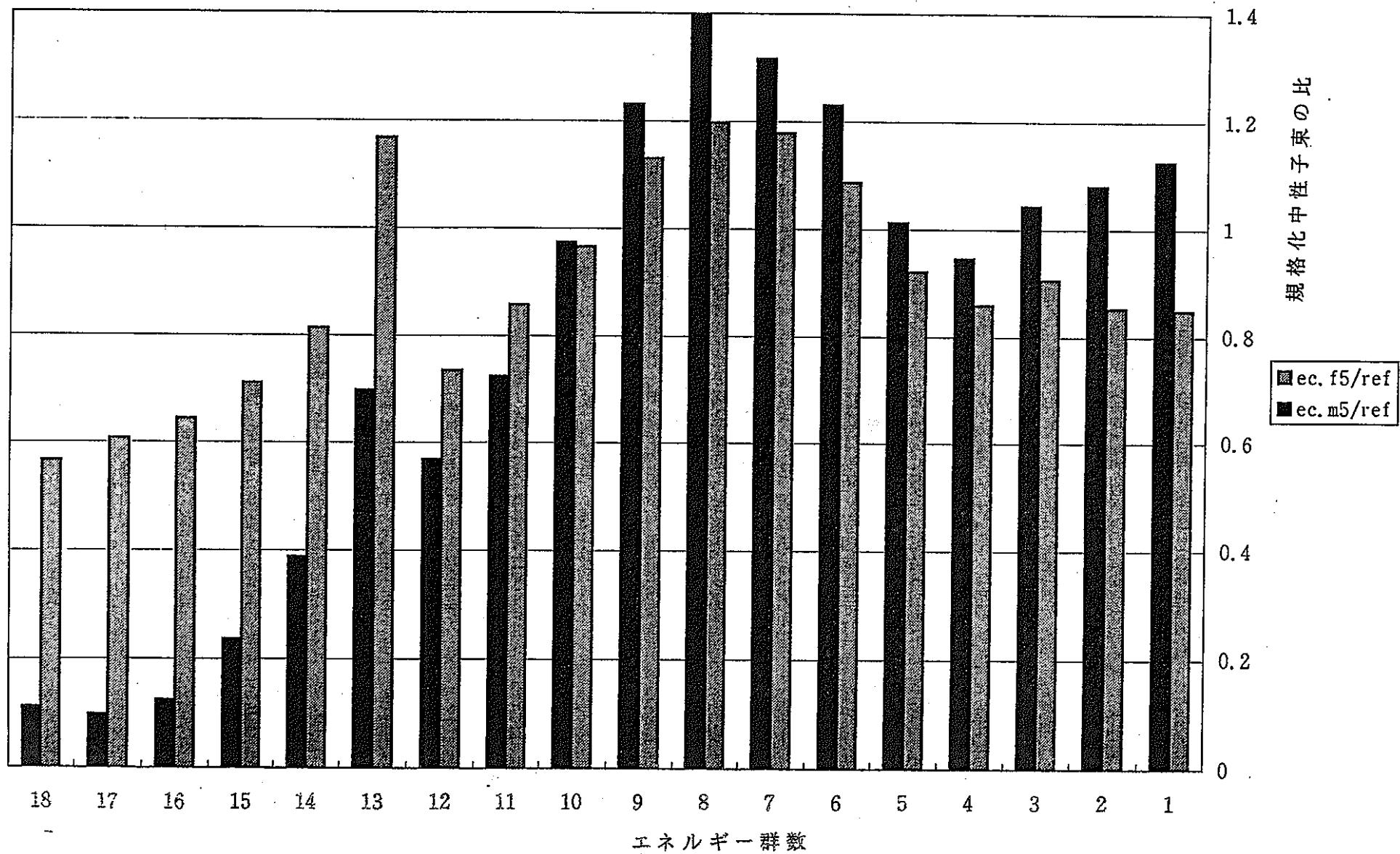


図3.5-3 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの比の比較(EOEC)

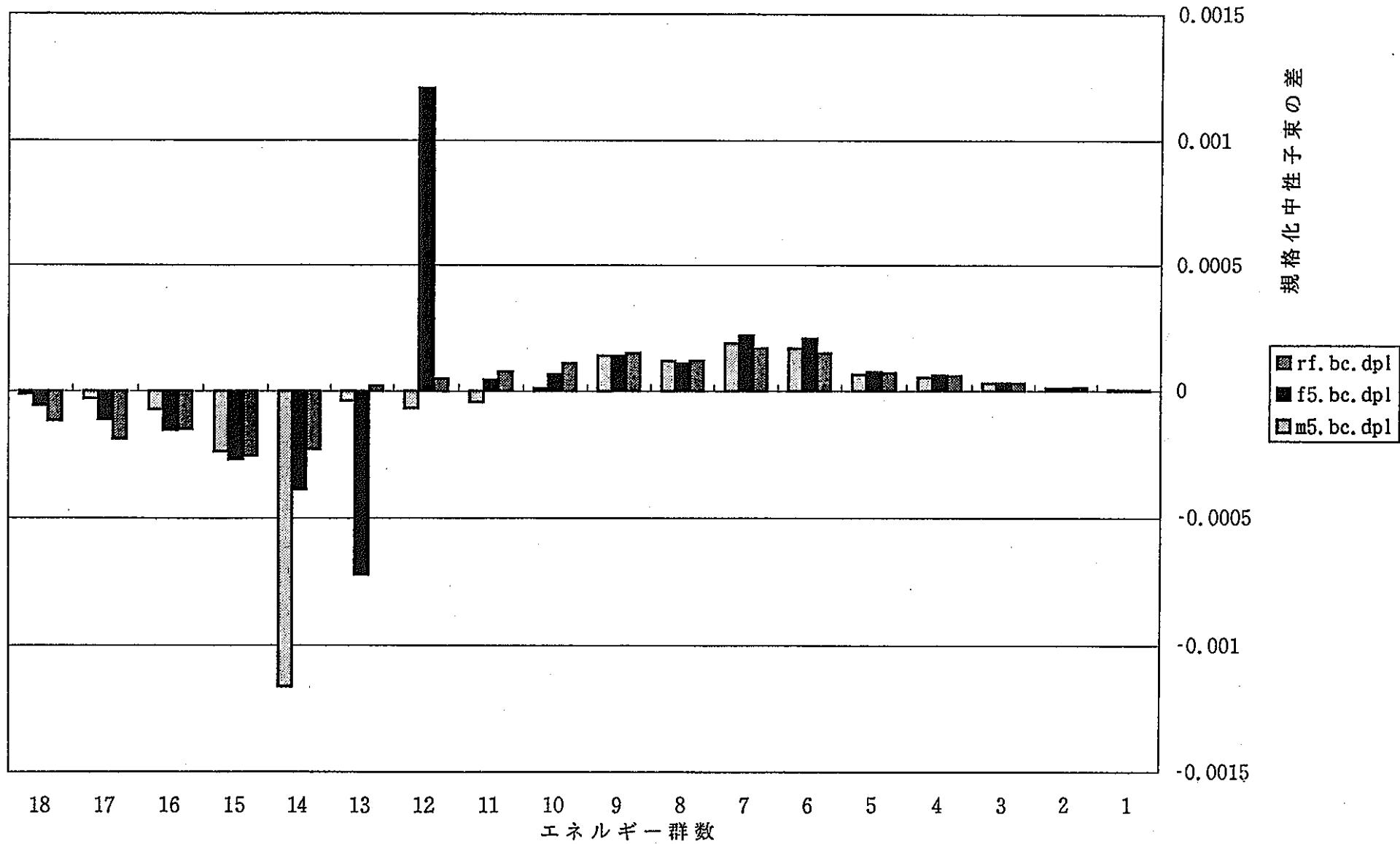


図3.5-4 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの差の比較(BOEC)

---- $\Phi_i(1500K) - \Phi_i(800K)$

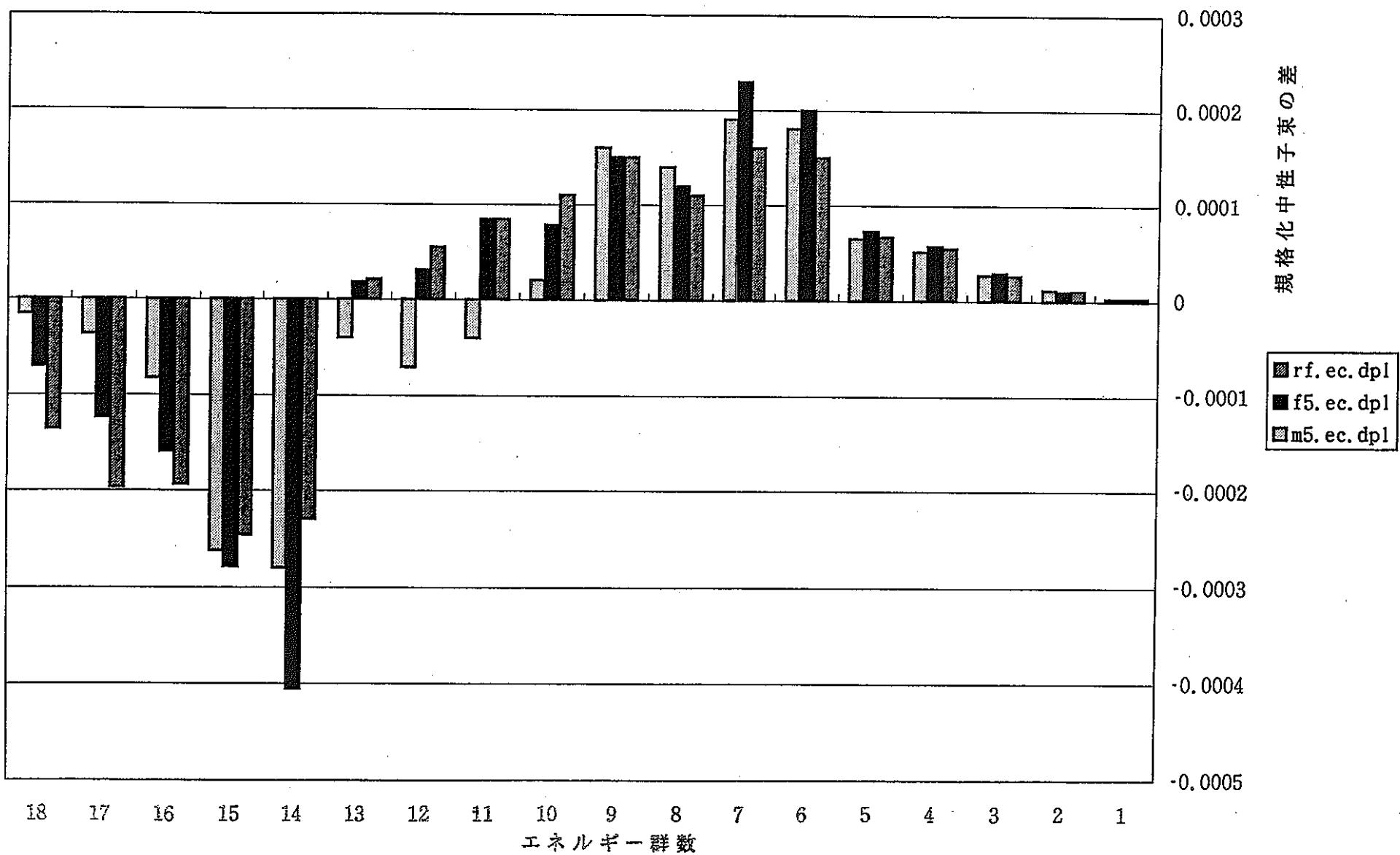


図3.5-4 3つの炉心の炉心中央領域の規格化中性子スペクトルの差の比較(EOEC)

---- $\Phi_i(1500K) - \Phi_i(800K)$

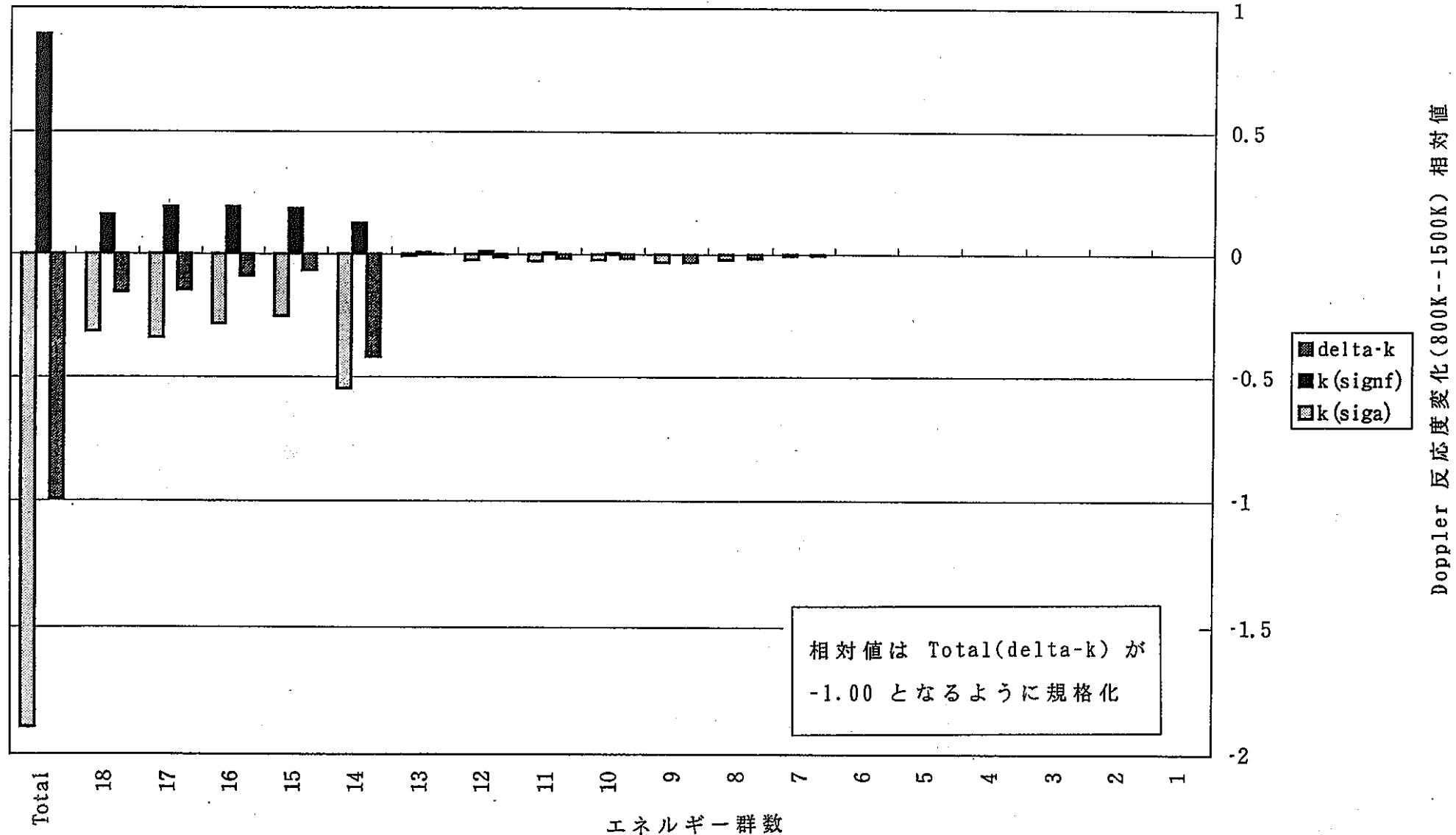


図 3.5-6 PuN-AlN 原心の Doppler反応度の群別・反応別寄与 相対値(B0EC)

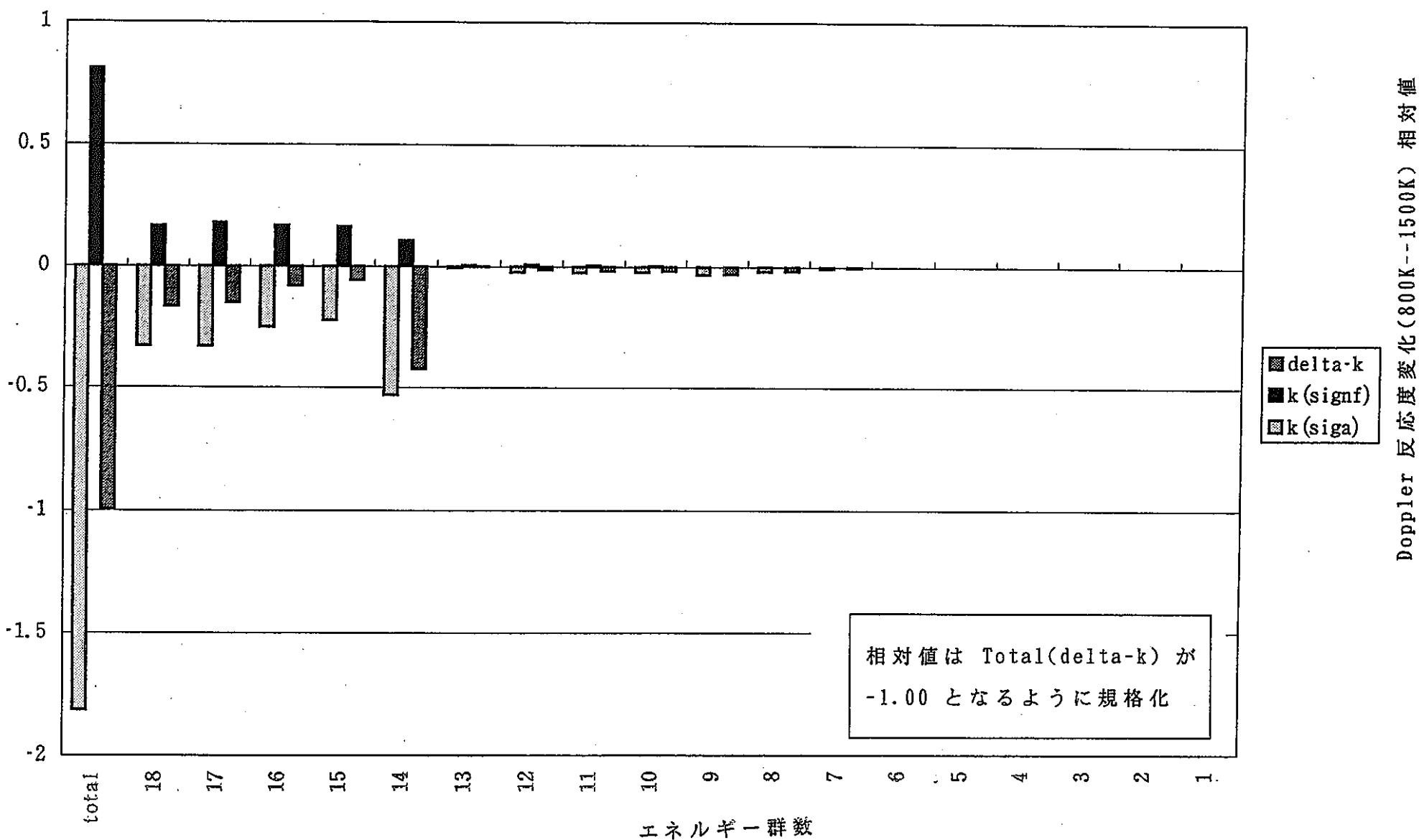


図 3.5.7 PuN-AlN 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与 相対値(EOEC)

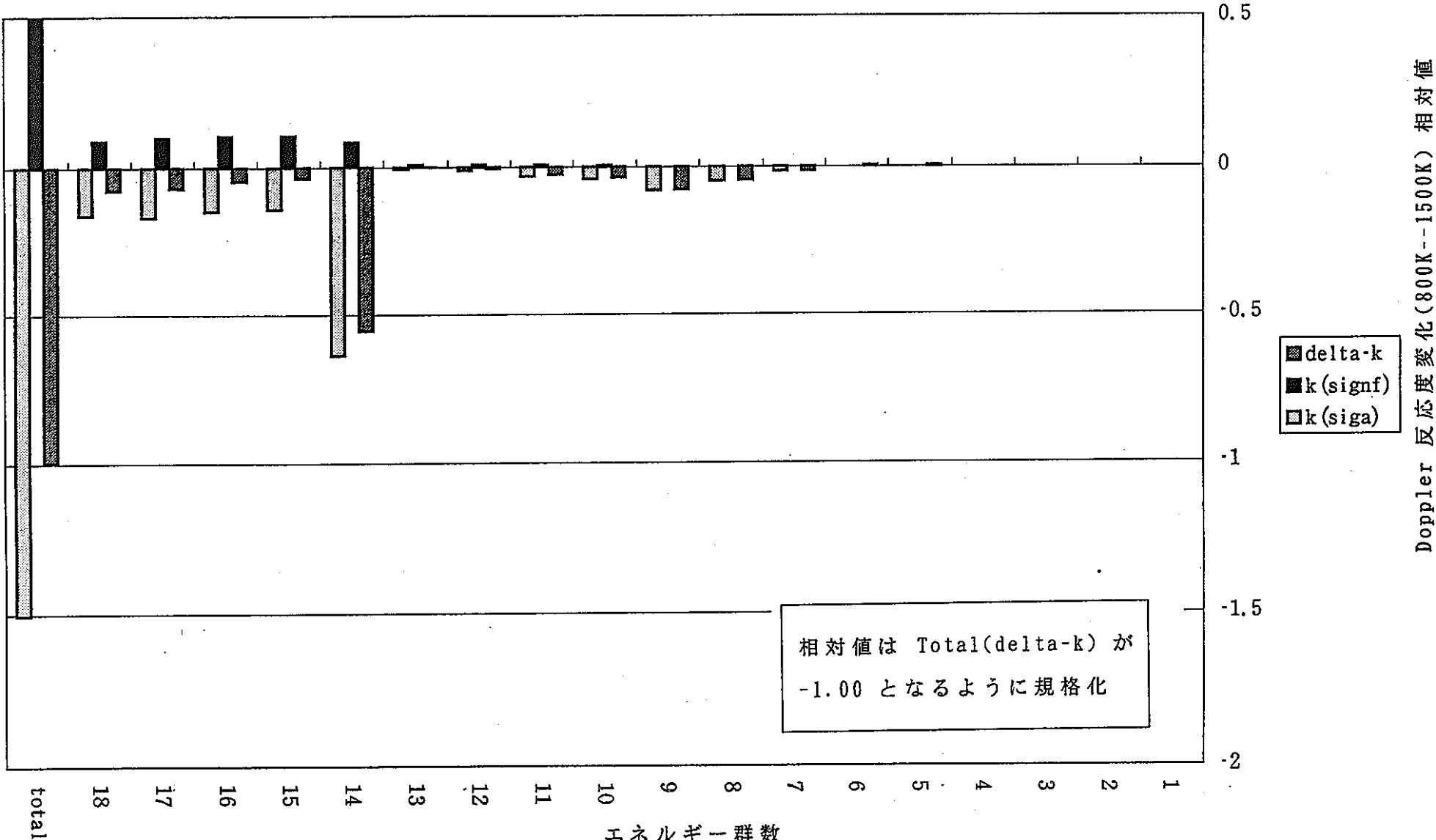


図 3.5-8 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与
相対値(BOEC)

Doppler 反応度変化(800K--1500K) 相対値

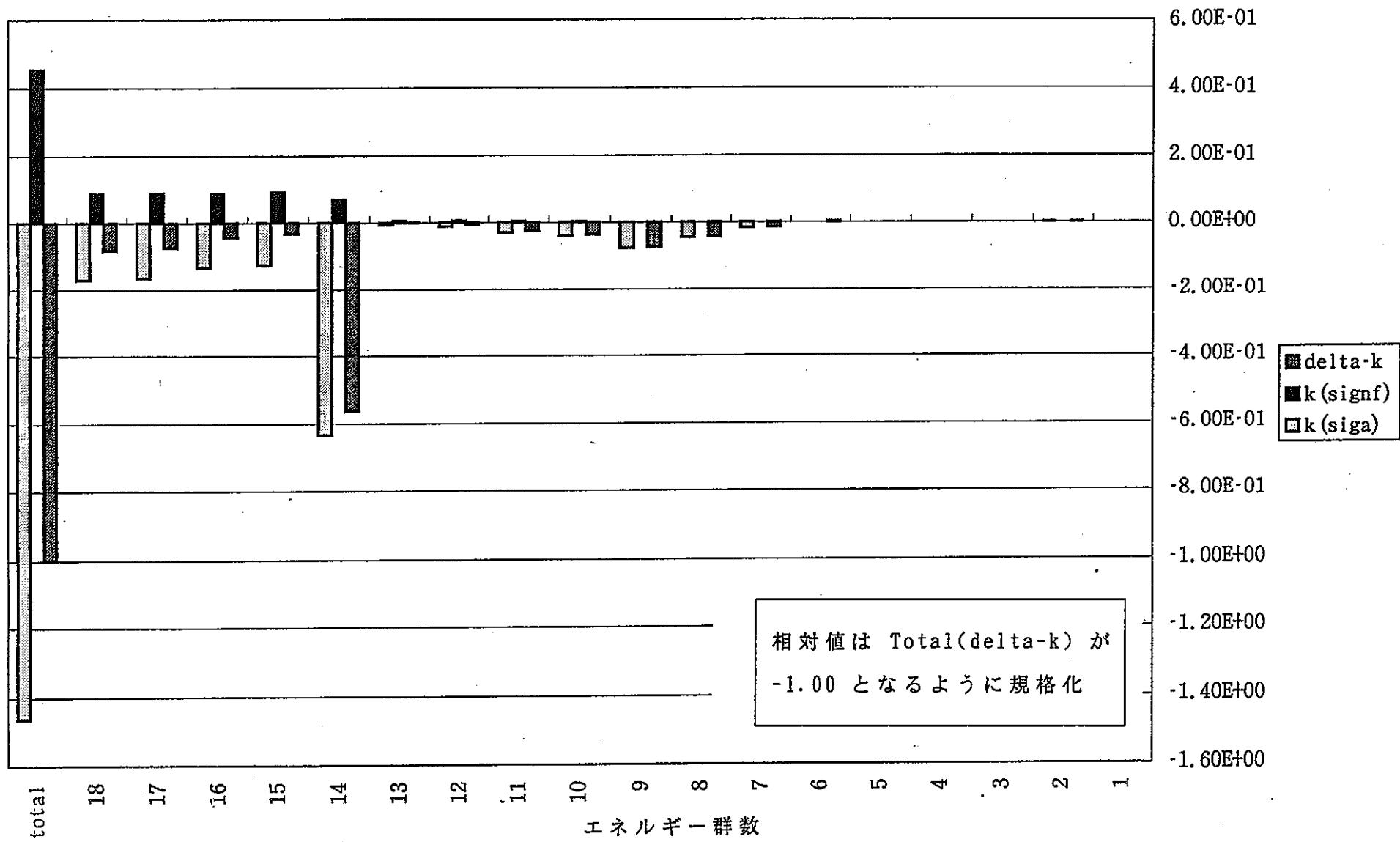


図 3.5-9 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与
相対値(E0EC)

Doppler 反応度変化(800K--1500K) 相対値

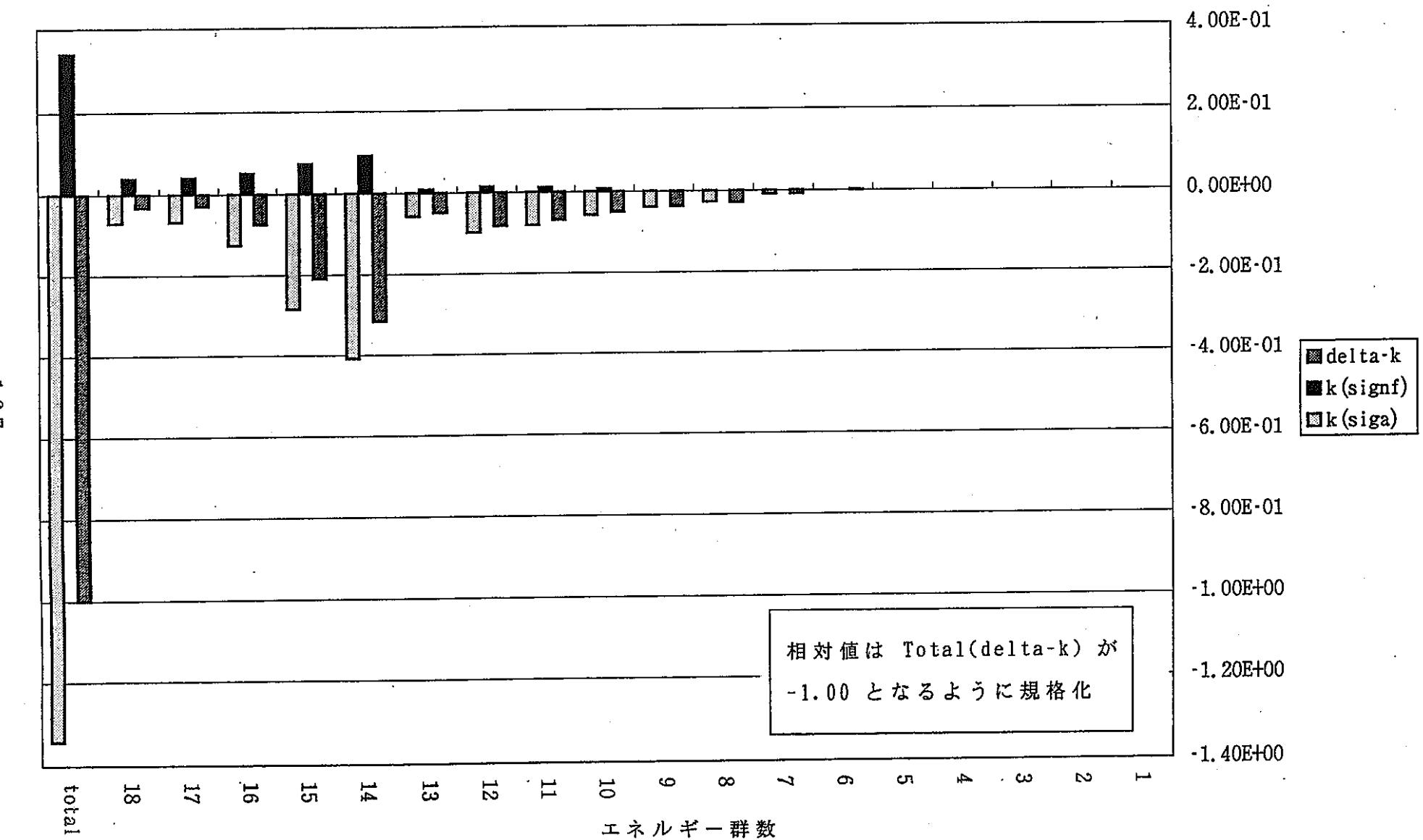


図 3.5-10 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler反応度の群別。反応別寄与
相対値(BOEC)

Doppler 反応度変化(800K--1500K) 相対値

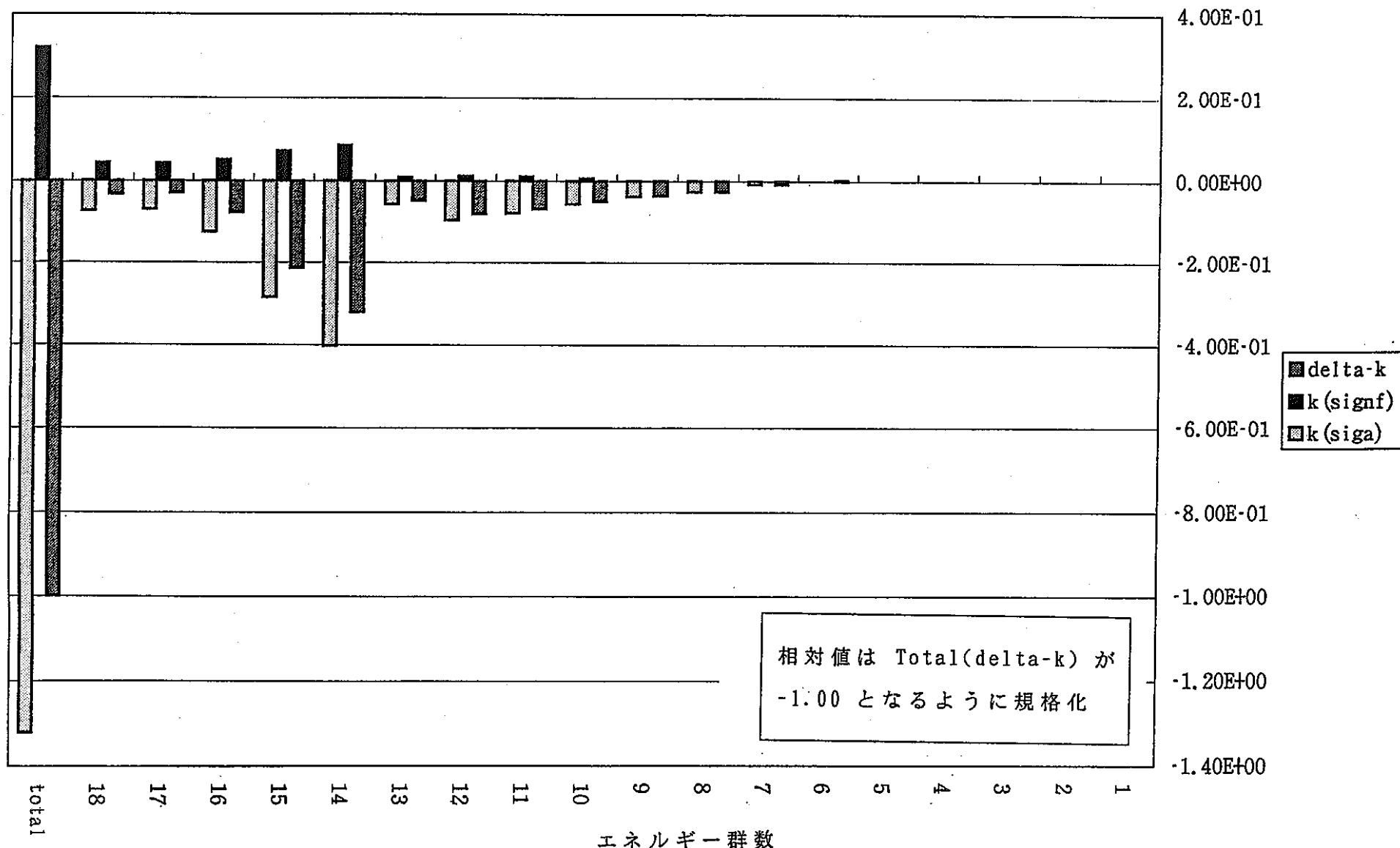


図 3.5-11 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler反応度の群別・反応別寄与
相対値(EOC)

Doppler 反応度変化(800K--1500K)

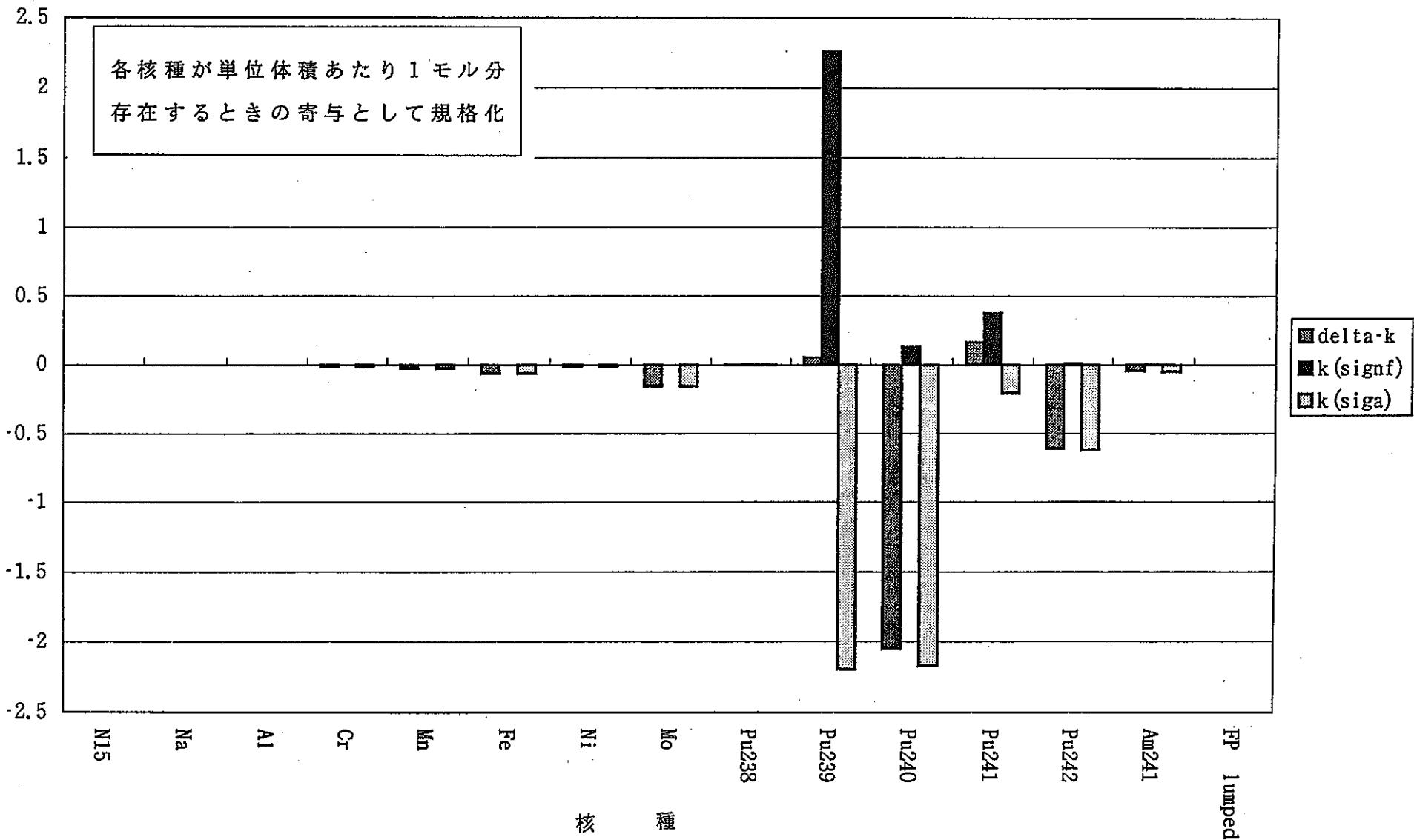


図 3.5-12 PuN-AlN 炉心の Doppler反応度への核種別寄与(BOEC)

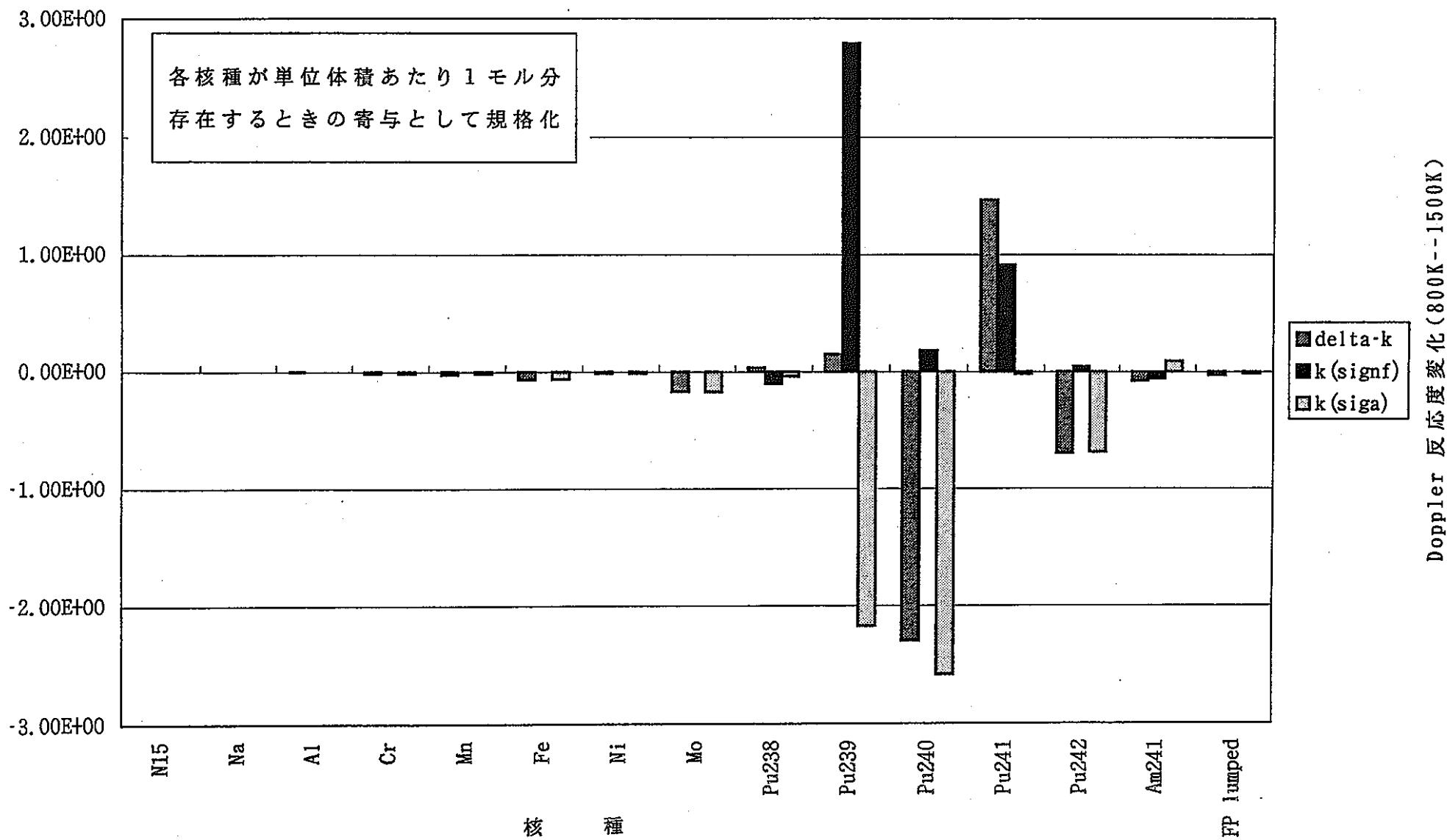


図 3.5-13 PuN-AlN 炉心の Doppler反応度への核種別寄与(EOC)

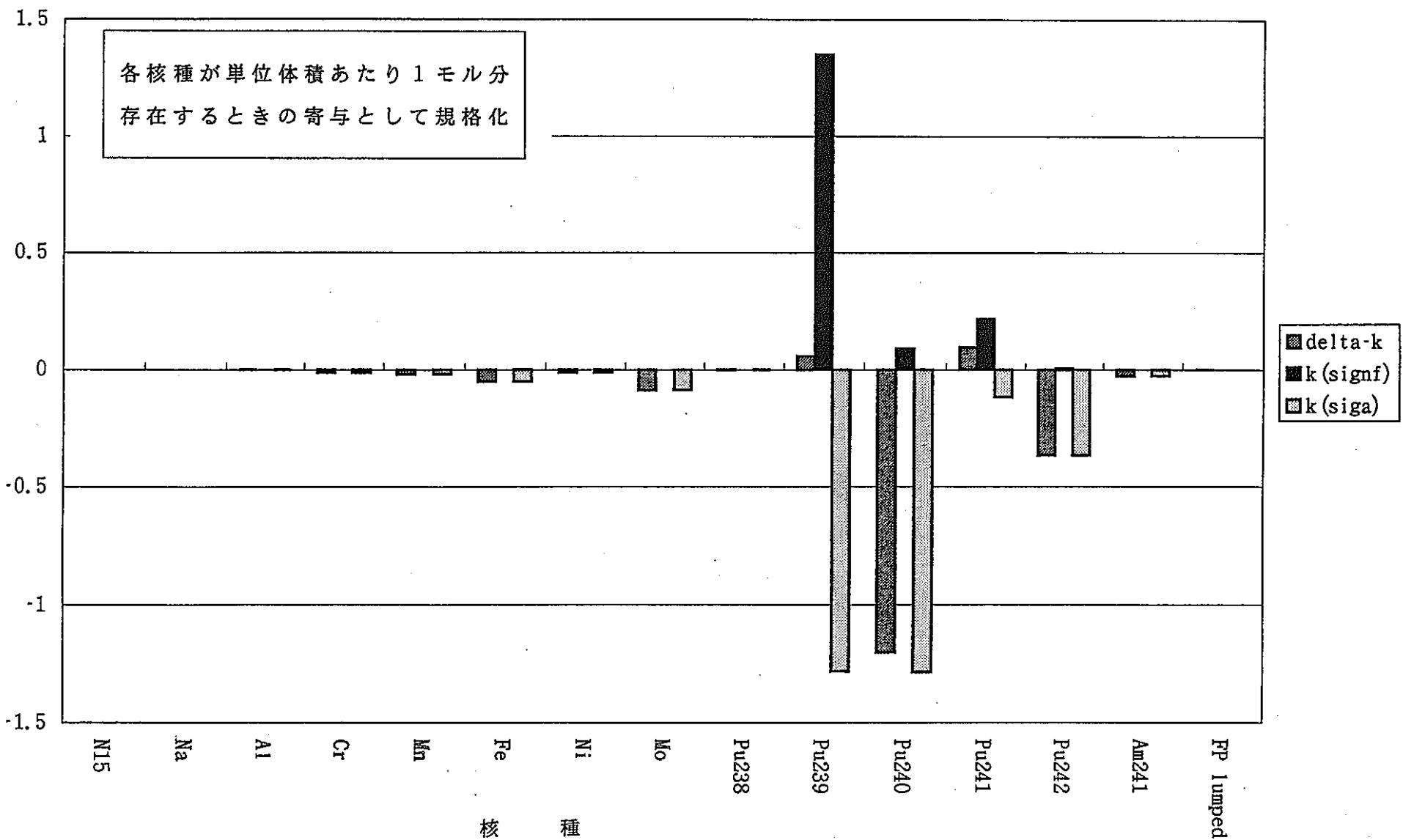


図 3.5-14 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler 反応度への核種別寄与 (BOEC)

Doppler 反応度変化(800K--1500K)

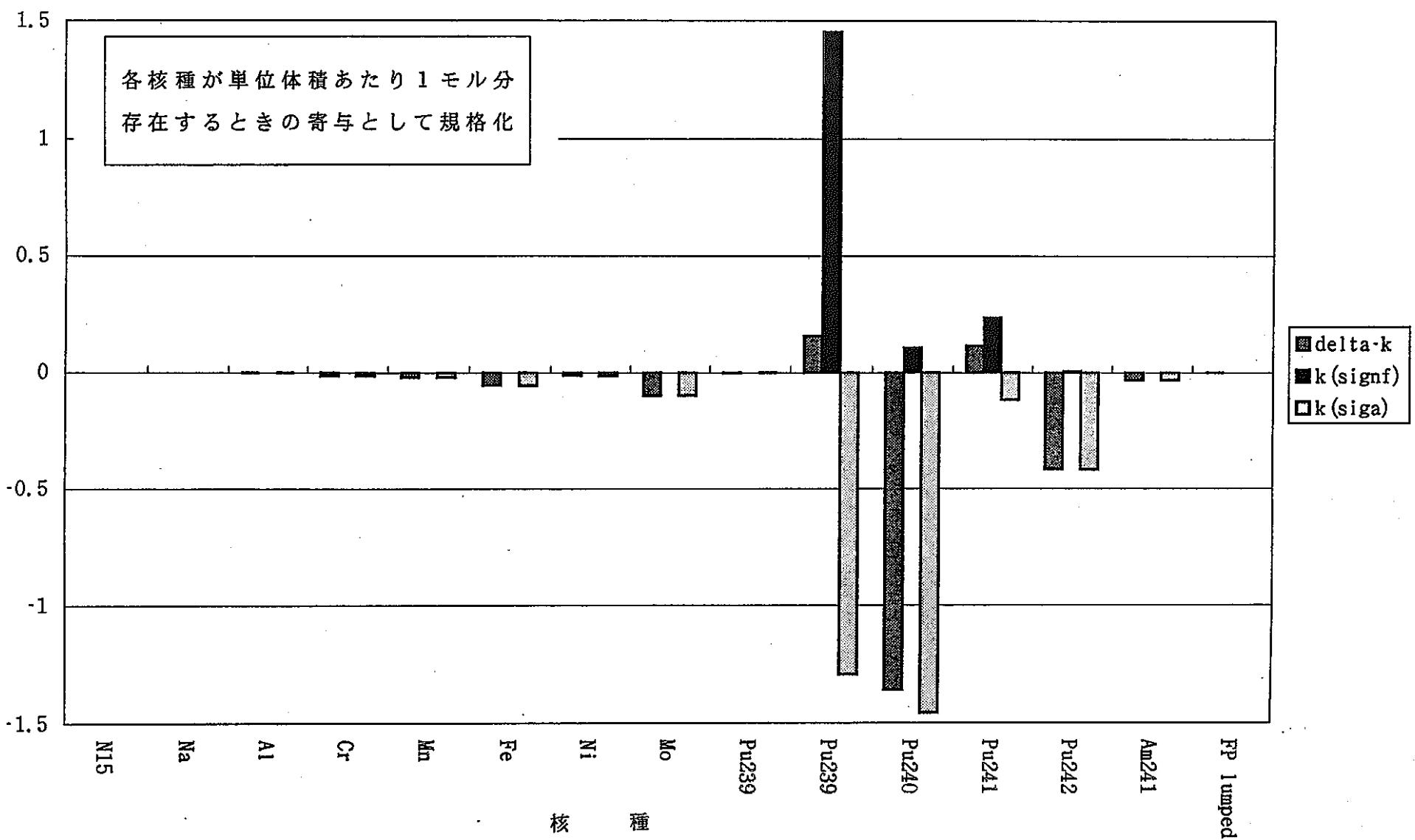


図 3.5-15 PuN-AlN-50%Fe 炉心の Doppler反応度への核種別寄与(EOEC)

Doppler 反応度変化(800K--1500K)

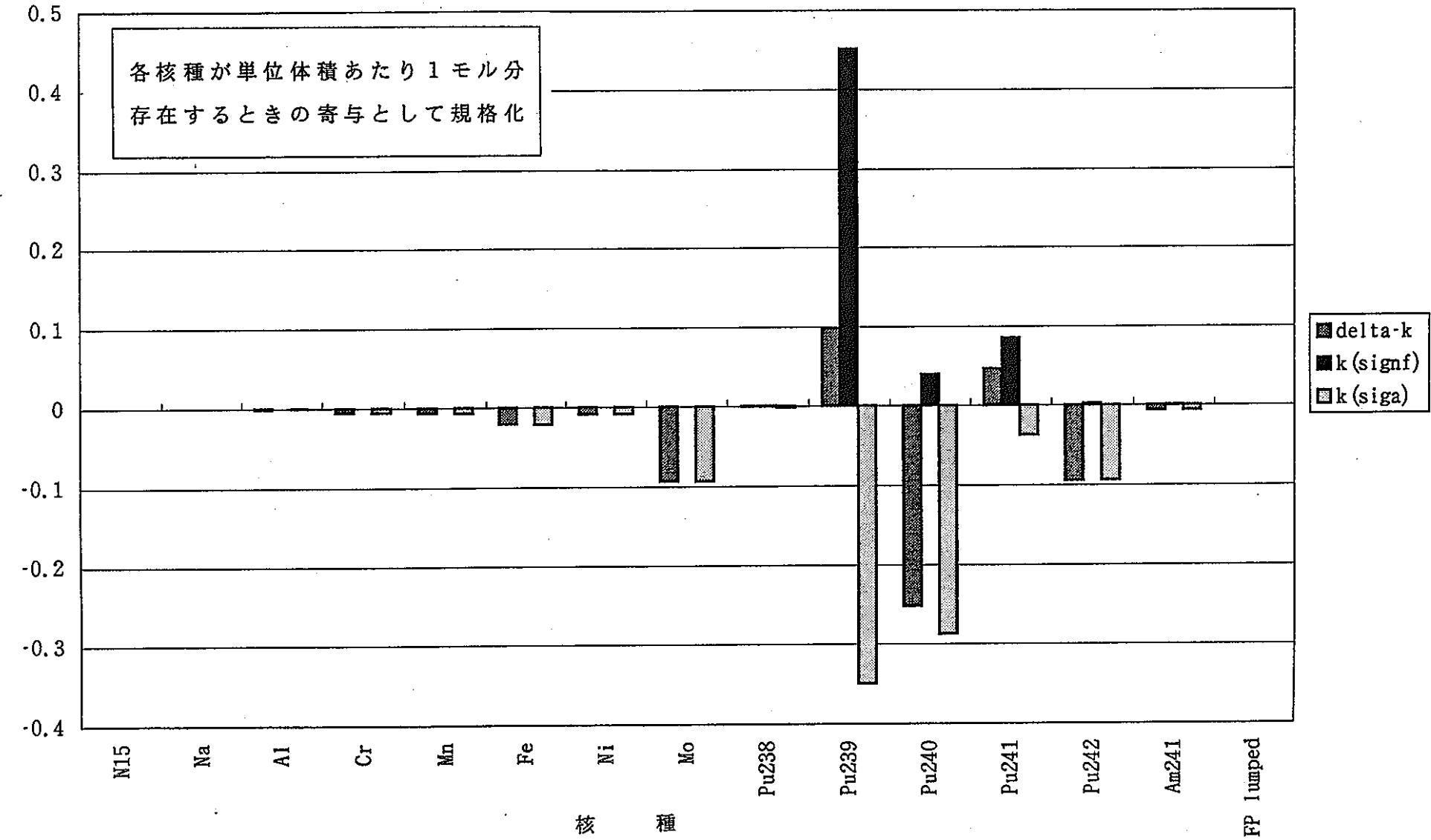


図 3.5-16 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler反応度への核種別寄与(BOEC)

Doppler 反応度変化 (800K - 1500K)

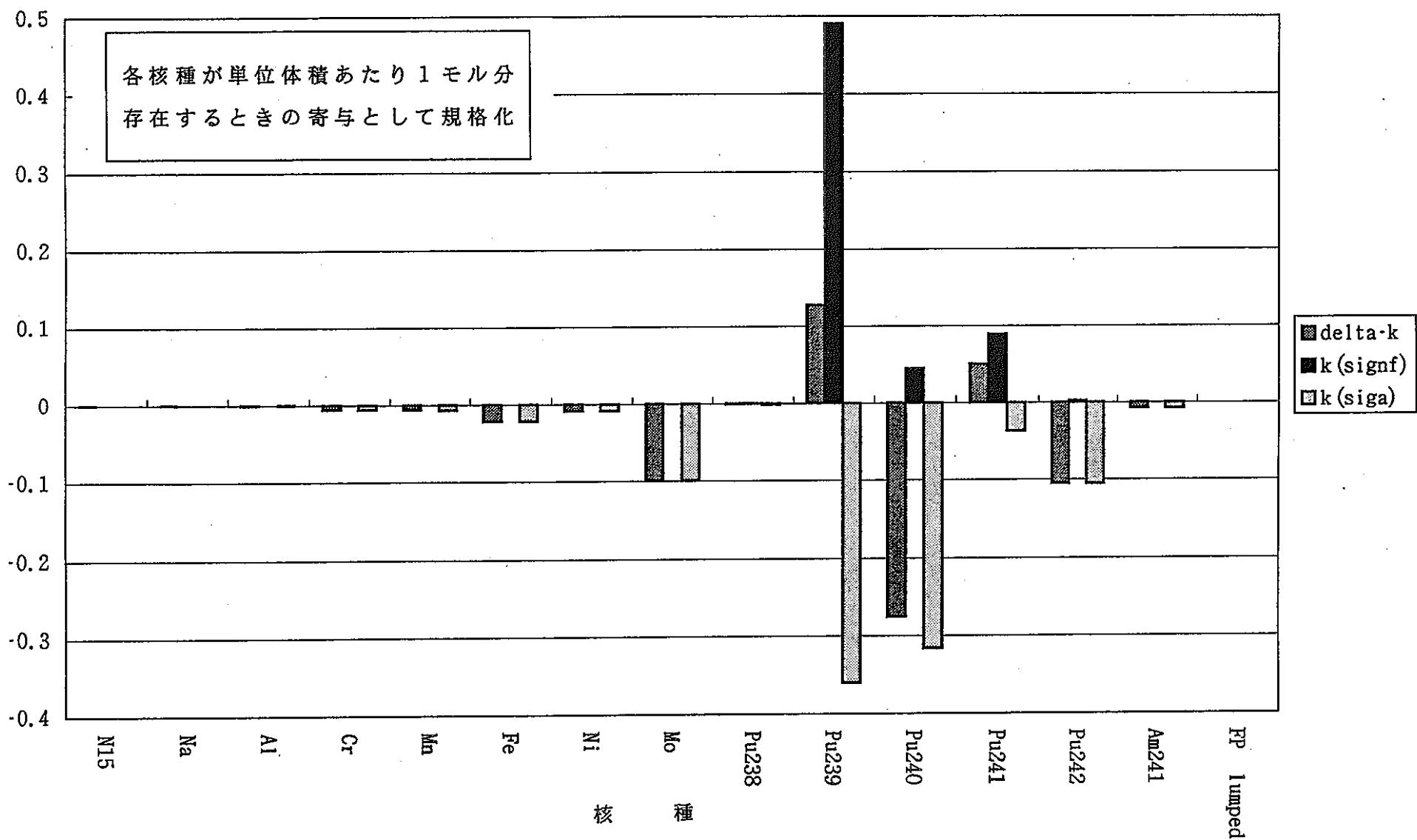


図 3.5-17 PuN-AlN-50%Mo 炉心の Doppler反応度への核種別寄与 (EOEC)

3.5 平衡サイクル炉心の特性値と分析結果

1サイクル運転長さを270日とし、均一分散バッチ数6の燃料交換パターンのもとで燃焼計算を行いつぎの3炉心について平衡サイクルの特性を求めた。この平衡サイクルにおいて、共鳴吸収物質の利用によるドップラー係数の改善効果を分析した。

共鳴吸収物質は前節のサーベイ計算結果をもとに、Fe, Moを選定した。燃料組成はStandard組成とし、利用する窒素は中性子吸収のほとんどないN15とした。また、共鳴吸収物質の混在量は燃料中の体積割合で50%とした。

選定した炉心体系はつぎのものである。

----PuN-AlN 炉心（レファレンス体系）

----PuN-AlN-50%Fe 炉心

----PuN-AlN-50%Mo 炉心

平衡サイクルまでの燃焼計算と平衡サイクル炉心の燃焼特性は、2次元RZモデルで、図3.1-2に示す分割で燃焼組成を求めた。燃料富化度は平衡サイクル末期の実効増倍率がおよそ1.003となること、また出力分布の平坦化を実現するよう設定した。

ドップラー係数およびナトリウムボイド反応度は、燃焼計算かせ得られた燃焼組成を内側・外側炉心領域につき平衡サイクル初期・末期に対して平均化した組成を使用して、70群拡散計算を行い求めた。また、要因分析のためには18群に縮約した後、それぞれの炉心の平衡サイクル初期・末期について一次摂動計算によりドップラー効果の分析をおこなった。

1)燃焼特性

3種類の燃料を使用した炉心の燃焼特性・Pu f バランスなどの特性を表3.5-1に示す。

(a)燃料富化度

燃料の富化度はそれぞれの燃料の初期炉心富化度よりも約50%増大している。これは核分裂生成物が存在するためである。

(b)燃焼欠損反応度

レファレンス炉心は、1サイクルの燃焼欠損反応度は約8.9%Δρであり、3つの炉心では最大となっている。この傾向は、3つの炉心では最も少ないサイクル初期のPu_fインベントリーが少ない（摂動の観点からは摂動分母が小さいことに対応する）ことに起因している。

Fe混在燃料炉心では、わずかに小さい値を示す程度の影響である。

Mo混在燃料炉心では、平衡サイクル初期のPu_fインベントリーが約40%増大していることに起因し、燃焼欠損反応度は約30%減少している。これは、Moの吸収断面積がFeの値にくらべて大きいためである。

(c) 転換比

転換比は、レファレンス炉心が0.16と3炉心のなかで最大である。これは中性子スペクトルがもっとも軟らかく、Pu240の中性子吸収反応率が大きくなっていることに関連している。

中性子スペクトルが硬くなるMo混在燃料炉心では、0.10と小さくなっている。

(d) 高速中性子照射量

$270 \times 6 \text{ days} = 4.4 \text{ EFPY}$ の炉内滞在においても、最大は $2.8 \times 10^{23} \text{ nvt}$ であり、従来炉心に比べて大きくはならない。

(e) Pu_f バランス

平衡炉心のバランスでは、Pu_fのインベントリーは約3.3～4.6トンであり、年間投入量は約1.0～1.3トンの範囲である。

(f) Pu_f 消滅率

Pu_fの年間の消滅量は3炉心とも同一である。転換比が低いためである。発電効率を40%とするとそれの炉心も約107 Kg/TWheの消滅率である。サイクル初期の投入量をもとにした減少率では、レファレンス炉心では約60%であり、Mo混在燃料炉心では、約45%である。

(g) 出力分布

いずれの炉心も、基本的に最大線出力を与えることは共通であるが、初期インベントリーと末期インベントリーの関係から、燃焼による出力低下率が大きく、新燃料との出力ミスマッチは、レファレンス炉心が最大で、共鳴吸収物質を混在

させることで、緩和する傾向にあることが示されている。

2)反応度係数

ドップラー係数とナトリウムボイド反応度について、平衡サイクル初期・末期炉心について計算した結果は表 3.5-2と表 3.5-3に示す。70群計算の結果を基準とするが、ドップラー効果の分析には18群を使用する。

群数の違いは、ドップラー係数については約 5%までの違いが見られる。ナトリウムボイド反応度については、18群計算では-0.1~-0.2%のほぼ一定のバイアス分の平行移動になっている。

この計算では、燃料および被覆管・ラッパ管分の構造材分のドップラー効果が含まれている。後述する摂動計算よりもとめられる核種毎のドップラー効果への寄与を計算し、燃料部分のみの寄与として補正した結果を()内に示した。

これらの結果からドップラー係数について次のことが示されている。

(a)平衡サイクルでは未燃焼状態の初期炉心に比べると、ドップラー係数は大幅に減少している。

(b)レファレンス炉心のドップラー係数に比べて、Fe、Mo構造材系の共鳴吸収物質を燃料と混合することは効果がある。およそ 50%~100%の増大が期待される。

(c)平衡サイクル初期から末期にかけて、ドップラー係数は増大している。これはつぎの理由である。

末期では核分裂生成物が増大するので中性子スペクトルは硬くなる。これは、ドップラー効果を低減させる効果である。一方、燃焼による物質の減少の中心はPu239, Pu241 であり、Pu240, Pu242 はあまり変化しない。また、共鳴吸収物質は減少しないまたは減少は無視できる。したがって、燃料インベントリー（摂動分母相当）が減少するので、反応度効果は大きくなってくる。

従来からのU・Pu混合酸化物燃料炉心では、燃焼によるスペクトルの変化分が支配的で、内部転換比が大きいのでインベントリー減少効果は小さい。したがって、末期のドップラー係数は初期の値より小さくなっている。

(d) Fe と Mo がドップラー効果に与える影響は、ほぼ同一と見なせるが、ナトリウムボイド反応度の増加には Fe は小さな寄与であるが、Mo を使用するとボイド反応度は大幅に増加させるので、Fe の方が望ましいと考えられる。

ナトリウムボイド反応度について次のことが示されている。

(e) 平衡サイクルでは未燃焼状態の初期炉心に比べると、ナトリウムボイド反応度は大幅に増大している。

(f) レファレンス炉心のナトリウムボイド反応度に比べて、Fe、Mo 構造材系の共鳴吸収物質を燃料と混合することにより、正にシフトさせる効果がある。この影響は、Fe、Mo の混在により強調されている。

3) 中性子スペクトルの分析

3つの炉心の平衡サイクル初期および末期の炉心中央領域の中性子スペクトルを表 3.5-5 に示されている。それぞれはエネルギー積分が 1.0 となるように規格化されている。

初期と末期の中性子スペクトルを図 3.5-1 と図 3.5-2 に示す。中性子スペクトルは、共鳴吸収物質が混在されると硬くなることが示されている。表 3.5-6 は炉心平均で 1 群化された重核の中性子捕獲と核分裂断面積を有する物質の減少の中心は比較して示した。この結果から、Pu240, Pu242 の中性子捕獲 capture 断面積と Pu239 の核分裂断面積との比が、シファレンスに比べて共鳴吸収物質の混在により減少していることが示される。即ち、核分裂にくらべドップラー効果の要因となる Pu240, Pu242 の中性子吸収割合が減少することを示している。

共鳴吸収物質の混在による中性子スペクトルへの影響を示すために群毎に、レファレンス炉心の値の比率を整理した結果が表 3.5-7 に示されている。これを図示して、図 3.5-3 に示した。

この結果、レファレンス炉心に比べて Fe, Mo 混在炉心では約 10 keV 以下のエネルギー領域で、中性子の存在割合が減少していることおよびスペクトルが硬くなっていることが明確に示されている。Fe 混在燃料炉心では約 2 ~ 4 keV の

エネルギー範囲では割合が増大していることは、例外的である。

このエネルギー領域の前後でレファレンスとの比率の傾向が変化しているのは、Fe、Moの非弾性散乱、Naの2.8keVの共鳴吸収の影響が関係していると考えられる。

また、表3.5-8には規格化された中性子スペクトルについて、レファレンス炉心と共鳴吸収物質を混在させた炉心のスペクトルの差を示した。共鳴吸収物質を混在させることにより、平衡サイクルでは12群／13群（約4keV）を境に、高エネルギー側は増大スペクトルが硬くなっていることが示されている。

この事実より、ドップラー効果の改善のためには、共鳴吸収物質混在炉心では中性子スペクトルが硬くなるが、数keV以下のエネルギー範囲に共鳴をもつ物質との組み合わせで共鳴吸収により中性子吸収を実質的に増大させることができるかどうかにかかっている。この領域のスペクトルへの影響が混在率の増加と効果の関係を決めることになると考えられる。

また、ナトリウムボイド反応度は10keV(10--11群)より高エネルギー領域で増大するPu240,Pu242の核分裂の増大する領域への影響があらわれていると考えられる。

4) K-effに対する核種毎の密度係数

炉心のスペクトルの違いと組成・燃料インベントリーの違いが反応度に与える影響を分析するために密度係数を表3.5-10～表3.5-16に示す。3つの炉心の平衡サイクル初期・末期について求めている。

これらの表の表示は"delta-k"の欄が特性値であり、1モルの原子数の増加による反応度への影響を示している。"k(signf)"、"k(siga)"は核分裂と中性子吸収効果の寄与を示している。"k(el+in)"の欄は散乱減速効果である。"k(diff)"はもれの寄与である。

軽い核種では、中性子吸収と散乱減速効果の負の反応度が中心であり、もれの項は中性子の漏れだしを低減させる正の反応度効果をもっている。

構造材系の核種では、Moが大きな負の反応度効果を有している。全体の傾向

はサイクル初期・末期の違いはあまり見られないが、共鳴吸収物質混在燃料の違いによる影響はある。特に、燃料インベントリーの違いによるM○混在の影響は大きい。

M○の反応度効果は、レファレンス炉心で最大であり、中性子スペクトルの硬いM○混在炉心では、値は約40%に低減し最小となっている。Feについても、レファレンス炉心とFe混在燃料炉心では約30%の違いがある。

重い核種では、核分裂と吸収効果の打ち消し合いが中心である。3つの炉心の比較では、レファレンスとFe混在燃料炉心の中性子スペクトルは類似していること、M○混在燃料炉心のスペクトルはかなり硬くなっている影響は、これらの密度係数にも現れている。

即ち、レファレンス炉心とFe混在燃料炉心では、Pu238, Pu239, Pu241は正の反応度価値をもち、Pu240, Pu241, Am241は負の反応度価値を持っている。

一方、M○混在燃料炉心ではPu238, Pu239, Ou240, Pu241, Pu242はすべて正の反応度を持っている。Pu240, Pu242についても核分裂効果が支配的な高エネルギー領域の寄与が、中性子吸収効果よりも勝る結果を示している。Am241は核分裂反応がしきい値をもつがそれが勝るほどはスペクトルが硬くないので大きな負の反応度価値を有している。

この結果をPu239の価値と等価係数として平衡サイクル初期の結果につき示すとつきの様になる。

核種	レファレンス炉心	Fe混在燃料炉心	M○混在燃料炉心
Pu238	0.362	0.422	0.558
Pu239	1.00	1.00	1.00
Pu240	-0.101	-0.0487	0.0910
Pu241	1.77	1.67	1.46
Pu242	-0.0912	-0.0558	0.0491
Am241	-0.736	-0.607	-0.236

5) Doppler反応度に対するエネルギー群・反応別寄与の分析

3つの炉心の違いによるドップラー反応度への寄与の分析結果を表 3.5-7～表 3.5-28 とそれらを相対寄与図を図 3.5-6～図 3.5-11に示す。相対値は全体を -1.00 としたときの群・反応別寄与である。

この計算では、燃料と被覆管・ラッパ管の構造材の寄与も含まれているが、エネルギー群としての分析には問題はない。

負のドップラー効果を確保するためには、約 2keV 以下のエネルギー領域の寄与によることが共通している。そのうち 1keV～2keV の寄与が半分であることも共通である。また、約 200eV 以下の寄与が支配的なものである。これらは、Pu240, Pu242 の寄与である。

一方、共鳴吸収物質の利用によるドップラー効果への影響は、レファレンス炉心の結果に比べて、つぎのようである。

(a) Fe 混在燃料炉心では、約 183keV～9keV の範囲（8--11群）で寄与が増大している。

(b) Mo 混在燃料炉心では、約 183keV～2keV の範囲（8--13群）で寄与が増大している。

6) Doppler反応度変化に対する核種別寄与潜在能力の分析

3つの炉心の平衡サイクル初期・末期について、核種毎の寄与をまとめた結果が表 3.5-29～表 3.5-34 に示した。これらを図示した結果は図 3.5-12～図 3.5-17 に示されている。

これらの結果は、各核種が単位体積あたり 1 モル存在したときの大きさに規格化されている。

負のドップラー効果を確保するためには、Pu240, Pu242 の存在量がとくに重要なことがしめされている。Pu239, Pu241 は僅かであるがいずれも正のドップラー係数を持っている。

一方、共鳴吸収物質としては、Fe, Mo が妥当なことが示されている。

4. おわりに

高速炉におけるPu利用の柔軟性・選択肢の増大のためには、炉心の基本特性である安全に係わる特性を確保することが必要である。

ウラン不使用型高速炉では、Puの高度利用のために広い範囲の同位体組成比に対して、安全性確保のためにドップラー効果に着目して分析的な検討を行った。

具体的には、窒化プルトニウムPuNと不活性母材AlNの体系に対して、構造材系の共鳴吸収物質を混在させた炉心の反応度係数としてドップラー係数とナトリウムボイド反応度への影響と特徴を調べた。

その結果、構造材系共鳴吸収物質を混在する燃料を利用することにより、ウラン不使用型高速炉の炉心特性を改善することが可能なことを示すことができた。使用するPu同位体組成比の観点からは、軽水炉取り出しプルトニウムについては、炉心特性の観点からは大きな違いはなく選択幅が大きいことが示されている。

共鳴吸収物質の選択によっては、ナトリウムボイド反応度が正となる炉心・燃料仕様となる可能性も示されている。

本検討から、Pu利用シナリオに柔軟な炉心概念候補として、共鳴吸収物質を利用することも選択肢のひとつであることが示された。今後、炉心仕様などの具体化を通して、概念を具体化していくことが重要と考えられる。

付録；Puの断面積図

Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242, Am241

JAERI-M 90-099; Curves and Tables of Neutron Cross Sections

- Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version3 -
(July 1990) edited by T. Nakagawa et. al より引用

本文中の図2.1-1～図2.1-5も上記資料より引用したものである。

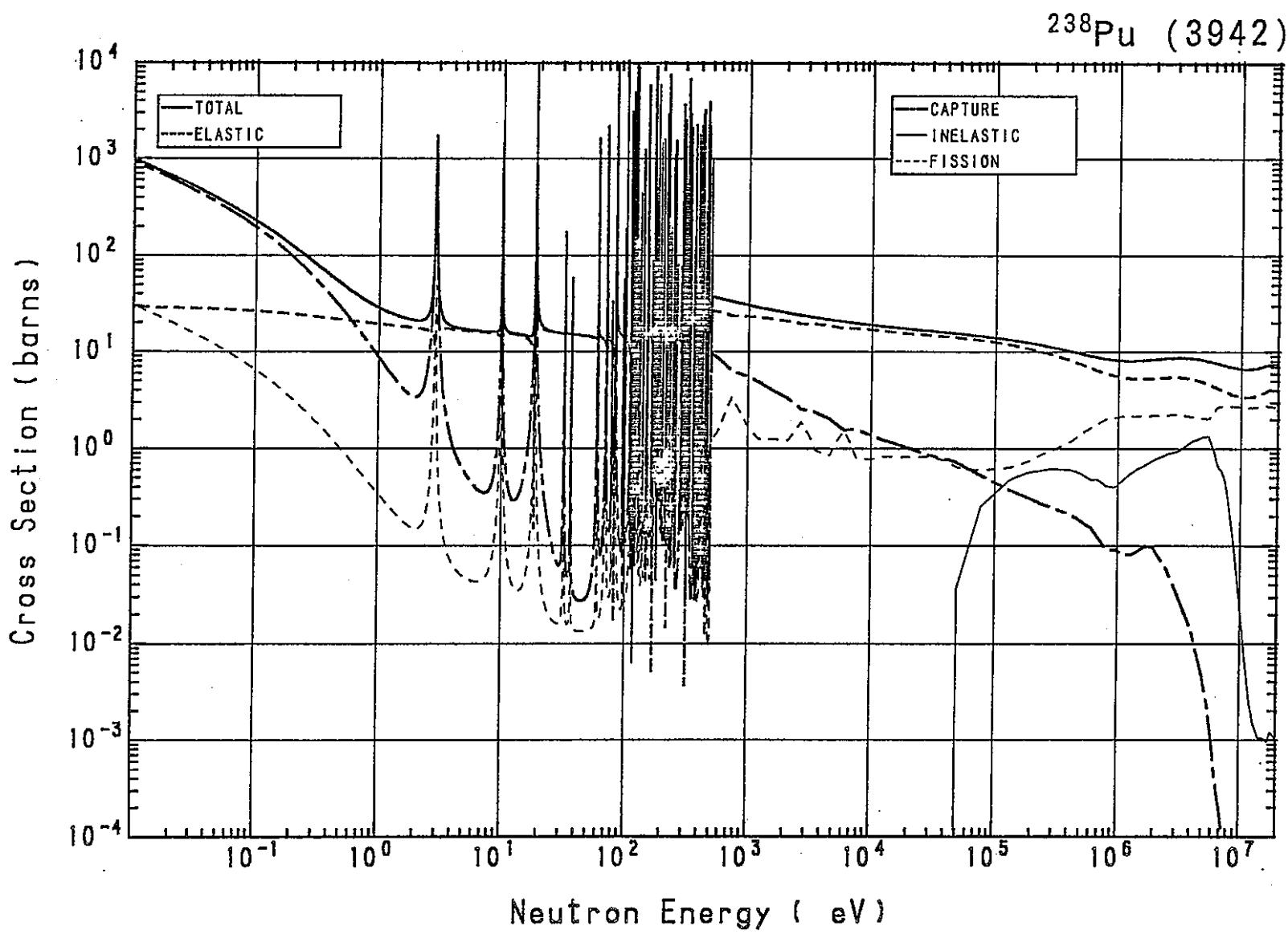


図 A1-1 Pu238の断面積のエネルギー依存性概要図

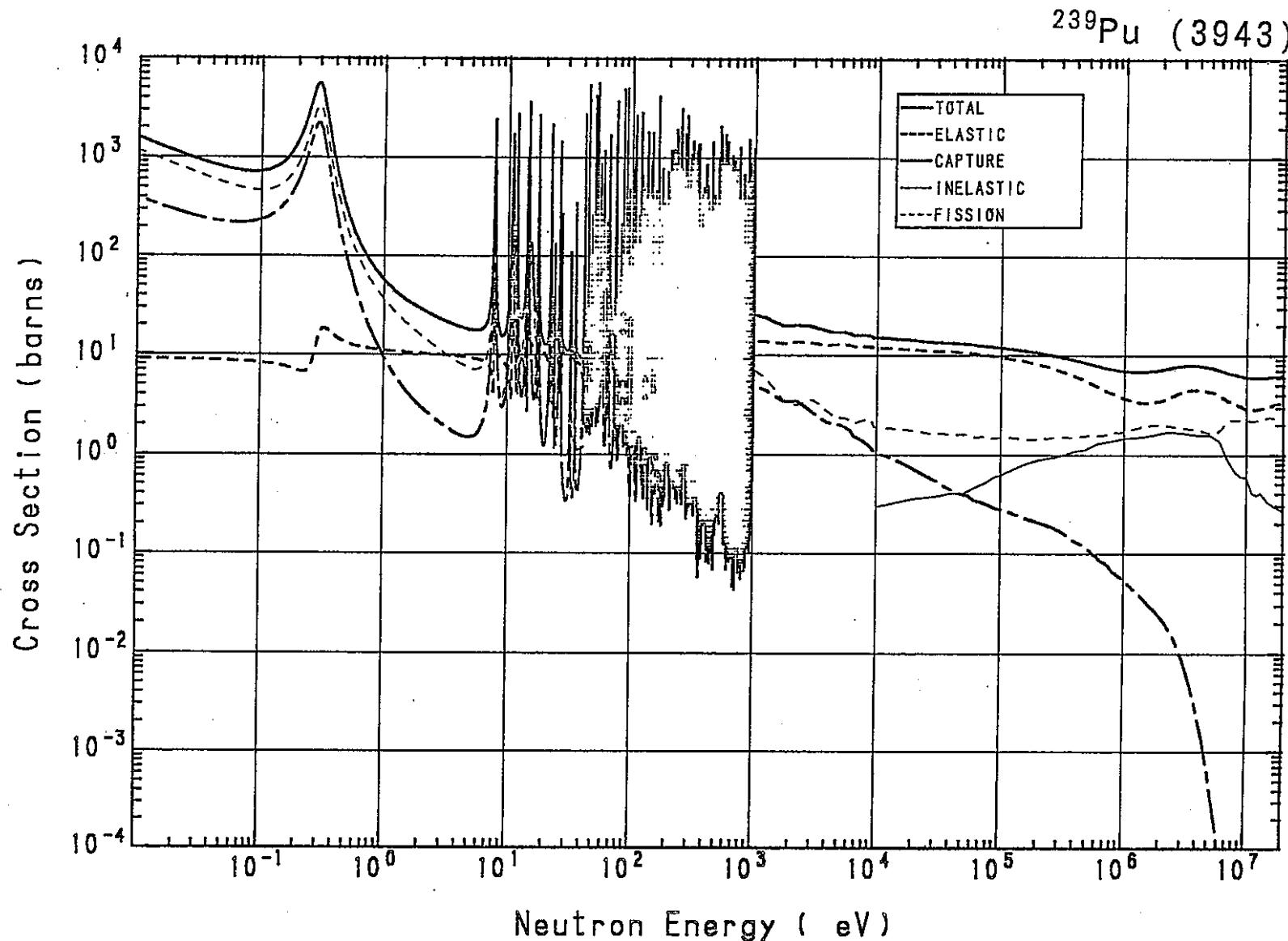


図 A1-2 Pu239の断面積のエネルギー依存性概要図

^{240}Pu (3944)

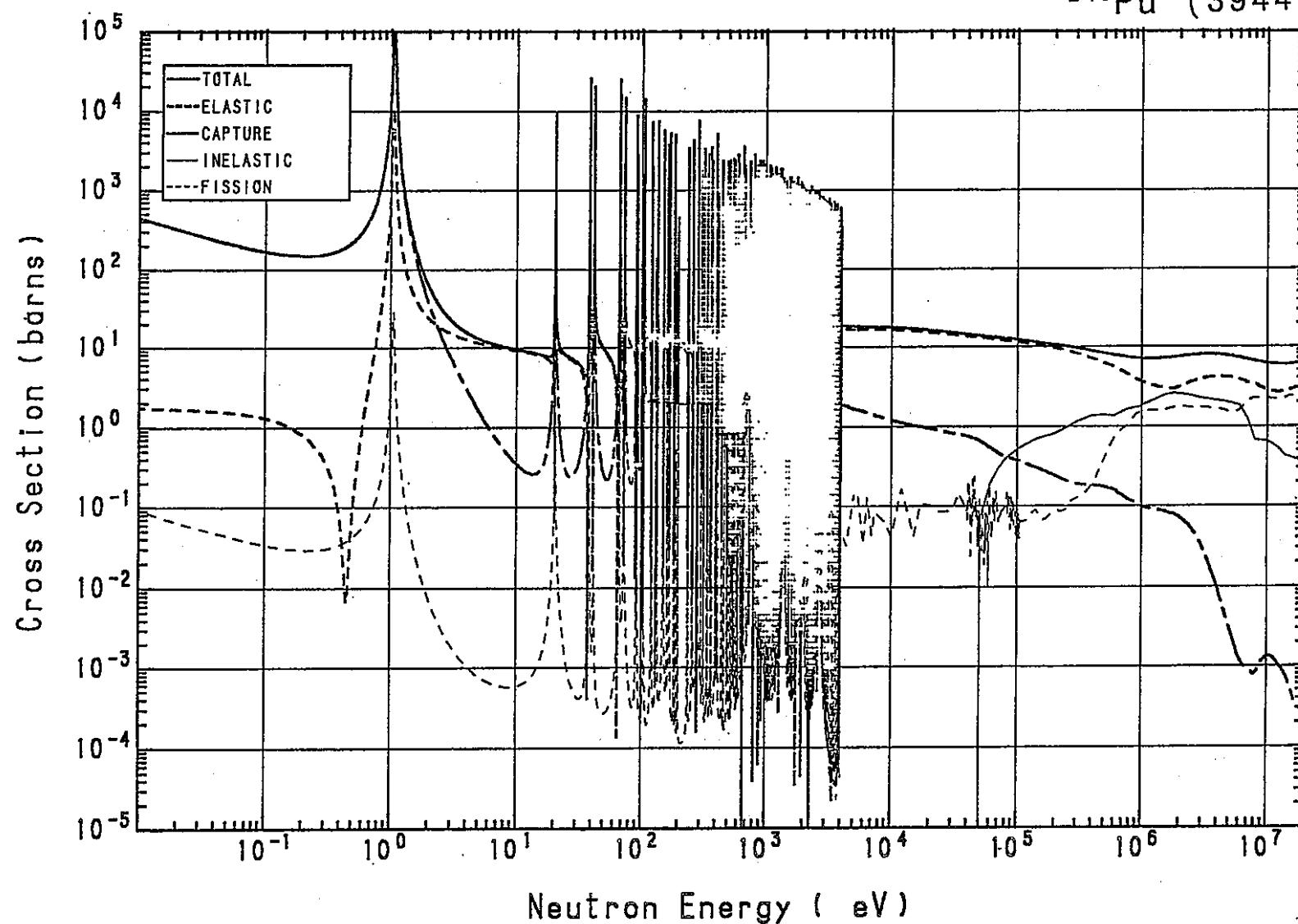


図 A1-3 Pu240の断面積のエネルギー依存性概要図

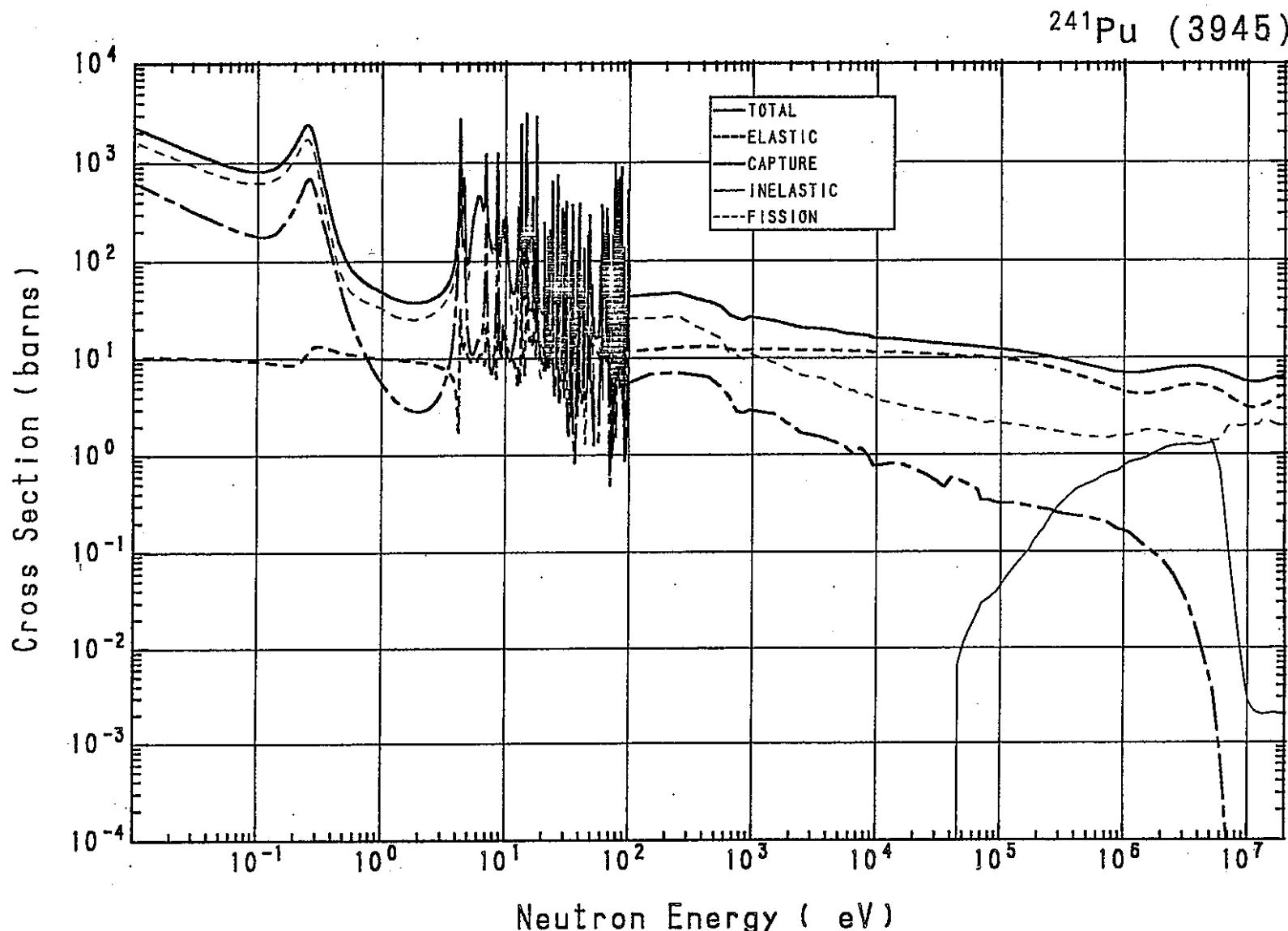


図 A1-4 Pu241の断面積のエネルギー依存性概要図

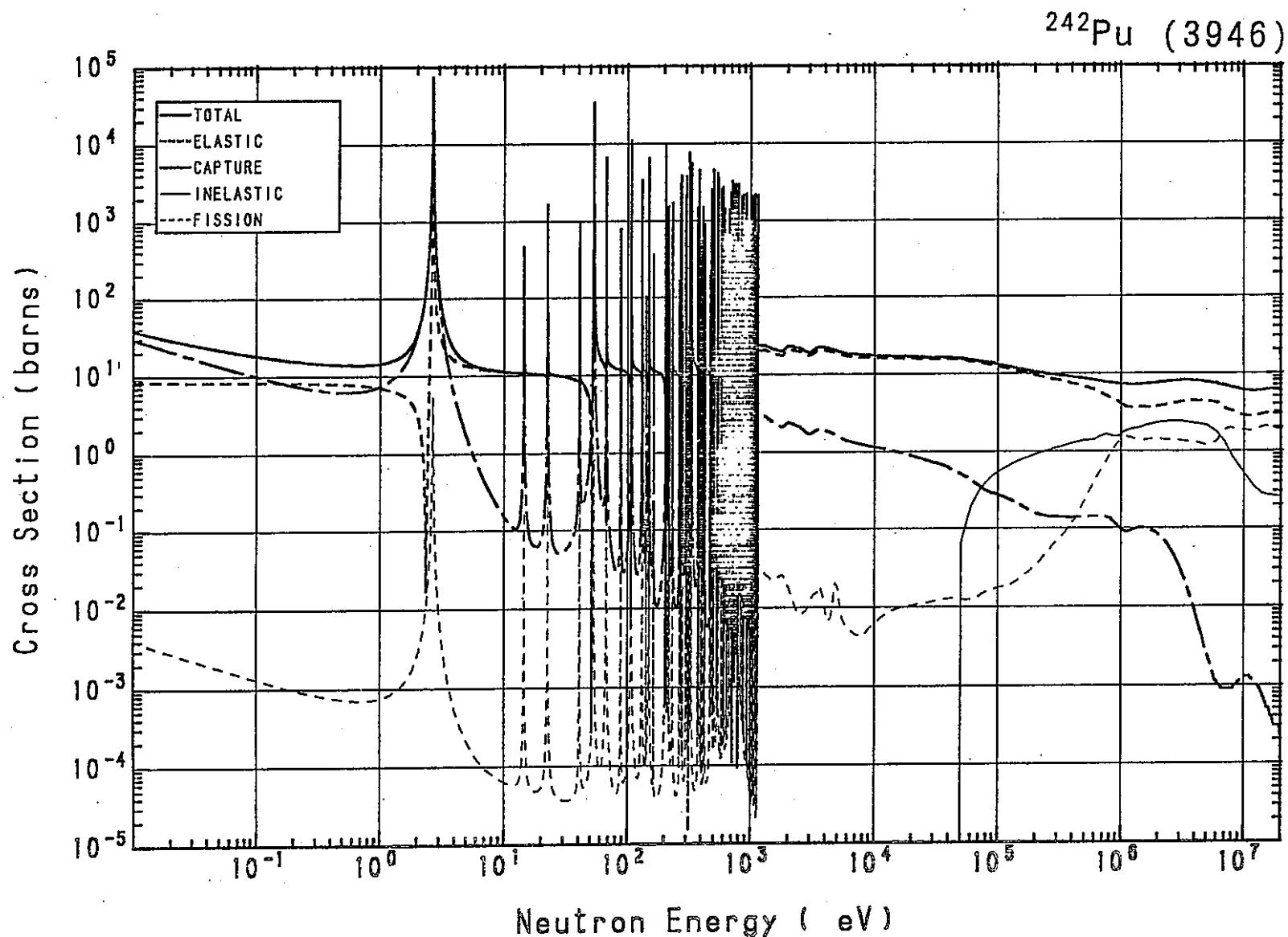


図 A1-5 Pu242の断面積のエネルギー依存性概要図

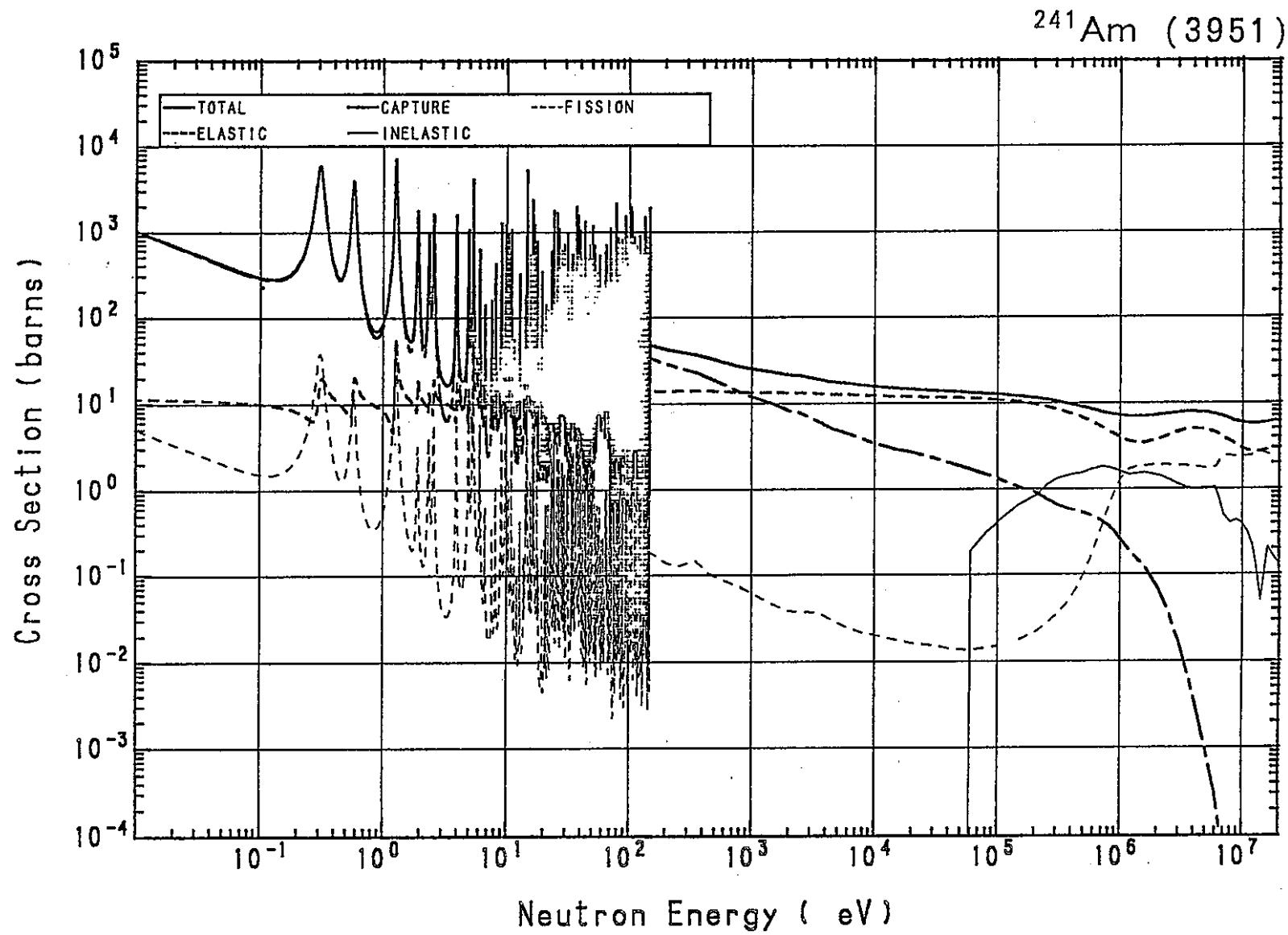


図 A1-6 Am241の断面積のエネルギー依存性概要図