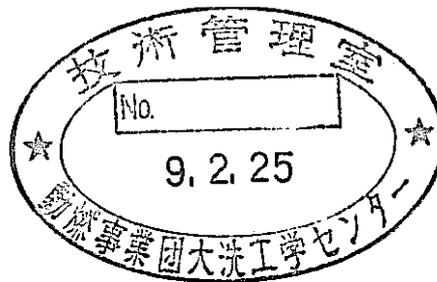


# 先進高速炉の検討

— 長半減期F.Pの消滅特性解析 —

(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18日

先進高速炉の検討  
- 長半減期FPの消滅特性解析 -

山岡 光明\*、川島 正俊\*

## 要 旨

使用済燃料中に含まれる核分裂生成物（FP）には、TRU核種と同様にきわめて長半減期のものが存在している。中性子束の高い高速炉では、これらFPを消滅できるポテンシャルがある。FPの断面積は低エネルギーで増大する傾向があるので、消滅効率を上げるために、FPを含むピンの他に水素化ジルコニウム（ $ZrH_{1.7}$ ）等の中性子減速材ピンを装荷したターゲット集合体による消滅が考えられる。

平成6年度は、Tc-99等のFPおよび減速材を装荷したFP消滅ターゲット集合体を炉心内部領域に配置することを前提とした検討を行った。その結果、減速材により消滅率は増大するものの、炉心燃料の出力スパイクが増大することがわかった。これを避けるには炉心周囲でのFP装荷が示唆された。

本年度は、Tc-99と減速材を装荷したターゲット集合体を炉心周囲に配置することを前提として、高速炉において効率的に消滅を行うための解析を行った。解析は主として、非均質性の強いターゲット集合体におけるTc-99の共鳴吸収効果を厳密に扱うために有効と考えられる連続エネルギーモンテカルロコードを用いて実施した。

その結果、以下のことがわかった。

- (1) Tc-99の吸収効率を上げるには共鳴領域の吸収が多く、熱群の吸収が少ない中性子スペクトルとする方が効率的である。これは構造材などの無駄吸収を減らすためである。このため、各減速材の減速能により適切な装荷量が存在する。
- (2) 消滅効率を上げるために、太径ZrH<sub>1.7</sub>ピン（19ピン）、細径Tc-99ピン（36ピン）の仕様を選定し、その結果、Tc消滅率は約4-5%/年、消滅量約15-20kg/年が得られた。
- (3) 上記仕様のターゲット集合体を装荷した場合の主要炉心特性への影響を評価した結果、ターゲット集合体に接した炉心燃料で出力密度がかなり高くなったが、炉心内部領域に装荷した場合よりも緩和された。ただし、ターゲット集合体の流量も含めた流量配分の調整が必要である。

---

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

事業団担当部課：大洗工学センター・基盤技術開発部・炉心技術開発室

契約番号；07C3738

事業団担当者：日向野 直美

\*) 東芝・原子力技術研究所・原子炉技術担当

March 18, 1996

Study on Advanced Fast Reactors\*  
- Analysis of Burning Characteristics of Long-Lived FPs -

Mitsuaki YAMAOKA\*\* and Masatoshi KAWASHIMA\*\*

## Abstract

Some of fission products (FPs) in spent fuels have very long half lives as transuranic nuclides. Fast reactors have a potential to transmute these FPs into short-lived ones because of high neutron flux. As neutron capture cross sections of FPs increase in low energy region, one of the effective means to transmute them is to irradiate them using target assemblies that contain pins loaded with neutron moderating material such as  $ZrH_{1.7}$  as well as FP loading pins.

In the work carried out in 1994, a study was performed on transmutation of long-lived FPs, assuming that FP target assemblies are loaded in the core region of fast reactors. As a result, it was found that neutron moderation tends to improve transmutation rate whereas it causes to significant power spike in the adjacent core fuel. So as to suppress the power spike, FPs' loading at the outer periphery of the core was suggested.

In the present study, an analysis was carried out to transmute FPs in fast reactors, assuming that target assemblies containing  $ZrH_{1.7}$  pins and Tc pins are loaded at the outer periphery of the core. The analysis was mainly performed using the continuous energy Monte Carlo code that is effective for rigorous treatment of resonance absorption of Tc99 in the target assembly with large heterogeneity.

The results are shown below.

- (1) To increase absorption rate of Tc99, the neutron spectrum where absorption in the resonance region is more than in the thermal region is advantageous. This is because the spectrum helps to suppress absorption by structural material. Therefore, the appropriate loading mass of moderator depends upon the moderating power.
- (2) The target assembly selected from the survey includes 19  $ZrH_{1.7}$  pins with large diameter and 36 Tc pins with small diameter. The transmutation rate of Tc99 is about 4-5%/year and the mass is about 15-20kg/year.
- (3) The effect of loading target assembly upon main core characteristics were analyzed. It was found that the power density of the core fuel adjacent to the target is rather high and is about the same as the maximum in the core. However, the power spike is much mitigated than that in the case of loading target assembly in the core region. Adjustment of coolant flow distribution is necessary.

---

(Continues to the next page)

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

**Contract Number ; 07C3738**

**PNC Liaison ; Naomi HIGANO, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center**

**\*\* )Core and Fuel Technology Group, Nuclear Engineering Laboratory, Toshiba Corporation**

## 目 次

要旨

表リスト

図リスト

1. はじめに	1
2. 共通仕様条件	3
3. 減速材選択の影響度解析	8
3.1 解析条件	8
3.2 解析結果	13
3.3 まとめ	28
4. FPピン及び減速材配置変更による影響度解析	29
4.1 解析条件	30
4.2 解析結果	37
4.2.1 FPピン配置及びピン径変更の影響解析(その1、減速材BeO)	37
4.2.2 FPピン配置及びピン径変更の影響解析(その2、減速材ZrH <sub>1.7</sub> )	40
4.2.3 減速材配置の影響度検討	49
4.2.4 遮蔽体組成の影響度検討	54
4.3 まとめ	56
5. 核熱特性の解析	57
5.1 解析条件	57
5.2 解析結果	61
5.3 まとめ	74
6. 解析手法による影響度比較計算	75
6.1 解析条件	75
6.2 解析結果	76
6.3 まとめ	81
7. まとめと課題	82
8. 参考文献	84
付録1 ターゲット集合体の炉心内部領域への装荷の結果(平成6年度作業)	85
付録2 Tc装荷ピン温度計算式	87
付録3 モンテカルロコード入力データ(MVP入力データ)	89

## 表リスト

表2-1 60万KWe高速炉炉心の炉心主要目

表2-2 JFS3J2炉定数のエネルギー群構造(1/2)

表2-2 JFS3J2炉定数のエネルギー群構造(2/2)

表3.1-1 ターゲット集合体AおよびBの仕様

表3.1-2 ターゲット集合体Aの各領域体積比

表3.2-1 Tc消滅特性の比較

表3.2-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率

表3.2-3 ZrH<sub>1.7</sub>領域の吸収量内訳

表3.2-4 高速フルエンスの比較

表4.1-1 ターゲット集合体の仕様

表4.1-2 ターゲット集合体Bの各領域体積比

表4.2.1-1 Tc体積比とTc消滅特性の関係(BeO減速材)

表4.2.1-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率(BeO減速材)

表4.2.2-1 Tc体積比とTc消滅特性の関係(減速材の比較)

表4.2.2-2 高速フルエンスの比較

表4.2.3-1 減速材集合体配置によるTc消滅特性への影響

表4.2.3-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率

表4.2.3-3 減速材集合体配置による高速フルエンスへの影響

表4.2.4-1 遮蔽体材質変更によるTc消滅特性への影響

表4.2.4-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率

表5.1-1 ターゲット集合体Cの仕様

表5.1-2 三次元体系モンテカルロ計算ケース(ターゲット集合体C)

表5.2-1 Tc消滅特性の比較

表5.2-2 ターゲット集合体内の吸収率(ケースC1)

表5.2-3 ターゲット集合体内の吸収率(各ケース、非均質)

- 表5.2-4 ターゲット集合体中性子吸収の内訳詳細（ケースC1・非均質）  
 表5.2-5 ターゲット集合体発熱量（1体あたり）  
 表5.2-6 Tcターゲットピンの線出力  
 表5.2-7 温度計算に使用した冷却材、被覆管およびFP試料の物性値  
 表5.2-8 Tcピン温度計算結果（ケースC2を対象）  
 表5.2-9 ターゲット装荷による炉心特性への影響（ケースC1 - 均質モデル）

- 表6.2-1 Tc消滅特性の比較（ケースC1 / 均質モデル）

## 図リスト

- 図1-1 テクネシウム99（Tc99）の核断面積（JENDL-3）  
 図2-1 60万KWe高速炉炉心配置図（ターゲット装荷）  
 図2-2 60万KWe大型高速炉炉心の径方向一次元モデル（基準体系）  
 図3.1-1 ターゲット集合体Aの断面図（37本ピン、全ピン同一径）  
 図3.1-2 Tcターゲット集合体の径方向一次元モデル（集合体Aをモデル化）  
 図3.2-1 Tc領域ごとのTc吸収量  
 図3.2-2 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；ZrH<sub>1.7</sub>）  
 図3.2-3 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；BeO）  
 図3.2-4 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；SiC）  
 図3.2-5 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）  
 図3.2-6 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率割合の比較（1.0に規格化）  
 図3.2-7 各領域の中性子スペクトル（ZrH<sub>1.7</sub>減速材のケース）  
 図3.2-8 各領域の中性子スペクトル（BeO減速材のケース）  
 図3.2-9 各領域の中性子スペクトル（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>減速材のケース）  
 図3.2-10 各領域の中性子スペクトル（SiC減速材のケース）

- 図4.1-1 減速材種類、減速材配置サーベイの計算体系
- 図4.1-2 ターゲット集合体B (FPピン細径、減速材ピン太径)
- 図4.1-3 Tcターゲット集合体の径方向一次元モデル (集合体Bをモデル化)
- 図4.2.1-1 Tc体積割合とTc消滅率・Tc消滅量の関係 (BeO減速材)
- 図4.2.2-1 Tc体積比とTc消滅率・Tc消滅量の関係
- 図4.2.2-2 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率 (減速材; BeOまたはZrH<sub>1.7</sub>)
- 図4.2.2-3 各領域の中性子スペクトル (ZrH<sub>1.7</sub>減速材のケース)
- 図4.2.2-4 各領域の中性子スペクトル (BeO減速材のケース)
- 図4.2.2-5 径方向出力分布 (BeO減速材のケース)
- 図4.2.2-6 径方向出力分布 (ZrH<sub>1.7</sub>減速材のケース)
- 図4.2.3-1 各領域の中性子スペクトル (ZrH<sub>1.7</sub>減速材、ターゲットの前後にSiC集合体のケース)
- 図4.2.3-2 径方向出力分布 (ZrH<sub>1.7</sub>減速材のケース)
- 図4.2.3-3 径方向出力分布 (ターゲット集合体内にZrH<sub>1.7</sub>減速材、前後にSiC減速材集合体)
  
- 図5.1-1 ターゲット集合体C (FPピン細径、減速材ピン太径)
- 図5.2-1 Tcピン径、Tc体積比とTc消滅率の関係
- 図5.2-2 詳細吸収量評価における各ピンのグループ分け
- 図5.2-3 ターゲット集合体各領域の中性子スペクトル (ケースC1 / 非均質)
- 図5.2-4 径方向出力分布 (集合体平均出力密度、ケースC1 / 非均質モデル)
  
- 図6.2-1 Tc99の中性子吸収率のエネルギー分布 (ケースC1 / 均質)
- 図6.2-2 径方向出力分布の比較 (集合体平均出力密度、ケースC1 / 均質)
- 図6.2-3 径方向出力分布 (ケースC1 / 均質、拡散計算)

## 1. はじめに

本作業は、動力炉核燃料開発事業団が実施している先進的な高速炉利用技術の検討の一環として、高速炉による長半減期FPの消滅技術の検討を行うものである。

使用済燃料中に含まれる核分裂生成物（FP）には、TRU核種と同様にきわめて長半減期のもが存在している。中性子束の高い高速炉では、これらFPを消滅できるポテンシャルがある。図1-1に示すように、FPの断面積は低エネルギーで増大する傾向があるので、消滅効率を上げるために、FPを含むピンの他に水素化ジルコニウム（ZrHx）等の中性子減速材ピンを装荷したターゲット集合体による消滅が考えられる。

平成6年度の作業<sup>(1)</sup>では、FPおよび減速材を装荷したターゲット集合体を炉心内に配置することを前提に、効率的な消滅を行うためのターゲット仕様を検討し、核熱特性評価を行うとともに、このような非均質な体系における計算手法について検討した。その結果、減速材により消滅率は増大するものの、炉心燃料の出力スパイクが大きくなることがわかった。（付録に、消滅特性と炉心燃料の出力に関する結果を示した。）これを避けるには、炉心周囲でのFP装荷が示唆された。

本作業では60万KWe相当の高速炉炉心周囲にFPターゲット集合体を装荷した場合の消滅特性をモンテカルロ計算コード等を用いて計算する。対象核種はTc-99とする。また、計算におけるパラメータとしては、減速材の種類、ターゲット集合体内のFPピンの配置、ターゲット集合体及び減速材の装荷方法を選定する。また、このような中性子漏洩の大きい体系でのモンテカルロ法と従来手法の違い等、計算手法の検討を行う。

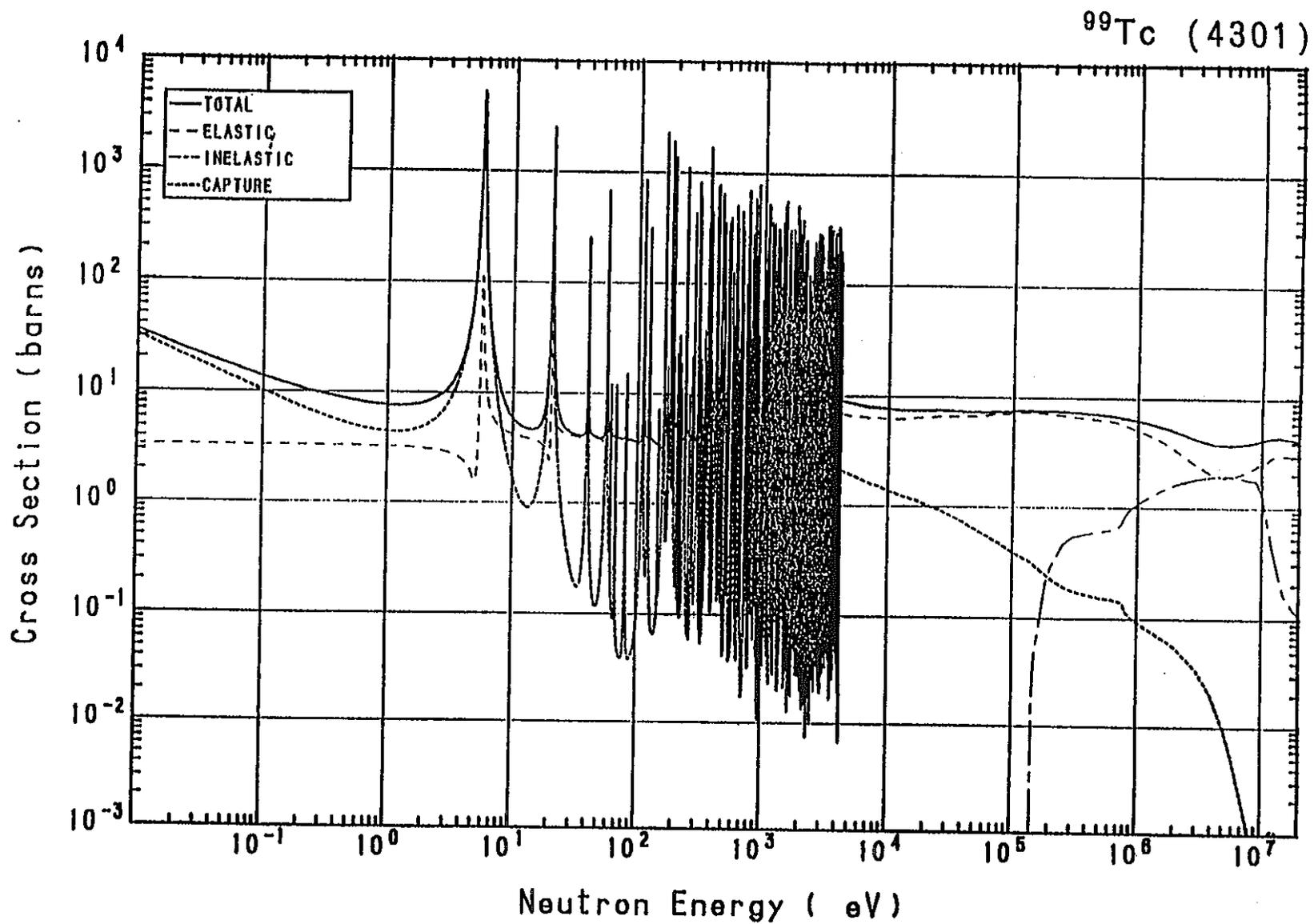


図1-1 テクネシウム99 (Tc99) の核断面積 (JENDL-3)



表2-1 60万KWe高速炉炉心の炉心主要目

項 目	仕 様				
熱出力, MW t	1 6 0 0				
炉心燃料形態	P u O <sub>2</sub> U O <sub>2</sub>				
炉心型式	均質2領域				
炉心燃料(内側/外側)、体	1 0 8 / 1 3 8				
径ブランケット	なし				
炉心高さ, cm	1 0 0				
炉心等価直径, cm	2 7 5				
軸ブランケット厚さ, cm	3 5				
ペレット密度, % T D	9 6				
ペレット中心孔体積比, v %	7 . 4				
P u 同位元素比, w %					
Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242	3 / 5 3 / 2 5 / 1 2 / 7				
組成体積比(v/o)					
	燃料	ギャップ	構造材	冷却材	吸収材
a)炉心燃料集合体	38.2*	5.1	22.4	34.3	— *ポア含む
b)主炉停止系制御棒	—	5.2	15.6	45.6	33.6 吸収体部
c)後備炉停止系制御棒	—	5.2	15.6	45.6	33.6 吸収体部
d)SUS遮蔽体(暫定値)					
第1層	—	—	70.0	30.0	
第2層	—	—	80.0	20.0	
P u 富化度, w %					
(本計算で使用したもの)	15.3/18.9	---	一次元サーベイ計算で使用		
(内側/外側)	17.01/21.05	---	二次元、三次元計算で使用		

表2-2 J F S 3 J 2 炉定数のエネルギー群構造(1/2)

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

\*) <sup>239</sup>Pu

表2-2 J F S 3 J 2 炉定数のエネルギー群構造(2/2)

Group		Upper Energy	Lower Energy	Lethargy Width	Fission Spectra
14	38	961.12 (eV)	748.52 (eV)	0.250	0.0
	39	748.52	582.95	0.250	0.0
	40	582.95	454.00	0.250	0.0
15	41	454.00	353.58	0.250	0.0
	42	353.58	275.36	0.250	0.0
	43	275.36	214.45	0.250	0.0
16	44	214.45	167.02	0.250	0.0
	45	167.02	130.07	0.250	0.0
	46	130.07	101.30	0.250	0.0
17	47	101.30	78.893	0.250	0.0
	48	78.893	61.442	0.250	0.0
	49	61.442	47.851	0.250	0.0
18	50	47.851	37.267	0.250	0.0
	51	37.267	29.023	0.250	0.0
	52	29.023	22.603	0.250	0.0
19	53	22.603	17.603	0.250	0.0
	54	17.603	13.710	0.250	0.0
	55	13.710	10.677	0.250	0.0
20	56	10.677	8.3153	0.250	0.0
	57	8.3153	6.4760	0.250	0.0
	58	6.4760	5.0435	0.250	0.0
21	59	5.0435	3.9279	0.250	0.0
	60	3.9279	3.0590	0.250	0.0
	61	3.0590	2.3824	0.250	0.0
22	62	2.3824	1.8554	0.250	0.0
	63	1.8554	1.4450	0.250	0.0
	64	1.4450	1.1254	0.250	0.0
23	65	1.1254	0.87642	0.250	0.0
	66	0.87642	0.68256	0.250	0.0
	67	0.68256	0.53158	0.250	0.0
24	68	0.53158	0.41399	0.250	0.0
	69	0.41399	0.32242	0.250	0.0
	70	0.32242 (eV)	0.00001 (eV)	10.650	0.0

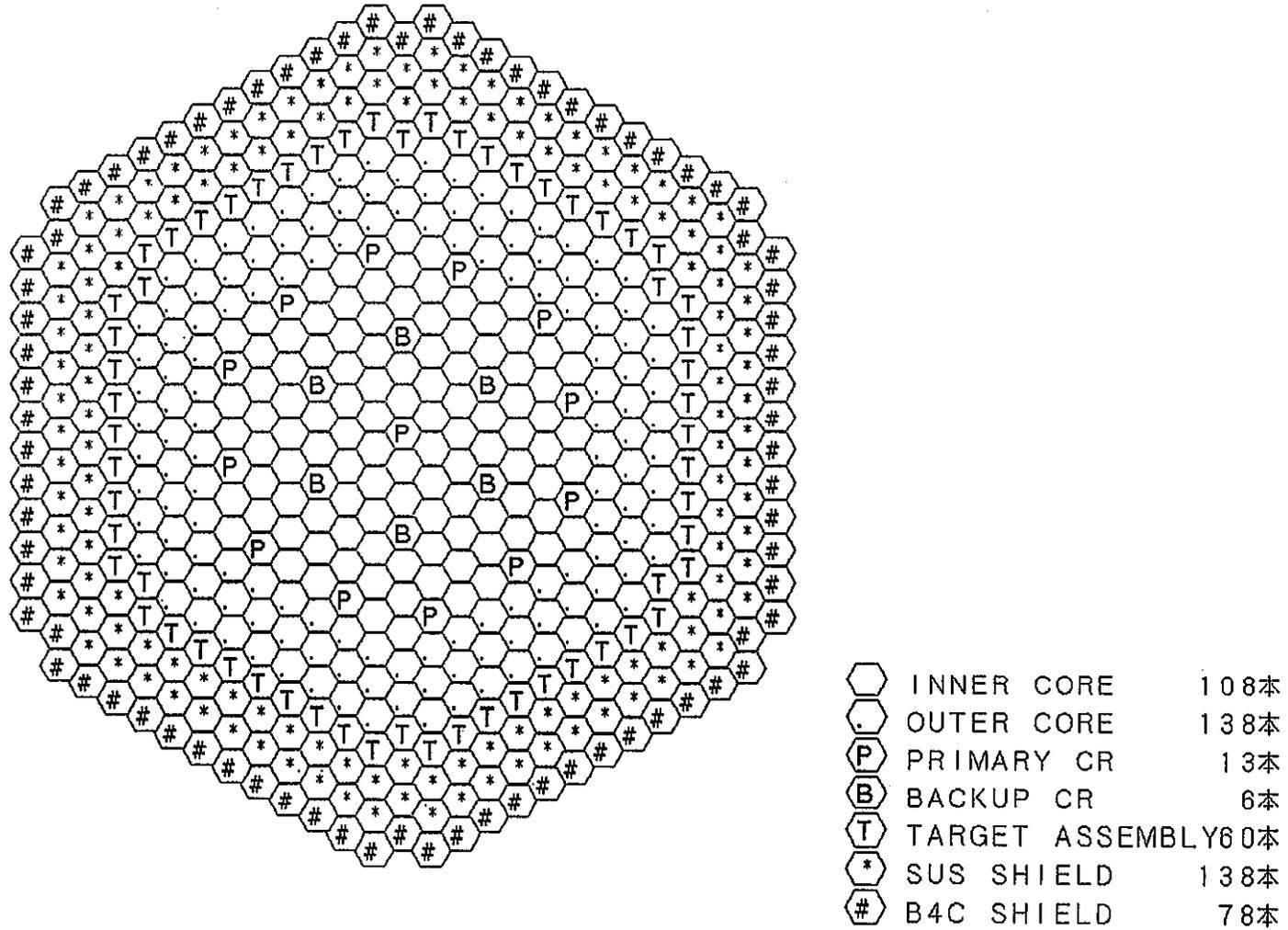
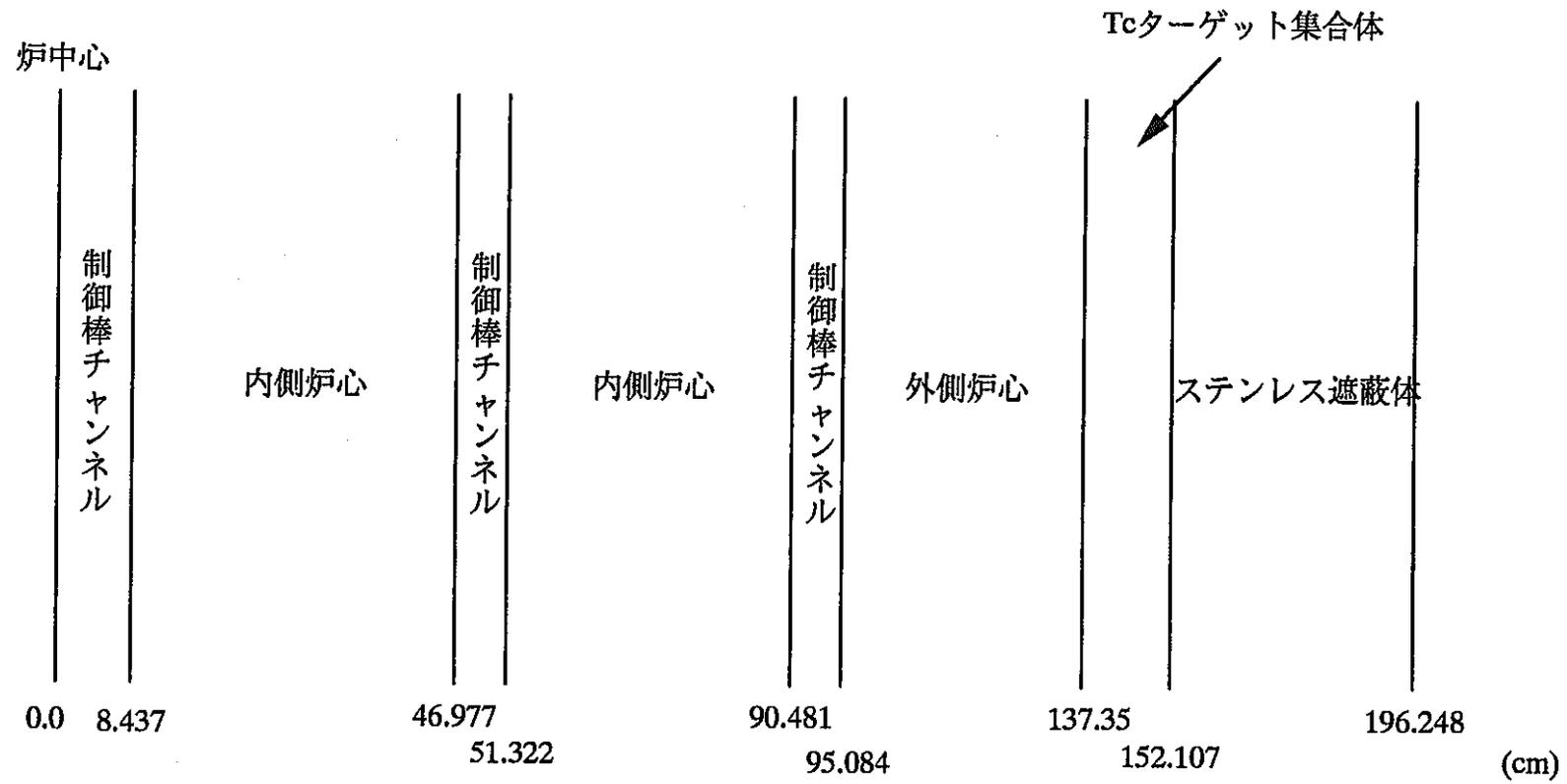


図2-1 60万kW e 高速炉炉心配置図 (ターゲット装荷)



注) Tcターゲット集合体を除き均質化

図2-2 600万KWe大型高速炉炉心の径方向一次元モデル(基準体系)

### 3. 減速材選択の影響度解析

炉心周囲にFP入り集合体を配置して消滅を行う場合に、効率良く消滅するための減速材を選出する解析を行う。計算コードはモンテカルロコードとする。

昨年度の検討の結果、 $ZrH_{1.7}$ で減速するとTcによる吸収は、共鳴領域と熱領域とで同程度である。スペクトルを変えると、他の核種の吸収との競合関係が変化する。これを考慮し、スペクトルの違いによる吸収効率の違いに着目する。SiCはFFTFでのFP消滅特性の検討において、 $ZrH_{1.7}$ とFPを含む集合体の周囲に置かれスペクトルを全体に軟らかくする働きをしていると考えられる。すなわち、減速材の組み合わせによる消滅特性の向上の可能性がある。そこで、SiCを含む減速特性が異なる種々の減速材について相対的な比較を行う。

#### 3.1 解析条件

(1) 減速材  $ZrH_{1.7}$ 、BeO、SiC、 $Al_2O_3$ 。以上4種

(2) 炉心モデル

Tcターゲットを装荷した60万KWe高速炉炉心・基準体系の一次元Rモデルとする。

(3) ターゲット集合体

##### ターゲット集合体A

昨年の結果から、 $Tc / (Tc + \text{減速材})$ の体積比は小さいほど消滅率は向上する。

ここでは約10%を基準としてサーベイを行うこととした。昨年の37本ピンモデルでいえばTc4本、減速材33本にほぼ相当する。このターゲット集合体ピン配置を図3.1-1に示す。ピン径はすべて同一である。ターゲット集合体仕様を表3.1-1に示す。これを一次元モデル化したものを図3.1-2に示す。ターゲット各領域の体積比を表3.1-2に示す。

○Tc体積比； $Tc / (Tc + \text{減速材}) = 0.108$

(4) モンテカルロコードMVPのヒストリー数

4000ソース、130ジェネレーション(52万ヒストリー)

統計誤差は各ケースとも固有値で0.06%  $\Delta k/k'$  程度、Tc吸収量で0.7%程度である。

表3.1-1 ターゲット集合体AおよびBの仕様

項 目	集合体A (ピン径1種類)	集合体B (ピン径2種類)	
		Tcピン	減速材ピン
ピン本数、本	37	36	19
ピン外径、mm	23.5	6.2	30.0
ピン内径、mm	21.5	5.6	28.0
被覆管肉厚、mm	1.0	0.3	1.0
ペレット径、mm	21.0	5.4	27.5
体積比、v%			
ペレット	57.3	3.7	50.5
冷却材	18.8	25.5	
構造材	21.1	18.2	
ギャップ	2.8	2.1	
ラッパ管形状	六角形	六角形	
ラッパ管内対面間距離、mm	147.7	同左	
ラッパ管肉厚、mm	4.0	同左	
集合体配列ピッチ、mm	160.7	同左	

表3.1-2 ターゲット集合体Aの各領域体積比

	領域			
	ギャップNa	ラッパ管	減速材領域	Tc領域
減速材	-	-	0.674	-
Tc	-	-	-	0.674
SUS	-	1.0	0.130	0.130
Na	1.0	-	0.165	0.165
Gap	-	-	0.031	0.031

注) 一次元モデルにおける領域ごとの体積比

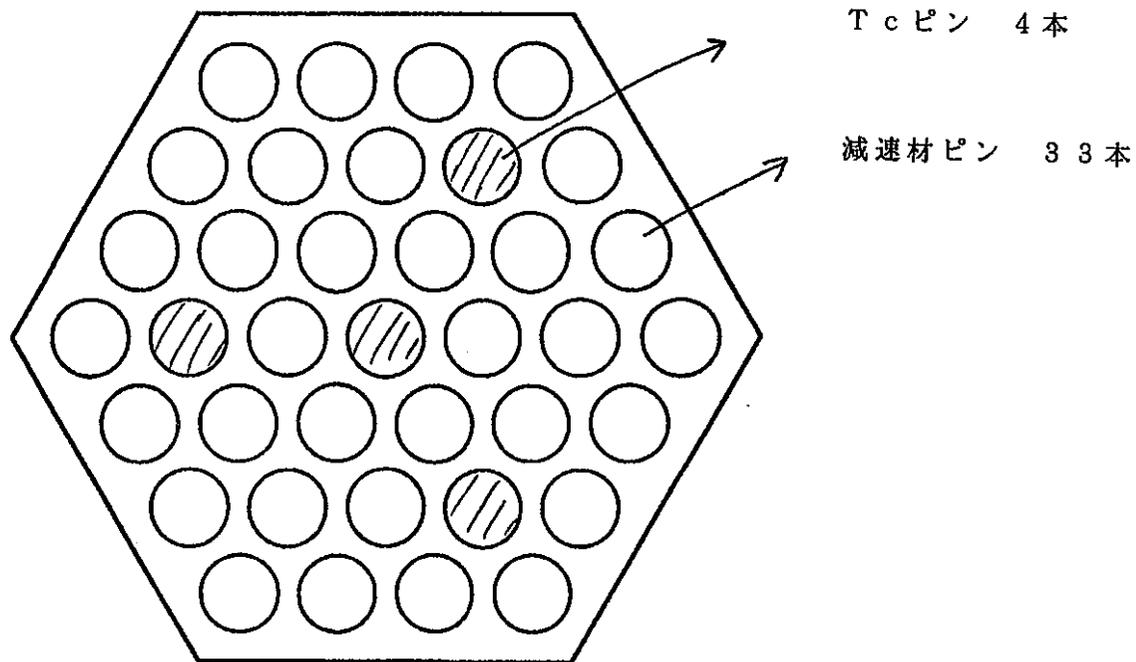


図3.1-1 ターゲット集合体Aの断面図（37本ピン、全ピン同一径）

注)  $ZrH_{1.7}$ , Tcを含む領域には側面のラップ管、Naもスミヤしている

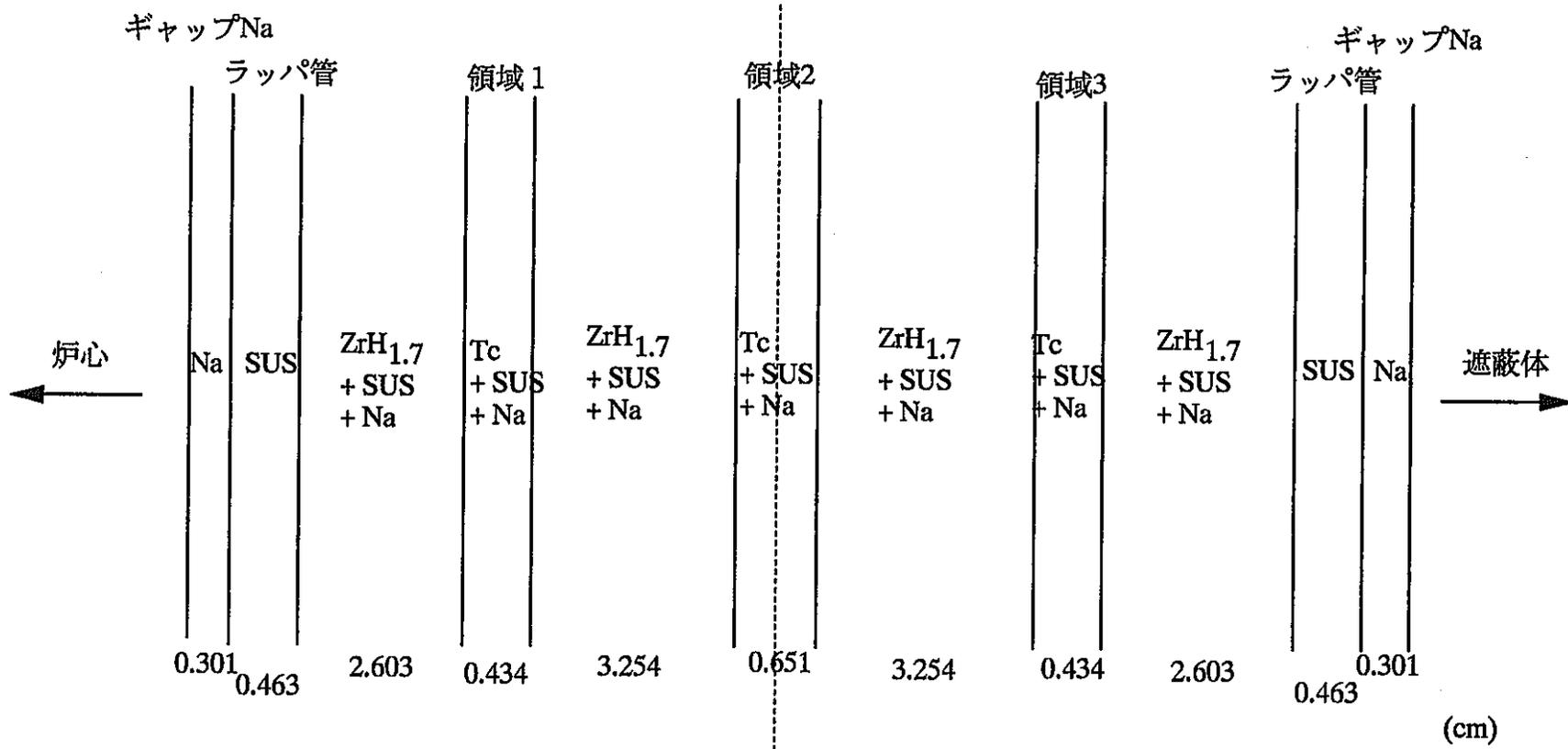


図3.1-2 Tcターゲット集合体の径方向一次元モデル (集合体Aをモデル化)

## 3. 2 解析結果

### (1) 消滅特性

表3.2-1 に消滅特性の比較を示す。減速材として、BeOの場合が最も消滅率が高く、ZrH<sub>1.7</sub>の場合が最も低い。BeOの場合で、年3.5%である。

吸収率の統計誤差は相対値1%弱である。

### (2) 中性子吸収の内訳

表3.2-2 にターゲットおよび遮蔽体における中性子吸収の内訳を示す。

○減速材がZrH<sub>1.7</sub>の場合、ZrH<sub>1.7</sub>ピンの中性子吸収が比較的大きい。これがTcの吸収と競合していると考えられる。これは、中性子スペクトルが最も軟らかいため、Tc以外の吸収（無駄吸収）が増えたためと考えられる。

○他の減速材の場合、減速材ピンの吸収はかなり小さい。

○ZrH<sub>1.7</sub>減速材の場合を除き、遮蔽体での吸収はTc吸収率の約3分の1から半分である。ZrH<sub>1.7</sub>領域での中性子吸収の内訳を表3.2-3 に示す。Fe, H, Zrの順で吸収が大きい。

### (3) Tc領域ごとの吸収内訳

図3.2-1 にTc領域ごとの吸収を示す。減速材がZrH<sub>1.7</sub>の場合、炉心から遠いほど吸収率の低下が大きいことがわかる。これは、ZrH<sub>1.7</sub>領域での無駄吸収のためと考えられる。他の減速材ではかなり平坦である。

### (4) 内訳エネルギー群ごとのTc吸収率内訳

図3.2-2から図3.2-5 にそれぞれのケースのエネルギー群ごとの吸収内訳を示す。また、図3.2-6 には、それぞれを規格化した吸収割合の相対比較を示す。

吸収率のエネルギー内訳は以下のように大きく異なる。

○減速材がZrH<sub>1.7</sub>の場合、70群（熱群）の吸収が大きく、約40%を占める。共鳴領域では小さい。

○減速材がSiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の場合、吸収は20-40群で大きく（86.5keV-454eV）、熱群の寄与は0.1%以下である。

○減速材がBeOの場合、吸収は53、58群（約20eV、5eV）の間の共鳴ピーク

で最も大きい、共鳴領域全体に広く及んでいる。熱群は1%強と小さい。

#### (5) 各領域中性子スペクトル

各ケースについて、各領域の中性子スペクトルを図3.2-7から図3.2-10に示す。ターゲット集合体の中性子スペクトルは、 $ZrH_{1.7}$ の場合に最も軟らかく $Al_2O_3$ と $SiC$ で最も硬いこと、 $BeO$ ではその中間であることがわかる。

#### (6) 各領域中性子スペクトル

各ケースのターゲット集合体Tcピンでの高速中性子スペクトルを表3.2-4に比較した。中性子スペクトルの傾向を反映して、 $ZrH_{1.7}$ では最も高速中性子フルエンスが少ない。

最も大きい $Al_2O_3$ のケースでも10年照射で $1.6 \times 10^{23} \text{nvt}$ であり、燃料被覆管の約 $2.7\text{--}2.8 \times 10^{23} \text{nvt}$ と比べて小さい。(PNC1520鋼の目安制限値は約 $3 \times 10^{23} \text{nvt}$ である。)

表3.2-1 Tc消滅特性の比較

減速材	Tc消滅量 (kg/年)	Tc消滅率 (%/年)
ZrH <sub>1.7</sub>	20.5	2.2
BeO	32.6	3.5
SiC	26.1	2.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.1	2.8

注) Tc消滅量は全炉心での値; 60体装荷  
 全炉心Tc装荷量934.0kg(1体; 15.6kg)  
 Tc体積割合  $Tc / (Tc + \text{減速材}) = 10.8\%$

表3.2-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率

減速材	Tc領域 吸収	減速材領域 吸収	遮蔽体 吸収
ZrH <sub>1.7</sub>	0.0370(0.0362)	0.0240	0.0035
BeO	0.0575(0.0569)	0.0061	0.0188
SiC	0.0459(0.0455)	0.0039	0.0278
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0463(0.0459)	0.0041	0.0253

注) Tc領域、減速材領域には構造材、冷却材を含む  
 規格化はfission neutronを1.13(keff)にしている  
 括弧内はTcのみの吸収

表3.2-3 ZrH<sub>1.7</sub>領域の吸収量内訳

核種	吸収率
Fe	0.0067
H	0.0052
Zr	0.0038
Ni	0.0036
Cr	0.0022
Mn	0.0013
Na	0.0008
Mo	0.0006
合計	0.0242

注) 規格化はfission neutronを1.13 (keff) にしている

Tc体積割合  $Tc / (Tc + ZrH_{1.7}) = 10.8\%$

表3.2-4 高速フルエンスの比較

減速材	高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /sec)	高速フルエンス (n/cm <sup>2</sup> )	
		5年装荷	10年装荷
ZrH <sub>1.7</sub>	1.588E+14	2.504E+22	5.008E+22
BeO	3.804E+14	5.998E+22	1.200E+23
SiC	4.977E+14	7.848E+22	1.570E+23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.694E+14	7.401E+22	1.480E+23

注) 全炉心Tc装荷量934.0kg(1体;15.6kg)  
Tc体積割合  $Tc / (Tc + 減速材) = 10.8\%$

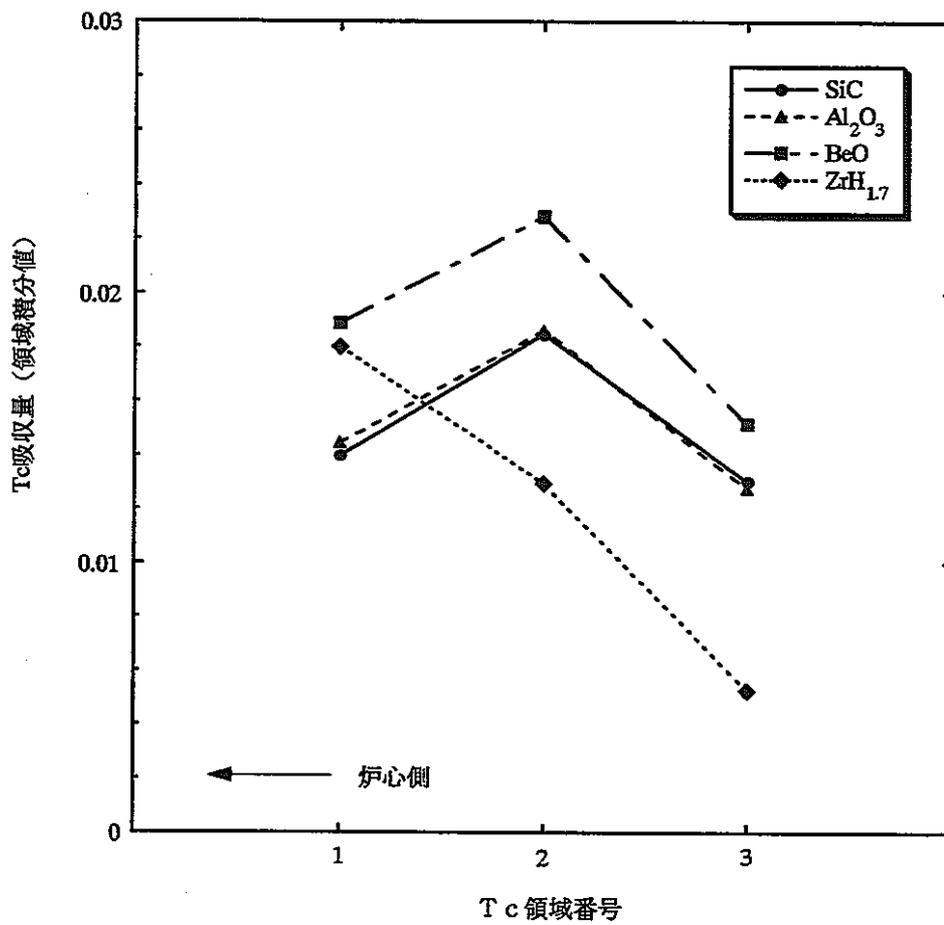


図3.2-1 Tc領域ごとのTc吸収量

中性子吸収率；核分裂数=1.13/炉心の場合のターゲット集合体1層分の積分値  
JFS3型群構造で表示

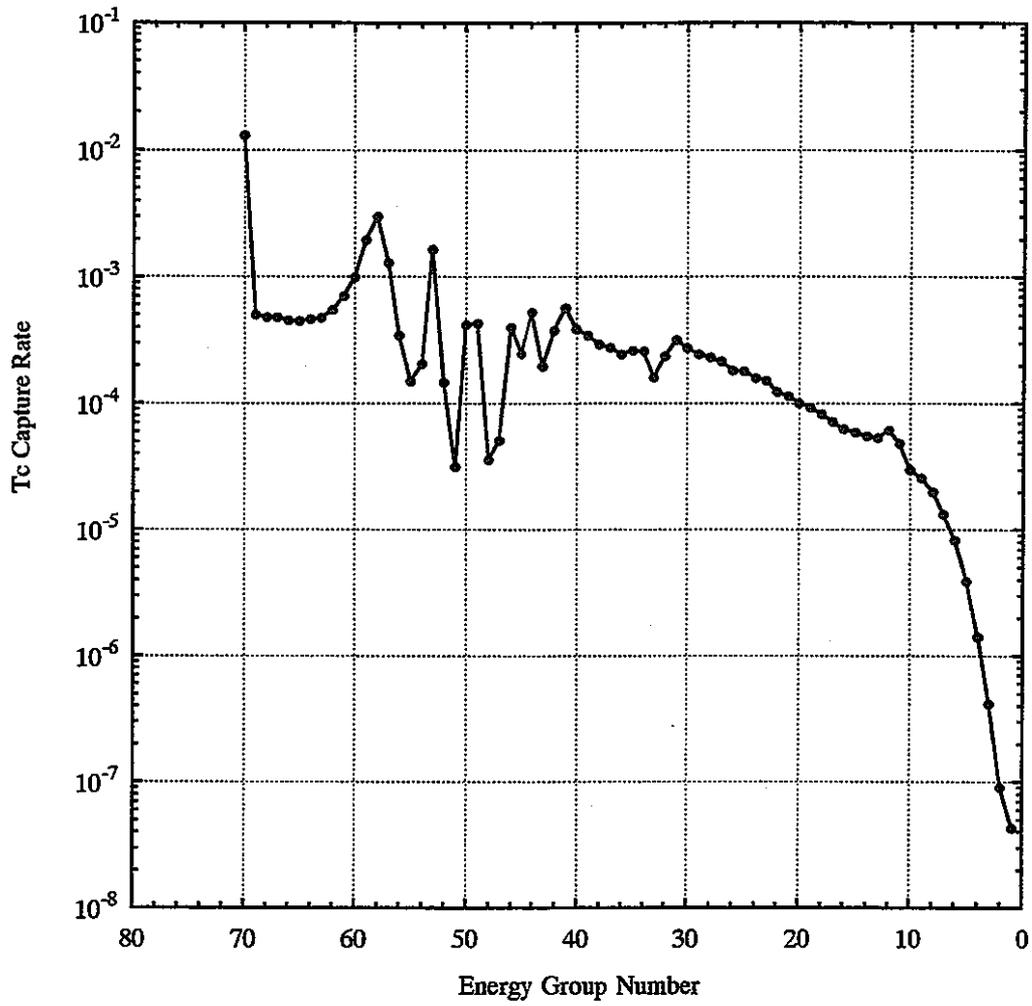


図3.2-2 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；ZrH<sub>1.7</sub>）

中性子吸収率；核分裂数=1.13/炉心の場合のターゲット集合体1層分の積分値  
JFS3型群構造で表示

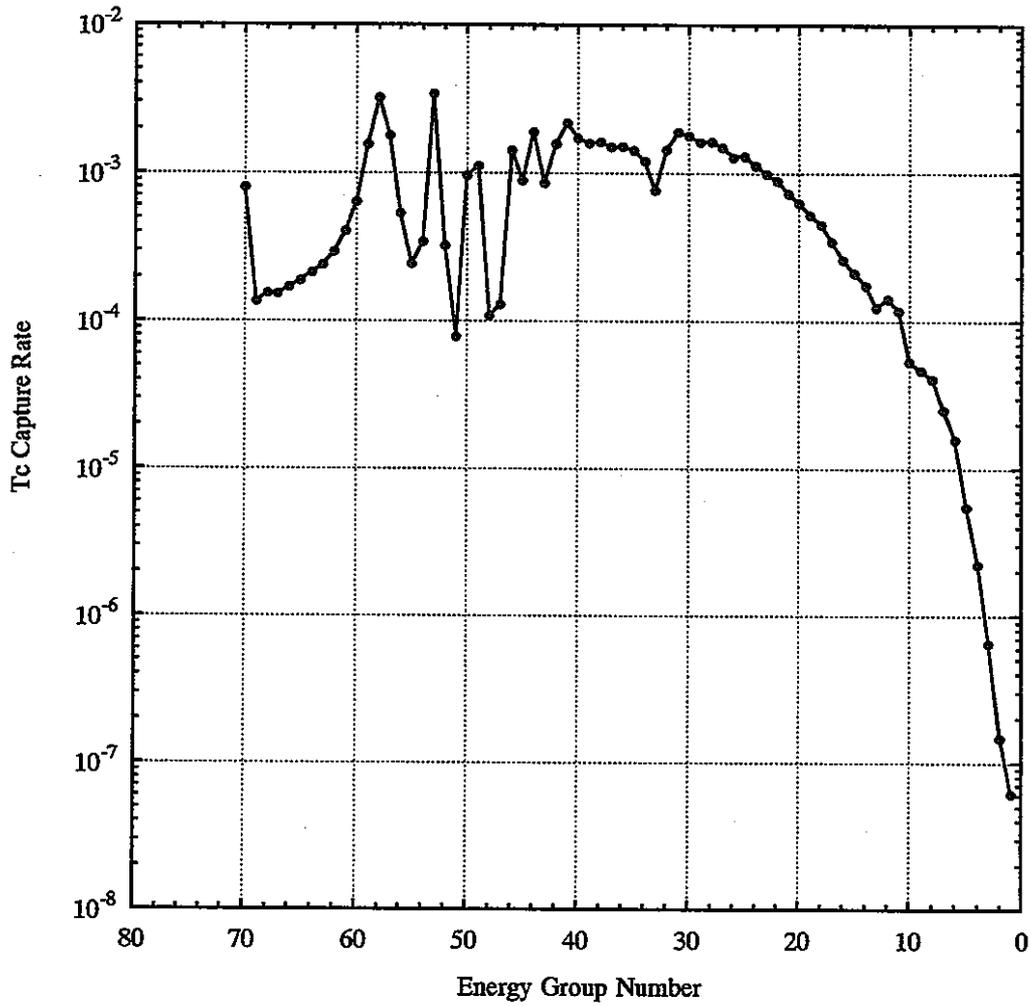


図3.2-3 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；BeO）

中性子吸収率；核分裂数=1.13／炉心の場合のターゲット集合体1層分の積分値  
JFS3型群構造で表示

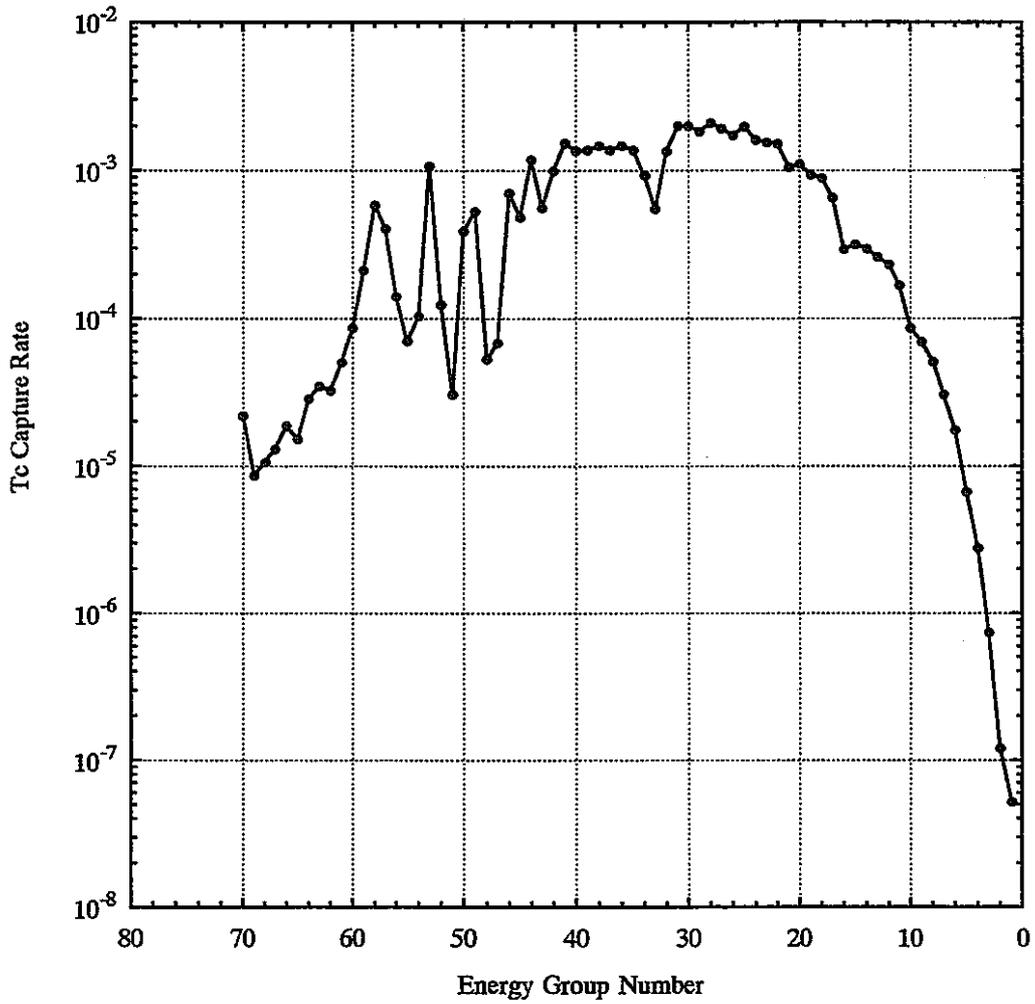


図3.2-4 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；SiC）

中性子吸収率；核分裂数=1.13 / 炉心の場合のターゲット集合体1層分の積分値  
JFS3型群構造で表示

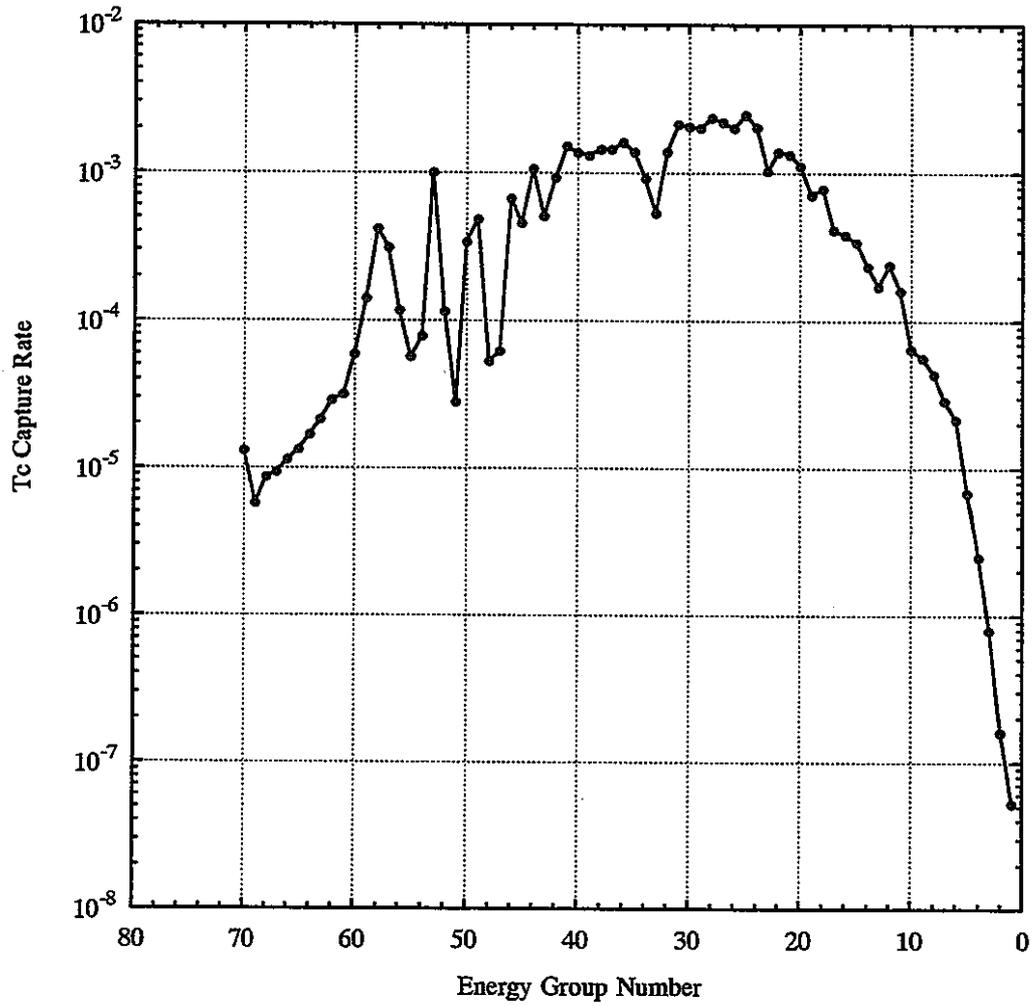


図3.2-5 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材； $Al_2O_3$ ）

中性子吸収率；エネルギー積分値を1.0と規格化  
JFS3型群構造で表示

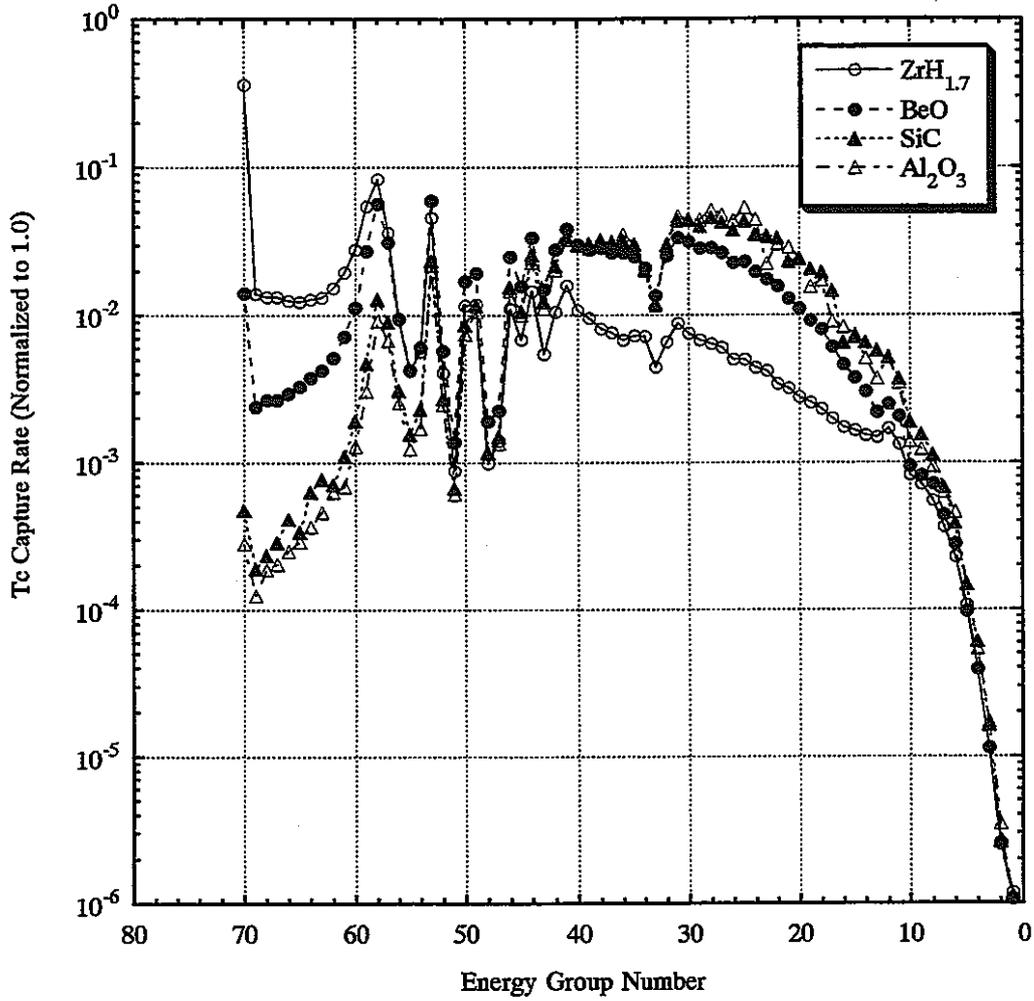


図3.2-6 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率割合の比較（1.0に規格化）

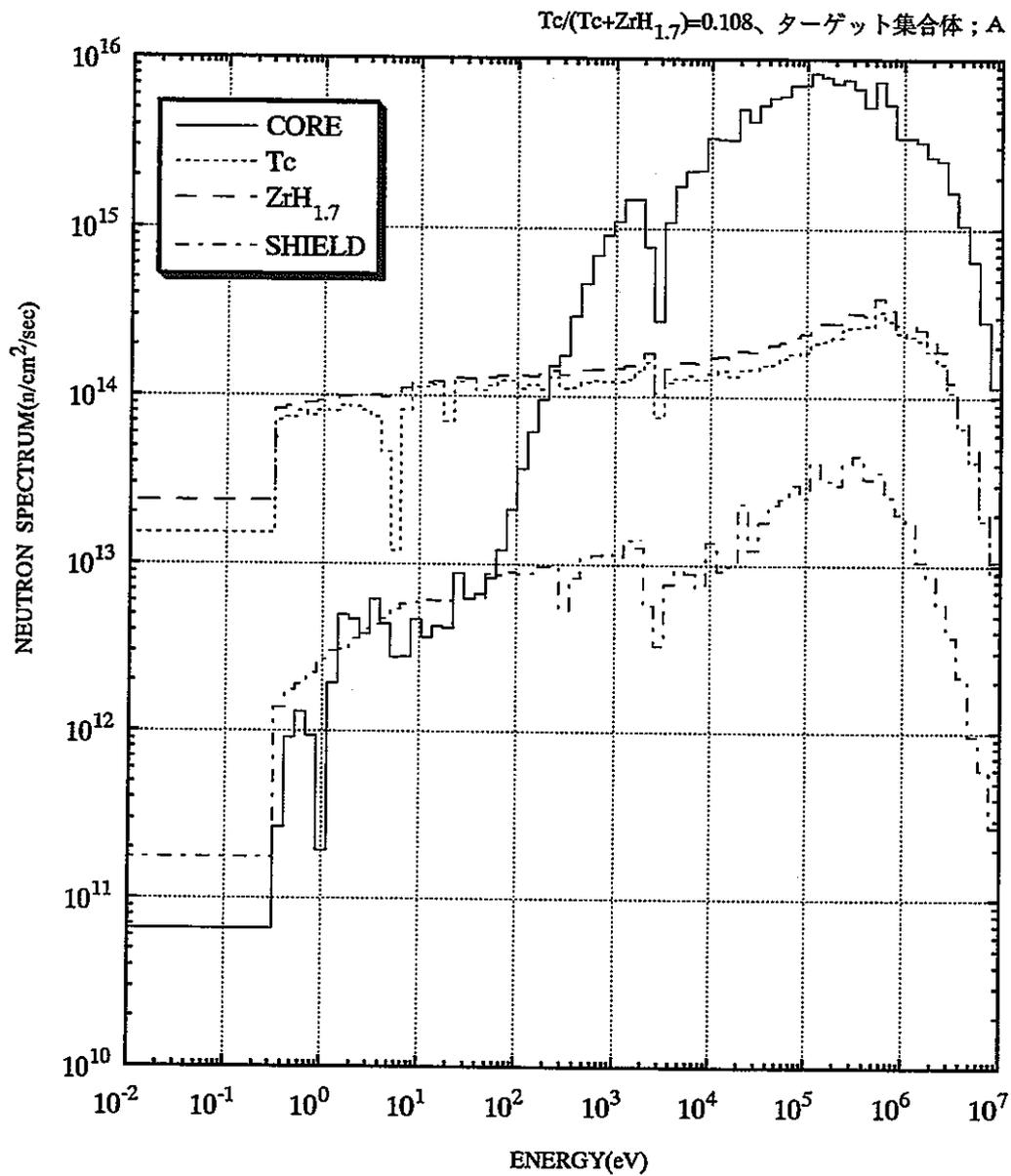


図3.2-7 各領域の中性子スペクトル (ZrH<sub>1.7</sub>減速材のケース)

Tc/(Tc+BeO)=0.108、ターゲット集合体：A

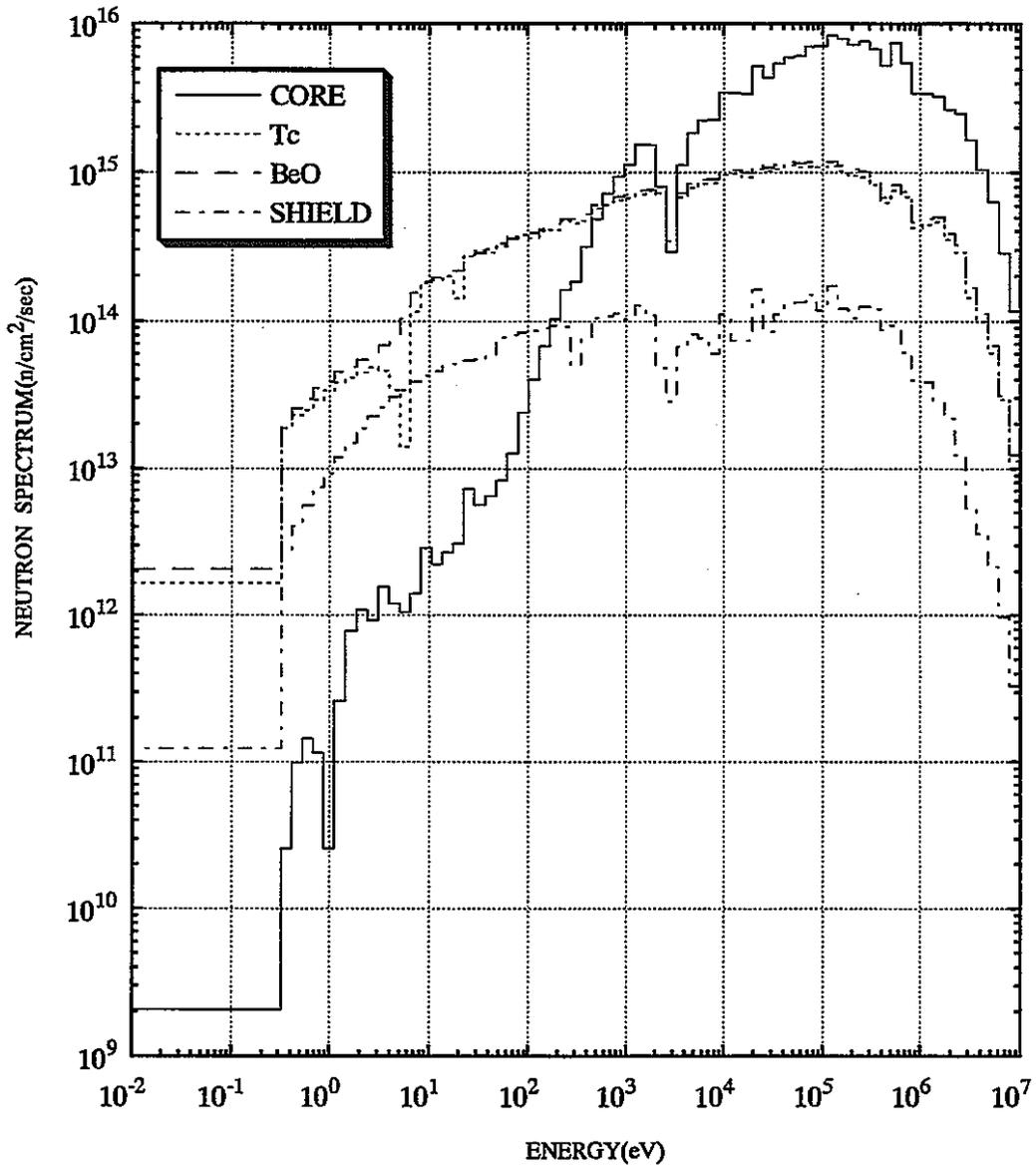


図3.2-8 各領域の中性子スペクトル (BeO減速材のケース)

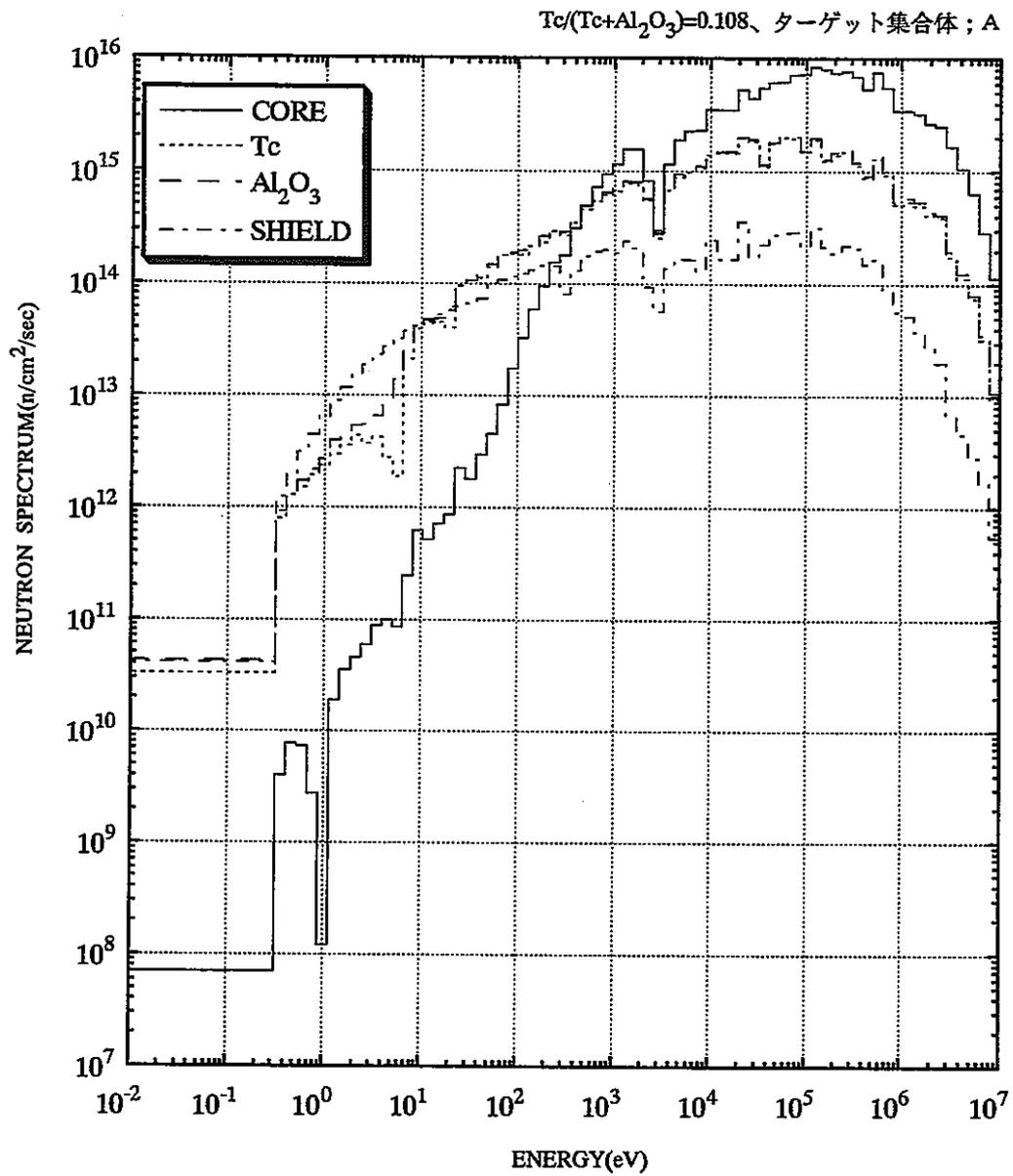


図3.2-9 各領域の中性子スペクトル (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>減速材のケース)

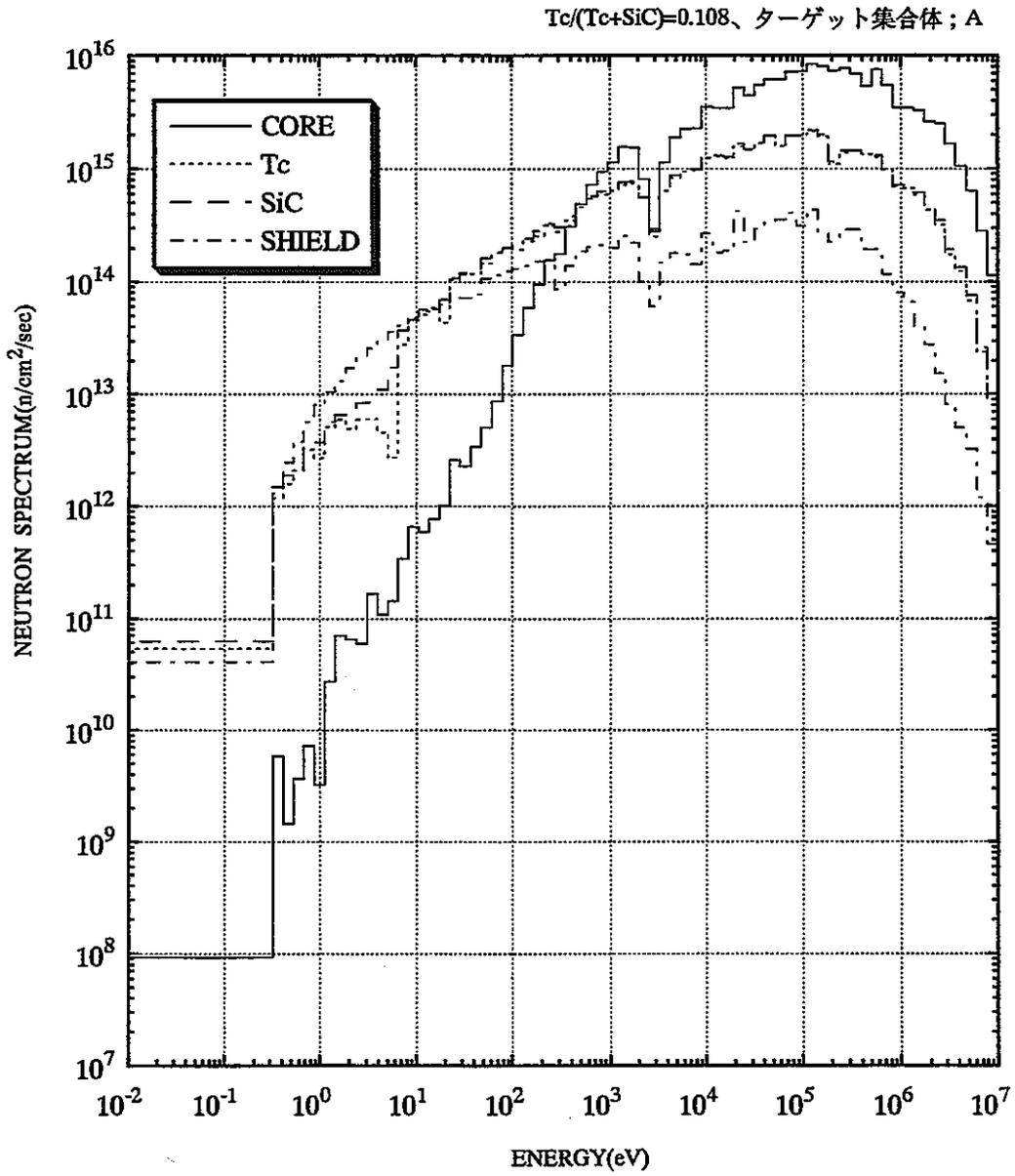


図3.2-10 各領域の中性子スペクトル (SiC減速材のケース)

### 3. 3 まとめ

本章のまとめを以下に示す。

- (1) 減速材およびTcのそれぞれの装荷体積比を同一とした解析の結果、BeOが最も消滅率が高くなった。これは熱群を避けて共鳴領域全体で吸収しているためと考えられる。熱群では他の核種の吸収も大きいので、吸収が競合し、無駄吸収が大きいためと考えられる。
- (2) ターゲット集合体の高速フルエンスとしては、炉心周囲に配置したことにより、5-10年間の照射が十分可能なレベルにあることがわかった。
- (3) ZrH<sub>1.7</sub>を用いる場合でも、ZrH<sub>1.7</sub>割合を下げて、適切な中性子スペクトルにすれば、BeOと同程度の消滅率を達成できる可能性がある。この場合、減速材装荷量を小さくできるメリットがある。(減速材物量削減) これは第4章で検討する。
- (4) さらに効率を上げるには、Tc割合を下げ、かつ、分散することと、背後で反射させること(後方に減速材をおき、もれを防ぐ)ことが考えられる。これも第4章で検討する。

#### 4. FPピン及び減速材配置変更による影響度解析

第3章の結果をもとにより減速能に優れた減速材を選択し、下記の検討を行った。

##### ○FPピン配置及びピン径変更の影響解析

太径の減速材ピンの配列に、径を変えた細いFPピンを分散させて装荷した場合について計算する。Tc装荷量および減速材装荷量ともに可変とする。減速材としては、BeO、ZrH<sub>1.7</sub>とする。

##### ○減速材集合体の装荷による影響度解析

ターゲット集合体と燃料部の境界およびターゲット集合体の後方に、減速能の小さな減速材集合体を配置する。このときの消滅率・消滅量および出力分布を解析する。これにより、減速材を1種類のみとする場合との得失を明らかにする。

##### ○遮蔽体組成の変更による影響度解析

ターゲット集合体からの中性子もれを減少させるため、その後方の遮蔽体を減速能の大きな組成として反射させた場合を検討する。

#### 4. 1 解析条件

(1) 減速材  $\text{BeO}$ 、 $\text{ZrH}_{1.7}$

#### (2) 炉心モデル

○FPピン配置及びピン径変更の影響解析

第2章に示した基準体系とした。

○減速材集合体の装荷による影響度解析

図4.1-1に示す体系IIIを設定した。ターゲットの前後にSiC集合体を配置

○遮蔽体組成による影響度解析

図4.1-1に示す体系IIを設定した。遮蔽体種類はSUS、 $\text{BeO}$ 、 $\text{ZrH}_{1.7}$

#### (3) ターゲット集合体

第3章で用いたターゲット集合体Aの他に、FPピンの吸収を効率化させるには小径のFPピンを太い径の減速材ピンの間に分散させたターゲット集合体Bを用いた。この集合体断面を図4.1-2に示す。ターゲット集合体仕様を表4.1-1に示す。これをモデル化したものを図4.1-3に示す。ターゲット各領域の体積比を表4.1-2に示す。以下のように、各検討では、これら2つの集合体を使いわけて検討した。

##### a. FPピン配置及びピン径変更の影響解析（その1、減速材 $\text{BeO}$ ）

ターゲット集合体Aでは減速材とTcの装荷量合計を基本的に一定としてサーベイした。Tc体積比として小さい方へサーベイしたので、FPピン径を小さく、減速材ピン径を大きくすることに対応する。

○ターゲット集合体A

$$\text{Tc体積比}; \text{Tc} / (\text{Tc} + \text{減速材}) = 0.027 \sim 0.108$$

○ターゲット集合体B

$$\text{Tc体積比}; \text{Tc} / (\text{Tc} + \text{減速材}) = 0.060$$

##### b. FPピン配置及びピン径変更の影響解析（その2、減速材 $\text{ZrH}_{1.7}$ ）

消滅率を増大させるため、Tc装荷量だけでなく、減速材装荷量をサーベイした。Tc装荷量を低減するだけでなく、中性子スペクトルを調整するため、減速

材装荷量を低減したので、実質的に両者を低減した。

○ターゲット集合体A、減速材  $Z_{rH_{1.7}}$

○Tc体積比； $T_c / (T_c + \text{減速材}) = 0.1 \sim 1.0$

c. 減速材配置の影響度検討

○ターゲット集合体A、減速材  $Z_{rH_{1.7}}$

○Tc体積比； $T_c / (T_c + \text{減速材}) = 0.108$ に固定

d. 遮蔽体組成による影響度解析

○ターゲット集合体A、減速材BeO

○Tc体積比； $T_c / (T_c + \text{減速材}) = 0.054$ に固定

(4) モンテカルロコードMVPのヒストリー数

4000ソース、130ジェネレーション（52万ヒストリー）

統計誤差は各ケースとも固有値で0.06%  $\Delta k/k'$  程度、Tc吸収量で0.7%程度である。

表4.1-1 ターゲット集合体の仕様

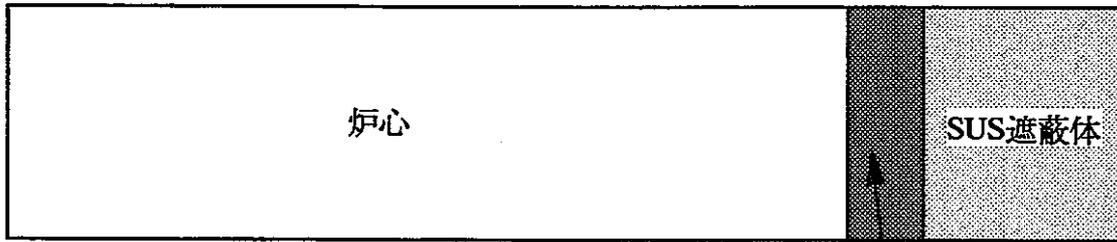
項 目	集合体 A (ピン径 1 種類)	集合体 B (ピン径 2 種類)	
		Tc ピン	減速材ピン
ピン本数、本	37	36	19
ピン外径、mm	23.5	6.2	30.0
ピン内径、mm	21.5	5.6	28.0
被覆管肉厚、mm	1.0	0.3	1.0
ペレット径、mm	21.0	5.4	27.5
体積比、v %			
ペレット	57.3	3.7	50.5
冷却材	18.8	25.5	
構造材	21.1	18.2	
ギャップ	2.8	2.1	
ラッパ管形状	六角形	六角形	
ラッパ管内対面間距離、mm	147.7	同左	
ラッパ管肉厚、mm	4.0	同左	
集合体配列ピッチ、mm	160.7	同左	

表4.1-2 ターゲット集合体Bの各領域体積比

	領域			
	ギャップNa	ラッパ管	減速材領域	Tc領域
減速材	-	-	0.658	-
Tc	-	-	-	0.286
SUS	-	1.0	0.137	0.114
Na	1.0	-	0.241	0.579
Gap	-	-	0.031	0.022

注) 一次元モデルにおける領域ごとの体積比

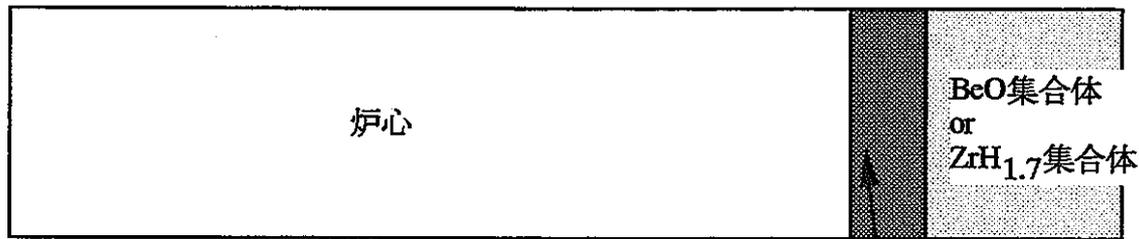
炉中心



I. 基準体系

ターゲット集合体  
減速材； $ZrH_{1.7}$ ,  $BeO$ ,  $SiC$ ,  $Al_2O_3$   
(Tc装荷割合サーベイも実施)

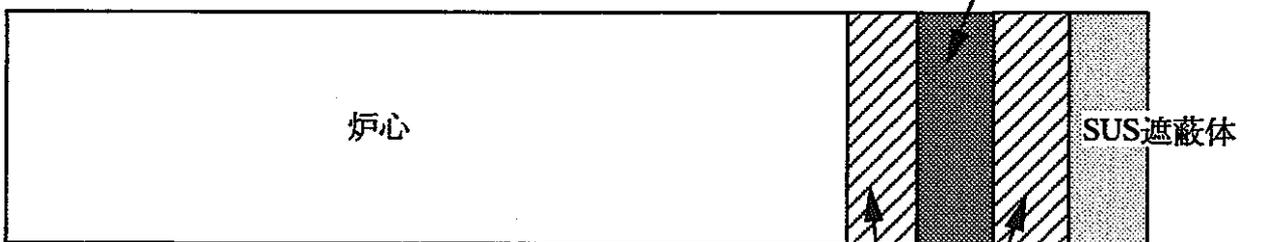
炉中心



II. 遮蔽体を変更した体系

ターゲット集合体  
減速材； $BeO$

炉中心

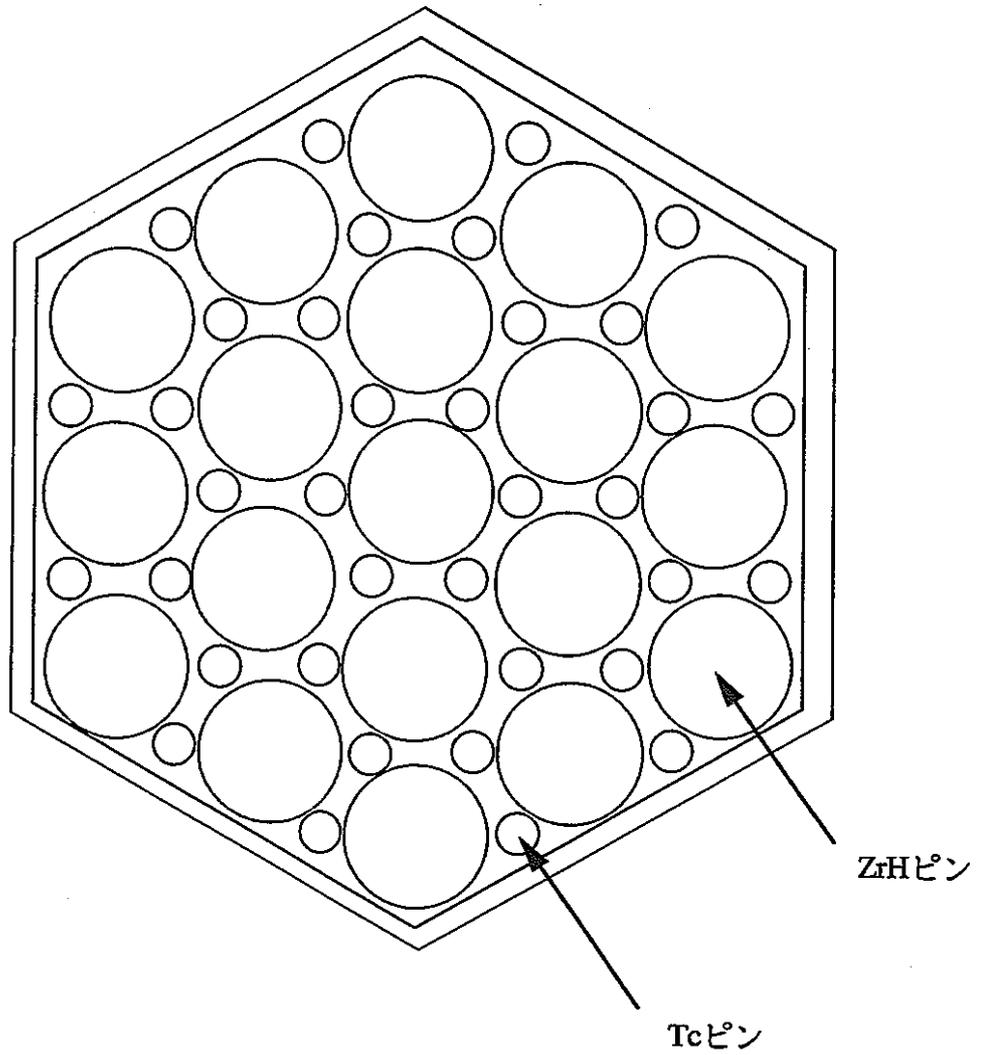


III.  $SiC$ 集合体をターゲット集合体前後に配置した体系

ターゲット集合体  
減速材； $ZrH_{1.7}$

$SiC$ 集合体

図4.1-1 減速材種類、減速材配置サーベイの計算体系



(ピン仕様、cm)

	Tcピン	ZrHピン
ピン外径	0.62	3.0
ピン内径	0.56	2.8
ペレット径	0.54	2.75

図4.1-2 ターゲット集合体B (FPピン細径、減速材ピン太径)

注) BeO, Tcを含む領域には側面のラップ管、Naもスミヤしている

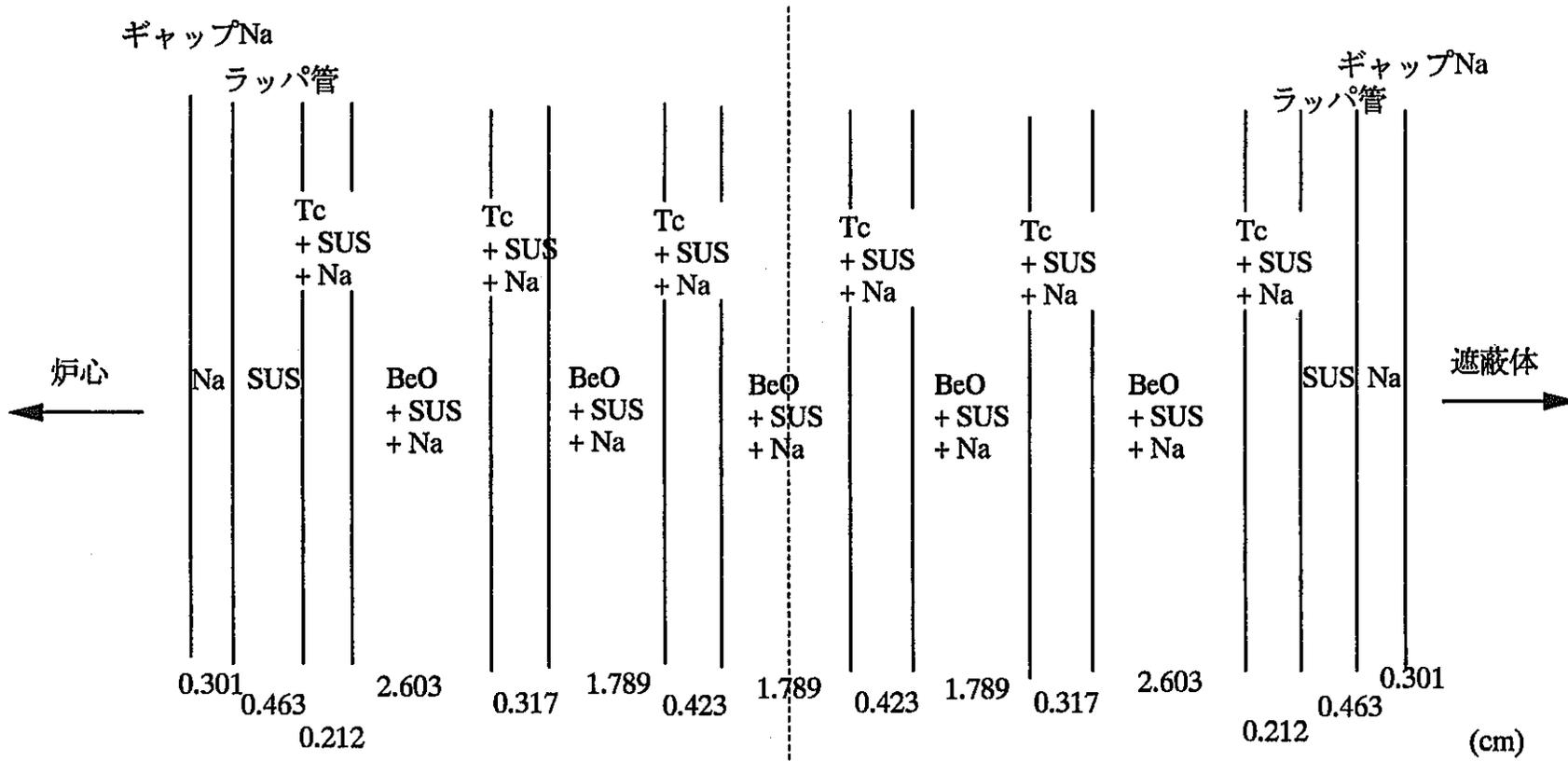


図4.1-3 Tcターゲット集合体の径方向一次元モデル (集合体Bをモデル化)

## 4.2 解析結果

### 4.2.1 FPピン配置及びピン径変更の影響解析（その1、減速材BeO）

#### （1）解析条件

##### a. 炉心モデル

基準体系

##### b. ターゲット集合体

○ターゲット集合体A及びB

$$\text{○Tc体積比； } Tc / (Tc + \text{減速材}) = 0.027 \sim 0.108 \quad (\text{A})$$

$$Tc / (Tc + \text{減速材}) = 0.060 \quad (\text{B})$$

#### （2）消滅特性

表4.2.1-1 に消滅特性の比較を示す。これをグラフ化したものを図4.2.1-1 に示す。

Tc体積比は低いほど消滅率が增大し、体積比2.7%で、消滅率は9%である。この時の全体の消滅量は約21kg/年である。

集合体A、Bの差はTc体積比が同じであれば消滅特性はほぼ同じであるが、Tcピンを細径化し、分散させた集合体Bの方がやや消滅率が高い。

#### （3）中性子吸収の内訳

表4.2.1-2 にターゲットおよび遮蔽体における中性子吸収の内訳を示す。

Tc体積比が小さいほど、減速材の吸収が大きくなっていることがわかる。

#### （4）まとめ

Tc体積比は小さいほど消滅率が高い。但し、消滅量は減少する。

軽水炉や高速炉のTc生成量は約24kg/GWe/年であるため、今回のサーベイ範囲のケースでは100万KWeの1基分のTc消滅量である。

表4.2.1-1 Tc体積比とTc消滅特性の関係 (BeO減速材)

ターゲット集合体 タイプ	Tc体積比	Tc装荷量 (kg/年)	Tc消滅量 (kg/年)	Tc消滅率 (%/年)
A	0.108	934.0	32.6	3.5
A1	0.054	466.7	27.0	5.8
A2	0.027	233.1	21.1	9.0
-----				
B	0.060	462.4	28.2	6.1

注) Tc消滅量は全炉心での値; 60体装荷

$$Tc \text{ 体積比} = Tc / (Tc + BeO)$$

表4.2.1-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率 (BeO減速材)

ターゲット集合体 タイプ	Tc体積比	Tc領域 吸収	減速材領域 吸収	遮蔽体 吸収
A	0.108	0.0575(0.0569)	0.0061	0.0188
A1	0.054	0.0475(0.0470)	0.0093	0.0229
A2	0.027	0.0371(0.0367)	0.0129	0.0259
-----				
B	0.060	0.0508(0.0499)	0.0076	0.0224

注) Tc領域、減速材領域には構造材、冷却材を含む  
規格化はfission neutronを1.13 (keff) にしている  
括弧内はTcのみの吸収

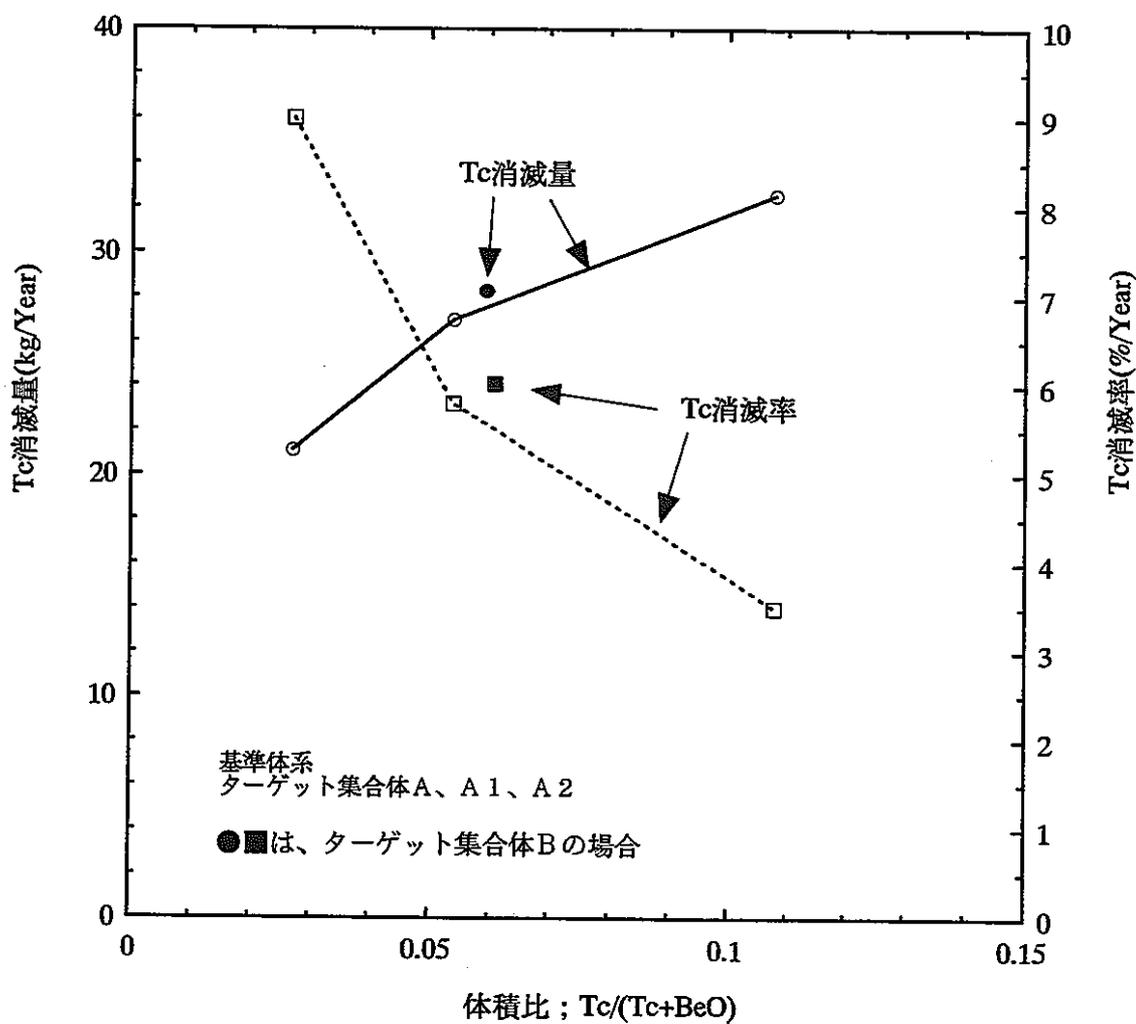


図4.2.1-1 Tc体積割合とTc消滅率・Tc消滅量の関係 (BeO減速材)

#### 4.2.2 FPピン配置及びピン径変更の影響解析（その2、減速材ZrH<sub>1.7</sub>）

ZrH<sub>1.7</sub>を減速材とする場合について、以下の検討を行った。

##### (1) ZrH<sub>1.7</sub>装荷量の低減

###### a. 解析条件

ターゲット集合体A、Tc装荷量は一定（934kg）

ZrH<sub>1.7</sub>装荷量を可変としてサーベイした。

###### b. 解析結果

図4.2.2-1 に結果を示す。これよりZrH<sub>1.7</sub>を減少させる（=Tc体積比を上げる）と、消滅率が增大する。Tc体積比が0.34程度で最大となる。これは、Tc吸収の最適なスペクトルが得られたことを示す。消滅率は約3.3%/Yであり、BeOの場合の3.5%/Yと同程度である。

ZrH<sub>1.7</sub>装荷量は基準Tc体積比では約3783kgであるが、最適な体積比（0.34）では891kgに減少する。

##### (2) Tc装荷量の低減

###### a. 解析条件

○ターゲット集合体A

○Tc装荷量=233.1kg（1）の場合の4分の1とする。← 消滅率を上げる

○ZrH<sub>1.7</sub>装荷量；上記最適なZrH<sub>1.7</sub>装荷量と同一とする。← 最適スペクトルの観点より選定

この結果、Tc体積比=0.115

（ターゲット内の絶対体積比はTc；0.0150、ZrH<sub>1.7</sub>；0.115）

これにより、TcとZrH<sub>1.7</sub>合計の体積比はこれまでより減少し、Na体積比が増大する。

###### b. 解析結果

結果を表4.2.2-1 に示す。BeOの場合との比較結果を示す。

消滅率は7.7%/Yとなり、（1）の最適な場合の3.3%/Yの2倍強となった。

消滅率はBeOの場合の9.0%/Yよりもやや低いが、これはTc装荷量が減ったので最適なスペクトルからややずれたためと考えられる。

### (3) BeO減速材の場合との比較

上記最も消滅率の高いケースについて、BeO減速材での最も高い消滅率のケースとの比較を行った。両ケースでTc装荷量は同一である。

#### a. 消滅率

表4.2.2-1 に示したように、消滅率はBeOの場合の方が10%程度高い。図4.2.2-2 にエネルギー群ごとの中性子吸収率を比較した。これより、吸収率のエネルギー依存性はよく似ているものの、ZrH<sub>1.7</sub>の場合の方がやや低エネルギーでの吸収割合が大きいことがわかる。

#### b. 中性子束分布（領域ごとの中性子スペクトル）及び高速中性子フルエンス

領域ごとの中性子スペクトルを図4.2.2-3、図4.2.2-4 に示す。低エネルギーのスペクトルに大きな差があることがわかる。また、ターゲット集合体の高速フルエンスを表4.2.2-2 に比較した。高速フルエンスはBeO減速材の方が20%程度大きい。しかし、10年照射でも約 $1.3 \times 10^{23}$ nvtと燃料に比べて小さい。

#### c. 出力分布

両ケースの出力分布を図4.2.2-5、図4.2.2-6 に示す。これより、BeOの方が隣接した炉心燃料の出力ピークが小さいことがわかる。これは、中性子の減速能が小さいためと考えられる。

### (4) まとめ

ZrH<sub>1.7</sub>の場合、最適なTc体積比がBeOと異なること、BeOの場合と遜色ない消滅率とできることが確認された。

減速材装荷量はBeOよりも少なくできるので、Tc量の増大等、自由度が大きいことを考えると、今後の検討はZrH<sub>1.7</sub>で行うことが良いと考えられる。

さらなる最適化は、ピン非均質性を扱った三次元計算にて検討した方が正確と考えられる。

表4.2.2-1 Tc体積比とTc消滅特性の関係（減速材の比較）

減速材	Tc体積比	Tc装荷量 (kg/年)	Tc消滅量 (kg/年)	Tc消滅率 (%/年)
BeO	0.027	233.1	21.1	9.0
ZrH <sub>1.7</sub>	0.115	233.1	18.1	7.7

注) ターゲットA集合体；ただし、ZrH<sub>1.7</sub>の場合、減速材割合を減少させた仕様

Tc装荷量同一

Tc消滅量は全炉心での値；60体装荷

Tc体積比 =  $Tc / (Tc + \text{減速材})$

ZrH<sub>1.7</sub>のTc体積比はサーベイでの最適値

表4.2.2-2 高速フルエンスの比較

減速材	Tc 体積比	高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /sec)	高速フルエンス (n/cm <sup>2</sup> )	
			5年装荷	10年装荷
BeO	0.027	4.112E+14	6.484E+22	1.297E+23
ZrH <sub>1.7</sub>	0.115	3.352E+14	5.285E+22	1.057E+23

注) Tc 装荷量一定

Tc 体積比 = Tc / (Tc + 減速材)

ZrH<sub>1.7</sub>についてはサーベイでの最適値

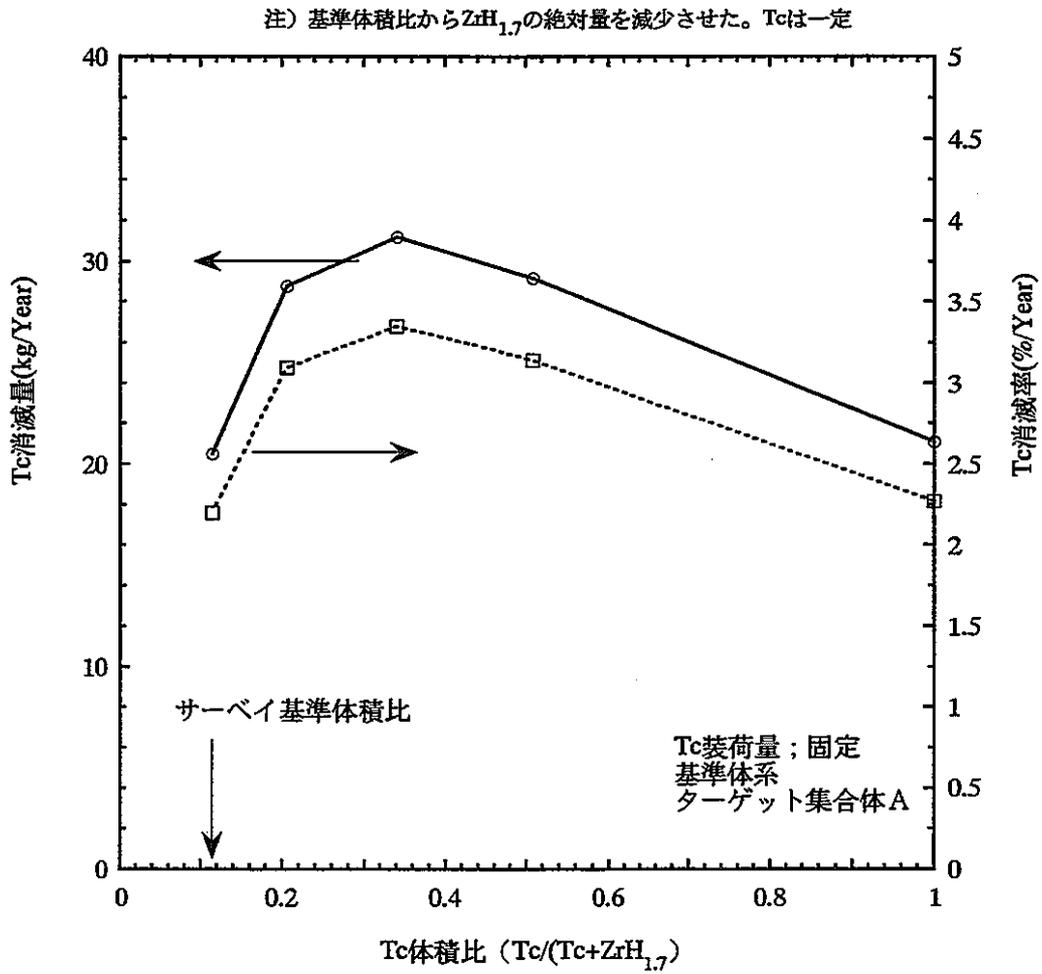


図4.2.2-1 Tc体積比とTc消滅率・Tc消滅量の関係

中性子吸収率；核分裂数=1.13/炉心の場合のターゲット集合体1層分の積分値  
JFS3型群構造で表示

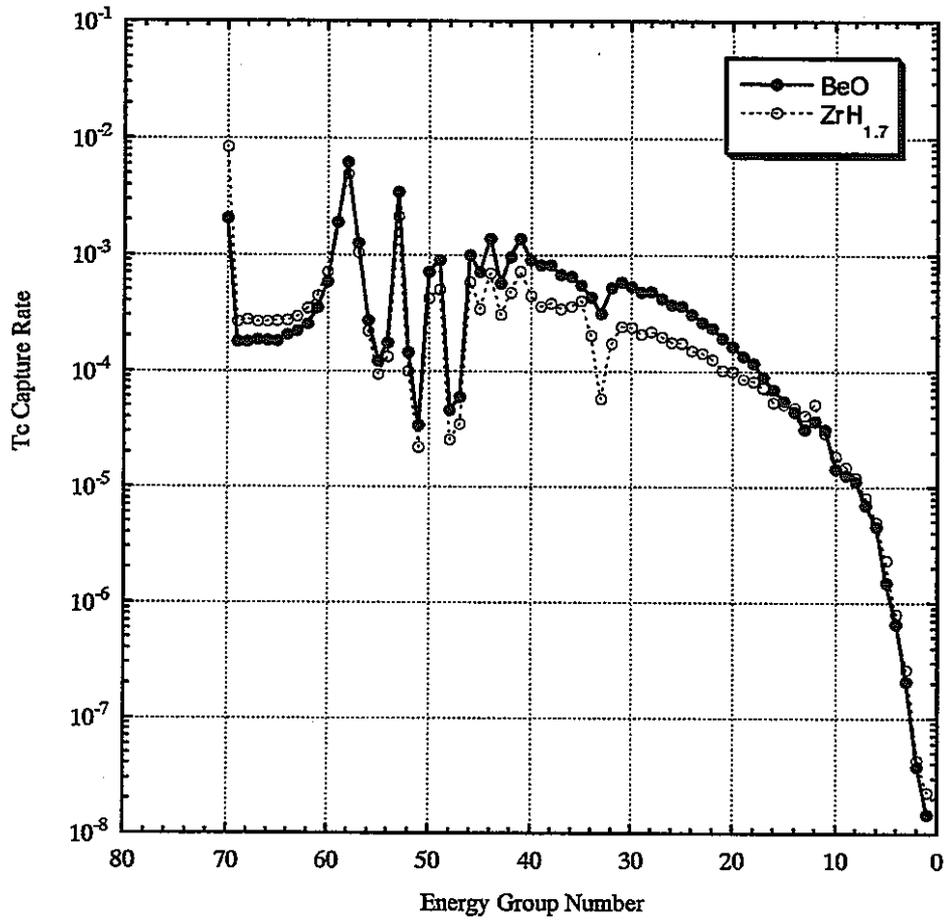


図4.2.2-2 エネルギー群ごとのTc中性子吸収率（減速材；BeOまたはZrH<sub>1.7</sub>）

Tc/(Tc+ZrH<sub>1.7</sub>)=0.115、ターゲット集合体；A2

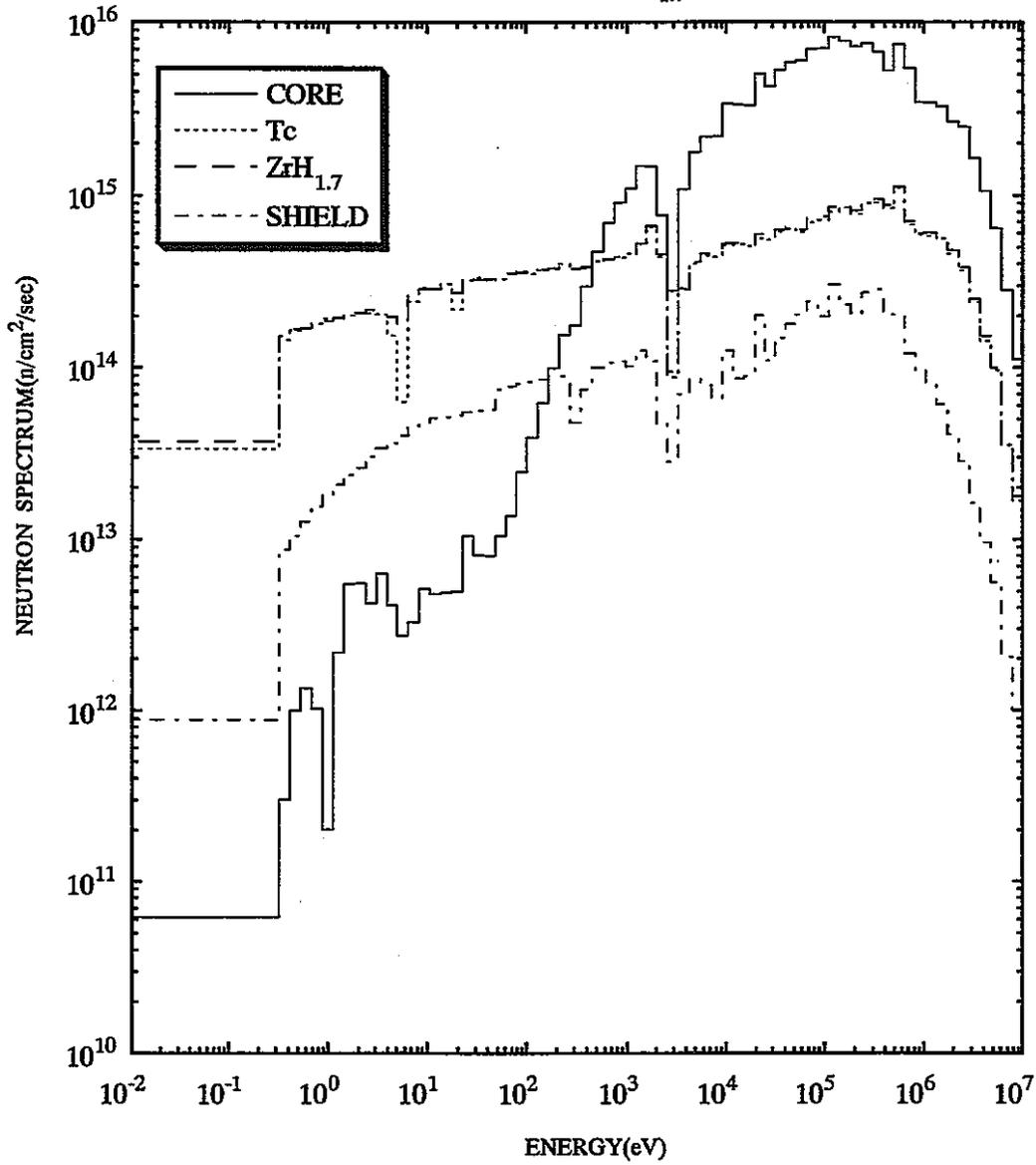


図4.2.2-3 各領域の中性子スペクトル (ZrH<sub>1.7</sub>減速材のケース)

Tc/(Tc+BeO)=0.027、ターゲット集合体；A2

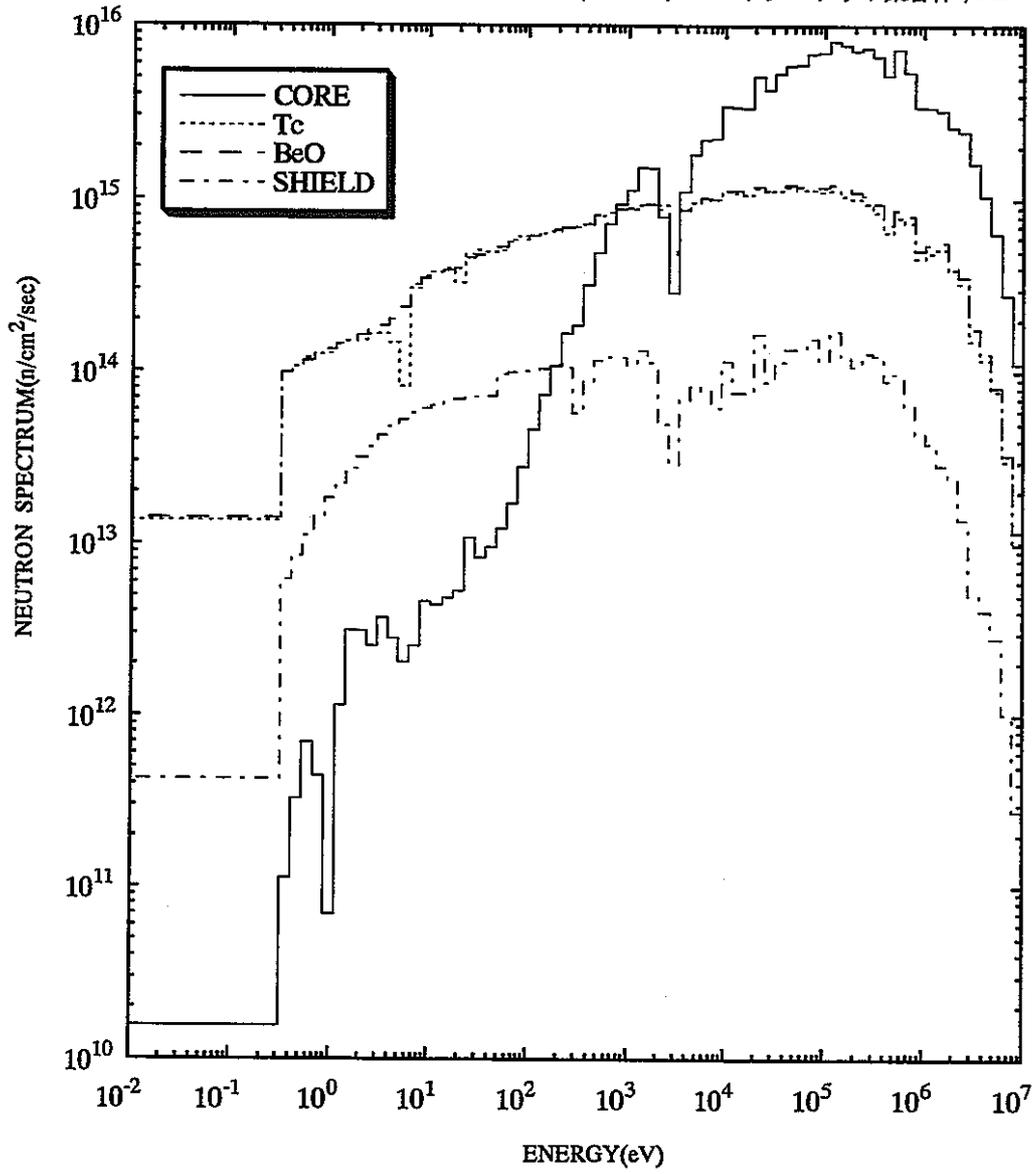


図4.2.2-4 各領域の中性子スペクトル (BeO減速材のケース)

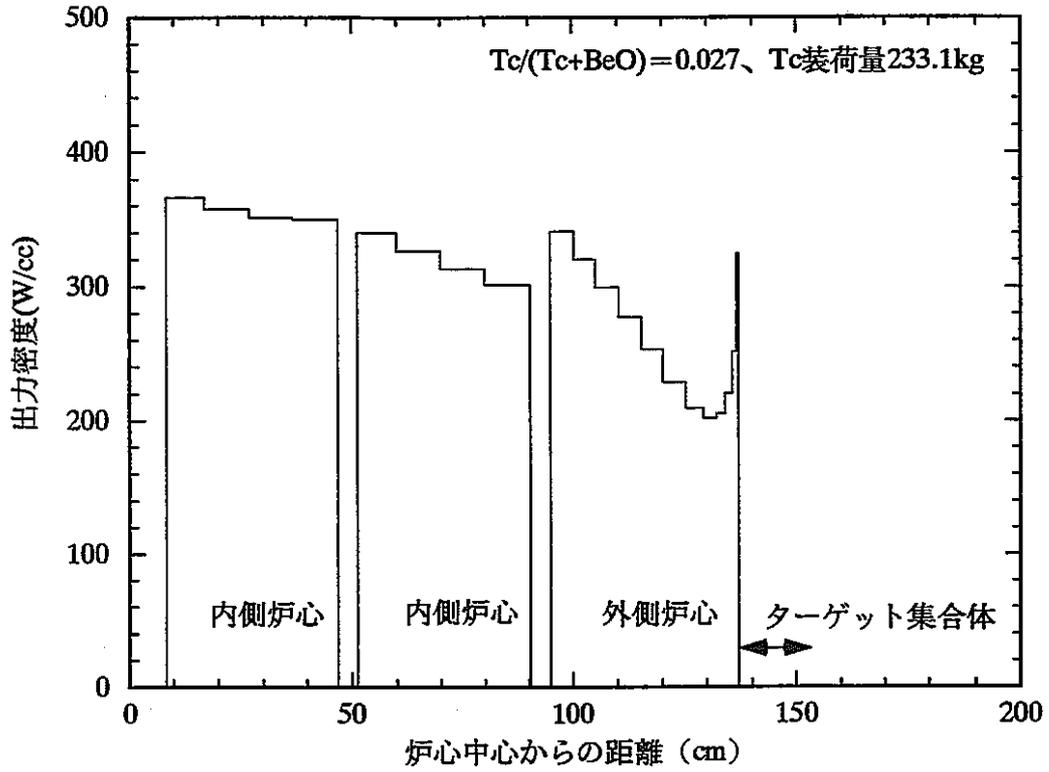


図4.2.2-5 径方向出力分布 (BeO減速材のケース)

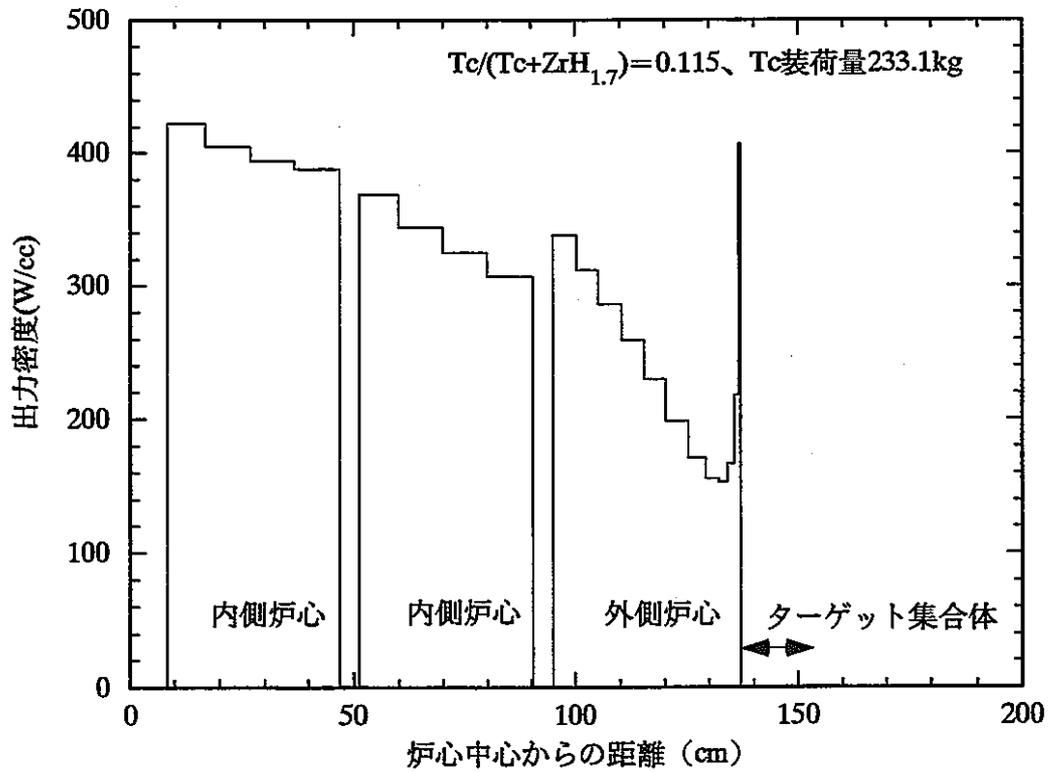


図4.2.2-6 径方向出力分布 (ZrH<sub>1.7</sub>減速材のケース)

#### 4.2.3 減速材配置の影響度検討

##### (1) 解析条件

###### a. 炉心モデル

ZrH<sub>1.7</sub>をターゲット内部の減速材として、ターゲット前後に減速能の小さい減速材SiCを配置した場合の影響を検討した。(図4.1-1の体系IIIに示す)

###### b. ターゲット集合体

○ターゲット集合体A(減速材; ZrH<sub>1.7</sub>)

○Tc体積比;  $Tc / (Tc + \text{減速材}) = 0.108$

##### (2) 消滅特性

表4.2.3-1に消滅特性の比較を示す。

SiC集合体の配置により、消滅率は低下している。

##### (3) 中性子吸収の内訳

表4.2.3-2に、各ケースの各領域中性子吸収率を示す。これよりわかるように、炉心側のSiC集合体における中性子吸収がかなりあり、Tc領域への中性子供給を減少させているものと考えられる。

##### (4) 中性子束分布(領域ごと中性子スペクトル)及び高速中性子フルエンス

SiC集合体を配置した場合の炉心各領域の中性子スペクトルを図4.2.3-1に示す。また、両ケースの高速中性子フルエンスを表4.2.3-3に比較した。

##### (5) 出力分布

両ケースの出力分布を図4.2.3-2、図4.2.3-3に示す。これよりわかるように、SiC集合体をターゲット集合体の前後に配置することにより、炉心最外周部での出力分布のピークが大幅に緩和されていることがわかる。これは、炉心に直接ZrH<sub>1.7</sub>を含むターゲット集合体を接して配置せず、段階的に中性子スペクトルを軟化させているためと考えられる。

表4.2.3-1 減速材集合体配置によるTc消滅特性への影響

集合体配置	Tc装荷量 (kg)	Tc消滅量 (kg/年)	Tc消滅率 (%/年)
ターゲット集合体のみ	934.0	20.5	2.2
SiC+ターゲット+SiC	1028.5	15.4	1.5

注) ターゲットA; Tc/ZrH<sub>1.7</sub>装荷  
Tc消滅量は全炉心での値; 60体装荷  
Tc体積割合  $Tc / (Tc + ZrH_{1.7}) = 0.108$

表4.2.3-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率

集合体 (炉心側より)	ターゲット 集合体のみ	SiC+ターゲット +SiC
SiC集合体	-	0.0115
Tc領域	0.0370(0.0362)	0.0245(0.0239)
ZrH <sub>1.7</sub>	0.0240	0.0182
SiC集合体	-	0.0007
遮蔽体	0.0035	0.0005

注) Tc領域、減速材領域には構造材、冷却材を含む  
規格化はfission neutronを1.13 (keff) にしている  
括弧内はTcのみの吸収

表4.2.3-3 減速材集合体配置による高速フルエンスへの影響

集合体配置	高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /sec)	高速フルエンス (n/cm <sup>2</sup> )	
		5年装荷	10年装荷
ターゲット集合体のみ	1.588E+14	2.504E+22	5.008E+22
SiC+ターゲット+SiC	4.458E+13	7.029E+21	1.406E+22

注) ターゲット; Tc/ZrH<sub>1.7</sub>

Tc消滅量は全炉心での値; 60体装荷

Tc体積割合  $Tc / (Tc + ZrH_{1.7}) = 0.108$

Tc/(Tc+ZrH<sub>1.7</sub>)=0.108、ターゲット集合体；A

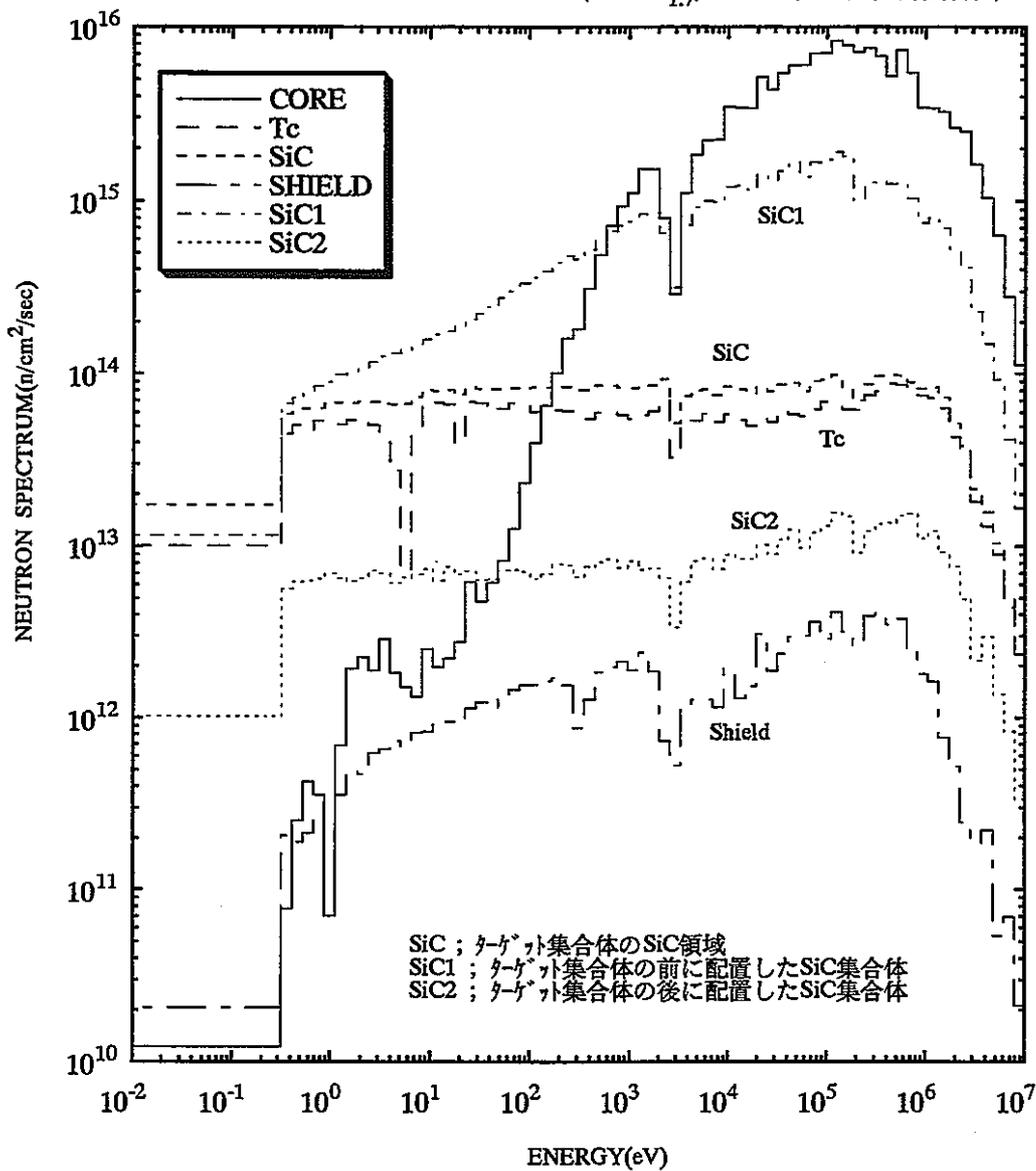


図4.2.3-1 各領域の中性子スペクトル (ZrH<sub>1.7</sub>減速材、ターゲットの前後にSiC集合体のケース)

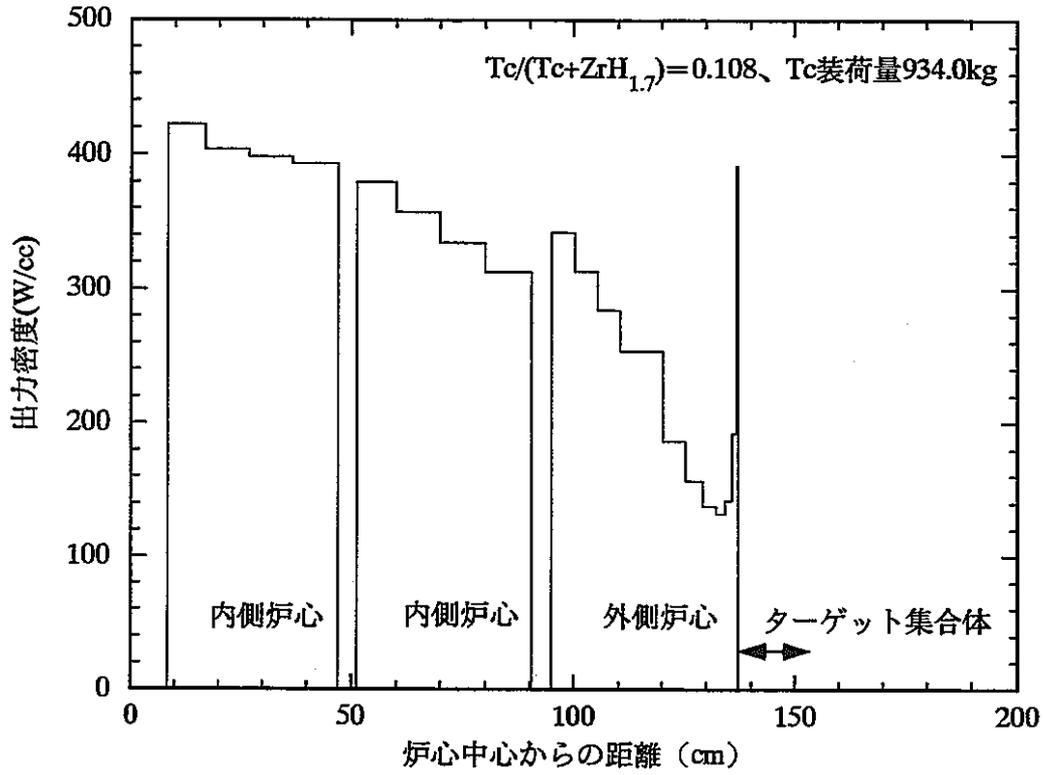


図4.2.3-2 径方向出力分布 ( $ZrH_{1.7}$ 減速材のケース)

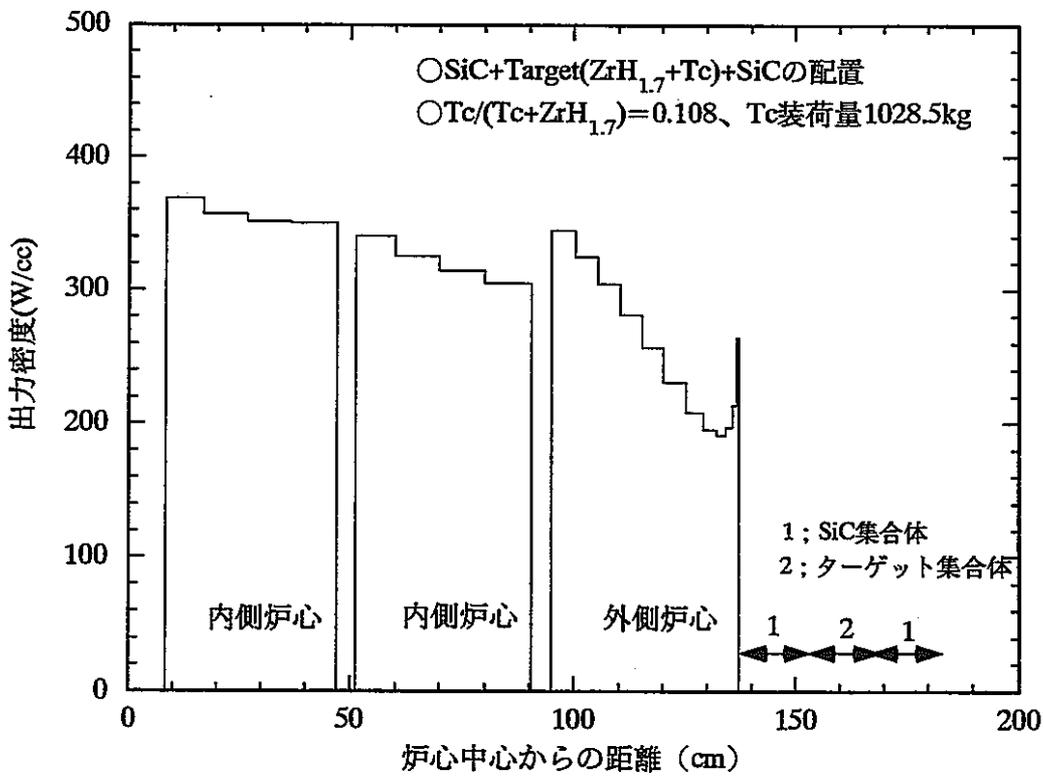


図4.2.3-3 径方向出力分布 (ターゲット集合体内に $ZrH_{1.7}$ 減速材、前後にSiC減速材集合体)

#### 4.2.4 遮蔽体組成の影響度検討

##### (1) 解析条件

###### a. 炉心体系

図4.1-1 の体系IIに示す。遮蔽体はSUS、BeO、ZrH<sub>1.7</sub>とした。本検討のみターゲット集合体の減速材はBeOとした。

###### b. ターゲット集合体

○ターゲット集合体A、減速材BeO

○Tc体積比； $Tc / (Tc + \text{減速材}) = 0.054$

##### (2) 消滅特性

表4.2.4-1 に消滅特性の比較を示す。

減速能の高い遮蔽体ほど消滅率は低下している。これは、減速により反射するものの、同時にエネルギーが軟化し、無駄吸収が増えるためと考えられる。

##### (3) 中性子吸収の内訳

表4.2.4-2 に、各ケースの中性子吸収率内訳を示す。遮蔽体材質変更により、Tc領域の吸収量は増加しないことがわかる。

表4.2.4-1 遮蔽体材質変更によるTc消滅特性への影響

遮蔽体材質	Tc消滅量 (kg/年)	Tc消滅率 (%/年)
SUS	27.0	5.8
BeO	26.6	5.7
ZrH <sub>1.7</sub>	21.2	4.6

注) ターゲットAl集合体、減速材; BeO  
 Tc体積割合;  $Tc / (Tc + BeO) = 0.054$   
 Tc装荷量; 466.7kg  
 Tc装荷量・消滅量は全炉心での値; 60体装荷

表4.2.4-2 ターゲット集合体及び遮蔽体の吸収率

遮蔽体材質	Tc領域 吸収	減速材領域 吸収	遮蔽体 吸収
SUS	0.0475(0.0470)	0.0093	0.0229
BeO	0.0469(0.0464)	0.0105	0.0227
ZrH <sub>1.7</sub>	0.0374(0.0370)	0.0083	0.0144

注) Tc領域、減速材領域には構造材、冷却材を含む  
 規格化はfission neutronを1.13 (keff) にしている  
 括弧内はTcのみの吸収

#### 4. 3 まとめ

(1) 第3章の減速材種類に関する検討および本章でのBeOおよびZrH<sub>1.7</sub>に対するピン径変更（計算上はテクネシウムおよび減速材の体積比の変更）の影響検討結果から、テクネシウム99の吸収効率を上げるには共鳴領域の吸収が多く、熱群の吸収が少ない中性子スペクトルとする方が効率的であると結論できる。これは構造材などの無駄吸収を減らすためである。このため、各減速材の減速能により適切な装荷量が存在する。これを適切に選定すれば、どの減速材によっても同様な消滅率が得られると考えられる。

最も少ない装荷量で適切な中性子スペクトルを実現でき、Tc装荷量を増大できるZrH<sub>1.7</sub>を減速材として選定した。Tc装荷量は少ない方が消滅率が上がることを示された。

(2) 出力分布への影響として、ターゲット集合体に接した炉心燃料の出力密度が局所的に大幅に増加する。炉心の最大出力密度を越えない程度に抑制できるが、流量配分の調整が必要と考えられる。

(3) ターゲット集合体の前後にSiC集合体を配置した体系では、必ずしも消滅率は向上しないことがわかった。これは主にSiC集合体での無駄吸収による。しかしながら、炉心周囲の出力スパイクが緩和されることがわかった。今回は1ケースのみの検討であるが、出力分布への影響から最適な配置方法やSiC集合体の組成が存在する可能性がある。ただし、消滅率の大幅な向上は期待できないと考えられる。

(4) ターゲット集合体からの中性子もれを抑制するために、その後方に減速材集合体を配置した体系を検討したが、消滅率は向上しないことがわかった。

## 5. 核熱特性の解析

これまでの結果をもとに、消滅特性の良い体系を2ケース選定し、モンテカルロ計算により、三次元モデルで集合体形状を正確に模擬した計算を行い、核熱特性を評価した。以上の結果から、核熱特性からの成立性を明らかにする。

### 5.1 解析条件

(1) 減速材  $ZrH_{1.7}$

(2) ターゲット集合体

基準となる仕様は第4.2.2項における最適な仕様とした。これを表5.1-1に示す。主な仕様は下記である。これをターゲット集合体Cとする。

○FPピン径；0.5cm， $ZrH_{1.7}$ ピン径；1.8cm

○FPピン本数；36， $ZrH_{1.7}$ ピン本数；19

これを基準仕様として、それぞれのピン径をパラメータとして、 $Tc$ 体積比や $ZrH_{1.7}$ 体積比を変えたケースも計算した。計算ケース一覧を表5.1-2に示す。

基本的にターゲットはピン非均質を扱ったが、基準仕様であるケース1ではターゲットのモデル化を均質の場合と非均質の場合を比較した。

(3) 計算コード

・モンテカルロ計算コードMVP

ヒストリー数；10000ソース、50ジェネレーション（50万ヒストリー）

統計誤差は各ケースとも、固有値で0.05%  $\Delta k/kk'$  程度、 $Tc$ 吸収量で0.7%程度である。

・拡散計算コードCITATION

(4) ライブラリー

・MVP；JENDL-3.2

・CITATION；JFS3型70群JENDL3.2

(5) 計算モデル

・三次元モデル（六角-Z）

ただし、燃焼欠損反応度やNaボイド反応度は拡散計算により二次元RZモデルにて行う。

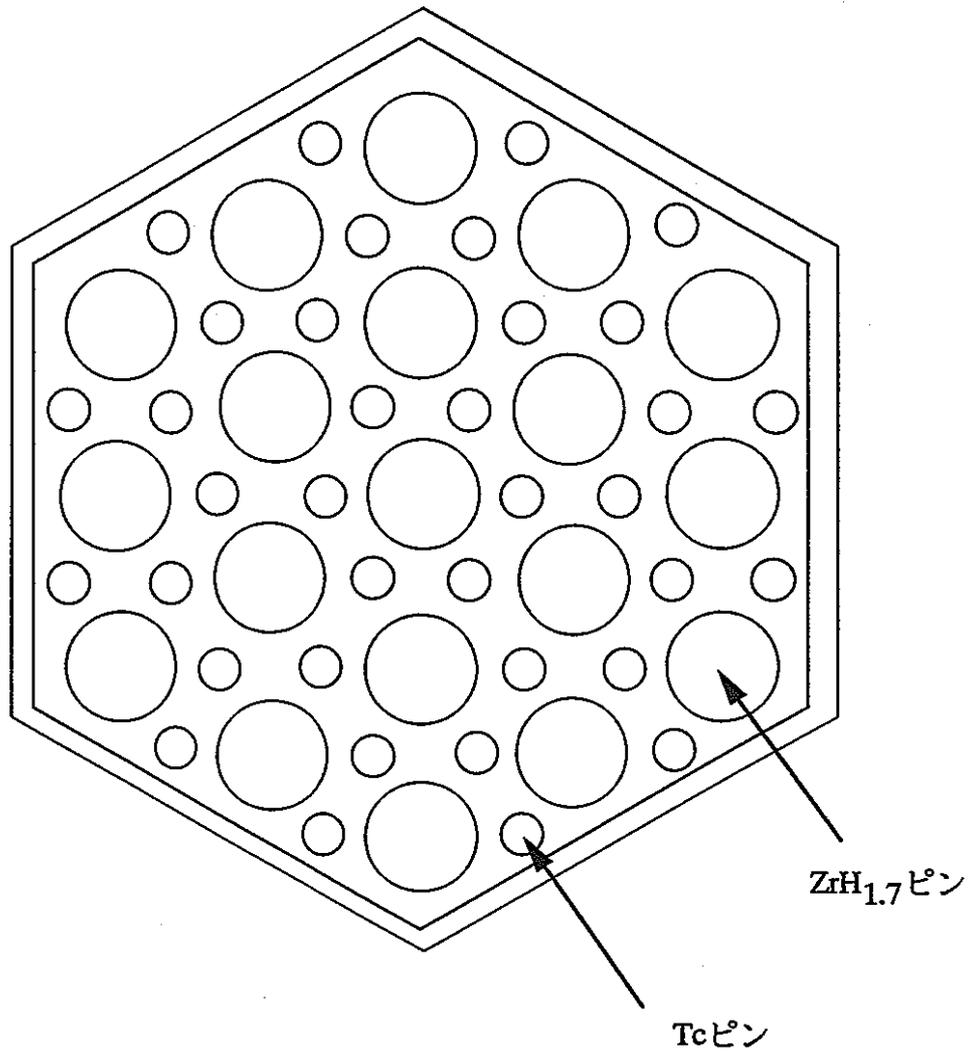
表5.1-1 ターゲット集合体Cの仕様

項 目	集合体C (ピン径2種類)	
	Tcピン	減速材ピン
ピン本数、本	36	19
ピン外径、mm	5.0	18.0
ピン内径、mm	4.4	16.0
被覆管肉厚、mm	0.3	1.0
ペレット径、mm	4.0	15.0
体積比、v%		
ペレット	2.0	15.0
冷却材	62.1	
構造材	18.4	
ギャップ	2.5	
ラッパ管形状	六角形	
ラッパ管内対面間距離、mm	147.7	
ラッパ管肉厚、mm	4.0	
集合体配列ピッチ、mm	160.7	

表5.1-2 三次元体系モンテカルロ計算ケース（ターゲット集合体C）

計算ケース	ターゲット モデル化	Tcピン ピン径	ZrH <sub>1.7</sub> ピン ピン径	Tc体積比	Tc装荷量 (kg)
ケースC1	均質	5.0	18.0	0.119	297.2
ケースC1	非均質	5.0	18.0	0.119	297.2
ケースC2	非均質	6.2	18.0	0.172	457.0
ケースC3	非均質	5.0	14.5	0.172	297.2
ケースC4	非均質	5.0	22.0	0.083	297.2

注) Tc体積比 ; Tc装荷体積 / (Tc装荷体積 + ZrH<sub>1.7</sub>装荷体積)



(ピン仕様基準値、cm)

	Tcピン	ZrH <sub>1.7</sub> ピン
ピン外径	0.5	1.8
ピン内径	0.44	1.6
ペレット径	0.4	1.5

図5.1-1 ターゲット集合体C (FPピン細径、減速材ピン太径)

## 5. 2 解析結果

以下で、特に示さないものはモンテカルロ法により求めた。

### (1) FP消滅特性

表5.2-1 にFP消滅特性を示す。また、グラフ化したものを図5.2-1 に示す。基準仕様のケースC1の均質モデルでは消滅率が7.7%/年となっているのに対し、その非均質モデルでは4.8%/年と約40%近く消滅率が小さくなった。これは、Tcピンが局在しているためと考えられる。吸収率の内訳を表5.2-2 及び表5.2-3 に示す。これより、非均質モデルでは減速材の吸収が増え、Tc吸収が低下していることがわかる。

非均質モデルとして計算した、ピン径を変更した他のケースでもおおむね消滅率は4-5%/年程度であった。減速材ピン径はあまり太くしない方が消滅率が上がることが示されている。消滅量を増大させるにはTcピン径を大きくすることが有効であることがわかる。(ケースC2) この場合、やや消滅率は低下する。

ケースC1・非均質の体系の吸収率内訳をさらに詳細に求めた結果を表5.2-4 に示す。これは、図5.2-2 に示したようなターゲット内部のピン列ごとに吸収量を求めた結果である。ピン列は炉心に接したものから、炉心との境界からの距離がほぼ同じものをひとまとめにした。これよりわかるように、Tcの吸収量はピン1本単位で見れば炉心からの距離にあまり関係しないことがわかる。一方、被覆管の吸収はピン1本あたりでは炉心からの距離に依存し、中間の領域で大きくなっている。これは被覆管の吸収は熱領域で大きいいため、炉心に近いとスペクトルが硬く吸収が少なく、中間領域ではスペクトルが軟化し吸収が大きく、また、離れた領域ではテクネシウムなどの吸収で到達する中性子が減る(同時に硬くなる)ため吸収が減ると考えられる。テクネシウムでは共鳴領域と熱領域の両方で吸収が大きく、スペクトルが多少変わってもどちらかの領域で吸収されるため、場所依存性が小さいといえる。ここで、 $ZrH_{1.7}$ の被覆管および $ZrH_{1.7}$ の吸収量がかなり大きいことがわかる。両者の合計はTcの吸収量とほぼ同一である。また、ラップ管の吸収も大きい。これより、 $ZrH_{1.7}$ ピンのピン径を減らす(体積を減らす)こと、被覆管肉厚を薄くすることが重要であることがわかる。ただし、スペクトルが硬くなりTcの共鳴吸収を減らさないことが条件である。この点からの最適化の余地は残されている。さらに、ラップ管の肉厚も薄くする

ことが望ましい。

## (2) 発熱量

発熱量として、ターゲット集合体のみ起因する発熱（Tc吸収量より評価、in situ）及び炉心からの流入ガンマ線に起因する発熱を表5.2-5に示す。後者については簡易評価とした。すなわち、従来の評価による径ブランケット第1層位置での炉心からの流入ガンマ線による発熱（均質モデルによる評価）をもとに評価した。

1体あたりの発熱量はおおむね140KW-180KWであり、1層60体分で8.4MW-10.8MWである。ターゲットピンの線出力を表5.2-6に示す。最大発熱ピンでは、炉心から流入するガンマ線の寄与の方がTc吸収による寄与の約2倍程度あることがわかる。

## (3) FPピン温度（単ピンモデルによる簡易計算）

径ブランケットまたはステンレス遮蔽体と同一の流量を仮定して、最大発熱ピンを対象に単ピンモデルで温度計算を行った。ただし、ターゲットでは二種類のピン径のピンが配置されている。それぞれのピンの流量はその周囲の冷却材の面積より近似的に求めた。また、不確かさは一切考慮しない概算値である。

集合体流量は以下とした。（動燃殿報告書より）

ケース1；径ブランケット（径ブランケットあり炉心）と同一（6.06 kg/sec）

ケース2；ステンレス遮蔽体（径ブランケットなし炉心）と同一（0.8 kg/sec）

温度評価式は付録に示したが、平成6年度作業と同様の一次元熱伝導式である。用いた冷却材・構造材・テクネシウムの物性値を表5.2-7に示す。

もっとも発熱の大きいケースC2に対して温度計算を行い、表5.2-8の結果となった。

ペレット中心温度は、ケース1では約660℃となり融点の2170℃を十分下回っている。この場合、冷却材温度も570℃と十分に低い。一方、流量の少ないケース2では冷却材最高温度が沸騰温度を大幅に越えている。この場合でも、Tcの熱伝導度が大きいので、ペレット中心温度は融点を下回っている。

実際の流量は、発熱量を正確に評価して炉心燃料の流量とのバランスから設定

することになる。この場合、冷却材温度と被覆管温度が余裕をもつように設定すれば、テクネシウムペレットの中心温度は十分に余裕があるといえる。

#### (4) 中性子束分布

図5.2-3 にターゲット内部の中性子スペクトルを示す。(ケースC1/非均質)

#### (5) 減速材隣接燃料の出力分布

ケースC1/非均質モデルの径方向出力分布(集合体列ごとの平均出力密度)を図5.2-4 に示す。この分布からは大きな歪みのない出力分布といえる。ただし、集合体単位であるので、ターゲット近辺の出力スパイクは生じていても現れていない可能性がある。モンテカルロ法では、統計精度の点から、詳細な出力分布を求めるのに膨大な計算時間を要するので、今回は集合体単位としている。

出力スパイクの有無などを知るための、より詳細な分布については、第6章に示す拡散計算で求めることにした。

#### (6) 燃焼欠損反応度(CITATION、7群縮約定数、二次元RZ体系)

ケースC1/均質の体系に対して、ターゲット装荷による反応度への影響を考慮して、Pu富化度調整および燃焼計算を行った。

Pu富化度及び燃焼欠損反応度を表5.2-9 に示す。

これより、ターゲット装荷の影響として、Pu富化度の0.6-0.7%増加、燃焼欠損反応度の0.2% $\Delta k/k'$ 増加があることがわかる。

#### (7) Naボイド反応度(CITATION、7群縮約定数、二次元RZ体系)

ケースC1/均質体系の初期炉心にて、Naボイド反応度を計算した。結果を表5.2-9 に示す。

これより、ターゲット装荷により、約15%程度のNaボイド反応度低下がみられる。この理由としては、炉心外周部でスペクトルが軟化していること( $ZrH_{1.7}$ の影響)、炉心中央部の中性子束の低下(炉心外周部での出力スパイクのため、相対的に中心部の出力が低下)が考えられる。

表5.2-1 Tc消滅特性の比較

体系	ターゲット モデル化	Tc装荷量 (kg)	Tc消滅量 (kg/年)	Tc消滅率 (%/年)
ケースC1	均質	297.2	22.9	7.7
ケースC1	非均質	297.2	14.3	4.8
ケースC2	非均質	457.0	20.9	4.6
ケースC3	非均質	297.2	14.5	4.9
ケースC4	非均質	297.2	12.9	4.3

注) 三次元全炉心モデル; ターゲット60体装荷

表5.2-2 ターゲット集合体内の吸収率(ケースC1)

物質	計算体系	
	ケースC1-均質	ケースC1-非均質
Tc	0.0342	0.0213
ZrH <sub>1.7</sub>	0.0032	0.0086
SUS	0.0189	0.0205
Na	0.0026	0.0044
合計	0.0588	0.0549

注) 規格化はfission neutronを1.07 (keff) にしている

表5.2-3 ターゲット集合体内の吸収率（各ケース、非均質）

物質	計 算 体 系			
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
T c	0.0213	0.0312	0.0216	0.0193
Z r H <sub>1.7</sub>	0.0086	0.0070	0.0046	0.0122
S U S	0.0205	0.0169	0.0140	0.0271
N a	0.0044	0.0032	0.0040	0.0032
合計	0.0549	0.0583	0.0442	0.0618

注) 規格化はfission neutronを1.07 (keff) にしている

表5.2-4 ターゲット集合体中性子吸収の内訳詳細 (ケースC1・非均質)

(1) Tcピン

	Tc 吸収	構造材吸収
第1カ <sup>ル</sup> 7°(4本)	0.0409 (0.0102)	0.0013 (0.00033)
第2カ <sup>ル</sup> 7°(10本)	0.1112 (0.0111)	0.0052 (0.00052)
第3カ <sup>ル</sup> 7°(10本)	0.1115 (0.0112)	0.0064 (0.00064)
第4カ <sup>ル</sup> 7°(8本)	0.0896 (0.0112)	0.0043 (0.00054)
第5カ <sup>ル</sup> 7°(4本)	0.0438 (0.0110)	0.0020 (0.00050)
合計	0.3962	0.0192

(2) ZrH<sub>1.7</sub>ピン

	ZrH <sub>1.7</sub> 吸収	構造材吸収
第1カ <sup>ル</sup> 7°(5本)	0.0362 (0.0072)	0.0483 (0.0097)
第2カ <sup>ル</sup> 7°(5本)	0.0422 (0.0084)	0.0584 (0.0117)
第3カ <sup>ル</sup> 7°(5本)	0.0442 (0.0088)	0.0625 (0.0125)
第4カ <sup>ル</sup> 7°(3本)	0.0255 (0.0085)	0.0379 (0.0126)
第5カ <sup>ル</sup> 7°(1本)	0.0062 (0.0062)	0.0100 (0.0100)
合計	0.1543	0.2171

(3) ラッパ管 0.1330

(4) 冷却材

ラッパ管外	0.0029
ラッパ管内	0.0774
合計	0.0804

注) 全体を1.0と規格化、括弧内はピン1本あたり

表5.2-5 ターゲット集合体発熱量（1体あたり）

体系	発 熱 量 (kW)		合計
	Tc吸収 による寄与	炉心からの寄与 (ガンマ)	
ケースC1	69.9	73.8	143.7
ケースC2	102.2	73.8	176.0
ケースC3	70.9	73.8	144.7
ケースC4	63.1	73.8	136.9

注) 三次元全炉心モデル、ターゲット；非均質モデル  
炉心からのガンマ発熱は簡易評価

表5.2-6 Tcターゲットピンの線出力

体系		線 出 力 (W/cm)		合計
		Tc吸収 による寄与	炉心からの寄与 (ガンマ)	
ケースC1	平均	19.4	20.5	39.9
	最大	21.9	44.7	66.6
ケースC2	平均	28.4	20.5	48.9
	最大	32.1	44.7	76.8
ケースC3	平均	19.7	20.5	40.2
	最大	22.3	44.7	67.0
ケースC4	平均	17.5	20.5	38.0
	最大	19.8	44.7	64.5

注) 三次元全炉心モデル、ターゲット；非均質モデル  
炉心からのガンマ寄与分は簡易評価

表5.2-7 温度計算に使用した冷却材 (Na)、被覆管 (SUS) 及び  
FP 試料の物性値

物 性	物 性 値
Na 冷却材	
密度 , $g/cc$	0.86
比熱 , $W \cdot s / g / K$	1.28
粘性係数 , $g / cm / s$	0.0029
熱伝導度 , $W / cm / K$	0.72
SUS 被覆管	
熱伝導度, $W / cm / K$	0.182
Tc99 金属	
融点 , $^{\circ}C$	2170
熱伝導度 , $W / cm / K$	0.561
ペレット-被覆管ギャップ	
熱伝達率, $W / cm^2 / K$	0.5677

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

表5.2-8 Tcピン温度計算結果（ケースC2を対象）

	温度計算ケース1	温度計算ケース2	
集合体流量	6.06 kg/sec	0.8 kg/sec	
冷却材温度	477°C	1113°C	軸方向中心
	573°C	1847°C	軸方向上端
被覆管内側温度	498°C	1135°C	軸方向中心
	586°C	1861°C	軸方向上端
ペレット中心温度	605°C	1242°C	軸方向中心
	658°C	1933°C	軸方向上端

注) ケース1 ; 径ブランケット (径ブランケットあり炉心) と同一流量  
 ケース2 ; ステンレス遮蔽体 (径ブランケットなし炉心) と同一流量  
 冷却材入口温度 ; 380°C

表5.2-9 ターゲット装荷による炉心特性への影響（ケースC1 - 均質モデル）

	ターゲットなし基準体系	ターゲット装荷体系
Pu富化度	17.01/21.05	17.58/21.75
燃焼欠損反応度	3.1%Δk/kk'	3.3%Δk/kk'
Naボイド反応度 (初期)	1.19%Δk/kk'	1.02%Δk/kk'

注) 燃焼計算 ; C I T A T I O N、7群縮約定数、二次元RZ体系  
 Naボイド反応度 ; C I T A T I O N、70群定数、二次元RZ体系

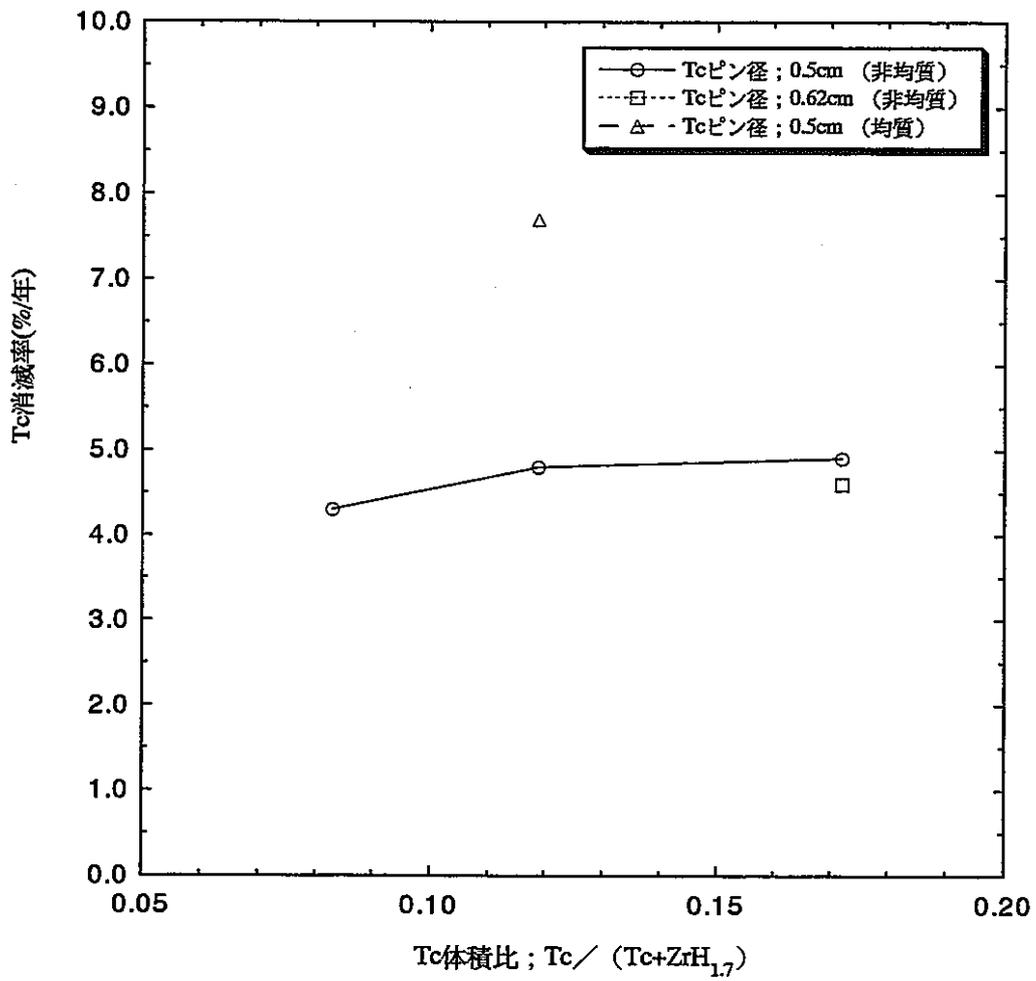
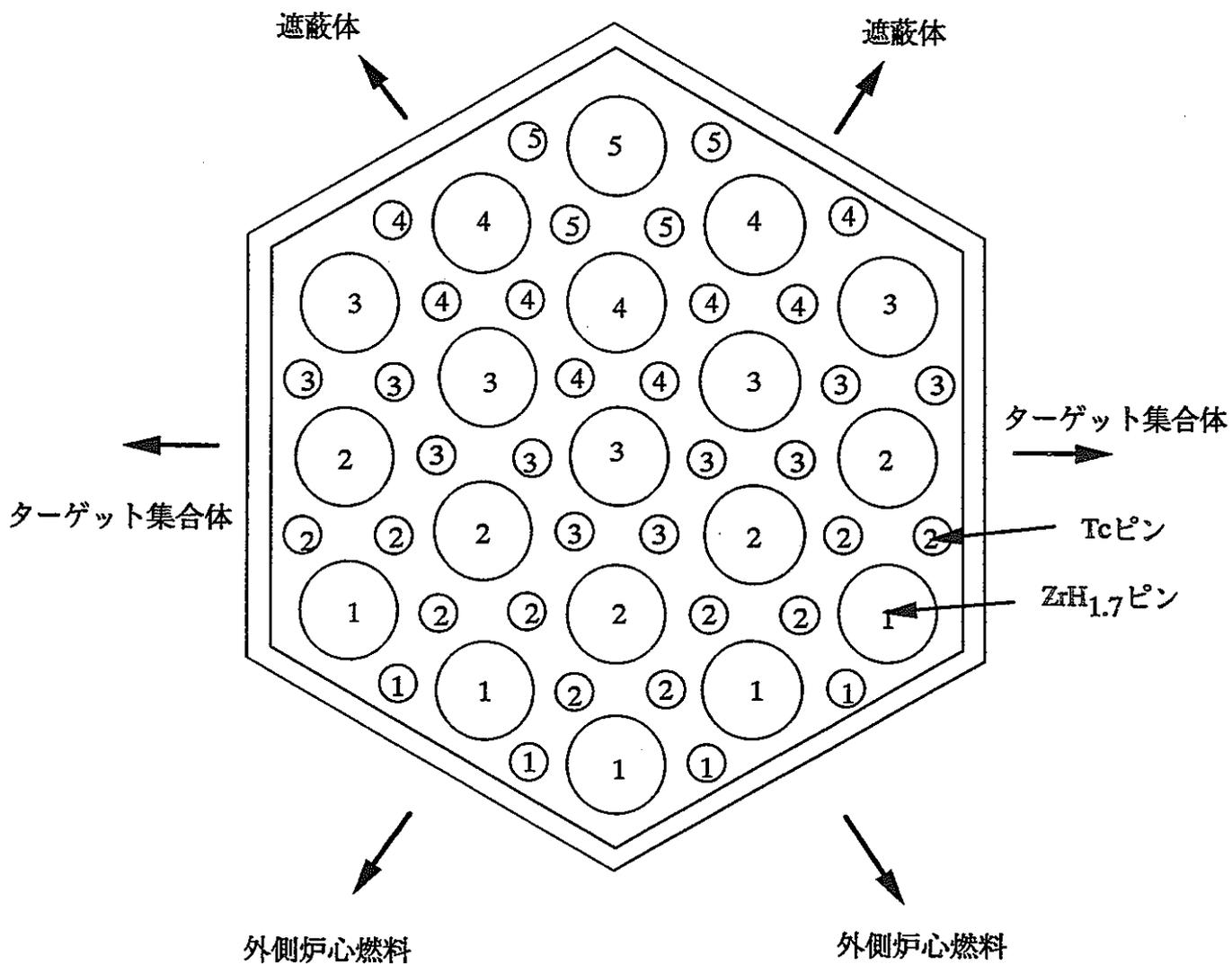


図5.2-1 Tcピン径、Tc体積比とTc消費率の関係



番号は、吸収量を求めるグループ番号を示す。  
 上記のように、炉心燃料から近いピン列順に番号づけした。  
 TcピンとZrH<sub>1.7</sub>ピンは同一の番号であっても分離して吸収量を求めた。

図5.2-2 詳細吸収量評価における各ピンのグループわけ

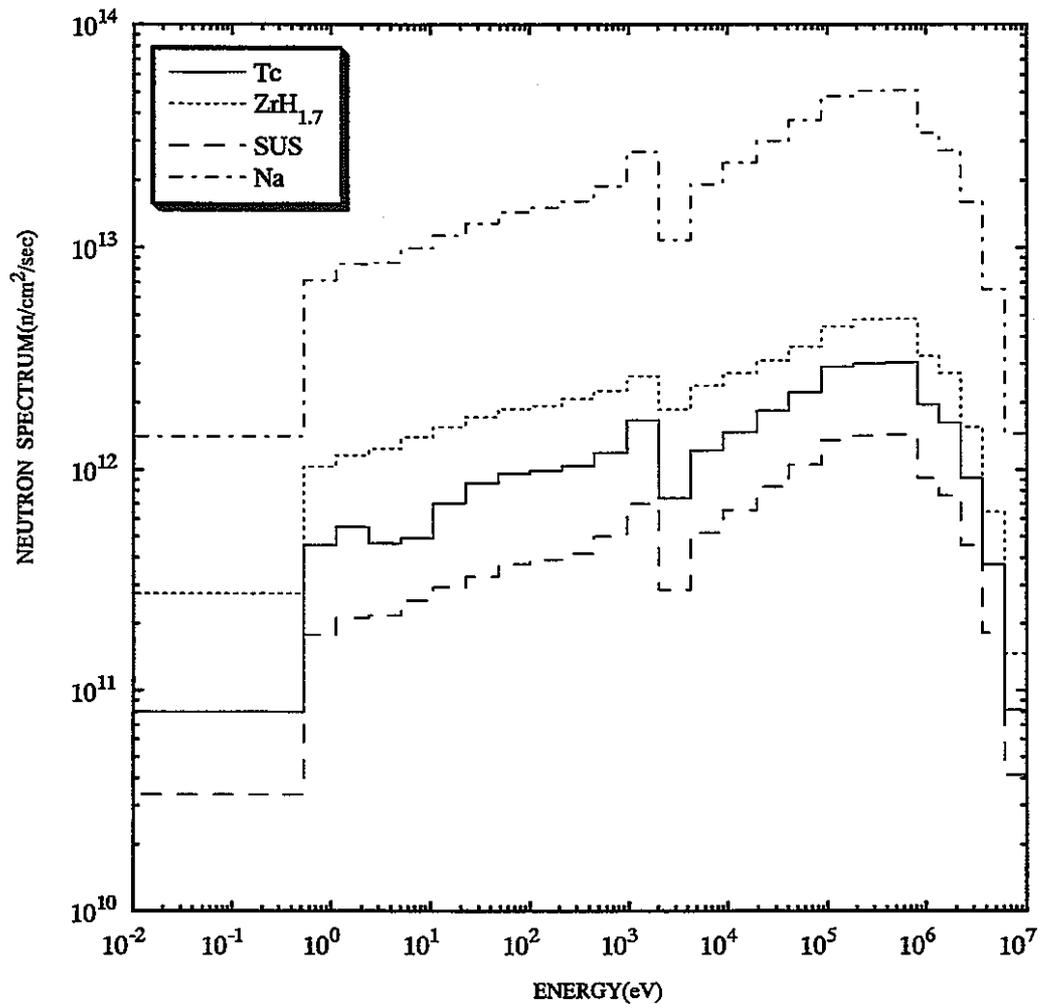


図5.2-3 ターゲット集合体各領域の中性子スペクトル (ケースC1 / 非均質)

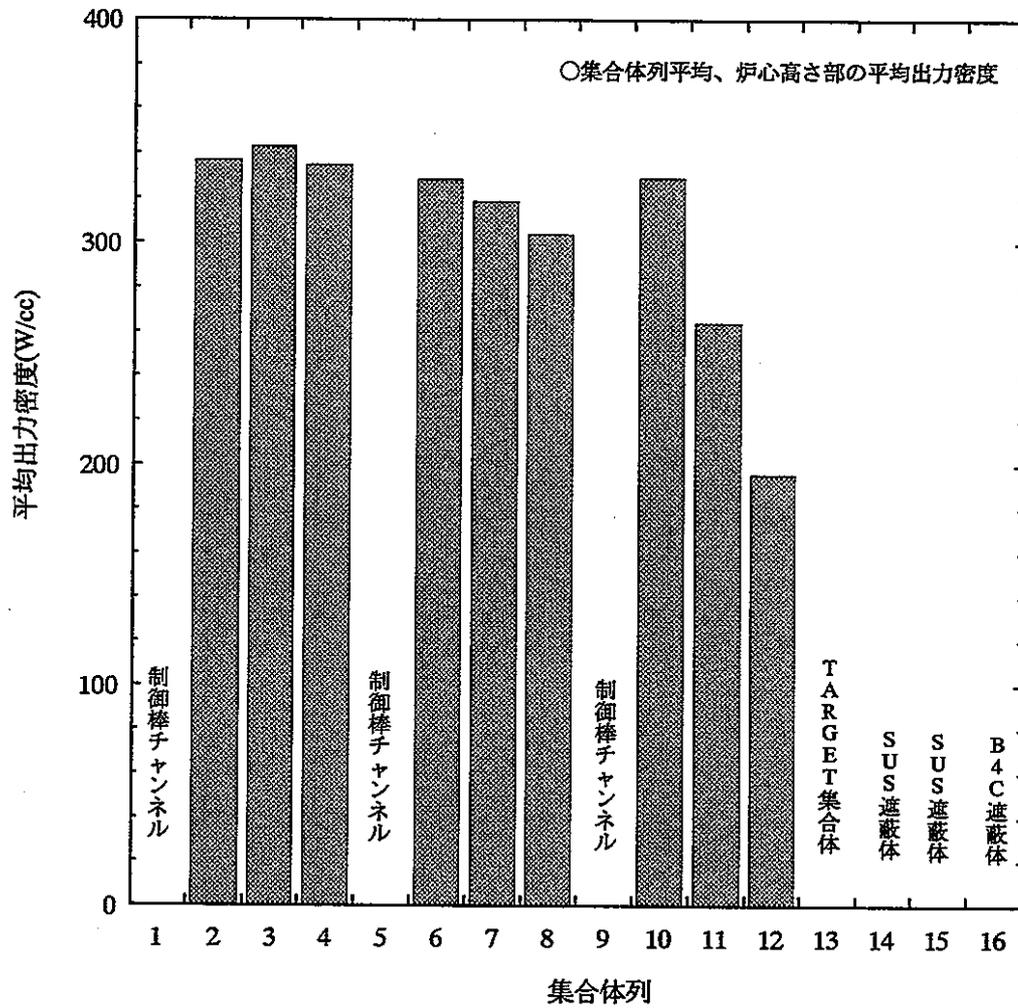


図5.2-4 径方向出力分布（集合体平均出力密度、ケースC1／非均質モデル）

### 5.3 まとめ

本章では、第4章の検討をもとにターゲット仕様を選定し、より詳細なモデル化により消滅特性を検討するとともに、一般の核熱特性を検討した。

すなわち、消滅効率を上げるために、Tc装荷量を少なくしたターゲット仕様、すなわち、太径ZrH<sub>1.7</sub>ピン（19ピン）、細径Tc99ピン（36ピン）の仕様を選定し、ターゲットを非均質とした三次元炉心モデルにより消滅特性を解析した。この場合、それぞれのピン径をパラメータとして解析した。また、ターゲット集合体を装荷した場合の主要炉心特性への影響を評価した。結果を以下に示す。

- (1) Tc消滅率は約4-5%/年、消滅量約15-20kg/年が得られた。消滅率や消滅量をさらに上げるには、ZrH<sub>1.7</sub>とその被覆管の体積をさらに最適化する余地のあることもわかった。
- (2) 炉心特性への影響としては、ターゲット集合体に接した炉心燃料で出力密度がかなり高くなり、炉心中央部の最大出力密度と同程度であることがわかった。ターゲット集合体の流量も含めた流量配分の調整が必要である。
- (3) また、Pu富化度の増大により燃焼欠損反応度がやや増大すること、Naボイド反応度が低下するが、大きな影響はないことがわかった。
- (4) ターゲットピンの温度についても評価を行った。この評価はTc吸収による発生ガンマ線の輸送を考慮せず、また、炉心からの流入ガンマ線による発熱は従来の評価例を使用するという簡易評価である。この結果、径ブランケット並みの流量を仮定すれば最大発熱ピンのTc中心温度は約660℃と融点の約2170℃と十分低く、冷却材最高温度も余裕があることがわかった。流量配分の見直しと、より詳細な評価は今後の課題である。

## 6. 解析手法による影響度比較計算

モンテカルロ法との比較により、従来の簡易法としての拡散計算の精度を明らかにする。  
また、ガンマ発熱量評価方法の影響を明らかにする。

### 6. 1 解析条件

#### (1) 計算体系、減速材

- ・ターゲット1層装荷、ZrH<sub>1.7</sub>減速材
- ・ケースC1 / 均質モデル

#### (2) 計算コード

- ・モンテカルロ計算コードMVP  
ヒストリー数； 10000ソース、50ジェネレーション（50万ヒストリー）  
統計誤差は各ケースとも、固有値で0.05%  $\Delta k/k'$  程度、Tc吸収量で0.7%程度である。
- ・拡散計算コードCITATION

#### (3) 計算モデル

- ・MVP；三次元モデル（六角-Z）
- ・CITATION；二次元RZ体系・70群拡散計算

このように、モデルが三次元六角-Zと二次元RZで異なるが、ターゲット集合体は1層完全に炉心周囲に巻いた場合を対象としており、RZモデルに適合しやすく、モデルの影響は小さいと考えられる。

## 6. 2 解析結果

### (1) 消滅量および消滅率

表6.2-1 に両計算による T c 吸収率と消滅率の比較を示す。拡散計算の方がやや高い（15%程度）消滅率となっている。図6.2-1 に T c 吸収率のエネルギースペクトルを示す。これより、特に100ev-1keVおよび熱群において拡散による吸収率が大きいことがわかる。他のエネルギーでもやや違いがあるが、前記のエネルギー範囲ではさらに違いが大きく、これは100ev-1keVでの自己遮蔽効果の扱いと熱群の扱いの差と考えられる。（JFS3J3.2の第70群=熱群の扱いは簡易である。）

### (2) 出力分布

両計算の径方向出力分布（列ごと集合体平均出力密度）を図6.2-2 に示す。両方の結果は比較的良好に一致している。

図6.2-3 には、拡散計算による径方向出力分布（メッシュごと）を示す。これより、ターゲットに接する炉心位置ではかなり高いピークが発生している。炉心の最大出力密度と同程度の約470W/cmとなっている。

熱的余裕の観点から、上記の出力ピークを考慮した流量配分の調整が必要である。すなわち、最外周炉心燃料の最大線出力の上昇分だけ流量を増加させることが必要である。出力ピークはターゲットに接した数cmのところで発生しているため、このピークをこの集合体の炉心側の出力ピークと同一のレベルまで下げれば、流量増加は必要ない。このためには、ターゲット集合体仕様をみなおすことが必要である。今回の仕様の場合でも、流量配分の調整で熱設計を成立させることが可能と考えられる。

なお、より正確に詳細出力分布を求めるには、非均質性および輸送効果を考慮した解析を行う必要がある。

表6.2-1 Tc消滅特性の比較（ケースC1／均質モデル）

計算手法	Tc装荷量 (kg)	Tc消滅量 (kg/年)	Tc消滅率 (%/年)
モンテカルロ	297.2	22.9	7.7
拡散計算	同上	26.8	9.0

注) モンテカルロ；三次元、拡散；二次元RZ

Tc/ZrH<sub>1.7</sub>体積割合（絶対値） = 0.0202/0.1501

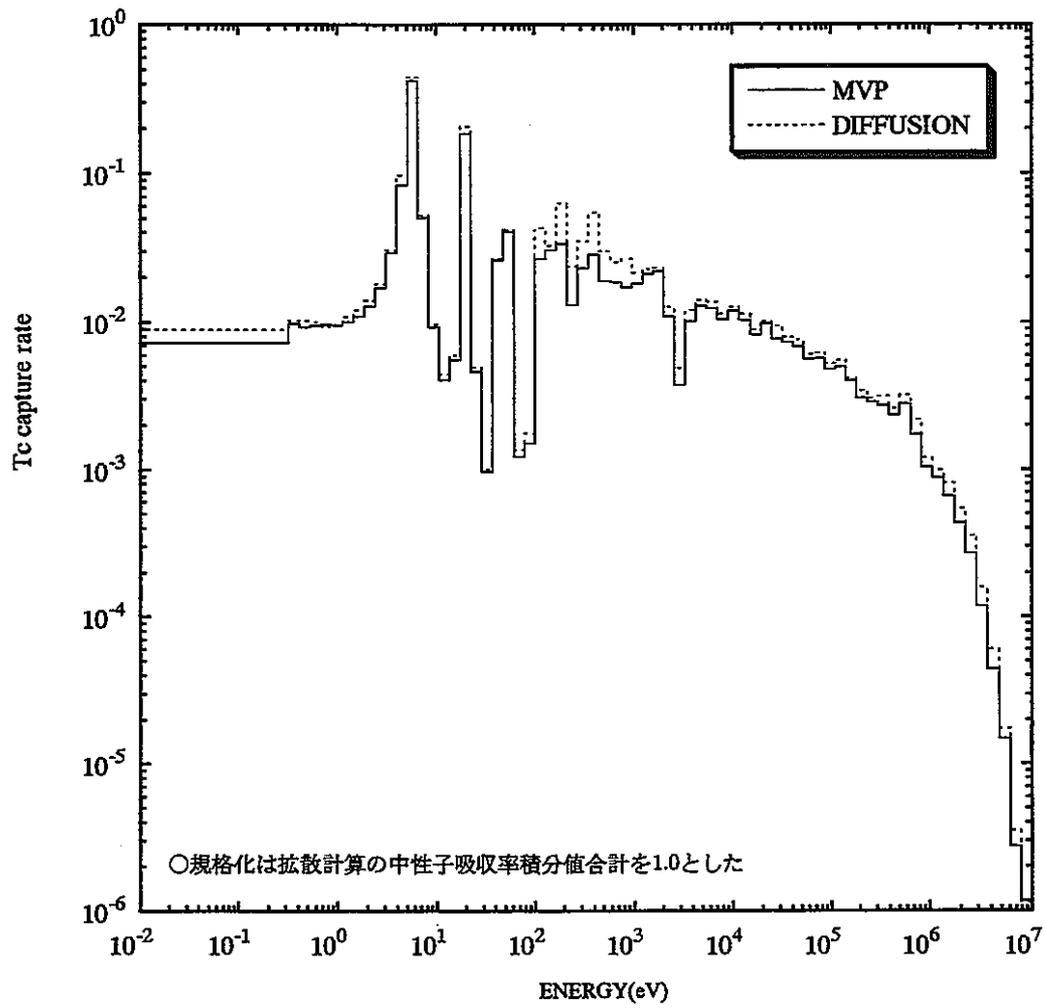


図6.2-1 Tc99の中性子吸収率のエネルギー分布 (ケースC1 / 均質)

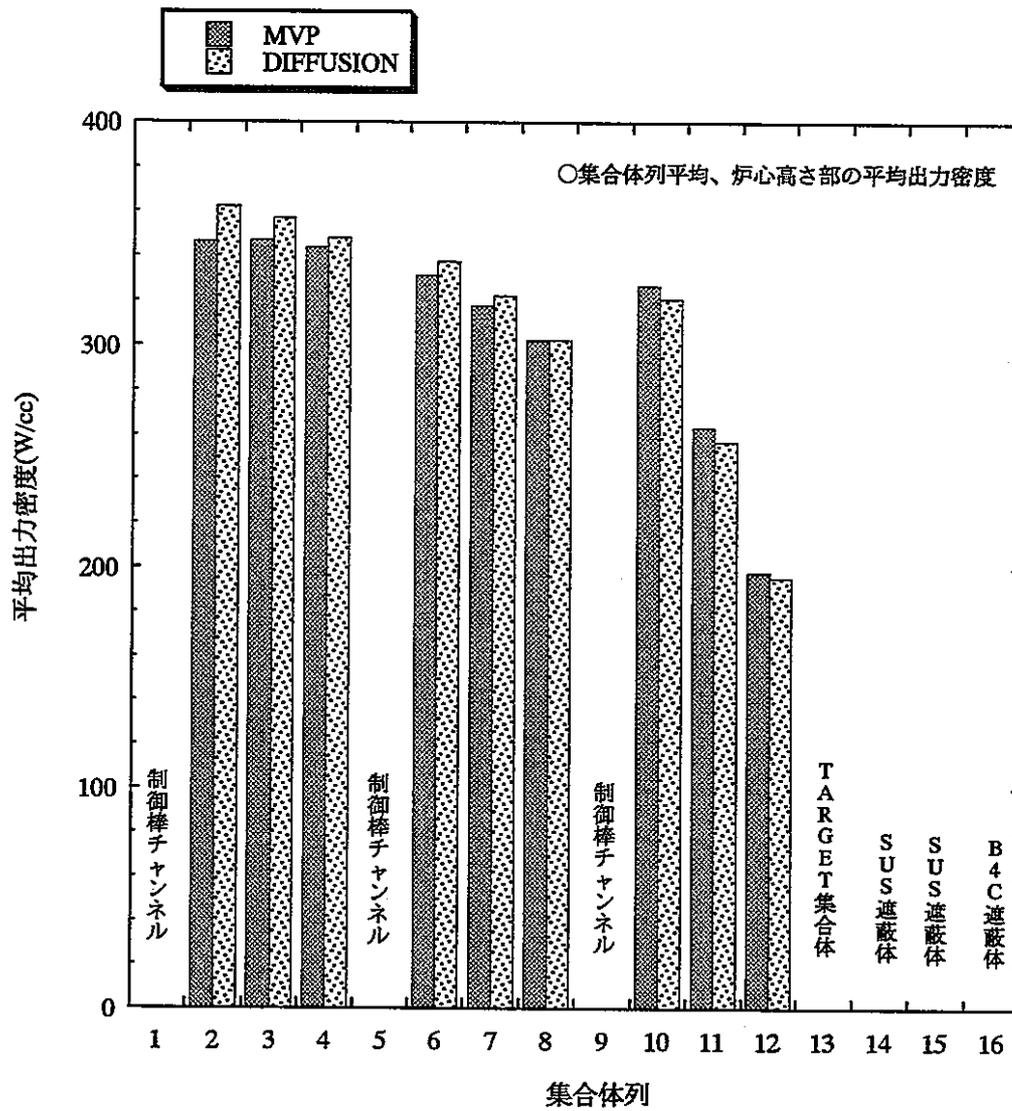


図6.2-2 径方向出力分布の比較（集合体平均出力密度、ケースC1／均質）

最大出力密度を有する軸方向中心面の分布

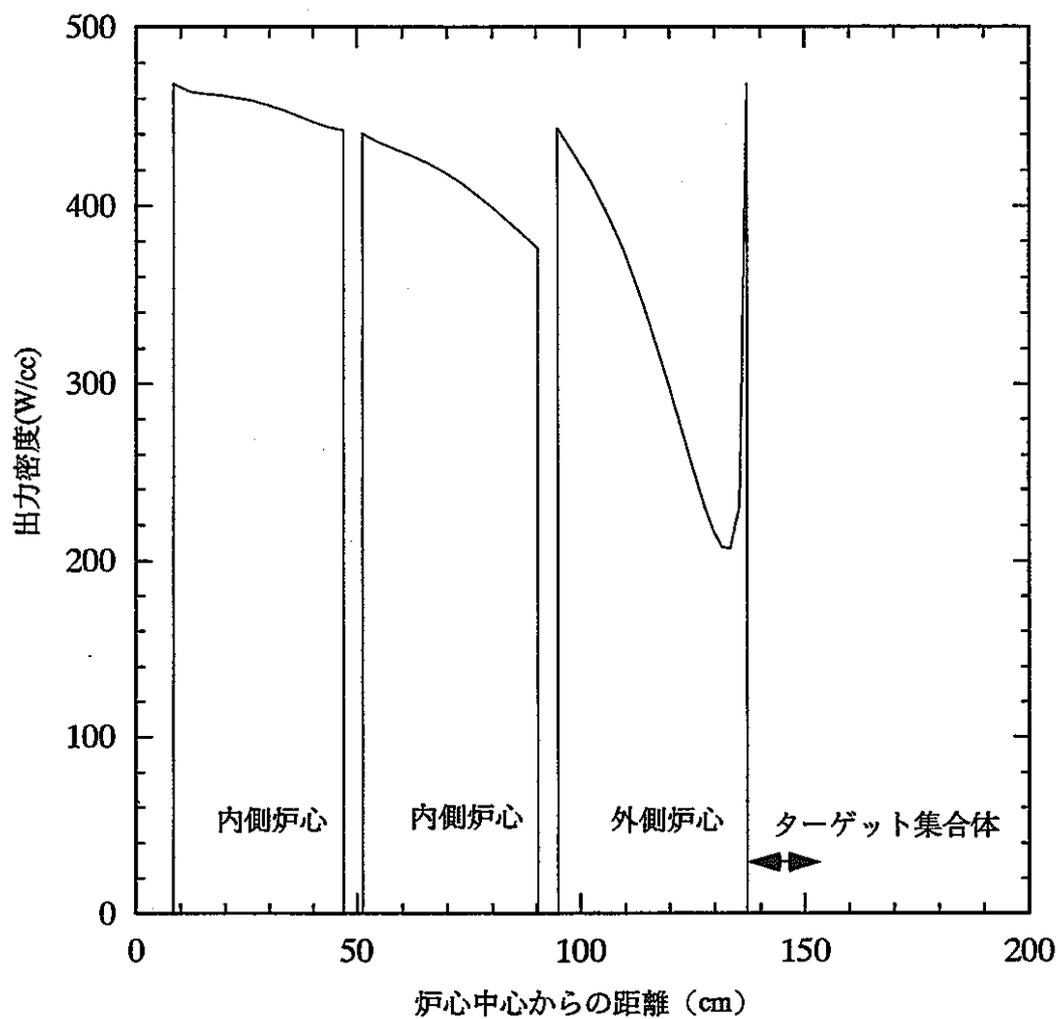


図6.2-3 径方向出力分布 (ケースC1 / 均質、拡散計算)

### 6.3 まとめ

ターゲット集合体を均質モデルとする体系において、拡散計算の結果をモンテカルロ法と比較した結果、拡散計算は消滅率を15%程度過大評価することがわかった。これはテクネシウム共鳴領域および熱領域での吸収量に差があるためである。出力分布については、列ごとの平均出力密度でみる限り大きな違いはないことがわかった。

また、拡散計算により詳細な出力分布を解析した結果、ターゲット集合体に隣接した炉心燃料に出力ピークが生じた。しかしながら、このピーク値は炉心燃料全体のピーク値と同程度であり、流量の調整により熱的な余裕を確保できると考えられる。

## 7. まとめと課題

本年度は、テクネシウム99と減速材を装荷したターゲット集合体を炉心周囲に配置することを前提として、高速炉において効率的に消滅を行うための解析を行った。解析は主として、非均質性の強いターゲット集合体におけるTc-99の共鳴吸収効果を厳密に扱うために有効と考えられる連続エネルギーモンテカルロコードを用いて実施した。

はじめに、BeO、ZrH<sub>1.7</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>など減速材種類、ピン径、減速材配置の影響を解析した。次に、この結果をもとに消滅率の高い減速材、ピン仕様を選定し、三次元モデルにより、消滅特性、炉心特性など核熱特性を解析した。また、モンテカルロ計算と拡散計算の違いについても検討した。

その結果、テクネシウム99の吸収効率を上げるには共鳴領域の吸収が多く、熱群の吸収が少ない中性子スペクトルとする方が効率的であることがわかった。そして、最も少ない装荷量で適切な中性子スペクトルを実現でき、Tc装荷量を増大できるZrH<sub>1.7</sub>を減速材として選定し、太径ZrH<sub>1.7</sub>ピン（19ピン）、細径Tc99ピン（36ピン）のターゲット仕様について消滅特性を検討した結果、Tc消滅率は約4-5%/年、消滅量約15-20kg/年を得られた。

上記仕様のターゲット集合体を装荷した場合の主要炉心特性への影響を評価した結果、ターゲット集合体に接した炉心燃料で出力密度がかなり高くなり、炉心中央部の最大出力密度と同程度であることがわかった。ターゲット集合体の流量も含めた流量配分の調整が必要である。また、Pu富化度の増大により燃焼欠損反応度がやや増大すること、Naボイド反応度が低下するが、大きな影響はないことがわかった。

また、ターゲット内を均質化したモデルに統一して、拡散計算の結果をモンテカルロ法と比較した結果、拡散計算は消滅率を15%程度過大評価することがわかった。これはテクネシウム共鳴領域および熱領域での吸収量に差があるためである。

平成6年度作業による、炉心内部領域でのターゲット装荷との比較を以下に行う。  
付録1に示したように、炉心内部領域でのターゲット装荷の場合、消滅率は最大6%/Yである（37本中1本にTc装荷の場合に最大）が、隣接炉心燃料の出力は通常の7倍程度に増大しており、熱特性からは成立しない。隣接炉心燃料の出力分布の観点からは、Tc体積比を50%前後とする必要があり、消滅率は1%/Y程度となってしまう。

一方、本年度に行った炉心周囲の装荷では、流量配分の調整が必要であるものの、熱特

性からは成立の見込みがあり、消滅率も4-5%/Yとなった。このように、消滅特性・出力分布ともに、炉心内部領域でのターゲット装荷の場合よりも大幅に改善されていることがわかる。

今後の課題としては以下が挙げられる。

- さらに消滅率や消滅量を上げるため、ターゲット集合体内のスペクトルの詳細な変化を考慮した、ZrH<sub>1.7</sub>ピンやTcピンの配置と寸法の最適化、特にZrH<sub>1.7</sub>と被覆管の体積の最適化の余地がある。(構造材の吸収が大きいため) TcおよびZrH<sub>1.7</sub>の中性子吸収反応によりガス発生はなく、大きな内圧はかからないため、被覆管薄肉化の可能性はある。(ただし、ZrH<sub>1.7</sub>では水素解離の問題を考慮する必要がある。)
- ターゲット集合体の発熱量の詳細な評価と流量配分
- 熱設計(流量配分)の観点から、ターゲット集合体に隣接した炉心燃料の出力分布の検討 → 適切な出力分布を達成するためのターゲット内のZrH<sub>1.7</sub>の体積と配置の検討

## 8. 参考文献

- (1)山岡 光明、飯田 正明：長半減期FPの消滅特性計算、PNC PJ 9164 95-011;東芝 (1995)
- (2)森、中川：“MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード”、JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- (3)T. B. Fowler, et al: "Nuclear Reactor Core Analysis Code : CITATION", ORNL-TM-2496, Rev. 2(1971).

付録1 ターゲット集合体の炉心内部領域への装荷の結果（平成6年度作業）

平成6年度に検討を行ったターゲット集合体炉心内部領域への装荷の結果について、一部を示す。消滅特性及び炉心燃料の出力への影響である。

（参考文献）PNC PJ9164 95-011 “長半減期F Pの消滅特性計算”、東芝（1995）。

詳しくは上記文献を参照されたい。

表3. 1. 2-1 Tc99の消滅量及び消滅率の計算結果

装荷ピン (本)	体積比(*) (%)	装荷重量 (kg)	消滅量 (kg/年)	消滅率 (%/年)
1	2.7	3.98	0.25	6.2
3	8.1	11.9	0.40	3.3
6	16.2	23.9	0.47	2.0
7	18.9	27.9	0.49	1.8
13	35.1	51.8	0.52	1.0
24	64.9	95.6	0.51	0.53
37	100.0	147.4	0.42	0.29

(\*) 体積比 =  $Tc / (Tc + ZrH)$

「PNC PJ9164 95-011 “長半減期F Pの消滅特性計算”、東芝（1995）」より抜粋

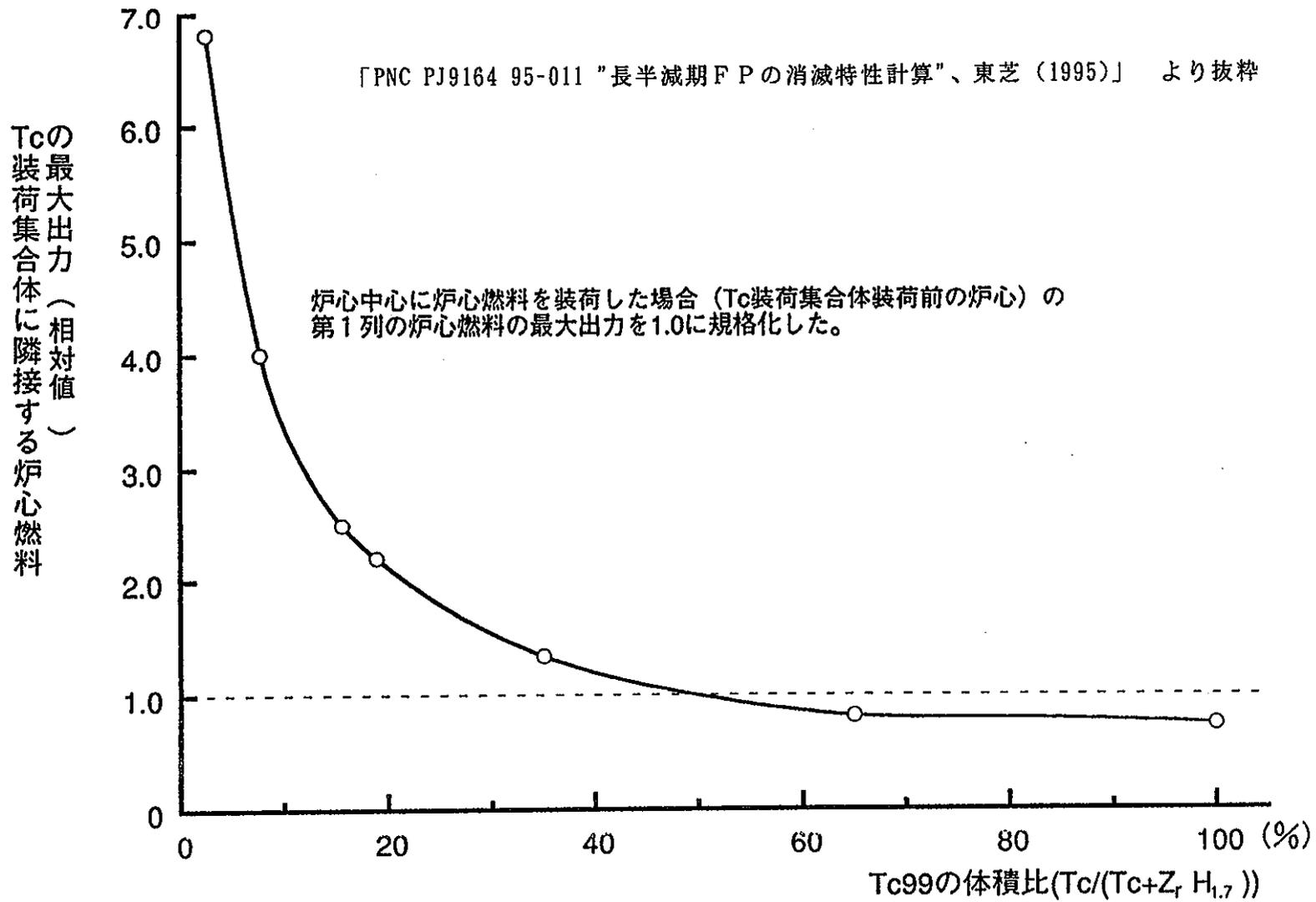


図 3.1.2-6

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

## 付録2 Tc装荷ピンの温度計算式

第5. 2節で行ったTc装荷ピンの温度計算は無限円柱体系での一次元熱伝導方程式により、簡易な方法で求めた。これを以下に示す。以下は炉心中心面での温度計算法である。ピンの出力と流量により、ピン上端でペレット最高温度となる場合があるが、この場合、Na温度計算式のみがやや異なる。これについてはNa温度計算式の項で述べる。それ以外の温度計算式はどの高さ位置でも基本的に同様である。

### (1) 炉心中心面でのNa温度

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

但し、 $Q_a$  : ピン平均線出力,  $W/cm$

$H_c$  : 炉心高さ,  $cm$

$C_p$  : Na比熱,  $W \cdot sec/g/K$

$W$  : ピン当たりのNa流量,  $g/sec$

$T_1$  : 炉心中心面でのNa温度,  $^{\circ}C$

$T_0$  : 原子炉入口温度,  $^{\circ}C$

ピン上端の場合、計算式左辺を $Q_a * H_c$ とする。(2で割らない)

### (2) 被覆管外面の温度

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

但し、 $T_2$  : 被覆管外面の温度,  $^{\circ}C$

$Q$  : 炉心中心面でのピン線出力,  $W/cm$

$d_o$  : 被覆管外径,  $cm$

$h$  : 被覆管表面熱伝達率,  $W/cm^2/K$

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

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

$\lambda$  : Naの熱伝導度,  $W/cm/K$

$D$  : 流路等価直径,  $D = 4S/L$

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

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

$S$  : ピン当たりの流路面積,  $cm^2$

$L$  : 被覆管のNaぬれ長さ,  $cm$

$v$  : Naの流速,  $cm/sec$

$\mu$  : Naの粘性係数,  $g/cm/sec$

$\rho$  : Naの密度,  $g/cm^3$

(3) 被覆管内面の温度

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

但し、 $T_3$  : 被覆管内面の温度,  $^{\circ}C$

$d_o, d_i$  : 被覆管の外径、内径,  $cm$

$K$  : SUSの熱伝導度,  $W/cm/K$

(4) ペレット外面温度

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

但し、 $T_4$  : ペレット外面温度,  $^{\circ}C$

$H_g$  : ギャップ熱伝達率,  $W/cm^2/K$

(5) ペレット中心温度

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

但し、 $T_5$  : ペレット中心温度,  $^{\circ}C$

$K_p$  : ペレット熱伝導度,  $W/cm/K$

付録3 MVP入力データ (PNC600MWe全炉心計算、ケースC1、ターゲットのみ非均質)

```

file:mvp_fp600_case1hetero_edit2_dat
600MWE LARGE FR CORE WITH Tc TARGET ASSEMBLY
HEXAGONAL CORE LATTICE, FIN-WISE MODEL FOR TARGET
LATTICE NO-RESTART TALLY-LATTICE
NO-RESPORCE FISSION EIGEN-VALUE FLUX-PRINT
PICTURE
PRINT-SUPPRESS(18 20)
EDIT-MICROSCOPIC-DATA(33303033)
EDIT-MACROSCOPIC-DATA(33303033)
* NO-EDIT-MACR-DATA(00303000)
DYNAMIC-MEMORY( 16000000 )

* NG = 25
NGROUP(<NG>) NMEMO(15) TCPU(-4400.0) NMEMS(16)
NPART(600000) NBIST(10000) IRAND(19940129) NBANK(111000)
*NPART(30000) NBIST(10000) IRAND(19940129) NBANK(111000)
EPOP(1.0E+7) ETHMAX(0.) AMLIM(13.) NSXIP(10)
$XSEC
* IC
* IDMAT(1)
PU9003J3(8.0625D-04)
PU0003J3(3.8031D-04)
PU1003J3(1.8255D-04)
PU2003J3(1.0649D-04)
U05003J3(2.2710D-05)
U08003J3(7.4521D-03)
O06003J3(1.7812D-02)
NA3003J3(7.7498D-03)
CRN003J3(3.1049D-03)
FEN003J3(1.1710D-02)
NIN003J3(3.6674D-03)
MON003J3(2.8050D-04)
MNS003J3(3.4293D-04)
PUB003J3(4.5637D-05)
* OC
* IDMAT(2)
PU9003J3(9.9950D-04)
PU0003J3(4.7146D-04)
PU1003J3(2.2630D-04)
PU2003J3(1.3201D-04)
U05003J3(2.1643D-05)
U08003J3(7.1018D-03)
O06003J3(1.7838D-02)
NA3003J3(7.7498D-03)
CRN003J3(3.1049D-03)
FEN003J3(1.1710D-02)
NIN003J3(3.6674D-03)
MON003J3(2.8050D-04)
MNS003J3(3.4293D-04)
PUB003J3(5.6576D-05)
* ABL
* IDMAT(3)
U05003J3(2.7254D-05)
U08003J3(8.9430D-03)
O06003J3(1.7941D-02)
NA3003J3(7.7498D-03)
CRN003J3(3.1049D-03)
FEN003J3(1.1710D-02)
NIN003J3(3.6674D-03)
MON003J3(2.8050D-04)
MNS003J3(3.4293D-04)
* USLD
* IDMAT(4)
NA3003J3(9.0535D-03)
CRN003J3(8.3055D-03)
FEN003J3(3.1324D-02)
NIN003J3(9.8102D-03)
MON003J3(7.5034D-04)
MNS003J3(9.1733D-04)
* LPLNM
* IDMAT(5)
NA3003J3(7.7634D-03)
CRN003J3(3.1049D-03)
FEN003J3(1.1710D-02)
NIN003J3(3.6674D-03)
MON003J3(2.8050D-04)
MNS003J3(3.4293D-04)
* RSLD
* IDMAT(6)
NA3003J3(4.5268D-03)
CRN003J3(1.1074D-02)
FEN003J3(4.1766D-02)
NIN003J3(1.3080D-02)
MON003J3(1.0004D-03)
MNS003J3(1.2231D-03)
* B4CSLD
* IDMAT(7)
B00003J3(1.3601D-02)
B01003J3(4.9479D-02)
C02003J3(1.5770D-02)
NA3003J3(4.5268D-03)
CRN003J3(2.7685D-03)
FEN003J3(1.0441D-02)
NIN003J3(3.2701D-03)
MON003J3(2.5011D-04)
MNS003J3(3.0578D-04)
* CRPP
* IDMAT(8)
NA3003J3(2.0370D-02)
CRN003J3(1.3842D-03)
FEN003J3(5.2207D-03)
NIN003J3(1.6350D-03)
MON003J3(1.2506D-04)
MNS003J3(2.5289D-04)
* ABSF
* IDMAT(9)
B00003J3(3.1593D-02)
B01003J3(3.1926D-03)
C02003J3(8.6965D-03)
NA3003J3(1.0321D-02)
CRN003J3(2.1594D-03)
FEN003J3(8.1444D-03)
NIN003J3(2.5507D-03)
MON003J3(1.9509D-04)
MNS003J3(2.3851D-04)
* CRPB
* IDMAT(10)
NA3003J3(2.0370D-02)
CRN003J3(1.3842D-03)
FEN003J3(5.2207D-03)
NIN003J3(1.6350D-03)
MON003J3(1.2506D-04)
MNS003J3(1.5289D-04)
* ABSB
* IDMAT(11)
B00003J3(3.1593D-02)
B01003J3(3.1926D-03)
C02003J3(8.6965D-03)
NA3003J3(1.0321D-02)
CRN003J3(2.1594D-03)
FEN003J3(8.1444D-03)

```

file:nvp\_fp600\_caselhetero\_edit2\_dat

```

NIN003J3 (2.5507D-03)
MON003J3 (1.9509D-04)
MN5003J3 (2.3851D-04)
* TARGET
4 IDMAT (12)
NA3003J3 (1.4056E-2)
CRN003J3 (2.5428E-3)
FEN003J3 (9.5904E-3)
NIN003J3 (3.0035E-3)
MN5003J3 (2.8086E-4)
MON003J3 (2.2974E-4)
H01203J3 (9.3980E-3)
ZRN203J3 (5.5280E-3)
TC9003J3 (1.4180E-4)
* SODIUM
4 IDMAT (13)
NA3003J3 (2.263E-2)
* T-SID
4 IDMAT (14)
NA3003J3 (4.5268D-03)
CRN003J3 (1.1074D-02)
FEN003J3 (4.1766D-02)
NIN003J3 (1.3080D-02)
MON003J3 (1.0004D-03)
MN5003J3 (1.2231D-03)
* SPS
4 IDMAT (15)
CRN003J3 (1.3842D-02)
FEN003J3 (5.2207D-02)
NIN003J3 (1.6350D-02)
MON003J3 (1.2506D-03)
MN5003J3 (1.5289D-03)
* TC smeared density ratio:0.8264
4 IDMAT (16)
TC9003J3 (5.5121E-2)
* ZRHx smeared density ratio:0.8789
4 IDMAT (17)
H01703J3 (5.5028E-2)
ZRN203J3 (3.2371E-2)

$END XSEC

NPICT( 6 )
PAPER(-250 -250 25.00 500 0 0.00 0 500 0.00 120 60 0
-250 -250 67.50 500 0 0.00 0 500 0.00 120 60 0
-250 -250 135.00 500 0 0.00 0 500 0.00 120 60 0
-10 -10 50.000 20 0 0.00 0 20 0.00 240 120 9
-250 -250 202.50 500 0 0.00 0 500 0.00 120 60 0
-250 -250 246.00 500 0 0.00 0 500 0.00 120 60 0
0 0 0.00 200 0 0.00 0 280.00 120 60 0 )

$GEOM
% P = 16.07 ,HT1 = 40.0 ,HT2 = 35.0 ,HT3 = 100.0
% PP = 15.57 , PFP = 14.77
% HT4 = 35.0 ,HT5 = 50.0
% DH = (31.0-1.0)*P*SQR(3)/2.0
*
% TP = 3.0 , TPX=SQR(3)*TP/2.0 ,TPY=TP/2.0
% TPXX=TPX*2.0 , TPYY=TPY*3.0
% X1=0.0 , Y1=0.0
% X2=0.0 , Y2= TP
% X3=TPX , Y3=TPY
% X4=TPX , Y4=-TPY
% X5=0.0 , Y5=-TP
% X6=-TPX , Y6=-TPY
% X7=-TPX , Y7=TPY
% X8=0.0 , Y8= 2.0*TP
% X9=TPX , Y9=TPY
% X10=TPXX , Y10= TP
% X11=TPXX , Y11=0.0
% X12=TPXX , Y12= -TP
% X13=TPX , Y13=-TPY
% X14=0.0 , Y14= -2.0*TP
% X15=-TPX , Y15=-TPY
% X16=-TPXX , Y16= -TP
% X17=-TPXX , Y17=0.0
% X18=-TPXX , Y18= TP
% X19=-TPX , Y19= TPY
*
% X20=(X1+X2+X3)/3.0 , Y20=(Y1+Y2+Y3)/3.0
% X21=(X1+X3+X4)/3.0 , Y21=(Y1+Y3+Y4)/3.0
% X22=(X1+X4+X5)/3.0 , Y22=(Y1+Y4+Y5)/3.0
% X23=(X1+X5+X6)/3.0 , Y23=(Y1+Y5+Y6)/3.0
% X24=(X1+X6+X7)/3.0 , Y24=(Y1+Y6+Y7)/3.0
% X25=(X1+X2+X7)/3.0 , Y25=(Y1+Y2+Y7)/3.0
*
% X26=(X3+X2+X9)/3.0 , Y26=(Y3+Y2+Y9)/3.0
% X27=(X3+X4+X11)/3.0 , Y27=(Y3+Y4+Y11)/3.0
% X28=(X5+X4+X13)/3.0 , Y28=(Y5+Y4+Y13)/3.0
% X29=(X5+X6+X15)/3.0 , Y29=(Y5+Y6+Y15)/3.0
% X30=(X7+X17+X6)/3.0 , Y30=(Y7+Y17+Y6)/3.0
% X31=(X2+X7+X19)/3.0 , Y31=(Y2+Y7+Y19)/3.0
*
% X32=(X2+X8+X9)/3.0 , Y32=(Y2+Y8+Y9)/3.0
% X33=(X3+X9+X10)/3.0 , Y33=(Y3+Y9+Y10)/3.0
% X34=(X3+X11+X10)/3.0 , Y34=(Y3+Y11+Y10)/3.0
% X35=(X4+X11+X12)/3.0 , Y35=(Y4+Y11+Y12)/3.0
% X36=(X4+X13+X12)/3.0 , Y36=(Y4+Y13+Y12)/3.0
% X37=(X5+X13+X14)/3.0 , Y37=(Y5+Y13+Y14)/3.0
% X38=(X5+X15+X14)/3.0 , Y38=(Y5+Y15+Y14)/3.0
% X39=(X6+X15+X16)/3.0 , Y39=(Y6+Y15+X16)/3.0
% X40=(X6+X17+X16)/3.0 , Y40=(Y6+Y17+X16)/3.0
% X41=(X7+X17+X18)/3.0 , Y41=(Y7+Y17+Y18)/3.0
% X42=(X7+X19+X18)/3.0 , Y42=(Y7+Y19+Y18)/3.0
% X43=(X2+X19+X8)/3.0 , Y43=(Y2+Y19+Y8)/3.0
*
% X44=X8+X9-X32 , Y44=Y8+Y9-Y32
% X45=X10+X9-X33 , Y45=Y10+Y9-Y33
% X46=X10+X11-X34 , Y46=Y10+Y11-Y34
% X47=X11+X12-X35 , Y47=Y11+Y12-Y35
% X48=X13+X12-X36 , Y48=Y13+Y12-Y36
% X49=X13+X14-X37 , Y49=Y13+Y14-Y37
% X50=X15+X14-X38 , Y50=Y15+Y14-Y38
% X51=X15+X16-X39 , Y51=Y15+Y16-Y39
% X52=X17+X16-X40 , Y52=Y17+Y16-Y40
% X53=X17+X18-X41 , Y53=Y17+Y18-Y41
% X54=X19+X18-X42 , Y54=Y19+Y18-Y42
% X55=X19+X8-X43 , Y55=Y19+Y8-Y43
*
% PZRH1=1.8/2.0 , PZRH2=1.6/2.0 , PTC1=0.5/2.0 , PTC2=0.44/2.0
*
#USLD
***** LATTICE DATA *****
IDLAT(100)
LTP(2) NVLAT( 31 31 1)
SZLAT(<P> 0.0 <HT1> )
SZHEX( 0.0 0.0 <DH> <RT1> 0.0 )
RCELL( 16 16 )
*****
KLATT(
```















C93ZRH15:ZRHZRH1:17 : 1615  
 C93ZRH16:ZRHZRH1:17 : 1616  
 C93ZRH17:ZRHZRH2:17 : 1617  
 C93ZRH18:ZRHZRH3:17 : 1618  
 C93ZRH19:ZRHZRH4:17 : 1619  
 C93TCSS1:TCSS4:15 : 701 -1701  
 C93TCSS2:TCSS3:15 : 702 -1702  
 C93TCSS3:TCSS3:15 : 703 -1703  
 C93TCSS4:TCSS3:15 : 704 -1704  
 C93TCSS5:TCSS3:15 : 705 -1705  
 C93TCSS6:TCSS4:15 : 706 -1706  
 C93TCSS7:TCSS4:15 : 707 -1707  
 C93TCSS8:TCSS3:15 : 708 -1708  
 C93TCSS9:TCSS2:15 : 709 -1709  
 C93TCSS10:TCSS2:15 : 710 -1710  
 C93TCSS11:TCSS3:15 : 711 -1711  
 C93TCSS12:TCSS4:15 : 712 -1712  
 C93TCSS13:TCSS5:15 : 713 -1713  
 C93TCSS14:TCSS4:15 : 714 -1714  
 C93TCSS15:TCSS3:15 : 715 -1715  
 C93TCSS16:TCSS2:15 : 716 -1716  
 C93TCSS17:TCSS2:15 : 717 -1717  
 C93TCSS18:TCSS2:15 : 718 -1718  
 C93TCSS19:TCSS2:15 : 719 -1719  
 C93TCSS20:TCSS2:15 : 720 -1720  
 C93TCSS21:TCSS2:15 : 721 -1721  
 C93TCSS22:TCSS3:15 : 722 -1722  
 C93TCSS23:TCSS4:15 : 723 -1723  
 C93TCSS24:TCSS5:15 : 724 -1724  
 C93TCSS25:TCSS5:15 : 725 -1725  
 C93TCSS26:TCSS4:15 : 726 -1726  
 C93TCSS27:TCSS3:15 : 727 -1727  
 C93TCSS28:TCSS2:15 : 728 -1728  
 C93TCSS29:TCSS1:15 : 729 -1729  
 C93TCSS30:TCSS1:15 : 730 -1730  
 C93TCSS31:TCSS1:15 : 731 -1731  
 C93TCSS32:TCSS1:15 : 732 -1732  
 C93TCSS33:TCSS2:15 : 733 -1733  
 C93TCSS34:TCSS3:15 : 734 -1734  
 C93TCSS35:TCSS4:15 : 735 -1735  
 C93TCSS36:TCSS5:15 : 736 -1736  
 C93TC1:TC1C4:16 : 1701  
 C93TC2:TC1C3:16 : 1702  
 C93TC3:TC1C3:16 : 1703  
 C93TC4:TC1C3:16 : 1704  
 C93TC5:TC1C3:16 : 1705  
 C93TC6:TC1C4:16 : 1706  
 C93TC7:TC1C4:16 : 1707  
 C93TC8:TC1C3:16 : 1708  
 C93TC9:TC1C2:16 : 1709  
 C93TC10:TC1C2:16 : 1710  
 C93TC11:TC1C3:16 : 1711  
 C93TC12:TC1C4:16 : 1712  
 C93TC13:TC1C3:16 : 1713  
 C93TC14:TC1C4:16 : 1714  
 C93TC15:TC1C3:16 : 1715  
 C93TC16:TC1C2:16 : 1716  
 C93TC17:TC1C2:16 : 1717  
 C93TC18:TC1C2:16 : 1718  
 C93TC19:TC1C2:16 : 1719  
 C93TC20:TC1C2:16 : 1720  
 C93TC21:TC1C2:16 : 1721  
 C93TC22:TC1C3:16 : 1722  
 C93TC23:TC1C4:16 : 1723  
 C93TC24:TC1C3:16 : 1724  
 C93TC25:TC1C3:16 : 1725  
 C93TC26:TC1C4:16 : 1726  
 C93TC27:TC1C3:16 : 1727  
 C93TC28:TC1C2:16 : 1728  
 C93TC29:TC1C1:16 : 1729  
 C93TC30:TC1C1:16 : 1730  
 C93TC31:TC1C1:16 : 1731  
 C93TC32:TC1C1:16 : 1732  
 C93TC33:TC1C2:16 : 1733  
 C93TC34:TC1C3:16 : 1734  
 C93TC35:TC1C4:16 : 1735  
 C93TC36:TC1C3:16 : 1736  
 #CELL ID(10) TYPE(HEXA) /\* TSLD  
 C101: 1 :-999 :-4  
 C102:TSLD: 14 : 4  
 #CELL ID(11) TYPE(HEXA) /\* TSLD  
 C111: 1 :-999 :-5  
 C112:TSLD: 14 : 5  
 #CELL ID(12) TYPE(HEXA) /\* RSLD  
 C121: 1 :-999 :-1  
 C122:RSLD: 6 : 1  
 #CELL ID(13) TYPE(HEXA) /\* RSLD  
 C131: 1 :-999 :-2  
 C132:RSLD: 6 : 2  
 #CELL ID(14) TYPE(HEXA) /\* RSLD  
 C141: 1 :-999 :-3  
 C142:RSLD: 6 : 3  
 #CELL ID(15) TYPE(HEXA) /\* RSLD  
 C151: 1 :-999 :-4  
 C152:RSLD: 6 : 4  
 #CELL ID(16) TYPE(HEXA) /\* RSLD  
 C161: 1 :-999 :-5  
 C162:RSLD: 6 : 5  
 #CELL ID(17) TYPE(HEXA) /\* B4CSLD  
 C171: 1 :-999 :-1  
 C172:B4CS: 7 : 1  
 #CELL ID(18) TYPE(HEXA) /\* B4CSLD  
 C181: 1 :-999 :-2  
 C182:B4CS: 7 : 2  
 #CELL ID(19) TYPE(HEXA) /\* B4CSLD  
 C191: 1 :-999 :-3  
 C192:B4CS: 7 : 3  
 #CELL ID(20) TYPE(HEXA) /\* B4CSLD  
 C201: 1 :-999 :-4  
 C202:B4CS: 7 : 4  
 #CELL ID(21) TYPE(HEXA) /\* B4CSLD  
 C211: 1 :-999 :-5  
 C212:B4CS: 7 : 5  
 #CELL ID(22) TYPE(HEXA) /\* ABSP  
 C221: 1 :-999 :-1  
 C222:ABSP: 9 : 1  
 #CELL ID(23) TYPE(HEXA) /\* ABSP  
 C231: 1 :-999 :-2  
 C232:ABSP: 9 : 2  
 #CELL ID(24) TYPE(HEXA) /\* CRPP  
 C241: 1 :-999 :-3  
 C242:CRPP: 8 : 3  
 #CELL ID(25) TYPE(HEXA) /\* CRPP  
 C251: 1 :-999 :-4  
 C252:CRPP: 8 : 4  
 #CELL ID(26) TYPE(HEXA) /\* CRPP  
 C261: 1 :-999 :-5  
 C262:CRPP: 8 : 5  
 #CELL ID(27) TYPE(HEXA) /\* ABSB  
 C271: 1 :-999 :-1

file:evp\_fp600\_caselhetero\_edit2\_dat

```
C272:ABSB: 11 : 1
#CELL ID(28) TYPE(HEXA) /* ABSB
C281: 1 :-999 : -2
C282:ABSB: 11 : 2
#CELL ID(29) TYPE(HEXA) /* CRPB
C291: 1 :-999 : -3
C292:CRPB: 10 : 3
#CELL ID(30) TYPE(HEXA) /* CRPB
C301: 1 :-999 : -4
C302:CRPB: 10 : 4
#CELL ID(31) TYPE(HEXA) /* CRPB
C311: 1 :-999 : -5
C312:CRPB: 10 : 5
#CELL ID(32) TYPE(HEXA) /* SODIUM
C311: 1 :-999 : -1
C312: NA : 13 : 1
#CELL ID(33) TYPE(HEXA) /* SODIUM
C311: 1 :-999 : -2
C312: NA : 13 : 2
#CELL ID(34) TYPE(HEXA) /* SODIUM
C311: 1 :-999 : -3
C312: NA : 13 : 3
#CELL ID(35) TYPE(HEXA) /* SODIUM
C311: 1 :-999 : -4
C312: NA : 13 : 4
#CELL ID(36) TYPE(HEXA) /* SODIUM
C311: 1 :-999 : -5
C312: NA : 13 : 5
#END CELL
#TALLY REGION
DEFINE #TCTC1(COREIN:TGL!TCTC1)
DEFINE #TCTC2(COREIN:TGL!TCTC2)
DEFINE #TCTC3(COREIN:TGL!TCTC3)
DEFINE #TCTC4(COREIN:TGL!TCTC4)
DEFINE #TCTC5(COREIN:TGL!TCTC5)
DEFINE #ZRRZRH1(COREIN:TGL!ZRRZRH1)
DEFINE #ZRRZRH2(COREIN:TGL!ZRRZRH2)
DEFINE #ZRRZRH3(COREIN:TGL!ZRRZRH3)
DEFINE #ZRRZRH4(COREIN:TGL!ZRRZRH4)
DEFINE #ZRRZRH5(COREIN:TGL!ZRRZRH5)
DEFINE #TGSSSTC1(COREIN:TGL!TGSS1)
DEFINE #TGSSSTC2(COREIN:TGL!TGSS2)
DEFINE #TGSSSTC3(COREIN:TGL!TGSS3)
DEFINE #TGSSSTC4(COREIN:TGL!TGSS4)
DEFINE #TGSSSTC5(COREIN:TGL!TGSS5)
DEFINE #TGSSZRH1(COREIN:TGL!ZRHSS1)
DEFINE #TGSSZRH2(COREIN:TGL!ZRHSS2)
DEFINE #TGSSZRH3(COREIN:TGL!ZRHSS3)
DEFINE #TGSSZRH4(COREIN:TGL!ZRHSS4)
DEFINE #TGSSZRH5(COREIN:TGL!ZRHSS5)
DEFINE #TGSSSTVB(COREIN:TGL!TGSTUBE*)
DEFINE #TGNA1(COREIN:TGL!TGNA1*)
DEFINE #TGNA2(COREIN:TGL!TGNA2*)
SEND GEOM
***** TALLY ENERGY GROUP *****
ENGYB(
1.000E+7 6.065E+6 3.678E+6 2.231E+6
1.353E+6 8.208E+5 3.877E+5
1.831E+5 8.651E+4 4.086E+4 1.930E+4
9.118E+3 4.307E+3 2.034E+3 961.1 4.540E+2
2.144E+2 1.013E+2 47.851 22.603 10.677 5.0435 2.3824 1.1254
0.53158 0.00001 )
* ENGYB(
* 1.000E+7 7.788E+6 6.065E+6 4.723E+6 3.678E+6 2.865E+6 2.231E+6
* 1.737E+6 1.353E+6 1.054E+6 8.208E+5 6.392E+5 4.978E+5 3.877E+5
* 3.019E+5 2.351E+5 1.831E+5 1.426E+5 1.110E+5 8.651E+4 6.737E+4
* 5.247E+4 4.086E+4 3.182E+4 2.478E+4 1.930E+4 1.503E+4 1.170E+4
* 9.118E+3 7.101E+3 5.530E+3 4.307E+3 3.354E+3 2.612E+3 2.034E+3
* 1.584E+3 1.234E+3 9.611E+2 7.485E+2 5.829E+2 4.540E+2 3.535E+2
* 2.753E+2 2.144E+2 1.670E+2 1.300E+2 1.013E+2 7.889E+1 6.144E+1
* 4.785E+1 3.726E+1 2.902E+1 2.260E+1 1.760E+1 1.371E+1 1.067E+1
* 8.315E+0 6.478E+0 5.043E+0 3.927E+0 3.059E+0 2.382E+0 1.855E+0
* 1.445E+0 1.125E+0 8.764E-1 6.825E-1 5.315E-1 4.139E-1 3.224E-1
* 1.000E-5 )
***** VOLUME
% NR = #NREG
% NRG = NR*NG
***** VARIANCE REDUCTION PARAMETERS *****
***** RESPONSE PARAMETERS *****
NRESP(1) RESP(<NG>(1.0) )
***** INITIAL SOURCE *****
NSOUR(1) KSOUR(3) IFISM(PU9003J3) SOUR(1.0) EINCD( 2.0E+5)
% DH2 = P*18.0/2.0 DH3 = P*19.0*SQR(3)/2.0/2.0
PSPAC( <-DR2> <DH2> <-DHB> <DHB> <HT5+HT4+0.1>
<HT5+HT4+HT3-0.1> R(0) )
***** FISSION NEUTRON GENERATION *****
/
```