

JAERI-Tech
95-006



JMTRにおける中性子スペクトル
調整照射の核的検討
—核融合炉条件模擬照射の可能性—

1995年2月

長尾美春・島川聡司・小森芳廣・桜井文雄

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

JMTRにおける中性子スペクトル調整照射の核的検討

— 核融合炉条件模擬照射の可能性 —

日本原子研究所大洗研究所材料試験炉部

長尾 美春・島川 聡司・小森 芳廣・桜井 文雄

(1995年1月25日受理)

JMTRのような混合スペクトルをもつ試験炉においては、熱中性子束を調節することにより、高速炉や核融合炉等での照射効果を模擬した照射試験のほか、材料の基礎基盤研究における中性子スペクトル効果の究明等のための照射試験が可能である。核融合炉材料の照射試験を行う場合には、ヘリウム生成量とはじき出し損傷量 (dpa) の比 (He/dpa) を照射効果の指標とし、その比を核融合炉での値に模擬する方法が採用されている。本報告書では、JMTRにおける中性子スペクトル調整照射に関する検討の一環として、ステンレス鋼 (SUS316) を核融合炉条件 (He/dpa = 15) で照射するための制御能力について検討した。本解析にあたり、SUS316の構成元素 ^{58}Ni の熱中性子2段反応 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ によって生成するヘリウム生成量を評価するため、計算プログラムNIHEを作成した。解析の結果、照射孔の移動と軽水リングの使用によるスペクトル調整を組合わせて行うことにより、JMTRにおいてHe/dpa = 13~15の範囲内に制御した照射が可能であることがわかった。

Neutron Spectral Tailoring Calculation in the JMTR
-Feasible Study on Irradiation Test Simulating the Fusion
Reactor Condition-

Yoshiharu NAGAO, Satoshi SHIMAKAWA, Yoshihiro KOMORI
and Fumio SAKURAI

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 25, 1995)

By adjusting the thermal-to-fast neutron flux ratio, it is feasible to carry out irradiation tests to simulate fast reactor or fusion reactor conditions and examine neutron spectrum effect in basic study of materials in testing reactor with mixed neutron spectrum such as the JMTR. For fusion reactor materials irradiation, the He-to-dpa ratio has been tailored to a fusion reactor condition(15 appm He/dpa). Thermal neutron irradiation of nickel-bearing materials generate high levels of helium due to $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ reaction. This process is used to simulate fusion reactor He-to-dpa ratio in stainless steel-316. This paper describes the analytical result on the possible range of He-to-dpa ratio to simulate fusion reactor condition for stainless steel-316 irradiation in the JMTR. NIHE program was developed to evaluate helium production due to the ^{58}Ni two step reaction. It was found that He-to-dpa ratio in stainless steel-316 irradiation is able to be tailored within 13~15 appm He/dpa in the JMTR.

Keywords: Neutron Spectral Tailoring, Irradiation Tests, Testing Reactor, Nickel-bearing Materials, ^{58}Ni Two Step Reaction, JMTR, He-to-dpa Ratio

目 次

1. 序論	1
2. He生成量計算プログラム (NIHE)	1
2.1 ^{58}Ni の2段反応	1
2.2 プログラミング	2
3. 計算方法	3
3.1 中性子スペクトル計算	4
3.2 はじき出し損傷率及びHe生成率計算	4
3.3 ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量計算	4
4. 計算結果	5
4.1 中性子スペクトル	5
4.2 はじき出し損傷率及びHe生成率	5
4.3 ^{58}Ni 2段反応を含めたHe生成量及びはじき出し損傷量	5
5. 中性子スペクトル調整照射の検討	6
5.1 照射孔の移動による調整	6
5.2 軽水リングの使用による調整	6
6. まとめ	7
謝辞	7
参考文献	8
付録 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ 反応計算プログラム(NIHE)の概要	43

Contents

1. Introduction	1
2. He Production Calculation Program(NIHE).....	1
2.1 ^{58}Ni Two Step Reaction	1
2.2 Programing	2
3. Calculation	3
3.1 Neutron Spectrum	4
3.2 Displacement Per Atom Rate and He Production Rate	4
3.3 He Production Due to ^{58}Ni Two Step Reaction.....	4
4. Results	5
4.1 Neutron Spectrum	5
4.2 Displacement Per Atom Rate and He Production Rate	5
4.3 He Production Including ^{58}Ni Two Step Reaction and Displacement Per Atom.....	5
5. Neutron Spectral Tailoring Calculation	6
5.1 Irradiation Location Changing Tailoring	6
5.2 Tailoring Used Light Water Ring	6
6. Conclusion	7
Acknowledgements	7
Reference	8
Appendix $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ Reaction Calculation Program "NIHE".....	43

1. 序 論

中性子照射量が高く、比較的大きな形状の試料が試験できる照射場として、核分裂炉である試験研究炉が利用されている。材料試験炉 (JMTR: Japan Materials Testing Reactor, 50MWt) のような混合スペクトル環境下で照射した場合、核融合炉用などの材料に対するスペクトル効果が問題となる。このような異なる中性子スペクトル場で形成された照射効果に対する相関をとるために、dpa (displacement per atom: 原子1個あたりのはじき出し数) という物理量が提案された。また近年、dpaと同様にヘリウムガス生成が材料の脆化に大きく影響することから、ヘリウム生成量とdpaの比 (He/dpa比) が照射相関の指標として用いられている。

ステンレス鋼の照射試験の場合、核融合炉第1壁条件はHe/dpa=15となる。JMTRのような混合スペクトルをもつ照射場では、ステンレス鋼などニッケルを含有する材料に対して、主に熱中性子によって起こる2段反応 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ によりHe生成を促進させることができ、結果としてHe/dpa比を制御することができる。ただし、この2段反応によるヘリウム生成量は指数関数的に増加し、時間とともにHe/dpa比が変化する。このため核融合炉のようにHe/dpa比を一定にして照射をするためには、中性子スペクトルを時間とともに調整して ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量を制御しながら照射する方法が採られている。本報告では、JMTRに対して計算シミュレーションを行い、SUS316を核融合炉条件で照射するための試験方法を提案する。また、He/dpa比の計算において、 ^{58}Ni 2段反応によって生成するヘリウム量を計算するため、He生成量計算プログラムNIHEを作成した。

2. He生成量計算プログラム(NIHE)

2.1 ^{58}Ni の2段反応

^{58}Ni のように中性子との多段反応によってHeが生成するような物質を含有する材料について照射試験を行う場合、生成速度が時間とともに変化するため正確に反応式を解くことが誤差を最小限にするために必要である。

Niの2段反応 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ によって生成するHe原子個数は次式(1)で与えられる。

$$\frac{N(\text{He})}{N_0(^{58}\text{Ni})} = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_T} + \frac{\sigma_\alpha \exp(-\sigma_\gamma \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T)} - \frac{\sigma_\alpha \sigma_\gamma \exp(-\sigma_T \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T) \sigma_T} \quad (2.1.1)$$

1. 序 論

中性子照射量が高く、比較的大きな形状の試料が試験できる照射場として、核分裂炉である試験研究炉が利用されている。材料試験炉 (JMTR : Japan Materials Testing Reactor, 50MWt) のような混合スペクトル環境下で照射した場合、核融合炉用などの材料に対するスペクトル効果が問題となる。このような異なる中性子スペクトル場で形成された照射効果に対する相関をとるために、dpa (displacement per atom: 原子1個あたりのはじき出し数) という物理量が提案された。また近年、dpaと同様にヘリウムガス生成が材料の脆化に大きく影響することから、ヘリウム生成量とdpaの比 (He/dpa比) が照射相関の指標として用いられている。

ステンレス鋼の照射試験の場合、核融合炉第1壁条件はHe/dpa=15となる。JMTRのような混合スペクトルをもつ照射場では、ステンレス鋼などニッケルを含有する材料に対して、主に熱中性子によって起こる2段反応 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ によりHe生成を促進させることができ、結果としてHe/dpa比を制御することができる。ただし、この2段反応によるヘリウム生成量は指数関数的に増加し、時間とともにHe/dpa比が変化する。このため核融合炉のようにHe/dpa比を一定にして照射をするためには、中性子スペクトルを時間とともに調整して ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量を制御しながら照射する方法が採られている。本報告では、JMTRに対して計算シミュレーションを行い、SUS316を核融合炉条件で照射するための試験方法を提案する。また、He/dpa比の計算において、 ^{58}Ni 2段反応によって生成するヘリウム量を計算するため、He生成量計算プログラムNIHEを作成した。

2. He生成量計算プログラム(NIHE)

2.1 ^{58}Ni の2段反応

^{58}Ni のように中性子との多段反応によってHeが生成するような物質を含有する材料について照射試験を行う場合、生成速度が時間とともに変化するため正確に反応式を解くことが誤差を最小限にするために必要である。

Niの2段反応 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ によって生成するHe原子個数は次式(1)(2)で与えられる。

$$\frac{N(\text{He})}{N_0(^{58}\text{Ni})} = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_T} + \frac{\sigma_\alpha \exp(-\sigma_\gamma \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T)} - \frac{\sigma_\alpha \sigma_\gamma \exp(-\sigma_T \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T) \sigma_T} \quad (2.1.1)$$

ここで、	$N(\text{He})$: 生成したHe原子個数密度 (n/cm^3)
	$N_0(^{58}\text{Ni})$: 照射前の ^{58}Ni 原子個数密度 (n/cm^3)
	σ_α	: $^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ 反応の平均断面積 (barn)
	σ_T	: ^{59}Ni 全吸収の平均断面積 (barn)
	σ_γ	: $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ 反応の平均断面積 (barn)
	ϕ	: 中性子束 ($\text{n/cm}^2\text{s}$)
	t	: 照射時間 (s)

2.2 プログラミング

計算のフローを図2.2.1に示す。

入力データは、1段反応速度、2段反応計算条件、はじき出し損傷量及びHe生成量等の蓄積値、中性子断面積セットから成る。1段反応速度は、はじき出し損傷率 (dpa/s) 及びHe生成率 (appm/s) であり、これらの値は別の照射損傷計算によりあらかじめ求めておく必要がある。2段反応の計算条件としては、照射試料の原子個数密度 (構成核種の原子個数密度の和)、照射試料中に含有しているNiの原子個数密度、照射場の多群中性子束、時間間隔である。多群中性子束のエネルギー群数は可変であるが、正確な計算を行うためには数10群以上にすべきである。時間間隔は計算結果を出力する時間ステップの設定値である。蓄積値は、中性子スペクトル調整照射計算などのように、幾つかの異なる中性子スペクトルを使用して一連の照射計算を行う場合において、中性子スペクトルを切り換えた後、続けて計算する場合の初期値として使用し、はじき出し損傷量 (dpa)、He生成量 (appm) 及び ^{59}Ni 原子個数密度を入力する。これにより、それまでのHe/dpa計算結果を保持して再計算を開始することができる。中性子断面積セットは、評価済み核データライブラリーから多群中性子束のエネルギー構成に合わせて縮約したNi2段反応に関係する多群断面積で構成される。また、He/dpa比の目標値を設定することができ、He/dpa比がその目標値に到達した場合に計算が打切られる。NIHEの入力データ及び出力例は付録に示した。

計算が開始されると、まず中性子断面積を多群中性子束で重みを付けて1群化し、次に示す計算式を解く。

断面積の1群化：

$$\sigma = \frac{\sum_{n=1}^N (\sigma_n \times \phi_n)}{\sum_{n=1}^N \phi_n} \quad (2.2.1)$$

^{58}Ni 原子個数密度：

$$N(^{58}\text{Ni}) = N_0(^{58}\text{Ni}) \exp(-\sigma_\gamma \phi t) \quad (2.2.2)$$

^{59}Ni 原子個数密度：

$$N(^{59}\text{Ni}) = \frac{N_0(^{58}\text{Ni})(\exp(-\sigma_\gamma \phi t) - \exp(-\sigma_T \phi t)) \sigma_\gamma \phi}{(\sigma_T \phi - \sigma_\gamma \phi)} + N_0(^{59}\text{Ni}) \exp(-\sigma_T \phi t) \quad (2.2.3)$$

^{58}Ni 2段反応によるHe生成量：

$$N_1(\text{He}) = \left(\frac{\sigma_\alpha}{\sigma_T} + \frac{\sigma_\alpha \exp(-\sigma_\gamma \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T)} - \frac{\sigma_\alpha \sigma_\gamma \exp(-\sigma_T \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T) \sigma_T} \right) \frac{N_0(^{58}\text{Ni})}{N_{\text{alloy}}} \quad (2.2.4)$$

N_{alloy} : 照射試料の原子個数密度

$^{59}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反応によるHe生成量：

$$N_2(\text{He}) = \frac{N_0(^{59}\text{Ni})(1 - \exp(-\sigma_\alpha \phi t))}{N_{\text{alloy}}} \quad (2.2.5)$$

3. 計算方法

He/dpa計算のフローを図3.1に示す。計算は次に示す順に実施した。

- 1)中性子スペクトル計算
- 2)はじき出し損傷率及びHe生成率計算
- 3) ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量計算

^{59}Ni 原子個数密度：

$$N(^{59}\text{Ni}) = \frac{N_0(^{58}\text{Ni})(\exp(-\sigma_\gamma \phi t) - \exp(-\sigma_T \phi t)) \sigma_\gamma \phi}{(\sigma_T \phi - \sigma_\gamma \phi)} + N_0(^{59}\text{Ni}) \exp(-\sigma_T \phi t) \quad (2.2.3)$$

^{58}Ni 2段反応によるHe生成量：

$$N_1(\text{He}) = \left(\frac{\sigma_\alpha}{\sigma_T} + \frac{\sigma_\alpha \exp(-\sigma_\gamma \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T)} - \frac{\sigma_\alpha \sigma_\gamma \exp(-\sigma_T \phi t)}{(\sigma_\gamma - \sigma_T) \sigma_T} \right) \frac{N_0(^{58}\text{Ni})}{N_{\text{alloy}}} \quad (2.2.4)$$

N_{alloy} : 照射試料の原子個数密度

$^{59}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反応によるHe生成量：

$$N_2(\text{He}) = \frac{N_0(^{59}\text{Ni})(1 - \exp(-\sigma_\alpha \phi t))}{N_{\text{alloy}}} \quad (2.2.5)$$

3. 計算方法

He/dpa計算のフローを図3.1に示す。計算は次に示す順に実施した。

- 1)中性子スペクトル計算
- 2)はじき出し損傷率及びHe生成率計算
- 3) ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量計算

3.1 中性子スペクトル計算

計算手順を図3.1.1に示す。計算コードは1次元輸送コードANISN³⁾を、断面積セットはJENDL-3.1⁴⁾から編集されたMGCL-J3 (137群、群構造は表3.1.1参照) ⁵⁾⁶⁾を使用した。

JMTRの照射領域を図3.1.2に示す。照射領域としては燃料領域1層、燃料領域2層、Be領域1層、Be領域2層及びAl領域1層を検討対象とした。計算は、JMTR全炉心計算及び照射キャプセル計算の2ステップに分けて行った。

1)JMTR全炉心計算

JMTR全炉心の計算体系を図3.1.3に、物質の組成を表3.1.2に示す。計算体系は1次元平板モデルで近似し、燃料領域2.5層、Be領域2層、Al領域3層から成り (1層分の寸法は7.72cm)、その外側に軽水を配置した。計算は1次元平板体系にて固有値問題で解き、境界条件は燃料領域側では反射(reflection)、軽水側では真空境界(vacuum)とした。

2)照射キャプセル計算

照射キャプセル計算体系を図3.1.4に示し、物質の組成を表3.1.3に示す。照射キャプセルは直径40mmとし、照射試料 (核融合炉材料としてSUS316) は直径10mmとした。計算は1次元円筒体系にて固定中性子源問題で解き、この際外部繰返しを実行した。また、境界条件は真空境界条件とし、線源は照射キャプセル最外側に配置した。各照射領域における照射試料中の中性子スペクトルは、1)のJMTR全炉心計算より求めた各照射領域の平均の中性子スペクトルを使用した。

3.2 はじき出し損傷率及びHe生成率計算

計算手順を図3.2.1に示す。計算コードは照射損傷計算コードTENJIN2⁷⁾を使用し、断面積はJENDL-3.1 (ファイル形式: ENDF/B-V形式) を使用した。TENJIN2の断面積入力形式はENDF/B-IV形式である。そのためJENDL-3.1の形式変換 (ENDF/B-V→ENDF/B-IV) は断面積編集コードCRECT-J5により行った。弾性散乱断面積及び(n, γ)反応断面積の編集には断面積編集コードSUPERTOG-J3⁸⁾を使用し、エネルギー群構造はMGCL群構造 (137群) に縮約した。その際の中性子スペクトルの重みとして、高速エネルギー領域に核分裂、中速エネルギー領域に1/E、熱エネルギー領域にマクスウェル分布を使った。

SUS316の組成及び構成元素の実効的なはじき出ししきいエネルギーの値⁹⁾¹⁰⁾を表3.2.1、3.2.2に示す。直接反応によるはじき出し損傷率及びHe生成率は、SUS316を構成する元素それぞれについて計算を行い、元素ごとに得られた値に原子個数密度の重みを乗じて、SUS316のはじき出し損傷率 (dpa/s) 及びHe生成率 (appm/s) を求めた。

3.3 ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量計算

計算手順を図3.3.1に示す。 ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量の計算には、 ^{58}Ni 2段反応He生成量計算プログラムNIHEを使用した。 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ 、 $^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ 及び ^{59}Ni 捕獲断面積はENDF/B-VI及びJENDL-3.1から断面積編集コードSUPERTOG-J3により編集し、MGCL群構造 (137群) に縮約した。断面積ENDF/B-VI (ENDF/B-VI形式) 及びJENDL-3.1 (ENDF/B-V形式) をSUPERTOG-J3で編集するためには断面積の形式をENDF/B-IV形式に変換する

必要がある。そのため断面積の形式変換にはB6T05 (ENDF/B-VI→ENDF/B-V形式) 及びCRECT-J5 (ENDF/B-V→ENDF/B-IV形式) を使用した。

4. 計算結果

4.1 中性子スペクトル

JMTR各照射領域(燃料領域1層、燃料領域2層、Be領域1層、Be領域2層及びAl領域1層)において照射試料(SUS316)を照射する場合の中性子スペクトル計算結果を図4.1.1～4.1.6及び表4.1.1に示す。各照射領域における熱中性子束(0.683eV以下の中性子束)の割合(=Thermal flux/Total flux)は、燃料領域1層が最も小さく15.6%であり、最大はAl領域1層での66.9%であった。熱中性子成分は、原子炉中心から遠ざかるに従って相対的に増加する傾向が確認できる。

4.2 はじき出し損傷率及びHe生成率

JMTR各照射領域におけるSUS316の直接反応によるはじき出し損傷率(dpa/s)及びHe生成率(appm/s)の計算結果を表4.2.1～4.2.5に示す。この計算結果は1MeV以上の中性子束 $\phi_{>1\text{MeV}}=1 \times 10^{13}[\text{n/cm}^2\text{sec}]$ で規格化したものである。また、拡散計算コードCITATIONによる炉心計算から得られた高速中性子束をもとに各照射領域で絶対値にしたのはじき出し損傷量(dpa)及びHe生成量(appm)を図4.2.1及び表4.2.6に示した。JMTRにて25日間(1サイクルに相当)照射した場合ははじき出し損傷量は、燃料領域1層が0.56dpaと最大であり、Al領域1層では最小の0.023dpaである。また、 ^{58}Ni 2段反応寄与分を除くHe生成量は燃料領域1層が最も大きく0.31appmとなり、Al領域1層は最小の0.007appmである。なお、これらの数値は平均値であり、ピーク値は1.3～2.0倍となる。

4.3 ^{58}Ni 2段反応を含めたHe生成量及びはじき出し損傷量

^{58}Ni 2段反応を含めたHe生成量及びはじき出し損傷量を図4.3.1～4.3.6及び表4.3.1～4.3.5に示す。計算時間間隔は25日とした。これはJMTRにおける1サイクル照射時間に相当するものである。

核融合炉条件に到達する照射量は、直線(He/dpa=15)と交差する点のdpaで表される。燃料領域(1層及び2層)では熱中性子の割合が少なく、現実的な時間内には核融合炉条件に到達しない。一方、熱中性子の割合が多いBe領域1層では1.49dpa(165日照射に相当)、Be領域2層では0.135dpa(75日照射に相当)、そしてAl領域1層では0.136dpa(150日照射に相当)の照射量で到達する。He生成量について、核融合炉条件に到達した時点における ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量の寄与割合は、Be領域(1層及び2層)及びAl領域1層では約97～98%であり、 ^{58}Ni 2段反応によるHe生成が支配的である。燃料領域(1層及び2層)においては500日照射した場合でもNi2段反応の寄与割合は約83～84%、He/dpa比についても燃料領域1、2層でそれぞれ3.3、3.6であった。

必要がある。そのため断面積の形式変換にはB6TO5 (ENDF/B-VI→ENDF/B-V形式) 及びCRECT-J5 (ENDF/B-V→ENDF/B-IV形式) を使用した。

4. 計算結果

4.1 中性子スペクトル

JMTR各照射領域(燃料領域1層、燃料領域2層、Be領域1層、Be領域2層及びAl領域1層)において照射試料(SUS316)を照射する場合の中性子スペクトル計算結果を図4.1.1～4.1.6及び表4.1.1に示す。各照射領域における熱中性子束(0.683eV以下の中性子束)の割合(= Thermal flux/Total flux)は、燃料領域1層が最も小さく15.6%であり、最大はAl領域1層での66.9%であった。熱中性子成分は、原子炉中心から遠ざかるに従って相対的に増加する傾向が確認できる。

4.2 はじき出し損傷率及びHe生成率

JMTR各照射領域におけるSUS316の直接反応によるはじき出し損傷率(dpa/s)及びHe生成率(appm/s)の計算結果を表4.2.1～4.2.5に示す。この計算結果は1MeV以上の中性子束 $\phi_{>1\text{MeV}}=1 \times 10^{13}[\text{n}/\text{cm}^2\text{sec}]$ で規格化したものである。また、拡散計算コードCITATIONによる炉心計算から得られた高速中性子束をもとに各照射領域で絶対値にしたのはじき出し損傷量(dpa)及びHe生成量(appm)を図4.2.1及び表4.2.6に示した。JMTRにて25日間(1サイクルに相当)照射した場合ははじき出し損傷量は、燃料領域1層が0.56dpaと最大であり、Al領域1層では最小の0.023dpaである。また、 ^{58}Ni 2段反応寄与分を除くHe生成量は燃料領域1層が最も大きく0.31appmとなり、Al領域1層は最小の0.007appmである。なお、これらの数値は平均値であり、ピーク値は1.3～2.0倍となる。

4.3 ^{58}Ni 2段反応を含めたHe生成量及びはじき出し損傷量

^{58}Ni 2段反応を含めたHe生成量及びはじき出し損傷量を図4.3.1～4.3.6及び表4.3.1～4.3.5に示す。計算時間間隔は25日とした。これはJMTRにおける1サイクル照射時間に相当するものである。

核融合炉条件に到達する照射量は、直線(He/dpa=15)と交差する点のdpaで表される。燃料領域(1層及び2層)では熱中性子の割合が少なく、現実的な時間内には核融合炉条件に到達しない。一方、熱中性子の割合が多いBe領域1層では1.49dpa(165日照射に相当)、Be領域2層では0.135dpa(75日照射に相当)、そしてAl領域1層では0.136dpa(150日照射に相当)の照射量で到達する。He生成量について、核融合炉条件に到達した時点における ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量の寄与割合は、Be領域(1層及び2層)及びAl領域1層では約97～98%であり、 ^{58}Ni 2段反応によるHe生成が支配的である。燃料領域(1層及び2層)においては500日照射した場合でもN2段反応の寄与割合は約83～84%、He/dpa比についても燃料領域1、2層でそれぞれ3.3、3.6であった。

5. 中性子スペクトル調整照射の検討

5.1 照射孔の移動による調整

燃料領域2層及びBe領域1層の照射孔間の移動により中性子スペクトル調整を行う場合を考える。これらの照射孔の選定理由としては、Be領域1層照射孔のスペクトルは熱中性子成分が大きく、 ^{58}Ni の熱中性子による2段反応を促進させ、短期間のうちに核融合炉条件 ($\text{He}/\text{dpa}=15$) に到達させることができる。また、燃料領域2層の照射孔のスペクトルは熱中性子成分が小さく、 ^{58}Ni 2段反応によるHe生成を抑制しHe/dpa比を核融合炉条件に維持できるためである。なお、燃料領域1層スペクトルでは ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量の抑制過剰になる可能性があるため、燃料領域のうちでもBe領域に近接し熱中性子束成分の幾分大きな燃料領域2層を選定した。

照射手順は、最初にBe領域1層照射孔にて照射し、Heの生成を促進させる。その後、Heの生成に応じてHe/dpa比を核融合炉条件に維持するため、燃料領域2層照射孔に移動して ^{58}Ni 2段反応によるHe生成を抑制しながら照射する。その後、Heの生成の促進が必要になった時点で再びBe領域1層照射孔に移動させた。He/dpa比が核融合炉条件である15を大幅にずれない範囲内 ($\text{He}/\text{dpa}=13\sim 16$ の範囲) でこの移動を繰り返した。また、照射時間間隔は25日 (JMTRにおける1サイクル照射に相当) とした。計算結果を図5.1.1及び表5.1.1に示す。He生成量が約100appm以上では、燃料領域2層スペクトルのみで核融合炉条件を模擬できる。

この結果、JMTRにおける核融合炉条件を模擬した照射は、He/dpaが13~15の範囲で行うことができることがわかった。また、JMTRで375日間照射した場合には約5dpaの照射が可能である。

5.2 軽水リングの使用による調整

Be領域1層と燃料領域2層の中性子スペクトルを比較すると熱中性子束の割合 (=Thermal flux/Total flux) はそれぞれ44.5%及び17.0%であり、切り替え調整の際の熱中性子束割合の差が大きい。このため、Be領域1層から燃料領域2層への最初の切り替えでは、 ^{58}Ni 2段反応によるHe生成の抑制過剰となり、核融合炉条件の維持ができなくなるため、再びBe領域1層にてHeの生成を促進させる必要が生じている。そのためBe領域1層照射孔と燃料領域2層照射孔との間を何度か移動させなければならない。しかし、燃料領域2層照射孔においてスペクトルをもう少し熱化させる (熱中性子束の割合を増やす) ことができれば、照射孔の移動頻度をかなり減少させることができる。

照射孔の移動頻度を減らすため、燃料領域2層の照射孔において図5.2.1に示すように照射キャプセル周囲に減速材として軽水を配置した場合について検討した。これは、キャプセルの周囲に厚さ1mmのAlで被覆した軽水減速材 (軽水リング) を配置するもので、軽水部分の厚さは7mmとなっている。

この計算モデルによる燃料領域2層スペクトル (以下、軽水リング付燃料領域2層スペクトル) 計算結果を図5.2.2 (各照射領域の中性子スペクトルの比較については図5.2.3を参照) 及び表5.2.1に示す。これにより熱中性子束の割合は17%から25%に増加した。

燃料領域2層スペクトルの代わりに軽水リング付燃料領域2層スペクトルを使用して照射シ

ミュレーションを行った結果を図5.2.4及び表5.2.3に示す（dpa率及びHe生成率については表5.2.2参照）。

その結果、1回の照射孔の移動（照射量1.488dpaでBe領域1層から軽水リング付燃料領域2層に移動）により7.7dpaの照射量までの核融合炉条件による照射ができるようになる。また、これ以上の照射を行う場合には、さらに ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量を抑制させるため、図5.2.4に示すように軽水リングを取除いた燃料領域2層照射孔にて照射することによって可能である。

今回の調整方法では1.24 dpa以上でHe/dpa比を制御できるが、さらに低いdpaからの制御が可能であると考えられる。最初にBe領域2層で照射試験を開始すれば0.13dpaから核融合炉条件を模擬するHe/dpa比が得られるが、その後の制御が困難となるためにより繊細な調整方法と詳細な解析を行うことが必要である。

6. まとめ

JMTRにおける中性子スペクトル調整照射に関する検討の結果、ステンレス鋼(SUS316)を核融合炉条件(He/dpa=15)で照射するための方法として照射孔移動と軽水リングの併用によって、1.24dpa以上でHe/dpa=13~15の範囲での調整照射が可能であることを確認した。これは、初期ではBe領域1層照射孔にて照射し、中期には軽水リングを施した上で燃料領域2層照射孔に移動して照射し、最後に燃料領域2層照射孔で照射する手順となる。今回の検討では、JMTRにおける核融合炉条件による照射試験の期間は3年と仮定しており（1年で5サイクル運転、1サイクルは25日間、のべ375日照射）、約5.8dpaの蓄積が可能である。今後の課題として、 ^{58}Ni の熱中性子2段反応計算プログラムNIHEで考慮する反応追加等の改良を行うとともに、損傷機構上重要な領域となる0.1dpa程度の少ない照射量から核融合炉条件を模擬した照射を行うための方法を検討する。また、高速炉条件を模擬した中性子スペクトル調整照射試験の検討を予定している。

謝辞

本報告書をまとめるにあたって、小山田六郎材料試験炉部長、新保利定次長、山本克宗原子炉第1課長、安藤弘栄照射第1課長に御指導いただいた。TENJIN2の使用に関しては燃料・材料工学部照射解析研究室の有賀武夫氏に、核データライブラリの使用に関しては核データセンターの中川康雄氏に有益な御助言をいただいた。また、中性子スペクトル計算及び計算機の使用に関しては、それぞれ計画課の小向文作氏と白石忠男氏に御協力いただいた。以上、記して謝意を表します。

ミュレーションを行った結果を図5.2.4及び表5.2.3に示す（dpa率及びHe生成率については表5.2.2参照）。

その結果、1回の照射孔の移動（照射量1.488dpaでBe領域1層から軽水リング付燃料領域2層に移動）により7.7dpaの照射量までの核融合炉条件による照射ができるようになる。また、これ以上の照射を行う場合には、さらに ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量を抑制させるため、図5.2.4に示すように軽水リングを取除いた燃料領域2層照射孔にて照射することによって可能である。

今回の調整方法では1.24 dpa以上でHe/dpa比を制御できるが、さらに低いdpaからの制御が可能であると考えられる。最初にBe領域2層で照射試験を開始すれば0.13dpaから核融合炉条件を模擬するHe/dpa比が得られるが、その後の制御が困難となるためにより繊細な調整方法と詳細な解析を行うことが必要である。

6. まとめ

JMTRにおける中性子スペクトル調整照射に関する検討の結果、ステンレス鋼(SUS316)を核融合炉条件(He/dpa=15)で照射するための方法として照射孔移動と軽水リングの併用によって、1.24dpa以上でHe/dpa=13~15の範囲での調整照射が可能であることを確認した。これは、初期ではBe領域1層照射孔にて照射し、中期には軽水リングを施した上で燃料領域2層照射孔に移動して照射し、最後に燃料領域2層照射孔で照射する手順となる。今回の検討では、JMTRにおける核融合炉条件による照射試験の期間は3年と仮定しており（1年で5サイクル運転、1サイクルは25日間、のべ375日照射）、約5.8dpaの蓄積が可能である。今後の課題として、 ^{58}Ni の熱中性子2段反応計算プログラムNIHEで考慮する反応追加等の改良を行うとともに、損傷機構上重要な領域となる0.1dpa程度の少ない照射量から核融合炉条件を模擬した照射を行うための方法を検討する。また、高速炉条件を模擬した中性子スペクトル調整照射試験の検討を予定している。

謝辞

本報告書をまとめるにあたって、小山田六郎材料試験炉部長、新保利定次長、山本克宗原子炉第1課長、安藤弘栄照射第1課長に御指導いただいた。TENJIN2の使用に関しては燃料・材料工学部照射解析研究室の有賀武夫氏に、核データライブラリの使用に関しては核データセンターの中川康雄氏に有益な御助言をいただいた。また、中性子スペクトル計算及び計算機の使用に関しては、それぞれ計画課の小向文作氏と白石忠男氏に御協力いただいた。以上、記して謝意を表します。

ミュレーションを行った結果を図5.2.4及び表5.2.3に示す（dpa率及びHe生成率については表5.2.2参照）。

その結果、1回の照射孔の移動（照射量1.488dpaでBe領域1層から軽水リング付燃料領域2層に移動）により7.7dpaの照射量までの核融合炉条件による照射ができるようになる。また、これ以上の照射を行う場合には、さらに ^{58}Ni 2段反応によるHe生成量を抑制させるため、図5.2.4に示すように軽水リングを取除いた燃料領域2層照射孔にて照射することによって可能である。

今回の調整方法では1.24 dpa以上でHe/dpa比を制御できるが、さらに低いdpaからの制御が可能であると考えられる。最初にBe領域2層で照射試験を開始すれば0.13dpaから核融合炉条件を模擬するHe/dpa比が得られるが、その後の制御が困難となるためにより繊細な調整方法と詳細な解析を行うことが必要である。

6. まとめ

JMTRにおける中性子スペクトル調整照射に関する検討の結果、ステンレス鋼(SUS316)を核融合炉条件(He/dpa=15)で照射するための方法として照射孔移動と軽水リングの併用によって、1.24dpa以上でHe/dpa=13~15の範囲での調整照射が可能であることを確認した。これは、初期ではBe領域1層照射孔にて照射し、中期には軽水リングを施した上で燃料領域2層照射孔に移動して照射し、最後に燃料領域2層照射孔で照射する手順となる。今回の検討では、JMTRにおける核融合炉条件による照射試験の期間は3年と仮定しており（1年で5サイクル運転、1サイクルは25日間、のべ375日照射）、約5.8dpaの蓄積が可能である。今後の課題として、 ^{58}Ni の熱中性子2段反応計算プログラムNIHEで考慮する反応追加等の改良を行うとともに、損傷機構上重要な領域となる0.1dpa程度の少ない照射量から核融合炉条件を模擬した照射を行うための方法を検討する。また、高速炉条件を模擬した中性子スペクトル調整照射試験の検討を予定している。

謝辞

本報告書をまとめるにあたって、小山田六郎材料試験炉部長、新保利定次長、山本克宗原子炉第1課長、安藤弘栄照射第1課長に御指導いただいた。TENJIN2の使用に関しては燃料・材料工学部照射解析研究室の有賀武夫氏に、核データライブラリの使用に関しては核データセンターの中川康雄氏に有益な御助言をいただいた。また、中性子スペクトル計算及び計算機の使用に関しては、それぞれ計画課の小向文作氏と白石忠男氏に御協力いただいた。以上、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) L.R.Greenwood : " A NEW CALCULATION OF THERMAL NEUTRON DAMAGE AND HELIUM PRODUCTION IN NICKEL " ,Journal of Nuclear Materials 115 p.137-142 ,(1983)
- 2) T.A.Gabriel, R.A.Lillie, K.Thoms, R.L.Childs : " SPECTRAL TAILORING FOR FUSION RADIATION STUDIES " ,Journal of Nuclear Materials 103&104 p1445-1450 ,(1981)
- 3) K.KOYAMA, et al. : " ANISN-JR, A ONE DIMENSIONAL DISCREAT ORDINATES CODE FOR NEUTRON AND GAMMA-RAY TRANSPORT CALCULATIONS " , JAERI-M6954,(1977)
- 4) K.Shibata, et al. : " Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 " , JAERI 1319 (1990)
- 5) Y.Naito, et al. : " MGCL-PROCESSOR : A Computer Code System for Procassing Multi-group Constants Library MGCL " , JAERI-M9396, (1981)
- 6) 小室雄一、他 : " 断面積セット作成プログラムMAIL3.0使用手引書 " , JAERI-M90-126, (1990)
- 7) 曾根和穂、白石健介 : " 原子炉材料の中性子照射損傷計算プログラム (計算コード: TENJIN1) " , JAERI-6103 ,(1975)
- 8) Y.TAJI, et al. : " SUPERTOG-JR, A CODE GENERATING TRANSPORT GROUP CONSTANTS, ENERGY DEPOSITION COEFFICIENTS AND ATOMIC DISPLACEMENTS CONSTANTS WITH ENDF/B " , JAERI-M6935,(1977)
- 8) 有賀武夫 : 私信
- 9) NUCLEAR DATA. Section A, (1967)
- 10) K.Shibata, et al. : " Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 " , JAERI 1319,(1990)

表 3.1.1 MGCL 群構造

Group	Upper Energy [eV]	Group	Upper Energy [eV]	Group	Upper Energy [eV]
1	1.65E+07	51	3.18E+04	101	6.83E-01
2	1.46E+07	52	2.81E+04	102	6.02E-01
3	1.28E+07	53	2.48E+04	103	5.32E-01
4	1.13E+07	54	2.19E+04	104	4.69E-01
5	1.00E+07	55	1.93E+04	105	4.13E-01
6	8.83E+06	56	1.70E+04	106	3.89E-01
7	7.79E+06	57	1.50E+04	107	3.65E-01
8	6.87E+06	58	1.17E+04	108	3.42E-01
9	6.07E+06	59	9.12E+03	109	3.20E-01
10	5.35E+06	60	7.10E+03	110	2.98E-01
11	4.72E+06	61	5.53E+03	111	2.77E-01
12	4.17E+06	62	4.31E+03	112	2.57E-01
13	3.68E+06	63	3.35E+03	113	2.37E-01
14	3.25E+06	64	2.61E+03	114	2.19E-01
15	2.87E+06	65	2.03E+03	115	2.01E-01
16	2.53E+06	66	1.58E+03	116	1.84E-01
17	2.23E+06	67	1.23E+03	117	1.67E-01
18	1.97E+06	68	9.61E+02	118	1.52E-01
19	1.74E+06	69	7.49E+02	119	1.37E-01
20	1.53E+06	70	5.83E+02	120	1.23E-01
21	1.35E+06	71	4.54E+02	121	1.10E-01
22	1.19E+06	72	3.54E+02	122	9.71E-02
23	1.05E+06	73	2.75E+02	123	8.53E-02
24	9.30E+05	74	2.14E+02	124	7.43E-02
25	8.21E+05	75	1.67E+02	125	6.40E-02
26	7.24E+05	76	1.30E+02	126	5.45E-02
27	6.39E+05	77	1.01E+02	127	4.58E-02
28	5.64E+05	78	7.89E+01	128	3.78E-02
29	4.98E+05	79	6.14E+01	129	3.06E-02
30	4.39E+05	80	4.79E+01	130	2.42E-02
31	3.88E+05	81	3.73E+01	131	1.85E-02
32	3.42E+05	82	2.90E+01	132	1.35E-02
33	3.02E+05	83	2.26E+01	133	9.88E-03
34	2.66E+05	84	1.76E+01	134	5.98E-03
35	2.35E+05	85	1.37E+01	135	3.34E-03
36	2.08E+05	86	1.07E+01	136	1.47E-03
37	1.83E+05	87	8.32E+00	137	3.52E-04
38	1.62E+05	88	6.48E+00	138	3.31E-05
39	1.43E+05	89	5.04E+00		
40	1.26E+05	90	3.93E+00		
41	1.11E+05	91	3.06E+00		
42	9.80E+04	92	2.38E+00		
43	8.65E+04	93	1.86E+00		
44	7.64E+04	94	1.64E+00		
45	6.74E+04	95	1.45E+00		
46	5.95E+04	96	1.28E+00		
47	5.25E+04	97	1.13E+00		
48	4.63E+04	98	9.93E-01		
49	4.09E+04	99	8.76E-01		
50	3.61E+04	100	7.73E-01		

表 3.1.2 原子個数密度 (JMTR 全炉心計算用)

核種	燃料領域	Be領域	Al領域	軽水
H	4.0069E-02	5.9750E-03	4.3110E-03	6.5946E-02
Be		1.1180E-01		
C				
O	2.0034E-02	2.9880E-03	2.1550E-03	3.2973E-02
Al	2.0579E-02		5.6370E-02	
Si	8.0098E-04			
Cd	1.2119E-06			
U-235	2.3505E-04			
U-238	9.4305E-04			

[$\times 10E-24/cm^2$]

表 3.1.3 原子個数密度 (照射キャプセル計算用)

核種	SUS316	SUS304	軽水	Al
H			6.5946E-02	
Be				
C				
O			3.2973E-02	
Al				6.0229E-02
Cr	1.5356E-02	1.7603E-03		
Fe	5.7620E-02	5.8901E-02		
Ni	9.6023E-03	7.7997E-03		
Mo	1.2241E-03			

[$\times 10E-24/cm^2$]

表 3.2.1 SUS316 物質の組成 (He/dpa 計算用)

核種	SUS316
Ni	9.8230E-03
Fe	5.6230E-02
Cr	1.5660E-02
Mn	1.7470E-03
Mo	1.2540E-03

[$\times 10E-24/cm^2$]

表 3.2.2 実効的なはじき出ししきいエネルギー

核種	エネルギー(eV)
Ni	40.0
Fe	40.0
Cr	40.0
Mn	40.0
Mo	60.0

表 4.1.1 JMTR 各照射領域の中性子束

照射領域	熱中性子束($\phi < 0.683\text{eV}$)	熱外中性子束($\phi > 0.683\text{eV}$)	中性子束 (熱+熱外)	熱中性子束 / 中性子束
燃料領域1層	6.829E+12	3.687E+13	4.370E+13	1.563E-01
燃料領域2層	7.750E+12	3.777E+13	4.552E+13	1.703E-01
Be領域1層	4.943E+13	6.177E+13	1.112E+14	4.445E-01
Be領域2層	1.888E+14	9.835E+13	2.871E+14	6.576E-01
Al領域1層	1.925E+14	9.526E+13	2.877E+14	6.691E-01

*1MeV以上の中性子束で規格化 ($\phi > 1\text{MeV} = 1.0\text{E}+13$)

表 4.2.1 燃料領域 1 層

計算核種	重量密度(g/cm ²)	原子個数密度(/cm ³)	weight fraction(WF)	dpa/s	dpa*WF(dpa/s)	He(appm/y)	He*WF (appm/s)
Ni	0.95	9.823E-03	0.116	1.346E-08	1.56075E-09	1.5390	5.659E-09
Fe	5.17	5.623E-02	0.664	1.554E-08	1.03149E-08	0.1204	2.534E-09
Cr	1.34	1.566E-02	0.185	1.557E-08	2.87823E-09	0.0459	2.689E-10
Mn	0.16	1.747E-03	0.021	1.511E-08	3.11603E-10	0.0409	2.676E-11
Mo	0.20	1.254E-03	0.015	8.383E-09	1.24091E-10	0.1429	6.708E-11
SUS316	7.82	8.471E-02	1.000		1.51895E-08		8.556E-09

*1MeV以上の中性子束が1.0E+13となるように規格化

表 4.2.2 燃料領域 2 層

計算核種	重量密度(g/cm ²)	原子個数密度(/cm ³)	weight fraction(WF)	dpa/s	dpa*WF(dpa/s)	He(appm/y)	He*WF (appm/s)
Ni	0.95	9.823E-03	0.116	1.349E-08	1.56423E-09	1.5140	5.567E-09
Fe	5.17	5.623E-02	0.664	1.559E-08	1.03481E-08	0.1206	2.538E-09
Cr	1.34	1.566E-02	0.185	1.567E-08	2.89671E-09	0.0461	2.701E-10
Mn	0.16	1.747E-03	0.021	1.515E-08	3.12428E-10	0.0413	2.697E-11
Mo	0.20	1.254E-03	0.015	8.387E-09	1.24151E-10	0.1406	6.600E-11
SUS316	7.82	8.471E-02	1.000		1.52456E-08		8.468E-09

*1MeV以上の中性子束が1.0E+13となるように規格化

表 4.2.3 Be 領域 1 層

計算核種	重量密度(g/cm ²)	原子個数密度(/cm ³)	weight fraction(WF)	dpa/s	dpa*WF(dpa/s)	He(appm/y)	He*WF (appm/s)
Ni	0.95	9.823E-03	0.116	1.518E-08	1.76019E-09	1.3300	4.890E-09
Fe	5.17	5.623E-02	0.664	1.799E-08	1.19411E-08	0.1081	2.275E-09
Cr	1.34	1.566E-02	0.185	1.885E-08	3.48456E-09	0.0415	2.431E-10
Mn	0.16	1.747E-03	0.021	1.705E-08	3.51611E-10	0.0372	2.435E-11
Mo	0.20	1.254E-03	0.015	8.869E-09	1.31286E-10	0.1313	6.163E-11
SUS316	7.82	8.471E-02	1.000		1.76687E-08		7.495E-09

*1MeV以上の中性子束が1.0E+13となるように規格化

表 4.2.4 Be 領域 2 層

計算核種	重量密度(g/cm ²)	原子個数密度(/cm ³)	weight fraction(WF)	dpa/s	dpa*WF(dpa/s)	He(appm/y)	He*WF (appm/s)
Ni	0.95	9.823E-03	0.116	1.813E-08	2.10226E-09	1.2730	4.681E-09
Fe	5.17	5.623E-02	0.664	2.099E-08	1.39324E-08	0.1114	2.345E-09
Cr	1.34	1.566E-02	0.185	2.294E-08	4.24063E-09	0.0434	2.543E-10
Mn	0.16	1.747E-03	0.021	2.071E-08	4.27088E-10	0.0394	2.575E-11
Mo	0.20	1.254E-03	0.015	9.728E-09	1.44001E-10	0.1267	5.947E-11
SUS316	7.82	8.471E-02	1.000		2.08464E-08		7.365E-09

*1MeV以上の中性子束が1.0E+13となるように規格化

表 4.2.5 Al 領域 1 層

計算核種	重量密度(g/cm ²)	原子個数密度(/cm ³)	weight fraction(WF)	dpa/s	dpa*WF(dpa/s)	He(appm/y)	He*WF (appm/s)
Ni	0.95	9.823E-03	0.116	1.837E-08	2.13009E-09	1.1560	4.251E-09
Fe	5.17	5.623E-02	0.664	2.106E-08	1.39788E-08	0.1023	2.153E-09
Cr	1.34	1.566E-02	0.185	2.330E-08	4.30717E-09	0.0402	2.355E-10
Mn	0.16	1.747E-03	0.021	2.083E-08	4.29563E-10	0.0365	2.388E-11
Mo	0.20	1.254E-03	0.015	9.605E-09	1.4218E-10	0.1210	5.680E-11
SUS316	7.82	8.471E-02	1.000		2.09879E-08		6.720E-09

*1MeV以上の中性子束が1.0E+13となるように規格化

表 4.2.6 各照射領域におけるはじき出し損傷率及びHe生成率

照射領域	規格化定数	dpa/s	He appm/s
燃料領域1層	1.70E+14	2.582E-07	1.454E-07
燃料領域2層	1.40E+14	2.134E-07	1.186E-07
Be領域1層	6.50E+13	1.148E-07	4.872E-08
Be領域2層	1.50E+13	3.127E-08	1.105E-08
Al領域1層	5.00E+12	1.049E-08	3.360E-09

*規格化定数は1MeV以上の中性子束の値

表 4.3.1 燃料領域 1 層

時間 (day)	中性子束		$\phi =$		He appm=		He生成量(Ni2段反応)	He生成量(TENJIN)	He生成量(合計)	dpa(TENJIN)	Ni2段反応/He生成量	He/dpa	neutron fluence
	TENJIN cal.	dpa/sec=	dpa/sec=	He appm=	He生成量(TENJIN)	He生成量(合計)							
0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
25	8.635E-02	3.141E-01	7.429E+14	4.004E-01	4.004E-01	5.577E-01	2.157E-01	7.180E-01	1.605E+21				
50	3.480E-01	6.281E-01	2.582E-07	9.761E-01	9.761E-01	1.115E+00	3.565E-01	8.751E-01	3.209E+21				
75	7.821E-01	9.422E-01	1.454E-07	1.724E+00	1.724E+00	1.673E+00	4.536E-01	1.031E+00	4.814E+21				
100	1.380E+00	1.256E+00	2.636E+00	2.636E+00	2.636E+00	2.231E+00	5.235E-01	1.182E+00	6.419E+21				
125	2.142E+00	1.570E+00	3.712E+00	3.712E+00	3.712E+00	2.789E+00	5.770E-01	1.331E+00	8.023E+21				
150	3.065E+00	1.884E+00	4.949E+00	4.949E+00	4.949E+00	3.346E+00	6.193E-01	1.479E+00	9.628E+21				
175	4.141E+00	2.198E+00	6.339E+00	6.339E+00	6.339E+00	3.904E+00	6.532E-01	1.624E+00	1.123E+22				
200	5.365E+00	2.513E+00	7.878E+00	7.878E+00	7.878E+00	4.462E+00	6.811E-01	1.766E+00	1.284E+22				
225	6.745E+00	2.827E+00	9.572E+00	9.572E+00	9.572E+00	5.019E+00	7.047E-01	1.907E+00	1.444E+22				
250	8.262E+00	3.141E+00	1.140E+01	1.140E+01	1.140E+01	5.577E+00	7.246E-01	2.045E+00	1.605E+22				
275	9.927E+00	3.455E+00	1.338E+01	1.338E+01	1.338E+01	6.135E+00	7.418E-01	2.181E+00	1.765E+22				
300	1.173E+01	3.769E+00	1.550E+01	1.550E+01	1.550E+01	6.693E+00	7.568E-01	2.316E+00	1.926E+22				
325	1.366E+01	4.083E+00	1.774E+01	1.774E+01	1.774E+01	7.250E+00	7.699E-01	2.447E+00	2.086E+22				
350	1.573E+01	4.397E+00	2.013E+01	2.013E+01	2.013E+01	7.808E+00	7.815E-01	2.578E+00	2.247E+22				
375	1.793E+01	4.711E+00	2.264E+01	2.264E+01	2.264E+01	8.366E+00	7.919E-01	2.706E+00	2.407E+22				
400	2.025E+01	5.025E+00	2.528E+01	2.528E+01	2.528E+01	8.923E+00	8.012E-01	2.832E+00	2.567E+22				
425	2.269E+01	5.339E+00	2.803E+01	2.803E+01	2.803E+01	9.481E+00	8.095E-01	2.956E+00	2.728E+22				
450	2.526E+01	5.653E+00	3.091E+01	3.091E+01	3.091E+01	1.004E+01	8.171E-01	3.079E+00	2.888E+22				
475	2.794E+01	5.967E+00	3.391E+01	3.391E+01	3.391E+01	1.060E+01	8.240E-01	3.200E+00	3.049E+22				
500	3.074E+01	6.281E+00	3.702E+01	3.702E+01	3.702E+01	1.115E+01	8.303E-01	3.319E+00	3.209E+22				

表 4.3.2 燃料領域 2 層

時間 (day)	中性子束 TENJIN cal.		He 生成量 (TENJIN)		He 生成量 (合計)		dpa (TENJIN)		Ni2 段反応 / He 生成量		He/dpa	neutron fluence
	He 生成量 (Ni2 段反応)	He 生成量 (TENJIN)	He 生成量 (TENJIN)	He 生成量 (合計)	dpa (TENJIN)	Ni2 段反応 / He 生成量	He/dpa	neutron fluence				
0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
25	8.225E-02	2.562E-01	3.384E-01	3.384E-01	4.609E-01	2.430E-01	7.342E-01	1.376E+21	1.376E+21	1.376E+21	1.376E+21	1.376E+21
50	3.097E-01	5.124E-01	8.221E-01	8.221E-01	9.219E-01	3.767E-01	8.917E-01	2.753E+21	2.753E+21	2.753E+21	2.753E+21	2.753E+21
75	6.864E-01	7.685E-01	1.455E+00	1.455E+00	1.383E+00	4.718E-01	1.052E+00	4.129E+21	4.129E+21	4.129E+21	4.129E+21	4.129E+21
100	1.210E+00	1.025E+00	2.235E+00	2.235E+00	1.844E+00	5.415E-01	1.212E+00	5.505E+21	5.505E+21	5.505E+21	5.505E+21	5.505E+21
125	1.872E+00	1.281E+00	3.153E+00	3.153E+00	2.305E+00	5.937E-01	1.368E+00	6.882E+21	6.882E+21	6.882E+21	6.882E+21	6.882E+21
150	2.674E+00	1.537E+00	4.211E+00	4.211E+00	2.766E+00	6.350E-01	1.523E+00	8.258E+21	8.258E+21	8.258E+21	8.258E+21	8.258E+21
175	3.614E+00	1.793E+00	5.407E+00	5.407E+00	3.227E+00	6.684E-01	1.676E+00	9.634E+21	9.634E+21	9.634E+21	9.634E+21	9.634E+21
200	4.688E+00	2.049E+00	6.737E+00	6.737E+00	3.688E+00	6.958E-01	1.827E+00	1.101E+22	1.101E+22	1.101E+22	1.101E+22	1.101E+22
225	5.890E+00	2.306E+00	8.196E+00	8.196E+00	4.148E+00	7.187E-01	1.976E+00	1.239E+22	1.239E+22	1.239E+22	1.239E+22	1.239E+22
250	7.220E+00	2.562E+00	9.782E+00	9.782E+00	4.609E+00	7.381E-01	2.122E+00	1.376E+22	1.376E+22	1.376E+22	1.376E+22	1.376E+22
275	8.676E+00	2.818E+00	1.149E+01	1.149E+01	5.070E+00	7.548E-01	2.267E+00	1.514E+22	1.514E+22	1.514E+22	1.514E+22	1.514E+22
300	1.025E+01	3.074E+00	1.332E+01	1.332E+01	5.531E+00	7.693E-01	2.409E+00	1.652E+22	1.652E+22	1.652E+22	1.652E+22	1.652E+22
325	1.195E+01	3.330E+00	1.528E+01	1.528E+01	5.992E+00	7.821E-01	2.550E+00	1.789E+22	1.789E+22	1.789E+22	1.789E+22	1.789E+22
350	1.376E+01	3.586E+00	1.735E+01	1.735E+01	6.453E+00	7.932E-01	2.688E+00	1.927E+22	1.927E+22	1.927E+22	1.927E+22	1.927E+22
375	1.569E+01	3.843E+00	1.953E+01	1.953E+01	6.914E+00	8.033E-01	2.825E+00	2.065E+22	2.065E+22	2.065E+22	2.065E+22	2.065E+22
400	1.774E+01	4.099E+00	2.184E+01	2.184E+01	7.375E+00	8.123E-01	2.961E+00	2.202E+22	2.202E+22	2.202E+22	2.202E+22	2.202E+22
425	1.989E+01	4.355E+00	2.424E+01	2.424E+01	7.836E+00	8.204E-01	3.094E+00	2.340E+22	2.340E+22	2.340E+22	2.340E+22	2.340E+22
450	2.215E+01	4.611E+00	2.676E+01	2.676E+01	8.297E+00	8.277E-01	3.225E+00	2.477E+22	2.477E+22	2.477E+22	2.477E+22	2.477E+22
475	2.451E+01	4.867E+00	2.938E+01	2.938E+01	8.758E+00	8.343E-01	3.354E+00	2.615E+22	2.615E+22	2.615E+22	2.615E+22	2.615E+22
500	2.698E+01	5.124E+00	3.210E+01	3.210E+01	9.219E+00	8.404E-01	3.482E+00	2.753E+22	2.753E+22	2.753E+22	2.753E+22	2.753E+22

表 4.3.3 Be 領域 1 層

時間 (day)	中性子束 TENJIN cal.		He appm=		He生成量(合計)	dpa(TENJIN)	Ni2段反応/He生成量	He/dpa	neutron fluence
	He生成量(Ni2段反応)	He生成量(TENJIN)	φ =	dpa/sec=					
0	0.000E+00	0.000E+00	7.227E+14	1.148E-07	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
25	6.732E-01	1.052E-01	1.148E-07	4.872E-08	7.784E-01	2.480E-01	8.648E-01	3.139E+00	1.561E+21
50	2.650E+00	2.105E-01			2.860E+00	4.959E-01	9.264E-01	5.768E+00	3.122E+21
75	5.850E+00	3.157E-01			6.166E+00	7.439E-01	9.488E-01	8.288E+00	4.683E+21
100	1.020E+01	4.209E-01			1.062E+01	9.919E-01	9.604E-01	1.071E+01	6.244E+21
125	1.564E+01	5.262E-01			1.617E+01	1.240E+00	9.675E-01	1.304E+01	7.805E+21
150	2.211E+01	6.314E-01			2.274E+01	1.488E+00	9.722E-01	1.529E+01	9.366E+21
175	2.954E+01	7.366E-01			3.028E+01	1.736E+00	9.757E-01	1.744E+01	1.093E+22
200	3.788E+01	8.419E-01			3.872E+01	1.984E+00	9.783E-01	1.952E+01	1.249E+22
225	4.707E+01	9.471E-01			4.802E+01	2.232E+00	9.803E-01	2.152E+01	1.405E+22
250	5.708E+01	1.052E+00			5.813E+01	2.480E+00	9.819E-01	2.344E+01	1.561E+22
275	6.784E+01	1.158E+00			6.900E+01	2.728E+00	9.832E-01	2.530E+01	1.717E+22
300	7.931E+01	1.263E+00			8.057E+01	2.976E+00	9.843E-01	2.708E+01	1.873E+22
325	9.146E+01	1.368E+00			9.283E+01	3.224E+00	9.853E-01	2.880E+01	2.029E+22
350	1.042E+02	1.473E+00			1.057E+02	3.472E+00	9.861E-01	3.044E+01	2.185E+22
375	1.176E+02	1.579E+00			1.192E+02	3.720E+00	9.868E-01	3.204E+01	2.342E+22
400	1.315E+02	1.684E+00			1.332E+02	3.967E+00	9.874E-01	3.357E+01	2.498E+22
425	1.460E+02	1.789E+00			1.478E+02	4.215E+00	9.879E-01	3.506E+01	2.654E+22
450	1.609E+02	1.894E+00			1.628E+02	4.463E+00	9.884E-01	3.647E+01	2.810E+22
475	1.763E+02	1.999E+00			1.783E+02	4.711E+00	9.888E-01	3.784E+01	2.966E+22
500	1.922E+02	2.105E+00			1.943E+02	4.959E+00	9.892E-01	3.918E+01	3.122E+22

表 4.3.4 Be 領域 2 層

時間 (day)	中性子束 TENJIN cal.		$\phi =$ dpa/sec =		He appm =		He生成量(合計)	dpa(TENJIN)	Ni2段反応/He生成量	He/dpa	neutron fluence
	He生成量(Ni2段反応)	He生成量(TENJIN)	He生成量(TENJIN)	He生成量(TENJIN)							
0	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
25	5.257E-01	2.387E-02	2.387E-02	5.496E-01	5.496E-01	6.754E-02	6.754E-02	9.566E-01	8.137E+00	9.303E+20	
50	2.060E+00	4.774E-02	4.774E-02	2.108E+00	2.108E+00	1.351E-01	1.351E-01	9.774E-01	1.560E+01	1.861E+21	
75	4.554E+00	7.160E-02	7.160E-02	4.626E+00	4.626E+00	2.026E-01	2.026E-01	9.845E-01	2.283E+01	2.791E+21	
100	7.966E+00	9.547E-02	9.547E-02	8.061E+00	8.061E+00	2.702E-01	2.702E-01	9.882E-01	2.984E+01	3.721E+21	
125	1.225E+01	1.193E-01	1.193E-01	1.237E+01	1.237E+01	3.377E-01	3.377E-01	9.904E-01	3.663E+01	4.652E+21	
150	1.735E+01	1.432E-01	1.432E-01	1.749E+01	1.749E+01	4.053E-01	4.053E-01	9.918E-01	4.317E+01	5.582E+21	
175	2.324E+01	1.671E-01	1.671E-01	2.341E+01	2.341E+01	4.728E-01	4.728E-01	9.929E-01	4.951E+01	6.512E+21	
200	2.986E+01	1.909E-01	1.909E-01	3.005E+01	3.005E+01	5.403E-01	5.403E-01	9.936E-01	5.561E+01	7.442E+21	
225	3.720E+01	2.148E-01	2.148E-01	3.741E+01	3.741E+01	6.079E-01	6.079E-01	9.943E-01	6.155E+01	8.373E+21	
250	4.521E+01	2.387E-01	2.387E-01	4.545E+01	4.545E+01	6.754E-01	6.754E-01	9.947E-01	6.729E+01	9.303E+21	
275	5.386E+01	2.625E-01	2.625E-01	5.412E+01	5.412E+01	7.430E-01	7.430E-01	9.951E-01	7.285E+01	1.023E+22	
300	6.311E+01	2.864E-01	2.864E-01	6.340E+01	6.340E+01	8.105E-01	8.105E-01	9.955E-01	7.822E+01	1.116E+22	
325	7.293E+01	3.103E-01	3.103E-01	7.324E+01	7.324E+01	8.781E-01	8.781E-01	9.958E-01	8.341E+01	1.209E+22	
350	8.330E+01	3.342E-01	3.342E-01	8.363E+01	8.363E+01	9.456E-01	9.456E-01	9.960E-01	8.845E+01	1.302E+22	
375	9.419E+01	3.580E-01	3.580E-01	9.455E+01	9.455E+01	1.013E+00	1.013E+00	9.962E-01	9.332E+01	1.395E+22	
400	1.056E+02	3.819E-01	3.819E-01	1.060E+02	1.060E+02	1.081E+00	1.081E+00	9.964E-01	9.807E+01	1.488E+22	
425	1.174E+02	4.058E-01	4.058E-01	1.178E+02	1.178E+02	1.148E+00	1.148E+00	9.966E-01	1.026E+02	1.582E+22	
450	1.297E+02	4.296E-01	4.296E-01	1.301E+02	1.301E+02	1.216E+00	1.216E+00	9.967E-01	1.070E+02	1.675E+22	
475	1.424E+02	4.535E-01	4.535E-01	1.429E+02	1.429E+02	1.283E+00	1.283E+00	9.968E-01	1.113E+02	1.768E+22	
500	1.555E+02	4.774E-01	4.774E-01	1.560E+02	1.560E+02	1.351E+00	1.351E+00	9.969E-01	1.155E+02	1.861E+22	

表 4.3.5 Al 領域 1 層

時間 (day)	中性子束 TENJIN cal.		$\phi =$		He appm =		dpa(TENJIN)	Ni2 段反応/He 生成量	He/dpa	neutron fluence
	He 生成量(Ni2 段反応)	He 生成量(TENJIN)	dpa/sec =	He appm =	He 生成量(合計)	He 生成量(TENJIN)				
0	0.000E+00	0.000E+00	1.439E+14	3.360E-09	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
25	6.030E-02	7.258E-03	1.049E-08		6.756E-02	2.266E-02	8.926E-01	2.982E+00	3.108E+20	
50	2.421E-01	1.452E-02			2.566E-01	4.532E-02	9.434E-01	5.663E+00	6.216E+20	
75	5.377E-01	2.177E-02			5.595E-01	6.798E-02	9.611E-01	8.231E+00	9.325E+20	
100	9.498E-01	2.903E-02			9.788E-01	9.063E-02	9.703E-01	1.080E+01	1.243E+21	
125	1.476E+00	3.629E-02			1.512E+00	1.133E-01	9.760E-01	1.335E+01	1.554E+21	
150	2.111E+00	4.355E-02			2.155E+00	1.360E-01	9.798E-01	1.585E+01	1.865E+21	
175	2.860E+00	5.080E-02			2.911E+00	1.586E-01	9.825E-01	1.835E+01	2.176E+21	
200	3.714E+00	5.806E-02			3.772E+00	1.813E-01	9.846E-01	2.081E+01	2.487E+21	
225	4.670E+00	6.532E-02			4.735E+00	2.039E-01	9.862E-01	2.322E+01	2.797E+21	
250	5.736E+00	7.258E-02			5.809E+00	2.266E-01	9.875E-01	2.564E+01	3.108E+21	
275	6.900E+00	7.983E-02			6.980E+00	2.492E-01	9.886E-01	2.800E+01	3.419E+21	
300	8.171E+00	8.709E-02			8.258E+00	2.719E-01	9.895E-01	3.037E+01	3.730E+21	
325	9.532E+00	9.435E-02			9.626E+00	2.946E-01	9.902E-01	3.268E+01	4.041E+21	
350	1.100E+00	1.016E-01			1.202E+00	3.172E-01	9.154E-01	3.788E+00	4.352E+21	
375	1.256E+01	1.089E-01			1.267E+01	3.399E-01	9.914E-01	3.727E+01	4.662E+21	
400	1.421E+01	1.161E-01			1.433E+01	3.625E-01	9.919E-01	3.952E+01	4.973E+21	
425	1.595E+01	1.234E-01			1.607E+01	3.852E-01	9.923E-01	4.173E+01	5.284E+21	
450	1.779E+01	1.306E-01			1.792E+01	4.079E-01	9.927E-01	4.394E+01	5.595E+21	
475	1.971E+01	1.379E-01			1.985E+01	4.305E-01	9.931E-01	4.610E+01	5.906E+21	
500	2.172E+01	1.452E-01			2.187E+01	4.532E-01	9.934E-01	4.825E+01	6.216E+21	

表 5.1.1 核融合炉条件 (He/dpa = 15) による中性子スペクトル調整照射

dpa	He生成量 (appm)		He/dpa
	Be-1	Fuel-2	
0.000E+00	0.000E+00		0.000E+00
2.480E-01	7.784E-01		3.139E+00
4.959E-01	2.860E-01		5.767E-01
7.439E-01	6.166E+00		8.289E+00
9.919E-01	1.062E+01		1.071E+01
1.240E+00	1.617E+01		1.304E+01
1.488E+00	2.274E+01		1.528E+01
1.949E+00		2.565E+01	1.316E+01
2.197E+00	3.357E+01		1.528E+01
2.658E+00		3.686E+01	1.387E+01
2.906E+00	4.600E+01		1.583E+01
3.367E+00		4.969E+01	1.476E+01
3.828E+00		5.352E+01	1.398E+01
4.289E+00		5.749E+01	1.340E+01
4.537E+00	6.813E+01		1.502E+01
4.998E+00		7.234E+01	1.447E+01
5.459E+00		7.668E+01	1.405E+01
5.920E+00		8.116E+01	1.371E+01
6.381E+00		8.576E+01	1.344E+01
6.629E+00	9.790E+01		1.477E+01
7.090E+00		1.026E+02	1.447E+01
7.551E+00		1.075E+02	1.424E+01
8.012E+00		1.125E+02	1.404E+01
8.473E+00		1.176E+02	1.388E+01
8.934E+00		1.228E+02	1.375E+01
9.395E+00		1.282E+02	1.365E+01
9.856E+00		1.337E+02	1.357E+01
1.032E+01		1.393E+02	1.350E+01
1.078E+01		1.450E+02	1.345E+01
1.124E+01		1.508E+02	1.342E+01
1.170E+01		1.568E+02	1.340E+01
1.216E+01		1.628E+02	1.339E+01

表 5.2.1 軽水リング付燃料領域 2 層における中性子束

熱中性子束	熱外中性子束	中性子束 (熱+熱外)	熱中性子束/中性子束
1.384E+13	4.251E+13	5.636E+13	2.456E-01

*1MeV以上の中性子束で規格化 ($\phi > 1\text{MeV}=1.0\text{E}+13$)

熱中性子束 : 0.683eV以下の中性子束

熱外中性子束 : 0.683eV以上の中性子束

表 5.2.2 軽水リング付燃料領域 2 層

計算核種	重量密度(g/cm ²)	原子個数密度(/cm ³)	weight fraction(WF)	dpa/s	dpa*WF(dpa/s)	He(appm/y)	He*WF (appm/s)
Ni	0.95	9.823E-03	0.116	1.388E-08	1.60945E-09	1.5510	5.703E-09
Fe	5.17	5.623E-02	0.664	1.615E-08	1.07198E-08	0.1227	2.583E-09
Cr	1.34	1.566E-02	0.185	1.631E-08	3.01502E-09	0.0468	2.746E-10
Mn	0.16	1.747E-03	0.021	1.557E-08	3.2109E-10	0.0418	2.735E-11
Mo	0.20	1.254E-03	0.015	8.561E-09	1.26726E-10	0.1439	6.755E-11
SUS316	7.82	8.471E-02	1.000		1.57921E-08		8.655E-09

*1MeV以上の中性子束が1.0E+13となるように規格化

表5.2.3 核融合炉条件 (He/dpa = 15) による中性子スペクトル調整照射
(軽水リング付燃料領域2層スペクトル使用)

dpa	He生成量 (appm)			He/dpa
	Be-1	Fuel-2 (Water-7mm)	Fuel-2	
0.000E+00	0.000E+00			0.000E+00
2.480E-01	7.784E-01			3.139E+00
4.959E-01	2.860E-01			5.767E-01
7.439E-01	6.166E+00			8.289E+00
9.919E-01	1.062E+01			1.071E+01
1.240E+00	1.617E+01			1.304E+01
1.488E+00	2.274E+01			1.528E+01
1.966E+00		2.757E+01		1.402E+01
2.443E+00		3.284E+01		1.344E+01
2.921E+00		3.854E+01		1.319E+01
3.398E+00		4.466E+01		1.314E+01
3.876E+00		5.117E+01		1.320E+01
4.353E+00		5.807E+01		1.334E+01
4.831E+00		6.534E+01		1.353E+01
5.309E+00		7.296E+01		1.374E+01
5.786E+00		8.093E+01		1.399E+01
6.264E+00		8.922E+01		1.424E+01
6.741E+00		9.783E+01		1.451E+01
7.219E+00		1.067E+02		1.478E+01
7.696E+00		1.159E+02		1.506E+01
8.157E+00			1.207E+02	1.480E+01
8.618E+00			1.257E+02	1.459E+01

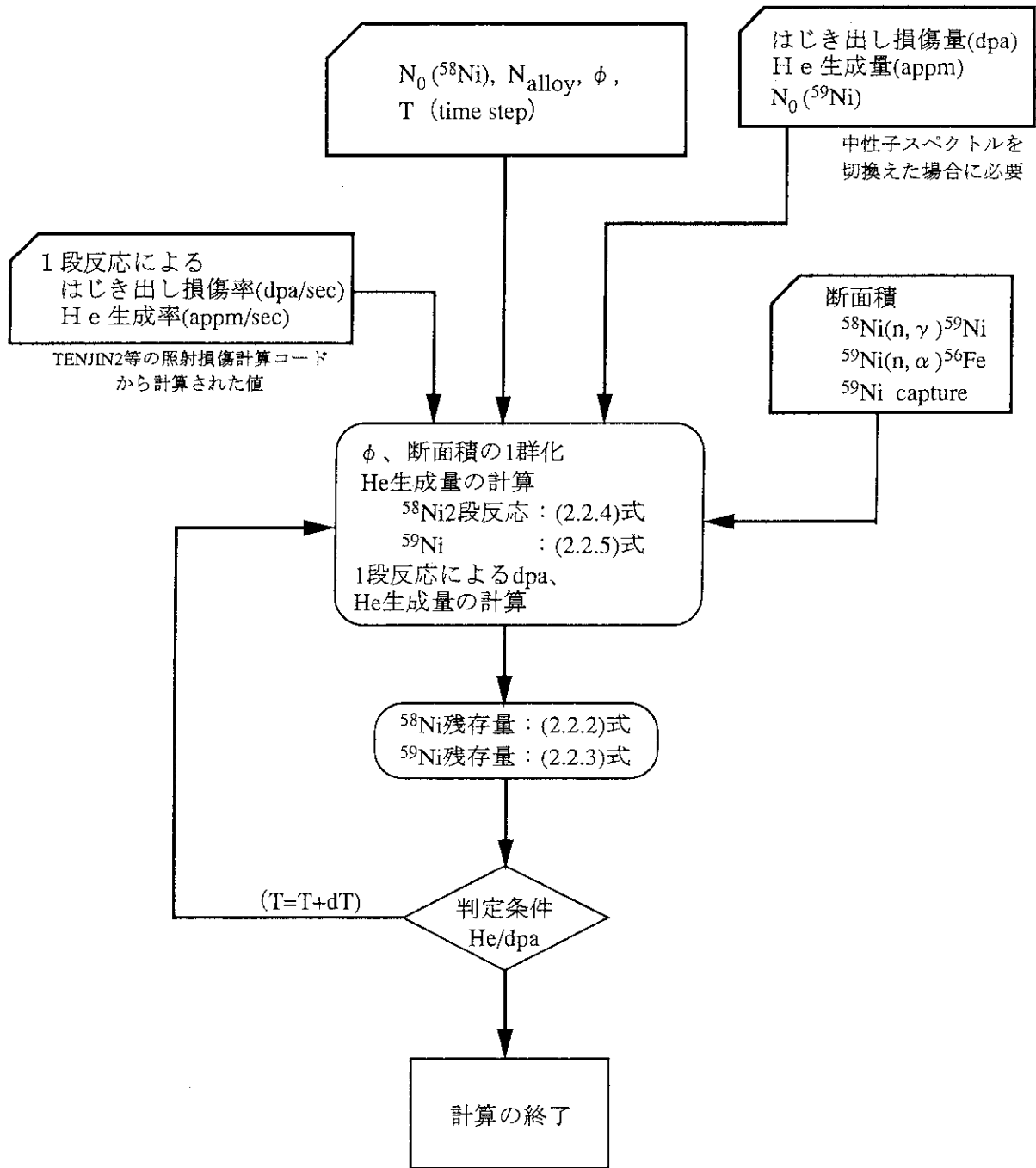


図 2.2.1 NIHE 計算の流れ

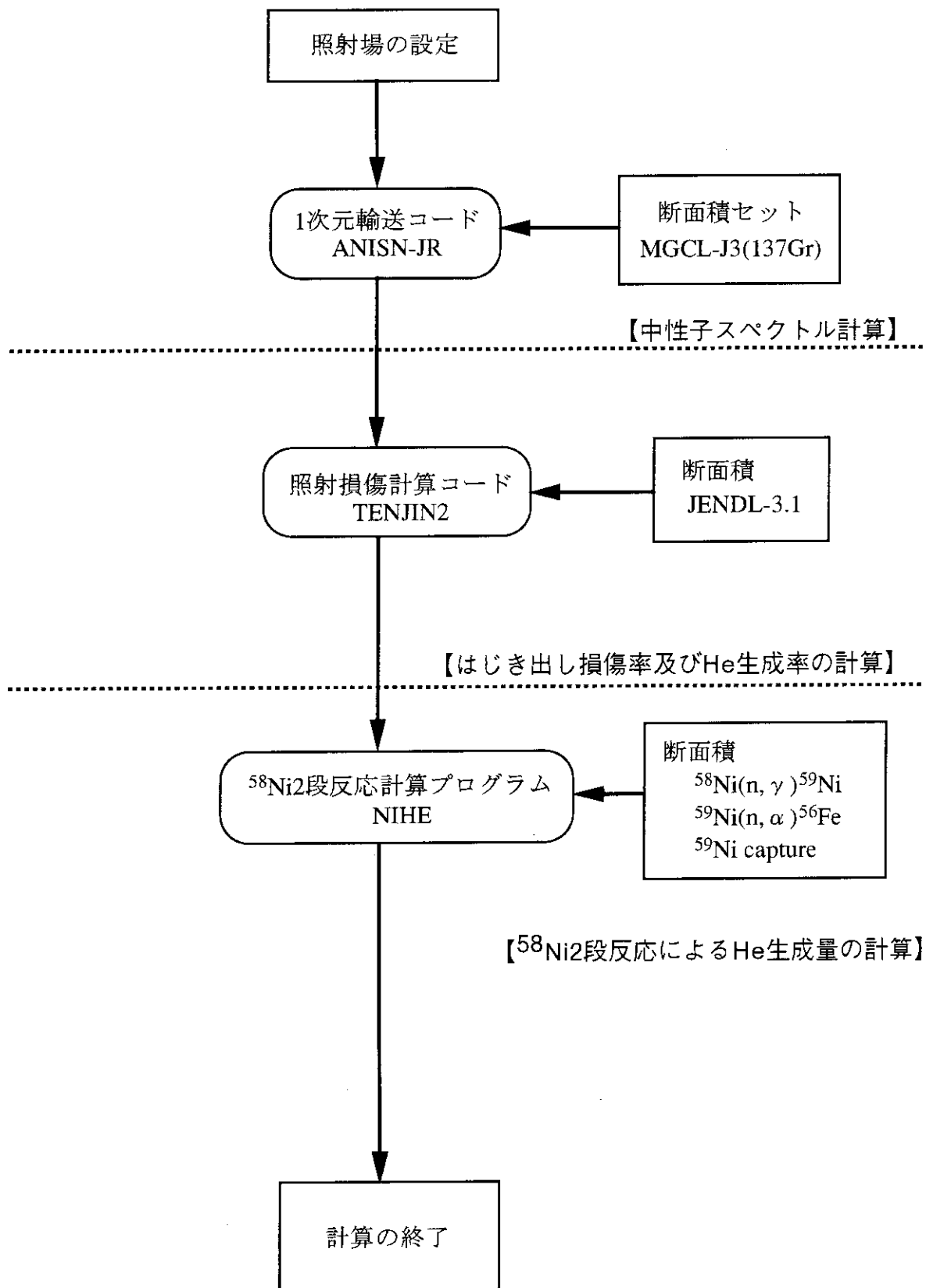


図3.1 He/dpa計算の流れ

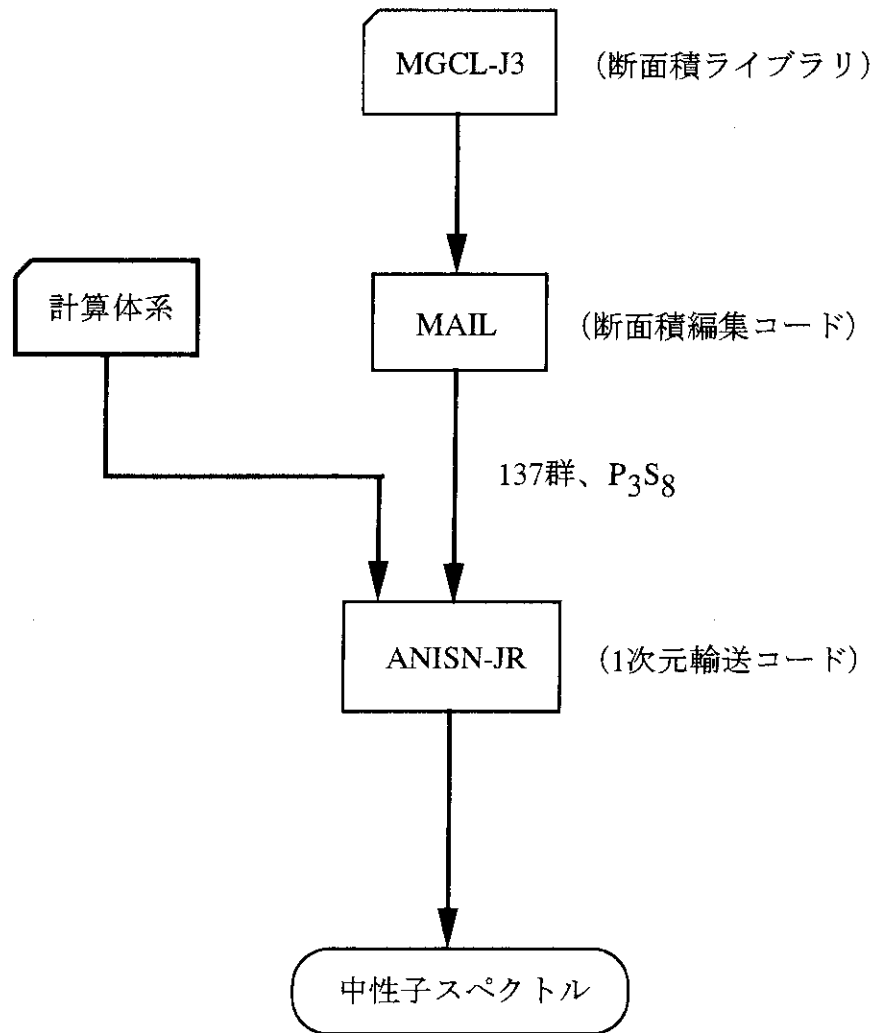


図3.1.1 中性子スペクトル計算

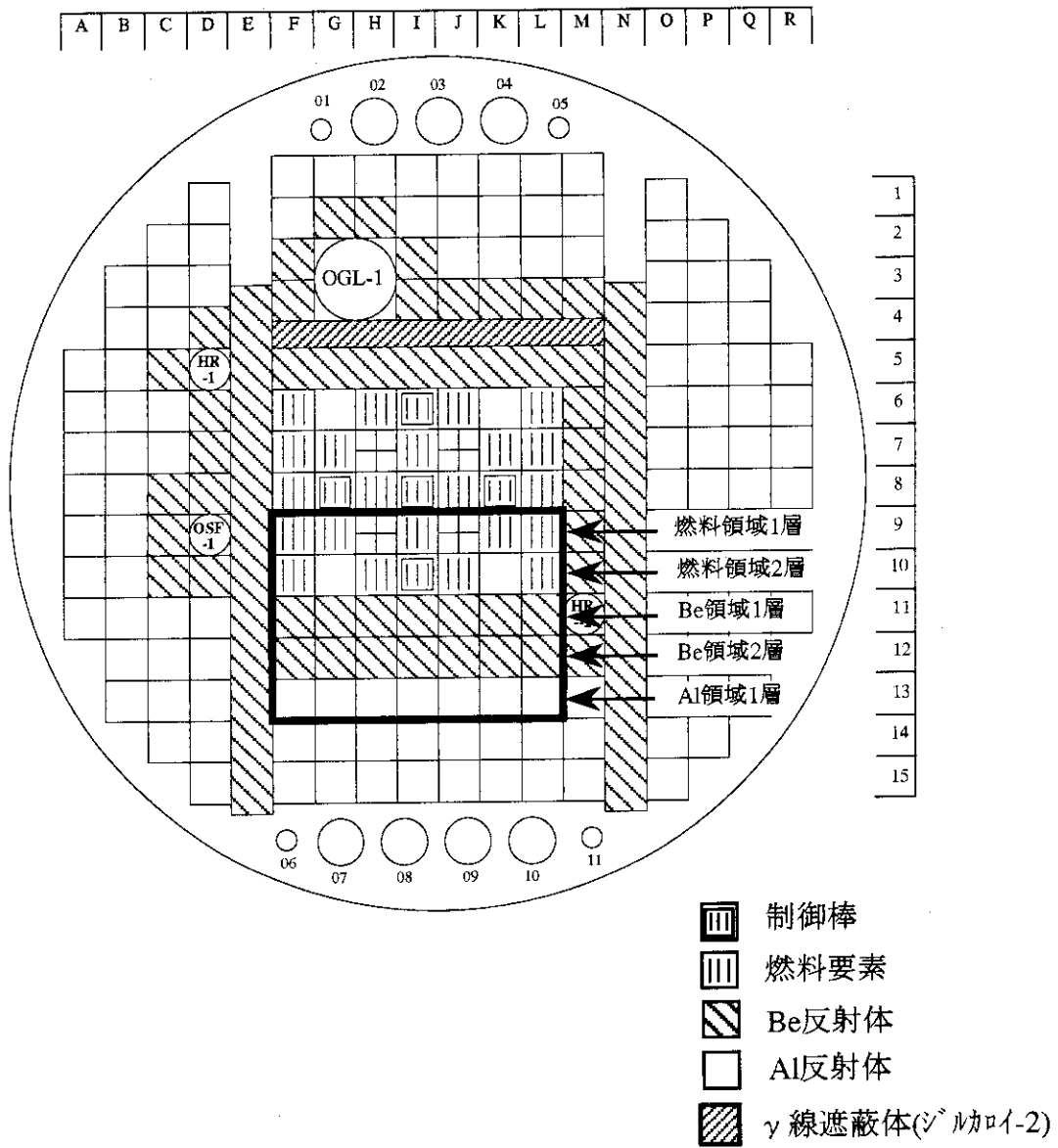


図3.1.2 JMTR照射領域

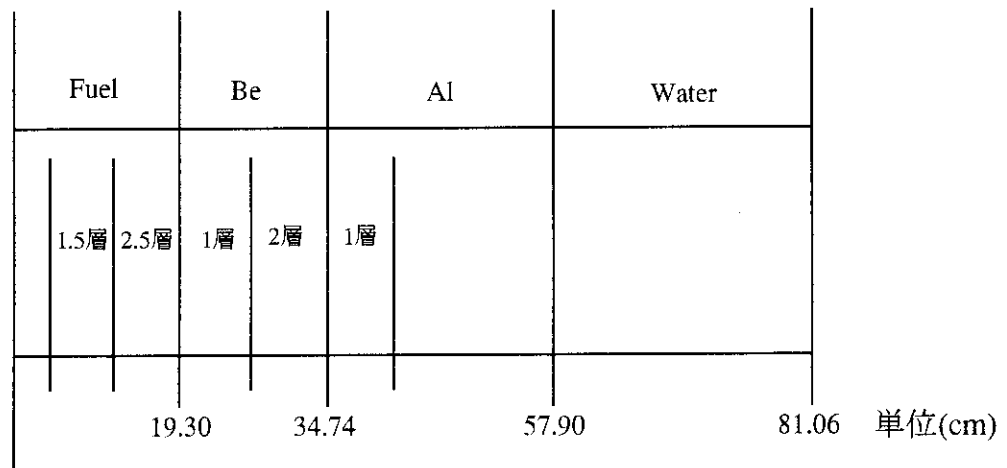


図3.1.3 JMTR全炉心計算体系

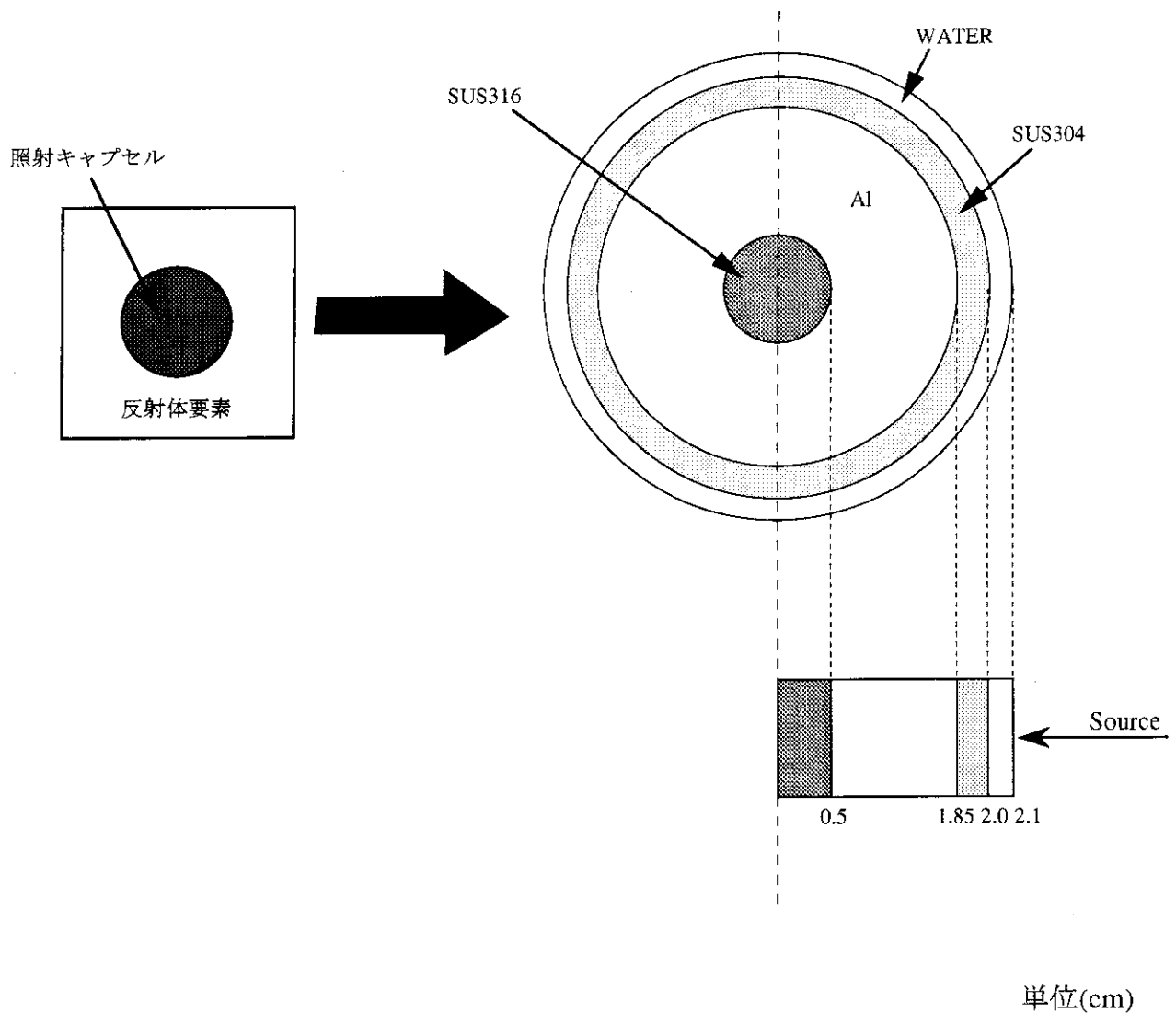


図3.1.4 照射キャプセル計算体系

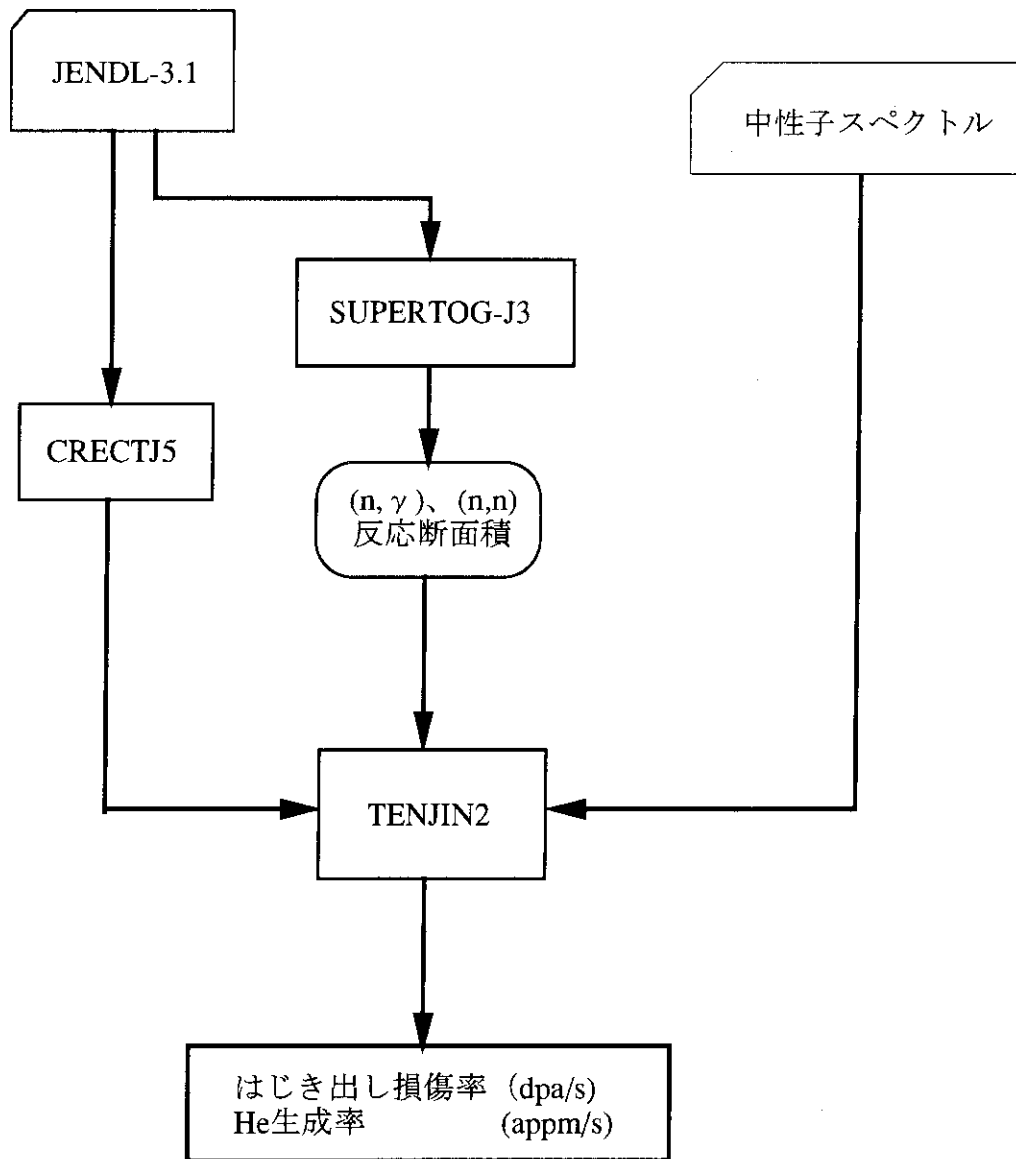


図3.2.1 はじき出し損傷率 (dpa/s), He生成率 (appm/s) の計算

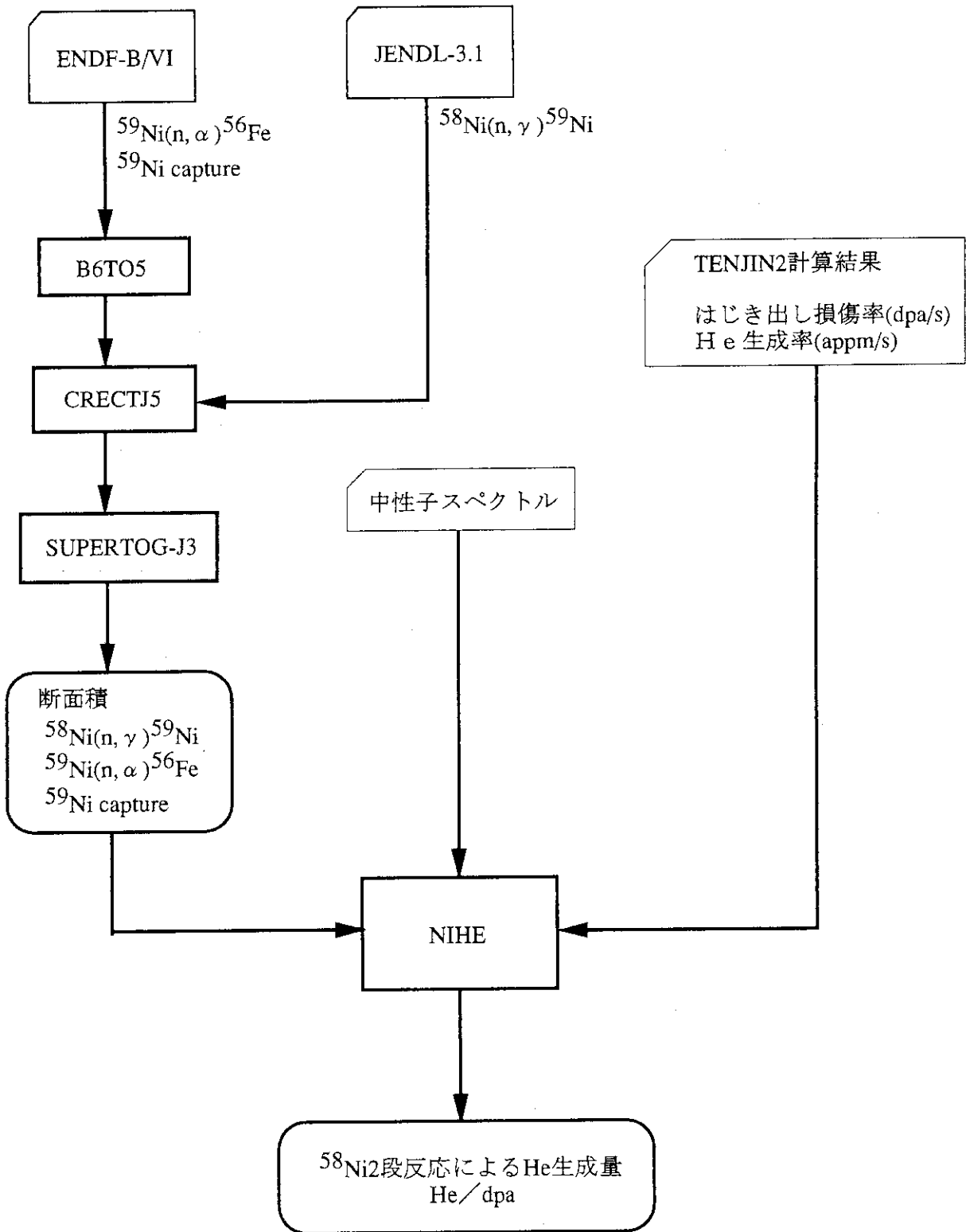


図 3.3.1 ^{58}Ni 2 段反応による He 生成量の計算

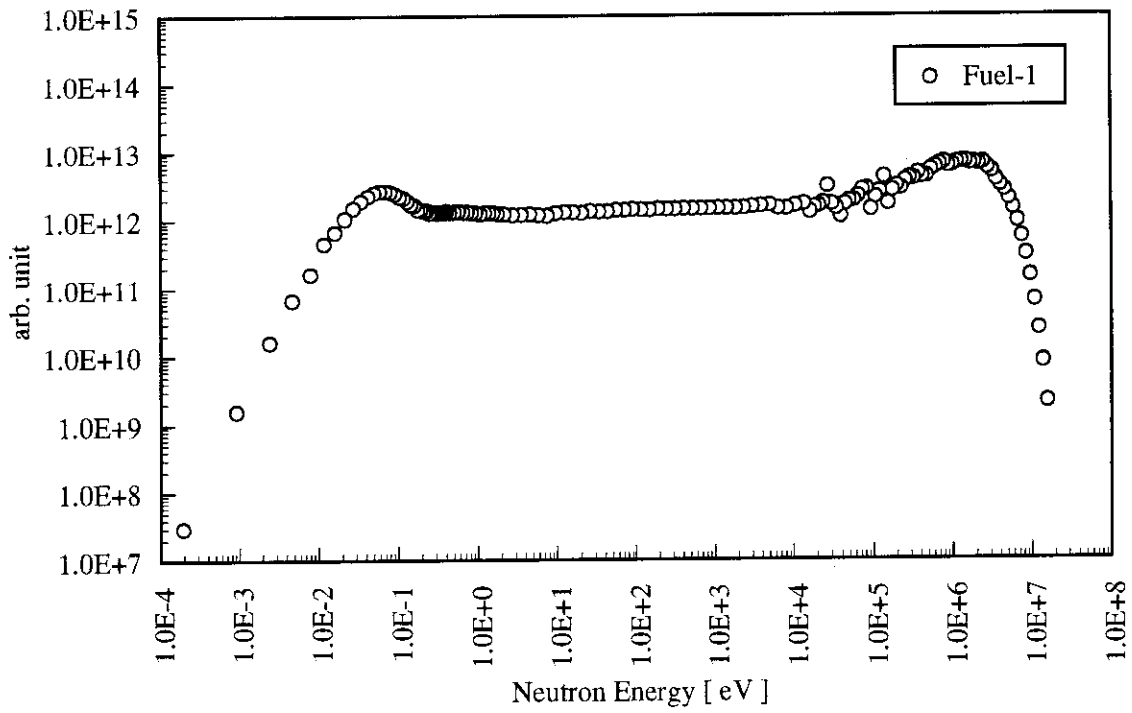


図 4.1.1 燃料領域 1 層スペクトル

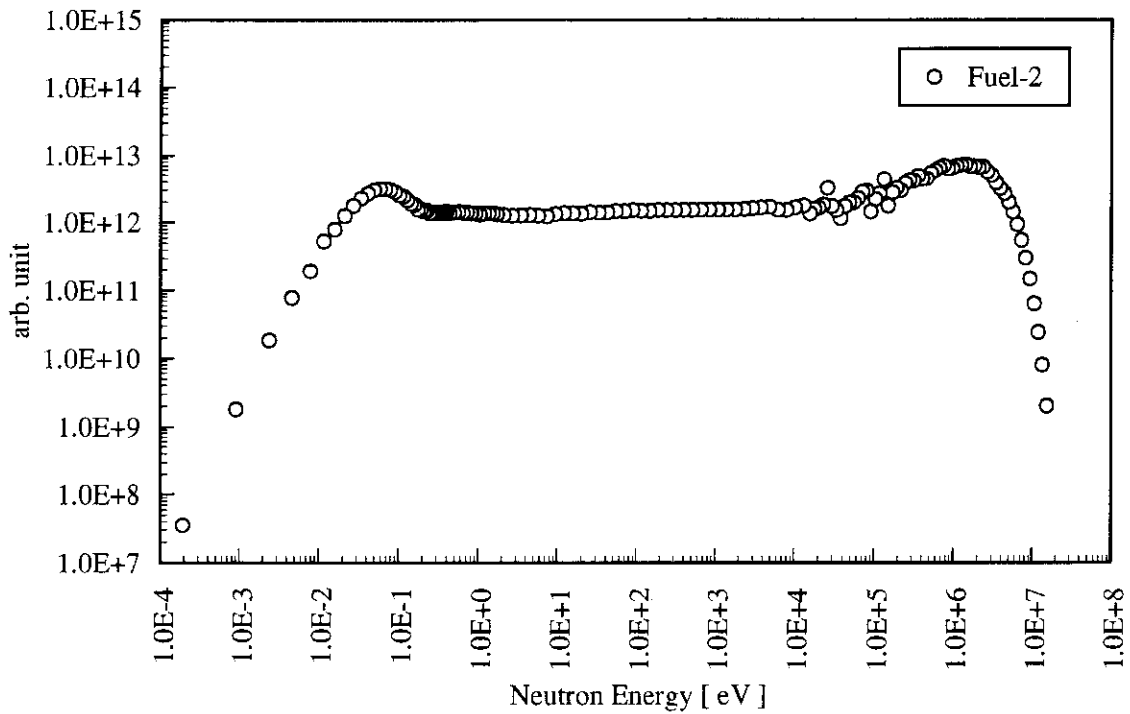


図 4.1.2 燃料領域 2 層スペクトル

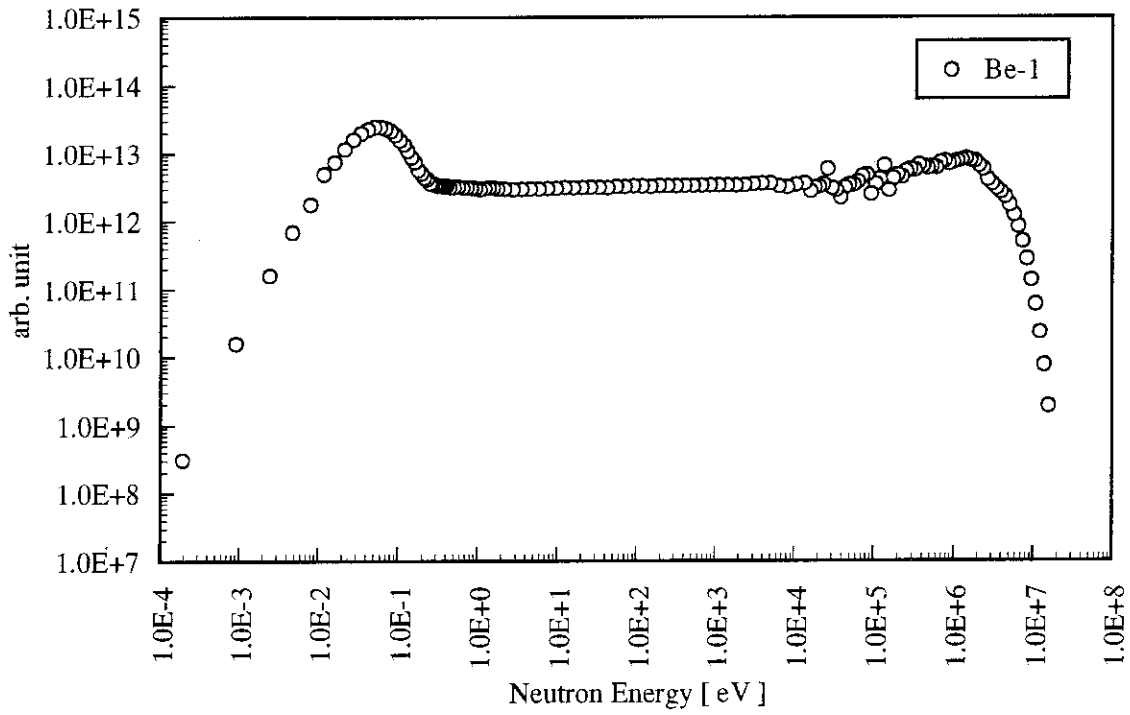


図4.1.3 Be領域1層スペクトル

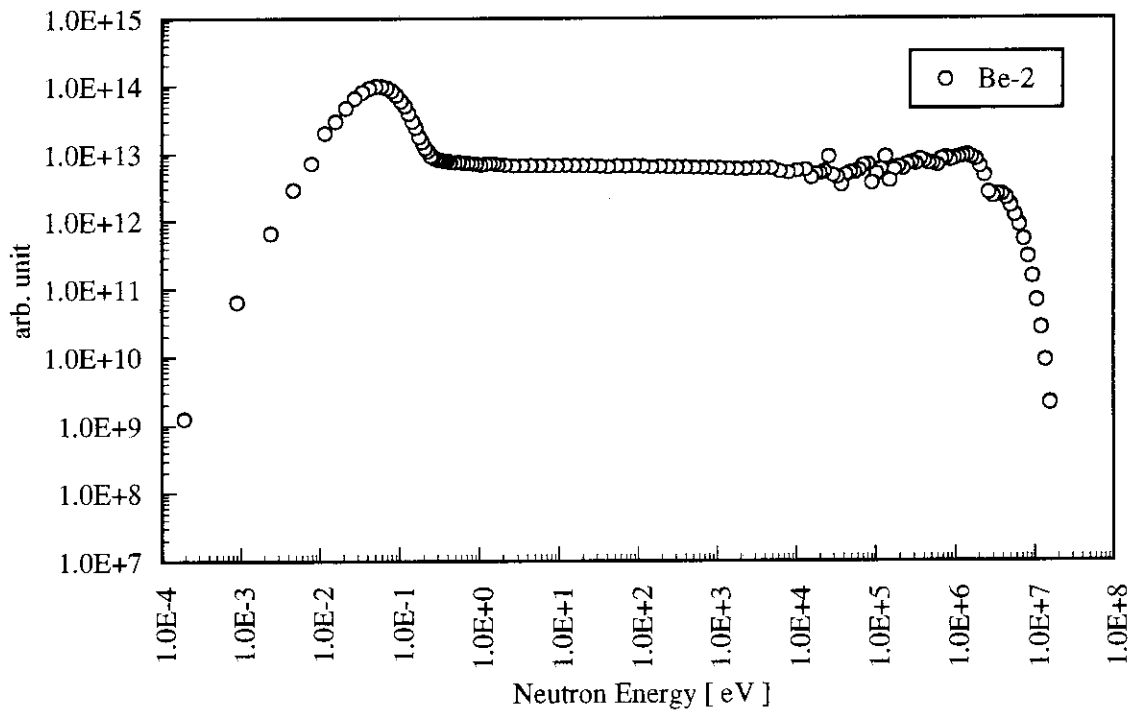


図4.1.4 Be領域1層スペクトル

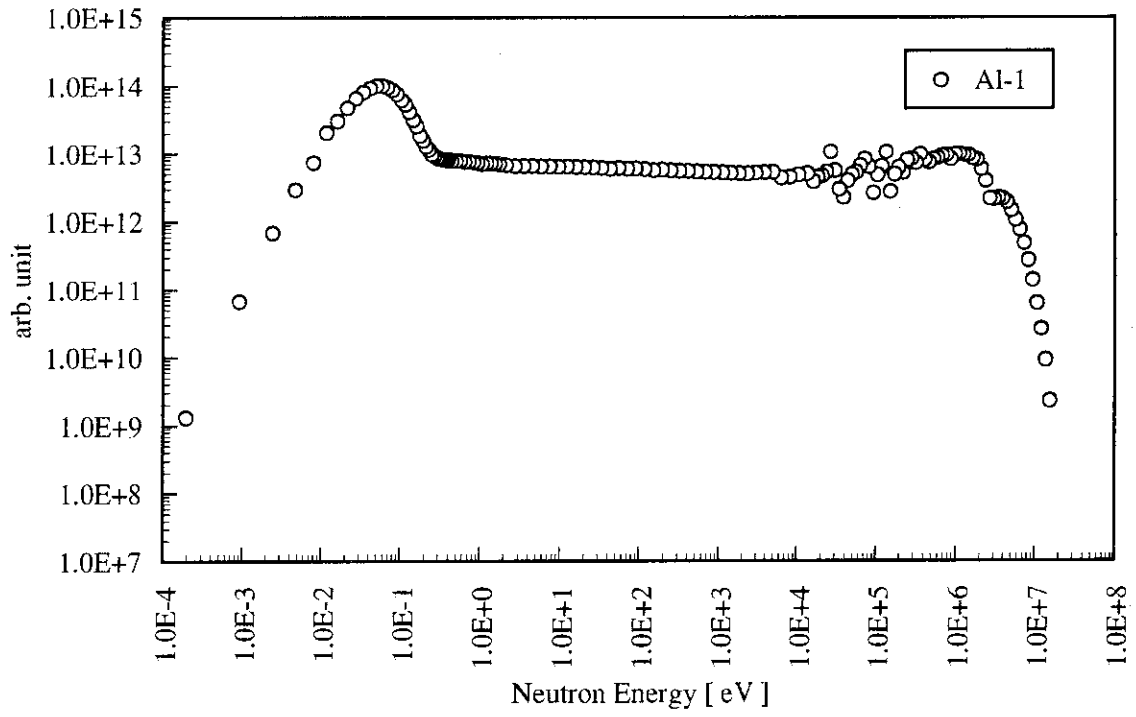


図 4.1.5 Al 領域 1 層スペクトル

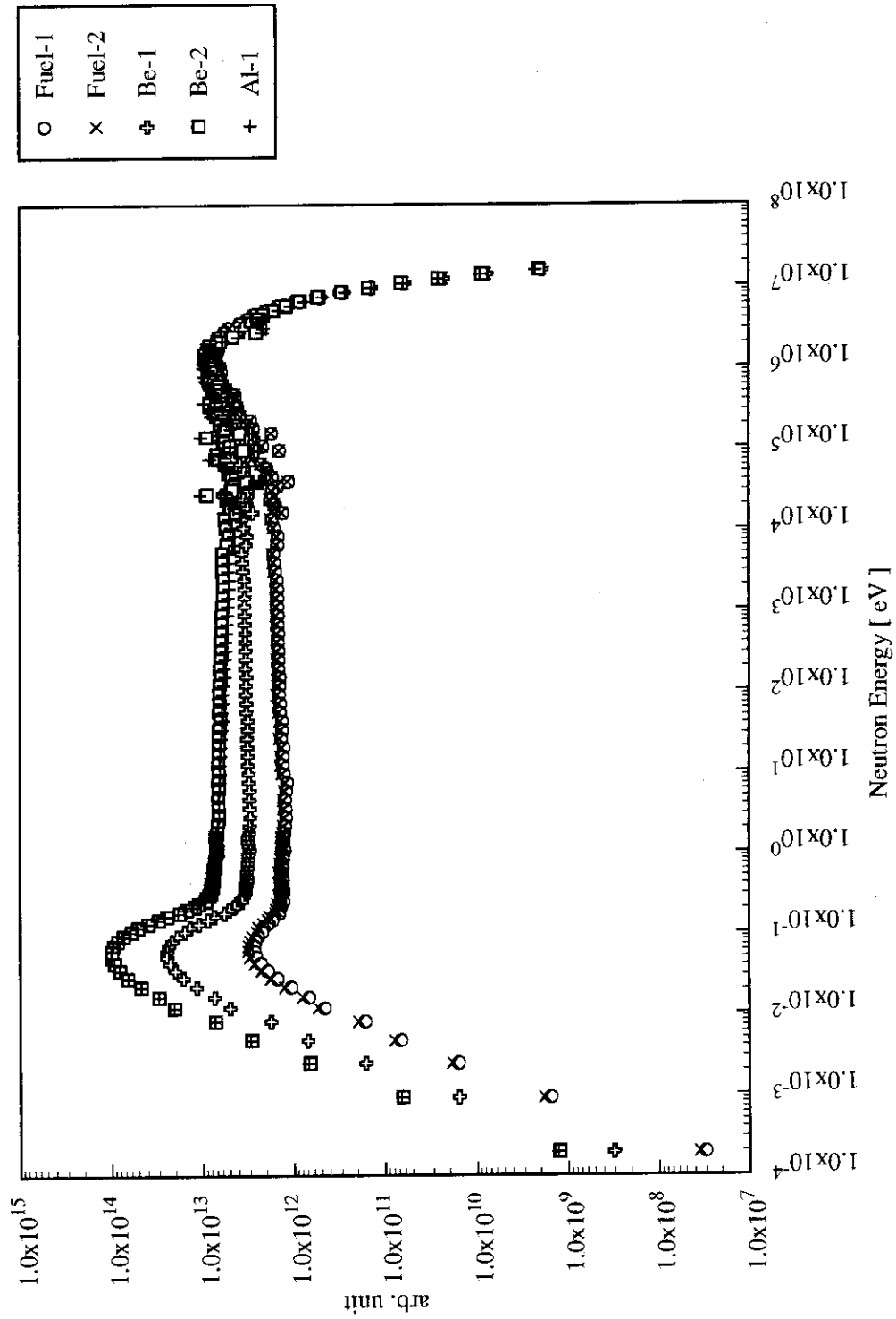


図 4.1.1.6 JMTR 各照射領域における中性子スペクトル

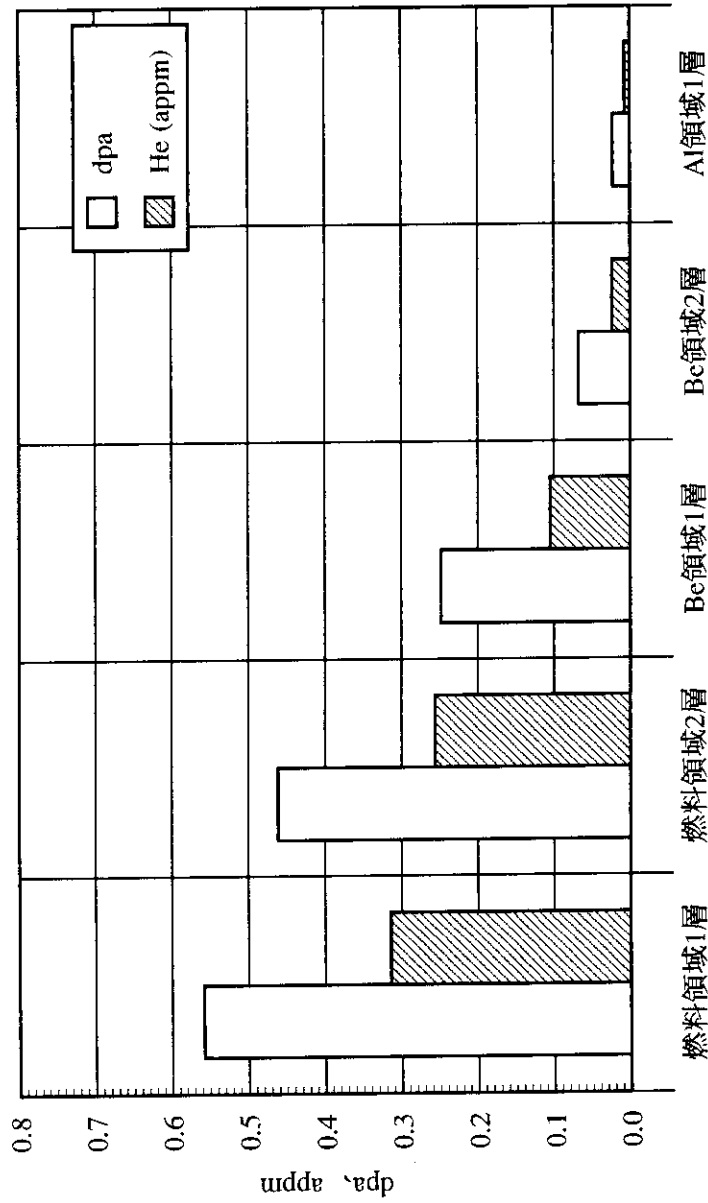


図 4.2.1 各照射領域におけるはじ出し損傷量(dpa)及びHe生成量(appm)
(JMTRにて25日間照射後)

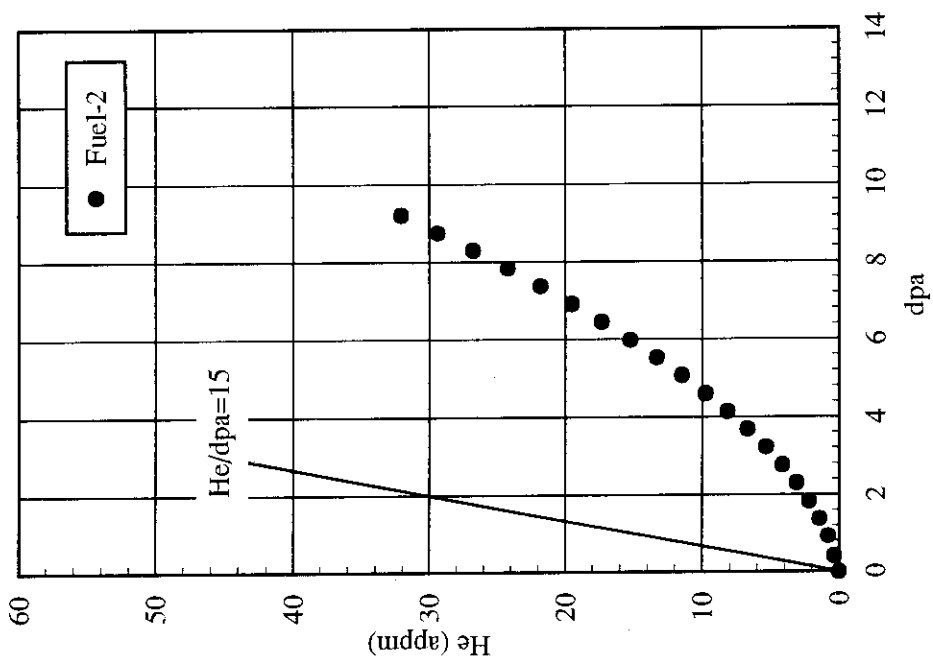


図 4.3.2 燃料領域 2 層

(プロット間隔は JMTR にて 25 日間照射に相当)

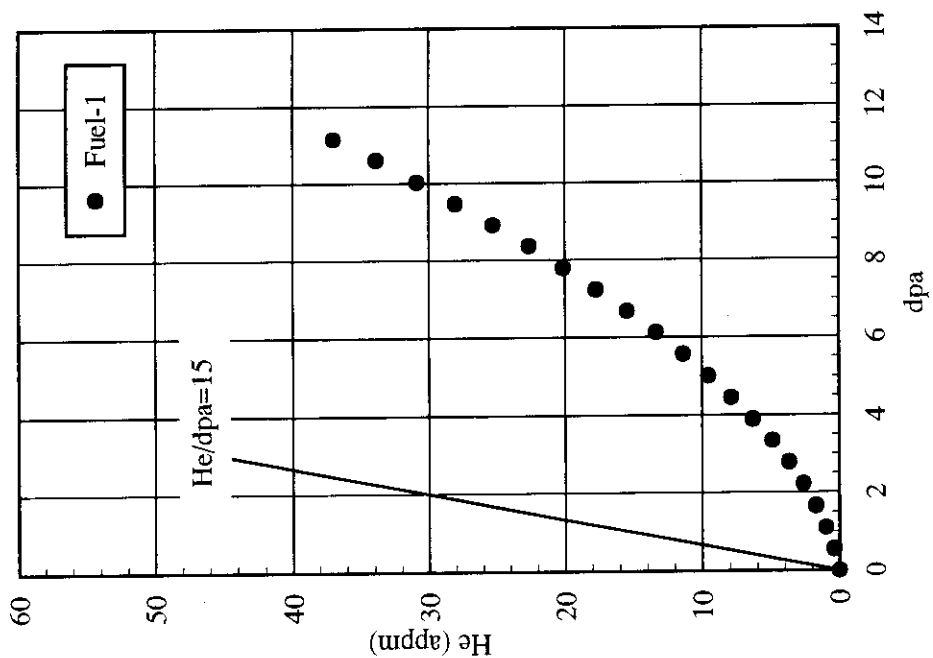


図 4.3.1 燃料領域 1 層

(プロット間隔は JMTR にて 25 日間照射に相当)

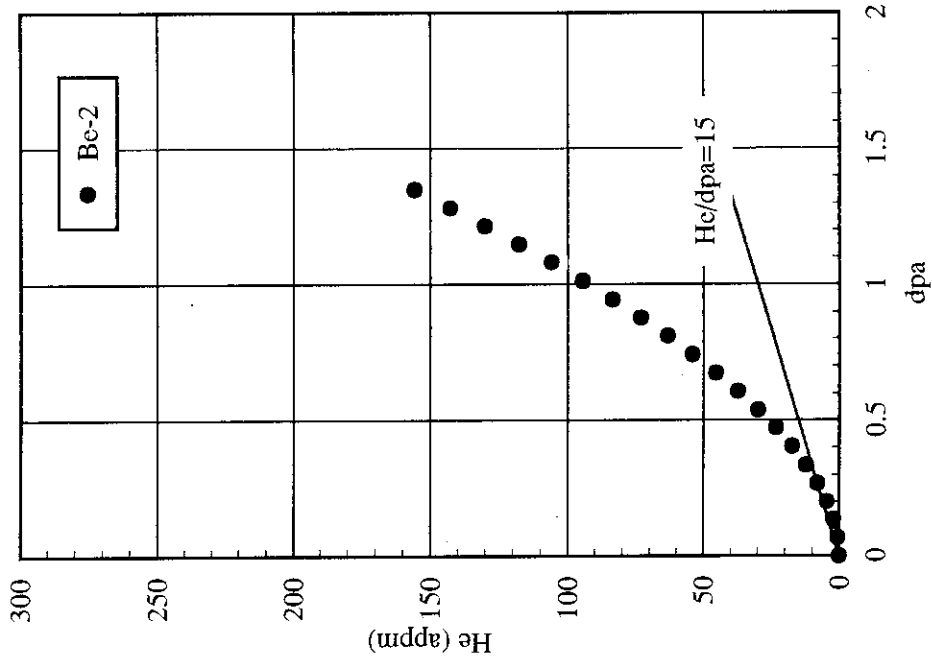


図 4.3.4 Be 領域 2 層

(プロット間隔は JMTR にて 25 日間照射に相当)

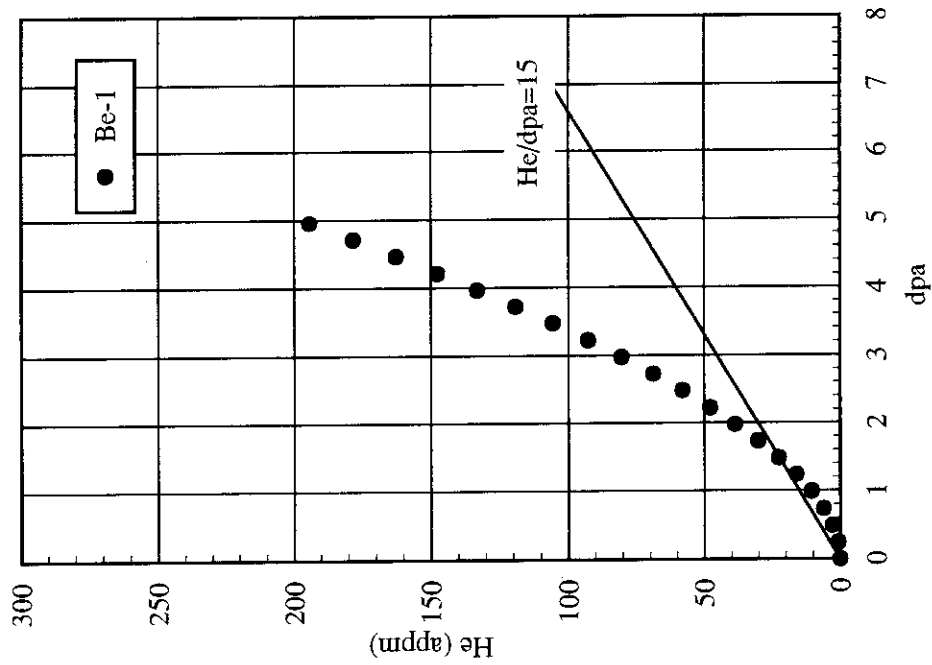


図 4.3.3 Be 領域 1 層

(プロット間隔は JMTR にて 25 日間照射に相当)

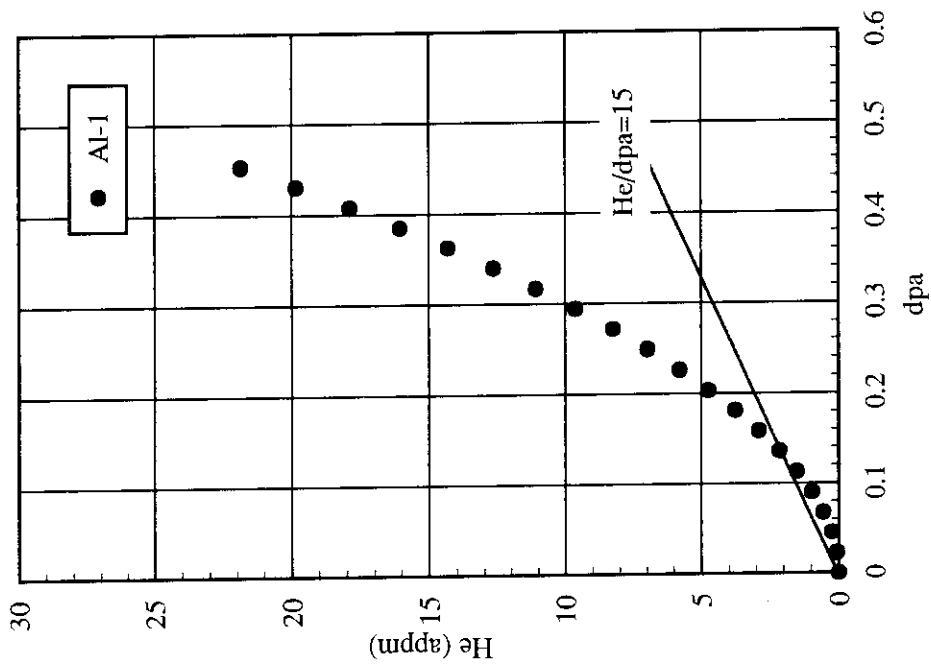


図4.3.5 Al領域1層
(プロット間隔はJMTRにて25日間照射に相当)

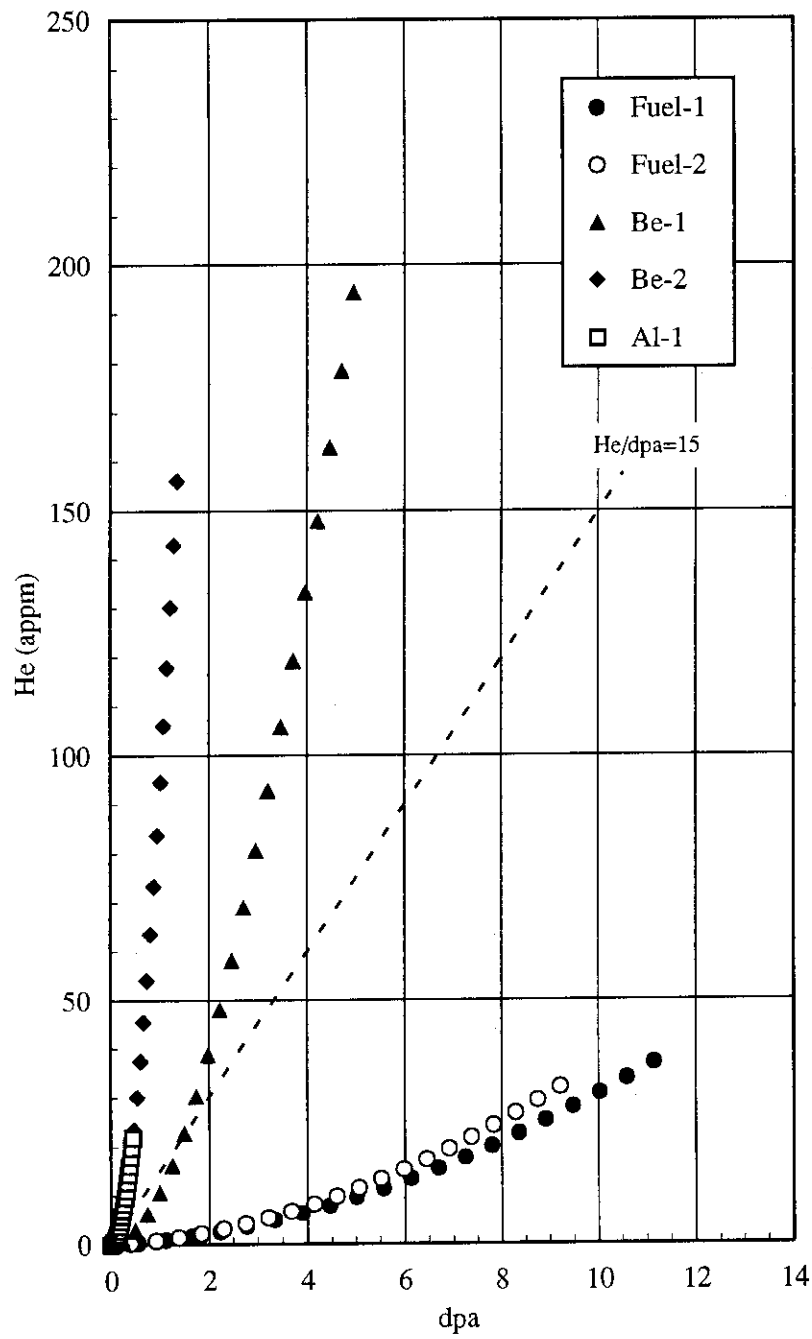


図4.3.6 He/dpa推移図

(プロット間隔はJMTRにて25日間照射に相当)

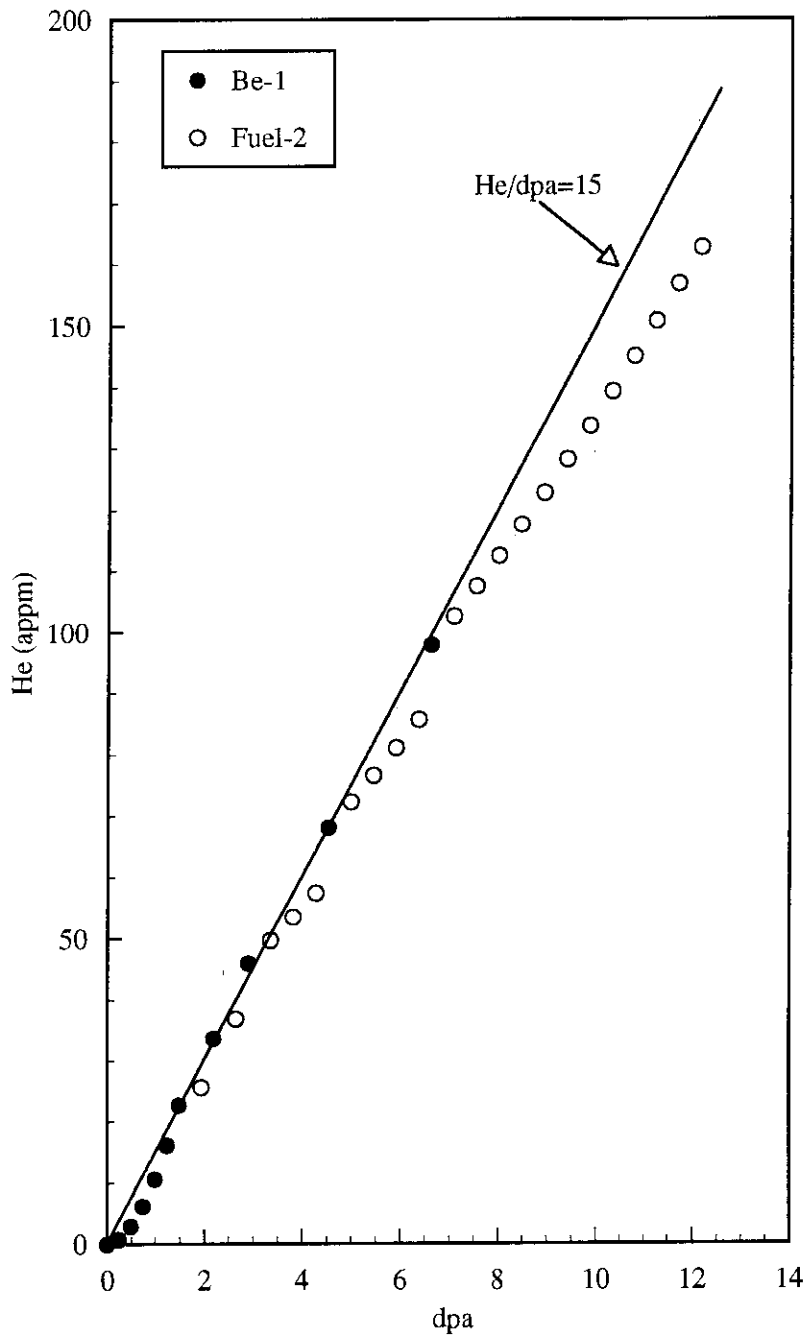


図5.1.1 核融合炉条件 ($\text{He}/\text{dpa} = 15$) を模擬した
中性子スペクトル調整照射

(プロット間隔はJMTRにて25日間照射に相当)

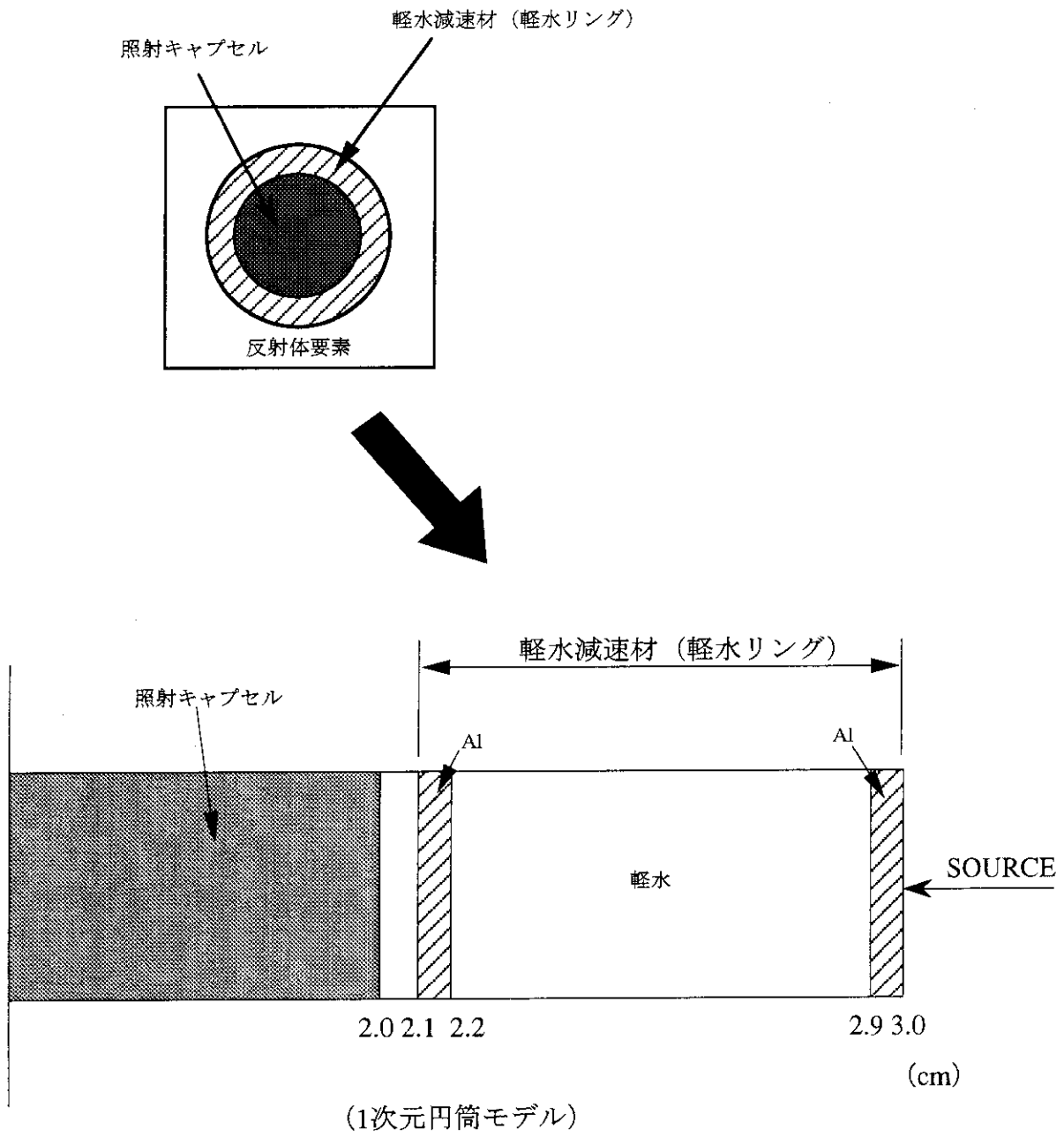


図5.2.1 燃料領域2層軽水減速材配置モデル

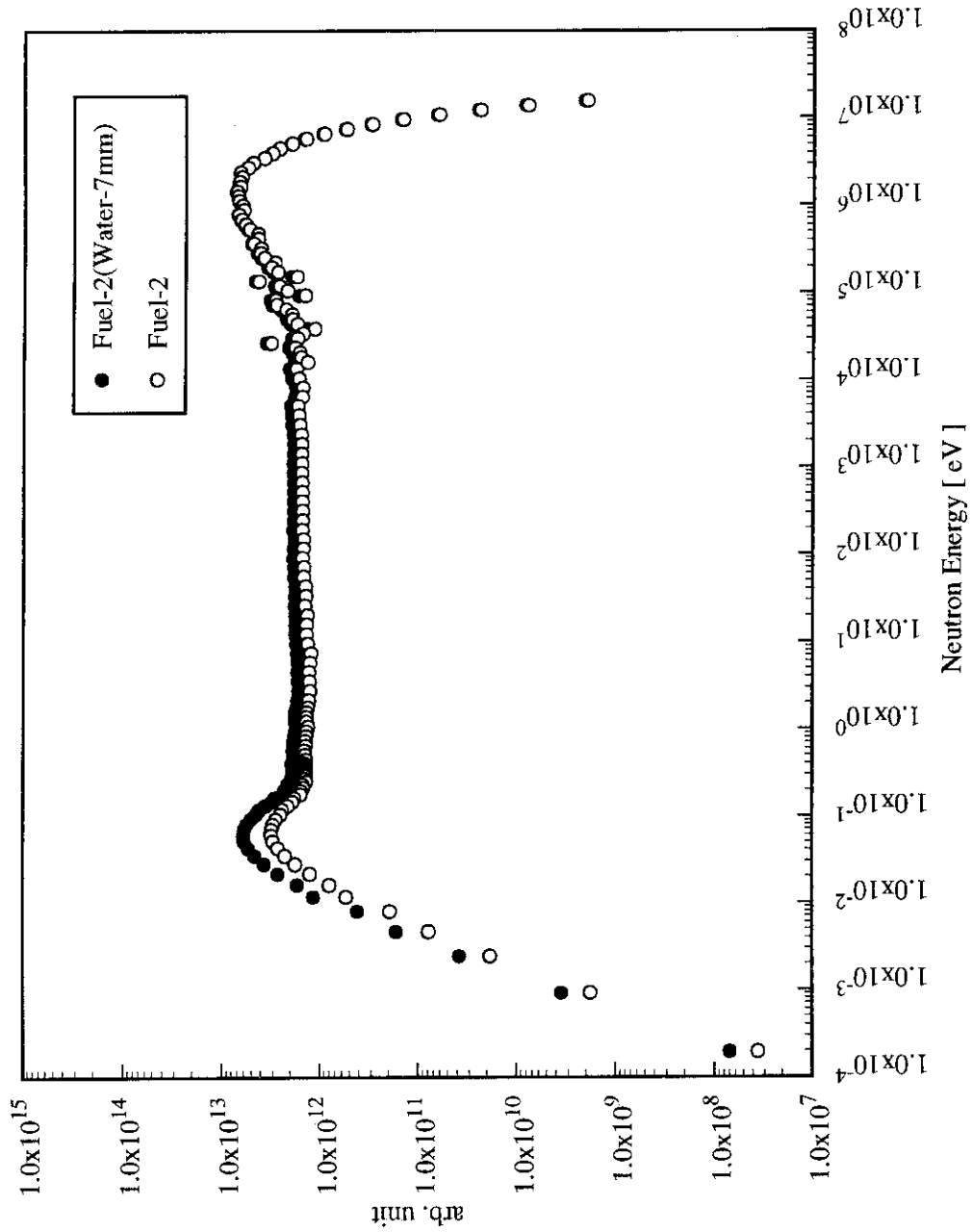


図 5.2.2 軽水リング燃料領域 2 層スペクトル

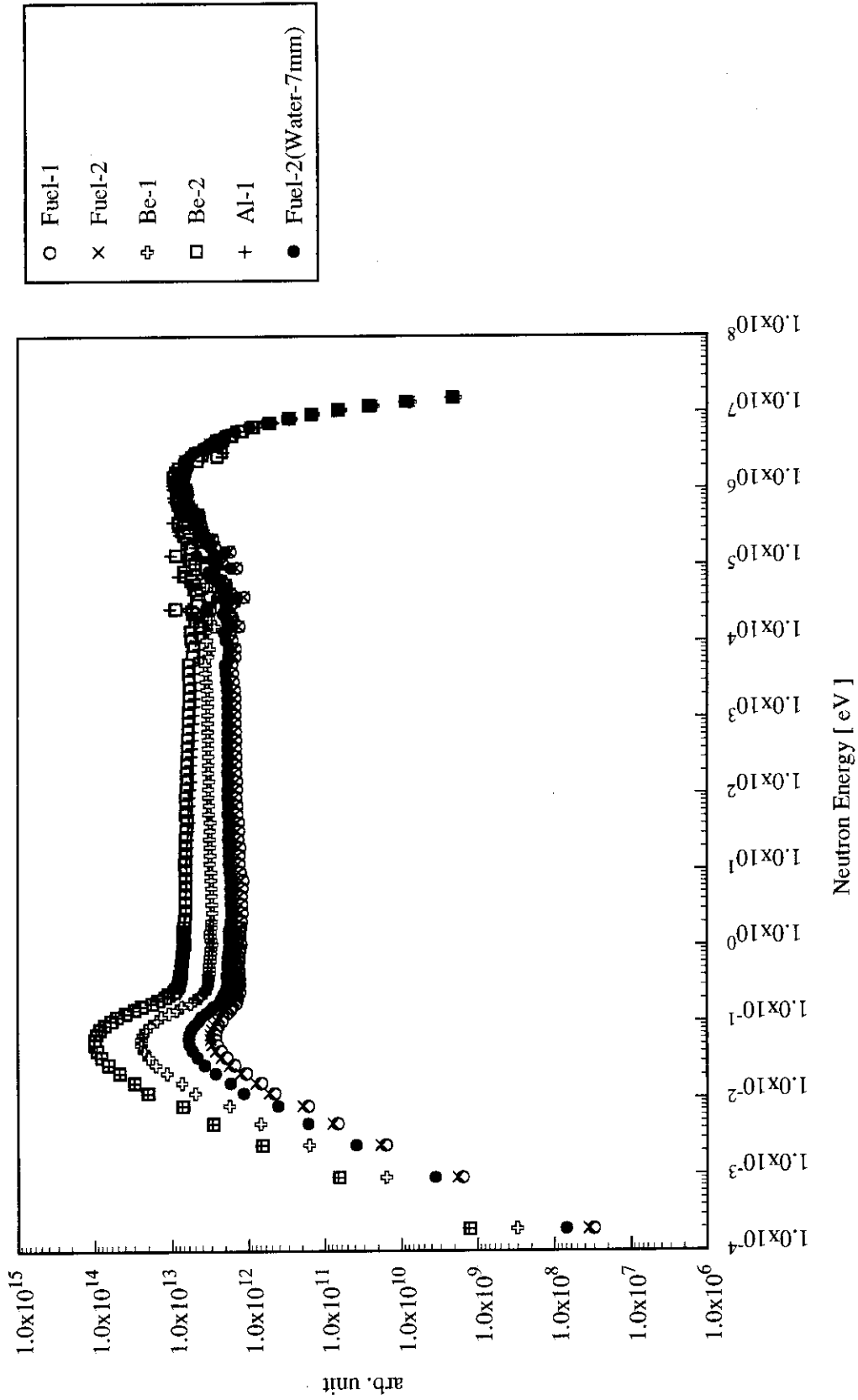


図5.2.3 JMTR 各照射領域における中性子スペクトル

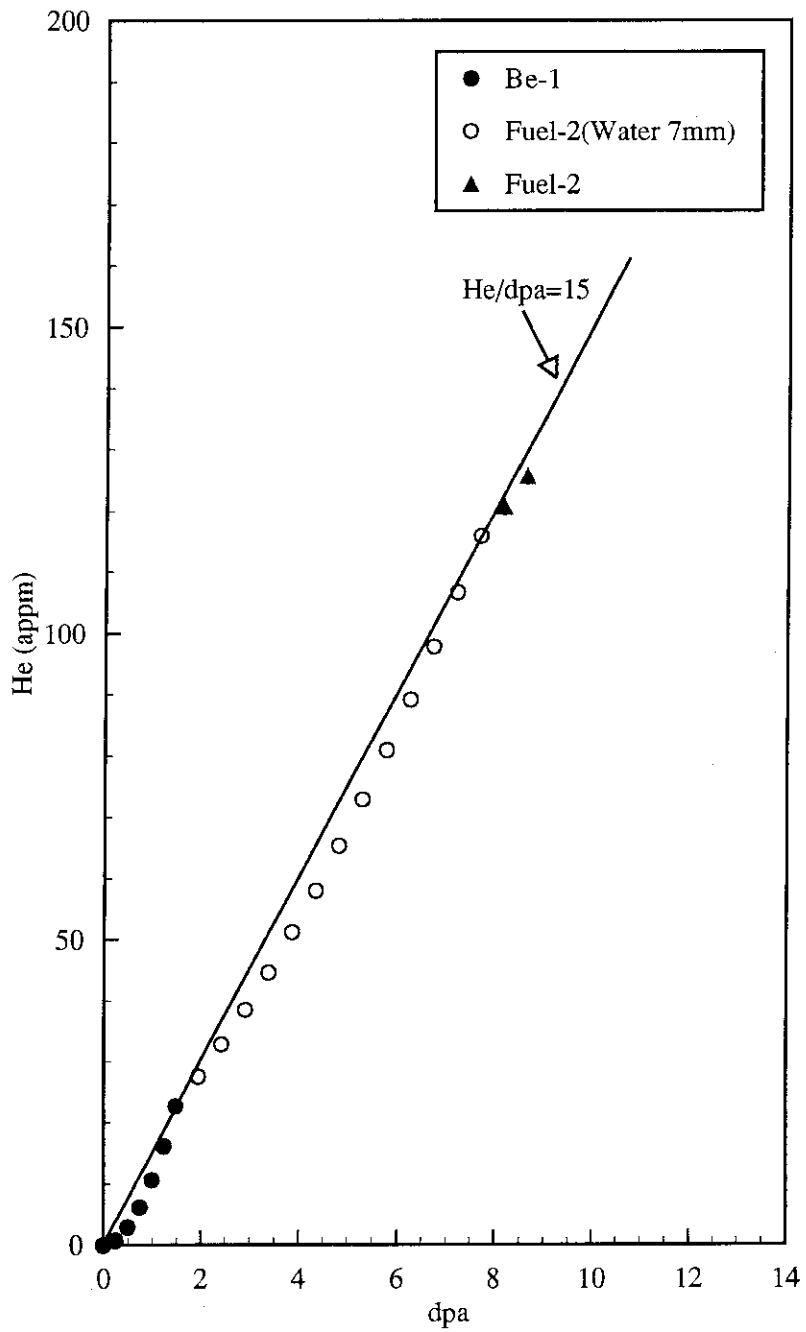


図5.2.4 核融合炉条件 (He/dpa = 15) を模擬した
中性子スペクトル調整照射 (軽水リング付
燃料領域2層スペクトルによる)

(プロット間隔はJMTRにて25日間照射に相当)

付録 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ 反応計算プログラム(NIHE)の概要

1. 入力データ

(1) Title : 計算のタイトル(80A4)

(2) 時間間隔、He/dpa基準値、初期値に関するデータ(5E12.3)

DT : 中性子照射の時間増分(s)
 TIMET : ダミー
 CRIREF : He/dpa打切り基準値
 EPS : He/dpa打切り基準値に対する許容範囲
 DENSITY : 目的とする物質の原子個数密度(/cm³)

(3) dpa率、He生成率、Niの原子個数密度などに関するデータ(6E12.3)

DEN58 : ^{58}Ni の原子個数密度(/cm³)
 DEN59 : ^{59}Ni の原子個数密度(/cm³)
 中性子スペクトルを切替えた場合、それまでに蓄積した ^{59}Ni の原子個数密度(/cm³)を入力する (通常は0.0を入力)

HETEN : He生成率(appm/s)
 TENJIN2の計算結果など

DPATEN : はじき出し損傷率(dpa/s)
 TENJIN2の計算結果など

HETOT : 累積He生成量(appm)
 中性子スペクトル切替時におけるそれまでのHe生成量

(通常は0.0)

DPATOT : 累積はじき出し損傷量(dpa)
 中性子スペクトル切替時におけるそれまでのはじき出し損傷量
 (通常は0.0)

(4) その他の入力(4I6,E13.5)

IGM : エネルギー群数
 IGMT : 熱中性子群数
 ITER : 収束計算の打切り回数
 IOPT : ダミー
 WEIT : 中性子スペクトルの重み (通常は1を入力)

2. 断面積、中性子スペクトルの入力

format (6E13.5)

低エネルギー側→高エネルギー側となるようにデータを編集する。

 $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ 断面積：論理機番01 $^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$ 断面積：論理機番02 ^{59}Ni capture 断面積：論理機番03

中性子スペクトル : 論理機番04

3. 出力量

T : 時間(s)
 GNI58 : ^{58}Ni の原子個数密度(/ cm^3)
 GNI59 : ^{59}Ni の原子個数密度(/ cm^3)
 HE(DIRECT) : ^{58}Ni 2段反応によって生成したHe (appm)
 HE(59NI) : ^{59}Ni から生成したHe (appm)
 中性子スペクトルを切替えた場合、それまでに蓄積して
 いた ^{59}Ni からの(n, α)反応で生成するHe
 HE(CUMULA) : HETEN \times T
 HE(TOTAL) : He生成量の合計
 =HE(DIRECT)+HE(59NI)+HE(CUMULA)
 DPATNW : DPATEN \times T
 HENEW/DPATNW : He/dpa
 FLUX1*T : 熱中性子群の中性子フルエンス
 FLUX2*T : 高速中性子群の中性子フルエンス

4. JCL、出力例

```

//F4917179 JOB ('649749170812.00001
//          'T.01W.01C.01I.04E.01', 'SRP
//          'YO.NAGAO', CLASS=B, PRTY=06, TIME=(0000,10),
//          MSGCLASS=S, MSGLEVEL=(2,0,1),
//          NOTIFY=J4917,
//          USER=J4917, GROUP=G0812, PASSWORD=
***JOBPARM          S=ANY, R=4917, L=0003, C=0000000
*****
*** J4917.TENINPUT.CNTL(TENJIN23)
*****
// EXEC FORTEX, SO='J4917.NI2DAN', A='ELM(HELIUMX3), SOURCE'
// EXEC LKEDEX
// EXEC GOEX
//FT01FOO1 DD DSN=J4917.NI58@59A.DATA(NI58@NG), DISP=SHR
//FT02FOO1 DD DSN=J4917.NI58@59A.DATA(NI59@NA), DISP=SHR
//FT03FOO1 DD DSN=J4917.NI58@59A.DATA(NI59@CAP), DISP=SHR
//FT04FOO1 DD DSN=J4917.TENSPE@3.DATA(@AL@A1), DISP=SHR
//FT06FOO1 DD SYSOUT=*
//SYSIN DD *
//SYSIN      DD *          GENERATED STATEMENT

```

```

***** INPUT DATA DESCRIPTION *****
DT      :TIME INTERVAL          : 2.160E+06
TIMET   :CUMULATIVE TIME       : 0.000E+00
CRIREF  :REFERENCE VALUE OF HE/DPA : 5.000E+01
EPS     :ERROR RANGE OF HE/DPA   : 5.000E-01
DENSITY:INITIAL ATOMIC NUMBER DENSITY : 8.471E+22
DENS8   :ATOMIC NUMBER DENSITY OF NI-58 : 6.656E+21
DENS9   :ATOMIC NUMBER DENSITY OF NI-59 : 0.000E+00
HETEN   :VELOCITY OF HE GENERATION BY TENJIN2 : 3.360E-09
DPATEN  :VELOCITY OF DPA GENERATION BY TENJIN2 : 1.049E-08
HETOT   :CUMULATIVE MASS OF HE GENERATION : 0.000E+00
DPATOT  :CUMULATIVE MASS OF DPA GENERATION : 0.000E+00
IGM     :ENERGY GROUP NUMBER     : 137
IGMT    :THERMAL GROUP NUMBER    : 114
ITER    :LIMITATION NUMBER OF ITERATION : 300
IOPT    : =0, FLUX FOR TENJIN2 FORMAT
          =1, FLUX FOR ANISN FORMAT(NO USE) : 0
FLUX WEIGHT = 0.50000E+00

```

```

*** FIRST GROUP CROSS SECTION AND FLUX ***
ENERGY GROUP 1 - 114
NI58-GAMMA : 2.495E-24
NI59-ALPHA : 6.878E-24
NI59-TOTAL : 5.448E-23
FLUX : 1.389E+14

```

```

*** SECOND GROUP CROSS SECTION AND FLUX ***
ENERGY GROUP 115 - 137
NI58-GAMMA : 8.708E-27
NI59-ALPHA : 1.381E-26
NI59-TOTAL : 1.356E-25
FLUX : 5.000E+12

```

```

*** ONE GROUP CROSS SECTION AND FLUX ***
NI58-GAMMA : 2.408E-24
NI59-ALPHA : 6.640E-24
NI59-TOTAL : 5.259E-23
FLUX : 1.439E+14

```


*** AL-CAP NI TWO-STEP REACTION BY (AL-1)-REGION ***

ITER	T	GNI58	GNI59	HE(DIRECT)	HE(59NI)	HE(CUMULA)	HE(TOTAL)	DPATNW	HENEW/DPATNW	FLUX1*T	FLUX2*T
1	2.160E+06	6.651E+21	4.939E+18	6.030E-02	0.000E+00	7.258E-03	6.756E-02	2.266E-02	2.982E+00	3.000E+20	1.080E+19
2	4.320E+06	6.646E+21	9.795E+18	2.421E-01	0.000E+00	1.452E-02	2.566E-01	4.532E-02	5.662E+00	5.999E+20	2.160E+19
3	6.480E+06	6.641E+21	1.457E+19	5.377E-01	0.000E+00	2.177E-02	5.955E-01	6.798E-02	8.231E+00	8.999E+20	3.240E+19
4	8.640E+06	6.636E+21	1.926E+19	9.498E-01	0.000E+00	2.903E-02	9.789E-01	9.063E-02	1.080E+01	1.200E+21	4.320E+19
5	1.080E+07	6.631E+21	2.387E+19	1.476E+00	0.000E+00	3.629E-02	1.513E+00	1.133E-01	1.335E+01	1.500E+21	5.400E+19
6	1.296E+07	6.626E+21	2.841E+19	2.111E+00	0.000E+00	4.355E-02	2.154E+00	1.360E-01	1.585E+01	1.800E+21	6.480E+19
7	1.512E+07	6.621E+21	3.286E+19	2.860E+00	0.000E+00	5.080E-02	2.911E+00	1.585E-01	1.835E+01	2.100E+21	7.560E+19
8	1.728E+07	6.616E+21	3.724E+19	3.714E+00	0.000E+00	5.806E-02	3.772E+00	1.813E-01	2.081E+01	2.400E+21	8.640E+19
9	1.944E+07	6.611E+21	4.155E+19	4.670E+00	0.000E+00	6.532E-02	4.735E+00	2.039E-01	2.322E+01	2.700E+21	9.720E+19
10	2.160E+07	6.606E+21	4.578E+19	5.736E+00	0.000E+00	7.258E-02	5.808E+00	2.266E-01	2.563E+01	3.000E+21	1.080E+20
11	2.376E+07	6.601E+21	4.994E+19	6.900E+00	0.000E+00	7.983E-02	6.980E+00	2.492E-01	2.800E+01	3.300E+21	1.188E+20
12	2.592E+07	6.596E+21	5.403E+19	8.171E+00	0.000E+00	8.709E-02	8.238E+00	2.719E-01	3.037E+01	3.600E+21	1.296E+20
13	2.808E+07	6.592E+21	5.805E+19	9.532E+00	0.000E+00	9.435E-02	9.676E+00	2.946E-01	3.268E+01	3.900E+21	1.404E+20
14	3.024E+07	6.587E+21	6.200E+19	1.100E+01	0.000E+00	1.016E-01	1.110E+01	3.172E-01	3.498E+01	4.200E+21	1.512E+20
15	3.240E+07	6.582E+21	6.588E+19	1.256E+01	0.000E+00	1.089E-01	1.267E+01	3.399E-01	3.726E+01	4.500E+21	1.620E+20
16	3.456E+07	6.577E+21	6.970E+19	1.421E+01	0.000E+00	1.161E-01	1.432E+01	3.625E-01	3.951E+01	4.800E+21	1.728E+20
17	3.672E+07	6.572E+21	7.345E+19	1.595E+01	0.000E+00	1.234E-01	1.607E+01	3.852E-01	4.173E+01	5.100E+21	1.836E+20
18	3.888E+07	6.567E+21	7.714E+19	1.779E+01	0.000E+00	1.306E-01	1.792E+01	4.079E-01	4.393E+01	5.399E+21	1.944E+20
19	4.104E+07	6.562E+21	8.076E+19	1.971E+01	0.000E+00	1.379E-01	1.984E+01	4.303E-01	4.610E+01	5.699E+21	2.052E+20
20	4.320E+07	6.557E+21	8.432E+19	2.172E+01	0.000E+00	1.452E-01	2.186E+01	4.532E-01	4.824E+01	5.999E+21	2.160E+20
21	4.536E+07	6.552E+21	8.782E+19	2.381E+01	0.000E+00	1.524E-01	2.398E+01	4.758E-01	5.036E+01	6.299E+21	2.268E+20

*** THE JOB IS NORMAL END ***