

JRR-3における12インチNTDシリコン 照射方法の検討

(受託研究)

Investigation of the Irradiation Method for 12 inch NTD Silicon in JRR-3 (Contract Research)

米田 政夫 山本 和喜 八木 理公 佐川 尚司

Masao KOMEDA, Kazuyoshi YAMAMOTO, Masahiro YAGI and Hisashi SAGAWA

東海研究開発センター 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center

October 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構



本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 = 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JRR-3 における 12 インチ NTD シリコン照射方法の検討 (受託研究)

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

米田 政夫・山本 和喜・八木 理公・佐川 尚司

(2008年7月25日受理)

現在、NTD(Neutron Transmutation Doping:中性子核変換ドーピング)で用いるシリコンの直径は6インチが主流であるが、12インチのシリコンを用いることにより、シリコンデバイスの製造コスト低減化を図ることができる。本報告書では、現在6インチNTDシリコンの生産が行われているJRR-3において、12インチNTDシリコンの均一な照射を行うための手法について、中性子輸送計算モンテカルロコードMVPを用いた検討を行った。

12 インチ NTD シリコン照射では、熱中性子フィルターを用いないと、径方向のドーピング分布の偏差は 1.17 となる。そこで、径方向に均一(偏差が 1.10 以下)なドーピングが得られるように熱中性子フィルターを使用することとした。検討の結果、厚さ 2mm の天然ボロン濃度 1.0%含有アルミニウムを用いると、径方向のドーピング分布の偏差が 1.10 以下となる見通しを得た。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」の一環として平成 19 年度に受託したものである。

原子力科学研究所: 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Investigation of the Irradiation Method for 12 inch NTD Silicon in JRR-3 (Contract Research)

Masao KOMEDA, Kazuyoshi YAMAMOTO, Masahiro YAGI and Hisashi SAGAWA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 25, 2008)

Though 6 inch silicon is still the mainstream for NTD (Neutron Transmutation Doping) silicon, it is possible to reduce the cost of manufacturing silicon devices by using 12 inch silicon. In this report, we investigated the irradiation method to irradiate 12 inch NTD silicon uniformly in JRR-3, where 6 inch NTD silicon is being irradiated at present, by using MVP of the Monte Carlo calculation code.

In the case of irradiating 12 inch NTD silicon, the deviation of the doping distribution in the radial direction becomes 1.17 without the thermal neutron filter. Therefore the thermal neutron filter was introduced for uniform doping (the deviation is less than 1.10) in the radial direction and the effect was analyzed. As the result, it was indicated that the deviation of the doping distribution in the radial direction became less than 1.1 by using the neutron filter, which was made from aluminum alloy of 2mm thickness including natural boron of 1%.

Keywords: Neutron Transmutation Doping, Research Reactor, Thermal Neutron Filter, Uniform Irradiation

This study was entrusted as a part of contract research "energy use rationalization technology strategic development" from the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) in 2007.

目 次

1	緒言		·· 1
2	シリ	リコン照射の基礎解析	2
3	JRI	R-3 重水タンクにおける中性子束分布	
	3.1	概要	$\cdots 4$
	3.2	中性子束、スペクトル計算方針	6
	3.3	中性子束、スペクトル計算結果	6
4	12	インチ NTD シリコン照射筒設置位置検討	·12
	4.1	概要	·12
	4.2	計算結果	·15
5	熱中	P性子フィルターの検討	·20
	5.1	概要	20
	5.2	ホウ素フィルター	·21
	5.3	チタンフィルター	.29
	5.4	フィルター有無によるエネルギースペクトル変化	·32
6	中性	生子スペーサー及び中性子流入経路の解析 ····································	.38
	6.1	概要	.38
	6.2	シリコンスペーサー	·40
	6.3	スペーサーを用いない場合	.44
	6.4	空気スペーサー	·46
	6.5	完全吸収体スペーサー	.50
	6.6	完全吸収体フィルター	.52
	6.7	考察	•54
7	スル	レー方式の検討	.56
	7.1	概要	.56
	7.2	計算結果	.57
	7.3	原子炉の反応度に与える影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	·63
8	照身	付時間及びフィルター寿命の概算	·64
	8.1	照射時間、NTD シリコン生産量概算	64
	8.2	フィルター寿命概算	·65
9	結言		·66
謝]辞 ::		·67

参考文	献
Append	$\operatorname{dix-A}$ MVP における (n,γ) 反応の計算手法について68
A.1	概要68
	MCNP 用ドジメトリファイルの使用方法 ······68
A.3	検証計算69
Append	dix-B JRR-3、JRR-4 における高速中性子の比較71
B.1	概要71
B.2	照射生成物71
	計算体系73
	中性子束計算結果74
B.5	不純物生成量計算結果74
Append	dix-C 計算環境 ·······77

Contents

1 Ir	ntroduction	1
2 B	asic analyses of the NTD method·····	2
3 N	Teutron flux in the heavy water tank of JRR-3 ·····	4
3.1	Summary	4
3.2	<u>*</u>	6
3.3	Calculation results of neutron flux and spectrum ······	6
4 L	ocation investigation of an irradiation hole for 12 inch NTD silicon	
4.1		
4.2	2 Calculation results · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	15
5 Ir	nvestigation of a thermal neutron filter ······	
5.1	v	
5.2		
5.3		
5.4	Influence on energy spectrum by a thermal neutron filter	$\cdots \cdots 32$
6 A	nalysis of a neutron spacer and neutron paths	38
6.1	· ·	
6.2	1	
6.3		
6.4	•	
6.5	· · ·	
6.6		
6.7	7 Discussion ·····	54
7 Ir	nvestigation of a pass-through method ·····	
7.1	· ·	
7.2		
7.3	3 Influence on the reactivity	63
8 R	ough estimate of irradiation time and lifetime of a thermal neutron filter ···	
8.1	<u> </u>	
8.2	2 Estimate of lifetime of a neutron filter	65
9 C	onclusion ·····	66
	nowledgment ·····	
Refer	rence	67

Appen	dix-A Calculation method of (n, γ) reaction with MVP68							
A.1	.1 Summary							
A.2	Directions how to use the dosimetry file of MCNP ······68							
A.3	Validation calculation ······69							
Appen	dix-B Comparison influence on fast neutron between JRR-3 and JRR-4 ·····71							
B.1	Summary71							
B.2	Irradiation product ······71							
B.3	Model of calculation ······73							
B.4	4 Calculation results of neutron flux ·······74							
B.5	Calculation results of irradiation products ·······74							
Appen	dix-C Calculation environment ······77							

1 緒言

シリコン単結晶に中性子を照射すると、シリコン中の 30 Si (同位体比 3.1%)が 30 Si (n, γ) 31 Si 反応が生じる。ここで生成した 31 Si は半減期 2.6 時間で β $^{-}$ 崩壊を起こし 31 P(安定核種)となる。 31 Pはシリコン中にドーピングされたことになり、ドーピングされたシリコンはn型半導体となる。 このように中性子を利用したドーピング法を NTD (Neutron Transmutation Doping)と呼び、原子炉を用いて実施されている $^{(1)}$ 。中性子は透過性が高く、シリコン中では均一に存在するため、NTD では他のドーピング法(ガスドープ法等)と比べて、均一にドーピングさせることが可能という特徴を持っている $^{(2)}$ $^{(3)}$ 。なお、本報告書では、 30 Si $^{(n, \gamma)}$ 31 Si 反応をドーピング反応と称す。

NTD シリコンはドーピング反応の均一性が高いため、特に高電圧のパワーデバイス素子として用いられる $^{(4)}$ 。パワーデバイスとは 5V、1A以上の電力を制御するものであるが、100V以下であれば主にパワーMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) が用いられ、100V以上では IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が主に用いられる。パワーデバイスの応用例としてインバーターがあり、家電やハイブリッドカー等の 100V以上の電圧を使用する機器のインバーターには IGBT が用いられている。特に、ハイブリッドカー等で使用される高電圧・大電力を扱う IGBT では、製品耐久性から均一にドーピングされたシリコンが要求され、NTD シリコンが適している。

近年、世界のエネルギー事情から省エネ運動が活発になっており、自動車に対してはハイブリッドカーに対する需要が高まっており、それに伴って NTD シリコンに対する需要が高まっている。シリコンウェハー業界では製造コストを下げるため、シリコンインゴットの大口径化が進んでおり、12 インチ径が主流となってきている。現在の NTD で用いるシリコンインゴットの直径は6インチが主流であるが、より大口径のシリコンインゴットを用いることにより、IGBT 製造コストの低減化を図ることができる。NTD シリコンは原子炉を用いて生産されるが、世界の NTD 生産量(約175トン,2006年)のうち、約70%は日本企業による需要である。一方、日本の NTD 生産量(約5トン,2006年)は世界の3%程度と需要に比べて格段に少ない(5)。日本の生産量の大半は研究用原子炉 JRR-3 によるものである。今後日本の NTD シリコンの生産量を増加させるためには、より大口径のシリコンを用いた NTD シリコンの生産コストの低減化が不可欠である。そこで、本報告書では、JRR-3 において、12インチという大口径シリコンの照射に向けた予備的な解析を行った。シリコン照射は炉心周りに設置された重水タンクにおいて行うが、その中での最適な照射場所、シリコン内のドーピング反応が均一となる手法等について、中性子輸送計算モンテカルロコード MVP(6)を用いて解析を行った。

第2章以降、本報告書は次の内容から構成される。第2章ではシリコン照射に関して拡散理論を用いた基礎的な解析について述べる。第3章ではJRR-3重水タンク内の中性子束、スペクトル分布について述べる。第4章では12インチシリコン照射筒の設置位置について述べ、第5章ではシリコン内で均一なドーピングを可能とする熱中性子フィルターの効果について述べる。第6章では、シリコンインゴット上下に設置するスペーサーの効果及びシリコン内に流入する中性子の経路について述べる。第7章では、シリコンインゴットを照射筒内でスルーさせた場合の結果について述べ、第8章では12インチシリコン照射を行った場合の照射時間及び熱中性子フィルターの寿命について述べる。最後の第9章では結言を述べる。

2 シリコン照射の基礎解析

本章では、第3章以降の計算コードを用いた解析に先立って、拡散理論を用いたシリコン内の中性子東分布について基礎的解析を行う。熱中性子を用いた無限円筒体系での拡散方程式は次のようになる。

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}r\frac{d\phi(r)}{dr} - \frac{\sum_{a}}{D}\phi(r) = 0 \qquad (1)$$

ここで、 Σ_a はシリコンの巨視的吸収断面積であり、Dは中性子拡散係数である。

(1) 式の一般解は第1種のゼロ次変形ベッセル関数 I_0 及び、第2種のゼロ次変形ベッセル関数 K_0 を用いて次のように示される。

$$\phi(r) = A \cdot I_0 \left(\frac{r}{L}\right) + C \cdot K_0 \left(\frac{r}{L}\right)$$
 (2)

ここで、 $1/L^2 = \Sigma_a/D$ であり、A 及び C は任意定数である。L は中性子拡散距離である。(2) 式において $K_0(r/L)$ は $r\to 0$ のとき $K_0\to \infty$ となるため、C=0 とおく。z=r/L と定義すると、 I_0 は次のように表すことが出来る。

$$I_0(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2m}}{(m!) \cdot (m!)}$$

境界条件として、シリコン表面部 r=R において、次のように定義する。

$$\phi (R) = \phi_0 \qquad \cdot \cdot \cdot (3)$$

(3)式を C=0 とした(2)式に代入することより、次のように A が求まる。

$$A = \frac{\phi_R}{I_0 \left(\frac{R}{L}\right)}$$

以上より、中性子束は次のようになる。

$$\phi(r) = \frac{\phi_R}{I_0\left(\frac{R}{L}\right)} \cdot I_0\left(\frac{r}{L}\right) \qquad (4)$$

 $I_0(0) = 1.0$ より、r=0 における中性子束 ϕ_0 を求めると、次のようになる。

$$\phi_0 = \frac{\phi_R}{I_0 \left(\frac{R}{L}\right)} \qquad (5)$$

(4) 式で求めた ϕ (r) の結果を図 2.1 に示す。ここで、中心での値が 1 となるように (4) 式を (5) 式で割っている。なお、中性子拡散距離として 20.6cm を用いている。

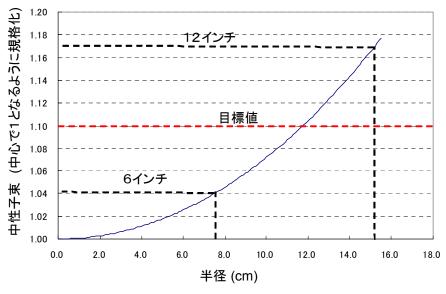


図 2.1 無限円筒モデル

図 2.1 から 6 インチ(半径 7.62cm) では側面における中性子束は中心と比べて 1.04 倍、12 インチで 1.17 倍となる。このことから、12 インチでは単純に熱中性子を入射させるだけでは、リンを均一に分布させるのが難しいことが分かる。IGBT の要求性能から 12 インチ NTD シリコンでは径方向のドーピング分布が $\pm 5\%$ 、つまり中心部の最低値を基準とすると、外周部では比率が 1.1 以内に収まるようにすることを目標としている (注)。シリコンの中心部での反応率を増加させるには、入射する中性子のエネルギーを高くすれば良い。エネルギーの高い中性子を入射させるには、大きく分けて次の 2 つがある。

- (i)エネルギーの高い中性子の割合が高い領域で照射する。
- (ii)熱中性子フィルターを使用して、カドミ比を高くした中性子を照射する。

しかし、中性子のエネルギーが高くなると、シリコン結晶内に照射欠陥及び、 28 Si $(n,\alpha)^{25}$ Mg 反応 (約 2. 7MeV のしきい値) 等により不純物が生成されるという問題が生じる。

⁽注)本報告書では、シリコンの径方向に対して円環状に 6 領域(中心部は円状)を考え、『(ある円環におけるドーピング反応率) / (中心部でのドーピング反応率) 』を R/C というパラメータで定義し、R/C が 1.1 以下になる照射条件について調べる。詳しくは、P.14 参照。

3 JRR-3 重水タンクにおける中性子東分布

3.1 概要

JRR-3 の概要を下記に示す⁽⁷⁾。

炉形式:低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型

· 最大熱出力:20MW

・ 炉心寸法:等価直径約60cm、高さ約75cm

・ 重水タンク寸法: 内径 0.5m、外径 2m、高さ 1.6m

・ 燃料要素:標準燃料要素 26体、フォロワ型燃料要素 6体

・ 制御棒: 6体 (ハフニウム)

・ 燃料:約20%濃縮ウランシリコンアルミニウム分散型合金燃料

図 3.1 に JRR-3 の水平断面図を示す。12 インチ NTD シリコンは 6 インチ NTD シリコンに比べて直径が 2 倍となるため、照射筒の直径も約 2 倍必要となる。そのため、現行の照射筒位置に 12 インチ NTD シリコン照射筒を設置すると水平実験孔と干渉することになる。本報告書では、図 3.1 に示す位置に 12 インチ NTD シリコン照射筒の設置を想定する。この場合、水平実験孔とは干渉しないが、垂直実験孔 HR-1, HR-2 と干渉するため、HR-1, HR-2 を取り外した体系を用いて解析を行う。具体的な照射筒の設置位置の検討については第 4 章で行う。

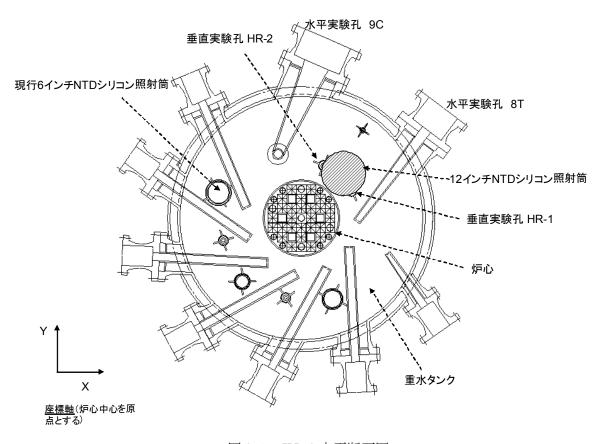


図 3.1 JRR-3 水平断面図

本章では、12 インチ NTD シリコン照射筒設置場所近辺の重水タンクにおける中性子東分布を求 める。図 3.2 に水平方向の中性子東分布計算領域を示す。中性子東分布の計算は、12 インチ NTD シリコン照射筒を設置していない体系で行った。中性子束は重水タンク内の高さ方向及び径方向 について行った。図3.2に示すように、45度方向の直線上の中性子東分布を求める。なお、第4 章において 12 インチ NTD シリコン照射筒設置位置の検討を行うが、照射筒中心位置は図 3.2 にお ける 45 度方向の直線上になるように検討を行う。図 3.3 に中性子東分布の計算領域を 3 次元的に 示す。図3.3は横軸が図3.2における45度方向に対応している。高さ方向及び径方向の中性子束 分布は、それぞれ3か所求めており、図3.3において高さ方向は『a, b, c』、径方向は『A, B, C』 と表記している。高さ方向で求めている範囲は、重水タンク底面(重水底面)から重水タンク上面 (重水上面)までの147cmである。径方向で求めているのは、重水タンク内面から外面までの67cm である。高さ方向の計算領域、『a, b, c』、径方向の計算領域『A, B, C』の意味は次の通りであ る。

- ・a: 重水タンク内面における、高さ方向の中性子束分布計算領域。
- •b: 重水タンク内面と外面の中間位置における、高さ方向の中性子東分布計算領域。
- ・c: 重水タンク内面における、高さ方向の中性子束分布計算領域。
- ・A: 重水タンク底面における、径方向の中性子束分布計算領域。
- ・B: a で求めた中性子束分布の最大値位置における、径方向の中性子束分布計算領域。
- ・C: 重水タンク上面における、径方向の中性子束分布計算領域。

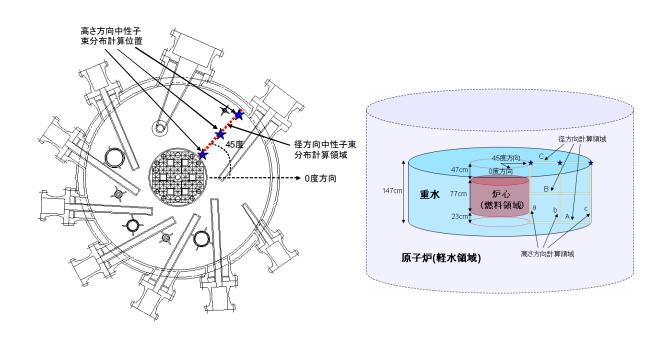


図 3.2 中性子束分布計算位置(水平断面図) 図 3.3 中性子束分布計算位置(概略立体図)

3.2 中性子東、スペクトル計算方針

JRR-3 重水タンクでの中性子東分布を求める前段階として、本解析で使用する制御棒位置等の炉心側の条件を設定する。燃料としては 235 U が 10%燃焼したものを用い $^{(\pm 1)}$ 、これを全燃料要素に用いた。この時の臨界計算を行い、制御棒位置としては 36.0cm となった (ただし制御棒 6 体のうち 2 体は上限位置)。 $k_{\rm eff}$ の結果は、 $1.002(\pm 0.001)$ となった。今後の計算において、燃料燃焼度及び制御棒位置については、上記の値を用いることにする。MVP で求まる中性子東及びスペクトルは相対値であるため、核出力 20MW で規格化を行うことにより絶対値を求める(以下、本報告書で示す計算値は特にことわりがない限り、核出力 20MW で規格化した値である)。

(注1:燃焼燃料の組成については、MVP-BURNにおいて燃料板1枚で燃焼計算を行った結果を採用した)。

中性子束のエネルギー区分については下記のとおりとした。

・熱中性子東: 1.0×10⁻⁵ eV ~ 0.53 eV

・熱外中性子: 0.53 eV ~ 100 keV

· 高速中性子: 100 keV ~ 2.0×10⁷ eV

エネルギースペクトル計算で用いたエネルギー区分は、SRAC で用いられている 107 群のエネルギー区分を用いた。

3.3 中性子東、スペクトル計算結果

図 3.4 ~図 3.6 に高さ方向の中性子東分布を、図 3.7~3.9 に径方向の中性子東分布を示す。図 3.10~3.12 に領域 a, b, c と A, B, C の交点 9 点におけるエネルギースペクトルを示す。

図 3.4: 領域 a における、高さ方向の中性子東分布。

図 3.5: 領域 b における、高さ方向の中性子東分布。

図 3.6: 領域 c における、高さ方向の中性子東分布。

図3.7:領域Aにおける、径方向の中性子東分布。

図3.8:領域Bにおける、径方向の中性子東分布。

図 3.9: 領域 C における、径方向の中性子束分布。

図 3.10:領域 a と、領域 A, B, C とのそれぞれの交点における、エネルギースペクトル(3点)。

図3.11:領域bと、領域A,B,Cとのそれぞれの交点における、エネルギースペクトル(3点)。

図 3.12:領域 c と、領域 A, B, C とのそれぞれの交点における、エネルギースペクトル(3 点)。

図3.4より高さ方向のピーク位置は重水タンク底面から49.5cmとなることが分かる。このことから、領域Bの計算では、重水タンク底面から49.5cmという高さを用いた。燃料(標準燃料要素体)の中心位置は重水タンク底面から61.5cmに相当するが、中性子束のピーク位置は燃料中心高さより低い位置となっていることが分かる。

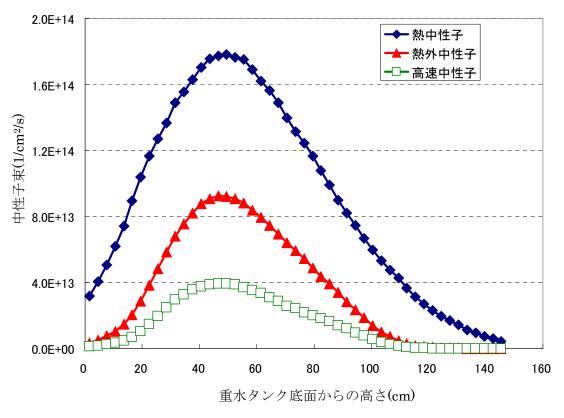


図 3.4 領域 a における中性子東分布(高さ方向)

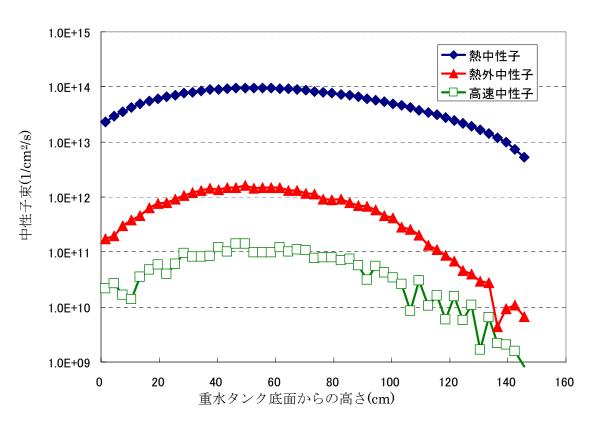


図3.5 領域bにおける中性子東分布(高さ方向)

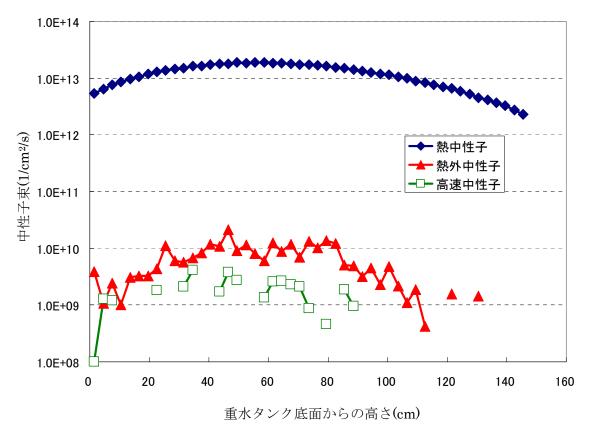


図 3.6 領域 c における中性子東分布(高さ方向)

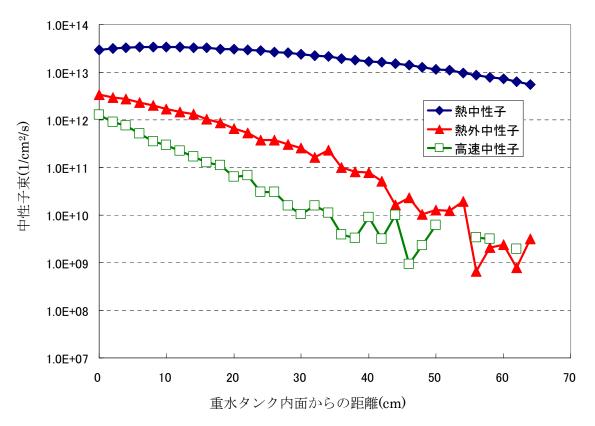


図3.7 領域Aにおける中性子東分布(径方向)

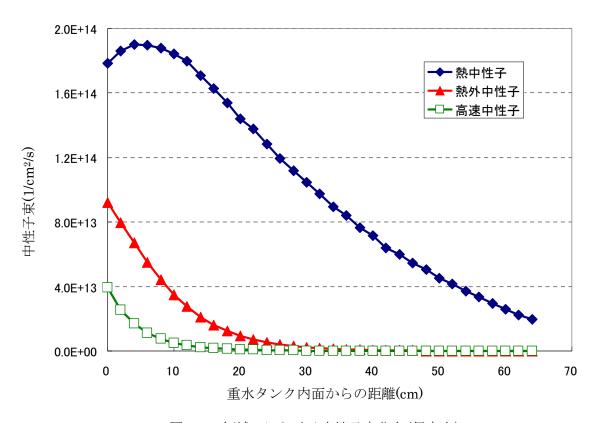


図3.8 領域Bにおける中性子東分布(径方向)

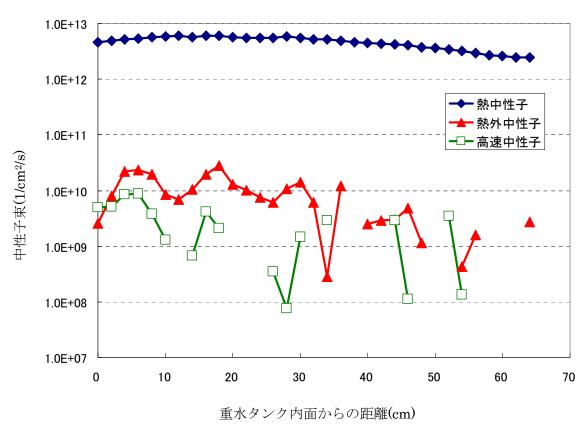


図 3.9 領域 C における中性子東分布(径方向)

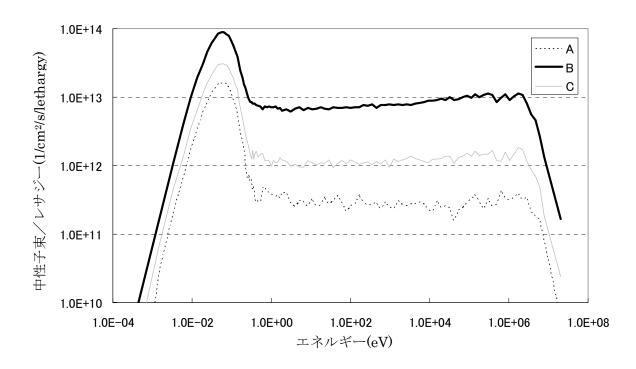


図 3.10 領域 a と領域 A, B, C との交点におけるエネルギースペクトル

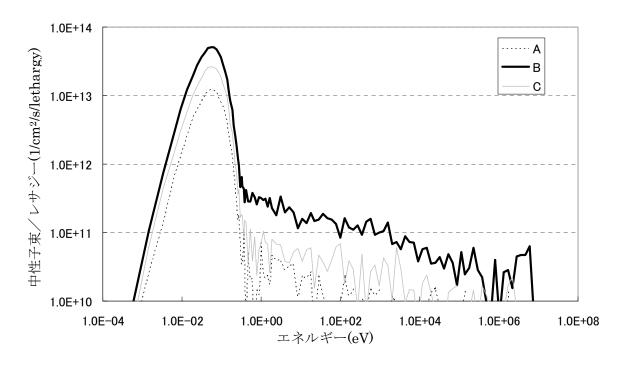


図3.11 領域 b と領域 A, B, C との交点におけるエネルギースペクトル

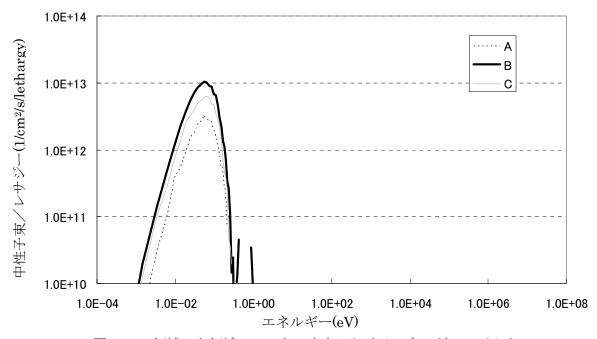


図3.12 領域 b と領域 A, B, C との交点におけるエネルギースペクトル

4 12 インチ NTD シリコン照射筒設置位置検討

4.1 概要

本章では 12 インチ NTD シリコン照射筒設置位置の検討を行う。照射筒の中心位置は、図 4.2 で示した 45 度方向の直線上で中心位置を調整する。本報告書で計算を実施するシリコンインゴットのサイズは直径が 12 インチ (30.48cm)、高さが 60cm である。シリコンインゴットの底面は第 3章で求めた高さ方向中性子束のピーク位置となるように、シリコンインゴットの高さを設定した。第 3章の結果、高さ方向の中性子束のピークは重水タンク底面から 49.5cm の位置であったことより、シリコンインゴットの底面の位置を重水タンク底面から 50cm として計算を行う。

本報告書で用いたシリコン照射筒及びシリコンホルダーの概略を次の図 4.1 に示す。

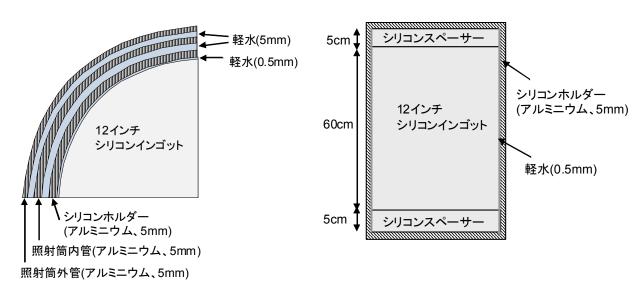


図 4.1 シリコン照射筒 1/4 水平断面図(左図)、垂直断面図(右図)

シリコン照射筒は、冷却水を循環させるため内管と外管から構成されており、それぞれの厚さは 5mm である。内管と外管との間(軽水)の厚さは 5mm である。シリコンインゴットは、上下に移動させるためにシリコンホルダーに収めており、シリコンホルダーの厚さは 5mm である。シリコンホルダーと内管と間(軽水)の厚さは 5mm である。シリコンホルダーとシリコンインゴットとのギャップ(軽水)は 0.5mm とした。内管、外管、ホルダーの材質はアルミニウムである。ホルダーの上下面の厚みは 5mm としている。本章の解析では、熱中性子フィルターを用いない体系について行う。

現在実施されているシリコン照射では、ターゲットとなるシリコンインゴット(通常、高さ 60cm)の上下にシリコンスペーサーを設置することが多い。本報告書では、特に断りがない限りシリコンインゴットの上下に高さ5cmのシリコンスペーサーを設置するものとする。シリコンスペーサーの影響については、第6章で述べる。

本章では、シリコン照射筒の設置位置を重水タンク内面とシリコン照射筒外管とのギャップ(以下、この値を重水間隔と呼ぶ)が、0cm、2cm、4cm、10cmの4通りについて計算を行った。ギャップが0cmと10cmの場合の原子炉水平断面図を図4.2に示す。45度方向の原子炉垂直断面図を図4.3に示す。

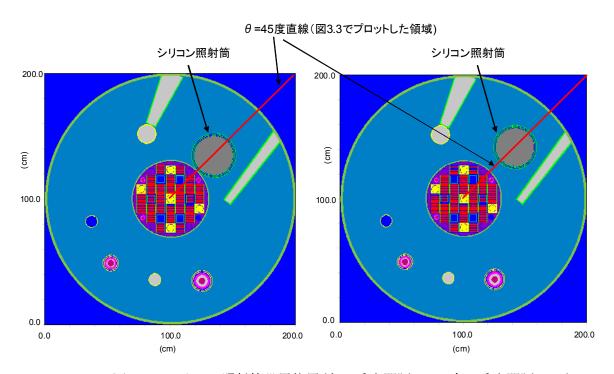


図 4.2 シリコン照射筒設置位置(左:重水間隔 0cm、右:重水間隔 10cm)

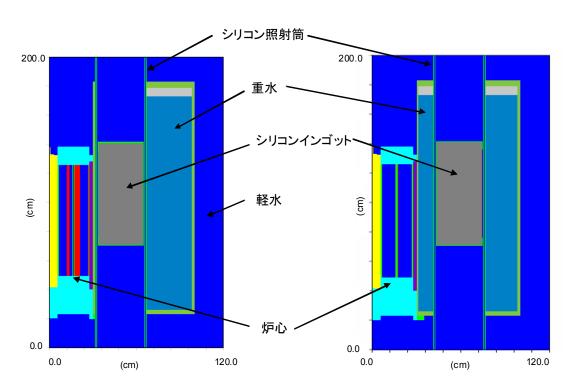


図 4.3 45 度方向の原子炉垂直断面図(左:重水間隔 0cm、右:重水間隔 10cm)

シリコンインゴット計算においてドーピング反応数等を求める領域(タリー領域)を図 4.4 に示す。径方向のタリー区分は6分割し、それぞれ分割された領域の面積は同じとした。高さ方向の分割は図 4.5 のように6分割した。それぞれの高さは同じである。タリー数としては、径方向6領域、高さ方向6領域の合計36領域となる。

今後、各タリー領域の記述としては、径方向はその最大半径、高さ方向はタリー高さの中間値を指すことにする。例えば、タリー領域が、高さ $z=0\sim10$ cm、 $r=0.0\sim6.2$ cm、このタリー領域を $\mathbb{Z}=5$ cm, r=6.2cm』と記述することにする。

本章では、シリコン照射筒の径方向の位置(重水間隔)を変化させて、シリコンインゴット内のドーピング反応率分布を調べる。シリコン内の反応率分布を示す指標として、『(ある円環でのドーピング反応率) 』というパラメータを導入し、本報告書ではこのパラメータを R/C 比と呼ぶことにする。例えば、中心(\mathbf{r} =6.2cm)における反応率を 1.0、 \mathbf{r} =10.8cm における反応率を 2.0 とすると、 \mathbf{r} =10.8cm における R/C 比は 2.0 となる。

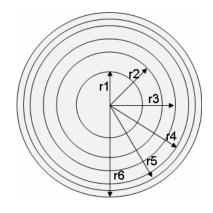


図 4.4 シリコンインゴット径方向タリー区分 (r1=6.2cm, r2=8.8cm, r3=10.8cm, r4=12.4cm, r5=13.9cm, r6=15.2cm)



図4.5 シリコンインゴット高さ(軸)方 向タリー区分

4.2 計算結果

重水間隔が、0cm、2cm、4cm、10cm 0 4 通りについて、径方向に平均化したシリコン内中性子束(全中性子束)分布の結果を表 4.1 及び図 4.6 に示す。なお、これらの結果はすべて原子炉出力 20MW における値である。

						122 7 7 14 (2)	, -,				
			シリコン高さ (cm)								
	5 15 25 35 45 55										
	0	6.42E+13	5.94E+13	5.04E+13	3.97E+13	2.89E+13	1.99E+13				
重水間隔	2	5.78E+13	5.37E+13	4.57E+13	3.62E+13	2.66E+13	1.86E+13				
(cm)	4	5.21E+13	4.85E+13	4.17E+13	3.30E+13	2.45E+13	1.73E+13				
	10	3.84E+13	3.62E+13	3.15E+13	2.55E+13	1.95E+13	1.42E+13				

表 4.1 重水間隔を変更した場合のシリコン内中性子束(1/cm²/s)

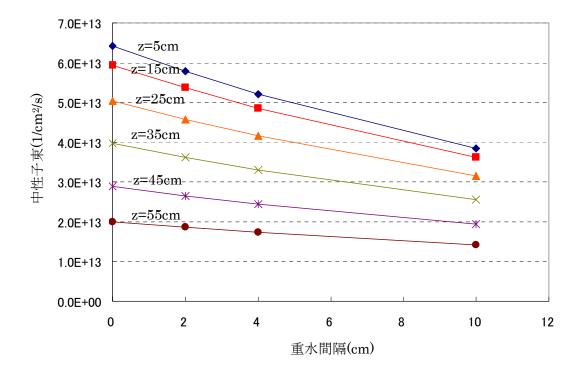


図 4.6 重水間隔を変更した場合のシリコン内中性子束

重水間隔が、0 cm、2 cm、4 cm、10 cm の 4 通りについて、ドーピング反応率分布の計算結果を図 4.7~4.10 に示す。

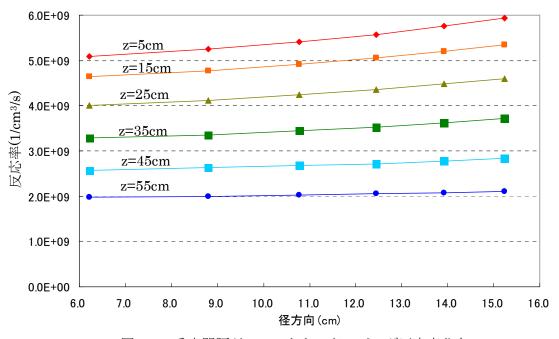


図 4.7 重水間隔が 0cm のときのドーピング反応率分布

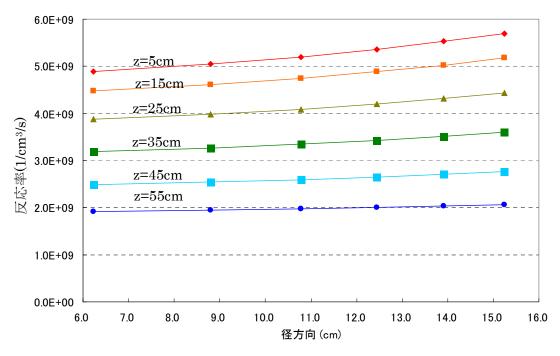


図 4.8 重水間隔が 2cm のときのドーピング反応率分布

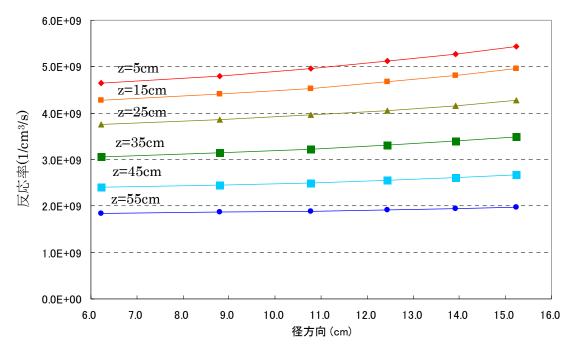


図 4.9 重水間隔が 4cm のときのドーピング反応率分布

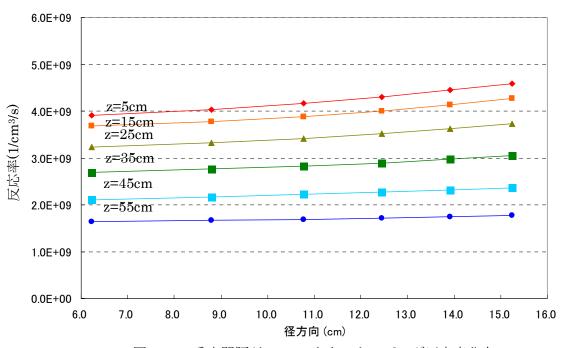


図 4.10 重水間隔が 10cm のときのドーピング反応率分布

表 4.1、図 4.6 より、重水間隔を増加させた場合の中性子束の減少は、シリコン底面ほど大きいことが分かる。これはシリコン底面の方がエネルギーの高い中性子の減少割合が大きいからである(参照:図 3.7)。なお、減少割合はシリコン底面(z=5cm)では約 4 割、シリコン上面(z=55cm)では約 3 割減少している。

図 4.7~4.10 のドーピング反応率分布の結果より、重水間隔を変化させた場合の、最大の R/C 比は下の表 4.2 のようになる。

	重水間隔 0cm	重水間隔 2cm	重水間隔 4cm	重水間隔 10cm
最大 R/C 比	1. 165	1. 164	1. 169	1. 173
場所	z=5cm, r=15.2cm	z=5cm, r=15.2cm	z=5cm, r=15.2cm	z=5cm, r=15.2cm

表 4.2 重水タンクと照射筒の間隔を変えたときの最大 R/C 比

これらの結果より、均一なドーピング反応率分布を得るには、照射筒は炉心に近い方が良いことが分かる。しかし、照射筒を炉心に近づけるだけでは、目標とする R/C 比である 1.1 以下にすることは厳しいことが分かる。表 4.3 に重水間隔が 0cm のときの各タリー領域における R/C 比を示す。

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	1.000	1.013	1.028	1.043	1.054	1.070		
	45	1.000	1.026	1.046	1.061	1.087	1.110		
高さ方向	35	1.000	1.021	1.047	1.074	1.103	1.128		
(cm)	25	1.000	1.027	1.058	1.086	1.116	1.148		
	15	1.000	1.030	1.059	1.090	1.120	1.153		
	5	1.000	1.032	1.062	1.094	1.130	1.165		

表 4.3 重水間隔が 0cm のときの各タリー領域における R/C 比

表 4.3 より r=15.2cm では z=55cm 以外のすべてで R/C 比が 1.1 以上であることが分かる。最も R/C 比が悪く (大きく)なったのは、z=5cm の場合であるが、これは図 4.6 からも分かるように最も 反応率が大きい高さである。仮に反応率の高い場所での R/C 比が低く、反応率の低い場所での R/C が高ければ、シリコンインゴットを上下にスルーさせることにより最終的な R/C 比を 1 に近づけることは可能である。しかし表 4.3 より、ほとんどの高さで R/C 比が 1.1 以上であることより、シリコンインゴットをスルーさせても R/C 比の改善は期待出来ない。この計算では、シリコンインゴットの底面がフラックスのピーク位置の高さになった場合の計算であるが、仮にこの高さ以外の位置で R/C 比が良い場所があったとしても、反応率はかなり低いと推測される。この場合、スルー時にその高さにおける照射時間を長くして、他の高さでは短時間でスルーさせることにより、R/C 比の良い結果が得られる可能性があるが、それは大部分の中性子束を無駄にしていることになり、現実的ではない。以上のことより、均一な反応率分布を得るには、照射筒の位置のみの変更では厳しく、シリコンの周りにフィルター等の設置をする必要があると言える。

本章の結果より、シリコン照射筒は炉心に近い位置で設置するほど R/C 比が良くなることが分かったが、炉心に最も近づけた場合でも R/C 比は 1.1 以上となることが分かった。そこで、次章では熱中性子フィルターを用いた体系を検討する。次章以降の計算では、シリコン照射筒の径方向の設置位置として、炉心に接した位置(重水間隔=0cm)での条件で進めることにする。重水間隔が 0cm であると、ドーピング反応量及び R/C 比にとっては最も良い条件であるが、炉心に近いことにより高速中性子による照射欠陥及び不純物生成が問題となると考えられる。今後、そのような高速中性子による影響について検討する必要がある(Appendix-B参照)。

5 熱中性子フィルターの検討

5.1 概要

第4章において、シリコン照射筒の設置位置を検討したが、どの照射位置においても均一なドーピングを行うことは難しいことが分かった。本章では、径方向に均一なドーピング反応率を得るためにシリコンインゴットの周りに熱中性子フィルターを取り付けた場合について検討する。熱中性子フィルターは熱中性子の吸収断面積の大きな物質からなり、その基本的な原理は、熱中性子を吸収させることによりシリコン表面近傍での反応率を低下させ、かつ、熱外中性子の割合を増加させることにより中心部に到達する中性子の割合を増加させ、径方向に均一な反応率分布を得ることである。熱中性子フィルターを用いることにより、ドーピング反応率自体は低下する。仮に熱中性子フィルターを用いない場合に比べてドーピング反応率自体は低下する。仮に熱中性子フィルターを用いることにより反応率分布が均一になったとしても、反応率の低下が大きければ照射ロスが大きくなる。

本検討において、シリコン照射筒にフィルター物質を取り付ける方法も考えられるが次のような理由により、適していないと考えられる。

- ・ シリコン照射筒にフィルター物質を取り付けると、フィルター物質とシリコン内の水領域が増加する。そのため、フィルターにより熱外中性子の割合が増えたにもかかわらず、増加した水領域を通過することにより熱化され、結果的に熱外中性子の割合が減少する(つまり、フィルターの効果が小さくなる)。
- ・ 照射筒にフィルター物質を取り付ける場合、スルー法(第6章参照)で照射する領域すべてに フィルターを取り付ける必要があり、シリコンに入射する中性子数が減り照射ロスが大きく なる。

本章では、熱中性子吸収材として用いる物質としては、熱中性子吸収断面積が大きいホウ素及びチタンを選択した。ホウ素についてはアルミニウムに混入させた材料を熱中性子フィルターとして用いることにした。ホウ素はアルミニウムの原子数密度に対して約1%前後の原子数密度で混入させた。チタンについては、金属チタンを熱中性子フィルターとして用いることとした。

熱中性子フィルターの配置を次の図5.1に示す。

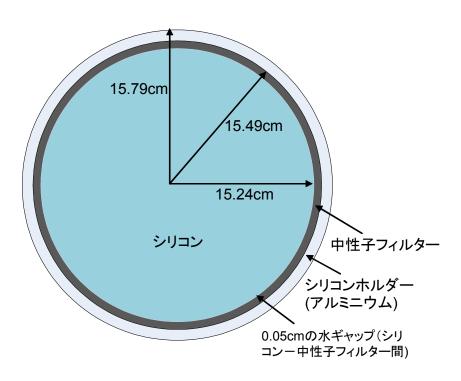


図 5.1 シリコン及び熱中性子フィルター断面図

熱中性子フィルターは図 5.1 に示すようにシリコンホルダー(0.05cm 厚)の内側に取り付ける。 熱中性子フィルターの厚さは 2mm である。なお、熱中性子フィルターはシリコンの外周方向にの み取り付けており、シリコン上面及び底面には取り付けていない。

熱中性子フィルターはシリコン外周部の全周に取り付けている。炉心の反対側からシリコンに 入射される中性子のエネルギーは、炉心側から入射する中性子より低いため、炉心と反対側の熱 中性子フィルターの必要性は低いと考えられる。しかし、シリコン照射はアルミホルダーを回転 させながら行うため、半周(炉心側だけ)熱中性子フィルターを取り付けるようにするのは難し い。仮にそのような機構を取り付けたとしても、径方向の厚みが増すことによる水領域の増加、 及びフィルターとシリコン間に比較的大きな間隔が生じることにより、中性子吸収及び熱化の影響が考えられるため、現実的ではないと考えられる。なお、本章の後半で、仮想的にフィルター を半周とした場合について取り上げる。

5.2 ホウ素フィルター

熱中性子フィルターとして 0.5%ホウ素フィルター(アルミニウムに 0.5%の原子数密度に相当する天然ホウ素を混入した物質)、1.0%ホウ素フィルター、2.0%ホウ素フィルター、3.0%ホウ素フィルターを用いた場合における中性子東分布、ドーピング反応率分布、R/C 比の結果を図 $5.2\sim5.9$ 及び表 $5.1\sim5.4$ に示す。また、参考のため、熱中性子フィルターをアルミニウムに置き換えた場合の結果についても図 $5.10\sim5.11$ 及び表 5.5 に示す(図 5.11 は図 4.7 と同じ内容で、表 5.5 は表 4.3 と同じ内容)。

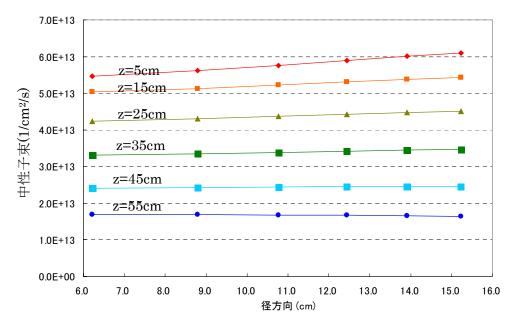


図 5.2 0.5%ホウ素フィルターを用いた場合の中性子東分布

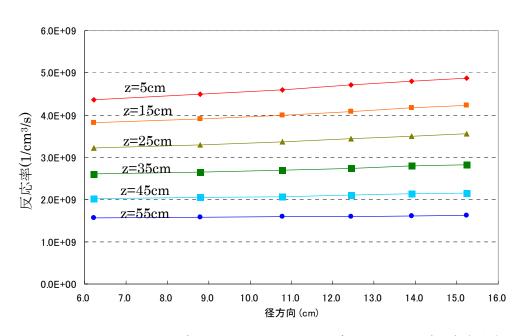


図 5.3 0.5% ホウ素フィルターを用いた場合のドーピング反応率分布

表 5.1 0.5% ホウ素フィルターを用いた場合の R/C 比

_		径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2	
	55	1.000	1.008	1.013	1.021	1.030	1.031	
	45	1.000	1.014	1.026	1.041	1.056	1.068	
高さ方向	35	1.000	1.019	1.037	1.055	1.075	1.089	
(cm)	25	1.000	1.023	1.047	1.069	1.090	1.106	
	15	1.000	1.023	1.046	1.069	1.090	1.105	
	5	1.000	1.030	1.053	1.078	1.101	1.117	

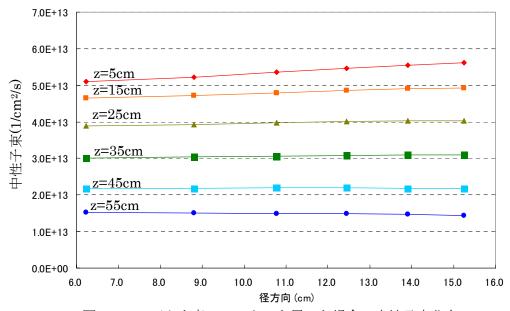


図 5.4 1.0% ホウ素フィルターを用いた場合の中性子東分布

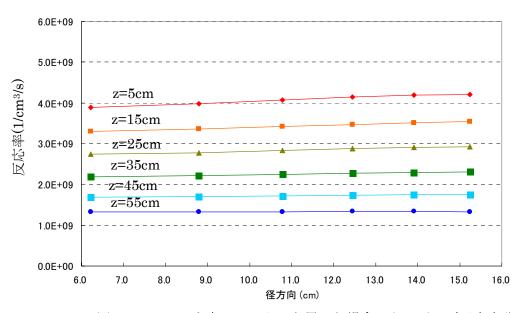


図 5.5 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合のドーピング反応率分布

表 5.2	1.0%中性子フィルターを用いた場合の R/C 比

_			径方向(cm)							
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	1.000	0.999	1.001	1.005	1.005	0.997			
	45	1.000	1.014	1.024	1.032	1.041	1.042			
高さ方向	35	1.000	1.019	1.032	1.045	1.055	1.060			
(cm)	25	1.000	1.014	1.035	1.051	1.062	1.068			
	15	1.000	1.019	1.035	1.052	1.065	1.073			
	5	1.000	1.023	1.046	1.064	1.076	1.082			

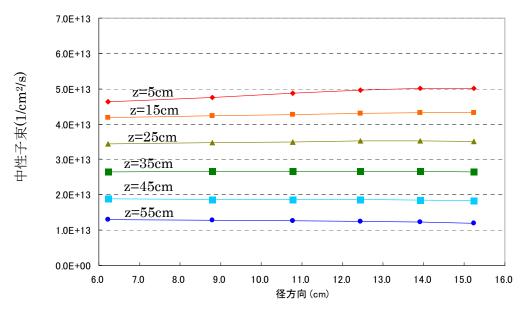


図 5.6 2.0%ホウ素フィルターを用いた場合の中性子東分布

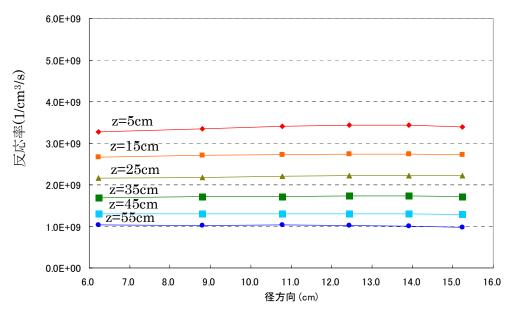


図 5.7 2.0%ホウ素フィルターを用いた場合のドーピング反応率分布

表 5.3 2.0%ホウ素フィルターを用いた場合の R/C 比

			径万回(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	1.000	0.993	0.994	0.987	0.974	0.947		
	45	1.000	1.000	0.999	1.005	1.001	0.993		
高さ方向	35	1.000	1.011	1.016	1.022	1.025	1.017		
(cm)	25	1.000	1.012	1.022	1.030	1.033	1.028		
	15	1.000	1.016	1.022	1.029	1.029	1.020		
	5	1.000	1.021	1.040	1.049	1.048	1.033		

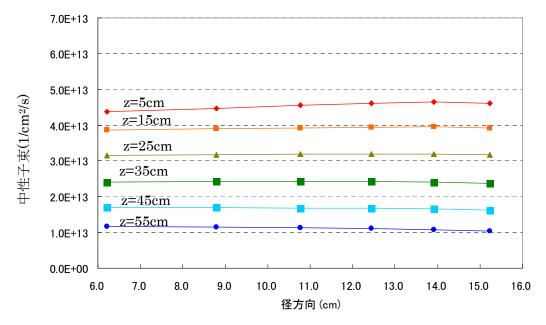


図 5.8 3.0%ホウ素フィルターを用いた場合の中性子東分布

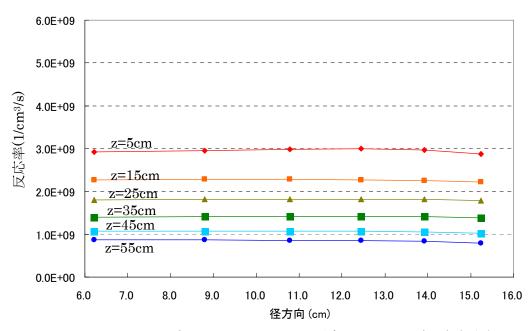


図 5.9 3.0%ホウ素フィルターを用いた場合のドーピング反応率分布

表 5.4 3.0% ホウ素フィルターを用いた場合の R/C 比

_		径方向(cm)						
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2	
	55	1.000	0.996	0.986	0.979	0.956	0.918	
	45	1.000	1.000	1.002	0.999	0.985	0.963	
高さ方向	35	1.000	1.004	1.005	1.006	1.005	0.986	
(cm)	25	1.000	1.005	1.008	1.010	1.007	0.992	
	15	1.000	1.008	1.007	1.003	0.995	0.980	
	5	1.000	1.013	1.024	1.029	1.018	0.986	

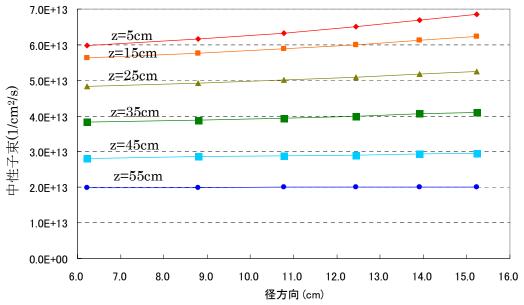


図 5.10 熱中性子フィルターを用いない場合の中性子東分布

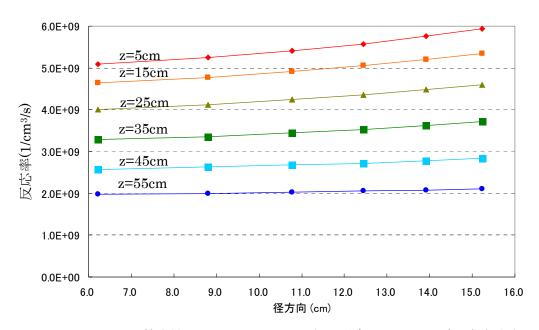


図 5.11 熱中性子フィルターを用いない場合のドーピング反応率分布

表 5.5 熱中性子フィルターを用いない場合の R/C 比

		径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
高さ方向 (cm)	55	1.000	1.013	1.028	1.043	1.054	1.070		
	45	1.000	1.026	1.046	1.061	1.087	1.110		
	35	1.000	1.021	1.047	1.074	1.103	1.128		
	25	1.000	1.027	1.058	1.086	1.116	1.148		
	15	1.000	1.030	1.059	1.090	1.120	1.153		
	5	1.000	1.032	1.062	1.094	1.130	1.165		

熱中性子フィルターを用いない場合の R/C 比は表 5.5 の通りであるが、ホウ素フィルターを用いることにより R/C 比が改善していることが分かる。しかし、0.5%ホウ素フィルターではフィルターの効果が弱く、一部 R/C 比が 1.1 を超えている。1.0%、2.0%、3.0%とホウ素の濃度が高くなるにつれて、R/C 比の最大値は低下しているが、濃度が高いと逆にシリコン表面でのひずみが大きくなっており、R/C 比が 0.9 に近くなっている。また、3.0%ホウ素フィルターを用いた場合のドーピング反応率は 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合に比べて約 34%低下する。これらのことから、ホウ素フィルターの濃度としては 1%程度が最適であると考えられる。

これまでの計算ではホウ素フィルターは全周に取り付けている体系であったが、次にホウ素フィルターが片面であった場合の反応率分布を求める(濃度は 2%)。次の図 5.12 に示すように、ホウ素フィルターを前面(炉心側)と後面(炉心と反対側)に分割し、前面のみにホウ素フィルターを取り付ける。後面はシリコンホルダーと同じアルミニウムである。なお、シリコン照射筒は 45度の直線状に設置しているが、前面と後面のフィルターの境は、その直線と垂直に交わる直線(照射筒中心を通る)である。なお、現実的にはホルダーはシリコンと同様に回転するため、このような機構の熱中性子フィルターを取り付けることは出来ない。ここではフィルターを半周に取り付けた場合の効果を見るために、このような体系を仮定して計算を行った。半周フィルターを用いた場合の、ドーピング反応率分布の結果を図 5.13 に、R/C 比の結果を表 5.6 に示す。

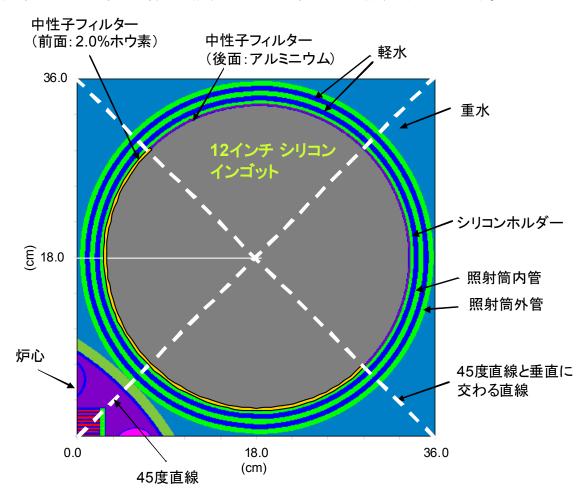


図 5.12 半周フィルターの設置場所

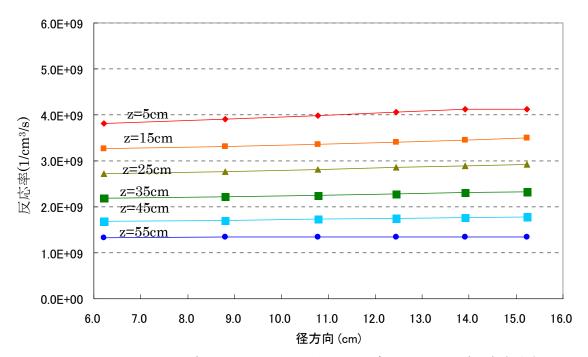


図 5.13 2.0%ホウ素半周フィルターを用いた場合のドーピング反応率分布

		径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
高さ方向 (cm)	55	1.000	1.009	1.015	1.020	1.020	1.017		
	45	1.000	1.017	1.031	1.043	1.051	1.058		
	35	1.000	1.018	1.031	1.047	1.060	1.069		
	25	1.000	1.018	1.037	1.053	1.066	1.075		
	15	1.000	1.014	1.031	1.045	1.058	1.070		
	5	1.000	1.024	1.045	1.066	1.080	1.082		

表 5.6 2.0% ホウ素半周フィルターを用いた場合の R/C 比

2.0%ホウ素半周フィルターの結果(表 4.6)と、2.0%ホウ素(全周)フィルターの結果(表 5.3)とを比較すると、半周フィルターより全周フィルターの方が R/C 比が良いことが分かる。一方、半周フィルターを用いると全周フィルターを使用するより、ドーピング反応率は 20%程度増加している。半周フィルターによりドーピング反応率分布が悪くなったのは、シリコン後面から入ってくる中性子がフィルタリングされなくなったことにより熱中性子割合が増加し、シリコン外周部でのドーピング反応率が増加したためと考えられる。シリコン後面(炉心と反対側)から入ってくる中性子の影響については、第6章で再度取り上げる。なお、半周フィルターと 1.0%ホウ素(全周)フィルター(表 5.2)と比べると、ドーピング反応率及び R/C 比は同等であることが分かる。

ここで検討した半周フィルターは理想形状である。現実的な半周フィルターはフィルターを固定する必要があり、水ギャップが増加することから、フィルターとしての性能は理想形状より大きく低下すると考えられる。2.0%ホウ素半周フィルターと1.0%ホウ素(全周)フィルターでは同等の効果が得られたことより、半周フィルターを用いる利点は少ないと考えられる。

5.3 チタンフィルター

フィルター材質としてチタンを用いた結果を次の図 5.14~15、表 5.7~8 に示す。フィルター材質として純チタンを用いる利点としては、アルミニウムにホウ素を混入させた材質を使用するホウ素フィルターに比べて、材質の均一性が高いことである。

ホウ素のマクロ吸収断面積(原子数密度=アルミの原子数密度に対して 1%)は約 0.47(1/cm)であるのに対して、チタンのマクロ吸収断面積は約 0.33(1/cm)である。このことより、厚さ 3mm程度のチタンフィルターは、厚さ 2mm の 1%ホウ素フィルターと同等の効果を持つと推測される。そこで、本節では 2mm のチタンフィルター(全周)及び、3mm のチタンフィルター(全周)の反応率分布の計算を行った。

チタンはアルミニウムに比べて強度が強い。そこで、チタンを熱中性子フィルターとしてのみ用いるのではなく、シリコンホルダー自体をチタンで作成することも考えられる。シリコンホルダーをチタンとした場合の計算結果を図 5.16 及び表 5.9 に示す。

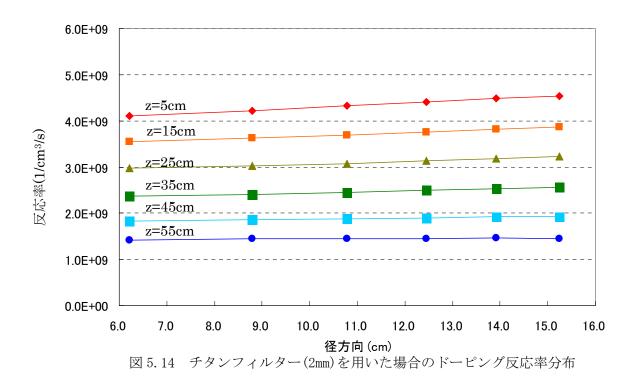


表 5.7 チタンフィルター(2mm)を用いた場合の R/C 比

_			径方向(cm)							
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	1.000	1.013	1.017	1.022	1.024	1.021			
	45	1.000	1.017	1.030	1.041	1.052	1.058			
高さ方向	35	1.000	1.017	1.037	1.056	1.068	1.080			
(cm)	25	1.000	1.017	1.036	1.053	1.070	1.085			
	15	1.000	1.019	1.039	1.058	1.074	1.088			
	5	1.000	1.026	1.052	1.074	1.092	1.102			

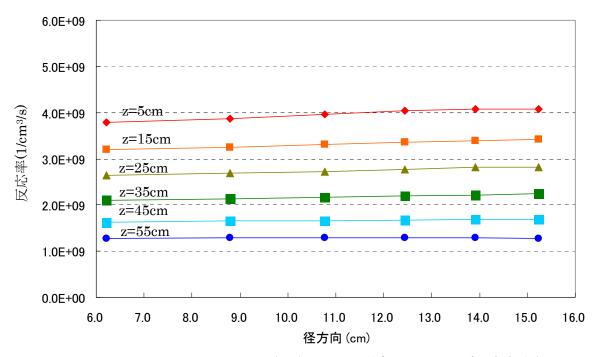


図 5.15 チタンフィルター(3mm)を用いた場合のドーピング反応率分布

表 5.8 チタンフィルター(3mm)を用いた場合の R/C 比

			径方向(cm)							
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	1.000	1.007	1.009	1.011	1.009	0.995			
	45	1.000	1.015	1.020	1.026	1.036	1.038			
高さ方向	35	1.000	1.013	1.027	1.039	1.053	1.061			
(cm)	25	1.000	1.018	1.031	1.048	1.063	1.068			
	15	1.000	1.016	1.034	1.049	1.063	1.070			
	5	1.000	1.023	1.047	1.067	1.076	1.077			

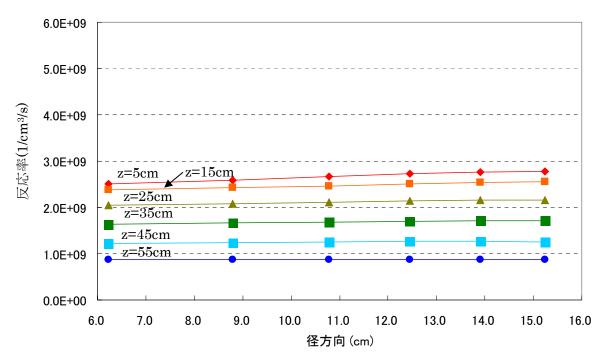


図 5.16 チタンホルダーを用いた場合のドーピング反応率分布

表 5.9 チタンホルダーを用いた場合の R/C 比

_			径方向(cm)						
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	1.000	1.002	1.008	1.009	1.005	0.996		
	45	1.000	1.011	1.016	1.028	1.031	1.022		
高さ方向	35	1.000	1.017	1.032	1.041	1.050	1.048		
(cm)	25	1.000	1.019	1.032	1.048	1.055	1.058		
	15	1.000	1.020	1.038	1.057	1.070	1.076		
	5	1.000	1.032	1.063	1.090	1.102	1.111		

図 5.14~16 の結果より、2mm チタンフィルターでは R/C 比は 1.1 を超えている箇所が存在するが、3mm チタンフィルターでは R/C 比は 1.1 未満となっていることが分かる。1%ホウ素フィルター(図 5.5 参照)と 3mm チタンフィルターでは同等の反応率、反応率分布となっていることが分かる。しかし、コスト的にはチタンフィルターを用いるよりホウ素フィルターを用いる方が有利である。本報告書では、今後、フィルター材質としてホウ素を用いた場合について検討を行う。

5.4 フィルター有無によるエネルギースペクトル変化

1%ホウ素フィルターを用いた場合のスペクトルの変化について記す。熱中性子フィルター無しの場合と有りの場合とを比較した。図 5.17 にスペクトルを求めたタリー領域を示す。図のようにタリーはシリコン前部と後部の対象となる位置に設置した。本来ならポイント領域で計算を行いたいが、統計誤差の問題からタリー領域は半径 0.1cm、高さ 10cm の円柱とした。このタリー領域について、シリコン底面(z=5cm)、中部(z=25cm)、上部(z=55cm)の高さにおける結果を図 5.18~20 に示す。

図 5.18~20 の結果より、熱中性子以外のエネルギーでは熱中性子フィルターの有無による有意な差はないことが分かる。最も中性子東が高い z=5cm の領域では、前面(front)と後面(rear)の差が大きいが、他の領域では前面と後面では大きな差は出ていない。中性子流入経路については次の第 6 章で述べる。

上記では、シリコン表面部での微小領域でのスペクトルの結果を示したが、図 $5.21\sim26$ に、それぞれの高さ (z=5,15,25,35,45,55cm) における、中心部 (r=6.2cm) と外周部 (r=15.2cm) のエネルギースペクトルを示す。図 5.21(z=5cm) では、すべてのエネルギー領域で外周部の方が中心部より中性子東が高いが、図 5.26(z=55cm) では逆に中心部の方が高いことが分かる。これは z=5cm では高さ方向の中性子東のピーク位置であるため、水平方向からの中性子の流入が多いためであり、z=55cm では水平方向より高さ (軸) 方向からの中性子の流入が多いためであると考えられる。z=55cm で水平方向からの中性子の流入が少ない理由は、その位置は炉心から離れており中性子が十分に減速されるため、熱中性子フィルターに吸収される中性子が多いためであると考えられる。

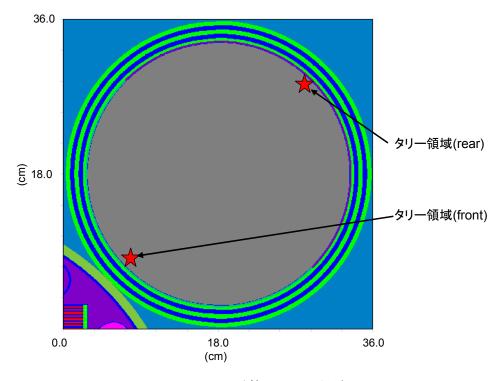


図 5.17 スペクトル計算のタリー領域

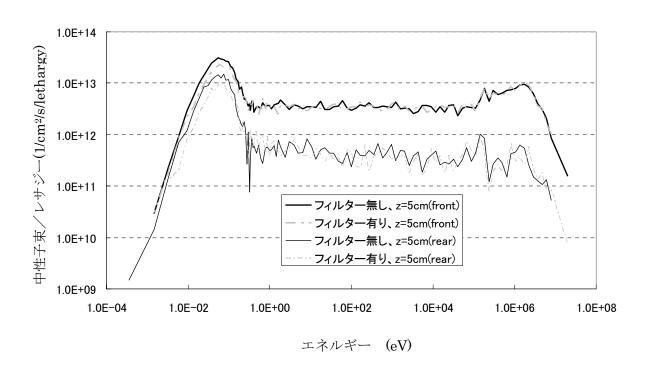


図 5.18 z=5cm におけるスペクトル計算結果

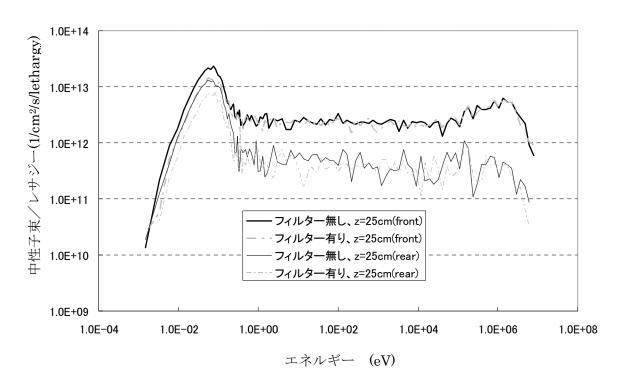


図 5.19 z=25cm におけるスペクトル計算結果

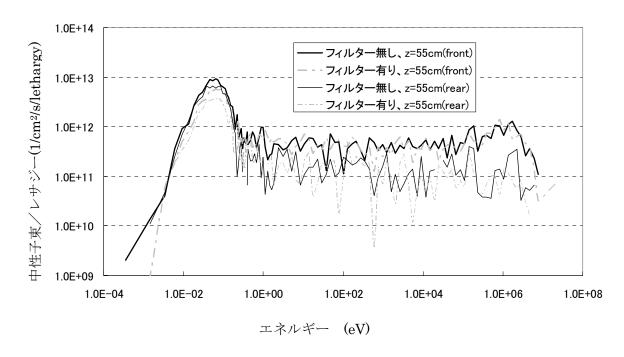


図 5.20 z=55cm におけるスペクトル計算結果

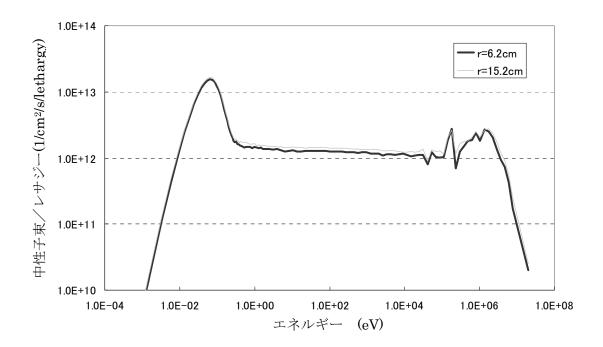


図 5.21 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合のエネルギースペクトル(z=5cm)

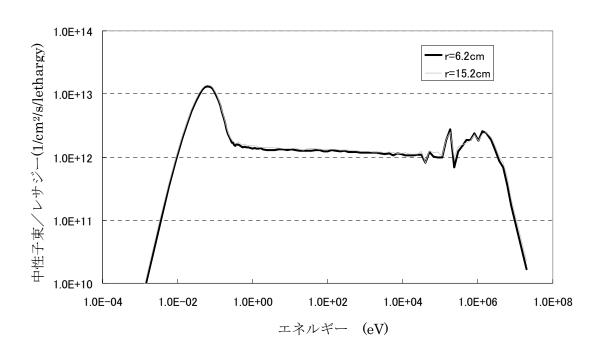


図5.22 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合のエネルギースペクトル(z=15cm)

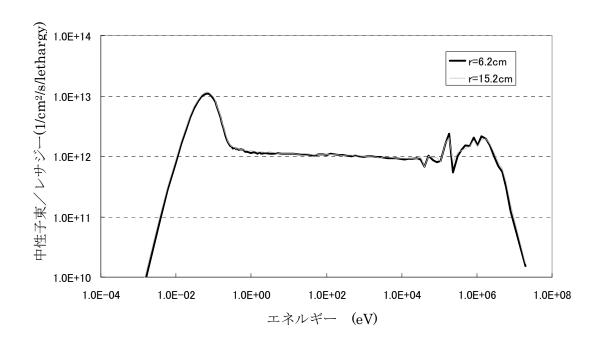


図 5.23 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合のエネルギースペクトル(z=25cm)

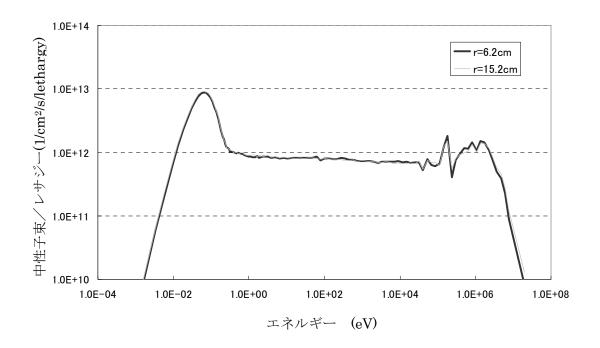


図 5.24 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合のエネルギースペクトル(z=35cm)

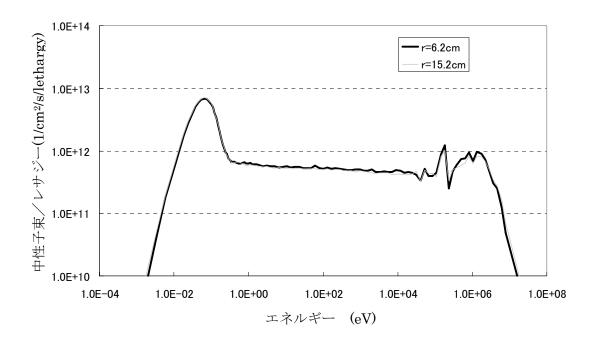


図 5.25 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合のエネルギースペクトル(z=45cm)

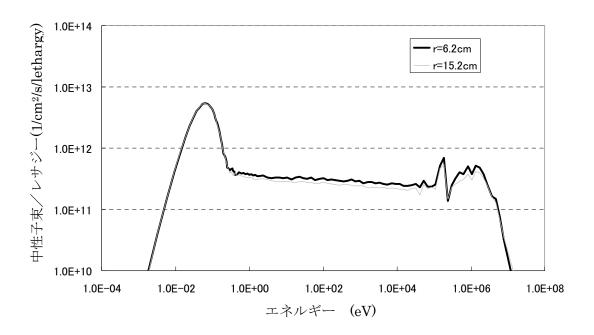


図 5.26 1.0%ホウ素フィルターを用いた場合のエネルギースペクトル(z=55cm)

6 中性子スペーサー及び中性子流入経路の解析

6.1 概要

第4章、第5章におけるドーピング反応率分布の解析においては、シリコンインゴットの上下に5cmのシリコンスペーサーを設定したモデルを用いていた。本章では、そのスペーサーの効果の検討、及びある領域におけるドーピング反応が、どの領域を通過してきた中性子によるものか調べることにより、シリコン内への中性子流入経路の検討を行った。計算ではMVPの機能の一つであるMARKER REGION機能を用いて中性子流入経路を調べた。

本章で用いるシリコン周辺部のモデルを図6.1に示す。

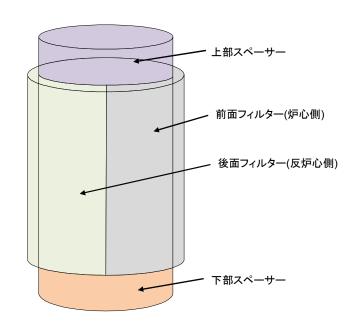


図 6.1 シリコンインゴット、中性子フィルター及びスペーサー

図 6.1 において、上部スペーサーと下部スペーサーの間にシリコンインゴットが存在する。第5章までは上部・下部スペーサー材質として高さ5cmのシリコンを用いていたが、本章ではスペーサー材質について、高さ及び材質を変えてその影響を調べた。MVPの MARKER REGION機能を用いると、求める反応量について、指定した領域を通過した中性子よる反応と、それ以外の領域を通過した中性子による反応を求めることが出来る。指定する領域として、図 6.1 において、前面フィルター、後面フィルター、上部スペーサー、下部スペーサーの4領域を指定する。36 個のシリコンインゴットのタリー領域(図 4.4, 4.5 参照) におけるドーピング反応率計算において、MARKER REGIONで指定した4領域それぞれの寄与率を計算で求めることにより、中性子流入経路を調べる。なお、前面フィルターと後面フィルターはMARKER REGIONとしては区別したが、物質組成としては同じである(同じく、上部フィルターと下部フィルターも同物質となる)。

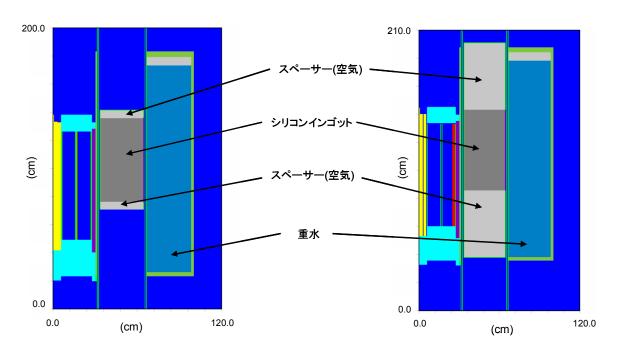


図 6.2 スペーサーとして空気を用いた場合の炉心垂直断面図(左図:スペーサー高さ 5cm、右図:スペーサー高さ 50cm)

本章で計算したスペーサー物質及び厚さは、シリコン(5cm)、シリコン(3cm)、スペーサーなし、空気(5cm)、空気(50cm)及び厚さ0cmの完全吸収体である。更にフィルターに完全吸収体を用いた場合(スペーサーとしては5cmのシリコンスペーサー)の、中性子流入経路についても求めた。これらのスペーサーを用いた場合の計算結果を次に記す。それぞれのスペーサー物質に対応する図、表番号は次の通りである。

・5cm シリコンスペーサー: 図 6.3、表 6.1~6
・3cm シリコンスペーサー: 図 6.4、表 6.7~12
・スペーサーなし: 図 6.5、表 6.13~18
・5cm 空気スペーサー: 図 6.6、表 6.19~24
・50cm 空気スペーサー: 図 6.7、表 6.25~30
・完全吸収体スペーサー: 図 6.8、表 6.31~34
・完全吸収体フィルター: 図 6.9、表 6.35~38

なお、スペーサーなしのモデルでは、微小厚(1mm)のシリコンスペーサーを配置することにより、MARKER REGIONにより上下スペーサーから流入する中性子の影響を求めている。

完全吸収体スペーサーの場合、上下スペーサー領域を通過した中性子によるドーピング反応は起きないため、それらの領域からの結果は省略している(値は0となるため)。同様に、完全吸収体フィルターの場合は前後フィルターを通過した中性子によるドーピング反応は起きないため、結果は省略している。

6.2 シリコンスペーサー

スペーサーとして高さ 5cm のシリコンを用いた場合の計算結果(ドーピング反応率分布及び R/C 比)を示す。

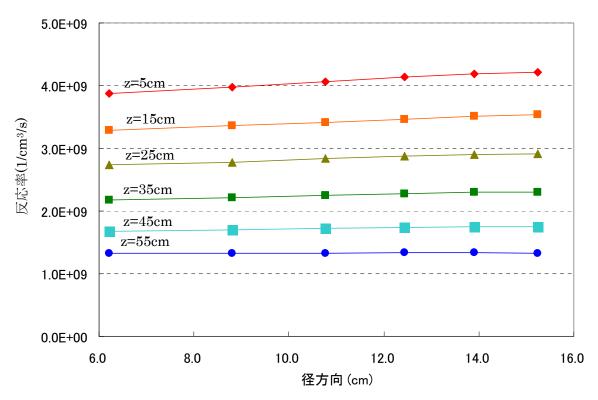


図 6.3 高さ 5cm のシリコンスペーサーを用いた場合のドーピング反応率分布

表 6.1 高さ 5cm のシリコンスペーサーを用いた場合の R/C 比

				径方向	可(cm)		
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2
	55	1.000	1.000	1.002	1.006	1.005	0.999
	45	1.000	1.013	1.022	1.033	1.042	1.042
高さ方向	35	1.000	1.020	1.034	1.047	1.056	1.061
(cm)	25	1.000	1.014	1.036	1.049	1.061	1.065
	15	1.000	1.020	1.037	1.053	1.065	1.073
	5	1.000	1.025	1.047	1.066	1.079	1.085

スペーサーとして高さ 5cm のシリコンを用いた場合の計算結果(中性子流入経路)の計算結果を示す

表 6.2 (前面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.83			
	45	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87			
高さ方向	35	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87			
(cm)	25	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86	0.87			
	15	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84			
	5	0.70	0.70	0.71	0.72	0.74	0.76			

表 6.3 (後面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47	0.48			
	45	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47	0.47			
高さ方向	35	0.42	0.43	0.43	0.44	0.44	0.44			
(cm)	25	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.42			
	15	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.38			
	5	0.29	0.29	0.30	0.30	0.31	0.33			

表 6.4 (上面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)							
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	0.43	0.42	0.41	0.40	0.38	0.36			
	45	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12			
高さ方向	35	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04			
(cm)	25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01			
	15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

表 6.5 (下面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05		
	45	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07		
高さ方向	35	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10		
(cm)	25	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15		
	15	0.34	0.32	0.30	0.29	0.27	0.26		
	5	0.61	0.60	0.58	0.56	0.53	0.49		

表 6.6 それぞれのドーピング反応率(前面、後面、上面、下面から)の合計割合

_			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	1.76	1.75	1.74	1.73	1.73	1.72			
	45	1.54	1.53	1.53	1.52	1.52	1.52			
高さ方向	35	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.45			
(cm)	25	1.46	1.45	1.46	1.45	1.45	1.45			
	15	1.50	1.50	1.50	1.50	1.49	1.49			
	5	1.61	1.60	1.59	1.58	1.58	1.59			

スペーサーとして高さ3cmのシリコンを用いた場合の計算結果(ドーピング反応率分布及びR/C比)を示す。

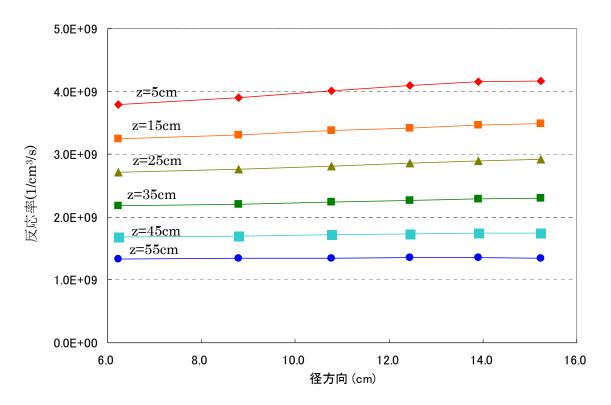


図 6.4 高さ 3cm のシリコンスペーサーを用いた場合のドーピング反応率分布

表 6.7 高さ 3cm のシリコンスペーサーを用いた場合の R/C 比

				径方向	可(cm)		
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2
	55	1.000	1.010	1.015	1.017	1.021	1.010
	45	1.000	1.008	1.019	1.028	1.033	1.032
高さ方向	35	1.000	1.011	1.026	1.038	1.052	1.057
(cm)	25	1.000	1.019	1.038	1.054	1.067	1.077
	15	1.000	1.019	1.040	1.053	1.067	1.074
	5	1.000	1.030	1.057	1.078	1.094	1.100

スペーサーとして高さ3cmのシリコンを用いた場合の計算結果(中性子流入経路)を示す。

表 6.8 (前面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84		
	45	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87		
高さ方向	35	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.88		
(cm)	25	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87		
	15	0.82	0.83	0.83	0.84	0.85	0.85		
	5	0.74	0.74	0.74	0.75	0.76	0.78		

表 6.9 (後面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	0.45	0.46	0.46	0.46	0.47	0.48			
	45	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47	0.47			
高さ方向	35	0.43	0.43	0.43	0.44	0.44	0.45			
(cm)	25	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.42			
	15	0.35	0.36	0.36	0.37	0.38	0.38			
	5	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.32			

表 6.10 (上面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.44	0.43	0.42	0.40	0.39	0.36		
	45	0.15	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12		
高さ方向	35	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04		
(cm)	25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		
	15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

表 6.11 (下面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		
	45	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06		
高さ方向	35	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09		
(cm)	25	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14		
	15	0.33	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25		
	5	0.60	0.58	0.57	0.54	0.52	0.48		

表 6.12 それぞれのドーピング反応率(前面、後面、上面、下面から)の合計割合

_			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	1.78	1.77	1.76	1.74	1.73	1.73		
	45	1.54	1.53	1.53	1.53	1.52	1.52		
高さ方向	35	1.46	1.46	1.45	1.45	1.45	1.45		
(cm)	25	1.46	1.46	1.45	1.45	1.45	1.45		
	15	1.51	1.50	1.50	1.49	1.49	1.49		
	5	1.64	1.62	1.61	1.60	1.59	1.59		

6.3 スペーサーを用いない場合

スペーサーを用いない場合の計算結果(ドーピング反応率分布及び R/C 比)を示す。

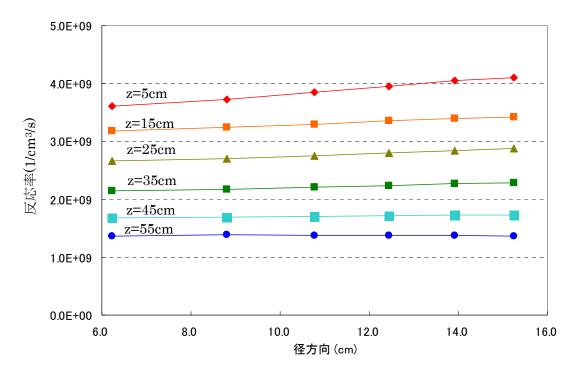


図 6.5 スペーサーを用いない場合のドーピング反応率分布

表 6.13 スペーサーを用いない場合の R/C 比

_				径方向	可(cm)		
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2
	55	1.000	1.011	1.007	1.005	1.003	0.994
	45	1.000	1.008	1.015	1.025	1.034	1.033
高さ方向	35	1.000	1.016	1.031	1.044	1.059	1.065
(cm)	25	1.000	1.014	1.031	1.050	1.067	1.079
	15	1.000	1.020	1.039	1.059	1.071	1.077
	5	1.000	1.032	1.067	1.096	1.124	1.138

スペーサーなしの場合の計算結果(中性子流入経路)を示す。

表 6.14 (前面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.87	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85		
	45	0.87	0.87	0.88	0.87	0.88	0.88		
高さ方向	35	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88		
(cm)	25	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88		
	15	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87		
	5	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82		

表 6.15 (後面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.45	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48		
	45	0.45	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47		
高さ方向	35	0.42	0.43	0.43	0.43	0.44	0.44		
(cm)	25	0.39	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41		
	15	0.36	0.36	0.36	0.37	0.37	0.38		
	5	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32		

表 6.16 (上面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	0.45	0.44	0.42	0.41	0.39	0.37			
	45	0.15	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12			
高さ方向	35	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04			
(cm)	25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02			
	15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

表 6.17 (下面から入射した中性子によるドーピング反応率)/ (全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04		
	45	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05		
高さ方向	35	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07		
(cm)	25	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12		
	15	0.29	0.28	0.26	0.24	0.23	0.22		
	5	0.56	0.55	0.53	0.51	0.48	0.44		

表 6.18 それぞれのドーピング反応率(前面、後面、上面、下面から)の合計割合

			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	1.81	1.80	1.78	1.77	1.75	1.73			
	45	1.54	1.53	1.52	1.52	1.51	1.51			
高さ方向	35	1.45	1.45	1.44	1.44	1.44	1.44			
(cm)	25	1.45	1.44	1.44	1.43	1.43	1.43			
	15	1.51	1.50	1.49	1.48	1.48	1.47			
	5	1.70	1.68	1.66	1.63	1.61	1.58			

6.4 空気スペーサー

スペーサーとして高さ 5 cm の空気を用いた場合の計算結果(ドーピング反応率分布及び R/C 比)を示す。

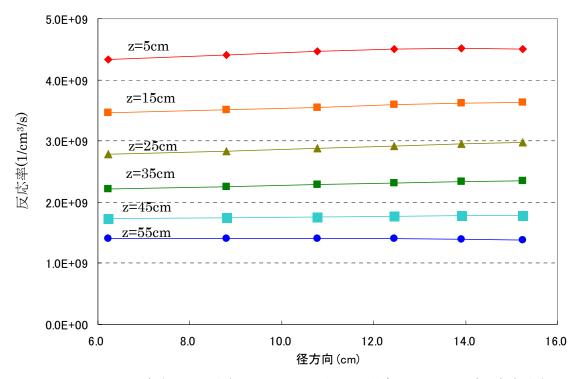


図 6.6 高さ 5cm の空気スペーサーを用いた場合のドーピング反応率分布

表 6.19 高さ 5cm の空気スペーサーを用いた場合の R/C 比

				径方向	可(cm)		
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2
	55	1.000	0.999	1.000	0.998	0.995	0.984
	45	1.000	1.004	1.016	1.024	1.030	1.027
高さ方向	35	1.000	1.013	1.030	1.041	1.051	1.056
(cm)	25	1.000	1.017	1.033	1.047	1.061	1.069
	15	1.000	1.012	1.023	1.036	1.044	1.048
	5	1.000	1.016	1.029	1.038	1.042	1.038

高さ 5cm の空気スペーサーを用いた場合の計算結果(中性子流入経路)を示す。 表 6.20 (前面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	0.81	0.80	0.81	0.81	0.82	0.82			
	45	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86			
高さ方向	35	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87			
(cm)	25	0.84	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86			
	15	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.83			
	5	0.67	0.67	0.68	0.70	0.71	0.74			

表 6.21 (後面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.44	0.45	0.45	0.46	0.47	0.48		
	45	0.45	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48		
高さ方向	35	0.43	0.44	0.44	0.45	0.45	0.45		
(cm)	25	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42	0.43		
	15	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.39		
	5	0.29	0.30	0.31	0.31	0.33	0.34		

表 6.22 (上面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.47	0.46	0.44	0.43	0.41	0.38		
	45	0.16	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12		
高さ方向	35	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04		
(cm)	25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		
	15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

表 6.23 (下面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05		
	45	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07		
高さ方向	35	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10		
(cm)	25	0.22	0.20	0.19	0.18	0.17	0.17		
	15	0.37	0.35	0.33	0.31	0.30	0.28		
	5	0.65	0.64	0.61	0.59	0.56	0.53		

表 6.24 それぞれのドーピング反応率(前面、後面、上面、下面から)の合計割合

			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	1.77	1.77	1.76	1.76	1.75	1.75			
	45	1.55	1.55	1.54	1.54	1.54	1.53			
高さ方向	35	1.48	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47			
(cm)	25	1.48	1.48	1.47	1.47	1.47	1.47			
	15	1.53	1.52	1.52	1.52	1.51	1.51			
	5	1.62	1.61	1.60	1.60	1.60	1.61			

スペーサーとして高さ50cmの空気を用いた場合の計算結果(ドーピング反応率分布及びR/C比)を示す。

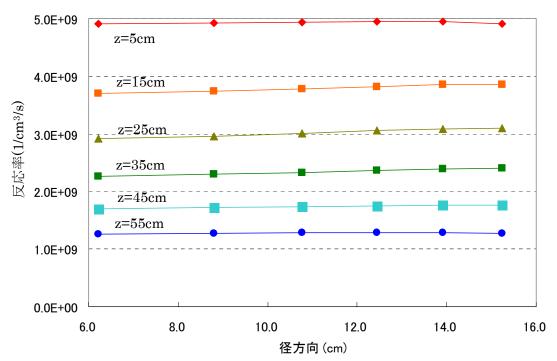


図 6.7 高さ 50cm の空気スペーサーを用いた場合のドーピング反応率分布

表 6.25 高さ 50cm の空気スペーサーを用いた場合の R/C 比

_				径方向	可(cm)		
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2
	55	1.000	1.017	1.020	1.019	1.020	1.013
	45	1.000	1.017	1.026	1.035	1.044	1.045
高さ方向	35	1.000	1.014	1.028	1.041	1.053	1.059
(cm)	25	1.000	1.013	1.028	1.044	1.054	1.059
	15	1.000	1.012	1.022	1.032	1.042	1.044
	5	1.000	1.002	1.006	1.008	1.009	1.000

高さ 50cm の空気スペーサーを用いた場合の計算結果(中性子流入経路)を示す。 表 6.26 (前面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.74	0.75	0.76	0.76	0.77	0.78		
	45	0.82	0.82	0.83	0.83	0.84	0.84		
高さ方向	35	0.82	0.83	0.83	0.84	0.84	0.85		
(cm)	25	0.79	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82		
	15	0.69	0.71	0.72	0.74	0.75	0.77		
	5	0.48	0.50	0.53	0.55	0.58	0.62		

表 6.27 (後面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47		
	45	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47	0.48		
高さ方向	35	0.44	0.44	0.45	0.45	0.45	0.46		
(cm)	25	0.41	0.42	0.42	0.43	0.43	0.44		
	15	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41		
	5	0.26	0.27	0.28	0.30	0.32	0.34		

表 6.28 (上面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)							
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2			
	55	0.39	0.38	0.37	0.35	0.34	0.31			
	45	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10			
高さ方向	35	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03			
(cm)	25	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			
	15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00			
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

表 6.29 (下面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08		
	45	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10		
高さ方向	35	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.14		
(cm)	25	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21		
	15	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.34		
	5	0.71	0.69	0.67	0.64	0.62	0.59		

表 6.30 それぞれのドーピング反応率(前面、後面、上面、下面から)の合計割合

_			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	1.65	1.64	1.65	1.65	1.65	1.65		
	45	1.52	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51		
高さ方向	35	1.48	1.48	1.48	1.48	1.47	1.48		
(cm)	25	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48		
	15	1.49	1.49	1.50	1.50	1.51	1.51		
	5	1.45	1.46	1.48	1.50	1.52	1.55		

6.5 完全吸収体スペーサー

スペーサーとして厚さ 0 cm の完全吸収体を使用した場合の計算結果(ドーピング反応率分布及び R/C 比)を示す。

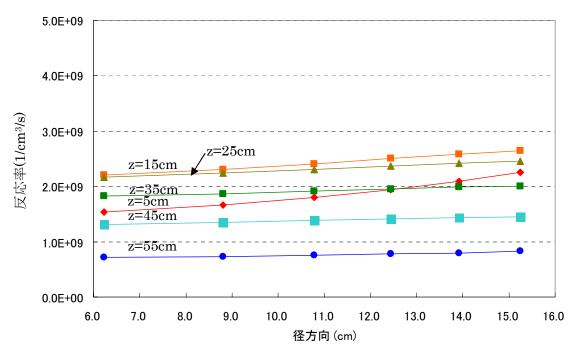


図 6.8 完全吸収体のスペーサーを用いた場合のドーピング反応率分布

表 6.31 完全吸収体スペーサーを用いた場合の R/C 比

				径方向	可(cm)		
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2
	55	1.000	1.025	1.055	1.086	1.116	1.158
	45	1.000	1.027	1.051	1.075	1.090	1.100
高さ方向	35	1.000	1.022	1.048	1.070	1.088	1.099
(cm)	25	1.000	1.034	1.065	1.093	1.116	1.136
	15	1.000	1.042	1.090	1.133	1.169	1.199
	5	1.000	1.081	1.168	1.255	1.357	1.466

完全吸収体スペーサーを用いた場合の計算結果(中性子流入経路)を示す。

表 6.32 (前面から入射した中性子によるドーピング反応率)/ (全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86		
	45	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87		
高さ方向	35	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88		
(cm)	25	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88		
	15	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88		
	5	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88		

表 6.33 (後面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.43	0.43	0.44	0.44	0.45	0.45		
	45	0.42	0.42	0.43	0.43	0.44	0.44		
高さ方向	35	0.40	0.40	0.41	0.41	0.41	0.42		
(cm)	25	0.37	0.38	0.38	0.38	0.39	0.39		
	15	0.35	0.34	0.34	0.35	0.35	0.35		
	5	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30		

表 6.34 それぞれのドーピング反応率(前面、後面から)の合計割合

			径方向(cm)					
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2	
	55	1.29	1.30	1.30	1.30	1.31	1.31	
	45	1.29	1.30	1.30	1.30	1.31	1.31	
高さ方向	35	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.30	
(cm)	25	1.26	1.26	1.26	1.27	1.27	1.27	
	15	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	
	5	1.20	1.19	1.19	1.19	1.18	1.18	

6.6 完全吸収体フィルター

フィルターとして完全吸収体を使用した場合の計算結果(ドーピング反応率分布及び R/C 比)を示す。

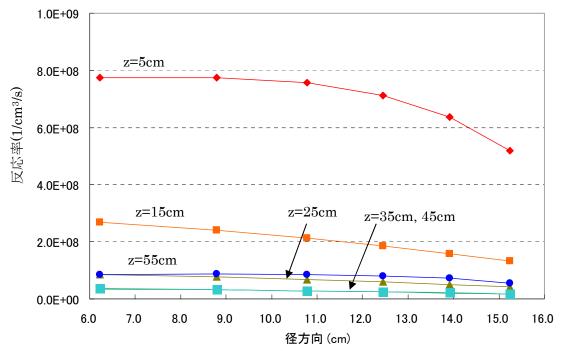


図 6.9 完全吸収体のフィルターを用いた場合のドーピング反応率分布

表 6.35 完全吸収体スペーサーを用いた場合の R/C 比

		径方向(cm)					
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2
	55	1.000	1.025	0.991	0.937	0.846	0.664
	45	1.000	0.877	0.767	0.672	0.596	0.510
高さ方向	35	1.000	0.892	0.786	0.668	0.564	0.485
(cm)	25	1.000	0.908	0.794	0.698	0.596	0.502
	15	1.000	0.899	0.795	0.688	0.590	0.497
	5	1.000	1.000	0.977	0.921	0.822	0.669

JAEA-Technology 2008-064

フィルターとして完全吸収体を用いた場合の計算結果(中性子流入経路)を示す。

表 6.36 (上面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97		
	45	0.76	0.78	0.76	0.75	0.75	0.74		
高さ方向	35	0.27	0.26	0.26	0.26	0.24	0.23		
(cm)	25	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04		
	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

表 6.37 (下面から入射した中性子によるドーピング反応率)/(全体のドーピング反応率)

_			径方向(cm)						
	/	6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04		
	45	0.24	0.23	0.24	0.26	0.26	0.27		
高さ方向	35	0.73	0.74	0.74	0.74	0.76	0.77		
(cm)	25	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96		
	15	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99		
	5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99		

表 6.38 それぞれのドーピング反応率(上面、下面から)の合計割合

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00		
	45	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00		
高さ方向	35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
(cm)	25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
	15	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
	5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99		

6.7 考察

スペーサーとして高さ 5cm と 3cm のシリコンを用いた場合及びスペーサーなしの結果(図 6.3~ 5)より、スペーサーなしよりスペーサーがあった方がドーピング反応率分布は良く、また、3cm スペーサーより 5cm スペーサーの方がドーピング反応率分布は良いことが分かる。これはスペー サーがないと、その分軽水領域が増加するため、軽水による中性子吸収効果が大きくなるためと 考えられる。表 5.6,12,18 から、それぞれの領域を通過した中性子によるドーピング反応率割 合の合計が1以上になっていることが分かる。これは、一度ある MARKER REGION を通過した中性 子が、その後別のMARKER REGIONを通過してシリコン内で反応を起こしているものと考えられる。 例えば、その割合が 1.5 だとすると、反応を起こさずにシリコン外に出た中性子の内半分の中性 子が再度シリコン内に戻り反応を起こしていることになる。5cm スペーサーの場合、上下スペー サーを通過した中性子による計算結果より、上面スペーサーを通過した中性子による反応はシリ コン下部(15cm 程度) ではほとんど反応していないことが分かる。一方、下面スペーサーを通過 した中性子による反応は、シリコン上面(55cm)でも全反応に対して5~6 %の割合で反応を起こ していることが分かる。これは下面スペーサーを通過する中性子は中性子束が高くエネルギーの 高い中性子も多いのに対して、上面スペーサーを通過する中性子は中性子束も低く、また十分に 熱化された中性子であるため、下部まで到達しないためであると考えられる。前面フィルター、 後面フィルターを通過した中性子による反応の計算結果(表 6.2, 3, 8, 9, 14,15)より、前面フ ィルターを通過した中性子による反応は径方向でほとんど変わりがないことが分かる。一方、後 面フィルターを通過した中性子による反応は中心部になるにつれて値が低下していることが分か る。フィルターにより熱中性子成分が低減されるが、後面フィルターを通過する中性子は前面フ ィルターを通過する中性子に比べて熱化しており、高速中性子の割合が少ないため中心部での反 応が少なくなったと考えられる。この後面フィルターを通過した中性子による反応が中心に向か うに従って低下することが、ドーピング反応率分布を悪くする主因だと推測する。一方、下面ス ペーサーを通過した中性子による反応は、前後面フィルターの場合とは逆に中心に向かうに従っ てドーピング反応率が増加している。この効果により、結果的に径方向のドーピング反応率分布 が改善されている。5cm スペーサー、3cm スペーサー、スペーサーなしの場合の下面スペーサーを 通過した中性子によるドーピング反応率の結果から、スペーサーが厚くなるほど下部スペーサー を通過した中性子によるドーピング反応率が増加している。

スペーサーとして高さ 5cm 及び 50cm の空気を用いた場合の計算結果(図 6.6~7)から、ドーピング反応率分布が良いことが分かる。両者ではドーピング反応率分布の均一性は同等であるが、50cm の方がよりドーピング反応率が高いことが分かる。空気のスペーサーを用いることにより、シリコンの水中重量を軽減できるメリットがある一方、炉心近くに大きなボイドが存在することになり炉心の安全解析を検討する必要がある。

スペーサーとして完全吸収体を用いた場合の計算結果(図 6.8、表 6.31~34)は、上下スペーサーを通過した中性子による影響を除外した条件での、前後面フィルターを通過した中性子による反応を示している。表 6.34 に前後面フィルターを通過した中性子によるドーピング反応率割合の合計を示しているが、この値が1以上となっていることが分かる。値が1以上ということは、前面フィルターを通過した中性子がシリコン及び後面フィルターを通過し、再度シリコン内に散乱して反応を起こしていることを示す。シリコン下部(約 1.2) より上部(約 1.3)の方が値は大きくなっているが、これはシリコン下部の方が上部に比べて中性子束が高いため、シリコン下部の前面フィルターを通過した中性子がシリコンを通過し再度シリコン上部の後面フィルターからの流

入がより多いことを示している。スペーサーとしてシリコン及び空気を使用した場合の、シリコン内でのドーピング反応率分布(図 6.3~図 6.7 参照)は、すべてシリコン下部が最も値が高く、その後、上になるに従って値は低くなっている。しかし、スペーサーとして完全吸収体を使用した場合のドーピング反応率分布(図 6.8)では、最も値が高くなっているのは z=15cm、25cm であり、下部(z=5cm)の結果は、下部スペーサーからの流入がないため低くなっている。z=5cm の結果は外周部から中心に向かうに従って大きく値が減少していることが分かる。z=5cm の領域はスペーサー有りのモデルではドーピング反応率分布が均一であったことより、この領域では下部スペーサーを通過した中性子による影響が大きいことが分かる。一方、シリコン上部(z=55cm)では下部ほどドーピング反応率分布の減少(外周部→中心)はないことから、シリコン上部では上部スペーサーの影響は大きくないことが分かる。

フィルターとして完全吸収体を用いた場合の計算結果(図 6.9、表 6.35~38)は、前記とは逆に、フィルターを通過した中性子による影響を除外した条件での、上下スペーサーを通過した中性子による反応を示している。表 6.38 より、上下スペーサーを通過した中性子によるドーピング反応率分布の合計はほぼ1となっていることが分かる。上部では値が1.01と少し1を超えているが、これは下部スペーサーを通過した中性子がシリコン上部に到達していること(表 6.37 参照)からも理解出来る。逆に上部スペーサーを通過した中性子はシリコン下部には到達していない(表 5.36 参照)ことより、下部におけるドーピング反応は下部スペーサーを通過した中性子のみによる反応となるため、下部におけるドーピング反応率分布の合計は1となっている。図 6.9 のドーピング反応率分布の結果より、下部(z=5cm)では図 6.8 とは逆に、外周部から中心部に向かうにつれて値が大きくなっていることが分かる。

以上のことから、シリコン内のドーピング反応率分布は外周方面(フィルター側)を通過した中性子による分布と、上下面(スペーサー)を通過した中性子による分布が逆になっているため、両者を合わせることにより分布が均一となっていると考えられる。シリコン下部ではその効果のみで分布は均一となるが、シリコン上部では上部スペーサーからの中性子の反応に加えて、下部スペーサーを通過した中性子による反応も加わる。外周方面(フィルター側)を通過した中性子によるドーピング反応率分布は、外周から中心部に向かうにつれて減少しているが、その減少している主な原因は後面フィルターを通過した中性子が十分に中心部に到達しないためと考えられる。

7 スルー方式の検討

7.1 概要

前章までのシリコン照射の計算では解析を容易にするために、シリコンインゴットの高さ位置を固定(重水タンク底面から $50 \, \mathrm{cm}$ の高さ) した条件で計算を実施してきた。原子炉でシリコン照射を行うと、必然的に軸方向の照射分布に差異が生じる。その差異を解消するために、世界の NTD を照射している原子炉では、(i) 照射途中で上下を反転させる方法、(ii) シリコンインゴットを縦方向にスルーさせる方法(以降、スルー方式と呼ぶ)、(iii) 軸方向の中性子束分布に従った厚さを持つ吸収材を設置する方法($^{(8)}$)、の $^{(3)}$ つの方法が主に用いられている。現在の JRR-3 では($^{(4)}$) の反転法が取り入れられている。原理的には($^{(i)}$) のスルー方式が中性子を最も効率的に利用し、かつ縦方向の均一性の良い照射が出来る。その一方、スルー方式は他の方法に比べて照射設備が大きくなる欠点がある。

本章ではスルー方式で12インチNTDシリコンを照射した場合の、反応率分布について調べた。 本章で用いた計算モデルは、下記の通りである。スルー方式の概略図を図7.1に示す。

- ・ シリコン照射筒と重水タンク内面の間隔:0cm
- ・ 熱中性子フィルター:1%ホウ素フィルター
- ・ シリコンスペーサー:5cm(上下とも)

スルー方式の検討を行うために、シリコンインゴットの高さ位置をパラメータとした計 9 ケースの計算を行った。高さ位置についてはシリコン底面 (以後、シリコン高さと称す) が-50cm, -30cm, -10cm, 10cm, 30cm, 50cm, 70cm, 90cm, 110cm の合計 9 通りとした。この高さであるとシリコンは燃料高さを通過することになる。シリコン高さが-50cm, 30cm, 110cm の場合のシリコン照射筒垂直断面図を図 7.2 に示す。

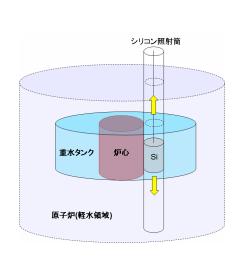


図 7.1 スルー方式外略図

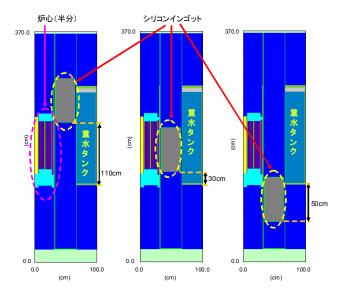


図 7.2 シリコン照射筒垂直断面図 (左からシリコン高さ=110cm, 30cm, -50cm)

7.2 計算結果

シリコン高さ-50cm~110cm(合計 9 通り) におけるドーピング反応率分布の結果を図 7.3~11 に示す。

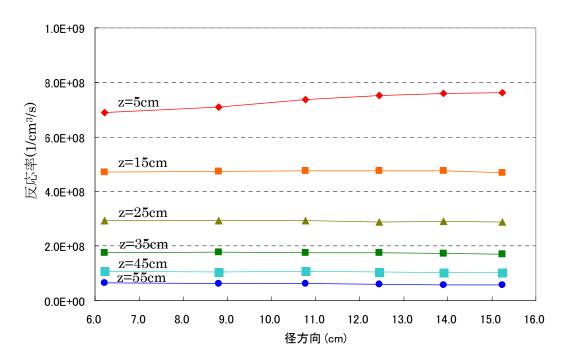


図 7.3 シリコン高さ=110cm におけるドーピング反応率分布

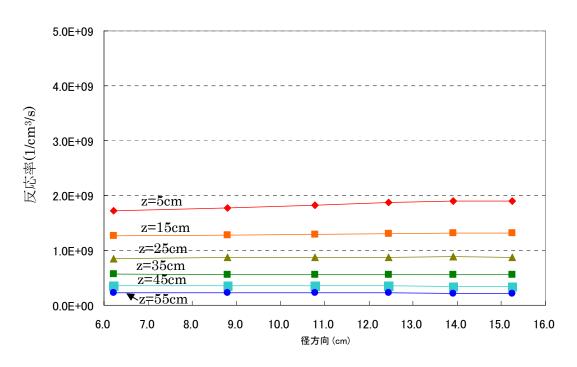


図 7.4 シリコン高さ=90cm におけるドーピング反応率分布

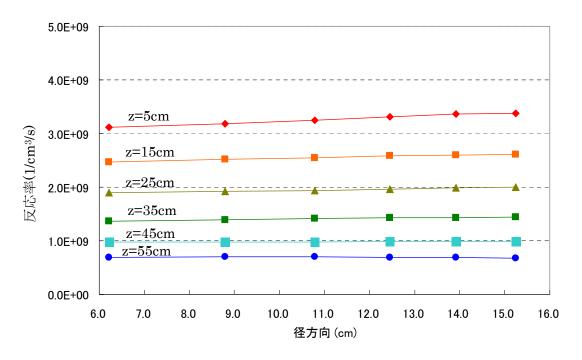


図 7.5 シリコン高さ=70cm におけるドーピング反応率分布

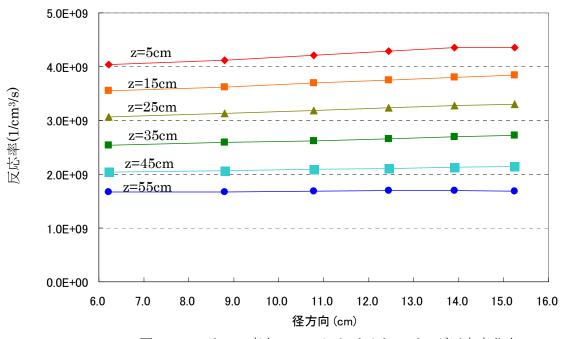


図 7.6 シリコン高さ=50cm におけるドーピング反応率分布

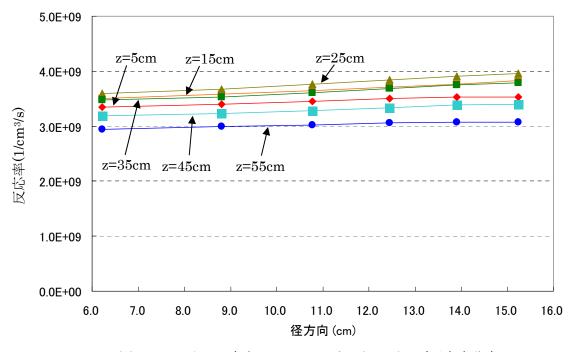


図7.7 シリコン高さ=30cmにおけるドーピング反応率分布

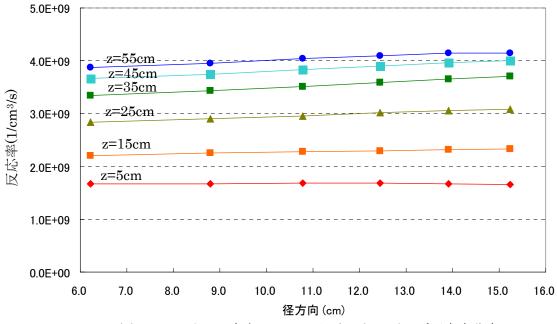


図 7.8 シリコン高さ=10cm におけるドーピング反応率分布

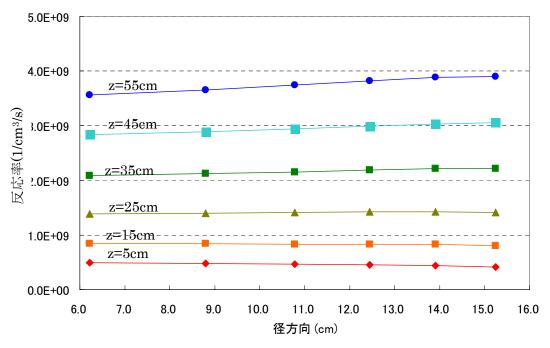


図 7.9 シリコン高さ=-10cm におけるドーピング反応率分布

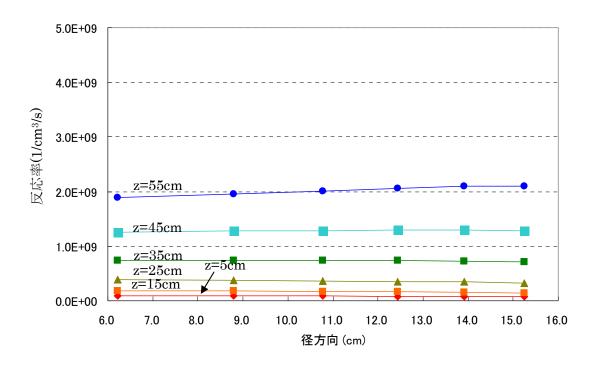


図7.10 シリコン高さ=-30cm におけるドーピング反応率分布

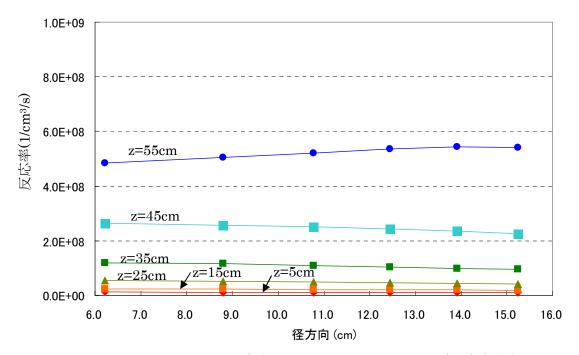


図 7.11 シリコン高さ=-50cm におけるドーピング反応率分布

上記9通りのドーピング反応率分布の平均値を表 7.1に示す。この結果は、シリコン高さを-50cm ~ 110 cm までの 1 秒でスルーさせた場合のドーピング反応率を示し、例えば、この区間を 1 時間でスルーさせた場合、表 7.1 の結果に 3600 を掛けた値がドーピング反応量となる。なお、ここではスルー速度は一定としている。

表 7.1 に対する R/C 比を表 7.2 に示し、R/C 比と同様の考えで、シリコン底面でのドーピング 反応率に対する、ある高さにおける反応率の比率を H/B 比と定義し、その結果を表 7.3 に示す。

表 7 1	一定谏度でシリコン	/ ネスルー	-させた場合の	ドーピン	グ反応率の平均値(1/cm³/s)
1X 1.1					7 /X /// T */ / T */ / III / 1 / CIII / S /

_			径方向(cm)					
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2	
	55	1.71E+09	1.75E+09	1.78E+09	1.80E+09	1.82E+09	1.82E+09	
	45	1.63E+09	1.66E+09	1.68E+09	1.70E+09	1.72E+09	1.73E+09	
高さ方向	35	1.60E+09	1.63E+09	1.65E+09	1.68E+09	1.70E+09	1.71E+09	
(cm)	25	1.60E+09	1.62E+09	1.65E+09	1.67E+09	1.69E+09	1.70E+09	
	15	1.61E+09	1.64E+09	1.66E+09	1.68E+09	1.70E+09	1.71E+09	
	5	1.69E+09	1.72E+09	1.75E+09	1.77E+09	1.79E+09	1.79E+09	

表 7.2 スルー方式で照射した場合の R/C 比

_			径方向(cm)					
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2	
	55	1.00	1.02	1.04	1.05	1.06	1.06	
	45	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.06	
高さ方向	35	1.00	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07	
(cm)	25	1.00	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07	
	15	1.00	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	
	5	1.00	1.02	1.04	1.05	1.06	1.06	

表 7.3 スルー方式で照射した場合の H/B 比

			径方向(cm)						
		6.2	8.8	10.8	12.4	13.9	15.2		
	55	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02		
	45	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.97		
高さ方向	35	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.96		
(cm)	25	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.95		
	15	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95		
	5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		

表 7.2 及び表 7.3 の結果から、スルー方式で照射した場合の径方向及び軸方向の均一性は良いことが分かる (差異は径方向で最大 7%、軸方向で最大 8%)。このことから、スルー方式を用いれば均一性の高いシリコン照射が実施出来ることが分かる。表 7.1 の平均反応率について、全領域での平均を求めると、 $1.70\times10^9(1/\mathrm{cm}^3/\mathrm{s})$ となる。なお、この平均値はシリコンを全領域(シリコン高さ-50cm~110cm) において等速でスルーさせた場合の値であり、反応率の高い位置での照射時間を増やすと、平均反応率はより高くなる。

7.3 原子炉の反応度に与える影響

本照射体系ではシリコン照射筒を重水タンク内面に接していることから、シリコンが原子炉反応度に与える影響は無視出来ないと考えられる。次に、前記の高さでシリコンをスルーさせた場合の、それぞれの $k_{\rm eff}$ の値を表 7.4 に示す。

表 7.4 それぞれのシリコン高さにおける keff 及び反応度

シリコン高さ(cm)	keff	∆k/k%
110	1.0014	0.000
90	1.0012	-0.024
70	1.0011	-0.033
50	1.0010	-0.040
30	1.0008	-0.057
10	1.0007	-0.071
-10	1.0008	-0.061
-30	1.0012	-0.023
-50	1.0013	-0.012

(注:反応度はシリコン高さ110cmを基準とした)

表 7.4 の結果より、シリコン高さが $10 \, \mathrm{cm}$ の時に最も大きな負の反応度 (約 $0.07\% \, \Delta \, \mathrm{k/k}$) を与えることが分かる。 JRR-3 の 1 本当たりの制御棒価値は約 $4\% \, \Delta \, \mathrm{k/k}$ であり、反応度価値は高さによって異なるが、単位高さ当たりの制御棒価値の単純平均は $4/800 = 0.005\% \, \mathrm{mm}$ となる。これより、約 0.07%の反応度は制御棒 $14 \, \mathrm{mm}$ 程度の高さに相当する。

8 照射時間及びフィルター寿命の概算

8.1 照射時間、NTD シリコン生産量概算

本章では 12 インチ NTD シリコンの照射時間及び熱中性子フィルターの寿命について概算する。 NTD シリコンでは照射前の電気抵抗が非常に大きいが照射するに従って抵抗は低下する。 目標とする電気抵抗率は最終的にシリコンを使用する製品によって異なるが、平均は約 172Ω cm である。 本章では、NTD シリコンの抵抗値として 172Ω cm の値を用いて照射時間を見積もった。

NTD シリコンの生成リン濃度とシリコン抵抗率には次のような実験式が存在する。

$$P = \frac{5 \times 10^{15}}{R_1} - \frac{5 \times 10^{15}}{R_0} \qquad \cdot \cdot \cdot (1)$$

ここで、

P : 照射による生成リン濃度(1/cm³) R₀ : 初期抵抗率(照射前) (Ωcm) R₁ : 目標抵抗率(照射後) (Ωcm).

目標抵抗率を $172\,\Omega$ cm、初期抵抗率を $2000\,\Omega$ cm とすると、 $P=2.65\times10^{13}(1/cm^3)$ となる。第 6 章 で求めたスルー方式での平均反応率 $1.70\times10^9(1/cm^3/s)$ を用いて照射時間を求めると次のようになる。

照射時間(s) =
$$\frac{2.65 \times 10^{13}}{1.7 \times 10^9}$$
 = 1.56×10⁴(s) = 4.3 (h)

JRR-3 では1サイクル 26 日の運転を行っており、仮に照射設備稼働率を50%とすると1サイクル当たりの照射時間は約310時間となる。これを上記で求めた照射時間で割ると、1サイクル当たり70体の照射が可能となる。原子炉の年間運転サイクルを7サイクルとすると、年間480体の照射が可能となる。1体当たりの12インチNTDシリコンの重量は0.1トンであるので、年間48トンのNTDシリコンの生産が可能となる。

しかし、上記の計算で用いた照射筒の位置は照射筒を最も炉心に近付けて設置した場合であり、今後、照射欠陥等の検討が進むと、より炉心から離れた位置での設置となる可能性がある。その場合、NTD シリコンの生産量は減少する。また、上記の生産量算出における仮定として目標抵抗率を $172\,\Omega$ cm としているが、例えばハイブリッド自動車で使用される IGBT では $50\sim60\,\Omega$ cm のシリコンが要求されている。(1)式より、目標抵抗率が 1/3 になれば P の値も 3 倍近い値になる。よって照射時間は 3 倍必要となるので、生産される NTD シリコンの量は 1/3 程度の 16 トン程度となる。

8.2 フィルター寿命概算

次にホウ素フィルターの燃焼について計算で求める。シリコン高さ 50cm、フィルターとして 1% ホウ素フィルターを用いた場合の、フィルターにおける 10 B の中性子吸収反応率を求めると、7.0 × $^{10^{12}}$ (n/cm³/s) となった (原子炉出力 20MW 時)。第4章においてホウ素フィルターの濃度を 0.5% とした場合も反応率分布の均一性が良かったことより、燃焼によりホウ素フィルター中の 10 B が 1%から 0.5%になったとしても十分に熱中性子フィルターとしての機能を有すると考えられる。燃焼によりホウ素フィルター中の 10 B が 1%から 0.5%になる時間を求めると、100 日となる。フィルター寿命はホウ素フィルター中の 10 B が 0.5%になるまでと仮定し、年間照射時間を 2200 時間 (310 時間/サイクル×7 サイクル/年) とすると、フィルター寿命は約1年となる。しかし、実際の照射では1個のフィルターを常に使用するのではなくて、数個のフィルターを用いて照射を行うため、仮に6個のフィルターを用いた場合、フィルターの寿命は約6年となる。

9 結言

本報告書では、JRR-3 における 12 インチ NTD シリコン照射方法の検討について、計算コード MVP を用いて行った。12 インチという大口径シリコンでは、熱中性子を主体とする照射を行った場合、中央での熱中性子が低下し、径方向のドーピング分布の均一性が悪くなる。12 インチ NTD シリコン照射筒を炉心に近付けるほど R/C 比は改善することが分かったが、照射筒を炉心に近付けるだけでは、最大 R/C 比が 1.1 以下という目標を達成出来ないことが分かった。そこで、本報告書ではシリコンインゴットの周りに熱中性子を良く吸収する熱中性子フィルターを設置することにより、径方向のドーピング分布の改善を図った。解析の結果、熱中性子フィルター材質としてアルミニウムに対して天然ホウ素を 1.0%混入した厚さ 2mm のホウ素混入アルミニウムを用いることにより、最大 R/C 比が 1.1 以下であり、反応量の低下も最小限に抑えることが可能であることが分かった。また、フィルター材質として厚さ 3mm のチタンを用いても同等の効果が得られることが分かった。

熱中性子フィルターを用いたシリコンに入射する中性子の経路解析より次のことが分かった。シリコン前面(炉心側)から入ってくる中性子はシリコン全体に均一に行きわたる(ドーピングする)が、シリコン後面(炉心と反対側)から入ってくる中性子は十分にシリコン中心部に到達しないため、ドーピング分布の均一性が悪くなる(中心に向かうに従ってドーピング反応率は低下する)。一方、シリコン上下から入ってくる中性子はシリコンの中心部(径方向)で最もドーピング量が多くなり、シリコン後面から入ってきた中性子によるドーピング分布と逆の傾向となるため、結果的に両者を合わせることによりシリコン中で均一な分布となることが分かった。

12 インチ NTD シリコン照射方法は、スルー方式と呼ばれるシリコンを垂直にスルーさせて照射する手法で検討を行った。スルー方式として等速度でシリコンをスルーさせた場合、ドーピング分布は最大 R/C 比(径方向) は 1.07、最大 H/B 比(軸方向) 1.08 と全体的に均一なドーピングが可能であることが分かった。また、シリコンインゴットをスルーさせているときの炉心の反応度に与える影響を求めると、シリコンが挿入されると最大約 0.07% Δ k/k の負の反応度が与えることが分かった。

シリコン照射筒を炉心と接して設置し、熱中性子フィルターとして 1%ホウ素混入アルミニウムを用いた体系と仮定した場合、年間 48 トン程度の NTD シリコンの生産が可能であることが分かった。 なお、この NTD シリコン生産量の計算では、シリコンの目標抵抗率を 172Ωcm、原子炉の運転サイクルを年間 7 サイクル、シリコン照射設備の稼働率を 50%としている。この場合、熱中性子フィルターの寿命は 8 年程度であることが分かった。

今後の課題としては、NTD シリコン照射における高速中性子による影響を詳しく調べる必要がある。シリコン単結晶に高速中性子を照射すると、照射欠陥及び不純物生成が生じる。照射欠陥はアニーリング時間との関係、不純物生成については抵抗率制御との関係があり、両者とも NTD シリコンの性能に大きく影響を与える。また、現在、研究用原子炉 JRR-4 において 12 インチ NTD シリコンを用いた照射実験計画を進めている (9)。 今後は、高速中性子による影響の調査結果、及び JRR-4 において得られた結果を用いて、より具体的な JRR-3 における 12 インチ NTD シリコン照射設備の設計を進めていく必要がある。

箝鵂

本報告書の作成に際し、貴重な意見を頂きました山下清信・研究炉加速器管理部長、左高正雄・研究炉加速器管理部次長、木名瀬政美・研究炉利用課課長代理、及び一色正彦・研究炉加速器管理部研究嘱託に深く感謝致します。

参考文献

- 1) M. Tanenbaum and A. D. Mills: "Preparation of Uniform Resistivity n-Type Silicon by Nuclear Transmutation", J. Electrochem. SOC., 108, 2, pp. 171-176(1961).
- 2) UCS 半導体基盤技術研究会 : "シリコンの科学", REALIZE INC (1996).
- 3) S. M. ジィー (南日康夫、川辺光央、長谷川文夫訳): "半導体デバイス 第 2 版", 産業 図書(2004).
- 4) NTD 技術検討会 : "研究炉(JRR-3, JRR-4 and JMTR)を用いた中性子核変換ドーピング Si 半導体(NTD-Si)製造機能拡充の検討", JAEA-Review 2005-006(2006).
- 5) 放射線振興協会、私信(2007).
- 6) Yasunobu Nagaya, et al.: "MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods", JAERI 1348 (2005).
- 7)日本原子力研究所 東海研究所 研究炉部 : "研究炉利用ハンドブック(改訂第2版)", 日本原子力研究所(1999).
- 8) Hak-Sung Kim, et al.: "Design of a Neutron Screen for 6-inch Neutron Transmutation Doping in HANARO", Journal of the Korean Nuclear Society, 38, 7(2006).
- 9) 八木理公、渡邊雅範、大山光樹、米田政夫、山本和喜、加島洋一 : "JRR-4 における 12 インチシリコン NTD-Si 照射実験装置に関する概念設計(受託研究)", JAEA-Technology 2008-015(2008).
- 10) J. W. Cleland, : "Heat Treatment Effect in Neutron Transmutation Doped Silicon", J. Nucl. Mater., 108&109, pp. 709-714(1982).

Appendix - A MVP における(n, γ) 反応の計算手法について

A.1 概要

MVPでは核分裂反応、吸収反応等の中性子ミクロ断面積で指定された基本的な反応については、『MICRO:nucid(reaction)』形式で反応率を求めることが出来るが、 (n, γ) 反応等のより詳細な反応率を求めるには、ポイントワイズレスポンス関数が記載されているドジメトリファイルを使用する必要がある。しかしながら、MVPで準備されているドジメトリファイルの核種は少なく、シリコンについては存在しない。そこで本章では、MVPでシリコンの (n, γ) 反応を計算出来るように、MCNP用のシリコンのドジメトリファイルをコピーして MVPで使用する方法及びその検証について述べることにする。また、MVPではマニュアルにドジメトリファイルの使用法に関する記述は多くないため、参考として、MVPでドジメトリファイルの使用法の基礎についても記述する。

A.2 MCNP 用ドジメトリファイルの使用方法

MVP のドジメトリファイルは MVPlib フォルダに収録されている『dosimetry』であり、これを使用するためのインデックスファイルは『dosimetry.index』である。MCNP5 に添付されている MCNP 用ドジメトリファイルは『111dos』である。

手順:

- ① MCNPの111dosファイルを、MVPの『MVP1ib¥dosimetry』ディレクトリにコピーする。
- ② MVP の dosimetry. index を編集し、『atomic weight ratios』の項目と『directory』の項目に対応する核種を書き換え・追加する。MVP と MCNP のインデックスファイルの記述形式は似ているため、必要な核種の上記2つの項目に相当する箇所を MCNP のインデックスファイルである xsdir ファイルから、MVP のインデックスファイルである dosimetry. index に書き換え・追加する。『atomic weight ratios』については、すでに dosimetry. index に記載されているが、xsdir の方が詳しい場合があり、また、ドジメトリファイルとして MCNP のものを使用する場合、この項目についても MCNP の内容(xsdir)を使用する必要があると考えられる。
- ③ 書き換えた dosimetry. index の核種に対応する名前をMV Pインプットで用いることにより、MCNP のドジメトリファイルを使用した計算が実行出来る。

 30 Si $(n, \gamma)^{31}$ Si, 30 Si $(n, p)^{30}$ Al 反応数を求めるためのインプット記述例(タリー記述部分):

```
$TALLY
```

```
NSTAL(2) ・・・・ ポイントワイズを使用する反応数。ここでは2となる。
STAL(14030.30y (MT102)) ・・・・ 14030.30y は核種名(<sup>30</sup>Si)、MT102は(n, γ)反応を示す。
STAL(14030.30y (MT103)) ・・・・ 14030.30y は核種名(<sup>30</sup>Si)、MT103は(n, p)反応を示す。
&
```

ID(1)

PARTICLE (NEUTRON)
DIMENSION (REGION)

REGION (SI) ・・・・ 『SI』という名前のリージョンでのタリーを求める。

PRESP(1) ・・・ STAL で指定した反応の順番。³⁰Si(n, γ)³¹Si は最初なので1となる。

&

ID(2)

PARTICLE (NEUTRON)

DIMENSION (REGION)

REGION (SI) ・・・・ 『SI』という名前のリージョンでのタリーを求める。

PRESP (2) ・・・・ STAL で指定した核種・反応の順番。30Si (n, p) 30A1 は 2 番目なので 2 となる。

\$END TALLY

A.3 検証計算

MCNP ドジメトリファイルを使用した計算の検証するため、MVP(ver.2)及び MCNP(ver.5)で比較計算を実施した。計算体系としては半径1cmのシリコン球を用い、球の中心から0.01eVの中性子を発生させて球内での反応を求める。

計算ケース:

ケース 1: MCNP ドジメトリファイルを使用して、MVP 及び MCNP で $^{30}Si(n, \gamma)^{31}Si$ 反応を計算結果 の比較。

ケース 2: MVP ドジメトリファイルを使用して MVP で計算した $^{23}Na(n, \gamma)^{24}Na$ の結果と、 MCNP ドジメトリファイルを使用して MVP で計算した $^{23}Na(n, \gamma)^{24}Na$ の結果と の比較。

計算結果:

ケース 1: MCNP 結果 = 1.75243E-01 (±0.0%)

MVP 結果 = 1.73254E-01 (±0.003%)

ケース 2: MVP 結果(MVP ドジメトリファイル) = 8.79657E-1 ($\pm 0.003\%$)

MVP 結果(MCNP ドジメトリファイル)= 8.75741 (±0.003%)

ケース1の結果より、同じドジメトリファイルを使用してMCNP及びMVPで計算すると約1%の差異が生じていることが分かる。ただ、この計算で使用した断面積はMCNPではENDF6、MVPではJENDL-3.3なので、その違いが差異の大きな原因だと考えられる。ケース2では、同じ計算コード、同じ断面積を使用して、ドジメトリファイルのみが違うケースであるが、この場合は約0.4%で一致した。この場合の差異の原因はドジメトリファイルの違いのみであるが、0.4%程度の小さな差異であるため、MCNPのドジメトリファイルをそのままMVPへ転用しても問題はないと考えられる。

MVP のドジメトリファイルで取り扱っている核種・反応一覧は日本語版マニュアルには記載されていないが、英語版マニュアルには記載されている。参考のため、次の表 A.1に MVP ドジメトリファイルで扱っている核種・反応について示す(英語版マニュアルより転載)。下記の通り現時点では MVP ドジメトリファイルでは取り扱っている数は少ないため、多くの核種・反応を取り扱っている MCNP ドジメトリファイルを使用することは有用であると考えられる。

表 A.1 MVP ドジメトリファイル取扱い核種・反応一覧

ZAID	MT	Target	Reaction	Product	EMIN	EMAX	NES	MAT
ZAID	MII	larget	Reaction	Product	(MeV)	(MeV)	NES	MAI
3006.03Y	105	Li-6	(n,t)	He-4	1.00E-11	2.00E+01	403	331
3006.03Y	207	Li-6	a production	ne-4	1.00E-11 1.00E-11	2.00E+01 2.00E+01	422	331
3007.03Y	205	Li-7	t production		2.82E+00	2.00E+01 2.00E+01	18	332
5010.03Y	107	B-10	(n,a)	Li-7	1.00E-11	2.00E+01	440	531
5010.03Y	207	B-10	a production	LI-7	1.00E-11	2.00E+01	423	531
9019.03Y	16	F-19	(n,2n)	F-18	1.10E+01	2.00E+01	19	931
11023.03Y	16	Na-23	(n,2n)	Na-22	1.30E+01	2.00E+01	13	1131
11023.03Y	102	Na-23	(n,g)	Na-24	1.00E-11	2.00E+01	1228	1131
12024.03Y	103	Mg-24	(n,p)	Na-24	4.93E+00	2.00E+01	41	1231
13027.03Y	103	A1-27	(n,p)	Mg-27	1.90E+00	2.00E+01	38	1331
13027.03Y	107	A1-27	(n,a)	Na-24	3.25E+00	2.00E+01	72	1331
15031.03Y	103	P-31	(n,p)	Si-31	7.32E-01	2.00E+01	22	1531
16032.03Y	103	S-32	(n,p)	P-32	9.57E-01	2.00E+01	31	1631
21045.03Y	102	Sc-45	(n,g)	Sc-46	1.00E-11	2.00E+01	9572	2131
22000.03Y	210	Ti-nat	(n,x)	Sc-46	1.62E+00	2.00E+01	32	2230
22000.03Y	211	Ti-nat	(n,x)	Sc-47	1.00E-11	2.00E+01	38	2230
22000.03Y	212	Ti-nat	(n,x)	Sc-48	3.28E+00	2.00E+01	27	2230
22046.03Y	103	Ti-46	(n,p)	Sc-46	1.62E+00	2.00E+01	31	2231
22047.03Y	28	Ti-47	(n,np)	Sc-46	1.07E+01	2.00E+01	13	2232
22047.03Y	103	Ti-47	(n,p)	Sc-47	1.00E-11	2.00E+01	30	2232
22048.03Y	28	Ti-48	(n,np)	Sc-47	1.17E+01	2.00E+01	17	2233
22048.03Y	103 28	Ti-48	(n,p)	Sc-48	3.28E+00	2.00E+01	26	2233
22049.03Y 25055.03Y	28 16	Ti-49 Mn-55	(n,np)	Sc-48 Mn-54	1.25E+00 1.04E+01	2.00E+01 2.00E+01	11 12	2234 2531
25055.03Y	102	Mn-55	(n,2n)	Mn-56	1.04E+01 1.00E-11	2.00E+01 2.00E+01	7355	2531
26054.03Y	102	Fe-54	(n,g)	Mn-54	1.00E-11	2.00E+01 2.00E+01	35	2631
26056.03Y	103	Fe-56	(n,p) (n,p)	Mn-56	2.97E+00	2.00E+01	32	2632
26057.03Y	28	Fe-57	(n,np)	Mn-56	1.08E+01	2.00E+01	10	2633
26058.03Y	102	Fe-58	(n,np)	Fe-59	1.00E-01	2.00E+01	4731	2634
27059.03Y	16	Co-59	(n,2n)	Co-58	1.06E+01	2.00E+01	14	2731
27059.03Y	102	Co-59	(n,g)	Co-60	1.00E-11	2.00E+01	10701	2731
27059.03Y	107	Co-59	(n,a)	Mn-56	1.00E-11	2.00E+01	16	2731
28058.03Y	16	Ni-58	(n,2n)	Ni-57	1.24E+01	2.00E+01	16	2831
28058.03Y	103	Ni-58	(n,p)	Co-58	1.00E-11	2.00E+01	35	2831
28060.03Y	103	Ni-60	(n,p)	Co-60	2.08E+00	2.00E+01	29	2832
29063.03Y	16	Cu-63	(n,2n)	Cu-62	1.10E+01	2.00E+01	10	2931
29063.03Y	102	Cu-63	(n,g)	Cu-64	1.00E-11	2.00E+01	15081	2931
29063.03Y	107	Cu-63	(n,a)	Co-60	1.00E-11	2.00E+01	23	2931
29065.03Y	16	Cu-65	(n,2n)	Cu-64	1.01E+01	2.00E+01	11	2932
30064.03Y	103	Zn-64	(n,p)	Cu-64	1.00E-11	2.00E+01	25	3031
40090.03Y	16	Zr-90	(n,2n)	Zr-89	1.21E+01	2.00E+01	10	4031
41093.03Y	16	Nb-93	(n,2n)	Nb-92m	9.05E+00	2.00E+01	12	4131
41093.03Y	51	Nb-93	(n,n')	Nb-93m	3.07E-02	2.00E+01	58	4131
45103.03Y	51	Rh-103	(n,n')	Rh-103m	4.00E-02	2.00E+01	70	4531
49115.03Y	51	In-115	(n,n')	In-115m	3.20E-01	2.00E+01	388	4931
49115.03Y	102	In-115	(n,g)	In-116m	1.00E-11	2.00E+01	13392	4931
53127.03Y	16	I-127	(n,2n)	I-126	9.22E+00	2.00E+01	16	5331
63151.03Y	102 102	Eu-151	(n,g)	Eu-152	1.00E-11	2.00E+01	4016 22138	6331
73181.03Y	102	Ta-181	(n,g)	Ta-182 W-187	1.00E-11	2.00E+01	8865	7331 7431
74186.03Y 79197.03Y	162	W-186 Au-197	(n,g)	W-187 Au-196	1.00E-11 8.11E+00	2.00E+01 2.00E+01	14	7931
79197.031 79197.03Y	102	Au-197 Au-197	(n,2n)	Au-198	1.00E-11	2.00E+01 2.00E+01	10941	7931
80199.03Y	57	Hg-199	(n,g) (n,n')	Hg-199m	5.34E-01	2.00E+01 2.00E+01	49	8031
90232.03Y	18	Th-232	fission	-11g-199III	1.00E-11	2.00E+01	92	9031
90232.03Y	102	Th-232	(n,g)	Th-233	1.00E-11	2.00E+01	18519	9031
20232.031	102	111-232	(4,5)	111-233	1.001-11	2.002.01	10319	2031

Appendix-B JRR-3、JRR-4における高速中性子の比較

B.1 概要

一般的に NTD シリコン照射は炉心から離れた場所で実施されるが、これは高速中性子による照射欠陥等の影響を避けるためである。NTD シリコンの径が小さい場合、炉心から離れたカドミ比が高い領域でも均一なドーピング分布を持つ照射が可能である。しかし、本章で述べたように 12 インチという大口径シリコンになると、そのような照射場では均一なドーピング分布を持つ照射が出来ない。そのため、炉心に近いカドミ比の低い領域において、なおかつ、熱中性子フィルターを用いることにより、均一なドーピング分布及び十分なドーピング量が得られる。その一方で、炉心に近い位置での照射は高速中性子による影響を受けるため、その影響を十分に考慮する必要がある。しかしながら、高速中性子が NTD シリコンに与える影響については、これまで十分には調べられていない。シリコンに中性子が照射されるとシリコン結晶内に照射欠陥が生じるが、照射欠陥は一般的にはアニーリング(10)を行うことにより回復する。照射欠陥が多いほどアニーリング時間は増加するが、産業的に NTD シリコンが成り立つためにはアニーリング時間に限界があるため、今後それらの関係を調べる必要がある。また、高速中性子の割合が増えると、高速中性子とシリコンが反応を起こして不純物を生成する。炉心から離れた場所での高速中性子による不純物生成は無視出来るが、炉心から近い場所の照射では無視出来ない程度の不純物が生成されると考えられる。

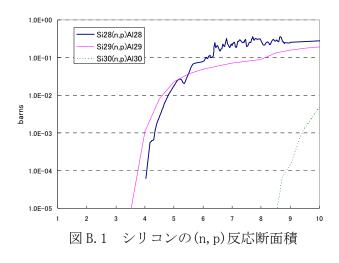
本章では、高速中性子による影響を簡易的に調べるために、他のNTDシリコン照射と比較して、熱外中性子の割合が多いJRR-4におけるNTDシリコン照射場(Nパイプと呼ばれる照射孔で実施される)を基準に、本報告書で検討しているJRR-3における12インチNTDシリコンでの高速中性子の比較・評価を行う。高速中性子の評価としては一般的にカドミ比が用いられることが多いが、このパラメータは0.53eVで熱中性子と熱外中性子を区別しているのみであり、この値だけでは高速中性子の評価は出来ない。そこで、本章では、カドミ比に加えて、100keV以上、1MeV以上の中性子東についてJRR-3とJRR-4の比較を行う。また、不純物生成について検討するため、最も多く生成されると考えられる28Si(n,p)28A1反応量(約2.7MeVのしきい値を持つ)についても求める。

B.2 照射生成物

シリコン照射において中性子とシリコンが起こす反応は、下記の(n,p)反応及び (n,α) 反応がある。

- ① ²⁸Si (n, p) ²⁸Al →(半減期=2.24m)→ ²⁸Si (安定核種)
- ② ²⁹Si (n, p) ²⁹Al →(半減期=6.6m)→ ²⁹Si (安定核種)
- ③ ³⁰Si (n, p) ³⁰Al →(半減期=3.69s)→ ³⁰Si (安定核種)
- ④ ²⁸Si(n, α)²⁵Mg (安定核種)
- ⑤ ²⁹Si(n, α)²⁶Mg (安定核種)
- ⑥ ³⁰Si (n, α) ²⁷Mg → (半減期=9.46m)→ ²⁷Al (安定核種)

ここで、①~③のアルミニウムは β 一崩壊を起こして、安定なシリコンとなる。①~⑥の断面積を下記の図 B. 1、B. 2 に示す。参考のために、 (n, γ) 反応断面積について B. 3 に示す。断面積ファイルは ENDF/B-VII. 0 である。



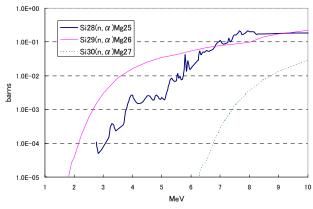


図 B. 2 シリコンの(n, α) 反応断面積

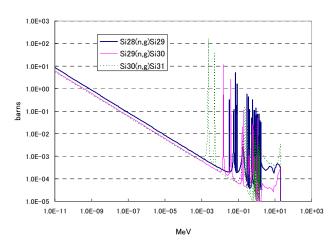


図 B. 3 シリコンの(n, γ) 反応断面積

図 B. 1、B. 2 からシリコンの (n, p)、 (n, α) 反応にはしきい値が存在し、1MeV 以上の高エネルギーでしか反応を起こさないことが分かる。例えば、 28 Si (n, α) 25 Mg 反応は約 2. 7MeV のしきい値を持つ。(n, p) 反応については最終的にシリコンで安定各種となるが、 (n, α) 反応については別核種であるマグネシウム若しくはアルミニウムで安定核種となる。

B.3 計算体系

JRR-3 体系については本章で用いた体系を用いる。JRR-4 体系については下記に示す。なお、JRR-3 の計算は計算コードMVPを用いたが、JRR-4の計算については計算コードMCNP-5を用いた。

JRR-4の主要諸元の概略は次の通りである。

・炉形式: 濃縮ウラン軽水減速冷却スイミングプール型非均質型研究用熱中性子炉

· 熱出力: 3500kW

・最大炉心寸法: 約65cmL×67cmW×60cmH

• 燃料要素数: 20 本

・燃料要素寸法: 80mm×80mm×約1m

JRR-4 炉心の水平断面図及び N パイプ水平断面図の概略を図 B. 3、図 B. 4 に示す。なお、本計算で用いたシリコンインゴットのサイズは ϕ 12. 7cm、高さ 45cm である。

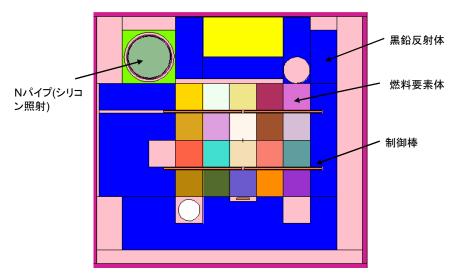


図 B. 3 JRR-4 炉心水平断面図

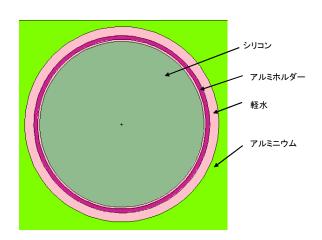


図 B. 4 Nパイプ水平断面図

計算で用いたシリコンインゴットサイズは ϕ 12.7cm、高さ 45cm である。シリコン中における (n,p)、 (n,α) 反応は MCNP5 の機能である Mesh タリーを用いて求めた。シリコンインゴットを径

方向に3領域(r1=3.67cm, r2=5.19cm, r3=6.35cm)、高さ方向に3領域(h1=15cm, h2=30cm, h3=45cm) と、合計9領域に分け、それぞれの領域における反応率を求めた。

B. 4 中性子東計算結果

JRR-3 及び JRR-4 における、カドミ比及び 100keV 以上、1MeV 以上の中性子束の割合を表 B-1 及び表 B-2 に示す。JRR-3 の結果は、第 6 章で求めたスルー方式の計算結果を示す(スルーさせた場合のそれぞれの高さにおける値の平均値)。なお、ここでのカドミ比の定義としては、『(全エネルギー)/(0.53eV 以上)』と定義する。同様に 100keV 以上を評価するパラメータとして『(全エネルギー)/(100keV 以上)』、1MeV 以上を評価するパラメータとして『(全エネルギー)/(1MeV 以上)』を定義する。計算結果は、それぞれのシリコン高さにおける径方向の平均値を示している。

						*
高さ(cm)	5	15	25	35	45	55
カドミ比	3. 6	3. 4	3. 5	3. 7	4. 1	4.8
全エネルギー/100keV 以上	11. 3	10.8	11. 1	11.9	13. 9	16. 6
全エネルギー/1MeV以上	26. 3	24. 5	25. 1	27.0	33. 1	42. 7
中性子束(n/cm²/s)	2. 2E+13	2. 2E+13	2. 3E+13	2. 3E+13	2. 2E+13	2. 2E+13

表 B. 1 JRR-3 におけるカドミ比等計算結果(スルー方式、第6章参照)

主p o	TDD_1 17 to 1t スカ	じこい体計管は甲	(現行 N パイプ位置)
/-/- B - 2		トンに去計用端来	し 現すし トノンオーノ かんきょ

高さ(cm)	7. 5	22. 5	37. 5
カドミ比	2.9	2. 7	3. 0
全エネルギー/100keV	6. 5	6. 1	6. 7
全エネルギー/1MeV 以上	12. 1	11.4	12.6
中性子束(n/cm²/s)	2. 0E+13	2. 1E+13	1. 6E+13

すべての JRR-3 の値が JRR-4 より高くなっていることより、本計算モデルで検討した JRR-3 照射筒モデルは JRR-4 より高速中性子の影響が少ないと考えられる。

B.5 不純物生成量計算結果

JRR-4 における、それぞれの領域(9 領域)における反応率($n/cm^2/s$)の計算結果を次の表 B. 3~表 B. 11 に示す。反応については上記①~⑨の反応に加えて、 (n, γ) 反応についても求めた。計算結果は、核出力 3500kW で規格化している。

表 B. 3 ²⁸Si (n, p) ²⁸A1 反応率(JRR-4) 表 B. 4 ²⁹Si (n, p) ²⁹A1 反応率(JRR-4)

		径方向							
		1.83cm	4.43cm	5.77cm					
高さ	37.5cm	4.45E+08	4.60E+08	4.82E+08					
1	22.5cm	5.95E+08	6.02E+08	6.24E+08					
万回	7.5cm	5.01E+08	5.09E+08	5.54E+08					

		径方向						
		1.83cm	4.43cm	5.77cm				
= ~	37.5cm	7.85E+06	7.96E+06	8.37E+06				
	22.5cm	1.06E+07	1.10E+07	1.11E+07				
기비	7.5cm	9.29E+06	9.76E+06	1.04E+07				

表 B. 5 ³⁰Si (n, p) ³⁰Al 反応率(JRR-4)

		径方向						
		1.83cm	4.43cm	5.77cm				
÷+	37.5cm	4.45E+04	4.05E+04	4.44E+04				
十つ	22.5cm	6.76E+04	4.87E+04	5.08E+04				
7J IHJ	7.5cm	6.43E+04	6.48E+04	7.06E+04				

表 B. 6 ²⁸Si (n, α) ²⁵Mg 反応率(JRR-4)

丰 p	7	29 C :	(n	~ `	26M~	反応率	(TDD_4)
- 7 ∕~ K	- (2051	ın	α) Lower		LIKK-4)

		径方向				
		1.83cm	4.43cm	5.77cm		
- +	37.5cm	1.90E+08	2.02E+08	2.06E+08		
高さ	22.5cm	2.66E+08	2.58E+08	2.67E+08		
万问	7.5cm	2.16E+08	2.17E+08	2.42E+08		

		径方向					
		1.83cm	4.43cm	5.77cm			
<u>+</u> +	37.5cm	1.88E+07	1.89E+07	1.96E+07			
	22.5cm	2.58E+07	2.64E+07	2.68E+07			
万问	7.5cm	2.29E+07	2.42E+07	2.52E+07			

表 B. 8 ³⁰Si (n, α) ²⁷Mg 反応率 (JRR-4)

		径方向						
		1.83cm	4.43cm	5.77cm				
高さ	37.5cm	2.27E+05	2.19E+05	2.27E+05				
十合	22.5cm	3.30E+05	2.96E+05	2.96E+05				
7J IHJ	7.5cm	3.05E+05	3.13E+05	3.39E+05				

表 B. 9 ²⁸Si (n, γ) ²⁹Si 反応率(JRR-4) 表 B. 10 ²⁹Si (n, γ) ³⁰Si 反応率(JRR-4)

		径方向						径方向	
		1.83cm	4.43cm	5.77cm			1.83cm	4.43cm	5.77cm
中十	37.5cm	2.32E+09	2.35E+09	2.37E+09	高さ	37.5cm	1.65E+09	1.67E+09	1.69E+09
高さ 方向	22.5cm	2.85E+09	2.89E+09	2.93E+09	方向	22.5cm	2.03E+09	2.06E+09	2.09E+09
/J IHJ	7.5cm	2.80E+09	2.83E+09	2.86E+09	\) LI	7.5cm	2.00E+09	2.02E+09	2.04E+09

表 B. 11 ³⁰Si (n, γ)³¹Si 反応率(JRR-4)

		径方向					
		1.83cm	4.43cm	5.77cm			
高さ 方向	37.5cm	1.82E+09	1.80E+09	1.78E+09			
	22.5cm	2.12E+09	2.02E+09	2.06E+09			
	7.5cm	1.91E+09	1.96E+09	2.03E+09			

シリコンの同位体は、²⁸Si が 92.2%、²⁹Si が 4.7%、³⁰Si が 3.1%である。²⁸Si が含まれる割合が圧

倒的に多いこともあり、上記の計算結果では 28 Si が引き起こす反応数が多いことが分かる。 28 Si が引き起こす反応の中で、特に 28 Si (n, α) 25 Mg 反応については、 α 線が結晶に与える影響が大きいと考えられ、また生成する 25 Mg が安定核種であることが、不純物としての影響も無視出来ないと考えられる。よって、高速中性子による不純物生成の評価法としては、 28 Si (n, α) 25 Mg 反応量を求めるのが適していると考えられる。ここで『 28 Si (n, α) 25 Mg』/『 30 Si (n, γ) 31 Si』というパラメータを定義し、JRR-4 と JRR-3 でこのパラメータの比較を行う。このパラメータが大きい方が、 28 Si (n, α) 25 Mg の影響が高いことを示す。表 B. 6 及び表 B. 11 より『 28 Si (n, α) 25 Mg』/『 30 Si (n, γ) 31 Si』の最小値は 0. 10 となる。JRR-3 の計算結果を表 B. 12 に示す。JRR-3 の計算体系は、シリコンの高さ 60 cm、フィルターとして 10 %ホウ素フィルターを用いたものである (第 4 章参照)。

径方向(cm) 6.2 8.8 10.8 12.4 13.9 15.2 55 0.009 0.010 0.008 0.009 0.004 0.009 45 0.004 0.010 0.012 0.012 0.012 0.010 高さ方向 35 0.004 0.015 0.014 0.013 0.014 0.014 (cm) 25 0.004 0.013 0.013 0.012 0.014 0.014 15 0.004 0.013 0.013 0.013 0.014 0.015 5 0.004 0.014 0.014 0.016 0.017 0.016

表 B. 12 JRR-3 における \mathbb{C}^{28} Si $(n, \alpha)^{25}$ Mg』 / \mathbb{C}^{30} Si $(n, \gamma)^{31}$ Si』 計算結果

この結果より、最大値は 0.017 となり JRR-4 における最小値と比べて約 1/6 となっており、本報告書で検討した JRR-3 モデルは現行 JRR-4 に比べて 28 Si $(n,\alpha)^{25}$ Mg 反応割合が少ないことが分かる。

以上の簡易的な高速中性子束の影響解析より、JRR-3 において照射筒を炉心に接して(重水間隔 = 0cm)に設置した場合でも現行の JRR-4 の照射設備と比較すると、高速中性子による照射欠陥及び不純物生成の影響は小さいと考えられる。

Appendix-C 計算環境

本章では、本報告書で用いた計算機環境及び計算時間の概要について記す。本報告書ではモンテカルロ核計算コードである MVP を使用して計算を行ったが、計算ヒストリー数が大きいため計算機として日本原子力研究開発機構にある並列計算機 Altix3700Bx2 を主に使用した。

並列計算機により 128 個の CPU を使用した並列計算で計算を実施した。代表的なヒストリー及び計算時間を次に記す。

・ヒストリー数: 1 バッチ当たり 12800 ヒストリーで合計 9128 バッチ(約 1.2 億ヒストリー)

捨てバッチ数は128バッチ。

• 計算時間: 2 時間 40 分

本報告書で使用した計算コード MVP はモンテカルロ法を用いていたものであるが、モンテカルロ 法を用いた計算結果は決定論的手法とは異なり計算誤差が生じる。本報告書では特に断りがない 限り計算誤差は表記していないが、計算誤差は 1%未満であるので誤差表記は省略した。 This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1 SI 基本単位

	ж.	Oı	- AS/T++1.	•/_	
Ħ	基本量		SI 基本単位		
	半里		名称	記号	
長	さ	メ	ートル	m	
質	量	丰	ログラム	kg	
時	間		秒	S	
電	流	ア	ンペア	A	
熱力	学温度	ケ	ルビン	K	
物	質 量	モ	ル	mo1	
光	度	力	ンデラ	cd	

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位				
和五里	名称	記号			
面積	平方メートル	m ²			
体 積	立法メートル	m^3			
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s			
加 速 度	メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数	毎メートル	m-1			
密度 (質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m^3			
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電 流 密 度	アンペア毎平方メートル	A/m^2			
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m			
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$			
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²			
屈 折 率	(数 の) 1	1			

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ タ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	٤ <u> </u>	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	丰 口	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	Z
10 ¹	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	у

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
			表し方	表し方
	ラジアン(a)	rad		m • m ⁻¹ =1 (b)
立 体 角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² • m ⁻² =1 (b)
周 波 数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m·kg·s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N • m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² · kg · s ⁻³
電荷,電気量	ク ー ロ ン	С		s · A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電 気 抵 抗	オ ー ム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁東	ウェーバ	Wb	V · s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁 束 密 度	テスラ	T	Wb/m^2	kg • s ⁻² • A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	$^{\circ}$ C		K
光	ルーメン	1 m	cd • sr (c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
照 度	ルクス	1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq		s cd iii cd
吸収線量, 質量エネル	グレイ	Gy	J/kg	m ² • s ⁻²
ギー分与, カーマ		Gy	J/ Kg	III · S
線量当量,周辺線量当	l		- "	2 -2
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² • s ⁻²
人線量当量,組織線量当				

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの
- 用例は表4に示されている。
 (b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号"1"は明示されない。
 (c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d)この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量		SI 組立単位			
	名称	記号	SI 基本単位による表し方		
粘	度パスカル 秒	Pa•s	m ⁻¹ · kg · s ⁻¹		
力のモーメント	トニュートンメートル	N • m	m ² · kg · s ⁻²		
	りニュートン毎メートル	N/m	kg • s ⁻²		
	関ラジアン毎秒	rad/s	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-1} = \mathbf{s}^{-1}$		
	関ラジアン 毎平方秒	rad/s ²	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-2} = \mathbf{s}^{-2}$		
	度 ワット毎平方メートル	W/m^2	kg • s ⁻³		
熱容量,エントロピー		J/K	m ² · kg · s ⁻² · K ⁻¹		
質量熱容量(比熱容量) 質量エントロピー	, ジュール毎キログラム - 毎ケルビン	J/(kg • K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$		
熱 伝 導 率	図ット毎メートル毎ケ ルビン	W/(m • K)	m·kg·s ⁻³ ·K ⁻¹		
体 積 エ ネ ル ギ -	_ ジュール毎立方メート ル	$\mathrm{J/m}^3$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$		
	ボルト毎メートル	V/m	m·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹		
体 積 電 荷	ヴァーロン毎立方メート ル	$\mathrm{C/m}^3$	m ⁻³ ⋅s⋅A		
電 気 変 位	カーロン毎平方メート ル	$\mathrm{C/m}^2$	m ⁻² ⋅ s ⋅ A		
誘 電 当	ドファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$		
透 磁 率	ドヘンリー毎メートル		m • kg • s ⁻² • A ⁻²		
モルエネルギー	- ジュール毎モル	I/mo1	m ² • kg • g ⁻² • mo1 ⁻¹		
モルエントロピーモル 熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol • K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mo1^{-1}$		
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ⋅ s ⋅ A		
吸 収 線 量 率	ダレイ毎秒	Gy/s	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$ $m^2 \cdot s^{-3}$		
放射 強 度	度 ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$		
放 射 輝 度	びット毎平方メートル 毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$		

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	۰	$1^{\circ} = (\pi/180) \text{ rad}$
分		1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ ベル	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)1n10(Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1. $60217733(49) \times 10^{-19}$ J 1u=1. $6605402(10) \times 10^{-27}$ kg
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と 併用されるその他の単位

	名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海	里		1海里=1852m
1	ット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
ア	ール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
\sim	クタール		1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バ	ール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オン	ノグストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バ	ー ン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダ イ ン	dyn	$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{N}$
ポアズ	P	1 P=1 dyn • s/cm ² =0.1Pa • s
ストークス	St	1 St = $1 \text{cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$
ガ ウ ス	G	1 G ≙10 ⁻⁴ T
エルステッド	0e	1 Oe ≙(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb = $1 \text{cd/cm}^2 = 10^4 \text{cd/m}^2$
ホート	ph	1 ph=10 ⁴ 1x
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

_		,,,,,,,		31 1 1	
	4	2 称		記号	SI 単位であらわされる数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レ	ン	トゲ	ン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν			A	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X	線	単	位.		1X unit=1.002 \times 10 ⁻⁴ nm
ガ		ン	eg	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
ジ	ヤン	ノスキ	_	Jу	1 Jy=10 ⁻²⁶ W ⋅ m ⁻² ⋅ Hz ⁻¹
フ	工	ル	171		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	系カラ	ット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg
1			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	D	IJ	_	cal	
3	ク	口	ン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$