JAEA-Technology 2012-003



# JRR-4中性子ビーム設備の特性測定

# ー反射体変更後のBNCT線量解析精度の評価ー

Characteristics Measurement of JRR-4 Neutron Beam Facility - Accuracy Estimation of BNCT Dose Calculation after Change of Reflector -

> 堀口 洋徳 中村 剛実 本橋 純 樫村 隆則 市村 茂樹 笹島 文雄

Hironori HORIGUCHI, Takemi NAKAMURA, Jun MOTOHASHI, Takanori KASHIMURA Shigeju ICHIMURA and Fumio SASAJIMA

> 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

March 2012

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, 2012

# JRR-4 中性子ビーム設備の特性測定 一 反射体変更後の BNCT 線量解析精度の評価 —

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

堀口 洋徳、中村 剛実、本橋 純、樫村 隆則、市村 茂樹、笹島 文雄

(2012年1月11日 受理)

研究炉 JRR-4 では、悪性脳腫瘍や頭頸部癌等に対するホウ素中性子捕捉療法(BNCT)の臨床 研究が実施されている。BNCT は、熱中性子と患者に投与されたホウ素(<sup>10</sup>B)との核反応を利 用した放射線治療法のひとつである。JRR-4 では、反射体要素の不具合に伴い、全種類の反射体 要素について設計仕様の変更が行われた。新たな反射体要素の製作においては、計算解析により 中性子ビーム設備への影響を考慮した設計を行っている。反射体要素の据え付け終了後、中性子 ビーム設備の性能についてフリービーム実験及び水ファントム実験による確認を実施した。得ら れた実験結果と本解析手法による結果を比較することにより、BNCTの線量評価に用いる計算誤 差を評価することができた。

# Characteristics Measurement of JRR-4 Neutron Beam Facility —Accuracy Estimation of BNCT Dose Calculation after Change of Reflector—

Hironori HORIGUCHI, Takemi NAKAMURA, Jun MOTOHASHI, Takanori KASHIMURA, Shigeju ICHIMURA and Fumio SASAJIMA

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 January 11, 2012)

Clinical trials of boron neutron capture therapy (BNCT) for malignant brain tumors and head and neck cancers have been performed at the research reactor JRR-4. BNCT is a kind of radiation therapy using a nuclear reaction with thermal neutrons and boron (<sup>10</sup>B) elements administered to a patient. The design specifications of all types of reflector elements were changed due to a trouble of a reflector element in JRR-4. In the production of new reflector elements, they were designed with the influence for the neutron beam facility by the calculation. After the installation of the new reflector elements, the performance of the neutron beam facility was verified by measurements such as a free air experiment and a water phantom experiment. Therefore, we estimated the calculation error needed to be the dose evaluation of BNCT by comparing the results of our calculation with the corresponding experimental data.

Keywords: Boron Neutron Capture Therapy, Dosimetry, Treatment Planning, JRR-4

# 目 次

1	はし	じめに	1
<b>2</b>	JR	R-4 中性子ビーム設備の概要	<b>2</b>
3	反射	対体変更に伴う中性子ビーム設備への影響	4
	3.1	反射体の設計変更	4
	3.2	核特性解析	4
	3.3	中性子ビーム設備の中性子スペクトル解析	<b>5</b>
4	JR	R-4 中性子ビーム設備の特性測定	10
	4.1	特性測定の概要	10
	4.2	フリービーム実験の概要	10
	4.3	ファントム実験の概要	10
	4.4	モニター金線を用いた出力補正	11
	4.5	熱中性子束の測定方法	12
	4.8	5.1 β-γ同時計数法	12
	4.8	5.2 熱中性子束の算出	14
<b>5</b>	特性	生測定の結果及び考察	20
	5.1	フリービーム実験の結果	20
	5.2	ファントム実験の結果	20
	5.3	モニター金線の基準値	20
	5.4	軟組織ファントムに対する線量評価	21
	5.5	リチウムフィルタを用いた線量の増強効果	22
6	まと	とめ	31
謝	辞		32
参	考文	献	32
付	録	炉心及び中性子ビーム設備の構成要素の原子個数密度	34

# Contents

1	Int	roduction	1			
<b>2</b>	Summary of JRR-4 Neutron Beam Facility 2					
3	Inf	luence on Neutron Beam Facility with Modified Reflectors	4			
	3.1	Specification Outline of Modified Reflectors	4			
	3.2	Nuclear Characteristics Analysis	4			
	3.3	Evaluation of Neutron Spectrum on JRR-4 Neutron Beam Facility	5			
4	Ch	aracteristics Measurement of JRR-4 Neutron Beam Facility	10			
	4.1	Summary of Experiment	10			
	4.2	Experiment of Free Air Condition	10			
	4.3	Experiment of Water Phantom	10			
	4.4	Correction of Reactor Power with Gold Wire	11			
	4.5	Measurement of Thermal Neutron Flux	12			
	4.	5.1 Method of B-Y Coincidence Counter	12			
	4.	5.2 Estimation of Thermal Neutron Flux	14			
<b>5</b>	Res	sults of Characteristics Measurement and Discussion	20			
	5.1	Experiment of Free Air Condition	20			
	5.2	Experiment of Phantom	20			
	5.3	Standard Value of Gold Wire	20			
	5.4	Dose Evaluation for Soft Tissue Phantom	21			
	5.5	Dose Enhancement Effect with Lithium Filter	22			
6	Co	nclusions	31			
А	ckno	wledgement	32			
R	efere	nces	32			
A	ppen	dix Atom Number Densities for Components of Core and Neutron Beam Facility	34			

# 1 はじめに

ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy: BNCT)は、予め患者に投与され た薬剤中のホウ素(10B)と熱中性子の捕獲反応により生じた  $\alpha$ 粒子とリチウム粒子により腫瘍細 胞を選択的に破壊することができる新たな放射線治療である<sup>1)</sup>。原理的には  $\alpha$ 粒子とリチウム核 の細胞内での飛程が数  $\mu$  m と短いこと、腫瘍細胞に集積し易いホウ素薬剤を用いることにより、 正常な細胞をほとんど損傷させることなく、腫瘍細胞を細胞レベルで選択的に破壊することが可 能であると考えられている。日本においては、日本原子力研究開発機構のJRR-2、JRR-3、JRR-4、 京都大学の KUR、旧武蔵工業大学の MuITR を用いて熱中性子ビームを用いた臨床研究が行われ てきた<sup>2)</sup>。最近では、生体深部まで高い線量を付与するために熱外中性子ビーム(0.5eV~10keV) を用いた臨床研究が行われている<sup>3)</sup>。JRR-4 では、1999年に熱中性子と熱外中性子の混合ビーム を用いた悪性脳腫瘍の BNCT の臨床研究が始まり、2003年には、熱外中性子ビームを用いた非 開頭の脳腫瘍に対する臨床研究が開始された<sup>4)</sup>。現在までに悪性脳腫瘍、頭頸部、肺腫瘍及び悪 性黒色腫に対して合わせて 100 症例以上の BNCT が行われている。さらに、現在は再発乳癌に 対する BNCT を実現するための技術開発が行われている<sup>5)</sup>。

しかし、JRR-4 は、2007 年 12 月 28 日に普通反射体の被覆部に破損が見つかり、長期間の運転停止を余儀なくされた。その原因調査により、反射体の破損は、黒鉛反射材の照射成長が要因であることが分かった。。黒鉛は、高速中性子に照射されると格子欠陥が発生し、照射成長することが分かっていたが、JRR-4の黒鉛反射材では、設計をはるかに上回る黒鉛反射材の照射成長が発生し破損に至った 7.8。そのため、反射体(計 33 体)の設計変更が行われている。主な変更点は、反射体内の黒鉛材の減少、黒鉛材と被覆材間のヘリウムギャップの増加、アルミニウム被覆材肉厚の増加であるが、BNCT が行われている中性子ビーム設備側に配置している特殊反射体については、反転して使用することで使用期限を延長できるようにするため、周辺の水ギャップが増加するような変更が行われている。

反射体の設計変更後、JRR-4 は、平成 22 年 3 月から供用運転を再開した。反射体の設計変更 に伴う中性子ビーム設備への影響を評価するため、各中性子ビームモード(熱中性子ビームモー ドI、熱中性子ビームモードII、熱外中性子ビームモード)について、その特性評価及び患者に 付与する線量の評価に必要なパラメータの取得を行った。特性測定では、各中性子ビームモード について、ビーム孔における特性を評価するフリービーム実験及び人体を模擬した水ファントム を用いた実験を行った。本報告書は、反射体変更後の平成 22 年 2 月から 12 月の間に実施した JRR-4 の中性子ビーム設備の特性測定結果をまとめたものである。その評価結果に基づき、平成 22 年 3 月から 8 月までの間に計 8 回の BNCT が実施されている。

# 2 JRR-4 中性子ビーム設備の概要

JRR-4の中性子ビーム設備は、重水タンク、カドミウムシャッター、中性子コリメータ、ビー ム孔、照射室及び簡易遮へい体により構成される。Fig.2.1 に中性子ビーム設備の概要を示す。重 水タンクは、炉心タンクとプール壁間に配置されており、重水タンクの重水層は、4 つの層(A 層:16cm、B層:4cm、C層:8cm、D層:5cm)から構成されており、ヘリウムガスを用いて 各層独立して重水の出し入れを行うことにより、0cmから33cmの間で16通りに変化させるこ とができる。重水タンクとプール壁の間には、カドミウムシャッターを配置してあり、シャッタ ーの出し入れにより、中性子ビーム中の熱中性子成分の有無を選択することができるようになっ ている。さらに、中性子ビーム設備内には、ガンマ線遮へい用のビスマス、中性子をビーム孔に 集中させるための黒鉛ライニング、中性子を取り出すためのビーム孔が配置されている。ビーム 孔は、患部の大きさに合わせて直径が10cm、12cm、15cm、20cmのコリメータを選択すること ができる。また、座った照射(座位照射)に対応するため、ビーム孔をビーム軸方向に 15cm 延 長した延長コリメータ(直径:12cm)を用意している。この延長コリメータを用いることで、患 者を楽な姿勢で照射することが可能となる ?)。その他の医療照射設備として、血液中のホウ素濃 度を短時間で精度良く測定するための即発ガンマ線分析装置 10及び誘導結合プラズマ発光分光 分析装置(ICP-AES)<sup>11)</sup>、事前に患者のセッティングを行うためのセッティングシステム<sup>12)</sup>が導 入されている。

BNCTでは、重水タンクの各層とカドミウムシャッターを組み合わせて以下の3つの中性子ビームモードが使用されている。

- (1) 熱外中性子ビームモード 重水厚さ:8cm、カドミウムシャッター:下限 (ON)
- (2) 熱中性子ビームモード I 重水厚さ:12cm、カドミウムシャッター:上限(OFF)
- (3) 熱中性子ビームモード II 重水厚さ: 33cm、カドミウムシャッター:上限(OFF)

熱外中性子ビームモードは、重水層での中性子の減速を少なく抑え、さらにカドミウムシャッ ターを用いることにより、熱中性子成分の割合を低下させた熱外中性子成分(0.53eV~10keV) の多いビームモードである。このビームモードは、非開頭の悪性脳腫瘍、頭頸部癌に適用されて おり、近年において最も使用頻度の高いモードである。熱中性子ビームモードIは、熱中性子成 分(<0.5eV)と熱外中性子成分を混合したモードであり、開頭の悪性脳腫瘍、表層の頭頸部癌 に適用されている。熱中性子ビームモードIIは、重水タンクの各層に重水を満たし、熱中性子成 分を最も多く含むモードであり、皮膚に発症した悪性黒色腫に適用されている。Table2.1に各中 性子ビームモードの使用実績を示す。開頭照射が実施されていた初期の医療照射では、熱中性子 ビームモードIを多く使用してきたが、熱外中性子ビームが使用できるようになってからは、非 開頭照射を行うことが多くなっている。

中性子ビームモード	症例数 括弧内反射体変更後	主な適用部位	
熱外中性子ビーム	81 (7)	悪性脳腫瘍(非開頭)、頭頸部癌、肺腫瘍	
熱中性子ビームモード I	24	悪性脳腫瘍(開頭)、頭頸部癌	
熱中性子ビームモードⅡ	2 (1)	悪性黒色腫(足裏)	

Table 2.1 JRR-4の中性子ビームモードの使用実績



Fig. 2.1 JRR-4 中性子ビーム設備の概要

# 3 反射体変更に伴う中性子ビーム設備への影響

### 3.1 反射体の設計変更

JRR-4の炉心は、Fig3.1 に示すように 6 種類(計 33 体)の黒鉛反射体、1 種類(計 3 体)の アルミニウム反射体が装荷されている。このうち 1 本の普通反射体のアルミニウム被覆部に割れ が発生した。その原因は、黒鉛反射材の照射成長によるアルミニウム被覆材に加えられた過大な 応力によるものであった。そのため、黒鉛反射材を使用している反射体について、黒鉛の照射成 長を考慮した設計変更が行われた。主な設計の変更点は、黒鉛反射体の体積の減少、アルミニウ ム被覆材の肉厚の増加、これらに伴う黒鉛反射材とアルミニウム被覆材の間隙の増加である。さ らに、黒鉛反射材を均一に照射成長させて反射体の使用期限を延長できるようにするため、大型 反射体を除く全ての反射体について、鉛直方向の軸に対して 180°回転させて使用できるような 設計となっている。Table3.1 に新旧の反射体の設計値を示す。最も装荷数の多い普通反射体では、 黒鉛反射材の体積が約 8.3%減少、アルミニウム被覆材の肉厚が 0.5mm 増加、黒鉛反射材とアル ミニウム被覆材の間隙が 1.0mm 増加された。さらに、中性子ビーム設備に影響を与えることが 予想される特殊反射体 II 型では、黒鉛反射材の体積が約 15.0%減少するとともに、鉛直軸周りに 180°回転出来るように 6mm の軽水ギャップが追加された。

#### 3.2 核特性解析

反射体の変更に伴う燃料領域の熱中性子束及び過剰反応度の変化についての核特性解析を行った。解析には、汎用核計算コードシステム SRAC2006<sup>13)</sup>を使用した。SRAC コードシステムは、 幾つかの核計算モジュールを統合したコードシステムであり、今回の解析では、衝突確率法計算 モジュール(PIJ)と多次元拡散計算モジュール(CITATION)を用いて解析を行った。計算に 用いる核データライブラリには、JENDL-3.2を使用した。

SRACによる計算では、燃料要素、反射体、照射筒等の各炉心構成要素の鉛直方向に複数分割 することにより、吊り手、燃料板、プラグ部、格子板等の鋼製部材に分割し、それぞれの炉心構 成要素(燃料、反射体、照射筒等)の水平断面については、冷却水、アルミニウム、燃料芯材又 は黒鉛が断面に一様に分布しているものとした均質化断面積を使用した。Fig.3.2 に計算に使用し た反射体変更後の炉心モデル(水平断面)を示す。主な反射体変更前後における違いは、反射体 の黒鉛及びアルミニウムの原子個数密度の変更、特殊反射体 I型とⅡ型の水ギャップ領域の追加 である。付録に計算に使用した主要な構成要素の原子個数密度を示す。

燃料領域の中性子束(<3.0eV)は、燃料の燃焼が平衡状態となっている炉心(14%均質平衡炉 心)を仮定して、JRR-4の最大出力である3500kWに換算した時の最大値及び平均値を算出した。 均質平衡炉心と仮定したのは、JRR-4の燃料管理において、炉心全体の燃焼度を平衡状態にする ような管理が行われているためであり、JRR-4の設置許可に準じる考えである<sup>14)</sup>。Table3.2 に 中性子束の結果を示す。ここから、反射体変更前後で燃料領域の中性子束に有意な変化のないこ とを確認した。過剰反応度は、全制御棒6本を上限に設定して、その時の実効増倍率から算出し た。Table3.3 に過剰反応度の結果を示す。反射体の変更に伴い0.52%∠k/k反応度が低下した。 この結果は、核分裂生成物(FP)等による影響、制御棒の持つ反応度に比べて十分に小さな値で あり、制御棒位置に換算すると数 mm 程度の変化である。核特性評価から、燃料領域の中性子束、 過剰反応度には、大きな変化は無く、中性子ビーム設備に与える影響は、少ないことが示された。

# 3.3 中性子ビーム設備の中性子スペクトル解析

中性子ビーム設備の中性子束及びガンマ線線量の計算には、モンテカルロ輸送計算コード MCNP5.1.51<sup>15)</sup>を使用し、核データライブラリには、ENDF/B·6 を使用した。計算モデルは、3.2 節の評価で作成した SRAC の多次元拡散計算(CITATION)のモデルを基にして、鉛直方向につ いては、燃料要素、反射体、照射筒等の炉心構成要素の部材ごとに吊り手、燃料板、反射材、照 射筒、プラグ部、格子板等の鋼製部を設定した。水平断面については、構成要素(燃料、反射体、 制御棒)ごとに、冷却水、アルミニウム、燃料芯材又は黒鉛が一様に分布しているものとして、 混合材質の原子個数密度を設定した。Fig. 3.3 に反射体変更前後の MCNP の炉心モデルを示す。 これらのモデルを用いてビーム孔における中性子束、ガンマ線線量を計算し、反射体変更前後の 中性子ビームの性能評価を行った。付録に計算に使用した主要な構成要素の原子個数密度を示す。

Fig. 3.4 に反射体変更前後の中性子スペクトルの比較を示す。反射体変更に伴い中性子スペクトルには、変化の無いことが分かる。次に、反射体変更に伴う熱中性子(<0.53eV)、熱外中性子(0.53eV~10keV)、高速中性子(>10keV)及びガンマ線線量の比較結果をTable 3.4 に示す。ここから、各中性子ビームモードにおいて、熱中性子、熱外中性子は、約5~8%低下、高速中性子については、約1~5%低下、ガンマ線束については、5~8%低下していることが分かった。この中性子束の低下の原因は、中性子ビーム設備側の特殊反射体Ⅱ型に新たに設けられた水ギャップ部で中性子が吸収されたためであり、医療照射を行う上では、反射体の変更に伴う中性子強度の低下による照射時間の延長が予想される。しかし、この中性子束の低下は、原子炉の出力変動に比べても少ない変化であり、BNCTの実施には影響は無いと考えることができる。

	大米	黒鉛反射材外寸		アルミ被覆肉厚	黒鉛 ・ アルミ被覆間隙
区初举石桥	平奴		(mm)	(mm)	(mm)
並通应射休	91	旧	72×72×691	3.0	1.0
日迪汉গ许	21	新	69×69×690	3.5	2.0
		旧	$140 \times 70 \times 690$	3.5	1.5
大型反射体 I 型	4	新	136×68×690	4.0	<ul><li>2.0 (炉心タンク側)</li><li>4.0 (燃料要素側)</li><li>2.0 (側面)</li></ul>
		旧	70×109×690	3.5	1.5
大型反射体Ⅱ型	2	新	66×105×690	4.0	2.0(炉心タンク側) 4.0(燃料要素側) 3.0(側面)
時建豆斛休Ⅰ刑	1	旧	71×59×616	3.0	1.5
村外区沿岸1至	1	新	69×46×615	3.5	2.0
時建長時休Ⅱ刑	4	旧	70×66×631	3.0	1.0
村外区别世11空	4	新	69×57×630	3.5	2.0
特殊反射体Ⅲ刑	1	旧	$74 \times 74 \times 688$	1.5	1.5
村/环队剂 伊田空	1	新	69×69×685	3.5	2.0

Table 3.1 JRR-4 の新旧反射体の仕様

# Table 3.2 燃料領域の中性子束の変化

	中性子束(n/cm²/s)(<3.0eV)			
	最大	平均		
反射体変更前	$7.08 \times 10^{13}$	$3.26 \times 10^{13}$		
反射体変更後	$7.06 \times 10^{13}$	$3.23 \times 10^{13}$		

# Table 3.3 過剰反応度の変化

	実効増倍率 keff	反応度(% <b>//k/k</b> )
反射体変更前	1.060	5.63
反射体変更後	1.054	5.11

中性子ビームモード	熱中性子束	熱外中性子束	高速中性子束	ガンマ線線量			
熱外中性子ビームモード	-8.1%	-7.8%	-4.7%	-4.5%			
熱中性子ビームモード I	-6.4%	-8.4%	-1.1%	-7.7%			
熱中性子ビームモードⅡ	-6.7%	-5.1%	-1.3%	-7.1%			

Table 3.4 反射体の設計変更に伴う中性子ビーム性能の変化



Fig. 3.1 JRR-4の炉心配置図(反射体変更後)



Fig. 3.2 SRAC で用いた炉心モデル(反射体変更後)

![](_page_13_Figure_3.jpeg)

Fig. 3.3 MCNP で用いた炉心モデル(反射体変更後)

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

Fig. 3.4 各中性子ビームの中性子スペクトル

# 4 JRR-4 中性子ビーム設備の特性測定

# 4.1 特性測定の概要

今回の特性測定では、フリービーム実験及び水ファントム実験を行った。フリービーム実験で は、ビーム孔出口の熱中性子束及びガンマ線線量の測定を行い、ファントム実験では、人体の頭 部を模擬した水ファントムの表面とその内部(ビーム軸上)の熱中性子束分布及びガンマ線線量 分布の測定を行った。熱中性子の測定には、金(<sup>197</sup>Au)を使用し、β・γ同時計数法を用いて金 の放射化量の測定を行った。熱中性子束の算出には、金(裸金)とカドミウムで覆った金(カド ミ金)を同じ実験体系で照射して、裸金からカドミ金の放射化量を差し引く方法(カドミ差引法) を用いて行った。ガンマ線線量の測定には、<sup>6</sup>LiF 粉末をエポキシ樹脂で固化させた容器に熱線量 計(Thermo Luminescence Dosimeter: TLD、素子母材:酸化ベリリウム、Panasonic 製 170LS) を挿入したものを使用した。170LS は、TLD の封入ガラスに石英ガラスを使用したもので、市 販されている硼珪酸ガラスのものよりも中性子に対する感度が低い特徴がある。中性子照射場に おいては、金又はカドミウムから発生する2次ガンマ線の影響によるガンマ線測定への影響を考 慮して、裸金、カドミ金及び TLD を使用した実験は個別に実施する必要がある。実験は、Table4.1 に示す日程で平成 22 年 2 月から平成 22 年 12 月の期間に実施した。

# 4.2 フリービーム実験の概要

フリービーム実験は、Fig.4.1 に示すようなノーマルコリメータ出口( $\phi$ 10cm)に金箔又はTLD を配置した体系で実施した。フリービーム実験では、コリメータ出口の熱中性子束、カドミ比及 びガンマ線線量について評価を行った。熱中性子束の測定では、ビーム孔中央から25mm離れた 位置に裸金箔とカドミ金箔を左右対称に配置した。使用した金箔は5mm×5mm、厚さ0.1mm であり、金箔を覆うカドミウム板は、厚さ0.5mmのものを使用した。実験時の原子炉出力は、 熱中性子測定では、3500kW、ガンマ線線量測定では、200kWとして、測定時間は、中性子ビー ムモード毎に十分な放射化量を得るために60分~90分間の照射を行った。

#### 4.3 ファントム実験の概要

水ファントムは、Fig.4.2 に示すように頭部を模擬した外径 18.6cm、内径 18.0cm の円筒形状 のアクリル樹脂製 (Poly(Methyl Meth Acrylate): PMMA) 容器と直方体のアクリル樹脂製容器 を組みわせた仕様となっている。ファントム内部は、精製水で満たし、金線又は TLD をビーム 軸上に配置するためのアクリル樹脂製の台を配置した。

熱外中性子ビームモード及び熱中性子ビームモード I のファントム内熱中性子束分布測定では、 Fig.4.3 に示すようにファントム表面及び内部に直径 0.25mm の金線(裸金線)又はカドミウム 管(外径 2.3mm、内径 1.3mm)に封入した金線(カドミ金線)を配置した。ファントム内の熱 中性子束のピーク位置をできるだけ詳細に評価するため、照射後に行う金線の切断位置は、ビー ム入射側から 0cm~3cm までを 0.5cm 毎に、3cm~10cm を 1cm 毎とした。熱中性子ビームモー ドIIについては、ファントム表面のみに裸金線又はカドミ金線を配置した。ガンマ線線量の測定 は、Fig.4.4 に示すようにビーム軸上のファントム表面に 1 個、ファントム内部に 6 個(ビーム 入射側から 1cm、2cm、3cm、4cm、6cm、8cm)の TLD を配置した体系で実施した。

# 4.4 モニター金線を用いた出力補正

中性子ビーム設備の中性子束及びガンマ線の強度は、燃焼度、核分裂生成物の生成、冷却水温 度(外気温)等による反応度に対する影響により、BNCT実施日又は実験日ごとに変動する。そ の変動をモニターするため、金線(モニター金線)を用いた出力の測定を行っている。モニター 金線以外にも、ガス検出器やシンチレーション検出器を用いた検討が行われてきたが、小型且つ 計算処理が容易であることから、金線モニターが採用されている。モニター金線は、金線(2.5cm) を熱外中性子ビームモード及び熱中性子ビームモードIではカドミウム管に封入し、熱中性子ビ ームモードIIではアルミニウム管に封入したものを使用し、Fig.4.5 に示すようにコリメータ内の ビスマスガンマ線遮へい体の前に配置する。その使用方法は、ファントム実験を行った日を基準 日として、その時に得られるモニター金線の反応率RR<sub>std</sub>(barn·n/cm<sup>2</sup>/s)を反応率の基準として 定め、BNCT実施日の反応率RR(barn·n/cm<sup>2</sup>/s)との比を用いて原子炉出力の補正に使用するも のである。今回の測定では、3 つの中性子ビームモードについて、基準となるモニター金線の反 応率RR<sub>std</sub>及びその時の熱出力を算出した。さらに、熱外中性子ビームモードについては、原子炉 出力を 1000kW、2000kW、3500kW 運転した時の金線モニターの反応率とファントム内の最大 熱中性子束との関係を測定し、原子炉出力とファントム内の熱中性子束の相関関係確認を行った。 反応率RRは次のように定義される。

 $RR = \sigma_{197}\phi \tag{4.1}$ 

RR : 金の反応率 (barn·n/cm<sup>2</sup>/s)

*σ*<sub>197</sub> : 金(<sup>197</sup>Au) のミクロ反応断面積(barn)

**φ** : 照射中の中性子フラックス (n/cm<sup>2</sup>/s)

さらに、反応率RRは、照射直後の放射能A<sub>0</sub>を用いて次のように表せる。放射能A<sub>0</sub>の算出については、次節で詳しく説明を行う。

$$RR = \frac{A_0}{N(1 - \exp(-\lambda t_i))}$$
(4.2)

A<sub>0</sub> : 照射直後の放射能(Bq)

- N : 照射前のモニター金線の金 (197Au) の原子個数 (n)
- λ : 金 (<sup>198</sup>Au)の崩壊定数 (s<sup>-1</sup>)
- *t*<sub>i</sub> : 金の照射時間

### 4.5 熱中性子束の測定方法

# 4.5.1 β-γ同時計数法

熱中性子束測定では、金 (Au) が最も広く利用されている。その理由は次のとおりである。(i) 金は、存在比 100%の <sup>197</sup>Au からなり、中性子による放射化反応 <sup>197</sup>Au(n,  $\gamma$ )<sup>198</sup>Au の断面積が1/v法 則に従う。(ii) <sup>197</sup>Au の放射化断面積は V<sub>0</sub>=2200m/s の中性子に対して断面積  $\sigma$  =98.5±0.4barn である。また、非1/v補正因子 g も約 1 である。(iii) <sup>197</sup>Au の放射化によって生成する誘導核 <sup>198</sup>Au の壊変は Fig.4.6 から分かるように比較的単純化できるため、その壊変率を決定し易い。(iv) <sup>198</sup>Au の半減期は 2.698 日で、放射能測定に適した値である。これらの理由から、本実験でも金の箔又 は金線を用いることとした。

Fig.4.6 に示したように、<sup>197</sup>Au の放射化によって生成した誘導核 <sup>198</sup>Au は、β崩壊によって <sup>198</sup>Hg の第1励起状態を通って 411.8keV のγ線放出後に基底状態に移行する。第1励起状態の 半減期は、22ps と非常に短いので、<sup>198</sup>Au から <sup>198</sup>Hg への転移に伴ってβ線とγ線が同時に放出 されるものと見なすことができる。このβ線とγ線の同時放出を利用した金箔の放射化量の絶対 値測定法として、β-γ同時計数法がある。この方法は、測定対象核種がβ崩壊後、直ちにγ線を 放出する場合には、β線及びγ線検出器の検出効率が不明であっても線源の壊変率を決定するこ とができる。

次に、 $\beta - \gamma$ 同時計数法を用いた金の誘導放射能を測定するために必要な原理を説明する。<sup>198</sup>Au が Fig.4.6 に示すように $\beta_3$ の分岐比が小さく $\beta_1$ の放出により達するエネルギー準位からは、そ の大部分が 411.8keV のエネルギー準位に落ちるため、この壊変図は簡略化することができ、 $\beta$ - $\gamma$ 同時計数に適用することができる。不感時間を無視して、計数ユニットの分解時間のみを補正 すると各計数率は次式で表わされる。

$$r_{\beta} = N_{\beta} - N_{\beta,BG} \tag{4.3}$$

$r_{\gamma} = N_{\gamma} - N_{\gamma,BG}$	(4.4)
---	-------

$$r_t = N_{\beta,\gamma} - N_{\beta,\gamma,BG} - 2\tau N_\beta N_\gamma \tag{4.5}$$

- $N_{\beta}$  : 測定された  $\beta$  線の計数率
- $N_{\gamma}$  : 測定された  $\gamma$  線の計数率
- $N_{\beta,\nu}$  : 測定された  $\beta$  線と  $\gamma$  線の同時計数率
- *N<sub>β,BG</sub>* : β線のバックグラウンド計数率
- $N_{\gamma,BG}$ :  $\gamma$ 線のバックグラウンド計数率
- $N_{\beta,\gamma,BG}$ :  $\beta$ 線と $\gamma$ 線の同時計数のバックグラウンド計数率
- *τ* :計数装置の分解時間(4.1×10<sup>-7</sup> sec)
- $r_{\beta}$  :  $\beta$ 線検出器の $\beta$ 線に対する計数率
- *r*<sub>γ</sub> : γ 線検出器の γ 線に対する計数率
- *r*<sub>t</sub> :真の同時計数率

放射化された金の真の崩壊率をSとする。γ線の放出割合が内部転換電子の放出によって減少

すること、内部転換電子の検出効率がβ線と異なることを考慮すると式(4.3)、式(4.4)、式(4.5) は次式で表わされる。

$$r_{\beta} = \varepsilon_{\beta}S + \frac{(1 - \varepsilon_{\beta})(\alpha\varepsilon_{\beta,c} + \varepsilon_{\beta,\gamma})}{1 + \alpha}S$$
(4.6)

$$r_{\gamma} = \varepsilon_{\gamma} \frac{1}{1+\alpha} S \tag{4.7}$$

$$r_t = \varepsilon_\beta \varepsilon_\gamma \frac{1}{1+\alpha} S \tag{4.8}$$

- α : 放出 γ 線転移に対する内部転換係数(-)
- *ε*<sub>β</sub> : β線検出器のβ線に対する絶対検出効率(-)
- *ε*<sub>γ</sub> : γ 線検出器の γ 線に対する絶対検出効率(-)
- ε<sub>β,c</sub>: β線検出器の内部転換電子に対する検出効率(-)
- *ε*<sub>β,γ</sub> : β線検出器のγ線に対する検出効率(-)

式(4.6)、式(4.7)、式(4.8)から真の崩壊率Sを求めると次のようになる。

$$S = \frac{\frac{r_{\beta}r_{\gamma}}{r_{t}}}{\left[1 + \frac{(\alpha\varepsilon_{\beta,c} + \varepsilon_{\beta,\gamma})(1 - \varepsilon_{\beta})}{\varepsilon_{\beta}(1 + \alpha)}\right]}$$
(4.9)

計測モジュール SCA を用いることでノイズレベルの $\gamma$ 線の影響を排除できる。そのため、 $\beta$ 検出器の $\gamma$ 線に対する検出効率 $\epsilon_{\beta,\gamma}$ は無視できるほど小さくなる。ただし、SCA を通過すること により $\beta$ 検出器の $\beta$ 線に対する検出効率も低下することになる。さらに、 $\beta$ 線検出器の内部転換 効率 $\epsilon_{\beta c}$ は、金の内部転換効率 $\epsilon_{ec}$ と $\beta$ 線検出器の $\beta$ 線に対する検出効率 $\epsilon_{\beta}$ との積である  $\epsilon_{\beta,c} = \epsilon_{ec} \times \epsilon_{\beta}$ で表わされる。従って、式(4.9)は、次のように表わすことができる。

$$S = \frac{\frac{r_{\beta}r_{\gamma}}{r_t}}{\left[1 + \frac{\alpha\varepsilon_{ec}(1 - \varepsilon_{\beta})}{(1 + \alpha)}\right]}$$
(4.10)

ここで、 $\beta$ 検出器の $\beta$ 線に対する検出効率 $\varepsilon_{\beta}$ は、式(4.7)と式(4.8)から $\gamma$ 線と $\beta$ 線の計数率 $\gamma_t$ と  $\gamma$ 線検出器の $\gamma$ 線に対する計数率 $\gamma_v$ を用いて次式のように表わされる。

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{r_{\gamma}}{\gamma_t} \tag{4.11}$$

今回の特性測定では、金の内部転換効率 $\epsilon_{ec}$ には 0.918 を用い、放出 $\gamma$ 線転移に対する内部転換 係数 $\alpha$ の値は、<sup>198</sup>Auの 411keVの $\gamma$ 線に対する値である 0.044 を用いた。

# 4.5.2 熱中性子束の算出

 $\beta \cdot \gamma$ 同時計数法により得られた壊変率から金(裸金、カドミ金)の放射能濃度は次のように表せる。

$$A_{bare} = \frac{S_b e^{-\lambda T_{c,b}}}{W_b} \tag{4.12}$$

$$A_{cd} = \frac{S_c \mathrm{e}^{-\lambda T_{c,c}}}{W_c} \tag{4.13}$$

Abare: 裸の金の照射直後の放射能濃度(Bq/g)

- Aca : カドミウムで覆った金の照射直後の放射能濃度(Bq/g)
- $S_b$  :裸の金の壊変率  $(s^{-1})$
- $S_c$  : カドミウムで覆った金の壊変率 (s<sup>-1</sup>)
- *T<sub>c,b</sub>* : 裸の金線の冷却時間(s)
- *T<sub>c,c</sub>* : カドミウムで覆った金線の冷却時間(s)
- *W<sub>b</sub>* : 裸の金線の重量 (g)
- W<sub>c</sub> : カドミウムで覆った金線の重量 (g)
- λ : 金 (<sup>198</sup>Au)の壊変定数 (s<sup>-1</sup>)

熱中性子束 $\phi_{th}$ は、式(4.12)の放射能濃度を用いて以下のように表せる。

$$\phi_{th} = \frac{A_{bare}(1 - \frac{1}{R_{cd}})}{N\sigma_{act}f(1 - e^{-\lambda T_{ib}})P}$$
(4.14)

$$N = \frac{YN_0}{M} \tag{4.15}$$

- f : 金線の熱中性子自己吸収補正係数(=0.925)
- M : 197Au の原子量 (amu)
- Y : 金の存在比(-)
- N : 金の単位重量あたりの原子数 (-)

*N*<sub>0</sub> : アボガドロ数 (/mol)

P : 裸の金線の原子炉出力補正係数 (-)

R<sub>cd</sub> : カドミ比 (-)

*T<sub>ib</sub>* : 裸の金線の照射時間(s)

T<sub>ic</sub> : カドミウムで覆った金線の照射時間(s)

 $\phi_{th}$  : 熱中性子束 (n/cm<sup>2</sup>/s)

*σ<sub>act</sub>* :Maxwell 分布の熱中性子束に対する平均の金(<sup>197</sup>Au)のミクロ断面積(barn)

カドミ比*R<sub>cd</sub>*は、カドミウムで覆った金線の照射時間を裸の金線の照射時間の補正を考慮して次のように表せる。

$$R_{cd} = \frac{A_{bare}}{A_{cd}} \frac{\left(1 - e^{-\lambda T_{ic}}\right)}{\left(1 - e^{-\lambda T_{ib}}\right)}$$
(4.16)

Maxwell 分布の熱中性子束に対する平均の金のミクロ断面積 $\sigma_{act}$ は、放射化断面積のエネルギー変化が1/v法則に従うと仮定すると、次のように表せる。ここでは、中性子温度 $T_b$ は、媒質温度 $T_0$ と同じとした。式(4.17)より、 $\sigma_{act}$ は 87.56barn となる。

$$\sigma_{act} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi T_0}{T_b}} \sigma_0 \tag{4.17}$$

*T*<sub>0</sub> : 媒質温度 (K)

 $T_b$  : 中性子温度 (K)

σ<sub>0</sub> : 中性子速度v<sub>0</sub> (2200m/s) に対する <sup>197</sup>Au のミクロ断面積 (=98.8barn)

JRR-4 は、Fig.4.7 に示すような運転パターンで出力を変動させるため、実験中以外の出力に ついて補正する必要がある。そこで、裸の金線の原子炉出力補正係数Pを原子炉出力の上昇及び 停止の過程の積算出力を補正係数として次のように表せる。

$$P = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I_2} \tag{4.18}$$

I<sub>1</sub> :出力上昇時の積算出力(kW·s)

I<sub>2</sub> :定常運転(実験中)の積算出力(kW·s)

I<sub>3</sub> :出力低下時の積算出力(kW·s)

原子炉出力は、ペリオドに従い指数関数的に変化するため、原子炉出力の上昇時及び低下時の

積算出力Icは次のようになる。

$$I_{c} = \int_{0}^{t_{c}} P_{b} \cdot e^{\lambda t} dt$$
  
$$= \frac{P_{b}}{\lambda} \left( e^{\lambda t_{c}} - 1 \right)$$
  
$$= \frac{P_{b}}{\frac{1}{t_{c}} \ln \left( \frac{P_{a}}{P_{b}} \right)} \left( \frac{P_{a}}{P_{b}} - 1 \right)$$
(4.19)

λ : ペリオド (s)

*P*<sub>b</sub> : 出力変動前の出力(kW)

*P*<sub>a</sub> : 出力変動後の出力 (kW)

*t<sub>c</sub>* : 出力変動中の時間 (s)

式 (4.19) から出力変動中の積算出力 $I_1$ 及び $I_3$ を求めて、式 (4.18) に代入することにより、原 子炉出力補正係数Pを算出して、式 (4.14) を用いて実験中の熱中性子束 $\phi_{th}$ を求めることができ る。

中州フレーシャード	フリービ	ーム実験	ファントム実験	
中性于日本五十一下	熱中性子束	ガンマ線線量	熱中性子束	ガンマ線線量
教み 市歴 スビーム	H22.3.11	H22.12.24	裸 金:H22.2.23	<b>U</b> 00 0 00
烈外中性于L			カドミ金:H22.2.24	1122.2.23
カロサンビー / 1	1100 10 00	H22.10.20	裸 金:H22.4.28	H22.3.26
	П22.10.20	H22.11.15	カドミ金:H22.4.28	H22.10.27
効 由州 スピー / Ⅱ	1100 2 20	H22.8.2	裸 金:H22.3.29	H22.8.2
	П22.3.29	H22.8.16	カドミ金:H22.3.29	H22.8.16

Table 4.1 各実験の実施日

![](_page_22_Figure_1.jpeg)

![](_page_22_Figure_2.jpeg)

![](_page_22_Figure_3.jpeg)

Fig. 4.2 アクリル樹脂製のファントム

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

Fig. 4.3 ファントム実験体系(熱中性子測定)

![](_page_23_Figure_3.jpeg)

Fig. 4.4 ファントム実験体系 (ガンマ線線量測定)

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

Fig. 4.5 金線モニタの配置場所

![](_page_24_Figure_3.jpeg)

Fig. 4.6 金 (<sup>198</sup>Au) の崩壊図

![](_page_24_Figure_5.jpeg)

Fig. 4.7 原子炉の運転パターン

#### 5 特性測定結果及び考察

### 5.1 フリービーム実験の結果

Table5.1に3つの中性子ビームモードについて、フリービーム実験で得られた熱中性子束、カ ドミ比及びガンマ線線量の結果を示す。反射体変更前後のカドミ比は、熱外中性子ビームモード で変更前は1.2、変更後は1.1、熱中性子ビームモードΙで変更前は2.3、変更後は2.4、熱中性 子ビームモードΙIで変更前は10.6、変更後は11.8となり、金線の配置、金線の切断、β・γ同時 計数装置等による実験誤差を考慮して有意な差の無いことを確認した。熱中性子束は、原子炉出 力の変動に影響を受けるため、反射体変更後の値のみを示す。

#### 5.2 ファントム実験の結果

Fig.5.1、Fig.5.2 に熱外中性子ビームモード及び熱中性子ビームモードIのファントム内の熱 中性子束分布及びガンマ線線量分布を示す。結果は、MCNPの計算値(3500kW換算)と比較す るため、モニター金線の値を用いて原子炉出力 3500kW に規格化した値を示す。Table5.2 に熱外 中性子ビームモードと熱中性子ビームモードIについて、ファントム内の最大値(熱中性子束及 びガンマ線線量)を示す。ファントム内の最大熱中性子束は、熱外中性子ビームモードでは、2.878 ×10<sup>9</sup>n/cm<sup>2</sup>/s、熱中性子ビームモードIでは、4.868×10<sup>9</sup>n/cm<sup>2</sup>/s となり、計算値と実験値との比

(C/E)を求めると、熱外中性子ビームモードで 1.011、熱中性子ビームモードで 0.994 となった。 熱中性子束の最大値が出現するファントム表面からの距離は、熱外中性子ビームモードでは、 1.6cm、熱中性子ビームモード I では、0.6cm になった。ファントム内のガンマ線線量の最大値 は、熱外中性子ビームモードでは、6.82Gy/h、熱中性子ビームモード I では、9.68Gy/h になり、 C/E は、それぞれ 0.99、0.96 になった。最大値の出現するファントム表面から距離は、熱外中性 子ビームモードでは 2.0cm、熱中性子ビームモード I では 1.3cm となった。ガンマ線線量は、ビ ーム中に含まれるガンマ線とファントム内の水素と熱中性子の吸収反応(<sup>1</sup>H(n, γ)<sup>2</sup>H) に由来す るものであり、熱中性子束よりも僅かに深い位置に最大値が出現する。

Table5.3、Table5.4 に 3 つのビームモードの熱中性子束及びガンマ線線量のファントム表面で の値とファントム内の最大値を示す。この値は、原子炉出力での規格化を行わず、得られた実験 値をそのまま示す。表面の値と最大値の比は、線量評価システム(JCDS)で皮膚の線量を算出 するために用いられている係数であり、熱外中性子ビームモード及び熱中性子ビームモード I を 用いた評価に使用されるものである。

なお、皮膚癌等の体表の疾患に用いられる熱中性子ビームモードⅡでは、ファントム内の熱中 性子束分布は必要でないため、表面の熱中性子束のみを示す。熱中性子ビームモードⅡを用いた BNCT では、患部表面に張り付けた金線(裸金)の放射化量とカドミ比(52.60)から熱中性子 束を算出している。

# 5.3 モニター金線の基準値

Fig.5.3 に熱外中性子ビームモードについて、原子炉出力 1000kW、2000kW、3500kW における金線モニターの反応率とファントム内の最大熱中性子束の関係を示す。原子炉出力とファント

ム内の熱中性子束の間に相関関係があることを確認し、線量評価を行う上で、モニター金線を用いた出力補正方法が有効であることを確認した。Table5.5 に各ビームモードの原子炉出力3500kW時の基準となる反応率RRstdを示す。この反応率RRstdは、照射中の原子炉出力の算出に用いる重要なパラメータとなる。

# 5.4 軟組織ファントムに対する線量評価

反射体変更前後の中性子ビーム特性変化に伴う BNCT に対する影響を評価するため、JCDS を 用いた線量評価シミュレーションを実施した。線量評価は、特性測定で得られた C/E 値、ファン トム表面と最大値の比を基に、Fig.5.4 に示すような軟組織ファントムに対する線量評価計算を実 施した。軟組織ファントムは、特性測定に用いた円筒形のファントムと同形である直径 18.6cm、 高さ 24cm の円筒形として、材質には、ICRU レポート 4616の定める Soft Tissue を設定し、さ らに、深さ 1cm 位置に直径 5cm、高さ 3cm の円筒形の腫瘍部を配置したものである。この軟組 織ファントムをΦ10cm ノーマルコリメータ手前 1cm に置き、原子炉出力 3500kW の条件におけ る線量評価を実施し、反射体変更に伴う影響を評価した。Table5.6に線量評価条件を示す。この 評価条件は、ホウ素薬剤として BPA(p-Boronophenylalanine : C<sub>9</sub>H12O4NB)を用いた場合のプ ロトコールに準じて決定している。正常組織のホウ素濃度は、24ppm として、この値に腫瘍部は 3.0 及びファントム表面の皮膚部 1.2 を乗じて、それぞれのホウ素濃度を 72ppm、28.8ppm に設 定した。CBE(Compound Biological Effectiveness)は、ホウ素化合物毎に決められているホウ 素と中性子の吸収反応(<sup>10</sup>B(n,α)<sup>7</sup>Li)による生物学的効果を示す値であり、腫瘍で 3.8、正常組 織で 1.35、皮膚で 2.5 に設定した。さらに、RBE(Relative Biological Effectiveness)は、生体 構成元素(窒素、水素)と中性子の相互作用による線量及び炉心からのガンマ線線量に対する生 物学的効果を示す値であり、それぞれ 2.5 及び 1.0 に設定した。これらの生物学的効果比(CBE、 RBE)は、物理線量(Gy)からX線等価線量(Gy-Eq)に変換するために使用されものであり、 生物実験により得られた JRR-4 の中性子ビーム固有の値である。

ここで、JCDS を用いた計算方法について簡単に述べる。JCDS は、非開頭の BNCT を実施す るために開発された原子力機構独自の BNCT 用治療計画システムである<sup>17)</sup>。その特徴は、CT 及 び MRI の医療画像から任意のボクセルを組み合わせた 3 次元計算モデルを作成し、脳や腫瘍等 の関心領域(ROI)の作成、モンテカルロ計算用インプットの出力(MCNP、PHITS<sup>18)</sup>)、モン テカルロ計算結果の読込み及び各材質、関心領域(ROI)の線量結果を出力できることである。 Fig.5.5 に JCDS で作成した軟組織ファントムモデルを、Fig.5.6 に MCNP のインプットを示す。 今回の計算では、モンテカルロ計算コードとして MCNP5 を使用し、計算体系は、炉心を含めた 場合、膨大な計算時間が必要となるため、ビーム孔の手前約 20cm のビーム軸に対して垂直な面 に線源を作成した繋ぎ計算を実施した。この線源の位置は、ビーム孔出口にファントム又は患者 モデルを配置した場合においても、後方散乱の影響を受けることの無い位置に線源を指定してい る。計算精度は、通常の 2mm ボクセルを用いた評価モデルでは、10 時間程度で数億の粒子数(ヒ ストリー)の計算を実行し、線量評価に必要な精度である 5%以内を得ることが可能である。

Table5.7 に軟組織ファントムに対する線量評価結果を示す。反射体変更により、照射時間が 6.7%(1.3分)延長し、腫瘍部、正常組織、皮膚の線量については、それぞれ約1%増加する結 果となった。Fig.5.7 にヒストグラムの結果を示す。ヒストグラムは、腫瘍部に対する等価線量に ついて、その線量が付与された体積の割合を示すものであり、治療効果又は正常組織に対する影 響を比較するために使用されるものである。この結果からも、BNCTの照射場としての性能に変 更の無いことが分かる。僅かに反射体変更後の線量が大きくなるのは、反射体変更に伴うスペク トル変化による影響は僅かであると考えられる。照射時間の延長は、中性子束の強度の低下に伴 うものであり、JRR-4 中性子ビームの性能の低下を示すものであるが、その延長割合は 6.7%で あり、BNCT を実施する上で大きな問題にならないと考えられる。しかし、BNCT の被験者及び 主治医に対して十分に説明した上で BNCT の臨床研究を実施する必要がある。

# 5.5 リチウムフィルタを用いた線量の増強効果

本節では、技術開発として行った熱外中性子ビームモードの改良について述べる。通常、BNCT は、1回の照射によって治療に必要な線量を腫瘍部に付与することができる。そのためには、照 射に適した中性子ビームの選択が必要であり、JRR-4では、3つの中性子ビームモードが BNCT に使用されている。さらに、熱外中性子ビームモードについては、ビーム中の熱中性子割合を低 下させることにより、生体深部に位置する腫瘍に対しても大きな線量を付与することが可能とな る。そこで、熱中性子を吸収するフィルタを用いた照射技術の開発を行った。

熱中性子の吸収には、リチウム(6Li)を採用した。6Liは、1/v特性を有し、熱中性子を効果 的に吸収できること、さらに、発生する2次ガンマ線が少ない特徴がある。これまでも、6Liは、 中性子遮へい材として、コリメータ及びビーム孔等に使用されている。本検討で使用する材料は、 加工が容易であることを理由に、フッ化リチウム(LiF)とポリテトラフルオロエチレン(テフ ロン<sup>®</sup>)を1対1の重量割合で混合した材料を使用した。フッ化リチウムの添加量は、熱中性子 を吸収する6Liの含有量の増加に伴う中性子束全体の低下を考慮して、その低下割合が水ファン トムを用いた解析において、ピーク値と表面の熱中性子束の比(P/S比)が3以上(フィルタ無 のP/S比=2.3)且つ、照射時間の延長が約2倍に収まるように決定した。これは、P/S比を3以 上にすることにより、5cm以上の生体深部の腫瘍に対しても、十分な線量を付与するためである。 計算解析の結果、6Liの濃縮度50%のフッ化リチウムとテフロンの混合材(厚さ:3mm)を用い ることにより、上記の要求を満足することを明らかにした。Fig.5.8 に製作したリチウムフィルタ を示す。

Fig.5.9 に MCNP 計算で求めた中性子スペクトルを示す。リチウムフィルタを用いることによ り、熱外中性子ビーム中の熱中性子割合を約 65%低減しており、これにより、Fig.5.10 に示すよ うにファントム内の熱中性子束分布は、最大値で 44%、表面の値で 60%低下することが分かった。 Fig.5.11 に表面の熱中性子束で規格化した結果を示す。ここから、熱中性子束の P/S 比が 3.1 と なり要求 (=3) を満足することを確認した。図中の斜線で示す熱中性子が増加する領域が、皮膚 の線量で照射を制御した場合の線量の増加が期待できる領域である。ここから、生体深部の線量 を増加できることを確認した。次に、JCDS を用いて実際の患者モデルに対する線量評価を実施 した。Table5.8 に皮膚線量を 10Gy-Eq で照射を制御した場合の腫瘍に付与する線量及び照射時 間の比較を示す。さらに、Fig.5.12 に腫瘍及び正常脳の線量体積ヒストグラムを示す。ここで、 GTV (Gross Tumor Volume) とは、医療画像上に腫瘍に対して目視により確認できる腫瘍領域 であり、CTV (Clinical Tumor Volume) とは、浸潤した腫瘍細胞を考慮して GTV の周囲+2cm を含む領域であり、より生体の深部に位置する CTV の線量を上げることが、リチウムフィルタ の目的である。以上の結果から、リチウムフィルタも用いることにより、GTV、CTV の線量を 増加できることを確認した。付録に計算に使用した主要な構成要素の原子個数密度を示す。

Table 0.1 / / C 公天砍相木							
由州スビームエード	熱中性子束	ガンマ線線量	カドミ比				
	$(n/cm^2/s/3500kW)$	(Gy/h/3500kW)	括弧内は変更前の値				
熱外中性子ビーム	$2.55 \times 10^{8}$	1.05	1.1 (1.2)				
熱中性子ビームI	$1.49 \times 10^{9}$	1.77	2.4 (2.3)				
熱中性子ビームⅡ	$4.76 \times 10^{8}$	0.44	11.8 (10.6)				

Table 5.1 フリービーム実験結果

Table 5.2 各ビームモードの実験値と計算値の比較

山舟フェッテード	熱中性子束(n/cm²/s/3500kW)			ガンマ線線量(Gy/h/3500kW)		
中性于ヒームモート	実験値	計算値	C/E	実験値	計算値	C/E
熱外中性子ビーム	$2.878 \times 10^{9}$	$2.909 \times 10^{9}$	1.011	6.82	6.78	0.99
熱中性子ビーム I	4.868×10 <sup>9</sup>	4.838×10 <sup>9</sup>	0.994	9.68	9.31	0.96

Table 5.3 ファントム実験結果(熱中性子束、カドミ比)

中州フレーンテード	熱中	カドミ比		
	表面	最大	表面/最大	(表面)
熱外中性子ビーム	$9.10 \times 10^{8}$	$2.47 \times 10^{9}$	0.37	2.32
熱中性子ビームI	$3.21 \times 10^{9}$	4.24×10 <sup>9</sup>	0.76	9.28
熱中性子ビームⅡ	9.13×10 <sup>8</sup>	_	_	52.60

Table 5.4 ファントム実験結果(ガンマ線線量)

い	ガンマ線線量 (mGy/h)				
中性子ピームモート	表面	最大	表面/最大		
熱外中性子ビーム	225	342	0.66		
熱中性子ビームI	303	442	0.69		
熱中性子ビームⅡ	89		_		

中性子ビームモード	実験日	基準となる反応率 RR <sub>std</sub> (barn・n/cm²/s)
熱外中性子ビーム	2010年2月23日	$2.143 \times 10^{11}$
熱中性子ビーム I	2010 年 4 月 28 日	$1.014 \times 10^{11}$
熱中性子ビームⅡ	2010 年 3 月 29 日	$1.628 \times 10^{11}$

Table 5.5 各中性子ビームの反応率の基準値

Table 5.6 軟組織ファントムに対する線量評価条件

<b>公口 公约</b>	ホウ素濃度	ODE	RBE			
术且和政	(ppm)	CBE	窒素	水素	ガンマ	
腫 瘍	72	3.8				
正常組織	24	1.35	2.5	2.5	1.0	
皮 膚	28.8	2.5				

Table 5.7 軟組織ファントムに対する線量評価結果

	照射 時間	腫瘍部 (Gy-Eq)			正常組織 (Gy-Eq)		皮膚 (Gy-Eq)
	(min)	平均	最低	最大	平均	最大	最大
反射体変更前	19.5	62.7	43.3	75.2	1.2	11.5	10.0
反射体変更後	20.8	63.1	43.7	76.0	1.2	11.6	10.0

Table 5.8 フィルタの有無による線量比較

フィルタの有無	照射時間 (min)	最小 GTV 線量(Gy-Eq)	平均 GTV 線量(Gy-Eq)	最大 GTV 線量(Gy-Eq)	最大 Left Brain 線量(Gy-Eq)
フィルタ無	18.1	32.5	56.2	79.5	11.8
フィルタ有	40.9	46.2	75.9	98.2	14.8
比較	+2.3 倍	+42%	+35%	+24%	+25%

![](_page_30_Figure_1.jpeg)

Fig. 5.1 ファントム内の熱中性子束分布 (3500kW 換算)

![](_page_30_Figure_3.jpeg)

Fig. 5.2 ファントム内のガンマ線線量分布(3500kW 換算)

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

# モニター金線の反応率(bran·n/cm<sup>2</sup>/s)

Fig. 5.3 モニタ金線の反応率に対するファントム内の最大熱中性子束

![](_page_31_Figure_4.jpeg)

Fig. 5.4 軟組織ファントム

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

Fig. 5.5 JCDS で作成した軟組織ファントム

![](_page_32_Figure_3.jpeg)

Fig. 5.6 MCNP 計算体系

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

Fig. 5.7 腫瘍部の線量体積ヒストグラム

![](_page_33_Figure_3.jpeg)

Fig. 5.8 リチウムフィルタの配置図

![](_page_34_Figure_1.jpeg)

Fig. 5.9 中性子スペクトルの比較

![](_page_34_Figure_3.jpeg)

Fig. 5.10 ファントム内の熱中性子束分布

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

Fig. 5.11 表面で規格化したファントム内の熱中性子束分布

![](_page_35_Figure_3.jpeg)

Fig. 5.12 腫瘍及び左脳の線量体積ヒストグラム

# 6 まとめ

JRR-4の反射体の設計変更に伴い、BNCT 照射場における線量解析精度の評価を行った。計算 解析による評価により、反射体変更後の燃料領域の熱中性子束の変化は、1%以内であり、中性子 ビームに対する評価では、各中性子ビームモードの熱中性子、熱外中性子、高速中性子及びガン マ線線量がそれぞれ低下することを確認した。その変化割合は、最も使用頻度の高い熱外中性子 ビームモードでは、熱中性子束及び熱外中性子束で約8%の低下、ガンマ線線量で約5%の低下と なった。各中性子ビームモードの中性子スペクトルについては、計算解析の結果により反射体変 更前後で BNCT の実施に影響を与えるような変化の無いことを確認し、さらに、特性測定で得ら れたカドミ比についても、実験誤差以上の変化のないことを確認した。

ファントム実験結果の評価から、JCDS を用いて行う患者に付与する線量の評価に必要な線量 評価パラメータを取得した。これらのパラメータを用いて行った軟組織ファントムに対する線量 評価シミュレーションでは、熱中性子束の低下に伴う照射時間の延長は、数分程度であり、中性 子スペクトルに変化が無いことから、腫瘍部を模擬した領域に付与される線量に変化は無かった。

反射体変更後、平成 22 年 3 月から平成 22 年 12 月において、合計 8 回の BNCT を実施してお り、その内訳は、熱外中性子ビームを用いた脳腫瘍に対する照射が 7 回、熱中性子ビームモード IIを用いたメラノーマに対する照射が 1 回であった。その線量評価には、今回の特性測定で得ら れた線量評価パラメータが使用されている。今後も、安全で確実な BNCT を実施していくために は、継続して線量評価に必要なパラメータや各実験条件におけるデータを取得し、その結果を評 価していくことが重要である。

# 謝辞

実験についてご指導下さった筑波大学の松村明先生、山本哲哉先生、熊田博明先生、京都大学 の古林徹先生には、深く感謝致します。実験を補助して頂いた(財)放射線利用振興協会の沼田 克彦氏、瀬畑理氏、石川靖志氏、斎藤公夫氏には、深く感謝致します。

本報告書をまとめるにあたり、ご指導下さった研究炉加速器管理部丸尾毅部長、石井哲郎次長、 村山洋二次長、JRR-4 管理課の木名瀬政美課長、JRR-4 管理課の方々、研究炉利用課の方々、そ の他多くの方に深く感謝致します。

#### 参考文献

- G. L. Locher: "Biological effects and therapeutic possibilities of neutrons", Am J Roentgenol, 36, pp.1-13 (1936)
- 2) T. Yamamoto, A. Matsumura, K. Nakai, Y. Shibata, K. Endo, F. Sakurai, T. Kishi, H. Kumada and K. Yamamoto: "Current clinical results of the Tsukuba BNCT trial", Applied Radiation and Isotopes, 61, pp.1089-1093 (2004)
- R. G. Fairchild: "Development and dosimetry of an 'epithermal' neutron beam for possible use in neutron capture therapy I. 'Epithermal' neutron beam development", Physics in Medicine and Biology, 10, pp.491-504 (1965)
- 4) Y. Nakagawa, K. Pooh, T. Kobayashi, T. Kageji, S. Uyama, A. Matsumura and H. Kumada: "Clinical review of the Japanese experience with boron neutron capture therapy and a proposed strategy using epithermal neutron beams", Journal of Neuro Oncology, 62, pp.87-99 (2003)
- H. Horiguchi, T. Nakamura, H. Kumada, H. Yanagie, M. Suzuki and H. Sagawa: "Investigation of irradiation conditions for recurrent breast cancer in JRR-4", Applied Radiation and Isotopes, 69, pp.1882-1884 (2011)
- 6) JRR-4 反射体要素割れの原因調査アドホック検討会: "JRR-4 反射体要素割れの原因調査報告書", JAEA-Technology 2008-070 (2008)
- 7) H. Horiguchi, T. Shibata, M. Yagi, K. Yokoo, K. Oyama and T. Kusunoki: "Irradiation growth of graphite in reflector elements of JRR-4" Transactions of 13<sup>th</sup> International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management (RRFM) (2009)
- 8) 八木理公、堀口洋徳、横尾健司、大山光樹、楠剛: "JRR-4 反射体要素黒鉛反射材の照射成長 に関する調査", JAEA-Technology 2008-072 (2008)
- 9) T. Nakamura, H. Kumada and T. Kishi: "Characteristics of thermal neutron flux distribution in phantom with extended collimator developed for head and neck cancer", Proceedings of 13th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-13), pp.535-538 (2006)

- 10) 山本和喜、岸敏明、堀直彦、熊田博明、鳥居義也、堀口洋二: "JRR-4 即発γ線分析装置に よる BNCT 用血液サンプルのホウ素濃度測定" JAERI-Tech 2001-016 (2001)
- 11) 堀口洋徳、山本和喜、岸敏明、大竹真一、熊田博明:"ホウ素中性子療法のための ICP 発光 分光分析法による血液中ホウ素濃度分析" JAEA-Research 2009-015 (2009)
- H. Kumada, K. Yamamoto, Y. Torii, A. Matsumura, T. Yamamoto and Y. Nakagawa: "Development of the patient setting system for BNCT at JRR-4", Proceedings of 9<sup>th</sup> International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer, pp.281-282 (2000)
- 13) 奥村啓介、久語輝彦、金子邦男、土橋敬一郎: "SRAC2006; A comprehensive neutronics calculation code system" JAEA-Data/Code 2007-004 (2007)
- 14) 石黒裕大: "JRR-4 低濃縮ウランシリサイド燃料の炉心特性; 初期炉心及び燃焼後"、 JAEA-Technology 2007-017 (2007)
- 15) X-5 Mote Carlo Team: "MCNP A general Monte Carlo N-particle transport code version 5", LA-UR-03-1987 (2005)
- 16) International committee on radiation units and measurements: "ICRU report 46; photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissue", (1992)
- 17) 熊田博明、山本和喜、鳥居義也、松村明、山本哲哉、能勢忠男、中川義信、影治照喜、内山 順三: "ホウ素中性子捕捉療法のための BNCT 線量評価システム (JCDS)の開発(協力研究)"、 JAERI-Tech 2003-002 (2003)
- 18) H. Iwase, K. Niita and T. Nakamura: "Development of general-purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code", Journal of nuclear Science and Technology, 39 (11), pp.1142-1151 (2002)

# 付録

計算解析に用いた炉心及び中性子ビーム設備の構成要素の原子個数密度を TableA-1~A5 に示す。

	(燃料要素、制御棒、冷却水)						
H	<b>本</b> 田本		核種と原	子個数密度			
件似安系			$(10^{24} \text{atoms/cm}^3)$				
			$1.07554 \times 10^{-5}$	U-235	$1.92287 \times 10^{-3}$		
	深心作于4以 ( 内· 4叫)	U-236	$1.35721 \times 10^{-5}$	U-238	$7.69035 \times 10^{-3}$		
	(下江則)	Al	$3.80043 \times 10^{-2}$	Si	$6.32544 \times 10^{-3}$		
-	24 1 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	U-234	$5.37770 \times 10^{-6}$	U-235	$9.61434 \times 10^{-4}$		
<b>除</b> 約 里手	/公本社位 (	U-236	$6.78607 \times 10^{-6}$	U-238	$3.84518 \times 10^{-3}$		
<u> </u>	(2下項)	Al	$4.90307 \times 10^{-2}$	Si	$3.16272 \times 10^{-3}$		
_	被覆材	Al	$5.9922 \times 10^{-2}$	Si	$5.7890  imes 10^{-5}$		
	(内側)	Fe	$1.3387 \times 10^{-4}$				
_	被覆材	Al	$5.9922 \times 10^{-2}$	Si	$5.7868 \times 10^{-5}$		
	(外側)	Fe	$1.3401 \times 10^{-4}$				
		B-10	$1.6276 \times 10^{-3}$	B-11	$6.0686 \times 10^{-3}$		
	生化和七万	Si	$1.1904 \times 10^{-3}$	Fe	$5.2332 \times 10^{-2}$		
	中山中小汉	Mn	$8.8677 \times 10^{-4}$	$\mathbf{Cr}$	$1.5882 \times 10^{-2}$		
		Ni	$1.2301 \times 10^{.2}$	С	$7.9531 \times 10^{-5}$		
判御捧		B-10	$4.8828 \times 10^{-4}$	B-11	$1.8206 \times 10^{-3}$		
市山市中平		Al	$2.9263 \times 10^{-2}$	Si	$5.5934 \times 10^{-5}$		
	フォロワー部	Fe	$1.5759 \times 10^{-2}$	Mn	$2.7263 \times 10^{-4}$		
	(C1-C4)	Mg	$3.3383 \times 10^{-4}$	$\mathbf{Cr}$	$4.7881 \times 10^{-3}$		
		Ni	$3.6902 \times 10^{-3}$	С	$2.3857 \times 10^{-5}$		
		Н	$1.3335 \times 10^{-2}$	0	6.6674×10 <sup>-3</sup>		
	冷却材	Н	6.6310×10 <sup>-2</sup>	0	$3.3155 \times 10^{-2}$		

Table A-1 SRAC で使用した主要な炉心構成要素の原子個数密度

# JAEA-Technology 2012-003

(燃料要素、制御棒、冷却水)						
雄氏亜苯			核種と原	子個数密度		
1冊川	安希		$(10^{24} ato)$	ms/cm³)		
		U-234	$7.4491 \times 10^{-7}$	U-235	$1.3318 \times 10^{-4}$	
		U-236	$9.3999 \times 10^{-7}$	U-238	$5.3263 \times 10^{-4}$	
除れ単手	こ、上文四	Al	$1.7448 \times 10^{-2}$	Si	4.8026×10-4	
於科安糸		Fe	$2.3491 \times 10^{-5}$	Mn	$3.1153 \times 10^{-7}$	
		Mg	$7.0418 \times 10^{-5}$	$\mathbf{Cr}$	8.2291×10-6	
		Н	$4.5205 \times 10^{-2}$	0	$2.2603 \times 10^{-2}$	
		B-10	$1.6276 \times 10^{-3}$	B-11	6.0686×10-	
	生山谷田七日	Si	$1.1904 \times 10^{-3}$	Fe	$5.2332 \times 10^{-2}$	
	市小山中小汉	Mn	$8.8677 \times 10^{-4}$	$\mathbf{Cr}$	$1.5882 \times 10^{-2}$	
		Ni	$1.2301 \times 10^{-2}$	С	7.9531×10-	
生化生素		B-10	$4.8828 \times 10^{-4}$	B-11	$1.8206 \times 10^{-3}$	
前仰徑		Al	$2.9263 \times 10^{-2}$	Si	$5.5934 \times 10^{-6}$	
	フォロワー部	Fe	$1.5759 \times 10^{-2}$	Mn	$2.7263 \times 10^{-2}$	
	(C1-C4)	Mg	$3.3383 \times 10^{-4}$	$\mathbf{Cr}$	4.7881×10-3	
		Ni	$3.6902 \times 10^{-3}$	С	$2.3857 \times 10^{-6}$	
		Н	$1.3335 \times 10^{-2}$	0	6.6674×10-3	
冷	却材	Н	$6.6600 \times 10^{-2}$	0	3.3300×10-2	

# Table A-2 MCNP で使用した主要な炉心構成要素の原子個数密度

Table A-3 SRAC,	MCNP で使用し	、た反射体の原子	個数密度
-----------------	-----------	----------	------

(旧反射体)

		核種と原子個数密度				
<b>構成安</b>	茶		(10 <sup>24</sup> ate	oms/cm³)	1	
		Al	8.3888×10 <sup>-3</sup>	Si	$3.3433 \times 10^{-5}$	
普通反射体	甲 約 並7	Fe	$8.2018 \times 10^{-6}$	Mg	$4.9940 \times 10^{-5}$	
(旧反射体)	「日本法	С	$6.8195 \times 10^{-2}$	Н	$1.6274 \times 10^{-3}$	
		0	$8.1372 \times 10^{-4}$			
十刑后针体工刑		Al	$7.6700 \times 10^{-3}$	Si	$5.9280  imes 10^{-6}$	
入空区射体1空 (旧反射体)	中央部	Fe	$1.4172 \times 10^{-5}$	$\mathbf{C}$	$6.7649 \times 10^{-2}$	
(旧汉豹神)		Н	$1.0364 \times 10^{-3}$	0	$5.1820 \times 10^{-4}$	
		Al	$8.2758 \times 10^{-3}$	Si	$3.4562 \times 10^{-5}$	
大型反射体Ⅱ型		Fe	$6.4690 \times 10^{-5}$	Mg	$4.6441 \times 10^{-5}$	
(旧反射体)	师天中	С	$7.1151 \times 10^{-2}$	Н	$1.0929 \times 10^{-3}$	
		0	$5.4641 \times 10^{-4}$			
性みらけなり知	黒鉛部	Al	$4.7327 \times 10^{-3}$	Si	$3.7261 \times 10^{-6}$	
将殊 <u>仅</u> 射体1空		Fe	$8.7778 \times 10^{-6}$	$\mathbf{C}$	$7.1858  imes 10^{-2}$	
		Н	$1.3040 \times 10^{-3}$	Ο	$6.5196  imes 10^{-4}$	
時建豆貯休Ⅱ刑		Al	$4.7327 \times 10^{-3}$	Si	$3.7261 \times 10^{-6}$	
付殊反射 ₩Ⅱ 空	黒鉛部	Fe	$8.7778 \times 10^{-6}$	$\mathbf{C}$	$7.1858 \times 10^{-2}$	
		Н	$1.3040 \times 10^{-3}$	Ο	$6.5196  imes 10^{-4}$	
		Al	$8.6616 \times 10^{-3}$	$\operatorname{Si}$	$6.3521 \times 10^{-6}$	
		Fe	$1.3160 \times 10^{-5}$	Mn	$6.6337 \times 10^{-7}$	
	黒鉛上部	Mg	$1.2488 \times 10^{-4}$	$\mathbf{Cr}$	$3.9696 \times 10^{-6}$	
		С	$4.8905 \times 10^{-2}$	Н	$2.8653 \times 10^{-3}$	
特殊反射体Ⅲ型		0	$1.4327 \times 10^{-3}$			
(旧反射体)		Al	$4.9439 \times 10^{-3}$	Si	$3.7915 \times 10^{-6}$	
		Fe	$8.7120 \times 10^{-6}$	Mn	$9.8580 \times 10^{-7}$	
	黒鉛下部	Mg	$1.8432 \times 10^{-5}$	$\mathbf{Cr}$	$5.8615 \times 10^{-7}$	
		С	$6.7886 \times 10^{-2}$	Η	$2.9275 \times 10^{-3}$	
		0	$1.4637 \times 10^{-3}$			

Table A-4 SRAC,	MCNP で使用し	した反射体の原子個数密度
-----------------	-----------	--------------

<sup>(</sup>新反射体)

雄忠周世		核種と原子個数密度			
1冊八3	<del>て</del> 糸		(10 <sup>24</sup> ate	oms/cm³)	)
		Al	$9.6789 \times 10^{-3}$	Si	$1.5209 \times 10^{-3}$
普通反射体	用公立	Fe	$7.7449 \times 10^{-7}$	Mg	$2.8311 \times 10^{-5}$
(新反射体)	伯西洪	С	$6.3363 \times 10^{-2}$	Н	$1.6272 \times 10^{-3}$
		0	$8.1359 \times 10^{-4}$		
		Al	$8.6383 \times 10^{-3}$	Si	$1.3574 \times 10^{-3}$
大型反射体 I 型	中市立四	Fe	$6.9122 \times 10^{-7}$	Mg	$2.5268 \times 10^{-6}$
(新反射体)	加大中	С	$6.6242 \times 10^{-2}$	Н	$1.0362 \times 10^{-3}$
_		0	$5.1811 \times 10^{-4}$		
		Al	$9.3600 \times 10^{-3}$	Si	$1.4708 \times 10^{-3}$
大型反射体Ⅱ型		Fe	$7.4897 \times 10^{-7}$	Mg	$2.7379 \times 10^{-6}$
(新反射体)	中大司	С	$6.2516 \times 10^{-2}$	Н	$1.0927 \times 10^{-3}$
		0	$5.4633 \times 10^{-4}$		
		Al	$1.7216 \times 10^{-2}$	Si	$2.7053 \times 10^{-3}$
特殊反射体I型	用公立	Fe	$1.3776 \times 10^{-6}$	Mg	$5.0358 \times 10^{-6}$
(新反射体)	光虹即	С	$5.1385 \times 10^{-2}$	Н	$8.1864 \times 10^{-4}$
		0	$4.0932 \times 10^{-4}$		
		Al	$1.0625 \times 10^{-2}$	Si	$1.6696 \times 10^{-3}$
特殊反射体Ⅱ型	甲扒壶	Fe	$8.5019 \times 10^{-7}$	Mg	$3.1079 \times 10^{-6}$
(新反射体)	半可即	С	$6.2350 \times 10^{-2}$	Н	$8.1864 \times 10^{-4}$
_		0	$4.0932 \times 10^{-4}$		
		Al	$1.4213 \times 10^{-2}$	Si	$2.2334 \times 10^{-3}$
	电公下动	Fe	$1.1373 \times 10^{-6}$	Mg	$4.1575 \times 10^{-6}$
	光市丁山	С	$3.6176 \times 10^{-2}$	Н	$1.4321 \times 10^{-2}$
特殊反射体Ⅲ型		0	$7.1606 \times 10^{-3}$		
(新反射体)		Al	$1.1511 \times 10^{-2}$	Si	1.8088×10 <sup>-3</sup>
	里鉛下邨	Fe	$9.2105 \times 10^{-7}$	Mg	$3.3669 \times 10^{-6}$
	어머 I 디포 <del>27</del> 7	С	$5.7442 \times 10^{-2}$	Η	$2.9270 \times 10^{-3}$
		0	$1.4635 \times 10^{-3}$		

	核種と原子個数密度				
伸成安希	$(10^{24} \text{atoms/cm}^3)$				
	Li-6	$1.1720 \times 10^{-3}$	Li-7	$1.4620 \times 10^{-2}$	
ビーム孔	F	$1.579 \times 10^{-2}$	$\mathbf{C}$	$2.9210 \times 10^{-2}$	
	Н	$5.8410 \times 10^{-2}$			
	B-10	$7.155 \times 10^{-4}$	B-11	$2.916 \times 10^{-3}$	
ホウ素入りポリエチレン	С	$3.065 \times 10^{-2}$	Η	$7.211 \times 10^{-2}$	
	0	$5.437 \times 10^{-3}$			
フッ化日壬ウム	Li-6	4.133×10 <sup>-3</sup>	Li-7	$5.157 \times 10^{-2}$	
	F	$5.699 \times 10^{-2}$			
黒鉛ブロック	С	$8.5700 \times 10^{-2}$			
鉛ブロック	Pb	$3.3000 \times 10^{-2}$			
ビスマス遮へい体	Bi	$2.8200 \times 10^{-2}$			
カドミウムシャッター	Cd	$4.6300 \times 10^{-2}$			
<b>電</b> 水	H-1	$2.7300 \times 10^{-4}$	H-2	$6.6200 \times 10^{-2}$	
里小	0	$3.3200 \times 10^{-2}$			
ファントム 水	Н	6.6658×10 <sup>-2</sup>	0	$3.3329 \times 10^{-2}$	
リチウトフィルタ	Li-6	$1.3126 \times 10^{-2}$	Li-7	$1.2866 \times 10^{-2}$	
y y y 4 / 1 / 2	F	$5.2958 \times 10^{-2}$	$\mathbf{C}$	$1.3488 \times 10^{-2}$	

Table A-5 MCNP で使用した主要な中性子ビーム設備構成要素の原子個数密度

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
盔半里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を用い	いて表されるSI組立里(	豆の例				
知辛量	SI 基本単位					
和立里	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 每メ	ートル	m <sup>-1</sup>				
密度,質量密度キロ	グラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
面積密度キロ	グラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>				
比 体 積立方	メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /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				
量濃度(a),濃度モル	毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>				
質量濃度+口	グラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度 カン	デラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>				
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数	字の) 1	1				
<u>比透磁率(b)</u> (数	字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentrati	on)は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration) とも上げれる						

(substance concentration)ともよばれる。
 (b)これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Βα		s <sup>-1</sup>
吸収線量 比エネルギー分与				~
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
線量当量,周辺線量当量,方向	2 ( (g)	Su	Ulta	2 o <sup>-2</sup>
性線量当量, 個人線量当量		50	o/kg	m s
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(カタール) kat [s<sup>1</sup>mol]
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 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である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (d)かけ性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[ 組立単位	
組立量	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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA
誘 電 率	シファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
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)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> sA
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> e <sup>-1</sup> mol

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^{3}$	+ 1	k	10 <sup>-18</sup>	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	v		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
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=86 400 s		
度	٥	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

# 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される剱値が美缺的に侍られるもの					
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダ	N	ŀ	$\sim$	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

#### 表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	ン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形法はいかおはない
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s			
ストークス	$\operatorname{St}$	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T			
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>·1</sup>			
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 △ 」					

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 尾	<b>禹さないその他の単位の例</b>
	名称 訂			記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	ン	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ	:	$\sim$	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルネ	系カラ:	ット		1メートル系カラット=200 mg=2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています