

Title	ホウ素中性子捕捉療法のための液体減速型中性子スペクトロメータの開発
Author(s)	玉置, 真悟
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69590
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

博士学位論文

ホウ素中性子捕捉療法のための
液体減速型中性子スペクトロメータの開発

玉置 真悟

2018年1月

大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻

要旨

近年、頭頸部腫瘍に対する放射線治療として、ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) が大きな注目を集めている。現在は原子炉を用いた BNCT の臨床例のみが報告されているが、近年では BNCT 用の加速器中性子源 (Accelerator Based Neutron Source, ABNS) の開発が盛んに行われており、大阪大学においても産学で連携して BNCT 用加速器中性子源装置の開発を行うプロジェクトが進められている。しかし ABNS は照射中性子場の特性が装置設計に依存して大きく変動するため、その特性を測定・評価することが BNCT 用加速器中性子源装置の開発において極めて重要である。特に照射場の中性子が持つエネルギーは BNCT 患者への実効線量に与える影響が大きく、人体への影響を評価するうえで極めて重要であるため、BNCT 用中性子場のエネルギースペクトルを正確に評価する装置開発が強く求められている。本論文は、中性子場のエネルギースペクトルを、BNCT で使用される熱外領域も含め、幅広いエネルギー範囲で測定するための装置の開発について取りまとめたものである。具体的には、液体減速型中性子スペクトロメータの開発及び実用化のための研究を実施し、その特性や実用化のための条件について検証した結果を報告する。

第 1 章では日本国におけるがん治療の背景やその中での BNCT の占める位置、BNCT の歴史、BNCT 用加速器中性子源装置開発の現状と課題について議論し、それを基に本研究の目的について述べた。

第 2 章では液体減速型中性子スペクトロメータの基本原理の実現可能性を数値的に検証し、液体減速型中性子スペクトロメータの実現可能性を確認した。その結果、液体減速材が ^{10}B 等の高い中性子吸収能を持つ原子を多く含むことで応答関数の特性が変化し、中性子スペクトルの測定性能が上昇することを明らかにした。

第 3 章では、液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ的设计・製作を行い、それを用いた実験的研究を実施した。その結果、検出器の応答関数を適切な条件下で評価することで、少なくとも 1 MeV 以下のエネルギー領域において中性子スペクトルを正確に測定可能であることを確認した。また、検出器の応答関数を適切に評価するためには実験で照射される中性子場の空間分布や角度分布などの特性が極めて重要であり、あらゆる中性子場で使用可能な中性子スペクトロメータを開発するためには中性子場特性に対する依存性の低い設計とする必要があると結論した。

第 4 章では、第 3 章で得られた知見を基に改良型中性子スペクトロメータの設計を行い、測定シミュレーションを通してその性能を確認した。結果は、照射中性子場の中性子入射角を考慮すれば、コリメータ孔内に入射する、 $\cos\theta > 0.9995$ を満たす前方中性子束のエネルギースペクトルを測定可能であり、1 MeV 以下の中性子に対して特に優れた測定能力を持っていることを確認した。

第 5 章では結言として以上までの成果を総括し、本装置の特性と有用性、そして実用化までの課題について述べた。最終的には、本研究で設計・開発を進めた装置は、前方中性子フラックスを測定可能な装置であり、その特性を応用して測定対象となる中性子場の角度・エネルギー微分中性子エネルギースペクトル、すなわち二重微分中性子束強度を測定するための手法を検討・実用化することであらゆる特性の中性子場に対する適用可能性があると結論した。

今後は本装置を用いた前方中性子束スペクトルの測定可能性を実験的に確認した後、二重微分中性子束強度の測定可能性について検証を進める方針である。

Development of liquid moderator based neutron spectrometer for BNCT

Abstract

Boron neutron capture therapy (BNCT) based on $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reactions is known to be an effective radiation therapy for cancers. Because of its superior treatment results, it attracts the attention of many doctors and researchers all over the world. In the past, cases have been reported only with nuclear reactors used as neutron sources. However, owing to social and political factors, it is very difficult to implement a new nuclear reactor in hospital. Therefore, accelerator-based neutron sources (ABNS) for BNCT are being developed all over the world. Generally, the neutron energy spectrum in the irradiation field formed by an ABNS is strongly dependent on the design of the ABNS, e.g., the type of target nuclide and bombarded particle, and the structure of the beam shaping assembly. Meanwhile, the absorbed or equivalent dose to normal tissues of the human body is largely dependent on the irradiated neutron energy. Therefore, it is necessary to evaluate the neutron spectrum accurately in a treatment field to realize an accelerator-based BNCT. In this study, a new neutron spectrometer, called a “liquid-moderator-based neutron spectrometer” has been developed to measure the neutron spectrum more accurately and precisely. In this paper, the details and the results of this research, usefulness of the method and problems were reported to realize the present spectrometer.

In chapter 1, a literature work was done to explain the background and the history of BNCT, the current status and problems of development of ABNS. Finally, the objectives of this study was shown.

In chapter 2, the principles and the result of a feasibility study of the employed method for the liquid-moderator-based neutron spectrometer were reported. The feasibility study was performed numerically, and validity of the liquid-moderator-based neutron spectrometer was examined. Finally, the feasibility was confirmed and essential elements for the spectrometer was revealed.

In chapter 3, a prototype of the liquid-moderator-based neutron spectrometer was developed to examine the validity of the method experimentally. As a result, it was found that prototype spectrometer enabled to measure the neutron spectrum from 1×10^{-9} MeV to 1 MeV. However, it also revealed that it is fundamentally important to consider the source condition used in the response function calculation due to its large dependence of the experimental condition; hence, it is necessary to design the spectrometer with a response function that has a low dependency on the incident neutron source characteristics

In chapter 4, a design study was performed to improve the previously developed prototype of the liquid-moderator-based neutron spectrometer. By carrying out a numerical simulation of the designed new spectrometer, the validity of this spectrometer was finally assessed and confirmed numerically.

In chapter 5, the characteristics, validity, usefulness and problems of the liquid moderator-based neutron spectrometer were discussed from the results of chapters 2 – 4. In conclusion, the developing spectrometer was confirmed to be possible to measure the energy spectrum of angular neutron flux which satisfies $\cos\theta > 0.9995$, where θ is an angle between the detector axis and incident neutron direction, by considering the measurement conditions carefully.

In future, the improved neutron spectrometer designed in chapter 4 will be developed, and an experimental test of the spectrometer will be performed to confirm the capability to measure the angular neutron flux spectrum. Finally, the possibility of the double differential neutron spectrum measurement will be explored after the experimental test.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 BNCT の原理と歴史.....	6
1.3 BNCT 用加速器中性子源の概要.....	10
1.4 BNCT 用加速器中性子源開発の課題.....	12
1.5 本研究の目的	14
1.6 本論文の構成	15
参考文献	15
第 2 章 測定原理と実現可能性の検討	19
2.1 緒言	19
2.2 減速型中性子スペクトロメータのスペクトル測定原理	20
2.2.1 放射線検出器の概論.....	21
2.2.2 中性子検出用比例計数管の動作原理.....	22
2.2.3 減速型中性子スペクトロメータの測定原理.....	24
2.2.4 液体減速型中性子スペクトロメータ	25
2.3 Bayes 推定法による spectrum unfolding.....	26
2.3.1 Bayes の定理.....	27
2.3.2 Bayes の定理による unfolding 問題の解釈	28
2.3.3 Bayes 推定の放射線計測問題への適用	30
2.3.4 Bayes 推定による unfolding の手続き	32
2.3.5 スペクトル型 Bayes 推定における繰り返し回数の決定	34
2.4 実現可能性の検討	35
2.4.1 応答関数の評価.....	36
2.4.2 数値実験.....	38
2.4.3 結果と考察.....	41
2.5 結論	48
参考文献	49
第 3 章 プロトタイプ的设计と原理の実験的検証	53
3.1 緒言	53
3.2 プロトタイプスペクトロメータ的设计	53

3.3 実験	57
3.3.1 実験体系	57
3.3.2 実験手順	59
3.3.3 実験結果と考察	61
3.4 結論	64
参考文献	65
第4章 改良型中性子スペクトロメータの設計	67
4.1 緒言	67
4.2 改良型中性子スペクトロメータの設計	67
4.3 数値実験 1: プロトタイプスペクトロメータとの比較	75
4.3.1 シミュレーション体系	75
4.3.2 結果と考察	76
4.4 数値実験 2: 種々の中性子場での検討	78
4.4.1 シミュレーション体系	78
4.4.2 結果と考察	79
4.5 結論	86
参考文献	87
第5章 総括	89
謝辞	93
研究業績	94
付録 モンテカルロ型 Bayes 推定 ソースコード	98

第1章 序論

1.1 研究の背景

わが国では 1981 年以來、悪性新生物、すなわちがんが脳血管疾患を抜いて死亡原因の第 1 位である (Fig. 1-1). また、がんによる死亡者の多くは高齢者が占めるため、近年の少子高齢化に伴いその割合は増加傾向にある (Fig. 1-2, 1-3) [1-2]. そのため、日本国民の寿命の延長や生活の質 (quality of life: QOL) の維持・向上のためには、がんの有効な治療法の確立が急務である.

我が国の国民病であるがんへの対応は、2006 年に「がん対策基本法」が制定され、2007 年より施行、放射線治療並びに化学療法 of 専門医の育成、緩和医療の充実、がん登録の推進、がん相談支援や情報提供体制の構築が謳われている. 特に参議院の付帯決議においては、放射線治療の重要性について述べられている. がん治療において放射線治療は、外科治療、化学療法と並んできわめて重要な位置を占めている. 放射線治療は外科治療と同様に局所療法であるが、多くのがんで罹患器官の形態と機能を温存し、QOL を良好に保ちつつがんを治療せしめる点で優れており、適応が正しければ腫瘍の局所制御率は手術に匹敵する. また、その低侵襲性の故、高齢のがん患者に対しても優しい治療である. [3].

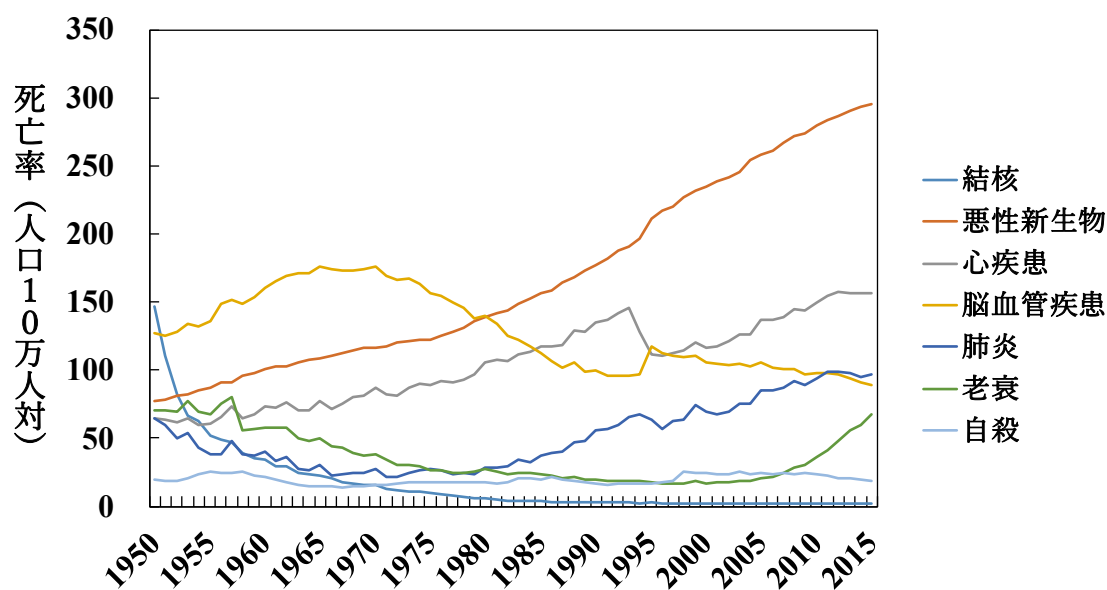


Fig. 1-1. 死因年次推移分類別にみた死亡率.

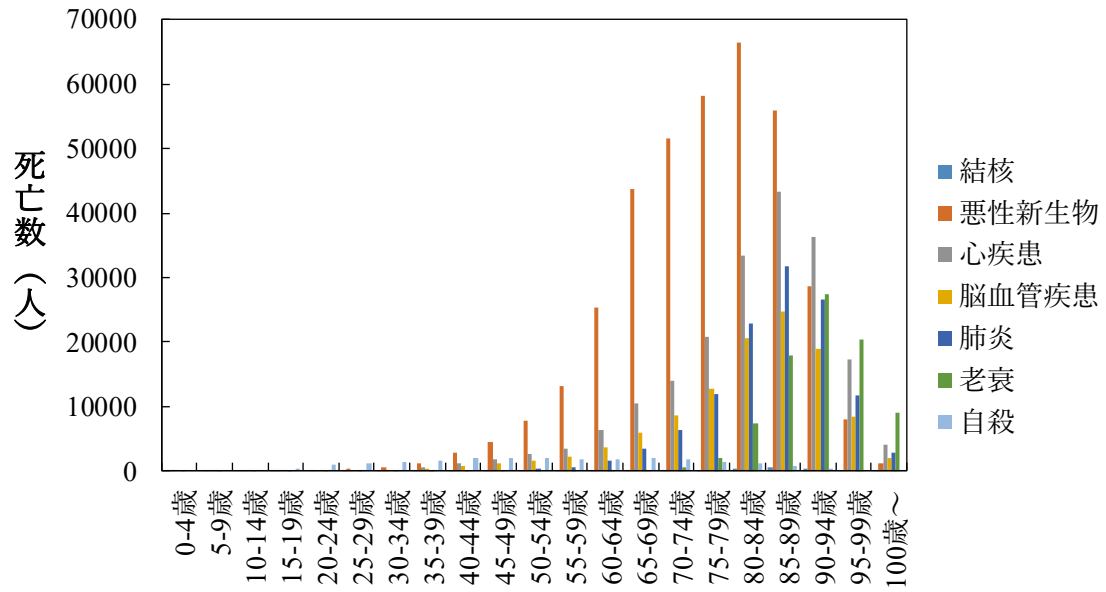


Fig. 1-2. 年齢別にみた死因分類別死亡数.

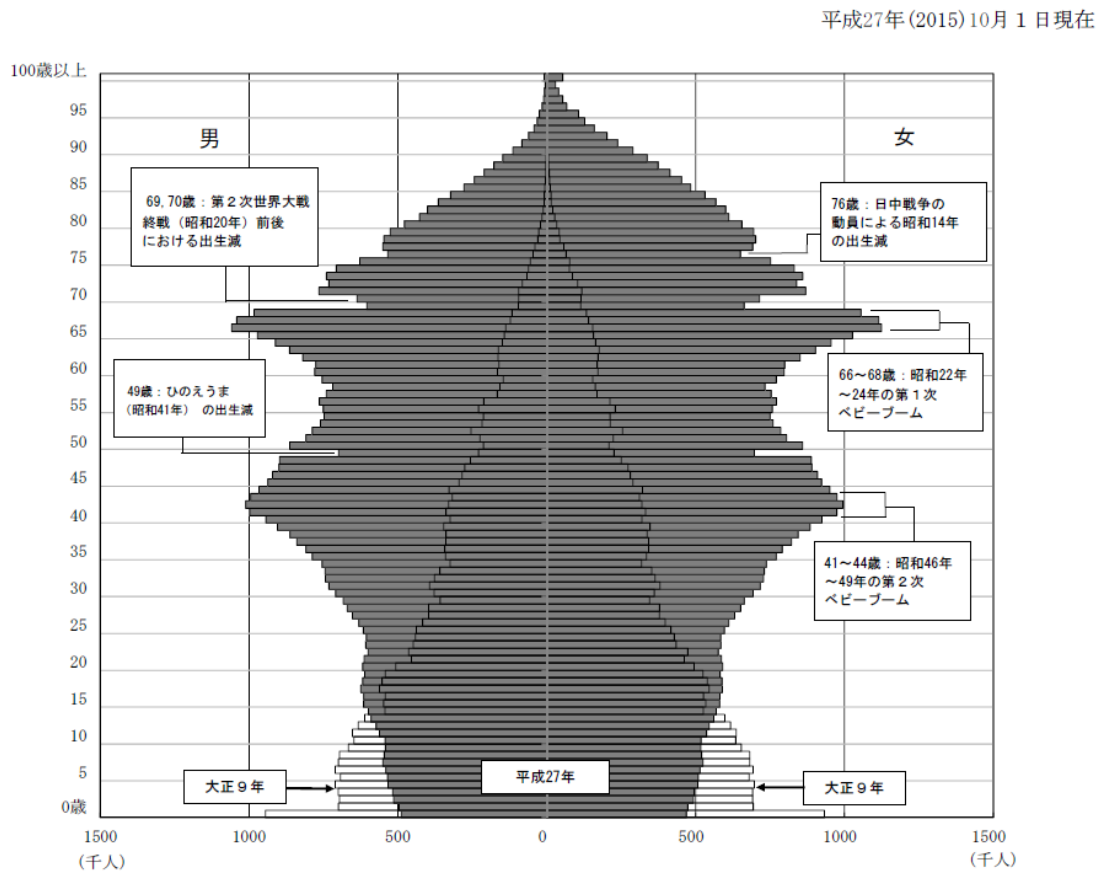


Fig. 1-3. 日本の人口ピラミッド (出典：総務省統計局 平成27年国勢調査「人口等基本集計結果」 [2])

高齢化社会を迎えた日本において、がん患者の QOL の向上が大いに期待できる放射線治療は、今後特に重要な役割を果たすと考えられる。

放射線治療を行うに当たって重要なことは、がん細胞に多くの放射線を照射し、正常細胞に対する照射は最小限にとどめることである。理想としてはがん細胞にのみ放射線を照射することであり、そのために様々な手法・技術が開発されてきた。現在の治療で使用されている主な放射線としては、X線、 γ 線、電子線、 β 線、中性子線、陽子線、重粒子線（炭素イオン線）などがある。これらの放射線は生体内物質を電離・励起する能力を持つ電離放射線であり、身体深部まで到達する高エネルギーを有している。

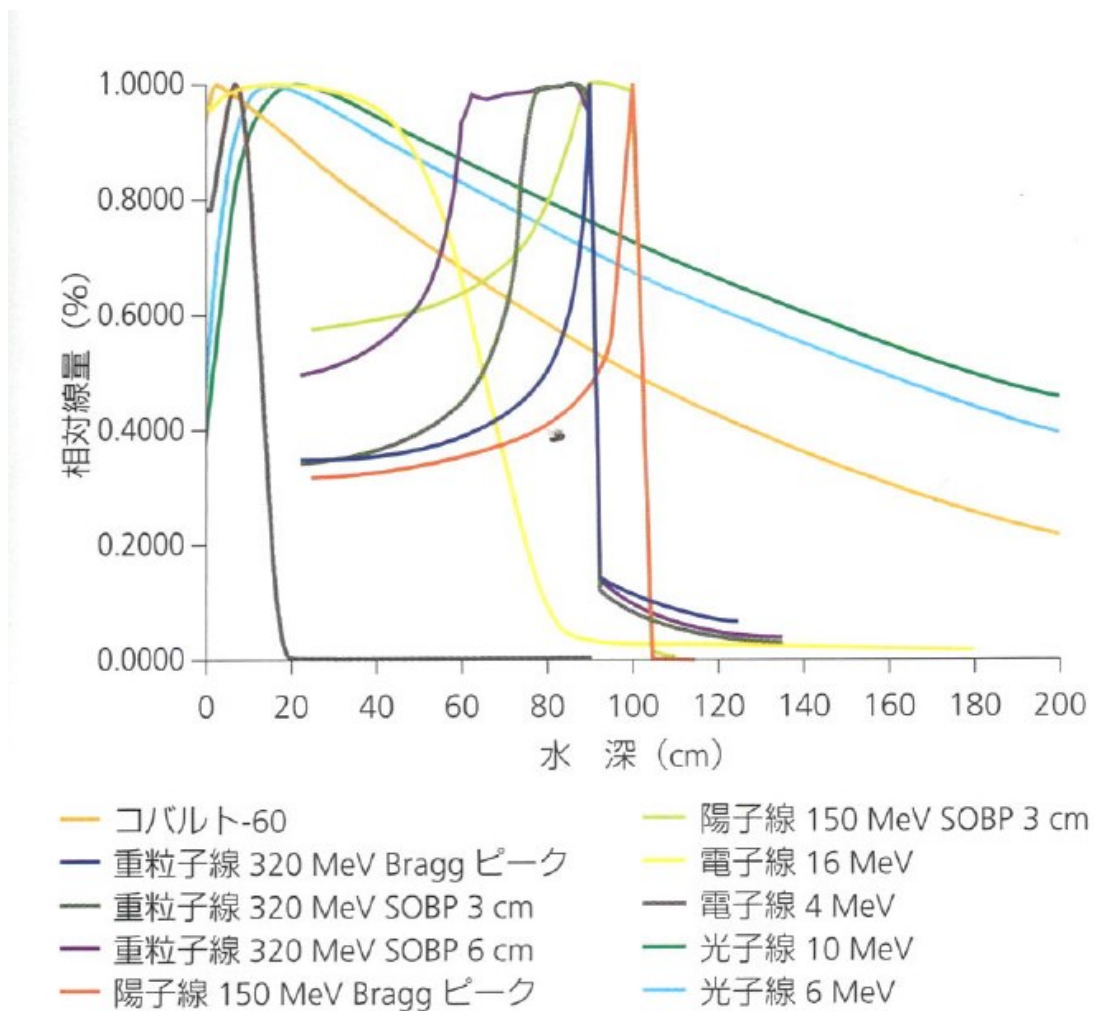


図1 放射線の種類による線量分布

SOBP : spread out Bragg peak (拡大 Bragg ピーク)

Fig. 1-4. 放射線の種類による線量分布 (出典: 臨床放射線腫瘍学 [3])

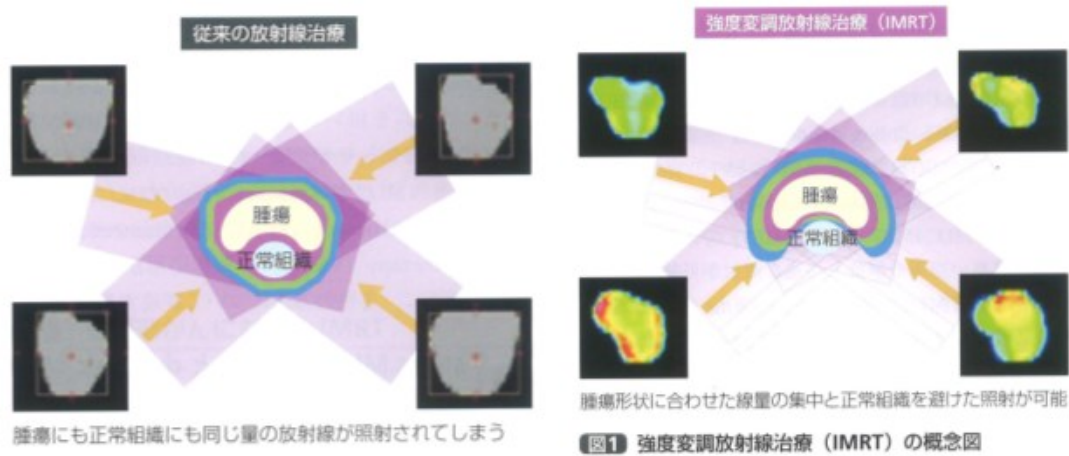


Fig. 1-5. 従来の X 線治療 (3D-CRT) と強度変調放射線治療 (IMRT) の概念図 (出典: 臨床放射線腫瘍学 [3])

X 線は放射線治療で最も多く利用されている放射線である。その大半はリニアックなどの直線加速器から発生する高エネルギー X 線の外部照射によるものである。X 線は真空の加速管内で高速に加速した電子を銅や白金などの重金属ターゲットに衝突させ、制動放射を利用して発生させる。高エネルギーの X 線の体内線量は、入射直後に増加に向かい、ピーク後は指数関数的に減弱する。 γ 線の物質に対する相互反応は X 線と違いはなく、体内線量も同じような分布形状となる。この入射直後から線量ピークまでをビルドアップ領域といい、光子と物質の相互作用で生じた二次電子の飛程付近が最大値となる (Fig. 1-4)。 γ 線は原子核の励起状態からのエネルギー遷移により発生し、長年 ^{60}Co 線源を用いた遠隔治療装置が使用されてきた。しかしながら、高エネルギー X 線発生装置で発生する X 線のエネルギーが ^{60}Co から発生するガンマ線のエネルギーよりも高く、ビルドアップまでの距離が深くなり急性期放射線皮膚炎を低減できることから、ガンマ線よりも X 線を用いた治療がより主流となっている。X 線や γ 線を利用する放射線治療では、様々な角度から放射線の外部照射を行い、無駄な部位への照射を極力避けつつできるだけ病巣の形状に線量分布を一致させる、3次元原体照射 (3D-CRT) と呼ばれる手法が一般的である。また、標的となる腫瘍と複数のリスク臓器が空間的に近接して存在する場合に、均一な強度の放射線を照射する 3D-CRT では適切な線量分布を得ることが原則的に困難であることから、照射する放射線強度を変調してより適切な線量分布を作り出す強度変調放射線

治療 (IMRT) と呼ばれる手法も近年では一般的となってきた (Fig. 1-5).

しかしながら, X 線では腫瘍に対する線量集中性に限界がある. そのため, さらに腫瘍への線量集中を可能とする陽子や重粒子線 (一般的には炭素イオン線) といった高エネルギー荷電粒子線治療法が提案された. 陽子線とは正の 1 荷の電荷量を持つ陽子 (水素原子核) を, 炭素イオン線とは ^{12}C 原子の原子核を加速したイオンビームであり, どちらも物質中を通過する際にクーロン力による電離作用によって運動エネルギーを損失する. その運動エネルギーの損失は阻止能と呼ばれ, 運動エネルギーの大きさに反比例する関係を持つ. 物質へ入射したイオンビームは深部へ進むにつれて運動エネルギーを損失し, 物質中で停止する寸前の場所で非常に大きなエネルギーを損失する. その結果, 停止寸前の場所に Bragg peak とよばれる高い線量領域が形成される (Fig. 1-4). 粒子線治療とは, イオンビームの照射位置及び入射運動エネルギーを調整して腫瘍部分に Bragg peak を集中させることで腫瘍に線量を集中させ, 腫瘍部以外の線量を極力抑えることが可能である. 粒子線でがんを治療するためには, Bragg peak をがんの大きさに合わせて拡大する必要がある. これを拡大 Bragg peak (SOBP) という (Fig. 1-6). 粒子線治療の利点は, Bragg peak を利用することで皮膚表面から腫瘍までの組織に与える線量を原理的に小さくできることである. 一方で, 大きな腫瘍に対して粒子線治療を行う際には SOBP も同様に拡大する

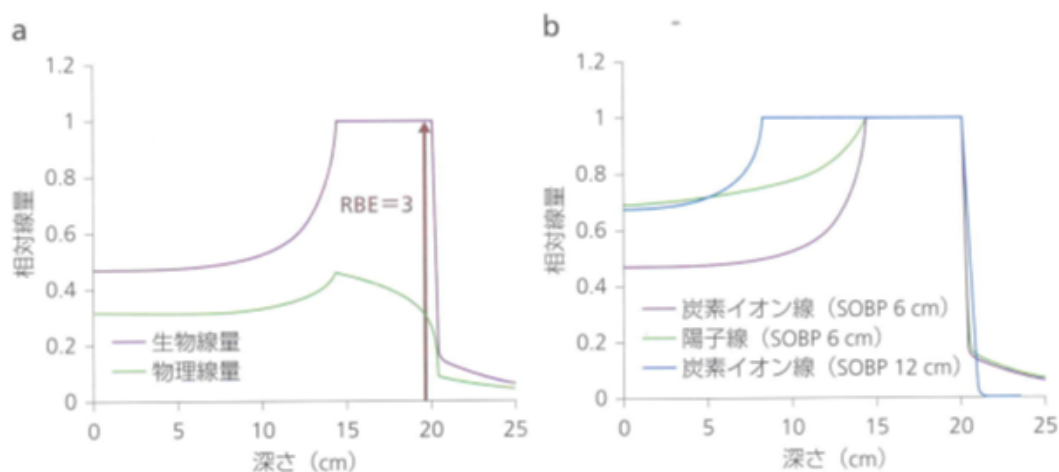


図1 拡大 Bragg ピーク (SOBP) の形成

a: 炭素イオン線の生物線量と物理線量. b: 炭素イオン線と陽子線線量分布の比較

RBE: 生物学的効果比

(a: Kanai T et al: Int J Radiat Oncol Biol Phys 44: 201-210, 1999)

Fig. 1-6. SOBP の形成 (出典: 臨床放射線腫瘍学 [3])

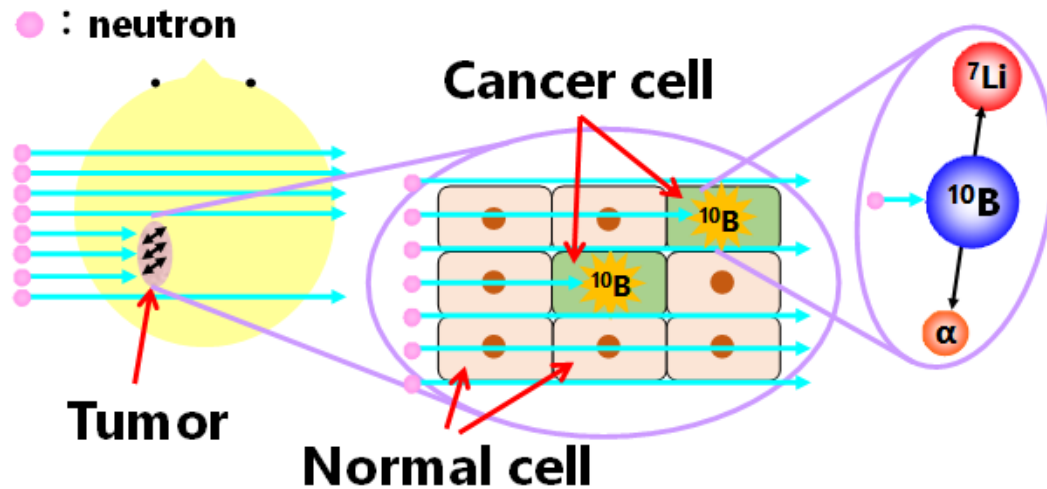


Fig. 1-7. BNCT の原理図

必要があり、結果として皮膚から腫瘍までの間にある組織への積算線量が大きくなってしまふ、という問題もある。

中性子線はそのエネルギーによって、熱中性子、熱外中性子、中速中性子、速中性子、超高速中性子に分類される。非荷電粒子である中性子線の体内における深部線量分布形状はX線や γ 線と同様な減衰曲線を描く。本研究では、その優れた治療実績から世界的に注目を集めている、ホウ素と中性子の原子核反応により放出される線エネルギー付与 (LET) の高い荷電粒子を利用した、ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) のための研究を行っている。

1.2 BNCT の原理と歴史

BNCT とは、非放射性核種である ^{10}B が低エネルギー中性子を捕獲し $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ で示される核反応を引き起こす性質を利用した、放射線がん治療法の一つである [4] (Fig. 1-7). 上記の核反応で発生する粒子は LET (linear energy transfer, 線エネルギー付与) が高く、水中や組織中における飛程が $4\ \mu\text{m}$ から $10\ \mu\text{m}$ の範囲内になる。これはすなわち、 $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応で発生した α 粒子と反跳リチウム原子核が 1 つの細胞内でその運動エネルギーをすべて放出することを意味している。また、 $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応は、熱中性子と人体を構成するほかの元素 (水素、炭素、窒素、酸素等) の相互作用によって引き起こされる反応と比較してその断面積

が極めて大きい [5] (Table 1). したがって、十分な量のホウ素を腫瘍組織に蓄積することができれば、正常細胞に対する線量付与を低く保ったまま ^{10}B を十分に含んだ腫瘍組織にのみ線量を付与することが理論上可能である.

BNCT の歴史の始まりは、今から 70 年以上前までさかのぼる. 1932 年に Chadwick によって中性子の存在が報告され [6], その 4 年後の 1935 年に Taylor と Goldhaber によって $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応に関する発表が行われた [7], そのわずか 1 年後の 1936 年に Locher によって NCT (neutron capture therapy) の基本的なアイデアは公表された [8]. 1940 年には Kruger の論文に最初の BNCT の実験に関する報告が発表されている [9]. 彼は、腫瘍組織片に対してホウ酸を混合したうえで中性子照射を行う非生体内実験を行ったのち、その組織片をマウスに移植したところ、ホウ酸あるいは中性子照射のみを行った組織片を移植した結果と比較して低い移植性を示すことが明らかとなったと報告している. また、同年に Zahl らによって生体に対する NCT の効果が調査された [10]. 彼らはマウスの肉腫に対して油性懸濁剤を注射して治療を行う実験を行った. その後まもなく、脳腫瘍に対する NCT が提案された [11]. 腫瘍細胞の脳関門機能消失によりホウ素の取り込みが行われる [12] という性質を利用し、正常な脳組織を保護しながらの治療が可能であると述べられている. また、同著者の別の論文で、脳の腫瘍細胞は正常な脳細胞に比べてホウ素の集積性が高くなるという結果が報告されている [13]. 初期の生物学的研究から 10 年後、人間に対する最初の医療応用が行われた. 以降の BNCT の歴史は、1951 年から 1961 年にアメリカで実施された初期の医療応用、1968 年から 1980 年代に行われた日本の畠中らによる先駆的研究、1990 年代中期から始まり現在まで続いている原子炉熱外中性子施設を利用した初期臨床試験、そして近年盛んになっている加速器熱外中性子源施設を用いた BNCT への取り組みの 4 つに分類することができる.

Table 1-1. 生体内元素及びホウ素と熱中性子との主要な反応

核種	反応	反応断面積(barn)	放出エネルギー(MeV)
^1H	$^1\text{H}(\text{n},\gamma)^1\text{H}$	0.332	2.22
^{12}C	$^{12}\text{C}(\text{n},\gamma)^{13}\text{C}$	0.0034	4.95
^{14}N	$^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$	1.81	0.63
^{16}O	$^{16}\text{O}(\text{n},\gamma)^{17}\text{O}$	0.00018	4.14
^{10}B	$^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$	3837	2.79

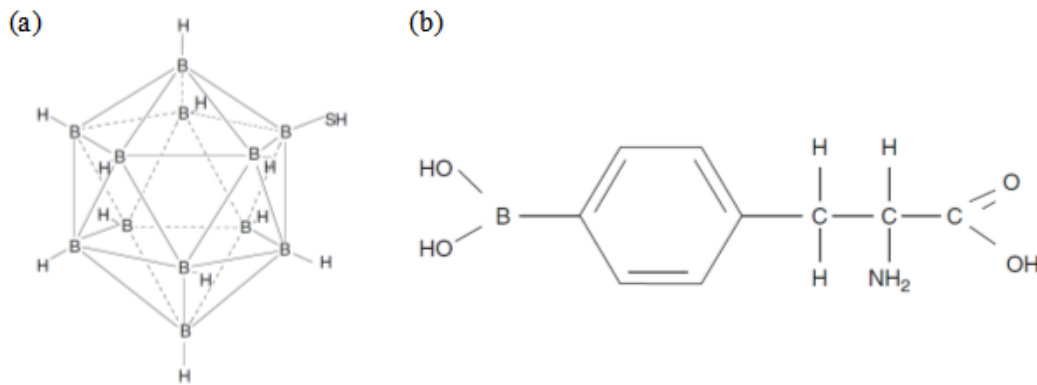


Fig. 1-8. (a) BSH と (b) BPA (出典: *Neutron capture therapy: principles and applications* [4]).

最初期のアメリカで実施された初期の医療応用では、原子炉を用いた熱中性子ビームによる BNCT が実施された。これは、原子炉で照射される熱中性子ビームには高速中性子やガンマ線等の不純物が少ない高品質なビームが製作可能だったからである。しかしながら、熱中性子は組織内への浸透性が低く、ビームそれ自体による線量は皮膚表面で最大になるので、腫瘍組織のホウ素取り込み量による個人差があったものの、皮膚表面からおおよそ 4 cm 程度までにある浅部がんにしか適用できなかった。1951 年から 1961 年まで Brookhaven にて、そして 1959 年から 1961 年まで Massachusetts Institute of Technology (MIT) にて、W Sweet らによって脳腫瘍に対する BNCT の臨床試験が実施された [14, 15]。これらの研究では熱中性子ビームを腫瘍まで届かせるため、手術により腫瘍を露出させたのちに中性子を照射する、術中照射と呼ばれる手法が採用された。しかしながら、これらの研究の結果は惨憺たるものであった。これは、腫瘍組織に選択的に十分蓄積するようなホウ素薬剤がなかったことや、高速中性子によって患者の体それ自体から発生する反跳陽子やガンマ線による付加線量が過小評価されていたことが主な原因であったと考えられている。この結果、1961 年には BNCT の研究が中止され、以降 30 年もの間、アメリカでは BNCT の研究がほとんど行われなかった。

この状況の大きな転換点は、1968 年の畠中らの研究によってもたらされた。彼らは Soloway らによって合成された BSH [16] (Fig. 1-8(a)) を使用して BNCT の術中照射を実施した [17]。この研究の結果として畠中らは grade 3 および grade 4 の malignant glioma 患者の 5 年生存率が 58 % になったという驚異的な成果を報告している [18] (Fig. 1-9)。

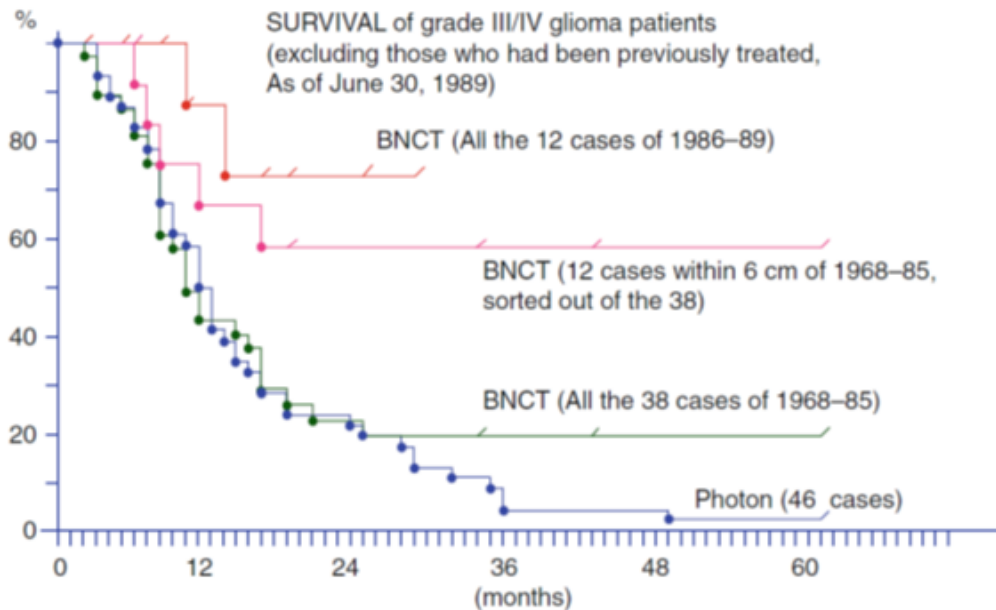


Fig. 1.2 Copy of H.Hatanaka's printed results shown 1989 at the 17th International Congress of Radiology in Paris

Fig. 1-9 畠中らが 1989 年当時発表した BNCT の成果 (出典: *Neutron capture therapy: principles and applications* [4]).

また、1987 年に三嶋らによって BPA(Fig. 1-8(b)) を用いた malignant melanoma に対する臨床試験が実施された [19]. 現在は治療するがんの種類に応じて BSH または BPA, あるいはその両方を使用する BNCT が主流となっている.

1990 年代初期からは、アメリカとヨーロッパで深部がん治療のため、原子炉中性子源を用いた熱外中性子源 (Fig. 1-10) の開発が行われ始めた. これは、放射線治療による深部がんの治療を、手術を行うことなく実施することを目指し、従来よりも高いエネルギーの中性子ビームを使用する BNCT の研究が進んだためである. 照射した熱外中性子は患者の組織それ自体によって減速され、従来よりも照射中の体内の熱中性子束分布が改善された. これにより、皮膚表面からおおよそ 8 cm までのより深部のがんを治療することができるようになり、熱外中性子場を BNCT 治療場とする手法が現在の主流となっている.

しかしながら、現在の BNCT 研究には重大な問題がある. それは原子炉施設を用いた運用は政治的な要素に大きく左右されることである. 実際、1990 年代に建設された BNCT 施設は、それぞれ理由は異なるものの、そのほとんどがシャットダウンし、2012 年段階で利用可能な BNCT 施設は台湾の National Tsing Hua University にある Tsing Hua Open-pool Reactor (T H O R), そしてアルゼンチンの

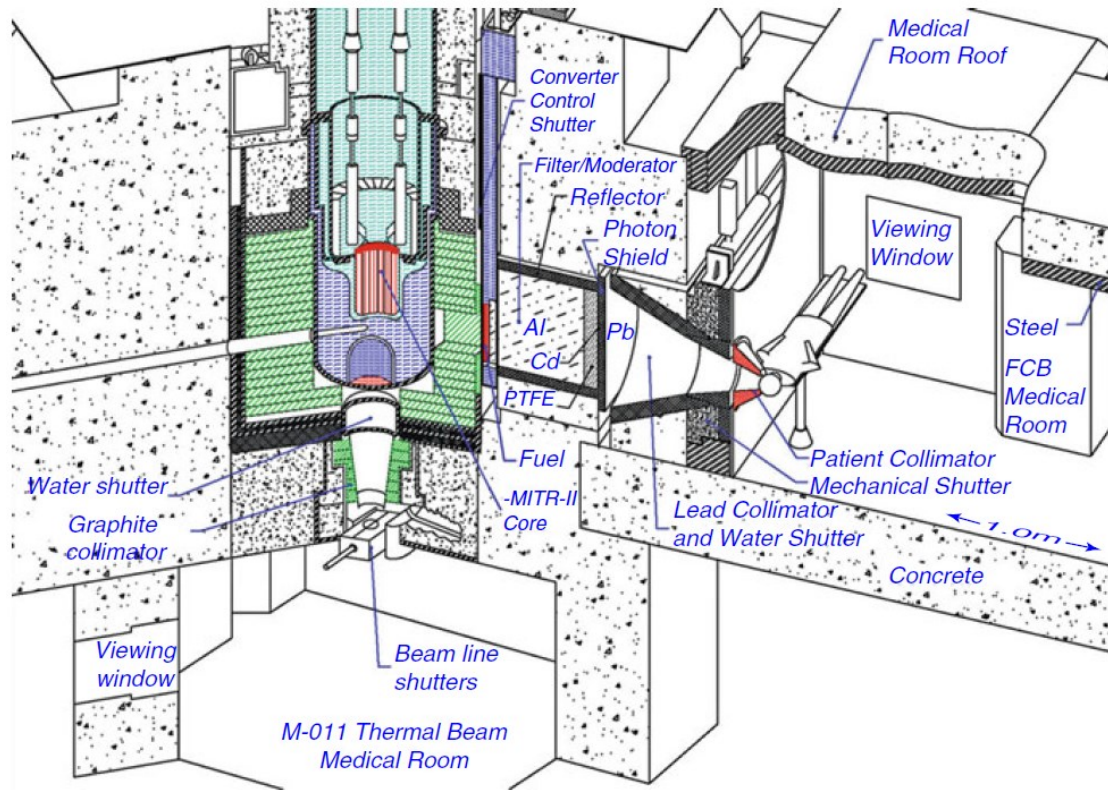


Fig. 2.2 Isometric drawing of the MITR-II depicting components of the vertical thermal neutron beam and (horizontal) fission converter-based epithermal neutron beam

Fig. 1-10 BNCT用熱外中性子照射装置 MITR-II の等角図. (出典: *Neutron capture therapy: principles and applications* [4]).

Bariloche Atomic Center にある RA-6 reactor のみとなった。この状況を打開するため、加速器中性子源を用いた BNCT 治療施設の開発に向けた研究が世界中で進められている。

1.3 BNCT 用加速器中性子源の概要

BNCT 用加速器中性子源とは、加速した粒子をターゲット物質に照射し、核反応によって中性子を発生させ、適切な減速材により熱/熱外エネルギーまで減速した中性子を、制御された状態で照射できる装置である。加速器中性子源を実用化するための研究は、粒子を加速するための加速器の研究、中性子を発生させるためのターゲットに関する研究、発生した中性子を適切に減速する減速材体系についての研究などに分けられる。これらのうち、加速器中性子源用ターゲットに関する研究と減速材体系に関する研究は、患者に照射する治療場の特

性に極めて密接にかかわっており、特に注目されている。

BNCT 用加速器中性子源のターゲットとしては、 ^9Be や ^7Li などが検討されることが多い [20]. これは、比較的低エネルギーのイオンビーム (主に陽子線) によって高い収量の中性子を得ることができるためである。

例えば、京都大学原子炉実験所では、サイクロトロン加速器による 30 MeV 陽子線と ^9Be ターゲットを利用した BNCT 用加速器中性子源 Cyclotron-based neutron source (C-BENS) の開発が進められている [21]. C-BENS ではターゲットに入射する陽子のエネルギーが $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$ 反応の閾値 (2.057 MeV) よりも極めて高く、発生する中性子は最大で 30 MeV のエネルギーを持つ。しかしこれでは、BNCT に直接利用するには中性子のエネルギーが高すぎるので、減速材体系 (Fig. 1-11) を使用して熱外中性子領域まで中性子エネルギーを低下させている。結果として、C-BENS の治療場では、中性子エネルギーは、熱中性子領域から数十 MeV 領域まで広がり、40 keV 程度にピークを持つ中性子スペクトルとなる (Fig. 1-12). 筑波大学ではライナック加速器による 8 MeV 陽子線と ^9Be ターゲットを利用した加速器中性子源の開発が行われている [22]. また、多くの BNCT 研究グループでは 2.3—2.8 MeV 陽子ビームによる $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ 反応を利用する BNCT 用加速器中性子源の可能性が検討されている [23-25]. これは、 ^9Be ターゲットを使用する場合よりも低エネルギーの中性子を高い収量で得られる点が評

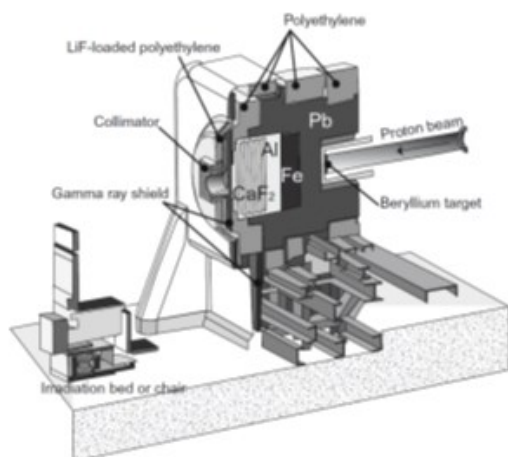


Fig. 3. Schematic layout of a beam-shaping assembly for epithermal neutron generator using 30-MeV proton cyclotron and Be target.

Fig. 1-11 C-BENS の減速材体系 (beam shaping assembly) (出典: Tanaka, H., et al. Nucl. Inst. Meth. B 267.11 (2009): 1970-1977. [21]).

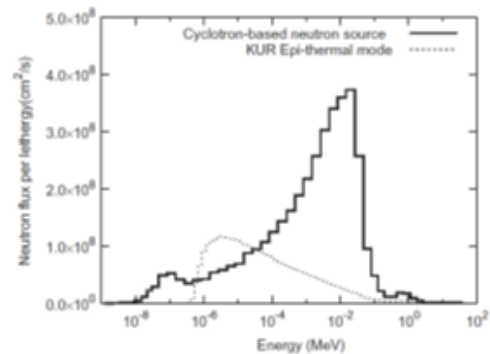


Fig. 6. Comparison with neutron spectrum at a gamma shield for KUR and CBNS.

Fig. 1-12 C-BENS 治療場の中性子スペクトル (出典: Tanaka, H., et al. Nucl. Inst. Meth. B 267.11 (2009): 1970-1977. [21])

価されてのことであり、その最大エネルギーはおよそ 1 MeV 程度になる。また、低エネルギー陽子を入射した場合でも比較的中性子収量が高い特徴を利用して、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応の閾値近傍のエネルギー（およそ 1.9 MeV）の陽子を入射することで数十 keV の中性子を発生させ、これを減速材によってエネルギーを減衰させることなく直接治療に利用する手法の研究も進められている [26, 27]。

ここで注目すべき点は、加速器中性子源はターゲットに用いる核種、入射する粒子の種類やエネルギー、減速材体系等に依存して照射する中性子のエネルギースペクトルが変化し、そのエネルギー範囲は原子核反応により中性子が発生するエネルギーを持つ高速領域から、室温近辺のエネルギーである熱領域まで幅広く分布することである。

1.4 BNCT 用加速器中性子源開発の課題

放射線医療においては、放射線の正常組織に対する影響を可能な限り小さくするため、精密に放射線量を制御する必要がある。特に中性子による人体への実効線量はそのエネルギー分布によって大きく変化する [28] (Fig. 1-13)。また、前節で述べた通り、加速器中性子源によって得られる中性子場は、ビームの加速エネルギーやターゲットの種類、減速材の構造等に依存して大きく変化するもので、患者に対する線量を正確に評価するためには治療用中性子場の中性子強度やそのエネルギーを正確に評価しておくことが必要である。

従来は、治療場の特性評価のためには多重箔放射化法が一般的に用いられてきた。これは、放射化サンプルは一般にその体積が小さく、検出器それ自体による中性子の場の乱れが小さいことや、極めて強度の強い中性子場においても検出器の故障を考慮する必要がないといった利点があることが理由である。例えば、京都大学原子炉実験所の原子炉 BNCT 施設である Heavy Water Thermal Neutron Irradiation Facility (KUR-HWNIF) では、16 種類の放射化反応を用いて治療場の中性子スペクトル測定が行われた [29]。また、Auterinen らは全世界にある原子炉 BNCT の内の 8 つについて、12 種類の放射化反応とカドミウムカプセルの組み合わせを用いて中性子場のスペクトル測定を行った [30]。

多重箔放射化法とは測定を行う中性子場に複数種類の金属サンプルを設置し、その放射化量から“unfolding”と呼ばれる逆行列解法処理を通して中性子スペクトルの評価を行うスペクトル測定法である。前述のとおり、測定場を乱さないことや高強度中性子場に対する適用性が高いといった利点のある極めて有力な手法であるが、一方で測定に利用できる核反応の種類が限られているため

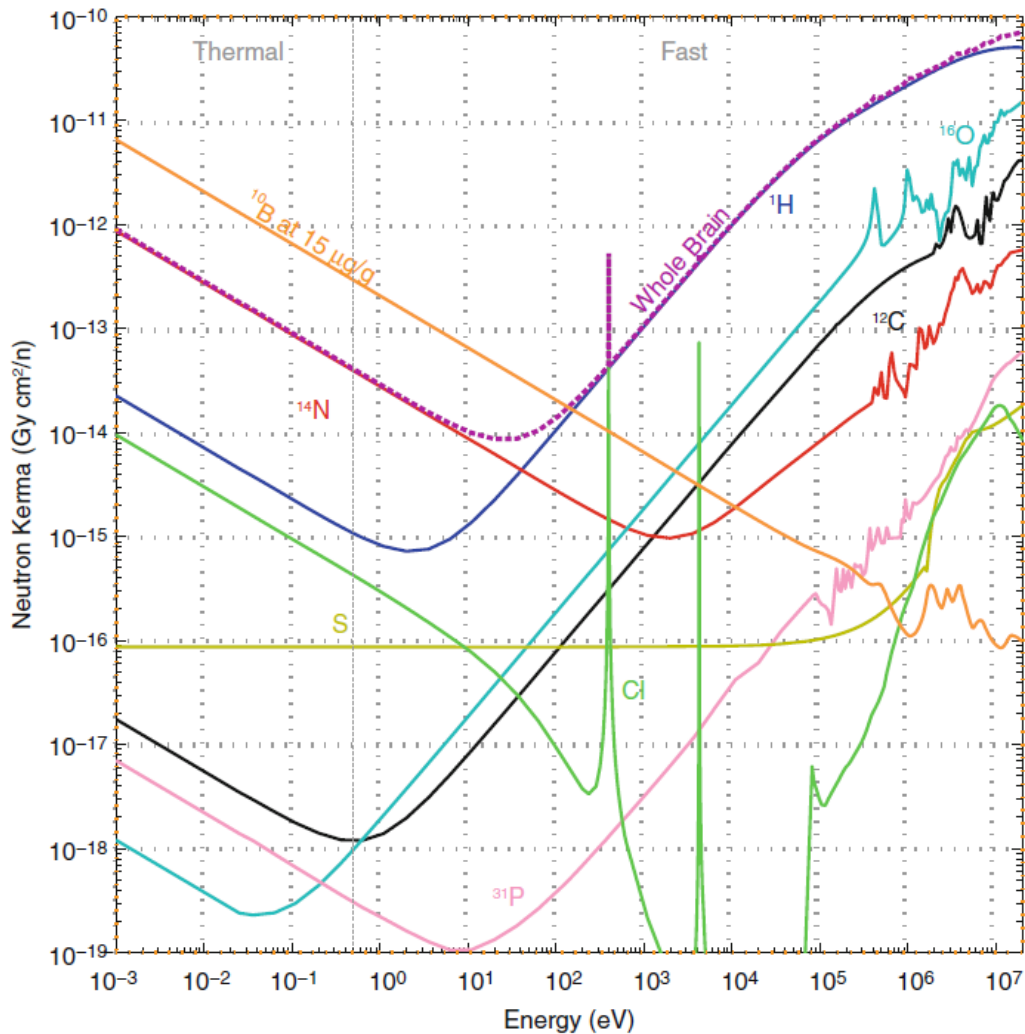


Fig. 16.3 Contributions to energy dependent neutron kerma factors for ICRU brain from different elements. For comparison, the kerma factor for ^{10}B is included, shown for a concentration of $15 \mu\text{g/g}$. The dashed vertical line at 0.5 eV indicates the boundary between fast and thermal neutrons (Adapted from data in Ref. [8])

Fig. 1-13 ICRU ファントムに対して中性子場の付与する線量の分布. 人体の脳に対する線量分布と等価である. (出典: *Neutron capture therapy: principles and applications* [4]).

有感エネルギー領域やエネルギー分解能が制限されるという欠点がある. 従来では, この問題は”initial guess”と呼ばれるスペクトル初期値を導入することにより解決が試みられてきた. これは, unfolding を行う際に実験データ群数が求める中性子スペクトルのエネルギー群数より小さい場合, 解の一意性が失われてしまうことを避けるために用いられてきた手法であり, 初期スペクトルにシミュレ

ーション計算などによって求めた理論スペクトルを代入することで、得られる解の正確性を向上させる効果が見込まれている。しかしながら、この手法はいわば計算値を実験値によって補正して解を得る手法であり、得られる解は *initial guess* の値に強く依存し、*initial guess* の値と真の解の差が大きくなるほど得られる解の正確性が悪くなる。これは多くの中性子スペクトル測定法に共通の問題でもある。例えば、空間中性子束評価のために用いられることが多い *Bonner sphere spectrometer (BSS)* [31] であるが、これは減速材殻を多数製作して検出器応答の種類を増やすということが一般的に容易でないことから、多重箔放射化法と同様に実験データ群数が制限され、*unfolding* の結果に不安定性が現れるという問題を持つ [32]。この問題を解決するため、*BSS* の減速材殻の材質を変化させる [33-34]、多重箔放射化法と *BSS* を組み合わせる [35] などの多くの工夫を凝らした研究がなされているが、まだ十分な解決がなされていないのが現状である。

1.5 本研究の目的

前節までの内容をまとめると、*BNCT* 治療を安全に行うためには照射される中性子のエネルギー分布に関する情報が極めて重要であるにも関わらず、それを実験的に評価するための測定方法の整備が未だ不十分であるため、シミュレーション計算結果を用いた実験補正值がそれに代用されている、ということができる。しかしながら、シミュレーション計算によって得られる結果は実際の設備で考慮されるべき条件がすべて反映されているとは限らないため、実験的に中性子スペクトルを正確に測定・評価することは依然として極めて難しい状況であると言える。

以上の問題を踏まえ、本研究では信頼性の高い中性子スペクトルを実験的に測定するスペクトロメータの設計・開発を行うこと目的とした。具体的には、ポナー球と同様の原理であるが、減速材に液体を用いることでスペクトルの推定に必要な実験データ数を増やす工夫が施された新しい中性子スペクトロメータの設計・開発を行い、得られる中性子スペクトルの精度や正確性を大幅に向上させることを目標とした。また、本装置のプロトタイプ検出器を製作して実際に中性子場のスペクトル測定を行い、その性能を実験的に評価することも目指した。

1.6 本論文の構成

本論文は全 5 章で構成されている。

第 2 章では本研究で開発した中性子スペクトロメータの基礎的な原理と、その実現可能性検討研究の結果について説明する。

第 3 章では中性子スペクトロメータのプロトタイプの開発並びに本手法の実験的研究の結果について説明する

第 4 章ではプロトタイプスペクトロメータを用いた実験的研究の結果から得られた知見を基に、スペクトロメータ実機の最適化設計の結果を説明する。

最後に、第 5 章で本研究の結論を記す。

参考文献

1. 厚生労働省, 平成 27 年 (2015) 人口動態統計 (確定数) の概況.
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei15/index.html>
2. 総務省, 平成 27 年国勢調査「人口等基本集計結果」
<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.htm>
3. 日本放射線腫瘍学会, 日本放射線腫瘍学研究機構 (編) (2012) 臨床放射線腫瘍学 最新知見に基づいた放射線治療の実戦. 南江堂
4. Sauerwein, Wolfgang AG, et al., eds. Neutron capture therapy: principles and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
5. Shibata, Keiichi, et al. "JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering." Journal of Nuclear Science and Technology 48.1 (2011): 1-30.
6. Chadwick, James. "The existence of a neutron." Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 136. No. 830. The Royal Society, 1932.
7. Taylor, H. J., and M. Goldhaber. "Detection of nuclear disintegration in a photographic emulsion." Nature 135.341 (1935).
8. Locher, Gordon L. "Biological effects and the therapeutic possibilities of neutrons." American Journal of Roentgenology and Radium Therapy. 36 (1936): 1-13.
9. Kruger, P. Gerald. "Some biological effects of nuclear disintegration products on neoplastic tissue." Proceedings of the National Academy of Sciences 26.3 (1940): 181-192.
10. Zahl, Paul A., Franklin S. Cooper, and John R. Dunning. "Some in vivo effects of

- localized nuclear disintegration products on a transplantable mouse sarcoma." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 26.10 (1940): 589-598.
11. Zahl, Paul A., and Franklin S. Cooper. "Physical and biological considerations in the use of slow neutrons for cancer therapy." *Radiology* 37.6 (1941): 673-682.
 12. Sweet, William H. "The uses of nuclear disintegration in the diagnosis and treatment of brain tumor." *New England Journal of Medicine* 245.23 (1951): 875-878.
 13. Sweet, W. H., and M. Javid. "The possible use of slow neutrons plus boron10 in therapy of intracranial tumors." *Transactions of the American Neurological Association* 56 (1950): 60-63.
 14. Slatkin, Daniel N. "A history of boron neutron capture therapy of brain tumours: postulation of a brain radiation dose tolerance limit." *Brain* 114.4 (1991): 1609-1629.
 15. Farr, L. E.; W. H. Sweet, J. S. Robertson, C. G. Foster, H. B. Locksley, D. L. Sutherland, M. L. Mendelsohn, E. E. Stickley, "Neutron capture therapy with boron in the treatment of glioblastoma multiforme." *American Journal of Roentgenology Radium Therapy and Nuclear Medicine*. 71 (1954):279-293.
 16. Soloway, A. H., H. Hatanaka, and M. A. Davis. "Penetration of brain and brain tumor. VII. Tumor-binding sulfhydryl boron compounds." *Journal of medicinal chemistry* 10.4 (1967): 714-717.
 17. Hatanaka, Hiroshi. "A revised boron-neutron capture therapy for malignant brain tumors." *Journal of neurology* 209.2 (1975): 81-94.
 18. Hatanaka, Hiroshi. "Clinical results of boron neutron capture therapy." *Basic Life Science* 54.15 (1990): 15-21.
 19. Mishima, Yutaka, et al. "Treatment of malignant melanoma by single thermal neutron capture therapy with melanoma-seeking ¹⁰B-compound." *The Lancet* 334.8659 (1989): 388-389.
 20. Kreiner, Andres Juan, et al. "Present status of accelerator-based BNCT." *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy* 21.2 (2016): 95-101.
 21. Tanaka, H., et al. "Characteristics comparison between a cyclotron-based neutron source and KUR-HWNIF for boron neutron capture therapy." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 267.11 (2009): 1970-1977.
 22. Kumada, H., et al. "Project for the development of the linac based NCT facility in University of Tsukuba." *Applied Radiation and Isotopes* 88 (2014): 211-215.

23. Horiike, H., et al. "Liquid Li based neutron source for BNCT and science application." *Applied Radiation and Isotopes* 106 (2015): 92-94.
24. Kononov, O. E., et al. "Optimization of an accelerator-based epithermal neutron source for neutron capture therapy." *Applied radiation and isotopes* 61.5 (2004): 1009-1013.
25. Minsky, D. M., and A. J. Kreiner. "Beam shaping assembly optimization for ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ accelerator based BNCT." *Applied Radiation and Isotopes* 88 (2014): 233-237.
26. Kobayashi, Tooru, et al. "Near-threshold ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ neutrons on the practical conditions using thick Li-target and Gaussian proton energies for BNCT." *Applied Radiation and Isotopes* 88 (2014): 221-224.
27. Halfon, S., et al. "High-power liquid-lithium target prototype for accelerator-based boron neutron capture therapy." *Applied Radiation and Isotopes* 69.12 (2011): 1654-1656.
28. Goorley, J. T., W. S. Kiger, and R. G. Zamenhof. "Reference dosimetry calculations for neutron capture therapy with comparison of analytical and voxel models." *Medical Physics* 29.2 (2002): 145-156.
29. Sakurai, Yoshinori, and Tooru Kobayashi. "Spectrum evaluation at the filter-modified neutron irradiation field for neutron capture therapy in Kyoto University Research Reactor." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 531.3 (2004): 585-595.
30. Auterinen, Iiro, et al. "Measurement of free beam neutron spectra at eight BNCT facilities worldwide." *Applied radiation and isotopes* 61.5 (2004): 1021-1026.
31. Bramblett, Richard L., Ronald I. Ewing, and T. W. Bonner. "A new type of neutron spectrometer." *Nuclear Instruments and Methods* 9.1 (1960): 1-12.
32. Thomas, D. J. "Neutron spectrometry." *Radiation Measurements* 45.10 (2010): 1178-1185.
33. Yonap, Shimsuke, et al. "Development of a new multi-moderator spectrometer for epithermal neutrons." *Journal of Nuclear Science and Technology* 41.sup4 (2004): 415-417.
34. Ueda, H., H. Tanaka, and Y. Sakurai. "Reprint of The improvement of the energy resolution in epi-thermal neutron region of Bonner sphere using boric acid water

- solution moderator." *Applied Radiation and Isotopes* 106 (2015): 107-110.
35. Lin, Heng-Xiao, et al. "Characteristics and application of spherical-type activation detectors in neutron spectrum measurements at a boron neutron capture therapy (BNCT) facility." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 811 (2016): 94-99.

第2章 測定原理と実現可能性の検討

2.1 緒言

本章では、筆者の開発した液体減速型中性子スペクトロメータの原理とその実現可能性の検討結果について述べる [1-2].

第 1 章で述べた通り、放射線医療においては放射線の正常組織に対する影響を可能な限り小さくするため、精密に放射線量を制御する必要がある。特に中性子による人体への実効線量は照射場の中性子エネルギー分布によって大きく変化する [3]. したがって、患者に対する線量を正確に評価するためには治療用中性子場の中性子強度やそのエネルギーを正確に評価しておくことが必要である。

従来は、治療場の特性評価のために多重箔放射化法が一般的に用いられてきた [4-5]. しかしながら、前章で述べた通り多重箔放射化法は測定に利用できる核反応の種類が限られているため有感エネルギー領域やエネルギー分解能が制限されるという欠点がある。また、空間中性子束評価のために用いられることが多いボナー球 (Bonner sphere spectrometer, BSS) [6] (Fig. 2-1) についても同様の問題がある。ボナー球は減速材殻を多数製作して検出器応答の種類を増やすということが一般的に容易でないことがその理由であり、その結果、応答関数の種類数が解析するエネルギー領域の範囲を十分細かく分割するには少なくなるからである (Fig. 2-2) [7-8].

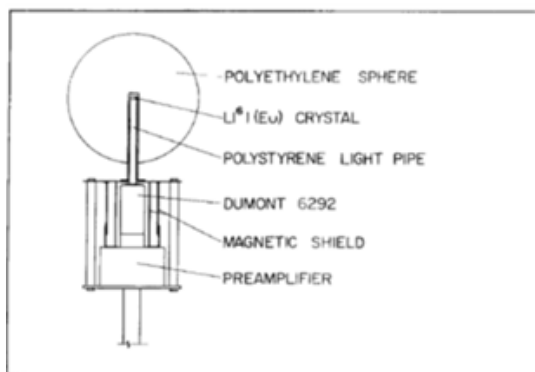


Fig. 2-1 ボナー球の模式図 (Bramblett 他による [6])

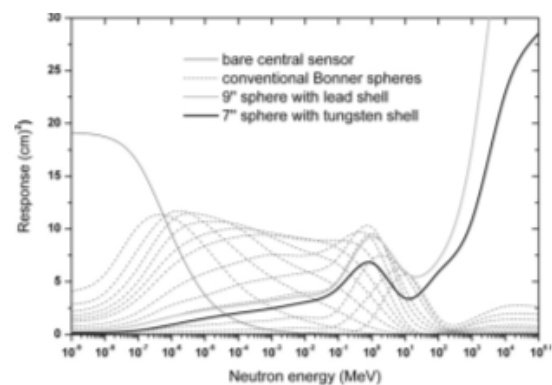


Fig. 2-2. ボナー球の応答関数の一例 (Thomas による [7]).

そこで本研究では、液体を減速材として用いるスペクトロメータを開発することで、減速材の厚さを連続的に変化させ、より高精度な中性子スペクトル測定を可能とする装置の開発を行っている。本章では、この新しい装置である液体減速型中性子スペクトロメータの概念設計と、スペクトル評価手法、そしてシミュレーションによる実現可能性検討の結果を述べる。

2.2 減速型中性子スペクトロメータのスペクトル測定原理

減速型中性子スペクトロメータは、(1) 検出器形状から検出器の応答関数（入射中性子に対する検出器応答のエネルギー依存性を示す関数）を決定し、(2) 検出器を中性子場に設置して検出器信号を計数し、(3) 応答関数と検出器信号の計数から逆算して中性子場のエネルギースペクトルを評価する、という3ステップで中性子スペクトルの測定を行う。本節では、まず中性子の測定に関連する放射線検出器全般について述べた後、本研究全般で使用した ^3He 充填比例計数管 (Fig. 2-3) の動作原理について述べる。その後、減速型中性子スペクトロメータを用いた中性子エネルギースペクトル測定の原理について説明する。



Fig. 2-3 本研究で使用した ^3He 充填比例計数管。直径 50 mm (2 inch), 内圧 1 MPa, 動作電圧 1250 V である。

2.2.1 放射線検出器の概論

まず、中性子検出器の概要と動作原理について述べる [19]. 一般的に放射線検出器は、入射した放射線が検出器内部で何らかの相互作用を経由し、最終的に何らかの定量的に評価可能な物理現象を引き起こすことで放射線を検出する装置である.

放射線検出器を大きく分類すると、検出器内部に入射した放射線の相互作用により、最終的に何らかの形で即発的な出力パルスの電気信号が発生し、それを放射線検出信号とするリアルタイム式の放射線検出器と、一次的には放射線との相互作用によって何らかの半ば恒常的な変化を引き起こし、それによりストレージされた情報を二次操作によって取り出す方式の検出器の 2 種類に分けられる. 前者の例としては、電離箱、比例計数管、ガイガーミュラー計数管等の、検出器内部で放射線との相互作用による電離によって発生した自由電子に対して高電圧を印加することにより電荷を収集し電気信号とするガス検出器や、放射線と相互作用してシンチレーション光を発生する物質 (シンチレータ) を利用し、発生した光を光電子増倍管によって電気信号に変換し検出信号とするシンチレーション検出器、半導体結晶の内部で放射線が相互作用を引き起こした時に発生する電子正孔対に電圧を印加して電流信号を得る半導体検出器などがある. 後者の例としては、前世紀の X 線の発見まで遡る古い歴史を持つ写真乳剤を利用したラジオグラフィ用フィルムや原子核乾板、放射線によって生じる電子正孔対が即座に再結合しない材料を使用し、二次的に熱励起による蛍光 (thermally stimulated luminescence, TSL) を発生させることで積分的で受動的な放射線検出器 (線量計) として利用することができる TLD 線量計 (thermoluminescent dosimeter), TLD 検出器と同様の原理であるが熱励起ではなく光励起による蛍光 (optically stimulated luminescence, OSL) によって動作する OSL 線量計, OSL を応用した位置敏感型放射線検出器のイメージングプレート (Imaging plate, IP), 中性子による原子核の放射化を利用し、中性子照射によって放射化したサンプルの放射能を測定することで中性子束の強度を評価する放射化検出器 (activation detector) 等があげられる.

これらの内、中性子検出器として主に使用されるものは比例計数管、シンチレーション検出器、放射化検出器である. 中性子は電荷を持たず電氣的に中性であるため、直接電離を発生させることはない. そのため、比例計数管やシンチレーション検出器を中性子検出器として用いる場合には、中性子を何らかの相互作用により電離放射線に変換する必要がある. 一般的には中性子と原子核

との荷電粒子放出反応を発生させ、それによる即発パルス信号を使用する。本論文では、本研究で使用した ^3He 充填比例計数管についてのみ次節にて詳細を述べる。その他の検出器については教科書やそれに引用されている参考文献をご参照いただきたい [19].

2.2.2 中性子検出用比例計数管の動作原理

本研究では $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反応によって荷電粒子が発生する性質を利用し中性子を検出する ^3He 充填比例計数管を利用した。本節では中性子検出用比例計数管の動作原理について説明する。

比例計数管 (proportional counter) とはガス入り検出器の一形式であり、常にパルスモードで作動させ、電離放射線と内部ガスの相互作用によって発生したイオン対の電荷をガス増幅 (gas multiplication) の現象に基づいて増幅し、収集することでパルス信号を得る装置である (Fig. 2-4). 比例計数管を中性子検出に用いるための手法としては、検出器内部で中性子と内部ガスを相互作用させ、陽子やアルファ粒子等の、エネルギーを持った荷電粒子に即時に変換する核反応を引き起こし、これらの荷電粒子を検出することで中性子を検出したものとする方法が一般的である。中性子と相互作用する内部ガスとしては、 ^{10}B を含有する BF_3 ガスや、本研究でも使用した ^3He ガスなどが広く用いられる。これは

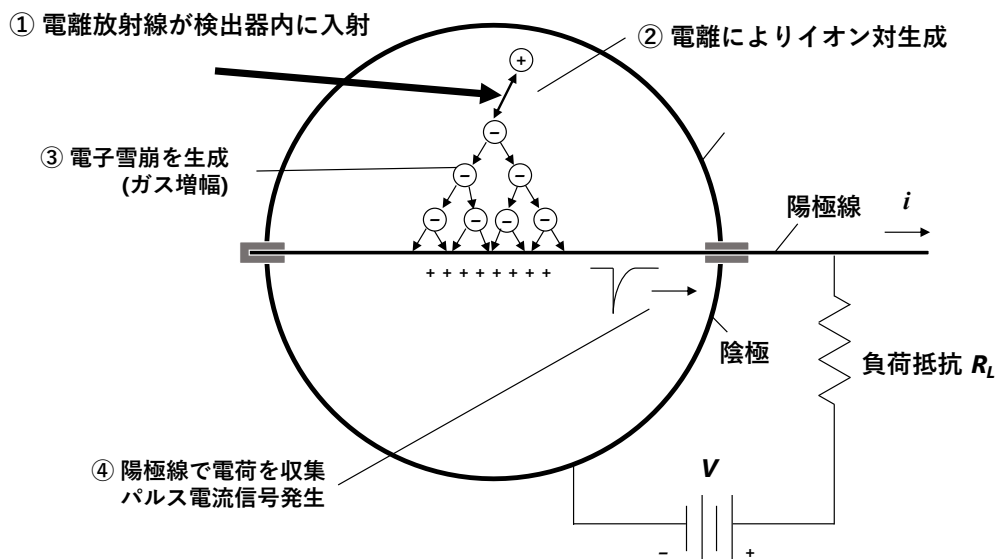


Fig. 2-4 比例計数管の基本要素と動作原理.

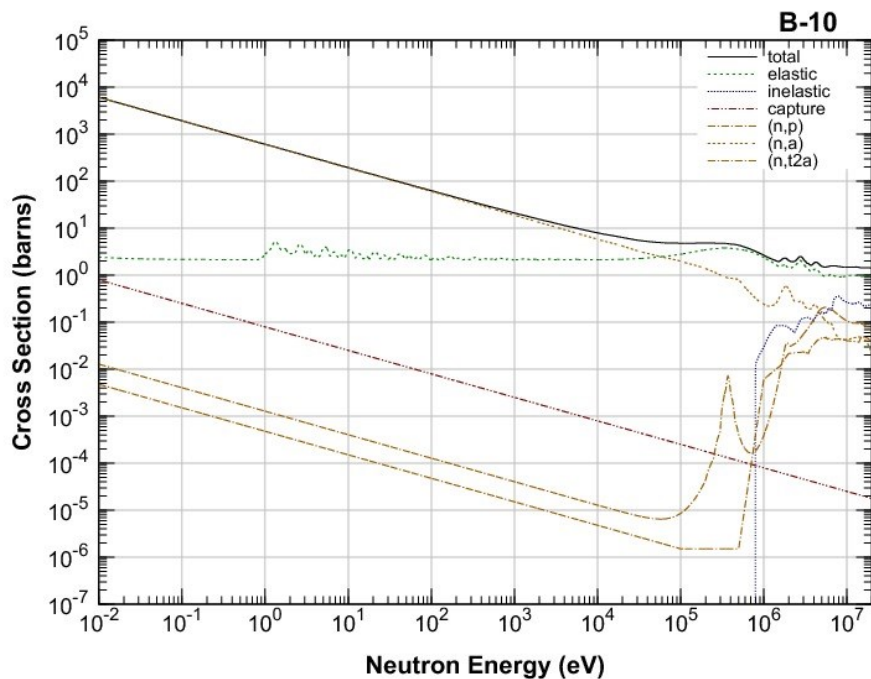


Fig. 2-5 ^{10}B の中性子反応断面積 [18]. $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応の断面積が極めて高い.

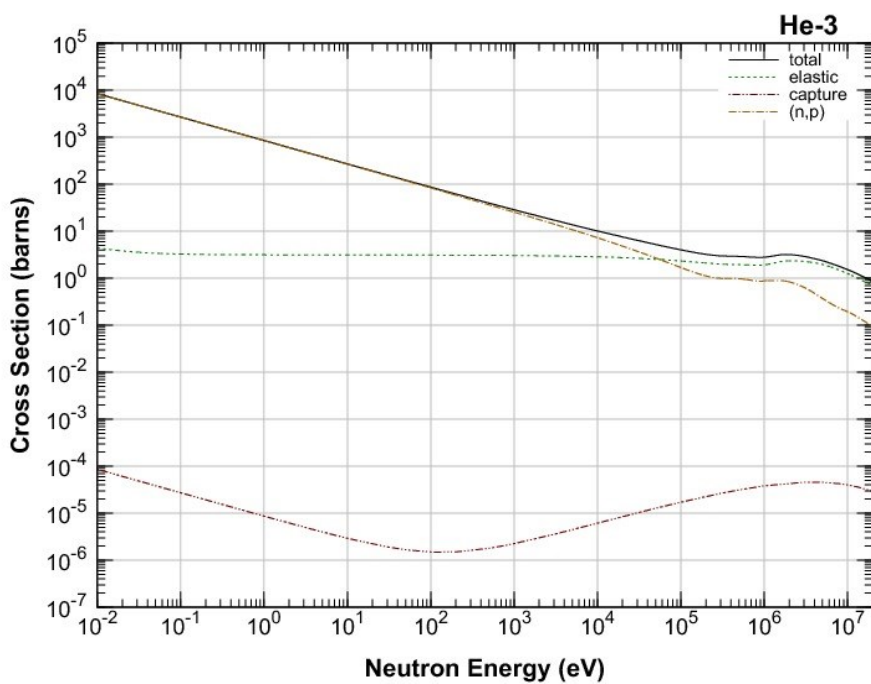


Fig. 2-6 ^3He の中性子反応断面積 [18]. $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反応の断面積が極めて高い.

$^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応や $^3\text{He}(\text{n},\text{p})^3\text{H}$ 反応の反応断面積が大きい (Fig. 2-5, Fig. 2-6) である [18]. 中性子の検出は荷電粒子放出反応を通して引き起こされるため、この反応率が高いということはすなわち中性子の検出効率が高いということと等価であり、中性子の測定を効率的に行うことができることを意味する。これらの反応は低エネルギー中性子に対して特に高い反応断面積を持つが、一方で主として反応する中性子のエネルギーよりも核反応の Q 値 (核反応によって発生するエネルギー) が大きな正の値 ($^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応では 2.792 MeV, $^3\text{He}(\text{n},\text{p})^3\text{H}$ 反応では 0.764 MeV) となる。そして核反応で発生したエネルギーは主として発生する荷電粒子に運動エネルギーとして与えられるため、検出器信号それ自体には入射中性子のエネルギーに関する情報が含まれず、中性子が比例計数管内で内部ガス中の原子核と核反応したという事実しか示さない。ゆえに中性子検出用の比例計数管単体で中性子のエネルギースペクトルを評価することは不可能である。比例計数管を用いて中性子スペクトル測定を行うためには、例えば、減速材等を組み合わせて中性子に対する応答関数を変化させることが必要となる。次節にてその詳細を記す。

2.2.3 減速型中性子スペクトロメータの測定原理

本節では、本研究でも採用した減速型中性子スペクトロメータを用いた中性子のエネルギースペクトル測定の原理についての概要を述べる。

今、エネルギー E の中性子に対して感度 $R_i(E)$ を持つ検出器について考える。この時、この検出器を用いて中性子フルエンスが $\Phi(E)$ と表される中性子場で測定実験を行うと、その時の実験値 M_i (エネルギー区間 $[E_{min}, E_{max}]$ の積分値) は式 (2.1) で表される。

$$M_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} R_i(E) \cdot \Phi(E) dE \quad (2.1)$$

この式は中性子フルエンス $\Phi(E)$ に関する第1種 Fredholm 型積分方程式と呼ばれる、中性子検出器によって得られる実験データを導出するための式である。

式 (2.1) の積分方程式の逆問題を解いて $\Phi(E)$ を求めることを一般に spectrum unfolding と呼ぶ。式 (2.1) では検出器の応答関数 $R_i(E)$ と中性子のフルエンス $\Phi(E)$ は中性子のエネルギー E に対して連続であるが、ヒストグラム型の離散スペクトルとして扱うほうが数値処理を施すに際して有利であるため、実際の評価を行う際には式 (2.1) の離散化を行う。まず検出器に入射する中性子のもつエネルギー E のエネルギー区間 $[E_{min}, E_{max}]$ ($E_{min} \cong 0$) を $n+1$ 個のエネル

ギービン $E_0 (= E_{min}) < E_1 < \dots < E_j < \dots < E_n (= E_{max})$ で分割する. このビン区間で $\Phi(E)$ を積分し, 式 (2.2) の通りエネルギー群 $\Delta E_j (E_{j-1} < E < E_j)$ に対するヒストグラム $p_j (j=1, n)$ を作成する.

$$p_j = \int_{\Delta E_j} \Phi(E) dE \quad (2.2)$$

ここで ΔE_j はビンの区間幅であり任意に定義できる. エネルギースペクトル $p_j (j=1, n)$ と実験で得られた測定値 $M_i (i=1, m)$ の関係は, 行列方程式を用いて式 (2.3) および式 (2.4) で表される. ここで検出器の応答関数 $R_i(E)$ も離散化されるので, その要素を $r_{ij} = R_i(E \in \Delta E_j)$ と表した. これは i 番目の減速材配置条件下 (典型的には i 番目の減速材厚さ) において検出器に入射した中性子がエネルギー群 ΔE_j に属するエネルギーを持つ場合における検出効率に相当する.

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_i \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mj} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_j \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\vec{M} = \mathbf{R} \cdot \vec{p} \quad (2.4)$$

この行列 \mathbf{R} を本研究では応答関数行列と呼ぶ. 最終的に式 (2.3) で表される行列式の逆問題を spectrum unfolding によって解くことにより入射中性子のエネルギースペクトル \vec{p} を求めることができる.

2.2.4 液体減速型中性子スペクトロメータ

従来のボナー球等の減速型中性子スペクトロメータでは, 球形を作るために減速材はポリエチレンなどの固体材料で製作されていた. これは減速材殻の取り扱いが容易であることや, 球状の減速材を製作することが可能となるため検出器の角度依存性を無視できる, 等の利点によるものであるが, 一方で同心球状の減速材殻を多数製作することは一般的に困難であるため, 応答関数行列の種類数が解析したいエネルギー範囲と比べて少なすぎる という欠点がある.

筆者が開発を行っている液体減速型中性子スペクトロメータとは, 中性子入射方向に液体の減速材を配置することで, 入射中性子のエネルギーに対する検出器感度を準連続的に変化させ, その変化量と実験で得られる中性子検出信号の数からエネルギースペクトルの推定を行う装置である (Fig. 2-7). 本装置では減速材として液体を使用するので減速材厚を変更することが容易であり, 検

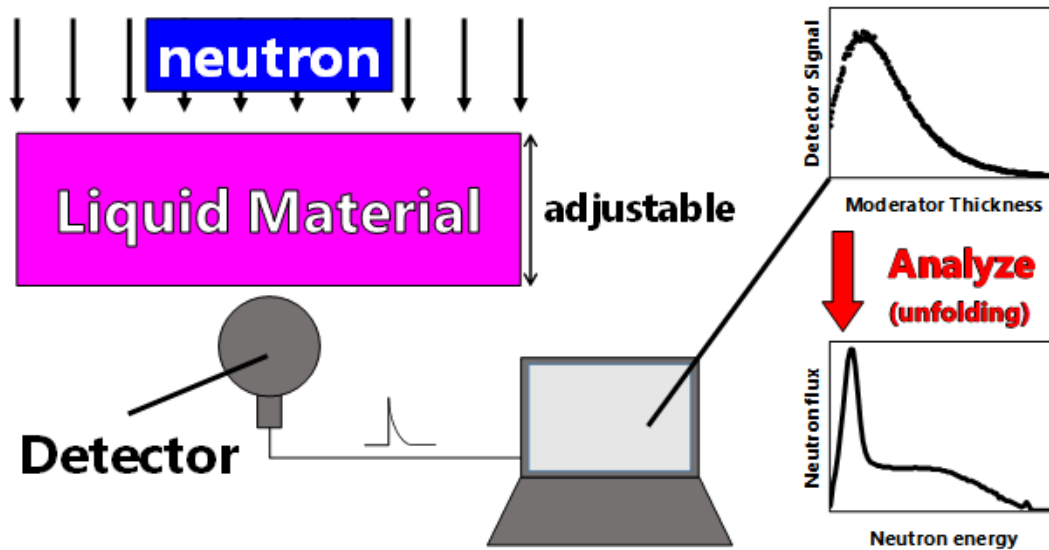


Fig. 2-7 液体減速型中性子スペクトロメータの概念図.

出器感度の変化 (応答関数) をより細やかに変更する (種類数を増やす) ことが可能となるため、エネルギースペクトル測定において測定値の確度や精度の向上が見込まれる。

2.3 Bayes 推定法による spectrum unfolding

一般的に spectrum unfolding は式 (2.3) で表される行列方程式の逆問題を数値計算によって解くことにより行われる。Spectrum unfolding の過程で最も問題となるのは、実験データに含まれる統計誤差等の影響により、得られたスペクトルに激しい振動や物理的に意味のない負の値が出てくること、そして解が正確に収束しないことである。これらの問題を解決するため、これまで様々な手法が提案されてきたが、この過程での不確かさは未だかなり大きいことがあり、そこで導出されるスペクトルの精度を向上するための計算法に関する研究が続けられている [9-12]。

本研究では、東北大学の岩崎らによって開発された、確率統計学の Bayes の定理を拡張した新しい Bayes 推定法を導入した [13]。この手法の特徴としては、原理が非常に単純であり適用が容易であること、応答関数以外の束縛条件を必要としないこと、応答関数を 1 つの放射線に対して発生する特定の事象が発生する確率から求められるためその評価が容易であること、測定値が正值の場合は必ず推定結果の正值が保証されること、逆行列を求める必要がなく数値的な

不安定さを生じないことなどがある。

2.3.1 Bayes の定理

Bayes の定理とは条件付き確率に関する基本的な定理である。まず, S を標本空間, A を S に属する部分集合 (事象) とする。これに対して実数 $P(A)$ を与える関数があり, かつ関数 $P(A)$ が式 (2.5) から式 (2.7) までを満たす時, P を標本空間 S の集合に対して定義された確率測度といい, $P(A)$ を事象 A の確率という。ただし, A_1, A_2, \dots, A_n は S 内の互いに排反な事象である。

$$P(A) \geq 0 \quad (2.5)$$

$$P(S) = 1 \quad (2.6)$$

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) \quad (2.7)$$

次に, 事象 B が起こったという条件のもとで A が起こる確率を考える。これは条件付き確率と呼ばれるものであり, 式 (2.8) で $P(A|B)$ として定義される。

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (2.8)$$

ここで, 2つの事象 A, B がともに生起する確率は式 (2.9) で与えられる。これを確率の乗法定理という。

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B|A) = P(B) \cdot P(A|B) \quad (2.9)$$

また, 式 (2.9) より条件付き確率 $P(A|B)$ は式 (2.10) のように整理される。

$$P(A|B) = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(B)} \quad (2.10)$$

事象 A_1, A_2, \dots, A_n が互いに排反でかつ S に属する全事象の分割である時, 任意の事象 B に対して式 (2.11) が成り立つ。これを全確率の公式という。

$$P(B) = P(A_1) \cdot P(B|A_1) + P(A_2) \cdot P(B|A_2) + \dots + P(A_n) \cdot P(B|A_n) \quad (2.11)$$

以上の式から, 事象 A_j の条件付き確率に対する関係式として式 (2.12) が導き出される。これを Bayes の定理という。

$$P(A_j|B) = \frac{P(A_j) \cdot P(B|A_j)}{\sum_{j=1}^n P(A_j) \cdot P(B|A_j)} \quad (2.12)$$

Bayes の定理は $P(A_j)$ 及び $P(B|A_j)$ が与えられたときに $P(A_j|B)$ を求める方法を示すもので, $P(A_j)$ を事前確率, $P(A_j|B)$ を事後確率という。一般的にベイズ推定とは,

事前確率 $P(A_j)$ に確率の 3 公理を満たす適当な任意の数値を代入し、あらかじめ与えられている $P(B)$ や $P(B|A_j)$ とともにその値を式 (2.12) に代入して事後確率 $P(A_j|B)$ を求め、より客観的に確からしい確率を得る手法である。この一連の手続きを Bayes 改訂という。通常この手法では Bayes 改訂によって得られた事後確率 $P(A_j|B)$ を新たな事前確率 $P(A_j)$ として更新し、繰り返し Bayes 改訂を行うことで可能な限り確からしい値を推定することが可能であると考えられている。

2.3.2 Bayes の定理による unfolding 問題の解釈

本節では、前節で述べた各々の式を実験で得られる値に対応させ、Bayes の定理を unfolding 問題に適用する方法を考える。

まず、標本空間 S を「放射線が検出器に入射し、検出器信号が出る」という事象とし、これが全事象を示しているものとする。次に、事象 A_j を「エネルギー ΔE_j に属するエネルギーを持つ放射線が検出器に入射し、検出器信号が出る」という事象とする。そして、 B_i を「 i 番目の検出器条件下 (本研究においては i 番目の減速材厚さ) において放射線が検出器に入射し、検出器信号が出る」という

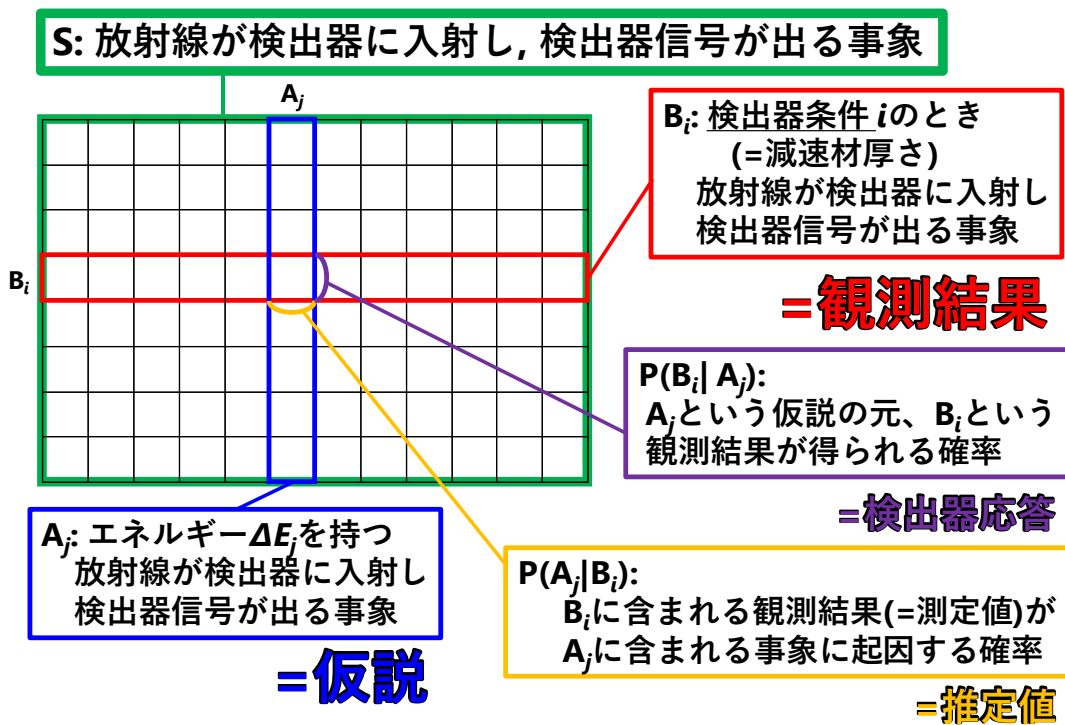


Fig. 2-8 統計学的観点から見た各々の事象の意味と関係の解説図

事象とする (図説: Fig. 2-8). 任意の事象 X が発生する確率を $P(X)$ とすると, $P(S)$ は放射線が検出器に入射し, 検出器信号が出る確率であり, $P(A_j)$ はエネルギー分割 ΔE_j に属するエネルギーを持つ放射線が検出器に入射して検出器信号が出る確率, $P(B_i)$ は i 番目の検出器条件下 (= i 番目の減速材厚さ) において放射線が検出器に入射し, 検出器信号が出る確率として表されることになる.

今, 事象 A_j は実際の物理現象に対する「仮説」, 事象 B_i は実際の物理現象「観測結果」という意味合いを持つものとして考える. これは Bayes 統計学的には岩崎らによって導入された「並立仮説」という解釈と強く結びついている [14]. これは, 事象群 $\{A_j\}$ を「観測結果を生成する複数の並立した仮説が存在し, そのどれもが正しい仮説の可能性がある」と解釈する考え方である. この場合, Bayes 推定によって最終的に求められるのは並立したそれぞれの仮説の混合割合であり, 仮説の事後確率 $P(A_j|B_i)$ として与えられることになる. 本研究において考えられる物理現象として考えると, 事後確率 $P(A_j|B_i)$ は「 i 番目の減速材配置条件下にある検出器が信号を出したとき, それがエネルギー分割 ΔE_j に属するエネルギーを持つ放射線に起因するものである」という事象が発生する確率を表し, 実験値が得られた場合に, その結果が妥当となる放射線のエネルギー

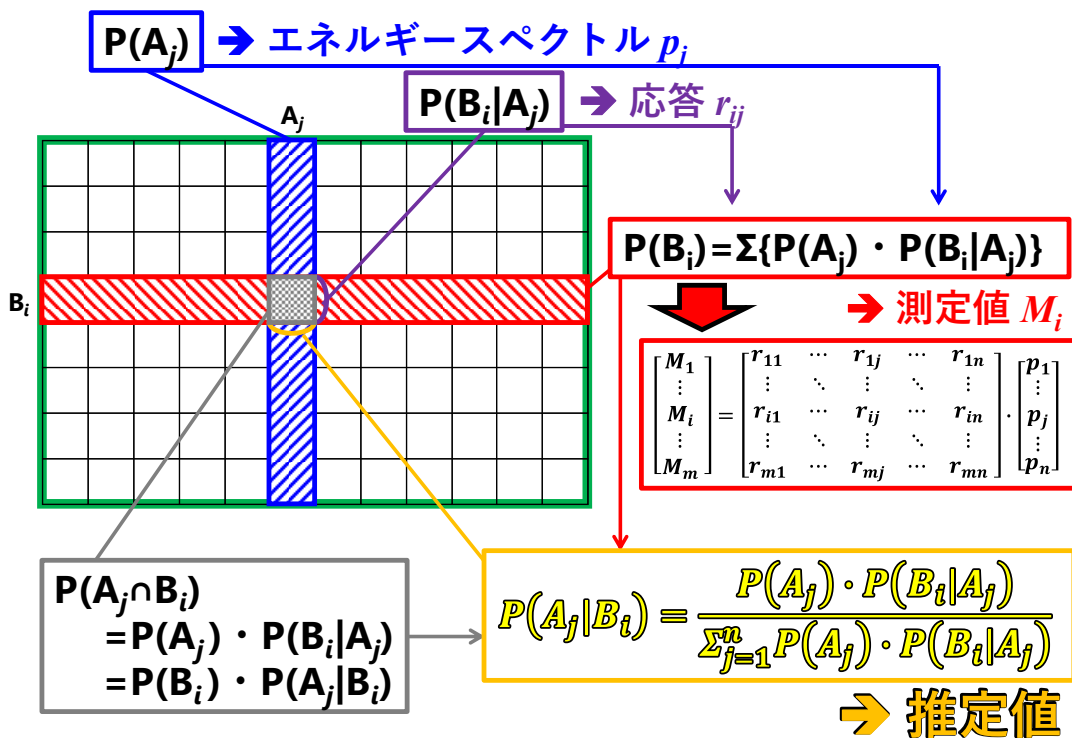


Fig. 2-9 Bayes 推定によりエネルギースペクトルの推定値を求める手続き.

ペクトルの推定値を与える指標となる (Fig. 2-9). また, 事後確率 $P(B_i|A_j)$ は「エネルギー分割 ΔE_j に属するエネルギーを持つ放射線が検出器に入射したとき, i 番目の減速材配置条件下にある検出器が信号を出す」という事象が起こる確率を示し, これは前節で述べた応答関数 r_{ij} と同じ意味合いを持つ量である.

2.3.3 Bayes 推定の放射線計測問題への適用

本節では, 前節で述べた Bayes の定理による unfolding 問題の解釈を基に, Bayes 推定を実際の放射線計測問題へ適用するための手法について検討する.

まず, 式 (2.12) を式 (2.4) に対応させて考えてみる. このとき, 事象 A_j が発生する確率 $P(A_j)$ ($j = 1, n$) は真のエネルギースペクトル \vec{p} に, 事象 B_i が発生する確率 $P(B_i)$ ($i = 1, m$) は実験によって得られる測定値群 \vec{M} に相当する. 先ほど述べたとおり $P(B_i|A_j)$ は応答関数 r_{ij} と対応する. しかしながら, これらの値が確率の3公理を満たすとは限らない. なぜならば, 2.3.2 節内の解説では放射線が検出器に入射した時に必ず検出器が信号を発するものとして unfolding 問題を解釈しているが, 一般的に応答関数 r_{ij} は「放射線が検出器に入射し, かつ検出器が信号を発さない」という事象を含む量として得られるためである. したがって, まずこれらの値を変形し, 誤差の3公理を満たす変数に置き換えることにする.

今, 応答関数要素 $\{r_{ij}\}$ の i に対する総和 f_i を式 (2.13), $\{r_{ij}\}$ を f_i で規格化した応答関数要素 $\{r'_{ij}\}$ を式 (2.14) のように表す. 定義より, 規格化応答関数要素 r'_{ij} は式 (2.15) を満たす.

$$f_j = \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad (2.13)$$

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij}}{f_j} \quad (2.14)$$

$$\sum_{i=1}^m r'_{ij} = 1 \quad (2.15)$$

このとき式 (2.14) にて r_{ij} に積算されている f_i の逆数は, 検出器の検出効率を補正する因子, すなわち検出器に放射線が入射したが検出器が信号を発さなかった事象を補正するための係数となっている. 式 (2.4) は規格化応答関数行列 R' と検出効率行列 F をそれぞれ式 (2.16) 及び式 (2.17) のように導入し, 式 (2.18) のように変形される.

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} r'_{11} & \cdots & r'_{1j} & \cdots & r'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{i1} & \cdots & r'_{ij} & \cdots & r'_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{m1} & \cdots & r'_{mj} & \cdots & r'_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & f_n \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\vec{\mathbf{M}} = \mathbf{R}' \cdot \mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{p}} \quad (2.18)$$

ここで $\mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{p}}$ の各要素の総和 $|\mathbf{P}_F|$ (式 (2.19))を用いて $\mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{p}}$ を規格化した補正スペクトル $\vec{\mathbf{p}}'$ (式 (2.20))を導入する.

$$|\mathbf{P}_F| = \sum_{j=1}^n f_j p_j \quad (2.19)$$

$$\vec{\mathbf{p}}' = \frac{1}{|\mathbf{P}_F|} \cdot \mathbf{F} \cdot \vec{\mathbf{p}} = \frac{1}{|\mathbf{P}_F|} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \cdot p_1 \\ \vdots \\ f_j \cdot p_j \\ \vdots \\ f_n \cdot p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'_1 \\ \vdots \\ p'_j \\ \vdots \\ p'_n \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

定義より, 補正スペクトル $\vec{\mathbf{p}}'$ の要素 $\{p'_j\}$ は式 (2.21) を満たす.

$$\sum_{j=1}^n p'_j = 1 \quad (2.21)$$

この時, 式 (2.18) は式 (2.22) のように変換される.

$$\vec{\mathbf{M}} = |\mathbf{P}_F| \cdot \mathbf{R}' \cdot \vec{\mathbf{p}}' \quad (2.22)$$

今, 式 (2.22) の両辺の各要素は式 (2.23) のように表される.

$$M_i = |\mathbf{P}_F| \sum_{j=1}^n r'_{ij} p'_j \quad (2.23)$$

i に対して M_i の総和 $|\mathbf{M}|$ をとると式 (2.24) のように整理される.

$$|\mathbf{M}| = \sum_{i=1}^m M_i = \sum_{i=1}^m \left(|\mathbf{P}_F| \sum_{j=1}^n r'_{ij} p'_j \right) = |\mathbf{P}_F| \sum_{j=1}^n \left\{ p'_j \cdot \left(\sum_{i=1}^m r'_{ij} \right) \right\} = |\mathbf{P}_F| \quad (2.24)$$

$|M|$ をもって式 (2.22) を規格化すると、式 (2.4) は最終的に式 (2.25) のように整理できることになる。

$$\begin{bmatrix} M'_1 \\ \vdots \\ M'_i \\ \vdots \\ M'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r'_{11} & \cdots & r'_{1j} & \cdots & r'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{i1} & \cdots & r'_{ij} & \cdots & r'_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{m1} & \cdots & r'_{mj} & \cdots & r'_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p'_1 \\ \vdots \\ p'_j \\ \vdots \\ p'_n \end{bmatrix} \left(= \frac{1}{|M|} \begin{bmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_i \\ \vdots \\ M_m \end{bmatrix} \right) \quad (2.25)$$

このとき、 $\{M'_i\}$, $\{r'_{ij}\}$, $\{p'_j\}$ はすべてその定義より確率の3公理を満たすので、これらを用いてベイズ推定を実際の放射線計測問題に適用することが可能となる。実際の実験値に対する絶対値の補正は $|M|$ を乗じることにより可能である。

2.3.4 Bayes 推定による unfolding の手続き

本節では、前節までの議論を踏まえ、実際の Bayes 推定による unfolding 処理の手続きについて議論する。

まず、事前確率 $P(A_j)$ を Bayes 改訂の繰り返し適用を念頭に置いた表式に書き換えるため、評価スペクトル $e_j^{(k)}$ を導入する。添え字 (k) は k 回目の Bayes 改訂によって得られた評価スペクトルであることを表す。導入された評価スペクトル $\overline{\mathbf{e}}^{(k)} = \{e_j^{(k)}\} (j = 1, n)$ は式 (2.20) で定義された補正スペクトル $\overrightarrow{\mathbf{p}}$ の推定値であり、真のスペクトル \mathbf{p} を評価するためのファクターである。したがって、 $\overline{\mathbf{e}}^{(k)}$ は $\overrightarrow{\mathbf{p}}$ の満たす条件、すなわち式 (2.26) を満足する必要がある。

$$\sum_{j=1}^n e_j^{(k)} = 1 \quad (2.26)$$

このとき、改訂後の評価スペクトル $e_j^{(k+1)}(i)$ は式 (2.12) との対応から式 (2.27) のように表される。

$$e_j^{(k+1)}(i) = M'_i \cdot \frac{r'_{ij} e_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^n r'_{ij} e_j^{(k)}} \quad (2.27)$$

ここで、添え字 (i) は測定スペクトルの i 群の値によって改訂された旨を表す。スペクトル全体については加算演算を行う。

$$e_j^{(k+1)} = \sum_{i=1}^m e_j^{(k+1)}(i) = \sum_{i=1}^m \left(M'_i \cdot \frac{r'_{ij} e_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^n r'_{ij} e_j^{(k)}} \right) \quad (2.28)$$

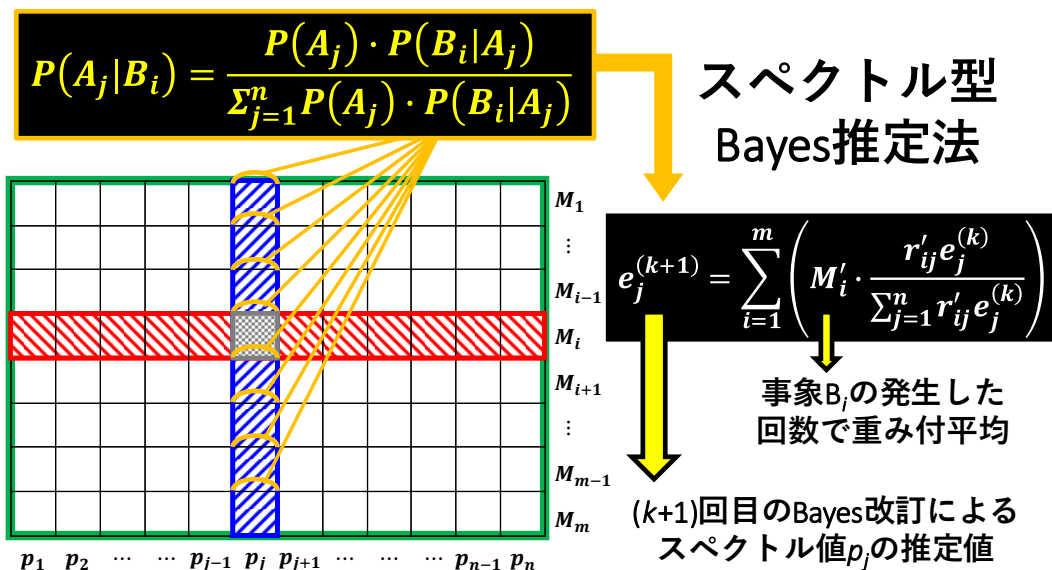


Fig. 2-9 スペクトル型 Bayes 推定法の解説図.

これによって Bayes 改訂された評価スペクトル $e_j^{(k+1)}$ が得られる. 式 (2.27) では式 (2.12) にはないファクター M'_i を乗じている点に注意が必要である. これは Bayes の定理から導き出される式 (2.12) の意味を拡大解釈した操作であるが, 最終的に式で加算演算を行っており, 複数の先行知識である $e_j^{(k)}$ に M'_i で重みづけを行う平均化の操作に相当する (Fig. 2-9). この操作は完全集積されたヒストグラム型のデータから Bayes 推定を行う際に必要となる. 東北大学の名内はこの方法を「スペクトル型 Bayes 推定法」と呼んでいる [15].

$e_j^{(k+1)}$ の積分値について考えてみると, 変数 i と j は独立で積分順序が交換可能であることから, 式 (2.29) が得られ, 式 (2.27) によって分配される M'_i の積分値は常に保存されることになる.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n e_j^{(k+1)} &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left(M'_i \cdot \frac{r'_{ij} e_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^n r'_{ij} e_j^{(k)}} \right) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(M'_i \cdot \frac{r'_{ij} e_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^n r'_{ij} e_j^{(k)}} \right) \\ &= \sum_{i=1}^m M'_i \times \sum_{j=1}^n \left(\frac{r'_{ij} e_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^n r'_{ij} e_j^{(k)}} \right) = \sum_{i=1}^m M'_i \times \left(\frac{\sum_{j=1}^n r'_{ij} e_j^{(k)}}{\sum_{j=1}^n r'_{ij} e_j^{(k)}} \right) = \sum_{i=1}^m M'_i \\ \therefore \sum_{j=1}^n e_j^{(k+1)} &= \sum_{i=1}^m M'_i = 1 \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.3.5 スペクトル型 Bayes 推定における繰り返し回数の決定

Bayes 推定において重要な要素の 1 つに, Bayes 改訂の繰り返し回数を何回に決定すべきか, ということがある. 本研究では大阪大学の近藤によって開発された, モンテカルロ法による Bayes 改訂数決定法を参考に, 繰り返し回数を決定した [16].

まず, 真の測定値 M からサンプル測定値列 $Y^{(h)} = \{Y_i^{(h)}\}$ を作成した. $Y_i^{(h)}$ は正規分布 $N(M_i, \sigma_i^2)$ に従うように乱数を用いて作成した. ここで, σ_i^2 は測定値の分散, h は作成した $Y_i^{(h)}$ のサンプル番号である. 本研究では $h = 1000$ とした. 次に, 全てのサンプル測定値数列 $Y^{(h)}$ に対して k 回目の推定における推定値 $e^{(k)(h)} = \{e_j^{(k)(h)}\}$ ($j = 1, n$) を求めた. その後, 式 (2.30) および (2.31) に従って $e^{(k)(h)}$ の平均値 $\overline{e^{(k)}} = \{\overline{e_j^{(k)}}\}$ と標準偏差 $\sigma_e^{(k)} = \{\sigma_{e_j^{(k)}}\}$ を求めた.

$$\overline{e_j^{(k)}} = \frac{1}{h} \sum_h e_j^{(k)(h)} \quad (2.30)$$

$$\left(\sigma_{e_j^{(k)}}\right)^2 = \frac{1}{h} \sum_h \left(e_j^{(k)(h)} - \overline{e_j^{(k)}}\right)^2 \quad (2.31)$$

$\overline{e^{(k)}}$ を式 (2.22) の $\overline{\mathbf{p}^i}$ に代入すると, k 回目の推定における測定の推定値 $Z^{(k)} = \{Z_i^{(k)}\}$ ($i = 1, n$) は式 (2.32) で与えられる. また, このとき $Z^{(k)}$ の標準偏差 $\sigma_Z^{(k)} = \{\sigma_{Z_j^{(k)}}\}$ は式 (2.33) で与えられる.

$$Z_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot \overline{e_j^{(k)}} \quad (2.32)$$

$$\left(\sigma_{Z_i^{(k)}}\right)^2 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 \cdot \left(\sigma_{e_j^{(k)}}\right)^2 \quad (2.33)$$

$(\sigma_{Z_j^{(k)}})^2$ は Bayes 改訂の繰り返し回数 k に対して単調増加であることが近藤の研究によって明らかとなっている [16]. したがって, 本研究では式 (2.34) を満たす最大の k を Bayes 改訂の繰り返し回数として決定した

$$\sum_{i=0}^m \sigma_i^2 \geq \sum_{i=0}^m \left(\sigma_{Z_i^{(k)}}\right)^2 \quad (2.34)$$

この式は, 測定の推定値 $Z^{(k)}$ の分散の総和が実験値の分散の総和の値より大きくならない範囲でベイズ推定の繰り返しを続行するということを意味している.

最終的に k 回の Bayes 改訂によって得られた推定スペクトルの平均値 $\overline{\mathbf{e}^{(k)}}$ を補正スペクトル $\overline{\mathbf{p}}$ の推定値として求める. 式 (2.20) より, 真のエネルギースペクトル \mathbf{p} の推定値 $\overline{\mathbf{e}}$ は, 式 (2.35) で求められる.

$$\overline{\mathbf{e}} = |\mathbf{P}_F| \cdot \mathbf{F}^{-1} \cdot \overline{\mathbf{e}^{(k)}} \quad (2.35)$$

巻末の付録に掲載したリスト 1 からリスト 3 に本研究で作成したモンテカルロ型 Bayes 推定 unfolding プログラムのソースコードを掲載したので, 具体的なプログラムについてはそちらを参照していただきたい.

2.4 実現可能性の検討

液体減速型中性子スペクトロメータの実現により, 初期スペクトルを必要とせず, 正確な中性子スペクトルの測定することが原理的に可能であることを確認するため, 理想的な検出器モデルを用いた数値実験による実現可能性の検証を行った. また, 使用する液体減速材の候補として複数の液体材料について検討することで, 液体減速型中性子スペクトロメータを製作する上で液体減速材に求められる条件についても検討した. 本節ではその詳細について報告する.

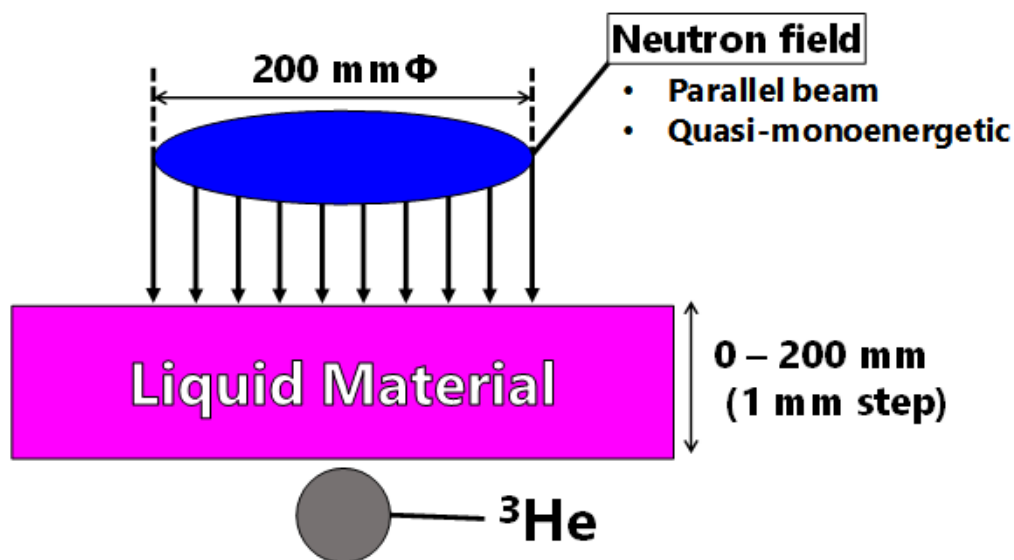


Fig. 2-10 応答関数の計算モデル.

2.4.1 応答関数の評価

理想的な液体減速型中性子スペクトロメータの検出器モデルとは、(1) ある特定の方向から中性子が照射されること、(2) 中性子が液体減速材を通して中性子検出素子に入射すること、(3) 液体減速材以外の何かと相互作用した中性子（例：実験室内の散乱中性子等）による検出器信号が一切無視できること、の以上 3 点を満たすモデルである。Fig. 2-10 に本研究で使用した計算モデルを示す。これは前述した 3 条件を満たす、最も基本的な液体減速型中性子スペクトロメータの検出器モデルである。

本研究では、応答関数の評価計算と実験のシミュレーションによる解析を行うため、汎用中性子輸送計算用モンテカルロコード MCNP-5 (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5) を使用した[17]。これは中性子、光子、電子の 3 次元輸送計算をモンテカルロ法によって行う計算コードである。MCNP-5 では連続エネルギー核データを利用でき、現在モンテカルロ計算コードの標準的なものとして広く利用されている。MCNP-5 は実験体系の形状を正確にモデル化することができる。その体系内に、線源となる領域を設定し、粒子の輸送を、モデルに含まれる物質の個々の反応断面積を考慮し、確率的にサンプリング計算を行う。この計算を多数回行うことで、任意の体系全体に平均的に発生する輸送現象のシミュレーション計算を行うことができる。MCNP-5 は各種放射線と物質との相互作用計算のために核データライブラリーを必要とする。本研究では日本原子力研究開発機構の評価済み核データライブラリー (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) の中で最も新しい JENDL-4.0 に基づく ACE フォーマットファイルを使用した[18]。

表 2-1 可能性検討の段階で検討された材料。

物質	軽水	重水	ホウ酸水	ホウ酸トリメチル
	H ₂ O	D ₂ O	H ₃ BO ₃ -aq	B(OCH ₃) ₃
融点 [°C (K)]	0 (273)	3.81 (277)	–	–34 (239)
沸点 [°C (K)]	100 (373)	101.4 (375)	–	68 (341)
¹⁰ B 密度 (mol/L)	–	–	0.174	1.784

応答関数を求めた手順を以下に示す. まず, MCNP-5 を用いて Fig. 2-10 に示された体系をモデル化した. 次に, エネルギー区間 ΔE_j で一様な分布を持つ準単色平行中性子ビームを減速材側から中性子検出器に向けて照射した. この手順を, 入射する中性子のエネルギーを 0.01 eV から 20 MeV までの範囲で $10^{0.1}$ 倍ずつ変化させながら繰り返し, 検出器モデルの応答関数を計算した. 検出器感度は ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応の反応率 (reactions / incident neutron flux intensity) と一致するものとした. 以上の手順に従って, 減速材の厚さを 0 mm から 200 mm まで 1 mm ずつ変化させながら減速材厚さと入射中性子エネルギーに依存する検出器応答関数を評価した. 液体減速材としては, 軽水, 重水, ホウ酸水, ホウ酸トリメチルの 4 種類を検討した. これらの材料を候補とした理由は, (1) 常温で液体である, (2) 入手が容易である, (3) 中性子に対する相互作用確率 (反応断面積) が異なっており, それぞれの応答関数に差異を設けることが可能である, という条件を満たしたためである. これらの材料の特性を表 2-1 に, それぞれを液体減速材として用いた場合の応答関数の計算結果を Fig. 2-11 に示す.

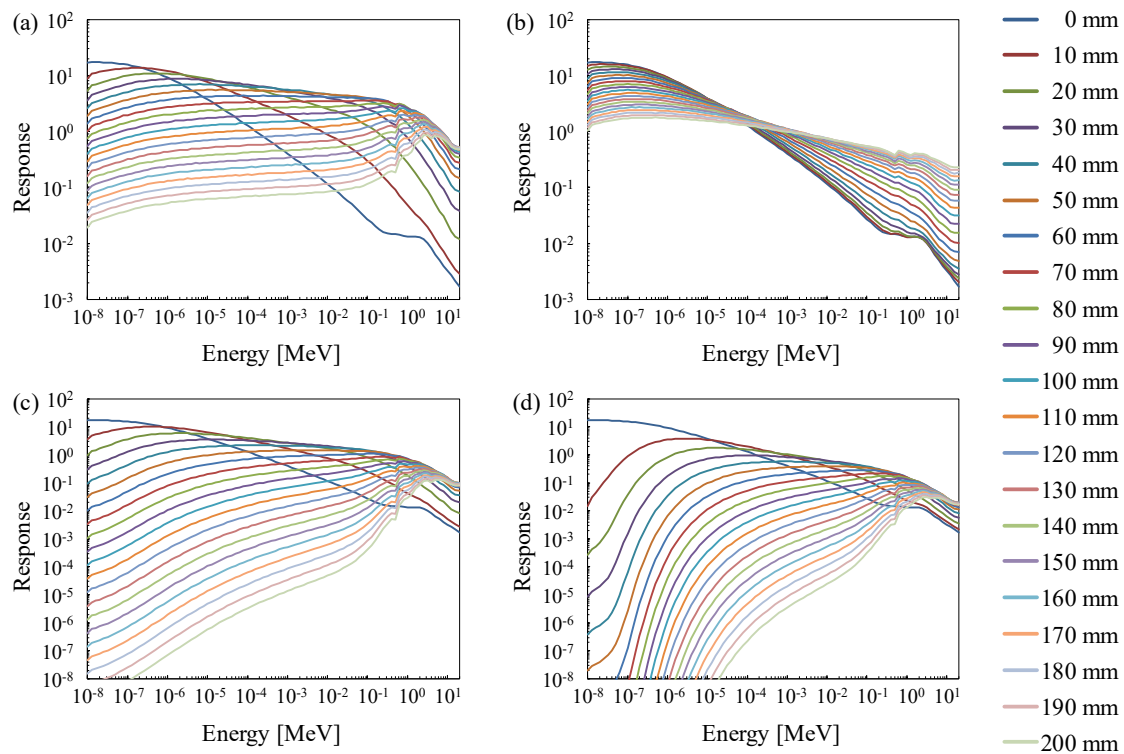


Fig. 2-11 応答関数の計算結果. 液体減速材として (a) 軽水, (b) 重水, (c) ホウ酸水, (d) ホウ酸トリメチルを用いた場合の計算結果をそれぞれ示す.

Fig. 2-11 より、軽水の応答関数は、減速材を厚くするほど熱、熱外中性子に対する感度が小さくなっていくが、50 mm 程度からの変化は感度曲線の形状は変わらずに絶対値のみが低下して行っていることや、その時 1 MeV 近傍の傾きが変化を続けておりそれ以上のエネルギー領域の感度はほとんど変化していないことが分かる。重水の応答関数は、熱中性子や高速中性子に対する感度変化が軽水より小さく、減速材を厚くするほど全エネルギー領域における応答が一定の値に近づいていくことが分かる。これは、重水素の断面積が軽水素より小さく、重水素との散乱によるエネルギー変化量がより小さいためと思われる。ホウ酸水の応答関数は、熱・熱外中性子の感度変化量が軽水より大きく、また軽水と異なり熱・熱外中性子の感度曲線の変化量がエネルギーごとに異なっており、傾きが徐々に大きくなっていることが分かる。これは、ホウ素の(n, α)反応断面積が大きいためである。ホウ酸トリメチルの応答関数は、ホウ酸水よりもさらに熱・熱外中性子の感度変化が大きく、低エネルギー側に大きく感度が低下する領域が発生し、減速材を厚くするほどその領域の境目が高エネルギー側にシフトしていったことが読み取れる。これは、ホウ酸トリメチルの方がホウ素の原子数密度が大きいためである。結論すると、応答関数の計算結果は用いる減速材によってそれぞれ特性が異なったものが得られたことが分かる。

2.4.2 数値実験

最後に、液体減速型中性子スペクトロメータにより原理的に中性子スペクトルが測定可能であることを確認するため、数値実験を行った。手順は以下の通りである。

まず、スペクトルの推定を行う「真のスペクトル」を設定した (Fig. 2-12)。中性子エネルギー領域の違いによる中性子スペクトル測定の実現可能性をそれぞれ検証するため、真のスペクトルとしては (A) 熱中性子領域、(B) 熱外中性子領域、(C) 高速中性子領域にそれぞれピークを持つ3種類のエネルギースペクトルを用意した。次に、Fig. 2-11 の応答関数と Fig. 2-12 の中性子スペクトルを用いて、式 (2.3) より検出器応答の期待値 \bar{M} を計算した。これは、Fig. 2-10 に示した応答関数計算モデルと同様の計算モデルで Fig. 2-12 に示したエネルギースペクトルを持つ中性子ビームを照射した場合に得られる検出器応答の期待値を計算する操作に相当する。その後、実験値を模擬するために、計算した検出器応答に統計誤差を加えた。統計誤差は、検出器信号の計数が十分に大きく、正規分布に従うものとした。統計誤差の大きさは誤差比が 0, 1, 2, 5% の場合について検討した。

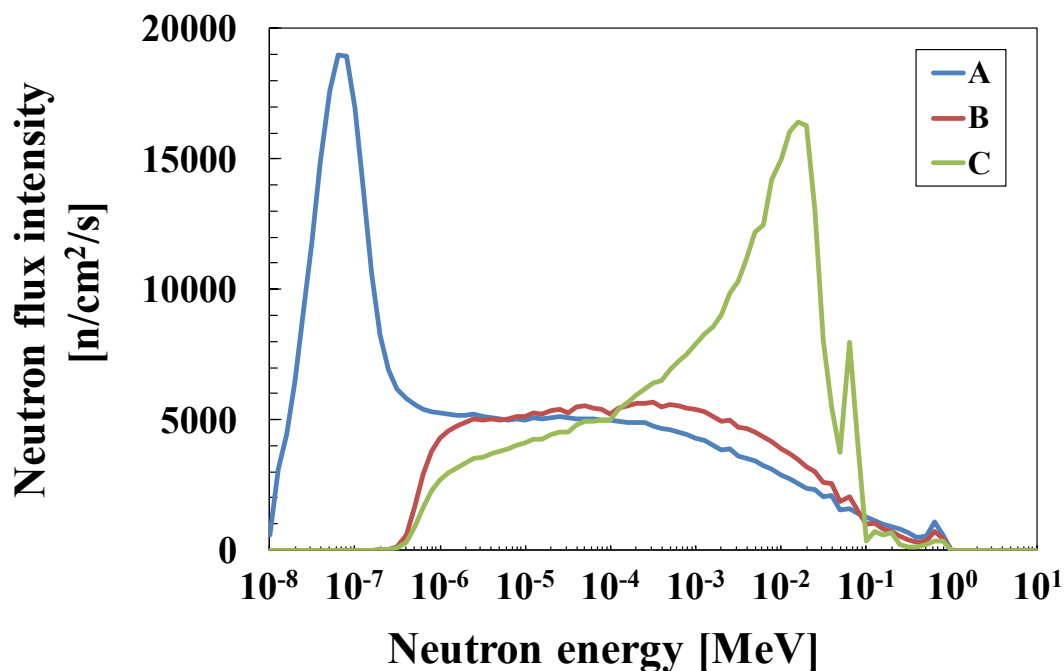


Fig. 2-12 数値実験で用いた真のスペクトル.A: 熱中性子領域, B: 熱外中性子領域, C: 高速中性子領域にそれぞれピークを持つ3種類のスペクトルを設定した.

例として、各減速材材料を用いた検出器モデルで A, B, C のスペクトル測定を行った場合の検出器信号計数率の期待値と、それに対して5%の統計誤差を加えた場合のランダムサンプリング値を Fig. 2-13, Fig. 2-14, Fig. 2-15 にそれぞれ示す。各図の (a) のグラフが各シミュレーションにおける測定結果の期待値を、(b) のグラフがランダムサンプリングの結果を示している。本研究では全ての測定値に一定の比率で誤差を加えたため、計数率がたかいほど誤差の絶対値は大きくなっている。最後に、Fig. 2-11 の応答関数と Fig. 2-13(b), Fig. 2-14(b), Fig. 2-15(b) の結果を用いてそれぞれ Bayes 推定法による unfolding を行うことで中性子スペクトルを推定し、真のスペクトルと比較を行った。

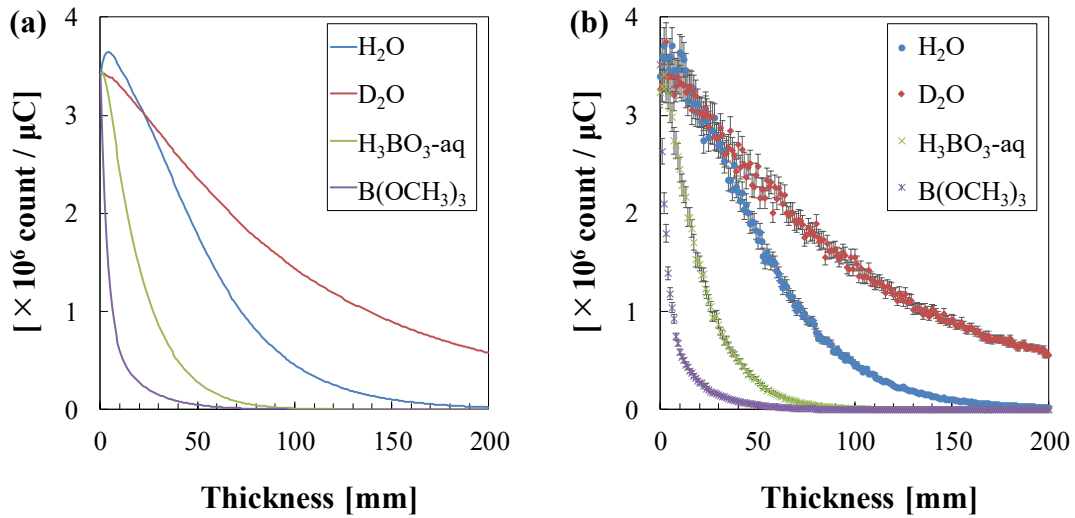


Fig. 2-13 A: 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、各減速材ごとの検出器応答. それぞれ, (a) 検出器応答の期待値, (b) 5%の統計誤差を加えた場合のランダムサンプリング値を示している.

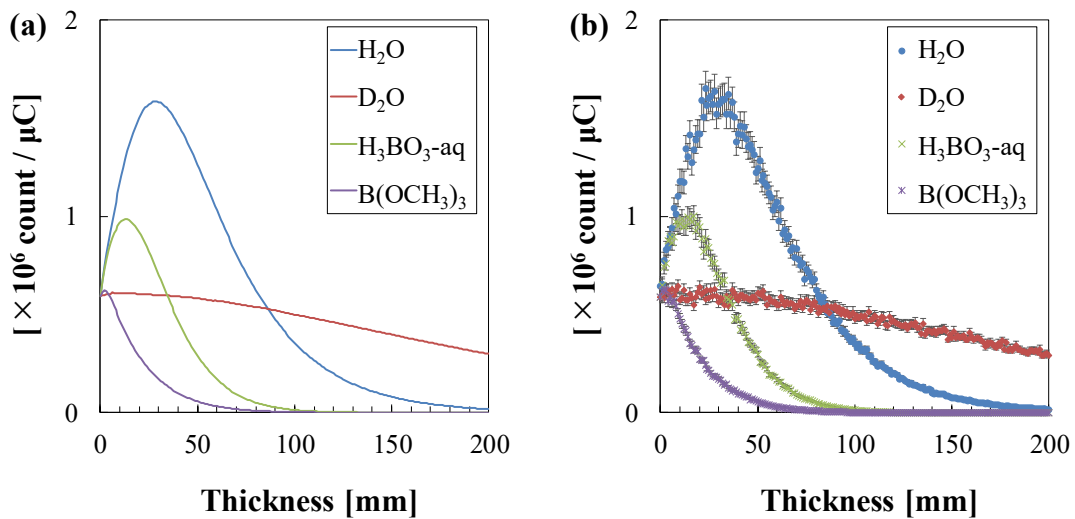


Fig. 2-14 B: 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、各減速材ごとの検出器応答. それぞれ, (a) 検出器応答の期待値, (b) 5%の統計誤差を加えた場合のランダムサンプリング値を示している.

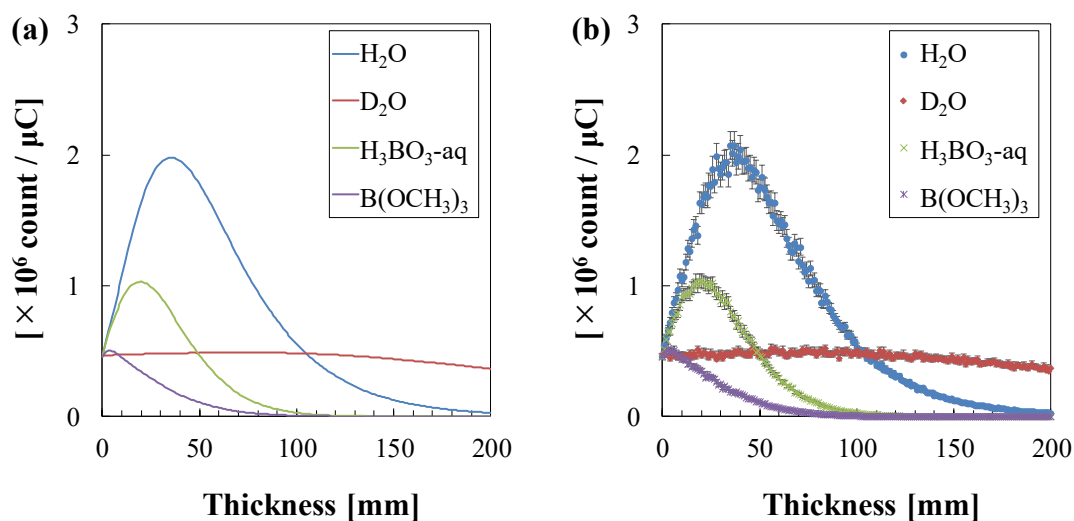


Fig. 2-15 C: 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、各減速材ごとの検出器応答. それぞれ, (a) 検出器応答の期待値, (b) 5%の統計誤差を加えた場合のランダムサンプリング値を示している.

2.4.3 結果と考察

中性子スペクトル A に対する数値実験の結果を Fig. 2-16 から Fig. 2-19 に, 中性子スペクトル B に対する結果を Fig. 2-20 から Fig. 2-23 に, 中性子スペクトル C に対する結果を Fig. 2-24 から Fig. 2-27 に示す. それぞれ, (a) 軽水, (b) 重水, (c) ホウ酸水, (d) ホウ酸トリメチルを用いた場合の結果を示している. この結果より, 各材料に対する考察を行った.

まず軽水を減速材として用いた場合の解析結果について記す. 熱中性子スペクトルの解析では, 加えた統計誤差が 0%の時は比較的良い一致が見られたが, 1%以上の統計誤差を加えた場合熱中性子の分布が広がってしまい, 元のスペクトルをよく再現しなかった. 熱外中性子に対しても同様に加えた統計誤差が 0%であったときは元のスペクトルをよく再現したが, 加えた誤差が大きくなるにつれてスペクトルに振動が現れた. この傾向は高速中性子スペクトルの解析を行った場合にも見られた.

重水を減速材に用いた場合は, いずれのスペクトルの解析を行った場合も, 統計誤差が 0%の場合は比較的よく一致しているが, わずかでも誤差が加わると元のスペクトルとは大きく異なる値を示す傾向が見られた. また, 比較的一致していた誤差 0%の場合の結果も, 他の材料と比べるとスペクトルの振動が目立ち, あまり良い結果が得られなかった. これは主として応答関数の減速材厚さ

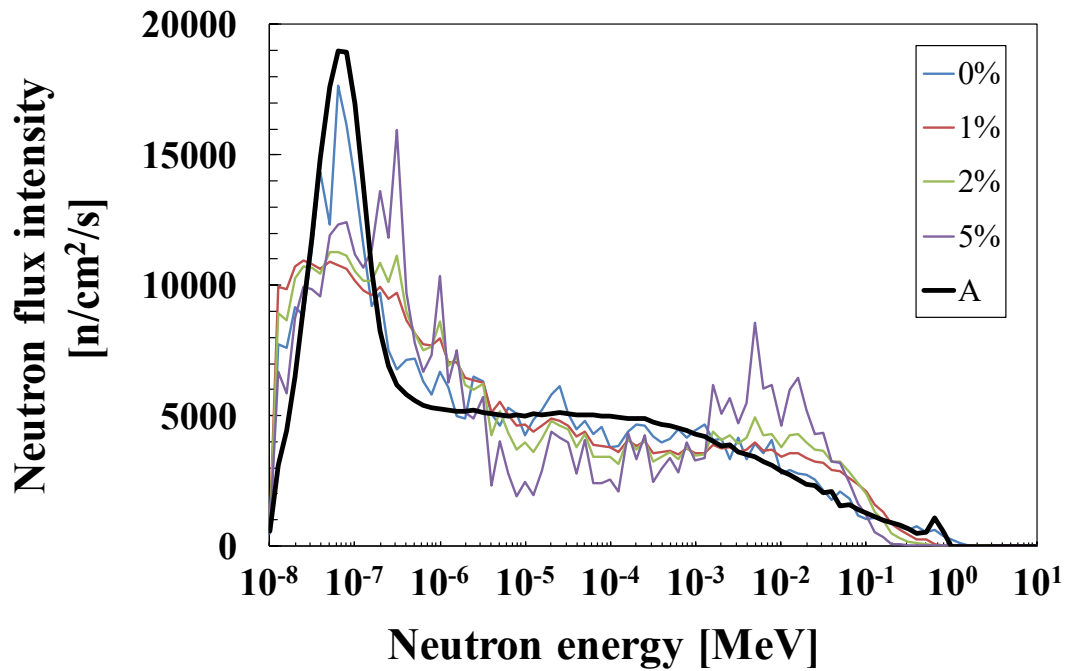


Fig. 2-16 A-(a): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、軽水を減速材として使用した場合の数値実験の結果.

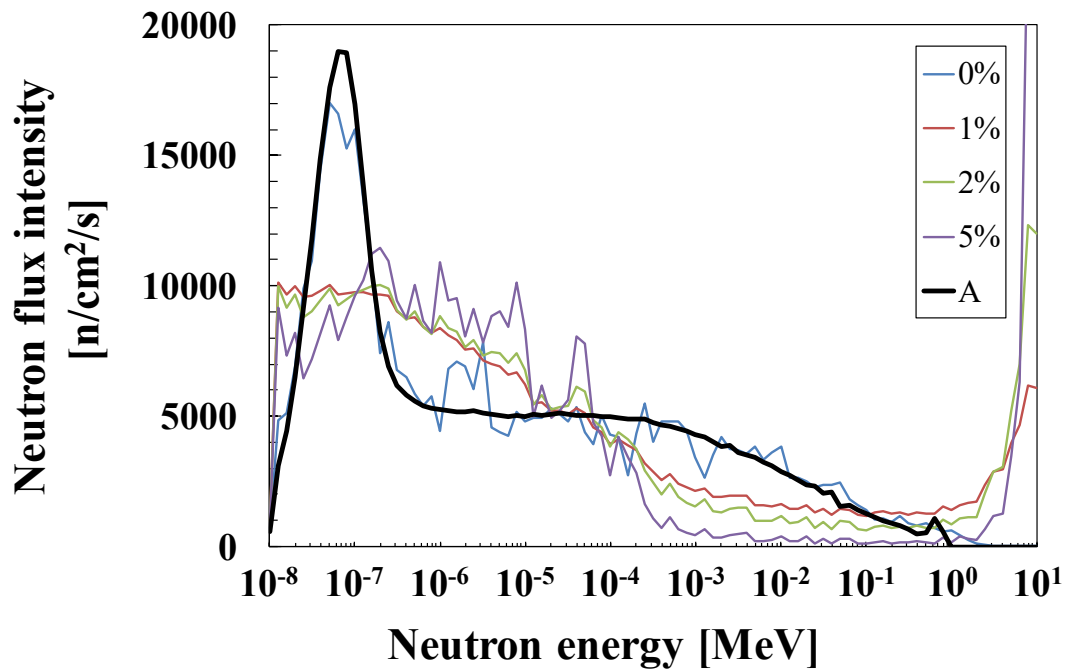


Fig. 2-17 A-(b): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、重水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

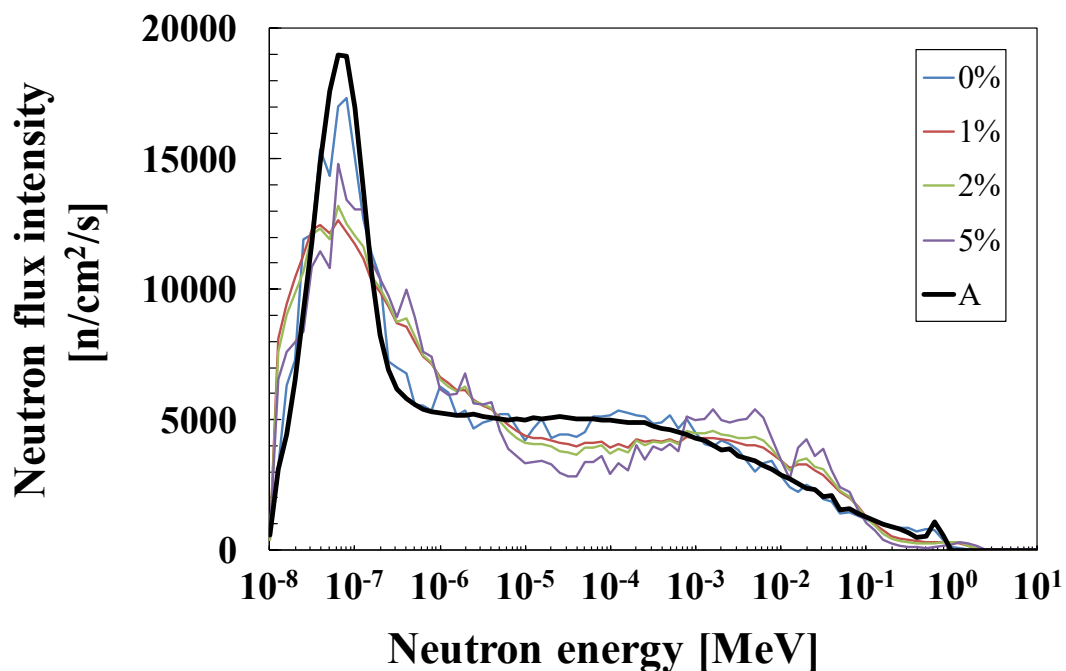


Fig. 2-18 A-(c): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、ホウ酸水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

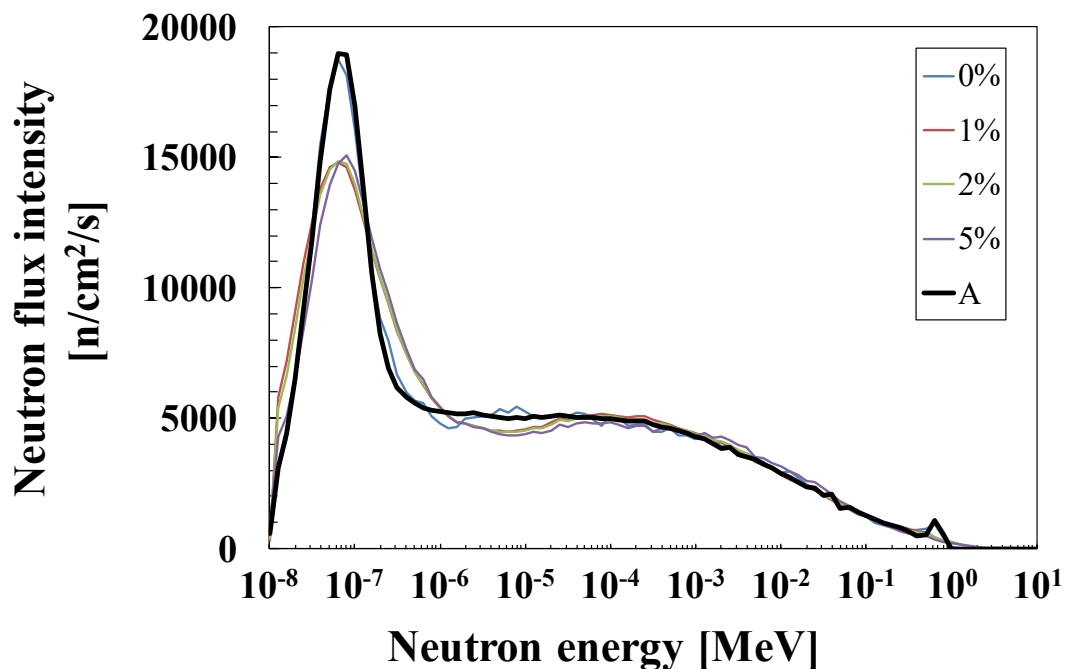


Fig. 2-19 A-(d): 熱中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、ホウ酸トリメチルを減速材として用いた場合の数値実験の結果.

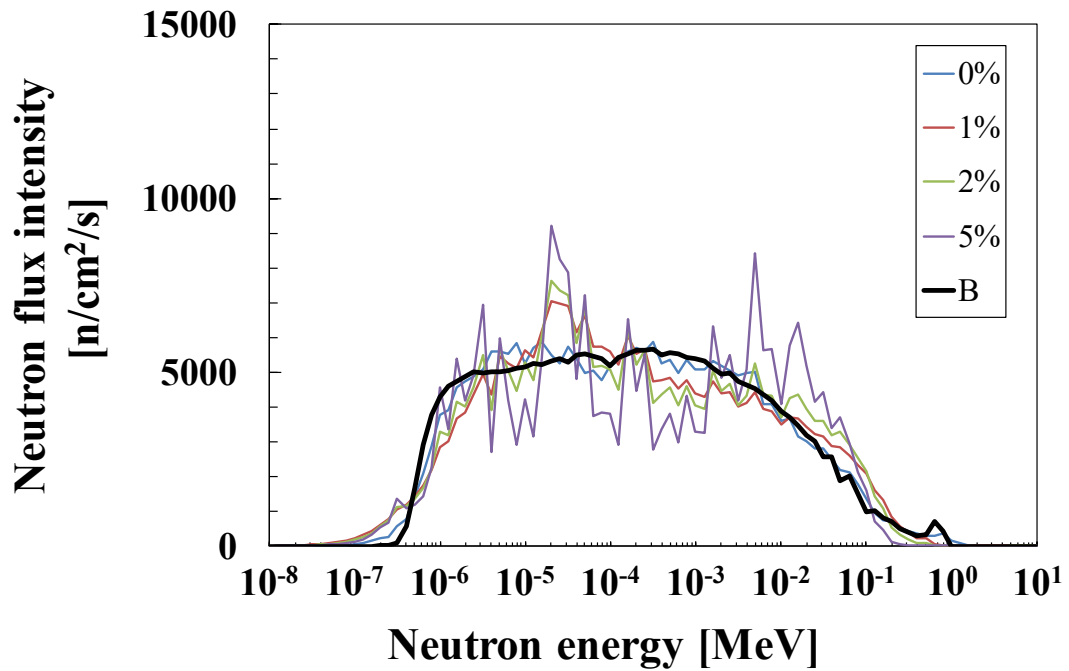


Fig. 2-20 B-(a): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、軽水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

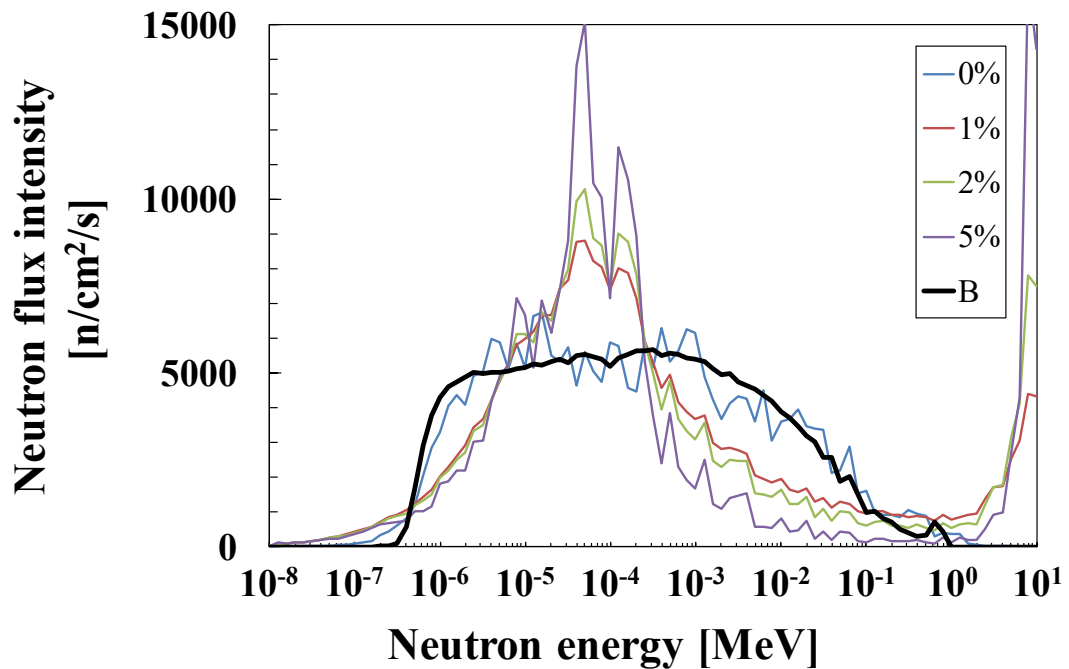


Fig. 2-21 B-(b): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、重水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

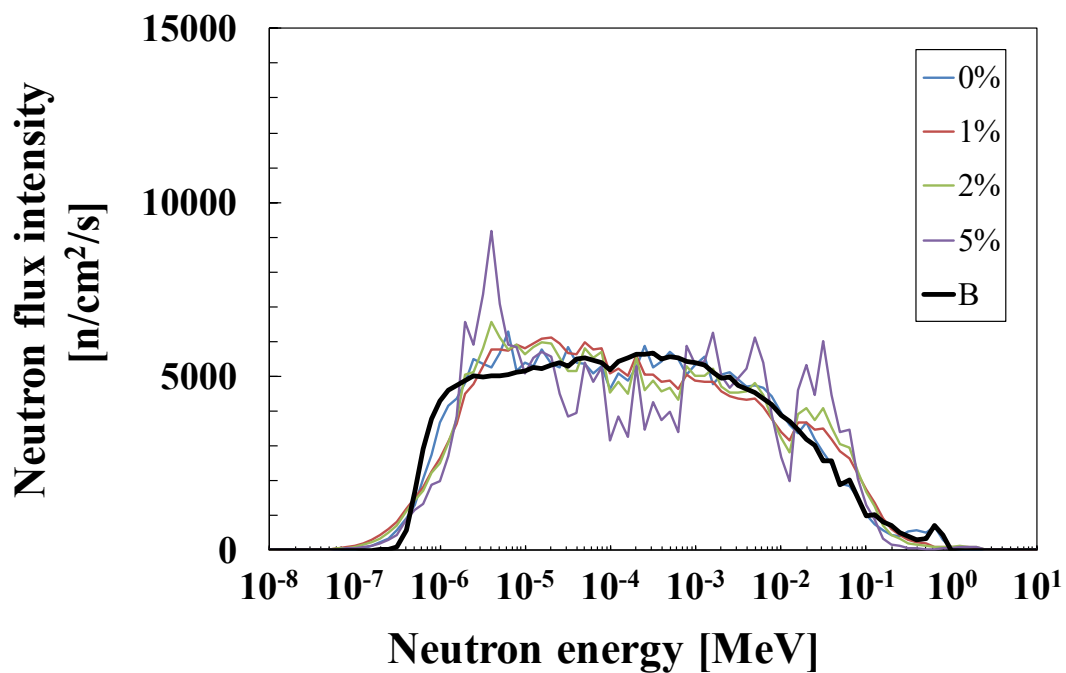


Fig. 2-22 B-(c): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、ホウ酸水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

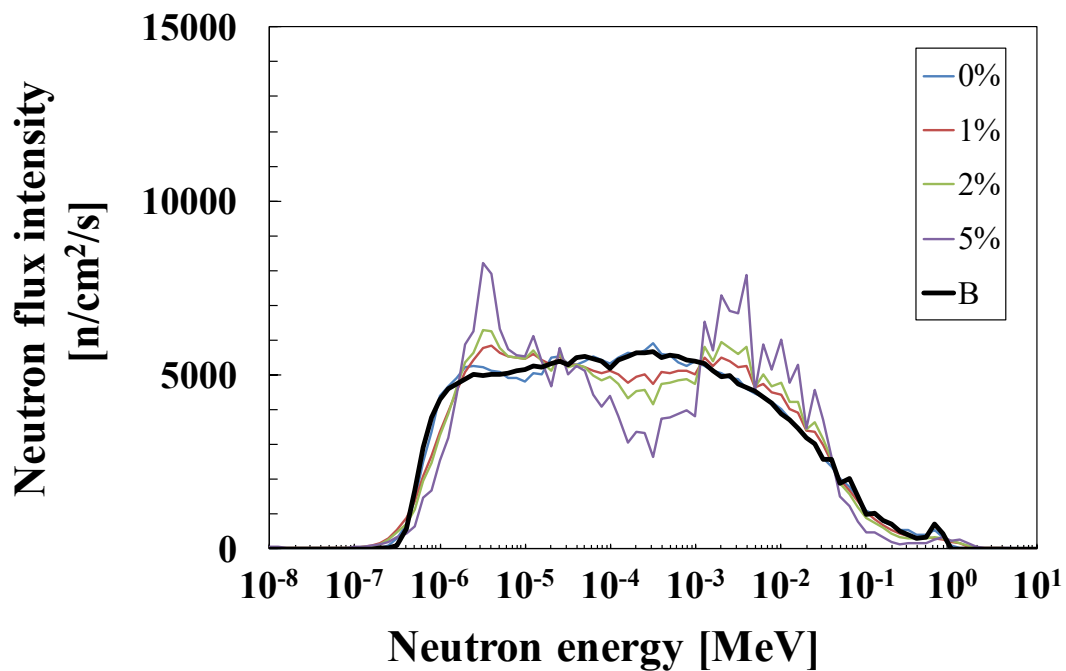


Fig. 2-23 B-(d): 熱外中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、ホウ酸トリメチルを減速材として用いた場合の数値実験の結果.

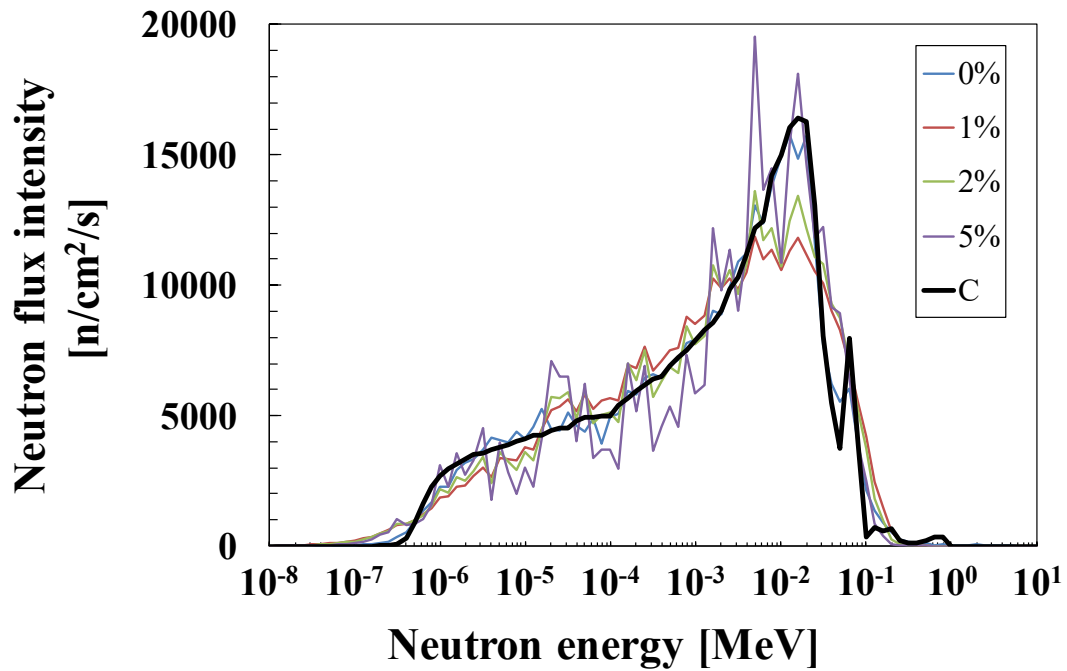


Fig. 2-24 C-(a): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、軽水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

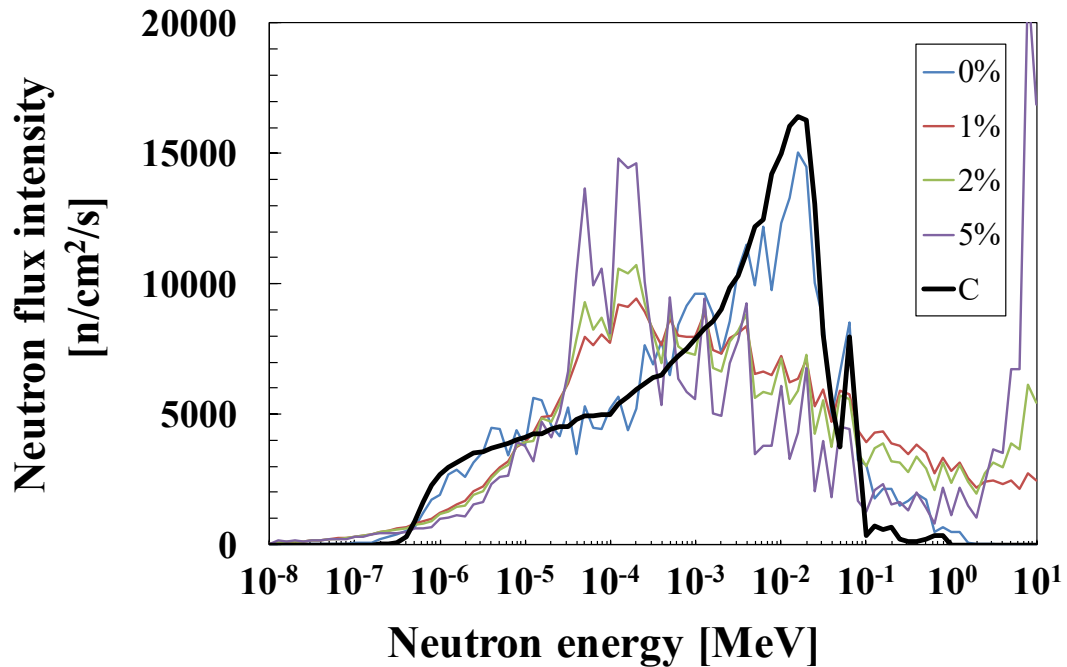


Fig. 2-25 C-(b): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、重水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

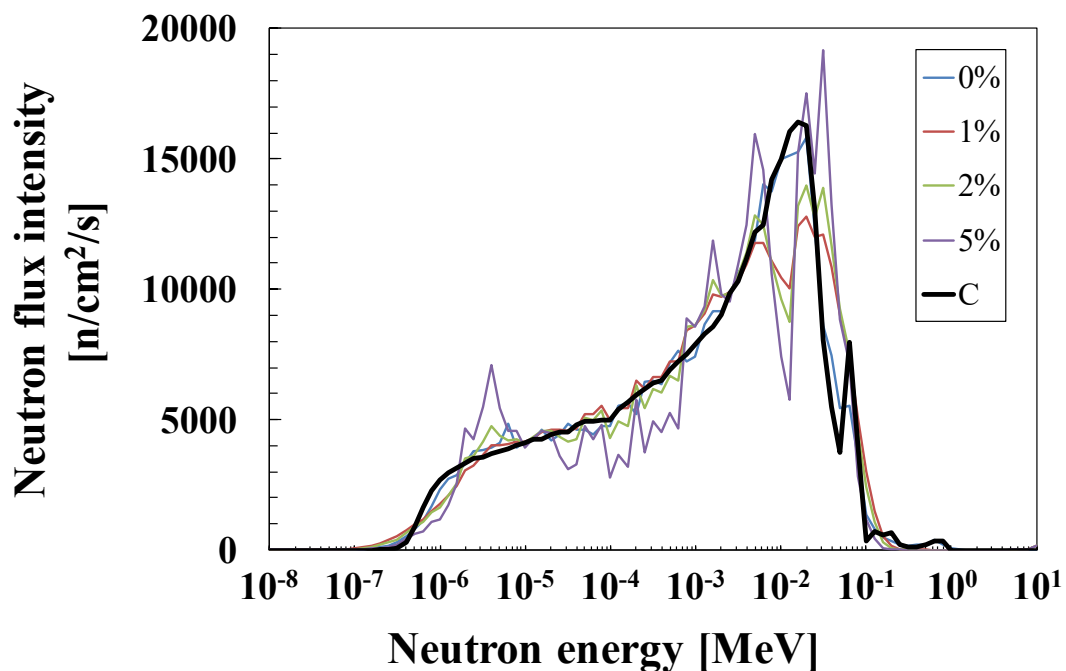


Fig. 2-26 C-(c): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、ホウ酸水を減速材として用いた場合の数値実験の結果.

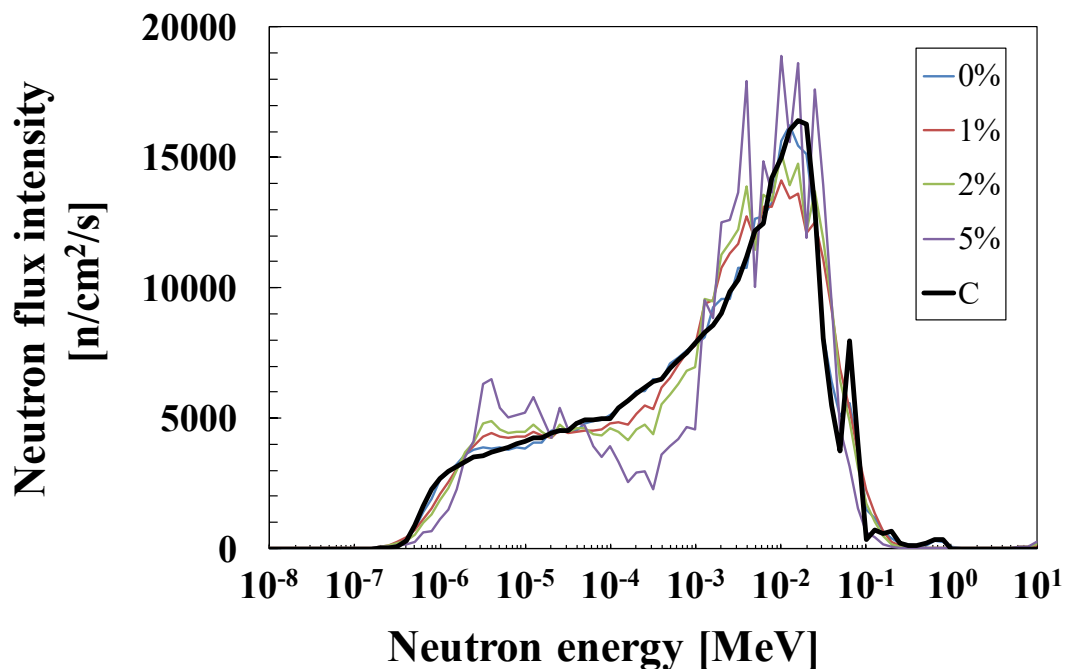


Fig. 2-27 C-(d): 高速中性子領域にピークを持つ中性子スペクトルに対する、ホウ酸トリメチルを減速材として用いた場合の数値実験の結果.

に対する変化が他の減速材に比べて小さいためと考えられる。

ホウ酸水については、軽水と同様に加えた誤差が0%の場合はいずれのスペクトルに対してもよい一致を示したが、1%以上の誤差を加えると、熱中性子の場合はピークの分布が広がり、熱外・高速領域のスペクトルに対しては誤差が大きくなるにつれて激しい振動が現れるようになった。軽水を用いた結果と比較すると、高速中性子スペクトルに対しては軽水を用いた結果と比べても優劣

はつかなかったが、熱・熱外スペクトルについては軽水の結果に比べて誤差を加えたときに現れる振動が緩やかであるように思われた。

ホウ酸トリメチルについては、熱中性子スペクトルの解析に対しては素晴らしい一致を示した。特に、5%までの誤差を加えた場合であっても、ピークの幅がわずかに広がっただけでスペクトルの振動がほとんど現れなかった点は特筆できる。これはホウ酸トリメチルが含有する ^{10}B 原子の量が多く、熱中性子に対する反応断面積が大きいため、減速材厚さに対する応答関数の変分が大きくなり、わずかな減速材量の変化からでも入射中性子の持つエネルギーの違いによる検出器応答の差異を評価することができたためと考えられる。熱外・高速スペクトルに対しては、傾向としては軽水・ホウ酸水と同様に、誤差が0%の時は元のスペクトルとよく一致し、誤差を大きくするにつれて激しい振動が見られるようになった。振動の度合いとしてはホウ酸水を用いた場合の結果と同程度であった。

2.5 結論

2.4 節の結果より、液体減速型中性子スペクトロメータにより熱、熱外、高速領域の中性子スペクトルが測定可能であることが確認された。また、今回評価した材料の中ではホウ酸トリメチルが本手法で用いる減速材として最も適していると考えた。このような結果が現れた理由としては、用いた減速材の中性子吸収断面積が強く関係している可能性が考えられる。すなわち、ホウ酸トリメチルは本章で検討した他の材料に比べて ^{10}B の含有量が多く、中性子吸収断面積が大きいため、減速材厚さ変化に対する応答関数の変化量が大きくなり、わずかな減速材厚さの変化からでも中性子エネルギーの差異に起因する検出器感度の違いを十分に評価することが可能であったため、正確な中性子スペクトルが評価できたのではないかと、ということである。

測定に含まれる誤差による影響として、次のような傾向が見られた。まず、測定値に誤差が含まれていない場合、いずれの減速材を用いた場合であっても、

再現性の精度に差があるもののおおむね真のスペクトルと解析スペクトルがよく一致した。しかし、測定値に誤差を加えて解析を行った場合、解析スペクトルに振動が現れ、各材料を用いた場合に対する元のスペクトルの再現性の差は明らかに顕著になった。最も振動の表れ方が緩やかであったホウ酸トリメチルを減速材として用いた場合、熱中性子場に対しては測定誤差が5%まで、熱外・高速中性子の比率が大きい場では2%までは解析スペクトルに現れる振動の幅が比較的小さく、測定を行うことが可能である見込みを得た。

以上の結果より、十分大きな中性子反応断面積を持つ液体減速材を使用して、適切な形状の検出器を設計し、十分な精度で測定を行うことにより、液体減速型中性子スペクトロメータの原理に基づいて中性子場のエネルギースペクトル測定が可能であると結論した。

参考文献

1. S. Tamaki, I. Murata, "Feasibility study on high-dynamic-range neutron spectrometer with continuously thick-adjustable moderator/absorber." in: *Proceedings of the 2013 Symposium on Nuclear Data, Tsuruga, Fukui, Japan, 2013, JAEA-Conf. 2014-002 INDC(JPN)-199*, 2015: 145-150.
2. Tamaki, S., F. Sato, and I. Murata. "A feasibility design study on a neutron spectrometer for BNCT with liquid moderator." *Applied Radiation and Isotopes* 106 (2015): 41-44.
3. Goorley, J. T., W. S. Kiger, and R. G. Zamenhof. "Reference dosimetry calculations for neutron capture therapy with comparison of analytical and voxel models." *Medical Physics* 29.2 (2002): 145-156.
4. Sakurai, Yoshinori, and Tooru Kobayashi. "Spectrum evaluation at the filter-modified neutron irradiation field for neutron capture therapy in Kyoto University Research Reactor." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 531.3 (2004): 585-595.
5. Auterinen, Iiro, et al. "Measurement of free beam neutron spectra at eight BNCT facilities worldwide." *Applied radiation and isotopes* 61.5 (2004): 1021-1026.
6. Bramblett, Richard L., Ronald I. Ewing, and T. W. Bonner. "A new type of neutron spectrometer." *Nuclear Instruments and Methods* 9.1 (1960): 1-12.
7. Thomas, D. J. "Neutron spectrometry." *Radiation Measurements* 45.10 (2010): 1178-

- 1185.
8. Johnson, T. L., et al. "Recent advances in Bonner sphere neutron spectrometry." Proceedings of the topical conference on theory and practices in radiation protection and shielding, Volumes 1-2. 1987.
 9. Mukherjee, Bhaskar. "A high-resolution neutron spectra unfolding method using the genetic algorithm technique." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 476.1 (2002): 247-251.
 10. Braga, Cláudia C., and Mauro S. Dias. "Application of neural networks for unfolding neutron spectra measured by means of Bonner spheres." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 476.1 (2002): 252-255.
 11. Sweezy, Jeremy, Nolan Hertel, and Ken Veinot. "BUMS—Bonner sphere Unfolding Made Simple: an HTML based multisphere neutron spectrometer unfolding package." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 476.1 (2002): 263-269.
 12. Bedogni, Roberto, et al. "FRUIT: an operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 580.3 (2007): 1301-1309.
 13. Iwasaki, S. "A new approach for unfolding problems based only on the Bayes' theorem." *9th International Symposium on Reactor Dosimetry, Prague, Czech, Sep. 2-6, 1996*. 1996.
 14. 岩崎信, “ベイズ統計的手法による放射線逆問題の解法” Technical report, 平成 8~10 年度 科学研究費補助金萌芽的研究 研究成果報告書, 1999.
 15. 名内泰志, “数十 MeV 中性子に対する荷電粒子生成反応に関する実験的研究” PhD thesis, 東北大学大学院工学研究科 (1998).
 16. 近藤恵太郎, “軽元素の核融合中性子誘起荷電粒子放出反応に関する実験的研究” PhD thesis, 大阪大学大学院工学研究科 (2008).
 17. Brown, Forrest B. "MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5." *Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge, TN* (2003).
 18. Shibata, Keiichi, et al. "JENDL-4.0: a new library for nuclear science and

- engineering." *Journal of Nuclear Science and Technology* 48.1 (2011): 1-30.
19. Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement, 4th Edition. *John Wiley & Sons*, 2010.

第3章 プロトタイプの設計と原理の実験的検証

3.1 緒言

前章では、液体減速型中性子スペクトロメータの実現可能性を、理想条件における検出器モデルを用いて数値計算的に検討した。しかしながら、本装置を実際に用いる場合には、スペクトロメータの構造や、実験室壁からの中性子の散乱、そして評価済み核データの評価精度等により、スペクトルの測定精度の悪化が予想される。したがって、液体減速型中性子スペクトロメータの開発において、その実現可能性を実験的に明らかにすることは極めて重要である。

本章では、液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ検出器の設計・製作を行い、それを用いた実験を通して液体減速型中性子スペクトロメータの測定原理の実現可能性を検証した結果について述べる [1]。

3.2 プロトタイプスペクトロメータの設計

本節では液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ検出器の設計とその応答関数の評価結果について述べる。本研究で開発しているスペクトロメータは、特定の方向から入射する中性子に対して、液体減速材を通過させたのち中性子検出器で計数する測定実験を実施し、その実験データを基に検出器の応答関数から入射中性子スペクトルを導出する装置である。以下にその詳細を示す。

プロトタイプスペクトロメータの設計を Fig. 3-1(a)に示す。本装置は中性子検出器として直径 5 cm, 内圧 1 MPa の ^3He 充填球形比例計数管を使用した。液体減速材としてはテトラフルオロホウ酸ナトリウム (NaBF_4) 水溶液を使用した。これは、 NaBF_4 は水への溶解度が大きく (109 g / 100 ml), 溶液内の ^{10}B 原子の密度を高めることができ、かつ前章で検討したホウ酸トリメチルと比べると可燃性などが無いため取り扱いが容易であったためである。液体減速材の厚さは容器に注入する液量によって容易に調整することができる。本研究では水 600 g に対して純度 98% の NaBF_4 試薬を 500 g 混合して液体減速材を製作した。このときの溶液の比重は 1.35 g/cc であった。液体減速材および比例計数管はカドミウム、ホウ酸、そしてポリエチレンを周辺に設置することによって散乱中性子等

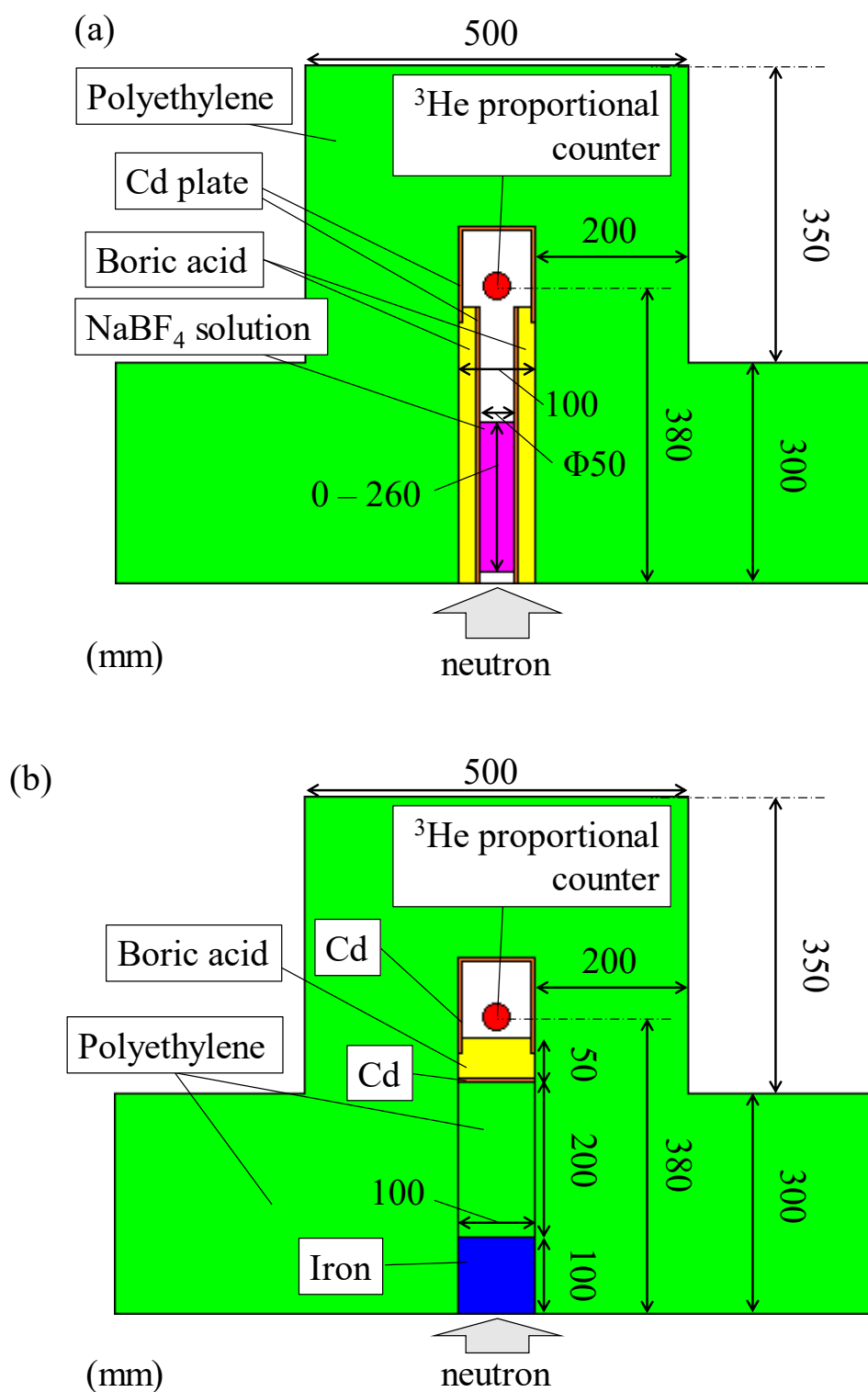


Fig. 3-1. プロトタイプスペクトロメータの設計. (a) Spectrum data measurement detector (SDM 検出器) と (b) Background compensation detector (BGC 検出器) をそれぞれ示す.

から遮蔽し、バックグラウンド信号の低減に努めた。本章ではこれをスペクトル測定検出器 (*spectrum data measurement detector*, SDM 検出器) と呼称する。また, Fig. 3-1(b) に SDM 検出器と同時に設計したバックグラウンド補正検出器 (*Background compensation detector*, BGC 検出器) の設計を示す。BGC 検出器は文字通り, 散乱中性子や漏れ中性子による検出器信号を補正するための検出器であり, SDM 検出器 (Fig. 3-1(a)) と比較すると, 減速材及びカドミウム板, そしてその周辺の間隙を埋めているホウ酸粉末を, 鉄, ポリエチレン, カドミウム及びホウ酸粉末で構成される遮蔽体に置き換えたものであることが分かる。

具体的なバックグラウンド信号の補正は以下の手順で行われる。まず, SDM 検出器を用いて, 減速材の厚さを Li ($1 \leq i \leq m, m=56$) とした場合の実験をそれぞれ実施し, 実験値 $M_{S,i}$ を求める。次に, BGC 検出器を用いて測定実験を行い, バックグラウンド信号値 M_{BG} を求める。最後に, $M_{S,i}$ から M_{BG} を減算し, 正味の測定値 M_i を求める。検出器入口以外の場所から入射する中性子に対する SDM 検出器と BGC 検出器の感度は, その構造が同じであることから等価であるため, この手順によりバックグラウンド信号による計数を補正することができる。これは後述する応答関数の計算についても同様に適用される。

スペクトロメータを設計した後, MCNP-5 [2] を使用してスペクトロメータをモデル化し, その検出器応答を求めることで応答関数の計算を行った。検出器応答は比例計数管内の ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応の反応率が検出器信号の計数に一致するものとして求めた。SDM 検出器の計算モデルについては, NaBF_4 水溶液の厚みを 0 mm から 260 mm まで, 0 mm から 26 mm までは 1.04 mm ごとに, 26 mm から 104 mm までは 20 mm ごとに, そして 104 mm から 260 mm までは 10.4 mm ごとに変化させたものをそれぞれモデル化した。260 mm という厚さは減速材容器に 500 ml の溶液が注入された場合の液体減速材の厚さを示している。入射中性子のエネルギーは, あるエネルギー区間 ΔE_j ($E_{j1} \leq E \leq E_j, 1 \leq j \leq n, n = 56$) 内で一様関数である分布を持つものとした。これにより, ΔE_j に含まれるエネルギー E を持つ中性子に対する検出器応答の平均値を, それぞれの区間 ΔE_j について求めた。各エネルギー区間のエネルギービン E_j ($0 \leq j \leq n$) は, $j = 0$ については $E_0 = 0$ eV とし, $E_1 = 1$ meV から $E_{36} = 1$ MeV までは各桁に 3 個ずつエネルギー区間を持つ等比数列 ($j = 1-36$), $E_{36} = 1$ MeV から $E_{56} = 20$ MeV までは 1 MeV ごとに区間を持つ等差数列 ($j = 36-56$) となるように定義した。

本研究で開発しているスペクトロメータは円筒形の検出器であり, ボナー球のように球形ではないため, 検出器に入射する中性子の特性, すなわち中性

子の入射位置や入射角度に検出器感度が依存する可能性が考えられた. そこで本研究では(a) 直径 2 cm Φ , 平行中性子ビーム, (b) 直径 2 cm Φ , 2π 方向等方中性子源, (c) 直径 20 cm Φ , 平行中性子ビーム, (d) 直径 20 cm Φ , 2π 方向等方中性子源の4種類の線源条件を, 応答関数を評価する条件として検討した. 入射中性子のフラックスは $1/\text{cm}^2/\text{s}$ として規格化した. BGC 検出器についても同様の線源条件で検出器応答を計算した.

SDM 検出器の検出器応答を $R_S = \{R_{S,ij}\}$ ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, m = n = 56$), BGC 検出器の検出器応答を $R_{BG} = \{R_{BG,j}\}$ と表すと, このスペクトロメータの応答関数は式 (3.1) のように, すべての i, j について SDM 検出器の応答から BGC 検出器の応答を減算することで求められる.

$$R = \{R_{ij}\} = \{R_{S,ij} - R_{BG,j}\} \quad (3.1)$$

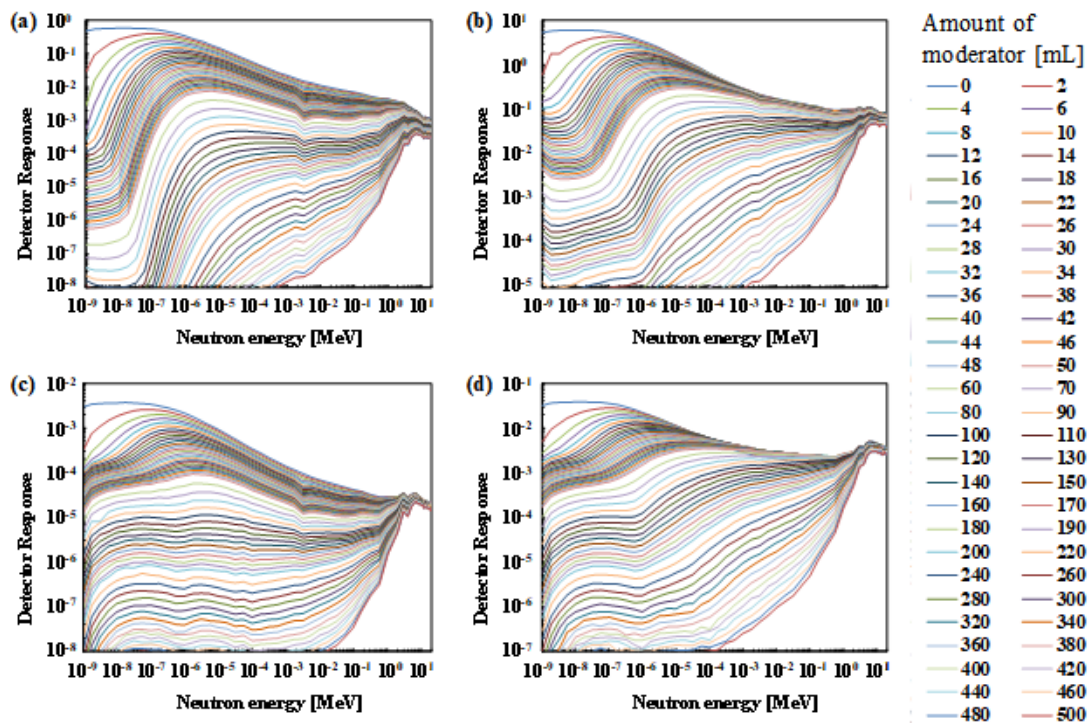


Fig. 3-2. 液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ検出器の応答関数. 線源条件として, (a) 直径 2 cm Φ , 平行中性子ビーム, (b) 直径 2 cm Φ , 2π 方向等方中性子源, (c) 直径 20 cm Φ , 平行中性子ビーム, (d) 直径 20 cm Φ , 2π 方向等方中性子源の4種類の条件を検討した.

本研究では最終的に、56個のエネルギー分割に区切られた56種類の検出器応答が応答関数として得られた。これを線源条件 (a), (b), (c), (d) についてそれぞれ求めた結果を Fig. 3-2 に示す。

3.3 実験

液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ設計とその応答関数計算を行った後、その製作精度や性能を評価し、本装置の原理についての検証を行うための中性子測定実験を実施した。本節ではその詳細を述べる。

3.3.1 実験体系

実験体系の外観と実験の様子を Fig. 3-3 に、実験体系のモデル図を Fig. 3-4 に示す。この実験では、黒鉛ブロックの上にポリエチレン、鉛、カドミウムで製作したコリメーターを設置し、さらにその上にスペクトロメータを設置して測定実験を行った。中性子源としては、1個あたり 4.0×10^6 個の中性子を放出する

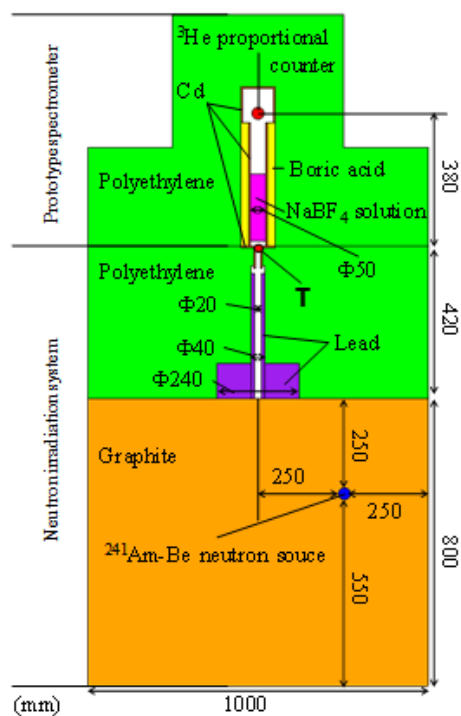
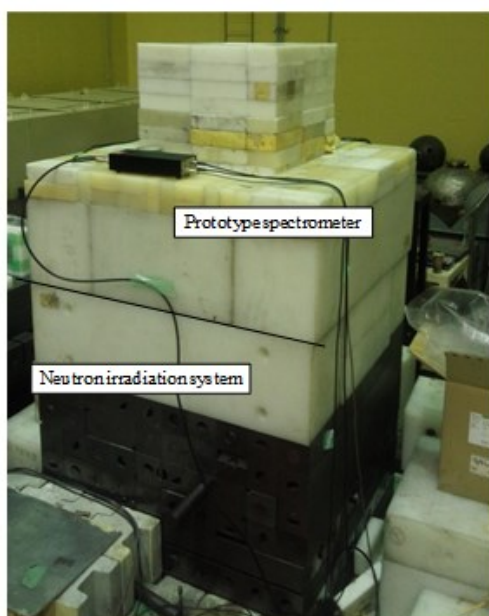


Fig. 3-3 実験体系の外観と実験の様子。 Fig. 3-4 実験体系のモデル図。

AmBe 中性子源を4個, Fig. 3-4 に示した位置に並べて設置して使用した. この実験体系は, AmBe 線源から放出された中性子を黒鉛により減速させ, その後コリメーターを通すことでスペクトロメータ中心部に下部から入射する中性子以外を遮蔽し, 中心部に, 収束された前方性の高い低エネルギー中性子を入射させることを目指した設計である. AmBe 線源はコリメーター孔の中心からずらして配置することにより, 線源から放出された高速中性子が直接検出器に入射しないよう工夫されている. この実験体系によって得られる入射中性子場の特性の MCNP-5 による計算結果を Fig. 3-5, Fig. 3-6, Fig. 3-7 に示す.

Fig. 3-5 は入射中性子場の中性子束強度径方向空間分布を, Fig. 3-6 は入射中性子場中心部 (Fig. 3-4 の点 T) の中性子束強度の角度分布を, Fig. 3-7 は入射中性子場中心部の中性子エネルギースペクトルをそれぞれ示している. これらの図より, 本実験体系により, コリメーター孔径である直径 20 mm 以内に収束された, 極めて前方性が強く熱中性子領域に大きなピークを持つ中性子ビームが設置したスペクトロメータに入射したことが読み取れる.

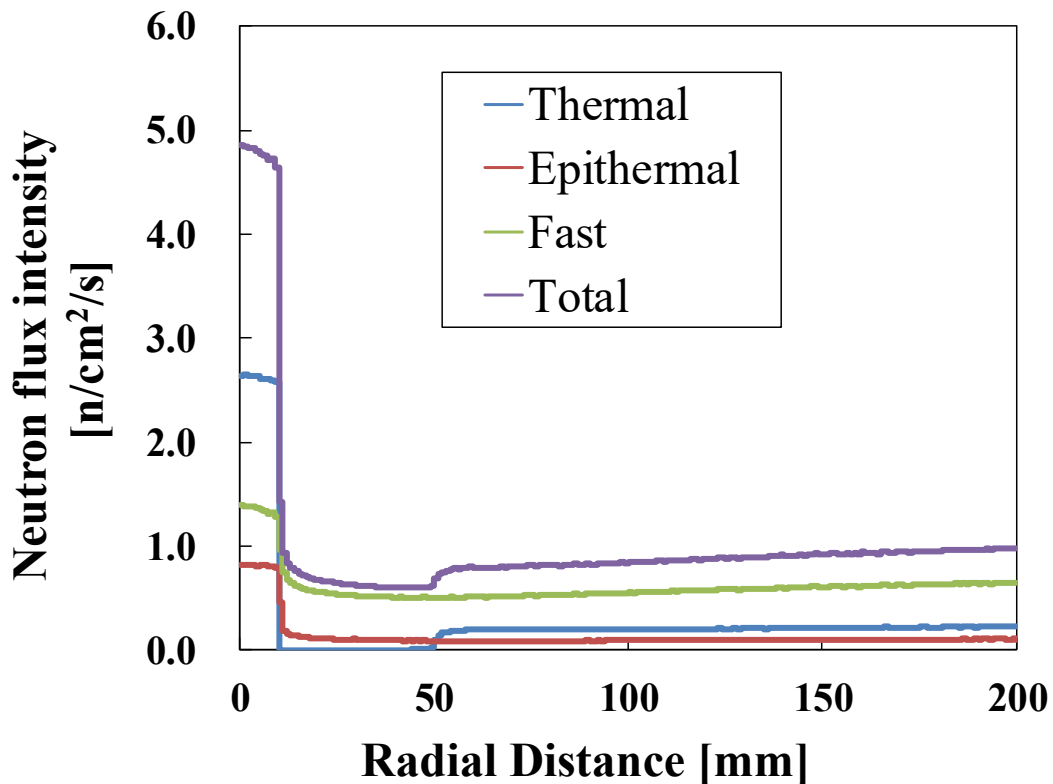


Fig. 3-5. 照射中性子場の径方向強度分布.

3.3.2 実験手順

本節では実際の実験手順について説明する．まず始めに，Fig. 3-3 に示した通りの実験体系において，スペクトロメータの減速材容器に注入する NaBF_4 水溶液の量を 0 ml から 500 ml まで，すなわち減速材の厚さを 0 mm から 260 mm まで変化させながら中性子測定実験を実施し，SDM 検出器の計数率 $\mathbf{M}_S = \{M_{S,i}\}$ を求めた．減速材体積の変化量，すなわち測定を実施した時の減速材の厚さは 3.2 節の応答関数計算で示した減速材厚さの変化量と同じとした．各測定では計数値として 10000 カウントを目途に測定を行った．その後，BCG 検出器を使用して同様の手順でバックグラウンド信号の計数率 M_{BG} を測定し，これを \mathbf{M}_S の各要素から減算し，正味の計数率 $\mathbf{M} = \{M_i\}$ を求めた．最後に，求めた正味の計数率 \mathbf{M} と Fig. 3-2 に示した応答関数を用いて 2.3 節に示した手順に従ってモンテカルロ型 Bayes 推定法による unfolding を行い，中性子のエネルギースペクトルを評価した．

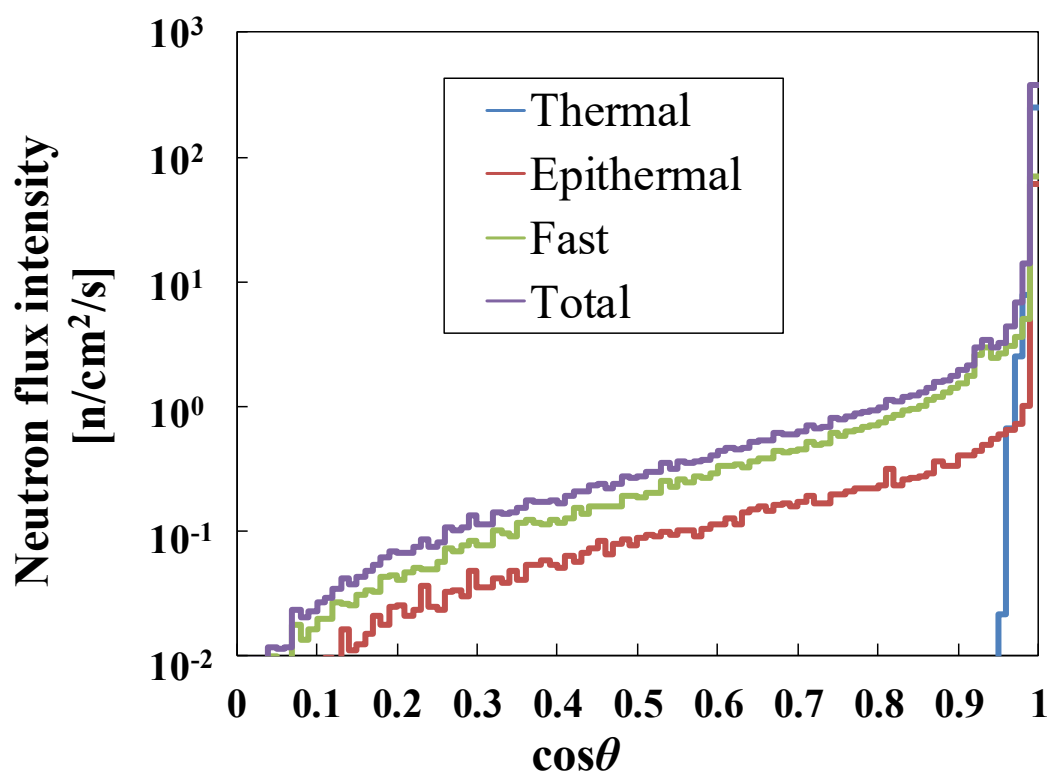


Fig. 3-6. 照射中性子場中心部の中性子束角度分布.

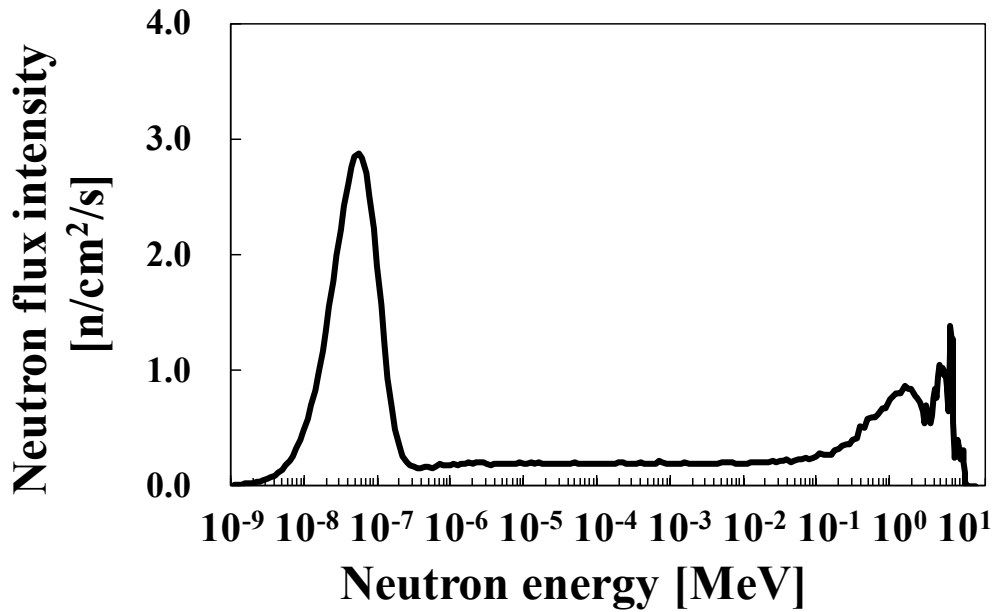


Fig. 3-7 検出器に入射する中性子場のエネルギースペクトル.

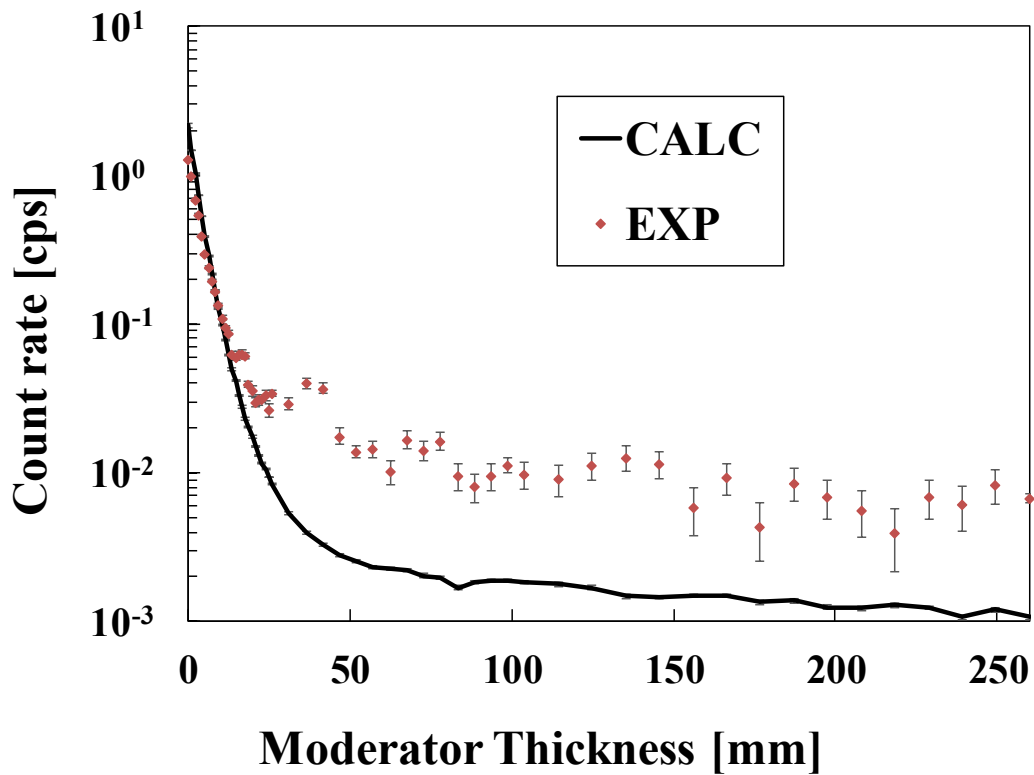


Fig. 3-8 検出器応答の実験値とシミュレーション計算値.

3.3.3 実験結果と考察

正味の計数率 M の測定結果と MCNP-5 によるシミュレーション結果を Fig. 3-8 に示す. この結果より, シミュレーション計算の結果は, 特に減速材の量が 30 ml 以下 (減速材厚さが 15.6 mm 以下) の時に実験値とよく一致することが読み取れる. この測定結果と Fig. 3-2 に示した応答関数を用いて, 第 2 章第 3 節で示した手順に従って unfolding を行い, 中性子スペクトルの評価値 Φ_a , Φ_b , Φ_c , Φ_d を求めた. Unfolding の結果を Fig. 3-9 に示す.

Unfolding によって得られた結果は, MCNP-5 を用いて計算した, Fig. 3-4 に示した点 T の中性子スペクトル Φ_T と比較し, 使用する応答関数に適した条件を検討した. ここで, 中性子スペクトル間の違いについて定量的に考察を行うため, 式 (3.2) によりスペクトル評価関数 A を求めた.

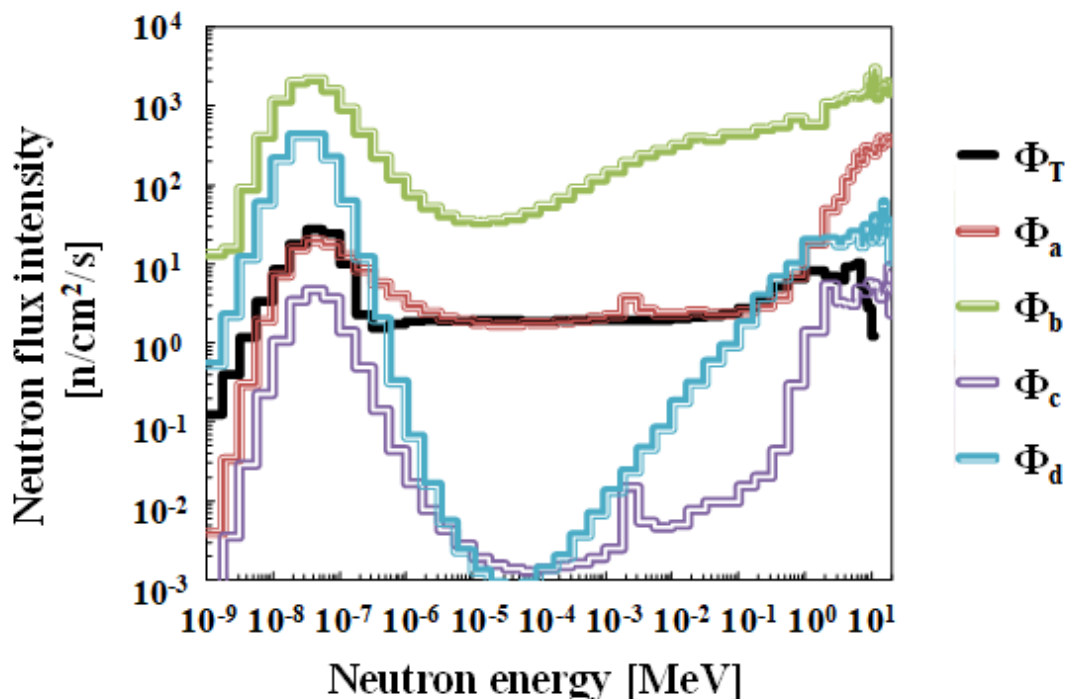


Fig. 3-9. 中性子スペクトルのアンフォールディング結果. Φ_T は MCNP-5 によるシミュレーションで得られた照射場の中性子スペクトル設計値を, Φ_a , Φ_b , Φ_c , Φ_d はそれぞれ Fig. 3-2 に示した応答関数(a), (b), (c), (d)を用いて unfolding した結果を示す.

$$A = \sqrt{\frac{1}{\log\left(\frac{E_n}{E_0}\right)} \sum_{j=1}^n \left[\int_{E_{j-1}}^{E_j} \left\{ \ln\left(\frac{\Phi_m(E)}{\Phi_T(E)}\right) \right\}^2 \cdot d(\log E) \right]} \quad (3.2)$$

Φ_T は中性子スペクトルの真値であり、本研究においては MCNP-5 による計算値とした。また、 Φ_m には Φ_a , Φ_b , Φ_c , Φ_d をそれぞれ代入した。この関数は、統計学における分散の求め方を基にしており、中性子のエネルギーとその強度の違いを対数スケールで比較するためのものである。 Φ_m に代入したスペクトルが Φ_T とよく一致しているほどその値が小さくなる。中性子エネルギーの対数値を用いた理由は、測定している中性子のエネルギー範囲が 1×10^{-9} から 20 MeV までと大変広範囲にわたっていることから、各桁のエネルギーについて等価に評価することがより実際的な評価関数を作成することにつながると考えたためである。また、中性子強度比の評価にも対数値を用いている理由は、Fig. 3-9 から読み取れるように unfolding の条件によって中性子スペクトルの強度が大きく異なっているが、線形的な取り扱いによってこの違いを評価すると、 Φ_m が Φ_T と比べて過小評価された時に評価に不具合が生じるためである。具体的には、 Φ_m の値が Φ_T に比べて十分に小さく無視できる場合、 Φ_T の値それ自体が評価関数の値として出力されてしまい、unfolding 結果の精度を評価することが困難であったためである。対数を取ることで、 Φ_m と Φ_T の違いの比率を評価量として用いることができるようになり、この問題を解決することができる。例えば、 Φ_m が Φ_T と比べてちょうど 10 倍または 10 分の 1 になるとき、評価関数 A の値は 1 になる。すなわち、10 倍または 10 分の 1 であるということを等価に表現することができる。また、100 分の 1 になった時は A の値は 2 に、1000 分の 1 になった時には 3 になる。すなわち、 Φ_m が Φ_T と比べて過小評価されている場合でもその違いを評価することができる。この評価関数 A を用いることにより、unfolding により得られた結果 Φ_a , Φ_b , Φ_c , Φ_d の精度を定量的に比較し、このプロトタイプスペクトロメータの応答関数を評価するにあたって適した条件を検討した。

$E \leq 0.5$ eV, 0.5 eV $< E \leq 10$ keV, 10 keV $< E \leq 100$ keV, 100 keV $< E \leq 1$ MeV, $E > 1$ MeV の領域における各中性子スペクトルの評価関数 A の値を Fig. 3-10 に示す。この結果より、1 MeV 以下の領域においては Φ_a の結果が最も Φ_T とよく一致していることが評価関数 A の値から明らかとなった。これは Fig. 3-5 及び Fig. 3-6 に示した通り、本実験ではスペクトロメータに直径 20 mm 以内にコリメートされた強前方性の中性子場を入射させており、この条件は 応答関数計算

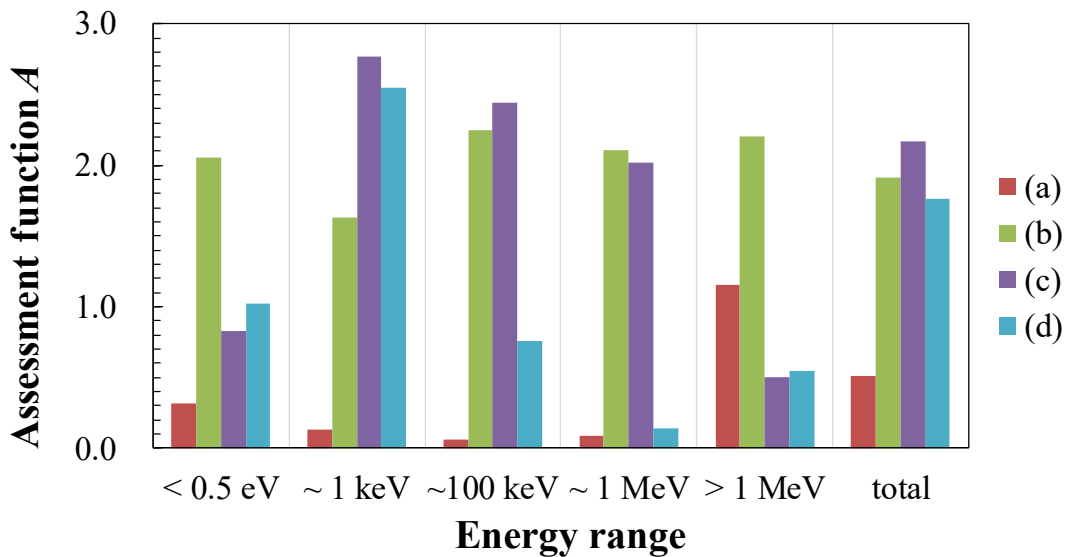


Fig. 3-10 各エネルギー領域におけるスペクトル評価関数 A の値.

における線源条件 (a) とよく一致する条件であるため、実験結果が計算値と良い一致を示したものと考えられる。

一方で、1 MeV 以上の領域では Φ_a の結果は芳しくなく、むしろ Φ_c または Φ_d の方が良い結果であることが示されている。これは、Fig. 3-5 に示される通り、高速中性子領域については中心部に比べてコリメート半径外の中性子束強度が2分の1程度の強度を保っていることが原因ではないかと推察される。すなわち、高速中性子は透過力が大きいために、減速材部以外の面からスペクトロメータに入射した後に側面部で散乱されて検出器ないし減速材に入射することにより信号が発生したため、この成分が検討されていない (a) よりも線源面積が大きく減速材面以外から多くの中性子が入射する (c) や (d) の条件で unfolding を行った方が正確に評価できた可能性を示唆している。

また、Fig. 3-8 に示した結果の通り、減速材の厚さが 30 mm よりも厚い時の実験結果と計算結果の一致が悪いことも 1 MeV 以上の中性子スペクトルの測定精度が悪いという結果に関連している可能性がある。Fig. 3-8 の結果は、減速材の厚さが 30 mm を超えるとき、実験結果に比べて計算結果が 10 分の 1 程度に過小評価されており、透過力が強く減速材量が多い条件下での応答関数の値が高い高速中性子による信号が計算値では過小評価されている、ということを示している。この理由としては、計算によって求めた検出器応答が、実験で使用した検出器の実際の感度に比べて高速中性子に対する応答が過小評価されてい

る可能性が考えられる。この具体的な原因としては、比較的中性子断面積の小さいガラス製の減速材容器や検出器を製作するときに使用したポリエチレンブロックの隙間を通過して検出器に入射した、ストリーミング中性子の影響があると思われる。差異は、計算にはそこまで詳細にモデル化されていないことにより発生したと考えている。以上の原因から、実験の測定値の高速中性子による寄与が過大評価された結果、1 MeV 以上の中性子束強度の過大評価につながった可能性がある。

以上の結果より、本装置は適切な応答関数を評価することにより、1 MeV 以下の広範な中性子スペクトルを非常に高い確度と精度で測定可能であることが示唆された。一方で、本装置の応答関数を評価するにあたっては、応答関数を計算するためのシミュレーション計算における線源条件が極めて重要であり、不適切なものを選ぶと場合によっては数10倍から100倍以上の違いが表れてしまうことも分かった。しかしながら、応答関数を評価する際の適切な線源条件は、本研究の結果からもわかる通り、実際の実験でスペクトロメータに入射する中性子場の特性に強く依存している。この事実は非常に重要である。なぜならば、筆者が本装置の測定対象として想定している BNCT 用加速器中性子源装置の照射中性子場は、その設計に依存した極めて複雑な特性、すなわち複雑な空間強度分布や角度分布を持った中性子場であり、これを事前に、しかも測定装置ごとに評価したうえで中性子スペクトルの測定を行うということは現実的ではなく、かつ個々に異なる手法でスペクトルを評価することになるため得られる結果の一般性についても問題が現れうるためである。したがって、スペクトロメータの実機設計においては、この装置を使用するための一般性を持たせるため、入射中性子場の特性を無視できるか、あるいはその影響を低減する何らかの工夫がなされていることが望ましい。以上までの検討結果を踏まえたスペクトロメータ実機的设计とその具体的な工夫については第4章で述べる。

3.4 結論

本章では液体減速型中性子スペクトロメータの実現可能性とそのために必要な条件を検討するため、スペクトロメータのプロトタイプ的设计・製作を行い、本装置の原理の実験的検証を行った。その結果、本装置では適切な応答関数を評価することにより1 MeV 以下の領域の中性子スペクトルを高い精度で測定可能であることを実験的に確認した。一方で、本装置の応答関数は入射する中性子場の強度分布や角度分布に極めて強く依存しており、装置の完成のためには検

出器応答関数の入射中性子場特性に対する依存性を除去ないしは低減することが可能な検出器設計が必要であることも明らかとなった。

次章では、本章の結果を踏まえ、液体減速型中性子スペクトロメータの実機設計の結果について述べる。

参考文献

1. S. Tamaki, F. Sato, I. Murata, “Study on a liquid-moderator-based neutron spectrometer for BNCT —Development and experimental test of the prototype spectrometer“, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 870, pp. 90 – 96 (2017).
2. Brown, Forrest B. "MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5." *Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge, TN* (2003).

第4章 改良型中性子スペクトロメータの設計

4.1 緒言

本章では、第 3 章の液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプを用いた実験的研究によって得られた知見を基に行った、本装置の改良設計及び数値実験による性能評価の結果について述べる [1].

第 3 章で、液体減速型中性子スペクトロメータには応答関数に入射する中性子場の特性に対する強い依存性があること、そのため、本装置の完成のためにはスペクトロメータの設計それ自体に入射中性子場の特性による影響を除去ないし低減する工夫を盛り込む必要があることが明らかとなった。そのことを踏まえ、中性子スペクトロメータ前方にプリコリメータを設置し、検出器へ入射して信号を発生させる入射中性子の成分を制限することで、入射中性子場の特性、すなわち入射中性子場の空間強度分布や角度分布に依存しないスペクトロメータの設計を目指した。設計したスペクトロメータは、2 段階の数値実験によりその性能を検証した。まず、第 3 章のプロトタイプスペクトロメータとの性能の比較を行うため、第 3 章の実験体系と同様の体系でスペクトル測定をシミュレーションし、改良型スペクトロメータによるスペクトル測定のシミュレーション結果を第 3 章に示したプロトタイプスペクトロメータによる中性子スペクトルの測定結果と比較することで、プリコリメータの有効性を検証するとともに改良型スペクトロメータの性能及び特性を評価した。その後、改良型スペクトロメータが中性子場特性に依存することなく性能を発揮することを確認するため、複数種類の実験体系で同様にシミュレーションによる検証を行い、その性能を評価した。本章ではその結果について述べる。

4.2 改良型中性子スペクトロメータの設計

本節では、前章で得られた知見を基に、入射中性子に対する有感位置や有感角度を制限するためのプリコリメータを取り付けた、改良型の液体減速型中性子スペクトロメータの設計と、その応答関数の評価結果について述べる。

液体減速型中性子スペクトロメータの設計改良案を Fig. 4-1 に示す。本装置と第 3 章で使用したプロトタイプスペクトロメータの違いは 3 点ある。すなわち、(1) 液体減速材部分の前方に、高密度ポリエチレンとホウ素添加ポリエチ

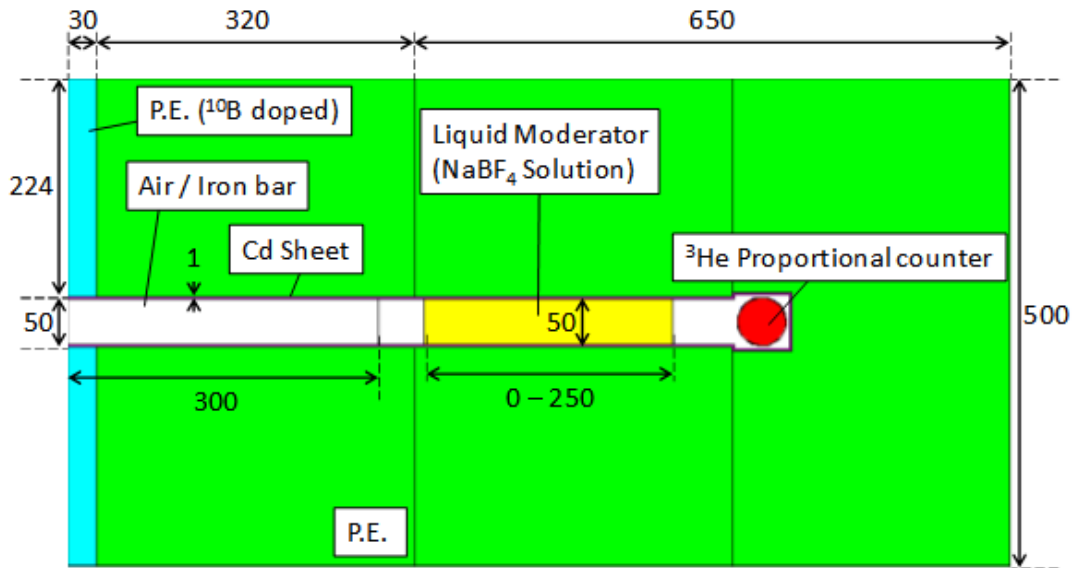


Fig. 4-1 液体減速型中性子スペクトロメータの設計改良案

レン、そしてカドミウム板を用いて製作した中性子用プリコリメータを設置したこと、(2) BG 信号の補正法を、バックグラウンド補正検出器を使用する方式からプリコリメータに長さ 30 cm の鉄製のシャドーバーを挿入する方式に変更したこと、(3) 減速材容器周辺のホウ酸粉末の層をポリエチレンに変更したことである。1 点目は、前節で述べた入射中性子に対する検出器応答依存性を低減するための変更である。(n,2n) 反応による入射中性子場の乱れを避けるため、鉄や鉛などの重原子核を含む材料の使用を避け、水素やホウ素等の軽核を主として遮蔽材の材料としている。2 点目は、検出器の内部構造に空間的な余裕ができたことを受けて、検出器構造に大きな変更を加えない、より簡便なバックグラウンド信号の補正方法を検討した結果、入射中性子を通るコリメータ孔部分を遮蔽し、その差分を取る手法が実験的にも簡便で効率的であると考えたためである。3 点目の変更は、2 点目の変更を受けて減速材部分周辺の製作性や交換性を考慮する必要がなくなり、より高速中性子に対する遮蔽能力の高い材質に交換したものである。

次に、MCNP-5 [2]を用いたモンテカルロ計算により検出器の応答関数の計算を行った。検出器応答は前章と同様に ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ 反応率を用いて計算し、減速材の厚さを 0 mm から 250 mm まで、0 mm から 25 mm までは 1 mm ごとに、25 mm から 100 mm までは 5 mm ごとに、100 mm から 250 mm までは 10 mm ごとに

とに変化させた場合の応答関数を計算した。本章では、改良型スペクトロメータの応答関数の入射中性子特性に対する依存性について検証を行うため、次の(a) から (i) に列挙した、線源条件の線源面積や中性子入射角度がそれぞれ異なる9条件についてそれぞれ応答関数の計算を行った。

- (a) 直径 50 mm Φ , 2π 方向等方線源
- (b) 直径 50 mm Φ , 強前方性線源 ($\cos\theta > 0.9995$)
- (c) 直径 50 mm Φ , 平行中性子ビーム
- (d) 直径 100 mm Φ , 2π 方向等方線源
- (e) 直径 100 mm Φ , 強前方性線源 ($\cos\theta > 0.9995$)
- (f) 直径 100 mm Φ , 平行中性子ビーム
- (g) 直径 200 mm Φ , 2π 方向等方線源
- (h) 直径 200 mm Φ , 強前方性線源 ($\cos\theta > 0.9995$)
- (i) 直径 200 mm Φ , 平行中性子ビーム

(b), (e), (h)の強前方性線源について $\cos\theta > 0.9995$ に中性子を照射した場合を検討した理由は、コリメータ孔の入口部から比例計数管を見る立体角のなす角が $\cos\theta = 0.9995$ となるためである。

入射中性子束の強度 I [neutrons]は、線源面積 S と Fig. 4-2 に示した中性子放出角度に対する角度成分規格化係数 $W(\theta)$ の積 I (式(4.1))を用いて規格化した。

$$I = S \cdot W(\theta) \quad (4.1)$$

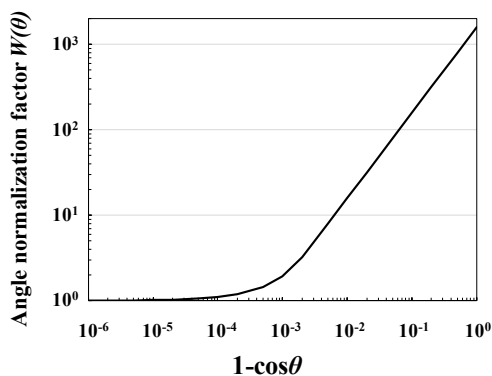


Fig. 4-2 中性子放出角度 θ と角度成分規格化係数 $W(\theta)$ の関係.

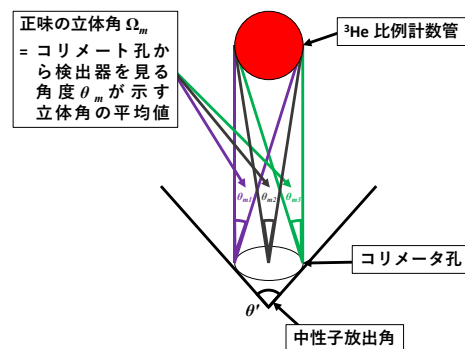


Fig. 4-3 コリメータ孔から比例計数管を見るの正味の立体角 Ω_m の概念図.

角度成分規格化係数 $W(\theta)$ は、コリメータ孔内部に、入射角 θ のなす立体角に対して均一な立体角密度の中性子が入射した場合に、中性子が比例計数管を通過する確率の逆数として定義した。中性子の放出角が大きく、比例計数管が全てその立体角内に入る場合には、中性子放出角の立体角 Ω とコリメータ孔から比例計数管を見る正味の立体角 Ω_m (Fig. 4-3) の比率の逆数 (Ω / Ω_m) として与えられ、中性子の放出角度が0度、すなわち、平行ビーム線源を使用する場合は、本装置のコリメータ孔径が比例計数管径と一致することから、全ての照射中子が比例計数管に入射するようになり、 $W(\theta)$ の値は1となる。角度成分規格化係数とはすなわち、中性子放出角の広がりによって生じる中性子照射密度の減少を、コリメータ孔の内側に平行ビームを入射したときに比例計数管に入射する中性子数で補正し、比例計数管位置における空間中性子束強度を $(1/S) [\text{cm}^{-2}]$ に規格化するための係数である。このことから、式 (4.1) とはすなわち、比例計数管一の空間中性子束強度を $1/\text{cm}^2$ に規格化する操作であることが分かる。角度成分規格化係数を解析的に求めることは極めて困難であるため、本研究ではモンテカルロ計算によりその値を求めた。

以上までの条件による応答関数の計算結果を Fig. 4-4 の(a)~(i)に示す。

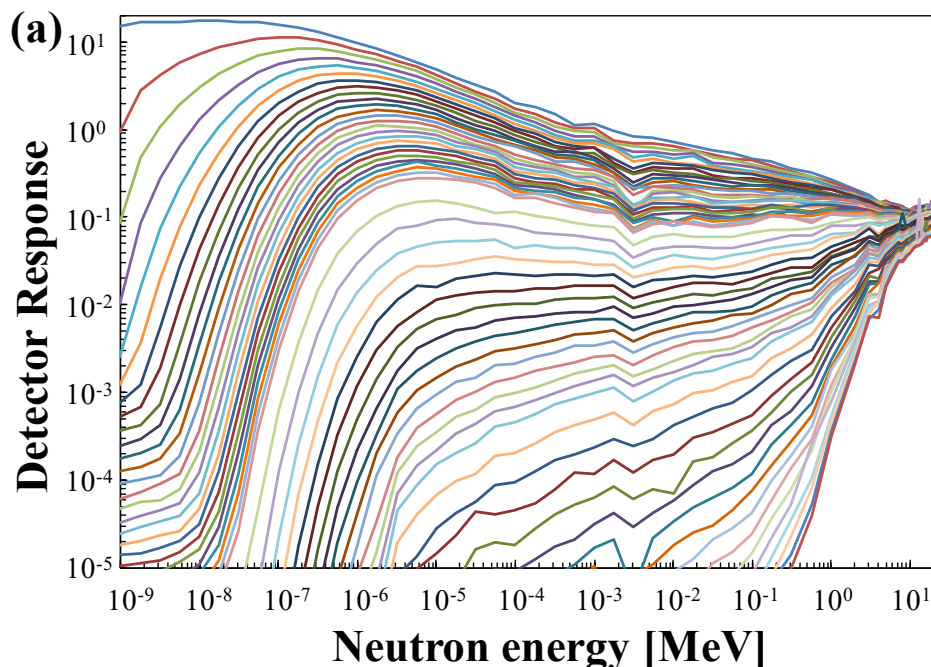


Fig. 4-4(a) 応答関数 (a), 線源条件が直径 50 mm Φ , 2π 方向等方線源の計算結果.

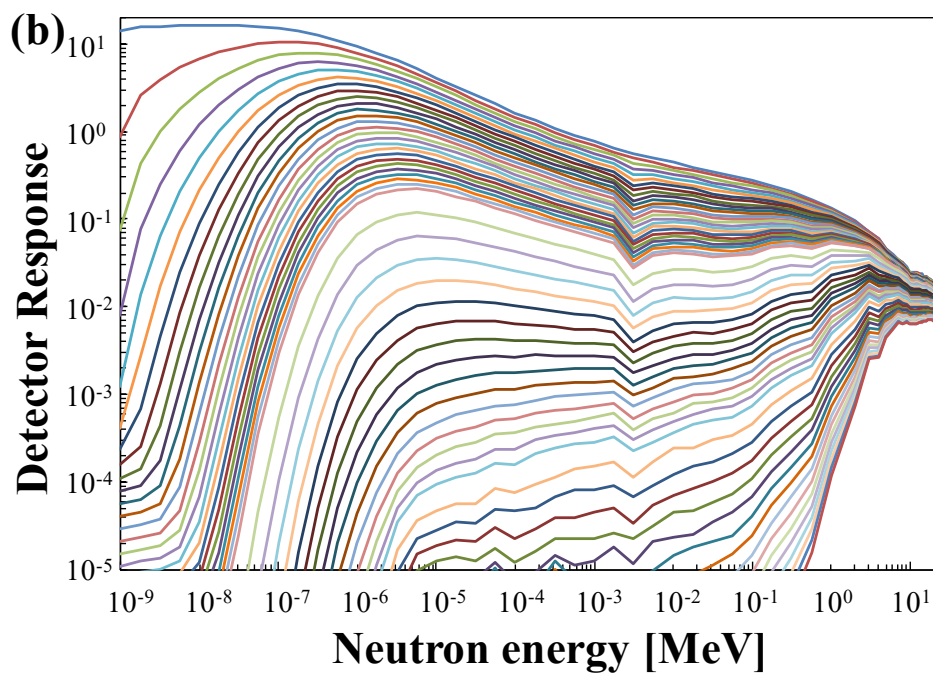


Fig. 4-4(b) 応答関数 (b), 線源条件が直径 50 mm Φ , $\cos\theta > 0.9995$ の強前方性線源の計算結果.

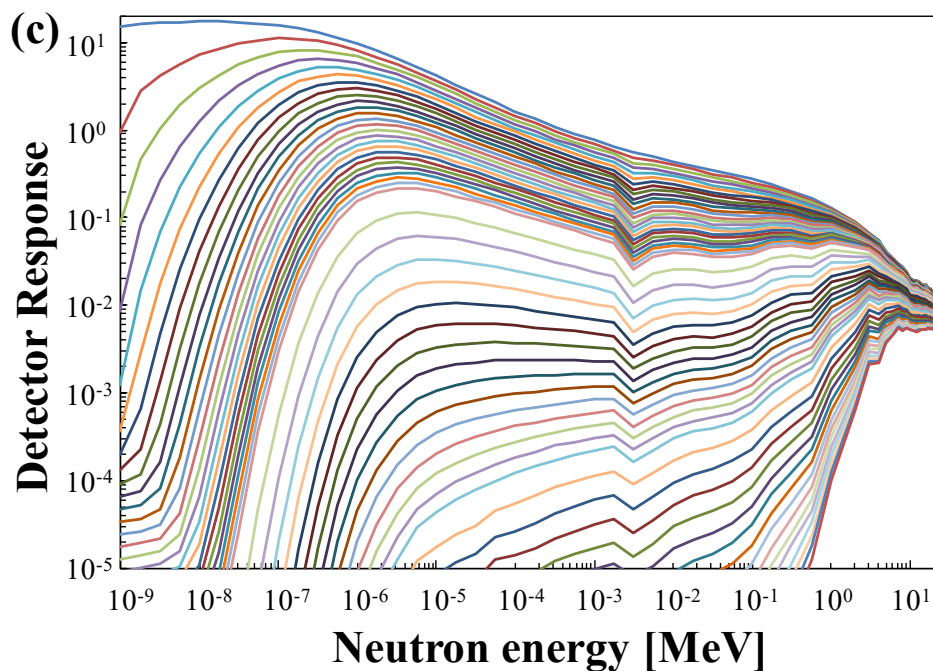


Fig. 4-4(c) 応答関数 (c), 線源条件が直径 50 mm Φ , 平行ビーム線源の場合の計算結果.

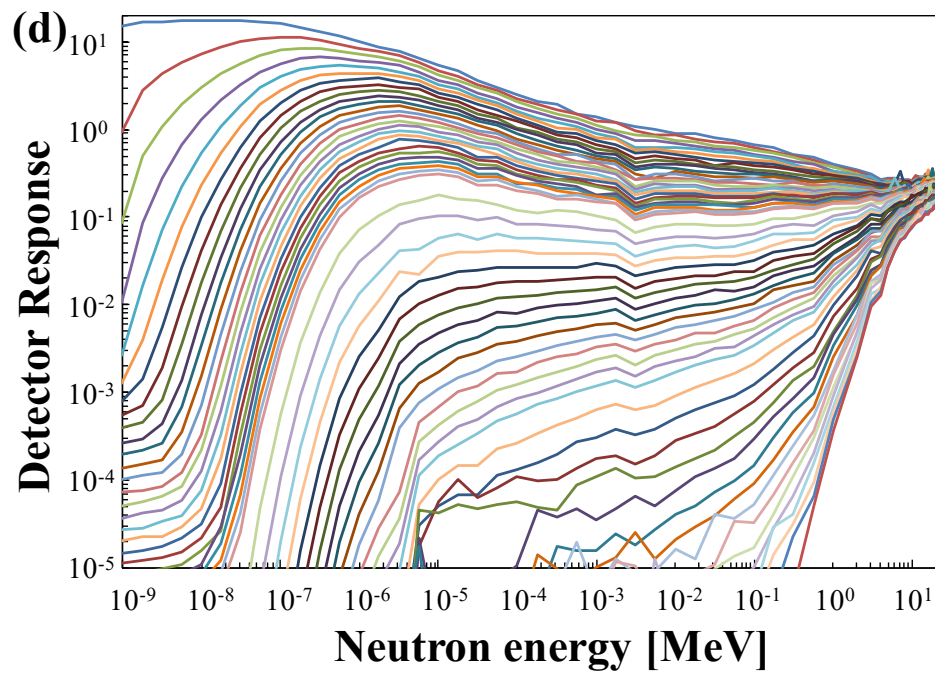


Fig. 4-4(d) 応答関数 (d), 線源条件が直径 100 mm Φ , 2π 方向等方線源の計算結果.

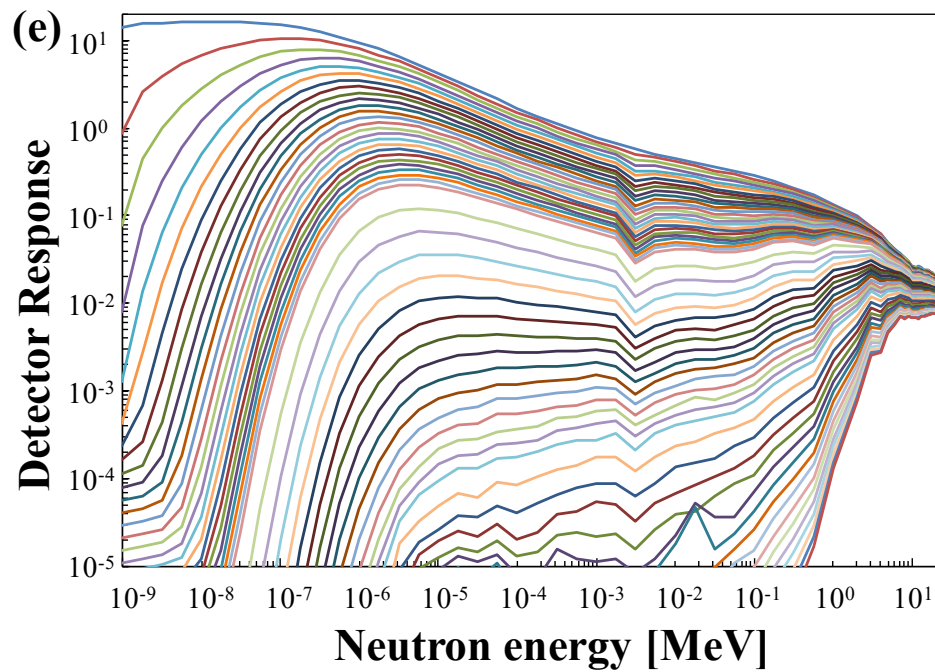


Fig. 4-4(e) 応答関数 (e), 線源条件が直径 100 mm Φ , $\cos\theta > 0.9995$ の強前方性線源の計算結果.

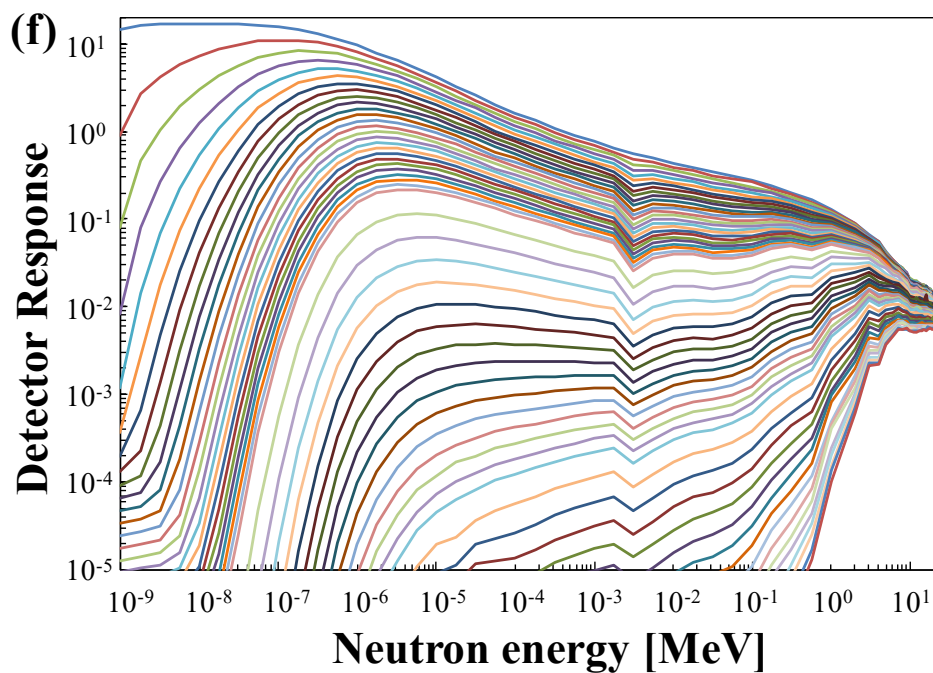


Fig. 4-4(f) 応答関数 (f), 線源条件が直径 100 mm Φ , 平行ビーム線源の計算結果.

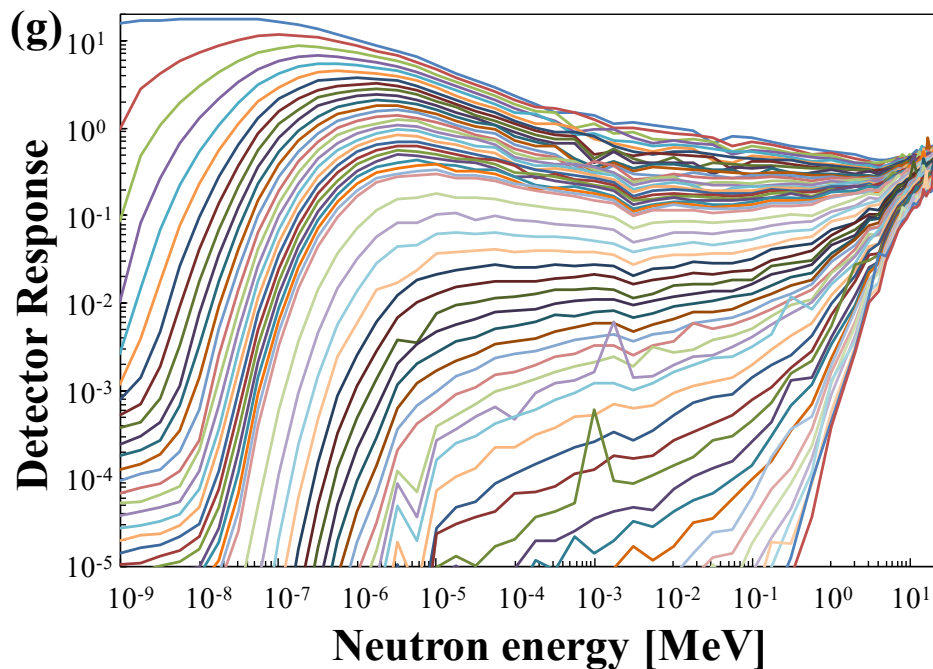


Fig. 4-4(g) 応答関数 (g), 線源条件が直径 200 mm Φ , 2π 方向等方線源の計算結果.

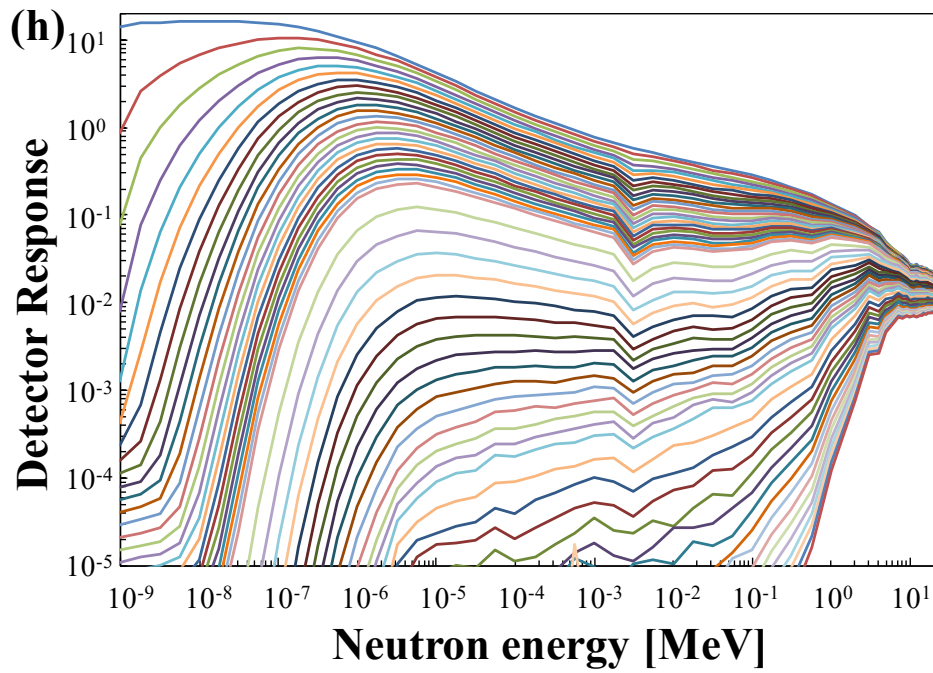


Fig. 4-4(h) 応答関数 (h), 線源条件が直径 200 mm Φ , $\cos\theta > 0.9995$ の強前方性線源の計算結果.

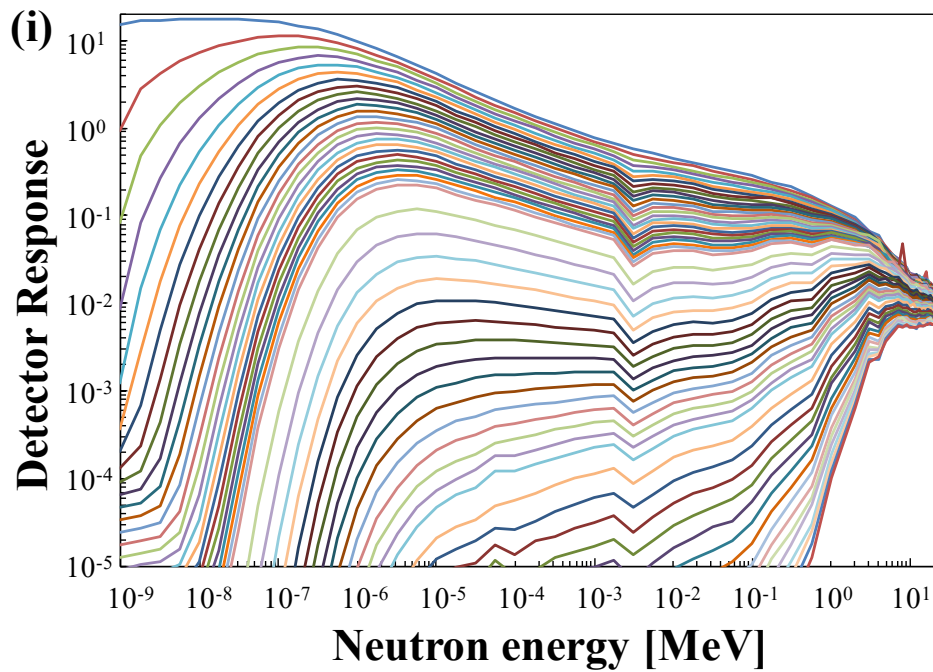


Fig. 4-4(i) 応答関数 (i), 線源条件が直径 200 mm Φ , 平行ビーム線源の計算結果.

4.3 数値実験 1: プロトタイプスペクトロメータとの比較

前節で設計した改良型スペクトロメータの性能を検証するため、まず前章の実験で使用した実験体系で測定を行った場合のシミュレーションを行い、そのスペクトル評価結果とプロトタイプスペクトロメータを使用した場合のスペクトル測定結果と比較することにより、測定結果の入射中性子場の特性に対する依存性について評価を行った。本節ではその結果を述べる。

4.3.1 シミュレーション体系

Fig. 4-5 に本節で使用した実験体系を示す。これは第 3 章で使用した実験体系のスペクトロメータ部分を本章で設計した改良型スペクトロメータに置き換えた体系である。本節では図中の点 T における中性子場のエネルギースペクトルを測定することを目標とし、以下の手順で数値実験を行った。

まず MCNP-5 を用いてモデル化した Fig. 4-5 の体系にて、スペクトロメータの減速材の厚さを 0 mm から 250 mm まで変化させて、照射測定シミュレーションとバックグラウンド信号の補正計算を行い、改良型スペクトロメータの計数率計算値を求めた (Fig. 4-6)。その後、Fig. 4-4 に示した各応答関数と Fig. 4-6 に示した計数率を用いて第 2 章に示した手順に従ってモンテカルロ型 Bayes 推定法による unfolding を行い、中性子スペクトルの評価を行った。

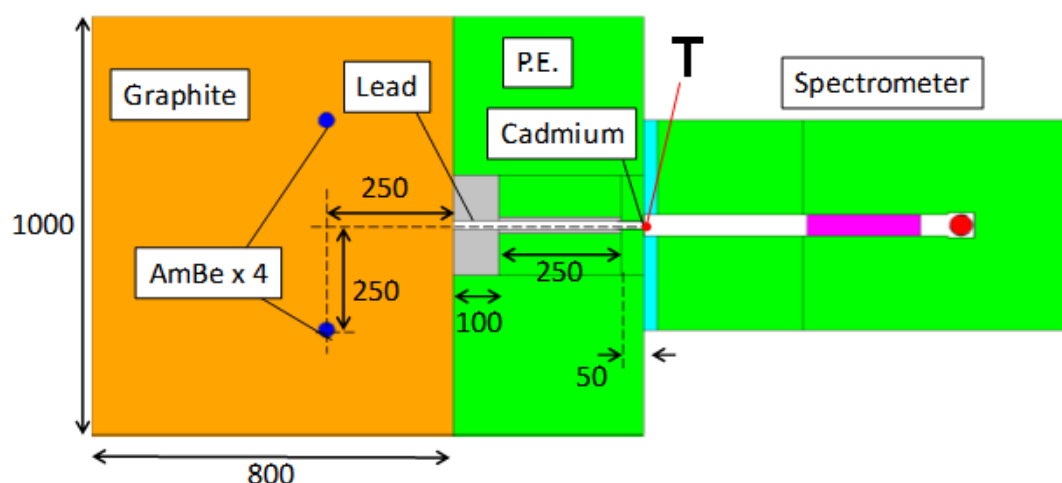


Fig. 4-5 数値実験 1 のシミュレーション体系。図中に示した点 T の位置のスペクトル測定を行う。

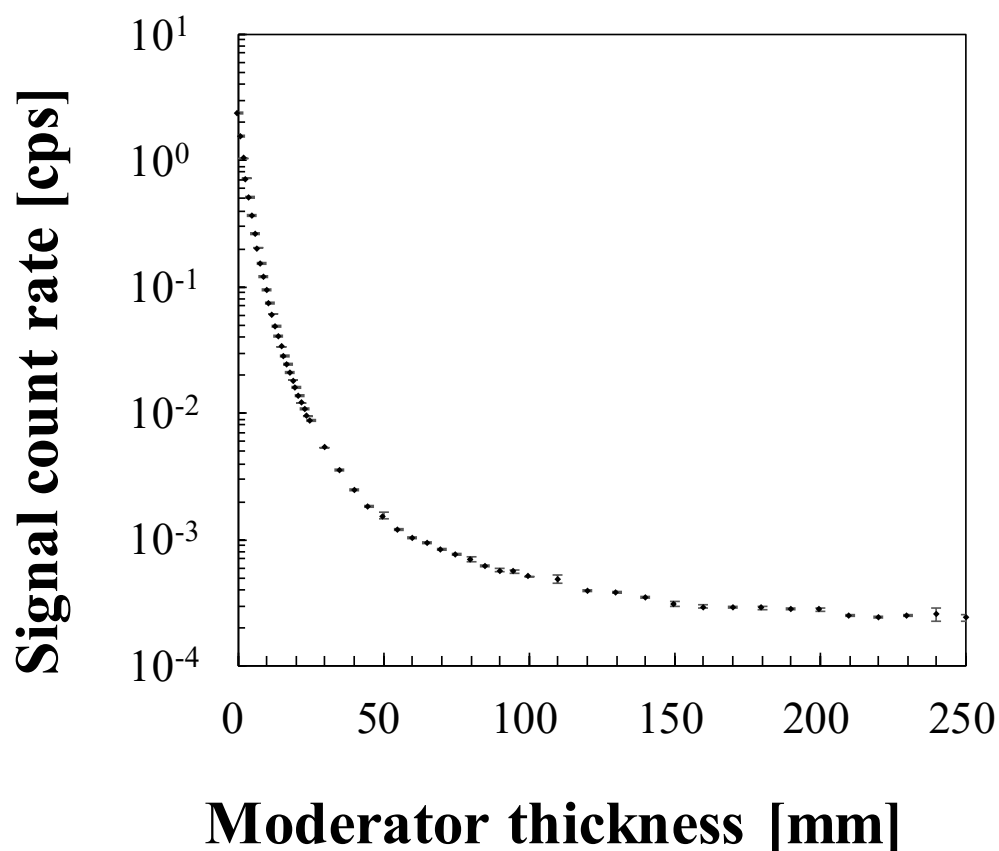


Fig. 4-6 数値実験 1 の検出器信号の計数率の計算値.

4.3.2 結果と考察

数値実験 1 の unfolding 結果を Fig. 4-7 に示す. T_w は点 T における中性子束の全角度成分積分値を, T_f は同位置における中性子束の前方成分 ($\cos\theta > 0.9995$) を, (a) から (i) は Fig. 4-4 に示した各応答関数を用いた場合の unfolding の結果を示している. $\Phi_a(3)$ は第 3 章で得られた unfolding 結果を再掲したものである. また, Fig. 4-8 に各 unfolding 結果を T_f と比較した場合の各エネルギー領域における評価関数 A の値を示す.

Fig. 4-7, Fig. 4-8 の結果より, まず (a) から (i) までの 9 個の線源条件を用いた場合について, 応答関数の計算結果やそれを用いた unfolding の結果のばらつきが少ないことが読み取れる. これは第 3 章の unfolding 結果と比較すると明らかである. この事実はすなわち, プリコリメータを用いたスペクトロメータ設計の改良により, 検出器感度の入射中性子特性依存性を大幅に低減できたこ

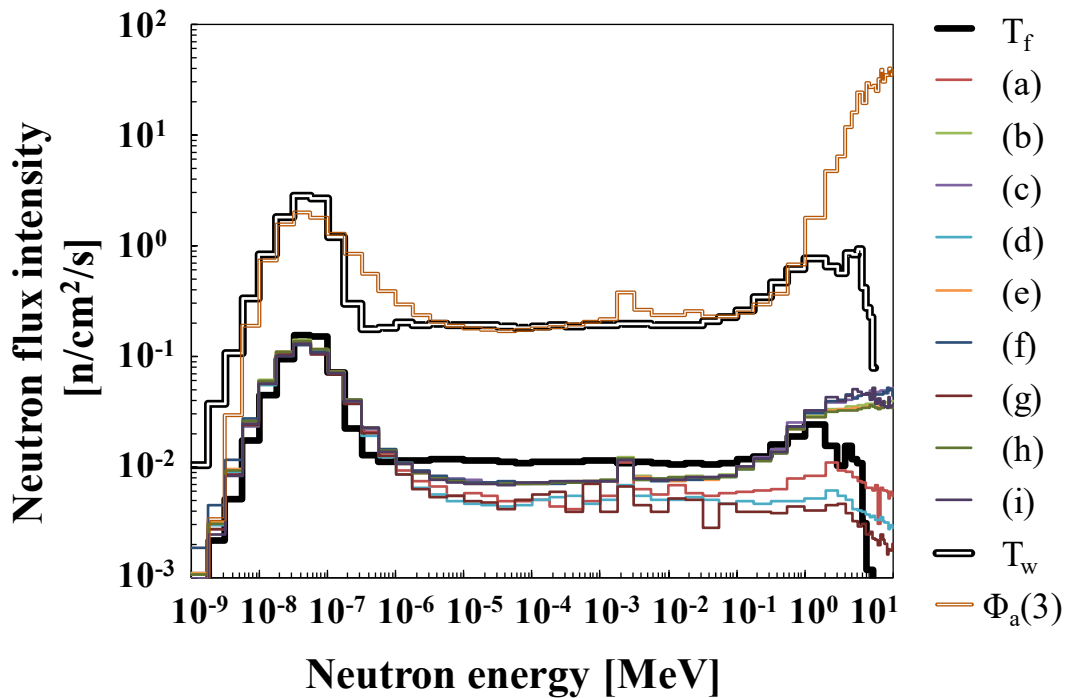


Fig. 4-7 数値実験 1 の unfolding 結果. T_w は点 T における中性子束の全角度成分を, T_f は同位置における中性子束の前方成分 ($\cos\theta > 0.9995$)を, (a)から(i)は Fig. 4-4 に示した各応答関数を用いた場合の unfolding の結果を示している. $\Phi_a(3)$ は第 3 章で得られた unfolding 結果を再掲したものである.

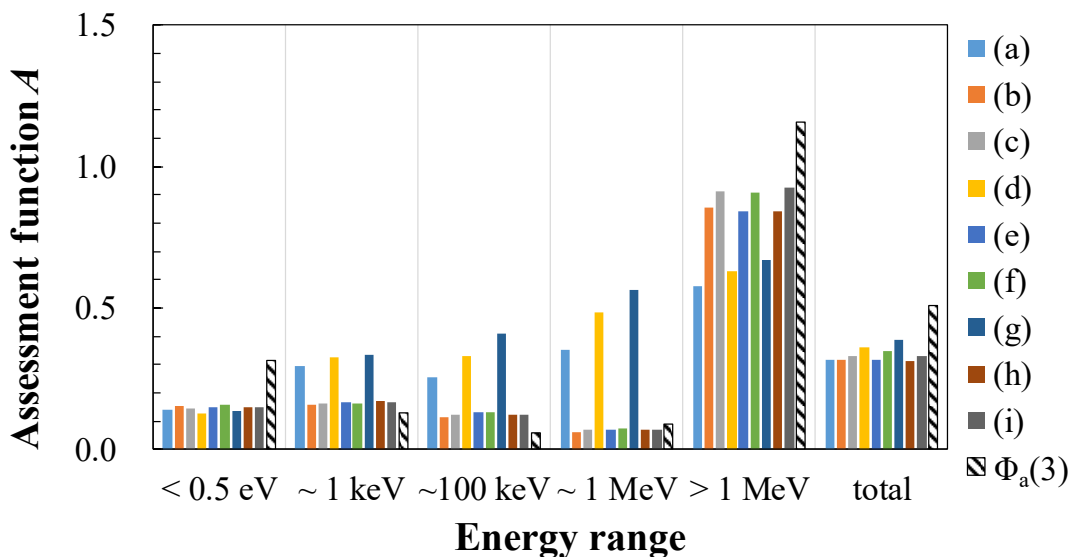


Fig. 4-8 数値実験 1 の unfolding 結果に対する, 各エネルギー領域における評価関数 A .

とを示している。一方で、改良型スペクトロメータを用いたスペクトル測定の結果は第3章の結果と異なり、点 T の全フラックスとはその絶対値に大幅な違いが表れた。これはプリコリメータを設置したことにより検出器に入射する中性子束の前方成分以外が遮蔽されており、測定結果からその成分を再現することができなかつたためと考えられる。ただし、入射中性子束の前方成分 ($\cos\theta > 0.9995$) と unfolding 結果を比較すると、これらは 1 MeV 以下の領域で良く一致している。この事実はすなわち、本装置は複雑な角度分布を持つ中性子場においても、中性子束の前方成分のみを抽出して中性子スペクトルの測定が可能となる特性を持っていることを示唆しているものと考えられる。

一方で、1 MeV 以上の領域については未だ十分な一致が見られない理由としては、プリコリメータにより高速中性子の透過成分や内部散乱成分が十分に除去しきれていない可能性が考えられる。しかしながら、Fig. 4-8 からわかる通り、評価関数 A の値は第3章の結果に比べて大きく改善しており、プリコリメータの設置の中性子スペクトル測定性能向上に対する有効性が確認できたといえる。

4.4 数値実験 2: 種々の中性子場での検討

プロトタイプスペクトロメータと改良型スペクトロメータの比較によりプリコリメータの有効性が確認できたため、次に、照射中性子場の特性に対する改良型スペクトロメータの応答特性と適用性について検討するため、4種類の異なる特性を持った中性子場に対する照射測定シミュレーションを行った。本節ではその詳細と結果について述べる。

4.4.1 シミュレーション体系

Fig. 4-9 に本節で検証したシミュレーション体系を示す。これら4つのシミュレーション体系は、中性子スペクトロメータに [1] 炭素ブロックによって減速された熱中性子を主な成分とし、かつコリメータを使用しない「非集束低エネルギー中性子場」、[2] エネルギーをほとんど失っていない高速中性子を主な成分とし、かつコリメータを使用しない「非集束高エネルギー中性子場」、[3] 熱中性子を主な成分とし、コリメータを使用する「集束低エネルギー中性子場」、[4] 高速中性子を主な成分とし、コリメータを使用する「集束高エネルギー中性子場」をそれぞれ照射する体系である。Fig. 4-9 に示した4体系は、各図中に示した点 T における前方中性子フラックス ($\cos\theta > 0.9995$) を測定することを目的に設計した。

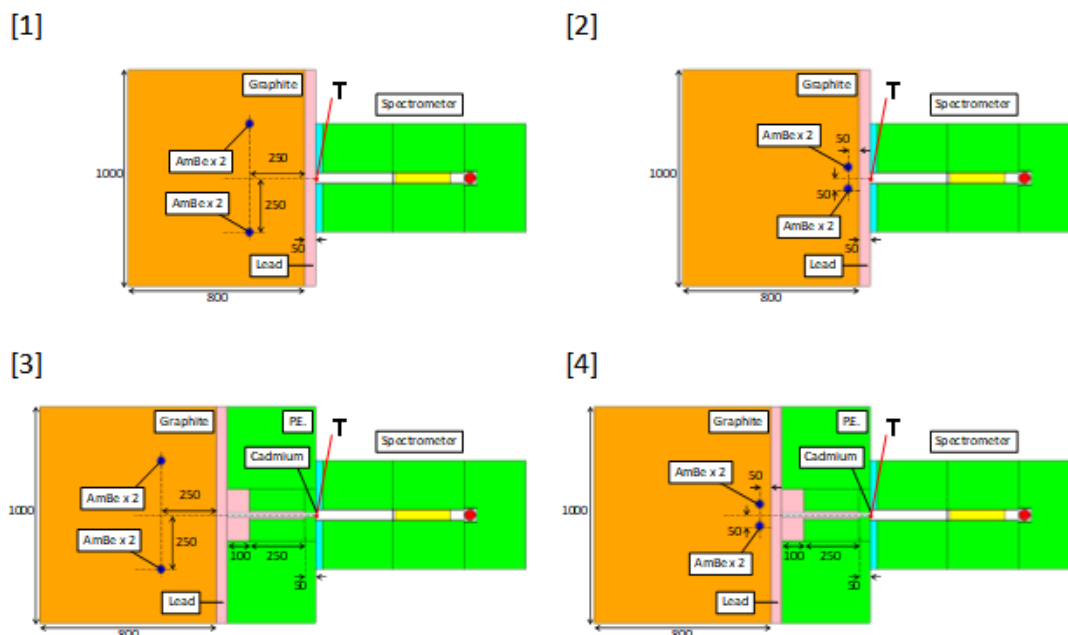


Fig. 4-9 数値実験 2 で使用したシミュレーション体系. それぞれ, [1] 非集束低エネルギー中性子場, [2] 非集束高エネルギー中性子場, [3] 集束低エネルギー中性子場, [4] 集束高エネルギー中性子場の照射を目的とした体系である.

この4体系における点Tの前方中性子フラックスのエネルギースペクトルを Fig. 4-10 に, 各体系で照射測定シミュレーションを行った結果を Fig. 4-11 に示す.

4.4.2 結果と考察

Fig. 4-11 に示した 4 つのシミュレーション体系における検出器信号計数率を, Fig. 4-4 に示したそれぞれの応答関数を用いて Unfolding した結果を Fig. 4-12, Fig. 4-14, Fig. 4-16, Fig. 4-18 に示す. また, これらの結果と Fig. 4-10 に示した中性子スペクトルとの一致を定量的に評価するための評価関数 A の値をそれぞれ Fig. 4-13, Fig. 4-15, Fig. 4-17, Fig. 4-19 に示す. これらの結果より, 改良型の液体減速型中性子スペクトロメータの特性について考察する.

Fig. 4-12 と Fig. 4-13, そして Fig. 4-14 と Fig. 4-15 の示す結果は, コリメートされていない中性子場の測定において, (a), (d), (g) の 2π 方向等方線源を使用した応答関数による unfolding 結果が測定中性子場のエネルギースペクトルによく一致しており, かつ線源面積が広いほどその一致は良くなることが明らかとなった. その他の強前方性, あるいは平行ビーム中性子源によって計算した応答

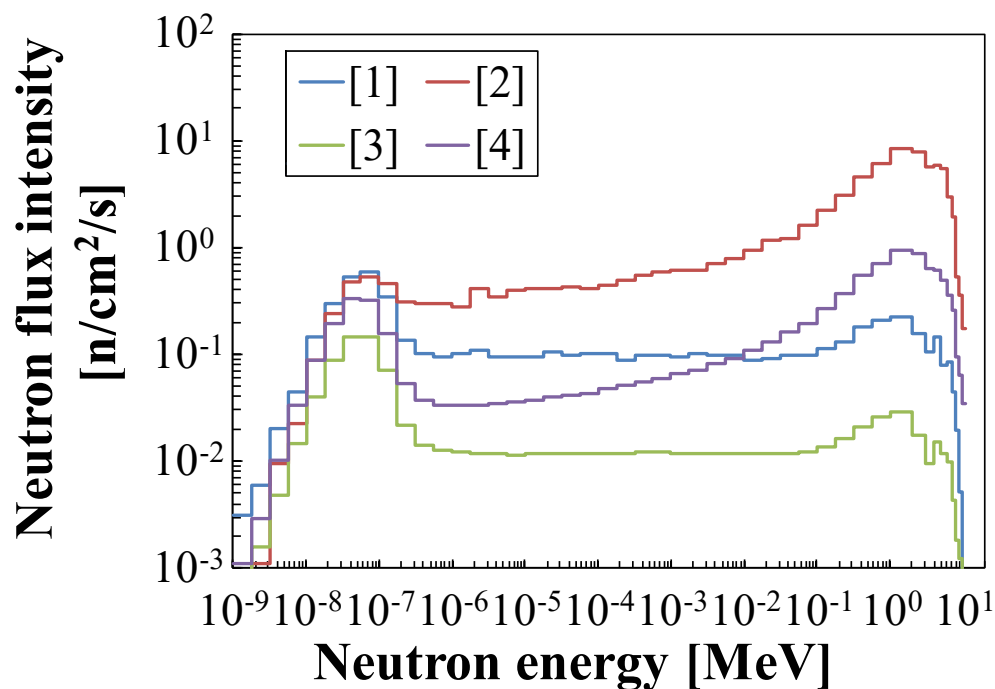


Fig. 4-10 シミュレーション体系 [1], [2], [3], [4] の入射前方中性子束スペクトル.

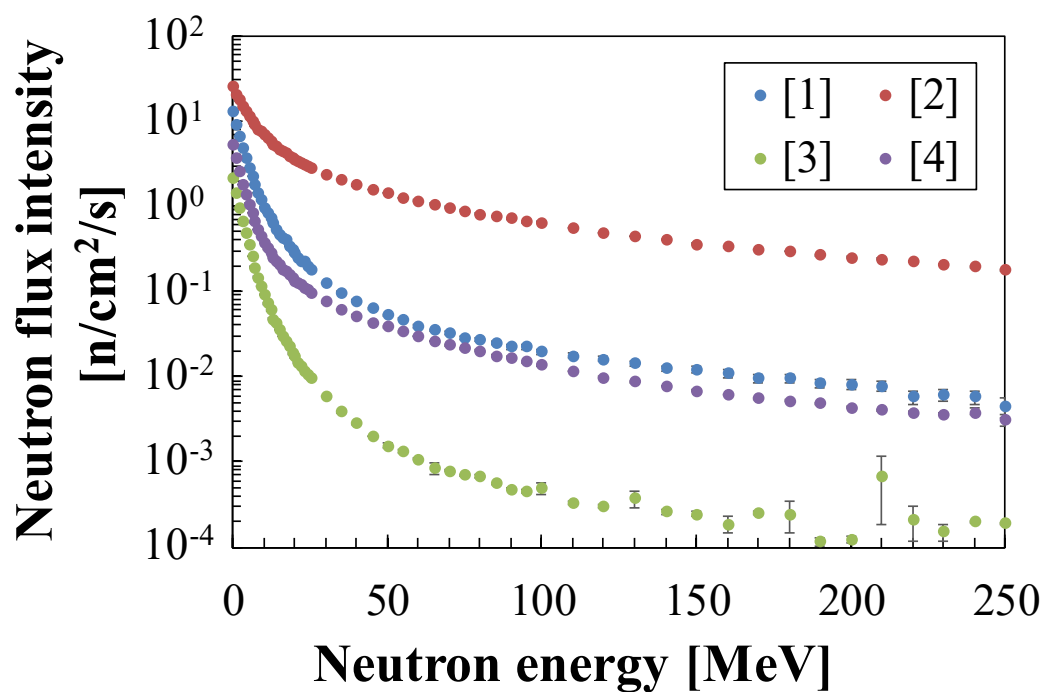


Fig. 4-11 シミュレーション体系 [1], [2], [3], [4] における検出器信号の計数率計算値.

関数による結果は、特に 1 MeV 以上の領域で一致が良くなかったものの、線源面積による感度の差がほとんど見られなかった。これは、中性子場がコリメートされておらず、かつ中性子源が検出器表面に近いことから、コリメータ孔側面の遮蔽材で散乱された中性子が側面からコリメータ孔内に浸透した後、液体減速材まで入射した可能性があり、これによる信号が無視できないほど大きい。この成分が十分に考慮されうる応答関数を使用した場合の方がよりスペクトル解析の結果が良くなったものと考えられる。

一方、Fig. 4-16 と Fig. 4-17 の結果、および Fig. 4-18 と Fig. 4-19 の結果より、コリメートされている中性子場においては (b), (c), (e), (f), (h), (i) の応答関数を用いた結果が良い一致を示した。また、これらの結果は全て互いによく一致していた。線源面積にかかわらずよく似た結果が得られたことから、検出器軸方向に対する角度がほとんどない入射中性子はプリコリメータによって非常によく遮蔽されており、コリメータ孔を通る成分のみが測定されているものと考えられる。またコリメートされていない中性子場の測定シミュレーションによる結果と合わせて考察すると、本章で設計した改良型中性子スペクトロメータの検出器応答を乱す要因は、検出器の軸に対して大きな角度を持つ入射中性子が、何らかの形でコリメータ孔とその側面の遮蔽体に最低でも 1 回ずつ入射したのち、比例計数管に到達して信号を発生させることであると考えられる。

以上の結果より本章で設計したスペクトロメータの一般的な適用性について検証する。本装置の特性をまとめると以下の通りとなる。

- 検出器軸と入射中性子のなす角度を θ とすると、 $\cos\theta > 0.9995$ を満たす前方中性子束のエネルギースペクトルを測定する能力を持つ。
- $\theta = 0$ の平行ビーム、あるいは小さな角度 θ しか持たない入射中性子場に対しては中性子の入射面積に対する検出器応答の依存性はほとんどなく、コリメータ孔に入射した中性子のみを対象に測定を行うことが可能である。
- θ が大きい中性子が入射する場合、一度コリメータ孔に入射した後に側面遮蔽体に入射し、その後またコリメータ孔に入射した中性子や、コリメータ径外に入射した後に遮蔽体を透過してコリメータ孔に浸透した中性子による信号を考慮する必要がある。

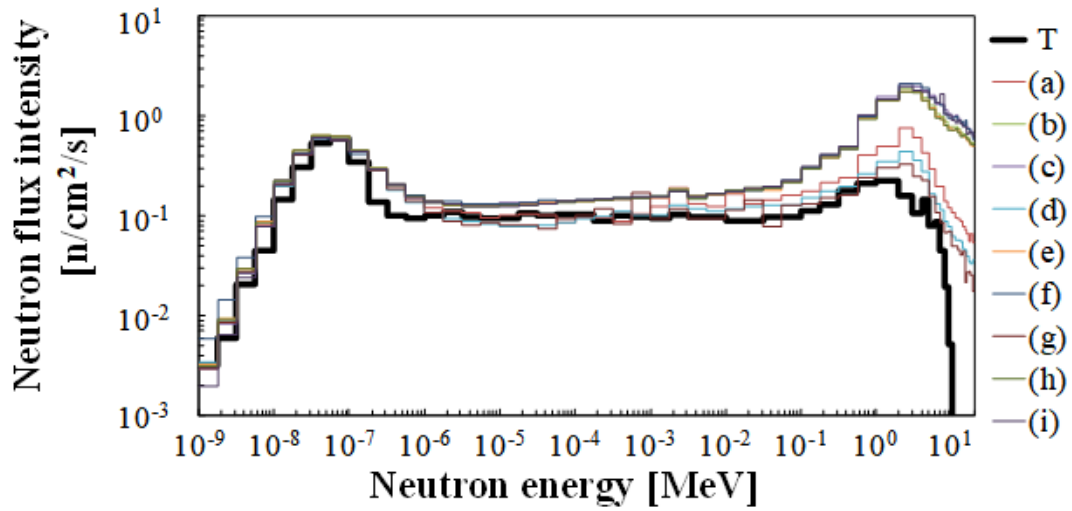


Fig. 4-12 シミュレーション体系 [1] の中性子スペクトル測定結果.

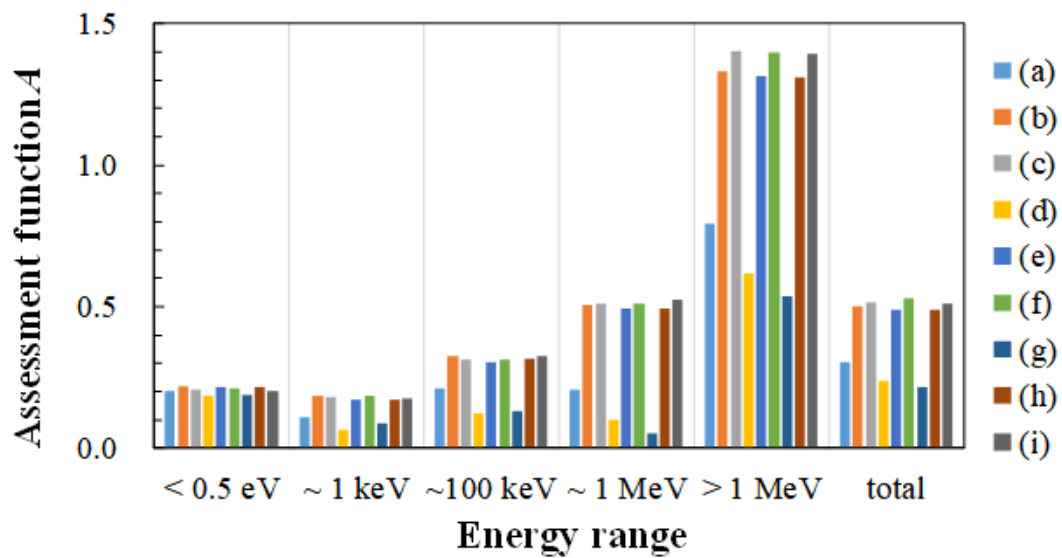


Fig. 4-13 シミュレーション体系 [1] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 A の値.

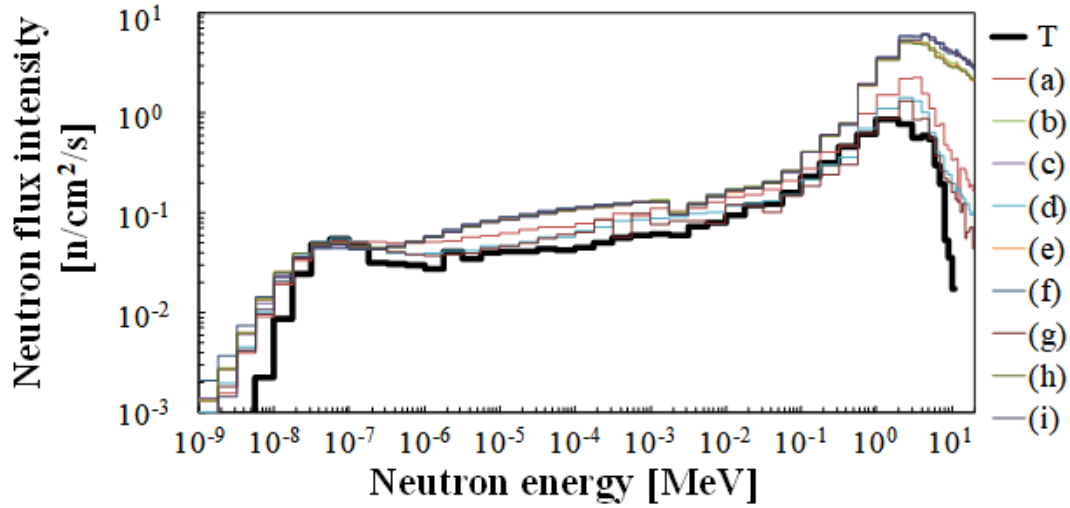


Fig. 4-14 シミュレーション体系 [2] の中性子スペクトル測定結果.

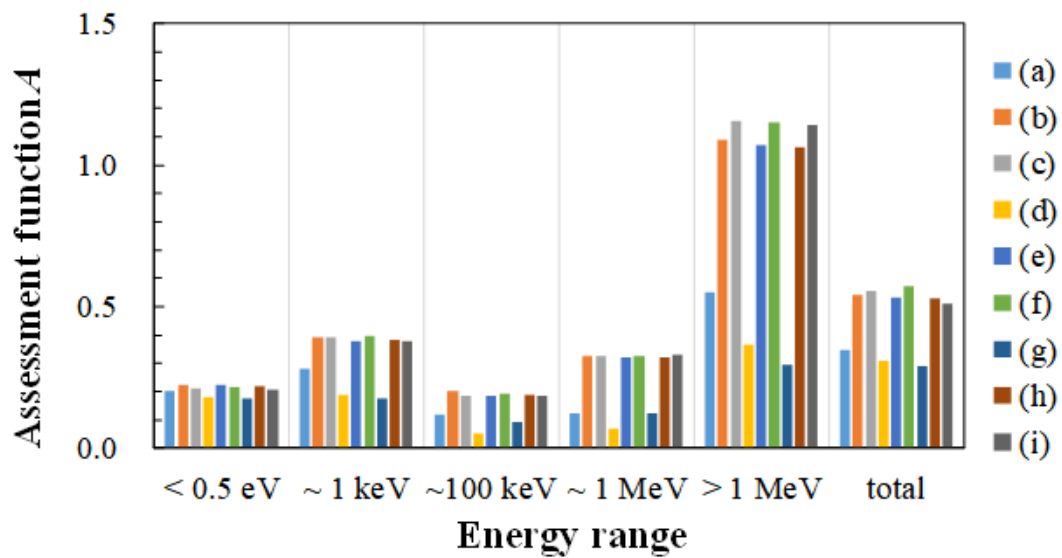


Fig. 4-15 シミュレーション体系 [2] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 *A* の値.

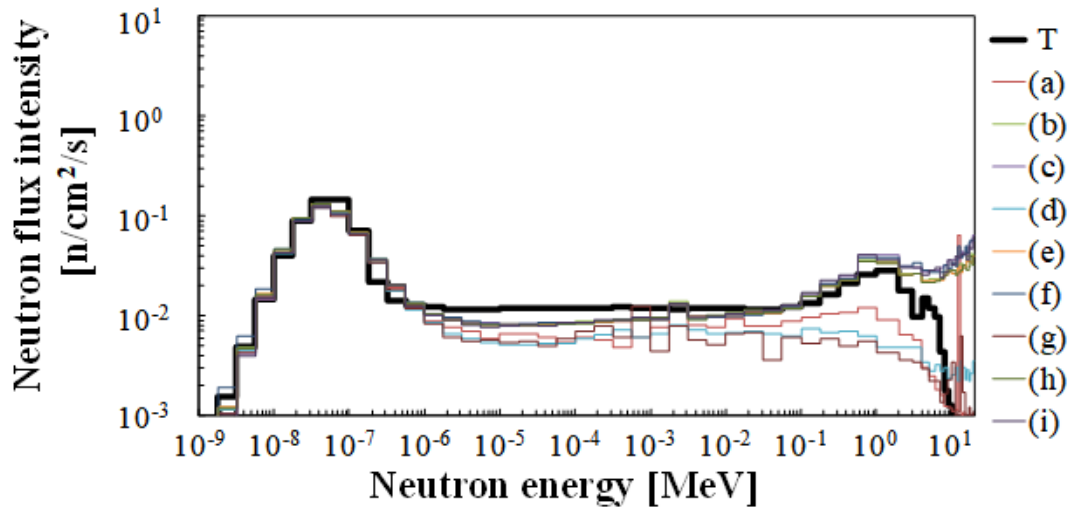


Fig. 4-16 シミュレーション体系 [3] の中性子スペクトル測定結果.

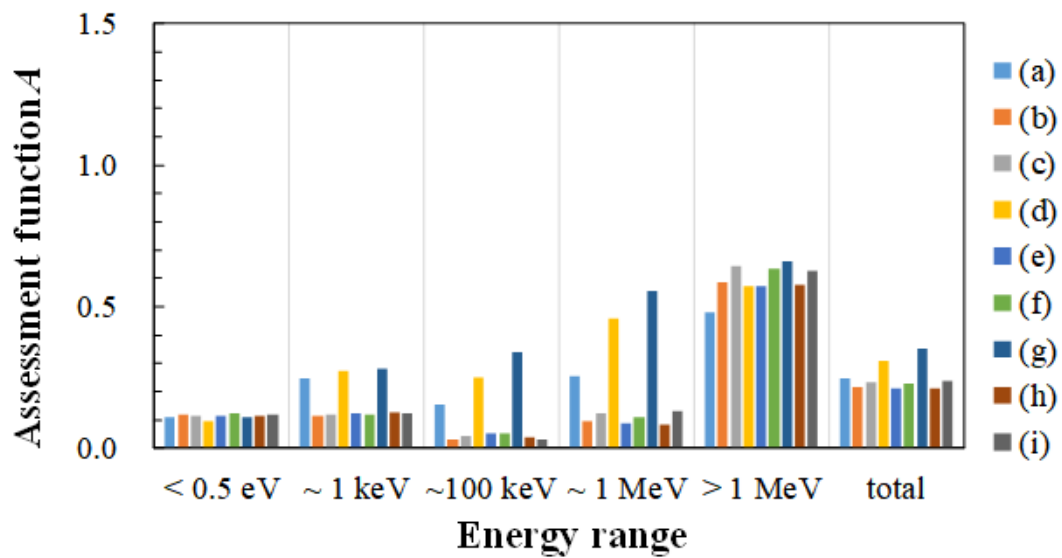


Fig. 4-17 シミュレーション体系 [3] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 A の値.

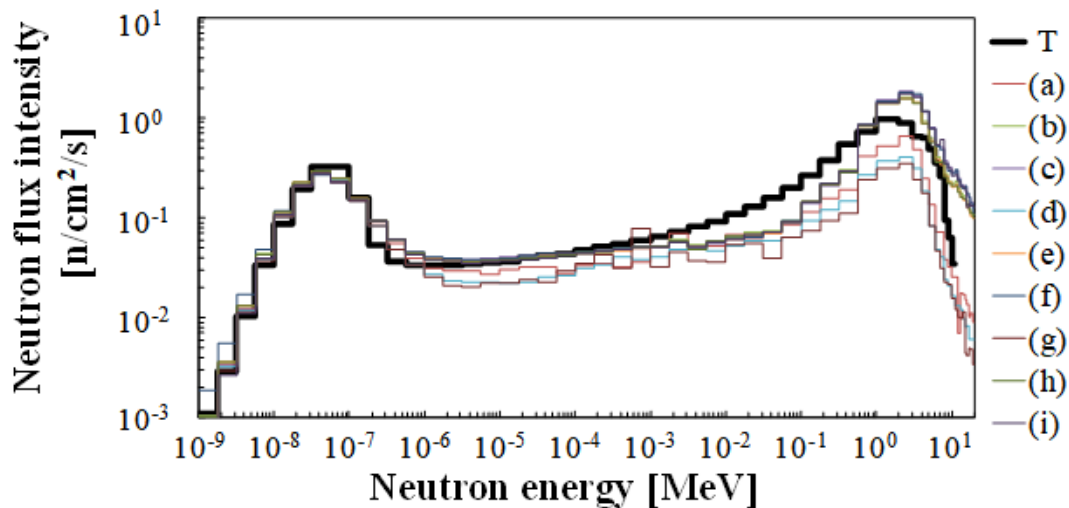


Fig. 4-18 シミュレーション体系 [4] の中性子スペクトル測定結果.

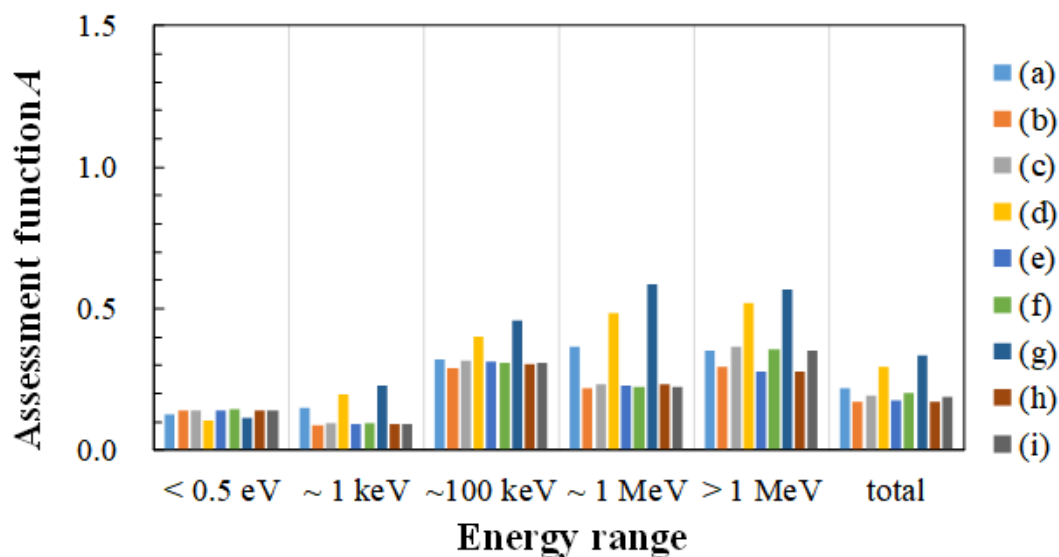


Fig. 4-19 シミュレーション体系 [4] の中性子スペクトル測定結果の評価関数 A の値.

すなわち、本装置は入射中性子場の入射角を考慮し、角度成分が十分小さい中性子が主として入射する中性子場に対して、平行ビームまたは強前方性中性子場によって計算した応答関数を用いることで、プリコリメータ孔の軸上の中性子場の前方中性子束スペクトルを測定することが可能な装置であると言える。入射角が大きな中性子が多く存在する中性子場に対しては、等方線源を使用した応答関数を用いることによりスペクトルを評価することが可能であるものの、線源面積、すなわち中性子の入射位置に対する依存性も完全には除去できておらず、このような中性子場に対する測定法に関してはさらなる検討を要する。

しかしながら、この問題は中性子場の測定方法を工夫することにより解決可能であると考えられる。例えば γ 線検出器であるゲルマニウム半導体検出器やシンチレーション検出器 [3] のように、測定したい線源から一定の距離を離して測定することで応答関数を使い分けることなくあらゆる中性子場のエネルギースペクトルを測定できる可能性がある。測定中性子場から距離を取ることにより、検出器軸に対して大きな角度を持つ中性子の強度は取った距離の二乗に反比例して減衰し、検出器軸に平行な成分が主として入射するようになる。そして改良型の液体減速型中性子スペクトロメータの特性上、中性子場が検出器軸に対して平行、すなわち平面波であるとみなすことができるようになれば、コリメータ孔径外に入射した中性子を無視することが可能となり、かつ応答関数による測定結果への影響も考慮する必要がなくなる可能性がある。

4.5 結論

本章では、第3章のプロトタイプ検出器を用いた液体減速型中性子スペクトロメータの実験的研究によって得られた知見を基に装置設計の改良を行い、その性能を数値実験によって評価した。

検出器設計では、入射中性子特性による検出器感度への影響を低減するため、Fig. 4-1 に示した、プロトタイプ検出器前方にプリコリメータを設置する装置を設計した。この装置でプロトタイプ検出器を用いた実験と同様の体系でシミュレーションを行い、中性子スペクトル測定実験を模擬した結果、入射中性子場のうち $\cos\theta > 0.9995$ を満たす前方中性子束のエネルギースペクトルを測定する装置としてスペクトロメータとして本装置が設計されており、かつ検出器感度の入射中性子場特性に対する依存性が大きく低減されていることを確認した。また、1 MeV 以下のエネルギーを持つ中性子に対して特に優れた測定能力を

持っていることを確認した。

その後、設計した装置の一般的な適用性を確認するため、照射中性子場の特性が異なる 4 種類の実験体系を用いた場合の測定実験のシミュレーションをそれぞれ実施した。その結果、測定中性子場の角度成分を考慮した応答関数、すなわち、検出器軸に対して平行に入射する中性子を主とする中性子場に対しては平行ビームまたは強前方性の中性子場を使用した応答関数を、大きな角度を持つ中性子が多く入射する中性子場に対しては等方中性子場を使用して求めた応答関数を使用することにより、プリコリメータ軸上の前方中性子束のエネルギースペクトル測定が可能であることを確認した。一方で、入射中性子場の特性に対する依存性を少なくするという本章の目的を考慮すると、本装置は検出器軸に対して平行に入射する中性子を主とする中性子場の測定を行うための装置であるとみなすべきであると結論できる。

しかしながら、この特性はあらゆる中性子場に対して適用可能な、汎用性を持つ測定装置を開発するという目的に矛盾しないと考えられる。なぜならば、一例としては測定対象となる中性子場と検出器の間に距離を取ることで、大きな入射角を持つ中性子が多く含まれる中性子場であっても平行中性子以外の入射中性子成分を減衰させ、検出器に入射する中性子場を検出器軸に対して平行に入射する中性子を主とする中性子場とみなすことができるからである。すなわち、本装置の特性は、本装置の使用方法について検証することにより、応答関数を使い分けることなくあらゆる中性子場のエネルギースペクトルを測定できる可能性を示唆している。

今後は設計したスペクトロメータを製作し、その特性を実験的に確認した後、汎用的にスペクトル測定を行う手法について検討を進める予定である。

参考文献

1. S. Tamaki, S. Kusaka, F. Sato, I. Murata, "DESIGN IMPROVEMENT OF A LIQUID-MODERATOR-BASED NEUTRON SPECTROMETER FOR BNCT." *Radiation Protection Dosimetry* (2017): 1 – 4.
2. Brown, Forrest B. "MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5." *Los Alamos National Laboratory, Oak Ridge, TN* (2003).
3. Knoll, Glenn F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010, pp. 321–364, 415–465.

第5章 総括

本章では、本研究 (第 2 章, 第 3 章及び第 4 章) の研究成果をそれぞれ要約し、導き出される知見と課題について議論する。

第 2 章では、液体減速型中性子スペクトロメータによる中性子スペクトル測定の基本原理について説明するとともに、スペクトロメータの基本モデルを用いた数値実験を実施し、本装置による中性子スペクトル測定原理の実現可能性を検証した。また、複数種類の液体減速材を用いて数値実験を実施することによって本装置のエッセンスとなる液体減速材の持つべき特性について議論を行った。液体減速材として軽水、重水、ホウ酸水、ホウ酸トリメチルの 4 種類を使用した数値実験の結果、得られる実験データから中性子のエネルギースペクトルを推定できる見込みを得た。また、その結果はホウ酸トリメチル、ホウ酸水、軽水、重水の順に良い結果を示した。これはそれぞれの液体減速材の中性子吸収断面積の大きさの順番と一致しており、液体減速材が高い中性子吸収能を持つ原子、例えば ^{10}B 等を多く含むことにより中性子スペクトルの測定性能が上昇する可能性を示唆している。この結果より、十分大きな中性子反応断面積を持つ液体減速材を使用して、適切な形状の検出器を設計し、十分な精度で測定を行うことにより、液体減速型中性子スペクトロメータの原理に基づいて中性子場のエネルギースペクトル測定が可能であると結論した。

第 3 章では、第 2 章で数値的に確認した液体減速型中性子スペクトロメータの基本原理の妥当性を、今度は実験的に確認するため、液体減速型中性子スペクトロメータのプロトタイプ的设计・開発を行い、それを用いた実験による本装置の中性子スペクトル測定原理の検証を実施した。また、その結果を基に液体減速型中性子スペクトロメータの実機設計・開発を行う上で重要となる条件・課題について議論した。結果としては、検出器の応答関数を適切な条件下で評価することにより、少なくとも 1 MeV 以下のエネルギー領域において中性子スペクトルを正確に測定可能であることを確認した。また、検出器の応答関数を適切に評価するためには照射される中性子場の空間分布や角度分布などの特性が極めて重要であり、あらゆる中性子場で使用可能な中性子スペクトロメータを開発するためには中性子場特性に対する依存性の低い応答関数を持つスペクトロメータの基礎設計を検討する必要があることを確認した。

第 4 章では、第 3 章で得られた知見を基に液体減速型中性子スペクトロメ

ータの改良設計を行い、照射測定シミュレーションを通してその性能を確認した。結果としては、中性子入射方向にプリコリメータを設置する検出器設計を採用することにより、入射中性子特性による検出器感度への影響が低減し、入射中性子場のうち $\cos \theta > 0.9995$ を満たす前方中性子束のエネルギースペクトルを測定するスペクトロメータが設計された。またこの設計では、1 MeV 以下のエネルギーを持つ中性子に対して特に優れた測定能力を持っていることを確認した。第3章の実験体系による照射測定シミュレーション結果により得られた中性子スペクトルと比較すると、プリコリメータの採用により、1 MeV 以上の中性子に対する測定精度が向上していることが明らかとなった。また、照射中性子場の特性が異なる4種類の実験体系を用いた場合の測定実験シミュレーションの結果、測定中性子場の角度成分を考慮した応答関数、すなわち、検出器軸に対して平行に入射する中性子を主とする中性子場に対しては平行ビームまたは強前方性の中性子場を使用した応答関数を、大きな角度を持つ中性子が多く入射する中性子場に対しては等方中性子場を使用して求めた応答関数を使用することにより、プリコリメータ軸上の前方中性子束のエネルギースペクトル測定が可能であることを確認した。一方で、入射中性子場の特性に対する依存性を少なくするという本章の目的を考慮すると、適切な応答関数を中性子場ごとに代えてスペクトルを評価することは適切でないこと、そして等方線源を用いた応答関数による結果よりも平行中性子場を用いた応答関数による結果の方がシミュレーション全体としての測定結果が良好であったことから、本装置は、コリメータ孔内に入射する、検出器軸に対して平行な中性子を主とする中性子場の測定を行うことが可能な装置であるとみなすべきであると結論した。また、改良型スペクトロメータの特性をこのように評価することにより、測定対象となる中性子場と検出器との間に距離を取るなど、検出器軸となす角が小さい中性子が主として入射するように測定実験の手法を工夫することで、本装置を用いたスペクトル測定における中性子場特性による測定結果への影響を低減し、より正確な前方中性子束エネルギースペクトルが測定可能になる可能性がある。

本研究全体の結論としては、本研究の成果として1 MeV 以下のエネルギー領域の前方中性子束に対して高い感度を持つ中性子エネルギースペクトロメータを設計することができたと言える。BNCT用中性子場の持つエネルギースペクトルを考慮すると、本装置によって有効に測定可能なエネルギー領域は、今後さらなる改良を加えることで拡張する必要があると考えられるが、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反

応を基礎とする BNCT 用加速器中性子源に関していえばその最大エネルギーが 1 MeV 以下になるため、本装置を用いて中性子場のエネルギースペクトルを評価することが可能であると言える。

また、本装置は特定方向の中性子束にのみ感度を持つスペクトロメータであると結論したが、このことはある一つの可能性を示唆している。それは、液体減速型中性子スペクトロメータを用いた角度・エネルギー微分中性子束強度分布、すなわち二重微分中性子束強度の測定可能性である。従来、BNCT 用中性子場のエネルギースペクトル測定と言えば空間測定、すなわち、ある特定の地点における全中性子束のみを対象とした測定のみが実施されてきた。しかしながら、IAEA の示す BNCT 用中性子場の設計要件にカレント・フラックス比、すなわち照射中性子場の前方性に関する項目が設けられていることからわかるように、照射場の中性子束角度分布は人体への影響を考慮するうえで非常に重要な項目である。にもかかわらず、これまで照射中性子場の角度分布についてはほとんど実験的に評価されてこなかった。その理由は、中性子場の角度分布は一般的にそのエネルギーに依存して異なる値を持っており、実験的な評価を行うことがこれまでは事実上不可能なほどに困難であったためである。しかしながら、本研究で開発した装置は中性子束の前方中性子束スペクトルを測定する装置である。また、第4章の考察より本装置は測定中性子場から距離を離して使用することにより、より正確なスペクトル測定を行うことが可能であると考えられる。このアイデアを応用すると、本装置は中性子スペクトルを測定したい点を定め、その点から距離を取り、測定点が検出器軸上に入るようにしつつ検出器の角度を変えながら測定実験を実施することにより、照射中性子場の角度ごとのエネルギースペクトル、すなわち二重微分中性子束強度を測定し、これまでより詳細な中性子場特性評価を行うことが可能となる可能性がある。二重微分中性子束強度が測定可能になれば、中性子場の特性にかかわらずあらゆる中性子場を評価することが可能となる。すなわち、本装置による中性子スペクトル測定の汎用性を担保することが可能になる。また、より詳細な中性子場の情報を評価することにより、より安全かつ効果的な加速器中性子源装置の開発に貢献することが期待される。したがって、二重微分中性子束強度の測定可能性は従来の中性子スペクトル測定とは一線を画する極めて画期的な結果をもたらすことが期待され、極めて重要であると言える。

今後は、まず本装置を用いた前方中性子束スペクトルの測定可能性を実験的に確認することが必要である。この実験は大阪大学 OKTAVIAN 施設にて使用

可能である AmBe 小線源や強力 14 MeV 中性子工学実験装置 (OKTAVIAN), そして日本原子力研究開発機構の放射線標準施設 (FRS) で使用可能である単色中性子照射用の加速器中性子源を用いて実施する予定である. これらの実験を通して液体減速型中性子スペクトロメータにより前方中性子束スペクトルが測定可能であることを実験的に確認した後, 改めて本装置を用いた二重微分中性子束強度の測定可能性について検証していく予定である.

謝辞

本研究の遂行にあたり直接の御指導を頂き、終始あたたかな御指導、御協力そして激励を頂きました大阪大学大学院工学研究科の村田 勲教授に深く感謝を申し上げます。

本論文作成にあたり、細部にわたって貴重な御助言、御指導を賜りました大阪大学レーザー科学研究所の乗松 孝好教授、大阪大学大学院工学研究科の北田 孝典教授に深く感謝申し上げます。

本研究の遂行、そして本論文作成に関する貴重な御助言、御指導を賜りました、大阪大学大学院工学研究科の佐藤 文信准教授に深く感謝申し上げます。

大阪大学 OKTAVIAN 施設での学生生活、そして実験において多大なご助力を賜りました、大阪大学大学院工学研究科技術部 伊達道 淳技術主幹、杉本 久司技術専門職員、吉岡 潤子技術専門職員、日下 祐江技術専門職員、高田 梨菜技術専門職員に深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に必須であった ^3He 充填比例計数管を貸与していただきました東北大学の馬場 護名誉教授、中村 尚司名誉教授、そして渡部 浩司教授に深く感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたりこれまで数多くの実験指導を頂きました、名古屋大学の吉橋 幸子准教授、群馬大学の酒井 真理助教、そして国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構の近藤 恵太郎研究員に深く感謝申し上げます。

本研究遂行及び研究室での学生生活において多くの御助力、御協力を頂きました大阪大学大学院工学研究科村田研究室所属・出身の学生の皆様に深く感謝申し上げます。

博士課程在学中に経済的なご支援を頂きました独立行政法人日本学術振興会 人材育成事業部 研究者養成科の皆様に深く感謝申し上げます。

本研究は日本学術振興会 科学研究費助成事業 特別研究員奨励費 課題番号 16J00093 による経済的援助を受けて遂行されました。深く感謝申し上げます。

最後になりましたが、これまで私を支え、見守ってくださった家族への深い感謝の意を持ちまして、謝辞の結びとしたいと思います。

平成 29 年 12 月 玉置 真悟

研究業績

I. 主要論文 (査読あり)

- (1) **S. Tamaki**, S. Kusaka, F. Sato, I. Murata, "DESIGN IMPROVEMENT OF A LIQUID-MODERATOR-BASED NEUTRON SPECTROMETER FOR BNCT." *Radiation Protection Dosimetry* (2017) in press.
- (2) **S. Tamaki**, F. Sato, I. Murata, "Study on a liquid-moderator-based neutron spectrometer for BNCT —Development and experimental test of the prototype spectrometer", *Nucl. Instr. and Meth. A*, **870**, pp. 90 – 96 (2017).
- (3) **S. Tamaki**, F. Sato, I. Murata, "A feasibility design study on a neutron spectrometer for BNCT with liquid moderator", *Applied Radiation and Isotopes*, **106**, pp. 41 – 44 (2015).

II. 関連論文 (査読あり)

- (1) **S. Tamaki**, I. Murata, "Feasibility study on high-dynamic-range neutron spectrometer with continuously thick-adjustable moderator/absorber", Proceedings of the 2013 Symposium on Nuclear Data, November 14 – 15, 2013, Research Institute of Nuclear Engineering University of Fukui, Tsuruga, Fukui, Japan, *JAEA-Conf. 2014-002 INDC(JPN)-199*, pp. 145-150 (2015).

III. その他論文 (査読あり)

- (1) X. Guan, M. Manabe, **S. Tamaki**, F. Sato, I. Murata, T. Wang, "Performance testing of the neutron flux monitors from 10 keV to 1 MeV developed for BNCT: A preliminary study", *Applied Radiation and Isotopes*, **125**, pp.119-123 (2017).
- (2) 田中 憲一, 櫻井 良憲, 梶本 剛, 田中 浩基, 高田 卓志, 村田 勲, **玉置 真悟**, 遠藤 暁, "イメージングプレートを用いた中性子捕捉療法ビーム成分分布の品質保証 (特集 放射線医療現場における受動型検出器による計測手法の最近の進展)." *放射線= Ionizing radiation* 43.1 (2017): 3-7.
- (3) S. Ohnishi, **S. Tamaki**, I. Murata, "Validation of large-angle scattering data via shadow-bar experiment", *Fusion Engineering and Design*, **112**, pp. 360 – 366 (2016).
- (4) X. Guan, M. Manabe, **S. Tamaki**, S. Liu, F. Sato, I. Murata, T. Wang, "Experimental study on the performance of an epithermal neutron flux monitor for BNCT",

Applied Radiation and Isotopes, **113**, pp.28-32 (2016).

- (5) **S. Tamaki**, F. Sato, I. Murata, “Simple phase-space-population control method for Monte-Carlo particle transport calculation”, Proceedings of the 2014 Symposium on Nuclear Data, November 27 – 28, 2014, Conference Hall, Hokkaido University, Sapporo, Japan, *JAEA-Conf. 2015-003 INDC(JPN)-2015*, pp. 219-224 (2016).
- (6) **S. Tamaki**, M. Sakai, S. Yoshihashi, M. Manabe, N. Zushi, I. Murata, E. Hoashi, I. Kato, S. Kuri, S. Oshiro, M. Nagasaki, H. Horiike, “Mock-up experiment at Birmingham University for BNCT project of Osaka University – Neutron flux measurement with gold foil”, *Applied Radiation and Isotopes*, **106**, pp. 72 – 74 (2015).
- (7) M. Sakai, **S. Tamaki**, I. Murata, “Simplified neutron detector for angular distribution measurement of p-Li neutron source”, *Plasma and Fusion Research*, **9**:4405111 (2014).

IV. 国際会議 (Oral)

- (1) **S. Tamaki**, F. Sato, I. Murata, “Study of a New Neutron Spectrometer based on Liquid Moderator for BNCT - Experiment in a neutron field produced with an AmBe source and graphite moderator -”, 8th Young Researchers BNCT Meeting, September 13 – 17, Pavia, Italy (2015).

V. 国際会議 (Poster)

- (1) **S. Tamaki**, S. Kusaka, F. Sato, I. Murata, “Improvement of a liquid moderator based neutron spectrometer for BNCT”, 9th Young Researchers BNCT Meeting, November 13 – 15, Kyoto, Japan (2017).
- (2) **S. Tamaki**, F. Sato, I. Murata, “Development of neutron collimator for the new wide dynamic range neutron spectrometer for BNCT”, 17th International Congress on Neutron Capture Therapy, October 2 – 7, Columbia, Missouri, USA (2016).

VI. 国内会議

- (1) **玉置 真悟**, “液体減速型中性子スペクトロメータの設計改良研究”, 平成 29 年度京都大学原子炉実験所専門研究会「放射線治療と放射線防護のための放射線計測に関する研究会」, 2017 年 9 月 1 日, 京都大学.
- (2) **玉置 真悟**, “ホウ素中性子捕捉療法のための液体式減速型中性子スペクト

ロメーターのプロトタイプ検出器の開発”, 第 12 回日本原子力学会関西支部「若手研究者による研究発表会」, 2016 年 12 月 14 日, 大阪科学技術センター, 大阪府.

- (3) 玉置 真悟, 佐藤 文信, 村田 勲, “BNCT 用新型中性子スペクトロメーターのための中性子コリメーターの開発”, 第 13 回日本中性子捕捉療法学術大会, P-06, 2016 年 8 月 6-7 日, 東京大学.
- (4) 玉置 真悟, 佐藤 文信, 村田 勲, “ホウ素中性子捕捉療法のための新型中性子スペクトロメータの実験的研究”, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, P34, 2015 年 12 月 9-11 日, 静岡大学.
- (5) 玉置 真悟, 佐藤 文信, 村田 勲, “ホウ素中性子捕捉療法のための液体減速材を用いた新型中性子スペクトロメーターに関する実験的研究”, 第 41 回非破壊検査に関する研究発表会, 8, 2015 年 8 月 21 日, 電子科学研究所, 大阪府.
- (6) 玉置 真悟, 佐藤 文信, 村田 勲, “熱領域から数 10MeV 領域を対象とする液体減速・吸収材を用いた中性子スペクトロメータの設計研究”, 第 11 回日本中性子捕捉療法学術大会, 39, 2014 年 7 月 4-5 日, 大阪大学.
- (7) 玉置 真悟, 酒井 真理, 吉橋 幸子, 真鍋 正伸, 凶子 直城, 村田 勲, 帆足 英二, 加藤 逸郎, 久利 修平, 河瀬 眞也, 大代 修司, 長崎 将雄, 堀池 寛, “大阪大学 BNCT プロジェクトのためのバーミンガム大学におけるモックアップ実験 -金箔による中性子強度分布測定-”, 第 11 回日本中性子捕捉療法学術大会, 39, 2014 年 7 月 4-5 日, 大阪大学.
- (8) 酒井 真理, 玉置 真悟, 村田 勲, 宮丸 広幸, 飯田 敏行, “p-Li 中性子源の角度分布測定用簡易 He-3 検出器の開発”, 日本放射線安全管理学会 第 11 回学術大会, 1B1-4, 2012 年 12 月 4-6 日, 大阪大学.

受賞歴等

- (1) S. Tamaki, “Travel Grant Award”, 8th Young Researchers BNCT Meeting, Pavia, Italy, September 2015.
- (2) 玉置真悟「2014 年度菅田-Cohen 賞」, 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 成績優秀賞.
- (3) S. Tamaki “Ralph Fairchild Award at the 16th ICNCT”, 16th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-16), Helsinki, Finland (Pörssitalo), June, 2014.

- (4) 玉置真悟「2013年度核データ研究会 ポスター発表最優秀賞」,2013年度核データ研究会, 福井大学, 2013年11月.

外部資金

(特別研究員奨励費) ホウ素中性子捕捉療法のための熱・熱外・高速中性子用新型スペクトロメーターの開発, 玉置 真悟 2016~2017年度, 1,300千円.

付録 モンテカルロ型 Bayes 推定 ソースコード

リスト 1: main.cpp

```
1  /*
2  * Unfolding Test code based on Bayes' Theorem
3  *   Revised on: 2016/06/18 -> ver 0.4 released
4  *   Author: S. TAMAKI, Osaka University
5  */
6
7  #include <stdio.h>
8  #include <stdlib.h>
9  #include <ctype.h>
10 #include <signal.h>
11 #include <string>
12
13 /* _DEBUG はコンパイラオプションで定義する (開発環境によっては定義済みかもしれない. 要確認) */
14 #ifdef _DEBUG
15 /* 開発モード (色々試す用) */
16 #include "bayes_develop.h"
17 #else
18 /* 正式モード (安定動作版) */
19 #include "bayes.h"
20 #endif
21
22 int main(int argc, char* argv[])
23 {
24     const int INPUT_LENGTH = 256;
25     char c;
26     char tmp[INPUT_LENGTH + 1];
27     char fname1[INPUT_LENGTH + 1] = "response4bayes.csv"; /*応答関数*/
28     char fname2[INPUT_LENGTH + 1] = "EXP_data.csv"; /*実験データ*/
29     char fname3[INPUT_LENGTH + 1] = "Init_dat_X1.csv"; /*初期値横軸エネルギービンの設定*/
30     char option[INPUT_LENGTH + 1] = "default";
31     char *out_spc = "Spectrum_output.csv";
32     char *out_fld = "Fold_data.csv";
33     int j;
34     int l, m, n;
35     char s[32], *p;
36     Bayesian_Estimation *bayes = NULL;
37
38     FILE *fp;
39     double *E = NULL, *est = NULL, *di = NULL, *dr = NULL, *est_var = NULL;
40     int fin = 0;
41
42     /* mode */
43     fputs("mode->", stderr);
44     fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
45     c = *tmp;
46     fputc(c, stdout);
47
48     /* Response Function */
49     fputs("%n 応答関数の入っている csv ファイル名%n->", stderr);
```

```
50  fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
51  sprintf(fname1, strtok(tmp, "%n"));
52  fputs(fname1, stdout);
53
54  /* Input Data */
55  fputs("%n 測定データの入っている csv ファイル名%n->", stderr);
56  fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
57  sprintf(fname2, strtok(tmp, "%n"));
58  fputs(fname2, stdout);
59
60  /* Energy Bin */
61  fputs("%n 初期値横軸エネルギービンの入っている csv ファイル名%n->", stderr);
62  fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
63  sprintf(fname3, strtok(tmp, "%n"));
64  fputs(fname3, stdout);
65
66  /* Number of Data */
67  fputs("%n 測定データ di の次数%n->m=", stderr);
68  fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
69  m = atoi(tmp);
70  printf("%d", m);
71  if (!(m > 0)) {
72      fputs("%n m には 0 より大きい整数を入力してください。%n 終了します %n", stderr);
73      return 0;
74  }
75
76  /* Number of Energy Bin */
77  fputs("%n 評価スペクトル est の次数%n->n=", stderr);
78  fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
79  n = atoi(tmp);
80  printf("%d", n);
81  if (!(n > 0)) {
82      fputs("%n n には 0 より大きい整数を入力してください。%n 終了します %n", stderr);
83      return 0;
84  }
85
86  /* Number to Repeat */
87  fputs("%n 繰り返し上限%n->", stderr);
88  fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
89  l = atoi(tmp);
90  printf("%d", l);
91  if (!(l > 0)) {
92      fputs("%n l には 0 より大きい整数を入力してください。%n 終了します %n", stderr);
93      return 0;
94  }
95
96  /* Standard Deviation */
97  if (toupper(c) == 'D')
98      *s = 'J';
99  else {
100     switch (toupper(c)) {
101     case 'A':
102         /* Analysis Mode */
103         fputs("%n エネルギースペクトル真値の入っている csv ファイル名%n->", stderr);
```



```

104         break;
105     case 'C':
106         /* Chi_Square Mode */
107         fputs("%n カイ二乗バイアス%n->bias=", stderr);
108         break;
109     case 'M':
110         fputs("%n サンプル数%n->k = ", stderr);
111         break;
112     }
113     /*
114     fgets(tmp, INPUT_LENGTH, stdin);
115     sprintf(option, strtok(tmp, "%n"));
116     */
117 #if defined __INTEL_COMPILER
118     sprintf(option, "1000");
119 #elif defined _MSC_VER
120     sprintf_s(option, INPUT_LENGTH, "1000");
121 #else
122     sprintf(option, "1000");
123 #endif
124     fputs(option, stdout);
125
126     fputs("%n 標準偏差(負の入力で偏差比) ファイル読み込みの場合は F を入力%n->s=", stderr);
127     fgets(tmp, sizeof(s) - 1, stdin);
128     sprintf(s, strtok(tmp, "%n"));
129     printf(s);
130 }
131 fputc('\n', stdout);
132
133 try {
134     switch (toupper(c)) {
135     case 'D':
136         if ((bayes = new Bayesian_Estimation(l, m, n)) == NULL)
137             throw bayes;
138         break;
139     case 'A':
140         if ((bayes = new Bayesian_Estimation(l, m, n, option)) == NULL)
141             throw bayes;
142         break;
143     case 'C':
144         if ((bayes = new Bayesian_Estimation(l, m, n, strtod(option, &p))) == NULL)
145             throw bayes;
146         break;
147     case 'M':
148         if ((bayes = new Bayesian_Estimation(l, m, n, strtol(option, &p, 10)) == NULL)
149             throw bayes;
150         break;
151     default:
152         printf(" 不正なモード入力です. %n D:繰り返し回数指定モード %n M:MC 繰り返し回数決定モ
153         ード %n のいずれかを選んでください.");
154         return 0;
155     }
156     catch (const Bayesian_Estimation *const err_bayes) {

```

```
157     printf("Program Construction failed!\n");
158     return 0;
159 }
160
161 bayes->Set_Bayes(s, fname1, fname2, fname3);
162
163 /* 終了処理 */
164 if ((fin = bayes->Bayesian()) > 0) {
165     /* Output */
166     try {
167         /* Output Estimate spectrum est[n] into file */
168         j = 0;
169         while ((fp = fopen(out_spc, "w")) == NULL)
170             if (!(j++ < 100))
171                 throw fp;
172
173         if (toupper(c) == 'M') {
174             if (bayes->Get_RESULT(&E, &est, &di, &dr, &est_var))
175                 throw fp;
176             fprintf(fp, "energy\tdistribution\terror\trepeat=\t%d\n", fin);
177             for (j = 0; j < n; j++) {
178                 if (est[j] < 1e-99) {
179                     est[j] = 0;
180                     est_var[j] = 0;
181                 }
182                 fprintf(fp, "%.4E\t%.4E\t%.4E\n", E[j], est[j], est_var[j]);
183             }
184         }
185         else {
186             if (bayes->Get_RESULT(&E, &est, &di, &dr))
187                 throw fp;
188             fprintf(fp, "energy\tdistribution\trepeat=\t%d\n", fin);
189             for (j = 0; j < n; j++) {
190                 if (est[j] < 1e-99)
191                     est[j] = 0;
192                 fprintf(fp, "%.4E\t%.4E\n", E[j], est[j]);
193             }
194         }
195         fclose(fp);
196         /* End Output Estimate spectrum */
197
198         /* Output Refolded data into file */
199         j = 0;
200         while ((fp = fopen(out fld, "w")) == NULL)
201             if (!(j++ < 100))
202                 throw fp;
203         fprintf(fp, "data_num\torigin\trefold\trepeat=\t%d\n", fin);
204         for (j = 0; j < m; j++)
205             fprintf(fp, "%04d\t%\lf\t%\lf\n", j + 1, di[j], dr[j]);
206         fclose(fp);
207         /* End Output Refolded data */
208
209         fputs("\n 推定スペクトルのファイル書き込みが正常に終わりました.\n", stderr);
210         printf(" 繰り返し回数は %07d 回  です\n", fin);

```

```

211     }
212     catch (const FILE *const err_fp) {
213         if (err_fp != NULL) {
214             printf("出力データのメモリ確保に失敗しました.¥n");
215             fclose(fp);
216         }
217         else
218             printf("出力ファイルの作成に失敗しました.¥n");
219     }
220     /* End Outputs */
221
222     if (E != NULL)
223         delete[] E;
224     if (est != NULL)
225         delete[] est;
226     if (di != NULL)
227         delete[] di;
228     if (dr != NULL)
229         delete[] dr;
230     if (est_var != NULL)
231         delete[] est_var;
232 }
233 else {
234     switch (bayes->Get_STATE()) {
235     case Bayesian_Estimation::PREPARE:
236         fputs("¥n 入力ファイルが指定されていません. source code を確認してください. ¥n プログラ
ムを終了します. ¥n", stderr);
237         break;
238     case Bayesian_Estimation::READY:
239         fputs("¥n 計算が実行されていません. source code を確認してください. ¥n プログラムを終了
します. ¥n", stderr);
240         break;
241     case Bayesian_Estimation::FIN:
242         fputs("¥n 異常な状態. 通常は STATE=FIN で l<= 0 にはならない. ¥n source code を確認し
て下さい. ¥n", stderr);
243         break;
244     case Bayesian_Estimation::ERR_MEM:
245         fputs("¥n メモリ確保に失敗しました. ファイルサイズが大きすぎる可能性があります. ¥n プ
ログラムを終了します. ¥n", stderr);
246         break;
247     case Bayesian_Estimation::ERR_RFILE:
248         fputs("¥n ファイルが存在しないか不正な入力が行われました.¥n ", stderr);
249         fputs(bayes->Get_Error_File(), stderr);
250         fputs("を確認してください ¥n プログラムを終了します. ¥n", stderr);
251         break;
252     case Bayesian_Estimation::ERR_WFILE:
253         fputs("¥n ログファイル作成に失敗しました. プログラムを再実行してください. ¥n プログラ
ムを終了します. ¥n", stderr);
254         break;
255     case Bayesian_Estimation::ERR_DZERO:
256         fputs("¥n 入力した実験誤差の一部または全部が 0.0 であり, 0 除算または無限ループ発生
の可能性ががあります. ¥n", stderr);
257         fputs(bayes->Get_Error_File(), stderr);
258         fputs("を確認してください. ¥n プログラムを終了します. ¥n", stderr);

```

```

259         break;
260     default:
261         fputs("%n STATE への代入値が異常. source code を確認して下さい. %n プログラムを終了し
ます. %n", stderr);
262         break;
263     }
264 }
265 delete bayes;
266
267 getchar();
268 return 0;
269 }
270 /*****/

```

リスト 2: bayes.h

```

1  /*
2  * bayes.h
3  * ver. 0.4.0
4  * Revised on: 2016/06/18 -> * Major Update: ver. 0.4.0
5  * Author: S. TAMAKI, Osaka University
6  */
7  #ifndef _DEBUG
8  // CHECKING _DEBUG
9
10 #ifndef S_TAMAKI_BAYESIAN_ESTIMATION_
11 #define S_TAMAKI_BAYESIAN_ESTIMATION_
12 // CHECKING S_TAMAKI_BAYESIAN_ESTIMATION_
13
14 typedef class Bayesian_Estimation {
15 public:
16     enum Bayes_State { PREPARE = 0, READY = 1, FIN = 2, ERR_MEM = -1, ERR_RFILE = -2,
17     ERR_WFILE = -3, ERR_DZERO = -4, STOP = -10 };
18     enum Bayes_Mode { DEFAULT = 0, ANALYSIS = 1, CHI_SQUARE = 2, MONTE_CARLO = 3 };
19
20     Bayesian_Estimation(); // constructor default
21     Bayesian_Estimation( // constructor MODE DEFAULT
22         const int repeat, const int m, const int n);
23     Bayesian_Estimation( // constructor MODE ANALYSIS
24         const int repeat, const int m, const int n, char *const true_name);
25     Bayesian_Estimation( // constructor MODE CHI_SQUARE
26         const int repeat, const int m, const int n, const double b);
27     Bayesian_Estimation( // constructor MODE MONTE_CARLO
28         const int repeat, const int m, const int n, const int k);
29     Bayesian_Estimation( // constructor MODE ANALYSIS : change log file
30         name
31         const int repeat, const int m, const int n, const double b, const char *const log);
32     Bayesian_Estimation( // constructor MODE CHI_SQUARE : change log file
33         name
34         const int repeat, const int m, const int n, char *const true_name, const char *const log);
35     Bayesian_Estimation( // constructor MODE MONTE_CARLO : change log
36         file name
37         const int repeat, const int m, const int n, const int k, const char *const log);
38     virtual ~Bayesian_Estimation(); // destructor

```

```

35
36 void Set_Bayes(                                // ファイル設定
37     char *s, char *fname1, char *fname2, char *fname3);
38 int Bayesian(void);                            // ベイズ推定計算シーケンス
39 int Get_RESULT(                                // 評価スペクトル取得
40     double **xenergy, double **xest, double **xdi, double **xdr);
41 int Get_RESULT(                                // 評価スペクトル取得 : MONTE_CARLO MODE
42     double **xenergy, double **xest, double **xdi, double **xdr, double **xest_var);
43
44 char* Get_Error_File(void) {                  // エラーファイル名取得
45     return error_file;
46 }
47 void Stop_Bayes(void) {                      // 強制停止
48     STATE = STOP;
49 }
50 Bayes_State Get_STATE(void) {                // 状態取得
51     return STATE;
52 }
53
54 private:
55     const Bayes_Mode MODE;                    // 計算モード
56     const int MMAX;                          // 測定スペクトル di の次数
57     const int NMAX;                          // 評価スペクトル初期値 est の次数
58     const int KMAX;                          // サンプル数上限
59     const int REPEAT;                        // ベイズ推定繰り返し回数上限
60     const char *const out_log;               // 出力ログファイル名
61     const int MC_RANDOM_SEED;               // MC モード用初期シード
62     char *spc_true;                          // 分析スペクトル用ファイル名
63     double bias;                             // カイ二乗モードの評価値バイアス
64
65     double **R;                              // 応答関数
66     double *di, *dev;                        // 測定データ di と標準偏差 dev
67     double *dr;                              // 再フォールディングデータの格納変数
68     double *E, *F;                          // energy:E における initial spectrum:F
69     double *LLDSUM;                          // 応答関数の列要素の総和
70     double *est;                             // 評価データの推定値 est
71     double *est_var;                         // 評価データの推定値の誤差 err
72     char *error_file;                       // エラー出力用文字列
73
74     Bayes_State STATE;                      //
75
76     Bayes_State Bayes_Construct(void);       // コンストラクタ共通部
77     void Bayes_EXE(                          // ベイズ推定計算本体
78         double *xe_sample, double *xd_sample, double *xa, double **xb, double **xc);
79     int Bayes_ANALYSIS(FILE *fp, int l);     // 分析モード
80     void Bayes_Chi_SQUARE(FILE *fp, int l);  // 終了判定:カイ二乗
81     int Bayes_MONTE_CARLO(void);            // ベイズ推定:モンテカルロ
82     double Randmize_G(double ave, double sigma);
83 } bayes_t;
84
85 // END CHECKING S_TAMAKI_BAYESIAN_ESTIMATION_
86 #endif
87
88 // END CHECKING _DEBUG

```

```
89 #endif
```

リスト 3: bayes.cpp

```
1  /*
2  * bayes.cpp
3  * ver. 0.4.0
4  * Revised on: 2016/06/18 -> Major Update: ver. 0.4.0
5  * Author: S. TAMAKI, Osaka University
6  */
7  #ifndef _DEBUG
8  // CHECKING_DEBUG
9
10 #include <stdio.h>
11 #include <stdlib.h>
12 #include <ctype.h>
13 #include <math.h>
14 #include <string>
15 #include <random>
16
17 #include "bayes.h"
18
19 /* _____ */
20 using namespace std;
21
22 /*****/
23 /* constructor default */
24 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation()
25     : MODE(DEFAULT), MMAX(100), NMAX(100), REPEAT(100000), KMAX(1),
26     MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt")
27 {
28     STATE = Bayes_Construct();          // Preparation
29 }
30 /* constructor MODE default */
31 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n)
32     : MODE(DEFAULT), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
33     MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt")
34 {
35     STATE = Bayes_Construct();          // Preparation
36 }
37 // constructor MODE ANALYSIS
38 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, char *const true_name)
39     : MODE(ANALYSIS), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
40     MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt"), spc_true(true_name)
41 {
42     STATE = Bayes_Construct();          // Preparation
43 }
44 // constructor MODE ANALYSIS : change log file name
45 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, char *const true_name,
46     const char *const log)
```

```

46     :MODE(ANALYSIS), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log(log), spc_true(true_name)
47 {
48     STATE = Bayes_Construct();           // Preparation
49 }
50
51 // constructor MODE CHI_SQUARE
52 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const double b)
53     :MODE(CHI_SQUARE), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt"), bias(b)
54 {
55     STATE = Bayes_Construct();           // Preparation
56 }
57
58 // constructor MODE CHI_SQUARE : change log file name
59 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const double b, const
char *const log)
60     :MODE(CHI_SQUARE), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(1),
MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log(log), bias(b)
61 {
62     STATE = Bayes_Construct();           // Preparation
63 }
64
65 /* constructor MODE MONTE_CARLO */
66 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const int k)
67     :MODE(MONTE_CARLO), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(k),
MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log("log_bayes.txt")
68 {
69     STATE = Bayes_Construct();           // Preparation
70 }
71
72 /* constructor MODE MONTE_CARLO : change log file name */
73 Bayesian_Estimation::Bayesian_Estimation(const int repeat, const int m, const int n, const int k, const char
*const log)
74     :MODE(MONTE_CARLO), MMAX(m), NMAX(n), REPEAT(repeat), KMAX(k),
MC_RANDOM_SEED(12345679), out_log(log)
75 {
76     STATE = Bayes_Construct();           // Preparation
77 }
78
79 /* common subroutine for constructor */
80 Bayesian_Estimation::Bayes_State Bayesian_Estimation::Bayes_Construct(void)
81 {
82     int i;
83
84     R = NULL;                               // Response Function      : R[MMAX][NMAX]
85     di = NULL;                              // Experimental data       : di[MMAX]
86     dev = NULL;                             // Err of EXP data        : dev[MMAX]
87     dr = NULL;                              // Refolded data          : dr[MMAX]
88     E = NULL;                               // Energy bin              : E[NMAX]
89     F = NULL;                               // Initial spectrum       : F[NMAX]
90     LLDSUM = NULL;                          // SUM of R Column        : LLDSUM[NMAX]
91     est = NULL;                             // Estimated result       : est[NMAX]
92

```

```
93     /*    Memory allocation */
94
95     // R[MMAX][NMAX]
96     if ((R = new double*[MMAX]) == NULL) {
97         return ERR_MEM;
98     }
99     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
100         if ((R[i] = new double[NMAX]) == NULL) {
101             return ERR_MEM;
102         }
103     }
104     // di[MMAX]
105     if ((di = new double[MMAX]) == NULL) {
106         return ERR_MEM;
107     }
108     // dev[MMAX]
109     if ((dev = new double[MMAX]) == NULL) {
110         return ERR_MEM;
111     }
112     // dr[MMAX]
113     if ((dr = new double[MMAX]) == NULL) {
114         return ERR_MEM;
115     }
116     // E[NMAX]
117     if ((E = new double[NMAX]) == NULL) {
118         return ERR_MEM;
119     }
120     // F[NMAX]
121     if ((F = new double[NMAX]) == NULL) {
122         return ERR_MEM;
123     }
124     // est[NMAX]
125     if ((est = new double[NMAX]) == NULL) {
126         return ERR_MEM;
127     }
128     // est_var[NMAX]
129     if ((est_var = new double[NMAX]) == NULL) {
130         return ERR_MEM;
131     }
132     // LLDSUM[NMAX]
133     if ((LLDSUM = new double[NMAX]) == NULL) {
134         return ERR_MEM;
135     }
136
137     return PREPARE;
138     /*    End Memory allocation */
139 }
140
141 /*****/
142 /*    destructor */
143 Bayesian_Estimation::~Bayesian_Estimation()
144 {
145     int i;
146
```



```

147     if (R != NULL) {
148         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
149             if (R[i] != NULL) {
150                 delete[] R[i];
151             }
152         }
153         delete[] R;
154     }
155     if (di != NULL) {
156         delete[] di;
157     }
158     if (dev != NULL) {
159         delete[] dev;
160     }
161     if (dr != NULL) {
162         delete[] dr;
163     }
164     if (E != NULL) {
165         delete[] E;
166     }
167     if (F != NULL) {
168         delete[] F;
169     }
170     if (est != NULL) {
171         delete[] est;
172     }
173     if (est_var != NULL) {
174         delete[] est_var;
175     }
176     if (LLDSUM != NULL) {
177         delete[] LLDSUM;
178     }
179 }
180
181 /*****
182  /*  入力設定  */
183 void Bayesian_Estimation::Set_Bayes(char *s, char *fname1, char *fname2, char *fname3) {
184     int i, j;
185     const int STR_LENGTH = 4096;
186     FILE *fp;
187     char str[STR_LENGTH + 1], *tp1 = NULL, *tp2 = NULL, tok[] = " ,\t\n";
188
189     if (STATE != PREPARE) {
190         return;
191     }
192
193     /*  Input Response function into R[MMAX][NMAX] */
194     try {
195         if ((fp = fopen(fname1, "r")) == NULL) {
196             throw ERR_RFILE;
197         }
198         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
199             if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {
200                 throw ERR_RFILE;

```

```
201     }
202     if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
203         throw ERR_RFILE;
204     }
205     R[i][0] = strtod(tp1, &tp2);
206     for (j = 1; j < NMAX; j++) {
207         if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
208             throw ERR_RFILE;
209         }
210         R[i][j] = strtod(tp1, &tp2);
211     }
212 }
213 fclose(fp);
214 }
215 catch (const Bayes_State err) {
216     if (fp != NULL) {
217         fclose(fp);
218     }
219     error_file = fname1;
220     STATE = err;
221     return;
222 }
223 /* End Input Response function */
224
225 /* Input Experimental data into di[MMAX] and Standard deviation into dev[MMAX] */
226 try {
227     if ((fp = fopen(fname2, "r")) == NULL) {
228         throw ERR_RFILE;
229     }
230     if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment
231         throw ERR_RFILE;
232     }
233     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
234         if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {
235             throw ERR_RFILE;
236         }
237         if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
238             throw ERR_RFILE;
239         }
240         if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
241             throw ERR_RFILE;
242         }
243         di[i] = strtod(tp1, &tp2);
244         switch (toupper(*s)) {
245             case 'J':
246                 dev[i] = 0.0;
247                 break;
248             case 'F':
249                 if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
250                     throw ERR_RFILE;
251                 }
252                 dev[i] = strtod(tp1, &tp2);
253                 break;
254             default:
```

```

255         dev[i] = strtod(s, &tp2);
256         break;
257     }
258     if (dev[i] < 0) {
259         dev[i] = -dev[i] * di[i];
260     }
261     if ((MODE == ANALYSIS || MODE == CHI_SQUARE) && dev[i] == 0.) {
262         throw ERR_DZERO;
263     }
264 }
265 fclose(fp);
266 }
267 catch (const Bayes_State err) {
268     if (fp != NULL) {
269         fclose(fp);
270     }
271     error_file = fname2;
272     STATE = err;
273     return;
274 }
275 /* End Input Experimental data and Standard deviation */
276
277 /* Input Energy bin into E[NMAX] and Initial spectrum into F[NMAX] */
278 try {
279     if ((fp = fopen(fname3, "r")) == NULL) {
280         throw ERR_RFILE;
281     }
282     if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment
283         throw ERR_RFILE;
284     }
285     for (j = 0; j < NMAX; j++) {
286         if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {
287             throw ERR_RFILE;
288         }
289         if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
290             throw ERR_RFILE;
291         }
292         E[j] = strtod(tp1, &tp2);
293         if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
294             throw ERR_RFILE;
295         }
296         F[j] = strtod(tp1, &tp2);
297     }
298     fclose(fp);
299 }
300 catch (const Bayes_State err) {
301     if (fp != NULL)
302         fclose(fp);
303     error_file = fname3;
304     STATE = err;
305     return;
306 }
307 /* End Input Energy bin and Initial spectrum */
308

```

```
309  /* Set est[NMAX] and compensate with detection efficiency for each energy */
310  for (j = 0; j < NMAX; j++) {
311      LLDSUM[j] = 0;
312      for (i = 0; i < MMAX; i++) {
313          LLDSUM[j] += R[i][j];
314      }
315  }
316  for (j = 0; j < NMAX; j++) {
317      for (i = 0; i < MMAX; i++) {
318          R[i][j] /= LLDSUM[j]; // Compensate Response function with detection efficiency
319      }
320      est[j] = F[j] * LLDSUM[j]; // Compensate Initial spectrum with detection efficiency
321      est_var[j] = 0.0;
322  }
323  /* End Set est and Compensate */
324
325  /* In Analysis mode : Input True spectrum into F[NMAX] */
326  if (MODE == ANALYSIS) {
327      try {
328          if ((fp = fopen(spc_true, "r")) == NULL) {
329              throw ERR_RFILE;
330          }
331          if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) { // Skip first line as a comment
332              throw ERR_RFILE;
333          }
334          for (j = 0; j < NMAX; j++) {
335              if (fgets(str, STR_LENGTH, fp) == NULL) {
336                  throw ERR_RFILE;
337              }
338              if ((tp1 = strtok(str, tok)) == NULL) {
339                  throw ERR_RFILE;
340              }
341              E[j] = strtod(tp1, &tp2);
342              if ((tp1 = strtok(NULL, tok)) == NULL) {
343                  throw ERR_RFILE;
344              }
345              F[j] = strtod(tp1, &tp2) * LLDSUM[j];
346          }
347          fclose(fp);
348      }
349      catch (const Bayes_State err) {
350          if (fp != NULL)
351              fclose(fp);
352          error_file = spc_true;
353          STATE = err;
354          return;
355      }
356  }
357  /* End Input True spectrum */
358
359  STATE = READY;
360  return;
361 }
362
```

```

363 /*****
364 /* Bayes 推定シーケンス */
365 int Bayesian_Estimation::Bayesian(void) {
366     int i, j, k, l;
367     FILE *fp = NULL;
368     double *a = NULL, **b = NULL, **c = NULL;           // temporary variables
369     double **d_sample = NULL;                          // d_sample
370     double **e_sample = NULL;                          // e_sample
371     double var_i = 0, var_e = 0, var_r = 0;             // Sum of variance of input, e_sample and
refolded e_sample
372
373     if (STATE != READY) { return -1; }
374
375     /* Memory allocation for temporary variables */
376     try {
377         /* Set log file */
378         if (MODE != DEFAULT) {
379             i = 0;
380             while ((fp = fopen(out_log, "w")) == NULL) {
381                 if (!(i++ < 100)) throw ERR_WFILE;
382             }
383             switch (MODE) {
384                 case ANALYSIS:
385                     fprintf(fp, " Repeat %t Chi_di %t Chi_est %t D_di %t D_est %n");
386                     break;
387                 case CHI_SQUARE:
388                     fprintf(fp, " repeat %t X2 %t sign %n");
389                     break;
390                 case MONTE_CARLO:
391                     fprintf(fp, " repeat%t var of t %t var of e %t var of r %n");
392                     break;
393                 default:
394                     break;
395             }
396         }
397         /* End Set log file */
398
399         /* Memory allocation for temporary variables */           // NULL 初期化にもっといい方法が
ある気がする
400         if ((a = new double[MMAX]) == NULL) {
401             throw ERR_MEM;
402         }
403         if ((b = new double*[MMAX]) == NULL) {
404             throw ERR_MEM;
405         }
406         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
407             b[i] = NULL;
408         }
409         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
410             if ((b[i] = new double[NMAX]) == NULL) {
411                 throw ERR_MEM;
412             }
413         }
414         if ((c = new double*[MMAX]) == NULL) {

```

```
415         throw ERR_MEM;
416     }
417     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
418         c[i] = NULL;
419     }
420     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
421         if ((c[i] = new double[NMAX]) == NULL) {
422             throw ERR_MEM;
423         }
424     }
425     if ((d_sample = new double*[KMAX]) == NULL) {
426         throw ERR_MEM;
427     }
428     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
429         d_sample[k] = NULL;
430     }
431     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
432         if ((d_sample[k] = new double[MMAX]) == NULL) {
433             throw ERR_MEM;
434         }
435     }
436     if ((e_sample = new double*[KMAX]) == NULL) {
437         throw ERR_MEM;
438     }
439     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
440         e_sample[k] = NULL;
441     }
442     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
443         if ((e_sample[k] = new double[NMAX]) == NULL) {
444             throw ERR_MEM;
445         }
446     }
447     /* End Memory allocation for temporary variables */
448
449     /* Initialize d_sample[KMAX][MMAX]*/
450     if (MODE == MONTE_CARLO) {
451         var_i = 0;
452         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
453             var_i += (dev[i] * dev[i]);
454         }
455         for (k = 0; k < KMAX; k++) {
456             for (i = 0; i < MMAX; i++) {
457                 d_sample[k][i] = Randmize_G(di[i], dev[i]);
458             }
459         }
460     }
461     else {
462         for (k = 0; k < KMAX; k++) {
463             for (i = 0; i < MMAX; i++) {
464                 d_sample[k][i] = di[i];
465             }
466         }
467     }
468     /* END Initialize d_sample */
```

```

469
470     /* Initialize e_sample[KMAX][NMAX] */
471     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
472         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
473             e_sample[k][j] = est[j];
474         }
475     }
476     /* END Initialize e_sample */
477 }
478 catch (const Bayes_State err) {
479     STATE = err;
480 }
481 /* End Memory allocation for temporary variables */
482
483 /* Unfolding */
484 l = 0;
485 while (STATE == READY) {
486     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
487         /* Initialize a,b,c */
488         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
489             a[i] = 0;
490             for (j = 0; j < NMAX; j++) {
491                 b[i][j] = 0;
492                 c[i][j] = 0;
493             }
494         }
495         /* End Initialize */
496
497         /* Calculate a : b : c */
498         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
499             for (j = 0; j < NMAX; j++) {
500                 b[i][j] = R[i][j] * e_sample[k][j];
501                 a[i] += b[i][j];
502             }
503         }
504         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
505             for (i = 0; i < MMAX; i++) {
506                 if (a[i] != 0) {
507                     c[i][j] = d_sample[k][i] * b[i][j] / a[i];
508                 }
509                 else {
510                     c[i][j] = 0;
511                 }
512             }
513         }
514         /* End Calculate */
515
516         /* Renew Estimation est */
517         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
518             e_sample[k][j] = 0;
519             for (i = 0; i < MMAX; i++) {
520                 e_sample[k][j] += c[i][j];
521             }
522         }

```

```
523         /* End Renew Estimation */
524     }
525
526     for (j = 0; j < NMAX; j++) {
527         est[j] = 0;
528         for (k = 0; k < KMAX; k++) {
529             est[j] += e_sample[k][j];
530         }
531         est[j] /= double(KMAX);
532     }
533
534     /* Judge Continue and Analyze */
535     if (!(++l < REPEAT)) {
536         STATE = STOP;
537     }
538
539     switch (MODE) {
540     case ANALYSIS:
541     {
542         if ((l = Bayes_ANALYSIS(fp, l)) < 0) {
543             }
544         break;
545     }
546     case CHI_SQUARE:
547     {
548         Bayes_Chi_SQUARE(fp, l);
549         break;
550     }
551     case MONTE_CARLO:
552     {
553         static const int MCtype = 1;
554         var_e = 0;
555         if (MCtype == 1) {
556             for (j = 0; j < NMAX; j++) {
557                 est_var[j] = 0;
558                 for (k = 0; k < KMAX; k++) {
559                     est_var[j] += (e_sample[k][j] - est[j]) * (e_sample[k][j] - est[j]);
560                 }
561                 est_var[j] /= double(KMAX - 1);
562                 var_e += est_var[j];
563             }
564             var_r = 0;
565             for (i = 0; i < MMAX; i++) {
566                 for (j = 0; j < NMAX; j++) {
567                     var_r += R[i][j] * R[i][j] * est_var[j];
568                 }
569             }
570         }
571     else { }
572     fprintf(fp, "%07d\t%.3E\t%.3E\t%.3E\n", l, var_i, var_e, var_r);
573     if (!(var_r < var_i)) {
574         STATE = STOP;
575     }
576     break;
```



```
577     }
578     default:
579         break;
580     }
581     /* End Judge and Analyze */
582 }
583 /* End Unfolding */
584
585 if (MODE != DEFAULT && fp != NULL) {
586     fclose(fp);
587 }
588
589 if (STATE == STOP) {
590     /* Refolding */
591     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
592         dr[i] = 0;
593         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
594             dr[i] += R[i][j] * est[j];
595         }
596     }
597     /* End Refolding */
598
599     for (j = 0; j < NMAX; j++) {
600         if (LLDSUM[j] > 0) {
601             est[j] /= LLDSUM[j];
602             est_var[j] = sqrt(est_var[j]);
603             est_var[j] /= LLDSUM[j];
604         }
605         else {
606             est[j] = 0;
607             est_var[j] = 0;
608         }
609     }
610     STATE = FIN;
611 }
612 getchar();
613 /* Free Memory for temporary variables */
614 if (a != NULL) {
615     delete[] a;
616 }
617 if (b != NULL) {
618     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
619         if (b[i] != NULL) {
620             delete[] b[i];
621         }
622     }
623     delete[] b;
624 }
625 if (c != NULL) {
626     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
627         if (c[i] != NULL) {
628             delete[] c[i];
629         }
630     }
}
```

```
631     delete[] c;
632 }
633 if (d_sample != NULL) {
634     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
635         if (d_sample[k] != NULL) {
636             delete[] d_sample[k];
637         }
638     }
639     delete[] d_sample;
640 }
641 if (e_sample != NULL) {
642     for (k = 0; k < KMAX; k++) {
643         if (e_sample[k] != NULL) {
644             delete[] e_sample[k];
645         }
646     }
647     delete[] e_sample;
648 }
649 /* End Free Memory for temporary variables */
650
651 if (STATE == FIN) {
652     return l;
653 }
654 else {
655     return -1;
656 }
657 }
658
659 /* Bayes 推定計算本体 */
660 void Bayesian_Estimation::Bayes_EXE(double *xe_sample, double *xd_sample, double *xa, double **xb,
661 double **xc)
662 {
663     int i, j;
664
665     /* Initialize a,b,c */
666     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
667         xa[i] = 0;
668         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
669             xb[i][j] = 0;
670             xc[i][j] = 0;
671         }
672     }
673     /* End Initialize */
674
675     /* Calculate a : b : c */
676     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
677         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
678             xb[i][j] = R[i][j] * xe_sample[j];
679             xa[i] += xb[i][j];
680         }
681     }
682     for (j = 0; j < NMAX; j++) {
683         for (i = 0; i < MMAX; i++) {
684             if (xa[i] != 0) {
```

```

684         xc[i][j] = xd_sample[i] * xb[i][j] / xa[i];
685     }
686     else {
687         xc[i][j] = 0;
688     }
689 }
690 }
691 /* End Calculate */
692
693 /* Renew Estimation est */
694 for (j = 0; j < NMAX; j++) {
695     xe_sample[j] = 0;
696     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
697         xe_sample[j] += xc[i][j];
698     }
699 }
700 /* End Renew Estimation */
701 }
702
703 /*****
704 /* 評価スベクトル取得 */
705 int Bayesian_Estimation::Get_RESULT(double **xenergy, double **xest, double **xdi, double **xdr) {
706     int i;
707
708     if (*xenergy != NULL) {
709         return -1;
710     }
711     if ((*xenergy = new double[NMAX]) == NULL) {
712         return -1;
713     }
714     if (*xest != NULL) {
715         return -1;
716     }
717     if ((*xest = new double[NMAX]) == NULL) {
718         return -1;
719     }
720     if (*xdi != NULL) {
721         return -1;
722     }
723     if ((*xdi = new double[MMAX]) == NULL) {
724         return -1;
725     }
726     if (*xdr != NULL) {
727         return -1;
728     }
729     if ((*xdr = new double[MMAX]) == NULL) {
730         return -1;
731     }
732     for (i = 0; i < NMAX; i++) {
733         (*xenergy)[i] = E[i];
734         (*xest)[i] = est[i];
735     }
736     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
737         (*xdi)[i] = di[i];

```

```
738     (*xdr)[i] = dr[i];
739 }
740
741     return 0;
742 }
743
744 /* 評価スペクトル取得 : MONTE_CARLO MODE */
745 int Bayesian_Estimation::Get_RESULT(double **xenergy, double **xest, double **xdi, double **xdr, double
746 **xest_var) {
747     int i;
748
749     i = Get_RESULT(xenergy, xest, xdi, xdr);
750     if (i) {
751         return i;
752     }
753     if (*xest_var != NULL) {
754         return -1;
755     }
756     if ((*xest_var = new double[NMAX]) == NULL) {
757         return -1;
758     }
759     for (i = 0; i < NMAX; i++) {
760         (*xest_var)[i] = est_var[i];
761     }
762
763     return 0;
764 }
765
766 /*****
767 /*   ベイズ推定 ANALYSIS MODE */
768 int Bayesian_Estimation::Bayes_ANALYSIS(FILE *fp, int l) {
769     int i, j;
770     double chi_di = 0, chi_est = 0, D_di = 0, D_est = 0;    //分析用変数
771
772     static int l_best;
773     static double *est_best = new double[NMAX];
774     static double sign = 1e+300;
775
776     if (fp == NULL) {
777         STATE = ERR_WFILE;
778         return -1;
779     }
780     if (est_best == NULL) {
781         STATE = ERR_MEM;
782         return -1;
783     }
784
785     /*   Refolding */
786     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
787         dr[i] = 0;
788         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
789             dr[i] += R[i][j] * est[j];
790         }

```

```

791     }
792     /* End Refolding */
793
794     /* Data Analysis */
795     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
796         chi_di += ((di[i] - dr[i])*(di[i] - dr[i])) / (dev[i] * dev[i]);
797         D_di += di[i] * log(di[i] / dr[i]);
798     }
799     /* End Data Analysis */
800
801     /* Spectrum Analysis */
802     for (j = 0; j < NMAX; j++) {
803         chi_est += ((est[j] - F[j])*(est[j] - F[j]));
804         if (F[j] > 1E-300) {
805             D_est += F[j] * log(F[j]);
806             if (est[j] > 1E-300) {
807                 D_est -= F[j] * log(est[j]);
808             }
809             else {
810                 D_est -= F[j] * (-300);
811             }
812         }
813         else {
814             if (est[j] > 1E-300) {
815                 D_est -= F[j] * (300 - log(est[j]));
816             }
817             else {
818                 D_est -= 0;
819             }
820         }
821     }
822     /* End Spectrum Analysis */
823
824     fprintf(fp, "%07d ¥t %.2IE ¥t %.2IE ¥t %.2IE ¥t %.2IE ¥n", l, chi_di, chi_est, D_di, D_est);
825
826     if (D_est < sign) {
827         sign = D_est;
828         l_best = l;
829         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
830             est_best[j] = est[j];
831         }
832     }
833     if (!(l < REPEAT)) {
834         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
835             est[j] = est_best[j];
836         }
837     }
838     return l_best;
839 }
840
841 /*****
842 /*   ベイズ推定 繰り返し終了判定   Chi_SQUARE */
843 void Bayesian_Estimation::Bayes_Chi_SQUARE(FILE *fp, int l) {
844     int i, j;

```

```
845     double log10_rep = 0, log10_chi = 0, chi = 0;
846     double alpha = 0, beta = 0, sign = 0;
847     static double sx_1 = 0, sy_1 = 0, sx_2 = 0, sxy = 0;
848
849     if (fp == NULL) {
850         STATE = ERR_WFILE;
851         return;
852     }
853
854     /* Refolding */
855     for (i = 0; i < MMAX; i++) {
856         dr[i] = 0;
857         for (j = 0; j < NMAX; j++) {
858             dr[i] += R[i][j] * est[j];
859         }
860         chi += ((di[i] - dr[i])*(di[i] - dr[i])) / (dev[i] * dev[i]);
861     }
862     /* End Refolding */
863
864     /* Calculate least square line */
865     if (1) { // もっといい方法ないかな
866         log10_rep = log10((double)l);
867         log10_chi = log10(chi);
868         sx_1 += log10_rep;
869         sy_1 += log10_chi;
870         sx_2 += log10_rep * log10_rep;
871         sxy += log10_rep * log10_chi;
872         alpha = (l * sxy - sx_1 * sy_1) / (l * sx_2 - sx_1 * sx_1);
873         beta = (sx_2 * sy_1 - sxy * sx_1) / (l * sx_2 - sx_1 * sx_1);
874         sign = (log10((double)MMAX * bias) - beta) / alpha;
875     }
876     /* End Calculate */
877
878     fprintf(fp, "%07d %t %.5IE %t %.5IE %n", l, chi, sign);
879     if (log10_rep > sign) {
880         STATE = STOP;
881     }
882     return;
883 }
884
885 /*****
886 /*   ベイズ推定   MONTE_CARLO */
887 int Bayesian_Estimation::Bayes_MONTE_CARLO(void) {
888     return 0;
889 }
890
891 /*****
892 /*   正規分布型乱数 -- ボックス・ミュラー法 */
893 double Bayesian_Estimation::Randmize_G(double ave, double sigma) {
894     static std::mt19937_64 engine(MC_RANDOM_SEED);
895     static std::uniform_real_distribution<double> rand_d(0.0, 1.0);
896     const double PI = 3.1415926535898;
897     double x1, x2;
898     double z1, z2;
```

```
899
900     x1 = rand_d(engine);
901     x2 = rand_d(engine);
902     z1 = sqrt(-1 * log(x1)) * sin(2 * PI * x2);
903     z1 = z1 * sigma + ave;
904     //     z2 = sqrt(-1 * log(x1)) * cos(2 * PI * x2);
905     //     z2 = z2 * sigma + ave;
906     return z1 > 0 ? z1 : 0.0;    // 負の値が得られたときは0を返す
907 }
908 /*****
909 #endif    // endif _DEBUG
```