

硼素中性子捕捉療法における
品質保証・品質管理向上のための
多重電離箱システムに関する研究

藤井 孝明

目次

第1章 緒言	1
1.1 放射線治療における硼素中性子捕捉療法の役割	1
1.2 硼素中性子捕捉療法の歴史的背景	7
1.3 硼素中性子捕捉療法のための加速器中性子源	9
1.4 硼素中性子捕捉療法における品質保証・品質管理における課題	14
1.4.1 硼素中性子捕捉療法における品質保証・品質管理	14
1.4.2 硼素中性子捕捉療法における患者への付与線量	15
1.4.3 硼素中性子捕捉療法における照射場の線量評価手法	20
1.4.4 硼素中性子捕捉療法の治療時における線量評価手法	21
1.4.5 硼素中性子捕捉療法におけるオンラインビームモニター	21
1.4.6 線量評価統合システム	22
1.5 本研究の目的	27
参考文献	29
第2章 多重電離箱システム構築のための使用電離箱の構造検討	35
2.1 諸言	35
2.2 電離箱の最適構造検討に用いた計算方法	39
2.2.1 電離箱構造	39
2.2.2 シミュレーションコード	43
2.2.3 生成電荷量の計算	45
2.2.4 本研究に用いた W 値に関するデータ	48
2.2.5 多重電離箱システムの構築対象とした中性子照射場	53
2.3 最適構造検討の計算結果	56

2.3.1	γ 線用電離箱	56
2.3.2	熱中性子用電離箱	65
2.3.3	熱外中性子用電離箱	70
2.3.4	高速中性子用電離箱	73
2.4	まとめ	76
	参考文献	79
第3章	多重電離箱システムにおける各電離箱の応答特性評価	81
3.1	諸言	81
3.2	使用電離箱および測定体系	82
3.2.1	市販電離箱	82
3.2.2	作製電離箱	82
3.2.3	測定体系	83
3.3	電離箱応答特性評価に使用した放射線源	87
3.3.1	^{60}Co γ 線照射装置	87
3.3.2	京都大学原子炉重水中性子照射設備 (KUR-HWNIF)	87
3.4	電離箱応答特性の評価方法	91
3.4.1	γ 線成分に対する応答係数の算出方法	91
3.4.2	中性子成分に対する応答係数の算出方法	97
3.4.3	γ 線変換係数および熱外・高速中性子成分分離比算出のための 計算方法	103
3.5	計算により算出された線質変換係数および中性子成分の応答比	107
3.5.1	線質変換係数	107
3.5.2	中性子成分の応答比	107
3.6	市販電離箱に対する応答特性評価	113
3.6.1	γ 線成分に対する応答特性	113
3.6.2	中性子成分に対する応答特性	113
3.7	作製電離箱に対する応答特性評価	121

3.7.1	γ線成分に対する応答特性	121
3.7.2	中性子成分に対する応答特性	121
3.8	まとめ	130
	参考文献	133
第4章	多重電離箱システムを用いたBNCT用中性子照射場における成分分離	
	評価	134
4.1	諸言	134
4.2	評価手法	136
4.2.1	KURの運転条件およびHWNIFの照射モード	136
4.2.2	電離箱取り付け体系	136
4.2.3	コリメータ出口中心と電離箱位置での線質に関するシミュレーション	139
4.2.4	ビームモニターに関するソフトウェア	143
4.3	電離箱信号測定結果	145
4.3.1	炉出力に対する線形性	145
4.3.2	4成分分離評価	147
4.4	まとめ	150
第5章	総括	151
	謝辞	154
	Appendix A	156
	Appendix B	158

第1章 緒言

1.1 放射線治療における硼素中性子捕捉療法役割

日本において、がんは1981年より死因の1位を占めており、2010年時点で年間35万人以上の国民が、がんで亡くなっている [1]。公益財団法人がん研究振興財団による報告では、男性、女性共に、およそ2人に1人が一生のうちにがんと診断され(2005年の罹患・死亡データに基づく)、男性ではおよそ4人に1人、女性ではおよそ6人に1人ががんで死亡する(2010年の死亡データに基づく)。図1.1の主要死因別年齢調整死亡率年次推移(1947~2010)が示すように、全がんの年齢調整死亡率(人口の年齢構成の影響を除いた人口10万人あたりの死亡数)は1990年代後半から緩やかに減少する傾向が見られる。一方で、がん患者数は年々増加しており、これは社会の高齢化および診断技術の発展によるものと考えられる。がん患者数は増えているが死亡率は改善されているのは、治療技術の改善や開発によるものと考えられる。しかしながら、将来的にも更に患者数の増加が予測されている昨今の状況から、がん対策は重要な国の政策の一つとされ、2007年4月にはがん対策基本法が施行された。これに基づき、高齢化に伴い増加するがん患者数増加を抑える様々な取り組みが行われている。今後も新たな治療法の開発による死亡率減少の期待が寄せられている。

がんの治療は主に、外科的切除、化学療法、放射線治療によって行われている。特に治療中および治療後の患者の生活の質(QOL)の向上という観点から、放射線治療の重要性が高まっている。例えば、2009年の1年間において新規患者数は約20万人であり、患者全体の約25%に放射線治療が行われている。今後も、放射線治療を受ける患者の割合は増加していく傾向にある。

放射線治療ではその歴史の初期の段階から、X線および γ 線といった生体に対し

て比較的透過特性に優れた光子が用いられている。光子線を用いた治療では多方向からの照射により腫瘍限局性を高めている。近年、マルチリーフコリメータの開度調整とインバースプランニングと呼ばれる逆線量計算手法によりさらに限局性を高めた治療計画を行う強度変調放射線治療 (Intensity Modulated Radiation Therapy: IMRT) なども現れており、従来の方法では十分な治療効果が期待できなかった患者に対しても、その有効性が示されている。

また、加速器により加速された陽子や原子核等の重荷電粒子を用いる粒子線治療への期待も高まっている。一般に、陽子を用いるものは陽子線治療、ヘリウム原子核以上の重さを持つ粒子を用いるものは重粒子線治療と呼ばれている [2]。粒子線治療では、物質に入射した重荷電粒子が飛程の終端部で電離作用のピークを形成するという特性を利用している。このピークはブラッグピークと言われ、ピークの生じる深さは入射した粒子のエネルギーに依存する。粒子線治療では、入射粒子のエネルギーに幅を持たせることにより、ピークに広がりを持たせた拡大ブラッグピークを形成し、病巣の深さ及び形状に応じた治療を行う。

粒子線治療は、光子線を用いた放射線治療に対して、有利な性質を有している。一つには、上記で述べた拡大ブラッグピークによる病巣への選択的なエネルギー付与が可能であることが挙げられる。また、光子線に対して抵抗性を示す疾患にも、有効性が示されている。

治療時の粒子線のエネルギーは、陽子線治療では 50 ~ 250 MeV、重粒子線治療では 50 ~ 1,000 MeV である。このため、粒子線治療には比較的大きな加速器施設が必要となる。

粒子線治療の一種に、非荷電粒子である中性子を用いる硼素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) がある。上述の放射線治療および粒子線治療では、浸潤性の高い腫瘍に対して選択性の高い治療は困難である。一方、BNCT では、硼素-10(^{10}B) と比較的エネルギーの低い中性子 (熱中性子 Thermal neutron) との (n,α) 反応を利用することで選択性の高い治療が可能である。ここで、 ^{10}B が用いられる理由は、熱中性子 (0.5 eV 以下, 最確エネルギー 0.025 eV) に対する反応断面積が約 3,840 barn と大きく、反応により比較的高い線エネルギー付与 (Linear Energy

Transfer: LET) の重荷電粒子を発生する核種だからである。図 1.2 に $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 断面積の中性子エネルギー依存性を示す。中性子エネルギーが小さいほど、断面積が大きくなることが分かる。

図 1.3 に BNCT の原理を示す。BNCT では、まず腫瘍細胞に選択的に集積する ^{10}B 化合物を患者に投与する。続いて、原子炉等で発生する中性子を患者に照射する。腫瘍細胞内に集積した ^{10}B は、主に熱中子と $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応を起こす。この核反応で生じる α 粒子及び ^7Li 核のそれぞれの飛程が細胞の大きさと同程度であることから、反応の起こった腫瘍細胞に選択的にエネルギーが付与される。なお、硼素化合物の集積については、腫瘍細胞 (Tumor cell) と正常細胞 (Normal cell) のホウ素濃度比 (T/N 比) が 3.0 以上、腫瘍内の ^{10}B 濃度が 2040 ppm 以上であることが望ましいとされている [3]。

BNCT では、深部の腫瘍を対象とする場合、熱中子よりエネルギーの高い熱外中子 Epi-thermal neutron (0.5 eV ~ 40 keV) を照射する。これは、熱外中子の体内での減速効果により生じる熱中子を利用するものである。このとき形成される熱中子分布は深さ 2 ~ 3 cm にピークを持ち、より深部に対する治療が可能となる。

現在、BNCT は、悪性脳腫瘍、悪性皮膚黒色腫、難治性頭頸部腫瘍、肺癌等の体幹部腫瘍に対して臨床研究が行われている。特に、悪性度の高い膠芽腫 (グリオブラストーマ) に対する治療法として期待されている。グリオブラストーマは極めて浸潤性の高い腫瘍であり、患者の生存期間は約 15 カ月である。有効な治療法が見つからず、BNCT 臨床の初期から対象疾患とされている [4]。大阪医科大学脳神経外科、筑波大学脳神経外科、ヘルシンキ大学腫瘍科等で BNCT 臨床研究が実施されており、その有効性が明らかになりつつある [5-7]。

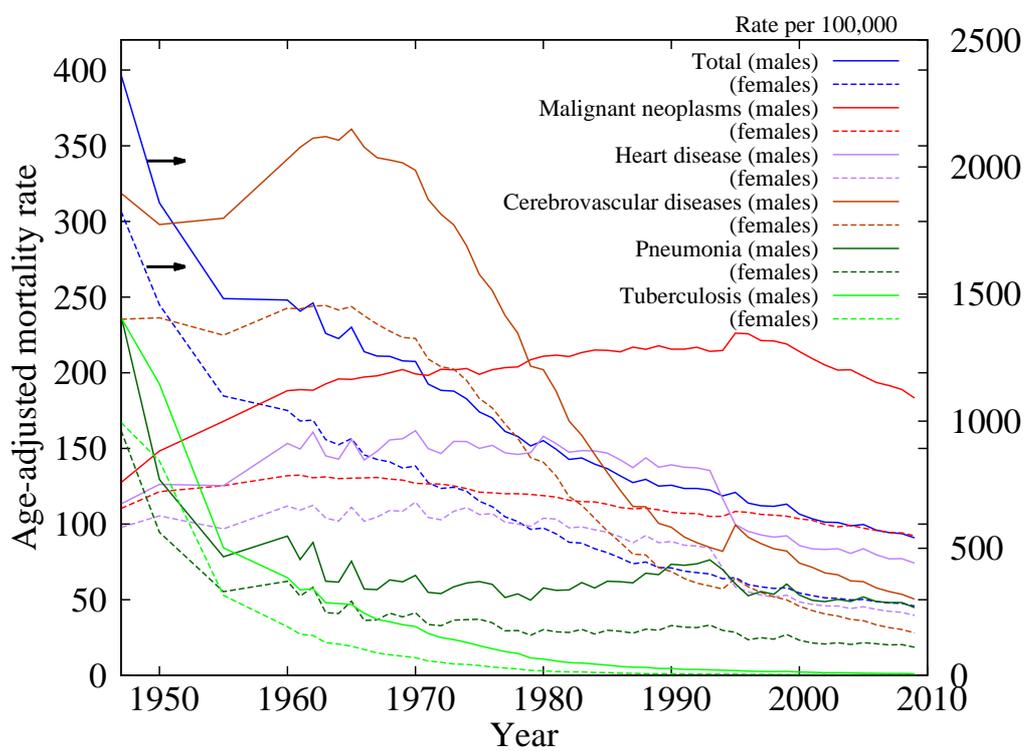


図 1.1 主要死因別年齢調整死亡率年次推移 (1947~2010)

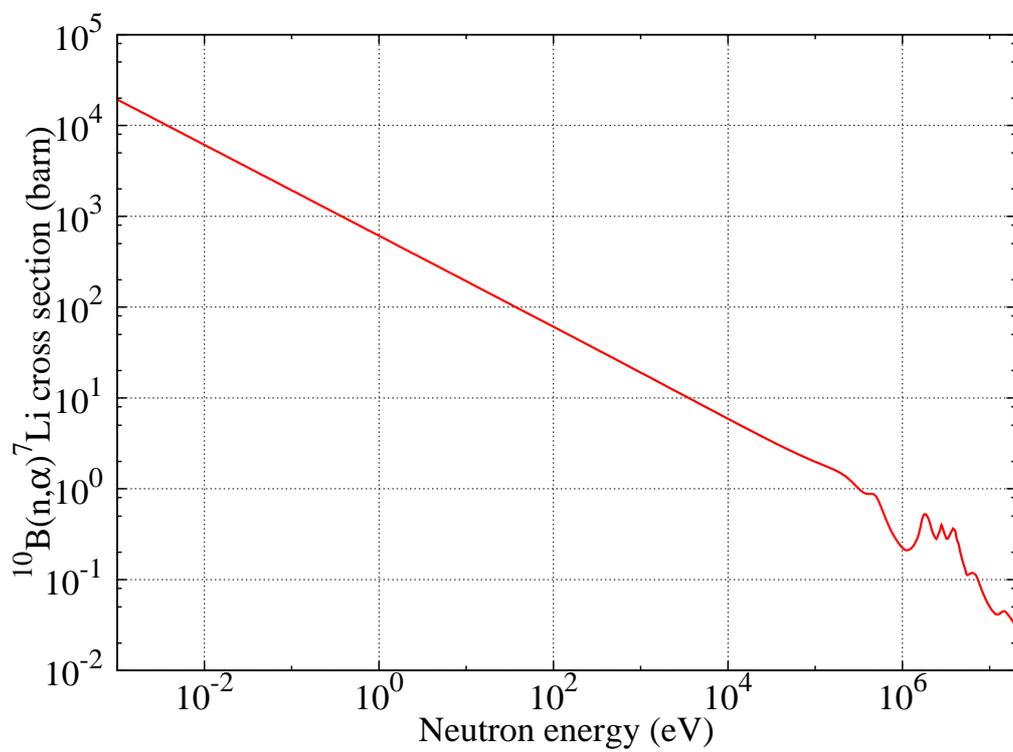


図 1.2 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 断面積の中性子エネルギー依存性

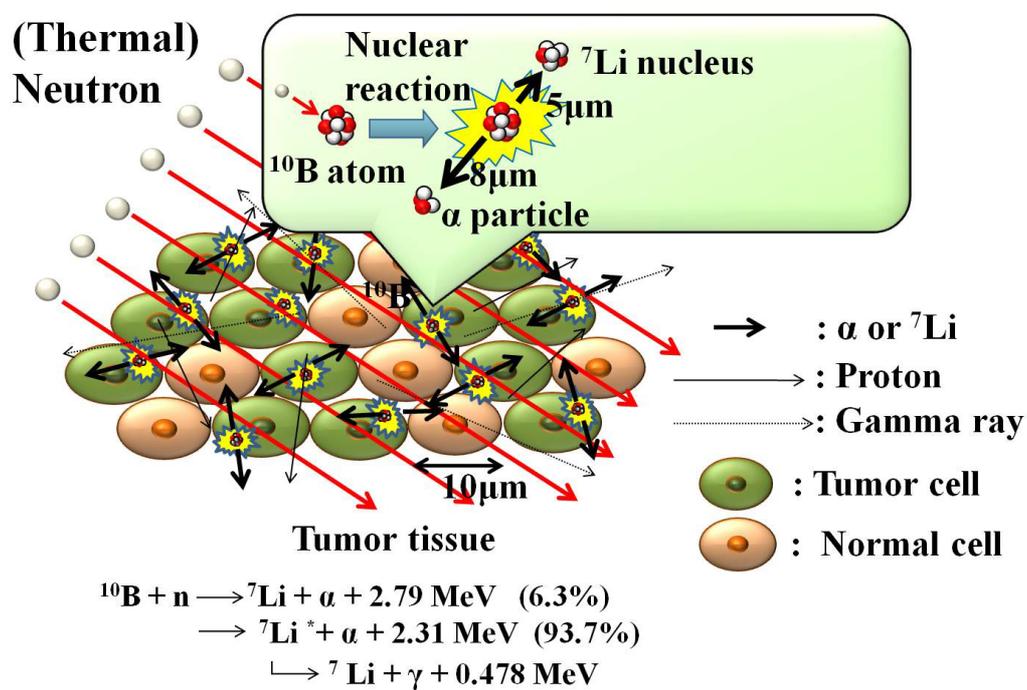


図 1.3 硼素中性子捕捉療法 (BNCT) の原理

1.2 硼素中性子捕捉療法の歴史的背景

BNCT の原理は、1932 年の J.Chadwick による中性子の発見から 4 年後の 1936 年に米国の物理学者 G.L.Locher により提唱された [8]。

米国においては 1940 年から 1950 年の間、加速器に設置された熱中性子を主体にした照射場を用いて、細胞や動物に対する基礎実験が行われた。そして、1953 年から 1961 年にかけて Brookhaven National Laboratory(BNL) 及び Massachusetts Institute of Technology(MIT) の研究用原子炉に設置された熱中性子照射場において、63 例の BNCT が実施された [9, 10]。当時は、 ^{10}B を 96% まで濃縮した硼素から生成した Borax(硼砂) を ^{10}B 化合物として使用していた。しかし、 ^{10}B 化合物の腫瘍細胞への取り込みおよび熱中性子ビームの線質の問題のため期待されるほどの成果が得られず、臨床研究は中断され、以後は基礎的な研究が主体となった [11]。

国内においては 1968 年から 1975 年にかけて、畠中らにより、日立炉 (Hitachi Training Reactor: HTR) を用いた悪性脳腫瘍に対する臨床研究が開始された [12, 13]。 ^{10}B 化合物として sodium borocaptate (BSH: $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$) が用いられ、本療法に適していることが確認された。1975 年には京都大学研究炉 (Kyoto University Reactor: KUR) に重水熱中性子照射設備 (Heavy Water Thermal Neutron Facility: HWTNI) が医療用照射場として整備され、1977 年には武蔵工業大学炉 (Musashi Institute of Technology Reactor: MuITR) が医療用に改造された [14, 15]。熱中性子は生体内での半価層が 1.6 cm 程度と小さいため、患部が深部の場合、十分な量の熱中性子を与えることができない。当時の日本における脳腫瘍 BNCT では、熱中性子の減衰を補うために、開頭術と併用したプロトコルを用いていた。

1987 年には三島らが率いる神戸大学グループにより MuITR を用いて世界で初めて悪性皮膚黒色腫 (メラノーマ) に対する BNCT が行われた [16, 17]。 ^{10}B 化合物として p-boronophenylalanine (BPA) が用いられた。1990 年からは、KUR、日本原子力研究所 (現、原子力研究開発機構) の 2 号炉 (Japan Research Reactor No2: JRR-2) において定期的に医療照射が実施されるようになった。JRR-2 での医療照射はその後、4 号炉 (Japan Research Reactor No.4: JRR-4) に引き継がれた。

日本で BNCT の臨床研究が進行している間、米国および欧州では基礎研究が継続されていた。特に、非開頭でも深在性の脳腫瘍の治療を可能にするために、熱外中性子照射場の開発が進められていた [18]。そして、1990 年代初頭に BNL と MIT に熱外中性子照射場が完成し、1994 年より熱外中性子照射による BNCT 臨床が開始された [19, 20]。

日本でも 1996 年に KUR の重水中性子照射設備 (KUR Heavy Water Neutron Irradiation Facility: KUR-HWNIF) が改修され、ほぼ純粋な熱中性子から熱外中性子までさまざまなエネルギースペクトルを有する中性子照射が可能となった [21]。また、JRR-4 でも 1998 年に、KUR-HWNIF と同様のコンセプトで改造が行われ、熱外中性子照射が可能となった [22]。2006 年に燃料低濃縮化のため KUR が、また 2007 年に反射体要素交換等のために JRR-4 が運転休止になったが、ともに 2010 年に運転が再開し、BNCT 医療照射も再開された。2012 年 12 月時点において KUR-HWNIF では脳腫瘍、頭頸部腫瘍、中皮腫、メラノーマ等に対して合計 400 例以上の BNCT が実施されている。

日本および米国以外では、1997 年にオランダのペッテン炉で熱外中性子を用いた臨床が開始された [23]。以後、フィンランド (1999) [24]、チェコ (2000) [25]、スウェーデン (2001) [26]、イタリア (2002) [27] で臨床が開始された。南米においてはアルゼンチン (2003) [28] で、アジアにおいては台湾 (2010) [29] で BNCT が開始されている。近年、BNCT の有効性の再評価に伴い、臨床研究を行う国の数は増加傾向にある。

1.3 硼素中性子捕捉療法のための加速器中性子源

BNCT 臨床に適した線質および強度を兼ね備えた中性子照射場は、これまで、研究用原子炉に設置された中性子照射設備しかなかった。しかし、臨床研究の開始された当初から原子炉に比べ運用面に優れ、病院併設も可能である加速器を用いた BNCT 用中性子照射場の実現可能性について議論されてきた。加速器を用いた BNCT 用中性子源の研究は 1980 年代初頭から欧米を中心として行われており、1994 年には第 1 回加速器中性子捕捉療法会議が開催されている [30]。

BNCT 用加速器中性子源を考える際のターゲット選択のポイントは中性子および γ 線の収率、入射荷電粒子のエネルギー、ならびにターゲット物質の熱的・化学的特性である。現在までに、核反応を用いたターゲット候補として検討された物質にはタングステン (W)、タンタル (Ta)、リチウム (Li)、ベリリウム (Be) 等がある。各ターゲットを用いて発生させる中性子のエネルギーおよび角度分布は入射荷電粒子の種類およびエネルギーに依存する。例として、表 1.1 に H.Tanaka らにより報告されたターゲットの融点、沸点、熱伝導度および 30 MeV の陽子を入射した際の中性子および γ 線収率についてまとめたものを示す [31]。各ターゲットの特徴の概要を以下に示す。

- タングステン (W), タンタル (Ta)

W や Ta は核破砕反応により中性子を発生させる。数十 MeV のエネルギーを有する陽子入射による中性子の収率が高く、融点が高いといった特徴を有することから中性子発生ターゲットとして選択されてきた [32, 33]。核破砕反応を用いることで発生中性子の角度分布は等方的になることから、90 度方向に取り出すことで、ターゲットからのエネルギーの高い中性子の治療ビームへの混入を防ぐことが出来るといった長所を有する。しかしながら、中性子発生量に対して γ 線発生量が多い。また、核破砕反応によって生成される核種の放射能は高く、長い半減期を有する。例えば、Ta に 1 日に 5 時間陽子を入射させた時の 1 cm 線量当量は Be に比べ 4 桁も高く、1 mSv/h になるまでの冷却期間は Be の 2 倍も要する [31]。

- リチウム (${}^7\text{Li}$)

加速器中性子源が検討され始めた当初から、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応 (Q 値 : -1.644 MeV, 閾値 : 1.881 MeV) の利用が、中性子の収率およびエネルギーの観点から最も有効なものとして検討されてきた [34, 35]。このターゲットでは、(1)2.5MeV 程度のエネルギーを有する陽子と厚い Li ターゲットから発生する中性子を減速して利用する方法、(2) 閾値近傍の ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応で発生するエネルギーの低い中性子を減速せずに直接利用する方法がある。前者の方法では、中性子の発生量が多く、既存の加速器で実現できる可能性を持っていたことから、広く検討されてきた。後者の方法では、減速体系を必要としないことから、システムを小型化できるという大きな長所がある。また、発生中性子の角度分布が前方方向に偏っている事を活かして、コリメータ (絞り込み装置) を小型化できる長所を持つ。しかしながら、 ${}^7\text{Li}$ の融点は 180°C と低く熱伝導率が悪いため、除熱の課題が残り、ターゲットを健全に保つことが困難である。

- ベリリウム (${}^9\text{Be}$)

${}^9\text{Be}$ ターゲットでは ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$, ${}^9\text{Be}(p,xn)$, ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ 反応を利用したものが検討されている。 ${}^9\text{Be}$ は生成中性子あたりの γ 線収率が前述の 3 種類に比べて低く、放射化生成物の半減期も短い。 ${}^9\text{Be}$ ターゲットから前方方向に発生する中性子を用いた場合、W、Ta の場合に比べて高いエネルギーの中性子が発生するため、厚い減速体が必要となる。そのため減速体厚さによる治療中性子ビーム強度の低下の課題があるが、高エネルギー中性子入射による $(n,2n)$, $(n,3n)$ といった反応を有する鉄 (Fe)、鉛 (Pb)、ビスマス (Bi) 等の材質を用いることで中性子を発生させながら、かつ非弾性散乱によって中性子エネルギーを減速させることが可能となる。ターゲット材としては Li の融点が 180°C であるのに対して、Be は 1278°C と比較的融点が高い。熱伝導率も Be の方が高く、固体ターゲットとして扱うならば、耐熱性および物性的にも Be の方が優れていると言える。

日本国内における加速器中性子照射場の研究は、主に、東北大学や京都大学原子炉実験所で行われてきた [32, 36]。現在、実機レベルの加速器中性子源のプロジェクトが、京都大学原子炉実験所、筑波大学、株式会社 CICS によってそれぞれ進められている。

京都大学原子炉実験所では、サイクロトロン加速器により発生する 30MeV 陽子とベリリウムターゲットを用いた熱外中性子照射場の検討が、住友重機械工業およびステラファーマとの共同プロジェクトとして行われており、2009 年に世界初の BNCT 臨床用加速器システムが完成した [31]。2012 年現在、治験が進められている状況である。

筑波大学では、高エネルギー研究開発機構が設計開発、三菱重工が製造した高周波四重極線形加速器 (RFQ) とアルバレ型線形加速器 (DTL) を用いた加速方式により発生する 8 MeV 陽子とベリリウムターゲットを用いた BNCT 用加速器システムのプロジェクトが進行中である [37]。

株式会社 CICS では RFQ によって加速した 2~3 MeV の陽子をリチウムに入射させて発生する中性子を減速させる方式の中性子源の開発を進めている。

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災以降、JRR-4 は運転を休止しており、東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響で研究用原子炉の新設はさらに難しくなることが予想される。従って、今後はますます BNCT 用加速器中性子照射場の必要性が高まってくると考えられる。表 1.2 に第 15 回国際中性子捕捉療法学会で報告された BNCT 用加速器中性子源の取り組みを示す [38]。

表 1.1 中性子発生ターゲットの物性値および中性子ならびに γ 線収率 [31]

Target	Melting point($^{\circ}$ C)	Boiling point($^{\circ}$ C)	Thermal conductivity(W/m/K)	Neutron yield(/s/mA)	Gamma-ray yield(/s/mA)	Gamma-ray yield per one neutron	Cross-section data
Li	180	1340	84.7	1.14×10^{14}	9.80×10^{12}	0.09	ENDF-VII
Be	1278	2970	201	1.90×10^{14}	3.35×10^{12}	0.02	ENDF-VII
Ta	3017	5458	57.5	1.27×10^{14}	1.18×10^{14}	0.93	Physics model
W	3422	5555	17.4	9.65×10^{13}	1.35×10^{14}	1.40	la150

表 1.2 検討中の BNCT 用加速器ベース中性子照射システム

Institute	Machine (Status)	Target & reaction	Beam energy (MeV)	Beam current (mA)
Budker Institute, Russia	Vacuum insulated Tandem (Ready)	Solid ${}^7\text{Li}(p,n)$	2.0	2
IPPE-Obninsk, Russia	Cascade generator KG-2.5 (Ready)	Solid ${}^7\text{Li}(p,n)$	2.3	3
Birmingham University, UK	Dynamitron (Ready)	Solid ${}^7\text{Li}(p,n)$	2.8	1
KURRI, Japan	Cyclotron (Operation)	${}^9\text{Be}(p,n)$	30	1
Soreq, Israel	RFQ-DTL (Ready)	Liquid ${}^7\text{Li}(p,n)$	4	1
Legnaro INFN, Italy	RFQ (Under construction)	${}^9\text{Be}(p,n)$	4 - 5	30
Tsukuba University, Japan	RFQ-DTL (Under construction)	${}^9\text{Be}(p,n)$	8	10
CNEA Buenos Aires, Argentina	Single ended Tandem Electrostatic Quadrupole (TESQ) (Under construction)	${}^9\text{Be}(d,n)$	1.4	30
NCCenter and CICS, Japan	RFQ (Under development)	Solid ${}^7\text{Li}(p,n)$	2.5	30
		Solid ${}^7\text{Li}(p,n)$	2.5	20

1.4 硼素中性子捕捉療法における品質保証・品質管理における課題

1.4.1 硼素中性子捕捉療法における品質保証・品質管理

1.3節で述べたように、京都大学原子炉実験所では2010年度から運転が再開されたKURでの臨床研究に加え、2012年度よりBNCT用サイクロトロン加速器での治験が開始されている。BNCTは臨床研究から正式な治療へと移行する重要な時期に来ている。BNCTのさらなる一般化を進め、治療を確実かつ有効に実施するためには、他の放射線治療と同様に治療の質を保証(品質保証、Quality Assurance: QA)し、各施設で実施されている治療の水準を揃える(品質管理、Quality Control: QC)ことが重要である。

放射線治療は、初診から治療計画、治療実施、治療中・治療後の評価など複雑で長いステップから成り立っている。そのQAを確立するためにはそれぞれのステップごとに評価項目の設定、望ましい行動(あるいは作動)の標準プロトコールと許容誤差の設定、その実行のためのマニュアル作成、実行状況の調査、許容限度を超過したときの対策、対策の効果の検討と各プロセスへのフィードバックなど複雑なステップを整備することが必要となる。通常は、これらのステップを施設ごとの状況に合わせて分析検討し、円滑に運用していくために、放射線QA委員会等を設置して独自のQAプログラムを作成して実行することが望ましいとされている [39]。

放射線治療のQA/QCの中でも、特に、照射場及び治療時の線量評価手法に関する基準は、BNCT施設の管理・維持及び治療効果を評価する上で非常に重要である。線量評価において測定されるべき値として患者体内の血中硼素濃度もあるが、本研究では照射場及び治療時の線量評価に主眼を置いて取り上げる。

放射線治療における品質保証の物理学的側面を記載したAAPM report 13には、「放射線治療における標的に対する吸収線量の決定精度(線量精度)は±5%以内でなければならない」と示されている [40]。

一般の光子及び電子を用いた放射線治療では評価対象が光子または電子であるの

に対し、BNCT では中性子および γ 線が評価対象となる。特に、中性子に関しては、エネルギーが0.5 eV 以下の熱中性子 (thermal neutron)、0.5 eV 以上 40 keV 未満の熱外中性子 (epi-thermal neutron)、そして、40 keV 以上の高速中性子 (fast neutron) の3成分に分類して評価できる。

中性子に γ 線を加えた4成分の生体内での物理学的・生物学的特性は異なり、生体構成物質と起こす相互作用ならびにそれにより発生する二次放射線および粒子線も異なる。そのため、これら4成分の混在を加味した線量測定が望まれている。図1.4に T.E.Blue *et al.* により報告された、中性子エネルギーに対する生物学的効果比 (RBE) 依存性を示す [41]。

さらに、中性子測定の困難さとその不確かさにより、BNCT における品質保証・品質管理は一般の放射線治療と同様に規定することは難しい。以上の理由より、BNCT に特化した QA/QC に関する独自の標準プロトコールの作成が求められている。原子炉中性子照射場と加速器中性子照射場では、QA/QC のチェック項目の名称等は異なる可能性はあるが、内容自体は同様なものが実施されると考えられる。

1.4.2 硼素中性子捕捉療法における患者への付与線量

BNCT の中性子照射によって患者に付与される総線量を評価するためには、各吸収線量値に組織毎の RBE を乗じた線量を求め、これらを加算して等価線量 (Equivalent Dose: ED) を求める。等価線量の単位としては“Gy-Eq” が用いられている。等価線量は、BNCT による線量と X 線治療等の他の放射線治療との線量比較の指標であり、これを用いることにより BNCT の治療効果を評価することができる。 ^{10}B に起因する硼素線量の荷重係数は、一般的な RBE の概念とは異なる CBE (Compound biological effective factor) として区別されている。これは硼素化合物の細胞内微小分布をはじめとした硼素化合物の特性に左右されるためである。CBE は、腫瘍組織、正常組織に対してそれぞれ異なり、さらに化合物によっても異なった値となる。BNCT における等価線量を求める式を以下に示す。

$$ED(\text{Gy-Eq}) = CB \cdot D_{B,ppm} \times CBE_{B,ppm} + D_N \times RBE_N + D_H \times RBE_H + D_\gamma \times RBE_\gamma \quad (1.1)$$

CB は ^{10}B 濃度 (ppm)、D は物理学的吸収線量でありそれぞれ以下のように表される。

- (1) $D_{B,ppm}$: 熱中性子と硼素との捕獲反応 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ による ^{10}B 濃度 (ppm) 当たりの吸収線量 (硼素線量)
- (2) D_N : 熱中性子と窒素との捕獲反応 $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ による高 LET 陽子による吸収線量 (窒素線量)
- (3) D_H : 高速中性子と生体構成元素 (主に水素) の原子核との反応により与えられる吸収線量 (水素線量)
- (4) D_γ : 生体中の $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ 反応と入射ビームに混在する γ 線による吸収線量 (γ 線線量)

$CBE_{B,ppm}$ 、 RBE_N 、 RBE_H 、 RBE_γ はそれぞれ、硼素、窒素、水素、 γ 線吸収線量に対する CBE、RBE である。中性子と生体中の水素および窒素との反応に起因する吸収線量 (D_H , D_N) の RBE は 2.5 - 3.0 の値が用いられている。 RBE_γ は 1.0 の値を用いている。図 1.5 に典型的な脳腫瘍に対する、BNCT 時の中心軸上の正常脳における線量分布を示す。BPA 使用時、 ^{10}B 濃度は 25 ppm、CBE は 1.35、 ^{10}B 濃度の正常組織 (=血液) に対する腫瘍比である T(Tumor)/N(Normal) 比は 3.5、正常脳線量ピークを 13 Gy-Eq として規格化している。図中の”BPA” は硼素線量に CBE および硼素濃度を掛けたもの、”Nitrogen” は熱中性子による線量 (窒素線量に RBE を掛けたもの)、”Hydrogen” は高速中性子による線量 (水素線量に RBE を掛けたもの)、”Gamma ray” は γ 線線量となる。ビーム中の熱中性子および高速中性子成分が増加すると皮膚線量が増加し、表面からピーク深さでの等価線量に影響を与える。また、 γ 線成分が増加すると深さ方向全体にわたりバックグラウンド線量が増加する。

このようなことから、線量評価精度を高めるためには、ビーム中の4成分の特性評価が重要である。

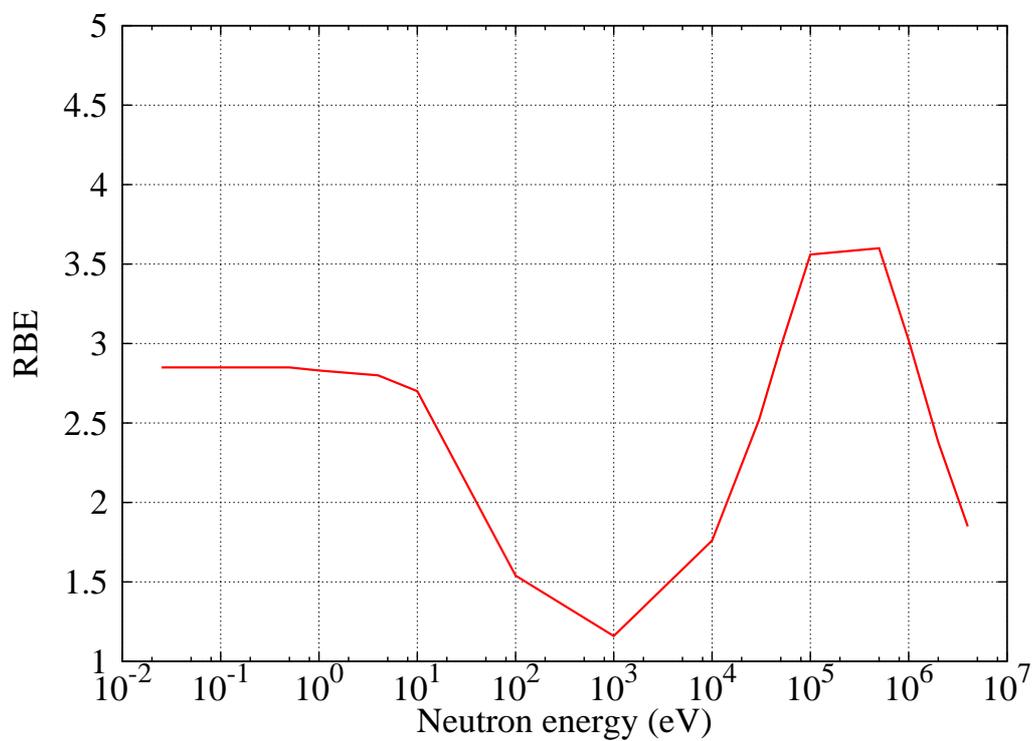


図 1.4 生物学的効果比の中性子エネルギー依存性 [41]

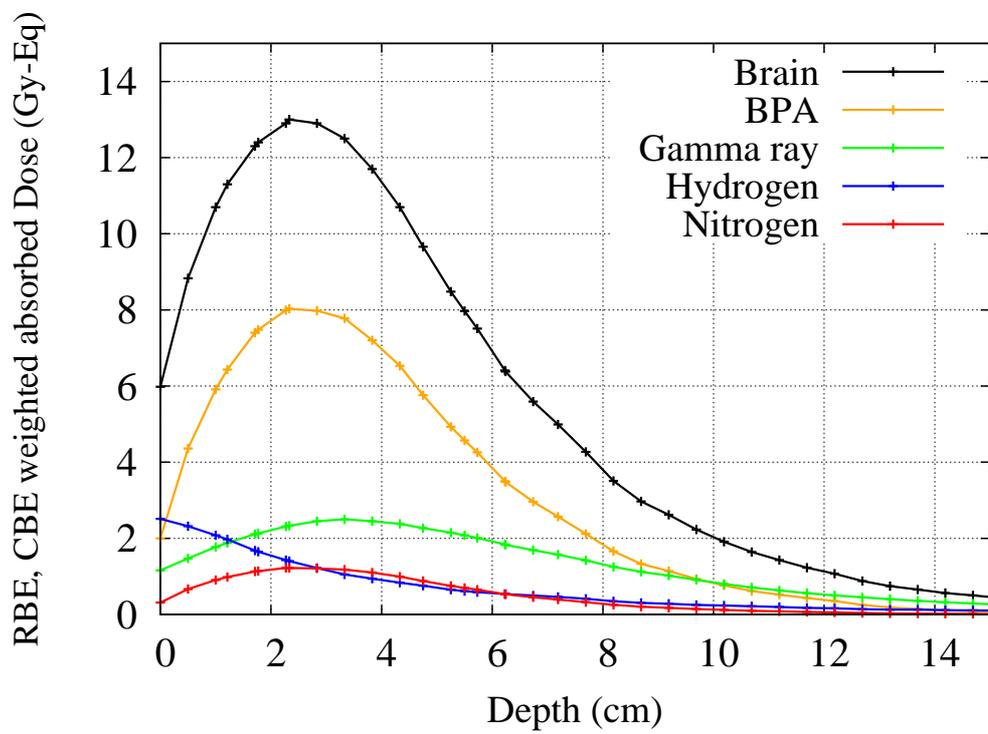


図 1.5 典型的な脳腫瘍に対する BNCT 時の中心軸上の正常脳における線量分布

1.4.3 硼素中性子捕捉療法における照射場の線量評価手法

γ 線と中性子の混在場における各線量を測定する手法として対電離箱法が広く用いられている [42]。この手法では中性子に感度を持たない (もしくは極めて低い感度を持つ) 電離箱および中性子ならびに γ 線に感度を持つ電離箱を用いて γ 線成分、中性子成分の線量を分離評価する。以下にその分離評価式を示す。

$$\begin{aligned}C_U &= h_U D_\gamma + k_U D_n \\C_T &= h_T D_\gamma + k_T D_n\end{aligned}\tag{1.2}$$

ここで下付き文字 U は中性子に対して感度の低い電離箱を表し、T は γ 線・中性子両方に感度を持つ電離箱を表す。C は電離箱の読み値、D は吸収線量、h、k はそれぞれ γ 線および中性子の校正用線源 (通常は ^{60}Co からの γ 線および ^{252}Cf からの中性子) に対する感度比である。前者の電離箱には電子密度の近い壁材と充填ガスの組み合わせとして、グラファイト壁二酸化炭素ガス充填またはマグネシウム壁アルゴンガス充填の電離箱が、後者には人体組成を模擬した元素組成値を有する組織等価プラスチック壁組織等価ガス充填の電離箱が用いられることが多い。

対電離箱法では、評価される中性子成分は主に高速中性子の寄与であり、より低エネルギーの中性子を用いる BNCT 用照射場の線量評価ではさらに熱中性子成分の評価も必要となる。そこで、熱中性子成分の評価を含めた線量測定法として以下の式が考案された [43]。

$$\begin{aligned}C_U &= h_U D_\gamma + k_U D_n + k'_U k_f \phi \\C_T &= h_T D_\gamma + k_T D_n + k'_T k_f \phi\end{aligned}\tag{1.3}$$

ここで k'_U 、 k'_T は校正用線源に対する混在場中の熱中性子成分の読み値の比である。 k_f は熱中性子に対するカーマファクター、 ϕ は熱中性子フルエンスである。BNCT の QA では上式を用いて照射場の線量測定を行い、ビームの線質を確認する。

1.4.4 硼素中性子捕捉療法の治療時における線量評価手法

現在、KUR-HWNIF での BNCT 時における患者への照射時間は、事前線量計画により得られた線量分布データを、当日の患者の ^{10}B 濃度と入射中性子ビーム強度を補正することにより、決定されている。 ^{10}B 濃度については、患者から採取した血液からの即発 γ 線を測定することで評価している。入射中性子ビーム強度については、患者の皮膚表面に張り付けた金属線の放射化量を測定することで評価している。金属線は照射開始から 5~10 分後に引き抜かれ、即座にそれらの放射化量を測定し、中性子フラックスを算出し、目標照射線量に応じた照射時間を決定する。KUR では、金 (^{197}Au) およびマンガン (^{55}Mn) を用いている。参考データとして、 γ 線線量を確認するために、熱ルミネッセンス線量計 (TLD) を患者皮膚表面に張り付けている。

1.4.5 硼素中性子捕捉療法におけるオンラインビームモニター

放射化法による評価は照射開始後 5~10 分間の積分的評価であり、高速中性子および γ 線に関する評価は行われていない。特に原子炉を用いた BNCT 設備では、燃料の配置が随時変更され、それにより BNCT 用照射場で得られる中性子ビームの強度および線質が影響を受けることがある [43]。より質の高い治療を実現するためには、本手法に加えてビーム中に混在する 4 成分 (熱中性子成分、熱外中性子成分、高速中性子成分、 γ 線成分) を対象としたリアルタイム線量率評価手法の構築が望まれている。そこで、オンラインビームモニターの検討が行われている。

各国の BNCT 用照射設備で用いられているビームモニター用検出器に関して、表 1.3 に中性子成分に対するもの、表 1.4 に γ 線成分に対するもの、表 1.5 に各施設でモニターされている測定項目を示す。原子炉を用いた BNCT 照射場では中性子測定用にはその感度の高さから核分裂電離箱が、 γ 線測定用には GM 管もしくは電離箱が一般に使用されている。

1.4.6 線量評価統合システム

現在、京都大学原子炉実験所では BNCT 用中性子照射場の QA/QC の一環として、BNCT 照射時の患者に関する線量を総合的に評価するためのシステムである「線量評価統合システム」を提案している [44]。線量評価統合システムにより照射ビームの特性から腫瘍部位の硼素濃度測定までの一貫した線量評価を行うことが計画されている。図 1.6 に線量評価統合システムの概要を示す。本システムは、4つのシステムから構成されている。

- (1) 体内線量評価システム
- (2) 中性子及び γ 線に関するビームモニターシステム
- (3) 位置固定装置を含む γ 線テレスコープシステム
- (4) 患者位置確認システム

(1) に関しては現在、治療計画ソフト”SERA”を用いている [45]。(2) では、次章で述べる多重電離箱システムと呼ばれる測定体系によりビーム中の混在成分を含めた照射ビーム特性の安定性を評価する。このシステムにより、ビームの照射特性の公称値からのずれ及び安定性を治療時に評価し、事前の線量計画で得られた結果を補正し、線量評価を行う。(3) では、患者位置確認の手間及び BSH、BPA の同時投与に関する問題を解決するために γ 線テレスコープシステムを用いる。テレスコープシステムには2つのユニット、一つは腫瘍部位に焦点を当てたもの、もう一つは正常部位に焦点を当てたもの、が用意されている。各ユニットは高純度ゲルマニウム半導体検出器、視野調整装置を含めたコリメータシステム、位置固定・視野確認システムから構成され、 ^{10}B と中性子との反応で発生する即発 γ 線を照射室外で逐次測定して各部位の硼素濃度を評価する。(4) では CCD カメラ等を用いて照射中の患者の患部近傍および全身の動きおよび状況を観察する。

表 1.3 諸外国の BNCT グループにおけるビームモニターに関する測定体系 (中性子)

Institute	No. of detectors	Type	Position	Application for clinical study
FiR 1, VTT, Espoo [43]	4	2 × ²³⁵ U fission chambers in plastic 2 × ²³⁵ U fission chambers in Cd	On bismuth gamma shield	Yes - none observed
Petten [43]	2	²³⁵ U fission chambers in Cd	After shutter, 50 cm from exit	N/A
BNL ^a [43]	2	2 × ²³⁵ U fission chambers in Cd	after Bi shield, before patient collimator	non - perturbable
Harvard/MIT (M67 beam) [43]	4	2 × ²³⁵ U fission chambers in Li caps 1 × ²³⁵ U fission chamber bare 1 × ³ He ionization chamber	Before beam aperture	Yes
Rež [43]	2	2 × ²³⁵ U fission chambers bare 2 × ²³⁵ U fission chambers in 1 mm Cd	In beam aperture	Yes - none observed
Birmingham [43]	3	²³⁵ U fission chambers in Cd	Before beam aperture	Yes ^b
THOR [46]	3	2 × ²³⁵ U fission chambers in Cd ²³⁵ U fission chambers in B ₄ C	Before beam aperture	N/A
JRR 4 [47]	1	Plastic scintillator + Optical fiber	Patient surface	Yes

^aAt BNL, beam monitors are only an indication of reactor power, not really for dosimetry

^bThe data for Birmingham is related to MCNP simulations

表 1.4 諸外国の BNCT グループにおけるビームモニターに関する測定体系 (γ 線)

Institute	No. of detectors	Type	Position	Application for clinical study
FiR 1, VTT, Espoo [43]	1	N ₂ - filled ionisation chamber	On bismuth gamma shield	N/A
Petten [43]	2	GM tubes	After shutter, 50 cm from exit	N/A
BNL [43]	0	None	-	-
Harvard/MIT (M67 beam) [43]	1	Ar ionisation chamber	Before beam aperture	Yes - insensitive
Rež [43]	2	GM tubes	In beam aperture	Yes - none observed
Birmingham [43]	1	ionization chamber	Before beam aperture	Not yet
THOR [46]	1	ionization chamber	Before beam aperture	N/A
JRR 4 [47]	1	Plastic scintillator painted by ⁶ LiF + Optical fiber	Patient surface	Yes

表 1.5 諸外国の BNCT グループにおけるビームモニター測定項目

Center	Neutron field intensity (Y/N)	Gamma ray field Intensity (Y/N)	Neutron Energy (Y/N)	Neutron uniformity (Y/N)	Neutron/gamma ratio (Y/N)
FiR 1, VTT, Espoo [43]	Y	Y	Y	Y	Y
Petten [43]	Y	N	N	Y	Y
BNL [43]	Y	N	N	Y($\pm 10\%$)	N
Harvard/MIT (M67 beam) [43]	Y	Y	Y	Y	Y
Rež [43]	Y	Y	Y	Y	Y
Birmingham [43]	Y	Y	N	Y	N/A
THOR [46]	Y	Y	N	Y	N/A
JRR 4 [47]	Y	Y	N	N	N/A

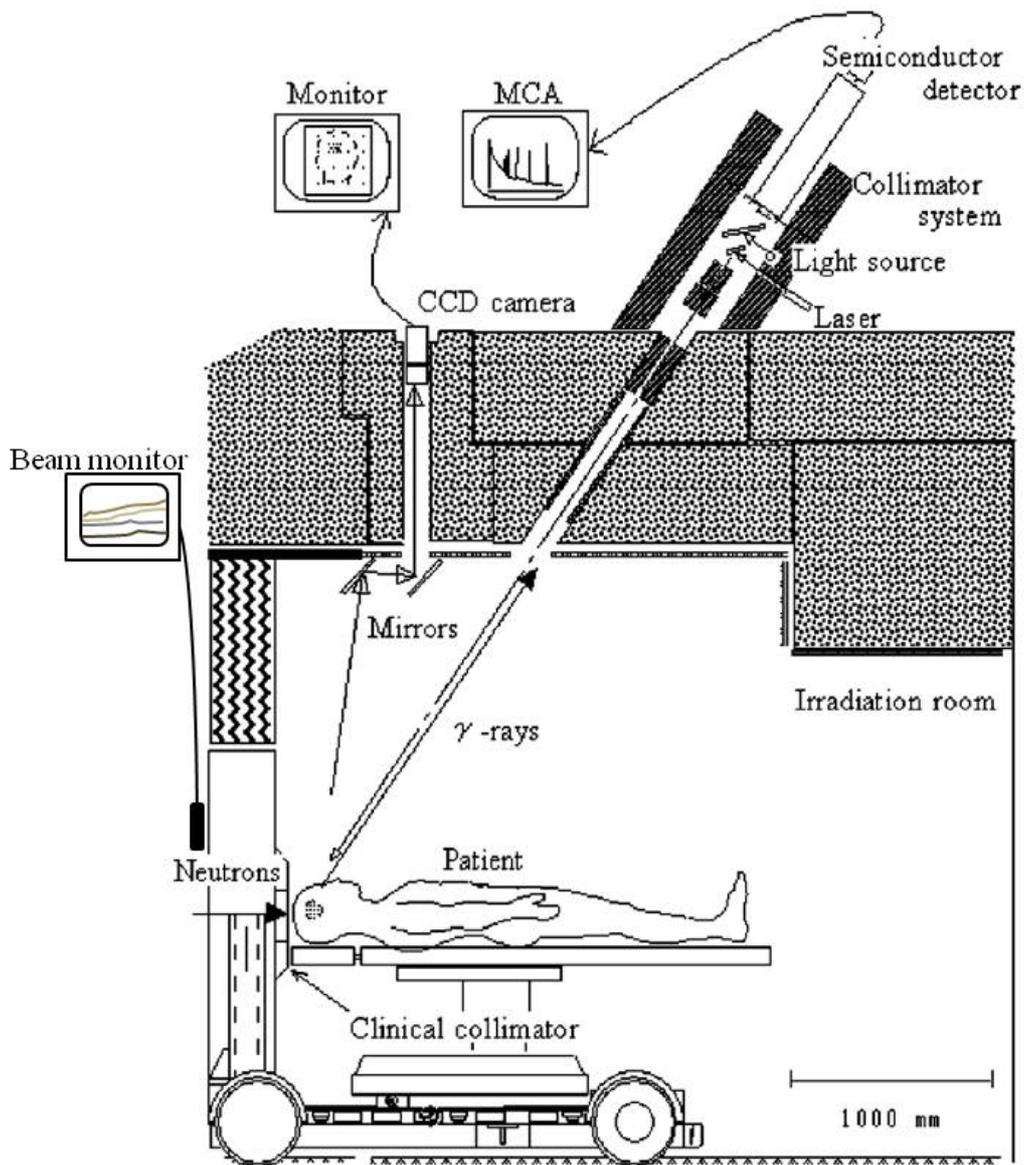


図 1.6 線量評価統合システムの概要

1.5 本研究の目的

BNCT では、線量評価精度を向上させるために医療照射中の中性子ビーム特性をリアルタイムに評価できるビームモニターの導入が望まれている。京都大学原子炉実験所に導入される多重電離箱システムは、治療時においてビーム中4成分の特性評価を可能にするものである。加えて、本システムを設置した複数の照射場間で、ビーム中4成分に関する相互比較を実施することで線量評価の整合性を確認することもできる。このように BNCT 照射場で QA/QC 標準ツールとして使用でき得るビームモニターシステムの構築は世界でも初めてである。多重電離箱システムの構築によって線量評価精度を高めることができ、さらにそれを組み込んだ線量評価統合システムは BNCT の QA/QC の向上に大きく貢献することが期待できる。本研究では、多重電離箱システムについて、以下の手順に従い検討を行った。

(1) 多重電離箱システム構築のための使用電離箱の構造検討 (第2章)

検討するシステムでは各成分の検出器として電離箱を用いる。中性子の測定に関しては、その応答は壁材、壁厚、充填ガスの組み合わせによる検出器構造に大きく依存する。そのため、対象とする成分に特化した応答を示すように各電離箱を構成する必要がある。本章ではシステムに使用する電離箱作製のために、各成分の測定に最適な電離箱構造についてシミュレーション手法を用いて検討した。シミュレーションでは壁材およびガスで構成される電離箱モデルを仮定し、電離箱応答のガスならびに壁の材質および厚さに対する依存性等を調べた。

また、得られた計算結果に基づいて選択された電離箱構造に対して、中性子照射場の公称値を用いて、治療用熱外中性子ビームに対する測定対象成分の応答割合を算出し、次章の電離箱応答特性実験に用いる電離箱のための参考値とした。

(2) 多重電離箱システムにおける各電離箱の応答特性評価 (第3章)

第2章の検討により選定された4成分検出用電離箱に対して応答特性評価実験を実施した。本研究では市販電離箱および独自に製作した電離箱を対象に、各成分に

対する応答係数を求めた。通常、中性子照射場には γ 線が混在している。また、各中性子成分について単色の中性子ビームを得ることは困難である。そのため、4成分各々を電離箱に照射し、その応答を評価することは困難である。第3章では、電離箱の応答特性評価のための評価手法および手順について紹介する。本評価手法を用いて各電離箱の4成分の応答係数 k を決定し、電離箱の応答特性を確認した。

(3) 多重電離箱システムを用いた BNCT 用中性子照射場における成分分離評価 (第4章)

第3章で決定された応答係数を用いて、実際の熱外中性子照射場のコリメータ辺縁部に各電離箱を配置し、熱外中性子ビーム照射時に得られる信号から成分の分離評価を行った。また、システムの安定性等についても検討してシステムの動作特性を確認した。

参考文献

- [1] がんの統計'11, 「がんの統計」編集委員会, 財団法人がん研究振興財団 (2011).
http://ganjoho.jp/public/statistics/backnumber/2011_jp.html, (参照 2012-10-21).
- [2] 辻井博彦, 赤城卓, 赤羽恵一, 上蓑義朋, 大野達也, 金井達明, 河野良介, 榮武二, 清水勝一, 浦壁恵理子, 中山隆, 中村尚司, 西尾禎治, 西澤かな枝, 西澤邦秀, 福田茂一, 松藤成弘, 山下晴男, 米内俊祐, 重粒子線治療等新技术の医療応用に係る放射線防護のあり方に関する研究, 医学物理, Vol. 28, No.4, 134-141, (2009).
- [3] ”BNCT 基礎から臨床応用まで”, 財団法人 医用原子力技術研究振興財団 (2011).
- [4] D.N.Slatkin, A history of boron neutron capture therapy of brain tumours, *Brain*, **114**, 1609-1629 (1991).
- [5] S.Kawabata, S.Miyatake *et al.*, “ Survival benefit from boron neutron capture therapy for the newly diagnosed glioblastoma patients ”, *Appl. Radiat. Isot.* **67**, S15-S18 (2009).
- [6] T.Yamamoto, K.Nakai *et al.*, “ Boron neutron capture therapy for newly diagnosed glioblastoma ”, *Radiother Oncol.* **91**, 80-84 (2009).
- [7] K.Nakai, T.Yamamoto *et al.*, “ Boron neutron capture therapy combined with fractionated photon irradiation for glioblastoma: A recursive partitioning analysis of BNCT patients ”, *Appl. Radiat. Isot.* **69**, 1790-1792 (2011).
- [8] G.L.Locher, ”Biological effects and therapeutic possibilities of neutrons”, *Am. J. Roentgenol. Radium Ther.* **36**, 1-13(1936).
- [9] L.E.Farr, W.H.Sweet, J.S.Robertson, C.G.Foster, H.B.Locksley, D.L.Sutherland, M.L.Mendesohn and E.E.Stickley, ” Neutron Capture Therapy with Boron in

- the Treatment of Glioblastoma Multiforme” . *Am. J. Roentgenol.* **71**, 279-293 (1954).
- [10] G.L.Brownell, R.G.Zamenhof *et al.*, *Therapy in Nuclear Medicine.* 205-222. Grune & Stratton. New York (1978).
- [11] W.H.Sweet, Early history of development of boron neutron capture therapy of tumors, *J. Neurooncol.* **33**, 19-26 (1997).
- [12] H.Hatanaka, K.Amano *et al.*, ” Boron-Neutron Capture Therapy in Relation to Immunotherapy ” , *Acta Neurochirurgica.* **42**, 57-72 (1978).
- [13] H.Hatanaka, Chapter I. Introduction. In Boron-neutron capture therapy for tumors. Ed by H.Hatanaka Niigata:Nishimura; 1-28 (1986).
- [14] K.Kanda, T.Kobayashi, K.Akuta, and K.Ono, ”Experiences of BNCT using KUR” , advances in Neutron Capture Therapy, *Eds. A.H.Soloway et al.*, Plenum Press, New York, 683-687(1993).
- [15] O.Aizawa, K.Kanda, T.Nozaki, and T.Matsumoto, ”Remodeling and dosimetry on the neutron irradiation facility of Musashi Institute of Technology Reactor for boron neutron capture therapy” , *Nucl. Technol.* **48**, 150-163(1980).
- [16] Y.Mishima, M.Ichihashi *et al.*, ”Boron -Neutron Capture Therapy for malignant melanoma: melanogenesis-seeking ^{10}B molecule-melanoma cell interaction from in vitro to first clinical trial ” , *Pigment Cell Res.* Jul-Aug;2(4), 226-234 (1989).
- [17] Y.Mishima, C.Honada, M.Ichihashi *et al.*, Treatment of malignant melanoma by single neutron capture treatment with melanoma-seeking ^{10}B -Compound. *Lancet* :383-389 (1989).
- [18] R.M.Brugger and T.J.Less, “ Intermediate Energy Neutron Beams for Neutron Capture Therapy a Progress Report ” , H. Hatanaka(ed). “ Boron Neutron

- Capture Therapy for Brain Tumors ” . Nishimura Co., Niigata, Japan, 349-379 (1986).
- [19] H.B.Liu, R.M.Brugger, and D.C.Rorer, “ Enhancement of the epithermal neutron beam at the Brookhaven Medical Research Reactor ” , *Advances in Neutron Capture Therapy*, Eds. A.H.Soloway *et al.*, Plenum Press, New York, 75-79 (1993).
- [20] R.D.Rogus, O.K.Harling *et al.*, “ Mixed field dosimetry of epithermal neutron beams for boron neutron capture therapy at the MITR-II research reactor ” , *Med. Phys.* **21**(10) 1611-1625 (1994).
- [21] Y.Sakurai and T.Kobayashi, ”Characteristics of the KUR Heavy Water Neutron Irradiation Facility as a neutron irradiation field with variable energy spectra ” . *Nucl. Instr. Meth* **A453**, 569-596 (2000).
- [22] K.Yokoo, T.Yamada *et al.*, “ A new medical irradiation facility at JRR-4 ” , *Advances in Neutron Capture Therapy*, Vol. I, Eds. B. Larsson, Elsevier, Amsterdam, 326-330 (1997).
- [23] R.L.Moss and J.Casado *et al.*, “ The completed boron neutron capture therapy facility at the HFR Petten ” , *Advances in Neutron Capture Therapy*, Vol. I, Eds. B.Larsson *et al.*, Elsevier, Amsterdam, 331-335 (1997).
- [24] S.Savolainen, I.Auterinen *et al.*, “ The Finnish boron neutron capture therapy program an overview on scientific projects ” , *Advances in Neutron Capture Therapy*, Vol. I, Eds. B.Larsson *et al.*, Elsevier, Amsterdam, 342-347 (1997).
- [25] M.Marek, L.Viererbl *et al.*, “ Validation of epithermal neutron beam at LVR-15 ” , Program & Abstracts of the Ninth International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer, Kyoto University Research Reactor Institute, 41-42 (2000).

- [26] K.Sold, J.Kierkegaard *et al.*, “ The Swedish facility for boron neutron capture therapy ” , Program & Abstracts of the Ninth International Symposium on Neutron Capture Therapy for Cancer, Kyoto University Research Reactor Institute, 39-40 (2000).
- [27] T.Pinelli, A.Zonta *et al.*, ” TAOOrMINA: From the first Idea to the Application to the Human Liver ” , Research and Development in Neutron Capture Therapy, 1065-1072 (2002).
- [28] S.J.González, M.R.Bonomi *et al.*, “ First BNCT treatment of a skin melanoma in Argentina: dosimetric analysis and clinical outcome ” , *Appl. Radiat. Isot.* **61**(5) 1101-1105 (2004).
- [29] L.W.Wang, S.J.Wang *et al.*, ”BNCT for locally recurrent head and neck cancer: Preliminary clinical experience from a phase I/II trial at Tsing Hua Open-Pool Reactor”, *Appl. Radiat. Isot.* **69**, 1803-1806 (2011).
- [30] Proceedings of the First International Workshop on Accelerator-based Neutron Sources for Boron Neutron Capture Therapy, September 11-14, Jackson, WY, Idaho National Engineering Laboratory, Report CONF-940976 (1994).
- [31] H.Tanaka,Y.Sakurai *et al.*, ”Characteristics comparison between a cyclotron based neutron source and KUR-HWNIF for boron neutron capture therapy”. *Nucl.Instr. Meth.* **B267**, 1970-1977 (2009).
- [32] S.Yonai,T.Aoki *et al.*, ”Feasibility Study on Epithermal neutron field for Cyclotron-Based Boron Neutron Capture Therapy”, *Med.Phys.* **30**(8), 2021-2030 (2003).
- [33] Y.Tahara, Y. Oda *et al.*, Engineering design of spallation reactor-based neutron generator for boron neutron capture therapy, *J. Nucl. Sci. Technol.* **43**(1) (2006) 9-19

- [34] T.E.Blue and J. C. Yanch, *Journal of Neuro-Oncology* **62**(2003) 19-31.
- [35] C.K.C.Wang, T.E. Blue *et al.*, *Nucl. Tech.*, **84**(1989)93-107.
- [36] T.Kobayashi, B.Gerard *et al.*, "A possibility of BNCT irradiation system using accelerators". Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan. 180-182 (2004).
- [37] H.Kumada, A.Matsumura *et al.*, "New Challenge for Advanced BNCT in University of Tsukuba", Proceedingd of 6th Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting, Taiwan, 132-136 (2011).
- [38] Program and Abstracts of 15th International Congress on Neutron Capture Therapy, Tsukuba (2012).
- [39] 西臺武弘, 放射線治療物理学, 文光堂, 373-379 (2009).
- [40] *Physical Aspects of Quality Assurance in Radiation Therapy*, AAPM report No.13, American Institute of Physics for American Association of Physicists in Medicine (AAPM) (1984).
- [41] T.E.Blue, N. Guptr and J.E.Woollard, "A calculation of the energy dependence of the RBE of neutrons", *Phys. Med. Biol.* **38**, 1693-1712 (1993).
- [42] *Neutron Dosimetry for Biology and Medicine*, ICRU report No.26, International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (1977).
- [43] H.Järvinen, W.P.Voorbraak *et al.*, "Recommendations for the Dosimetry of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)", Petten, 41-43 (2003).
- [44] Y.Sakurai, A.Marubishi and K.Ono, "The irradiation system and dose estimation joint-system for NCT wider application in Kyoto University", *Appl. Radiat. Isot.* **61**, 829-833 (2004).

- [45] D.Wessol,, M.Cohen, G.Harkin, M.Rossmeier, C.Wemple, F.Wheeler, SERA workshop lab manual. INEEL/EXT-99-00766. (1999).
- [46] Liu,Y.H., *et al.*, On-line Neutron Monitoring System of Epithermal Neutron Beam for BNCT at THOR, ICNCT-12 International Society for Neutron Capture Therapy, 413-416 (2006).
- [47] M.Ishikawa, *et al.*, Development of a wide-range paired scintillator with optical fiber neutron monitor for BNCT irradiation field study, *Nucl. Instr. Meth. A* **551**, 448-457 (2005).

第2章 多重電離箱システム構築のための の使用電離箱の構造検討

2.1 諸言

線量評価統合システムに組み込まれるビームモニターシステムには、中性子および γ 線に感度を持ち、オンライン測定が可能な検出器が使用される。その候補として、 BF_3 等の比例計数管、GM管、電離箱(核分裂型、その他)がある。比例計数管に関してはBNCT用照射場のように大強度の中性子照射場では応答が飽和するため中性子と γ 線の分別が困難である[1]。また、GM管については、デッドタイムが長いことため使用が困難という報告がある[2]。一方、核分裂電離箱は ^{235}U が含まれた壁材を用いることで γ 線と比較して高い中性子応答が得られることから、中性子ビーム測定に適している[2, 3]。しかしながら、使用には核燃料の使用許可が必要であり、今後のBNCT用加速器中性子施設の普及を考えると、取り扱いの容易な電離箱(Ionization chamber: IC)の使用が適していると考えられる。

そこで、京都大学原子炉実験所ではBNCT用照射場中に混在している熱、熱外、高速中性子ならびに γ 線の4成分の分離評価を行うため、成分に特化した応答を示す4種類の電離箱から構成される「多重電離箱システム」を提案している。本実験所では近い将来、原子炉中性子源に加え、加速器中性子源を用いた治療も並行して実施される予定である。本システムにより両施設のビーム特性の安定性を確認することで、照射場間の線量評価の整合性の保証も期待できる。

図2.1に多重電離箱システムの概要を示す。本システムはビームモニター、LANケーブル、BNCケーブル、電流計、電離箱より構成されており、照射室内で取得された検出器の信号が照射室外のビームモニター上に線量率あるいは積算線量として

表示される。図中の Thermal-IC、Epi-IC、Fast-IC、Gamma-IC はそれぞれ熱中性子用電離箱、熱外中性子用電離箱、高速中性子用電離箱、 γ 線用電離箱を示しており、各電離箱は KUR-HWNIF の輸送台車上のコリメータのビーム上流側辺縁、コリメータ中心軸から 25 cm 以内の位置に取り付けられる。コリメートされる前の中性子ビームの照射野は直径約 50 cm であることから、コリメータ辺縁部でもビーム特性を知ることができる。各電離箱から得られた信号は以下の式のように書き表すことができる。

$$\begin{aligned}
C_T &= k_{T,t} \cdot \varphi_t + k_{T,e} \cdot \varphi_e + k_{T,f} \cdot \varphi_f + k_{T,g} \cdot \varphi_g \\
C_E &= k_{E,t} \cdot \varphi_t + k_{E,e} \cdot \varphi_e + k_{E,f} \cdot \varphi_f + k_{E,g} \cdot \varphi_g \\
C_F &= k_{F,t} \cdot \varphi_t + k_{F,e} \cdot \varphi_e + k_{F,f} \cdot \varphi_f + k_{F,g} \cdot \varphi_g \\
C_G &= k_{G,t} \cdot \varphi_t + k_{G,e} \cdot \varphi_e + k_{G,f} \cdot \varphi_f + k_{G,g} \cdot \varphi_g
\end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで、 C は電離箱の電流値 (pA) を表し、 φ は各成分のフラックス ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 k は電離箱の各成分に対する応答係数 ($\text{pA}/(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$) である。添字 t, e, f, g は熱、熱外、高速中性子および γ 線の成分を表し、 T, E, F, G は各成分測定用電離箱を表す。予め各電離箱の 4 成分に対する応答係数 k が求められていれば、得られた信号 C を用いて、以下に示す 4 行 4 列の行列式を $\varphi_t, \varphi_e, \varphi_f, \varphi_g$ について解くことにより、各成分の情報を分離評価することができる。式中の逆行列は Cramer の公式を用いて解くことができる (詳細は Appendix A に記載)。

$$\begin{pmatrix} \varphi_T \\ \varphi_E \\ \varphi_F \\ \varphi_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{T,t} & k_{T,e} & k_{T,f} & k_{T,g} \\ k_{E,t} & k_{E,e} & k_{E,f} & k_{E,g} \\ k_{F,t} & k_{F,e} & k_{F,f} & k_{F,g} \\ k_{G,t} & k_{G,e} & k_{G,f} & k_{G,g} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} C_T \\ C_E \\ C_F \\ C_G \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

電流モードで測定する場合、ここで得られた $\varphi_t, \varphi_e, \varphi_f, \varphi_g$ の経時変化を監視す

ることで照射ビーム特性の安定性を評価できる。また、積算電荷から照射線量を見積もることも可能である。

構築する多重電離箱システムの達成すべき評価精度は、本システムが従来にないシステムであることから独自に設定する必要がある。本検討では、実際の照射場のフラックスと比べた場合のモニター値の許容誤差は5%以内、フラックスの平均値からのばらつきは2%以内とした。

また、KUR-HWNIF 公称値に対しての許容値を考える場合は、公称値そのものに年間を通して、測定精度と燃料配置の変更等による変動・誤差が γ 線が5%、熱中性子で15%、熱外および高速中性子で25%存在する。そのため、各成分の分離評価で得られたフラックスの許容範囲は以下のように書き表せる。本検討ではこれらの値を許容範囲として各成分を評価できるシステムの構築を目指した。

- γ 線 : 7%
- 熱中性子 : 16%
- 熱外および高速中性子 : 26%

多重電離箱システムの成分分離は、式(2.1)から分かるように、各電離箱の測定対象成分の応答係数 k が大きいほど精度の良い分離評価が可能となる。電離箱の応答特性は電離箱構造に依存し、用いる壁材質、壁厚、充填ガス種により中性子および γ 線に対するエネルギー応答特性が変化する。そこで、KUR-HWNIFの照射場を対象として多重電離箱システム構築のための電離箱構造の最適化検討を、シミュレーションを主体に行った。発生する荷電粒子のエネルギー分布にも着目し、どのような粒子が電流値に寄与しているかを調べた。

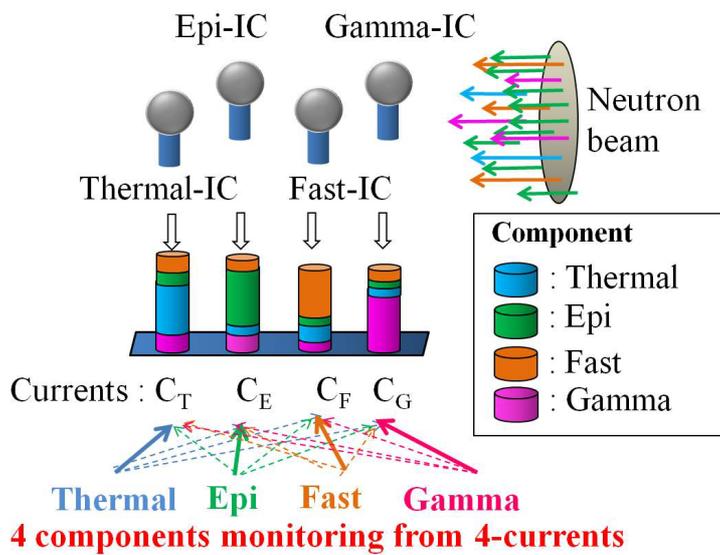
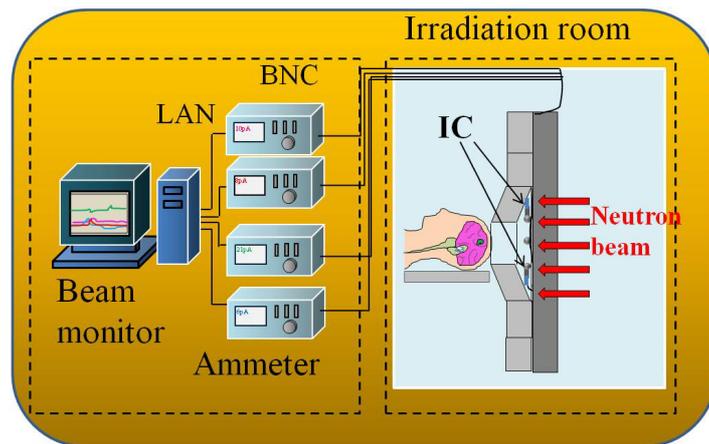


図 2.1 多重電離箱システムの概要

2.2 電離箱の最適構造検討に用いた計算方法

2.2.1 電離箱構造

BNCT用中性子照射場に設置する多重電離箱システムの電離箱の応答には、多方向からの中性子および γ 線による寄与が混在している。一般に放射線治療場の線量測定に用いられる指頭型電離箱は方向依存性が高いため、多重電離箱システムでは電離箱の壁形状は方向依存性が比較的少ない球形を採用した。電離箱の本体は有感領域2 ccのFWT社製IC-17シリーズを用いることを想定し、本体に装着する最適な壁構造および充填ガスに関する検討を行った。

検討を行った各電離箱の構造を表2.1に示す。 γ 線用電離箱には、中性子に対する応答を抑えて γ 線に対する応答を高める構造として壁材にグラファイト、マグネシウム、アルミニウム、充填ガスにアルゴン、二酸化炭素を選択した。

熱中性子用電離箱については、熱中性子と窒素との(n,p)反応による増感効果を利用して、壁材として窒化珪素、充填ガスとして窒素ガスを選択した。

熱外中性子は物質との反応断面積が比較的小さく測定が困難である。熱外中性子用電離箱については、ボナーボールの原理を参考に、壁材にポリエチレン、ガスとして窒素を選択した。熱外中性子が壁材により減速されることにより生じる熱中性子と、ガス中の窒素との(n,p)反応により、熱外中性子に対する増感効果を利用した。

L. Lüdemannらは高速中性子ビーム入射時のファントム内での熱中性子線量分布を評価するために、マグネシウム壁にアルゴンガスを充填した電離箱の内壁に天然硼素を蒸着した構造を提案している[4]。本検討でも、内壁に天然硼素の薄膜を蒸着させた壁材に関する検討も行った。薄膜の厚さについては、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応により発生する α 粒子および ^7Li 粒子の両方が通過できる厚さを基準とした。SRIMコードを用いて算出した0.84 MeVの ^7Li 粒子の飛程から1.8 μm とした[5]。

高速中性子用電離箱については、高速中性子と水素との弾性散乱による増感効果を利用して、壁材としてポリエチレン、ガスとしてメタンガスを選択した。

KUR-HWNIFでは照射室に併設されている施療室で予め患者を輸送台車上にセッティングし、施療室から照射室に繋がるレール上を輸送台車が移動することにより

患者を照射位置に導いている。照射位置において、台車上のコリメータのビーム上流側の面から炉心側のビスマス照射面までの隙間は5 cm 程度である。この隙間に取り付けられるサイズの電離箱の設計が必要となる。そのため、1 mm から10 mm の間で1 mm 間隔で最適な壁厚の検討を行った。熱外中性子電離箱のみは、壁厚による減速効果を確認するために、10 mm から50 mm の間で10 mm 間隔で最適厚さの検討を行った。また、壁材が無いガスみの状態の応答を確認するため、壁厚0 mm の状態の特性評価も行った。

本検討では壁材とガスの組み合わせおよび壁厚に着目していることから、計算では球形のモデルを使用した。図 2.2 にシミュレーションで検討した電離箱の構造を示す。

表 2.1 シミュレーションで検討した電離箱の構造と組み合わせ

	Gamma-IC	Thermal-IC	Epi-IC	Fast-IC
Wall material	Graphite / Magnesium / Aluminium	Silicon nitride	Polyethylene (with natural Boron layer)	Polyethylene
Wall density (g/cm ³)	1.8 / 1.74 / 2.7	2.7	1.12 (Natural Boron: 2.13)	1.12
Gas	Argon / Carbon dioxide	Nitrogen	Nitrogen	Methane
Gas density ($\times 10^{-3}$ g/cm ³)	1.78 / 1.99	1.25	1.25	0.72
Abbreviation	G(Ar), G(CO ₂), Mg(Ar), Mg(CO ₂), Al(Ar), Al(CO ₂)	Si ₃ N ₄ (N ₂)	Poly _B (N ₂)	Poly(CH ₄)

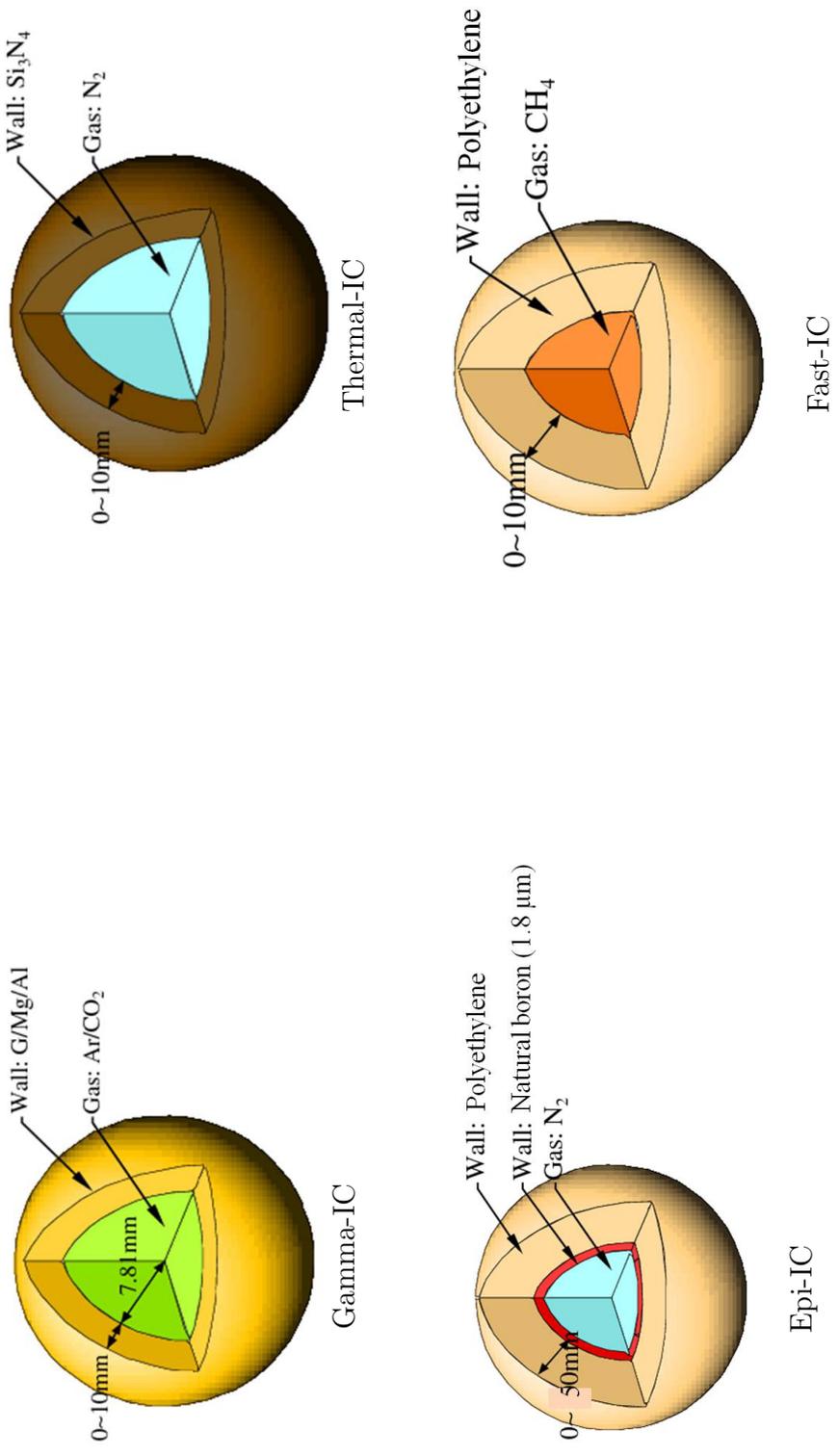


図 2.2 シミュレーションで検討した電離箱の構造の概要

2.2.2 シミュレーションコード

シミュレーションには、粒子・重イオン汎用モンテカルロコード Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS ver.2.30 を用いた。PHITS はほぼ全ての粒子と重イオン (原子核) の物質中での輸送と核反応をシミュレートできる 3 次元モンテカルロコードであり、広いエネルギー範囲を扱える。その特徴から、加速器分野、航空宇宙分野、粒子線がん治療などの医療分野などで幅広く用いられている [6, 7]。

PHITS の特徴的な機能の一つにイベントジェネレーターモードがある [8]。これは従来の輸送計算コードには含まれない新しい概念である。イベントジェネレーターとは高エネルギー核反応シミュレーションの分野では、よく使用される用語である。これは、一種の核反応モデルであるが、ひとつの物理モデルに基づいた核反応モデルである必要はなく、複数のモデルや、各種パラメータ、また、核データを用いた複合的な計算モデルとすることができる。特定の生成 2 次粒子の断面積を独立に計算するだけでなく、イベント、即ち、ひとつの核反応で生成される全ての 2 次粒子と反跳核を、エネルギー保存則、運動量保存則の制約のもとで、モンテカルロ的に生成 (ジェネレート) できる特徴を有する。

一方、MCNP 等の炉物理などで用いられる従来のモンテカルロコードは、Boltzmann 方程式を基礎としている [9]。この方程式は、位相空間における一体の分布関数の時間発展を記述するもので、例えば、座標や運動量空間での中性子の確率分布を与える方程式である。従って、数値解法の手法に拠らず、この方程式から得られる解は、一体の物理量、フラックス、発熱等の平均値となり、実際のイベントを模擬していることにはならない。

従来の PHITS では、高エネルギー領域における核反応モデルとして、イベントジェネレーターを用いていたが、20 MeV 以下の核データを使う中性子輸送に関しては、従来の MCNP タイプの輸送コードを用いた。従って、2 つのタイプの輸送コードが PHITS の中には混在していたことになる。そこで、20 MeV 以下の核データを使う中性子輸送に関しても、イベント毎にエネルギーと運動量が保存される、即ち、核反応から全ての放出粒子と反跳核のエネルギーと運動量を記述できるモデルとし

てイベントジェネレーターモードが開発された。これにより、ミクロな領域での放射線挙動に重要な平均値周りの強度分布等の観測量を扱えるようになった [10]。

本検討のように電離箱空間内に付与したエネルギーから生成電荷量を求める場合、MCNP では KERMA 係数に電離空間内 (タリー領域内) に入ってくる中性子フラックスを掛けることによりエネルギー付与計算を行うことになる。KERMA 係数を用いて得られた結果は、局所近似であり「核反応が起きた場所で、荷電粒子に与えられたエネルギーの全てが付与される」と仮定した場合の計算結果となる。

本研究で検討した電離箱の直径は 16 mm 程度 (2 cc より) であり、中性子エネルギーは高エネルギー側では数 10 MeV である。100 keV 以上の陽子では、ガス中での飛程は mm オーダーになることから、局所近似を用いた従来の MCNP では高エネルギー荷電粒子によるエネルギー付与が過大評価される可能性がある。イベントジェネレーターモードでは KERMA 係数による局所近似無しに荷電粒子及び反跳核のエネルギーロスから対象とする領域のエネルギー付与を計算できる。

本研究では、実際の物理現象に近いシミュレーションのために、PHITS のイベントジェネレーターモードを用いることとした。

ENDF/B-VII 核データライブラリを使用し、[T-deposit] タリーを用いてガス領域内のエネルギー付与を計算した [11]。

2.2.3 生成電荷量の計算

対象照射場からの中性子照射による電離箱応答(電流値)を見積もるためには、中性子もしくは γ 線の入射によって生成した荷電粒子がガス領域内に付与したエネルギーから生成電荷量を求める必要がある。PHITSではエネルギー付与に参与した荷電粒子のエネルギー分布を知ることができる。ガス領域における生成電荷量はPHITSにより計算された荷電粒子のエネルギー付与分布 $d_i(E)$ とW値を用いて以下の式により単位フルエンス当たり生成する電荷量として求められる。

$$\text{Electric charge} = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \frac{d_i(E) \times e \times S}{W_i(E)} dE \quad (\text{C/fluence} = \text{C/cm}^{-2}) \quad (2.3)$$

ここで、 $d_i(E)$ はガス領域内での荷電粒子 i によるエネルギー付与分布(MeV/source)、 n はエネルギー付与を与える荷電粒子の総数、 e は素電荷(1.609×10^{-19} C/electron)、 S は計算で用いた線源の面積(cm^2)、 $W_i(E)$ はガスに対する荷電粒子 i におけるエネルギー E のW値(eV)を示す。生成電荷は全て電離箱の電極に集まるものとした。

計算では、電離箱の外径と等しい面積の面線源を用いた。線源のエネルギーには実際の中性子照射場に存在するエネルギー範囲を考慮して、 γ 線に対しては8 keVから25 MeV、中性子に対しては1 meVから36 MeVまでの単色エネルギーを用いた。

複数の単色エネルギー中性子および γ 線(光子)入射による電離箱ガス領域内の生成電荷量を計算することで、検出器応答のエネルギー依存性を表す応答関数 $R(E)$ を求めた。シミュレーションに用いた面線源および照射体系を図2.3に示す。得られた応答関数と対象とする照射場の中性子フラックス $\varphi_n(E)$ および γ 線フラックス $\varphi_g(E)$ を用いて以下に示す式により各成分の電流値を算出した。

$$\text{Thermal current} = \int_{E=0eV}^{0.5eV} \varphi_n(E) \cdot R_n(E) dE \quad (2.4)$$

$$\text{Epi-thermal current} = \int_{E=0.5eV}^{40keV} \varphi_n(E) \cdot R_n(E) dE \quad (2.5)$$

$$\text{Fast current} = \int_{E=40keV}^{\infty} \varphi_n(E) \cdot R_n(E) dE \quad (2.6)$$

$$\text{Gamma current} = \int_{E=0eV}^{\infty} \varphi_g(E) \cdot R_g(E) dE \quad (2.7)$$

ここで、 $\varphi_n(E)$ は中性子フラックス ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 $R_n(E)$ は中性子応答関数 ($\text{C}/\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 $\varphi_g(E)$ は γ 線フラックス ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)、 $R_g(E)$ は γ 線応答関数 ($\text{C}/\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) である。

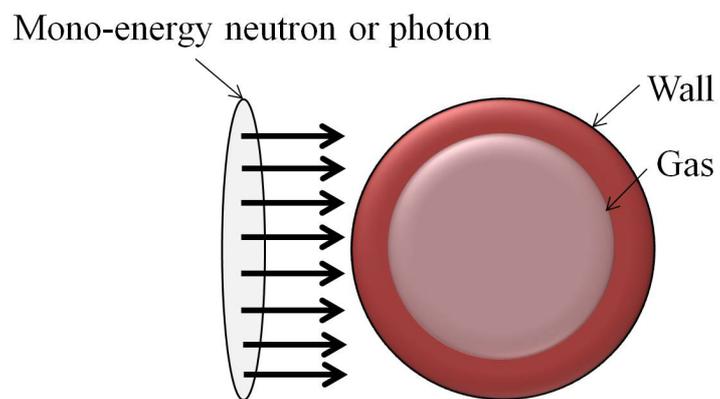


図 2.3 シミュレーションに用いた面線源および照射体系

2.2.4 本研究に用いた W 値に関するデータ

W 値はエネルギーを付与する荷電粒子やそのエネルギーおよびガスの種類に依存する。生成電荷量計算には各荷電粒子に関するW値データが必要となる。

本検討で用いた4種類のガス (Ar, CO₂, CH₄, N₂) に対する陽子およびヘリウムに関するW値実験データは R.Huber,1985、H.Tawara,1987、D.J.Thomas,1985、J.A.Phipps,1964、M.Varma, 1978 らおよび ICRU report31 により報告されている [12-17]。しかし、ヘリウム以上の粒子に関するW値実験データは少ない。

そこで、本研究では陽子およびヘリウムに関する W 値には実験値を用い、実験値の得られていない重荷電粒子のW値データに関しては、J.Lindhard らにより提案された“Reduced energy”の概念を利用して W 値の推定を行った [18]。“Reduced energy”ではヘリウム以上の荷電粒子のエネルギーを $E/(Mz^{4/3})$ として置き換えることでガス中の全荷電粒子を1本の曲線上に載せることができる。ここで E/M は核子当たりの粒子エネルギー、z は粒子の原子番号である。

この曲線を、ヘリウム以上の重粒子に対して得られた実験値より予め求め、通常の核子当たりのエネルギーに対する W 値を逆算することにより実験値の得られていない重粒子の W 値のエネルギー依存性を推定できる。W 値の曲線を再現する式として、本研究では J.A.Dennis, 1973 らにより報告された以下の式を用いた [19]。

$$W(E) = W_{\beta}(1.035 + A(E/M)^{-n}) \quad (2.8)$$

ここで、 W_{β} は対象とするガスの電子に対する W 値 (一定) であり、A 及び n はパラメータである。“Reduced energy”で表示された W 値の曲線に対してパラメータ値 A, n をフィッティングにより求めることで曲線を表す式を求めた。CO₂ では重粒子に対する実験データが特に少ないため、Reduced energy に対する曲線には M.Varma, 1978 らにより報告されたヘリウムの W 値の実験値を再現する式 $W(E) = 30.59 + 7.15 E^{1/2}$ の曲線を当てはめて算出した [16]。

図 2.4 から図 2.7 に Ar, CO₂, CH₄, N₂ に関する荷電粒子の W 値の実験値および “Reduced energy” に対してプロットされた W 値を示す。電子に対する各ガスの W 値には ICRU report 31 で報告された値を用いた [17]。表 2.2 に各ガスに対する電子の W 値およびフィッティングにより求められた各ガスに対するパラメータ値 A, n を示す。

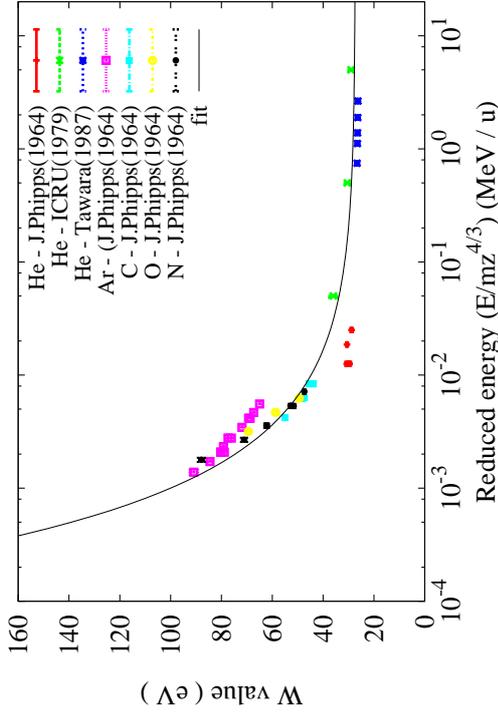
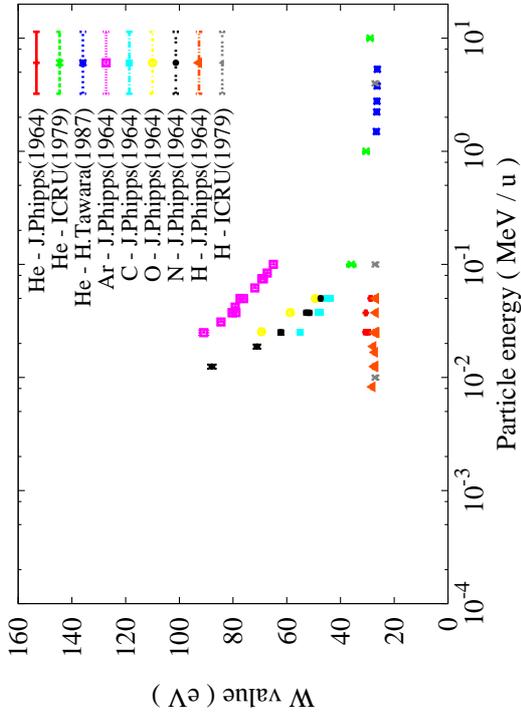


図 2.4 Ar ガスの荷電粒子に関する W 値の実験値 (左) および”Reduced energy” に対して示された W 値 (右)

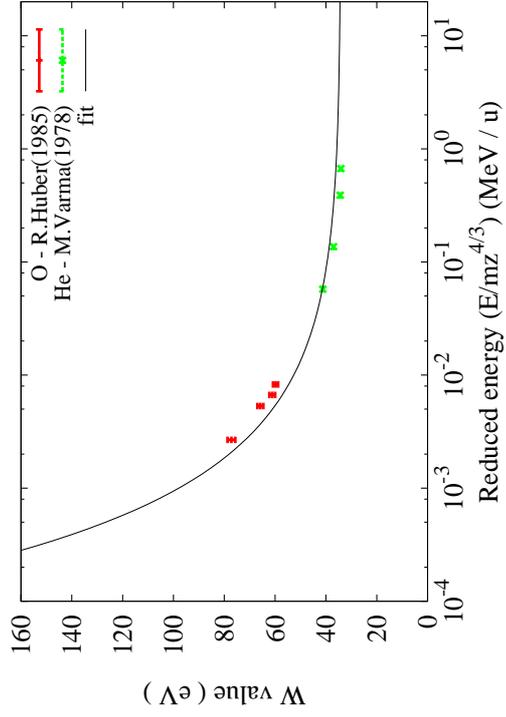
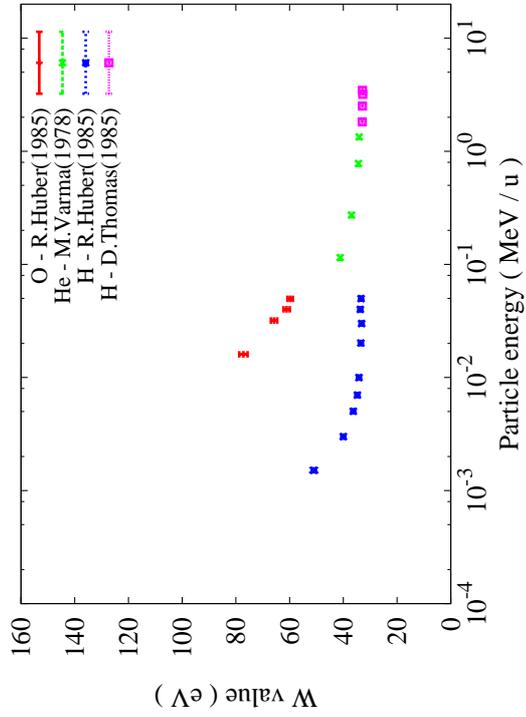


図 2.5 CO₂ ガスの荷電粒子に関する W 値の実験値 (左) および”Reduced energy” に対して示された W 値 (右)

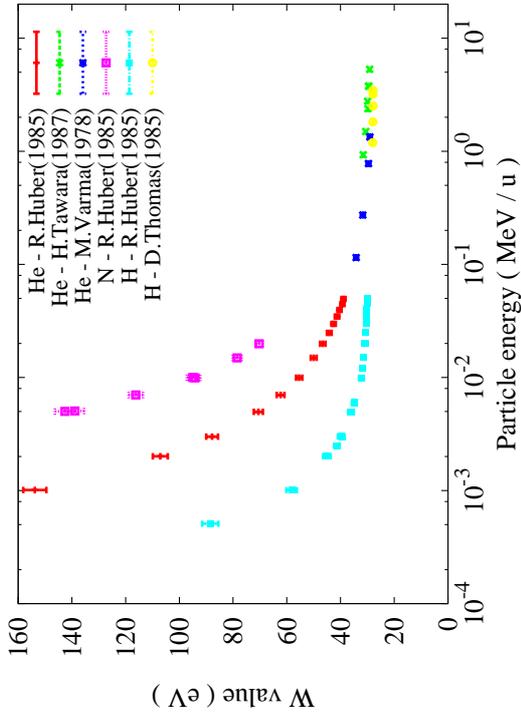


図 2.6 CH₄ ガスの荷電粒子に関する W 値の実験値 (左) および”Reduced energy”に対して示された W 値 (右)

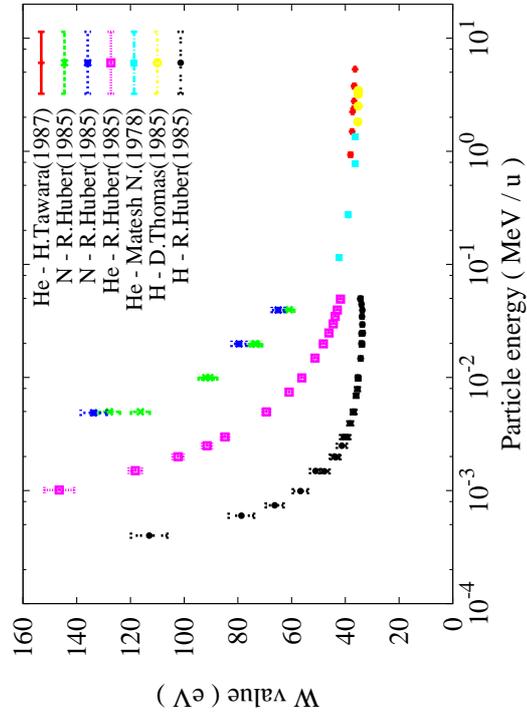
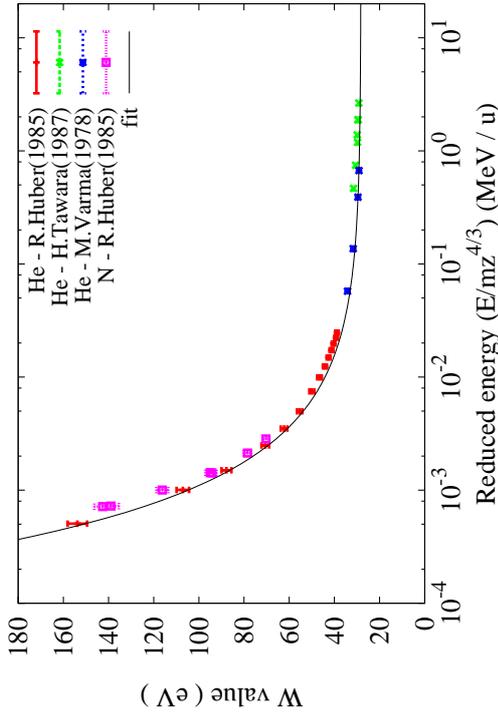


図 2.7 N₂ ガスの荷電粒子に関する W 値の実験値 (左) および”Reduced energy”に対して示された W 値 (右)

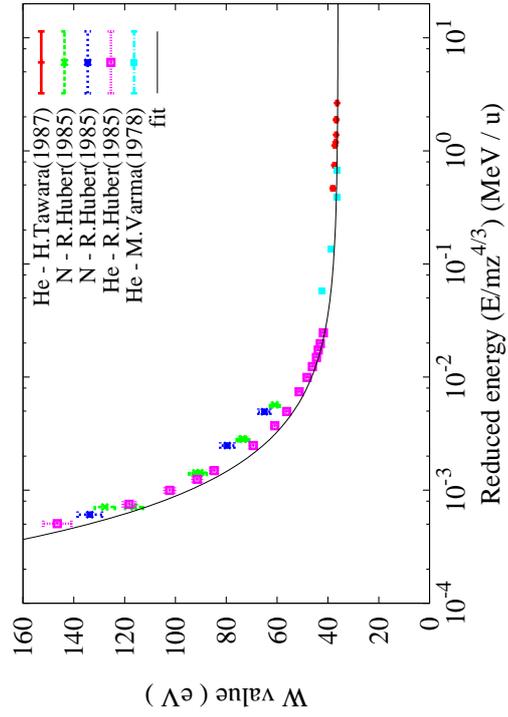


表 2.2 計算に用いた電子の W 値および”Reduced energy”に対して
決定したパラメータ

	Ar	CO ₂	CH ₄	N ₂
W_{β} (eV)	26.4 ± 0.5	33.0 ± 0.7	27.3 ± 0.3	34.8 ± 0.2
A	$3.80\text{E-}02 \pm 8.0\%$	$4.73\text{E-}02 \pm 4.0\%$	$2.52\text{E-}02 \pm 6.8\%$	$9.43\text{E-}03 \pm 5.8\%$
n	$6.20\text{E-}01 \pm 2.0\%$	$7.07\text{E-}01 \pm 0.2\%$	$6.82\text{E-}01 \pm 0.1\%$	$7.50\text{E-}01 \pm 1.4\%$

2.2.5 多重電離箱システムの構築対象とした中性子照射場

電離箱の構造検討においては、現在主に治療で用いられている KUR-HWNIF の KUR5MW 運転時の熱外中性子ビーム (照射モード : CO-0000-F) を対象とした。

この照射モードでは、カドミウムフィルターにより熱中性子成分がほとんどカットされている。そのため、今回検討した熱中性子用電離箱では十分な応答が得られないことが予想される。一方、メラノーマに対する治療では熱中性子ビーム (照射モード : OO-0011-F) が使用されている。本検討では、熱中性子用電離については、熱外中性子ビームおよび熱中性子ビームそれぞれに対する最適化検討を行った。

本検討で用いた熱外中性子ビームおよび熱中性子ビームの γ 線エネルギースペクトルの公称データを図 2.8、中性子エネルギースペクトルの公称データを図 2.9 に示す。

Appendix B に、計算で用いた KUR-HWNIF のビスマス面におけるビーム中心付近の各中性子ビームの γ 線 8 群および中性子 144 群のエネルギー群構造を示す。

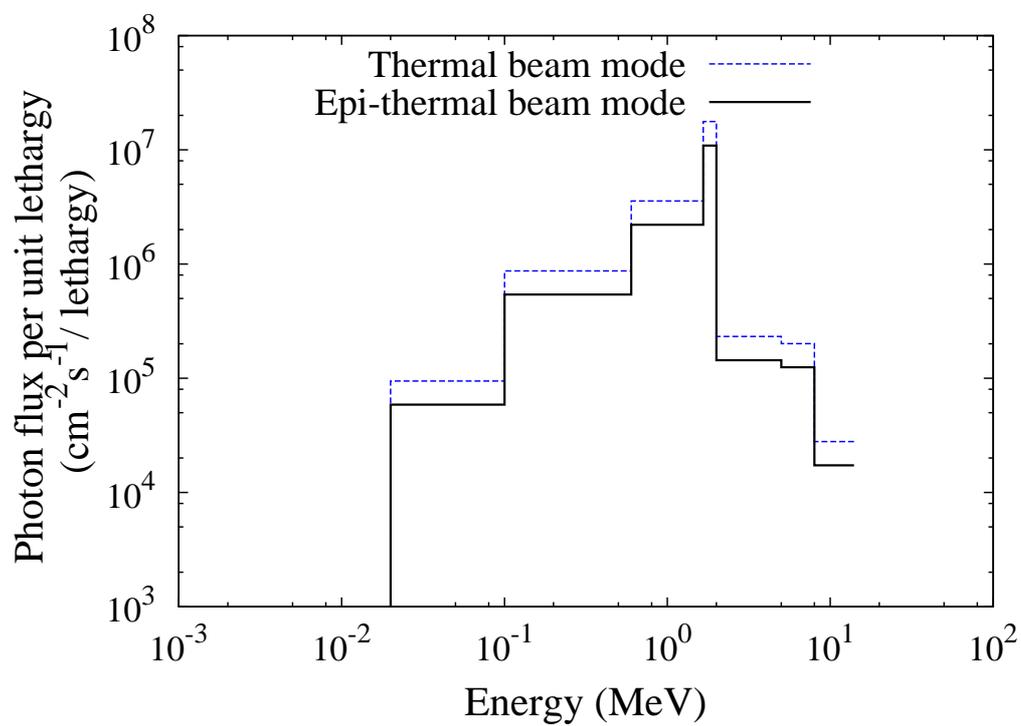


図 2.8 KUR-HWNIF(5MW 運転時) における
熱外中性子ビームおよび熱中性子ビームの γ 線エネルギースペクトル

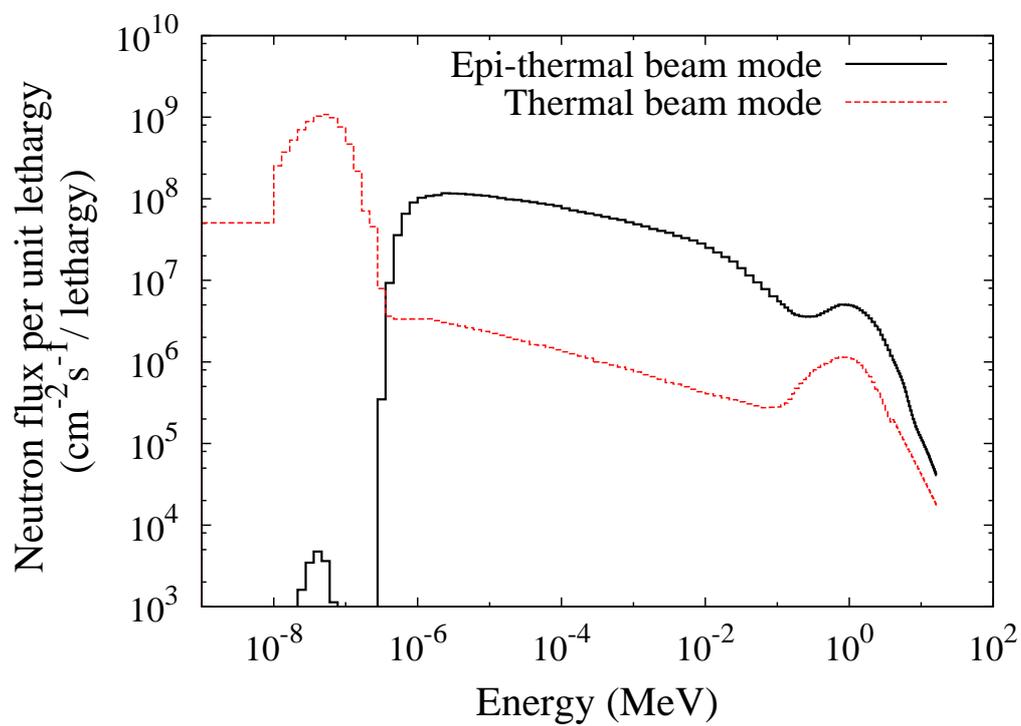


図 2.9 KUR-HWNIF(5MW 運転時) における
熱外中性子ビームおよび熱中性子ビームの的中性子エネルギースペクトル

2.3 最適構造検討の計算結果

2.3.1 γ 線用電離箱

- ・ 応答関数の壁材およびガス依存性

アルゴン、二酸化炭素充填の γ 線用電離箱に対する γ 線応答関数を図2.10、図2.11に示す。各図において2 mm 間隔の壁厚に対する応答関数をそれぞれ示している。図中の凡例”Bare” はガスだけの構造における応答を示す。両図に示されている”Bare”の結果(赤線)を比較すると、アルゴンおよび二酸化炭素で MeV 程度のエネルギーに関する応答に大きな違いは見られず、僅かに二酸化炭素に対する応答が高くなっている。壁材に関しては、アルミニウム壁の MeV 領域における γ 線応答が他の壁材に比べ1.5倍から2.0倍程度高いことが確認できる。これはアルミニウムの電子密度が比較的高いことに起因している。

アルゴン、二酸化炭素充填の γ 線用電離箱に対する中性子応答関数を図2.12、図2.13に示す。100 keV 付近を境に低エネルギー領域では壁厚に依存し、高エネルギー領域では充填ガスの種類に依存した応答関数の変化が見られる。低エネルギー中性子に対して、アルミニウム壁の電離箱は他に比べ1桁以上も高い応答を示す傾向がある。一方、グラファイト壁は他の二種類の壁材より中性子に低感度である。アルミニウムおよびマグネシウムの壁材は中性子捕獲反応断面積がグラファイトに比べ1桁程度高いことにより、低エネルギー中性子入射により、壁材から発生する γ 線由来の電子の寄与が増すことに起因している。アルゴンガスは100 keV 付近に弾性散乱の共鳴ピークが見られるが、高速中性子エネルギー領域全体で見ると二酸化炭素ガスの0.2倍から0.7倍程度低い応答を示している。

以上の結果より、壁材およびガスの組み合わせとしては、グラファイト壁にアルゴンを充填したものが中性子応答を抑える点で適していると言える。

- ・ 電離箱応答の壁厚依存性

図2.10、図2.11を見ると、 γ 線のエネルギー10 MeV 以上では全ての電離箱の組

み合わせで壁から発生する電子の影響で壁が厚くなるに従い γ 線に対する応答が高まっている。これは壁厚増加に従い壁材で生成される電子が増えることに起因していると考えられる。しかしながら、KUR-HWNIFの中性子ビーム中の γ 線のエネルギー領域(数 MeV 程度)においては、壁厚変化による γ 線応答関数の変化は小さい。

上述した γ 線および中性子応答関数と照射場の公称データを用いて式 2.4 ~ 式 2.7 から算出したアルゴン及び二酸化炭素充填電離箱の各成分起因応答の壁厚依存性を図 2.14、図 2.15 に示す。比較的低い応答の中性子 3 成分に対する壁厚依存性を見るため、縦軸は対数として表示している。壁材が無い場合は、計算で想定した大気中の窒素と熱外中性子および熱中性子の(n,p)反応による陽子が主な寄与粒子である。壁が存在すると、陽子の寄与が減少するため、それに伴い応答も減少している。

γ 線成分及び高速中性子成分の応答は壁厚に依存せず一定である。二酸化炭素充填電離箱では高速中性子成分の応答は、電離箱応答の主な成分である γ 線応答に対して無視できない程度である。熱外及び熱中性子成分応答は壁厚増加とともに高くなるが、アルミニウム壁電離箱(Al(Ar), Al(CO₂))以外では γ 線成分起因の応答に比べ僅かであるため電離箱全体の応答にはほとんど寄与しないことが分かる。

図 2.16 に γ 線用電離箱の全応答に占める γ 線成分の応答比率を示す。上述したアルミニウム壁電離箱の 2 種類では壁厚の増加に従い、熱外中性子成分の寄与が増加することで γ 線成分の応答比率が低下している。G(Ar)電離箱の壁厚に関しては 3 mm 以上では応答に大きな変化が見られないことから、3 mm 程度の厚さが最適であると考えられる。この厚さでは、計算上、95%以上の応答比率で γ 線成分を測定できることが期待される。

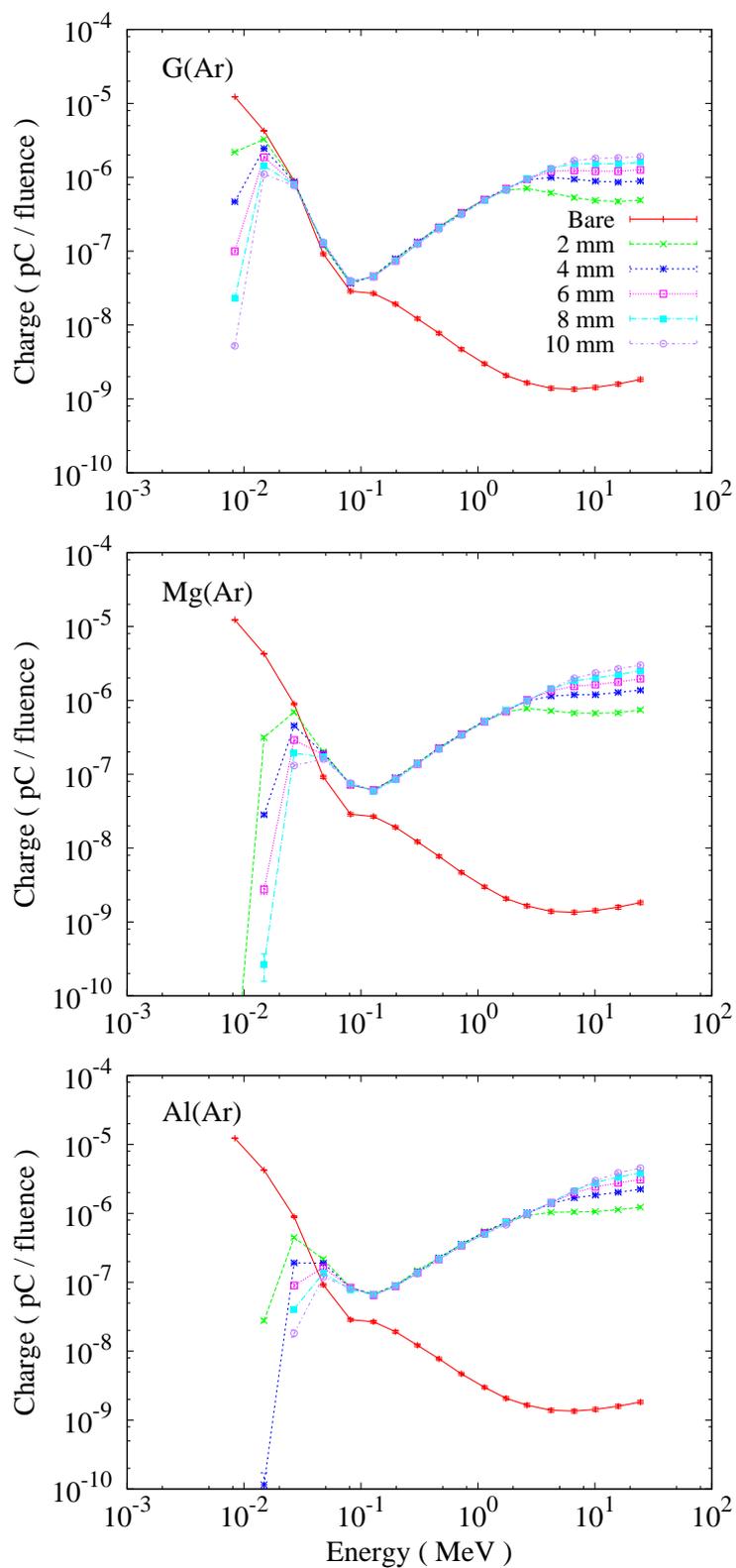


図 2.10 アルゴン充填 γ 線用電離箱に対する γ 線応答関数 $R_g(E)$

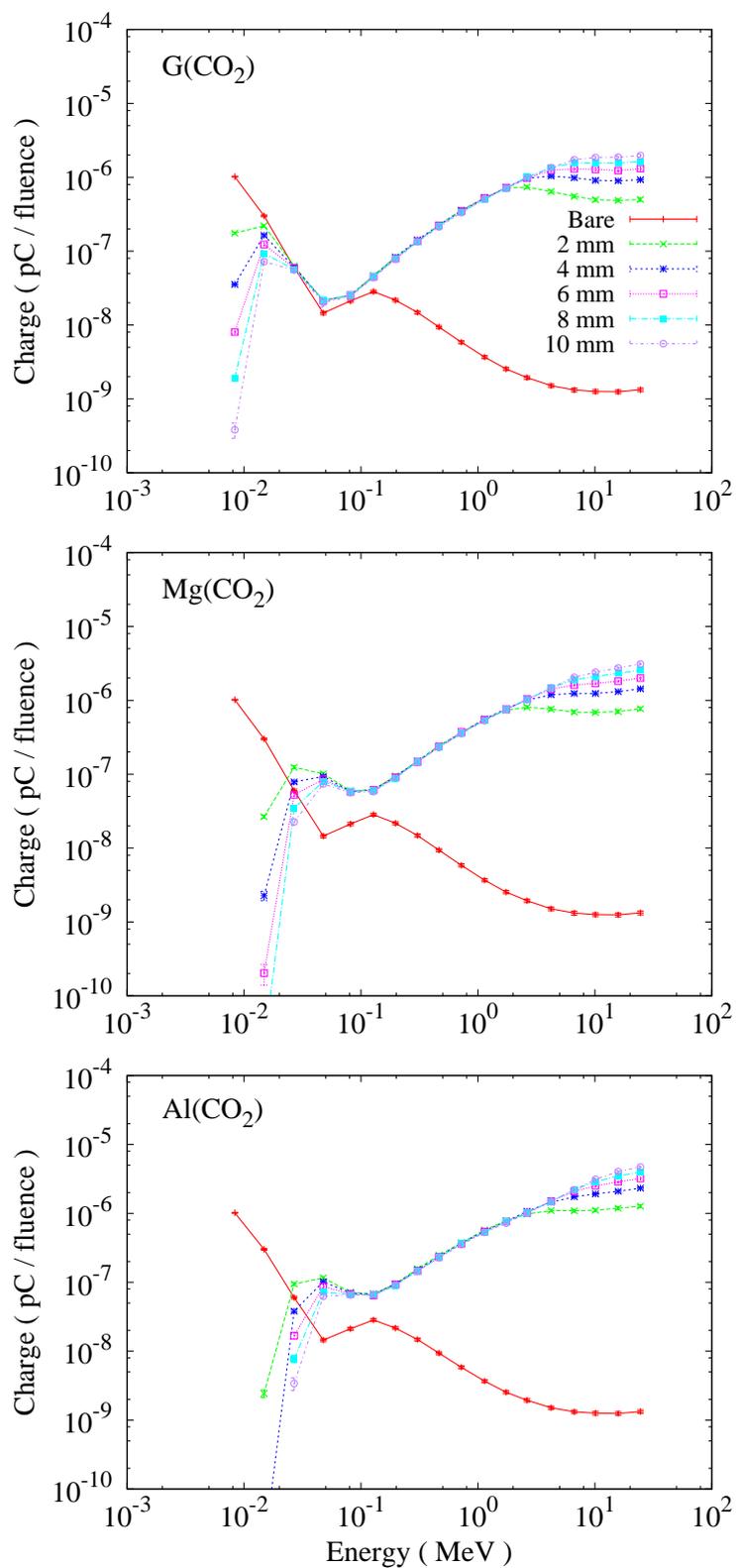


図 2.11 二酸化炭素充填 γ 線用電離箱に対する γ 線応答関数 $R_g(E)$

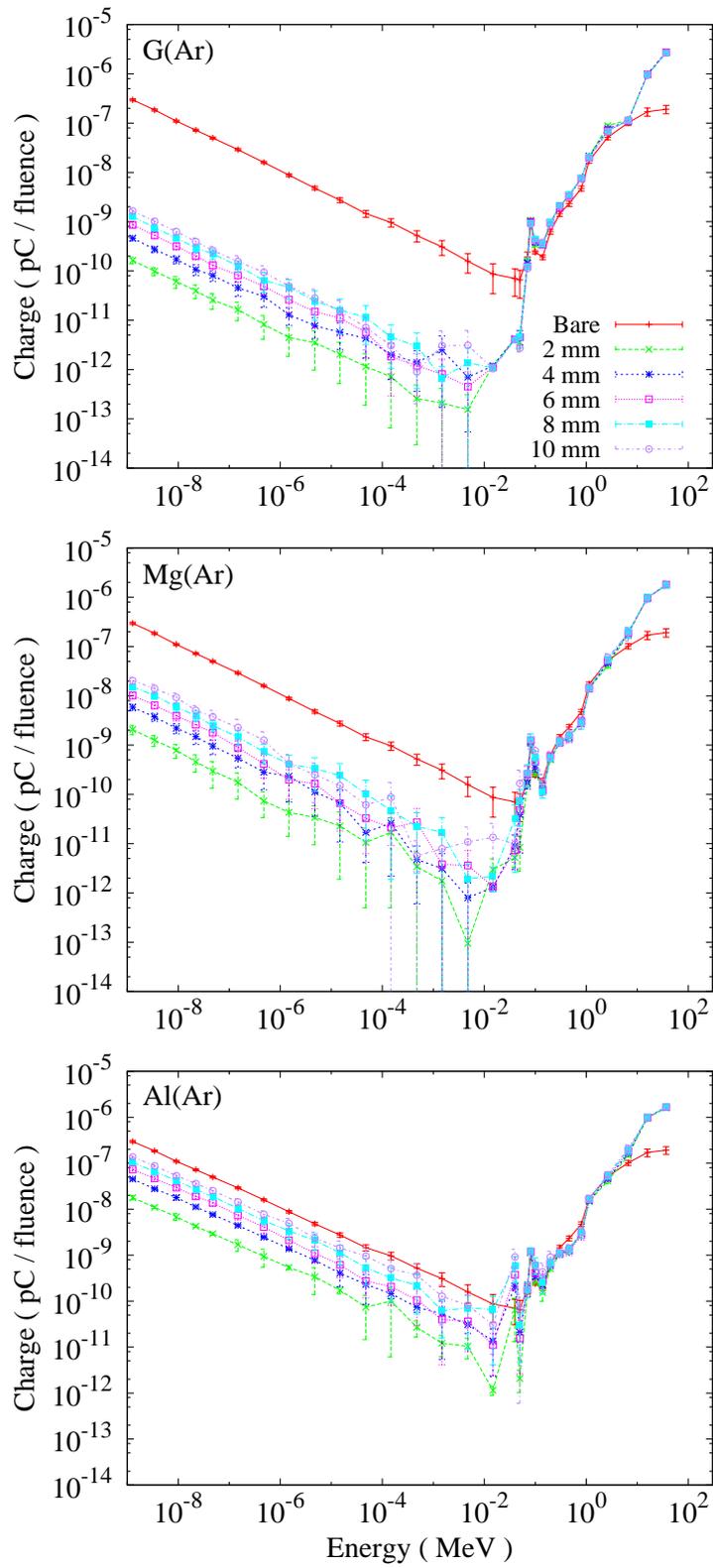


図 2.12 アルゴン充填 γ 線用電離箱に対する中性子応答関数 $R_n(E)$

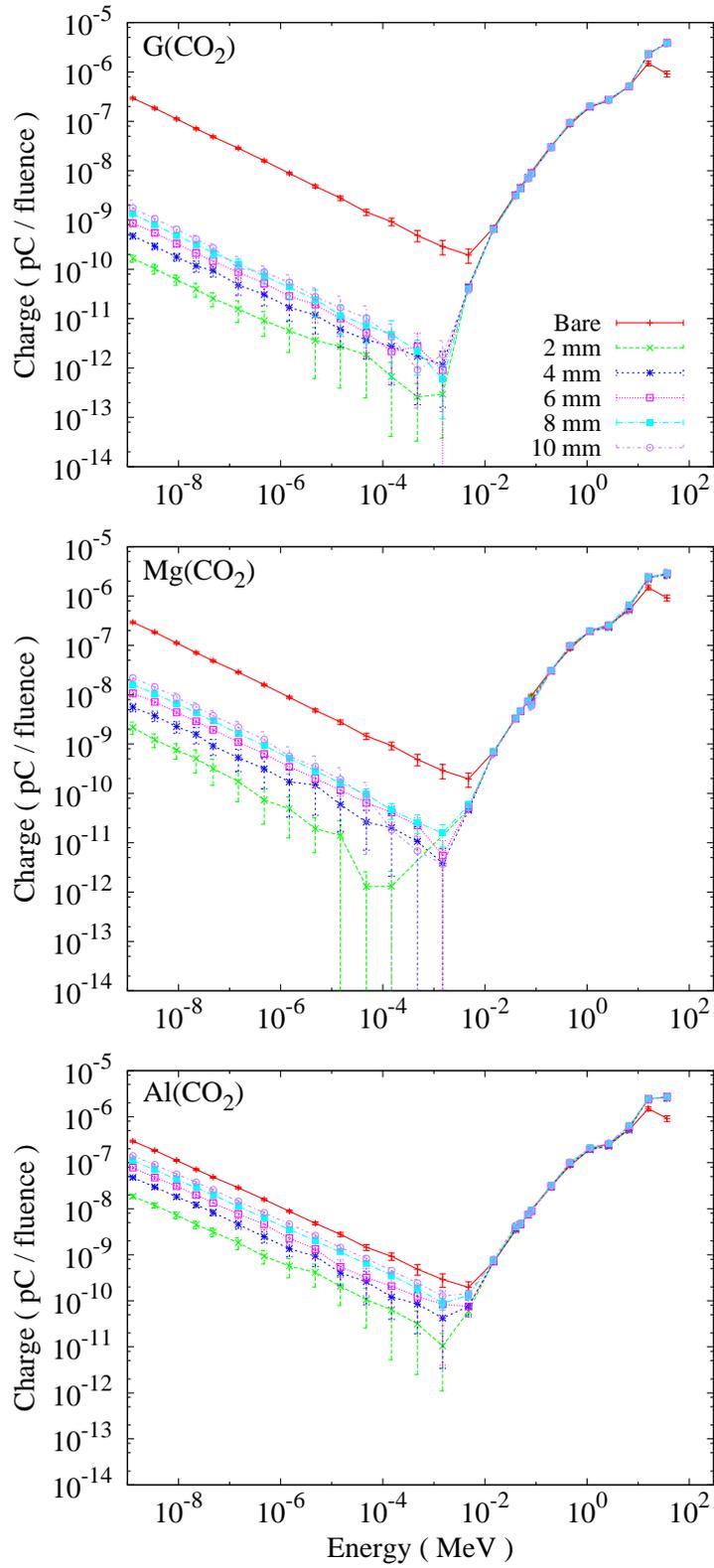


図 2.13 二酸化炭素充填 γ 線用電離箱に対する中性子応答関数 $R_n(E)$

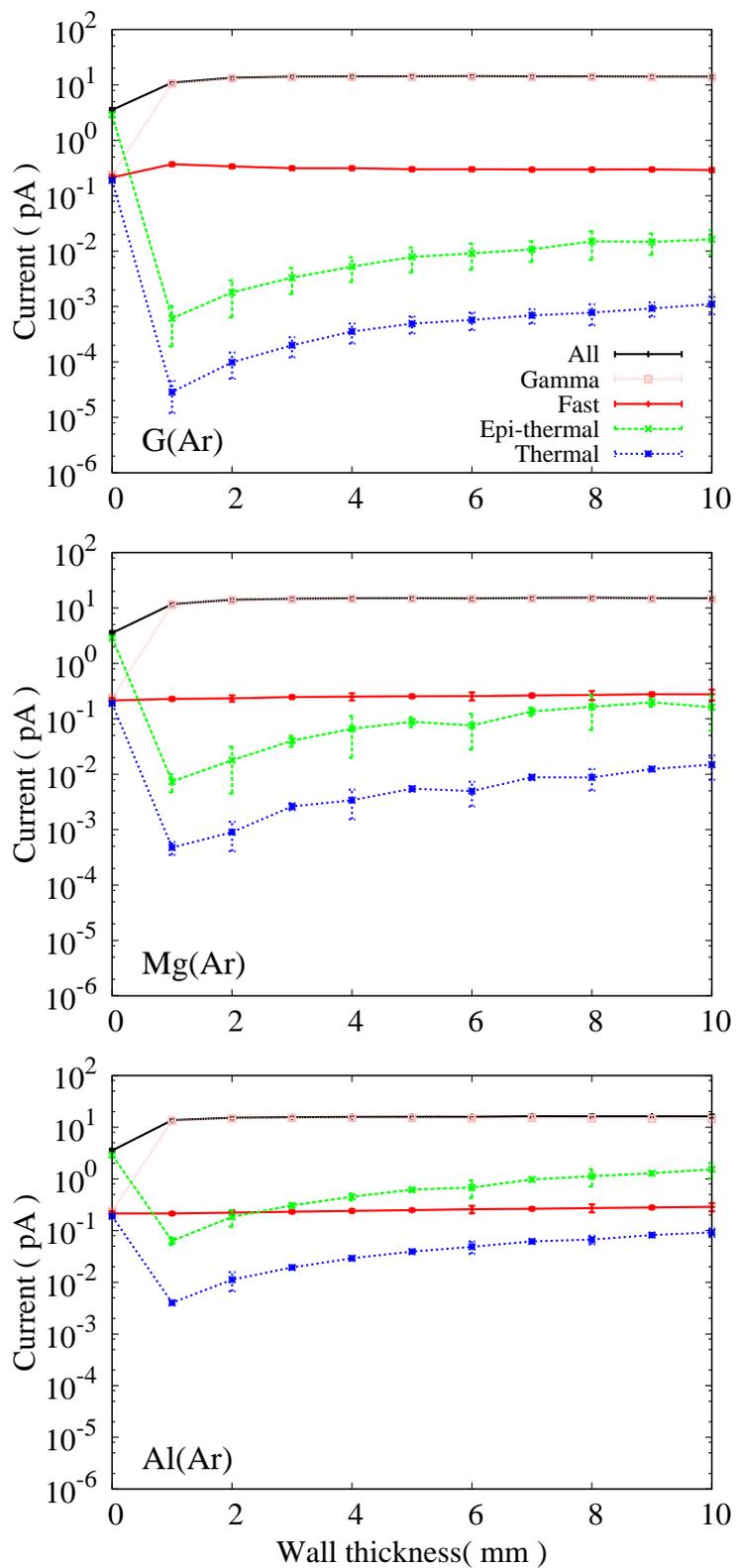


図 2.14 アルゴン充填 γ 線用電離箱の壁厚依存性

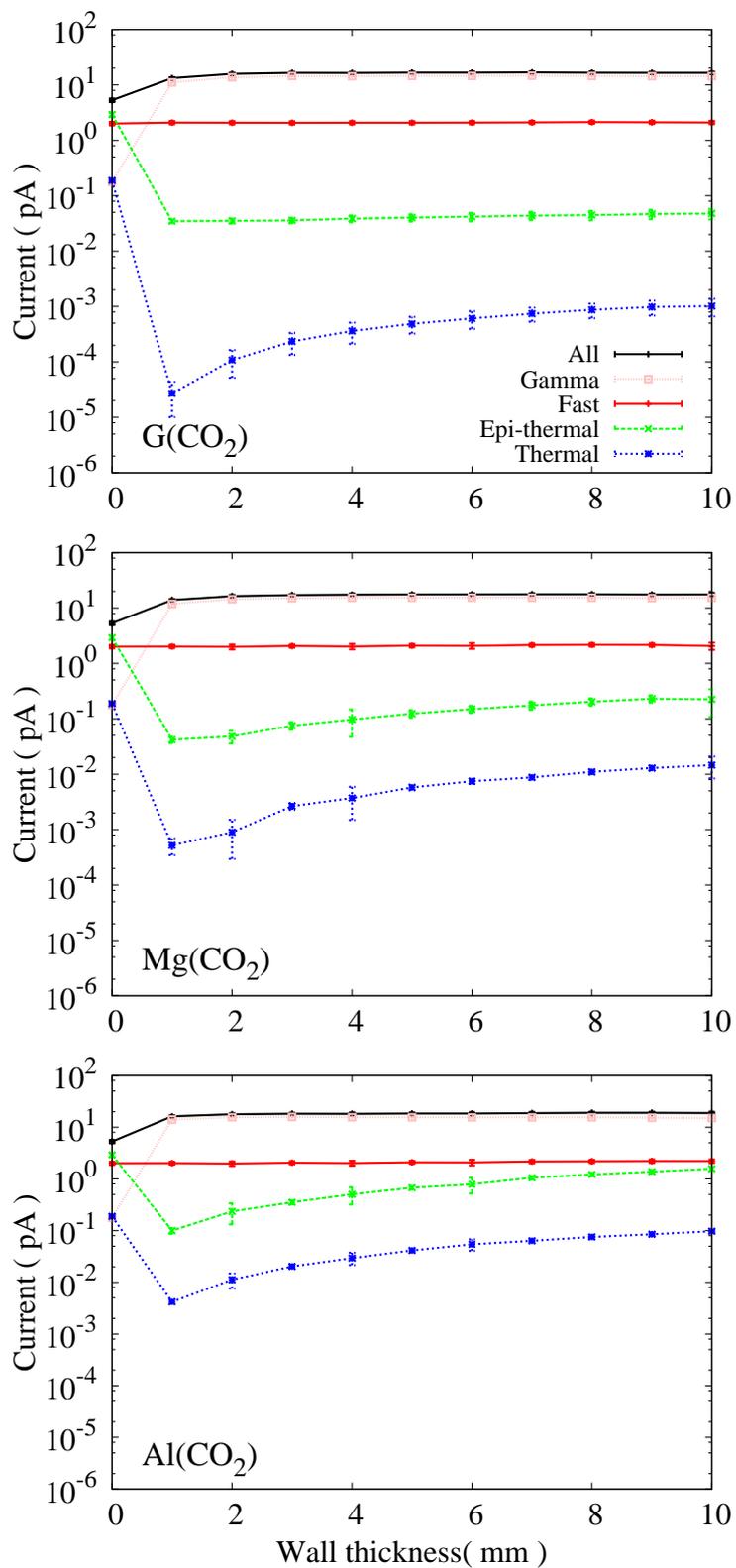


図 2.15 二酸化炭素充填 γ 線用電離箱の壁厚依存性

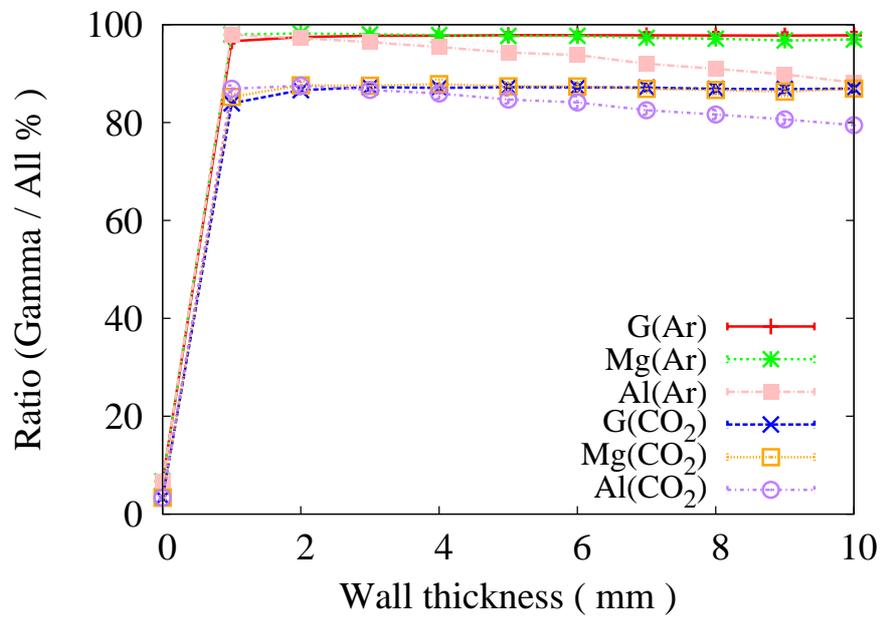


図 2.16 γ 線用電離箱の全応答に占める γ 線成分の応答比率

2.3.2 熱中性子用電離箱

・応答関数の壁厚およびガス依存性

熱中性子用電離箱 ($\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$) に対する γ 線応答関数を図 2.17 に示す。壁材の密度が高いため 2 MeV 以上での壁厚依存性は比較的少ない。

熱中性子用電離箱に対する中性子応答関数を図 2.18 に示す。中性子応答に関しては壁厚に依存せず応答関数にほとんど変化が見られない。これは窒素原子と熱中性子との (n,p) 反応で生成する約 580 keV の陽子に関する壁材 Si_3N_4 中の飛程が数 μm 程度であり、壁材内壁表面付近から発生した陽子の寄与しか得られないことに起因していると考えられる。

壁無しの低エネルギー中性子の応答関数が壁有りのものより僅かに小さいが、これは計算で想定した大気中の窒素ガス (大気中の 75 wt%) からの寄与が壁の存在による寄与より小さいことを示している。窒素ガス中の生成陽子の飛程は 10 mm 程度であり、応答は主にガスが寄与し、熱中性子 (- 0.5 eV) のエネルギー領域では、充填ガスである窒素との (n,p) 反応による応答が高いことが分かる。

・電離箱応答の壁厚依存性

熱外中性子ビームに対する各成分の壁厚依存性を図 2.19 に、熱中性子ビームに対するものを図 2.20 に示す。熱外中性子ビームに対する結果では、カドミウムフィルターにより熱中性子がほとんど除去されるため、ビーム中には熱中性子がほとんど混在していない。そのため、熱中性子成分に対する応答は熱外および高速中性子成分に比べて 1桁程度小さい中性子3成分について、各成分のフラックス当たりの応答と比較すると、熱中性子に対する応答は、高速中性子に比べ約 0.9 倍から同程度、熱外中性子に比べ約 4 倍であることが分かる。熱中性子ビームに対する結果では、主成分が熱中性子のため、熱中性子成分の応答が大部分を占める。これより、 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 電離箱は熱中性子測定用の電離箱として有用であると考えられる。

図 2.21 に熱中性子用電離箱応答の全体に占める熱中性子の応答比率を示す。壁厚 1 mm から 10 mm の間において、熱外中性子ビームに対する結果で応答比率は 5%程

度、熱中性子ビームに対する結果で98%程度である。他成分からの寄与の増加を考慮すると、使用する状況に応じて薄い厚さの壁材を用いることが望まれる。

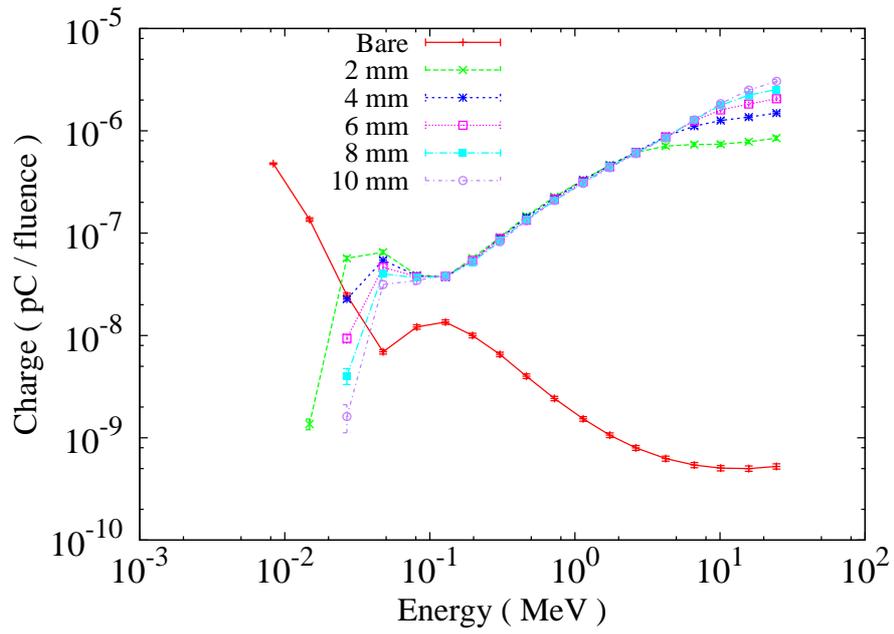


図 2.17 熱中性子用電離箱に対する γ 線応答関数 $R_g(E)$

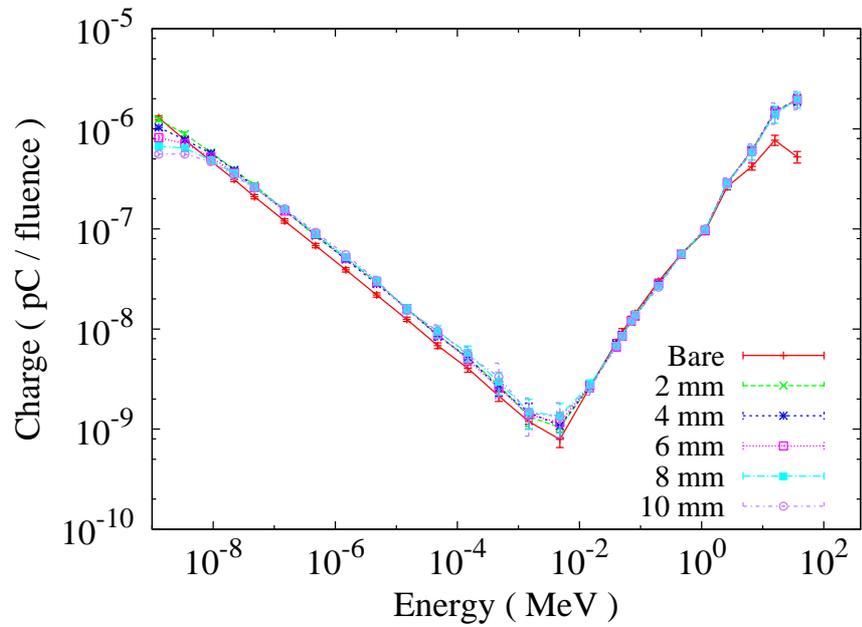


図 2.18 熱中性子用電離箱に対する中性子応答関数 $R_n(E)$

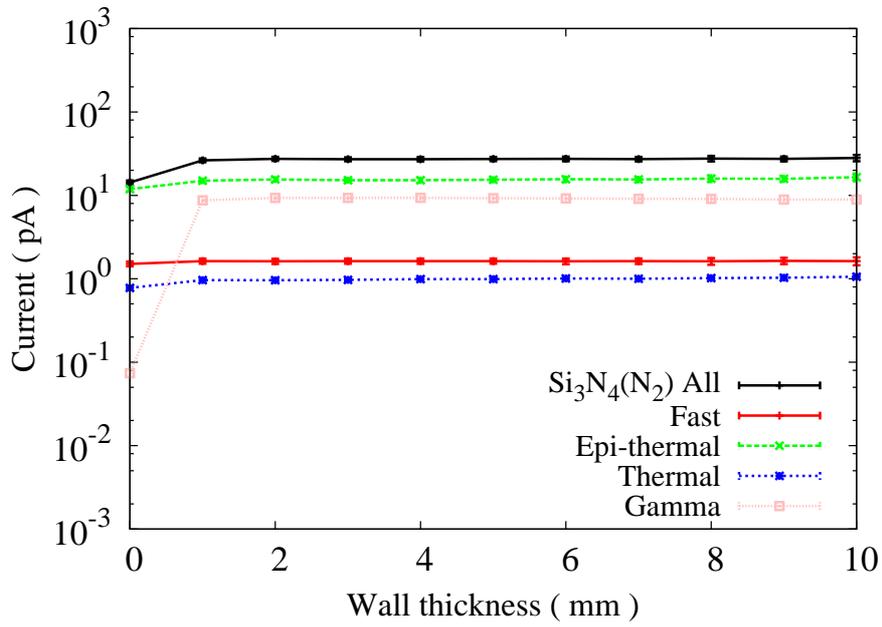


図 2.19 熱中性子用電離箱応答の壁厚依存性 (熱外中性子ビーム)

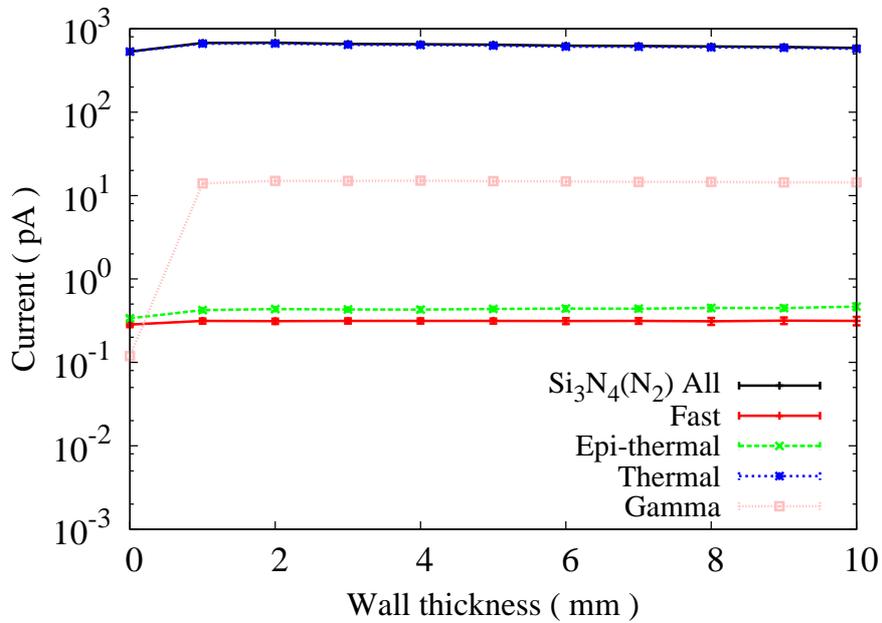


図 2.20 熱中性子用電離箱応答の壁厚依存性 (熱中性子ビーム)

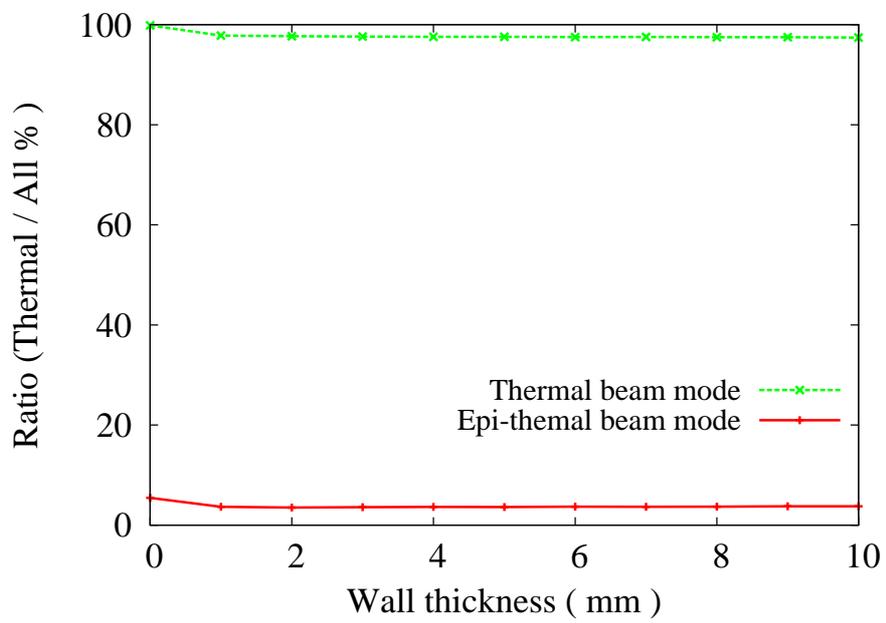


図 2.21 熱中性子用電離箱応答の全体に占める熱中性子の応答比率

2.3.3 熱外中性子用電離箱

・応答関数の壁厚およびガス依存性

熱外中性子用電離箱 (Poly_B(N₂)) に対する γ 線応答関数を図 2.22 に示す。2 MeV 以上の γ 線エネルギーに対しては壁厚に依存し、生成電子の寄与の増加が見られる。20 mm 以上の壁厚で応答関数の壁厚依存性が小さくなるのは、壁からの生成電子の飛程が壁厚以下となりガス領域にエネルギー付与をしなくなるためと考えられる。

熱外中性子用電離箱 (Poly_B(N₂)) に対する中性子応答関数を図 2.23 に示す。¹⁰B の (n, α) 反応起因のガス領域内へのエネルギー付与により、壁有りの応答関数は壁無しのものに比べて 3 桁程度高くなっている。壁厚の増加に伴い、熱外中性子成分および高速中性子成分の応答が増加し、厚さ 40 mm 以上ではこれらの成分の応答は熱中性子よりも高くなる。この結果より、ポリエチレン壁材による中性子の減速、および、この減速中性子と内壁の ¹⁰B との捕獲反応により、効果的に熱外中性子成分に対する応答が高められることが確認できる。なお、実際の KUR-HWNIF の熱外中性子ビームでは前述したカドミウムフィルターにより熱成分の応答は小さいと考えられる。

・電離箱応答の壁厚依存性

図 2.24 に熱外中性子用電離箱の壁厚依存性を示す。壁厚の増加に従い、熱外中性子の応答が高くなり、30 mm 付近に応答のピークを持っていることが確認できる。熱中性子は壁厚増加に従い、単調に減少していることが分かる。

図 2.25 に熱外中性子用電離箱応答の全体に占める熱外中性子の応答比率を示す。壁厚が 30 mm 以上で高速中性子成分の寄与の増加により応答比率が緩やかに減少する傾向がある。これより、壁厚 20 mm から 30 mm 程度が適した厚さであり、同厚さにおいて 95% 以上の応答比率で熱外中性子成分を測定できることが分かる。

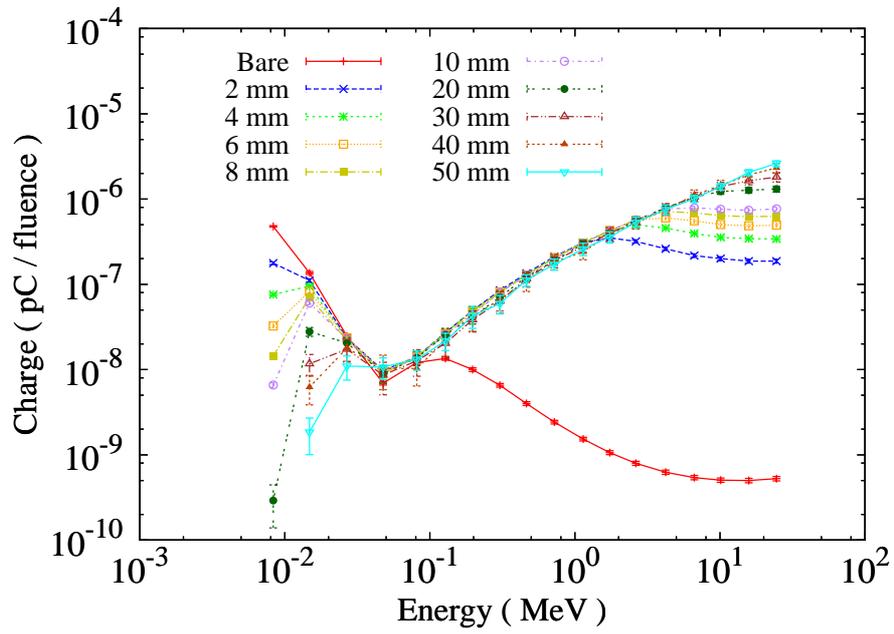


図 2.22 熱外中性子用電離箱に対する γ 線応答関数 $R_g(E)$

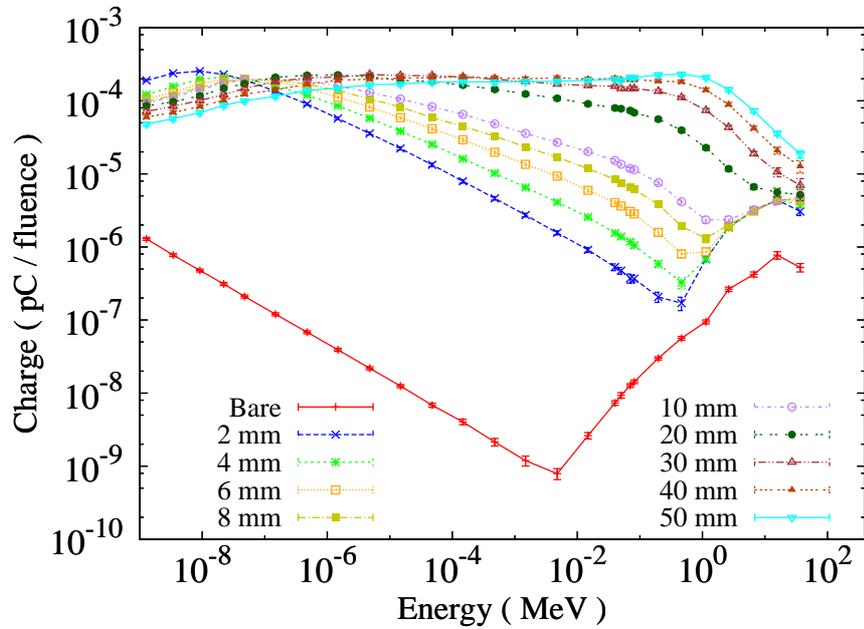


図 2.23 熱外中性子用電離箱に対する中性子応答関数 $R_n(E)$

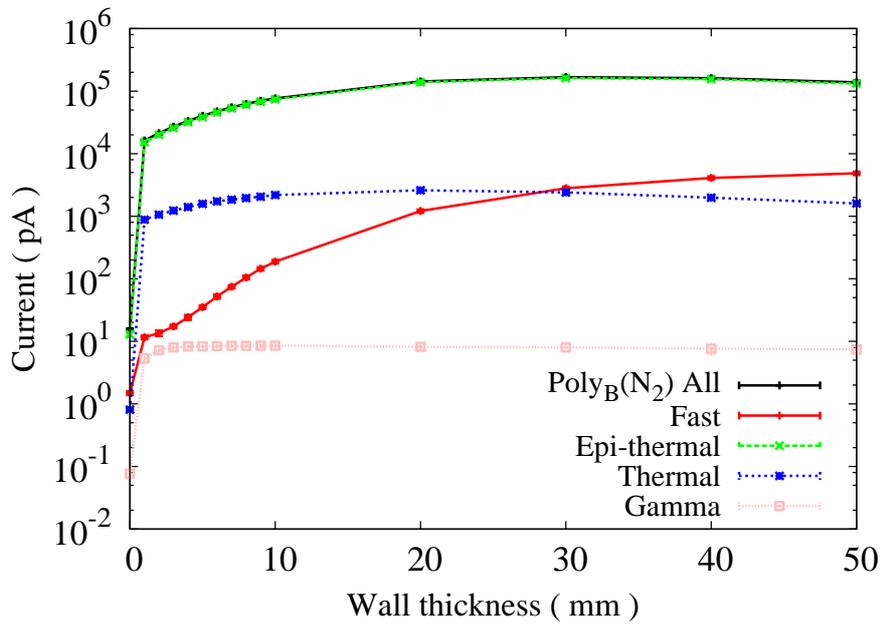


図 2.24 熱外中性子用電離箱応答の壁厚依存性

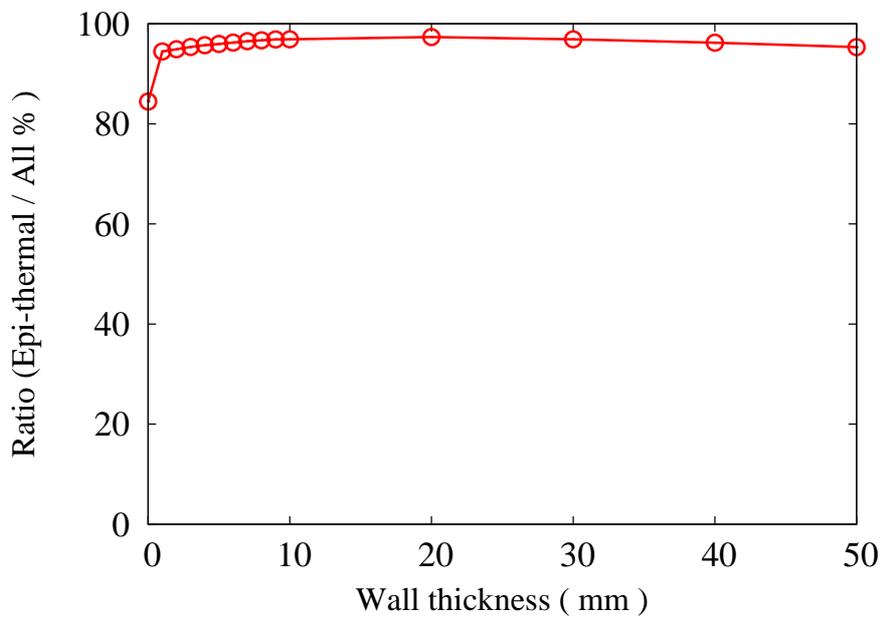


図 2.25 熱外中性子用電離箱応答の全体に占める熱外中性子の応答比率

2.3.4 高速中性子用電離箱

・応答関数の壁厚およびガス依存性

高速中性子用電離箱 (Poly(CH₄)) に対する γ 線応答関数を図 2.26、中性子応答関数を図 2.27 に示す。 γ 線に関して、2 MeV 以上のエネルギーでは壁厚 10 mm まで熱外中性子用電離箱と類似した形状を示している。中性子に関しては、高速中性子領域 (40 keV -) では応答の壁厚依存性は小さい。熱外中性子領域 (0.5 eV - 40 keV) では、1 keV から 40 keV のエネルギーにおいては壁厚の増加に従って応答が低くなり、1 keV 未満では壁厚の増加に従って応答が高くなっている。

1 keV から 40 keV では、中性子と壁材およびガス中の水素原子との弾性散乱で生成された反跳陽子の寄与が大きく、壁厚の増加に伴って散乱および減速を受けてガス領域に付与するエネルギーが減少する。1 keV 未満では電子による寄与が大きく、壁材の増加に従い生成電子による寄与が増加する。1 keV 未満の応答はそれ以上の応答に比べ 2 桁程度小さいため、実際に応答として寄与する熱外中性子成分の大部分は 1 keV 以上のエネルギーを有する熱外中性子であると考えられる。

壁無しの場合、1 keV 未満で応答関数が増加する。これは、計算で仮定した大気中の窒素との (n,p) 反応で生成された陽子による寄与である。

・電離箱応答の壁厚依存性

図 2.28、図 2.29 に高速中性子用電離箱に対する応答の壁厚依存性および全応答に占める高速中性子成分の応答比率を示す。壁厚の増加に従い、 γ 線および熱外中性子起因の応答が増加するため高速中性子に対する応答比率が低下していることが分かる。数 100 meV 以下の熱中性子成分は大部分がカドミウムフィルターにより除去され、ビーム中にはほとんど混在していないため、熱中性子成分の応答の壁厚依存性は現れなかった。 γ 線および熱外中性子起因の応答を抑えるためには、壁厚は 2 mm 程度が適しており、同厚さにおいて 65% 程度の応答比率で高速中性子成分を測定できることが分かる。

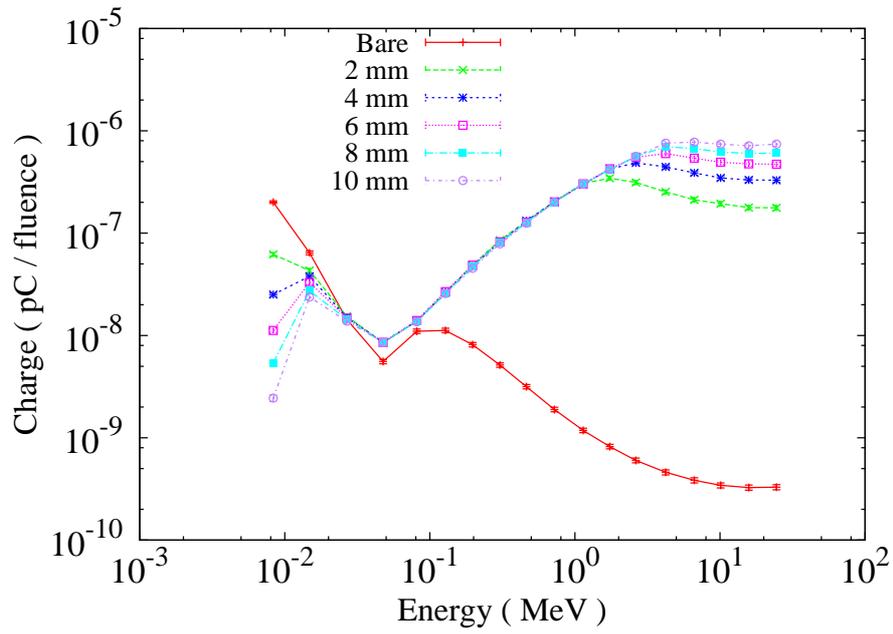


図 2.26 高速中性子用電離箱に対する γ 線応答関数 $R_g(E)$

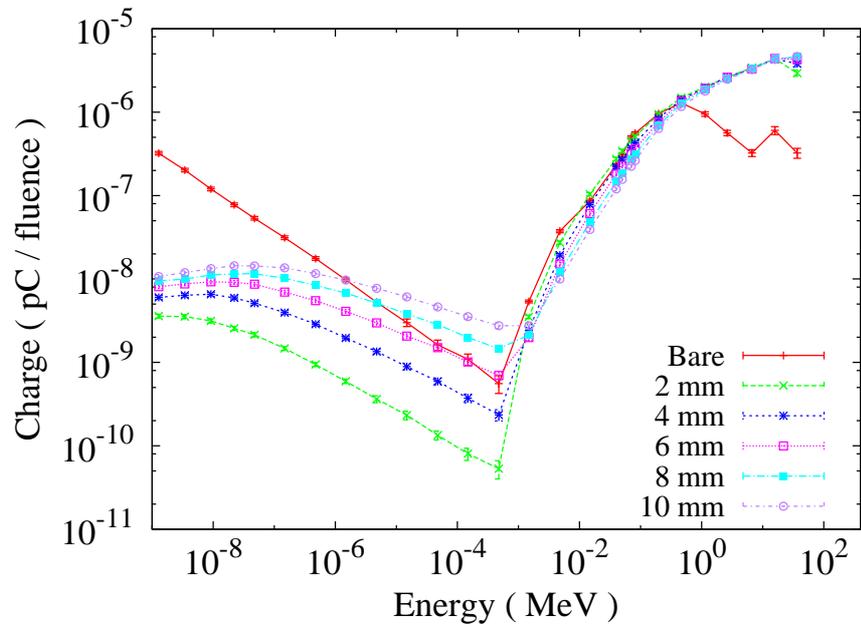


図 2.27 高速中性子用電離箱に対する中性子応答関数 $R_n(E)$

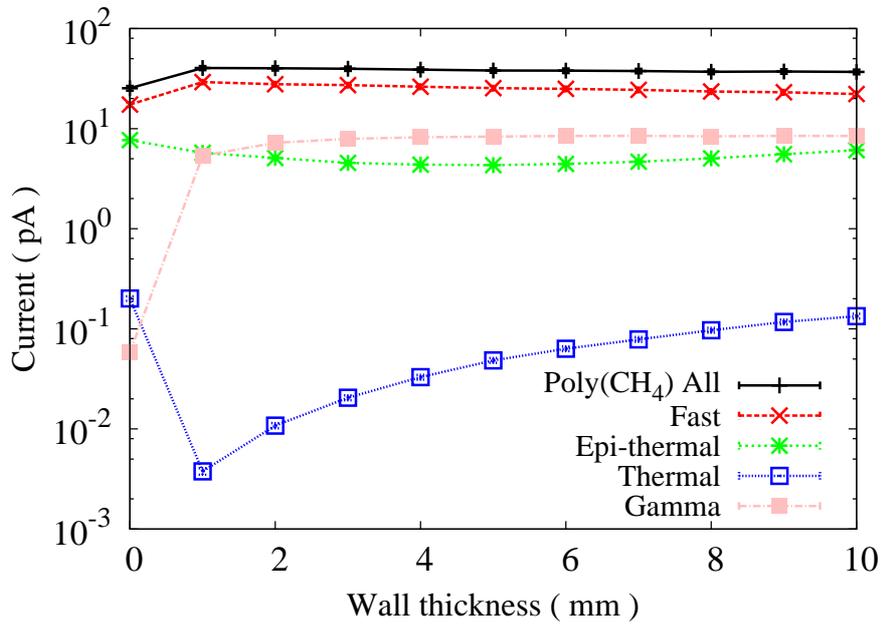


図 2.28 高速中性子用電離箱応答の壁厚依存性

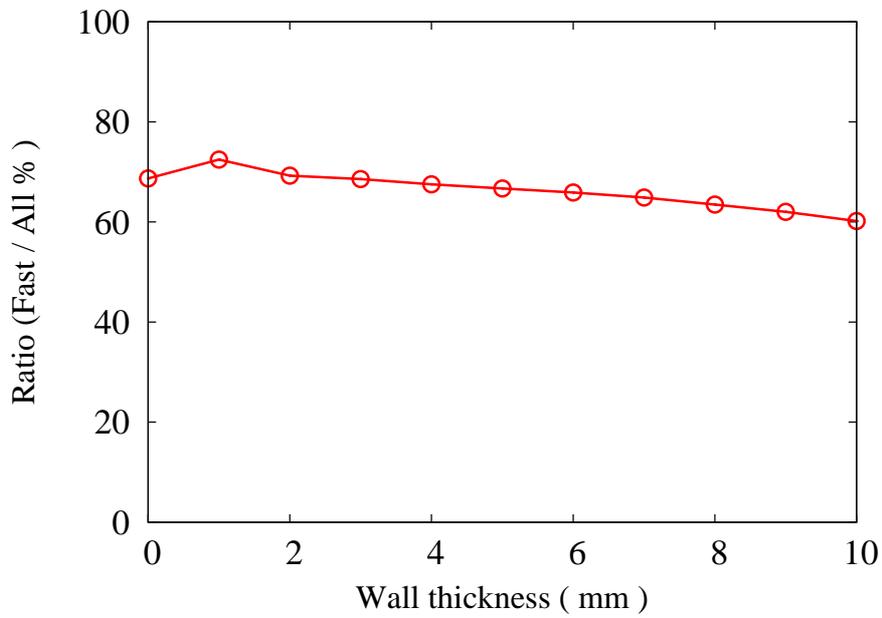


図 2.29 高速中性子用電離箱応答の全体に占める高速中性子の応答比率

2.4 まとめ

KUR-HWNIFの熱外中性子ビームを対象とした「多重電離箱システム」を構築するために、熱、熱外、高速中性子および γ 線成分それぞれに特化した4種類の電離箱の構造に関する検討を行った。各電離箱を構成する壁材、壁厚、充填ガスについて、最適化検討をシミュレーションコードPHITSを用いて行った。壁およびガスで構成される電離箱モデルに対してPHITSを用いた計算を行うことにより、発生する粒子の付与エネルギーから、応答に寄与する粒子および反応の依存性を読み取ることができた。計算で得られた電流は全ての組み合わせにおいて、市販の電流計で測定可能な10 pA以上であることが確認された。本研究で検討した電離箱の最適な組み合わせについて以下にまとめる。

・ γ 線用電離箱

計算では壁材および充填ガスの全ての組み合わせの電離箱について、 γ 線による応答は壁材が存在することにより増加し、中性子3成分と比較して高い応答を示した。アルゴンは二酸化炭素に比べ、0.2倍から0.7倍程度高速中性子に対する応答が小さい。グラファイト壁材は他の2種類の壁材(マグネシウム、アルミニウム)よりも熱中性子に対する (n,γ) 反応の断面積が一桁程度小さい。これらのことから、G(Ar)の組み合わせが γ 線用電離箱として適していると考えられる。全応答に占める γ 線応答比率は壁厚3 mm以上で95%程度であった。電離箱は中性子場を乱さないようにサイズをコンパクトにすることが望まれる。従って、本研究で得られた結果では、壁厚は3 mm程度が適していると考えられる。

・熱中性子用電離箱

熱中性子に対する応答は、壁材からの寄与は少なく、ガスの寄与が大部分を占めることが分かった。元来、KUR-HWNIFの熱外中性子ビーム中の熱中性子成分は少ないため、ビーム主成分である熱外中性子ならびに高速中性子および γ 線に対する

応答に比べ、熱中性子に対する応答は相対的に小さくなった。しかしながら、各中性子成分のフラックス当たりの応答で比較すると、 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 電離箱は、その熱中性子に対する応答が高速中性子と同程度であった。熱中性子ビームに対する結果では熱中性子に対する応答が他の成分に比べて非常に高いことから、 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 電離箱は熱中性子測定用の電離箱として有用であると考えられる。

熱中性子成分用電離箱については、熱成分に対する応答比率を高めるために、壁は薄くすることが望ましいと考えられる。壁材の強度を考慮すると、2～3 mm の厚さもしくはメッシュ構造の壁材と窒素ガス(空気)との組み合わせが適していると考えられる。この組み合わせにおいて、熱外中性子ビームでは全成分に占める熱中性子成分の応答比率は5%程度であった。熱中性子ビームでは、応答比率は98%程度であり、非常に高い応答比が得られることが確認できた。

・ 熱外中性子用電離箱

ポリエチレン壁材により熱外中性子成分が減速を受け、減速された中性子が窒素ガスと効果的に(n,p)反応を起こすことが確認された。本研究で検討したポリエチレン壁内壁に膜厚1.8 μm の天然硼素を蒸着した壁材を用いることで、 $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ 反応により発生する α 粒子と ^7Li 粒子により、ガスのみと比べ中性子3成分で約3桁以上の高い応答が得られることが分かった。壁厚30 mm 付近に熱外中性子成分応答のピークを示し、計算上は全成分に対して95%以上の高い割合で熱外中性子成分に対する応答が得られることが確認された。

「多重電離箱システム」を構成する他の電離箱と同様に、熱外中性子成分用電離箱についても中性子場を極力乱さない小型のものが望まれる。今回検討した1から50 mm の壁厚では、全て応答比率は90%以上であった。電離箱を取り付ける予定である輸送台車の照射面側とビスマス面との間隔が5 cm 程度であることを考慮すると、壁厚は10 mm 程度が適していると考えられる。

・高速中性子用電離箱

壁厚の増加に従い増加する熱外中性子成分および γ 線成分の寄与を低減する意味で、2 mm 厚程度のポリエチレン壁材とメタンガスの組み合わせが適していると考えられる。この組み合わせにおいて、全応答に占める高速中性子応答は65%程度であった。

参考文献

- [1] 山本和樹, 熊田博明, 岸敏明, 大竹真一, 檜村隆則, 野沢晶, イオンチャンバーを用いた JRR-4 中性子ビームの特性測定, 平成 14 年度専門研究会報告書, 京都大学原子炉実験所, 45-47 (2002).
- [2] C.P.J.Raaijmakers, E.L.Nottelman, *et al.*, Dose monitoring for boron neutron capture therapy using a reactor-based epi-thermal neutron beam, *Phys. Med. Biol.* **41**, 2789-2797 (1996).
- [3] O.K.Harling, D.J.Moulin, *et al.*, On-line beam monitoring for neutron capture therapy at the MIT Research Reactor, *Nucl. Instr. Meth.* **B101**, 464-472 (1995).
- [4] L. Lüdedemann, T.Matzen, *et al.*, Determination of the thermal neutron flux in a fast neutron beam by use of a boron-coated ionization chamber, *Med. Phys.* **22**(11), 1743-1747 (1995).
- [5] J.F.Ziegler, J.P.Biersack, and U.Littmark, The Stopping and Range of Ions in Solids. [Online] Available: <http://www.srim.org>, [2013, February 12].
- [6] K.Niita.RIST ニュース. **40**, 3-7 (2005).
- [7] K.Niita.RIST ニュース. **43**,20-29 (2007).
- [8] K.Niita.RIST ニュース. **45**, 21-29 (2008).
- [9] J.F.Breismeister (Ed.). "MCNPTM-A General Monte Carlo N-particle Transport Code Version 4C". LA-13709-M,Los Aramos National Laboratory, 2.76-2.81 (2000).
- [10] 仁井田浩二, PHITS ver 2.08 User's Manual. 高度情報科学技術研究機構,42-43 (2006).

- [11] M.B.Chadwick, P.Obložinský, M.Herman *et al.*, "ENDF/B-VII.0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology", *Nucl. Data Sheets* **107**(12), 2931-3118 (2006).
- [12] H.Tawara and N.Ishida,J.Kikuchi, Measurements of the W value in argon, nitrogen, and methane for 0.93 to 5.3 MeV alpha particles, *Nucl. Instr. Meth.* **B29**, 447-455 (1987).
- [13] R.Huber, D.Combecher, and G.Burger, Measurement of Averaged Energy Required to Produce an Ion Pair (W Value) for Low-Energy Ions in Several Gases, *Radiat. Res.* 101, 237-251 (1985).
- [14] J.A. Phipps, J.W. Boring, and R.A.Lowry, Total Ionization in Argon by Heavy Ions of Energies 8 to 100 keV, *Phys. Rev.* 135(1A), A36-A39 (1964).
- [15] D.J.Thomas, and M.Burke, W value measurements for protons in tissue-equivalent gas and its constituent gases, *Phys. Med. Biol.* **30**(11), 1202-1213 (1985).
- [16] M.N.Varma and J.W.Baum, Energy dependence of W for Alpha Particles in N₂, CO₂, CH₄, Ar, H₂ and Rossi-type Tissue-equivalent Gases, *Phys. Med. Biol.* **23**(6), 1162-1172 (1978).
- [17] *Average Energy Required to Produce An Ion Pair*, ICRU report No.31, International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (1979).
- [18] J.Lindhard, V.Nielsen, M.Scharff and P.V.Thomsen, Integral equations governing radiation effects (Notes on atomic collisions, III) K.Dan. Vidensk. Selsk. *Mat.-Fys. Medd.* **33** (10), 1-42 (1963).
- [19] J.A.Dennis, Computed Ionization and Kerma value in Neutron Irradiated Gases, *Phys. Med. Biol.*, **18**(3), 379-395 (1973).

第3章 多重電離箱システムにおける各電離箱の応答特性評価

3.1 諸言

多重電離箱システムの成分分離評価は、第2章の式(2.2)に示す行列式から各成分のフルエンスを導出することで行われる。式を解くためには予め対象とする照射場において各電離箱の測定対象成分および他の3成分に対する応答特性(応答係数： k)を把握しておくことが必要である。

理想的な応答特性評価方法は、対象照射場において各々の成分を電離箱に照射した際のフラックスに対する応答を評価することである。しかしながら、実際の中性子照射場には γ 線が混在しており、また各成分についても単色のエネルギーでビームを得ることは困難である。そのため、複数の成分が混在した状態で4成分に対する各電離箱の応答特性を評価する必要がある。

KUR-HWNIFではスペクトルシフター層の重水厚さの調整およびカドミウムシャッターの開度調整により、照射モードを変更し、様々な線質を持つ中性子ビームを得ることができる。複数の照射モードに対する電離箱応答を測定することで、4成分の応答特性を評価することができる。

第2章のシミュレーション主体の検討結果を参考に、各成分用の電離箱を選定あるいは作製した。それらの電離箱の各成分に対する応答特性を実験的に評価した。本章では、まず、電離箱の応答特性評価のために提案された評価手法および手順について記述する。そして、その評価手法と実験結果を用いて導出された各電離箱の応答係数 k を示す。それらの結果から、最終的に多重電離箱システムで使用する電離箱の組み合わせについて再検討した。

3.2 使用電離箱および測定体系

3.2.1 市販電離箱

第2章の電離箱最適構造に関する検討により、 γ 線成分および高速中性子用電離箱に関しては、市販されている電離箱でも両成分に対して比較的高い応答が得られることが確認された。そこで、本研究では γ 線用にはFar West Technology(FWT)社製IC-17シリーズのグラファイト壁電離箱(IC-17G)、高速中性子用には同社のポリエチレン壁電離箱(IC-17P)を選定し、それぞれアルゴンガスおよびメタンガスを充填したものをを用いることにした。また、中性子線量測定に広く用いられている組織等価壁電離箱(IC-17)および組織等価ガスの組み合わせについても評価を行い、IC-17Pと比較することで、中性子応答の壁材質および充填ガス等の構造材に関する依存性を確認した。FWT社製IC-17シリーズ電離箱の外観を図3.1に示す。

3.2.2 作製電離箱

熱および熱外中性子用電離箱としては、FWT社製IC-17Mの本体をベースに、壁を変更したものをを用いた。

熱中性子用については、窒化珪素製の壁に変更し、窒素ガスをを用いた。壁の外側を、導電性を保持するために、厚さ11 μm のアルミニウム箔で覆った。

熱外中性子用については、ポリエチレン製の壁に変更し、窒素ガスをを用いた。図3.2に示すように、壁の内側に天然硼素の薄膜および導電性保持のための銅薄膜を蒸着した。厚さ5 mmおよび10 mmの2種類の壁を用意し、中性子の減速効果およびその応答特性の違いを評価した。

内壁に天然硼素が蒸着された熱外中性子用電離箱では、中性子ビーム中に混在する熱中性子成分の応答の混入が考えられる。そこで、10 mm厚のポリエチレン壁については、熱中性子成分に対する応答を低減するために、壁の外側5面を縦50 mm×横50 mm×厚さ2 mmのフッ化リチウムLiF(^6Li 濃縮96 wt%)製のカバー

で覆った。写真 3.1 に熱中性子成分除去のために用いた LiF カバーおよび電離箱 (Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂)) の外観を示す。

3.2.3 測定体系

電流計として東洋メディック社製 RAMTEC smart を使用した。FWT 社製 3 軸ケーブル、東洋メディック社製 MHV コネクターおよび BNC 信号コネクターの変換ケーブルを用いて電流計と電離箱を接続し、高電圧印加および信号収集を行った。ガス流量は KOFLOC 社製精密ニードルバルブ付流量計を用いて調整し、フッ素樹脂製ガスチューブ (内径 1.59 mm、外径 3.17 mm) を介して電離箱にガスを供給した。FWT 社製電離箱では印加電圧を中心電極から見て、壁電圧を負極性に設定することで中心電極側が正極性となり、電離箱内で電離した電子を中心電極で収集する構造となっている。電離箱の印加電圧およびガス流量率に関しては A. D. Kantz, 1980 により推奨された 250 V、5 cc/min に設定した [1]。表 3.1 に実験に用いた電離箱の仕様、動作条件および略記形式を示す。

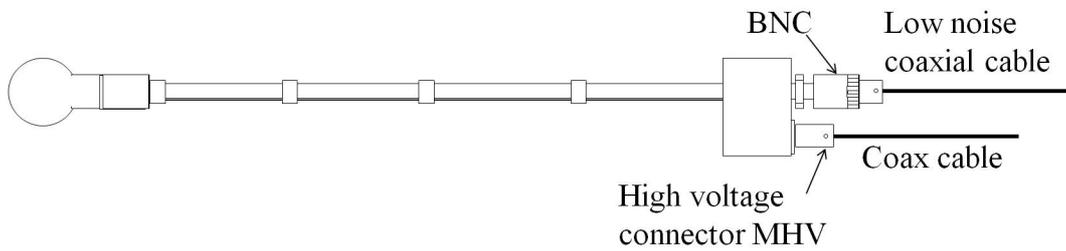


図 3.1 FWT 社製電離箱の外観

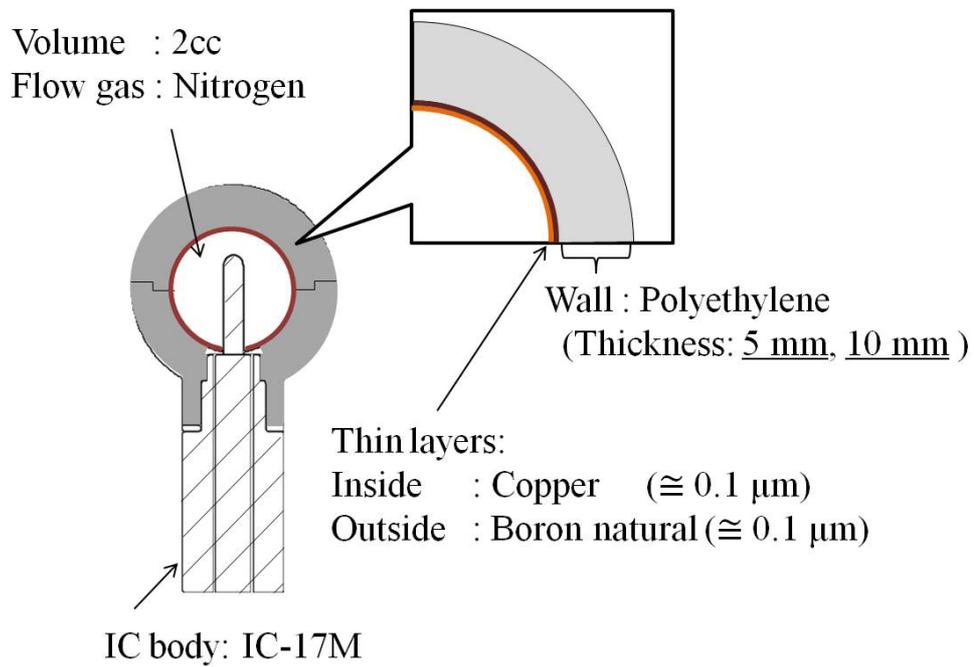


図 3.2 熱外中性子用電離箱 (Poly5mm_{BCu}(N₂), Poly10mm_{BCu}(N₂)) の
検出部の断面図

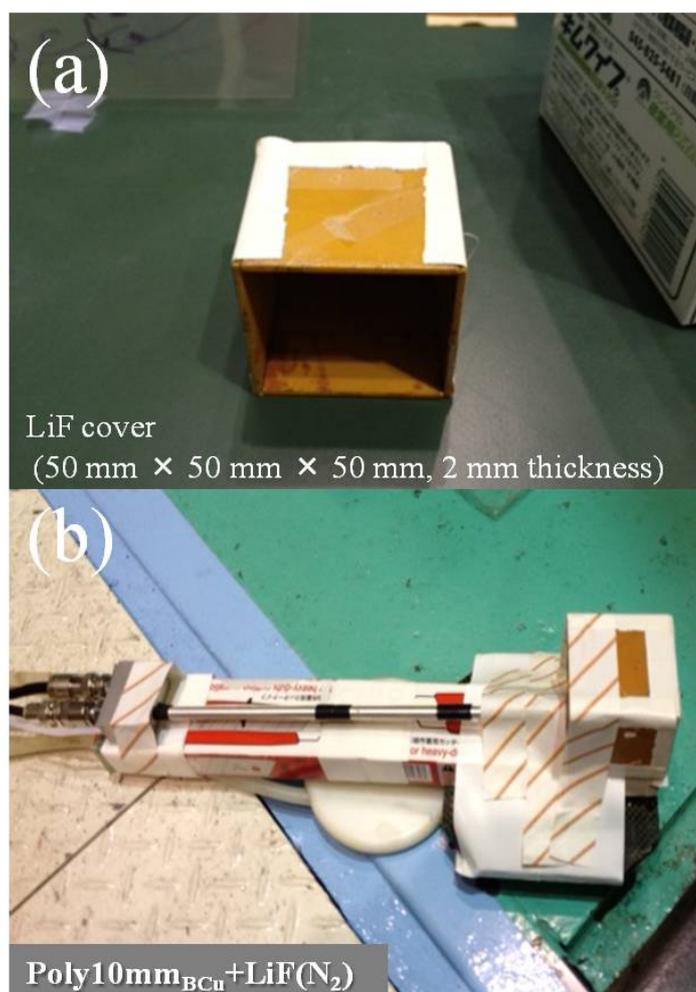


写真 3.1 (a) 熱中性子成分低減のために用いた LiF カバー、
(b) 電離箱 (Poly10mm_{BCu}+LiF (N₂)) の外観

表 3.1 市販電離箱および作製電離箱の仕様と動作条件

Model No.	Commercially available chambers			Originally manufactured chambers		
	IC-17G	IC-17P	IC-17	IC-17M	IC-17M	IC-17M
Volume (cc)	2.5	1	1	2		IC-17M
Wall	Graphite	Polyethylene ^a	Tissue equivalent plastic ^b	Silicon nitride		Polyethylene with boron + copper
Wall thickness (mm)	3.0	5.0	5.0	3.0	5.0	10.0
Wall density (g/cm ³)	1.80	1.12	1.13	1.12		1.12
Wall density (g/cm ³)	1.80	1.12	1.13	1.12		1.12
Flow gas	Argon	Methane	Tissue equivalent (Methane base ^c)	Nitrogen		Nitrogen
Flow rate (cc/min)	5	5	5	5		5
Applied voltage (V)	-250	-250	-250	-250		-250
Abbreviation	G(Ar)	Poly(CH ₄)	TE(TE)	Si ₃ N ₄ (N ₂)	Poly5mm _{BCu} (N ₂)	Poly10mm _{BCu} (N ₂) Poly10mm _{BCu} +LiF(N ₂)

^aGraphite impurity < 3 wt%

^bTissue-equivalent plastic (H: 10.1, C: 77.6, N: 3.5, O:5.2, F:1.7, Ca:1.8, others:1 in wt%)

^cTissue-equivalent gas (CH₄: 64.4, CO₂: 32.4, N₂: 3.2 in wt%)

3.3 電離箱応答特性評価に使用した放射線源

3.3.1 ^{60}Co γ 線照射装置

京都大学原子炉実験所の ^{60}Co γ 線照射装置は、地下の線源格納容器内に格納された ^{60}Co γ 線源を遠隔操作で床上 70 cm まで押し上げることによって γ 線照射を行う押上式 γ 線照射装置である。2008 年 2 月に線源の更新が行われ、最大放射能強度 414 TBq の ^{60}Co γ 線源が装填された。2010 年 4 月 1 日時点で、最高線量率 27 kGy/h での照射が可能となっており効率的な照射実験を行うことができる。照射室は 30 m² 程度の面積を有しており、適切な測定位置を選択することにより多様な種類、大きさ、形状の対象物に対して γ 線照射を行うことができる。純粋な γ 線照射を行う実験設備として、実験所内の他の実験設備を補完する役割を担っている。本研究では ^{60}Co γ 線照射装置を γ 線成分特性評価のための γ 線源として使用した

3.3.2 京都大学原子炉重水中性子照射設備 (KUR-HWNIF)

KUR-HWNIF は KUR(最大出力 5 MW) に設置されている BNCT 用中性子照射場である。本設備は 1996 年に改修され、スペクトルシフターの機能を備えた 4 層の重水 (Deuterium water: D₂O) の厚さおよびビスマス面の炉心側に設置された厚さ 1 mm のカドミウムフィルター (Cadmium filter: CF) の開度を調整することで、ほぼ純粋な熱中性子ビームから熱外中性子ビームまで様々なエネルギースペクトルの中性子ビームが利用可能となった [2]。照射レーン装置を用いることで、照射室への実験者の立ち入り無しに照射試料の入れ替えが可能である。図 3.3 に KUR-HWNIF および照射レーン装置の概要を示す。本研究では KUR の運転出力 1 MW 時に本設備で得られる中性子ビームを中性子源として使用した。

4 層の重水の厚さは炉心側から順に 10 cm、20 cm、30 cm、30 cm である。本設備の照射モードは CO-0011-F のように表記される。CO は 2 枚のカドミウムフィルターの状態を示しており、C が全閉 (Close)、O が全開 (Open) である。X は各重水層の重水の満たし具合を示しており、1 が満水、0 が空を意味している。最後のアルファ

ベットはビーム最下流に位置するビスマス層の厚さを示しており、18.4 cm の場合、F と表記する。表 3.2 に今回の実験に用いた照射モードの概要およびその略称を示す。重水厚さ 90 cm の照射モード CO-1111-F は照射場の強度不足ため、本実験では使用しなかった。

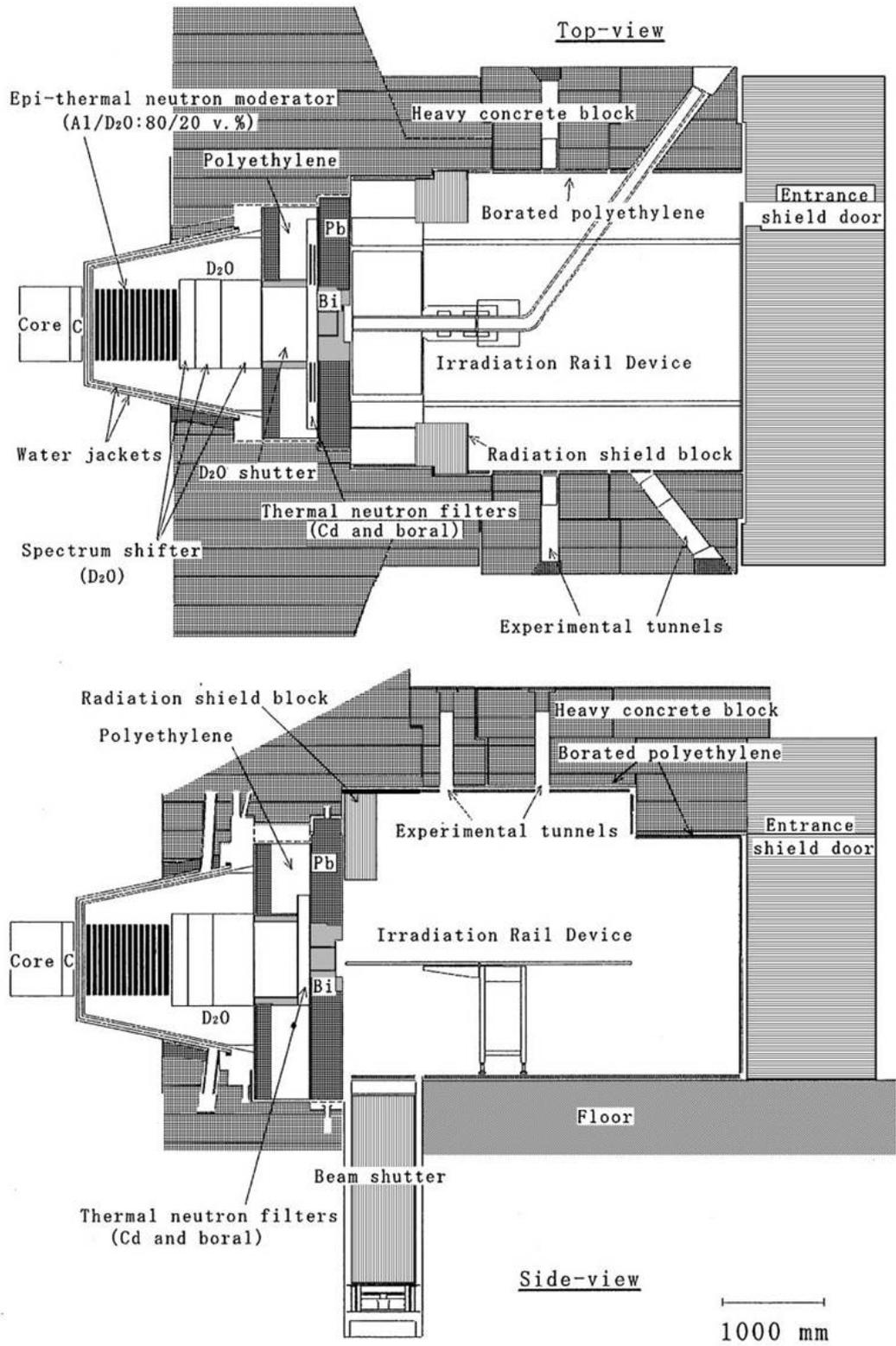


図 3.3 KUR-HWNIF および照射レール装置の概要

表 3.2 KUR-HWNIF 各照射モードの概要

Irradiation mode	D ₂ O thickness (cm)	Cadmium filter	Abbreviation
OO-0000-F	0	Open	D ₂ O(0)CFO ^a
OO-0011-F	30	Open	D ₂ O(30)CFO
CO-0000-F	0	Close	D ₂ O(0)
CO-0001-F	10	Close	D ₂ O(10)
CO-0010-F	20	Close	D ₂ O(20)
CO-0011-F	30	Close	D ₂ O(30)
CO-0101-F	40	Close	D ₂ O(40)
CO-0110-F	50	Close	D ₂ O(50)
CO-0111-F	60	Close	D ₂ O(60)

^aCFO: Cadmium filter (Open)

3.4 電離箱応答特性の評価方法

3.4.1 γ 線成分に対する応答係数の算出方法

$^{60}\text{Co}\gamma$ 線照射装置を用いて行った実験では、まず応用技研社製 AE-132a 型線量計および C-110 JARP 型校正用電離箱 (有感体積 0.6 cc) を用いて、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線源から距離 200 cm, 250 cm, 380 cm, 470 cm, 500 cm, 520 cm の 6 点において空間吸収線量率を測定した。その後、各位置において校正を行う電離箱の電流値を測定することで $^{60}\text{Co}\gamma$ 線の線量率に対する電離箱応答を確認した。発泡スチロールおよび木材で構成された台座を用いて、電離箱の高さを線源と同様に床面から 70 cm とした。図 3.4 に選択した測定点の位置を、写真 3.2 に電離箱のセッティング状況を示す。

図 3.5 に $^{60}\text{Co}\gamma$ 線 (単色エネルギー 1.17 MeV および 1.33 MeV) ならびに MCNPX を用いた計算で得られた HWNIF の照射モード $\text{D}_2\text{O}(0)$ から $\text{D}_2\text{O}(60)$ の γ 線エネルギースペクトルを示す。このように、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線照射設備と HWNIF とでは、 γ 線エネルギースペクトルが異なっている。

そのため、電離箱毎に $^{60}\text{Co}\gamma$ 線実験で得られた電離箱の応答係数を、HWNIF の γ 線に対する応答係数に変換するための線質変換係数を求める必要がある。本研究では以下に示す方法を用いて線質変換係数を求め、HWNIF 中の γ 線成分に対する応答係数を算出した。

線質変換係数算出の手順

- (1) ^{60}Co からの γ 線のエネルギーを 1.17 MeV および 1.33 MeV の 2 種類の単色と仮定し、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線照射設備において較正用電離箱を用いて得られた各測定点の空間吸収線量率 (cGy/h) と ICRU report 47 に記載された両エネルギーにおける空気に対する光子のカーマ係数を用いてフラックスの値を推定する [3]。図 3.6 に ICRU report 47 に記載された空気に対する光子のカーマ係数を示す。
- (2) PHITS を用いたシミュレーションにより、各電離箱の γ 線に対する応答関数 $R_g(E)$ を求める。(1) で求めた各測定点におけるフラックスと $R_g(E)$ の 1.17 MeV および 1.33 MeV における生成電荷量 (C/fluence) との積から各測定点における $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する電流値 (pA) を算出する。
- (3) (2) の結果を用いて、各測定点における空間吸収線量率 (cGy/h) に対応する電流値 (pA) を最小二乗法により線形フィッティングすることで、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する応答係数 (計算値)(pA/(cGy/h)) を算出する。
- (4) HWNIF 照射場における γ 線スペクトルの公称値データ $\varphi_g(E)$ と各電離箱の応答関数 $R_g(E)$ の積分計算により、HWNIF の照射モード毎の γ 線に対する電流値 (pA) を算出する。
- (5) (4) の結果を用いて、Y.Sakurai *et al.* により報告された各照射モードにおける空間吸収線量率 (cGy/h) の公称値に対応する電流値 (pA) を、最小二乗法を用いて線形フィッティングすることで、HWNIF 各照射モードにおける γ 線応答係数を算出する [2]。
- (6) (3) および (5) で得られた応答係数の比 (HWNIF/ ^{60}Co) をとることで検出器毎に変換係数 ($^{60}\text{Co} \rightarrow \text{HWNIF}$) を求める。
- (7) $^{60}\text{Co}\gamma$ 線照射設備における γ 線成分応答特性実験で得られた応答係数に (6) の変換係数を掛けることで HWNIF 中の γ 線成分に対する応答係数を算出する。

上記で得られた γ 線成分に対する応答係数 (pA/(cGy/h)) は中性子 3 成分に対する応答係数と単位を合わせるために、空気に対する平均カーマ係数 (\bar{K}) で割ることで単位換算を行い、 γ 線フラックスに対する応答係数 (pA/(cm⁻²s⁻¹)) に変換した。ここで、平均カーマ係数 \bar{K} は以下の式で算出される。

$$\bar{K} = \frac{\int_0^\infty K_p(E) \cdot \varphi_g(E) dE}{\int_0^\infty \varphi_g(E) dE} \quad (3.1)$$

ここで K_p は光子の空気に対するカーマ係数 (Gy cm²)、 φ_g は HWNIF 中の γ 線フラックス (cm⁻²s⁻¹) である。各照射モード間で γ 線スペクトルは相対的に変化しないと仮定すると、HWNIF の γ 線平均カーマ係数は $\bar{K} = 5.36$ (pGy cm²) となる。

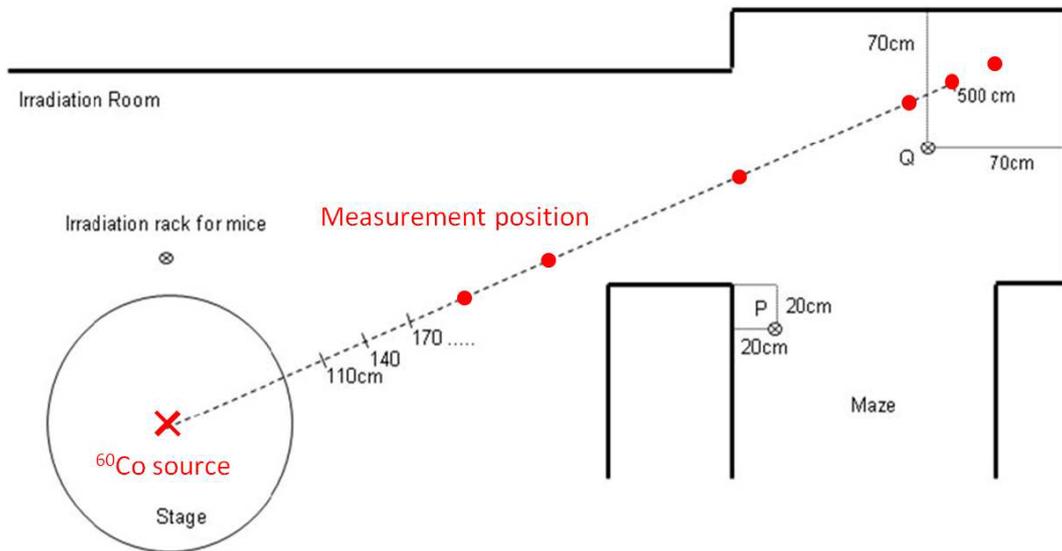


図 3.4 ^{60}Co 線照射装置照射室内の配置

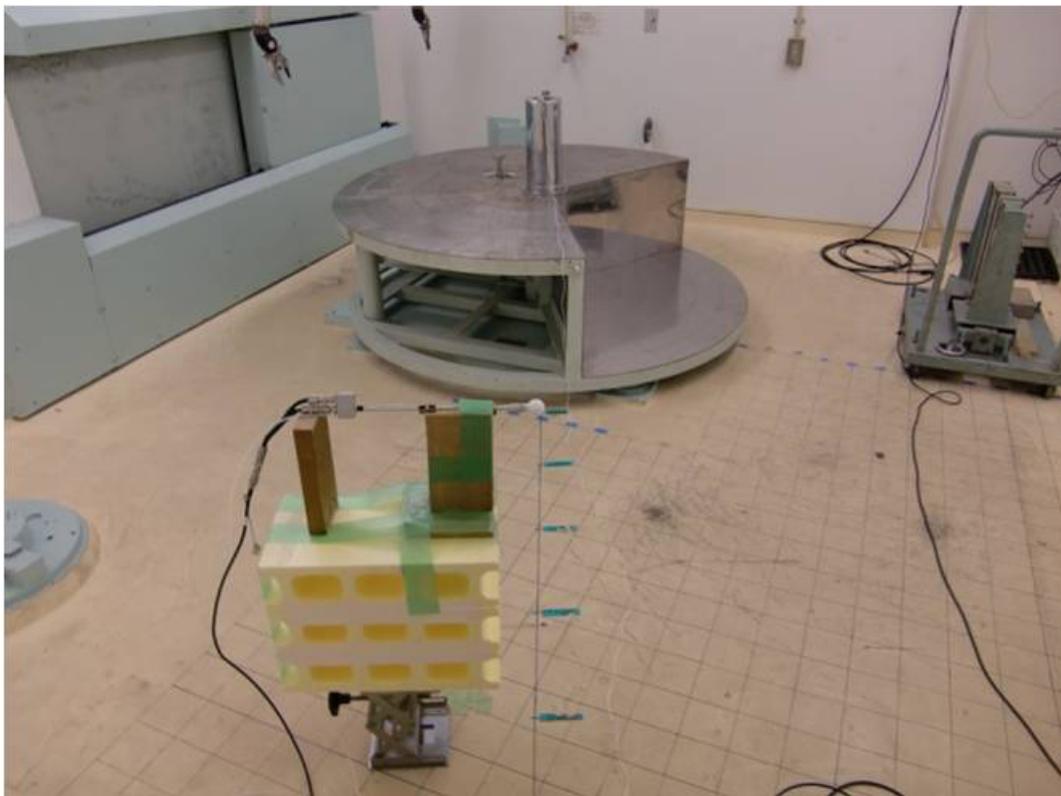


写真 3.2 ^{60}Co 線照射装置照射室の測定位置にセッティングされた電離箱

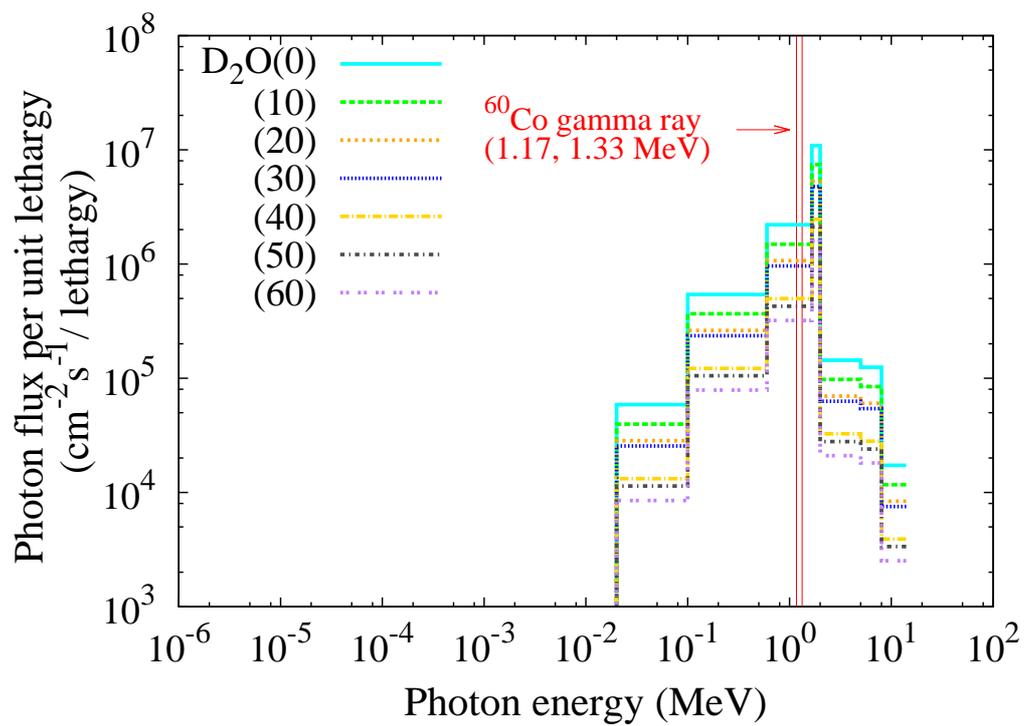


図 3.5 KUR 運転出力 1 MW 時での HWNIF 各照射モードの
 γ 線エネルギースペクトル (赤線は ^{60}Co γ 線源の 2 本の崩壊 γ 線)

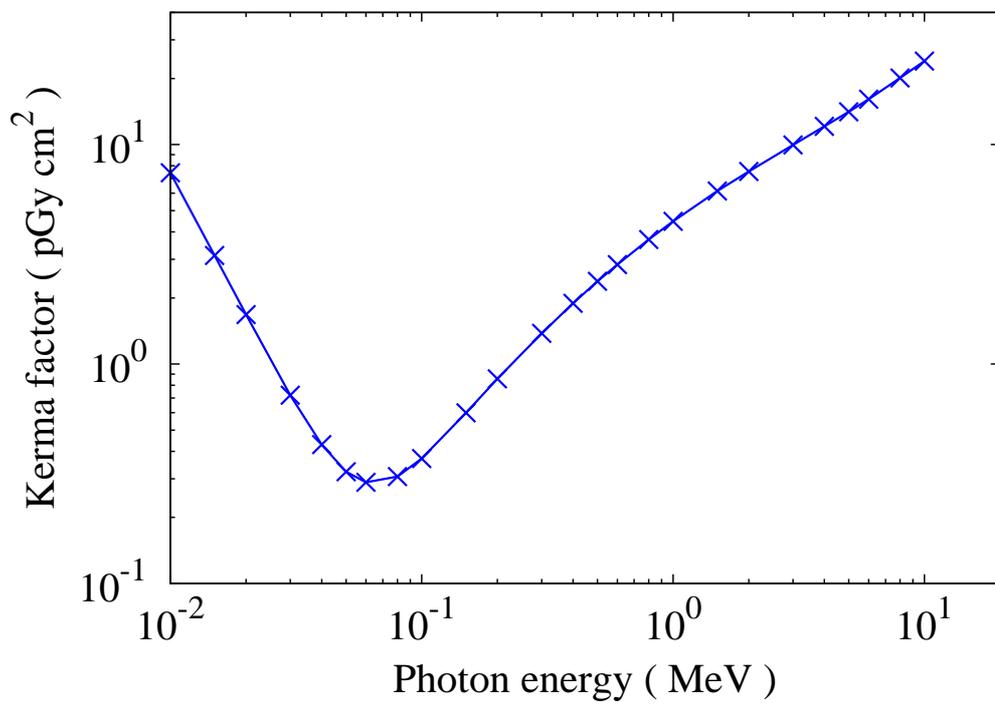


図 3.6 ICRU report 47 に記載された空気に対する光子のカーマ係数 [3]

3.4.2 中性子成分に対する応答係数の算出方法

中性子成分に対する応答特性は、KUR-HWNIFにおける照射レーン装置を用いた実験により評価した。電離箱は、写真 3.3 に示すように、照射レーン装置の試料台に固定した。

・高速中性子および熱外中性子応答特性の評価

KUR-HWNIF ではカドミウムフィルターを用いることにより、熱中性子成分のみをカットした中性子ビームを利用することができる [2]。さらに、重水厚さを変化させることにより、熱外および高速中性子領域のエネルギースペクトルを変えることができる。

図 3.7 に、照射モード $D_2O(0)$ から $D_2O(60)$ までのビスマス層表面中心付近の公称中性子エネルギースペクトルを示す。この図から分かるように、重水の厚さに応じて高速および熱外中性子領域双方のスペクトルが変化する。本実験では、シミュレーション計算から求めた高速および熱外中性子両成分の応答比を用いて、高速および熱外中性子各成分の応答を個別に評価した。

中性子 3 成分に関する照射モード $D_2O(XX)$ での応答比 $Ratio_{XXcm,component}$ は、以下の式により算出される。

$$Ratio_{XXcm,thermal} = \frac{\int_{0eV}^{0.5eV} R_n(E) \cdot \varphi_{n,XXcm}(E) dE}{\int_{0eV}^{\infty} R_n(E) \cdot \varphi_{n,XXcm}(E) dE} \quad (3.2)$$

$$Ratio_{XXcm,epi} = \frac{\int_{0.5eV}^{40keV} R_n(E) \cdot \varphi_{n,XXcm}(E) dE}{\int_{0eV}^{\infty} R_n(E) \cdot \varphi_{n,XXcm}(E) dE} \quad (3.3)$$

$$Ratio_{XXcm,fast} = \frac{\int_{40keV}^{\infty} R_n(E) \cdot \varphi_{n,XXcm}(E) dE}{\int_{0eV}^{\infty} R_n(E) \cdot \varphi_{n,XXcm}(E) dE} \quad (3.4)$$

ここで、 $R_n(E)$ は中性子応答関数、 $\varphi_{n,XXcm}$ は中性子フラックスを示す。

各成分起因の電離箱応答は、これらの応答比と以下の式を用いて見積もることができる。

$$\text{Estimated current}_{XXcm,component} = (\text{Measured current} - k_g \cdot \varphi_{g,XXcm}) \times \text{Ratio}_{XXcm,component} \quad (3.5)$$

ここで Measured current は測定電流、component は対象成分 (熱、熱外、高速)、 k_g は γ 線応答係数、 $\varphi_{g,XXcm}$ は γ 線の総フラックスを示す。照射モード $D_2O(XX)$ の component 成分の公称フラックスと estimated current $_{XXcm,component}$ との間に線形性があれば、フラックスに対する傾きから component に対する応答係数 ($\text{pA}/\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) を求めることができる。

実験で用いた複数の照射モードの中性子エネルギースペクトルは、熱外から高速中性子に渡る広いエネルギー範囲で異なっている。そのため、実際には、各照射モードで得られた estimated current と公称フラックスとの関係は完全な線形にはならない。

本実験では、まず中性子各成分のエネルギー群の強度変化に対する電離箱応答の線形性を確認した。その後、分離評価を行う照射モードの各成分フラックスに対する電流値の原点 (フラックスが $0 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のとき電流値は 0 pA) を基準とした傾きから、応答係数を求めた。

・熱中性子応答特性の評価

カドミウムフィルターの開度を調整して熱中性子成分の混入度を調整することにより、熱中性子成分に対する応答特性評価を行った。市販電離箱については $D_2O(30)$ から $D_2O(30)CFO$ まで、作製電離箱については $D_2O(0)$ から $D_2O(0)CFO$ までのカドミウムフィルターの開度調整を行い、熱中性子応答を評価した。

図 3.8 に示す $D_2O(0)$ 、 $D_2O(0)CFO$ 、 $D_2O(30)$ および $D_2O(30)CFO$ のビスマス層表面中心付近の公称中性子エネルギースペクトルから分かるように、熱外および高速中性子成分に変化を与えず、熱中性子成分を調整することができる。なお、中性子ビーム中に混在する γ 線成分も、フィルター開度に応じて変化する。

図 3.9 および図 3.10 に、それぞれ、 $D_2O(0)$ から $D_2O(0)CFO$ および $D_2O(30)$ から

D₂O(30)CFO までの熱中性子フラックスおよび γ 線線量率の公称データを示す。熱中性子成分の応答特性は、フィルター開度に対応した電離箱応答を測定し、 γ 線成分起因電流および熱外・高速中性子成分起因電流 (D₂O(0) もしくは D₂O(30) の結果を使用) を差し引くことで熱中性子起因電流を算出する。熱中性子フラックスに対する熱中性子起因電流の傾きを求めることで応答係数を評価した。

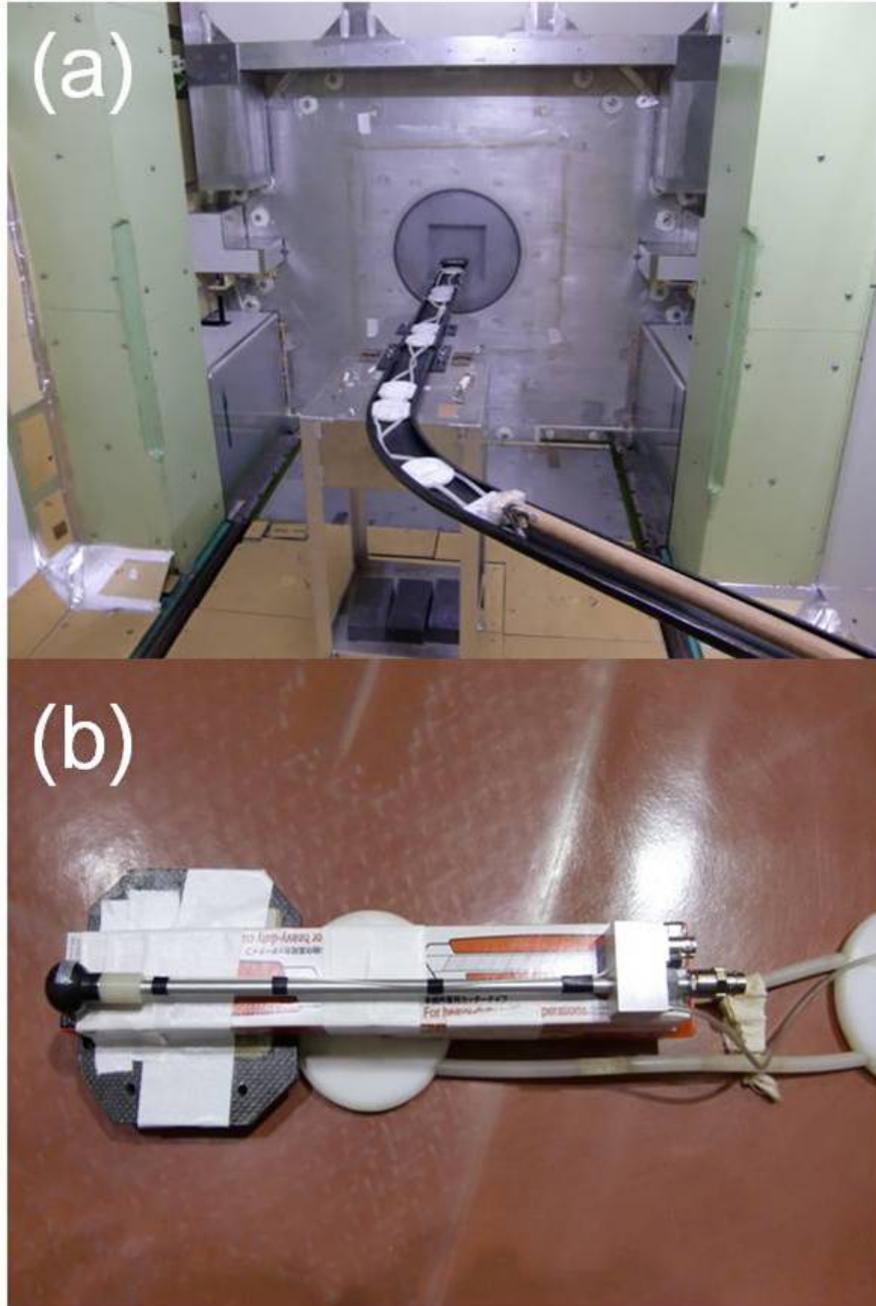


写真 3.3 HWNIF 実験における (a) 照射レール装置、
(b) 試料台上に固定された電離箱

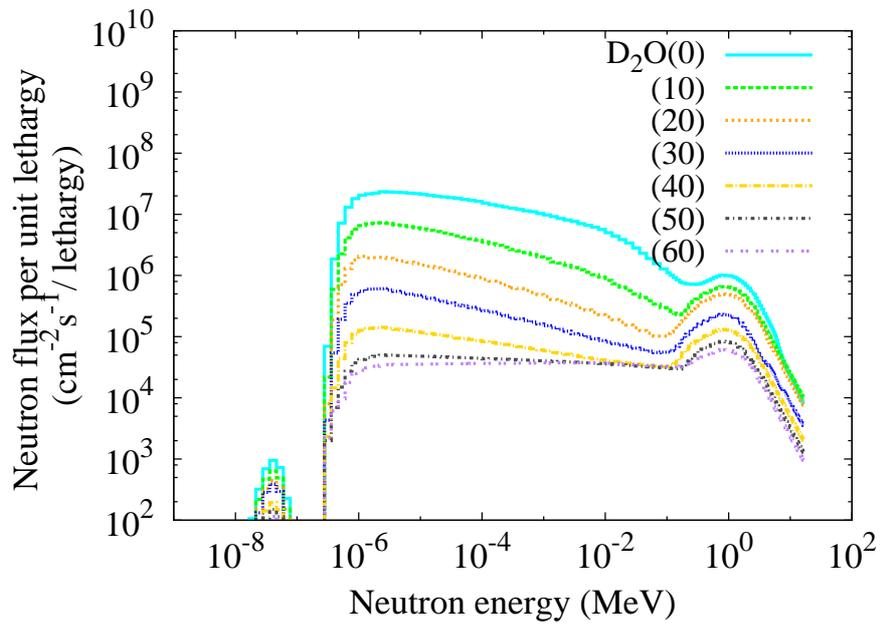


図 3.7 KUR-HWNIF(1 MW 運転時)における照射モード $D_2O(0)$ から $D_2O(60)$ までの中性子エネルギースペクトル

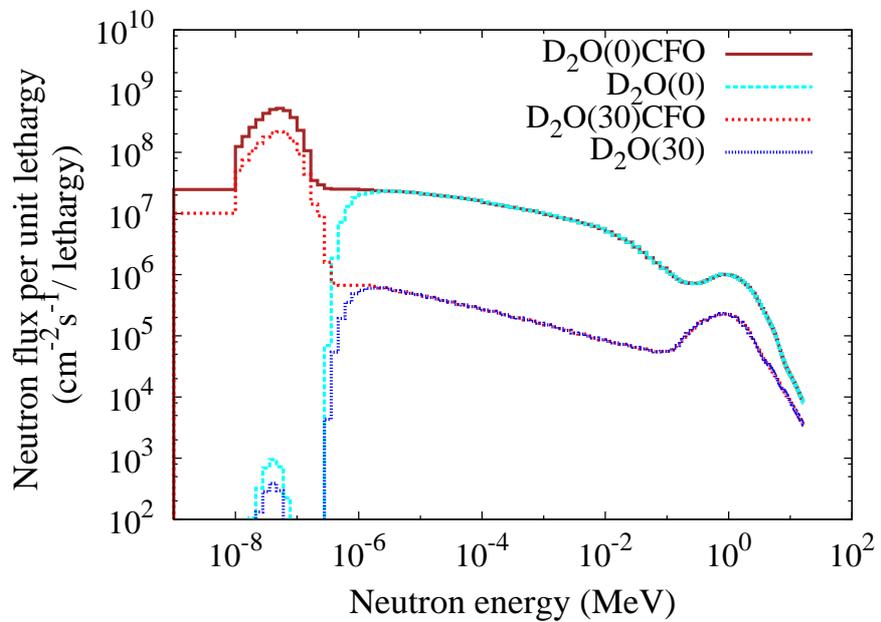


図 3.8 KUR-HWNIF(1 MW 運転時)における照射モード $D_2O(0)$ 、 $D_2O(0)CFO$ 、 $D_2O(30)$ および $D_2O(30)CFO$ の中性子エネルギースペクトル

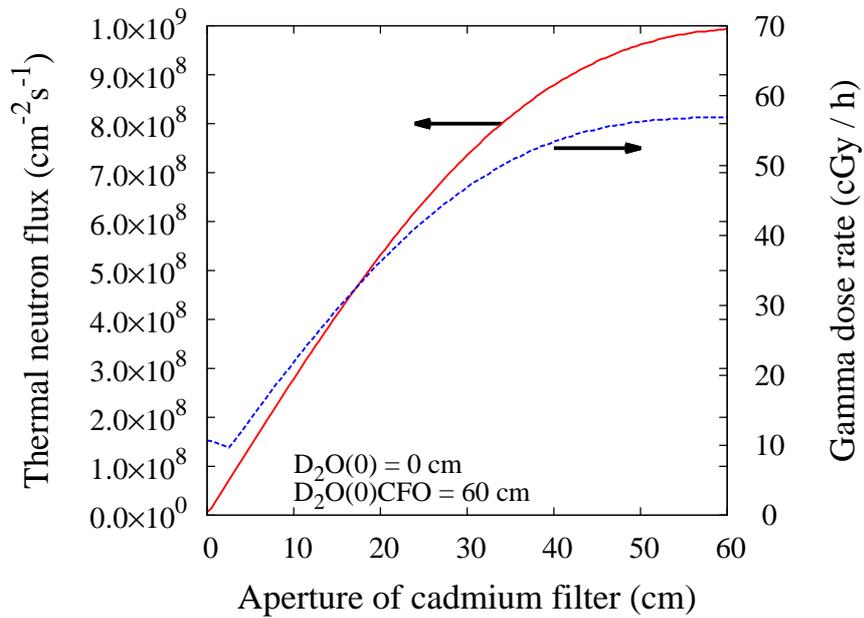


図 3.9 照射モード D₂O(0) から D₂O(0)CFO までの熱中性子フラックス
および γ 線線量率 (1MW 運転時)

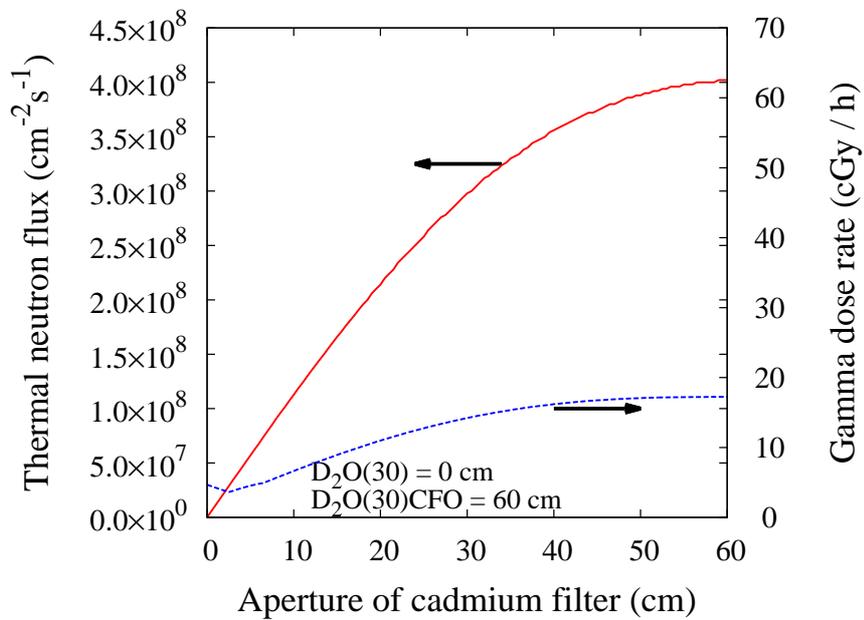


図 3.10 照射モード D₂O(30) から D₂O(30)CFO までの熱中性子フラックス
および γ 線線量率 (1MW 運転時)

3.4.3 γ 線変換係数および熱外・高速中性子成分分離比算出のための 計算方法

本研究のシミュレーションでは、第2章と同様に、モンテカルロ計算コード PHITS を使用した。電離箱を模擬した体系については、FWT 社のパンフレットに記載された形状および材質密度を参考に、実物に合わせて構築した。

KUR-HWNIF の照射室内では構造材などによる散乱の影響により、様々な方向からの光子および中性子が電離箱に入射すると考えられる。ここでは、ICRU report 85 に記載されたフルエンスの定義に則って、電離箱体系を取り囲む球線源を想定した [4]。

Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂) に関しては、大部分を占める前方からの熱中性子及び低エネルギー領域の熱外中性子の混入が LiF で囲まれた箱により除去できる。しかしながら、球線源を用いると、後方から LiF 壁のない部分から電離箱有感領域に入射した熱中性子および低エネルギー領域の熱外中性子成分の影響により、低エネルギー中性子に対する応答を過大評価してしまう。そこで、Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂) の計算体系に関しては、電離箱中心電極軸に対して平行なビームを出す面線源を想定した。

市販電離箱に関する計算体系を図 3.11 に、作製電離箱に関する計算体系を図 3.12 に示す。計算に用いた市販電離箱および 3 種類の作製電離箱に対する球線源モデルを図 3.13 に、Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂) に関する照射体系を図 3.14 に示す。各電離箱の光子および中性子に対する生成電荷量および応答関数の算出には、第2章のシミュレーションと同様の手法を用いた。

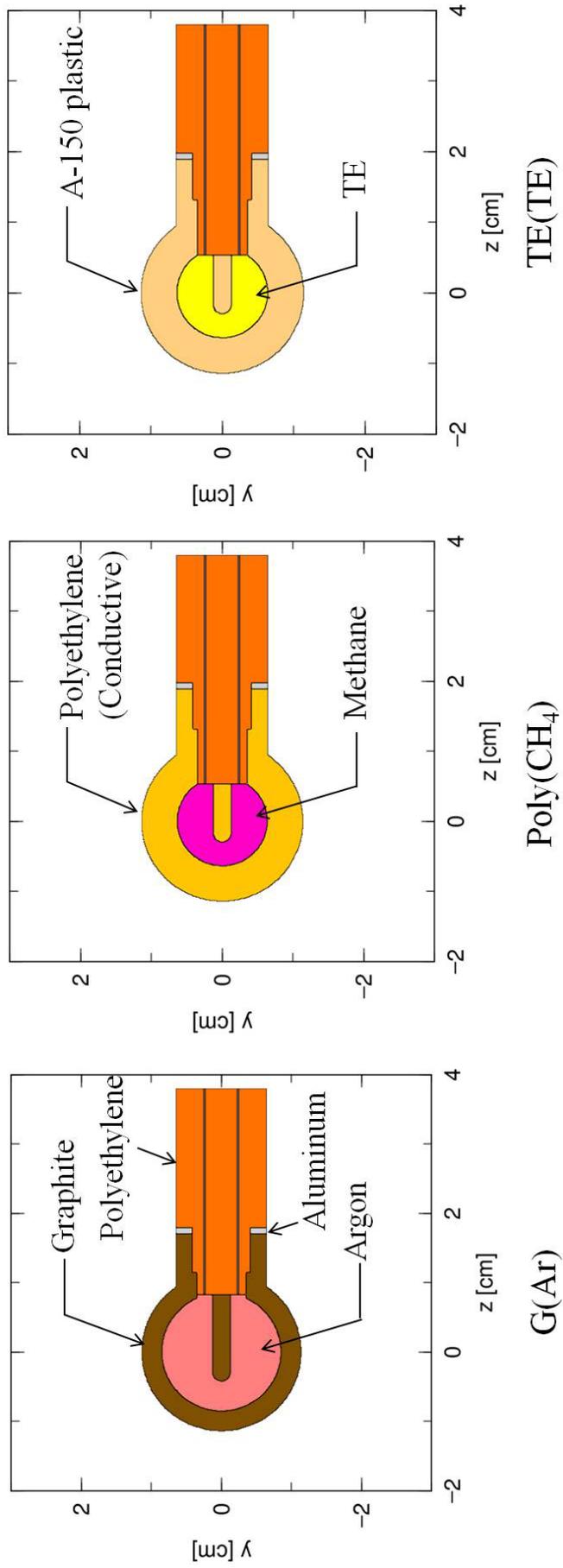
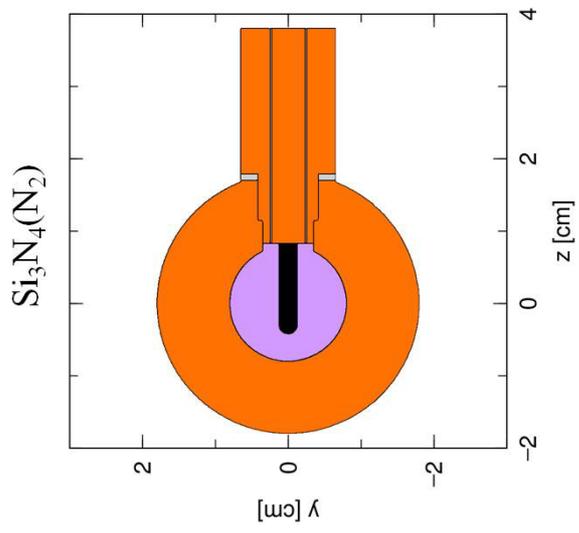
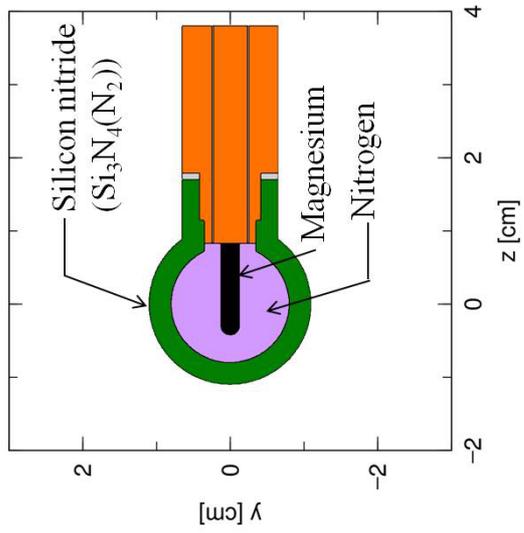
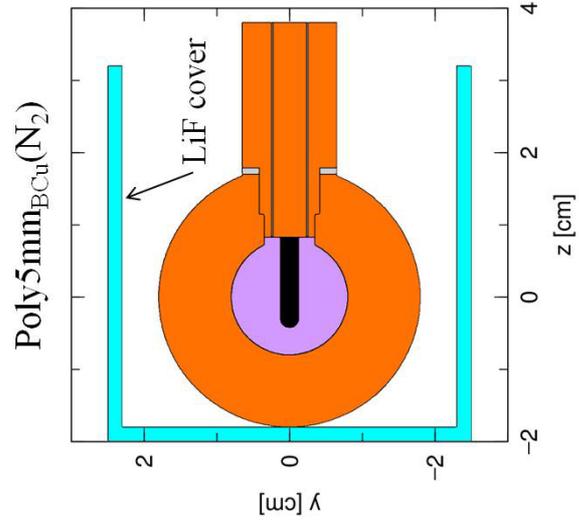
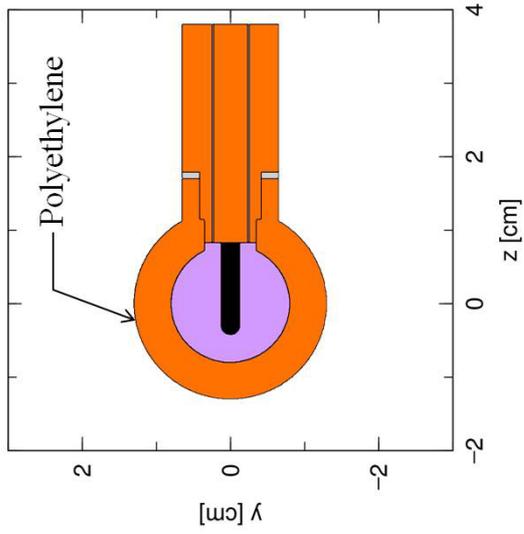


図 3.11 市販電離箱の計算体系



Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂)

Poly10mm_{BCu}(N₂)

図 3.12 作製電離箱の計算体系

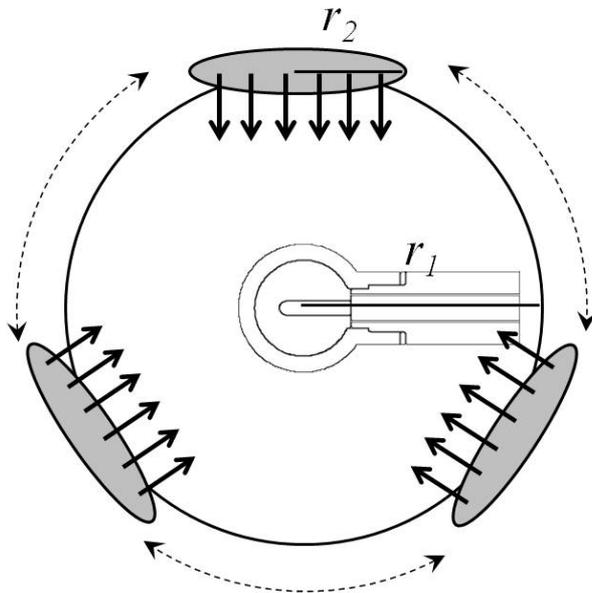


図 3.13 市販電離箱及び 3 種類の作製電離箱に対する球線源モデル
 (半径 $r_1 = r_2$ に設定)

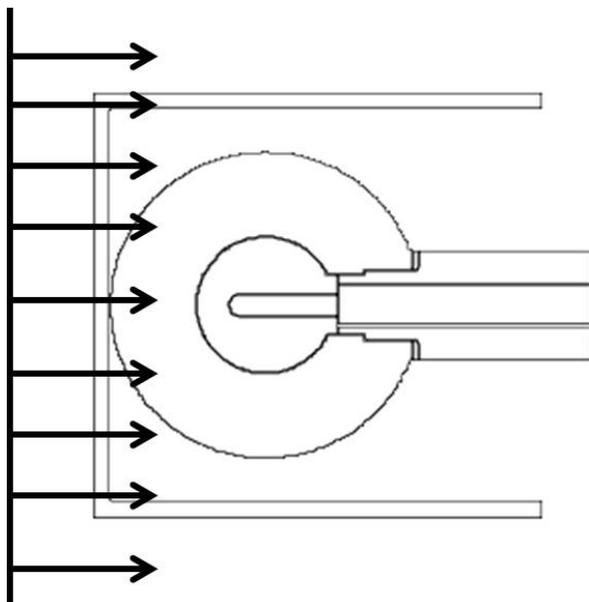


図 3.14 Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂) に対して用いた面線源

3.5 計算により算出された線質変換係数および中性子成分の応答比

3.5.1 線質変換係数

市販電離箱に対する γ 線応答関数および中性子応答関数を図 3.15 および図 3.16 に、作製電離箱に対する γ 線応答関数および中性子応答関数を図 3.17 および図 3.18 にそれぞれ示す。得られた γ 線に対する応答関数と KUR-HWNIF γ 線スペクトルおよび ^{60}Co 線源の値を用いて算出された市販および作製電離箱の線質変換係数を表 3.3 および表 3.4 にそれぞれ示す。KUR-HWNIF 中の γ 線平均エネルギーが ^{60}Co 線源のエネルギー (1.17 MeV および 1.33 MeV) に比べ低く、 γ 線応答関数から求める生成電荷量が減少するため、変換係数は 1 以下の値となった。

3.5.2 中性子成分の応答比

中性子成分 3 成分に関して、得られた中性子応答関数と KUR-HWNIF において各照射モードの中性子エネルギースペクトルと式 3.2、式 3.3、式 3.4 を用いて算出した各電離箱に対する 3 成分の応答比を表 3.5 および表 3.6 にそれぞれ示す。

表 3.5 から、高速中性子成分に対する熱外中性子成分の応答は、今回用いた市販電離箱 3 種類では非常に小さく、中性子応答の大部分が高速中性子によるものであることが分かる。一方、表 3.6 から、作製電離箱では高速中性子成分に対する熱外中性子成分の応答が相対的に増大しており、低エネルギー中性子に感度を持っていることが分かる。熱中性子に関しては、カドミウムフィルターによりその混在は低く抑えられ、全ての重水厚さにおいて $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 、 $\text{Poly}5\text{mm}_{\text{BCu}}(\text{N}_2)$ および $\text{Poly}10\text{mm}_{\text{BCu}}(\text{N}_2)$ で応答比は 1% 程度、その他の電離箱ではほぼ 0 となり応答に関してもほとんど寄与しないことが分かった。

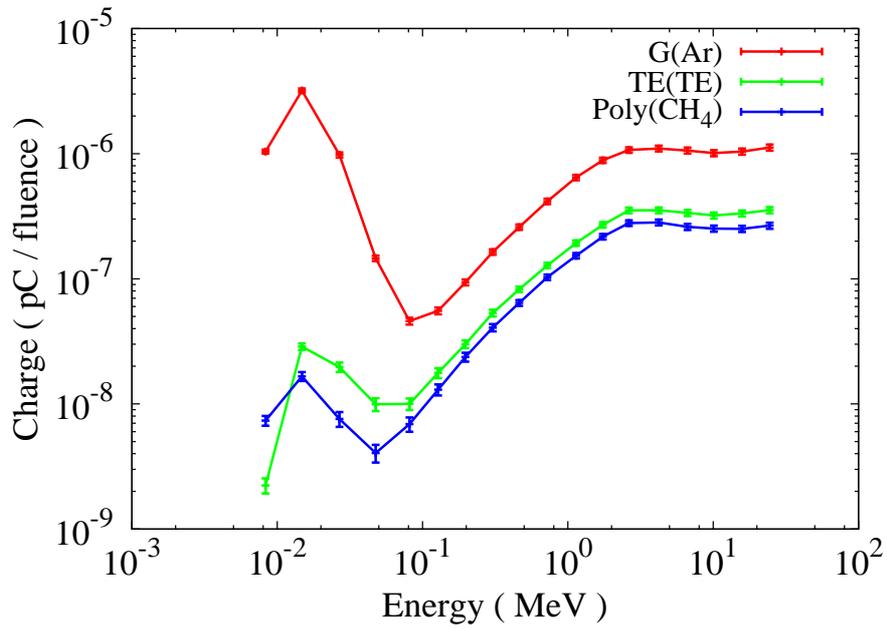


図 3.15 市販電離箱の γ 線に対する応答関数 $R_g(E)$

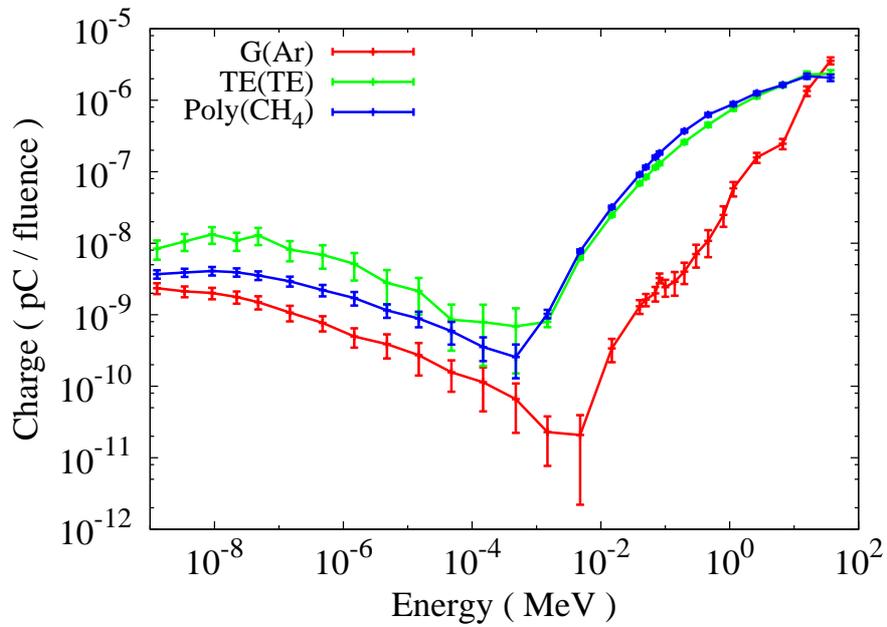


図 3.16 市販電離箱の中性子に対する応答関数 $R_n(E)$

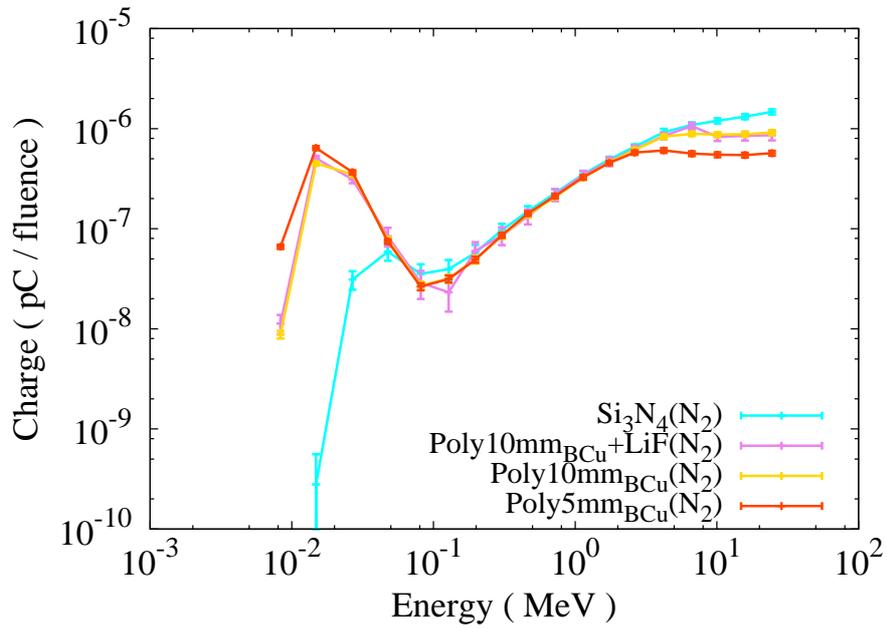


図 3.17 作製電離箱の γ 線に対する応答関数 $R_g(E)$

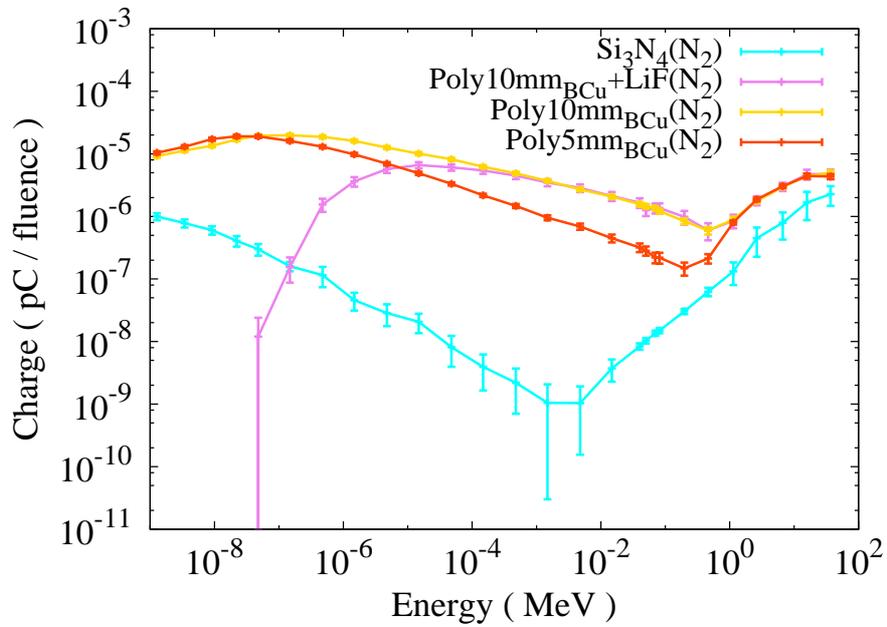


図 3.18 作製電離箱の中性子に対する応答関数 $R_n(E)$

表 3.3 市販電離箱に対する線質変換係数

IC	Conversion factors (HWNIF/ ⁶⁰ Co)
G(Ar)	0.91
Poly(CH ₄)	0.92
TE(TE)	0.92

表 3.4 作製電離箱に対する線質変換係数

IC	Conversion factors (HWNIF/ ⁶⁰ Co)
Si ₃ N ₄ (N ₂)	0.94
Poly5mm _{BCu} (N ₂)	0.92
Poly10mm _{BCu} (N ₂)	0.94
Poly10mm _{BCu} +LiF(N ₂)	0.93

表 3.5 市販電離箱に対する中性子応答比 ($Ratio_{XXcm,component}$)

IC	Irradiation mode	Fast ($Ratio_{XXcm,fast}$)	Epi-thermal ($Ratio_{XXcm,epi}$)	Thermal ($Ratio_{XXcm,thermal}$)
G(Ar)	D ₂ O(0)	0.77	0.23	0.00
	(10)	0.85	0.15	0.00
	(20)	0.93	0.07	0.00
	(30)	0.95	0.05	0.00
	(40)	0.98	0.02	0.00
	(50)	0.98	0.02	0.00
	(60)	0.98	0.02	0.00
Poly(CH ₄)	D ₂ O(0)	0.89	0.11	0.00
	(10)	0.93	0.07	0.00
	(20)	0.97	0.03	0.00
	(30)	0.98	0.02	0.00
	(40)	0.99	0.01	0.00
	(50)	0.99	0.01	0.00
	(60)	0.99	0.01	0.00
TE(TE)	D ₂ O(0)	0.80	0.20	0.00
	(10)	0.87	0.13	0.00
	(20)	0.94	0.06	0.00
	(30)	0.96	0.04	0.00
	(40)	0.98	0.02	0.00
	(50)	0.98	0.02	0.00
	(60)	0.98	0.02	0.00

表 3.6 作製電離箱に対する中性子応答比 ($Ratio_{XXcm,component}$)

IC	Irradiation mode	Fast ($Ratio_{XXcm,fast}$)	Epi-thermal ($Ratio_{XXcm,epi}$)	Thermal ($Ratio_{XXcm,thermal}$)
Si ₃ N ₄ (N ₂)	D ₂ O(0)	0.10	0.89	0.01
	(10)	0.15	0.84	0.01
	(20)	0.31	0.68	0.01
	(30)	0.39	0.60	0.01
	(40)	0.57	0.42	0.01
	(50)	0.64	0.35	0.01
	(60)	0.63	0.36	0.01
Poly5mm _{BCu} (N ₂)	D ₂ O(0)	0.00	0.99	0.01
	(10)	0.00	0.99	0.01
	(20)	0.01	0.98	0.01
	(30)	0.02	0.97	0.01
	(40)	0.04	0.95	0.01
	(50)	0.05	0.94	0.01
	(60)	0.05	0.94	0.01
Poly10mm _{BCu} (N ₂)	D ₂ O(0)	0.00	0.99	0.01
	(10)	0.00	0.99	0.01
	(20)	0.01	0.98	0.01
	(30)	0.02	0.97	0.01
	(40)	0.04	0.96	0.01
	(50)	0.05	0.94	0.01
	(60)	0.05	0.94	0.01
Poly10mm _{BCu} +LiF(N ₂)	D ₂ O(0)	0.01	0.99	0.00
	(10)	0.01	0.99	0.00
	(20)	0.03	0.97	0.00
	(30)	0.04	0.96	0.00
	(40)	0.08	0.92	0.00
	(50)	0.11	0.89	0.00
	(60)	0.11	0.89	0.00

3.6 市販電離箱に対する応答特性評価

3.6.1 γ 線成分に対する応答特性

^{60}Co γ 線の空間線量率 (cGy/h) に対する電離箱応答を図3.19に示す。G(Ar)、Poly(CH₄)、TE(TE)の順に、応答感度が高かった。G(Ar)の高い応答は、他の電離箱と比べた容積の差 (2.5倍) に依存していると考えられる。Poly(CH₄) および TE(TE) では応答係数の差は小さく、全ての市販電離箱について、0 ~ 1500 cGy/h 間で電離箱応答の線形性が確認された。

3.6.2 中性子成分に対する応答特性

・熱外および高速中性子成分

重水厚さに対する電離箱応答を図3.20に示す。図から分かるように、電離箱応答は誤差の影響により 30 cm 以上の重水厚さでは暗電流に隠れて明瞭な測定電流を得ることは困難であった。

得られた結果から暗電流を差し引き、式3.4および式3.5を用いて各照射モードにおける高速中性子応答を算出し、高速中性子フラックスの公称値に対してプロットしたものを図3.21に示す。この図から、高速中性子フラックス $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 未満では高速中性子成分起因電流は得られていないことが分かる。グラフより高速中性子フラックス $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上で、市販電離箱応答の良好な線形性が確認された。

TE(TE)の高速中性子応答は、図3.16に示す中性子応答関数では水素含有量の多い Poly(CH₄) が TE(TE) に比べ僅かに高い応答を示したが、ここでは2.5倍程度も高い応答を示している。この原因としては、電離箱内の回路起因によるもの、あるいは、 γ 線および熱外中性子成分の混在による応答への影響等が考えられる。

式3.3および式3.5を用いて各照射モードにおける熱外中性子応答を算出し、熱外中性子フラックスの公称値に対してプロットしたものを図3.22に示す。熱外中性子成分に対しては TE(TE) のみが僅かながら応答を示し、その他の電離箱では応答が現れなかった。これは TE(TE) の構造材および充填ガス中の窒素原子と低エネルギー領域の熱外中性子との (n,p) 反応による寄与だと考えられる。

・熱中性子成分

カドミウムフィルターの開度変化に対する電離箱応答を図 3.23 に示す。得られた測定結果から式 3.2 および式 3.5 を用いて算出した熱中性子起因電流値を、熱中性子フラックスの公称値に対してプロットしたものを図 3.24 に示す。 $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上のフラックスで応答の飽和現象のようなものが見られる。この原因の一つとして、電離箱への熱中性子の入射に対する生成電荷量の比例性が無くなったことが考えられる。また、実際の熱中性子成分の混在量が公称値に比べ少なかった可能性や、反対に、熱中性子以外の成分の混在が実際には公称値に比べ少なく、測定電流値から他成分起因電流値分が余分に差し引かれた可能性等も考えられる。実際の治療で用いる熱外中性子ビーム中の混在熱中性子成分は、 $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度でありこのフラックスに比べ遥かに小さいため、実用上の問題は無いと考えられる。

熱中性子フラックス $4 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 未満での実験結果より、熱中性子フラックスに対する電離箱応答の良好な線形性が確認された。構造材および充填ガス中の窒素原子と低エネルギー寄りの熱外中性子との (n,p) 反応による寄与の影響により、TE(TE) が Poly(CH₄) に比べ約 8 倍高い応答を示すことが確認された。

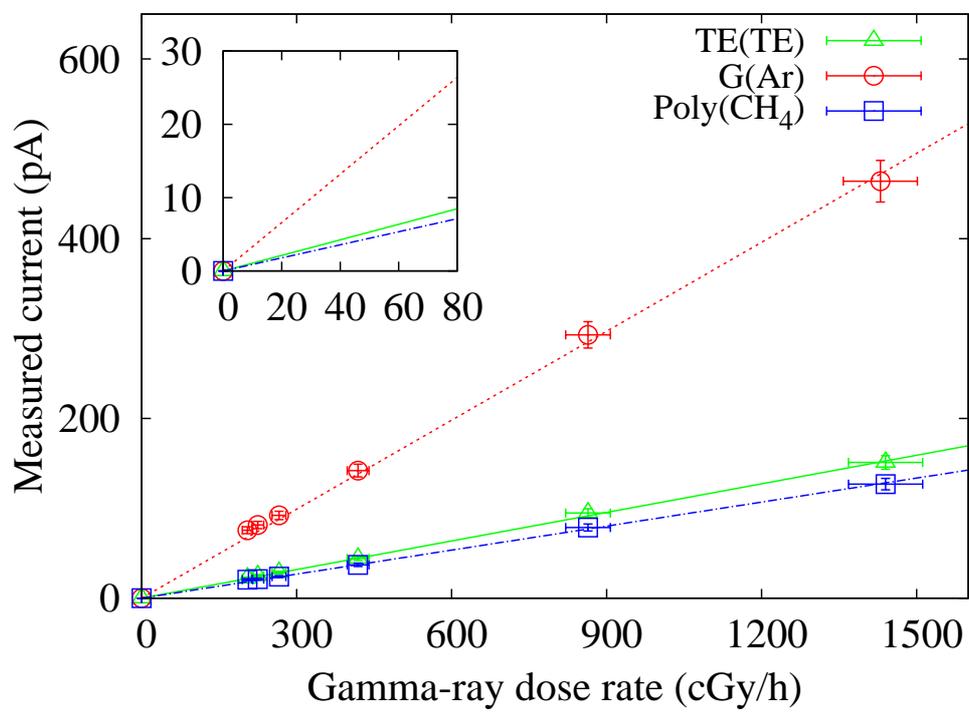


図 3.19 ⁶⁰Co γ 線に対する市販電離箱の応答特性

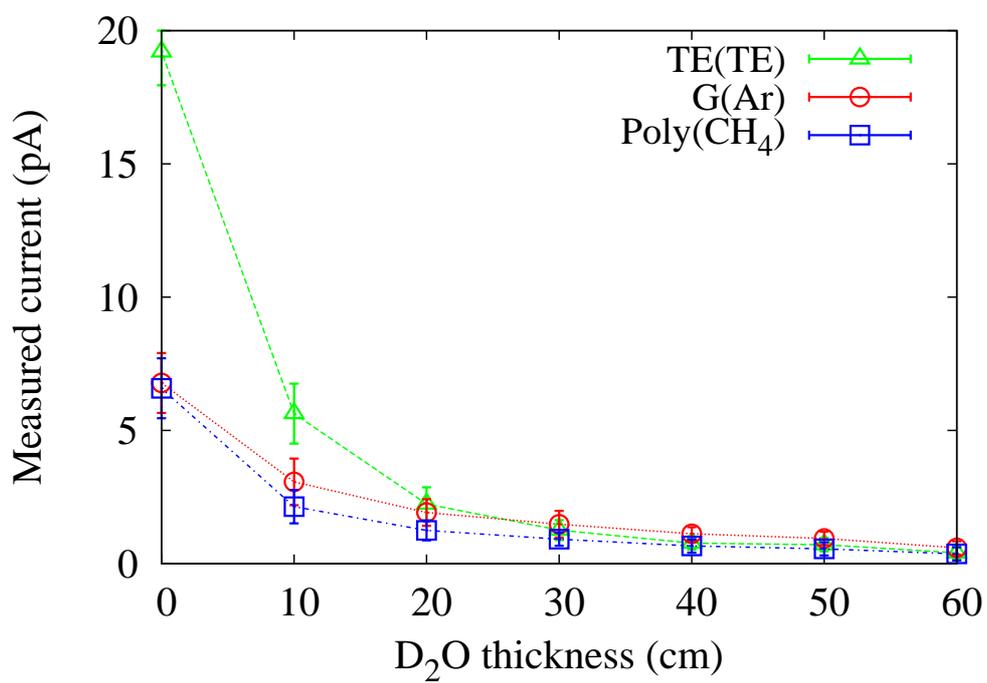


図 3.20 HWNIF 各重水厚さにおける市販電離箱の測定電流

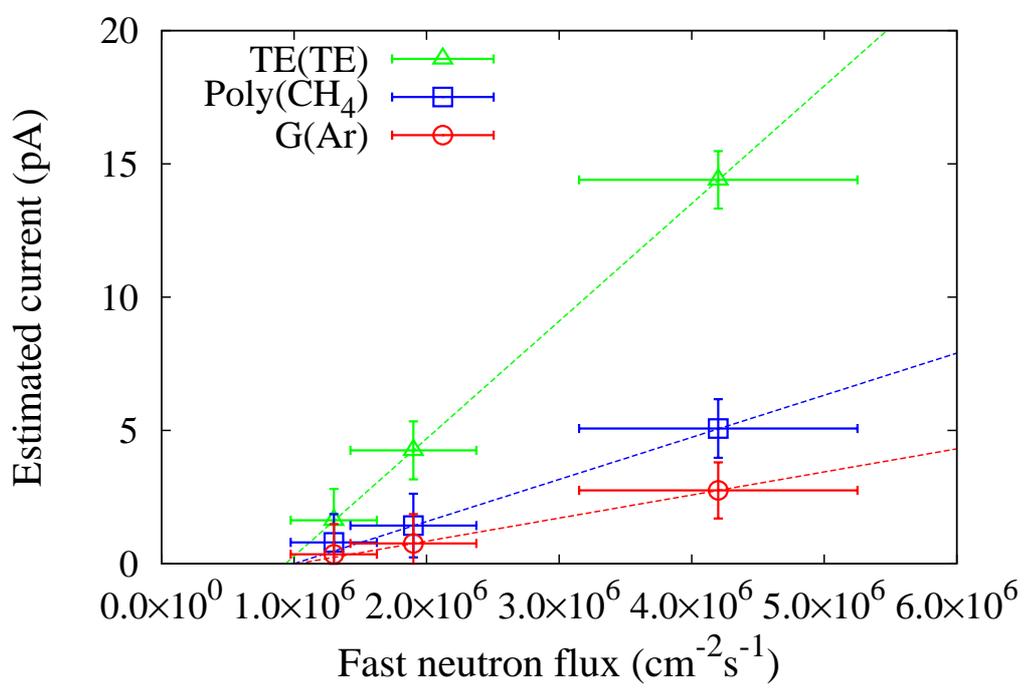


図 3.21 高速中性子フラックスに対する市販電離箱の応答特性

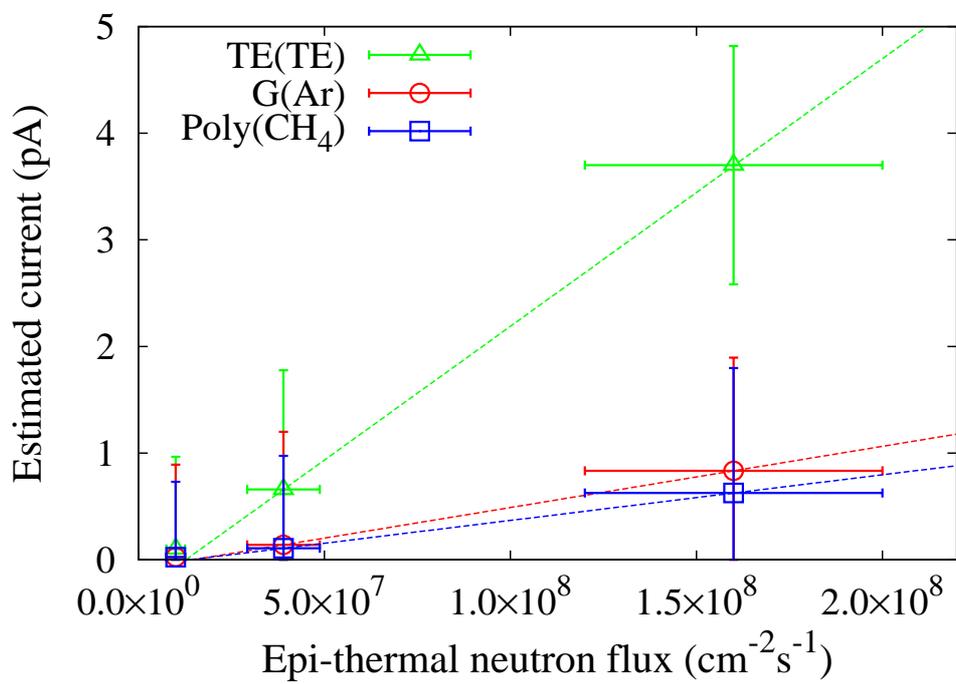


図 3.22 熱外中性子フラックスに対する市販電離箱の応答特性

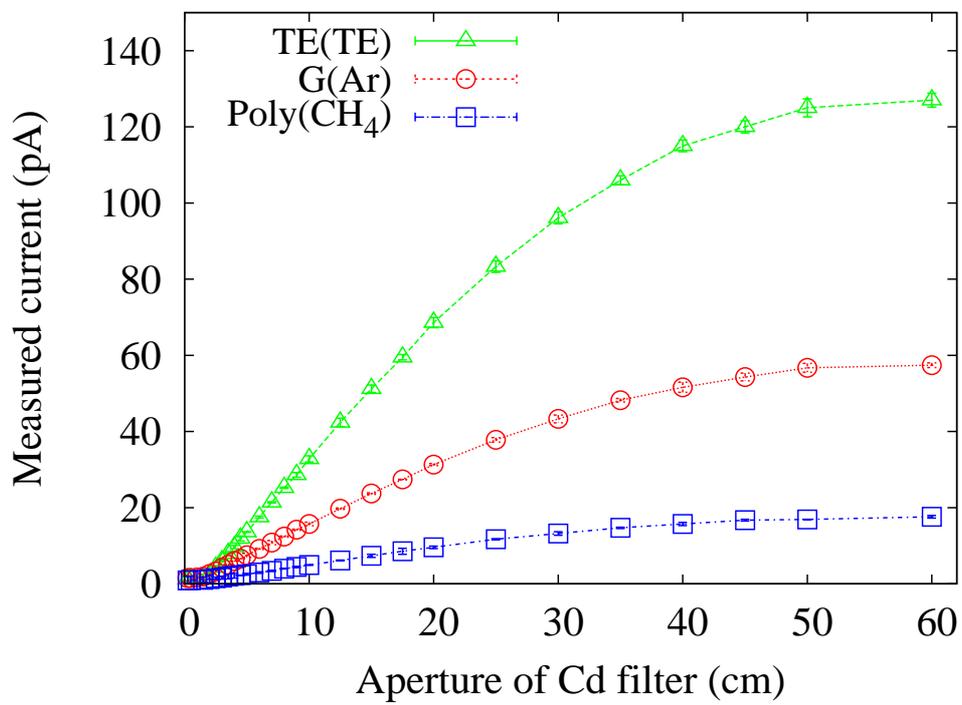


図 3.23 カドミウムフィルター開度に対応した市販電離箱の測定電流

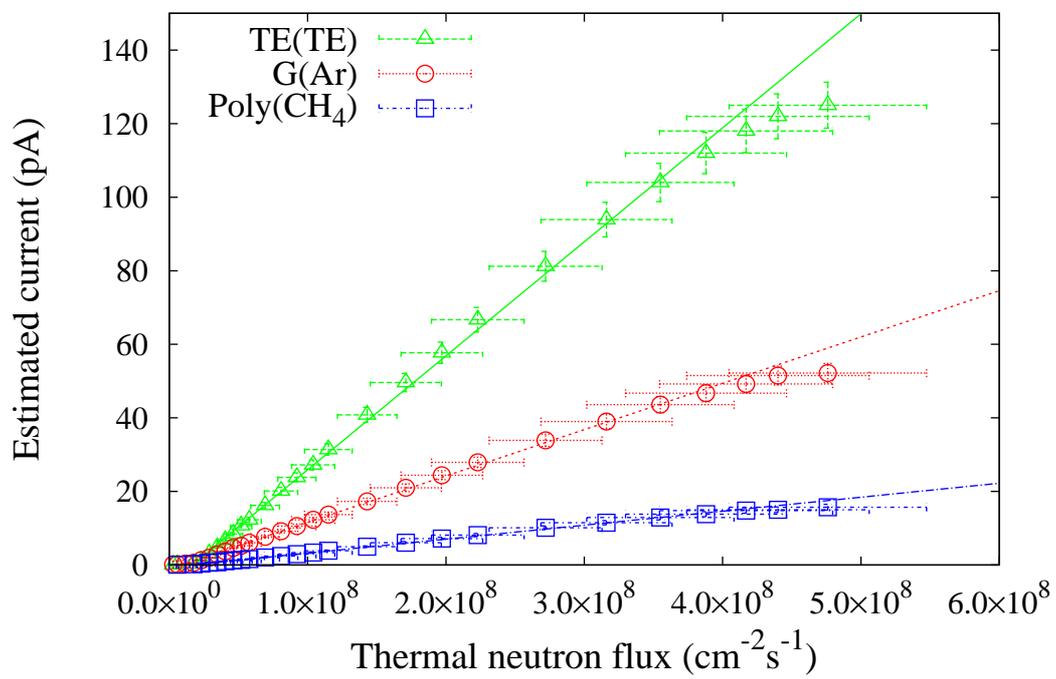


図 3.24 熱中性子フラックスに対する市販電離箱の応答特性

3.7 作製電離箱に対する応答特性評価

3.7.1 γ 線成分に対する応答特性

^{60}Co γ 線の空間線量率 (cGy/h) に対する電離箱応答を図 3.25 に示す。電離箱間の応答係数の差は小さく、作製電離箱全てにおいて 0 ~ 1500 cGy/h 間で電離箱応答の線形性が確認された。

3.7.2 中性子成分に対する応答特性

・熱外および高速中性子成分

重水厚さに対する作製電離箱の応答を図 3.26 に示す。市販電離箱と同様に、30 cm 以上の重水厚さでは暗電流に隠れて明瞭な測定電流を得ることは困難であることが分かった。

算出した各照射モードにおける高速中性子応答を、高速中性子フラックスの公称値に対してプロットしたものを図 3.27 に示す。高速中性子成分起因電流は測定電流全体と比較して非常に小さいことが分かる。これは、計算で求めた $\text{D}_2\text{O}(0)$ における作製電離箱の高速中性子成分の応答比が、熱外および熱中性子成分の高応答比に対して、非常に小さい値 (0.01 程度) となっているためである。

算出された各照射モードにおける熱外中性子応答を、熱外中性子フラックスの公称値に対してプロットしたものを図 3.28 に示す。Poly5mm_{BCu}(N₂) に比べ Poly10mm_{BCu}(N₂) が高い応答特性を示していることから、壁材による熱外中性子の減速効果が確認された。また、Poly10mm_{BCu}(N₂) と Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂) を比較した。低エネルギー領域の熱外中性子が LiF カバーにより効果的に低減されていることが確認された。グラフより、高速中性子および熱外中性子フラックスに対する作製電離箱応答の良好な線形性が確認された。

・熱中性子成分

カドミウムフィルターの開度に対応した電離箱応答を図 3.29 に示す。Poly5mm_{BCu}(N₂)

に比べ、Poly10mm_{BCu}(N₂)では、内壁に蒸着された天然硼素の影響で、通常の電離箱で得られる応答よりも1桁以上も高い応答が得られた。得られた測定結果から算出された熱中性子起因電流値を、熱中性子フラックスの公称値に対してプロットしたものを図3.30に示す。壁厚が薄く中性子の減速効果の低いPoly5mm_{BCu}(N₂)がPoly10mm_{BCu}(N₂)より高い応答を示した。Si₃N₄(N₂)およびPoly10mm_{BCu}+LiF(N₂)に関する熱中性子応答特性のみをプロットしたのもも図3.31に示す。

4種類の電離箱全てで、市販電離箱と同様にフラックス $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上で飽和現象が観測されるが、実際の使用範囲($10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)においてはこの影響はほとんど無い。この現象の原因も市販電離箱の場合と同様であると考えられる。今回の結果より、Poly10mm_{BCu}(N₂)は高い熱中性子応答により熱外中性子成分の応答特性を弁別するのは難しいが、Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂)の結果から分かる通りLiFカバーを用いることで熱中性子成分を除去することができることが分かった。Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂)の電離箱を用いることにより熱外中性子を効率的に測定できることが確認された。

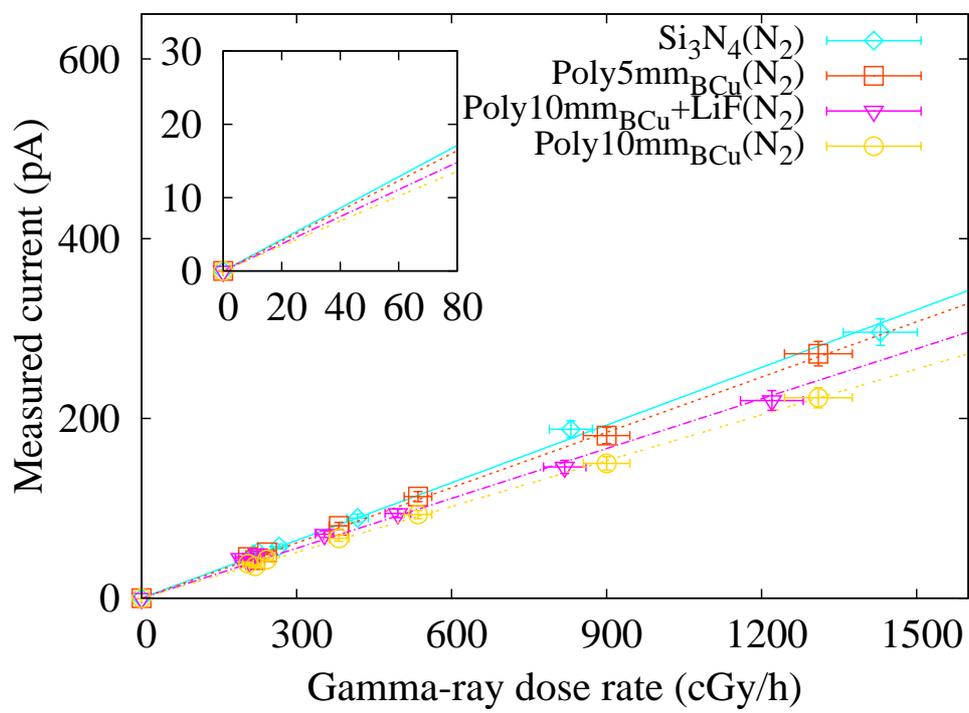


図 3.25 ^{60}Co γ 線に対する作製電離箱の応答特性

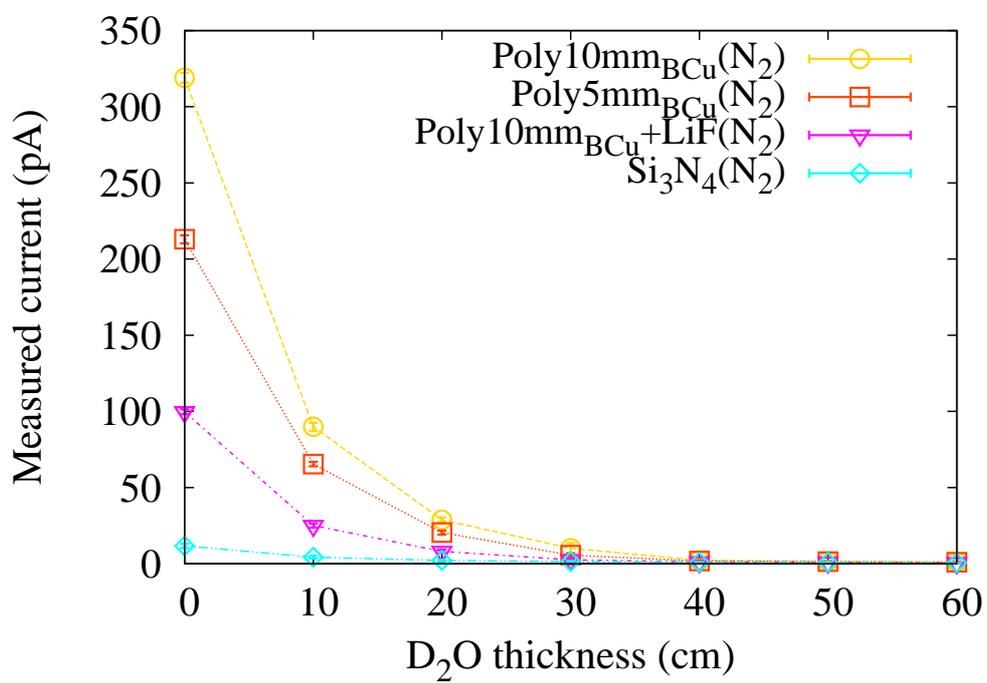


図 3.26 HWNIF 各重水厚さにおける作製電離箱の測定電流

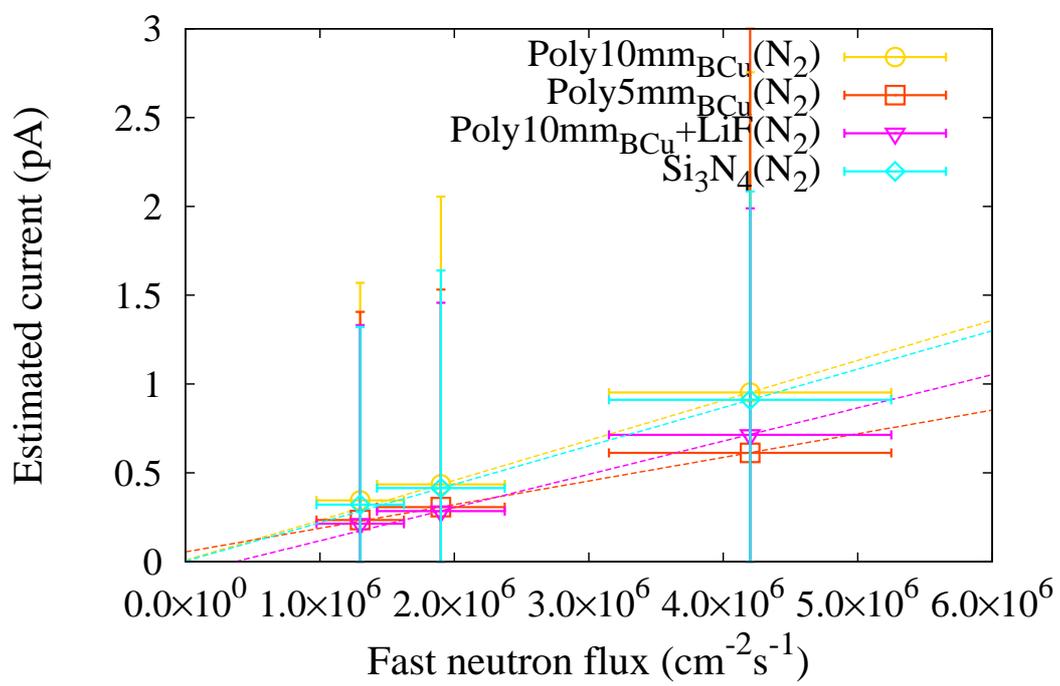


図 3.27 高速中性子フラックスに対する作製電離箱の応答特性)

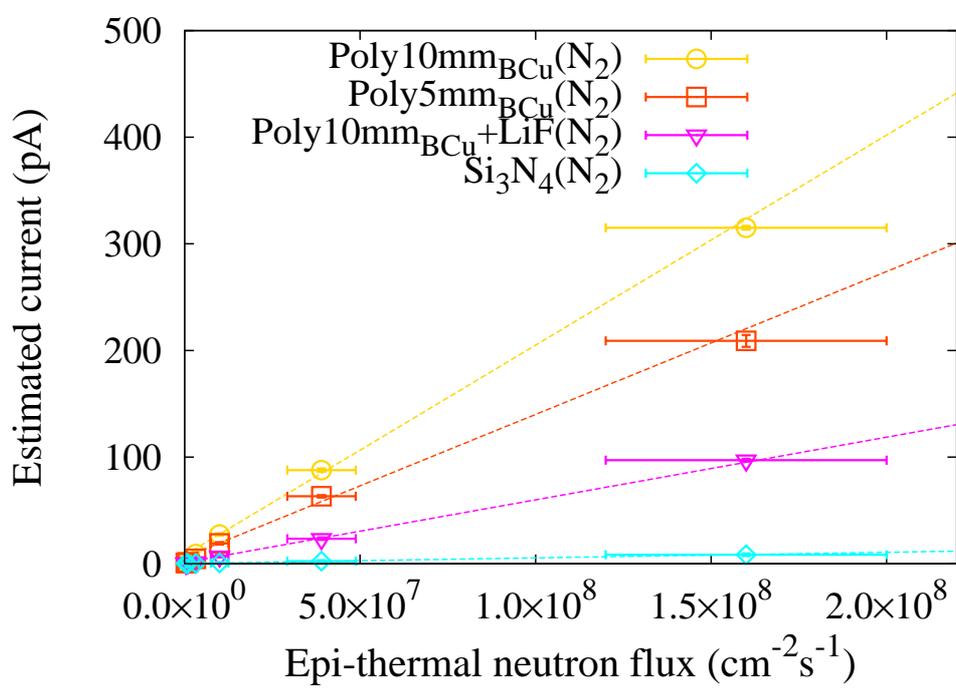


図 3.28 熱外中性子フラックスに対する作製電離箱の応答特性

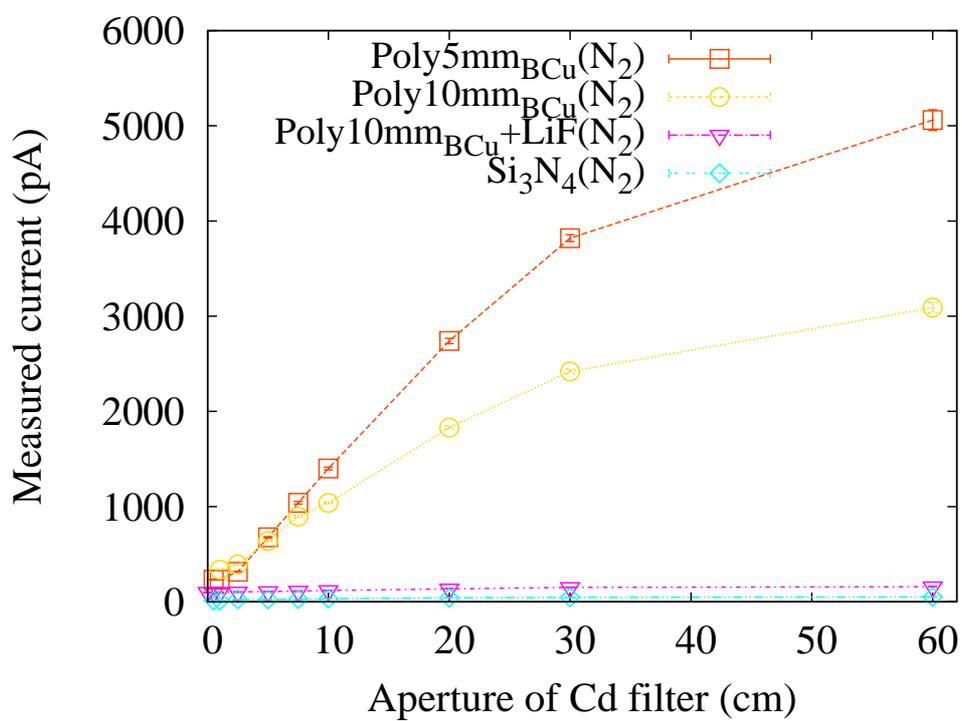


図 3.29 カドミウムフィルター開度に対応した作製電離箱の測定電流

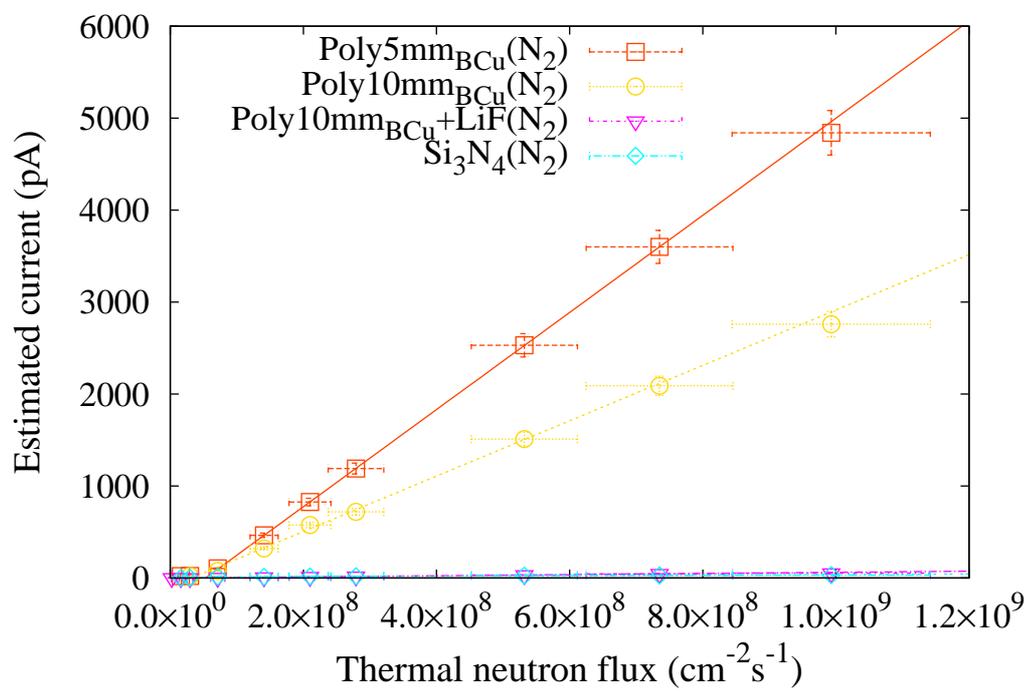


図 3.30 熱中性子フラックスに対する作製電離箱の応答特性

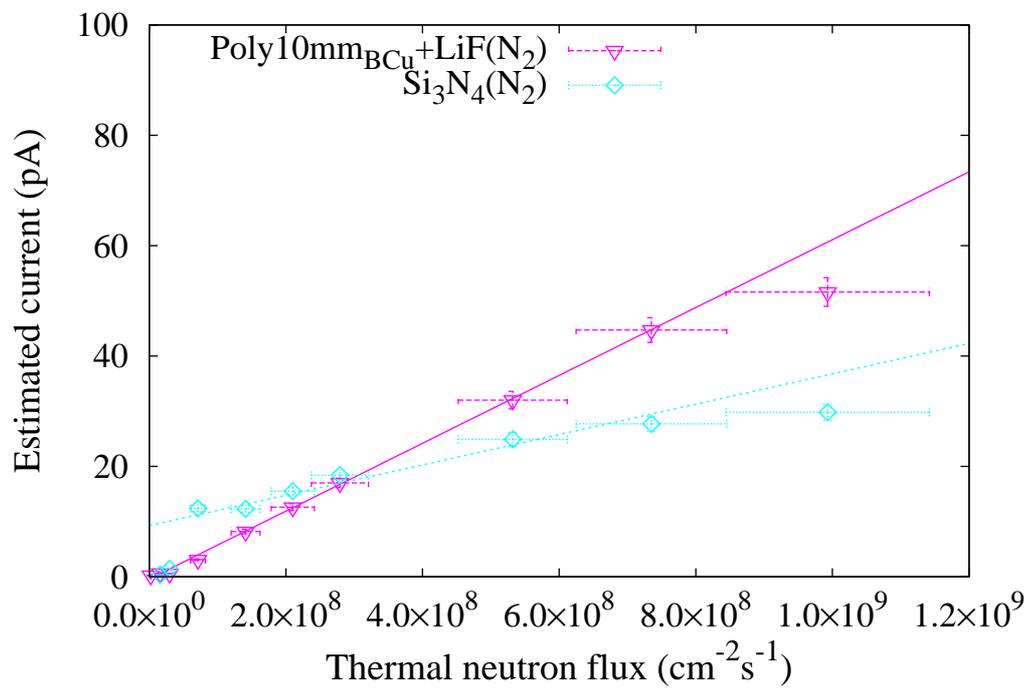


図 3.31 熱中性子フラックスに対する
Si₃N₄(N₂) および Poly10mm_{BCu}+LiF(N₂) の応答特性

3.8 まとめ

多重電離箱システム用に準備された市販電離箱および作製電離箱に対して、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線照射装置からの γ 線およびKUR-HWNIFからの中性子ビームを用いて応答特性評価実験を行った。4成分に対する各電離箱の応答特性を評価するための手法について検討を行い、KUR-HWNIFの中性子ビームを対象に、4成分に対する応答係数を求めた。

全ての電離箱について、4成分のフラックスに関する応答の線形性が確認された。市販電離箱では高速中性子に対する応答係数は原点を通る直線とならず、フラックス $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 付近に切片を持つ直線となった。この原因の一つとしては、1MWのKUR運転出力では中性子フラックスが低いため、高速中性子の混在の少ない照射モードにおいて十分な応答が得られなかったことが考えられる。得られた応答係数と公称値との差は、 γ 線では5%、熱中性子では15%、高速および熱外中性子では25%程度であった。

現在、KUR-HWNIFにおけるBNCTは、KUR運転出力5MWで行われており、主に熱外中性子照射モード(CO-0000-F)が用いられている。本照射モードのビーム特性は、 γ 線線量率約50 cGy/h、高速中性子フラックスは約 $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、熱外中性子フラックスは約 $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、熱中性子フラックスは約 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。本実験により決定された応答係数から判断すると、2種類の市販電離箱G(Ar)およびPoly(CH₄)は γ 線用および高速中性子用電離箱として、多重電離箱システムに使用できることが確認された。

作製電離箱に関しては、Poly5mm_{BCu}(N₂)およびPoly10mm_{BCu}(N₂)の熱外中性子および熱中性子に対する応答特性の比較から、ポリエチレン壁による熱外中性子の減速効果、および、内壁に蒸着された硼素による低エネルギー中性子に対する増感効果が確認された。Poly10mm_{BCu}(N₂)については、熱中性子成分を低減するためにLiFでカバーすることにより、熱外中性子用電離箱として使用できることが確認された。Si₃N₄(N₂)については、熱中性子用電離箱として用いることとした。

実験で得られた中性子に関する応答特性について、高速および熱外中性子成分に

関しては、両成分の見積もられた電流値に対する線形性は照射モード $D_2O(0)$ から $D_2O(60)$ までにおける各成分のエネルギー群内のフラックス強度の変化に対して得られたものであり、エネルギースペクトルの変化に対する補正は行っていなかった。

多重電離箱システムの実用的な観点から、応答係数は原点を通る直線に補正し、このときの係数を用いることとした。表 3.7 に基準熱外中性子照射モードに対する応答係数を示す。

表 3.7 HWNIF 実験から算出された基準熱外中性子照射モードに対する応答係数

IC	Response factor (pA / cm ⁻² s ⁻¹)			
	Gamma ray (k_g)	Fast (k_f)	Epi-thermal (k_e)	Thermal (k_t)
G(Ar)	5.8×10^{-7}	6.5×10^{-7}	5.2×10^{-9}	2.8×10^{-8}
Poly(CH ₄)	1.6×10^{-7}	1.2×10^{-6}	3.9×10^{-9}	9.9×10^{-9}
Poly10mm _{BCu} +LiF(N ₂)	3.3×10^{-7}	1.7×10^{-7}	6.1×10^{-7}	3.4×10^{-7}
Si ₃ N ₄ (N ₂)	3.9×10^{-7}	2.2×10^{-7}	5.2×10^{-8}	4.8×10^{-7}

参考文献

- [1] A.D.Kantz, CHARACTERISTICS OF SPHERICAL ION CHAMBER MANUFACTURED BY FAR WEST TECHNOLOGY, ionization chamber for neutron dosimetry, 61-67 (1980)
- [2] Y.Sakurai and T.Kobayashi, "Characteristics of the KUR Heavy Water Neutron Irradiation Facility as a neutron irradiation field with variable energy spectra", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A453**, 569-596, (2000).
- [3] *Measurement of dose equivalents from photon and electron radiation*, ICRU report No.47, International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (1992).
- [4] *Fundamental quantities and units for ionizing radiation*, ICRU report No.85, International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (2011).

第4章 多重電離箱システムを用いた BNCT用中性子照射場にお ける成分分離評価

4.1 諸言

多重電離箱システムの有用性を確認するために、KUR-HWNIFにおいて特性確認実験を行った。輸送台車上のコリメータ辺縁部の炉心側に、第3章で応答特性を確認した4種類の電離箱を配置し、中性子3成分および γ 線の分離評価を試みた。本章では、以下の3つの項目を中心に、特性確認実験について記述する。

(1) 電離箱の配置

多重電離箱システムを用いてBNCT時に、患者に入射する中性子ビームの照射特性を評価するためには、照射場を乱さないような位置に電離箱を配置する必要がある。多重電離箱システムの特性確認実験に先立って、コリメータ炉心側での中性子および γ 線エネルギースペクトルの径方向の変化に関する計算データを参考に、電離箱の取り付け位置の線質に関する検討を行った。

(2) 電離箱応答のKUR出力に対する線形性

多重電離箱システムをビームモニターとして利用する場合、ビーム強度の変動に対応した各電離箱の応答の線形性が保たれていることが望ましい。KUR-HWNIFの場合、同じ炉心配置であれば、ビーム強度はKURの運転出力とほぼ比例関係にある。そこで、ビーム強度の代わりに、KUR運転出力に対する電離箱応答の線形性

の確認実験を行った。KUR 立ち上げ時から出力 1 MW に至るまで経時測定を行い、電離箱応答の出力依存性を確認した。

(3) 4 成分分離評価および応答安定性

第 3 章で求めた各電離箱の応答係数 k を用いて、得られた応答から 4 成分の成分分離を行った。シミュレーションで求めた電離箱取り付け位置の 4 成分のフラックスと分離評価結果とを比較し、その再現性の確認を行った。また、分離評価した各線量成分の経時的な変動を評価し、それらの安定性を確認した。

4.2 評価手法

4.2.1 KURの運転条件およびHWNIFの照射モード

KURの運転出力は、実験時は1 MW 運転、BNCT実施時のみ5 MW 運転である。4成分分離評価実験および安定性確認実験は、炉出力1 MW で行われた。炉出力に対する線形性確認実験については、他の設備の実験の都合のために炉出力を立ち上げ時から1 MW まで段階的に上げる機会に行った。

KUR-HWNIFの照射モードについては、通常、BNCT臨床に用いられている基準熱外中性子照射モードを選択した。

4.2.2 電離箱取り付け体系

電離箱は中性子ビーム軸上のコリメータ出口中心付近に配置されることが理想的であるが、電離箱のサイズや照射場の乱れ等の観点からそこに配置することはできない。KUR-HWNIFでは、本システムを輸送台車上のコリメータ辺縁部炉心側に配置する。図4.1に示すように、一辺30 cmのインナーコリメータユニットの辺縁から3 cm 外側に、有感領域の中心が来るように電離箱を配置した。この位置はビーム軸中心から径方向に18 cm 離れた位置に相当する。

電離箱2本を一組として左右に分けて配置し、各組の電離箱はコリメータ中心高さから上下5 cm 離して配置した。電離箱の固定にはフッ化リチウム入りポリエチレン製の固定具を使用し、コリメータ炉心側の面から2 cm 離れた位置に電離箱の中心が来るように配置した。写真4.1に、輸送台車上での電離箱の取り付け状況を示す。

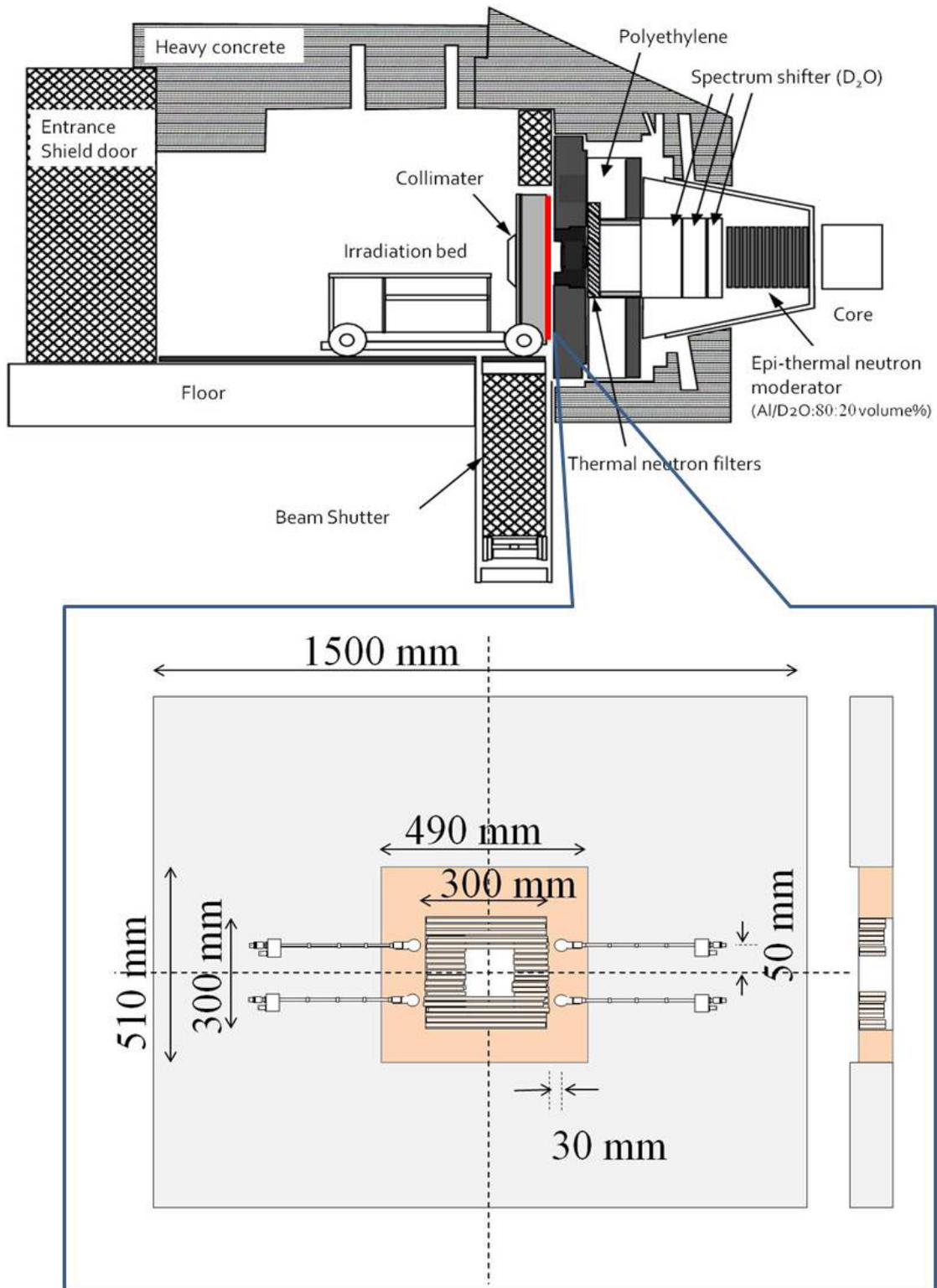


図 4.1 コリメータの炉心側面上での電離箱配置の概要

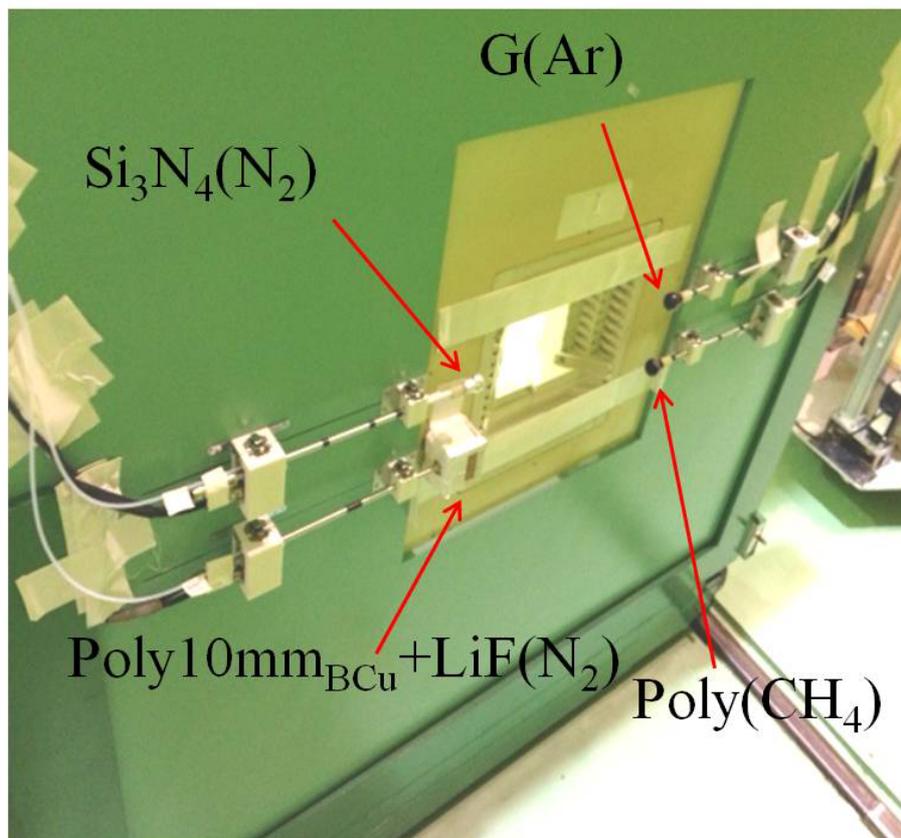


写真 4.1 輸送台車面に取り付けられた電離箱

4.2.3 コリメータ出口中心と電離箱位置での線質に関するシミュレーション

コリメータ出口中心と異なった位置に置いた電離箱によりビーム特性を評価するためには、コリメータ出口中心と電離箱の位置で、同様の線質であることが望ましい。両位置の線質を確認するために、PHITSを用いて中性子および γ 線フラックスに関するシミュレーションを行った。

図 4.2 に計算で用いた体系を示す。コリメータに取り付けた電離箱の炉心側の壁表面位置に半径 0.5 cm、厚さ 0.1mm の円柱形状のタリーを、ビーム中心軸の同深さに同形状のタリーを設定した。電離箱位置およびビーム中心の中性子および γ 線フラックスを確認した。線源は以前シミュレーションにより計算されたビーム中心から径方向 30 cm までの円環領域の 11 群中性子エネルギースペクトルおよび 7 群 γ 線エネルギースペクトルのデータを用い、ビーム軸に対して角度 0°の平行ビームの照射体系とした。

図 4.3 に中性子および γ 線フラックスの空間分布を示す。図 4.4 および図 4.5 にコリメータ出口中心および電離箱位置における中性子および γ 線のエネルギースペクトルを示す。コリメータ出口と比較して、電離箱位置では、強度は中性子で 45%、 γ 線で 10%程度減少するが、スペクトルの形状の変化は小さく、ほぼ同じと見なせる。この計算で得られた電離箱位置の 4 成分のフラックスを評価値として、実験によって得られた成分分離結果と比較した。

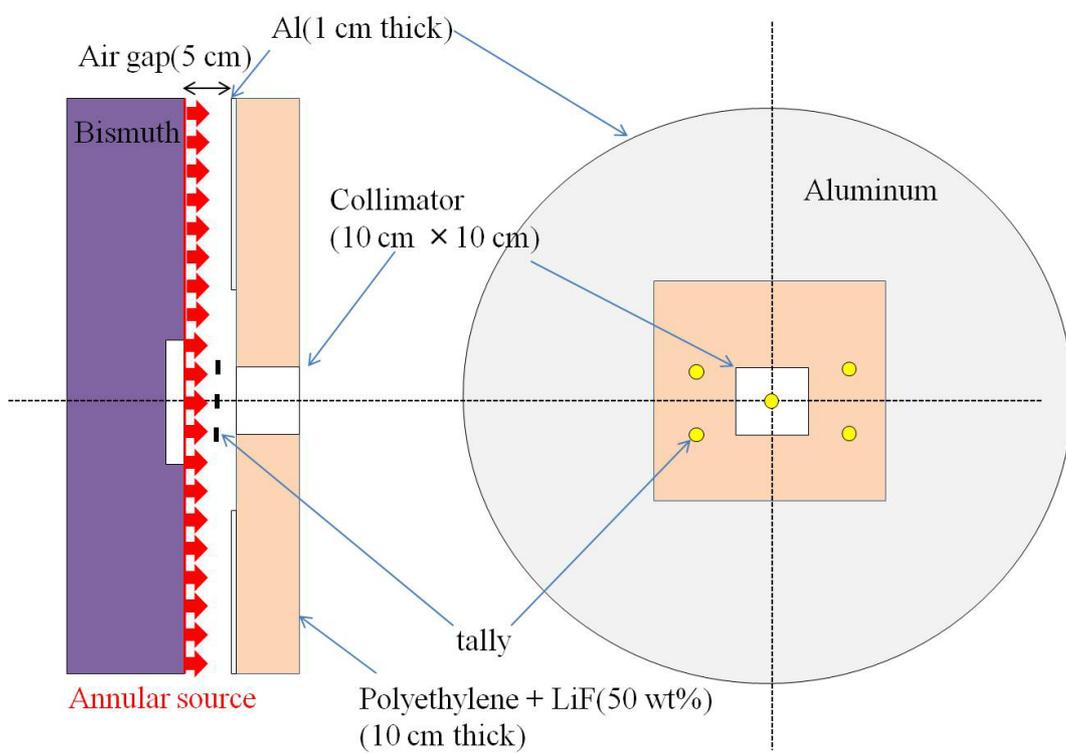


図 4.2 照射場の中性子および γ 線フラックスの計算に用いた計算体系

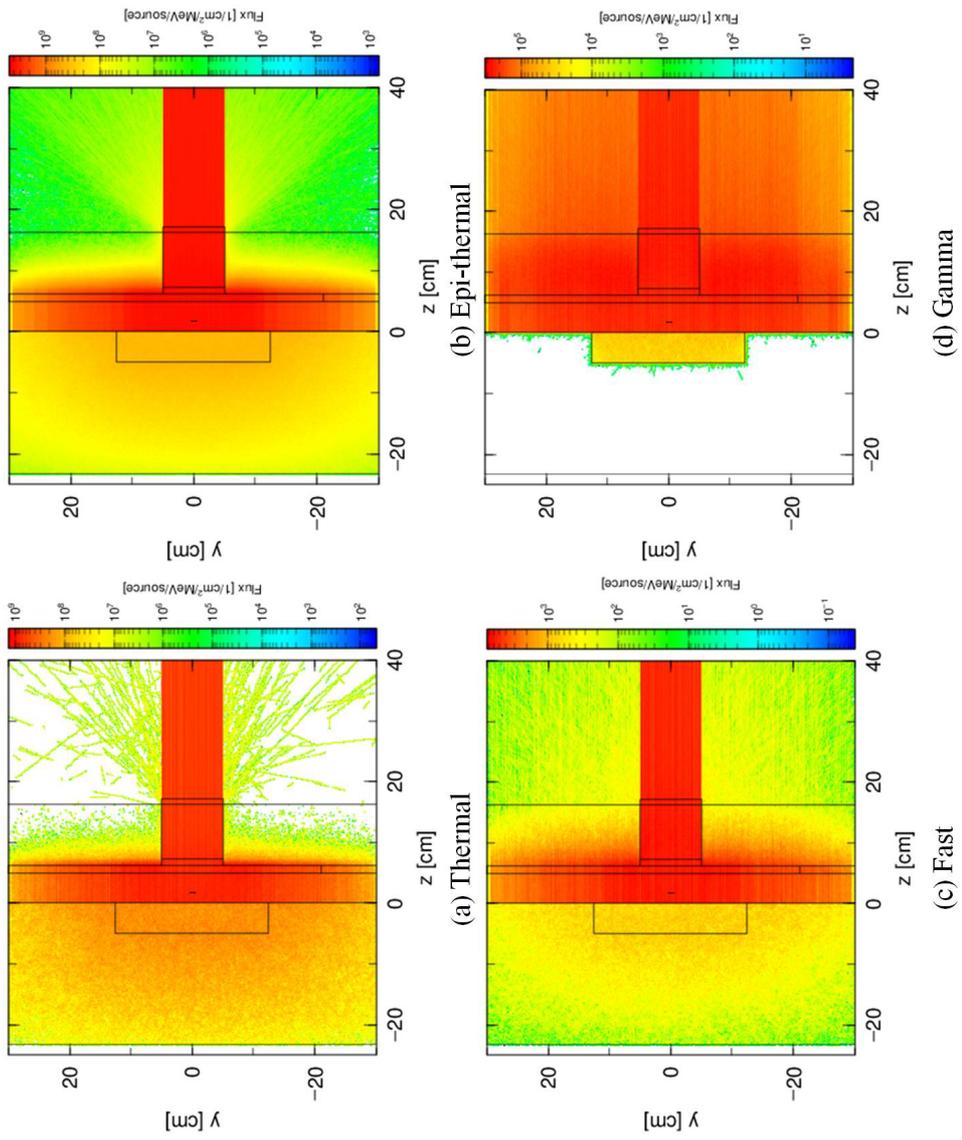


図 4.3 PHITS により得られたビスマス面とコリメータ間の中性子および γ 線フラックスの空間分布

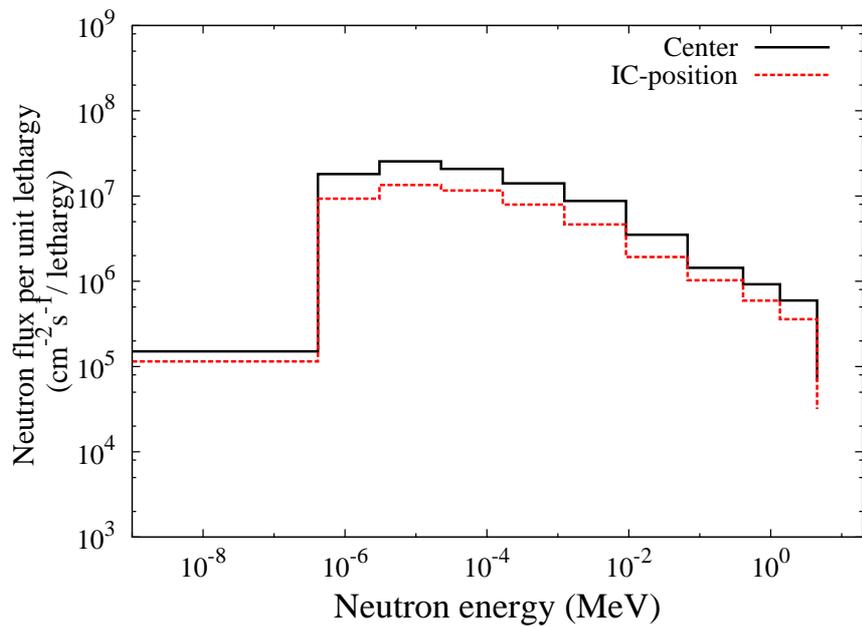


図 4.4 ビーム中心および電離箱位置の中性子エネルギースペクトル

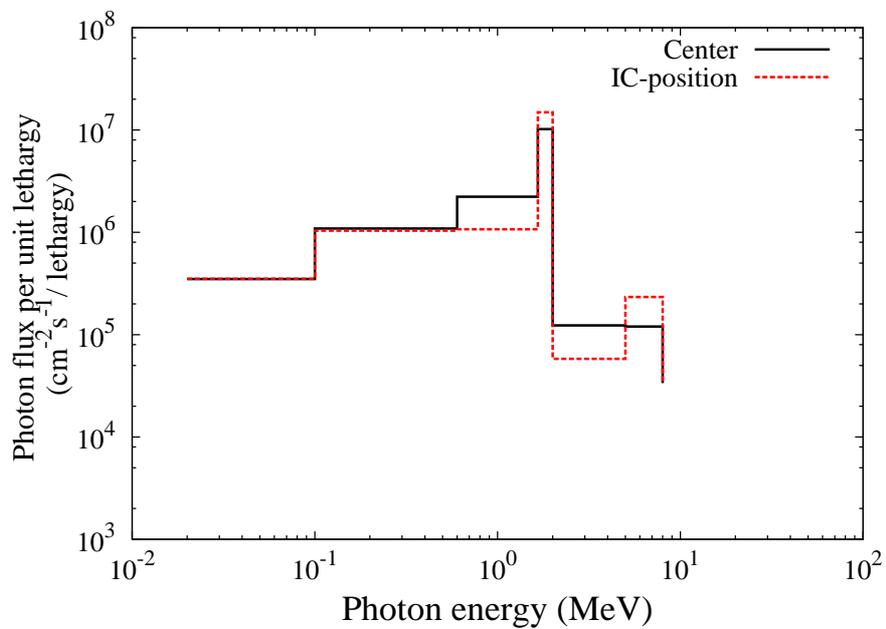


図 4.5 ビーム中心および電離箱位置の γ 線エネルギースペクトル

4.2.4 ビームモニターに関するソフトウェア

電離箱で得られた信号は、専用のソフトウェアを用いて成分分離評価され、その結果はPCモニター上に表示される。写真4.2に電離箱からの電流の測定体系を示す。

多重電離箱システム構築のために作成されたソフトウェア”RAMTEC704Monitor(東洋メディック社製)”では、4種類の電離箱から取得される平均電流(平均線量率)、積算電荷(積算線量)の経時変化を表示することが可能である。あらかじめ各電離箱の4成分に対する応答係数を入力することで、分離評価された各成分の線量を表示することができる。図4.6にRAMTEC704Monitorの表示画面の一例を示す。

RAMTEC704Monitorで取得されたデータはコンピューター内に保存される。保存データはCSVファイルとして出力でき、また、データ表示用ソフトウェア”RAMTEC704Viewer”で取り扱うことが出来る。

RAMTEC704Monitorでは、データの取得間隔を変更することが出来る。本実験では、1秒間隔でのデータ取得を基本とした。

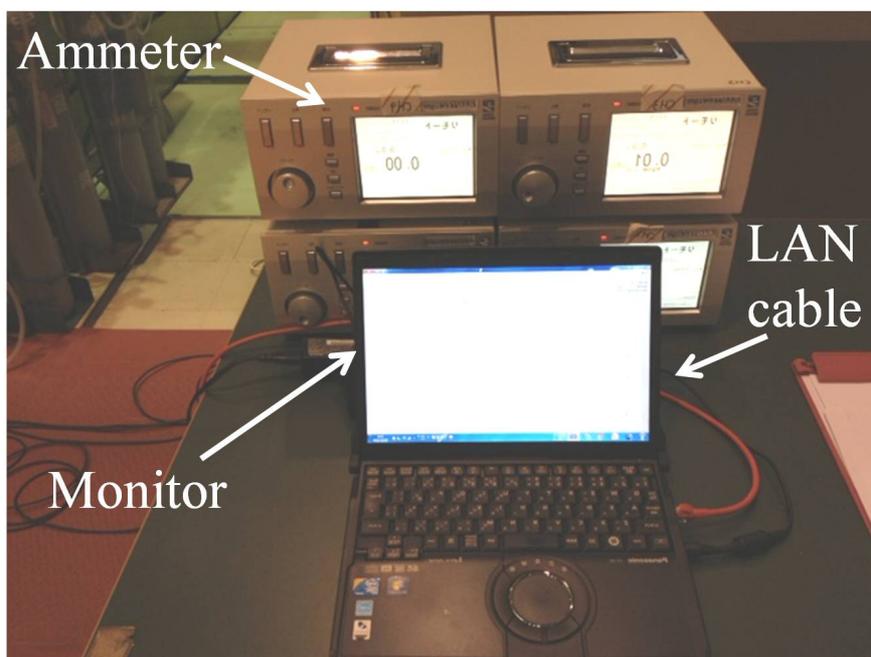


写真 4.2 電離箱電流の測定体系

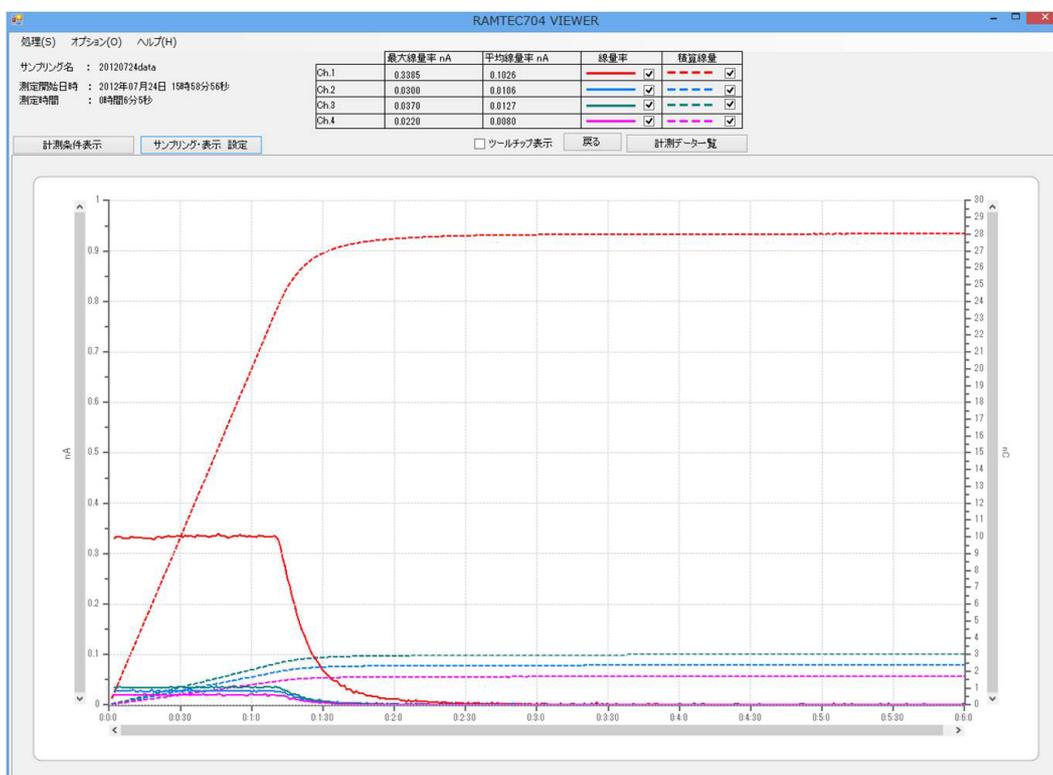


図 4.6 RAMTEC704Monitor の出力画面の一例

4.3 電離箱信号測定結果

4.3.1 炉出力に対する線形性

KURの運転出力と各電離箱応答の関係を図4.7に示す。全ての電離箱で、応答の炉出力に対する比例性が確認された。熱外中性子用電離箱については、他の電離箱に比べて、14倍程度高い応答が得られることが確認された。上述のように、中性子および γ 線強度は炉出力にほぼ比例する。従って、本実験により、中性子および γ 線強度に対する電離箱応答の線形性が確認できた。

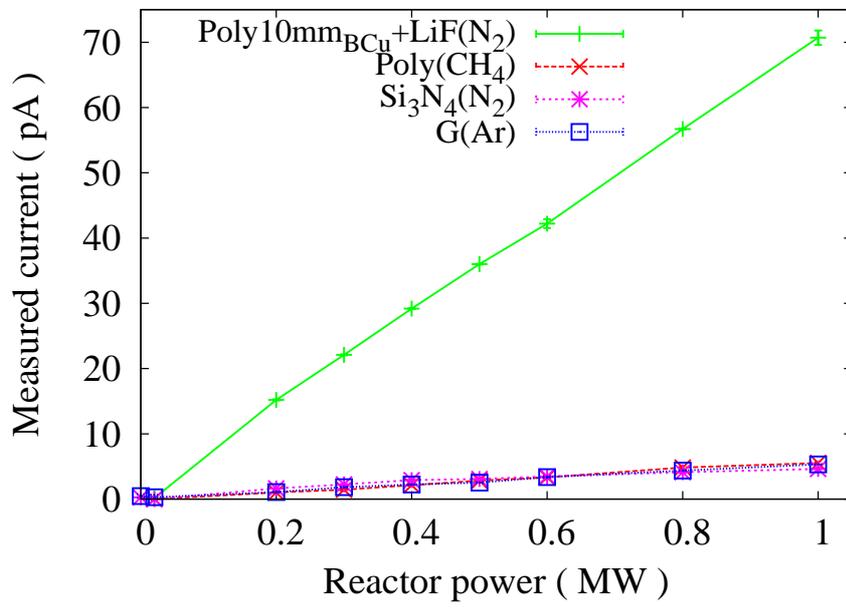


図 4.7 電離箱応答と炉出力との関係

4.3.2 4成分分離評価

各電離箱の応答係数を用いて行った4成分分離評価による各フラックスの経時変化を図4.8に示す。図中の実線は成分分離の実験結果、破線はシミュレーションで見積もられた各成分フラックスの評価値である。今回の実験では、熱中性子フラックスは分離評価の限界を下回っており、実質ゼロであった。この原因としては、用いた基準熱外中性子照射モードには熱中性子がほとんど含まれていないことや、 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ の電離箱応答が予想に比べ低かったこと、などが考えられる。

表4.1に電離箱位置(ビーム軸中心から18-19 cm)における4成分のフラックスについて、シミュレーションによる評価値と分離評価で得られた平均値を示す。計算値に比べて分離評価値は、熱外中性子および高速中性子で誤差4%および12%以内で一致し、 γ 線で63%の過大評価となった。

分離評価で得られたフラックスのばらつきは、高速中性子で26%、熱外中性子で2%程度、 γ 線で27%であり、応答の大きな成分ほど分離評価精度が良く、応答が安定していることが確認された。

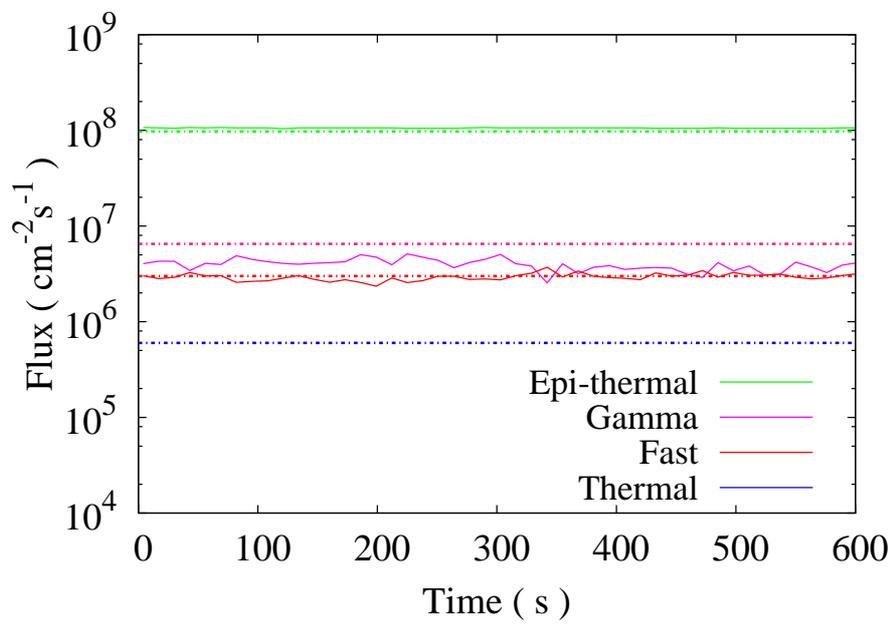


図 4.8 多重電離箱システムを用いた 4 成分の分離評価結果

表 4.1 電離箱位置における 4 成分フラックスの評価値と
成分分離結果の平均値の比較

Components	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	
	Evaluated data	Experiment
Gamma	6.5×10^6 (13 cGy/h)	4.0×10^6 (7.7 cGy/h)
Fast	3.0×10^6	2.9×10^6
Epi-thermal	9.7×10^7	1.1×10^8
Thermal	6.0×10^5	N/A

4.4 まとめ

実際に電離箱を KUR-HWNIF の輸送台車コリメータ辺縁部に配置し、電離箱応答を取得することで、多重電離箱システムの動作確認を行った。KUR の運転出力に対する電離箱応答の線形性が確認された。炉出力 1MW における基準熱外中性子照射モードでは、熱外中性子および高速中性子で誤差 4% および 12% 以内で一致し、 γ 線で 63% 以内の誤差で分離評価できることが確認された。主成分である熱外中性子成分と高速中性子成分に関する誤差は、2 章の緒言で示した「目指すべき評価精度」の許容範囲である 26% 以内であった。

熱中性子成分については、もともと十分なフラックスが無い条件であり、かつ $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 電離箱の応答が想定よりも低かったことから有効な分離評価が行われなかった。原因としては、 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 電離箱の外側のアルミ箔による導電性が保持できていなかった可能性がある。 γ 線成分については、 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 電離箱の低い応答が分離評価に影響を与え、 γ 線フラックスが過少評価された可能性がある。実際の BNCT では、5MW の炉出力であることから、熱中性子成分の分離評価が有効に行われることが期待できる。また、分離評価時の誤差や変動のさらなる低減も期待できる。

第5章 総括

本研究では、BNCTの品質保証・品質管理を向上させる線量評価統合システムのビームモニターシステム部を担う「多重電離箱システム」に関して、京都大学原子炉実験所のKUR-HWNIFでの利用を想定してシステムの構築を検討した。第2章から第4章までに得られた結果を以下に要約する。

多重電離箱システム構築のための使用電離箱の構造検討

第2章では、システムに用いる4種類の電離箱に関して最適化検討を行った。本検討では、モンテカルロシミュレーションコードPHITSを用いて、中性子ビーム照射により電離箱で生成する電流の物理現象をモデル化して、生成電荷量および発生電流量の算出を行った。

γ 線用電離箱については、高速中性子に対するガスからの寄与が少なく、熱中性子に対する壁からの寄与が少ないことから、厚さ3 mmのグラファイト壁とアルゴンガスの組み合わせが適していることが分かった。熱中性子用電離箱については、2～3 mm程度の薄い窒化珪素壁に窒素ガスの構造を用いることで熱中性子に対する応答を高められることが確認できた。熱外中性子用電離箱については、内面に天然硼素を蒸着したポリエチレン壁に窒素ガスを充填した構造を用いることで、熱外中性子を適度に減速させ、測定感度を高められることが分かった。高速中性子用電離箱については、厚さ2 mmのポリエチレン壁にメタンガス充填した構造が適していることが分かった。

多重電離箱システムにおける各電離箱の応答特性評価

第3章では、第2章で決定した構造を有する電離箱を準備し、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線源およびKUR-HWNIFで得られる複数種の中性子ビームを用いて、応答特性評価を行った。実験で得られる中性子応答から3成分の応答を個々に評価するために、シミュレーションを用いた分離評価手法を提案した。

γ 線用および高速中性子用電離箱としては市販の電離箱が、熱中性子用電離箱としては新たに作成した窒化珪素壁の電離箱が有効であることが確認できた。熱外中性子用電離箱については、電離箱に入射する熱中中性子を低減するLiFカバー、ならびに内面に蒸着した天然硼素およびガス中の窒素原子により、熱外中中性子の相対感度を高められることが確認できた。

実験で評価した電離箱全てについて、KUR-HWNIFで得られる様々なエネルギースペクトルを有する中性子ビームの各フラックスの強度変化に対して電離箱応答の線形性が確認できた。

多重電離箱システムを用いたBNCT用中性子照射場における成分分離評価

第4章では、KUR-HWNIFにおいて、4種類の電離箱を患者輸送台車上のコリメータ炉心側に取り付けて、多重電離箱システムの動作を実験的に確認した。KUR運転出力1 MWで、基準熱外中性子照射モードを対象に4成分の分離評価を行った。各電離箱の応答係数については、第3章で決定されたものを用いた。

シミュレーションで求めた電離箱位置における各成分のフラックスに関する評価値に対して、分離評価結果は熱外中性子および高速中性子で誤差4%および12%以内で一致し、 γ 線で63%以内の誤差で評価できることが確認された。主成分である熱外中性子成分と高速中性子成分に関する誤差は、本システムの「目指すべき評価精度」の許容範囲である26%以内であった。熱中中性子に関しては、もともと十分なフラックスが得られる条件でなかったことと、 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{N}_2)$ 電離箱の応答が期待よりも低かったこと等により、分離評価できなかった。

実際のBNCTでは、5 MWの炉出力であることから、熱中中性子成分の分離評価が

有効に行われることが期待できる。また、分離評価時の誤差や変動のさらなる低減も期待できる。

以上の結果から、本研究で検討した多重電離箱システムを BNCT 用照射場に構築することにより、照射時のビーム特性の変動をリアルタイムに評価できることが確認できた。本システムの BNCT 施設への導入は、線量評価手法を含む BNCT に関する品質保証・品質管理の向上に大きく貢献すると期待している。

謝辞

平成 20 年から平成 25 年にわたり京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻において行った「硼素中性子捕捉療法の高品質保証・品質管理向上のための多重電離箱システムの研究」を遂行するにあたり、このような研究の機会を頂くとともに、研究全般に渡りご指導頂きました京都大学原子炉実験所の櫻井良憲准教授に深く感謝いたします。本研究の初期から、計算手法および実験結果の解析方法に関する幾多の有益な助言と多大なご支援を頂きました京都大学大学院工学研究科の田中浩基助教に心より感謝いたします。

本論文を審査して頂きました京都大学大学院工学研究科の伊藤秋男教授、神野郁夫教授に深く感謝いたします。

医学・生物学の立場からご教授頂いた京都大学原子炉実験所の小野公二教授に感謝いたします。医学物理学全般に関する知識をご教授頂いた京都大学原子炉実験所の丸橋晃教授に感謝いたします。

モンテカルロシミュレーションコード PHITS に関する疑問点、使用方法などを教えて下さった高度情報科学技術研究機構 (RIST) の仁井田浩二氏、原子力研究開発機構の佐藤達彦氏に感謝いたします。BNCT 及びシミュレーションに関して多くの御助言をして下さった若狭湾エネルギー研究センターの高田卓志研究員に深く感謝いたします。

電離箱の製造を行うにあたり、御助言、御指摘を頂きました技術室の吉永尚生氏、金山雅哉氏に深く感謝いたします。電離箱の内壁への硼素および銅の蒸着をして頂いた京都大学原子炉実験所の日野正裕准教授に深く感謝いたします。

線量データ処理に関するソフトウェアの作製において、細かな相談事にも快く応

じて下さった東洋メディックの前田弘康氏に深く感謝いたします。

研究生活をともに送ってきた工学研究科原子核工学専攻放射線医学物理学研究室の先輩および後輩の皆様方に感謝いたします。専門外の多方面からの意見をして頂いた京都大学原子炉実験所の学生部屋の皆様感謝いたします。

最後に、博士前期・後期課程の在籍期間にわたり、学生生活を温かく見守り、経済面からのご支援頂きました家族の皆様心より深く感謝いたします。

Appendix A

Cramer の公式

式 (2.2) に示した逆行列は以下の計算に基づき解くことができる。

$$\begin{pmatrix} k_{T,t} & k_{T,e} & k_{T,f} & k_{T,g} \\ k_{E,t} & k_{E,e} & k_{E,f} & k_{E,g} \\ k_{F,t} & k_{F,e} & k_{F,f} & k_{F,g} \\ k_{G,t} & k_{G,e} & k_{G,f} & k_{G,g} \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} I_{T,t} & I_{T,e} & I_{T,f} & I_{T,g} \\ I_{E,t} & I_{E,e} & I_{E,f} & I_{E,g} \\ I_{F,t} & I_{F,e} & I_{F,f} & I_{F,g} \\ I_{G,t} & I_{G,e} & I_{G,f} & I_{G,g} \end{pmatrix}$$

$\det A \neq 0$

ここで、 $\det A$ および I は以下に示す計算により得られる。

$$\begin{aligned} \det A &= k_{G,g}k_{F,f}k_{E,e}k_{T,t} + k_{G,g}k_{F,e}k_{E,t}k_{T,f} + k_{G,g}k_{F,t}k_{E,f}k_{T,e} \\ &\quad + k_{G,f}k_{F,g}k_{E,t}k_{T,e} + k_{G,f}k_{F,e}k_{E,g}k_{T,t} + k_{G,f}k_{F,t}k_{E,e}k_{T,g} \\ &\quad + k_{G,e}k_{F,g}k_{E,f}k_{T,t} + k_{G,e}k_{F,f}k_{E,t}k_{T,g} + k_{G,e}k_{F,t}k_{E,g}k_{T,f} \\ &\quad + k_{G,t}k_{F,g}k_{E,e}k_{T,f} + k_{G,t}k_{F,f}k_{E,g}k_{T,e} + k_{G,t}k_{F,t}k_{E,f}k_{T,g} \\ &\quad - k_{G,g}k_{F,f}k_{E,t}k_{T,e} - k_{G,g}k_{F,e}k_{E,f}k_{T,t} - k_{G,g}k_{F,t}k_{E,e}k_{T,f} \\ &\quad - k_{G,f}k_{F,g}k_{E,e}k_{T,t} - k_{G,f}k_{F,e}k_{E,t}k_{T,g} - k_{G,f}k_{F,t}k_{E,g}k_{T,e} \\ &\quad - k_{G,e}k_{F,g}k_{E,t}k_{T,f} - k_{G,e}k_{F,f}k_{E,g}k_{T,t} - k_{G,e}k_{F,t}k_{E,f}k_{T,g} \\ &\quad - k_{G,t}k_{F,g}k_{E,f}k_{T,e} - k_{G,t}k_{F,f}k_{E,e}k_{T,g} - k_{G,t}k_{F,e}k_{E,g}k_{T,f} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{T,g} &= k_{F,g}k_{E,e}k_{T,f} + k_{F,f}k_{E,g}k_{T,e} + k_{F,e}k_{E,f}k_{T,g} - k_{F,g}k_{E,f}k_{T,e} - k_{F,f}k_{E,e}k_{T,g} - k_{F,e}k_{E,g}k_{T,f} \\
I_{T,f} &= k_{G,g}k_{E,f}k_{T,e} + k_{G,f}k_{E,e}k_{T,g} + k_{G,e}k_{E,g}k_{T,f} - k_{G,g}k_{E,e}k_{T,f} - k_{G,f}k_{E,g}k_{T,e} - k_{G,e}k_{E,f}k_{T,g} \\
I_{T,e} &= k_{G,g}k_{F,e}k_{T,f} + k_{G,f}k_{F,g}k_{T,e} + k_{G,e}k_{F,f}k_{T,g} - k_{G,g}k_{F,f}k_{T,e} - k_{G,f}k_{F,e}k_{T,g} - k_{G,e}k_{F,g}k_{T,f} \\
I_{T,t} &= k_{G,g}k_{F,f}k_{E,e} + k_{G,f}k_{F,e}k_{E,g} + k_{G,e}k_{F,g}k_{E,f} - k_{G,g}k_{F,e}k_{E,f} - k_{G,f}k_{F,g}k_{E,e} - k_{G,e}k_{F,f}k_{E,g} \\
I_{E,g} &= k_{F,g}k_{E,f}k_{T,t} + k_{F,f}k_{E,t}k_{T,g} + k_{F,t}k_{E,g}k_{T,f} - k_{F,g}k_{E,t}k_{T,f} - k_{F,f}k_{E,g}k_{T,t} - k_{F,t}k_{E,f}k_{T,g} \\
I_{E,f} &= k_{G,g}k_{E,t}k_{T,f} + k_{G,f}k_{E,g}k_{T,t} + k_{G,t}k_{E,f}k_{T,g} - k_{G,g}k_{E,f}k_{T,t} - k_{G,f}k_{E,t}k_{T,g} - k_{G,t}k_{E,g}k_{T,f} \\
I_{E,e} &= k_{G,g}k_{F,f}k_{T,t} + k_{G,f}k_{F,t}k_{T,g} + k_{G,t}k_{F,g}k_{T,f} - k_{G,g}k_{F,t}k_{T,f} - k_{G,f}k_{F,g}k_{T,t} - k_{G,t}k_{F,f}k_{T,g} \\
I_{E,t} &= k_{G,g}k_{F,t}k_{E,f} + k_{G,f}k_{F,g}k_{E,t} + k_{G,t}k_{F,f}k_{E,g} - k_{G,g}k_{F,f}k_{E,t} - k_{G,f}k_{F,t}k_{E,g} - k_{G,t}k_{F,g}k_{E,f} \\
I_{F,g} &= k_{F,g}k_{E,t}k_{T,e} + k_{F,e}k_{E,g}k_{T,t} + k_{F,t}k_{E,e}k_{T,g} - k_{F,g}k_{E,e}k_{T,t} - k_{F,e}k_{E,t}k_{T,g} - k_{F,t}k_{E,g}k_{T,e} \\
I_{F,f} &= k_{G,g}k_{E,e}k_{T,t} + k_{G,e}k_{E,t}k_{T,g} + k_{G,t}k_{E,g}k_{T,e} - k_{G,g}k_{E,g}k_{T,e} - k_{G,e}k_{E,g}k_{T,t} - k_{G,t}k_{E,e}k_{T,g} \\
I_{F,e} &= k_{G,f}k_{F,t}k_{T,e} + k_{G,e}k_{F,g}k_{T,t} + k_{G,t}k_{F,e}k_{T,g} - k_{G,g}k_{F,e}k_{T,t} - k_{G,e}k_{F,t}k_{T,g} - k_{G,t}k_{F,g}k_{T,e} \\
I_{F,t} &= k_{G,g}k_{F,e}k_{E,t} + k_{G,e}k_{F,t}k_{E,g} + k_{G,t}k_{F,g}k_{E,e} - k_{G,g}k_{F,t}k_{E,e} - k_{G,e}k_{F,g}k_{E,t} - k_{G,t}k_{F,e}k_{E,g} \\
I_{G,g} &= k_{F,f}k_{E,e}k_{T,t} + k_{F,e}k_{E,t}k_{T,f} + k_{F,t}k_{E,f}k_{T,e} - k_{F,f}k_{E,t}k_{T,e} - k_{F,e}k_{E,f}k_{T,t} - k_{F,t}k_{E,e}k_{T,f} \\
I_{G,f} &= k_{G,f}k_{E,t}k_{T,e} + k_{G,e}k_{E,f}k_{T,t} + k_{F,t}k_{E,e}k_{T,f} - k_{G,f}k_{E,e}k_{T,t} - k_{G,e}k_{E,t}k_{T,f} - k_{G,t}k_{E,f}k_{T,e} \\
I_{G,e} &= k_{G,f}k_{F,e}k_{T,t} + k_{G,e}k_{F,t}k_{T,f} + k_{G,t}k_{F,f}k_{T,e} - k_{G,f}k_{F,t}k_{T,e} - k_{G,e}k_{F,f}k_{T,t} - k_{G,t}k_{F,e}k_{T,f} \\
I_{G,t} &= k_{G,f}k_{F,t}k_{E,e} + k_{G,e}k_{F,f}k_{E,t} + k_{G,t}k_{F,e}k_{E,f} - k_{G,f}k_{F,e}k_{E,t} - k_{G,e}k_{F,t}k_{E,f} - k_{G,t}k_{F,f}k_{E,e}
\end{aligned}$$

Appendix B

表 B.1 最適化計算で用いた KUR-HWNIF 熱外中性子ビーム (5MW 運転時) のビスマス面におけるビーム中心付近の 8 群 γ 線エネルギー群構造

No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	1.40E+01	8.00E+00	4.85E+04
2	8.00E+00	5.00E+00	2.93E+05
3	5.00E+00	2.00E+00	6.61E+05
4	2.00E+00	1.66E+00	1.02E+07
5	1.66E+00	6.00E-01	1.12E+07
6	6.00E-01	1.00E-01	4.85E+06
7	1.00E-01	2.00E-02	4.72E+05
8	2.00E-02	0.00E+00	0.00E+00

表 B.2 最適化計算で用いた KUR-HWNIF 熱外中性子ビーム (5MW 運転時) のビスマス面におけるビーム中心付近の 144 群中性子エネルギー群構造

No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	1.64E+01	1.61E+01	7.55E+02	51	2.70E+00	2.50E+00	1.91E+05
2	1.61E+01	1.58E+01	8.07E+02	52	2.50E+00	2.27E+00	2.67E+05
3	1.58E+01	1.56E+01	5.66E+02	53	2.27E+00	2.06E+00	3.00E+05
4	1.56E+01	1.53E+01	9.01E+02	54	2.06E+00	1.87E+00	3.31E+05
5	1.53E+01	1.50E+01	9.60E+02	55	1.87E+00	1.70E+00	3.55E+05
6	1.50E+01	1.47E+01	1.02E+03	56	1.70E+00	1.54E+00	3.97E+05
7	1.47E+01	1.45E+01	7.19E+02	57	1.54E+00	1.40E+00	4.09E+05
8	1.45E+01	1.42E+01	9.62E+01	58	1.40E+00	1.28E+00	4.07E+05
9	1.42E+01	1.40E+01	8.06E+02	59	1.28E+00	1.16E+00	4.67E+05
10	1.40E+01	1.37E+01	1.28E+03	60	1.16E+00	1.06E+00	4.41E+05
11	1.37E+01	1.35E+01	9.07E+02	61	1.06E+00	9.64E-01	4.73E+05
12	1.35E+01	1.32E+01	1.44E+03	62	9.64E-01	8.78E-01	4.69E+05
13	1.32E+01	1.30E+01	1.02E+03	63	8.78E-01	8.00E-01	4.69E+05
14	1.30E+01	1.28E+01	1.08E+03	64	8.00E-01	7.13E-01	5.79E+05
15	1.28E+01	1.26E+01	1.14E+03	65	7.13E-01	6.35E-01	5.63E+05
16	1.26E+01	1.22E+01	2.44E+03	66	6.35E-01	5.66E-01	5.34E+05
17	1.22E+01	1.19E+01	2.00E+03	67	5.66E-01	5.04E-01	5.08E+05
18	1.19E+01	1.15E+01	2.92E+03	68	5.04E-01	4.49E-01	4.80E+05
19	1.15E+01	1.11E+01	3.21E+03	69	4.49E-01	4.00E-01	4.56E+05
20	1.11E+01	1.08E+01	2.64E+03	70	4.00E-01	3.56E-01	4.38E+05
21	1.08E+01	1.05E+01	2.90E+03	71	3.56E-01	3.17E-01	4.20E+05
22	1.05E+01	1.01E+01	4.23E+03	72	3.17E-01	2.83E-01	4.08E+05
23	1.01E+01	9.69E+00	4.89E+03	73	2.83E-01	2.52E-01	4.17E+05
24	9.69E+00	9.31E+00	5.08E+03	74	2.52E-01	2.24E-01	4.25E+05
25	9.31E+00	8.95E+00	5.40E+03	75	2.24E-01	2.00E-01	4.14E+05
26	8.95E+00	8.60E+00	5.94E+03	76	2.00E-01	1.73E-01	5.47E+05
27	8.60E+00	8.26E+00	6.53E+03	77	1.73E-01	1.59E-01	3.32E+05
28	8.26E+00	7.94E+00	7.11E+03	78	1.59E-01	1.41E-01	5.08E+05
29	7.94E+00	7.63E+00	7.97E+03	79	1.41E-01	1.26E-01	5.21E+05
30	7.63E+00	7.33E+00	8.99E+03	80	1.26E-01	1.12E-01	5.97E+05
31	7.33E+00	7.04E+00	1.03E+04	81	1.12E-01	1.00E-01	6.28E+05
32	7.04E+00	6.77E+00	1.13E+04	82	1.00E-01	7.74E-02	1.64E+06
33	6.77E+00	6.50E+00	1.34E+04	83	7.74E-02	5.99E-02	2.00E+06
34	6.50E+00	6.24E+00	1.53E+04	84	5.99E-02	4.64E-02	2.41E+06
35	6.24E+00	6.00E+00	1.69E+04	85	4.64E-02	3.59E-02	2.95E+06
36	6.00E+00	5.76E+00	2.00E+04	86	3.59E-02	2.78E-02	3.61E+06
37	5.76E+00	5.53E+00	2.22E+04	87	2.78E-02	2.15E-02	4.37E+06
38	5.53E+00	5.31E+00	2.44E+04	88	2.15E-02	1.67E-02	4.88E+06
39	5.31E+00	5.10E+00	2.66E+04	89	1.67E-02	1.29E-02	5.68E+06
40	5.10E+00	4.90E+00	2.88E+04	90	1.29E-02	1.00E-02	6.37E+06
41	4.90E+00	4.70E+00	3.23E+04	91	1.00E-02	7.74E-03	7.25E+06
42	4.70E+00	4.52E+00	3.29E+04	92	7.74E-03	5.99E-03	7.89E+06
43	4.52E+00	4.34E+00	3.70E+04	93	5.99E-03	4.64E-03	8.43E+06
44	4.34E+00	4.17E+00	3.95E+04	94	4.64E-03	3.59E-03	9.01E+06
45	4.17E+00	4.00E+00	4.41E+04	95	3.59E-03	2.78E-03	9.69E+06
46	4.00E+00	3.70E+00	9.28E+04	96	2.78E-03	2.15E-03	1.04E+07
47	3.70E+00	3.42E+00	1.10E+05	97	2.15E-03	1.67E-03	1.08E+07
48	3.42E+00	3.16E+00	1.27E+05	98	1.67E-03	1.29E-03	1.19E+07
49	3.16E+00	2.92E+00	1.48E+05	99	1.29E-03	1.00E-03	1.22E+07
50	2.92E+00	2.70E+00	1.68E+05	100	1.00E-03	7.74E-04	1.32E+07

表 B.2 最適化計算で用いた KUR-HWNIF 熱外中性子ビーム (5MW 運転時) のビスマス面におけるビーム中心付近の 144 群中性子エネルギー群構造 (続き)

No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
101	7.74E-04	5.99E-04	1.41E+07	123	2.78E-06	2.15E-06	3.01E+07
102	5.99E-04	4.64E-04	1.46E+07	124	2.15E-06	1.67E-06	2.80E+07
103	4.64E-04	3.59E-04	1.54E+07	125	1.67E-06	1.29E-06	2.79E+07
104	3.59E-04	2.78E-04	1.61E+07	126	1.29E-06	1.00E-06	2.57E+07
105	2.78E-04	2.15E-04	1.70E+07	127	1.00E-06	7.74E-07	2.31E+07
106	2.15E-04	1.67E-04	1.74E+07	128	7.74E-07	5.99E-07	1.68E+07
107	1.67E-04	1.29E-04	1.86E+07	129	5.99E-07	4.64E-07	9.14E+06
108	1.29E-04	1.00E-04	1.91E+07	130	4.64E-07	3.59E-07	2.39E+06
109	1.00E-04	7.74E-05	2.09E+07	131	3.59E-07	2.78E-07	8.90E+04
110	7.74E-05	5.99E-05	2.17E+07	132	2.78E-07	2.15E-07	4.57E+00
111	5.99E-05	4.65E-05	2.22E+07	133	2.15E-07	1.67E-07	1.12E-07
112	4.65E-05	3.59E-05	2.35E+07	134	1.67E-07	1.29E-07	1.00E-06
113	3.59E-05	2.78E-05	2.39E+07	135	1.29E-07	1.00E-07	4.74E-02
114	2.78E-05	2.15E-05	2.48E+07	136	1.00E-07	7.74E-08	1.83E+01
115	2.15E-05	1.67E-05	2.49E+07	137	7.74E-08	5.99E-08	2.90E+02
116	1.67E-05	1.29E-05	2.63E+07	138	5.99E-08	4.64E-08	9.24E+02
117	1.29E-05	1.00E-05	2.65E+07	139	4.64E-08	3.59E-08	1.22E+03
118	1.00E-05	7.74E-06	2.79E+07	140	3.59E-08	2.78E-08	8.85E+02
119	7.74E-06	5.99E-06	2.85E+07	141	2.78E-08	2.15E-08	4.14E+02
120	5.99E-06	4.64E-06	2.89E+07	142	2.15E-08	1.67E-08	1.34E+02
121	4.64E-06	3.59E-06	2.95E+07	143	1.67E-08	1.29E-08	3.33E+01
122	3.59E-06	2.78E-06	2.97E+07	144	1.29E-08	1.00E-08	5.81E+00

表 B.3 最適化計算で用いた KUR-HWNIF 熱中性子ビーム (5MW 運転時) のビスマス面におけるビーム中心付近の 8 群 γ 線エネルギー群構造

No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	1.40E+01	8.00E+00	7.80E+04
2	8.00E+00	5.00E+00	4.73E+05
3	5.00E+00	2.00E+00	1.07E+06
4	2.00E+00	1.66E+00	1.65E+07
5	1.66E+00	6.00E-01	1.81E+07
6	6.00E-01	1.00E-01	7.80E+06
7	1.00E-01	2.00E-02	7.60E+05
8	2.00E-02	0.00E+00	0.00E+00

表 B.4 最適化計算で用いた KUR-HWNIF 熱中性子ビーム (5MW 運転時) のビスマス面におけるビーム中心付近の 144 群中性子エネルギー群構造

No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
1	1.64E+01	1.61E+01	3.27E+02	51	2.70E+00	2.50E+00	3.17E+04
2	1.61E+01	1.58E+01	3.46E+02	52	2.50E+00	2.27E+00	4.48E+04
3	1.58E+01	1.56E+01	2.41E+02	53	2.27E+00	2.06E+00	5.45E+04
4	1.56E+01	1.53E+01	3.81E+02	54	2.06E+00	1.87E+00	6.40E+04
5	1.53E+01	1.50E+01	4.02E+02	55	1.87E+00	1.70E+00	7.05E+04
6	1.50E+01	1.47E+01	4.25E+02	56	1.70E+00	1.54E+00	8.20E+04
7	1.47E+01	1.45E+01	2.96E+02	57	1.54E+00	1.40E+00	8.65E+04
8	1.45E+01	1.42E+01	4.66E+02	58	1.40E+00	1.28E+00	8.75E+04
9	1.42E+01	1.40E+01	3.26E+02	59	1.28E+00	1.16E+00	1.03E+05
10	1.40E+01	1.37E+01	5.15E+02	60	1.16E+00	1.06E+00	9.85E+04
11	1.37E+01	1.35E+01	3.62E+02	61	1.06E+00	9.64E-01	1.07E+05
12	1.35E+01	1.32E+01	5.70E+02	62	9.64E-01	8.78E-01	1.07E+05
13	1.32E+01	1.30E+01	4.00E+02	63	8.78E-01	8.00E-01	1.06E+05
14	1.30E+01	1.28E+01	4.20E+02	64	8.00E-01	7.13E-01	1.33E+05
15	1.28E+01	1.26E+01	4.41E+02	65	7.13E-01	6.35E-01	1.29E+05
16	1.26E+01	1.22E+01	9.35E+02	66	6.35E-01	5.66E-01	1.22E+05
17	1.22E+01	1.19E+01	7.60E+02	67	5.66E-01	5.04E-01	1.16E+05
18	1.19E+01	1.15E+01	1.10E+03	68	5.04E-01	4.49E-01	1.10E+05
19	1.15E+01	1.11E+01	1.21E+03	69	4.49E-01	4.00E-01	1.05E+05
20	1.11E+01	1.08E+01	9.80E+02	70	4.00E-01	3.56E-01	1.00E+05
21	1.08E+01	1.05E+01	1.07E+03	71	3.56E-01	3.17E-01	9.30E+04
22	1.05E+01	1.01E+01	1.55E+03	72	3.17E-01	2.83E-01	8.35E+04
23	1.01E+01	9.69E+00	1.78E+03	73	2.83E-01	2.52E-01	7.80E+04
24	9.69E+00	9.31E+00	1.83E+03	74	2.52E-01	2.24E-01	7.15E+04
25	9.31E+00	8.95E+00	1.94E+03	75	2.24E-01	2.00E-01	6.15E+04
26	8.95E+00	8.60E+00	2.10E+03	76	2.00E-01	1.73E-01	6.90E+04
27	8.60E+00	8.26E+00	2.28E+03	77	1.73E-01	1.59E-01	3.44E+04
28	8.26E+00	7.94E+00	2.39E+03	78	1.59E-01	1.41E-01	4.18E+04
29	7.94E+00	7.63E+00	2.58E+03	79	1.41E-01	1.26E-01	3.53E+04
30	7.63E+00	7.33E+00	2.77E+03	80	1.26E-01	1.12E-01	3.50E+04
31	7.33E+00	7.04E+00	3.00E+03	81	1.12E-01	1.00E-01	3.18E+04
32	7.04E+00	6.77E+00	3.11E+03	82	1.00E-01	7.74E-02	7.10E+04
33	6.77E+00	6.50E+00	3.47E+03	83	7.74E-02	5.99E-02	7.05E+04
34	6.50E+00	6.24E+00	3.71E+03	84	5.99E-02	4.64E-02	7.40E+04
35	6.24E+00	6.00E+00	3.82E+03	85	4.64E-02	3.59E-02	7.85E+04
36	6.00E+00	5.76E+00	4.25E+03	86	3.59E-02	2.78E-02	8.30E+04
37	5.76E+00	5.53E+00	4.57E+03	87	2.78E-02	2.15E-02	8.85E+04
38	5.53E+00	5.31E+00	4.87E+03	88	2.15E-02	1.67E-02	9.15E+04
39	5.31E+00	5.10E+00	5.20E+03	89	1.67E-02	1.29E-02	9.90E+04
40	5.10E+00	4.90E+00	5.50E+03	90	1.29E-02	1.00E-02	1.04E+05
41	4.90E+00	4.70E+00	6.15E+03	91	1.00E-02	7.74E-03	1.11E+05
42	4.70E+00	4.52E+00	6.20E+03	92	7.74E-03	5.99E-03	1.19E+05
43	4.52E+00	4.34E+00	6.90E+03	93	5.99E-03	4.64E-03	1.27E+05
44	4.34E+00	4.17E+00	7.30E+03	94	4.64E-03	3.59E-03	1.37E+05
45	4.17E+00	4.00E+00	8.15E+03	95	3.59E-03	2.78E-03	1.43E+05
46	4.00E+00	3.70E+00	1.44E+04	96	2.78E-03	2.15E-03	1.58E+05
47	3.70E+00	3.42E+00	1.69E+04	97	2.15E-03	1.67E-03	1.67E+05
48	3.42E+00	3.16E+00	1.99E+04	98	1.67E-03	1.29E-03	1.80E+05
49	3.16E+00	2.92E+00	2.31E+04	99	1.29E-03	1.00E-03	1.93E+05
50	2.92E+00	2.70E+00	2.73E+04	100	1.00E-03	7.74E-04	2.07E+05

表 B.4 最適化計算で用いた KUR-HWNIF 熱中性子ビーム (5MW 運転時) のビスマス面におけるビーム中心付近の 144 群中性子エネルギー群構造 (続き)

No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	No.	Upper energy (MeV)	Lower energy (MeV)	Flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
101	7.74E-04	5.99E-04	2.22E+05	123	2.78E-06	2.15E-06	7.80E+05
102	5.99E-04	4.64E-04	2.34E+05	124	2.15E-06	1.67E-06	8.10E+05
103	4.64E-04	3.59E-04	2.51E+05	125	1.67E-06	1.29E-06	8.70E+05
104	3.59E-04	2.78E-04	2.55E+05	126	1.29E-06	1.00E-06	8.55E+05
105	2.78E-04	2.15E-04	2.86E+05	127	1.00E-06	7.74E-07	8.60E+05
106	2.15E-04	1.67E-04	2.98E+05	128	7.74E-07	5.99E-07	8.60E+05
107	1.67E-04	1.29E-04	3.26E+05	129	5.99E-07	4.64E-07	8.55E+05
108	1.29E-04	1.00E-04	3.39E+05	130	4.64E-07	3.59E-07	9.35E+05
109	1.00E-04	7.74E-05	3.61E+05	131	3.59E-07	2.78E-07	2.03E+06
110	7.74E-05	5.99E-05	3.85E+05	132	2.78E-07	2.15E-07	1.17E+07
111	5.99E-05	4.65E-05	4.05E+05	133	2.15E-07	1.67E-07	1.79E+07
112	4.65E-05	3.59E-05	4.22E+05	134	1.67E-07	1.29E-07	5.65E+07
113	3.59E-05	2.78E-05	4.58E+05	135	1.29E-07	1.00E-07	1.19E+08
114	2.78E-05	2.15E-05	4.86E+05	136	1.00E-07	7.74E-08	1.94E+08
115	2.15E-05	1.67E-05	5.05E+05	137	7.74E-08	5.99E-08	2.52E+08
116	1.67E-05	1.29E-05	5.45E+05	138	5.99E-08	4.64E-08	2.76E+08
117	1.29E-05	1.00E-05	5.70E+05	139	4.64E-08	3.59E-08	2.65E+08
118	1.00E-05	7.74E-06	6.05E+05	140	3.59E-08	2.78E-08	2.27E+08
119	7.74E-06	5.99E-06	6.35E+05	141	2.78E-08	2.15E-08	1.81E+08
120	5.99E-06	4.64E-06	6.70E+05	142	2.15E-08	1.67E-08	1.33E+08
121	4.64E-06	3.59E-06	7.05E+05	143	1.67E-08	1.29E-08	9.60E+07
122	3.59E-06	2.78E-06	7.40E+05	144	1.29E-08	1.00E-08	6.45E+07

発表論文等リスト

I. 邦文発表

1. 藤井孝明, 櫻井良憲, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, ”BNCT 用多重電離箱システムに関する検討 (1) γ 線用電離箱の最適化”, 日本医学物理学会 第 98 回学術大会 MO-25(2009.09) 京都
2. 藤井孝明, 櫻井良憲, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, ”BNCT 用多重電離箱システムの最適化検討”, 日本中性子捕捉療法学会 第 6 回学術大会 21(2009.09) 京都
3. 藤井孝明, 田中浩基, 櫻井良憲, ”ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 用多重電離箱システムの最適化に関する研究”, 平成 21 年度京都大学原子炉実験所専門研究会 (2010.02) 熊取
4. 藤井孝明, 櫻井良憲, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, ”BNCT 用多重電離箱システムに関する検討 (2) サイクロトロンベース熱外中性子照射場に対する電離箱の最適化”, 日本医学物理学会 第 99 回学術大会, O-085(2010.04) 横浜
5. 櫻井良憲, 藤井孝明, 田中浩基, 鈴木 実, 劉 勇, 菓子野元郎, 木梨友子, 増永慎一郎, 小野公二, 丸橋 晃, ”硼素中性子捕捉療法における QA 用ファントムに関する検討”, 日本医学物理学会 第 99 回学術大会, O-086(2010.04) 横浜
6. 藤井孝明, 櫻井良憲, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, ”KUR 重水中性子照射設備及びサイクロトロン中性子照射設備に対する BNCT 用多重電離箱システムの最適化と応答特性評価”, 日本中性子捕捉療法学会 第 7 回学術大会 18(2010.08) 東京
7. 藤井孝明, 田中浩基, 櫻井良憲, ”BNCT 用多重電離箱システムに関する最適化研究”, 日本原子力学会 2010 年秋の大会 32(2010.09) 札幌

8. 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, 櫻井良憲, ”BNCT用多重電離箱システムに関する実験的研究”, 日本中性子捕捉療法学会 第8回学術大会 24(2011.09) 徳島
9. 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, 櫻井良憲, ”BNCT用リアルタイムビームモニターに関する実験的研究”, 放射線工学部会夏期セミナー P25(2011.08) 仙台
10. 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, 櫻井良憲, ”BNCT用リアルタイム線量評価システムに関する基礎的研究”, 京都大学原子炉実験所第46回学術講演会, 一般講演 P30(2012.02) 熊取
11. 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 櫻井良憲, ”BNCT用多重電離箱システムに関する基礎的研究”, 日本医学物理学会 第103回学術大会 O-115(2012.04) 横浜
12. 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, 日野正裕, 櫻井良憲, ”多重電離箱システムの開発”, 平成24年度京都大学原子炉実験所専門研究会 (2013.02) 熊取

II. 欧文発表

1. T.Fujii, H.Tnaka, Y.Sakurai, ”Study on medical application of nuclear energy focused on Boron Neutron Capture Therapy”, The 2nd International Symposium Kyoto University Global COE Program (2010.08) Kyoto
2. T.Fujii, H.Tanaka, A.Marubishi, K.Ono, Y.Sakurai, ”Study on optimization of multi ionization-chamber system for BNCT”, 14th International Congress on Neutron Capture Therapy (2010.10) Buenos Aires
3. Y.Sakurai, T.Fujii, H.Tanaka, M.Suzuki, Y.Liu, G.Kashino, Y.Kinashi, S.Masunaga, K.Ono, A.Marubishi, ”A Study on QA-phantom for Boron

Neutron Capture Therapy”, 14th International Congress on Neutron Capture Therapy (2010.10) Buenos Aires

4. T.Fujii, T.Ageishi, H.Tanaka, A.Marubishi, K.Ono, Y.Sakurai, ”An experimental study for real-time neutron beam monitor system for BNCT”, 6th Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting (2011.12) Hsinchu
5. T.Fujii, T.Ageishi, H.Tanaka, A.Marubishi, K.Ono, Y.Sakurai, ”An experimental study for on-line neutron beam monitor system for BNCT”, 102nd Congress of Japan Society of Medical Physics, 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, 11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics (2011.09) Fukuoka
6. T.Fujii, H.Tanaka, Y.Sakurai, ”An experimental study on multi ionization-chamber system for BNCT”, The 3rd G-COE International Symposium (Specially Jointed with BK21 Program at Ajou University) (2011.08) Suwon
7. T.Fujii, T.Ageishi, M.Hino, H.Tanaka, A.Marubishi, K.Ono, Y.Sakurai, ”A fundamental research on Multi Ionization-Chamber System for BNCT”, World Congress 2012 Medical Physics and Biomedical Engineering (2012.05) Beijing
8. T.Fujii, T.Ageishi, M.Hino, H.Tanaka, A.Marubishi, K.Ono, Y.Sakurai, Response evaluations of ionization chambers to develop Multi Ionization-Chamber System for Boron Neutron Capture Therapy, 15th International Congress on Neutron Capture Therapy (2012.09) Tsukuba

III. 邦文論文等

1. 藤井孝明, 櫻井良憲, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, ”BNCT用多重電離箱システムに関する検討(1)γ線用電離箱の最適化”, 日本医学物理学

- 会機関誌, 日本医学物理学会, **29**, 82-83 (2009)
2. 藤井孝明, 櫻井良憲, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, ”BNCT用多重電離箱システムに関する検討 (2) サイクロトロンベース熱外中性子照射場に対する電離箱の最適化”, 日本医学物理学会機関誌, 日本医学物理学会, **30**, 245-246 (2010)
 3. 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, 櫻井良憲, ”BNCT用リアルタイム線量評価システムに関する基礎的研究”, 京都大学原子炉実験所第46回学術講演会報文集, 京都大学原子炉実験所, 207-212 (2012)
 4. 藤井孝明, 上石達也, 丸橋 晃, 小野公二, 田中浩基, 櫻井良憲, ”BNCT用リアルタイムビームモニターに関する実験的研究”, 放射線, 応用物理学会放射線分科会, **38**, 35-39 (2012)
 5. 藤井孝明, 上石達也, 田中浩基, 丸橋 晃, 小野公二, 櫻井良憲, ”BNCT用多重電離箱システムに関する基礎的研究”, 日本医学物理学会機関誌, 日本医学物理学会, **32**, 196 (2012)

IV. 欧文論文等

1. T.Fujii, H.Tanaka, A.Marubishi, K.Ono, Y.Sakurai, ”Study on optimization of multi ionization-chamber system for BNCT”, Proceedings of 14th International Congress on Neutron Capture Therapy, 177-180 (2010)
2. Y.Sakurai, T.Fujii, H.Tanaka, M.Suzuki, Y.Liu, G.Kashino, Y.Kinashi, S.Masunaga, K.Ono, A.Marubishi, ”A Study on QA-phantom for Boron Neutron Capture Therapy”, Proceedings of 14th International Congress on Neutron Capture Therapy, 254-256 (2010)
3. T. Fujii, T. Ageishi, H. Tanaka, A. Marubishi, K. Ono, Y. Sakurai, ”An experimental study for real-time neutron beam monitor system for BNCT”, Proceedings of 6th Young Researchers Boron Neutron Capture Therapy Meeting, National Tsing Hua University, 61-67 (2011)

4. T. Fujii, H. Tanaka, A. Maruhashi, K. Ono, Y. Sakurai, "Study on optimization of multi ionization-chamber system for BNCT", *Appl. Radiat. Isot.* **169**, 1862-1865 (2011)