

JAERI-Tech
2003-011



JP0350084



高エネルギー加速器施設対応
中性子レムモニタのエネルギー応答特性評価

2003年3月

中根 佳弘・原田 康典・坂本 幸夫
小栗 朋美・吉澤 道夫・高橋 史明・石倉 剛*
藤本 敏明*・田中 進・笹本 宣雄

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

高エネルギー加速器施設対応中性子レムモニタのエネルギー応答特性評価

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター

中根 佳弘・原田 康典・坂本 幸夫⁺・

小栗 朋美・吉澤 道夫⁺・高橋 史明⁺・石倉 剛^{*}・

藤本 敏明^{*}・田中 進⁺⁺・笹本 宣雄

(2003年 1月 28日受理)

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設している大強度陽子加速器施設(J-PARC)に適用する中性子レムモニタの開発を行った。本研究では、熱エネルギーから中高エネルギー領域までの広範な中性子による線量率を精度よく測定できるモニタの開発を目的として、従来型のレムモニタに中高エネルギー領域中性子に対して増倍効果のある鉛ブリーダを装着した中性子レムモニタを試作した。試作した中性子レムモニタのエネルギー応答に関し、熱エネルギーから 150MeV までの広範なエネルギー領域の中性子に対する応答特性を中性子輸送計算により評価するとともに、この評価精度を確認する目的で、熱エネルギーから 65MeV までの中性子場を用いて応答特性を測定した。得られたエネルギー応答特性を中性子の線量換算係数と比較した結果、試作中性子レムモニタは熱エネルギーから 150MeV までの広範なエネルギー領域において優れたエネルギー応答特性を有することが確認できた。このことにより、加速器施設用中性子レムモニタとして実用化の目処がついた。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 - 4

+ 保健物理部

++ 高崎研究所放射線高度利用センター

* 富士電機(株)

Evaluation of Energy Response of Neutron Rem Monitor
Applied to High-energy Accelerator Facilities

Yoshihiro NAKANE, Yasunori HARADA, Yukio SAKAMOTO⁺,
Tomomi OGURI, Michio YOSHIZAWA⁺, Fumiaki TAKAHASHI⁺, Takeshi ISHIKURA^{*},
Toshiaki FUJIMOTO^{*}, Susumu TANAKA⁺⁺ and Nobuo SASAMOTO

Center for Proton Accelerator Facilities
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 28, 2003)

A neutron rem monitor was newly developed for applying to the high-intensity proton accelerator facility (J-PARC) that is under construction as a joint project between the Japan Atomic Energy Research Institute and the High Energy Accelerator Research Organization. To measure the dose rate accurately for wide energy range of neutrons from thermal to high-energy region, the neutron rem monitor was fabricated by adding a lead breeder layer to a conventional neutron rem monitor. The energy response of the monitor was evaluated by using neutron transport calculations for the energy range from thermal to 150 MeV. For verifying the results, the response was measured at neutron fields for the energy range from thermal to 65 MeV. The comparisons between the energy response and dose conversion coefficients show that the newly developed neutron rem monitor has a good performance in energy response up to 150 MeV, suggesting that the present study offered prospects of a practical fabrication of the rem monitor applicable to the high intensity proton accelerator facility.

Keywords: Neutron Rem Monitor, Lead Breeder, Energy Response, Intermediate and High Energy Neutron, Monte Carlo Calculation

⁺ Department of Health Physics

⁺⁺ Advanced Radiation Technology Center, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

^{*} Fuji Electric Co., Ltd.

目 次

1.	はじめに.....	1
2.	実験	2
2.1	中高エネルギー対応中性子レムモニタ.....	2
2.1.1	鉛ブリーダ付き中性子レムモニタ概要.....	2
2.1.2	試作した中性子レムモニタ.....	2
2.2	エネルギー応答特性の測定.....	3
2.2.1	FRS の速中性子標準場及び熱中性子標準場における応答特性の測定.....	3
2.2.2	TIARA の数 10MeV 準単色中性子場における応答特性の測定.....	4
3.	計算	10
3.1	中性子レムモニタ応答特性計算の目的.....	10
3.2	エネルギー応答特性計算	10
3.3	計算結果.....	10
3.3.1	中性子エネルギースペクトル計算結果の中性子レムモニタ間の比較.....	11
3.3.2	計数管に入射する中性子の、エネルギー領域毎の反応数への寄与.....	12
4.	結果及び考察	22
4.1	中性子レムモニタのエネルギー応答特性と比較する線量換算係数.....	22
4.2	試作レムモニタ設計における鉛ブリーダの配置及び厚さの検討	24
4.2.1	鉛ブリーダの配置検討	24
4.2.2	鉛ブリーダの厚さ検討	24
4.3	エネルギー応答特性	25
4.3.1	応答特性計算値と実験値との比較(計算精度の検証, 計算の妥当性)	25
4.3.2	試作レムモニタと従来型レムモニタの応答特性の比較.....	25
4.3.3	線量換算係数との比較	26
4.4	数 10MeV 中性子場において中性子レムモニタが与える線量率と 実際の場の線量率との比較	26
5.	まとめ.....	35
	謝 辞	35
	参考文献	36

Contents

1. Introduction.....	1
2. Experiments	2
2.1 Neutron Rem Monitor for Intermediate and High Energy Region	2
2.1.1 Outline of Neutron Rem Monitor with Lead Breeder.....	2
2.1.2 Characteristics of the Improved Neutron Rem Monitor.....	2
2.2 Measurements of Energy Response	3
2.2.1 Measurement of Energy Response at FRS	3
2.2.2 Measurement of Energy Response at TIARA.....	4
3. Calculations.....	10
3.1 Purpose of Response Calculation for the Neutron Rem Monitor.....	10
3.2 Calculation of Energy Response.....	10
3.3 Calculated Results	10
3.3.1 Comparison with Calculated Neutron Energy Spectra for the Neutron Rem Monitors.....	11
3.3.2 Contribution of Neutron Energy in Counter to the Number of Reaction.....	12
4. Results and Discussion.....	22
4.1 Dose Conversion Coefficients Compared for the Energy Response of Neutron Rem Monitor.....	22
4.2 Examination of the Position and the Thickness of the Lead Breeder for the Design of Rem Monitor.....	24
4.2.1 Examination of the Position of the Lead Breeder	24
4.2.2 Examination of the Thickness of the Lead Breeder.....	24
4.3 Energy Response	25
4.3.1 Comparison of Measured Energy Responses with Calculated Ones	25
4.3.2 Comparison of Energy Responses of the Improved Rem Monitor with Those of the Conventional One	25
4.3.3 Comparison with Dose Conversion Coefficients.....	26
4.4 Comparison of Dose Rate Measured by the Neutron Rem Monitor with Actual Dose Rate at Several Tens MeV Fields	26
5. Summary	35
Acknowledgements	35
References	36

1. はじめに

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で建設している大強度陽子加速器研究施設（J-PARC）や、近年増加傾向にある 200MeV 程度の陽子ビームを用いたがん治療用加速器施設といった中高エネルギー加速器施設における放射線管理では、利用施設において陽子ビームがターゲットに入射することで生成される中性子や、損失ビームが加速器構造物や遮蔽体に入射することで生成される二次中性子による被ばく評価が重要となる。遮蔽体を透過した後の中性子に関し、熱エネルギーから 180MeV 程度までのエネルギー領域の中性子による被ばくが人体への被ばく線量の殆どを占め、とりわけ 20-180MeV までの中高エネルギー領域中性子による被ばく線量への寄与は大きく、50%以上である¹⁾。従って、低エネルギーから中高エネルギー領域までの広範な中性子に対して、精度良く線量率の測定が可能な放射線モニタが必要である。しかし、従来から広く用いられている既存の中性子レムモニタは、原子炉施設や放射性同位元素取り扱い施設といった 10MeV 前後までの比較的低いエネルギー領域の中性子による線量率測定を念頭に開発されており、中高エネルギー領域の中性子は測定対象としていない。これらの中性子レムモニタでは 20MeV 以上の中性子に対して、ICRP 等によって示された線量換算係数と比較してエネルギー応答が低下することから、広範なエネルギー領域における線量換算係数を再現することはできない。仮にこのような中性子レムモニタを中高エネルギー中性子の割合が多い放射線場に持ち込み、モニタの指示値をそのまま場の線量と解釈すると、実際の放射線場の線量を過小評価するおそれがある。そのため、既存の加速器施設のなかには、中性子レムモニタの読み値を便宜上 2 倍し、これを放射線場の線量に読み替えて対応しているところもあるが、この方法も、その放射線場における中性子エネルギースペクトルによって過大若しくは過小評価となることが考えられる。以上のことから、熱エネルギーから中高エネルギー領域までの広範な中性子に対して精度よく線量率測定ができるエネルギー応答特性を有する中性子レムモニタの開発が、加速器施設の放射線管理を考える上で極めて重要である。

本研究では、数年後に稼働予定である大強度陽子加速器施設に用いることのできる、広範なエネルギー領域の中性子に対して精度の高い線量率測定が可能なレムモニタの開発を目的として、従来型の中性子レムモニタ（以下、従来型レムモニタと記す）に鉛の層を加えることで中高エネルギー中性子に対する検出感度を向上させた鉛プリーダ付き中性子レムモニタを試作した。この試作中性子レムモニタ（以下、試作レムモニタと記す）及び従来型レムモニタのエネルギー応答特性に関し、熱エネルギーから、断面積ライブラリの上限にあたる 150MeV までの広範なエネルギー領域の中性子に対する応答を中性子輸送計算により評価するとともに、熱エネルギーから 65 MeV までの中性子場を用いて応答特性を測定し、評価計算の精度の確認、試作レムモニタと従来型レムモニタの応答特性の比較を行った。また、得られたエネルギー応答特性を中性子の線量換算係数と比較した。

これらの結果から、試作レムモニタのエネルギー応答は、高エネルギー陽子加速器施設において遮蔽体を透過した後の中性子による線量評価で重要な、熱エネルギーから 150MeV までの中性子に対する線量換算係数を良く再現できることが確認でき、加速器施設用中性子レムモニタとしての目標性能を達成できたことが確認され、実用化の目処がついた。

2. 実験

2.1 中高エネルギー対応中性子レムモニタ

中高エネルギー領域の中性子による線量率の測定に対応した中性子レムモニタとして、開発中のものを含めて幾つかの検出器が挙げられるが²⁻¹⁾、数年後に稼働予定の加速器施設 (J-PARC) に設置でき、実用に耐え得るもの、という観点から、現時点において実用化までに多くの歳月が必要と思われるモニタは今回の検討の対象外とした。また、低エネルギーから中高エネルギーまでの広範な中性子に対するエネルギー応答特性としては、線量換算係数を再現する、いわゆるレムレスポンスを有すること、外乱などに対する安定性などのモニタとしての信頼性等の観点から、大強度陽子加速器施設に設置する中性子レムモニタの検討を行った。その結果、原子炉施設や RI 取り扱い施設などの既存施設で十分な実績のある従来型の中性子レムモニタをベースに、中・高速中性子を減速・熱化させるポリエチレン減速材の間に中高エネルギー中性子の増倍・減速を図るための鉛の層を追加することで、中高エネルギー領域中性子に対する応答特性を改善する方式を採用することが最適であると判断し、鉛ブリーダ付き中性子レムモニタの開発を行った。

2.1.1 鉛ブリーダ付き中性子レムモニタ概要

原子炉施設、中性子発生装置、RI 中性子源取り扱い施設などにおいて用いられている従来型の中性子レムモニタに鉛の層を加えることで、中高エネルギー中性子に対する検出感度を高める手法そのものは旧来からあり、Birattari らの論文²⁻²⁾で述べられている。この原理に基づいて、中高エネルギー中性子対応を謳う中性子レムモニタが既に幾つか開発されている^{2-3,2-4)}。これらを Table 2.1 にまとめる。しかしながら、これらの中性子レムモニタは、数 10MeV 中性子に対する応答特性の計算及び測定結果、高線量率の場合における応答特性評価など、モニタとしての基本性能に関わる情報の全てが十分に揃っているとは言えない状況にある。また、中性子レムモニタ内部の詳細構造や測定回路などといった、基本性能に関わる重要な情報について、必ずしも全てが公開されているわけではないことから、モニタの応答関数計算や測定回路の改良など、中性子レムモニタとしての基本性能及び信頼性の確認などの作業について、モニタの開発元以外で行うのは極めて困難であると考えられる。

以上のことから、本研究ではこれまで国内における中性子線量率モニタとして多くの導入実績があり、モニタの詳細な情報を得ることのできる国産の従来型中性子レムモニタをベースに、新たな中性子レムモニタを開発することとした。このことにより、計算機シミュレーションによる応答特性の評価や、測定回路の調整及び改良を制約無く行うことが可能となり、結果として信頼性の高い中性子レムモニタの設計が可能となった。

2.1.2 試作した中性子レムモニタ

本研究では、これまで国内における中性子線量モニタとして多くの導入実績がある富士電機製の従来型レムモニタ（据え置きタイプ：型番 NDN2）をベースとし、このレムモニタの特性を生かしつつ、高エネルギー中性子対応とするため、ポリエチレン製の2層の減速材の間に鉛の層を新たに追加したレムモニタを試作した。試作レムモニタの模式断面図を Fig. 2.1 に示す。モニタ中央に配置された検出器は直径 5.08cm の ^3He 比例計数管（封入 ^3He ガスの圧力：5.0 気圧）で、従来型レムモニタと同一である。本モニタの試作にあたり、あらかじめモニタの応答関数を粒子輸送計算モンテカルロコード MCNP-4B²⁻⁵⁾ を用いて評価し、鉛の厚さ及び配置の最適化を図った。この計算の詳細は次章で述べる。鉛の層を追加した中性子レムモニタに対するエネルギー応答特性計算結果から、鉛の厚さを増すほど、中高エネルギー領域の応答も大きくなる傾向がみられたが、鉛の厚さを 1.5cm にした場合に線量換算係数を良く再現できたことから、本研究では試作レムモニタにおける鉛の層の厚さを 1.5cm とした。この結果、試作レムモニタの重量は約 30kg、減速材を含めたレムモニタの直径（外径）は約 28cm となり、鉛の層が追加されたことにより従来型レムモニタよりも重量、大きさとも増してはいるが、モニタの保守などを人力で行える範囲内に収めた。

2.2 エネルギー応答特性の測定

試作レムモニタのエネルギー応答を実験により評価するため、原研東海研究所の放射線標準施設棟(FRS)の速中性子標準場及び熱中性子標準場、原研高崎研究所イオン照射研究施設(TIARA)に設置された 40 及び 65MeV 準単色中性子場を用いて、試作レムモニタ及び従来型レムモニタの応答特性を測定した。以下に、各々の中性子場の概要と、照射条件について述べる。

2.2.1 FRS の速中性子標準場及び熱中性子標準場における応答特性の測定

FRS 速中性子標準場（第4照射室）における ^{252}Cf 及び Am-Be 中性子線源を用いた中性子レムモニタ照射実験の体系図を Fig. 2.2 に示す。この FRS 速中性子場の詳細は、文献²⁻⁶⁾に記されているので、ここでは概略のみ説明する。

第4照射室の広さは縦 12.5m、横 12.5m で、線源はこの室内のほぼ中央の位置に設置した。この照射室の床は、散乱の影響を低減させるため、鉄製のグレーチング床となっており、線源はこのグレーチング床から 100cm の高さに、線源カプセル（容器）に収められた状態で設置した。中性子レムモニタは、この線源から 100cm 離れた位置に設置し、線源からの中性子による応答特性を測定した。中性子レムモニタに入射する中性子は、線源から直達する中性子だけでなく、線源の周りにある線源カプセル、線源を設置するスタンド、壁や天井などによって散乱された中性子も含まれている。従って本研究では、これらの散乱線の影響を考慮したスペクトルの評価値²⁻⁶⁾を線源スペクトルとして用いた (Fig. 2.3)。

また、 ^{252}Cf 線源による測定結果を用いて中性子レムモニタの校正（計数率から線量率への換算係数の算出）を行った。ここで、中性子レムモニタ照射位置における線量率の絶対値は、被ばく線量の測定・評価マニュアル等に採用されている ICRP Publ.74²⁻⁷⁾ に示された周辺線量当量

H*(10)への換算係数を用いて算出した。

一方、熱中性子に対する中性子レムモニタの応答特性についても、この第4照射室の隅に設置されている黒鉛パイル（外寸：1640×1500×1160 mm）を用いた標準熱中性子場により測定を行った。この熱中性子場の詳細は、文献²⁻⁸⁾に記されている。この中性子場は、金箔の誘導放射能の絶対測定により、国家標準（産業技術総合研究所）とのトレーサビリティを得ている²⁻⁸⁾。今回の測定には、熱中性子束分布が均一な平行ビーム状照射場（パイルの外側）を用い、黒鉛減速材の表面から40cmの位置に中性子レムモニタを設置して、熱中性子に対する応答特性を測定した。

2.2.2 TIARA の数 10MeV 準単色中性子場における応答特性の測定

原研高崎研究所 TIARA の第3軽イオン室 LC0 コースに設置された準単色中性子発生装置を用い、中高エネルギー領域中性子に対する中性子レムモニタの応答特性を測定した。この中性子場の詳細については文献^{2-9, 2-10)}に紹介されている。

TIARA 準単色中性子場における実験体系図を Fig. 2.4 に示す。AVF サイクロトロンにより加速された陽子を ${}^7\text{Li}$ ターゲットに入射させることで、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応による準単色中性子を発生させる。本研究では 43MeV 及び 68MeV の陽子入射で発生する約 40MeV 及び 65MeV 付近にピークを持つ2種類の準単色中性子を実験に用いた。 ${}^7\text{Li}$ ターゲット(99.99% ${}^7\text{Li}$)厚は入射陽子が約 2MeV のエネルギー損失をする厚さ(陽子エネルギー 43MeV 及び 68MeV に対してそれぞれ 3.6mm 及び 5.2mm)である。生成した中性子はサイクロトロン本体室と照射室である第3軽イオン室との間の壁内に設けられた直径 10.9cm、長さ 220cm の鉄コリメータを通過した後、遮蔽実験用の供試体を乗せる移動台車(movable stand)上に設置した直径 10.9cm、長さ 80cm の追加の鉄コリメータを通過して第3軽イオン室内に入射する。一方、 ${}^7\text{Li}$ ターゲットを通過した陽子ビームはクリアリングマグネットによりファラデーカップに導かれる。

今回の応答特性測定において、 ${}^7\text{Li}$ ターゲットから 1240cm の位置に中性子レムモニタを設置し、中性子を照射した。この位置は第3軽イオン室のほぼ中央にあたることから、壁からの散乱線の影響は少ないと考えられる。

照射中における入射中性子束のモニタとして、

1. ファラデーカップにおけるビーム電流の積算値
2. ${}^{238}\text{U}$ 核分裂計数管 (Fig. 2.3 における monitor 1)
3. ${}^{232}\text{Th}$ 核分裂計数管 (Fig. 2.3 における monitor 2)

の3種類の中性子モニタを用い、反跳陽子カウンターテレスコープ(PRT: Proton Recoil counter Telescope)によるピーク領域の中性子束絶対値測定実験²⁻¹¹⁾により、これらのモニタをあらかじめ値付けしておくことで、測定中の照射量を決定する。TIARA の準単色中性子場において従来行われてきた測定では、中性子照射量の算出は主に 1. のビーム電流積算値を用いて行われていたが、今回の測定では入射陽子ビームが小さく、暗電流の影響によりビーム電流積算値の測定精度が悪化する場合の測定が含まれることから、主に 2. 及び 3. の核分裂計数管によるモニタ値から測定中の照射量を決定した。

第3軽イオン室に入射する 40 及び 65MeV 準単色中性子のエネルギースペクトルは直径 12.7cm、長さ 12.7cm の BC501A 有機液体シンチレーションカウンタを用いた飛行時間法(TOF

法)により測定²⁻⁹⁾されている。しかしながら、液体シンチレーションカウンタを用いた飛行時間法による測定では、検出効率やビームパルスの間引き等の制約から数 10MeV 領域での測定に用いた測定機器で 6~7MeV 以下の低エネルギー領域スペクトルを精度良く測定することができない。そこで、広範なエネルギー領域の中性子スペクトルを測定できる球形の多減速材付きスペクトロメータ（ボナー検出器）を用いて、10MeV 以下の低エネルギー領域における中性子線源スペクトルを測定した。この測定で室内散乱を含む低エネルギー領域のスペクトルを測定し、これを上述の TOF 法による 10MeV 以上のスペクトル測定結果と接続することにより、測定位置における熱領域から数 10MeV までの広範なエネルギー領域の線源スペクトルを求めることができた（Fig. 2.5）。ここで得られたスペクトルを本研究での実験及び計算における線源条件として用いた。

Table 2.1 中高エネルギー中性子対応レムモニタの比較

	計数管	ブリーダ の材料	ブリーダ の厚さ	レムモニタ 形状
LINUS (INFN, Italy) ²⁻²⁾	BF ₃	鉛	1cm	円筒, 球
WENDI (LANL, USA) ²⁻³⁾	³ He	タングステン	1.5cm	円筒, 球
中国高能研 ²⁻⁴⁾	BF ₃	鉛	1cm	円筒
Health Physics Instruments (type 6060)	BF ₃	鉛	1cm	円筒
試作した中性子レムモニタ	³ He	鉛	1.5cm	球

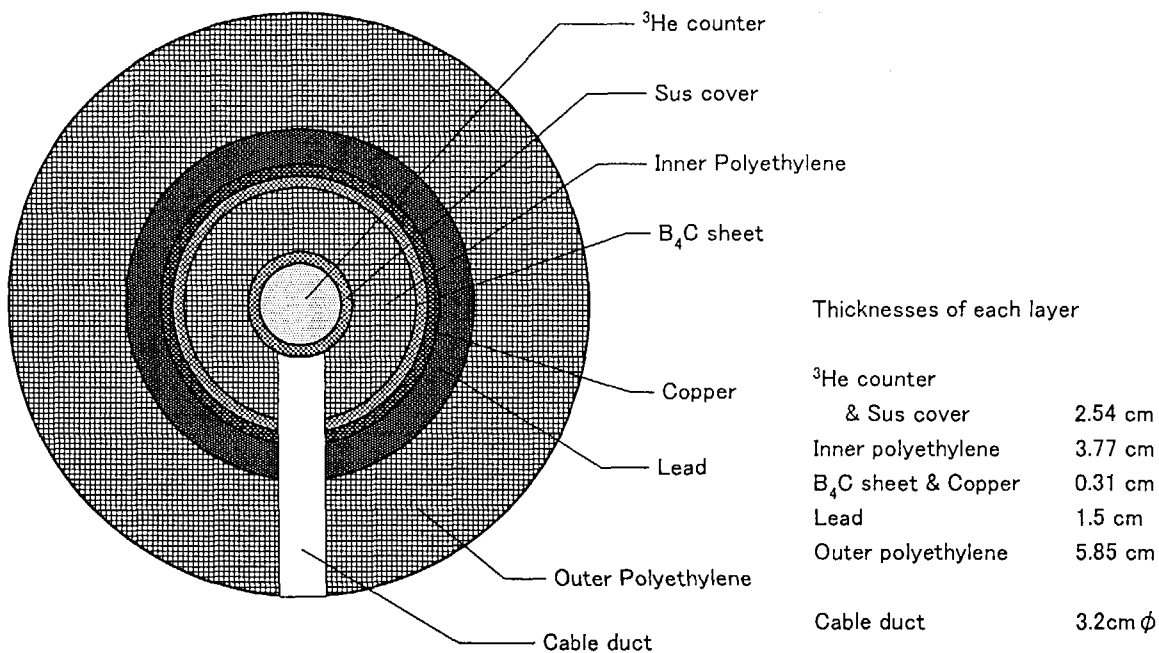


Fig. 2.1 鉛ブリーダ付きレムモニタ試作器の概略図

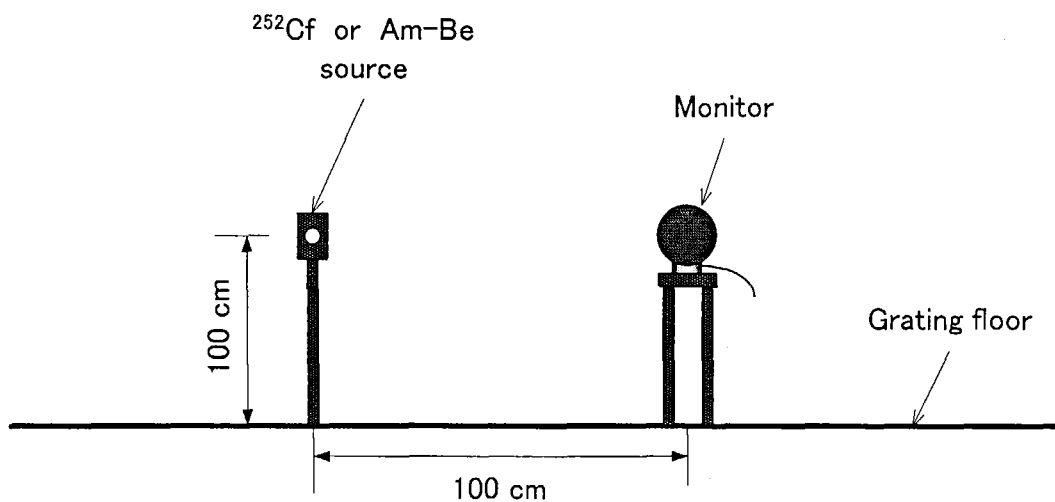


Fig. 2.2 FRS 第4 照射室（速中性子標準場）における照射実験体系図

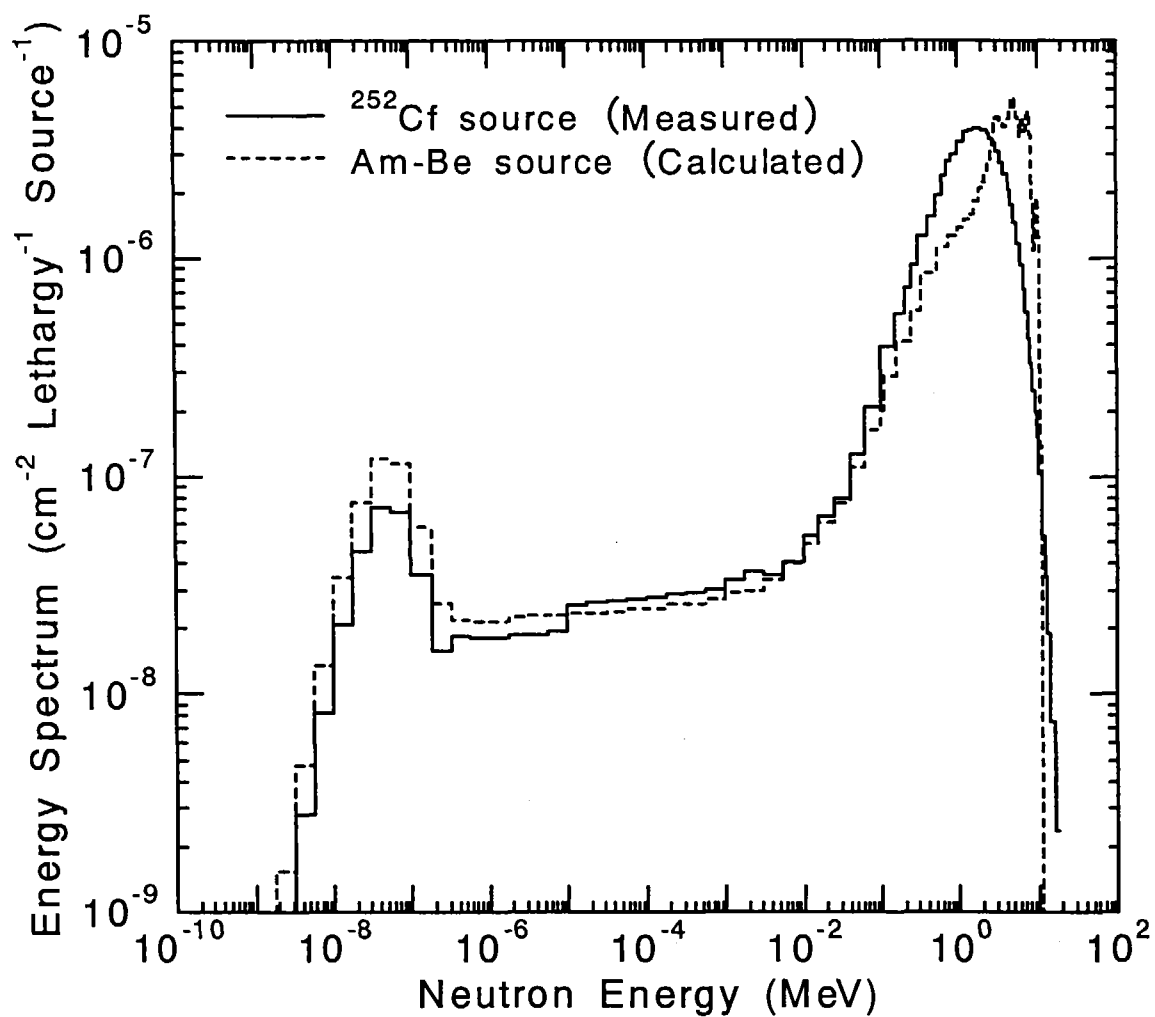


Fig. 2.3 中性子レムモニタ照射位置における ²⁵²Cf 線源及び Am-Be 線源からの
中性子スペクトル²⁻⁶⁾ (線源カプセル及び室内散乱の影響を含む)

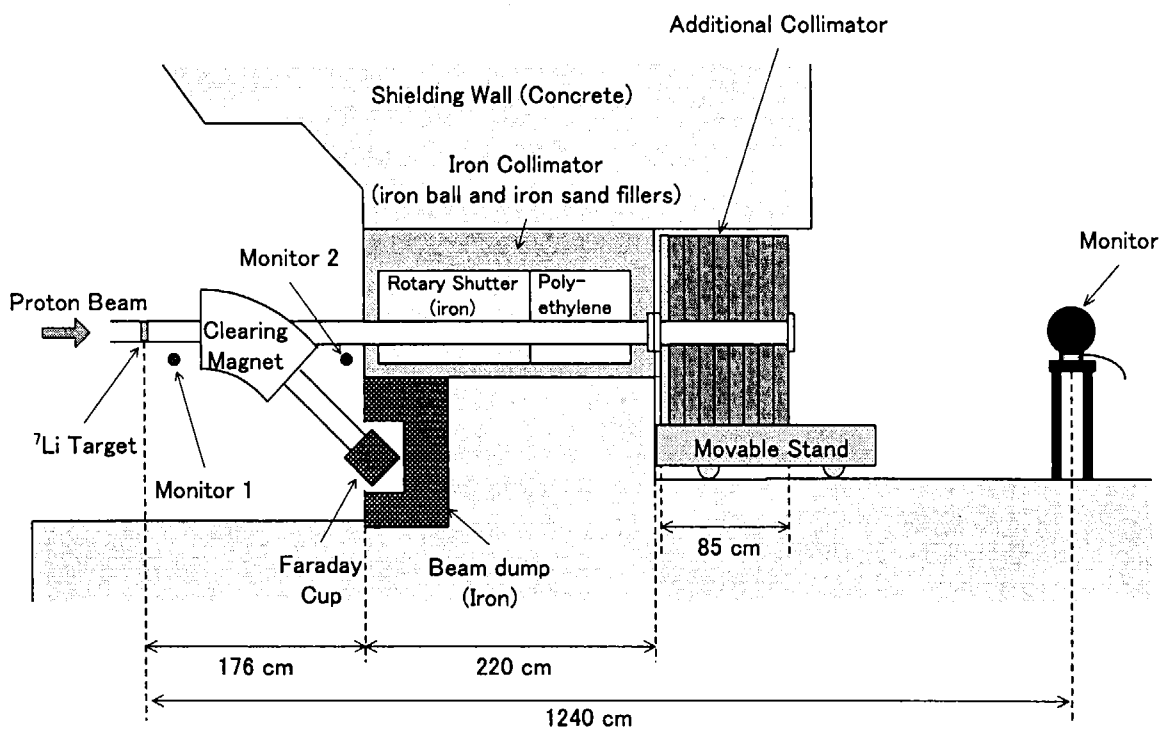


Fig. 2.4 TIARA 準単色中性子場における実験体系図

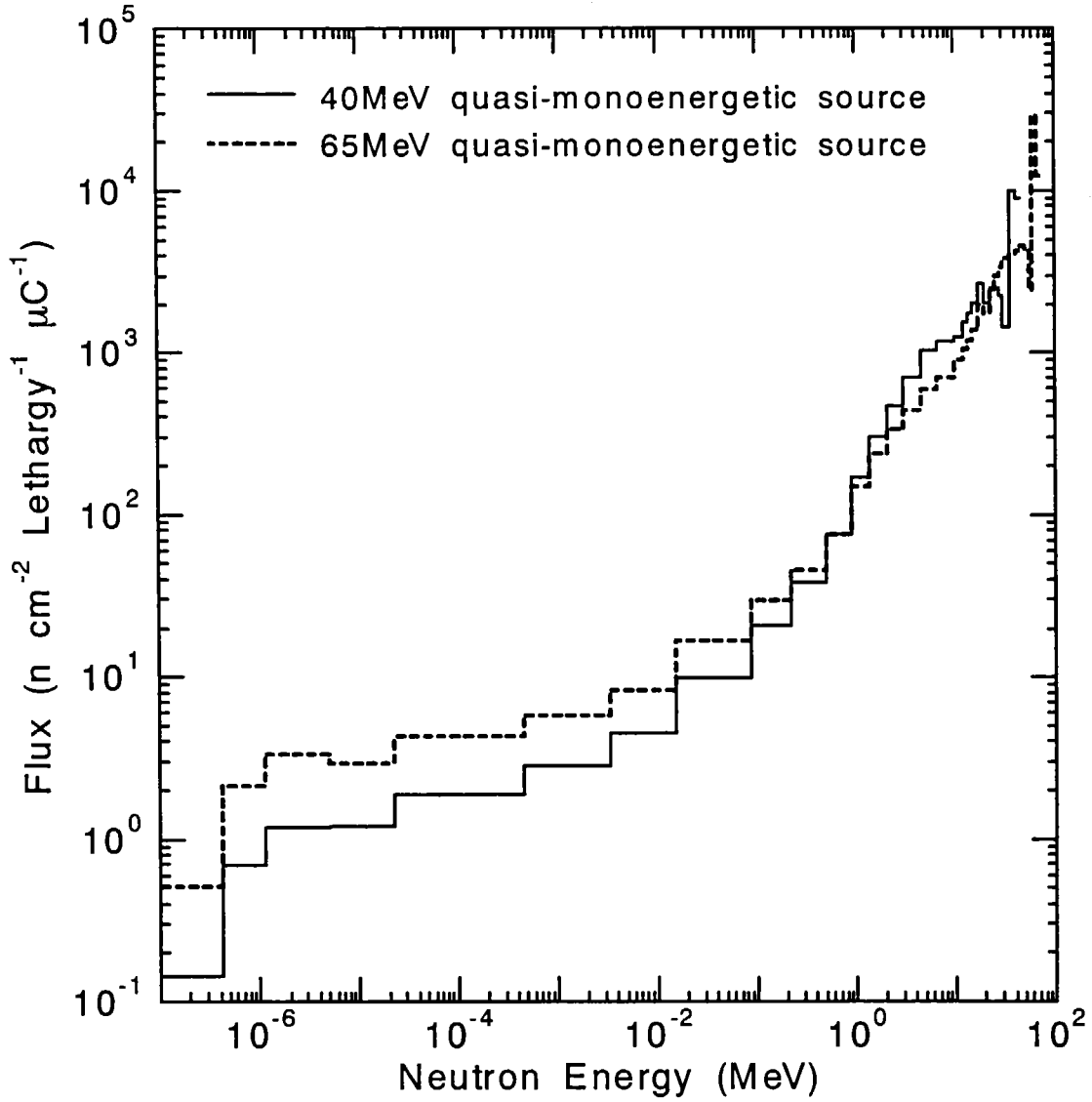


Fig. 2.5 TLARA の 40 及び 65MeV 準単色中性子源のエネルギースペクトル (室内散乱を含む)

3. 計算

3.1 中性子レムモニタ応答特性計算の目的

本実験を行った TIARA の数 10MeV 中性子場は、完全な単色中性子場ではない。そのため、単色中性子に対する応答特性を得るには、実験値から単色部以外の中性子による寄与を差し引く必要があるが、この寄与の不確定さのために得られる結果の精度は悪くなる。また、実験で測定できる線源エネルギー点には限りがあることから、実験による測定だけで広範なエネルギー領域に対する応答を連続的に評価することは困難である。以上のことから、本研究では、入射中性子エネルギーに対する中性子レムモニタの応答特性を中性子輸送計算により求めることとし、この応答関数の計算結果の精度について、応答特性実験値を用いて確認することとした。また、応答関数計算により、鉛ブリーダの厚さ及び配置の検討を行い、最適化を図った。

3.2 エネルギー応答特性計算

試作レムモニタ及び従来型レムモニタの応答特性を評価するため、粒子輸送計算モンテカルロコード MCNP-4B を用いた計算を行った。計算体系を Fig. 3.1 に示す。計算体系は 3 次元形状で取り扱い、中性子レムモニタ内の構造については前章の試作レムモニタの模式断面図 (Fig. 2.1) に示した構造物を全てモデル化した。このモニタの中央には ^3He 比例計数管を模擬した球形の track length estimator を配置し、この estimator における中性子スペクトルを計算で求めた。線源に関しては、試作レムモニタの外径よりも大きい、半径 20cm の円形をした面線源を想定し、この面から線源中性子を一様に、かつ平行ビームで中性子レムモニタに入射させた。計算における線源のエネルギースペクトルについて、熱中性子は単色とし、 ^{252}Cf 線源、Am-Be 線源及び TIARA の 40 及び 65MeV 準単色中性子場における線源に対しては、前章に示した各々の照射位置における中性子スペクトルを用いた。粒子輸送計算に用いる断面積ライブラリには、150MeV までの中性子エネルギーに対応した LA150 ³⁻¹⁾ ライブラリを用いた。但し、中性子レムモニタを構成する元素のうち ^3He 及び B については、LA150 ライブラリに格納されていないことから、これらの核種のみ JENDL-3.2 ³⁻²⁾ を用いた。この場合、20MeV 以上の領域の断面積としては、20MeV における断面積の値が適用される。中性子レムモニタの応答は、計数管を模擬した estimator における中性子スペクトルの計算結果に、JENDL Activation File ³⁻³⁾ に格納された $^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積 (Fig. 3.2) を乗じて求めた。この断面積に関しても同様に、20MeV 以上の断面積として 20MeV での断面積の値を適用したが、この影響については、本章の後半に述べる。

3.3 計算結果

試作レムモニタ及び従来型レムモニタの応答特性評価のため、これらのモニタに関して中性子輸送計算を行い、計数管部分における中性子エネルギースペクトルを得た。ここでは、得られた

中性子スペクトル及びこのスペクトルに Fig. 3.2 の $^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積を乗じて求めた単位中性子フルエンスあたりの検出器反応数について、中性子レムモニタ間の比較を行った。

3.3.1 中性子エネルギースペクトル計算結果の中性子レムモニタ間の比較

^{252}Cf 中性子線源及び 100MeV 単色中性子入射における、試作レムモニタ及び従来型レムモニタの比例計数管位置における中性子エネルギースペクトルの計算結果を Fig. 3.3 及び 3.4 に示す。Fig. 3.3 から、 ^{252}Cf 中性子線源に対して試作レムモニタ内のスペクトルは従来型レムモニタのスペクトルとほぼ同じ値、同じ傾向を示していることが判る。一方、Fig. 3.4 から、100MeV 単色中性子線源に対して試作レムモニタの中性子束は従来型レムモニタの場合と比較して全体的に高く、検出器反応率への影響が大きい低エネルギー領域では中性子束絶対値で 6 倍程度の差があることが判った。これは試作レムモニタに装着されている鉛ブリーダの $^{208}\text{Pb}(n,xn)$ 反応によって生成される低エネルギー中性子によるものと考えられる。一方で、線源を含む 90-100MeV のエネルギー群においては、試作レムモニタの中性子束は従来型レムモニタより 1 割程度低い。これは鉛ブリーダによって線源中性子が減速されたためと考えられる。

$^{208}\text{Pb}(n,xn)$ 反応断面積に関して、核データライブラリ ENDF/B-VI³⁻⁴⁾ に格納されている入射中性子エネルギー 30MeV までの反応断面積を Fig. 3.5 に、ICRU Report 63³⁻⁵⁾ に示された 30-150MeV までの反応断面積を Fig. 3.6 に示す。ここで、Fig. 3.5 に示す ENDF/B-VI のデータは、本研究の粒子輸送計算で用いた LA150 ライブラリにおける反応断面積として採用されている。また、Fig. 3.6 に示す中性子生成断面積は、不弾性散乱断面積に、反応によって生成される中性子数が乗じられた値が示されている。30MeV までの断面積を示した Fig. 3.5 から、入射中性子エネルギーが 7MeV 以上で $(n,2n)$ 反応、14MeV 以上で $(n,3n)$ 反応といった 2 個以上の中性子が生成する反応が起こることが判る。更に 20MeV 以上の入射中性子エネルギーでは、 $(n,4n)$ 反応といった、より多くの中性子が放出される反応が起こるようになる。30-150MeV までの断面積を示した Fig. 3.6 から、このエネルギー領域における不弾性散乱断面積の絶対値そのものは、入射中性子エネルギーが高くなるにつれて減少傾向にあるものの、高エネルギー領域では 1 つの反応で生成される中性子数が多くなることから、反応で生成される中性子数が乗じられた中性子生成断面積で考えると、入射中性子エネルギーが高くなるにつれて中性子生成断面積は増加の傾向にあることが判る。また、入射粒子エネルギーが低い場合には $(n,2n)$ などの反応は起こらず、1 反応あたりの中性子生成数も少ないことから、2 個以上の中性子が生成する反応が起こる 7MeV 程度以上の中性子が入射することにより、鉛の層から多くの 2 次中性子が生成されることが予想され、これが鉛ブリーダの中性子増倍効果となっている。一方、この 2 次中性子のエネルギーに関して、100MeV 中性子入射において $^{208}\text{Pb}(n,xn)$ 反応で生成される 2 次中性子のエネルギー微分断面積³⁻⁵⁾ を Fig. 3.7 に示す。このグラフから、生成される 2 次中性子のエネルギー分布として、数 MeV 以下の比較的低エネルギーの低い中性子はその殆どを占めることが判る。このことは、主に低エネルギー領域中性子に対して高い感度を有する ^3He 計数管の計数率を高めることとなり、結果として中性子レムモニタの応答が大きくなることを意味している。

以上から、鉛ブリーダを装着した試作レムモニタは、 $\text{Pb}(n,xn)$ 反応による低エネルギー中性子

の増倍効果により、中高エネルギー中性子入射において高い応答が得られることを、中性子輸送計算から確認することができた。

3.3.2 計数管に入射する中性子の、エネルギー領域毎の反応数への寄与

中性子レムモニタの応答は、実際に ^3He 比例計数管によって検知される中性子の割合、すなわち、計数管位置における中性子エネルギースペクトルと、中性子エネルギーに対する $^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積の積である反応数によって表すことができる。従って、この反応数を求めることで実際の検出器応答特性が判ると同時に、計数管に入射する中性子の、エネルギー領域毎の反応数（応答）への寄与を知ることができる。前節に示した ^{252}Cf 線源及び100MeV単色中性子入射における中性子レムモニタ計数管部分のエネルギースペクトル計算結果に、Fig. 3.2の $^3\text{He}(n,p)$ 断面積を乗じて求めた、単位中性子フルエンスあたりの反応数をFig. 3.8及びFig. 3.9に示す。試作レムモニタと従来型レムモニタのモニタ間の比較では、反応数の比較においても前節のエネルギースペクトルの結果を反映しており、 ^{252}Cf 中性子線源に対しては両者の差がなく、100MeV中性子線源では試作レムモニタの反応数が高いことが確認できた。また、計数管に入射する中性子の、エネルギー領域別の寄与について、中性子レムモニタの種類（鉛ブリーダの有無）や線源の種類に依らず、何れの条件においても熱中性子の寄与が非常に多いことが判る。そこで、 ^{252}Cf 線源及び100MeV単色中性子入射における、反応数に占める0.4eV以下、0.4eV～20MeV及び20MeV以上の中性子の割合を算出した（Table 3.1）。この結果から、熱中性子の反応数は中性子レムモニタや線源の種類によらず、反応数全体の91～93%を占めていることが判り、中高エネルギー中性子入射の場合においても、計数管の部分に入射される熱中性子束を増すことが、中性子レムモニタの応答特性に大きく影響を及ぼすことが判る。一方で、20MeV以上の中性子による反応数は、100MeV中性子入射の場合で反応数全体の0.1%以下と非常に少ないことが判る。本研究における中性子レムモニタのエネルギー応答計算において、一部の核種に対して上限20MeVまでの断面積ライブラリを適用しているが、20MeV以上の中性子による反応数は非常に小さく、このライブラリ適用による応答特性評価における誤差は極めて小さいと考えられる。

Table 3.1 計数管での反応数に占める 0.4eV 以下, 0.4eV~20MeV 及び 20MeV 以上の中性子の割合

(a) ^{252}Cf 線源中性子

	En < 0.4 eV	0.4eV ~ 20MeV	En > 20MeV
試作レムモニタ	0.926	0.074	---
従来型モニタ	0.923	0.077	---

(b) 100MeV 単色中性子

	En < 0.4 eV	0.4eV ~ 20MeV	En > 20MeV
試作レムモニタ	0.911	0.089	0.0001
従来型モニタ	0.912	0.088	0.0007

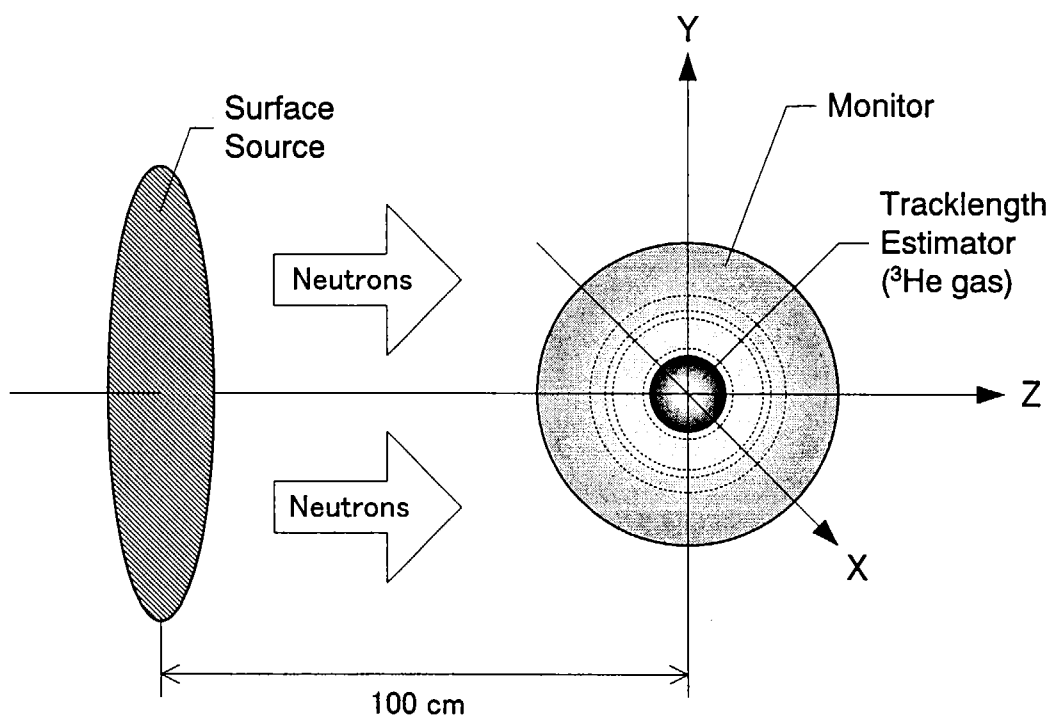


Fig. 3.1 中性子レムモニタ応答特性計算体系

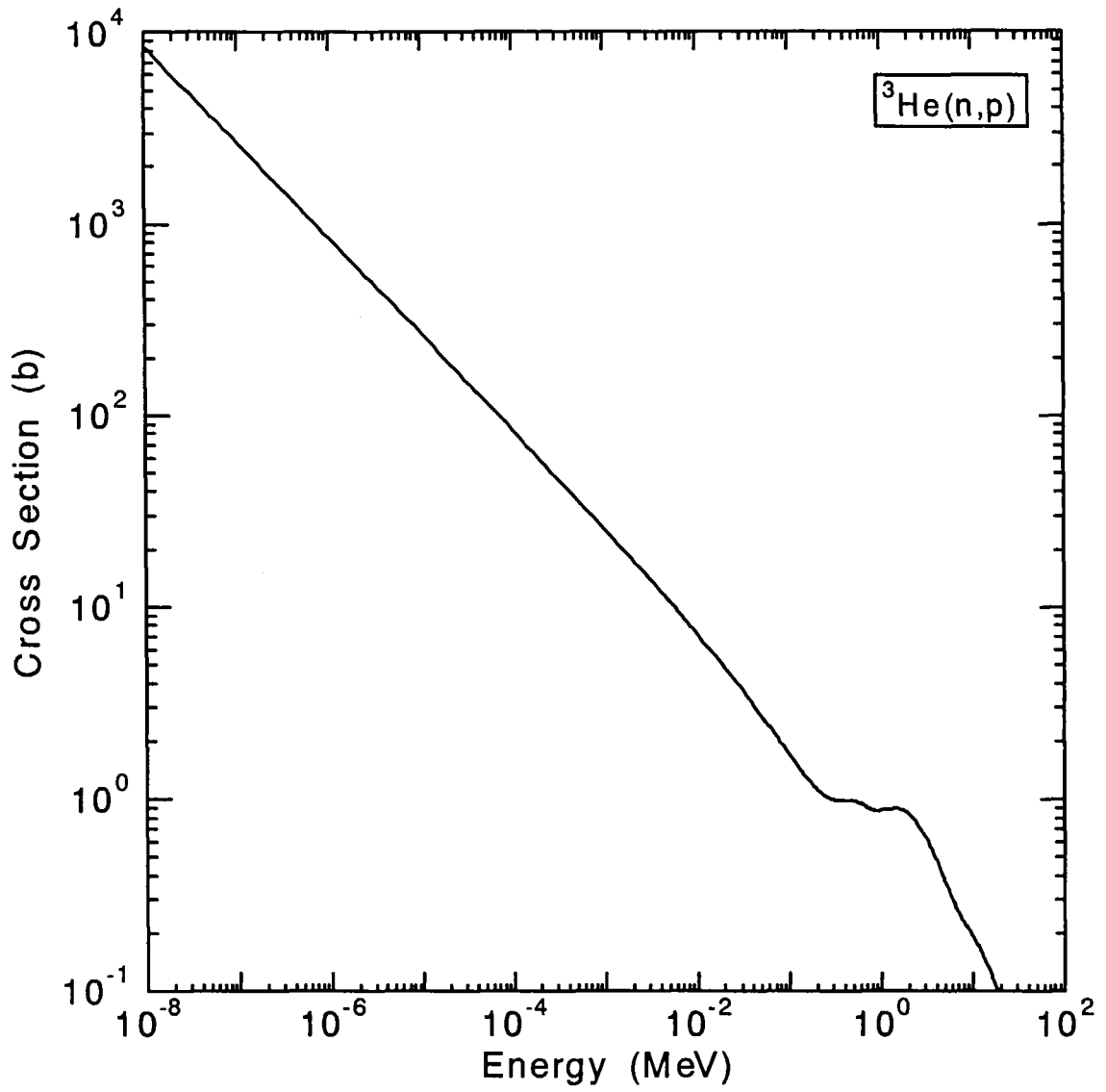


Fig. 3.2 ${}^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積³⁻³⁾

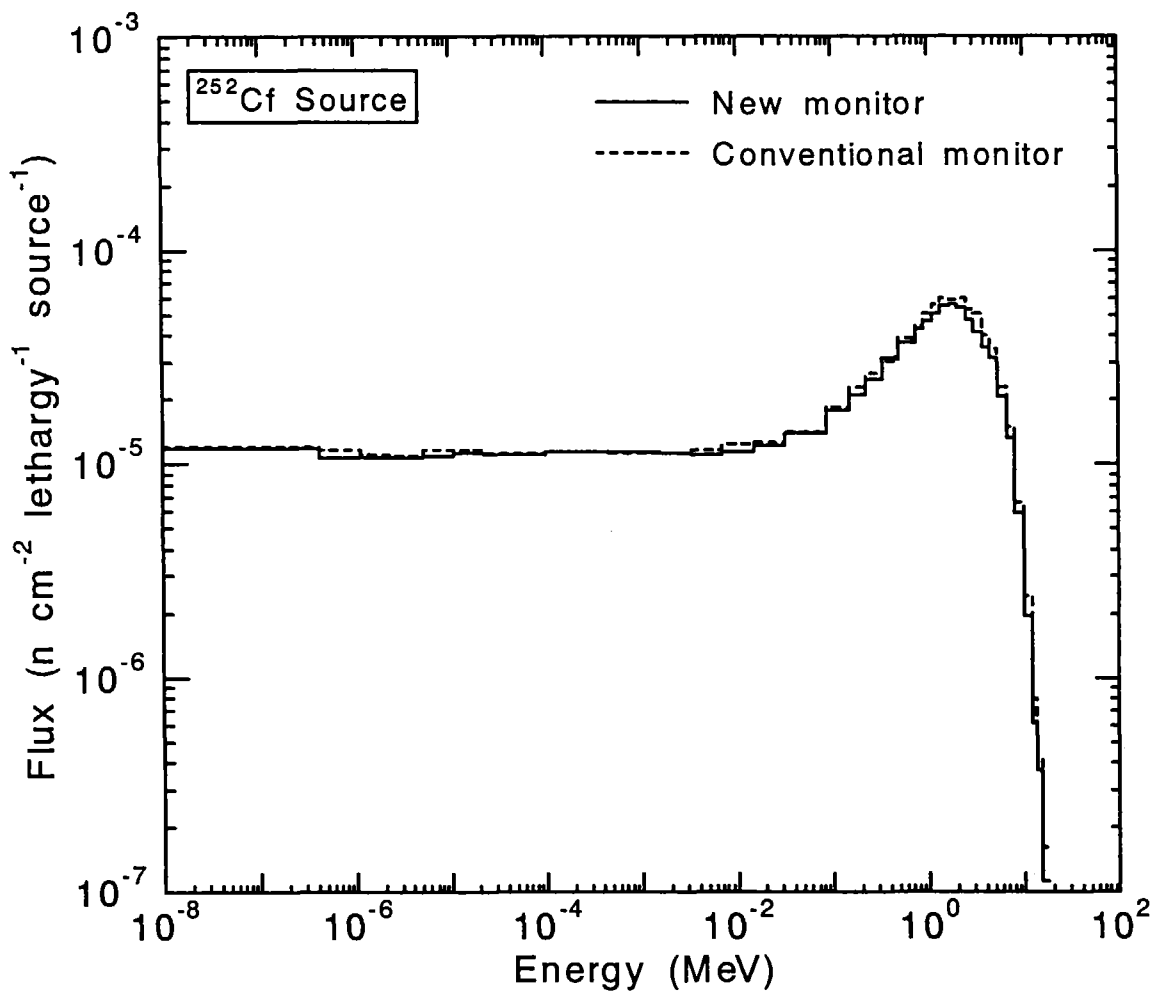


Fig. 3.3 ^{252}Cf 中性子線源入射による，試作レモニタ及び従来型レモニタの ^3He 計数管部分における中性子エネルギースペクトル計算結果

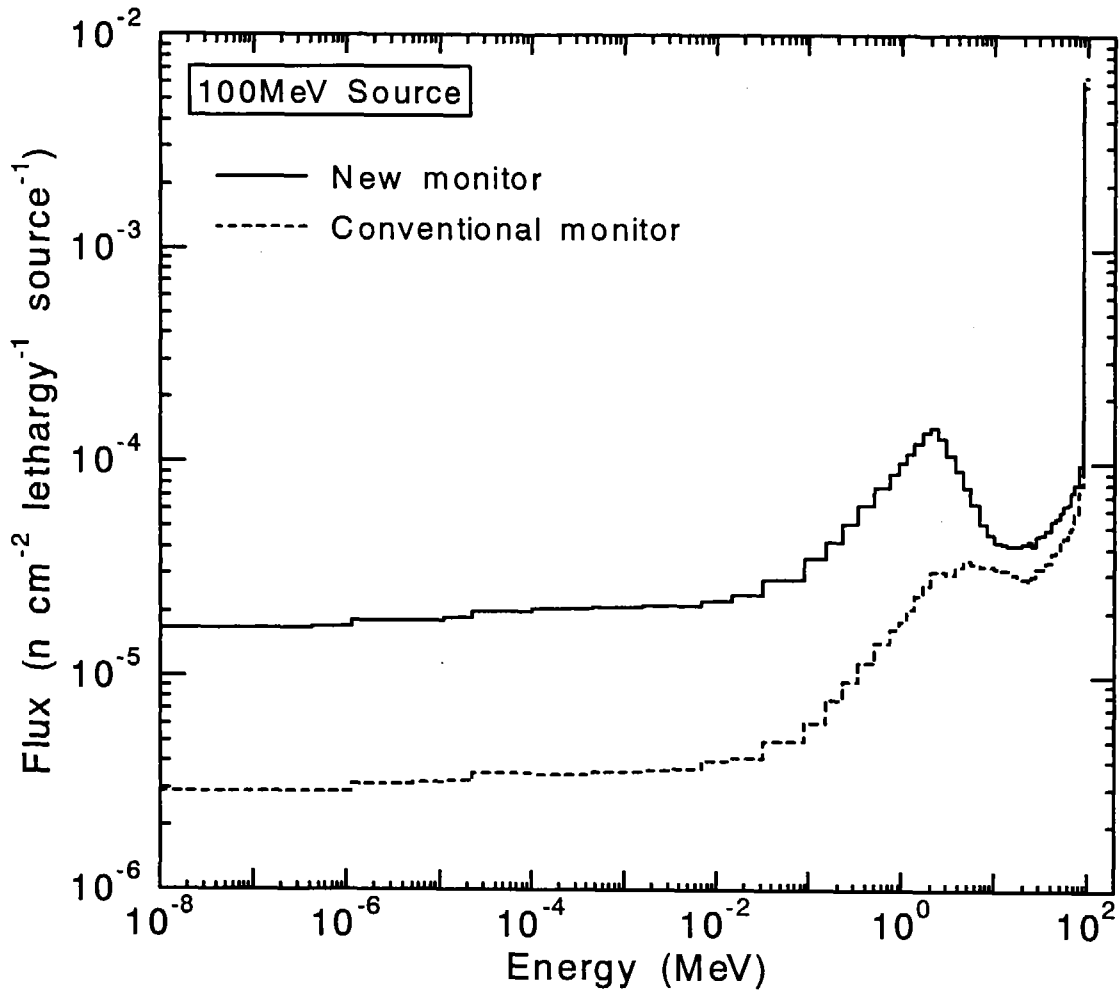


Fig. 3.4 100MeV 中性子入射による，試作レムモニタ及び従来型レムモニタの³He 計数管部分における中性子エネルギースペクトル計算結果

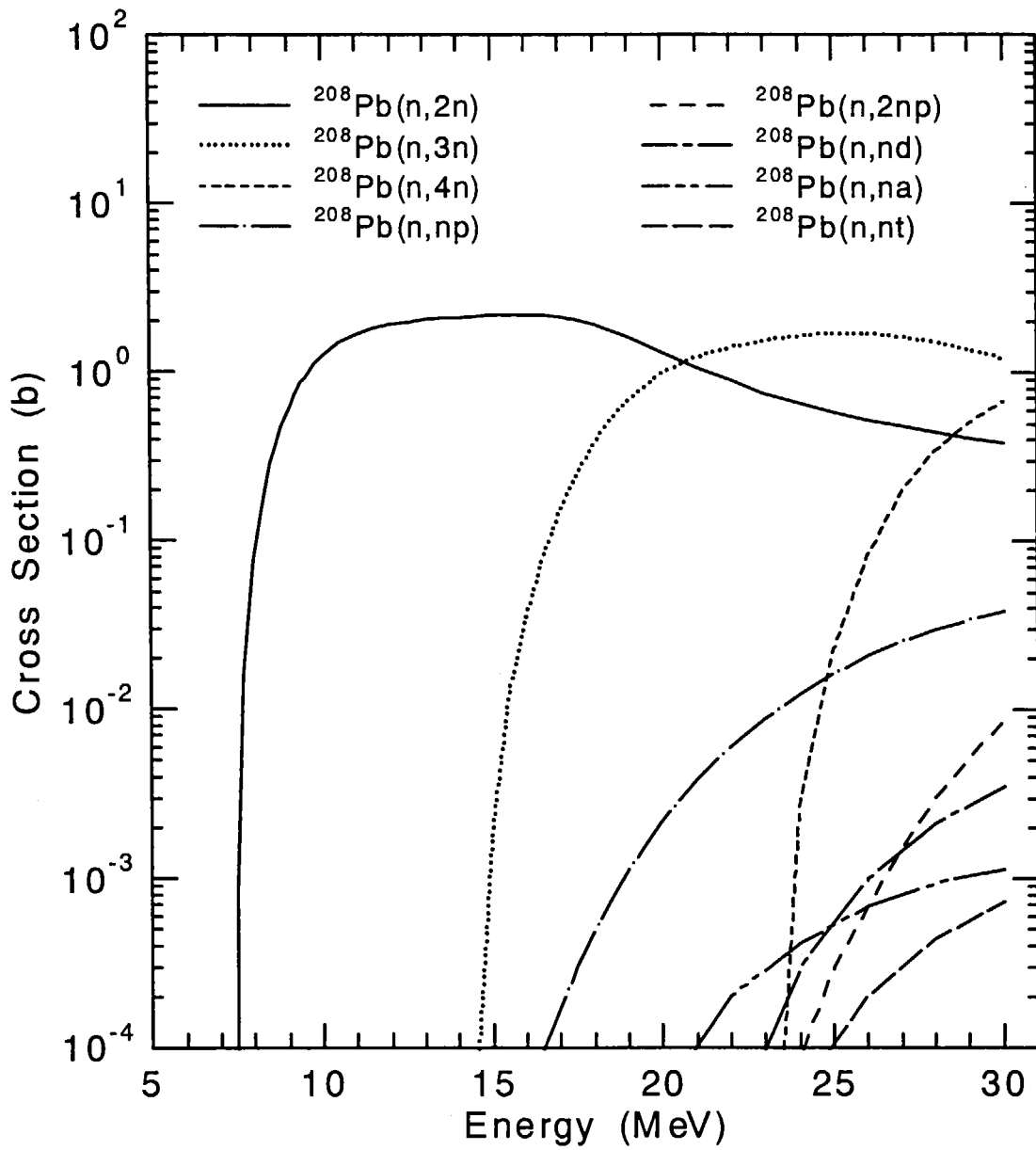


Fig. 3.5 LA150 で入射中性子エネルギー30MeV 以下の断面積として採用されている ENDF-B/VI ライブラリの ^{208}Pb 中性子生成反応断面積³⁻⁴⁾

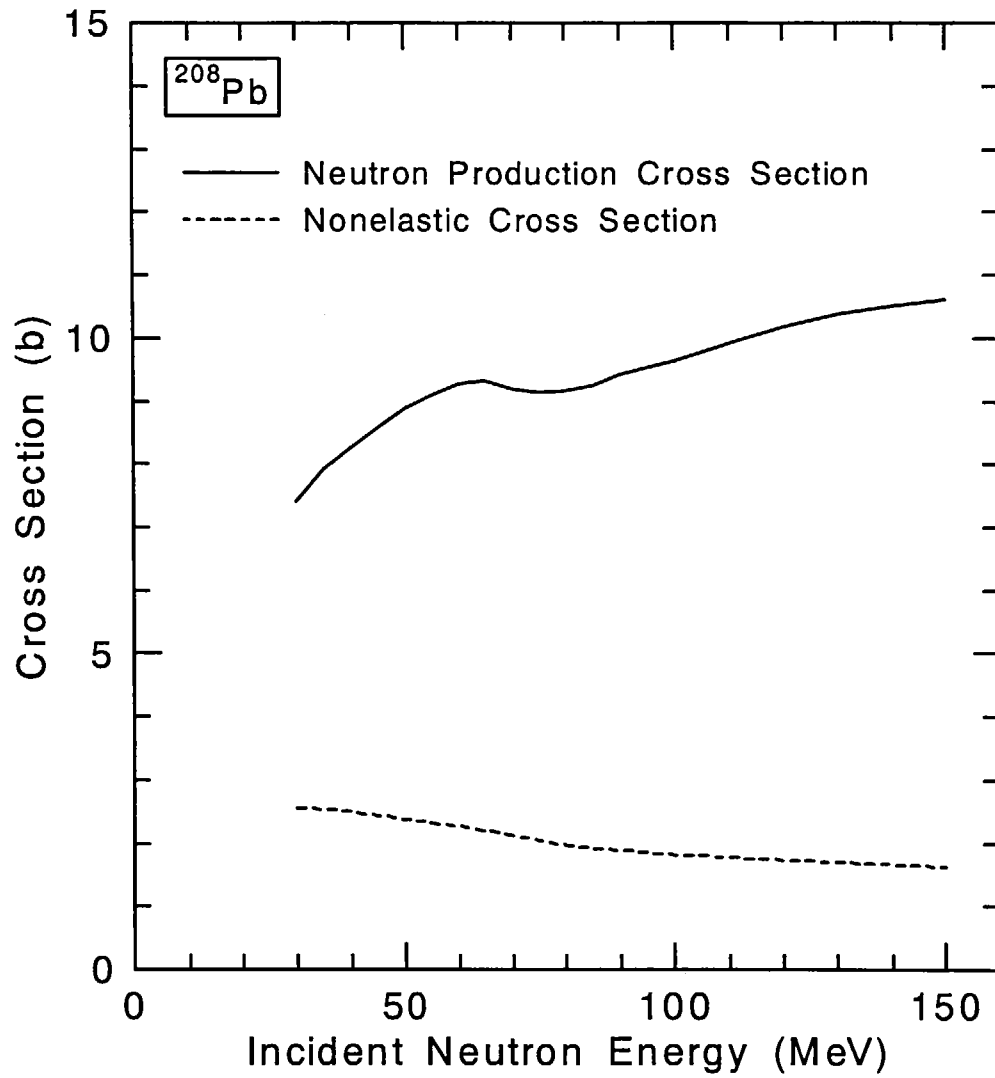


Fig. 3.6 30-150MeV 中性子入射における ^{208}Pb の中性子生成断面積³⁻⁵⁾
 ここに示す中性子生成断面積には、それぞれの反応断面積に、
 反応によって生成される中性子数が乗じられている。

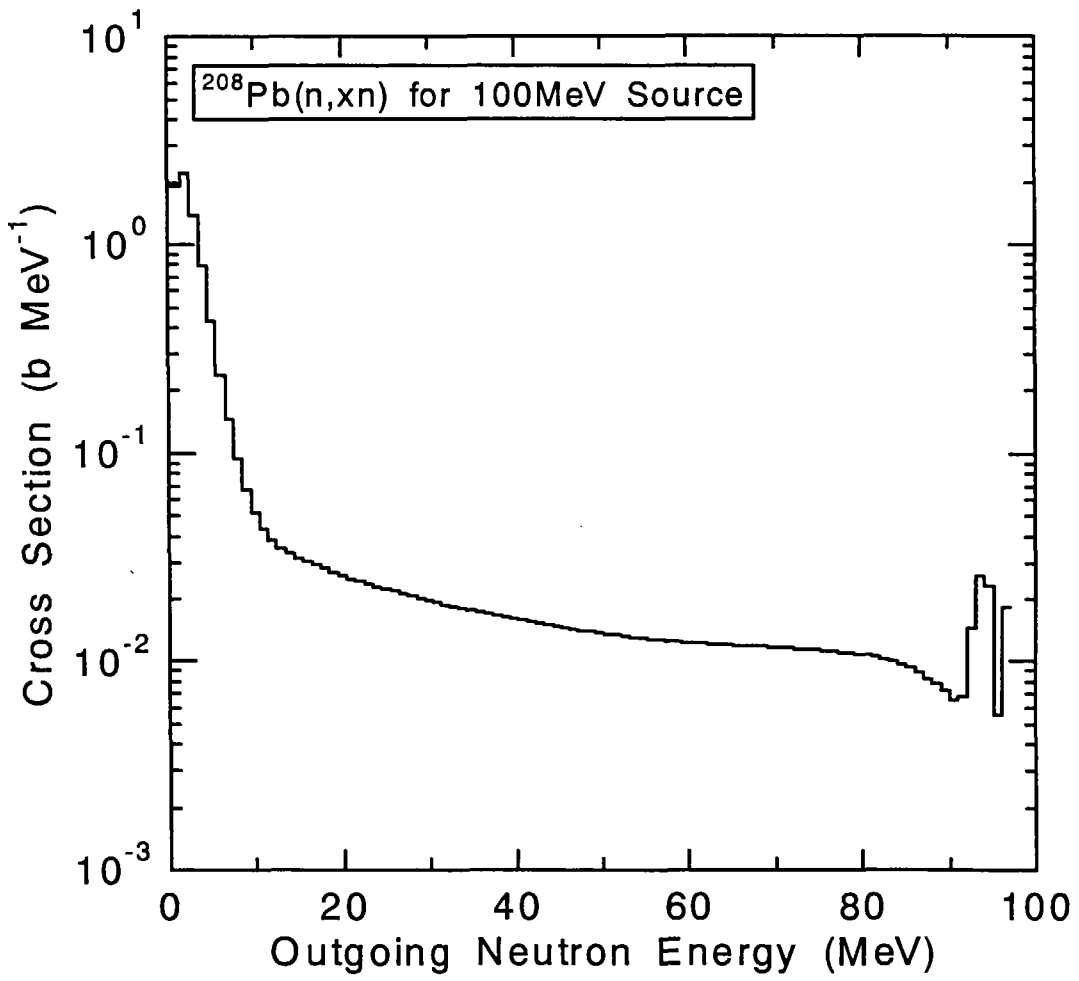


Fig. 3.7 100MeV 中性子入射における $^{208}\text{Pb}(n,xn)$ 反応で生成する 2 次中性子
エネルギー微分断面積³⁻⁵⁾

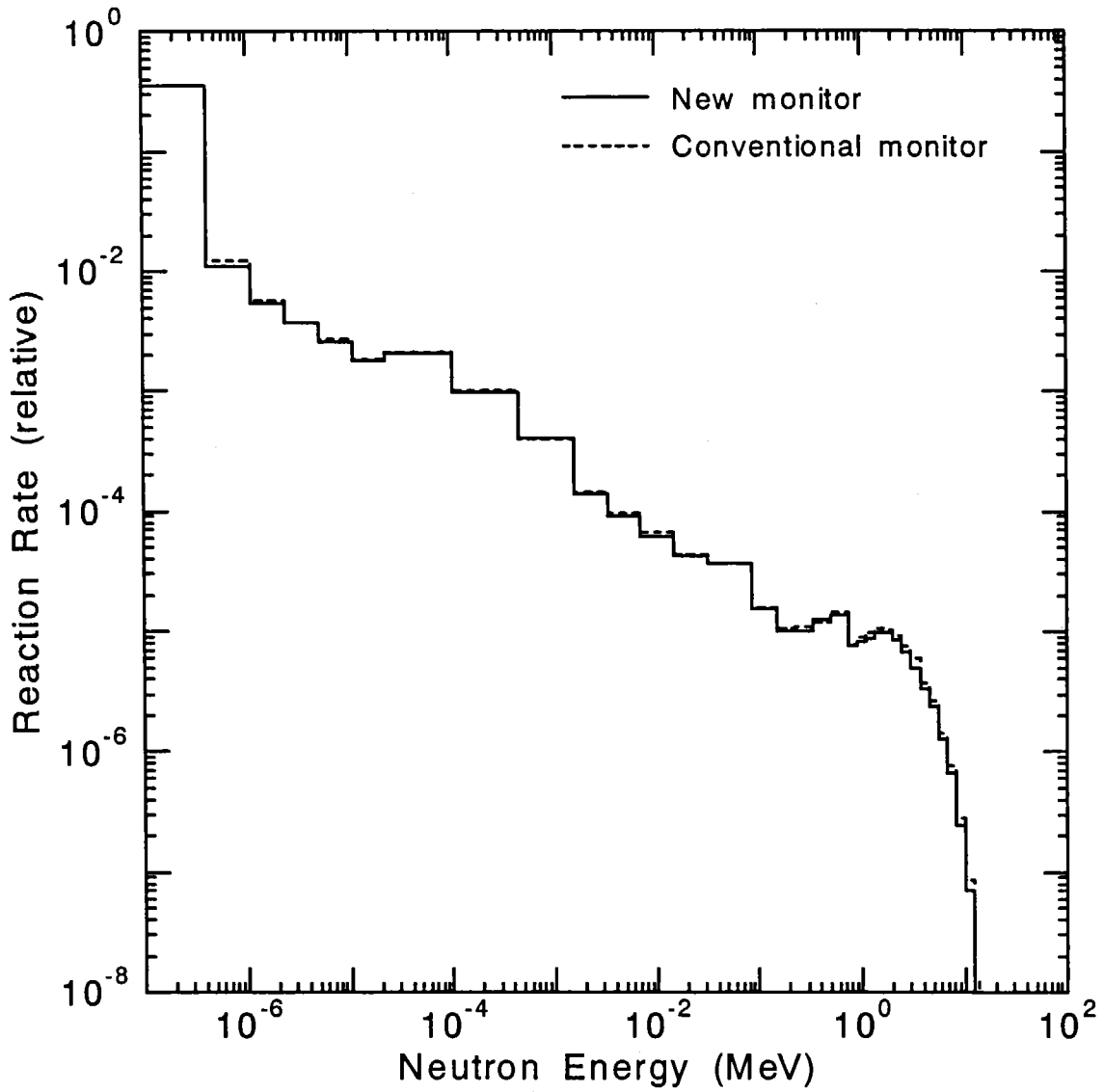


Fig. 3.8 ^{252}Cf 線源中性子入射による、試作レムモニタ及び従来型レムモニタの単位中性子フルエンスあたり ^3He 計数管反応数

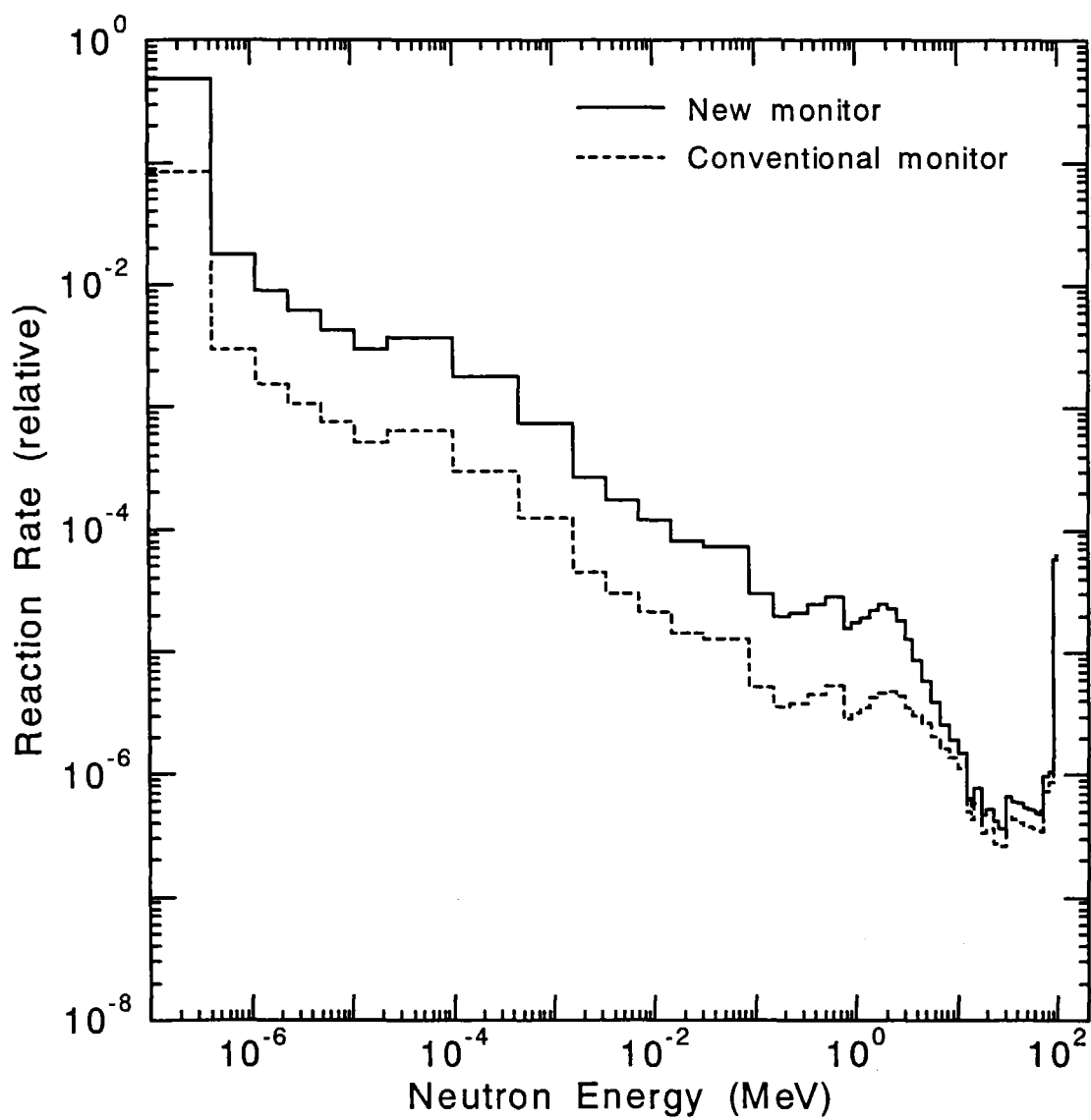


Fig. 3.9 100MeV 中性子入射による、試作レムモニタ及び従来型レムモニタの単位中性子フルエンスあたり ^3He 計数管反応数

4. 結果及び考察

前章に述べた計算により、試作レムモニタ及び従来型レムモニタのエネルギー応答特性を評価し、これを実験値と比較することで評価計算の精度を確認した。また、試作レムモニタと従来型レムモニタの応答特性の比較を行うとともに、これらのエネルギー応答特性を線量換算係数と比較し、中高エネルギー対応中性子レムモニタとしての性能を評価した。

4.1 中性子レムモニタのエネルギー応答特性と比較する線量換算係数

試作レムモニタ及び従来型レムモニタの、熱領域から 150MeV までの広範な領域の中性子に対するエネルギー応答特性を線量換算係数と比較することで、レムモニタのエネルギー応答性能を評価した。本研究で開発した中性子レムモニタは、加速器施設において遮蔽体の後方における場の線量率を測定することになる。このため、高エネルギー中性子に対して参照すべき線量換算係数について検討を行った。

国内では ICRP1990 年勧告の導入に伴い、平成 13 年 4 月に放射線障害防止法等関係法令が改正された。この中で、外部被ばくに関する線量として、線量限度や施設の基準など放射線防護基準を定める量には防護量（実効線量）を、モニタリングのための量には直接測定が可能な実用量（場のモニタリングには周辺線量当量、個人モニタリングには個人線量当量）を用いることが定められた。この法令改正を受けて出された被ばく線量の測定・評価マニュアル（(財)原子力安全技術センター 発行）では、場のモニタリングに用いる測定器に対しては周辺線量当量 $H^*(10)$ への換算係数を用いて校正時の基準線量を算出することとなり、20MeV 以下の中性子に対する換算係数として ICRP Publ.74 に示された $H^*(10)$ への換算係数が採用された。Fig. 4.1 に ICRP Publ.74 に示された $H^*(10)$ への換算係数を示す。一方、遮蔽計算では防護量としての実効線量への線量換算係数が用いられる。実効線量への線量換算係数は中性子の入射方向に対する依存性があることから、照射条件によって換算係数の値が異なり、ICRP Publ.74 においても複数の照射ジオメトリ毎に換算係数が与えられている。そこで、各中性子エネルギーにおいて最大値を与える照射条件における実効線量への換算係数をつないだ係数を、実効線量への換算係数の最大値として Fig. 4.1 に示す。

20MeV 以下の領域における $H^*(10)$ への換算係数と実効線量への換算係数との比較に関しては上記マニュアルや文献⁴⁾等で述べられており、中性子のエネルギー領域によっては部分的に AP 条件における実効線量が $H^*(10)$ を上回る部分がみられる。しかし、実際の測定においては散乱線を含んだ広がりを持つスペクトルとなることから、 $H^*(10)$ は実効線量と比較して概ね安全側の結果を与え、 $H^*(10)$ を用いたモニタリングが実効線量を過小評価することはないと考えられている。このことが、実際の運用において、レムモニタで測定された $H^*(10)$ をそのまま実効線量に読み替えることを正当化する根拠になっている。

以上のことから、本研究で試作したレムモニタで参照する線量換算係数について、20MeV 以下の中性子に対しては、試作レムモニタのベースとなっている原子力施設や RI 利用施設などで

使用されている既存のレムモニタと同様の応答を与えることを前提とし、上記マニュアルで採用している ICRP Publ.74 に示された $H^*(10)$ への換算係数を参照することとした。

一方、20MeV 以上の中性子に対する線量換算係数については、ICRP Publ.74 において 201MeV までの $H^*(10)$ 及び 180MeV までの実効線量に対する換算係数が示されている。 $H^*(10)$ への換算係数は、上述のように 20MeV 以下における換算係数として採用したことから、仮にこれを 20MeV 以上の換算係数として採用した場合、20MeV 以下との連続性の観点からは理解しやすい。しかしながら、20MeV 以上の中性子に対して、実効線量への換算係数が入射中性子エネルギーの増加に伴い概ね増加するのに対し、 $H^*(10)$ への換算係数は入射エネルギーの増加に伴って減少することから、 $H^*(10)$ への換算係数は実効線量への換算係数と比較して過小となる (Fig. 4.1)。両者の差が最も大きい 150MeV において、 $H^*(10)$ への換算係数は PA 条件における実効線量への換算係数の $1/2$ 以下である。これは、20MeV 以上の中性子入射では、反応によって生成される 2 次荷電粒子の飛程が長く、ICRU 球中において深さ 1cm の位置よりも更に深い位置で粒子がエネルギーを付与するからである。このように、20MeV 以上では $H^*(10)$ への換算係数は実効線量への換算係数と比較して安全側の結果を与えないことから、放射線防護の観点から 20MeV 以上の中性子に対して $H^*(10)$ への換算係数を参照することは適切でないと判断される。一方、実効線量への換算係数に関しては、J-PARC の遮蔽評価における線量換算係数として用いられている。仮にこれを 20MeV 以上においてモニタが参照する線量換算係数として採用した場合には、 $H^*(10)$ と比較して安全側の結果を与えるとともに、施設の遮蔽設計における評価結果との整合性の観点から支障は少ないものと思われる。しかし、実効線量そのものは場のモニタリングに用いられる実用量ではなく、放射線防護基準を定めるための、人体中に特定された防護量であることから、20MeV 以下で適用した $H^*(10)$ と直接的な整合性はない。そのため、試作したレムモニタのエネルギー応答は、20MeV 以下では $H^*(10)$ 、それ以上では実効線量という、目的の異なる 2 種類の線量換算係数に基づくレムモニタとなり、20MeV 以上の中性子混在場における本モニタの測定結果 (表示される線量) の定義が明確にできない、という問題点は残る。

以上のように、20MeV 以上の線量換算係数として、 $H^*(10)$ 及び実効線量の何れの換算係数を参照しても完璧ではない。将来的には上記マニュアル等において線量換算係数推奨値の提示が期待されるところであるが、現時点において参照すべき換算係数が必要である。そこで、本研究における試作レムモニタで参照すべき換算係数について検討した結果、試作レムモニタの示す結果が実際の場の線量を過小評価することなく、常に安全側の結果を与えるモニタとなるよう設計することを最重要と考え、20MeV 以上の中性子に対する線量換算係数として実効線量への換算係数を参照するという、実際的かつ工学的な判断を行った。その結果、このモニタの示す測定結果は、20MeV 以下の中性子のみの場においては従来の中性子レムモニタと同様の結果を与えるが、20MeV 以上の中性子が混在する場においては、実効線量に対して安全側の結果を与えるレムモニタ、ということになる。実効線量は人体形状モデルを用いて評価されることから、中性子の入射方向に対する依存性があり、ICRP Publ.74 においても 20-180MeV 中性子に対して 4 種類の照射ジオメトリー毎に換算係数が与えられている (Fig. 4.2)。AP 条件 (人体前方からの照射) における換算係数は、30MeV 以下の領域で他の照射条件での値と比較して最大値を与えるが、50-150MeV においては PA 条件 (人体後方からの照射)、180MeV においては RLAT (人体右側

面から照射)条件における換算係数が最大値を与える。50・180MeVのエネルギー領域において、AP条件での換算係数を、最大値を与える照射条件における換算係数と比較した結果、2・18%低いことが判った。本研究では、線量を過小評価しないことを前提に考えることとし、各々のエネルギー点において最大値を与える照射ジオメトリーでの値を実効線量への換算係数として用いることとした。

4.2 試作レムモニタ設計における鉛ブリーダの配置及び厚さの検討

試作レムモニタの設計において、追加する鉛ブリーダの配置及び厚さに関し、中性子レムモニタの応答特性計算を行って検討した。

4.2.1 鉛ブリーダの配置検討

試作レムモニタの設計において、従来型レムモニタの持つ特性を生かしつつ、高エネルギー中性子対応とするために、現在の構造を大きく変えることのない位置に鉛ブリーダを配置する必要がある。ベースとなる従来型レムモニタにおいて、鉛の層を配置できる場所としては、 ^3He 計数管の外側(内側ポリエチレン減速材層の内側)、外側ポリエチレン減速材層の内側あるいはその外側の計3カ所に限られる。ここでは、鉛の層を1.5cmと仮定し、どの位置に配置するのが最適なのかを、鉛ブリーダ追加の効果が現れる中高エネルギー領域における応答関数の計算を行って確かめた。100MeV単色中性子入射において、鉛の層の位置を変えた場合の単位中性子フルエンスあたりの反応数計算結果をTable 4.1に示す。計算結果との比較のため、鉛を装着していない従来型レムモニタの結果も併せて示す。この結果から、外側ポリエチレン減速材層の内側に配置した場合(この位置は検出器全体からみて、中央付近に相当する)に最も高い応答が得られることが判った。よって、試作レムモニタの設計では、鉛の層を他の配置よりも高い検出効率が期待できる、外側ポリエチレン減速材層の内側に配置することとした。

4.2.2 鉛ブリーダの厚さ検討

試作レムモニタにおいて追加した鉛ブリーダの厚さについて最適化を図るため、鉛ブリーダ厚さを変えた場合の中高エネルギー領域での中性子レムモニタ応答特性を計算した。100MeV単色中性子入射における試作レムモニタの単位中性子フルエンスあたりの反応数の計算結果をTable 4.2に示す。この表から、鉛の厚さが増すにつれて計数管の反応数(中性子レムモニタの応答)も増す傾向にあることが判る。試作レムモニタの応答特性としては、熱領域から中高エネルギー領域までの広範な領域において線量換算係数を再現することが求められる。そこで、検出器の校正照射を行う ^{252}Cf 線源における応答を基準に考え、試作レムモニタの、 ^{252}Cf 線源における応答に対する中高エネルギー中性子に対する応答の比が、線量換算係数における ^{252}Cf 線源に対する係数と中高エネルギー中性子に対する係数の比に近いことが重要である。鉛の厚さを変化させた場合の、 ^{252}Cf 線源における応答に対する100MeV中性子に対する応答の比をTable 4.2に併せて

示す。 ^{252}Cf 線源に対する周辺線量当量への換算係数と 100MeV 中性子に対する実効線量への換算係数との比が 1.40 であるのに対し、鉛の厚さを 1.5cm とした場合に 1.39 と最も近い値 (比) が得られたことから、試作のレムモニタにおいて鉛ブリーダの層の厚さを 1.5cm とすることが最適であると判断し、設計を行った。

4.3 エネルギー応答特性

試作レムモニタのエネルギー応答特性を中性子輸送計算により求め、これを実験値と比較することで計算精度の検証を行った。また、試作レムモニタと従来型レムモニタの応答特性の比較を行うとともに、これらのエネルギー応答特性を線量換算係数と比較し、中高エネルギー領域対応中性子レムモニタとしての性能を評価した。

4.3.1 応答特性計算値と実験値との比較(計算精度の検証, 計算の妥当性)

第 2 章で得られた試作レムモニタ及び従来型レムモニタの応答特性測定結果を用いて、応答関数計算の精度検証を行った。計算値と実験値の比較結果を Table 4.3 に示す。実験によって得られる中性子レムモニタ応答は ^3He 計数管の実際の計数 (率) だが、計算によって得られる応答は ^3He 計数管における反応数であることから、ここでは実験値、計算値について各々 ^{252}Cf 線源における結果を用いて規格化し、実験値、計算値それぞれに得られた結果を ^{252}Cf 線源での結果に対する比で表し、この比を比較することにより実験値と計算値の比較とした。Table 4.3 から、従来型レムモニタで測定可能な 20MeV 以下のエネルギー領域内にある、熱中性子及び Am-Be 中性子線源に対し、試作レムモニタ及び従来型レムモニタの何れにおいても、 ^{252}Cf 線源での結果で規格化した応答関数計算結果は、実験値を 16%以内で再現できることが確認できた。一方で TIARA の 40 及び 65MeV 準単色中性子に対しても、試作レムモニタ計算結果は 15%以内、従来型レムモニタ計算結果は 31%以内で実験値を再現できることが確認できた。以上から、応答特性計算の精度を実験によって検証できたことで、本計算により中性子レムモニタの応答特性を精度よく評価できることを確認できた。

4.3.2 試作レムモニタと従来型レムモニタの応答特性の比較

試作レムモニタと従来型レムモニタの入射中性子エネルギーに対する応答特性を比較するため、これらの応答の比を実験値、計算値それぞれに求めた (Table 4.4)。その結果、熱中性子、 ^{252}Cf 及び Am-Be 中性子線源に対し、試作レムモニタと従来型レムモニタの応答は実験値で 13%以内、計算値では 4%以内で一致することが判った。このことから、従来型レムモニタの測定範囲である低エネルギー領域中性子に対して、試作レムモニタにおいて鉛を装着したことによる応答特性への影響は殆どなく、従来型レムモニタと同様のエネルギー応答特性であることが、計算及び実験の双方の結果から確認できた。一方、40 及び 65MeV 準単色中性子に対しては、試作レムモニタの応答は従来型レムモニタと比べてそれぞれ 1.8 及び 2.7-2.8 倍高いことが実験及び計算の双方

の結果から確認できた。これは前章でも述べたように、試作レムモニタにおいては鉛ブリーダを装着したことで、 $Pb(n,xn)$ 反応による中性子増倍効果で計数管に入射する低エネルギー中性子が増加し、その結果中性子レムモニタの応答が高くなるためである。

また、40, 65, 100 及び 150MeV の単色エネルギー中性子入射に対する試作レムモニタと従来型レムモニタの応答特性計算結果の比を求め、Table 4.4 に併せて示した。この結果から、40 及び 65MeV 単色エネルギー中性子に対し、試作レムモニタは従来型レムモニタより 3.6 及び 5.0 倍高い応答が得られることが判った。TIARA の準単色場では、中高エネルギー中性子だけの寄与でなく、低エネルギー中性子による寄与も混在していることから、準単色場における、試作レムモニタと従来型レムモニタとの応答比は、単色エネルギーでの結果に比べて低くなっていると考えられる。また、100 及び 150MeV 単色エネルギーに対しては、試作レムモニタでは 5.7 及び 6.4 倍高い応答が得られたことから、中高エネルギー領域においてエネルギーが高くなるにつれて従来型レムモニタとの応答の差が拡大する傾向にあることが判った。

4.3.3 線量換算係数との比較

試作レムモニタと従来型レムモニタの、熱領域から 150MeV までの広範なエネルギー領域の中性子に対する応答特性を計算によって求め、これを線量換算係数と比較することで、中性子レムモニタとしての性能を評価した。中性子レムモニタ応答特性と線量換算係数を比較した結果を Fig.4.3 に示す。このグラフにおいて、中性子レムモニタの応答特性については単位フルエンスあたりの反応数で示し、比較する線量換算係数は ^{252}Cf 線源における結果で規格化した値をプロットした。この図から、従来型レムモニタでは、20MeV 以上の領域において応答特性は著しく低下し、実効線量への換算係数との差も広がる傾向にあるのに対し、試作レムモニタでは 20MeV 以上の領域においても応答特性の低下がなく、実効線量への換算係数を良く再現することが判る。この比較における、 ^{252}Cf 線源における結果で規格化した 20-150MeV 領域での中性子レムモニタ応答と線量換算係数を比較した値を Table 4.5 に示す。この結果から、従来型レムモニタでは 20-150MeV の中性子に対する線量換算係数と比較して 0.16~0.40 倍、すなわち線量換算係数の $1/6 \sim 1/2$ 以下なのに対し、試作レムモニタでは線量換算係数に対し 0.78~1.04 倍、すなわち 22% 以内で線量換算係数をよく再現できることが判った。これらの結果から、試作レムモニタは、従来型レムモニタでは場の線量率を過小評価する 20-150MeV の中性子による被ばく線量を、高い精度で測定することが可能なエネルギー応答特性を有していることが確認できた。

4.4 数 10MeV 中性子場において中性子レムモニタが与える線量率と実際の場の線量率との比較

中性子レムモニタの校正は、強度が明確な ^{252}Cf や $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ などの線源を用いた中性子標準場で測定した結果から、計数率と線量率の換算係数を導出する方法が一般的である。実際の運用時において、今回試作した中性子レムモニタの校正も従来型レムモニタと同様の方法で行われることが予想されることから、この様な方法で校正された中性子レムモニタが数 10MeV 領域中性子場において与える線量率と、実際の場の線量率とを比較することにより、運用時における中高エ

エネルギー中性子に対するレムモニタの線量率測定精度を実験的に確認することができる。そこで、 ^{252}Cf 線源を用いたFRS標準場で校正照射した際の計数率と線量率との比を用いて、TIARAの中性子場で測定された試作レムモニタと従来型レムモニタの計数率を線量率（中性子レムモニタ読み値）に換算し、これをTIARA中性子場における実際の線量率と比較した（Table 4.6）。ここで、 ^{252}Cf 線源によるFRS標準場での中性子レムモニタ校正における線量率は、照射位置における中性子線源強度並びにエネルギースペクトルと、ICRP Publ.74に示された周辺線量当量への換算係数を用いて求めた。また、TIARAの中性子場における線量率については、モニタ照射位置における線源中性子の強度並びにエネルギースペクトルと、線量換算係数（20MeV以下を周辺線量当量、それ以上は最大値を与える照射条件での実効線量への換算係数）を用いて計算した。ここで、TIARA実験における加速器のビーム電流に関し、中性子レムモニタの数え落とし等の影響がないと考えられる100～140nAにおける実験値を採用した。測定結果から求めた線量率と場の線量率の比較から、従来型レムモニタにおいて計数率を線量率に換算した結果は、40及び65MeV準単色中性子における実際の場の線量率に対して、それぞれ0.44倍及び0.31倍の値しか与えず、場の線量率を著しく過小評価したのに対し、試作レムモニタにおいて計数率を線量率に換算した結果は、実際の場の線量率に対し10%以内で一致した。この結果から、試作レムモニタは、従来型レムモニタと同様に ^{252}Cf 線源やAm-Be線源を用いて計数率と線量率の換算係数を導出することで、数10MeV中性子に対しても精度のよい測定が可能であることが確認できた。このことから、高エネルギー陽子加速器施設における遮蔽体後方での線量評価に重要な150MeVまでのエネルギー領域における精度のよい中性子線量率測定が期待できる。

更に、高エネルギー中性子に対しては、荷電粒子輸送計算コードを用いたシミュレーション計算によりエネルギー応答特性を評価するとともに、GeVクラスの加速器施設における応答特性の測定を検討している。

Table 4.1 鉛ブリーダ付きレムモニタの試作における，100MeV 単色中性子入射による
単位中性子フルエンスあたりのモニタ反応数の，鉛ブリーダの配置による比較

鉛ブリーダの位置	単位中性子フルエンスあたり反応数 (反応数 cm ²)
³ He計数管の外側	3.44
外側ポリエチレン減速材の内側	5.80
外側ポリエチレン減速材の外側	3.69
鉛ブリーダなしの従来型モニタ(参照値)	1.01

Table 4.2 鉛ブリーダ付きレムモニタの試作において，100MeV 単色中性子入射による
鉛の厚さの違いによるレムモニタ反応数の比較（厚さ最適化検討）

鉛の厚さ (cm)	単位中性子フルエンス あたり反応数 (反応数 cm ²)	²⁵² Cf線源での単位 中性子フルエンスあたり 反応数(反応数 cm ²)	²⁵² Cf線源での反応数 に対する100MeV線源 での反応数の比
0.0	1.01	4.25	0.239
0.5	2.62	4.21	0.621
1.5	5.81	4.19	1.39
2.5	8.94	4.16	2.15
²⁵² Cf線源における周辺線量当量への換算係数に対する 100MeV線源における実効線量への換算係数の比			1.40

Table 4.3 応答特性計算値と実験値の比較（各々の ^{252}Cf 線源での結果で規格化）

(a) 試作レムモニタ

線源	応答計算値 (反応数 cm^2)	^{252}Cf 計算値 で規格化	応答実験値 (count cm^2)	^{252}Cf 実験値 で規格化	^{252}Cf 線源での結果 で規格化した計算 値と実験値の比
Thermal	0.0715	0.0171	0.0700	0.0203	0.842
^{252}Cf	4.19	1.00	3.45	1.00	---
Am-Be	4.44	1.06	4.21	1.22	0.869
TIARA 40MeV	4.67	1.11	3.34	0.967	1.15
TIARA 65MeV	4.93	1.18	3.68	1.07	1.10

(b) 従来型レムモニタ

線源	応答計算値 (反応数 cm^2)	^{252}Cf 計算値 で規格化	応答実験値 (count cm^2)	^{252}Cf 実験値 で規格化	^{252}Cf 線源での結果 で規格化した計算 値と実験値の比
Thermal	0.0742	0.0175	0.0626	0.0158	1.10
^{252}Cf	4.25	1.00	3.95	1.00	---
Am-Be	4.27	1.01	4.25	1.08	0.93
TIARA 40MeV	2.54	0.599	1.86	0.471	1.27
TIARA 65MeV	1.83	0.431	1.30	0.329	1.31

Table 4.4 試作レムモニタと従来型レムモニタの応答の比

線源	実験値	計算値
Thermal	1.12	0.96
^{252}Cf	0.87	0.99
Am-Be	0.99	1.04
TIARA 40MeV	1.79	1.84
TIARA 65MeV	2.83	2.69
40MeV単色	----	3.63
65MeV単色	----	4.97
100MeV単色	----	5.73
150MeV単色	----	6.40

Table 4.5 20~150MeV 中性子入射におけるレムモニタの応答と線量換算係数の比較
(^{252}Cf 線源での結果で規格化した値の比較)

(a) 試作レムモニタ

Energy (MeV)	試作レムモニタ応答		線量換算係数		^{252}Cf 結果で 規格化した モニタ応答と 換算係数の比
	応答計算結果 (Reaction cm^2)	^{252}Cf 線源での 計算結果で規格 化した応答	実効線量当量 への換算係数 (最大値) (pSv cm^2)	^{252}Cf 線源に対する 換算係数で規格化 した実効線量当量 への換算係数	
20	4.40	1.05	480	1.35	0.78
30	4.60	1.10	458	1.29	0.85
50	5.11	1.22	444	1.25	0.98
75	5.42	1.29	459	1.29	1.00
100	5.81	1.39	477	1.34	1.03
150	6.30	1.50	514	1.45	1.04

(b) 従来型レムモニタ

Energy (MeV)	従来型レムモニタ応答		線量換算係数		^{252}Cf 結果で 規格化した モニタ応答と 換算係数の比
	応答計算結果 (Reaction cm^2)	^{252}Cf 線源での 計算結果で規格 化した応答	実効線量当量 への換算係数 (最大値) (pSv cm^2)	^{252}Cf 線源に対する 換算係数で規格化 した実効線量当量 への換算係数	
20	2.32	0.55	480	1.35	0.40
30	1.62	0.38	458	1.29	0.30
50	1.21	0.28	444	1.25	0.23
75	1.05	0.25	459	1.29	0.19
100	1.01	0.24	477	1.34	0.18
150	0.99	0.23	514	1.45	0.16

Table 4.6 TIARA 中性子場における計数率測定値を、 ^{252}Cf 線源による校正照射の結果から換算した線量率と、実際に照射を行った TIARA の場の線量率（場の中性子強度及びスペクトルから算出）との比較

(a) 試作レムモニタ

線源	加速器 ビーム 電流 (nA)	場の中性子 フルエンス率から 求めた線量率 (mSv/h)	モニタ計数率 から求めた 線量率* (mSv/h)	モニタ計数率 から求めた 線量率と、場の 線量率との比
TIARA 40MeV	~100	1.03	0.939	0.909
TIARA 65MeV	~100	1.35	1.39	1.03

* ^{252}Cf で求めた計数率-線量率換算係数を使用して算出

(b) 従来型レムモニタ

線源	加速器 ビーム 電流 (nA)	場の中性子 フルエンス率から 求めた線量率 (mSv/h)	モニタ計数率 から求めた 線量率* (mSv/h)	モニタ計数率 から求めた 線量率と、場の 線量率との比
TIARA 40MeV	~100	1.04	0.460	0.441
TIARA 65MeV	~140	1.96	0.606	0.310

* ^{252}Cf で求めた計数率-線量率換算係数を使用して算出

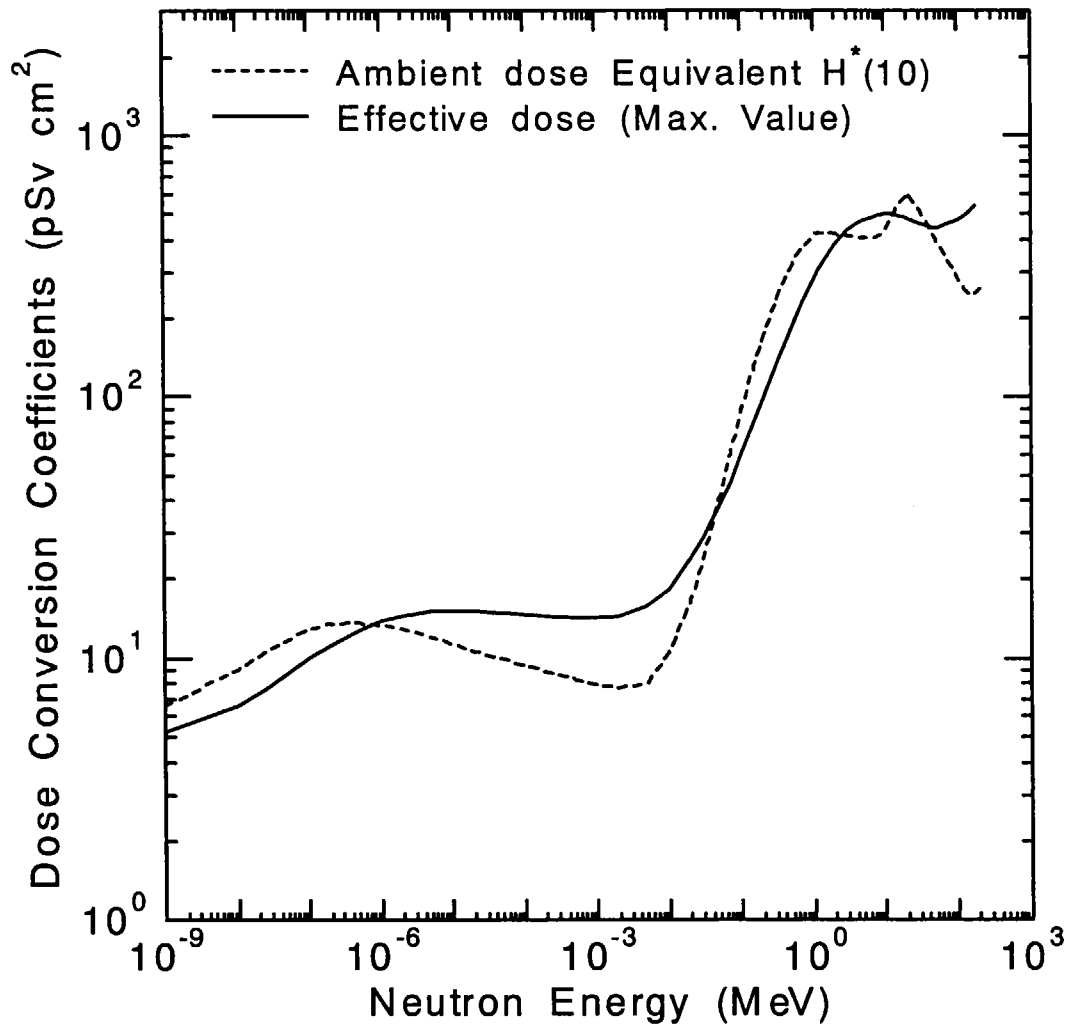


Fig. 4.1 ICRP Publ.74 に示された周辺線量当量及び最大値を与える照射条件における実効線量への換算係数

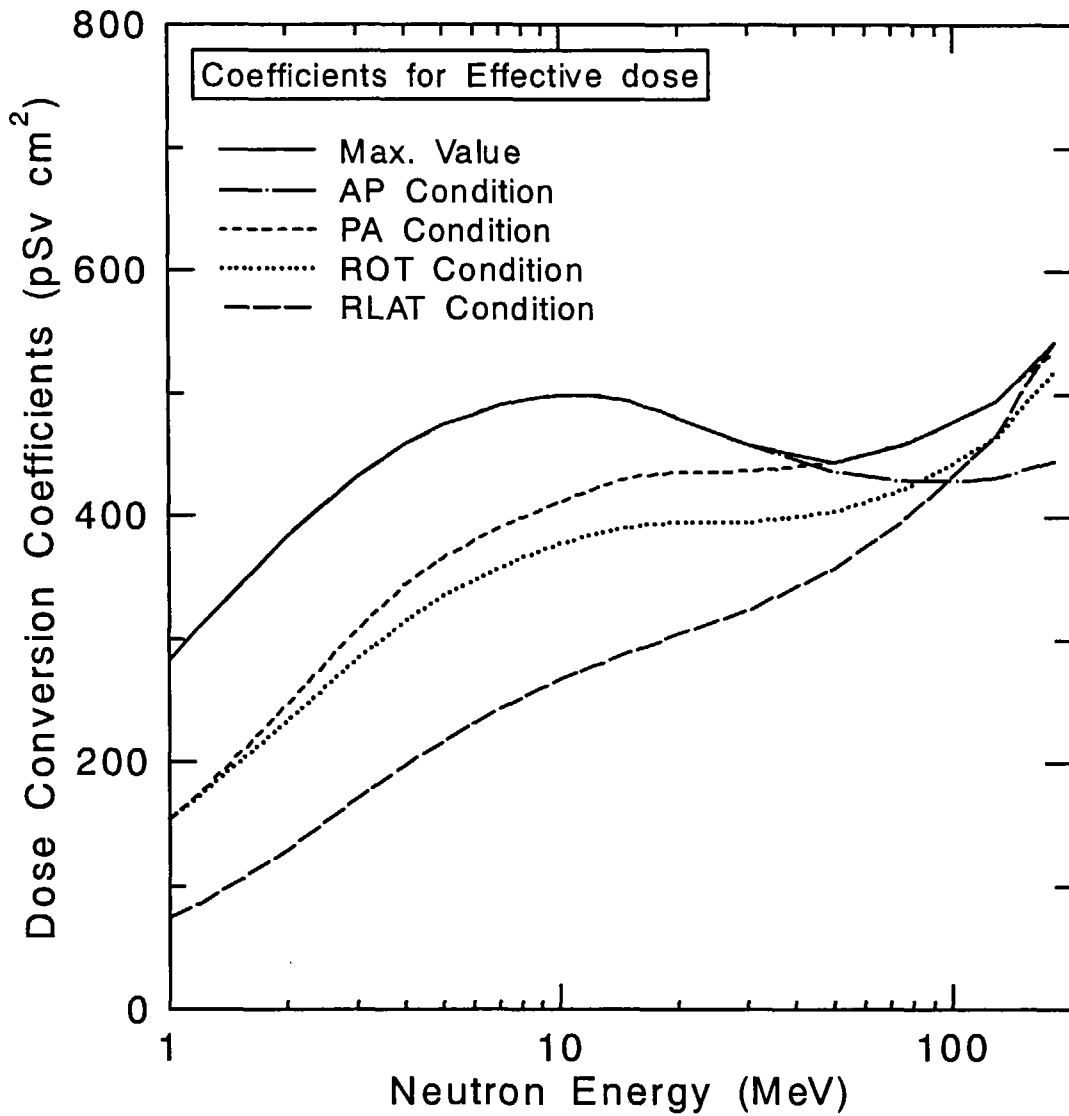


Fig. 4.2 ICRP Publ.74 に示された、いろいろな照射ジオメトリーで入射する中性子に対する実効線量への換算係数
(各々のエネルギー点における最大値についてもプロット)

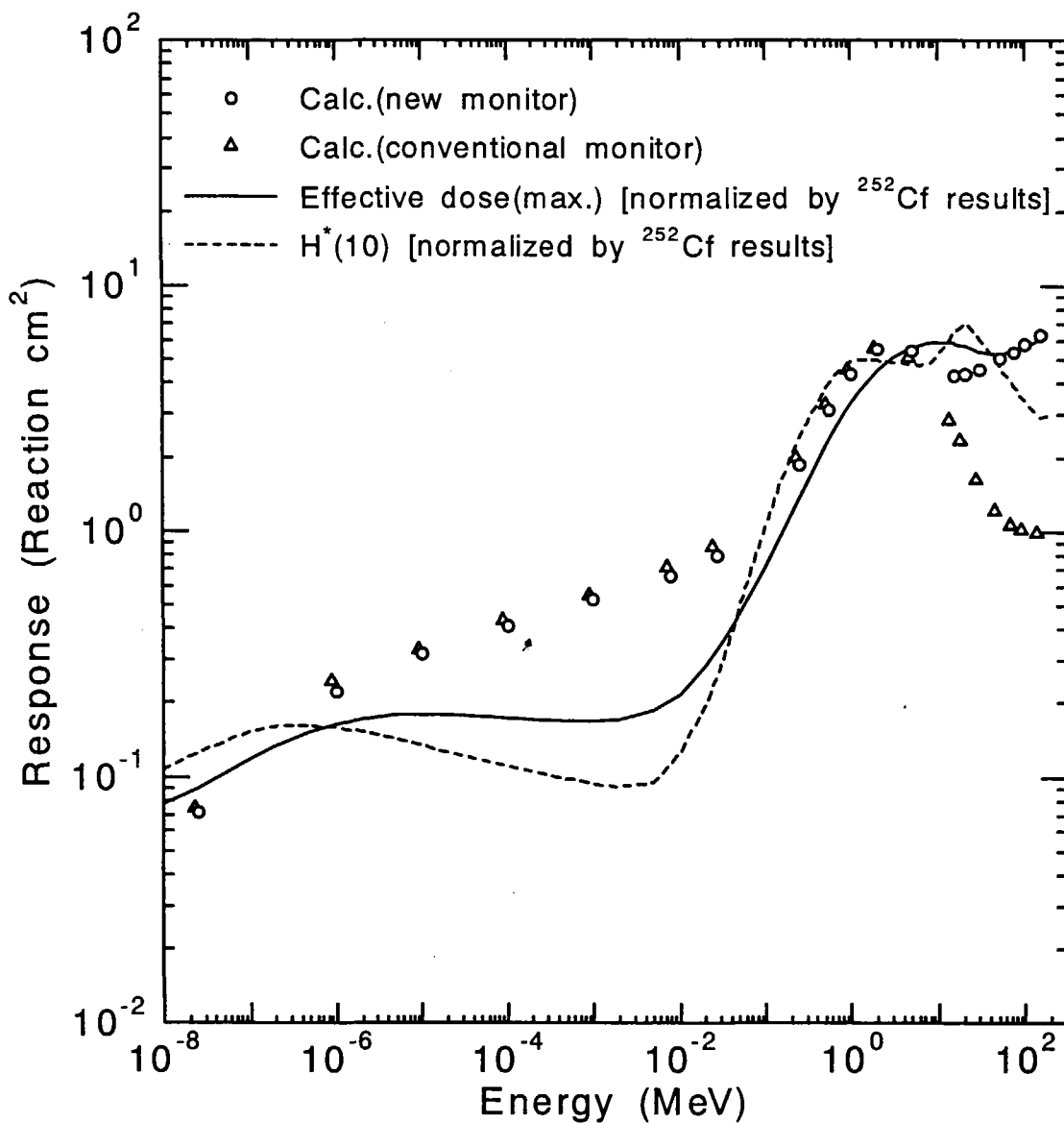


Fig. 4.3 試作レムモニタ及び従来型レムモニタのエネルギー応答特性計算結果を²⁵²Cf線源に対する結果で規格化した線量換算係数（周辺線量当量及び最大値を与える照射条件における実効線量）との比較

5. まとめ

原研・KEK が共同で建設している大強度陽子加速器施設の放射線管理に適した中性子レムモニタの開発を目的として、従来型レムモニタをベースに鉛の層を加えることで中高エネルギー中性子に対する応答特性を改善した鉛ブリーダ付き中性子レムモニタを試作した。この試作レムモニタのエネルギー応答特性について、熱エネルギーから 150MeV までの広範な入射中性子エネルギーに対する応答特性を中性子輸送計算により評価するとともに、熱エネルギーから 65MeV までの中性子場を用いて応答特性を測定し、評価結果の精度検証を行った。試作レムモニタと従来型レムモニタの応答特性の比較から、試作レムモニタのエネルギー応答は、従来型レムモニタにみられる 20MeV 以上のエネルギー領域における応答の落ち込みもなく、熱エネルギーから 150MeV までの広範な中性子エネルギーに対して、ICRP Publ.74 の周辺線量当量及び実効線量（最大値を与える照射条件における値）への換算係数をよく再現できることが確認できた。また、従来の中性子レムモニタと同様に、 ^{252}Cf 線源による中性子標準場を用いて試作レムモニタの校正を行い、40 及び 65MeV 準単色中性子場における線量率を計数率から算出した結果、実際の中性子場における線量率に対し 10%以内で一致する結果が得られたことから、今回試作した中性子レムモニタは、数 10MeV 領域中性子に対して精度の高い線量測定が可能であることが確認できた。

以上の結果から、試作した中性子レムモニタのエネルギー応答特性が加速器施設用中性子レムモニタとしての目標性能を達成できたことが確認され、実用化の目処がついた。

謝 辞

本研究の高崎研 TIARA における実験は、原研・大学プロジェクト共同研究「陽子加速器施設における放射線安全性に関する研究」の一環として行われた。TIARA の加速器運転において御協力いただきました高崎研究所ビーム技術開発室 荒川和夫氏並びに運転スタッフの皆様に感謝いたします。また、FRS 中性子標準場における応答特性測定実験において御協力をいただきました保健物理部線量管理課のスタッフの皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1-1) 坂本幸夫, 山口恭弘: JAERI-Tech 2001-042, “高エネルギー陽子加速器施設の遮へい設計計算のための線量換算係数”(2001).
- 2-1) たとえば 金ウンジュ, 遠藤章, 山口恭弘, 吉澤道夫, 田中進, 潮見大志, 中村尚司, A.H.D. Rasolonjatovo: JAERI-Tech 2002-041, “広帯域エネルギー中性子モニタ用検出器の開発”(2002).
- 2-2) C. Birattari et al.: “An Extended Range Neutron REM Counter,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A297, 250 (1990).
- 2-3) R.H. Olsher et al.: “WENDI: An Improved Neutron Rem Meter,” Health Phys., 79(2), 170 (2000).
- 2-4) L. Jianping et al.: “Neutron Energy Response of a Modified Andersson-Braun Rem Counter,” Radiat. Protec. Dosim., 67, 179 (1996).
- 2-5) J.F. Briesmeister (Editor): “MCNP – A General Monte Carlo n-Particle Transport Code, Version 4B,” LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1997).
- 2-6) J.R. Dumais, 吉澤道夫, 山口恭弘: JAERI-Tech 98-005, “ ^{252}Cf 及び $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 中性子源を用いた速中性子校正場の散乱線評価”(1998).
- 2-7) International Commission on Radiological Protection: “Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation,” ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3/4) (Oxford: Elsevier Science) (1996).
- 2-8) 浅野芳裕, 吉田真: 「測定器校正用熱中性子場の製作と特性試験」, 保健物理, 19, 341 (1984).
- 2-9) 中尾徳晶: 「高エネルギー陽子加速器施設の遮蔽に関する実験的研究」, 博士論文, 東北大学 (1998).
- 2-10) Y. Nakane and Y. Sakamoto: “Measurement of absorbed dose distributions in a plastic phantom irradiated by 40- and 65-MeV quasi-monoenergetic neutrons,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A459, 552 (2001).
- 2-11) M. Baba et al.: “Characterization of a 40-90 MeV $^7\text{Li}(p,n)$ neutron source at TIARA using a proton recoil telescope and a TOF method,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A428, 454 (1999).
- 3-1) M.B. Chadwick et al.: “Cross Section Evaluations to 150 MeV for Accelerator-Driven Systems and Implementation in MCNPX,” Nucl. Sci. Eng., 131, 293 (1999).
- 3-2) T. Nakagawa et al.: “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2,” J. Nucl. Sci. Technol., 32, 1259 (1995).
- 3-3) Y. Nakajima: JAERI-Conf 96-008, “Status of the JENDL Activation File” p50 (1996).
- 3-4) P.F. Rose (comp.): “ENDF-201: ENDF/B-VI summary documentation,” BNL-NCS--17541, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, U.S.A. (1991).

- 3-5) International Commission on Radiation Units and Measurements: "Nuclear Data for Neutron and Proton Radiotherapy and for Radiation Protection," ICRU Report 63 (1999).
- 4-1) 吉澤道夫:「新しい外部被ばく線量換算係数の放射線管理への適用とその問題点」, 保健物理, 33(1), 7 (1998).

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バー	bar
ガロン	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 bar=100kPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻³m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 u の値はCODATAの1986年推奨値による。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクターも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- E.C.閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れていない。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

精度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P (ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁶St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ¹	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1

1 cal= 4.18605J (計量法)

= 4.184J (熱化学)

= 4.1855J (15℃)

= 4.1868J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS(仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

高エネルギー加速器施設対応中性子レムモニタのエネルギー応答特性評価

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています