

JAERI-Tech
2002-041



JP0250181



広帯域エネルギー中性子モニタ用検出器の開発
(共同研究)

2002年3月

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*・Danielle R.D. RASOLONJATOVO*

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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

広帯域エネルギー中性子モニタ用検出器の開発
(共同研究)

日本原子力研究所東海研究所保健物理部
金 ウンジュ・遠藤 章・山口 恒弘・吉澤 道夫・田中 進⁺
潮見 大志*・中村 尚司*・Danielle R.D. RASOLONJATOVO*

(2002年2月4日受理)

大強度高エネルギー陽子加速器施設においては、熱エネルギーから数 100MeVまでのエネルギー成分を持つ中性子に対する線量評価が、作業者及び一般公衆の安全確保上極めて重要である。本研究では、有機液体シンチレータ、¹⁰B入り有機液体シンチレータ、⁶Liガラスシンチレータを用いて、熱エネルギーから 100MeVまで線量評価可能な中性子モニタ用検出器を開発した。本研究の第一段階では、有機液体シンチレータにスペクトル荷重関数法(G関数法)を適用して、数 MeV以上の中性子線量を測定する方法を開発し、この信頼性を数種類の中性子場において確認した。この方法を基に、測定エネルギー範囲を熱中性子まで拡張するために、¹⁰B(n, α)⁷Li 反応により熱中性子まで感度を持つ¹⁰Bを含有させた有機液体シンチレータについて、応答関数及びG関数を求めて、線量測定特性を解析した。その結果、G関数により中性子線量評価が可能であるものの、 γ 線のバックグラウンドがある場では、¹⁰B(n, α)⁷Li 反応により生成する α 粒子の発光による低エネルギー領域の中性子弁別が困難であることも分かった。そこでさらに、⁶Li(n, α)³H 反応により低エネルギー領域の中性子を測定する⁶Liガラスシンチレータと有機液体シンチレータを組み合わせた検出器を考案した。そして、この目的のために新たに開発した SCINFUL-CG コード等を用いて、⁶Liガラスシンチレータ、有機液体シンチレータの各々について、適切な応答特性が得られる検出器の形状を設計し、これに基づき検出器を製作した。製作した検出器の検出効率及び応答関数を計算及び実験により評価した。その結果、開発した検出器は、中性子モニタ用検出器として使用可能であることを実証した。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

⁺高崎研究所放射線高度利用センター

* 東北大学

Development of Detector for Neutron Monitor of Wide Energy Range
(Joint Research)

Eunjoo KIM, Akira ENDO, Yasuhiro YAMAGUCHI, Michio YOSHIZAWA, Susumu TANAKA⁺
Tomoyuki SHIOMI*, Takashi NAKAMURA* and Danielle R.D. RASOLONJATOVO*

Department of Health Physics
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 4, 2002)

Radiation monitoring of neutrons in high-power proton accelerator facilities is very important for radiation safety management for workers and members of the public. In the present study, a neutron detector that can evaluate dose of neutrons in the energy range from thermal energy to 100MeV was developed using an organic liquid scintillator, a boron-loaded scintillator and a ⁶Li glass scintillator. First, a method was developed to evaluate neutron doses above several MeV by a spectrum weight function (G-function) which is applied to the organic liquid scintillator, and the validity of the methods was confirmed by dose evaluation in some neutron fields. Second, the G-function was applied to the boron-loaded scintillator which detects thermal neutrons by ¹⁰B(n,α)⁷Li reaction, in order to expand the covering neutron energy range. The response function and the G-function of the scintillator were evaluated by experiment and calculation, and the characteristics of dose measurement were analyzed. It was found from the results that the boron-loaded scintillator can evaluate neutron dose by applying the G-function. However, it is difficult to discriminate neutron event below 1MeV by the scintillation of alpha particle produced from ¹⁰B(n,α)⁷Li reactions in a field accompanying background of γ rays. Third, a hybrid detector of ⁶Li glass and organic liquid scintillators was developed to overcome the difficulty of the boron-loaded scintillator. The optimized configuration of two detectors was designed by Monte Carlo calculation codes, and then the detector was fabricated. The efficiency and response function of detectors were evaluated based on the calculated results and the measured results in some neutron fields. It was concluded from these results that the developed hybrid detector in this study can be used as a detector for neutron monitoring of wide energy range from thermal to 100MeV.

⁺Advanced Radiation Technology Center, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

*Tohoku University

Keywords: Neutron Monitor, Neutron Dose, Spectrum Weight Function(G-function), Organic Liquid Scintillator, Boron-loaded Scintillator, ^6Li Glass Scintillator, Hybrid Detector

This is a blank page.

目次

1. 序論	1
2. スペクトル荷重関数法	3
2.1 スペクトル荷重関数法の原理	3
2.2 スペクトル荷重関数（G 関数）の計算方法	4
3. 有機液体シンチレータを用いた数 MeV 以上の中性子に対する線量評価	5
3.1 計算	5
3.1.1 有機液体シンチレータの応答関数の計算	5
3.1.2 有機液体シンチレータの G 関数の計算	8
3.2 実験及び解析	9
3.2.1 連続エネルギー中性子場を用いた実験	9
3.2.2 単色エネルギー中性子場を用いた実験	10
3.2.3 準単色エネルギー中性子場を用いた実験	11
3.2.4 解析	13
3.3 結果	16
3.3.1 有機液体シンチレータの G 関数	16
3.3.2 G 関数による中性子線量評価	21
4. ^{10}B 入り有機液体シンチレータを用いた中性子モニタ用検出器の開発：	
広帯域対応中性子モニタ用検出器の開発(1)	24
4.1 実験及び解析	24
4.2 ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数及び G 関数の計算	26
4.2.1 ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数の計算	27
4.2.2 ^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数の計算	27
4.3 結果	27
4.3.1 ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数	27
4.3.2 ^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数	30
4.3.3 ^{10}B 入り液体シンチレータの中性子モニタ用検出器としての可能性検討	32
5. ^6Li ガラスシンチレータと有機液体シンチレータを組み合せた中性子検出器の開発(2)：	
設計・製作・特性試験	33
5.1 ^6Li ガラスシンチレータと有機液体シンチレータを組み合せた中性子検出器の 設計計算及び製作	33
5.1.1 SCINFUL-CG コードの概要	33
5.1.2 ^6Li ガラスシンチレータと液体シンチレータの最適配置の決定	34
5.1.3 ^6Li ガラスシンチレータの大きさの決定	37
5.1.4 設計した検出器の特性計算	38
5.1.5 複合型検出器の製作	39
5.2 特性試験	41

5.3 結果	42
5.3.1 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率とウェル型液体シンチレータの応答関数	42
5.3.2 複合型検出器の広帯域対応中性子モニタ用検出器化としての可能性検討	43
6. まとめ	45
謝辞	46
参考文献	47
付録-A	50
付録-B	59
付録-C	67

Contents

1. Introduction	1
2. Spectrum Weight Function (G-function) Method	3
2.1 Principle of a Spectrum Weight Function (G-function) Method	3
2.2 Calculation Method of the Spectrum Weight Function (G-function)	4
3. Dose Evaluation for Neutrons above Several MeV with an Organic Liquid Scintillator	5
3.1 Calculation	5
3.1.1 Calculation of Response Function of the Organic Liquid Scintillator	5
3.1.2 Calculation of G-function of the Organic Liquid Scintillator	8
3.2 Experiment and Analysis	9
3.2.1 Experiment in Continuous Energy Neutron Field	9
3.2.2 Experiment in Mono-energetic Neutron Field	10
3.2.3 Experiment in Quasi Mono-energetic Neutron Field	11
3.2.4 Analysis	13
3.3 Results	16
3.3.1 G-function of the Organic Liquid Scintillator	16
3.3.2 Neutron Dose Evaluation by the G-function	21
4. Development of Neutron Detector for Neutron Monitor with a Boron-loaded Scintillator	24
4.1 Experiment and Analysis	24
4.2 Calculation of the Response Function and the G-function of the Boron-loaded Scintillator	26
4.2.1 Calculation of the Response Function of the Boron-loaded Scintillator	27
4.2.2 Calculation of the G-function of the Boron-loaded Scintillator	27
4.3 Results	27
4.3.1 Response Function of the Boron-loaded Scintillator	27
4.3.2 G-function of the Boron-loaded Scintillator	30
4.3.3 Examination of Application as Detector for Neutron Monitor of the Boron-loaded Scintillator	32
5. Development of Neutron Detector Consisting of a ^6Li Glass Scintillator and an Organic Scintillator : Design, Fabrication and Experiment	33
5.1 Design and Fabrication of Neutron Detector Consisting of the ^6Li Glass Scintillator and the Organic Liquid Scintillator	33
5.1.1 Summary of SCINFUL-CG Code	33
5.1.2 Determination of Optimized Arrangement of the ^6Li Glass Scintillator and the Organic Liquid Scintillator	34
5.1.3 Size Determination of the ^6Li Glass Scintillator	37

5.1.4 Calculation of the Efficiency and Response Function of the Designed Detector	38
5.1.5 Product of Hybrid Neutron Detector	39
5.2 Experiment	41
5.3 Results	42
5.3.1 Efficiency of the ^6Li Glass Scintillator and the Response Function of the Welled-shaped Organic Liquid Scintillator	42
5.3.2 Examination of Application as Neutron Monitor of Hybrid Neutron Detector	43
6. Conclusions	45
Acknowledgment	46
References	47
Appendix-A	50
Appendix-B	59
Appendix-C	67

List of Figures

Fig. 3·1 Calculation geometry of SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes	6
Fig. 3·2 Response functions of the organic liquid scintillator, calculated by SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes	7
Fig. 3·3 Light output of proton and deuteron in SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes	8
Fig. 3·4 (a) Experimental arrangement, and (b) measuring electronic circuit in FRS	9
Fig. 3·5 Energy spectra of ^{252}Cf and $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ neutron sources	10
Fig. 3·6 (a) Experimental arrangement, and (b) measuring electronic circuit in FNL	11
Fig. 3·7 Components of the total and slow gates	11
Fig. 3·8 (a) Experimental arrangement, and (b) measuring electronic circuit in TIARA	12
Fig. 3·9 Energy spectra of 41 and 65MeV neutrons in TIARA	12
Fig. 3·10 Two-dimensional plot of rise-time versus light output using the measuring circuit in Fig. 3·4(b)	13
Fig. 3·11 Two-dimensional plot of the total component versus the slow component using the measuring circuit in Figs. 3·6(b) and 3·8(b)	14
Fig. 3·12 Light output of compton edge by ^{60}Co -gamma source	15
Fig. 3·13 Variation of the G-function for lower cut-off value of the response function	17
Fig. 3·14 (a) Variation of the G-function for various iteration frequencies, ITMAX, of a successive approximation method, and (b) Initial dose conversion coefficients and those reproduced by folding the G-function	18
Fig. 3·15 G-function calculated for ambient dose equivalent, $H^*(10)$	18
Fig. 3·16 Pulse height spectra measured by the organic liquid scintillator: (a) ^{252}Cf neutron source, and (b) neutron source of 15 MeV	21
Fig. 3·17 (a) Pulse height spectrum for 15 MeV neutrons, and (b) example of ambient dose equivalent evaluated by Equation (2·4) using the G-function	22
Fig. 4·1 Experimental arrangement in KEK	25
Fig. 4·2 Measuring electronic circuit in KEK	25
Fig. 4·3 Comparison of two-dimentional plots for the boron-loaded scintillator and the organic liquid scintillator	26
Fig. 4·4 Calculation geometry of the boron-loaded scintillator in SCINFUL-CG code	27
Fig. 4·5 Response functions for thermal energy, 250keV and 550keV neutrons	28
Fig. 4·6 Response function for 15MeV neutrons	29
Fig. 4·7 Response function for 41MeV neutrons	29
Fig. 4·8 Response function for 65MeV neutrons	29
Fig. 4·9 Ambient dose equivalent conversion coefficients folded by the G-function and	

the response function of the boron-loaded scintillator	31
Fig. 4·10 G·function of the boron-loaded scintillator	31
Fig. 5·1 Calculation geometry for determination of optimized arrangement of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator and the organic liquid scintillator	34
Fig. 5·2 Energy spectra for 1keV, 10keV, 100keV and 1MeV neutrons in the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator region calculated by MCNP·4B code	35
Fig. 5·3 Reaction rate of ${}^6\text{Li}(\text{n},\alpha){}^3\text{H}$ reaction for 1keV, 10keV, 100keV and 1MeV neutrons in the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator region by MCNP·4B code	36
Fig. 5·4 Response functions of the organic liquid scintillator region calculated by SCINFUL·CG code	36
Fig. 5·5 Calculation geometry to determine size of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator	37
Fig. 5·6 Variable of reaction rate in the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator region	38
Fig. 5·7 Calculation geometry of the hybrid detector by SCINFUL·CG and MCNP·4B codes	39
Fig. 5·8 Hybrid detector consisting of ${}^6\text{Li}$ glass scintillator and welled-shaped organic liquid scintillator	40
Fig. 5·9 Structure of the hybrid detector of Fig. 5·8	40
Fig. 5·10 Measuring electronic circuit of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator	41
Fig. 5·11 Pulse height spectrum of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator for 550keV neutrons in FNL	42
Fig. 5·12 Detection efficiency of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator	42
Fig. 5·13 Pulse height spectra measured by the welled-shaped scintillator: (a) 15MeV neutrons, and (b) 65MeV neutrons	43
Fig. 5·14 Detection efficiency of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator which was normalized by the ambient dose equivalent conversion coefficient	44

List of Tables

Table 3·1 Characteristic of an organic liquid scintillator	5
Table 3·2 Nuclear reactions considered in SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes	6
Table 3·3 Neutron energy group	8
Table 3·4 Light output in compton edge of each gamma energy in the organic liquid scintillator	15
Table 3·5 Light output of recoil proton produced by mono-energetic neutron	16
Table 3·6 G-function for $H^*(10)$ estimation in the energy range of 1 MeV to 100 MeV, which is applicable to the organic liquid scintillator of cylindrical shape of 12.7 cm in diameter and 12.7 cm in length	19
Table 3·7 Comparison of ambient dose equivalent, $H^*(10)$, by the G-function and the energy spectrum	23
Table 4·1 Characteristic of the boron-loaded scintillator	24
Table 4·2 Neutron energy group for response function calculation of the boron-loaded scintillator	30

This is a blank page.

1. 序論

核物理をはじめ、材料科学、生命科学等の様々な研究分野において、加速器の利用が増加し、それにともない、世界的に大強度陽子加速器施設の建設計画及び建設が相次いでいる。日本でも、日本原子力研究所(原研)と高エネルギー加速器研究機構(高エネ研)共同の「大強度陽子加速器プロジェクト」¹⁾において、原研東海研究所に世界最先端の加速器施設を設置するため、2001年度から建設が開始された。

大強度陽子加速器施設においては、加速された陽子がターゲット、加速器機器等に入射した際に、標的核の核破碎反応により発生する種々の高エネルギー放射線及び誘導放射性核種が、作業者等の被ばく源となる。特に、二次粒子として発生する高エネルギー中性子は、極めて透過力が高いため、加速器運転時の施設内外において主な被ばく源となる。そして、「大強度陽子加速器プロジェクト」で建設される陽子エネルギー数十 GeV オーダーの加速器施設では、遮へい体の外側における中性子による線量は、その 70%以上が熱エネルギーから 100MeV までの中性子によってもたらされる²⁾。したがって、作業者及び公衆に対する安全を確保するためには、上記のエネルギー範囲の中性子線量を適切にモニタリングすることが、極めて重要である。

現在、中性子モニタには、Andersson and Braun 型³⁾、Leake 型⁴⁾、LB6411 型⁵⁾、WENDI⁶⁾等のレムカウンタが広く使われている。しかし、これらのレムカウンタの応答特性は、中性子エネルギーが eV～keV の領域において、線量を過大に評価する一方、10MeV を超えると、感度が急激に低下する。そのため、これらのレムカウンタは、高エネルギー加速器施設において、中性子線量を適切にモニタリングすることはできない。これに対し、レムカウンタの減速材中に、鉛やタングステンを組み込み、ここで二次中性子を発生させることにより、10MeV 以上の中性子に対する感度を向上させた LINUS⁷⁾、WENDI-II⁸⁾と呼ばれるレムカウンタが開発されている。しかし、これらのレムカウンタでも、数十 MeV 以上の中性子に対する感度はなお不十分であり、大強度陽子加速器施設で必要とされる、広いエネルギー範囲において優れた応答特性及び十分な感度を有する中性子モニタは殆どない。

そこで、本研究では、熱エネルギーから 100MeV の中性子に対して、線量測定が可能な新しいタイプの中性子モニタ用検出器の開発を行った。検出器には、高エネルギー中性子のスペクトル測定に利用されている有機液体シンチレータに着目し、さらに、これに ¹⁰B を含有させた有機液体シンチレータ、⁶Li ガラスシンチレータを組み合わせ、熱中性子まで対応可能な線量測定特性の改良を行った。本章の序論に続き、第 2 章では、検出器の応答関数から線量を直接評価するために用いるスペクトル荷重関数(G 関数)法の原理^{8,10)}、シンチレーション検出器への適用及び計算方法について述べる。第 3 章では、有機液体シンチレータに対して 750keV から 100MeV までの G 関数を計算するとともに、この方法を用いて数種類の中性子場において線量を測定し、本方法の適用性を実証した結果について述べる。第 4 及び 5 章では、第 3 章で開発した線量測定法を基に、測定エネルギー範囲を熱中性子まで拡張するための改良について述べる。第 4 章では、(n, α)反応により、低エネルギー中性子を検出する ¹⁰B を含有させた有機液体シンチレータ¹¹⁾を用い、その応答関数を計算及び実験に基づき作成するとともに、G 関数を計算し、線量測定特性を評価した。第 5 章では、低エネルギー中性子を測定する ⁶Li ガラスシンチレータを、有機液体シンチレータと組み合わせる

ことにより、熱エネルギーから 100MeVまでの線量を測定する方法を考案した。ここでは、2つの検出器の最適な組み合わせ形状を計算により解析し、それに基づき検出器を製作し、その特性を評価した。第6章では、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

2. スペクトル荷重関数法

中性子検出器の波高分布は、検出器の応答関数と中性子エネルギースペクトルを掛け合わせ、全エネルギー領域で積分した量である。任意の放射線場の中性子線量は、中性子検出器で測定した波高分布を、その検出器の応答関数を用いてアンフォールディングし、その結果得られるエネルギースペクトルに線量換算係数を掛けて全エネルギー領域において積分することにより評価できる。しかし、この線量評価法は、検出器の波高分布と応答関数を用いてアンフォールディングを行う複雑な作業を必要とする。これに対し、検出器の波高分布から直接線量に変換できるある関数(以下、この関数をスペクトル荷重関数と言う)があれば、中性子線量は、検出器の波高分布から直接評価できる。以下に、このスペクトル荷重関数法の原理及び計算方法について述べる。

2.1 スペクトル荷重関数法の原理

中性子検出器により測定した波高分布は、(2-1)式で表される。

$$P(E_R) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} R(E, E_R) \cdot \phi(E) dE \quad (2-1)$$

ここで、 $R(E, E_R)$ は検出器の応答関数、 $\phi(E)$ はエネルギースペクトルである。任意の放射線場の中性子線量 H は、この波高分布を検出器の応答関数を用いてアンフォールディングして求めたエネルギースペクトルより、次式で計算される。

$$H = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \phi(E) \cdot h(E) dE \quad (2-2)$$

ここで、 $h(E)$ は単位フルエンスあたりの線量換算係数(以下、線量換算係数)である。ここで、検出器の応答関数と線量換算係数を関連付ける関数を $G(E_R)$ とすると、線量換算係数 $h(E)$ は、応答関数 $R(E, E_R)$ と $G(E_R)$ を用いて、(2-3)式のように書くことができる。

$$h(E) = \int_{E_{R,min}}^{E_{R,max}} R(E, E_R) \cdot G(E_R) dE_R \quad (2-3)$$

そして、(2-3)式を(2-2)式に代入すると、中性子線量 H は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} H &= \int_{E_{min}}^{E_{max}} \left(\int_{E_{R,min}}^{E_{R,max}} R(E, E_R) \cdot G(E_R) dE_R \right) \cdot \phi(E) dE \\ &= \int_{E_{R,min}}^{E_{R,max}} \left(\int_{E_{min}}^{E_{max}} R(E, E_R) \cdot \phi(E) dE \right) \cdot G(E_R) dE_R \\ &= \int_{E_{R,min}}^{E_{R,max}} P(E_R) \cdot G(E_R) dE_R \end{aligned} \quad (2-4)$$

つまり、(2-3)式で定義した $G(E_R)$ は、検出器の波高分布 $P(E_R)$ と中性子線量 H を関連付けるスペクトル荷重関数(以下、G 関数)で、この G 関数を用いれば、中性子エネルギースペクトルが未知の場合でも検出器の波高分布から中性子線量を直接評価できる。また、(2-3)式で定義したように、検出器の応答関数が決まっていれば、線量換算係数 $h(E)$ が変わった場合でも、 $G(E_R)$ を再評価すること

により、検出器の構造を変えずに $h(E)$ の更新に対応した線量評価が可能という大きな利点も持つている。

2.2 スペクトル荷重関数（G 関数）の計算方法

(2-3)式で定義した $G(E_R)$ は、次のように書き直せる。

$$h = R^t \cdot G \quad (2-5)$$

R^t は行列形式の応答関数で、 G は、検出器の応答関数 R^t と線量換算係数 h を逆行列で解くアンフォールディング法¹²⁾により得ることができる。 G を求めるための(2-5)式のアンフォールディングでは、放射化検出器のアンフォールディングコードである SAND-II¹³⁾で用いられる逐次近似法を用いた。この方法では、最初に初期値 G_j^0 を仮定し、 G 関数の補正項である C_{kj} を用いて、繰り返し計算を行い、適当な収束条件を満たす k 番目の G_j^k を計算する。例えば、 k 番の逐次近似での値を G_j^k とする。また、逐次近似の重み行列は、次式で求める。

$$\begin{aligned} W_{i,1}^{(k)} &= \frac{(5R_{i,1}^t \cdot G_1^{(k)} + 2R_{i,2}^t \cdot G_2^{(k)} - 5R_{i,3}^t \cdot G_3^{(k)})}{6R_{i,j}^t \cdot G_j^{(k)}} \quad (j=1) \\ W_{i,j}^{(k)} &= \frac{(R_{i,j}^t \cdot G_1^{(k)} + R_{i,j-1}^t \cdot G_{j-1}^{(k)})}{2R_{i,j}^t \cdot G_j^{(k)}} \quad (j=2, m-1) \\ W_{i,m}^{(k)} &= \frac{(5R_{i,m}^t \cdot G_m^{(k)} + 2R_{i,m-1}^t \cdot G_{m-1}^{(k)} - 5R_{i,m-2}^t \cdot G_{m-2}^{(k)})}{6R_{i,j}^t \cdot G_j^{(k)}} \quad (j=m) \end{aligned} \quad (2-6)$$

さらに、 G 関数の補正項 C_{kj} を、(2-6)式の重み行列を用いて式で表すと、(2-7)式のように書ける。

$$C_j^{(k)} = \frac{\sum_i W_{i,j}^{(k)} \cdot \ln(h_i / h_i^{(k)})}{\sum_i W_{i,j}^{(k)}} \quad (2-7)$$

ここで、 h_i は線量換算係数である。 $k+1$ 番目の G_j^{k+1} 値は、(2-7)式の C_{kj} を用いて次式により求められる。

$$G_j^{k+1} = G_j^k \cdot \exp(C_j^k) \quad (2-8)$$

(2-8)式は、あらかじめ与えた初期値 G_j^0 を用いて、適当な収束条件を満たすまで繰り返し計算を行い、 $k+1$ 番目の G を計算する。本計算で設定した初期値 G_j^0 は 1 である。以上に述べた方法による G 関数の計算のプログラムを、付録・A に示す。

3. 有機液体シンチレータを用いた数 MeV 以上の中性子に対する線量評価

本章の目的は、中性子スペクトロメータ用有機液体シンチレータを用いて、数 MeV 以上の中性子に対する線量測定法を開発し、有機液体シンチレータの中性子モニタ用検出器としての可能性を実証することである。そこで、有機液体シンチレータに対して、G 関数を計算するとともに、幾つかの中性子場で波高分布を測定し、この波高分布と G 関数を用いて、各中性子場の中性子線量を評価した。そして、その結果により、中性子モニタ用検出器としての可能性を実証したので、これについて述べる。

3.1 計算

3.1.1 有機液体シンチレータの応答関数の計算

中性子線量を評価するための検出器は、BICRON 社の BC501A と呼ばれる有機液体シンチレータ(以下、液体シンチレータ)を用いた。これは Nuclear Enterprise 社の NE213 型に相当するもので、有機成分の中に含まれている水素と中性子の弾性散乱により生成する反跳陽子、炭素と中性子の多体崩壊反応により生成する荷電粒子によるシンチレーションを検出することにより、高速中性子を測定できる。この液体シンチレータは、水素含有率が非常に高いため、高検出効率を持ち、また、中性子と γ 線の弁別能力が優れるなどの長所を持っている。Table 3-1 に、液体シンチレータの特性を示す。一般的に液体シンチレータは、測定したい最大エネルギーの中性子により、水素の弾性散乱から生成する反跳陽子の液体シンチレータ中での飛程を基に、その大きさを決める。本研究で用いた液体シンチレータは、直径 12.7cm、長さ 12.7cm のもので、この大きさは、約 117MeV の陽子の飛程に相当し、百数十 MeV の中性子まで測定可能で、また、検出器の中での光の減衰も問題にならない。

Table 3-1 Characteristic of an organic liquid scintillator

Scintillator	Density [g cm ⁻³]	Ratio of atom density, H/C	Light output [% Anthracene]	Decay time [nsec]	Wave length of max emission [nm]
NE213	0.874	1.213	78	3.7	425
BC501A	0.874	1.212	78	3.2	425

第 2.1 節で述べたように、液体シンチレータの G 関数を求めるためには、液体シンチレータの応答関数が必要である。応答関数は、実測値により求めるのが理想的たが、実際に実験に利用できる中性子エネルギーは限られているために、ここでは、計算コードを用いて求めた。一般的によく使われている液体シンチレータの応答関数計算コードには、SCINFUL コード¹⁴⁾、SCINFUL-R コード¹⁵⁾及び CECIL コード¹⁶⁾がある。これらは、点線源からの中性子を液体シンチレータに入射させ、乱数により液体シンチレータ中での反応位置を決め、水素及び炭素との全反応断面積から反応する元素を決定し、反応により生成した 2 次粒子の輸送計算を行うモンテカルロコードである。計

算コードの中でも、SCINFUL-R コードは、SCINFUL コードの一部の断面積や重陽子の発光量データを実験による実測値を基に、更新したものである。Table 3-2 には、各計算コードで扱っている核反応の種類と、計算可能な中性子上限値エネルギーを示した。

まず、液体シンチレータの G 関数計算用の応答関数を計算する前に、得られる応答関数を相互比較するために、各々の計算コードを用いて、応答関数を計算した。Fig. 3-1 に応答関数の計算体系を、Fig. 3-2 に各計算コードで計算した応答関数を示す。Fig. 3-2 のように、同じ体系で計算した応答関数にもかかわらず、各計算コードによって多少の違いが見られ、中性子エネルギーが高くなるにつれ、最大発光量付近の反跳陽子端のズレがはっきり見える。これは、各コードで考慮している陽子や重陽子の発光量の違いによると考えられる。Fig. 3-3 には、各コードで用いている陽子や重陽子の発光量を示した。

Fig. 3-2 のように、各計算コードによる応答関数の違いは、計算される液体シンチレータの G 関数に大きく影響し、最終的に評価される中性子線量評価にまで影響する。以上の検討より、液体シンチレータの G 関数計算用応答関数は、80MeV 以下では実測値に基づき陽子や重陽子の発光量データを更新した SCINFUL-R コードを用い、80MeV 以上では CECIL コードを用いて計算した。Table 3-3 は、SCINFUL-R コードと CECIL コードにより計算した応答関数の中性子エネルギー群構造を示す。

Table 3-2 Nuclear reactions considered in SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes

	SCINFUL, SCINFUL-R	CECIL
Considered reactions	H(n,p), C(n,n), C(n,d), C(n,2n), C(n,p), C(n,np), C(n,n'), C(n, ³ He), C(n,α), C(n,n'3α), C(n,xα) reactions	H(n,p), C(n,n), C(n,2n), C(n,np), C(n,n'3α), C(n, α), C(n,xα) reactions
Upper energy limit	up to 80MeV	up to several GeV

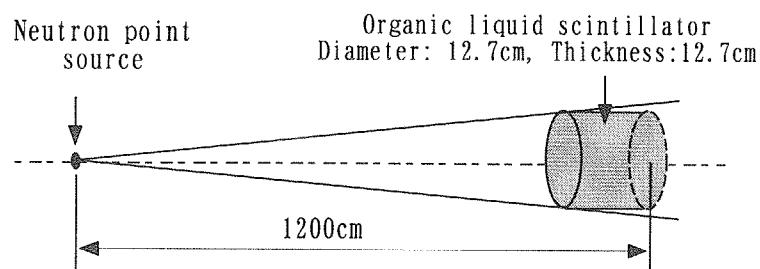


Fig. 3-1 Calculation geometry of SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes

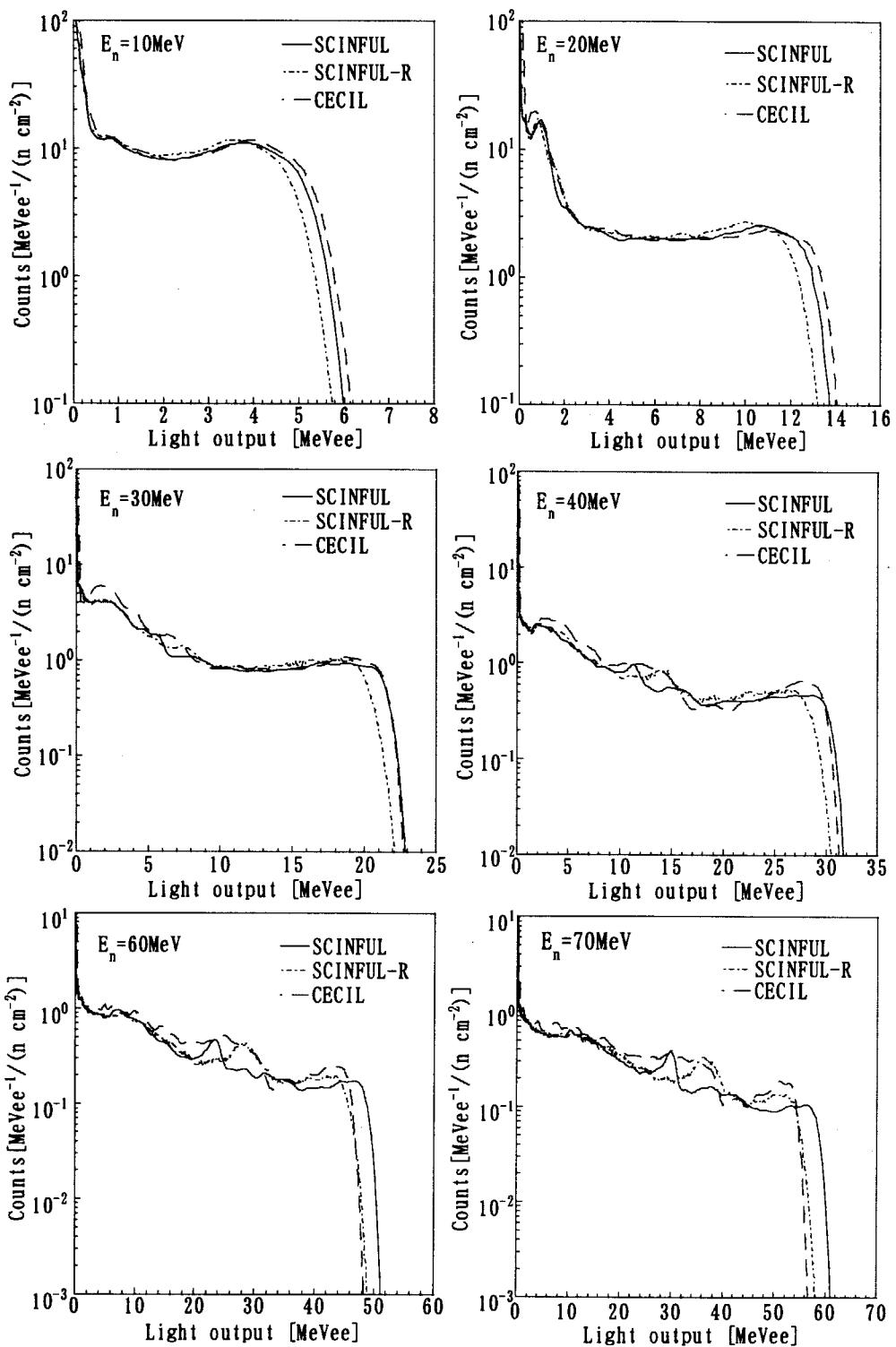


Fig. 3-2 Response functions of the organic liquid scintillator, calculated by SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes

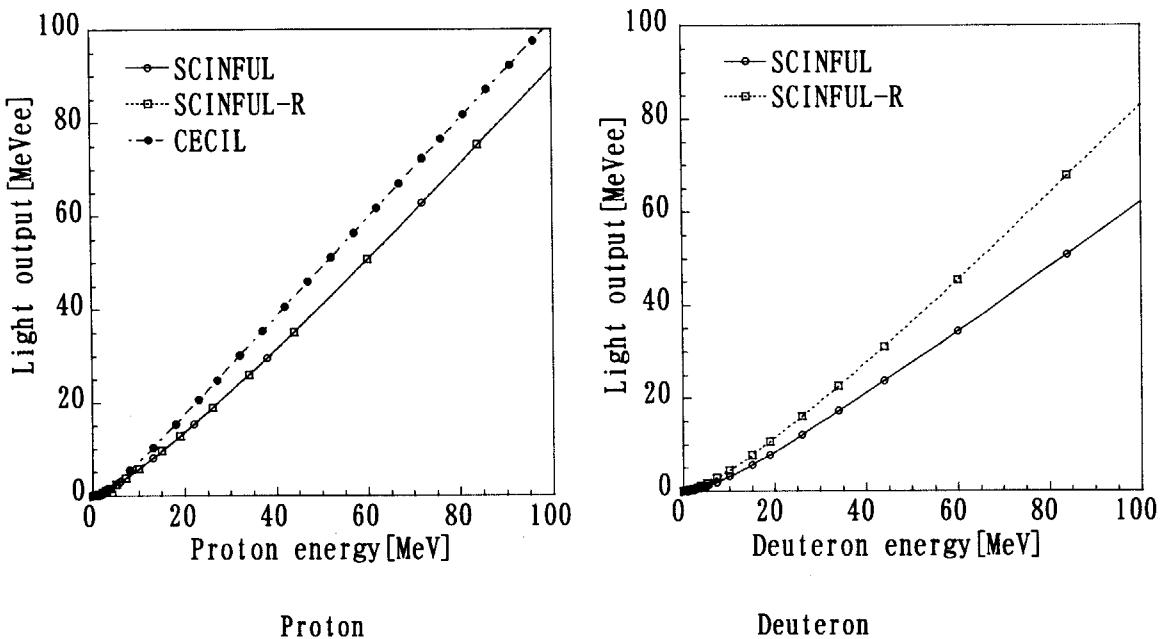


Fig. 3-3 Light output of proton and deuteron in SCINFUL, SCINFUL-R and CECIL codes

Table 3-3 Neutron energy group

Neutron energy	Interval of energy
~44MeV	1MeV
~68MeV	2MeV
~80Mev	4MeV
~100MeV	5MeV

3.1.2 有機液体シンチレータの G 関数の計算

液体シンチレータの G 関数は、SCINFUL-R コードと CECIL コードにより計算した応答関数と周辺線量当量換算係数を用い、(2-5)式の逐次近似によるアンフォールディング法により求めた。線量換算係数には、ICRP Publ. 74¹⁷⁾の周辺線量当量換算係数を用いた。G 関数を(2-5)式により計算するとき、応答関数のエネルギー下限値及び逐次近似の繰り返し回数の選択は、G 関数の収束及び振動に大きく影響する。したがって、これらの最適値を検討する必要がある。応答関数のエネルギー下限値の影響に関しては、エネルギー下限値が 250、500、750keV での G 関数の変化を検討した。また、逐次近似の繰り返し回数が 10 回から 50 回の場合の G 関数の変化を検討した。

3.2 実験及び解析

G 関数による線量評価及び計算コードにより求めた液体シンチレータの応答関数の再現性を確認するために、液体シンチレータの波高分布をエネルギースペクトルが既知の幾つかの中性子場で測定した。実験は、連続エネルギースペクトルの ^{252}Cf 及び $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ の RI 中性子線源に関しては原研・放射線標準施設棟¹⁸⁾(Facility of Radiation Standard:FRS)の速中性子校正場で、8keV～15MeV の単色中性子源に関しては東北大学・高速中性子実験室(Fast Neutron Laboratory: FNL)¹⁹⁾で、40MeV～90MeV の準単色中性子源に関しては原研・高崎研(Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application: TIARA)²⁰⁾で行った。

3.2.1 連続エネルギー中性子場を用いた実験

原研・FRS では、 ^{252}Cf と $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ の RI 中性子線源を用いて液体シンチレータの波高分布測定を行った。Fig. 3-4(a)及び(b)に、FRS の実験体系及び測定回路を示す。波高分布は、線源から 100cm 離れた位置に液体シンチレータを置いて測定した。 ^{252}Cf と $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ 線源の中性子放出率は、それぞれ、 $4.05\text{E}+05 (\text{n sec}^{-1})$ と $2.38\text{E}+06 (\text{n sec}^{-1})$ である。検出器の信号を処理するための測定回路は、Fig. 3-4(b)のとおりで、検出器のダイノードの信号は、発光量と減衰時間を決めるパルス波高・パルス波形の情報として用いられ、PA(Pre Amplifier)で電荷積分し、DLA(Delay Line Amplifier)で增幅積分される。DLA からの信号は 2 つに分け、1 つは PSA/T-SCA (Pulse-Shape Analyzer/ Timing-Single Channel Analyzer) と TAC/SCA (Time-to-Amplitude Converter/ Single Channel Analyzer) を通して信号の立ち上がり時間を波高に変換、もう 1 つの信号とタイミングを合せて、ADC (Analog-to-Digital Converter) に送った。その後、2 次元 MCA システムを用いてデータを収集した。

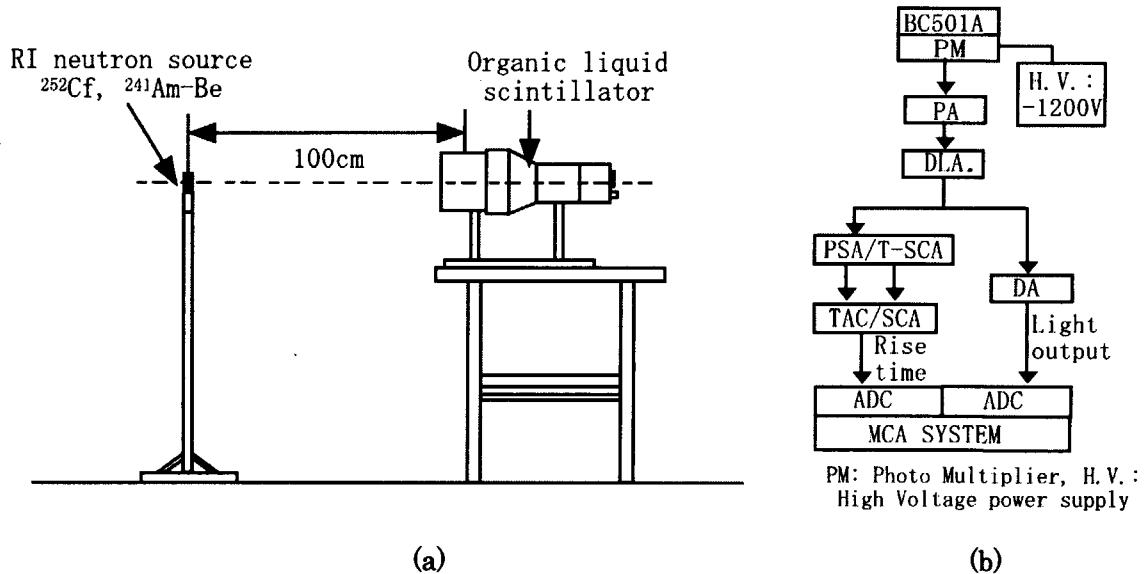


Fig. 3-4 (a) Experimental arrangement, and (b) measuring electronic circuit in FRS

Fig 3-5 に、 ^{252}Cf と $^{241}\text{Am-Be}$ 中性子線源から 100cm 離れた位置でのエネルギースペクトルを示す。FRS 中性子場の線量は、このエネルギースペクトルと周辺線量当量換算係数を用いて、(2-2) 式により評価した。そして、その結果は G 関数による線量評価結果と比較し、液体シンチレータの G 関数による中性子線量評価方法の信頼性の確認に用いた。

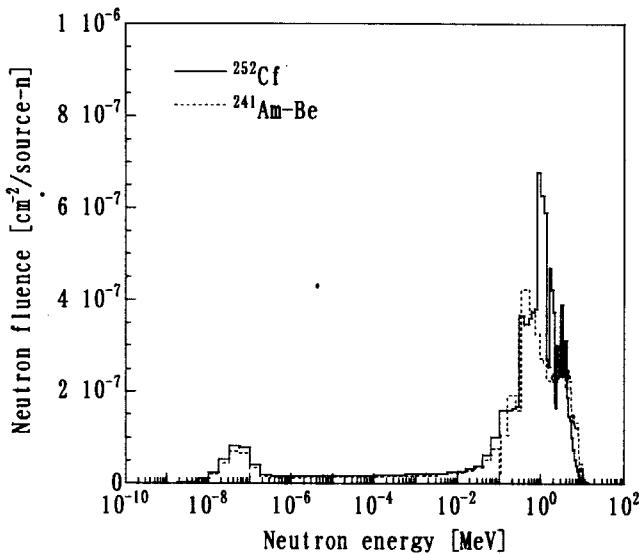


Fig. 3-5 Energy spectra of ^{252}Cf and $^{241}\text{Am-Be}$ neutron sources

3.2.2 単色エネルギー中性子場を用いた実験

東北大大学・FNLにおいては、 $^3\text{H}(\text{p},\text{n})$ と $^3\text{H}(\text{d},\text{n})$ 反応で発生する 2MeV と 15MeV の単色中性子源を用いて、波高分布を測定した。実験体系及び測定回路を、Fig. 3-6 に示す。波高分布は、ターゲットから 180cm～360cm 離れた位置に液体シンチレータを置いて測定した。ターゲットで発生した中性子束の絶対値は、核分裂電離箱と反跳陽子比例計数管を用いて求めた。液体シンチレータからの信号は、Fig. 3-6(b)の回路により処理し、データを収集した。まず、検出器のアノード信号は 3 つに分けて、1 つは CFD(Constant Fraction Discriminator)を通して、パルス波高に依存しないロジック信号に変換した。残り、2 つの信号は、DLY(Delay)を通して信号を遅らせて、粒子弁別を行うために、Fig. 3-7 のように、信号の全電荷を積分(total component: TOTAL)した TOTAL 成分と、減衰時間の遅い電荷成分だけを積分(slow component: SLOW)した SLOW 成分をロジック信号と一緒に、電荷積分型 ADC に入力した。そして、電荷積分型 ADC のデータは、KODAQ データ収集システム(the Kakuken On-line Data Acquisition System)²¹⁾により収集した。

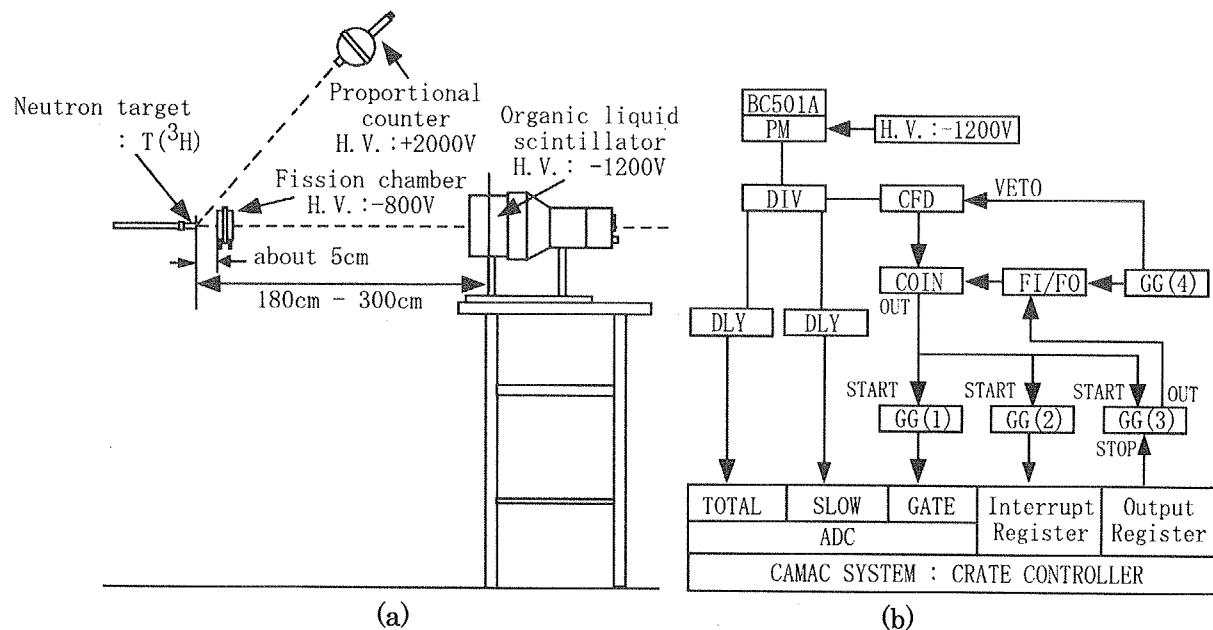


Fig. 3-6 (a) Experimental arrangement, and (b) measuring electronic circuit in FNL

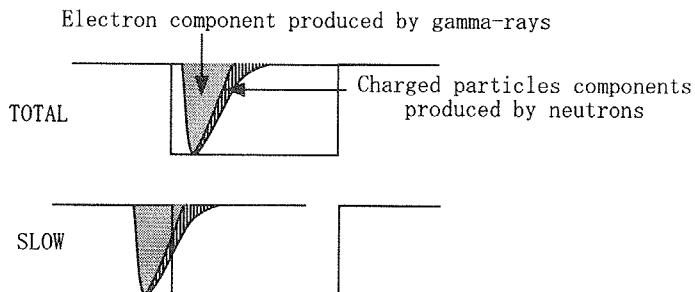


Fig. 3-7 Components of the total and slow gates

3.2.3 準単色エネルギー中性子場を用いた実験

Fig. 3-8 に、TIARA の実験体系及び測定回路を示す。TIARA では、 $^7Li(p,n)^7Be$ 反応で発生する 41 と 65MeV 準単色中性子の波高分布とエネルギースペクトルを測定するために、Fig. 3-8(a)のように、液体シンチレータを、Li ターゲットから約 10m 離れた位置に置いた。Li ターゲットで生成したピーク中性子束の絶対値は、PRT(Proton Recoil Telescope)²²⁾により評価した校正值を基に、中性子フルエンスモニタである ^{238}U と ^{232}Th 核分裂計数管の測定値の相対値を用いて算出した。ピーク中性子束の絶対値を算出するために、核分裂計数管の測定は、41 と 65MeV の実験中に行つた。

測定回路は、Fig. 3-8(b)に示すように、FNL での実験と同じである。しかし、中性子飛行時間法 (TOF 法)によりエネルギースペクトルを測定するために、検出器のアノードからの信号をスタート、加速器のビームチョッパのトリガーをストップ信号として、TDC(Time-to-Digital converter)に送り、TOF 法によるエネルギースペクトルを測定した。電荷積分型 ADC 及び TDC からのデータ収

集には、KODAQ データ収集システムを用いた。

Fig. 3-9 に、TOF 法により測定した 41 と 65MeV 準単色中性子のエネルギースペクトルを示す。このエネルギースペクトルを用いて中性子場の線量を評価し、その結果を、G 関数による線量評価法の信頼性の確認に用いた。

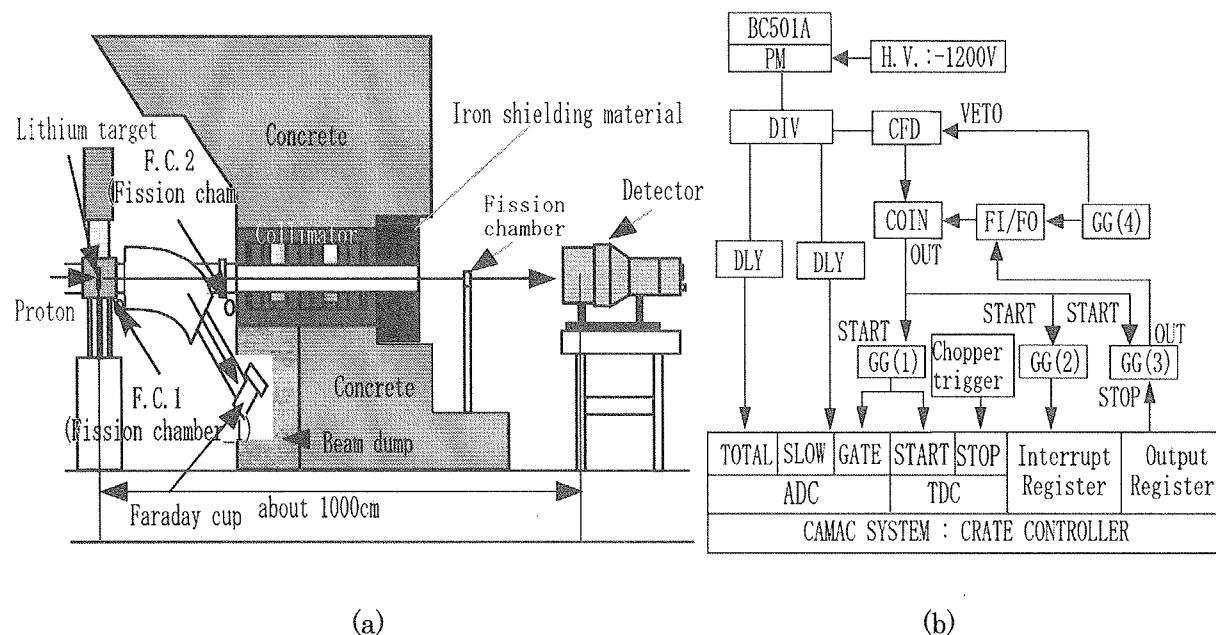


Fig. 3-8 (a) Experimental arrangement, and (b) measuring electronic circuit in TIARA

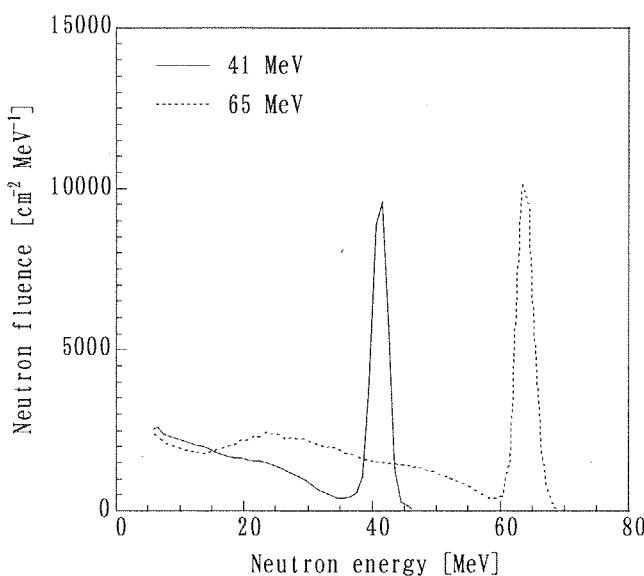


Fig. 3-9 Energy spectra of 41 and 65 MeV neutrons in TIARA

3.2.4 解析

(1) 中性子— γ 線弁別 (n- γ 弁別)

液体シンチレータは、中性子以外にも γ 線に対して感度があり、中性子による波高分布を求めるためには、 γ 線の寄与を除く必要がある。液体シンチレータの中で、 γ 線はコンプトン散乱及び電子対生成反応により電子を生成し、この電子によるシンチレーションの減衰時間は数 nsec と短い。一方、中性子は、水素及び炭素との弹性散乱などにより陽子や重陽子等の荷電粒子を生成し、これら荷電粒子によるシンチレーションの減衰時間は百数十 nsec で、電子の減衰時間と比べて長い。液体シンチレータの中性子成分と γ 成分の弁別(n- γ 弁別)は、この減衰時間差を用いて行った。

FRS での実験のように、検出器のダイノード信号を Fig. 3-4(b)に示す測定回路によりデータを収集した場合、電子による発光した成分と荷電粒子による発光した成分を DLA で積分した信号の波高の違いを用いて n- γ 弁別を行った。Fig. 3-10 は、FRS で測定した発光量と信号の立ち上がり時間の 2 次元分布である。n- γ 弁別は、低チャンネル側に見られる電子による発光成分を除くことにより行った。また、FNL 及び TIARA での実験のように、検出器のアノードからの信号を Fig. 3-6(b)及び Fig. 3-8(b)に示す測定回路でデータを収集した場合は、信号の全電荷を積分した TOTAL 成分と、減衰時間の遅い電荷成分だけ積分した SLOW 成分を用いて n- γ 弁別を行った。Fig. 3-11 は、KODAQ データ収集システムにより得られた TOTAL 成分と SLOW 成分の 2 次元分布である。TOTAL 成分に対して SLOW 成分が多い方が、減衰時間の遅い中性子による荷電粒子成分であり、この領域を取り出すことにより、n- γ 弁別を行った。

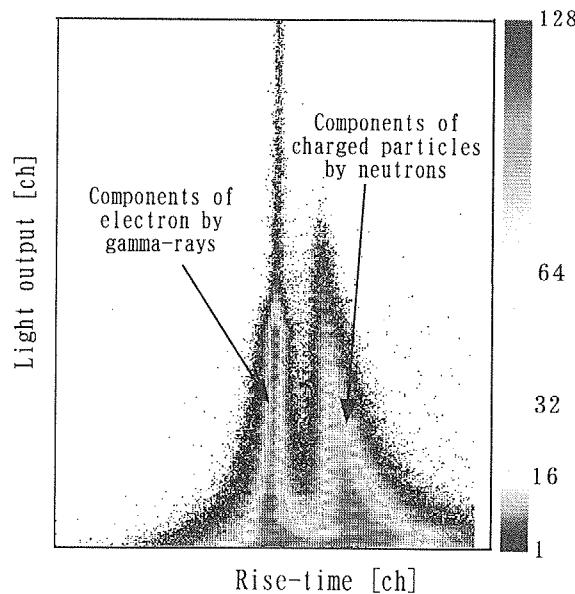


Fig. 3-10 Two-dimensional plot of rise-time versus light output using the measuring circuit in Fig. 3-4(b)

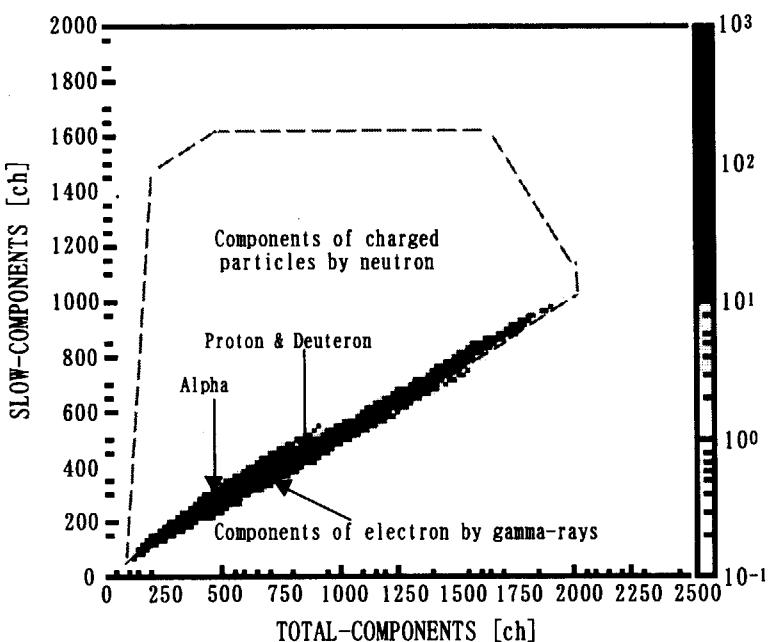


Fig. 3-11 Two-dimensional plot of the total component versus the slow component using the measuring circuit in Figs. 3-6(b) and 3-8(b)

(2) 発光量校正

γ 線による発光量校正

液体シンチレータ中での電子による発光は、125keV以上において直線性を持つ。しかし、反跳陽子及び α 粒子のような荷電粒子による発光は、同じエネルギーの電子より小さく、また、高い荷電粒子エネルギーにおいて非直線性を持っている。液体シンチレータの発光量単位の種類は、幾つかあるが、1MeV電子による発光量に相当する MeV electron equivalent (以下 MeVee と言う)が広く用いられている。本研究では、この MeVee を発光量単位として用いた。

波高分布に対する発光量の校正是、 ^{137}Cs , ^{60}Co , $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ 線源からの γ 線を用いて行った。 γ 線のコンプトン散乱により生成される電子エネルギーは、(3-1)式で計算できる。

$$E_e = \frac{(1 - \cos \theta) E_\gamma^2}{mc^2 + (1 - \cos \theta) E_\gamma} \quad (3-1)$$

ここで、 E_γ は γ 線の入射エネルギー、 mc^2 は電子の静止エネルギー(0.511MeV)、 θ は γ 線の散乱角である。さらに、電子の最大エネルギーは、(3-2)式の通りである。

$$E_{e_max} = \frac{2E_\gamma^2}{mc^2 + 2E_\gamma} \quad (3-2)$$

この式により、入射した γ 線によるコンプトン端エネルギーが算出できるが、波高分布におけるコンプトン端エネルギーの位置決定は、液体シンチレータの分解能に依存する。

現在、広く用いられている校正方法として、Fig. 3-12 のように、測定スペクトルのカウントが最大である見かけのコンプトン端 L_{max} に対し、その半分のカウントを持つ位置 $L_{1/2}$ を実際のコンプトン端エネルギーとする方法²³⁾がある。ここでは、この方法を用いて波高分布の発光量校正を行った。Table 3-4 に、校正に用いた γ 線源のエネルギーとコンプトン端 $L_{1/2}$ チャンネルでの発光量を示す。

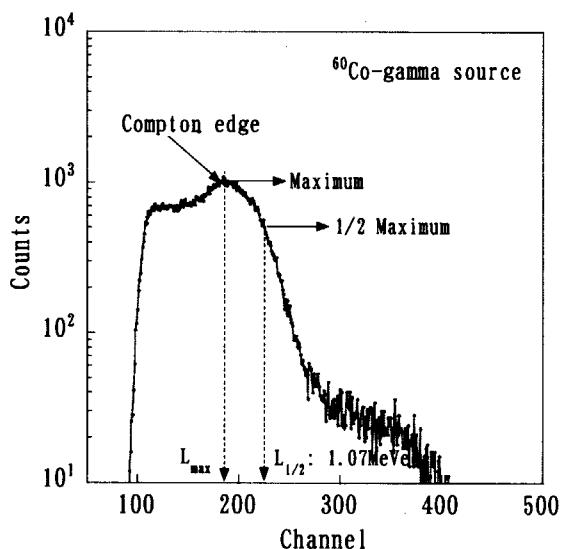


Fig. 3-12 Light output of compton edge by ^{60}Co -gamma source

Table 3-4 Light output in compton edge of each gamma energy
in the organic liquid scintillator

Gamma ray source	Energy[MeV]	Light output[MeVee]
^{137}Cs	0.662	0.493
^{60}Co	1.173, 1.333	1.074
$^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$	4.439	4.331

中性子の反跳陽子端による校正

$^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ の γ 線による発光量は、約 8.4MeV 陽子の発光量に相当する。そのため、数十 MeV 中性子の波高分布に関して γ 線による発光量校正のみでは、非常に大きな誤差が生じる。本研究では、Verbinski²⁴⁾や秦、上蓑ら^{25,26)}が、Birks の式、(3-3)式²⁷⁾に基づいて計算した単色中性子による反跳陽子の発光量を用いて高発光量側の校正を行った。

$$L(E_p) = \int_0^{E_p} \frac{S}{1 + kB \cdot dE/dx} dE \quad (3-3)$$

ここで、 E_p は陽子エネルギー、 $L(E_p)$ は発光量、 S はシンチレーション効率、 k は消光率、 B は定数、 dE/dx は陽子の阻止能である。

Table 3-5 に、(3-3)式を用いて計算された単色中性子による反跳陽子の 40MeV までの発光量を示す。表中の反跳陽子エネルギーは、中性子群の中央値とし、各陽子エネルギーでの発光量は、反跳陽子の最大カウントに f をかけた値を持つチャンネルでの発光量を意味する。 f は、中尾ら²⁸⁾により、SCINFUL コードを用いて求められた値である。

Table 3-5 Light output of recoil proton produced by mono-energetic neutron

Neutron energy [MeV]	Recoil proton energy [MeV]	$f^{28)}$	Light output ²⁵⁾ [MeVee]
09-10	9.5	0.30	4.94
19-20	19.5	0.34	12.6
29-30	29.5	0.40	20.9
39-40	39.5	0.43	29.7
48-50	49	0.46	
60		0.5	

発光量の校正式

以上の発光量の校正值を用いて各チャンネルに発光量の絶対値を与えた。また、ADC のゼロ点と最小二乗法によるフィッティングにより、(3-4)式の定数 a 及び b を求めて発光量校正式を算出する。

$$L[\text{MeVee}] = a \cdot x[\text{channel}] + b \quad (3-4)$$

3.3 結果

3.3.1 有機液体シンチレータの G 関数

(2-5)式により直径 12.7cm、長さ 12.7cm の液体シンチレータの G 関数を計算するとき、応答関数のエネルギー下限値及び繰り返し回数は、G 関数の収束性及び振動に深く関係する。Fig. 3-13 に、応答関数のエネルギー下限値が 250、500、750keV での G 関数の変化を示す。エネルギー下限値が 250、500keV のように低いと、アンフォールディングの重みが小さくなり、逐次近似への収束性が悪くなり、G 関数に振動の傾向が見られる。そこで、応答関数のエネルギー下限値は、G 関数に振動が見られない 750keV とした。

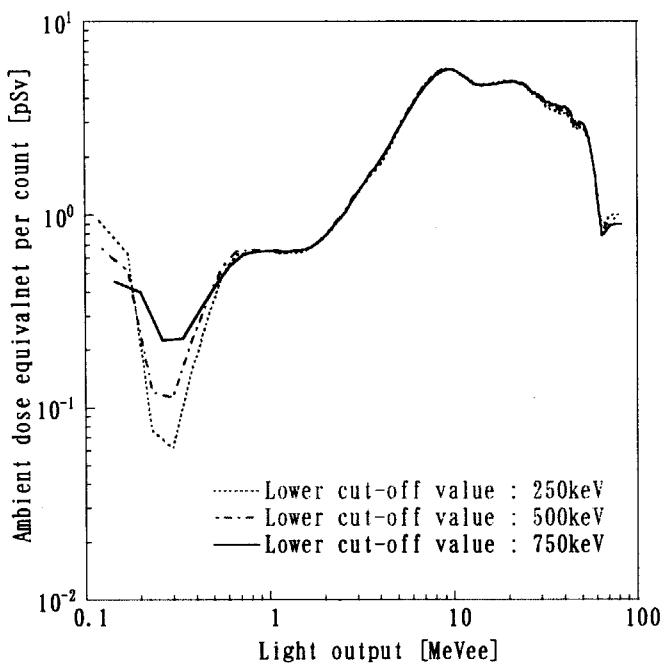


Fig. 3-13 Variation of the G-function for lower cut-off value of the response function

Fig. 3-14(a)及び(b)に、逐次近似の繰り返し回数(ITMAX)によるG関数の変化と、ITMAXが10回～50回の場合におけるG関数と応答関数のフォールディングにより再現した周辺線量当量換算係数を示す。ITMAXが10回の場合、逐次近似の収束値は41%である。また、G関数のフォールディングによる線量換算係数は、ICRP Publ. 74の値に対して約14%の差で再現している。ITMAXが20回の場合、逐次近似の収束値は22%で、線量換算係数も11%まで再現している。しかし、ITMAXが20回以上になると、逐次近似の収束値、線量換算係数の再現度は段々良くなるが、一方で、G関数に振動の傾向が現われてしまう。

以上の検討結果より、液体シンチレータのG関数として、応答関数のエネルギー下限値が750keV、ITMAXが20回で計算したものを採用した。Fig. 3-15及びTable 3-6に、周辺線量当量、 $H^*(10)$ 評価用G関数及びその数値データを示す。

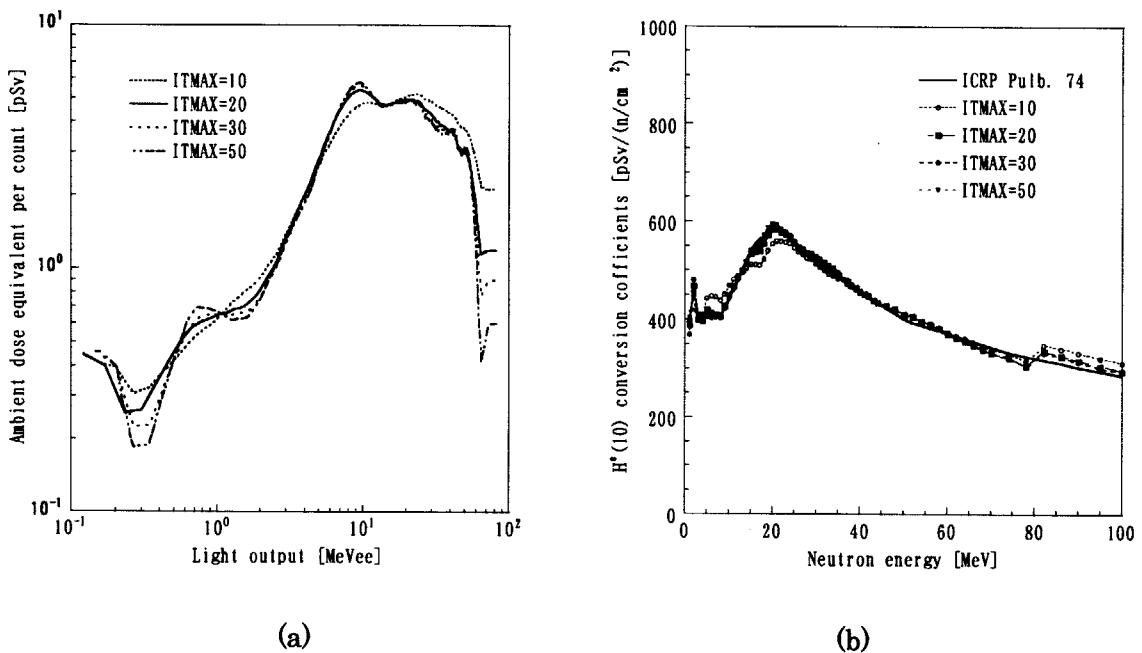


Fig. 3-14 (a) Variation of the G-function for various iteration frequencies, ITMAX, of a successive approximation method, and (b) Initial dose conversion coefficients and those reproduced by folding the G-function

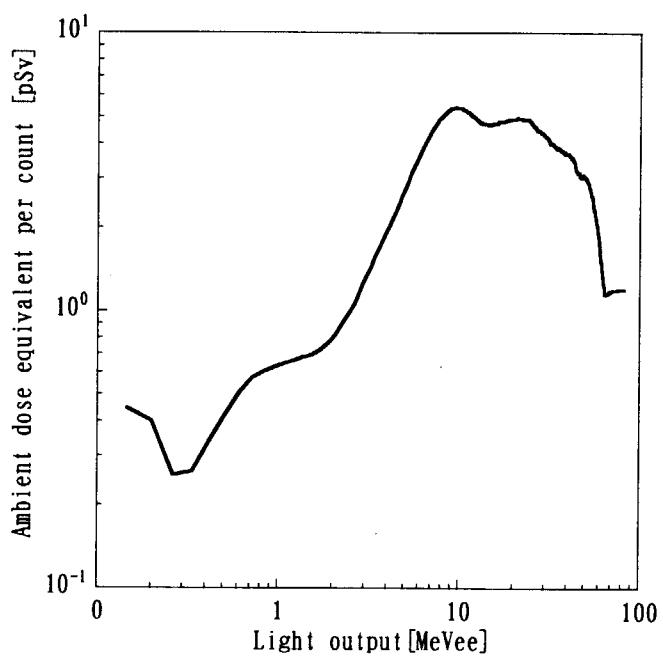


Fig. 3-15 G-function calculated for ambient dose equivalent, $H^*(10)$

Table 3-6 G-function for $H^*(10)$ estimation in the energy range of 1 MeV to 100 MeV, which is applicable to the organic liquid scintillator of cylindrical shape of 12.7 cm in diameter and 12.7 cm in length

Light output (MeVee)	G-function: $H^*(10)$ per count (pSv)	Light output (MeVee)	G-function: $H^*(10)$ per count (pSv)	Light output (MeVee)	G-function: $H^*(10)$ per count (pSv)
1.46×10^{-1}	4.44×10^{-1}	8.78	5.27	1.82×10^1	4.84
2.01×10^{-1}	4.00×10^{-1}	9.05	5.34	1.84×10^1	4.86
2.66×10^{-1}	2.56×10^{-1}	9.32	5.38	1.86×10^1	4.84
3.39×10^{-1}	2.63×10^{-1}	9.59	5.40	1.88×10^1	4.88
4.22×10^{-1}	3.38×10^{-1}	9.87	5.39	1.90×10^1	4.89
5.13×10^{-1}	4.22×10^{-1}	1.02×10^1	5.37	1.92×10^1	4.90
6.14×10^{-1}	5.08×10^{-1}	1.04×10^1	5.34	1.94×10^1	4.88
7.23×10^{-1}	5.74×10^{-1}	1.05×10^1	5.31	1.96×10^1	4.88
8.42×10^{-1}	6.05×10^{-1}	1.07×10^1	5.29	1.98×10^1	4.91
9.69×10^{-1}	6.27×10^{-1}	1.08×10^1	5.26	2.00×10^1	4.91
1.11	6.50×10^{-1}	1.10×10^1	5.23	2.02×10^1	4.91
1.20	6.59×10^{-1}	1.11×10^1	5.20	2.04×10^1	4.92
1.28	6.69×10^{-1}	1.13×10^1	5.17	2.06×10^1	4.92
1.38	6.83×10^{-1}	1.14×10^1	5.14	2.08×10^1	4.94
1.49	6.89×10^{-1}	1.16×10^1	5.10	2.10×10^1	4.95
1.60	7.02×10^{-1}	1.17×10^1	5.06	2.12×10^1	4.93
1.71	7.23×10^{-1}	1.19×10^1	5.03	2.14×10^1	4.94
1.83	7.50×10^{-1}	1.20×10^1	5.00	2.16×10^1	4.93
1.95	7.83×10^{-1}	1.22×10^1	4.97	2.18×10^1	4.93
2.08	8.27×10^{-1}	1.23×10^1	4.93	2.21×10^1	4.94
2.21	8.84×10^{-1}	1.25×10^1	4.89	2.23×10^1	4.93
2.35	9.42×10^{-1}	1.26×10^1	4.86	2.25×10^1	4.90
2.49	9.97×10^{-1}	1.28×10^1	4.83	2.27×10^1	4.88
2.63	1.06	1.30×10^1	4.77	2.29×10^1	4.91
2.78	1.15	1.31×10^1	4.75	2.31×10^1	4.86
2.93	1.25	1.33×10^1	4.76	2.33×10^1	4.85
3.08	1.34	1.35×10^1	4.71	2.35×10^1	4.88
3.24	1.43	1.36×10^1	4.69	2.38×10^1	4.87
3.40	1.55	1.38×10^1	4.72	2.40×10^1	4.86
3.57	1.66	1.39×10^1	4.71	2.42×10^1	4.87
3.74	1.77	1.41×10^1	4.70	2.44×10^1	4.85
3.92	1.88	1.43×10^1	4.69	2.46×10^1	4.81
4.10	2.01	1.45×10^1	4.68	2.49×10^1	4.81
4.28	2.13	1.46×10^1	4.69	2.51×10^1	4.77
4.47	2.26	1.48×10^1	4.69	2.53×10^1	4.73
4.66	2.42	1.50×10^1	4.68	2.55×10^1	4.72
4.85	2.60	1.51×10^1	4.70	2.58×10^1	4.65
5.05	2.77	1.53×10^1	4.72	2.60×10^1	4.61
5.25	2.95	1.55×10^1	4.70	2.62×10^1	4.60
5.46	3.13	1.57×10^1	4.70	2.65×10^1	4.55
5.67	3.31	1.58×10^1	4.73	2.67×10^1	4.51
5.89	3.48	1.60×10^1	4.71	2.69×10^1	4.48
6.11	3.66	1.62×10^1	4.73	2.71×10^1	4.47
6.33	3.87	1.64×10^1	4.77	2.74×10^1	4.47
6.56	4.07	1.66×10^1	4.78	2.76×10^1	4.46
6.79	4.24	1.67×10^1	4.79	2.79×10^1	4.44
7.02	4.42	1.69×10^1	4.79	2.81×10^1	4.44
7.26	4.58	1.71×10^1	4.79	2.83×10^1	4.41
7.50	4.72	1.73×10^1	4.80	2.86×10^1	4.36
7.75	4.87	1.75×10^1	4.81	2.88×10^1	4.37
8.00	5.01	1.77×10^1	4.81	2.90×10^1	4.35
8.26	5.10	1.79×10^1	4.83	2.93×10^1	4.34
8.52	5.19	1.81×10^1	4.83	2.95×10^1	4.33

Light output (MeVee)	G-function: H*(10) per count (pSv)	Light output (MeVee)	G-function: H*(10) per count (pSv)	Light output (MeVee)	G-function: H*(10) per count (pSv)
2.98×10^1	4.30	4.50×10^1	3.20	6.23×10^1	1.39
3.00×10^1	4.26	4.53×10^1	3.17	6.27×10^1	1.35
3.03×10^1	4.23	4.56×10^1	3.15	6.30×10^1	1.31
3.05×10^1	4.22	4.59×10^1	3.14	6.34×10^1	1.27
3.08×10^1	4.20	4.62×10^1	3.15	6.37×10^1	1.25
3.10×10^1	4.19	4.65×10^1	3.13	6.41×10^1	1.21
3.13×10^1	4.15	4.68×10^1	3.07	6.44×10^1	1.15
3.15×10^1	4.10	4.71×10^1	3.06	6.48×10^1	1.15
3.18×10^1	4.06	4.74×10^1	3.04	6.52×10^1	1.15
3.20×10^1	4.03	4.77×10^1	3.02	6.55×10^1	1.15
3.23×10^1	4.00	4.81×10^1	3.04	6.59×10^1	1.16
3.25×10^1	4.02	4.84×10^1	3.01	6.63×10^1	1.16
3.28×10^1	4.01	4.87×10^1	3.04	6.66×10^1	1.16
3.30×10^1	4.01	4.90×10^1	3.09	6.70×10^1	1.16
3.33×10^1	4.00	4.93×10^1	3.05	6.73×10^1	1.16
3.35×10^1	3.95	4.96×10^1	3.04	6.77×10^1	1.16
3.38×10^1	3.94	4.99×10^1	3.05	6.81×10^1	1.17
3.41×10^1	3.91	5.02×10^1	3.03	6.85×10^1	1.18
3.43×10^1	3.88	5.06×10^1	3.01	6.88×10^1	1.17
3.46×10^1	3.85	5.09×10^1	2.99	6.92×10^1	1.17
3.49×10^1	3.84	5.12×10^1	2.98	6.96×10^1	1.18
3.51×10^1	3.88	5.15×10^1	2.97	6.99×10^1	1.18
3.54×10^1	3.87	5.18×10^1	2.95	7.03×10^1	1.18
3.56×10^1	3.86	5.22×10^1	2.89	7.07×10^1	1.18
3.59×10^1	3.85	5.25×10^1	2.87	7.11×10^1	1.19
3.62×10^1	3.84	5.28×10^1	2.85	7.14×10^1	1.19
3.65×10^1	3.82	5.31×10^1	2.79	7.18×10^1	1.19
3.67×10^1	3.80	5.35×10^1	2.75	7.22×10^1	1.19
3.70×10^1	3.77	5.38×10^1	2.72	7.26×10^1	1.19
3.73×10^1	3.77	5.41×10^1	2.65	7.29×10^1	1.19
3.75×10^1	3.78	5.45×10^1	2.61	7.33×10^1	1.19
3.78×10^1	3.74	5.48×10^1	2.59	7.37×10^1	1.19
3.81×10^1	3.72	5.51×10^1	2.53	7.40×10^1	1.19
3.84×10^1	3.73	5.54×10^1	2.47	7.44×10^1	1.19
3.86×10^1	3.69	5.58×10^1	2.40	7.48×10^1	1.19
3.89×10^1	3.68	5.61×10^1	2.35	7.52×10^1	1.19
3.92×10^1	3.68	5.65×10^1	2.31	7.55×10^1	1.20
3.95×10^1	3.67	5.68×10^1	2.26	7.59×10^1	1.20
3.98×10^1	3.70	5.71×10^1	2.21	7.63×10^1	1.20
4.00×10^1	3.70	5.75×10^1	2.17	7.67×10^1	1.20
4.03×10^1	3.70	5.78×10^1	2.12	7.70×10^1	1.20
4.06×10^1	3.69	5.81×10^1	2.06	7.74×10^1	1.20
4.09×10^1	3.66	5.85×10^1	2.02	7.78×10^1	1.20
4.12×10^1	3.63	5.88×10^1	1.96	7.81×10^1	1.20
4.15×10^1	3.62	5.92×10^1	1.92	7.85×10^1	1.20
4.18×10^1	3.59	5.95×10^1	1.87	7.89×10^1	1.20
4.21×10^1	3.54	5.99×10^1	1.80	7.93×10^1	1.20
4.23×10^1	3.55	6.02×10^1	1.72	7.96×10^1	1.20
4.26×10^1	3.56	6.06×10^1	1.64	8.00×10^1	1.20
4.29×10^1	3.51	6.09×10^1	1.58	8.04×10^1	1.20
4.32×10^1	3.48	6.13×10^1	1.52	8.08×10^1	1.20
4.35×10^1	3.46	6.06×10^1	1.64	8.11×10^1	1.20
4.38×10^1	3.41	6.09×10^1	1.58	8.15×10^1	1.20
4.41×10^1	3.35	6.13×10^1	1.52	8.19×10^1	1.20
4.44×10^1	3.27	6.16×10^1	1.49	8.22×10^1	1.20
4.47×10^1	3.22	6.20×10^1	1.44		

3.3.2 G 関数による中性子線量評価

Fig. 3-16(a)及び(b)に、連続エネルギー分布を持つ ^{252}Cf 中性子源と15MeV単色中性子に対する液体シンチレータの波高分布の実測値をそれぞれ示す。Fig. 3-16(b)は、15MeV単色中性子に対する応答関数であり、SCINFUL-Rコードにより得られた計算値と良く一致している。この結果から、液体シンチレータの応答関数の再現性が確認された。

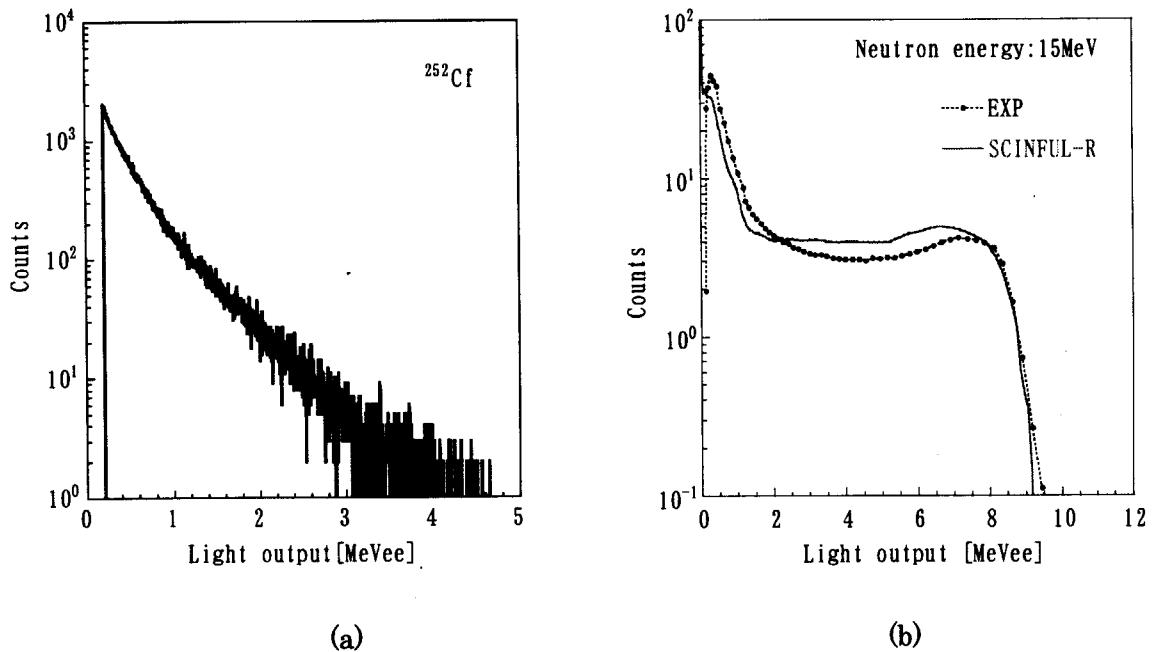


Fig. 3-16 Pulse height spectra measured by the organic liquid scintillator: (a) ^{252}Cf neutron source, and (b) neutron source of 15 MeV

Table 3-6 の G 関数と、実験により測定した液体シンチレータの波高分布を用いて、(2-4)式により各中性子場の中性子線量を評価した。Fig. 3-17(a)及び(b)に、G 関数による中性子の線量評価例を示す。Fig. 3-17(a)は、15MeV 単色中性子に対する波高分布と G 関数であり、これらを各々掛け合せることにより各発光量における線量が求まる。Fig. 3-17(b)に、各発光量の線量分布と累積線量を示す。図のように、1MeVee 以下の低発光量成分による線量は、全線量の約 2 割を占めている。この結果から、中性子エネルギーが 15MeV 以下になると、全線量に対する数 MeV 以下中性子による線量が占める割合は、段々大きくなることが推測できた。

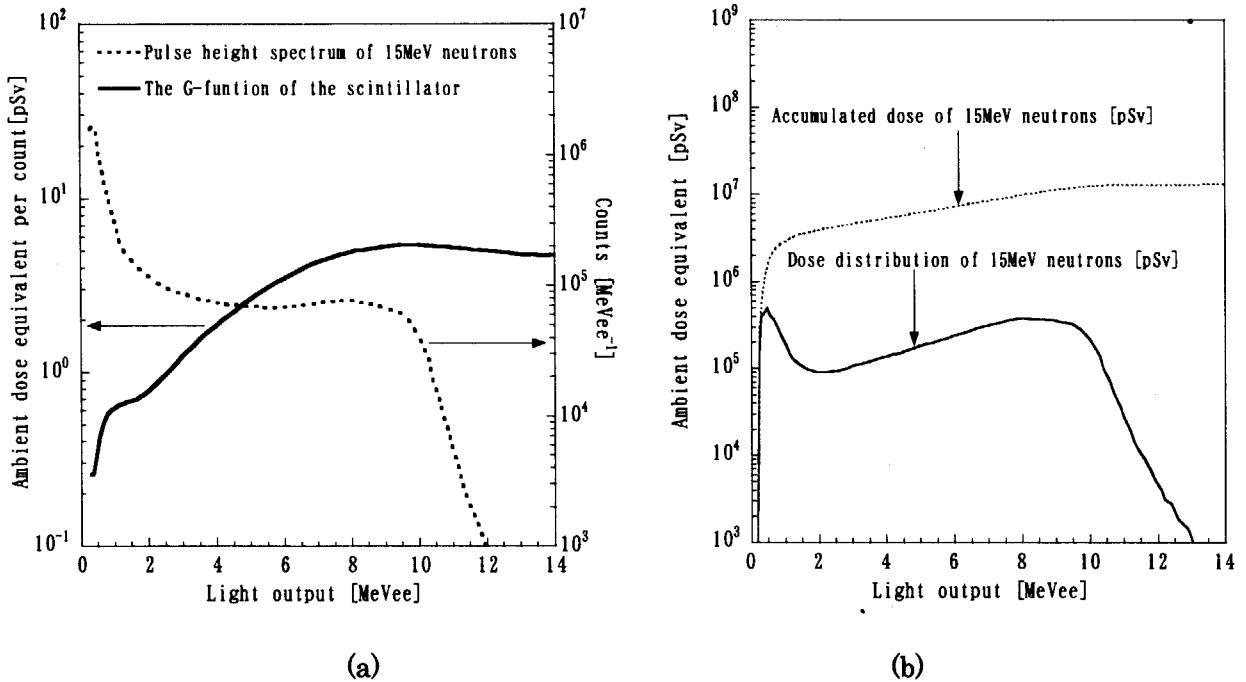


Fig. 3-17 (a) Pulse height spectrum for 15 MeV neutrons, and (b) example of ambient dose equivalent evaluated by Equation (2-4) using the G-function

G 関数により評価した線量の誤差をもたらす要因には、波高分布の統計誤差と G 関数の誤差があり、線量 H の誤差は(2-4)式から次式のように与えられる。

$$(\Delta H)^2 = \left(\int_{E_{R\min}}^{E_{R\max}} \Delta P(E_R) \cdot G(E_R) dE_R \right)^2 + \left(\int_{E_{R\min}}^{E_{R\max}} P(E_R) \cdot \Delta G(E_R) dE_R \right)^2 \quad (3-5)$$

各項を、 $\Delta H = \delta_H H$ 、 $\Delta P(E_R) = \delta_P P(E_R)$ 、 $\Delta G(E_R) = \delta_G G(E_R)$ とすると、(3-5)式は次式のように書き直せる。

$$\begin{aligned} (\delta_H H)^2 &= \left(\int_{E_{R\min}}^{E_{R\max}} \delta_P P(E_R) \cdot G(E_R) dE_R \right)^2 + \left(\int_{E_{R\min}}^{E_{R\max}} P(E_R) \cdot \delta_G G(E_R) dE_R \right)^2 \\ &= (\delta_P^2 + \delta_G^2) \left(\int_{E_{R\min}}^{E_{R\max}} P(E_R) \cdot G(E_R) dE_R \right)^2 \end{aligned} \quad (3-6)$$

したがって、線量の誤差 δ_H は、次式で与えられる。

$$\delta_H^2 = \delta_P^2 + \delta_G^2 \quad (3-7)$$

しかし、波高分布の統計誤差 δ_P は非常に小さく、ここでは、(2-4)式による線量 H の誤差として、G 関数 δ_G の誤差だけを考慮し、これを評価した。

$$\delta_H = \delta_G \quad (3-8)$$

G 関数の誤差は、液体シンチレータの応答関数の誤差、線量換算係数の誤差及び(2-5)式のアンフォールディング法の誤差があり、(2-5)式から次式のように与えられる。

$$(\delta_G G)^2 = ((R^{-t})^2 \Delta h^2 + (\Delta R^t)^2 (R^{-2t} h)^2) + \delta_{\text{unfolding}} \quad (3-9)$$

ここで、 $\Delta h = \delta_h h$ 、 $\Delta R^t = \delta_{R^t} R^t$ とすると、(3-9)式は次式に書き直せる。

$$\delta_G = \sqrt{\delta_{R^t}^2 + \delta_h^2} + \delta_{\text{unfolding}} \quad (3-10)$$

結局、(2-4)式による線量の誤差評価は、(3-10)式により行った。ここでは、ICRP Publ. 74 の線量換算係数による誤差はないとして、応答関数による誤差 δ_{R^t} とアンフォールディングによる誤差 $\delta_{\text{unfolding}}$ だけを考慮した。評価した応答関数の誤差 δ_{R^t} は約~30%で、アンフォールディングによる誤差 $\delta_{\text{unfolding}}$ は 11%である。

Table 3-7 に、G 関数を用いて液体シンチレータの波高分布から直接評価した各中性子場の周辺線量当量を示す。この表には、G 関数による線量評価法の信頼性を確認するために、Fig. 3-5 及び 3-9 で示した各中性子場のエネルギースペクトルにより評価した中性子線量も示した。

15MeV 以上の領域での G 関数による中性子線量は、エネルギースペクトルから直接に計算した線量と良く一致している。しかし、²⁵²Cf と ²⁴¹Am-Be 中性子線源、2MeV 単色中性子の場合、G 関数による線量は、エネルギースペクトルによる線量と比べて、0.63, 0.74 及び 0.45 の比で小さい値を持つ。この原因には、Fig. 3-17(b) のように中性子エネルギーが低くなると、波高分布測定中、不感時間(dead time)やノイズ 成分を減らすために設定したディスクリレベル以下の低発光量成分による線量が占める割合が大きくなることが考えられる。実際に、²⁵²Cf 及び ²⁴¹Am-Be 中性子線源の線量は、波高分布の低発光量領域の外挿により、エネルギースペクトルによる線量と 1.3 及び 1.1 比で一致しており、これらエネルギーでの線量は、以上のような補正により、エネルギースペクトルを基に評価した線量に近づくことが分かった。

以上の結果により、数 MeV 以上の中性子線量は、G 関数法を適用することにより、液体シンチレータによって評価可能であることが実証された。また、²⁵²Cf 及び ²⁴¹Am-Be 中性子線源に対する線量評価の結果より、液体シンチレータを用いて、数 nSv/hr の低線量まで十分に測れるとの予測ができた。

Table 3-7 Comparison of ambient dose equivalent, H*(10), by the G-function and the energy spectrum

Neutron source (Facility)	H*(10) by G-function (G) [pSv]	H*(10) by energy spectrum (D) [pSv]	Ratio (G/D)
²⁵² Cf (FRS)	1.57×10^{-3} *1	2.48×10^{-3} *1	0.63
²⁴¹ Am-Be (FRS)	2.10×10^{-3} *1	2.83×10^{-3} *1	0.74
2 MeV (FNL)	1.88×10^{-2} *2	4.20×10^{-2} *2	0.45
15 MeV (FNL)	5.71×10^{-2} *2	5.40×10^{-2} *2	1.06
41 MeV (TIARA)	8.41×10^{-2} *2	9.67×10^{-2} *2	0.87
65 MeV (TIARA)	1.08×10^{-1} *2	1.08×10^{-1} *2	1.00

*1 : 1MeV 以上の中性子成分に対する線量で、中性子 1 個当たりの線量を意味する。

*2 : 中性子単位フルエンス当たりの線量を意味する。

4. ^{10}B 入り有機液体シンチレータを用いた中性子モニタ用検出器の開発： 広帯域対応中性子モニタ用検出器の開発(1)

第3章では、液体シンチレータにG関数法を適用することにより、数MeVから100MeVまでの中性子線量を測定できることを実証した。そこで、本章では、この方法を基に、評価対象とするエネルギー領域を熱エネルギーまで拡張するために、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により熱中性子まで感度を持つ ^{10}B 入り有機液体シンチレータを利用した線量測定法の開発を行った。そのため、 ^{10}B 入り有機液体シンチレータの応答関数を求めてG関数を計算し、これを用いて線量測定用のモニタ用検出器としての適用性について検討した。

4.1 実験及び解析

本研究で用いた ^{10}B 入り有機液体シンチレータ(以下、 ^{10}B 入り液体シンチレータ)は、BICRON社のBC523Aと呼ばれるもので、これは、Nuclear Enterprise社のNE311型に相当するものである。 ^{10}B 入り液体シンチレータは、第3章の液体シンチレータと同様に、1MeV以上では中性子により生成する荷電粒子によるシンチレーションを検出する。また、1MeV以下(以下、低エネルギー領域)では、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ の熱中性子捕獲反応により生成する α 粒子によるシンチレーションを測定することができる。したがってこの検出器を用いることにより、熱中性子から百数十MeV中性子までの線量評価できる可能性がある。Table 4-1に、 ^{10}B 入り液体シンチレータの特性を示す。

Table 4-1 Characteristic of the boron-loaded scintillator

Light output [%antrathen]	Density [g cm ⁻³]	Ration of atomic density: H/C	Decay constant [nsec]	Wave length of max emission [nm]	Additive element
65	0.916	1.41	3.7	424	^{10}B : 4.41%
^1H [atoms cm ⁻³]	^{12}C [atoms cm ⁻³]	^{16}O [atoms cm ⁻³]	^{10}B [atoms cm ⁻³]	^{11}B [atoms cm ⁻³]	
4.98E+22	2.86E+22	0.811E+22	0.243E+22	0.027E+22	

^{10}B 入り液体シンチレータの波高分布を次の中性子場において測定した。すなわち、高エネルギー加速器研究機構(KEK)熱中性子標準棟の熱中性子場²⁹、東北大・FNLの8keVから15MeVの単色中性子場¹⁹、原研・高崎研の41、65MeVの準単色中性子場及び連続エネルギー分布を持つ65MeV白色中性子場²⁰である。東北大・FNLと原研・TIARAで行った実験の体系や測定方法は、第3.2節で述べたものと同じであり、ここでは、KEKでの実験に関してのみ述べる。

Fig. 4-1に、KEKで実施した実験体系を示す。実験は、 $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ 中性子線源を黒鉛パイアルの中心に入れて、黒鉛パイアルの中で減速された熱中性子場を用いて行った。 ^{10}B 入り液体シンチレータを黒鉛パイアルの側表面から30cm離れた位置に置いて波高分布を測定した。Fig. 4-2に、 ^{10}B 入り液体シンチレータの測定回路を示す。測定回路は、第3.2.3項で述べたFig. 3-6(a)の液体シンチレータの測定回路とほぼ同じであるが、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により生成する α 粒子の発光量を増幅させるために、PM·AMP(Photo Multiplier Amplifier)を用いて、High·gainでのTOTAL成分とSLOW

成分を別に処理した。この時、低発光量端の増幅により、 α 粒子による発光成分以外に、ノイズ成分も増幅してしまうが、これは、不感時間(Dead time)に基づき補正した。

KEK の中性子場の熱中性子束の絶対値 $\Phi(n\text{ cm}^{-2}\text{ sec}^{-1})$ は、米内ら²⁹⁾により値付けされた ^3He 力 ウンタの検出器の値、 $A_{30\text{cm}}(3.629\text{E-}06\text{ cm}^{-2})$ と $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ 線源の放出率 $Q(4.599\text{E+}06\text{ n sec}^{-1})$ から 次の(4-1)式を用いて求めた。

$$\Phi = A_{30\text{cm}} \times Q \quad (4-1)$$

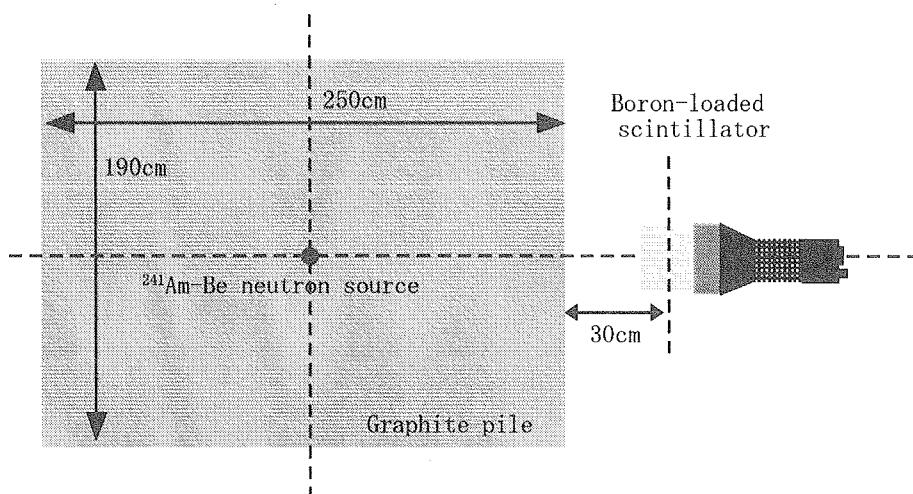


Fig. 4-1 Experimental arrangement in KEK

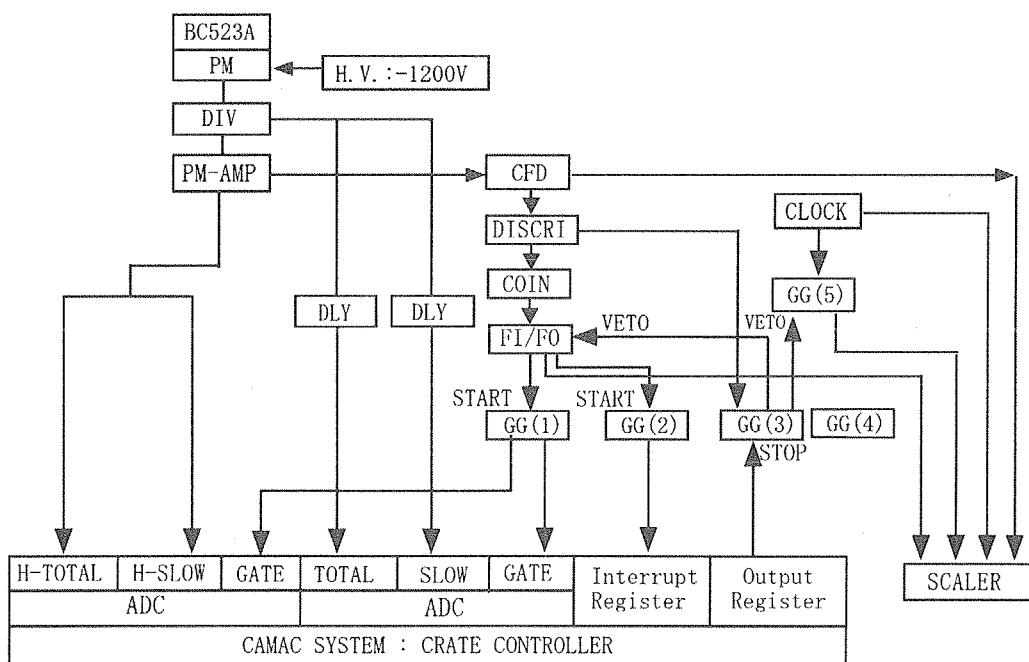


Fig. 4-2 Measuring electronic circuit in KEK

測定データの解析方法は、第3.2.4項と同じである。Fig. 4-3に、 ^{10}B 入り液体シンチレータによるn・ γ 弁別性能を確認するために、 ^{10}B 入り液体シンチレータからのTOTAL成分とSLOW成分の2次元分布を示す。図から、 ^{10}B 入り液体シンチレータの弁別性能は、通常の液体シンチレータと比べて少々落ちるが、1MeV以上の中性子に対する弁別性能は十分であること、また、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ ^7Li 反応により生成する α 粒子の発光がはっきり区別でき（550keVの場合）、通常の液体シンチレータで弁別できなかった低エネルギー領域の中性子弁別もできることが分かった。

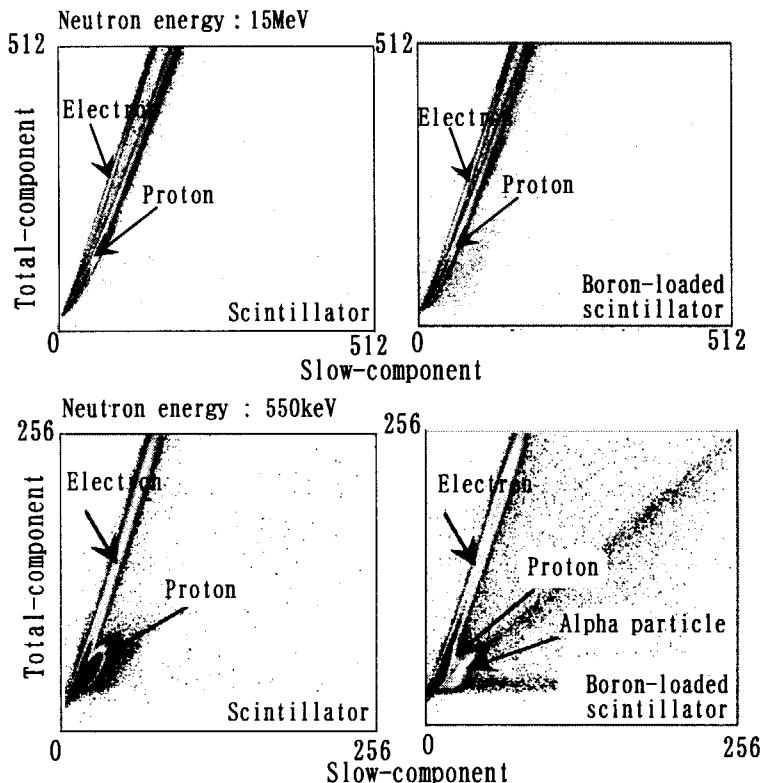


Fig. 4-3 Comparison of two-dimentional plots for the boron-loaded scintillator and the organic liquid scintillator

4.2 ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数及びG関数の計算

^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数を計算した。ここでは、SCINFUL-CGコード^{30,31)}及びMCNP-4Bコード³²⁾を用いて応答関数を計算した。そして、実験による実測値と計算値により作成した応答関数を用いて、G関数を計算した。ここで、用いたSCINFUL-CGコードは、任意の形状のシンチレータに対する応答関数と体系内のスペクトルの両方を評価できるように開発したコードである。このコードの概要は、第5.1.1項に述べる。

4.2.1 ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数の計算

Fig. 4-4 に、SCINFUL-CG コードと MCNP-4B コードの計算体系を示す。SCINFUL-CG コードの計算では、発光量に寄与する元素が ^1H と ^{12}C に限定されているために、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応の影響が殆どない 1MeV 以上の中性子に対する応答関数は、 ^1H と ^{12}C 以外の成分である ^{10}B 、 ^{11}B 及び ^{16}O は、 ^{12}C に置き換えて計算した。また、低エネルギー領域の $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ の熱中性子捕獲反応の反応率分布を調べるために、反応率分布を、中性子・光子輸送計算用モンテカルロコード、MCNP-4B を用いて計算した。そして、その計算値を実験による実測値の規格値として用いた。

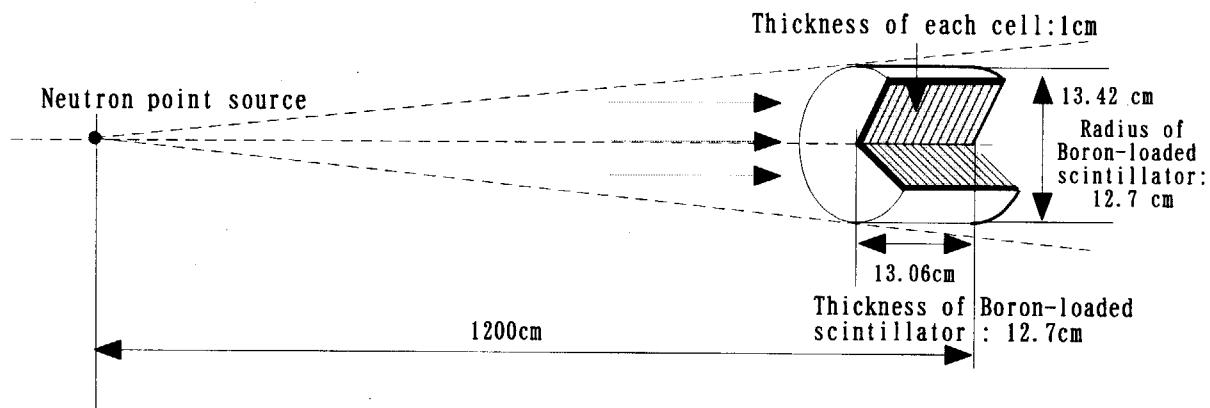


Fig. 4-4 Calculation geometry of the boron-loaded scintillator in SCINFUL-CG code

4.2.2 ^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数の計算

G 関数は、第 4.1 節で測定した実測値と第 4.2.1 項で計算した応答関数を用いて作成した応答関数と ICRP Publ. 74 の周辺線量当量換算係数を用いて、第 2.2 節で述べた方法で計算した。

4.3 結果

4.3.1 ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数

Fig. 4-5～Fig. 4-8 に、実験により求めた ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数を示す。Fig. 4-5 は、中性子エネルギーが 0.0253eV、250keV、550keV の $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応による生成した α 粒子の発光を用いて求めた応答関数である。これらの低エネルギー領域の中性子に対する応答関数は、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ の熱中性子捕獲反応によるものなので、各エネルギーで生成した α 粒子の発光端は、入射中性子エネルギーに関係なく、約 0.06MeVee 付近を中心に分布している³³⁾。また、250keV と 550keV の発光量は 0.0253eV と比べて高く、カウントも少々高くなっている。これは、測定中電子と陽子による発光が広がり、 α 粒子による発光成分と混入したのが原因と思われる。また、

8keV 中性子に対する測定も行ったが、8keV 単色中性子場は、他のエネルギーの中性子場に比べて、 γ 線のバックグラウンドが非常に多く、 α 粒子による発光成分が電子による発光の広がり成分に埋もれてしまい、発光位置が特定できなかった。この結果により、 γ 線のバックグラウンドが高い場では、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応から生成する α 粒子の発光を用いた低エネルギー領域の中性子弁別は、非常に難しいと判断される。

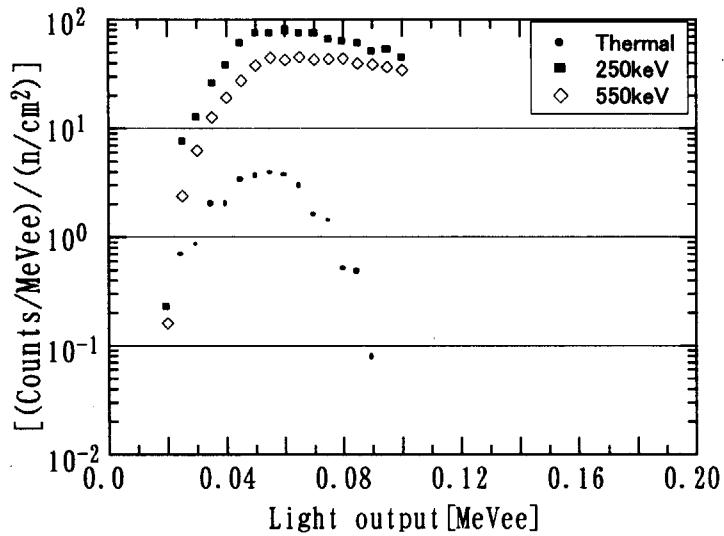


Fig. 4-5 Response functions for thermal energy, 250keV and 550keV neutrons

Fig. 4-6~4-8 に、15、41、65MeV 中性子に対する応答関数を示す。 ^{10}B 入り液体シンチレータの実測値は、中尾²⁰⁾により測定された液体シンチレータの応答関数と SCINFUL-CG コードによる結果と比較した。TIARA experiment(mono)は準単色中性子源から、TIARA experiment(White)は白色中性子源から求めた実測値である。図より、中性子エネルギーが 15MeV の場合(Fig. 4-6)、 ^{10}B 入り液体シンチレータの実測値の反跳陽子による最大発光端は、SCINFUL-CG コードの計算結果(実線)や中尾による液体シンチレータの応答関数(白四角)と比べて低い。これは、Table 3-1 及び Table 4-1 に示されているように、液体シンチレータの発光量と ^{10}B 入り液体シンチレータの発光量の差によるものと考えられる。また、Fig. 4-7 に 41MeV 中性子の応答関数を示す。この時も、 ^{10}B 入り液体シンチレータの反跳陽子による最大発光端は、SCINFUL-CG コードの計算結果(実線)より低く、15MeV 中性子の応答関数と同じ傾向が見られる。また、15MeVee 付近で見られる $^{12}\text{C}(n, d)^{11}\text{Be}$ 反応による生成した重陽子による発光ピークが SCINFUL-CG による計算結果と比べて緩やかなのは、 ^{10}B 液体シンチレータの中に含有している ^{12}C の割合が少ないからである。中性子エネルギーが 65MeV の場合(Fig. 4-8)も反跳陽子による最大発光端は、SCINFUL-CG コードの結果(実線)や中尾による液体シンチレータの応答関数(白四角)と比べて低い。

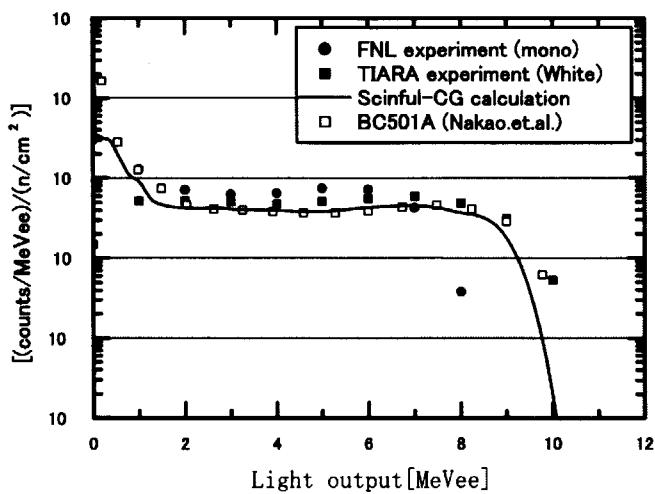


Fig. 4-6 Response function for 15MeV neutrons

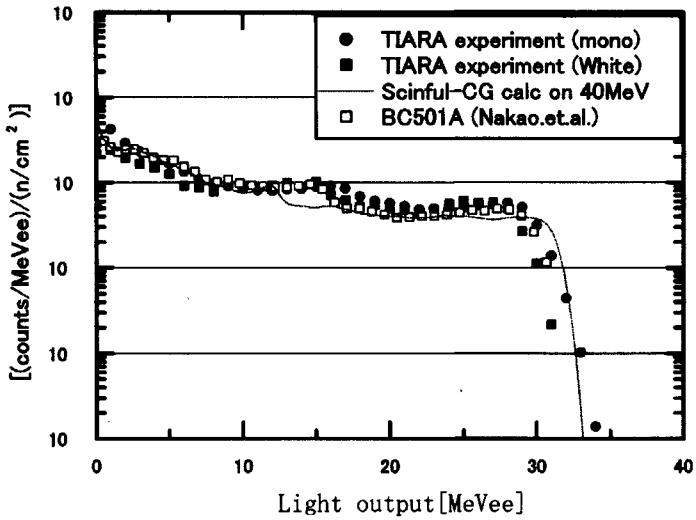


Fig. 4-7 Response function for 41MeV neutrons

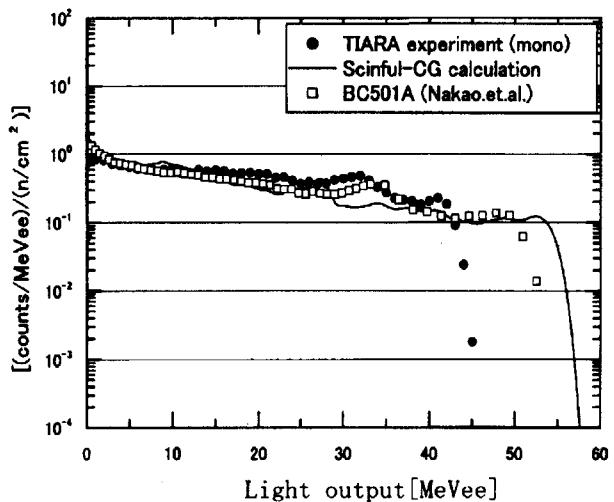


Fig. 4-8 Response function for 65MeV neutrons

^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数は、0.0253eV、250keV、550keV、1MeV、2MeV、5MeV、15MeV、41MeV、65MeV の中性子での実測値と、SCINFUL-CG コード及びMCNP-4B コードによる計算値を用いて作成した。まず、熱中性子から 50eV までは、熱中性子捕獲反応により生成した α 粒子のみを考慮し、MCNP-4B コードで求めた反応率を乗じて求めた。次に、50keV から 5MeV までは、熱中性子捕獲反応による α 粒子の発光成分と SCINFUL-CG コードで求めた荷電粒子の発光成分を用いて応答関数を求めた。最後に、5MeV 以上の応答関数は、白色中性子線源と準単色中性子源により測定した実測値を用いて求めた。Table 4-2 に、ここで作成した ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数の中性子エネルギー群を示す。また、作成した ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数マトリックスを、付録-B に示す。

Table 4-2 Neutron energy group for response function calculation of the boron-loaded scintillator

Neutron energy [MeV]	Neutron energy [MeV]
~2.50E-08	1.00E-03~1.00E-02
2.50E-08~1.00E-07	1.00E-02~2.00E-02
1.00E-07~1.00E-06	2.00E-02~1.00E-01
1.00E-06~1.00E-05	1.00E-01~2.00E-01
1.00E-05~1.00E-04	1.00E+00~4.40E+01(1MeV intervals)
1.00E-04~1.00E-03	4.40E+01~6.60E+01(2MeV intervals)

4.3.2 ^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数

^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数を求める際、逐次近似の繰り返し回数(ITMAX)は、G 関数のフォールディングにより求めた周辺線量当量換算係数の再現性の検討に基づき 40 回とした。Fig. 4-9 は、ITMAX が 40 回の時、G 関数と応答関数のフォールディングによる再現された線量換算係数と ICRP Publ.74 の周辺線量当量換算係数の比較を示したものである。中性子エネルギーが数十 keV 以上の場合、フォールディングにより再現された線量換算係数は、ICRP Publ.74 の周辺線量当量換算係数と良く一致している。しかし、それより低い領域では、ICRP Publ.74 の周辺線量当量換算係数と大きくずれ、最大で約 3 倍の差がある。これは、アンフォールディングを行う際、初期値(本研究では、周辺線量当量換算係数)の分布が緩やかに変動する場合、アンフォールディングの収束性は良いが、Fig. 4-9 のように、鋭いピークを持つ場合には、その収束性は悪く振動してしまうからである。

Fig. 4-10 に、ITMAX が 40 回での ^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数を示す。比較のために、この図には、第 3 章で求めた液体シンチレータの G 関数も示した。図のように、 ^{10}B 入り液体シンチレータは、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^{7}\text{Li}$ 反応により、液体シンチレータでは計算できなかった低エネルギー領域の G 関数を求めることができた。また、 ^{10}B 入り液体シンチレータと液体シンチレータの G 関数を比較すると、数 MeVee 以上の領域では、 ^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数は、液体シンチレ

ータの G 関数に対し、約 2 衡高い値を持つ。この原因として、応答関数のエネルギー領域の違い、エネルギー群の違い、 ^{10}B 入り液体シンチレータと液体シンチレータの発光量の差による応答関数の違い等が考えられる。また、1MeVee 付近では、液体シンチレータでは見えないピークがあり、この領域は、低エネルギー領域と 1MeV 以上エネルギーの応答関数がつながる領域で、つなぎ方法の工夫を検討する必要があると考えられる。

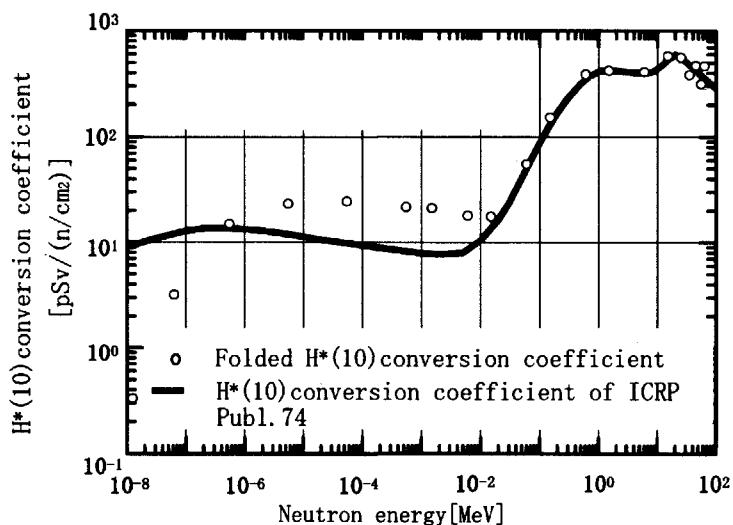


Fig. 4-9 Ambient dose equivalent conversion coefficients folded by the G-function and the response function of the boron-loaded scintillator

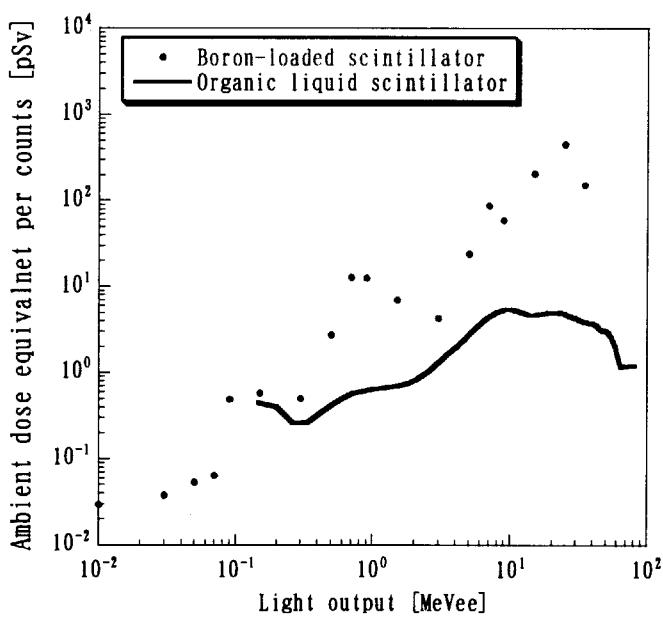


Fig. 4-10 G-funtion of the boron-loaded scintillator

4.3.3 ^{10}B 入り液体シンチレータの中性子モニタ用検出器としての可能性検討

熱エネルギーから 100MeV まで線量測定可能な中性子モニタ用検出器の開発をめざし、 ^{10}B 入り液体シンチレータの適用性を検討するために、応答関数を作成し G 関数を計算した。そして、この G 関数により、 ^{10}B 入り液体シンチレータは、通常の液体シンチレータの線量評価領域より低い熱エネルギーまで線量を評価できることが分かった。しかし、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により生成した α 粒子の発光量が非常に少なく、また、この α 粒子の発光端が非常に低いため、 γ 線のバックグラウンドが高い場では、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ により生成する α 粒子の発光成分を用いた低エネルギー領域の中性子弁別は非常に難しいことも判明した。

以上の結果により、 ^{10}B 入り液体シンチレータは、G 関数により中性子線量評価ができることが分かった。しかし、 γ 線が混在する放射線場では、低エネルギー領域の $\text{n}\cdot\gamma$ 弁別が難しく、実際の使用環境が、中性子と γ 線が混在する場であることを想定すると、中性子モニタ用検出器として使用するのは困難であると判断できる。

5. ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと有機液体シンチレータを組み合せた中性子検出器の開発 (2) : 設計・製作・特性試験

第4章では、 ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^7\text{Li}$ 反応により、熱中性子まで感度を持つ ${}^{10}\text{B}$ 入り液体シンチレータに対し、中性子モニタ用検出器としての適用性を検討した。その結果、G 関数を用いることにより、熱中性子エネルギーまで線量測定が可能であるものの、 γ 線が混在する場では、低エネルギーの中性子に対する $\text{n} \cdot \gamma$ 弁別が困難であることが分かった。そこで、本章では、 ${}^6\text{Li}(\text{n}, \alpha){}^3\text{H}$ 反応により熱中性子に感度を持つ ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと液体シンチレータを組み合せた検出器を考案した。この検出器では、低エネルギー領域の中性子は、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータにより、また、1MeV 以上の中性子は液体シンチレータにより、各々線量を測定する。そこで、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率のエネルギー依存性が、線量換算係数のエネルギー依存性を再現するように、計算コードを用いて設計計算を行い、中性子検出器の形状及び大きさを決定した。そして、それを基に製作した中性子検出器の検出効率及び応答関数を実際の中性子場で測定した。

5.1 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと有機液体シンチレータを組み合せた中性子検出器の設計計算 及び製作

${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと液体シンチレータの最適な組み合わせ形状を決定するために、MCNP-4B コードと SCINFUL-CG コードを用いて設計計算を行った。まず、設計計算のために本研究で開発した SCINFUL-CG コードの概要について述べる。

5.1.1 SCINFUL-CG コードの概要

シンチレーション検出器の応答関数計算コードとして、第3章で述べたように、SCINFUL コード、SCINFUL-R コード及び CECIL コードがある。しかし、これらの計算コードの適用は、円柱型 NE213 型と NE110 型シンチレータの応答関数計算に制限されている。そこで、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと液体シンチレータの最適形状を評価するために、任意形状のシンチレーション検出器に対する応答関数と体系内のスペクトルを評価できるモンテカルロコードを開発した。このコードは、SCINFUL コードに 1) 形状指定機能、2) スペクトル評価機能、3) 新たな断面積データを追加したもので、SCINFUL-CG コードと命名された。

まず、検出器形状指定機能として、任意の形状の複数領域設定を行うために、CG (Combinatorial Geometry) と呼ばれる幾何形状指定機能をさらに拡張した MARS-CG³⁴⁾を組み込んだ。これは、直方体、球、円柱等の基本形状を組み合わせ、複雑な形状を表す方法である。基本形状には、MARS-CG に新たに一般回転楕円体、斜楕円錐体等の 5 つを加え、合計 15 種類の基本形状の利用をできるようにした。また、ある領域でのエネルギースペクトルを評価するために、CG で定義された各領域における中性子飛跡長エスティメータを追加した。

断面積の追加では、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータ中の中性子輸送計算を行うために、ガラスシンチレータを構成する珪素(Si)及び酸素(O)、シンチレータのカバーに使われているアルミニウム(Al)につ

いて、高エネルギー中性子・陽子断面積ファイル LA150³⁵⁾を用い、100MeVまでの中性子輸送用の断面積データを組み込んだ。

その結果、SCINFUL-CG コードを用いることにより、任意形状の有機シンチレータの応答関数及び検出器内の中性子スペクトルの計算が可能になった。SCINFUL-CG コードに関する詳細は、参考文献 30,31)に述べている。

5.1.2 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと液体シンチレータの最適配置の決定

MCNP-4B コードと SCINFUL-CG コードを用いて、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率を周辺線量当量換算係数に近いエネルギー応答特性、適切な液体シンチレータの応答関数が得られる配置を解析した。 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと液体シンチレータの配置は、Fig. 5-1 のように、12.7cmΦ × 12.7cm の液体シンチレータの内側に、直径 5.08cm の円柱状の ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを置き、その厚さを変えた場合(case 1, case 2, case 3)と、また、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの内側に直径 10.16cm、高さ 10.16cm の液体シンチレータを置いた場合(case 4)、4 つの場合を検討した。

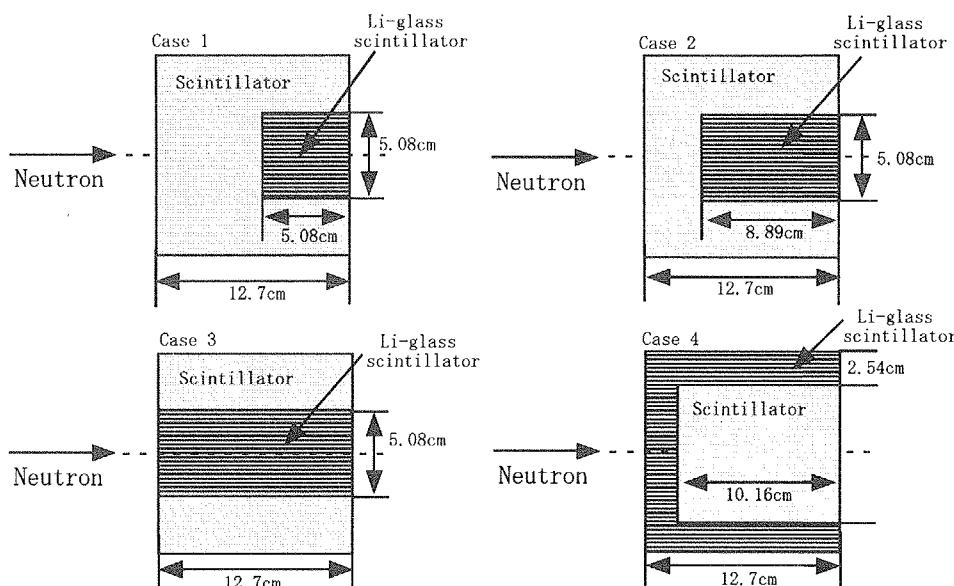


Fig. 5-1 Calculation geometry for determination of optimized arrangement of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator and the organic liquid scintillator

低エネルギー領域の中性子に対して、MCNP-4B コードを用いて、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータ領域のエネルギースペクトル及び ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応の反応率、液体シンチレータ領域のエネルギースペクトルを計算した。ここで、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応の反応率は、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータ領域のエネルギースペクトルに、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応の反応断面積を掛けて求めた。これは、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率に相当する。また、1MeV以上では、SCINFUL-CG コードを用いて、液体シンチレータ領域の応答関数を計算した。

Fig. 5-2 に、case 1, 2, 3, 4 の検出器に 1keV, 10keV, 100keV, 1MeV 中性子が入射したとき、MCNP-4B コードにより得た ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータ領域のエネルギースペクトルを示す。 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータ領域のエネルギースペクトルは、case 2 及び case 3 のように、液体シンチレータを外側、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを内側に置いた方が、case 4 のように ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを外側に置いた場合より、数 keV 領域の中性子成分が増える。これは、数百 keV 以上の中性子が、液体シンチレータの中で減速し、そのエネルギー成分の中性子が増えるからである。また、case 1 のエネルギースペクトルが、case 2, 3, 4 のエネルギースペクトルと比べて、数 keV 以上の中性子成分が非常に少なくなるのは、液体シンチレータが厚く、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータに到達する前に液体シンチレータの中で吸収されてしまうからである。

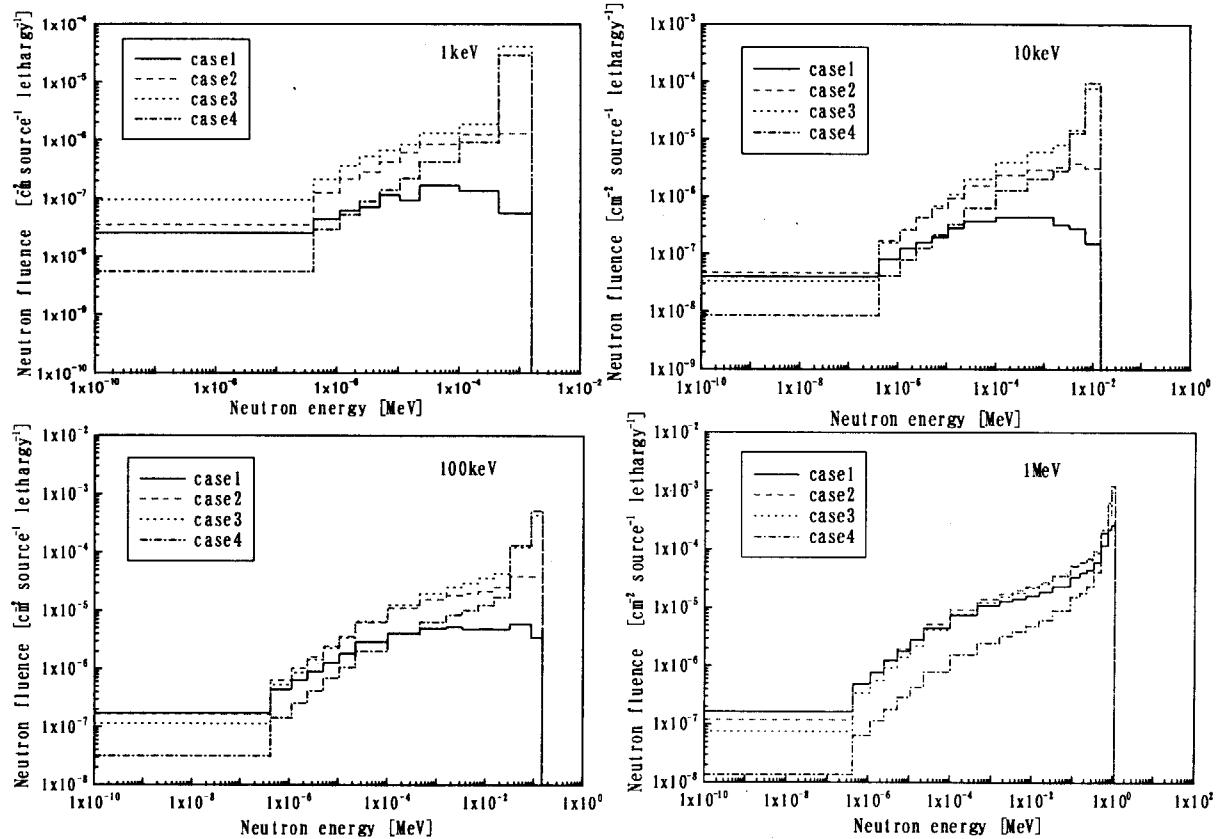


Fig. 5-2 Energy spectra for 1keV, 10keV, 100keV and 1MeV neutrons in the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator region calculated by MCNP-4B code

Fig. 5-3 に、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータ領域での 1keV, 10keV, 100KeV, 1MeV 中性子に対する検出効率を示す。 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率は、case2 と case3 が、case 1 と case 4 に比べて高い。これは、液体シンチレータを外側、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを内側に置くと、入射した中性子が液体シンチレータの中で減速して、熱中性子成分が増えるからである。また、液体シンチレータを外側、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを内側に置いた case 2 と case 3 を比較すると、検出効率は、100keV 以下では、case 3 が高く、100keV 以上では、case 2 が高くなる。

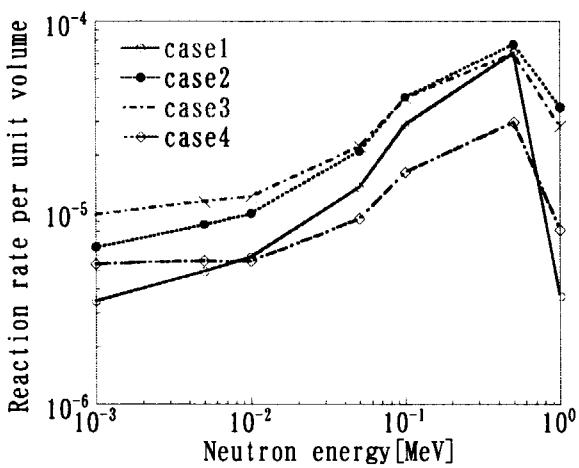


Fig. 5-3 Reaction rate of ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ reaction for 1keV, 10keV, 100keV and 1MeV neutrons in the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator region by MCNP-4B code

Fig. 5-4 に、5~78MeV の単色中性子が入射した時、SCINFUL-CG コードにより計算した液体シンチレータ領域の単位体積あたりの応答関数を示す。各入射中性子エネルギーに対する case 1、2、3、4 での応答関数は、形状の違いによる差が殆ど見えない。すなわち、1MeV 以上の中性子に対する応答関数は、液体シンチレータの配置に関わらず殆ど変わらない。

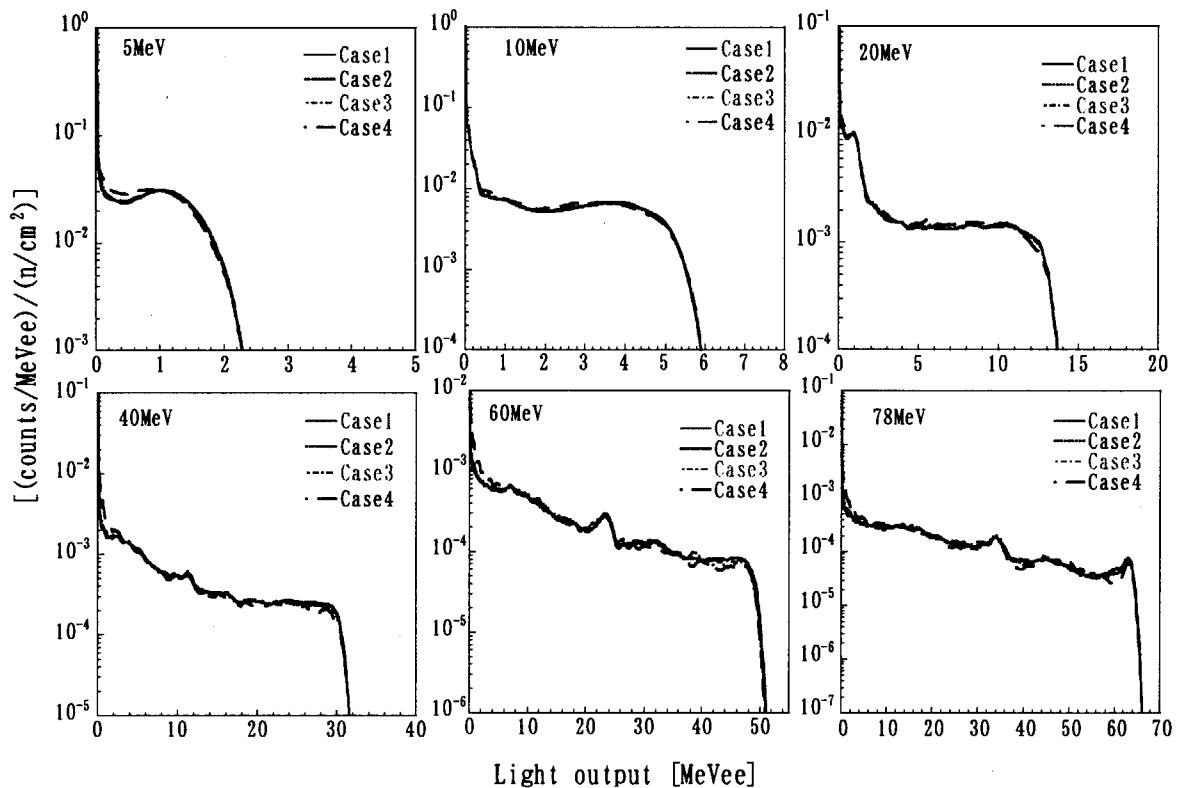


Fig. 5-4 Response functions of the organic liquid scintillator region calculated by SCINFUL-CG code

以上の結果から、低エネルギー領域の中性子に対する ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率は、case 2 のように液体シンチレータの中心に置いた場合が高い。特に、線量当量換算係数が急激に大きくなる数百 keV 中性子に対する検出効率が高くなり、かつ、液体シンチレータの応答関数は、配置により殆ど変わらないことから、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと液体シンチレータの組み合わせは、液体シンチレータを外側に置き、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを内側に置く case 2 が最適な配置であると結論できる。

5.1.3 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの大きさの決定

液体シンチレータは、100MeV 中性子までの測定が可能なように、 $12.7\text{cm}\Phi \times 12.7\text{cm}$ のものを用いる。第 5.1.2 項の解析から、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータは、液体シンチレータの中心に配置することが最適であることが分かった。しかし、液体シンチレータの大きさが固定されているために、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの大きさをあまり大きくすると、液体シンチレータで測定可能な上限エネルギーが低くなってしまう。そこで、MCNP-4B コードを用いて、液体シンチレータの大きさを $12.7\text{cm}\Phi \times 12.7\text{cm}$ に設定したときに、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの最適な検出効率及びエネルギー依存性が得られる ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの大きさを決定した。Fig. 5-5 に、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの大きさを変えた場合の計算体系を示す。

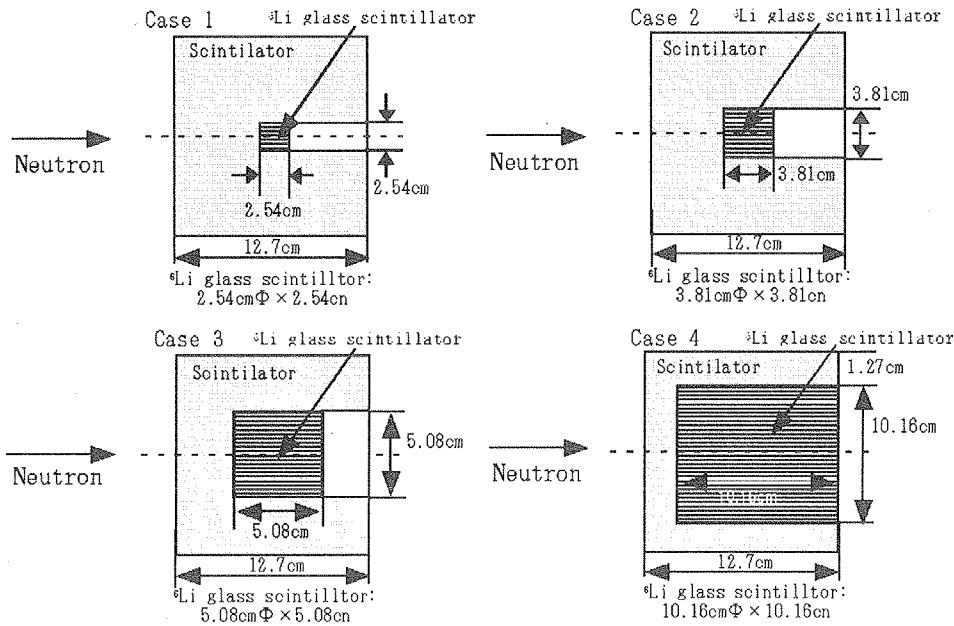


Fig. 5-5 Calculation geometry to determine size of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator

Fig. 5-6 に、case 1～case 4 における ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率を示す。検出効率は、液体シンチレータの厚さが厚い case 1 が一番高く、液体シンチレータが段々薄くなり ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの大きさが大きくなるにつれて、低エネルギー領域の中性子に対する検出効率は、全体的に低くなる。特に、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの直径が 10.16cm にもなると数 keV から数百 keV 領域の検出効率は、急激に落ちてしまう。また、各 case の検出効率のエネルギー依存性は、 ${}^6\text{Li}$

ガラスシンチレータの大きさが小さくなるほど、線量当量換算係数のエネルギー依存性に近づいていく。

以上の計算結果により、外側に置く液体シンチレータの大きさを $12.7\text{cm}\Phi \times 12.7\text{cm}$ に設定したとき、内側に入れる ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの大きさは、低エネルギー領域中性子に対する検出効率が高く、かつ、線量当量換算係数のエネルギー依存性に比較的に近い $2.54\text{cm}\Phi \times 2.54\text{cm}$ に決定した。

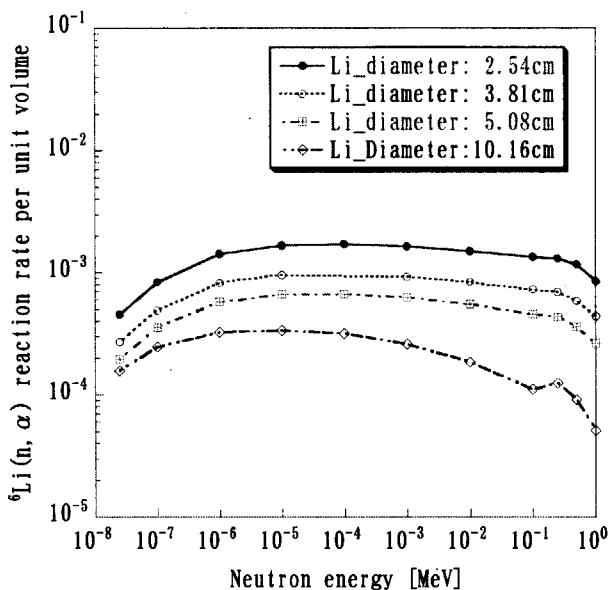


Fig. 5-6 Variable of reaction rate in the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator region

5.1.4 設計した検出器の特性計算

各検出器の最適配置及び大きさの検討結果に基づき設計した ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータとウェル型の液体シンチレータ(以下ウェル型液体シンチレータと言う)を組み合わせた複合型検出器の検出効率及び応答関数を、MCNP-4B コードと SCINFUL-CG コードを用いて計算した。Fig. 5-7 に、複合型検出器の計算形状を示す。ここでは、複合型検出器の側面に、平行中性子ビームが入射するときの検出効率と応答関数を計算した。

${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率を MCNP-4B コードを用い、また、ウェル型液体シンチレータの応答関数は SCINFUL-CG コードを用いて、それぞれ計算した。SCINFUL-CG コードによる計算における中性子エネルギー群は、第 3 章の液体シンチレータの応答関数計算と同様である。ただし、中性子のエネルギー上限値を 80MeV とした。

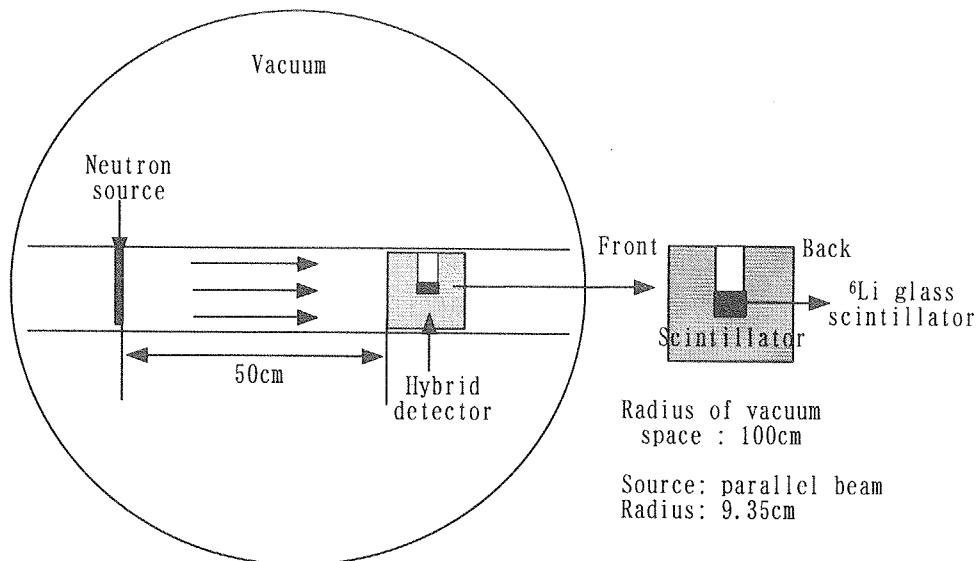


Fig. 5-7 Calculation geometry of the hybrid detector by SCINFUL-CG and MCNP-4B codes

5.1.5 複合型検出器の製作

以上の設計計算結果を基に、Fig. 5-8 に示す ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータとウェル型液体シンチレータを組み合せた複合型検出器を製作した。Fig. 5-9 に、製作した複合型検出器の詳細な構造を示す。 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータは、 $2.54\text{cm}\Phi \times 2.54\text{cm}$ の円柱型ガラスシンチレータ、 $2.54\text{cm}\Phi \times 5\text{cm}$ の円柱型アクリルライトガイド及び光電子増倍管で構成されている。ここで、アクリルライトガイドは、シンチレーション光の損失を小さくして、光の集光性を高めると同時に ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータに対する方向依存性を減衰させるために用いた。液体シンチレータはウェル型形状で、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータを中心に配置、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータと密着するように、外径は $12.7\text{cm}\Phi \times 12.7\text{cm}$ で、内側は $3.6\text{cm}\Phi \times 8.2\text{cm}$ の空間を設けた。液体シンチレータとして、NE213 型を用いた。また、各検出器の発光を各々に計測するために、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータとウェル型液体シンチレータには別々の光電子増倍管を付けた。

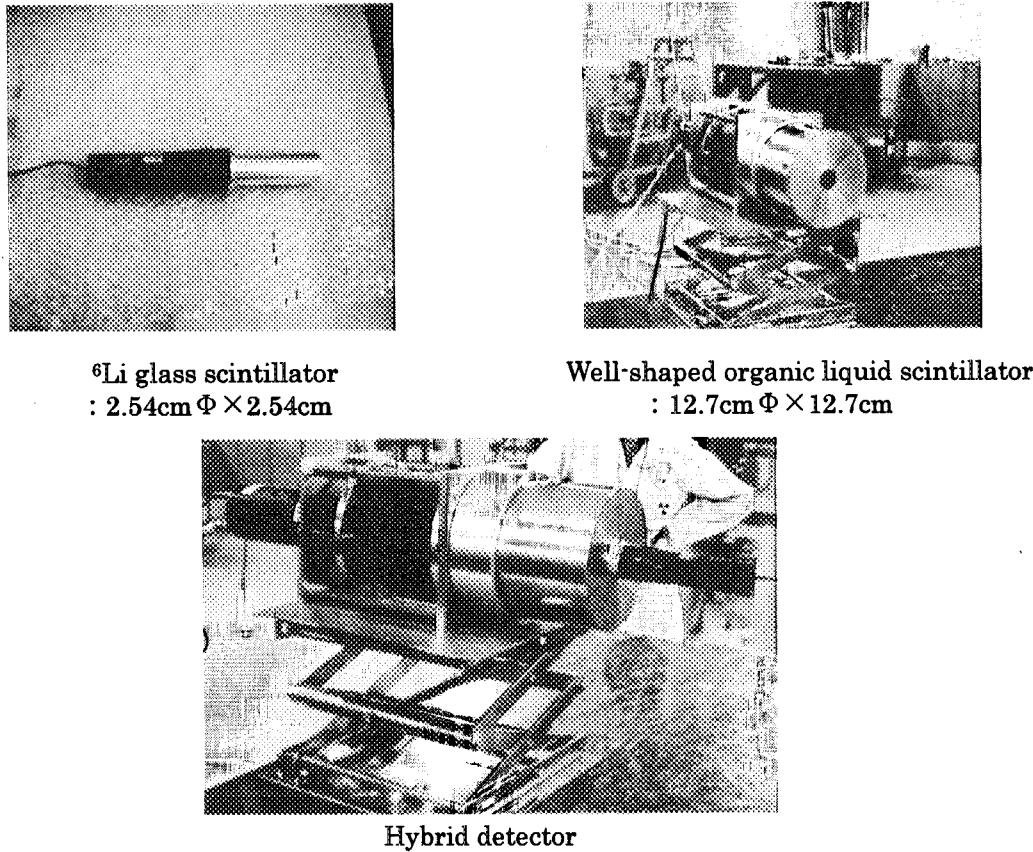


Fig. 5-8 Hybrid detector consisting of ^6Li glass scintillator and welled-shaped organic liquid scintillator

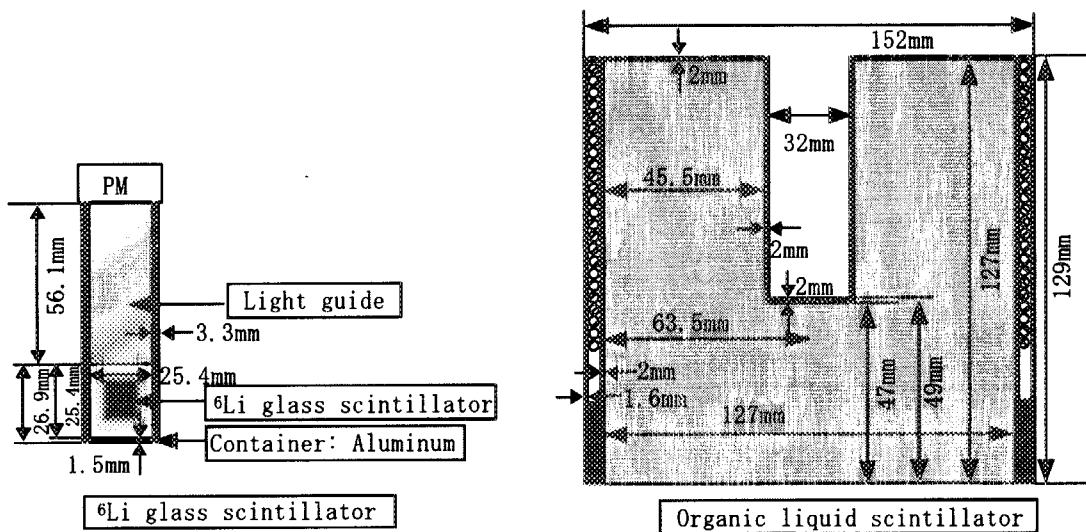


Fig. 5-9 Structure of the hybrid detector of Fig. 5-8

5.2 特性試験

東北大・FNL の単色中性子場及び原研・TIARA の準単色・白色中性子場において検出器の特性試験を行った。ウェル型液体シンチレータに対する実験内容は、第 3.2 節及び第 4.1 節で述べた方法と同じなので省略し、ここでは、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの実験内容のみ説明する。

${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率は、東北大大学・FNL の単色中性子場で測定した。FNL の実験体系は、液体シンチレータの実験体系(Fig. 3-6(a))と同じである。Fig. 5-10 に、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの測定回路を示す。検出器のダイノードからの信号は、PA(Pre Amplifier)と AMP(Amplifier)を用いて増幅して ADC に送られ、その後 MCA によりデータで収集された。

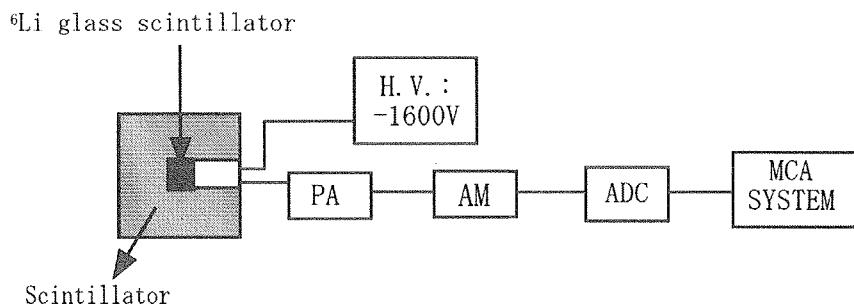
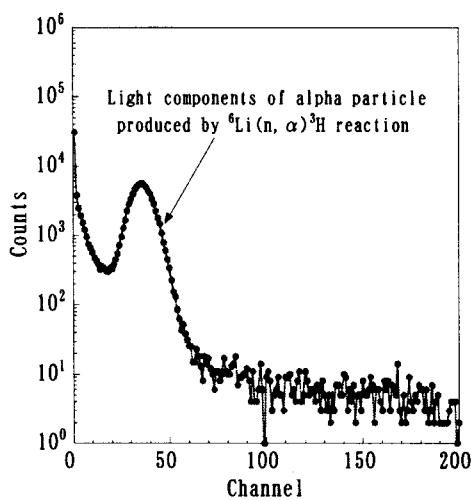


Fig. 5-10 Measuring electronic circuit of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator

${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータは γ 線にも感度があるので、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応に対する検出効率を求めるには、n- γ 弁別を行う必要がある。しかし、 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応により生成する α 粒子の信号は、数 nsec の早い立ち上がり時間と百数十 nsec の遅い減衰時間を持っているため、数 nsec の減衰時間を持つ電子成分と弁別ができない。したがって、液体シンチレータのような各粒子の減衰時間の差による n- γ 弁別方法で、中性子成分を弁別するのは難しい。そこで、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの n- γ 弁別は MCA で測定した波高分布を用いて行った。Fig. 5-11 に、FNL で測定された ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの波高分布の例を示す。波高分布のピークは ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応により見られるもので、このピークから ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率を求めた。

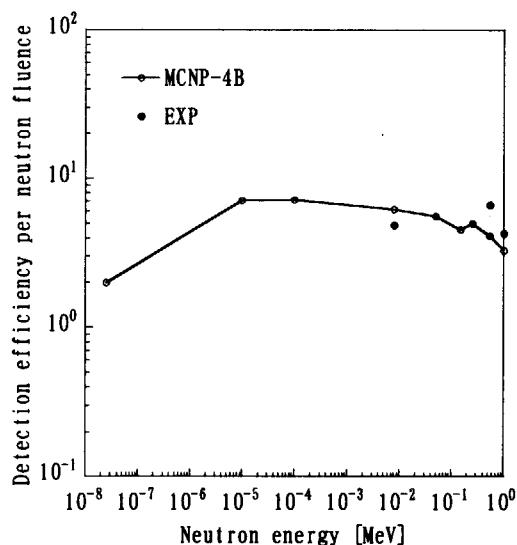
Fig. 5-11 Pulse height spectrum of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator for 550keV neutrons in FNL

5.3 結果

5.3.1 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率とウェル型液体シンチレータの応答関数

${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率

Fig. 5-12 に、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの低エネルギー領域の中性子に対する検出効率を示す。図には、MCNP-4B コードによる計算値と FNL における実測値が併せて示されている。8keV と 1MeV 中性子の場合、実測値による検出効率は計算値と一致している。しかし、550keV 中性子の場合、実測値による検出効率は計算値と比べて約 1.6 倍高い。この結果から、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータの検出効率の実測値による検出効率は、550keV を除き MCNP-4B の計算値に対して 30%以内で一致していることが分かった。

Fig. 5-12 Detection efficiency of the ${}^6\text{Li}$ glass scintillator

ウェル型液体シンチレータの応答関数

Fig. 5-13 に、15MeV 単色中性子と 65MeV 準単色中性子が入射した時のウェル型液体シンチレータの波高分布を示す。実測値は、SCINFUL-CG コードによる計算値と一致している。特に、15MeV 単色中性子の結果では、実測値による応答関数の絶対値が、計算値と約 20%以内で一致している。

ウェル型液体シンチレータの応答関数は、15、45、65MeV 中性子の実測値と SCINFUL-CG コードによる計算値を用いて求めた。応答関数作成用の中性子エネルギー群は、液体シンチレータと同じである。ここで作成したウェル型液体シンチレータの応答関数マトリックスを、付録-C に示す。

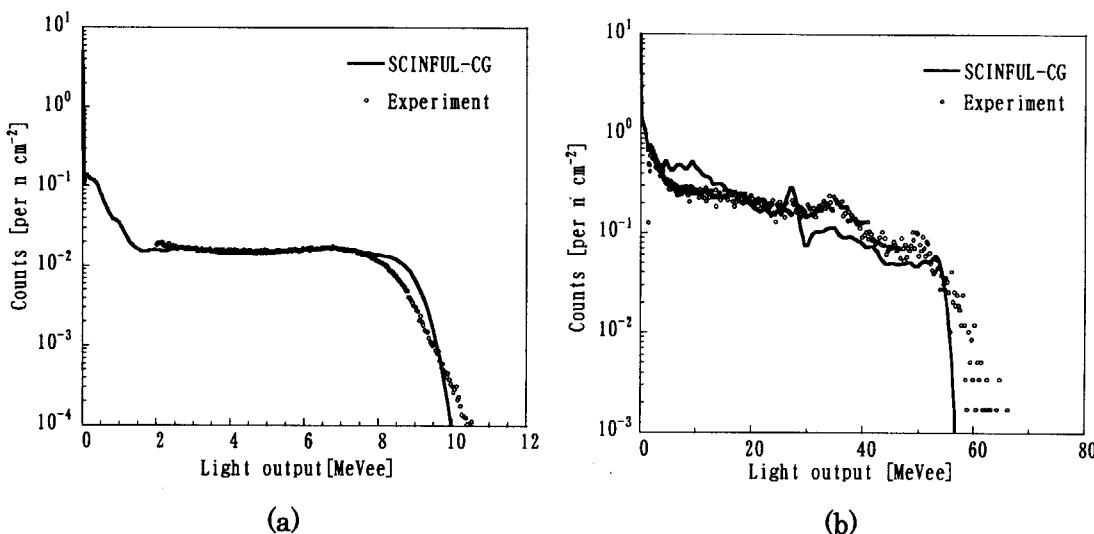


Fig. 5-13 Pulse height spectra measured by the well-shaped scintillator:
(a) 15MeV neutrons, and (b) 65MeV neutrons

5.3.2 複合型検出器の広帯域対応中性子モニタ用検出器化としての可能性検討

1MeV 以上の中性子に対して液体シンチレータを用いて、低エネルギー領域の中性子は液体シンチレータを減速材に利用し、その中に置いた ⁶Li ガラスシンチレータを用いて線量測定をする検出器を考案した。そして、計算コードによる検出器形状の最適設計に基づき、検出器を製作し、その特性を評価した。

Fig. 5-14 は、開発した検出器で得られた ⁶Li ガラスシンチレータの検出効率を熱中性子について、周辺線量当量換算係数に規格した図である。熱エネルギー(0.0253eV)から約 100keV までは、実測値の検出効率は線量をやや過大評価する傾向があるが、100keV を超えると検出効率は低下し線量を過少評価する。したがって、線量測定に用いるためは、このエネルギー依存性をさらに改良する必要がある。これは、減速材を厚くするか減速材中の水素成分を増やせば、周辺線量当量換算係数に近い曲線に改善できると考えられる。また、1MeV 以上中性子は第 3 章で述べたように、ウェル型液体シンチレータを用いることにより線量評価できる。

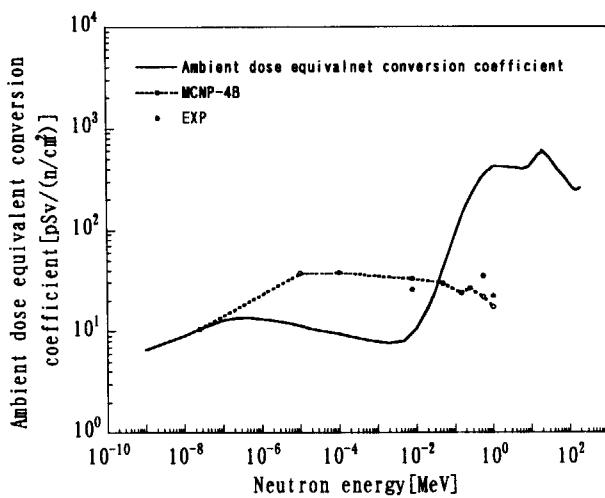


Fig. 5-14 Detection efficiency of the ^{6}Li glass scintillator which was normalized by the ambient dose equivalent conversion coefficient

以上の検討結果から、複合型検出器は、各検出器からの信号を別々に処理する信号処理システムを設ければ、熱中性子から 100MeV 中性子まで線量評価可能な中性子モニタ用検出器として使用可能であるという結論が得られた。

6. まとめ

本研究では、液体シンチレータ、 ^{10}B 入り液体シンチレータ及び ^6Li ガラスシンチレータを用いて、熱エネルギーから 100MeV まで中性子線量評価可能な中性子モニタ用検出器の開発を行った。ここでは、各章別に研究内容をまとめた。

第 3 章では、中性子スペクトロメータ用液体シンチレータを線量測定できる中性子モニタ用検出器として適用するために、本研究の第 1 段階として、液体シンチレータに G 関数法を適用し、液体シンチレータの G 関数を計算した。そして、中性子エネルギースペクトルが既知の幾つかの中性子場で液体シンチレータの波高分布を測定し、G 関数と波高分布を用いて各中性子場の線量を評価した。その結果により、この線量評価法の信頼性を確認し、数 MeV 以上の中性子線量は、G 関数法を適用して液体シンチレータにより評価できることを実証した。

第 4 章では、第 3 章で用いた方法を基に、線量評価領域を熱エネルギーまで拡張した中性子モニタ用検出器を開発するために、検出器として $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により熱中性子まで感度を持つ ^{10}B 入り液体シンチレータに着目した。そして、中性子モニタ用検出器としての使用可能性を検討するために、幾つかの中性子場で測定した実測値と SCINFUL コード及び MCNP-4B コードによる計算値を用いて ^{10}B 入り液体シンチレータの応答関数を作成し、 ^{10}B 入り液体シンチレータの G 関数を計算した。この G 関数により、 ^{10}B 入り液体シンチレータは、液体シンチレータの線量評価領域より低い熱エネルギーまで中性子線量測定できるようになった。しかし、中性子と γ 線が混在する放射線場では、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ により生成する α 粒子の発光を用いた低エネルギー領域の中性子弁別が難しく、モニタ用検出器としての適用は困難であると判断した。

第 5 章では、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$ 反応の代わりに $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$ 反応に着目し、低エネルギー領域の中性子線量測定に ^6Li ガラスシンチレータ、1MeV 以上の中性子線量測定に液体シンチレータを組み合わせることを考案した。まず、各々の検出器が適切な検出効率のエネルギー依存性と応答関数を持つ最適な形状を設計するために、SCINFUL-CG コードと MCNP-4B コードを用いて設計計算を行い、その計算結果を基に、 ^6Li ガラスシンチレータと液体シンチレータを組み合わせた検出器を製作した。また、製作した検出器に関して、幾つかの中性子場で検出器の検出効率及び応答関数を測定し、この測定結果を用いて、モニタ用検出器としての適用性を調べた。この検討結果により、本研究で開発した検出器は、各検出器に別々の信号処理システムを設けることにより、熱中性子から数百 MeV 中性子まで線量評価が可能なモニタ用検出器として使用できることが分かった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、G 関数に関する貴重な資料を提供していただいた中性子科学センターの大山幸夫氏と中島宏氏に深く感謝致します。液体シンチレータを使用するにあたり、CAMAC 回路の組み方から実験解析方法等の研究内容について有意な助言や実験機材の貸与等、物心両面で支持してくださった中性子科学センターの明午伸一郎氏に深く感謝致します。また、SCINFUL コードの提供、TIARA の実験を行う際、実験機材の貸与や有益な助言を頂いた高エネルギー研究所の中尾徳晶氏にもお礼を申し上げます。

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。高崎の実験中、昼夜を問わらずに加速器を運転して下さいました TIARA のマシングループの皆様にお礼を申し上げます。また、東北大・FNL での実験中、実験回路の貸与及び FNL マシンを運転して下さいり、有益な助言をして頂いた馬場護教授に深く感謝致します。他に、実験の御協力を頂いた馬場研究室の学生の皆様、中村研究室の布宮智也氏にも感謝します。そして、原研・FRS の実験に御協力を頂いた原研保健物理部線量計測技術研究室の皆様にも深く感謝致します。

実験をはじめとして、日頃の研究生活を支えてくださった原研保健物理部外部被ばく防護研究室の皆様、研究を進めるに有益な助言を下さった坂本幸夫氏、FNL 及び TIARA での実験に御協力を頂いた高橋史明氏、実験の御協力及び TIARA の中性子束の絶対値を提供して頂いた津田修一氏、実験を行うに有益な助言と実験に御協力して頂いた佐藤達彦氏には大変お世話になりました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム：大強度陽子加速器計画, JAERI-Tech 2000-003 (2000).
- 2) 坂本 幸夫、山口 恭弘：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, JAERI-Tech 2001-042 (2001).
- 3) Andersson, I.O. and Braun, J.A., *A Neutron Rem Counter with Uniform Sensitivity from 0.0256 eV to 10 MeV*, In: Proc. IAEA Symposium on Neutron Dosimetry(Vienna: IAEA). Vol. II, 87-95 (1963).
- 4) Leake, J.W., *A Spherical Dose Equivalent Detector*, Nucl. Instrum. Methods 63, 329-332 (1968).
- 5) Burgkhardt, B., Fieg, G., Klett, A., Plewnia, A. and Siebert, B. R. L., *The Neutron Fluence and H*(10) Response of the New LB6411 Rem Counter*, Radiat. Prot. Dosim. 70(1-4), 361-364 (1997).
- 6) Olsher, R.H., Hsu, H. H., Beverding, A., Kleck, J. H., Casson, W. H., Vasilik, D.G. and Devine, R.T., *WENDI: An Improved Neutron Rem Meter*, Health Phys. 79(2), 170-181 (2000).
- 7) Birattari, C., Esposito, A., Ferrari, A., Pelliccioni, M., Rancati, T. and Silari, T., *The Extended Range Neutron Rem Counter 'LINUS'. Overview and Lastest Developments*, Radiat. Prot. Dosim. 76(3), 135-148 (1998).
- 8) 森内 茂、長岡 鋭、坂本 隆一、斎藤 公明：球形 NaI(Tl)シンチレーション検出器のスペクトル線量換算演算子の決定, JAERI-M 8092 (1979).
- 9) 森内 茂：スペクトル線量換算演算子による線量評価法とその演算子の決定, JAERI 1209 (1971).
- 10) Oyama, Y., Sekiyama, K. and Maekawa, H., *Spectrum Weight Function Method for In-situ Fast Neutron and Gamma-ray Response Measurements in Fusion Integral Experiments with an NE213 Scintillation Detector*, Paper for Eleventh Topical Meeting in the Technology of Fusion Energy, June 19-23, New Orleans, Louisiana, U.S.A., (1994).
- 11) Bollinger, L. M. and Thomas, G. E., *Boron-loaded liquid scintillation neutron detectors, the review of scientific instruments*, Vol. 28, Num. 7, 489-496(1957).
- 12) Shin, K et al., *Propagation of Errors from Response functions to Unfolded Spectrum*, Nucl. Technol., 53, 78-85 (1981).
- 13) McElroy, W. N., Berg, S. and Crockett T., *A Computer-Automated Interactive Method for Neutron Flux Spectra Determined by Foil Activation*, AFWL-TR-67- 41. Vol. I-IV (1967).
- 14) Dickens, J., *SCINFUL: A Monte Carlo Based Computer Program to Determine a Scintillator Full Energy Response to Neutron Detection for En Between 0.1 and 80 MeV*, ORNL-6436, Oak Ridge National Laboratory (1988).

- 15) Meigo, S., *Measurements of Response Function and Detection Efficiency of an NE213 Scintillator for Neutrons Between 20 and 65 MeV*, Nucl. Instrum. Methods **A401**, 365-378 (1997).
- 16) Cecil, R., Anderson, B. and Madey, R., *Improved Predictions of Neutron Detection Efficiency for Hydrogen Scintillator from 1 MeV to about 300 MeV*, Nucl. Instrum. Methods **161**, 439 (1979).
- 17) International Commission on Radiological Protection. *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP Publication 74 (Oxford: PERGAMON Press) (1997).
- 18) Dumais, J.P., 吉澤 道夫、山口 恭弘 : ^{252}Cf 及び $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ 中性子源を用いた速中性子校正場の散乱性評価, JAERI-Tech **98-005** (1998).
- 19) Baba, M., Takada, M., Iwasaki, T., Matsuyama, S., Nakamura, T., Ohguchi, H., Nakao, N., Sanami, T. and Hirasawa, H., *Development of Monoenergetic Neutron Calibration Fields Between 8 keV and 15 MeV*, Nucl. Instrum. Methods, **A376**, 115-123 (1996).
- 20) Nakao, N., Nakamura, T., Baba, M., Uwamino, Y., Nakanishi, N., Nakashima, H. and Tanaka, Sh., *Measurements of Response Function of Organic Liquid Scintillator for Neutron Energy Range up to 135 MeV*, Nucl. Instrum. Methods, **A362**, 454-465 (1995).
- 21) Omata, K., Fujita, Y., Yoshizawa, N., Sekiguchi, M. and Shida, Y., *A Data Acquisition System Based on a Personal Computer*, IEEE Trans. Nucl. Sci, **39**, 143 (1992).
- 22) Baba, M., Nauchi, Y., Iwasaki, T., Kiyosumi, T., Yoshioka, M., Matsuyama, S., Hirakawa, N., Nakamura, T., Tanaka, Su., Meigo, S., Nakashima, H., Tanaka, Sh. and Nakao, N., *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, **A428**, 454-465 (1999).
- 23) Dietz, G and Klien, H., *Gamma-calibration of NE213-scintillation counters*, Nucl. Instrum. Methods, **193**, 549-556 (1982).
- 24) Verbinski, V. V., Burrus, W. R., Love, T. A., Zobel, W., Hill, N. W. and Textor, R., *Calibration of an organic scintillator for neutron spectrometer*, Nucl. Instrum. Methods, **65**, 8-25 (1968).
- 25) Shin, K., Tokumaru, H., Toshida, M. and Hyodo, T., *Calculation of neutron response functions of NE-213 scintillator in the energy range up to 40MeV*, Mem, Fac. Eng. Kyoto univ., **41**, 116-136(1979).
- 26) Uwamino, Y., Shin, K., Fujii, M. and Nakamura, T., *Light output and response function of an NE-213 scintillator to neutrons up to 100MeV*, Nucl. Instrum. Methods, **204**, 179-189 (1982).
- 27) Birks, J. B., *The Theory and practices of scintillation counting*, Pergamon press, Oxford, (1964).
- 28) 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, 東北大学大 学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻(1993)

- 29) 米内 俊祐、佐波 俊哉、佐々木 慎一、中村 尚司、道川 太一、瓜 谷章：高エネルギー
加速器研究機構における黒鉛パイアル熱中性子標準場の開発, KEK Internal 2001-1 (2001).
- 30) 遠藤 章、金 ウンジュ、山口 恭弘：任意形状の中性子用シンチレータに対する応答関数計
算コード SCINFUL-CG の開発, JAERI-Data/Code 2001-207 (2001).
- 31) Kim, E., Endo, A. and Yamaguchi, Y., *Development of SCINFUL-CG Code to Calculate
Response Function of Hybrid Neutron Detectors Using Scintillators*, International
Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Oct. 7-12, Tsukuba, Japan(2001)
(submitted).
- 32) Briesmeister, J. F., *MCNP TM - A General Monte Carlo n-particle transport code*, Ver. 4B,
LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, (1997).
- 33) Miller., M.C. et al., *Neutron detection and application using a bc454/bgo array*, Nucl. Instr.
and Meth., A422, 89-94 (1999).
- 34) West, J. T., Emmett, M. B., *MARS: A Multiple array system using combinational geometry*,
Section M9 of NUREG/CR- 0200, Vol.3 (1984).
- 35) Chadwick, M. B. et al., *Cross-section evaluations to 150MeV for accelerator driven system
and implementation in MCNPX*, Nucl. Sci. Eng., 131, 293 (1999).
- 36) Dumais, J.P.、吉澤 道夫、山口 恭弘：熱中性子場中の中速及び速中性子成分の影響評価：
計算シミュレーションによる評価, JAERI-Tech, 97-033, (1997).

付録-A

第2章のG関数を計算する逐次近似法によるアンフォールディング用G関数計算プログラムと入力ファイルを示す。ここでは、G関数計算プログラムのリストとプログラムを実行するために必要な入力ファイルの種類及びその内容について述べる。

1. G関数計算用プログラム

```

C=====
C-----+---1---+---2---+---3---+---4---+---5---+---6---+---8---+
C
C      SPECTRUM WEIGHTING FUNCTION PROGRAM FOR SCINTILLATOR
C
C-----+---+---+---+---+---+---+---+
C
C
C=====

IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
REAL*8 FX, FXE
REAL*8 FFD
PARAMETER (N=64, M=324, NW=162, N1=37, NNN=200)
DIMENSION ELAB(500), R(500,500), RG(500,500), FX(500), PHB(500),
&           G(500), W(500), GG(500), FFD(500),
&           FXE(500), SS(500)
C      CHARACTER DUMM
COMMON /AA/ PH(500)
call IOINIT(.TRUE.,.FALSE.,.FALSE.,'FORT',.FALSE.)
C----- < Iteration Times Input >
      READ(1,1500) ITMAX
      1500 FORMAT(I10)
C----- < ENERGY BIN_DOSE CONVERSION COEFFICIENTS >
      DO 4 J=1,NW,6
      READ (2,1100) (FXE(I), I=J, J+5)
      4 CONTINUE
      WRITE(3,1100) (FXE(I), I=1, NW)
C----- < DOSE CONVERSION COEFFICIENTS INPUT>
      DO I=163,NNN
      FXE(I)=FXE(162)+(I-162)*(FXE(162)-FXE(161))
      ENDDO
      DO 3 J=1,NNN,6
      READ (4,1100) (FFD(I), I=J, J+5)
      3 CONTINUE
      WRITE(5,1100) (FFD(I), I=1, NNN)
C----- < Light Unit Boundary Point Input >
      DO 2 J=1,M+1,6
      READ (6,1100) (PHB(I), I=J, J+5)
      WRITE(7,1100) (PHB(I), I=J, J+5)
      2 CONTINUE
      DO 22 I=1,M
      22 PH(I)=PHB(I)
C     22 PH(I)=(PHB(I)+PHB(I+1))*0.5

```

```

      WRITE(8,1100) (PH(I), I=1,M)
C----- < ENERGY MIDDLE POINT INPUT > -----
      DO 1 J=1,N,6
      READ (9,1100) (ELAB(I), I=J, J+5)
1 CONTINUE
      WRITE(10,1100) (ELAB(I), I=1,N)
C----- < Response Matrix Input > -----
      DO 5 I=1,N
      DO 55 K=1,M,6
      READ(11,1100) (R(J,I), J=K, K+5)
      WRITE(12,1100) (R(J,I), J=K, K+5)
55 CONTINUE
5 CONTINUE
C----- < Dose conversion coefficient > -----
      DO 30 I=1,N
      DO 31 J=1,161
      IF (ELAB(I).GT.FXE(J).AND.ELAB(I).LT.FXE(J+1)) GOTO 32
31 CONTINUE
32 K=J
      FX(I)=(FFD(K+1)-FFD(K))*ELAB(I)+FXE(K+1)*FFD(K)-
*           FXE(K)*FFD(K+1)
      FX(I)=FX(I)/(FXE(K+1)-FXE(K))
30 CONTINUE
C
C     PROGRAM RUN
C
C----- < INITIAL FUNCTION(DOSE CONVERSION COEFFICIENTS) SMEARTING > --
      DO 10 I=1,N
      DO 10 J=1,M
      RG(I,J)=R(J,I)
10 CONTINUE
C----- <INITIAL FUNCTION(DOSE CONVERSION COEFFICIENTS) SMEARTING > --
      DO 12 I=1,N
      SS(I)=FX(I)
12 CONTINUE
      WRITE(13,1100) (SS(I), I=1,N)
C
      CALL GFC (RG, SS, G, N, M, W, ITMAX)
C
      WRITE (14,1800) (PH(I), I=1,M)
      WRITE (14,1800) ( G(I), I=1,M)
C
      DO 20 I=1,N
      GG(I)=0.0
      DO 20 J=1,M
      GG(I)=GG(I)+RG(I,J)*G(J)
20 CONTINUE
C
      WRITE(15,1800) (ELAB(I), I=1,N)
      WRITE(15,1800) (FX(I), I=1,N)
C

```

```

      WRITE(16,1800) (ELAB(I), I=1, N)
      WRITE(16,1800) (GG(I), I=1, N)

      WRITE(17,1800) (SS(I), I=1, N)
C
      900 FORMAT (E12. 5)
      1000 FORMAT (I10)
      1100 FORMAT (6E12. 5)
      1800 FORMAT (1E12. 5)
      STOP
      END
C
C          SUBROUTINE G-FUNCTION
C
C          SUBROUTINE GFC(RG, SS, G, N, M, W, ITMAX)
C          IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C          REAL*8 FX
C          DIMENSION    RG(500,500), G(500), W(500), B(500), SS(500),
C          &           D(500), W1(500,500), S1(500), S2(500), S0(500),
C          &           S(500)
C          COMMON /AA/ PH(500)
C
      EPS=1.0D-2
      ITRT=0
C
      DO 50 I=1, M
          G(I)=0.1D1
      50 CONTINUE
C
      111 DO 60 I=1, N
          D(I)=0.0D0
          DO 60 J=1, M
              D(I)=D(I)+RG(I, J)*G(J)
      60 CONTINUE
C
      DO 70 I=1, N
          B(I)=SS(I)/D(I)
      70 CONTINUE
C
      SSD=0.0
      DO 80 I=1, N
          SSD=SSD+(B(I)-1.0D0)**2
      80 CONTINUE
      SSD=DSQRT(SSD)
      IF (SSD.LT.EPS) THEN
          GOTO 999
      ELSE IF (ITRT.EQ.ITMAX) THEN
          GOTO 999
      END IF
C

```

```

      DO 90 I=1,N
      S(I)=0.0D0
      DO 100 J=1,M
      S(I)=S(I)+RG(I,J)*G(J)
100    CONTINUE
      W(I)=2.0D0*S(I)
90     CONTINUE
      WRITE(18,1700) (W(I),I=1,N)
C
      DO 110 I=1,N
      DO 120 J=2,M-1
      W1(I,J)=RG(I,J)*G(J)+RG(I,J-1)*G(J-1)
120    CONTINUE
      W1(I,1)=5.0D0*RG(I,1)*G(1)+3.0D0*RG(I,2)*G(2)-RG(I,3)*G(3)
      W1(I,M)=5.0D0*RG(I,M)*G(M)+3.0D0*RG(I,M-1)*G(M-1)
      *           -RG(I,M-2)*G(M-2)
110    CONTINUE
C
      DO 130 I=1,N
      DO 135 J=2,M-1
      W1(I,J)=W1(I,J)/W(I)
135    CONTINUE
      W1(I,1)=W1(I,1)/(3.0D0*W(I))
      W1(I,M)=W1(I,M)/(3.0D0*W(I))
130    CONTINUE
C
      DO 140 I=1,M
      S1(I)=0.0D0
      S2(I)=0.0D0
      DO 150 J=1,N
      S1(I)=S1(I)+(W1(J,I)*DLG(B(J)))
      S2(I)=S2(I)+(W1(J,I))
150    CONTINUE
      IF(S2(I).LT.1E-36)THEN
      S0(I)=1
      ELSE
      S0(I)=S1(I)/S2(I)
      ENDIF
140    CONTINUE
      WRITE(19,1700) (S0(I),I=1,M)
C
      DO 160 I=1,M
      G(I)=G(I)*EXP(S0(I))
160    CONTINUE
C
      ITRT=ITRT+1
      GOTO 111
C
      999 CONTINUE
      WRITE (20,*) ITRT, SSD
      DO 170 I=1,M
      WRITE (20,1500) I,PH(I),G(I)

```

```

170 CONTINUE
C
1700 FORMAT(1E12.5)
1500 FORMAT (1H ,7X,I5,5X,1PE12.5,5X,1PE12.5)
      RETURN
      END

```

2. 必要な入力データファイル及び出力ファイルとその内容

ファイル内容	入出力	機番	拡張子
繰り返し回数の設定	入力	1	*.itm
線量換算係数用エネルギー間隔	入力	2	*.rfx
線量換算係数	入力	4	*.rfd
応答関数のエネルギー群	入力	9	*.reb
応答関数の発光量群	入力	6	*.rph
応答関数マトリックス	入力	11	*.rrs
G関数の計算結果	出力	14	*.wpg
G関数による求めた線量換算係数	出力	16	*.egg

2.1 繰り返し回数 (*.itm) : READ(1, 1500) ITMAX

20

2.2 中性子エネルギー間隔[MeV] (線量換算係数用) (*.rfx) : READ (2, 1100) (FXE(I), I=J, J+5)

2.10210E-01	2.20990E-01	2.32320E-01	2.44230E-01	2.56760E-01	2.66920E-01
2.83760E-01	2.98310E-01	3.13600E-01	3.29680E-01	3.46580E-01	3.64350E-01
3.83040E-01	4.02670E-01	4.23320E-01	4.45020E-01	4.67840E-01	4.91830E-01
5.17040E-01	5.43550E-01	5.71420E-01	6.00720E-01	6.31520E-01	6.63900E-01
6.97940E-01	7.33720E-01	7.71340E-01	8.10890E-01	8.52460E-01	8.96170E-01
9.42110E-01	9.90420E-01	1.04120E+00	1.09460E+00	1.15070E+00	1.20970E+00
1.27170E+00	1.33690E+00	1.40550E+00	1.47750E+00	1.55330E+00	1.63290E+00
1.71660E+00	1.80470E+00	1.89720E+00	1.99450E+00	2.09670E+00	2.20420E+00
2.31720E+00	2.43600E+00	2.56090E+00	2.69220E+00	2.83030E+00	2.97540E+00
3.12790E+00	3.28830E+00	3.45690E+00	3.63410E+00	3.82050E+00	4.01630E+00
4.22230E+00	4.43870E+00	4.66630E+00	4.90560E+00	5.15710E+00	5.42150E+00
5.69950E+00	5.99170E+00	6.29890E+00	6.62180E+00	6.96130E+00	7.31830E+00
7.69350E+00	8.08790E+00	8.50260E+00	8.93850E+00	9.39680E+00	9.87860E+00
1.03800E+01	1.09180E+01	1.14770E+01	1.20660E+01	1.26840E+01	1.33350E+01
1.40180E+01	1.47370E+01	1.54930E+01	1.62870E+01	1.71220E+01	1.79570E+01
1.87920E+01	1.96270E+01	2.04620E+01	2.12970E+01	2.21320E+01	2.29670E+01
2.38020E+01	2.46370E+01	2.54720E+01	2.63070E+01	2.71420E+01	2.79770E+01
2.88120E+01	2.96470E+01	3.04820E+01	3.13170E+01	3.21520E+01	3.29870E+01
3.38220E+01	3.46570E+01	3.54920E+01	3.63270E+01	3.71620E+01	3.79970E+01
3.88320E+01	3.96670E+01	4.05020E+01	4.13370E+01	4.21720E+01	4.30070E+01
4.38420E+01	4.46770E+01	4.55120E+01	4.63470E+01	4.71820E+01	4.80170E+01
4.88520E+01	4.96870E+01	5.05220E+01	5.13570E+01	5.21920E+01	5.30270E+01
5.38620E+01	5.46970E+01	5.55320E+01	5.63670E+01	5.72020E+01	5.80370E+01
5.88720E+01	5.97070E+01	6.05420E+01	6.13770E+01	6.22120E+01	6.30470E+01
6.38820E+01	6.47170E+01	6.55520E+01	6.63870E+01	6.72220E+01	6.80570E+01
6.88920E+01	6.97270E+01	7.05620E+01	7.13970E+01	7.22320E+01	7.30670E+01
7.39020E+01	7.47370E+01	7.55720E+01	7.64070E+01	7.72420E+01	7.80770E+01

2.3 線量換算係数 (*.rfd) : READ (4, 1100) (FFD(I), I=J, J+5)

1.76432E+02 1.83224E+02 1.90362E+02 1.97865E+02 2.05759E+02 2.12160E+02

2. 22769E+02 2. 31935E+02 2. 39052E+02 2. 46208E+02 2. 53728E+02 2. 61636E+02
 2. 69953E+02 2. 78688E+02 2. 87877E+02 2. 97534E+02 3. 07689E+02 3. 18364E+02
 3. 26516E+02 3. 33541E+02 3. 40926E+02 3. 48691E+02 3. 56853E+02 3. 65434E+02
 3. 74454E+02 3. 79215E+02 3. 83918E+02 3. 88861E+02 3. 94058E+02 3. 99521E+02
 4. 06738E+02 4. 14467E+02 4. 17854E+02 4. 20257E+02 4. 22782E+02 4. 24939E+02
 4. 24552E+02 4. 24144E+02 4. 23716E+02 4. 23266E+02 4. 22792E+02 4. 22294E+02
 4. 21771E+02 4. 21221E+02 4. 20643E+02 4. 20034E+02 4. 19226E+02 4. 18366E+02
 4. 17462E+02 4. 16512E+02 4. 15513E+02 4. 14462E+02 4. 13358E+02 4. 12197E+02
 4. 11488E+02 4. 10847E+02 4. 10172E+02 4. 09464E+02 4. 08718E+02 4. 07951E+02
 4. 07333E+02 4. 06684E+02 4. 06001E+02 4. 05283E+02 4. 04215E+02 4. 02893E+02
 4. 01503E+02 4. 00042E+02 4. 01495E+02 4. 03109E+02 4. 04807E+02 4. 06273E+02
 4. 07774E+02 4. 09967E+02 4. 14529E+02 4. 19324E+02 4. 27936E+02 4. 37572E+02
 4. 47600E+02 4. 58360E+02 4. 69540E+02 4. 81320E+02 4. 93680E+02 5. 06700E+02
 5. 20360E+02 5. 34740E+02 5. 47395E+02 5. 57153E+02 5. 63415E+02 5. 69678E+02
 5. 81880E+02 5. 94405E+02 5. 96073E+02 5. 88976E+02 5. 81878E+02 5. 74781E+02
 5. 67683E+02 5. 60586E+02 5. 53488E+02 5. 46391E+02 5. 39293E+02 5. 32196E+02
 5. 25098E+02 5. 18001E+02 5. 12229E+02 5. 07427E+02 5. 02626E+02 4. 97825E+02
 4. 93024E+02 4. 88222E+02 4. 83421E+02 4. 78620E+02 4. 73819E+02 4. 69017E+02
 4. 64216E+02 4. 59415E+02 4. 54614E+02 4. 49812E+02 4. 45011E+02 4. 40210E+02
 4. 35409E+02 4. 30607E+02 4. 25806E+02 4. 21005E+02 4. 16204E+02 4. 11402E+02
 4. 06601E+02 4. 01800E+02 3. 98538E+02 3. 96200E+02 3. 93862E+02 3. 91524E+02
 3. 89186E+02 3. 86848E+02 3. 84510E+02 3. 82172E+02 3. 79834E+02 3. 77496E+02
 3. 75158E+02 3. 72820E+02 3. 70482E+02 3. 68144E+02 3. 65806E+02 3. 63468E+02
 3. 61130E+02 3. 58792E+02 3. 56454E+02 3. 54116E+02 3. 51778E+02 3. 49440E+02
 3. 47102E+02 3. 44764E+02 3. 42426E+02 3. 40088E+02 3. 37750E+02 3. 35412E+02
 3. 33074E+02 3. 30736E+02 3. 28970E+02 3. 27467E+02 3. 25964E+02 3. 24461E+02
 3. 22958E+02 3. 21455E+02 3. 19952E+02 3. 18449E+02 3. 16946E+02 3. 15443E+02
 3. 13940E+02 3. 12437E+02 3. 10934E+02 3. 09431E+02 3. 07928E+02 3. 06425E+02
 3. 04922E+02 3. 03419E+02 3. 01916E+02 3. 00413E+02 2. 98910E+02 2. 97407E+02
 2. 95904E+02 2. 94401E+02 2. 92898E+02 2. 91395E+02 2. 89892E+02 2. 88389E+02
 2. 86886E+02 2. 85383E+02 2. 84378E+02 2. 83543E+02 2. 82708E+02 2. 81873E+02
 2. 81038E+02 2. 80203E+02 2. 79368E+02 2. 78533E+02 2. 77698E+02 2. 76863E+02
 2. 76028E+02 2. 75193E+02

2.4 液体シンチレータの中性子エネルギー群 (*.reb) : READ (9, 1100) (ELAB(I), I=J, J+5)

1. 00000E+00 2. 00000E+00 3. 00000E+00 4. 00000E+00 5. 00000E+00 6. 00000E+00
 7. 00000E+00 8. 00000E+00 9. 00000E+00 1. 00000E+01 1. 10000E+01 1. 20000E+01
 1. 30000E+01 1. 40000E+01 1. 50000E+01 1. 60000E+01 1. 70000E+01 1. 80000E+01
 1. 90000E+01 2. 00000E+01 2. 10000E+01 2. 20000E+01 2. 30000E+01 2. 40000E+01
 2. 50000E+01 2. 60000E+01 2. 70000E+01 2. 80000E+01 2. 90000E+01 3. 00000E+01
 3. 10000E+01 3. 20000E+01 3. 30000E+01 3. 40000E+01 3. 50000E+01 3. 60000E+01
 3. 70000E+01 3. 80000E+01 3. 90000E+01 4. 00000E+01 4. 10000E+01 4. 20000E+01
 4. 30000E+01 4. 40000E+01 4. 60000E+01 4. 80000E+01 5. 00000E+01 5. 20000E+01
 5. 40000E+01 5. 60000E+01 5. 80000E+01 6. 00000E+01 6. 20000E+01 6. 40000E+01
 6. 60000E+01 6. 80000E+01 7. 00000E+01 7. 40000E+01 7. 80000E+01 8. 20000E+01
 8. 60000E+01 9. 00000E+01 9. 50000E+01 1. 00000E+02 1. 05000E+02 1. 10000E+02
 1. 15000E+02 1. 20000E+02

2.5 液体シンチレータの応答関数の発光量間隔 (*.rph) : READ (6, 1100) (PHB(I), I=J, J+5)

1. 20200E-01 1. 71200E-01 2. 31300E-01 3. 00300E-01 3. 78300E-01 4. 65200E-01
 5. 61300E-01 6. 66300E-01 7. 80200E-01 9. 03200E-01 1. 03500E+00 1. 17600E+00
 1. 22500E+00 1. 32600E+00 1. 43100E+00 1. 54000E+00 1. 65300E+00 1. 77000E+00
 1. 89100E+00 2. 01600E+00 2. 14500E+00 2. 27800E+00 2. 41500E+00 2. 55600E+00
 2. 70100E+00 2. 85000E+00 3. 00300E+00 3. 16000E+00 3. 32100E+00 3. 48600E+00
 3. 65500E+00 3. 82800E+00 4. 00500E+00 4. 18600E+00 4. 37100E+00 4. 56000E+00
 4. 75300E+00 4. 95000E+00 5. 15100E+00 5. 35600E+00 5. 56500E+00 5. 77800E+00
 5. 99500E+00 6. 21600E+00 6. 44100E+00 6. 67000E+00 6. 90300E+00 7. 14000E+00
 7. 38100E+00 7. 62600E+00 7. 87500E+00 8. 12800E+00 8. 38500E+00 8. 64600E+00
 8. 91100E+00 9. 18000E+00 9. 45300E+00 9. 73000E+00 1. 00100E+01 1. 03000E+01
 1. 04400E+01 1. 05900E+01 1. 07300E+01 1. 08800E+01 1. 10300E+01 1. 11800E+01
 1. 13300E+01 1. 14800E+01 1. 16300E+01 1. 17800E+01 1. 19400E+01 1. 20900E+01
 1. 22500E+01 1. 24000E+01 1. 25600E+01 1. 27200E+01 1. 28800E+01 1. 30400E+01
 1. 32000E+01 1. 33700E+01 1. 35300E+01 1. 37000E+01 1. 38600E+01 1. 40300E+01
 1. 42000E+01 1. 43700E+01 1. 45400E+01 1. 47100E+01 1. 48800E+01 1. 50500E+01
 1. 52300E+01 1. 54000E+01 1. 55800E+01 1. 57500E+01 1. 59300E+01 1. 61100E+01
 1. 62900E+01 1. 64700E+01 1. 66500E+01 1. 68400E+01 1. 70200E+01 1. 72100E+01
 1. 73900E+01 1. 75800E+01 1. 77700E+01 1. 79600E+01 1. 81500E+01 1. 83400E+01

1.85300E+01	1.87200E+01	1.89200E+01	1.91100E+01	1.93100E+01	1.95000E+01
1.97000E+01	1.99000E+01	2.01000E+01	2.03000E+01	2.05000E+01	2.07100E+01
2.09100E+01	2.11200E+01	2.13200E+01	2.15300E+01	2.17400E+01	2.19500E+01
2.21600E+01	2.23700E+01	2.25800E+01	2.27900E+01	2.30100E+01	2.32200E+01
2.34400E+01	2.36500E+01	2.38700E+01	2.40900E+01	2.43100E+01	2.45300E+01
2.47500E+01	2.49800E+01	2.52000E+01	2.54300E+01	2.56500E+01	2.58800E+01
2.61100E+01	2.63400E+01	2.65700E+01	2.68000E+01	2.70300E+01	2.72600E+01
2.75000E+01	2.77300E+01	2.79700E+01	2.82000E+01	2.84400E+01	2.86800E+01
2.89200E+01	2.91600E+01	2.94000E+01	2.96500E+01	2.98900E+01	3.01400E+01
3.03800E+01	3.06300E+01	3.08800E+01	3.11300E+01	3.13800E+01	3.16300E+01
3.18800E+01	3.21300E+01	3.23900E+01	3.26400E+01	3.29000E+01	3.31500E+01
3.34100E+01	3.36700E+01	3.39300E+01	3.41900E+01	3.44500E+01	3.47200E+01
3.49800E+01	3.52500E+01	3.55100E+01	3.57800E+01	3.60500E+01	3.63200E+01
3.65900E+01	3.68600E+01	3.71300E+01	3.74000E+01	3.76800E+01	3.79500E+01
3.82300E+01	3.85000E+01	3.87800E+01	3.90600E+01	3.93400E+01	3.96200E+01
3.99000E+01	4.01900E+01	4.04700E+01	4.07600E+01	4.10400E+01	4.13300E+01
4.16200E+01	4.19100E+01	4.22000E+01	4.24900E+01	4.27800E+01	4.30700E+01
4.33700E+01	4.36600E+01	4.39600E+01	4.42500E+01	4.45500E+01	4.48500E+01
4.51500E+01	4.54500E+01	4.57500E+01	4.60600E+01	4.63600E+01	4.66700E+01
4.69700E+01	4.72800E+01	4.75900E+01	4.79000E+01	4.82100E+01	4.85200E+01
4.88300E+01	4.91400E+01	4.94600E+01	4.97700E+01	5.00900E+01	5.04000E+01
5.07200E+01	5.10400E+01	5.13600E+01	5.16800E+01	5.20000E+01	5.23300E+01
5.26500E+01	5.29800E+01	5.33000E+01	5.36300E+01	5.39600E+01	5.42900E+01
5.46200E+01	5.49500E+01	5.52800E+01	5.56100E+01	5.59500E+01	5.62800E+01
5.66200E+01	5.69500E+01	5.72900E+01	5.76300E+01	5.79700E+01	5.83100E+01
5.86500E+01	5.90000E+01	5.93400E+01	5.96900E+01	6.00300E+01	6.03800E+01
6.07300E+01	6.10800E+01	6.14300E+01	6.17800E+01	6.21300E+01	6.24800E+01
6.28400E+01	6.31900E+01	6.35500E+01	6.39000E+01	6.42600E+01	6.46200E+01
6.49800E+01	6.53400E+01	6.57000E+01	6.60700E+01	6.64300E+01	6.68000E+01
6.71600E+01	6.75300E+01	6.79000E+01	6.82700E+01	6.86400E+01	6.90100E+01
6.93800E+01	6.97500E+01	7.01300E+01	7.05000E+01	7.08800E+01	7.12500E+01
7.16300E+01	7.20100E+01	7.23699E+01	7.27426E+01	7.31154E+01	7.34881E+01
7.38609E+01	7.42336E+01	7.46064E+01	7.49791E+01	7.53519E+01	7.57246E+01
7.60974E+01	7.64701E+01	7.68429E+01	7.72156E+01	7.75884E+01	7.79611E+01
7.83338E+01	7.87066E+01	7.90793E+01	7.94521E+01	7.98248E+01	8.01976E+01
8.05703E+01	8.09431E+01	8.13158E+01	8.16836E+01	8.20613E+01	8.24341E+01
8.28068E+01	8.31796E+01				

2.6 液体シンチレータの応答関数マトリックス (*.rrs) : READ(11, 1100) (R(J, I), J=K, K+5)

以下省略

付録-B

第4章で作成した 12.7cmΦ×12.7cm の ^{10}B 入り有機液体シンチレータの応答関数マトリックスを以下に示す。応答関数の単位は、[(counts/MeVee)/(n/cm²)]で、これは検出器の全面表面積当たりの中性子に対する感度を意味する。

[MeVee]	2.50E-08 [MeV]	1.00E-07 [MeV]	2.00E-07 [MeV]	5.00E-07 [MeV]	1.00E-06 [MeV]	2.00E-06 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	5.69E-02	5.51E-01	7.73E-01	1.44E+00	2.55E+00	2.71E+00
0.03	1.11E+00	1.08E+01	1.51E+01	2.82E+01	4.99E+01	5.30E+01
0.04	2.35E+00	2.27E+01	3.19E+01	5.95E+01	1.05E+02	1.12E+02
0.05	3.64E+00	3.53E+01	4.95E+01	9.23E+01	1.64E+02	1.74E+02
0.06	3.68E+00	3.56E+01	5.00E+01	9.32E+01	1.65E+02	1.75E+02
0.07	1.74E+00	1.69E+01	2.37E+01	4.42E+01	7.83E+01	8.31E+01
0.08	7.29E-01	7.05E+00	9.90E+00	1.85E+01	3.27E+01	3.47E+01
0.09	1.44E-01	1.39E+00	1.95E+00	3.64E+00	6.45E+00	6.85E+00
[MeVee]	5.00E-06 [MeV]	1.00E-05 [MeV]	2.00E-05 [MeV]	5.00E-05 [MeV]	1.00E-04 [MeV]	2.00E-04 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	3.18E+00	3.97E+00	4.00E+00	4.06E+00	4.18E+00	4.12E+00
0.03	6.22E+01	7.76E+01	7.80E+01	7.93E+01	8.15E+01	8.05E+01
0.04	1.31E+02	1.64E+02	1.65E+02	1.68E+02	1.72E+02	1.70E+02
0.05	2.04E+02	2.54E+02	2.56E+02	2.60E+02	2.67E+02	2.64E+02
0.06	2.06E+02	2.57E+02	2.58E+02	2.63E+02	2.70E+02	2.67E+02
0.07	9.76E+01	1.22E+02	1.22E+02	1.25E+02	1.28E+02	1.26E+02
0.08	4.08E+01	5.09E+01	5.12E+01	5.20E+01	5.35E+01	5.28E+01
0.09	8.04E+00	1.00E+01	1.01E+01	1.03E+01	1.05E+01	1.04E+01
[MeVee]	5.00E-04 [MeV]	1.00E-03 [MeV]	2.00E-03 [MeV]	5.00E-03 [MeV]	1.00E-02 [MeV]	2.00E-02 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	3.97E+00	3.72E+00	3.64E+00	3.39E+00	3.09E+00	3.02E+00
0.03	7.76E+01	7.26E+01	7.10E+01	6.63E+01	6.04E+01	5.90E+01
0.04	1.64E+02	1.53E+02	1.50E+02	1.40E+02	1.28E+02	1.25E+02
0.05	2.54E+02	2.38E+02	2.33E+02	2.17E+02	1.98E+02	1.94E+02
0.06	2.57E+02	2.40E+02	2.35E+02	2.19E+02	2.00E+02	1.95E+02
0.07	1.22E+02	1.14E+02	1.11E+02	1.04E+02	9.47E+01	9.26E+01
0.08	5.08E+01	4.76E+01	4.65E+01	4.34E+01	3.96E+01	3.87E+01
0.09	1.00E+01	9.38E+00	9.18E+00	8.57E+00	7.80E+00	7.63E+00
[MeVee]	5.00E-02 [MeV]	1.00E-01 [MeV]	2.00E-01 [MeV]	6.00E-01 [MeV]	1 [MeV]	2 [MeV]
0.01	0	4.01E+03	2.62E+03	1.07E+03	8.22E+02	8.15E+02
0.02	2.82E+00	1.38E+03	3.83E+03	1.96E+03	6.07E+02	3.09E+02
0.03	5.51E+01	1.13E+02	1.34E+03	1.49E+03	4.91E+02	1.88E+02
0.04	1.16E+02	1.03E+02	7.53E+02	1.65E+03	6.81E+02	2.32E+02
0.05	1.81E+02	1.59E+02	4.14E+02	1.53E+03	9.03E+02	2.82E+02
0.06	1.82E+02	1.60E+02	1.81E+02	1.17E+03	1.09E+03	3.14E+02
0.07	8.64E+01	7.60E+01	7.18E+01	7.13E+02	1.17E+03	3.20E+02
0.08	3.61E+01	3.18E+01	2.94E+01	3.66E+02	1.16E+03	3.54E+02
0.09	7.12E+00	6.26E+00	5.79E+00	1.52E+02	1.04E+03	4.07E+02
0.1	0	0	0	1.22E+01	3.63E+02	2.89E+02
0.2	0	0	0	1.71E-02	6.70E+01	2.96E+02
0.3	0	0	0	0	1.16E+00	1.60E+02
0.4	0	0	0	0	4.51E-04	7.94E+01
0.5	0	0	0	0	0	2.26E+01
0.6	0	0	0	0	0	6.08E+00
0.7	0	0	0	0	0	6.41E-01
0.8	0	0	0	0	0	1.15E-02
0.9	0	0	0	0	0	2.14E-04
1.0	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	5 [MeV]	7 [MeV]	8 [MeV]	9 [MeV]	10 [MeV]	11 [MeV]
0.01	1.27E+03	0	0	0	0	0
0.02	5.52E+02	0	0	0	0	0
0.03	9.80E+01	0	0	0	0	0
0.04	8.76E+01	1.40E+02	7.24E+01	6.15E+01	6.08E+01	5.30E+01
0.05	9.59E+01	0	0	0	0	0
0.06	9.65E+01	0	0	0	0	0
0.07	7.94E+01	1.41E+02	6.75E+01	5.87E+01	5.13E+01	4.98E+01
0.08	7.10E+01	0	0	0	0	0
0.09	6.67E+01	0	0	0	0	0
0.1	3.67E+01	4.37E+01	2.25E+01	1.78E+01	1.55E+01	1.44E+01
0.2	3.74E+01	2.55E+01	1.32E+01	1.03E+01	8.07E+00	8.77E+00
0.3	3.50E+01	3.61E+01	1.89E+01	1.44E+01	1.25E+01	1.15E+01
0.4	4.07E+01	3.43E+01	1.90E+01	1.25E+01	1.08E+01	1.01E+01
0.5	3.51E+01	3.01E+01	1.59E+01	1.10E+01	9.08E+00	9.17E+00
0.6	4.03E+01	2.15E+01	1.21E+01	7.74E+00	6.32E+00	5.87E+00
0.7	4.70E+01	3.58E+01	1.90E+01	1.23E+01	1.00E+01	9.50E+00
0.8	3.58E+01	3.54E+01	1.93E+01	1.25E+01	9.66E+00	8.56E+00
0.9	6.06E+01	3.69E+01	2.15E+01	1.35E+01	1.06E+01	8.25E+00
1	4.41E+01	2.98E+01	2.09E+01	1.43E+01	1.02E+01	8.61E+00
2	1.16E+01	1.54E+01	1.85E+01	1.65E+01	1.23E+01	9.41E+00
3	5.07E-03	7.63E-01	6.66E+00	1.27E+01	1.27E+01	1.06E+01
4	0	0	2.48E-01	4.00E+00	9.33E+00	1.04E+01
5	0	0	0	1.27E-01	2.40E+00	6.93E+00
6	0	0	0	0	6.95E-02	1.61E+00
7	0	0	0	0	0	5.10E-02
8	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	12 [MeV]	13 [MeV]	14 [MeV]	15 [MeV]	16 [MeV]	17 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0
0.04	4.54E+01	3.94E+01	3.90E+01	4.04E+01	3.12E+01	2.66E+01
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	4.21E+01	3.57E+01	3.00E+01	3.36E+01	2.99E+01	2.53E+01
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0
0.1	1.31E+01	1.14E+01	9.79E+00	1.16E+01	9.00E+00	8.53E+00
0.2	7.02E+00	6.56E+00	5.82E+00	5.76E+00	4.95E+00	4.58E+00
0.3	9.32E+00	7.85E+00	7.74E+00	8.76E+00	6.21E+00	5.95E+00
0.4	8.11E+00	7.09E+00	6.34E+00	6.79E+00	5.94E+00	5.01E+00
0.5	6.63E+00	5.20E+00	5.30E+00	5.70E+00	4.84E+00	4.31E+00
0.6	4.61E+00	4.34E+00	3.61E+00	4.34E+00	3.40E+00	2.57E+00
0.7	7.58E+00	6.23E+00	5.91E+00	5.95E+00	4.84E+00	4.38E+00
0.8	7.32E+00	6.52E+00	5.29E+00	5.26E+00	4.64E+00	3.84E+00
0.9	7.93E+00	6.55E+00	5.97E+00	5.80E+00	4.52E+00	4.25E+00
1	7.03E+00	5.66E+00	5.22E+00	4.95E+00	4.33E+00	3.60E+00
2	7.49E+00	5.96E+00	5.13E+00	5.24E+00	4.24E+00	3.60E+00
3	7.79E+00	5.82E+00	4.99E+00	5.11E+00	3.93E+00	3.12E+00
4	9.22E+00	6.79E+00	5.36E+00	4.81E+00	3.79E+00	3.04E+00
5	7.61E+00	7.21E+00	5.74E+00	5.16E+00	3.79E+00	3.08E+00
6	4.92E+00	5.69E+00	5.72E+00	5.56E+00	4.10E+00	3.09E+00
7	1.08E+00	3.92E+00	5.29E+00	5.96E+00	4.70E+00	3.54E+00
8	4.49E-02	8.35E-01	3.13E+00	4.83E+00	4.54E+00	3.67E+00
9	0	2.31E-02	7.00E-01	3.11E+00	4.02E+00	3.80E+00
10	0	0	6.52E-03	5.30E-01	2.11E+00	3.43E+00
11	0	0	0	0	3.74E-01	1.57E+00
12	0	0	0	0	0	2.89E-01
13	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	18 [MeV]	19 [MeV]	20 [MeV]	21 [MeV]	22 [MeV]	23 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0
0.04	3.08E+01	3.29E+01	3.76E+01	3.48E+01	3.43E+01	3.24E+01
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	2.98E+01	3.31E+01	2.92E+01	3.15E+01	3.45E+01	3.66E+01
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0
0.1	9.50E+00	1.09E+01	1.01E+01	1.07E+01	1.13E+01	1.10E+01
0.2	5.24E+00	5.29E+00	5.51E+00	5.69E+00	6.45E+00	6.06E+00
0.3	6.51E+00	7.40E+00	7.54E+00	7.49E+00	8.88E+00	8.09E+00
0.4	5.24E+00	5.99E+00	6.95E+00	6.80E+00	6.83E+00	7.23E+00
0.5	4.74E+00	4.79E+00	5.75E+00	5.50E+00	5.45E+00	5.88E+00
0.6	3.25E+00	3.10E+00	3.42E+00	3.95E+00	3.80E+00	3.82E+00
0.7	4.45E+00	5.04E+00	5.33E+00	5.69E+00	5.95E+00	5.29E+00
0.8	4.22E+00	4.38E+00	5.47E+00	5.50E+00	5.09E+00	5.57E+00
0.9	4.27E+00	4.77E+00	4.35E+00	5.11E+00	5.34E+00	4.73E+00
1	3.67E+00	3.77E+00	3.29E+00	3.65E+00	4.05E+00	3.92E+00
2	3.58E+00	3.26E+00	3.19E+00	3.06E+00	3.06E+00	3.27E+00
3	3.06E+00	2.81E+00	2.55E+00	2.31E+00	2.22E+00	2.29E+00
4	2.93E+00	2.76E+00	2.48E+00	2.19E+00	2.13E+00	1.89E+00
5	2.82E+00	2.54E+00	2.26E+00	1.99E+00	1.92E+00	1.84E+00
6	2.71E+00	2.42E+00	2.01E+00	1.84E+00	1.74E+00	1.51E+00
7	2.94E+00	2.62E+00	2.11E+00	1.84E+00	1.78E+00	1.65E+00
8	3.27E+00	2.68E+00	2.26E+00	1.84E+00	1.68E+00	1.54E+00
9	3.59E+00	3.15E+00	2.50E+00	2.05E+00	1.77E+00	1.65E+00
10	3.58E+00	3.31E+00	2.91E+00	2.30E+00	2.03E+00	1.65E+00
11	2.96E+00	3.00E+00	2.78E+00	2.42E+00	2.18E+00	1.69E+00
12	1.43E+00	2.65E+00	2.70E+00	2.54E+00	2.27E+00	1.88E+00
13	2.85E-01	1.13E+00	2.18E+00	2.29E+00	2.39E+00	2.01E+00
14	0	2.19E-01	8.99E-01	1.70E+00	2.16E+00	2.09E+00
15	0	0	9.32E-02	6.53E-01	1.45E+00	1.82E+00
16	0	0	0	4.08E-02	4.94E-01	1.13E+00
17	0	0	0	0	3.56E-02	2.71E-01
18	0	0	0	0	0	1.21E-02
19	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	24 [MeV]	25 [MeV]	26 [MeV]	27 [MeV]	28 [MeV]	29 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0
0.04	2.88E+01	2.97E+01	1.99E+01	2.05E+01	1.86E+01	1.85E+01
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	3.42E+01	3.31E+01	2.80E+01	1.85E+01	1.72E+01	1.87E+01
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0
0.1	1.14E+01	1.06E+01	7.82E+00	6.62E+00	6.32E+00	6.40E+00
0.2	6.07E+00	6.12E+00	4.85E+00	3.91E+00	3.34E+00	4.05E+00
0.3	7.86E+00	8.67E+00	6.98E+00	5.95E+00	5.23E+00	5.50E+00
0.4	6.88E+00	7.24E+00	6.65E+00	5.72E+00	5.21E+00	4.87E+00
0.5	4.79E+00	6.45E+00	5.98E+00	5.30E+00	4.88E+00	4.12E+00
0.6	3.80E+00	4.30E+00	3.88E+00	3.64E+00	3.16E+00	3.80E+00
0.7	5.41E+00	6.27E+00	5.49E+00	5.35E+00	4.81E+00	4.67E+00
0.8	4.89E+00	5.30E+00	4.67E+00	4.75E+00	4.46E+00	5.56E+00
0.9	5.04E+00	5.20E+00	4.85E+00	4.51E+00	5.02E+00	4.65E+00
1	3.74E+00	3.73E+00	3.26E+00	3.60E+00	3.77E+00	4.20E+00
2	3.10E+00	3.04E+00	2.71E+00	2.77E+00	2.70E+00	3.12E+00
3	2.43E+00	2.34E+00	2.10E+00	2.16E+00	2.16E+00	2.32E+00
4	1.86E+00	1.98E+00	1.80E+00	1.78E+00	1.98E+00	1.98E+00
5	1.59E+00	1.66E+00	1.58E+00	1.64E+00	1.66E+00	1.80E+00
6	1.34E+00	1.42E+00	1.27E+00	1.23E+00	1.44E+00	1.59E+00
7	1.39E+00	1.27E+00	1.23E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.47E+00
8	1.36E+00	1.30E+00	1.07E+00	1.13E+00	1.19E+00	1.16E+00

[MeVee]	24 [MeV]	25 [MeV]	26 [MeV]	27 [MeV]	28 [MeV]	29 [MeV]
9	1.30E+00	1.32E+00	1.12E+00	9.89E-01	1.07E+00	1.27E+00
10	1.39E+00	1.26E+00	1.14E+00	1.05E+00	1.01E+00	1.15E+00
11	1.47E+00	1.29E+00	1.08E+00	9.74E-01	9.52E-01	1.01E+00
12	1.56E+00	1.33E+00	1.21E+00	9.89E-01	9.10E-01	1.04E+00
13	1.72E+00	1.50E+00	1.10E+00	1.06E+00	9.26E-01	1.05E+00
14	1.83E+00	1.56E+00	1.27E+00	1.04E+00	1.07E+00	1.06E+00
15	1.80E+00	1.71E+00	1.37E+00	1.19E+00	1.21E+00	1.06E+00
16	1.59E+00	1.68E+00	1.49E+00	1.44E+00	1.24E+00	1.19E+00
17	7.51E-01	1.37E+00	1.44E+00	1.32E+00	1.28E+00	1.13E+00
18	2.44E-01	6.16E-01	1.06E+00	1.25E+00	1.29E+00	1.26E+00
19	8.04E-03	1.58E-01	3.95E-01	8.86E-01	1.23E+00	1.21E+00
20	0	7.50E-04	8.04E-02	2.94E-01	6.65E-01	1.06E+00
21	0	0	0	4.03E-02	2.29E-01	5.68E-01
22	0	0	0	0	9.46E-03	1.47E-01
23	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	30 [MeV]	31 [MeV]	32 [MeV]	33 [MeV]	34 [MeV]	35 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0
0.04	1.40E+01	1.75E+01	1.46E+01	1.73E+01	1.59E+01	1.18E+01
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	1.61E+01	1.56E+01	1.56E+01	1.67E+01	1.28E+01	1.26E+01
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0
0.1	6.09E+00	5.67E+00	6.40E+00	6.05E+00	4.53E+00	4.85E+00
0.2	3.19E+00	3.53E+00	2.50E+00	2.68E+00	3.05E+00	2.93E+00
0.3	4.92E+00	4.64E+00	4.22E+00	4.09E+00	4.13E+00	4.28E+00
0.4	4.15E+00	3.66E+00	3.59E+00	3.74E+00	3.49E+00	3.37E+00
0.5	3.43E+00	3.07E+00	2.80E+00	2.97E+00	3.02E+00	2.97E+00
0.6	2.84E+00	2.61E+00	2.08E+00	2.08E+00	1.83E+00	1.87E+00
0.7	4.08E+00	3.71E+00	3.27E+00	3.35E+00	2.86E+00	3.01E+00
0.8	4.61E+00	3.63E+00	3.46E+00	3.42E+00	2.91E+00	2.64E+00
0.9	4.15E+00	3.68E+00	3.38E+00	2.97E+00	2.95E+00	2.56E+00
1	3.85E+00	3.50E+00	3.01E+00	2.93E+00	2.40E+00	2.39E+00
2	2.83E+00	2.73E+00	2.50E+00	2.69E+00	2.35E+00	2.35E+00
3	1.98E+00	1.90E+00	1.85E+00	1.79E+00	1.70E+00	1.85E+00
4	1.77E+00	1.71E+00	1.54E+00	1.54E+00	1.44E+00	1.50E+00
5	1.52E+00	1.50E+00	1.39E+00	1.41E+00	1.25E+00	1.30E+00
6	1.44E+00	1.46E+00	1.30E+00	1.24E+00	1.12E+00	1.13E+00
7	1.39E+00	1.31E+00	1.21E+00	1.18E+00	1.10E+00	1.04E+00
8	1.15E+00	1.23E+00	1.05E+00	1.23E+00	1.10E+00	1.06E+00
9	1.08E+00	1.09E+00	1.21E+00	1.25E+00	1.10E+00	1.18E+00
10	1.03E+00	1.03E+00	1.02E+00	1.13E+00	1.13E+00	1.14E+00
11	9.70E-01	9.47E-01	8.99E-01	9.29E-01	9.84E-01	1.09E+00
12	8.49E-01	9.11E-01	8.55E-01	9.02E-01	8.08E-01	1.02E+00
13	9.55E-01	9.26E-01	8.03E-01	8.93E-01	7.83E-01	7.83E-01
14	9.20E-01	7.97E-01	7.75E-01	6.34E-01	7.71E-01	7.72E-01
15	9.88E-01	7.49E-01	7.99E-01	7.00E-01	6.61E-01	6.61E-01
16	8.97E-01	8.35E-01	7.80E-01	8.08E-01	6.52E-01	6.53E-01
17	1.03E+00	8.55E-01	7.14E-01	7.46E-01	6.76E-01	6.45E-01
18	1.09E+00	9.46E-01	8.29E-01	7.89E-01	6.41E-01	6.46E-01
19	1.18E+00	1.02E+00	9.63E-01	8.18E-01	7.64E-01	6.82E-01
20	1.07E+00	9.48E-01	8.74E-01	8.45E-01	7.28E-01	6.34E-01
21	8.07E-01	1.04E+00	9.75E-01	9.06E-01	9.02E-01	7.18E-01
22	3.46E-01	7.09E-01	8.22E-01	8.34E-01	7.93E-01	8.06E-01
23	7.83E-02	2.63E-01	4.96E-01	8.16E-01	8.05E-01	8.05E-01
24	0	5.85E-03	1.41E-01	4.04E-01	5.74E-01	7.32E-01
25	0	0	1.54E-03	1.03E-01	2.87E-01	4.50E-01
26	0	0	0	3.55E-03	8.72E-02	1.85E-01
27	0	0	0	0	0	3.36E-02
28	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	36 [MeV]	37 [MeV]	38 [MeV]	39 [MeV]	40 [MeV]	41 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0
0.04	1.21E+01	1.34E+01	1.29E+01	1.29E+01	1.03E+01	1.05E+01
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	1.37E+01	1.20E+01	1.30E+01	1.36E+01	1.51E+01	9.49E+00
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0
0.1	3.55E+00	4.84E+00	4.00E+00	4.85E+00	3.77E+00	3.48E+00
0.2	2.55E+00	2.92E+00	2.28E+00	2.09E+00	2.04E+00	1.69E+00
0.3	3.10E+00	3.28E+00	3.00E+00	3.67E+00	2.83E+00	2.61E+00
0.4	3.46E+00	3.35E+00	2.96E+00	3.55E+00	3.23E+00	2.37E+00
0.5	2.61E+00	2.39E+00	2.45E+00	2.57E+00	2.46E+00	2.60E+00
0.6	2.14E+00	2.07E+00	1.70E+00	1.92E+00	1.65E+00	1.22E+00
0.7	2.98E+00	2.69E+00	2.85E+00	2.99E+00	2.87E+00	2.46E+00
0.8	2.97E+00	2.52E+00	2.32E+00	2.50E+00	2.46E+00	2.15E+00
0.9	2.45E+00	2.83E+00	2.71E+00	2.89E+00	2.86E+00	2.55E+00
1	2.44E+00	2.20E+00	2.11E+00	2.50E+00	2.30E+00	2.29E+00
2	2.14E+00	2.05E+00	2.06E+00	2.14E+00	1.95E+00	1.78E+00
3	1.69E+00	1.73E+00	1.67E+00	1.97E+00	1.67E+00	1.47E+00
4	1.41E+00	1.38E+00	1.34E+00	1.51E+00	1.50E+00	1.37E+00
5	1.24E+00	1.11E+00	1.03E+00	1.43E+00	1.26E+00	1.14E+00
6	1.07E+00	1.02E+00	9.75E-01	1.15E+00	9.12E-01	9.09E-01
7	9.67E-01	9.95E-01	8.92E-01	9.17E-01	8.64E-01	8.11E-01
8	9.55E-01	9.21E-01	8.97E-01	1.04E+00	7.85E-01	7.53E-01
9	1.02E+00	1.05E+00	8.96E-01	1.11E+00	9.28E-01	8.42E-01
10	1.05E+00	1.10E+00	9.30E-01	1.08E+00	9.24E-01	8.30E-01
11	1.10E+00	1.13E+00	9.38E-01	1.04E+00	8.90E-01	8.07E-01
12	1.12E+00	1.09E+00	9.11E-01	9.13E-01	9.33E-01	9.03E-01
13	8.29E-01	9.32E-01	9.38E-01	1.08E+00	1.01E+00	7.53E-01
14	6.63E-01	7.59E-01	8.83E-01	9.91E-01	8.96E-01	8.57E-01
15	7.27E-01	6.90E-01	6.70E-01	1.01E+00	1.02E+00	9.32E-01
16	6.34E-01	7.26E-01	6.67E-01	7.88E-01	7.14E-01	8.12E-01
17	5.86E-01	5.73E-01	6.15E-01	6.66E-01	6.26E-01	6.58E-01
18	6.13E-01	5.84E-01	5.61E-01	6.82E-01	5.22E-01	6.93E-01
19	6.08E-01	6.21E-01	5.32E-01	6.74E-01	5.48E-01	5.47E-01
20	6.98E-01	6.00E-01	5.33E-01	5.57E-01	4.94E-01	4.68E-01
21	6.28E-01	6.50E-01	6.23E-01	5.90E-01	4.81E-01	4.50E-01
22	6.77E-01	6.31E-01	4.84E-01	6.44E-01	4.56E-01	4.50E-01
23	7.38E-01	7.12E-01	5.97E-01	6.80E-01	4.81E-01	5.18E-01
24	8.12E-01	7.13E-01	6.45E-01	6.55E-01	5.67E-01	4.47E-01
25	5.97E-01	6.20E-01	6.06E-01	7.03E-01	6.12E-01	4.65E-01
26	3.11E-01	5.08E-01	6.76E-01	7.07E-01	5.79E-01	5.80E-01
27	1.19E-01	2.91E-01	4.31E-01	5.89E-01	5.86E-01	5.66E-01
28	2.08E-02	1.01E-01	2.03E-01	3.32E-01	4.96E-01	5.80E-01
29	0	1.13E-02	8.63E-02	1.93E-01	2.68E-01	3.75E-01
30	0	0	0	4.28E-02	1.13E-01	2.30E-01
31	0	0	0	0	2.18E-02	6.87E-02
32	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	42 [MeV]	43 [MeV]	44 [MeV]	46 [MeV]	48 [MeV]	50 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0
0.04	1.24E+01	7.06E+00	1.14E+01	1.30E+01	1.08E+01	1.37E+01
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	1.10E+01	9.62E+00	9.44E+00	1.27E+01	1.15E+01	1.18E+01
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0
0.1	3.92E+00	3.34E+00	2.52E+00	3.60E+00	3.31E+00	3.22E+00
0.2	1.84E+00	1.86E+00	1.55E+00	1.84E+00	1.94E+00	1.73E+00
0.3	2.80E+00	3.15E+00	2.73E+00	3.26E+00	2.40E+00	2.22E+00
0.4	2.08E+00	2.16E+00	2.18E+00	2.23E+00	2.12E+00	1.80E+00

[MeVee]	42 [MeV]	43 [MeV]	44 [MeV]	46 [MeV]	48 [MeV]	50 [MeV]
0.5	1.66E+00	1.77E+00	2.00E+00	1.72E+00	2.02E+00	1.53E+00
0.6	1.67E+00	1.53E+00	1.33E+00	1.50E+00	1.03E+00	9.01E-01
0.7	2.21E+00	2.02E+00	1.72E+00	2.36E+00	2.34E+00	1.87E+00
0.8	2.12E+00	2.03E+00	1.95E+00	1.89E+00	2.11E+00	1.31E+00
0.9	2.13E+00	1.86E+00	2.00E+00	1.84E+00	2.18E+00	1.21E+00
1	2.02E+00	1.69E+00	1.51E+00	1.83E+00	1.77E+00	1.41E+00
2	1.82E+00	1.67E+00	1.60E+00	1.63E+00	1.55E+00	1.26E+00
3	1.46E+00	1.40E+00	1.39E+00	1.32E+00	1.31E+00	1.03E+00
4	1.43E+00	1.20E+00	1.12E+00	1.29E+00	1.22E+00	9.78E-01
5	1.20E+00	1.04E+00	1.11E+00	1.15E+00	1.19E+00	8.87E-01
6	9.61E-01	8.04E-01	8.45E-01	9.73E-01	1.04E+00	7.95E-01
7	8.29E-01	8.00E-01	7.55E-01	9.57E-01	8.84E-01	7.13E-01
8	8.48E-01	6.71E-01	6.73E-01	7.93E-01	8.65E-01	6.32E-01
9	8.67E-01	7.61E-01	7.49E-01	7.91E-01	7.89E-01	7.23E-01
10	8.75E-01	7.50E-01	6.09E-01	6.90E-01	8.46E-01	7.11E-01
11	8.11E-01	6.28E-01	5.53E-01	6.49E-01	7.43E-01	5.99E-01
12	7.38E-01	8.33E-01	7.14E-01	7.36E-01	7.44E-01	6.29E-01
13	8.33E-01	7.38E-01	7.60E-01	7.83E-01	7.09E-01	6.04E-01
14	7.69E-01	6.88E-01	7.45E-01	7.63E-01	6.62E-01	4.79E-01
15	8.69E-01	7.60E-01	8.06E-01	6.86E-01	7.13E-01	5.24E-01
16	9.09E-01	7.81E-01	8.02E-01	7.66E-01	6.79E-01	5.46E-01
17	7.10E-01	8.73E-01	7.07E-01	7.99E-01	6.27E-01	5.26E-01
18	7.10E-01	5.95E-01	7.40E-01	7.62E-01	8.13E-01	6.29E-01
19	5.81E-01	5.66E-01	6.91E-01	7.95E-01	8.24E-01	6.53E-01
20	6.21E-01	4.93E-01	6.61E-01	6.76E-01	7.68E-01	6.43E-01
21	4.80E-01	4.48E-01	5.06E-01	5.42E-01	7.55E-01	6.63E-01
22	5.31E-01	4.23E-01	4.40E-01	4.18E-01	5.90E-01	5.96E-01
23	4.93E-01	4.29E-01	4.20E-01	4.15E-01	5.19E-01	4.78E-01
24	4.60E-01	4.07E-01	4.32E-01	4.07E-01	4.11E-01	4.51E-01
25	4.77E-01	3.75E-01	4.43E-01	3.92E-01	4.60E-01	3.41E-01
26	5.26E-01	4.27E-01	3.91E-01	4.15E-01	4.11E-01	3.35E-01
27	5.06E-01	4.45E-01	4.23E-01	4.04E-01	3.74E-01	3.54E-01
28	5.23E-01	4.88E-01	4.48E-01	4.13E-01	3.71E-01	3.15E-01
29	5.19E-01	5.05E-01	4.19E-01	4.82E-01	4.32E-01	3.01E-01
30	2.58E-01	3.97E-01	5.24E-01	5.28E-01	4.77E-01	3.80E-01
31	1.35E-01	1.81E-01	3.06E-01	4.46E-01	4.11E-01	3.92E-01
32	1.70E-02	6.70E-02	1.66E-01	2.94E-01	4.31E-01	3.49E-01
33	0	8.53E-03	7.31E-02	1.14E-01	3.62E-01	3.57E-01
34	0	0	0	3.73E-02	2.03E-01	2.92E-01
35	0	0	0	6.96E-03	5.74E-02	1.61E-01
36	0	0	0	0	2.90E-03	5.87E-02
37	0	0	0	0	0	1.18E-02
38	0	0	0	0	0	2.92E-03
39	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	52 [MeV]	54 [MeV]	56 [MeV]	58 [MeV]	60 [MeV]	62 [MeV]
0.01	0	0	0	0	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0
0.04	1.24E+01	7.64E+00	9.91E+00	1.01E+01	8.29E+00	1.78E+01
0.05	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0
0.07	1.14E+01	9.34E+00	1.07E+01	9.25E+00	1.28E+01	2.26E+01
0.08	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0
0.1	3.00E+00	2.37E+00	2.70E+00	2.62E+00	2.82E+00	5.13E+00
0.2	1.57E+00	1.37E+00	1.60E+00	1.12E+00	1.08E+00	2.30E+00
0.3	2.20E+00	1.80E+00	1.64E+00	1.44E+00	2.06E+00	2.06E+00
0.4	1.76E+00	1.50E+00	1.67E+00	1.17E+00	1.11E+00	1.57E+00
0.5	8.66E-01	1.14E+00	1.14E+00	1.07E+00	9.14E-01	1.01E+00
0.6	8.19E-01	8.28E-01	7.24E-01	4.45E-01	7.23E-01	4.84E-01
0.7	1.72E+00	1.13E+00	1.17E+00	1.30E+00	9.35E-01	1.17E+00
0.8	1.70E+00	1.45E+00	9.40E-01	1.16E+00	1.25E+00	1.61E+00
0.9	1.15E+00	9.13E-01	9.91E-01	9.96E-01	7.86E-01	4.44E-01
1	1.37E+00	1.07E+00	8.69E-01	9.41E-01	6.18E-01	6.97E-01

[MeVee]	52 [MeV]	54 [MeV]	56 [MeV]	58 [MeV]	60 [MeV]	62 [MeV]
2	1.29E+00	1.06E+00	9.06E-01	8.09E-01	6.33E-01	6.66E-01
3	1.03E+00	8.19E-01	7.09E-01	7.84E-01	4.89E-01	3.83E-01
4	1.07E+00	7.80E-01	7.42E-01	7.01E-01	5.25E-01	3.63E-01
5	7.97E-01	6.29E-01	6.37E-01	6.60E-01	4.10E-01	3.07E-01
6	6.97E-01	5.93E-01	5.66E-01	6.37E-01	4.68E-01	3.43E-01
7	7.50E-01	6.10E-01	5.15E-01	5.39E-01	4.19E-01	2.82E-01
8	7.10E-01	6.03E-01	5.25E-01	5.24E-01	4.29E-01	2.87E-01
9	8.20E-01	5.35E-01	5.67E-01	5.83E-01	4.40E-01	2.94E-01
10	6.81E-01	5.37E-01	5.99E-01	5.53E-01	4.27E-01	3.91E-01
11	7.09E-01	5.65E-01	5.02E-01	6.01E-01	3.72E-01	2.70E-01
12	6.11E-01	5.02E-01	5.05E-01	4.89E-01	4.74E-01	3.43E-01
13	5.50E-01	5.01E-01	4.87E-01	5.19E-01	4.53E-01	3.23E-01
14	5.27E-01	4.80E-01	3.85E-01	4.78E-01	3.85E-01	2.30E-01
15	5.80E-01	4.24E-01	4.91E-01	5.03E-01	5.74E-01	4.20E-01
16	5.48E-01	5.70E-01	4.47E-01	4.68E-01	4.08E-01	3.03E-01
17	5.15E-01	3.99E-01	3.71E-01	4.55E-01	3.85E-01	2.42E-01
18	5.28E-01	4.96E-01	4.03E-01	4.77E-01	3.06E-01	3.11E-01
19	5.24E-01	3.84E-01	3.70E-01	4.45E-01	3.38E-01	2.06E-01
20	4.90E-01	4.60E-01	3.70E-01	2.97E-01	2.96E-01	1.57E-01
21	5.72E-01	5.03E-01	3.22E-01	4.41E-01	4.25E-01	2.34E-01
22	6.67E-01	4.14E-01	3.34E-01	4.20E-01	2.98E-01	2.02E-01
23	6.02E-01	5.19E-01	4.12E-01	3.20E-01	3.06E-01	1.70E-01
24	5.39E-01	5.60E-01	4.68E-01	4.16E-01	3.49E-01	2.38E-01
25	4.12E-01	3.91E-01	4.59E-01	4.60E-01	3.66E-01	1.90E-01
26	3.59E-01	3.90E-01	4.12E-01	4.02E-01	4.10E-01	3.59E-01
27	3.67E-01	3.15E-01	3.81E-01	4.69E-01	4.23E-01	1.94E-01
28	3.55E-01	3.10E-01	2.57E-01	3.88E-01	4.08E-01	3.95E-01
29	3.03E-01	2.64E-01	3.15E-01	3.45E-01	2.85E-01	2.70E-01
30	2.25E-01	2.46E-01	2.48E-01	3.29E-01	2.96E-01	2.54E-01
31	3.16E-01	2.20E-01	2.58E-01	2.70E-01	2.49E-01	1.33E-01
32	3.51E-01	2.43E-01	2.14E-01	2.76E-01	2.87E-01	1.94E-01
33	3.46E-01	2.87E-01	2.36E-01	2.28E-01	2.78E-01	1.53E-01
34	3.48E-01	3.26E-01	2.21E-01	2.37E-01	2.23E-01	1.77E-01
35	2.70E-01	2.98E-01	2.85E-01	2.37E-01	2.23E-01	1.45E-01
36	1.53E-01	2.42E-01	2.90E-01	2.24E-01	2.30E-01	1.73E-01
37	4.68E-02	1.41E-01	2.78E-01	2.90E-01	2.23E-01	1.37E-01
38	1.75E-02	5.63E-02	1.07E-01	2.06E-01	2.66E-01	2.78E-01
39	0	8.51E-03	5.21E-02	1.26E-01	2.23E-01	2.42E-01
40	0	6.37E-03	7.63E-03	4.80E-02	7.86E-02	6.05E-02
41	0	0	0	5.30E-03	3.19E-02	6.45E-02
42	0	0	0	0	1.06E-02	0
43	0	0	0	0	0	4.06E-03
44	0	0	0	0	0	0

[MeVee]	64 [MeV]	66 [MeV]	[MeVee]	64 [MeV]	66 [MeV]
0.01	0	0	21	3.45E-01	5.12E-01
0.02	0	0	22	3.85E-01	4.49E-01
0.03	0	0	23	1.99E-01	4.61E-01
0.04	5.84E+01	2.51E+00	24	3.58E-01	4.10E-01
0.05	0	0	25	1.46E-01	3.68E-01
0.06	0	0	26	2.12E-01	3.90E-01
0.07	3.58E+01	2.53E+00	27	2.92E-01	3.66E-01
0.08	0	0	28	2.52E-01	3.71E-01
0.09	0	0	29	3.96E-02	4.16E-01
0.1	7.48E+00	8.42E-01	30	3.05E-01	4.37E-01
0.2	4.64E+00	5.39E-01	31	3.19E-01	4.60E-01
0.3	9.42E+00	9.00E-01	32	3.98E-01	4.82E-01
0.4	3.98E+00	8.14E-01	33	2.39E-01	4.14E-01
0.5	2.52E+00	7.68E-01	34	9.30E-02	3.26E-01
0.6	1.86E+00	6.60E-01	35	3.19E-01	2.74E-01
0.7	2.92E+00	9.46E-01	36	9.30E-02	2.27E-01
0.8	2.26E+00	8.72E-01	37	7.96E-02	2.14E-01
0.9	2.65E+00	9.36E-01	38	1.86E-01	2.06E-01
1	2.20E+00	8.23E-01	39	2.39E-01	1.84E-01
2	1.01E+00	8.21E-01	40	2.39E-01	2.05E-01

[MeVee]	64 [MeV]	66 [MeV]	[MeVee]	64 [MeV]	66 [MeV]
3	6.77E-01	7.22E-01	41	1.06E-01	2.27E-01
4	5.04E-01	6.83E-01	42	7.96E-02	1.84E-01
5	5.97E-01	6.54E-01	43	2.67E-02	9.02E-02
6	3.19E-01	6.08E-01	44	0	2.39E-02
7	4.12E-01	5.90E-01	45	0	1.80E-03
8	3.58E-01	5.66E-01	46	0	0
9	4.38E-01	5.93E-01			
10	6.90E-01	6.21E-01			
11	7.83E-01	5.31E-01			
12	5.58E-01	5.33E-01			
13	5.97E-01	5.91E-01			
14	4.65E-01	5.64E-01			
15	6.90E-01	5.85E-01			
16	5.04E-01	5.66E-01			
17	5.70E-01	5.20E-01			
18	3.98E-01	5.29E-01			
19	3.98E-01	5.36E-01			
20	2.26E-01	5.13E-01			

付録-C

第5章で作成した 12.7cmΦ × 12.7cm のウェル型有機液体シンチレータの応答関数マトリックスを以下に示す。応答関数の単位は、[(counts/MeVee)/(n/cm²)]で、これは検出器の側表面積当たりの中性子に対する感度を意味する。

MeVee	1MeV	2MeV	3MeV	4MeV	5MeV	6MeV
0.2	4.99E+02	3.22E+02	1.77E+02	1.68E+02	1.46E+02	1.23E+02
0.53	7.85E-01	8.32E+01	9.97E+01	4.60E+01	2.85E+01	2.00E+01
1	0.00E+00	1.14E+00	3.64E+01	5.25E+01	3.20E+01	1.92E+01
1.48	0.00E+00	0.00E+00	8.84E-01	1.96E+01	3.21E+01	2.22E+01
2.06	0.00E+00	0.00E+00	7.90E-07	1.04E+00	1.42E+01	2.16E+01
2.62	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.90E-05	1.16E+00	1.15E+01
3.25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.11E-04	1.25E+00
3.95	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.62E-04
MeVee	7MeV	8MeV	9MeV	10MeV	11MeV	12MeV
0.2	1.17E+02	1.38E+02	1.30E+02	1.29E+02	1.21E+02	1.33E+02
0.53	1.76E+01	1.66E+01	1.34E+01	1.35E+01	1.43E+01	1.51E+01
1	1.31E+01	1.12E+01	1.09E+01	8.87E+00	7.36E+00	6.37E+00
1.48	1.37E+01	9.69E+00	7.92E+00	7.40E+00	6.64E+00	5.55E+00
2.06	1.59E+01	1.06E+01	7.51E+00	5.94E+00	5.75E+00	5.15E+00
2.62	1.57E+01	1.27E+01	8.62E+00	6.11E+00	5.17E+00	4.76E+00
3.25	8.81E+00	1.17E+01	9.71E+00	6.84E+00	5.21E+00	4.34E+00
3.95	9.87E-01	5.94E+00	8.59E+00	7.51E+00	5.75E+00	4.49E+00
4.57	7.23E-04	6.75E-01	4.97E+00	6.62E+00	6.21E+00	4.93E+00
5.32	0.00E+00	2.03E-03	7.97E-01	4.07E+00	5.32E+00	5.10E+00
6.04	0.00E+00	0.00E+00	2.13E-03	6.15E-01	3.29E+00	4.24E+00
6.71	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.08E-03	6.01E-01	2.78E+00
7.52	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.96E-08	5.88E-03	5.58E-01
8.27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.03E-08	4.39E-03
8.96	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.19E-07
9.78	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
MeVee	13MeV	14MeV	15MeV	16MeV	17MeV	18MeV
0.2	1.29E+02	1.22E+02	1.18E+02	1.24E+02	1.23E+02	1.17E+02
0.53	1.77E+01	1.95E+01	2.03E+01	1.99E+01	1.86E+01	1.50E+01
1	6.49E+00	7.70E+00	8.85E+00	9.79E+00	1.15E+01	1.30E+01
1.48	4.65E+00	4.08E+00	4.28E+00	4.45E+00	4.59E+00	5.41E+00
2.06	4.26E+00	3.65E+00	3.19E+00	2.98E+00	2.87E+00	2.90E+00
2.62	4.21E+00	3.60E+00	3.09E+00	2.76E+00	2.52E+00	2.33E+00
3.25	3.93E+00	3.47E+00	2.98E+00	2.63E+00	2.34E+00	2.12E+00
3.95	3.64E+00	3.24E+00	2.81E+00	2.52E+00	2.22E+00	2.02E+00
4.57	3.82E+00	3.13E+00	2.68E+00	2.42E+00	2.13E+00	1.94E+00
5.32	4.16E+00	3.32E+00	2.69E+00	2.37E+00	2.08E+00	1.89E+00
6.04	4.24E+00	3.58E+00	2.89E+00	2.43E+00	2.08E+00	1.87E+00
6.71	3.51E+00	3.60E+00	3.06E+00	2.56E+00	2.13E+00	1.83E+00
7.52	2.35E+00	2.96E+00	3.09E+00	2.69E+00	2.24E+00	1.91E+00
8.27	4.56E-01	2.00E+00	2.63E+00	2.67E+00	2.39E+00	1.98E+00
8.96	5.85E-03	4.63E-01	1.94E+00	2.28E+00	2.31E+00	2.13E+00
9.78	9.46E-07	1.00E-02	4.76E-01	1.66E+00	1.96E+00	2.04E+00
10.64	0.00E+00	7.54E-07	7.01E-03	3.38E-01	1.37E+00	1.72E+00
11.42	0.00E+00	0.00E+00	4.49E-07	3.97E-03	2.60E-01	1.18E+00
12.11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.07E-07	4.95E-03	2.86E-01
12.94	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.10E-06	1.02E-02
13.8	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.07E-06
14.68	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

MeVee	19MeV	20MeV	21MeV	22MeV	23MeV	24MeV
0. 2	1. 21E+02	1. 24E+02	1. 28E+02	1. 24E+02	1. 24E+02	1. 24E+02
0. 53	1. 18E+01	1. 09E+01	1. 02E+01	8. 84E+00	7. 94E+00	7. 31E+00
1	1. 17E+01	1. 10E+01	9. 65E+00	7. 61E+00	6. 68E+00	5. 54E+00
1. 48	7. 46E+00	6. 75E+00	7. 83E+00	8. 15E+00	7. 44E+00	6. 75E+00
2. 06	3. 34E+00	4. 30E+00	3. 78E+00	4. 60E+00	5. 08E+00	5. 16E+00
2. 62	2. 16E+00	2. 44E+00	2. 95E+00	2. 63E+00	3. 02E+00	3. 30E+00
3. 25	1. 95E+00	1. 87E+00	1. 90E+00	2. 22E+00	2. 00E+00	2. 12E+00
3. 95	1. 85E+00	1. 69E+00	1. 56E+00	1. 52E+00	1. 74E+00	1. 68E+00
4. 57	1. 76E+00	1. 60E+00	1. 44E+00	1. 35E+00	1. 31E+00	1. 48E+00
5. 32	1. 73E+00	1. 55E+00	1. 42E+00	1. 29E+00	1. 18E+00	1. 16E+00
6. 04	1. 69E+00	1. 52E+00	1. 35E+00	1. 25E+00	1. 15E+00	1. 06E+00
6. 71	1. 66E+00	1. 50E+00	1. 33E+00	1. 20E+00	1. 11E+00	1. 03E+00
7. 52	1. 66E+00	1. 51E+00	1. 33E+00	1. 19E+00	1. 08E+00	9. 97E-01
8. 27	1. 74E+00	1. 53E+00	1. 31E+00	1. 20E+00	1. 08E+00	9. 67E-01
8. 96	1. 78E+00	1. 56E+00	1. 35E+00	1. 20E+00	1. 10E+00	9. 96E-01
9. 78	1. 89E+00	1. 60E+00	1. 37E+00	1. 22E+00	1. 08E+00	1. 01E+00
10. 64	1. 74E+00	1. 66E+00	1. 43E+00	1. 23E+00	1. 09E+00	9. 88E-01
11. 42	1. 47E+00	1. 48E+00	1. 43E+00	1. 26E+00	1. 11E+00	9. 82E-01
12. 11	1. 10E+00	1. 28E+00	1. 27E+00	1. 26E+00	1. 15E+00	1. 00E+00
12. 94	3. 11E-01	9. 75E-01	1. 11E+00	1. 14E+00	1. 12E+00	1. 01E+00
13. 8	9. 13E-03	2. 56E-01	8. 40E-01	9. 91E-01	9. 87E-01	1. 00E+00
14. 68	4. 73E-06	6. 96E-03	2. 12E-01	7. 33E-01	8. 78E-01	9. 05E-01
15. 47	0. 00E+00	3. 76E-06	5. 86E-03	1. 83E-01	6. 50E-01	7. 84E-01
16. 27	0. 00E+00	0. 00E+00	1. 04E-05	7. 72E-03	1. 98E-01	6. 16E-01
17. 09	0. 00E+00	0. 00E+00	0. 00E+00	1. 66E-05	9. 92E-03	1. 98E-01
17. 93	0. 00E+00	0. 00E+00	0. 00E+00	0. 00E+00	2. 96E-05	1. 09E-02
18. 79	0. 00E+00	3. 60E-05				
19. 68	0. 00E+00					

MeVee	25MeV	26MeV	27MeV	28MeV	29MeV	30MeV
0. 2	1. 24E+02	1. 25E+02	1. 26E+02	1. 25E+02	1. 25E+02	1. 29E+02
0. 53	6. 77E+00	6. 14E+00	5. 77E+00	5. 55E+00	5. 28E+00	4. 98E+00
1	4. 85E+00	4. 41E+00	4. 11E+00	3. 80E+00	3. 58E+00	3. 42E+00
1. 48	5. 66E+00	5. 01E+00	4. 36E+00	3. 91E+00	3. 52E+00	3. 17E+00
2. 06	5. 33E+00	4. 80E+00	4. 32E+00	3. 84E+00	3. 46E+00	3. 22E+00
2. 62	3. 42E+00	3. 63E+00	3. 47E+00	3. 38E+00	3. 17E+00	2. 93E+00
3. 25	2. 33E+00	2. 43E+00	2. 54E+00	2. 51E+00	2. 52E+00	2. 47E+00
3. 95	1. 63E+00	1. 73E+00	1. 81E+00	1. 87E+00	1. 90E+00	1. 86E+00
4. 57	1. 47E+00	1. 34E+00	1. 44E+00	1. 43E+00	1. 53E+00	1. 50E+00
5. 32	1. 28E+00	1. 30E+00	1. 19E+00	1. 25E+00	1. 25E+00	1. 29E+00
6. 04	1. 03E+00	1. 11E+00	1. 21E+00	1. 08E+00	1. 09E+00	1. 06E+00
6. 71	9. 52E-01	9. 32E-01	1. 03E+00	1. 12E+00	9. 66E-01	9. 49E-01
7. 52	9. 28E-01	8. 52E-01	8. 53E-01	9. 36E-01	1. 03E+00	8. 94E-01
8. 27	9. 19E-01	8. 54E-01	7. 94E-01	7. 81E-01	8. 45E-01	9. 76E-01
8. 96	8. 89E-01	8. 31E-01	7. 68E-01	7. 24E-01	7. 05E-01	7. 81E-01
9. 78	9. 01E-01	8. 19E-01	7. 57E-01	7. 02E-01	6. 59E-01	6. 62E-01
10. 64	8. 93E-01	8. 31E-01	7. 57E-01	7. 05E-01	6. 44E-01	6. 05E-01
11. 42	8. 88E-01	8. 03E-01	7. 37E-01	6. 94E-01	6. 37E-01	5. 82E-01
12. 11	8. 85E-01	7. 90E-01	7. 23E-01	6. 77E-01	6. 20E-01	5. 88E-01
12. 94	9. 04E-01	8. 09E-01	7. 35E-01	6. 79E-01	6. 12E-01	5. 77E-01
13. 8	9. 28E-01	8. 35E-01	7. 33E-01	6. 75E-01	6. 21E-01	5. 71E-01
14. 68	8. 75E-01	8. 37E-01	7. 66E-01	6. 75E-01	6. 10E-01	5. 76E-01
15. 47	7. 81E-01	7. 85E-01	7. 48E-01	6. 88E-01	6. 11E-01	5. 46E-01
16. 27	7. 37E-01	7. 29E-01	7. 24E-01	6. 93E-01	6. 45E-01	5. 72E-01
17. 09	5. 80E-01	6. 62E-01	6. 67E-01	6. 54E-01	6. 24E-01	5. 90E-01
17. 93	1. 89E-01	5. 27E-01	6. 07E-01	6. 05E-01	5. 90E-01	5. 75E-01
18. 79	1. 07E-02	1. 82E-01	4. 84E-01	5. 60E-01	5. 51E-01	5. 43E-01

MeVee	25MeV	26MeV	27MeV	28MeV	29MeV	30MeV
19.68	3.71E-05	1.12E-02	1.70E-01	4.55E-01	5.07E-01	5.03E-01
20.43	0.00E+00	5.23E-05	1.28E-02	1.83E-01	4.39E-01	4.75E-01
21.35	0.00E+00	1.46E-08	1.33E-04	1.82E-02	1.89E-01	4.07E-01
22.13	0.00E+00	0.00E+00	1.77E-08	1.39E-04	1.78E-02	1.78E-01
23.09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.48E-08	2.50E-04	1.90E-02
23.9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.22E-08	1.64E-04
24.73	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.59E-07
25.57	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

MeVee	31MeV	32MeV	33MeV	34MeV	35MeV	36MeV
0.2	1.25E+02	1.25E+02	1.24E+02	1.23E+02	1.22E+02	1.22E+02
0.53	4.75E+00	4.54E+00	4.36E+00	4.16E+00	3.99E+00	3.77E+00
1	3.26E+00	3.12E+00	2.96E+00	2.77E+00	2.67E+00	2.60E+00
1.48	2.91E+00	2.83E+00	2.68E+00	2.41E+00	2.25E+00	2.15E+00
2.06	2.98E+00	2.73E+00	2.61E+00	2.46E+00	2.29E+00	2.15E+00
2.62	2.72E+00	2.51E+00	2.39E+00	2.35E+00	2.28E+00	2.12E+00
3.25	2.42E+00	2.29E+00	2.15E+00	2.03E+00	1.99E+00	1.98E+00
3.95	1.85E+00	1.89E+00	1.87E+00	1.82E+00	1.73E+00	1.70E+00
4.57	1.47E+00	1.48E+00	1.48E+00	1.50E+00	1.48E+00	1.44E+00
5.32	1.26E+00	1.21E+00	1.24E+00	1.23E+00	1.23E+00	1.20E+00
6.04	1.08E+00	1.08E+00	1.03E+00	1.03E+00	1.04E+00	1.02E+00
6.71	9.14E-01	9.27E-01	9.58E-01	8.92E-01	8.91E-01	8.98E-01
7.52	8.63E-01	8.26E-01	8.39E-01	8.57E-01	7.98E-01	7.88E-01
8.27	8.61E-01	7.89E-01	7.59E-01	7.42E-01	7.67E-01	7.22E-01
8.96	9.14E-01	8.24E-01	7.35E-01	6.93E-01	6.75E-01	6.89E-01
9.78	7.09E-01	8.44E-01	7.74E-01	6.96E-01	6.58E-01	6.19E-01
10.64	5.82E-01	6.31E-01	7.67E-01	7.40E-01	6.51E-01	6.07E-01
11.42	5.43E-01	5.30E-01	5.68E-01	6.97E-01	6.97E-01	6.02E-01
12.11	5.36E-01	5.03E-01	4.91E-01	5.16E-01	6.41E-01	6.58E-01
12.94	5.29E-01	4.94E-01	4.62E-01	4.42E-01	4.82E-01	6.11E-01
13.8	5.11E-01	4.81E-01	4.58E-01	4.23E-01	4.13E-01	4.38E-01
14.68	5.30E-01	4.82E-01	4.43E-01	4.13E-01	3.99E-01	3.84E-01
15.47	5.04E-01	4.86E-01	4.37E-01	4.00E-01	3.77E-01	3.56E-01
16.27	5.11E-01	4.80E-01	4.58E-01	4.10E-01	3.76E-01	3.58E-01
17.09	5.38E-01	4.71E-01	4.46E-01	4.17E-01	3.86E-01	3.56E-01
17.93	5.30E-01	4.91E-01	4.32E-01	4.04E-01	3.95E-01	3.63E-01
18.79	5.08E-01	4.94E-01	4.41E-01	4.02E-01	3.80E-01	3.64E-01
19.68	4.95E-01	4.71E-01	4.37E-01	4.13E-01	3.78E-01	3.51E-01
20.43	4.72E-01	4.67E-01	4.28E-01	4.19E-01	3.86E-01	3.59E-01
21.35	4.46E-01	4.37E-01	4.26E-01	4.07E-01	3.80E-01	3.61E-01
22.13	3.91E-01	4.12E-01	4.07E-01	4.00E-01	3.72E-01	3.48E-01
23.09	1.69E-01	3.54E-01	3.82E-01	3.76E-01	3.64E-01	3.35E-01
23.9	1.61E-02	1.53E-01	3.34E-01	3.56E-01	3.42E-01	3.45E-01
24.73	2.74E-04	1.92E-02	1.56E-01	3.11E-01	3.25E-01	3.28E-01
25.57	4.00E-07	3.93E-04	2.18E-02	1.52E-01	2.94E-01	3.12E-01
26.42	0.00E+00	7.11E-07	5.20E-04	2.30E-02	1.51E-01	2.78E-01
27.29	0.00E+00	0.00E+00	1.17E-06	5.99E-04	2.33E-02	1.42E-01
28.17	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.55E-06	6.18E-04	2.22E-02
29.07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.60E-06	5.82E-04
29.8	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.87E-06
30.72	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

MeVee	37MeV	38MeV	39MeV	40MeV	41MeV	42MeV
0.2	1.21E+02	1.20E+02	1.19E+02	1.18E+02	1.17E+02	1.16E+02
0.53	3.60E+00	3.45E+00	3.39E+00	3.25E+00	3.09E+00	3.02E+00
1	2.50E+00	2.42E+00	2.30E+00	2.24E+00	2.16E+00	2.09E+00
1.48	2.07E+00	1.96E+00	1.85E+00	1.77E+00	1.69E+00	1.63E+00

MeVee	37MeV	38MeV	39MeV	40MeV	41MeV	42MeV
2.06	2.00E+00	1.92E+00	1.81E+00	1.72E+00	1.61E+00	1.50E+00
2.62	1.98E+00	1.90E+00	1.82E+00	1.77E+00	1.68E+00	1.59E+00
3.25	1.87E+00	1.81E+00	1.70E+00	1.66E+00	1.59E+00	1.55E+00
3.95	1.70E+00	1.68E+00	1.61E+00	1.53E+00	1.46E+00	1.40E+00
4.57	1.46E+00	1.46E+00	1.46E+00	1.42E+00	1.37E+00	1.34E+00
5.32	1.19E+00	1.24E+00	1.26E+00	1.27E+00	1.27E+00	1.21E+00
6.04	1.03E+00	9.84E-01	1.01E+00	1.02E+00	1.07E+00	1.09E+00
6.71	9.18E-01	9.07E-01	8.70E-01	8.67E-01	8.71E-01	8.93E-01
7.52	7.98E-01	7.92E-01	7.83E-01	7.64E-01	7.70E-01	7.74E-01
8.27	7.09E-01	7.01E-01	7.03E-01	6.93E-01	6.77E-01	6.63E-01
8.96	6.62E-01	6.31E-01	6.23E-01	6.08E-01	6.18E-01	6.10E-01
9.78	6.19E-01	5.92E-01	5.69E-01	5.58E-01	5.43E-01	5.43E-01
10.64	5.62E-01	5.60E-01	5.58E-01	5.20E-01	5.02E-01	5.10E-01
11.42	5.56E-01	5.24E-01	5.10E-01	5.01E-01	4.85E-01	4.58E-01
12.11	5.58E-01	5.21E-01	4.78E-01	4.75E-01	4.73E-01	4.51E-01
12.94	6.10E-01	5.32E-01	4.93E-01	4.55E-01	4.34E-01	4.33E-01
13.8	5.53E-01	5.94E-01	5.10E-01	4.59E-01	4.19E-01	4.06E-01
14.68	4.03E-01	5.11E-01	5.68E-01	4.98E-01	4.42E-01	3.98E-01
15.47	3.51E-01	3.71E-01	4.60E-01	5.42E-01	4.78E-01	4.19E-01
16.27	3.50E-01	3.34E-01	3.55E-01	4.42E-01	5.23E-01	4.55E-01
17.09	3.34E-01	3.21E-01	3.17E-01	3.37E-01	4.08E-01	4.91E-01
17.93	3.33E-01	3.12E-01	3.00E-01	2.98E-01	3.09E-01	3.84E-01
18.79	3.50E-01	3.20E-01	2.91E-01	2.83E-01	2.70E-01	2.93E-01
19.68	3.34E-01	3.21E-01	2.98E-01	2.70E-01	2.60E-01	2.51E-01
20.43	3.26E-01	3.15E-01	3.04E-01	2.78E-01	2.56E-01	2.47E-01
21.35	3.35E-01	3.11E-01	2.96E-01	2.77E-01	2.60E-01	2.42E-01
22.13	3.37E-01	3.20E-01	2.90E-01	2.72E-01	2.56E-01	2.42E-01
23.09	3.26E-01	3.21E-01	2.98E-01	2.73E-01	2.52E-01	2.37E-01
23.9	3.24E-01	3.06E-01	2.99E-01	2.80E-01	2.60E-01	2.41E-01
24.73	3.20E-01	3.03E-01	2.80E-01	2.81E-01	2.64E-01	2.44E-01
25.57	3.06E-01	3.08E-01	2.87E-01	2.70E-01	2.60E-01	2.60E-01
26.42	2.94E-01	2.96E-01	2.99E-01	2.72E-01	2.50E-01	2.55E-01
27.29	2.59E-01	2.82E-01	2.85E-01	2.73E-01	2.51E-01	2.35E-01
28.17	1.30E-01	2.51E-01	2.67E-01	2.64E-01	2.59E-01	2.38E-01
29.07	2.07E-02	1.29E-01	2.34E-01	2.51E-01	2.46E-01	2.42E-01
29.8	7.38E-04	2.54E-02	1.37E-01	2.35E-01	2.37E-01	2.34E-01
30.72	6.92E-06	1.47E-03	3.20E-02	1.44E-01	2.22E-01	2.26E-01
31.47	0.00E+00	8.81E-06	1.64E-03	3.46E-02	1.47E-01	2.15E-01
32.23	0.00E+00	1.02E-08	2.72E-05	3.04E-03	4.94E-02	1.60E-01
33.19	0.00E+00	0.00E+00	5.71E-08	5.43E-05	4.84E-03	5.37E-02
34.75	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.38E-08	3.11E-05	2.44E-03
36.55	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.67E-07
38.19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

MeVee	43MeV	44MeV	46MeV	48MeV	50MeV	52MeV
0.2	1.15E+02	1.14E+02	1.13E+02	1.10E+02	1.06E+02	1.04E+02
0.53	2.93E+00	2.82E+00	2.67E+00	2.51E+00	2.37E+00	2.24E+00
1	2.04E+00	1.94E+00	1.87E+00	1.74E+00	1.61E+00	1.57E+00
1.48	1.57E+00	1.53E+00	1.48E+00	1.37E+00	1.30E+00	1.24E+00
2.06	1.42E+00	1.35E+00	1.30E+00	1.16E+00	1.09E+00	1.01E+00
2.62	1.46E+00	1.35E+00	1.23E+00	1.12E+00	1.02E+00	9.56E-01
3.25	1.50E+00	1.42E+00	1.29E+00	1.10E+00	1.01E+00	9.14E-01
3.95	1.37E+00	1.37E+00	1.26E+00	1.12E+00	1.01E+00	9.11E-01
4.57	1.31E+00	1.25E+00	1.22E+00	1.12E+00	1.01E+00	8.79E-01
5.32	1.18E+00	1.15E+00	1.14E+00	1.07E+00	9.98E-01	9.11E-01
6.04	1.07E+00	1.05E+00	1.04E+00	1.02E+00	9.53E-01	9.05E-01
6.71	9.41E-01	9.45E-01	9.23E-01	9.18E-01	9.02E-01	8.28E-01
7.52	7.88E-01	8.15E-01	8.36E-01	8.14E-01	8.19E-01	7.85E-01
8.27	6.76E-01	6.96E-01	7.33E-01	7.49E-01	7.33E-01	7.27E-01

MeVee	43MeV	44MeV	46MeV	48MeV	50MeV	52MeV
8.96	6.08E-01	6.03E-01	6.16E-01	6.62E-01	6.84E-01	6.84E-01
9.78	5.41E-01	5.38E-01	5.47E-01	5.75E-01	6.06E-01	6.16E-01
10.64	4.99E-01	4.76E-01	4.76E-01	4.84E-01	5.14E-01	5.43E-01
11.42	4.59E-01	4.42E-01	4.25E-01	4.21E-01	4.36E-01	4.58E-01
12.11	4.23E-01	4.13E-01	3.95E-01	3.85E-01	4.02E-01	4.04E-01
12.94	4.29E-01	4.00E-01	3.77E-01	3.76E-01	3.71E-01	3.80E-01
13.8	3.94E-01	4.02E-01	3.71E-01	3.52E-01	3.45E-01	3.50E-01
14.68	3.76E-01	3.67E-01	3.71E-01	3.28E-01	3.25E-01	3.24E-01
15.47	3.69E-01	3.47E-01	3.43E-01	3.25E-01	2.91E-01	2.94E-01
16.27	4.02E-01	3.61E-01	3.28E-01	3.22E-01	2.96E-01	2.77E-01
17.09	4.33E-01	3.85E-01	3.32E-01	2.99E-01	3.00E-01	2.69E-01
17.93	4.69E-01	4.19E-01	3.48E-01	2.86E-01	2.73E-01	2.60E-01
18.79	3.67E-01	4.45E-01	3.85E-01	3.04E-01	2.70E-01	2.52E-01
19.68	2.72E-01	3.28E-01	4.10E-01	3.28E-01	2.80E-01	2.46E-01
20.43	2.42E-01	2.57E-01	3.55E-01	3.69E-01	2.85E-01	2.59E-01
21.35	2.28E-01	2.33E-01	2.73E-01	3.86E-01	3.04E-01	2.65E-01
22.13	2.28E-01	2.21E-01	2.30E-01	3.25E-01	3.48E-01	2.68E-01
23.09	2.26E-01	2.21E-01	2.08E-01	2.54E-01	3.60E-01	2.90E-01
23.9	2.24E-01	2.18E-01	2.05E-01	2.20E-01	2.90E-01	3.39E-01
24.73	2.21E-01	2.09E-01	2.00E-01	1.98E-01	2.21E-01	3.45E-01
25.57	2.28E-01	2.07E-01	1.96E-01	1.82E-01	1.95E-01	2.77E-01
26.42	2.42E-01	2.17E-01	1.98E-01	1.74E-01	1.78E-01	2.13E-01
27.29	2.37E-01	2.25E-01	1.96E-01	1.73E-01	1.56E-01	1.82E-01
28.17	2.24E-01	2.18E-01	2.04E-01	1.66E-01	1.51E-01	1.55E-01
29.07	2.25E-01	2.03E-01	1.98E-01	1.68E-01	1.55E-01	1.34E-01
29.8	2.29E-01	2.09E-01	1.83E-01	1.76E-01	1.53E-01	1.31E-01
30.72	2.18E-01	2.18E-01	1.85E-01	1.73E-01	1.57E-01	1.39E-01
31.47	2.08E-01	2.09E-01	1.94E-01	1.61E-01	1.61E-01	1.40E-01
32.23	2.07E-01	2.00E-01	1.91E-01	1.65E-01	1.56E-01	1.43E-01
33.19	1.55E-01	1.95E-01	1.83E-01	1.76E-01	1.47E-01	1.46E-01
34.75	3.03E-02	1.04E-01	1.65E-01	1.66E-01	1.50E-01	1.31E-01
36.55	1.12E-04	4.49E-03	6.57E-02	1.48E-01	1.40E-01	1.23E-01
38.19	0.00E+00	5.69E-07	2.91E-03	6.97E-02	1.30E-01	1.22E-01
39.66	0.00E+00	0.00E+00	2.33E-06	6.84E-03	8.03E-02	1.19E-01
41.36	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.07E-05	1.25E-02	8.62E-02
42.89	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.46E-05	1.74E-02
44.66	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.28E-09	3.41E-04
46.25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.85E-05
47.86	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.63E-05
49.49	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.26E-07
50.92	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

MeVee	54MeV	56MeV	58MeV	60MeV	62MeV	64MeV
0.2	1.01E+02	9.93E+01	9.70E+01	9.40E+01	9.13E+01	8.89E+01
0.53	2.08E+00	1.96E+00	1.86E+00	1.81E+00	1.76E+00	1.64E+00
1	1.47E+00	1.39E+00	1.29E+00	1.24E+00	1.20E+00	1.15E+00
1.48	1.17E+00	1.09E+00	1.02E+00	1.01E+00	9.63E-01	9.15E-01
2.06	9.62E-01	9.10E-01	8.84E-01	8.45E-01	7.94E-01	7.77E-01
2.62	8.62E-01	8.05E-01	7.66E-01	7.44E-01	6.88E-01	6.58E-01
3.25	8.49E-01	7.63E-01	7.09E-01	6.58E-01	6.28E-01	5.89E-01
3.95	8.29E-01	7.54E-01	6.98E-01	6.34E-01	5.97E-01	5.58E-01
4.57	7.98E-01	7.37E-01	6.89E-01	6.18E-01	5.89E-01	5.42E-01
5.32	8.05E-01	6.96E-01	6.37E-01	5.97E-01	5.63E-01	5.33E-01
6.04	8.44E-01	7.49E-01	6.46E-01	6.06E-01	5.54E-01	5.02E-01
6.71	7.87E-01	7.49E-01	6.79E-01	6.05E-01	5.58E-01	5.19E-01
7.52	7.45E-01	7.07E-01	6.70E-01	6.12E-01	5.41E-01	5.10E-01
8.27	7.05E-01	6.85E-01	6.57E-01	6.14E-01	5.53E-01	5.03E-01
8.96	6.70E-01	6.57E-01	6.28E-01	6.02E-01	5.63E-01	5.10E-01
9.78	6.11E-01	6.08E-01	5.84E-01	5.63E-01	5.54E-01	5.04E-01

MeVee	54MeV	56MeV	58MeV	60MeV	62MeV	64MeV
10.64	5.46E-01	5.46E-01	5.33E-01	5.15E-01	5.14E-01	4.97E-01
11.42	4.80E-01	4.93E-01	4.89E-01	4.71E-01	4.69E-01	4.65E-01
12.11	4.30E-01	4.43E-01	4.51E-01	4.36E-01	4.33E-01	4.33E-01
12.94	3.91E-01	3.90E-01	4.04E-01	4.13E-01	4.10E-01	3.98E-01
13.8	3.59E-01	3.58E-01	3.61E-01	3.77E-01	3.78E-01	3.74E-01
14.68	3.25E-01	3.41E-01	3.41E-01	3.54E-01	3.46E-01	3.48E-01
15.47	2.99E-01	3.00E-01	3.19E-01	3.20E-01	3.15E-01	3.20E-01
16.27	2.77E-01	2.78E-01	2.94E-01	3.00E-01	3.08E-01	3.03E-01
17.09	2.55E-01	2.56E-01	2.60E-01	2.76E-01	2.94E-01	2.96E-01
17.93	2.43E-01	2.35E-01	2.39E-01	2.51E-01	2.65E-01	2.74E-01
18.79	2.37E-01	2.22E-01	2.17E-01	2.26E-01	2.37E-01	2.52E-01
19.68	2.43E-01	2.11E-01	2.05E-01	2.02E-01	2.09E-01	2.31E-01
20.43	2.43E-01	2.12E-01	2.04E-01	2.05E-01	1.91E-01	2.07E-01
21.35	2.39E-01	2.17E-01	1.96E-01	1.98E-01	1.96E-01	1.89E-01
22.13	2.47E-01	2.21E-01	1.94E-01	1.86E-01	1.87E-01	1.83E-01
23.09	2.48E-01	2.15E-01	1.95E-01	1.83E-01	1.73E-01	1.77E-01
23.9	2.51E-01	2.29E-01	1.94E-01	1.85E-01	1.74E-01	1.65E-01
24.73	2.87E-01	2.39E-01	1.92E-01	1.81E-01	1.74E-01	1.57E-01
25.57	3.38E-01	2.42E-01	2.07E-01	1.73E-01	1.68E-01	1.57E-01
26.42	3.29E-01	2.70E-01	2.21E-01	1.79E-01	1.61E-01	1.57E-01
27.29	2.51E-01	3.17E-01	2.33E-01	1.96E-01	1.60E-01	1.46E-01
28.17	1.90E-01	3.04E-01	2.59E-01	2.15E-01	1.72E-01	1.39E-01
29.07	1.56E-01	2.21E-01	2.93E-01	2.22E-01	1.85E-01	1.44E-01
29.8	1.37E-01	1.68E-01	2.74E-01	2.43E-01	2.02E-01	1.57E-01
30.72	1.24E-01	1.43E-01	2.09E-01	2.70E-01	2.13E-01	1.72E-01
31.47	1.22E-01	1.24E-01	1.55E-01	2.55E-01	2.29E-01	1.89E-01
32.23	1.21E-01	1.15E-01	1.37E-01	2.04E-01	2.47E-01	2.05E-01
33.19	1.24E-01	1.12E-01	1.31E-01	1.48E-01	2.42E-01	2.25E-01
34.75	1.27E-01	1.11E-01	1.17E-01	1.22E-01	1.65E-01	2.42E-01
36.55	1.14E-01	1.14E-01	1.01E-01	1.07E-01	1.06E-01	1.57E-01
38.19	1.08E-01	1.02E-01	9.82E-02	9.23E-02	9.57E-02	9.95E-02
39.66	1.12E-01	9.92E-02	9.28E-02	8.74E-02	8.65E-02	9.06E-02
41.36	1.08E-01	1.06E-01	9.22E-02	8.46E-02	8.00E-02	8.23E-02
42.89	8.67E-02	9.92E-02	9.53E-02	8.19E-02	7.49E-02	7.09E-02
44.66	2.42E-02	8.74E-02	8.89E-02	8.54E-02	7.40E-02	6.57E-02
46.25	6.49E-04	2.94E-02	8.39E-02	8.16E-02	7.75E-02	6.49E-02
47.86	4.06E-07	1.76E-03	3.80E-02	8.09E-02	7.48E-02	7.03E-02
49.49	0.00E+00	3.04E-06	3.48E-03	4.60E-02	7.63E-02	6.90E-02
50.92	0.00E+00	0.00E+00	1.61E-05	6.92E-03	5.46E-02	6.71E-02
52.12	0.00E+00	0.00E+00	2.02E-09	1.69E-04	1.70E-02	6.36E-02
54.08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.77E-07	1.08E-03	2.52E-02
57.08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.83E-07	6.68E-04
60.16	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.09E-08
63.32	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

MeVee	66MeV	68MeV	72Mev	76MeV	80MeV
0.2	8.63E+01	8.44E+01	8.15E+01	7.76E+01	7.33E+01
0.53	1.59E+00	1.53E+00	1.42E+00	1.30E+00	1.24E+00
1	1.09E+00	1.04E+00	9.56E-01	8.79E-01	7.92E-01
1.48	8.84E-01	8.49E-01	7.66E-01	6.71E-01	5.89E-01
2.06	7.48E-01	7.05E-01	6.45E-01	5.97E-01	5.16E-01
2.62	6.47E-01	6.27E-01	5.80E-01	5.23E-01	4.73E-01
3.25	5.62E-01	5.30E-01	5.06E-01	4.59E-01	4.19E-01
3.95	5.21E-01	4.77E-01	4.49E-01	4.10E-01	3.68E-01
4.57	5.08E-01	4.69E-01	4.26E-01	3.78E-01	3.29E-01
5.32	4.94E-01	4.68E-01	4.19E-01	3.61E-01	3.21E-01
6.04	4.69E-01	4.30E-01	3.99E-01	3.60E-01	3.07E-01
6.71	4.78E-01	4.39E-01	3.91E-01	3.51E-01	3.07E-01
7.52	4.69E-01	4.47E-01	3.94E-01	3.41E-01	3.06E-01

MeVee	66MeV	68MeV	72MeV	76MeV	80MeV
8.27	4.67E-01	4.28E-01	3.87E-01	3.48E-01	3.03E-01
8.96	4.52E-01	4.19E-01	3.87E-01	3.41E-01	2.99E-01
9.78	4.49E-01	4.06E-01	3.84E-01	3.33E-01	3.02E-01
10.64	4.60E-01	4.20E-01	3.68E-01	3.28E-01	2.94E-01
11.42	4.47E-01	4.13E-01	3.65E-01	3.12E-01	2.93E-01
12.11	4.38E-01	4.12E-01	3.65E-01	3.07E-01	2.90E-01
12.94	3.94E-01	4.00E-01	3.67E-01	3.17E-01	2.81E-01
13.8	3.73E-01	3.56E-01	3.56E-01	3.13E-01	2.70E-01
14.68	3.48E-01	3.39E-01	3.37E-01	3.17E-01	2.72E-01
15.47	3.11E-01	3.16E-01	3.12E-01	3.06E-01	2.72E-01
16.27	2.93E-01	2.89E-01	3.00E-01	3.03E-01	2.74E-01
17.09	2.90E-01	2.80E-01	2.78E-01	2.87E-01	2.64E-01
17.93	2.77E-01	2.72E-01	2.56E-01	2.69E-01	2.57E-01
18.79	2.57E-01	2.61E-01	2.43E-01	2.52E-01	2.59E-01
19.68	2.34E-01	2.50E-01	2.39E-01	2.38E-01	2.41E-01
20.43	2.21E-01	2.34E-01	2.34E-01	2.31E-01	2.31E-01
21.35	2.02E-01	2.18E-01	2.21E-01	2.20E-01	2.21E-01
22.13	1.86E-01	1.95E-01	2.08E-01	2.05E-01	2.08E-01
23.09	1.73E-01	1.74E-01	1.95E-01	2.02E-01	2.03E-01
23.9	1.73E-01	1.63E-01	1.77E-01	1.95E-01	2.00E-01
24.73	1.65E-01	1.59E-01	1.59E-01	1.83E-01	1.89E-01
25.57	1.55E-01	1.57E-01	1.50E-01	1.72E-01	1.82E-01
26.42	1.46E-01	1.48E-01	1.47E-01	1.55E-01	1.70E-01
27.29	1.47E-01	1.33E-01	1.44E-01	1.40E-01	1.59E-01
28.17	1.39E-01	1.38E-01	1.35E-01	1.35E-01	1.51E-01
29.07	1.31E-01	1.35E-01	1.21E-01	1.33E-01	1.43E-01
29.8	1.31E-01	1.24E-01	1.19E-01	1.29E-01	1.35E-01
30.72	1.39E-01	1.20E-01	1.25E-01	1.26E-01	1.28E-01
31.47	1.46E-01	1.24E-01	1.22E-01	1.19E-01	1.31E-01
32.23	1.55E-01	1.28E-01	1.16E-01	1.16E-01	1.29E-01
33.19	1.72E-01	1.38E-01	1.16E-01	1.12E-01	1.20E-01
34.75	2.05E-01	1.57E-01	1.19E-01	1.08E-01	1.10E-01
36.55	2.33E-01	1.94E-01	1.31E-01	1.02E-01	1.02E-01
38.19	1.47E-01	2.21E-01	1.66E-01	1.03E-01	9.74E-02
39.66	9.33E-02	1.48E-01	2.02E-01	1.19E-01	9.17E-02
41.36	8.55E-02	9.26E-02	1.74E-01	1.50E-01	9.39E-02
42.89	7.80E-02	7.96E-02	1.16E-01	1.82E-01	1.05E-01
44.66	6.42E-02	7.12E-02	7.68E-02	1.68E-01	1.31E-01
46.25	6.06E-02	5.93E-02	6.45E-02	1.13E-01	1.63E-01
47.86	6.14E-02	5.53E-02	5.85E-02	7.18E-02	1.57E-01
49.49	6.33E-02	5.68E-02	5.12E-02	5.84E-02	1.16E-01
50.92	6.32E-02	5.66E-02	4.82E-02	5.25E-02	7.10E-02
52.12	6.21E-02	5.95E-02	5.02E-02	4.80E-02	5.20E-02
54.08	5.94E-02	5.84E-02	4.75E-02	4.12E-02	4.43E-02
57.08	1.56E-02	4.69E-02	4.94E-02	4.08E-02	3.91E-02
60.16	2.21E-05	3.67E-03	3.50E-02	3.94E-02	3.19E-02
63.32	0.00E+00	1.38E-07	4.46E-03	3.65E-02	5.23E-02
66.31	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

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
物質量	モル	mol
光度	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	$m \cdot kg/s^2$
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	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
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	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタール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わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

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
バーン	b
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

換算表

力	N($=10^5 \text{ dyn}$)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s/m}^2) = 10 \text{ P} \text{ (ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} \text{ (ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa($=10 \text{ bar}$)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
力	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($=10^7 \text{ erg}$)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)	
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	$= 4.184 \text{ J} \text{ (熱化学)}$	
9.80665	1	2.72407	10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	$= 4.1855 \text{ J} \text{ (15°C)}$	
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694 $\times 10^{25}$	2.61272×10^{19}	$= 4.1868 \text{ J} \text{ (国際蒸気表)}$	
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272 $\times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仮馬力)		
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515 $\times 10^{21}$	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$		
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$		
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			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270×10^{-11}		1	100
	3.7×10^{10}	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

広島域エネルギー中性子モニタ用検出器の開発（共同研究）

R100
古紙配合率100%再生紙を使用しています