

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360426

研究課題名(和文) 熱中性子ビームを利用した中性子線量計の2次元微分校正法の開発

研究課題名(英文) Development of two-dimensional differential calibration method of neutron dosimeters using a thermal neutron beam

研究代表者

原野 英樹 (HARANO HIDEKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：60302775

研究成果の概要(和文)：本課題では、熱中性子に対して中性子線量計の高精度感度校正のために、原子炉からの高強度熱中性子ビームを利用した新たな校正方法を開発した。従来の積分的な校正法とは異なり中性子飛行時間法を応用した微分的な評価を行うのが特徴である。実験では、研究炉 JRR-3M から引き出される熱中性子ビームを使った。熱中性子ビームの特性を詳細に評価し、市販の中性子個人線量計に対して提案した校正方法の実証試験を行い、熱中性子領域において応答曲線が得られた。

研究成果の概要(英文)：We developed a two dimensional differential neutron calibration method using a time of flight (TOF) technique and an intense thermal neutron beam from a research reactor for precise calibration of neutron dosimeters. A thermal neutron beam was obtained from a research reactor "JRR-3M" in the present study. After characteristics of the thermal neutron beam were experimentally evaluated, the calibration method was experimentally demonstrated for a ^3He spherical proportional counter and a electric personal dosimeter. The responses of the detectors were successfully obtained as a function of neutron energy in the thermal neutron region..

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	11,700,000	3,510,000	15,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：放射線工学、量子ビーム、2次元測定、中性子飛行時間法、熱中性子

1. 研究開始当初の背景

原子力施設や核燃料施設において放射線防護の観点から利用されている電子式個人線量計、レムカウンタなどは信頼性を維持するために定期的な校正を必要とされている。熱中性子に対する校正では、通常黒鉛パイプと Am-Be などの中性子線源によって構成される熱中性子場が利用されている。しかしな

がら、中性子発生に減速材体系を用いていることから、校正の際に用いる水ファントムや線量計そのものが持っている減速材との散乱効果によって、熱中性子に対する校正値が、異なって評価される場合がある。また、中性子線量計の校正に必要な 1 mSv の線量照射にも数日以上時間が掛かってしまうことがあり、改善する必要があった。また、通常

の熱中性子校正では、2 ケタに及ぶ広範囲のエネルギー分布を持った熱中性子スペクトル場に対する校正であり、積分的な手法である。しかしながら、熱中性子場は場所ごとにほぼすべて異なるスペクトルを持っているため、正確には校正値をそのまま使用することができない。任意の熱中性子に対して正しい校正値を得るためには、熱中性子領域においてもエネルギーの関数で検出器応答を得る必要がある。そこで、上記の課題を解決することを目的として、本研究課題を実施した。

2. 研究の目的

- (1)減速材体系を用いない高強度熱中性子ビームを利用して、中性子線量計の校正を可能にする。
- (2)ある中性子検出器の応答をエネルギー関数として得る新しい校正法を開発する。

3. 研究の方法

- (1)日本原子力研究開発機構 JRR-3M の即発ガンマ線分析用ビームラインを用いて、高強度熱中性子ビームを得る。ビームライン中に新たにビームチョッパー、中性子モニタをインストールし、中性子飛行時間法を利用した2次元微分校正法が実施できる準備を行う。
- (2)インストールする小型中性子モニタの開発を行う。
- (3)整備されたビームラインにおいて、中性子スペクトル、中性子フルエンスなどのビーム特性を実験的に評価する。
- (4)通常利用される中性子検出器や中性子線量計に対して、2次元微分校正法の実証試験を行う。

4. 研究成果

(1)2次元微分校正法の原理

本研究課題で提案する2次元微分校正法は、パルス平行中性子ビームと中性子飛行時間法を用いて行われる。2次元微分校正法の考えを図1に示す。

中性子検出器の応答は、通常

$$R(E, I) = N(E, I) / \eta(E) \quad (1)$$

で求められる。ここで $R(E, I)$ は中性子エネルギー E 、検出器からの計測波高チャンネル I に対する応答であり、 $N(E, I)$ は計数、 $\eta(E)$ は応答測定を行った場のスペクトルである。この時、 $\eta(E)$ は中性子飛行時間法によって求められる。また、 $N(E, I)$ も校正対象の中性子検出器からの出力を中性子飛行時間と波高の2次元同時測定を行うことによって求められる。したがって、検出器の応答をエネルギーの関数として求めることができる。 $R(E, I)$ が求めれば、任意の熱中性子スペクトル場 $\nu(E)$ の応答 R_{th} も(2)式のように正確に求めることが可能になる。

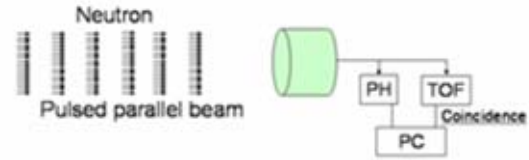


図1. 2次元微分校正法のコンセプト

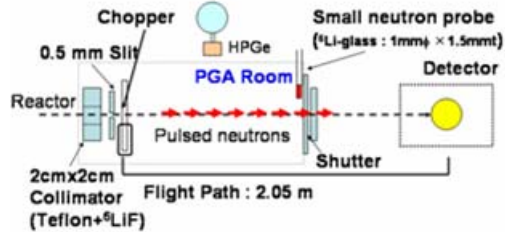


図2 本研究で使用した JRR-3M の熱中性子ビームライン

$$R_{th} = \iint R(E, I) \nu(E) dE dI / \int \nu(E) dE \quad (2)$$

(2)熱中性子ビームラインの準備

本研究における原子炉からの熱中性子ビームを用いた中性子線量計の校正実験を行うために、原子力機構 JRR-3M における PGA 用ビームラインを用いた。図2に本研究で利用しているビームラインの概略図を示す。熱中性子ビームは、スーパーミラーで構成される中性子曲導管によって原子炉からビームガイドホールに導かれる。中性子曲導管を通過する際、原子炉から引き出されるエネルギーの高い中性子およびガンマ線成分は、曲がることができずビームガイドホールには到達しない。中性子ビームは、コリメータによって $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ に整形され PGA 装置に到達する。図2に示すように回転チョッパーを PGA 装置の上流側、小型中性子プローブを測定器照射位置の上流かつ PGA 装置の下流側になるように導入した。中性子飛行時間法

(TOF法)で、中性子スペクトルを得るために、中性子ビームはチョッパーによってパルス化された。チョッパーは、95%濃縮 ^6LiF を含んだ 8 mm 厚 PTFE 円盤であり、 0.5 mm のスリットが2つ設けられている。このとき濃縮 ^6LiF の実効的な厚さは 2.5 mm になる。チョッパーは、 $0 \sim 50\text{ Hz}$ の範囲で回転する。チョッパーのすぐ上流側には前置スリットが設置されており、 $0.5 \sim 1.5\text{ mm}$ の幅で調整が可能である。前置スリットの幅を 0.5 mm とし、 50 Hz でチョッパーを回転させたとき、パルス中性子ビームのパルス幅は $26.5\text{ }\mu\text{s}$ で得られる。TOF測定スタート信号は、チョッパー軸上に取り付けられたエンコーダーから取り出される。チョッパーと本実験で利

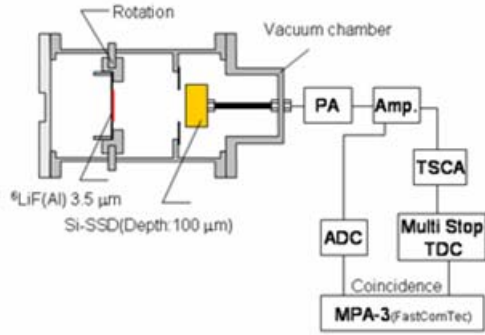


図3 熱中性子検出器の概略図

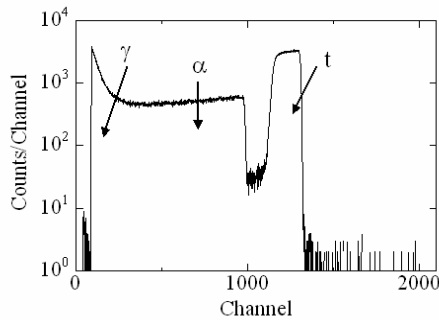


図4 熱中性子検出器によって得られた波高スペクトル

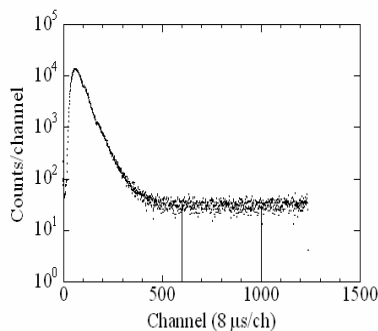


図5 熱中性子検出器によって得られたTOFスペクトル。波高スペクトルのトリトンに対応する部分のゲートに対して得られた。

用した照射場の中心までの中性子飛行距離は、約2 mである。

(3) 小型中性子プローブの開発

小型中性子プローブは、中性子モニターとして使用された。小型中性子プローブは、直径1.0 mm、長さ1.5 mmの小さな ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータが直径1.0 mmのプラスチックファイバーに取り付けられた構造となっている。プラスチックファイバーの反対側は、光電子増倍管、さらには前置増幅器、増幅器、マルチチャンネルアナライザが接続されている。このプローブの大きな特徴は、中性子場に与える影響が小さいということにある。

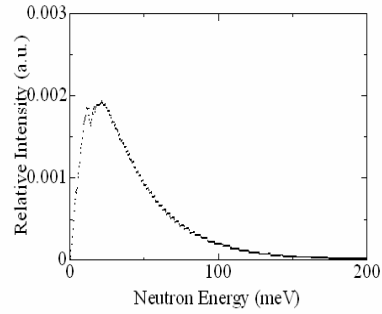


図6 熱中性子検出器によって得られた熱中性子スペクトル

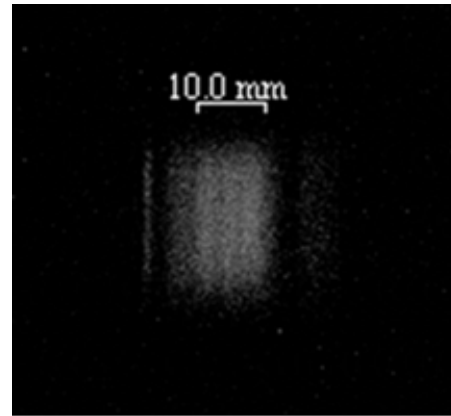


図7 イメージングプレートで測定された熱中性子ビームの空間分布

また、 ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータは、波高弁別によって中性子とガンマ線を区別することができる。中性子プローブは、チョッパーと中性子照射場の間に設置された。

(4) 熱中性子ビームの特性評価

TOF法による中性子スペクトル測定は、熱中性子検出器によって行われた。熱中性子検出器は、図3に示すように0.5 mm厚のアルミニウムに蒸着された濃縮 ${}^6\text{LiF}$ 膜と表面障壁型シリコン半導体検出器(空乏層厚: 100 μm, 有感領域: 150 mm²)によって構成されている。全体は、真空チャンバー内に格納されている。 ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ 反応によって生成されるアルファ粒子とトリトン表面障壁型シリコン半導体検出器で観測することによって、入射中性子のタイミングを見ることが出来る。一般的に、熱中性子は ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータによって測定されるが、ガンマ線に対しても大きな感度を持つ。一方で、今回用いた熱中性子検出器は、ガンマ線に対する感度は低く、デッドタイムを軽減することができる。アルファ粒子やトリトンのチャンバー内における飛行時間があるため、時間分解能は ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレータに比べて劣るが、熱中性子の測定では十分である。検出器の検出効率は、濃縮 ${}^6\text{LiF}$ 膜の厚さによって調整できる。

熱中性子検出器の相対検出効率は、 ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ 反応断面積に依存しており、モンテカルロシミュレーションコード NRESP-ANT によって検証されている。検出器からの信号は、図 3 に示す回路系で波高と TOF の 2 次元データとしてパソコンに取り込まれる。熱中性子の TOF 測定においては、マイクロ秒オーダーでの時間測定のため、スロー系の回路であるタイミングシングルチャネルアナライザ (TSCA) による信号処理で十分である。また、チョッパーからのひとつのトリガー信号 (スタート信号) に対して熱中性子検出器からの複数のパルス信号 (ストップ信号) を入力できるマルチストップ型 TDC を用いている。

図 4 は、熱中性子検出器で得られた波高スペクトルである。波高スペクトルは、ガンマ線、 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 反応からのアルファ粒子、トリトンの各成分で説明できる。特に、アルファ粒子とトリトンに起因する波高スペクトルは、きれいに区別することができる。図 5 は、波高スペクトルのトリトンに対応する TOF スペクトルである。図中 600 チャンネル以上は、主にチョッパーディスクを透過してきた中性子によるものである。ビームストップや他のビームラインの装置からの散乱中性子に起因するものは少ないが、この中に含まれる。この領域の中性子は、中性子スペクトル測定においては時間依存のないバックグラウンドとして考えられる。このバックグラウンドを引き去った後、TOF スペクトルは図 6 のようにエネルギースペクトルに変換された。図 6 の中性子スペクトルは、面積が 1 になるように規格化されている。スペクトル $\nu(E)$ のピークエネルギーと平均エネルギー $\langle E \rangle$ は、それぞれ 22.1 meV と 38.9 meV である。平均エネルギーは次式で定義される。

$$\langle E \rangle = \frac{\int E \times \nu(E) dE}{\int \nu(E) dE}$$

このとき、 E は中性子エネルギーである。図 6 は、0.5 eV 以上の熱外中性子成分の寄与がほとんどなく無視できることを示している。すなわち、中性子線量計の校正を行うために表 1 金箔放射化法によって得られた熱中性子ビームの中性子フラックス。チョッパーがある場合とない場合について示している。

Method	Flux (s^{-1})	Uncertainty (%)
Gold Activation (with the chopper)	1.01×10^4	2.3 %
Gold Activation (without the chopper)	2.38×10^7	2.3 %

は、理想的な状態である。また、中性子スペクトル中のディップは、PGA 装置の上流に設置されているグラフィートモノクロメータによる反射波長に起因するものである。

さらに、(n,p) 反応の $1/\nu$ 断面積を持った球形 ${}^3\text{He}$ 比例計数管 (Centronic, SP9) を用いて 1mm 厚のカドミウム板で覆われた場合と覆われていない場合の測定から、カドミ比を求めた。カドミ比は、 4.4×10^4 であった。

表 1 はチョッパーがある場合とない場合の中性子フラックスである。中性子フラックスは、金箔の放射化法によって決定された。金箔は、直径が 20 mm、公称厚さが 50 μm と 100 μm のものを用いた。実際の箔の厚さは、直径と重量から求められた。金箔の放射能は、井戸型 NaI(Tl) 検出器によって測定された。金箔からの 412 keV ガンマ線に対する井戸型 NaI(Tl) 検出器の検出効率は、 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数装置によって校正されている。データ処理で使用された金の放射化断面積は、測定で得られた中性子スペクトルと ENDF-B/VII に格納されている ${}^{197}\text{Au}$ に対する評価済み中性子捕獲断面積から求められた。中性子フラックスは、校正目的で大きい場合には、天然 LiF による薄い遮蔽材をビームライン上のチョッパー前に挿入することによってフラックスを低減することが可能である。

空間分布は、イメージングプレートによって測定された。図 7 にイメージングプレートで得られた空間分布の写真を示す。このビームサイズは、一般的に直径 20 cm、長さ 20 cm の大きさの中性子サーベイメータを実際に校正する場合には、とても小さい。したがって、将来的には大きな測定器に対して均一に照射することができるように、ビームスキヤニング装置を用いる。

中性子フラックスの時間変動についても、小型中性子プローブを用いて測定した。図 8 は、測定結果である。図 8 では、フラックスは実験中緩やかに変動するが、概ね 1~2% で安定していることを示している。しかしながら、原子炉の調整に起因して時々大幅な変動

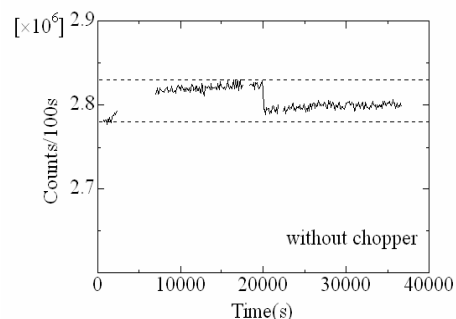


図 8 小型中性子プローブによって測定された中性子フラックスの時間変動

をすることがある。

(5) 2次元微分校正法の実証試験

^3He 球形比例計数管と市販されている富士電機システムズ製の電子式個人線量計に対して2次元微分校正法の実証試験を行った。

^3He 比例計数管の場合は、その応答曲線は、熱中性子領域において $^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積の曲線に従うことが予測されるため、実証試験として適している。図9は、 ^3He 比例計数管で測定されたTOFスペクトルであり、図10は、図9の結果と図5の基準中性子スペクトルの結果から得られた ^3He 球形比例計数管の応答曲線である。図10中の青線は、 $^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積の相対曲線である。得られた結果と青線の傾向は0.2eV以下のエネルギー領域で一致しており、得られた結果は、妥当なものであると言える。しかしながら、JRR-3Mの熱中性子ビームでは、0.1eV以上の中性子フラックスは小さく統計が足りないため、データのばらつきが大きい。

中性子個人線量計はボロンラジエータとシリコン検出器によって構成されているものであり、熱領域でTOF測定することに問題はない。中性子個人線量計によって得られたTOFスペクトルを図11に示す。図12には、

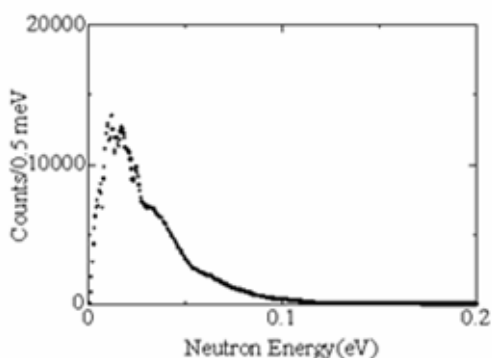


図9 ^3He 球形比例計数管による測定で得られたTOFスペクトル

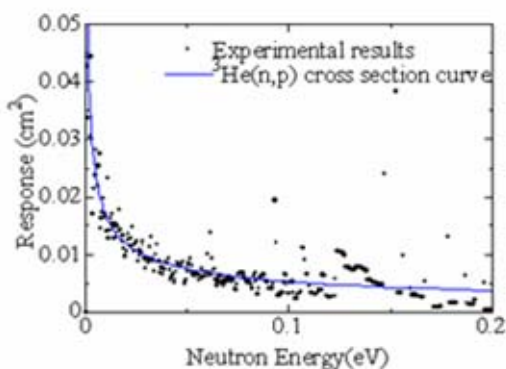


図10 2次元微分校正法で得られた ^3He 球形比例計数管の応答曲線。青線は、 $^3\text{He}(n,p)$ 反応断面積の相対曲線である。

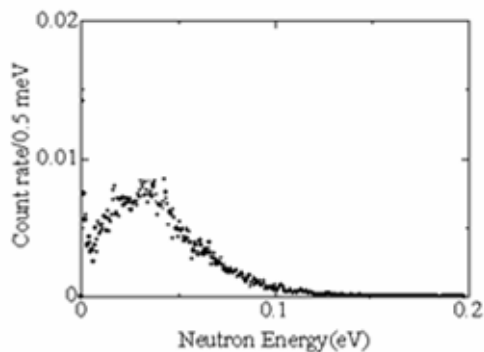


図11 電子式中性子個人線量計によって得られたTOFスペクトル

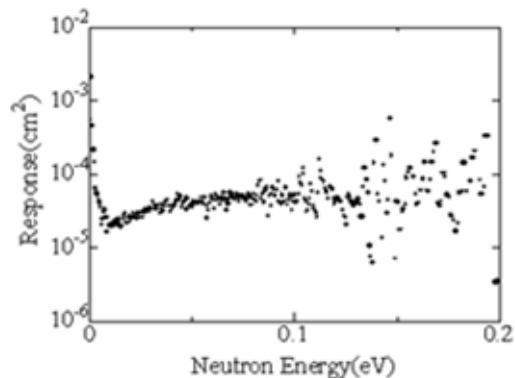


図12 2次元微分校正法によって得られた電子式中性子個人線量計の応答曲線

図11と図5の基準スペクトルの結果から求められた中性子個人線量計の応答曲線である。未知の検出器についても、熱領域において応答曲線が得られることを示せた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 松本哲郎、原野英樹、増田明彦、西山潤、櫻井良憲、瓜谷章、New idea of a small-sized neutron detector with a plastic fiber, Radiation Protection Dosimetry, 査読有、掲載確定(web 上先行掲載済: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/early/2011/04/26/rpd.ncr119.full.pdf+html>)
- ② 松本哲郎、原野英樹、西山潤、松江秀明、増田明彦、瓜谷章、工藤勝久、Thermal neutron calibration method using an intense neutron beam from the JRR-3M, Radiation Measurement, Radiation measurement, 査読有、45巻、2010、1124-1126

〔学会発表〕（計 6 件）

①松本哲郎、原野英樹、西山潤、松江秀明、増田明彦、瓜谷章、布宮智也、Development of two-dimensional differential calibration method for a neutron dosimeter using a thermal neutron beam, IEEE Nuclear Science Symposium 2010、アメリカ・ノックスビル、2010.11.2

②松本哲郎、原野英樹、増田明彦、西山潤、松江秀明、瓜谷章、原子炉からの高強度熱中性子ビームを用いた中性子線量計の校正法に関する研究、電気学会原子力研究会、東京、2010.8.30

③松本哲郎、原野英樹、増田明彦、西山潤、櫻井良憲、瓜谷章、New idea of a small-sized neutron detector with a plastic fiber、The third Asian and Oceanic Congress on Radiation Protection、東京、2010.5.25

④松本哲郎、原野英樹、西山潤、松江秀明、増田明彦、瓜谷章、工藤勝久、Thermal neutron calibration method using an intense neutron beam from the JRR-3M, NEUDOS11, 南アフリカ・ケープタウン、2009.10.13

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nmi.j.jp/~quant-rad/neutron/newhp.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原野 英樹 (HARANO HIDEKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：60302775

(2) 研究分担者

松本 哲郎 (MATSUMOTO TETSURO)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70415793

瓜谷 章 (URITANI AKIRA)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10213521

松江 秀明 (MATSUE HIDEAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹

研究者番号：30354864