

白色中性子源を用いた中性子線量計の革新的校正法に関する研究

(受託者)独立行政法人産業技術総合研究所

(研究代表者)原野英樹 計測標準研究部門

(再委託先)国立大学法人京都大学、大学共同利用法人高エネルギー加速器研究機構、

独立行政法人放射線医学総合研究所

(研究開発期間)平成21年度～24年度

1. 研究開発の背景とねらい

原子力発電所や核燃料施設、加速器施設などの施設内や周辺環境において、より信頼される安全管理は目に見える形で保障されている必要がある。その安全指標のひとつとして線量計は、必要不可欠である。本事業では中性子線量計に着目し、そのエネルギー特性を、従来の離散的なエネルギー一点で感度校正[1]を行う手法ではなく、白色中性子(連続的な中性子スペクトル)を利用して一度に連続的に測定する手法を提案・開発することで、中性子線量評価の高度化を図ることを目的としている。使用する白色中性子源は10 keV～20 MeV領域を産総研ペレットロン加速器施設、熱外～10 keVを京大電子ライナック施設で開発し、特性試験を実施する。また中性子飛行時間と線量計からの波高出力の2次元同時測定を基礎とした校正方法の開発を行い、実際の中性子線量計に対する実証試験を行う。本事業では、J-PARCを始め近年発展の著しい高エネルギー加速器施設等で注目されている高エネルギー中性子に対する線量評価の高度化にも取り組む。高エネルギー中性子照射場にて得られる高エネルギー中性子成分に加えて低エネルギー側にテイルを持った準単色スペクトルを有する白色中性子について特性評価を実施する。以上により放射線施設の線量評価技術とその信頼性を高める足がかりとし、放射線防護における安全安心に貢献する。

2. 研究開発成果

(1)白色中性子源を用いた中性子飛行時間と測定器出力の2次元測定による校正法に関する研究

本事業で提案している白色中性子源を用いた校正法は、中性子飛行時間(TOF)と線量計からの波高出力の2次元同時測定によって行われる。TOFは中性子エネルギーに対応しており、図1に示すように高エネルギーの中性子は速く、低エネルギーの中性子は遅く移動することを利用してさまざまなエネルギーの中性子を一度に測定することができる。2次元同時測定により、中性子エネルギーに対応した線量計出力情報を得ることができるため、白色中性子を利用すれば、広領域の感度を一度に取得することができる。

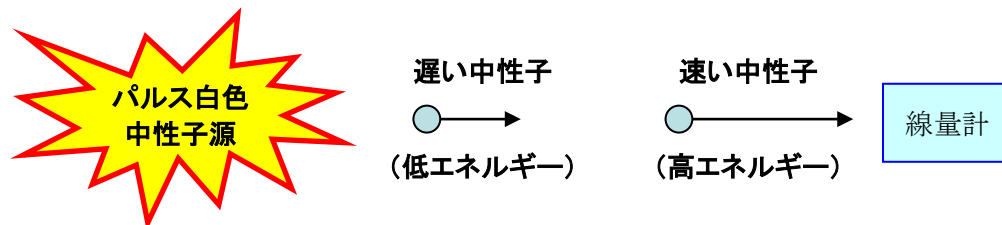


図1 本事業の校正法のイメージ図

①10 keV～20 MeV 速中性子領域における校正法に関する研究

10keV～20 MeV 領域については、産業技術総合研究所(以下、産総研)のペレットロン加速器施設によるパルスイオンビームを利用して白色中性子を生成させる。平成23年度は、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応、 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 反応によって生成される白色中性子のスペクトル及びフルエンスを決定した。決定に際しては、荷電粒子輸送、中性子輸送計算が可能なMCNP-ANT[2]コードも利用した。図2は、2つ

の反応で得られる白色中性子のスペクトラルフルエンスである。白色中性子を用いた校正では、白色中性子スペクトルを複数のビンに分割し、各ビンに対応するフルエンスに対して中性子線量計の感度を校正する。そこで、各ビンの中性子フルエンスに対する不確かさも決定した。不確かさの主な要因として、(1)測定の統計不確かさ、(2)フルエンス測定に用いる検出器の検出効率の不確かさを考慮した。検出効率の不確かさについては、たとえば中性子とガンマ線の弁別能に関する不確かさ、核反応断面積の不確かさなど細分化して考慮し、最終的な不確かさ導出の式を決定した。

②熱外～10 keV 領域における校正法に関する研究

熱外～10 keV 領域については、京都大学原子炉実験所電子ライナック施設における光核反応中性子源を利用した。白色中性子は、 (γ, n) 反応によって生成される中性子を水減速させることにより得られる。中性子スペクトラルフルエンスは、 $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 反応による 478 keV 単色ガンマ線をターゲットから $12.7 \pm 0.2\text{m}$ の位置に設置された全吸収 BGO 検出器による測定で得られた。中性子線量計の校正を行う位置は、全吸収 BGO 検出器の前面（ターゲットから 12 m の位置）で行う

ため、全吸収 BGO 検出器によって得られたフルエンスとの比を金放射化測定から求めた。その結果、校正位置のフルエンスは、全吸収 BGO 検出器の位置に比べて 1.76 倍であると決まった。中性子スペクトルの妥当性を検証するために、金放射化法による測定と MCNP5 モンテカルロコード[2]による計算を行った。金放射化法の測定では、熱/熱外比を求め、スペクトル形状を説明できる結果が得られた。MCNP5 による計算では、加速器からの電子、光子、中性子輸送計算を行い、得られたスペクトルの妥当性についても検証を行った。図 3 は実験と計算によって得られたスペクトルの比較である。計算結果は、測定結果を支持するものとなった。フルエンスの不確かさは、測定の統計不確かさ、 $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 反応断面積に起因する不確かさ、金放射化測定に起因する不確かさを考慮して評価された。また、中性子源の特性を評価するために、光核反応によって生成される MeV 領域を含む全エネルギー領域の中性子スペクトルも求めた。測定は、1.5 MeV 以上の領域では有機液体シンチレータを用い、1.5 MeV 以下の領域では ^6Li ガラスシンチレータを用いた TOF 法で行われた。最終的にターゲットから生成される最大 30 MeV までの中性子スペクトルを求めることができた[3]。

③線量計への実用化研究

実証試験として、原子力施設等で実際に利用されている中性子線量計に対して、白色中性子源を用いた校正法による応答測定を行った。中性子線量計として、シリコン半導体検出器を利用した電子式個人線量計[4]と減速材を用いないタイプの中性子サーベイメータ PRESCILA[5]を利用した。白色中性子源を利用した校正試験により、各線量計について TOF と線量計からの出力の 2

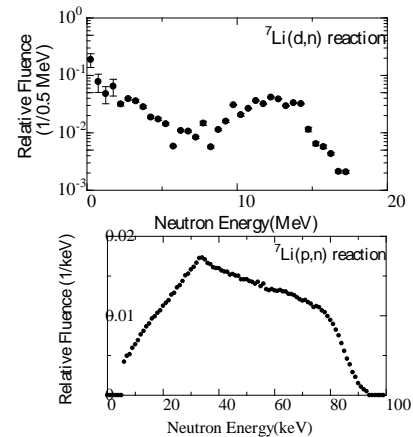


図 2. 白色中性子スペクトル

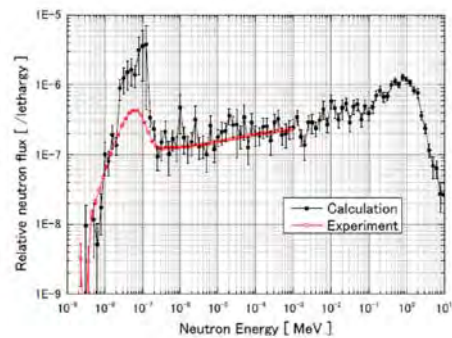


図 3. 実験と計算によって得られた京大白色中性子場のスペクトルの比較

次元プロットが得られ、応答曲線を求めることができた。図 4 は、最終的に 2 つの線量計について得られた応答曲線である。

次に、国内核燃料施設の 3 か所の作業環境場において、上記の 2 種類の線量計を用いた測定を行った。中性子線量は、図 4 で得られた応答曲線と作業環境場における中性子スペクトルをフォルディングすることによって求められた。中性子スペクトルは、ボナー球スペクトロメータによって求められた。図 5 は、3 か所の作業環境場において測定された中性子周辺線量当量である。比較として実際の線量当量である中性子スペクトルから直接求めた結果、2 種類の線量計について従来の Am-Be 線源を用いた校正を行った際の校正定数から得られる結果を示した。従来の校正によって得られる結果は、実際の線量当量との間に差異が見られるが、本研究の校正法によって得られた結果は、不確かさ内で一致が見られた。

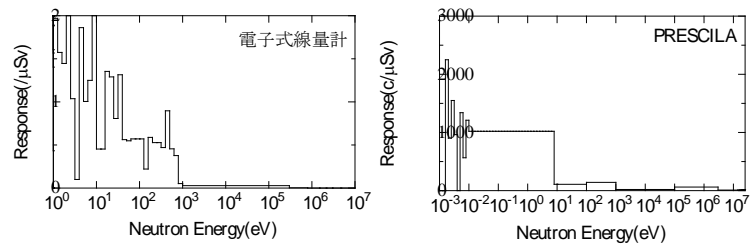


図 4. 電子式線量計と PRESCILA の応答曲線

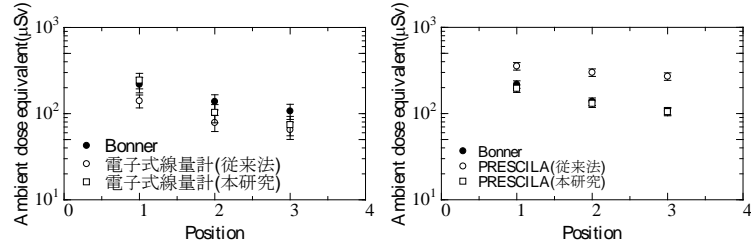


図 5. 3 か所の作業環境場の線量測定結果

(2) 静電加速器を用いたパルス白色中性子源に関する研究

本事業では、産総研が所有するシングルエンド型 4 MV ペレトロン加速器（米国 National Electrostatics Corporation 製、4UH-HC）を用いたパルス白色中性子発生技術の開発を行っている。イオンビームをパルスの発生させるために、クライストロンバンチング法によりパルスイオンビームを発生させるための要素であるスイープ電極、ポップ電極、バンチャーを、既存のイオン源アセンブリに組み込んだパルス化装置を開発中である。パルスイオンが発生できれば、 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 反応、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応を用いて、10 keV～20 MeV 領域のパルス白色中性子が発生できる。ナノ秒オーダーのパルスイオンビームを安定的に発生できるよう作業を続けている。

(3) 準単色高エネルギー中性子場における低エネルギー成分の解明

① 低エネルギー成分の計測技術に関する研究

本事業では、高エネルギー中性子の校正に一般的に利用される ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応による準単色高エネルギー中性子場における低エネルギー成分の評価を行った。低エネルギー成分の解明は、今後中性子線量計の高エネルギー中性子に対する校正の精度向上のために重要である。準単色中性子場のスペクトルは、通常 TOF 測定によって求められるが、ターゲットからの距離やパルス周波数の制限により、約 10 MeV 以下のエネルギー測定は簡単ではなかった。本研究では、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所 TIARA における AVF サイクロトロン加速器施設を利用した準単色高エネルギー中性子場を用いた。低エネルギー成分を求めるために、従来の TOF 法による測定とボナー球スペクトロメータを利用した全エネルギー領域のスペクトル測定を行った。次に、数 100 keV～数 MeV 領域の測定を可能にする ${}^3\text{He}$ 比例計数管と 2 つの Si 半導体検出器によって構成されたサンドイッチスペクトロメータの開発及び測定を行った。 ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$ 反応によって生成される陽子とトリトンの同時計測によるエネルギースペクトルを求める。また、熱領域の測

定のために ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ 反応を用いる ${}^6\text{LiF}$ 薄膜と Si 半導体検出器で構成される熱中性子測定器の開発及び測定を行った。全エネルギー領域において、異

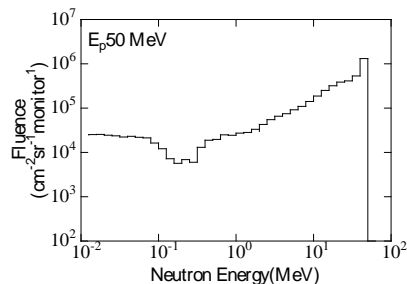


図 6. ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応準単色中性子場の全エネルギー領域のスペクトル

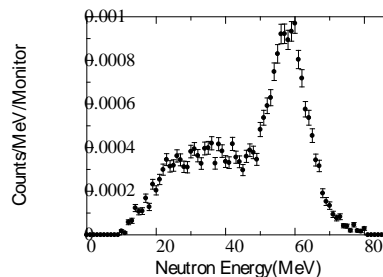


図 7. 60 MeV 準単色中性子場において PRESCILA で測定された TOF スペクトル

なる 2 つ以上の測定方法で中性子スペクトルを測定した。最終的に図 6 のように、加速陽子エネルギー 50 MeV による ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応準単色中性子場における全エネルギー領域の中性子スペクトルを求めることができた。本研究で得られたデータを基礎として、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応における蒸発過程の検証など理論面における発展が期待される。

②線量計への影響評価技術の開発

準単色高エネルギー中性子場において、中性子線量計の TOF 法を用いた校正法も試みた。図 7 は 60 MeV 準単色中性子場における PRESCILA からの出力パルスによる TOF スペクトルである。準単色場の全エネルギーピークに対応するピークが観測され、応答を求めることもできた。また、準単色高エネルギー中性子場において、市販の中性子線量計の校正を行った場合に、①において評価した低エネルギー成分がどのような影響を及ぼすかについて定量的に評価した。

3. まとめと今後

最終年度となる平成 23 年度は、実際中性子線量計について、パルス白色中性子源を用いて応答曲線を実験によって一度に取得することを示すことができた。また、応答曲線を精度良く求めれば、核燃料施設の作業環境場において信頼性の高い中性子線量評価ができることも示すことができた。しかしながら、東日本大震災により計画の遅延が生じており、平成 24 年度に計画延長して実施している。本事業で開発した校正法は、世界的にも初めての試みであり、より詳細な線量評価の道筋を示し、原子力施設内での作業や周辺住民の安全・安心に寄与できるものと考えている。

4. 参考文献

- [1] ISO8529-1, Reference Neutron Radiations Part1: Characteristics and Methods of Production 2001, ISO 8529-1.
- [2] J. F. Briesmeister, *MCNP – A general Monte Carlo N particle transport code, version 4C*. LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [3] T. Matsumoto et al., Development of a New Calibration Method of Neutron Dosimeters Using Pulsed White Neutron Sources, KEK proceedings 2011 (8), 218-225 (2012).
- [4] M. Sasaki, et al., Development and characterization of real-time personal neutron dosimeter with two silicon detectors, Nucl. Instr. Methods A418, 465-475 (1998).
- [5] R. H. Olsher et al., PRESCILA: A New, Lightweight Neutron Rem meter, Health Phys. 86(6), 603-612 (2004).