

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 計測標準研究部門量子放射科

(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～平成23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 領域を産総研ペルトロン加速器施設、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。本研究項目では、TOF により白色中性子のスペクトル及びフルエンス情報を正確に知るための測定器の試作及び特性試験を行う。

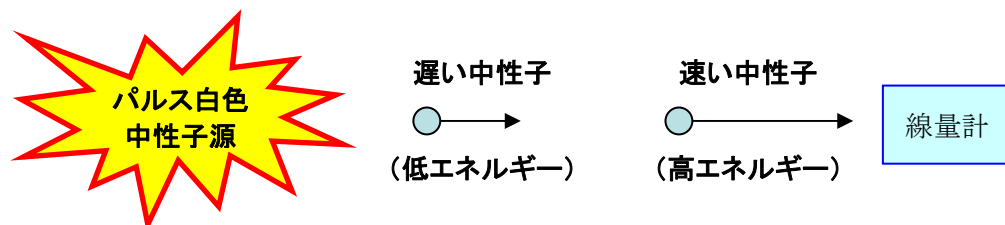


図1 本事業の校正法のイメージ図

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)のペルトロン加速器施設において開発を行っている(2)項で記載の白色中性子源を利用する。平成22年度は、TOF 測定

と測定器出力の2次元同時測定が可能になる2次元測定システム(図2)を試作した。実際に用いる低エネルギー用中性子測定器(リチウムガラスシンチレータ)と液体シンチレータにより2次元測定システムによる信号処理の試験を実施し、正常に動作することを確認した。中性子場では、必ずガンマ線も混在するため、2次元測定システムには、中性子とガンマ線を弁別する機能も組み込まれている。現在は、校正の際に基準となる白色中性子スペクトルと中性子フルエンスの評価を実施している。2次元測定システムは、(1)②の熱外~10 keV領域の研究項目でも利用され、スペクトラルフルエンス測定が行われた。

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する。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って得られる。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単色ガンマ線を全吸収BGO検出器を用いて測定することによって評価された。全吸収BGO検出器の中心部分は、ターゲットから 12.7 ± 0.2 mの位置にある。測定は、中性子フルエンス決定用の ^{10}B 試料(0.052 atms/b)、バックグラウンド決定用ダミーケース、検出効率決定用Sm試料(0.0015 atms/b)に対して行われた。図3は、得られた中性子スペクトラルフルエンスの結果である。ここで用いている光核反応中性子源は、実際には10 keV以上の中性子も発生しており、一部は直接測定器設置位置に到達する。この高エネルギー中性子成分は、線量計校正を行うためには、フラックスが小さいこと等利用するのは難しいが、測定の際にバックグラウンドとなり得る。従って、高エネルギー成分も含めた中性子スペクトルの形状を正確に把握する必要がある。そこで、「①10 keV~20 MeV速中性子領域における校正法に関する研究」で利用する低エネルギー用中性子測定器、液体シンチレーション検出器、2次元測定システムによるTOF法により、京大施設における全エネルギー領域の中性子スペクトルを測定した。図4は図3の結果も含めた全エネルギー領域のスペクトラルフルエンス[2]である。このスペクトラルフルエンス情報を基礎データとして、線量計への実証試験を行った。今後、不確かさ評価についても詳細に行う予定である。

この高エネルギー中性子成分は、線量計校正を行うためには、フラックスが小さいこと等利用するのは難しいが、測定の際にバックグラウンドとなり得る。従って、高エネルギー成分も含めた中性子スペクトルの形状を正確に把握する必要がある。そこで、「①10 keV~20 MeV速中性子領域における校正法に関する研究」で利用する低エネルギー用中性子測定器、液体シンチレーション検出器、2次元測定システムによるTOF法により、京大施設における全エネルギー領域の中性子スペクトルを測定した。図4は図3の結果も含めた全エネルギー領域のスペクトラルフルエンス[2]である。このスペクトラルフルエンス情報を基礎データとして、線量計への実証試験を行った。今後、不確かさ評価についても詳細に行う予定である。

③線量計への実用化研究

本研究では、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ついて、白

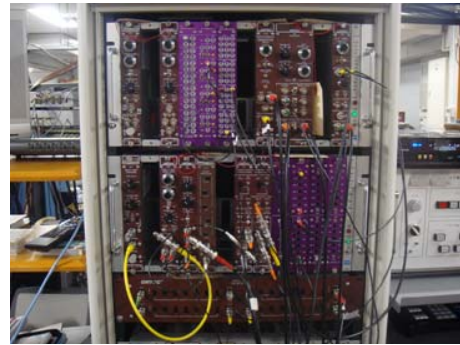


図2. 2次元測定システムの写真

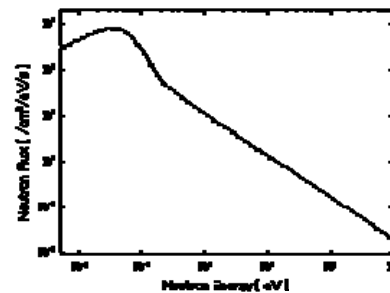


図3. 京大白色中性子場のスペクトラルフルエンス

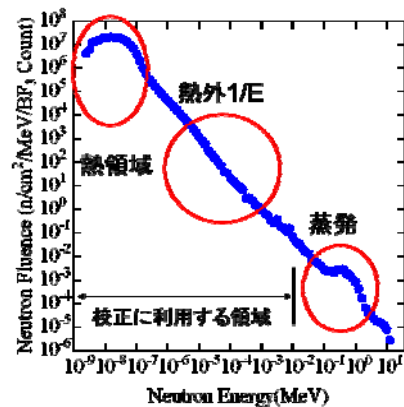


図4. 京大白色中性子場の全エネルギー領域の中性子スペクトラルフルエンス

色中性子源を利用した校正法による応答測定を行った。中性子線量計としては、シリコン半導体検出器を利用した電子式個人線量計[3]と減速材を用いないタイプの中性子サーベイメータとして PRESCILA[4]を利用した。京都大学原子炉実験所電子ライナック施設における熱外～10 keV において中性子線量計のパルス白色中性子源による校正試験を行った。TOF と線量計からの出力の 2 次元プロットが得られた。また統計精度が不十分であるなど、改善できる課題が見つかり、現在再測定およびデータ処理を行っているところである。これらの校正された線量計を用いて、平成 23 年度には、産総研における 10 keV～20 MeV 領域の校正も実施し、日本原燃株式会社内の核燃料施設における実際の作業環境場において、線量評価を行う予定である。

(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、TOF 測定を行うために、中性子をパルスの発生させる必要がある。10 keV～20 MeV 領域の白色中性子源は、 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 反応、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応、 ${}^9\text{Be}(\alpha,n)$ 反応を組み合わせるものによって構成される。これらの反応を起こすための重水素や陽子のイオンビームをパルスの発生させる。そこで、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）から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む作業を行った。まず、導入した回路系について、制御台より正常に動作することを確認した。次に、スイープとバンチャーは、RF 共鳴回路を用いているので、正しい共鳴位置、すなわちチューニングが正常に行われていることを確認し、最終的にパルスイオンビームを発生した。図 5 は、チューニングを行った際のバンチャーからの RF 出力信号である。今後は、ビーム輸送、イオン源、パルスのパラメータの最適化を行っていく予定である。また、本研究で利用する ${}^7\text{Li}(d,n)$ 反応、 ${}^9\text{Be}(\alpha,n)$ 反応、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応の 3 種類の核反応を連続的に利用するためのターゲットチェンジャーには、熱によるターゲットの劣化を防ぐための冷却機能を追加した。また、本研究において TOF 法を適用するために、ターゲットからパルスイオンビームのタイミング信号を取り出すキャパシティブピックオフ装置を導入し、ターゲットチェンジャーとビームラインの間に組み込んだ。

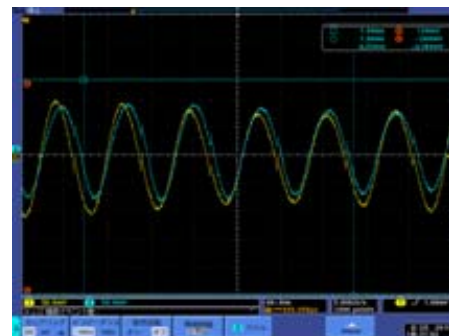


図 5. チューニング後のバンチャーからの RF 出力信号

(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

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ている。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い。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 と東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンターCYRIC 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において実験を行った。両中性子場でまず減速材付中性子検出器（ボナー球）による測定を行った。減速材の大きさ、材質を変化させることによって、中性子に対する応答関数を大きく変えることができ、この応答関数の違いを利用してアンフォールディング法により中性子スペクトルを求めた。図 6 は、TIARA と CYRIC

における低エネルギー成分のスペクトルである。1MeV 近傍の蒸発スペクトル成分と熱領域に顕著な構造があることが分かる。これらのデータの信頼性を高めるため、 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反応と ${}^3\text{He}(n,p)$ 反応を応用した2種類の検出器を設計・開発し、特性試験を実施している。 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反応を用いる検出器は、 ${}^6\text{LiF}$ 蒸着薄膜と

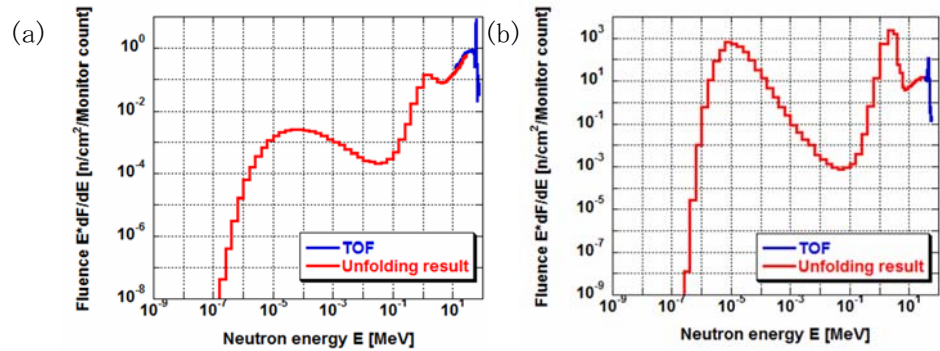


図6. 減速材付中性子検出器によって(a)TIARA と(b)CYRIC の準単色高エネルギー中性子場で得られた低エネルギー領域の中性子スペクトル

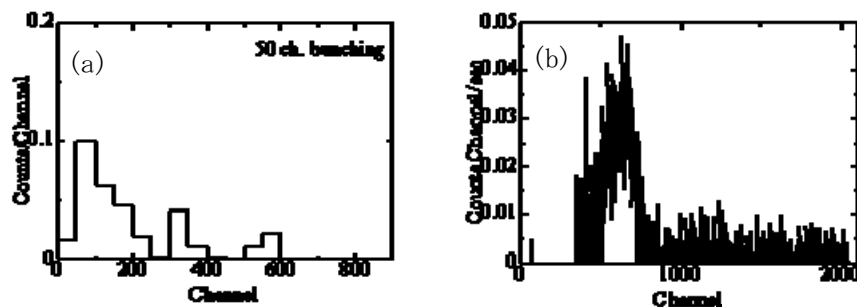


図7. ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反応を用いる検出器によって、(a)TIARA と(b)CYRIC の準単色高エネルギー中性子場で測定した際に得られた波高スペクトル

シリコン半導体検出器によって構成されており、熱中性子成分を測定できる。検出効率、産総研の熱中性子場で校正された。図7は、TIARA と CYRIC の準単色高エネルギー中性子場で測定した際に得られた波高スペクトルであり、ここから2つの場における熱中性子フルエンスを求めることができた。 ${}^3\text{He}(n,p)$ 反応を用いる検出器は、 ${}^3\text{He}$ 比例計数管と2台のシリコン検出器で構成されており、数100keV~10MeV 領域のスペクトル情報が得られるスペクトロメータである。今後、準単色高エネルギー中性子場で測定を実施する予定である。

3. 今後の展望

最終年度となる平成23年度は、白色中性子場を利用した中性子線量計の校正を実際に行い、最終的に実際の核燃料施設の作業環境場における線量評価へと展開していく予定である。本事業で開発する校正法は、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、結果的に安全・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] T. Matsumoto et al., Development of a New Calibration Method of Neutron Dosimeters Using Pulsed White Neutron Sources, KEK proceedings (in press)
- [3] M. Sasaki, et al., Development and characterization of real-time personal neutron dosimeter with two silicon detectors, Nucl. Instr. Methods A418, 465-475 (1998).
- [4] R. H. Olsher et al., PRESCLA: A New, Lightweight Neutron Rem meter, Health Phys. 86(6), 603-612 (2004).