

## 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

研究代表者 原野 英樹 独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門量子放射科  
参画機関 独立行政法人産業技術総合研究所、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における中性子線量評価の信頼性を高め、放射線防護における安全・安心に貢献するための足がかりとする。

### 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。

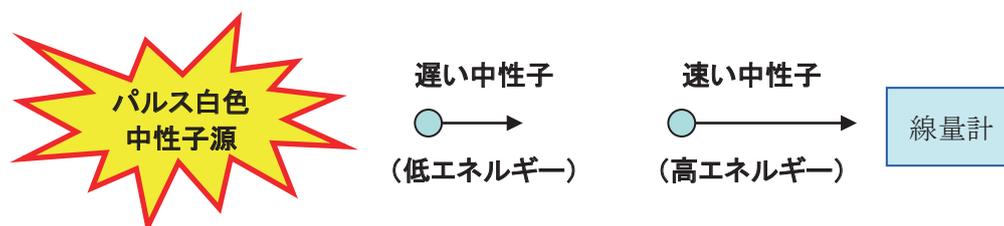


図1 本事業の校正法のイメージ図

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。 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 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。中性子フルエンスに対する

不確かさも詳細に評価した。不確かさの主な要因として、(1)測定の実験的不確かさ、(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、中性子とガンマ線の弁別能に関する不確かさ、検出器のジオメトリ情報に関する不確かさ、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。その結果最高測定能力としての不確かさは、10keV～100keV、100keV～1MeV、1MeV～20MeV のエネルギー領域毎にそれぞれについて、6.1%、9.4%、7.3%となった。

### 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、 $(\gamma, n)$ 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、 $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 反応を利用した全吸収 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。MCNP5 による加速器からの電子、光子、中性子輸送計算もを行い、測定で得られたスペクトルの妥当性も確認された。フルエンスの不確かさは、測定の実験的不確かさ、 $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$ 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。最終的な最高測定能力としての不確かさは、5.0%となった。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  $^6\text{Li}$  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評価し[3]、校正に関わるバックグラウンド中性子の情報として活用された。

### 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 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 1 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 2 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ー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 2 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。比較として実際の中

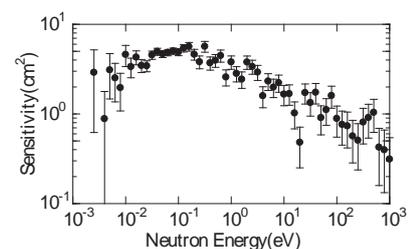


図 1. 電子式線量計の応答曲線

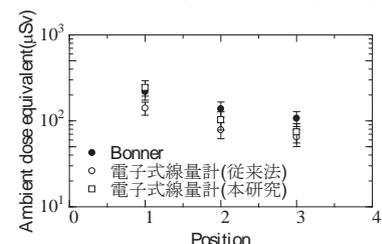


図 2. 3 か所の作業環境場の線量測定結果

中性子周辺線量当量であるボナー球スペクトロメータによる中性子スペクトルから直接求めた結果、電子式中性子線量計について従来の Am-Be 線源を用いた校正



図 3. キャパシティブピックオフによって得られたパルスビームの信号

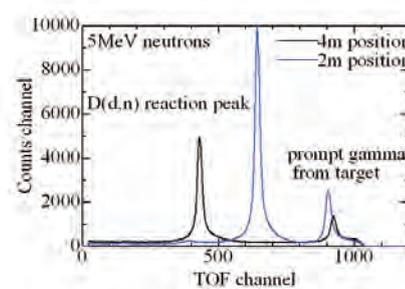


図 4. パルス幅測定のために得られた 5 MeV 単色中性子の TOF スペクトル

を行った際の校正定数から得られる結果を示した。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。

### (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た。イオンビームをパルスの発生させるために、2 MHz の高周波電圧によりイオン源から引き

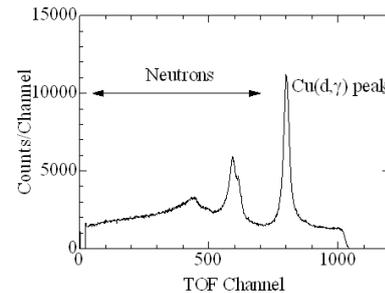


図 5.  ${}^7\text{Li}(d,n)$  反応により得られた 10 keV~20 MeV 領域パルス白色中性子の TOF スペクトル

出されたイオンビームをパルス化するためのスイープ電極、パルスを間引くためのポップ電極、パルス幅を圧縮するためのバンチャーによって構成されるパルス化装置を開発した。このパルス化装置を既存のイオン源アセンブリに組み込むことにより、パルスイオンビームの生成に成功した。パルスイオンビームは、中性子生成用ターゲットの直前のビームラインに取り付けられたキャパシティブピックオフ装置により信号が引き出され観測された(図 3)。パルスイオンビームは、繰り返し周波数 0.5、1、2、4 MHz で生成可能であり、陽子、重陽子の 2 種類のイオンについてパルス化できることを確認した。次に、イオンビームのパルス幅の評価のために、D(d,n)反応によってされる 5 MeV 単色中性子を生成し、TOF 法により測定を行った。中性子検出器としては液体シンチレータ（BC501A : 76.2 cm 直径×76.2 cm 厚）を用いた。図 4 は、5 MeV 単色中性子を測定した際の TOF スペクトルである。図 4 より液体シンチレータの時間分解能を考慮して、パルス幅は 1.96 ns であった。また、約 20  $\mu\text{m}$  厚の金属リチウムターゲットを利用し、 ${}^7\text{Li}(d,n)$  反応、 ${}^7\text{Li}(p,n)$  反応によるパルス白色中性子を生成し、その TOF スペクトルを得ることができた。図 5 は、 ${}^7\text{Li}(d,n)$  反応により得られた 10 keV~20 MeV 領域パルス白色中性子の TOF スペクトルである。今後も、パルスビーム電流の増強やパルス幅の低減などより良質なパルス中性子源を得るための開発を継続する予定である。

### (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

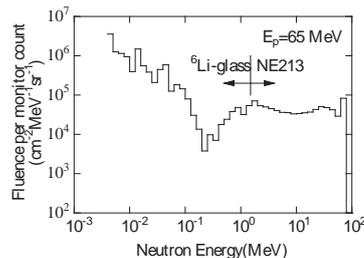


図 6.  ${}^7\text{Li}(p,n)$  反応準単色中性子場の全エネルギー領域のスペクトル

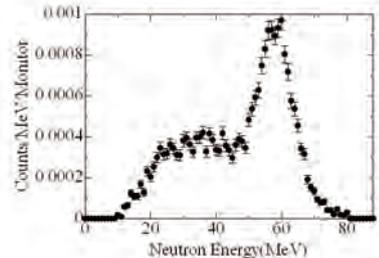


図 7. 60 MeV 準単色中性子場において PRESCILA で測定された TOF スペクトル

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、ボナー球による測定、に加え本研究で開発した  ${}^3\text{He}$  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による測定、および  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$  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による測定を行った。その結果、図 6 のように、 ${}^7\text{Li}(p,n)$  反応準単色中性子場における MeV 領域より低いエネルギー領域の中性子スペクトルを求めることを可能にした。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

実際の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。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、原子力及び核燃料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).