

研究室だより (II)

電総研における中性子標準と関連計測技術の研究

電子技術総合研究所量子放射部

工藤勝久*、武田直人

*) kkudo@etl.go.jp

1. はじめに

電総研では、熱中性子から 20 MeV エネルギー範囲の中性子標準の確立に関する研究を行い、熱中性子フルエンス率、144keV、565keV、2.5MeV、5.0MeV、14.8MeV における中性子フルエンスおよび²⁵²Cf中性子源の中性子放出率の国際比較に参加し国際的な同等性と信頼性を確保してきた。

近年原子炉周辺環境の放射線防護に関連し、未着手エネルギー領域である 100keV 以下の中速中性子の発生技術およびその計測技術に関する研究を実施した[1-3]。また、中性子場に混在する γ 線のエネルギー分布および実効線量当量の測定に着手した。

2. 研究内容

2.1 中速中性子フルエンス標準に関する研究

ペレトロン加速器を用いた Sc(p,n)反応中性子源、Sb(γ ,n)反応 RI 中性子源及び京大炉 B-1 実験孔の鉄フィルター中性子ビームを用いて中速中性子フルエンス標準の研究を行った[4]。

Sb(γ ,n)Be 光中性子源はマンガバス法により不確かさ $\pm 1\%$ でその中性子放出率(約 10^5 n/s 程度)を決定した。他の方法と比較して簡便であるが、半減期が 60.2 日と短いため、定期的な線源の作製が不可欠である。また、 γ 線強度が中性子強度の約 10000 倍のため、パルス出力信号のパイルアップの問題がある。一方、Sb-Be 線源の Be ブランケット部 ($3\text{cm}^{\phi} \times 3\text{cm}^{\text{L}}$) における中性子散乱が問題となる[5]。

京大炉 B-1 実験孔の鉄フィルター中性子ビームは中性子フルエンス率が 10^5 [n/cm²/s] 最も大きく、生物照射などに利用できる。鉄フィルターを厚くすることにより、高速中性子の混在比を減らしスペクトルの質を向上できるが、中速中性子強度は 2 桁ほど減少する。中性子ビームには、原子炉からの速中性子成分、鉄フィルター高エネルギー成分および照射室内での散乱による低速中性子が混在している。

ペレトロン加速器を用いた Sc(p,n)核反応により中速中性子を発生する場合、核反応に多数の隣接する共鳴反応ピークが混在するため入射プロトンエネルギーの高安定化が要求される。ペレトロン加速器の 1Hz から 1kHz の電圧リップルを平滑化するためのフィードバック装置を増設することにより、3MeV に対して $\pm 0.5\text{keV}$ 以下の安定度が達成で

きた[6]。中性子エネルギーは、陽子のエネルギーおよび中性子の放出角度を選ぶことにより 10keV～50keV 範囲で発生でき、その単色性は3つの方法の中で最も優れている。

以上述べた3つの方法で得られた中性子場の中性子スペクトルシミュレーション結果を Fig. 1 に示す。

2.2 ガス入り比例計数管のレスポンス関数に関する研究

中速エネルギー領域を含めた中性子フルエンスを精密に測定するため、 ^3He 円筒型比例計数管の端効果、空間電荷効果及び再結合に関する基本特性を詳細に研究した。また、レスポンス関数を計算する NRESPG モンテカルロ計算コードを開発し、実験の波高分布をより正確に再現できるようになった。

Fig. 2 に市販の ^3He 円筒型比例計数管の陽極線に沿ったガス増幅率の変化を示し、Fig. 3 にガス増幅率が有効領域内で一定（理想的な計数管）の場合とガス増幅率の遷移領域を考慮した場合の熱中性子に対するレスポンス関数のシミュレーション結果と測定結果の比較を示す[7]。ガス増幅率の遷移領域を考慮した場合、測定結果と良い一致を示している。

一方、比例計数管においてその動作電圧・封入ガスの種類及びその圧力・荷電粒子の飛程及びその向き等により、空間電荷効果や再結合が起きる可能性がある。荷電粒子の飛程の向きが陽極線に垂直の場合、検出器への放射線の入射により生じた一次イオン対が陽極線に到達するのに時間差が生じ、また陽極線の同じ部分に到達するため空間電荷効果によりガス増幅率の低下が生じる。この効果は計数管に印加する電圧が高くなるほど顕著になる[8]。再結合の割合は印加電圧を高くすることによりある程度減らすことができるが、LET の大きさによっては完全に無くすることはできない[9]。

2.3 熱中性子場に混在する γ 線測定に関する研究

電総研の熱中性子標準場に混在する γ 線を熱中性子の妨害反応を避けて測定するために、圧力可変の ^3He ガスフィルター付 GM 計数管を開発した。裸の GM 計数管による測定では、入射した熱中性子が GM 計数管中で捕獲され二次的な γ 線を発生し出力計数が増加してしまう。これを避けるため、GM 計数管の周囲を ^3He ガスの封入されたアルミ容器で囲み $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ 反応を用いて熱中性子を捕獲することにより、二次的 γ 線の発生を防ぐことができる[10]。測定では、 ^3He ガスの圧力を変化させて飽和計数率を求めた。この場合、熱中性子場の γ 線のエネルギー分布は MCNP モンテカルロ計算により、また GM 計数管のレスポンスは EGS4 モンテカルロ計算によりそれぞれ決定した[11]。更に、フルエンスから実効線量当量への換算係数を用いることにより γ 線の実効線量当量を決定した。

次に熱中性子場に混在する γ 線のエネルギー分布を測定するために、中性子と γ 線の

分離測定ができる NE213 液体シンチレータを用い、 γ 線波高分布の分離測定を行った。また、シンチレータに入射した熱中性子の水素捕獲による 2.2MeV γ 線の発生を阻止するために、シンチレータの外側を熱中性子吸収用 LiF フィルターで囲った。得られた波高分布を HEPRO コード[12]によりアンフォールディングすることにより γ 線のエネルギー分布を求め、更にフルエンスから実効線量当量への変換係数を用いて実行線量当量を決定した[13]。

3. 今後の研究展開の方向

これまでの研究により、一部のエネルギー範囲を除いて熱中性子から 20MeV エネルギー範囲における中性子フルエンス（率）の標準研究がほぼ完成した。20MeV 以下で残された未整備エネルギー範囲は、核融合関連分野で重要な 5～10MeV 領域及び 15～20MeV 領域である。次の課題として、中性子標準場に混在する最大エネルギー 10MeV の γ 線のエネルギー分布と実効線量当量の測定が要求される。また、 γ 線レスポンス関数を測定するための基準線源として、電子蓄積リング TERAS とレーザー光の相互作用により発生する高エネルギーフォトンが有望であり、現在実施している高エネルギーフォトン量子標準の研究の成果が待たれる[14]。

4. おわりに

昨年 10 月の第 21 回国際度量衡委員会の決議で、加盟国間の基幹相互比較により国家計量標準の同等性を評価して公表するとともに、更に各国家計量標準および各国立標準研究所で発行される校正証明書に関する相互承認の取り決めを制定することになった。そのため、電総研の中性子標準の国際的な同等性を放射線諮問委員会の加盟国間の基幹相互比較により再実証するとともに、その成果をアジア太平洋計量プログラム (APMP) の加盟国間の基幹相互比較に生かしていくことが責務である。また、同時に ISO17025 で要求される校正機関としての品質システムを確立することにより、電総研の発行する校正証明書が国際的に相互承認されるような枠組み造りを今後推進しなければならない。

謝 辞

京大炉鉄フィルタービームおよび Sb-Be 中性子源を用いた中速中性子標準の共同研究は、京都大学原子炉実験所的小林捷平先生、義本孝明先生、岡本賢一先生、大阪府立大学先端科学研究所の藤代正敏先生と行い、貴重なご意見やご教示を頂き、多くの成果を得ることができました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] E. Teranishi et al., *Bull of Electrotech. Lab.*, Vol. **41** (1977) p. 693.
- [2] N. Kobayashi, N. Kinoshita, T. Michikawa, *Nucl. Instr. Meth.*, Vol. **A242** (1985) p. 164.
- [3] N. Takeda, K. Kudo, H. Toyokawa, et. al., *Nucl. Instr. Meth.*, Vol. **A422** (1999) pp. 69-74.
- [4] N. Takeda, K.Kudo, M. Fujishiro, K. Okamoto, K.Kobayashi and S. Yshimoto, *Proceedings of Int. Symp. On Reactor Dosimetry*, in Osaka (1999), in press.
- [5] 武田直人、工藤勝久、杉田武志、岡本賢一、京都大学原子炉実験所学術講演会報文集、(1996) p. 67.
- [6] 林伸行他、タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告書、(1994) p. 77.
- [7] N. Takeda, K. Kudo, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, Vol. **41**, No.4 (1994) pp. 880-883.
- [8] N. Takeda, K. Kudo, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, Vol. **42**, No.4 (1995) pp. 548-551.
- [9] N. Takeda, K. Kudo, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, Vol. **44**, No.1 (1997) pp. 42-46.
- [10] K.Kudo, N.Takeda, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, Vol. **43** (1996) p. 1851.
- [11] W.R. Nelson, H.Hirayama and D.W.R. Roger, The EGS4 code system, *SLAC-265* (1985).
- [12] M. Matzke, The HEPRO Program System, *PTB-N-19* (1994).
- [13] K.Kudo, N.Takeda, S. Koshikawa, H. Toyokawa, H. Ohgaki and M. Matzke, *Proceedings of Int. Workshop on Neutron Field Spectrometry*, in Pisa (2000).
- [14] K.Kudo, N. Takeda, H. Ohgaki, T. Toyokawa, *Proceedings of Int. Symp. On Reactor Dosimetry*, in Osaka (1999), in press.

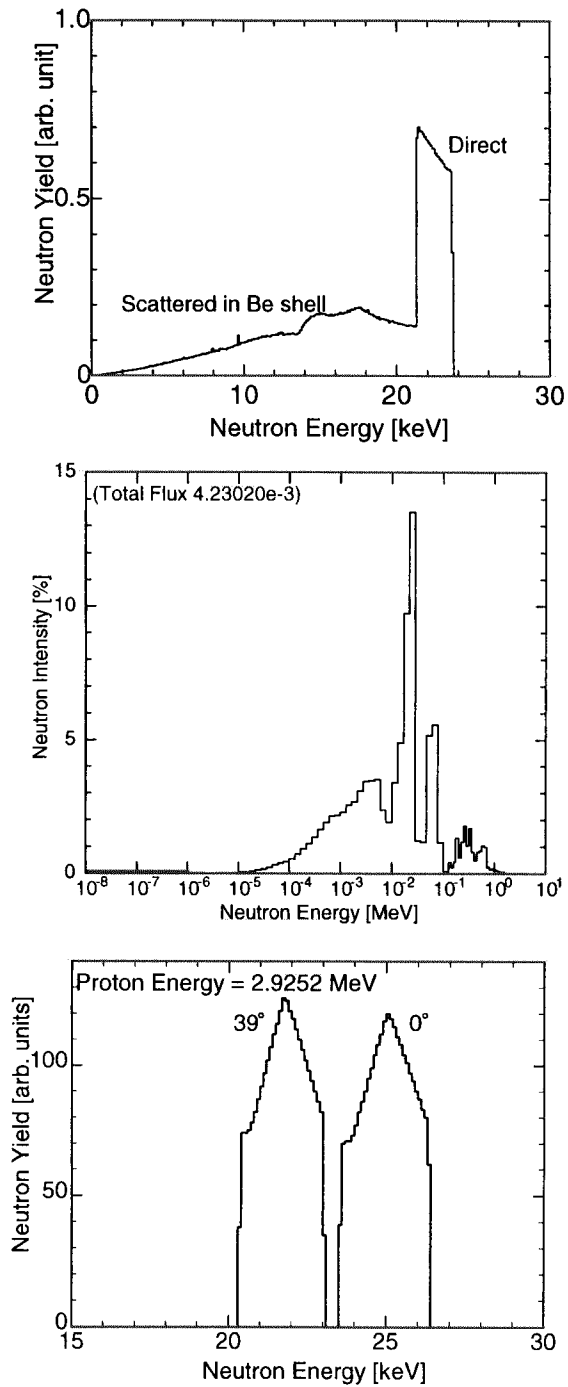


Fig. 1. 中速中性子場の中性子スペクトル。上から順に Sb-Be 光中性子源、京大炉 B-1 実験施設の鉄フィルター中性子場、ペレット加速器による Sc(p,n)Ti 中性子場。

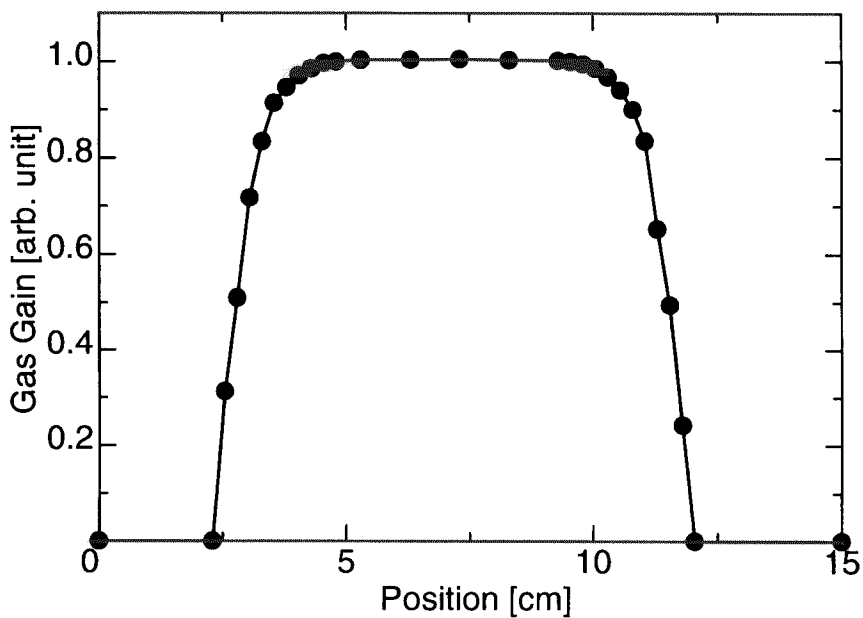


Fig. 2. 円筒型³He 比例計数管の陽極線に沿ったガス増幅率の変化.

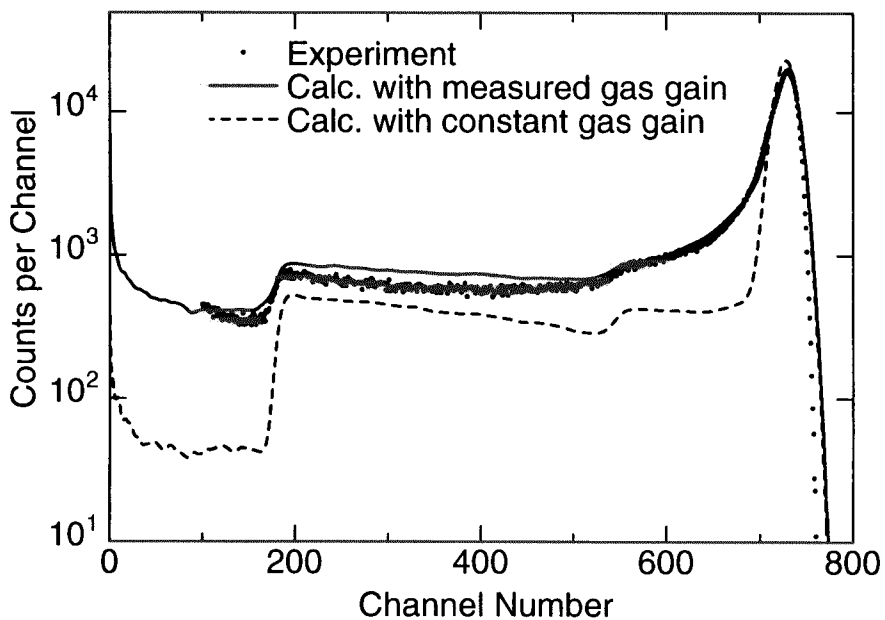


Fig. 3. NRESPGによる熱中性子に対する³He 比例計数管のレスポンス関数と測定結果の比較