ミニレビュー

標準中性子場の発生と測定

工藤勝久

チャドウィックの中性子発見から10年目に原子炉が誕生し、そして昨年12月その生誕50周年を迎えた。「原子炉の制御は中性子の制御である。」といわれるように、中性子は核分裂連鎖反応の「火付け」役として重要な役割を果たしている。また、次世代のエネルギー源である核融合炉においても、核エネルギーの「キャリア」役として重要な使命を担っている。一方、中性子線照射利用分野においても、中性子線治療をはじめとして、ラジオグラフィや水分計などの工業利用、長半減期の放射性同位元素の消滅処理や付加価値の高い放射線高度利用などの果たすべき役割は大きい^{1), 2)}。

これら多岐にわたる分野の共通した要求は、対象とする場における中性子線量（中性子フルエンス、吸収線量、線量当量など）の定量化である。これら計測対象量の計測精度の向上と信頼性を確保するためには、中性子の発生とその測定の基準となるいわゆる「ものさし」が不可欠である。つまり、目的に応じて中性子エネルギー、強度が自由に選べ再現性に優れた中性子

発生源とその中性子放出率や中性子フルエンスの精密測定系から構成される標準中性子場が必要となる。

電子技術総合研究所（電総研）では、4 MV バンデグラフ（4UH-HC）および 0.3 MV コッククロフト型加速器による $D(d, n)^3\text{He}$, $T(d, n)^4\text{He}$, $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 核反応を用いて、0.1–20 MeV エネルギー範囲（一部のエネルギー範囲を除く）の単色中性子線を発生している³⁾。図 1 にこれらの発生反応とそのエネルギー範囲を示す。

単色中性子線のフルエンスの絶対測定には、中性子と水素原子核との弾性散乱を利用した水素ガス比例計数管、厚いポリエチレンラジエータ付き Si 表面障壁型半導体検出器および薄いポリエチレンラジエータを用いたカウンタテレスコープを用いている。いずれも反跳陽子の波高分布の測定値に別途モンテカルロ法で決定した検出効率から、入射中性子フルエンスを決定する。

通常の測定器の感度校正では、2 系統のロングカウンタ（ポリエチレン減速材と BF_3 比例計数管から構成され、異なるエネルギーの中性子フルエンスに対する感度がほぼ一定）をモニターとして中性子フルエンスを相対的に決定している。また、コッククロフト型加速器による $T(d, n)^4\text{He}$ 反応を用いた 14 MeV 中性子フルエンスの測定では、中性子の発生と随伴する α 粒子を定立体角法で計測する随伴 α 粒子測定法により中性子フルエンスを $\pm 1\%$ の精度で決定している⁴⁾。

放射性同位元素 (RI) を用いた標準中性子源として、 $^{241}\text{Am}-\text{Be}$, $^{226}\text{Ra}-\text{Be}$ および ^{252}Cf 中性子源を使用している。前者二つの線源は、主に (α, n) 反応による中性子平均エネルギー約 4.5 MeV の連続エネルギー分布を持っている。 ^{252}Cf 中性子源は、半減期が 2.65 年と短い、自然核分裂中性子を放出するので、核分裂中性子スペクトル標準として利用価値が高い。RI 中性子源の中性子放出率は、マンガンバス法により約 $\pm 0.7\%$ の精度

図 1 電総研における中性子標準の現状

で測定されており⁵⁾, 国際相互比較により国際的な整合性を確保している⁶⁾。

標準中性子場の応用研究として, 国際原子力機関 (IAEA) が標準反応断面積として推奨している $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ および $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 反応断面積の絶対測定を行い, 中性子評価済みデータである ENDF/B-V データファイルとは系統的に差があることを指摘した⁴⁾。

先に述べた単色中性子線はターゲット中での入射荷電粒子のエネルギー損失やストラグリングの影響によりある程度のエネルギー幅を持つと同時に, そのエネルギー値もターゲットの履歴や運転条件に依存して変化する。電総研で開発中のコッククロフト型加速器を用いた $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 反応による 2.413 MeV および $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反応による 14.00 MeV 中性子エネルギー標準は, 入射重陽子ビームと 100 度および 96 度方向に放出される中性子線を利用するものであり, 加速エネルギーやターゲット条件に依存せずに単色度 (エネルギー半値幅が 0.5% 以下) がきわめて優れている。このエネルギー標準は, とくに核融合プラズマ診断用の中性子スペクトロメータの校正用エネルギー標準として重要である^{7), 8)}。

50 keV 以下の中速エネルギー領域の中性子フルエンス標準 (未整備) は, 原子炉周辺の放射線防護を目的とした線量計の校正のために不可欠であるが, 現在は熱中性子と 144 keV 中性子標準における校正値に基づき中速領域へ内挿して使用しているのが現状である。

$^{45}\text{Sc}(p, n)^{45}\text{Ti}$ 反応による中性子の発生では, 反応の共鳴ピークが多数隣接しているために陽子ビームのエネルギー安定性を ± 1 keV 以下への改善が必要である。また測定では, 中性子と γ 線の分離が深刻な問題であり, 反跳陽子とその随伴中性子とを同時測定する手法を開発中である⁹⁾。

通常のバンデグラフ加速器では 7–14 MeV 領域の中性子線を発生できない。そのためドイツの PTB では, サイクロトロンを用いた $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 反応によりこのエネルギー範囲をカバーしている。しかし, 二次的な $\text{D}(d, np)\text{D}$ ブ

レークアップ反応による寄生中性子の影響が深刻になるために, 飛行時間法によりその影響を評価している。また, 米国の LANL では, タンデム型バンデグラフによりトリトンビームを加速して $\text{H}(t, n)^3\text{He}$ 反応による中性子の発生を実施しているが, 大量のトリチウムガスの取扱いが課題である¹⁰⁾。

大型加速器の建設により, 20 MeV 以上のエネルギー領域の中性子標準が必要となっている。スエーデンの Svedberg 研究所では, 高エネルギーサイクロトロンを用いた $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 反応により, 200 MeV までの中性子線発生が可能となった。測定用に複数のプラスチックシンチレータと分析用マグネットを組み合わせた反跳陽子スペクトロメータを開発している¹⁰⁾。

国内でも, 高エネルギー物理学研究所でスプレッション中性子源を用いた冷中性子源の発生を行い, 物性研究などに使用されている¹¹⁾。

Key Words: neutron standard field, neutron fluence, neutron emission rate

文 献

- 1) 大山 章, 佐野一男, 他: 日本原子力学会誌, **34**, 1019–1051 (1992)
- 2) 富増多喜夫, 田中隆一, 他: 同上, **33**, 1016–1048 (1991)
- 3) 工藤勝久, 福田 昭, 他: 電総研彙報, **54**, 248–262 (1990)
- 4) Kudo, K., Michikawa, T. et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **24**, 684–692 (1987)
- 5) 工藤勝久: 電総研研究報告, 第825号 (1982)
- 6) Axton, E. J.: *Metrologia*, **23**, 129–144 (1987)
- 7) Kudo, K., and Kinoshita, T.: *Fusion Eng. & Design*, **10**, 145–149 (1989)
- 8) Kudo, K., Takeda, N. et al.: *Proc. Nucl. Data for Sci. & Technol.*, 533–535 (1992)
- 9) 工藤勝久, 武田直人, 他: 日本原子力学会秋の大会予稿集, 145 (1992)
- 10) Condé, H., Haight, R. et al.: *Proc. Nucl. Data for Sci. & Technol.*, 386–394 (1992)
- 11) 中澤正治, 渡辺 昇, 他: “放射線応用技術ハンドブック”, pp. 594–600 (1990)

(電子技術総合研究所)