

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871197

研究課題名(和文)複合的実験手法による ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応準単色中性子スペクトル構造の解明研究課題名(英文)Spectral measurements of quasi-monoenergetic neutron fields generated from ${}^7\text{Li}(p,n)$ reactions using multiple experimental methods

研究代表者

増田 明彦(Masuda, Akihiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70549899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)： ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応を用いて生成される高エネルギー中性子場に混在する低エネルギー連続中性子のエネルギースペクトルを精度良く測定する技術を開発した。サイクロトロンビーム間引き技術を利用し、複数のシンチレーターによるTOF測定技術を確立し、ターゲットで直接生成される中性子が有意に測定される100 keV近辺までのスペクトルを取得することに初めて成功した。また、高エネルギー中性子場に適した金放射化ボンナ球検出器を用いて、アンフォールディング法により全エネルギースペクトルを評価した。さらに、実際の検出器応答評価のベンチマーク実験を行い、検出器や施設の特性に合わせた測定・解析手法について知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Spectral measurement techniques for low-energy components of quasi-monoenergetic high-energy neutron field were developed. Spectral information of the high-energy neutron field above about 100 keV was derived, for the first time, by the time-of-flight method using two types of scintillation detector. Unfolding method for whole-energy neutron spectrometry was performed using gold-activation Bonner sphere spectrometer which is developed to deal with some difficulties of using ordinary proportional counters in the high-energy neutron field. In addition, benchmark experiments of response calibration of neutron detectors were performed to investigate the suitability of calibration method and its dependence on characteristics of detectors and facilities.

研究分野：放射線

キーワード：加速器 放射線 中性子 校正 高エネルギー中性子

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー加速器施設や航空宇宙環境での高エネルギー中性子に対する線量管理に用いる機器の校正・応答評価や、半導体デバイスの中性子ソフトエラー耐性試験等の分野で、精度良く値付けられた高エネルギー中性子基準場が必要とされている。20 MeV 以上の中性子はサイクロトロンで加速された陽子ビームを用いた ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応で得られるが、本来試験等に用いたい高エネルギー単色成分に加え、低エネルギーまで続く連続成分も混在する。その連続成分が測定に及ぼす影響を評価し必要に応じて補正するため、そのエネルギー分布情報(スペクトル)を正確に把握する必要がある。

従来は中性子エネルギー分布は中性子飛行時間(TOF)法で求められてきたが、測定原理とサイクロトロンの運転条件との兼ね合いにより測定の下限值が数 MeV であり、それ以下の低エネルギー領域はほとんど未知であった。一方、一般的な減速材型中性子検出器には 1 MeV 近辺に大きな応答を持つものが多く、そのような場合には測定に大きな不確かさが含まれてしまうことが問題視されてきた。こういった状況から、より低いエネルギーまでの中性子エネルギー分布を精度良く測定する技術が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、準単色高エネルギー中性子場の高精度なエネルギー分布測定の下限エネルギーを従来の数 MeV から低減させ、より広範囲で信頼性に富むエネルギー分布情報得られるようにする。さらに、得られた知見により ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応準単色中性子場一般の利用価値の向上を目指す。

3. 研究の方法

(1) 中性子エネルギー分布を測定するのに最も信頼性が高いとされているのは、パルス状の中性子が一定の距離を飛行する時間からエネルギーを求める TOF 法である。しかしあるエネルギー以下の中性子は次のパルスに追いつかれてしまうため、これが TOF 法のエネルギー測定下限値となる。下限エネルギーはパルスの繰り返し周波数と測定距離で決まるが、それぞれ加速器のビーム条件や遮蔽設備などの実験体系の都合で制約を受け、一般的に数 MeV 程度であった。近年、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所 TIARA のサイクロトロン施設において陽子ビームを無限に間引いてパルス間隔を確保する技術が実用化(引用文献)され、生成中性子に対する TOF 測定の原理的な下限値が撤廃された。そこで、従来用いられてきた有機液体シンチレーター(MeV 領域用)に加えて ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレーター(keV 領域以下用)も用いて、より低エネルギーまでの TOF 法による測定を行う。

(2) 十分低いエネルギー領域の中性子は実験室内などで散乱し時間情報を失っているため TOF 法は適用できず、ボナー球スペクトロメーターによるアンフォールディング法が有用である。ボナーアンフォールディング法は予想解として与える初期推定スペクトルに強く依存するためその信頼性は TOF 法には及ばないが、(1)によってより低エネルギーまで TOF 法の実測に基づく初期推定スペクトルを用いることができるようになるため、精度の改善が期待される。しかし、高エネルギー中性子場ではボナー球検出器に用いる ${}^3\text{He}$ 比例計数管の信号に高エネルギー荷電粒子に起因する信号が混入し、その信頼性が低下する。そこで、金の放射化 ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$ 反応を利用した検出素子として金板をボナー球の中心に装荷することで問題を解決する。金放射化ボナー球検出器の応答は、「照射中性子フルエンス率に対する飽和放射能に対して一定の測定体系で特定の高純度ゲルマニウム(HPGe)検出器が示す計数率(飽和計数率)」で定義する。モンテカルロ計算によるシミュレーションと産業技術総合研究所(産総研)の中性子標準場での実測により応答関数を評価し、実際の高エネルギー中性子場で使用する。一方、従来用いていた ${}^3\text{He}$ 比例計数管を用いたボナー球検出器の信号についても、熱中性子に対する理想的な信号波高スペクトルでフィッティングすることにより、乱れた信号波高スペクトルから本来の信号を抽出して精度を向上させるを試みる。



図1 制作した金放射化ボナー球検出器(直径3.5インチのもの)。左上のアタッチメントの中に金板が格納されている。左下の補助アタッチメントも用いて、球殻の中心に隙間なく設置される。誘導放射能はアタッチメントごと HPGe 検出器で測定する。

(3) 大阪大学核物理研究センター(RCNP)のサイクロトロン施設では、400 MeV までのより高いエネルギーでの ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応準単色中性子が生成可能であり、TIARA で得られた知見を元に 100-400 MeV における検出器校正のベンチマーク実験を実施する。RCNP

では TIARA のように大幅なビーム間引きはできないため、TOF 法によるスペクトル測定の下限エネルギーは数 MeV である。しかし、ターゲットスウィンガーと可動コリメーターを備えており、 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応の斜め前方成分のみを切り出して照射することができる。斜め前方成分は高エネルギーピーク成分を持たず連続成分だけを含むため、前方成分の測定から斜め前方成分の測定を差し引くことで擬似的に高エネルギー単色ピークのみに対する測定を実現する二角度差分測定法が可能である。この設備を用いて、中性子検出器として一般的であるボナー球検出器の応答測定のベンチマーク実験を行い、二角度差分測定法による低エネルギー成分の影響除去手法の有効性ととも、スウィンガーを持たない一般的なサイクロトロン施設における連続成分の情報の重要性を検証する。

4. 研究成果

(1) TIARA サイクロトロン施設で得られる準単色光エネルギー中性子場で、シンチレーション検出器を用いた TOF 法により中性子エネルギー分布を測定した。MeV 領域には有機液体シンチレーター BC501A (直径 3 インチ、長さ 3 インチ) を、keV 領域以下には ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレーター GS20 (直径 5 cm、長さ 5 mm) を用いた。BC501A の応答関数は SCINFUL-QMD を用いたモンテカルロシミュレーションで導出した。GS20 の応答関数は MCNPX を用いたモンテカルロシミュレーションと産総研中性子標準場での実験によって評価した。GS20 は対象エネルギー領域が低くシンチレーター周辺の物質 (検出器ハウジング、光電子増倍管、光学カップリング用グリッドなど) との相互作用の影響を受けやすいため、その影響をモンテカルロシミュレーションを用いて補正した。高エネルギー中性子場で得られたエネルギー分布を図 2 に示す。時間に依存しない中性子信号を差し引くと、TOF 法で有意な中性子信号が確認できたのは 100 keV 近傍までであった。これより低いエネルギー領域では、コリメーターや実験室内で散乱し時間情報を失った中性子が支配的であると考えられる。 ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応で生成される中性子のエネルギー情報をこの領域まで取得したのは本研究が初めてであり、核物理学の分野でも貴重なデータである。

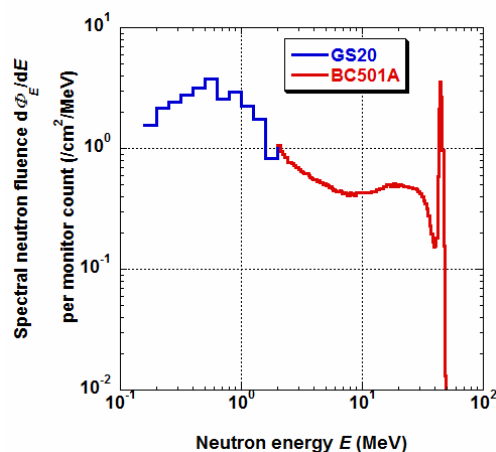


図 2 有機液体シンチレーター BC501A と ${}^6\text{Li}$ ガラスシンチレーター GS20 を用いた TOF 法により測定した、50 MeV 陽子による ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応で生成された中性子スペクトル。

(2) 高密度ポリエチレン製のボナー球殻に厚さ 1 mm、直径 20 mm の金板を隙間なく挿入できる同材質のアタッチメントを用意し、金放射化ボナー球スペクトロメーターを制作した。金放射化ボナー球検出器の応答関数は、MCNPX によるモンテカルロシミュレーションで照射中性子フルエンスに対する金放射化反応の効率とそのエネルギー依存性を求め、産総研の中性子標準場での単色中性子照射と HPGe 検出器による誘導放射能の測定から前章で定義した応答に換算することにより導出した (図 3)。高エネルギー中性子場での測定を行い、アンフォールディングコード MXD_FC33 を用いて熱中性子から高エネルギーピークまでの全領域に渡るエネルギー分布を導出した。得られた結果を図 4 に示す。アンフォールディングに用いる初期推定スペクトルとしては、TOF 法で測定した 100 keV 近辺までのスペクトルに、物理的に予測される熱中性子の Maxwell 分布及び $1/E$ 減速スペクトルを外挿したものを用いた。アンフォールディングで得られた結果は妥当なものであったが、低エネルギー中性子の量が予想よりも少なく、これは実験室が広く散乱中性子が少ないことに起因すると考えられる。また、通常用いられる ${}^3\text{He}$ 比例計数管を検出素子とするボナー球検出器に対しても、熱中性子に対する理想的な信号波高スペクトルでフィッティングすることによって本来の信号を抽出し、同様の解析によりアンフォールディング結果を得た。金放射化ボナーの結果と概ね整合する結果が得られたが、低エネルギー中性子の量について差異があり、引き続きその要因を調査する必要がある。

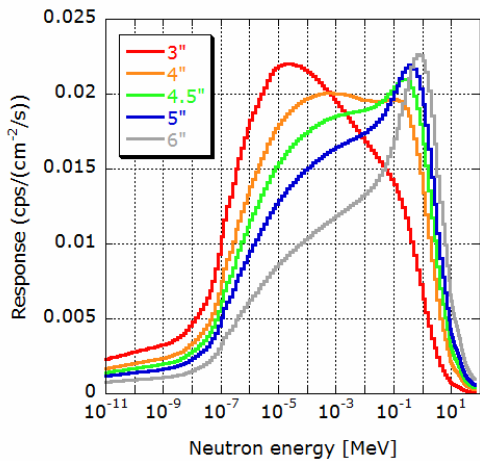


図 3 金放射化ボナー検出器の応答関数。MCNPX によるモンテカルロシミュレーションと産総研の単色中性子標準場での測定により評価した。

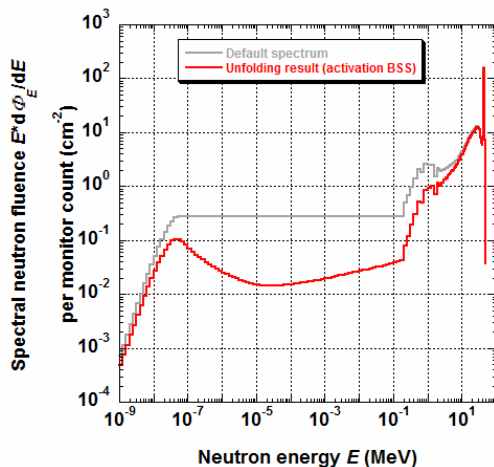


図 4 金放射化ボナー球スペクトロメータの測定結果のアンフォールディングで得られた高エネルギー中性子場の全エネルギースペクトル。

(3) RCNP で実施した 300 MeV 陽子で生成される高エネルギー中性子場における応答測定の結果を対計算応答比として図 5 に示す。高エネルギー領域に応答の中心をもつ検出器は計算と良く一致する結果が得られた一方、低エネルギー領域に応答の中心をもつ小径の検出器では本手法で相殺しきれっていない低エネルギー中性子の影響が顕著であった。高エネルギー向け検出器に対する本手法の有効性を確認するとともに、その適応性について知見を得ることができた。また、本手法を用いなかった場合の結果は計算値と極端に乖離した。多くのサイクロトロン施設では RCNP のようなターゲットスウィンガーがなく二角度差分測定法が使えないために本研究で得られた連続成分の知見に頼って補正する必要があり、本研究の重要性を改めて明らかにすることができた。

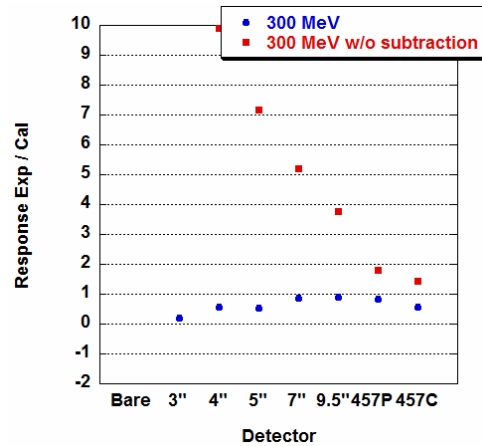


図 5 RCNP で行った二角度差分測定法によるボナー球検出器の応答測定ベンチマークの結果(青丸)。大径の検出器については良く機能した。二角度差分測定法を用いなかった場合(赤四角)は計算値と大きく乖離した。通常はこの乖離分を本研究の成果を用いて補正することとなる。

<引用文献>

S. Kurashima, et al., Enhancement of beam pulse controllability for a single-pulse formation system of a cyclotron, Review of Scientific Instruments, 86 (2015) 073311
DOI: 10.1063/1.4927603

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

A. Masuda, T. Matsumoto, H. Harano, Y. Tanimura, Y. Shikaze, H. Yoshitomi, S. Nishino, S. Kurashima, M. Hagiwara, Y. Unno, J. Nishiyama, M. Yoshizawa, H. Seito, Time-of-flight measurement for low-energy components of 45-MeV quasi-monoenergetic high-energy neutron field from ${}^7\text{Li}(p,n)$ reaction, IEEE Transactions on Nuclear Science, 査読あり, 62 (2015) 1295-1300.
DOI: 10.1109/TNS.2015.2432273

〔学会発表〕(計 12 件)

増田明彦、松本哲郎、原野英樹、岩元洋介、岩瀬広、中村尚司、佐藤大樹、萩原雅之、佐藤達彦、八島浩、中根佳弘、嶋達志、民井淳、畑中吉治、100-400 MeV 中性子に対するボナー検出器の応答測定実験、日本原子力学会 2016 年春の年会、2016 年 3 月 26 日、東北大学川内キャンパス(宮城県仙台市)

A. Masuda, T. Matsumoto, H. Harano, H. Yoshitomi, S. Nishino, Y. Tanimura, Y. Shikaze, H. Seito, M. Hagiwara, Y. Unno, J. Nishiyama, M. Yoshizawa,

Spectral measurement of quasi-monoenergetic high-energy neutron field by combination of TOF and Bonner unfolding methods, 2015 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2015年11月4日, San Diego (USA)

A. Masuda, T. Matsumoto, H. Harano, H. Yoshitomi, Y. Tanimura, Y. Shikaze, S. Kurashima, H. Seito, M. Hagiwara, Y. Unno, J. Nishiyama, M. Yoshizawa, Development and evaluation of activation neutron detector for spectrum measurements of quasi-monoenergetic high-energy neutron fields, 2014 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2014年11月11日, Seattle (USA)

増田明彦、松本哲郎、原野英樹、吉富寛、谷村嘉彦、志風義明、倉島俊、清藤一、吉澤道夫、TIARA 準単色高エネルギー中性子場の低エネルギー成分のスペクトル測定、日本原子力学会 2014 年秋の年会、2014 年 9 月 9 日、京都大学（京都府京都市）

A. Masuda, T. Matsumoto, H. Harano, Y. Tanimura, Y. Shikaze, S. Kurashima, M. Hagiwara, Y. Unno, J. Nishiyama, M. Yoshizawa, H. Seito, Time-of-flight measurement of low-energy components of quasi-monoenergetic high-energy neutron field, 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2013 年 10 月 29 日, Seoul (Korea)

増田明彦、松本哲郎、原野英樹、谷村嘉彦、志風義明、吉澤道夫、清藤一、TIARA 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 TOF 測定、日本原子力学会 2013 年秋の大会、2013 年 9 月 5 日、八戸工業大学（青森県八戸市）

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

増田 明彦 (MASUDA, Akihiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・研究員

研究者番号：70549899