

核データ部会総合講演(1)

数十 MeV 領域における核データの実験的研究

東北大学サイクロトロン・RI センター

馬場 護

babam@cyric.tohoku.ac.jp

原研高崎研 TIARA 施設を用いた数十 MeV 領域における中性子, 荷電粒子核データの
実験的研究と東北大学サイクロトロンを用いた核データ測定の計画を紹介する。

1. はじめに

加速器利用の進展に伴い, 大型で大強度ビームの加速器システムの建設・計画が国内
外で進展している。これらのシステムの安全で有効な利用のためには高エネルギー粒子
の輸送, 照射・生体効果, 遮蔽性能などを評価するために反応断面積, 生成粒子の種類
とエネルギー・角度分布, 放射化・放射性核種生成などに関して種々の核データが必要
とされる。とりわけ, 数十 MeV 領域ではカスケードモデルの適用が困難なため, 詳細
な核データが必要と考えられ, JENDL でも JENDL-High Energy File の作成が進めら
れている。しかし, 評価や計算の参照値として必要な実験データは, 陽子の場合ですら
質的には不十分で, 中性子の場合には実験データそのものが極めて乏しいのが現状であ
る。

我々は原研高崎研 TIARA の 40~90 MeV ${}^7\text{Li}(p,n)$ 単色中性子発生装置を用いて,
1) ${}^7\text{Li}(p,n)$ 中性子源の特性, 2) p,d,α 荷電粒子生成断面積, 3) 中性子弾性散乱断面積の測
定を行ってきた。また, 東北大学サイクロトロン・RI センター(CYRIC)において, K=110
AVF サイクロトロンを用いてイオンビーム及び中性子についての核データ測定を開始
した。1)~3)については, すでに核データ研究会[1]及び発表論文[2~8]に報告しており,
4)についても最近, 「核データニュース」[9]で紹介したので, ここでは概要のみを紹介し
参考文献を挙げることにする。

2. TIARA における実験

TIARA では本格的な ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応を用いた 40~90 MeV 領域の単色中性子源が設置
され, 数十 MeV 中性子に対する遮蔽ベンチマーク実験や検出器開発とともに中性子及
び荷電粒子入射反応について核データ測定が行われてきた[1]。ここでは, 我々が進めて
きた中性子核データの測定を簡単に紹介する。

2-1 中性子源特性

中性子源のスペクトルや強度は全ての実験の基礎となるデータである。我々は効率の高いアニュウアラ型反跳陽子カウンターテレスコー(PT)を製作しこれと NE213 または BC501A シンチレータを用いた TOF 法により、ピーク中性子強度、中性子生成断面積、連続中性子スペクトルの形状等を明らかにした[2]。

これによって、ピーク中性子を生成する ${}^7\text{Li}(p,n\alpha)$ 反応の断面積がこのエネルギー範囲でほぼ 35 mb/sr ($\pm 10\%$) であること、従ってビーム電流とターゲット厚さが分かれば $\pm 10\%$ 程度で中性子取量を予測できること、連続中性子のスペクトルが多体崩壊の位相空間分布で近似できることなどを明らかにした。

2-2 軽荷電粒子生成断面積の測定

中性子による荷電粒子生成反応は核発熱、照射損傷、生体効果などの源となるものであり、それらの評価には生成断面積とともに粒子ごとのエネルギー・角度分布が必要とされる。そのため、カウンターテレスコープを用いて二次荷電粒子を測定し、粒子弁別を行って p, d, t, α 粒子ごとの角度依存スペクトルデータ(二重微分断面積)を取得した。当初、Si-SSD と NaI(Tl) からなるテレスコープを用い空気中で荷電粒子の測定を行い、C, Al に対する 75, 65 MeV のデータを得た[1]が、この方法では、空気によるエネルギー損失が大きく、かつ空気からのバックグラウンドが多いため低エネルギー粒子や α 粒子の測定が不可能であった。そのため、薄窓ガス比例計数管をエネルギー損失用に加えた 3 要素テレスコープを新たに開発し、かつそれらを真空チェンバーに取付けることで改良を図った[4,5]。バックグラウンドとエネルギー損失の大幅な減少によって、数 MeV 陽子や α 粒子までの測定が可能となった。この手法を用いて、C, Al, Fe, Ni について、55, 65, 75 MeV 中性子に対するデータを取得した[4,5]。

得られたデータを最新のデータライブラリである LA150, カスケードモデルによる計算と比較するとともに、KERMA 因子の導出も行った。比較を通じ、LA150 は重陽子放出反応の場合を除けば実験値をかなりよく再現することが分かった。また、これらのスペクトルデータは陽子入射の場合のデータと強い類似性を示し、陽子入射データによって中性子データを類推できる可能性が示された。

現在、生体構成核種として窒素、酸素に対する測定が行われている。Li よりも重い粒子の生成については殆ど実験データが存在しないので、実験手法を開拓して挑戦したいと考えている。

2-3 中性子弾性散乱

中性子弾性散乱の測定では TIARA の配置の特徴を生かして TOF 法を採用した。散乱

サンプルをターゲットから 10m 近傍にセットし、二次中性子を 5 台の NE213/BC501A を用いて 5 角度同時測定した。現在まで、C, Si, Fe, Zr, Pb について、55, 65, 75 MeV でデータを得た[6~8]。(なお、ターゲットからサンプルまでの距離が必要以上に大きいのは、荷電粒子測定用セットアップの下流に散乱実験装置を設置して同時測定を行うためである。)

この配置によって、2.5°という前方角までの測定が可能となり、かつ良好な角度分解能が実現された。実験値に、非弾性散乱中性子の寄与、多重散乱の補正を行うことで、2.5°から 55°付近までの範囲に亘って高い角度分解能のデータを得、角度分布形状を初めて明らかにできた。55°付近より後方角になると非弾性散乱中性子の寄与が大きくなり、その補正に伴う誤差が大きくなってデータの信頼性が乏しくなるため、現状ではこの辺が限度と考えられる。中性子弾性散乱については LANSCE WNR でワイヤチェンバーと反跳陽子テレスコープを用いてデータが得られているが、それに比べても角度分解能はずっと良好であり、角度範囲も倍程度に広い。

比較の結果、HETC や HILO86 など粒子輸送コードの内臓データは実験値と大きな差異を示し、グローバル及び微視的ポテンシャルでは全核種に亘るデータの再現は難しいが、陽子に対する核種ごとポテンシャルを基礎とした LA150 は中性子に対しても非常によい再現を与える、などが分かった[5~8]。

TIARA における実験は「大学・原研プロジェクト共同研究」の一環として、大学、原研の多くの方々の協力の下に行われたものである。

3. 東北大学サイクロトロンにおける実験[9]

東北大学サイクロトロン・RI センターでは、サイクロトロンが K=110 型に更新され、それに対応して旧サイクロトロンに設置されていたビームスウィンガーも大型化された。このスウィンガーと 45 m までの飛行路と検出器アレイを用いることにより中性子スペクトルの高分解能測定が可能である。また、新サイクロトロンでは、p, d, He の軽イオンに加えて各種の重イオンが加速可能なので、重イオン反応による中性子についても TOF 法による測定が可能である。また、負イオンを用いて p, d の大電流ビームを加速し、中性子生成に用いることも計画されている。

これらのビームと設備を利用し、核データの分野では、加速器施設の遮蔽・安全設計、運転計画などに必要な、1)軽重イオンによる中性子生成、2)軽重イオンによる放射化、3)中性子による二次粒子生成、4)中性子散乱、などの核データ測定が計画されている。1),2),3)については、実験が開始され予備的なデータが得られ始めている。この過程で、ビームの時間特性も測定され、ビーム量はまだ数百 nA 程度と少ないものの、半値幅で 400 ps 程度の良好な結果が得られており、高いエネルギー分解能のデータが期待される。

核データ測定とともに、(p,n)反応などを用いた原子核の荷電変換反応や高エネルギー中性子の捕獲反応などの核物理実験が計画されている。

参考文献

1. M.Baba "Nuclear Data Measurement for 40-90 MeV Neutrons at TIARA",
JAERI-Conf 2000-005 (Proc. 1999 Nuclear Data Symposium, JAERI) p.32-25.
2. M.Baba et al.: "Characterization of 40-90 MeV ${}^7\text{Li}(p,n)$ Neutron Source at TIARA using a Proton Recoil Telescope and a TOF Method" *Nucl. Instrum. Methods*, A428, (1999) 454-465
3. Y.Nauchi et al.: "Measurement of (n,xp), (n,xd) Double Differential Cross Sections of Carbon and Aluminum for 65 and 75 MeV" *J. Nucl. Sci. Technol.*, 36 (2), (1999), 143-151
4. Y.Hirasawa et al.: "Measurements of Double-differential Charged-particle Production Cross Sections for 55, 65, 75 MeV Neutrons", *JAERI-Conf 2000-005 (Proc. 1999 Nuclear Data Symposium, JAERI)* p.232-237.
5. M.Baba et al. "Measurement of Differential Neutron-Induced Charged-Particle Emission Cross Sections for 5-75 MeV Neutrons", *Proc. 10-th Int. Conf on Reactor Dosimetry* (Sept. 1999, Osaka), ASTM STP 1398 (2001) 447-454
6. M.Ibaraki et al. "Experimental Method for Neutron Elastic Scattering Cross Section Measurement in 40-90 MeV Region at TIARA" *Nucl. Instrum. Methods*, A446/3 (2000) 536-544
7. M.Ibaraki et al.: "Measurement of Elastic Scattering Cross Sections of Carbon, Silicon, Iron, Zirconium and Lead for 75 MeV Neutrons" *J. Nucl. Sci. Technol.*, Suppl. 1, 2000 (March, 2000) 683-686
8. M.Ibaraki et al.: "Measurement of Elastic Scattering and Total Non-Elastic Cross Sections for 40-80 MeV Neutrons at TIARA" *JAERI-Conf 2000-005 (Proc. 1999 Nuclear Data Symposium, JAERI)* p.243-248
9. 馬場 護: 「核データニュース」 No.67, p.53