

2014 年度核データ部会賞

(1) 奨励賞

— 重陽子入射反応のモデリングと 断面積計算コードシステムの開発 —

九州大学大学院総合理工学府

先端エネルギー理工学専攻

中山 梓介

nakayama@ees.kyushu-u.ac.jp

この度、平成 26 年度日本原子力学会核データ部会奨励賞を受賞させていただきました。本稿では表題の研究テーマについて述べるとともに、現在博士後期課程の学生として在籍しております、九州大学大学院総合理工学府の渡辺研究室を中心に行われている重陽子入射反応研究に関する取り組みについても簡単にご紹介したいと思います。

1. はじめに

IFMIF（国際核融合材料照射施設）を初めとした様々な応用分野において、重陽子加速器を用いた大強度中性子源の利用が提案・検討されています。これは、軽い標的（Li, Be, C 等）に対する (d, xn) 反応を用いて大強度の中性子ビームを得ようというものです。図 1 に示すように、 (d, xn) 反応から得られる中性子はその多くが弾性分解反応やストリッピング反応によって生じる為、入射重陽子エネルギーの約半分に緩やかなピークを持つエネルギースペクトルを有します。さらに、準単色中性子源として広く用いられている (p, xn) 反応よりも入射粒子 1 個あたりに多くの中性子を発生させることができます。

このように、重陽子加速器中性子源は「エネルギー選択性」と「中性子収量の多さ」を兼ね備えた中性子源であると言えます。IFMIF ではこ

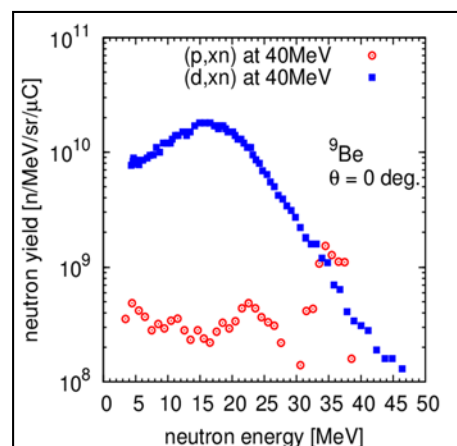


図 1 ${}^9\text{Be}$ に対する 40 MeV の (p, xn) および (d, xn) 反応からの中性子生成量（実験値）[1,2]

れを大強度の 14MeV 中性子場を模擬するために用いますが、最近では医療用 RI の製造への応用等も提案されています[3,4]。

2. 重陽子核データの現状

重陽子加速器中性子源の詳細な設計のためには重陽子核データが必要不可欠と言えますが、現時点で利用可能な重陽子核データライブラリは核反应用計算コード TALYS の計算値を基に作成した TENDL (TALYS-based evaluated nuclear data library、最新版は TENDL-2014) のみとなっています。このため核融合炉開発用核データライブラリ FENDL-3.0 でも、重陽子については当時最新であった TENDL-2011 の値がそのまま採用されています (放射化断面積の一部は現象論的に求めた値に更新されました)。ただし、後述するように TALYS (を含めた現行の核データ評価用計算コード全般) は重陽子入射反応の取り扱いが必ずしも十分ではなく、TENDL にも実験値と乖離のある値が格納されているのが現状です。

3. 断面積計算コードシステムの概要

このような背景の下、本研究では高精度の重陽子核データライブラリの作成を目指して、重陽子入射反応中の反応過程ごとに異なる理論モデルを適用し、それらに基づいた断面積計算コードシステムを開発しました[5,6]。図 2 に本研究で開発した計算コードシステムの概要を示します。弾性分解反応および連続状態へのストリッピング反応の計算には、所属研究室の卒業生である叶氏が過去に重陽子入射反応に適用し[7-9]、成功を収めていた CDCC 法[10]と Glauber モデルをそれぞれ使用しました。ただし、Glauber モデルでは残留核の束縛状態へのストリッピング反応を適切に取り扱うことができません。応用上重要な 40MeV 以下程度の入射エネルギー範囲ではこの成分の寄与が相対的に大きくなってきますので、DWBA (歪曲波ボルン近似) で計算をすることにしました。なお、この計算には DWBA コードとして有名な DWUCK4 を用いていま

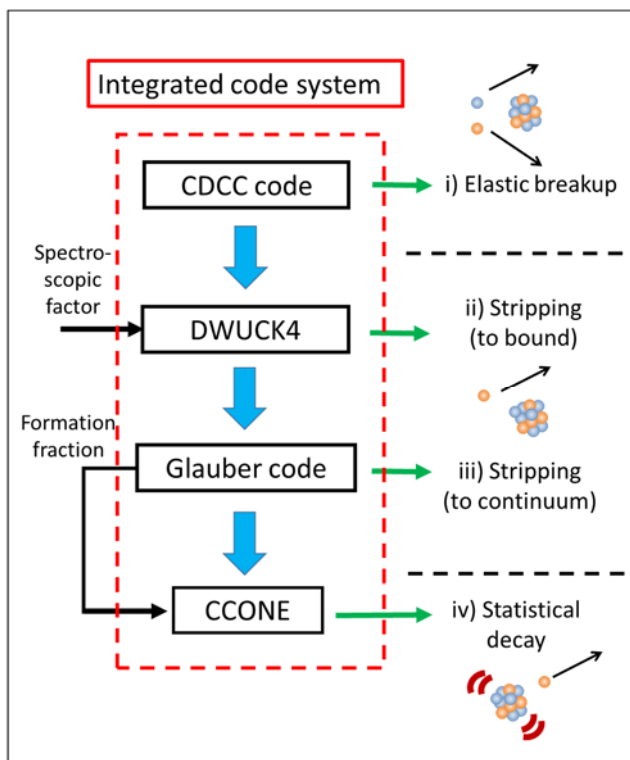


図 2 断面積計算コードシステムの概要

す。これら直接過程の計算に対し、前平衡・複合核過程は CCONE を用いて計算をしています。このように、反応過程ごとに異なる計算コードを用い、それらを組み合わせることで断面積計算コードシステムを開発しました。

なお、重陽子入射反応では重陽子吸収および陽子・中性子ストリッピングによって三種類の複合核が形成されうるため、コードシステム内ではこの効果も考慮しています。具体的には CCONE で重陽子入射・陽子入射・中性子入射の3つの計算を行い、その計算値を Glauber モデルで求めた各複合核の形成比率で重み付け平均しています。

また、DWBA 計算値の絶対値を決めるのに必要なスペクトロスコピックファクター(SF)については、過去の実験で取得され論文等に記載のある値をそのまま使うのではなく、本研究での DWBA 計算条件（例えば、光学ポテンシャルや DWBA 計算の補正因子の値）の下で系統的に取得し直しました[11]。これは SF が一般には実験値と DWBA 計算値との比から取得されるため、計算条件に依存して値が変わりうるからです。

4. 実験データとの比較結果

次に、開発した計算コードシステムの計算値を実験値[12,13]と比較することで、その妥当性を検証しました。図 3, 4 に、 ^{27}Al と ^{58}Ni に対する 56 および 100MeV 入射時の(d, xp) 反応の二重微分断面積 (DDX) の比較結果を示します。なお、重陽子加速器中性子源の開発のためには(d, xn)反応の DDX が重要な量となりますが、この実験データはほとんどなく系統的な検証をすることが難しいので、その代替として同じ核子放出反応である(d, xp) 反応を対象としました。図より三つの異なる反応成分を足し合わせた合計値である、コードシステムから最終的に出力される計算値(図中の黄色線)が、幅広いエネルギー範囲にわたって TALYS の計算値(図中の水色線)よりも放出陽子スペクトルの実測値をよく再現できています。TALYS では直接過程から生じる重陽子入射に特有のピークを経験式で

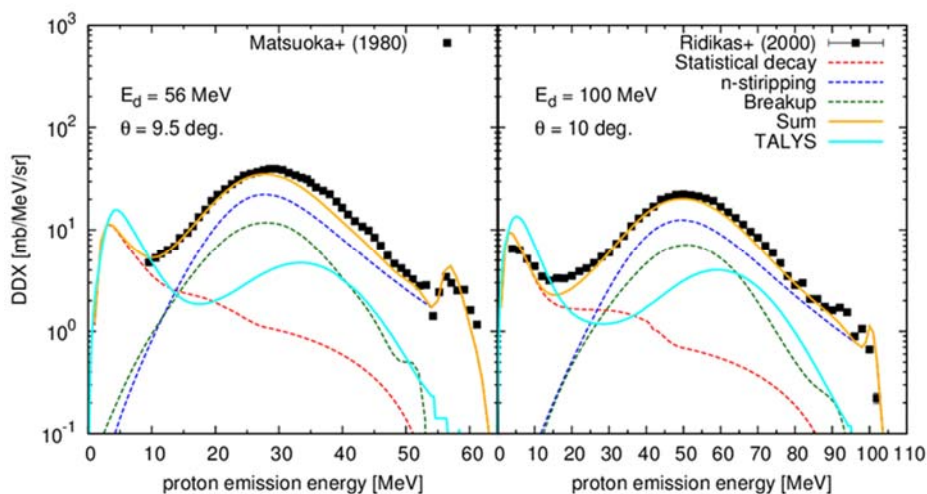


図 3 $^{27}\text{Al}(d, xp)$ 反応の DDX

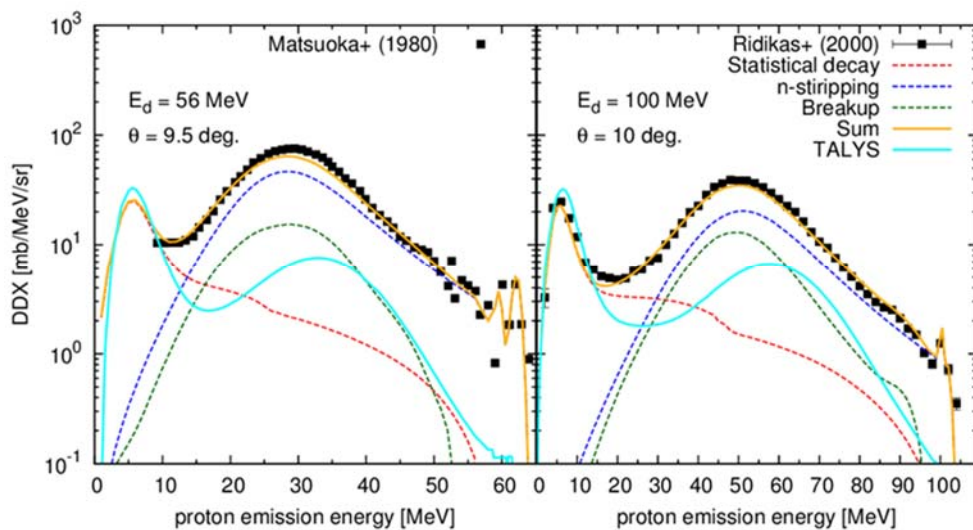


図 4 $^{58}\text{Ni}(d, xp)$ 反応の DDX

取り扱っていますが、本計算コードシステムでは既述のように物理モデルに基づいて計算をしています。この結果は重陽子核データ評価における直接過程の取り扱いの重要性を示すものであると言えます。

次に、より低い入射エネルギーにおいて実験データ[14]が存在する (d, p) 反応からの放射化断面積についても検証を行いました。その結果を図 5 に示します。DDX と同様、本計算コードシステムの計算値が TALYS の計算値よりも、数 MeV から 20MeV 付近までの幅広い範囲で実験値を良く再現することができています。こちらも重陽子核データ評価における直接過程の重要性を示していると言えます。

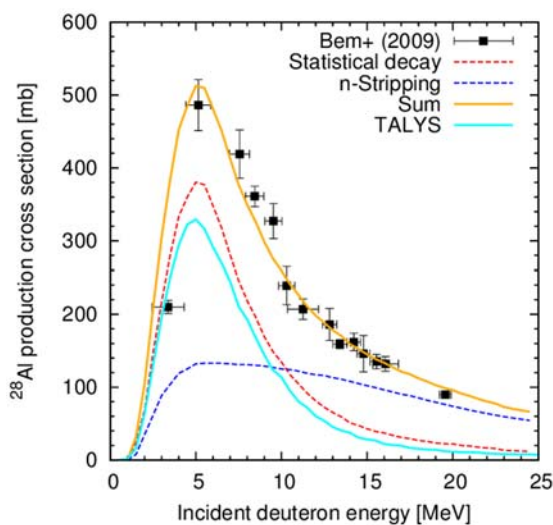


図 5 $^{27}\text{Al}(d, p)$ 反応からの ^{28}Al 生成断面積

以上の結果から、重陽子入射反応に関する実験データ件数は限られているものの、その中でも実験データが存在する今回解析対象とした範囲では、計算値が実験値を良好に再現することができており、本計算コードシステムで採用した計算手法が有効であることを実証できました。

5. おわりに

本研究では重陽子入射反応用の断面積計算コードシステムを開発し、陽子放出反応についてその妥当性を検証しました。今後は中性子源開発に向け、中性子放出反応についての系統的な検証が必要になります。ただし、前述の通り(d, xn)反応の DDX は実験データがほとんどないため、厚い標的からの中性子収量 (TTY) 等の解析を中心としてこの検証をしていくことになると考えられます。なお、現在所属しております渡辺研究室では私が従事している断面積の理論計算に限らず、データが不足している(d, xn)反応に関する実験も行っています。また、それだけにとどまらず、冒頭に述べました重陽子加速器中性子源を用いた医療用 RI 製造に向けた基礎実験や効率的な照射体系の検討のためのシミュレーション研究も行っています。理論計算・実験・応用が三位一体となった精力的な重陽子入射反応研究が今後も行われていくと思います。

謝辞

本研究は筆者が所属する九州大学大学院総合理工学府での博士課程研究として行ったものです。指導教員の渡辺幸信教授にはご多忙の中、貴重な時間を割いて熱心な指導をして頂きました。心より御礼申し上げます。JAEA の岩本修氏、大阪大学の緒方一介准教授、北京応用計算数学研究所の叶涛氏には計算コードシステム内で用いた各種の計算コードについて貴重なご意見・ご助言を賜りました。また、JAEA の橋本慎太郎氏には DWBA 計算について有益なご助言を賜りました。皆様に深く感謝致します。最後に、研究活動の様々な場面でお世話になりました、金政浩助教をはじめ渡辺研究室の皆様にご心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. J. Saltmarsh, C. A. Ludemann, C. B. Fulmer, R. C. Styles, “Characteristics of an intense neutron source based on the $d+Be$ reaction”, Nucl. Instr. Meth. **145**, 81-90 (1977).
- [2] Y. Uwamino, T. Okubo, A. Torii, T. Nakamura, “Semi-monoenergetic neutron field for activation experiments up to 40 MeV”, Nucl. Instr. Meth. A **271**, 546-552 (1988).
- [3] Y. Nagai, K. Hashimoto, Y. Hatsukawa, et al., “Generation of Radioisotopes with Accelerator Neutrons by Deuterons”, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 064201 (2013).
- [4] T. Kin, Y. Nagai, N. Iwamoto, et al., “New Production Routes for Medical Isotopes ^{64}Cu and

- ⁶⁷Cu Using Accelerator Neutrons” , J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 034201 (2013).
- [5] S. Nakayama, S. Araki, Y. Watanabe, O. Iwamoto, “New extension of CCONE code for calculation of deuteron-induced reactions”, JAEA-Conf 2013-002, 79-84 (2013).
- [6] S. Nakayama, S. Araki, Y. Watanabe, O. Iwamoto, T. Ye, K. Ogata, “Cross Section Calculations of Deuteron-induced Reactions Using the Extended CCONE Code.” Nuclear Data Sheets, 118, 305-307 (2014).
- [7] T. Ye, Y. Watanabe, K. Ogata, S. Chiba, “Analysis of deuteron elastic scattering from ^{6,7}Li using the continuum discretized coupled channels method” Phys. Rev. C **78**, 024611 (2008).
- [8] T. Ye, Y. Watanabe, K. Ogata, “Analysis of deuteron breakup reactions on ⁷Li for energies up to 100 MeV” , Phys. Rev. C **80**, 014604 (2011).
- [9] T. Ye, S. Hashimoto, Y. Watanabe, K. Ogata, M. Yahiro, “Analysis of inclusive (*d, xp*) reactions on nuclei from ⁹Be to ²³⁸U at 100 MeV” , Phys. Rev. C **84**, 054606 (2011).
- [10] M. Yahiro, K. Ogata, T. Matsumoto, K. Minomo, “The continuum discretized coupled-channels method and its applications” , Prog. Theor. Exp. Phys. **2012**, 01A206 (2012), and references therein.
- [11] S. Nakayama, S. Araki, Y. Watanabe, O. Iwamoto, T. Ye, K. Ogata, “Development of a calculation code system for evaluation of deuteron nuclear data” to be published in Energy Procedia. (2015)
- [12] N. Matsuoka, M. Kondo, A. Shimizu, et al., “Deuteron break-up in the field of nuclei at 56 MeV” , Nucl. Phys. A **345**, 1-12 (1980).
- [13] D. Lidikas, W. Mittig, H. Savajols, et al., “Inclusive proton production cross sections in (*d, xp*) reactions induced by 100 MeV deuterons” , Phys. Rev. C **63**, 014610 (2000).
- [14] P. Bem, E. Simeckova, M. Honusek, et al., “Low and medium energy deuteron-induced reactions on ²⁷Al” , Phys. Rev. C **79**, 044610 (2009).