

部会・連絡会セッション 核データ部会 [「シグマ」特別専門委員会共催]
「我が国における核データ計算コード開発の現状と将来ビジョン」

(3) 重陽子入射断面積計算コード DEURACS の開発

日本原子力研究開発機構

核データ研究グループ

中山 梓介

nakayama.shinsuke@jaea.go.jp

1. はじめに

セッションの 3 番手として、重陽子核データ評価に向け開発中の重陽子入射用断面積計算コード DEURACS (DEUteron-induced Reaction Analysis Code System) について発表させて頂きました。なお、重陽子入射反応研究は私が学生時代から行っているテーマです。当時も一度、核データニュースに記事を書かせて頂きました[1]。本稿ではその後の進展を中心に、学会当日の持ち時間中には話しきれなかったことも含め、DEURACS の開発状況や今後の展望について述べたいと思います。

2. なぜ重陽子か？

重陽子核データの必要性を端的に言えば、「軽核 (Li, Be, C) に対する (d, xn) 反応が中性子源として使われるから」です。図 1 に代表的な中性子源反応から得られる中性子スペクトルを示します。図に示す通り、 $\text{Li}(d, xn)$ 反応は入射重陽子エネルギーの半分ほどに緩やかなピークを持った分布を持ちます。また、そのピークにおける断面積も大きくなっています。

一方、準単色中性子源として良く知られる $\text{Li}(p, xn)$ 反応は、入射陽子エネルギーとほぼ同じエネルギーに鋭いピークを持った分布を持ち、 $\text{Li}(d, xn)$ 反応に勝るエネルギー選択性を有します。ただし、ピーク断面積は 10 分の 1 以下です。また、核破砕中性子源として用いられる $\text{Pb}(p, xn)$ 反応は数 MeV 領域での断面積は大きいものの、入射陽子エネルギーが変わっても数 MeV 領域の分布形状はあまり変わらず、エネルギー選択性には乏しいと言えます。

以上を総合すると、「それほど厳密でなくてもよいが、あるエネルギー (10MeV 以上) 近傍の中性子が効率よく欲しい」という場面で (d, xn) 反応による中性子源は有用だと言え

ます。このような応用としては、核融合炉内の中性子束を模擬するための大強度中性子源 IFMIF [6]が有名ですが、最近では高速中性子を用いた医療用 RI の製造[7,8]や長寿命核分裂生成物の核変換処理[9]といったものも提案されています。

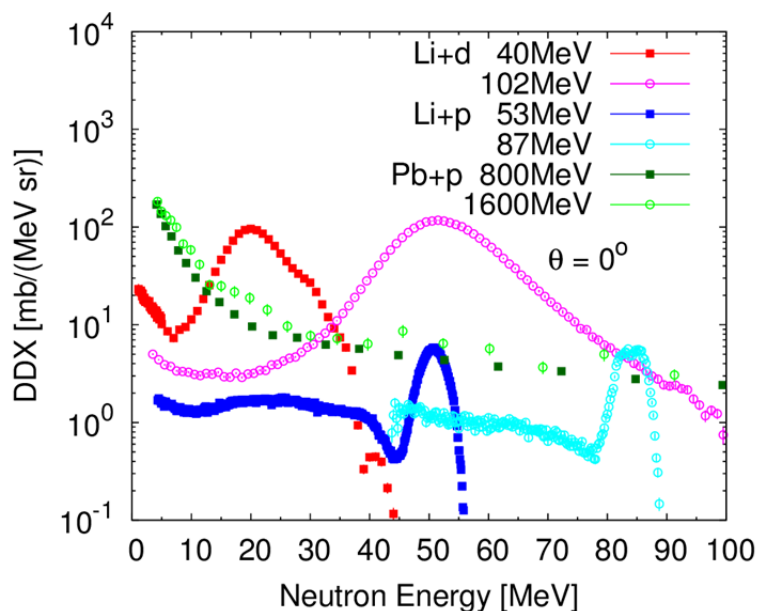


図 1 Li(*d,xn*)[2,3], Li(*p,xn*)[4], Pb(*p,xn*)[5] 反応の二重微分中性子放出断面積 (実験値)

3. DEURACS の概要・特徴

重陽子は陽子と中性子が弱く結合した粒子であるため、標的核と反応する際に容易に分解します。DEURACS ではこうした核子入射にはない重陽子入射に特有の反応過程に注意を払い、各々の反応の記述に特化した理論モデルを採用しています。具体的には、弾性分解および非弾性分解反応は、それぞれ連続状態離散化チャネル結合法[10] (CDCC 法) および Glauber 模型[11]で計算しています。また、残留核の低励起準位への移行反応は、過去の研究[12]から見出した規格化因子の入射エネルギー依存性を考慮した歪曲波 Born 近似 (DWBA) で計算しています。

一方、核子入射の場合と同様と考えられる前平衡および複合核過程は統計模型コード CCONE[13]を用いて計算しています。ただし、重陽子入射では非弾性分解反応や重陽子吸収反応により三種の複合核が形成されます。このため、DEURACS では直接過程の計算値を CCONE に引き渡して計算することにより、こうした効果を考慮した計算を可能にしています。

以上をまとめますと、「種々の理論モデルと CCONE を組み合わせることで重陽子入射反応の断面積を精度良く計算できること」、また「CCONE に改良がなされた場合にそれを速やかに反映できるシステムとなっていること」が DEURACS の特徴です。

4. 中性子放出反応の計算結果

重陽子加速器を用いた中性子源の設計のためには、軽核に対する(d,xn)反応の二重微分断面積 (DDX) が最も重要な量となります。しかし、この実験データがほとんどなかったため、以前の記事[1]の時点まででは、代替として同じ核子放出反応である ^{27}Al や ^{58}Ni に対する(d,xp)反応の DDX 等について解析を行っていました。

とは言えやはり、DEURACS 開発の一番の動機は中性子源設計です。このため、やや積分的な量にはなりますが、実験データが比較的存在する厚い標的からの二重微分中性子収量 (TTNY) を解析することにしました[14]。TTNY は標的内での輸送過程を含んだ量ですが、計算値は DEURACS で求めた(d,xn)反応の DDX から標的中の重陽子阻止能を用いて簡易的に求めました。なお、解析に当たっては、この輸送過程の簡略化が DEURACS 内の理論モデルの良否の議論にはほとんど影響がないことも確認しています[14]。

その TTNY の計算結果を図 2 に示します。また、比較として PHITS[15]の計算結果も併せて示します (核反応モデルは INCL-4.5+DWBA+GEM)。図の通り、中性子源設計で最も重要な軽核からの中性子放出について、DEURACS は PHITS よりも実験値を良く再現しています。さらに、反応成分に分けた分析により、中ほどにある緩やかなピークは主に非弾性分解反応から生じており、中性子放出量の精度良い予測のためには非弾性分解反応をいかに記述するかが決定的に重要であることを明らかにしました。なお、高エネルギー部に見られる階段状の分布は低励起準位への移行反応から生じているもので、この成分についても DEURACS は標的に依らず実験値を良く再現しています。

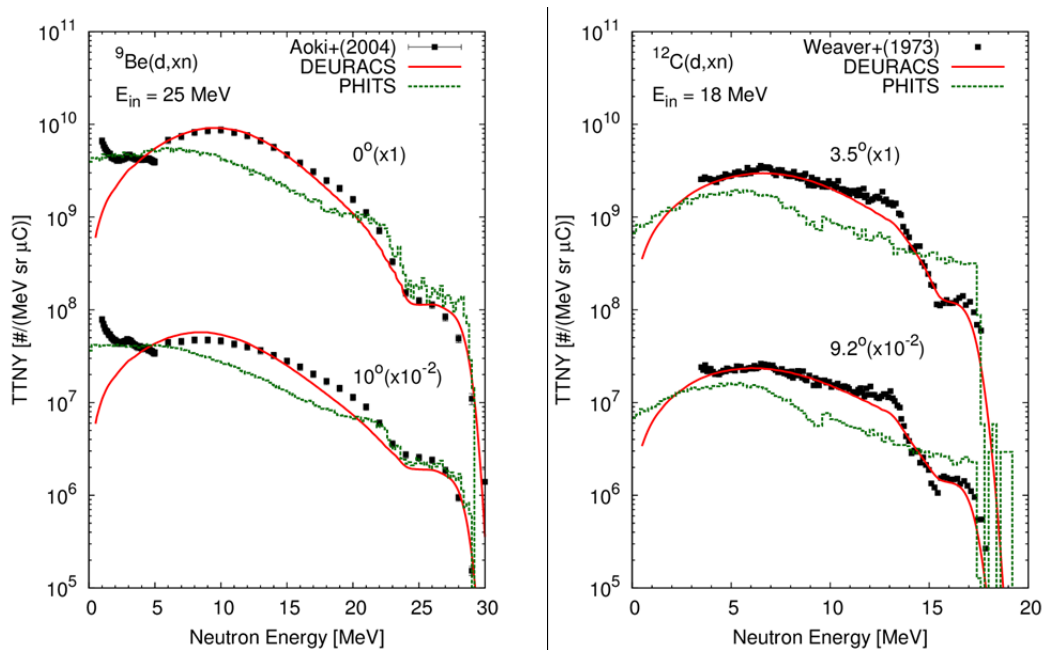


図 2 厚い標的からの二重微分中性子収量 (左図： ^9Be 標的、右図 ^{12}C 標的)

一方で、これ以前の ^{27}Al や ^{58}Ni に対する (d, xp) 反応の解析からはわからなかった問題も判明しました。特に ^9Be 標的で顕著な低エネルギー部の過小評価です。これは、軽核標的の場合、残留核として ^5He 等の中性子放出崩壊をする不安定核ができるのですが、この崩壊過程が DEURACS 内の統計モデルでは考慮されていないことが原因と考えられます。これに対し、PHITS 内の GEM ではこうした崩壊を考慮しています。PHITS の方が DEURACS よりも低エネルギーの中性子放出量が多くなっているのはこのためだと考えられます。なお、この点については今後改良していく予定です。

上記の TTTY の解析を終えた後、重陽子入射エネルギー102MeV における (d, xn) 反応の DDX の実験結果[2]が報告されましたので、DEURACS でも計算を行い、比較検証をしました[15]。その結果を図3に示します。また、PHITS の計算値に加え、現状で唯一の重陽子核データファイルと言える TENDL[16]の最新版 TENDL-2017 に格納されている値も併せて示します。図の通り、INCL モデルに基づいて分解反応を計算している PHITS も良い結果を出していますが、それ以上に DEURACS の計算値は幅広い中性子エネルギーにわたり実験値を良く再現しています。一方で、TENDL-2017 は分解反応に起因する中ほどのピークを大幅に過小評価しています。これは TENDL 内で分解反応の計算に用いている Kalbach の経験式[17]が図3の条件には適用が難しいことを示唆しています。また、分解反応が過小評価となっているために複合核が過剰に形成されることになり、低エネルギー成分は逆に過大評価になっています。

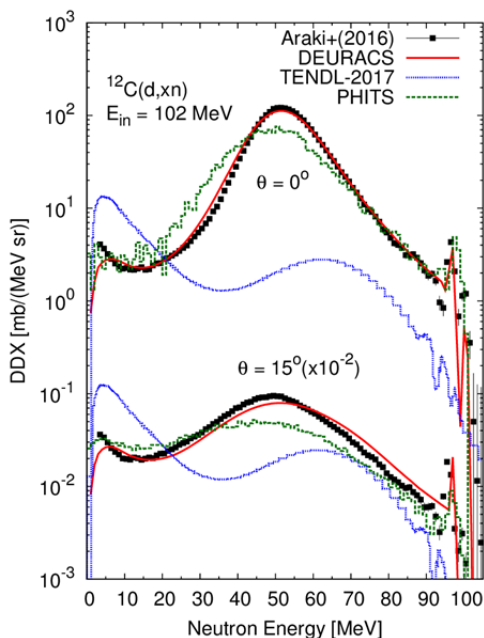


図3 $^{12}\text{C}(d, xn)$ 反応の二重微分断面積

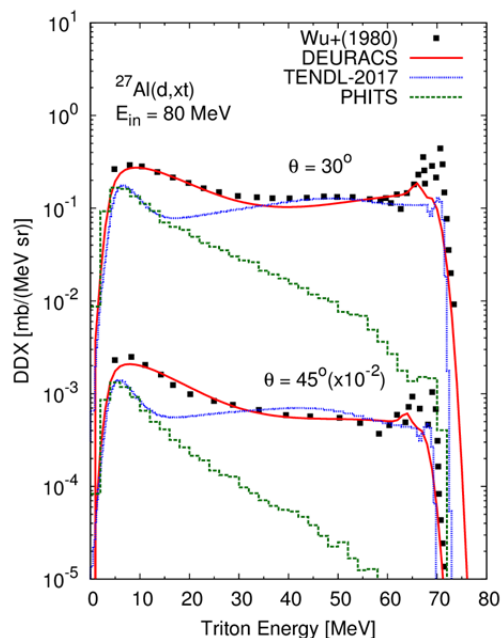


図4 $^{27}\text{Al}(d, xt)$ 反応の二重微分断面積

5. 複合粒子放出反応の計算結果

次に、DEURACS を改良し、 (d,xd) , (d,xt) , $(d,x^3\text{He})$, $(d,x\alpha)$ 反応といった複合粒子放出反応にも適用しました[18]。これは、放射性物質であるトリチウムの発生量予測のために重要な (d,xt) 反応を含めた、完備的な重陽子核データ評価に向けた取り組みです。計算結果の一例として、図 4 に $^{27}\text{Al}(d,xt)$ 反応の DDX に対するものを示します。図の通り、DEURACS の計算結果は実験値を良く再現しています。一方、図 3 とは対照的に、TENDL-2017 は実験値をそれなりに再現しますが、PHITS は大幅な過小評価になっています。これは PHITS 内の INCL モデルが重陽子によるピックアップ反応を上手く記述できていないことを示唆しています。図 3 の結果と合わせると、種々の反応チャンネルについて適用性があるのは DEURACS のみと言えます。

この複合粒子放出反応の計算に当たっては、CCONE に内蔵された核子入射のピックアップ反応や α 粒子入射の非弾性散乱を記述する Kalbach の半経験式[19]を重陽子入射にも適用できるよう、CCONE を改良しました。図 4 の結果は、このような CCONE の改良を速やかに反映できるという DEURACS の特徴が活かされた例と言えます。なお、文献[18]では図 4 の (d,xt) 反応だけでなく (d,xd) , $(d,x^3\text{He})$, $(d,x\alpha)$ 反応についても、DEURACS は他の計算手法よりも精度良い予測ができることを示しています。

6. 今後の展望

これまでの DEURACS の開発から得られた成果を応用に活かすため、中性子源設計で最重要の Li, Be, C 標的に対し、DEURACS の計算値に基づいた PHITS 用のデータ形式 (Frag data) のファイルを作成する作業が進行中です。さらに、今後はより一般的な核データの形式である ENDF フォーマットのファイルも作成する予定です。

また、医療用 RI 製造や長寿命核分裂生成物の核変換処理では、重陽子を直接標的に照射し、核変換することも検討されています。こうした中性子源設計以外の応用で重要となる量 (中重核に対する核種生成断面積など) についても精度良い計算ができるよう、今後 DEURACS 内の理論モデルを改良していく予定です。

参考文献

- [1] 中山 梓介, “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”, 核データニュース **110**, 23-28 (2015).
- [2] S. Araki, Y. Watanabe, M. Kitajima et al., “Systematic measurement of double-differential neutron production cross sections for deuteron-induced reactions at an incident energy of 102 MeV”, Nucl. Instr. Meth. A **842**, 62-70 (2016).
- [3] M. Hagiwara, T. Itoga, N. Kawata et al., “Measurement of neutron emission spectra in $\text{Li}(d,xn)$ reaction with thick and thin targets for 40-MeV deuterons”, Fusion Sci. Technol. **48**,

1320-1328 (2005).

- [4] T. Nakamura, M. Takada, N. Nakao et al., “Quasi-monoenergetic neutron fields for neutron cross section and shielding experiments in the energy range of 20 to 200 MeV”, Proc. of ND1997, 1508-1512 (1997).
- [5] X. Ledoux et al., “Spallation Neutron Production by 0.8, 1.2, and 1.6 GeV Protons on Pb Targets”, Phys. Rev. Lett. **82**, 4412-4415 (1999).
- [6] A. Moeslang, V. Heinzl, H. Matsui, M. Sugimoto, “The IFMIF test facilities design”, Fusion Eng. Des. **81**, 863–871 (2006).
- [7] Y. Nagai, K. Hashimoto, Y. Hatsukawa, et al., “Generation of Radioisotopes with Accelerator Neutrons by Deuterons”, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 064201 (2013).
- [8] 太田 雅之, 権 セロム, 落合 謙太郎, 鈴木寛光, “先進核融合中性子源 (A-FNS) 計画における $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製造の概念検討”, 日本原子力学会和文論文誌 **17**, 18-23 (2018).
- [9] 藤田 玲子, “ImPACT プログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」を起点として”, 日本原子力学会誌 **58**, 93-95 (2016).
- [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] T. Ye, S. Hashimoto, Y. Watanabe et al., “Analysis of inclusive (d, xp) reactions on nuclei from ^9Be to ^{238}U at 100 MeV”, Phys. Rev. C **84**, 054606 (2011).
- [12] S. Nakayama, Y. Watanabe, “Systematic investigation of spectroscopic factors from (d, p) reactions for deuteron nuclear data evaluation”, J. Nucl. Sci. Technol. **53**, 89-101 (2016).
- [13] O. Iwamoto, “Development of a Comprehensive Code for Nuclear Data Evaluation, CCONE, and Validation Using Neutron-Induced Cross Sections for Uranium Isotopes”, J. Nucl. Sci. Technol. **44**, 687-697 (2007); O. Iwamoto, N. Iwamoto, S. Kunieda et al., “The CCONE Code System and its Application to Nuclear Data Evaluation for Fission and Other Reactions”, Nucl. Data. Sheets **131** 259-288 (2016).
- [14] S. Nakayama, H. Kouno, Y. Watanabe et al., “Theoretical model analysis of (d, xn) reactions on ^9Be and ^{12}C at incident energies up to 50 MeV”, Phys. Rev. C **94**, 014618 (2016).
- [15] S. Nakayama, H. Kouno, Y. Watanabe et al., “Development of a code system DEURACS for theoretical analysis and prediction of deuteron-induced reactions”, EPJ Web Conf. **146**, 12025 (2017).
- [16] A.J. Koning, D. Rochman, “Modern Nuclear Data Evaluation with The TALYS Code System”, Nucl. Data Sheets **113**, 2841-2934 (2012),
- [17] C. Kalbach, “Phenomenological model for light-projectile breakup”, Phys. Rev. C **95**, 014606 (2017).

- [18] S. Nakayama, O. Iwamoto, Y. Watanabe, “Theoretical model analysis of composite-particle emission from deuteron-induced reactions”, *JAEA-Conf.* **2017-001**, 91-96 (2018).
- [19] C. Kalbach, “The Griffin Model, Complex Particles and Direct Nuclear Reactions”, *Z. Phys. A* **283**,401-411 (1977).