

平成 22 年 5 月 15 日現在

研究種目： 基盤研究(C)

研究期間： 2007～2009

課題番号： 19560844

研究課題名(和文) 加速器中性子源設計に関連した重陽子入射反応核データの研究

研究課題名(英文) Study of deuteron-induced reactions associated with accelerator-driven neutron sources

研究代表者

渡辺幸信 (WATANABE YUKINOBU)

九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号： 30210959

研究成果の概要(和文)：

加速器中性子源の候補である Li に対する 100MeV までの重陽子入射反応の理論模型解析を行った。弾性分解過程に連続状態離散化チャンネル結合法、核子ストリッピング過程にグラウバー模型、前平衡・蒸発過程に運動源模型を用いた計算手法を提案した。前方角へ放出される核子スペクトルの実験データに見られる特徴的なバンプ構造を良く再現でき、核子ストリッピング過程が主要な反応機構であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

A theoretical model analysis was performed for deuteron-induced reactions on Li up to 100 MeV, which is one of the candidate reactions used as an accelerator-driven neutron source. The inclusive nucleon spectra from deuteron breakup reactions on Li are analyzed by using the continuum discretized coupled channels theory for elastic breakup process, the Glauber model for nucleon stripping process, and the moving source model for preequilibrium and evaporation processes. The calculation reproduces a prominent bump observed in experimental nucleon emission spectra at forward angles quite well. The present analysis clarifies that the stripping process is more dominant than the elastic breakup process in deuteron breakup reactions on Li.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学・原子力学

キーワード： 重陽子分解反応、核データ、連続状態離散化チャンネル結合法、グラウバー模型、運動源模型、加速器中性子源、国際核融合材料照射施設

1. 研究開始当初の背景

加速器中性子源に使われる中性子生成反応は、使用目的に応じて選択される。例えば、

単色中性子源の場合は、14MeV 近傍であれば T(d,n)反応、さらに高エネルギー領域の場合は Li(p,n)反応が広く利用されている。高強度

かつ連続スペクトル成分が要求される場合は、陽子入射に比べて反応断面積が大きい重陽子入射反応 (Li(d,n) や Be(d,n)) が候補となりうる。例えば、核融合炉材料健全性評価のための中性子重照射施設 (IFMIF) では Li(d,n) 反応が採用され基本設計が行われている。強い前方ピーク性をもった中性子が放出されるために遮蔽やコリメータ設計を容易にできる利点がある。

これらの反応に対する微断面積測定や厚い標的からの中性子収量測定の実験的研究は国内外でいくつか報告されている。一方、理論解析については、個別の反応過程についての核物理研究はいくつか報告はあるが、放出中性子スペクトルの包括的な理解を目指したものは殆どなく、Konobeyev 等による d+Li 研究があるのみである。しかし、限定された実験データに基づく経験式や半古典的モデルを多用した解析で、理論的予測には限界がある。工学的応用の見地から実験値の再現性は必ずしも満足できる水準にはない。Li 標的ばかりでなく他の標的に対しても、核設計を行う上で不可欠な重陽子核データファイル (ライブラリ) は存在しない。

理論解析を困難にしている理由は、重陽子は結合エネルギーが 2.22MeV と小さく、原子核との相互作用で容易に分解され、終状態が3体になる点にある。この3体問題を厳密に考慮できる理論が不可欠である。重陽子反応をより現実的に取り扱う最有力な理論アプローチとしては、連続状態離散化チャンネル結合法 (CDCC 法) がある。重陽子入射のみならず軽い重イオン入射反応機構の精力的な研究が行われ、種々の実験データ解析に適用されて成功を収めた。最近では、宇宙核物理分野に関連して、不安定核入射反応への応用で再び脚光を浴び、理論研究が大きく進展してきた。しかしながら、これまで CDCC 法が d+Li 反応からの中性子生成に対する系統的な解析に適用された例はなく、原子核物理の側面からも興味深い研究対象である。

2. 研究の目的

本研究では、高強度連続スペクトル中性子源反応として Li(d,xn) 反応を取り上げ、CDCC 法やグラウバーモデルを用いた理論解析により、中性子生成に大きな寄与が予想される重陽子分解過程を含む核反応メカニズムを解明する。その結果に基づいて、中性子源シミュレーションに必要な基礎データである中性子生成2重微断面積 (放出角度・エネルギー相関スペクトル) を計算できるコードシステムを開発し、 100MeV までの入射エネルギー領域に対する核データ評価への適用性を検討する。

3. 研究の方法

Li(d,n) 反応機構を模式的に図 1 に示す。重陽子分解反応過程を弾性分解過程 (終状態が中性子、陽子、基底状態 Li の3体となる反応過程) と非弾性分解過程 (重陽子中の陽子のはぎ取られ、Li に吸収される、いわゆるストリップング反応過程) に分け、前者に対しては連続状態離散化チャンネル結合法 (CDCC) を適用し、後者に対しては、グラウバーモデル計算を行い、両者の和で直接分解反応を記述する。さらに、直接分解反応過程以外の前平衡及び蒸発過程には運動源 (Moving source) モデルを用いる。以上の3成分の非干渉な和として、包括的2重微断面積を計算する。

本研究では、まずは直接分解反応のモデルに含まれる核子-Li 間の光学ポテンシャルパラメータを決定し、重陽子弾性散乱を CDCC 計算で再現できるかどうか確かめる。主に、 40MeV 入射の Li(d,xn) 反応実験データを解析し、その適用性を調査する。 40MeV 以上のデータが皆無なために、 100MeV 入射の Be(d,xp) 反応実験データを同様な手法で解析し、入射エネルギー依存性を調べる。さらに、標的核の質量数依存性を見るために、炭素標的の (d,xp) 反応データの解析も行う。これらの解析から、 100MeV までの入射エネルギー領域に対する重陽子入射核データ評価への本提案モデルの適用性を検討する。

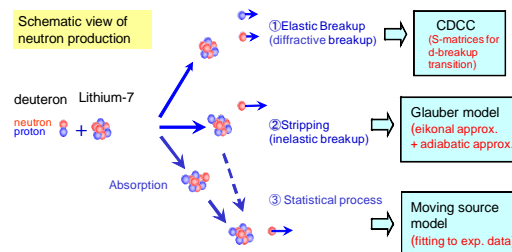


図 1 Li(d,xn) 反応過程の分類

4. 研究成果

(1) 光学モデルパラメータの決定

CDCC 理論計算およびグラウバーモデル計算では、中性子および陽子と Li 標的との光学ポテンシャルが必要となる。 ${}^6\text{Li}$ に対する核子弾性散乱微断面積、中性子全断面積、全反応断面積の実験データに対する光学モデル解析により、 5MeV から 50MeV のエネルギー領域における最適な光学ポテンシャルパラメータを導出した。この結果、調整可能なパラメータを含まない CDCC 計算およびグラウバーモデル計算が可能となった。

図 2 に ${}^6\text{Li}$ による中性子弾性散乱微断面積の光学モデル計算と実験値との比較を示す。本研究で導出された extended Chiba ポテンシ

ヤルおよび Dave-Gould によるポテンシャル (7~15MeV 領域限定) を用いた計算結果の比較を示している。赤の実線の結果は実験値を広い入射エネルギー範囲に亘り良好に再現できている。 ${}^7\text{Li}$ に対しても同様な結果が得られた。また、陽子弾性散乱についても本研究でパラメータを決定した extended Chiba ポテンシャルは実験値との良い一致を得ることができた。

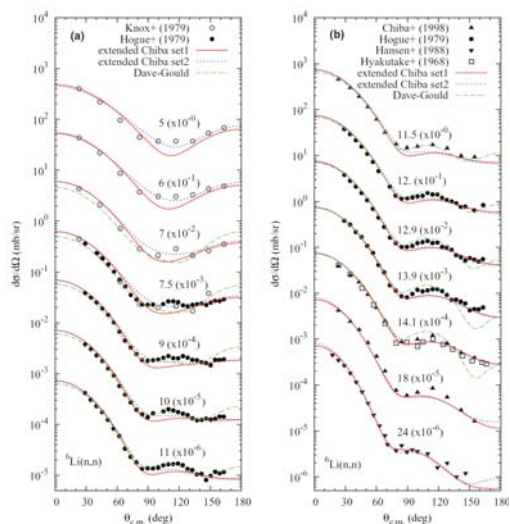


図 2 ${}^6\text{Li}$ に対する中性子弾性散乱微分断面積の実験値と計算値との比較

(2) 重陽子弾性散乱微分断面積および反応断面積

CDCC 計算を ${}^6,7\text{Li}$ に対する重陽子弾性散乱微分断面積および反応断面積データの解析へ適用した。計算結果は 10MeV から 50MeV の入射エネルギー範囲に亘る実験値を十分良く再現でき、特に断面積の大きな前方角で良い一致を示した。さらに、重陽子分解過程が弾性散乱へ与える効果を調べた結果、重陽子分解過程を考慮した方が実験データとの再現性が改善できることがわかり、重陽子分解過程を陽に考慮できる CDCC 計算の優位性を実証した。

(3) 包括的核子放出スペクトルの解析

本研究で提案した計算手法を用いて、 ${}^7\text{Li}$ に対する包括的核子放出スペクトルの解析を行った。直接分解反応過程以外の前平衡及び蒸発過程には運動源モデルを用い、後方角の実験データを再現するようにパラメータを決定した。図 4.5 に 40MeV(d,xn)反応の解析結果を示す。また図 6 に 100MeV(d,xp)反応に対する計算結果と実験値 (標的核 ${}^9\text{Be}$) との比較を示す。前方角への放出核子スペクトルの絶対値も含めて測定値との良い一致を示した。特に、重陽子分解反応に特徴的な幅広

いピーク構造を定量的に説明でき、この領域ではストリッピング過程が弾性分解過程に比べて重要であることを明らかにした。これらの解析結果から、提案された計算手法が前方性の強い $\text{Li}(d,n)$ 反応中性子源の核設計において有効であることを見出した。さらに、C 標的に対する 100MeV(d,xp)反応データの解析も行い、Li, Be と同様な結果を得ることができた。

なお、図 4.6 からわかるように、 20° より大きな角度では、ストリッピング反応のグラウバー模型計算のピーク位置が高エネルギー側へシフトし、実験値の再現性が悪化してくる。グラウバー模型はアイコナル近似を用いて、入射重陽子の重心軌道が直線であることを仮定している。これが一因の可能性が考えられるが、原因究明と改良が今後の課題の 1 つである。

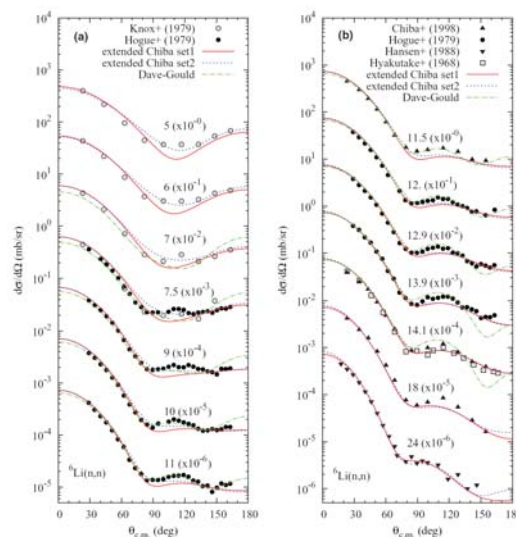


図 3 ${}^6,7\text{Li}$ に対する重陽子弾性散乱微分断面積の CDCC 計算と実験値との比較

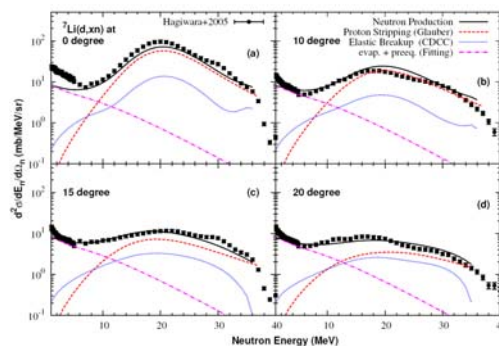


図 4 40 MeV 重陽子入射に対する $\text{Li}(d,xn)$ 反応の 2 重微分断面積

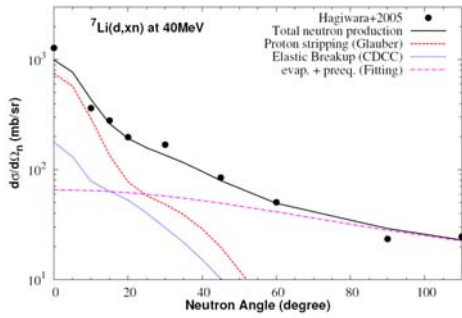


図5 40 MeV 重陽子入射に対する ${}^7\text{Li}(d,xn)$ 反応の角度分布

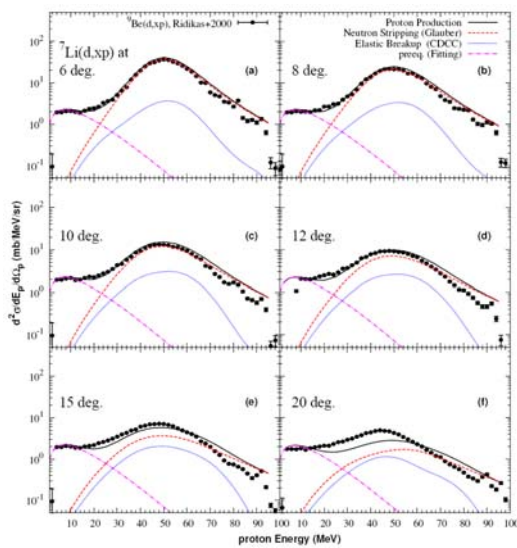


図6 100 MeV 重陽子入射に対する ${}^7\text{Li}(d,xp)$ 反応の2重微分断面積。なお、 ${}^9\text{Be}(d,xp)$ 反応に対する実験データがプロットされている。

(4) グラウバー模型の適用条件の検討

グラウバー模型の適用条件の一つとして、入射エネルギーが入射粒子と標的間のポテンシャルより十分大きいことが要求される。解析対象とした40MeV入射の場合に対して、ストリッピング反応の衝突係数依存性を調査することで、この反応が標的核の表面近傍で起こること、また表面領域のポテンシャルは入射エネルギーに比べて小さいことを定量的に示すことで、比較的低い入射エネルギーの重陽子反応に対してもグラウバー模型が適用可能であることを示した。

(5) 結論と今後の展望

Li に対する重陽子入射核反応について重陽子の分解過程を考慮可能な理論模型を有効に組み合わせた計算手法を提案し、重陽子弾性散乱および中性子生成反応の解析を行

い、その反応機構を定量的に明らかにした。特に中性子収量の多い前方角のエネルギー分布を絶対値も含めて良好に再現できることが分かり、100MeV までの入射エネルギー領域に対する重陽子の核データ評価への適用可能性を示すことができた。

今後は、 Li 以外の重い標的核の実験データ解析にも本提案模型を拡張し、クーロン分解反応の影響を調査する予定である。また、運動源模型は実験データに基づく現象論的な模型であるため、Hauser-Feshbach 理論や前平衡模型に基づく理論計算が可能な計算コードの開発を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Daisuke Kaku, Ye Tao, Yukinobu Watanabe, Neutronics analysis of the International Fusion Materials Irradiation Facility using the PHITS code, Proceedings of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, 査読有, (2008), pp.987-990.
- ② Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Satoshi Chiba, Analysis of deuteron elastic scattering from ${}^{6,7}\text{Li}$ using the continuum discretized coupled channels method, Phys. Rev. C, 査読有, Vol. 78, (2008), 024611.
- ③ Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Satoshi Chiba, Nucleon optical potentials for the CDCC analysis of deuteron elastic scattering from ${}^{6,7}\text{Li}$, Proceedings of the 2007 Symposium on Nuclear Data; JAEA-Conf 2008-008, 査読無, Vol. 8, (2008), pp.62-67.
- ④ Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Analysis of deuteron breakup reactions on ${}^7\text{Li}$ for energies up to 100 MeV, Physical Review C, 査読有, Vol. 80, (2008), 014604.
- ⑤ Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Theoretical Model Analysis of $\text{Li}(d,n)$ Reactions up to 50 MeV, Proceedings of the 2008 Symposium on Nuclear Data; JAEA-Conf 2009-008, 査読無, Vol. 8, (2008), pp.163-167.
- ⑥ Yukinobu Watanabe, Tao Ye, and Kazuyuki Ogata, Analysis of deuteron breakup reactions for energies up to 100 MeV, Proc. of Second Int. Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics; EPJ Web of Conferences, 査読無, Vol. 2, 11003 (2010).

[学会発表] (計6件)

- ① Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Satoshi Chiba, Nucleon Optical Potentials for the CDCC analysis of Deuteron Elastic Scattering from $6,7\text{Li}$, 2007 Symp. On Nuclear Data, 2007年11月30日, 茨城県東海村リコティ会議場
- ② Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Analysis of the direct processes in $^{6,7}\text{Li}(d, xn)$ reaction for energies up to 50 MeV, 日本原子力学会春の大会, 2008年3月26日, 大阪大学
- ③ Tao Ye, Chikahide Motooka, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Systematic study of deuteron induced reactions using Glauber model, 日本原子力学会2008年秋の大会, 2008年9月3日, 高知工科大学
- ④ Tao Ye, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Theoretical Model Analysis of $\text{Li}(d, xn)$ Reactions up to 50 MeV, The 2008 Symposium on Nuclear Data, 2008年11月21日, 茨城県那珂郡東海村リコティ
- ⑤ 叶 涛, 渡辺幸信, 緒方一介, ^7Li による重陽子分解反応からの包括的核子放出スペクトルの解析, 日本原子力学会 2009年秋の大会, 2009年9月16日, 東北大学
- ⑥ Yukinobu Watanabe, Tao Ye, Kazuyuki Ogata, Analysis of deuteron breakup reactions for energies up to 100 MeV, Second International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics, 2009年10月8日, ボルドー(フランス)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 幸信 (WATANABE YUKINOBU)
九州大学・大学院総合理工学研究院・
准教授
研究者番号： 30210959

(2) 研究分担者

緒方 一介 (OGATA KAZUYUKI)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号： 50346764

(3) 研究協力者

叶 涛 (YE TAO)
九州大学・大学院総合理工学府・
博士後期課程院生(2009年9月まで)