

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月13日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560820

研究課題名（和文）

分解反応過程を考慮した核融合中性子及び重陽子核反応断面積計算コードシステム開発

研究課題名（英文） Development of a calculation code system for neutron and deuteron induced reactions including breakup processes

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・教授

研究者番号：30210959

研究成果の概要（和文）：

核融合炉および核融合炉材料用照射試験施設の設計において必要不可欠な中性子および重陽子入射核反応の基礎データベースを作成するために、標的核や入射重陽子の分解反応過程を陽に考慮できる核反応理論モデル（例えば、連続状態離散化チャンネル結合法）を用いた統合計算コードシステムを開発した。本コードシステムをリチウム同位体に対する中性子入射反応や標的核の広い質量数範囲に対する重陽子入射反応計算に適用し、実験値との比較に基づいて、その有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：

Fundamental neutron and deuteron nuclear data are required in the design of fusion reactors and fusion material irradiation facilities. We have developed an integrated code system based on modern nuclear reaction theories such as continuum discretized coupled-channel method capable of taking into account explicitly the breakup processes of target nuclei and an incident deuteron. The code system was applied to neutron-induced reactions on lithium isotopes and deuteron-induced reactions on target nuclei over a wide range of mass number. The validity was demonstrated by comparison with available experimental data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合炉用核データ、中性子入射反応、軽核、重陽子入射反応、分解反応、連続状態離散化チャンネル結合法、グラウバー模型、断面積計算コード

## 1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉（ITER）の建設がフランスで開始され、日本では、日欧協力として「幅広いアプローチ活動」が始まった。これ

に合わせて、材料照射実験を行う国際核融合炉材料照射試験施設（IFMIF）の設計も本格化し始めた。これらの活動を支える核融合炉用核データの重要性が高まっており、国際原子

力機関 (IAEA) では核融合炉用評価核データライブラリの新版である FENDL-3 の評価プロジェクトがスタートした。実験データが不足しているエネルギー領域に対する断面積を予測するために、核データ評価では理論計算が重要な役割を担っている。DT 反応で生じた中性子 (14MeV) は、核分裂中性子 (平均約 2MeV) に比べてエネルギーが高いため、核反応機構がより複雑になる。低エネルギーでは、入射中性子を吸収した原子核が熱平衡状態 (複合核状態) になって粒子が放出される複合核過程が支配的であるが、十数 MeV 以上になると、原子核が熱平衡状態になる前に粒子放出が起こる直接過程や前平衡過程が影響を与えてくる。

核融合炉の特徴として、Li、Be 等の軽核と中性子との相互作用に関する知見が重要となる。これらは Al や Fe 等の中重核領域の核に比べて、非常に個性の強い原子核で、核子の集団からなるクラスター構造 (例えば、 ${}^7\text{Li}$  は 3 重陽子と  $\alpha$  粒子で構成) を取ることが知られている。その結果、中性子入射により標的核が分解され、終状態が 3 体以上になる多体反応 (例:  ${}^7\text{Li} + n \rightarrow n + t + \alpha$ ) が非常に起こり易いという特徴があるため、中重核領域で確立された断面積計算手法をそのまま適用することには限界がある。さらに、IFMIF 関連では、従来の中性子核データに加えて重陽子核データが必要となる。重陽子が核力やクーロン場で陽子と中性子に容易に分解されるため、従来の中性子・陽子反応用計算コードでは対応できず、重陽子分解を厳密に考慮した理論計算が必要となる。一方、反応の終状態が多体になる核反応を厳密に取り扱うための有力な理論アプローチとして、連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC 法) がある。約 20 年前に九大核理論グループにより提案され、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  $n+\text{Li}$  や  $n+\text{Be}$  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。

一方、IFMIF に関連した重陽子入射反応については、応募者等が平成 19~21 年度に行った基盤研究(C)で  $d+\text{Li}$  反応の重陽子分解過程を CDCC 法+グラウバー模型の枠組で記述可能であることを示した。なお、グラウバー模型は、重陽子中の陽子か中性子のいずれかが標的核に吸収されて、それ以外の核子が前方方向に強く放出されるストリッピング反応の記述に用いられる。この成功に基づき、CDCC 法を  ${}^7\text{Li}(n,t)\alpha$  のような標的核の分解反

応にも拡張し、中重核に対する重陽子入射反応へ適用するために、標的核および入射重陽子分解反応に特化した研究を計画することにした。

## 2. 研究の目的

本研究では、最新の理論模型 (CDCC 法やグラウバー模型) を用いてこれら分解反応を厳密に考慮できる断面積計算コードシステムを新規開発して、高精度断面積データベース生産に向けた核融合炉用核データ評価研究に応用することを目的とする。

## 3. 研究の方法

標的核および入射重陽子の分解反応過程を陽に考慮できる断面積計算コードシステムを開発するために、まず、核融合炉ブランケット設計で重要な反応である  $n+\text{Li}$  反応を取り上げ、分解反応を記述できる CDCC 理論を用いた実験データの解析を行う。現状では中性子入射反応実験データは少ないので、陽子入射反応実験データの解析も併用する。

重陽子入射反応に対してはグラウバー模型によるストリッピング反応過程の計算を Al、Ni 等の中重核領域まで拡張する。これら分解反応に引き続いて起こる前平衡・統計崩壊過程を記述するコードを重陽子入射に適用できるように拡張する。

それぞれ開発・整備された計算コードを統合化して、最終的に、核融合炉工学に必要なとされる軽核の中性子反応断面積および重陽子反応断面積の計算コードシステムを完成させる。このコードシステムで計算された断面積を実験データと比較し、その有効性を検証する。

## 4. 研究成果

核融合炉用核データ (特に Li に対する中性子入射反応データ)、および IFMIF 設計研究で不可欠な重陽子入射核反応断面積データを精度良く計算できる統合計算コードシステムの開発研究を行った。その成果を以下に述べる。

### (1) 核子入射 Li 分解反応

まず、中性子および陽子と  ${}^6,7\text{Li}$  との核的相互作用計算に CDCC 法を適用し、弾性・非弾性散乱および全断面積データの解析を行った。計算には、微視的光学ポテンシャル (Jeukenne-Lejeune-Mahaux(JLM)ポテンシャル) を使用し、ポテンシャルの実部と虚部に含まれる規格化因子の入射エネルギー依存性に着目した実験データ (中性子全断面積と陽子全反応断面積) の解析を行い、数 MeV~150MeV まで適用可能な規格化因子の経験式を新たに導出した。

${}^7\text{Li}$  に対する中性子全断面積および陽子全

反応断面積の実験値と計算値との比較を図 1 および図 2 に示す。150MeV までのエネルギー領域に亘り、計算結果は実験値との良好な一致を得ている。以前の低エネルギー領域の解析で以前使われた実部の規格化因子を 1、虚部を 0.1 とした結果 (図 1 の破線) は、入射エネルギーが高くなるにつれて大きく過小評価する傾向を示すことも分かった。

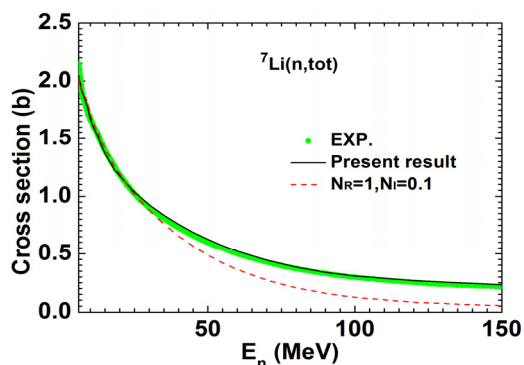


図 1  ${}^7\text{Li}$  に対する中性子全断面積

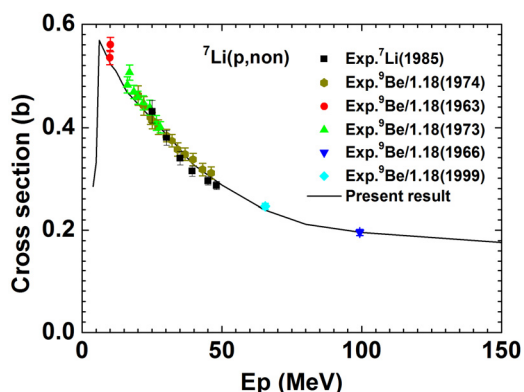


図 2  ${}^7\text{Li}$  に対する陽子全反応断面積。なお、 $p+{}^9\text{Be}$  実験データをスケールリングして  $p+{}^7\text{Li}$  データに変換したデータも使用している。

次に、CDCC 法を中性子および陽子弾性散乱と非弾性散乱微分断面積の計算に適用した。その結果の一例として、 ${}^7\text{Li}$  に対する陽子弾性散乱微分断面積を図 3 に示す。計算結果は広い入射エネルギー範囲に亘り実験値の良い再現性を示している。

以上、標的核の分解過程を陽に扱う CDCC 法は、 $\text{Li}$  の核子入射に対する中性子全断面積、陽子全反応断面積、弾性・非弾性散乱断面積をうまく説明できることが分かった。続いて、標的核の分解を経由するトリチウム生成反応 ( ${}^7\text{Li}(n,n')\alpha$ ) の反応機構を調べるために、終状態相互作用 (FSI) モデルと順次崩壊 (SD) モデルを組み合わせた計算コードを作成して、実験データが存在する  ${}^7\text{Li}(p,p')\alpha$  反応からの放出陽子とトリチウムのスペクトルの同時解析に適用した。その結果を図 4 と図 5 に示す。両データとも矛盾なく説明でき、

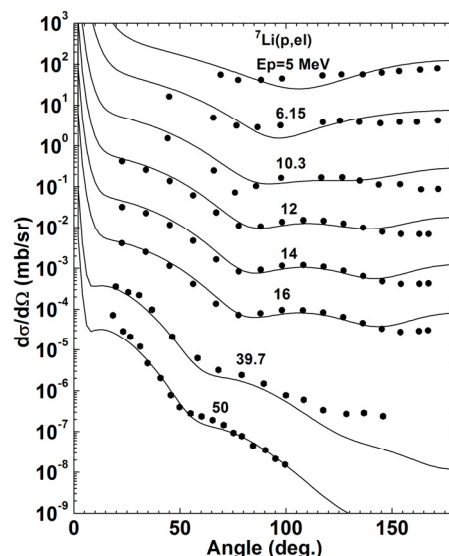


図 3  ${}^7\text{Li}$  に対する陽子弾性散乱微分断面積。なお、データは上から順に 1/10 ずつシフトしてプロットしている。

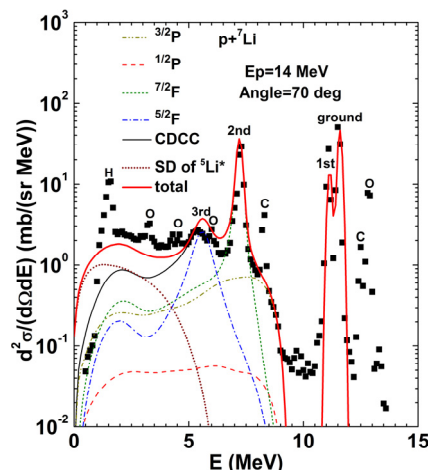


図 4  ${}^7\text{Li}$  に対する 14MeV 陽子入射陽子放出二重微分断面積

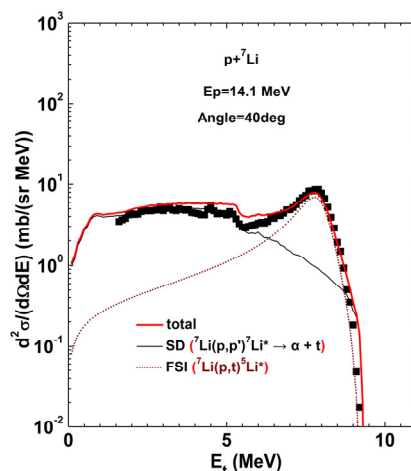


図 5  ${}^7\text{Li}$  に対する 14MeV 陽子入射トリトン放出二重微分断面積

本計算手法の陽子入射反応への適用可能性を示すことができた。なお、CDCC 計算とそれに続く SD モデル計算には調整可能なパラメータは含まれていないが、 ${}^7\text{Li}(p,t)$ 反応を説明するために導入した FSI 計算では、絶対値を実験値に規格化している。今後はこの規格化因子の入射エネルギー依存性の調査やより厳密な計算モデルの適用を予定している。

さらに、本計算コードシステムを用いて、20MeV 以下の  ${}^7\text{Li}$  に対する中性子反応からのトリチウム生成二重微分断面積を計算した。計算結果を国産評価済汎用核データファイル JENDL-4 に組み込み、ブランケット候補材料中での生成トリチウム輸送計算を行った。その結果、生成トリチウムの運動エネルギー分布を考慮することで、核反応と同時にペレット状の増殖材表面からのトリチウム放出が起こることがシミュレーションできた。

## (2)重陽子入射反応

重陽子入射反応断面積計算コードシステムの開発では、直接反応過程（弾性分解過程および核子剥ぎ取り反応過程）に引き続いて起こる前平衡・統計崩壊過程の計算手法の検討を主に行った。重陽子中の中性子または陽子のはぎ取り反応後に2通りの複合核が生成される。さらに重陽子吸収によってもう1種類の複合核形成が起こる。これらの3つの複合核からの前平衡・統計崩壊過程を核子入射専用の CCONE コードで計算する方法を考案した。これらの知見を基に、重陽子入射反応に適用可能な統合計算コードシステムを開発した。本コードシステムで取り扱う反応機構およびそれぞれに対応する計算モデルコードの関係を図6に示す。

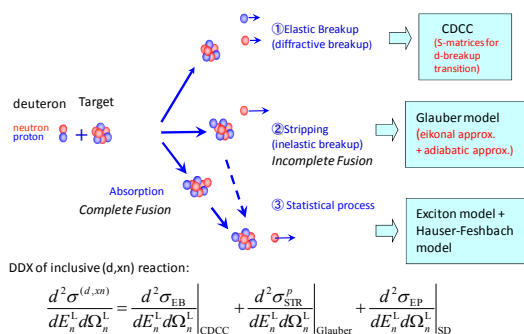


図6 統合計算コードシステムの概要

まず、重陽子弾性散乱微分断面積および全反応断面積の計算に CDCC コードを適用した。重陽子分解の連続中間状態を経て弾性散乱チャンネルに戻る成分もチャンネル結合で考慮できる。 ${}^{58}\text{Ni}$  および  ${}^{27}\text{Al}$  標的に対して計算された重陽子弾性散乱微分断面積と実験値との比較を図7に示す。経験的な光学モデル計算と同程度に、実験値に対する良好な再現

性を得た。

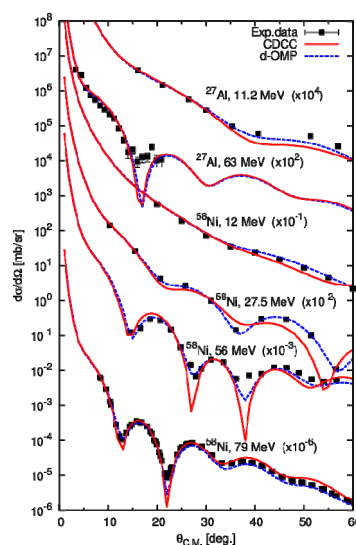


図7  ${}^{27}\text{Al}$  および  ${}^{58}\text{Ni}$  に対する重陽子弾性散乱微分断面積

次に、本計算コードシステムを  ${}^{58}\text{Ni}$  および  ${}^{27}\text{Al}$  標的に対する  $(d,xp)$  反応実験データの解析に適用した。その結果を図8と図9にそれぞれ示す。入射エネルギー56MeVと100MeVにおいて両標的とも実験データを非常に良好に再現できることがわかる。入射エネルギーの約半分のエネルギー付近に見られるバンプ構造は、主に重陽子弾性分解と中性子剥ぎ取り反応過程が支配的で、低エネルギー領域は複合核からの前平衡・統計崩壊過程が主要な反応機構であることを示している。実験値に見られる高エネルギー端付近のピーク構造は、中性子剥ぎ取り反応で標的核に移行した中性子が束縛状態の軌道に入り、残留核の離散的準位を励起したことに対応している。剥ぎ取り反応を扱う現行のグラウバーモデルでは、このような離散的準位への遷移を計算できないため不一致が見られている。今後は、歪曲波ボルン近似法の適用を計画している

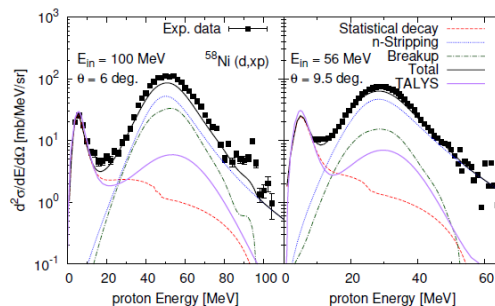


図8  ${}^{58}\text{Ni}$  に対する  $(d,xp)$  反応二重微分断面積

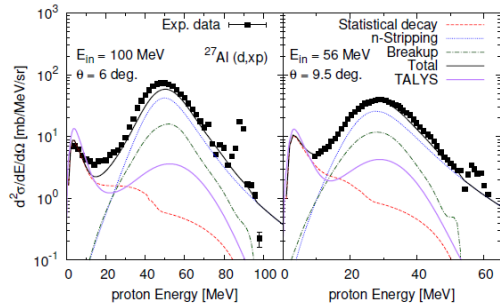


図9  $^{27}\text{Al}$  に対する(d,xp)反応二重微分断面積

さらに、本計算コードシステムを 85MeV 入射の  $^{59}\text{Co}(d,x)$  反応による残留核の放射化断面積計算にも適用した。その結果の計算値と実験値との比(C/E)を図10に示す。重陽子分解を含む直接過程計算を考慮した場合としない場合で C/E を比較している。分解過程を厳密に考慮した場合、多くの生成核種に対して、実験データとの一致が大きく改善できることが分かる。

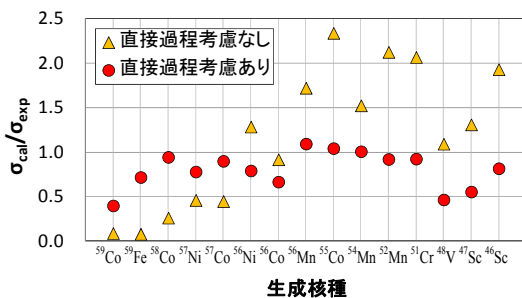


図10 85MeV 入射の  $^{59}\text{Co}(d,x)$  反応放射化断面積の C/E

### (3)結論と今後の展望

本研究では、核融合炉および核融合炉材料用照射試験施設の設計において必要不可欠な中性子および重陽子入射核反応の基礎データベースを作成するために、標的核や入射重陽子の分解反応過程を考慮できる核反応理論模型を組み合わせた統合計算コードシステムを開発した。本コードシステムをリチウム同位体に対する中性子及び陽子入射反応や標的核の広い質量数範囲に対する重陽子入射反応計算に適用し、実験値との比較に基づいて、その有効性を検証した。

今後は、リチウム同位体に対する研究成果を現在開発中の国産 JENDL 高エネルギーファイル用核データ評価へ応用する予定である。重陽子入射反応に関しては、IFMIF 等の加速器中性子源開発で要求の高い中性子生成反応の実験データを測定し、本計算コードの予測精度検証ならびに課題抽出をさら

に継続して行い、高精度重陽子核データの生産に貢献する予定である。

### 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 2 件)

- ① Hairui Guo, Yukinobu Watanabe, Takuma Matsumoto, Kazuyuki Ogata, Masanobu Yahiro, Systematic analysis of nucleon scattering from  $^{6,7}\text{Li}$  with the continuum discretized coupled channels method, Phys. Rev. C, 査読有, Vol. 87, (2013), 024610 (9 pages), DOI 10.1103/PhysRevC.87.024610
- ② Tao Ye, Shintaro Hashimoto, Yukinobu Watanabe, Kazuyuki Ogata, Masanobu Yahiro, Analysis of inclusive (d,xp) reactions on nuclei from  $^9\text{Be}$  to  $^{238}\text{U}$  at 100MeV, Phys. Rev. C, 査読有, Vol. 84, (2011), 054606 (8 pages), DOI 10.1103/PhysRevC.84.054606

[学会発表] (計 16 件)

- ① 渡辺 幸信、核データ研究から見た微視的核反応論、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月29日、広島大学東広島キャンパス
- ② 中山梓介、荒木祥平、渡辺 幸信、岩本 修、叶 涛、緒方一介、重陽子入射核反応断面積計算コードシステムの開発、日本原子力学会 2013年春の大会、2013年3月26日、近畿大学
- ③ Hairui Guo, Kohei Nagaoka, Yukinobu Watanabe, Takuma Matsumoto, Kazuyuki Ogata, Masanobu Yahiro, Application of the continuum discretized coupled channels method to nucleon-induced reactions on  $^{6,7}\text{Li}$  for energies up to 150 MeV, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2013), 2013年3月6日、ニューヨーク (米国)
- ④ S. Nakayama, S. Araki, Y. Watanabe, O. Iwamoto, T. Ye, K. Ogata, Cross section calculation of deuteron-induced reactions using extended CCONE code, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2013), 2013年3月4日、ニューヨーク (米国)
- ⑤ S. Araki, S. Nakayama, Y. Watanabe, Statistical model calculation for deuteron induced reactions under appropriate consideration of direct reaction process, 14th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST), 2013年2月18日、九州大学筑紫キャンパス

- ⑥ K. Nagaoka, H. Guo, Yukinobu Watanabe, Analysis of tritium production from nucleon-induced reactions on  ${}^7\text{Li}$  at energies from 14 to 18 MeV, 14th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST), 2013 年 2 月 18 日、九州大学筑紫キャンパス
- ⑦ 中山梓介、荒木祥平、渡辺幸信、岩本修、叶 涛、緒方一介、重陽子入射核反応断面積計算手法の開発、日本原子力学会九州支部第 31 回研究発表講演会、2012 年 12 月 1 日、九州大学伊都キャンパス
- ⑧ Shinsuke Nakayama, Shouhei Araki, Yukinobu Watanabe, Osamu Iwamoto, New extension of CCONE code for calculation of deuteron-induced reactions, 2012 Symposium on Nuclear Data, 2012 年 11 月 15 日、京都大学原子炉実験所
- ⑨ Hairui Guo, Kohei Nagaoka, Yukinobu Watanabe, Takuma Matsumoto, Kazuyuki Ogata, Masanobu Yahiro, Analysis of nucleon and triton emissions via breakup process in nucleon-induced reactions on  ${}^{6,7}\text{Li}$ , 2012 Symposium on Nuclear Data, 2012 年 11 月 15 日、京都大学原子炉実験所
- ⑩ Guo Hairui, Yukinobu Watanabe, Takuma Matsumoto, Masanobu Yahiro, and Kazuyuki Ogata, Continuum discretized coupled channels analysis of nucleon induced reactions on  ${}^{6,7}\text{Li}$ , 日本原子力学会 2012 年秋の大会, 2012 年 9 月 20 日、広島大学東広島キャンパス
- ⑪ 長岡恒平、渡辺幸信、郭海瑞、 ${}^7\text{Li}$  に対する 14-18MeV 核子入射トリチウム生成核反応の解析、日本原子力学会 2012 年秋の大会、2012 年 9 月 20 日、広島大学東広島キャンパス
- ⑫ 荒木祥平、渡辺幸信、岩本修、直接過程を考慮した重陽子入射核反応の統計モデル計算、日本原子力学会 2012 年秋の大会、2012 年 9 月 20 日、広島大学東広島キャンパス
- ⑬ Guo Hairui, Yukinobu Watanabe, Takuma Matsumoto, Masanobu Yahiro, and Kazuyuki Ogata, Analysis of nucleon induced reactions on  ${}^{6,7}\text{Li}$  with the continuum discretized coupled channels method, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), 2012 年 8 月 21 日、福岡国際会議場
- ⑭ 荒木祥平、渡辺幸信、岩本修、重陽子入射核反応計算における統計崩壊モデルの検討、日本原子力学会九州支部第 30 回研究発表講演会、2011 年 12 月 17 日、九州大学筑紫キャンパス
- ⑮ 長岡恒平、渡辺幸信、 ${}^7\text{Li}$  に対する核子入

射トリチウム生成核反応のモデル解析、日本原子力学会九州支部第 30 回研究発表講演会、2011 年 12 月 17 日、九州大学筑紫キャンパス

- ⑯ 渡辺 幸信、緒方 一介、八尋 正信、橋本 慎太郎、叶 涛、100MeV までの (d,xp) 及び (d,xn) 分解反応の系統的解析、日本原子力学会秋の大会、2010 年 9 月 16 日、北海道大学 (札幌)

## 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・教授  
研究者番号：30210959

### (2) 研究分担者

緒方 一介 (OGATA KAZUYUKI)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：50346764

### (3) 連携研究者

岩本 修 (IWAMOTO OSAMU)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究部門・研究副主幹  
研究者番号：80370360

### (3) 研究協力者

郭海瑞 (GAO HAIRUI)  
九州大学・大学院総合理工学府・  
博士後期課程院生  
中山梓介 (NAKAYAMA SHINSUKE)  
九州大学・大学院総合理工学府・  
博士後期課程院生