

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23600002

研究課題名(和文)ウラン核分裂片量子ビームに対する陽子半径の系統的測定

研究課題名(英文)Systematic measurements of point-proton radii for unstable nuclear beams

研究代表者

山口 貴之(YAMAGUCHI, Takayuki)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10375595

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、中間エネルギーの荷電変化反応を利用して、不安定核の中の陽子の分布半径(陽子半径)を導出する方法論を確立し、できるだけ多くの核種の陽子半径を決定するものである。

我々は陽子半径が既知の安定核と不安定核の荷電変化反応断面積を精密かつ系統的に測定し、改良したグラウバー理論を適用することで陽子半径を再現することに成功した。この方法によって中性子過剰な炭素同位体の中性子スキン厚を決定した。さらに中重核の荷電変化反応断面積を系統的に測定し、鉄、ニッケル同位体の陽子半径を得るとともに、核図表中の広い範囲で荷電変化反応から陽子半径を決定出来る事を示した。

研究成果の概要(英文)：The present study demonstrates that point-proton radii of unstable nuclei can be determined from the charge-changing cross sections at intermediate energies. With the phenomenologically modified Glauber model analysis, systematic measurements of the charge-changing cross sections for stable and unstable nuclei, whose proton radii are already known, show a simple scaling law over a wide range of proton-neutron ratios. An application to neutron-rich carbon isotopes indicates a systematic evolution of proton radii and discovered a thick neutron skin. The present method was applied to medium mass nuclei such as Fe and Ni isotopes, and shows a clear correlation between the charge-changing cross sections and proton radii.

研究分野：原子核物理学(実験)

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：不安定核 陽子半径 荷電変化反応

## 1. 研究開始当初の背景

原子核の荷電半径は核構造解明の為の基本物理量の一つである。荷電半径は核内の陽子の分布で決まり、安定核に対してはこれまで電子散乱によって正確に測定されてきた。しかし、不安定核に対しては電子散乱が不可能であるため、現在までアイソトープシフト測定しか荷電半径を実験的に決定する方法がなかった。不安定核に対する電子散乱実験の計画はあるものの、アイソトープシフト実験と同様にルミノシティの制限のため、ドリップラインに近い極端に不安定な原子核に対しては適用できない。不安定核の構造を統一的に理解するためには、ドリップラインに至るまで多種多様な不安定核に対して系統的に荷電半径を測定する必要がある。そのような測定によって、不安定領域での殻構造の変化を明らかにすることが出来る。さらには陽子半径と中性子半径の差つまりスキン厚を実験的に得ることで、原子核の状態方程式 EOS の解明にも役立てる事が出来る。

## 2. 研究の目的

原子核の荷電半径は核内の陽子の分布によって決まるため、本研究では高エネルギー重イオン反応を利用して直接核内の陽子分布を導出する方法を確立する事を目的とする。本研究では、高エネルギー重イオンビームによる荷電変化反応に着目する。重イオンの荷電変化断面積は数バールと比較的大きいため、ドリップライン近傍の稀少な不安定核ビームに対しても効率的な測定が期待出来る。これにより、これまでアイソトープシフト測定による不安定核の荷電分布の研究を極めて不安定な原子核にまで相補的に発展させる。

荷電変化断面積から不安定核の陽子半径が得られると、相互作用断面積（もしくは反応断面積）から決定される不安定核の物質半径と比較することによって、核内の中性子の分布半径（中性子半径）を導出する事が出来る。このように陽子半径と中性子半径を分離することで、不安定核の中性子スキン厚を得ることが出来る。

## 3. 研究の方法

放射線医学総合研究所の HIMAC シンクロトロン加速器と核破砕片分離装置を使用して、高エネルギー重イオンビームから入射核破砕反応によって安定核ならびに不安定核の 2 次ビームを生成する。生成された 2 次ビームは核破砕片分離装置で磁気剛性率とエネルギー損失分析によって分離、純化された後、飛行時間とエネルギー損失の測定によって事象毎に粒子識別される。その後、2 次反応標的に導かれ、荷電変化反応を起こす。荷電変化反応は入射粒子の原子番号が変化する確率であるため、2 次反応標的の下流で出射される粒子の原子番号を識別できればよい。

このため、エネルギー分解能の優れた多層電極型イオンチェンバーを開発した。

荷電変化断面積はトランスミッション法を用いて測定した。2 次反応標的には炭素とアルミニウムを用いた。反応標的の上流と下流の粒子数の変化率を空標的についても測定し、検出器中での反応による偽の効果を打ち消す。これによって荷電変化断面積を精度よく決定する事が出来る。軽い領域では、1 次ビーム  $^{18}\text{O}$  から Be, C, O 同位体を生成、重い領域では、1 次ビーム  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{70}\text{Ge}$  から Ar から Ge までの同位体を生成した。合計で約 100 種類の核種について荷電変化断面積の精密測定を行った。

## 4. 研究成果

## (1) 原理検証実験—安定核による定式化

はじめに荷電半径既知の安定核  $^{28}\text{Si}$  に対して、荷電変化断面積を核子当たり 100MeV から 600MeV までビームエネルギーを変化させて精密測定した。その結果、荷電変化断面積はエネルギーとともに減少し、核子当たり 200MeV 以上ではほぼ一定になる事が分かった。これは反応断面積のエネルギー依存性と類似している。そこで、陽子半径を導出するため荷電変化断面積を測定するエネルギーとして、核子-核子全断面積が最小になる核子当たり 300MeV と決定した。

次に、荷電変化断面積から陽子半径を導出するための定式化を行った。高エネルギー重イオン反応はグラウバー理論でよく記述される。反応は、入射核と標的核の中の核子同士の反応の和として表せる。荷電変化断面積は入射核の原子番号が変化する確率であるため、グラウバー理論で入射核の中の陽子だけが標的核と反応すると仮定し、現象論的なパラメーターを導入した。

$$\sigma_{cc} = 2\pi \int b(1 - T^p(b))\mathcal{E}(E)db,$$

$$T^p(b) = \exp \left[ - \left( \sigma_{pp} \int \rho_p^{\text{targ}} \rho_p^{\text{proj}} + \sigma_{np} \int \rho_n^{\text{targ}} \rho_p^{\text{proj}} \right) \right]$$

荷電変化断面積 ( $\sigma_{cc}$ ) は上式に示すように、透過関数  $T^p(b)$  を衝突係数  $b$  で積分して与えられる。透過関数は入射核の密度と標的核の密度を核子-核子全断面積をかけて積分したものである。ここで入射核の密度として陽子の分布のみを考慮した (下付きの  $p, n$  はそれぞれ陽子, 中性子を示す)。本研究で導入した現象論的なパラメーターは  $\mathcal{E}(E)$  としてエネルギー依存性を持つと仮定した。そして  $^{28}\text{Si}$  の荷電変化断面積を再現するようにパラメータを調整したところ、エネルギー依存性はほとんどなく、オリジナルのグラウバー理論値から約 12% の補正でよい事が分かった。さらに荷電半径が既知である安定核 ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{36,40}\text{Ar}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ) に対して、改良したグラウバー理論を用いて荷電変化断面積を計算したところ、約 3-4% の精度で再

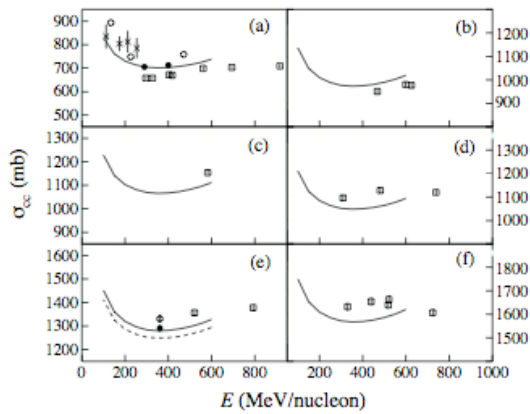


図 1: 荷電変化断面積の実験値 (文献値) と改良グラウバー理論値の比較 (業績論文②より引用)

現する事に成功した。図 1 に結果を示す (業績論文②より引用)。上記 7 種類の核種に対して、荷電変化断面積 (文献値) のビームエネルギー依存性を示す。図中の実線 (破線) は改良グラウバー理論値である。

### (2) 原理検証実験—軽い不安定核による検証

1 次ビーム  $^{18}\text{O}$  から荷電半径が既知である安定核ならびに中性子過剰核 ( $^{9-11}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{16-18}\text{O}$ ) を生成し、荷電変化断面積を精密測定した。安定核で構築した方法論を不安定核で検証するためである。結果を図 2 に示す (業績論文②より引用)。縦軸は測定した荷電変化断面積と改良グラウバー理論値との比である。横軸は測定した核種の陽子数と中性子数の比である。図にはこの実験で得られた値以外の文献値もプロットしている。この図から、陽子中性子比が広い範囲で荷電変化断面積の比が一定になっている事が分かる。但し、一定値から外れている 2 点のデータは  $^9\text{Be}$  と  $^{10}\text{B}$  に対応する。これらの核種は反応で中性子が剥離すると存在できない特殊な核であるため、比が一定にならない事が理解できる。以上の関係から、不安定核に対しても荷電変化断面積から陽子半径を導出できる事が分かった。ただし、比のばらつき (ハッチで示されている) は系統誤差として考慮しなければならない。

### (3) 炭素同位体の中性子スキン

不安定核に対しても荷電変化断面積から陽子半径を決定出来る事が分かった。応用として、本研究の方法論をアイソトープシフト測定が困難な中性子過剰炭素同位体  $^{15,16}\text{C}$  に適用した。 $^{15,16}\text{C}$  の荷電変化断面積を炭素標的に対して核子当たり約 300MeV で精密測定し、荷電変化断面積の比が図 2 のようになるよう入射核の陽子の密度分布を決めた。ここで陽子の密度分布の関数形を調和振動子型として幅パラメータを決定した。その結果、陽子半径として、 $^{15}\text{C}$  に対して 2.33(11) fm,  $^{16}\text{C}$

に対して 2.25(11) fm と決定する事が出来た。炭素同位体の物質半径は、GSI に於いて相互作用断面積の系統測定から決定されているため、中性子半径を導出する事が出来る。得られた中性子半径と陽子半径の差を図 3 に示す (青四角のデータ: 業績論文②より引用)。ここで横軸は陽子の分離エネルギーと中性子の分離エネルギーの差である。図 3 には Na や Ar 同位体等の結果もプロットしている。この図から陽子中性子分離エネルギー差が大きいほど、つまり中性子ドリップラインに近づくほど中性子スキンが厚くなり、中性子過剰な炭素同位体  $^{15,16}\text{C}$  に中性子スキンが存在するという事が初めて分かった。中性子スキン厚は陽子中性子分離エネルギー差に関してほぼ直線的に増加し、この効果は核種によらず一般的なものである事が分かった。

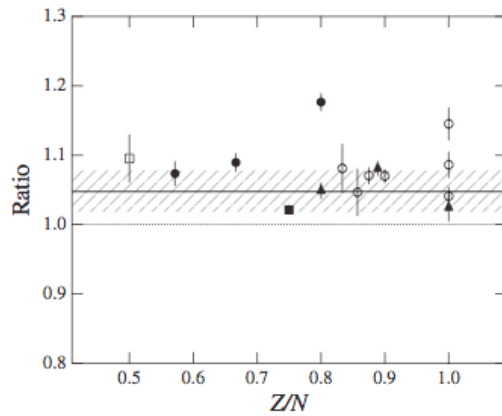


図 2: 荷電変化断面積の実験値と理論値の比 (業績論文②より引用)

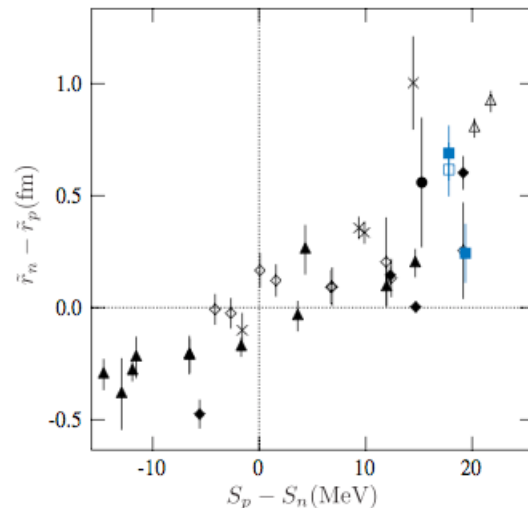


図 3: 中性子スキン厚と陽子中性子分離エネルギー差の相関図 (業績論文②より引用)

### (4) 中重核への応用

軽い核では安定核、不安定核ともに荷電変化断面積から陽子半径を導出できる事が分かった。この方法論をさらに重い核種に対して検証すべく、 $^{56}\text{Fe}$  と  $^{70}\text{Ge}$  から生成される

Ar から Ge までの同位体までの 84 核種の荷電変化断面積を精密測定した。図 4 に測定した核種を示す。測定した荷電変化断面積の Ca から Fe の結果を図 5 に示す (業績論文⑦より引用)。比較のために軽い核で測定された荷電変化断面積 (文献値) もプロットしている。原子番号とともに荷電変化断面積が増加している事が分かる。Fe, Ni 同位体について陽子半径の予備的な結果は得られているが, 他の核種も含めて投稿論文を準備中である。

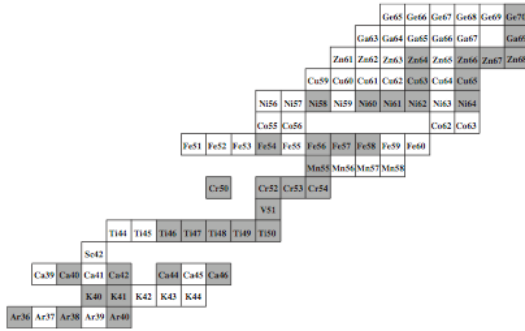


図 4 : 荷電変化断面積を測定した中重核

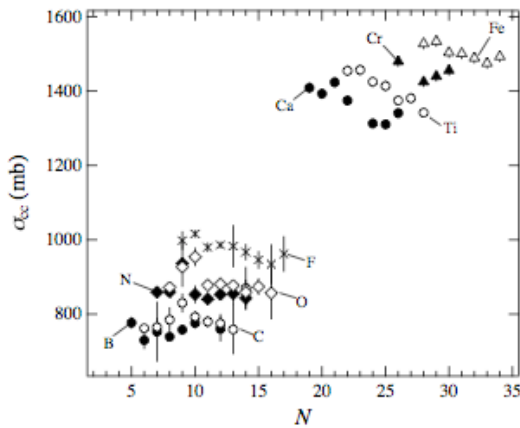


図 5 : 中重核の荷電変化断面積 (業績論文⑦より引用)

#### (5) 荷電変化部分断面積—偶奇効果

2 次反応標的の下流で破砕片を計数することで, 荷電変化反応の部分断面積を導出する事が出来る。このために多層電極型のイオンチェンバーを開発した。通常イオンチェンバーでは P-10 ガス 1 気圧を使用するところ, ガス圧力を上げる事でエネルギー分解能を上げる事に成功した。Z~28 でエネルギー分解能約 0.7%を得ている。図 6 は Ti 同位体の荷電変化部分断面積の結果である (業績論文⑦より引用)。Ti 同位体につき, 入射核の質量数 A を変化させながら, 剥離する陽子数  $\Delta Z (= Z - Z_f)$  の時の荷電変化部分断面積 ( $\sigma_F$ ) を使って下式で定義される V をプロットしたものである。

$$V(Z_f) = \frac{2\sigma_F(Z_f)}{\sigma_F(Z_f + 1) + \sigma_F(Z_f - 1)}$$

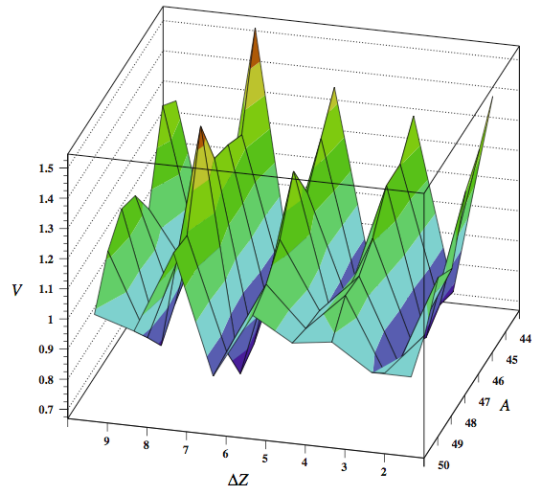


図 6 : Ti 同位体の荷電変化部分断面積の偶奇効果 (業績論文⑦より引用)

定義から V は荷電変化部分断面積の偶奇効果を示す。図 6 から分かるように, Ti 同位体の質量数が小さくなるほど, 偶奇効果が顕著に発達している。これは他の同位体でも同様である。

#### (6) まとめと今後の展開

不安定核の陽子半径を決める為の新たな方法として, 荷電変化断面積を系統的に測定し, 陽子半径を導出する定式化を行った。軽い核では本研究で開発した方法論が成功し, 炭素同位体の中性子スキンを明らかにする事が出来た。中重核でも陽子半径を決定できる事が分かったが, 軽核と比べて系統誤差が大きくなる傾向があるため, さらなる研究が必要である。

副産物として得られた荷電変化部分断面積に顕著な偶奇効果を発見した。また, 陽子捕獲反応も観測されており, 高エネルギー重イオン反応の基礎的なデータを得る事が出来た。

理化学研究所 RI ビームファクトリのビームタイムがもらえ次第, ウラン核分裂片の荷電変化断面積を測定する。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ①. A. Ozawa, T. Moriguchi, T. Ohtsubo, N. Aoi, D. Q. Fang, N. Fukuda, M. Fukuda, H. Geissel, I. Hachiuma, N. Inabe, Y. Ishibashi, S. Ishimoto, Y. Ito, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, T. Kuboki, K. Kusaka, M. Lantz, Y. G. Ma, M. Mihara, Y. Miyashita, S. Momota, D. Nagae, K. Namihira, D. Nishimura, H. Ooishi, Y. Ohkuma, T. Ohnishi, M. Ohtake, K. Ogawa, Y. Shimbara, T. Suda, T. Sumikama, H. Suzuki, S. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, H. Takeda, K. Tanaka, R. Watanabe, M. Winkler, T.

- Yamaguchi, Y. Yanagisawa, Y. Yasuda, K. Yoshinaga, A. Yoshida, and K. Yoshida, Charge-changing cross sections of  $^{30}\text{Ne}$ ,  $^{32,33}\text{Na}$  with a proton target, *Phys. Rev. C* 89 (2014) 044602/1-5, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.89.044602
- ②. S. Yamaki, J. Kouno, D. Nishimura, M. Nagashima, M. Takechi, K. Sato, K. Abe, Y. Abe, M. Fukuda, H. Furuki, I. Hachiuma, A. Homma, N. Ichihashi, C. Ichikawa, N. Inaba, T. Ito, K. Iwamoto, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kikuchi, S. Kinno, A. Kitagawa, T. Kojima, T. Kuboki, M. Mihara, S. Miyazawa, S. Momota, Y. Morita, D. Nagae, Y. Nakamura, K. Namihira, R. Nishikiori, I. Nishizuka, T. Niwa, M. Ogura, Y. Ohkuma, T. Ohtsubo, S. Okada, J. Ohno, A. Ozawa, Y. Saito, T. Sakai, S. Sato, D. Sera, F. Suzuki, S. Suzuki, S. Suzuki, T. Suzuki, M. Taguchi, H. Uenishi, M. Wakabayashi, D. Watanabe, M. Yaguchi, S. Yasumoto, and T. Yamaguchi, Charge-changing interactions probing point-proton radii of nuclei, *Eur. Phys. J. (Web of Conferences)* 66 (2014) 03099/1-4, 査読有, DOI: 10.1051/epjconf/20146603099
- ③. M. Takechi, S. Suzuki, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Ohtsubo, M. Nagashima, T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Ozawa, 他 47 名, Search for halo nucleus in Mg isotopes through the measurements of reaction cross sections towards the vicinity of neutron drip line, *Eur. Phys. J. (Web of Conferences)* 66 (2014) 02101/1-4, 査読有, DOI: 10.1051/epjconf/20146602101
- ④. S. Momota, T. Yamaguchi, T. Suzuki, F. Suzuki, K. Sato, S. Yamaki, J. Kouno, A. Ozawa, R. Nishikiori, D. Nishimura, M. Fukuda, S. Suzuki, M. Nagashima, A. Kitagawa, S. Sato, Inelastic process observed in charge-exchange reactions of  $^{56}\text{Fe}$  at 500 MeV/u, *Eur. Phys. J. (Web of Conferences)* 66 (2014) 03062/1-4, 査読有, DOI: 10.1051/epjconf/20146603062
- ⑤. S. Suzuki, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Kuboki, M. Nagashima, T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Ozawa, 他 37 名, Measurements of interaction cross sections for  $^{22-35}\text{Na}$  isotopes, *Eur. Phys. J. (Web of Conferences)* 66 (2014) 03084/1-4, 査読有, DOI: 10.1051/epjconf/20146603084
- ⑥. M. Fukuda, D. Nishimura, S. Suzuki, M. Tanaka, M. Takechi, K. Iwamoto, S. Wakabayashi, M. Yaguchi, J. Ohno, Y. Morita, Y. Kamisho, M. Mihara, K. Matsuta, M. Nagashima, T. Ohtsubo, T. Izumikawa, T. Ogura, K. Abe, N. Kikukawa, T. Sakai, D. Sera, T. Suzuki, T. Yamaguchi, K. Sato, H. Furuki, S. Miyazawa, N. Ichihashi, J. Kohnno, S. Yamaki, A. Kitagawa, S. Sato, and S. Fukuda, Neutron halo in  $^{14}\text{B}$  studied via reaction cross sections, *Eur. Phys. J. (Web of Conferences)* 66 (2014) 02037/1-4, 査読有, DOI: 10.1051/epjconf/20146602037
- ⑦. S. Yamaki, T. Yamaguchi, J. Kouno, K. Sato, N. Ichihashi, T. Suzuki, 他 32 名, Systematic study of individual charge-changing cross sections of intermediate-energy secondary beams, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 317 (2013) 774-778, 査読有, DOI: 10.1016/j.nimb.2013.05.057
- ⑧. T. Moriguchi, A. Ozawa, S. Ishimoto, Y. Abe, M. Fukuda, I. Hachiuma, Y. Ishibashi, Y. Ito, T. Kuboki, M. Lantz, D. Nagae, K. Namihira, D. Nishimura, T. Ohtsubo, H. Ooishi, T. Suda, H. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, K. Tanaka, T. Yamaguchi, Density distribution of  $^{11}\text{Li}$  deduced from reaction cross-section measurements, *Phys. Rev. C* 88 (2013) 024610/1-7, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.024610
- ⑨. D. Kameda, T. Kubo, T. Ohnishi, K. Kusaka, A. Yoshida, K. Yoshida, M. Ohtake, N. Fukuda, H. Takeda, K. Tanaka, N. Inabe, Y. Yanagisawa, Y. Gono, H. Watanabe, H. Otsu, H. Baba, T. Ichihara, Y. Yamaguchi, M. Takechi, S. Nishimura, H. Ueno, A. Yoshimi, H. Sakurai, T. Motobayashi, T. Nakao, Y. Mizoi, M. Matsushita, K. Ieki, N. Kobayashi, K. Tanaka, Y. Kawada, N. Tanaka, S. Deguchi, Y. Satou, Y. Kondo, T. Nakamura, K. Yoshinaga, C. Ishii, H. Yoshii, Y. Miyashita, N. Uematsu, Y. Shiraki, T. Sumikama, J. Chiba, E. Ideguchi, A. Saito, T. Yamaguchi, I. Hachiuma, T. Suzuki, T. Moriguchi, A. Ozawa, T. Ohtsubo, M. A. Famiano, H. Geissel, A. S. Nettleton, O. B. Tarasov, D. Bazin, B. M. Sherrill, S. L. Manikonda, and J. A. Nolen, Observation of new microsecond isomers among fission products from in-flight fission of 345 MeV/nucleon  $^{238}\text{U}$ , *Phys. Rev. C* 86 (2012) 054319/1-21, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.86.054319
- ⑩. M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Kuboki, T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Ozawa, T. Moriguchi, H.

- Ooishi, D. Nagae, H. Suzuki, S. Suzuki, T. Izumikawa, T. Sumikama, M. Ishihara, H. Geissel, 他 36 名, Interaction cross sections for Ne isotopes towards the island of inversion and halo structures of  $^{29}\text{Ne}$  and  $^{31}\text{Ne}$ , Phys. Lett. B 707 (2012) 357-361, 査読有, DOI: 10.1016/j.physletb.2011.12.028
- ⑪. A. Ozawa, Y. Hashizume, Y. Aoki, K. Tanaka, T. Aiba, N. Aoi, H. Baba, B. A. Brown, M. Fukuda, K. Inafuku, N. Iwasa, T. Izumikawa, K. Kobayashi, M. Komuro, Y. Kondo, T. Kubo, M. Kurokawa, T. Matsuyama, S. Michimasa, T. Motobayashi, T. Nakabayashi, S. Nakajima, T. Nakamura, T. Ohtsubo, H. Sakurai, R. Shinoda, M. Shinohara, H. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, E. Takeshita, S. Takeuchi, Y. Togano, K. Yamada, T. Yamaguchi, T. Yasuno, and M. Yoshitake, One- and two-neutron removal reactions from  $^{19,20}\text{C}$  with a proton target, Phys. Rev. C 84 (2011) 064315/1-7, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.84.064315
- ⑫. T. Yamaguchi, I. Hachiuma, A. Kitagawa, K. Namihira, S. Sato, T. Suzuki, I. Tanihata, M. Fukuda, Scaling of charge-changing interaction cross sections and point-proton radii of neutron-rich carbon isotopes, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 032502/1-4, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.032502
- ⑬. T. Yamaguchi, K. Tanaka, T. Suzuki, A. Ozawa, T. Ohtsubo, 他 30 名, Nuclear reactions of  $^{19,20}\text{C}$  on a liquid hydrogen target measured with the superconducting TOF spectrometer, Nucl. Phys. A 864 (2011) 1-37, 査読有, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2011.05.095

[学会発表] (計 10 件)

- ① T. Yamaguchi, Charge-changing interactions probing point-proton radii of nuclei, 25th International Nuclear Physics Conference (INPC2013), 2013.6.2-7, Florence, Italy
- ② T. Yamaguchi, Systematic study on individual charge-changing cross sections of intermediate-energy secondary beams, XVI International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications (EMIS2012), 2012.12.2-7, Matsue, Japan
- ③ 河野準平「300MeV/u における陽子ピックアップ反応の系統的測定」日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学

- ④ 松永達「重イオンビーム用多層電極型イオンチェンバーにおけるエネルギー分解能のガス圧力依存性」日本物理学会 2014 年年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学
- ⑤ 山木さやか「核子当り 300MeV での中重核の荷電変化断面積の系統的測定」日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 14 日, 京都産業大学
- ⑥ 河野準平「HIMAC に於ける中間エネルギー核破砕片生成断面積の測定」日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 13 日, 京都産業大学
- ⑦ 佐藤加奈恵「陽子過剰 Fe 同位体の荷電変化断面積」日本物理学会第 67 回年年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.ne.phy.saitama-u.ac.jp/~yamaguti>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山口 貴之 (YAMAGUCHI, Takayuki)  
 埼玉大学・理工学研究科・准教授  
 研究者番号: 10375595

### (2) 研究協力者

鈴木 健 (SUZUKI, Takeshi)  
 埼玉大学・理工学研究科・教授  
 研究者番号: 10196842

佐藤 加奈恵 (SATO, Kanae)  
 埼玉大学・理工学研究科・大学院生

山木 さやか (YAMAKI, Sayaka)  
 埼玉大学・理工学研究科・大学院生

河野 準平 (Kouno, Junpei)  
 埼玉大学・理工学研究科・大学院生

松永 達 (MATSUNAGA, Satoshi)  
 埼玉大学・理工学研究科・大学院生