

令和元年6月18日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17678

研究課題名(和文) スキン構造理解のための不安定原子核の陽子及び中性子密度分布の研究

研究課題名(英文) Study of proton and nucleon density distributions of unstable nuclei for nuclear skin thickness

研究代表者

森口 哲朗 (Moriguchi, Tetsuaki)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号：10635890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：不安定原子核は、天然には存在せず、その多くは短寿命で安定原子核に崩壊してしまう。本研究ではそのような不安定原子核を加速器により人工的に生成させ、その密度分布を調べるために、核反応率に関する測定を行った。その結果、対象とした $^{17}\text{Ne}$ (陽子数10、中性子数7、半減期109 ms)に関して、実験値と理論的な予想値に不一致が見られた。不安定原子核の密度分布を精度良く導出すべく、他核種においても更なる検証が必要であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、不安定原子核と陽子との核反応率に関して、広いエネルギー範囲における実験データを取得した。本研究により、今まで見逃されてきたエネルギー領域において実験値と理論値の比較を行うことができ、両者に不一致があることがわかった。この原因を多方面から考察したことに本研究の学術的な意義があり、これは今後の不安定原子核の半径や密度分布といった大きさに関する実験研究に貢献するものと考えている。

研究成果の概要(英文)：Unstable nuclei cannot exist in nature and decay to stable nuclei within their finite life time. In this study, unstable nuclei were produced by using an accelerator, and experiments for their density distributions were performed. It was found that the experimental data of  $^{17}\text{Ne}$  (proton number 10, neutron number 7, life time 109 ms) was not consistent with theoretical predictions. This work suggests the necessity of more careful investigations for various nuclei to determine the nuclear size properties precisely.

研究分野：実験核物理学

キーワード：不安定原子核 密度分布 半径 反応断面積 固体水素標的

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スキンとは原子核の表面に現れる過剰の中性子もしくは陽子の層を指し、不安定原子核の特徴的な現象の一つとして知られている。スキンの研究は不安定原子核の構造の理解にとって重要であり、スキン領域が陽子もしくは中性子に偏っていることから、超新星爆発のメカニズムや中性子星の内部構造と関連する非対称核物質の状態方程式の決定にも貢献すると期待される。スキン厚は陽子密度分布半径  $r_p$  と中性子密度分布半径  $r_n$  の差として定義され、実験的にスキン厚を得るためには、 $r_p$  と  $r_n$  を別々に決める必要がある。

陽子と中性子を総称して核子と呼び、これまで、反応断面積  $\sigma_R$  (弾性散乱以外の全核反応率) のエネルギー依存性の測定は核子密度分布の導出にとって有効とされてきた。ここで、核子核子間の反応確率にはエネルギー領域によって「陽子 - 陽子」よりも「陽子 - 中性子」の方が高いという性質がある。この性質に注目すると、 $\sigma_R$  測定において陽子標的を用いることで、原子核内の陽子に比べ、中性子の方により高い感度を与えることができる。これは、原子核内の陽子密度と中性子密度を別々に導出できる可能性を示唆する。密度分布がわかれば半径を知ることができる。先行研究として、我々は固体水素標的を用いた  $\sigma_R$  測定から中性子ドリップライン核である  $^{11}\text{Li}$  の  $r_p$  と  $r_n$  を導出することができた [T. Moriguchi et al., Physical Review C, 88(2) 024610, 2013.]. しかし、不安定原子核における陽子標的を用いた  $\sigma_R$  の実験データは少なく、そのエネルギー依存性やスキン厚の導出に関する検討は必ずしも十分ではないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では不安定原子核のスキン構造の解明に向け、原子核内の陽子と中性子の密度分布の導出手法を確立すべく、固体水素標的を用いた  $\sigma_R$  のエネルギー依存性を調べた。特に、先行研究の発展として、本研究では陽子ドリップライン核である  $^{17}\text{Ne}$  と  $^{17}\text{F}$  に注目した。 $^{17}\text{Ne}$  は実験的にスキン厚が既知であり、本手法の妥当性を確認するのに適している。一方、 $^{17}\text{F}$  のスキン厚は実験的にまだ報告されていない。

### 3. 研究の方法

実験的に  $\sigma_R$  は反応標的への入射粒子数と反応標的から出射する未反応粒子数の比から求めることができる。そのため、実験では反応標的上流と下流での粒子識別とその粒子数を知ることが要求される。実験は放射線医学総合研究所のシンクロトロン加速器 HIMAC を用いて行った。180, 290, 400, 600 A MeV まで加速した  $^{20}\text{Ne}$  を生成標的 (Be 標的) に照射し、入射核破碎反応によって不安定原子核である  $^{17}\text{Ne}$  や  $^{17}\text{F}$  を生成した。図 1 に実験セットアップを示す。入射粒子を識別するために、固体水素標的上流にはエネルギー損失 ( $\Delta E$ ) を測定するためのシリコン半導体検出器 (Si) と飛行時間 (TOF) を測定するためのプラスチックシンチレータ (Pla) を二カ所に設置した。固体水素標的へのビームの入射位置を知るために二台の位置敏感型ガス検出器 PPAC を固体水素標的の直前に設置した。本実験では、エネルギーに応じて厚さの異なる二種類の固体水素標的 ( $\phi 50 \times 30 \text{ mm}^3$ ,  $\phi 50 \times 100 \text{ mm}^3$ ) を使い分けた。固体水素標的下流では、電離箱 (IC) で  $\Delta E$ 、NaI(Tl) シンチレーション検出器で全エネルギーを測定することで、固体水素標的から出射する粒子の識別を行った。

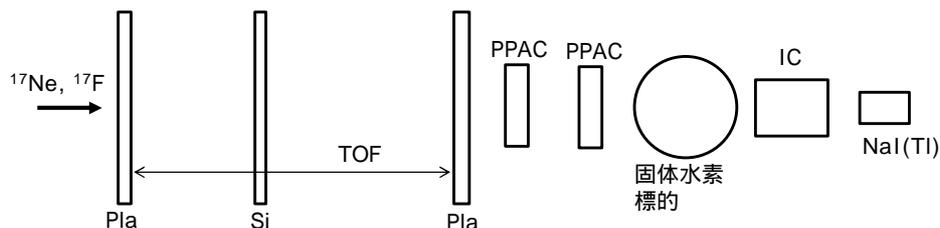


図 1 実験セットアップ。

図 2(a) は横軸に TOF、縦軸に  $\Delta E$  をとった二次元プロットで、432 A MeV の  $^{17}\text{Ne}$  における固体水素標的上流の粒子識別図を表す。 $^{17}\text{Ne}$  が他の粒子と良く分離できているのが確認できる。図 2(b) は上流で  $^{17}\text{Ne}$  を選んだときの固体水素標的下流における IC で得た  $\Delta E$  のスペクトルである。 $^{16}\text{Ne}$  が非束縛核であること、反応標的に中子が含まれないことから、図 2(b) のメインピークは未反応の  $^{17}\text{Ne}$  に対応する。反応イベントを示す C、N、O 同位体のピークも確認できる。また、 $^{17}\text{Ne}$  から陽子が 1 個抜けた  $^{16}\text{F}$  が非束縛核であることから F 同位体のピークは見えていない。上述の通り、固体水素標的上流と下流の  $^{17}\text{Ne}$  の数の比から  $\sigma_R$  を求めることができる。

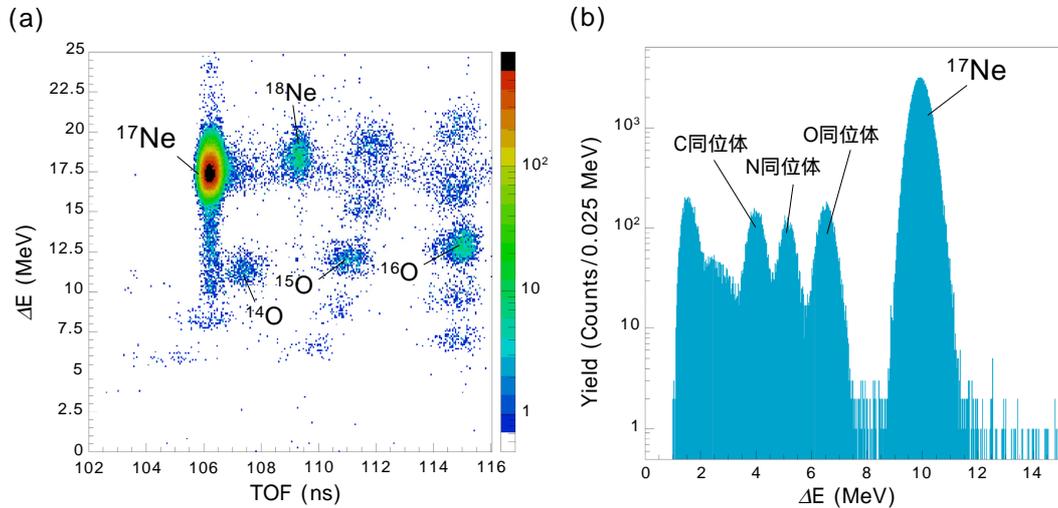


図 2 (a)固体水素標の上流の粒子識別図 (432A MeV の  $^{17}\text{Ne}$ )、(b)固体水素標の下流の IC で得たエネルギー損失  $\Delta E$ 。上流で  $^{17}\text{Ne}$  を選んでいる。

#### 4. 研究成果

図 3 は本研究で得られた  $^{17}\text{Ne}$  と  $^{17}\text{F}$  の固体水素標的を用いた  $\sigma_R$  のエネルギー依存性である。本研究から、 $^{17}\text{Ne}$  と  $^{17}\text{F}$  の広いエネルギー範囲における固体水素標的を用いた  $\sigma_R$  の実験データを得ることができた。特に、300~500A MeV の不安定原子核と陽子との  $\sigma_R$  の実験データはこれまでほとんど報告されていない。 $^{17}\text{F}$  の 100A MeV 以下のデータは解析中である。

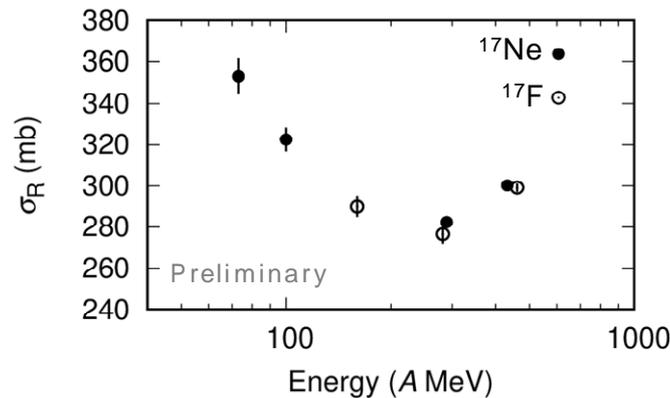


図 3 本実験で得られた固体水素標的を用いた  $^{17}\text{Ne}$  (●) と  $^{17}\text{F}$  (○) の反応断面積 ( $\sigma_R$ ) のエネルギー依存性。

$^{17}\text{Ne}$  に関して  $\sigma_R$  の実験値を理論モデルによる計算値と比較した。理論モデルには、中高エネルギー領域における代表的な原子核反応理論である Glauber モデルを採用した。図 4 (a) は  $^{17}\text{Ne}$  と陽子との  $\sigma_R$  である。これを見ると、100A MeV 以下では、理論値が実験値よりも大きい、逆に、300~500A MeV では理論値は大きく過小評価している。同様の傾向は、安定核である  $^{12}\text{C}$  でも見られる (図 4 (b))。このような原子核と陽子との衝突における  $\sigma_R$  に関して、実験値と理論値に不一致があることは実験データの不足によりこれまで議論されたことがなかった。この不一致に関して、本研究では、原子核内の核子の運動や理論モデルの不定性等の可能性を考察したが、今のところ明確な説明はできていない。スキン構造の解明に向け、原子核内の陽子と中性子の密度分布の導出手法を確立するために、不安定原子核だけでなく安定原子核においても、 $\sigma_R$  のエネルギー依存性に関してより詳しく調べる必要があると考えられる。

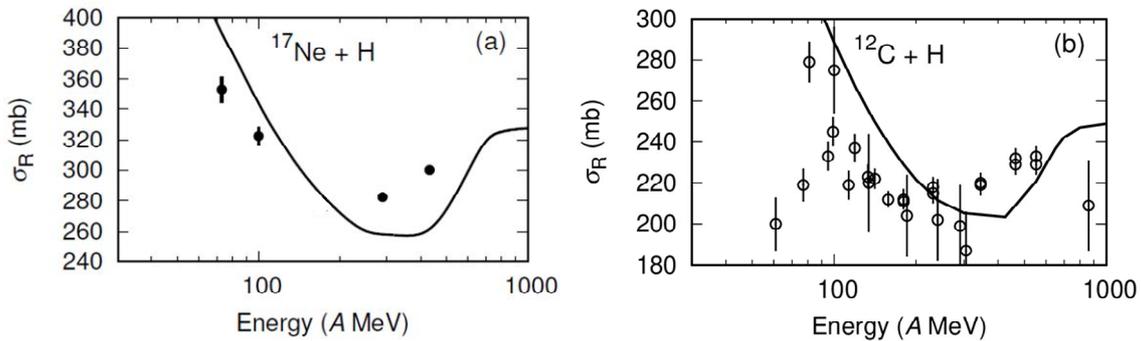


図4 (a)  $^{17}\text{Ne}$  及び (b)  $^{12}\text{C}$  と陽子との $\sigma_R$ 。実線は Glauber モデルの理論値。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

K.Sawahata, A.Ozawa, Y.Saito, Y.Abe, Y.Ichikawa, N.Inaba, Y.Ishibashi, A.Kitagawa, S.Matsunaga, T.Moriguchi, D.Nagae, S.Okada, S.Sato, S.Suzuki, T.Suzuki, Y.Takeuchi, T.Yamaguchi, J.Zenihiro. "Investigations of charge-changing processes for light proton-rich nuclei on carbon and solid-hydrogen targets", Nuclear Physics A, 961, 142-153, 2017, 査読有.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2017.02.012>

M. Takechi, M. Tanaka, A. Homma, Y. Tanaka, T. Suzuki, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Moriguchi(以下 53 名省略), "Determination of neutron skin thickness via measurements of  $\sigma_I$  and  $\sigma_{CC}$  of Ni isotopes", RIKEN Accelerator Progress Report 2016, 50, p61 (1 page), 2017, 査読有.

<https://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/APR050/APR050.html>

〔学会発表〕(計 4 件)

森口哲朗 他、「固体水素標的を用いた  $^{17}\text{Ne}$  の反応断面積測定」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019/03/14-17、九州大学伊都キャンパス(口頭)

T. Moriguchi et al., "Reaction cross-section measurement with a proton target", The workshop on "Proton and Neutron Densities and Radii in Nuclei and Related Topics", Beihang University, Peking, China, Dec. 17-19, 2018 (Oral)

森口哲朗 他、「固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発」、H29 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、2018/04/16-17、ホテルポートプラザ千葉(口頭)

森口哲朗 他、「固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発」、H28 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、2017/04/17-18、ホテルポートプラザ千葉(口頭)

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2)研究協力者

天野 将道 (AMANO Masamichi)

小沢 顕 (OZAWA Akira)

堀内 涉 (HORIUCHI Wataru)

阿部 康志 (ABE Yasushi)

藤居 朋也 (FUJII Tomoya)

景澤 怜央 (KAGESAWA Reo)  
上岡 大起 (KAMIOKA Daiki)  
北川 敦志 (KITAGAWA Atsushi)  
向井 もも (MUKAI Momo)  
長江 大輔 (NAGAE Daisuke)  
坂上 護 (SAKAUE Mamoru)  
佐藤 眞二 (SATO Shinji)  
鈴木 伸司 (SUZUKI Shinji)  
鈴木 健 (SUZUKI Takeshi)  
山口 貴之 (YAMAGUCHI Takayuki)  
横田 健次郎 (YOKOTA Kenjirou)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。