

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13947

研究課題名（和文）スズ同位体の中性子スキン厚で探る核半径異常増大の起源解明

研究課題名（英文）Elucidation of origin of unexpected nuclear-radius growth probed by neutron skin thickness of Sn isotopes

研究代表者

田中 聖臣（Tanaka, Masaomi）

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号：70838143

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は魔法数を跨ぐ領域で発現する原子核半径の増大現象の起源解明のために、二重魔法数核 ^{132}Sn を跨いでスズ同位体の中性子スキン厚の測定を目指すものである。中性子スキン厚は物質半径と陽子分布半径の差から導出されるが、Sn同位体では実験収量が極めて乏しい $^{135}\text{-}^{137}\text{Sn}$ の陽子分布半径は現在まで未測定である。そこで、本研究では荷電変化断面積による陽子分布半径の導出法を新たに確立し、Te同位体でのテスト実験により手法の妥当性を検証した。残念ながら当該期間中には加速器施設での実験割り当てがなされなかったためにSn同位体の実験実施が叶わなかったものの、検出器等の準備は整えることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陽子分布半径は原子核の基本的な物理量であり、不安定原子核に対する測定はレーザー分光法が主に行われてきた。しかし、適したビーム生成の収量の観点や適用核種の化学的性質に依存することから、極めて中性子過剰な原子核の適用は容易ではなかった。本研究で確立した荷電変化断面積を利用した陽子分布半径導出法は収量が乏しい核種にも適用可能であるため、超中性子過剰核に対する測定が本研究成果によって切り開かれる。このことにより、超中性子過剰核の中性子スキン厚の実験的決定にも取り組むことができ、原子核構造の議論や元素合成過程に必要な不可欠な核物質の状態方程式の理解への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to measure the neutron skin thickness of Sn isotopes across the double magic number nucleus ^{132}Sn to elucidate the origin of the unexpected nuclear-radius enhancement occurring across the magic number. The neutron skin thickness can be extracted from the difference between the matter and point-proton radius. In Sn isotopes, the point-proton radii of $^{135}\text{-}^{137}\text{Sn}$ has not been measured yet due to their extremely low experimental yield. In this study, we established a new method to derive point-proton radii from charge change cross sections, and verified its validity by the test experiment in neighboring Te isotopes. Unfortunately, the experiment for Sn isotopes could not be performed because the machine time was not allocated at the accelerator facility during the period of this project, but we prepared experimental equipments and are ready to perform.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：不安定原子核 中性子スキン

1. 研究開始当初の背景

原子核は原子と同様の殻構造をもち、原子核の性質は殻構造に基づいて体系的に説明されている。したがって、殻構造によって現れる性質である魔法数（原子における貴ガスに相当）と原子核の諸性質の関係を明らかにすることは原子核物理の大きな研究テーマである。

最近、魔法数と原子核の大きさの関係が大きな注目を集めている。直近 10 年間で、核内の陽子分布の広がりを表す荷電半径の測定が魔法数近傍の重要領域で精力的に行われている。その結果、Ca 同位体では中性子魔法数 $N=28$ の ^{48}Ca よりも中性子過剰な領域において荷電半径の異常な増大が見られた（図 1 左・x 印）[1]。しかし、この異常増大のメカニズムの完全な理解は得られていない。

一方この問題に対して、中性子の影響も含めた原子核全体の大きさを表す物質半径の観点から議論するために、Ca 同位体に対する物質半径測定したところ、 ^{48}Ca を超えた領域の増大は荷電半径に比べて物質半径の方がはるかに大きいことがわかった（図 1 左・●印）。さらに、物質半径と荷電半径の差から中性子スキン厚（図 1 挿入図）を導出すると、中性子スキン厚も ^{48}Ca を超えた領域で異常に増大することが明らかとなった。このことから、半径異常増大現象では核表面中性子スキンの急激な変化が主役であり、中性子スキン自身、あるいはその情報を含む物質半径の測定がより重要である手がかりを得た [2]。

Sn 同位体でも中性子魔法数 $N=82$ である ^{132}Sn を超えた領域で同様の異常増大が発見されている [3]。この現象の起源として現在のところ最も有力な候補は、典型的な相互作用では考慮されていない「特殊な対相関相互作用 [4]」あるいは「3 核子間スピン軌道相互作用 [5]」が挙げられる。これら 2 つの理論計算は、中性子魔法数 $N=82$ を境とした Sn 同位体の荷電半径の傾向において異なるトレンドを示す。原子核に普遍的に現れる当該現象を理解するために、Ca 同位体に加えて Sn 同位体でも中性子の影響を含む物質半径や中性子スキン厚での議論が望まれる。

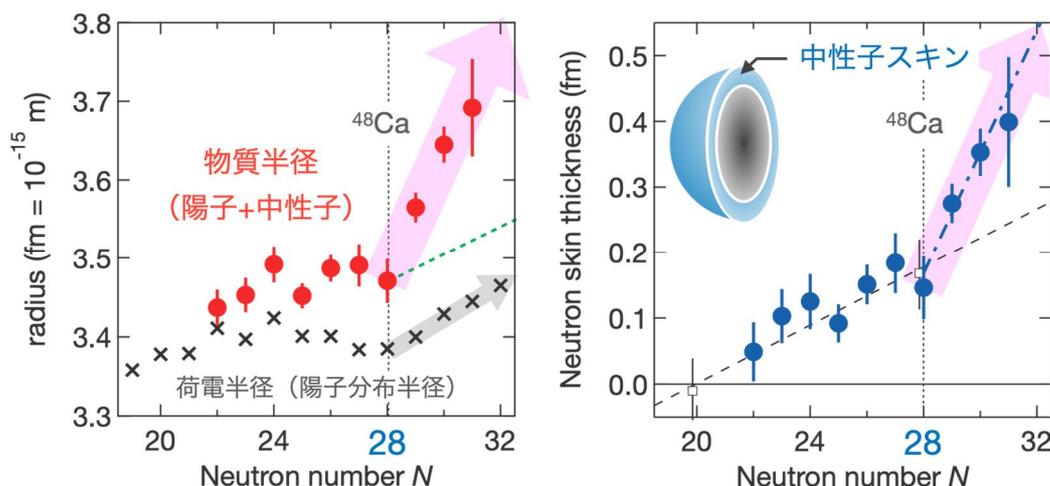


図 1 | Ca 同位体の (左) 荷電半径 (陽子分布半径) [1] と物質半径 [2]、および (右) 中性子スキン厚 [2]。

2. 研究の目的

本研究の目的は「中性子魔法数 82 を跨いで Sn 同位体の中性子スキン厚と物質半径の系統的变化を実験的に決定することで、核半径異常増大現象のメカニズムの理解を目指す」ことである。

3. 研究の方法

中性子魔法数 $N = 82$ での半径増大の程度を明確に判別するためには $N = 82$ からなるべく遠く離れた Sn 同位体まで測定する必要がある。物質半径は相互作用断面積を測定することで実験収量の少ない不安定 Sn 同位体に対しても実験の遂行が可能である (Ca 同位体に対する先行研究でも用いた手法)。しかし、Sn 同位体の荷電半径は ^{134}Sn ($N = 84$) までしか測定されていない [3]。これは荷電半径測定に適した低速高品質ビームの生成が難しいことが原因として考えられる。このことを踏まえて本研究の要点は以下の 2 点となる。

A) **実験収量の低い不安定核に対しても荷電半径が導出可能な手法の開発**

この点については、相互作用断面積と類似の物理量である荷電変化断面積に着目した。この物理量は原子番号が変化する反応の総確率を表し、断面積が大きく低収量の不安定核ビームに対しても適用可能である。一方で荷電変化断面積と荷電半径の関係については完全に明らかになっていないため両者の相関を検証する必要がある。

B) **開発した手法を用いて Sn 同位体の物質半径・中性子スキン厚の測定**

上記で開発される荷電変化断面積と相互作用断面積を同時に測定可能な実験セットアップを構築し、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) で $^{114-137}\text{Sn}$ 同位体の測定を行う。

4. 研究成果

A) 荷電半径がアイソトープシフト法で測定

されている Ca 同位体について理研 RIBF で荷電変化断面積を測定した。荷電半径と荷電変化断面積の関係は、物質半径と相互作用断面積の関係を記述する Glauber model 計算に対して、入射核の陽子分布のみを考慮、中性子分布を無視することで上手く記述できることが期待される (図 2 中赤線・Glauber-model-like 計算)。Ca 同位体において測定結果と Glauber-model-like 計算を比較すると、安定核近傍では計算値は実験値を過小評価し、中性子過剰領域では計算値と実験値は一致する傾向があった。この傾向を説明するために、Glauber-model-like 計算に対して、これまで考慮されていなかった「入射核の中性子が剥離した後に荷電粒子が蒸発することで

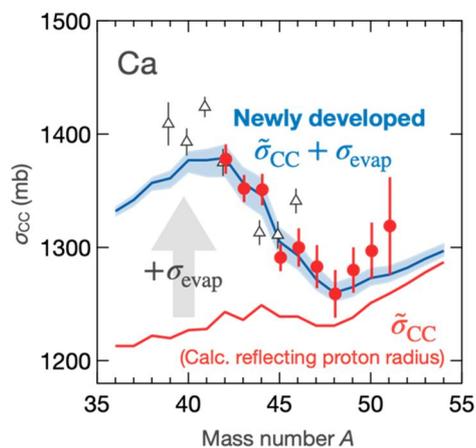


図 2 | Ca 同位体の荷電変化断面積。赤線が入射核の荷電半径のみを考慮した計算結果。青線が新たに開発した計算モデルで、入射核の中性子が剥がれた後に荷電粒子蒸発が起こり原子番号変化する反応を考慮。安定核近傍では赤線に対して青線が大きく増大している。

原子番号変化が起こる過程」を導入することで、実験値をうまく再現することができた (図 2 中青線)。また、Ca 同位体だけに限らず、C 同位体から Fe 同位体までを一貫して説明できることがわかり、これは荷電変化断面積と荷電半径の関係に対して物理背景を理解した上で記述できる枠組みを得たことになる。この成果を 2022 年に Physical Review C にて論文出版を行なった [6]。また、構築したモデルの高度化のために、量研 HIMAC において $^{40,44,48}\text{Ca}$, $^{50}\text{Ti} + ^1\text{H}$, ^{12}C の荷電変化断面積のエネルギー依存性を 100-600 MeV/核子のエネルギーで系統的に測定した。現在はデータ解析を進めているところである。

さらに、Sn 同位体に対する測定に向けて、近傍同位体である Te 同位体の荷電半径既知核に対して荷電変化断面積測定を量研 HIMAC にて行い、新たに確立したモデルが Te 同位体

の測定値も矛盾なく説明することを確認した(図 3c)。

B) 理研 RI ビームファクトリーでの相互作用断面積と荷電変化断面積の同時測定を行うために、反応標的を設置する F8 焦点面の実験セットアップを最適化した(図 4)。荷電変化断面積を同時に測定するためには、イオンチェンバーによるエネルギー損失測定に加えて標的直下 1 m での飛行時間測定による原子番号の同定が必須となる。この要求を満たすために超高速応答のシンチレーター(Eligen EJ232Q)と光電子増倍管(浜松 R13089)を組み合わせたプラスチックシンチレーター検出器 2 台を用いた。このシステムの原子番号識別能力の評価のために、量研 HIMAC における Te 同位体の荷電変化断面積測定で実際に運用し、このシステムが Sn 同位体近傍でも十分な原子番号識別能力を有する結果を得た(図 3ab)。

Sn 同位体の実験は理研 RIBF において既に採択済みで、実験準備も概ね完了している。ただし、ビームタイムの割り当てを要求していたが、加速器の不具合による長期の運転停止などの影響もあり期間内に実験を行うことが叶わなかった。加速器の復旧直後の 2024 年 5 月(本科研費課題の実施期間直後)に、Sn 同位体の実験に先駆けて Ca 同位体 48-55Ca の相互作用断面積と荷電変化断面積の同時測定をついに実施することができた。準備した測定システムも概ね想定通りに機能し、データ解析・成果発表を急ぎたい。Sn 同位体の実験についてもなるべく早くビームタイムが割り当てられるよう備えている。

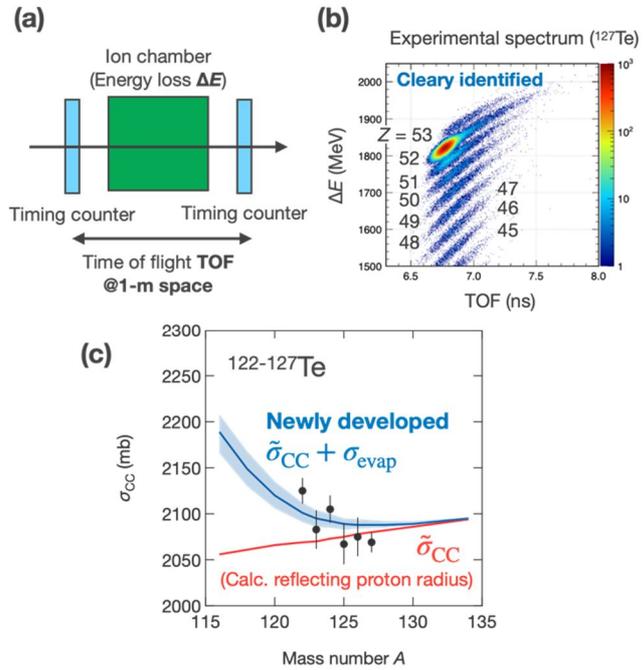


図 3 | Te 同位体 ($Z = 52$) の測定における (a) 原子番号識別システムのセットアップ (b) 原子番号識別スペクトル (c) 実験結果。青線が新たに開発した計算モデル。

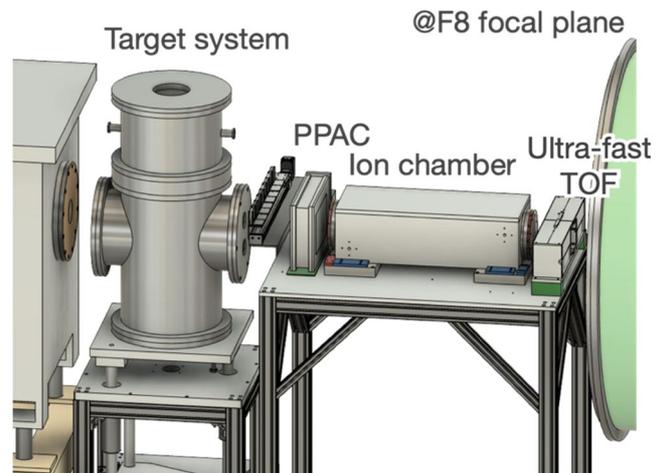


図 4 | F8 焦点面の実験セットアップのデザイン

参考文献

- [1] R. F. Garcia Ruiz *et al.*, Nature Phys., **12** 594 (2016).
- [2] M. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 102501 (2020).
- [3] C. Gorges *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 192502 (2019).
- [4] P.-G. Reinhard and W. Nazarewicz, PRC **95**, 064328 (2017).
- [5] H. Nakada and T. Inakura, PRC **101**, 061301(R) (2015).

[6] M. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. C **106**, 014617 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tanaka M., Takechi M., Homma A., Prochazka A., Fukuda M., Nishimura D., Suzuki T., Moriguchi T., 他60名	4. 巻 106
2. 論文標題 Charge-changing cross sections for 42-51Ca and effect of charged-particle evaporation induced by neutron-removal reactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.106.014617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Horiuchi W., Inakura T., Michimasa S., Tanaka M.	4. 巻 107
2. 論文標題 Enlarged deformation region in neutron-rich Zr isotopes promoted by the second intruder orbit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.107.L041304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukutome M., Fukuda M., Tanaka M., Nishimura D., Takechi M., Ohtsubo T., Mihara M., Matsuta K., Suzuki T., Yamaguchi T., Izumikawa T., Sato S., Fukuda S., Kitagawa A., Takahashi H., Kimura Y., Sugawara S., Takatsu K., Takayama G.	4. 巻 63
2. 論文標題 One-Neutron Removal Cross Sections for 16N Isomeric State	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00601-021-01721-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Fukutome M., Fukuda M., Tanaka M., Nishimura D., Takechi M., Ohtsubo T., Mihara M., Matsuta K., Suzuki T., Yamaguchi T., Izumikawa T., Sato S., Fukuda S., Kitagawa A., Takahashi H., Kimura Y., Sugawara S., Takatsu K., Takayama G.	4. 巻 63
2. 論文標題 One-Neutron Removal Cross Sections for ^{16}N Isomeric State	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 37-1 ~ 37-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00601-021-01721-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Masaomi Tanaka
2. 発表標題 Charge-changing cross section measurements for Ca isotopes and new method to extract point-proton radius of exotic unstable nucleus in medium-mass region
3. 学会等名 International Nuclear Physics Conference 2022 (INPC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中聖臣 他
2. 発表標題 Te同位体の荷電変化反応における荷電粒子蒸発効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋弘幸 他
2. 発表標題 重イオンビームの粒子識別に用いるイオンチェンバーの性能評価()
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留美樹 他
2. 発表標題 108-124Snの荷電変化断面積測定と陽子分布半径
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口法秀 他
2. 発表標題 重い標的核に対する ^{12}C の反応断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高山元 他
2. 発表標題 重イオン二次ビームを用いた原子核の陽子及び中性子分布半径の測定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口法秀 他
2. 発表標題 重い標的核に対する ^{12}C の反応断面積測定()
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高山元 他
2. 発表標題 Be同位体の陽子及び中性子分布半径の導出に向けた固体水素および重水素標的を用いた断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢野朝陽 他
2. 発表標題 反応断面積測定のための固体重水素標的の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇根千晶 他
2. 発表標題 BigRIPSにおける超高速プラスチックシンチレーション検出器を用いた時間測定システムの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------