

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17683

研究課題名（和文）パリティ移行核反応によるニュートリノレス二重ベータ崩壊の核行列要素の検証

研究課題名（英文）Study of nuclear matrix elements of neutrinoless double-beta decay by parity-transfer reactions

研究代表者

堂園 昌伯 (Dozono, Masanori)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任助教

研究者番号：60616259

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートリノ質量の絶対値を決める目的で、ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊の探索が世界各地で行われている。崩壊寿命からニュートリノ質量を導くためには原子核の核行列要素の理論計算が必須であるが、精度向上のため、二重ベータ崩壊について、中間核のスピンドイポル2-状態を経由する核行列要素成分を実験的に検証することが望まれる。本研究では2-遷移強度分布の効率的な測定を可能とするために、新反応「パリティ移行核反応」を着想し、そのための測定手法を確立した。また、実証実験を行った結果、新反応の2-遷移測定に対する有効性が示された。これにより、二重ベータ崩壊核の2-遷移測定に目処がついたといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立した手法により、二重ベータ崩壊核のスピンドイポル2-遷移の実態が明らかになれば、核行列要素の理論計算に対して実験的に大きな指標を与え、理論モデルの精緻化を促すと予想される。核行列要素の予言精度向上は二重ベータ崩壊寿命から導出されるニュートリノ質量の精度向上に直結するため、本研究はニュートリノの性質解明に対して大きな意義を持つ。また、本研究で開発した測定手法は、放射性廃棄物の核変換に必要な核反応の基礎データの取得実験にも用いられるなど、社会的な貢献もみせている。

研究成果の概要（英文）：A new method, parity-transfer reaction, has been established to study spin-dipole 2- excitations in nuclei, which is important for calibrating nuclear matrix elements of neutrinoless double-beta decays. The first proof-of-principle experiment has demonstrated that the parity-transfer reaction is quite an efficient probe to 2- states in nuclei. Studies of spin-dipole 2- excitations in double-beta decay nuclei are now feasible with the experimental method established in this work.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：スピンドイポル遷移 二重ベータ崩壊 ニュートリノレス二重ベータ崩壊 重イオン荷電交換反応

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スーパーカミオカンデ実験グループなどが観測したニュートリノ振動は、ニュートリノが小さな質量をもつことを示し、素粒子標準理論を超える新しい物理があることを我々に教えてくれた。ただし、ニュートリノ振動から質量の絶対値を決めるのは難しく、それを可能とする現象として二重ベータ崩壊が注目されている。このうち、ニュートリノ放出を伴わないニュートリノレス二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) が見つければ、その半減期からニュートリノ質量が決まることから、世界各地で  $0\nu\beta\beta$  崩壊事象の探索が進行中である。

一方で、崩壊寿命からニュートリノ質量を得るには核行列要素 ( $M^{0\nu}$ ) の理論計算が必須である。しかし、 $M^{0\nu}$  の理論計算がニュートリノ質量を導くほどに十分な精度を持つためには、いくつかの解決すべき問題がある。特に、 $M^{0\nu}$  に最も大きく寄与する、中間核のスピン双極子  $2^-$  [SD( $2^-$ )] 状態を経由する成分が大幅に過剰評価されるという問題が指摘されている。 $M^{0\nu}$  予言の信頼度を高めるためには、その過剰評価の元になっている SD( $2^-$ ) 遷移行列を検証し、裏にある核内相関のモデルを精緻化することが肝要である。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、二重ベータ崩壊核において、 $M^{0\nu}$  に最も大きく寄与する SD( $2^-$ ) 遷移の強度分布を測定することである。これにより、 $M^{0\nu}$  の理論的記述の妥当性を検証し、 $M^{0\nu}$  予言の信頼度を高める。測定には、SD( $2^-$ ) 遷移を選択的に励起できる反応手法が必須である。そこで、反応手法の確立および実現を本研究の主目的に設定した。具体的には、新手法「パリティ移行核反応」を二重ベータ崩壊核へ適用することを想定したうえで、必要な実験セットアップを開発する。また、 $^{12}\text{C}$  標的を用いた予備的実験を行い、パリティ移行核反応の SD( $2^-$ ) 遷移測定に対する有効性を調べる。

3. 研究の方法

図1に本研究方法を示す。二重ベータ崩壊は親核から娘核への崩壊であるが、 $M^{0\nu}$  では中間核の  $2^-$  状態を経由する成分が大きく関わる。そこで、親核に対しては  $\beta^-$  型、娘核に対しては  $\beta^+$  型、二種類の荷電交換反応を用いることにより、両方向から中間核の SD( $2^-$ ) 状態を測定する。

SD( $2^-$ ) 状態を励起するための荷電交換反応であるが、従来の反応では他の SD 遷移 ( $0^-$  や  $1^-$ ) が物理的背景事象となっており、 $2^-$  遷移のみ抽出して測定することはできない。そこで我々は新手法「パリティ移行核反応」を着想した(図2参照)。パリティ移行核反応は、プローブの原子核がパリティのみを移行する反応 ( $0^+ \rightarrow 0^+$ ) で、非自然パリティ状態 ( $0^-, 1^+, 2^-, \dots$ ) のみを選択的に励起することができる。また、これらの状態は軌道角運動量遷移  $\Delta L_R$  が異なるため、反応の角度分布を測定することで、各々の状態を同定することができる。これらの特徴から、パリティ移行核反応は SD( $2^-$ ) 遷移の測定に有効なプローブといえる。

この着想を得て、我々は、パリティ移行核反応として、 $\beta^-$  型の ( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{N}(0^-)$ ) 反応と  $\beta^+$  型の ( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-)$ ) 反応を用いた実験を計画した。実験は、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) で得られる核子あたり 250 MeV の  $^{16}\text{O}$  ビームと、高分解能 SHARAQ スペクトロメータを用いて行う。このビームエネルギーは反応機構が単純という特徴を持ち、SD( $2^-$ ) 遷移を抽出するのに最適なエネルギーである。

このような測定を実現するためには、従来の SHARAQ スペクトロメータの粒子検出システムに新たな要素を組み込み、測定手法を確立する必要がある。また本測定の前に、パリティ移行核反応の SD( $2^-$ ) 遷移測定に対する有効性を実証することが肝要である。そこで、以下の開発、実験を行った。

(1) パリティ移行核反応の測定手法の確立

- ①  $\beta^+$  型 ( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-)$ ) 反応測定のための陽子-重イオン同時測定モードの開発
- ②  $\beta^-$  型 ( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{N}(0^-)$ ) 反応測定のためのアクティブストッパーの開発

(2)  $^{12}\text{C}$  ( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-)$ ) 反応によるパリティ移行核反応実証実験

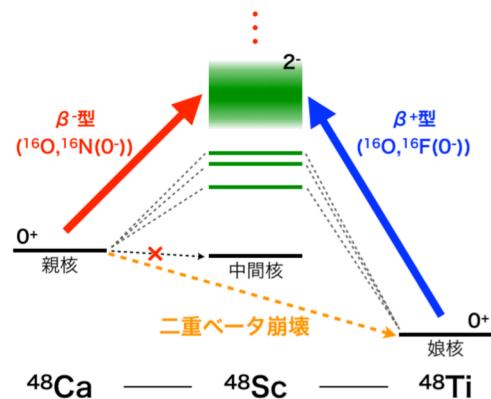


図1: 研究方法

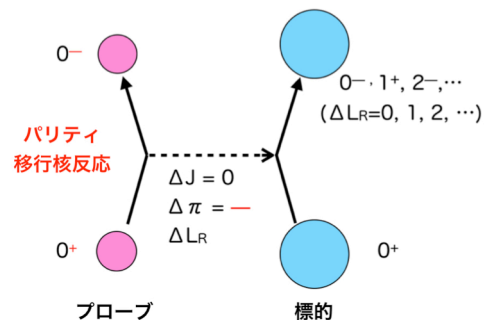


図2: パリティ移行核反応

#### 4. 研究成果

##### (1) パリティ移行核反応の測定手法の確立

###### ① $\beta^+$ 型 ( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-)$ ) 反応測定のための陽子-重イオン同時測定モードの開発

( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-)$ ) 反応により放出される  $^{16}\text{F}$  は非束縛粒子で、陽子と  $^{15}\text{O}$  粒子に崩壊するため、これら 2 つの粒子を同時に検出する必要がある。運動量アクセプタンスの小さい SHARAQ スペクトロメータでこれを実現するために、新たなイオン光学モード(陽子-重イオン同時測定モード)を開発した。図 3 に測定セットアップを示す。新モードでは SHARAQ を 2 つのスペクトロメータとして扱い、2 粒子をそれぞれ異なる焦点面(S1 および S2)で検出する。測定した 2 粒子の不変質量を組むことで、 $^{16}\text{F}(0^-)$  を同定することが可能である。図 4 に不変質量法から得られた 2 粒子間の相対エネルギー分布を示す。相対エネルギー分解能 100 keV (FWHM) を達成し、 $^{16}\text{F}(0^-)$  状態を他の状態と分離することに成功した。これにより、( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-)$ ) 反応の測定手法を確立した。以上の結果を国際的雑誌に発表した。また、新イオン光学モードの大きな運動量アクセプタンスを活かして、原子核反応から生成された反応生成物の粒子識別を行うなど、確立した手法は本研究以外の研究にも大きな波及効果を見せた。

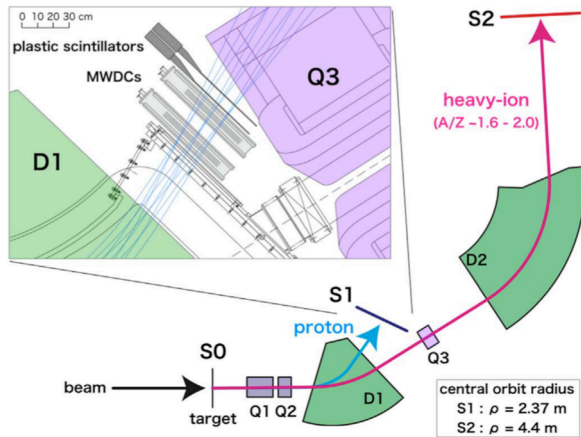


図 3: 陽子-重イオン同時測定モード

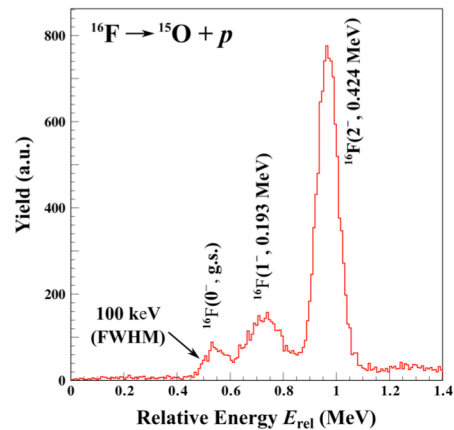


図 4:  $^{15}\text{O}$ -陽子間の相対エネルギー分布

###### ② $\beta^-$ 型 ( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{N}(0^-)$ ) 反応測定のためのアクティブストッパーの開発

( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{N}(0^-)$ ) 反応により放出される  $^{16}\text{N}(0^-)$  粒子はアイソマー状態であり、半減期 5.25  $\mu\text{s}$  でエネルギー 120 keV の遅延ガンマ線を放出する。この遅延ガンマ線を高効率で測定し、 $^{16}\text{N}(0^-)$  アイソマーを同定することが、( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{N}(0^-)$ ) 反応測定の必要条件となる。アイソマー同定の一般的な手法としては、アイソマー粒子をストッパーとなる物質に埋め込み、そこから放出される遅延ガンマ線を周辺に配置したガンマ線検出器で検出する、ということが考えられる。しかし、 $^{16}\text{N}(0^-)$  からのガンマ線の場合エネルギーが低いため、ストッパーでの吸収による損失が大きいという問題があり、また、大立体角を達成するために多数のガンマ線検出器を配置する必要がある。これらの問題を回避するために、ストッパーの役割も兼ね備えたガンマ線検出器、アクティブストッパーを開発した。アクティブストッパーでは、アイソマー粒子埋め込みにより誘起されるバックグラウンド信号を速やかに減衰させる必要があるため、時間応答が早く、かつ高密度な CeBr<sub>3</sub> シンチレータを採用し、この素材をベースに、MPPC や荷電時間変換回路 (QTC) を組み合わせた検出器系を構築した。放医研 HIMAC にて  $^{16}\text{N}(0^-)$  アイソマービームを用いて検出器の性能評価の実験を行ったところ、約 80% という高効率で遅延ガンマ線を検出することに成功した (図 5 参照)。これは従来のストッパーと検出器が独立したシステムと比べて数倍から 10 倍の効率であり、アクティブストッパーの有効性を如実に示す結果である。これにより、( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{N}(0^-)$ ) 反応の測定手法を確立した。現在、結果をまとめ、技術論文への投稿の準備を進めている。

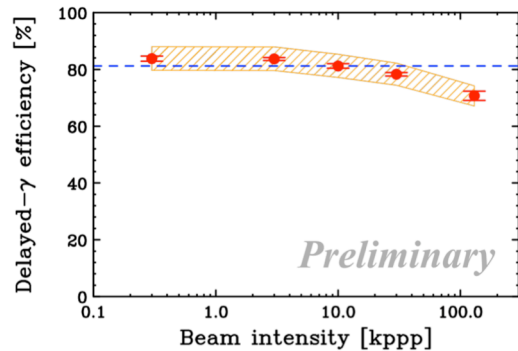


図 5: アクティブストッパーで得られた  $^{16}\text{N}(0^-)$  遅延ガンマ線の検出効率

(2)  $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-))$  反応によるパリティ移行核反応実証実験

パリティ移行核反応実験の第1弾として、 $(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-))$  反応を $^{12}\text{C}$ 標的に適用し、パリティ移行核反応のSD(2 $^-$ )遷移測定に対する有効性を実証するための実験を行った。図6に実験結果を示す。 $^{12}\text{B}$ の励起エネルギー分布(図6左)において、既知の状態として、 $1^+(E_x = 0.0\text{ MeV})$ 、 $2^-(4.4\text{ MeV})$ 、 $0^-(9.3\text{ MeV})$ が見えている。これらの状態がこれだけ強く強調されることは、これまでの他の反応ではなかったことで、今回の反応が非自然パリティ状態への強い選択性を持つことを示している。各状態の角度分布(図6右)はスピン・パリティにより振動パターンが異なることが分かる。この特徴を利用すれば、角度分布から未知の2 $^-$ 状態を同定することも可能である。これらの特徴により、パリティ移行核反応がSD(2 $^-$ )遷移の測定に有効なプローブであることを実証した。現在、結果をまとめ、論文への投稿の準備を進めている。

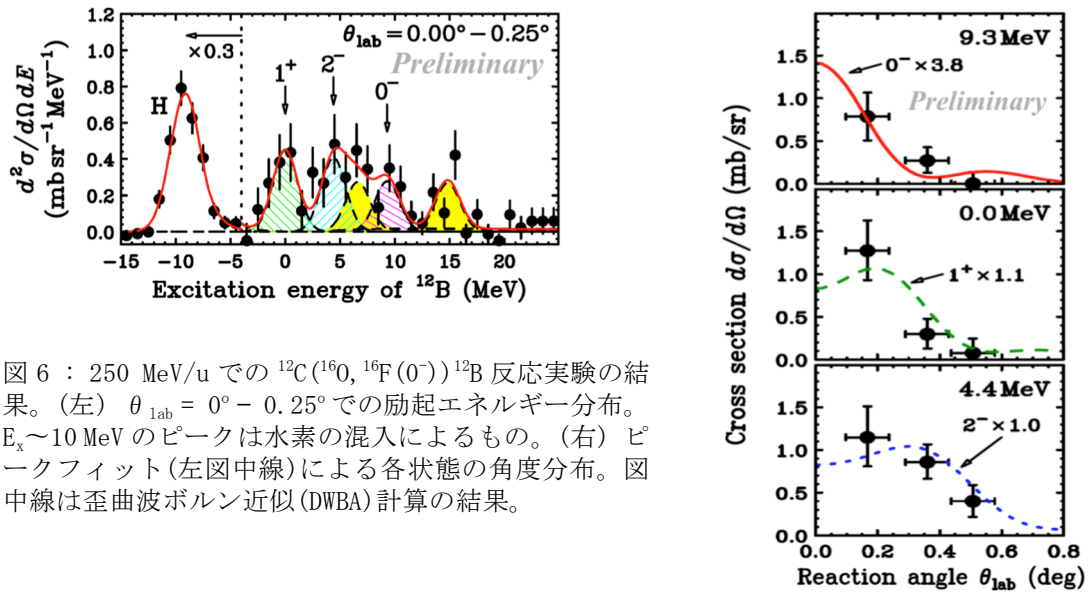


図6：250 MeV/uでの $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}(0^-))^{12}\text{B}$ 反応実験の結果。(左)  $\theta_{\text{lab}} = 0^\circ - 0.25^\circ$ での励起エネルギー分布。 $E_x \sim 10\text{ MeV}$ のピークは水素の混入によるもの。(右)ピークフィット(左図中線)による各状態の角度分布。図中線は歪曲波ボルン近似(DWBA)計算の結果。

以上により、本研究の主目的として設定した、パリティ移行核反応の、(1)測定手法の確立、(2)SD(2 $^-$ )遷移測定に対する有効性の実証、を達成した。これにより、最終目標である二重ベータ崩壊核のSD(2 $^-$ )遷移測定に目処がついたといえる。本研究で得られた成果を足がかりに、今後、二重ベータ崩壊核の研究を展開していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 M. Dozono et al.	4. 巻 52
2. 論文標題 Proton- and deuteron-induced reactions on 107Pd and 93Zr at 20-30 MeV/nucleon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report 2018	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 M. Dozono et al.	4. 巻 830
2. 論文標題 Separated flow operation of the SHARQA spectrometer for in-flight proton-decay experiments	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A	6. 最初と最後の頁 233-242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.084">https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.084</a>	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 Michimasa Shin' ichiro, Dozono Masanori, et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 OEDO, the energy-degrading beamline at RI Beam Factory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/ptep/ptz007">https://doi.org/10.1093/ptep/ptz007</a>	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 -
1. 著者名 Hwang Jongwon, Dozono Masanori, et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 Angle-tunable wedge degrader for an energy-degrading RI beamline	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043D02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1093/ptep/ptz028">https://doi.org/10.1093/ptep/ptz028</a>	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 -

1. 著者名 M. Dozono et al.	4. 巻 51
2. 論文標題 Proton- and deuteron-induced reactions on 107Pd and 93Zr at 20-30 MeV/nucleon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report 2017	6. 最初と最後の頁 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 M. Dozono et al.	4. 巻 97
2. 論文標題 Proton- and deuteron-induced reactions on 107Pd at 20-30 MeV/u	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CNS Annual Report 2017	6. 最初と最後の頁 3-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 M. Dozono et al.	4. 巻 50
2. 論文標題 Parity-transfer (160,16F(0-)) reaction to study spin-dipole 0- states	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report 2016	6. 最初と最後の頁 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 M. Dozono et al.	4. 巻 50
2. 論文標題 Separated flow operation of the SHARAQ spectrometer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report 2016	6. 最初と最後の頁 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 M. Dozono et al.	4. 巻 96
2. 論文標題 Development of an active stopper for isomer tagging	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 CNS Annual Report	6. 最初と最後の頁 61-62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 アイソマー同定のためのアクティブストッパーの開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 Proton-induced reactions on $^{107}\text{Pd}$ at around 30MeV/nucleon: First result using slowed-down RI beams at OEDO
3. 学会等名 International Nuclear Physics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Dozono
2. 発表標題 Nuclear reaction study for long-lived fission products in nuclear waste: Proton- and deuteron-induced reactions on $^{107}\text{Pd}$ and $^{93}\text{Zr}$ at 20-30 MeV/u
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 低速RIビームを用いた $^{107}\text{Pd}$ の陽子・重陽子誘起反応測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 アイソマー同定のための新しいガンマ線手法の開発
3. 学会等名 平成28年度HIMAC共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 Separated flow operation of the SHARAQ spectrometer for in-flight proton-decay experiments
3. 学会等名 International Symposium on Modern Technique and its Outlook in Heavy Ion Science (MOT016)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 Parity-transfer ( $^{160,16}\text{F}(0^-)$ ) reaction for study of spin-dipole 0- mode
3. 学会等名 The 9th international Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB) 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年



1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 不安定核で切り拓くスピン・アイソスピン応答研究
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 SHARQAスペクトロメータにおける陽子-重イオン同時測定モードの開発
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 The parity-transfer (160,16F) reaction for studies of spin-dipole excitations in nuclei
3. 学会等名 International Workshop on Neutrino Nuclear Responses for Double Beta Decays and Astro-Neutrino Interactions (NNR16)
4. 発表年 2016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
---------	---------------------------	-----------------------	----