

**平成27年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書**  
**〔追跡評価用〕**

平成27年 4月24日現在

<b>研究代表者 氏名</b>	酒井 英行	<b>所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)</b>	東京大学・大学院理学系研究科・教授
<b>研究課題名</b>	発熱型荷電交換反応による時間的領域でのスピン・アイソスピン応答		
<b>課題番号</b>	17002003		
<b>研究組織 (研究期間終了時)</b>	研究代表者 酒井 英行（東京大学・大学院理学系研究科・教授） 研究分担者 矢向謙太郎（東京大学・大学院理学系研究科・助教）		

**【補助金交付額】**

年度	直接経費
平成17年度	36,900 千円
平成18年度	184,333 千円
平成19年度	188,351 千円
平成20年度	45,030 千円
平成21年度	15,100 千円
総計	469,714 千円

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

## (1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

研究の目的は、不安定核ビーム(RI ビーム)が持つ他に類の無い特質を活かした発熱型荷電交換反応を用い、これまで未開拓であった時間的運動学領域でのスピン・アイソスピン応答の研究を推進するというものであった。特に、高励起状態に焦点を絞り、

1) 発熱型荷電交換反応の有効性の確立を、荷電ベクトル・スピン単極巨大共鳴(IVSMR)の発見( $\beta^+$ 型)と確認( $\beta^-$ 型)で行う。

その一方で従来から培ってきた荷電交換 (p,n)や(n,p) 反応によるスピン・アイソスピン応答研究の活用として、

2) 二重 $\beta$ 崩壊核のガモフテラー遷移強度測定による中間状態の微視的構造

の研究を進めた。この目的達成のために、1) 理化学研究所(理研)の RI ビームファクトリー(RIBF)施設に高分解能磁気分析装置(SHARAQ スペクトロメータ)を建設、実験を遂行した。また 2) については、大学核物理研究センター(RCNP)の(p,n)及び(n,p)ファシリティに於いて実験を行った。尚、SHARAQ スペクトロメータの建設は、東京大学理学系研究科原子核科学研究センター(CNS)と理研仁科加速器研究センターとの共同事業として行われた。

1) については、SHARAQ の最初の物理実験成果として $\beta^+$ 側 IVSMR を発見することができた。この発見に基づき IVSMR についての詳しい理論的解釈が試みられテンソル力による核内相関の重要性が指摘されている。

2) については、二重 $\beta$ 崩壊核  $^{48}\text{Ca}$  及び  $^{116}\text{Cd}$  の中間核  $^{48}\text{Sc}$  及び  $^{116}\text{In}$  へのガモフテラー遷移強度の測定に成功した。これは世界最初の実験結果であり、ニュートリノ質量を定量的に求めることも関係することから  $2\nu$ 及び  $0\nu$ 二重 $\beta$ 崩壊の核行列要素について様々な角度から理論的研究が現在盛んにされている。

発熱型荷電交換反応の有効性は、不安定核ビームと SHARAQ スペクトロメータを使いより発展させることができた。

i) ( $^{12}\text{N}$ ,  $^{12}\text{C}$ ) 発熱反応は、従来に比較し極めて S/N よく  $\beta^-$  型 IVSMR を励起することを明らかにした。(野地俊平氏学位論文)

ii) ( $^{10}\text{C}$ ,  $^{10}\text{B}$ ) 反応を用いたスピン非反転荷電ベクトル遷移研究の有効性も確かめられ、荷電ベクトル非スピン単極巨大共鳴探索への道を開いた。(笹本良子氏学位論文)

これにより、不安定核ビームによる安定な標的核のスピン・荷電スピン応答の研究を進める新たな核分光学研究の手段として、「発熱型荷電交換反応」分野を確立させることができた。

その一方で、逆運動学を利用した測定手法を本研究終了後に開拓し、不安定核のスピン・荷電スピン応答の研究を、SHARAQ スペクトロメータを利用し進めている(科研費による支援①と②、後述)。逆運動学とは従来の入射ビームと標的の関係を入れ替えた測定手法であり、例えば、順反応  $A(p,n)B$  反応(入射ビームは p(陽子))に対して、 $p(A,n)B$  反応(入射ビームは不安定核 A、反跳中性子(n)を測定)を指す。これにより、研究領域を一気に不安定原子核に広げることが可能になる。

i) 発熱型荷電交換反応  $^{12}\text{Be}(p,n)^{12}\text{B}$ (測定は逆運動学  $p(^{12}\text{Be},n)^{12}\text{B}$ )により、世界で初めて不安定原子核  $^{12}\text{Be}$  における GT 巨大共鳴の測定に成功した(科研費による支援①)。 $^{12}\text{Be}$  は、 $(N-Z)/A=0.33$  の中性子過剰核(半減期 20.4 ミリ秒)である。

ii) 更なる展開として、核異性体(アイソマー)ビームによる励起状態を標的(実験上は逆運動学による不安定核ビーム)とするスピン・荷電スピン応答の研究を着想した(科研費による支援②)。例えば、励起状態核からの GT 遷移は星の燃焼・進化過程で重要な役割を果たすにも関わらず実験的な情報は全く存在していないが、この研究が進めば何らかの有用な情報が得られると期待している。その上、異性体ビームを利用すると、様々な極限状態(例えば高スピンや大変形)核からの(p,n)反応も可能になり、珍奇な原子核励起状態を研究対象にできるようになるため新たな発見が期待される。その最初の試みとして、 $^{52}\text{Fe}$  の  $12^+$  という高スピン異性体が存在するが、現在この異性体を標的とするスピン・荷電スピン応答の研究の計画を進めている(すでに LOI が認められている)。

iii) パリティのみを移行する極めてユニークな( $^{16}\text{O}$ ,  $^{16}\text{F}$ )反応を用いた  $0^+$ 状態探索実験にも成功した。 $0^+$ 状態はパイオン状態とも呼ばれパイ中間子効果が直接現れると考えられている。今後の発展が期待される。

以上のように、本特別推進研究を契機として、不安定核ビームの特徴を活かした新しいスピン・アイソスピン応答の研究を創始し進展させることができた。

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

国際会議における招待講演について、酒井（研究代表者）、下浦、上坂、矢向（研究分担者）に関して一部のみ記入。

- 1) ECT\* Workshop on Reactions and Nucleon Properties in Rare Isotopes、Trento, Italy, April 6-12, (2010)、酒井招待講演、「Search for the beta+ IVSM resonance via (t,  $^3\text{He}$ ) reactions at 900 MeV --The first result from SHARAQ spectrometer--」
- 2) University of Aizu - JUSTIPEN - EFES symposium、Cutting - Edge Physics of Unstable Nuclei, Aizu, Japan, 10-13 Nov. (2010)、上坂招待講演、「Spin-isospin studies with the SHARAQ Spectrometer」
- 3) Isomers in Nuclear and Interdisciplinary Research, Saint Petersburg, July 4-10 (2011)、酒井招待講演、「Study of Charge-Exchange Reactions between Excited States Using Isomer Beams」、Russia, <http://onlinereg.ru/inir2011/>
- 4) French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, Saitama, Japan, 5-8 Jan. (2011) 上坂招待講演、「High-resolution Ion-optical analysis of RI-beams with the SHARAQ Spectrometer」
- 5) 日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学、9 月 16 日-19 日、2011 年、シンポジウム「RIBF と RCNP における核物理のクロスオーバー」、矢向招待講演、「SHARAQ でのスピン-アイソスピン実験」
- 6) Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011), Kyoto, Japan, 11-15 Oct. (2011), 上坂招待講演、「RI-Beam Induced Charge Exchange Reactions ~ new usage of RI-beams ~」
- 7) International Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN2011), Hanoi, Vietnam, 23-28 Nov. (2011) 上坂招待講演、「RI-Beam Induced Charge Exchange Reactions as new probes to nuclei」
- 8) The Conference on Application of Accelerators in Research and Industry, Texas, Fort Worth, USA, August 5-10 (2012)、酒井招待講演、「Recent activities of RIKEN RIBF」、<http://www.caari.com/>
- 9) 7th Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics, Lenzkirch-Saig, Germany, 2-7 Sep. (2012) 上坂招待講演、「Nuclear Spin-Isospin Studies with RI-beams」
- 10) International Symposium on Exotic Nuclei (EXON2012), Vladivostok, Russia, 1-6 Oct. (2012), 下浦招待講演、「Charge exchange reactions of RI-beams」
- 11) International Symposium on Exotic Nuclear Structure From Nucleons (ENSFN2012), Tokyo, Japan, 10-12 Oct. (2012) 上坂招待講演、「Spin-Isospin Responses studied with RI-beams」
- 12) International Symposium on Exotic Nuclear Structure From Nucleons (ENSFN2012), Tokyo, Japan, 10-12 Oct. (2012) 下浦招待講演、「Physics opportunities using double-charge exchange reactions」
- 13) Collective Motions in nuclei under Extreme conditions (COMEX4), Kanagawa, Japan, 22-26 Oct. (2012)、上坂招待講演、「Spin-Isospin Responses studied with RI-beams」
- 14) NUSTAR Annual Meeting 2013, GSI, Darmstadt, Germany, 25 Feb.-1 Mar. (2013), 下浦招待講演、「SHARAQ Spectrometer and its physics opportunities」
- 15) 2<sup>nd</sup> Advances in Nuclear Structure at Extreme Conditions, Bormio, Italy, 19 - 22 February (2014). 酒井招待講演、「Spin-isospin physics with unstable beams」、<https://sites.google.com/site/wsbormiomi2014/program>
- 16) 2<sup>nd</sup> Advances in Nuclear Structure at Extreme Conditions, Bormio, Italy, 19 - 22 February (2014). 下浦招待講演、「Nuclear responses via inelastic scatterings of exotic nuclei」、<https://sites.google.com/site/wsbormiomi2014/program>
- 17) 2<sup>nd</sup> Advances in Radioactive Isotope Science, June 1-6, (2014), Tokyo, Japan, 酒井口頭発表、「Spin-isospin Correlation in Light Neutron Rich Nuclei」、<http://ribf.riken.jp/ARIS2014/>
- 18) 日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学、3 月 27 日-30 日、2014 年、シンポジウム「二重ベータ崩壊研究の最前線」、矢向招待講演、「荷電交換反応による二重ベータ核行列要素の研究」
- 19) NUBA Conference Series-1: Nuclear Physics and Astrophysics in Antalya, Adrasan, Turkey, 15-21 Sep. (2014), 下浦招待講演、「Charge exchange reactions of RI-beams using SHARAQ spectrometer」
- 20) The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2014 (ISPUN14)、Ho Chi Minh City, Vietnam, November 3 - 8, (2014)、酒井招待講演、「Spin-isospin correlation in  $^8\text{He}$  and  $^{12}\text{Be}$ 」、<http://ispun14.vn/>
- 21) Turkish Physical Society : 31th International Physics Congress, July 21-24 (2014), Bodrum, Turkey、酒井招待講演、「Recent Results from RIBF of RIKEN with Exotic beams」、<http://tfd31.turkfizikderneği.org/en/>

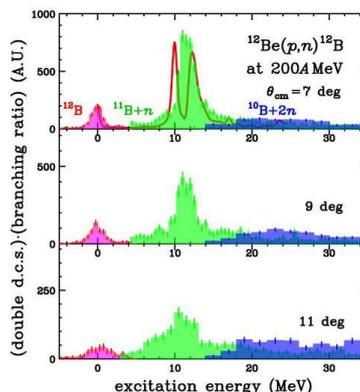
1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか (続き)

(3) 研究費の取得状況 (研究代表者として取得したもののみ)

①基盤研究(B)、研究課題「逆運動学・発熱荷電交換反応による不安定核のスピンの応答」、研究期間平成 22-24 年度、配分額 17,680,000 円の研究費支援を受けた。

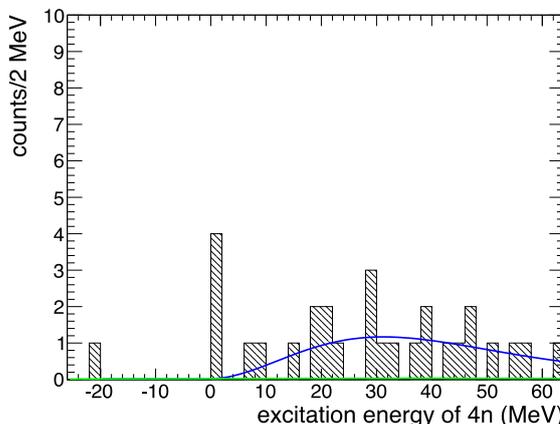
この研究は、中性子過剰度が大きく  $(N-Z)/A=0.33$ 、中性子スキンやハロー構造を持ち且つ大変形(長軸:短軸 $\approx 2:1$ )という際立った特徴を持つ不安定原子核  $^{12}\text{Be}$  について、 $^{12}\text{Be}$  をビームとし水素を標的とする逆運動学条件での荷電交換反応実験を行うのを目的とした。その結果が右図である。これは世界で最初の中性子過剰核におけるガモフ・テラー型巨大共鳴測定である。前方角度で励起エネルギー10 MeVあたりの鋭いピークが巨大共鳴によるもので、スピン・アイソスピン応答の中で最も重要なスピンの集団運動状態である。このピークエネルギーから、運動を司る定数(ばね定数にあたる)が、中性子過剰核では安定核よりも小さいという兆候を得た。現在論文執筆中である。

②基盤研究(B)、研究課題「アイソマービーム製造技術の確立による励起状態からのGT遷移測定」、研究期間平成 27-29 年度、配分額 11,700,000 円(直接経費)の研究費支援を受けることが決まった。



(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

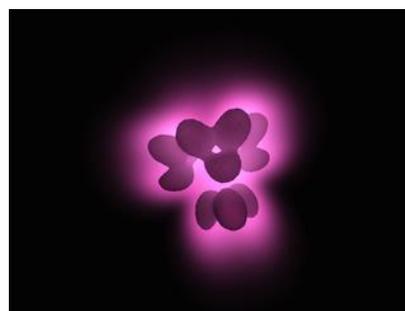
研究期間終了後も新たな発見・知見が得られたが、本研究で成果を上げたRIビームの発熱型荷電交換反応の有用性を展開させたものの中で取り分け重要だと考えている結果は、 $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})4n$  反応を用いたテトラ中性子状態( $4n$ )の研究がある。これによりテトラ中性子の基底状態の候補が同定された。この発熱型二重荷電交換反応はほとんど反跳しない4中性子系を生成するほぼ唯一の2体反応であり、テトラ中性子状態の存在を調べるのに最適である。核子あたり190 MeVの $^8\text{He}$ ビーム(毎秒 $2 \times 10^6$ )を液体ヘリウム標的に照射し、 $^8\text{Be}$ から直ちに崩壊する2つの $\alpha$ 粒子が本研究で建設したSHARAQスペクトロメータで測定された。反応の前後の質量欠損から、4中性子系のエネルギースペクトルが得られた(右図)。実験的なバックグラウンドは非常に小さく(図中緑線)、4中性子閾値から5 MeV以上大きな領域は、反応で生成された4中性子波束が連続状態へ崩壊するという計算(図中青線)でよく説明できた。その一方で、閾値近傍の励起エネルギーにこの連続状態やバックグラウンドとしては説明がつかないピークが観測された。統計的な解析の結果、このピークは有意であり、そのエネルギーと幅の分析から寿命の長いテトラ中性子の基底状態の候補であることが世界で初めて明らかになった。



4 中性子系のエネルギースペクトル。緑線は実験的なバックグラウンド。青線は連続状態からの寄与を示す。0-2 MeVのピークがテトラ中性子の基底状態の候補を示す。

束縛状態をもたないことが知られている2中性子系と、巨大原子核として束縛されていると見なされる中性子星との間に、束縛あるいは共鳴状態の中性原子核が存在するか否かは、50年来の研究課題であり、テトラ中性子はその存在の可能性が最も高い候補であった。エネルギーと幅が決まった世界最初の基底状態の候補を得たことは、極めて意義深い。特に、現在知られている2体力のみを用いた4中性子系の厳密計算では、このような基底状態の説明がつかず、中性子間の多体力の必要性とその大きさに制限を与えるという点で、理論的にも注目を集めている。さらに、多体力に対する制限から、中性子物質の状態方程式に制限を与えることになり、中性子星の性質の解明に大きく寄与する。この結果は、束縛された中性子ストレンジ粒子の存在を示唆するものとしても注目されている。また、超冷原子分野における、フェルミ粒子4体系の研究に対するインパクトも大きい。この様に他分野へも大きな影響を与える結果である。より統計精度の高い追試を行う予定である。

この研究は木佐森慶一の博士學位論文(H26年度)としてまとめられ、また、学術雑誌(Physical Review Letters)への論文執筆中である。



$(0s)^2(0p)^2$  配位を仮定した場合の4中性子固有座標系における密度分布。反対称化のために正四面体構造が取れないことが示されている。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

1. 本研究はスピン・アイソスピン物理新展開の幕を開いたと言える。この研究を契機として、発展形となる下記の重要な研究が開始された。

#### A) 大阪大学 RCNP での二重ガモフテラー共鳴探索実験（理研、東大、RCNP らの実験グループ）

本研究で着目した重イオン荷電交換反応の手法を応用して、炭素の安定核ビームを用いた( $^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be} \gamma$ )反応による二重ガモフテラー共鳴の探索実験が提案され、 $^{48}\text{Ca}$  核に対する実験が実施された。本研究で  $^{48}\text{Ca} \cdot ^{48}\text{Ti}$  に対する一重荷電交換反応の詳細研究を行ったことが、この研究の背景となっている。

#### B) ミシガン州立大学国立超伝導サイクロトロン研究所での荷電ベクトル非スピン単極共鳴探索実験（アメリカ・ミシガン州立大学らの実験グループ）

本研究で行った( $^{10}\text{C}, ^{10}\text{B} \gamma$ )反応の発想を応用した、( $^{10}\text{Be}, ^{10}\text{B} \gamma$ )反応の実験が、アメリカで建設された大規模ゲルマニウム検出器アレイ GRETINA を用いて行われた。この実験は同施設での GRETINA キャンペーンのハイライト実験の一つとなった。また Zegers 教授は、 $^{100}\text{Mo}(t, ^3\text{He}+n)$  実験を提案し PAC で承認されたが、これは我々が行った( $t, ^3\text{He}$ )反応による IVSM 探索実験の発展版である。

#### C) 大阪大学 RCNP での M1 応答実験（RCNP、ミシガン州立大学らの実験グループ）

同様に重イオン荷電交換反応とガンマ線検出の手法を組合せた、( $^6\text{Li}, ^6\text{Li} \gamma$ ) M1 励起応答を探る実験が阪大 RCNP で提案されている。この実験は阪大がアメリカとの国際共同研究で進めている。CAGRA キャンペーンの重要実験の一つである。

2. 本研究では、核反応による運動量の変化を、RI ビームの運動量の拡がりよりずっと良い精度で測定する「分散整合」という手法が実現されたが、この手法は、①核破碎反応によるスピン偏極が運動量の変化に依存するという性質を利用して、RI ビームのスピン制御に応用されている(Y. Ichikawa, H. Ueno, et al., Nature Physics, 8,918(2012))。また、別の応用として、②RI ビームの速度の違いを利用することによりビームの性質を損なわずに減速するシステムが考案され、その建設が始まっている(下記 OEDO 計画)。

3. 本研究で建設された SHARAQ スペクトロメータ及び高分解能ビームラインは、RI ビームファクトリーの基幹装置として、本研究終了後も多くの実験で活用されている。

①高い運動量分解能と高次収差制御能力を最も良く活かした例としては、中性子過剰  $^{55,56}\text{Ca}$  の質量測定が挙げられる。この実験では、新魔法数領域にある中性子過剰 Ca の質量を運動量と飛行時間から測定した。飛行距離が長くかつ高次収差の小さい SHARAQ システムを、超高時間分解能をもつダイヤモンド検出器と組み合わせて飛行時間を測定することで、 $10^{-6}$  の精度での核質量測定が可能であり、中性子過剰核での殻構造進化の解明を目指している。

②この活用法の発展形が、理研仁科センターが新たに建設した質量測定用蓄積リングである稀少 RI リングの入射ビームラインとしての使用である。稀少 RI リングでの質量測定には、入射粒子の速度又は運動量を 1 万分の一の精度で決めることが必要であるが、SHARAQ+高分解能ビームラインの持つ特性と本研究で開発されたビーム調整法をそのまま活かせばこの精度を実現可能であることから、このシステムが稀少 RI リングへの入射ビームラインとして採用された。質量測定は 2015 年度以降実施される。

③また、SHARAQ 設計時、柔軟な活用を意図してアクセプタンスの大きい中間焦点面(D1 磁石下流)が用意された。この大アクセプタンスを活かして、( $p, 2p$ )反応による陽子/中性子過剰窒素同位体の分光実験が行われている。更に、パリティだけを移行する( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}$ )反応も世界で初めて開発された。

④OEDO 計画は、RI ビームの時間構造に着目した初めての高分解能 RI ビーム減速法である。RI ビームの運動量を双極磁場で分析し、その大きさに応じた厚さのエネルギー減衰板によりエネルギーを所定の値に揃えたとともに、その下流に到達時刻と焦点面での通過位置との相関を相殺させるような RF 電場を印加することで、ビームサイズを最小化する。OEDO 計画は、本研究で整備された高分解能ビームラインの高度化として位置づけられ、核子あたり 10 MeV 程度から 300 MeV の広いエネルギー領域にわたる RI ビームを供給できる初めての設備として世界的に期待を集めている。

この様に、本特別推進研究で培ったスピン・荷電スピン物理の研究の発展系が世界各地（大阪大学 RCNP, 米国 NSCL）で展開されつつあるとともに、SHARAQ スペクトロメータで実現した分散整合ビームラインの発展系として高強度偏極 RI ビーム製造や低エネルギー RI ビーム製造 (OEDO 計画) として実を結び、その一方で SHARAQ スペクトロメータの性能を活かして、質量の精密測定、( $p, 2p$ )反応や( $^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}$ )反応による新たな核分光法が開発されるとともに、稀少 RI リングへの入射ビームラインとしてまでも利用されている。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

## 【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	K. Yako et al., "Gamow-Teller Strength Distributions in Sc-48 by the Ca-48(p,n) and Ti-48(n,p) Reactions and Two-Neutrino Double-beta Decay Nuclear Matrix Elements", Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 012503.	(p,n) 反応、(n,p) 反応を用いて、二重ベータ崩壊核 $^{48}\text{Ca}$ の核行列要素に寄与するガモフ・テラー遷移強度の分布を測定し、理論予測にくらべて高励起状態に広がっていることを示した。	38
2	T. Uesaka, H. Sakai et al., "The high resolution SHARAQ spectrometer", Nucl. Instrum. and Methods B 266 (2008) 4218-4222.	磁気スペクトロメタ SHARAQ の基本設計と核物理実験プログラム、建設経過の報告。	34
3	K. Yako, H. Sagawa, and H. Sakai, "Neutron skin thickness of $^{90}\text{Zr}$ determined by the charge exchange reactions", Phys. Rev. C 74 (2006) 051303(R).	(p,n) 反応、(n,p) 反応データの解析から、核物質の状態方程式と密接な関係にある中性子スキン厚を $^{90}\text{Zr}$ 核について導出。	31
4	H. Sagawa et al., "Charge exchange spin-dipole excitations in Zr-90 and Pb-208 and the neutron matter equation of state", Phys. Rev. C 76 (2007) 024301.	(p,n) 反応、(n,p) 反応データから抽出したスピン双極子励起と最新の理論計算を詳細に比較し、中性子物質の状態方程式を論じた。	23
5	M. Sasano, H. Sakai, K. Yako et al., "Gamow-Teller unit cross sections of the (p,n) reaction at 198 and 297 MeV on medium-heavy nuclei", Phys. Rev. C 79 (2009) 024602.	(p,n) 反応の反応断面積とガモフ・テラー遷移強度を結びつける量であるガモフ・テラー単位断面積を中重核に対して精密測定し、質量数依存性を論じた。	18
6	T. Kawabata, H. Sakai et al., "High resolution beam line for the SHARAQ spectrometer", Nucl. Instrum. And Methods B 266 (2008) 4201-4204.	SHARAQ での高分解能測定のために必要な分散整合ビームラインの設計。	16
7	K. Yako et al., "The RCNP (n,p) facility", Nucl. Instrum. Methods A 592 (2008) 88-99	阪大核物理研究センターに建設した (n,p) 反応の測定施設の技術的詳細。	7
8	M. Sasano et al., "Determination of the Gamow-Teller transition strength to In-116(g.s.) by the Cd-116(p,n) reaction at 300 MeV for the study of the nuclear matrix element of the two-neutrino double beta decay", Nucl. Phys. A 788 (2007) 76c-81c.	二重ベータ崩壊核 $^{116}\text{Cd}$ の二重ベータ崩壊寿命を説明する最も重要な $^{116}\text{In}$ の基底状態を経由する遷移について、(p,n) 反応によりガモフ・テラー遷移強度を精密決定した。	7
9	S. Shimoura, "SHARAQ spectrometer and GRAPE", Nucl. Instrum. And Methods B 266 (2008) 4131-4136.	RIBF における高分解能核分光装置である SHARAQ スペクトロメタとガンマ線検出器アレイ GRAPE について物理的動機、仕様、開発状況を報告。	4
10	S. Shimoura, "High-Resolution Spectroscopy Using RI-Beams - SHARAQ Project", Int. Jour. Of Mod. Phys. E 18 (2009) 2011-2014.	RI ビームを用いた高分解能核分光プログラム SHARAQ プロジェクトを概説し、SHARAQ スペクトロメタと高分解能ビームラインの建設状況を報告。	0

## 【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	M. Sasano, H. Sakai et al., "Gamow-Teller transition strength in the intermediate nucleus of the Cd-116 double-beta decay by the Cd-116(p,n)In-116 and Sn-116(n,p)In-116 reactions at 300 MeV", Phys. Rev. C 85 (2012) 061301.	(p,n)反応、(n,p)反応を用いて、二重ベータ崩壊核 <sup>116</sup> Cdの核行列要素に寄与するガモフ・テラー遷移強度の分布を測定し、理論予測にくらべて高励起状態に広がっており、核行列要素の理解に影響を与えることを示した。	8
2	K. Miki et al., "Identification of the $\beta^+$ Isovector Spin Monopole Resonance via the <sup>208</sup> Pb and <sup>90</sup> Zr(t, <sup>3</sup> He) Reactions at 300 MeV/u", Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 262503.	SHARAQにおいて(t, <sup>3</sup> He)反応の測定を <sup>208</sup> Pb核、 <sup>90</sup> Zr核について行い、 $\beta^+$ 型のアイソベクトル型単極子共鳴をはじめて同定した。	4
3	T. Uesaka et al., "New Experimental Studies of Nuclear Spin-Isospin Responses", Prog. of Theo. Phys. Suppl. 196 (2012) 150-157.	SHARAQプロジェクトの研究戦略をスピン・アイソスピン励起研究の観点から概観し、新しいデータを紹介。	1
4	T. Uesaka, et al., "The SHARAQ spectrometer", Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 03C007.	SHARAQ スペクトロメタと高分解能ビームライン、検出器システムについて報告。	0
5	S. Michimasa et al., "SHARAQ spectrometer for high-resolution studies for RI-induced reactions", Nucl. Instrum. Methods B 317 (2013) 305-310.	SHARAQ スペクトロメタにおける高分解能測定を行うための装置とイオン光学の報告。運動量分解能1/8100を実現した。	0
6	H. Miya et al., "Development of low-pressure multi-wire drift chambers for high-resolution spectroscopy with radioactive isotope beams", Nucl. Instrum. Methods B 317 (2013) 701-704.	SHARAQの実験をはじめ、RIビームの高分解能測定におけるビーム診断やエネルギー測定に用いる低圧型ドリフトチェンバーの装置論文。	0
7	S. Michimasa et al., "Development of CVD diamond detector for time-of-flight measurements", Nucl. Instrum. Methods B 317 (2013) 710-713.	SHARAQ 高分解能ビームラインで粒子飛行時間の精密測定を行うためのダイヤモンド検出器の開発状況を報告。	0
8	S. Kawase et al., "Spectroscopy of Single-Particle States in Oxygen Isotopes via (p, 2p) Reaction", to be published in JPS Conf. Proc. Volume 6 (2015).	SHARAQ における(p, 2p)反応測定による酸素同位体 <sup>22,24</sup> Oの陽子p軌道のスピン・軌道分離の研究報告。	0
9	Tsz Leung Tang et al., "Proton Single-particle Energy of <sup>23</sup> F by Quasi-free (p, 2p) Scattering and the Operation of Polarized Proton Target", to be published in JPS Conf. Proc. Volume 6 (2015).	SHARAQ における(p, 2p)反応測定による <sup>23</sup> F核の陽子軌道の研究と、測定に用いたスピン偏極陽子陽的のオペレーションの報告。	0
10	K. Kisamori et al., "Missing-mass Spectroscopy of the 4n System by Exothermic Double-charge Exchange Reaction <sup>4</sup> He( <sup>8</sup> He, <sup>8</sup> Be)4n", to be published in JPS Conf. Proc. Volume 6 (2015).	SHARAQ における二重荷電交換反応 <sup>4</sup> He( <sup>8</sup> He, <sup>8</sup> Be)4n測定による四中中性子状態の精密探索実験の初期報告。	0

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

本研究の過程で2件のプレスリリースを行い、研究成果を発信した。

##### 1) 「ニュートリノ質量の上限値は正しいか？」

発表日：2009年7月10日

発表者：酒井英行、矢向謙太郎

発表内容：カルシウム48核の二重ベータ崩壊過程の理解を目的に、原子核散乱実験を行った。この結果、二重ベータ崩壊の半減期とニュートリノの質量を結びつける理論計算に大幅な修正を要することが明らかになった。

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2009/16.html>

##### 2) 「原子核の新型巨大共鳴状態を発見」

発表日：2012年6月26日

発表者：下浦 享、酒井英行、三木 謙二郎、上坂 友洋

- どのような成果を出したのか？

原子核の新しいタイプの振動状態である巨大共鳴「荷電ベクトルスピン単極共鳴」を発見した。

- 新規性（何が新しいのか）

不安定な原子核三重水素をビームとして用いた核反応の測定・分析手法を確立し、新型の巨大共鳴状態「荷電ベクトルスピン単極共鳴」を発見した。

- 社会的意義／将来の展望

原子核の性質と相互作用に関する新しい知見を得るとともに、中性子過剰な不安定原子核への適用により、中性子星により近い状況下での地上実験で実現する道を開いた。

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2012/25.html>

SHARAQ スペクトロメータは理研仁科センター内のRIBF棟実験室に設置されている。一般見学者に研究成果と施設の説明を日常的に行っている。

また、理研の一般公開に常に参加し、SHARAQ スペクトロメータの見学および研究内容の紹介を行っている。2010(平成22)年度以降の日程は、2010年4月17日、2011年4月23日、2012年4月21日、2013年4月20日、2014年4月19日であった。毎回見学者は約2,000名以上に上る。

更に、奈良高校のスーパーサイエンスハイスクールサイエンスツアーを毎年受け入れている。下浦が放射線について講演し、SHARAQ 見学会を行っている。その実施日は、2010年7月29日、2011年8月8日、2012年8月9日、2013年8月7日、2014年8月5日であった。参加者は毎年約10程度である。

東大のオープンキャンパスに於いて講演会を開催し SHARAQ の成果も含め原子核の面白さを紹介した。

2010年8月4日 講演「フェムトワールド-極微世界-の多様性と秩序」(下浦、上坂それぞれ1回)

2012年8月7日 講演「フェムトワールド-極微世界-の景色」(下浦、矢向それぞれ1回)

2014年8月6,7日 講演「フェムトワールド-極微世界-の景色」(下浦、矢向それぞれ2回)

尚、下浦享氏はH18-20年度の期間、また上坂友洋氏はH17-19年度の期間研究分担者であった。それぞれ科学研究費を獲得したのでその後は研究協力者として参画した。



下浦 CNS 教授が奈良高校の生徒に SHARAQ の前で説明している様子。

## 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

## (2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポストク等の研究終了後の動向を記述してください。）

この研究には、下記の若手が研究分担者として重要な寄与をされ、その業績が評価され昇進された。

（名前（分担者の期間）：当時の所属と身分→現在の所属と身分）

- 矢向謙太郎 (H17-21)：東大理学系・助教→東大 CNS・准教授、  
 上坂友洋 (H17-19)：東大 CNS 准教授→理化学研究所主任研究員、  
 川畑貴裕 (H17-19)：東大 CNS 助教→京大大学院理学研究科・准教授  
 井手口栄治 (H17-18)：東大 CNS 講師→大阪大学核物理研究センター・准教授

主要大学の中堅の研究者として活躍している。

つまり研究開始時の研究分担者（矢向、上坂、川畑、井手口）は、研究期間終了前に研究代表者を除き全員転出した。

ポストクであった、斎藤明登氏は、CNS 特任研究員後、医学物理分野へ転身した。順天堂大医学部助教、群馬大医学研究科助教、RTQM システム株式会社(高度医療のための品質管理システム開発)を経て、現在広島大学病院 放射線治療科助教として異分野で活躍している。

この研究から下記の方々が東京大学から学位を取得された。（ ）内は学位取得年度と現在の所属と身分を示す。

1. 笹野匡紀 (H19)：“Study of intermediate states of the two neutrino double beta decay via the (p,n)and(n,p)reactions at 300 MeV”，理研仁科センター・研究員
2. 三木謙二郎 (H22)：“Study of the isovector spin monopole resonance via the (t,<sup>3</sup>He) reactions at 300MeV/u” 日本学術振興会 PD(大阪大学核物理研究センター)を経て、日本学術振興会海外研究員として米国ミシガン大学国立超伝導サイクロトロン施設 (NSCL) に所属
3. 野地俊平 (H24)：“Development of a new spectroscopic tool for spin-isospin responses by the exothermic charge-exchange reaction” 米国ミシガン大学国立超伝導サイクロトロン施設 (NSCL) のポストクを経て、現在大阪大学核物理研究センター・特任助教
4. 笹本良子 (H24)：“Study of the isovector non-spin-flip monopole resonance via the super-allowed Fermi type charge exchange (<sup>10</sup>C,<sup>10</sup>B) reaction” (2012年、東京大学)  
東京大学 CNS 研究機関研究員、日本科学未来館サイエンス・コミュニケーターを経て、現在東京大学理学系研究科・リサーチアドミニストレータ
5. 木佐森慶一 (H26)：“Study of tetra-neutron system via exothermic double-charge exchange reaction <sup>4</sup>He(<sup>8</sup>He,<sup>8</sup>Be)4n”，日本学術振興会 PD(理研仁科センター)

## 修士論文

- 時枝紘史(上坂研) SHARAQ 磁気分析装置のためのカソード読み出しドリフトチェンバー (2010年、東京大学)  
 宮裕之(下浦研) RI ヒームを用いた高分解能核分光のための 飛跡検出器の開発(2010年、東京大学)  
 菊地陽介(井手口研) 大強度不安定核ビーム実験のための 1mm 角プラスチックシンチレータを用いたホドスコープの開発 (2012年、東京大学)  
 小林幹(下浦研) 逆運動学(p,n)反応による中性子過剰核 <sup>8</sup>He のスピン・アイソスピン応答(2014年、東京大学)  
 三木謙二郎(酒井研) Study of the double beta decay process of <sup>48</sup>Ca via the <sup>48</sup>Ti(n,p) reactions (2008年、東京大学)  
 野地俊平(酒井研) Study of the exothermic heavy-ion charge-exchange reaction <sup>13</sup>C(<sup>12</sup>N,<sup>12</sup>C)<sup>13</sup>N at 100 MeV/nucleon (2008年、東京大学)