

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 9 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03692

研究課題名(和文)原子線共鳴法を利用した高核スピン偏極RIビーム生成装置の開発

研究課題名(英文)Production of highly spin-polarized RI beams based on the atomic beam resonance method

研究代表者

上野 秀樹 (Ueno, Hideki)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

研究者番号：50281118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：核スピン偏極させたNeと酸素のRIビームを用い、線検出型超高感度NMR測定を通じた物質科学研究を実施した。前者では天然では合成されないNeがドーピングされた場合の停止位置や結晶内部場に関する知見が得られ、後者ではRIビーム停止位置でのスピン格子緩和時間に関する結果が得られた。関連研究として実施した高圧下の結晶合成や、核プローブを用いた核化学研究でも多くの成果が得られた。これらのより本格的な展開に必要なRIビーム用原子線共鳴法に関する開発研究を行い、RIビームのイオントラップ、冷却、および中性化などの各要素の技術開発が大きく進展し、当該手法の適用の実現に大きく近づいた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子ビームを用いた物質科学など横断研究の代表例としてミュオンを用いた μ SR法が挙げられる。RIビームも同様の手法として利用展開が期待される。例えば、寿命の違いによる異なるスピン緩和過程・ダイナミクスの観察、電氣的局所場の観察、RI元素置換による原子核位置での局所場の直接観察、線非対称度の変化を指標とする外場に乱されないゼロ磁場スピン緩和の観測等が可能となる。本研究により物性の鍵となる場合の多いスピン偏極酸素RIを用いた実験は独自性が高い。要素技術に関する本研究の成果を活かしRI原子線共鳴装置を完成させ、超高偏極RIが実現できれば、今後新たな量子ビームを用いた独自の研究展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Utilizing nuclear spin-polarized RI beams of neon and oxygen, we have conducted materials science studies by means of the beta-ray-detected NMR measurements. In the first study, we obtained knowledge of the stopping position and the internal field of a host crystal when neon is doped, which is not naturally synthesized. In the latter study, we obtained results on the spin-lattice relaxation time at the stopping position of the RI beam. Many results were also obtained in the related studies of crystal synthesis under high pressure and nuclear chemistry using nuclear probes. R&D study on the atomic beam resonance method for RI beams, which is necessary for full-scale implementation of these studies, was conducted. Development of elemental technologies such as ion trapping, cooling, and neutralization of RI beams has progressed, bringing the application of this method much closer to realization.

研究分野：原子核物理学(実験)

キーワード：その他の量子ビーム 小型量子ビーム発生技術 磁気共鳴 原子・分子 RIプローブ 原子核(実験)

1. 研究開始当初の背景

原子核のスピンを道具として用いる他分野への応用研究、例えば核磁気共鳴 (NMR) 法に基づく物質科学研究は今日では不可欠なものとなっている。そこではスピンの方向に偏りが生じている核スピン偏極 (以下偏極) 状態を実現することが技術的な鍵となる。通常の NMR では、外場を印加することで僅か 0.01% にも満たない偏極核スピンを生成し利用している。これに対し、量子ビームを使った物質科学研究として代表的な μ SR 法 (ミュオンスピン共鳴/緩和/回転法) では、100% 偏極した正ミュオンビームを直接物質中にドーピングして NMR に類似した測定を行うことが可能である。ここでは、偏極度が高いことと、電磁気的信号の代わりにミュオンのスピン方向に対して非対称に放出される β 線を測定するため、磁気共鳴に伴うスピン反転を通常の NMR に比べ 11 桁以上高感度に検出できる [1]。また、ミュオンは物質構造を崩すことなく植え込みが可能、且つ最近では J-PARC にて超低速ミュオンの開発が進められ、その深さも表面 1 nm から深さ 200–300 nm に至る物質内部まで任意の深さに打ち込むことができ、界面・バルクの研究も可能となっている。これらの利点から μ SR 法は既に確立した手法として物質科学研究では世界中で広く利用され、数多くの成果を創出している。

しかし一方で、 μ SR は結晶格子 (原子核位置) での局所場や電気的性質を調べることができないといった弱点もある。これを実現する可能性を秘めているのが、RI (放射性同位核種) ビームである。もし、様々な元素の RI ビームにおいて、高偏極が達成できれば、上述の μ SR の弱点をカバーし元素置換により特定の元素に着目した類似の手法、 β 線検出型 NMR (β -NMR) 法を用いて機能性発現機構の直接解明をすることができ、新たな物質科学研究を拓くことができると考えられる。しかし実際にそれを行おうとすれば、元素依存性の無い高偏極生成の手法が無いという決定的な制約を受けるため、Li などの特定の元素を除き実用例は殆どない。

2. 研究の目的

本研究では、偏極 RI の物質科学研究展開に向け、特に NMR プローブ核の安定同位体存在比率が 0.04% しかないため、高い磁場下など特殊な環境でしか NMR が適用できない酸素を題材に選ぶ。現在、高偏極酸素 RI ビームの生成方法は皆無であるため、研究代表者も中心的役割を担って開発が行われた入射核破砕反応を利用する方法の更なる高度化を図り、並行して原子線共鳴法に基づく新たな手法の開発に取り組み、偏極 RI 生成技術に関するブレイクスルーを目指す。また、酸素をはじめとする RI ビームを用いた物質科学の研究開発を進めるため、 β -NMR 法、核化学的手法に基づく実験研究にも取り組む。本研究を第一歩とし、後に元素依存性なく様々な RI を数十% 偏極させることができるようになれば、高偏極酸素 RI ビームの物質への直接導入による β -NMR 物質科学研究が可能となる。

3. 研究の方法

偏極 RI ビーム生成に関しては、RI ビーム生成率の観点で有利である RIBF のエネルギー領域 (345A MeV, A は質量数) では、エネルギーが高すぎて入射核破砕反応の特性から核スピン偏極が生成できないことが決定的な問題となっている。また、偏極生成に適したエネルギー領域 (100A MeV 程度) であっても、生成偏極度は高々数% に留まる。しかし近年開発された、運動量分散整合二回散乱法 [2, 3] を用いると 30% に達する核スピン整列 RI ビームが生成できることが示されている。そこで、偏極 RI ビーム生成技術の開発研究ではまず、通常用いられる核偏極ではなく、入射核破砕反応により核整列 RI ビームを生成し、照射結晶の電場勾配を用いた新たな β -NMR 測定の原理実証に取り組む。これを経て、運動量分散整合二回散乱法を高度利用した新たな β -NMR 核物理実験・物質科学研究の可能性を探る。しかし RI 元素と結晶内部の物性に依存しないより抜本的な問題解決に向け、このような依存性の無い汎用の高偏極 RI 生成法の開発が

必要である。そこで本研究では新たな技術的ブレイクスルーを達成すべく、原子線共鳴法を RI ビームに応用する新たな技術開発に取り組む。原子線共鳴法は、不均一磁場（シュテルン - ゲルラッハ磁石）を用いた原子磁気モーメントの選別に超微細構造間隔の共鳴を組み合わせた方法であり、1970 年代に全盛期を迎えた確立した技術である。ここでは、低速の原子スピンの不均一磁場を通過すると、その方向に応じて収束と発散を選べることを利用している。当該装置では、上流・下流で二回原子スピン方向の選別を行うが、その中間で核スピンの反転を伴う超微細構造間隔遷移を引き起こすことで、原子スピン選別と同時に核スピン選別を行うことができ、結果として核スピン偏極 RI ビームの生成が可能となる。最大の利点は、単に原子スピンと核スピンだけにしか依存せず大きな核偏極が生成可能という汎用性にある。当該手法で最も重要な開発要素は低速 RI 原子線の生成である。そこで本研究では、RI イオンを捕集し、冷却および中性化を行う装置の根幹部分の開発を中心に計画に取り組む。

RI ビームを用いた物質科学の研究開発に関しては、既存の入射核破砕反応を用いて偏極 O-21 ビームの生成を行い、CuO 単結晶の β -NMR 物性実験を行う。CuO は磁気秩序と強誘電秩序が共存するマルチフェロイック物質として知られる物質で、誘電性と磁性が強く結合するため、性質変化を β -NMR で測定可能な電場勾配の変化から感度良くプローブできる可能性がある。これに向け、O-21 の核磁気双極子・核電気四重極モーメント測定を行い、 β -NMR 用の大型 CuO 単結晶合成を行う。これに加え、Ne 元素の核偏極 RI (Ne-23) を ZnO に直接導入する β -NMR 実験研究を進める。天然に存在しない希ガス元素が結晶内部に導入された場合、どのような状態になっているかを、電場勾配の測定結果から調べる。

4. 研究成果

偏極 RI ビーム生成研究開発および RI ビームを用いた物質科学の研究開発について、以下の成果を得た。

(1) 偏極 RI ビーム生成研究開発

核スピン整列 RI ビームを用いた β -NMR 法の開発：100A MeV の N-15 ビームを Be 標的に照射し、入射核破砕反応により核スピン整列 B-13 ビームを生成した後 TiO₂ 単結晶にインプラントした。通常の β -NMR では、偏極度が低く収量の少ない RI ビームを用いるので、結晶電場勾配と核電気四重極モーメントによる四重極相互作用によりラーモア周波数からシフト・分離する共鳴線が重畳するよう、断熱高速通過法による複数の磁気副準位間遷移を同時に引き起こす。実験ではあえてそれを行わない単一周波数掃引による β -NMR 測定を行うことで、スピンおよび核磁気・核電気四重極モーメントに応じた磁気副準位間遷移に対応する β -NMR スペクトルを意図した通りに取得することができた（図 1）。この結果、分散整合二回散乱法により得られる高い核整列度の RI ビームを用いれば、核偏極が生成できないという困難を回避して、稀少 RI のスピンおよび核磁気・核電気四重極モーメントが決定可能であることが示された。なお、実験は QST-HIMAC 加速器施設にて実施した。また関連研究として、理研 RIBF 施設にて励起状態の核モーメント測定を実施し、中性子過剰稀少 RI の核電磁モーメント測定で成果が得られた [3, 4]。

RI 原子線共鳴装置開発：Rb イオン源を製作し、オフラインでの装置開発を行った。引き出された Rb イオンは Q mass でイオンガイドされ装置に導入された後、粗冷却用のヘリウムが導入され 5 つの独立電極で構成される線形 Paul トラップにて捕集される。下流側に設置したチャンネルトロンで粒子数を計測しつつ、ヘリウムガス圧、トラップ電場

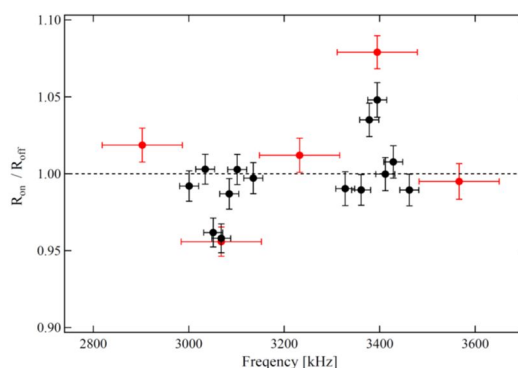


図 1. 核整列 RI ビームを用いた B-13 核の β -NMR スペクトル

の印加電圧及び時間制御に関する基礎データを取得し、パラメータの最適化を図った。トラップ電場下のイオンの挙動に関しては興味深い結果が得られたため、今後シミュレーションと比較検討するなどして結果を別途取りまとめる方針である。イオンから原子線へ変換するために必要となるイオンの中性化に関しては、中性化ガスを導入する方法を採用した。中性化ガスは目的イオンの元素により適したものを選択する必要がある。本測定では窒素ガスを利用した。まだ系統誤差が大きく不定性が高いが、性能評価試験で得られたイオン捕集効率は60%、引き出し効率は20%であった。これらの効率を向上させるのと並行し、次に開発を一歩進め、磁石系による原子スピン選別を可能とするため、目的のイオンを eV 領域のエネルギーの原子線として利用するために必要となる Rb イオンの冷却に向けた開発を行った。ここでは Rb に質量数が近い Sr を同時トラップし、これをレーザー冷却した後に協同冷却するシステムを構築した。SrTiO₃ 試料と Nd:YAG レーザーを用いたアブレーション法に基づく Sr (Sr-88 同位体)イオン源を構築し、引き出される Sr イオンの Rb との同時トラップを確認した。冷却用 ECLD レーザー ($\lambda_{D1} = 422$ nm) の波長を掃引し脱励起光強度を測定する方法で共鳴線幅を評価した結果、定量的に Rb の温度を評価するには至らなかったが、Sr は 50 K までイオン冷却が行えたことが分かった。以上のオフライン開発研究により、まだ性能は充分とは言えず実用には効率の面で改善が必要であるものの、イオン捕集/制御・冷却・中性化といった、RI 原子線共鳴装置の原子線生成部で必要となる主要要素技術に関しては、装置開発と機能実証を行うことができ、RI 原子線共鳴の実現に大きく近づいた。

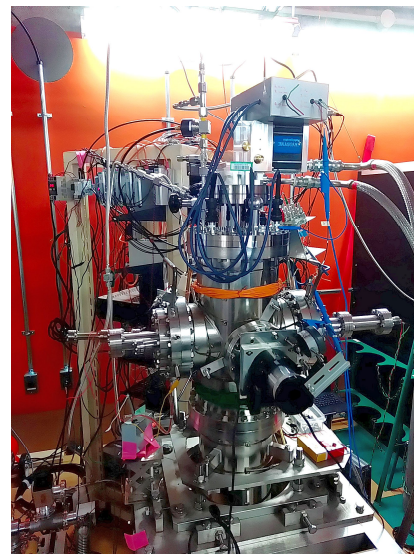


図2. RI 原子線共鳴装置

(2) RI ビームを用いた物質科学の研究開発

まずは O-21 を RI プロブとして利用可能とするため、理研 RIBF 施設入射核破砕片分離装置 RIPS を使い、O-21 の基底状態の核磁気双極子 [5]・電気四重極モーメント測定を行い、それぞれ実験値を決定した(図3)。並行して 4 mm サイズの CuO の大型単結晶を複数作製し結晶軸を揃えて並べて冷却温度を制御し、偏極 O-21 RI ビームを用いた CuO 単結晶の β -NMR (NQR: 核四重極共鳴)実験を実施することができた。現在データ解析中でありまだ最終結果は得られていないが、スピン格子緩和時間が β 崩壊寿命 $\tau_\beta = 4.9$ sec に比べて短いことが判明し、今後、より τ_β が短い O-13 RI で測定することが望まれる。これは RI 原子線共鳴装置が完備されれば可能となる。

β -NMR 物質科学研究として実施した、もう1つの実験である ZnO 単結晶に核偏

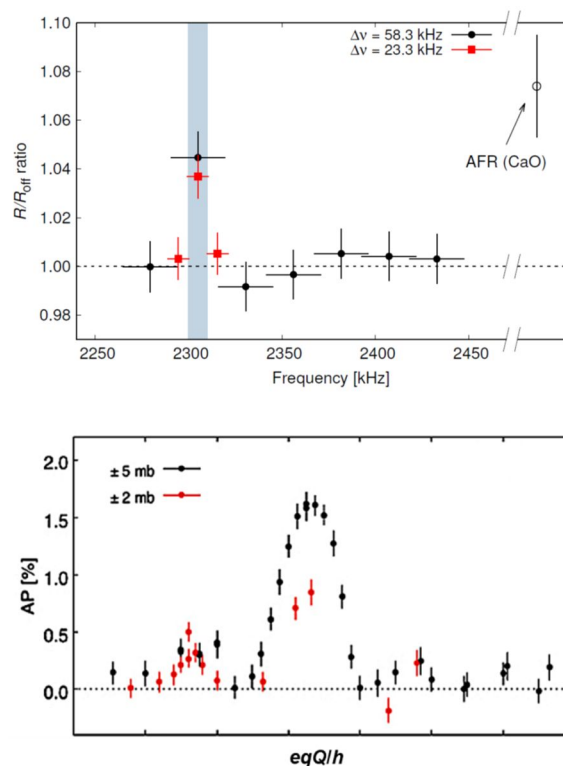


図3. O-21 核の基底状態の β -NMR スペクトル(上図)と β -NQR スペクトル(下図)。下図では X 軸は任意単位

極 Ne-23 RI ビームをインプラントして実施した β -NMR 測定では、NMR (NQR) スペクトルを取得することができた (図 4)。データ解析から Ne-23 が結晶内で受ける電場勾配を決定することができ、これを基に Ne-23 の結晶内停止サイトに関する知見を得ることができた。得られた電場勾配はどの Ne 同位体をインプラントしても同一となるため、今後、 β -NMR (NQR) 法に基づく全ての遠不安定 Ne 同位体の核電気四重極モーメント測定では、相対参照値として用いることができる実験核物理学の観点では重要な成果となった。

以上の通り RI プローブを用いた β -NMR 法に基づく偏極 RI ビーム利用物性研究では RI 停止結晶位置、四重極電場勾配、スピン緩和時間に関する知見を得ることができたが、関連研究として実施した核化学実験、高圧結晶合成研究などでも成果が得られた。

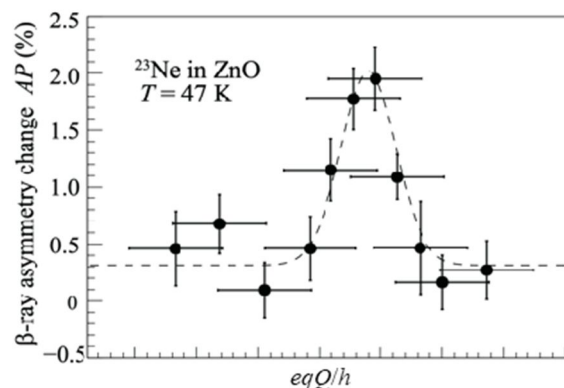


図 4. ZnO 結晶に Ne-23 核をビーム導入して得られた β -NQR スペクトル。X 軸は任意単位。

< 引用文献 >

- [1] Wichert *et al.*, Nucl. Phys. A **693**, 327 (2001).
- [2] Y. Ichikawa *et al.*, Nat. Phys. **8**, 918–922 (2012)
- [3] Y. Ichikawa *et al.*, Nat. Phys. **15**, 321–325 (2019).
- [4] F. Boulay *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 112501 (2020).
- [5] Y. Ishibashi *et al.*, Phys. Rev. C **107**, 024306-1–7 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Kakimoto, Y. Ohki, S. Takada, Y. Haraguchi, A. Yamamoto, H. Aruga Katori	4. 巻 51
2. 論文標題 Formation of the metastable iron (III) germanate Fe ₂ GeO ₅ through kinetic control of the oxidative reaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 451 ~ 454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.220024	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 Y. Kobayashi, M. Sato, Y. Yamada, K. M. Kubo, M. Mihara, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, A. Okazawa, S. Sato, A. Kitagawa	4. 巻 243
2. 論文標題 Chemical species of localized Fe atoms in solid hydrogen using in-beam Moessbauer spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hyperfine Interactions	6. 最初と最後の頁 13-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-022-01793-3	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 W. Sato, S. Takenaka, M. Sakaguchi, M. Shimada	4. 巻 130
2. 論文標題 Cobalt content dependences of cationic distribution and local fields in Co _x Fe _{3-x} O ₄ --Hyperfine interaction studies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 215102-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0059311	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 Y. Sato, Y. Yamada, Y. Kobayashi, M. K. Kubo, M. Mihara, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, T. Ando, N. Takahama, K. Some, M. Sato, S. Sato, A. Kitagawa	4. 巻 170
2. 論文標題 In-beam Moessbauer spectra of ⁵⁷ Mn implanted into lithium aluminum hydride	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 109582-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apradiso.2020.109582	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 14.山本文子	4. 巻 32
2. 論文標題 高エントロピー金属カルコゲナイドの高圧合成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 高圧力の科学と技術	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) なし	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 Y. Ichikawa	4. 巻 2319
2. 論文標題 Nuclear-moment measurements of exotic nuclei using spin-oriented RI beams at RIBF	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 080021-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039413	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 Y. Ichikawa, H. Ueno (43rd/45 authors), et al.	4. 巻 32
2. 論文標題 Magnetic Moment of the Isomeric State of ⁷⁵ Cu Measured with a Highly Spin-aligned Beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 010047-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.32.010047	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 Y. Sato, W. Sato (6th/14 authors), et al.	4. 巻 170
2. 論文標題 In-beam Moessbauer spectra of ⁵⁷ Mn implanted into lithium aluminum hydride	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 109582-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apradiso.2020.109582	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 Y. Yamada, W. Sato (10th/16 authors), et al.	4. 巻 241
2. 論文標題 In-beam Moessbauer spectra for 57Mn implanted sulfur hexafluoride	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Hyperfine Interactions	6. 最初と最後の頁 15-1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-019-1655-y	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 H. Shimizu, M. Wilde, W. Sato	4. 巻 467
2. 論文標題 Different bound states of impurity hydrogen atoms in hydrothermally grown ZnO detected with nuclear reaction analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 13 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2020.01.026	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 Tao Long-Chun 他	4. 巻 36
2. 論文標題 Negative Parity States in 39Cl Configured by Crossing Major Shell Orbits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chinese Physics Letters	6. 最初と最後の頁 062101-1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/0256-307X/36/6/062101	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 Boulay F. 他	4. 巻 124
2. 論文標題 g Factor of the Zr99 (7/2+) Isomer: Monopole Evolution in the Shape-Coexisting Region	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 112501-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.112501	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 市川雄一	4. 巻 765
2. 論文標題 変形しながら殻進化 磁気モーメントで探るエキゾチック核の「中身」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Isotope News	6. 最初と最後の頁 26 ~ 29
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 Murayama H., Sato Y., Kurihara R., Kasahara S., Mizukami Y., Kasahara Y., Uchiyama H., Yamamoto A., Moon E.-G., Cai J., Freyermuth J., Greven M., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 10
2. 論文標題 Diagonal nematicity in the pseudogap phase of HgBa ₂ CuO ₄	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3282-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-11200-1	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 該当する

1. 著者名 Laffez Patrick, Simon Quentin, Kikuchi Yuhei, Retoux Richard, Giovannelli Fabien, Yamamoto Ayako	4. 巻 693
2. 論文標題 Growth of polycrystalline Pr ₄ Ni ₃ O ₁₀ thin films for intermediate temperature solid oxide fuel cell cathode by radio frequency magnetron co-sputtering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 137705 ~ 137705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2019.137705	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 TAKESHITA Nao, YAMAMOTO Ayako, SASAKI Misaki	4. 巻 29
2. 論文標題 Characteristics of Cuprate Superconductors Against Pressure and Carrier Doping ~ How Can We Find a New Superconductor with the Highest T _c ? ~	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Review of High Pressure Science and Technology	6. 最初と最後の頁 254 ~ 261
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4131/jshpreview.29.254	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 Shimizu H., Wilde M., Sato Wataru	4. 巻 467
2. 論文標題 Different bound states of impurity hydrogen atoms in hydrothermally grown ZnO detected with nuclear reaction analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 13~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2020.01.026	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 Sato W., Komatsuda S., Shimizu H., Moriichi R., Abe S., Watanabe S., Komatsu S., Terai T., Kawata S., Ohkubo Y.	4. 巻 100
2. 論文標題 Dynamic motion and freezing of polaronic local structures in a colossal-magnetoresistive perovskite manganite La _{0.7} Ca _{0.3} MnO ₃ detected with radioactive nuclei	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184111-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.184111	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50件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 A. Yamamoto
2. 発表標題 High-pressure synthesis of high-entropy chalcogenides
3. 学会等名 The 10th Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Z. Laila, A. Yamamoto, et al.
2. 発表標題 Synthesis and characterization of high-entropy disulfides (Fe, Co, Ni, Cu) ₂ S with pyrite type via high-pressure
3. 学会等名 The 10th Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-10) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Yamamoto, H. Kagi, et al.,
2. 発表標題 Estimation of phase-transition pressure of HgI ₂ using the color change of a pH indicator, phenol red, as a pseudo pressure scale
3. 学会等名 The 10th Asian Conference on High Pressure Research (ACHPR-10) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 W. Sato, S. Takenaka, and M. Sakaguchi
2. 発表標題 Hyperfine fields at native and dopant cation sites in cobalt ferrites Co _x Fe _{3-x} O ₄
3. 学会等名 3rd International Conference on Hyperfine Interactions and their applications (HYPERFINE 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Komatsuda, W. Sato, and Y. Ohkubo
2. 発表標題 Local structure of impurity doped strontium titanate studied by TDPAC method
3. 学会等名 3rd International Conference on Hyperfine Interactions and their applications (HYPERFINE 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷優里花 他
2. 発表標題 酸素イオン伝導体YSZ中における短寿命核 ¹⁹⁰ のスピング子緩和時間
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 西畑洸希 他
2. 発表標題 スピン整列不安定原子核を用いたベータ核磁気共鳴法の開発
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 高峰愛子
2. 発表標題 高偏極RI原子ビーム生成へ向けた低速RIビーム生成装置と中性化装置の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 共催シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本文子
2. 発表標題 水銀系ではなぜ高圧では 160 K まで上がるのか?常圧では可能か?
3. 学会等名 令和 3 年度 低温工学超電導学会東北・北海道支部 第 1 回材料研究会 合同研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本文子
2. 発表標題 ヒ化ニッケル型 MX およびパイライト型 MX ₂ (X = S, Se) 構造を有する高エントロピーカルコゲナイドの高圧合成と物性
3. 学会等名 第 5 回固体化学フォーラム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤健、山本文子 他
2. 発表標題 Rb-Nb-O 系強誘電体材料の合成と結晶構造
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第 37 回 関東支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤健、山本文子 他
2. 発表標題 正方晶タングステンブロンズ型構造を有する (Rb, K, Li)-Nb-O 系の新規誘電体の探索
3. 学会等名 第 62 回高圧討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Takamine
2. 発表標題 SLOWRI rf gas catcher development toward symbiotic mass measurement at F11
3. 学会等名 RIBF User Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Mukai
2. 発表標題 In-gas-jet laser spectroscopy of 199-202Pt, 195-198Ir, 193-198Os
3. 学会等名 SSRI-PNS Collaboration Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ueno
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy with spin-polarized RI beams
3. 学会等名 The International School for Strangeness Nuclear Physics 2020 (SNP School 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Yamamoto
2. 発表標題 Estimation of phase-transition pressure of HgI ₂ using the color change of a pH indicator, phenol red, as a pseudo pressure scale
3. 学会等名 10th Asian Conference on High-Pressure Research (ACHPR-10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野秀樹
2. 発表標題 高偏極 RI ビームの生成と核・物質科学研究への応用
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」第2回領域全体会議(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今村慧
2. 発表標題 RI 原子線磁気共鳴に向けた中性化装置開発
3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」第2回領域全体会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三原基嗣, Aleksey Gladkov (14th) 他 13 名
2. 発表標題 短寿命酸素NMRプローブ核 190 の物質科学利用
3. 学会等名 日本物学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市川雄一
2. 発表標題 低エネルギースピ物理
3. 学会等名 日本のスピ物理の展望研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷優里花, Aleksey Gladkov (19th) 他 23 名
2. 発表標題 190 の偏極ビーム生成と固体燃料電池研究への応用
3. 学会等名 日本物学会第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本文子
2. 発表標題 超高压を用いた新規超伝導体の開発
3. 学会等名 低温工学超電導学会 高温超伝導バルク材の基礎と応用調査研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Zakiyatul, A. Yamamoto, et al.
2. 発表標題 High-pressure synthesis and characterization of high-entropy disulfides MS ₂ with pyrite-type structure
3. 学会等名 第 61 回高圧討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本文子 他
2. 発表標題 KSbO ₃ 型派生構造を有する新規ストロンチウムイリジウム酸塩化物の合成、結晶構造、および物性
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本文子 他
2. 発表標題 ナローギャップ半導体 M _{1-x} Pt ₃ O ₆ (M = Cd, Hg, x = 0-0.2) の輸送特性における組成及び圧力依存性
3. 学会等名 日本セラミックス協会第 33 回秋季シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 他 10 名
2. 発表標題 超巨大磁気抵抗効果を示す La _{0.7} Ca _{0.3} MnO ₃ 中ポーラロンの運動とその凍結
3. 学会等名 日本放射化学会第 64 回討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ueno
2. 発表標題 Nuclear-physics research based on RI spin orientation technique
3. 学会等名 XXXVI Mazurian Lakes Conference on Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Magnetic-moment measurement of exotic nuclei using spin-oriented RI beams at RIBF
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (APPC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Yamamoto, M. Iida, N. Takeshita
2. 発表標題 High-pressure synthesis of Hg containing complex oxides
3. 学会等名 Aalto Symposium on New Functional Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Yamamoto, M. Iida, N. Takeshita
2. 発表標題 Control of energy gap in semiconducting complex platinum oxides with extremely narrow-gap, $A_{1-x}Pt_3O_6$ (A = Cd and Hg, x = 0-0.2)
3. 学会等名 17th European Conference of Solid State Chemistry (17th ECSSC) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kikuchi, Q. Simon, A. Yamamoto, P. Laffez
2. 発表標題 Pr ₄ Ni ₃ O ₁₀ ±d thin films for IT-SOFC cathode: a two-step synthetic route by magnetron co-sputtering
3. 学会等名 The 2019 Spring Meeting of the European Materials Research Society (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本文子, 飯田睦大, 竹下直
2. 発表標題 ナローギャップ半導性を有する複合白金酸化物の高圧合成と高圧下輸送特性
3. 学会等名 東京大学物性研究所短期研究会「高圧合成による新規材料開発と高圧下測定技術の集結」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊地優平, 杉山和正, 山本文子
2. 発表標題 KSbO ₃ 型新規酸塩化物 Sr ₁₀ Ir ₁₂ O ₃₇ Cl の合成, 結晶構造および物性
3. 学会等名 第 60 回高圧討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田睦大, 竹下直, 山本文子
2. 発表標題 ナローギャップ半導体 MxPt ₃ O ₆ (M = Cd, Hg, x = 0.8-1.0)の高圧合成および伝導特性
3. 学会等名 第 60 回高圧討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊地優平, 杉山和正, 山本文子
2. 発表標題 KSb03 型立方晶 SrIrO3 の高圧合成
3. 学会等名 第 4 回固体化学フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田睦大, 竹下直, 山本文子
2. 発表標題 ナローギャップ半導体 MxPt306 の高圧合成および伝導特性
3. 学会等名 第 4 回固体化学フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊地優平, 杉山和正, 山本文子
2. 発表標題 3 種のSrIrO3 多形の合成、結構構造および物性
3. 学会等名 東京大学物性研究所短期研究会「高圧合成による新規材料開発と高圧下測定技術の集結」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田睦大, 竹下直, 山本文子
2. 発表標題 ナローギャップ半導体 MxPt306 の高圧合成および伝導特性
3. 学会等名 東京大学物性研究所短期研究会「高圧合成による新規材料開発と高圧下測定技術の集結」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤渉, 藤沢照功, 竹中聡汰, 杉本友亮, 高田真宏, 小松田沙也加, 大久保嘉高
2. 発表標題 四酸化三鉄中に不純物として導入されたインジウムおよびガリウムの原子ジャンプ過程
3. 学会等名 日本放射化学会第 63 回討論会 (2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤渉, 小松田沙也加, 清水弘通, 盛一遼平, 阿部 聡, 渡辺祥太, 小松俊介, 寺井智之, 川田知, 大久保嘉高
2. 発表標題 不純物核スピン緩和を利用したLa _{0.7} Ca _{0.3} MnO ₃ 中ポーラロンの状態観察
3. 学会等名 KUR専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Gladkov
2. 発表標題 -NMR measurements of the ground-state nuclear moments for ²¹⁰
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (HAWAII2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nishibata
2. 発表標題 Structure of neutron-rich ³¹ Mg by β^- -decay spectroscopy of spin-polarized ³¹ Na
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (HAWAII2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Takamine
2. 発表標題 Prospects for laser spectroscopy project at the SLOWRI facility in RIKEN RIBF
3. 学会等名 2018 KPS Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Ueno
2. 発表標題 R&D of spin-controlled RI beams
3. 学会等名 The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJNP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tajima
2. 発表標題 Laser spectroscopy of RI beams at the SLOWRI facility of RIKEN
3. 学会等名 The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJNP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yamazaki
2. 発表標題 -NMR/NQR spectroscopy as a local probe of condensed matter
3. 学会等名 Technical Meeting on Novel Multidisciplinary Applications with Unstable Ion Beams and Complementary Techniques (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ichikawa
2. 発表標題 Nuclear magnetic dipole moments measured with spin-oriented RI beams at RIKEN RIBF
3. 学会等名 The International Conference on HYPERFINE Interactions and Applications (HYPERFINE 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島美典
2. 発表標題 Development of offline ion source for collinear laser spectroscopy of RI beams
3. 学会等名 第10回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市川雄一
2. 発表標題 不安定核の核スピン偏極・整列生成について
3. 学会等名 第10回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西畑洸希
2. 発表標題 スピン整列ビームを用いた核モーメント測定と核分光研究への応用
3. 学会等名 第10回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

理研開拓研究本部 上野核分光研究室
https://www.riken.jp/research/labs/chief/nucl_spectro/
理研仁科加速器科学研究センター 核分光研究室
https://www.riken.jp/research/labs/rnc/nucl_spectro/index.html
理化学研究所 開拓研究本部 上野核分光研究室
https://www.riken.jp/research/labs/chief/nucl_spectro/
理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 核分光研究室
https://www.riken.jp/research/labs/rnc/nucl_spectro/index.html
理化学研究所 「フジサンケイビジネスアイ」連載企画、第87弾掲載
https://www.riken.jp/pr/news/2020/20200522_1/index.html
理化学研究所 ジルコニウム同位体は励起状態でも突然変形する
https://www.riken.jp/press/2020/20200317_2/index.html
主任研究員研究室 上野核分光研究室
https://www.riken.jp/research/labs/chief/nucl_spectro/index.html
仁科加速器科学研究センター 核分光研究室
https://www.nishina.riken.jp/labo/nuclear_spectroscopy.html
ジルコニウム同位体は励起状態でも突然変形する
https://www.riken.jp/press/2020/20200317_2/index.html
B03 高偏極R1ビームの生成と核・物質科学研究への応用
https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/planned-research/b03/index.html
上野核分光研究室
http://www.riken.jp/research/labs/chief/nucl_spectro/
核分光研究室

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
研究 分担者	山本 文子 (Yamamoto Ayako) (50398898)	芝浦工業大学・工学部・教授 (32619)	
研究 分担者	佐藤 渉 (Sato Wataru) (90333319)	金沢大学・物質化学系・教授 (13301)	

	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
研究 協力者	高峰 愛子 (Takamine Aiko)		
研究 協力者	山崎 展樹 (Yamazaki Hiroki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	市川 雄一 (Ichikawa Yuichi)		
研究協力者	西畑 洸希 (Nishibata Hiroki)		
研究協力者	郷 慎太郎 (Go Shintaro)		
研究協力者	田島 美典 (Tajima Minori)		
研究協力者	今村 慧 (Imamura Kei)		
研究協力者	グラドコフ アレクセイ (Gladkov Aleksey)		

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
---------	---------

フランス	CEA	CNRS/IN2P3	Universite Paris-Saclay	他5機関
ベルギー	KU Leuven			
中国	Peking University			
ルーマニア	IFIN-HH			
韓国	Kyungpook National University			
米国	Michigan State University	The Ohio State University	University of Maryland	他1機関
韓国	Kyungpook National University	Korea Advanced Inst. of Sci. Tech.		
ドイツ	GSI			
オーストラリア	Australian National University			