

令和 4 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01923

研究課題名（和文）反物質系ボース・アインシュタイン凝縮のためのポジトロニウム生成・濃縮・冷却の実現

研究課題名（英文）Positronium generation, condensation, and cooling to realize Bose-Einstein condensation of antimatter system

研究代表者

石田 明（Ishida, Akira）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：00647670

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：物質優勢の宇宙の謎を解くため、電子とその反粒子である陽電子が束縛した反物質系であるポジトロニウム（Ps）原子を活用した物質・反物質非対称性の精密検証を行うべく、Psをボース・アインシュタイン凝縮させるためのPs生成・濃縮・冷却手法の確立を目標とした研究を行った。本研究課題ではこれら手法に必須となる要素技術として、Ps生成材の作製および性能評価技術、時間・空間ともに圧縮された陽電子の生成技術、Ps高速冷却技術の開発研究を進め、それぞれにおいて大きな進展があった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、ポジトロニウム（Ps）のボース・アインシュタイン凝縮（BEC）実現に必要な各要素技術開発において世界に先駆けた成果が得られ、Ps-BEC実現に向けた課題解決に資する新たな知見を蓄積した。各要素技術は高精度分析に応用できるため、分析装置の高度化による産業界・学术界での利用促進が期待できる。さらに、Ps-BECを実現すれば、反物質にはたらく重力の測定により基礎物理学の発展に大きく貢献することができるほか、Ps-BECを光源に応用したガンマ線レーザーを実現し、光科学技術や精密機械計測といった各分野に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：We have researched with the goal of establishing methods to generate, condense, and cool positronium (Ps), which is the bound state of an electron and its antiparticle positron, for realizing Bose-Einstein condensate of Ps. Our purpose is to use such condensate of Ps for future precision tests of matter-antimatter asymmetry to unravel the mystery of the matter-dominated universe. In this project, we have made a great progress in a development of essential element technologies for the methods, such as fabrication and evaluation techniques of Ps generator, positron compression techniques in both time and space, and fast Ps cooling techniques.

研究分野：物理学（素粒子実験、陽電子科学、反物質）

キーワード：反物質 ボース・アインシュタイン凝縮（BEC） ポジトロニウム レーザー冷却 高密度陽電子 陽電子蓄積装置 輝度増強システム ポジトロニウム生成・濃縮・冷却ナノ反応器

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 水素様原子の研究は基礎物理定数の定義にも決定的な役割を果たすなど基礎物理学の発展に貢献している。中でも、電子とその反粒子である陽電子の束縛系：ポジトロニウム (Ps) は反物質を含むシンプルな系である (図1)。基礎物理学における重要な未解決問題として、「なぜ宇宙に物質のみ残ったのか」という究極の問いがある。これを解明する方法として、束縛系量子電磁力学や物質・反物質非対称性の精密検証、あるいは、反物質の重力測定による弱い等価原理の精密検証が有力である。

【ポジトロニウム (Ps)とは】

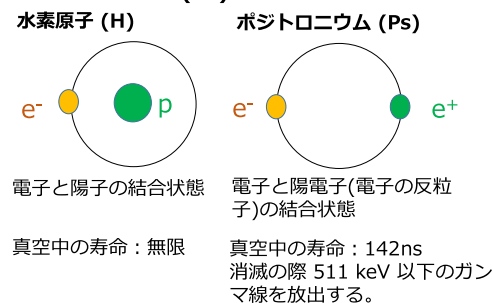


図1 ポジトロニウム (Ps) 原子

(2) 項目(1)で述べた真空・時空にまつわる研究分野を切り開くため、本研究課題では水素様原子のエネルギー準位の超精密測定や世界初の反物質系ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現に Ps 原子を活用する。Ps 原子のエネルギー準位超精密測定や Ps-BEC を実現するために必要不可欠な要素技術である、高効率の Ps 原子の生成・濃縮・冷却手法を確立し、反物質系で世界初となる 10 K までの Ps 原子レーザー冷却を達成することを当初目標として、本研究を行った (図2)。

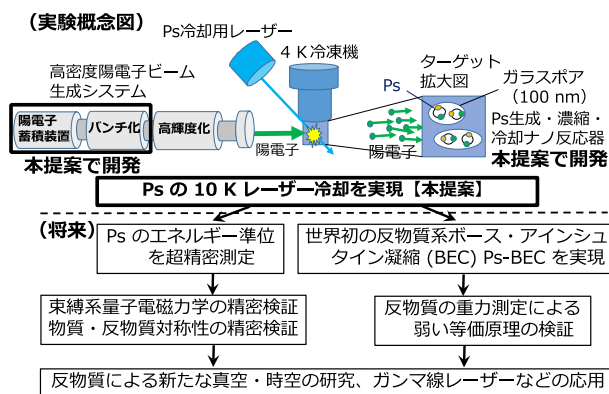


図2 実験概念図と将来の展望

2. 研究の目的

(1) 本研究課題の申請時における当初の研究目的は、素粒子物理学・原子物理学・光科学の各分野にパラダイムシフトをもたらすべく、反物質系 BEC を実現させ、物質優勢の宇宙の謎を解く鍵となる反物質重力測定による物質・反物質対称性の検証や Ps 原子のエネルギー準位超精密測定による束縛系量子電磁力学の精密検証、さらにはガンマ線レーザーに応用することである。

(2) 本研究では、Ps-BEC 実現に必須技術となる高効率の Ps 原子の生成・濃縮・冷却手法を確立する。これら機能をもつ、Ps-BEC を発現させるための「ナノ反応器」としての高度機能性酸化ケイ素 (シリカ) 多孔体、陽電子の蓄積とバンチ圧縮を実現する高密度陽電子ビーム生成システム、および Ps 冷却や BEC 相転移を観測するための Ps ドップラー温度測定法をそれぞれ開発し、開発した要素技術を組み合わせることで 10 K までの Ps 原子レーザー冷却を達成する。

3. 研究の方法

(1) Ps 生成・濃縮・冷却機能をもつナノ反応器の開発：Ps 原子は粒子・反粒子対の束縛系であり、三重項でも自己消滅寿命が 142 ns と短いため、その寿命より短い時間で Ps-BEC を発現させる必要がある。このため Ps-BEC 発現の肝となる Ps 原子の生成・濃縮・冷却を行うための「ナノ反応場」として Ps 生成・濃縮・冷却 (generator / condenser / cooler) の三項目の特性をもつシリカ多孔体を開発する。本研究では、ゾルゲル合成法や規則配列シリカナノ粒子/インプリント加工法やナノプロセッシングを駆使した格子パターンシリカ、によるボトムアップ/トップダウンの挟み撃ち方式で候補材料を作製して、これら特性をもった高度機能シリカ多孔体「ナノ反応器」の新規開発に取り組んだ。

① ボトムアップ的手法による開発と Ps の閉じ込め構造の作製：ゾルゲル合成によりシリカエアロゲルを開発した。閉じ込め構造の作製にはプラズマ化学気相成長 (PECVD) を用いて緻密シリカ薄膜を表面に形成した。項目4. で後述するように、シリカエアロゲル細孔中における励起状態 Ps の振る舞いがレーザー冷却の阻害要因となることが判明した。そこで、シリカエアロゲル以外のナノ細孔中における励起状態 Ps の振る舞いを系統的に調べ、Ps-BEC 実現に最適なナノ構造・組成を探るべく、無機酸化物の組成およびナノ集合構造を自在に制御する技術を活用して規則配列シリカナノ粒子を作製し、その特性を評価する研究も行った。

② トップダウン的手法による開発：研究開始当初はインプリント加工法による開発に取り組んだが、調査研究を進めて様々な手法を探索し、ナノプロセッシングを駆使した手法による格子パターンシリカ開発を先に行うことにした。試作基材の特性評価は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所（IMSS）低速陽電子実験施設（SPF）の共同利用陽電子ビームラインにて行った。

③ 陽電子減速過程シミュレーション法開発：Ps-BEC 実現に必要な超高密度陽電子をシリカ多孔体に入射した際、どのような反応が起こるかは明らかになっておらず、帯電や発熱等の問題が懸念される。そこで陽電子減速過程シミュレーションを行うことによりナノ反応器内で起こる反応を予測して問題点を洗い出し、その知見をナノ反応器開発にフィードバックする。まず、水中における減速過程シミュレーション法を開発し、より現実的な無機酸化物質中における減速過程シミュレーションコード開発につなげた。

(2) 高密度陽電子バンチ生成装置の開発

① 陽電子蓄積装置開発：高密度の陽電子によるパルス状ビームを生成するための陽電子蓄積装置では窒素ガス冷却式の陽電子トラップを利用する。本研究では産業技術総合研究所（AIST）高強度陽電子施設に設置された蓄積装置を高度化した上でバンチ生成装置に活用する。蓄積装置で用いる陽電子トラップ電極を設計し、蓄積時間の短縮による高効率化を行った。蓄積効率改善のためトラップ電極の改善やトラップ電位・磁場・ガス圧の最適化を行った。

② 陽電子密度増大システム開発：Ps 原子の自己消滅時間（142 ns）内にレーザー冷却を完了するには、注入する陽電子バンチの時間パルス幅を寿命よりも十分短くする必要がある。そこで上記陽電子蓄積装置から取り出した陽電子（パルス幅 1000 ns、 10^8 e⁺ pulse⁻¹、ビーム径 5 mm）をパルス時間幅 50 ns 以下にバンチ圧縮するための陽電子密度増大システムを新規開発した。具体的には電子蓄積装置からの陽電子ビームを円筒型電極から成るバンチャーに高周波電圧を印加することによって時間的に圧縮した。

また、Ps-BEC に必要な高密度 Ps を達成するため、磁気集束レンズによる輝度増強システムを適用して空間的に陽電子を圧縮する。試作磁気集束レンズを用いた陽電子ビーム集束実験の結果を解析するためのシミュレーション手法を確立し、試作レンズの性能評価を行った。

(3) Ps ドップラー温度測定法の確立：Ps の温度を測定するため、パルスレーザーを用いた 1S-2P 間遷移によるドップラー広がり測定法（図 3）を確立し、項目(1)で開発したサンプルを用いた原理検証実験を KEK-SPF にて行った。

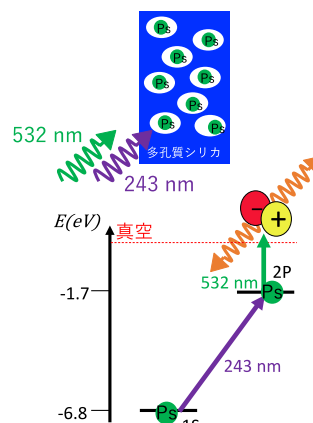


図 3 Ps 温度測定概念図と用いる Ps エネルギー準位

(4) Ps 高速冷却法の確立：初段冷却としての Ps 熱化について、低温シリカエアロゲル中での熱化冷却効率を見積もるための物理モデルを構築し、次段冷却である Ps レーザー冷却に対する要求性能を求めた。また、項目(3)で開発した Ps ドップラー広がり測定法を用いて、別途開発した Ps 冷却用プロトタイプレーザー照射の有無による Ps 温度差を測定し、Ps レーザー冷却の原理を実証すべく、実験を KEK-SPF にて行った。

4. 研究成果

(1) Ps 生成・濃縮・冷却機能をもつナノ反応器の開発

① ボトムアップ的手法による開発と Ps の閉じ込め構造の作製：ゾルゲル合成によりシリカエアロゲルを開発し、PECVD によりシリカエアロゲル表面に緻密シリカ薄膜を形成し、Ps 閉じ込め構造を作製した。KEK-SPF にて、開発したシリカエアロゲル空孔内における Ps のレーザー冷却実現可能性を調べるため室温における Ps の 1S-2P 遷移実験を行った。その結果、シリカエアロゲル中では 2P 状態に遷移した Ps (2P-Ps) が瞬時にガンマ線に消滅するという、当初予期していないことが起きた<引用文献①>。国外の別試料中における最近の研究において同様の現象が観測されていたため、当該研究で 2P-Ps 消滅の原因として指摘されていた性質をもたないことを確認した試料を用いて実験を行ったが、前述のように同様の現象が観測され、当該研究の指摘が誤りであったことが判明し、本研究は 2P-Ps 消滅現象の原因を究明するうえで国内外において大きなインパクトをもたらした。この興味深い現象は Ps レーザー冷却を困難にし、結果として Ps-BEC 実現の阻害要因となるため引き続き原因を追究しており、2P-Ps 消滅率を詳細に調べることで Ps 生成材の改良に向け重要な知見を蓄積し、課題を明確にすることができた。今後も引き続き 2P-Ps 消滅現象の原因を解明する。

一方、室温で Ps レーザー冷却を阻害することが判明したシリカエアロゲルに代わるナノ反応器を探索するため、無機酸化物の組成およびナノ集合構造を自在に制御する技術を活用し、規則

配列シリカナノ粒子を試作した。AIST の陽電子ビームラインで行った実験で Ps 生成を確認し、重要な知見を蓄積した。本研究で得られた知見を基に、今後はこれら手法によるナノ反応器を Ps-BEC 実現に最適化する研究を行う。

② トップダウン的手法による開発:試作シリカ基材を用いて KEK-SPF において Ps 飛行時間(TOF)測定を行ったところ、酸化膜厚が不十分であることが判明した。追加で酸化処理を行い同様の測定をした結果、Ps 生成によるものと思われる信号を捉えることに成功した。今後はデータのより詳細な解析を進め、ナノ微細加工の各種パラメータを最適化する。

③ 陽電子減速過程シミュレーション法開発:陽電子減速過程シミュレーション法の開発もを行い、水中における電子・陽電子線コードの高度化を実施するとともに、断面積をシリコンやシンチレータへ拡張する研究を行った。これまでの研究では一粒子のシミュレーションを行っており、今後の課題は高密度陽電子特有の現象を捉えるためのさらなるシミュレーション高度化である。

(2) 高密度陽電子バンチ生成装置の開発

① AIST 高強度陽電子施設に設置した蓄積装置を用いて、電子線形加速器を用いて発生した低速陽電子をトラップすることに成功した<引用文献②>。今後は Ps-BEC 実現に必要な陽電子強度を達成すべく、さらなる陽電子ビーム強度向上のため電子線形加速器も含めた装置の改良と最適化を進める。

② 陽電子密度増大システム開発:当初計画の 50 ns 以下という要求性能を大幅に上回る数 ns 以下の短パルス取り出しに成功し、高密度陽電子生成のための知見が蓄積された。また、陽電子輝度増強システムに用いる磁気集束レンズについて、試作レンズを用いて KEK-SPF で実施したビーム集束テスト結果を解析するためのシミュレーション手法を確立し、試作レンズによってフラックスを向上させられたことが明らかになった。さらに、陽電子輸送効率の改善、ビームエネルギーの増大、陽電子トラップの活用によるレーザーとの同期の改善により陽電子フラックスを向上させられることを計算で明らかにし、今後のレンズ開発方針を明確にした。

(3) Ps ドップラー温度測定法の確立:項目(1)で判明したシリカエアロゲル中での 2P-Ps 消滅を回避しつつ、Ps の 1S-2P 遷移によるドップラー温度測定法を確立するため、開放孔をもつシリカエアロゲルで生成され真空中に放出された Ps を用い、真空中で温度測定法を確立すべく実験を行った。測定の結果、遷移を飽和させられたものと結論づけた<引用文献③>。得られた Ps 温度は多孔質 Ps 生成材において得られた文献値と同じオーダーであったため、Ps 温度が測定できたと推測される。今後は得られたデータの詳細な解析を進め、Ps 温度測定精度を高める。

(4) Ps 高速冷却法の確立:初段冷却に用いる Ps 熱化について、低温シリカエアロゲル細孔中での Ps 熱化関数を Ps のド・ブロイ波長を用いて説明するモデルを提唱し、100 K-500 K の広い Ps 温度領域にわたって熱化測定結果をよく再現することに成功した。これにより、ナノ細孔中の Ps 平均自由行程を当初の 100 nm から 50 nm に半減させることで、研究開始当初に想定した Ps 冷却用レーザーの性能で Ps-BEC が実現可能であることを示した<引用文献④>。

次段冷却である Ps レーザー冷却については、シリカエアロゲルから真空中に放出された Ps を用いて真空中で Ps レーザー冷却の原理実証実験を行うべく、準備を進めた。国内外でまだ誰も Ps レーザー冷却原理実証には成功しておらず、本研究で蓄積した知見を活用した装置によって今後、世界に先駆けて Ps レーザー冷却原理実証に成功することが期待される。

以上のように、本研究課題では、Ps-BEC 実現に必要な不可欠な Ps 生成・濃縮・冷却機能を達成すべく各必須要素技術の開発研究を進め、それぞれにおいて大きな進展があった。当初予期していなかった問題も発見されたため、当初目標の 10 K までの Ps レーザー冷却達成はできなかったが、問題解決に資する新たな知見を蓄積しつつ Ps-BEC 実現に向け着実に研究を進めており、世界に先駆けた成果が得られ、また今後速やかに得られる見込みである。Ps-BEC 実現によって基礎物理学研究を大きく発展させるべく、今後も本研究を継続する予定である。

<引用文献>

① 周 健治、石田 明、満汐 孝治、大島 永康、伊藤 賢志、甲斐 健師ほか、シリカ空孔中でのポジトロニウム励起実験、陽電子科学、16、2021、31-38

② H. Higaki, K. Michishio, K. Hashidate, A. Ishida, N. Oshima, “Accumulation of LINAC based low energy positrons in a buffer gas trap”, Appl. Phys. Express, 13, 2020, 066003

③ 石田 明、大島 永康、満汐 孝治、伊藤 賢志、甲斐 健師ほか、ポジトロニウムのレーザー冷却、Photon Factory Activity Report, 37, 2020, 201

④ K. Shu, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, N. Oshima, B. E. O’Rourke, K. Ito, “Observation of orthopositronium thermalization in silica aerogel at cryogenic temperatures”, Phys. Rev. A, 104, 2021, L050801

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shu Kenji, Ishida Akira, Namba Toshio, Asai Shoji, Oshima Nagayasu, O'Rourke Brian E., Ito Kenji	4. 巻 104
2. 論文標題 Observation of orthopositronium thermalization in silica aerogel at cryogenic temperatures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 L050801-1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physreva.104.1050801	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 Higaki Hiroyuki, Michishio Koji, Hashidate Kaori, Ishida Akira, Oshima Nagayasu	4. 巻 13
2. 論文標題 Accumulation of LINAC based low energy positrons in a buffer gas trap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 066003~066003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab939f	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 石田明、橋立佳央理、山田恭平、周健治、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師	4. 巻 37
2. 論文標題 ポジトロニウムのレーザー冷却	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Photon Factory Activity Report	6. 最初と最後の頁 201-1~6
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 無
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 周健治、田島陽平、蔡恩美、吉岡孝高、橋立佳央理、石田明、浅井祥仁、五神真、山田恭平、難波俊雄、満汐孝治、オロークブライアン、大島永康、鈴木良一、伊藤賢志、熊谷和博、藤野茂、望月出海、和田健、兵頭俊夫、甲斐健師	4. 巻 16
2. 論文標題 シリカ空孔中でのポジトロニウム励起実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 陽電子科学	6. 最初と最後の頁 31~38
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 大島 永康	4. 巻 69
2. 論文標題 空孔評価のための陽電子マイクロビーム技術	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計量標準と計量管理	6. 最初と最後の頁 56～58
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 無
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 周 健治、山田 恭平、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師	4. 巻 37
2. 論文標題 物質反物質非対称性探索を目指したポジトロニウムのレーザー冷却	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Photon Factory News	6. 最初と最後の頁 23～26
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 無
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57件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、小林拓豊、魚住亮介、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮実現のためのポジトロニウム冷却
3. 学会等名 第58回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Shu, Y. Tajima, T. Kobayashi, R. Uozumi, E. Chae, K. Yoshioka, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2. 発表標題 Experimental progress in physics of cold positronium
3. 学会等名 VIRTUAL FPUA 2021 Fundamental Physics Using Atoms (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名	A. Ishida, K. Hashidate, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, T. Kobayashi, R. Uozumi, K. Shu, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B.E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2 . 発表標題	Dense positronium formation for Bose-Einstein condensation
3 . 学会等名	12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC 12.5) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	R. Uozumi, Y. Tajima, T. Kobayashi, K. Shu, E. Chae, K. Yoshioka, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2 . 発表標題	Development of a high-resolution probing laser suited for cold positronium spectroscopy
3 . 学会等名	12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC 12.5) (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	Y. Tajima, K. Yamada, T. Kobayashi, R. Uozumi, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, K. Shu, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2 . 発表標題	Development of a chirped pulse laser for cooling positronium
3 . 学会等名	12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC 12.5) (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1 . 発表者名	K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2 . 発表標題	Enhanced decay and line broadening of 2P ortho-positronium inside silica pores
3 . 学会等名	12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC 12.5) (国際学会)
4 . 発表年	2021年

1. 発表者名 石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、小林拓豊、魚住亮介、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却
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 石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、小林拓豊、魚住亮介、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム生成材料の開発
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 桧垣浩之、満汐孝治、橋立佳央理、石田明、大島永康
2. 発表標題 電子線形加速器を用いた電子陽電子プラズマ実験に向けて
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 桧垣浩之、満汐孝治、大島永康、石田明
2. 発表標題 電子線形加速器と荷電粒子閉じ込め装置に基づく低エネルギー陽電子ビーム生成
3. 学会等名 2021年度ビーム物理研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	魚住亮介、田島陽平、小林拓豊、蔡恩美、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、鈴木良一、兵頭俊夫、望月出海、和田健、周健治、吉岡孝高
2. 発表標題	(2020G101) ポジトロニウムのレーザー冷却を見据えたドップラー分光法の開拓
3. 学会等名	JAEA 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	周健治、魚住亮介、小林拓豊、田島陽平、吉岡孝高、前川雅樹、和田健、難波俊雄、石田明、浅井祥仁
2. 発表標題	(2020G631) 多孔材料から放出されるポジトロニウムの飛行時間法によるエネルギー分布測定
3. 学会等名	JAEA 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	和田健、望月出海、R. Ahmed、星健夫、兵頭俊夫、一宮彪彦、水野清義、仁谷浩明、小菅隆、齋藤裕樹、石井晴乃、永谷康子、五十嵐教之、榎本嘉範、白川明広、諏訪田剛、設楽哲夫、古川和朗、岩瀬広、河裾厚男、白澤徹郎、石田明、周健治
2. 発表標題	低速陽電子実験施設報告
3. 学会等名	JAEA 2021年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、田島陽平、小林拓豊、魚住亮介、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題	ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却
3. 学会等名	日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 田島陽平、山田恭平、小林拓豊、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、蔡恩美、周健治、吉岡孝高
2. 発表標題 ポジトロニウムのレーザー冷却に向けた深紫外チャープパルス光源の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 魚住亮介、田島陽平、小林拓豊、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、周健治、吉岡孝高
2. 発表標題 ポジトロニウムの高分解能速度分布測定法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 満汐孝治、桧垣浩之、石田明、大島永康
2. 発表標題 SiC減速材を用いた高効率陽電子トラップの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林拓豊、田島陽平、魚住亮介、蔡恩美、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、鈴木良一、兵頭俊夫、望月出海、和田健、周健治、吉岡孝高
2. 発表標題 ポジトロニウムのレーザー冷却実証に向けたドップラー分光法の開拓
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Tajima, K. Yamada, K. Shu, A. Ishida, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, E. Chae, and K. Yoshioka
2. 発表標題 Development of a Sub-microsecond Broadband Pulsed Laser for Cooling Positronium
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO): Applications and Technology 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、山田恭平、田島陽平、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度ポジトロニウム生成材料の開発
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 石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、山田恭平、田島陽平、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
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 橋立佳央理、石田明、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、山田恭平、田島陽平、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
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 石田 明、橋立 佳央理、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、山田 恭平、田島 陽平、小林 拓豊、魚住 亮介、周 健治、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却(1)
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 周 健治、田島 陽平、小林 拓豊、魚住 亮介、蔡 恩美、吉岡 孝高、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、山田 恭平、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却(2)
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 満汐孝治、檜垣浩之、橋立佳央理、石田 明、大島永康
2. 発表標題 リニアックベース陽電子ビームの蓄積・制御とその応用
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林拓豊、田島陽平、魚住亮介、蔡恩美、周健治、吉岡孝高、石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、山田恭平、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、鈴木良一、兵頭俊夫、望月出海、和田健
2. 発表標題 Ps のレーザー冷却実現に向けた光源開発及び温度測定実験
3. 学会等名 低速陽電子実験施設研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 魚住亮介、田島陽平、小林拓豊、蔡恩美、周健治、吉岡孝高、石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、山田恭平、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、鈴木良一、兵頭俊夫、望月出海、和田健
2. 発表標題 Psのレーザー冷却の実証に向けた温度測定実験
3. 学会等名 2020年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 周健治、田島陽平、小林拓豊、魚住亮介、蔡恩美、吉岡孝高、石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、山田恭平、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、鈴木良一、兵頭俊夫、望月出海、和田健
2. 発表標題 ポジトロニウムのレーザー冷却実験
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田明、橋立佳央理、難波俊雄、浅井祥仁、五神真、山田恭平、田島陽平、小林拓豊、魚住亮介、周健治、蔡恩美、吉岡孝高、大島永康、オロークブライアン、満汐孝治、伊藤賢志、熊谷和博、鈴木良一、藤野茂、兵頭俊夫、望月出海、和田健、甲斐健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 恭平、周 健治、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オロークブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 周 健治、山田 恭平、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋立 佳央理、周 健治、山田 恭平、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却III
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 満汐 孝治、小林 慶規、オローク・ブライアン、鈴木 良一、大島 永康
2. 発表標題 産総研 低速陽電子ビーム利用施設の現状 -寿命測定装置開発とビームライン整備-
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 甲斐 健師、石田 明、大島 永康
2. 発表標題 高密度陽電子パンチシミュレーションコードの開発
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大島 永康、満汐 孝治、オローク・ブライアン、鈴木 良一
2. 発表標題 産総研電子加速器ベース低速陽電子利用施設の現状
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Ishida, K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2. 発表標題 Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation
3. 学会等名 8th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Ishida, K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2. 発表標題 Recent progress towards positronium Bose-Einstein condensation
3. 学会等名 15th International Workshop on Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Michishio, Brian E. O'Rourke, Yoshinori Kobayashi, Ryoichi Suzuki, Nagayasu Oshima
2. 発表標題 Current status of the AIST slow positron facility
3. 学会等名 15th International Workshop on Positron Beam Techniques and Applications (SLOPOS-15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 オローク・ブライアン、満汐 孝治、小林 慶規、鈴木 良一、大島 永康
2. 発表標題 産総研の低速陽電子ビーム施設
3. 学会等名 JASIS 2019 コンファレンス 分析計測標準研究部門 第5回シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田 明、周 健治、山田 恭平、橋立 佳央理、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指した高密度・低温ポジトロニウム生成
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 甲斐 健師、石田 明、大島 永康
2. 発表標題 凝縮相における高密度陽電子バンチシミュレーションコードの開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 恭平、周 健治、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 周 健治、山田 恭平、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Ishida, K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2. 発表標題 Experimental progress towards positronium Bose-Einstein condensation
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Michishio
2. 発表標題 A high-quality and energy-tunable positronium beam and its applications
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nagayasu Oshima
2. 発表標題 Positron microbeam experiments in AIST
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shu, K. Yamada, K. Hashidate, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2. 発表標題 Excitation of positronium by laser for efficient cooling
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Yamada, K. Shu, K. Hashidate, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2. 発表標題 Development of cooling laser for positronium Bose-Einstein condensation
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hashidate, K. Shu, K. Yamada, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, M. Kuwata-Gonokami, Y. Tajima, E. Chae, K. Yoshioka, N. Oshima, B. E. O'Rourke, K. Michishio, K. Ito, K. Kumagai, R. Suzuki, S. Fujino, T. Hyodo, I. Mochizuki, K. Wada, T. Kai
2. 発表標題 Development of focusing lens for high-density positron beam
3. 学会等名 4th Japan-China Joint Workshop on Positron Science (JWPS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桧垣 浩之、満汐 孝治、橋立 佳央理、石田 明、大島 永康
2. 発表標題 線形加速器を用いた低エネルギー陽電子蓄積実験
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田 明、周 健治、山田 恭平、橋立 佳央理、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮実現のためのポジトロニウム冷却
3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大島 永康、オローク・ブライアン、満汐 孝治、折原拓磨、佐藤公法
2. 発表標題 陽電子ビームを用いた消滅ガンマ線ドップラー広がりシステム
3. 学会等名 2019年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 周 健治、山田 恭平、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 高速レーザー冷却を目指したポジトロニウムのレーザー励起
3. 学会等名 2019年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 満汐 孝治、オローク・ブライアン、大島 永康
2. 発表標題 産総研・低速陽電子ビーム施設
3. 学会等名 2019年度量子ビームサイエンスフェスタ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋立 佳央理、周 健治、山田 恭平、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却I
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田 恭平、周 健治、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却II
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 周 健治、山田 恭平、橋立 佳央理、石田 明、難波 俊雄、浅井 祥仁、五神 真、田島 陽平、蔡 恩美、吉岡 孝高、大島 永康、オローク ブライアン、満汐 孝治、伊藤 賢志、熊谷 和博、鈴木 良一、藤野 茂、兵頭 俊夫、望月 出海、和田 健、甲斐 健師
2. 発表標題 ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却III
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ボース-アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 (東京大学・Tabletop実験HP) https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/?page_id=110 Ps-BEC Project Webpage (東京大学助教・石田明作成) https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~ishida/work/psbec/index.html

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	大島 永康 (Oshima Nagayasu) (00391889)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	
研究分担者	満汐 孝治 (Michishio Koji) (10710840)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	
研究分担者	渡邊 亮太 (Watanabe Ryota) (50736832)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	甲斐 健師 (Kai Takeshi) (70403037)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主幹 (82110)	
研究分担者	伊藤 賢志 (Ito Kenji) (90371020)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長 (82626)	

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