

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02190

研究課題名(和文) J-PARCにおけるエキゾチック原子の革新的研究

研究課題名(英文) Innovative study of exotic atoms at J-PARC

研究代表者

谷田 聖 (Tanida, Kiyoshi)

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 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：00360587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導転移端X線検出器(TEs)によるK原子・原子分光を目指し、J-PARCにて段階的なビーム実験を実施すると共に、米国NISTの共同研究者と共に新たなTEsの開発を推進した。まず、(1)TEsを用いた初めてのエキゾチック原子実験「K-3He/4He原子 3d-2p X線精密分光実験(J-PARC E62)」を遂行した。(2)原子実験については、現在実行中の実験の次になることが事実上決まったが、J-PARCの故障などによって、ビームタイムは待たされている。さらに、(3)将来実験に向けた硬X線TEs開発は、試作製作・性能試験を実施し、17.5 keV X線に対して十分な性能が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々は、従来より一桁以上良い分解能をもつX線検出器TEsを世界に先駆けハドロン物理研究に導入し、J-PARCの大強度ビームと組み合わせることで、他の追随を許さない研究を展開した。新たな手法を確立し、エキゾチック原子を用いた強い相互作用の研究に革新をもたらした点で大変意義深い。さらに、将来に向けた新たな硬X線用TEsの開発も行い、原子核中のK- π のポテンシャルを定量的に明らかにする系統的实验に向け、低エネルギー-QCDと中性子星の構造研究の研究の飛躍的進展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Aiming at K-atom and π -atom spectroscopy by transition edge sensor (TES), we performed stepwise experiments at J-PARC while proceeding with the development of a new TES with collaborators of NIST. (1) The first exotic-atom experiment "Precision spectroscopy of K-3He / 4He atom X-rays with TES (J-PARC E62)" was conducted successfully. (2) π -atom experiment is granted to be the next experiment, but we are still waiting for beam time due to troubles in J-PARC. (3) Hard X-ray TES development for future experiments was carried out by trial manufacture and performance test, and sufficient performance was obtained for 17.5 keV X-ray.

研究分野：ハドロン物理実験

キーワード：エキゾチック原子 実験核物理 X線分光

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

エキゾチック原子とは、原子核のまわりを通常の電子のかわりに他の負電荷を持つ粒子(μ^- , π^- , p^- 等)が回っているような系を指し、これまでも大変興味深い研究対象となってきた。例えば、エキゾチック原子を使えば、負電荷を持つ粒子の基本パラメータである質量を精密に決定することができる。また、粒子が強い相互作用を感じる粒子(ハドロン)の場合は、原子軌道からの摂動(シフトと幅)を見ることで、これらの粒子と原子核の間の強い相互作用について定量的に調べることができる。負電荷を持つハドロンと原子核の相互作用は、ハドロン物理として興味深いだけでなく、中性子星の構造を考える上でも重要な役割を果たす。負電荷の粒子が入ると、電荷のつり合いから、中性子を1つ陽子に変えることができ、その分フェルミエネルギーを大きく得をする。このため、 π^- 中間子凝縮の可能性が議論されたり、最近では、ストレンジクォークを含んだ負電荷ハドロンである K^- や Ξ^- の役割が議論の主役となっている。この K^- と Ξ^- が、本研究のターゲットである。

K^- は、これまでの K 原子X線分光実験により、原子核との間に強い引力が働くことがわかっているが、大きな吸収幅と短寿命ゆえの高精度 K 原子実験の困難さにより、未だポテンシャルの深さに関して決定的な情報が得られていなかった。殊に近年、この引力が非常に強い(~ 200 MeV)場合、原子核に K^- が強い相互作用で深く束縛する可能性(K 核)が盛んに議論されている。存在すれば、原子核の高密度状態や中性子星の K 中間子凝縮の研究の糸口になるため、世界各地で探索実験が実施されているが、その存否は未決着のままであった。一方、この K 核の存在に関連し、 K^- -He原子2p準位に、 K^- -原子核間ポテンシャル依存の僅かな変化がみられる可能性は、30年以上前から指摘されていた。この系に関しては、 ${}^3\text{He} \cdot {}^4\text{He}$ 電荷密度分布精密計算結果を用いた、より精密な理論計算が行われ、代表的な浅い深い光学ポテンシャルを用いて計算した K^- - ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ の3d-2p X線(~ 6 keV)のエネルギーシフトの差において、両ポテンシャル間に約0.6 eVの有意な違いが現れることが分かった。これはこれまでの10倍以上の測定精度が必要であることを意味し、分解能向上が待ち望まれていた(従来型半導体検出器(SDD)では2 eVの精度が限界)。

Ξ^- は、原子核とのポテンシャルが十分に強い引力であれば、中性子星において、より軽い Λ 粒子よりも多く存在する可能性がある。このポテンシャルについては、いくつかの引力であることを示唆するデータがあるが、その深さは未だ不明であった。理論的にも、Nijmegen ESC08モデルなどは比較的強い引力($-20 \sim -30$ MeV)を予測するが、京都-新潟モデルはほとんど0のポテンシャルを予測しており、格子QCDによる計算の難しさとも相まって、確たる予想はできない状態であった。それに加え虚部の深さは ΞN - $\Lambda\Lambda$ 混合の強さを表しており、これは $\Lambda\Lambda$ 核に ΞN がどれだけの割合で混ざるかを定めるとともに、Hダイバリオンの存否にも関係するため、その決定が長年待望されてきた。一方、 Ξ^- の寿命は K^- と比べて2桁短い。この為、 Ξ^- 原子及び Ξ^- ハイパー核のデータは皆無であったが、近年J-PARCによる大強度 K 中間子ビームの実現により、 Ξ 原子実験や Ξ ハイパー核実験が、現実味を帯びてきた。

我々はこれまで、加速器を用いたストレンジ核物理の分野において、最新 $X \cdot \gamma$ 線検出器技術とサイエンスを融合させることを継続して追い求めてきた。強力なビームで安定動作する半導体検出器の開発により、ハイパー核 γ 線分光実験による Λ ハイパー核収縮効果の発見や、シリコンドリフト検出器を用いた K 中間子水素原子1s準位の世界最高精度測定など、関連分野に多大なインパクトを与えてきた。しかし、今後の系統的な研究に向けて、半導体検出器を超えるX線検出技術側のブレークスルーが必要だと感じており、そこで本研究を立案した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来より一桁以上良い分解能をもつ超伝導遷移端X線検出器(TES)を世界に先駆けて導入し、エキゾチック原子を用いた強い相互作用の研究に革新を起こす事である。J-PARCの大強度ビームと組み合わせることで、他の追従を許さない研究を展開できる。我々の目標は、原子核中の $K^- \cdot \Xi^-$ のポテンシャルを定量的に明らかにすることである。 K 原子に関しては K^- -He X線分光を行い K^- のポテンシャルの深さに決着をつける。原子に関しては、 Ξ^- 半導体検出器を用いた最初の実験で、世界で初めて Ξ 鉄原子X線を観測し、その手法を確立するとともに、新たなTESを開発して将来の系統的实验に備える。これらは低エネルギーQCDと中性子星の構造研究の飛躍的進展の鍵となる。

より具体的には、以下を目標とする：

- (1) TESを用いて K^- - ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 原子の3d-2p X線(~ 6 keV)のエネルギーを0.2 eVの精度で決定し、 K^- -原子核間の強い相互作用ポテンシャルの深さに関する長年の謎を解明する(J-PARC E62実験)。
- (2) Ξ 原子実験の第一歩として、Ge検出器を用いた Ξ^- -Fe原子6h-5g X線の測定により手法を確立する。エネルギー・幅の決定精度は、それぞれ0.05 keV・1 keVを目指す。これは、予想されるエネルギーシフト(1~4 keV)より十分良く、ポテンシャル決定の為の初データとなる(J-PARC E03実験)。
- (3) 将来実験に向け、硬X線用TESの開発を行う。 Ξ^- -C原子4f-3d X線を念頭に置き、55 keV X線に対して、有効面積500 mm²、検出効率80%、エネルギー分解能50 eVのシステムを目指し、本研究課題においては、先ず、有効面積1/4サイズの試作機を製作する。

3. 研究の方法

(1) TES 検出器を用いた K⁻He 原子の X 線測定

K 中間子ヘリウム原子 X 線分光実験 (J-PARC E62) においては、K⁻³He 原子及び K⁻⁴He 原子から放出される X 線のエネルギー (~6 keV) を TES 検出器により精度良く測定し、電磁相互作用のみによる計算値からのシフトと幅を観測することで、強い相互作用の情報を引き出す。

実験は、J-PARC ハドロン実験施設の K1.8BR ビームラインにて実施した。K 中間子は、30GeV 陽子ビームを金の生成標的に衝突させることで生成し、二次ビームとして実験エリア内まで引き出した。K⁻He 原子は、K⁻ビームを減速後、液体ヘリウム標的の中に静止させて生成した。K⁻ビームは spill 構造をもち、約 2 秒間の DC ビームが、5.52 秒毎に供給された。K⁻ビームの強度は、減速材直前で $9 \times 10^4 / \text{spill}$ 、この内 0.06% (³He)、0.08% (⁴He) のみが、He 標的に静止した。TES 検出器による K⁻He 原子 X 線の収量は、1 週間で約 100 事象と非常に低い。貴重な X 線を失わないため、TES・ビームライン・液体 He 標的システムは注意深く設計・配置した。

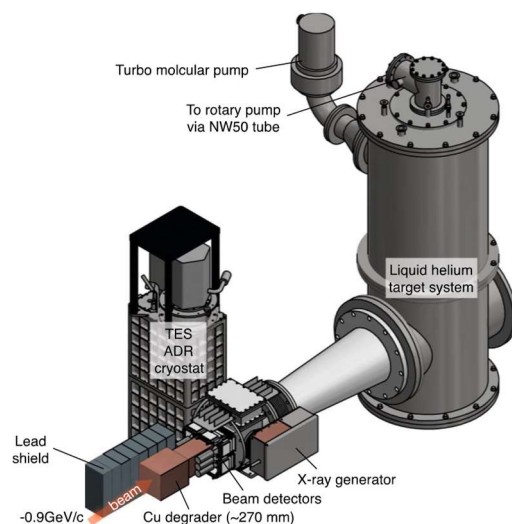


図 1: E62 実験セットアップ

実験のセットアップを図 1 に示す。ビームの減速材としては銅ブロックを使用した。ビーム中の荷電粒子 (特に不純物として紛れ込んだ π^- 中間子) による TES への直接ヒットを低減するため、鉛ブロックを図の様に配置した。ビームの飛跡とエネルギー損失は、多線式ドリフトチェンバーとプラスチックシンチレーション検出器を標的直前に配置して測定した。エネルギー損失の大きい減速した K 中間子による事象のみを選択することで、静止 K 事象を同定した。ビームライン系のデータ読出系は TES とは別系統で、オフラインでタイムスタンプによる同期を行った。

液体 He 標的システムは、液体窒素熱輻射シールドを備えた液体 He 冷媒による冷凍機システムを使用した。減圧冷却により 1.4K まで冷却できる。但し、ワンショットオペレーションのため、定期的な He 冷媒の補給を必要とした。TES システムは、共同研究先のアメリカ国立標準技

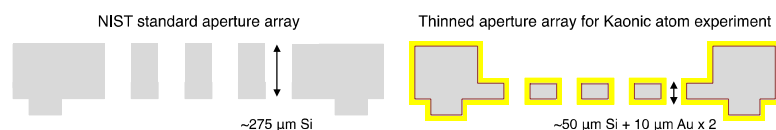


図 2 TES 開口アレイ

術研究所 (NIST) が開発した 240 素子 TES を使用した。Mo-Cu 二層薄膜の TES 素子に 4 μm 厚ビスマス吸収体を実装し、目的の 6 keV X 線に対し 85% 吸収効率を有する。有効面積は、素子当たり ~305 × 290 μm²、240 素子全体で 21 mm² に達する。TES 上部には、受光部以外の基盤部をカバーするため、受光部だけに開口を設けた「開口アレイ」を使用した。本実験では、図 2 (右) のような、薄い開口アレイを新規作成し、X 線に対する阻止能を下げないように 10 μm 厚の金コーティングを施した。これにより、NIST 標準(左)に対し検出器の標的見込み角にして ~50% 増加を実現した。素子の冷却には、二段式パルスチューブ断熱消磁冷凍機(ADR)を使用した。ベース温度を 70 mK で制御し、温度揺らぎを 6 μK (RMS) 前後に抑えた。TES の超伝導臨界温度は ~100 mK で、電氣的バイアスによってこの超伝導転移端に温度を保ち、吸収体の温度上昇に起因する急激な抵抗変化を、電流変化として SQUID 電流アンプで読み出す。多素子の信号は、熱流入を最小限に保つため、時分割 (TDM) 式 SQUID アンプ多重読み出しにより多重化して読み出した。独立した 30 素子の出力を連続的に切り替え 1 本の SQUID アンプで読み込み、これを 8 TDM カラム平行して読むことで、240 素子読み出しを行った。

K⁻He 原子 X 線の検出立体角を最大化する為、TES 及び He 標的の 2 つの極低温システム間は、同じ真空を共有する。図 3 のように、TES 検出面は、標的セルのできるだけ近くに (約 10 mm の間隔) 設置した。標的セルは、直径 75 mm、長さ 90 mm の円筒形で、円筒部にはマイラシート、円筒両端には X 線用の Be 窓を設けてある。各々の冷却ステージ (50 mK, 3 K, 50 K) における輻射窓のサイズや素材を工夫することで、NIST 標準セットアップとの比較で、検出器の標的見込み角増加と同時に X 線透過率においても ~50% 増加を実現した。エネルギー較正は、図 3 の様に配置した X 線発生装置を用いて行った。X 線強度を制御でき、任意の二次標的を選ぶことで、較正用特性 X 線を限定できる。実験中は常時、較正用 X 線を照射することで、"in-situ" エネルギー較正を実現できた。

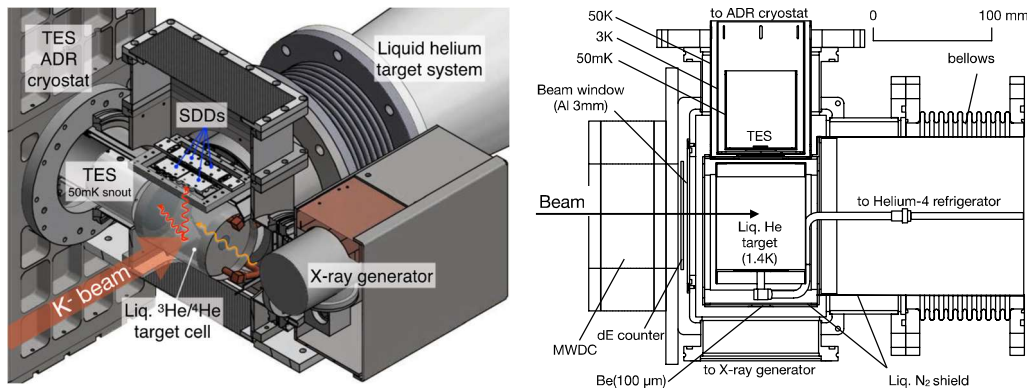


図 3 標的及びX線検出器付近の実験セットアップ

(2) Ge 検出器を用いた Ξ^- -Fe 原子の X 線測定(J-PARC E03 実験)

E03 実験においては、鉄のターゲットから(K^- , K^+)反応によって Ξ^- を作り出し、同じターゲット内で減速・静止させることで Ξ^- 鉄原子を生成する。そこから放出される X 線の測定には、ゲルマニウム検出器を用いて行う。

まず 2017 年には同じ(K^- , K^+)反応を用いて Ξ^- 粒子を生成する E07 実験 (ハイブリッドエマルジョン法を用いたダブルラムダハイパー核探索実験)に参加し、 Ξ^- 粒子がちゃんと生成されていることを確認した。同時にゲルマニウム検出器を置いて、ゲルマニウム検出器がちゃんと動作していることを確認し、エネルギー分解能などを確認した。また、2017 年 6 月及び 2018 年 2 月にそれぞれテストのためのビームタイムが数時間ずつ割り当てられたので、それを用いてバックグラウンドのスタディを行った。

(3) 硬 X 線 TES の開発

将来実験に向けた硬 X 線用 TES の開発に関しては、共同研究先の NIST において、試作製作・性能試験を実施した。吸収体には金を採用し、様々なサイズ(有効面積 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}^2 / \text{pixel}$)・厚さ($0.6 \sim 1.8 \text{ }\mu\text{m}$)の吸収体に対し、分解能評価を行った。

4. 研究成果

(1) TES 検出器を用いた K-He 原子の X 線測定

K 中間子ヘリウム原子 X 線分光実験(J-PARC E62)は、①2016 年 6 月に約 1 週間のコミッション実験 (K-ビーム調整、静止 K 調整、X 線検出器調整)を実施し、②2018 年 6 月に約 1 ヶ月、物理データ収集のための本実験を実施した。

①コミッション実験においては、K-ビーム及び静止させる為のビーム減速材の調整を行うと共に、実際のビーム条件にて、 ^{55}Fe 線源からの $\text{Mn K}\alpha$ 線を用いて TES のパフォーマンスを確認した。エネルギー分解能は、荷電粒子直接ヒットの計数率に (1 Hz/pixel 以下の範囲で) 比例して低下することが明らかとなり、荷電粒子直撃を抑えるため、鉛ブロック遮蔽が有効であることを示した。J-PARC における K-ビームは、上述のように約 5 秒間隔の時間構造 (spill) をもち、この spill ON/OFF (ビーム有り/無し) でのエネルギー分解能は、それぞれ $5 \text{ eV} / 6.5 \text{ eV}$ であった (図 4)。このとき荷電粒子直接ヒットの実効計数率は 0.2 Hz/spill で、2014 年に行ったスイス PSI 研究所での π 中間子ビームによるテスト実験で確認した傾向と矛盾の無い結果を得た (図 5)。ビーム起因のバックグラウンドも $\sim 0.02 \text{ [counts/20 eV/sec]}$ であることが分かり、現実的なビーム条件にて、分解能・バックグラウンド共に、実験遂行に問題無いレベルであることを確認した。

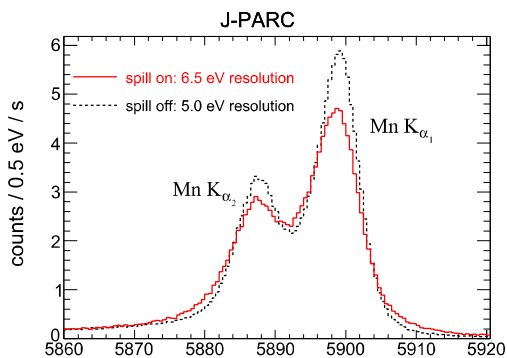


図 4 ^{55}Fe 線源による Mn Ka 線のスペクトル。K-ビームの spill ON/OFF 時の比較

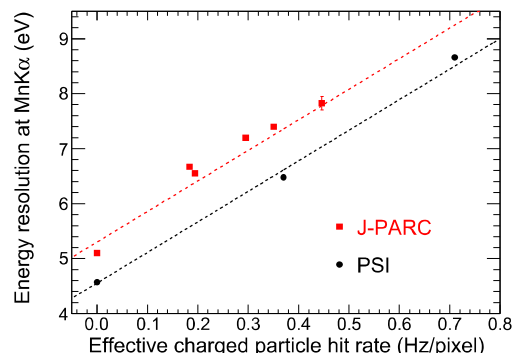


図 5 エネルギー分解能(FWHM) vs. ビーム起因の荷電粒子ヒット計数率

②本実験は、2018年5月29日からシステムの冷却を開始し、6月2日よりビームによるコミッショニングを開始した。物理データ収集は、6月8日から30日まで実施し、 $^3\text{He} \cdot ^4\text{He}$ 標的に対し各々~200時間及び~150時間分取得した。図6に本実験における標的及びTESシステムの長期安定性を示す。上から順に、液体He標的セルの温度、ADRスピン(70 mK検出器ステージを制御するための磁石電流)、及びCo K α (6.9 keV) X線に対するエネルギー分解能を示す。両冷凍機システムともに、約30時間の保持時間を達成した。矢印はそれぞれヘリウム冷媒補充とADR磁石サイクルのタイミングを表す。これらの作業中(約1.5時間)はビーム利用できないため、両作業を同時に行うことで効率化を図った。合計28回の冷媒補充と、27回のADR磁石サイクルを行った。図7は、約2時間の較正X線照射で得られた、単一素子に対する典型的なスペクトルである。エネルギー較正は、X線発生装置で生成した6本のX線、Cr K α 、Cr K β 、Co K α 、Co K β 、Cu K α 、Cu K β を用いた。矢印で示した目的のX線エネルギーの領域をカバーしつつ、X線同士が重ならないよう慎重に選択された。エネルギー較正には、6本の較正線の文献値を用い、3次スプライン補間曲線を用いて行った。図6の分解能評価は、良いパフォーマンスを示す224素子分を足し合わせたoff-spill時のスペクトルに対して行った。実験中、分解能5~6 eV FWHM@Co K α (6.9 keV)で安定していた。

現在、全データセットに対し、応答関数・エネルギー較正・イベント照合・隣接素子を用いたバックグラウンド低減のスタディ等、詳細な解析を行っている。最終スペクトルでは ^3He 標的及び ^4He 標的のデータについてそれぞれK中間子X線およそ200カウント、エネルギー分解能(FWHM@6keV)およそ6eVを達成する見込みである。解析の最終段階で、印刷公表に向けて準備を進めている。

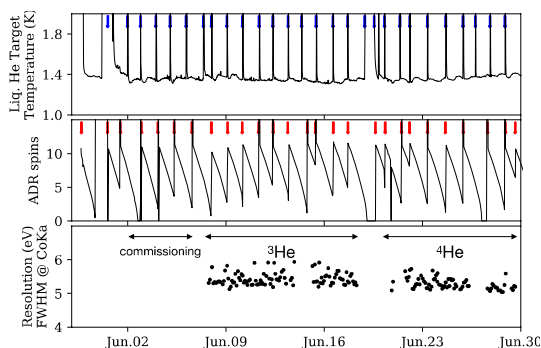


図6 2つの冷凍機の長期安定性と TES 分解能

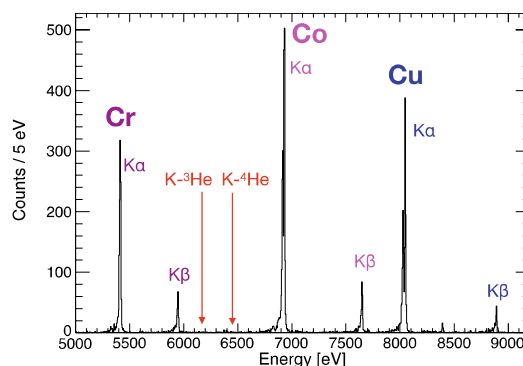


図7 エネルギー較正用スペクトル

(2) Ge 検出器を用いた Ξ^- -Fe 原子の X 線測定

2017年及び2018年のテスト実験の結果、エネルギー分解能は300 keVのX/γ線に対して2~2.5 keV(FWHM)と、E03にとって十分な値が得られた。また、 Ξ 粒子の取量、X線バックグラウンド共に予想の範囲内であり、本実験を行うことに何の問題もないという結論を得た。このことをJ-PARCの実験審査委員会(PAC)において報告し、PACから"it is now appropriate to press ahead with high priority."とのコメントを頂いた。これにより、E03が当時実行中だったE40実験の次に行われることが事実上決まった。しかしながら、J-PARC主リングでの磁石故障(2019年4月)などの影響を受けて、J-PARCのビームタイムは遅れを余儀なくされており、E40実験は2020年4月現在もまだ実行中である。そのあおりを受けて、E03実験は本研究終了の段階で残念ながらまだ実施できていない。

(3) 硬 X 線 TES の開発

硬 X 線 TES をテストした結果、結果、比較的小さなサイズの吸収体においては、分解能 $\Delta E(\text{FWHM}) < 10 \text{ eV} @ 17.5 \text{ keV} (\text{Mo K}\alpha)$ を達成し、大きなサイズの吸収体においても $\Delta E(\text{FWHM}) < 15 \text{ eV} @ 17.5 \text{ keV}$ という十分な性能が得られた。本試験結果を元に最終デザインを決定し、2021年内の完成を目指し実機製作を進めている。

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 17件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 S. Ajimura, S. Okada, K. Tanida et al. (J-PARC E15 collaboration):	4. 巻 789
2. 論文標題 "K-pp", a K-meson nuclear bound state, observed in $3\text{He}(K^-, \Lambda p)n$ reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 620-625
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.12.058	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 H. Ekawa, K. Tanida et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 Observation of a Be double-Lambda hypernucleus in the J-PARC E07 experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 021D02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty149	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 Yamada S., et al. the DIOS team	4. 巻 193
2. 論文標題 Super DIOS: Future X-ray Spectroscopic Mission to Search for Dark Baryons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1016 ~ 1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-1918-z	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 C. Tripl, S. Okada et al.	4. 巻 1138
2. 論文標題 A New Silicon Drift Detector System for Kaonic Atom Measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013 ~ 012013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1138/1/012013	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 Hashimoto T., Bazzi M., Bennett D. A., Berucci C., Bosnar D., Curceanu C., Doriese W. B., Fowler J. W., Fujioka H., Guaraldo C., Parnefjord Gustafsson F., Hayakawa R., Hayano R. S., Hays-Wehle J. P., Hilton G. C., Hiraiwa T., Ichinohe Y., Iio M., ..., Okada S., ..., Tanida K., et al.	4. 巻 27
2. 論文標題 Beamline Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2016.2646374	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 Hashimoto T., Bazzi M., Bennett D. A., Berucci C., Bosnar D., Curceanu C., Doriese W. B., Fowler J. W., Fujioka H., Guaraldo C., Gustafsson F., Parnefjord, Hayano R. S., Hays-Wehle J. P., Hilton G. C., Hiraiwa T., Iio M., Iliescu M., Ishimoto S., ..., Okada S., ..., Tanida K., et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 Kaonic-Atom X-ray Spectroscopy with Superconducting Microcalorimeters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 72001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.17.072001	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 Inoue K., Ajimura S., Beer G., Bhang H., Bragadireanu M., Buehler P., Busso L., Cargnelli M., Choi S., Curceanu C., Enomoto S., Faso D., Fujioka H., Fujiwara Y., Fukuda T., Guaraldo C., Hashimoto T., Hayano R. S., ..., Okada S., ..., Tanida K., et al	4. 巻 17
2. 論文標題 Spectroscopic Study of Hyperon Resonance Below KbarN Threshold via the d(K-, n) Reaction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 72003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.17.072003	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 Yang S. B., Akazawa Y., Aoki K., Chiga N., Ekawa H., Feliciello A., Fujita M., Hasegawa S., Hayakawa S., Hayakawa T., Honda R., Hosomi K., Hwang S. H., Ichige N., Ichikawa Y., Ikeda M., Imai K., Ishimoto S., Kanatsuki S., ..., Tanida K., et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 The First Gamma-ray Spectroscopic Study of sd-shell Hypernucleus, 19 F	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 12004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.17.012004	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 Tamura H., Yamamoto T. O., Agnello M., Akazawa Y., Amano N., Aoki K., Botta E., Chiga N., Ekawa H., Evtoukhovitch P., Feliciello A., Fujita M., Gogami T., Hasegawa S., Hayakawa S. H., Hayakawa T., Honda R., Hosomi K., Hwang S. H., ..., Tanida K., et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 Gamma-ray Spectroscopy of Hypernuclei --Recent Results and Prospect at J-PARC--	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.17.011004	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 Honda R., Agnello M., Ahn J. K., Ajimura S., Akazawa Y., Amano N., Aoki K., Bhang H. C., Chiga N., Endo M., Evtoukhovitch P., Feliciello A., Fujioka H., Fukuda T., Hasegawa S., Hayakawa S. H., Hosomi K., Hwang S. H., ..., Tanida K., et al. (J-PARC E10 Collaboration)	4. 巻 96
2. 論文標題 Missing-mass spectroscopy with the $Li6(-, K^+)X$ reaction to search for $H^{-}6$	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.96.014005	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 Yang S.B., Ahn J.K., Akazawa Y., Aoki K., Chiga N., Ekawa H., Evtoukhovitch P., Feliciello A., Fujita M., Hasegawa S., Hayakawa S., Hayakawa T., Honda R., Hosomi K., Hwang S.H., Ichige N., Ichikawa Y., Ikeda M., Imai K., ..., Tanida K., et al. (J-PARC E13 Collaboration)	4. 巻 120
2. 論文標題 First Determination of the Level Structure of an sd-Shell Hypernucleus, $F^{-}19$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 132505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.132505	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 S. Kawasaki, S. Okada, K. Tanida et al.	4. 巻 13
2. 論文標題 Spectroscopic Experiment of $(1405)^{-}$ via the In-flight $d(K^{-}, n)$ Reaction at J-PARC K1.8BR	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS conference proceedings	6. 最初と最後の頁 20018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.13.020018	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 Fuminori Sakuma the J-PARC E15 Collaboration	4. 巻 13
2. 論文標題 KbarNN Bound State Search at J-PARC	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS conference proceedings	6. 最初と最後の頁 10002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.13.010002	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 Yudai Ichikawa, Kiyoshi Tanida et al.	4. 巻 13
2. 論文標題 Study of the Kbar-Nucleus Interaction by Using the $^{12}\text{C}(K^-, p)$ Reaction at J-PARC	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS conference proceedings	6. 最初と最後の頁 20007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.13.020007	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 Y. Sada, S. Okada, K. Tanida et al. (J-PARC E15 Collaboration)	4. 巻 2016
2. 論文標題 Structure near K^+p threshold in the in-flight $^3\text{He}(K^-, p)n$ reaction	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Progress of theoretical and experimental physics	6. 最初と最後の頁 051D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw040	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 S. Okada et al.	4. 巻 2016
2. 論文標題 First application of superconducting transition-edge sensor microcalorimeters to hadronic atom X-ray spectroscopy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Progress of theoretical and experimental physics	6. 最初と最後の頁 091D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw130	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 T. Hashimoto, S. Okada, K. Tanida, S. Yamada et al.	4. 巻 27
2. 論文標題 Beamline Test of a Transition-Edge-Sensor Spectrometer in Preparation for Kaonic-Atom Measurements	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 2100905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2016.2646374	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 H. Tatsuno, S. Okada et al.	4. 巻 130
2. 論文標題 Future projects of light kaonic atom X-ray spectroscopy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 1018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201613001018	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

[学会発表] 計30件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Kiyoshi Tanida
2. 発表標題 Baryon spectroscopy at J-PARC
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hashimoto, S. Okada, K. Tanida, S. Yamada et al.
2. 発表標題 Kaonic atom experiments at J-PARC
3. 学会等名 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinji Okada
2. 発表標題 Hadronic atoms at J-PARC HEF
3. 学会等名 International workshop on the project for the extended hadron experimental facility of J-PARC (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田信二
2. 発表標題 超伝導転移端センサーによるX線精密分光と低速中性分子測定
3. 学会等名 第4回 ExpRes Dojo 道場 “Precision Detection / Detector” (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Okada, K. Tanida, S. Yamada et al. (for J-PARC E62 collaboration)
2. 発表標題 Kaonic Atom X-ray Spectroscopy with Transition Edge Sensors
3. 学会等名 the 2018 Applied Superconductivity Conference (ASC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Randy Doriese and Shinji Okada
2. 発表標題 Pionic and kaonic atoms: high-resolution, high-efficiency X-ray spectroscopy with microcalorimeters
3. 学会等名 Seminar for the University of Colorado Physics Department (招待講演)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Okada, K. Tanida, S. Yamada et al. (for J-PARC E62 collaboration)
2 . 発表標題 Exotic atom x-ray spectroscopy with superconducting detectors
3 . 学会等名 The ALL-RIKEN workshop 2018
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Okada, K. Tanida, S. Yamada et al. (for J-PARC E62 collaboration)
2 . 発表標題 Kaonic atom x-ray spectroscopy at J-PARC
3 . 学会等名 The 52th Reimei Workshop “ Experimental and Theoretical Hadron Physics: Recent Exciting Developments ” (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hashimoto T., Bazzi M., Bennett D. A., Berucci C., Bosnar D., Curceanu C., Doriese W. B., Fowler J. W., Fujioka H., Guaraldo C., Parnefjord Gustafsson F., Hayakawa R., Hayano R. S., Hays-Wehle J. P., Hilton G. C., Hiraiwa T., Ichinohe Y., Iio M.,, Okada S.,, Tanida K., et al.
2 . 発表標題 TES application to kaonic atom X-ray spectroscopy in a charged-particle beamline
3 . 学会等名 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Okada S., Bazzi M., Bennett D. A., Berucci C., Bosnar D., Curceanu C., Doriese W. B., Fowler J. W., Fujioka H., Guaraldo C., Parnefjord Gustafsson F., Hashimoto T., Hayakawa R., Hayano R. S., Hays-Wehle J. P., Hilton G. C., Hiraiwa T., Ichinohe Y., Iio M.,, Tanida K., et al.
2 . 発表標題 X-ray spectroscopy of kaonic atoms with cryogenic detectors
3 . 学会等名 International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名	Hashimoto T., Bazzi M., Bennett D. A., Berucci C., Bosnar D., Curceanu C., Doriese W. B., Fowler J. W., Fujioka H., Guaraldo C., Parnefjord Gustafsson F., Hayakawa R., Hayano R. S., Hays-Wehle J. P., Hilton G. C., Hiraiwa T., Ichinohe Y., Iio M.,, Okada S.,, Tanida K., et al.
2. 発表標題	Kaonic nuclei studied via K- induced reactions at J-PARC
3. 学会等名	International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	橋本直、井上謙太郎、岩崎雅彦、川崎新吾、Yue Ma、野海博之、大西宏明、岡田信二、應田治彦、佐久間史典、佐藤将春、谷田聖、山我拓巳、(J-PARC E15 collaboration)
2. 発表標題	J-PARC E15実験における前方核子を用いたKbarNN束縛状態の研究
3. 学会等名	日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	谷田聖
2. 発表標題	J-PARC E03実験
3. 学会等名	第6回「ストレンジネス核物理を考える会」
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	K. Tanida
2. 発表標題	Baryon spectroscopy at Belle and future prospects for Belle II and J-PARC
3. 学会等名	2nd Workshop on Future Directions in Spectroscopy Analysis (FDSA2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 K. Tanida
2. 発表標題 Proposed measurements on exotic Lambda* resonances
3. 学会等名 International workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017 (HNP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷田聖
2. 発表標題 J-PARC とBelle でのバリオン分光
3. 学会等名 2017 年度KEK 理論センターJ-PARC 分室活動総括研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷田聖
2. 発表標題 理論と実験が協力したデータ解析
3. 学会等名 ヘビークォークハドロンとエキゾチックハドロンの構造
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 Hadronic atoms at J-PARC HEF
3. 学会等名 International workshop on the project for the extended hadron experimental facility of J-PARC (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 Kaonic atoms at J-PARC
3. 学会等名 Kaon in atoms/nuclei at DAFNE and J-PARC (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Tanida
2. 発表標題 Possible new $\Lambda(1520)$ resonance with $J=3/2$ in Λ c decay and $K-p \rightarrow$
3. 学会等名 International Workshop on Strangeness Nuclear Physics (SNP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Okada et al.
2. 発表標題 Kaonic-atom x-ray spectroscopy with cryogenic detectors
3. 学会等名 International Workshop on Meson in Nucleus (MIN16) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 橋本直、岡田信二、谷田聖、山田真也 et al.
2. 発表標題 J-PARCにおけるK-ビームを用いた超伝導遷移端マイクロカロリメータの性能評価
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 S. Okada et al.
2. 発表標題 ハドロンビーム環境下における 超伝導X線検出器の性能評価
3. 学会等名 計測システム研究会2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Okada et al.
2. 発表標題 Kaonic atom x-ray spectroscopy with superconducting microcalorimeters
3. 学会等名 The international workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics (HINT2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Okada et al.
2. 発表標題 超伝導検出器を用いたハドロニック原子X線精密分光
3. 学会等名 原子衝突学会第41回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Tatsuno and S. Okada
2. 発表標題 Light Kaonic Atoms
3. 学会等名 14th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (MESON2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Hashimoto et al.
2. 発表標題 High-resolution kaonic atom X-ray spectroscopy with transition-edge sensors
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2016 (ASC2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Hashimoto et al.
2. 発表標題 Application of X-ray microcalorimeters to hadronic-atom spectroscopy
3. 学会等名 International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山田真也他
2. 発表標題 超伝導 TES カロリメータを用いた K 中間子原子 X 線の精密分光プロジェクト(3-1)
3. 学会等名 日本天文学会2017年春季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 早川亮大、岡田信二、山田信也他
2. 発表標題 超伝導 TES カロリメータを用いた K 中間子原子 X 線の精密分光プロジェクト(3-2)
3. 学会等名 日本天文学会2017年春季年会
4. 発表年 2017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
研究 分担者	山田 真也 (Yamada Shinya) (40612073)	首都大学東京・理学研究科・助教 (22604)	
研究 分担者	岡田 信二 (Okada Shinji) (70391901)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・協力研究員 (82401)	
研究 協力者	橋本 直 (Hashimoto Tadashi)		
研究 協力者	竜野 秀行 (Tatsuno Hideyuki)		
研究 協力者	佐久間 史典 (Sakuma Fuminori)		