

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630480

研究課題名(和文) 固体ホウ素コンバータを用いた超伝導中性子検出器による超高空間分解能イメージング

研究課題名(英文) Superconducting neutron detector with Boron convertor for high spatial resolution neutron imaging

研究代表者

大野 雅史 (Ohno, Masashi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：90391896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：固体ホウ素10Bで中性子を吸収させ、核反応により生じる 線やリチウム核のエネルギーを熱に変換して超伝導転移端センサ( TES )で読み出す新しい超伝導中性子検出器の開発を進めた。プロトタイプとなるスズ放射線吸収体をIr-TESの上に搭載した素子において、イオン粒子のエネルギーの計測実証を行い、中性子核反応により生じる 線やリチウム各のエネルギーもTESで検出しうることを確かめた。そして10B中性子吸収コンバータブロックをイリジウム(TES)上に搭載した検出素子の作製に成功した。

研究成果の概要(英文)：We are developing the new neutron detector which detect the energy of alpha particle and Lithium nucleus from the nuclear reaction in the 10B neutron converter. First, using the TES coupled with a tin absorber, we demonstrated that TES can accurately measure the energy of the heavy ion. Therefore, TES is expected to detect the energy of alpha particle and Lithium nucleus which are produced in the 10B neutron converter. Further, we succeeded to fabricate the TES device coupled with the 10B bulk neutron converter.

研究分野：放射線計測

キーワード：超伝導転移端センサ 中性子計測

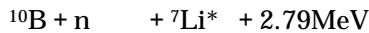
## 1. 研究開始当初の背景

$^3\text{He}$  を中性子コンバータとして用いた気体中性子検出器は検出効率と中性子/線弁別特性に優れ、中性子散乱実験やラジオグラフィに適用するため、 $\mu\text{-pic}$ 、GEM、MSGC 等、イメージング性能の向上を目指した検出器開発が進められてきた。しかしながら  $^3\text{He}$  は希少資源で非常に高価であるばかりか、その産出量の大半を占める米国の輸出制限により、近年は我が国や欧州において極めて入手困難な状況にある。ゆえに  $^3\text{He}$  を高圧力で大量に封入する気体中性子検出器の運用は困難であり、 $^3\text{He}$  に代わる新規中性子コンバータを用いた検出技術の開発は急務となっている。

## 2. 研究の目的

固体ホウ素  $^{10}\text{B}$  で中性子を吸収させ、核反応  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  により生じる線やリチウム核のエネルギーを熱に変換して超伝導転移端センサ( TES : Transition Edge Sensor) で読み出す新しい超伝導中性子検出技術を開発する。

$^{10}\text{B}$  は中性子を吸収し、以下に示す核反応  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  により線とリチウム原子核に変換され、2.79 MeV あるいは 2.31 MeV (励起  $^7\text{Li}$  が線を発生した場合) のエネルギーを発生する。



あるいは



ここで 70 % 以上の高い中性子吸収効率を得るには、20  $\mu\text{m}$  厚以上の  $^{10}\text{B}$  膜厚を必要とする。一方、上記核反応により生じる線やリチウム核の  $^{10}\text{B}$  (固体) 中での飛程は高々 2 $\mu\text{m}$  程度であり、これらを気体検出器で検出する場合は、 $^{10}\text{B}$  コンバータの厚さを線、リチウム核の飛程以下に薄くせねばならず、十分な検出効率を得るのは難しい。本研究では、この粒子やリチウム核のエネルギーが  $^{10}\text{B}$  コンバータ内で吸収され、熱に変換されて生じる温度上昇を TES マイクロカロリメータにより精密に検出させることを目指す。

TES は放射線入射に伴う温度上昇を検出原理とし、超伝導体の超伝導転移領域における急峻な温度抵抗変化を利用した高感度な温度センサを用いて、この温度上昇を正確に測定することにより入射放射線のエネルギーを精密に検出するエネルギー spektrometa である。本研究実施者は超伝導イリジウム(Ir)を温度センサに用いた TES の開発を行ってきた。イリジウムはバルクで 112 mK に超伝導転移温度を有するため、検出器を 100 mK 近傍の温度にて動作させることが可能となり、これによりセンサの熱揺らぎが低減され優れたエネルギー分解能が期待される。本研究実施者はこれまでに、この Ir- TES と重金属製バルクからなる線吸収体を組み合わせた検出素子により 59.5 keV の線

に対して既存 HPGe 半導体検出器の数倍以上に相当する 84 eV(FWHM)を実現した他、662 keV の線に対し世界最高の 465 eV(FWHM)の極めて優れたエネルギー分解能を達成している。

本研究では、厚膜またはバルクの  $^{10}\text{B}$  コンバータ適用による高い中性子変換効率と TES のエネルギー弁別特性を活かし、中性子計測応用に耐えうる高検出効率と優れた中性子/線弁別特性の実証を目指す。そして本研究実施者がすでに確立している Ir- TES アレイ検出システムを適用して既存中性子検出技術では原理的に達成不可能な超高空間分解能 20  $\mu\text{m}$  を有する中性子イメージングの実現を最終的な目標とする。

## 3. 研究の方法

本研究実施者がこれまで進めてきた「超伝導イリジウム(Ir)を用いた TES 検出器」の開発研究をベースとし、Ir- TES ピクセル上に固体ホウ素  $^{10}\text{B}$  中性子コンバータを配した検出素子を開発する。まず、中性子検出器の作製工程の開拓を進めた。研究当初は Ir 薄膜 TES ピクセル上にスパッタリング製膜法あるいはイオンビーム真空蒸着法を駆使して固体ホウ素  $^{10}\text{B}$  中性子コンバータ層を積膜、形成することを検討したが、これらの製膜法では必要となる検出部以外にも発散してデポされるため、ターゲットから拡散した  $^{10}\text{B}$  の大部分が無駄になり、製膜効率が極めて低く、非常に高価な  $^{10}\text{B}$  ターゲットの適用を考えると経済的コストに見合わない判断せざるを得なかった。それゆえ、本研究では  $^{10}\text{B}$  の板材から切り出して中性子コンバータ部を作成し、これを TES ピクセル上に搭載する検出器構造を考案して、検出素子を試作することとした。また、TES 検出部において  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  の核反応により発生する  $\alpha$  粒子や  $^7\text{Li}$  粒子のエネルギーを正確に検出しようことを実証するため、Ir- TES ピクセル上にスズのバルクからなる放射線吸収体を搭載した素子を試作し、これにタンデム加速器で加速されたイオン粒子を照射して、TES でそのイオン粒子のエネルギーを検出する実験を進めた。試作した検出器の動作実験を行うため、希釈冷凍機内のコールドステージ上に検出素子と信号増幅に用いる dc-SQUID アレイ増幅器からなる信号読み出し回路を構築した。そして検出素子と信号読み出し回路を 100 mK 以下に冷却して、TES を駆動させて、信号応答特性を評価した。中性子入射イベントは  $^{10}\text{B}$  中性子コンバータでの  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  核反応により生じるエネルギーを検出することにより判別される。具体的には、TES により得られるエネルギー spektrol は  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  の核反応エネルギーに対応する 2.79 MeV と 2.31 MeV に鋭いピークを持つことが予想される。したがって、これらエネルギーピークを形成するイベントが中性子吸収によるものと結論づけられ、超伝導中性

子検出器による中性子検出を実証したことになる。さらに 25  $\mu\text{m}$  角の Ir 薄膜温度センサピクセルをベースとした超伝導中性子検出器アレイ(10×4 ピクセル)を開発する。この TES アレイの各ピクセルを全て並列バイアスで駆動させ、検出信号波形に反映されるピクセル毎の熱特性の違いを詳細な波形解析により読み出し、中性子入射ピクセルを特定する手法の確立を図る。

#### 4. 研究成果

##### 検出素子作成法の確立

TES 検出素子は、極薄い窒化シリコンメンブレン上に形成された超伝導 Ir/Au 薄膜温度センサおよびこれと熱的に接続された中性子吸収コンバータ部から成る。検出素子の作成においては、まず窒化シリコン膜付き両面研磨シリコン基板上に超伝導 Ir 単一膜(超伝導転移温度  $T_c=150\text{mK}$ )または Ir/Au 薄膜(超伝導転移温度  $T_c=120\text{mK}$ )を製膜する。Ir 膜成膜を基盤加熱せずにスパッタリング製膜したものについては、リフトオフ法にて超伝導薄膜温度センサの形状(20~250 $\mu\text{m}$ 角)に成形する。ただし、Ir 膜とした面の窒化シリコン膜との付着力を向上させるため 300 に基盤加熱して Ir をスパッタリング製膜した場合は、 $\text{BCl}_3$  ガスを用いた反応性イオンエッチング法を用いて Ir 膜(あるいは Ir/Au 膜)を温度センサ形状にパターンングすることとなる。続いてニオブ電極をスパッタリング製膜およびリフトオフ法を用いて製膜・成形する。この段階にて、Ir/Au 薄膜上に中性子吸収コンバータを搭載する土台の役割を担うポストをあらかじめ作成しておく。本研究実施者はこのポスト形成において金バンプボンディング技術または極少量のエポキシを Ir 薄膜上に滴下して直径 50 $\mu\text{m}$  程度のポスト(台座)を再現性よく作成する手法を確立した。そして裏面のシリコン基板を深堀エッチング法により除去して、窒化シリコンメンブレン構造を完成させる。なお、中性子吸収コンバータとして、本研究では  $^{10}\text{B}$  板材をダイシング法により 1 mm 角立方体形状に切削したものを適用し、これを Ir/Au 薄膜上に作製した金バンプポストの上に搭載する。金バンプポストを採用した場合、高い熱伝導率を有する金バンプにより中性子吸収コンバータと超伝導温度センサ薄膜が接続されることとなり、中性子吸収コンバータ内で核反応により生じた温度上昇を素早く超伝導薄膜温度センサに伝達しうる。これは従来の厚膜レジストやエポキシ製のポストに比べてセンサの高感度化、応答高速化(計数率向上)を達成する独創的な技術であり、重金属線吸収体を用いた TES センサ開発研究において優れた線検出特性がすでに実証されている。したがって中性子吸収コンバータを金バンプポストを介して Ir 温度センサと熱的に強く結合させることにより、中性子吸収により生じる  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{L}$  反応のエネルギー検出

においても優れた検出特性が期待される。

##### 検出器冷却系と信号読み出し回路の構築

希釈冷凍機コールドステージ上に TES 検出素子を設置し、その近傍に dc-SQUID チップを配して、検出素子と dc-SQUID チップ上の入力コイル端子及びシャント抵抗をアルミボンディングに接続することにより、超伝導回路を構成する。シャント抵抗には、TES の常伝導抵抗値より充分低い 20 m $\Omega$  の抵抗を用いることにより、TES を疑似的な定電圧バイアスにて駆動させる。なお、これらの検出素子および電流読み出し回路系は、冷凍機デュー内に仕込まれた超伝導ニオブシールドおよびクライオパームシールドにより磁氣的に外部環境から遮蔽されている。TES からの電流信号は、入力コイルにより磁束に変換されて、SQUID 増幅器により、その磁場変化を読み出すことにより、低インピーダンスな信号読み出しを行う。SQUID 増幅器からの信号は、冷凍機デュー直上に設けられた室温アンプでさらに増幅され、それを PC で操作可能な SQUID 駆動エレクトロニクス系ユニットに入れて処理し、PC 内のフラッシュ ADC ボードに取り込む。本研究では、中性子コンバータ内での  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{L}$  反応により発生する個々の  $\alpha$  粒子が中性子コンバータ内で吸収され、そのエネルギーが全てに熱に変換されて TES に電流出力が生じると考えられるため、TES 出力における一定のトリガレベル以上の入射信号について、その応答波形の立ち上がりから立下りまでの電流値データ全てを一つずつ全て PC 内に取り込み、後からオフラインで応答信号データを信号処理解析して中性子検出イベントを特定する。

適用するパルス管搭載寒剤フリー希釈冷凍機は、冷却のために液体ヘリウム、液体窒素等を大量に必要とする従来型の冷却装置に比べて、格段に安全性と冷却性能の安定性に優れており、わずか数回のボタン操作のみで全自動で室温から 100 mK 以下の極低温状態まで冷却可能な装置である。しかしながら、これまでの線検出用 TES の開発研究により、特にマイクロデバイスとしては極めて大きく重い重金属バルク製放射線吸収体を搭載した TES において、希釈冷凍機プレクーリングを担うパルス管から冷凍機のコールドステージ上に伝播する機械的振動が大きなノイズ源となることが判明している。そして本研究における大型の  $^{10}\text{B}$  中性子吸収コンバータを搭載した TES 素子においてもこれと同様のノイズ発生が予想される。そこでこの機械的振動によるノイズを抑制するため、まずパルス管において振動源となるモーターのみを分離した新しい低振動タイプの物に換装すると共に、パルス管コールドヘッドを希釈冷凍機冷却部から浮かせて溶接ペローで接続し、空気バネでパルス管本体を吊り上げて保持すると共に、パルス管コールドヘッドと冷凍機 4 K ステージ間を複数の柔らかか

い銅線で熱的に接続し、パルス管と希釈冷凍機冷却部の固定脚をも分離して設置するなどの様々な工夫を施すことにより、冷却装置由来の機械振動起因のノイズ低減に努めた。

#### TES による粒子検出実証

本研究での中性子 TES 検出器において高い検出特性を実現するためには、まず  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  で生じる  $\alpha$  粒子のエネルギーを TES により高い精度で検出することが必要不可欠である。そこで本研究では、確立した TES 素子構造の粒子検出特性を評価すべく、まず、 $^{10}\text{B}$  の代わりに 0.5 mm 角のスズのパルクから成る放射線吸収体を搭載した検出素子を作製し、これを用いて東京大学タンデム加速器 (MALT) で発生する炭素ビームを TES に照射してその入射応答を調べる実験を試みた。加速器からのビームポートと希釈冷凍機の放射線入射ポートを直結し、加速器で発生した炭素イオン  $^{14}\text{C}$  をコールドステージ上の TES に照射した。ただし、加速器から入射される  $^{14}\text{C}$  は TES 素子のスズ吸収体部に到達するまでに、冷凍機デューワ内の 50 K、4 K、0.9 K、0.1 K 各温度での熱輻射シールド上に開けられたアルミマイラ層の窓を透過することとなり、各アルミマイラ層透過時に入射イオンのエネルギーは減速されることとなる。SRIM 計算コードによる入射イオンのエネルギーロス計算の結果、加速器で発生した  $^{14}\text{C}^{+4}$  および  $^{14}\text{C}^{+5}$  各ビームの冷凍機侵入前のエネルギーがそれぞれ 24 MeV および 29 MeV を想定すると、これらのイオンは熱シールドアルミマイラ窓を透過して TES に吸収される直前にそれぞれ 3.5 MeV および 10.5 MeV まで減速されているものと推定された (図 1 参照)。このような入射体系においてタンデム加速器からの  $^{14}\text{C}^{+4}$  および  $^{14}\text{C}^{+5}$  ビームを TES に入射したところ、いずれのビームにおいてもその応答として先がつつ

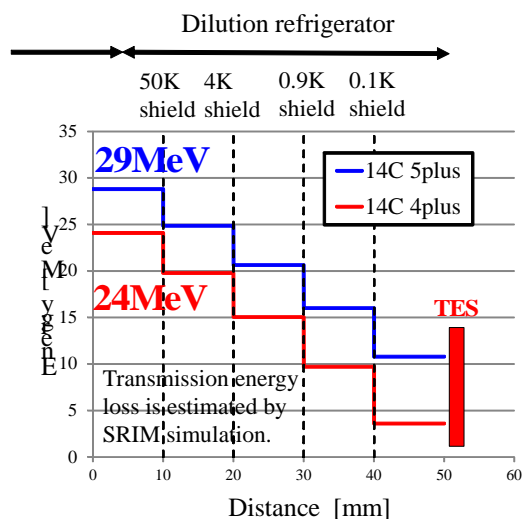


図 1 :  $^{14}\text{C}$  スズ放射線吸収体を搭載した TES による  $^{14}\text{C}$  イオン粒子の検出

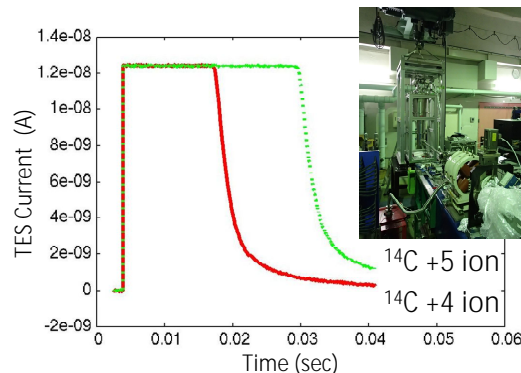


図 2 :  $^{14}\text{C}$  スズ放射線吸収体を搭載した TES による  $^{14}\text{C}$  イオン粒子の検出

れて平らになった入射信号波形が得られた (図 2 参照)。これは TES の熱容量が小さくてイオン入射による温度上昇が大きくなり、センサの温度が超伝導転移領域を飛び越えて飽和し、超伝導薄膜センサは完全に常伝導状態に移行した後、しばらく時間が経過してセンサの冷却が進むと再びセンサの温度は超伝導転移領域内に再突入して、そして元のバイアス点に帰還するような挙動を示しているものと考えられる。ただし、イオンが持つ加速エネルギーの違いが入射応答信号の飽和波形の長さ (飽和時間) に反映されることが確かめられ、これにより TES が入射した個々の粒子のエネルギーを精密に弁別していることが実証された (図 2 参照)。以上の結果より、 $^{10}\text{B}$  中性子吸収コンバータを搭載した TES 検出素子においても、中性子吸収により生じる  $\alpha$  粒子は、それぞれ 2.31 MeV および 2.79 MeV なので、上記の  $^{14}\text{C}$  イオン検出と同様の検出信号が得られ、しかもその入射信号の飽和時間を計測することにより、中性子吸収に起因した入射応答を高い精度にて弁別することが可能と考えられる。

#### $^{10}\text{B}$ 中性子コンバータ搭載 TES 素子の作製

で確立した中性子 TES 検出器作製プロセスに基づき、1mm 角の立方体形状に切削された  $^{10}\text{B}$  中性子吸収コンバータを  $1\mu\text{m}$  厚の窒化シリコンメンブレン上に製膜されてい

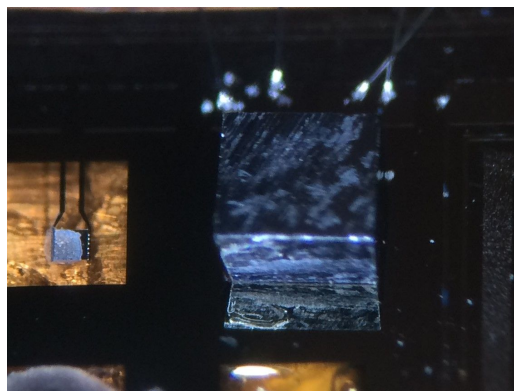


図 3 :  $^{10}\text{B}$  中性子吸収コンバータを搭載した TES 検出素子

る Ir-TES に搭載した検出素子の作製に成功した。中性子吸収コンバータを支えるポストは金バンプポストとエポキシポストの2通りについて作製プロセスを進めた。このうち金バンプポストを用いた素子は、最後工程である中性子吸収体搭載時に窒化シリコンメンブレンを破損させてしまい、完成には至らなかったが、エポキシポストを用いた検出素子においては、図3の写真に示すとおり完成させることができた。

#### 今後の見通し

超伝導 Ir 薄膜製膜に用いるスパッタリング装置の経年劣化に伴う不調とその大規模改修作業、および希釈冷凍機冷却性能の不調等、予期せぬトラブルが重なり、検出器作製、および評価のスケジュールが一時的に滞ったが、その後、それらのトラブルは改善され、ようやくプロトタイプとなるスズ吸収体付 TES 素子によるイオン粒子の精密計測を実証し、そして、 $^{10}\text{B}$  中性子吸収コンバータ付き TES 素子を完成させるに至った。現在、試作した中性子吸収コンバータ付き TES 検出素子を希釈冷凍機にセットして、電気特性評価を進めており、動作が確認されれば、 $^{252}\text{Cf}$  中性子源を用いた中性子計測実証を進める予定である。

なお本研究の最終目標である、高空間分解能を実現しうるアレイ検出器を実現するためには、ピクセルの小型化が必要となるが、 $^{10}\text{B}$  の中性子吸収反応に伴い発生する $\alpha$ 粒子のエネルギーが高いため、TES の入射信号はより顕著に飽和することが予想される。このような飽和時間の遅延が、バックグラウンドの $\gamma$ 線カウンタをも考慮した場合、中性子計測の計数率特性にどの程度影響を及ぼすのかについてさらに検討を進める必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計3件)

Masashi Ohno, Tomoya Irimatsugawa, Hiroyuki Takahashi, Chiko Otani, Takashi Yasumune, Koji Takasaki, Chikara Ito, Takashi Ohnishi, Shin-ichi Koyama, Shuichi Hatakeyama, R.M. Thushara Damayanthi, "Superconducting Transition Edge Sensor for Gamma-ray Spectroscopy", IEICE TRANSACTIONS ELECTRONICS, INVITED PAPER, 査読有, E100-C No.3, 2017, 283-290  
DOI:10.1587/transele.E100.C.283

S. Hatakeyama, T. Irimatsugawa, M. Ohno, H. Takahashi, Damayanthi, C. Otani, T. Maekawa, "Development of Hard X-ray and Gamma-ray Detector with Transition Edge, Sensor, for Nuclear Material Analysis", IEEE TRANSACTIONS

ON SUPERCONDUCTIVITY, 査読有, Vol.25, 2015, 2101603,  
DOI:10.1109/TRSC.2014.2374873

T. Irimatsugawa, S. Hatakeyama, M. Ohno, H. Takahashi, C. Otani, T. Maekawa, "High Energy Gamma-ray Spectroscopy Using Transition Edge Sensor with a superconducting bulk tantalum absorber", IEEE TRANSACTIONS ON SUPERCONDUCTIVITY, 査読有, Vol.25, 2015, 2101303,  
DOI:10.1109/TRSC.2014.2380173

##### 〔学会発表〕(計12件)

入松川知也、平山文紀、佐藤昭、山森弘毅、永沢秀一、福田大治、日高睦夫、佐藤泰、神代暁、大野雅史、高橋浩之、"TES マイクロ波読出による線光子検出"、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月14日~2017年3月17日、パシフィコ横浜、神奈川

三浦義隆、入松川知也、石井裕也、大野雅史、高橋浩之、"単一超伝導 Ir を用いた極小 TES の開発"、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月14日~2017年3月17日、パシフィコ横浜、神奈川

Masashi Ohno, "Heavy ion detection by superconducting transition edge sensor", International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors, 2016年11月14日~2016年11月17日、AIST, Tsukuba, Ibaraki, Japan,

大野雅史、入松川知也、細野米一、高橋浩之、三宅泰斗、松崎浩之、"重粒子検出のための超伝導転移端センサの開発"、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月13日~2016年9月16日、朱鷺メッセ、新潟

T. Irimatsugawa, F. Hirayama, S. Kojiro, A. Sato, S. Nagasawa, D. Fukuda, M. Hidaka, Y. Sato, M. Ohno, H. Takahashi, "Study of Nb and NbN Resonators at 0.1 K for Low-noise Microwave SQUID Multiplexers", Applied Superconductivity Conference 2016, 2016年9月4日~2016年9月9日、コロラド州、米国

大野雅史、"TES マイクロカロリメータの開発とイオンビーム計測"、日本学術振興会第186委員会第19回研究会(招待講演)、2016年5月19日、東京大学、東京

大野雅史、"超伝導転移端センサを用いた

線超精密分光の開拓”、日本学術振興会  
第146委員会第95回研究会(招待講演)  
2016年4月21日、学士会館、東京

入松川知也、平山文紀、神代暁、大野雅史、高橋浩之、安宗貴志、高崎浩司、伊藤主税、”超伝導転移端センサによる線超精密分光”、日本原子力学会北関東支部若手研究者発表会、2016年4月15日、茨城県東海村

Masashi Ohno, Tomoya Irimatsugawa, Shuichi Hatakeyama, Hiroyuki Takahashi, “Superconducting transition edge sensor for heavy ion detection”, 16<sup>th</sup> international Workshop on Low Temperature detectors, 2015年7月20日~2015年7月24日、グルノーブル、仏国

大野雅史、超伝導転移端マイクロカロリメータによる高精度放射線計測、第109回日本医学物理学会学術大会ランチャイムレクチャー(招待講演)、2015年4月17日、パシフィコ横浜、神奈川県横浜市

T. Irimatsugawa, S. Hatakeyama, M. Ohno, H. Takahashi, C. Otani, T. Maekawa, “High Energy Gamma-ray Spectroscopy Using Transition Edge Sensor with a superconducting bulk tantalum absorber”, Applied Superconductivity Conference (ASC2014), 2014年8月10日~2014年8月15日、Charlotte, NC, USA

S. Hatakeyama, T. Irimatsugawa, M. Ohno, H. Takahashi, Damayanthi, C. Otani, T. Maekawa, “Development of Hard X-ray and Gamma-ray Detector with Transition Edge, Sensor, for Nuclear Material Analysis”, Applied Superconductivity Conference (ASC2014), 2014年8月10日~2014年8月15日、Charlotte, NC, USA

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)  
なし

取得状況(計0件)  
なし

〔その他〕  
特になし

6. 研究組織  
(1)研究代表者

大野 雅史(Ohno, Masashi)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号: 90391896

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし

(4)研究協力者  
畠山 修一(Hatakeyama, Shuichi)  
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程

入松川 知也(Irimatsugawa, Tomoya)  
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程

三浦 義隆(Miura, Yoshitaka)  
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程

三宅 泰斗(Miyake, Yasuto)  
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程

松崎 浩之(Matsuzaki, Hiroyuki)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授

高橋 浩之(Takahashi, Hiroyuki)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授