

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03515

研究課題名(和文) 産業利用への実用を目指した中性子共鳴吸収温度測定法の展開

研究課題名(英文) Development of neutron resonance absorption thermometry aimed at practical application to industrial usage

研究代表者

加美山 隆 (Kamiyama, Takashi)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：50233961

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非破壊で物体の内部温度を測定可能な中性子共鳴吸収分光法(N-RAS)について、作動機械を模擬した回転運動している中性子共鳴吸収体に対して粒子輸送計算の援用による温度検量線法(N-RAS/PTS法)を適用し、非破壊・非接触・リモートで回転体の温度測定が室温から600 Kまでの間で数Kの精度で可能であることを明らかにした。N-RASの測定では中性子ビームの照射野に何の制限も必要無く、加速器の運転と測定試料の回転の同期をとることも必要ない。N-RAS/PTS法は測定試料体系さえ分かれば事前に検量線を作成することが可能で、測定時間の効率的な利用が可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体内部の温度を非破壊・非接触で測定できる中性子共鳴吸収分光法(N-RAS)について、これまで測定について制限があった運動している物体の温度測定を制限なく可能にする新しい解析法(N-RAS/PTS)を開発した。それにより装置内部で運動している物体の温度を室温から300 Kまで数 Kの精度で測定することが可能となった。この方法は計算機シミュレーションにより温度の検量線を作成するため、実験は必要な温度の測定で済み、実験時間の大幅な節約を図ることができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have applied the neutron resonance absorption spectroscopy (N-RAS) to a rotating neutron resonance absorber simulating a working machine, and developed the temperature analysis with a standard curve constructed by the aid of particle transport simulation (N-RAS/PTS method). We found that by the method the temperature of the rotating object can be measured non-destructively, remotely and without contact, with an accuracy of several kelvin from room temperature to 600 K. For N-RAS/PTS measurement does not require any restriction on the neutron beam irradiation field, and synchronization between the accelerator operation and sample rotation. The N-RAS/PTS method can be used to prepare a standard curve in advance as long as the sample structure is known, which allows for efficient use of measurement time.

研究分野：中性子工学

キーワード：非破壊・非接触温度測定 中性子共鳴吸収 中性子イメージング 小型中性子源 熱外中性子

1. 研究開始当初の背景

中性子共鳴吸収分光法(Neutron Resonance Absorption Spectroscopy, N-RAS、図1)は、中性子共鳴吸収分析法と飛行時間法を組み合わせ、我々のグループにより提案・開発された分光法である。N-RASは、核種に固有な中性子共鳴吸収断面積を利用することで、核種やそのダイナミクスを非破壊・非接触的に分析できる手法であり、計算機断層撮像(CT)法と組み合わせると対象物断面上の情報分布の可視化も可能なため、加速器中性子源を使った中性子イメージングの新しい手法として、大型加速器中性子源 J-PARC/MLF 施設や各国施設において導入されつつある。

本研究では、この N-RAS を産業応用向けに実用化するため、稼働中の機械内部部品を念頭に置いた温度測定に適用することを試みた。N-RAS で得られる情報の内、産業的に最も応用が期待されるのが、物体の温度の非接触・非破壊測定である。N-RAS では、物質中の特定の同位体元素に関する運動状態を、実効温度というパラメータで決定することが出来る。実効温度測定は中性子共鳴吸収時に核種の運動によりスペクトルの幅が広がることを利用しており、例えばデバイモデルを適用することで通常の温度に変換できるので、標的核種が存在する領域の局所的な温度を測定することに繋がる。特に、プローブとなる中性子は物体への侵入深さが大きいため、その内部の温度情報が得られること、さらに温度センサに対応するものが核種そのものであり情報は中性子あるいは中性子共鳴吸収に伴う即発線が持ち出すことから非接触測定が可能という特徴があり、他種の温度測定法とは全く異なるユニークな測定が可能となる。

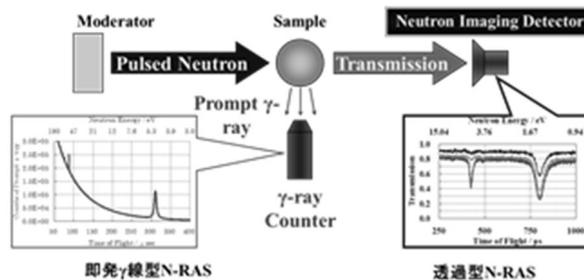


図1. 共鳴吸収分光法 N-RAS の基本的な測定体

我々は一連の研究を通じて、KEK や北海道大学の加速器中性子源を利用した N-RAS の解析まで含めた手法について開発を進めてきた。その中で、N-RAS として、中性子共鳴吸収時に発生する即発線を計数してスペクトルを得る即発線法と、中性子の吸収量そのものを記録する透過法の2種類の手法を開発し、前者はバックグラウンドの影響が少なく定量性に優れること、後者は位置情報の取得に優れることを示してきた。そこで直近の科研費研究では定量性の高い即発線型 N-RAS へ比較的簡易に位置分解能を付与するため複数核種を温度センサとして位置分解に用いる方法を検討し、その解析を可能とした。N-RAS 実用化のための次の段階は、N-RAS の特徴を活かせる測定対象を選定し、その解析が正しく遂行可能か評価することである。

2. 研究の目的

透過力に優れ非接触かつ位置分解で温度測定できる N-RAS を現実の温度測定に適用することを考える場合、一つの目標として挙げられるのは、作動中の機械内部部品の温度の測定である。ここで、加速器中性子パルスと作動中機械には何らの同期も取らないことが汎用性につながる。これまで、我々は動作状態のモーターに対してある限定的なビーム照射をすることで温度測定が可能であることを示した。これを受けて、本研究では、測定時の制限条件を失くして作動状態にある機械部品の温度を測定することを目標に、実際の機械装置の温度情報が必要な位置に複数核種をセンサとして設置し、それらの共鳴吸収スペクトル(図2)を解析して、作動中の機械部品の温度を測定する方法を開発することを目的とした。この基盤となる複数核種の同時温度解析法は開発したが、動作中の部品の動きに伴う入射ビームに対する標的核種の厚さ変化の影響など、解析面に影響を与えるスペクトル形状の挙動をよく検討することが必要となる。本研究では、この応用時に生ずるに課題についての検討を中心に据え、解析的並びにシミュレーションにより測定時の影響を評価すると同時に、実際に機械装置(最初は電動モーターを想定)を対象に測定を行い、両者を併せて解析上の課題を解決していく。これにより、実際の製品内部の温度測定への応用に向けて大きく前進するものと期待される。

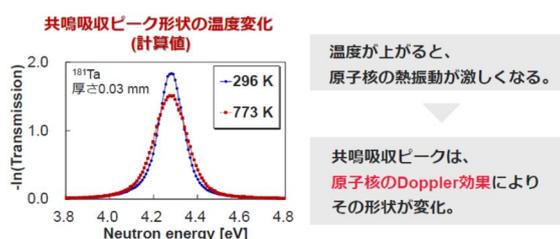


図2. 共鳴吸収スペクトルの温度変化。

3. 研究の方法

本研究は N-RAS による実用機械内部の測定のための手法開発が目的である。そのために、実際の実験状態の再現を行う計算機シミュレーション、シミュレーション或いは実験から得た機械の動作に伴う変形を受けたスペクトル形状から温度情報を得る解析方法の開発、そして最終的には N-RAS 実験による温度測定法の確認と評価という流れで全体の研究計画を構成した。

実験状態の再現シミュレーションには粒子輸送計算コード PHITS を用い、中性子線源からの

照射中性子パルスで試料が共鳴吸収を起こしたスペクトルを、飛行時間測定を再現したシミュレーション計算で取得した。この粒子輸送計算に使った核データでは試料の温度依存性を再現するために核データ処理コード NJOY を利用した。また、共鳴核種の運動の様子は時分割で共鳴核種位置を変更することで再現した。これらのシミュレーションの結果から、N-RAS で温度測定する際にスペクトルが受ける変形の原因をまず突き止めた。

次に、粒子輸送シミュレーションで得た変形した共鳴吸収スペクトルに対して、何らかの補正をかけることで温度情報を解析できないか検討した。一般に温度情報の解析に使われる REFIT と呼ばれる共鳴吸収計算コードを使用した解析では、補正を含めても変形スペクトルをうまくフィッティング出来ないことが明らかになった。本研究の当初計画では、実験データを補正してから REFIT コードにより解析することになっていたため、ここで大きく研究方針を変更し、新たな解析方法を構築することとした。新たな解析方法としては、もう一つの可能性として検討を進めていた粒子輸送計算の援用による温度検量線法(N-RAS/PTS, 図3)が有効と考えられた。この手法は、実験体系を再現したシミュレーション体系を構築した上で、PHITS と NJOY を用いた粒子輸送計算を、試料温度を変えて行うことで試料温度対共鳴スペクトル特徴量、例えばスペクトルピークの幅、の検量線を作成しておき、実測データを当てはめて温度を導出するというものである。これは位置の時間変化がない金属箔の測定で精度よく温度を決定できていた。そこで、この手法を位置や厚さが時間変化する作動中機械の温度測定に利用することでスムーズに方針の転換が図られた。作動機械部品温度測定への粒子輸送計算援用検量線法の最適化が進んだところで、実際に N-RAS による実験を行い、結果を評価した。

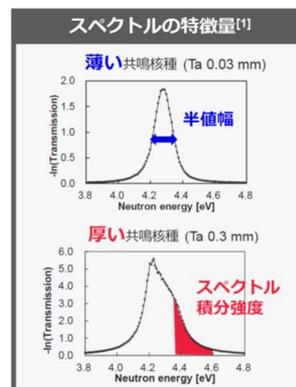
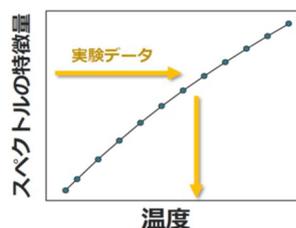
N-RAS 実験に関しては、産業応用に対応するために小型加速器線源での測定を可能とすることを念頭に、まず N-RAS 測定に必要な中性子線源強度の確保のための熱中性子源体系の改良(図4)、オンラインで試料確認するための中性子イメージング器材(図5)の開発を行った。研究スタートの時点では、即発線型 N-RAS が透過型 N-RAS より精密測定には向いているという結果だったが、粒子輸送シミュレーションで作動機械を模擬したケーシングなどを付加して検討した結果、機械測定には透過型 N-RAS がより良い結果を与えることがわかったため、透過型 N-RAS 体系を構築して N-RAS 測定を行った。この際、当初計画で試料とする予定であった電動モーター製品では試料の精密な温度制御ができないため、温度制御をしながら回転する部品を模擬した専用の高温装置を製作し実験に使用した。

4. 研究成果

本研究のスタートとして、まず回転運動を伴う共鳴核種の N-RAS 実験体系を粒子輸送シミュレーション上で構築し、測定時に共鳴吸収ピークが受ける形状変形を明らかにした。その結果、共鳴吸収核種の時間的な位置変化による共鳴吸収ピークの変形について、大きく 2 種類の原因が影響することがわかった。その 1 つは、回転軸を中性子ビーム軸に直交させると中性子線源から共鳴核種までの飛行距離が時間的に変動する効果で、これは回転軸を置く中心位置を飛行距

共鳴核種の運動や構造の影響も含めた、新たなスペクトル解析法。

1. 粒子輸送計算により実験を再現した上で、複数温度点における共鳴吸収スペクトルを計算。
2. 計算結果を基にして、スペクトルの特徴量と温度の関係を表す検量線を作成。



[1] 浅子ら, 日本中性子科学会第18回年会 (2018).

図3. 粒子輸送シミュレーション援用解析(N-RAS/PTS)。



図4. 新型ターゲットステーションの全体写真。

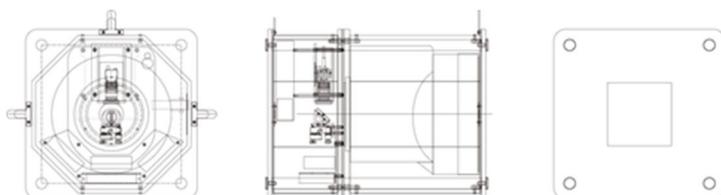


図5. 中性子透過イメージ検出器。

離の基準点として、ほぼキャンセルできることが示された。2つ目は、回転軸と中性子ビーム軸を直交させたときに、回転により共鳴吸収核種の実効的な厚さが変動することで、特に全吸収が起こる厚さまで変化すると大きく共鳴吸収線形が変形してしまうことがわかった。また、実際の機械装置内部を測定する場合には、機械のケーシングがスペクトル形状に与える影響も検討する必要がある。図6に即発線型および透過型 N-RAS を模擬して得たスペクトルを示す。ケーシングを模した非ターゲット材があると、即発線型ではスペクトルが大きく裾を引き半値幅にも違いがあるのに対し、透過型ではほぼ影響がないことがわかる。

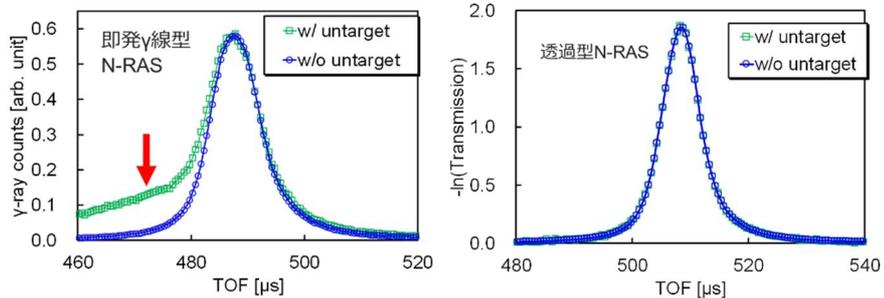


図6. 非ターゲット材が共鳴吸収スペクトル形状に与える影響。

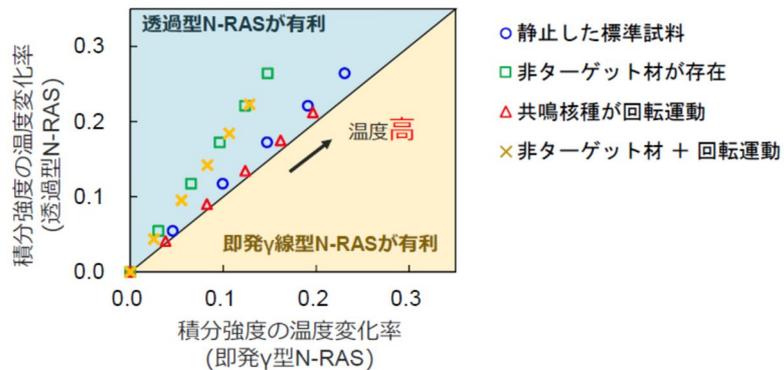


図7. 各種条件における、即発線型及び透過型 N-RAS の温度依存変化率の比較。

シミュレーション計算で作られる検量線による測定感度は、温度に対して N-RAS スペクトルの特徴量がどれだけ大きく変化するか、即ちその傾きで決まる。特徴量としてスペクトルのあるエネルギー範囲を積分した量を取り、基準点(296K)に対して変化率をプロットしたものが図7である。真ん中の黒線に対して上側だと透過型の温度感度が高いことになるが、運動状態やケーシングを模した非ターゲット材の有無にかかわらず、シミュレーションした室温以上の温度では透過型 N-RAS が温度感度の点で有利であることがわかった。先のスペクトル形状変形と温度測定感度の両点から、機械装置の温度測定では透過型 N-RAS を用いた方が有利という結論が得られる。そこで本研究では実験に透過型 N-RAS 体系を用いることとした。

N-RAS 温度測定に検量線法を適用する場合、それに利用できるスペクトル形状の特徴量を算出する必要がある。試料が厚い場合には、試料の厚さや装置分解能の影響を受けるピーク半値幅の代わりに、スペクトルの裾部を積分した量を用いることが可能であることはこれまでの研究で判明していた。そこで、測定に汎用性を持たせるためには、試料の厚さに依らず温度解析できるように常に決められた領域のスペクトル積分値を使うようにすることが望まれる。そのため、本研究内で積分領域の決め方に関する検討を行った。図8に一例を示すが、積分領域の下端を透過率がほぼ10%の位置となる $-\ln(\text{透過率})=2.3$ 、上端を温度変化率の上端となるよう決めると最も感度よく温度決定ができることが明らかになった。

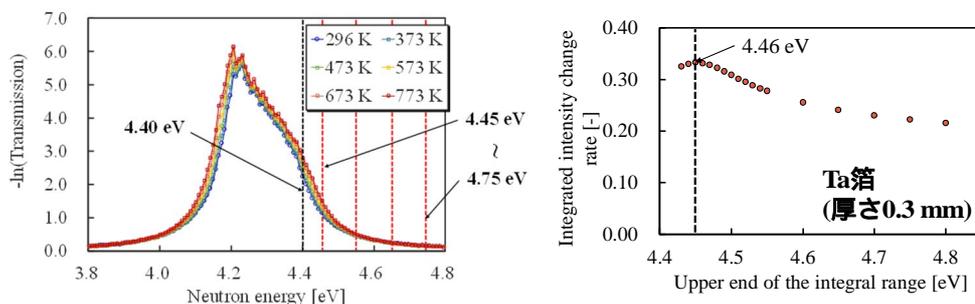


図8. 左図: 積分エネルギー範囲上端変化位置(厚さ0.3 mmのTa箔)。右図: 積分エネルギー範囲の上端とスペクトル積分強度の温度依存変化率との関係。図中の黒い破線で示したのはスペクトル積分強度の温度依存変化率が最も大きくなるような積分エネルギー範囲の上端位置。

この手順に従い、実験体系を模擬した PHITS と NJOY によるシミュレーション計算を数点の温度で実施して温度検量線を構成した。この際、一次ビームである北海道大学電子線形加速器のパルス幅を再現してシミュレーションを行った。電子ビーム加速器の運転条件は加速エネルギーが33MeV、出力2.2 kW、電子パルス幅4 μ s、繰り返しが70 ppsである。模擬した実験体系を図9に示す。線源から検出器までの中性子飛行距離は6375 mm、検出器には16 \times 16ピクセルのLiガラスシンチレータ型検出器を用いた。

実際の測定では図 10 に示す回転模擬専用真空高温装置を作成して実験に利用した。試料は 40 mm 角・厚さ 0.03 mm の Ta 箔とし、回転半径が 20 mm、回転数は 20.5 rpm である。試料の周囲は厚さ 1 mm の壁を持つ Al 製の内筒と外筒があり、中性子ビームの入射と出射時の機械ケーシングの効果を模擬している。温度は電熱ヒータと試料箔に接触させた熱電対で制御した。

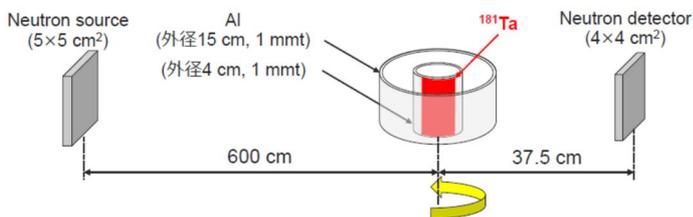


図 9. 回転体温度測定用検量線作成のための粒子輸送シミュレーション体系。

得られた共鳴吸収スペクトルの透過率を $-\ln(\text{透過率})$ で変換した結果が図 11 となる。それぞれの温度で 5 時間程度測定し、試料箔が通過する幅(試料の軌道直径である 40 mm)にわたってピクセルのカウント数を合計して、回転する箔全体を透過したスペクトルとしている。図 12 に示されるように、実際には装置分解能などの効果でスペクトル毎の差は非常に小さいが、積分することによって差異を拡大することができる。

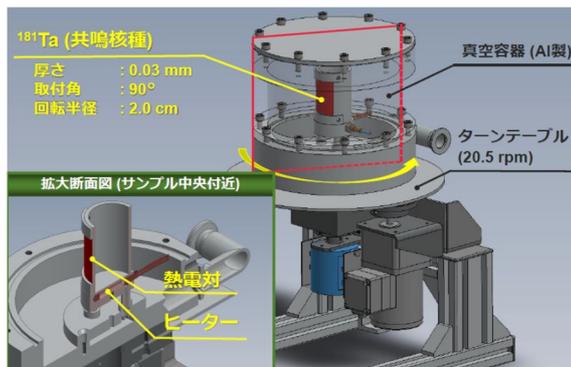


図 10. 実際の N-RAS 測定用のため製作した回転模擬測定専用の真空高温装置。

得られた各温度のスペクトルを用いて先述の方法で決定したエネルギー範囲を積分し、シミュレーションで作成した検量線と比較して各点の温度を決定する。その際に気を付けなければならないのは、N-RAS/PTS では検量線と測定点の間に一定の差が現れることである。これは、試料の数密度評価や中性子パルス、バックグラウンドといった複数の要因による影響と考えられており、確実にシミュレーションと試料の温度が一致している温度点、例えば室温、で補正することで影響が取り除かれる。測定

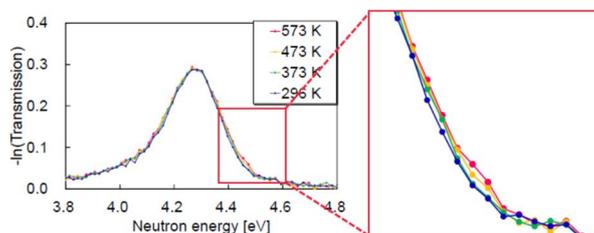


図 11. Ta-181 の 4.28 eV 共鳴吸収スペクトルの温度による変化。

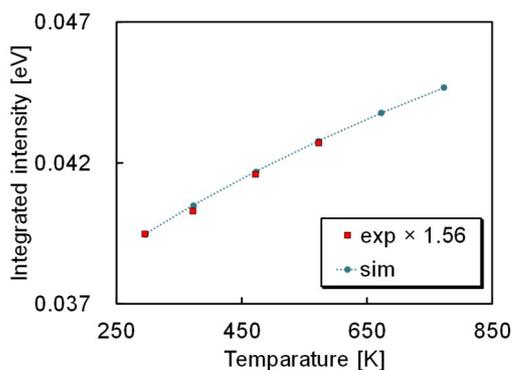


図 12. 実験結果(積分値)とシミュレーションによる検量線との比較。

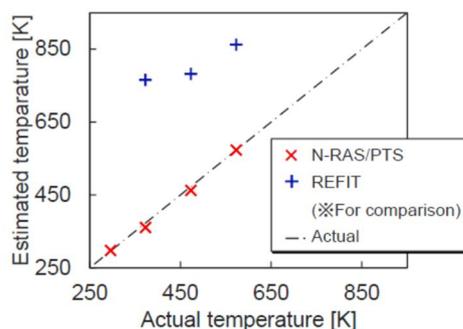


図 13. N-RAS/PTS による温度測定結果と REFIT を使った従来法による結果の比較。

スペクトルの積分値を実験の基準温度 296 K で補正して、シミュレーションによる検量線と比較した結果を図 12 に示す。赤いプロットが N-RAS/PTS による解析値を 1.56 倍した実験によるデータ、青い点と破線がシミュレーションによる検量線となる。図から N-RAS/PTS 法を用いた測定がよく検量線と一致していることがわかる。即ち、同じ体系であればどの温度の試料でもこの検量線で温度を決めることが可能である。図 13 では従来法である REFIT コードで実験データを解析した結果を N-RAS/PTS による結果と比較した。REFIT はどれも解析がうまく行かず、解析値に 300 K 以上の温度差が付くこともあった。一方、N-RAS/PTS ではこの温度域で測定結果が破たんせず、296 ~ 573 K において平均 6 K の確度で温度解析出来るという結果が得られた。

本研究では、作動機械を模擬した回転運動している中性子共鳴吸収体に対して N-RAS/PTS 法という従来とは全く異なる解析法を適用して、非破壊・非接触・リモートで温度測定可能であることを明らかにした。この場合、中性子ビームの照射野には何の制限も必要無く、加速器の運転と回転の同期をとることも必要ない。この N-RAS/PTS 法による成果は、測定体系さえ分かれば事前に検量線作成が可能で、効率的に測定を行うことが可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 加美山 隆、日塔 光一	4. 巻 28
2. 論文標題 中性子イメージインテンシファイア撮像カメラの検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 波紋	6. 最初と最後の頁 77～83
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5611/hamon.28.2_77	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 加美山 隆、長谷美 宏幸、佐藤 博隆	4. 巻 67(5)
2. 論文標題 北海道大学における中性子とX線の複合イメージングのための技術開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 217-225
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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 貞永 直樹、佐藤 博隆、加美山 隆
2. 発表標題 中性子共鳴吸収分光法に粒子輸送シミュレーション計算を援用した温度解析法のスペクトル積分強度抽出に関する研究
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 貞永 直樹、佐藤 博隆、加美山 隆
2. 発表標題 中性子共鳴吸収分光法を用いた駆動部品に対する粒子輸送計算援用温度解析法の開発
3. 学会等名 日本中性子科学会第20回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 貞永 直樹, 佐藤 博隆, 加美山 隆
2. 発表標題 中性子共鳴吸収分光法による物体内部で回転する核種の温度測定法の開発
3. 学会等名 令和2年度中性子イメージング専門研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 貞永 直樹, 佐藤 博隆, 加美山 隆
2. 発表標題 中性子共鳴吸収分光法による回転する物体内部の非破壊温度測定
3. 学会等名 日本原子力学会北海道支部 第38回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kaniyama, F. Hiraga, H. Sato, M. Ohnuma, M. Furusaka
2. 発表標題 Upgrade of the Electron Linac of Hokkaido University Neutron Source Facility
3. 学会等名 8th International Meeting of Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Sources (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Kamiyama, Masato Uechi, Hiroyuki Hasemi, Hiroataka Sato
2. 発表標題 Thermometry for mechanical parts in operation by neutron resonance absorption spectroscopy
3. 学会等名 The 3rd Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅子穰、甲斐哲也、佐藤博隆、原かおる、加美山隆
2. 発表標題 粒子輸送シミュレーションを利用した中性子共鳴吸収法による 物体温度導出
3. 学会等名 日本中性子科学会 第18回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 貞永 直樹、佐藤 博隆、加美山 隆
2. 発表標題 共鳴核種のマクロな運動を考慮した中性子共鳴吸収温度測定法の開発
3. 学会等名 日本原子力学会北海道支部会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Kamiyama, Koichi Nittoh, Kazuyuki Takada
2. 発表標題 Improvement of Neutron Color Image Intensifier Detector using an Industrial Digital Camera
3. 学会等名 11th World Conference on Neutron Radiography (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加美山隆, 日塔光一, 清水裕彦
2. 発表標題 中性子イメージンシファイア用CMOSカメラの冷却効果
3. 学会等名 日本中性子科学会 第17回年会
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	佐藤 博隆 (Sato Hirotaka) (30610779)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

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