

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12484

研究課題名(和文) ミュオニウム欠陥の電子軌道状態解明に向けた電子スピン共鳴ミュエスアール法の開拓

研究課題名(英文) Development of the muSR-detected electron spin resonance method for elucidating the electronic state of muonium defects

研究代表者

伊藤 孝 (Ito, Takashi)

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・研究副主幹

研究者番号：10455280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：電子スピン共鳴ミュエスアール法によるミュオニウム(Mu)欠陥研究を開拓するために、実験で必要となるRFプローブを開発し、J-PARC物質・生命科学実験施設での実証実験を通して同手法を確立した。これを用いてルチルTiO₂中に生じた常磁性Mu欠陥のg値を測定することに成功し、常磁性H欠陥に対するg値との間に微小ながら差異が存在する可能性を示唆する結果を得た。今後、装置の改良によりg値の測定精度を向上させることで、Mu・H欠陥に関する同位体効果の研究へと発展することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

常磁性Mu欠陥のg値を測定する手法を確立したことにより、その電子状態をより多角的に解析できるようになった。これは水素とMuのアナロジーに基づいた水素欠陥研究と、水素・Mu欠陥間の差異に関する同位体科学のさらなる発展につながる成果である。また、本研究を通してJ-PARCミュオン実験施設に初めて導入された4He温度におけるRFスピン共鳴技術は、Mu欠陥研究に限らず低温物性研究に広く応用できることから、磁性研究などの他分野への波及効果も期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to open up muonium (Mu) defect research using the electron spin resonance method, we have developed an RF probe required for the experiment and established the method through a demonstration experiment at the Materials and Life Science Experimental Facility at J-PARC. Using this probe, we succeeded in measuring the g-values of paramagnetic Mu defects in rutile TiO₂, and obtained a result suggesting that there may be small differences between the g-values of Mu defects and those of paramagnetic H defects. Further improvement of the measurement accuracy of the g-values by means of instrumentation improvements is expected to advance the study of the isotope effects on Mu and H defects.

研究分野：物性物理学、量子ビーム科学

キーワード：ミュオニウム欠陥 ミュオンスピン回転緩和法 電子スピン共鳴法 水素欠陥

1. 研究開始当初の背景

水素はコピキタス元素と呼ばれ、我々を取り巻く環境の至る所に存在する。水素は水や有機物の構成要素として重要であるのはもちろんのこと、機能性無機材料の結晶中にも不純物として存在し、たとえ微量であってもその物性にきわめて重大な影響を及ぼし得る。2000年代初頭に水素が ZnO の n 型伝導性の起源(不随意に混入するドナー)として一躍脚光を浴びたことを契機に、水素のドーパントとしての性質が一層盛んに研究されるようになり、今日に至っている[引用文献]。

水素欠陥研究の歴史において μ^+ スピン回転・緩和・共鳴法 (μ^+ SR) が果たしてきた役割は大きい。物質中に μ^+ 粒子を打ち込むと、水素の擬似同位体ミュオニウム (Mu) の化学種として Mu 欠陥を形成する。真空中の水素原子と Mu 原子の換算質量の比がほぼ 1 であることに基づいて、物質中に形成された Mu 欠陥もそれに対応する孤立した水素欠陥の電子状態を高い精度で模擬すると言われている。この推論に基づき、 μ^+ SR 法で Mu 欠陥の電子状態を研究することは水素欠陥自体を研究することとほぼ同義であると見なされてきた。これまでに Si、Ge、GaAs といった主要な半導体中の Mu 欠陥の電子状態が明らかにされ、対応する孤立水素欠陥の微視的な理解に大きく貢献してきた実績がある[引用文献]。

その一方で、この Mu-H アナロジーの成立が疑問視される例も報告されている。プロトン電子二重共鳴法 (^1H -ENDOR) により得られた ZnO 中の水素欠陥に対する超微細結合パラメーターは、プロトンとミュオンの磁気回転比の違いを考慮しても同物質中の Mu 欠陥に対する値よりも 1 桁大きい[引用文献]。また、ルチル TiO_2 中の常磁性水素・Mu 欠陥[引用文献]に対する超微細結合パラメーターに関しては、c 軸に垂直な成分は磁気回転比でスケールできるものの、水平成分についてはそれが成立しない事が報告されている[引用文献]。これらは Mu の質量が H の約 1/9 であることに由来する同位体効果の現れであると考えられるが、その具体的な原因が単に「核」波動関数の広がりの違いにあるのか、もしくは欠陥の構造や電子状態が本質的に異なることにあるのかについては判断が難しい。このような場合、欠陥に束縛された不対電子の状態そのものに敏感な g 値の比較が重要になるが、Mu 欠陥に対する g 値の測定は技術的な難しさからこれまでほとんど行われてこなかった。このため、固体中における Mu-H アナロジーの検証は、Mu 欠陥科学をさらに発展させていく上で避けては通れない重要な課題であるにもかかわらず、まだ十分に行われていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超微細結合の弱い常磁性 Mu 欠陥を対象に、その電子軌道状態について明確な描像を与え得る「電子スピン共鳴 μ^+ SR 法」を開拓することにある。固体中の常磁性 Mu 欠陥の研究において、不対電子の g 値を直接観測した例はこれまでほとんどない。本研究ではルチル TiO_2 中で形成される超微細結合の弱い (~ 2 MHz) 常磁性 Mu 欠陥を対象に、同手法を用いて g 値の測定を行う。これを通して電子スピン共鳴 μ^+ SR を Mu 欠陥研究における新たな標準手法として確立するとともに、H・Mu 欠陥における同位体効果の研究の開拓を試みる。

3. 研究の方法

電子スピン共鳴 μ^+ SR 実験のための RF プローブを開発し、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) ミュオン S1 エリアにおいてパルスミュオンビームを用いた実証実験を行う。ルチル TiO_2 中で形成される常磁性 Mu 欠陥 (超微細結合パラメーター ~ 2 MHz) を対象に不対電子の g 値を測定し、常磁性 H 欠陥の g 値との比較を行う。

電子スピン共鳴 μ^+ SR 実験は基本的に横磁場 μ^+ SR の実験配置にて行う。常磁性 Mu 欠陥の横磁場 μ^+ SR 信号は、超微細相互作用により周波数空間で偶数本に分裂する。対を成す信号は、電子スピンのアップ・ダウンにそれぞれ対応する。ここに電子のゼーマン分裂 $g\mu_B B_0$ に対応する周波数の RF 振動磁場 B_1 を横磁場 B_0 に対し垂直な軸に沿って印加すると、共鳴現象によりスピンアップ・ダウン間の振動が誘起され、その結果、 μ^+ SR スペクトルに「運動による先鋭化」が生じる。この先鋭化の度合いを RF オン/オフ時の μ^+ SR スペクトルの差に基づいて数値化し、これを B_0 の関数としてプロットすると、共鳴条件 $h\nu = g\mu_B B_0$ を満たす点 $B_0 = B_{\text{res}}$ にディップ構造が現れる。その値から常磁性 Mu 欠陥の g 値を直接求めることができる。

電子スピン共鳴により μ^+ SR スペクトルの先鋭化が生じるためには、RF 振動磁場 B_1 の大きさが超微細結合パラメーター A に対して $g\mu_B B_1/h > A$ を満たす必要がある。 $A \sim 2$ MHz とすると B_1 の下限値は 0.1 mT 程度となる。これは NMR 用の小型 RF 電力増幅器の使用により十分に達成し得る値である。

ルチル TiO_2 中で形成される常磁性 Mu 欠陥は 10 K 以下でのみ観測されるため、RF- μ^+ SR プローブは ^4He 冷凍機のインサートとして開発する必要がある。実験に際し、RF の印加による試料の発熱が問題となる可能性があるが、J-PARC のパルスミュオンビーム (25 Hz) に RF パルスを同期させることで影響の軽減が可能である。

4. 研究成果

(1) RF- μ^+ SR プロープの製作・性能評価

^4He 冷凍機インサートの低温部先端に、コイル、同調用可変コンデンサ、および 50 整合用の固定コンデンサを設置し、標準的なタンク回路を構成した。このコイルは、平板状の試料空間を覆うようにジュンフロン線を約 10 ターン巻いたものである。固定コンデンサの容量は共振周波数 60 MHz でインピーダンス整合が取れるように選択した。このプロープにベクトルネットワークアナライザを接続して S11 パラメーターを測定したところ、共振周波数 60 ± 10 MHz の範囲で良好な周波数特性を示すことが確認できた。

(2) ミュオンスピン共鳴の観測を通じた RF- μ^+ SR プロープの性能評価

RF- μ^+ SR プロープに入力する電力と、それにより試料位置に生じる RF 振動磁場 B_1 の大きさの関係は、反磁性環境にあるミュオンのスピンの対する共鳴信号から評価することができる。ルチル TiO_2 中に打ち込まれたミュオンは室温付近ではほぼ全てが反磁性環境にあることがわかっている[引用文献]。そこで我々は、まず、室温においてミュオンスピン共鳴の観測を試みた。ミュオンスピン共鳴実験では、常磁性 Mu 欠陥に対する電子スピン共鳴実験とは異なり、磁場をミュオンビームの入射軸に沿って印加する。以下、これを縦磁場と呼ぶ。RF 周波数を 52.5 MHz、入力電力を 90 W に固定し、縦磁場を掃引しながら μ^+ SR スペクトルを取得した。図 1 に RF 照射時の μ^+ SR スペクトルの縦磁場依存性を示す。縦磁場はミュオンスピンの初期偏極をそのまま保持する役割を果たすので、RF 振動磁場による共鳴遷移が生じない限り、平坦なスペクトルが観測されることになる。共鳴条件下においては、ミュオンスピンのゼーマン準位間の振動が誘起され、余弦振動がスペクトルに現れる。この振動の振幅が最も大きくなる 0.393 T (公称値) 付近が共鳴点であり、その周波数から B_1 の大きさが 1.0 mT であることがわかった。上述のように、低温で常磁性 Mu 欠陥に対して電子スピン共鳴をかけるために必要な B_1 は 0.1 mT 程度であるため、その際に入力すべき RF 電力は数 W で十分ということになる。なお、ミュオンスピン共鳴は室温だけでなく ^4He 温度においても確認された。

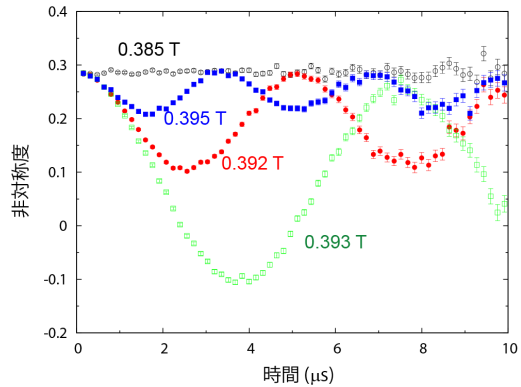


図 1. 反磁性環境に置かれたミュオン (ルチル TiO_2 単結晶試料中、室温) に対するミュオンスピン共鳴。縦磁場を結晶の [001] 方向に、52.5 MHz の RF 振動磁場を [-110] 方向に印加して得られた μ^+ SR スペクトルは、共鳴条件を満たすと余弦振動を示す。

(3) ルチル TiO_2 中の常磁性 Mu 欠陥に対する電子スピン共鳴の観測

試料の温度を 3.5 K に設定し、横磁場 B_0 を [110] 方向に印加して常磁性 Mu 欠陥に対する電子スピン共鳴実験を行った。RF 周波数を 60 MHz、入力電力を 4 W に固定し、 B_0 を掃引しながら μ^+ SR スペクトルを取得した。図 2(a) に $B_0=2.17$ mT ($\sim B_{\text{res}}$) における RF オン/オフ時の μ^+ SR スペクトルを示す。RF オン時のスペクトルに電子スピン共鳴を反映した先鋭化が認められる。この先鋭化の度合いを評価するために、RF オフ時のスペクトルから RF オン時のスペクトルを引き算し、その絶対値の積分値を求めた。これを B_0 の関数としてプロットすると図 2(b) が得られ、上述の共鳴磁場 B_{res} におけるディップ構造を実際に確認することができた。 $B_0 \parallel [110]$ に対する g 値 (g_{110}) は B_{res} の値から 1.984(5) と求められ、孤立電子に対する値 2.002 からわずかに減少していることが明らかになった。一方で、常磁性水素欠陥についての g_{110} 値は 1.9736(2) および 1.9762(2) であり [引用文献]、いずれも常磁性 Mu 欠陥に対する値

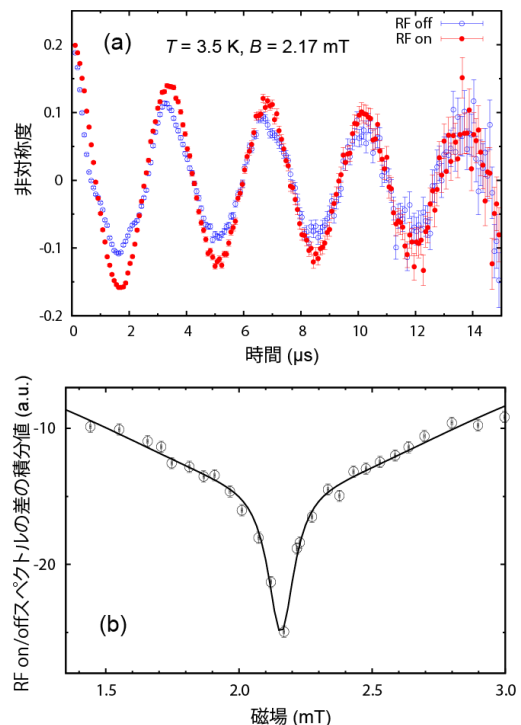


図 2. ルチル TiO_2 中に生じた常磁性 Mu 欠陥に対する電子スピン共鳴。(a) 3.5 K において横磁場 2.17 mT を [110] 方向に印加した際の μ^+ SR スペクトル。周波数 60 MHz の RF パルスオン/オフした際のスペクトルを重ねて示した。(b) 磁場掃引共鳴曲線。

の標準誤差の範囲外にある。これは $\mu\cdot\text{H}$ 欠陥の g 値がわずかに異なる可能性を示唆するものであるが、その有意性を強く主張するには μ 欠陥に対する g 値の測定精度がまだ十分ではない。今後、電子スピン共鳴 $\mu^+\text{SR}$ 法をさらに高度化することで g 値の測定精度を向上させ、より精密な議論へとつなげたい。

(4) J-PARC MLF で初となる ^4He 温度におけるミュオンスピン・電子スピン共鳴の観測

^4He 温度におけるミュオンスピン・電子スピン共鳴実験は J-PARC MLF ではこれまで行われておらず、いずれも今回が初の成功例となる。RF スピン共鳴法はパルス $\mu^+\text{SR}$ の欠点を補い、その利点を最大限に活かす技術であることから、今後、MLF ミュオン実験施設において重要な地位を占めるようになることは間違いない。本研究がその端緒を開いたことにより、RF スピン共鳴法を用いた $\mu^+\text{SR}$ 実験が J-PARC で加速度的に進展し、多くの研究成果の創出につながることを期待したい。

<引用文献>

- C. G. Van de Walle, "Hydrogen as a Cause of Doping in Zinc Oxide", Phys. Rev. Lett., Vol. **85**, 2000, 1012~1015.
- S. F. J. Cox, "Muonium as a model for interstitial hydrogen in the semiconducting and semimetallic elements", Rep. Prog. Phys., Vol. **72**, 2009, 116501-1~130.
- D. M. Hofmann et al., "Hydrogen: A Relevant Shallow Donor in Zinc Oxide", Phys. Rev. Lett., Vol. **88**, 2002, 045504-1~4.
- K. Shimomura et al., "Electronic Structure of the Muonium Center as a Shallow Donor in ZnO", Phys. Rev. Lett., Vol. **89**, 2002, 255505-1~4.
- A. T. Brant et al., "Hydrogen donors and Ti^{3+} ions in reduced TiO_2 crystals", J. Appl. Phys., Vol. **110**, 2011, 053714-1~7.
- K. Shimomura et al., "Electronic structure of Mu-complex donor state in rutile TiO_2 ", Phys. Rev. B, Vol. **92**, 2015, 075203-1~6.
- R. C. Vilão et al., "Muonium donor in rutile TiO_2 and comparison with hydrogen", Phys. Rev. B, Vol. **92**, 2015, 081202-1~5.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Ito Takashi U.	4. 巻 20
2. 論文標題 Hydrogen-Ti3+ Complex as a Possible Origin of Localized Electron Behavior in Hydrogen-Irradiated SrTiO3	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 128 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2022-021	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 伊藤 孝	4. 巻 56
2. 論文標題 水素照射により金属化されたSrTiO3において観測される局在電子の起源について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本中間子科学会誌「めそん」	6. 最初と最後の頁 21 ~ 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 伊藤 孝	4. 巻 2022-035
2. 論文標題 SrTiO3 中の格子間水素に束縛されたTi3+ スモールポーラロンの安定性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JAEA-Review	6. 最初と最後の頁 112 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11484/jaea-review-2022-035	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 -
1. 著者名 Higemoto Wataru, Yokoyama Makoto, Ito Takashi U., Suzuki Taiga, Raymond Stephane, Yanase Youichi	4. 巻 119
2. 論文標題 Direct measurement of the evolution of magnetism and superconductivity toward the quantum critical point	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2209549119-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2209549119	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 Sheng Q., Kaneko T., Yamakawa K., Guguchia Z., Gong Z., Zhao G., Dai G., Jin C., Guo S., Fu L., Gu Y., Ning F., Cai Y., Kojima K. M., Beare J., Luke G. M., Miyasaka S., Matsuura M., Shamoto S., Ito T., Higemoto W., Gauzzi A., Klein Y., Uemura Y. J.	4. 巻 4
2. 論文標題 Two-step Mott Transition in Ni(S,Se) ₂ : μ SR studies and charge-spin percolation model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033172-1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.033172	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 Tripathi Rajesh, Adroja D. T., Ritter C., Sharma Shivani, Yang Chongli, Hillier A. D., Koza M. M., Demmel F., Sundaresan A., Langridge S., Higemoto Wataru, Ito Takashi U., Strydom A. M., Stenning G. B. G., Bhattacharyya A., Keen David, Walker H. C., Perry R. S., Pratt Francis, Si Qimiao, Takabatake T.	4. 巻 106
2. 論文標題 Quantum critical spin-liquid behavior in $S = 1/2$ quasi-Kagome lattice CeRh _{1-x} PdxSn investigated using Muon Spin Relaxation and Neutron Scattering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064436-1~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.064436	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 Kadono Ryosuke, Hiraishi Masatoshi, Okabe Hirotaka, Koda Akihiro, Ito Takashi U.	4. 巻 35
2. 論文標題 Local electronic structure of interstitial hydrogen in MgH ₂ inferred from muon study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 285503-1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648x/acccc7	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 Higa N., Ito T. U., Yogi M., Hattori T., Sakai H., Kambe S., Guguchia Z., Higemoto W., Nakashima M., Homma Y., Nakamura A., Honda F., Shimizu Y., Aoki D., Kakihana M., Hedo M., Nakama T., Onuki Y., Tokunaga Y.	4. 巻 104
2. 論文標題 Critical slowing-down and field-dependent paramagnetic fluctuations in the skyrmion host EuPtSi: μ SR and NMR studies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045145-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.045145	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 Nishimura S., Torii H. A., Fukao Y., Ito T. U., Shimomura K. et al. (MuSEUM Collaboration)	4. 巻 104
2. 論文標題 Rabi-oscillation spectroscopy of the hyperfine structure of muonium atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 L020801-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.L020801	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 Suzuki Shintaro, Takubo Kou, Kuga Kentaro, Higemoto Wataru, Ito Takashi U., Tomita Takahiro, Shimura Yasuyuki, Matsumoto Yosuke, Bareille Cedric, Wadati Hiroki, Shin Shik, Nakatsuji Satoru	4. 巻 3
2. 論文標題 High-temperature antiferromagnetism in Yb based heavy fermion systems proximate to a Kondo insulator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023140-1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023140	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 Shamoto Shin-ichi, Akatsu Mitsuhiro, Matsuura Masato, Ohira-Kawamura Seiko, Harii Kazuya, Ono Masao, Chang Lieh-Jeng, Ito Takashi U., Nemoto Yuichi, Ieda Jun'ichi	4. 巻 4
2. 論文標題 Magnetic Bragg peak enhancement under ultrasound injection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013245-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.013245	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 Tsutsui Satoshi, Higashinaka Ryuji, Nakamura Raito, Fujiwara Kosuke, Nakamura Jin, Kobayashi Yoshio, Ito Takashi U., Yoda Yoshitaka, Kato Kazuo, Nitta Kiyofumi, Kawamura Naomi, Mizumaki Masaichiro, Matsuda Tatsuma D., Aoki Yuji	4. 巻 242
2. 論文標題 Sm valence determination of Sm-based Intermetallics using 149Sm Mossbauer and Sm LIII-edge X-ray absorption spectroscopies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hyperfine Interactions	6. 最初と最後の頁 32-1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10751-021-01759-x	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 Yamauchi Hiroki, Sari Dita Puspita, Watanabe Isao, Yasui Yukio, Chang Lieh-Jeng, Kondo Keietsu, Ito Takashi U., Ishikado Motoyuki, Hagihara Masato, Frontzek Matthias D., Chi Songxue, Fernandez-Baca Jaime A., Lord James S., Berlie Adam, Kotani Atsuhiko, Mori Shigeo, Shamoto Shin-ichi	4. 巻 1
2. 論文標題 High-temperature short-range order in Mn ₃ RhSi	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 43-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-0042-1	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5件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 伊藤 孝, 髭本 亘, 幸田 章宏, 下村 浩一郎
2. 発表標題 ペロブスカイト型酸化物中のミュオン拡散におけるゼロ点振動の影響
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ito Takashi U.
2. 発表標題 μ +SR as a Potential Tool for Depth-resolved Detection of Oxygen Vacancies in Perovskite Oxides
3. 学会等名 Material Research Meeting 2021 (MRM2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ito Takashi U.
2. 発表標題 Positive Muons in SrTiO ₃ : Electronic Structure of the Hydrogen-Like Defects and Their Potential Use in Depth-Resolved Detection of Oxygen Vacancies
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 孝
2. 発表標題 ルチルTiO2中のミュオニウム関連常磁性欠陥に対する電子スピン共鳴
3. 学会等名 CIQuS研究会「無機材料中の水素の存在状態と機能発現 II」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 孝
2. 発表標題 SrTiO3中の微量水素/ミュオニウムの電子状態
3. 学会等名 量子チーム連携研究センター研究会「無機材料中の水素の存在状態と機能発現」(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Orimo Shin-ichi, Fukutani Katsuyuki, Fujita Ken-ichi, Akiyama Eiji, Ajito Saya, Arita Ryotaro, Iimura Soshi, Ikuhara Yuichi, Ito Takashi U., Usami Noritaka, Otomo Toshiya, Oyaizu Kenichi, Kato Hiroyuki S., Kisu Kazuaki, Kitano Masaaki, Kim Sangryun, Gotoh Kazuhiro, Kobayashi Genki, Kondo Takahiro et al.	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Kyoritsu Shuppan Co., Ltd.	5. 総ページ数 304
3. 書名 Hydrogenomics: The Science of Fully Utilizing Hydrogen	

〔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

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