

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24221005

研究課題名(和文) 同位体特定による局所状態解明のための先進的メスバウアー分光法開発

研究課題名(英文) Development of Advanced Moessbauer Spectroscopy for Isotope Specific Analysis of Local State

研究代表者

瀬戸 誠 (SETO, Makoto)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：40243109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 74,000,000円

研究成果の概要(和文)：同位体を特定することによって、これまでの電子系による測定では困難であった測定を多元素において可能とする放射光吸収メスバウアー分光法の開発研究を行い、大幅な測定効率向上を達成した。さらに、世界に先駆けて、偏光状態を制御可能なメスバウアー線などの生成にも成功し、超高圧・強磁場下や薄膜等の測定を可能とする実用的かつ先進的なメスバウアー分光法を確立することができた。さらに、同位体置換法を用いた研究を行い、他の方法では測定困難な埋もれた界面の磁気モーメントをサイト毎に決定し、この方法の有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed multi-element Moessbauer absorption spectroscopy with synchrotron radiation; by identifying the isotope, it enables the measurement that is difficult with electronic methods. We could improve the measurement efficiency of the spectroscopy significantly. Moreover, we succeeded the generation of Moessbauer γ -rays with various polarization states for the first time. As a result, we established the advanced Moessbauer spectroscopy that allows the measurement of thin films and samples under high-pressures and/or high magnetic fields. Furthermore, we performed the study using an isotope substitution method. By using this method, we could determine the magnetic moments of the atoms at buried interfaces and showed the effectiveness of this method.

研究分野：核共鳴散乱

キーワード：量子ビーム メスバウアー分光 核共鳴散乱 放射光 同位体特定

1. 研究開始当初の背景

メスバウアー分光法は原子核の共鳴励起過程を用いるため、物質を構成する元素の中でも、特定の元素(同位体)だけの性質(電子構造、磁性)を調べることができる。そのため、現代の精密物質科学研究で求められる特定元素や特定サイトの状態に関しての高精度な測定が可能である。さらに、元素選択だけに留まらず“同位体”を特定しての測定が可能であることから、同位体のドーブなどによって電子系を用いた方法では区別不可能な状態の測定が可能となる。また、近年の第3世代放射光源の利用によって、これまでは困難であった全反射法や超高压下測定などの先進的測定が実現可能となってきた。さらに、これまでは困難であった元素を特定したフォノン測定までもが可能となってきた。

これまでにメスバウアー効果は、約100同位体(50元素)で観測されているが、研究代表者等は、ほぼ全てのメスバウアー核での測定を実現可能な放射光核共鳴吸収分光法の開発に初めて成功し、従来は困難であった高エネルギー核種における測定に途を拓き、新しい分光法としてのアイデアを実証した。また、原子核によるブラッグ散乱を利用することで、Si等による通常の結晶分光法では達成できないneV(10^{-9} eV)オーダーのバンド幅の超単色X線を実現し、放射光から通常のメスバウアー分光用線源(100 mCi相当の ^{57}Co)の約10万倍という圧倒的な超高輝度の超単色X線をエネルギー可変で定位置に出射できる技術を世界に先駆けて実現した。

このように新しく有効な分光法が出現したが、物質科学研究において強力で競争力のある分光法へと進化させ、これまで測定が困難であった対象にも先導的な研究を展開していく必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、元素(同位体)を特定した局所的な電子状態の測定を可能とするメスバウアー効果測定を多元素で実現し、放射光の高い輝度を活かした先進的な分光法を開発・確立することとした。そして、同位体置換法を用いて、これまでは困難であった特定部分だけの微視的測定を可能とするなどといった、応用研究領域の拡大を指向した先導的な研究の実施を目指した。そのために、以下を実現することを目的とした。

- (1). 放射光で励起可能なメスバウアー同位体核種に対して吸収メスバウアー分光法を確立する。
- (2). 核モノクロメーターにより生成したneVバンド幅の高輝度X線ビームを精密X線光学技術で制御し、斜入射メスバウアー分光法等の先進的なメスバウアー分光法を実現する。
- (3). 同位体置換法を積極的に活用し、これまでの電子系を用いた方法では不可能で

あった研究領域を開拓する。

本研究では、開発した装置を用いて、磁性薄膜などの界面等におけるスピン構造解析によりスピン転移と局所構造変化との関連性を明らかにするなどといった研究を先導的に行うことでその有用性を示していくこととした。また、本方法は、生体関連物質などの特定部位についての電子状態やフォノンの情報を分離して測定できる。そこで、このような研究についても有効性を示していくこととした。さらに、放射光を利用することで、斜入射やX線集光によるマイクロビームが利用できるため、強磁場・超高压などといった極端条件下での測定も可能となることより、地球科学分野などでの積極的活用も目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、極端条件下測定や薄膜測定を可能とする先進的なメスバウアー分光法開発を目標としたが、そのために高輝度放射光を利用した。さらに、放射光ではカバーできないような高い励起エネルギーのメスバウアー核種も存在していることから、多元素メスバウアー分光測定を実現するために放射性同位体(RI)線源を利用したメスバウアー分光法についても高度化開発研究を行うものとした。放射光を利用した分光法の開発においては、事前にRIを用いたテストおよび試料評価と共にシミュレーションを行うことで、限られたビームタイムで最大限の成果を得られるようにした。

4. 研究成果

(1) 電子検出による放射光吸収メスバウアー分光法の開発研究

放射光吸収メスバウアー分光法の大幅な高効率化を達成し、局所的な電子状態の測定を可能とするメスバウアー効果測定を多元素において実現した。そして、これを用いた先導的な物質科学研究を実施した。

具体的には、これまでは困難であったために実現されていなかった、共鳴脱励起時に散乱される内部転換電子の検出を可能とする新しい測定手法の開発研究を実施し、散乱体と検出器との間に電子を遮る窓のないクライオスタットとAPD(アバランシェ・フォトダイオード)検出器とを一体化した分光システムを構築することに成功した(図1)。このシステムにおいて、 γ 線、蛍光X線、電子の検出効率の最適化を実施することによって、 ^{174}Yb メスバウアースペクトル測定において、これまでと比較して5倍もの大幅な測定効率向上を達成した[12(主な発表論文等の雑誌論文番号、以下同)](図2)。このシステムの有効性は ^{174}Yb だけに限られるものではなく、他の核種においても高効率測定が可能となっており、実際にこの方法により実用的なニッケル(^{61}Ni)のメスバウアー分光測定を実現し、Niナノ粒子の磁性に関する研究

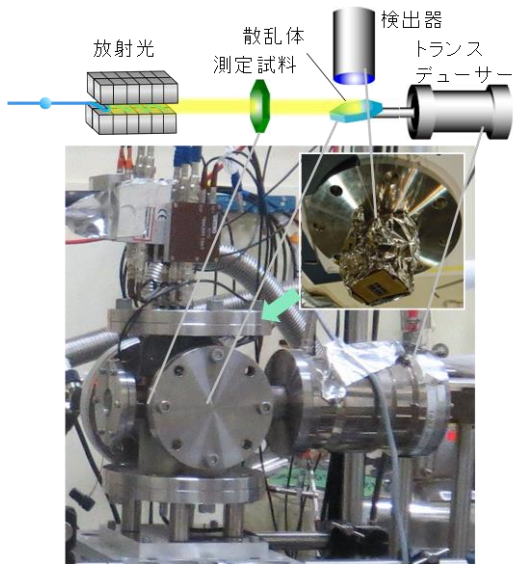


図 1. 電子検出放射光吸収メスバウアー分光システム。測定試料を透過した放射光は散乱体で共鳴吸収された後に γ 線、蛍光 X 線、内部転換電子を放出するが、これらは窓のない APD 検出器で検出される。散乱体は冷却された状態で速度トランスデューサーにより駆動される。

[4] (図 3)、Ni 酵素錯体に関する研究[2]、二次電池正極材料中の Ni イオンの充放電による挙動に関する研究[5]などといった様々な分野における研究が活発に行われるようになった。

カリウム (^{40}K) のメスバウアースペクトル測定は適当な RI 線源が存在しないためこれまで大変難しいものであったが、本方法により測定が容易となり、いわゆる磁性元素が含まれていないにもかかわらず低温で反強磁性を示すソーダライト中の K についての測定が行われ、反強磁性秩序状態における s 電子による内部磁場を初めて直接観測することに成功した[7]。さらに、 ^{125}Te 放射光メスバウアー分光法を用いた鉄系超伝導体 $\text{Fe}(\text{Te}, \text{Se})$ 系の Te の電子状態に関する研究も実施された[14]。また、放射性同位体 (RI) を用いたメスバウアー分光法では、強磁場・高圧下での測定は極めて困難であるが、放射光吸収メスバウアー分光法を用いることによって短時間での測定が実現され、Eu 化合物

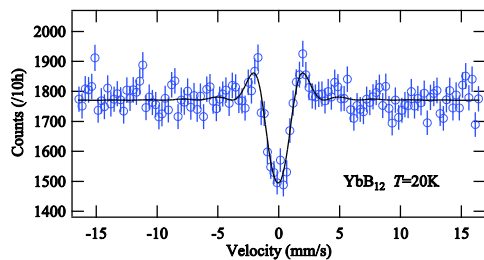


図2. 20 Kで測定された ^{174}Yb メスバウアースペクトル。透過体と散乱体は共に YbB_{12} [12]。

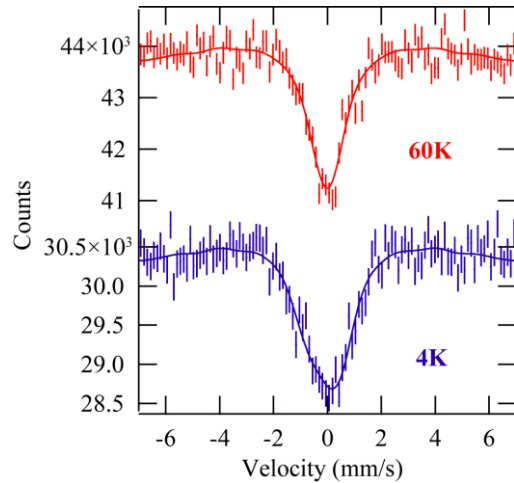


図3. 4 Kおよび60 Kで測定されたNiナノ粒子の ^{61}Ni 放射光吸収メスバウアースペクトル [4]。

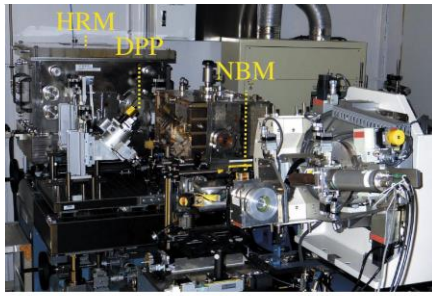
の高圧下における測定が行われ Eu の明瞭な価数変化が測定されている。

さらに、この方法では放射光のパルスタイミングに同期した測定を行っているため、脱励起後の散乱を検出する時間範囲を選択することで、実効線幅を抑制することが可能で、実効線幅が自然幅の 70%程度までに抑制されていることを実証できた。この結果により、メスバウアー分光法の高分解能化への道を拓くことができた。また、このような高分解能メスバウアースペクトルを精度良く再現可能な解析ソフトウェアの開発も行った。

多元素メスバウアー分光法は、同位体を特定することによってこれまでの電子系による測定では困難であった測定を可能とするものであり、大変有用性の高いものであると考えている。そのような測定を実現する放射光吸収メスバウアー分光法において、大幅な測定効率向上を達成し、超高圧下測定等といった先進的なメスバウアー測定を多元素において実用可能としたことには大きなインパクトのあることと考えている。この方法を利用して、国内の研究者のみならず国外の研究グループや企業等との共同研究が実施されていることより、今後の関連分野への発展および波及効果も大いに期待できるものと考えられる。

(2) メスバウアー γ 線の線質制御技術の開発研究と応用

偏光状態を制御した放射光メスバウアー γ 線を生成可能なダイヤモンド移相子と核モノクロメーターから成る核共鳴光学系を考案し、磁性体に含まれる鉄原子の内部磁場の大きさと向きを局所解析できる放射光偏光メスバウアー分光装置を世界に先駆けて開発することに成功した(図 4)。本装置により、多彩な偏光状態(直線、円偏光、無偏光)でのメスバウアー分光測定を実現した[8]。この方法をスピントロニクス材料として期待される Fe_2O_3 超薄膜におけるスピントロニクス転移



Polarized ^{57}Fe SR-Mössbauer radiation

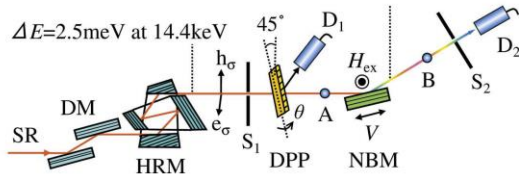


図4. 偏光メスbauer分光装置。

SR:放射光、DM: Si二結晶分光器、HRM:高分解能Si分光器、S₁:スリット、DPR:透過型移相子、D₁: PIN検出器、NBM:核モノクロメータ、H_{ex}:印加磁場、S₂:スリット、D₂:NaI検出器[8]。

(Morin 転移)の観測に適用して、Morin 転移温度が微量のイリジウムの添加により大きく上昇することを観測した[6]。更に、ナノ材料研究分野での応用展開を視野に入れた γ 線の全反射現象を利用した金属磁性薄膜の局所電子スピン構造解析法も実用化した[8]。

放射光の高い輝度を活かした研究として、液体水素を充填したダイヤモンドアンビルセルによる超高压下の偏光メスbauer分光測定を行い、超高压水素下でC15ラーベス合金(GaFe₂:フェリ磁性体)の水素吸蔵量が2段階で増加し、これに伴う逐次的な圧力誘起磁気転移(強磁性-常磁性-強磁性)が起きることなどを明らかにした[3, 14]。

また、新しい局所解析法として、核モノクロメータとSi結晶の非対称反射を利用した発散角が1秒角以下の平面波メスbauer γ 線の生成にも成功し、従来のメスbauer分光では不可能な秒オーダーの角度分解能の極小角散乱法の実用化にも成功した(図5)。

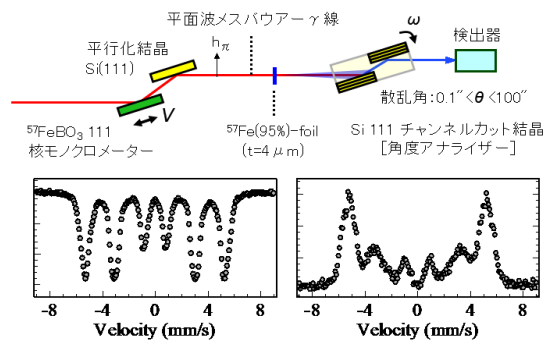


図5. メスbauer小角散乱法光学系および測定スペクトル。下図左: $2\theta = 0^\circ$ で測定した通常の吸収スペクトル、 $2\theta = 10^\circ$ で測定した小角散乱スペクトル。

本手法を用いると、他の手法では測定困難な物質中に形成されたマイクロ/ナノ微細構造に固有の電子・磁気状態の秩序パラメータとその局所構造を調べることができるため、微細組織の物性解明と制御が重要な高性能磁石、水素吸蔵合金、先進鉄鋼等の省エネ・省資源材料などの研究が可能となる。

さらに、2重ガスフロー比例計数管検出器を開発し、微小サイズの放射光メスbauer γ 線と組み合わせて利用する事で鋼材の局所構造解析が可能になった。

(3) 同位体置換による局所状態研究

希少金属 Ru を用いない反平行磁気結合積層膜として注目されている Fe/Fe₃O₄ 積層膜界面の局所磁性の研究を行った[15]。この系でみられる強い反平行磁気結合は、平坦な界面を想定した理論計算では再現できず、ヘテロ界面がどのような原子配列・磁気配列を持つのか、実験的な情報が待たれていた。そこで、埋もれた界面の研究に有効な、本研究により開発された同位体置換を用いたメスbauer効果測定を行った。さらに、開発を行った円偏光光源を併用することにより、界面の複数の Fe サイトの磁気モーメントの印加磁場に対する方向をサイト毎に決定できた。異なる結晶サイトにある同一元素の磁気モーメントの方向が印加磁場に対してどの方向に向いているのかを埋もれた界面に対して適用できる実験方法は他にはなく、本研究は学術的価値のある結果であり、波及効果も高い独創的なものであると考えている。

また、非磁性金属細線に電流を流した際に細線の上下左右界面に電子スピンの蓄積される現象であるスピンホール効果の検証を、放射光メスbauer分光法を用いて試みた。この効果は、通常、細線に付与された端子に誘起される電気信号を通じて検出されるが、界面からの深さに依存した電子スピン分極がミクロスコピックな実験で検出できれば、現象への理解も深まるものと期待される。そこで細線の上層界面から一定の深さの位置にメスbauer核を選択的にドーブした試料の測定を実施した[9]。非平衡定常状態における電子状態のメスbauer分光測定が可能であることを示すことができた意義は大きいものと考えられる。

磁気記録分野では次世代のハードディスクの記録媒体用の強い垂直磁気異方性を示しかつ希少元素を含まない候補物質として MgO 基板上で垂直磁気異方性を示す CoFe₂O₄ が挙げられる。将来的に高密度記録媒体として用いるには、強磁性ビットのパターン化が必要とされ、そのための要素技術の1つとしてイオン打ち込みによる磁性の制御がある。本研究では、イオン打ち込みによる室温での非磁性化が報告されている、CoFe₂O₄ の類似物質である Fe₃O₄ 薄膜に Kr⁺照射を行った試料に対して、本研究で開発された放射光メスbauer分光法を用いた研究を行なった。さ

らに、スピントロニクス材料として重要なハーフメタル物質の候補であるホイスラー合金 Co_2FeGe に対しては、界面のみメスバウアー核である ^{57}Fe で構成された磁気トンネル接合積層膜を作製し、積層界面の磁氣的安定性に関する研究を行った[11]。

以上の研究に加えて、核共鳴準弾性・非弾性散乱法の高度化研究なども実施し、成果を上げはじめている。

放射光吸収メスバウアー分光法は当研究グループが世界で初めて実現したものであるが、それを実用的な分光法として確立し、さらに偏光状態を制御した放射光メスバウアー γ 線を生成し、全反射条件や極小角散乱測定を可能とする先進的分光法の開発にも成功した。これらは世界的にも最先端といえる分光法であり、実施されている研究分野も物質科学、地球科学、生体関連物質などの多岐にわたっていることから、今後の更なる発展が期待されるものと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 36 件)

- ① “Nuclear Resonance Vibrational Spectroscopic Definition of Peroxy Intermediates in Nonheme Iron Sites”, K. D. Sutherlin, L. V. Liu, Y. Lee, Y. Kwak, Y. Yoda, M. Saito, M. Kurokuzu, Y. Kobayashi, M. Seto, L. Que, Jr., W. Nam, E. I. Solomon; *Journal of the American Chemical Society*, (査読有), **138**, 1494–14302 (2016).
DOI:10.1021/jacs.6b07227
- ② “Synchrotron-Based Nickel Mössbauer spectroscopy”, L. B. Gee, C. Lin, F. E. Jenney, Jr., M. W. W. Adams, Y. Yoda, R. Masuda, M. Saito, Y. Kobayashi, Kenji Tamasaku, Michael Lerche, M. Seto, C. G. Riordan, A. Ploskonka, P. P. Power, S. P. Cramer, L. Lauterbach; *Inorganic Chemistry*, (査読有), **55**, 6866–6872 (2016).
DOI:10.1021/acs.inorgchem.5b03004
- ③ “High-Pressure-Hydrogen-Induced Spin Reconfiguration in GdFe_2 Observed by ^{57}Fe -Polarized Synchrotron Radiation Mössbauer Spectroscopy with Nuclear Bragg Monochromator”, T. Mitsui, Y. Imai, N. Hirao, T. Matsuoka, Y. Nakamura, K. Sakaki, H. Enoki, N. Ishimatsu, R. Masuda, M. Seto; *Journal of the Physical Society of Japan*, (査読有), **85**, 123707-1–123707-5, (2016).
DOI: 10.7566/JPSJ.85.123707
- ④ “ ^{61}Ni synchrotron radiation-based Mössbauer spectroscopy of nickel-based nanoparticles with hexagonal structure”, R. Masuda, Y. Kobayashi, S. Kitao, M. Kurokuzu, M. Saito, Y. Yoda, T. Mitsui, K. Hosoi, H. Kobayashi, H. Kitagawa and M. Seto; *Scientific Reports*, (査読有), **6**, 20861-1–20861-9, (2016).
DOI: 10.1038/srep20861
- ⑤ “Synchrotron Radiation-Based ^{61}Ni Mössbauer Spectroscopic Study of $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$ Cathode Materials of Lithium Ion Rechargeable Battery”, T. Segi, R. Masuda, Y. Kobayashi, T. Tsubota, Y. Yoda, and M. Seto; *Hyperfine Interactions*, (査読有), **237**, 7-1–7-11, (2016).
DOI: 10.1007/s10751-016-1252-2
- ⑥ “Observation of Enhancement of the Morin Transition Temperature in Iridium-Doped $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Thin Film by ^{57}Fe -Grazing Incidence Synchrotron Radiation Mössbauer Spectroscopy”, T. Mitsui, K. Mibu, M. Seto, M. Kurokuzu, S. P. Pati, T. Nozaki and M. Sahashi; *Journal of the Physical Society of Japan*, (査読有), **85**, 063601-1–063601-4, (2016).
DOI: 10.7566/JPSJ.85.063601
- ⑦ “Synchrotron-radiation-based Mössbauer Spectroscopy of ^{40}K in Antiferromagnetic Potassium Nanoclusters in Sodalite”, T. Nakano, N. Fukuda, M. Seto, Y. Kobayashi, R. Masuda, Y. Yoda, Mototsugu Mihara, and Y. Nozue; *Physical Review B*, (査読有), **91**, 140101(R)-1–140101(R)-5, (2015).
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.140101
- ⑧ “ ^{57}Fe polarization-dependent synchrotron Mössbauer spectroscopy using a diamond phase plate and an iron borate nuclear Bragg monochromator”, T. Mitsui, Y. Imai, R. Masuda, M. Seto and K. Mibu; *Journal of Synchrotron Radiation*, (査読有), **22**, 427–435, (2015).
DOI: 10.1107/S1600577514028306
- ⑨ “Attempt to Measure Magnetic Hyperfine Fields in Metallic Thin Wires under Spin Hall Conditions Using Synchrotron-Radiation Mössbauer Spectroscopy”, K. Mibu, T. Mitsui, M. A. Tanaka, R. Masuda, S. Kitao, Y. Kobayashi, Y. Yoda, M. Seto; *Journal of Applied Physics*, (査読有), **117**, 17E126-1–17E126-4, (2015).
DOI: 10.1063/1.4917189
- ⑩ “High-pressure radiative conductivity of dense silicate glasses with potential implications for dark-magmas”, M. Murakami, A. F. Goncharov, N. Hirao, R. Masuda, T. Mitsui, S.-M. Thomas and C. R. Bina; *Nature Communications*, (査読有), **5**, 5428-1–5428-6, (2014).
DOI: 10.1038/ncomms6428
- ⑪ “Interface Magnetism of Co_2FeGe Heusler Alloy Layers and Magnetoresistance of $\text{Co}_2\text{FeGe}/\text{MgO}/\text{Fe}$ Magnetic Tunnel Junctions”, M. A. Tanaka, D. Maezaki, T. Ishii, A. Okubo, R. Hiramatsu, T. Ono, and

K. Mibu; Journal of Applied Physics, (査読有), **116**, 163902-1 – 1693902-5, (2014).

DOI: 10.1063/1.4898761

- ⑫ “Synchrotron radiation-based Mössbauer spectra of ^{174}Yb measured with internal conversion electrons”, R. Masuda, Y. Kobayashi, S. Kitao, M. Kurokuzu, M. Saito, Y. Yoda, T. Mitsui, F. Iga and M. Seto; Applied Physics Letters, (査読有), **104**, 082411 – 082411-5, (2014).
DOI: 10.1063/1.4866280
- ⑬ “ ^{125}Te Synchrotron-Radiation-Based Mössbauer Spectroscopy of $\text{Fe}_{1.1}\text{Te}$ and $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ ”, M. Kurokuzu, S. Kitao, Y. Kobayashi, M. Saito, R. Masuda, T. Mitsui, Y. Yoda and M. Seto; Journal of the Physical Society of Japan, (査読有), **83**, 044708-1 – 044708-7, (2014).
DOI: 10.7566/JPSJ.83.044708
- ⑭ “In-situ synchrotron ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy of RFe_2 (R=Y, Gd) hydrides synthesized under ultra-high hydrogen pressure”, T. Mitsui, R. Masuda, M. Seto, N. Hirao, T. Matsuoka, Y. Nakamura and K. Sakaki; Journal of Alloys and Compounds, (査読有), **580**, S264 – S267, (2013).
DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.03.271
- ⑮ “Studies on spintronics-related thin films using synchrotron-radiation-based Mössbauer spectroscopy”, K. Mibu, M. Seto, T. Mitsui, Y. Yoda, R. Masuda, S. Kitao, Y. Kobayashi, E. Suharyadi, M. Tanaka, M. Tsunoda, H. Yanagihara and E. Kita; Hyperfine Interactions, (査読有), **217**, 127 – 135, (2013).
DOI: 10.1007/s10751-012-0734-0

[学会発表] (計 100 件)

- ① 瀬戸 誠、“放射光メスバウアー分光法の基本原理と最近の進歩”、第 2 回先進的放射光メスバウアー分光研究会、2014 年 3 月 6 日、名古屋工業大学(名古屋市).
- ② M. Saito, S. Kitao, Y. Kobayashi, M. Kurokuzu, Y. Yoda and Makoto SETO, “Slow Dynamics of supercooled liquid revealed by Rayleigh scattering of Mössbauer radiation method in time domain”, International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect – 2013, 2013 年 09 月 01 日～2013 年 09 月 06 日, Opatija (Croatia).

[その他]

ホームページ

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NRP/kibans/kibans.htm>

プレスリリース

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_reults/2015/160217_3.html

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_reults/2015/150417_1.html

http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h/h1/news6/2013_1/140227_1.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬戸 誠 (SETO, Makoto)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：4 0 2 4 3 1 0 9

(2) 研究分担者

壬生 攻 (MIBU, Ko)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：4 0 2 2 2 3 2 7

(3) 研究分担者

三井 隆也 (MITSUI, Takaya)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所放射光科学研究センター・上席研究員

研究者番号：2 0 3 5 4 9 8 8

(4) 連携研究者

依田 芳卓 (YODA, Yoshitaka)

(財)高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・主幹研究員

研究者番号：9 0 2 4 0 3 6 6

(5) 連携研究者

北尾 真司 (KITAO, Shinji)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：0 0 3 1 4 2 9 5

(6) 連携研究者

小林 康浩 (KOBAYASHI, Yasuhiro)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：0 0 3 0 3 9 1 7

(7) 研究協力者

齋藤 真器名 (Saito, Makina)

(8) 研究協力者

増田 亮 (MASUDA, Ryo)

(9) 研究協力者

黒葛 真行 (KUROKUZU, Masayuki)