

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05012

研究課題名(和文) インビーム・メスバウアー分光法を応用した鉄水素化物の電子状態と化学結合の研究

研究課題名(英文) Chemical states of localized Fe atoms in hydrides by in-beam Mossbauer spectroscopy

研究代表者

小林 義男 (Kobayashi, Yoshio)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30221245

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：インビーム・メスバウアー実験を、放医研重イオン加速器HIMACで行なった。短寿命メスバウアープローブ核 ^{57}Mn (半減期 1.45分)は、核子あたり500 MeVに加速した ^{58}Fe とBe標的の入射核破砕反応により得た。 ^{57}Mn を試料に直接イオン注入しながら、ガスフロー型平行平板電子なだれ型検出器(PPAC)でスペクトルをオンライン測定した。得られたスペクトルのメスバウアーパラメータと密度関数計算の結果と合わせて、固体ガス及び水素化アルミニウムリチウムと氷中の孤立Fe原子の電子状態と化学状態を考察した。固体水素作製のガスライン製作や格子間位置のFe原子の電子密度と電場勾配の計算を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化学反応や結合様式の基礎的理解を深めるには、孤立状態にある分子の観察が必要である。従来、希ガスマトリックス中に対象化合物を捕捉するマトリックス単離法が適用されているが、希ガスマトリックス単離法を応用して、マトリックス原子とプローブ元素との反応生成物に関する測定例は非常に少ない。希薄濃度の金属イオンをマトリックス中に捕捉することが非常に難しく、常にクラスター生成の影響を考慮する必要があるためである。インビーム・メスバウアー分光法は、完全に孤立した原子に関する情報をオンラインで測定することができる。鉄の水素化物に関する知見は少なく、水素化社会に向けての基礎データを得ることも可能である。

研究成果の概要(英文)：In-beam Mossbauer spectroscopy was carried out at the heavy-ion accelerator in NIRS. Short-lived Mossbauer probe nuclei ^{57}Mn (half-life 1.45 minutes) were obtained by the projectile fragmentation reaction between ^{58}Fe accelerated to 500 MeV per nucleon and a Be thick target. The in-beam Mossbauer spectra were measured by on-line technique with a gas flow parallel-plate avalanche counter (PPAC). The electronic and chemical states of ^{57}Fe in lithium aluminum hydride and ice were discussed, together with the Mossbauer parameters and the results of density function calculations. The apparatus for solid hydrogen was designed and the electron density calculation of Fe atoms at interstitial sites in the hydrogen matrix was performed.

研究分野：放射化学

キーワード：インビーム・メスバウアー分光法 短寿命核 マンガン-57 鉄-57 水素化物 イオン注入 入射角破砕反応

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者(小林)は、短寿命不安定核を用いたインビーム・メスバウアー分光法を開発した。典型的メスバウアー核 ^{57}Fe の短寿命 ^{57}Mn プローブ核 ($T_{1/2} = 1.45$ 分) を入射核破砕反応で生成分離して最適化した後、固体試料中にこれを直接イオン注入する。試料内部で停止した ^{57}Mn が壊変後に放出する 14.4 keV のメスバウアー線をオンラインで検出するのがインビーム・メスバウアー分光法である。これまでに、本手法を酸化物や金属塩・ガスマトリックスに適用し、物質中の孤立した Fe 原子の占有位置や原子価状態、動的挙動、格子欠陥との再結合過程について研究を重ねてきた[1]。固体酸素 O_2 を用いたガスマトリックス実験では、 $(\text{O}_2)\text{Fe}(\text{O}_2)$ や $(\text{O}_2)\text{FeO}_2$ などが生成したことや固体メタン CH_4 試料では、直線 2 配位の分子構造をもつエキゾチック分子 $(\text{CH}_4)\text{Fe}(\text{CH}_4)$ の二種類の構造異性体が生成することをメスバウアー分光法と密度汎関数計算 (DFT 計算) から帰属した[2]。高励起状態にある孤立したイオンが、通常の化学反応とは全く異なる反応経路をたどり、エキゾチックな反応生成物とその電子構造を観測することに成功している。水素化リチウム LiH と重水素化リチウム LiD を使った実験では、核壊変後生成した ^{57}Fe が Li 置換位置あるいは H 置換位置を占有するまでの時間経過について報告した[3]。

化学反応や結合様式の基礎的理解を深めるには、孤立状態にある分子の観察が必要であり、従来から希ガスマトリックス中に対象化合物を捕捉するマトリックス単離法が適用されている。希ガスマトリックス中で単離された中性分子やイオンに関しては、メスバウアー分光法や赤外吸収法により報告されているが、マトリックス中での反応生成物に関する測定例は非常に少ない。これは、希薄な濃度の金属イオンをマトリックス中に捕捉することが非常に難しく、常にクラスター生成の影響を考慮する必要があるためである。一方で、プローブ原子を希薄にすると、統計精度の悪化をまねき、質の高いデータが得られない。研究代表者(小林)らが開発したインビーム・メスバウアー分光法は、プローブ核の注入エネルギーが核子あたり 20 MeV と大きいために飛程が長く試料内部に侵入できること、straggling range が広いためにプローブ核は完全に孤立していること、注入個数は 10^9 個程度と極微量で、プローブ核同士による相互作用は無視できること、独自に開発した平行平板電子なだれ式検出器はメスバウアー効果による内部転換電子を測定するので、高バックグラウンド下でも十分な統計精度を得ることが出来る特徴をもつ[4]。クラスター生成の影響を無視することができ、孤立したプローブ原子の化学反応とその生成物をオンラインでかつ高感度に探索することが可能な実験手法である。

プローブ核 ^{57}Mn は 80 % の分岐比で 14.4 keV の第一励起準位へ壊変する。 ^{57}Mn の壊変で放出するイベントをスタート信号にして、遅延したメスバウアー線を適当な時間窓を設けて計測する。同時に計数システムを採用することで、質の高いスペクトルを得ることができる。これにより、核壊変後生成した ^{57}Fe の占有位置や配位環境の微小時間変化を *in-situ* で観測することに成功した。同時に計数により、高励起原子の核壊変直後のホットアトム効果による電子状態や配位環境の時間変化をその場で追跡できるので、従来の湿式分離法ではなし得なかった電子ダイナミクスの研究が可能となった。

参考文献

- [1] Y. Kobayashi, "Chapter 3. In-Beam Mössbauer Spectroscopy Using a Radioactive Beam and a Neutron Capture Reaction", in *Mössbauer Spectroscopy – Applications in Chemistry, Biology, Nanotechnology*, ed. by V. K. Sharma, G. Klingelhöfer, and T. Nishida, John Wiley & Sons, New Jersey (USA), (2013) p.58-70.
- [2] S. Tanigawa et al., *Hyp. Int.*, 237, 72 (2016) doi s10751-016-1261-1.
- [3] Y. Sato et al., *Hyp. Int.*, 237, 74 (2016) doi s10751-016-1299-0.
- [4] T. Nagatomo et al., *Nucl. Inst. Meth. B* 269 (2011) 455-459.

2. 研究の目的

短寿命メスバウアープローブ核 ^{57}Mn を試料中に直接導入してオンライン測定するインビーム・メスバウアー分光法は、高感度の分光法であり、希薄な条件でのプローブ核の電子状態や配位環境の知見を与える。本研究では、 ^{57}Mn を水素含有物質及び水素マトリックスに注入し、壊変で生成する ^{57}Fe の電子状態とその配位環境を明らかにすることを研究目標として、インビーム・メスバウアー分光実験を行なった。時間分解測定を適用することで、未だに生成されていない Fe 水素化物の電子ダイナミクスの時間変化の追跡も行なった。

3. 研究の方法

インビーム・メスバウアー実験は、放医研重粒子線がん治療装置 (HIMAC) の二次ビームコース (SB2) で行なった。短寿命メスバウアー親核 ^{57}Mn ($T_{1/2} = 1.45$ 分) は、安定核 ^{58}Fe の入射核破砕反応で生成した。 ^{58}Fe 富化フェロセン $^{58}\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ を ECR イオン源でイオン化し、LINAC 加速器により ^{58}Fe イオンを前段加速した。その後、シンクロトロンに入射して 500 MeV/nucleon まで再加速後、厚さ 20 mm の Be 標的に照射し、入射核破砕反応を起こした。陽子 1 個が剥ぎ取られた ^{57}Mn は、二段の質量分析器を用いた電磁的手段によって多数の他の RI 破砕片と分離、収束した後、インビーム・メスバウアー分光スペクトロメータに導いた。Pb 板 (4 mm 厚) と Al 板 (4 mm 厚) の減速材を通過させ、試料厚さ内で停止可能なエネルギーに減速した。直径

20mm のビームコリメータを通過させ、水素含有物質の水素化アルミニウムリチウム・氷に直接注入した。停止位置の微調整は、くさび形アクリル減速材を使って行なった。

インビーム・メスバウアー分光スペクトロメータの試料および検出器の配置を Fig. 1 に示す。

線検出には、自作したガスフロー型平行平板電子なだれ型検出器 (PPAC) を用いた。PPAC は、 ^{57}Fe 富化 SUS 箔を吸収体として内蔵していて、メスバウアー効果にもなって放出される内部転換電子の電子なだれを利用したもので、14 keV のメスバウアー γ 線測定に特化した検出器である。PPAC をメスバウアー駆動装置に取り付け、メスバウアースペクトルを測定した。試料周囲にプラスチックシンチレーションカウンターを配置して線を検出して、反同時計数法により線由来のバックグラウンドを低減するとともに、同時計数法で数 10 ナノ秒毎の時間分割測定を行なった。同時計数イベントは、TDC (Time-to-Digital Converter) と高エネルギー物理学研究機構で開発された KODAQ プログラムで時間情報とともに記録した [5]。

得られたメスバウアーパラメータ (異性体シフト・四極分裂・線幅・共鳴面積強度) と DFT 計算から孤立 Fe 原子の電子状態や反応生成物の帰属を行なった。マックスプランク研究所の F. Neese らによって開発された密度汎関数計算プログラム ORCA を使って、物質中に孤立した Fe 原子の電子密度計算を行なった [6]。ORCA は、計算結果をメスバウアーパラメータの異性体シフト・四極分裂に簡便に変換することができるプログラムである。これまでの固体酸素や固体メタン中の Fe 原子についても、このプログラムを利用している。

水素マトリックス作製のためのターゲットセルや熱シールド、水素ガス導入ガスラインを設計製作した。ターゲットセルは低酸素銅製とし、 ^{57}Mn ビームのスポットサイズ径から $\phi 25$ mm、厚さ 5 mm 程度の容積とした。ターゲットセルの窓材は、セル内を目視で確認できるようにアラミド膜とした。このターゲットセルは、パルスチューブ型閉サイクル冷凍機に接続したクライオスタットのコールドヘッドに直接取り付けられる形状とし、セル内に高純度水素を導入する SUS 管を接続した。パルスチューブ型閉サイクル冷凍機は、ガスマトリックス実験で使用した実績から 6 K まで到達できる。セルの温度は、Si ダイオードセンサーによりモニターした。クライオスタットは、ターボポンプ排気系により $\sim 10^{-5}$ Pa まで十分に真空排気し、水素導入のガスラインも同時に排気した。冷凍機を稼働してセルの温度を 8 K に保持して、高純度水素をマスフローコントローラで制御しながら導入した。急激な温度上昇による圧力変化に対処するために、排気系にはバッファータンクを用意した。

参考文献

[5] S. Fukuda, K. Omata et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS41-1(1994)117.

[6] M. Roemelt, S. Ye, F. Neese, *Inorg. Chem.*, 48 (2009) 784–785.

4. 研究成果

氷にイオン注入して得られた Fig. 2 に示す。13 K で測定したメスバウアースペクトルは、ダブルレット成分 2 組で解析した。これらのダブルレットは Fe^{2+} に対応したが、その ΔE_Q 値の大きさは、以前に報告された氷中の 6 配位 $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ のそれより明らかに小さかった。今回の実験の結果は、6 配位より小さい配位数を持つ H_2O の格子の空格子点に捕獲された Fe^{2+} イオンであると考えた。77 および 150 K で測定したメスバウアースペクトルでは、別のダブルレットが現れたが、温度上昇にともなう無反跳分率の減少のために面積強度は減少した。高スピン Fe^{2+} であるこれらの Fe 化学種の存在を氷の結晶中で明らかにした。この結果は、液体状態の水中の Fe^{2+} イオンは $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ の形で安定化されているが、固体の氷に注入された ^{57}Fe 原子は異なる化学形で存在した。DFT 計算では、氷の 4 つの H_2O 分子に結合した Fe^{2+} および立方晶の氷 (ice Ic) の内側に位置する平面 4 配位 $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4^{2+}$ で解釈できることを示した。DFT 計算結果とメスバウアーパラメータから、13 K で出現した他の化学種は、 OH^- に結合した Fe^{2+} が 3 つの H_2O 分子に取り囲まれた $\text{FeOH}(\text{H}_2\text{O})_3^+$ とであると帰属できた。77 K と 130 K で出現した別の化学種は、氷中に閉じ込められた $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_2$ と帰属した [7]。

17 K で測定した水素化リチウムアルミニウム (LiAlH_4) に注入した ^{57}Fe メスバウアースペクトルを Fig. 3 に示す。スペクトルは、2 組のダブルレットで解析した。主成分のダブルレットのメスバウアーパラメータ ($\delta = -0.22$ mm/s, $\Delta E_Q = 0.65$ mm/s) から、その化学種は Fe イオンが Al^{3+} 位置を置換した FeH_4^- であると帰属した。メスバウアーパラメータは、DFT 計算によって推定された結果とほぼ一致した。小さなダブルレット ($\delta = -1.5$ mm/s, $\Delta E_Q = 1.1$ mm/s) は、 Li^+ を置換した Fe イオンであると考えられた。この結果は、Fe 原子が FeH_4^- 型を有する Al 置換位置で優先的に安定することが示唆された [8]。

水素ガスマトリックスとプローブ原子 ^{57}Fe から生じる反応生成物について、DFT 計算を行なうにあたり、計算モデルに必要なクラスターサイズの検討を行なった。水素マトリックスで Fe は格子間隙位置を占有すると予想して、固体水素の結晶中の正八面体間隙位置に占有する Fe 原子と正四面体間隙位置に占有する Fe 原子の異性体シフトと四極分裂の値を計算した。Fe 原子に近接する H_2 分子を徐々に増やしていき、メスバウアーパラメータに変化が見られなくなったところを必要なクラスターサイズとして求めた。計算結果を Table 1 と 2 に示す。固体水素マトリックスの実験は、2019 年 6 月に行なった。現在、実験結果の解析中である。

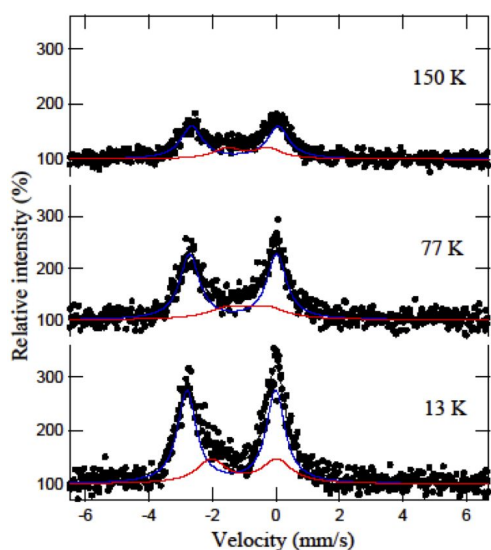


Fig. 1. In-beam emission Mössbauer spectra of ^{57}Fe after ^{57}Mn implantation into ice at 13, 77, and 150 K [7].

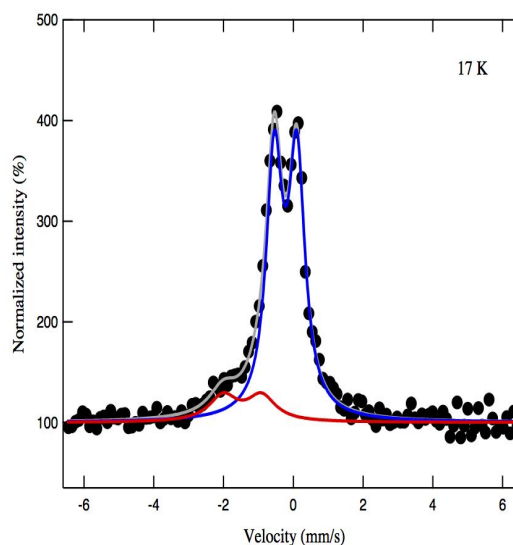


Fig. 2. In-beam emission Mössbauer spectra of ^{57}Fe after ^{57}Mn implantation into LiAlH_4 at 17 K [8].

Table 1 固体水素間隙位置（八面体位置）の Fe 原子の計算結果

第 n 近接分子	Fe-H ₂ (重心)間距離 Å	<i>I.S.</i> / mm/s	<i>Q.S.</i> / mm/s
1	2.67298	2.238	0.193
2	4.63124	2.245	0.156
3	5.11476	2.242	0.188
4	5.97929	2.248	0.149
5	6.36116	2.248	0.151
6	7.40053	2.248	0.151

Table 2 固体水素間隙位置（四面体位置）の Fe 原子の計算結果

第 n 近接分子	Fe-H ₂ (重心)間距離 Å	<i>I.S.</i> / mm/s	<i>Q.S.</i> / mm/s
1	2.31558	2.025	0.530
2	3.85425	2.027	0.547
3	4.43310	2.030	0.540
4	5.39989	2.030	0.547
5	5.82128	2.029	0.550
6	6.94196	2.029	0.549

参考文献

- [7] Y. Yamada et al., *Hyperfine Interact.*, 239 (2018) 10.1007/s10751-018-1500-1.
 [8] S. Sato et al., *Book of Abstracts of RANC2019*, p36.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- [1] Y. Yamada, Y. Sato, Y. Kobayashi, M. Mihara, M. K. Kubo, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, S. Tanigawa, D. Natori, J. Kobayashi, S. Sato, and A. Kitagawa, “In-beam Mossbauer spectra of ^{57}Mn implanted into ice”, *Hyperfine Interact.*, 239 (2018) 10.1007/s10751-018-1500-1.(査読あり)

- [2] Y. Kobayashi, Y. Yamada, M. K. Kubo, M. Mihara, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, K. Takahashi, S. Tanigawa, Y. Sato, D. Natori, M. Suzuki, J. Kobayashi, S. Sato, A. Kitagawa, “Chemical reactions of localized Fe atoms in ethylene and acetylene matrices at low temperatures using in-beam Mossbauer spectroscopy”, *Hyperfine Interact.*, 239-18 (2018) s10751-018-1494-2. (査読あり)
- [3] 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 佐藤 渉, 宮崎 淳, 長友 傑, 高橋賢也, 谷川祥太郎, 佐藤祐貴子, 名取大樹, 小林潤司, 佐藤眞二, 北川敦志, “エチレンおよびアセチレン・マトリックスに注入されたFe原子のインビーム・メスバウアースペクトル”, 京都大原子炉実験所 専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究IV」報告書, KURRI-EKR-22 (2018) 12-16. (査読なし)
- [4] 鈴木聖人, 谷川祥太郎, 佐藤祐貴子, 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 長友 傑, 佐藤 渉, 宮崎 淳, 佐藤眞二, 北川敦志, “インビーム・メスバウアー分光法を用いた⁵⁷Fe原子の化学状態の分析”, *放射化学*, 35 (2017) 59-61. (査読なし)
- [5] Y. Kobayashi, Y. Yamada, S. Tanigawa, M. Mihara, M. K. Kubo, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, Y. Sato, D. Natori, M. Suzuki, J. Kobayashi, S. Sato, A. Kitagawa, “Chemical states of localized Fe atoms in ethylene matrices using in-beam Mossbauer spectroscopy”, *Hyperfine. Interact.*, 237 (2016) 1511-1516. (査読あり)
- [6] 小林義男, “不安定原子核ビームを用いたオンライン・メスバウアー分光法”, *分光研究*, 65 (2016) 167-168. (査読あり)
- [7] 佐藤祐貴子, 谷川祥太郎, 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 長友 傑, 宮崎 淳, 佐藤 渉, 佐藤眞二, 北川敦志, “LiHとLiDに⁵⁷Mnイオンを注入したインビーム・メスバウアースペクトル”, 京都大原子炉実験所 専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究II」報告書, KURRI-EKR-6 (2016) 68-73. (査読なし)
- [8] 谷川祥太郎, 佐藤祐貴子, 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 長友 傑, 宮崎 淳, 佐藤 渉, 北川敦志, 佐藤眞二, “ガスマトリックス中で生成する化学種の時間分割メスバウアースペクトル”, 京都大原子炉実験所 専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究II」報告書, KURRI-EKR-6 (2016) 74-77. (査読なし)

〔学会発表〕(計 10 件)

- [1] Y. Sato, Y. Yamada, Y. Kobayashi, K. M. Kubo, M. Mihara, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, T. Ando, N. Takahama, K. Some, M. Sato, S. Sato, A. Kitagawa, “In-Beam Mossbauer Spectra of ⁵⁷Mn implanted into LiAlH₄”, 2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear chemistry (RANC2019), Budapest (Hungary), May (2019).
- [2] 佐藤方実, 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 佐藤 渉, 長友 傑, 高橋賢也, 安藤貴俊, 高濱矩子, 染佳梨子, 小林潤司, 佐藤眞二, 北川敦志, “窒素マトリックスにイオン注入した Fe 原子の化学状態”, 第 55 回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京, 7 月 (2018).
- [3] 高濱矩子, 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 佐藤 渉, 長友 傑, 高橋賢也, 安藤貴俊, 染佳梨子, 小林潤司, 佐藤眞二, 北川敦志, “CaF₂に注入されたFe原子のインビーム・メスバウアースペクトル”, 第55回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京, 7月 (2018).
- [4] Y. Kobayashi, N. Takahama, Y. Yamada, Y. Sato, M. K. Kubo, M. Mihara, W. Sato, K. Takahashi, K. Some, T. Ando, M. Sato, T. Nagatomo, J. Miyazaki, J. Kobayashi, S. Sato, and A. Kitagawa, “In-beam Mossbauer Studies of ⁵⁷Mn Implanted into CaF₂”, 3rd Mediterranean Conference on the Applications of the Mossbauer Effect (MECAME 2018), Zadar (Croatia), May (2018).
- [5] Y. Yamada, Y. Sato, Y. Kobayashi, M. Mihara, M. K. Kubo, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, S. Tanigawa, D. Natori, J. Kobayashi, S. Sato, and A. Kitagawa, “In-beam Mossbauer Spectra of ⁵⁷Mn Implanted into Ice”, 3rd Mediterranean Conference on the Applications of the Mossbauer Effect (MECAME 2018), Zadar (Croatia), May (2018).
- [6] K. Takahashi, Y. Kobayashi, Y. Yamada, M. K. Kubo, M. Mihara, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, S. Tanigawa, Y. Sato, D. Natori, M. Suzuki, J. Kobayashi, S. Sato, A. Kitagawa, “Chemical reactions of localized Fe atoms in ethylene and acetylene matrices at low temperatures using in-beam Mossbauer spectroscopy”, International Conference on the Applications of Mossbauer Effect (ICAME2017), St. Petersburg (Russia), Sept. (2017).
- [7] 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 佐藤 渉, 宮崎 淳, 長友 傑, 高橋賢也, 谷川祥太郎, 佐藤祐貴子, 名取大樹, 小林潤司, 佐藤眞二, 北川敦志 : “エチレンおよびアセチレン・マトリックスに注入されたFe原子のインビーム・メスバウアースペクトル”, 京都大学原子炉実験所 専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究」, 熊取, 12月 (2017).
- [8] Y. Kobayashi, Y. Yamada, S. Tanigawa, M. Mihara, M. K. Kubo, W. Sato, J. Miyazaki, T. Nagatomo, Y. Sato, D. Natori, M. Suzuki, J. Kobayashi, S. Sato, A. Kitagawa, “Chemical states of localized Fe atoms in ethylene matrices using in-beam Mossbauer spectroscopy”, 2nd Mediterranean Conference on the Applications of the Mossbauer Effect (MECAME 2016), Cavtat (Croatia), June (2016).
- [9] 小林義男: “ガス・マトリックスに注入された孤立 Fe 原子のインビーム・メスバウアースペクトル”, 日本原子力研究機構 原子力基礎工学研究センター「原子力基礎工学研究セミナー」, 東海, 2 月 (2017).

[10] 鈴木聖人, 谷川祥太郎, 佐藤祐貴子, 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 長友 傑, 佐藤 渉, 宮崎 淳, 佐藤眞二, 北川敦志, “低温C₂H₄/Ar マトリックス中の孤立⁵⁷Fe原子の化学状態”, 2016日本放射化学会・第60回放射化学討論会, 9月 (2016).

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:
ローマ字氏名:
所属研究機関名:
部局名:
職名:
研究者番号(8桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 山田 康洋
ローマ字氏名: Yasuhiro YAMADA
研究協力者氏名: 久保 謙哉
ローマ字氏名: Kenya M. KUBO
研究協力者氏名: 三原 基嗣
ローマ字氏名: Mototsugu MIHARA
研究協力者氏名: 佐藤 渉
ローマ字氏名: Wataru SATO
研究協力者氏名: 長友 傑
ローマ字氏名: Takashi NAGATOMO
研究協力者氏名: 宮崎 淳
ローマ字氏名: Jun MIYAZAKI
研究協力者氏名: 小林 潤司
ローマ字氏名: Junji KOBAYASHI
研究協力者氏名: 岡澤 厚
ローマ字氏名: Atsushi OKAZAWA
研究協力者氏名: 佐藤 眞二
ローマ字氏名: Shinji SATO
研究協力者氏名: 北川 敦志
ローマ字氏名: Atsushi KITAGAWA

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。