

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04627

研究課題名（和文）空孔型欠陥のin situおよび二次元分布計測による金属水素脆化支配欠陥

研究課題名（英文）Defects responsible for hydrogen embrittlement in metals from in-situ and two-dimensional distribution measurements of vacancy-type defects

研究代表者

Chiari Luca (Chiari, Luca)

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：20794572

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、水素・応力環境下でのその場測定により、金属材料の水素脆化支配欠陥を特定することである。水素・応力負荷下での陽電子寿命測定を可能にする新しい装置が開発された。水素感受性が高い低速延伸材においては、水素添加中に空孔-水素複合体が形成され、大気時効により空孔クラスターへの成長が初めて観察された。

また、純ニッケルにおける水素誘起欠陥の形成とその経時変化が、高速陽電子寿命測定によって追跡された。空孔-水素複合体は、引張応力なしで水素添加のみで形成されることが分かった。室温時効により、それらは徐々に消失し、残った単空孔は可動性になり、空孔クラスターに凝集し、サイズが徐々に大きくなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属材料の水素脆化は、水素環境下における力学特性の低下や遅れ破壊現象であり、水素社会を迎えるにあたり解決すべき重要な課題となっている。本研究は、純鉄および純ニッケルにおける空孔-水素複合体の形成を実証し、室温時効によるその成長過程を観察した初めての研究である。この結果は、学術的には長年未解明であった水素脆化の原子レベルメカニズムの解明に貢献したものであり、学術的・工業的大きな波及効果をもたらすことが期待される。最終的には、本研究で得られた新たな知見は、水素社会に向けて耐水素鋼材の開発につながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The primary scope of this research is to determine the lattice defects responsible for hydrogen embrittlement in metallic materials by in-situ measurements in a hydrogen environment and under tensile stress. A new experimental system was developed to enable positron lifetime measurements under tensile stress and while charging hydrogen. In pure iron strained under conditions of high hydrogen susceptibility, the formation of vacancy-hydrogen complexes during hydrogen addition and their growth into vacancy clusters by aging in air was observed for the first time.

In addition, the formation and time dynamics of hydrogen-induced defects in pure nickel was measured by high-speed positron lifetime measurements. Vacancy-hydrogen complexes were found to form just by hydrogen addition without tensile stress. By room temperature aging, they gradually disappeared and the remaining monovacancies became mobile and agglomerated into vacancy clusters, which progressively increased in size.

研究分野：化学物理学

キーワード：水素脆化 格子欠陥 陽電子消滅法 鉄 ニッケル

### 1. 研究開始当初の背景

金属材料の水素脆化とは、水素環境下における力学特性の低下や遅れ破壊現象であり、水素社会を迎えるにあたり解決すべき重要な課題である。これまでの水素脆化に対する取組は非常に多く、HEDE、HIPT、HELP、AIDE、HESIV などといった様々な水素脆化機構が提唱されてきた。一般的に、水素脆化は、水素環境下での転位運動の促進観察と、亀裂を出发点としてその後の亀裂進展で説明しようとする現象論的アプローチに起因するとされることが多い。また、結晶構造及び組織形態観察という結晶組織論的アプローチも主流である。さらに、水素エネルギーインフラによく使用されているオーステナイト系ステンレス鋼においては、相は安定で加工誘起マルテンサイト変態が水素脆化の原因になるという通説が広く普及している。しかしながら、それらの中で水素脆化現象を完全に矛盾なく説明できるものはない。その理由は、従来研究が単に力学特性と組織の関連を調べているのみで、物性の本質に迫っていないことである。そこで、原子レベルから亀裂進展までのマルチスケールにわたる統一的機構の開発が必要となると考えられる。最近までは、原子レベルからの水素脆化のメカニズムそのものを実験的な取組はほとんどなかった。特に、適切な欠陥検出法の欠如から水素脆化支配欠陥そのものの検出に挑む研究は非常に少なかった。一方、第一原理計算から最安定な水素関与欠陥として空孔-2水素( $\text{VH}_2$ )複合体が提案されているが、その実証は未達成である。ただし、近年非破壊・高感度で転位・原子空孔・空孔集合体等を検出可能な陽電子消滅法を駆使して、純鉄・ステンレス鋼などについて原子レベルでの水素脆化の支配欠陥の特定に挑戦されてきた。これまでに得られた新規知見を以下にまとめられている。

- 水素は原子空孔形成を安定化し空孔集合体形成を促進するが、それが水素脆化と相関があるわけではない。つまり、空孔集合体を形成しても水素脆化しない場合がある。
- 水素・応力負荷誘起欠陥は室温では不安定であり、応力負荷状態と負荷解除後の室温時効で欠陥種が変化する。また、それは水素の拡散係数に強く依存する。
- 組織観察 (EBSD-ECCI など) から、水素脆化材では粒界近傍などといった局所に不均一ひずみ場が形成している。

上記三つの知見も機構解明には重要かつ画期的であるが、相関関係にとどまっており、原子空孔挙動と水素脆化特性との因果関係取得に至っていない。

### 2. 研究の目的

上記の従来知見間の矛盾点の解析結果のもとに、本研究の最終目標は、水素脆化支配因子を原子レベルで特定することである。特に、陽電子消滅法に基づく新規測定法の開発で空孔 - 水素複合体検出と挙動を観察し、水素感受性と因果関係を得ることで、水素脆化メカニズムに原子空孔起因という新モデルの実証を目指す。水素脆化支配欠陥は空孔 - 水素複合欠陥と高ひずみ場領域への転位運動による空孔集積という仮説を立て、陽電子消滅法に基づいた高度化アプローチによる仮説実証を目的とする。原子レベルでの空孔 - 水素複合体形成から亀裂の核となる空孔集合体形成への成長というマルチスケールにつなぐ仮説を立て、その実証を測定手法の開発により実現することは、新たな学説を創成するという位置づけとなる。

なお、空孔 - 水素複合体は室温で非常に不安定なため、水素 + 応力環境下での *in situ* 陽電子消滅測定法を開発し、水素感受性の異なる純鉄材における空孔 - 水素複合体の存在を立証する。また、超伝導加速器による高速陽電子寿命測定装置を利用し、水素添加純ニッケル材における水素誘起欠陥の経時変化を分オーダ (従来数時間) で測定し、室温時効による水素脱離に伴う欠陥の成長挙動を追跡する。

最後に、得られた結果のもとに、水素脆化メカニズムとしては、水素により空孔 - 水素複合体形成が促進され、それらが転位運動に伴い局所ひずみ場に高密度集積し、亀裂へと成長するという独創性が非常に高く、先導的であるモデルの実証を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 純度 99.99% の鉄を供試材とし、初期欠陥を除去するために溶体化処理を行った。水素誘起欠陥の実態を観察し、応力印加状態での欠陥挙動の変化を追跡するために、テフロン製電解セルを製造し、室温

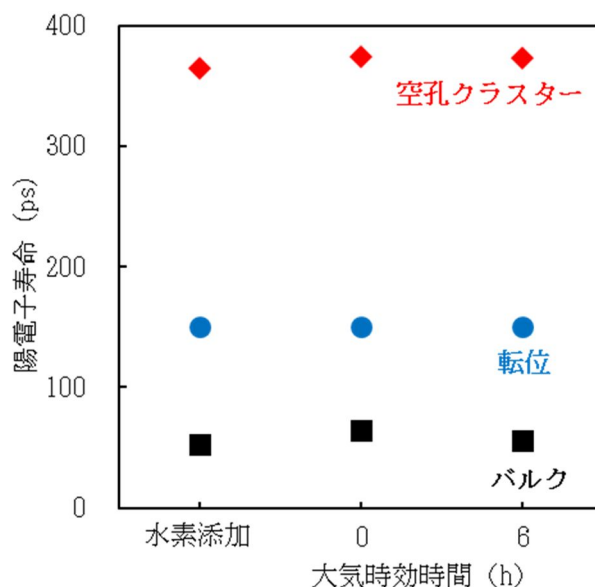


図1. *In situ* 水素添加高速延伸材の陽電子寿命測定結果。

で陰極電解法 ( $H_2SO_4 + NH_4SCN$  電解液) による水素添加および引張応力負荷した状態でのその場陽電子消滅寿命測定装置を新規に開発した。引張試験は、水素感受性が低い高引張速度 (15 mm/min) と水素感受性が高い低引張速度 (0.015 mm/min) で行った。

(2) 純度 99% のニッケルを溶体化処理した後、陰極電解法 (電解液同上) により水素添加した。分オダの陽電子寿命測定するには、Helmholtz Zentrum Dresden/Rossendorf (ドイツ) の ELBE 超伝導加速器による MePs という陽電子ビームを利用し、室温時効に伴う水素誘起欠陥の経時変化を追跡した。

#### 4. 研究成果

(1) 25% のひずみ量まで高低速延伸純鉄の水素添加状態での陽電子寿命測定結果は図 1, 2 に示し、以下にまとめる。

水素感受性が低い高速延伸材においては (図 1), 水素添加しながら陽電子寿命が 150 ps の塑性変形による転位成分および 370 ps の数十個の空孔が凝集した空孔クラスター成分が検出された。水素添加を停止し、大気下での結果に変化がなかった。これは、水素添加延伸で空孔クラスターが形成するという先行研究の結果と同様である。水素により空孔形成が促進され、不安定な空孔は拡散・凝集することで空孔クラスターとなり、安定化していると考えられる。しかしながら、この状態では延性低下には至らない。

一方、水素感受性が高く延性低下が認められた低速延伸材においては (図 2), 水素添加しながら空孔クラスター成分が検出されず、185 ps の陽電子寿命が得られた。これは転位と空孔-水素複合体混合成分を表すと考えられる。水素感受性の異なる純鉄における誘起欠陥の差の観察に初めて成功した。水素添加を停止して大気時効の測定結果は、転位と空孔クラスター成分が検出された。また、時効時間と共に空孔クラスターの寿命値が長くなり、つまりサイズが大きくなるのが分かった。この結果は、水素存在下で空孔-水素複合体が形成し、大気下で複合体から水素が脱離して、空孔が拡散し凝集したことを支持している。

(2) 水素添加ニッケルにおける高速陽電子寿命測定の結果は図 3 に示す。陽電子寿命スペクトルの解析により 2 成分が検出された。第 1 成分は 170 ~ 200 ps の範囲で、理論計算結果との比較により、単空孔または二空孔レベルの欠陥を示すことが分かった。第 2 成分は 350 ~ 400 ps の範囲で、大きな空孔クラスター (15 個を超える原子空孔) および表面または表面近傍に生成された欠陥を表す。水素チャージ直後は、第 1 成分が優勢で、水素添加による空孔-水素複合体の形成を示している。室温時効とともに、第 1 成分の強度が低下し、つまり空孔-水素複合体の濃度が低下し、同時に第 2 成分が出現する。この成分の寿命は徐々に増加し、空孔クラスターの形成とそのサイズの拡大を示している。この結果は、水素が脱着したときに残った単空孔と二空孔が移動して空孔クラスターに凝集することを示唆している。

(3) 結論として、本研究は、純鉄および純ニッケルにおける空孔-水素複合体形成を実証し、室温時効による成長過程を観察した初めての研究であり、水素脆化の原子レベルメカニズムの解明に貢献するものである。最終的には、本研究で得られた新たな知見は、水素社会に向けて耐水素鋼材の開発につながることを期待される。

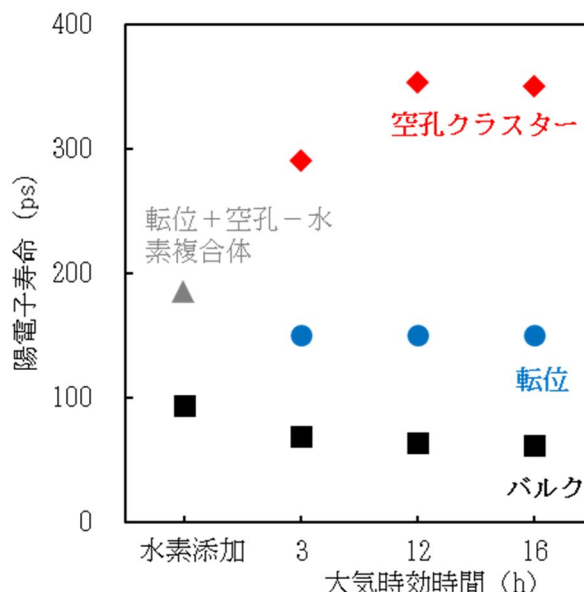


図 2. In situ 水素添加低速延伸材の陽電子寿命測定結果。

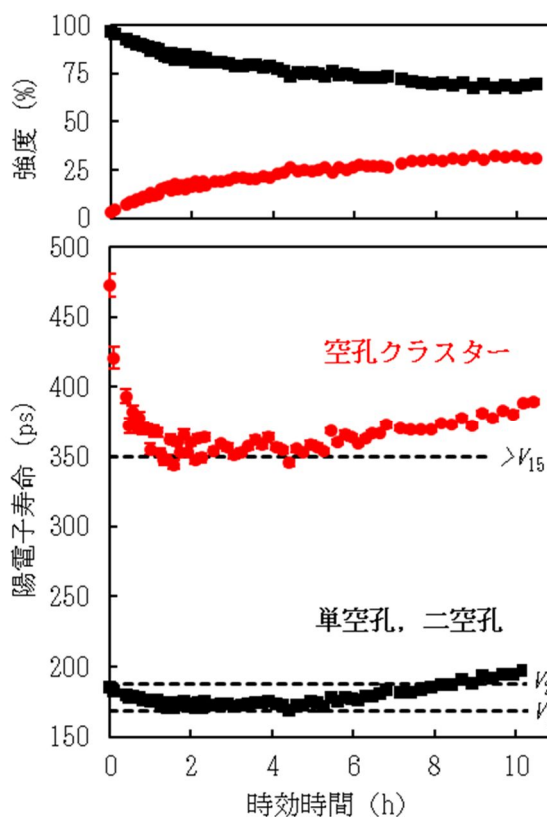


図 3. 高速陽電子寿命測定装置を用いた水素添加ニッケルにおける室温時効に伴う陽電子寿命測定結果の経時変化。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Michishio Koji, Chiari Luca, Tanaka Fumi, Nagashima Yasuyuki	4. 巻 132
2. 論文標題 Anisotropic Photodetachment of Positronium Negative Ions with Linearly Polarized Light	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 203001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.132.203001	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 Frighetto Francisco F., Chiari Luca, Sullivan James P., Buckman Stephen J., Bettega M?rcio H. F., Sanchez Sergio d 'A., Barbosa Alessandra Souza, Brunger Michael J.	4. 巻 78
2. 論文標題 Joint theoretical and experimental study on positron scattering by isopentane	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 7~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/s10053-024-00799-6	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 Chiari Luca, Noguchi Haruka, Michishio Koji	4. 巻 216
2. 論文標題 Identification of ortho-positronium annihilation sites in Y zeolites by positron lifetime measurements in different environments	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 111470 ~ 111470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radphyschem.2023.111470	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 Noguchi Haruka, Chiari Luca	4. 巻 78
2. 論文標題 Ortho-positronium annihilation processes in Y zeolites under different environments by measurements of the energy spectra of the positron annihilation radiation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 30 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/s10053-024-00823-9	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 Chiari Luca, Fujinami Masanori	4. 巻 62
2. 論文標題 Recent Studies of Hydrogen-related Defects in Iron-based Materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 832 ~ 839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-422	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 Chiari Luca, Nippa Madoka, Ikeda Yuko, Sato Tomoyuki, Tsujimoto Yuji, Kato Atsushi, Chiba Naomichi, Fujinami Masanori	4. 巻 139
2. 論文標題 Free volume in carbon black filled isoprene rubber investigated by positron annihilation lifetime spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Polymer Science	6. 最初と最後の頁 e52857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/app.52857	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 Chiari Luca, Nippa Madoka, Ikeda Yuko, Sato Tomoyuki, Tsujimoto Yuji, Kato Atsushi, Chiba Naomichi, Fujinami Masanori	4. 巻 198
2. 論文標題 In-situ positron annihilation lifetime measurements of strained isoprene rubber filled with carbon black	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 110267 ~ 110267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radphyschem.2022.110267	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 Chiari Luca, Komatsu Akari, Fujinami Masanori	4. 巻 61
2. 論文標題 Defects Responsible for Hydrogen Embrittlement in Austenitic Stainless Steel 304 by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 1927 ~ 1934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-670	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 Chiari Luca, Kojima Kenji, Endo Yusuke, Teshigahara Hiroki, Butterling Maik, Liedke Maciej Oskar, Hirschmann Eric, Attallah Ahmed G., Wagner Andeas, Fujinami Masanori	4. 巻 219
2. 論文標題 Formation and time dynamics of hydrogen-induced vacancies in nickel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 117264 ~ 117264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.117264	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 Chiari Luca	4. 巻 17
2. 論文標題 Positron and positronium scattering research	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 陽電子科学	6. 最初と最後の頁 3 ~ 13
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 -

1. 著者名 Nagashima Yasuyuki, Michishio Koji, Chiari Luca, Nagata Yugo	4. 巻 54
2. 論文標題 An energy-tunable positronium beam produced via photodetachment of positronium negative ions and its applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 212001 ~ 212001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/ac3b40	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 Chiari Luca, Ohnuki Chihiro, Fujinami Masanori	4. 巻 37
2. 論文標題 Analysis of the Chemical State in Y-zeolite Pores by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Analytical Sciences	6. 最初と最後の頁 1117 ~ 1122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2116/analsci.20P416	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 Chiari Luca, Ohnuki Chihiro, Fujinami Masanori	4. 巻 184
2. 論文標題 A positronium-based systematic study of the physico-chemical properties of zeolite pores	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 109441 ~ 109441
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radphyschem.2021.109441	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23件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 M. Butterling, M. O. Liedke, E. Hirschmann, M. Wenskat, C. Bate, J. Cizek, L. Chiari, M. Fujinami, A. Wagner
2. 発表標題 Dynamic study of Vacancy-Hydrogen dynamics using a high-intense slow-positron beam
3. 学会等名 16th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 L. Chiari, K. Yamamoto, R. Shirai, K. Michishio
2. 発表標題 Hydrogen susceptibility of polished pure iron
3. 学会等名 16th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagata, K. Michishio, L. Chiari, S. Kuma, T. Azuma, R. Mikami, Y. Nagashima
2. 発表標題 Fundamental studies of positronium using a high-quality energy-tunable positronium beam
3. 学会等名 33rd International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Shiga, N. Sakurai, L. Chiari
2. 発表標題 Stability evaluation of complex lyophilized formulations by free volume measurements using positron annihilation lifetime spectroscopy
3. 学会等名 2023年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nagata, R. Mikami, K. Michishio, L. Chiari, Y. Nagashima
2. 発表標題 An energy-tunable positronium beam and its application to atomic physics
3. 学会等名 International Conference on Atomic, Molecular, Material, Nano and Optical Physics with Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Awaji, L. Chiari, M. Hatano, M. Sugeoi, M. Fujinami
2. 発表標題 Hydrogen-induced defect behavior in austenitic stainless steels with different hydrogen embrittlement sensitivities
3. 学会等名 19th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, Heraklion (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Awaji, L. Chiari, M. Sugeoi, M. Hatano, M. Fujinami
2. 発表標題 Causal relationship between hydrogen-induced defect formation behaviour and mechanical properties in austenitic stainless steels
3. 学会等名 16th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques & Applications (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Chiari Luca, Yamamoto Kansei, Michishio Koji
2. 発表標題 Effect of surface processing on hydrogen-induced defects in pure iron
3. 学会等名 19th International Conference on Positron Annihilation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shiga Yuta, Sakurai Naoto, Chiari Luca
2. 発表標題 Stability evaluation of complex lyophilized formulations by positron annihilation lifetime spectroscopy and solid state 1H-NMR
3. 学会等名 19th International Conference on Positron Annihilation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fujinami Masanori, Chiari Luca
2. 発表標題 Positron annihilation lifetime spectroscopy of unstable hydrogen-induced defects in pure iron and nickel
3. 学会等名 19th International Conference on Positron Annihilation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Awaji Ryo, Chiari Luca, Sugeoi Mitsuki, Hatano Masaharu, Fujinami Masanori
2. 発表標題 Hydrogen-induced defect behaviour in austenitic stainless steels with different hydrogen embrittlement sensitivities
3. 学会等名 19th International Conference on Positron Annihilation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Matsuno Akemi, Chiari Luca, Yamawaki M., Oshima Nagayasu, Sato L., Takai K., Fujinami Masanori
2. 発表標題 Hydrogen-induced defects in bcc-iron by in situ positron annihilation lifetime spectroscopy
3. 学会等名 19th International Conference on Positron Annihilation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chiari Luca, Yamamoto Kansei
2. 発表標題 Surface treatment effects on hydrogen-induced defect formation in pure iron
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第184回秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chiari Luca
2. 発表標題 Evaluation of hydrogen-induced defects in iron and austenitic stainless steels by positron annihilation spectroscopy
3. 学会等名 日本鉄鋼協会「結晶性材料のマルチスケール解析フォーラム」シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲澤凌平、森田剛、Chiari Luca
2. 発表標題 ガンマアルミナにおける炭素材料のオルトポジトロニウムクエンチング効果
3. 学会等名 2022年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chiari Luca、山本寛星、満汐孝治
2. 発表標題 Hydrogen induced defects in surface processed pure iron
3. 学会等名 2022年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chiari Luca
2. 発表標題 Applications of Ps to material science
3. 学会等名 第14回陽電子科学研究交流会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chiari Luca
2. 発表標題 Formation dynamics of hydrogen-induced vacancies in stainless steels and nickel by positron annihilation spectroscopy
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第184回秋季講演大会「結晶性材料のマルチスケール解析フォーラム」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nagata Yugo, Michishio Koji, Iizuka T., Kikutani H., Chiari Luca, Tanaka F., Nagashima Yasuyuki
2. 発表標題 Observation of hyperfine resonance of positronium using a static periodic magnetic field
3. 学会等名 19th International Conference on Positron Annihilation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chiari Luca、Sakurai Naoto、Fujinami Masanori
2. 発表標題 陽電子消滅法を用いた凍結乾燥製剤の自由体積
3. 学会等名 第58回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chiari Luca、Noguchi Haruka、Michishio Koji、Fujinami Masanori
2. 発表標題 Adsorption effects on positronium behavior in Y zeolites
3. 学会等名 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Michishio K.、Kuma S.、Nagata Y.、Chiari L.、Iizuka T.、Mikami R.、Azuma T.、Nagashima Y.
2. 発表標題 Photodetachment threshold spectroscopy of the positronium negative ion -first determination of the electron affinity of positronium-
3. 学会等名 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagata Y.、Michishio K.、Iizuka T.、Kikutani H.、Chiari L.、Tanaka F.、Nagashima Y.
2. 発表標題 Hyperfine resonance of positronium using a static periodic magnetic field
3. 学会等名 12.5th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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		
ドイツ	Helmholtz Zentrum Dresden/Rossendorf		