

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03902

研究課題名(和文)陽電子消滅と第一原理計算を併用した電子運動量分布解析で調べるガス元素-空孔複合体

研究課題名(英文) Gas element-vacancy complexes investigated by electron momentum distribution analysis using a combination of positron annihilation and first-principles calculations

研究代表者

藪内 敦 (Yabuuchi, Atsushi)

京都大学・複合原子力科学研究所・助教

研究者番号：90551367

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)：タングステン中の原子空孔に複数個の侵入型不純物原子(X=H,C,N,O)が結合した欠陥複合体(VXk)の陽電子寿命の変化を第一原理計算を用いて調べたところ、VH₂、VC₁、VN₁、VO₁複合体いずれもが約170 psの陽電子寿命を示すことがわかった。そこで各種欠陥複合体における消滅ガンマ線ドップラー広がりスペクトルについても計算したところ、いずれの欠陥複合体のスペクトルでも電子運動量16 mrad付近に肩が現れ、欠陥種を区別することは困難であることが示された。これらの欠陥複合体の種類を同定するためには欠陥複合体のアニール挙動観察と、空孔-不純物原子間の結合エネルギー計算の併用が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉のプラズマ対向壁材料として期待されているタングステン中の原子空孔と侵入型不純物原子との相互作用、および不純物原子の空孔への結合が陽電子寿命や陽電子消滅ガンマ線ドップラー広がりを与える影響について第一原理計算を用いて調べた。タングステン中のそのような欠陥の種類を同定するためには欠陥のアニール挙動観察と不純物原子の空孔への結合エネルギー計算の併用が必要であることが示された。

研究成果の概要(英文)：The change in the positron lifetime of defect complexes (VXk) with multiple interstitial impurity atoms (X=H, C, N, O) bound with a vacancy in tungsten was investigated using first-principles calculations. It was found that the VH₂, VC₁, VN₁, and VO₁ complexes all exhibit a positron lifetime of around 170 ps. The Doppler broadening of the annihilation radiation spectra of these defect complexes was also calculated. It was shown that a shoulder appears around 16 mrad of electron momentum in the spectra of all defect complexes, making it difficult to distinguish the defect species. It was concluded that a combination of observation of the annealing behavior of defect complexes and calculation of the binding energy between vacancy and impurities is necessary to identify the species of these defect complexes.

研究分野：材料科学

キーワード：陽電子寿命 消滅ガンマ線ドップラー広がり 電子運動量分布 第一原理計算 原子空孔 欠陥複合体

1. 研究開始当初の背景

陽電子消滅法は空孔型欠陥を評価する手法として優れた特性を持つため、中性子照射およびプラズマ照射に耐えなければならない核融合炉のプラズマ対向材料であるタングステンの照射欠陥研究にも広く用いられている[1]。陽電子寿命測定により金属中の欠陥を評価する際、陽電子寿命の違いに基づいて欠陥種(例えば転位に付随する空孔、孤立した単空孔、複空孔、またはより大きな空孔集合体)が区別されることがある。しかし、空孔が水素(H)、炭素(C)、窒素(N)、酸素(O)などの侵入型不純物原子と結合すると、空孔の陽電子寿命は大きく変化する。これらの軽元素不純物は金属から完全に除去することが難しく、金属の純度分析には含まれないことがある。これらの侵入型不純物原子は空孔と大きな引力相互作用を持ち[2]、タングステン中の空孔のアニール挙動に大きな影響を与える。特に、H原子とO原子はタングステン中でそれぞれ0.21 eVと0.17 eVという小さな移動エネルギーを持つことが報告されている[3,4]。したがって、多数のH原子やO原子がタングステン結晶外部から内部に取り込まれ、複数のH原子やO原子が1つの空孔に結合する可能性がある。陽電子消滅法を用いてタングステン中の空孔型欠陥を研究するには、これらの侵入型不純物原子が陽電子消滅特性に及ぼす影響を評価しておくことが重要となる。

2. 研究の目的

本研究ではタングステン中の単原子空孔に複数個のH、C、N、O原子が結合した欠陥複合体の陽電子寿命の変化を計算し、陽電子寿命による欠陥種の同定が可能かどうか調べた。さらに、陽電子寿命で区別がつかない欠陥種について、消滅ガンマ線ドップラー広がりスペクトル(電子運動量分布)も計算し、電子運動量分布の違いから欠陥種の同定が可能かどうか調べた。

3. 研究の方法

侵入型不純物原子の空孔(または空孔-不純物複合体)への結合エネルギー、陽電子寿命、消滅ガンマ線ドップラー広がりスペクトルは、密度汎関数理論(DFT)に基づくプログラムであるABINIT [5-7]を使用して計算した。電子-イオン相互作用は、Blöchlのプロジェクター拡張波法を用いてモデル化された[8,9]。電子間の交換相関汎関数は、Perdew、Burke、Ernzerhofの一般化勾配近似を使用して記述された[10]。陽電子の寿命は、2成分DFTスキームを使用して計算した[11,12]。電子-陽電子交換相関汎関数としてPuska、Seitsonen、Nieminenの局所密度近似を使用して、電子密度分布に対する陽電子局在の影響を考慮した[13]。計算は、 $3 \times 3 \times 3$ 体心立方スーパーセルを用いて行った。平面波カットオフエネルギーとk点サンプリングメッシュはそれぞれ408 eVと $6 \times 6 \times 6$ メッシュとした。すべての欠陥構造の原子構成は、スーパーセル内の各原子に働く力が 0.01 eV/\AA 未満になるまで格子緩和計算を繰り返すことによって最適化した。陽電子が空孔に局在すると、空孔周囲の電子密度が変化し[11]、空孔周囲の各原子に働く力も変化する[14]。そのため陽電子が空孔に局在化すると空孔の周囲で格子緩和が生じ、陽電子寿命にも影響を与える。そこで陽電子寿命計算では、陽電子が局在する空孔周囲の各原子に作用する力が再び 0.01 eV/\AA 未満になるまで格子緩和計算を繰り返した。

本研究では、各侵入型不純物原子の初期位置として空孔周囲のOサイトを使用して格子緩和計算を行った。図1に示すように、空孔の周囲には第一近接(1NN)Oサイトと第二近接(2NN)Oサイトがある。1NNと2NNのOサイトは、空孔の周囲にそれぞれ6か所および12か所存在する。格子緩和計算は、1NNまたは2NN Oサイトを不純物原子の初期位置とし、考えられるすべての原子配置について行った。それらの総エネルギーを比較することで、各欠陥の最も安定な原子配置を決定した。

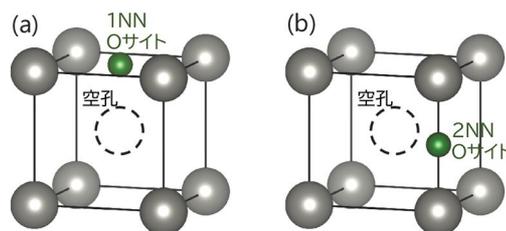


図1. BCC結晶における空孔から第一近接(1NN)および第二近接(2NN)のOサイト。

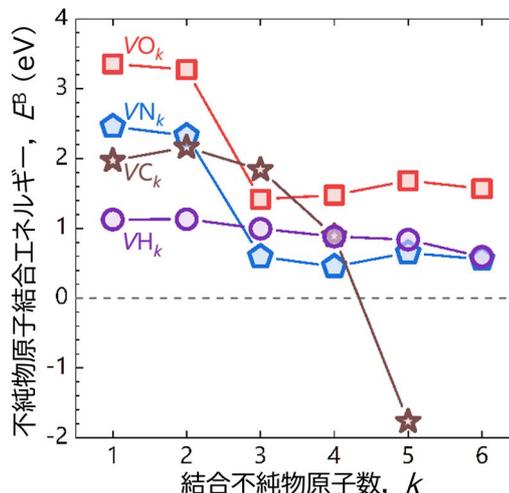


図2. 各不純物原子の空孔(空孔-不純物複合体)への結合エネルギー計算値。

4. 研究成果

第一原理計算により各欠陥複合体の最安定な原子配置を探索し、それに基づき不純物原子の単原子空孔への結合エネルギーを計算した。図 2 はタングステン中の単原子空孔と不純物原子との結合エネルギーの計算結果を示す。($k=2$ の場合の結合エネルギーは空孔 V と不純物原子 X との欠陥複合体 VX_{k-1} に k 番目の X 原子が結合した際のエネルギー利得を表している。) C 原子の場合を除き、各不純物原子は 1 つの空孔に少なくとも 6 個まで結合できることを示している。一方、空孔-炭素複合体の場合は 1 つの空孔に C 原子が 4 個までは結合するが 5 個目の C 原子は反発を受けることを示している。本研究で得られた最安定原子配置および結合エネルギーの計算結果は過去の第一原理計算研究で報告されたものと概ね一致した。

次に、上述の計算で得られた各欠陥複合体の最安定構造について、陽電子寿命を計算した。図 3 に各欠陥複合体での陽電子寿命計算値を示す。空孔-水素複合体 VH_k や空孔-炭素複合体 VC_k では結合する不純物原子数の増加に伴い、陽電子寿命は単調に短くなる。また、単空孔に炭素原子が 4 個結合した欠陥複合体 VC_4 にはもはや陽電子は局在化しないという結果を得た。(したがって、図中で VC_4 の陽電子寿命は完全結晶の位置にプロットしてある。) 一方で、 VH_k や VC_k とは対照的に、空孔-窒素複合体 VN_k や空孔-酸素複合体 VO_k では結合不純物原子数の増加に伴い陽電子寿命が長くなる場合があることが明らかになった。そのため VN_k や VO_k では陽電子寿命の変化から、空孔に結合している不純物原子の数を見積もることは困難である。また、 VH_2 、 VH_3 、 VC_1 、 VN_1 、 VO_1 はどれも 170 ps 前後の陽電子寿命を持つ。そのため水中で電子線照射したタングステン試料で観測された 170 ps の陽電子寿命を持つ欠陥 [2] についても、陽電子寿命測定から欠陥種を同定することは困難である。

空孔-窒素複合体 VN_k および空孔-酸素複合体 VO_k でみられた結合不純物原子数の増加に伴う陽電子寿命の長寿命化の原因について検討するため、空孔に k 番目に結合した不純物原子の空孔中心からの距離について整理した。図 4 で空孔と k 番目の不純物原子との距離 L は、空孔中心から未緩和 1NN 0 サイトまでの距離 $0.5a$ (a は格子定数) で規格化している。 VH_k や VC_k では、不純物原子は常に $L < 1$ の位置に結合する。これは不純物原子が未緩和 1NN 0 サイトから内側(空孔中心側)に向けて緩和していることを意味する。そのため空孔-不純物複合体の陽電子寿命は結合不純物原子数の増加に伴い短くなると考えられる。一方、 VN_k では $k=3$ から、 VO_k では $k=5$ から、不純物原子は未緩和 2NN 0 サイトの外側に結合する。このような空孔中心から離れた位置に結合する不純物原子はタングステン格子を押し広げ、空孔-不純物複合体の陽電子寿命を長寿命化させると考えられる。

VH_2 、 VC_1 、 VN_1 、 VO_1 の各欠陥複合体は陽電子寿

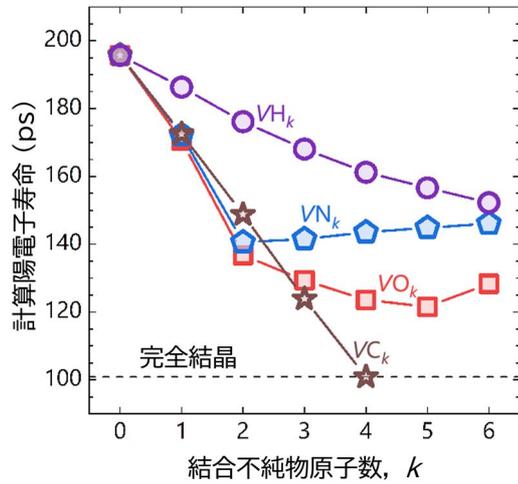


図 3. 各欠陥複合体の陽電子寿命計算値。 $k=0$ は孤立単空孔の陽電子寿命値を表す。

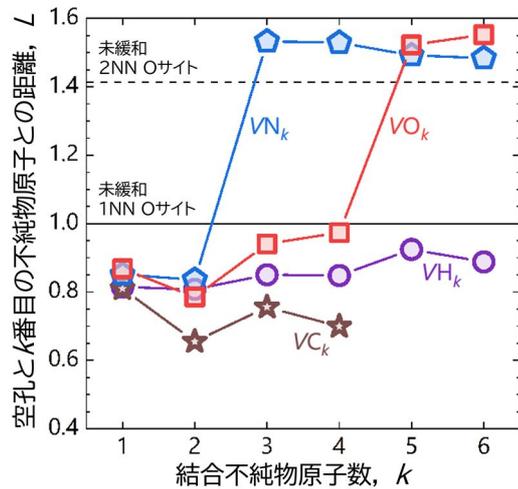


図 4. 空孔(空孔-不純物複合体)に k 番目に結合する不純物原子の空孔中心からの距離。

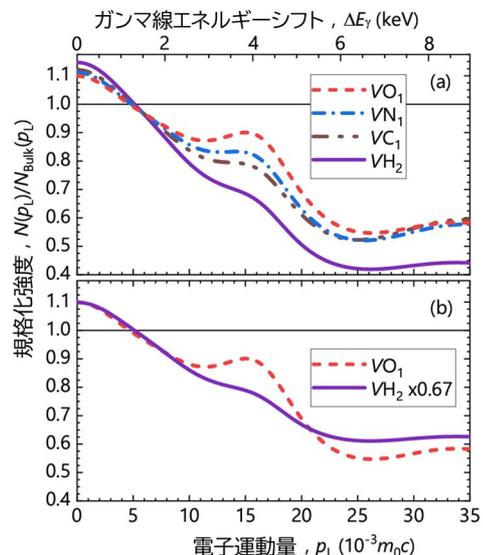


図 5. ほぼ同等の陽電子寿命(約 170 ps)を持つ空孔-不純物複合体の電子運動量分布(比率曲線)計算値。

命計算からはどれも約 170 ps の寿命値を持つため区別がつかない。これらの欠陥複合体の電子運動量分布(消滅ガンマ線ドップラー広がりスペクトル)を計算した結果を図5に示す。いずれの欠陥複合体のスペクトルでも電子運動量 $16 \times 10^{-3} m_0 c$ 付近に肩が現れることが示された。電子運動量 $16 \times 10^{-3} m_0 c$ 付近に現れる肩が最も小さい VH_2 複合体と最も大きい VO_1 複合体との区別であれば消滅ガンマ線ドップラー広がりスペクトルから見分けることは可能であるが、 VH_2 複合体と VO_1 複合体の中間的なスペクトル形状となる VC_1 、 VN_1 複合体の存在も可能性として含めると、消滅ガンマ線ドップラー広がりスペクトルからも欠陥種を同定することは困難である。したがって、これらの欠陥複合体の種類を同定するためには陽電子消滅測定による欠陥複合体のアニール挙動観察と、第一原理計算による空孔-不純物原子間の結合エネルギー計算を併用した解析が必要であるという結論に至った。

<引用文献>

- [1] F.A. Selim, Mater. Charact. **174** (2021) 110952. [2] A. Yabuuchi et al., J. Nucl. Mater. **542** (2020) 152473. [3] K. Heinola et al., J. Appl. Phys. **107** (2010) 113531. [4] A. Alkhamees et al., J. Nucl. Mater. **393** (2009) 508. [5] X. Gonze et al., Comput. Phys. Comm. **205** (2016) 106. [6] X. Gonze et al., Comput. Phys. Comm. **248** (2020) 107042. [7] A.H. Romero et al., J. Chem. Phys. **152** (2020) 124102. [8] P. E. Blöchl, Phys. Rev. B **50** (1994) 17953. [9] G. Kresse et al., Phys. Rev. B **59** (1999) 1758. [10] J.P. Perdew et al., Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 3865. [11] J. Wiktor et al., Phys. Rev. B **87** (2013) 235207. [12] J. Wiktor et al., Phys. Rev. B **92** (2015) 125113. [13] M.J. Puska et al., Phys. Rev. B **52** (1995) 10947. [14] M. Mizuno et al., Mater. Trans. **45** (2004) 1964.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yabuuchi Atsushi	4. 巻 513
2. 論文標題 Effect of neutron-photon converter materials (Cd, Gd, and Sm) on the positron production in a reactor-based slow positron beamline	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 44 ~ 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2021.12.008	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 Sugita Kazuki, Ogawa Ryusei, Mizuno Masataka, Araki Hideki, Yabuuchi Atsushi	4. 巻 208
2. 論文標題 Vacancy migration energies in CrMnFeCoNi, CrFeCoNi, and CrFeNi alloys and their effect on atomic diffusion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 114339 ~ 114339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2021.114339	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 Yosuke IWAMOTO, Makoto YOSHIDA, Shin-ichiro MEIGO, Katsuya YONEHARA, Taku ISHIDA, Keita NAKANO, Shin-ichiro ABE, Hiroki IWAMOTO, T. SPINA, K. AMMIGAN, N. MOKHOV, Atsushi YABUUCHI, and Toshimasa YOSHIE	4. 巻 2021-001
2. 論文標題 Experimental plan for displacement damage cross sections using 120-GeV protons at Fermi National Accelerator Laboratory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAEA-Conf	6. 最初と最後の頁 138 ~ 143
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 Yabuuchi A., Tanaka M., Kinomura A.	4. 巻 542
2. 論文標題 Short positron lifetime at vacancies observed in electron-irradiated tungsten: Experiments and first-principles calculations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152473 ~ 152473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152473	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 Yabuuchi Atsushi, Ozaki Toshinori, Sakane Hitoshi, Okazaki Hiroyuki, Koshikawa Hiroshi, Yamamoto Shunya, Yamaki Tetsuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Characterization of the effect of ion irradiation on industrially produced GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ -superconducting tapes using a slow positron beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 123004 ~ 123004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abcd72	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 Iwamoto Yosuke, Yoshida Makoto, Matsuda Hiroki, Meigo Shin-ichiro, Satoh Daiki, Yashima Hiroshi, Yabuuchi Atsushi, Kinomura Atsushi, Shima Tatsushi	4. 巻 28
2. 論文標題 Measurement of Defect-induced Electrical Resistivity Change of Tungsten Wire at Cryogenic Temperature Using High-energy Proton Irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 061003 ~ 061003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.28.061003	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 Nakajima M., Taguchi R., Yabuuchi A., Kinomura A.	4. 巻 91
2. 論文標題 Reduction of background radiation effects for positron lifetime measurements in the slow positron beamline at the Kyoto University Research Reactor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 125109 ~ 125109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0013891	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 Sato Koichi, Kondo Yohei, Ohta Masakiyo, Xu Qiu, Yabuuchi Atsushi, Kinomura Atsushi, Onoue Masahira, Onitsuka Takashi, Hatakeyama Masahiko, Iwakiri Hiroto, Kato Daiji, Watanabe Yoshiyuki, Tanigawa Hiroyasu	4. 巻 1024
2. 論文標題 Change in the Positron Annihilation Lifetime of Vacancy Clusters Containing Hydrogen Atoms in Electron-Irradiated F82H	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 71 ~ 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1024.71	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 Iwamoto Yosuke, Yoshida Makoto, Matsuda Hiroki, Meigo Shin Ichiro, Satoh Daiki, Yashima Hiroshi, Yabuuchi Atsushi, Shima Tatsushi	4. 巻 1024
2. 論文標題 Measurements of Displacement Cross Section of Tungsten under 389-MeV Proton Irradiation and Thermal Damage Recovery	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 95 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1024.95	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 Yabuuchi Atsushi	4. 巻 34
2. 論文標題 Inverse change in positron lifetimes of vacancies in tungsten by binding of interstitial impurity atoms to a vacancy: A first-principles study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 101364 ~ 101364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2023.101364	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 Nakajima Makoto, Kinomura Atsushi, Yabuuchi Atsushi, Kuriyama Kazuo	4. 巻 61
2. 論文標題 Investigation of defect states in light-irradiated single-crystal ZnO by low-temperature positron annihilation lifetime spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 100905 ~ 100905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac9103	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27件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 数内敦
2. 発表標題 タングステン中の空孔と侵入型不純物原子が結合した欠陥複合体の第一原理計算
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 藪内敦
2. 発表標題 陽電子による原子空孔挙動解明と原子炉ベースの陽電子ビーム開発
3. 学会等名 令和3年度京大複合研専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神田一浩、三嶋友博、丹羽大輔、堀史説、藪内敦、木野村淳
2. 発表標題 水素脱離による水素化DLC膜中の自由体積の変化
3. 学会等名 令和3年度京大複合研専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤拓巳、松岡直希、小川竜生、杉田一樹、水野正隆、藪内敦、木野村淳、荒木秀樹
2. 発表標題 CrMnFeCoNi, CrFeCoNi, CrFeNi 等モル固溶体合金の空孔形成エネルギー
3. 学会等名 令和3年度京大複合研専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshinori Ozaki, Itsuhiro Kakeya, Tatsunori Okada, Satoshi Awaji, Satoshi Semboshi, Hiroyuki Okazaki, Hiroshi Koshikawa, Shunya Yamamoto, Tetsuya Yamaki, Atsushi Yabuuchi, Tetsuro Sueyoshi, and Hitoshi Sakane
2. 発表標題 Flux pinning engineering by low-energy heavy ion irradiation for GdBa ₂ Cu ₃ O _y coated conductors
3. 学会等名 virtual 2021 joint 23rd Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC/ICMC 2021) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshinori Ozaki, Atsushi Yabuuchi, Hitoshi Sakane, Hiroyuki Okazaki, Hiroshi Koshikawa, Shunya Yamamoto, Tetsuya Yamaki
2. 発表標題 Characterization of the effect of low-energy Au-ion irradiation on GdBa ₂ Cu ₃ O _y superconducting tape using a slow positron beam
3. 学会等名 MATERIALS RESEARCH MEETING 2021 (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神田一浩、赤坂大樹、堀史説、藪内敦、木野村淳
2. 発表標題 低エネルギー陽電子線・軟X線放射光を用いたDLC膜の構造解析
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹羽大輔、三嶋友博、寺井響、中西康次、新部正人、神田一浩、堀史説、藪内敦、木野村淳
2. 発表標題 軟X線照射による水素化DLC膜の構造変化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三嶋友博、寺井響、中西康次、新部正人、神田一浩、福室直樹、竹内雅耶、堀史説、藪内敦、木野村淳
2. 発表標題 熱処理による水素化DLC膜の構造変化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kanda, M. Niibe, H. Akasaka, T. Suzuki, F. Hori, A. Yabuuchi, A. Kinomura
2. 発表標題 Totally-viewed structural analysis on DLC films using low energy positron beam, soft x-ray beam and high energy ion beam
3. 学会等名 The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2021 (Pacifichem 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 数内 敦, 木野村 淳, 尾崎 壽紀, 坂根 仁, 岡崎 宏之, 越川 博, 山本 春也, 八巻 徹也
2. 発表標題 イオン照射GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ - 超伝導テープ線材の低速陽電子ビームによる評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 数内 敦, 尾崎 壽紀, 坂根 仁, 岡崎 宏之, 越川 博, 山本 春也, 八巻 徹也
2. 発表標題 量産GdBa ₂ Cu ₃ O ₇ - 超伝導テープ線材へのイオン照射によるSパラメータ低下
3. 学会等名 令和2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 2020年

1. 発表者名 数内 敦
2. 発表標題 原子炉ベース低速陽電子ビームラインにおけるGd-capの利用の検討
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島 諒, 木野村 淳, 藪内 敦, 栗山 一男
2. 発表標題 陽電子消滅寿命法と電子スピン共鳴による電子線照射されたZnO中空孔型欠陥の可視光応答観測
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 外山健、Zhao Can、井上耕治、永井康介、波多野雄治、藪内敦、木野村淳
2. 発表標題 電子線照射されたW-X合金(X=Mo, Ta, Re)中の照射欠陥
3. 学会等名 日本金属学会秋季(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大沢一人、藪内敦、外山健、渡邊英雄
2. 発表標題 タングステン中の空孔クラスターの成長に対する不純物の影響
3. 学会等名 日本金属学会秋季(第167回)講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 外山 健、Zhao Can、井上 耕治、永井 康介、波多野 雄治、藪内 敦、木野村 淳、鈴木 知明
2. 発表標題 陽電子消滅法で調べた電子線照射W合金中の空孔型欠陥形成に対するRe添加効果
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季(第168回)講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 外山 健、Zhao Can、井上 耕治、永井 康介、波多野 雄治、藪内 敦、木野村 淳
2. 発表標題 電子線照射されたW合金中の照射欠陥
3. 学会等名 令和2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 2020年

1. 発表者名 佐藤紘一、平原雅史、Qiu Xu、藪内敦、木野村淳
2. 発表標題 金属材料における水素を捕獲した照射欠陥の陽電子寿命値の変化
3. 学会等名 令和2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 2020年

1. 発表者名 小川竜生、杉田一樹、水野正隆、藪内敦、木野村淳、荒木秀樹
2. 発表標題 CoCrFeMnNi高エントロピー合金における空孔移動エネルギーの推定
3. 学会等名 令和2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 2020年

1. 発表者名 木野村淳、村上亮、藪内敦、Brian E. O' Rourke
2. 発表標題 陽電子ビームパルス化システムの荷電粒子軌道計算コードによる評価
3. 学会等名 第59回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Kanda, Tomohiro Mishima, Hiroki Akasaka, Fuminobu Hori, Atsushi Yabuuchi, and Atsushi Kinomura
2. 発表標題 Investigation of Free Volume in Diamond-like Carbon Films Using a Slow Positron Beam
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbon 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中尾節男、木野村淳、藪内敦、鈴木耕拓
2. 発表標題 熱処理したa-C:H膜の陽電子消滅測定
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Toyama, K. Inoue, Y. Hatano, A. Yabuuchi, A. Kinomura, Y. Oya, T. Suzudo, Y. Nagai
2. 発表標題 Doping Effect of Re, Mo, Ta on irradiation-induced defects in W
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 A. Kinomura, A. Yabuuchi, K. Tomatsu, and T. Omura
2. 発表標題 Slow-positron beam analysis of fracture surfaces of hydrogen-charged Ni-20Cr alloy
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 富松宏太、大村朋彦、木野村淳、藪内敦
2. 発表標題 低速陽電子ビームによる水素添加Ni-Cr合金の粒界破面直下の格子欠陥分析
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 藪内敦
2. 発表標題 陽電子消滅法を用いた金属材料中の原子空孔の非破壊評価
3. 学会等名 大阪ニュークリアサイエンス協会 第77回放射線科学研究会（招待講演）
4. 発表年 2022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
---------	---------