

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03517

研究課題名(和文)陽電子消滅法と昇温脱離分析による原子力材料中の水素 - 空孔型欠陥相互作用の解明

研究課題名(英文)Study on hydrogen-defect interaction in nuclear materials by using PAS and TDS

研究代表者

外山 健 (Toyama, Takeshi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：50510129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：陽電子消滅法と昇温脱離分析によって、照射されたタングステン中の照射欠陥への重水素捕獲を観察した。純粋なタングステンを電子線照射または中性子照射し、照射後焼鈍を真空中または重水素ガス中に行った。重水素ガス中で焼鈍された試料の陽電子寿命は真空中で焼鈍された場合よりも短いことから、照射欠陥への重水素捕獲が示唆された。このことは、同時計数ドップラー広がり測定によって陽電子が重水素の電子と消滅することを直接観察することによって示された。照射欠陥への水素同位体捕獲を陽電子消滅法によって明確に示したものであり、今後空孔型欠陥と水素との相互作用をより定量的に解明することにつながることを期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水素脆化は広い学問分野にまたがる学際的な課題であり、これまでに多くの研究が行われてきた。本研究は、実験手法および理論計算の最近の進歩をもとに水素 - 空孔型欠陥の相互作用に焦点を当てるものであり、水素脆化研究において水素拡散・捕獲プロセスをより良く理解するための材料科学からの知見を与える。原子力材料の劣化機構解明につながるのみならず、材料科学的にも大きな意義がある研究である。

研究成果の概要(英文)：Deuterium trapping at irradiation-induced defects in tungsten, a candidate material for plasma facing components in fusion reactors, was revealed by positron annihilation spectroscopy. Pure tungsten was electron-irradiated (8.5 MeV at ~373 K and to a dose of ~1 mdpa) or neutron-irradiated (at 573 K to a dose of ~0.3 dpa), followed by post-irradiation annealing at 573 K for 100 h in deuterium gas of ~0.1 MPa. In both cases of electron- or neutron-irradiation, vacancy clusters were found by positron lifetime measurements. In addition, positron annihilation with deuterium electrons was demonstrated by coincidence Doppler broadening measurements, directly indicating deuterium trapping at vacancytype defects. This is expected to cause significant increase in deuterium retention in irradiated-tungsten.

研究分野：原子力材料

キーワード：陽電子消滅法 中性子照射 電子線照射 昇温脱離分析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水素は金属材料の強度や破壊特性を劣化させることは古くから知られている。原子力材料では、軽水炉燃料被覆管材料（ジルコニウム合金）の水素脆化が代表例である。ジルコニウム合金は使用とともに徐々に腐食するが、このときの反応によって水素が生じ、その一部は材料中に侵入する。侵入した水素は高温部から低温部へと拡散し、低温部での水素濃度が溶解限度を超えるとジルコニウム水素化物が析出する。この水素化物近傍ではひずみ等のために微小割れが生じやすく、結果として燃料被覆管が脆化してしまう。これは、特に冷却水喪失事故における燃料の健全性を確保する上で非常に重要な問題である。

また、次世代のエネルギー源の一つとして核融合炉の研究開発が進められており、主要な課題の一つに、プラズマ対向材料の開発がある。プラズマ対向材料には水素同位体の滞留が低いことが要請されるが、照射欠陥が存在するとタングステンの水素同位体滞留量が顕著に増加することが分かってきた。その原因として、空孔（クラスター）や転位ループのような照射誘起欠陥が水素の捕獲サイトになると考えられているが、これは直接調べられてはいない。

しかしながら、金属中の水素含有量は（たとえ水素脆性が問題となるレベルであっても）多くの場合ごく微量であり、その上水素は最も軽い元素であり各種の物理的な刺激に対する反応が弱い。そのため、金属材料中の水素を実験的に観察することは容易ではない。水素昇温脱離分析法は通常用いられる手法であり、試料の水素吸蔵量や水素の結合エネルギーを測定でき、モデル計算と合わせれば水素捕獲サイトの評価もある程度可能である。一方で、昇温による材料そのものの変化は避けられないため、水素捕獲サイトである空孔や空孔クラスターは測定とともに回復してしまう。従って、水素-空孔型欠陥の相互作用の理解は未だ十分ではない。

2. 研究の目的

鉄鋼材料やタングステンなど原子力材料について、電子線あるいは中性子照射したのちに水素を導入し、空孔型欠陥への水素捕獲を陽電子消滅法と昇温脱離分析で観察することで、水素-空孔型欠陥の相互作用を明らかにすることを目的とする。両実験手法を同一試料に適用し、さらに第一原理計算など理論計算による結果とも比較することで、空孔型欠陥での水素の配位数や水素結合エネルギーを初めて実験的に直接評価しようとする。

本報告では、電子線照射あるいは中性子照射されたタングステンについて、照射欠陥への水素捕獲を陽電子消滅法によって明らかにした成果を示す。陽電子寿命測定および陽電子消滅同時計数ドップラーブロードニング測定（coincidence Doppler broadening : CDB）を組み合わせたことによって、陽電子消滅サイトである照射欠陥の化学分析を行い、水素が捕獲されていることを明瞭に観察することができた。その後昇温脱離分析により、確かに水素滞留量が増加していることを示した。

3. 研究の方法

供試材は、純タングステンロッド（純度：99.99%）から作製した。ロッドから直径6 mm、厚さ0.2 mm（電子線照射用）または直径3 mm、厚さ0.2 mm（中性子照射用）のディスクを切り出し、真空中で900°C×1時間の焼鈍を行った。次いで、真空中で、900°C×30分間の応力緩和（Stress relief）焼鈍または1300°C×30分間の再結晶（Re-crystallization）焼鈍を行った。応力緩和焼鈍のままの試料をSAと呼ぶ。SAを約0.1 MPaの重水素ガス中で300°C×100時間焼鈍した。この試料をSBと呼ぶ。SAを京都大学複合原子力研究所のライナックで電子線照射した。電子エネルギーは8.5 MeV（カスケード損傷は生じず、フレンケル対のみが導入されるようなエネルギーである）、はじき出し損傷量は約 1×10^{-3} dpa、照射温度は約100°Cである。この試料をSCと呼ぶ。SCを真空中または約0.1 MPaの重水素ガス中でそれぞれ300°C×100時間焼鈍した。真空中で焼鈍した試料をSDと呼ぶ。重水素ガス中で焼鈍した試料をSEと呼ぶ。再結晶試料についても同様の処理を施した。対応する試料の呼び名をRA - REとする。なお、RCでは電子線照射に替えて中性子照射を行った。中性子照射は米国オークリッジ国立研究所のHFIRを用いて行った。はじき出し損傷量は約0.3 dpa、照射温度は約300°Cである。本実験の照射条件では、電子線照射および中性子照射とも、照射欠陥は試料の十分深い領域まで、試料の厚さ方向にほぼ均一に導入されている。

陽電子寿命測定は、BaF₂シンチレーション検出器およびデジタルオシロスコープを用いて行った。時間分解能は約180 psである。測定毎に約 5×10^6 個のコインシデンスイベントを収集し、解析ソフトウェアPALSを用いて寿命スペクトルを解析した。CDB測定は、2個のゲルマニウム半導体検出器を用いて行った。測定毎に約 3×10^6 個のコインシデンスイベントを収集した。運動量分解能は約 $4 \times 10^{-3} m_0c$ である（ m_0 : 電子および陽電子の静止質量、 c : 光速）。CDBスペクトルの比率曲線は、各CDBスペクトルを良く焼鈍された純タングステン（純度：99.99%、約1800°C×2時間焼鈍）のCDBスペクトルで正規化することによって得られた。陽電子が空孔型欠陥に捕獲されると、伝導電子との消滅確率が高くなり相対的に内殻電子との消滅割合は減少する。伝導電子は実空間において空間的に広い分布を有するので、不確定性原理より、運動量空間における分布は狭くなる。従って、空孔型欠陥への陽電子捕獲が生じると、CDB比率曲線の低運動量領域

が増加し、高運動量領域は相対的に減少する。また、CDB 比率曲線の高運動量領域の形状は、陽電子捕獲サイト近傍の化学的環境を強く反映する。本研究で対象とする重水素およびタングステンの電子構造は互いに大きく異なるから、CDB 比率曲線の高運動量領域を調べることで陽電子捕獲サイトにおける重水素を検出できると期待される。さらに、試料間の比率曲線の変化を見やすくするため、低運動量割合 (S-parameter) および高運動量割合 (W-parameter) を導入した。S-、W-parameter は、CDB スペクトルの低、高運動量領域におけるカウントの総 CDB カウントに対する比率として定義され、ここでは運動量領域をそれぞれ $(0 - 4) \times 10^{-3} m_0c$ および $(13 - 20) \times 10^{-3} m_0c$ と設定した。

電子線照射された試料に関しては、重水素滞留量を調べるために陽電子消滅測定の後昇温脱離 (Thermal Desorption Spectrometry : TDS) 分析を行った。TDS 分析は試料を真空中で加熱・昇温し、試料から放出されるガスを質量分析する手法である。TDS スペクトルは試料温度に対するガス量として得られ、ガスの脱離量や脱離温度を調べることができる。本研究では、温度上昇率 10 K min^{-1} で TDS 分析を行った。

4. 研究成果

(1) 実験結果

①電子線照射材

SA での平均寿命 τ_{ave} は 128 ps とバルクにおける陽電子寿命の計算値よりやや長かった。したがって、SA には、転位線や結晶粒界などの陽電子を捕獲する欠陥がわずかに残存することが示唆された。SB でも $\tau_{ave} = 128 \text{ ps}$ であり、重水素ガス中での焼鈍では陽電子寿命には全く変化は見られなかった。SC では、陽電子寿命スペクトルは 1 成分で良くフィッティングされ、 $\tau_{ave} = 169 \text{ ps}$ となった。SA での τ_{ave} から増加したことから、電子線照射によって導入された空孔型欠陥への陽電子捕獲が生じていることが分かる。169 ps は単空孔における陽電子寿命の計算値 (200 ps) からはかなり低いことから、陽電子は単空孔およびバルクで消滅していると考えられる。また、転位での陽電子寿命は単空孔よりも短いことを考えると、照射で形成された転位や転位ループも消滅サイトである可能性も考えられる。SD では陽電子寿命スペクトルは 2 成分で良くフィッティングされ、 $\tau_1 = 133 \text{ ps}$ 、 $\tau_2 = 312 \text{ ps}$ が得られた。 τ_1 は、タングステンバルクにおける陽電子寿命よりも長いことから、バルクにおける陽電子消滅の成分だけでなく、空孔型欠陥における陽電子消滅の成分も τ_1 に寄与していることを示している。 τ_2 は空孔クラスターにおける陽電子捕獲を反映しており、得られた τ_2 の値は V_{6-9} の空孔クラスターにおける陽電子寿命に対応する。これは、照射後焼鈍によって空孔が移動・集合して空孔クラスターが形成したことを示している。SE でも 2 成分解析ができ、 $\tau_1 = 154 \text{ ps}$ および $\tau_2 = 300 \text{ ps}$ が得られた。SE の τ_{ave} は 188 ps であり、これは SD の τ_{ave} の値 195 ps よりも 7 ps 短くなっていた。以上より、重水素中で焼鈍すると、真空中での焼鈍と比べて、 τ_{ave} も τ_2 も短くなることが分かった。

CDB 測定の結果、SA および SB では、CDB 比率曲線はすべての運動量領域で 1.0 に近く、多くの陽電子はタングステンバルクで消滅していると考えられることが分かった。SC では、低運動量領域の増加と高運動量領域の減少が見られた。これは、電子線照射で導入された空孔型欠陥への陽電子捕獲によるものである。SD では、SC と比較して、低運動量領域のわずかな増加および高運動量領域の減少が観察された。SE では、低運動量領域がはっきりと増加しており、相対的に高運動量は減少していた。SE の比率曲線は、SC および SD とは明らかに異なっていた。

重水素中で焼鈍した SB および SE に関しては、TDS 測定も行った。SB では、約 (400 - 700) °C の温度領域で重水素が検出されたが、その総量は小さかった。一方、SE では、約 300 °C から重水素が検出され、その総量は SB と比べて顕著に大きかった。すなわち、SE では重水素滞留量が顕著に大きいことが分かった。これは、照射によって水素同位体滞留量が増加するというこれまでの報告によく一致する結果である。特に、本実験でのわずかなはじき出し損傷量 (約 $1 \times 10^{-3} \text{ dpa}$) であっても重水素滞留量が顕著に増加することは注目に値する。

②中性子照射材

RA - RE の陽電子寿命測定の結果、RA では、 τ_{ave} は 118 ps とバルクにおける陽電子寿命の計算値にほぼ等しく、RA では陽電子を捕獲するような欠陥はほとんど含まれないことが分かった。RA では高温での再結晶熱処理が行われたためと考えられる。RB では、 τ_{ave} は 120 ps と RA とほぼ等しく、重水素ガス中での焼鈍では空孔型欠陥が導入されなかったことが分かった。RC では、 τ_{ave} は 332 ps であり、RA よりも著しく長かった。中性子照射によって導入された空孔型欠陥への陽電子捕獲によるものと考えられる。RC の陽電子寿命スペクトルは 2 成分に分離でき、 $\tau_1 = 268 \text{ ps}$ および $\tau_2 = 453 \text{ ps}$ が得られた。RC では多くの陽電子は空孔型欠陥に捕獲されているものと考えられる。 τ_2 は、 V_{40} 程度の大きな空孔クラスターにおける陽電子寿命に対応する。RD では、陽電子寿命の結果は RC とほぼ同一であり、照射後焼鈍の効果はほとんど無いことが分かった。すなわち、中性子照射後に存在する空孔型欠陥は、 $300^\circ\text{C} \times 100$ 時間の照射後焼鈍ではほと

んど変化しなかったと考えられる。一方、RE では、 τ_{ave} は 253 ps であり、RC よりも約 80 ps も小さくなった。RD で分かったように 300°C×100 時間焼鈍では空孔型欠陥そのものはほぼ変化しないことを考えると、焼鈍中の重水素雰囲気による効果が観察されているものと考えられる。

RA - RE の CDB 測定結果、RA および RB では、CDB 比率曲線は全運動量領域でほぼ 1.0 であり、陽電子はタングステンバルクのみで消滅することが分かった。RC では、低運動量領域の増加と高運動量領域の減少が観察された。これは空孔型欠陥への陽電子捕獲を明確に示している。RD の比率曲線は RC のそれとほぼ同じであり、これは陽電子寿命の結果と一致する。RE の比率曲線は RC および RD とは大きく異なっており、これらと比べて低運動量領域が大きく増加するとともに高運動量領域も増加した。高運動量領域の形状は RC や RD とは大きく異なっており、 $15 \times 10^{-3} m_0c$ 近傍の運動量領域で肩のような形状が観察された。

(2) 議論

①空孔型欠陥の構造変化

電子線照射まま材 (SC) では、単空孔等の照射欠陥への陽電子捕獲が観察されたが、空孔クラスターへの陽電子捕獲は見られなかった。一方で、電子線照射後焼鈍材 (SD) では、空孔クラスターへの陽電子捕獲が明確に観察された。これは、電子線照射によって形成された単空孔が 300°C×100 時間の照射後焼鈍によって移動・集合して空孔クラスターが形成したことを示している。これまでの報告では、タングステンでのいわゆるステージⅢ温度 (原子空孔の移動が始まる温度) は (200 - 400) °Cとされており、本実験で見られた変化を説明することができる。すなわち、電子線照射で単空孔が導入されたが、約 100°C という低い照射温度のため空孔の易動度は小さく単空孔のままできどまった。そのため、SC には単空孔が残っていた。300°Cでの照射後焼鈍によって、単空孔の移動・集合が生じ、SD では空孔クラスターが形成された。

一方で、中性子照射の場合、照射まま材 (RC) と照射後焼鈍材 (RD) の陽電子寿命測定の結果はほぼ同じであった。これは、照射まま材から空孔クラスターが観察されたが、照射後焼鈍は照射欠陥の回復にほとんど寄与しないことを示している。これは、ステージⅢ付近の温度である約 300°Cで 48 日間の中性子照射が行われたため、中性子照射中に照射誘起空孔の移動が起こり RC で空孔クラスターが形成されたが、ほぼ同じ温度での照射後焼鈍 (300°C×100 時間) ではこの空孔クラスターは安定でありほとんど回復しなかったためと考えられる。

②空孔型欠陥への重水素捕獲

SD と SE とで、あるいは RD と RE とでそれぞれ観察されたように、照射後焼鈍条件が同じであっても、真空中か重水素ガス中かによって陽電子寿命は異なった。重水素ガス中で焼鈍した試料の方が短い陽電子寿命が得られた。重水素が空孔クラスター中に捕獲された場合、空孔クラスター中の電子密度が増加し、陽電子消滅確率が増加すると考えられる。そのため、重水素を含まない同じサイズの空孔クラスターの場合よりも陽電子寿命が短くなると予想される。このことは Troev ら (2009) による計算でも示唆されている)。彼らは、タングステン中の空孔型欠陥における陽電子寿命値を計算し、水素捕獲の効果を評価した。例えば、 V_6 、 $V_6 + 1H$ 、 $V_6 + 10H$ の陽電子寿命値はそれぞれ 273 ps、249 ps、190 ps と計算され、重水素を含む空孔クラスターでは陽電子寿命値が短くなると予想された。したがって、本実験での SE および RE では、空孔クラスターへの重水素捕獲が強く示唆されている。

なお、水素が空孔に捕獲されると空孔の拡散が促進されることが指摘されており、本研究では、電子線照射材に関してはこの効果も考慮しなければならない可能性もある。すなわち、照射後に重水素ガス中で焼鈍された SE では、空孔への水素捕獲と空孔の移動・集合が同時に起きているから、空孔の易動度は SD でのそれよりも異なる可能性がある。そのため、SD と SE とでは、照射後焼鈍後に形成した空孔クラスターの寸法や数密度が異なるかもしれない。したがって、SD と SE とでは、空孔への水素捕獲の有無に加えて空孔クラスターの寸法等の違いも陽電子寿命値の差異に影響している可能性もある。つまり、今回の電子線照射材に関しては、空孔への水素捕獲を陽電子寿命測定のみで議論することは得策ではなく、すぐ後に述べるように CDB 測定と合わせた議論が必要である。

重水素が空孔クラスターに捕獲されているならば、陽電子は重水素の電子とも消滅するはずである。重水素には内殻電子が存在せず価電子のみが存在することを考えると、CDB 測定によって得られる運動量分布は、重水素による陽電子消滅とタングステンによる陽電子消滅とで異なることが予想される。伝導電子の運動量分布は狭く、低運動量領域に限られているのに対し、内殻電子の運動量分布は広く、高運動量領域まで広がっている。実際、SE および RE の比率曲線は、それぞれ SD および RD の比率曲線とは異なっていた。

全ての試料の CDB 比率曲線の変化をより端的に示すために S-parameter および W-parameter

を求めた。結果を図1に示す。図中の破線は、RA (タングステンバルク) と RC (タングステン中の“純粋な”空孔型欠陥) とを結ぶ直線である。SA - SD および RA - RD の相関点はこの破線上に位置するから、これらの試料中では陽電子はタングステンの電子とのみ消滅することが分かる。一方で、SE および RE の相関点は破線の下方に位置する。これは、陽電子はタングステン以外の元素 (すなわち重水素) の電子とも対消滅することを示す。重水素は内殻電子を持たないために、W-parameter がタングステンよりも低くなり、相関点は破線よりも下方に位置している。

なお、金属が高圧水素ガスに曝されると、熱平衡濃度以上の空孔が生成することが報告されている。一方、本研究では、SB および RB の陽電子寿命はそれぞれ SA および RA の陽電子寿命とほぼ同じであったことから、重水素ガス中の焼鈍のみでは空孔は導入されなかったことが分かる。これは、本研究では焼鈍中の重水素ガス圧は約 0.1 MPa と低かったためと考えられる。

以上より、本研究では、陽電子消滅法を用いて電子線照射または中性子照射された純タングステン中の空孔型欠陥への重水素捕獲を観察することができた。次のステップとして、単空孔や空孔クラスターにおける重水素の密度および配位の分析を、陽電子消滅法と TDS 測定や第一原理計算とを組み合わせで行おうとしている。

以上、陽電子消滅法と昇温脱離分析によって、照射されたタングステン中の照射欠陥への重水素捕獲を観察した。純粋なタングステンを電子線照射または中性子照射したのちに、300°C×100時間の照射後焼鈍を真空中または重水素ガス中で行った。重水素ガス中で焼鈍された試料の陽電子寿命は真空中で焼鈍された場合よりも短いことから、照射欠陥への重水素捕獲が示唆された。このことは、同時計数ドップラー広がり測定によって陽電子が重水素の電子と消滅することを直接観察することによって示された。この重水素捕獲は、タングステン中の水素滞留が照射後は著しく増加することの原因と考えられる。本稿で紹介した結果は、照射欠陥への水素同位体捕獲を陽電子消滅法によって明確に示したものであり、今後空孔型欠陥と水素との相互作用をより定量的に解明することにつながることを期待される。

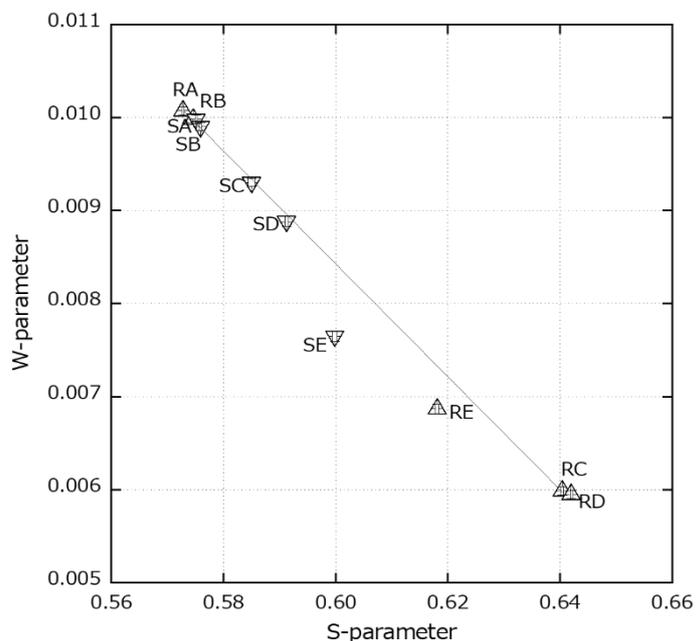


図1: 電子線照射または中性子照射されたタングステンの陽電子同時計数ドップラー広がり測定で得られたSパラメータ・Wパラメータの相関図。

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 6件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Shimodaira Masaki, Toyama Takeshi, Yoshida Kenta, Inoue Koji, Ebisawa Naoki, Tomura Keiko, Yoshiie Toshimasa, Konstantinovic Milan J., Gerard Robert, Nagai Yasuyoshi | 4. 巻 155 |
| 2. 論文標題 Contribution of irradiation-induced defects to hardening of a low-copper reactor pressure vessel steel | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Acta Materialia | 6. 最初と最後の頁 402 ~ 409 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.06.015 | 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 Hwang Taehyun, Hasegawa Akira, Tomura Keiko, Ebisawa Naoki, Toyama Takeshi, Nagai Yasuyoshi, Fukuda Makoto, Miyazawa Takeshi, Tanaka Teruya, Nogami Shuhei | 4. 巻 507 |
| 2. 論文標題 Effect of neutron irradiation on rhenium cluster formation in tungsten and tungsten-rhenium alloys | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 78 ~ 86 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2018.04.031 | 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 外山健 網恭平 佐藤紘一 Qiu, Xu 井上耕治 永井康介 波多野雄治 | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 陽電子消滅法で調べたタングステン中の照射欠陥への重水素捕獲 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 陽電子科学 | 6. 最初と最後の頁 23-29 |
| 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 該当する |
| 1. 著者名 Toyama T., Ami K., Inoue K., Nagai Y., Sato K., Xu Q., Hatano Y. | 4. 巻 499 |
| 2. 論文標題 Deuterium trapping at vacancy clusters in electron/neutron-irradiated tungsten studied by positron annihilation spectroscopy | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 464 ~ 470 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2017.11.022 | 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 Fujita Hiroe, Uemura Yuki, Sakurada Shodai, Azuma Keisuke, Zhou Qilai, Toyama Takeshi, Yoshida Naoki, Hatano Yuji, Chikada Takumi, Oya Yasuhisa | 4. 巻 125 |
| 2. 論文標題 The damage depth profile effect on hydrogen isotope retention behavior in heavy ion irradiated tungsten | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 468 ~ 472 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2017.05.141 | 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 Toyama T., Yamamoto T., Ebisawa N., Inoue K., Nagai Y., Odette G.R. | 4. 巻 532 |
| 2. 論文標題 Effects of neutron flux on irradiation-induced hardening and defects in RPV steels studied by positron annihilation spectroscopy | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 152041 ~ 152041 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152041 | 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 Ohsawa Kazuhito, Toyama Takeshi, Hatano Yuji, Yamaguchi Masatake, Watanabe Hideo | 4. 巻 527 |
| 2. 論文標題 Stable structure of hydrogen atoms trapped in tungsten divacancy | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials | 6. 最初と最後の頁 151825 ~ 151825 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2019.151825 | 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 Yajima M., Hatano Y., Ohno N., Kuwabara T., Toyama T., Takagi M., Suzuki K. | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Kinetics of deuterium penetration into neutron-irradiated tungsten under exposure to high flux deuterium plasma | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy | 6. 最初と最後の頁 100699 ~ 100699 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2019.100699 | 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 Yi Xiaou, Zhang Lei, Han Wentuo, Chen Jiao, Liu Pingping, Lv Yanwei, Song Jiupeng, Xue Luwei, Geng Diancheng, Yoshida Kenta, Toyama Takeshi, Zhan Qian, Wan Farong, Ohnuki Somei, Nagai Yasuyoshi | 4. 巻 85 |
| 2. 論文標題 Defect characterization, mechanical and thermal property evaluation in CVD-W after low-dose neutron irradiation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Refractory Metals and Hard Materials | 6. 最初と最後の頁 105004 ~ 105004 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrmhm.2019.105004 | 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 Nakata Moeko, Azuma Keisuke, Togari Akihiro, Zhou Qilai, Zhao Mingzhong, Toyama Takeshi, Hatano Yuji, Yoshida Naoaki, Watanabe Hideo, Shimada Masashi, Buchenauer Dean, Oya Yasuhisa | 4. 巻 146 |
| 2. 論文標題 Dynamics evaluation of hydrogen isotope behavior in tungsten simulating damage distribution | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design | 6. 最初と最後の頁 2096 ~ 2099 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.03.114 | 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 Dong Yan, (16名), Toyama Takeshi, Wang Jing, Sefta Faiza, Chou Peter, Marquis Emmanuelle A. | 4. 巻 25 |
| 2. 論文標題 Atom Probe Tomography Interlaboratory Study on Clustering Analysis in Experimental Data Using the Maximum Separation Distance Approach | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis | 6. 最初と最後の頁 356 ~ 366 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927618015581 | 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 |

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Toyama, M. Shimodaira, K. Yoshida, K. Inoue, Y. Nagai, M. J. Konstantinovic, R. Gerard |
| 2. 発表標題 Ultra-fine defects in a neutron-irradiated Reactor Pressure Vessel steel studied by positron annihilation spectroscopy |
| 3. 学会等名 ICPA-18 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 外山 健、吉田 健太、下平 昌樹、井上 耕治、永井 康介、Milan Konstantinovic、Robert Gerard |
| 2. 発表標題 陽電子消滅法で調べた原子炉压力容器鋼監視試験片中で照射初期に形成する微小欠陥 |
| 3. 学会等名 日本金属学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 外山 健、吉田 健太、下平 昌樹、井上 耕治、永井 康介、Milan Konstantinovic、Robert Gerard |
| 2. 発表標題 陽電子消滅法で調べた照射初期に形成する微小欠陥 |
| 3. 学会等名 日本アイソトープ協会研究発表会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Toyama, K. Inoue, Y. Nagai, K. Ami, Y. Hatano |
| 2. 発表標題 Deuterium trapping at vacancy clusters in neutron-irradiated tungsten studied by positron annihilation spectroscopy |
| 3. 学会等名 Positron Study on Defects (国際学会) |
| 4. 発表年 2017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 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 大澤 一人 (OHSAWA KAZUHITO) (90253541) | 九州大学・応用力学研究所・助教 (17102) | |