

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02661

研究課題名(和文) 高温・水素雰囲気照射法の開発によるフェライト鋼の中性子照射劣化への水素効果の解明

研究課題名(英文) Investigation of the Effects of Hydrogen on Neutron Irradiation Degradation of Ferritic Steel through the Development of High-Temperature Hydrogen Atmosphere Irradiation

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) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：フェライト鋼における中性子照射効果に対する水素の効果を調べた。フェライト組織を含む鋼材であるA533B鋼(原子炉圧力容器鋼として代表的な鋼材)を真空中または水素環境下で中性子照射したのち、照射欠陥(原子空孔クラスター)の形成と成長、溶質原子の拡散挙動と固溶限濃度に対する水素の効果を調べた。溶質原子としては、原子炉圧力容器鋼で重要な銅とした。照射欠陥の形成と成長では、水素環境下で中性子照射された場合は照射欠陥の成長が抑制される可能性が示唆された。一方、溶質原子の拡散・固溶では、水素の効果はほとんど見られなかった。これは、空孔-水素の結合に因るものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フェライト鋼は最重要の原子力材料の一つであり、中性子照射による材料特性劣化や水素脆化が盛んに研究されているが、照射と水素との重畳効果を調べた研究例は多くない。本研究では、同一試料を真空中または水素環境下で中性子照射し、照射欠陥や溶質原子の挙動に対する水素効果を調べた。また、水素環境下での中性子照射を行うための照射装置を開発した。以上により、照射・水素の重畳効果研究の端緒となる結果を報告したとともに、今後さらなる照射・水素研究を進展させる素地を整えることができた。今後、金研大洗センターの共同利用照射を通して幅広い原子力材料研究に利用されることが見込まれる。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effect of hydrogen on neutron irradiation effects in ferritic steel. After neutron irradiation of A533B steel (a representative material for reactor pressure vessels) in vacuum or hydrogen environments, we examined the effects of hydrogen on the formation and growth of irradiation defects (atomic vacancy clusters), the diffusion behavior of solute atoms, and the solubility limit concentration. Copper was chosen as the solute atom, which is important in reactor pressure vessel steel. In the formation and growth of irradiation defects, it was suggested that the growth of irradiation defects might be suppressed when neutron irradiation occurred in a hydrogen environment. On the other hand, in solute atom diffusion and solid solution, the effect of hydrogen was hardly observed. This is thought to be due to the bonding between vacancies and hydrogen.

研究分野：原子力材料

キーワード：中性子照射 陽電子消滅 3次元アトムプローブ 原子炉圧力容器鋼

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄 - クロム系フェライト鋼は、放射化・高温強度・応力腐食割れ等での良好な特性から、次世代の原子力材料として期待されている。例えば軽水炉の事故耐性燃料被覆管(酸化物分散強化鋼(ODS 鋼))、次世代炉の構造材料(ODS 鋼、F82H 鋼)、核融合炉のプラズマ第一壁ブランケット材料(F82H 鋼)等の最有力候補材料であり、我が国で世界をリードする材料開発が進められている。

原子力環境では、材料は照射され空孔と格子間原子が導入される。これら照射欠陥は集合して空孔クラスターや転位ループを作り、また、溶質原子の拡散を促進する。フェライト鋼では、低温～中温(500 以下)では空孔クラスターやクロムリッチ相の形成による照射脆化が、高温(500 以上)では炭化物組織の回復による高温強度の低下がそれぞれ問題となる。また、結晶粒界でのクロム欠乏による耐腐食性の低下も生じる。さらに、照射欠陥に加えて水素も導入される。これは、一次冷却水との接触、(n, p)核反応、核融合プラズマへの曝露などに起因する。フェライト鋼中の水素固溶度は非常に低いが、空孔が存在するとそこが強力な水素捕獲サイトとなり多量の水素が蓄積する。供用末期での平均水素量は、現行軽水炉や次世代炉環境では数 - 数 10appm、国際熱核融合実験炉(ITER)環境では 100appm 以上、核融合炉原型炉(DEMO)環境では ITER 以上と試算されている。これらの蓄積量は、フェライト鋼の水素脆性が平均水素量わずか数 appm で生じうることを考えると、完全に無視できる量とは言えない可能性がある。

水素は空孔と強く相互作用するから、空孔の移動・拡散への水素効果、ひいては照射組織の形成・発達に対する水素効果が予想される。したがって、実使用環境でのフェライト鋼の照射劣化をさらに正確に評価し理解するためには、照射劣化に対する水素効果を検討する必要がある。このことは、原子力材料としての鉄 - クロム系フェライト鋼研究の初期(1980 年代)から提示され、次世代炉向けフェライト鋼開発(2000 年代 -)や核融合炉向けフェライト鋼開発(1990 年代 -)等でも指摘されているが、適切な照射実験が難しかったため、未だに重要課題の一つとして残されたままである。

この課題解決には、照射・水素の同時導入が必要である。従来から行われている水環境照射でも水素は導入されるが、水環境では放射線環境下の水化学および水 - 材料相互作用という複雑で学際的な効果も入るため、純粋な水素効果の理解は困難である。また、照射温度(100 以下)は実使用環境(400 以上)よりもはるかに低温である。理想的には、実使用環境に近い高温での水素ガス雰囲気での中性子照射が望ましいが、そのような照射実験は国内外であまり行われていない。以上が、研究開始当初の学術的背景であった。

2. 研究の目的

1. で述べた学術的背景に基づき、本研究では、次世代原子炉材料であるフェライト鋼に関して、照射欠陥と水素とが重畳するとき両者はどのような相互作用をするのかを調べ、材料の照射劣化に対する水素効果を評価することを当初の研究の目的とした。

3. 研究の方法

まず、水素環境下で中性子照射を行うための照射キャプセルを新たに開発する。それを用いて、プラント供用中に想定される材料中への水素蓄積量を確保しての中性子照射を行い、電子線照射および熱時効の結果とも比較しながら、照射劣化や照射組織の形成・発達に対する水素効果を明らかにする。

具体的な照射組織に関して、下記 5 項目を着目点とした。いずれも、フェライト鋼の材料特性に直結する重要因子と考えられる。

(1)空孔クラスター形成・成長の促進。空孔が水素と複合体を形成して安定化し、空孔濃度(より正確には空孔 - 水素複合体濃度)が上昇する。さらに、空孔クラスターの形成・成長が促進される。

(2)溶質原子拡散の促進または抑制。単空孔 - 水素複合体は易動度が高く溶質原子の拡散に寄与するから、高密度に空孔 - 水素複合体が存在すると拡散は促進される。一方、空孔同士のクラスター化が主反応ならば、拡散の担い手が減少して拡散は抑制される。溶質拡散の促進/抑制は、クロムリッチ相形成や粒界クロム欠乏に直接影響する特に重要な因子である。

(3)転位組織の形成・発達の促進。水素は転位の易動度を増加させるため、照射で生じる転位ループや転位ネットワークの形成・成長が促進される。

(4)金属水素化物の形成。クロムは水素との結びつきが強いため、クロム水素化物が形成される場合がある。フェライト鋼の照射脆化に寄与するクロムリッチ相の形成に影響する。

(5)炭化物組織の回復。フェライト鋼の高温強度を担う炭化物組織(マルテンサイト相)が、 $MC+2H_2 \rightarrow M+CH_4$ (M: 鉄やクロムなど金属、C: 炭素)等の反応により溶解する。

(なお、(4)、(5)は照射特有の組織変化ではないが、照射により促進される可能性が高い)

中性子照射を行うためには研究炉を利用する必要がある。国内研究炉の状況は現時点では不透明なため、ベルギー原子力研究所 SCK.CEN の研究炉 BR2 を利用して高温・水素雰囲気照射を行う。そのための照射キャプセルを BR2 と協力して開発する。

研究対象とする試料は、フェライト鋼、特に、最重要の原子力材料の一つである原子炉圧力容器鋼 (A533B 鋼) とする (A533B 鋼のベイナイト組織中には、フェライトが含まれる)。微小引張試験片 (4×0.25×16 mm) およびディスク試験片 (6×0.2 mm) などを作製する。これらの試料厚さは中性子照射中の水素拡散長よりも十分に小さい。

照射後試験として、硬さ試験を行い、照射劣化 (硬化) を定量し水素効果を明らかにする。ミクロ組織観察は、陽電子消滅 (観察対象: 空孔、空孔 - 水素複合体、空孔クラスター) および 3 次元アトムプローブ (観察対象: 溶質クラスター、粒界偏析 / 欠乏、炭化物界面など) を用いる。これらミクロ組織はフェライト組織の材料特性で重要な上、水素効果が顕著に発現すると考えられるから、特に重点的に観察・解析する。

4. 研究成果

まず、BR2 での水素環境下中性子照射について述べる。中性子照射に関する業務は、令和 2 - 3 年度および令和 3 - 4 年度の 2 回に渡り繰越 (翌債) を必要とした。いずれも BR-2 における事情によるものであり、前者は COVID-19 の影響、後者はウクライナ危機に端を発する原子炉燃料や電気部品の入手困難に因るものである。その後、令和 4 年度研究実績報告書で述べたように、中性子照射は BR2 で実施された。しかし、照射キャプセルからの試料取り出し時に予期せぬトラブルがあったため、照射済み試料は当初予定していた令和 5 年度中には東北大学金属材料研究所には搬入されなかった。そこで、過去に行われた水素環境下照射によって得られた試料を活用して本研究を遂行することとした。この照射は同じく BR-2 で行われたリーキータイプの照射キャプセルを利用したものであり、本研究で対象としたい試料 (原子炉圧力容器鋼 A533B) が装荷されていた。本研究の目的に十分合致しうる照射条件であったことから、その試料を利用することとした。水素効果を調べるため、同一の照射条件 (照射温度、照射速度、照射量) で真空雰囲気中で照射された同一試料も実験に供し、水素環境下照射と真空照射とを直接比較した。

図 1 に、真空中または水素環境中で中性子照射された A533B の平均陽電子寿命を示す。照射まま材 (As-irrad.) では、真空照射と比較して水素環境中照射ではわずかに短い平均陽電子寿命が得られた。このことは、水素環境中照射では空孔クラスターの形成がわずかに抑制された可能性を示唆している。照射後焼鈍を行った結果、100 から 400 までの温度領域では、水素環境中照射後の平均陽電子寿命は系統的に真空照射後のそれよりも短かった。フェライト鋼ではこの温度領域では空孔クラスターの形成と成長が生じることが知られているが、本実験で得られた結果から、水素環境中照射では空孔クラスターの形成・成長が抑制されていると考えられることが分かった。これは、空孔が強い水素捕獲サイトとなり空孔-水素が結合するため、空孔の易動度が低下することによって生じたものと考えられる [1]。

次に、溶質原子拡散に対する水素環境中照射の効果を調べるため、拡散実験を行った。真空中または水素環境中で中性子照射された A533B 鋼に高純度 Cu を真空蒸着して Cu-A533B 拡散対を作製した [2, 3]。その拡散対を 550

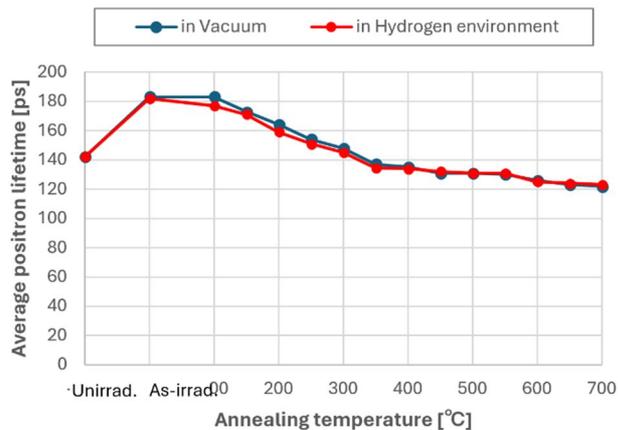


図1: 真空中または水素環境中で中性子照射されたA533B鋼中の平均陽電子寿命の照射後焼鈍挙動

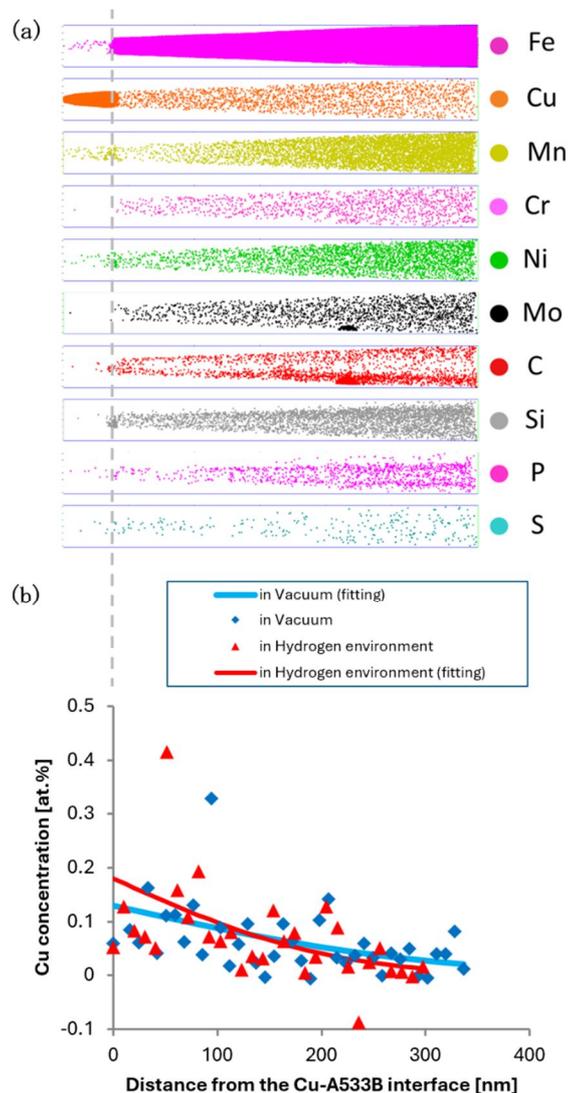


図2: (a) Cu-A533B拡散対のアトムマップの例、(b) Cu-A533B拡散対中のCu濃度プロファイル

で 3 時間保持して A533B 鋼母相中に Cu を拡散させた後、集束イオンビーム装置を用いて Cu-A533B 鋼界面近傍を含む 3D-AP 測定用試料を作製し、3D-AP 測定によって A533B 鋼中の Cu 濃度を測定した。

図 2(a)に、3D-AP 観察で得られた Cu-A533B 鋼界面近傍のアトムマップを Fe, Cu, Mn, Cr, Ni, Mo, C, Si, P, S の各元素について示す。Cu 薄膜および A533B 鋼母相が観察されており、界面を通じた Cu 拡散が観察された。得られたアトムマップから、界面近傍の Cu 濃度プロファイルを得た。プロファイルの断面は $2.0 \times 2.0 \text{ nm}^2$ とした。図 2(b)に、真空中または水素環境中で中性子照射された A533B 鋼について、Cu 濃度プロファイルを示す。なお、負の値は、バックグラウンド値を減じたことによる。それぞれの Cu 濃度プロファイルを、薄膜における希薄拡散で用いられるモデルである誤差関数型濃度プロファイルを用いて、拡散係数および固溶限濃度をフィッティングパラメータとしてフィッティングした。その結果を実線で示す。真空中照射および水素環境中照射の結果を比較したところ、両者における拡散係数および固溶限濃度の差異は小さいことが分かった。すなわち、溶質原子拡散に対する水素環境中照射の効果は顕著ではないことが明らかとなった。空孔クラスターに関しては水素効果が認められたことと対照的な結果となった。これは、拡散を調べた温度 (550) では水素は空孔から脱離したために空孔-水素結合が消失していたためと考えられる。

以上、フェライトにおける中性子照射効果の基礎過程である空孔クラスター形成・成長および溶質原子拡散に対する水素環境照射の効果調べ、前者では水素効果が見られる一方、後者では水素効果は顕著ではないことを明らかにし、その機構は空孔-水素結合の温度依存性で説明できることを示した。

参考文献

- [1] M. Nagumo, Hydrogen related failure of steels – a new aspect, *Materials Science and Technology* 20(8) (2004) 940-950.
- [2] T. Toyama, F. Takahama, A. Kuramoto, H. Takamizawa, Y. Nozawa, N. Ebisawa, M. Shimodaira, Y. Shimizu, K. Inoue, Y. Nagai, The diffusivity and solubility of copper in ferromagnetic iron at lower temperatures studied by atom probe tomography, *Scr. Mater.* 83 (2014) 5-8.
- [3] M. Shimodaira, T. Toyama, F. Takahama, N. Ebisawa, Y. Nozawa, Y. Shimizu, K. Inoue, Y. Nagai, Diffusivity and Solubility of Cu in a Reactor Pressure Vessel Steel Studied by Atom Probe Tomography, *Mater. Trans.* 56(9) (2015) 1513-1516.

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 9件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshida Kenta, Toyama Takeshi, Inoue Koji, Nagai Yasuyoshi, Shimodaira Masaki	4. 巻 62
2. 論文標題 Defect Analysis of Matrix Damage in Reactor Pressure Vessel Steel Using WB-STEM	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materia Japan	6. 最初と最後の頁 154 ~ 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.62.154	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 Hughes J., Toyama T., Gorley M., Jimenez-Melero E.	4. 巻 20
2. 論文標題 Full-stage precipitation during aging of Cu-0.55Cr-0.07Zr alloy for high heat flux fusion reactor technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research and Technology	6. 最初と最後の頁 801 ~ 810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmrt.2022.07.113	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 Nobuta Y., Toyama T., Matsumoto A., Shimada M., Oya Y., Inoue K., Nagai Y., Hatano Y.	4. 巻 566
2. 論文標題 Effect of rhenium addition on deuterium retention in neutron-irradiated tungsten	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 153774 ~ 153774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2022.153774	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 Rossaert B., Toyama T., Yamazaki M., Suzuki K., Narui M., Shikama T., Sikik E., Jacquet P., Van Dyck S.	4. 巻 565
2. 論文標題 Development of a multipurpose rig for material irradiation tests in BR2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 153742 ~ 153742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2022.153742	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 Cetiner Nesrin O., Hatano Yuji, McDuffee Joel L., Ilas Dan, Katoh Yutai, Geringer Josina W., Toyama Takeshi	4. 巻 178
2. 論文標題 Neutron irradiation of tungsten in hydrogen environment at HFIR	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 113089 ~ 113089
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2022.113089	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 Yi Xiao-Ou, Kuwabara Tatsuya, Alimov Vladimir Kh., Du Yu-Feng, Han Wen-Tuo, Liu Ping-Ping, Yan Bin-You, Song Jiu-Peng, Yoshida Kenta, Toyama Takeshi, Wan Fa-Rong, Ohnuki Somei, Hatano Yuji, Nagai Yasuyoshi	4. 巻 4
2. 論文標題 Microstructure, hardening and deuterium retention in CVD tungsten irradiated with neutrons at temperatures of defect recovery stages II and III	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tungsten	6. 最初と最後の頁 248 ~ 260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42864-022-00161-6	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 Alimov V.Kh., Hatano Y., Kuwabara T., Toyama T., Someya Y., Spitsyn A.V.	4. 巻 60
2. 論文標題 Deuterium release from deuterium plasma-exposed neutron-irradiated and non-neutron-irradiated tungsten samples during annealing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096025 ~ 096025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aba337	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 Du Yufeng, Yoshida Kenta, Shimada Yusuke, Toyama Takeshi, Inoue Koji, Arakawa Kazuto, Suzudo Tomoaki, Milan Konstantinovic J., Gerard Robert, Ohnuki Somei, Nagai Yasuyoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 In-situ WB-STEM observation of dislocation loop behavior in reactor pressure vessel steel during post-irradiation annealing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 100778 ~ 100778
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtla.2020.100778	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 Suzudo Tomoaki, Takamizawa Hisashi, Nishiyama Yutaka, Caro Alfredo, Toyama Takeshi, Nagai Yasuyoshi	4. 巻 540
2. 論文標題 Atomistic modeling of hardening in spinodally-decomposed Fe-Cr binary alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152306 ~ 152306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152306	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 Takeshi, YAJIMA Miyuki, OHNO Noriyasu, KUWABARA Tatsuya, ALIMOV Vladimir Kh., HATANO Yuji	4. 巻 15
2. 論文標題 Dynamics of Hydrogen Isotope Absorption and Emission of Neutron-Irradiated Tungsten	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1505081 ~ 1505081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.1505081	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 Tokunaga Kazutoshi, Matsuo Satoru, Kurishita Hiroaki, Toyama Takeshi, Hasegawa Makoto, Nakamura Kazuo	4. 巻 553
2. 論文標題 Close-up tracing of fatigue precrack evolution and reliable fracture toughness evaluation by the precracked specimens in an ITER specification W plate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 153054 ~ 153054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2021.153054	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11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 外山 健, J. Hughes, M. Gorley, 井上 耕治, 永井 康介, E. Jimenez-Melero
2. 発表標題 Cu-Cr-Zr合金の480 熱時効初期過程における硬度およびCr析出物の変化
3. 学会等名 日本金属学会第172回講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 外山 健,鈴木 克弥,山崎 正徳,永井 康介
2. 発表標題 BR2を利用した高温・高精度中性子照射計画
3. 学会等名 日本金属学会第172回講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 外山健
2. 発表標題 東北大金研大洗における全国大学共同利用中性子照射について
3. 学会等名 第2回A-FNS研究会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Toyama,K.Inoue,M. Shimodaira,K. Yoshida,Y. Nagai,M. J. Konstantinovic,R. Gerard,M. De Smet
2. 発表標題 Ultra-fine defects in RPV surveillance test specimens studied by temperature dependency of positron annihilation
3. 学会等名 IGRDM-21(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 外山健,柴原理恵,Du Yufen,井上耕治,永井康介,矢野康英,大塚智史,光原昌寿,中島英治,大沼正人
2. 発表標題 常陽で重照射されたODS鋼中の酸化物粒子の3D-AP観察
3. 学会等名 日本金属学会第171回講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 外山健
2. 発表標題 鉄中の溶質原子の拡散・析出に対する照射効果
3. 学会等名 日本放射化学会第66回討論会（招待講演）
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 外山健,鈴木克弥,山崎正徳,永井康介
2. 発表標題 BR2共同利用照射における高温 (>500) 照射
3. 学会等名 材料照射研究会
4. 発表年 2022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
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 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会
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 日本金属学会第168回講演大会
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
研究分担者	秋山 英二 (Akiyama Eiji) (70231834)	東北大学・金属材料研究所・教授 (11301)	
研究分担者	波多野 雄治 (Hatano Yuji) (80218487)	富山大学・学術研究部理学系・教授 (13201)	

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			
ベルギー	SCK CEN			
英国	University of Manchester			