

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15477

研究課題名（和文）Crystal orientation dependence of irradiation-induced hardening in structural materials for nuclear applications

研究課題名（英文）Crystal orientation dependence of irradiation-induced hardening in structural materials for nuclear applications

研究代表者

楊 会龍（YANG, Huilong）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任助教

研究者番号：10814254

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）：本研究では、超微小硬さ試験、電子線後方散乱回折法を駆使することで結晶方位と照射硬化を相関付けて理解し、燃料被覆管等の集合組織を有した原子炉構造材の照射誘致硬化現象の結晶方位依存性を明らかにした。ここで、結晶構造に由来した照射硬化の結晶方位依存性は、六方晶系のジルコニウム合金で顕著であったが、立方晶系材料の酸化物分散強化型フェライト鋼では、この依存性に乏しく、照射硬化に対しては結晶粒界分布が支配的因子であった。このような材料種毎の照射硬化の結晶方位異方性は、微細組織のみならず、照射欠陥形成や変形挙動との相互作用によって制御されることに由来するためである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

照射誘起硬化は炉内部材の経年劣化及び高性能材料開発において重要な指針であるが、これまでの先行研究では、照射硬化は材料がランダムな微細組織を持つという仮定の下で研究開発が進められてきた。しかし、実材料における微細組織は完全にランダムではなく、照射硬化が不均一に生じる。このため、本研究知見は、これらの原子炉構造材料の経年劣化をより正確に評価するために活用され、材料寿命管理の高度化に資する知見を提供する。さらに、これらを材料開発にフィードバックすることで高性能材料開発への応用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：Anisotropic effects of irradiation-induced hardening in nuclear engineering materials with texture in microstructure, such as fuel cladding in nuclear power reactors, were studied with the assistance of the combined utilization of ion-accelerator, nano-indentation testing and electron backscatter diffraction analysis. The effects of the microstructural features such as lattice structure, grain boundary, secondary phase particles on the anisotropy of hardening were investigated. Strong crystal orientation dependent irradiation hardening is confirmed in hcp-latticed Zr alloys, whereas in bcc-latticed ODS steel, the occurrence of anisotropic behaviors of irradiation hardening is more likely to be influenced by the lamella grain structure rather than the crystal orientation. The mechanism behind the anisotropic effects of irradiation-induced hardening is linked with the interaction among microstructure-irradiation defects-deformation in various nuclear engineering materials.

研究分野：原子力工学

キーワード：照射硬化 結晶方位 変形 ジルコニウム基合金 燃料被覆管材料

1. 研究開始当初の背景

材料の照射誘起脆化は、原子炉構造材における1つの劣化挙動である。これまでに本研究グループでは、軽水炉の燃料被覆管材料であるZr基、鉄基(酸化物分散強化型鋼: ODS 鋼)を対象とし、これら材料における照射誘起脆化や照射硬化、延性低下現象を確認した^[1-2]。ここで、照射誘起脆化や照射硬化の勘弁な評価手法に硬さ試験が挙げられる。当該手法は非破壊試験であり、尚且つ、評価体積を微小に抑えることができ、原子炉の炉内材料評価において、多くの研究報告で硬さ試験を用いた材料特性評価が実施されてきている。

軽水炉や高速炉の燃料被覆管は管状形状を有した薄板材である。また、これらの部材には溶接等による機械特性の不連続性が許容されないため、ピルガー圧延等によって作製され、それ故、材料には強い集合組織を呈している^[3-4]。しかし、これまでの照射誘起硬化に関する研究の多くは、「材料の微細組織はランダム(均質)である」という仮定に基づいており、集合組織由来の材料(強度)不均一性に関する先行研究例は過少である。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、原子炉材料における集合組織と照射誘起硬化現象との相関関係を調査する。研究方法としては、照射硬化の結晶方位依存性評価方法の確立を目的とし、結晶格子の対称性の低いhcp系材料を使用し、未照射/照射材における照射硬化の結晶方位依存性を明らかにする。その後、結晶粒径や形態を制御したbcc系材料の12Cr-ODSフェライト鋼において、照射硬化の結晶方位依存性を調査し、転位論に裏打ちされた照射硬化と結晶方位依存性の理論構築を進める。

3. 研究の方法

供試材としてZr-Nb合金と12Cr-ODSフェライト鋼を使用した。これらは典型的な原子力材料であり、それぞれ、六方最密充填(hcp)と体心立方(bcc)格子構造である。Zr-Nb合金では、Nb添加量を0.2、2.0 wt.%とし、アーク溶解法によってボタン状試料を作製した。その後、冷間加工と焼鈍処理を実施し、再結晶組織に調整した。一方で、12Cr-ODSフェライト鋼は、熱間押出、熱間鍛造、中間焼鈍、冷間圧延、最終焼鈍によって作製されており、所謂、粉末冶金法で作製された試料である。照射実験は東京大学の重照射施設で実施し、3.0 MeV-Zr²⁺、2.8 MeV-Fe²⁺イオンビームをそれぞれZr-Nb合金、12Cr-ODS鋼に照射した。照射量はZr-Nb合金で0.1及び0.2 dpa(displacement per atom)、12Cr-ODS鋼で0.5及び15 dpaとした。照射後、微小硬さ試験において硬度測定を実施し、この測定箇所を電子後方散乱回折(EBSD)分析することで、超微小硬さ試験における試験箇所の結晶方位を取得した。これらの結果を組み合わせ、各結晶方位での硬度結果としてデータを整理した。また、圧痕直下の透過型電子顕微鏡(TEM)観察を実施することで、超微小硬さ試験における変形組織の同定も試みた。

4. 研究成果

(1) Zr合金における照射硬化の異方性効果^[5-6]

図1に照射前後のZr0.2NbとZr2Nbの硬度分布の結果を示す。ここでは、逆極点マップ(IPF)上に各硬度結果をカラープロットで示した。これより、各結晶面で硬さの結晶方位依存が確認され、ここでは、照射量やNb濃度に依らず、(0001)軸付近で最も硬く、(0001)から(2-1-10)、(10-10)軸側に傾斜することで、硬度が徐々に低下することが分かった。

当該結果を下に、各結晶面での硬度を[0001]軸からの回転角の関数としてプロットした。この結果を図2(a, b)に示す。これより、硬度は照射量やNb濃度に依らず、逆S字カーブを示し、[0001]軸付近で最も硬度が高いことが分かった。

また、図2(c, d)は[0001]軸からの0-10、10-20、20-30、30-40、40-55、55-70、70-90°範囲でグループ化し、当該範囲における照射硬化量と硬化率を評価した。その結果、照射硬化の

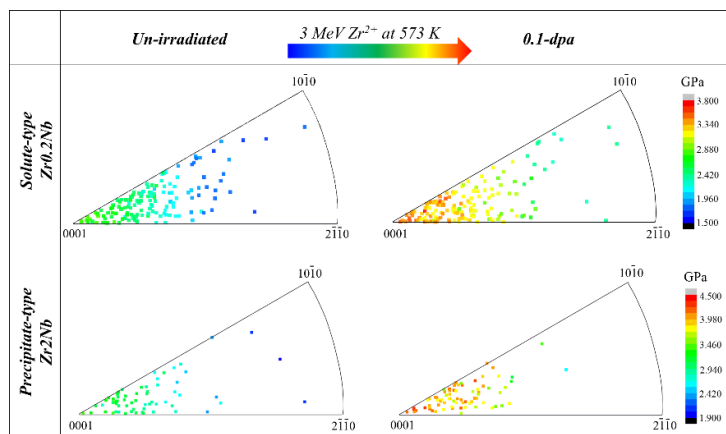


Fig.1 IPF based color-coded nano-hardness distribution in Zr0.2Nb and Zr2Nb specimens with and without irradiation. The IPF maps are in the form of stereographic projections.

度合いは均一ではなく、[0001]軸付近で照射硬化量、硬化率が共に極小値を示しており、回転角度が40-50°付近で極大値を有していた。なお、Zr0.2NbとZr2Nbの最大硬化率は、それぞれ、~43と37%であり、これは[0001]付近での硬化率の1.5-2.0倍であって、Zrの底面方位が耐照射性に優れていることを示唆している。

転位論に基づけば、照射前の結晶方位に対する硬さ依存性は、すべり系の違いとして考察される。hcp材料系において[10-10]および[11-20]方位は、柱面およびピラミッド面のシュミット因子が高いため、すべり運動が容易に生じ、その結果、硬度が低い。逆に、[0001]方向は、柱面およびピラミッド面の<a>型すべりのシュミット因子は低く、一次すべりが起こり難い。このことは、[0001]方位では、硬度が高くなる。これらより、hcp系材料における照射誘起硬化の結晶方位依存性は、すべり系やシュミット因子から定性的に説明できることを意味している。

なお、照射後のTEM観察により、両試料で平均サイズが約5 nmの<a>型の転位ループが確認された。数密度は、Zr0.2Nb、Zr2Nb試料でそれぞれ4.47、6.00 x 10²²/m³であった。今後は、結晶方位と、転位ループ、すべりの転位との相互作用を定量的に評価することによって、hcp系材料における照射硬化挙動の精緻な理解につなげる計画としている。

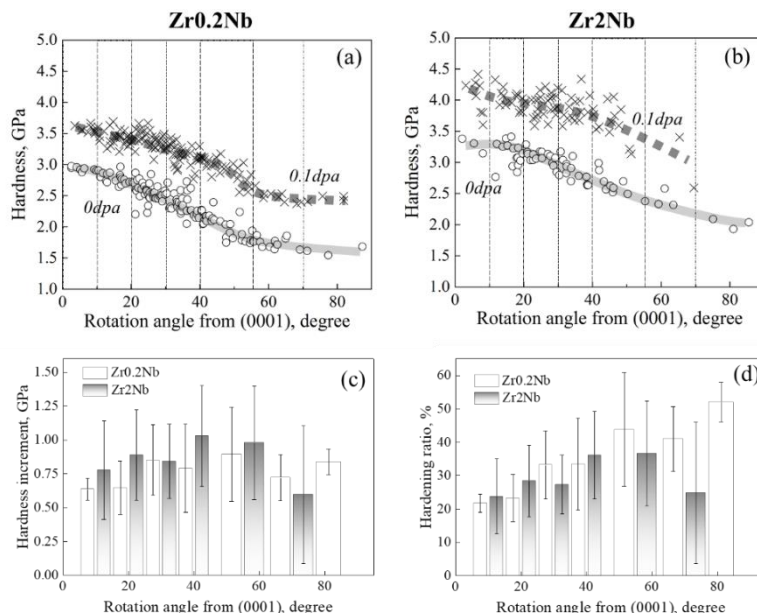


Fig.2 Variation of nano-hardness with the rotation angle from (0001) pole in Zr0.2Nb (a) and Zr2Nb (b) alloys. The bar charts indicating (c) the nano-hardness increment and (d) hardening ratio by irradiation with the variation of rotation angle from (0001) pole in Zr0.2Nb and Zr2Nb.

(2) 12Cr-ODS フェライト鋼における照射硬化の異方性効果^[7-8]

図3に573 Kで照射した12Cr-ODS鋼の超微小硬さ試験分布の結果を示す。ここでも、IPF上に各結晶面における硬度をカラープロットした。ここでは、(011)軸角付近のデータが欠落しているが、これは、当該材料では、圧延方向に<110>方位に高密度のラメラ構造(集合組織)を有しており、この平面、ならびに、垂直面からのみのデータを取得したため、(011)軸角付近でのデータが存在しない。図3に示すようにいずれの試料でも、照射量に依存せず、<011>軸方位から<111>軸方位に向かって徐々に硬度が上昇している傾向が確認された。

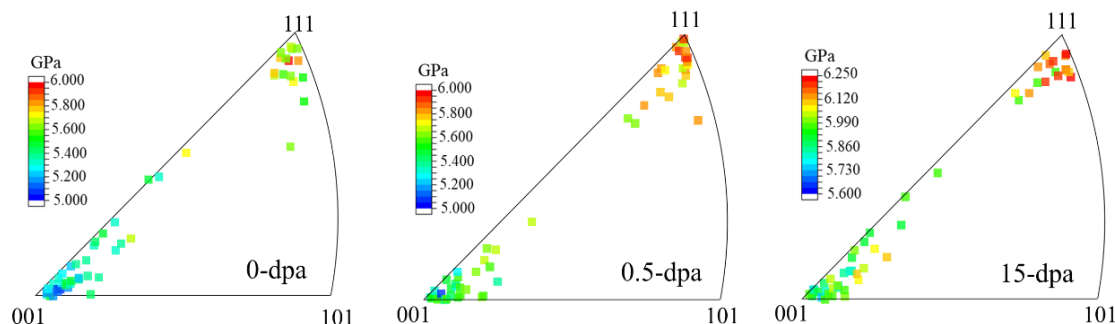


Fig.3 IPF based color-coded nano-hardness distribution in 0-dpa, 0.5-dpa, and 15-dpa 12Cr-ODS steel specimens irradiated at 573 K.

室温と573 Kで照射した試料の超微小硬さ、ならびに、照射硬化量の照射量依存性を図4(a, b)に示す。ここで、RD(圧延方向)とND(法線方向)は試料採取方向を示す。未照射時の硬度はND > RDであった、照射後では、ND試料に比べ、RD試料で起こった照射硬化は低いことが分かった。図4(c)は、(001)および(111)軸からそれぞれ回転角<10度のデータ点でグループ化し、これらの照射硬化量を評価した。その結果、いずれの照射温度においても、照射硬化量は(001) > (111)の関係を満たしていることが分かった。また、TEM観察により、圧痕下の転位組織発達

の差異を考察した。その結果、当該試料が粉末冶金法によって作製されたラメラ状の微細組織特徴を呈しているため、 $\langle 011 \rangle$ 方位の結晶粒は、柱状結晶粒構造であって、粒界面が荷重印加方向と平行な位置関係にあるのに対し、 $\langle 111 \rangle$ 方位の結晶粒では、荷重印加面に伸長した結晶粒として存在し、荷重印加方向に対し粒界が積み重なるよう形で存在する。粒界は転位運動を抑制するため、幾何学的転位理論に基づけば、より高強度の材料と認識されることが分かった。

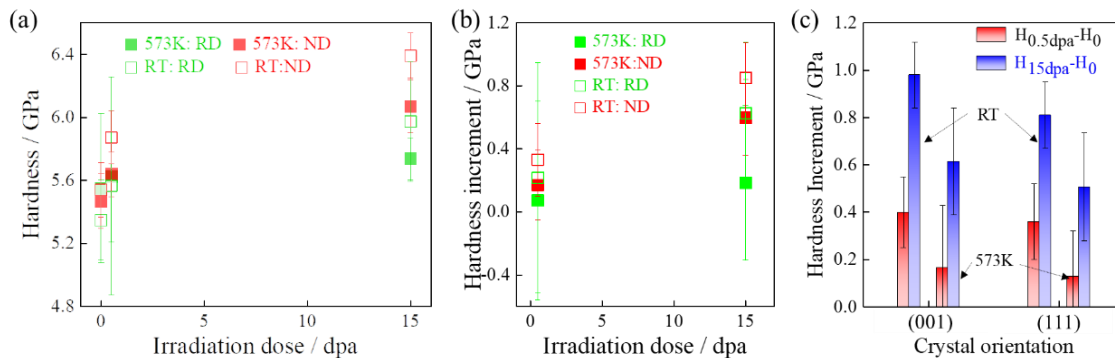


Fig.4 Summary of the nano-hardness in RD and TD specimens irradiated at RT and 573 K. (a) The average of nano-hardness, (b) hardness increment, and (c) hardness increment at (001) and (111) poles.

(3)まとめ

これまでに照射硬化は様々な原子力材料でよく知られているが、結晶方位や結晶粒形態等の影響については未だ十分な評価は実施されていない。本研究では、Zr-Nb合金とフェライト系 ODS 鋼の照射硬化における異方性を系統的に検討した結果、hcp 系材料では、結晶構造の対称性が bcc 系材料よりも低く、照射硬化は結晶方位に強く依存することが分かった。特に、hcp 系材料の [0001] 軸は耐照射性に優れている結晶方位であり、また、bcc 系材料の (001) 軸での照射硬化は (111) 軸よりも相対的に大きいことを明らかにした。なお、bcc 系材料である 12Cr-ODS 鋼では、照射硬化に及ぼす結晶方位よりもラメラ状の結晶粒形態に強く依存することが分かった。

照射硬化の異方性効果を理解することは、原子炉の現行構造材だけでなく、将来の原子力システムに適用可能な新しい材料に対しても必要である。特に、燃料被覆管材料では、管状形状であり、薄板の部材によって構成されるため、必然的に、材料には集合組織や細長い結晶粒など不均一性を有することが想定される。このような材料の劣化挙動を正確に評価することは、原子炉内の機器の劣化挙動をより適切に予測し、原子炉の安全裕度を向上させるために重要である。今後も引き続き、不均一組織における微細組織、照射欠陥、変形挙動の相関関係を調査することによって、照射硬化の異方性メカニズムの解明を目指す。

<引用文献>

- [1] H.L. Yang, S. Kano, Y. Matsukawa, J.J. Shen, Z.S. Zhao, Z.G. Duan, D.Y. Chen, K. Murakami, Y.F. Li, Y. Satoh, H. Abe, Tensile properties and microstructure of Zr-1.8Nb alloy subjected to 140-MeV C⁴⁺ ion irradiation, *J. Nucl. Mater.* 495 (2017) 138-145.
- [2] Y. Matsukawa, H.L. Yang, K. Saito, Y. Murakami, T. Maruyama, T. Iwai, K. Murakami, Y. Shinohara, T. Kido, T. Toyama, Z. Zhao, Y.F. Li, S. Kano, Y. Satoh, Y. Nagai, H. Abe, The effect of crystallographic mismatch on the obstacle strength of second phase precipitate particles in dispersion strengthening: bcc Nb particles and nanometric Nb clusters embedded in hcp Zr, *Acta Mater.* 102 (2016) 323-33.
- [3] J.J. Shen, H.L. Yang, Z. Zhao, H. McGrady, S. Kano, H. Abe, Effects of pre-deformation on microstructural evolution of 12Cr ODS steel under 1473–1673 K annealing, *Nucl. Mater. Energy* 16 (2018) 137-144.
- [4] H.L. Yang, S. Kano, J.J. Shen, J. McGrady, Z. Zhao, Z. Duan, H. Abe, On the strength-hardness relationships in a Zr-Nb alloy plate with bimodal basal texture microstructure, *Mater. Sci. Eng.: A* 732 (2018) 333-340.
- [5] H.L. Yang, S. Kano, J. McGrady, J.J. Shen, Y. Matsukawa, D.Y. Chen, K. Murakami, H. Abe, Surface orientation dependence of irradiation-induced hardening in a polycrystalline zirconium alloy, *Scripta Mater.* 162 (2019) 209-213.
- [6] H.L. Yang, S. Kano, J. McGrady, D.Y. Chen, K. Murakami, H. Abe, Microstructural evolution and hardening effect in low-dose self-ion irradiated Zr-Nb alloys, *J. Nucl. Mater.* 542 (2020) 152523.
- [7] Investigation of anisotropic hardening response in a 12Cr-ODS ferritic steel subjected to 2.8 MeV Fe²⁺ irradiation, *J. Nucl. Mater.* 531 (2020) 152016.
- [8] H.L. Yang, S. Kano, J. McGrady, J.J. Shen, Y.F. Li, D.Y. Chen, K. Murakami, H. Abe, Hardening behavior and deformation microstructure beneath indentation in heavy ion irradiated 12Cr-ODS steel at elevated temperature, *J. Nucl. Mater.* 534 (2021) 152606.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yang Huilong	4. 巻 561
2. 論文標題 Anisotropic effects of radiation-induced hardening in nuclear structural materials: A review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 153571 ~ 153571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2022.153571	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 Yang H.L., Kano S., McGrady J., Shen J.J., Li Y.F., Chen D.Y., Murakami K., Abe H.	4. 巻 543
2. 論文標題 Hardening behavior and deformation microstructure beneath indentation in heavy ion irradiated 12Cr-ODS steel at elevated temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152606 ~ 152606
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152606	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 Yang H.L., Kano S., McGrady J., Chen D.Y., Murakami K., Abe H.	4. 巻 542
2. 論文標題 Microstructural evolution and hardening effect in low-dose self-ion irradiated Zr?Nb alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152523 ~ 152523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152523	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 Luu Vu Nhut, Murakami Kenta, Samouh Hamza, Maruyama Ippei, Ohkubo Takahiro, Tom Phongsakorn Prak, Chen Liang, Kano Sho, Yang Huilong, Abe Hiroaki, Suzuki Kiyoteru, Suzuki Masahide	4. 巻 545
2. 論文標題 Changes in properties of alpha-quartz and feldspars under 3 MeV Si-ion irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152734 ~ 152734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152734	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 Kano Sho, Yang Hui long, McGrady John, Hamaguchi Dai, Ando Masami, Tanigawa Hiroyasu, Abe Hiroaki	4. 巻 533
2. 論文標題 Study of radiation-induced amorphization of M23C6 in RAFM steels under iron irradiations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152088 ~ 152088
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152088	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 Oh Sun-Ryung, Kano Sho, Yang Hui long, McGrady John, Abe Hiroaki	4. 巻 538
2. 論文標題 Radiation-induced nanoparticle growth in 12Cr-ODS steel at elevated temperature	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152192 ~ 152192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152192	査読の有無 無
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 Yang H.L., Kano S., McGrady J., Shen J.J., Matsukawa Y., Chen D.Y., Murakami K., Abe H.	4. 巻 162
2. 論文標題 Surface orientation dependence of irradiation-induced hardening in a polycrystalline zirconium alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 209 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2018.11.029	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 Yang H.L., Kano S., Shen J.J., McGrady J., Li Y.F., Chen D.Y., Murakami K., Abe H.	4. 巻 531
2. 論文標題 Investigation of anisotropic hardening response in a 12Cr-ODS ferritic steel subjected to 2.8MeV Fe ²⁺ irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 152016 ~ 152016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2020.152016	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 Oh Sun-Ryung, Kano Sho, Yang Huilong, McGrady John, Yasuda Hidehiro, Abe Hiroaki	4. 巻 524
2. 論文標題 In-situ HVEM observation under 2?MeV electron irradiations on Y?Ti?O nanoparticles in 12Cr-ODS steel at 723K	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 278 ~ 285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2019.07.009	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 Shen Jingjie, Yang Huilong, Li Yanfen, Kano Sho, Matsukawa Yoshitaka, Satoh Yuhki, Abe Hiroaki	4. 巻 143
2. 論文標題 Recrystallization behavior of a two-way cold rolled 12Cr ODS steel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 99 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2019.03.113	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 -

1. 著者名 Li Yanfen, Zhang Jiarong, Shan Yiyin, Yan Wei, Shi Quanqiang, Yang Ke, Shen Jingjie, Nagasasa Takuya, Muroga Takeo, Yang Huilong, Kano Sho, Abe Hiroaki	4. 巻 517
2. 論文標題 Anisotropy in creep properties and its microstructural origins of 12Cr oxide dispersion strengthened ferrite steels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 307 ~ 314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnucmat.2019.01.049	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7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 H.L. Yang, S. Kano, J. McGrady, Y. Matsukawa, D.Y. Chen, K. Murakami, H. Abe
2. 発表標題 イオン照射したZr - Nb合金における照射硬化の結晶方位依存性
3. 学会等名 日本原子力学会 2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 H.L. Yang, S. Kano, J. McGrady, Y. Matsukawa, D.Y. Chen, K. Murakami, H. Abe
2 . 発表標題 Probing the orientation dependence of irradiation-induced hardening in Zr alloys
3 . 学会等名 Asian Zirconium Workshop 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Huilong Yang, Sho Kano, John McGrady, Jingjie Shen, Dongyue Chen, Kenta Murakami, Hiroaki Abe
2 . 発表標題 Effect of Crystal Orientation on Hardness of Fe ²⁺ Irradiated 12Cr-ODS steel
3 . 学会等名 The Nineteenth International Conference on Fusion Reactor Materials (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Huilong Yang, Sho Kano, John McGrady, Dongyue Chen, Jingjie Shen, Kenta Murakami, Hiroaki Abe
2 . 発表標題 Anisotropic hardening response by ion irradiation in a 12Cr-ODS ferritic steel
3 . 学会等名 日本金属学会 2020年春期講演大会
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Huilong Yang, Sho Kano, John McGrady, Jingjie Shen, Dongyue Chen, Kenta Murakami, Hiroaki Abe
2 . 発表標題 Crystal orientation dependence of irradiation-induced hardening in Zr-based nuclear fuel cladding alloys
3 . 学会等名 2019年やよい研究会
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Jingjie Shen, Takuya Nagasaka, Takeo Muroga, Hui long Yang, Sho Kano, Hiroaki Abe
2. 発表標題 Microstructure and mechanical properties of 12Cr ODS steel after a novel recrystallization process
3. 学会等名 日本金属学会 2019年秋期講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jingjie Shen, Takuya Nagasaki, Takeo Muroga, Hui long Yang, Sho Kano, Hiroaki Abe
2. 発表標題 Comparisons of microstructure and mechanical properties between as-fabricated and recrystallized 12Cr ODS steel
3. 学会等名 The Nineteenth International Conference on Fusion Reactor Materials (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------