

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01372

研究課題名(和文) 格子欠陥をプローブとしたその場観察と組合せ照射による照射欠陥の顕在化技術

研究課題名(英文) Combination irradiation technique for identification of radiation damage

研究代表者

関村 直人 (Sekimura, Naoto)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：10183055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 24,100,000円

研究成果の概要(和文)：中性子照射を受ける原子力材料の劣化挙動をモデル化するための新しい実験技術を開発した。

「中性子-イオン組合せ照射」は、数十年にわたって徐々に進行する劣化を加速的に再現する手法である。この手法で劣化させた原子炉圧力容器模擬材中では、中性子照射だけを長期間実施した試料と同様に、マンガン・ニッケル・ケイ素などのクラスタが観察された。「その場観察法」は、電子顕微鏡の中にイオンビームを入射して、リアルタイムで照射劣化挙動を観察する。異なる条件の照射実験を段階的に行って、照射後の観察では見つけられない短寿命又は不連続な現象を複数同定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、さまざまな理工学に使われている「照射損傷」と「固体内拡散」の理論を補完する。言い換えると、結晶性材料の挙動に関する新しい教科書に利用できるデータを収集することができた。また、本研究で開発した手法を廃止措置に移行した原子力発電所に応用すれば、そのプラントがより長い期間使われたらどうなっていたか、という情報を明らかにすることができる。つまり、海外の研究用原子炉に過度に依存せず、長期間の原子炉利用による劣化挙動の研究が可能になる。

研究成果の概要(英文)：We have developed new experimental techniques to model the degradation behavior of nuclear materials irradiated with fast neutrons.

The "neutron-ion combination irradiation" accelerates the evolution of irradiation-induced microstructures, which usually takes decades. Similar to the neutron-irradiated reactor pressure vessel materials, the enrichment of manganese, nickel, and silicon in a range of few nanometers was confirmed in the combination-irradiated specimens.

"In-situ observation" is a method to observe irradiation degradation behavior in real-time by injecting an ion beam into the transmission electron microscope. By sequentially irradiating one specimen with several conditions, both the discontinuous development and disappearance behaviors of radiation defects were confirmed.

研究分野：原子力学

キーワード：原子力材料・核燃料 イオンビーム 電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所の原子炉圧力容器や炉内構造物は単体で複数の安全機能を有する重要な機器である。これらの材料特性は供用期間中に高速中性子照射を受けて変化するので、原子炉材料の照射劣化は原子力工学における安全上重要な研究課題となっている。研究代表者は、軽水炉の長期運転に関連する領域を中心に、照射によって誘起される潜在的な材料問題を特定したり、照射実験と先端的な分析技術に基づいたモデリングを行ったりして、原子力安全に資する知識基盤を構築してきた。

この研究を開始した時点で東日本大震災から6年が経過していた。当時は規制基準に合格した発電所の再稼働がはじまり、長期運転に係った研究課題がより現実味を帯びた時期だった。一方、国内では地震による被害を受けた研究設備も多く、材料試験炉の利用は完全に停止し、材料照射に関連した研究基盤の脆弱化が顕著であった。

研究代表者らは本研究に先立ち、茨城県東海村にある東京大学大学院工学系研究科原子力専攻の重照射損傷研究設備(通称 HIT)の加速器を交換し、透過電子顕微鏡とビームラインを接続させた「イオン加速器結合顕微鏡法(*in-situ* TEM)」を開発して材料照射研究を再開した。また「組合せ照射」というコンセプトを提案し、制御された欠陥構造を導入したり、通常の照射試験では可視化できない潜在的な欠陥を観察したり、照射欠陥の発達挙動を微分的に測定したりするための実験技術の開発に成功した。

どのような照射場を選択するとしても、原子炉材料の研究においては「実際の原子炉と加速試験にはどの程度の違いがあるのか」という問いに答えることが必要である。低線量率の中性子照射を受ける原子力材料の中には、数十年かけてようやく変化が発現するものがあるからである。こうした現象への対策において、線量率等を実際のプラントと同じ条件に合わせた照射試験を行うことは不可能である。機構論に基づいて加速照射試験を設計する手法を確立することは、既設炉の長期運転に関連した実務的課題と、日本はこれからどのような材料試験炉を持つべきかという基礎基盤的課題の双方において重要である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、原子炉圧力容器の照射脆化という劣化事象を例にとり、機構論に基づいた材料照射試験を行って劣化の特徴を抽出することで、望ましい経年劣化管理の在り方を示すことを目指した。

低合金鋼製の原子炉圧力容器は、供用期間中の高速中性子の照射によって破壊靱性が低下することが知られている。その原因は、不純物元素(主に銅)や添加元素(主にマンガン・ニッケル・ケイ素)が集合して、結晶粒内に直径数ナノメートルのナノクラスターを形成することだとされている。ナノクラスターは転位の運動を阻害するので、材料が硬化して破壊靱性低下に至る。ここで、鉄中における銅の析出は良く知られた現象である。

一方、マンガン・ニッケル・ケイ素のナノクラスター(MNS クラスター)については、不明な点が多い。そもそも MNS クラスターは供用開始後数十年を経て、高速中性子照射量が 10^{19} cm^{-2} を大きく超えたあたりから三次元アトムプローブで検出されるようになる。サイズが小さすぎて構造を特定できないので、おおよその組成は分かるが金属間化合物の種類は明らかでない。クラスタリングには熱力学的な析出現象と微細な照射欠陥集合体への偏析現象が関係していると考えられるが、これらの現象が十分に整理できていないので経時変化を予測することが難しい。加えて、中性子照射下での欠陥挙動は、変位カスケードと呼ばれるはじき出し連鎖過程の影響で常に大きく揺らいでおり、教科書的な固体内拡散だけでは記述できない。

複雑な MNS クラスターの発達挙動をモデル化するためには、機構論に基づく基礎的な実験技術の開発が必要であると考え、本研究は二つの大きなタスクで構成することにした。

一つ目は、加速的に MNS クラスターを成長させて顕在化する技術の開発である。イオン加速器など損傷速度の高い照射場を用いて原子炉圧力容器材を加速劣化させると、マンガン・ニッケル・ケイ素は疎にクラスタリングしたり、異方性を有する組織を作るので、材料の硬化は観察される。しかし実機で観察されている鉄含有量の低い緻密な MNS クラスターは見られておらず、軽水炉環境の再現として十分とは言い難い。そこで、実機に近い低損傷速度の照射試験と、安価で加速的な高損傷速度の照射試験を組み合わせることにより、低コストかつ短期間で MNS クラスターを成長させることを目的とした。このコンセプトが成功すれば、比較的短い運転年数で廃止措置を迎えたプラントから試料を採取して追照射し、運転年数が延びていたなら劣化はどの程度であったかを検証するような研究も可能になる。

二つ目は、変位カスケードによって形成される高密度の欠陥の挙動を把握したり、照射欠陥の不連続な発達挙動をモデル化するための実験技術の開発である。変位カスケードは、中性子と最初に衝突した原子を起点として はじき出しの連鎖過程が生じ、数ナノメートル程度の範囲に大量の照射欠陥が導入される現象である。変位カスケードの中心付近には高濃度な空孔が残り、外縁には格子間原子やその集合体が形成される。これらの欠陥はランダムな熱拡散だけでなく、結晶方位に依存した一次元運動や、ナノクラスターを始めとする微細組織との相互作用によって移動し、その大半はすぐに消失する。変位カスケードによる複雑な欠陥挙動は、中性子照射劣化の定式化を妨げる大きな要因であるので、本研究は *in-situ* TEM 法を駆使して、短寿命で不連続な照射欠陥発達挙動の顕在化手法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

1) 加速照射試験による溶質原子ナノクラスターの顕在化

一般に金属中における第二相の形成は、核形成・成長理論に従う。核形成過程では多様な照射欠陥の複雑な相互作用が反応を律速するが、ひとたび第二相が成長過程に移行すると時間当たりの空孔形成数が支配的な律速因子となる。言い換えると、材料を二つの条件で照射した場合、第一段階の照射条件の影響が、第二段階の照射で顕在化することがある。

この特徴を利用して、長期運転時の原子炉压力容器照射脆化の主因であるマンガン・ニッケル・ケイ素のナノクラスターを加速的に発達させるため「中性子 - イオン」組合せ照射法を設計した。第一段階では高速中性子束が $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下の研究炉を使って高速中性子を 10^{19} cm^{-2} 程度することで、ナノクラスターの核形成を誘起する。第二段階では、自己イオンを第一段階と同じ温度で $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ dpa}$ 追加照射してナノクラスターを成長させる。「中性子 - イオン」組み合わせ照射材を中性子だけで同レベルのはじき出し損傷を受けた試料と比較することで、この手法がどの程度ナノクラスターの再現性を持つのかを明らかにする。

本研究で中性子照射を実施することは予算的にも時間的にも不可能であるので、過去に実施された材料照射研究から適切なものを選定し、その残材をマイクロサンプリングして第二段階の照射試験を行うことにした。

一連の実験に必要とされる試料のマイクロサンプリング、イオン照射、第二段階照射済み試料の加工、三次元アトムプローブ観察などの技術を実証するために、第一段階をイオン照射材とした実験を予め実施し、ハンドリング等における問題点を抽出し、手技を確立させた。

2) 短寿命で不連続な照射欠陥発達挙動の顕在化

図1に、本研究で使用した in-situ TEM の外観を示す。この装置は 200kV の透過電子顕微鏡 JEM 2000-FX (日本電子) を 32 MeV amu の輸送能力をもったビームラインで 1.7MV タンデム加速器 (High Voltage Engineering Europe) と結合したものである。本研究では、装置のインターロックの設置、イオンビーム照射システムの改良などを行い、操作性を向上させた。また画像記録システムを大きく改良した。短寿命又は不連続な現象を定量的に評価するには、照射欠陥の挙動を動画で記録することが必要である。そこで、この装置のボトム位置にカメラレートの新しい CCD カメラを設置して、幅広い倍率で動画撮影を可能にした。

そのうえで、変位カスケードの影響を可視化するために、照射欠陥の特徴的な挙動を利用し、次の二つの方法を試行することにした。

一つ目は、Cascade collapse の観察である。変位カスケードによって導入された高濃度な空孔は、短距離拡散を経て集合し、TEM-visible な空孔集合体を形成することがある。これが Cascade collapse である。

Cascade collapse の形成は、導入された空孔の密度、空孔の可動性（つまり温度）、再結合相手となる周辺の格子間原子型欠陥の状態などに依存し、鉄などの面心立方金属では形成しにくいことが知られている。また鉄の場合、試料表面の方位によって、次元運動による転位ループの吸収消滅頻度が変わるので、空孔型欠陥の再結合頻度も試料形状に依存してしまう。これらの問題を解決すれば、入射エネルギーや溶質原子濃度の関数として cascade collapse の発生頻度を系統的に測定し、原子シミュレーションなどと比較することができると期待される。

そこで、質量数の大きなタングステンイオンを一次はじき出し原子の模擬として in-situ TEM 内へ入射し、入射エネルギーに対する cascade collapse の発生頻度を求めることにした。この実験は、多段階のイオン組合せ照射として実施した。つまり、同一の試料に対して順次異なるエネルギーでイオン照射を行って、同一視野で cascade collapse を定量化することにより、試料形状や局所的な材料特性の違いに影響されない実験を可能にした。

二つ目は、イオン照射されたバルク状試料を薄膜化して in-situ TEM 観察に供するという二段階の組合せイオン照射である。第一段階で微小な（したがって性質が十分には分らない）照射欠陥を導入し、それを薄膜化した後に成長させながら観察する。同視野での観察であるので、変位カスケードによる欠陥濃度の揺らぎを受けて照射欠陥が急峻に変化したとしても、その現象を敏感に捉えることが可能になる。

また、薄膜の厚みと温度によって、試料内部を「空孔濃度の高い状態」「空孔と格子間原子がどちらも可動な状態」「空孔と比べて格子間原子の移動が活発な状態」などを作り出し、欠陥の性質に応じて集合体の成長または収縮を制御できる。この手法は、微小な照射欠陥の性情を明らかにするのに有効である。



図1 使用した in-situ TEM の外観

4. 研究成果

1) 「中性子 - イオン」 組合せ照射法の開発

組合せ照射の第一段階として、カリフォルニア大学サンタバーバラ校が作成した原子炉圧力容器モデル合金の照射材ライブラリを使用した。これは、銅とニッケルの含有量を系統的に変化させた6種類の原子炉圧力容器模擬材をミシガン大学の Ford Nuclear Reactor で照射したものであり、照射条件に対する微小硬さのデータベースが構築されている。この実験における中性子束は加圧水型軽水炉の監視試験材がつける中性子束と同程度であり、第一段階の照射条件として最適であった。

今回は照射温度 290 K で照射された実験シリーズから、T5 材及び T6 材の一部を使用した。それぞれ 1.36×10^{19} 及び $3.32 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ の高速中性子照射を受けており、はじき出し損傷量は 0.02 及び 0.05 dpa に相当する。この試料には MNSP または CRP が既にある程度形成されている。組合せ照射の第二段階として、0.03 dpa 相当のイオン照射を 290 K で行って、「T5+イオン照射」材と T6 照射材を比較することで、組合せ照射の効果を確認できる。

本研究に関係するすべての実験が試料の放射化による制限を受けないようにするため、T5 材及び T6 材は図 2 に示す要領でマイクロサンプリングされ、基板に接着された状態で使用した。はじめに、各試料は集束イオンビーム加工装置 (FIB) を用いて $30 \times 20 \times 3 \mu\text{m}$ の板状に切り出され、タングステンプローブへ溶着されてリフトアウトされる。試料の両面は中空にて低速ビームでスパッタリングされ、リデポやダメージ層が除去される。試料は基板上に立てられた状態でプローブと切り離される。その後、ゆっくりとプローブに押されることで基板上に倒れ、両端をタングステンデポで溶着される。微小試料を装荷した部分の基板表面は電解研磨によって平坦に仕上げると共に、他の部分より僅かに低くなっている (一般的なイオン照射のハンドリングによって微小試料が破損しないよう、機械的接触を避けている)。一つの微小試料で最大 20 回以上の三次元アトムプローブ測定を行うことができる。

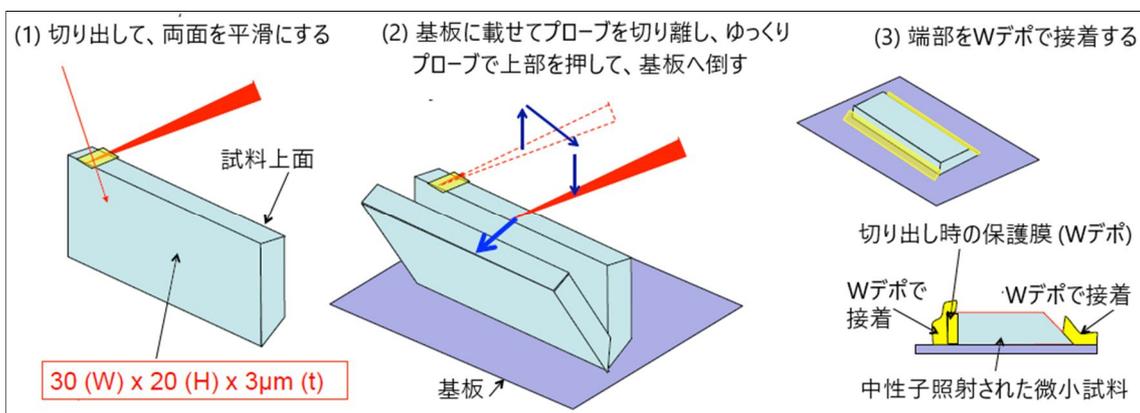


図 2 中性子照射材のマイクロサンプリングの手順

組合せ照射の第二段階として、2.8 MeV の Fe イオンを用いたイオン照射を利用した。中性子照射と同じ 290 K にて、試料位置で約 0.035 dpa に相当するイオン照射を行った。はじき出し損傷速度は、おおよそ $1 \times 10^{-5} \text{ dpa/s}$ である。イオン照射におけるはじき出し損傷は深さ方向へ分布を持つので、本研究におけるはじき出し損傷量は SRIM コードの計算結果に基づき、表面から 800 nm までのはじき出し損傷の平均値で定義している。一般的なイオン照射実験は、ビームを 1~2 mm 程度まで電磁レンズで集束してから走査することによって均一なビームプロファイルを得ている。つまり試料が受けるはじき出し損傷速度は、走査によって周期的に変動している。事前の検討の結果、 10^{-7} dpa/s 以上の領域では損傷速度が溶質原子クラスターの成長挙動に強い影響を与える可能性を否定できなかったため、本研究ではレンズ系によって敢えて広がったビームを作り、ビームプロファイルを内挿することで試料位置におけるビーム量を定義した。

照射された微小試料から断面が一片 $2 \mu\text{m}$ 弱の正三角形になるよう楔形に細片をリフトアウトし、タングステン製の針の先端に接着して、三次元アトムプローブ用の試料に加工することができた。この方法で作成された試料に対し、通常の照射材とおおよそ同じ程度の成功率 (観察開始直後に試料が破損しない確率) で原子マップを取得できることを確認した。「中性子 (0.02 dpa) - イオン (0.035 dpa)」組合せ照射材中には、「中性子 (0.05 dpa)」照射材に似た銅・マンガン・ニッケル・ケイ素のナノクラスターが確認された。これらの原子は密に集合しており、イオン照射材に見られる溶質原子のナノクラスターとは凝集度を異にしていた。現在、クラスターの特徴を様々なパラメータで指標して定量的な比較を行っており、その成果は近く論文公開される予定である。

2) 照射欠陥をプローブとしたその場観察法の開発

同一試料に対してエネルギーの異なる重イオンを照射することによって Cascade collapse の発生頻度を変化させ、変位カスケードの影響を観察することに成功した。図3は、鉄薄膜に対して室温で0.6~1.5 MeV のタングステンイオンを順次照射したときの明視野像である。コントラストの低いドット状の物体 (black dot) は格子欠陥であり、照射中に急峻に (<0.04 s の時間で) 形成されることから変位カスケードによって形成された空孔型欠陥だと判断できる。Black dots の多くは形成後数秒でおおよそ $\langle 111 \rangle$ の投影方向へ次元運動をはじめ、やがて急峻に消滅する。これらの特徴から *ex-situ* 実験では cascade collapse の定量化が困難であることは明らかであり、*in-situ* TEM の利点を確認できた。

入射イオンあたりの black dot 形成数は照射量には (したがって試料に残っている black dots の数密度にも) ほとんど依存しなかったが、イオンの入射エネルギーには依存した。例えば、0.6MeV のタングステン照射下ではイオン当たり 4×10^{-3} の頻度であるが、入射エネルギーを1.1MeV とすると 7×10^{-3} 程度まで増加する。また同程度の厚さ及び表面方位であっても、1%程度のニッケル・マンガン・ケイ素を添加した試料では変位カスケードによる欠陥損傷効率が有意に異なることが示された。

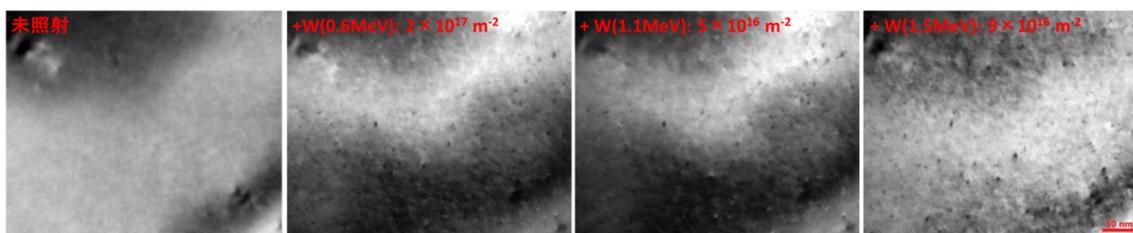


図3 室温の鉄薄膜に W イオンを照射した際の明視野像。

図4は、バルクでのイオン照射によって形成された照射欠陥を *in-situ* TEM における追照射によって成長させる実験の結果の一例である。第二段階の照射では、格子間原子と空孔がともに活発に熱拡散して、すぐに表面へ吸収される条件となっている。第一段階の照射によって形成された転位ループはすべて格子間原子型であるが、Burgers vector が $1/2\langle 111 \rangle$ のものと $\langle 100 \rangle$ のものが混在している。これらは、第二段階の照射において、ほぼ同じ速度で成長していく。しかし、時折小さな転位ループが次元運動によって大きな転位ループに吸収される現象が起こり、やがてサイズの大きな転位ループが低数密度に存在するようになる。同視野での連続的な観察によって、照射欠陥同士の相互作用に起因する不連続な変化を定量化できた。

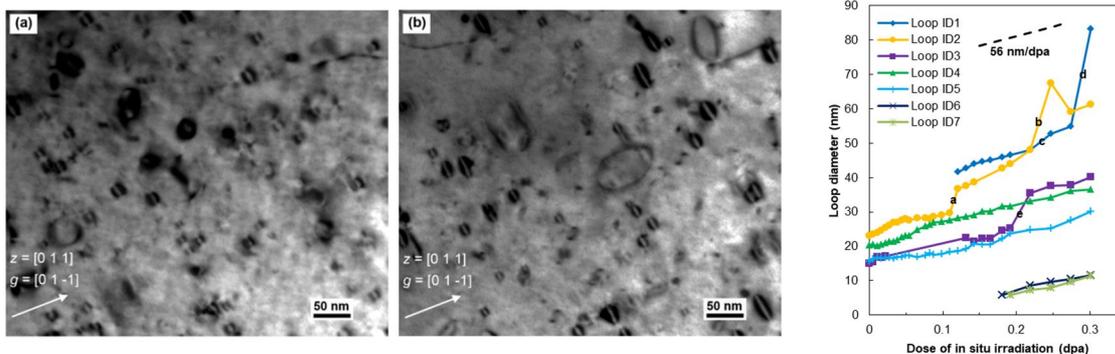


図4 Fe-0.6wt.%Ni を 400 K で二段階組合せイオン照射した結果。格子間原子型の転位ループが照射量とともに成長するが、一部は結合して急激に粗大化する。

第二段階の照射は、室温~400 K 程度の条件で系統的に実施し、試料の厚みと照射温度を因子として、空孔濃度が格子間原子と比較して高くなる条件を見出すことができた。この場合、既存の転位ループは空孔との再結合によって縮小し、代わりに新しい転位ループが発生して成長を始める。この手法により、分析の難しい微小な照射欠陥を成長させて、その特徴を明らかにする実験も可能になった。

以上の研究により、組合せ照射法と *in-situ* TEM 法を活用することで長い時間をかけてゆっくりと進展する照射劣化を加速的に発現させる手法の開発、及び変位カスケードによる短時間かつ不均質な照射欠陥の挙動を顕在化させる手法の開発、並びに照射欠陥の不連続な成長挙動を評価する実験手法の開発に成功した。

本研究により、軽水炉の長期運転における安全上の課題の検討に役立つ知識基盤の構築に貢献した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chen Dongyue, Murakami Kenta, Abe Hiroaki, Li Zhengcao, Sekimura Naoto	4. 巻 163
2. 論文標題 Investigation of interactions between defect clusters in stainless steels by in situ irradiation at elevated temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 78 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2018.10.011	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 K. Murakami, D. Y. Chen, H. Abe, N. Sekimura	4. 巻 1
2. 論文標題 Improvement of In-situ Transmission Electron Microscope Technique for Analysis of Cascade Damage", Proceedings of 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants	6. 最初と最後の頁 17288_1~2
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 Chen Dongyue, Murakami Kenta, Dohi Kenji, Nishida Kenji, Li Zhengcao, Sekimura Naoto	4. 巻 529
2. 論文標題 The effects of loop size on the unfauling of Frank loops in heavy ion irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 151942 ~ 151942
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.jnucmat.2019.151942	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 Chen Liang, Nishida Kenji, Murakami Kenta, Chen Dongyue, Liu Li, Kobayashi Tomohiro, Li Zhengcao, Sekimura Naoto	4. 巻 455
2. 論文標題 A model to evaluate the hardening effect of solute clusters in Fe-based alloys	5. 発行年 2019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 32 ~ 34
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.nimb.2019.06.022	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 該当する

1. 著者名 Chen Liang, Nishida Kenji, Murakami Kenta, Liu Li, Kobayashi Tomohiro, Li Zhengcao, Sekimura Naoto	4. 巻 498
2. 論文標題 Effects of solute elements on microstructural evolution in Fe-based alloys during neutron irradiation following thermal ageing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 259 ~ 268
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.jnucmat.2017.10.026	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 Chen Dongyue, Murakami Kenta, Dohi Kenji, Nishida Kenji, Ohnuma Toshiharu, Soneda Naoki, Li Zhengcao, Liu Li, Sekimura Naoto	4. 巻 494
2. 論文標題 First-principles investigation on the composition of Ni-Si precipitates formed in irradiated stainless steels	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Materials	6. 最初と最後の頁 354 ~ 360
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.jnucmat.2017.07.029	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 該当する

1. 著者名 L. Chen, K. Nishida, K. Murakami, T. Kobayashi, Z. C. Li, N. Sekimura	4. 巻 9
2. 論文標題 Evaluation of Hardening under Ion Irradiation in Reactor Pressure Vessel Model Alloys by Nano-indentation Techniques	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 E-Journal of Advanced Maintenance	6. 最初と最後の頁 72 ~ 77
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 Almirall N., Wells, P.B., Pal S., Edmondson P.D., Yamamoto T., Murakami K., Odette G.R.	4. 巻 181
2. 論文標題 The mechanistic implications of the high temperature, long time thermal stability of nanoscale Mn-Ni-Si precipitates in irradiated reactor pressure vessel steels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 134 ~ 139
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.scriptamat.2020.02.027	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37件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 24件）

1. 発表者名 K. Murakami, D. Y. Chen, H. Abe, N. Sekimura
2. 発表標題 In-situ TEM observation of radiation defects in iron-based model alloys under ion irradiation
3. 学会等名 The 20th meeting of the International Group on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Murakami
2. 発表標題 Studies on ageing mechanism of structural materials using ion accelerator facilities
3. 学会等名 Fourth International Conference on Nuclear Power Plant Life Management (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 L. Chen, K. Nishida, K. Dohi, D. Y. Chen, K. Murakami, Z. C. Li, N. Sekimura
2. 発表標題 Solute precipitation and effects of dislocation lines in RPV steels neutron-irradiated to high fluences
3. 学会等名 The 21th meeting of the International Group on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Murakami, D. Y. Chen, L. Chen, N. Sekimura, Phonsakorn P. T., Luu V. N., M. Suzuki
2. 発表標題 Effects of solute atoms and microstructures on in-situ TEM-visible damage formation in Fe-based binary alloys
3. 学会等名 The 21th meeting of the International Group on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Almirall, P. Wells, T. Yamamoto, G. Odette, P. Edmondson, K. Murakami
2. 発表標題 Investigation of the Thermal Stability of Mn-Ni-Si Precipitates in Ion Irradiated RPV Steels
3. 学会等名 The 20th meeting of the International Group on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 村上健太
2. 発表標題 劣化メカニズムに基づく中性子束効果の検討
3. 学会等名 日本保全学会 第16回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Sekimura
2. 発表標題 Materials and Their Systems for Continuous Improvement of Nuclear Safety
3. 学会等名 International symposium on the future of nuclear materials research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L. Chen, K. Murakami, D. Y. Chen, Z. C. Li, N. Sekimura
2. 発表標題 Ab initio study of Si interaction with Ni in bcc Fe
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L. Chen, K. Murakami, D. Y. Chen, H. Abe, Z. C. Li, N. Sekimura
2. 発表標題 In-situ transmission electron microscopy study of evolution of dislocation loops in irradiated reactor pressure vessel model alloys
3. 学会等名 日本原子力学会2020年春の年会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 L. Chen, K. Murakami, D. Y. Chen, H. L. Yang, H. Abe, Z. C. Li, N. Sekimura
2. 発表標題 Nature of defect clusters produced in ferritic model alloy at elevated temperatures
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 D. Y. Chen, K. Murakami, K. Dohi, K. Nishida, L. Chen, Z. C. Li, N. Sekimura
2. 発表標題 The Formation of Ni-Si Precipitates and Their Relationship with Loops in Irradiated Stainless Steels
3. 学会等名 The Nuclear Materials Conference (NuMat) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Y. Chen, K. Murakami, L. Chen, Z. C. Li, N. Sekimura
2. 発表標題 An Investigation of Nucleation Sites for the Formation of Solute Clusters in Ferrite Fe
3. 学会等名 Computer Simulation of Radiation Effects in Solids (COSIRES) (国際学会)
4. 発表年 2018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	村上 健太 (Murakami Kenta) (50635000)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	
研究 分担者	山本 琢也 (Yamamoto Takuya) (50212296)	福井大学・附属国際原子力工学研究所・その他 (13401)	削除：平成29年10月12日
研究 協力者	山本 琢也 (Yamamoto Takuya)	カリフォルニア大学サンタバーバラ校・工学研究科	
研究 協力者	陳 東鉞 (Chen Dongyue)	東京大学・大学院工学系研究科・特任講師 (12601)	
研究 協力者	陳 良 (Chen Liang)	東京大学・大学院工学系研究科・特任研究員 (12601)	