

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01909

研究課題名（和文）過酷照射した3d遷移金属合金の磁化及び磁気・構造変態挙動のコンビナトリアル研究

研究課題名（英文）Combinatorial study on magnetization, magnetic and structural transition behaviors of 3d-TM alloys irradiated under severe conditions

研究代表者

鎌田 康寛（KAMADA, YASUHIRO）

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：00294025

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：Fe-Cr-Ni合金に代表される鉄系3d遷移金属合金は原子炉、核融合炉や素粒子加速器において重要な構造材料となっている。それらの磁性や結晶構造が過酷照射により変化して構造特性や機能に影響を与える可能性があるため、その現象の把握と機構解明が重要となる。本研究では、主に(1)Fe-Cr-NiおよびFe-Ni合金の高品位薄膜の重イオン照射による結晶構造と磁性の変化、(2)実用フェライト系耐熱鋼およびモデル合金の高温保持による微細組織と磁性の変化、(3)実用オーステナイト系ステンレス鋼のGaイオン照射による結晶構造変態、を効果的に調べ、変化挙動とメカニズムの詳細を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Fe-Cr-Ni合金薄膜の系統的な重イオン照射実験を行うことで、ある組成範囲で磁化の増加と結晶構造の変化が生じることを明らかにし、Fe-Ni合金の変化挙動と相違点から、照射による磁性変化に2つの機構があることを実験的に見出した。さらにオーステナイト系ステンレス鋼のGaイオン照射実験により、照射面に依存した結晶方位関係が生じることを見出した。このように照射誘起変態現象に関する新しい知見を得た点で学術的意義がある。鉄基合金は、照射環境下で使用される機器構造物で広く使用されている。本研究で得た知見は、それらの機器構造物の安全利用や性能維持を考える上で役立つことから、社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：Iron-based 3d transition metal alloys such as Fe-Cr-Ni are important structural materials in fission and fusion reactors, and particle accelerators. Severe irradiation causes the change of magnetism and crystal structure, which leads to deteriorate the structural properties and material functions. Therefore, it is necessary to know the behaviors and clarify their mechanisms. In this study, (1) heavy-ion irradiation effects on the crystal structure and magnetism of Fe-Cr-Ni and Fe-Ni high-quality films, (2) thermal-aging effects on the microstructures and magnetism of practical ferritic heat-resistant steels and model alloys, (3) Ga ion irradiation effects on phase transition of practical austenitic stainless steels, were investigated effectively and clarified in details.

研究分野：材料工学（金属物理学）

キーワード：照射損傷 磁気特性 構造変態 非破壊評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

照射環境下で利用される機器構造物で、種々の鉄基 3d 遷移金属合金が使用されている。例えばフェライト系の Fe-Cr 合金は核融合炉ブランケット材、オーステナイト系の Fe-Cr-Ni 合金は各種原子炉の配管材や大強度素粒子加速器の構造物として用いられる。一般にフェライト系の鉄基合金(体心立方格子:bcc)は強磁性を有する。他方、オーステナイト系の鉄基合金(面心立方格子:fcc)は非磁性である。しかし、後者の場合でも SUS304 鋼のように冷却や強加工で容易に結晶構造が変化し、強磁性が生じる場合があることが知られている。それらの合金の磁性や結晶構造が、機器構造物の使用中に変化すると機能不全や事故が生じ得ることから、磁性と結晶構造に与える照射効果の解明と対策が重要となる。鉄以外の他元素を少量しか含まない低合金鋼の磁性研究に関しては、軽水炉压力容器の安全性研究の観点から、欧州における関連の国際共同事業の実施などで研究が進んでいる。それに対して、鉄以外の他元素を多く含む鉄基 3d 遷移金属合金の全体を俯瞰した磁性と結晶構造に与える照射効果の研究はこれまでに無い。これらの背景のもと、本研究では Fe-Cr-Ni 系合金(2 元合金を含む)を中心に上記課題に取り組む。

2. 研究の目的

本研究では、過酷照射した鉄基 3d 遷移金属の磁気特性と構造変態挙動を系統的に調べ、そのメカニズムを明らかにすることを目的としている。その一つの方法として高品質な合金薄膜試料を作製し、損傷深さは制限されるが系統的な照射実験が容易という利点を持つ重イオン照射を実施し、照射前後での結晶構造・微細組織と磁気特性の変化について効率的に調べる。並行して実用バルク材料に対して、高温環境および照射環境下での構造・組織と磁気特性の変化挙動を明らかにする。

3. 研究の方法

合金薄膜研究では、超高真空蒸着装置(岩手大装置)を、高品質薄膜を効率的に電子ビーム蒸着できるように改良し、エピタキシャル薄膜を作製した。重イオン照射はタンDEM型加速器(九州大装置)を利用した。磁気特性評価は主に VSM と研究室自作の BH 曲線計測器(いずれも岩手大装置)を用いて実施した。結晶構造および微細組織の評価には、超高真空蒸着装置に装着した RHEED、電解放出型 SEM に装着した EBSD と EDS(岩手大電顕室)、収差補正型 STEM-EDS(九州大装置)を用いた。Ga イオン照射実験と断面観察用試料の作製では FIB 装置(岩手大電顕室)を活用した。

4. 研究成果

主な成果を 3 つにまとめ、以下に示す。

(1) 合金薄膜の結晶構造と磁性に与える重イオン照射効果

超高真空中で電子ビーム蒸着により組成の異なる Fe-Cr-Ni および Fe-Ni 合金薄膜を系統的に作製した。基板温度と下地物質として、低温(80°C)で MgO(001)、低温で Cu(001)、高温(500°C)で MgO(001)、の 3 条件の組み合わせとした。低温成長の試料は、直線駆動シャッターを用いて MgO 基板の半分に Cu バッファ層を 50nm 蒸着し、その後全面に Fe-Cr-Ni および Fe-Ni を 200nm 蒸着した。成膜中に RHEED 観察で、結晶成長を観察した。EDS 分析により合金薄膜の組成を確認した。成膜後に小片を切り出し、加速電圧 2.4MeV で Cu²⁺を室温照射した。損傷量は SRIM 計算より 0.7dpa と見積もられた。照射前後の結晶構造と結晶方位を XRD および EBSD で、磁化曲線を VSM で調べた。

EBSD 観察により得た Fe-Cr-Ni 薄膜の相マップの例を図 1 に示す。MgO 上の低温成長では、いずれの組成でも bcc(001)がエピ成長した(図 1 左)。高温成長では、Ni 濃度が多くなると bcc(001)に加えて、fcc(110)成長が確認された(図 1 右)。他方、Cu 上に成長させた薄膜では EBSD 解析不能点が多く見られた。これは微細粒の成長を示唆しており、照射研究に適した高品位膜は作製できなかった。

次に磁化曲線を測定し比較した結果、成長条件に関わらず、Ni 量の増加に伴い飽和磁化が減少する傾向が見られた。その傾向は高温成長試料でより顕著であった。各試料の飽和磁化から fcc 相の体積率を推定して Ni 当量[1]で整理したところ、高温成長した Ni 当量 33%の試料で、fcc 相の形成率が

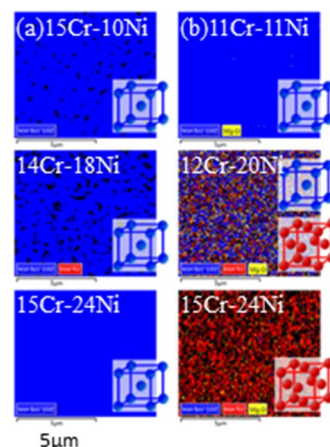


図 1 Fe-Cr-Ni 合金薄膜の相マップ

0.79 に達した。

高温成長した合金薄膜の試料に対してイオン照射を行った。照射前後の XRD プロファイルと比較した結果、Fe-Cr-Ni 3 合金では結晶構造の変化は見られなかったが、Fe-29Ni 2 元合金では fcc 相から bcc 相への構造変態が確認された。一方、Fe-Cr-Ni および Fe-Ni 合金とも、ある組成範囲で照射による飽和磁化の増加現象が確認された。Ni 当量に対して結果を整理したところ、Fe-Ni、Fe-Cr-Ni 合金ともに Ni 当量 29% 付近で磁化が増加することがわかった(図 2)。これまでのインバー合金 (Fe-Ni 合金バルク材) の物性研究から、インバー組成付近において、低スピンと高スピンの 2 つの磁気状態 (結晶構造は共に fcc) が存在し得ると報告されている。このことを踏まえると、本研究で確認した Fe-15Cr-20Ni の照射による磁化微増の挙動は、上述の磁気状態の遷移が関係していると考えられる。他方、Fe-29Ni の磁化増加については、bcc 相への構造変態に伴う強磁性化の効果も関係しており、2 つの磁化の増加で機構が働いていると考えられる。

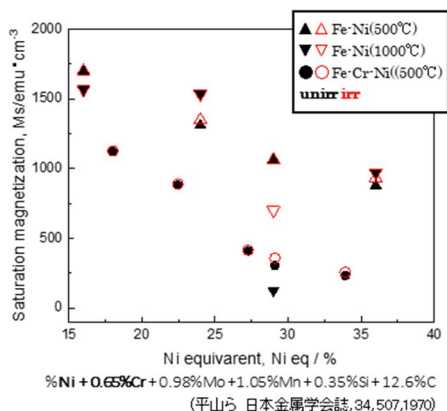


図 2 照射前後の合金の飽和磁化(室温)

(2) 実用フェライト系耐熱鋼及びモデル合金の微細組織と磁性

核融合ブランケット材として期待される F82H 鋼(Fe-8Cr-1.9W-0.2V-0.04Ta-0.09C)の受入材 (AR)および 60%クロス圧延材(CR)と、類似組成の実用フェライト系耐熱鋼 (ASME Gr91 および 92) Fe-Cr2 元合金 (10~45Cr) を準備した。それらを真空電気炉で等時焼鈍した (900°C、10h および 100h)。ビッカース硬さ試験、磁気ヒステリシス計測 (励磁・検出コイルを巻いたリング状試料を使用)、EBSD 観察による組織評価を行った。

図 3 に実用鋼の硬さの焼鈍温度依存性を示す。硬さは、F82H 鋼の AR・CR 材の両試料とも 600°C 焼鈍から減少し、特に CR 材で顕著であった。Gr91、92 の硬さの焼鈍温度依存性は AR 材と似た挙動であった。EBSD 観察より、F82H 鋼 AR 材と Gr91、92 では 800°C 焼鈍後まで焼き戻しマルテンサイト組織が保たれていたが、CR 材では再結晶による粗大な結晶粒の形成が見られた。

図 4 に実用鋼の磁気ヒステリシス計測から得た保磁力の焼鈍温度依存性を示す。F82H 鋼の AR 材の保磁力は 800°C までほとんど変化しないが、900°C 焼鈍で急増した。CR 材の保磁力は、焼鈍前では AR 材より大きい、焼鈍初期から減少し 700°C で逆転した。前者の減少は転位の再配列と回復が、後者の逆転は再結晶が原因と考えられる。一方、900°C 焼鈍による保磁力の急増は、冷却時の相変態 ($\gamma \rightarrow \alpha$) に起因すると考えられる。Gr91、92 は F82H 鋼 AR 材と同様の挙動を示した。

一方、Fe-Cr2 元合金の硬さと磁気ヒステリシス特性の焼鈍温度依存性については、複雑な挙動が見られた。硬さは 10Cr ではほとんど変化しないが、20、30、45Cr の 100h 焼鈍材は 500°C で一度増加した。さらに 45Cr のみ 100h 焼鈍材では 700°C の焼鈍後に、硬さが大小と異なる 2 つの領域が存在した。EBSD 観察の結果、硬さが増加した 500°C 焼鈍材および 700°C、10h 焼鈍材では、焼鈍前と同じ bcc 相であった。一方、700°C、100h 焼鈍材では σ 相が形成していた。状態図を考慮すると 20、30、45Cr の 500°C、100h 焼鈍材では α - α' の二相分離が、一方、45Cr の 700°C、100h 焼鈍での硬さの急増は、 σ 相の形成によると考えられる。

磁気特性については、45Cr の保磁力は 500°C で最大となり、硬さの増加挙動と対応した。一方、20、30Cr では保磁力と硬さの挙動が対応しなかった。後者の減少は、硬さと保磁力に及ぼす二相分離の影響機構が異なることを示唆しており、二相分離に起因する脆化の非破壊評価に磁気計測を適用する際に注意が必要である。それに対して 45Cr の 700°C 焼鈍材では

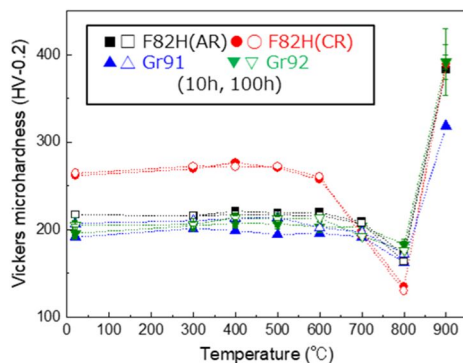


図 3 F82H, Gr91, 92 等時焼鈍材の硬さ

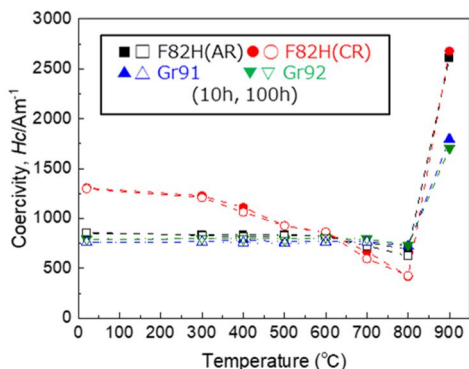


図 4 F82H, Gr91, 92 等時焼鈍材の保磁力

保磁力と硬さに相関があり、さらに最大磁束密度の減少が確認され、 σ 相（非磁性）の形成と対応していた。このことは磁気計測による脆化評価の有用性を示している。

その他のモデル合金として、Fe-Cu合金の照射損傷組織の調査を実施した。

(3) 実用オーステナイト系ステンレス鋼のGaイオン照射と構造変態

実用オーステナイト系ステンレス鋼（Fe18Cr8Ni および Fe18Cr8Ni）を固溶化熱処理後に機械研磨と電解研磨をした。その後、30 kV の Ga イオンを室温照射した。照射量を $0.8 \sim 8.0 [\times 10^{16} \text{ ions/cm}^2]$ の間で系統的に変化させた7条件、照射方向を2条件（ $(001)_{\text{fcc}}$ と $(111)_{\text{fcc}}$ に垂直方向）を組み合わせた合計14条件の実験を、1つの多結晶試料を使い、FIB装置により効率的に実施した。SEM-EBSD & EDS、STEM-EDS 分析により、試料表面および断面の組織観察と組成分析を行った。断面観察用試料は Pt/Os を保護層としてコートし、FIB加工による微小サンプリング法で作製した。Ga 注入深さのピークは、SRIM 計算より表面から約 10 nm の深さと見積もられた。

図5に、照射量が $4.0 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^2$ 以上の照射領域（各 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 範囲）のSEM画像と相マップ、結晶方位マップを示す。照射領域で $\text{fcc} \rightarrow \text{bcc}$ 変態が生じており、変態量は照射量の増加に従い増加している。同一照射量の場合、 $(111)_{\text{fcc}}$ 照射で変態量が多い傾向が見られる。いずれの照射方位でも照射量の増加とともに Ga 濃度も増加していた。

$(001)_{\text{fcc}}$ 照射領域の表面近傍の断面観察の結果、Ga 照射領域の表面直下に厚さ約 100 nm の帯状 bcc 相が見られ、この組織が照射による変態相と推定される。STEM-EDS による断面組成分析の結果、Ga 濃度は約 10 nm の深さをピークに急激に減少していることを実験的に確認した（図6）。従って変態相は高 Ga 濃度の領域だけでなく、低濃度領域まで深く広がっていることがわかった。

EBSD 測定で得たオイラー角データから fcc と bcc の結晶方位を解析し、最密面（CPP）と最密方向（CPD）の角度差で整理した。その結果、照射により生じた bcc 相の結晶方位関係は単一でなく幅を持って分布しており、さらにその分布は照射方向により異なることがわかった。マルテンサイト変態でよく知られている NW 関係 $\{111\}_{\text{fcc}} // \{110\}_{\text{bcc}} \langle 211 \rangle_{\text{fcc}} // \langle 110 \rangle_{\text{bcc}}$ には等価な12種の方位関係（バリエント）が存在する。NW 関係の観点からバリエント解析した結果、全12バリエント中、 $(001)_{\text{fcc}}$ 照射では4種類、 $(111)_{\text{fcc}}$ 照射では3種類の特定の方位関係の bcc 相が形成していることを明らかにした（図7）。

以上の結果をもとに変態機構について考察を進める。Fe-Ga2元系状態図においてGaの固溶限は広く、Gaは bcc 相の安定化元素と考えられることから、Ga注入による化学的効果の変態の要因として第一に挙げられる。しかし、変態相がGa注入の少ない領域まで広がっていたことから（図6）他の要因も考慮する必要がある。その第二の要因として応力効果が挙げられる。Fe-Cr-Ni合金にGaを添加すると格子定数が増大することが過去の研究で報告されており、本研究結果でもGa注入による応力効果がGa注入の少ない領域まで影響を与え、表面直下100 nmまで変態した可能性がある。以上2つの効果で、本研究で見られた変態挙動が概ね説明できるが、 $(001)_{\text{fcc}}$ と $(111)_{\text{fcc}}$ の照射方向による変態量の違い（後者が大きいこと）が説明できない。先ほど触れたように、詳細な方位解析を行った結果、照射面により異なるバリエントが形成することが明らかとなった。ここで、すべりと関係する最密面（CPP）に着目すると、 $(001)_{\text{fcc}}$ 照射では4面のCPPが均等に傾斜しているのに対し、 $(111)_{\text{fcc}}$ 照射では1面のみ平行となっている（図7）。このことから、 $(001)_{\text{fcc}}$ 照射では深さ方向に変態が生じてひずみが増加するため、 $(111)_{\text{fcc}}$ 照射と比較して変態量が少なくなったと考えられる。

<引用>

[1]平山, 小切間, 日本金属学会誌, 34, 1970, 507-510

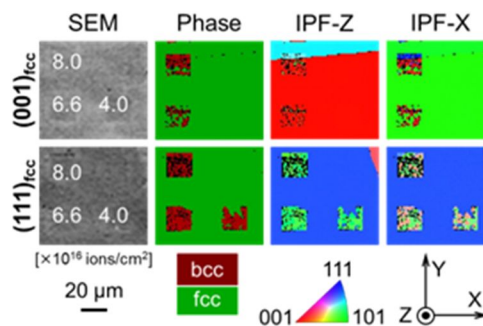


図5 SEM-EBSDにより確認したGaイオン照射による bcc 変態相

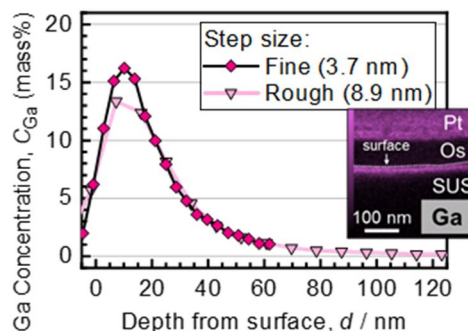


図6 STEM-EDSにより得た試料断面のGa分布。 $(001)_{\text{fcc}}$ 照射。

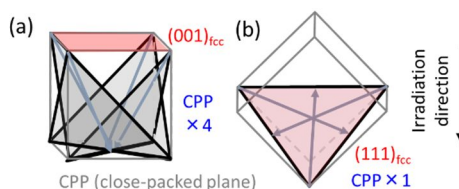


図7 $(001)_{\text{fcc}}$ 及び $(111)_{\text{fcc}}$ 照射における照射方向と最密面(CPP)の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 鶴田華子、清水一行、村上武、鎌田康寛、渡邊英雄	4. 巻 85
2. 論文標題 Gaイオン照射したSUS304鋼の構造相変態	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本金属学会誌	6. 最初と最後の頁 239-246
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/jinstmet.J2021006	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 H. Watanabe, T. Tanaka, T. Turu and Y. Kamada	4. 巻 12
2. 論文標題 Direct Observation of Cu Clusters and Dislocation Loops by Cs-Corrected STEM in Fe-0.6wt%Cu Alloy Irradiated in BR2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 729/1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met12050729	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 山口真功、清水一行、鎌田康寛、野澤貴史、谷川博康
2. 発表標題 等時焼鈍した低放射化フェライト鋼およびFe-Cr2元合金の硬さと磁気ヒステリシス特性
3. 学会等名 第20回日本金属学東北支部研究発表大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 國枝暁人、清水一行、鎌田康寛、石井範幸、長谷川泰士
2. 発表標題 ASME Grade91耐熱鋼の初期クリープ損傷と磁気ヒステリシス特性
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会(第169回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川一沙, 清水一行, 鎌田康寛, 渡邊英雄
2. 発表標題 Fe-Cr-Ni/MgO(001)薄膜の構造と磁性に及ぼすイオン照射効果
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会(第169回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 及川涼一, 中川一沙, 清水一行, 鎌田康寛, 渡邊英雄
2. 発表標題 Fe-Cr-Niエピタキシャル合金薄膜の作製とその磁性に及ぼすイオン照射効果
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演大会(第167回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴田華子, 中川一沙, 村上武, 清水一行, 鎌田康寛
2. 発表標題 SUS304鋼のイオン照射誘起相変態の結晶方位関係
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演大会(第167回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口真功, 清水一行, 鎌田康寛, 野澤貴史
2. 発表標題 F82H鋼の磁気ヒステリシスと飽和磁化の温度依存性
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演大会(第167回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤松拓人, 國枝暁人, 清水一行, 鎌田康寛, 石井範幸, 長谷川泰士
2. 発表標題 9Crフェライト系耐熱鋼の焼戻し組織と磁気ヒステリシス特性の関係
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演大会(第167回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鶴田華子, 鎌田康寛, 渡邊英雄
2. 発表標題 Gaイオン照射したオーステナイト系ステンレス鋼における微細組織の断面観察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会2020年第180回秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kamada
2. 発表標題 Application of magnetic hysteresis loop measurement for assessment of microstructure modification of thermally aged and neutron irradiated iron-chromium alloys
3. 学会等名 Diagnostics of Materials and Industrial Components, DMIUT2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kamada, T. Oyake, T. Murakami, S. Kobayashi and H. Watanabe
2. 発表標題 Ion Irradiation Effects on Magnetic Properties of BCC and FCC Fe-Ni Alloys
3. 学会等名 Fifth International Workshop on Structural Materials for Innovative Nuclear Systems, SMINS-5 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kamada, Y. Aihara, M. Yamaguchi, S. Kobayashi, H. Sakasegawa and H. Tanigawa
2. 発表標題 Magnetic Hysteresis Properties of F82H Steels
3. 学会等名 Fifth International Workshop on Structural Materials for Innovative Nuclear Systems, SMINS-5 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小宅智樹, 鶴田華子, 村上武, 鎌田康寛, 渡辺英雄
2. 発表標題 鉄ニッケル合金薄膜の磁性と結晶構造に与える重イオン照射効果
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期講演大会(第165回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴田華子, 鎌田康寛
2. 発表標題 オーステナイト系ステンレス鋼の(101)結晶面の微細組織に及ぼすGaイオン照射効果
3. 学会等名 日本鉄鋼協会2019年第178回秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴田華子, 村上武, 鎌田康寛
2. 発表標題 オーステナイト系ステンレス鋼の表面組織に及ぼすGaイオン照射の影響
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季講演大会(第164回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 生内幸亜, 鎌田康寛, 村上武, 小林悟, 渡辺英雄
2. 発表標題 Fe-Cr二元合金の組織、硬さ、磁気ヒステリシス特性に与える熱時効効果
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会(第163回)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平船和哉、鎌田康寛、村上武
2. 発表標題 オーステナイト系ステンレス鋼の磁性・組織・微小硬さに与える熱時効効果
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会(第163回)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kamada, Y. Aihara, T. Murakami, S. Kobayashi, H. Sakasegawa and H. Tanigawa
2. 発表標題 Magnetic Hysteresis Properties of Thermally Aged RAFM Steels
3. 学会等名 14th Japan-China Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Oyake, Y. Kamada, T. Takahashi, T. Murakami, S. Kobayashi and H. Watanabe
2. 発表標題 Ion Irradiation Effects on Magnetic Properties of Fe-Ni Alloys
3. 学会等名 14th Japan-China Symposium on Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering (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	小林 悟 (KOBAYASHI SATORU) (30396410)	岩手大学・理工学部・教授 (11201)	
研究分担者	清水 一行 (SHIMIZU KAZUYUKI) (30748760)	岩手大学・理工学部・助教 (11201)	
研究分担者	村上 武 (MURAKAMI TAKESHI) (60466513)	岩手大学・理工学部・技術専門職員 (11201)	
研究分担者	渡辺 英雄 (WATANABE HIDEO) (90212323)	九州大学・応用力学研究所・准教授 (17102)	

	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
連携研究者	三谷 誠司 (MITANI SEIJI) (20250813)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究拠点・拠点長 (82108)	
連携研究者	谷川 博康 (TANIGAWA HIROYASU) (50354668)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所・次長 (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	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
連携研究者	中本 建志 (NAKAMOTO TATSUSHI) (20290851)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授 (82118)	

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