

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 7 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02443

研究課題名(和文) ダイバータ用耐照射性銅合金の創製

研究課題名(英文) Creation of radiation-resistant copper alloys for application to divertors

研究代表者

室賀 健夫 (Muroga, Takeo)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：60174322

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,400,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉のダイバータへの適用を目指し、機械的合金化(MA)法と焼結により銅母相中にイットリウム酸化物を微細分散させた酸化物分散強化(ODS)銅合金の製造要件を、水冷MA法や酸化還元(REDOX)制御MA法、分級処理分析等を適用し明らかにした。また、焼結後熱機械処理効果も含め、強度と延性の向上の微細組織学的因子との関係を明らかにした。さらに、イオン照射法とナノインデンテーション法を用いて、得られた試作材が優れた耐照射性を有することを示した。これらに基づき、ODS銅合金のダイバータヒートシンク材としての可能性を明らかにするとともに、その製造プロセスを最適化する指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械的合金化(MA)法と焼結によりイットリウム酸化物などを微細分散させる強化法(酸化物分散強化法)は鉄鋼材に適用されていたが、銅合金ではこれまで例が無かった。本研究では核融合炉ダイバータのヒートシンク材として期待されている銅合金の高温強度と耐照射性を高めるため、酸化物分散強化材の試作開発を進め、その可能性を示すと同時にプロセスの最適化指針を得た。この成果は、核融合機器開発だけでなく、酸化物分散強化法の広範な材料への応用の可能性を示したことを意味し、学術的な意義だけでなく、産業界へもインパクトを与えるものである。

研究成果の概要(英文)：The production process of oxide dispersion strengthened (ODS) copper alloys, by means of mechanical alloying (MA) and the following sintering, was investigated for application to divertors of fusion reactors, including water-cooled MA, REDOX-MA, and powder classification by their size after MA. The relation between the enhancement of strength and ductility of the materials produced, and their microstructural parameters was clarified, including the case when post-sintering thermal and mechanical treatments were applied. In addition, high irradiation resistance of the materials produced was demonstrated by means of ion irradiation and nano-indentation. Based on these results, the potential of the ODS copper alloys as divertor heat sink materials was evaluated, and the guidelines for optimizing the production process were extracted.

研究分野：核融合炉材料、核融合炉工学、照射損傷

キーワード：銅合金 ダイバータ 酸化物分散強化 機械的合金化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ITER のダイバータには熱伝導性に優れた銅基合金が用いられるが、銅基合金は 1dpa 以下の照射で延性を失うことが知られ、その後の原型炉への採用は難しいと考えられていた。しかし原型炉のダイバータ設計において中性子照射量の低減化が進められ、銅合金の耐照射性をこれまでに比べ数倍高めることができれば、原型炉への適用の見通しが得られるという工学的要請と期待が高まっている。そこで、既存材料の GlidCop® に比べ、はるかに微小な酸化物粒子を高密度に分散させることによって、機能として必須の 3 要件 (高熱伝導率、高強度、耐照射性) を同時達成可能な ODS 銅合金の開発を目指すこととした。

2. 研究の目的

延性・展性の高い銅に対しては困難とされていた機械的合金化 (Mechanical Alloying: MA) 法と大型化・自由成形を見越せる熱間等方加圧法 (Hot Isostatic Pressing: HIP) を含む種々の焼結法により、銅母相中に Y_2O_3 酸化物を微細分散させる ODS 銅合金の製造要件を明らかにする。また、その後の組織制御によって ODS 銅合金の強度と延性の向上を図る。MA においては、水冷 MA 法や酸化還元 (REDOX) 制御 MA 法等を適用し、熱伝導特性、変形及び強度発現機構等を調べ、微細組織学的因子との関係を明らかにする。また、得られた ODS 銅合金について、イオン照射法とナノインデンテーション法を用いて、耐照射性を明らかにする。これらに基づき、最高の性能を得るための ODS 銅合金製造プロセスを明らかにする。

3. 研究の方法

【水冷ボールミルによる製作と微小試験、照射効果】

基本組成として $Cu-1Y_2O_3$ となる ODS 銅合金の創製を目指して、水冷型ボールミルを用いて Y_2O_3 直接添加法および YH_2 と CuO を添加した REDOX 制御法による MA を行い、 $Cu-Y_2O_3$ 系 ODS 銅合金粉末を作製した。得られた MA 粉末のホットプレス焼結体の強度特性を調べるために、押込硬さ試験、マイクロピラー圧縮試験を行った。Xe フラッシュ型熱伝導測定装置による熱拡散率評価を行い、硬さとの関係を調べた。ODS 銅合金、MA 純銅 (微細粒)、単結晶銅に対して、重イオン加速器施設 DuET により $5.1MeV Cu^{2+}$ イオンビームを用いて、100、3dpa の照射を行い、ナノインデンテーション硬さ試験やマイクロピラー圧縮試験を行うことによって、耐照射硬化性発現における微細粒や酸化物分散粒子の影響を調べた。

【雰囲気制御 MA と組織制御処理】

銅粉末と Y_2O_3 粉末を最大 470rpm で 48h まで MA した。MA 後の粉末回収率を高くする目的で、潤滑剤として 1wt. % のステアリン酸と Ar 雰囲気の組み合わせ、潤滑剤無しで He/5% H_2 雰囲気の両方を試した。MA 後粉末を 900、45min でスパークプラズマ焼結した後、80% の冷間圧延を室温及び液体窒素温度で行った。一部の試料には 100~1050、30min の再結晶熱処理を施した。EBSD・TEM により得られた微細組織を観察し、硬さ試験・引張試験により機械特性を調査した。

【HIP 法による試作研究】

基本的な MA 処理における原材料の組み合わせとしては、純銅 (Cu) 粉末と純イットリウム (Y) 金属粉末とした。加えて、酸化助剤として CuO も添加した。これらの粉末の秤量、混合及び MA 処理は、高純度大型グローブボックスにて高純度の Ar 雰囲気下で実施した。MA 処理は、グローブボックス内に導入した遊星型ボールミル装置を用いて実施した。MA 処理後の粉末は、不純物管理された高純度金属カプセル脱気封入装置内にて Fe カプセル封入を行った。その後、カプセルを HIP 装置にて HIP 処理を実施して試料を作製した。MA 粉末や HIP 処理後の焼結体の微細組織変化については、X 線回折 (XRD) 及び走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて精査した。一部の粉末や焼結体については、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた微細構造解析も行った。材料強度については、MA 粉末や HIP 処理後の焼結体の一部を鏡面研磨し、研磨面でのピッカース硬さ試験にて評価した。

4. 研究成果

【水冷ボールミルによる製作と微小試験、照射効果】

図 1 に示すように、 Y_2O_3 直接添加法によって作製した $Cu-1Y_2O_3$ では、析出強化型銅合金において一般に見られる硬さと熱拡散率のトレードオフ関係が克服されていることが見出された [1]。これは、熱拡散率には影響が少ない強化機構である母相組織の超微細粒強化とナノ粒子分散強化が貢献しているためと考えられる。REDOX 法では微細な MA 粉末が得られたが、直接添加法に比べて焼結体の熱拡散率、硬さともに低くなった。反応生成物である水分や水酸化物の影響が考えられる。MA

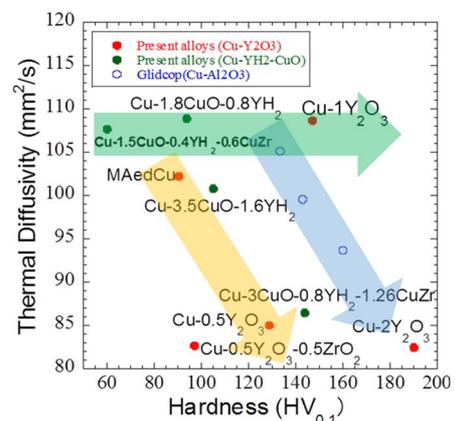


図 1 ODS-Cu 合金におけるピッカース硬さと熱拡散率の関係

環境を十分に冷却することによって、直接添加法でも微細な MA 粉末が得られており、REDOX 法のように MA に助剤を加えることなく、不純物の少ない緻密な焼結体が得られる指針が得られた。

得られた ODS 銅合金の強度特性をマイクロピラー圧縮試験によって調べたところ、図 2 に示すような比較的大きな降伏強度のバラつきが得られた。これは、1-5 μm 立方という超微小試験片であることに加えて、不均一な微細粒や酸化物粒子の分布においてもスケール性の影響が生じるためであることが、モンテカルロ法と微細組織観察結果を組み合わせた独自の手法によって明らかにすることができた [2]。本手法は、不均一組織を有する材料に対するマイクロピラー圧縮試験のような超微小試験技術による強度評価に広く応用可能であると考えられる。また、同様の手法によって、イオン照射硬化挙動を調べたところ、今回開発した Cu-Y₂O₃ 系 ODS 銅合金の優れた耐照射硬化特性は、主に微細粒のシンク効果によって生じていることが示唆された [3]。

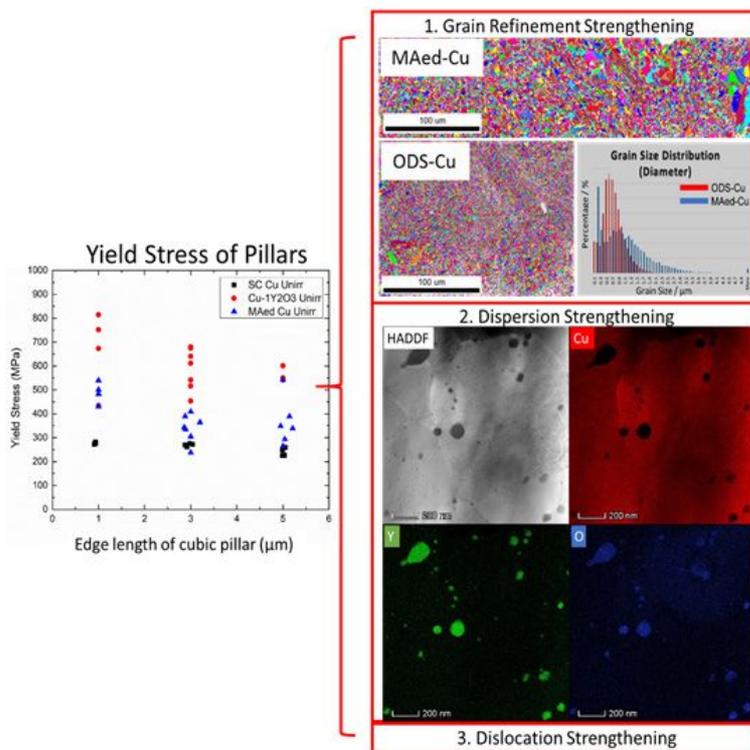


図 2 マイクロピラー圧縮試験で得られた単結晶銅、MA 銅、ODS 銅合金における降伏応力のマイクロピラーサイズ依存性と、材料強化因子となる微細組織因子 [1]。

【雰囲気制御 MA と組織制御処理】

ステアリン酸を用いた Ar 雰囲気下の MA(Ar-MA)では、470rpm, 48h の条件において 94% の回収率で良好な粉末が得られた [4]。焼結した ODS 銅中の酸化物粒子は、平均直径 10.8nm, 体積率は 0.0075 で、市販材の GlidCop® AL-25 と同程度の分散であるが、GlidCop® AL-25 の粒子が三角平板状であるのに対して本研究で形成された酸化物粒子はほぼ球形であり、照射によって生じた点欠陥を等方的に捕獲できると考えられる [4, 5]。図 3 は Ar-MA ODS 銅を焼結・冷間圧延・再結晶熱処理した試料の引張試験結果である [4, 5]。焼結したままの Ar-MA ODS 銅の引張強度は 272MPa であり、これだけでも GlidCop® AL-25 と同等の強度を持つが、室温で 80% 冷間圧延をすると、引張強度が 550MPa まで上昇する。冷間圧延までは伸びが小さいため、圧延試料に 800 $^{\circ}\text{C}$, 30min の熱処理を施した結果、引張強度を約 500MPa に保ったまま全伸びが 19% まで上昇し、強度・延性ともに GlidCop® AL-25 以上に優れた ODS 銅の開発に成功した。EBSD 解析から、800 $^{\circ}\text{C}$, 30min の再結晶材は 1 μm 以下の微細結晶粒と数 μm の再結晶粒の二相から成り、微細結晶粒が強度を、再結晶粒が伸びを高く保つ要因であると考えられる [5]。結晶粒の面積割合は微細粒：粗大粒 = 2 : 1 で、試験後はネッキング領域において微細粒が粒成長し、微細粒と粗大粒の面積割合が逆転する結果となった [6]。TEM 解析からは引張試験中は双晶変形とともに転位の動的回復が起きたことが示唆される [6]。80% の冷間圧延を室温で施すと、ほぼ全体が Brass 方位と低角粒界 (LAB) で構成される微細粒の集合体が形成される [4]。これに対し液体窒素温度で 80% の冷間圧延を室温で施すと、 α -fiber の集合組織が支配的となり、LAB の割合が低下する [7]。 α -fiber は室温においても 10⁻¹s⁻¹ 程度の大きな歪速度で変形した場合に見られる。

これら加工・変形後試料の TEM 解析から、ODS 銅には温度及び歪速度によって 2 つの異なる変形機構が存在し [7]、Brass 方位が支配的となる場合には微細粒の形成とその後に続く結晶粒の回転が変形を

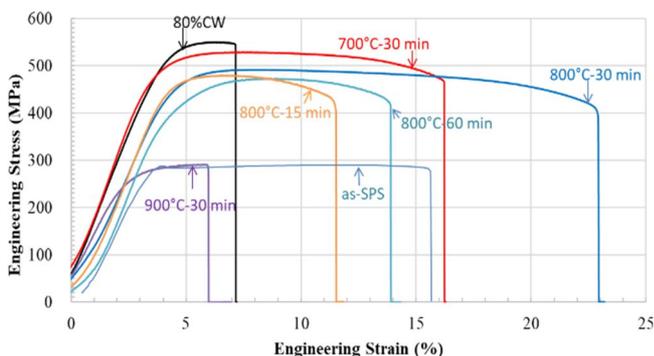


図 3 焼結・圧延・再結晶熱処理後の ODS 銅の引張応力-ひずみ曲線 [4, 5]

担い、 γ -fiber が支配的となる場合は双晶変形(液体窒素温度の場合)または「幾何学的に必要な転位」の堆積(室温で大きな歪速度の場合)が起きることが考えられる。室温及び液体窒素温度で冷間圧延した ODS 銅は、室温で長時間保持した場合にも再結晶する現象が見られた[8]。室温圧延した試料では LAB が移動することで高角粒界(HAB)を形成するのに対し、液体窒素温度圧延試料では HAB に再結晶粒が核生成・成長することが分かった[8]。

He/5% H_2 雰囲気(H_2 -MA)においては、ボールミル回転数の増加とともに粉末サイズと硬さが上昇し、470rpm, 48h の条件で粉末の平均直径は 3 μ m で、最大 15 μ m であった [6]。EBSD 解析から、 H_2 -MA ままの材料は平均約 1 μ m の微細粒からなる Brass 方位が支配的な集合組織を持つことが明らかとなった[6]。試料をこのまま引張試験した結果、引張強度 688 MPa、全伸び 8.6% という優れた機械特性を示した[6]。TEM 解析から、レンズ状及び帯状の双晶、転位森、平均直径が約 5 nm で粒子間間隔が 67 nm の酸化物微粒子の分散が含まれ、これらの全てが機械特性に寄与していることが分かった[9]。

【HIP 法による試作研究】

(1) 高純度 Ar 雰囲気下での MA 処理の効果

MA-HIP 法による Y_2O_3 ナノレベル酸化物分散強化銅合金の開発を最終目的に、高純度大型グローブボックスにて高純度 Ar 雰囲気下での MA 処理の効果について検討した。MA 処理時間を変化させた MA 粉末について、XRD による生成相の同定を実施した。図 4 に、MA 処理時間別の XRD 回折図形を示す[10, 11]。MA 処理の延長に伴って、金属 Y の回折ピークは小さくなり、16 時間にてほぼ消滅した。加えて、Cu の回折ピークは低角度側にシフトし、ブラッグ条件から推定される Cu の格子定数が大きくなること示唆された。これは、MA 処理によって Cu に Y が強制固溶されていることを示唆していると考えられる。一方で、MA 処理工程における Y_2O_3 の回折ピークは一切認められないことから、高純度 Ar 雰囲気下での MA 処理は活性な金属 Y を酸化させずに Cu への強制固溶を効果的に促進したと考えられる。また、MA 処理途中で Y_2O_3 生成促進のための酸化助剤として添加した CuO の回折ピークも 32 時間の MA 処理にて消滅した[10, 11]。

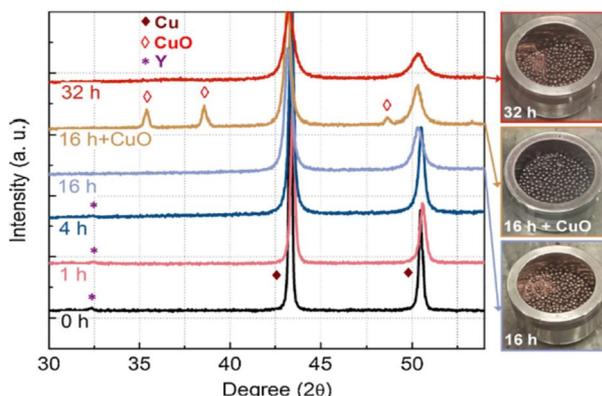


図 4 MA 処理時間別の MA 粉末の XRD 回折図形

(2) MA-HIP 法による分散強化銅合金の微細組織

MA-HIP 法によるナノレベル酸化物分散強化銅合金の試作として、32 時間の MA 処理粉末を 950 MPa という HIP 焼結を実施し、ナノサイズの Y_2O_3 粒子が Cu 粒内あるいは粒界に生成していることが明らかになり、当初の狙いである MA-HIP 法による Y_2O_3 粒子生成機構を確認した[10, 11]。また、HIP 処理後の硬度は、純銅と比較して、明確に高くなっており、 Y_2O_3 粒子が生成したためと考えている。一方、 Y_2O_3 分散粒子については、酸化助剤として添加した CuO の有無で生成量が大きく違うことが分かった。これは、Cu の含有酸素濃度では、 Y_2O_3 粒子生成では不十分であり、含有酸素濃度不足に対して CuO の還元反応による酸素供給が効率的に為されたためであると考えられる[11]。図 5 に典型的な MA-HIP 法による Cu- Y_2O_3 分散銅合金の微細組織 (BSE) 像を示す[12]。HIP 処理後のマクロ組織は、 μ m オーダーの粗大粒と nm オーダーの微細粒との混粒組織を呈していた[12, 13]。また、微細粒組織は、粗大粒の周囲に生成しており、均質な微細組織の形成に向けて MA 処理粉末の粒径及び微細組織に注目した。

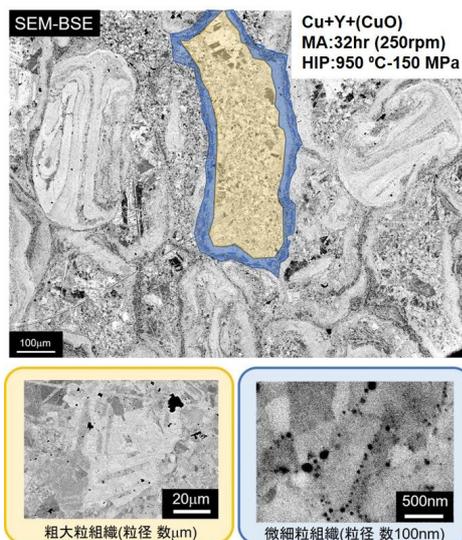


図 5 典型的な MA-HIP 法による Cu- Y_2O_3 分散銅合金の微細組織(BSE)像

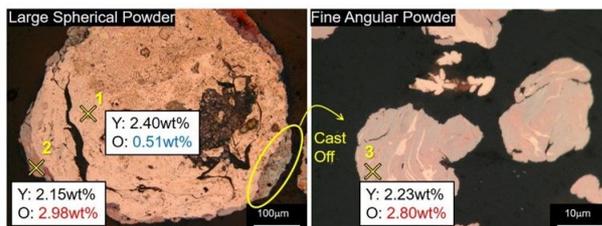


図 6 分級された粗大及び微細 MA 粒子の光学顕微鏡写真 (粗大粒: > 212 μ m, 微細粒: < 46 μ m)

(3)分級した MA 処理粉末の微細組織

32 時間の MA 処理粉末を複数のメッシュサイズの多段階の装置にて分級した。その結果、212 μm 以上の粗大粒子が 80% 以上となり、46 μm 以下の微細粒子が約 4% 程度存在した [12, 13]。図 6 に粗大及び微細 MA 粒子の光学顕微鏡写真を示す [12, 13]。図中に示した Y 及び O の定量は SEM-EDX にて測定した。粗大粒子は球状を呈しており、外周部において同程度の Y 元素と過剰な O 元素が検出された。一方、46 μm 以下の微細粒子は扁平状であり、粗大粒の外周部と同じ組成を示していた

ことから、粗大粒の外周部が MA 処理によって剥離した破片であることが推測された [12, 13]。図 7 に微細粒子の TEM 像と SAED 図形を示す。ナノサイズの Cu_2O 等を主相とする酸化物の凝集体であることが明らかになった。これにより、MA-HIP 処理後に生成する微細粒領域は微細粒子から生成したものと考えられ、酸化物のような脆性的な機械特性を有することが予想できる。

【まとめ】

本研究により、MA と焼結により銅母相中に Y_2O_3 酸化物を微細分散させる ODS 銅合金の製造要件を水冷 MA 法や酸化還元 (REDOX) 制御 MA 法、分級処理分析等を適用し明らかにするとともに、焼結後熱機械処理も含め、強度と延性の向上に関する微細組織学的因子との関係を明らかにした。また、イオン照射法とナノインデンテーション法を用いて、得られた試作材が優れた耐照射性を有することを示した。これらに基づき、ODS 銅合金のダイバータヒートシンク材としての可能性を明らかにするとともに、その製造プロセスを最適化する明確な指針が得られた。

引用文献

- [1] Yuchen Liu, R. Kasada et al., to be submitted.
- [2] Yuchen Liu, Sosuke Kondo, Hao Yu, Kiyohiro Yabuuchi, Ryuta Kasada, “Statistical approach for understanding the effect of specimen size on the yield stress and its scattering in mechanically-alloyed Cu and ODS-Cu obtained by micro-pillar compression test”, Materials Transaction 61 (2020) 955-962.
- [3] Yuchen Liu, Sosuke Kondo, Hao Yu, Kiyohiro Yabuuchi, Ryuta Kasada, “Evaluation of irradiation hardening in ODS-Cu and non ODS-Cu by nanoindentation hardness test and micro-pillar compression test after self-ion Irradiation”, submitted to Nuclear Materials and Energy.
- [4] S.M.S. Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, “Microstructure and mechanical properties of mechanically alloyed ODS copper alloy for fusion material application”, Nucl. Mater. Eng., 15, (2018)17-22.
- [5] S.M.S. Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, “Brass-texture induced grain structure evolution in room temperature rolled ODS copper”, Mater. Sci. Eng. A, 749, (2019)118-128.
- [6] S.M.S. Aghamiri, S. Ukai, N. Oono, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, “Microstructure-tensile properties relationship of oxide dispersion strengthened copper after cold rolling and annealing conditions”, submitted to Mater. Sci. Eng. A.
- [7] S.M.S. Aghamiri, S.H. Zhang, S. Ukai, N. Oono, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, “Microstructure development in cryogenically rolled oxide dispersion strengthened copper”, Materialia, 9, (2020) 100520.
- [8] S.M.S. Aghamiri, S. Ukai, N. Oono, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, “Recrystallization of cold rolled oxide dispersion strengthened copper during room temperature annealing”, J. Alloy. Comp. 798, (2019) 187-193.
- [9] S.M.S. Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, “Microstructure development and high tensile properties of He/ H_2 milled oxide dispersion strengthened copper”, J. Alloy. Comp. 783, (2019) 674-679.
- [10] B. Huang, Y. Hishinuma, H. Noto, R. Kasada, N. Oono, S. Ukai and T. Muroga, “In-situ fabrication of yttria dispersed copper alloys through MA-HIP process”, Nuclear Materials and Energy, vol. 16, (2018) 168-174.
- [11] B. Huang, Y. Hishinuma, H. Noto and T. Muroga, “Mechanochemical processing of Cu- Y_2O_3 alloy by MA-HIP for heat sink materials application”, Fusion Engineering and Design, vol. 149, (2019) 33-40.
- [12] Y. Hishinuma, et.al, presented at ICFRM-19, La Jolla, USA.
- [13] B. Ma, Y. Hishinuma, Y. Shimada, H. Noto, R. Kasada, N. Oono, S. Ukai and T. Muroga, “The size dependence of microstructure and hardness on the MA powders for the MA-HIP processed Cu- Y_2O_3 dispersion-strengthened alloys”, Nuclear Materials and Energy, vol. 24, (2020) 100773..

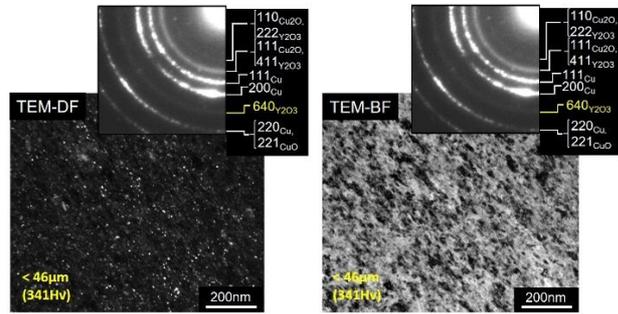


図 7 分級された微細 MA 粒子の TEM 像と SAED 図形 (DF:暗視野, BF:明視野)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 S.M.S Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga	4. 巻 783
2. 論文標題 Microstructure development and high tensile properties of He/H ₂ milled oxide dispersion strengthened copper	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 674-679
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jallcom.2018.12.298	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 S.M.S Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga	4. 巻 749
2. 論文標題 Brass-texture induced grain structure evolution in room temperature rolled ODS copper	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 118-128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.msea.2019.02.019	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 S.M.S Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga	4. 巻 15
2. 論文標題 Microstructure and mechanical properties of mechanically alloyed ODS copper alloy for fusion material application	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 17-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nme.2018.05.019	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 Bo Huang, Yoshimitsu Hishinuma, Hiroyuki Noto, Takeo Muroga	4. 巻 140
2. 論文標題 Mechanochemical processing of Cu-Y ₂ O ₃ alloy by MA-HIP for heat sink materials application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 33-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.fusengdes.2019.01.133	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 B. Huang, Y. Hishinuma, H. Noto, R. Kasada, N. Oono, S. Ukai, T. Muroga	4. 巻 16
2. 論文標題 In-situ fabrication of yttria dispersed copper alloys through MA-HIP process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 168-174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2018.06.024	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 Noto H., Yamada T., Hishinuma Y., Muroga T.	4. 巻 124
2. 論文標題 Effect of atmospheric control during MA-HIP process on mechanical properties of oxide dispersion-strengthened Cu alloy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 1024 ~ 1027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2017.04.062	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 T. Yamada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga, H. Nakamura	4. 巻 9
2. 論文標題 Development of a dispersion strengthened copper alloy using a MA-HIP method	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 455-458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nme.2016.05.007	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 Aghamiri S.M.S., Zhang S.H., Ukai S., Oono N., Kasada R., Noto H., Hishinuma Y., Muroga T.	4. 巻 9
2. 論文標題 Microstructure development in cryogenically rolled oxide dispersion strengthened copper	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 100520 ~ 100520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtla.2019.100520	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 Aghamiri S.M.S., Ukai S., Oono N., Kasada R., Noto H., Hishinuma Y., Muroga T.	4. 巻 798
2. 論文標題 Recrystallization of cold rolled oxide dispersion strengthened copper during room temperature annealing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 187 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2019.05.248	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 Liu Yuchen, Kondo Sosuke, Yu Hao, Yabuuchi Kiyohiro, Kasada Ryuta	4. 巻 61
2. 論文標題 Statistical Approach for Understanding the Effect of Specimen Size on the Yield Stress and Its Scattering in Mechanically-Alloyed Cu and ODS-Cu Obtained by Micro-Pillar Compression Test	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 955 ~ 962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MBW2019005	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 大野 直子, Aghamiri S.M.S, 鶴飼 重治, 笠田 竜太, 能登 裕之, 菱沼 良光, 室賀 健夫	4. 巻 95
2. 論文標題 ダイバータ用ODS-Cuの開発 (小特集 原型炉級核融合ダイバータおよび先進加速器コンポーネント開発に向けた共通課題と最新研究)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 370 ~ 373
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 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 B. Ma, B. Huang, Y. Hishinuma, H. Noto and T. Muroga	4. 巻 10
2. 論文標題 Influence of HIP temperature on yttria dispersed copper alloys during in-situ fabrication process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The conference proceedings of PRICM '10 (Advanced Materials and processing)	6. 最初と最後の頁 626 ~ 632
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 -

[学会発表] 計27件(うち招待講演 1件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 LIU Yuchen、近藤 創介、YU Hao、笠田 竜太、藪内 聖皓
2. 発表標題 Evaluation of Irradiation Hardening of Ion-irradiated ODS-Cu Alloy using Ultra-small Testing Technologies
3. 学会等名 日本金属学会2019春期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Liu, H. Yao, R. Kasada, S. Konishi, H. Yu, S. Kondo, S. Mohammad, N. Oono, S. Ukai, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga
2. 発表標題 Mechanical and mechano-chemical alloying of Cu-Y2O3 ODS alloy
3. 学会等名 Numat2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Liu, H. Yao, R. Kasada, S. Konishi, H. Yu, S. Kondo, S. Mohammad, N. Oono, S. Ukai, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga
2. 発表標題 Development of ODS-Cu alloys for fusion reactor divertor component
3. 学会等名 JCS-14(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 LIU Yuchen、H. Yao、笠田 竜太、YU Hao、S. Mohammad、大野 直子、鵜飼 重治、能登 裕之、菱沼 良光、室賀 健夫、近藤 創介
2. 発表標題 Size dependence of compression yield strength of micro-pillar on ODS-Cu and non-ODS-Cu fabricated by mechanical alloying
3. 学会等名 日本金属学会2018秋期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.M.S. Aghamiri, 大野直子, 鶴飼重治, 笠田竜太, 能登裕之, 菱沼良光, 室賀健夫
2. 発表標題 Comparison of microstructural development at room temperature rolled and cryogenically rolled Cu-ODS
3. 学会等名 日本金属学会2018年秋期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.M.S. Aghamiri, 大野直子, 鶴飼重治, 笠田竜太, 能登裕之, 菱沼良光, 室賀健夫
2. 発表標題 Recrystallization of rolled ODS Copper during room temperature annealing
3. 学会等名 日本金属学会2019年春期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Noto, Yoshimitsu Hishinuma, Bo Huang, Takeo Muroga
2. 発表標題 Dispersion Strengthened Copper Alloys Produced by Mechanical Alloying and Hot Isostatic Pressing for Divertor Application
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 能登裕之、菱沼良光、室賀健夫
2. 発表標題 Effect of oxygen concentration on mechanical properties of oxide dispersion-strengthened Cu alloy
3. 学会等名 18th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 笠田 竜太、八尾 栄彰、小西 哲之、Mohammad Aghamiri、大野 直子、鶴飼 重治、能登 裕之、菱沼 良光、室賀 健夫
2. 発表標題 REDOX反応制御MA法によるODS-Cu合金の創製
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Yao, Ryuta Kasada, Satoshi Konishi, Mahammad Aghamiri, Naoko Oono, Shigeharu Ukai, Hiroyuki Noto, Yoshimitsu Hishinuma, Takeo Muroga
2. 発表標題 Development of ODS-Cu using a Water-Cooled High Energy Ball Mill
3. 学会等名 18th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 八尾 栄彰、笠田 竜太、小西 哲之、大野 直子 ³ 、鶴飼 重治、能登 裕之、菱沼 良光、室賀 健夫
2. 発表標題 高エネルギー水冷ボールミルを用いたODS-Cuの開発
3. 学会等名 日本原子力学会2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S.M.S. Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga
2. 発表標題 Texture evolution of cold rolled ODS copper for the future fusion reactor
3. 学会等名 日本金属学会2018年春期講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.M.S. Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga
2. 発表標題 Development of ODS Copper by Control of Microstructure for Fusion Material Application
3. 学会等名 18th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S.M.S. Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, H. Noto, Y. Hishinuma, T. Muroga
2. 発表標題 Microstructure and tensile properties of ODS copper processed at various conditions
3. 学会等名 日本金属学会2017年秋期講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 能登裕之、 菱沼良光、 室賀 健夫
2. 発表標題 MA-HIP法による分散強化銅における不純物濃度が機械的特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本金属学会2017年春季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 能登裕之、 菱沼良光、 室賀 健夫
2. 発表標題 機械的合金化法と熱間等方加圧による分散強化銅の機械的特性
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会2016年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 能登裕之、山田哲也、菱沼良光、室賀 健夫
2. 発表標題 Development of Oxide Dispersion Strengthened-Copper Using MA-HIP Process
3. 学会等名 29th Symposium on Fusion Technology (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 能登裕之、山田哲也、菱沼良光、室賀 健夫
2. 発表標題 次期原型炉へ向けた分散強化銅材料の開発
3. 学会等名 第11回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S.M.S. Aghamiri, N. Oono, S. Ukai, R. Kasada, T. Muroga
2. 発表標題 Mechanical milling and consolidation of ODS Copper for fusion material application
3. 学会等名 日本金属学会2017年春季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryuta Kasada, Hao Yu, Sosuke Kondo, Yuchen Liu, Mohamad Aghamiri, Naoko Oono, Shigeharu Ukai, Hiroyuki Noto, Yoshimitsu Hishinuma and Takeo Muroga
2. 発表標題 Japanese R&D on ODS-Cu for divertor application
3. 学会等名 19th International Conference on Fusion Reactor Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuchen LIU, Sosuke KONDO, Hao YU, Kiyohiro YABUUCHI, Ryuta KASADA
2. 発表標題 Evaluation of irradiation hardening of ion-irradiated ODS-Cu Alloy using ultra-small testing technologies (USTT)
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuchen LIU, Sosuke KONDO, Hao YU, Kiyohiro YABUUCHI, Ryuta KASADA
2. 発表標題 Evaluation of ion irradiation effect on mechanical properties of ODS-Cu alloy using ultra-small testing technologies
3. 学会等名 19th International Conference on Fusion Reactor Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuchen LIU, Sosuke KONDO, Hao YU, Kiyohiro YABUUCHI, Ryuta KASADA
2. 発表標題 Evaluation of Irradiation Hardening Behavior for ODS-Cu Based on Statistical Analysis of Micro-Pillar Compression Test
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬 氷、菱沼 良光、能登 裕之、室賀 健夫
2. 発表標題 MA-HIP焼結プロセスによる分散強化Cu-Y2O3合金におけるHIP温度の影響
3. 学会等名 日本金属学会2019年秋期(第165回)講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 B. Ma, B. Huang, Y. Hishinuma, H. Noto and T. Muroga
2. 発表標題 Influence of HIP temperature on yttria dispersed copper alloys during in-situ fabrication process
3. 学会等名 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Material and Processing (PRICM ' 10) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Hishinuma, B. Ma, Y. Shimada, H. Noto, R. Kasada, N. Oono, S. Ukai and T. Muroga
2. 発表標題 The size dependence of microstructure and hardness on the MA powders for the MA-HIP processed Cu-Y2O3 dispersion-strengthened alloys
3. 学会等名 19th International Conference on Fusion Reactor Materials
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬 氷、菱沼 良光、能登 裕之、室賀 健夫
2. 発表標題 Effect of process control agents on characteristics of Cu-Y2O3 alloys synthesized by in-situ fabrication process
3. 学会等名 日本金属学会2020年春季(第166回)講演大会
4. 発表年 2020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	菱沼 良光 (Hishinuma Yoshimitsu) (00322529)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	

6. 研究組織（つづき）

	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	笠田 竜太 (Kasada Ryuta) (20335227)	東北大学・金属材料研究所・教授 (11301)	
研究分担者	大野 直子 (Oono Naoko) (40512489)	北海道大学・工学研究院・助教 (10101)	
研究分担者	能登 裕之 (Noto Hiroyuki) (50733739)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	鵜飼 重治 (Ukai Shigeharu) (00421529)	北海道大学・工学研究院・特任教授 (10101)	2016年度-2018年度分担者