

**Development of Zr-doped ODS-Cu alloys as divertor heat-sinks for  
DEMO fusion reactor****(2) Understanding the mechanism of oxide refinement in Zr-doped  
ODS-Cu alloys**

齋藤隼輝<sup>1</sup>、余浩<sup>1</sup>、井上耕治<sup>1</sup>、高子墨<sup>1</sup>、近藤創介<sup>1</sup>、笠田竜太<sup>1</sup>、永井康介<sup>1</sup>  
SAITO Toshiki<sup>1</sup>, YU Hao<sup>1</sup>, INOUE Koji<sup>1</sup>, GAO Zimo<sup>1</sup>, KONDO Sosuke<sup>1</sup>,  
KASADA Ryuta<sup>1</sup>, NAGAI Yasuyoshi<sup>1</sup>

(1) 東北大学 Tohoku University

**【背景と目的】**核融合炉ダイバータヒートシンク構造材料には、優れた熱伝導性、強度、耐照射性の3つの特性が求められる。ITERで用いられる析出強化CuCrZr合金では、比較的高い熱伝導性と高い強度が実現されたが、耐照射性に課題がある。そこで、原型炉以降の材料として酸化物分散強化銅合金（以下、ODS-Cu）が注目されている。ODS-Cuでは、Cu母相中に高温安定性や耐照射性に優れた酸化物粒子を微細・緻密に分散させ、強度と耐照射性の向上を図っている。当研究グループでは、ODS鉄鋼材料における知見から、Cu-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系ODS-CuにZrを添加し、酸化物粒子のさらなる微細化を図ったZr添加ODS-Cuを開発し、優れた熱伝導性と強度が両立することを示した。また、透過型電子顕微鏡（TEM）による観察から、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子より微細なY-Zr酸化物粒子の形成が示され、これらの粒子の分散による強度向上が明らかにされた [1]。本研究では、ODS-CuのZr添加による酸化物粒子微細化機構を解明することを目的とし、3次元アトムプローブ解析（3D-AP）とTEMを用いて合金中の酸化物粒子の組成の空間分布や結晶構造、母相との方位関係を調べた。

**【実験手法】**メカニカルアロイング法（MA）を用いてZr添加ODS-Cu合金粉末を作製した。作製した合金粉末を真空プラズマ焼結法により固化した。東北大学金属材料研究所大洗センターの3D-AP装置を用いて酸化物粒子の組成および空間分布を調べた。また、東北大学先端電子顕微鏡センターのTEMを用いて酸化物粒子の

結晶構造や母相との方位関係を調べた。

**【結果と考察】**3D-AP解析の結果、形成した酸化物粒子は主に直径4 nm程度の微細なY-Zr複合酸化物であった。これらは、鉄鋼中で報告されているY<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>やY<sub>4</sub>Zr<sub>3</sub>O<sub>7</sub>とは異なるZrリッチな非化学量論組成をとっており、TEMも同様の結果を示した。得られた酸化物粒子の組成は、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>系状態図上では、所謂イットリア安定化ジルコニア（YSZ）に相当していた。高分解能TEM観察結果は、酸化物粒子が蛍石型結晶構造を持つことを示しており結晶学的にも矛盾しない。さらに、Cu母相と酸化物粒子が整合界面を形成していることが確認され、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のみを添加したODS-Cu合金[2]中のY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子と比較して、界面ひずみエネルギーは50～97%減少していることが示された。これらの結果を、酸化物形成自由エネルギーの酸化物サイズ依存性に反映させたところ、酸化物粒子の臨界核半径は0.1 nm以下となり、Zrリッチな組成でも微細な酸化物粒子が形成することが示唆された。Zrリッチな組成を有する酸化物粒子が形成した要因は、MA中に十分にY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が分解されない不均一性によるものと考えられ、合金組成の最適化に向けて重要な知見が得られた。

**【結論】**Zr添加したODS-Cuにおいては母相と整合性の高いYSZが酸化物粒子として形成したために微細化したと考えられる。

[1] Gao *et al.*, *J. Alloys. Comp.*, (2022), 899

[2] Aghamiri *et al.*, *Nucl. Mater. Eng.*, (2018), 17 – 22, 15