



Title	Study on Cu-containing High Entropy Alloys for Nuclear Fusion Application [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	LEI, Yu
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第14432号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/81322">http://hdl.handle.net/2115/81322</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Lei_Yu_review.pdf (審査の要旨)



[Instructions for use](#)

## 学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 LEI Yu

審査担当者 主査教授 橋本直幸  
副査教授 三浦誠司  
副査教授 大野宗一  
副査准教授 磯部繁人

### 学位論文題名

#### Study on Cu-containing High Entropy Alloys for Nuclear Fusion Application

(核融合用の Cu 含有高エントロピー合金に関する研究)

軽水炉、高速炉、核融合炉などのエネルギー炉は、温室効果ガスによる地球温暖化に対応したエネルギー源といえるが、安全で信頼性の高い持続可能なエネルギー源として利用し続けるためには、炉構造材料の耐照射性を向上させることが必要不可欠となる。本研究は、近未来のエネルギー源として開発が進められている核融合炉構造材料について、近年、一部の条件で耐照射性が認められてきている高エントロピー合金に着目し、新規低放射化高エントロピー合金を作製しその耐照射性と有用性について考察したものである。

原子炉および次世代型エネルギー炉の安全な稼働には、高エネルギー粒子照射環境に十分な耐性を持つ構造材料が必要不可欠であり、従来構造材料として高い信頼性を有する鋼を基礎に開発が行われてきたが、材料開発のポイントは、中性子エネルギーによる材料の照射損傷とそれに起因する機械的特性劣化の抑制にある。耐照射性が最初に報告された高エントロピー合金は FCC 構造を有する CoCrFeNiMn 合金であるが、当該材料は放射化元素の Co を含有するためエネルギー炉用材料としては不適である。従って、現在も開発が進められている高エネルギー炉用 FCC 型構造材料の代替となり得る新規材料として、Co フリーの FCC 型合金の創製が必要である。一方、核融合炉用候補材料の中で FCC 構造材料を適用させるのは水冷却配管或いはダイバータであり、特に過酷な照射損傷環境に晒されるダイバータ材料の開発は急務である。本研究では、核融合炉ダイバータ用材料としての Cu 基の高エントロピー合金の開発と照射損傷機構について検討した。

供試材として、Cu, CuNi, CuNiFe, Cu0.3NiFeCr, Al0.4CuFeCrNi2 をアーク溶解法により作製した。このうち高エントロピー合金については、3 元系平衡状態図および第一原理計算から FCC 構造となる組成を選定した。溶解した試料を適切な温度で溶体化処理した後、XRD, SEM, EDS 分析と熱処理を繰り返し、構成元素濃度が均一かつ単相になる最適な熱処理温度条件を探索した。Cu, CuNi, CuNiFe, Al0.4CuFeCrNi2 の溶解まま試料の分析結果は、予想通り FCC 単相を示した。一方、Cu0.3NiFeCr 中には高 Cu 濃度領域及び高 Cr 濃度領域が出現したが、更に 1076 °C で 120 時間熱処理することで FCC 単相材料を作製できた。これらの材料について、機械的特性試験として Vickers 硬度試験および引張試験を実施し、既存の銅合金 (CuCrZr) 及び 316 オーステナイトステンレス鋼 (316SS) と比較した結果、Vickers 硬度、引張強度共に Cu, CuNi, CuNiFe, Cu0.3NiFeCr, Al0.4CuFeCrNi2 の序列となり一般的な固溶体効果を示すとともに、Al0.4CuFeCrNi2 の強度は 316SS と同レベルにあることが判明した。この結果は、Al0.4CuFeCrNi2 が FCC 型構造材料 316SS

の代替材料となり得ることを示唆している。さらに、各材料の耐照射性について検討するため、比較的高温 (500 oC) 条件でイオン (Kr+) 照射その場観察実験を実施し、材料中の照射誘起 2 次欠陥の形成・成長過程について精査した。なお、エネルギー炉用材料開発の鍵は材料中に形成する照射誘起 2 次欠陥の抑制であり、FCC 構造材料中の主要な損傷組織である積層欠陥四面体 (SFT) およびフランクグループ (FL) は、構造材料の寿命を決定する直接的因子である。一般的に、FCC 材料中におけるこれら 2 次欠陥の形成挙動は当該材料の積層欠陥エネルギー (SFE) と相関しており、Cu 等の低 SFE 金属では、中性子やイオン照射によるカスケード損傷で SFT 及び FL が高密度に形成される。Kr+ イオン照射の結果、Cu, CuNi, Cu0.3NiFeCr 中に高密度の SFT 及び FL が観察されたが、Al0.4CuFeCrNi2 中に SFT は観察されず、観察された FL もサイズが小さかった。上述したように、照射損傷 (照射誘起 2 次欠陥の形成) は材料の機械的特性劣化 (照射硬化) に直接的に影響し、その数密度とサイズの積 (Orowan の硬化式) により照射硬化が見積もられる。イオン照射した各合金の微細組織観察から照射硬化を算出したところ、照射硬化は Al0.4CuFeCrNi2, Cu0.3NiFeCr, CuNi, Cu の順に高くなり、照射前の Vickers 硬度及び引張強度の序列と逆になった。本研究で観られた高エントロピー合金における緩やかな微細組織変化は、当該合金の高 SFE に起因しており、作製した新規低放射化高エントロピー合金 Al0.4CuFeCrNi2 は、照射硬化に対して CuCrZr 及び 316SS よりも優位な耐照射性を有する材料として注目に値するものである。また、凝集エネルギー及び形成エンタルピーの計算結果は、Al0.4CuFeCrNi2 合金が安定的に存在し得ることを示した。さらに、C, N, H, He などの不純物が HEA 中に存在する場合、C は Ni 近傍、N, He, H は Cr 近傍に配置し、HEA 中の磁気モーメントを低下させる可能性があることを見出した。この結果は、核融合炉用材料として HEA を利用する際、不純物の厳密な管理が必要であることを示唆している。これらの研究結果は、過酷な高エネルギー照射下におけるダイバータ用材料開発において、耐照射性の高い低放射化高エントロピー合金という新たなオプションと材料デザイン手法に対する知見を与えるものであり、材料工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。