

補助事業番号 2024M-424
補助事業名 2024年度 高強度と延性を両立する高耐久性ハイエントロピー合金の開発 補助事業
補助事業者名 関西大学 化学生命工学部 化学・物質工学科 融体加工研究室 丸山徹

1 研究の概要

ハイエントロピー合金は高荷重に耐える高強度とともに高信頼性に必要な延性を有しており、幅広い構造部材への応用が期待され、例えば軸受け用材料や宇宙機器用材料などの応用が考えられる。そこで、それらの応用分野への実用化を目指した高強度と高延性を両立するハイエントロピー合金を開発することを目的とする。Cr, Fe, Co, Niを主要成分とするFCC構造の固溶体合金に対して、延性を損なわずに強度を向上させる合金元素を探索し、その合金に対して、第5元素としてBCC系元素を添加した合金を試作製造する。そのアプローチとして高エントロピー側からの試作製造（鋳造法）と低エントロピー側からの試作製造（メカニカルアロイング法と焼結法）により、エントロピーを制御した合金の作製・評価を行い、高耐久性のハイエントロピー合金を開発する。

2 研究の目的と背景

昨今のカーボンニュートラルに向けて再生可能エネルギーの開発は益々重要性を増しており、発電機の重要部品である軸受けの高耐久性・高信頼性が求められている。ハイエントロピー合金は高強度と高延性を両立する機械的性質の発現が期待でき、機械・装置の性能向上、特に軸受材料の性能向上に直接寄与する金属材料の高強度化を目的として引張強度1200MPa、伸び20%の合金を開発する。金属材料の機械的性質は、強度が向上するほど伸びが低下して脆くなるトレードオフの関係があるが、この関係を脱却する合金設計のバリエーションを明らかにする。熱力学計算、温度履歴を変化させた製造プロセスによって化学組成とエントロピーを制御した合金の作製・評価を行い、高耐久性のハイエントロピー合金を開発する。

3 研究内容

(1) 状態図計算による添加元素の探索

CrFeCoNi系合金に対してBCC安定化元素であるTi, Moを添加するとFCC相に固溶する量が推定された。一方で添加量が過剰になるとσ相などの脆化が懸念される相の生成が予測された。この結果より、鋳造材においてはfcc固溶体が得られるMoは約10at%程度と推定された。

<https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/melt/2024hea/>

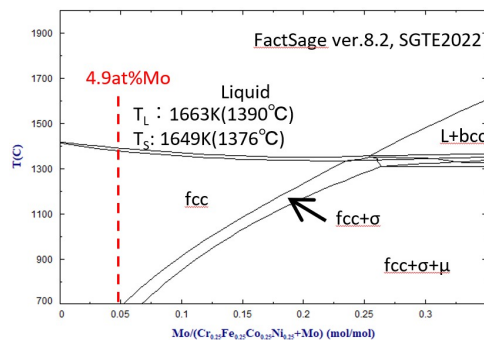


図 CrFeCoNi-Mo系合金計算状態図

(2) 鑄造法による高エントロピー側からの候補合金試作

<https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/melt/2024hea/>

CrFeCoNi合金にMoを添加した結果、Moの歩留まりは90%以上であり狙い通りの鑄造材が得られた。

(3) メカニカルアロイング (MA) 法と放電プラズマ焼結法を用いた低エントロピー側からの候補合金試作 <https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/melt/2024hea/>

Ti添加CrFeCoNi合金焼結材を作製した。粉末を出発材とした固相プロセスのため、概ね狙い通りの化学組成を有する焼結材が得られたが、MA時と考えられる炭素の混入もみられた。Moを添加したCrFeCoNi合金焼結は、相対密度約85%と緻密性に劣っていたが、概ね狙い通りの化学組成を有する焼結材が得られた。Ti添加合金と同様炭素の混入がみられた。

(4) 鑄造材および焼結材製造による候補合金評価

<https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/melt/2024hea/>

Mo添加CrFeCoNi合金鑄造材では、Mo添加量の増加とともに機械的性質が向上することを明らかにした。さらに熱処理を施した合金の金属組織、結晶構造及び機械的性質を評価した結果、Moリッチの相が低減し、強度と延性がともに向上することを明らかにした。

焼結材について、Ti、Mo添加合金ともMA時間の増加とともに硬さが増加し、Ti添加合金では最大900HVの硬さ、Mo添加合金では最大1000HVの硬さを示した。Ti系、Mo系いずれも粉末は、MA時間とともに結晶子サイズは減少、転位密度は増加し、焼結材では粉末と比較して結晶子サイズは増加、転位密度は減少した。

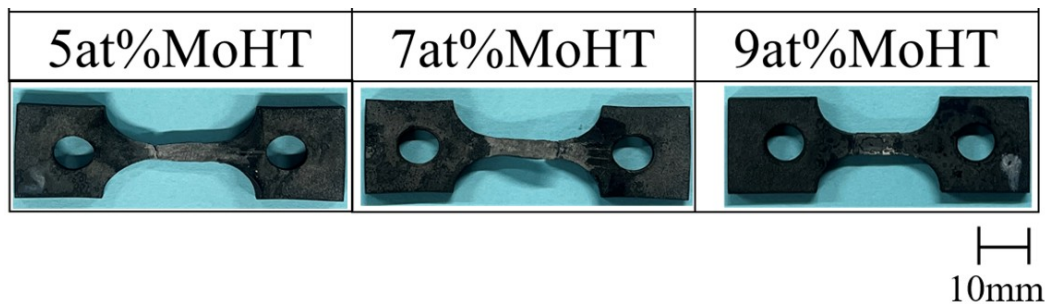


図 高強度・高延性を示したハイエントロピー合金の引張試験後の試験片外観

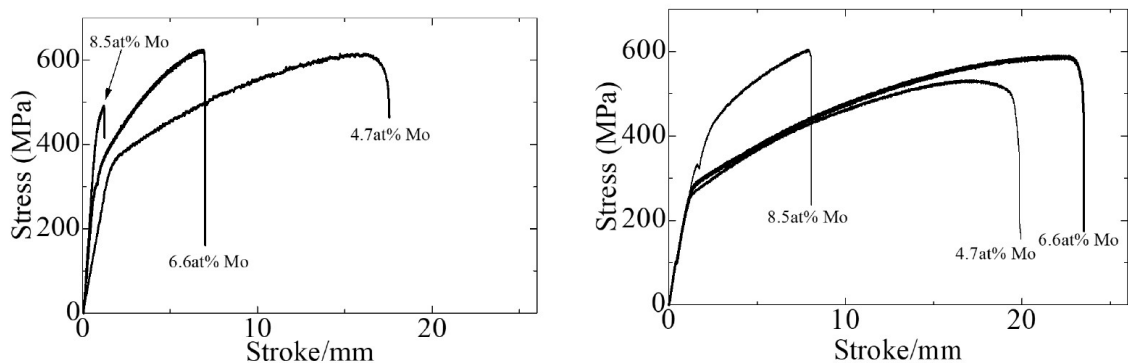


図 CrFeCoNi-Mo合金鑄造材 (左) 及び熱処理材 (右) の応力-ストローク曲線

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

開発したCrFeCoNi-Mo合金あるいはCrFeCoNi-Ti合金は高強度と高延性を両立することから、軸受けなど高耐久性と高信頼性が求められる構造部材に用いることが期待される。例えば、風力発電等で使用される軸受材料の性能向上によって、カーボンニュートラルの推進に貢献することが考えられる。また、これらの合金は極低温環境下においても高強度と高延性を発現することが考えられ、極環境下に暴露される宇宙機器への応用が期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代表者は鑄造工学を熱力学の研究に従事した経験を生かして鑄造法で作製する入エントロピー合金の熱力学的設計を行った。鑄造工学と熱力学の分野の研究を複合分野の研究として位置づけ、合金開発を行った。さらに共同研究者の研究歴でつちかわれたMA法と焼結法の理論と実践が合金開発の推進に寄与した。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- 1) 神野舞香, 丸山徹, CrFeCoNi-Mo系ハイエントロピー合金の鑄放し組織と機械的性質に及ぼすMoの影響, 日本鑄造工学会第184回全国講演大会, 87 (2024年10月27日, 富山国際会議場)
- 2) 藤井明都, 西本明生, CoCrFeNiTi ハイエントロピー焼結合金に対するボールミリング時間の影響, 日本金属学会第176回春期講演大会, P39, (2025年3月8日, 東京都立大学南大沢キャンパス)
- 3) 小畑奈々, 藤井明都, 西本明生, CoCrFeNiMoハイエントロピー焼結合金に対するボールミリング時間の影響, 日本金属学会第176回春期講演大会, P112, (2025年3月8日, 東京都立大学南大沢キャンパス)
- 4) 丸山徹, 神野舞香, CrFeCoNi-Mo合金鑄造材の機械的性質に及ぼすMoの影響, 日本金属学会第176回春期講演大会, P116, (2025年3月8日, 東京都立大学南大沢キャンパス)

7 補助事業に係る成果物

- (1) 補助事業により作成したもの

該当なし

- (2) (1) 以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 関西大学化学生命工学部

(カンサイダイガクカガクセイメイコウガクブ)

住 所： 〒564-8680

大阪府吹田市山手町3-3-35

担 当 者： 教授 丸山 徹 (マルヤマトオル)

担 当 部 署： 化学・物質工学学科 (カガクブッシツコウガッカ)

E - m a i l : tmaru@kansai-u.ac.jp

U R L : <https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/melt/>