



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                     |                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title               | Helium and hydrogen effect on the microstructural evolution and mechanical property of irradiated Co-free FCC medium entropy alloys for nuclear application [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review] |
| Author(s)           | 牛, 孟珂                                                                                                                                                                                                                          |
| Degree Grantor      | 北海道大学                                                                                                                                                                                                                          |
| Degree Name         | 博士(工学)                                                                                                                                                                                                                         |
| Dissertation Number | 甲第16340号                                                                                                                                                                                                                       |
| Issue Date          | 2025-03-25                                                                                                                                                                                                                     |
| Doc URL             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/95099">https://hdl.handle.net/2115/95099</a>                                                                                                                                              |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>                                                                                                                        |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                                                                                                                                |
| File Information    | NIU_Mengke_review.pdf, 審査の要旨                                                                                                                                                                                                   |



## 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      NIU Mengke

審査担当者    主   査   教   授      橋本 直幸  
                  副   査   教   授      三浦 誠司  
                  副   査   准教授      坂口 紀史  
                  副   査   准教授      磯部 繁人

## 学位論文題名

Helium and hydrogen effect on the microstructural evolution and mechanical property of irradiated  
Co-free FCC medium entropy alloys for nuclear application

(原子炉用 Co フリー FCC ミディアムエントロピー合金の照射下における微細組織変化と機械的  
性に及ぼすヘリウムと水素の影響)

先進的な原子力発電システムの研究開発は、次世代の原子炉の開発にとって極めて重要であり、特に高温及び高線量での長期使用には、耐腐食性と耐放射線性に優れた新規構造材料の必要性が高まっている。近年、ミディアムエントロピー合金 (MEA) 及びハイエントロピー合金 (HEA) は、高温において優れた機械的特性を有することが報告され、強度、延性、耐腐食性に優れた HEA は、高温核分裂炉または核融合炉の構造材料として有望で魅力的な材料と考えられている。一方、照射による特性変化に関する大きな懸念材料の一つとして、中性子照射下での核変換によって大量に生成するガス原子 (He 及び H) の微細組織変化に及ぼす影響が挙げられる。この現象により、さらなるスウェリング及び照射脆化の進行が予想される。本研究では、M/HEA における微細組織と機械的特性に及ぼす He と H の影響について調査した。

低放射化を考慮した研究対象試料として、FCC 系 M/HEA である  $\text{Cr}_{0.65}\text{FeMnNi}$ 、 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$ 、 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMn}_{1.3}\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMn}_{1.3}\text{Ni}_{1.3}$  をアーク溶解法により作製し、 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  で 48 時間焼鈍した後、冷間圧延した。続いて、直径 3mm のディスクに打ち抜き、電解研磨により電子顕微鏡観察用薄膜を作製した。照射下における HEA の微細構造変化に対する He/dpa 比の影響を精査するため、 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  及び 316L 鋼に対し  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  で  $\text{He}^{+}$  を予注入した後、 $\text{Fe}^{2+}$  を照射した。これらの試料について透過型電子顕微鏡を用いて微細組織及び構造解析を行い、照射誘起ブラックドット、転位ループ及びキャビティの形成・成長挙動を精査した結果、He/dpa 比の増加に伴い自己格子間原子 (SIA) と He-V 複合体との結合エネルギーの減少が確認された。これは、マトリクス内において SIA クラスターの核形成と成長が促進され、He 予注入合金中に形成したブラックドットの数密度が増加したものと推察される。 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  中に形成したブラックドットの数密度変化は、316L において観察されたものよりもはるかに小さい。これは、照射によって導入された点欠陥が  $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  中に存在する格子歪みと反応することによる自己修復プロセスに起因する可能性を示すものである。

最後に、 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  と 316L に対して  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  でシングルビーム ( $\text{Fe}^{3+}$ )、デュアルビーム ( $\text{Fe}^{3+}+\text{He}^{+}$ ) 及びトリプルビーム ( $\text{Fe}^{3+}+\text{He}^{+}+\text{H}^{+}$ ) 照射実験を行い、He 及び H が HEA と 316L の照射硬化とスウェリングに与える影響を調査した。ナノインデンテーション試験の結果、 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  の照射硬

化は 316L よりも低く、また He は  $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  の照射硬化に寄与するが、H が共存する場合は硬度低下することが判明した。一方、 $\text{Fe}^{3+}$  照射実験では  $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  中に大サイズのボイド形成が見られたが、 $\text{Fe}^{3+}+\text{He}^+$  及び  $\text{Fe}^{3+}+\text{He}^++\text{H}^+$  照射実験では、 $\text{Cr}_{0.8}\text{FeMnNi}$  及び 316L 中に微小バブルが高密度に形成し、He 及び H の共存がバブルの核生成を促進することで優れた耐スウェリング特性を発現することが分かった。これは、HEA 中に存在する大きな格子歪みと He 及び H による空孔捕獲の相乗効果に起因するものと推察した。

この研究は、He の存在による He/dpa 比の変化が He-V クラスターと空孔との結合エネルギーに大きな影響を及ぼし、マトリクス中における格子間型二次欠陥の増加を招くことを明示した。さらにバルク照射実験では、He 及び H が空孔と強い相互作用を有する結果、高温におけるバブルの核形成の大幅な促進が見られ、HEA のスウェリングは低減した。これは、He 及び H の相乗効果と HEA 中に存在する格子歪みによって点欠陥の長距離拡散が抑制されたことを反映しており、結果的に 316L よりも耐照射性が向上した。

以上より、本研究では先進原子炉用構造材料としての新規 HEA 中に形成する核変換ガス原子 (He 及び H) のスウェリングに対する影響について実験的に調査し、He 及び H の効果的な空孔捕獲と HEA 中に存在する格子歪みが HEA の耐スウェリング特性の大幅な向上に起因していることが示した。これにより、従来用いられてきた原子炉構造材料と比較して耐照射性及び耐スウェリング性の高い新規材料として、HEA が応用可能であることを示した。これらの研究結果は、過酷な中性子エネルギー環境下における基幹炉構造材料開発について新たな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。