HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Research and development of diffusion bonding between high entropy alloys and stainless steel for nuclear application [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	SUN, Haotian
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16115号
Issue Date	2024-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93682
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	SUN_Haotian_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　SUN Haotian

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　礒部 繁人

学位論文題名

Research and development of diffusion bonding between high entropy alloys and stainless steel for nuclear application
(原子力用ハイエントロピー合金とステンレス鋼の拡散接合研究)

急速に増加する世界のエネルギー需要に対応するには、安全で信頼性が高く経済的かつ先進的な核分裂及び核融合発電の稼働が求められ、低炭素エネルギー社会における重要な要素と考えられている。原子力発電所やその関連分野において、構造体は単一の部材ではなく、ほとんどが複数の部材で構成されるため、部材を構造体として形作る方法として、接合技術の発展及び接合条件の最適化が重要と言える。近年、耐照射性と耐食性・耐酸化性に優れたハイエントロピー合金 (HEA) の原子炉構造体への応用研究が行われているが、HEA の設計や性能に関する研究と比較して、HEA の接合に関する研究は相対的に不足していると言わざるを得ない。本研究では、HEA の原子炉への適用範囲を拡大するための接合技術として、HEA と既存構造材料との拡散接合に着目した。拡散接合は、原子炉構造体を作製する際に用いられる手法で、この手法による HEA と異種材料との健全な接合体の作製を目途にした。

基本材料として、等原子比の CoCrNi 系高濃度固溶体合金 (CSSA) である CoCrFeNiMn、CoCrFeNi、及び CoCrNi を採用し、放電プラズマ焼結 (SPS) 法を用いた拡散接合により、316 ステンレス鋼との異種材料接合体を作製した。調査する媒介変数として、接合温度および接合界面における溶質原子濃度に着目し、それらが接合部の拡散挙動と引張特性に与える影響を精査した。

CSSA/316SS 接合部の引張強度は、接合温度の上昇に伴って徐々に増加した。さらに、0.8Tm で接合された接合部の引張強度は全て 316SS の引張強度の 8 割以上を示した。同時に、0.8Tm で接合した場合、接合界面において十分な溶質原子の拡散と粒成長を伴い、接合界面にしばしば現れるボイドの形成を抑制したと考えられる。さらに、溶質原子の拡散領域には連続した FCC 固溶体構造が形成し、接合部の引張特性の向上に大きく寄与したことが示唆された。

次に、本研究では、SPS 法を用いて $Cr_{0.8}FeMnNi$ ミディアムエントロピー合金 (MEA) と 316SS の拡散接合を行い、接合界面近傍における Ni 中間層の有無を調査した。直接接合では界面に Cr_2O_3 および Mn_3O_4 酸化物が形成し、この領域における応力集中を誘発し、結果的に引張強度の低下を招いた。一方、この領域に Ni 中間層が存在する場合、酸化物サイズの縮小が見られ、これが溶質原子の拡散促進と応力集中の緩和に寄与したことで、機械的特性が大幅な改善が見られた。当該接合体における最適な接合条件は 820 ℃/60 分/25MPa であり、316SS と同程度の引張強度と伸びを有する接合部が得られた。さらに、拡散挙動、拡散層の成長および各原子と拡散層における拡散の

活性化エネルギーを見積もった結果、Ni 中間層を用いた接合は、直接拡散接合と比較して各元素における拡散の活性化エネルギーが低下することが判明した。

最後に、本研究では、拡散接合された $Cr_{0.8}FeMn_{1.3}Ni_{1.3}$ HEA/316SS 接合部に存在する転位の拡散挙動に及ぼす影響について調査した。異なる加工率で冷間加工された接合部と 316 ステンレス鋼は同程度の結晶粒サイズを有しており、加工率の増加に伴い転位密度も増加した。さらに、接合界面には Mn-O 酸化物および Cr-Mn-O 酸化物の形成が確認された。接合界面近傍の溶質濃度分布を調査した結果、接合界面を通過する溶質原子の拡散距離が加工率の増加に伴って増加することが分かった。この現象は、おそらく転位が溶質原子の拡散チャンネルとして寄与したためと推察される。二次加工率が 2 割程度のとき、接合界面を通る溶質原子の拡散距離は加工しない場合と比較して 2 倍弱まで増加した。これらの結果は、HEA ベースの金属中に多くの転位密度が存在する場合、結晶構造内の溶質原子の拡散が促進されることにより、接合界面近傍の引張強度が増加したことを示唆している。

これらの結果から、HEA/316SS 拡散接合界面は、適切な接合条件を選択することで優れた接合強度を持ちうることが示され、先進的な原子炉構造体の接合部に適用可能な材料となり得ることが分かった。

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ハイエントロピー合金と従来鋼との異種接合技術開発に着手し、健全な接合界面を有する接合体の製造条件を得た。これにより、従来鋼を用いた原子炉構造材料の溶接・接合部における耐照射性の向上と高温強度特性の維持を担保する材料の創製に成功した。これを要するに、著者は、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知見を得たものであり、原子力用新規構造材料の開発に対して材料工学の寄与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あるものと認める。