

原子力プラント安全性の向上に対応できる高耐食性 EHP ステンレス鋼の適用技術に関する研究開発

研究代表者 中山 準平 株式会社神戸製鋼所エンジニアリング事業部門
参画機関 株式会社神戸製鋼所、国立大学法人大阪大学、学校法人福井工業大学、
株式会社三菱総合研究所
研究開発期間 平成24年度～27年度

1. 研究開発の背景とねらい

超高純度 (Extra High Purity) オーステナイト系ステンレス鋼 (以下、EHP 鋼) は核燃料再処理施設のような高濃度の沸騰硝酸環境において優れた耐粒界腐食性を示し、さらに溶接時の耐高温割れ感受性にも優れていることを提案した¹⁾。さらに、実用化研究を進め、実機の主要部材にも適用可能であることを報告した²⁾。しかしながら、EHP 化による弊害として機械的強度の低下や製造コストの増大が課題である。したがって、原子力システムの圧力バウンダリーに EHP 鋼を適用するためには機械的強度の向上が必須条件となる。そこで、本事業では、これらの課題を克服して原子力プラント安全性の向上に資するため、耐食性と耐照射性に優れた高 Cr-高 Ni 系の EHP 鋼を現行のステンレス鋼等の表面に接合することにより、実機に適用できる複合材料を開発する。この技術は現行原子力プラント機器表面に EHP 鋼を肉盛りする技術としても適用でき、既存の原子力システムの老朽化対策、補修対策としての安全基盤技術となると考えられる。

2. 研究開発成果

2. 1 EHP合金応用部材の開発

本クラッド技術開発においては、合せ材として25Cr-35Ni系EHP鋼、またベース材として圧力容器に広く使用されている低合金鋼のASTM A533 B鋼及び炉心構造材のSUS316L鋼を選定した。EHP鋼は高純度電解Fe、金属Ni及び電解Crを溶解原料として真空誘導溶解炉にて約120kgfインゴット溶製後、それらを溶解電極としてエレクトロンビーム溶解装置 (EB-CHR) により再溶解して得た。得られた板材についてチェック分析、マイクロ組織観察、硬さ測定、常・高温引張試験、シャルピー衝撃試験、耐食性試験 (コリオ、ストラウス) 及びヤング率・ポアソン比などの材料特性、さらにクラッド技術開発に必要な基礎物性 (線膨張率、熱伝導率) の評価試験を実施した。EHP鋼のコリオ腐食試験の結果、腐食速度が $2.6\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ と小さく、試験時間を増加しても全く変化しなかった。さらに、試験後の表面SEM観察でも腐食の様相が認められず、優れた耐食性を示した。また、線膨張率はA533B鋼<EHP鋼<SUS316L鋼の順であった。常温の熱伝導率はEHP鋼及びSUS316L鋼とA533B鋼とで大きく異なり、前者が約 $14\text{w}/\text{m}\cdot\text{K}$ であるのに対して、後者は約 $45\text{w}/\text{m}\cdot\text{K}$ であった。さらに、EHP鋼及びSUS316L鋼の熱伝導率は温度とともに増加するのに対して、A533B鋼は減少した (変態点近傍での特異現象を除く)。

得られた EHP 鋼板を合せ材、A533B 鋼板もしくは SUS316 鋼板をベース材としてクラッドの製造試験を実施した。実施したクラッド法は以下のとおりである。

(a) 熱間圧延クラッド法

表 1 に示す板組み及び圧延条件について熱間圧延法によるクラッド材の製造試験を行った。EHP 鋼と A533B 鋼の板組みによるクラッド材については、線膨張係数の相違による熱間圧延時の反りや残留応力生成の軽減、さらに両鋼種の C 量の相違により A533B 鋼の C が EHP 鋼に拡散

して耐食性などを阻害することを防止するため、Niをインサートして圧延した。圧延後、A533B鋼をベース材とする片面クラッドはEHP鋼側を凸状に反っていた。これらはレベラにより平坦に矯正することができた。一方、SUS316L鋼をベース材とする片面クラッドや両面クラッドには反りは認められなかった。得られたクラッド材について超音波探傷試験、組織観察、硬さ測定、曲げ試験、せん断強さ試験などを実施し、以下のような結果を得た。

超音波探傷試験の結果、エッジ部約20mmを除いて非接合部は認められず、健全であった。曲げ試験の結果、いずれのクラッド鋼も割れは生じず、健全であった。せん断強さはいずれの板組みにおいても「1100°C-90%圧下」>「1100°C-80%圧下」>「1200°C-80%圧下」の順であった。これらは、JIS G 3601「ステンレスクラッド鋼」で定めているクラッド鋼のせん断強さ200MPa以上であり、クラッド鋼として良好なせん断強さ特性を示した。ベース材と合せ材の接合部界面でせん断応力が負荷されるようなせん断引張試験の結果、いずれの試験条件においても合せ材であるEHP鋼の平行部で破断した。これは、クラッド材の引張強さ<せん断強さであったためと考えられる。

表1 熱間圧延法によるクラッド材の製造試験条件

板組み		圧延条件 (温度, 圧下率)			1100°C		1200°C	
		90%	80%	70%	80%	70%		
片面	EHP鋼/A533B鋼	▲	▲	○	▲			
〃	EHP鋼/Ni/A533B鋼	○	○	○	○	○		
〃	EHP鋼/SUS316L鋼	▲	▲	○	▲	○		
両面	EHP鋼/A533B鋼/EHP鋼	○		○				
〃	EHP鋼/Ni/A533B鋼/Ni/EHP鋼	○		○				
〃	EHP鋼/316L鋼/EHP鋼	○		○				

合せ材(EHP鋼)：板厚20mm/ベース材：板厚30mm/Niインサート材：2mm

※ ▲印はH24年度に実施

(b) 熱間押出クラッド法

熱間押出法によるクラッド材の製造試験を行った。φ50×125mmLのEHP鋼の丸棒の外周を外径72mm/内径50mmのA533B鋼もしくはSUS316鋼製の円筒及び上・下蓋で覆い、これらをEB溶接して押出用小型ビレットを製作し、1100°C×4h加熱後、φ34mmのダイスを用いて押出した。なお、A533B鋼との組合せに関しては、板厚2mmのNiをインサートしたものも製作した。熱間押出後のクラッド材には外観上の欠陥は認められなかった。

(c) 爆発圧着クラッド法

表2に示す板組みについて爆着クラッド法による製造試験を行った。写真1に爆発圧着後の外観写真の例を示す。得られたクラッド材について超音波探傷試験、組織観察、硬さ測定、曲げ試験、せん断強さ試験などを実施し、以下のような結果を得た(H24年度試作材。H25年度材は今後実施予定)。超音波探傷試験の結果、いずれのクラッド鋼も周囲に通常認められる程度の非接合部分が存在したが、内部に異常は認められず、健全であった。合せ材の板厚が厚くなるにつれて外周の非接合部分は広くなる傾向を示した(写真1)。

ミクロ組織観察の結果、いずれのクラッド材もクラッド界面は起爆側では直線状であり、中央及び終爆側では波形状であった。界面部には割れや過剰な合金層は認められず、健全であった。せん断強さ試験の結果、ベース材が SUS316L 鋼のクラッド材のせん断強さは 413MPa (平均値)、ベース材が A533B 鋼の引張強さは 407MPa (平均値) であった。いずれも JIS G 3601「ステンレスクラッド鋼」で定めているクラッド鋼のせん断強さ 200MPa 以上であり、ステンレスクラッド鋼として良好なせん断強さを有していた (表 3)。

表 2 爆発圧着法によるクラッド材の製造試験条件

板組み	EHP 鋼の板厚/t		
	3mm	6mm	12mm
EHP 鋼(t)/A533B 鋼(20mm)	▲	○	○
EHP 鋼(t)/Ni/A533B 鋼(20mm)	○	○	○
EHP 鋼(t)/SUS316L 鋼(20mm)	▲	○	○

※ ▲印は H24 年度に実施

写真 1 爆発圧着法によるクラッド材の外観

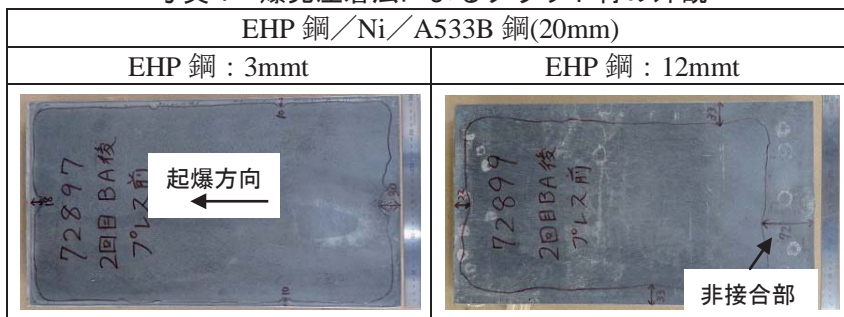


表 3 爆発圧着法によるクラッド材のせん断強さ試験結果

板組み	せん断強度 (N/mm ²)	破断箇所
EHP 鋼/A533B 鋼	411	素材 (EHP 鋼)
	402	素材 (EHP 鋼)
EHP 鋼/SUS316L 鋼	422	素材 (EHP 鋼)
	404	素材 (EHP 鋼)

2. 2 開発材の環境適用性評価 (再委託先 : 三菱総合研究所)

クラッド材界面における相互拡散や熱応力の影響を簡易計算し、模擬試験装置の製作に必要なクラッド材各層の厚さの最適性や応力分布の評価を行い、以下の結果を得た。同一系統の現行ステンレス鋼に EHP 鋼でクラッド化する場合は、供用温度が 300°C 以下では接合界面で大きな熱応力は発生せず、クラッド材板厚の制限も小さいが、供用温度が 300°C 以上では母材との組成の違いや熱膨張係数の違いにより接合界面で大きな熱応力が発生する。それはフェライト系材料の A533B 鋼に EHP 鋼でクラッド化する場合も同様である。その対策として、軟質の Ni 板をインサートすることが異材接合の課題となる応力の低減や相互拡散による EHP 鋼の変質の抑制を図るのに有効である事が明確となった。また、接合時に合せ材とベース材間で C が拡散しやすく、接合界面付近の引張強度が低下する。拡散層の厚さは熱処理温度や時間により増加し、最大で 100 μm 程度となる。

また、実機条件を模擬した γ 線照射場の 400~600°C の水蒸気の流動条件下の SUS316L 薄板材では、γ 線照射線量率の低下とともに水素発生量は減少し、γ 線照射線量率一定の条件では、水素発生量は水蒸気流量に比例して増加した。

2. 3 接合技術の選定評価

(1) 手法開発・評価試験 (再委託先 : 大阪大学)

EHP 鋼のレーザクラッド溶接金属の施工健全性を評価するため、TIG アーク溶接金属（H24 年度）及びレーザ溶接金属についてもっとも重要な因子である凝固割れ感受性を調査した。このため、新たにバレストレイン試験機にファイバーレーザ溶接機（最大出力：6kW）を組合せたレーザバレストレイン試験装置を開発した。レーザ溶接速度が高速であるため、レーザ照射とひずみ付加のタイミング及び割れ発生時点は高速度カメラを用いたその場観察により調整した。本手法により Cr_{eq}/Ni_{eq} 比を変化させた SUS304 系 EHP 鋼及び SUS316 系 EHP 鋼の溶接金属の凝固割れ感受性に及ぼす溶接条件（特に、溶接速度）の影響を評価した結果、いずれの鋼種及び溶接条件においても凝固割れ感受性そのものは非常に低く、実施工での凝固割れの発生は十分阻止できるレベルに留まるものと判断された。なお、レーザ溶接速度の増加により凝固割れ感受性が増大する傾向を示した。これらは、溶接速度の増加に伴い δ フェライト量が減少すること（加えて、凝固モードが FA→AF に変化する）により残留融液への不純物元素（C、P、S など）の凝固偏析量が増加するためであると推察される（ δ フェライトへの不純物元素の固溶限が高いことに起因する）。

（2）接合技術解析評価（再委託先：福井工業大学）

クラッド溶接金属の特性に大きな影響を及ぼす溶接施工条件及び母材希釈（すなわち Cr_{eq}/Ni_{eq} 比）の影響を系統的に評価するため、 Cr_{eq}/Ni_{eq} 比を変化させた SUS304 系 EHP 系及び SUS316 系 EHP 系鋼について TIG アーク溶接及び走行速度を変化させてレーザ溶接を行った溶接金属のマイクロ組織観察及び δ フェライト量測定を実施した。これらの室温組織はいずれもオーステナイトマトリックスに少量の δ フェライト相が存在する二相組織となっているが、 δ フェライト相の存在状況から溶接金属の凝固形態はオーステナイト初晶凝固（AF モード）とフェライト初晶凝固（FA モード）に分類できる。 Cr_{eq}/Ni_{eq} 比が高い鋼種では凝固モードがフェライト初晶凝固（FA モード）となる傾向が見られた。また、SUS316 系 EHP 鋼では、レーザ走行速度が増加すると FA モード→AF モード（→A モード）に遷移した。以上のように、合金組成（母材希釈）のみならず、レーザ溶接施工条件が溶接金属のマイクロ組織、特に δ フェライト量及び凝固モードに大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

3. 今後の展望

得られた熱間圧延、熱間押出及び爆発圧着法によるクラッド材の材料特性を評価する。また、これらのクラッド材を用いて TIG 及びレーザ溶接継手を製作し、さらに継手性能を評価する。

軽水炉の炉心材料の照射効果等の実機の使用条件に関する詳細解析により適用材の要求特性を検討する。安全性上重要な γ 線照射場の高温水蒸気の流動条件下試験及び照射時効脆化の模擬評価試験を実施する。

4. 参考文献

- 1) 平成17～20年度 文部科学省 原子力システム研究開発事業「次世代再処理機器用耐硝酸性材料技術の研究開発」
- 2) 平成21～23年度 文部科学省 原子力システム研究開発事業「次世代再処理機器用超高純度EHP合金の実用化に関する研究開発」