

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

(受託者)株式会社 神戸製鋼所

(研究代表者)中山準平 エンジニアリング事業部門 原子力・CWD 本部 原子力・復興PJ 部長
(再委託先) 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 鋼と称す) 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おり、先の研究事業において実用化研究を進めて、再処理機器の主要部材にも適用可能であることを明確にした。しかしながら、原子力システムの EHP 化を広く進めるためには、機械的強度の低下及び製造コストの増大という課題があった。

そこで、本事業では、これらの課題を克服し、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した。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

25Cr-35Ni 系 EHP 鋼を合せ材、JIS G 3120 SQV2A (ASTM A533B 鋼相当材。以下、SQV2A と称す) もしくは SUS316L ステンレス鋼をベース材として熱間圧延法および爆発圧着法により実機部材を模擬できる規模の大型クラッド材を試作し、接合健全性および溶接健全性などを評価した。

(a) クラッド材の試作および評価試験

大型クラッド材の試作およびその評価試験に用いる 25Cr-35Ni-EHP 鋼を真空誘導溶解 (VIM) -真空アーク再溶解 (VAR) により溶製した。得られた約 2 t 鋼塊を熱間鍛造、熱間圧延および溶体化処理により合せ材用素材に加工した。圧力容器を想定した場合には当該機器に使用されている低合金鋼の一種である SQV2A、もしくはシュラウドや再循環系配管などの炉心構造材を想定した場合には SUS316L をベース材として表 1 および写真 1 に示す大型クラッド材を試作した。

表 1 実施したクラッド試作の概略条件

クラッド法	板組	寸法 [素材→圧延後：重量]
熱間圧延	① EHP/SQV2A	(29/260)t×1,200w×1,400L →(8/72)t×1,000w×3,000L：約 1,920kg
	② EHP/SUS316L	(29/110)t×1,260w×1,400L →(6/24)t×1,000w×3,000L：約 720kg →3,000L の内の 2,000L を φ318 の溶接管に加工
	③ EHP/SUS316L/EHP	(12.6/110/12.6)t×1,220w×1,380L →(3/32/3)t×1,000w×3,000L：約 910kg
爆発圧着	④ EHP/Ni/SQV2A	(8/2/100)t×900w×1,970L：約 1,560kg
	⑤ EHP/SUS316L (管)	(4/31)t×φ318×1,000H：約 250kg
	⑥ EHP/SUS316L/EHP	(3/32/3)t×840w×2,000L：約 510kg

(a) 圧延クラッド材③
38t × 1,000w × 3,000L



(b) 爆着クラッド材⑤
35t × φ 318 × 1,000L
(管内面にEHP鋼の合せ材)



写真 1 試作したクラッド材の外観写真の例

得られたクラッド材に対して UT 法などの非破壊検査による接合状態の調査、断面組織観察、ビッカース硬さ分布測定、引張試験、曲げ試験、せん断試験およびシャルピー衝撃試験を実施した。非破壊検査では、いずれのクラッド材も良好な接合状況が得られていることを確認した。また、圧延クラッド材では、接合界面には異相や硬さの増大は認められなかった。一方、爆着クラッド材では、爆着時の塑性変形によるものと推定される界面近傍の黒色状組織および硬さの増加が認められた。せん断強さは圧延クラッド材および爆着クラッド材とも JIS G 3601 に規定された値 200N/mm^2 を満足した。引張強さも JIS G 3601 の規定値を満足した。シャルピー衝撃試験に関して、例えば、板組「EHP/SQV2A」のクラッド合材としての吸収エネルギーは JIS 3120 に規定された値より十分大きい。また、界面シャルピー衝撃吸収エネルギー値は圧延クラッド材では 40J 程度であるが、爆着クラッド材では圧延クラッド材に比べて高い界面吸収エネルギーが得られた。

(b) クラッド材の溶接継手の製作および評価試験

得られたクラッド材について、ベース材が SQV2A の場合には溶接ワイヤ US63S/PF200 によるサブマージアーク溶接、また SUS316L の場合には溶加棒 TG-S316L による TIG 溶接の溶接試験を実施した。なお、25Cr-35Ni-EHP 鋼の合せ材部は共材溶接材料を用いた。

得られた溶接継手に対して超音波探傷試験 (UT) もしくは放射線透過試験 (RT) (板厚により使い分け)、断面組織観察、ビッカース硬さ分布測定、引張試験、曲げ試験およびシャルピー衝撃試験を実施した。クラッド材①および④に対して実施した UT 検査では M 線を超えるきずを認めず、また、クラッド材②、③、⑤および⑥に対して実施した RT 検査では全てが 1 類判定であり、いずれのクラッド材においても健全な溶接継手を得た。溶接継手の引張試験の結果、圧延クラッド材③を除いて溶金部破断であり、圧延クラッド材の継手強度はクラッド材と同等、爆着クラッド材の継手強度はクラッド材より小さいが、規定下限値は満足していた。

以上のように、25Cr-35Ni-EHP 鋼を合せ材、SQV2A もしくは SUS316L をベース材とする熱間圧延法および爆発圧着法により実機部材を模擬できる規模の大型クラッド材を試作し、接合健全性および溶接健全性などを評価した結果、概ね良好なクラッド材を得ることができた。

2. 2 開発材の環境適用性評価 (再委託先：三菱総合研究所)

中高温域で供用する新型炉等のクラッド構造材への適用を念頭に、平成 25 年度に実験室規模で試作したクラッド材 (板組「25Cr-35Ni-EHP 鋼/SUS316L」) に対して熱時効試験を実施した。EHP 鋼の主要元素である Cr、Ni、Fe について、クラッド界面を EDS 分析した結果、熱時効前

後で大きな違いは見られなかった。また、熱時効材に対してシャルピー衝撃試験を行った結果、EHP 鋼の破面は延性破壊であったが、接合部の剥離形態は脆性破壊であった（図 1、2）。数値解析では、熱時効後の EHP 鋼および SUS316L の単材におけるシャルピー衝撃試験結果に対する解析で得られた物性値を用いて板組「EHP 鋼/SUS316L」クラッド材の耐衝撃健全性評価に資する解析のモデル化を行い、試解析を実施して課題を抽出した（図 3）。

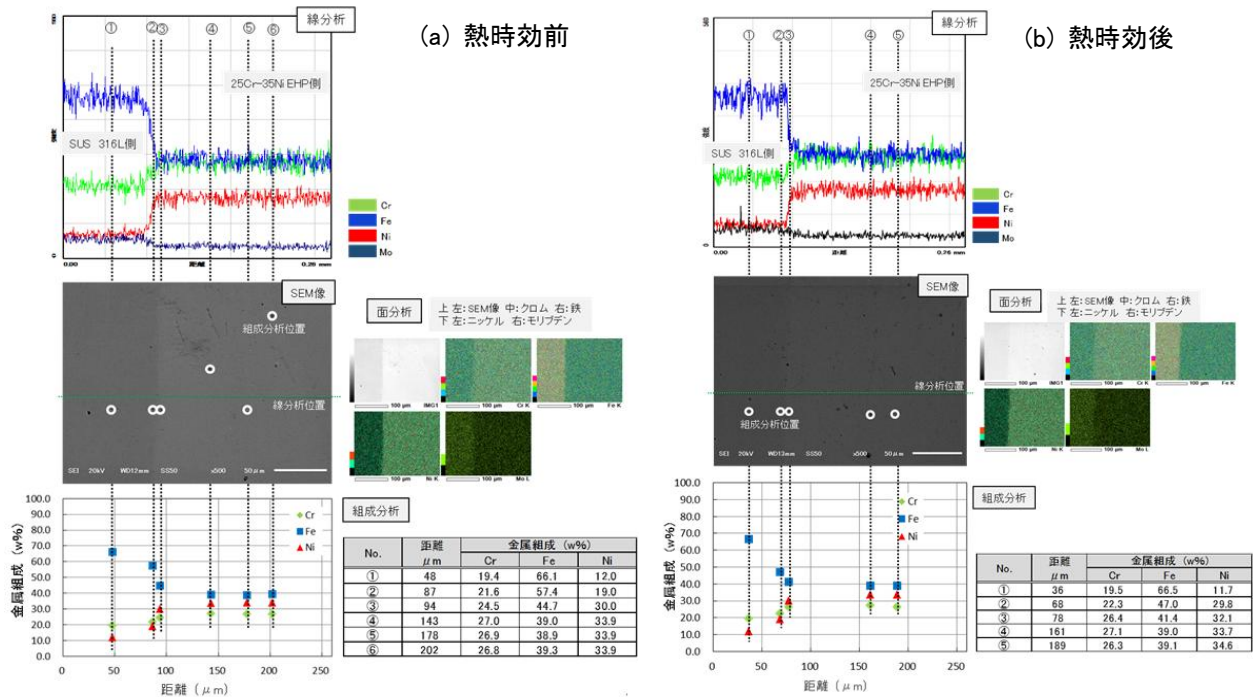


図 1 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の接合界面近傍断面の EDS 分析結果

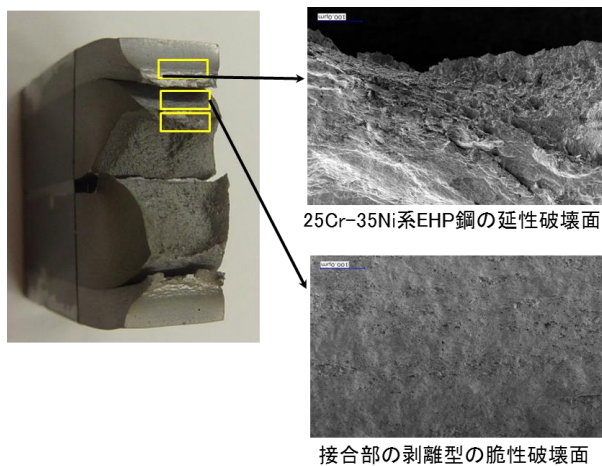


図 2 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の衝撃試験後の破面形態 (750°C × 1,500h 時効材)

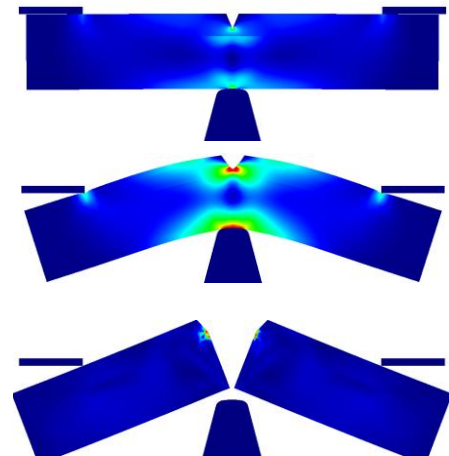


図 3 クラッド材の衝撃試験解析による変形と Mises 応力分布

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)

バレストレイン試験により SUS304EHP 鋼および SUS316EHP 鋼の溶接部の高温割れ (凝固割れ) 感受性を定量的に評価し (凝固温度範囲 BTR で評価)、EHP 鋼の溶接施工健全性評価に対する基礎的知見を得た。図 4 にその結果を示す。FA モード凝固する SUS304EHP 鋼の BTR は 7~10K 程度とな

り、AFモード凝固するSUS304EHP鋼のBTRは20~25K程度となった。また、FAモード凝固するSUS316EHP鋼のBTRは7Kとなり、AFモード凝固するSUS316EHP鋼のBTRは25~40K程度となった。これらのことからEHP鋼の凝固割れ感受性はいずれもFAモード凝固する普通純度鋼（SUS316L）と比べて非常に小さいことが明らかとなった。

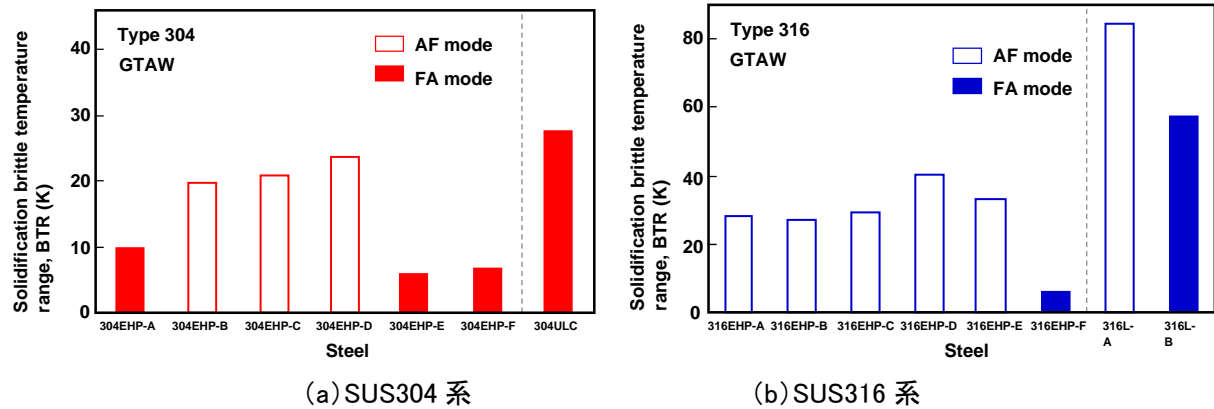
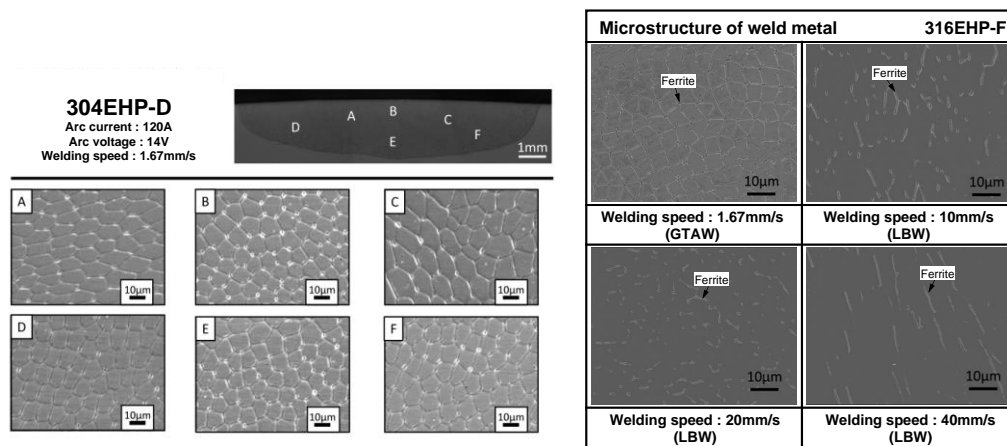


図4 SUS304EHP鋼およびSUS316EHP鋼の溶接部の凝固割れ感受性

(2) 接合技術解析評価（再委託先：福井工業大学）

阪大にて作製したSUS304EHP鋼およびSUS316EHP鋼の溶接試験体についてマイクロ組織を評価し、アークおよびレーザー溶接部の組織学的特徴を把握した。図5にその結果を示す。いずれの溶接部でも溶接割れやブローホールなどの欠陥は認められず、溶接施工健全性が確保されていることが明らかとなった。今後、レーザークラッド溶接施工において、溶接ボンド部に生成するマルテンサイトについてマイクロ組織および組成分析、硬さ測定などを行い、溶接施工健全性評価に対する技術的知見を得る予定である。



(a)アーク溶接部

(b)レーザー溶接部

図5 SUS304EHP鋼およびSUS316EHP鋼の溶接部の組織

3. 今後の展望

試作した熱間圧延および爆発圧着法による大型クラッド材およびその溶接継手について長期耐久性および耐食性などの評価試験を実施する。また、 γ 線照射場での衝撃試験や経年材質変化試験により材料健全性等を評価する。さらに、実機使用条件における熱や照射の影響を考慮した解析により環境適用性保持条件等々を評価する。