

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、機械的強度の低下およ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

25Cr-35Ni 系 EHP ステンレス鋼を合せ材、JIS G 3120 SQV2A および 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で試作した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した。

(a) クラッド界面の健全性評価試験

平成 26 年度に試作した板組「EHP/SQV2A」および「EHP/SUS316L」の圧延および爆着クラッド材を用いて長時間運転を想定した熱処理材のクラッド界面の健全性評価試験を実施した。

界面のせん断試験において $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 時効処理や $(600 \rightleftharpoons 200^{\circ}\text{C}) \times 229$ 回 熱サイクル処理により板組「EHP/SQV2A」の爆着クラッド材の界面せん断応力がやや低下する傾向が認められたが、他のクラッド材ではほとんど変化せず、いずれも規格下限値の 200MPa を満足していた (図 1)。側曲げ試験では、長時間熱処理後も割れなどは認められず、いずれも健全であった。繰返し曲げによるはく離を想定した平面曲げ疲労試験の結果、時効処理による疲労寿命の低下は認められなかった。また、クラッド界面に引張応力が働くように試験片を製作した応力腐食割れ試験 (温度 288°C 、応力 9MPa、溶存酸素濃度 20ppm、歪み 1%、時間 1,900h) の結果、板組「EHP/SQV2A」の圧延クラッド材の熱サイクル処理材で割れの兆候が認められたものの、他のクラッド材では時効処理材および熱サイクル処理材とも割れは認められず、健全であった。

以上のように、長時間熱処理材のクラッド界面の健全性評価試験を実施した結果、一部のクラッド材において時効処理や熱サイクル処理により特性の劣化が認められるものの、概ね界面の健全性が維持されていることが判った。

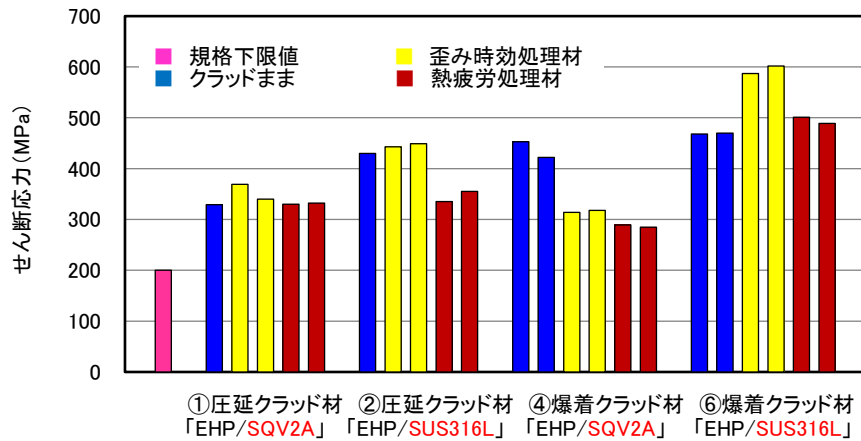


図 1 長時間熱処理後のクラッド界面のせん断試験結果

(b) クラッド材溶接部の健全性および耐食性評価試験

平成 26 年度に試作したクラッド材を用いて表 1 に示す溶接継手を製作し、長時間運転を想定した熱処理材の長期健全性および耐食性評価試験を実施した。

表 1 製作した溶接継手の概要

板組	板厚(mm)	溶接法	評価対象面	熱処理条件
EHP／Ni／SQV2A	圧延：8＋72	・ベース材 SQV2A は溶接ワイヤ US56B/PF200 による SAW、合せ材 EHP 鋼は共材溶加棒による TIG 溶接 ・PWHT	最終層	Cr-Mo 鋼の焼戻脆化再現処理のステップ冷却
	爆着：8＋2＋100			
EHP／SUS316L	圧延：6＋24	・ベース材 SUS316L は TG-S316、合せ材 EHP 鋼は共材溶加棒による TIG 溶接	初層(裏波)	500℃ ×2,000h
	爆着：4＋31			
EHP／SUS316L ／EHP	圧延：3＋32＋3		最終層	
	爆着：3＋32＋3			

長時間熱処理後も溶接継手の引張応力はクラッド母材としての規定下限値を上回っており、健全性が維持されていた。また、溶金部ノッチおよび HAZ 部ノッチによる溶接継手のシャルピー衝撃試験において、ベース材 SUS316L の板組で 500℃×2,000h 時効処理後、上部棚吸収エネルギーが低下する傾向にあるが、NRC による判定基準（運転期間を通じて 68J 以上）を満足した（図 2）。

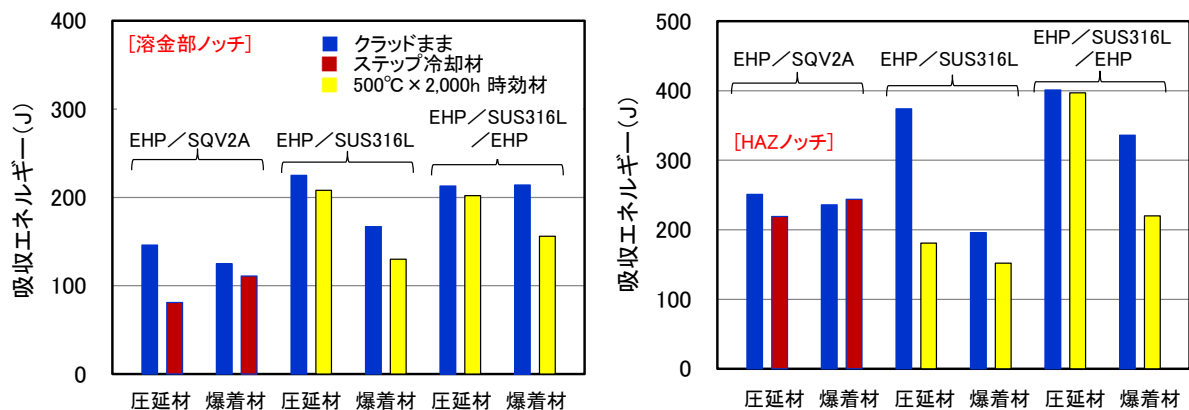


図 2 長時間熱処理後の溶接継手のシャルピー衝撃試験結果

板組「EHP/SQV2A」および「EHP/SUS316L」の圧延クラッド材の溶接継手に対する疲労き裂伝播試験において、いずれも長時間熱処理による下限応力拡大係数 ΔK_{th} の相違は認められなかった。溶接継手表面の応力腐食割れ試験[CBB]において、板組「EHP/SQV2A」ではクラッドまま材および長時間熱処理材ともひび割れが発生したが、板組 EHP/SUS316L」ではほぼ健全であった。これらは、EHP 鋼共材溶加棒による肉盛厚さが不十分であったか、PWHT 条件が適切でなかったためと推定される。

以上のように、溶接継手の長時間健全性評価試験を実施した結果、一部の特性に経年劣化傾向が認められるものの、溶接施工条件の対応により健全性が担保できる範囲と推定される。

2. 2 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）

γ 線照射場熱時効処理におけるクラッド界面の長期健全性におよぼす Ni インサートの効果を評価するため、板組「EHP/(Ni)/SUS316L」および「EHP/(Ni)/A533B」のクラッド材について、電子線プローブマイクロアナライザーによる組成分析およびストラウス試験条件による腐食後の断面観察を行った結果、Ni インサートにより不純物の拡散が抑制され、界面近傍の腐食領域が低減していることが確認された（図 3～4）。

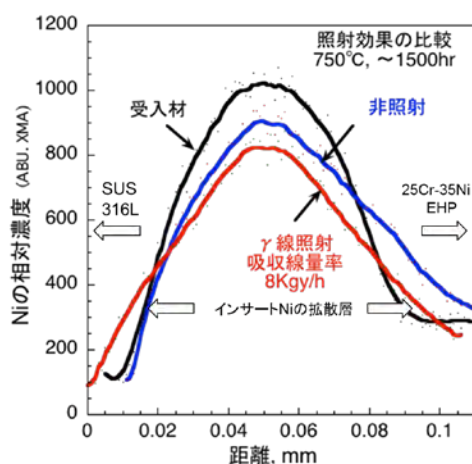


図 3 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理による Ni 濃度プロファイル

γ 線照射場を模擬した熱時効処理後の EHP 鋼および SUS316L の単材におけるシャルピー試験で得られた物性値を用いて、クラッド材の耐衝撃健全性評価のための解析を行った結果、EHP 鋼の厚みに依存した耐衝撃性の指標となる吸収エネルギーの変化を概ね再現することができた。また、上記試験結果を踏まえた γ 線照射効果を含めた相互拡散による経年材質変化域の検討により変質層厚などを考

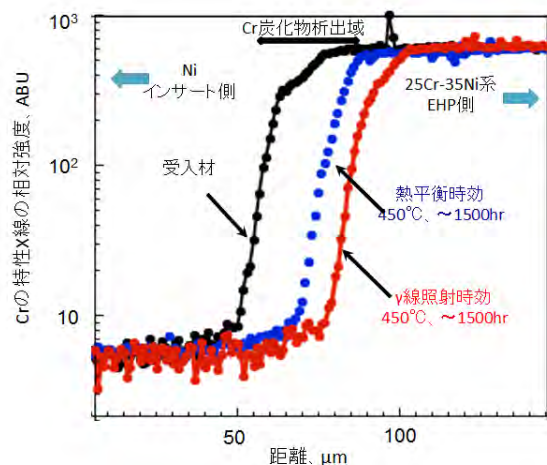


図 4 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効条件による 25Cr-35Ni-EHP 鋼の組成変化の違い

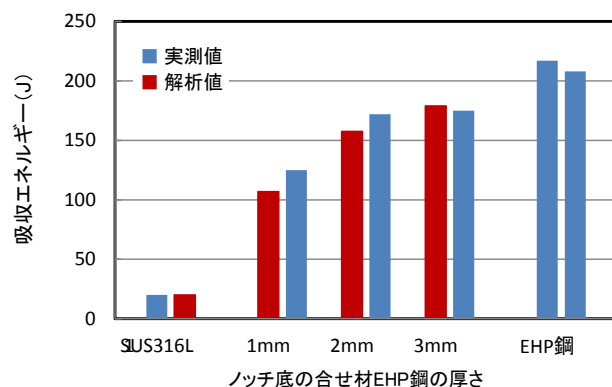


図 5 シャルピー衝撃試験吸収エネルギーの実測値と解析値の比較

慮した EHP 鋼の必要肉厚は Ni インサート有りの場合には 2mm 程度確保すれば十分であるとの評価結果を得た（図 5～6）。

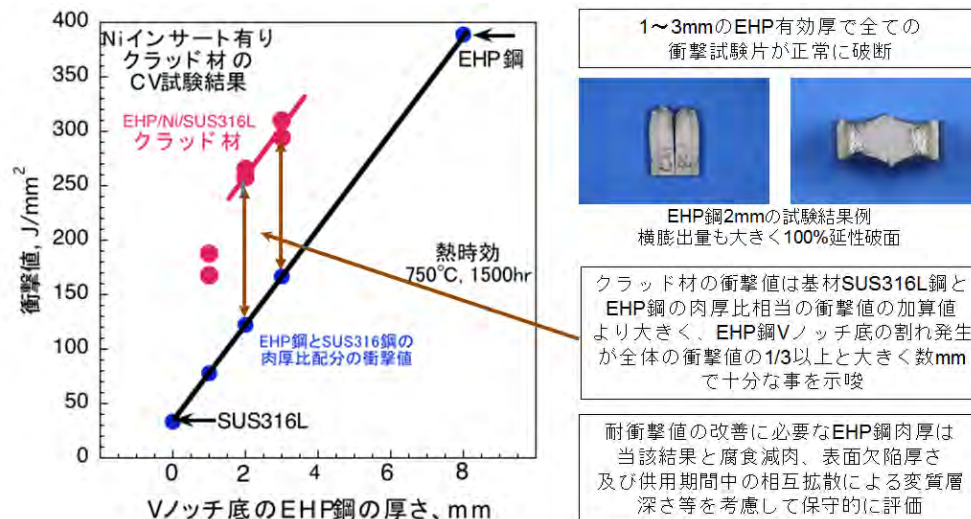


図 6 Ni インサート有リクラッド材（板組「EHP/Ni/SUS316L」）の良好な耐衝撃性

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）

低合金鋼A533B上に25Cr-35Ni-EHPステンレス鋼のレーザクラッド溶接を行ったときのボンド部に生成するマルテンサイト量について検討し、レーザクラッド溶接施工健全性評価に対する技術的知見を得た。図7はEHP鋼レーザクラッド溶接部におけるボンドマルテンサイト生成状況をシェフラー組織図上にプロットしたものである（赤点：ボンドマルテンサイト生成、青点：同なし）。溶込み率から得られる溶接金属組成と低合金鋼母材組成をさらに2：5程度に内分する点でボンドマルテンサイト生成限界が与えられ、実施工溶接条件で想定される溶込み率の範囲

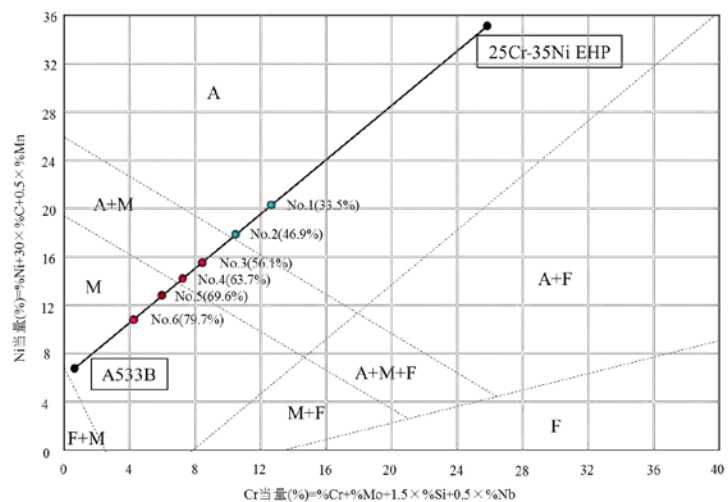


図 7 ボンドマルテンサイト生成状況（シェフラー組織図）

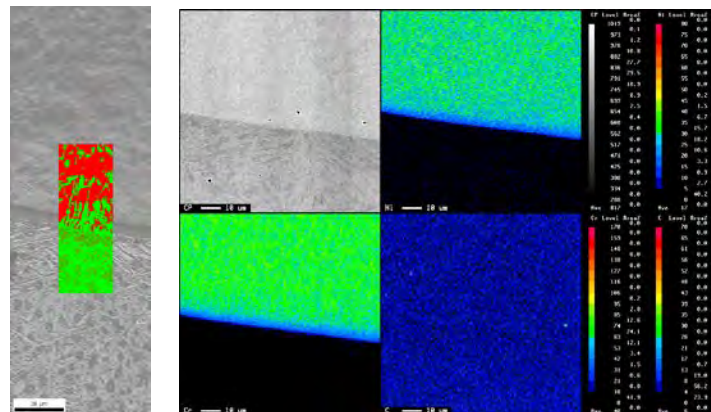
（30～40%程度以下）では、ボンドマルテンサイトは生成しないことが示された。以上のことから、EHP鋼によるレーザクラッド溶接部の施工健全性は担保されることが明らかとなった。

(2) 接合技術解析評価（再委託先：福井工業大学）

阪大にて製作した試験体についてマイクロ組織を評価し、レーザクラッド溶接部におけるボンドマルテンサイトの組織学的特徴を把握した。図 8 は溶込み率 63.7%のレーザクラッド溶接ボンド

部の組織、EBSD 解析および元素分析結果を示したものである。ボンド部において bcc (bct) 相と判定される層状組織が形成しており、この層中に Cr および Ni が検出されることからボンドマルテンサイトが生成しているものと示唆される。なお、この層状組織ではマイクロ硬さが高いことも確認している。

以上のように、溶込み率が非常に大きい溶接条件ではボンドマルテンサイトが生成するが、実施工のレーザクラッド溶接条件ではその可能性がかなり低いことが示された。



(a) EBSD 解析

(b) 元素分析

図 8 ボンドマルテンサイト組織解析結果

3. 今後の展望

本研究において耐食性等に優れた EHP 仕様のステンレス鋼に対する製造技術の確立、高信頼性溶接技術の開発および放射線環境下を含む環境適用性評価試験において材料技術基盤データを取得できたことは、革新的原子力システムおよび軽水炉等の既存原子力システムに共通する安全基盤技術の向上に寄与し、ステンレス鋼を適用する様々な産業分野への波及効果が期待される。また、本研究で得られた成果は原子力プラントのみならず、喫緊の課題である使用済燃料の乾式貯蔵キャスク等への応用も期待できる。さらに、今後の革新的原子力システムおよび軽水炉等の既存原子力システムの安全性確保には各種の用途に適用できる EHP 仕様のステンレス鋼の技術基準化および安全技術対策としての有効性評価の継続的研究が不可欠であると考えられる。