

平成27年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

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

成果報告書

平成28年3月

株式会社 神戸製鋼所

本報告書は、文部科学省の原子力システム研究開発事業による委託業務として、株式会社神戸製鋼所が実施した平成27年度「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」の成果を取りまとめたものです。

概要

福島第一原子力発電所のシビアアクシデント以降、従来にも増して軽水炉や核燃料再処理施設などの商業原子力システムの安全性確保が必須条件となることが予想される。原子力システムの安全性確保とは、周辺環境への放射性物質の異常な放出を防止することであり、放射性物質を閉じ込めることにほかならない。しかしながら、原子力システムの黎明期から材料の腐食による経年劣化によって閉じ込め機能の一部喪失する事例が報告されてきた。材料腐食による原子力システムの経年劣化を防止し、想定以上の環境に材料が直面しても材料腐食に対する安全性が確保できる、より耐食性の高い材料への期待が高まっている。ステンレス鋼の耐食性を向上させる方法として従来から超高純度（Extra High Purity／以下、EHP と略す）オーステナイト系ステンレス鋼（以下、EHP ステンレス鋼と略す場合あり）を提案してきた。EHP ステンレス鋼は核燃料再処理施設のような高濃度の硝酸環境においても優れた耐粒界腐食性を示し、実用化に必要な主要部材にも適用可能であることを報告している。また、高純度化により溶接時の高温割れを低減可能なことも報告しており、実用化研究が進められている。

しかしながら、超高純度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。特に、溶接部においては金属組織の粗大化による強度低下が避けられない。したがって、原子力システムの圧力バウンダリーに EHP ステンレス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するため、EHP ステンレス鋼の薄板を現行の低合金鋼やステンレス鋼の表面に接合することによる高性能複合素材を開発することを目的とする。また、この開発技術は現行原子力プラント機器の表面に EHP ステンレス鋼を肉盛りする技術としても応用でき、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。

平成 27 年度は、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として以下の 3 項目を実施し、以下に記すような成果が得られた。

(i) EHP 合金応用部材の開発

25Cr-35Ni-EHP ステンレス鋼を合せ材、JIS G 3120 SQV2A（圧力容器用材料 ASTM A533B 相当材／低合金鋼。以下、SQV2A と略す）および SUS316L ステンレス鋼（以下、SUS316 と略す）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) クラッド界面の長期健全性評価試験

平成 26 年度に試作製造した板組「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時の経年変化を想定したクラッド界面の健全性評価試験

を実施した。経年変化を想定した熱処理条件は以下のとおりである。

- ・歪み時効処理：15%予歪み－500℃×2,000h
- ・熱疲労処理：(600×1h⇔200℃)×229cycle [トータル1,500h]

熱処理による時効程度を評価する時効パラメータ (Tempering Parameter：TP) は、歪み時効処理材で 10.28、熱疲労処理材で 10.79 である。288℃で SQV2A を 40 年間使用されたと仮定した TP は 8.72 であることから、これらの熱処理により十分な時効が施されたと考える。

実施した評価試験は界面組織観察、硬さ分布測定、EPMA 観察、引張試験、界面せん断試験、側曲げ試験、平面曲げ疲労試験、界面シャルピー衝撃試験および CBB 試験 (応力腐食割れ試験の一種/Cleviced Bend Beam Test：すきま付き定ひずみ曲げ試験/試験条件：温度 288℃、応力 9MPa、溶存酸素濃度 20ppm、歪み 1%、時間 1,900h) である。界面せん断試験の結果、歪み時効処理や熱疲労処理により板組「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。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。繰返し曲げによる界面はく離を想定した平面曲げ疲労試験では、未処理材および歪み時効処理材ともクラッド界面からはく離することなく母材破断し、さらに歪み時効処理を施すとクラッド界面の疲労寿命がかえって長くなる傾向にあった。これらはクラッド界面の接合性が良好なため、さらに歪み時効処理により母材の強度が増加したためと推定される。界面シャルピー衝撃試験では、爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L」) の熱疲労処理材の界面の上部棚吸収エネルギーが減少した以外、他のクラッド材では、長時間熱処理により延性－脆性遷移温度が上昇する傾向にあるものの、上部棚吸収エネルギーはほとんど変化しなかった。なお、爆着クラッド材⑥の熱疲労処理材において上部棚吸収エネルギーが減少したのは、当該クラッド材では界面に Ni インサートや Ni めっきを施していないため、熱疲労処理により界面での組織変化やはく離が生じ、その結果、延性－脆性遷移温度が上昇したためと推定される。また、クラッド界面に引張応力が働くように試験片を加工した CBB 試験の結果、いずれのクラッド材の歪み時効処理および熱疲労処理後も割れは認められず、健全であった。

以上のように、25Cr-35Ni-EHP 鋼を合せ材、SQV2A もしくは SUS316L をベース材とする圧延クラッド材および爆着クラッド材について長時間運転時の経年変化を想定して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歪み時効処理や熱疲労処理により特性の劣化が認められたものの、おおむね界面の健全性が維持されていた。

(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 年度に試作製造したクラッド材を用いて溶接継手を製作し、それらの長期健全性および耐食性評価試験を実施した。なお、SQV2A をベース材とするクラッド材については PWHT (Post Welding Heat Treatment：溶接後熱処理/615℃×7h・空冷) を施した。

長時間運転時の経年変化を想定した熱処理条件は以下のとおりである。ステップ冷却材の時効パラメータ TP は 9.55 である。

- ・ベース材が SQV2A の場合：ステップ冷却処理 (Cr-Mo 鋼の焼戻脆化再現法)

- ・ベース材が SUS316L の場合：500℃×2,000h 熱時効処理

実施した評価試験は溶接断面組織観察[ミクロ・マクロ]、硬さ分布測定、室温引張試験、側曲げ試験、シャルピー衝撃試験、疲労き裂伝播試験および CBB 試験である。側曲げ試験の結果、板組「EHP/SQV2A」の圧延および爆着クラッド材の溶接-PWHT 処理ままでは割れが発生したのに対して、ステップ冷却を施すと割れが発生しなくなった。これらは、PWHT ままではベース材 SQV2A 用の SAW (Submerged Arc Welding：サブマージアーク溶接) 溶接材料 US56B/PF200 や中間域用の溶接材料 TG-S309 による溶金とのコンタミ (希釈) によりボンドマルテンサイトが生成していたが、ステップ冷却処理を施すことにより焼戻し効果が生じたと推定される。一方、板組「EHP/SUS316L」および「EHP/SUS316L/EHP」のクラッド材では熱時効処理を施すことにより割れが発生した。これらは、25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層が薄かったため、ベース材用の溶接材料 TG-S316L による溶金層とのコンタミを生成し、これらが熱時効処理により脆化した推定される。これらは、EHP 鋼共材溶加棒による溶金層厚さの増加により回避されると推定される。また、溶金部ノッチおよび HAZ 部ノッチによるシャルピー衝撃試験の結果、長時間熱処理により延性-脆性遷移温度が上昇し、上部棚吸収エネルギーがやや低下する傾向を示すクラッド材もあったが、NRC (Nuclear Regulatory Commission：アメリカ合衆国原子力規制委員会) が脆化の判定基準として要求している上部棚吸収エネルギー68J を十分上回っていた。疲労き裂伝播試験の結果、板組「EHP/SQV2A」の圧延クラッド材に対するステップ冷却により疲労き裂伝播速度 da/dN が増大する (脆化) 傾向を示すが、板組「EHP/SUS316L」の圧延クラッド材では熱時効処理により da/dN がやや減少 (靱性化) する傾向を示した。また、いずれも下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} への影響は認められなかった。

溶金部表面の耐食性評価としての CBB 試験については、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の溶接に用いた共材溶加棒による溶金層厚さを 6~8mm もしくはその半分とすることによりベース材 (SQV2A 系および SUS316L 系) 用の溶接材料によるコンタミの影響も調査した。その結果、SQV2A をベース材とするクラッド材の溶接継手では未処理の溶接まま材でもボンド部近傍に割れが認められ、ステップ冷却を施すことによりその程度が増す傾向にあった。これらは、ベース材 SQV2A 用の SAW 溶接材料 US56B/PF200 や中間域用の溶接材料 TG-S309 による溶金とのコンタミ (希釈) によるボンドマルテンサイトの生成が起因すると推定される。一方、SUS316L をベース材とするクラッド材の溶接継手では、一部を除いて未処理の溶接まま材やそれらの熱時効処理材でも割れは認められず、良好な耐食性を示した。割れが発生した溶接継手では、クラッド製作時の爆着による残留応力の影響や 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層が薄く、ベース材用の溶接材料の TG-S316L による溶金部のコンタミが影響しているものと考えられる。改善には、前者は爆着クラッド後の応力除去焼鈍 (もしくは、溶体化処理)、後者は EHP 鋼共材溶加棒による溶金層を厚くする必要があると考えられる。

以上のように、25Cr-35Ni-EHP 鋼を合せ材、SQV2A もしくは SUS316L をベース材とする圧延クラッド材および爆着クラッド材について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、溶接施工の対応などにより健全性が担保できる範囲と推定される。

(ii) 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）

過年度の成果を踏まえて、 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した。また、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を評価した。

(a) γ 線照射場試験

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25Cr-35Ni-EHP鋼と現行材SUS316Lのクラッド材に対して環境適用性評価試験を実施した。その結果、 γ 線照射場かつ水蒸気暴露温度250～350℃でのブリネル圧痕すきま腐食試験（Double Brinell Crevice / 以下、DBCと略す）では、25Cr-35Ni-EHP鋼もSUS316Lも割れは発生しなかった。このすきま条件を実現するために設置したSUS304製メッシュ材では、水蒸気温度の上昇とともにDBC試験片との接触面が腐食している状況を確認した。また、 γ 線照射場を模擬した熱時効後のNiインサートありのクラッド材に対するシャルピー試験では、Niインサートなしの場合に観察された接合界面に沿ったき裂伝播によるはく離がみられず、25Cr-35Ni-EHP鋼のクラッドによる耐衝撃性の改善効果を確認した。さらに、材料健全性を評価するため、Niインサートありのクラッド材（板組「EHP/Ni/SUS316L」、「EHP/Ni/A533B」）の接合界面における γ 線照射場熱時効試験を実施した。その接合界面における経年材質変化のEPMA（Electron Probe Micro Analyzer：電子線マイクロアナライザ）による組成分析および電気化学的腐食試験を行った結果、Niインサートなしのクラッド材に比較してNi層により不純物の拡散が抑制され、接合界面近傍の腐食領域が低減していることが確認された。

(b) 環境適用性の数値解析

環境適用性の数値解析では、 γ 線照射場を模擬した熱時効試験後の25Cr-35Ni-EHP鋼およびSUS316Lの単材におけるシャルピー試験結果に対する分析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に資する解析のモデル化を実施した。過年度に実施したクラッド材の解析では、材料特性の設定方法に課題が残ったため、接触条件を変更するなど、解析モデルの改良を行った。その結果、25Cr-35Ni-EHP鋼の厚さ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おおむ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慮した合せ材EHPステンレス鋼の必要肉厚はNiインサートありの場合には2mm程度確保すれば十分であるとの評価結果を得た。

以上、本年度の研究成果より、Niインサートありのクラッド材において、現行材SUS316Lに比較して中高温域における耐食性および耐衝撃性の向上が認められる結果が得られた。また、環境適用性の数値解析的な検討では、耐衝撃性の変化を再現可能な解析モデルの改良を行い、クラッド材の耐衝撃健全性を評価可能な数的解析によりクラッド材の必要肉厚の評価が可能となった。

今後の課題としては、福島第一原子力発電所の事故を踏まえて、原子炉の安全

性向上の観点から25Cr-35Ni-EHP鋼のシビアアクシデントを念頭においた環境適用性を評価する安全基盤技術の開発が挙げられる。

(iii) 接合技術の評価選定

(1) 手法開発・評価試験（再委託先：大阪大学）

レーザクラッドによるEHP鋼被覆法の実機適用に向けた施工健全性および接合性能を評価し、適用性をまとめた。

- ① 低合金鋼 A533B に対して EHP ステンレス鋼溶加材による単パスレーザ肉盛溶接を行い、ボンドマルテンサイトの生成条件を調査した。希釈率 56.1 と 63.7% の試験片からボンドマルテンサイトが形成された。また、希釈率が 69.6% 以上になると溶接金属部全体がマルテンサイトとなることがわかった。このことから、母材に A533B、溶加材に 25Cr-35Ni-EHP 鋼を使用した場合、ボンドマルテンサイトは希釈率がおおよそ 47~70% の範囲内で発生することがわかった。
- ② 25Cr-35Ni-EHP 鋼溶加材による低合金鋼 A533B への肉盛溶接のボンド部の組織はシェフラー組織図において、溶接金属と母材を 2.5 : 1~4 : 1 の範囲内で内分することで得られた。すなわち、異材接合における溶接ボンド部の組織をシェフラー組織図上に適用することが可能であり、ボンドマルテンサイトの生成予測ができるものと推察された。
- ③ PWHT の保持時間の平方根と浸炭層および脱炭層厚さのプロットは直線関係を呈しており、生成挙動が拡散律速であった。また、算出した浸炭および脱炭の活性化エネルギーはそれぞれ 97.8 および 134kJ/mol であり、純 Fe 中の C 拡散の活性化エネルギー 80~150kJ/mol と同程度であったことから浸炭および脱炭現象は C の拡散律速であることが検証された。
- ④ 低合金鋼 A533B の法定の PWHT 条件で熱処理を施した場合、25Cr-35Ni-EHP 鋼溶加材を用いた溶接ボンド部では硬さが最大でも 300~350HV 程度であると予測でき、ボンド部の健全性は確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）

25Cr-35Ni-EHP 鋼のレーザ肉盛溶接部の組織学的評価を行い、実機適用における溶接部の健全性を検証した。評価試験では試料製作装置を用いて試験片を準備した。

具体的には、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、レーザ肉盛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。

- ① 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た
- ② ボンドマルテンサイトの層状組織ではマイクロ硬さが高いことを確認した。
- ③ 溶接金属側のボンド部には浸炭による硬化がみられたが、母材側のボンド部には脱炭による硬さ変化は顕著には現れなかった。脱炭層の成長速度は浸炭層よりも大きくなり、C の濃度勾配が緩やかになるため、硬さに対してあまり影響しないことがわかった。

以上のように、本年度の研究結果より低合金鋼への 25Cr-35Ni-EHP 鋼の異材肉盛溶接では、溶込み率が非常に大きい溶接条件においてボンドマルテンサイトが生成するが、実施工のレ

一ザ肉盛溶接条件では、その可能性がかなり低いことが示された。また、25Cr-35Ni-EHP 鋼の肉盛溶接ボンド部では、低合金鋼 A533B の法定の PWHT 条件で熱処理を施した場合、健全性が確保されることが明らかとなった。

(iv) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、実施計画等を協議するため打ち合わせを行った。

(v) まとめ・評価

本業務の4年間の結果についてまとめ、開発材の技術的適用性を評価した。

目次

1. はじめに	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 全体計画	2-1
2.1.1 実施内容	2-1
2.1.1.1 EHP 合金応用部材の開発	2-1
2.1.1.2 開発材の環境適用性評価	2-1
2.1.1.3 接合技術の評価選定	2-1
2.1.2 実施体制およびスケジュール	2-1
2.2 平成 27 年度の成果の目標および業務の実施方法	2-3
2.2.1 実施内容	2-3
2.2.1.1 EHP 合金応用部材の開発	2-3
2.2.1.2 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）	2-3
2.2.1.3 接合技術の評価選定（再委託先：大阪大学、福井工業大学）	2-3
2.2.1.4 研究推進	2-3
2.2.1.5 まとめ・評価	2-3
2.2.2 実施体制およびスケジュール	2-3
3. 平成 27 年度の実施内容および成果	3. 1-1
3.1 EHP 合金応用部材の開発	3. 1-1
3.1.1 供試材	3. 1-1
3.1.2 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」の管）の評価試験	3. 1-1
3.1.2.1 クラッド材	3. 1-1
3.1.2.2 溶接継手	3. 1-3
3.1.3 クラッド界面の長期健全性評価試験	3. 1-5
3.1.3.1 試験方法	3. 1-5
3.1.3.2 試験結果	3. 1-6
3.1.4 クラッド材溶接部の健全性および耐食性評価試験	3. 1-11
3.1.4.1 試験方法	3. 1-11
3.1.4.2 試験結果	3. 1-13
3.1.5 まとめ	3. 1-18
3.2 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）	3. 2-1
3.2.1 γ 線照射場試験	3. 2-1
3.2.1.1 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験によるクラッド用素材の耐食性評価	3. 2-1
3.2.1.2 高温熱時効処理したクラッド材のシャルピー衝撃試験による破壊抵抗性評価	

	3.2-3
3.2.1.3 γ 線照射場時効処理したクラッド材の経年材質変化	3.2-4
3.2.1.4 まとめ	3.2-7
3.2.2 環境適用性の数値解析	3.2-8
3.2.2.1 クラッド材の耐食性・耐 EAC 性の保持条件評価に資する解析	3.2-8
3.2.2.2 クラッド材の経年材質変化と力学的評価に資する解析	3.2-12
3.2.2.3 まとめ	3.2-14
3.2.3 試験と解析による環境適用性の考察	3.2-15
3.2.3.1 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験によるクラッド用素材の耐食性評価	3.2-15
3.2.3.2 高温熱時効処理したクラッド材のシャルピー衝撃試験による破壊抵抗性評価	3.2-17
3.2.3.3 γ 線照射場熱時効処理したクラッド材の経年材質変化	3.2-18
3.2.4 結言	3.2-21
3.3 接合技術の評価選定（再委託先：大阪大学、福井工業大学）	3.3-1
3.3.1 はじめに	3.3-1
3.3.2 異材継手の溶接ボンドに関する研究の現状と課題	3.3-1
3.3.3 供試材および実験方法	3.3-4
3.3.4 手法開発・評価試験	3.3-5
3.3.4.1 シェフラー組織図上でのボンドマルテンサイトの形成条件範囲の検討	3.3-5
3.3.4.2 溶接ボンド部組織に及ぼす PWHT の影響	3.3-6
3.3.5 接合技術解析技術（再委託先：福井工業大学）	3.3-7
3.3.5.1 A533B/25Cr-35Ni-EHP 鋼単パスレーザー肉盛溶接部のボンドマルテンサイトの組織学的検討	3.3-7
3.3.5.2 溶接ボンド部組織に及ぼす PWHT の影響	3.3-9
3.3.6 まとめ	3.3-10
3.3.6.1 手法開発・評価試験	3.3-10
3.3.6.2 接合技術解析技術	3.3-11
3.4 研究推進	3.4-1
3.5 まとめ・評価	3.5-1
4. 平成 27 年度の成果のまとめ	4-1
4.1 EHP 合金応用部材の開発	4-1
4.2 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）	4-1
4.3 接合技術の評価選定	4-1
4.3.1 手法開発・評価試験（再委託先：大阪大学）	4-1

表 一 覧

- 表 2.1-1 全体実施体制およびスケジュール
- 表 2.2-1 平成 26 年度の実施体制およびスケジュール
- 表 3.1-1 平成 26 年度に試作したクラッド材（供試材）の概要
- 表 3.1-2 合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の溶製目標化学成分および実績
- 表 3.1-3 クラッド用ベース材 SQV2A の化学成分
- 表 3.1-4 クラッド用ベース材 SUS316L の化学成分
- 表 3.1-5 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の爆着後の形状測定結果
- 表 3.1-6 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の室温引張試験結果
- 表 3.1-7 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の曲げ試験結果
- 表 3.1-8 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）のせん断試験結果
- 表 3.1-9 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の界面シャルピー衝撃試験結果
- 表 3.1-10 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316」）／溶接継手 D の引張試験結果
- 表 3.1-11 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316」）／溶接継手 D の曲げ試験結果
- 表 3.1-12 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 D のシャルピー衝撃試験結果
- 表 3.1-13 クラッド材の健全性評価試験のマトリックス（略号）
- 表 3.1-14 長時間熱処理による時効の評価
- 表 3.1-15 クラッド材の健全性評価のための処理結果
- 表 3.1-16 クラッド材の健全性評価試験項目
- 表 3.1-17 クラッド材の長時間熱処理材の引張試験結果
- 表 3.1-18 クラッド材の長時間熱処理材の曲げ試験結果
- 表 3.1-19 クラッド材の長時間熱処理後のせん断試験結果
- 表 3.1-20 クラッド材の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 表 3.1-21 クラッド材の (600⇔200℃)×229c 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 表 3.1-22 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ試験結果
- 表 3.1-23 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ試験結果
- 表 3.1-24 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ試験結果
- 表 3.1-25 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SUS316L(／EHP)」）の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ試験結果
- 表 3.1-26 クラッド界面の CBB 試験結果のまとめ
- 表 3.1-27 クラッド材の溶接継手の長期健全性および耐食性評価試験のための溶接施工条件の概要

表 3.1-28	25Cr-35NiEHP 鋼製溶加棒の化学成分
表 3.1-29	クラッド材の溶接要領書
表 3.1-30	クラッド材の溶接継手の浸透探傷試験結果のまとめ
表 3.1-31	クラッド材の溶接継手の浸透探傷試験記録
表 3.1-32	クラッド材の溶接継手の超音波探傷試験結果のまとめ
表 3.1-33	クラッド材①および④の溶接継手の超音波探傷試験記録
表 3.1-34	クラッド材の溶接継手の放射線透過試験結果のまとめ
表 3.1-35	クラッド材②／溶接継手 C の放射線透過試験記録
表 3.1-36	クラッド材③／溶接継手 E の放射線透過試験記録
表 3.1-37	クラッド材⑤／溶接継手 D の放射線透過試験記録
表 3.1-38	クラッド材⑤／溶接継手 E の放射線透過試験記録
表 3.1-39	クラッド材⑥／溶接継手 F の放射線透過試験記録
表 3.1-40	クラッド材の溶接継手の長期健全性および耐食性評価試験項目
表 3.1-41	クラッド材の溶接継手の引張試験結果
表 3.1-42	クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材の曲げ試験結果
表 3.1-43	クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験結果
表 3.1-44	疲労き裂伝播試験のマトリックス
表 3.1-45	疲労き裂進展試験結果
表 3.1-46	クラッド材の溶接継手の CBB 試験結果のまとめ
表 3.2-1	γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験片の試験前後の重量変化
表 3.2-2	蛍光探傷試験の要領
表 3.2-3	熱時効処理材のシャルピー衝撃試験結果 (H26 年度結果を含む)
表 3.2-4	熱時効処理後のクラッド材の界面近傍の Ni 拡散傾向の比較
表 3.2-5	相互拡散分析の対象とした試験とその条件
表 3.2-6	25Cr-35Ni-EHP 鋼の部位別素材特性
表 3.2-7	SUS316L の部位別素材特性
表 3.2-8	物性値決定後の 25Cr-35Ni-EHP 鋼と SUS316L の吸収エネルギー
表 3.2-9	衝撃試験解析での吸収エネルギー
表 3.3-1	供試材の化学成分
表 3.3-2	レーザ肉盛溶接条件
表 3.3-3	PWHT 条件
表 3.3-4	レーザ肉盛溶接試験条件
表 3.3-5	PWHT による浸炭層幅
表 3.3-6	PWHT による脱炭層幅
表 3.3-7	低合金鋼 A533B に対する PWHT の法定条件
表 3.3-8	レーザ肉盛溶接溶金部の EDS 分析結果

図 一 覧

- 図 3.1-1 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の硬さ測定分布
- 図 3.1-2 爆着クラッド材⑤の板組の模式図
- 図 3.1-3 クラッド材の引張特性のまとめ
- 図 3.1-4 クラッド材のせん断試験片形状 (mm)
- 図 3.1-5 クラッド材のせん断試験方法の模式図
- 図 3.1-6 クラッド材のせん断強さのまとめ
- 図 3.1-7 界面シャルピー衝撃試験片の加工要領
- 図 3.1-8 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-9 クラッド材の界面シャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめ
- 図 3.1-10 溶接継手のビッカース硬さ分布測定位置の模式図
- 図 3.1-11 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316」) /溶接継手 D の硬さ分布
- 図 3.1-12 クラッド材の溶接継手の引張強さのまとめ
- 図 3.1-13 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D のシャルピー衝撃試験片の採取要領
- 図 3.1-14 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D の試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係
- 図 3.1-15 クラッド材の溶接継手のシャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめ
- 図 3.1-16 クラッド材の(600×1h⇔200℃)×229cycle 熱疲労処理の温度チャートの例 (Total : 1,500h)
- 図 3.1-17 クラッド材の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の評価試験片の採取要領の例
- 図 3.1-18 クラッド材の(600×1h⇔200℃)×229cycle 熱疲労処理材の評価試験片の採取要領の例
- 図 3.1-19 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の長時間熱処理材の硬さ分布
- 図 3.1-20 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の長時間熱処理材の硬さ分布
- 図 3.1-21 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の長時間熱処理材の硬さ分布
- 図 3.1-22 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(／EHP)」) の長時間熱処理材の硬さ分布
- 図 3.1-23 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果
- 図 3.1-24 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果
- 図 3.1-25 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果
- 図 3.1-26 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(／EHP)」) の 500℃×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果
- 図 3.1-27 クラッド材の長時間熱処理材の引張試験結果のまとめ

- 図 3.1-28 クラッド材の長時間熱処理後のせん断強さのまとめ
- 図 3.1-29 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-30 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-31 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-32 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SUS316L（/EHP）」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-33 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の（600⇔200°C）×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-34 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の（600⇔200°C）×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-35 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の（600⇔200°C）×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-36 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SUS316L（/EHP）」）の（600⇔200°C）×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果
- 図 3.1-37 クラッド材の長時間熱処理材の界面シャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめ
- 図 3.1-38 クラッド材の 500°C×2,000h 歪み時効処理材後の平面曲げ試験片の採取要領の例
- 図 3.1-39 平面曲げ試験片形状（板厚 5mm）
- 図 3.1-40 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図
- 図 3.1-41 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図
- 図 3.1-42 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図
- 図 3.1-43 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SUS316L」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図
- 図 3.1-44 クラッド界面の応力腐食割れ試験片（CBB 試験）の製作要領の例—界面の評価
- 図 3.1-45 フライス加工後の CBB 試験片の表層からの硬さ分布
- 図 3.1-46 CBB 試験片の応力負荷状態の模式図
- 図 3.1-47 クラッド材の CBB 試験片の製作要領の例—Under Cladding Crack の評価
- 図 3.1-48 母材の CBB 試験後のひび割れ深さと個数の関係
- 図 3.1-49 クラッド材の溶接継手の試験材の採取要領
- 図 3.1-50 溶接パターン
- 図 3.1-51 クラッド板材の溶接継手の長期健全性評価試験片の採取要領の例
- 図 3.1-52(a) クラッド管材の溶接継手の長期健全性評価試験片の採取要領の例—溶接パター

ン A

図 3.1-52 (b) クラッド管材の溶接継手の長期健全性評価試験片の採取要領の例－溶接パターン B

- 図 3.1-53 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 A の硬さ分布
- 図 3.1-54 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 B の硬さ分布
- 図 3.1-55 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 C の硬さ分布
- 図 3.1-56 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 D の硬さ分布
- 図 3.1-57 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 E の硬さ分布
- 図 3.1-58 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 F の硬さ分布
- 図 3.1-59 クラッド材の溶接継手の長時間熱処理後の引張特性のまとめ
- 図 3.1-60 クラッド材の溶接継手からのシャルピー衝撃試験片の採取要領
- 図 3.1-61 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 A のステップ冷却材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係
- 図 3.1-62 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 B のステップ冷却材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係
- 図 3.1-63 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 C の 500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係
- 図 3.1-64 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 D の 500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係
- 図 3.1-65 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 E の 500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係
- 図 3.1-66 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 F の 500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係
- 図 3.1-67 クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめ
- 図 3.1-68 疲労き裂伝播試験片形状
- 図 3.1-69 疲労き裂伝播試験片の採取要領
- 図 3.1-70 疲労き裂進展試験の自動計測システムの概要図
- 図 3.1-71 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 A の疲労き裂進展試験結果
- 図 3.1-72 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 E の疲労き裂進展試験結果
- 図 3.1-73 クラッド材の溶接継手の CBB 試験片の採取要領の例

- 図 3.2-1 DBC 試験片の研磨方法
- 図 3.2-2 DBC 試験片の圧痕加工方法

- 図 3.2-3 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験の系統図
- 図 3.2-4 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験の水蒸気曝露温度の記録の例
- 図 3.2-5 DBC 試験片の断面観察のための加工要領
- 図 3.2-6 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片によるストラウス試験条件による腐食の要領
- 図 3.2-7 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材のシャルピー衝撃試験片の加工要領（合せ材 EHP 鋼側ノッチ）
- 図 3.2-8 板組「EHP/316L」のクラッド材のシャルピー衝撃試験片の加工要領（ベース材 SUS316L 側ノッチ）
- 図 3.2-9 熱時効処理時の温度履歴の例（板組「EHP/316L」および「EHP/Ni めっき/SUS316L」）
- 図 3.2-10 熱時効処理の温度履歴の例
- 図 3.2-11 γ 線照射場熱時効処理の温度履歴の例
- 図 3.2-12 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の未処理材の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-13 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 650°C 熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-14 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 700°C 熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-15 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 750°C 熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-16 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 650°C γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-17 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 700°C γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-18 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 750°C γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-19 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の未処理材の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-20 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 650°C 熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-21 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 700°C 熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-22 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 750°C 熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-23 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 650°C γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-24 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 700°C γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-25 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 750°C γ 線照射場熱時効処理後の

界面近傍の EPMA 分析結果

- 図 3.2-26 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の未処理材の EHP/Ni 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-27 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の未処理材の Ni/A533B 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-28 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-29 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-30 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400℃熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-31 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400℃熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-32 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450℃熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-33 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450℃熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-34 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃ γ 線照射場熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-35 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃ γ 線照射場熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-36 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400℃ γ 線照射場熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-37 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400℃ γ 線照射場熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-38 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450℃ γ 線照射場熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-39 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450℃ γ 線照射場熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA 分析結果
- 図 3.2-40 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
- 図 3.2-41 濃度プロファイルを表現する関数形
- 図 3.2-42 クラッド界面の相互拡散分析のフロー図
- 図 3.2-43 各試験の Fe の拡散係数に対するアレニウスプロット
- 図 3.2-44 解析モデル図
- 図 3.2-45 25Cr-35Ni-EHP 鋼単体の素材特性部位
- 図 3.2-46 SUS316L 単体の素材特性部位
- 図 3.2-47 クラッド材の素材特性部位

- 図 3.2-48 解析メッシュ図 (条件 1 : V ノッチ底の合せ材 EHP 鋼の厚さ 1mm)
- 図 3.2-49 解析メッシュ図 (条件 2 : V ノッチ底の合せ材 EHP 鋼の厚さ 2mm)
- 図 3.2-50 解析メッシュ図 (条件 3 : V ノッチ底の合せ材 EHP 鋼の厚さ 3mm)
- 図 3.2-51 衝撃解析変形履歴図 (条件 1)
- 図 3.2-52 衝撃解析変形履歴図 (条件 2)
- 図 3.2-53 衝撃解析変形履歴図 (条件 3)
- 図 3.2-54 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
- 図 3.2-55 原子炉等への EHP 鋼によるクラッド材の環境適用性に要求される耐照射性
- 図 3.2-56 原子力システム機器による構造材料に対する環境適用性の要求条件の違い
- 図 3.2-57 原子炉用材料に想定している EHP 鋼によるクラッド材の適用対象と達成目標
- 図 3.2-58 平成 27 年度の EHP 鋼によるクラッド材の環境適用性評価上の主要な 2 つの視点
- 図 3.2-59 基盤知見の乏しい γ 線照射場水蒸気特有の環境誘起割れ EAC の重要度評価
- 図 3.2-60 過年度までの 400°C 以上の γ 線照射場水蒸気中の酸化やすきま腐食評価の知見
- 図 3.2-61 過年度の 400°C 以上の高温側の γ 線照射場酸化性ガス環境適応性のまとめ
- 図 3.2-62 γ 線照射場の高酸素ポテンシャル (高酸化電位) 条件での耐酸化性評価に関する因子
- 図 3.2-63 350°C γ 線照射場水蒸気中 DBC 試験後の外観写真
- 図 3.2-64 γ 線照射場水蒸気中 DBC 試験のすきま用 SUS304 鋼製メッシュの SEM 写真
- 図 3.2-65 350°C γ 線照射場水蒸気中 DBC 試験後の断面片のストラウス試験条件による腐食後の状況
- 図 3.2-66 新 EAC 知見による現行軽水炉の γ 線照射場炉内構造物の割れのモデル化
- 図 3.2-67 熱時効脆化の知見に基づく γ 線照射効果や時効条件の選定
- 図 3.2-68 過年度の Ni インサートなしのクラッド材 (板組「EHP/SUS316L」) の界面剥離の課題
- 図 3.2-69 当該年度の Ni インサートありクラッド材 (板組「EHP/Ni/SUS316L」) の良好な耐衝撃性
- 図 3.2-70 熱時効処理したクラッド材の V ノッチシャルピー衝撃値の FEM 法による破壊力学的解析値と実験値の比較
- 図 3.2-71 板組「EHP/(Ni)/SUS316L」のクラッド材の時効効果上重要な Fe-Cr-Ni 系平衡状態図
- 図 3.2-72 クラッド材の時効材質変化評価用の腐食電位に対応した電気化学的評価法
- 図 3.2-73 Ni インサートなしのクラッド材 (板組「EHP/SUS316L」) の時効材質変化の σ 相生成挙動
- 図 3.2-74 Ni インサートなしのクラッド材 (板組「EHP/SUS316L」) の時効に伴う界面の組成変化
- 図 3.2-75 板組「EHP/(Ni)/SUS316L」のクラッド材の 650°C 熱時効処理による 25Cr-35Ni-EHP 鋼の材質変化の違い
- 図 3.2-76 板組「EHP/(Ni)/SUS316L」のクラッド材の 750°C 熱時効処理による 25Cr-35Ni-EHP

鋼の材質変化の違い

- 図 3.2-77 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の γ 線照射含む時効誘起材質変化モデル
 - 図 3.2-78 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理条件による Cr 濃度プロファイル変化
 - 図 3.2-79 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理条件による Ni 濃度プロファイルの違い
 - 図 3.2-80 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の Ni 拡散層成長速度のアレニウス依存性
 - 図 3.2-81 板組「EHP/A533B」のクラッド材の Ni インサートの有無による金属組織変化域の違い
 - 図 3.2-82 板組「EHP/A533B」のクラッド材の界面での主要元素の組成変化の違い
 - 図 3.2-83 板組「EHP/A533B」のクラッド材の熱時効処理に伴う経年材質変化のモデル図
 - 図 3.2-84 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 3.2-85 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の E25Cr-35Ni-HP 鋼の材質変化におよぼす熱時効処理条件の影響
 - 図 3.2-86 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の Cr 拡散層成長速度定数のアレニウス依存性
 - 図 3.2-87 現行原子炉材への EHP ステンレス鋼によるクラッド化の環境適応性の技術的成立性の集約
 - 図 3.2-88 本研究で得た γ 線照射環境の安全性に関わる新たな学術的知見整備の必要性
 - 図 3.2-89 原子力施設の安全性確保用の EHP ステンレス鋼の実用化の実施項目
-
- 図 3.3-1 レーザ肉盛溶接の模式図
 - 図 3.3-2 レーザ肉盛溶接用ベース材 A533B の形状
 - 図 3.3-3 シェフラー線図におけるレーザ肉盛溶接条件による希釈率の関係
 - 図 3.3-4 レーザ肉盛溶接金属部と母材を任意の比で内分したシェフラー線図
 - 図 3.3-5 レーザ肉盛溶接金属部と母材を任意の比で内分したシェフラー線図
 - 図 3.3-6 PWHT における保持時間と浸炭層幅の関係
 - 図 3.3-7 PWHT における保持時間と脱炭層幅の関係
 - 図 3.3-8 PWHT による浸炭層幅の成長速度のアレニウスプロット
 - 図 3.3-9 PWHT による脱炭層幅の成長速度のアレニウスプロット
 - 図 3.3-10 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率: 33.5%)
 - 図 3.3-11 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率: 46.9%)
 - 図 3.3-12 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率: 56.1%)
 - 図 3.3-13 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率: 63.7%)
 - 図 3.3-14 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率: 69.6%)
 - 図 3.3-15 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率: 79.7%)

- 図 3.3-16 レーザ肉盛溶接溶金部の結晶方位解析結果
- 図 3.3-17 レーザ肉盛溶接溶金部の希釈率とオーステナイト率の関係
- 図 3.3-18 レーザ肉盛溶接溶金部のビッカース硬さ分布
- 図 3.3-19 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (As welded)
- 図 3.3-20 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 500°C×5s)
- 図 3.3-21 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 500°C×1h)
- 図 3.3-22 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 500°C×3h)
- 図 3.3-23 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 500°C×10h)
- 図 3.3-24 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 500°C×24h)
- 図 3.3-25 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 550°C×5s)
- 図 3.3-26 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 550°C×1h)
- 図 3.3-27 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 550°C×3h)
- 図 3.3-28 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 550°C×10h)
- 図 3.3-29 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 550°C×24h)
- 図 3.3-30 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 600°C×5s)
- 図 3.3-31 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 600°C×1h)
- 図 3.3-32 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 600°C×31h)
- 図 3.3-33 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 600°C×10h)
- 図 3.3-34 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 600°C×24h)
- 図 3.3-35 レーザ肉盛溶接溶金部の PWHT (600°C) によるビッカース硬さ分布
- 図 3.3-36 レーザ肉盛溶接溶金部の PWHT によるビッカース変化

写真 一覧

- 写真 3.1-1 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」、(8+72)t×1,000w×3,000L) の外観写真
- 写真 3.1-2 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」、(6+24)t×1,000w×3,000L) の外観写真
- 写真 3.1-3 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) のφ318 製管後の外観写真
- 写真 3.1-4 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」、(3+32+3)t×1,000w×3,000L) の外観写真
- 写真 3.1-5 クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」、(8+100)t×900w×1,970L) の爆着後の外観写真
- 写真 3.1-6 クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316」、(4+31)t×φ318×1,000L) の爆着後の外観写真
- 写真 3.1-7 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316/EHP」、(3+32+3)t×840w×2,000L) の爆着後の外観写真
- 写真 3.1-8 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の断面マイクロ組織
- 写真 3.1-9 爆着クラッド材⑤用の補強材の爆着前後の外観写真

- 写真 3.1-10 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の室温引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-11 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の曲げ試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-12 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) のせん断試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-13 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の界面シャルピー衝撃試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-14 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D のマクロ組織
- 写真 3.1-15 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D のミクロ組織
- 写真 3.1-16 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D の引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-17 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D の曲げ試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-18 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D のシャルピー衝撃試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-19 クラッド材の歪み時効処理材の軽圧下冷間圧延後の外観写真
- 写真 3.1-20 クラッド材の 500°C×2,000h 歪み時効処理後の試験片の外観写真
- 写真 3.1-21 クラッド材の (600×1h⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理後の試験片の外観写真
- 写真 3.1-22 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の断面ミクロ組織の長時間熱処理による変化
- 写真 3.1-23 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の断面ミクロ組織の長時間熱処理による変化
- 写真 3.1-24(a) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の断面ミクロ組織の長時間熱処理による変化 (EHP/Ni 界面)
- 写真 3.1-24(b) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の断面ミクロ組織の長時間熱処理による変化 (Ni/SQV2A 界面)
- 写真 3.1-25 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(/EHP)」) の断面ミクロ組織の長時間熱処理による変化
- 写真 3.1-26 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の室温引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-27 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の室温引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-28 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の室温引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-29 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の室温引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-30 クラッド材の長時間熱処理材の曲げ試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-31 クラッド材の長時間熱処理材のせん断試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-32 クラッド材の 500°C×2,000h 歪み時効処理後の界面シャルピー衝撃試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-33 クラッド材の (600⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理後の界面シャルピー衝撃試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-34 CBB 試験状況

- 写真 3.1-35 圧延クラッド界面の CBB 試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-36 爆着クラッド界面の CBB 試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-37 クラッド界面の CBB 試験後の表面観察結果
- 写真 3.1-38 クラッド界面の CBB 試験後の UCC 評価結果
- 写真 3.1-39 母材の CBB 試験後の試験片外観および表面観察結果
- 写真 3.1-40 SUS316L 母材の CBB 試験後の断面観察結果
- 写真 3.1-41 圧延クラッド材の溶接継手の外観写真
- 写真 3.1-42 爆着クラッド材の溶接継手の外観写真
- 写真 3.1-43 クラッド材の溶接継手のステップ冷却処理後の外観写真
- 写真 3.1-44 クラッド材の溶接継手の 500°C×2,000h 熱時効処理後の外観写真
- 写真 3.1-45 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 A のステップ冷却処理後のマクロ組織
- 写真 3.1-46 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 B のステップ冷却処理後のマクロ組織
- 写真 3.1-47 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 C の 500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織
- 写真 3.1-48 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 D の 500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織
- 写真 3.1-49 圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）／溶接継手 E の 500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織
- 写真 3.1-50 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SUS316L/EHP」）／溶接継手 F の 500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織
- 写真 3.1-51 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の溶接パターン A のステップ冷却処理後の断面ミクロ組織
- 写真 3.1-52 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の溶接パターン B のステップ冷却処理後の断面ミクロ組織
- 写真 3.1-53(a) 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の溶接パターン A のステップ冷却処理後の断面ミクロ組織（EHP/Ni 界面）
- 写真 3.1-53(b) 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の溶接パターン A のステップ冷却処理後の断面ミクロ組織（Ni/SQV2A 界面）
- 写真 3.1-54(a) 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の溶接パターン B のステップ冷却処理後の断面ミクロ組織（EHP/Ni 界面）
- 写真 3.1-54(b) 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の溶接パターン B のステップ冷却処理後の断面ミクロ組織（Ni/SQV2A 界面）
- 写真 3.1-55 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面ミクロ組織
- 写真 3.1-56 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の溶接パターン B の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面ミクロ組織

- 写真 3.1-57 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織
- 写真 3.1-58 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン B の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織
- 写真 3.1-59 圧延クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織
- 写真 3.1-60 圧延クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン B の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織
- 写真 3.1-61 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織
- 写真 3.1-62 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン B の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織
- 写真 3.1-63 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン A のステップ冷却材の引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-64 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン A のステップ冷却材の引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-65 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-66 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-67 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-68 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-69 クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材の曲げ試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-70 圧延クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-71 爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-72 疲労き裂伝播試験状況
- 写真 3.1-73 圧延クラッド材①/溶接継手 A の疲労き裂進展試験後の試験片外観
- 写真 3.1-74 圧延クラッド材③/溶接継手 E の疲労き裂進展試験後の試験片外観
- 写真 3.1-75 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手 A の CBB 試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-76 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手 A の CBB 試験後の表面観察結果
- 写真 3.1-77 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手 B の CBB 試験後の試験片外観写真

- 写真 3.1-78 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 B の CBB 試験後の表面観察結果
- 写真 3.1-79 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 C の CBB 試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-80 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 C の CBB 試験後の表面観察結果
- 写真 3.1-81 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 D の CBB 試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-82 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 D の CBB 試験後の表面観察結果
- 写真 3.1-83 圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）／溶接継手 E の CBB 試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-84 圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）／溶接継手 E の CBB 試験後の表面観察結果
- 写真 3.1-85 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SSUS316L/EHP」）／溶接継手 F の CBB 試験後の試験片外観写真
- 写真 3.1-86 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SSUS316L/EHP」）／溶接継手 F の CBB 試験後の表面観察結果
- 写真 3.1-87 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 A の CBB 試験後の断面観察結果
- 写真 3.1-88 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 B の CBB 試験後の断面観察結果
-
- 写真 3.2-1 DBC 試験片の圧痕加工用ブリネル硬度計の外観
- 写真 3.2-2 圧痕加工後の DBC 試験片の外観
- 写真 3.2-3 SUS304 製すきま材の外観（100 メッシュ、0.2mmt）
- 写真 3.2-4 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験装置の外観-その 1（ γ 線照射セル内）
- 写真 3.2-5 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験装置の外観-その 2（線照射セル内）
- 写真 3.2-6 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験装置外観-その 3（ γ 線照射セル外）
- 写真 3.2-7 石英ガラス製ホルダへの DBC 試験片の設置状況
- 写真 3.2-8 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片の外観
- 写真 3.2-9 SUS316L の γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片の SEM 像（350°C×1,500h）
- 写真 3.2-10 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片の蛍光探傷試験結果
- 写真 3.2-11 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片断面の光学顕微鏡写真（試験温度：350°C）
- 写真 3.2-12 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片のストラウス試験条件による腐食状況

- 写真 3.2-13 25Cr-35Ni-EHP 鋼の 350°C γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片のスト
ラウス試験条件による腐食後の光学顕微鏡写真
- 写真 3.2-14 SUS316L の 350°C γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片によるストラウ
ス試験条件による腐食後の光学顕微鏡写真
- 写真 3.2-15 350°C γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片によるストラウス試験条件
による腐食後の SEM 像 ($\times 1,000$)
- 写真 3.2-16 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後のすきま材 (SUS304 製メッシュ) の外観
- 写真 3.2-17 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験片のすきまに配置した SUS304 製メッシュの SEM
像
- 写真 3.2-18 シャルピー試験片の熱時効処理のための石英ガラスへの封入状態
- 写真 3.2-19 熱時効処理後のシャルピー試験片の外観
- 写真 3.2-20 熱時効処理材のシャルピー試験後の試験片外観 (板組「EHP/316L」および「EHP
/Ni めっき/316L」)
- 写真 3.2-21 熱時効処理材のシャルピー試験後の破断面の SEM 像
- 写真 3.2-22 γ 線照射場熱時効試験の供試材外観および石英管封入—熱時効処理後の外観
- 写真 3.2-23 γ 線照射場熱時効試験装置の外観
- 写真 3.2-24 熱時効処理および γ 線照射場熱時効処理後の試験片外観
- 写真 3.2-25 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による腐食
後の光学顕微鏡写真
- 写真 3.2-26 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理—ストラウス試験
条件による腐食後の光学顕微鏡写真
- 写真 3.2-27 板組「EHP/Ni/A533B」クラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による腐
食後の光学顕微鏡写真
- 写真 3.2-28 板組「EHP/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による腐
食後の SEM 像
- 写真 3.2-29 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理—ストラウス試験
条件による腐食後の SEM 像
- 写真 3.2-30 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による
腐食後の SEM 像
- 写真 3.2-31 板組「EHP/(Ni めっき)/SUS316L」のクラッド材の 750°C \times 1,500h 熱時効処理
における 25Cr-35Ni-EHP 鋼の材質変化の違い
- 写真 3.2-32 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400°C \times 1,500h 熱時効処理における
25Cr-35Ni-EHP 鋼の材質変化の違い
- 写真 3.2-33 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効処理条件による腐食状況の違い(光
学顕微鏡写真)
- 写真 3.2-34 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効処理条件による腐食状況の違い
(SEM 写真)

- 写真 3.3-1 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 33.5%)
- 写真 3.3-2 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 46.9%)
- 写真 3.3-3 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 56.1%)
- 写真 3.3-4 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 63.7%)
- 写真 3.3-5 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 69.6%)
- 写真 3.3-6 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 79.7%)
- 写真 3.3-7 レーザ肉盛溶接金属部の時効処理後 (PWHT) のマイクロ組織 (時効温度 : 500°C)
- 写真 3.3-8 レーザ肉盛溶接金属部の時効処理後 (PWHT) のマイクロ組織 (時効温度 : 550°C)
- 写真 3.3-9 レーザ肉盛溶接金属部の時効処理後 (PWHT) のマイクロ組織 (時効温度 : 600°C)

略号表

BWR	: Boiling Water Reactor	/ 沸騰水型軽水炉
CBB	: Clevised Bend Beam	/ すきま付き定ひずみ曲げ試験
CCIM	: Cold Crucible Induction Melting	/ 磁気浮上型高周波誘導溶解
DBC	: Double Brinell Crevice	/ ブリネル圧痕隙間腐食試験
EAC	: Environmentally Assisted Cracking	/ 環境誘起割れ
EB	: Electron Beam (Remelting)	/ 電子ビーム (溶解)
EBSD	: Electron Backscatter Diffraction	/ 後方電子線回折
EDS	: Energy dispersive X-ray spectrometry	/ エネルギー分散型 X 線分析
EHP	: Extra High Purity	/ 超高純度
EPMA	: Electron Probe Micro Analyzer	/ 電子線マイクロアナライザ
FEM	: Finite Element Method	/ 有限要素法
GDMS	: Glow Discharge Mass Spectrometry	/ グロー放電質量分析
IASCC	: Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking	/ 照射誘起応力腐食割れ
IGSCC	: Intergranular Stress Corrosion Cracking	/ 粒界応力腐食割れ
LMFBR	: Liquid Metal Fast Breeder Reactor	/ 液体金属冷却高速増殖炉
NRC	: Nuclear Regulatory Commission	/ アメリカ合衆国原子力規制委員会
MPC	: Martensitic Path Corrosion	/ 加工誘起マルテンサイトや残留フェライトのスピノーダ ル分解による結晶面レベルでの高 Cr 面および低 Cr 面の生成に伴う粒界および粒内の耐 食性の低下域
PDE	: Plasma Driven Excitation	/ 低速電子励起
PWHT	: Post Welding Heat Treatment	/ 溶接後熱処理
PWR	: Pressurized Water Reactor	/ 加圧水型軽水炉
RIS	: Radiation Induced Segregation	/ 照射誘起偏析
SAW	: Submerged Arc Welding	/ サブマージアーク溶接
SCC	: Stress Corrosion Cracking	/ 応力腐食割れ
SCWR	: Supercritical-water-cooled reactor	/ 革新的水冷却炉
SEM	: Scanning Electron Microscope	/ 走査型電子顕微鏡
TGSCC	: Transgranular Stress Corrosion Cracking	/ 粒内応力腐食割れ
TIG	: Tungsten Inert-gas Arc Welding	/ タングステンイナートガスアーク溶接
TTC	: Time Temperature Corrosion	/ 鋭敏化曲線
UT	: Ultrasonic Test	/ 超音波探傷試験
VAR	: Vacuum Arc Remelting	/ 真空アーク再溶解
VIM	: Vacuum Induction Melting	/ 真空誘導溶解
ZAF Correction Method	: ZAF 補正法	/ 特性 X 線の分光分析 (EDS) において目的元素の定量に用 いる補正法。試料が厚くなると (測定元素により違いがあるが、ほぼ数 10nm 以上)、放出 される特性 X 線の強度は原子番号効果 Z、吸収効果 A、蛍光励起効果 F を受けるのでこれ

らの 3 つの効果を補正する必要がある。未知試料と標準試料(単純組成の化合物)から得た X 線の相対強度を求め、その値にこれら 3 つの効果の補正をほどこす

1. はじめに

福島第一原子力発電所のシビアアクシデント以降、従来にも増して軽水炉や核燃料再処理施設などの商業原子力システムの安全性確保が必須条件となることが予想される。原子力システムの安全性確保とは周辺環境への放射性物質の異常な放出を防止することであり、放射性物質を閉じ込めることにほかならない。しかしながら、原子力システムの黎明期から材料の腐食による経年劣化によって閉じ込め機能の一部喪失する事例が報告されてきた。

ステンレス鋼はその耐食性の高さから原子力システム用材料として多用されてきた。しかしながら、軽水炉のような高温高圧環境や核燃料再処理施設のような高濃度の硝酸環境のような極めて厳しい環境に曝される環境において応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking / 以下、SCC と略す）や粒界腐食の発生が報告されてきた。このような腐食損傷を防止する目的で耐 SCC や耐粒界腐食性を向上させた低炭素ステンレス鋼（SUS316L）や極低炭素ステンレス鋼（R-SUS304ULC）が開発された。しかし、このような対策材であっても SCC や粒界腐食の発生が報告されている。さらに、SCC 感受性が極めて低いとされる PWR の一次冷却水環境においても SUS316 での SCC の事例が報告されるに至っている。割れによるき裂や腐食による減肉は材料の強度低下につながることから交換可能な構造物については交換が行われる。しかしながら、放射性物質を閉じ込める境界部は高放射線量環境となるため、交換作業が容易ではないことから、き裂や減肉を評価することで腐食損傷を残したままの運転継続や Ni 基合金を用いた補修作業が行われている。しかしながら、耐食性を高めた高 Cr-Ni 基合金を用いた補修溶接においても高温割れが発生し、SCC による割れと区別がつかないケースが見受けられる。

材料腐食による原子力システムの経年劣化を防止し、想定以上の環境に材料が直面しても材料腐食に対する安全性が確保できる、より耐食性の高い材料への期待が高まっている。ステンレス鋼の耐食性を向上させる方法として従来から超高純度（Extra High Purity / 以下、EHP と略す）オーステナイト系ステンレス鋼（以下、EHP ステンレス鋼と略す場合あり）を提案してきた。EHP ステンレス鋼は核燃料再処理施設のような高濃度の硝酸環境においても優れた耐粒界腐食性を示し、実用化に必要な主要部材にも適用可能であることを報告している。また、高純度化により溶接時の高温割れを低減可能なことも報告しており、実用化研究が進められている。

しかしながら、超高純度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。特に、溶接部においては金属組織の粗大化による強度低下が避けられない。したがって、原子力システムの圧力バウンダリーに EHP ステンレス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するため、EHP ステンレス鋼の薄板を現行の低合金鋼やステンレス鋼の表面に接合することによる高性能複合素材を開発することを目的とする。この複合素材が実現できれば、表面層は優れた耐久性を有する EHP ステンレス鋼、母材は強度が高く廉価な従来鋼であるため、高性能でありながら低コストで十分な強度を有する材料が得られ、革新的原子力システムに不可欠な耐久性の高い実用的な構造部材となる。また、この開発技術は現行原子力プラント機器の表面に EHP ステンレス鋼を肉盛りする技術

としても応用でき、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. 業務計画

2.1 全体計画

耐照射性と耐食性に優れた超高純度仕様の高 Cr-高 Ni 系の安定オーステナイト系ステンレス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て原子力プラント安全性の向上に資するため、以下の3項目を実施する。

- (i) EHP 合金応用部材の開発
- (ii) 開発材の環境適用性評価
- (iii) 接合技術の評価選定

2.1.1 実施内容

2.1.1.1 EHP 合金応用部材の開発

- ・クラッド技術開発に必要な EHP ステンレス鋼を溶製し、それらの製造技術開発に必要な材料特性データを取得する。クラッド化に必要な現行ステンレス鋼や低合金鋼を入手して材料の基礎特性データを取得する。
- ・動的拡散接合法などによるクラッド材の試作試験の実施、さらに超音波探傷試験などの評価試験により最適な接合条件を選定する。
- ・試作、評価試験で選定した最適条件にて実機化を想定した規模のクラッド材を製作する。
- ・クラッド材を適用する実用機器を想定して温度サイクルなどの模擬環境条件での健全性評価試験を実施して接合材の長期健全性の評価データを取得する。

2.1.1.2 開発材の環境適用性評価

- ・材料特性が異なる素材によるクラッド板材などを実機に適用する上での照射時効に係わる相互拡散や熱膨張係数の違いによる適用上の制約や最適接合条件などに関して有限要素法解析などにより評価する。
- ・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体を製作し、照射時効脆化の模擬評価試験を実施する。

2.1.1.3 接合技術の評価選定

- ・EHPステンレス鋼のレーザクラディングにおけるレーザ肉盛溶接部の施工健全性および溶接金属の特性評価を実施し、レーザによるEHPステンレス鋼の溶接技術の実機適用性を明確にする。

2.1.2 実施体制およびスケジュール

全体の実施体制およびスケジュールを表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 全体実施体制およびスケジュール

業務項目	年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度
1. EHP合金応用部材開発 (神戸製鋼所)	製造試験		候補材料の試験評価	実用材料の試験評価	材料の最適化試験評価
	予備評価		材料特性試験/解析評価	照射・熱環境試験/解析評価	実機適用性試験/解析評価
2. 開発材の環境適用性評価 (三菱総合研究所)	予備検討		接合性試験	施工健全性評価1	施工健全性評価2
	予備評価		接合性評価	施工条件評価	施工健全性評価
3. 接合技術の評価選定 ①手法開発・評価試験 (大阪大学)	予備評価		接合性評価	施工条件評価	施工健全性評価
	②接合技術解析評価 (福井工業大学)				

2.2 平成27年度の成果の目標および業務の実施方法

2.2.1 実施内容

平成27年度は項2.2.1.1、項2.2.1.2および項2.2.1.3の(1)および(2)を実施する。

2.2.1.1 EHP合金応用部材の開発

25Cr-35Ni-EHPステンレス鋼を合せ材、JIS G 3120 SQV2A（圧力容器用材料 ASTM A533B相当材／低合金鋼。以下、SQV2Aと略す）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する。

2.2.1.2 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）

過年度の成果を踏まえて、 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。また、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を評価する。

2.2.1.3 接合技術の評価選定（再委託先：大阪大学、福井工業大学）

(1) 手法開発・評価試験（再委託先：大阪大学）

レーザクラッドによる25Cr-35Ni-EHPステンレス鋼被覆法の実機適用に向けた施工健全性および接合性能を評価し、適用性をまとめる。

(2) 接合技術解析評価（再委託先：福井工業大学）

25Cr-35Ni-EHPステンレス鋼のレーザクラッド溶接部の組織学的評価を行い、実機適用における溶接部の健全性を検証する。評価試験では、試料作製装置を用いて、試験片を準備する。

2.2.1.4 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、実施計画等を協議するため打ち合わせを行う。

2.2.1.5 まとめ・評価

本業務の4年間の結果についてまとめ、開発材の技術的適用性を評価する。

2.2.2 実施体制およびスケジュール

平成27年度の実施体制およびスケジュールを表2.2-1に示す。

3. 平成 27 年度の実施内容および成果

3.1 EHP 合金応用部材の開発

25Cr-35Ni-EHP ステンレス鋼(以下、EHP 鋼と略す場合あり)を合せ材、JIS G 3120 SQV2A (以下、SQV2A と略す) および SUS316L ステンレス鋼(以下、SUS316 と略す)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。

3.1.1 供試材

本項の「クラッド界面の長期健全性」および「溶接部の長期健全性および耐食性」の評価試験に用いた供試材は平成 26 年度に試作製造した 25Cr-35Ni-EHP 鋼を合せ材、SQV2A および SUS316L をベース材とする熱間圧延法および爆発圧着法による大型クラッド材である。詳細を表 3.1-1 に示す。

- ・圧延クラッド板材①：板組「EHP/SQV2A」
- ・圧延クラッド管材②：板組「EHP/SUS316L」
- ・圧延クラッド材板③：板組「EHP/SUS316L/EHP」
- ・爆着クラッド板材④：板組「EHP/SQV2A」
- ・爆着クラッド管材⑤：板組「EHP/SUS316L」
- ・爆着クラッド材板⑥：板組「EHP/SUS316L/EHP」

写真 3.1-1～7 にクラッド材の外観写真を示す。また、表 3.1-2 に合せ材に用いた 25Cr-35Ni-EHP 鋼の化学成分を示す。また、表 3.1-3 および表 3.1-4 にそれぞれベース材に用いた SQV2A および SUS316L の化学成分を示す。

3.1.2 爆着クラッド材⑤(板組「EHP/SUS316L」の管)の評価試験

平成 26 年度に試作製造した爆着クラッド材⑤(板組「EHP/SUS316L」)については、評価試験を実施していなかったため、今年度、クラッド材およびその溶接継手の評価試験を実施した。

3.1.2.1 クラッド材

爆着クラッド材⑤(板組「EHP/SUS316L」)に対する評価試験項目は以下のとおりである。

- ・断面マイクロ組織観察
- ・硬さ測定
- ・引張試験
- ・曲げ試験
- ・せん断強さ試験
- ・界面シャルピー衝撃試験

(1) 断面マイクロ組織観察

爆着クラッド材⑤について断面組織観察を実施した。写真 3.1-8 に断面マイクロ組織観察結

果を示す。観察した領域では、割れや異常な合金層は認められなかったが、一般的に良好な界面接合状態を示す波状形態が顕著ではないようであった。また、界面近傍の組織（特に、合せ材の 25Cr-35Ni-EHP 鋼）は加工状態のようであった。

(2) 硬さ測定

前項で断面組織観察を行った試料についてビッカース硬さ分布測定を実施した。試験荷重は 100 gf である。結果を 図 3.1-1 に示す。板材の爆着クラッド材に比べて合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼およびベース材 SUU316L とも硬さが高いようである。これは、図 3.1-2 に示すように当該のクラッド材の試作製造に際して、内側から合せ材の 25Cr-35Ni-EHP 鋼管、その外側にベース材の SUS316L 管をセットし、さらに 25Cr-35Ni-EHP 鋼管内面に爆薬を設置して、その爆発力により接合した。この際、爆着の衝撃を支えて塑性変形を抑えるため、これらの外側に補強材 S45C (外径 530×厚さ 100×高さ 1,000mm) を設置しているが、写真 3.1-9 に示すように補強材が粉々に破壊し、自由変形になった。このため、表 3.1-5 に示すように管径が拡大するような塑性変形を生じたためと推定される。

(3) 引張試験

爆着クラッド材⑤について JIS G 0601「クラッド鋼の試験方法」および JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に準拠して室温引張試験を実施した。試験条件は以下の通りとした。

- ・試験装置：島津製作所製 UH 500 kN/XR 型自動引張試験機
- ・試験速度：耐力まで 15 MPa/s、耐力以降 18mm/min
- ・測定項目：0.2%耐力、引張強さ、伸び、破断位置

表 3.1-6 に引張試験結果を示す。図 3.1-3 にクラッド材の引張特性のまとめを示す。また、写真 3.1-10 に引張試験後の試験片外観を示す。

JIS G 3601「ステンレスクラッド鋼」では、クラッド材の引張強さおよび 0.2 %耐力について以下の式により下限値を定めている。

$$\sigma_y = \frac{t_1 \sigma_{y1} + t_2 \sigma_{y2}}{t_1 + t_2}$$

$$\sigma_B = \frac{t_1 \sigma_{B1} + t_2 \sigma_{B2}}{t_1 + t_2}$$

ここで、 σ_y ：クラッド鋼の降伏点または耐力の規定下限値 (N/mm²)、 σ_{y1} ：ベース材の降伏点または耐力の規定下限値 (N/mm²)、 σ_{y2} ：合せ材の耐力の規定下限値 (N/mm²)、 σ_B ：クラッド鋼の引張強さの規定下限値 (N/mm²)、 σ_{y1} ：ベース材の引張強さの規定下限値 (N/mm²)、 σ_{y2} ：合せ材の引張強さの規定下限値 (N/mm²)、 t_1 ：ベース材の厚さ (mm)、 t_2 ：合せ材の厚さ (mm) である。合せ材である 25Cr-35Ni-EHP 鋼は規格化された材料ではないが、ここでは平成 24 年度に得られた常温引張特性を参考にして便宜上、当該材の引張強さの下限値を 480 MPa、0.2 %耐力の下限値を 175 MPa と定め、クラッド鋼の引張強さおよび 0.2 %耐力の下限値を算出した。表 3.1-6 にはこのようにして計算した規格値を併記した。引張強さは 620～638MPa であり、規格値（規格値 480MPa 以上）を上回った。同様に、0.2%耐力も規格値を上

回った。伸びに関しては、約 20%で、他の圧延クラッド材では伸びの規格値を上回り、また板材の爆着クラッド材では規格値と同程度の値を示しているにも係わらず、爆着クラッド材⑤ではこれらを大幅に下回っていた。これらは、上述のように爆着による塑性変形の影響と推定され、爆着後の再溶体化処理などの歪み取り処理が必要と考えられる。

(4) 曲げ試験

爆着クラッド材⑤について JIS G 0601「クラッド鋼の試験方法」および JIS Z 2248「金属材料の曲げ試験方法」に準拠して曲げ試験を実施した。曲げ試験は管内面の合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼が曲げ外側になるようにして実施した（裏曲げ）。曲げ角度は 180° とし、曲げ直径は全厚の 2 倍となるものを用いた。表 3.1-7 に曲げ試験結果を示す。写真 3.1-11 に曲げ試験後の試験片外観を示す。いずれも割れなどは発生せず、良好であった。

(5) 界面せん断強さ試験

爆着クラッド材⑤について JIS G 0601「クラッド鋼の試験方法」に準拠して界面せん断強さ試験を実施した。せん断試験片形状を図 3.1-4 に示す。せん断試験方法は図 3.1-5 に示すとおりである。表 3.1-8 および図 3.1-6 に試験結果を示す。写真 3.1-12 にせん断試験後の試験片外観を示す。爆着クラッド材⑤のせん断強さは約 590MPa で、圧延クラッド材や板材の爆着クラッド材に比べて極めて高く、JIS G 3601「ステンレスクラッド鋼」に規定されたせん断強さ 200 MPa を上回った。

(6) 界面シャルピー衝撃試験

爆着クラッド材⑤について界面シャルピー衝撃試験を実施した。クラッド材の界面シャルピー衝撃試験に関する JIS の規定はないが、ここでは、JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」に準拠して実施した。図 3.1-7 に界面シャルピー衝撃試験片の加工要領を示す。クラッド材の板厚方向をシャルピー衝撃試験片の長手方向とし、接合界面に 2mmV ノッチを入れるためには合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の板厚が不足しているため、タブ板を EB 溶接した。表 3.1-9 に界面シャルピー衝撃試験結果を示す。図 3.1-8 に試験温度と上部棚吸収エネルギー (USE) および脆性破面率の関係を示す。写真 3.1-13 に界面シャルピー衝撃試験後の試験片外観を示す。また、図 3.1-9 にクラッド材の界面シャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめを示す。爆着クラッド材⑤の延性-脆性遷移温度はベース材の SUS316L と同様-196℃以下で、吸収エネルギーは試験温度 0~100℃の範囲内で 180~240 J 以上と、比較的高い値を示した。これらは、同じ板組 (EHP/SUS316L) の圧延クラッド材②および③のそれより高く、また、爆着クラッド材⑥より低い値であった。爆着クラッド材⑥より低いのは、爆着による塑性変形の影響と推定される。

3.1.2.2 溶接継手

爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) を用いて溶接継手 (継手略号を D と称す) を製作し、以下に示す評価試験を実施した。溶接施工条件については、項 3.1.4 に記すとおり

である。

- ・マクロおよびマイクロ組織観察
- ・硬さ分布測定
- ・引張試験
- ・曲げ試験
- ・シャルピー衝撃試験

(1) マクロおよびマイクロ組織観察

爆着クラッド材⑤／溶接継手 D について断面マクロおよびマイクロ組織観察を実施した。写真 3.1-14 に断面マクロ組織観察結果、写真 3.1-15 にマイクロ組織観察結果を示す。

(2) 硬さ分布測定

前項で断面組織観察を行った試料についてビッカース硬さ分布測定を実施した。試験荷重は 100 g である。ビッカース硬さは図 3.1-10 に示すように合せ材の板厚中央位置 ($t/2$) およびベース材の板厚 $t/4$ の位置で溶金から板幅方向に溶金部～母材にかけて測定した。図 3.1-11 に圧爆着クラッド材⑤／溶接継手 D のビッカース硬さ分布を示す。合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の母材のビッカース硬さは Hv 240～290 と、他のクラッド材に比べて高かった。これは、項 3.1.2 で述べたようにクラッド製造時の塑性変形により母材部が加工硬化しているためと推定される。また、溶金部および HAZ の硬さは Hv220 程度である。一方、ベース材の SUS316L の母材のビッカース硬さも約 Hv 300 と、他のクラッド材に比べて高かった。また、溶金部の硬さは Hv200、HAZ は Hv220～240 である。

(3) 引張試験

爆着クラッド材⑤／溶接継手 D について JIS G 0601 「クラッド鋼の試験方法」および JIS Z 2241 「金属材料引張試験方法」に準拠して室温引張試験を実施した。試験条件は項 3.1.2.1 と同じである。表 3.1-10 に引張試験結果を示す。図 3.1-12 にクラッド材の溶接継手の引張特性のまとめを示す。また、写真 3.1-16 に引張試験後の試験片外観を示す。引張強さは約 620MPa と、同じ SUS316L をベース材とする板組の圧延クラッド材②および③、さらに爆着クラッド材⑥より高く、規格値（規格値 480MPa 以上）を上回った。伸びは約 26% で、前記のクラッド材より小さかった。これは、上述のように母材部の爆着による塑性変形の影響と推定され、爆着後の再溶体化処理などの歪み取り処理が必要と考えられる。

(4) 曲げ試験

爆着クラッド材⑤／溶接継手 D について JIS Z 2248 「金属材料の曲げ試験方法」および JIS Z 3122 「突合せ溶接継手の曲げ試験方法」に準拠して曲げ試験を実施した。曲げ試験は管内面の合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼が曲げ外側になるようにして実施した（裏曲げ）。なお、元板厚ままでは、曲げ半径が大きくなるため、JIS G 0601 の規定に従い全板厚が 15mm になるようにベース材を減厚した。側曲げ試験は溶接ビード長さを 15mm とした。曲げ角度は

180° とし、曲げ半径が減厚の板厚の2倍となるようにした。表 3.1-11 に爆着クラッド材⑤／溶接継手 D の曲げ試験結果を示す。また、写真 3.1-17 に曲げ試験後の試験片外観を示す。裏曲げ試験では軽微な割れが発生したが、側曲げ試験では割れは発生しなかった。

(5) シャルピー衝撃試験

爆着クラッド材⑤／溶接継手 D について JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」および JIS Z 3128「溶接継手の衝撃試験方法」に準拠して溶金部に 2mmV ノッチを入れた試験片および HAZ に 2mmV ノッチを入れた試験片についてシャルピー衝撃試験を実施した。図 3.1-13 にシャルピー衝撃試験片の加工要領を示す。表 3.1-12 にシャルピー衝撃試験結果を示す。図 3.1-14 に試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面率の関係を示す。図 3.1-15 に上部棚吸収エネルギー (USE) のまとめを示す。また、写真 3.1-18 にシャルピー衝撃試験後の試験片外観を示す。延性－脆性遷移温度は溶金部および HAZ とも -196℃以下と推定される。上部棚吸収エネルギーは溶金部では試験温度 -50～100℃で約 180 J、HAZ では試験温度 0～100℃で 200 J で、溶金部の上部棚吸収エネルギーは同じ板組のそれと同等であったが、HAZ の上部棚吸収エネルギーは同じ板組のそれより小さかった。

3.1.3 クラッド界面の長期健全性評価試験

平成 26 年度に試作製造した熱間圧延法および爆発圧着法による大型クラッド材を用いて長時間運転時の経年劣化を想定したクラッド界面の健全性評価試験を実施した。

3.1.3.1 試験方法

(1) 供試材

評価したクラッド界面は以下の通りである。

- ・圧延クラッド板材①：板組「EHP/SQV2A」
- ・圧延クラッド管材②：板組「EHP/SUS316L」→製管前の板材を供試
- ・爆着クラッド板材④：板組「EHP/SQV2A」
- ・爆着クラッド板材⑥：板組「EHP/SUS316L (／EHP)」→一方の界面を供試

(2) 長時間熱処理条件

長時間運転時の経年劣化を想定し、表 3.1-13 に示すような歪み時効および熱疲労処理を施した。

- ・歪時効：15%予歪み－500℃×2,000h
- ・熱疲労：(600×1h⇔200℃)×229 サイクル、Total 1,500h

熱処理によりどの程度時効が起こるかを評価する方法として、クリープ破断寿命の推定に用いられている Larson Miller パラメータを拡張した時効パラメータ TP が提案されている¹⁾。

$$TP=T \{10+\log t\} \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここで、T は絶対温度で表わした加熱温度、t は保持時間である。

上式を用いて 288℃で SQV2A を 40 年間使用されたと仮定すると TP は 8.72 となる。一方、本事業で採用した 500℃×2,000h 歪み時効処理について計算すると表 3.1-14 に示すように TP は 10.28 となるため、本試験で実施した熱処理は十分な時効が施されたと考えられる。ちなみに、熱疲労処理材については 600×1h の保持時間を加算すると TP は 10.79 となる。

歪み時効処理材については、照射の影響を冷間圧延による歪みによって模擬した。表 3.1-15 に示すように SUS316L をベース材とする圧延クラッド材②および爆着クラッド材⑥については、所定の冷間圧延を施すことができたが、SQV2A をベース材とする圧延クラッド材①および爆着クラッド材④については、1 パス目でクラッド材の端面で界面がはく離したため、冷間圧延を中断した。写真 3.1-19 に軽圧下冷間圧延前後のクラッド材の外観を示す。これらを恒温保持炉に挿入し、500℃で 2,000h 保持した。写真 3.1-20 に 500℃×2,000h 歪み時効処理後の試験片外観を示す。

一方、熱疲労処理材については、600℃×1h 保持後、150℃/h の速度で 200℃まで冷却し、その後、150℃/h の速度で 600℃まで再加熱し、1h 保持後、同様な処理を繰り返す熱疲労処理を施した。サイクル数は 229 回、Total 処理時間は 1,500h である。図 3.1-16 に温度チャートの例を示す。写真 3.1-21 に (600×1h⇔200℃)×229 サイクル・熱疲労処理後の試験片外観を示す。

3.1.3.2 試験結果

上記の長時間熱処理を施したクラッド材について表 3.1-16 に示す特性評価試験を実施した。

- ・断面マイクロ組織観察
- ・硬さ分布測定
- ・界面組織観察 [EPMA]
- ・側曲げ試験
- ・せん断試験 [界面剥離強度]
- ・界面シャルピー衝撃試験
- ・応力腐食割れ試験 [CBB 試験]
- ・平面曲げ疲労試験

図 3.1-17～18 に評価試験片の採取要領の例を示す。試験方法は項 3.1.2.1 と同じである。

(1) 断面マイクロ組織観察

写真 3.1-22～25 に長時間熱処理を施したクラッド材の断面マイクロ組織観察結果を示す。圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) および圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) については、500℃×2,000h 歪み時効処理材および (600⇔200℃)×229cycle 熱疲労処理材とも界面の Ni めっき層を挟んで組織変化は認められない。一方、爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) および爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L」) に関しては、長時間熱処理により 25Cr-35Ni-EHP 鋼がやや黒くエッチされるようである。これらが、用いた腐食液による影響によるのか、変質相なのかは不明である。なお、界面近傍の加工層は軽減されているよ

うである。

(2) 硬さ測定

前項で断面組織観察を行った試料についてビッカース硬さ分布測定を実施した。試験荷重は 100 gf である。結果を図 3.1-19~22 に示す。圧延クラッド材の 25Cr-35Ni-EHP 鋼の硬さは Hv150 前後であり、溶体化処理材の硬さと同等レベルであった。圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の未処理材では、接合界面近傍の 25Cr-35Ni-EHP 鋼の硬さがやや増大する傾向を示した後、SQV2A 層で急激に増大し、Hv 270~300 の硬さを呈する。長時間熱処理を施すと SQV2A 層の硬さは Hv200 程度まで低下する。界面での下向きのピークは焼鈍軟化した Ni めっき層に該当すると想定され、界面近傍でやや軟化する傾向が認められ、長時間熱処理による変質層などは生成しなかったと推定される。また、圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）では、未処理材では 25Cr-35Ni-EHP 鋼から SUS316L にかけて硬さがやや増大するが、長時間熱処理により SUS316L の硬さは若干減少した。未処理材および長時間熱処理材とも接合界面に Ni めっき層に起因すると推定される軟化部が存在するが、界面近傍は 25Cr-35Ni-EHP 鋼および SUS31L とも硬化域は認められなかった。

爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）および爆着クラッド材⑥（「EHP/SUS316L/EHP」）のビッカース硬さ分布は同じ板組の圧延クラッド材のそれらに比べて高く、未処理材の合せ材の 25Cr-35Ni-EHP 鋼の硬さは Hv 200 程度、ベース材の SQV2A および SUS316L はそれぞれ Hv250 および Hv200 程度である。さらに、クラッド界面近傍での硬さの増加が認められ、また、爆着クラッド材⑥においては界面部でビッカース硬さはスパイク状になっている。これらは爆着による硬化が生じたと考えられる。これらに対して、長時間熱処理を施すとやや軟化するようである。

(3) EPMA ライン分析

前項で断面組織観察を行った試料について EPMA ライン分析を実施した。実施したのは長時間熱処理を施したクラッド材の内の 500°C×2,000h 歪み時効処理材である。装置および測定条件は以下のとおりである。

- ・ JEOL 製 X 線マイクロアナライザー JX8800RL
- ・ 加速電圧：15kV
- ・ 照射電流：0.3 μ A
- ・ 分析対象元素：Fe、Cr、Ni、C および Mo

分析長さは 1.5 mm とし、分析長さの中間位置 (0.75mm) がクラッド界面または Ni インサート材の中間位置となるようにした。すべて 25Cr-35Ni-EHP 鋼からライン分析を行った。図 3.1-23~26 に EPMA ライン分析結果を示す。圧延クラッド材①（板組「EHP/A533B」）の 25Cr-35Ni-EHP 鋼と Ni めっきとの界面に C が濃化している傾向が認められた以外は、500°C×2,000h 歪み時効処理によるクラッド界面の濃度変化域や金属間化合物を想定される様相は認められなかった。

(4) 引張試験

長時間熱処理を施したクラッド材について JIS G 0601「クラッド鋼の試験方法」および JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に準拠して室温引張試験を実施した。試験条件は項 3.1.2.1 と同じである。表 3.1-17 に長時間熱処理を施したクラッド材の引張試験結果を示す。図 3.1-27 に引張特性の比較図を示す。また、写真 3.1-26～29 に引張試験後の試験片外観を示す。板組「EHP/SQV2A」の圧延クラッド材①および爆着クラッド材④に関しては、引張強さは $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 歪み時効処理を施してもほとんど変化せず、 $(600 \leftrightarrow 200^{\circ}\text{C}) \times 229\text{cycle}$ 熱疲労処理によりやや低下する。伸びは引張強さに対応した変化を示す。一方、板組「EHP/SUS316L」の圧延クラッド材②および爆着クラッド材⑥の引張強さは $(600 \leftrightarrow 200^{\circ}\text{C}) \times 229\text{cycle}$ 熱疲労処理によりほとんど変化しないが、 $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 歪み時効処理により大幅に増大する。伸びも引張強さの増大に対応して低下する。これらは、硬さ変化には現れていないが、 σ 相などの晶出に起因すると推定される。

(5) 曲げ試験

長時間熱処理を施したクラッド材について JIS G 0601「クラッド鋼の試験方法」および JIS Z 2248「金属材料の曲げ試験方法」に準拠して曲げ試験を実施した。試験片はいずれも板厚 15mm の側曲げ試験片である。なお、曲げ試験片の幅方向となるクラッド板厚が 38mm を超えるものについては、JIS G 0601 の規定に従い全板厚が 38mm になるようにベース材を減厚した。曲げ角度は 180° とし、曲げ半径が減厚の板厚の 2 倍となるようにした。表 3.1-18 に長時間熱処理を施したクラッド材の曲げ試験結果を示す。また、写真 3.1-30 に曲げ試験後の試験片外観を示す。いずれのクラッド材も割れは発生せず、良好であった。

(6) 界面せん断強さ試験

長時間熱処理を施したクラッド材について JIS G 0601「クラッド鋼の試験方法」に準拠して界面せん断強さ試験を実施した。せん断試験片形状および試験方法はそれぞれ項 3.1.2.1 と同じである。なお、Ni インサートを含む爆着クラッド材④については、25Cr-35Ni-EHP 鋼/Ni 界面のせん断強さが評価できるように試験片を採取した。表 3.1-19 に爆着クラッド材のせん断試験結果を示す。図 3.1-28 にクラッド材のせん断強さのまとめを示す。写真 3.1-31 にせん断試験後の試験片外観を示す。爆着クラッド材④（板組「EHP/Ni/SQV2A」）を除いて、 $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 歪み時効処理や $(600 \leftrightarrow 200^{\circ}\text{C}) \times 229\text{cycle}$ 熱疲労処理によりせん断応力はほとんど変化せず、JIS G 3601「ステンレスクラッド鋼」に規定されたせん断強さ 200 MPa を上回った。爆着クラッド材④のせん断応力の低下はせん断応力が作用した界面（インサートした Ni シート）に起因するのかもしれない。

(7) 界面シャルピー衝撃試験

長時間熱処理を施したクラッド材について JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」に準拠して界面シャルピー衝撃試験を実施した。試験片は図 3.1-7 と同じ要領にて加工した。表 3.1-20 に $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 歪み時効処理を施したクラッド材の界面シャルピー衝撃

試験結果、表 3.1-21 に (600⇔200°C) × 229cycle 熱疲労処理を施したクラッド材の界面シャルピー衝撃試験結果を示す。図 3.1-29～32 に 500°C × 2,000h 歪み時効処理材の試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面率の関係、図 3.1-33～36 に (600⇔200°C) × 229cycle 熱疲労処理材の試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面率の関係を示す。図 3.1-37 に長時間熱処理を施したクラッド材の界面シャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギー (USE) のまとめを示す。また、写真 3.1-32～33 にシャルピー衝撃試験後の試験片外観写真を示す。長時間熱処理を施しても爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の (600⇔200°C) × 229cycle 熱疲労処理材を除いて、上部棚吸収エネルギーはほとんど変化しないようである。爆着クラッド材⑥の (600⇔200°C) × 229cycle 熱疲労処理後の上部棚吸収エネルギーが極端に小さいのは、同じクラッド材の 500°C × 2,000h 歪み時効処理材にみられるように、試験した範囲内では延性-脆性遷移温度が大幅に上昇しているためと推定される。なお、爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) では長時間熱処理によりかえって延性-脆性遷移温度が低下しているが、爆着による界面の加工硬化域が消失しているためと推定される。

(8) 平面曲げ疲労試験結果

500°C × 2,000h 歪み時効処理を施したクラッド材について JIS Z 2275 「金属平板の平面曲げ疲れ試験方法」に準拠して平面曲げ疲労試験結果を実施した。試験片は図 3.1-38 に示すようにクラッド界面から均等に切除して厚さ 5mm の板材を切出し、図 3.1-39 に示す寸法・形状の試験片に加工した。表 3.1-22～25 に 500°C × 2,000h 歪み時効処理を施したクラッド材の平面曲げ疲労試験結果を示す。図 3.1-40～43 に平面曲げ疲労試験による S-N 曲線図を示す。未処理材および 500°C × 2,000h 歪み時効処理材とも平面曲げによりクラッド界面がはく離することなく、母材から破断しており、500°C × 2,000h 歪み時効処理を施すとクラッド界面の疲労寿命がかえって長くなる傾向にあった。特に、圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) でその傾向が顕著であった。これらは、クラッド界面の接合性が良好なため、さらに歪み時効処理により母材の強度が増加したためと推定される。また、未処理材および時効処理材とも圧延クラッド材に比べて爆着クラッド材の低サイクル疲労寿命が長いようである。

(9) 応力腐食割れ試験 [CBB 試験]

長時間熱処理を施したクラッド材について界面の CBB 試験を実施した。クラッド界面の応力腐食割れ (SCC) を評価するため、図 3.1-44 に示すようにクラッド界面に引張応力が働くように 2t × 10w × 50L (mm) の試験片を採取した。その際、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の板厚が不足していたため、タブ板を EB 溶接した。また、SUS316L の応力腐食割れ感受性は表面硬化層が大きく関与していることが知られており、特にビッカース硬さ $H_v 300$ 以上で割れ感受性が増すと報告されている。本項の CBB 試験はクラッド界面の応力腐食割れを評価するものであるため、表面の状態はあまり関係しないと考えられるが、比較材の SUS316L 母材や項 3.1.4 で述べる溶接部継手の応力腐食割れ感受性に関しては、表面硬化層が影響すると考えられる。そこで、試験片製作に際して、表面硬化層が付与できるように平成 25 年度に実施したすき

ま付き SSRT 試験片加工時と同じフライス切削条件(回転送度:300rpm、送り速度:150min/min)にて表面を研削した。参考までに、25Cr-35Ni-EHP 鋼および SUS316L に関する断面のビッカース硬さ測定結果を図 3.1-45 に添付した。表層のビッカース硬さがもっとも高く、内部に進むにつれて急速に低下する傾向を示す。SUS316L の表面硬さは H_V 300 以上であったが、25Cr-35Ni-EHP 鋼の表面硬さは H_V 300 以下であった。25Cr-35Ni-EHP 鋼は高純度のため、表面硬化が生じにくいものと推定される。

試験は平成 15 年度軽水炉プラント標準化調査成果報告書「原子力発電用配管の応力腐食割れ試験方法の標準化調査研究」(経済産業省)²⁾ に準拠して実施した。試験条件は以下のとおりである。

- ・試験片形状(mm) : 2.0t×10w×50L
- ・試験環境 : 高温高压水中 (288°C、 $D_0 = 20$ ppm)、導電率 $0.1 \mu S/cm$ 以下
- ・応力状態 : 約 1.0 % 曲げ歪み
- ・試験時間 : 1,900 h

試験手順は以下のとおりである。

(a) すきま材 (グラファイトファイバウール) の洗浄

- ① 沸騰水環境にてグラファイトファイバウールを約 168h 浸漬洗浄した。
- ② 水圧 9MPa、温度 288°C の高温高压水環境にてグラファイトファイバウールを約 240h 浸漬洗浄した。

(b) 試験片の前処理

- ① 評価面以外には #600 乾式研磨を施した。
- ② 寸法測定を行った。
- ③ アセトンにて超音波洗浄 (脱脂洗浄) を行った。

(c) 応力負荷

- ① 溶接面がすきま腐食状態となるように下側 CBB 試験治具の上に試験片、グラファイトファイバウール、スペーサ、上側 CBB 試験治具の順に乗せ、ボルトにて締付け (応力負荷) を行った。

(d) 高温高压水中 CBB 試験

- ① 循環装置にて試験溶液を導電率 Cond. $0.1 \mu S/cm$ 以下、溶存酸素 D_0 濃度 20ppm に調整した。
- ② 応力負荷後の試験片をオートクレーブに装荷した。
- ③ オートクレーブ本体を蓋板まで上昇させ、所定のトルクでオートクレーブのボルトを締めつけた。
- ④ 循環装置の高圧定量ポンプにて項目①で調整した試験溶液をオートクレーブへ送水した。
- ⑤ 試験溶液をオートクレーブへ送った直後はオートクレーブ戻り側の導電率が上昇するため、戻り側の導電率が安定するまで試験溶液を循環させた (1 晩程度)。
- ⑥ 循環装置送り側および戻り側の導電率、溶存酸素が安定していることを確認した。
- ⑦ 循環装置の保圧弁にて水圧を 9MPa に調整した。

- ⑧ 昇温を開始した。
- ⑨ 288℃に到達後、温度が安定していることを確認した。
- ⑩ 項目⑨から1,900h経過後、降温を開始した。
- ⑪ 降温後、循環装置の保圧弁にて常圧まで降下させた。
- ⑫ 試験片をオートクレーブから取出した。

図 3.1-46 に各試験片の治具へのセット状況を示す。写真 3.1-34 に試験状況を示す。表 3.1-26 に長時間熱処理材のクラッド界面の CBB 試験後の観察結果のまとめを示す。写真 3.1-35～36 に CBB 試験後の試験片外観を示す。写真 3.1-37 に CBB 試験後の表面観察結果を示す。500℃×2,000h 歪み時効処理材および (600⇄200℃)×229cycle 熱疲労処理材ともクラッド界面に割れは認められず、良好な接合状態が得られていた。

クラッド界面での CBB 試験に加えて、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼とベース材間の Under Clad Crack (UCC) の応力腐食割れについても評価した。図 3.1-47 に試験片の採取要領を示す。写真 3.1-38 に圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) および圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の UCC 試験の断面観察結果を示す。圧延クラッド材①および圧延クラッド材③ともクラッド界面に Under Clad Crack は認められず、良好な接合状態が得られていた。

また、比較材として、写真 3.1-39 に 25Cr-35Ni-EHP 鋼および SUS316L の母材表面の CBB 試験における表面観察結果を示す。また、写真 3.1-40 に断面観察結果を示す。図 3.1-48 に母材の CBB 試験後のひび割れ深さと個数の関係を示す。SUS316L では母材表面に微細なひび割れが多数認められたが、25Cr-35Ni-EHP 鋼は健全であった。

3.1.4 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 年度に試作製造した熱間圧延法および爆発圧着法による大型クラッド材を用いて溶接部 (デポおよび HAZ) の長期健全性および耐食性評価試験 (コンタミによる SCC への影響) を実施した。

3.1.4.1 試験方法

(1) 供試材

評価試験に供したクラッド材は以下の通りである。

- ・圧延クラッド板材①：板組「EHP/SQV2A」→溶接継手 A
- ・爆着クラッド板材④：板組「EHP/SQV2A」→溶接継手 B
- ・圧延クラッド管材②：板組「EHP/SUS316L」→溶接継手 C
- ・爆着クラッド管材⑤：板組「EHP/SUS316L」→溶接継手 D
- ・圧延クラッド板材③：板組「EHP/SUS316L/EHP」→溶接継手 E
- ・爆着クラッド板材⑥：板組「EHP/SUS316L/EHP」→溶接継手 F

(2) 溶接継手の製作

溶接継手の健全性評価試験に供するため、平成 26 年度に試作製造した圧延クラッド材お

よび爆着クラッド材に対して溶接施工を実施した。クラッド材および溶接条件の概要を表 3.1-27 に示す。合せ材の 25Cr-35Ni-EHP 鋼に対しては共材溶加棒 $\phi 2.4 \times 1,000\text{L}$ 切断線を準備した。また、ベース材の SQV2A のサブマージドアーク溶接 (SAW) 用には $\phi 4.0 \times \text{コイル巻}$ の溶接ワイヤ JIS Z 3351 US56B/PF200 および SUS316L の TIG 溶接用には $\phi 2.4 \times 1,000\text{L}$ 切断線の溶加棒 TG-S316L を準備した。表 3.1-28 に 25Cr-35Ni-EHP 鋼製溶加棒の化学成分を示す。

図 3.1-49 にクラッド材の溶接継手の試験片採取要領を示す。表 3.1-29 に溶接継手製作の溶接要領書 (WPS) を示す。板材のクラッド材①、③、④および⑥については長手方向に約 $200\text{mm} \times 2$ 枚、切断し、当該の端面を開先加工後、溶接に供した。管材のクラッド材②および⑤についても長手方向を約 $200\text{mm} \times 2$ 本、切断し、当該の端面を開先加工後、溶接に供した。開先形状は、ベース材が SQV2A のクラッド材① (全板厚 80mm) および④ (同 110mm) には H 字、ベース材が SUS316L の片面クラッド材② (同 30mm) および⑤ (同 34mm) には合せ材の 25Cr-35Ni-EHP 鋼がルート面となる U 字、またベース材が SUS316L の面クラッド材③および⑥ (同いずれも 38mm) には H 字とした。溶接方法は以下のとおりである。

- ・クラッド①および④：合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼層は共材溶加棒による TIG 溶接、ベース材 SQV2A 層は溶接ワイヤ US56B/PF2000 による SAW 溶接
- ・クラッド②、③、⑤および⑥：合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼層は共材溶加棒による TIG 溶接、ベース材 SUS316L 層は溶加棒 TG-S316L による TIG 溶接

なお、ベース材用の溶接材料によるコンタミ程度 (希釈率) を変化させるため、図 3.1-50 に示すように 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金属層厚さを変化させて溶接継手を製作した。溶接パターン A では 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金属層厚さを 5~8mm とし、溶接パターン B ではその半分程度とした。溶接パターン B の溶接線長さは、板材のクラッド材①、③、④および⑥については 150mm、管材のクラッド材②および⑤については管の 1/4 周とした。

いずれも問題なく溶接施工することができた。なお、板組「EHP/SQV2A」の圧延クラッド材①および爆着クラッド材④では、SQV2A 層用の溶接材料 US56B/PF2000 による溶金属層の上に直接 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒により肉盛を行うと溶接割れが発生したため、これらの中に TG-S309 による TIG 溶接を挟んだ。写真 3.1-41~42 に得られたクラッド材の溶接継手の外観写真を示す。表 3.1-30~31 にクラッド材の溶接継手の浸透探傷試験結果 (PT)、表 3.1-32~33 にクラッド材①および④の超音波探傷試験結果 (UT)、さらに表 3.1-34~39 にクラッド材②、③、⑤および⑥の放射線透過試験結果 (RT) を示す。なお、クラッド材①および④で超音波探傷試験を実施したのは板厚が厚いため、放射線透過試験が不可であったためである。浸透探傷試験ではいずれのクラッド材も評価すべき指示模様が認められず、また、超音波探傷試験結果でも M 線を超えるきずが認められず、放射線透過試験では 1 類判定と、いずれのクラッド材の溶接継手も健全であった。

SQV2A 鋼をベース材とするクラッド材については PWHT ($615^{\circ}\text{C} \times 7\text{h}$) を施した。

(3) 経年変化熱処理条件

長時間運転時の経年劣化を想定し、以下に示すようなステップ冷却処理もしくは熱時効処

理を施した。

- ・ベース材が SQV2A の場合：ステップ冷却（Cr-Mo 鋼の焼戻脆化再現法）
- ・ベース材が SUS316L の場合：500℃×2,000h 熱時効処理

ステップ冷却処理は Cr-Mo 鋼の焼戻脆化再現法も模擬したもので、温度履歴は以下のとおりである。

・593℃×1 h-538℃×15 h-524℃×24h-496℃×48h-468℃×72h-316℃ まで炉冷熱処理による時効程度を評価する時効パラメータ TP は 10.28 で、288℃で SQV2A 鋼を 40 年間使用されたと仮定したが TP 8.72 であることから、これらの熱処理により十分な時効が施されたと考えられる。

試験片はあらかじめ図 3.1-51~52 に示すように溶接継手板材から粗切断した状態（実線部）で熱処理に供した。写真 3.1-43~44 にステップ冷却および 500℃×2,000h 熱時効処理後の外観写真を示す。

3.1.4.2 試験結果

上記の長時間熱処理を施したクラッド材の溶接継手について表 3.1-40 に示す特性評価試験を実施した。図 3.1-51~52 に試験片の採取要領の例を示した。

- ・溶接断面組織観察 [光顕：マクロ、ミクロ]
- ・硬さ分布測定
- ・室温引張試験
- ・シャルピー衝撃試験
- ・疲労き裂伝播試験
- ・応力腐食割れ試験 [CBB 試験]

(1) マクロおよびミクロ組織観察

パターン A および B にて溶接した圧延および爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理後の断面マクロおよびミクロ組織観察を実施した。写真 3.1-45~50 に溶接継手の断面マクロ組織観察結果、写真 3.1-51~62 にミクロ組織観察結果を示す。エッチング状況による組織識別が明確ではないが、いずれの溶接継手もパターン A および B にて肉盛しており、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼側の共材溶加棒による溶金属層厚さがパターン B では、パターン A の半分程度になっているのが伺える。なお、マクロ観察において SQV2A をベース材とする圧延クラッド材①および爆着クラッド材④の US56B/PF200 による溶金属層と成分傾斜のために肉盛した TG-S309 との界面にクラックらしき状況が観察された。また、ミクロ組織的には長時間熱処理による変化は顕著ではないと思われる。

(2) 硬さ分布測定

前項で断面組織観察を行った試料についてビッカース硬さ分布測定を実施した。試験荷重は 100 g である。ビッカース硬さは図 3.1-10 に示したように合せ材の板厚中央位置 (t/2) およびベース材の板厚 t/4 の位置で、板幅方向に溶金属部～母材にかけて測定した。図 3.1-53

～58に溶接パターンAおよびBにて溶接した圧延および爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理後のビッカース硬さ分布を示す。

SQV2A をベース材とする圧延クラッド材①／溶接継手 A および爆着クラッド材④／溶接継手 B の溶接まま材に関しては、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の母材の硬さは Hv 170～230 であった。圧延クラッド材①に比べて爆着クラッド材④の母材の硬さがやや高い。これはクラッド製造時の塑性変形により母材部が加工硬化しているためと推定される。また、溶金部の硬さは母材部に比べてやや軟質である。一方、SQV2A 母材の硬さは Hv 250～280 であった。溶金部では Hv240 程度に硬化していた。ベース材 SQV2A の HAZ 部では、圧延クラッド材①で Hv350 程度、爆着クラッド材④で Hv285 程度まで硬化していた。PWHT を施すことにより圧延クラッド材①および爆着クラッド材④のベース材 SQV2A 母材の硬さは Hv 200 程度、HAZ および溶金部で Hv200～245 と、大幅に減少していた。また、爆着クラッド材④の合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の母材の硬さも圧延クラッド材並みに低下していた。次に、ステップ冷却を施すと圧延クラッド材①および爆着クラッド材④の母材、HAZ および溶金部とも硬さが増大し、バラツキを増すようである。また、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の母材もステップ冷却によりやや硬さが増加する傾向にある。25Cr-35Ni-EHP 製溶加棒による溶金部に関しては、圧延クラッド材①の溶接パターン A 材でステップ冷却によりやや硬さが増加するが、他の条件のものはバラツキが大きくなるものの、平均値はステップ冷却を施さないものとほとんど差がない。これらのバラツキが合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼層（母材－溶金部）の硬さ測定位置（ $t/2$ 部）に起因して TG-S309 による溶金部と混在しているためか、ステップ冷却によりマイクロ組織などに変化があったためかは不明である。

一方、SUS316L をベース材とする圧延クラッド材②／溶接継手 C、圧延クラッド材③／溶接継手 E および爆着クラッド材⑥／溶接継手 F のベース材 SUS316L の硬さは、溶金部～母材にかけて Hv200～210 程度であり、ほとんど変化していない。なお、爆着クラッド材⑤／溶接継手 D の母材層硬さが高いのは前述のとおりである。500℃×2,000h 熱時効処理後もほとんど変化しないようである。また、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の母材の硬さは圧延クラッド材で Hv200 前後、爆着クラッド材で Hv200～250 である。また、溶金部の硬さは開先形状が異なる圧延クラッド材②および爆着クラッド材⑤と、圧延クラッド材③および爆着クラッド材⑥とで異なり、ビード幅が小さい前者では Hv200 前後であるが、後者では Hv150 程度であった。母材および溶金部とも 500℃×2,000h 熱時効処理によりほとんど変化しなかった。

(3) 引張試験

パターンAにて溶接した圧延および爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材について JIS Z 2241 「金属材料引張試験方法」および JIS Z 3121 「突合せ溶接継手の引張試験方法」に準拠して室温引張試験を実施した。試験条件は項 3.1.2 と同じである。表 3.1-41 に長時間熱処理後の圧延クラッド材および爆着クラッド材の溶接継手の室温引張試験結果を示す。図 3.1-59 にクラッド材の溶接継手の引張強さのまとめを示す。また、写真 3.1-63～68 に引張試験後の試験片外観を示す。SQV2Q をベース材とする圧延クラッド材①および爆着クラッド材（PWHT）の引張強さはステップ冷却処理を施してほとんど変化しない。一方、SUS316L

をベース材とする圧延および爆着クラッド材の溶接継手では、500℃×2,000h 熱時効処理によりビッカース硬さ分布がほとんど変化しないにもかかわらず引張強さは増大し、破断伸びは減少する。これらは、クラッド界面の耐久性評価試験で実施したクラッド母材の引張試験結果と同じである。

(4) 曲げ試験

パターンAにて溶接した圧延および爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材について JIS Z 2248「金属材料の曲げ試験方法」および JIS Z 3122「突合せ溶接継手の曲げ試験方法」に準拠して曲げ試験を実施した。曲げ試験はいずれも板厚 15mm の側曲げである。なお、圧延クラッド材①／溶接継手 A および爆着クラッド材④／溶接継手 B に関して、元板厚ままでは試験片幅が大きくなるため、JIS G 0601 の規定に従い全板厚（＝試験片幅）が 38mm になるようにベース材を減厚した。曲げ角度は 180° とし、曲げ半径が減厚の板厚の 2 倍となるようにした。表 3.1-42 に長時間熱処理後の圧延クラッド材および爆着クラッド材の溶接継手の曲げ試験結果を示す。また、写真 3.1-69 に曲げ試験後の試験片外観を示す。SQV2A をベース材とする圧延クラッド材①／溶接継手 A および爆着クラッド材④／溶接継手 B の未処理材（PWHT）では軽微な割れが発生していたが、ステップ冷却処理を施すことにより軽減される傾向にあった。これらは、ベース材 SQV2A 用の SAW 溶接材料 US56B/PF200 や中間域用の溶接材料 TG-S309 による溶金とのコンタミによるボンドマルテンサイトの生成に起因し、ステップ冷却処理を施すことにより焼戻し効果が生じたものと推定される。一方、SUS316L をベース材とする溶接継手の未処理材では割れが発生していなかったが、500℃×2,000h 熱時効処理により圧延クラッド材②／溶接継手 C を除いて軽微な割れが発生した。これらは、25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層が薄いため、ベース材用の溶接材料 TG-S316L による溶金層とのコンタミ（希釈）を起し、これらが熱時効処理により脆化したのかも知れない。これらを回避するためには 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層厚さを一定量以上、確保する必要があると考えられる。

(5) シャルピー衝撃試験

パターンAにて溶接した圧延および爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材について JIS Z 2242「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」および JIS Z 3128「溶接継手の衝撃試験方法」に準拠して、図 3.1-60 に示す位置から試験片を採取し、溶金部に 2mmV ノッチを入れた試験片および HAZ に 2mmV ノッチを入れた試験片を製作してシャルピー衝撃試験を実施した。図 3.1-60 からわかるように基本的には合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼よりもむしろベース材の長時間熱処理による材質変化を調査した試験である。表 3.1-43 長時間熱処理後の圧延クラッド材および爆着クラッド材の溶接継手のシャルピー衝撃試験結果を示す。図 3.1-61～66 に試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面率の関係を示す。図 3.1-67 に上部棚吸収エネルギー（USE）のまとめを示す。また、写真 3.1-70～71 にシャルピー衝撃試験後の試験片外観を示す。圧延クラッド③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）／溶接継手 E の HAZ ノッチ試験片を除いて、長時間熱処理により延性－脆性遷移温度が上昇する傾向を示す。同様に、上部棚

吸収エネルギーも長時間熱処理により低下する傾向にある。低下の程度はSQV2Aをベース材とするクラッド材の溶接継手よりもSUS316Lをベース材とするクラッド材の溶接継手の方が大きいようである。

Druce³⁾らや橋内ら⁴⁾によると、前者は300～500℃の温度での $10^3\sim 2\times 10^4$ hの等温熱時効処理、後者は本事業と同じステップ冷却を施したA533Bに対して衝撃エネルギー遷移温度を求め、熱時効処理により母材および溶接金属の41J遷移温度 TT_{41J} は増加するが、上部棚吸収エネルギーはほとんど変化しないとの結果を得ているが、本事業ではSQV2Aをベース材とする圧延クラッド材の溶接継手の溶接金属部ノッチ試験片において上部棚吸収エネルギーが低下している。

脆化の判定基準としてNRC (Nuclear Regulatory Commission：アメリカ合衆国原子力規制委員会) では41J遷移温度 TT_{41J} の増加量と上部棚吸収エネルギーの低下量を用いており、処女材では102J以上を必要とし、運転期間を通じて68J以上の要求している。図 3.1-67にみられるように本実験で得られた上部棚吸収エネルギーは長時間熱処理後も68Jを上回っている。

(6) 疲労き裂伝播試験

圧延クラッド材①(板組「EHP/SQV2A」)および圧延クラッド材③(板組「EHP/SUS316L/EHP」)の溶接継手の長時間熱処理に伴う疲労き裂伝播特性の比較を実施した。試験のマトリックスを表 3.1-44 に示す。図 3.1-68 に示す形状の疲労き裂伝播試験を図 3.1-69 に示すように母材および溶接継手の位置から採取し、加工した。試験片は厚さ12.5mmの1CT試験片である。溶接継手では溶金中をき裂が伝播するように切欠きを入れた。なお、試験片採取の都合上、25Cr-35Ni-EHP鋼よりもむしろベース材の溶金部の長時間熱処理による材質変化を評価した試験になっているのは否めない。試験はASTM E-647に準拠し、電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて以下に示す条件で行った。

- ・試験環境：室温・大気中
- ・制御方法：荷重制御
- ・制御波形：正弦波
- ・応力比： $R=0.05$
- ・試験速度：5～20Hz
- ・データ取得範囲： ΔK_{th} ($da/dN=1.0\times 10^{-7}$ mm/cycle) を含むフルカーブ

き裂長さはコンピュータ制御のコンプライアンス法によって計測した。試験方法の概要を図 3.1-70 に示す。また、写真 3.1-72 に試験状況を示す。コンプライアンスとはき裂開口変位 δ と荷重 P の比(δ/P)であり、き裂が長くなるとその値は大きくなる。コンプライアンスとき裂長さの関係は定式化されており、き裂長さはコンプライアンスから自動的に計算される。まず、き裂の進展とともに荷重を自動的に減少させていく荷重漸減K値減少法で疲労き裂進展が起こらなくなる ΔK_{th} を求めた。次に荷重一定で試験し、き裂の成長に伴いK値が増大する荷重一定K値増大法で安定成長域の疲労き裂進展速度 da/dN を求めた。

図 3.1-71～72に圧延クラッド材①(板組「EHP/SQV2A」)および圧延クラッド材③(板組

「EHP/SUS316L/EHP」の母材および溶接継手の da/dN と ΔK の関係を示す。表 3.1-45 に疲労き裂伝播試験結果のまとめを示す。また、写真 3.1-73～74 に試験後の試験片外観を示す。溶接継手の試験片ではサイドグループ底よりき裂が反れて進展しているため、データは参考値となるが、圧延クラッド材①および圧延クラッド材③とも母材に比べて溶接継手のき裂進展速度 (da/dN) が遅い結果となった（これはき裂閉口挙動が影響していると考えられる。き裂閉口挙動の影響を少なくするためには、高応力比で試験をする必要がある）。また、圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の溶接継手に対するステップ冷却により疲労き裂伝播速度 da/dN が増大する（脆化）傾向を示すが、圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）の溶接継手では $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 熱時効処理により da/dN がやや減少（靱性化）する傾向を示した。下限応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の相違は認められなかった。また、母材および溶接継手（長時間熱処理材も）とも、圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）に比べて圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）のき裂進展速度が遅い結果となった。

(7) 応力腐食割れ試験 [CBB 試験]

パターン A および B にて溶接した圧延および爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理後の CBB 試験を実施した。CBB 試験片は図 3.1-73 に示すように合せ材表面と同一面が評価面になるように溶金余盛部を切除して $2t \times 10w \times 50L$ (mm) 形状の試験片を採取・加工した。その際、表層に加工硬化層を付与するため、フライス加工条件を回転数 300rpm、送り速度 150mm/min とした。CBB 試験条件は項 3.1.3 と同じである。

表 3.1-46 に時間熱処理材のクラッド界面の CBB 試験後の観察結果のまとめを示す。写真 3.1-75～86 に CBB 試験後の試験片外観および表面観察結果を示す。SQV2A をベース材とする圧延クラッド材①/溶接継手 A および爆着クラッド材④/溶接継手 B では、未処理の溶接-PWHT 材でもボンド部近傍や溶金部に割れが認められ、ステップ冷却を施すことにより割れを増す傾向にある。溶接パターン B に比べて溶接パターン A の方がその傾向が強いようである。当該試験では、基本的には 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層から $2t \times 10w \times 50L$ の試験片は採取しているが、ベース材 SQV2A 用の SAW 溶接材料 US56B/PF200 や中間域用の溶接材料 TG-S309 による溶金とのコンタミ（希釈）を生じ、これらによりボンドマルテンサイトを生成しているものと推定される。参考までに、写真 3.1-87～88 にこれらの断面観察結果を示す。一方、SUS316L をベース材とする圧延および爆着クラッド材の溶接継手では、パターン A で溶接した爆着クラッド材⑤/溶接継手 D の未処理材やパターン B で溶接した爆着クラッド材⑥/溶接継手 F の $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 熱時効処理材を除いて、未処理の溶接まま材やそれらの $500^{\circ}\text{C} \times 2,000\text{h}$ 熱時効処理材でも割れは認められなかった。割れが発生した溶接継手では、25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層が薄く、前者ではクラッド製作時の爆着による（残留）応力の影響、後者ではベース材用の溶接材料の TG-S316L による溶金部のコンタミが影響しているものと推定される。改善には、前者は爆着クラッド後の応力除去焼鈍（もしくは、溶体化処理）、後者は 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層を厚くする必要があると考えられる。

3.1.5 まとめ

(a) クラッド界面の長期健全性評価試験

平成 26 年度に試作製造した板組「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時の経年変化を想定したクラッド界面の健全性評価試験を実施した。経年変化を想定した熱処理条件は以下のとおりである。

- ・歪み時効処理：15%予歪み-500°C×2,000h
- ・熱疲労処理：(600×1h⇄200°C)×229回 cycle [トータル1,500h]

熱処理による時効程度を評価する時効パラメータ TP は、歪み時効処理材で 10.28、熱疲労処理材で 10.79 である。288°C で SQV2A を 40 年間使用されたと仮定した TP は 8.72 であることから、これらの熱処理により十分な時効が施されたと考える。

実施した評価試験は界面組織観察、硬さ分布測定、EPMA 観察、引張試験、界面せん断試験、側曲げ試験、平面曲げ疲労試験、界面シャルピー衝撃試験および応力腐食割れ試験 [CBB 試験/試験条件：温度 288°C、応力 9MPa、溶存酸素濃度 20ppm、歪み 1%、時間 1,900h] である。界面せん断試験の結果、歪み時効処理や熱疲労処理により板組「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。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。繰返し曲げによる界面はく離を想定した平面曲げ疲労試験では、未処理材および歪み時効処理材ともクラッド界面からはく離することなく母材破断し、さらに歪み時効処理を施すとクラッド界面の疲労寿命がかえって長くなる傾向にあった。これらはクラッド界面の接合性が良好なためで、さらに歪み時効処理により母材の強度が増加したためと推定される。界面シャルピー衝撃試験では、爆着クラッド材⑥(板組「EHP/SUS316L」)の熱疲労処理材の界面の上部棚吸収エネルギーが減少した以外、他のクラッド材では、長時間熱処理により延性-脆性遷移温度が上昇する傾向にあるものの、上部棚吸収エネルギーはほとんど変化しなかった。なお、爆着クラッド材⑥の熱疲労処理材において上部棚吸収エネルギーが減少したのは、当該クラッド材では界面に Ni インサートや Ni めっきを施していないため、熱疲労処理により界面での組織変化やはく離が生じ、その結果、延性-脆性遷移温度が上昇したためと推定される。また、クラッド界面に引張応力が働くように試験片を加工した CBB 試験の結果、いずれのクラッド材の歪み時効処理および熱疲労処理後も割れは認められず、健全であった。

以上のように、25Cr-35Ni-EHP 鋼を合せ材、SQV2A もしくは SUS316L をベース材とする圧延クラッド材および爆着クラッド材について長時間運転時の経年変化を想定して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歪み時効処理や熱疲労処理により特性の劣化が認められたものの、おおむね界面の健全性が維持されていた。

(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 年度に試作製造したクラッド材を用いて溶接継手を製作し、それらの長期健全性および耐食性評価試験を実施した。なお、SQV2A をベース材とするクラッド材については PWHT (615°C×7h・空冷)を施した。

長時間運転時の経年変化を想定した熱処理条件は以下のとおりである。ステップ冷却材の時効パラメータ TP は 9.55 である。

- ・ベース材が SQV2A の場合：ステップ冷却処理（Cr-Mo 鋼の焼戻脆化再現法）
- ・ベース材が SUS316L の場合：500℃×2,000h 熱時効処理

実施した評価試験は溶接断面組織観察[マイクロ・マクロ]、硬さ分布測定、室温引張試験、側曲げ試験、シャルピー衝撃試験、疲労き裂伝播試験および応力腐食割れ試験[CBB 試験]である。側曲げ試験の結果、板組「EHP/SQV2A」の圧延および爆着クラッド材の溶接-PWHT 処理ままでは割れが発生したのに対して、ステップ冷却を施すと割れが発生しなくなった。これらは、PWHT 処理ままではベース材 SQV2A 用の SAW 溶接材料 US56B/PF200 や中間域用の溶接材料 TG-S309 による溶金とのコンタミ（希釈）によりボンドマルテンサイトが生成していたが、ステップ冷却処理を施すことにより焼戻し効果が生じたと推定される。一方、板組「EHP/SUS316L」および「EHP/SUS316L/EHP」のクラッド材では熱時効処理を施すことにより割れが発生した。これらは、25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層が薄かったため、ベース材用の溶接材料 TG-S316L による溶金層とのコンタミを生成し、これらが熱時効処理により脆化したと推定される。これらは、25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層厚さの増加により回避されると推定される。また、溶金部ノッチおよび HAZ 部ノッチによるシャルピー衝撃試験の結果、長時間熱処理により延性-脆性遷移温度が上昇し、上部棚吸収エネルギーがやや低下する傾向を示すクラッド材もあったが、NRC が脆化の判定基準として要求している上部棚吸収エネルギー68J を十分上回っていた。疲労き裂伝播試験の結果、板組「EHP/SQV2A」の圧延クラッド材に対するステップ冷却により疲労き裂伝播速度 da/dN が増大する（脆化）傾向を示すが、板組「EHP/SUS316L」の圧延クラッド材では熱時効処理により da/dN が減少（靱性化）する傾向を示した。また、いずれも下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} への影響は認められなかった。

溶金部表面の耐食性評価としての CBB 試験については、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の溶接に用いた共材溶加棒による溶金層厚さを 6~8mm（パターン A）もしくはその半分（パターン B）とすることによりベース材（SQV2A 系および SUS316L 系）用の溶接材料によるコンタミの影響も調査した。その結果、SQV2A をベース材とするクラッド材の溶接継手では未処理の溶接まま材でもボンド部近傍に割れが認められ、ステップ冷却を施すことによりその程度が増す傾向にあった。これらは、ベース材 SQV2A 用の SAW 溶接材料 US56B/PF200 や中間域用の溶接材料 TG-S309 による溶金とのコンタミ（希釈）によるボンドマルテンサイトの生成が起因すると推定される。一方、SUS316L をベース材とするクラッド材の溶接継手では、パターン A で溶接した爆着クラッド材⑤/溶接継手 D の未処理材やパターン B で溶接した爆着クラッド材⑥/溶接継手 F の熱時効処理材を除いて、未処理の溶接まま材やそれらの熱時効処理材でも割れは認められず、良好な耐食性を示した。割れが発生した溶接継手では、25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層が薄く、前者ではクラッド製作時の爆着による（残留）応力の影響、後者ではベース材用の溶接材料の TG-S316L による溶金部のコンタミに起因すると考えられる。改善には、前者は爆着クラッド後の応力除去焼鈍（もしくは、溶体化処理）、後者は 25Cr-35Ni-EHP 鋼共材溶加棒による溶金層を厚くする必要があると考えられる。

以上のように、25Cr-35Ni-EHP 鋼を合せ材、SQV2A もしくは SUS316L をベース材とする圧延クラッド材および爆着クラッド材について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、溶接施工の対応などにより健全性が担保できる範囲と推定される。

[参考文献]

- 1) R. Pelli and J. Forsten : The IAEA Specialists Meeting on Load and Time Dependent Material Performance Other Than Irradiation, Budapest, (1986)
- 2) 平成 15 年度軽水炉プラント標準化調査成果報告書「原子力発電用配管の応力腐食割れ試験方法の標準化調査研究」(経済産業省)
- 3) S. G. Druce, G. R. ordan and J. A. Hudson : Trans. 8th Int. Conf on Structural Mechanics in Reactor Technology, Brussel, Vol.F2, (1985), 401
- 4) 橋内良雄、吉久悦二 : 日本機械学会論文集 (A 編)、59 巻 565 号 (1933-9)、31~37

表 3.1-1 平成 26 年度に試作したクラッド材（供試材）の概要

No.	クラッド法	板組み	形状 ^{*1)}	模擬部位の例
1	熱間圧延	① EHP / (Ni ^{*2)} / SQV2A ^{*3)}	(8+72)t × 1,000w × 3,000L	圧力容器
		② EHP / (Ni ^{*2)} / SUS316L	(6+24)t × 1,000w × 3,000L (→t × φ 318 × 2,000H)	再循環系配管 ^{*3)} (圧延後、溶接管に加工)
		③ EHP / (Ni ^{*2)} / SUS316L / (Ni ^{*2)} / EHP	(3+32+3)t × 1,000w × 3,000L	シュラウド
2	爆着	④ EHP / Ni / SQV2A	(8+100)t × 1,000w × 2,000L	圧力容器
		⑤ EHP / SUS316L	(4+31)t × φ 318 × 1,000H	再循環系配管
		⑥ EHP / SUS316L / EHP	(3+32+3)t × 1,000w × 1,000L	シュラウド

*1) 平成 26 年度の試作時の形状。平成 26 年度の評価試験に一部を使用

*2) めっき

*3) JIS G 3120 SQV2A (ASTM A533B 相当)



写真 3.1-1 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」、 $(8+72)t \times 1,000w \times 3,000L$ ）の外観写真

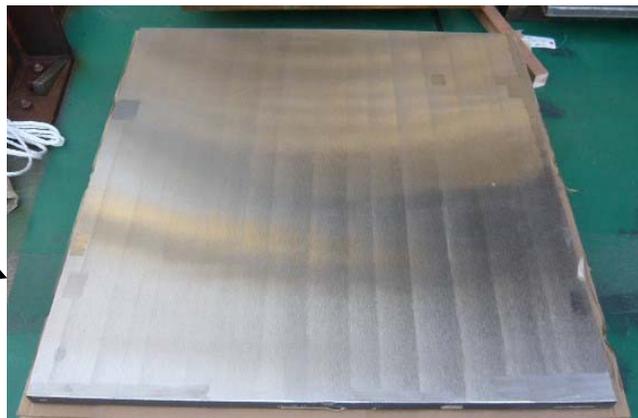
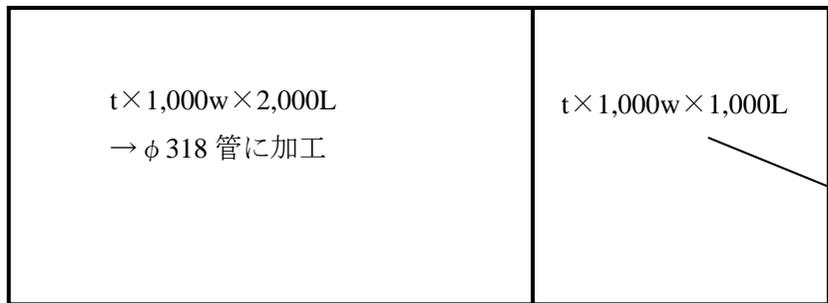


写真 3.1-2 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」、 $(6+24)t \times 1,000w \times 3,000L$) の外観写真

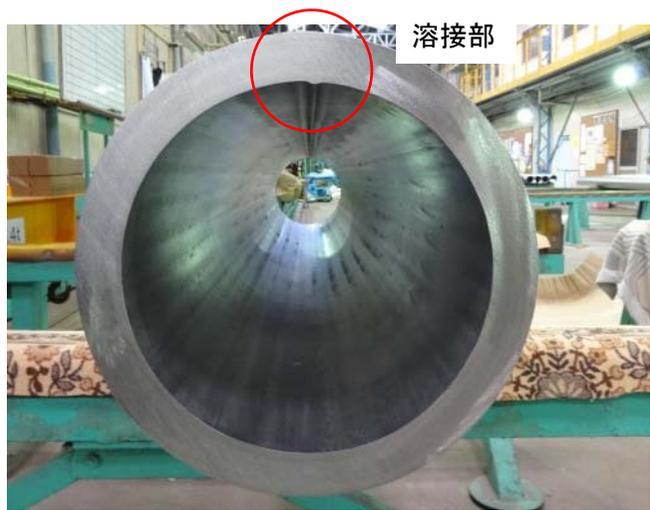


写真 3.1-3 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の $\phi 318$ 製管後の外観写真

【供試材】

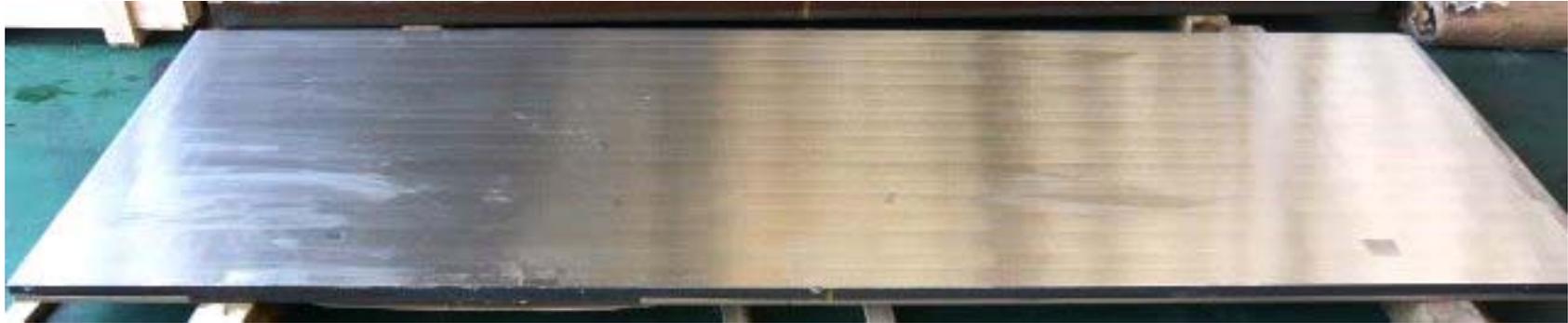


写真 3.1-4 圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」、 $(3+32+3)t \times 1,000w \times 3,000L$ ）の外観写真

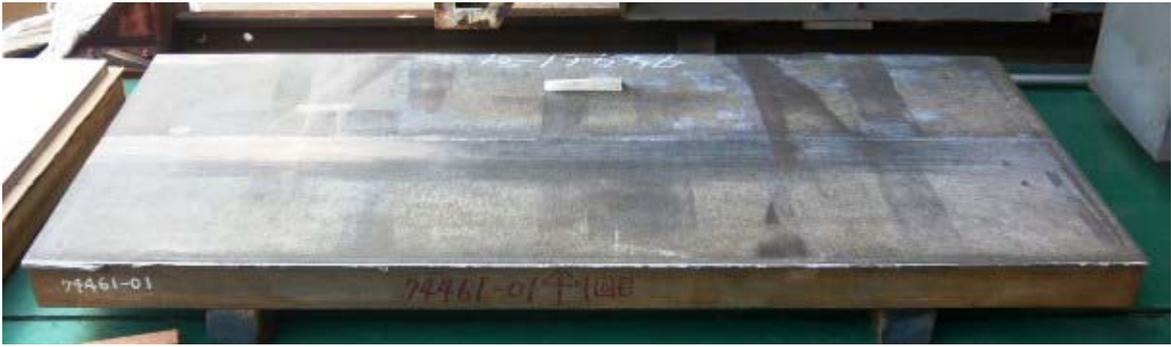


写真 3.1-5 クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」、 $(8+100)t \times 900w \times 1,970L$) の爆着後の外観写真



写真 3.1-6 クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316」、 $(4+31)t \times \phi 318 \times 1,000L$) の爆着後の外観写真



写真 3.1-7 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316/EHP」、 $(3+32+3)t \times 840w \times 2,000L$) の爆着後の外観写真

表 3.1-2 合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の溶製目標化学成分および実績 (化学／%、GDMS／ppm)

クラッド	溶製法	略号	位置		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	N	O	B
			目標		0.002 ～ 0.005	<0.03	<0.03	<0.003	<0.002	34.0 ～ 36.0	24.0 ～ 26.0	—	—	—	<0.2ppm
①	2tVIM -VAR	VB4008	Ladle	化学	0.004	0.00	0.00	0.00011	0.0001	34.85	25.33	0.10	0.0039	0.0011	<0.0001
②			Check	化学	0.004	0.04	<0.01	<0.0005	0.001	35.06	25.34	—	0.0034	0.0015	—
③			Check-T	GDMS	—	12.41	9.66	0.27	0.39	—	—	750	—	—	0.06
④ ⑥			Check-B	GDMS	—	22.68	8.96	0.72	1.22	—	—	550	—	—	0.32
⑤	150kg VIM -VAR	PX401	Check	化学	0.001	<0.10	<0.01	0.0007	0.0005	34.04	27.08	<0.01	0.0064	0.0096	
				GDMS	—	33.9	68.02	4.21	1.66	—	—	1.6	—	—	0.26

表 3.1-3 クラッド用ベース材 SQV2A の化学成分 (%)

品種		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	O
SQV2A*1)	規格値	0.25 以下	0.15～ 0.40	1.15～ 1.50	0.030 以下	0.030 以下	0.40～ 0.70	—	0.45～ 0.60	—	—
クラッド①用	ミルシート値	0.15	0.26	1.43	0.007	0.002	0.67	0.02	0.55	—	—
	チェック分析	0.15	0.24	1.39	0.009	0.002	0.67	0.16	0.54	0.0030	0.0007
クラッド④用	ミルシート値	0.15	0.25	1.44	0.007	0.002	0.53	0.03	0.49	—	—
	チェック分析	0.15	0.23	1.40	0.006	0.003	0.53	0.04	0.48	0.0050	0.0009

*1) JIS G 3120 G (ASTM A533B 相当)

表 3.1-4 クラッド用ベース材 SUS316L の化学成分 (%)

品種		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	N	O
SUS316L	規格値	0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	12.00～ 15.00	16.00～ 18.00	2.00～ 3.00	—	—	—
クラッド②用	ミルシート値	0.006	0.49	0.74	0.022	0.001	12.10	17.19	2.88	0.22	—	—
	チェック分析	0.007	0.47	0.74	0.027	0.001	12.08	17.64	2.94	—	0.0335	0.0015
クラッド③用	ミルシート値	0.010	0.52	0.79	0.023	0.001	12.14	16.91	2.76	—	—	—
	チェック分析	0.012	0.48	0.79	0.026	0.001	12.12	17.29	2.81	—	0.0420	0.0018
クラッド⑤用	ミルシート値	0.009	0.26	0.96	0.025	0.001	13.25	16.68	2.13	—	—	—
	チェック分析	0.011	0.25	1.00	0.024	0.001	12.86	16.62	2.11	—	0.0417	0.0056
クラッド⑥用	ミルシート値	0.019	0.63	1.18	0.035	0.001	12.15	17.48	2.05	0.19	—	—
	チェック分析	0.018	0.58	1.20	0.033	0.001	12.16	17.93	2.08	—	0.0254	0.0023

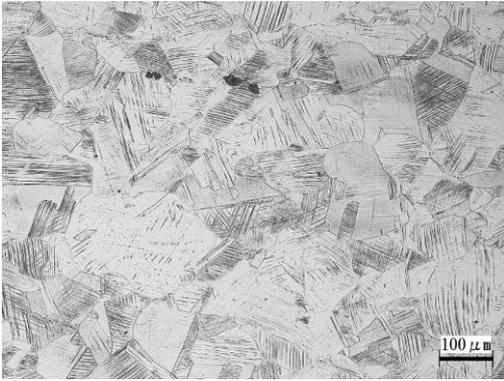
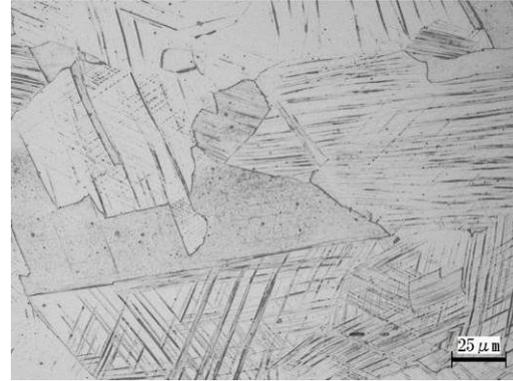
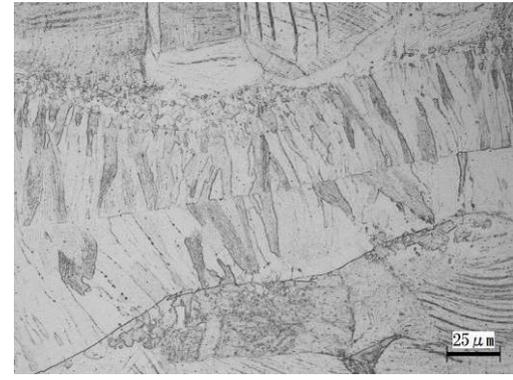
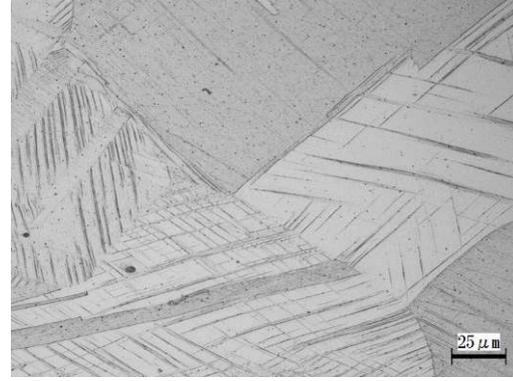
位置	低倍	高倍
SUS316L		
SUS316L /EHP		
EHP		

写真 3.1-8 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の断面マイクロ組織

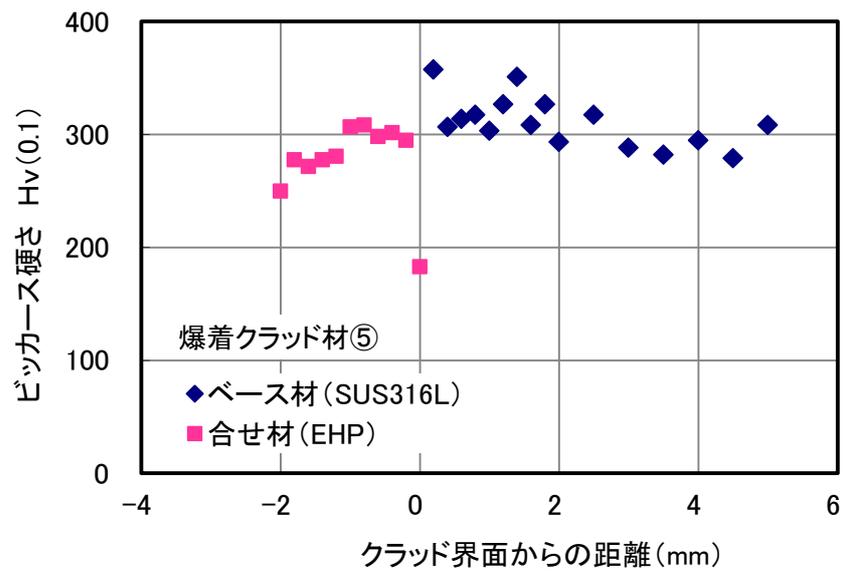


図 3.1-1 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の硬さ測定分布

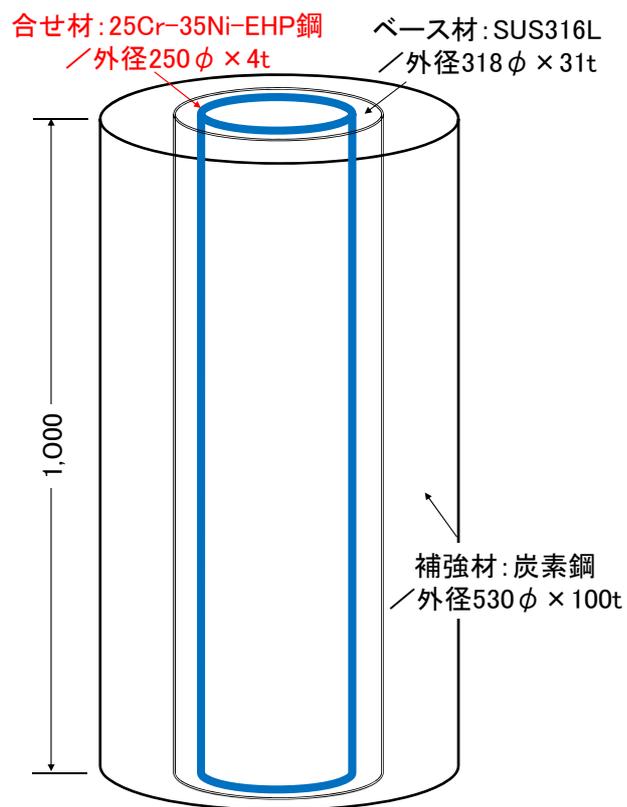


図 3.1-2 爆着クラッド材⑤の板組の模式図

	機械加工後（爆着前）	爆着後
<p>補強材 S45C $\phi 532 / 332 \times$ 1,000L</p>		

写真 3.1-9 爆着クラッド材⑤用の補強材の爆着前後の外観写真

表 3.1-5 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の爆着後の形状測定結果

起爆側からの位置 (mm)	周長 L *1) (mm)	計算外径 φ (mm)	拡管率 (%)	備考
0	1,030	327.9	3.4	
100	1,042	331.7	4.6	
200	1,080	343.8	8.4	
300	1,124	357.8	12.8	
400	1,170	372.4	17.4	
500	1,186	377.5	19.0	
550	1,196	380.7	20.0	周長最大部
600	1,194	380.1	19.8	
700	1,180	375.6	18.4	
800	1,150	366.1	15.4	
900	1,104	351.4	10.8	
994（終爆部）	1,074	341.9	7.8	
爆着前	—	317.2（測定値）		

*1) 周長：巻尺で測定

*2) 計算外径=L/π

*3) 拡管率=（爆着後の計算外径φ/爆着前の外径）×100-100（%）

表 3.1-6 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の室温引張試験結果

板組			板厚 (mm)	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断 位置
EHP/ SUS316L	規格*1)	—	—	> 175	> 480	> 40.0		—
	結果*2)	1	32.10	477	638	19.9	59	A
		2	33.22	501	620	21.9	59	A

*1) JIS G 3601 「ステンレスクラッド鋼」 の表 2-機械的性質から算出した値

*2) JIS Z 2241 1A 号試験片 (GL=200mm)

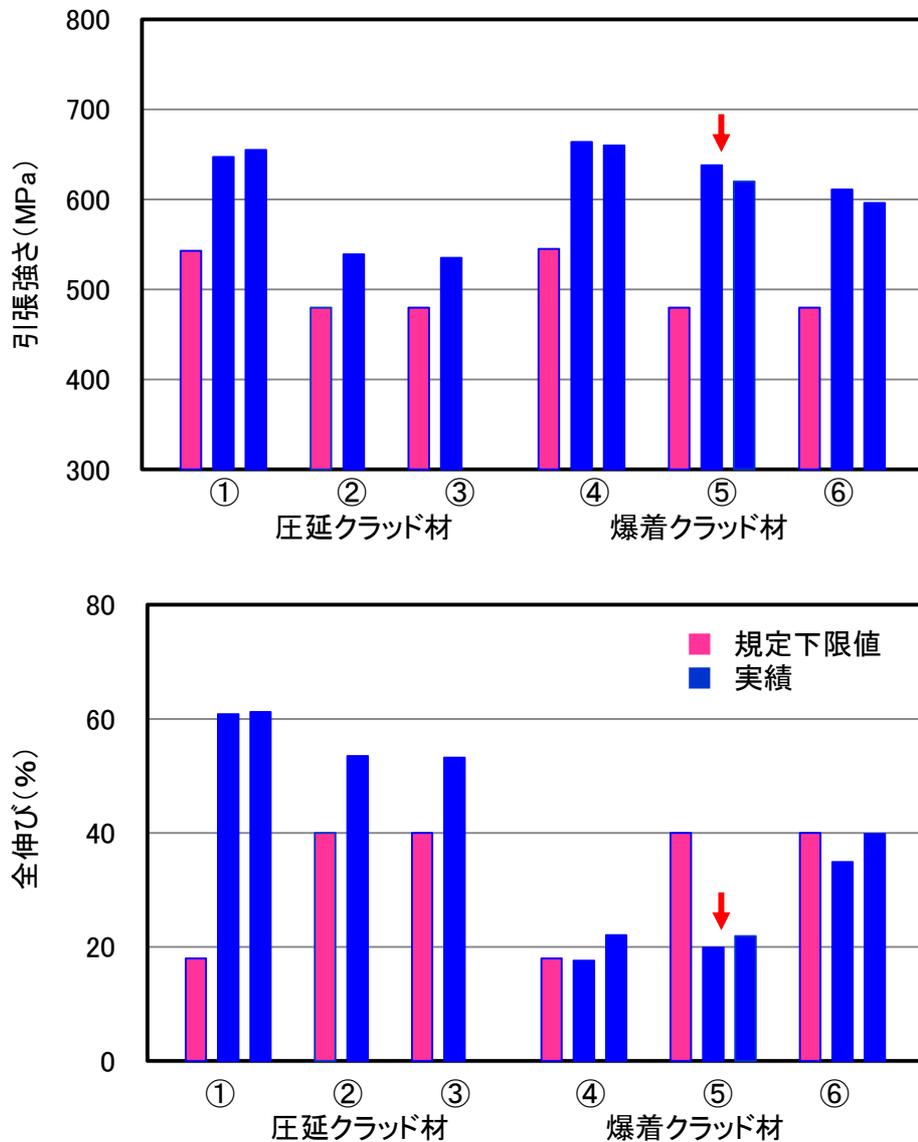


図 3.1-3 クラッド材の引張特性のまとめ

		爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」)	
		1	2
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-10 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の室温引張試験後の試験片外観写真

表 3.1-7 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の曲げ試験結果

クラッド／板組	板厚 (mm)	曲げ半径 (mm)	位置		結果
爆着クラッド材⑤ EHP/SUS316L	35	140	合せ材を外側	1	割れなし
				2	〃

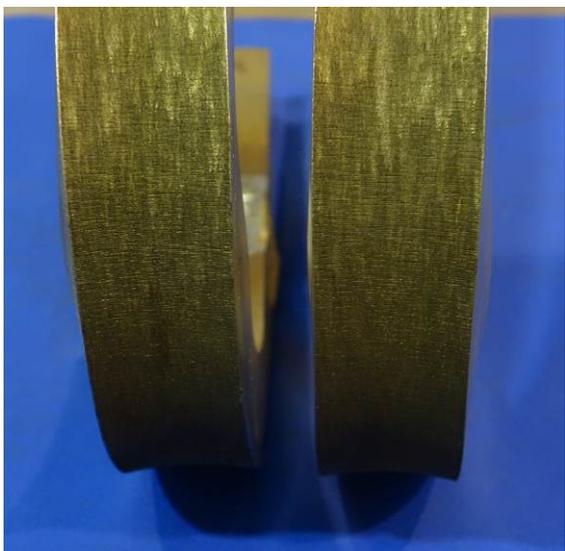
クラッド／板組	外観写真	
	1	2
爆着クラッド材⑤ EHP/SUS316L		

写真 3.1-11 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の曲げ試験後の試験片外観写真

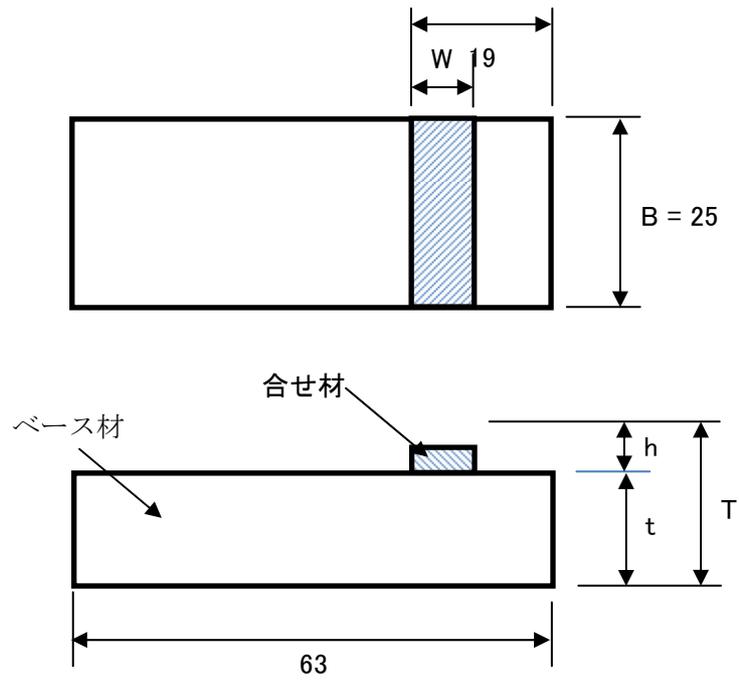


図 3.1-4 クラッド材のせん断試験片形状 (mm)

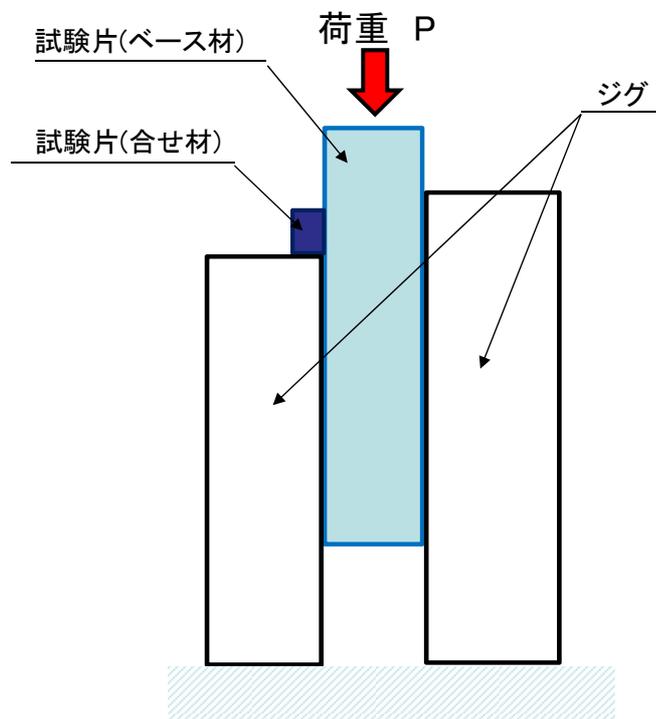


図 3.1-5 クラッド材のせん断試験方法の模式図

表 3.1-8 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）のせん断試験結果

クラッド/板組		試験片形状 (mm)		せん断応力 (MPa)
		板幅	クラッド幅 w	
爆着クラッド材⑤ EHP/SUS316L	規格	—	—	> 200
	1	25.02	4.52	594
	2	25.01	4.50	592

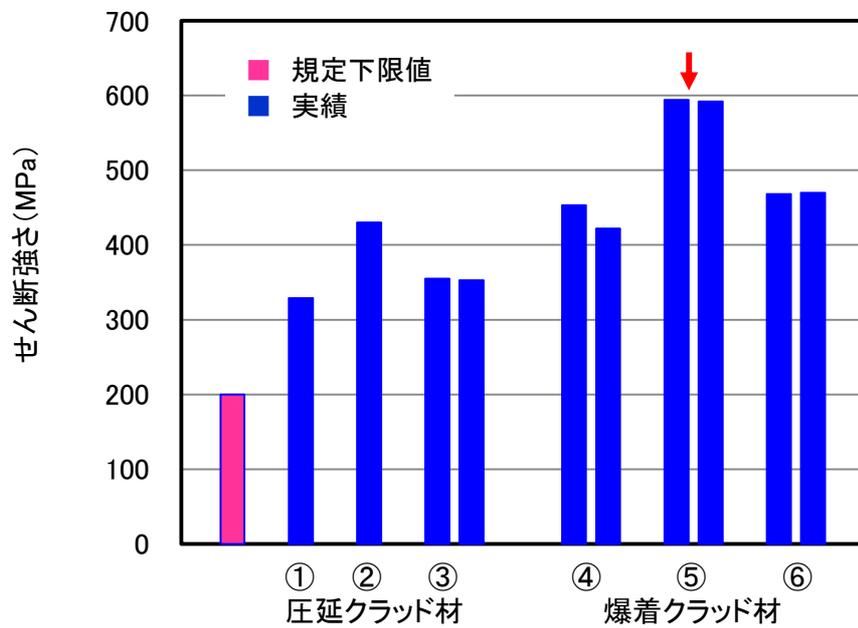


図 3.1-6 クラッド材のせん断強さのまとめ

クラッド／板組	外観写真	
	1	2
爆着クラッド材⑤ EHP／SUS316L		

写真 3.1-12 爆着クラッド材⑤（板組「EHP／SUS316L」）のせん断試験後の試験片外観写真

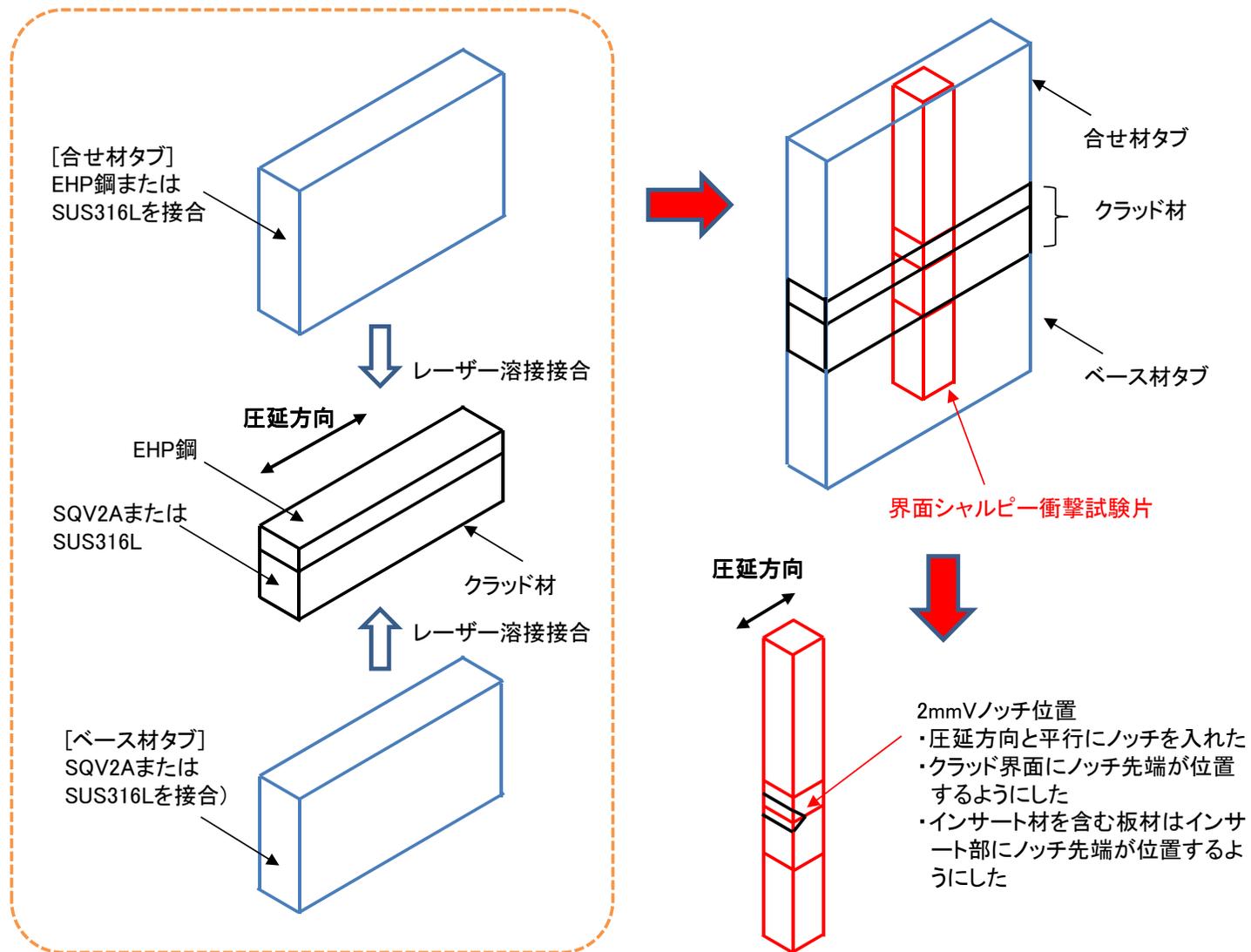


図 3.1-7 界面シャルピー衝撃試験片の加工要領

表 3.1-9 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の界面シャルピー衝撃試験結果

No.	試験温度 (°C)	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性破面率 (%)
1	-196	142	178	0
2	-150	143	179	0
3	-100	150	188	0
4	-50	160	200	0
5	0	179	224	0
6	25	240	300	0
7	50	196	245	0
8	100	213	266	0

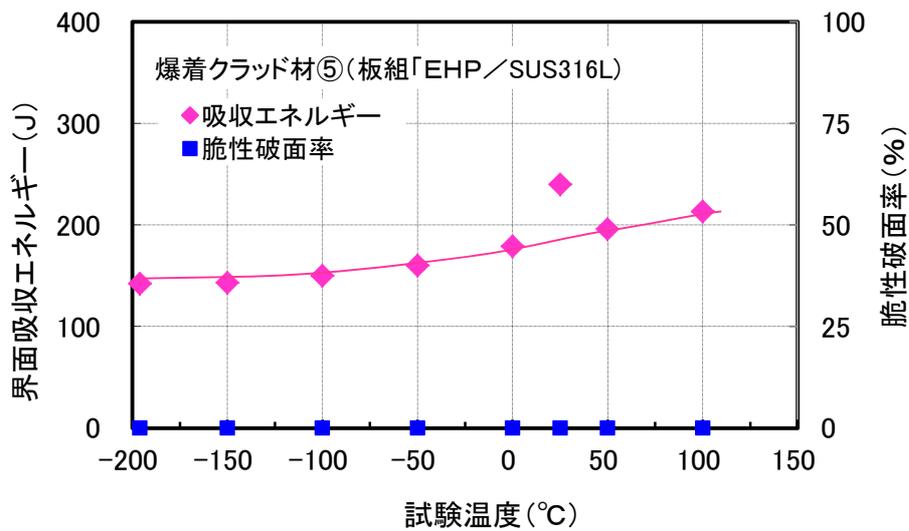


図 3.1-8 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の界面シャルピー衝撃試験結果

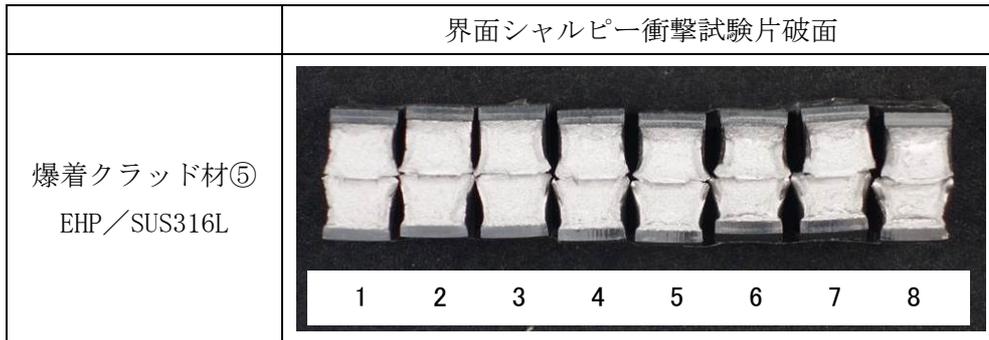


写真 3.1-13 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）の界面シャルピー衝撃試験後の試験片外観写真

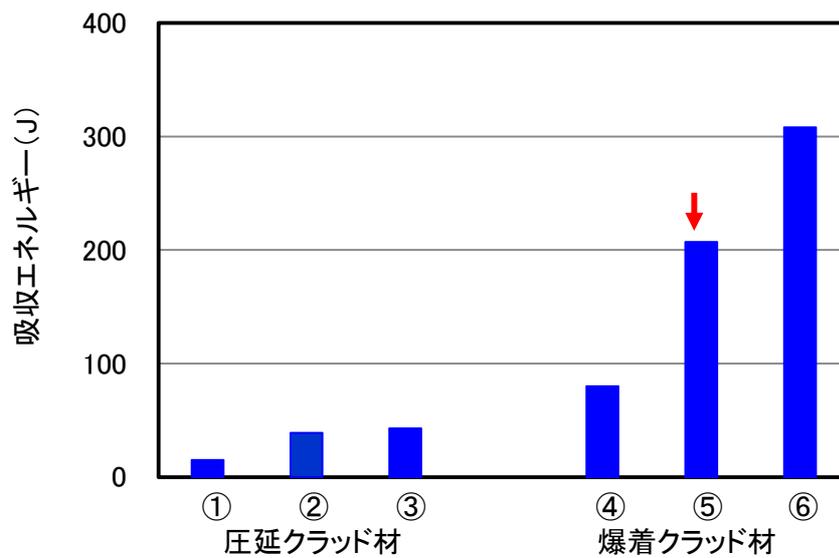


図 3.1-9 クラッド材の界面シャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめ

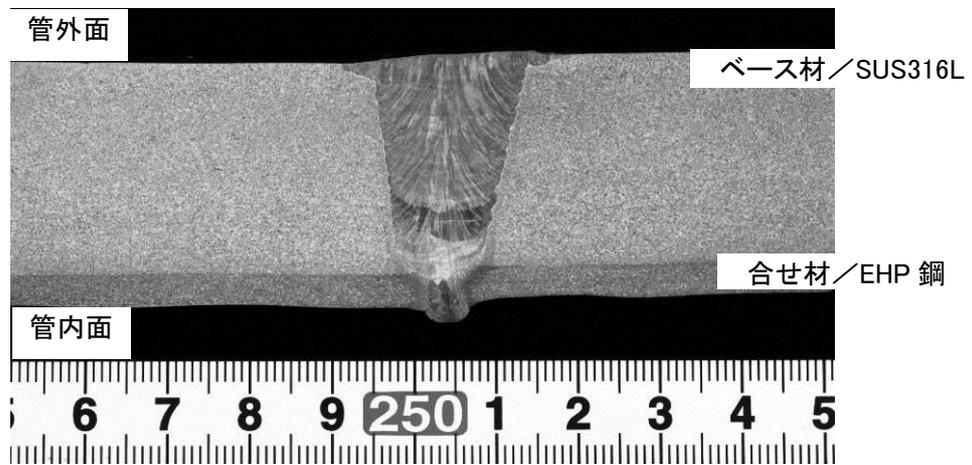


写真 3.1-14 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 D のマクロ組織

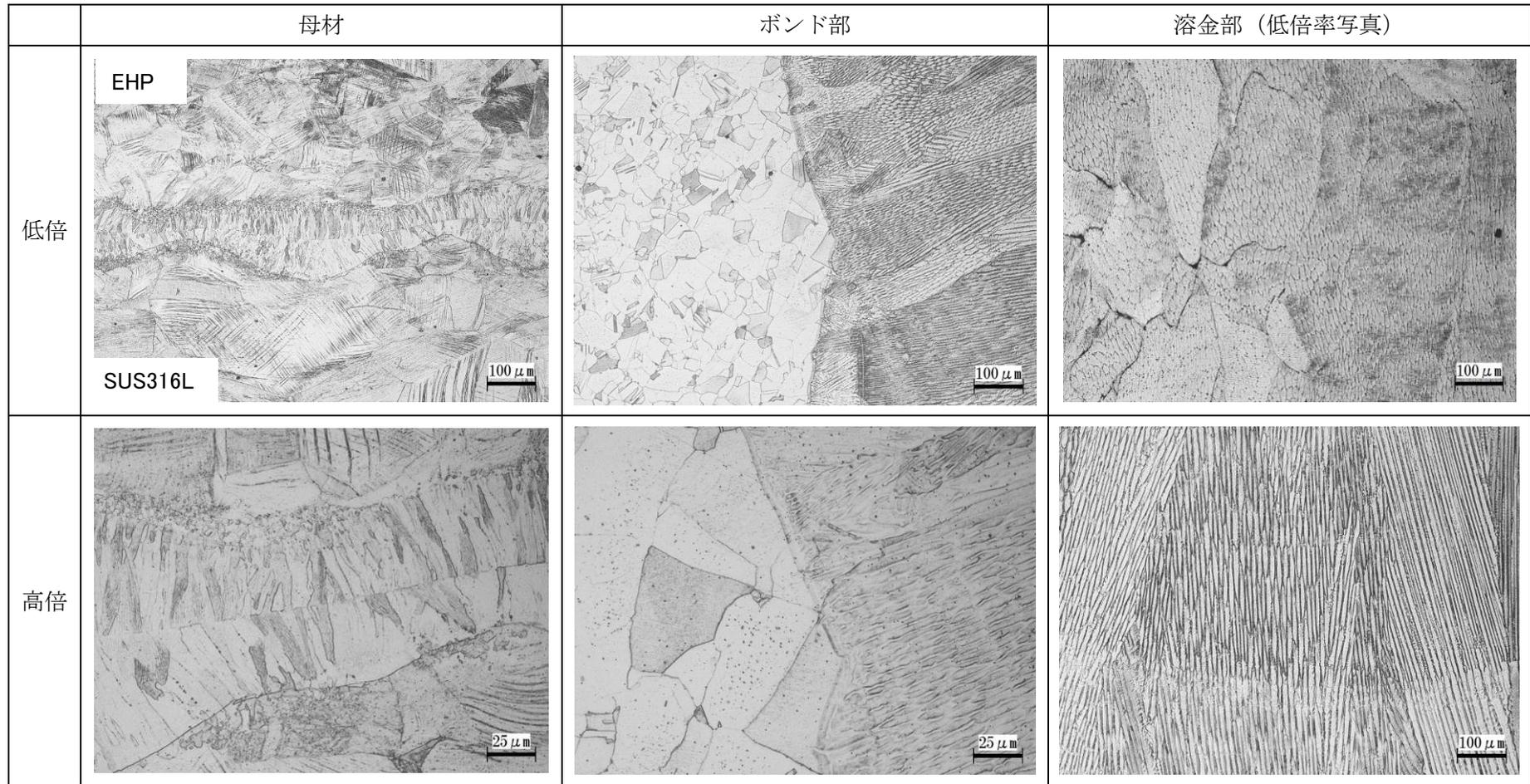


写真 3.1-15 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D のマイクロ組織

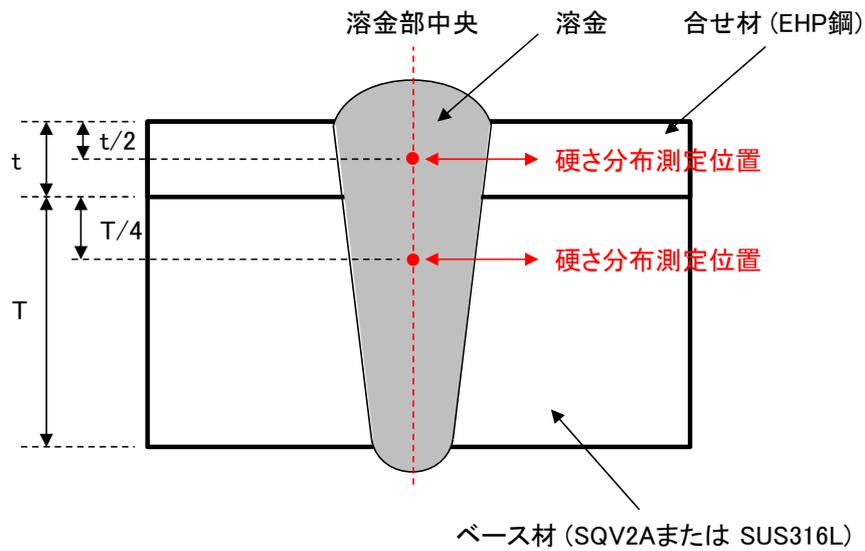


図 3.1-10 溶接継手のビッカース硬さ分布測定位置の模式図

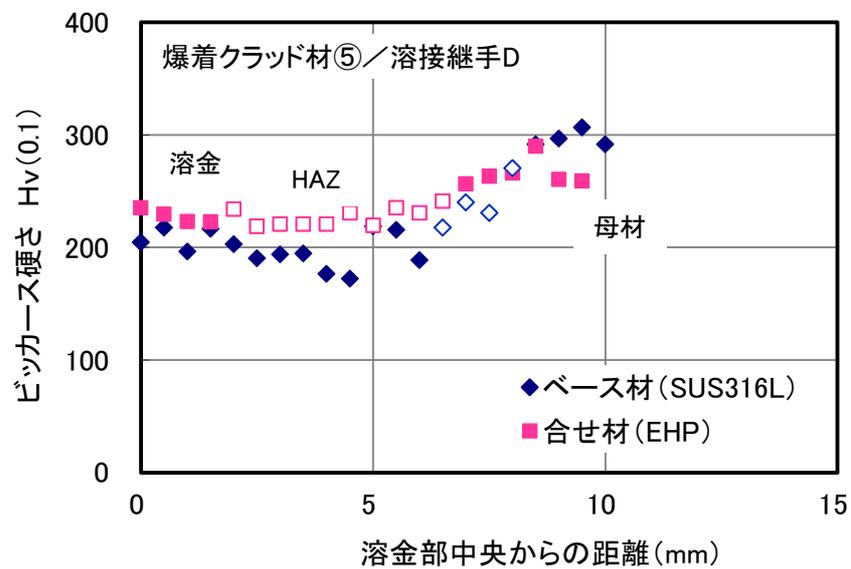


図 3.1-11 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316」) / 溶接継手 D の硬さ分布

表 3.1-10 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316」）／溶接継手 D の引張試験結果

クラッド／板組			板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	破断 位置
クラッド材① EHP/SQV2A (8+72mm)	規格*1)	—	—	> 543	—	—
	結果*2)	1	34.95	650	?	溶金部
		2	35.02	639	?	〃
クラッド材② EHP/SUS316L (6+24mm)	規格*1)	—	—	> 480	—	—
	結果*2)	1	31.89	553	48.8	母材部
		2	31.67	544	47.3	〃
クラッド材③ EHP/SUS316L/EHP (3+32+3mm)	規格*1)	—	—	> 480	(GL=65mm)	—
	結果*2)	1	39.92	547	53	母材部
		2	39.91	548	59	〃
クラッド材④ EHP/Ni/SQV2A (8+2+110mm)	規格*1)	—	—	> 545	—	—
	結果*2)	1	35.01	621	?	溶金部
		2	35.01	634	?	〃
クラッド材⑤ EHP/SUS316L (3+26mm)	規格*1)	—	—	> 480	(GL=65mm)	—
	結果*3)	1	29.26	630	25.7	溶金部
		2	28.92	607		R部
クラッド材⑥ EHP/SUS316L/EHP (3+32+3mm)	規格*1)	—	—	> 480	(GL=65mm)	—
	結果*2)	1	37.20	584	35	溶金部
		2	37.43	582	40	〃

*1) JIS G 3601「ステンレスクラッド鋼」の表 2—機械的性質（クラッド合材としての値）より算出下した値（参考値）

*2) JIS Z 3121 1A 号試験片 *3) JIS Z 3121 3A 号試験片

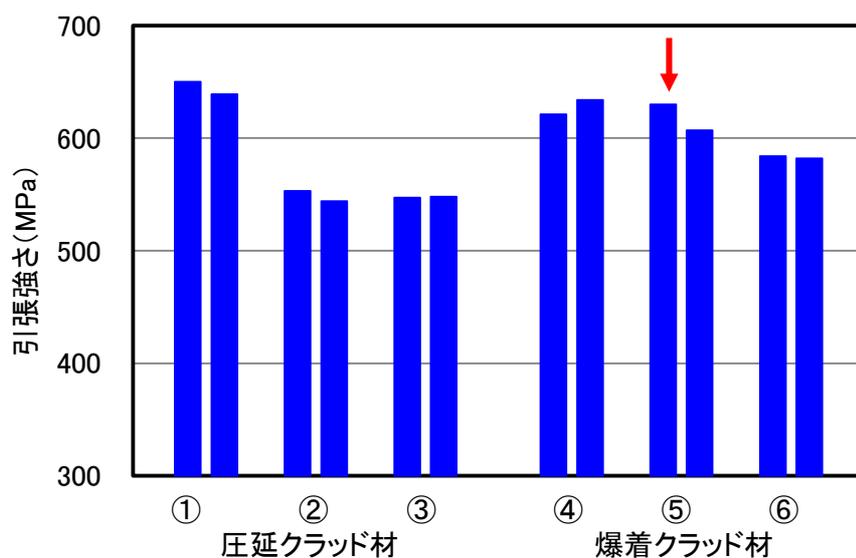


図 3.1-12 クラッド材の溶接継手の引張強さのまとめ

		クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 D	
		1	2
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-16 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 D の引張試験後の試験片外観写真

表 3.1-11 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316」）／溶接継手Dの曲げ試験結果

クラッド／板組	位置	板厚 (mm)		結果
圧延クラッド材① EHP/SQV2A	合せ材を外側に曲げ	15	1	割れ発生
			2	〃
	側曲げ	〃	1	割れ発生
			2	〃
圧延クラッド材② EHP/SUS316L	合せ材を外側に曲げ	〃	1	割れなし
			2	〃
	側曲げ	〃	1	割れなし
			2	〃
圧延クラッド材③ EHP/SUS316L/EHP	合せ材を外側に曲げ	〃	1	割れなし
			2	〃
	側曲げ	〃	1	割れなし
			2	〃
爆着クラッド材④ EHP/SQV2A	合せ材を外側に曲げ	〃	1	(割れ発生)
			2	割れなし
	側曲げ	〃	1	割れなし
			2	(割れ発生)
爆着クラッド材⑤ EHP/SUS316L	合せ材を外側に曲げ	15	1	割れなし
			2	破断
	側曲げ	〃	1	割れなし
			2	〃
爆着クラッド材⑥ EHP/SUS316L/EHP	合せ材を外側に曲げ	15	1	割れなし
			2	〃
	側曲げ	〃	1	割れなし
			2	〃

<p>爆着クラッド材⑤ EHP/SUS316L 溶接継手 D</p>	<p>合せ材を外 側に曲げ</p>	
	<p>側曲げ</p>	

写真 3.1-17 爆着クラッド材⑤（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 D の曲げ試験後の試験片外観写真

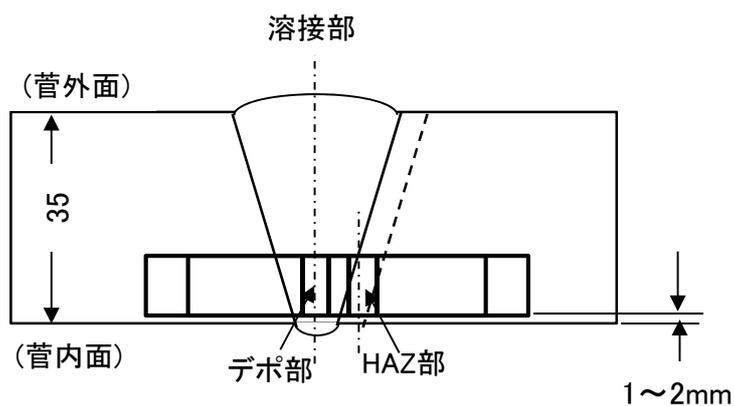
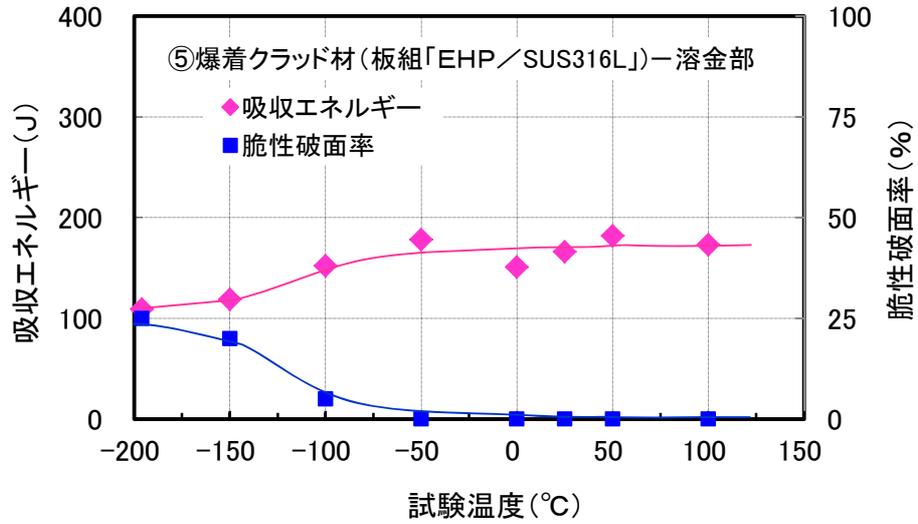


図 3.1-13 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D のシャルピー衝撃試験片の採取要領

表 3.1-12 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D のシャルピー衝撃試験結果

品種/板組	試験温度 (°C)	溶金部ノッチ			HAZ ノッチ		
		吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性破面率 (%)
クラッド材⑤ EHP/SUS316L	-196	109	136	25	146	183	5
	-150	119	149	20	146	183	5
	-100	152	190	5	155	194	5
	-50	178	223	0	157	196	5
	0	151	189	0	198	248	0
	25	166	208	0	207	259	0
	50	182	228	0	180	225	5
	100	173	216	0	197	246	0

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

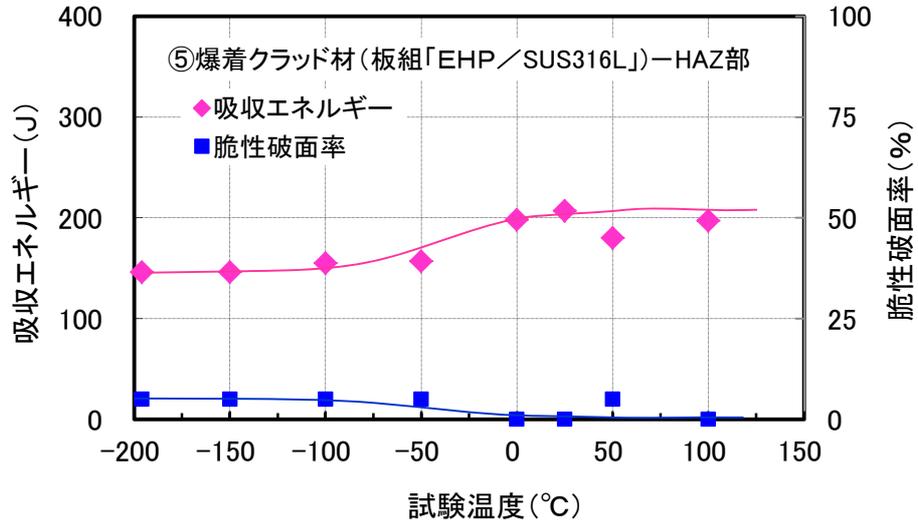


図 3.1-14 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 D の試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係

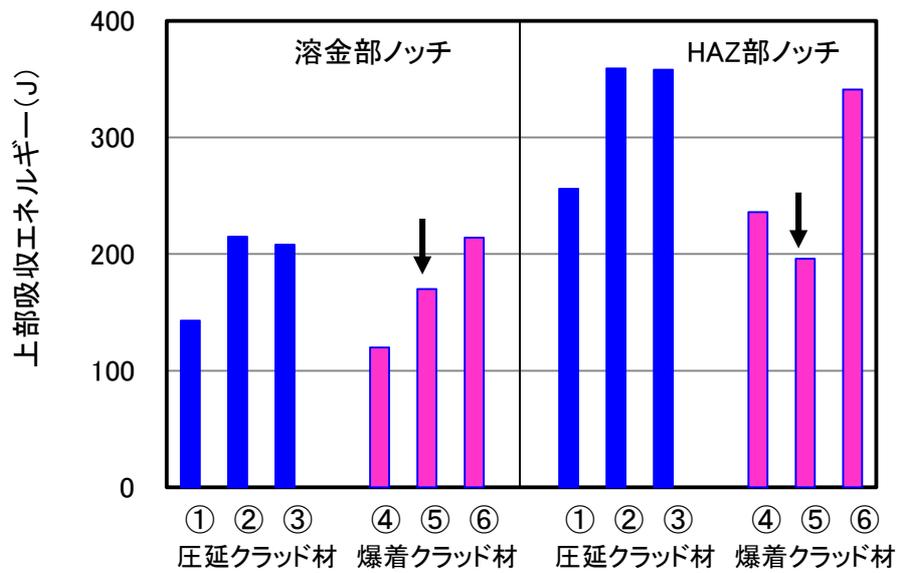


図 3.1-15 クラッド材の溶接継手のシャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめ

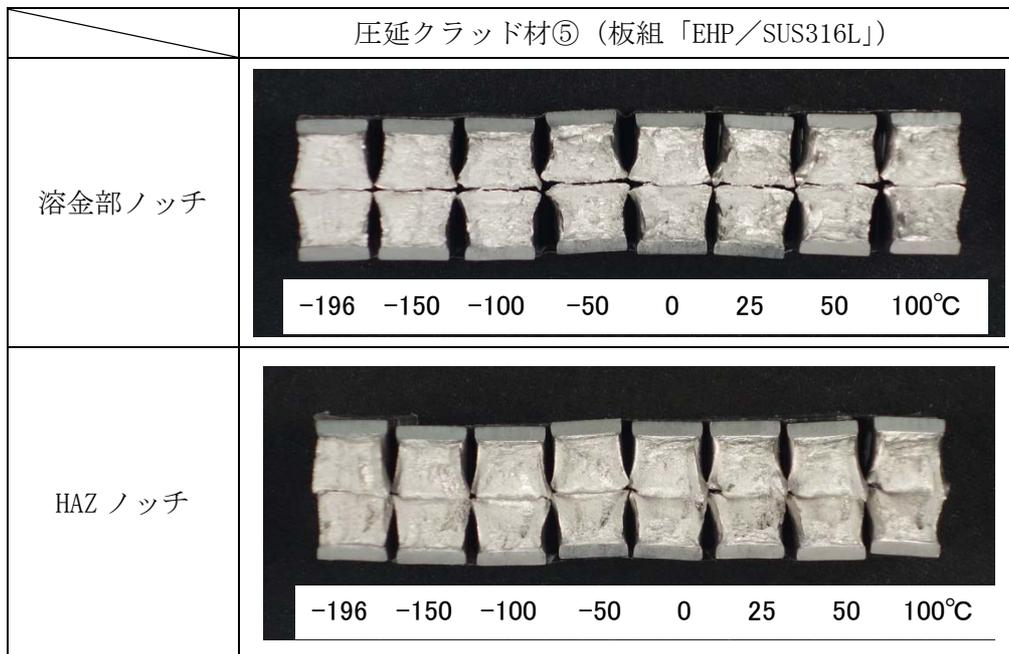


写真 3.1-18 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手Dのシャルピー衝撃試験後の試験片外観写真

【クラッド界面の長期健全性評価試験】

表 3.1-13 クラッド材の健全性評価試験のマトリックス (略号)

	板組	処理		
		未処理	500℃×2,000h 歪み時効	(600×1h⇔200℃) ×229cycle 熱疲労
圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	1	N1	S1
圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	2	N2	S2
爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	4	N4	S4
爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L/ EHP	5	N6	S6

表 3.1-14 長時間熱処理による時効の評価

	材料	熱処理	処理条件	TP
圧力容器	SQV2A	—	288℃で40年間運転した場合	8.72
クラッド界面	—	歪み時効	500℃×2,000h	10.28
	—	熱時効	(600×1h⇔200℃)×229cycle	10.79
溶接継手	EHP/SQV2A	ステップ冷却	593℃×1h—538℃×15h —524℃×24h—496℃×48h —468℃×72h—316℃ まで炉冷	9.55
	EHP/SUS316L	熱時効	500℃×2,000h	10.28

TP：クリープ破断寿命の推定に用いられているLarson Millerパラメータを拡張した時効パラメータ

$$TP = T \{10 + \log t\} \times 10^{-3}$$

T：絶対温度で表した加熱温度

t：保持時間

*) Pelli, R. and Forsten J., The IAEA Specialists Meeting on Load and Time Dependent Materials Performance Other Than Irradiation, Budapest, (1986)

表 3.1-15 クラッド材の健全性評価のための処理結果

品種	板組	素材形状 (mm)	減肉	冷間圧延	熱処理	略号
圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	80t×500w×300L	45t	45t (0%) *1)	500℃×2,000h	N1
圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	32t×625w×185L 32t×325w×300L	—	27.2t (15.0%) 28.0t (12.5%)	〃	N2
爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	110t×450w×300L	45.5t	44.2t (0.03%) *1)	〃	N4
爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L /EHP	37.2×420w×300L	—	33.3t (10.5%)	〃	N6
圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	80t×500w×300L	—	—	(600⇔200℃)×229cycle	S1
圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	32t×625w×185L 32t×325w×300L	—	—	〃	S2
爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	110t×450w×300L	—	—	〃	S4
爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L /EHP	37.2×420w×300L	—	—	〃	S6

*1) 1パス目に端部で界面がはく離したため、中断

	圧延前	軽圧下冷間圧延後
圧延クラッド 材① 板組「EHP/ SQV2A」		
圧延クラッド 材② 板組「EHP/ SUS316L」	 	

写真 3.1-19(a) クラッド材の歪み時効処理材の軽圧下冷間圧延後の外観写真-1

	圧延前	軽圧下冷間圧延後
爆着クラッド材④ 板組「EHP/SQV2A」		
爆着クラッド材⑥ 板組「EHP/SUS316L/EHP」		

写真 3.1-19 (b) クラッド材の歪み時効処理材の軽圧下冷間圧延後の外観写真-2

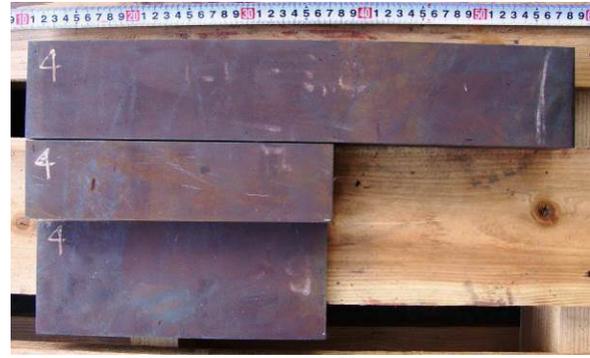
板組	圧延クラッド材	爆着クラッド材
EHP/SQV2A		
EHP/SUS316L		

写真 3.1-20 クラッド材の 500°C×2,000h 歪み時効処理後の試験片の外観写真

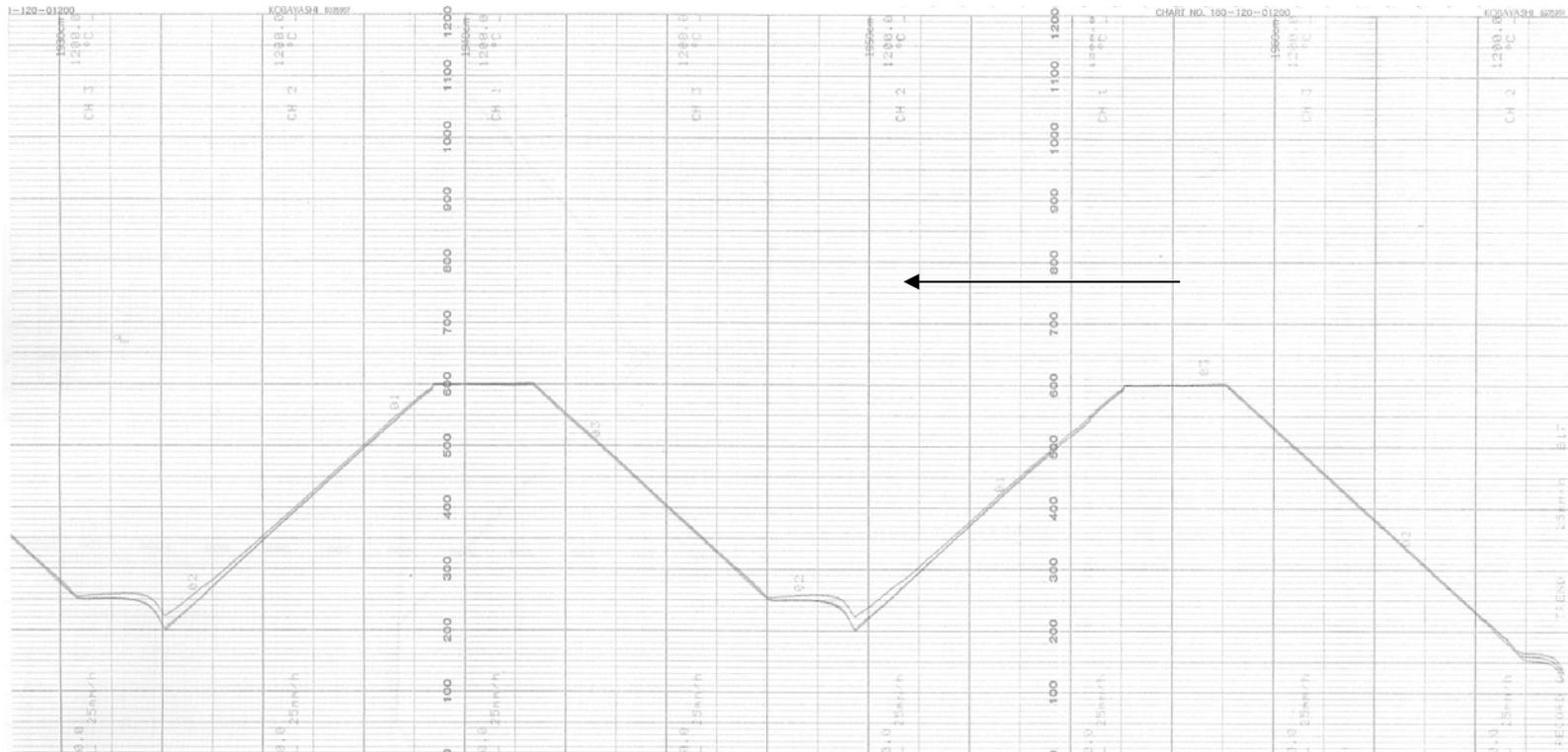


図 3.1-16 クラッド材の(600×1h⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理の温度チャートの例 (Total : 1,500h)

板組	圧延クラッド材	爆着クラッド材
EHP/SQV2A		
EHP/SUS316L		

写真 3. 1-21 クラッド材の(600×1h⇔200℃)×229cycle 熱疲労処理後の試験片の外観写真

表 3.1-16 クラッド材の健全性評価試験項目

試験項目	供試材	未処理	歪み時効 15%–500°C ×2,000h	熱疲労 (600×1h⇔200°C) ×229cycle ※2
マイクロ組織観察 硬さ分布測定	4種	※1	○	○
界面 EPMA 分析	〃	○	○	—
側曲げ試験	〃	※1	○	○
界面シャルピー衝撃試験	〃	※1	○	○
せん断試験 [界面剥離強度]	〃	※1	○	○
平面曲げ疲労試験	〃	○	○	—
応力腐食割れ試験 [CBB 試験]	〃	○	○	○

※1：平成 26 年度実施

※2：加熱・冷却速度 150°C/h、Total 1,500h

クラッド材の健全性評価試験用-1

・圧延クラッド①: 80t × 500w × 300L → 切断(45t) → 15% 予歪み: 45t → 熱処理 N/500°C × 2,000h → 試験片加工【略号N1】

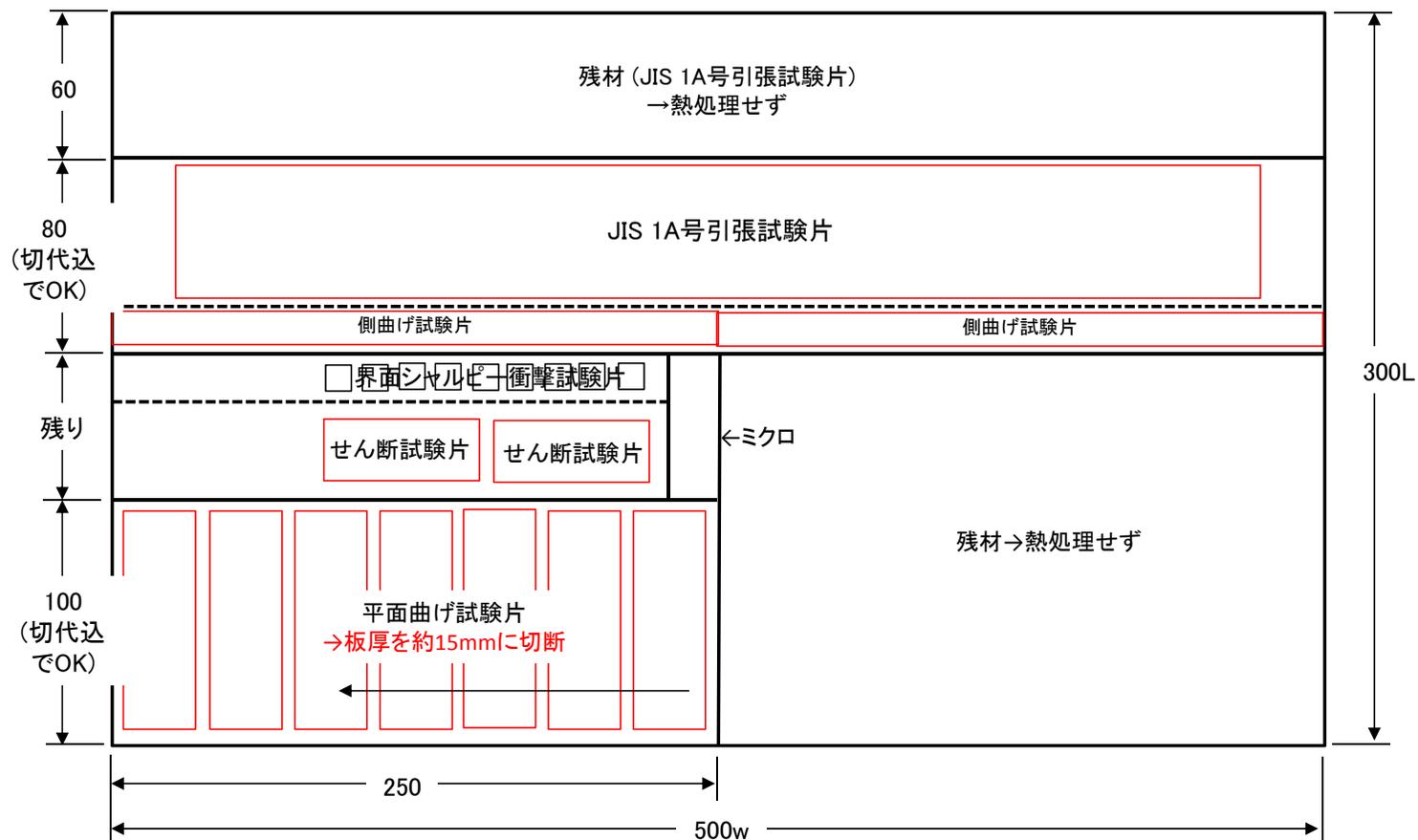


図 3.1-17 クラッド材の 500°C × 2,000h 歪み時効処理材の評価試験片の採取要領の例

クラッド材の健全性評価試験用-5

・圧延クラッド①: 80t × 500w × 300L → 切断 (38t) → 熱処理 S/(600 ⇔ 200°C) × 229サイクル (1,500h) → **試験片加工【略号S1】**

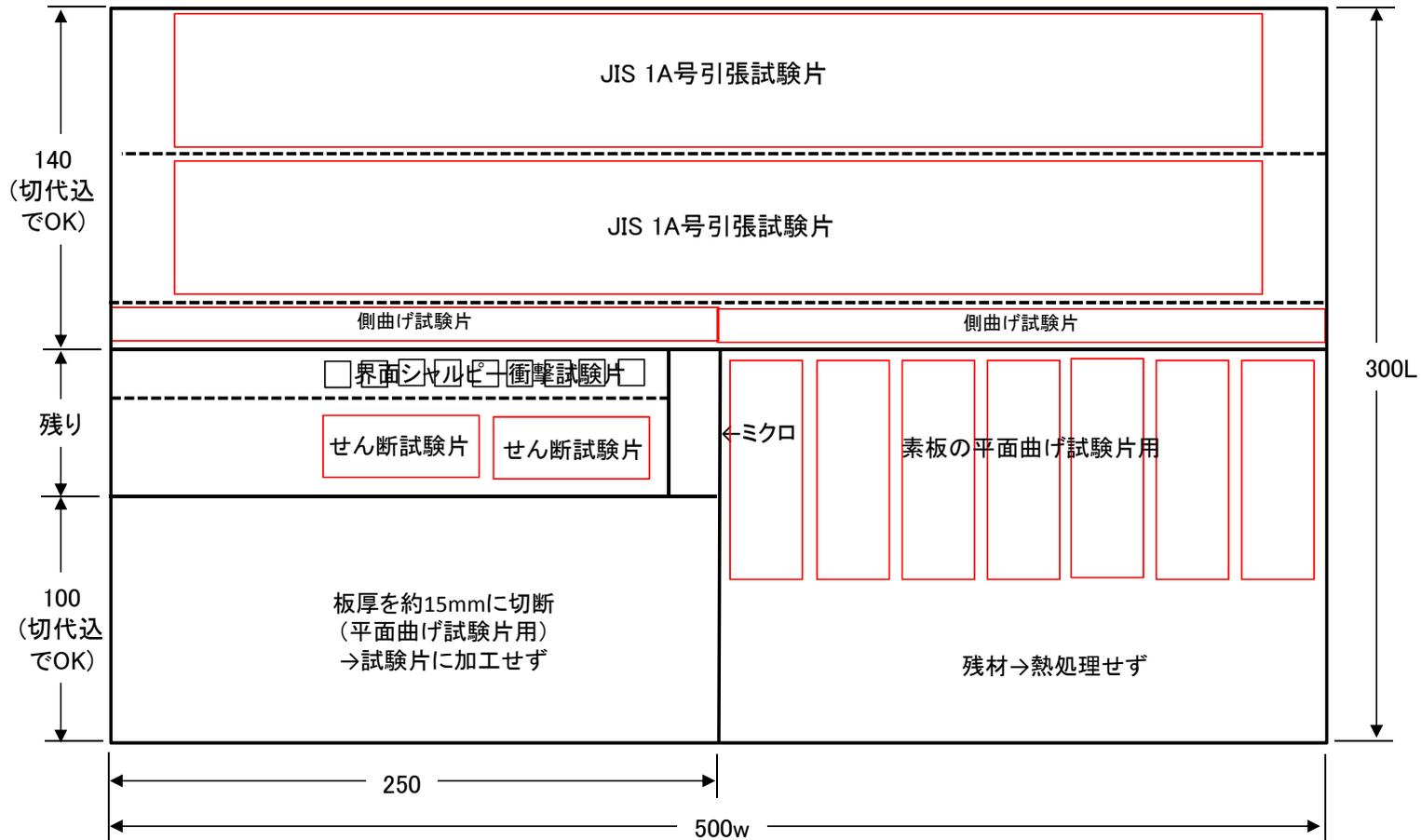


図 3.1-18 クラッド材の (600 × 1h ⇔ 200°C) × 229cycle 熱疲労処理材の評価試験片の採取要領の例

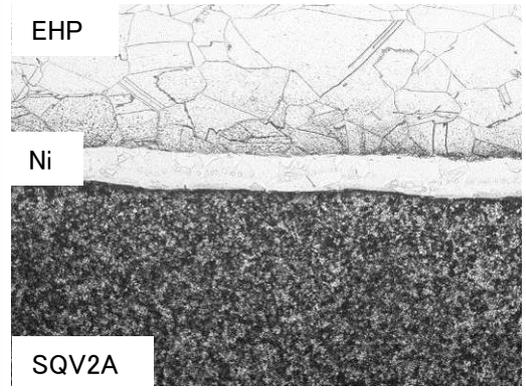
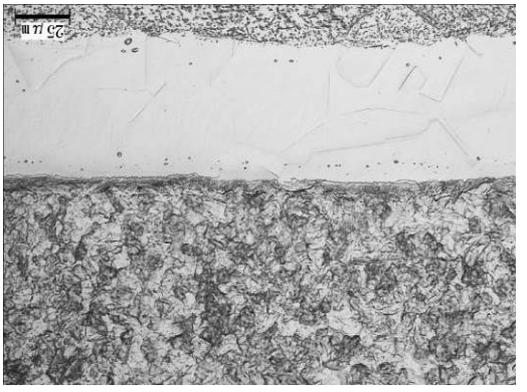
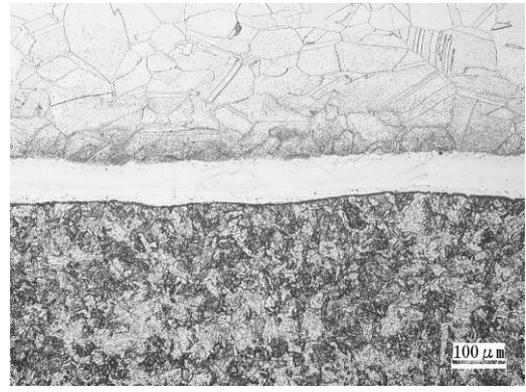
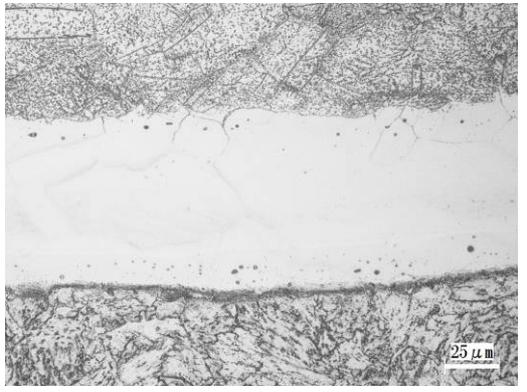
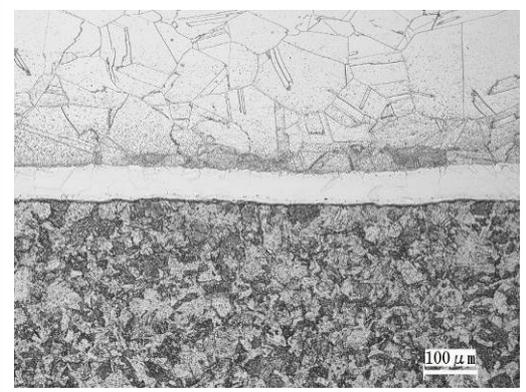
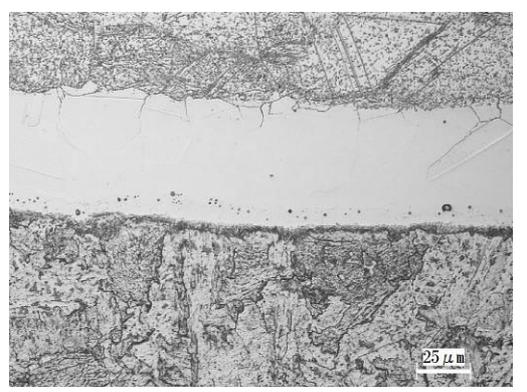
処理	圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」)	
	低倍	高倍
1		
N1		
S1		

写真 3.1-22 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の断面マイクロ組織の
長時間熱処理による変化

処理	圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）	
	低倍	高倍
2		
N2		
S2		

写真 3.1-23 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の断面マイクロ組織の
長時間熱処理による変化

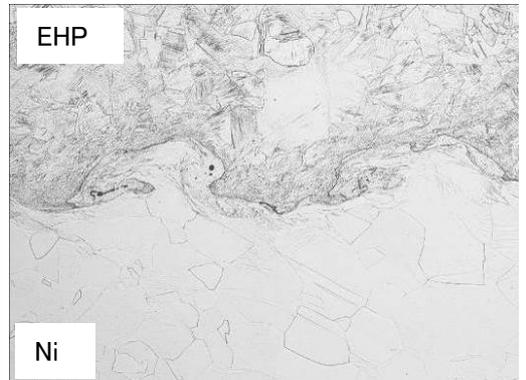
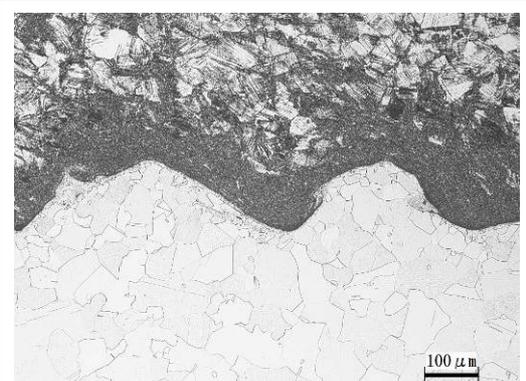
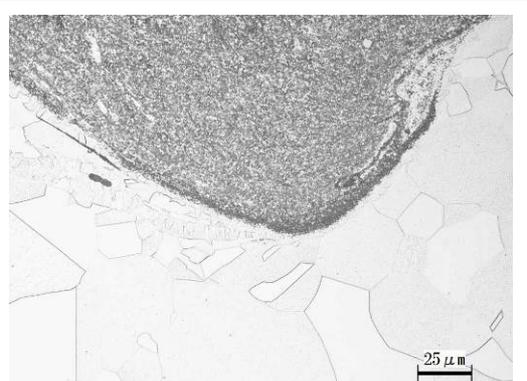
処理	爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」)	
	低倍	高倍
4		
N4		
S4		

写真 3.1-24(a) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の断面マイクロ組織の長時間熱処理による変化 (EHP/Ni 界面)

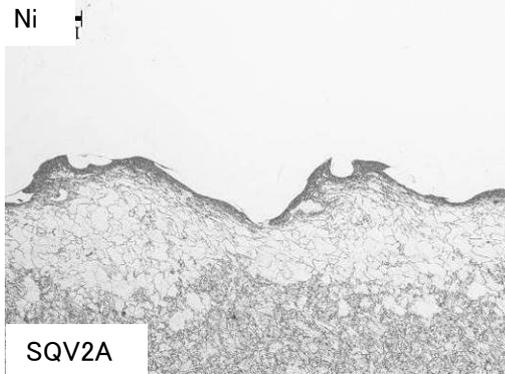
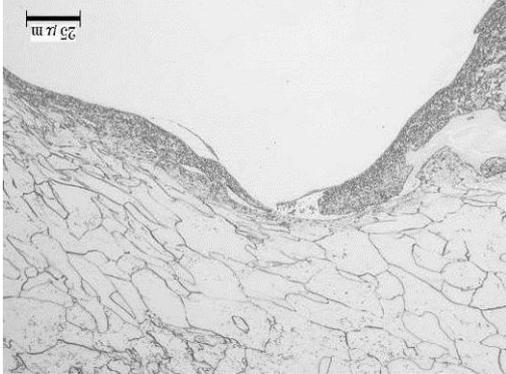
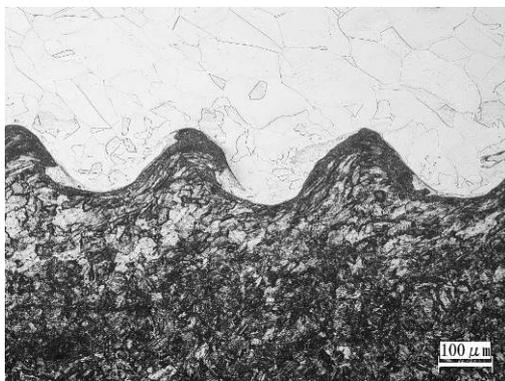
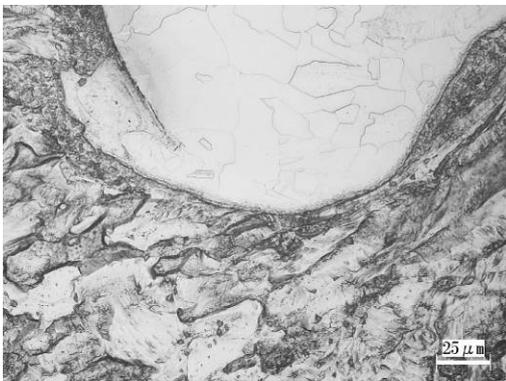
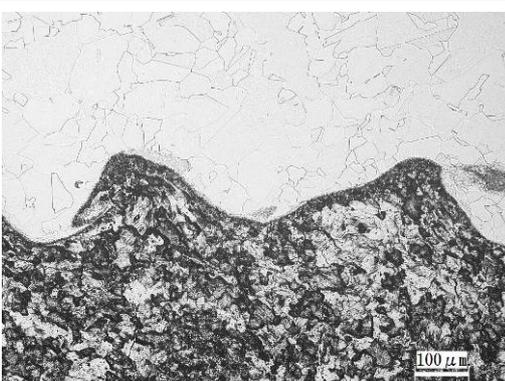
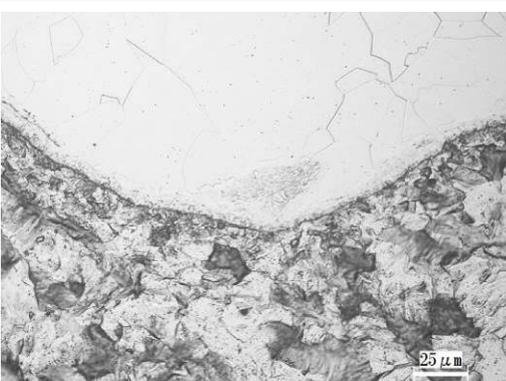
処理	爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」)	
	低倍	高倍
4		
N4		
S4		

写真 3.1-24(b) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の断面マイクロ組織の長時間熱処理による変化 (Ni/SQV2A 界面)

処理	爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」)	
	低倍	高倍
6		
N6		
S6		

写真 3.1-25 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(／EHP)」) の断面マイクロ組織の長時間熱処理による変化

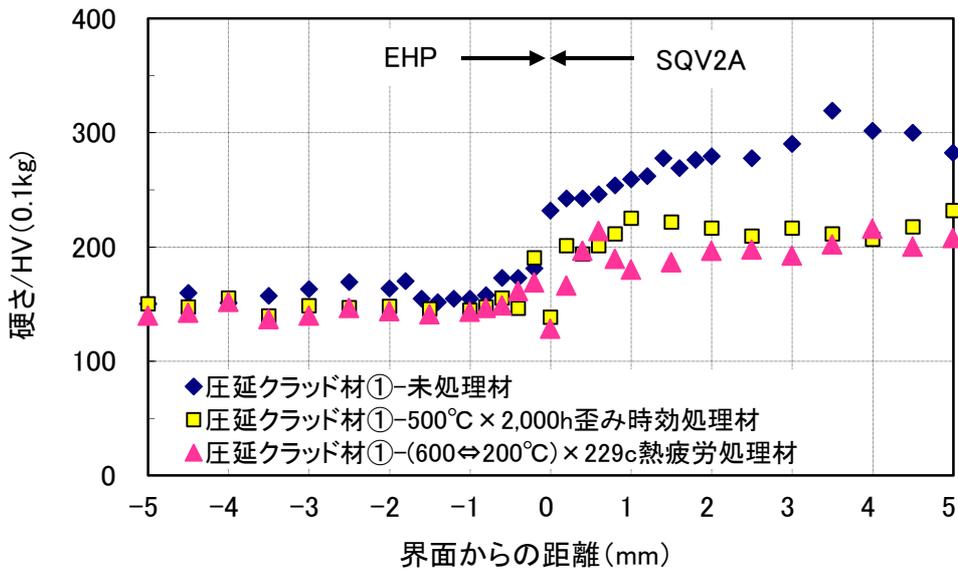


図 3.1-19 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の長時間熱処理材の硬さ分布

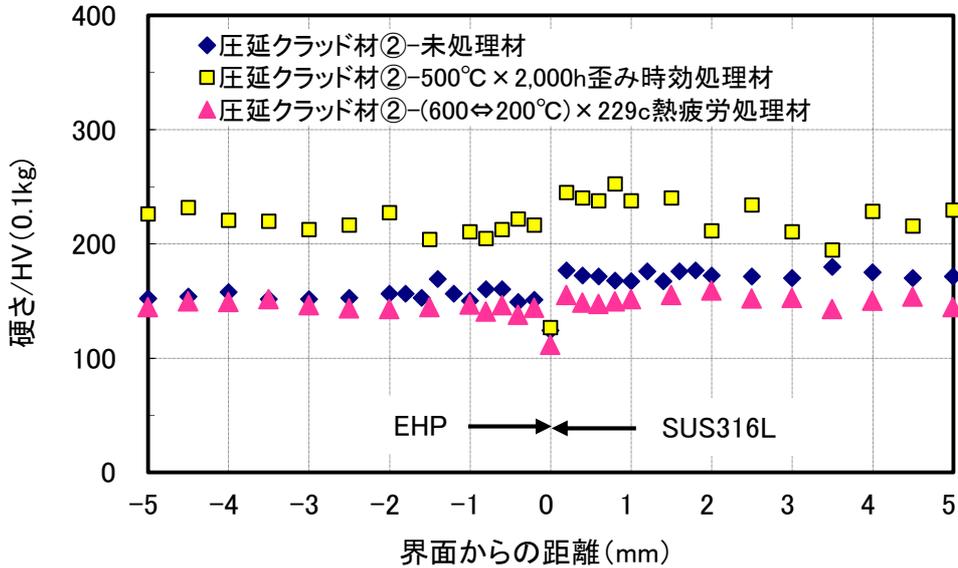


図 3.1-20 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の長時間熱処理材の硬さ分布

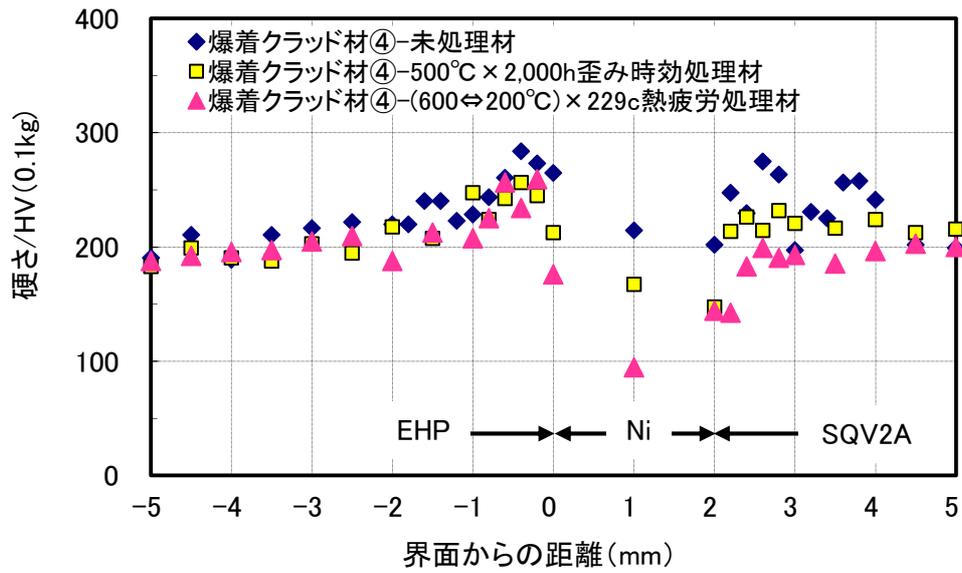


図 3.1-21 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の長時間熱処理材の硬さ分布

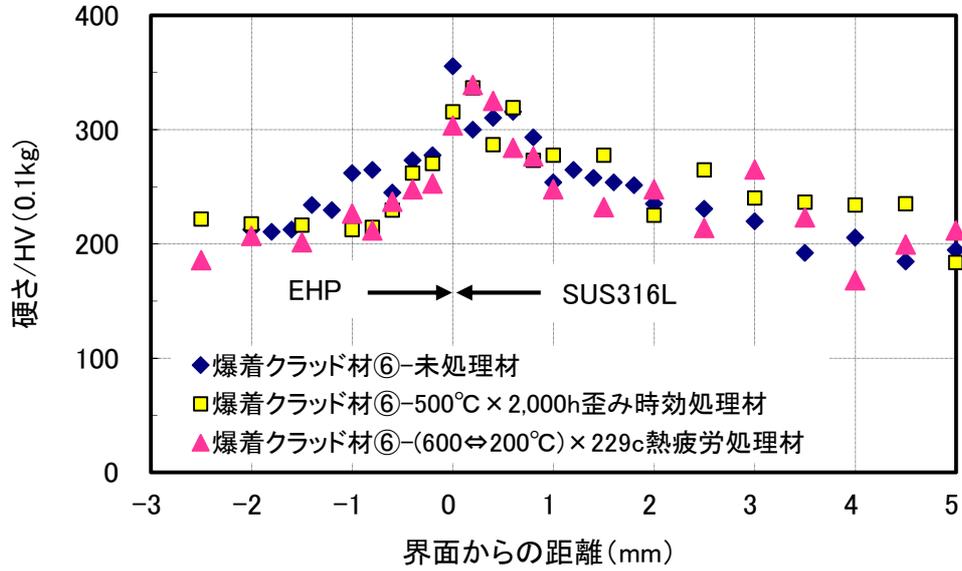


図 3.1-22 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(/EHP)」) の長時間熱処理材の硬さ分布

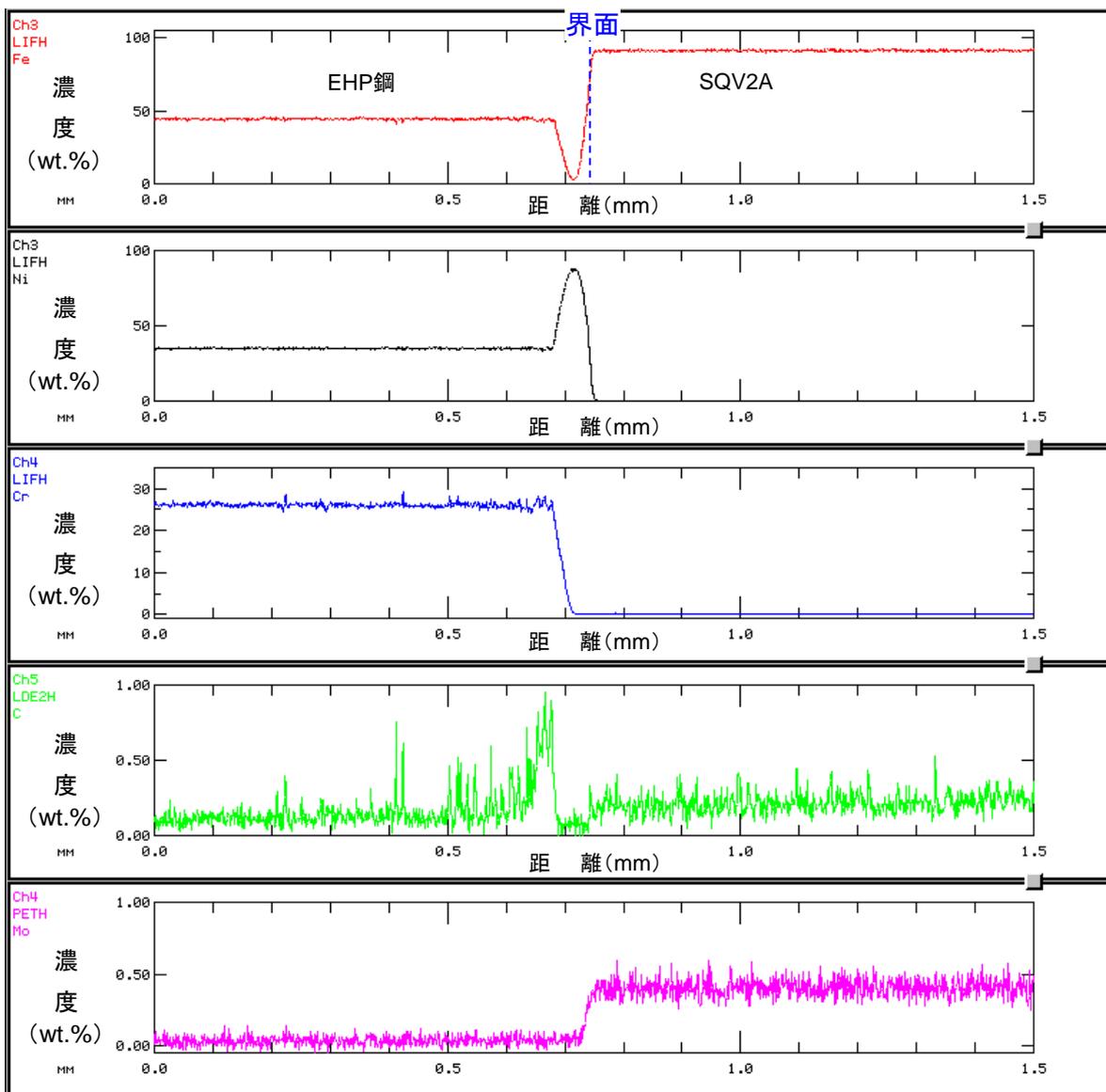
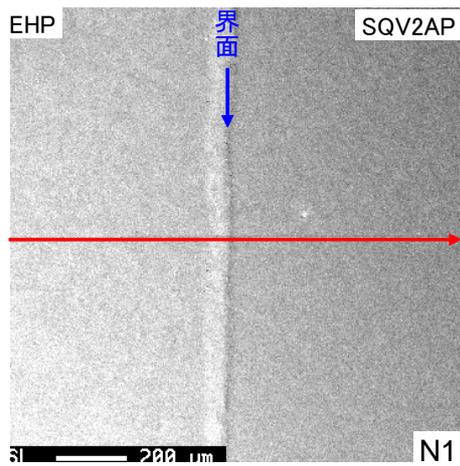


図 3.1-23 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果

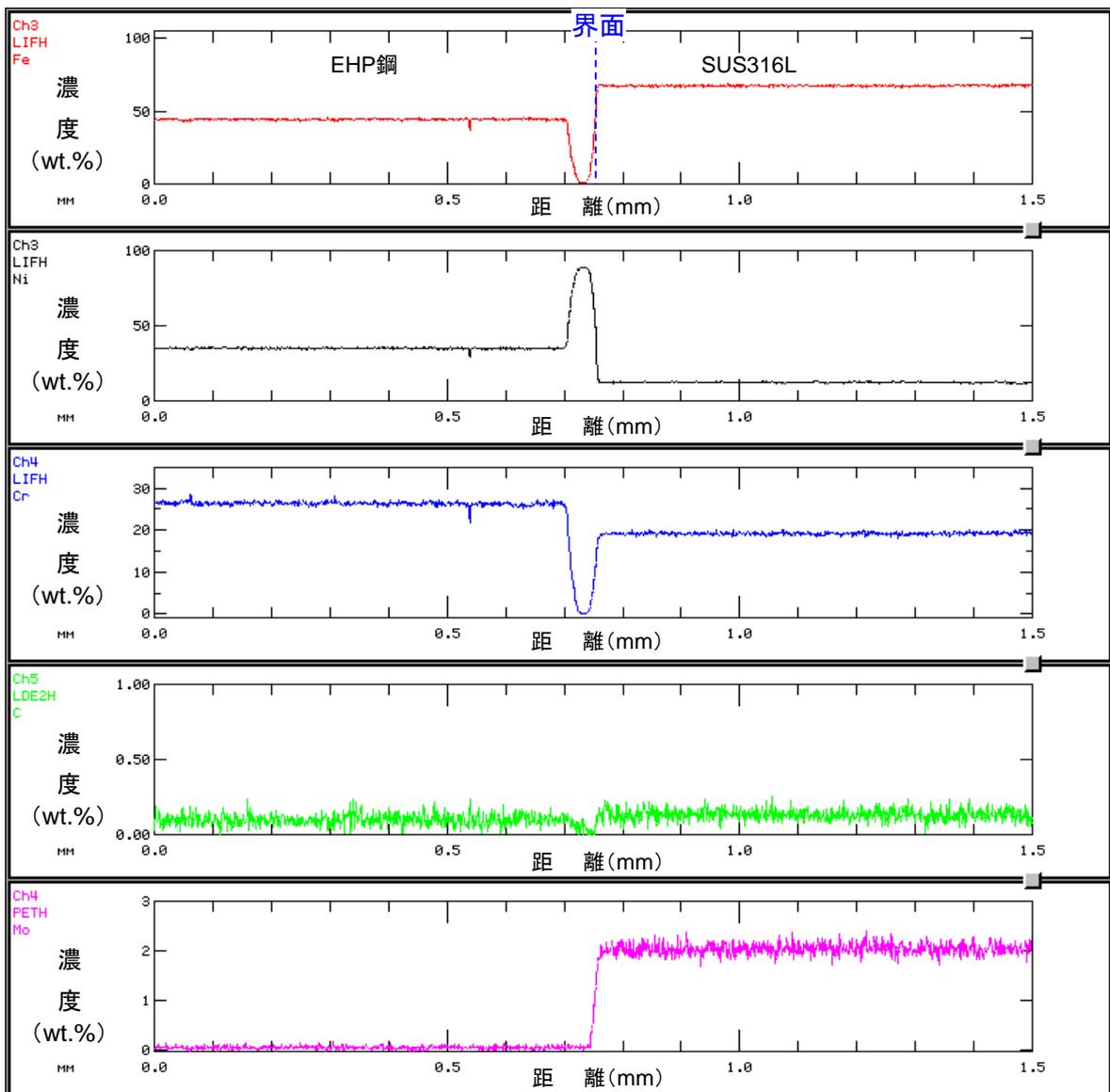
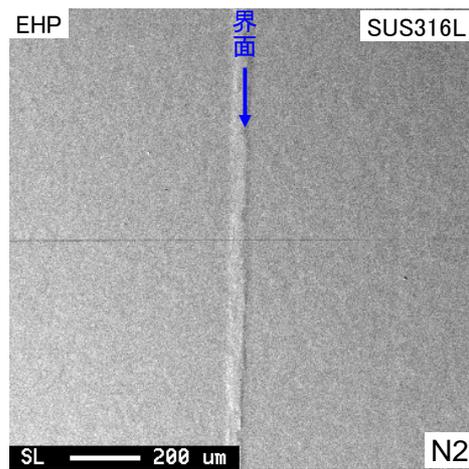


図 3.1-24 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果

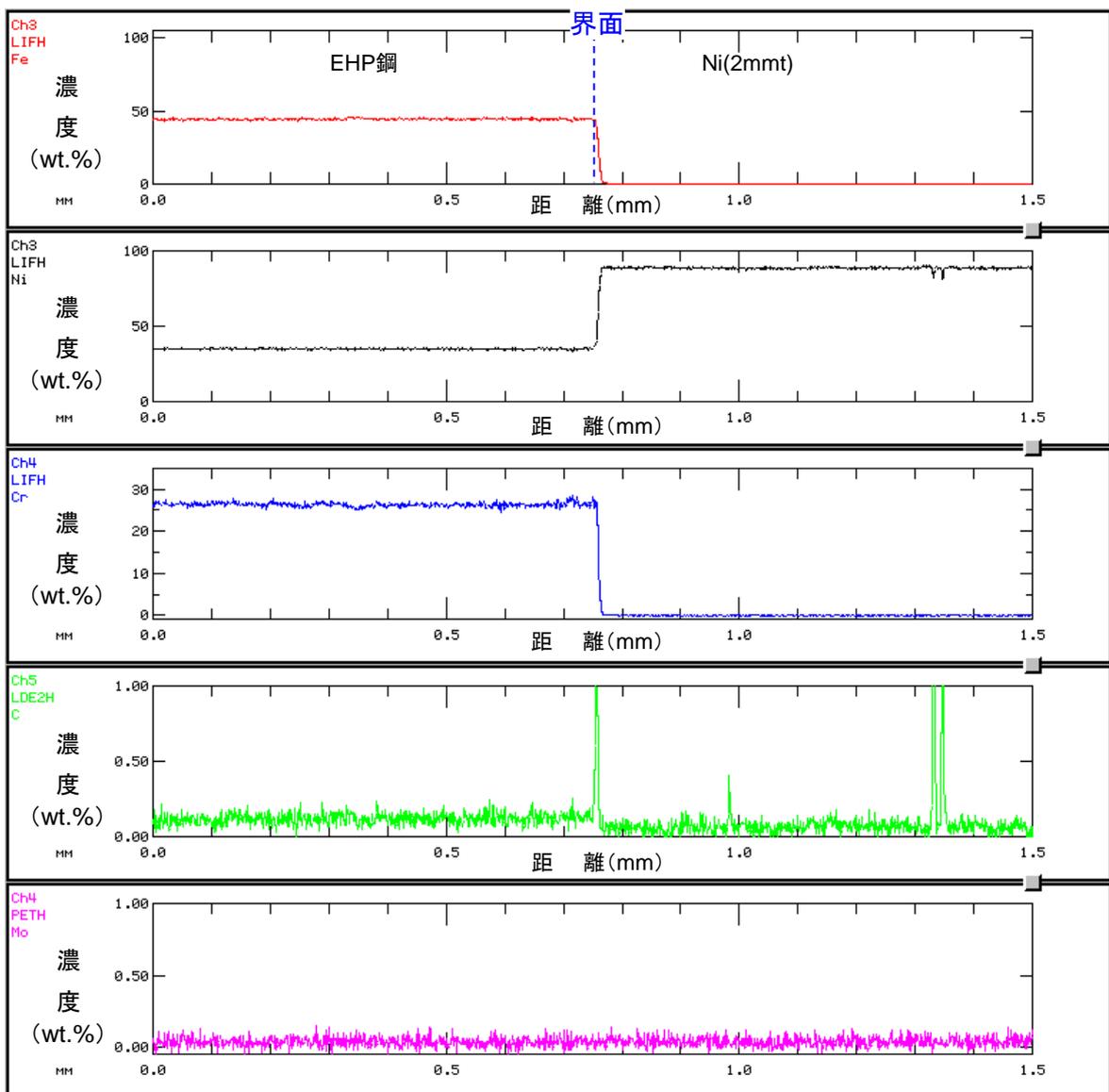
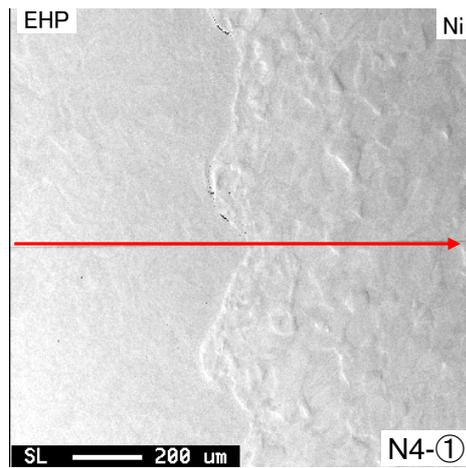


図 3.1-25(a) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果

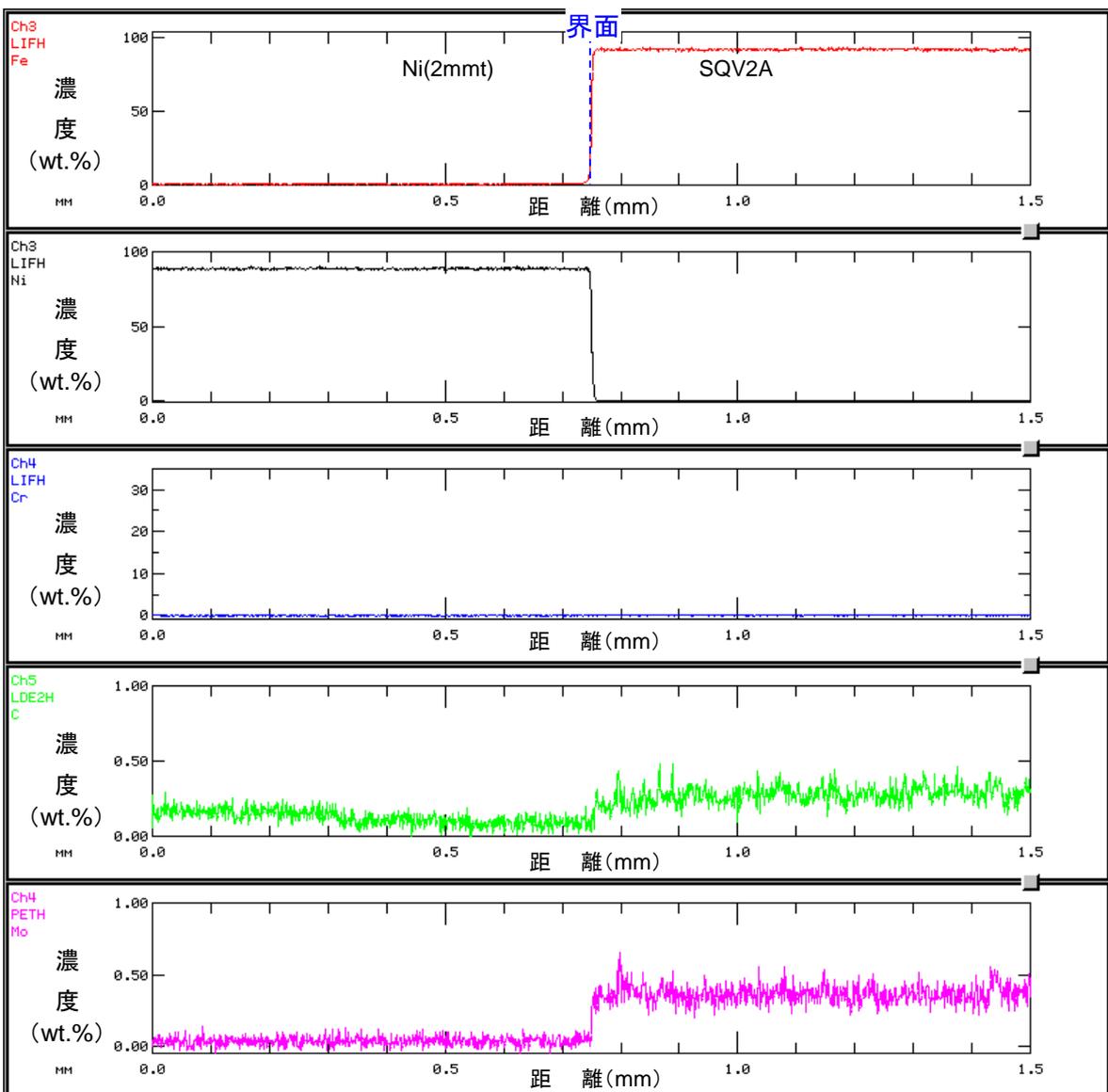
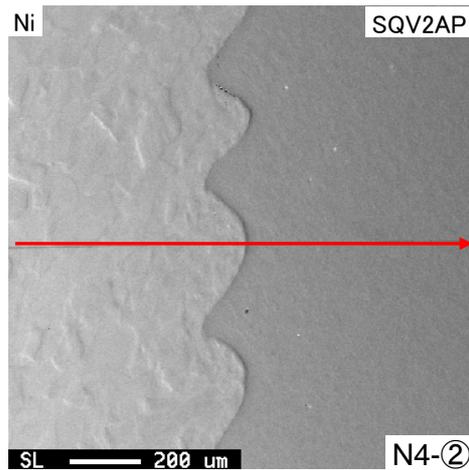


図 3.1-25 (b) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果

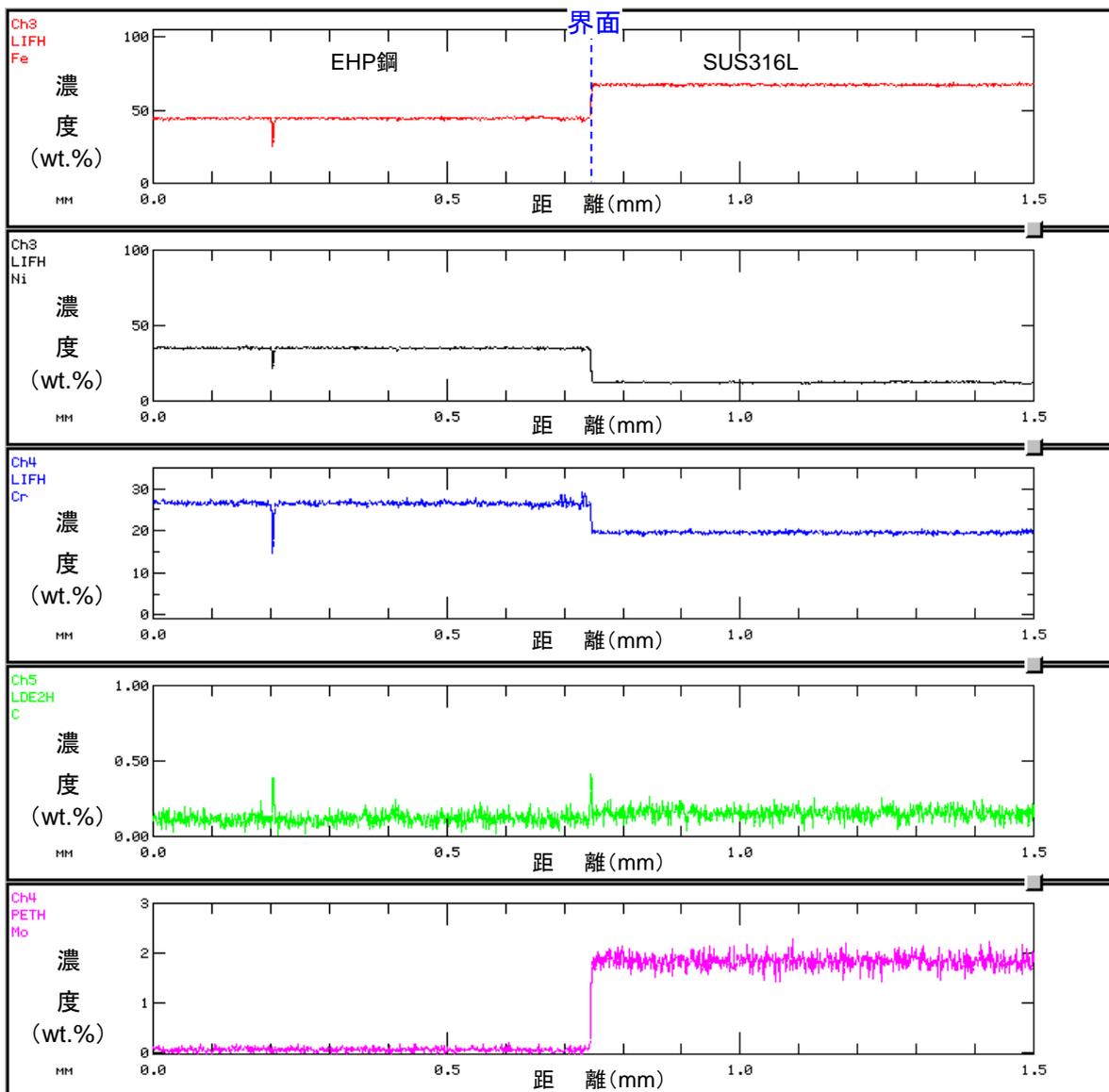
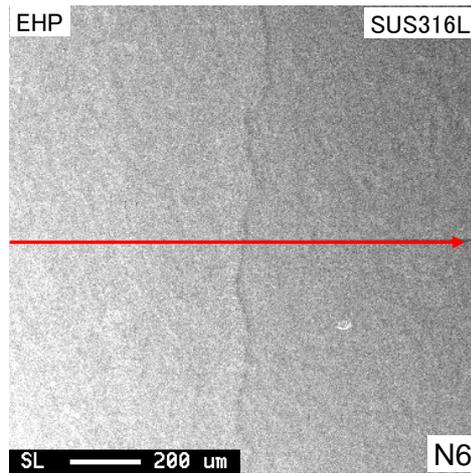


図 3.1-26 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(／EHP)」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の EPMA ライン分析結果

表 3.1-17 クラッド材の長時間熱処理材の引張試験結果*1)

品種	板組	処理			板厚 (mm)	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	破断 位置
			規格*2)							
圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	クラッドまま	規格*2)		—	>328	>543	>18.0	—	—
			結果	1	80	533	647	20.8	—	A
		500°C×2,000h	1	37.86	581	648	23.7	68	A	
		(600⇔200°C)×229c	1	38.32	494	611	27.4	64	A	
圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	クラッドまま	規格*2)		—	>175	>480	>40.0	—	—
			結果	1	32	252	539	53.5	—	A
		500°C×2,000h	1	27.42	547	669	26.7	62	B	
(600⇔200°C)×229c	1	31.89	259	542	51.6	69	A			
爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	クラッドまま	規格*2)		—	>332	>545	>18.0	—	—
			結果	1	38.02	614	664	17.6	—	A
		500°C×2,000h	1	37.93	529	639	24.7	66	A	
		(600⇔200°C)×229c	1	37.68	475	588	25.8	66	A	
			2	37.83	476	572	24.9	65	A	
爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L (/EHP)	クラッドまま	規格*2)		—	>175	>480	>40.0	—	—
			結果	1	36.68	496	611	34.9	—	A
		500°C×2,000h	1	34.03	551	682	29.1	61	A	
		(600⇔200°C)×229c	1	37.31	458	593	39.4	58	A	
			2	37.36	437	593	39.6	61	A	

*1) JIS G 0601、JIS Z 2241 1A 号試験片 (GL=200mm)

*2) JIS G 3601「ステンレスクラッド鋼」の表 2—機械的性質から算出した値

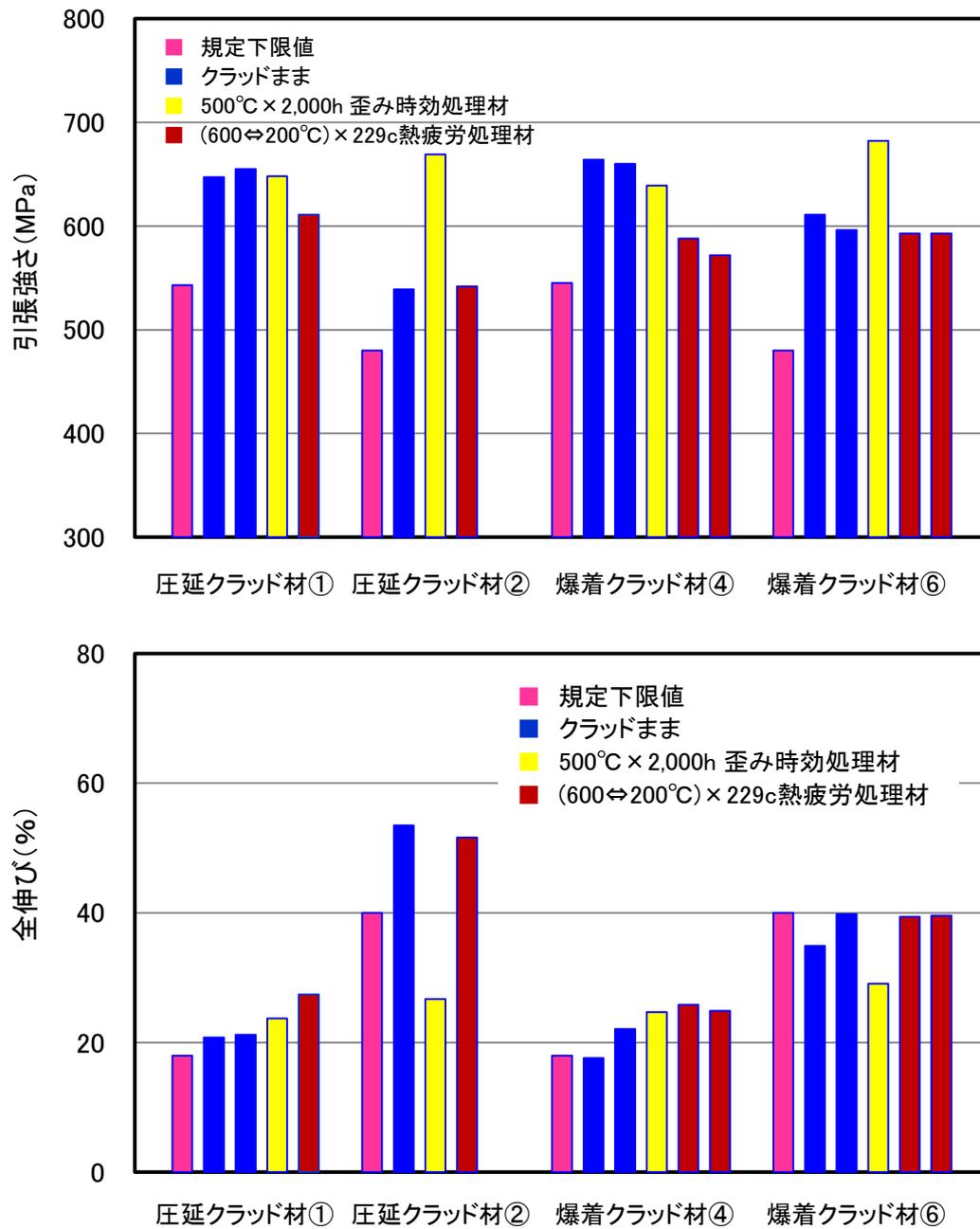


図 3.1-27 クラッド材の長時間熱処理材の引張試験結果のまとめ

		圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」)	
		N1 : 500°C×2,000h 歪み時効処理材	S1 : (600⇄200°C)×229cycle 熱疲労処理材
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-26 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の室温引張試験後の試験片外観写真

		圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」)	
		N2 : 500°C × 2,000h 歪み時効処理材	S2 : (600⇄200°C) × 229cycle 熱疲労処理材
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-27 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の室温引張試験後の試験片外観写真

		爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」)	
		N4 : 500°C×2,000h 歪み時効処理材	S4-1 : (600⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理材
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-28 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の室温引張試験後の試験片外観写真

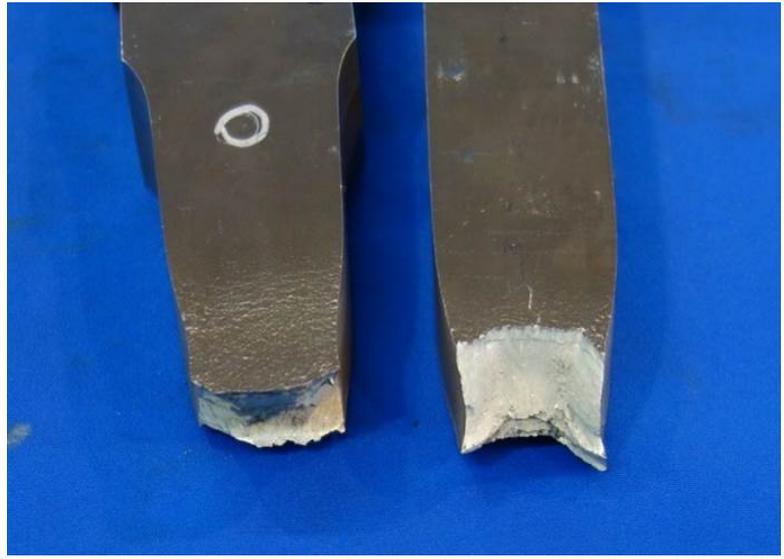
		爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(／EHP)」)	
		N6 : 500℃×2,000h 歪み時効処理材	S6-1 : (600⇔200℃)×229cycle 熱疲労処理材
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-29 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(／EHP)」) の室温引張試験後の試験片外観写真

表 3.1-18 クラッド材の長時間熱処理材の曲げ試験結果

処理	品種	板組	曲げ条件	板厚 (mm)		結果
クラッドまま	圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	合せ材を外側	38	1	割れなし
					2	—
	圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	合せ材を外側	32	1	割れなし
					2	—
	爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	合せ材を外側	38	1	割れなし
					2	〃
	爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L /EHP	合せ材を外側	38	1	割れなし
					2	〃
500°C×2,000h 歪み時効処理材	圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	側曲げ	15	1	割れなし
					2	〃
	圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	〃	〃	1	割れなし
					2	〃
	爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	〃	〃	1	割れなし
					2	〃
	爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L /EHP	〃	〃	1	割れなし
					2	〃
(600⇔200°C)× 229cycle 熱疲労処理材	圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	側曲げ	15	1	割れなし
					2	〃
	圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	〃	〃	1	割れなし
					2	〃
	爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	〃	〃	1	割れなし
					2	〃
	爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L (/EHP)	〃	〃	1	割れなし
					2	〃

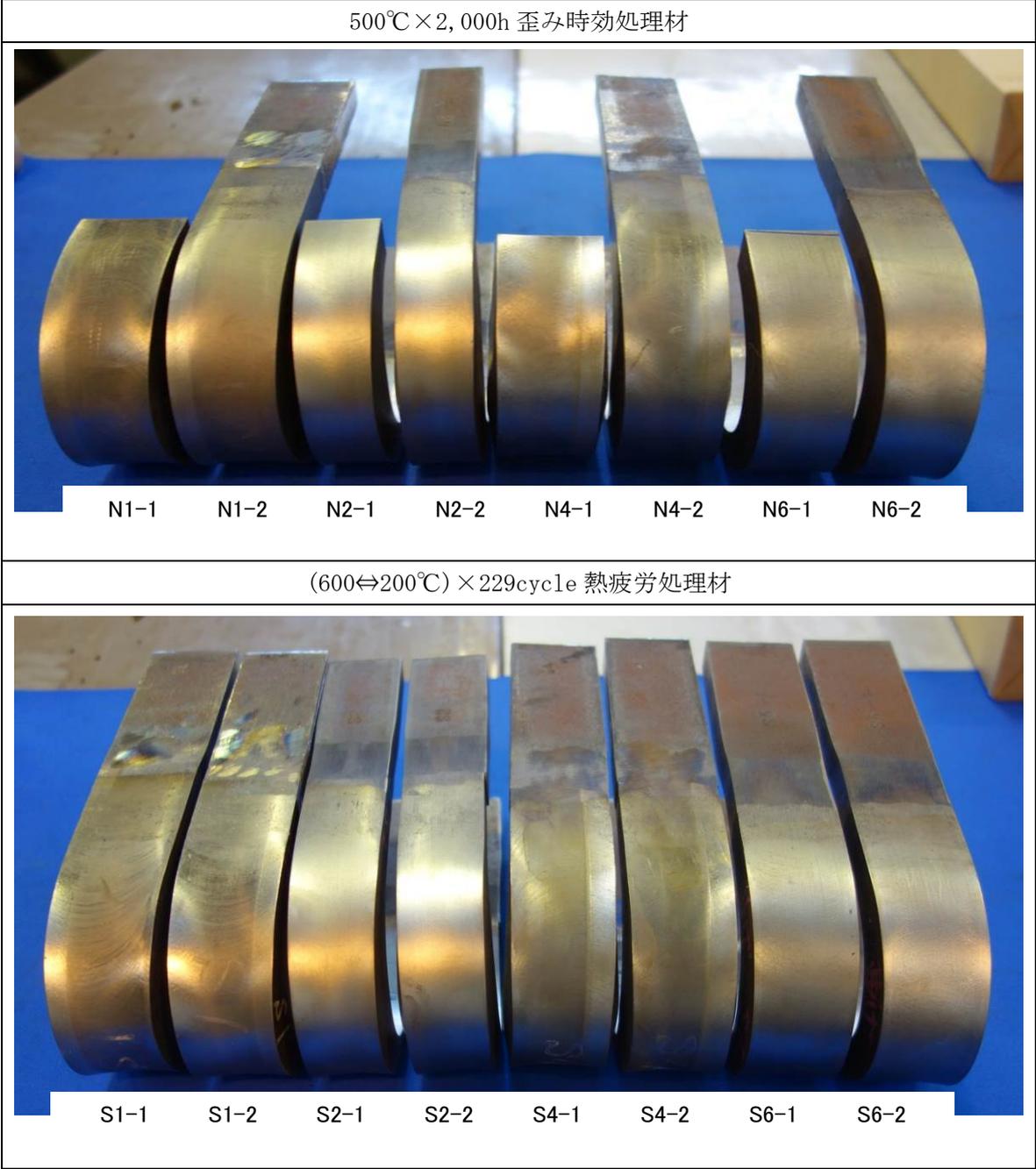


写真 3.1-30 クラッド材の長時間熱処理材の曲げ試験後の試験片外観写真

表 3.1-19 クラッド材の長時間熱処理後のせん断試験結果

品種	板組		クラッドまま	500℃×2,000h 歪み時効処理材		(600⇔200℃)×229cycle 熱疲労処理材			
			せん断応力 (MPa)	試験片形状 (mm)		せん断応力 (MPa)	試験片形状 (mm)		せん断応力 (MPa)
				板幅	クラッド幅 w		板幅	クラッド幅 w	
圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	1	329	24.97	4.52	369	24.96	4.52	330
		2	—	24.96	4.52	340	24.95	4.52	332
圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	1	430	24.98	4.52	443	24.97	4.52	335
		2	—	24.96	4.51	449	24.95	4.52	355
爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	1	453	24.97	4.52	314	24.97	4.52	289
		2	422	24.97	4.51	318	24.98	4.52	285
爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L (/EHP)	1	468	24.95	4.52	587	24.98	4.52	501
		2	470	24.97	4.52	602	24.97	4.52	489

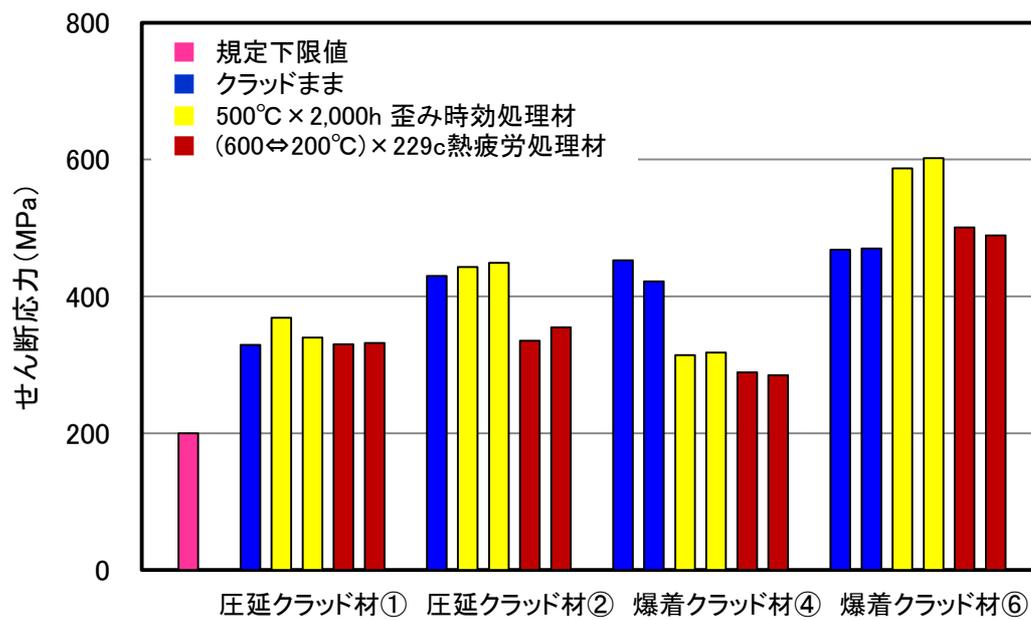


図 3.1-28 クラッド材の長時間熱処理後のせん断強さのまとめ

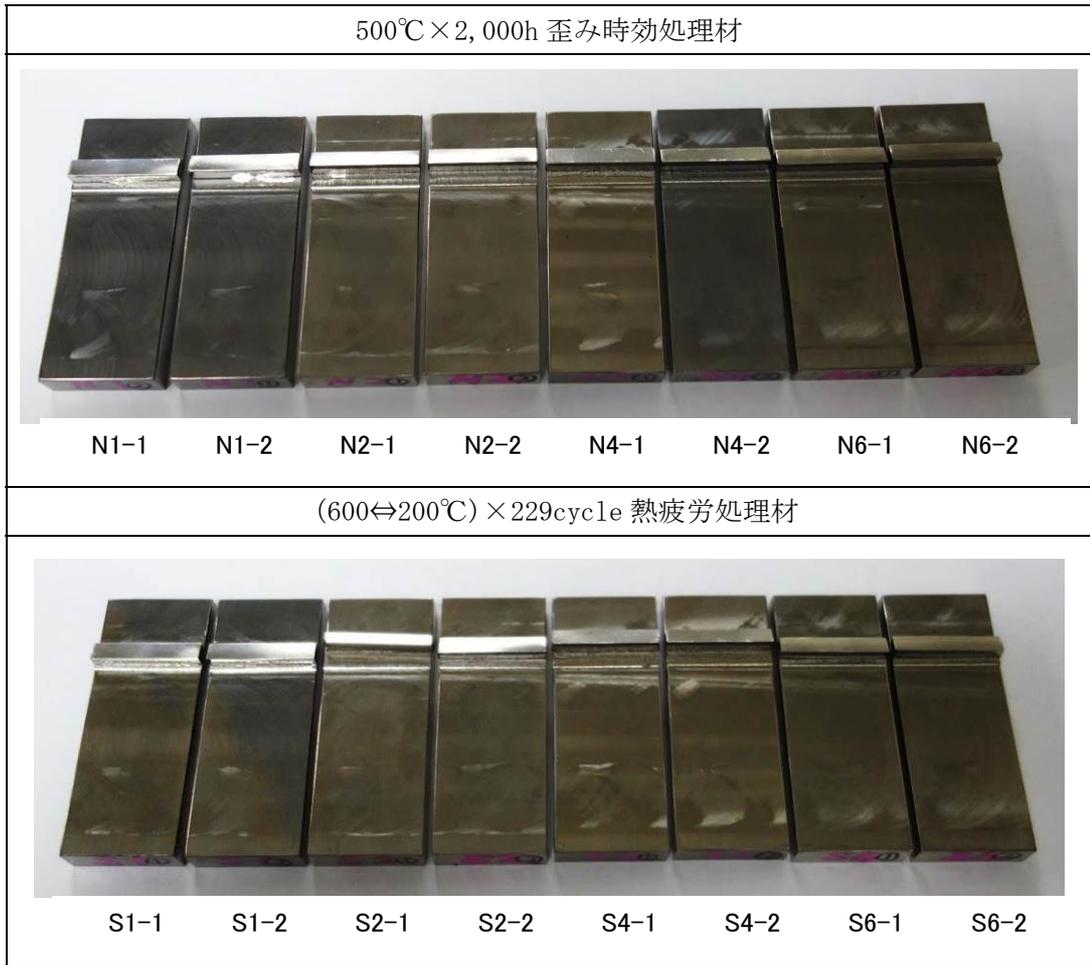


写真 3. 1-31 クラッド材の長時間熱処理材のせん断試験後の試験片外観写真

表 3. 1-20 クラッド材の 500℃×2, 000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

板組	No.	試験 温度 (°C)	圧延クラッド材			爆着クラッド材		
			吸収エネ ルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性 破面率 (%)	吸収エネ ルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性 破面率 (%)
EHP/SQV2A	1	-196	4	5	95	10	13	90
	2	-150	10	13	90	21	26	0
	3	-100	11	14	60	19	24	0
	7	-50	16	20	0	25	31	0
	4	0	14	18	0	28	35	0
	5	25	17	21	0	24	30	0
	6	50	15	19	0	27	34	0
	8	100	18	23	0	18	23	0
EHP/SUS316L	1	-196	23	29	0	14	18	0
	2	-150	22	28	0	18	23	0
	3	-100	33	41	0	17	21	0
	4	-50	20	25	0	77	96	0
	5	0	51	64	0	24	30	0
	6	25	34	43	0	24	30	0
	7	50	26	33	0	55	69	0
	8	100	27	34	0	288	360	0

表 3.1-21 クラッド材の (600⇔200℃)×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

板組	No.	試験 温度 (°C)	圧延クラッド材			爆着クラッド材		
			吸収エネ ルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性 破面率 (%)	吸収エネ ルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性 破面率 (%)
EHP/SQV2A	1	-196	3	4	95	34	43	80
	2	-150	11	14	90	41	51	0
	3	-100	10	13	80	45	56	0
	4	-50	13	16	10	40	50	0
	5	0	17	21	55	54	68	0
	6	25	22	28	5	46	58	0
	7	50	19	24	5	62	78	0
	8	100	20	25	5	56	70	0
EHP/SUS316L	1	-196	57	71	0	4	5	100
	2	-150	53	66	0	10	13	100
	3	-100	49	61	0	5	6	100
	4	-50	45	56	0	4	5	100
	5	0	51	64	0	9	11	100
	6	25	54	68	0	11	14	100
	7	50	60	75	0	8	10	100
	8	100	53	66	0	12	15	100

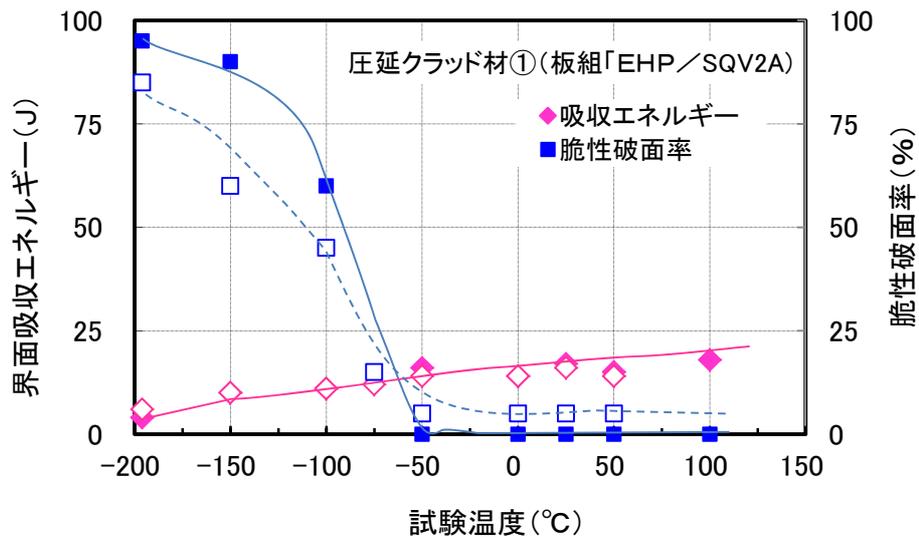


図 3.1-29 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の
 界面シャルピー衝撃試験結果
 Open marks : 未処理材、Solid marks : 500°C×2,000h 時効処理

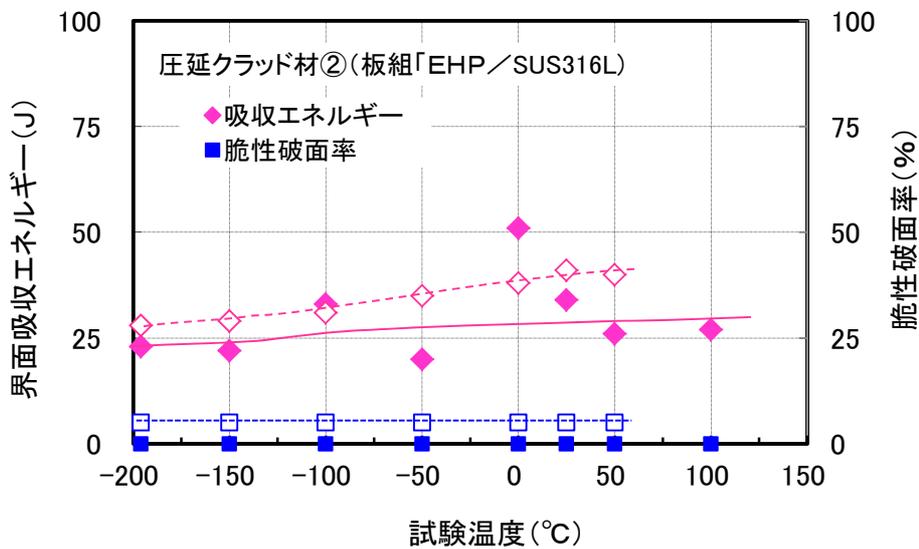


図 3.1-30 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の
 界面シャルピー衝撃試験結果

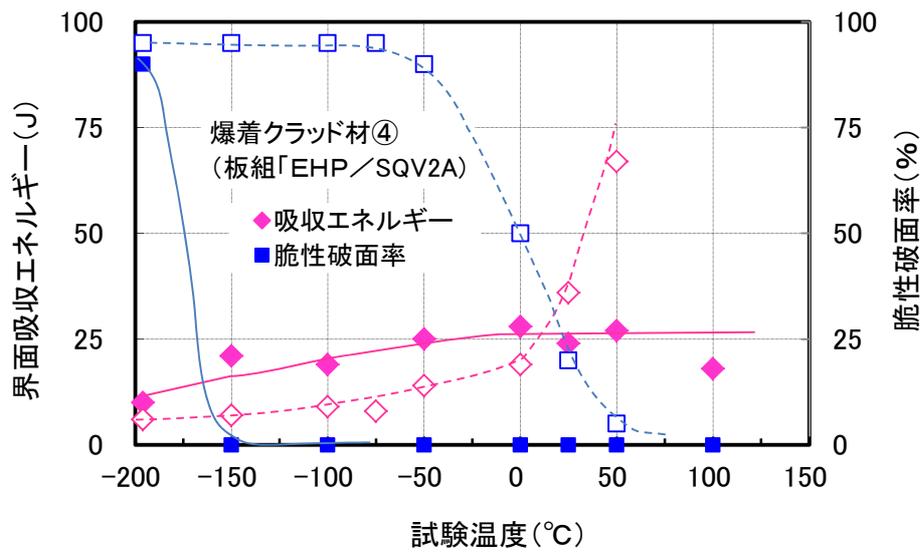


図 3.1-31 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

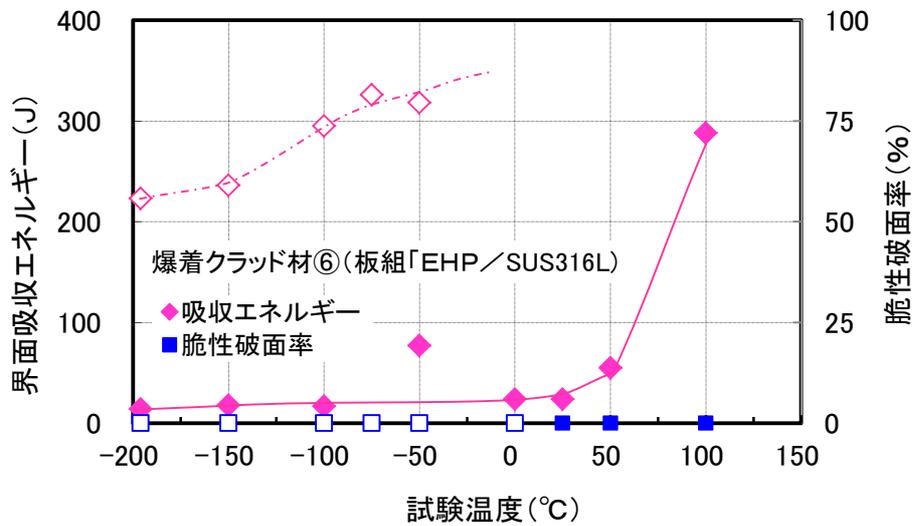


図 3.1-32 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

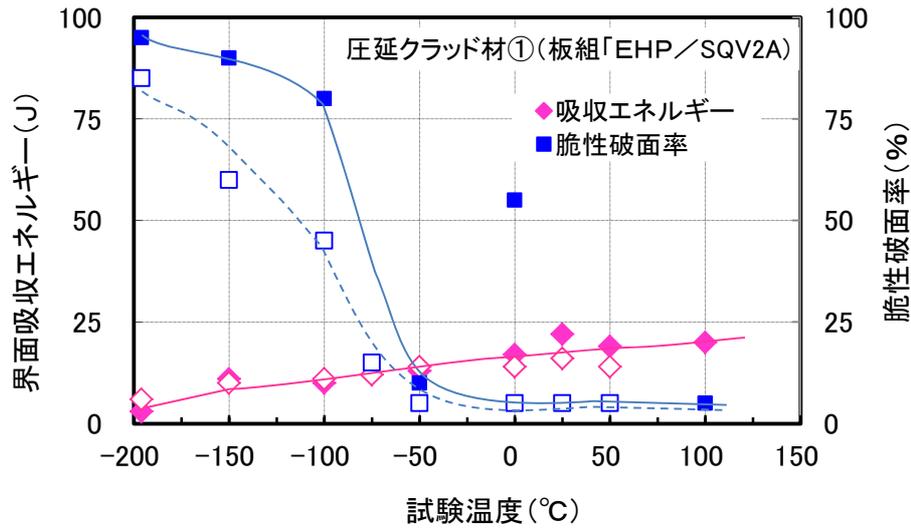


図 3.1-33 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の (600⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

Open marks : 未処理材、Solid marks : (600⇔200°C)×229cycle 処理材

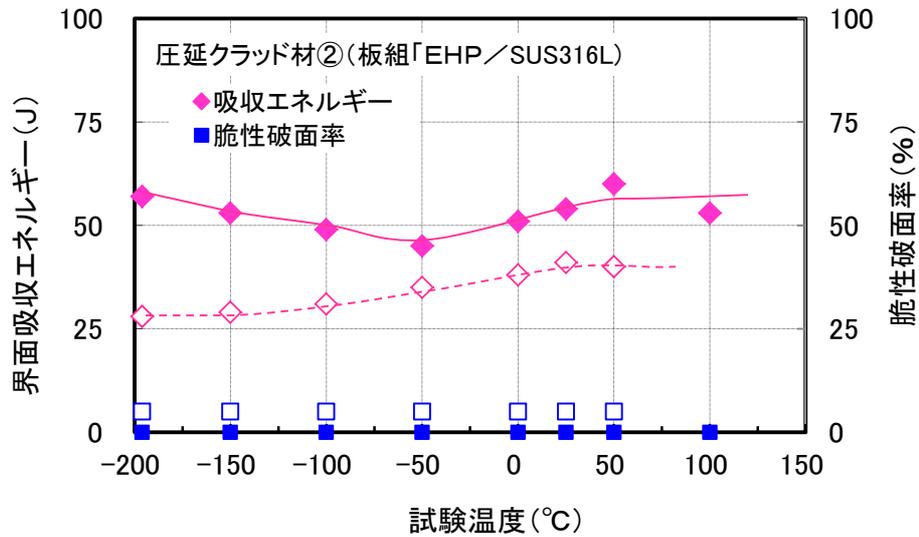


図 3.1-34 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の (600⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

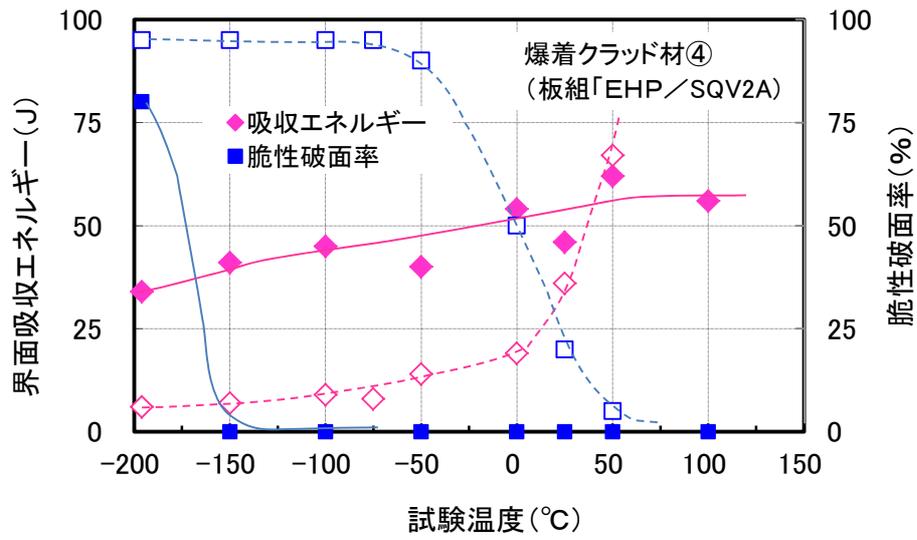


図 3.1-35 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の (600⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

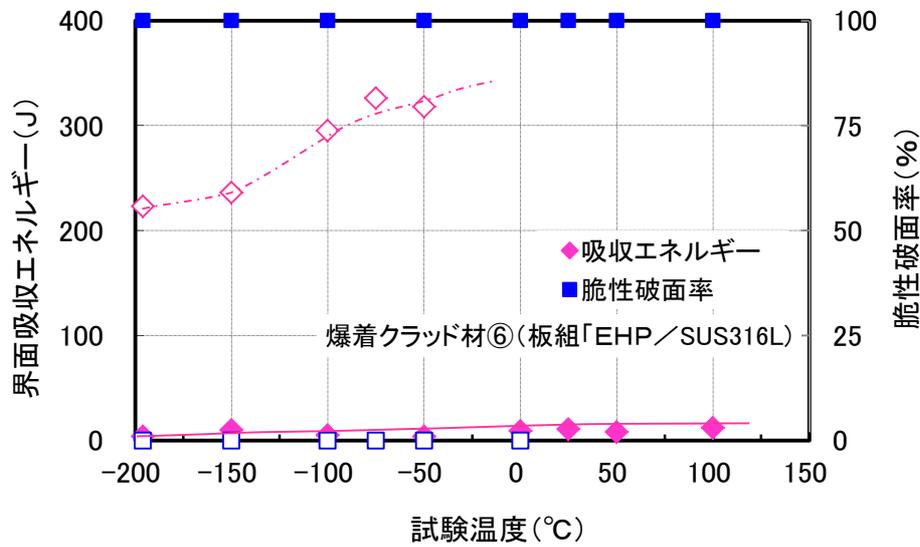


図 3.1-36 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(EHP)」) の (600⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理材の界面シャルピー衝撃試験結果

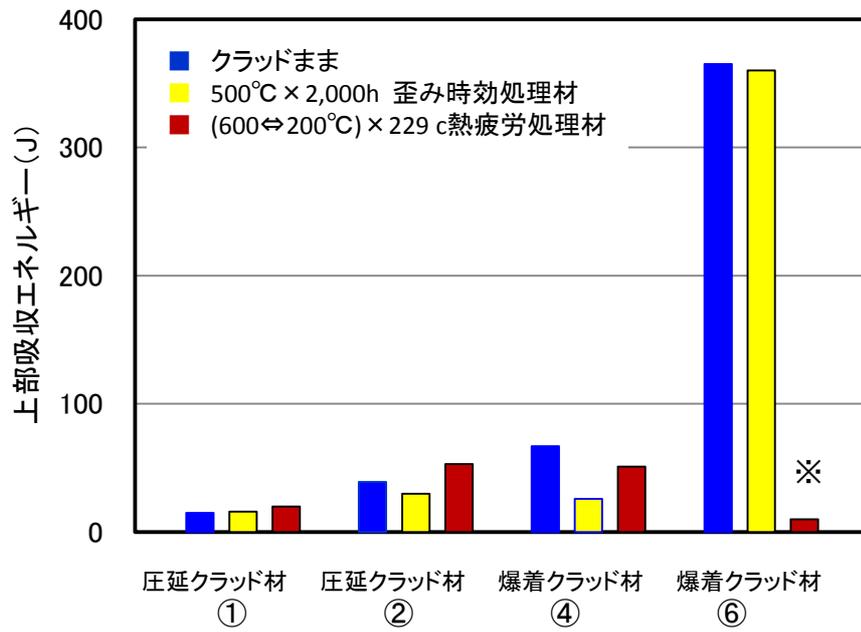


図 3.1-37 クラッド材の長時間熱処理材の界面シャルピー衝撃試験の
上部棚吸収エネルギーのまとめ

※ 延性-脆性遷移温度が 100°C 以上に上昇しているものと推定される。

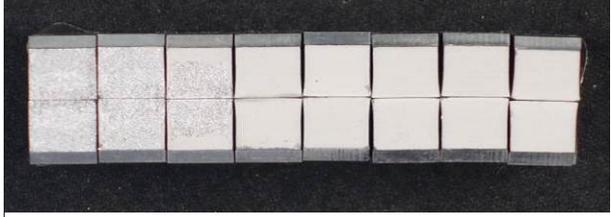
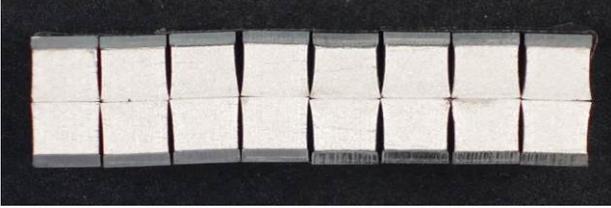
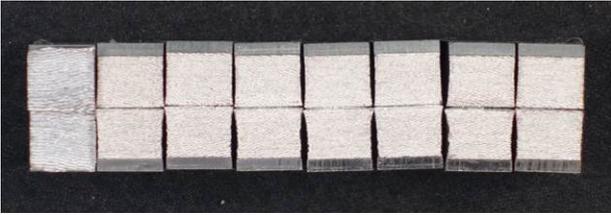
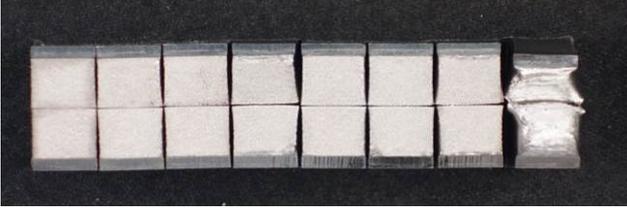
	界面シャルピー衝撃試験片破面
圧延クラッド材① EHP/SQV2A	 <p>-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
圧延クラッド材② EHP/SUS316L	 <p>-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
圧延クラッド材④ EHP/SQV2A	 <p>-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
圧延クラッド材⑥ EHP/SUS316L (／EHP)	 <p>-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>

写真 3.1-32 クラッド材の 500°C×2,000h 歪み時効処理後の界面シャルピー衝撃試験後の試験片外観写真

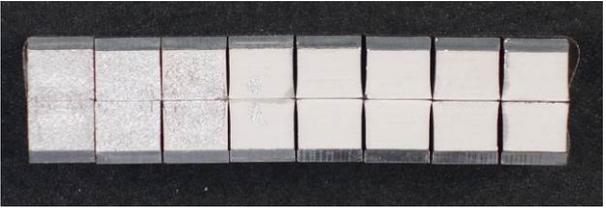
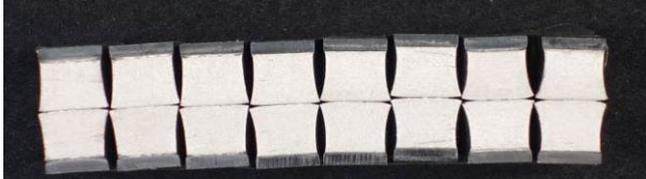
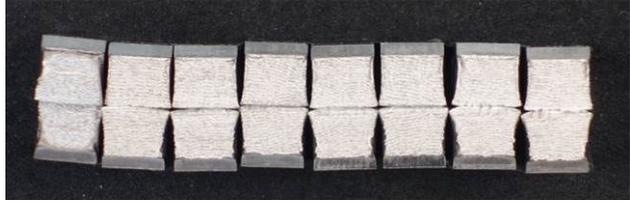
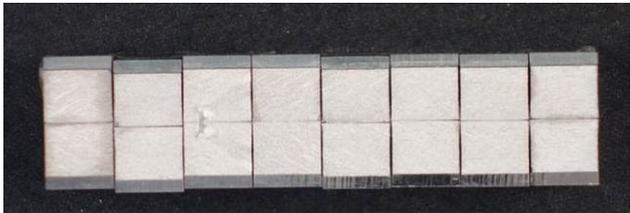
	界面シャルピー衝撃試験片破面
圧延クラッド材① EHP/SQV2A	 <p style="text-align: center;">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
圧延クラッド材② EHP/SUS316L	 <p style="text-align: center;">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
圧延クラッド材④ EHP/SQV2A	 <p style="text-align: center;">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
圧延クラッド材⑥ EHP/SUS316L (／EHP)	 <p style="text-align: center;">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>

写真 3.1-33 クラッド材の(600⇔200°C)×229cycle 熱疲労処理後の界面シャルピー衝撃試験後の試験片外観写真

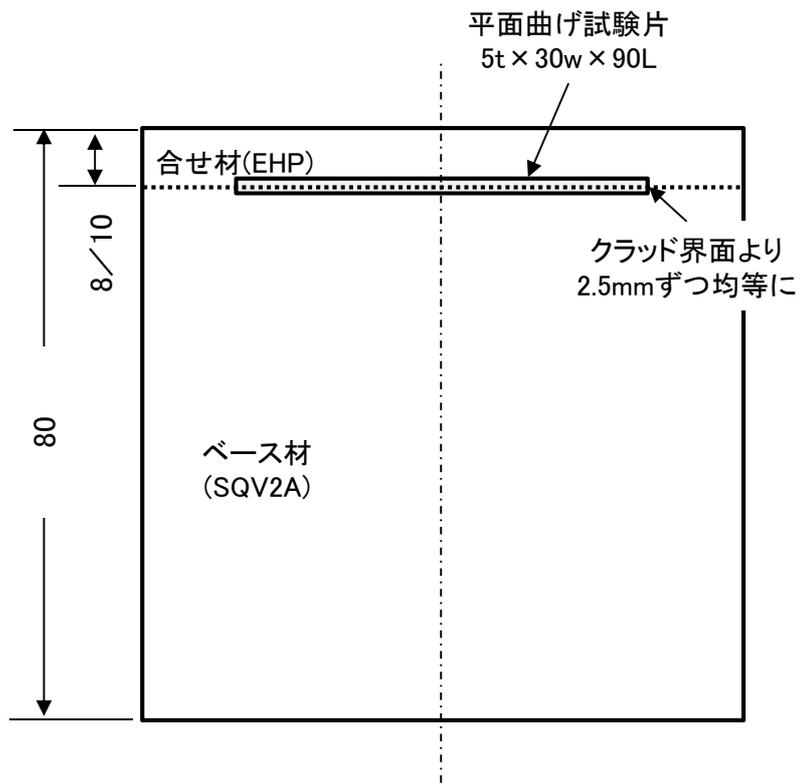


図 3.1-38 クラッド材の 500°C × 2,000h 歪み時効処理材後の平面曲げ試験片の採取要領の例

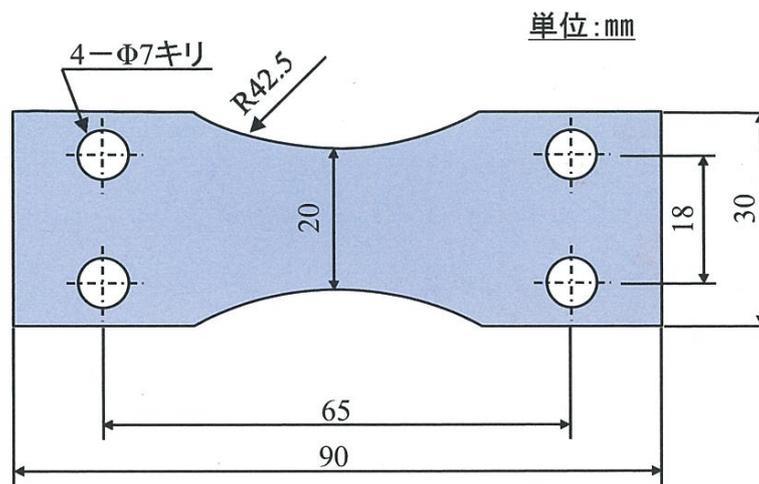


図 3.1-39 平面曲げ試験片形状 (板厚 5mm)

表 3.1-22 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）の500℃×2,000h歪み時効処理材の平面曲げ試験結果

処理	試験片 番号	応力振幅 σ_a (MPa)	最大応力 σ_{max} (MPa)	最小応力 σ_{min} (MPa)	板厚 t (mm)	板幅 W (mm)	断面係数 Z (mm ³)	曲げモーメント M (N・m)	応力比 R	破断繰返数 N _f (cycles)
クラッドまま	1-1	317	317	-317	4.996	20.030	83.325	26.52	-1	5.36×10 ⁵
	1-2	447	447	-447	4.994	20.021	83.210	37.26	-1	1.47×10 ⁴
	1-3	251	251	-251	5.010	20.012	83.728	21.01	-1	3.24×10 ⁶
	1-4	404	404	-404	5.013	20.015	83.830	33.98	-1	4.09×10 ⁴
	1-5	202	202	-202	5.008	20.028	83.717	16.98	-1	5.26×10 ⁶
	1-6	352	352	-352	5.010	20.027	83.780	29.47	-1	1.55×10 ⁵
	1-7	378	378	-378	5.012	20.020	83.818	31.72	-1	7.22×10 ⁴
500℃×2,000h 歪み時効処理	N1-1	248	248	-248	5.012	20.016	83.790	20.85	-1	1.00×10 ⁷
	N1-2	403	403	-403	5.009	20.005	83.655	33.75	-1	5.78×10 ⁴
	N1-3	350	350	-350	5.008	20.011	83.657	29.26	-1	2.71×10 ⁵
	N1-4	454	454	-454	5.007	20.005	83.588	38.05	-1	1.44×10 ⁴
	N1-5	301	301	-301	5.009	20.009	83.660	25.18	-1	1.10×10 ⁶

表 3.1-23 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ試験結果

処理	試験片 番号	応力振幅 σ_a (MPa)	最大応力 σ_{max} (MPa)	最小応力 σ_{min} (MPa)	板厚 t (mm)	板幅 W (mm)	断面係数 Z (mm ³)	曲げモーメント M (N・m)	応力比 R	破断繰返数 N _f (cycles)
クラッドまま	2-1	315	315	-315	4.968	20.012	82.319	21.98	-1	1.52×10 ⁶
	2-2	444	444	-444	4.972	20.030	82.537	36.67	-1	4.00×10 ³
	2-3	254	254	-254	5.000	20.033	83.471	21.18	-1	3.80×10 ⁶
	2-4	405	405	-405	4.916	20.030	80.678	32.69	-1	8.30×10 ³
	2-5	200	200	-200	4.994	20.026	83.230	16.68	-1	1.00×10 ⁷
	2-6	352	352	-352	5.002	20.032	83.522	29.43	-1	4.82×10 ⁴
	2-7	378	378	-378	5.003	20.025	83.549	31.60	-1	3.30×10 ⁴
500°C×2,000h 歪み時効処理	N2-1	248	248	-248	5.001	20.022	83.458	20.70	-1	1.00×10 ⁷
	N2-2	399	399	-399	5.008	20.014	83.648	33.33	-1	3.62×10 ⁴
	N2-3	350	350	-350	5.003	20.008	83.467	29.24	-1	1.05×10 ⁶
	N2-4	452	452	-452	5.000	20.003	83.346	37.68	-1	1.94×10 ⁵
	N2-5	301	301	-301	5.011	20.017	83.772	25.18	-1	4.78×10 ⁶

表 3.1-24 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ試験結果

処理	試験片 番号	応力振幅 σ_a (MPa)	最大応力 σ_{max} (MPa)	最小応力 σ_{min} (MPa)	板厚 t (mm)	板幅 W (mm)	断面係数 Z (mm ³)	曲げモーメント M (N・m)	応力比 R	破断繰返数 N _f (cycles)
クラッドまま	4-1	266	266	-266	5.029	20.026	84.412	26.57	-1	4.76×10 ⁶
	4-2	370	370	-370	5.028	20.030	84.407	31.24	-1	8.60×10 ⁵
	4-3	198	198	-198	5.025	20.031	84.288	16.71	-1	1.00×10 ⁷
	4-4	298	298	-298	5.032	20.028	84.510	25.18	-1	1.80×10 ⁶
	4-5	348	348	-348	5.017	20.033	84.039	29.28	-1	7.23×10 ⁵
	4-6	397	397	-397	5.030	20.024	84.438	33.56	-1	2.77×10 ⁵
	4-7	445	445	-445	5.032	20.035	84.540	37.61	-1	つかみ部破断
500°C×2,000h 歪み時効処理	N4-1	247	247	-247	5.015	20.016	83.901	20.70	-1	1.00×10 ⁷
	N4-2	397	397	-397	5.021	20.005	84.067	33.49	-1	2.22×10 ⁵
	N4-3	345	345	-345	5.018	20.018	83.999	28.94	-1	1.01×10 ⁶
	N4-4	446	446	-446	5.013	20.014	83.826	37.45	-1	1.06×10 ⁵
	N4-5	299	299	-299	5.016	20.015	83.919	25.07	-1	7.11×10 ⁶

表 3.1-25 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L(／EHP)」) の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ試験結果

処理	試験片 番号	応力振幅 σ_a (MPa)	最大応力 σ_{max} (MPa)	最小応力 σ_{min} (MPa)	板厚 t (mm)	板幅 W (mm)	断面係数 Z (mm ³)	曲げモーメント M (N・m)	応力比 R	破断繰返数 N _f (cycles)
クラッドまま	6-1	264	264	-264	4.960	20.022	82.085	21.72	-1	5.25×10 ⁶
	6-2	371	371	-371	4.983	20.017	82.849	30.76	-1	5.34×10 ⁵
	6-3	200	200	-200	4.922	20.017	80.833	16.13	-1	1.00×10 ⁷
	6-4	297	297	-297	5.005	20.013	83.558	24.86	-1	2.09×10 ⁶
	6-5	348	348	-348	5.006	20.030	83.659	29.10	-1	4.96×10 ⁵
	6-6	398	398	-398	4.993	20.025	83.215	33.07	-1	2.28×10 ⁵
	6-7									
500°C×2,000h 歪み時効処理	N6-1	248	248	-248	4.997	20.035	83.368	20.70	-1	1.00×10 ⁷
	N6-2	391	391	-391	4.997	20.030	83.347	32.52	-1	4.54×10 ⁵
	N6-3	348	348	-348	4.988	20.020	83.006	28.87	-1	9.34×10 ⁵
	N6-4	448	448	-448	4.977	20.018	82.632	36.97	-1	2.25×10 ⁵
	N6-5	300	300	-300	4.975	20.022	82.604	24.83	-1	3.25×10 ⁶

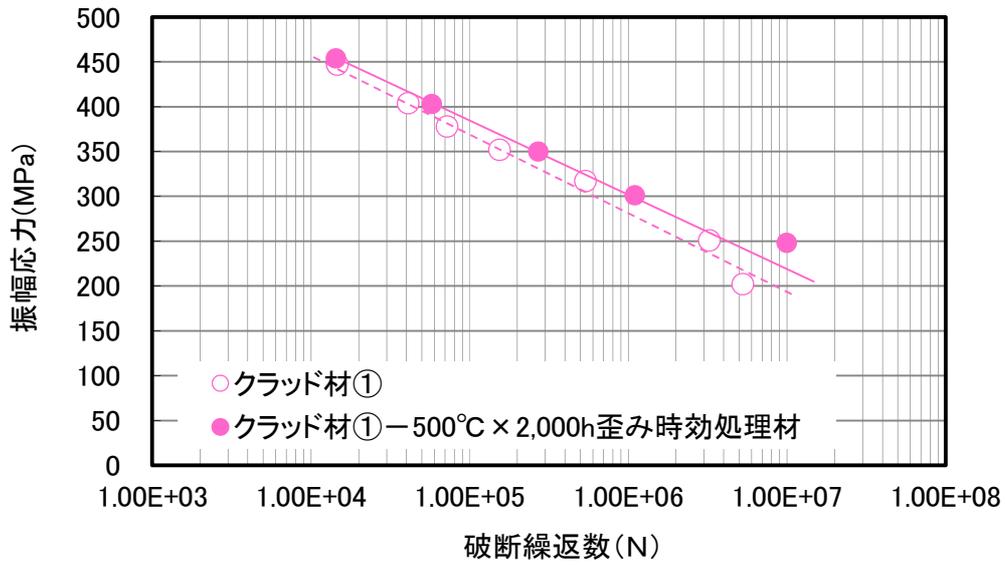


図 3.1-40 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の 500°C × 2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図

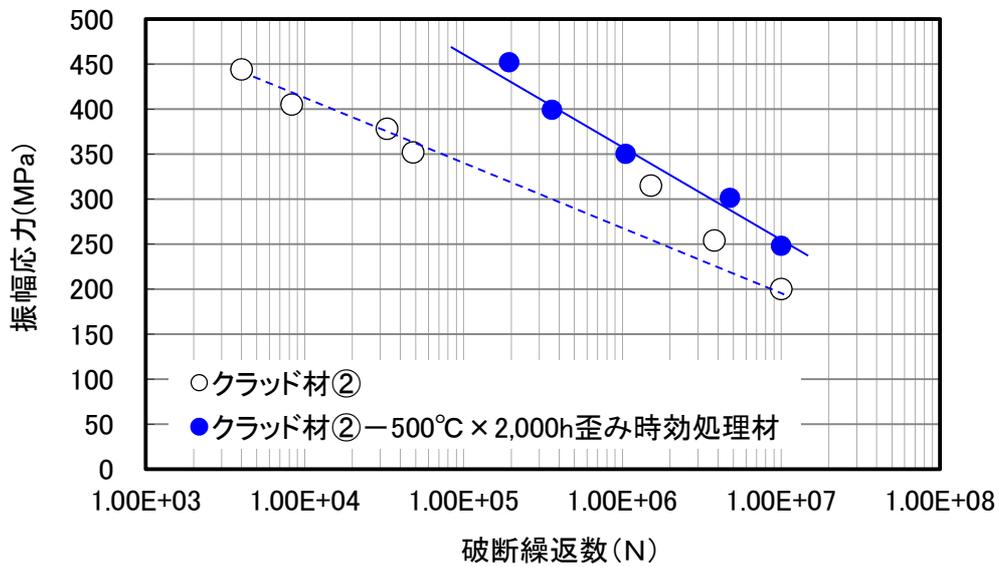


図 3.1-41 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の 500°C × 2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図

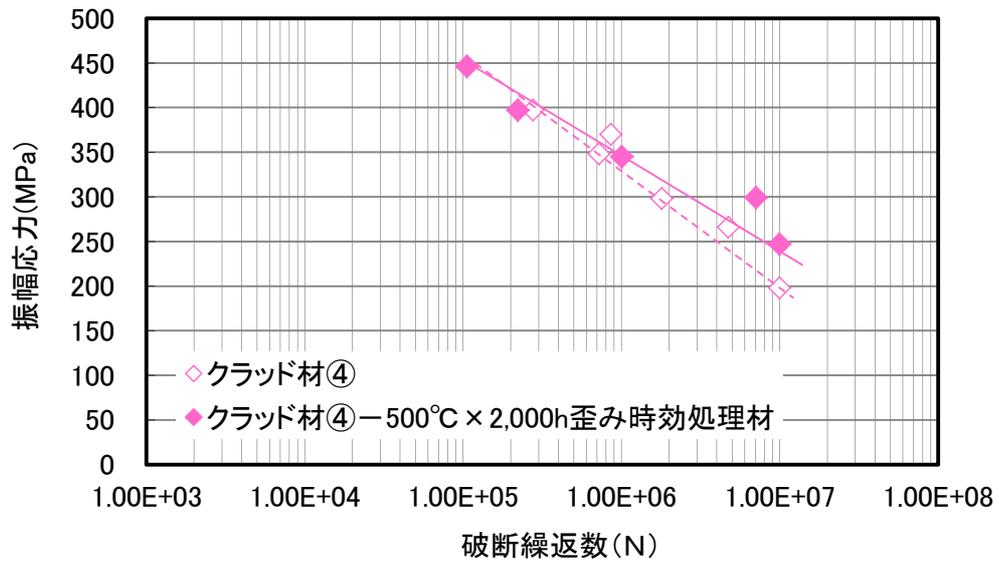


図 3.1-42 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図

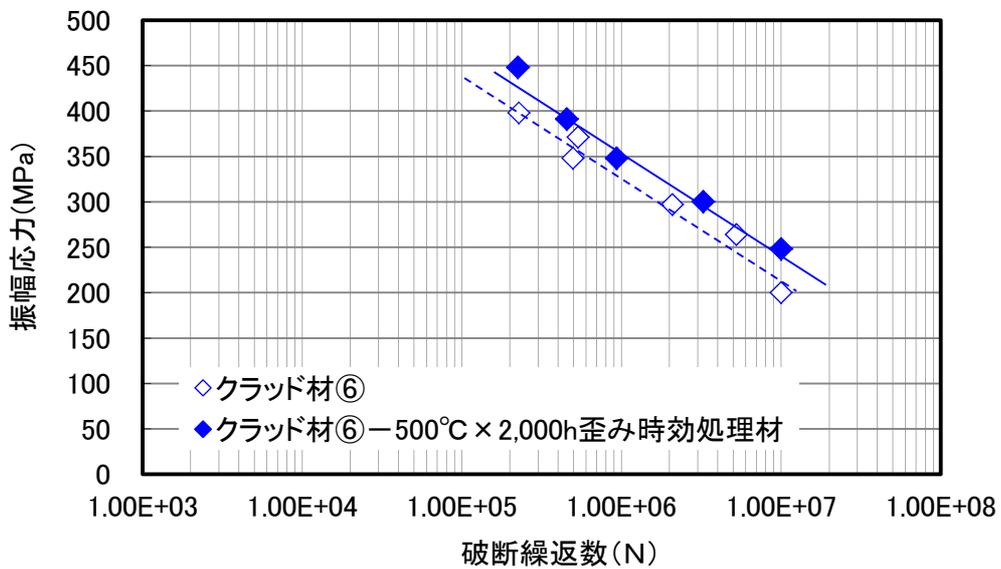


図 3.1-43 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SUS316L」）の 500°C×2,000h 歪み時効処理材の平面曲げ疲労による S-N 線図

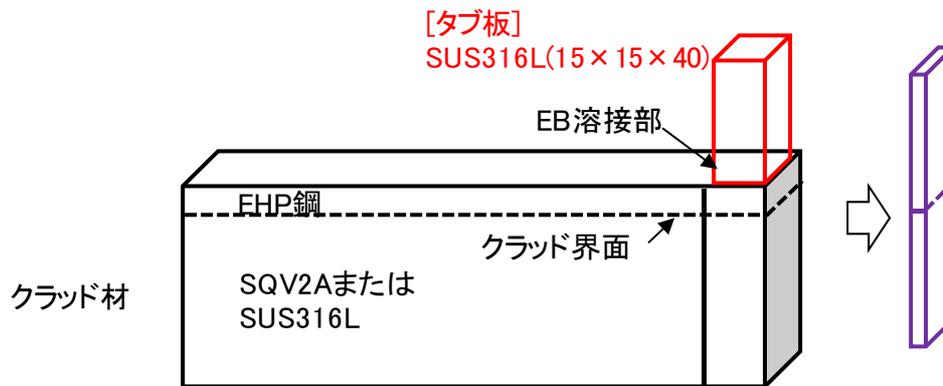


図 3.1-44 クラッド界面の応力腐食割れ試験片（CBB 試験）の製作要領の例－界面の評価
 ※タブ板を EB 溶接後、クラッド界面が中心になるように $2t \times 10w \times 50L$ に加工

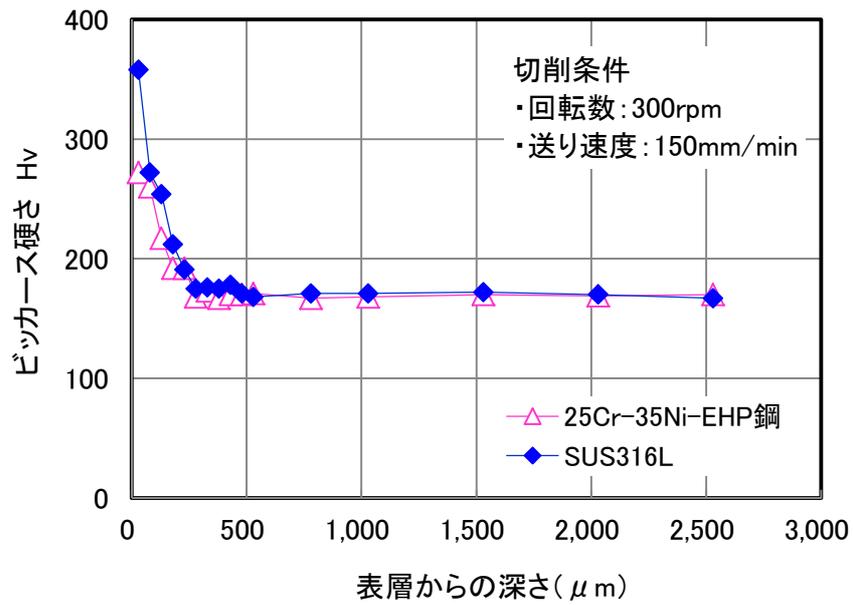


図 3.1-45 フライス加工後の CBB 試験片の表層からの硬さ分布

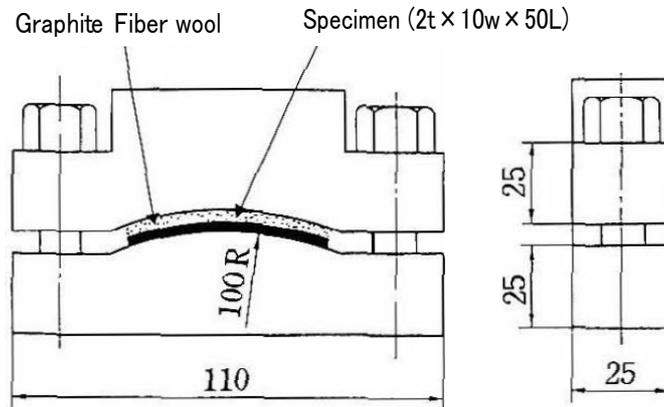


図 3.1-46 CBB 試験片の応力負荷状態の模式図

20L オートク
レーブ



試験片セット
状況

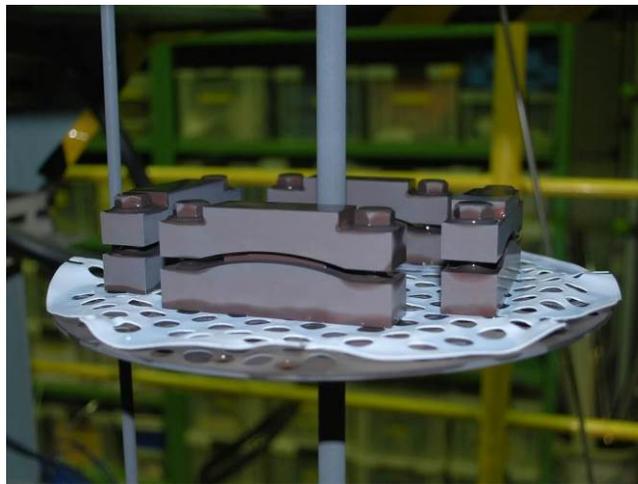


写真 3.1-34 CBB 試験状況

表 3.1-26 クラッド界面の CBB 試験結果のまとめ

品種		クラッドまま		500℃×2,000h 歪み時効処理		(600⇔200℃)× 229cycle 熱疲労処理	
界面	圧延クラッド材① EHP/SQV2A	1	割れなし	N1	割れなし	S1	割れなし
	圧延クラッド材② EHP/SUS316L	2	割れなし	N2	割れなし	S2	割れなし
	爆着クラッド材④ EHP/SQV2A	4	割れなし	N4	割れなし	S4	割れなし
	爆着クラッド材⑥ EHP/SUS316L (/SUS316L)	6	割れなし	N6	割れなし	S6	割れなし
UCC	圧延クラッド材① EHP/SQV2A	1A	割れなし				
	圧延クラッド材③ EHP/SUS316L (/SUS316L)	3E	割れなし				
母材	EHP	n1	割れなし				
		n2	割れなし				
	SUS316L (比較材)		割れ				

※UCC : Under Clad Crack

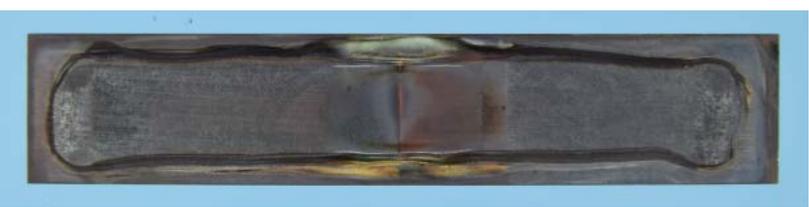
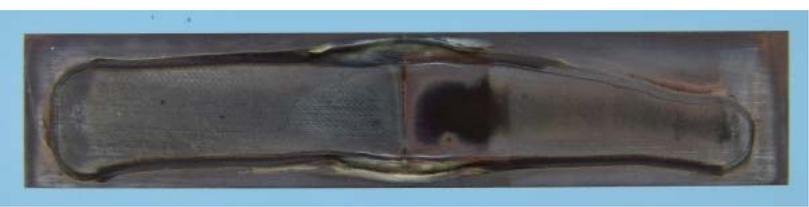
	処理	CBB 試験後の外観
① 圧延クラッド材	クラッドまま (1)	
	500°C×2,000h 歪み時効処理 (N1)	
	(600⇔200°C)× 229c 熱疲労処理 (S1)	
② 圧延クラッド材	クラッドまま (2)	
	500°C×2,000h 歪み時効処理 (N2)	
	(600⇔200°C)× 229c 熱疲労処理 (S2)	

写真 3.1-35 圧延クラッド界面の CBB 試験後の試験片外観写真

	処理	CBB 試験後の外観
爆着クラッド材 ④	クラッドまま (4)	
	500℃×2,000h 歪み時効処理 (N4)	
	(600⇔200℃)× 229c 熱疲労処理 (S4)	
爆着クラッド材 ⑥	クラッドまま (6)	
	500℃×2,000h 歪み時効処理 (N6)	
	(600⇔200℃)× 229c 熱疲労処理 (S6)	

写真 3.1-36 爆着クラッド界面の CBB 試験後の試験片外観写真

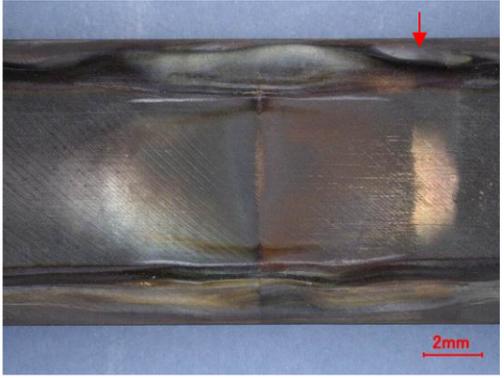
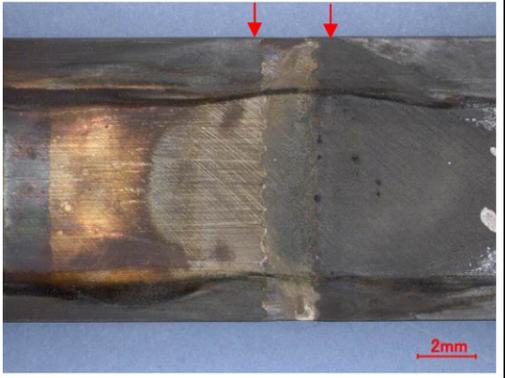
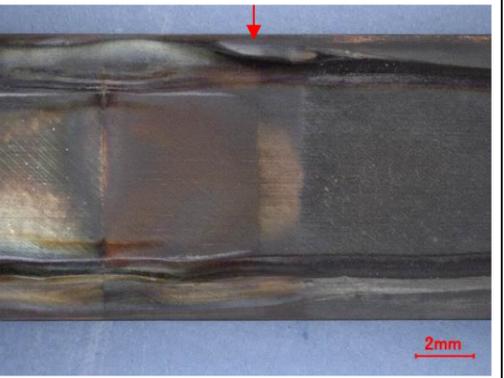
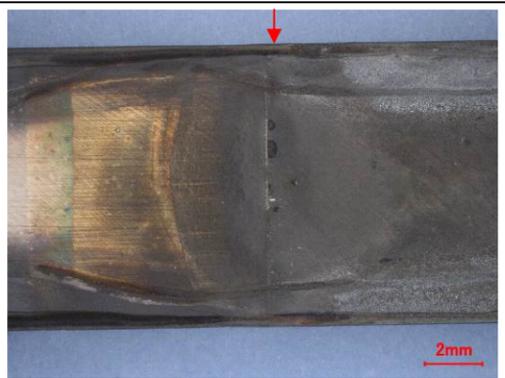
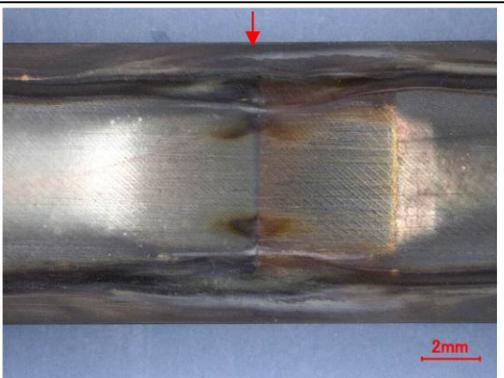
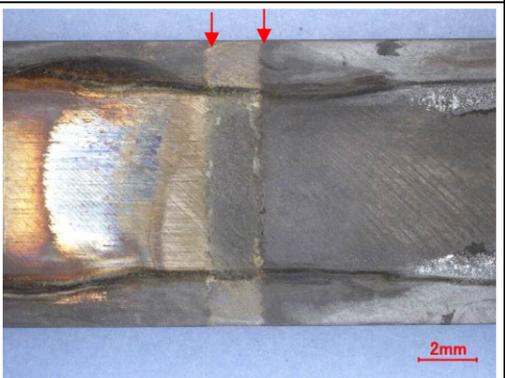
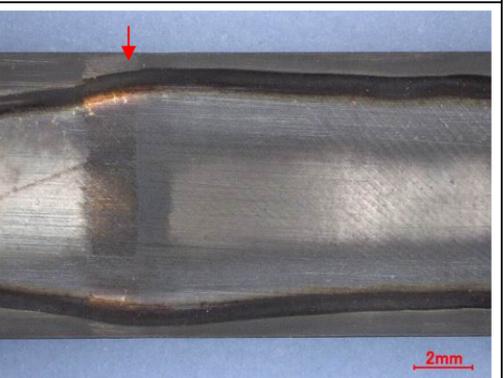
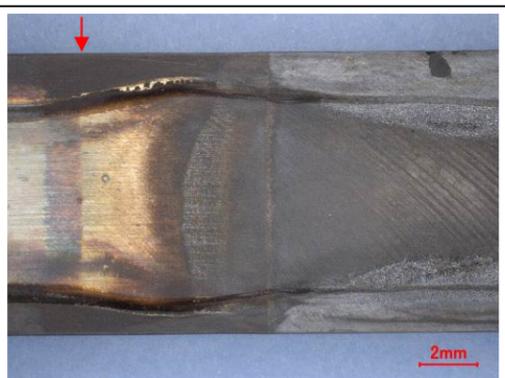
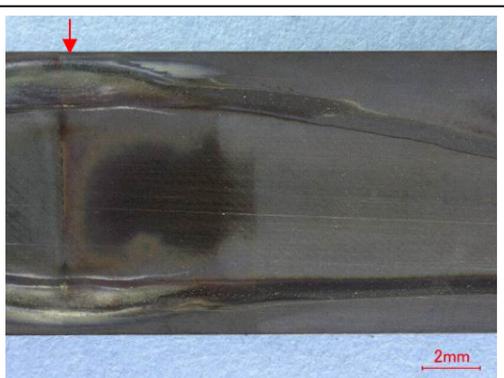
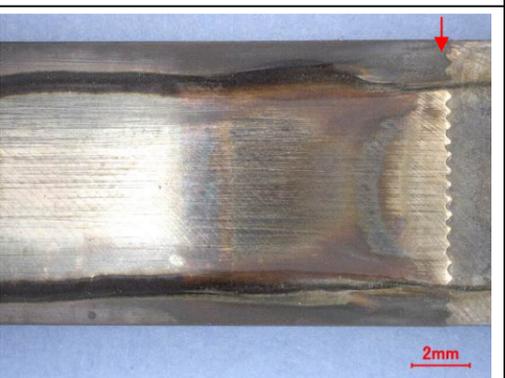
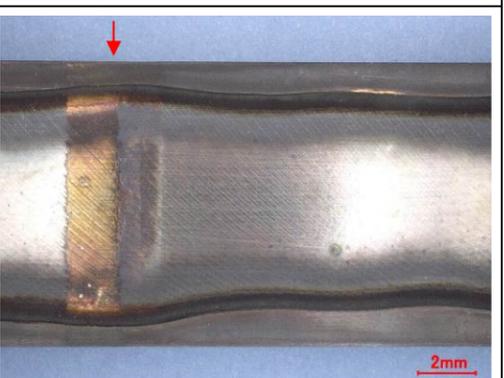
品種	圧延クラッド材①	圧延クラッド材②	爆着クラッド材④	爆着クラッド材⑥
板組	EHP/SQV2A	EHP/SUS316L	EHP/Ni/SQV2A	EHP/SUS316L
クラッドまま				
500°C×2,000h 歪み時効処理				
(600⇔200°C)× 229c 熱疲労処 理				

写真 3.1-37 クラッド界面の CBB 試験後の表面観察結果

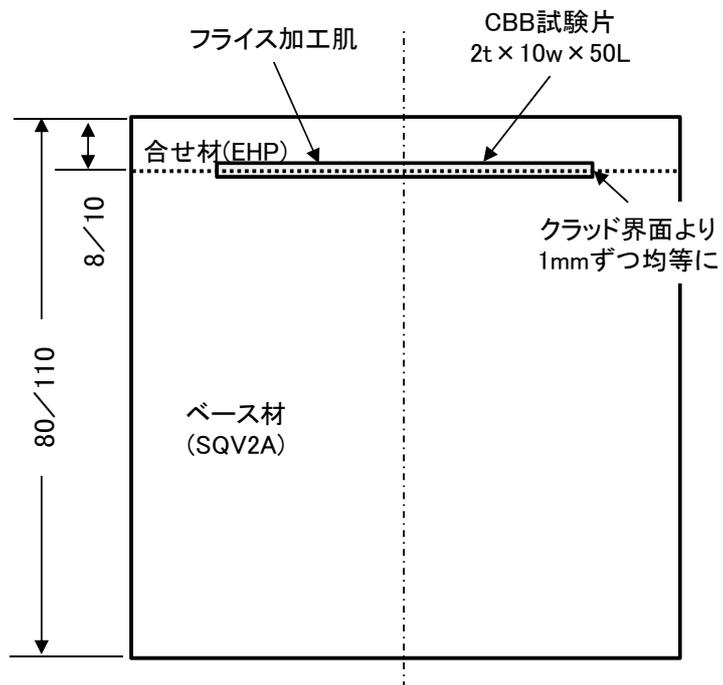


図 3.1-47 クラッド材の CBB 試験片の製作要領の例—Under Cladding Crack の評価

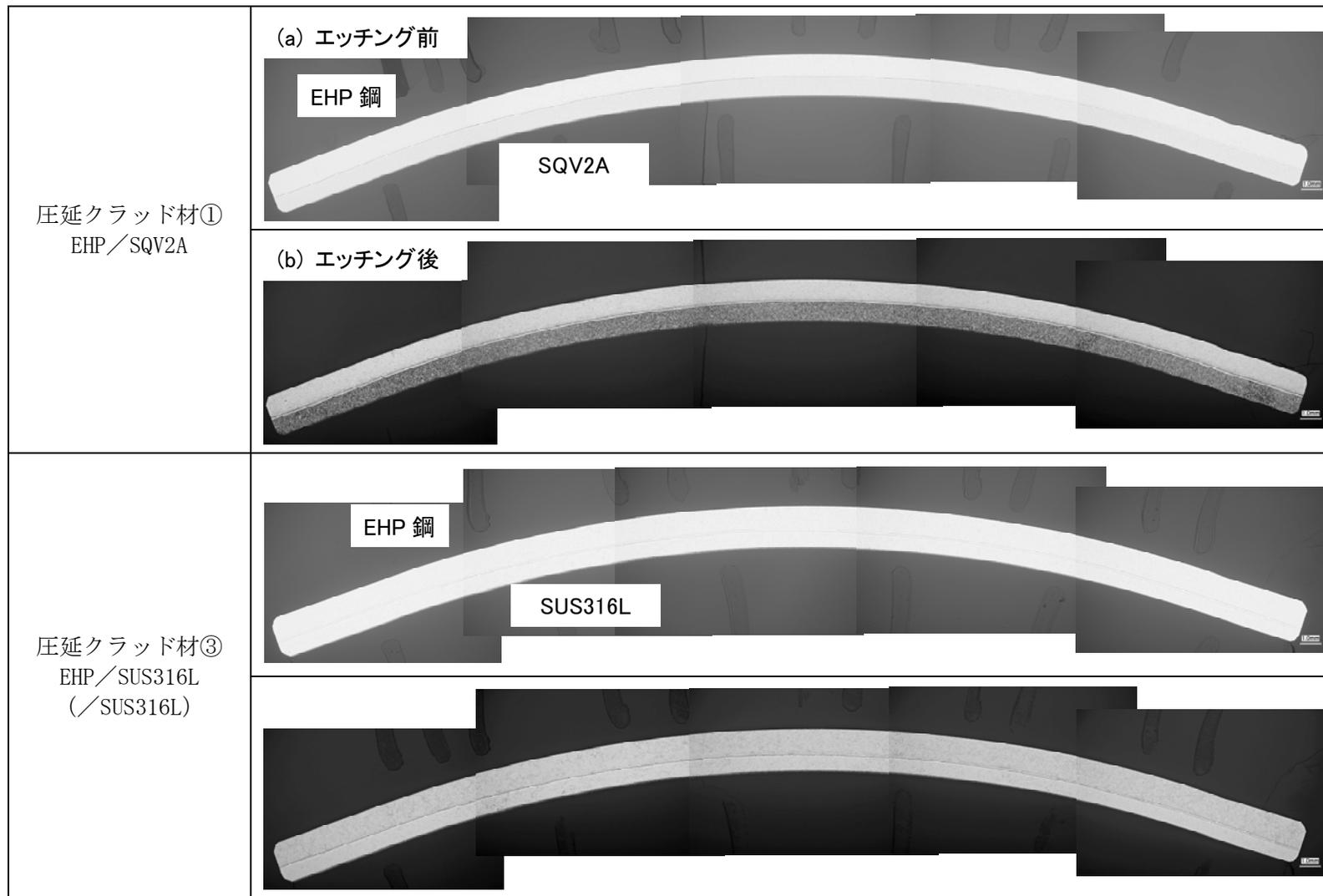


写真 3. 1-38 クラッド界面の CBB 試験後の UCC 評価結果

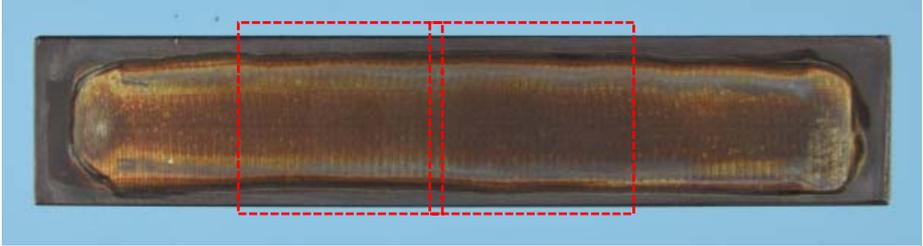
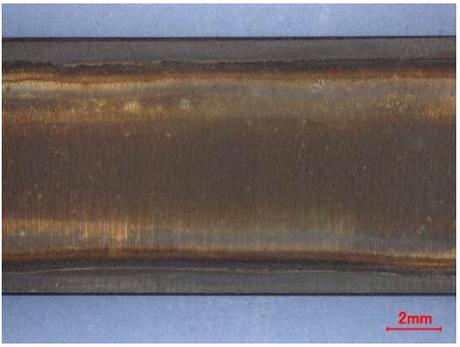
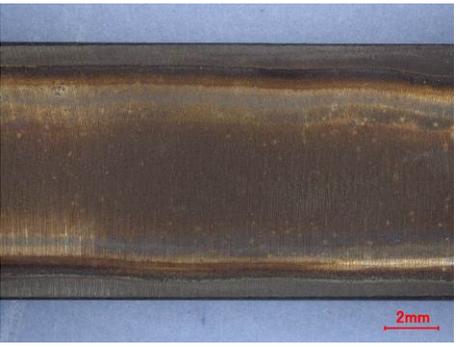
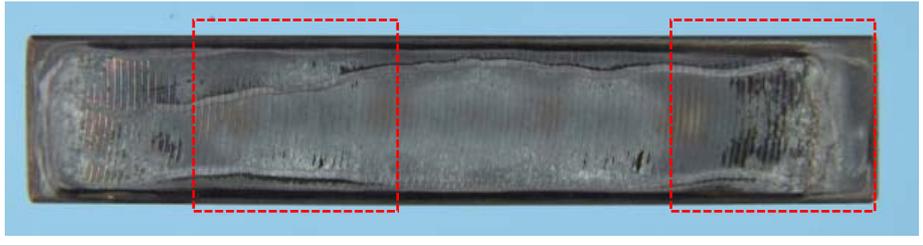
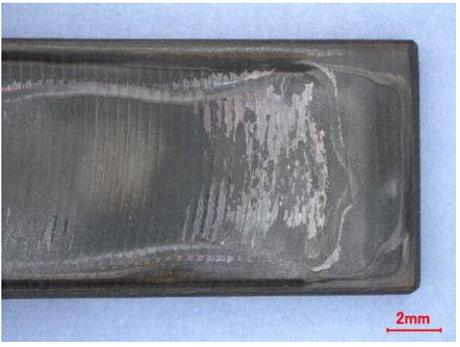
		表面観察結果	
EHP鋼	全景		
	拡大		
SUS316L (比較材)	全景		
	拡大		

写真 3.1-39 母材の CBB 試験後の試験片外観および表面観察結果

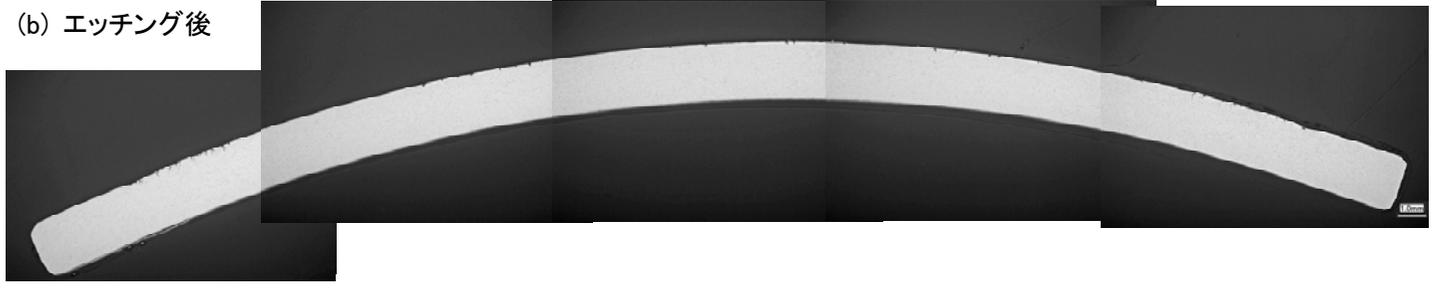
断面観察結果	
SUS316L (比較材)	(a) エッチング前 
	(b) エッチング後 

写真 3.1-40 SUS316L 母材の CBB 試験後の断面観察結果

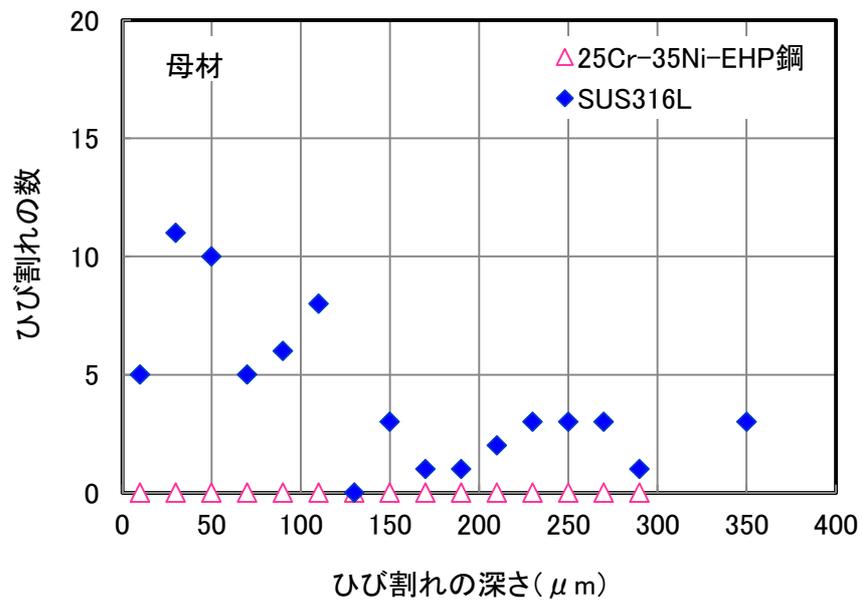


図 3.1-48 母材の CBB 試験後のひび割れ深さと個数の関係

【クラッド材溶接部の健全性および耐食性評価試験】

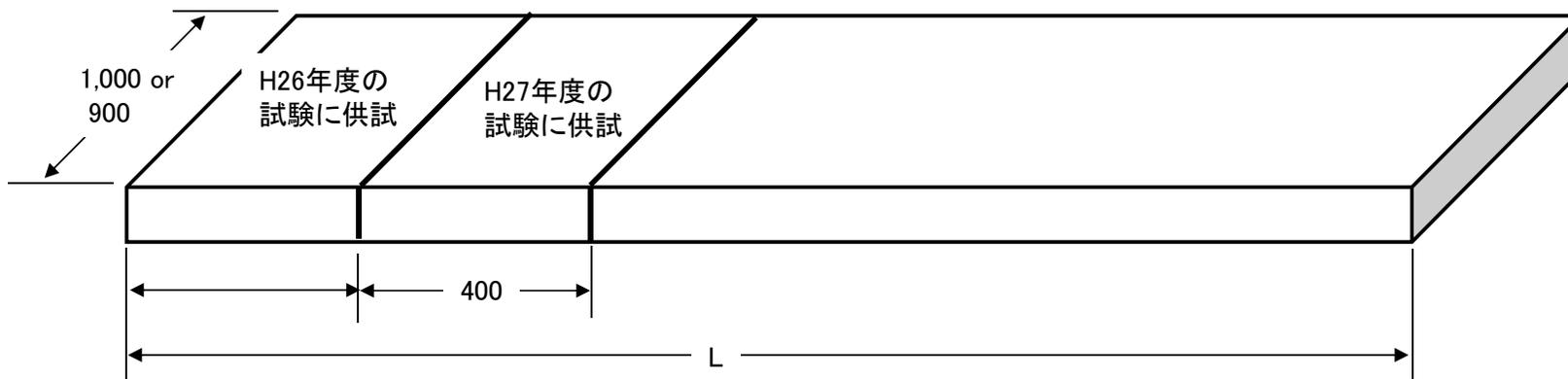
表 3.1-27 クラッド材の溶接継手の長期健全性および耐食性評価試験のための溶接施工条件の概要

品種	板組	板厚(mm)	溶接法	熱処理
圧延クラッド材①	EHP/Ni/SQV2A	8+72	<ul style="list-style-type: none"> ベース材 SQV2A は溶接ワイヤ US63S/PF200 による SAW 合せ材は EHP 系共材溶加棒による TIG 溶接 	ステップ冷却処理 (Cr-Mo 鋼の焼戻し脆化再現)
爆着クラッド材④		8+(2+)100		
圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	6+24	<ul style="list-style-type: none"> ベース材 SUS316L は TG-S316L、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼は共材溶加棒による TIG 溶接 	500°C×2,000h 熱時効
爆着クラッド材⑤		4+31		
圧延クラッド材③	EHP/SUS316L/EHP	3+32+3		
爆着クラッド材⑥		3+32+3		

※ 爆着クラッド材⑤については、平成 26 年度に溶接試験を実施せず

表 3.1-28 25Cr-35Ni-EHP 鋼製溶加棒の化学成分 (化学/%、GDMS/ppm)

	略号	位置		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	N	O	B
目標				0.002~ 0.005	<0.03	<0.03	<0.003	<0.002	34.0~ 36.0	24.0~ 26.0	—	—	—	<0.2ppm
VIM	150-9	Ladle	化学	0.0016	<0.02	0.01	<0.005	<0.0005	34.55	25.20		0.0008	0.0171	<0.00002
VAR	150-9	Check	化学	0.003	<0.10	<0.01	<0.0005	0.0007	34.85	25.03	<0.002	<0.009	0.0205	—
			GDMS	—	3.45	230.7	0.93	4.17	—	—	0.25	—	—	0.13



圧延クラッド材①: 3,000mmL ⇒ H26年度の試験に350mmL 供試 ⇒ 残2,650mmL
 圧延クラッド材③: 3,000mmL ⇒ H26年度の試験に350mmL 供試 ⇒ 残2,650mmL
 爆着クラッド材④: 2,000mmL ⇒ H26年度の試験に550mmL 供試 ⇒ 残1,450mmL
 爆着クラッド材⑥: 2,000mmL ⇒ H26年度の試験に550mmL 供試 ⇒ 残1,450mmL

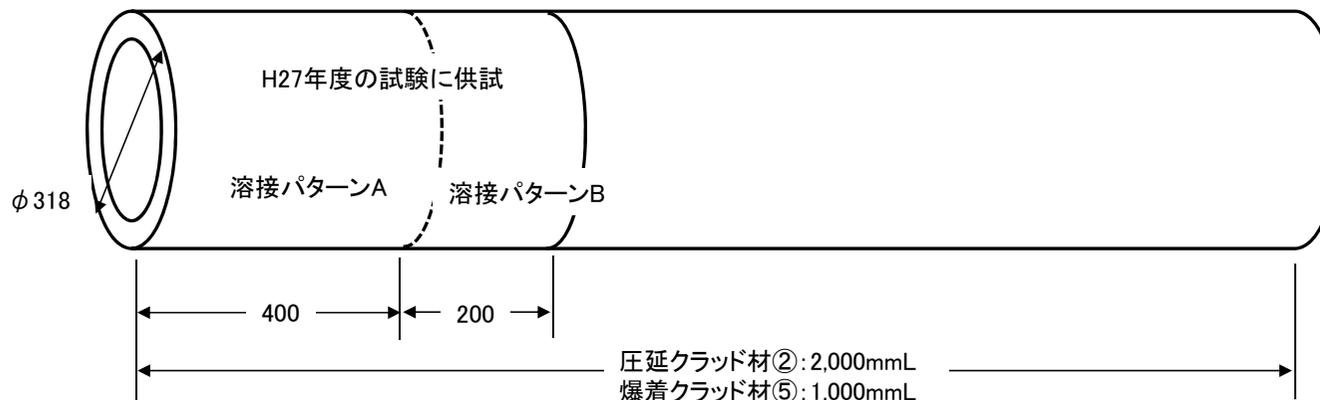


図 3.1-49 クラッド材の溶接継手の試験材の採取要領

目 次

溶 接 要 領 書 ----- W1 ~ W6

1. 適用範囲

本要領書は、(株)コベルコ科研殿 クラッド板材の溶接に適用する。

2. 適用規格

JIS

3. テストピース仕様 (コベルコ科研殿 支給品)

	材質組合せ	略号	形状	板厚	数量
a	EHP /SQV2A	a	200×1000	8+72	1
b	EHP /(Ni)/SQV2A	b	200×900	8+2+100	1
c	EHP /SUS316L	c	φ 318×200	6+24	2
d	EHP /SUS316L	d	φ 318×200	4+31	2
e	EHP /SUS316L/EHP	e	200×1000	3+32+3	1
f	EHP /SUS316L/EHP	f	200×840	3+32+3	1

4. 溶接棒仕様

・EHP鋼 φ 2.4×1,000 (コベルコ科研殿 支給品)

表 3.1-29-1 溶接施工要領書 (圧延クラッド材①)

溶接要領書 (W P S)		溶接要領書番号		P15-02278-W1			
		施工法確認試験記録番号		-	改定番号	0	
溶接施工法及び組合せ: U & T		溶接継手番号		A			
<p>■T: ティグ溶接 (手動、半自動、自動)</p> <p>□A: 被覆アーク溶接</p> <p>■J: サブマージドアーク溶接 (U)</p> <p>□M: ミグ溶接 (半自動、自動)</p> <p>□G: マグ溶接 (半自動、自動) (炭酸ガスアーク溶接含む)</p> <p>・非破壊検査</p> <p>■PT: 染色探傷試験</p> <p>■RT: 放射線試験 (1種判定)</p>							
材質	EHP/SQV2A +EHP/SQV2A	トーチシールドガス	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う Ar > 99.9%, 10L/mim 以上				
P. NO. (Gr)		裏面からのガス保護 (バックングガス)	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim 以上				
板厚範囲	(8/72)t + (8/72)t	アフターシールドガス	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim 以上				
予熱温度	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う 150℃以下	片側のパス/層数	<input checked="" type="checkbox"/> 多パス (層) <input type="checkbox"/> 単パス (層)				
パス間温度	Max 350℃	その他	SAW 用溶接ワイヤ US56B/PF200 は施工者調達、他は客先支給				
直後熱	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う						
溶接後熱処理	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う	電流・極性・電極数	<input checked="" type="checkbox"/> T: DC EN <input type="checkbox"/> A: <input checked="" type="checkbox"/> J: AC <input type="checkbox"/> M: 電極数: <input checked="" type="checkbox"/> 単、 <input type="checkbox"/> 複 個				
溶接姿勢	<input checked="" type="checkbox"/> 下向 <input type="checkbox"/> 立向(上進) <input type="checkbox"/> 横向						
溶接士資格	JIS						
溶接条件							
層数パス	溶接方法	溶接材料		電流(A)	電圧(V)	速度 (cm/min)	
		銘柄	径				
仮付	T	TG-S50	φ2.4	60~120	8~20	-	
全層	U	US56B/PF200	φ4	450~600	25~35	-	
B. C							
全層	U	US56B/PF200	φ4	450~600	25~35	-	
全層(2層)	T	TG-S309	φ2.4	120~250	8~20	-	
EHP 鋼層	T	25Cr-35Ni-EHP	φ2.4	120~250	8~20	-	
注記				改訂番号	年 月 日/氏名		
				0			

表 3.1-29-2 溶接施工要領書 (圧延クラッド材②)

溶接要領書 (W P S)		溶接要領書番号		P15-02278-W1		
		施工法確認試験記録番号		—	改定番号	0
溶接施工法及び組合せ : T		溶接継手番号		C		
<p>■ T : ティグ溶接 (手動、半自動、自動)</p> <p>□ A : 被覆アーク溶接</p> <p>□ J : サブマージドアーク溶接 (U)</p> <p>□ M : ミグ溶接 (半自動、自動)</p> <p>□ G : マグ溶接 (半自動、自動) (炭酸ガスアーク溶接含む)</p> <p>・非破壊検査</p> <p>■ PT : 染色探傷試験</p> <p>■ RT : 放射線試験 (1種判定)</p>						
材質	EHP/SUS316L +EHP/SUS316L	トーチシールドガス	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う Ar > 99.9%, 10L/mim 以上			
P. NO. (Gr)		裏面からのガス保護 (バックングガス)	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim 以上			
板厚範囲	(6/24)t + (6/24)t	アフターシールドガス	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim 以上			
予熱温度	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う °C 以下	片側のパス/層数	<input checked="" type="checkbox"/> 多パス (層) <input type="checkbox"/> 単パス (層)			
パス間温度	Max 150°C	その他	溶接棒・試験材とも客先支給			
直後熱	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接後熱処理	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接姿勢	<input checked="" type="checkbox"/> 下向 <input type="checkbox"/> 立向(上進) <input type="checkbox"/> 横向					
溶接士資格	JIS	電流・極性・電極数	<input checked="" type="checkbox"/> T : DC EN <input type="checkbox"/> A : <input type="checkbox"/> J : <input type="checkbox"/> M : 電極数 : <input checked="" type="checkbox"/> 単、 <input type="checkbox"/> 複 個			
溶接条件						
層数パス	溶接方法	溶接材料		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)
		銘柄	径			
仮付	T	25Cr-35Ni-EHP	φ 2.4	60~120	8~20	—
1~2層	T	25Cr-35Ni-EHP	φ 2.4	80~100	8~20	—
残り	T	TG-S316L		80~100	8~20	—
						—
						—
注記				改訂番号	年 月 日 / 氏名	
				0		

表 3.1-29-3 溶接施工要領書 (圧延クラッド材③)

溶接要領書 (W P S)		溶接要領書番号		P15-02278-W1		
		施工法確認試験記録番号		-	改定番号	0
溶接施工法及び組合せ : T		溶接継手番号		E		
<p>■T : ティグ溶接 (手動、半自動、自動)</p> <p>□A : 被覆アーク溶接</p> <p>□J : サブマージドアーク溶接 (U)</p> <p>□M : ミグ溶接 (半自動、自動)</p> <p>□G : マグ溶接 (半自動、自動) (炭酸ガスアーク溶接含む)</p> <p>・非破壊検査</p> <p>■PT : 染色探傷試験</p> <p>■RT : 放射線試験 (1種判定)</p>						
材質	EHP/SUS316L/EHP +EHP/SUS316L/EHP	トーチシールドガス	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う Ar>99.9%, 10L/mim以上			
P. NO. (Gr)		裏面からのガス保護 (バックングガス)	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim以上			
板厚範囲	(6/32/3)t + (6/32/3)t	アフターシールドガス	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim以上			
予熱温度	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う °C以下	片側のパス/層数	<input checked="" type="checkbox"/> 多パス (層) <input type="checkbox"/> 単パス (層)			
パス間温度	Max 150°C	その他	溶接棒・試験材とも客先支給			
直後熱	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接後熱処理	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接姿勢	<input checked="" type="checkbox"/> 下向 <input type="checkbox"/> 立向(上進) <input type="checkbox"/> 横向					
溶接士資格	JIS	電流・極性・電極数	<input checked="" type="checkbox"/> T : DC EN <input type="checkbox"/> A : <input type="checkbox"/> J : <input type="checkbox"/> M : 電極数 : <input checked="" type="checkbox"/> 単、 <input type="checkbox"/> 複 個			
溶接条件						
層数パス	溶接方法	溶接材料		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)
		銘柄	径			
仮付	T	TG-S316L	φ 2.4	60~120	8~20	-
層	T	TG-S316L	φ 2.4	80~100	8~20	-
残層	T	25Cr-35Ni-EHP	φ 2.4	80~100	8~20	-
B. C						-
層	T	TG-S316L	φ 2.4	80~100	8~20	-
残層	T	25Cr-35Ni-EHP	φ 2.4	80~100	8~20	-
注記				改訂番号	年 月 日 / 氏名	
				0		

表 3.1-29-4 溶接施工要領書 (爆着クラッド材④)

溶接要領書 (WPS)		溶接要領書番号		P15-02278-W1		
		施工法確認試験記録番号		—	改定番号	0
溶接施工法及び組合せ: U & T		溶接継手番号		B		
<p>■T: ティグ溶接 (手動、半自動、自動)</p> <p>□A: 被覆アーク溶接</p> <p>■J: サブマージドアーク溶接 (U)</p> <p>□M: ミグ溶接 (半自動、自動)</p> <p>□G: マグ溶接 (半自動、自動) (炭酸ガスアーク溶接含む)</p> <p>・非破壊検査</p> <p>■PT: 染色探傷試験</p> <p>■RT: 放射線試験 (1種判定)</p>						
材質	25Cr-25Ni-EHP/SQV2A	トーチシールドガス	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う Ar > 99.9%, 10L/mim 以上			
P. NO. (Gr)		裏面からのガス保護 (バックングガス)	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim 以上			
板厚範囲	(8+100)t × (8+100)t	アフターシールドガス	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim 以上			
予熱温度	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う 150℃以下	片側のパス/層数	<input checked="" type="checkbox"/> 多パス (層) <input type="checkbox"/> 単パス (層)			
パス間温度	Max 350℃	その他	SAW 用溶接ワイヤ US56B/PF200 は施工者調達、他は客先支給			
直後熱	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接後熱処理	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う	電流・極性・電極数	<input checked="" type="checkbox"/> T: DC EN <input type="checkbox"/> A: <input checked="" type="checkbox"/> J: AC <input type="checkbox"/> M: 電極数: <input checked="" type="checkbox"/> 単、 <input type="checkbox"/> 複 個			
溶接姿勢	<input checked="" type="checkbox"/> 下向 <input type="checkbox"/> 立向 (上進) <input type="checkbox"/> 横向					
溶接士資格	JIS					
溶接条件						
層数パス	溶接方法	溶接材料		電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)
		銘柄	径			
仮付	T	TG-S50	φ 2.4	60~120	8~20	—
全層	U	US56B/PF200	φ 4	450~600	25~35	—
B. C						
全層	U	US63B/PF200	φ 4	450~600	25~35	—
全層 (2層)	T	TG-S309	φ 2.4	120~250	8~20	—
EHP 鋼層	T	25Cr-35Ni-EHP	φ 2.4	120~250	8~20	
注記				改訂番号	年 月 日 / 氏名	
				0		

表 3.1-29-5 溶接施工要領書 (爆着クラッド材⑤)

溶接要領書 (W P S)		溶接要領書番号		P15-02278-W1		
		施工法確認試験記録番号		-	改定番号	0
溶接施工法及び組合せ: J & T		溶接継手番号		D		
<p>■T: ティグ溶接 (手動、半自動、自動)</p> <p>□A: 被覆アーク溶接</p> <p>□J: サブマージドアーク溶接 (U)</p> <p>□M: ミグ溶接 (半自動、自動)</p> <p>□G: マグ溶接 (半自動、自動) (炭酸ガスアーク溶接含む)</p> <p>・非破壊検査</p> <p>■PT: 染色探傷試験</p> <p>■RT: 放射線試験 (1種判定)</p>						
材質	EHP/SUS316L +EHP/SUS316L	トーチシールドガス	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う Ar>99.9%, 10L/mim以上			
P. NO. (Gr)		裏面からのガス保護 (バックングガス)	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim以上			
板厚範囲	(2/12)t + (2/12)t	アフターシールドガス	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim以上			
予熱温度	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う °C以下	片側のパス/層数	<input checked="" type="checkbox"/> 多パス (層) <input type="checkbox"/> 単パス (層)			
パス間温度	Max 150°C	その他	溶接棒・試験材とも客先支給			
直後熱	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接後熱処理	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接姿勢	<input checked="" type="checkbox"/> 下向 <input type="checkbox"/> 立向(上進) <input type="checkbox"/> 横向					
溶接士資格	JIS	電流・極性・電極数	<input checked="" type="checkbox"/> T: DC EN <input type="checkbox"/> A: <input type="checkbox"/> J: <input type="checkbox"/> M: 電極数: <input checked="" type="checkbox"/> 単、 <input type="checkbox"/> 複 個			
溶接条件						
層数パス	溶接方法	溶接材料		電流(A)	電圧(V)	速度 (cm/min)
		銘柄	径			
仮付	T	25Cr-35Ni-EHP	φ2.4	60~120	8~20	-
1~2層	T	25Cr-35Ni-EHP	φ2.4	80~100	8~20	-
残り	T	TG-S316L		80~100	8~20	-
						-
						-
注記				改訂番号	年 月 日/氏名	
				0		

表 3.1-29-6 溶接施工要領書 (爆着クラッド材⑥)

溶接要領書 (W P S)		溶接要領書番号		P15-02278-W1		
		施工法確認試験記録番号		—	改定番号	0
溶接施工法及び組合せ：T		溶接継手番号		F		
<p>■T：ティグ溶接 (手動、半自動、自動)</p> <p>□A：被覆アーク溶接</p> <p>□J：サブマージドアーク溶接 (U)</p> <p>□M：ミグ`溶接 (半自動、自動)</p> <p>□G：マグ`溶接 (半自動、自動) (炭酸ガスアーク溶接含む)</p> <p>・非破壊検査</p> <p>■PT：染色探傷試験</p> <p>■RT：放射線試験 (1種判定)</p>						
材質	EHP/SUS316L/EHP +EHP/SUS316L/EHP	トーチシールドガス	<input type="checkbox"/> 行わない <input checked="" type="checkbox"/> 行う Ar>99.9%, 10L/mim以上			
P. NO. (Gr)		裏面からのガス保護 (バックングガス)	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim以上			
板厚範囲	(6/32/3)t + (6/32/3)t	アフターシールドガス	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う 純Ar L/mim以上			
予熱温度	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う °C以下	片側のパス/層数	<input checked="" type="checkbox"/> 多パス (層) <input type="checkbox"/> 単パス (層)			
パス間温度	Max 150°C	その他	溶接棒・試験材とも客先支給			
直後熱	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う					
溶接後熱処理	<input checked="" type="checkbox"/> 行わない <input type="checkbox"/> 行う	電流・極性・電極数	<input checked="" type="checkbox"/> T：DC EN <input type="checkbox"/> A： <input type="checkbox"/> J： <input type="checkbox"/> M： 電極数： <input checked="" type="checkbox"/> 単、 <input type="checkbox"/> 複 個			
溶接姿勢	<input checked="" type="checkbox"/> 下向 <input type="checkbox"/> 立向(上進) <input type="checkbox"/> 横向					
溶接士資格	JIS					
溶接条件						
層数パス	溶接方法	溶接材料		電流(A)	電圧(V)	速度 (cm/min)
		銘柄	径			
仮付	T	TG-S316L	φ2.4	60~120	8~20	—
層	T	TG-S316L	φ2.4	80~100	8~20	—
残	T	25Cr-35Ni-EHP	φ2.4	80~100	8~20	—
B. C						—
層	T	TG-S316L	φ2.4	80~100	8~20	—
残	T	25Cr-35Ni-EHP	φ2.4	80~100	8~20	—
注記				改訂番号	年 月 日/氏名	
				0		

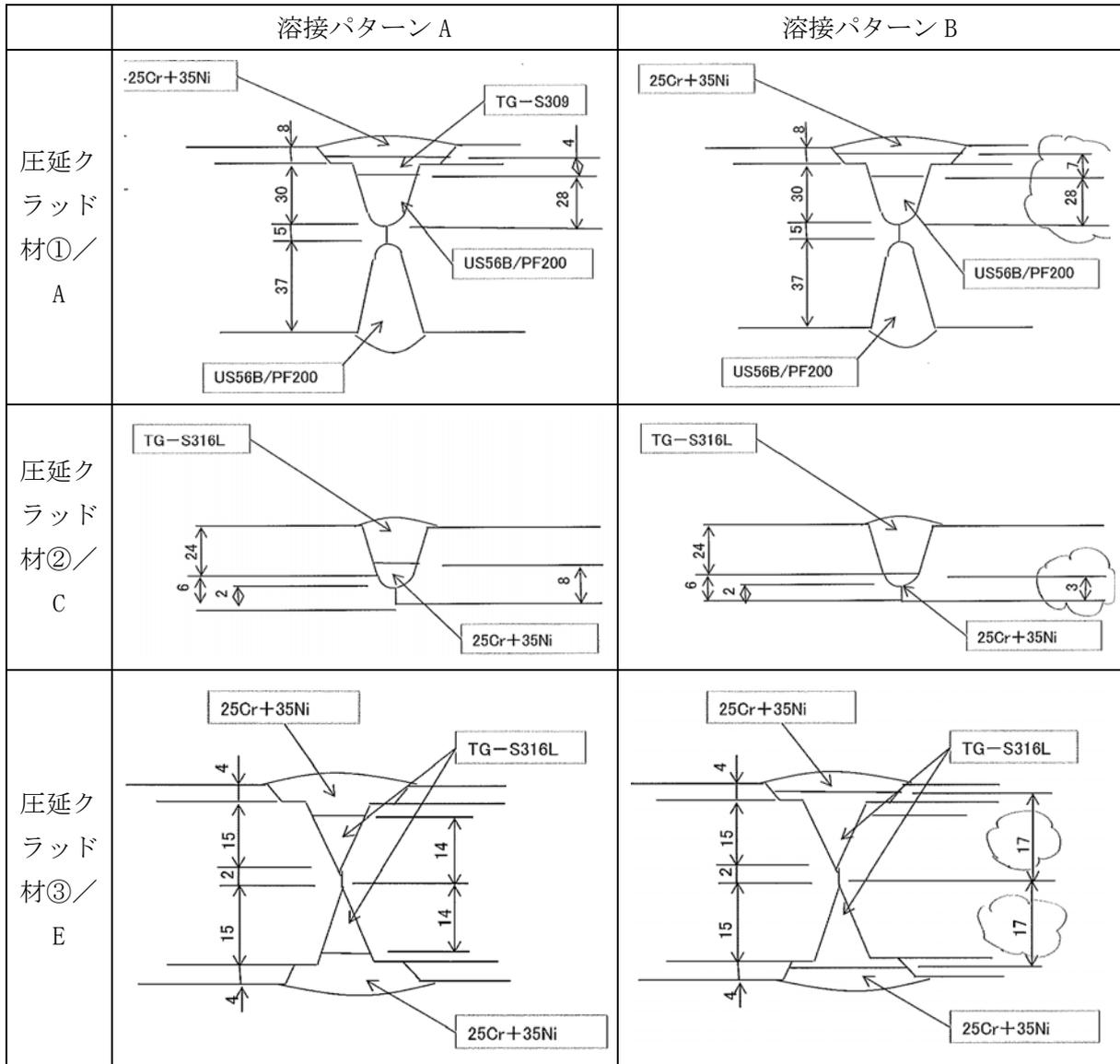


図 3.1-50(a) 溶接パターン-1

※溶接パターン Bは溶接パターン A の肉盛層の半分のイメージ

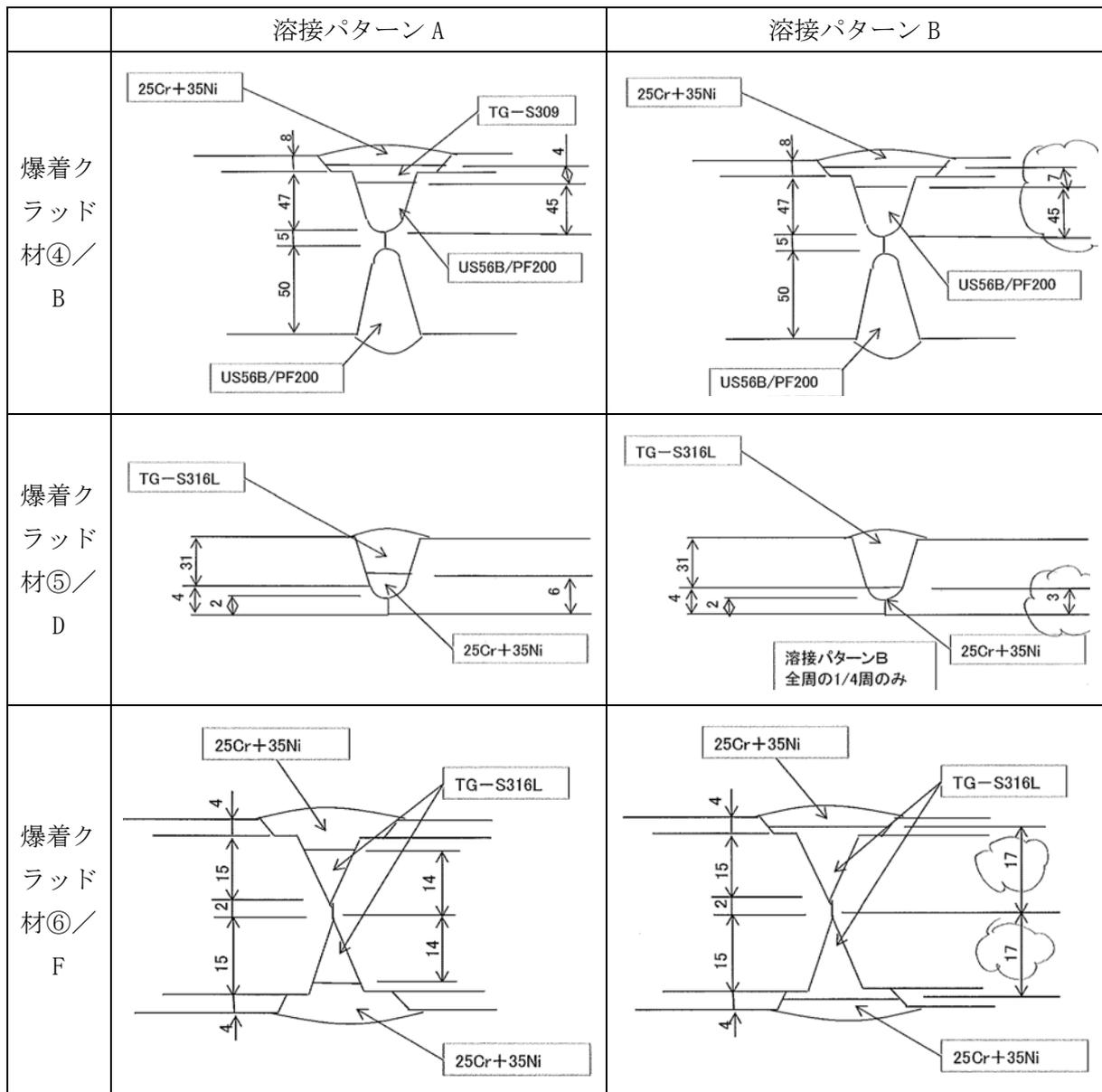


図 3.1-50(b) 溶接パターン-2

圧延クラッド材の溶接継手の外観	
圧延クラッド材①/A	
圧延クラッド材②/C	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>溶接パターン A</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>溶接パターン B</p> </div> </div>
圧延クラッド材③/E	

写真 3.1-41 圧延クラッド材の溶接継手の外観写真

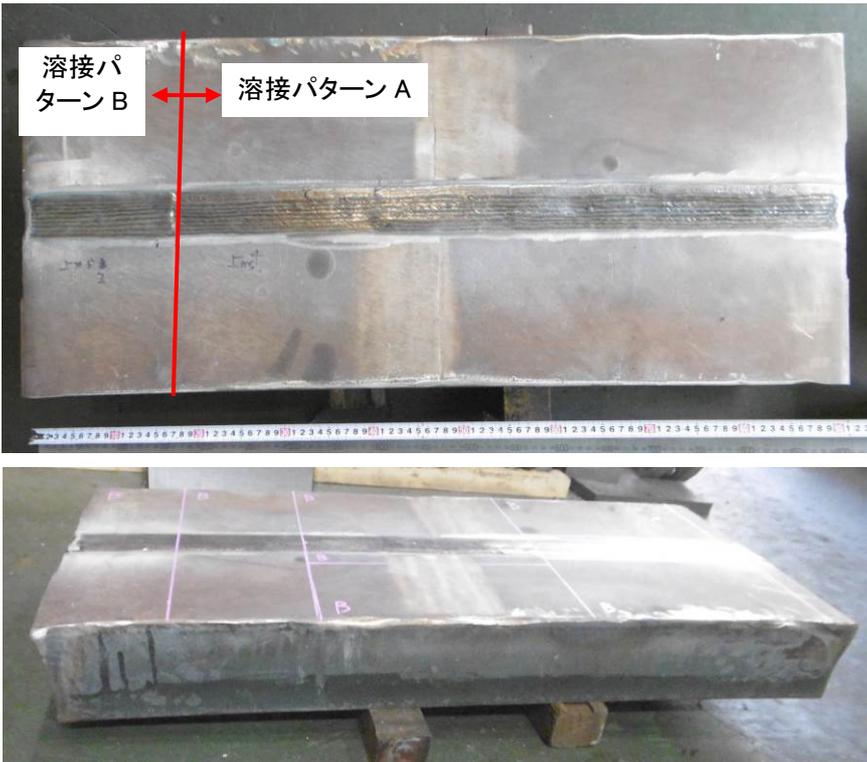
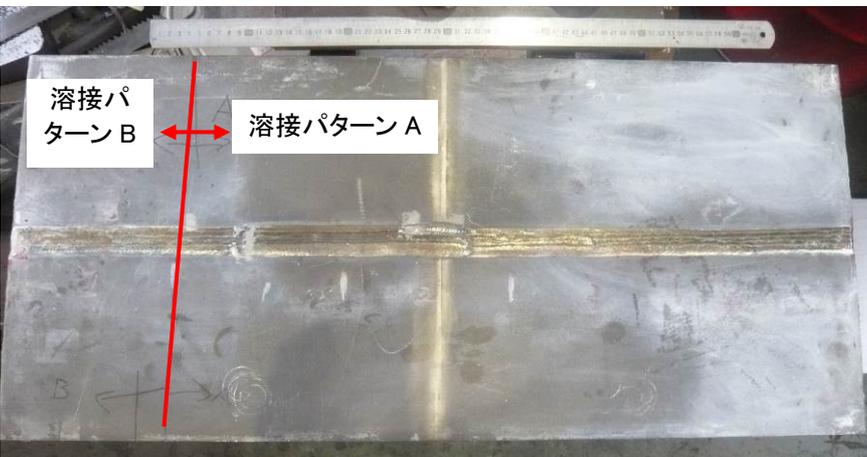
爆着クラッド材の溶接継手の外観	
爆着クラッド材④ /B	
爆着クラッド材⑤ /D	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="464 1039 871 1438"> <p>溶接パターン A</p>  </div> <div data-bbox="927 1077 1294 1438"> <p>溶接パターン B</p>  </div> </div>
爆着クラッド材⑥ /F	

写真 3.1-42 爆着クラッド材の溶接継手の外観写真

表 3.1-30 クラッド材の溶接継手の浸透探傷試験結果のまとめ

品種	板組	パターン	浸透探傷試験		
			場所	試験結果	判定
圧延クラッド材① 溶接継手 A	EHP/SQV2A	A	表裏	評価するきずを認めず	合格
		B	〃		
圧延クラッド材② 溶接継手 C	EHP/SUS316L	A	全周	〃	〃
		B	1/4 周	〃	
圧延クラッド材③ 溶接継手 E	EHP/SUS316L/ EHP	A	表裏	〃	〃
		B	〃	〃	
爆着クラッド材④ 溶接継手 B	EHP/SQV2A	A	表裏	〃	〃
		B	〃	〃	
爆着クラッド材⑤ 溶接継手 D	EHP/SUS316L	A	全周	〃	〃
		B	1/4 周	〃	
爆着クラッド材⑥ 溶接継手 F	EHP/SUS316L/ EHP	A	表裏	〃	〃
		B	〃	〃	

表 3.1-31 クラッド材の溶接継手の浸透探傷試験記録

浸透探傷試験記録 (1/1)

顧客	株式会社コベルコ科研 材料技術部殿	溶接施工工場	(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス 播磨事業所		
		検査場所	工場		
EN&M 工事番号	P15-02278	承認		検査員	
名称	クラッド材の溶接			杉森	
1. 探傷条件					
試験方法	溶剤除去性、染色 JISZ2343(2001)	試験時期	溶接後		
探傷剤	浸透剤:マークテック㈱ スーパーチェック浸透液UP-T	浸透時間	10分		
	洗浄剤:マークテック㈱ スーパーチェック洗浄液UR-T	現像時間	10分		
	現像剤 :マークテック㈱ スーパーチェック現像液UD-T エアゾール	探傷温度	26~32℃		
2. 探傷位置及び結果					
管理番号(略号)	実施箇所	探傷結果	判定	検査日	備考
a	 全周	評価する きずを認めず。	合格	2015.8.3	溶接部
b	 全周	評価する きずを認めず。	合格	2015.8.3	溶接部
c	裏表  全周	評価する きずを認めず。	合格	2015.7.2	溶接部
d	裏表  全周	評価する きずを認めず。	合格	2015.7.2	溶接部
e	 全周	評価する きずを認めず。	合格	2015.7.14	溶接部
f	 全周	評価する きずを認めず。	合格	2015.7.2	溶接部
3. 判定基準 : 次の1~3による指示模様がいないこと。 1. 割れ 2. 長さ1mmを超える線状 3. 長さ4mmを超える円形状					
備考:					

表 3.1-32 クラッド材の溶接継手の超音波探傷試験結果のまとめ

品種	板組	パターン	超音波探傷試験	
			試験結果	判定
圧延クラッド材① 溶接継手 A	EHP/SQV2A	A	M線を超えるきずを認めず	合格
		B		
爆着クラッド材④ 溶接継手 B	EHP/SQV2A	A	〃	〃
		B		

※ クラッド材①および③は厚さが厚いため、RT 試験不可により UT を実施

表 3.1-33 クラッド材①および④の溶接継手の超音波探傷試験記録

超音波探傷試験記録(1/1)					(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス 播磨事業所 品質保証室		
					承認	検査員	
					 杉森		
工事番号	P15-02278		品名	クラッド材の溶接			
注文主	(株)コベルコ科研 材料技術部殿						
適用規格	JIS Z3060 (2002)		判定基準	M検出レベルにて、1類又は2類を合格とする。			
検査技術者	杉森 知和		試験場所	(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス 播磨事業所			
探傷器	製造業者名	クラウトクレーマ			型式	USM35X	
	有効年月日	2016年3月31日まで			点検者	クラウトクレーマ	
探触子	呼称	斜角	垂直	備考 (点検項目)	探傷器 の性能	JIS Z 2344 付属書による測定	
		2C14X14A45	N5Z10N				
	製造業者名	JAPAN PROBE	クラウトクレーマ				
製造番号	A0 777	57750	時間軸直線性	0%			
感度調整用試験片	RB-41(No.3,4)			—	—		
※ 1 基準感度	RB41(No.3,4)の(φ3.0,6.0)=80%-H線			接触媒質	CMC		
探傷試験品：略号(a),(b)の溶接部 試験実施日 (a)2015年8月3日 (b)2015年8月3日 探傷面の仕上げ状態：余盛グラインダー仕上げ 判定：M線を超えるきずを認めず。合格					主材質：支給品		
備考							

表 3.1-34 クラッド材の溶接継手の放射線透過試験結果のまとめ

品種	板組	パターン	放射線透過試験		
			試験結果	分類	判定
圧延クラッド材② 溶接継手 C	EHP/SUS316L	A	Tφ1.4×1 個、Bφ1.4×1 個	1	合格
		B	Tφ1.4×1 個、Bφ1.0×1 個	1	〃
圧延クラッド材③ 溶接継手 E	EHP/SUS316L/ EHP	A	N	1	〃
		B	N	1	〃
爆着クラッド材⑤ 溶接継手 D	EHP/SUS316L	A	Tφ1.4×1 個	1	〃
		B	Bφ1.0×1 個、Bφ0.9×1 個	1	〃
爆着クラッド材⑥ 溶接継手 F	EHP/SUS316L/ EHP	A	(Bφ1.2×2 個、Bφ2.0×2 個)	対象外	〃
		B	N	1	〃

表 3.1-35(a) クラッド材②/溶接継手 C の放射線透過試験記録-1/2

Title 項目		REPORT OF RADIOGRAPHIC EXAMINATION 放射線透過試験成績書 (1/2)			Date 作成日	2015/7/27	
Customer 御注文主		(株)コベルコ科研 殿			 神鋼エンジニアリング&メンテナンス Shinko Engineering & Maintenance Co., Ltd.		
Description 品名		クラッド鋼の溶接			QUALITY ASSURANCE SECTION 品質保証室		
Job. No. 製作番号		P15-02278			承認	検査員	
要領書 番号		-		Quantity 数量	1式		 北川
Examination Technical Condition 試験条件							
Exam'd Stage 試験時期		溶接後		Material 材 料	-		Appl. Code 適用規格
						JIS Z 3106(2001)	
(1)	Equipment 放射線装置名	RF300EGM2	(2)	Kind of Source 線 源 種 類	X線	Contrast meter 階 調 計	20形
(3)	Focus Size 線源・焦点寸法	2.5×2.5mm	(4)	Source Energy 線源エネルギー	290	(5)	Intensity 線 源 強 さ
						5 mA	
(6)	Thickness 材 厚	-mm	(7)	B. M. Thickness 母材厚さ	30mm	(12)	Marking 名 称
						S04	
(8)	Source-Film Distance 線源-フィルム間距離	800mm	(9)	Exposure Time 露 出 時 間	2.0分	Penetra meter 計 測 器	Sensitivity 識 別 度
							φ 0.50
(10)	Kind of Film フィルムの種類	Fuji #100	(11)	Screen 増 感 紙	Pb0.03	Location 位 置	
						<input checked="" type="checkbox"/> S:放射線側 <input type="checkbox"/> F:フィルム側	
Reference Sketch or Summary スケッチ又は概要 <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;"> 溶接継手番号:C-A, C-B </div>							
Result of Examination 試 験 結 果				<input checked="" type="checkbox"/> Accept 合格		<input type="checkbox"/> Not Accept 不合格	
Write on another sheet 別 紙 に 書 く							

表 3.1-36(a) クラッド材③/溶接継手 E の放射線透過試験記録-1/2

Title 項 目		REPORT OF RADIOGRAPHIC EXAMINATION 放射線透過試験成績書 (1/2)			Date 作成日	2015年 3月 19日		
Customer 御注文主		(株)コベルコ科研 材料技術部殿			 神鋼エンジニアリング&メンテナンス Shinko Engineering & Maintenance Co., Ltd. QUALITY ASSURANCE SECTION 品質保証室			
Description 品 名		クラッド材の溶接			承認			
Job. No. 製作番号		P14-09826			検 査 員			
要領書 番号		-	Quantity 数 量	1式		北川		
Examination Technical Condition 試験条件								
Exam'd Stage 試験時期		溶接後	Material 材 料	-	Appl. Code 適用規格	JIS Z 3106(2001)		
(1)	Equipment 放射線装置名	RF300EGM2	(2)	Kind of Source 線 源 種 類	X線	Contrast meter 階 調 計	20形	
(3)	Focus Size 線源・焦点寸法	2.5×2.5mm	(4)	Source Energy 線源エネルギー	290	(5)	Intensity 線 源 強 さ	5 mA
(6)	Thickness 材 厚	-mm	(7)	B. M. Thickness 母 材 厚 さ	40mm	(12)	Marking 名 称	S08
(8)	Source-Film Distance 線源-フィルム間距離	800mm	(9)	Exposure Time 露 出 時 間	4.0分	Penetra meter 註 記 欄 外	Sensitivity 識 別 度	φ 0.63
(10)	Kind of Film フィルムの種類	Fuji #100	(11)	Screen 増 感 紙	Pb0.03		Location 位 置	<input checked="" type="checkbox"/> S:放射線側 <input type="checkbox"/> F:フィルム側
Reference Sketch or Summary スケッチ又は概要 <div style="text-align: center; font-size: 24px; margin: 20px 0;">溶接継手番号:E</div>								
Result of Examination 試 験 結 果		<input checked="" type="checkbox"/> Accept 合格	<input type="checkbox"/> Not Accept 不合格					
Write on another sheet 別 紙 に 書 く								

表 3.1-37(a) クラッド材⑤/溶接継手 D の放射線透過試験記録-1/2

Title 項 目		REPORT OF RADIOGRAPHIC EXAMINATION 放射線透過試験成績書 (1/2)			Date 作成日	2015/7/27		
Customer 御注文主		(株)コベルコ科研 殿			 神鋼エンジニアリング&メンテナンス Shinko Engineering & Maintenance Co., Ltd.			
Description 品 名		クラッド鋼の溶接			QUALITY ASSURANCE SECTION 品質保証室			
Job. No. 製作番号		P15-02278			承認	検 査 員		
要領書 番号		-		Quantity 数 量	1式		 北川	
Examination Technical Condition 試験条件								
Exam'd Stage 試験時期	溶接後		Material 材 料	-		Appl. Code 適用規格	JIS Z 3106(2001)	
(1)	Equipment 放射線装置名	RF300EGM2	(2)	Kind of Source 線 源 種 類	X線	Contrast meter 階 調 計	20形	
(3)	Focus Size 線源・焦点寸法	2.5×2.5mm	(4)	Source Energy 線源エネルギー	290	(5)	Intensity 線 源 強 さ	5 mA
(6)	Thickness 材 厚	-mm	(7)	B. M. Thickness 母 材 厚 さ	35mm	(12) Penetra meter 計 位 置	Marking 名 称	S04
(8)	Source-Film Distance 線源-フィルム間距離	800mm	(9)	Exposure Time 露 出 時 間	3.0分		Sensitivity 識 別 度	φ 0.63
(10)	Kind of Film フィルムの種類	Fuji #100	(11)	Screen 増 感 紙	Pb0.03		Location 位 置	<input checked="" type="checkbox"/> S:放射線側 <input type="checkbox"/> F:フィルム側
Reference Sketch or Summary スケッチ又は概要								
溶接継手番号:D-A, D-B								
Result of Examination 試 験 結 果		<input checked="" type="checkbox"/> Accept <input type="checkbox"/> Not Accept		合格 不合格				
Write on another sheet 別 紙 に 書 く								

表 3.1-38(a) クラッド材⑤／溶接継手 E の放射線透過試験記録-1/2

Title 項 目		REPORT OF RADIOGRAPHIC EXAMINATION 放射線透過試験成績書 (1/2)			Date 作成日	2015/7/27	
Customer 御注文主		(株)コベルコ科研 殿			 神鋼エンジニアリング&メンテナンス Shinko Engineering & Maintenance Co., Ltd.		
Description 品 名		クラッド鋼の溶接			QUALITY ASSURANCE SECTION 品質保証室		
Job. No. 製作番号		P15-02278			承認	検 査 員	
要領書 番号		-		Quantity 数 量	1式		 北川
Examination Technical Condition 試験条件							
Exam'd Stage 試験時期		溶接後		Material 材 料	-		Appl. Code 適用規格
						JIS Z 3106(2001)	
(1)	Equipment 放射線装置名	RF300EGM2	(2)	Kind of Source 線 源 種 類	X線	Contrast meter 階 調 計	20形
(3)	Focus Size 線源・焦点寸法	2.5×2.5mm	(4)	Source Energy 線源エネルギー	290	(5)	Intensity 線 源 強 さ
						5 mA	
(6)	Thickness 材 厚	-mm	(7)	B. M. Thickness 母 材 厚 さ	38mm	(12)	Marking 名 称
						S04	
(8)	Source-Film Distance 線源-フィルム間距離	800mm	(9)	Exposure Time 露 出 時 間	3.5分	Penetra meter 言 語 通 訳	Sensitivity 識 別 度
							φ 0.63
(10)	Kind of Film フィルムの種類	Fuji #100	(11)	Screen 増 感 紙	Pb0.03	Location 位 置	
						<input checked="" type="checkbox"/> S:放射線側 <input type="checkbox"/> F:フィルム側	
Reference Sketch or Summary スケッチ又は概要 <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;"> 溶接継手番号:E-A, E-B </div>							
Result of Examination 試 験 結 果				<input checked="" type="checkbox"/> Accept <input type="checkbox"/> Not Accept		<input checked="" type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	
Write on another sheet 別 紙 に 書 く							

表 3.1-38(b) クラッド材⑤／溶接継手 E の放射線透過試験記録-2/2

放射線透過試験成績表 (2/2)				 新神鋼エンジニアリング&メンテナンス Shinko Engineering & Maintenance Co.,Ltd. QUALITY ASSURANCE SECTION 品質保証室				
Film No.	Kind of defect	クラッド鋼の溶接	Judgment	Date of Examination	Interpreted By	Remarks		
フィルム番号	きずの種類	分類	合 否	検査年月日	判定者	備考		
E-A-1	N	1	合格	2015/7/14	北川			
2	N	1	合格	2015/7/14	北川			
3	N	1	合格	2015/7/14	北川			
4	N	1	合格	2015/7/14	北川			
E-B-1	N	1	合格	2015/7/14	北川			
以下余白								
Discontinuity Type Mark きず種別記号	N	No Defect 無欠陥	B	Blow Hole ブローホール	T	Tangsten タングステン	S	Slag スラグ
	L	Lack of Fusion 融合不良	I	Incomplet Penetration 溶込不良	P	Piping パイプ	C	Crack 割れ
Remarks 備 考								

表 3.1-39(a) クラッド材⑥／溶接継手 F の放射線透過試験記録-1/2

Title 項目		REPORT OF RADIOGRAPHIC EXAMINATION 放射線透過試験成績書 (1/2)			Date 作成日	2015/7/27	
Customer 御注文主		(株)コベルコ科研 殿			 神鋼エンジニアリング&メンテナンス Shinko Engineering & Maintenance Co.,Ltd.		
Description 品名		クラッド鋼の溶接			QUALITY ASSURANCE SECTION 品質保証室		
Job. No. 製作番号		P15-02278			承認	検査員	
要領書 番号		-		Quantity 数量	1式		 北川
Examination Technical Condition 試験条件							
Exam'd Stage 試験時期		溶接後		Material 材 料	-		Appl. Code 適用規格
						JIS Z 3106(2001)	
(1)	Equipment 放射線装置名	RF300EGM2	(2)	Kind of Source 線 源 種 類	X線	Contrast meter 階 調 計	20形
(3)	Focus Size 線源・焦点寸法	2.5×2.5mm	(4)	Source Energy 線源エネルギー	290	(5)	Intensity 線 源 強 さ
						5 mA	
(6)	Thickness 材 厚	-mm	(7)	B. M. Thickness 母 材 厚 さ	38mm	(12)	Marking 名 称
						S04	
(8)	Source-Film Distance 線源-フィルム間距離	800mm	(9)	Exposure Time 露 出 時 間	3.5分	Penetra meter 社 製 機 器	Sensitivity 識 別 度
							φ0.63
(10)	Kind of Film フィルムの種類	Fuji #100	(11)	Screen 増 感 紙	Pb0.03	Location 位 置	
						<input checked="" type="checkbox"/> S:放射線側 <input type="checkbox"/> F:フィルム側	
Reference Sketch or Summary スケッチ又は概要 <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;">溶接継手番号:F-A, F-B</div>							
Result of Examination 試 験 結 果				<input checked="" type="checkbox"/> Accept <input type="checkbox"/> Not Accept 合格 不合格 (但し対象外有り)			
Write on another sheet 別 紙 に 書 く							

クラッド材の溶接継手の健全性評価試験用-1

・略号A: 80t × 1,000w × 400 L → 切断 → 熱処理(ステップ冷却)

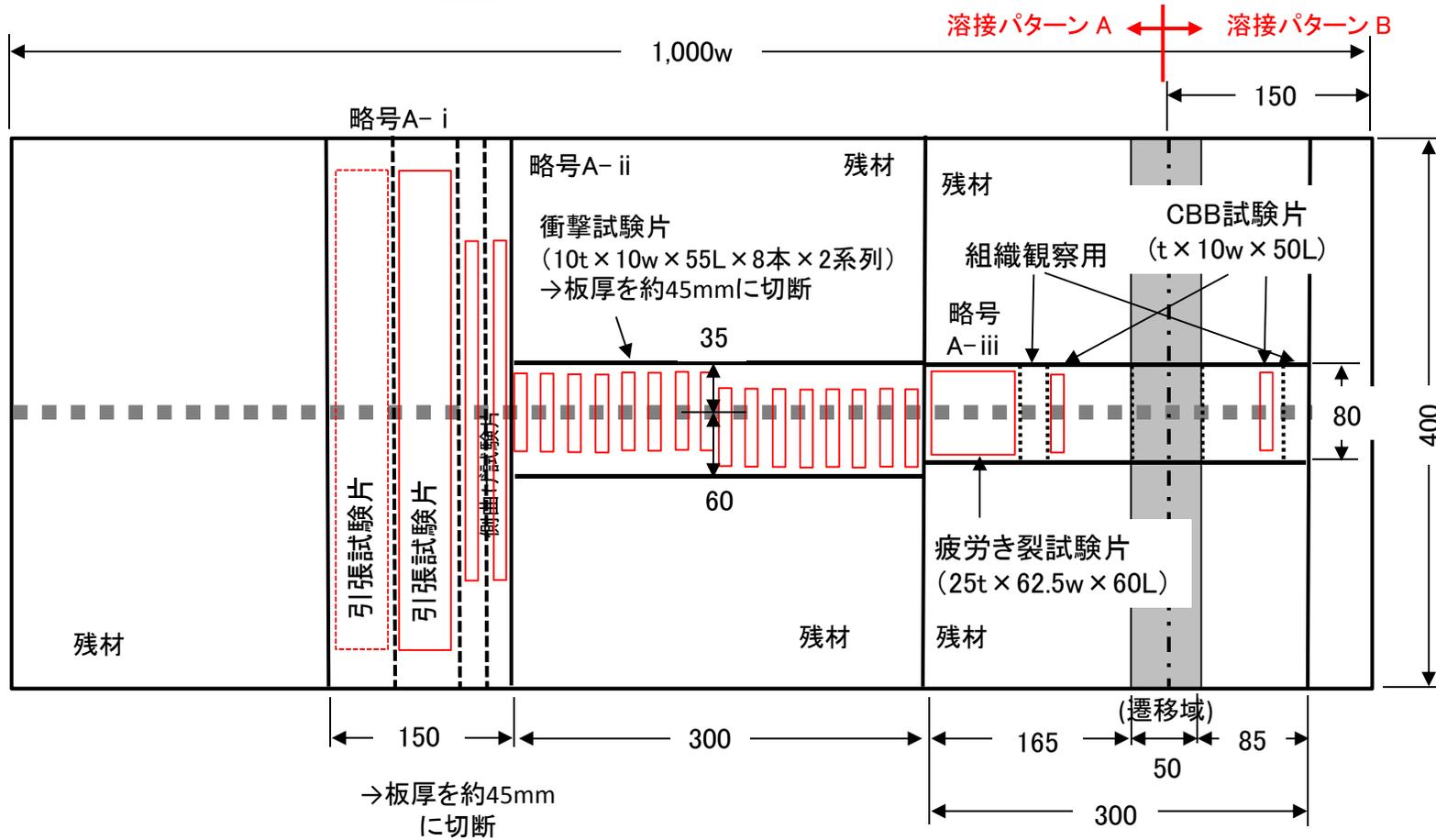


図 3.1-51 クラッド板材の溶接継手の長期健全性評価試験片の採取要領の例

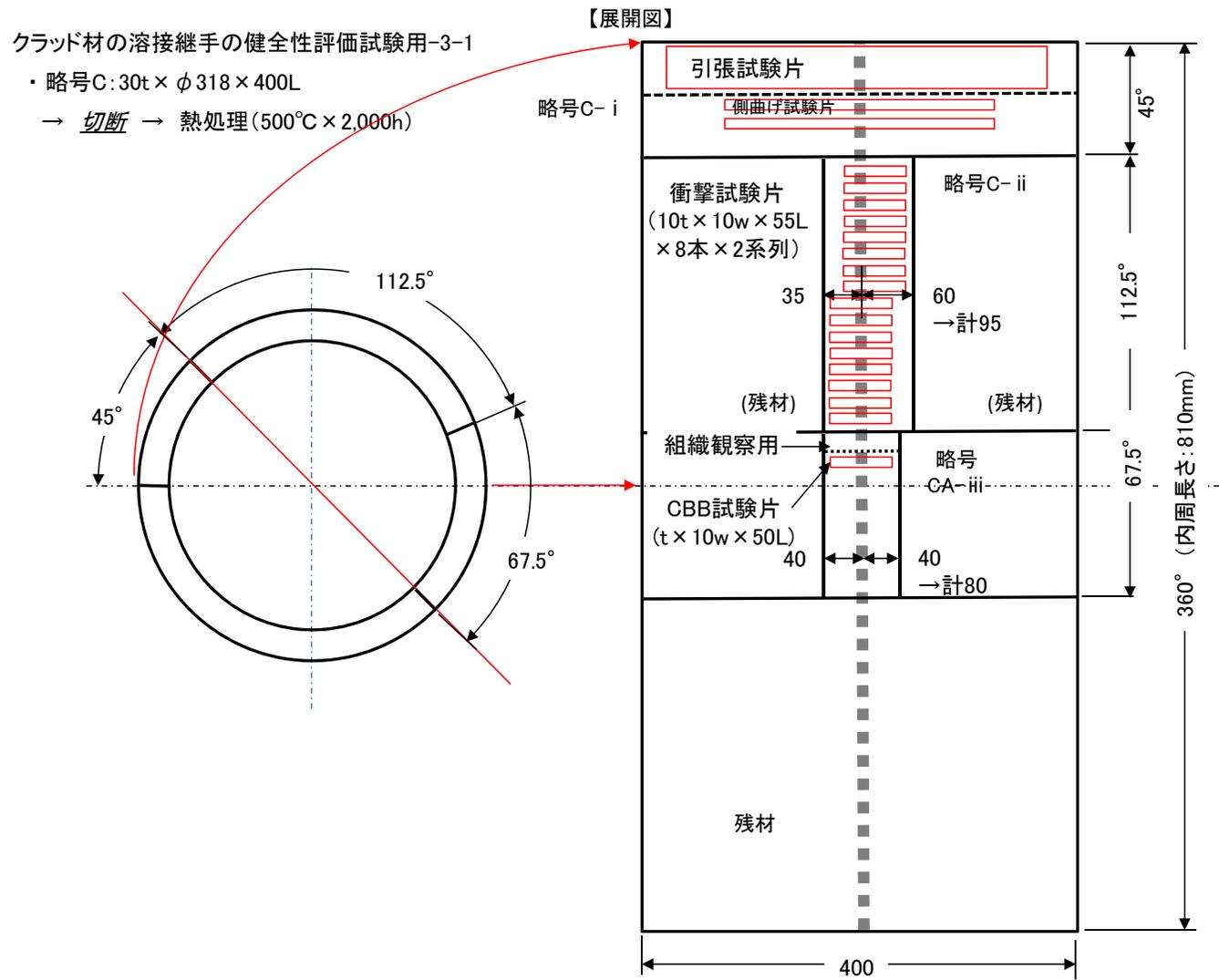


図 3.1-52(a) クラッド管材の溶接継手の長期健全性評価試験品の採取要領の例—溶接パターンA

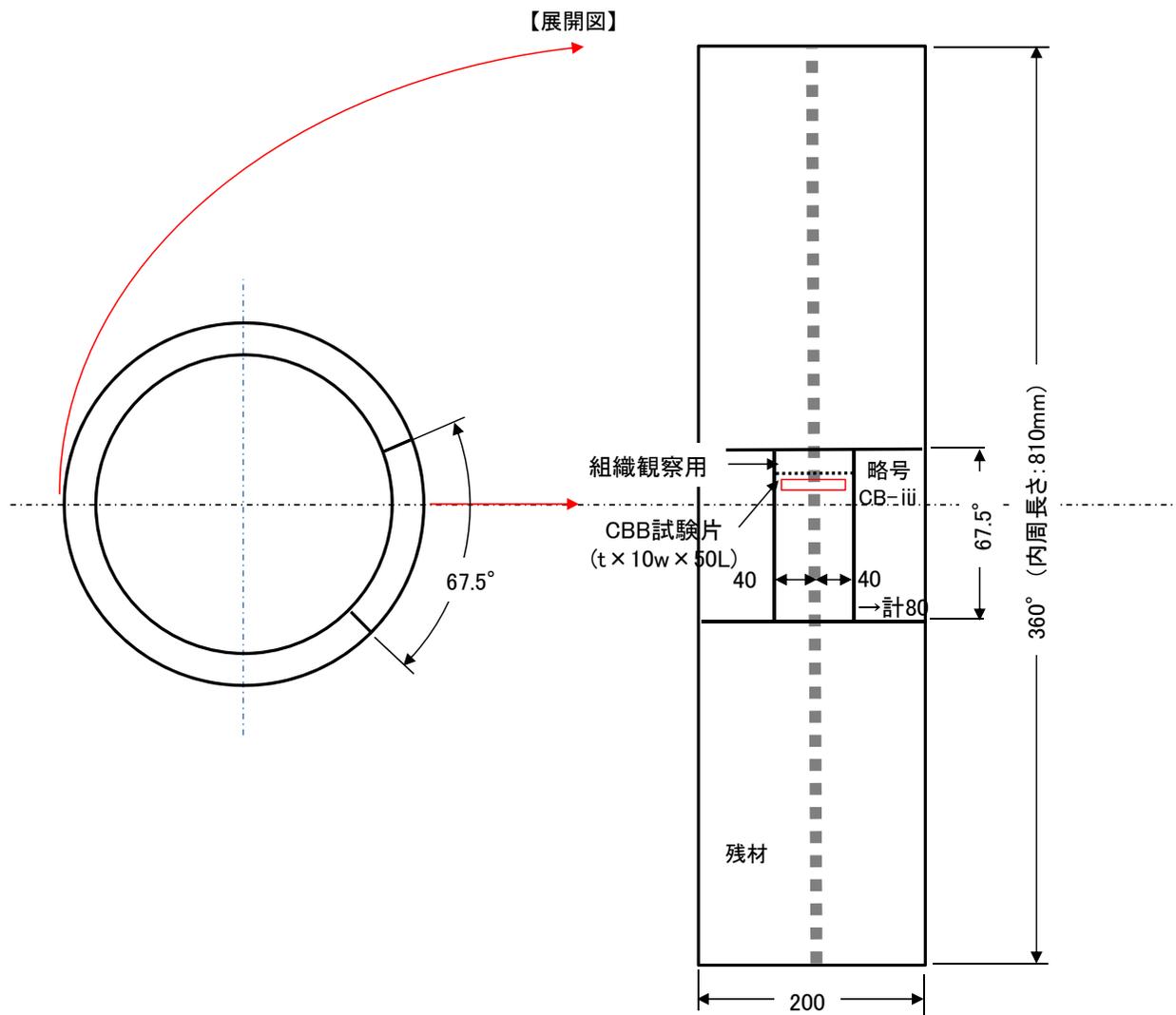


図 3.1-52(b) クラッド管材の溶接継手の長期健全性評価試験片の採取要領の例—溶接パターンB

外観写真	
<p>圧延クラッド材① 板組「EHP/SQV2A」 ／溶接継手 A</p>	
<p>爆着クラッド材④ 板組「EHP/SQV2A」 ／溶接継手 B</p>	

写真 3.1-43 クラッド材の溶接継手のステップ冷却処理後の外観写真

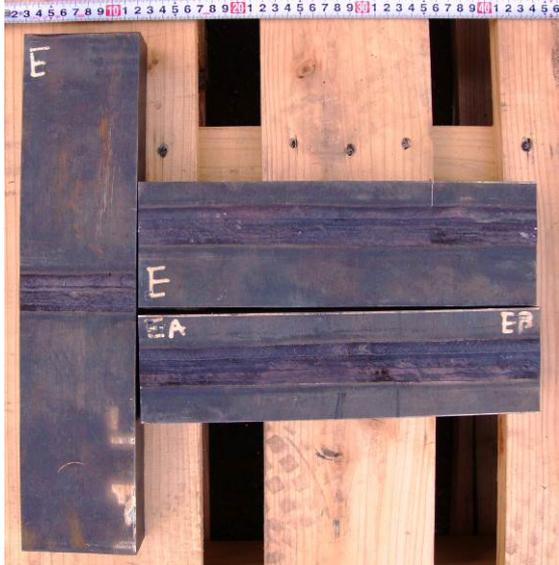
<p>圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) ／溶接継手 C</p>	<p>爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) ／溶接継手 D</p>
	
<p>圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/ EHP」) ／溶接継手 E</p>	<p>爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) ／溶接継手 F</p>
	

写真 3.1-44 クラッド材の溶接継手の 500°C×2,000h 熱時効処理後の外観写真

表 3.1-40 クラッド材の溶接継手の長期健全性および耐食性評価試験項目

試験項目	供試材	溶接パターン	処理		
			未処理	SQV2A 系	SUS316L 系
				ステップ冷却	500℃× 2,000h 熱時効
断面組織観察 硬さ分布測定	6 種	A, B	※	○	○
室温引張試験	〃	A	※	○	○
シャルピー衝撃試験	〃	〃	※	○	○
疲労き裂伝播試験	2 種	〃	○	○	—
応力腐食割れ試験 [CBB 試験]	6 種	A, B	○	○	○

※：平成 26 年度実施

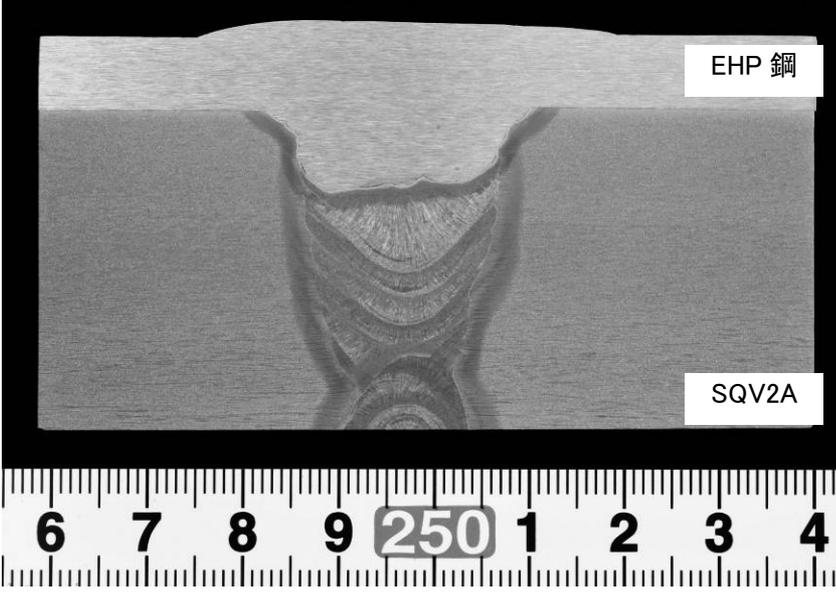
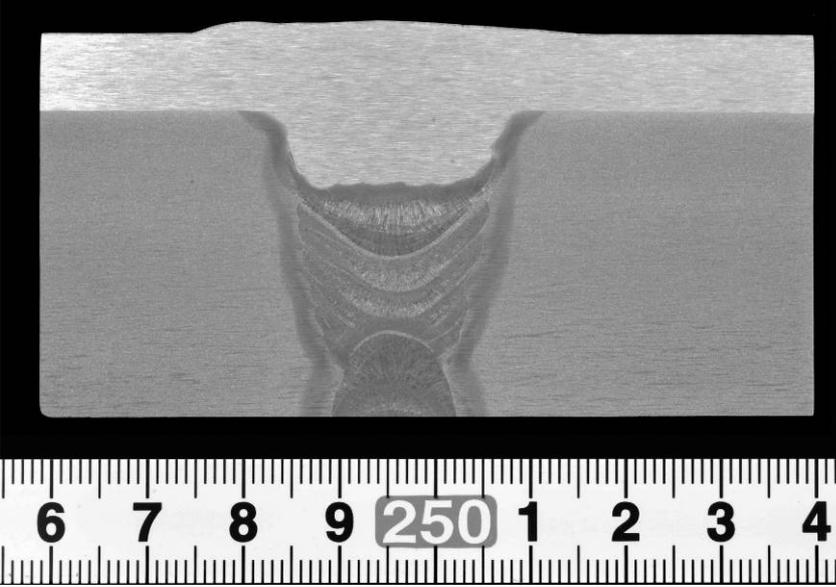
継手 A	圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」)
溶接パターン A (略号 AA)	
溶接パターン B (略号 AB)	

写真 3.1-45 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 A の
ステップ冷却処理後のマクロ組織

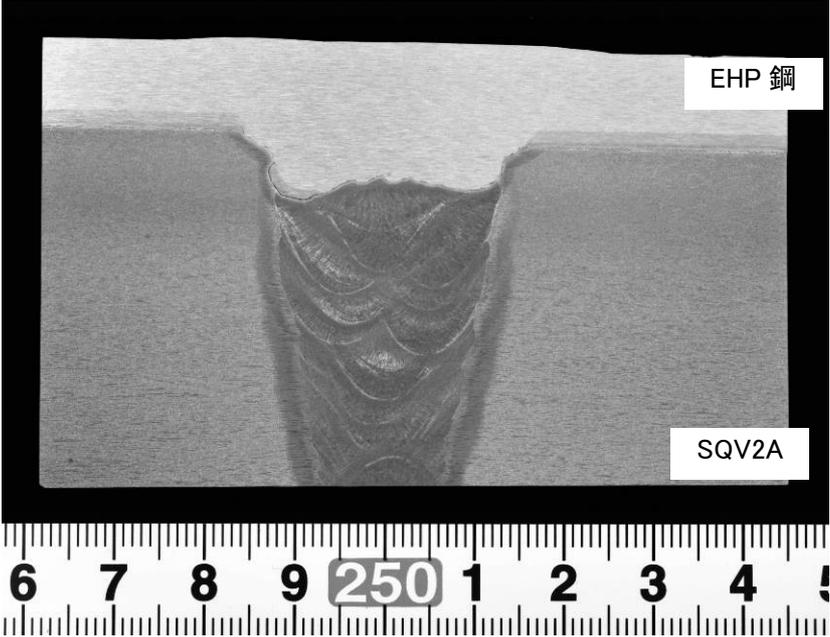
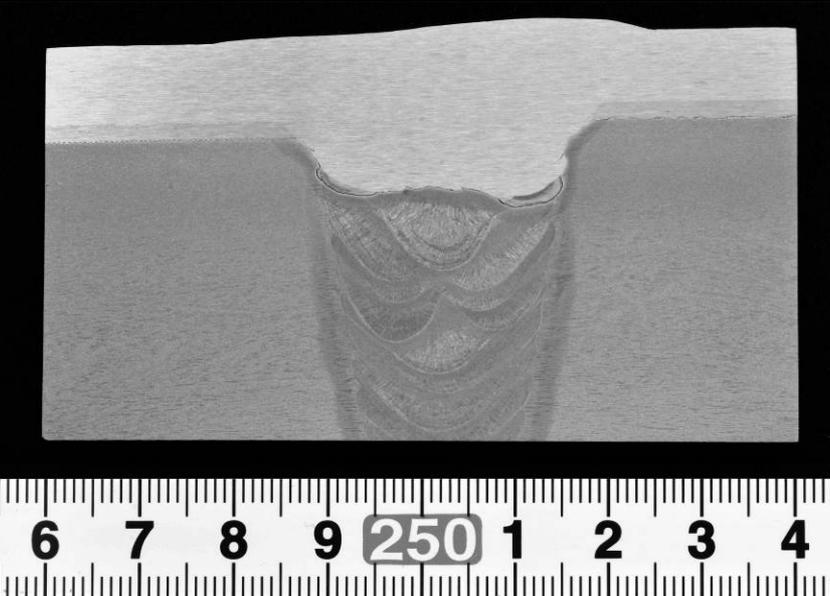
継手 B	爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」)
溶接パターン A (略号 BA)	
溶接パターン B (略号 BB)	

写真 3.1-46 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 B の
ステップ冷却処理後のマクロ組織

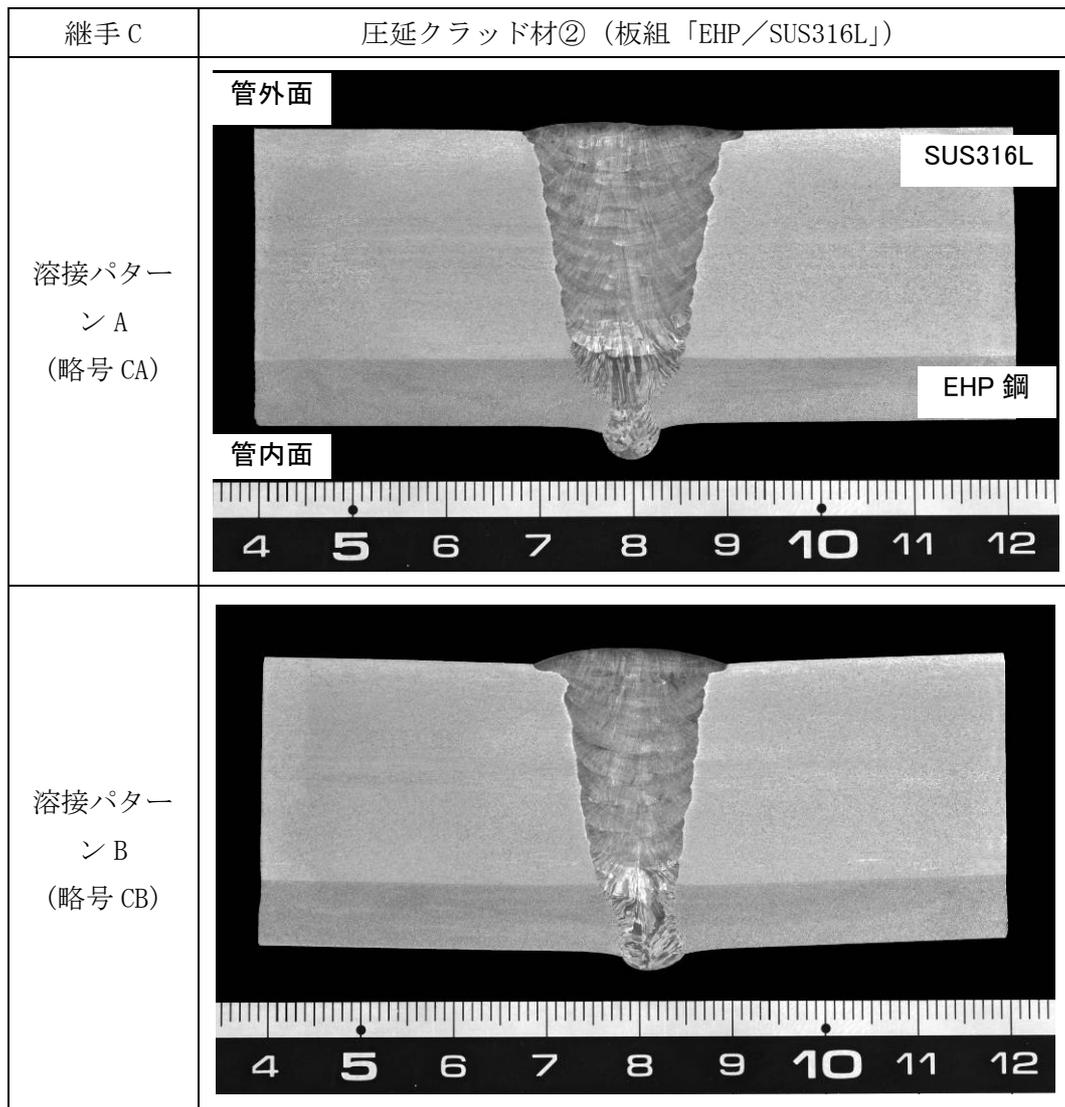


写真 3.1-47 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 C の
 500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織

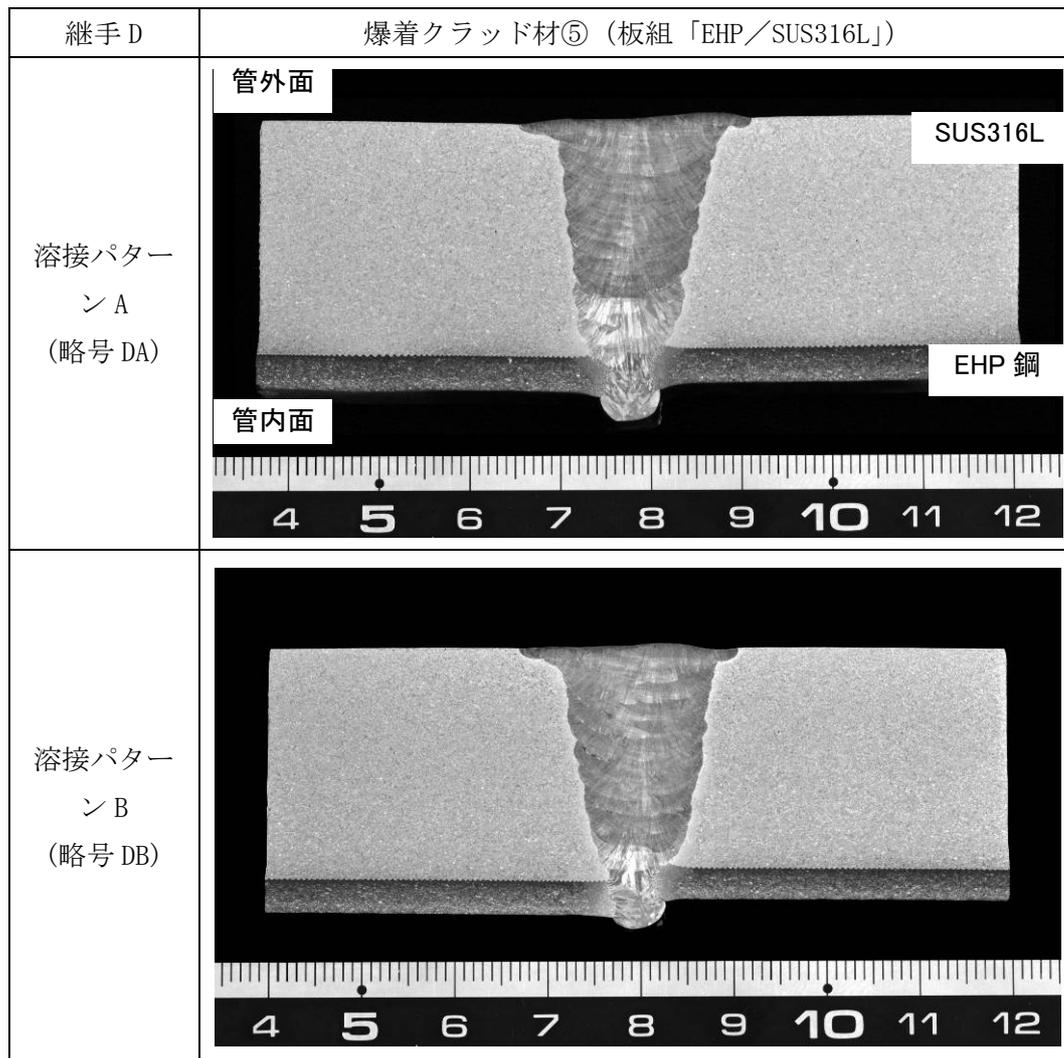


写真 3.1-48 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 D の
500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織

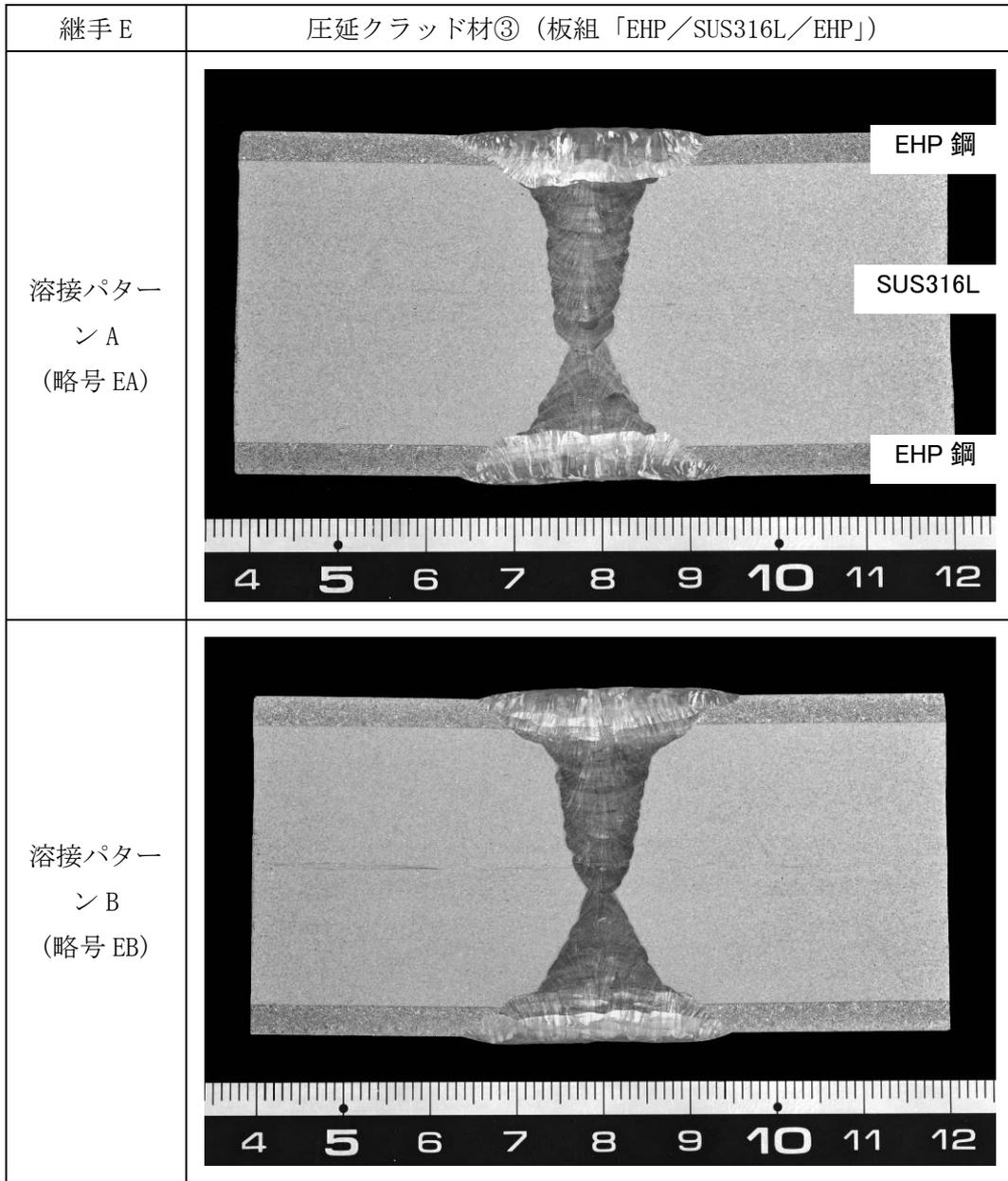


写真 3.1-49 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 E の
500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織

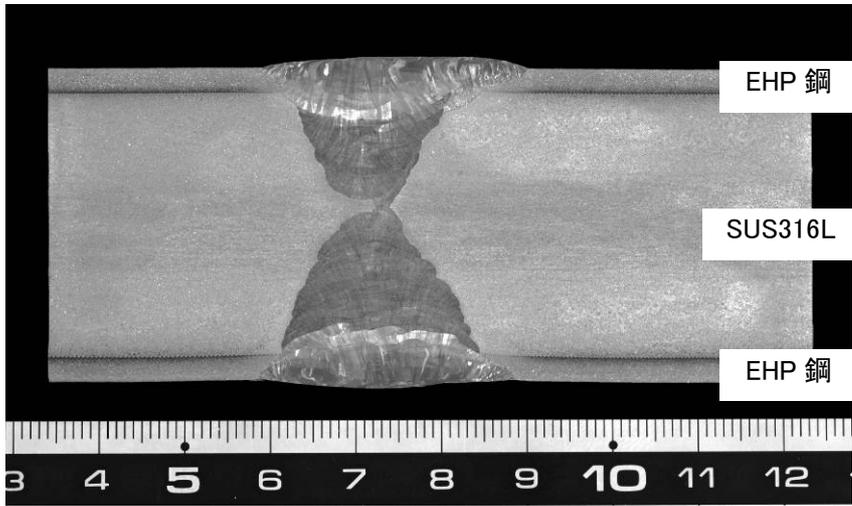
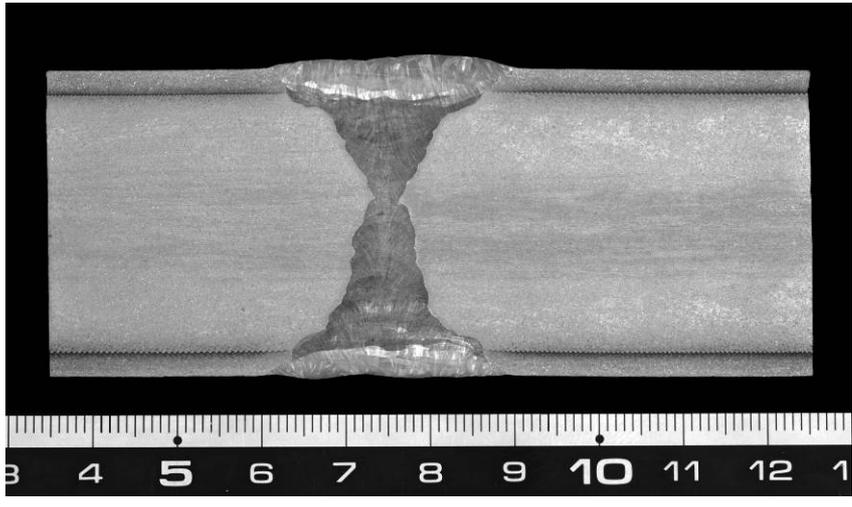
継手 F	爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」)
溶接パターン ン A (略号 FA)	
溶接条件 B (略号 FB)	

写真 3.1-50 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 F の
 500°C×2,000h 熱時効処理後のマクロ組織

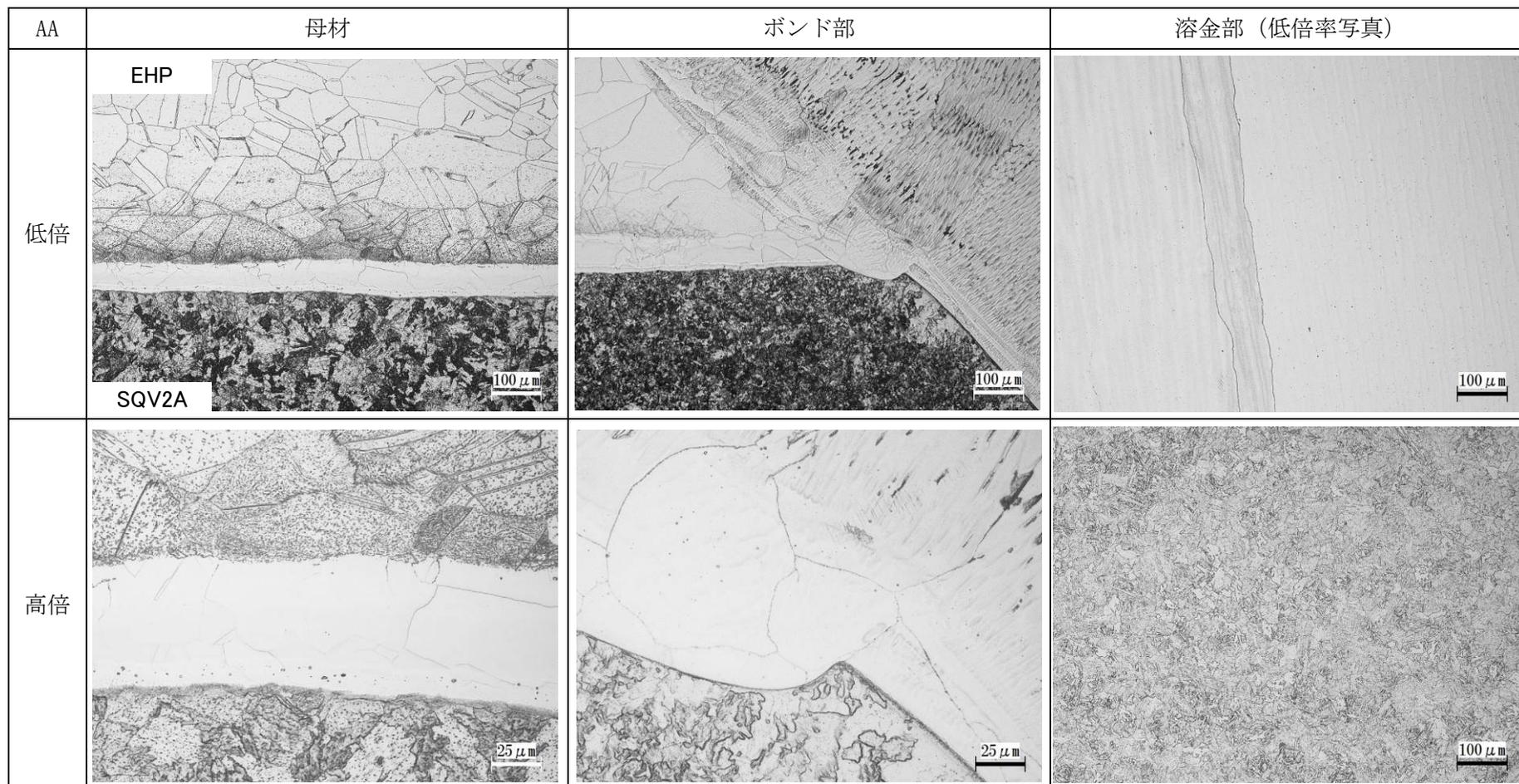


写真 3.1-51 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン A のステップ冷却処理後の断面マイクロ組織

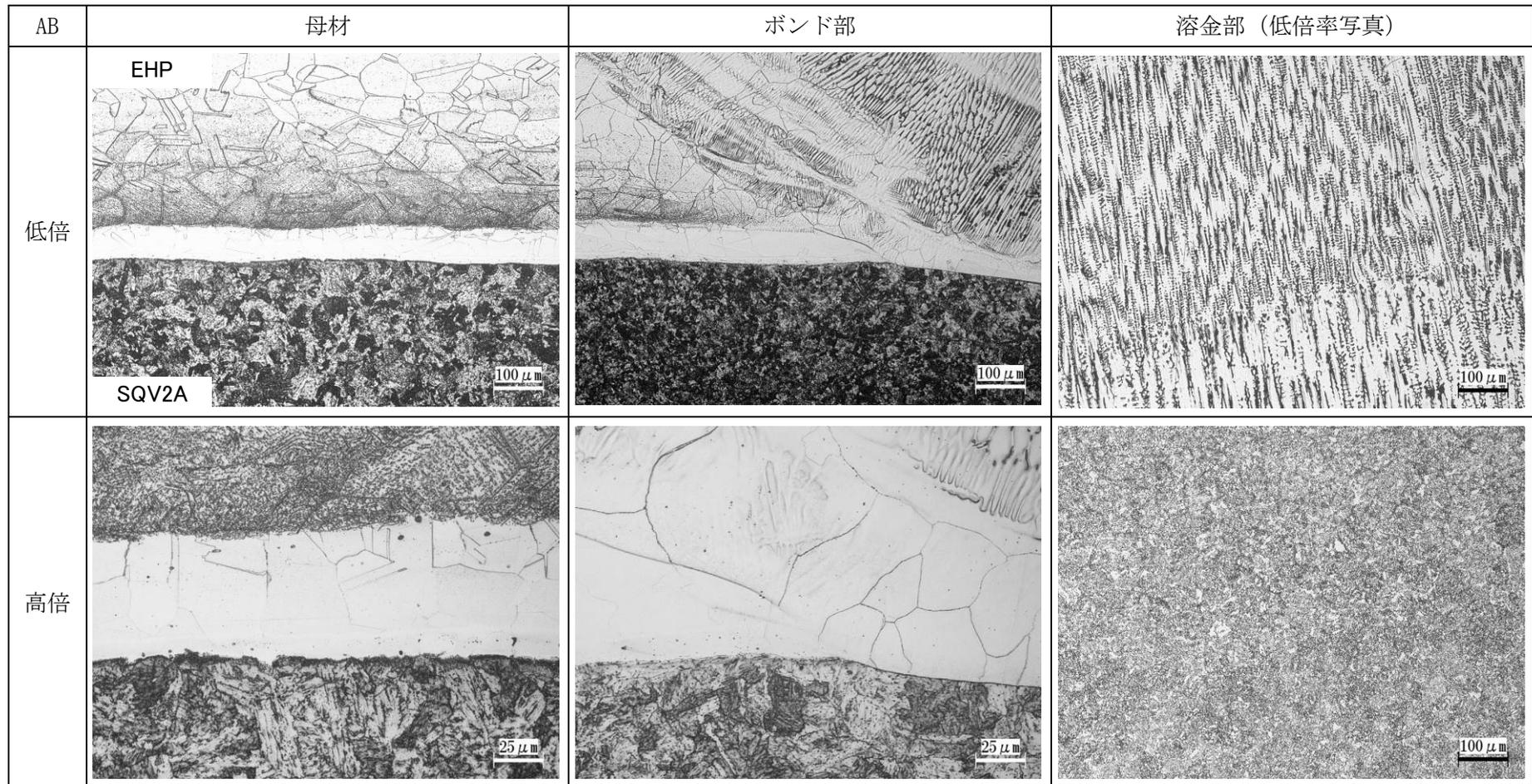


写真 3.1-52 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターンBのステップ冷却処理後の断面マイクロ組織

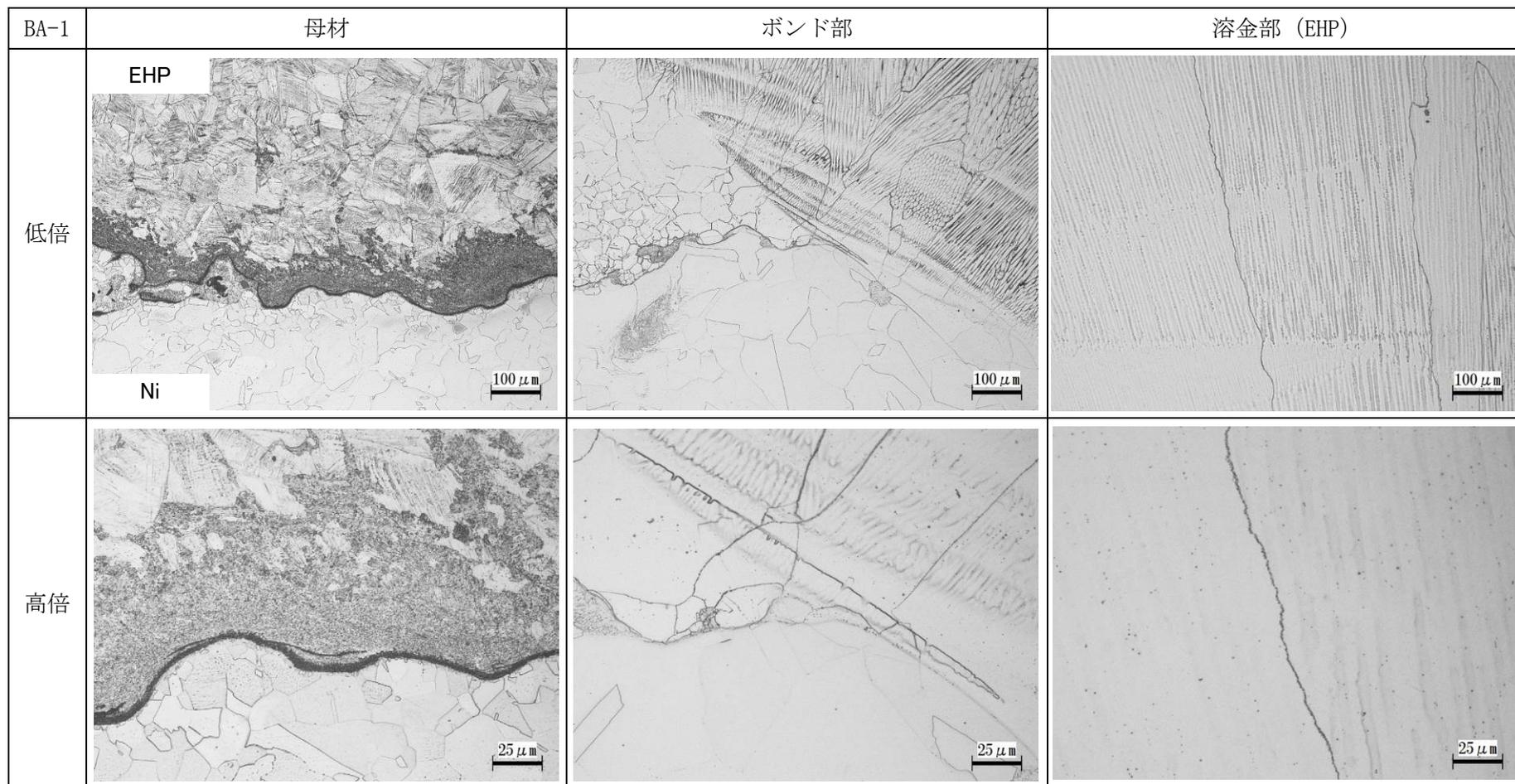


写真 3.1-53(a) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン A のステップ冷却処理後の断面マイクロ組織 (EHP/Ni 界面)

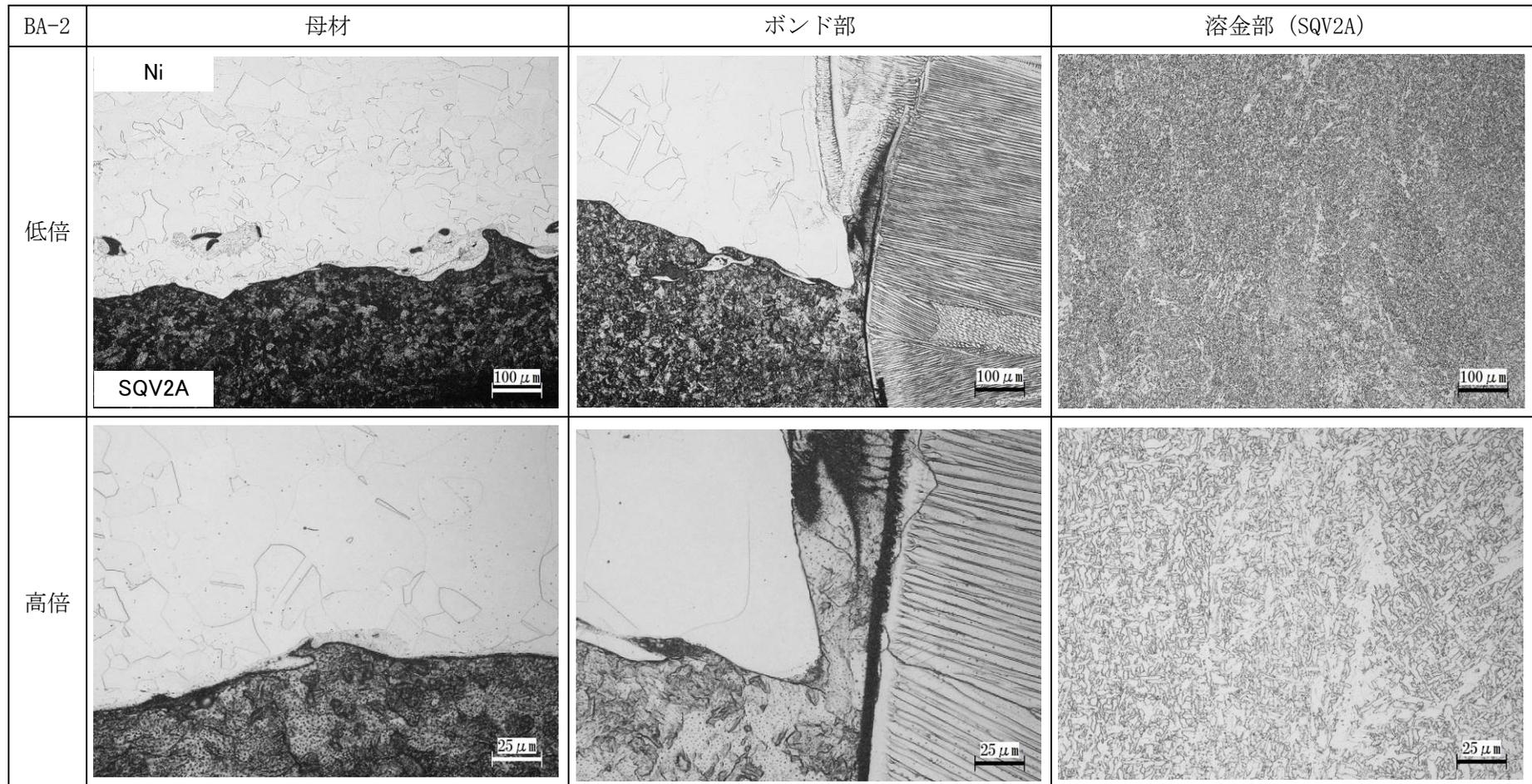


写真 3.1-53(b) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン A のステップ冷却処理後の断面マイクロ組織 (Ni/SQV2A 界面)

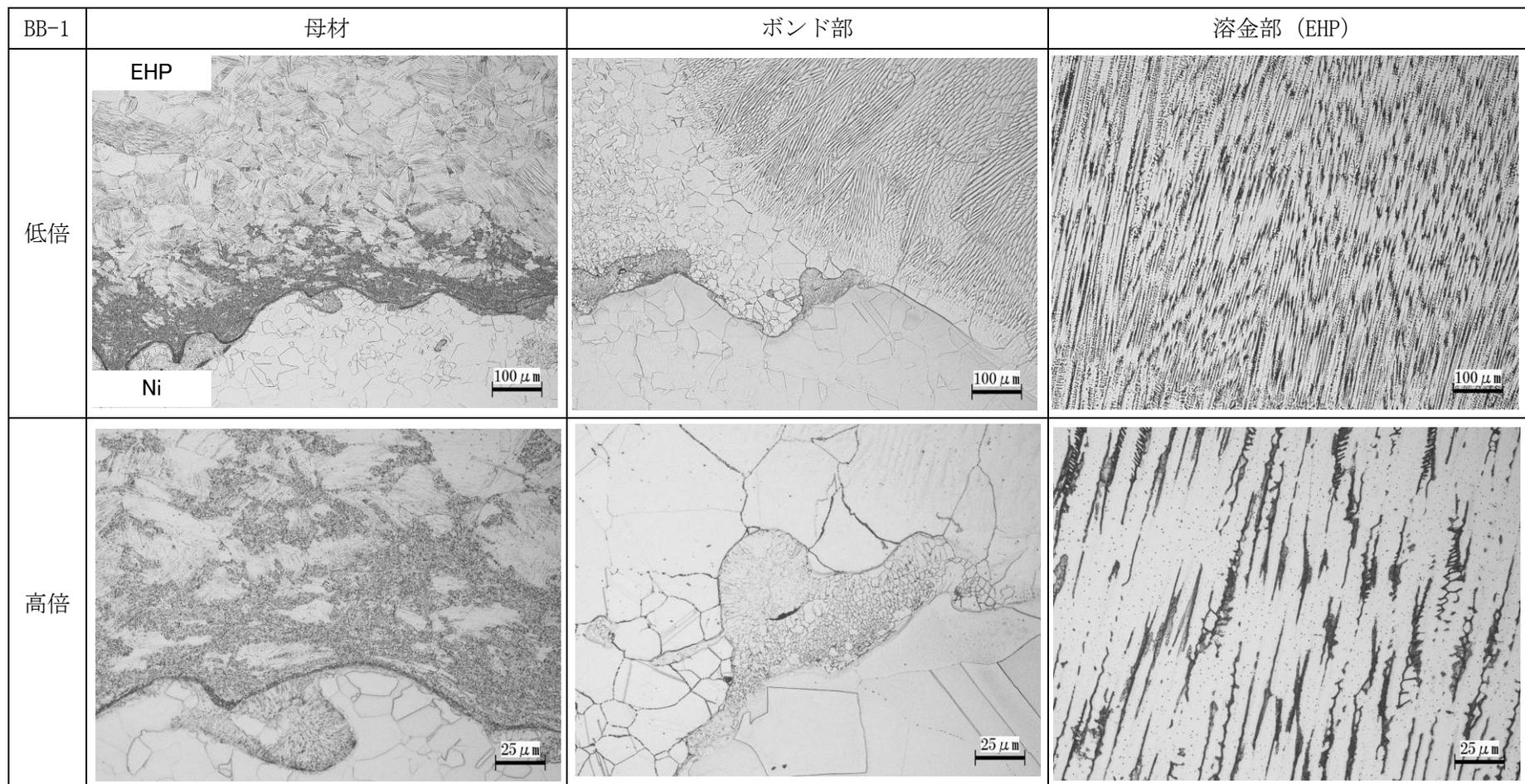


写真 3.1-54(a) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン B のステップ冷却処理後の断面マイクロ組織 (EHP/Ni 界面)

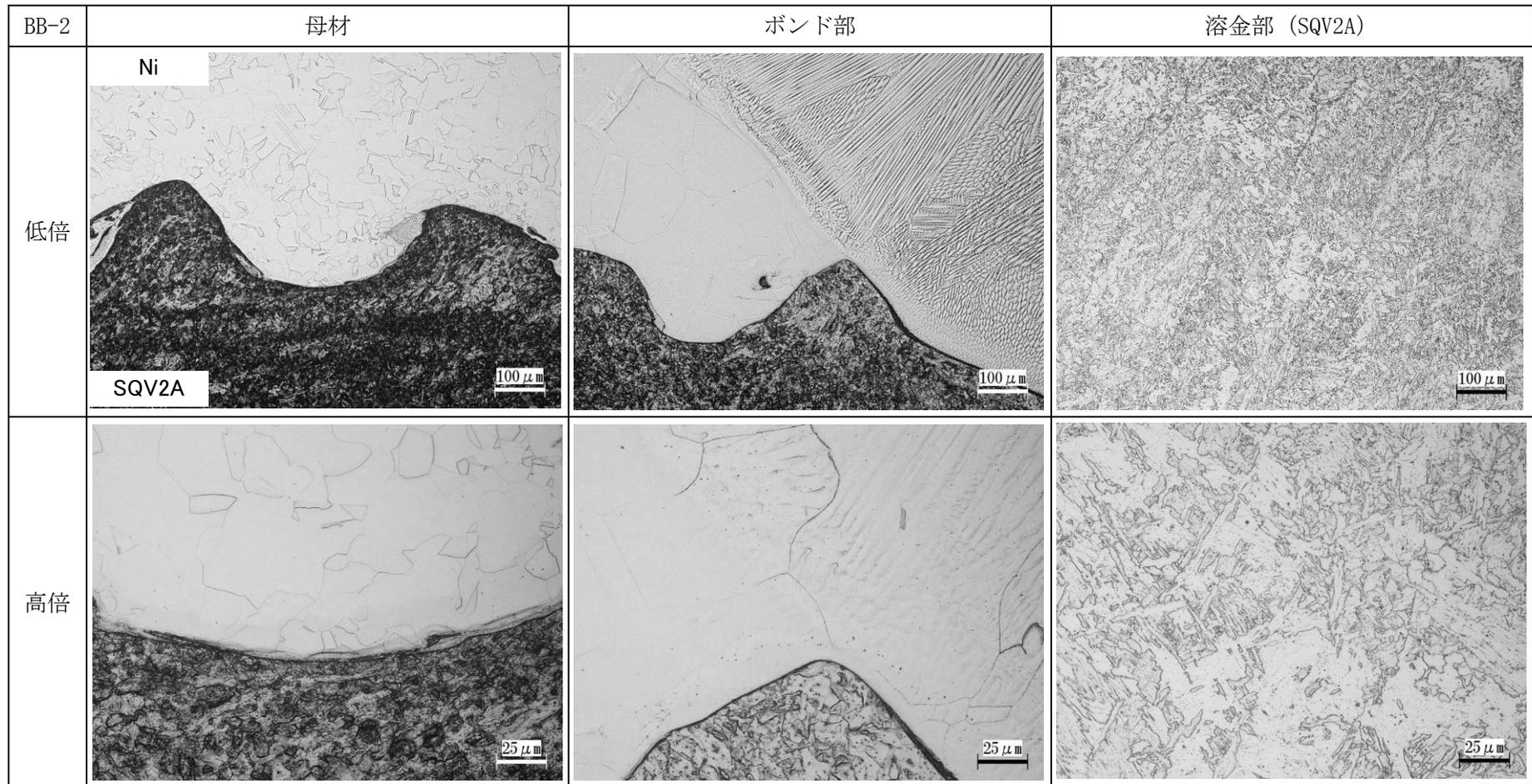


写真 3. 1-54(b) 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン B のステップ冷却処理後の断面マイクロ組織 (Ni/SQV2A 界面)

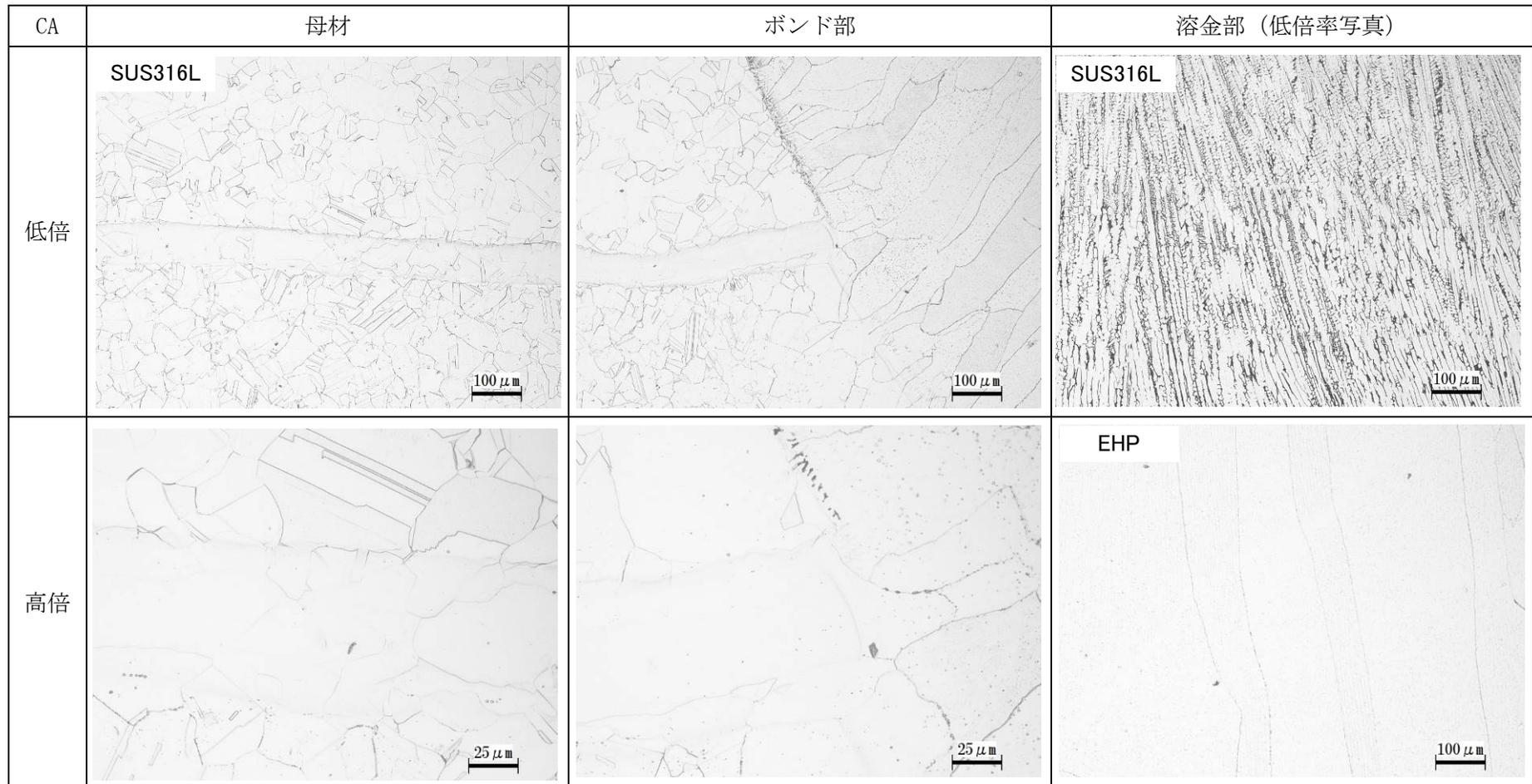


写真 3.1-55 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン A の 500℃×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

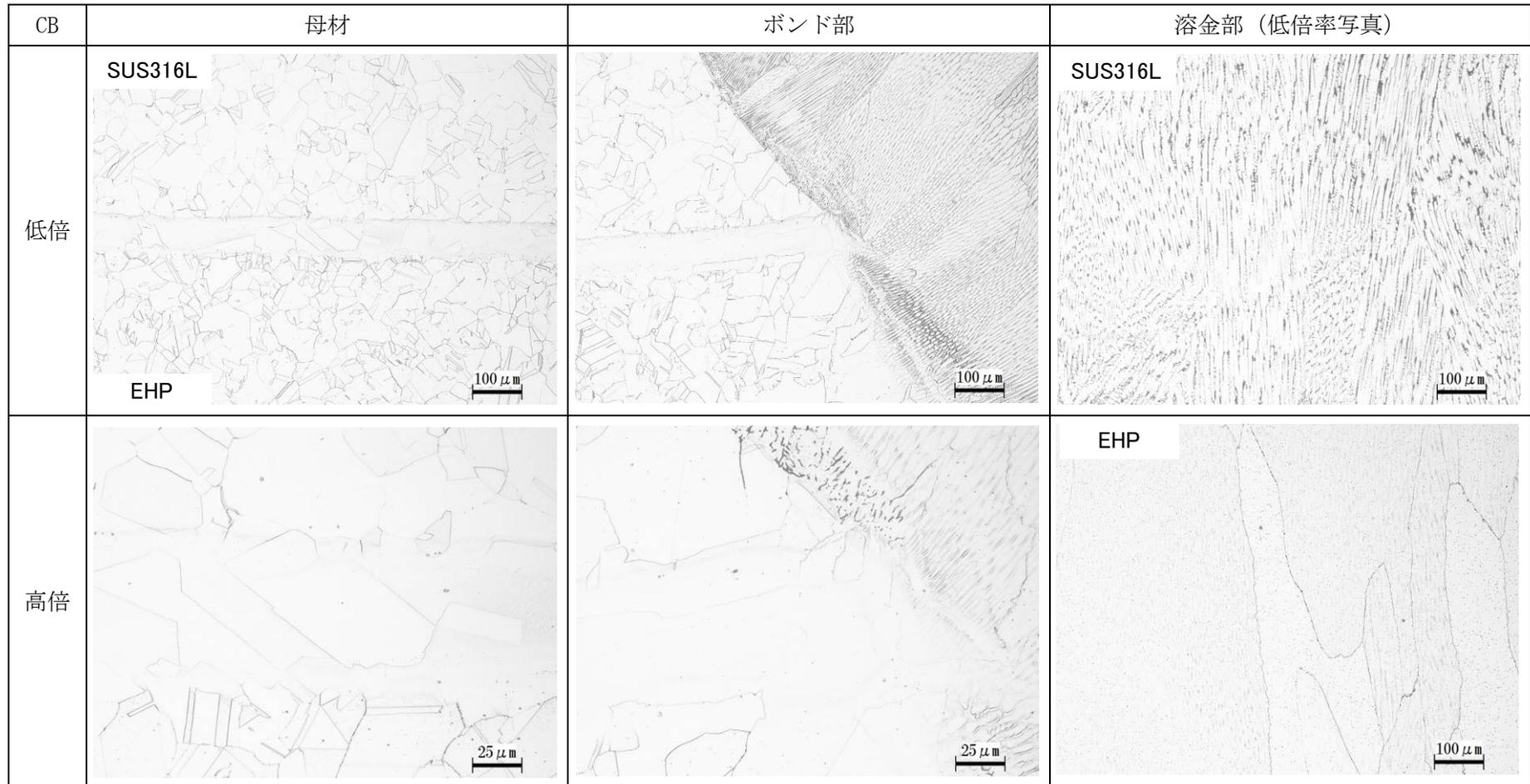


写真 3.1-56 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン B の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

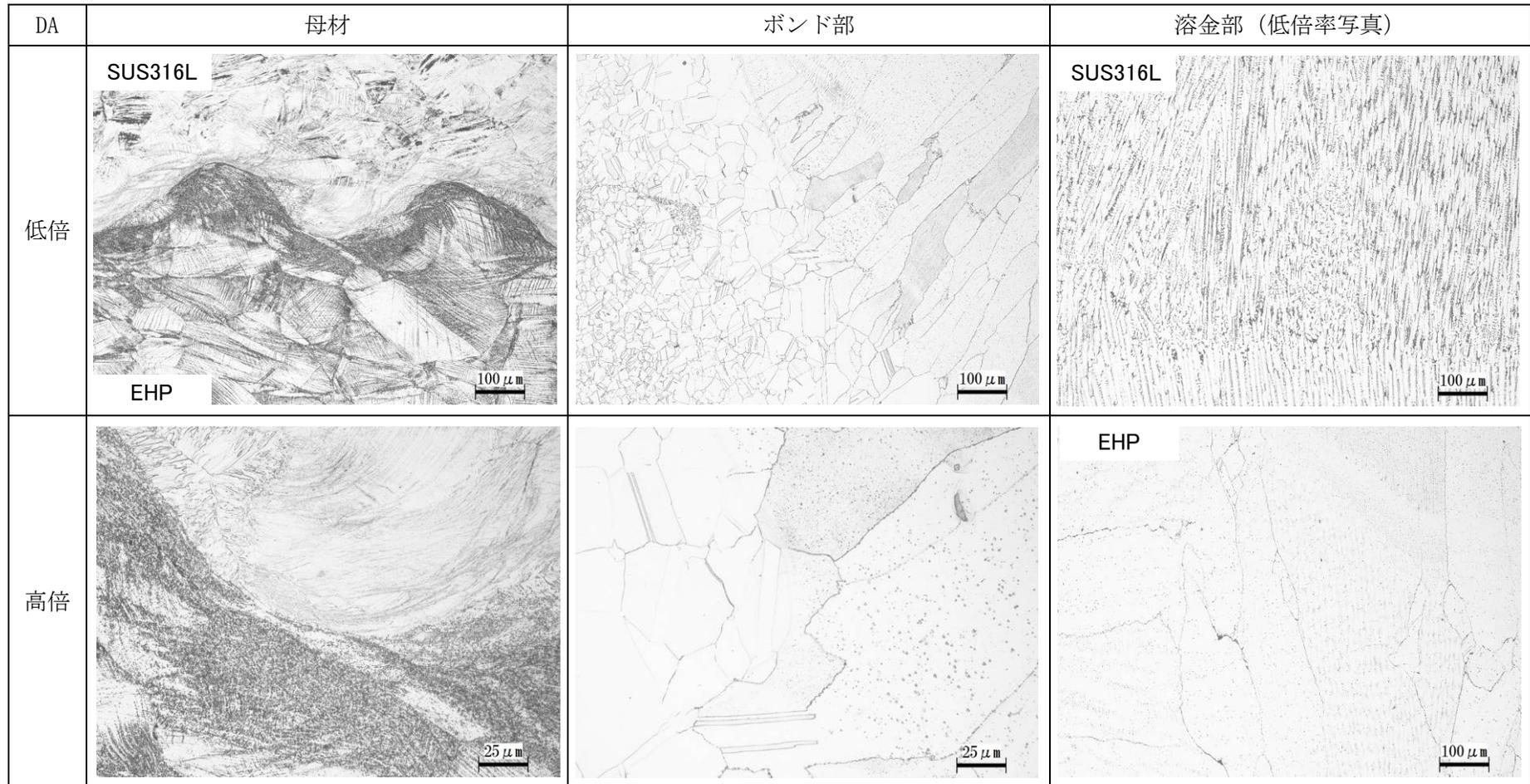


写真 3.1-57 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン A の 500℃×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

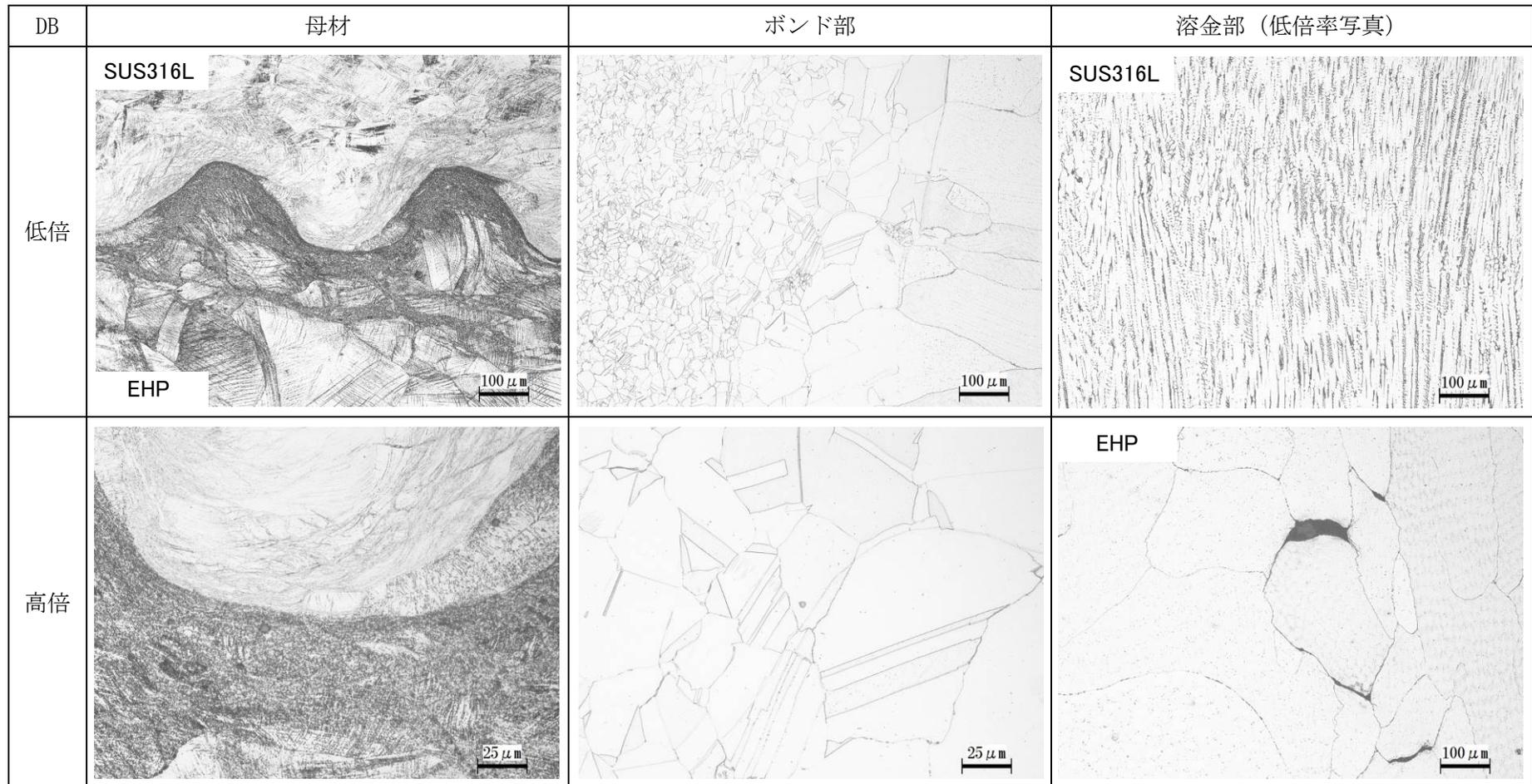


写真 3.1-58 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン B の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

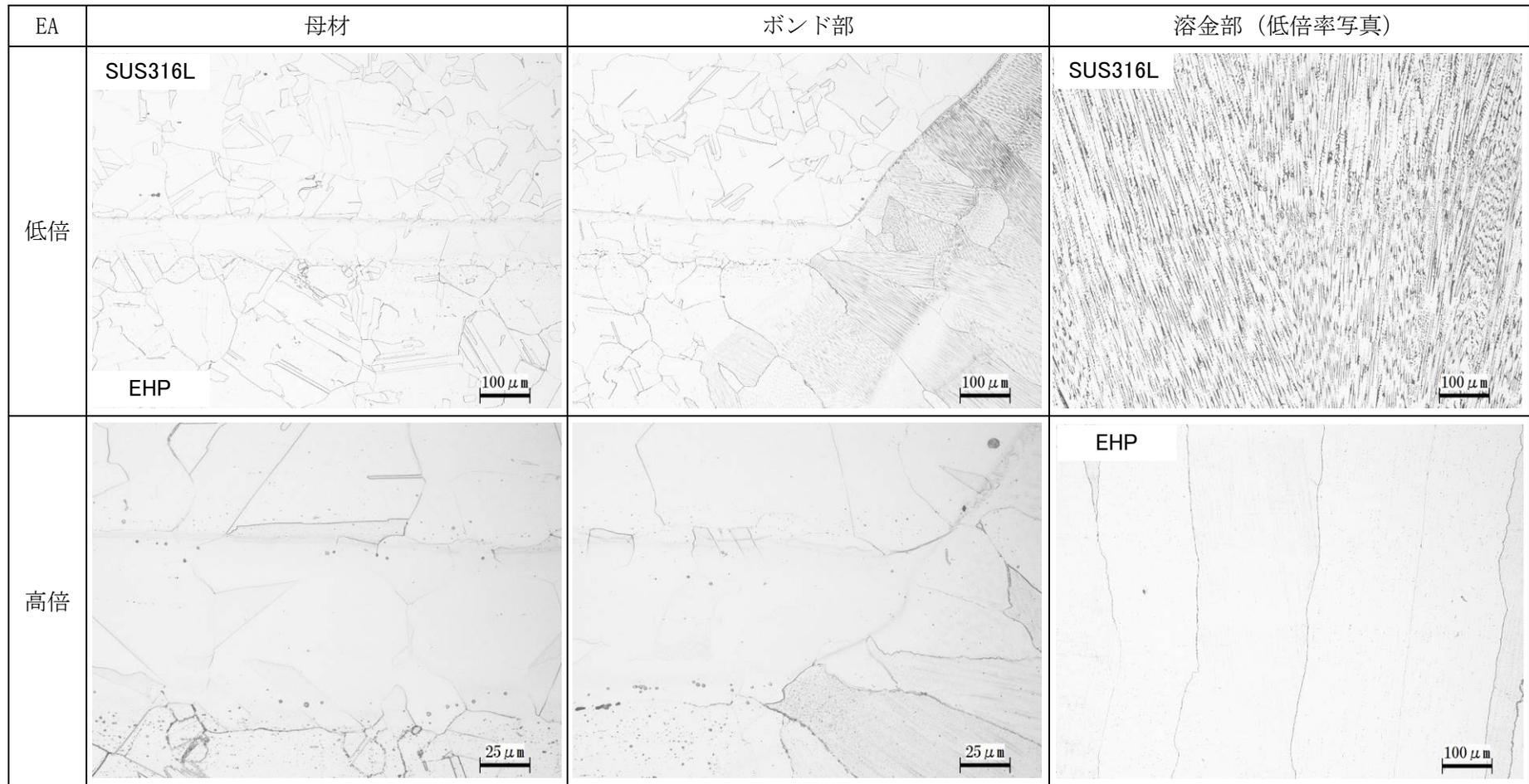


写真 3.1-59 圧延クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の 500℃×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

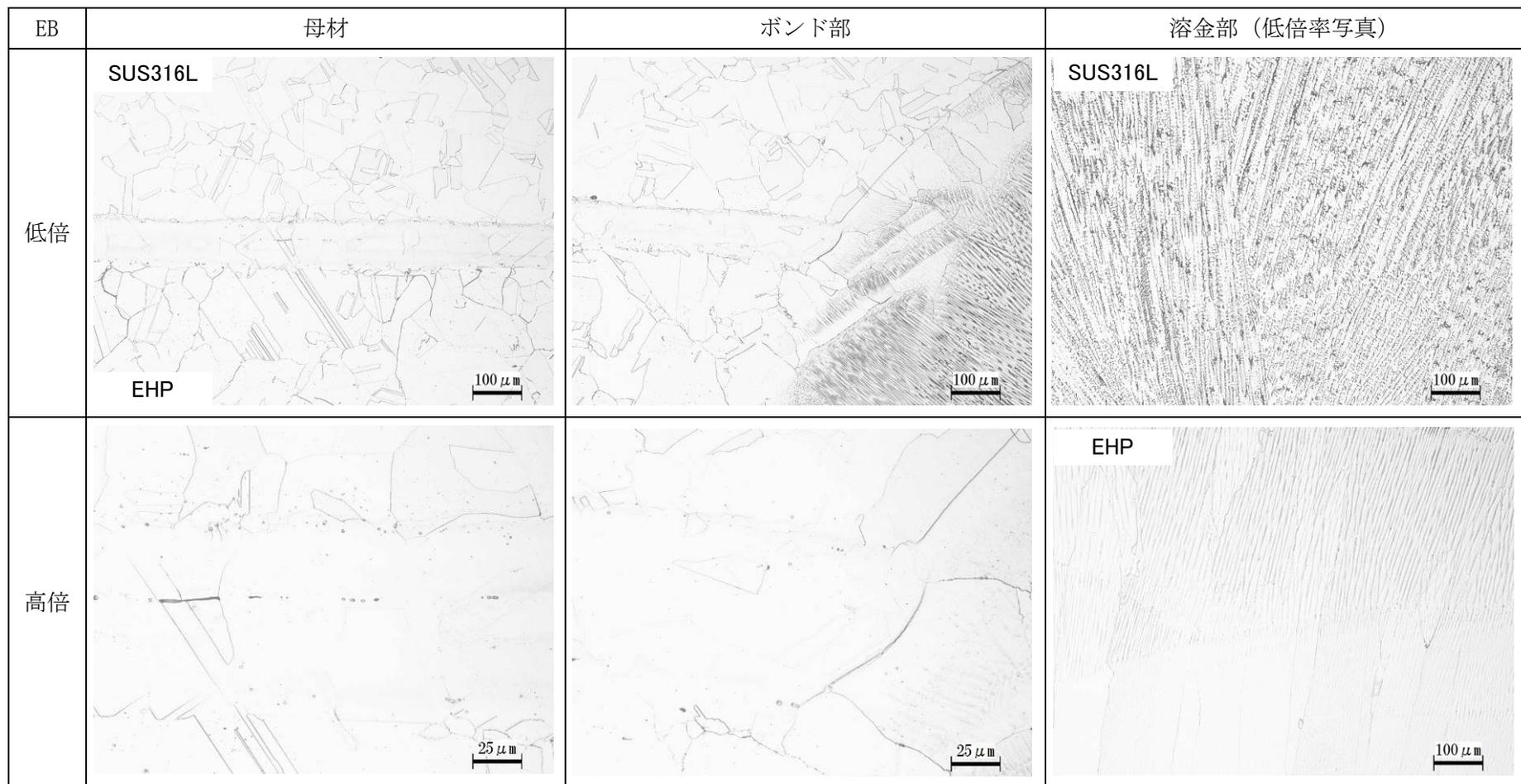


写真 3.1-60 圧延クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン B の 500℃×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

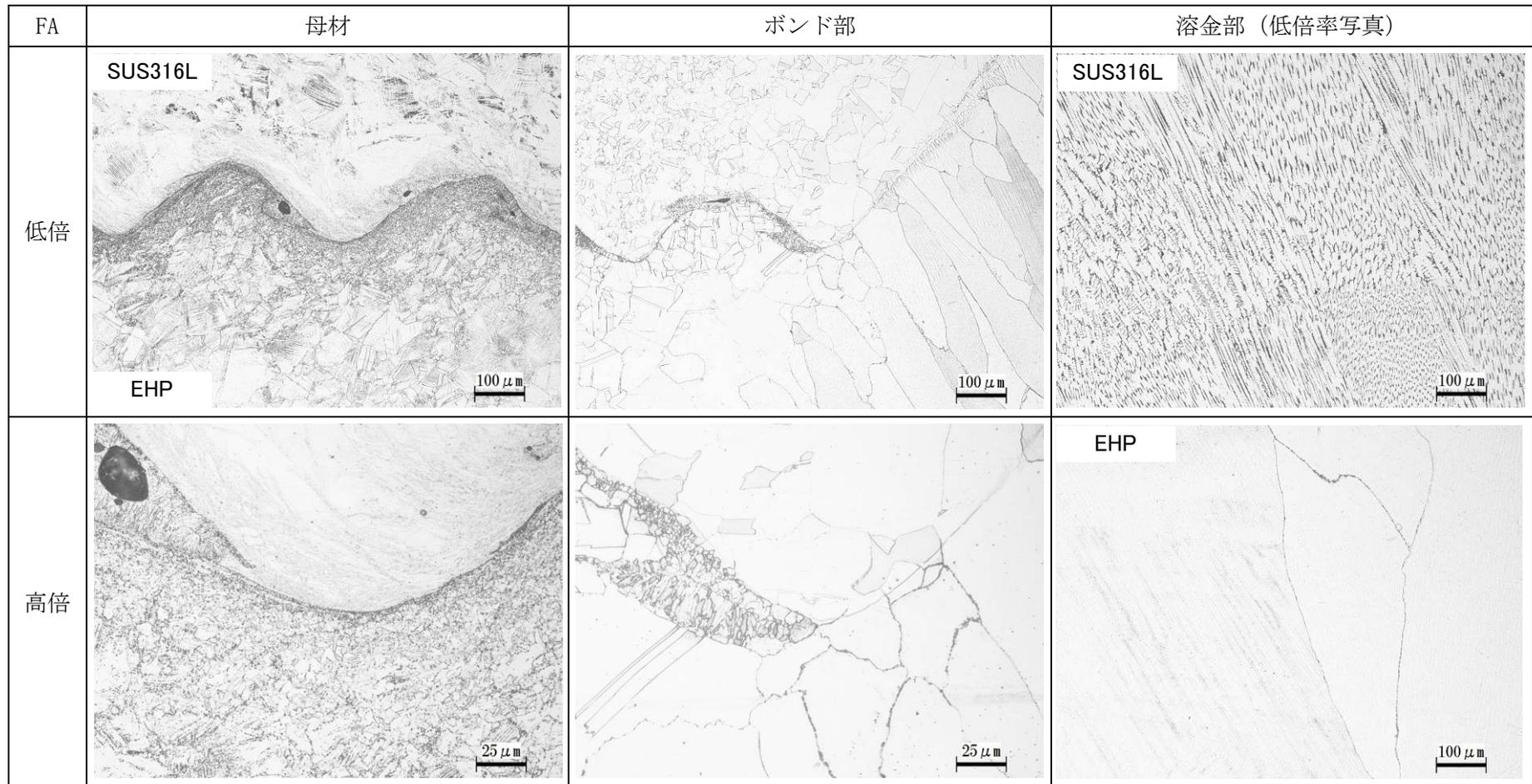


写真 3.1-61 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の 500℃×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

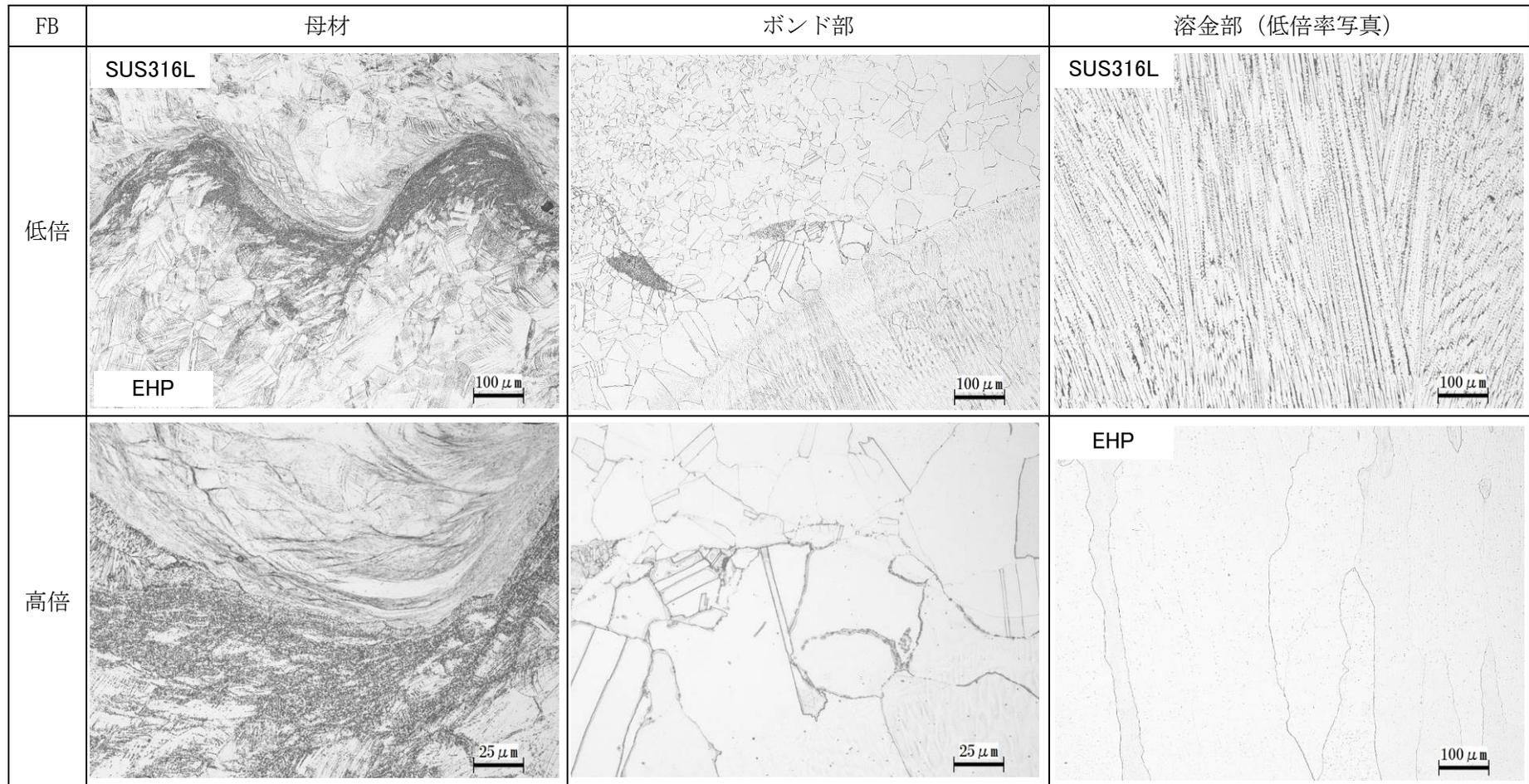


写真 3.1-62 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン B の 500°C×2,000h 熱時効処理後の断面マイクロ組織

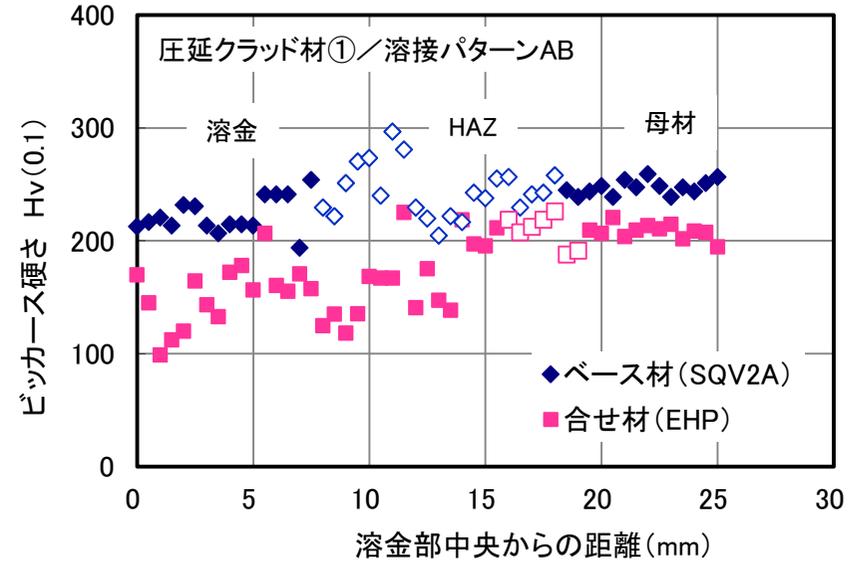
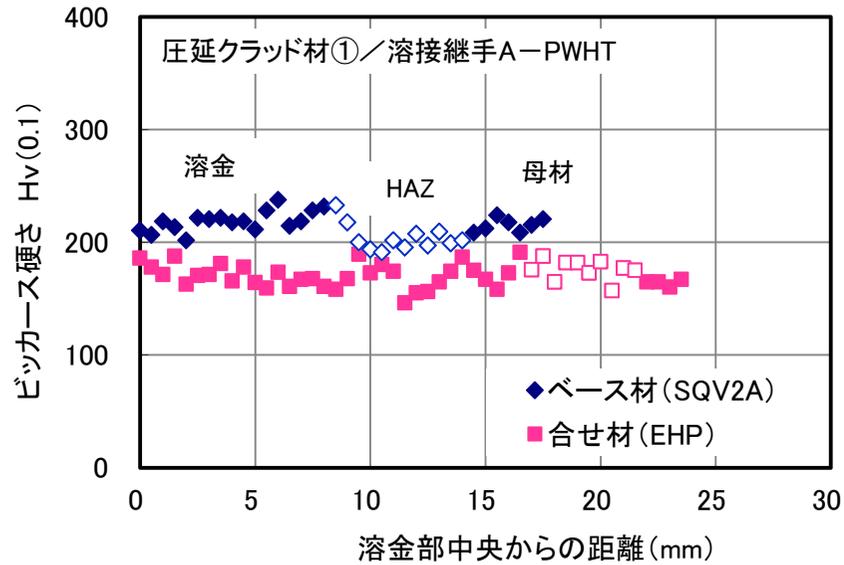
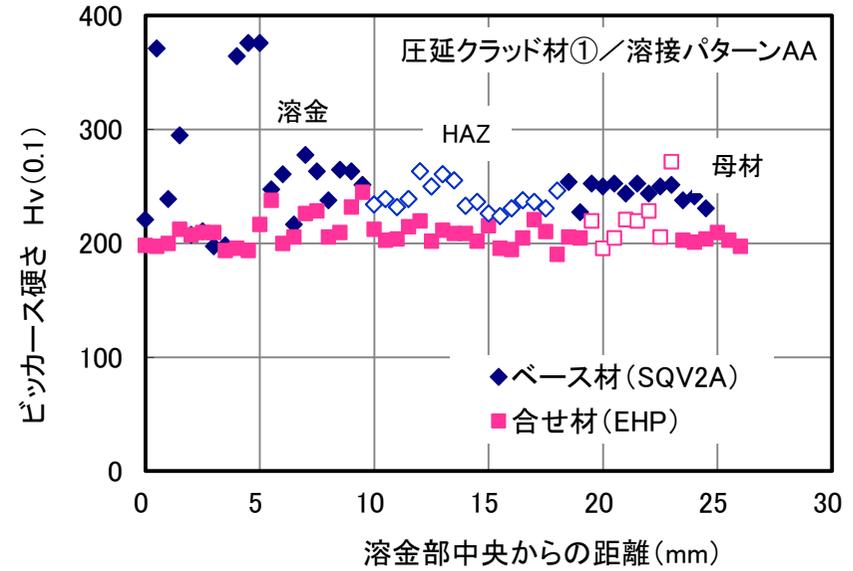
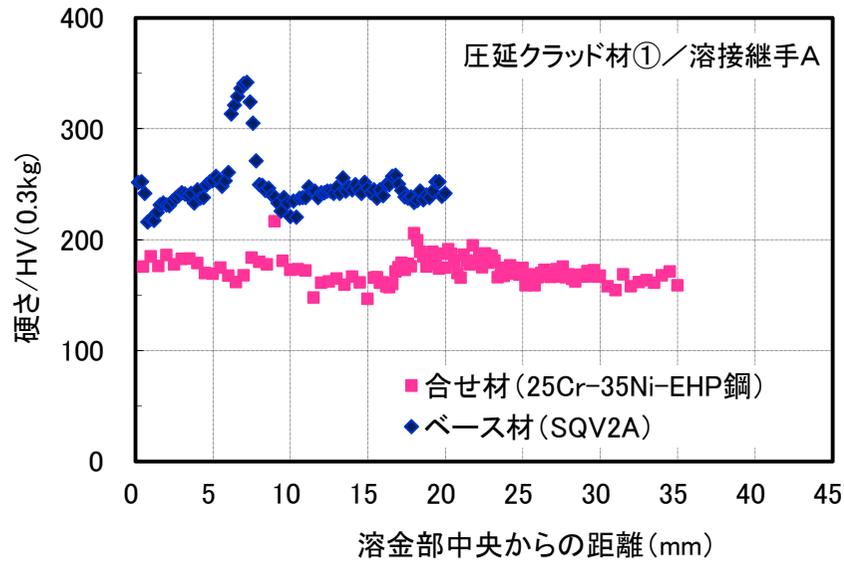


図 3.1-53 圧延クラッド材①(板組「EHP/SQV2A」)/溶接継手Aの硬さ分布

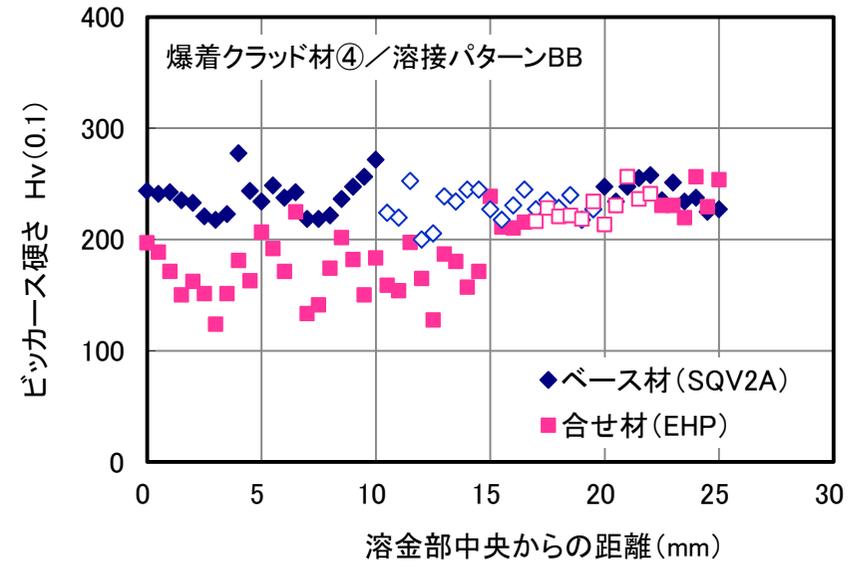
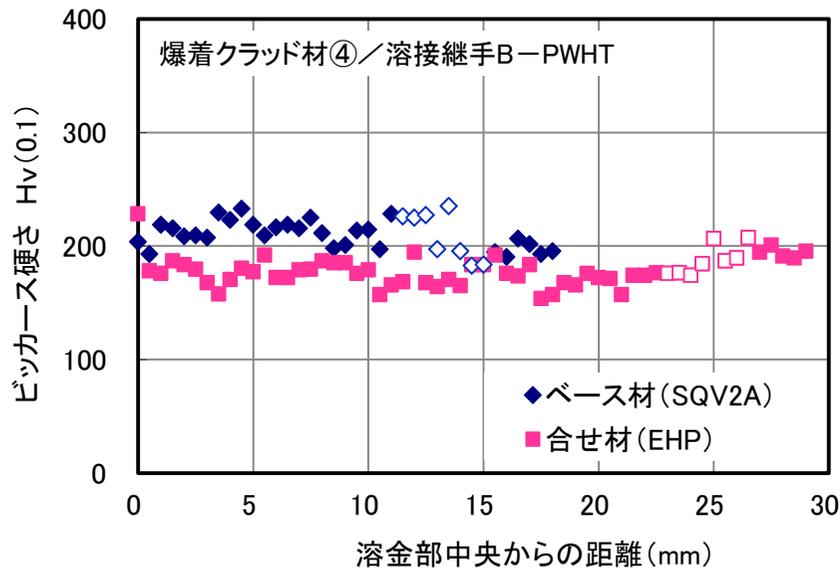
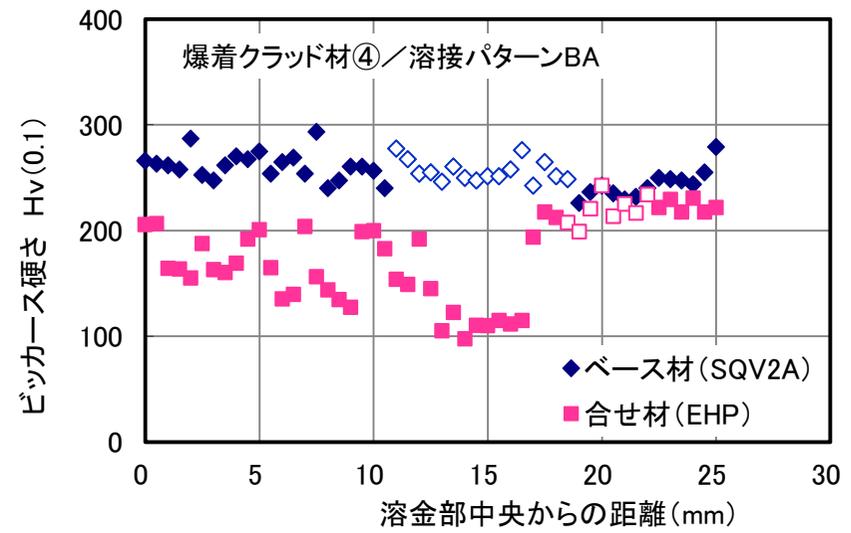
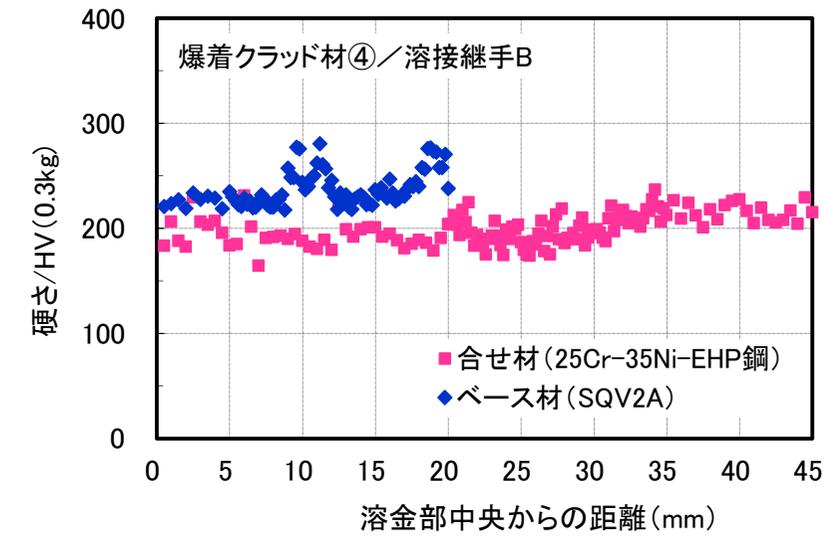


図 3.1-54 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手Bの硬さ分布

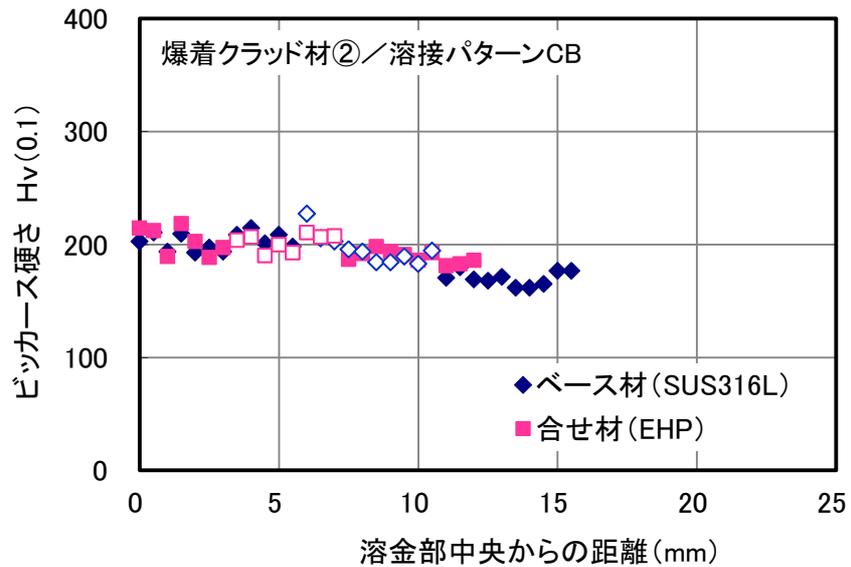
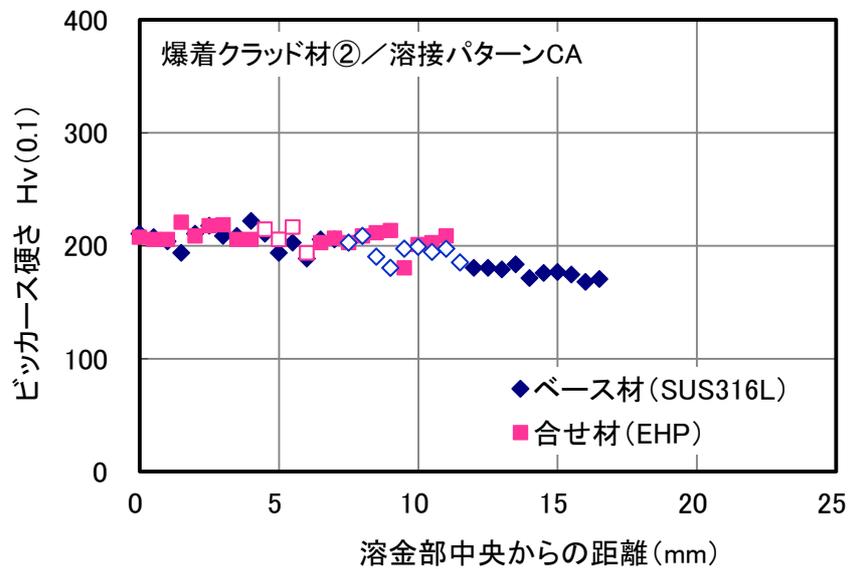
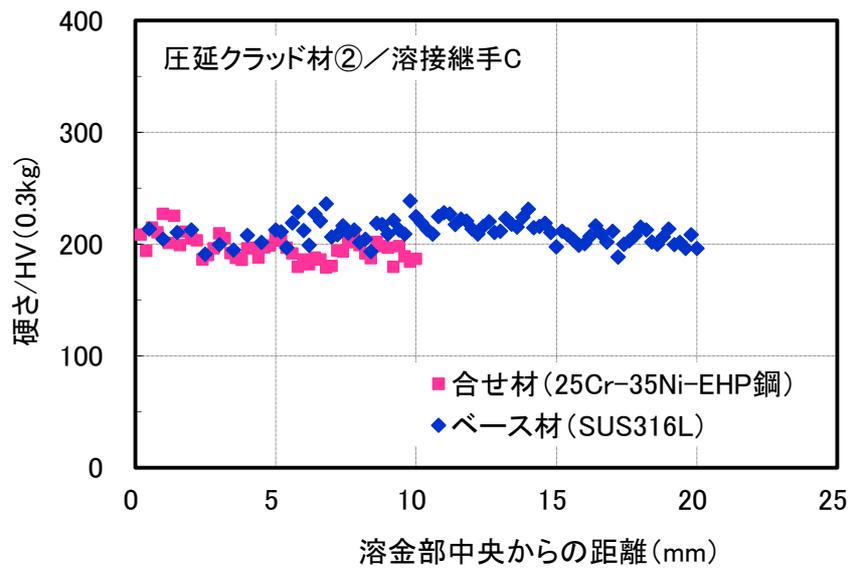


図 3.1-55 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 C の硬さ分布

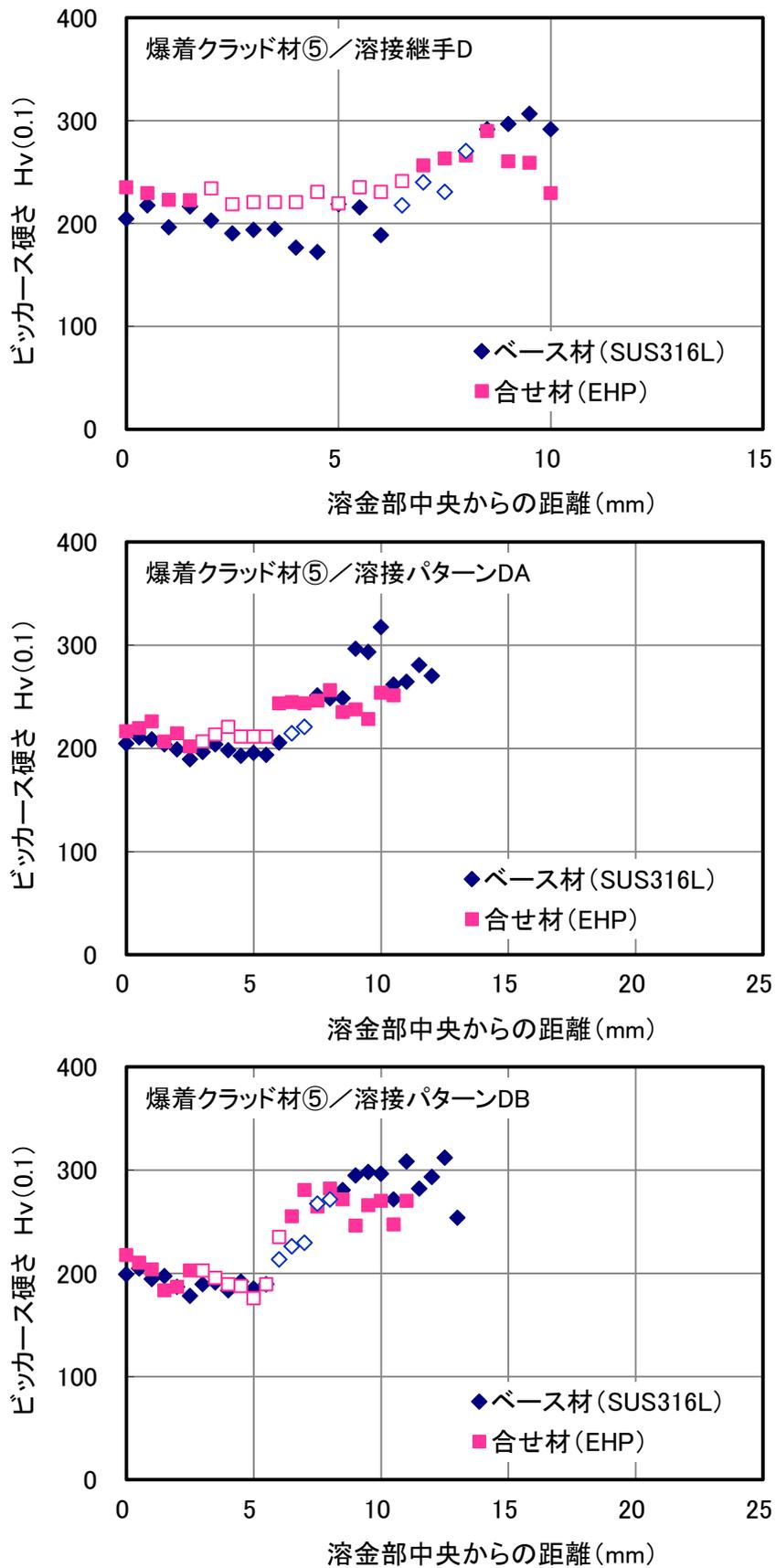


図 3.1-56 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手Dの硬さ分布

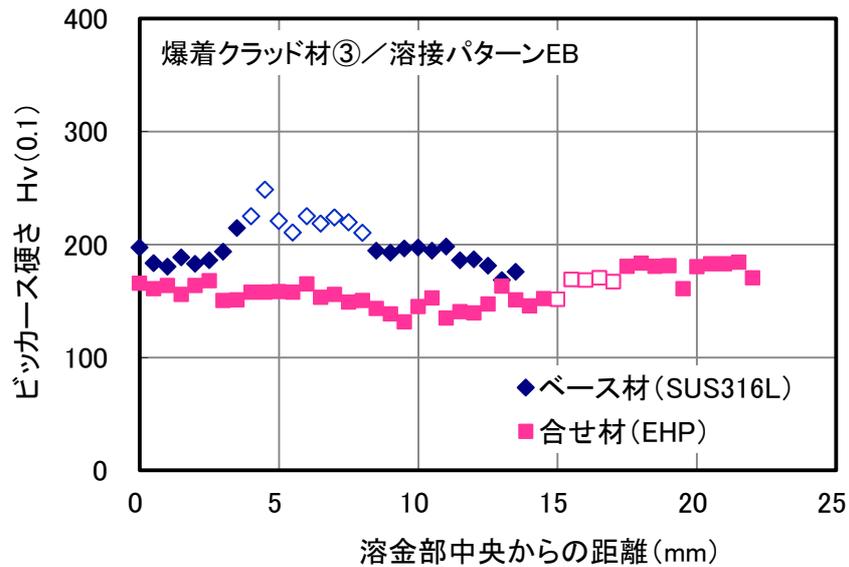
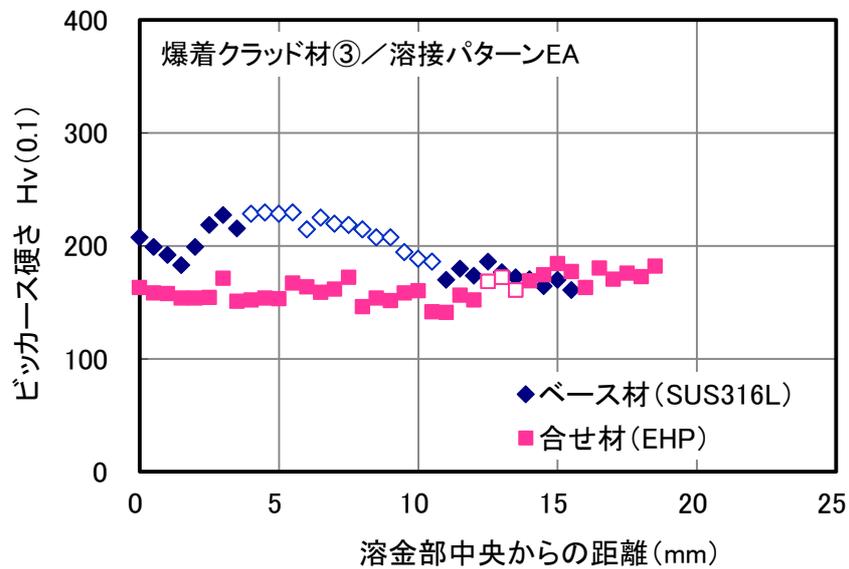
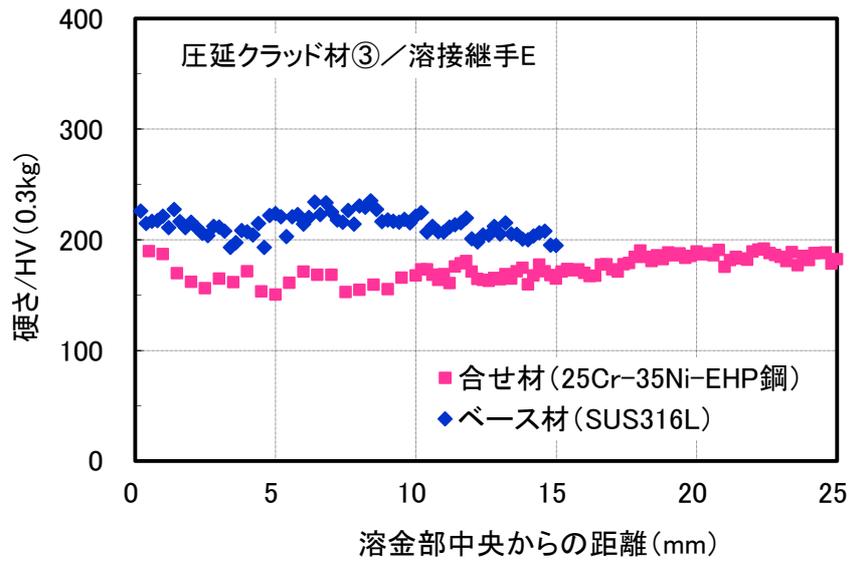


図 3.1-57 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) /溶接継手 E の硬さ分布

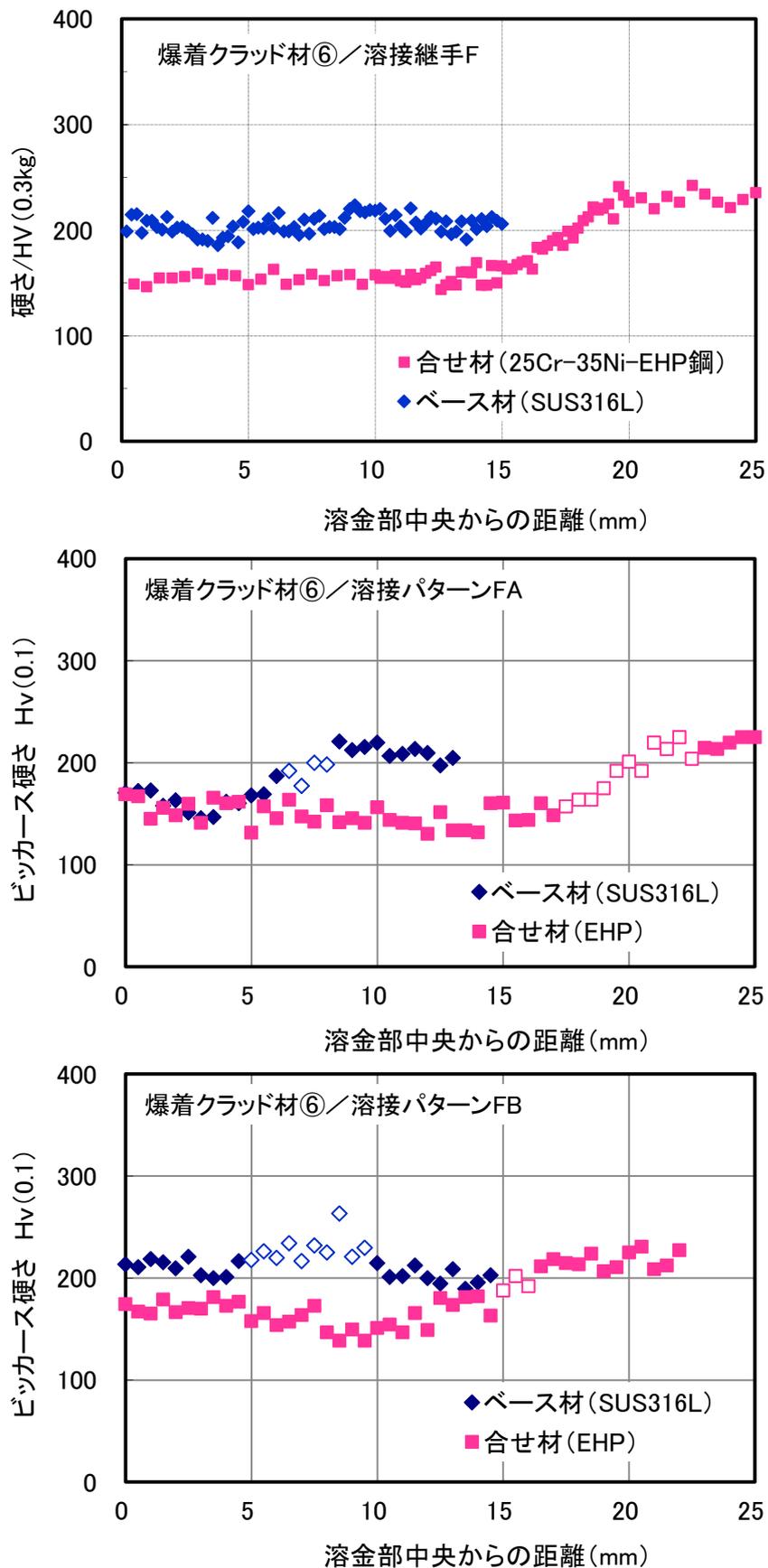


図 3.1-58 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) /溶接継手 F の硬さ分布

表 3.1-41 クラッド材の溶接継手の引張試験結果

品種／板組	処理	略号	板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	破断 位置
圧延クラッド材① EHP/SQV2A	溶接まま	A1	34.95	650	?	溶金部
		A2	35.02	639	?	〃
	ステップ冷却	AA1	37.76	656	35.8	溶金部
		AA2	37.95	657	39.6	〃
爆着クラッド材④ EHP/Ni/SQV2A	溶接まま	B1	35.01	621	?	溶金部
		B2	35.01	634	?	〃
	ステップ冷却	BA1	37.96	640	38.2	母材
		BA2	37.95	644	41.9	〃
圧延クラッド材② EHP/SUS316L	溶接まま	C1	31.89	553	48.8	母材
		C2	31.67	544	47.3	〃
	500℃× 2,000h 熱時効 処理	CA1	31.94	616	38.5	溶金部
爆着クラッド材⑤ EHP/SUS316L	溶接まま	D1	29.26	630	25.7	溶金部
		D2	28.92	607		R 部
	500℃× 2,000h 熱時効 処理	DA1	28.51	699	20.3	溶金部
圧延クラッド材③ EHP/SUS316L/EHP	溶接まま	E1	39.92	547	53	母材
		E2	39.91	548	59	〃
	500℃× 2,000h 熱時効 処理	EA1	39.70	582	32.5	母材
爆着クラッド材⑥ EHP/SUS316L/EHP	溶接まま	F1	37.20	584	35	溶金部
		F2	37.43	582	40	〃
	500℃× 2,000h 熱時効 処理	FA1	37.95	644	41.9	母材

クラッド材①、③、④、⑥： JIS Z 3121 1A 号試験片

クラッド材②、⑤： JIS Z 3121 3A 号試験片

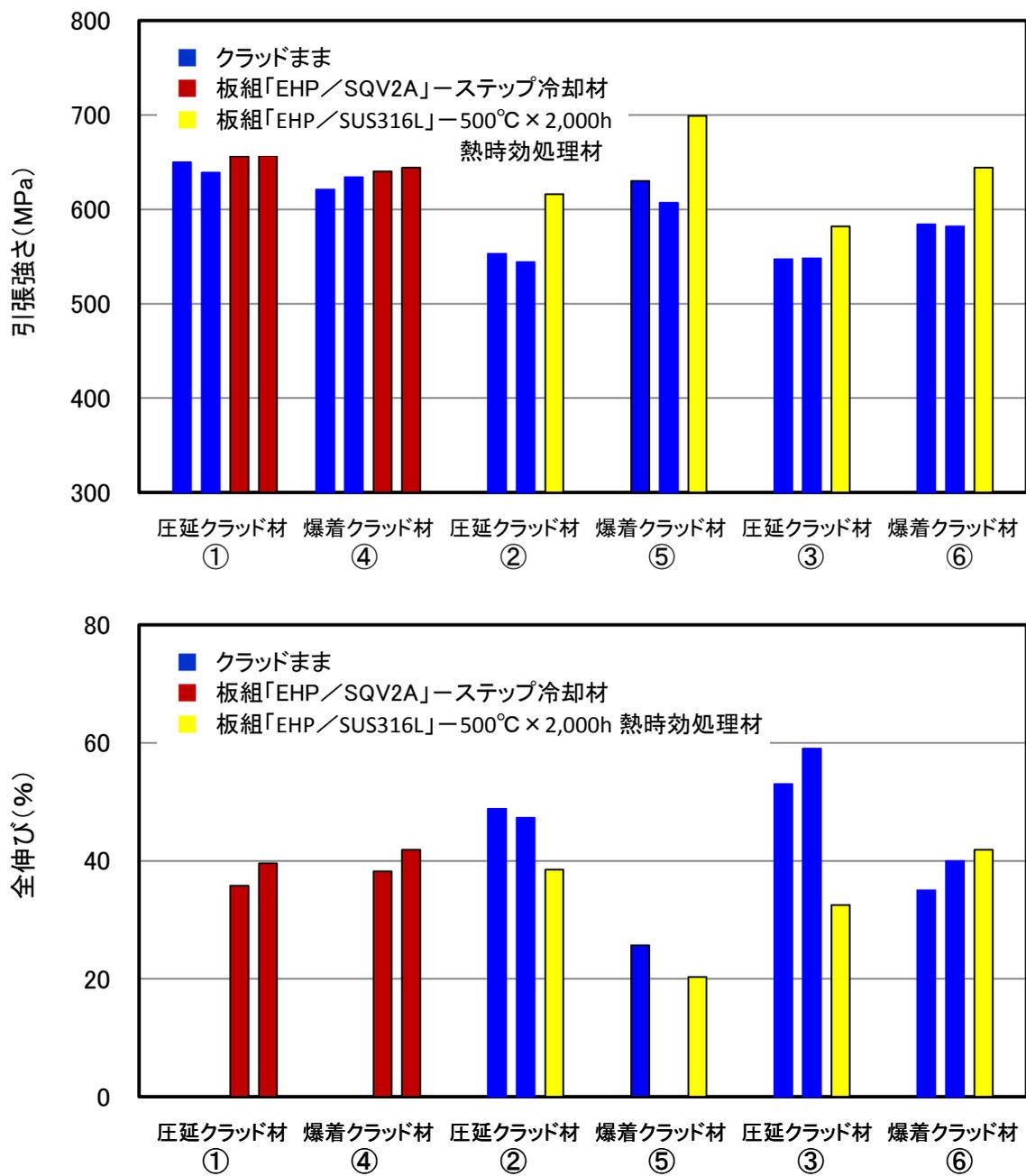


図 3.1-59 クラッド材の溶接継手の長時間熱処理後の引張特性のまとめ

		クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」)	
		略号 : AA1	略号 : AA2
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-63 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン A のステップ冷却材の引張試験後の試験片外観写真

		クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」)	
		略号 : BA1	略号 : BA2
全景			
破断部 拡大			

写真 3.1-64 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) の溶接パターン A のステップ冷却材の引張試験後の試験片外観写真

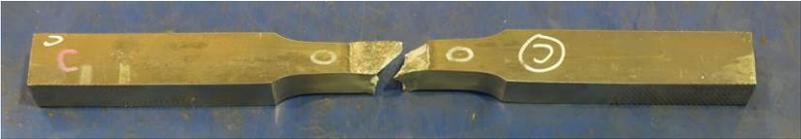
	クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」)
	略号 : CA1
全景	
破断部 拡大	

写真 3.1-65 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h 熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真

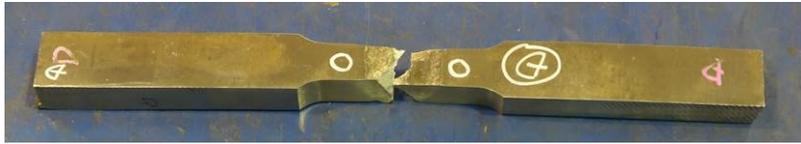
	クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」)
	略号 : DA1
全景	
破断部 拡大	

写真 3.1-66 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) の溶接パターン A の 500°C×2,000h
熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真

	クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」)
	略号 : EA1
全景	
破断部 拡大	

写真 3.1-67 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の
500℃×2,000h 熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真

	クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」)
	略号 : FA1
全景	
破断部 拡大	

写真 3.1-68 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) の溶接パターン A の
500°C×2,000h 熱時効処理材の引張試験後の試験片外観写真

表 3.1-42 クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材の曲げ試験結果

品種／板組	略号	処理	位置	板厚 (mm)		結果
クラッド材① EHP／SQV2A	A	PWHT	側曲げ	15	1	割れ発生
					2	〃
	AA	PWHT- ステップ冷却	〃	〃	1	割れなし
					2	〃
クラッド材④ EHP／SQV2A	B	PWHT	側曲げ	15	1	割れ発生
					2	〃
	BA	PWHT- ステップ冷却	〃	〃	1	割れなし
					2	割れ発生
クラッド材② EHP／SUS316L	C	溶接まま	側曲げ	15	1	割れなし
					2	〃
	CA	500℃×2,000h 熱時効処理	〃	〃	1	割れなし
					2	〃
クラッド材⑤ EHP／SUS316L	D	溶接まま	側曲げ	15	1	割れなし
					2	〃
	DA	500℃×2,000h 熱時効処理	〃	〃	1	破断
					2	〃
クラッド材③ EHP／SUS316L／ EHP	E	溶接まま	側曲げ	15	1	割れなし
					2	〃
	EA	500℃×2,000h 熱時効処理	〃	〃	1	軽微な割れ
					2	〃
クラッド材⑥ EHP／SUS316L／ EHP	F	溶接まま	側曲げ	15	1	割れなし
					2	〃
	FA	500℃×2,000h 熱時効処理	〃	〃	1	軽微な割れ
					2	〃

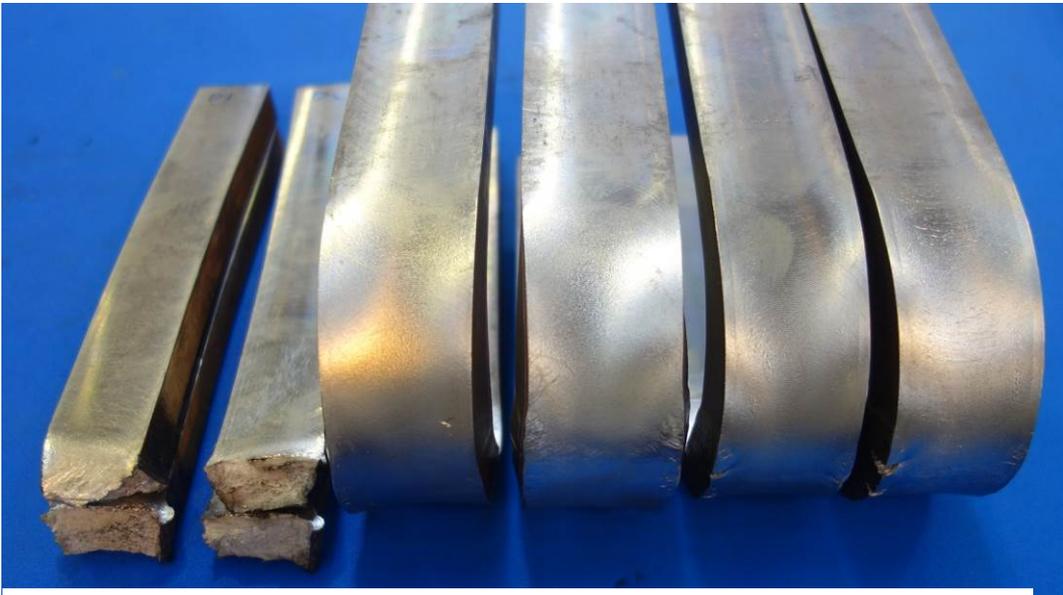
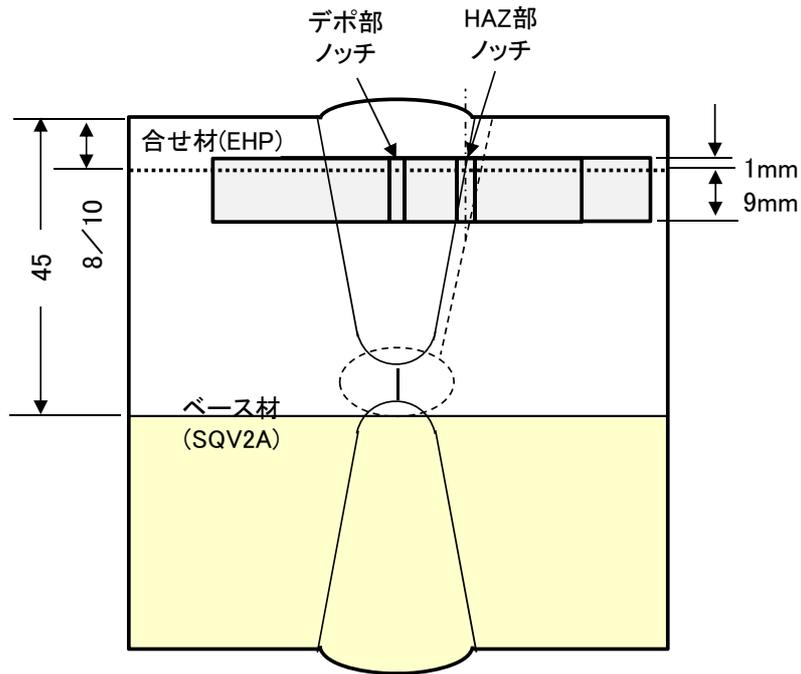
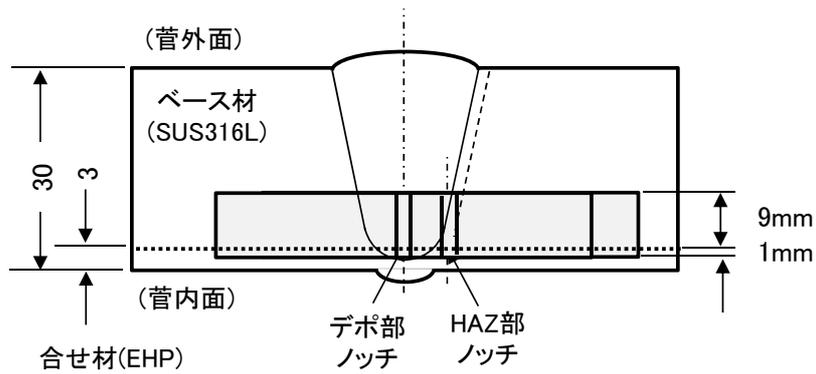
圧延クラッド材① EHP/SQV2A 略号：AA	爆着クラッド材④ EHP/SQV2A 略号：BA	圧延クラッド材② EHP/SUS316L 略号：CA
		
爆着クラッド材⑤ EHP/SUS316L 略号：DA	圧延クラッド材③ EHP/SUS316L/EHP 略号：EA	爆着クラッド材⑥ EHP/SUS316L/EHP 略号：FA
		

写真 3.1-69 クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材の曲げ試験後の試験片外観写真

(a) 板組「EHP/SQV2A」



(b) 板組「EHP/SUS316L」



(c) 板組「EHP/SUS316L/EHP」

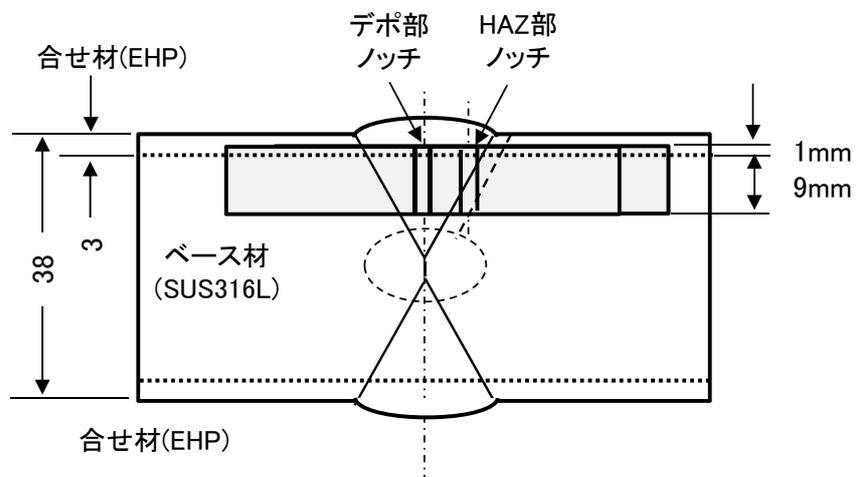


図 3.1-60 クラッド材の溶接継手からのシャルピー衝撃試験片の採取要領

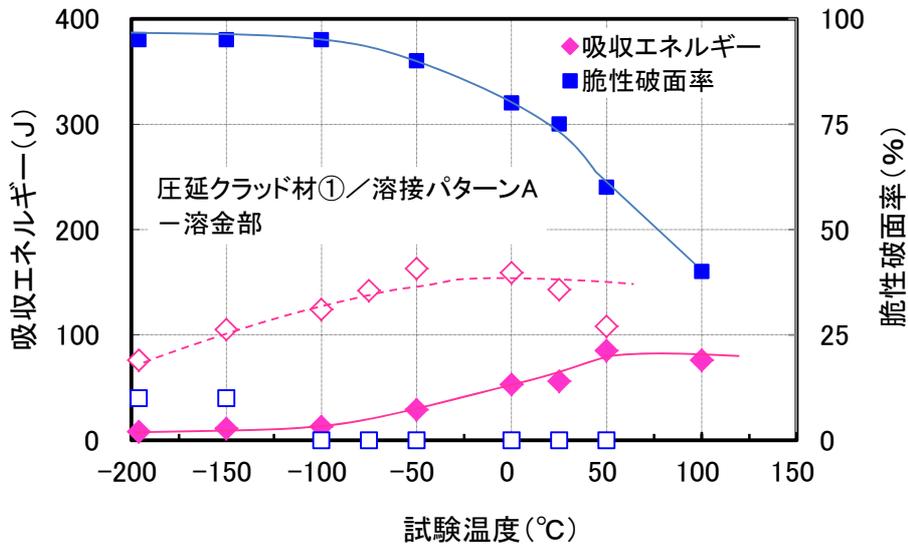
表 3.1-43(a) クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験結果-1

品種／板組	試験温度 (°C)	溶金部ノッチ			HAX ノッチ		
		吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性破面率 (%)
圧延クラッド材① EHP/SQV2A 溶接パターン A	-196	8	10	95	6	8	90
	-150	11	14	95	12	15	90
	-100	13	16	95	18	23	85
	-50	29	36	90	119	149	55
	0	53	66	80	207	259	10
	25	56	70	75	256	320	0
	50	85	106	60	170	213	0
	100	76	95	40	244	305	0
爆着クラッド材④ EHP/SQV2A 溶接パターン A	-196	7	9	95	-196	14	18
	-150	12	15	95	-150	18	23
	-100	19	24	90	-100	23	29
	-50	35	44	80	-50	61	76
	0	103	129	5	0	80	100
	25	105	131	0	25	136	170
	50	98	123	0	50	143	179
	100	138	173	0	100	244	305
圧延クラッド材② EHP/SUS316L 溶接パターン A	-196	99	124	30	70	88	45
	-150	67	84	65	91	114	15
	-100	114	143	25	87	109	15
	-50	140	175	20	115	144	10
	0	198	248	5	159	199	0
	25	192	240	0	179	224	0
	50	202	253	0	190	238	0
	100	238	298	0	175	219	0
爆着クラッド材⑤ EHP/S 溶接パターン A	-196	59	74	80	75	94	20
	-150	60	75	80	85	106	10
	-100	89	111	10	94	118	5
	-50	128	160	5	177	221	0
	0	146	183	5	151	189	0
	25	113	141	10	139	174	0
	50	127	159	0	137	171	0
	100	134	168	0	157	196	0

表 3. 1-43 (b) クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験結果-2

品種／板組	試験温度 (°C)	溶金部ノッチ			HAX ノッチ		
		吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性破面率 (%)	吸収エネルギー (J)	衝撃値 (J/cm ²)	脆性破面率 (%)
圧延クラッド材③ EHP／SUS316L／ EHP 溶接パターン A	-196	21	26	95	312	390	0
	-150	60	75	80	342	428	0
	-100	83	104	70	368	460	0
	-50	138	173	25	374	468	0
	0	179	224	0	449	561	0
	25	198	248	0	-	-	-
	50	193	241	0	-	-	-
	100	214	268	0	-	-	-
爆着クラッド材⑥ EHP／SUS316L／ EHP 溶接パターン A	-196	40	50	90	68	85	45
	-150	77	96	75	84	105	35
	-100	92	115	35	207	259	5
	-50	130	163	5	263	329	0
	0	150	188	5	207	259	5
	25	175	219	0	168	210	5
	50	147	184	5	160	200	5
	100	153	191	0	304	380	0

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

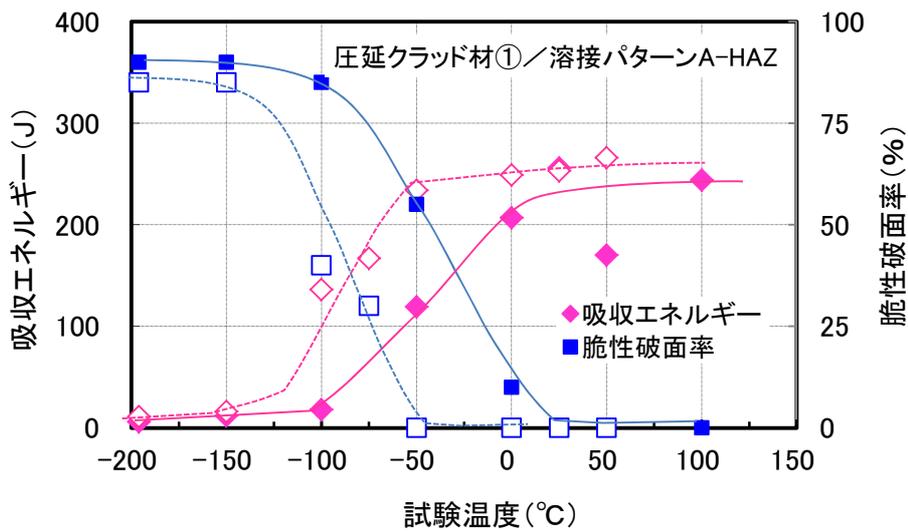
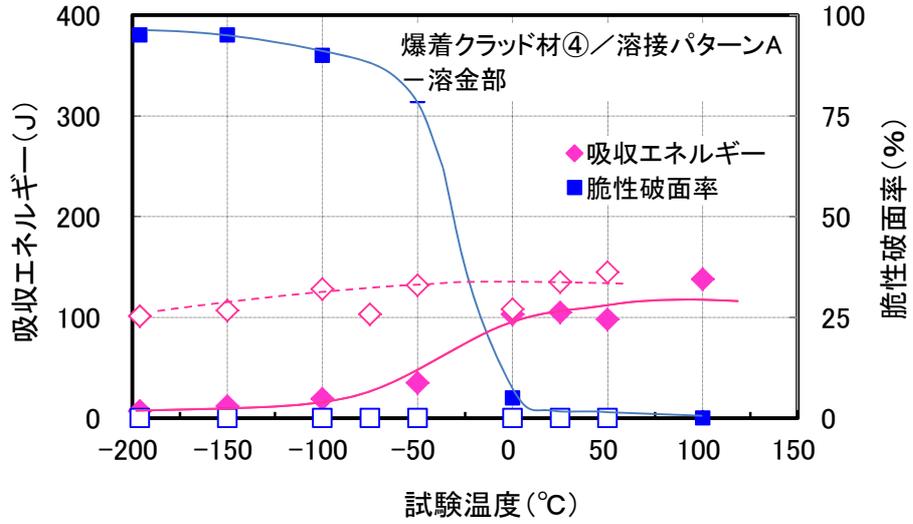


図 3.1-61 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手 A のステップ冷却材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係

Open marks : 未処理材

Solid marks : ステップ冷却材

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

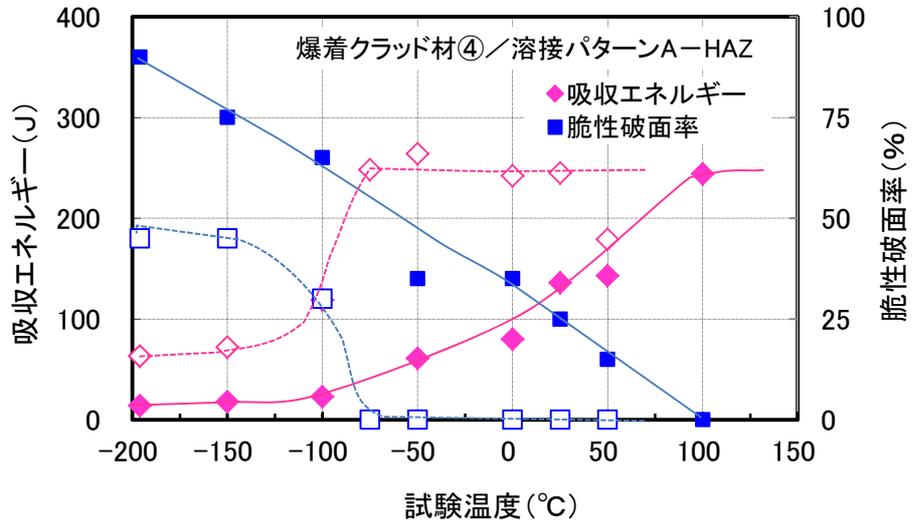
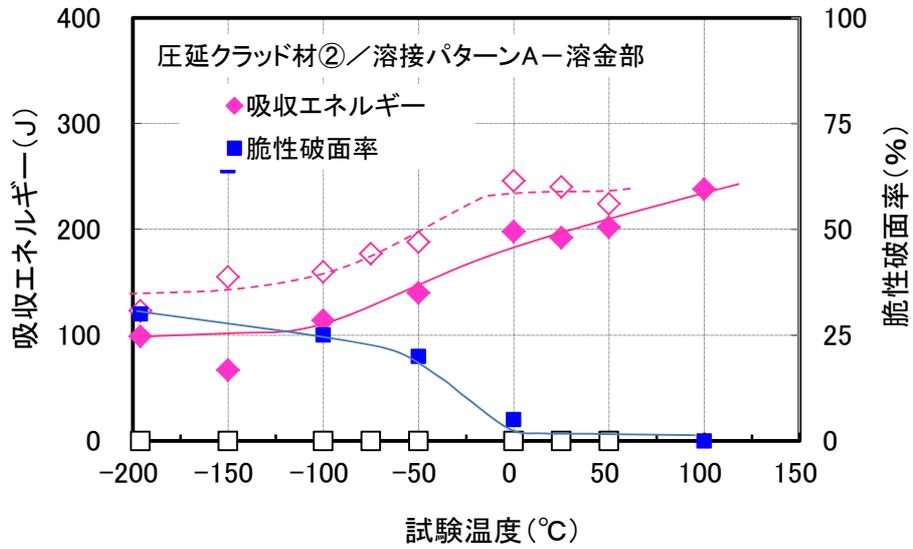


図 3.1-62 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手Bのステップ冷却材のシャルピー衝撃試験温度と吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

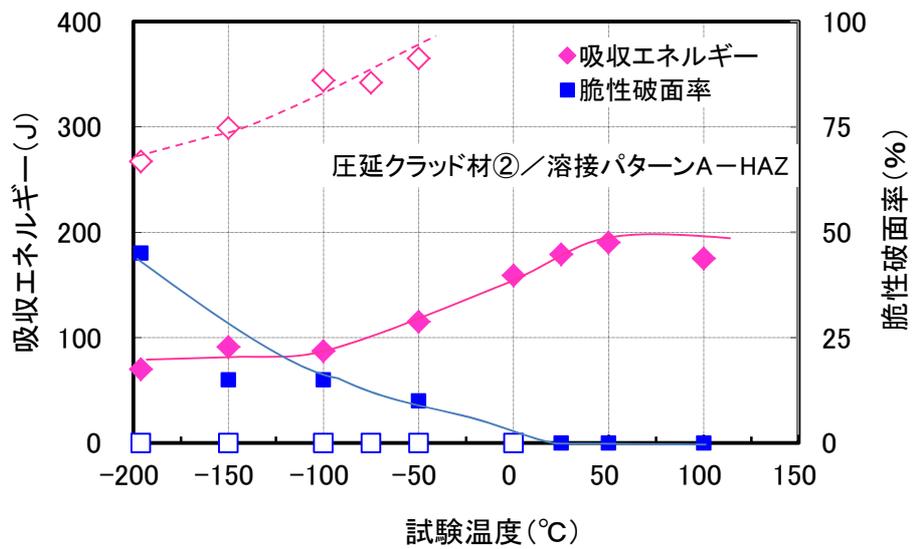
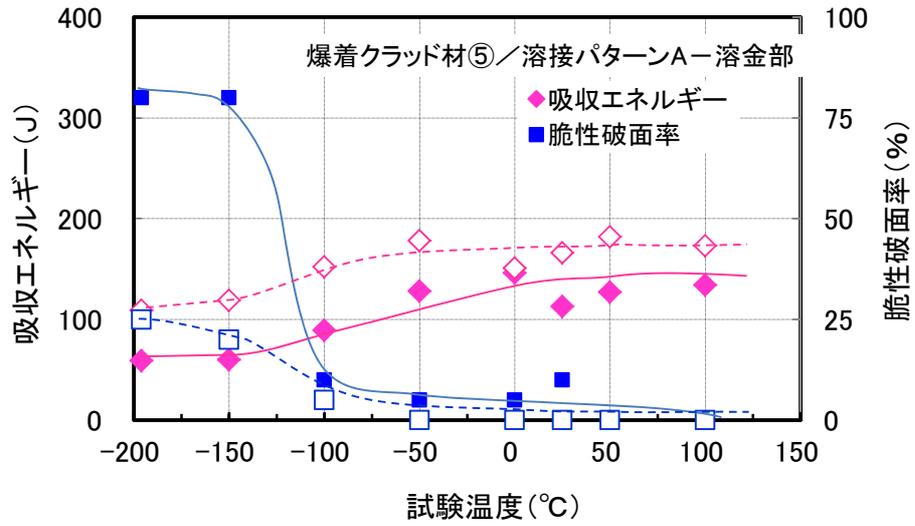


図 3.1-63 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手Cの
500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と
吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係

Open marks : 未処理材

Solid marks : 500°C×2,000h 熱時効処理材

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

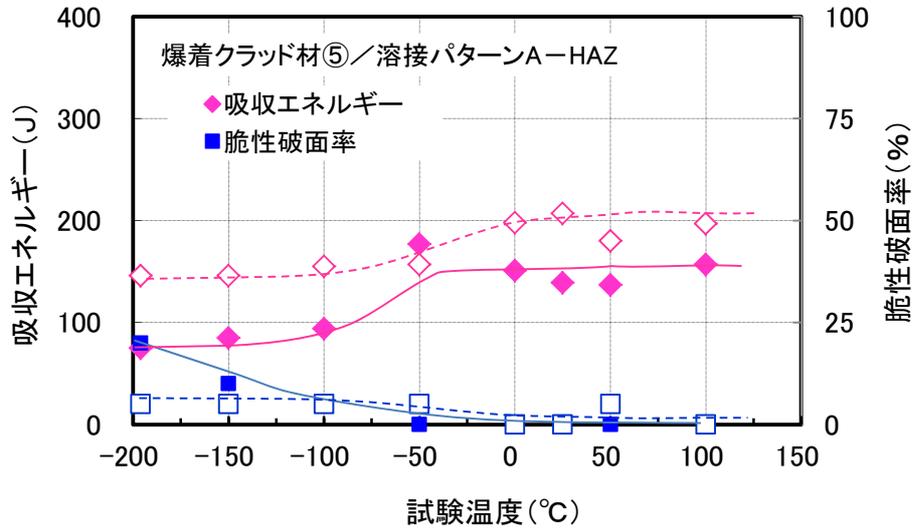
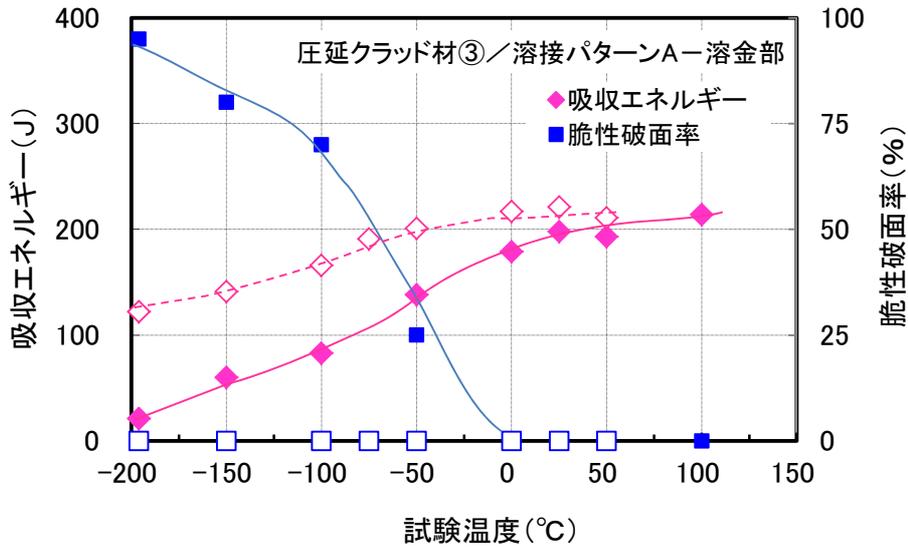


図 3.1-64 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D の 500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と 吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

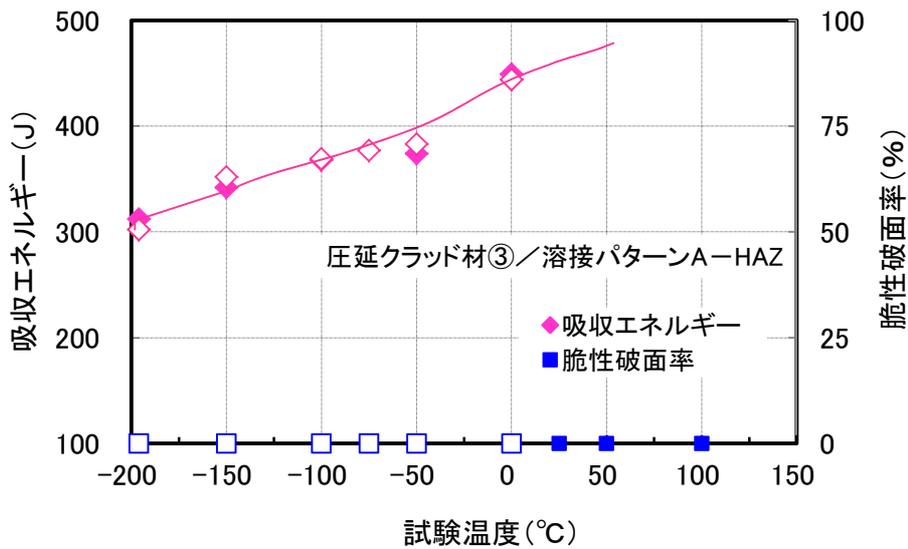
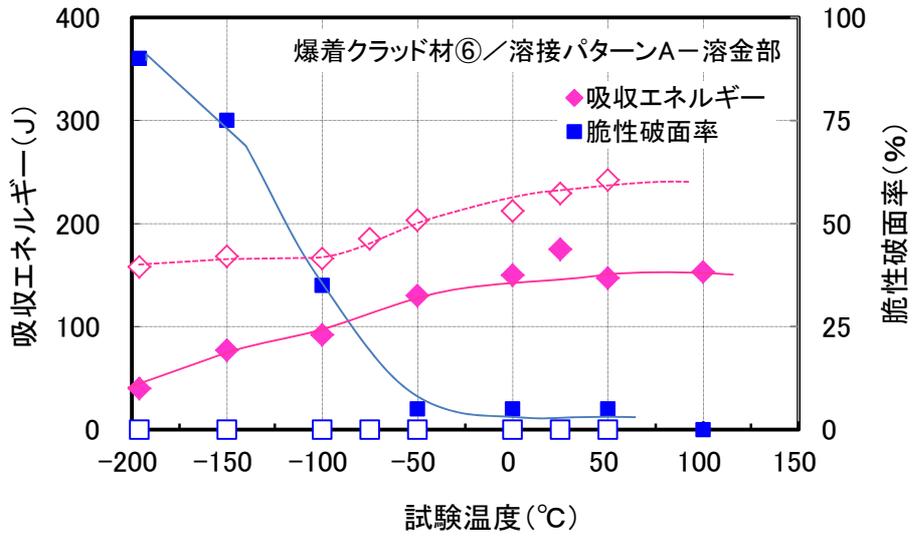


図 3.1-65 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) /溶接継手 E の
500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と
吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

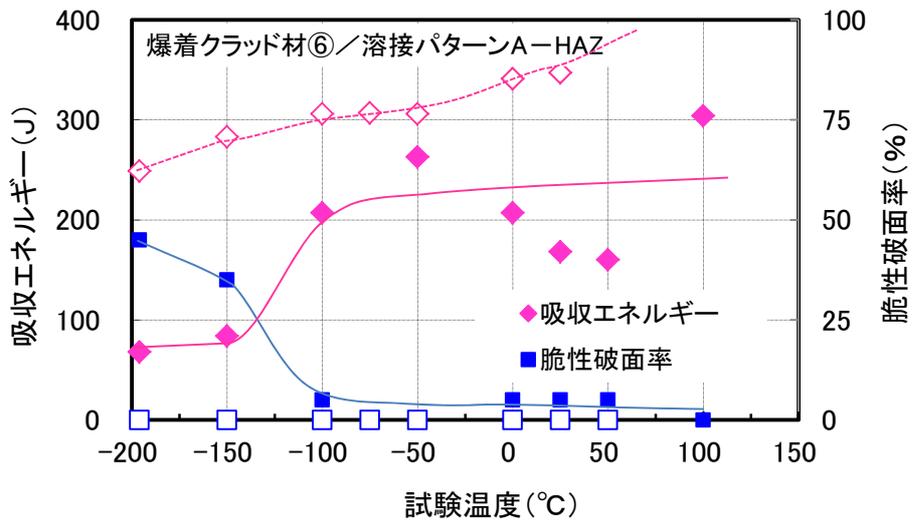
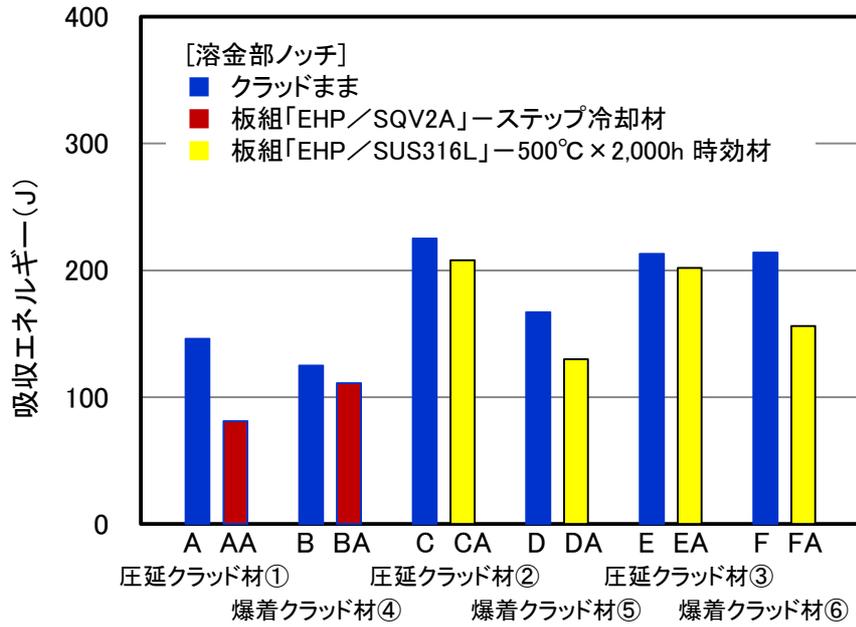


図 3.1-66 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) /溶接継手 F の
500°C×2,000h 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験温度と
吸収エネルギーおよび脆性破面温度の関係

(a) 溶金部ノッチ



(b) HAZ ノッチ

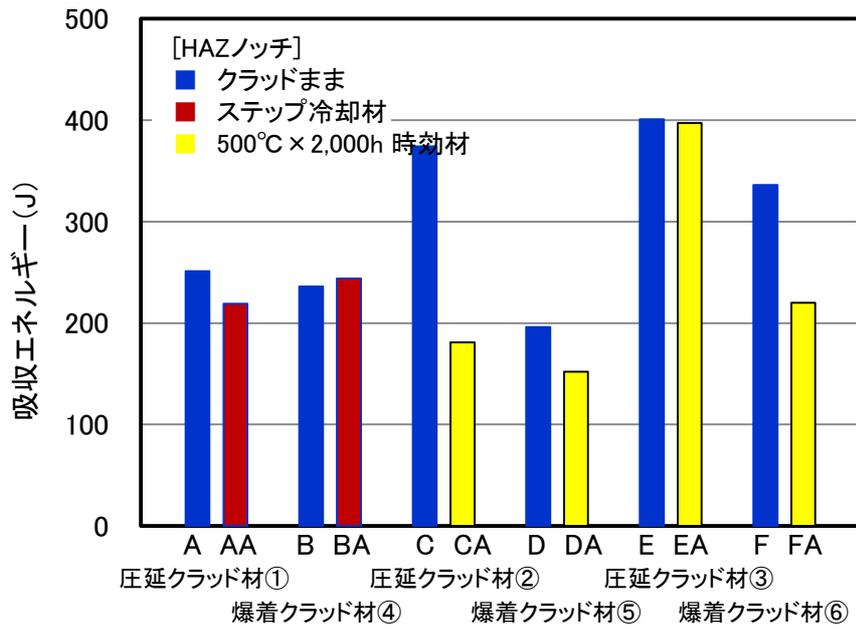


図 3.1-67 クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験の上部棚吸収エネルギーのまとめ

品種／板組	溶金部ノッチ	HAZ ノッチ
圧延クラッド材① EHP/SQV2A	 <p data-bbox="551 563 1238 619">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>	 <p data-bbox="1305 563 1993 619">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
爆着クラッド材④ EHP/SQV2A	 <p data-bbox="551 869 1238 925">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>	 <p data-bbox="1305 869 1993 925">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>
圧延クラッド材② EHP/SUS316L	 <p data-bbox="551 1176 1238 1232">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>	 <p data-bbox="1305 1176 1993 1232">-196 -150 -100 -50 -0 25 50 100°C</p>

写真 3.1-70 圧延クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験後の試験片外観写真

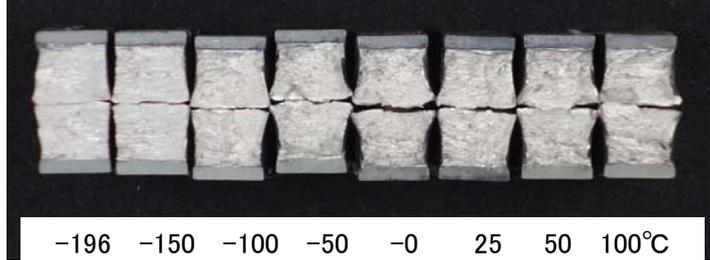
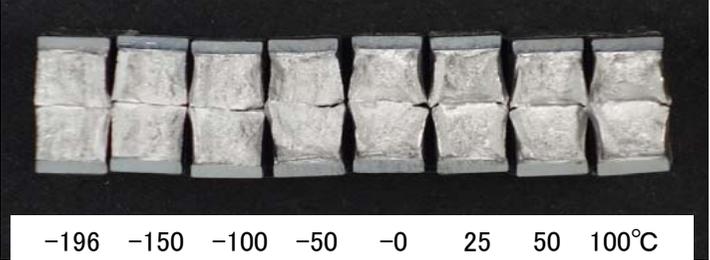
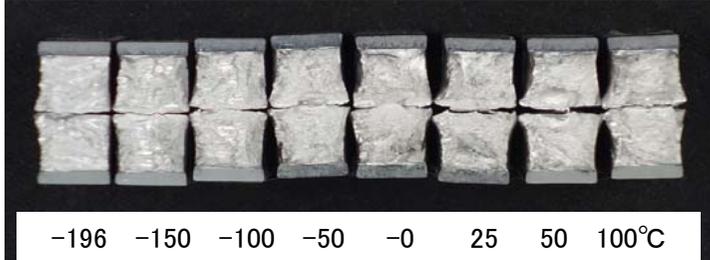
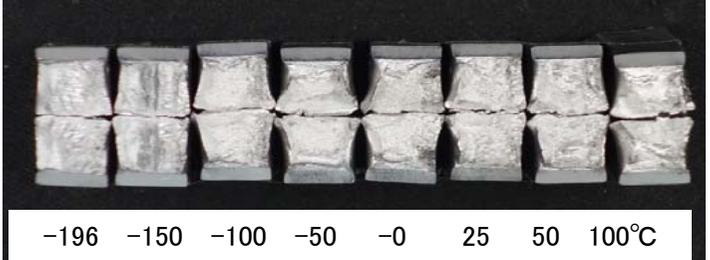
品種／板組	溶金部ノッチ	HAZ ノッチ
爆着クラッド材⑤ EHP／SUS316L		
クラッド材③ EHP／SUS316L／ EHP		
爆着クラッド材⑥ EHP／SUS316L／ EHP		

写真 3.1-71 爆着クラッド材の溶接継手の長時間熱処理材のシャルピー衝撃試験後の試験片外観写真

表 3.1-44 疲労き裂伝播試験のマトリックス

品種	板組	略号	処理
圧延クラッド材①	板組「EHP/SQV2A	1	クラッド材
		A	溶接継手
		A-S	ステップ冷却材
圧延クラッド材③	EHP/SUS316L/EHP	3	クラッド材
		E	溶接継手
		E-N	500°C×2,000h 熱時効処理材

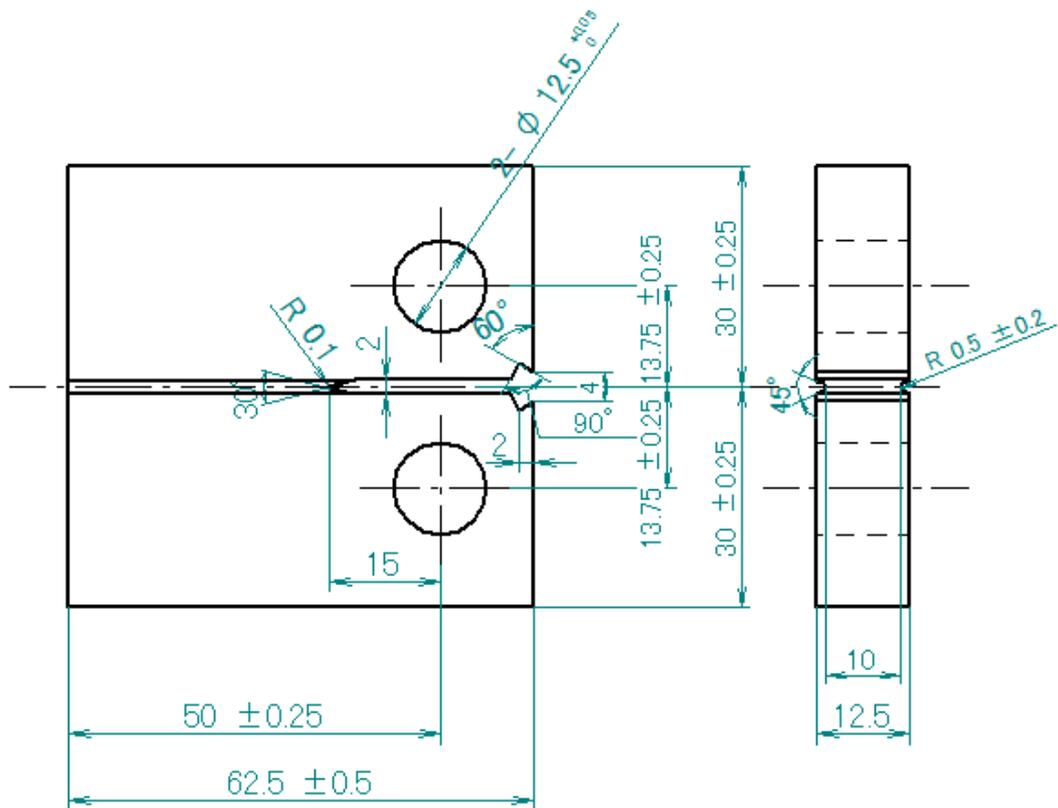
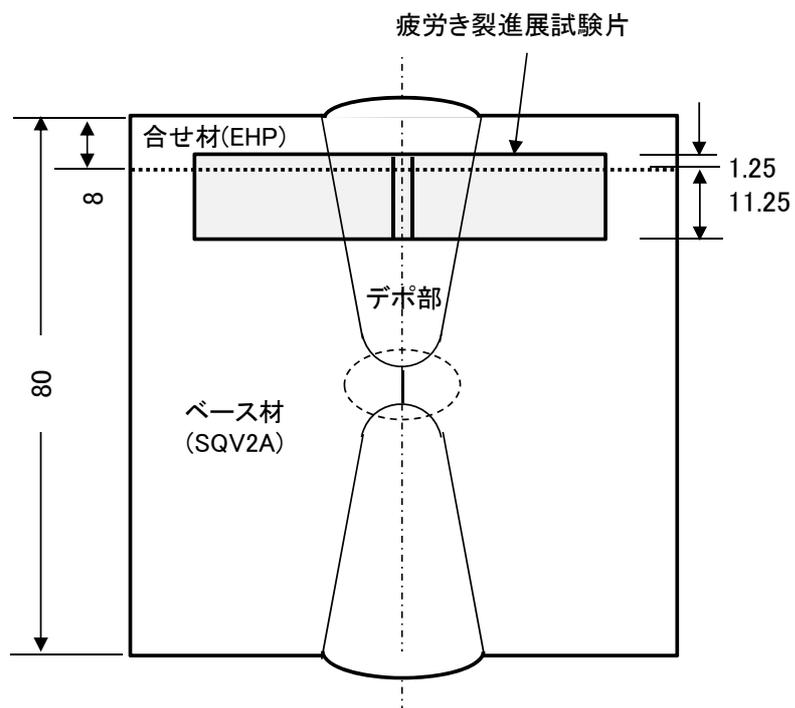


図 3.1-68 疲労き裂伝播試験片形状

(a) 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 A



(b) 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) / 溶接継手 E

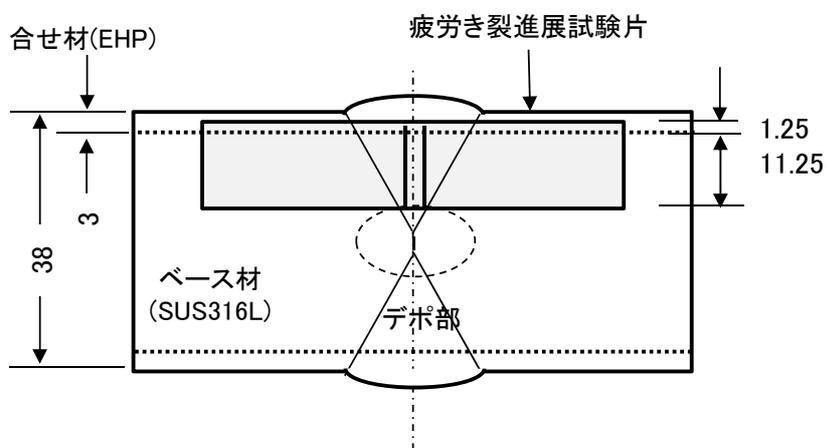


図 3.1-69 疲労き裂伝播試験片の採取要領

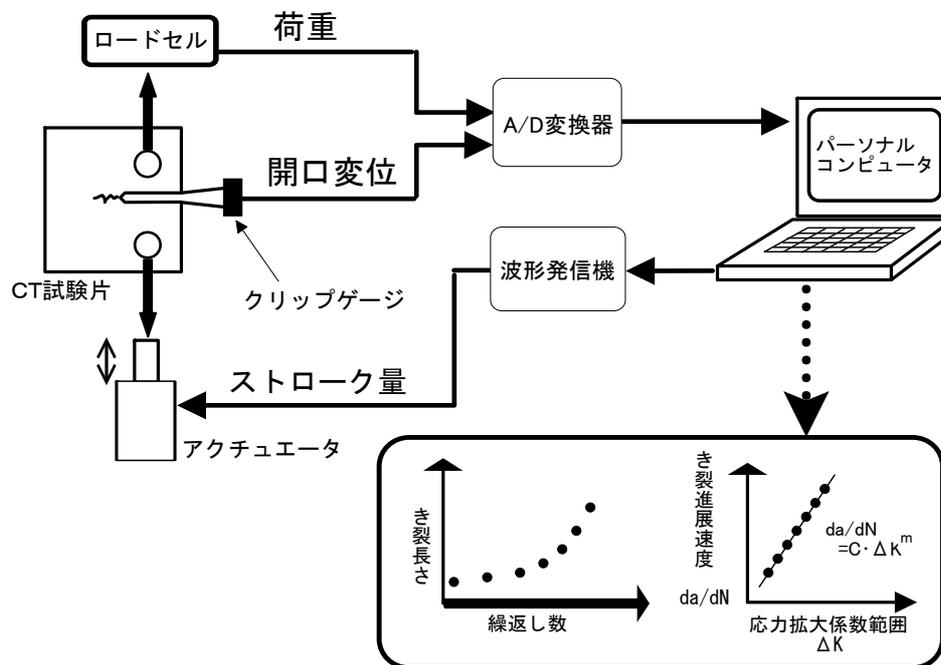


図 3.1-70 疲労き裂進展試験の自動計測システムの概要図

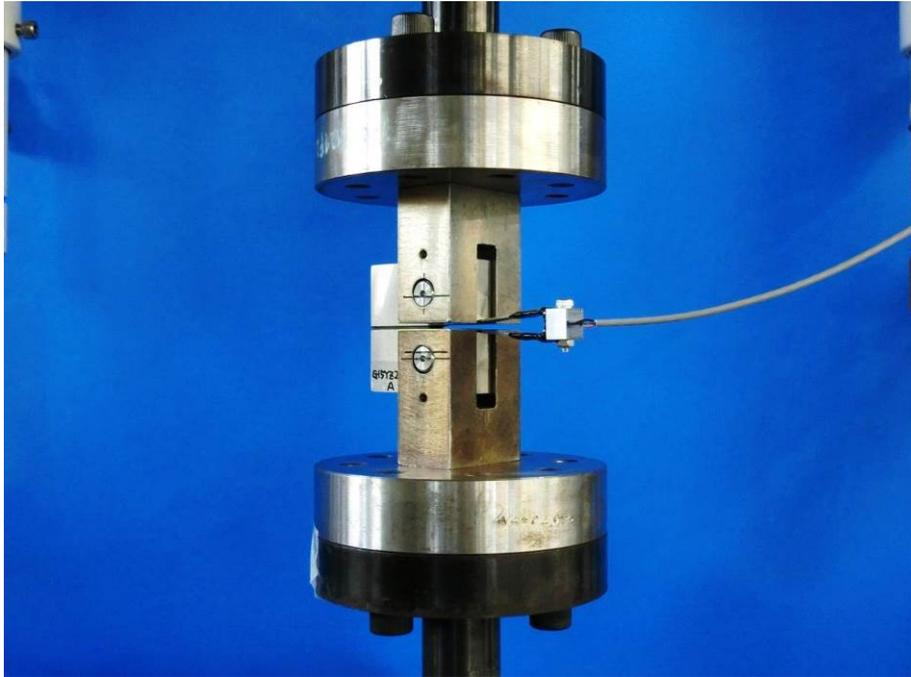


写真 3.1-72 疲労き裂伝播試験状況

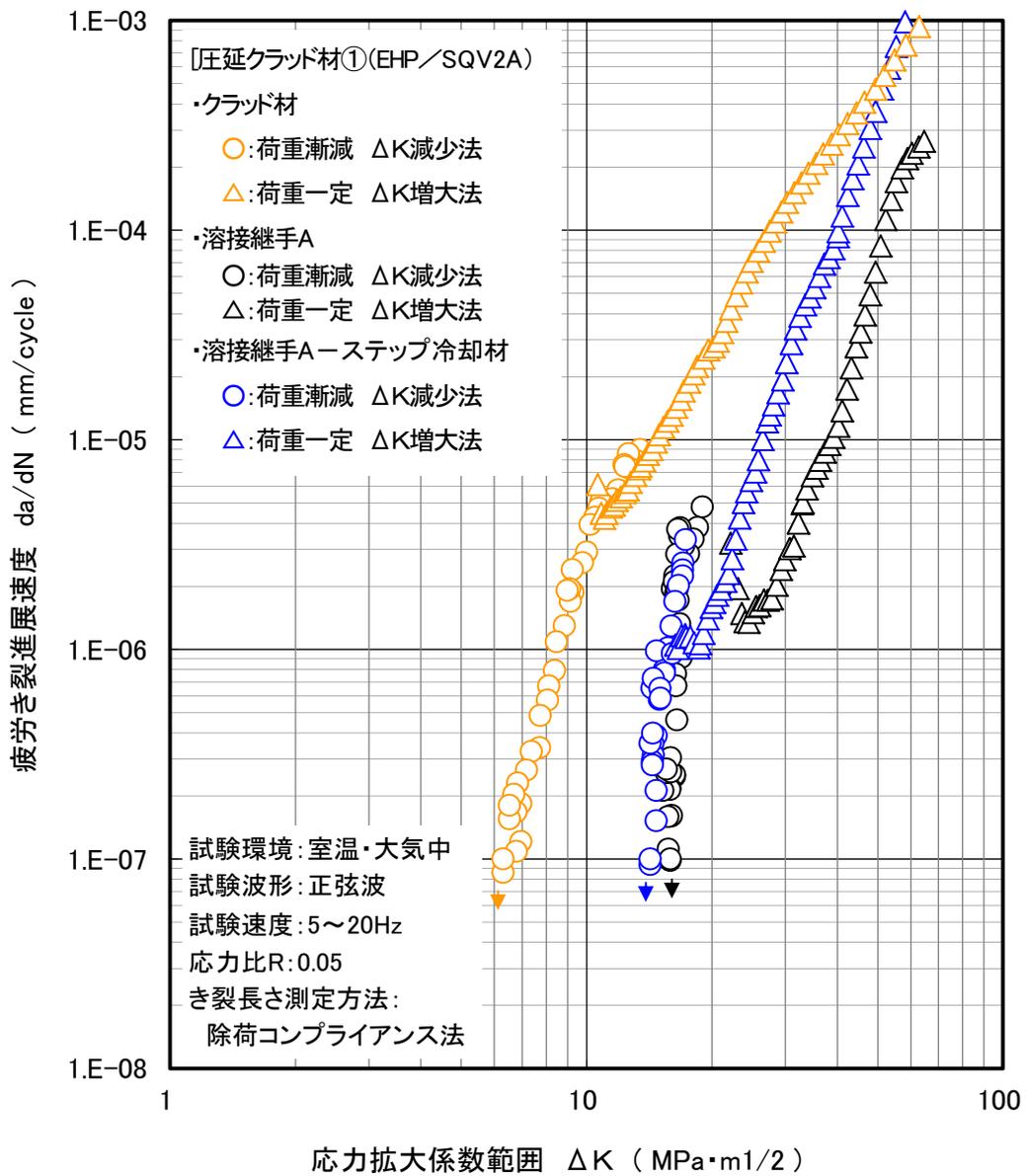


図 3.1-71 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手 A の疲労き裂進展試験結果

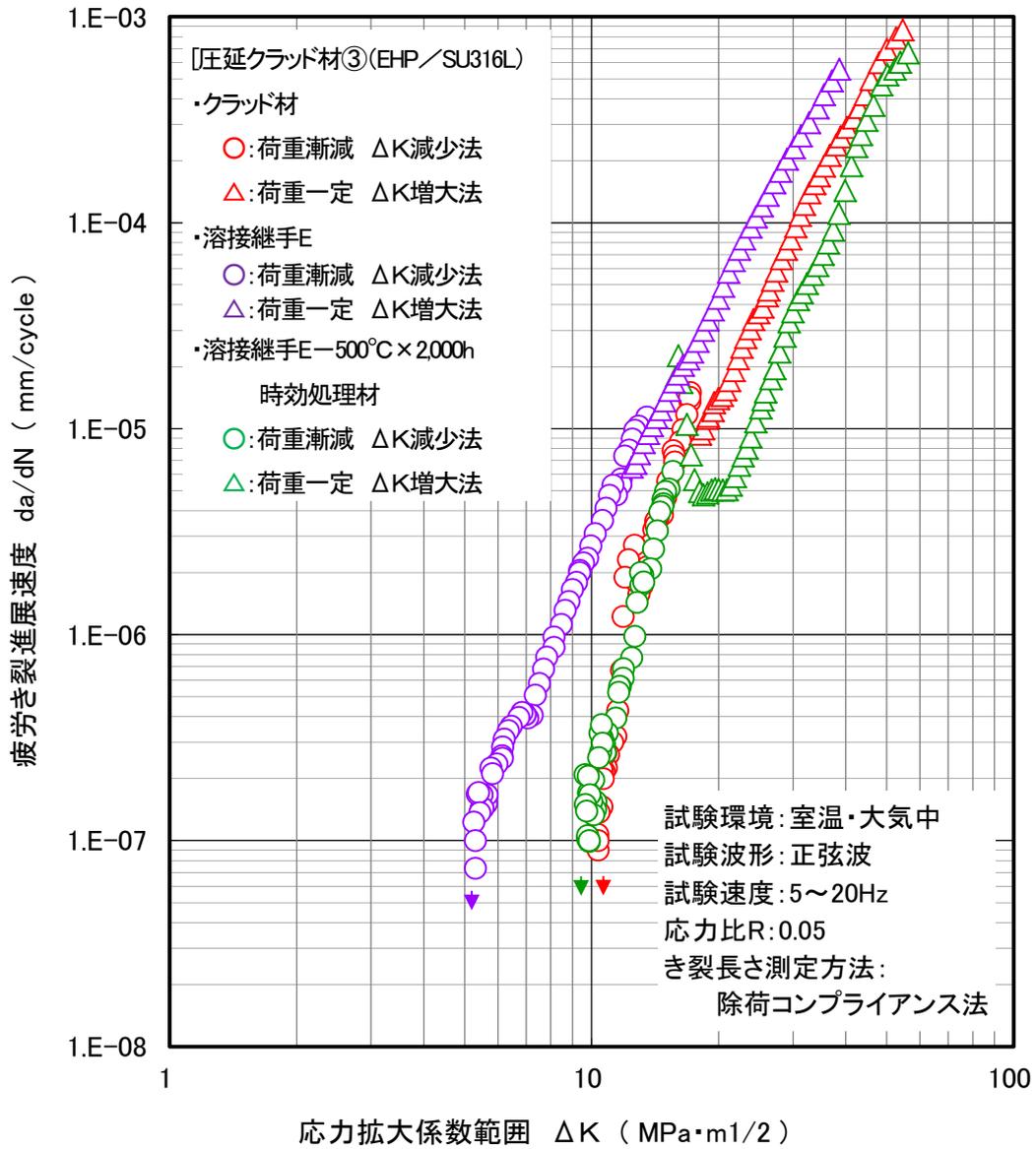


図 3.1-72 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) /溶接継手 E の疲労き裂進展
 試験結果

表 3.1-45 疲労き裂進展試験結果

品種／板組	処理	応力比	パリス則		ΔK_{th}	パリス則算出範囲	備考
			C	m	MPa \sqrt{m}	ΔK (MPa \sqrt{m})	
圧延クラッド材① EHP/SQV2A	クラッド材	0.05	4.66×10^{-10}	3.69	6.3	14.9~27.5	
	溶接継手 (PWHT)	0.05	9.73×10^{-19}	8.16	15.9	39.2~50.9	き裂が反れているため参考値
	溶接継手 (PWHT) －ステップ冷却材	0.05	2.95×10^{-13}	5.32	14.2	26.5~40.2	き裂が反れているため参考値
圧延クラッド材③ EHP/SUS316L	クラッド材	0.05	1.95×10^{-10}	4.12	5.3	13.9~23.8	
	溶接継手	0.05	1.95×10^{-11}	4.50	10.4	18.8~30.5	
	溶接継手 －500℃×2,000h熱時効処理材	0.05	1.19×10^{-12}	5.04	9.9	24.5~37.4	き裂が反れているため参考値

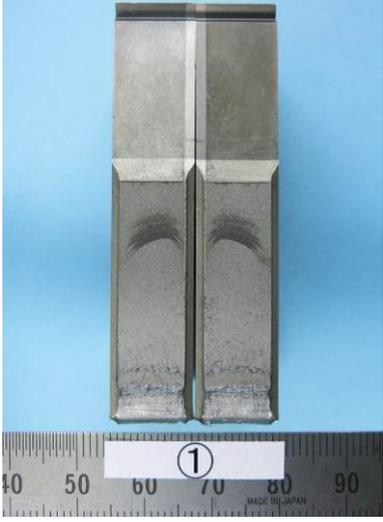
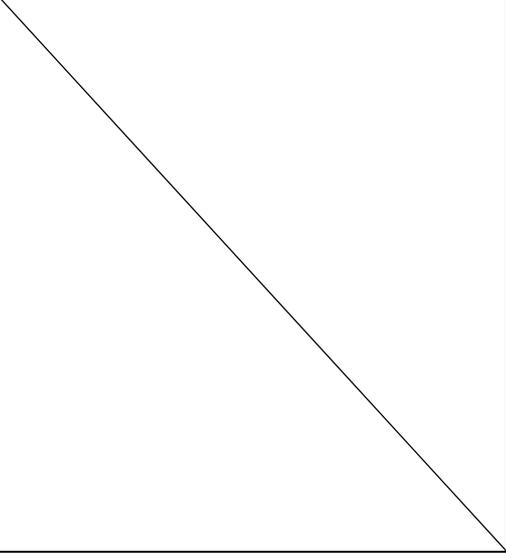
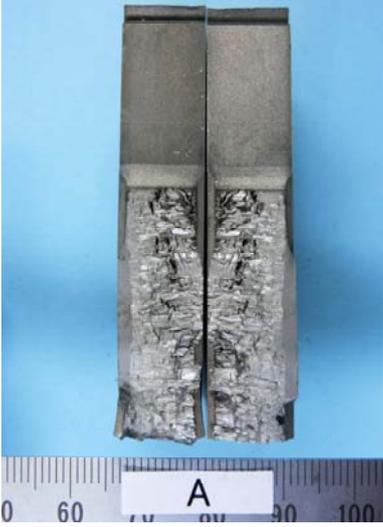
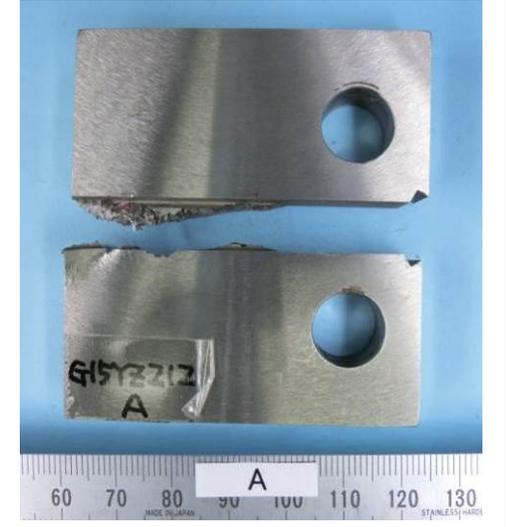
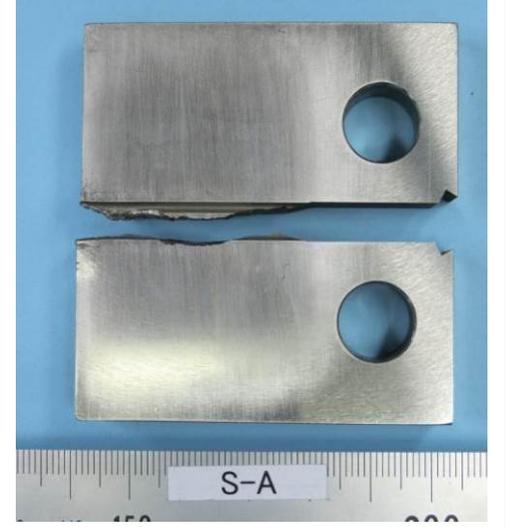
	破断面	試験後外観	
クラッド材			
溶接継手 A			
溶接継手 A -ステップ 冷却材			

写真 3.1-73 圧延クラッド材①／溶接継手 A の疲労き裂進展試験後の試験片外観

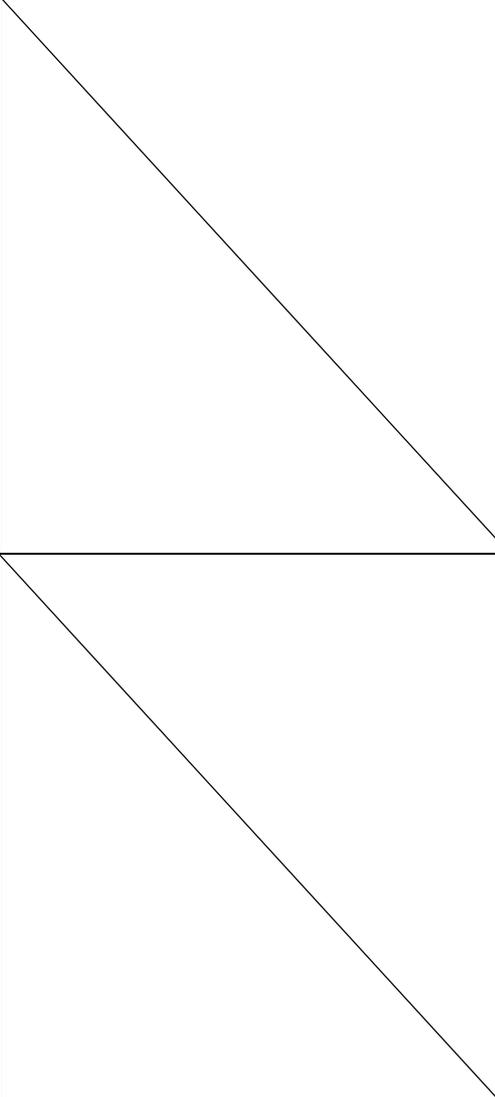
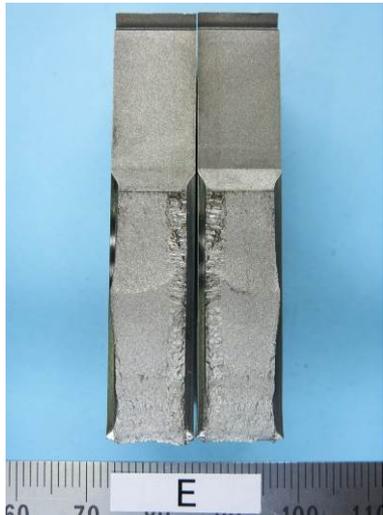
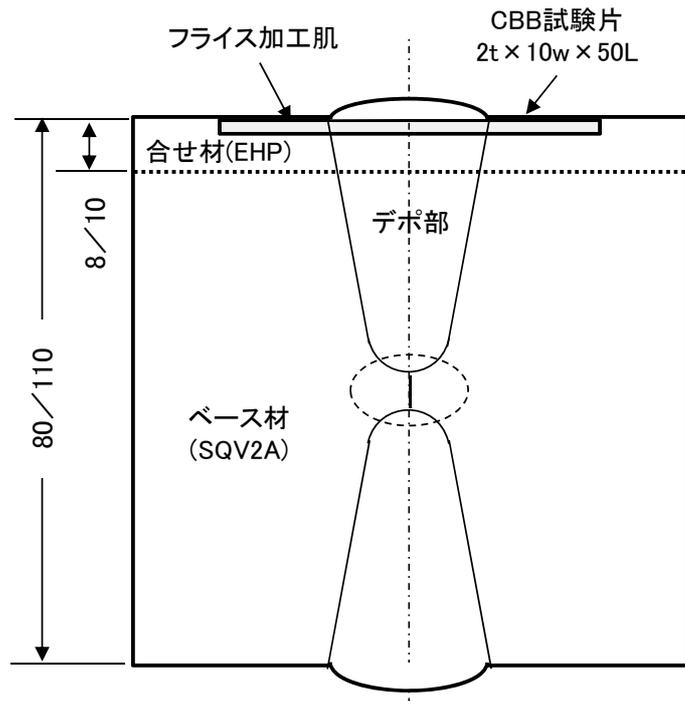
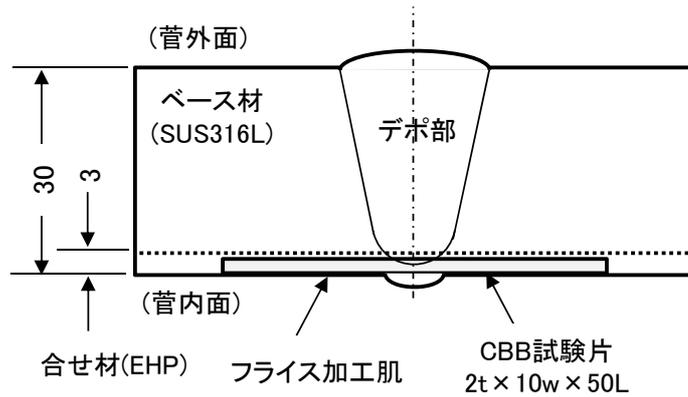
	破断面	試験後外観
クラッド材		
溶接継手 E		
溶接継手 E -500℃ ×2,000h熱 時効処理材		

写真 3.1-74 圧延クラッド材③/溶接継手 E の疲労き裂進展試験後の試験片外観

(a) 板組「EHP/SQV2A」



(b) 板組「EHP/SUS316L」



(c) 板組「EHP/SUS316L/EHP」

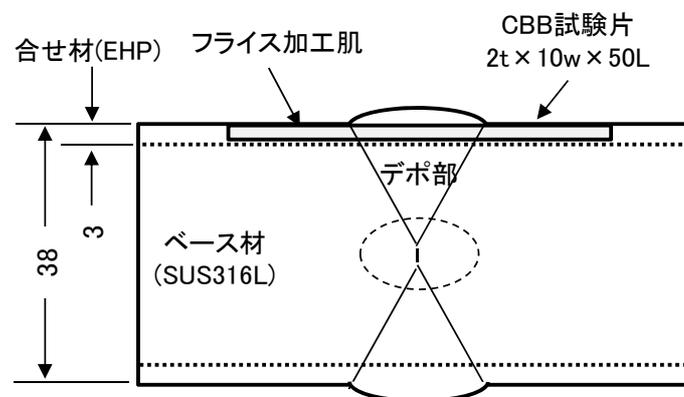


図3.1-73 クラッド材の溶接継手のCBB試験片の採取要領の例

表 3.1-46 クラッド材の溶接継手の CBB 試験結果のまとめ

板組		処理		溶接パターン A		溶接パターン B	
		未処理		長時間熱処理			
圧延クラッド材①	EHP/SQV2A	A	割れ	AA	割れ	AB	割れ
爆着クラッド材④	EHP/SQV2A	B	割れ	BA	割れ	BB	割れなし
圧延クラッド材②	EHP/SUS316L	C	割れなし	CA	割れなし	CB	割れなし
爆着クラッド材⑤	EHP/SUS316L	D	割れ	DA	割れなし	DB	割れなし
圧延クラッド材③	EHP/SUS316L/EHP	E	軽微な割れ	EA	割れなし	EB	割れなし
爆着クラッド材⑥	EHP/SUS316L/EHP	F	割れなし	FA	割れなし	FB	割れ

長時間熱処理

- ベース材 SQV2A : ステップ冷却
- ベース材 SUS316L : 500℃×2,000h 熱時効

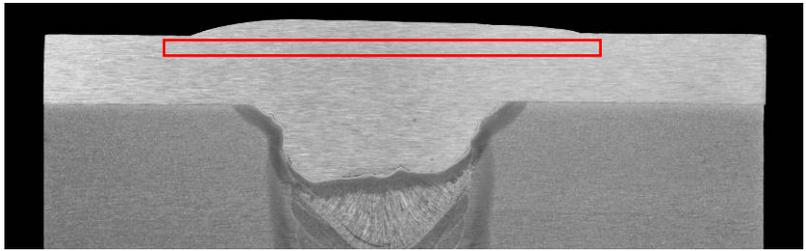
処理		圧延クラッド材①／溶接継手 A
断面マクロ (CBB 試験片採取位置)		
溶接パターン A (AA)	未処理 (A)	
	ステップ冷却 処理	
溶接パターン B (AB)		

写真 3.1-75 圧延クラッド材① (板組「EHP/SQV2A」) / 溶接継手 A の CBB 試験後の試験片外観写真

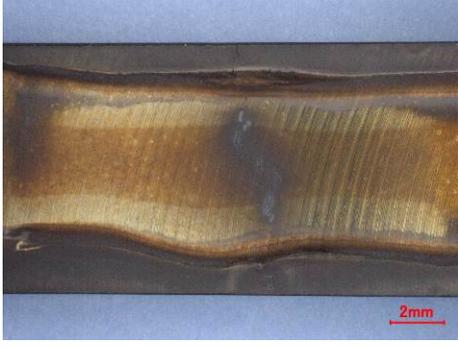
処理		圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 A	
		イ部	ロ部
溶接パターン A	未処理		
	ステップ冷却処理		
溶接パターン B			

写真 3.1-76 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 A の CBB 試験後の表面観察結果

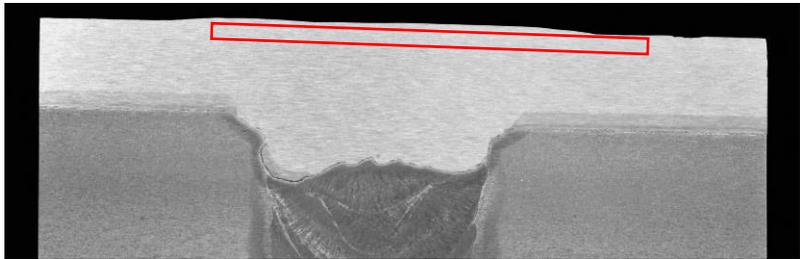
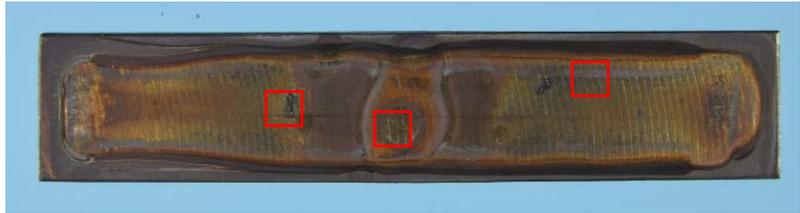
処理		爆着クラッド材④／溶接継手 B
断面マクロ (CBB 試験片採取位置)		
溶接パターン A (BA)	未処理 (B)	
	ステップ冷却 処理	
溶接パターン B (BB)		

写真 3.1-77 爆着クラッド材④ (板組「EHP/SQV2A」) /溶接継手 B の CBB 試験後の試験片外観写真

処理		爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 B	
		イ部	ロ部
溶接パターン A	未処理		
	ステップ冷却処理		
溶接パターン B	ステップ冷却処理		

写真 3.1-78 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 B の CBB 試験後の表面観察結果

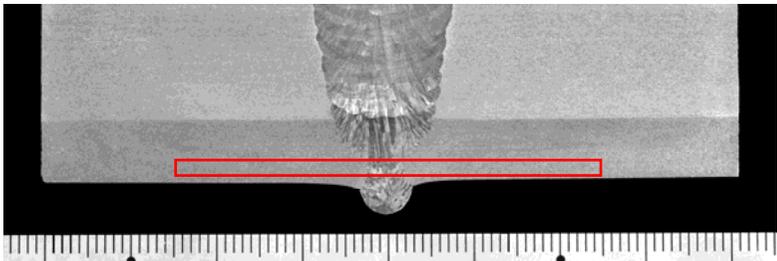
処理		圧延クラッド材②／溶接継手 C
断面マクロ (CBB 試験片採取位置)		
溶接パターン A (CA)	未処理 (C)	
	500°C×2,000h 熱時効処理	
溶接パターン B (CB)		

写真 3.1-79 圧延クラッド材② (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 C の CBB 試験後の試験片外観写真

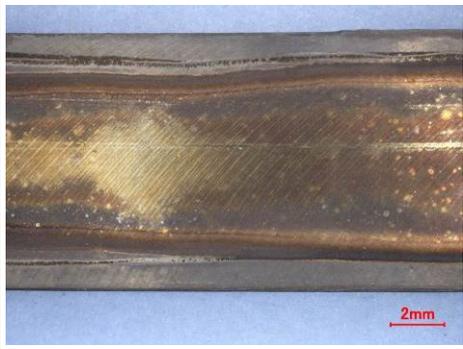
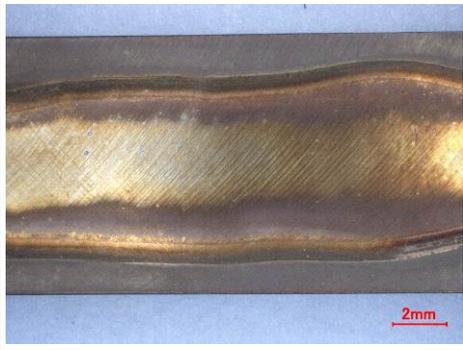
処理		圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 C	
		イ部	ロ部
溶接パターン A	未処理		
	500°C × 2,000h 熱時効処理		
溶接パターン B			

写真 3.1-80 圧延クラッド材②（板組「EHP/SUS316L」）／溶接継手 C の CBB 試験後の表面観察結果

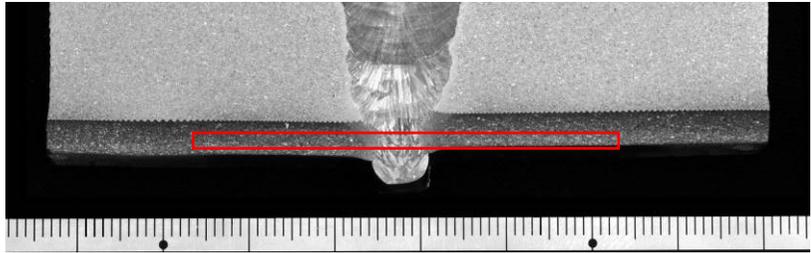
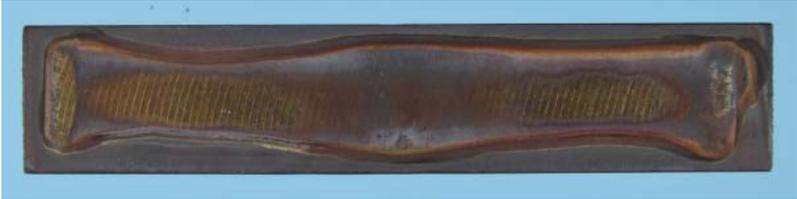
処理		爆着クラッド材⑤／溶接継手 D
断面マクロ (CBB 試験片採取位置)		
溶接パターン A (DA)	未処理 (D)	
	500°C × 2,000h 熱時効処理	
溶接パターン B (DB)		

写真 3.1-81 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) /溶接継手 D の CBB 試験後の試験片外観写真

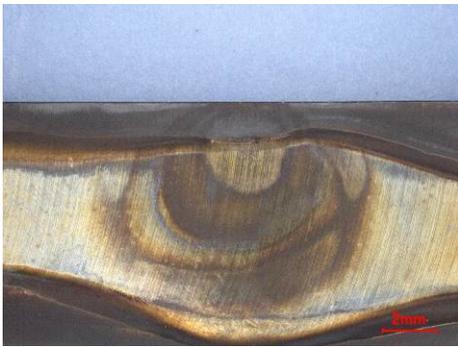
処理		爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 D	
		イ部	ロ部
溶接パターン A	未処理		
	500°C × 2,000h 熱時効処理		
溶接パターン B			

写真 3.1-82 爆着クラッド材⑤ (板組「EHP/SUS316L」) / 溶接継手 D の CBB 試験後の表面観察結果

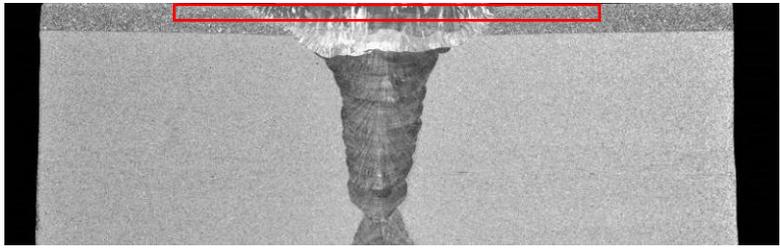
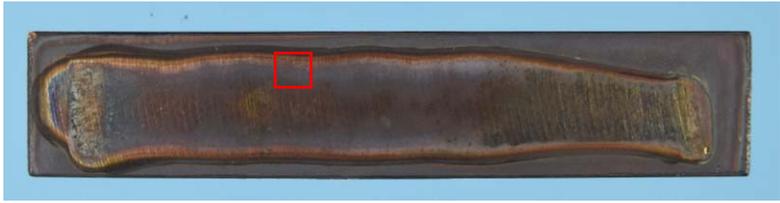
処理		圧延クラッド材③／溶接継手 E
断面マクロ (CBB 試験片採取位置)		
溶接パターン A (EA)	未処理 (E)	
	500°C × 2,000h 熱時効処理	
溶接パターン B (EB)	500°C × 2,000h 熱時効処理	

写真 3.1-83 圧延クラッド材③ (板組「EHP/SUS316L/EHP」) /溶接継手 E の CBB 試験後の試験片外観写真

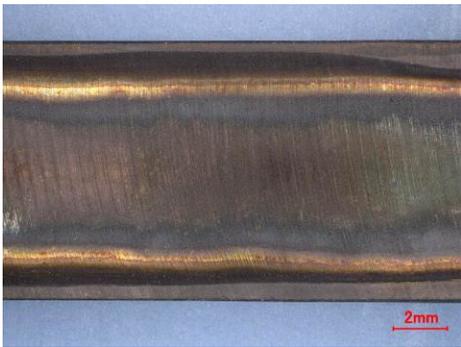
処理		圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）／溶接継手 E	
		イ部	ロ部
溶接パターン A	未処理		
	500°C × 2,000h 熱時効処理		
溶接パターン B			

写真 3.1-84 圧延クラッド材③（板組「EHP/SUS316L/EHP」）／溶接継手 E の CBB 試験後の表面観察結果

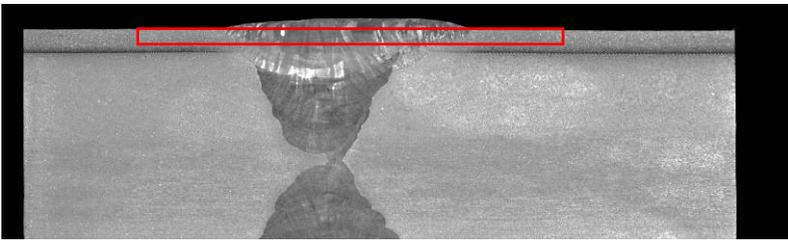
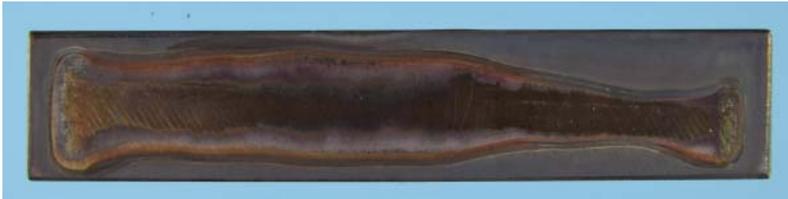
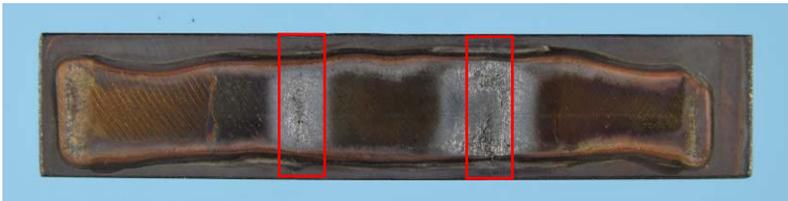
処理		爆着クラッド材⑥／溶接継手 F
断面マクロ (CBB 試験片採取位置)		
溶接パターン A (FA)	未処理 (F)	
	500°C × 2,000h 熱時効 処理	
溶接パターン B (FB)		

写真 3.1-85 爆着クラッド材⑥ (板組「EHP/SSUS316L/EHP」) /溶接継手 F の CBB 試験後の試験片外観写真

処理		爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SSUS316L/EHP」）／溶接継手 F	
		イ部	ロ部
溶接パターン A	未処理		
	500°C × 2,000h 熱時効処理		
溶接パターン B			

写真 3.1-86 爆着クラッド材⑥（板組「EHP/SSUS316L/EHP」）／溶接継手 F の CBB 試験後の表面観察結果

		圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」／溶接継手A
溶接パターンA	未処理	
	ステップ冷却処理	
溶接パターンB		

写真 3.1-87 圧延クラッド材①（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手 A の CBB 試験後の断面観察結果

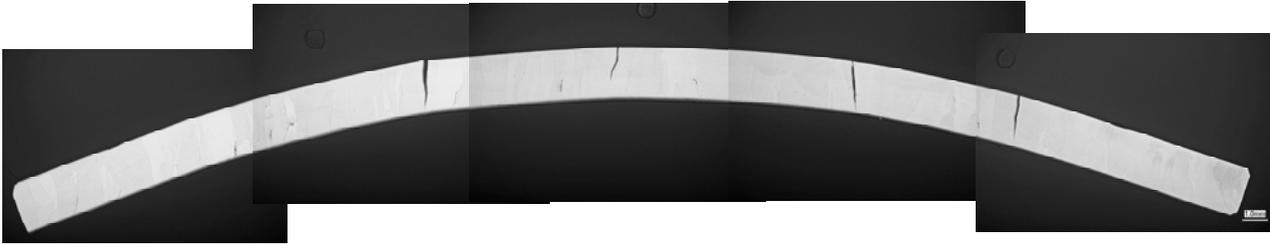
		爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」／溶接継手B
溶接パターンA	未処理	
	ステップ冷却処理	
溶接パターンB		

写真 3.1-88 爆着クラッド材④（板組「EHP/SQV2A」）／溶接継手BのCBB試験後の断面観察結果

3.2 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）

過年度の成果を踏まえて、 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した。また、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を評価した。

3.2.1 γ 線照射場試験

革新炉や軽水炉の圧力容器鋼や炉内構造材、炭素鋼配管のEHPステンレス鋼によるクラッド化を念頭におき、 γ 線照射場水蒸気環境におけるブリネル圧痕すきま腐食試験（Double Brinell Crevice／以下、DBCと略す）によるクラッド用素材の耐食性評価に関するデータ、また γ 線照射場熱時効処理によるクラッド界面の経年材質変化などに関するデータを取得した。

3.2.1.1 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験によるクラッド用素材の耐食性評価

γ 線照射場の高温水中では炉心材料全体が吸収線量／発熱の伝熱条件となり、局所的な高温水蒸気に曝される。1次励起種の影響を受け、酸素溶解度が低い低温側では酸素浸食支配のSCC、また、0の溶解度が高い高温側では酸化クリープ支配の環境誘起割れ（Environmentally Assisted Cracking／以下、EACと略す）が重要となる。

低速電子励起界面反応が重要となる水蒸気すきまにおけるEAC評価のため、クラッド用合せ材25Cr-35Ni-EHP鋼および現行材SUS316Lについて、多軸残留歪み場が再現できるDBC試験片（Double Brinell Crevice試験片：小型平板にブリネル型鋼球を押し込んで加工した立体型の試験片2枚をすきまを設けて重ねた応力腐食割れ試験片／以下、DBCと略す）を用いて γ 線照射場水蒸気環境（常圧）での試験を実施した。

(a) 試験条件

γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験の試験条件を以下に示す。

- ・水蒸気量 : 4g/min
- ・水蒸気温度 : 250℃、300℃、350℃
- ・加熱時間 : 2,000h（計画）
- ・ γ 線照射時間 : 2,000h（計画）
- ・ γ 線線量率 : 5 kGy/h（計画）
- ・ γ 線照射線量 : 10,000kGy 以上
- ・試験片種 : SUS316L（現行材）、25Cr-35Ni-EHP鋼（開発材／合せ材）
- ・試験片形状 : 板材／3t×35mm×35mm、圧痕深さ 2mm
- ・圧力 : 常圧（ γ 線照射場の高温水蒸気中の腐食機構は放射線作用により材料極表面に生成する原子状のOやHの励起種の直接反応に支配される。この反応は材料最表面の水わかる子の表面被覆量、1次励起種の生成に関わる吸収線量および生成わかる子の材料吸脱着に関わる温度をパラメータとすべきであるが、水わかる子の表面被覆は常圧において「1」を達

成していることから本試験では常圧で模擬することとした)

(b) 供試材 (DBC 試験片)

試験片は供試材の表面が圧延面となるように厚肉材から板状試験片を切り出した。試験片の形状は 35mm 角で、厚さは 3 mm とした。4 隅に $\phi 4.5$ mm の試験片固定用の穴を配した。表面は #1,200 のエメリ紙にて湿式研磨後、バフ研磨し、鏡面に仕上げた。手順を 図 3.2-1 に示す。その後、写真 3.2-1 に示す(株)東京衡機製造所製油圧式ブリネル硬度計を用いて試験片中央部の $\phi 20$ mm の領域を深さ 2mm 押し込み、ブリネル圧痕試験片とした。さらに、すきま材として SUS304 製メッシュを挟んで 2 枚のブリネル圧痕試験片を重ね、その 4 角をボルトで固定し、DBC 試験片とした。使用したブリネル硬度計の鋼球の直径は $\phi 10$ mm である。図 3.2-2 に圧痕加工方法を示す。写真 3.2-2 に圧痕加工した試験片の外観を示す。写真 3.2-3 に SUS304 製メッシュの外観を示す。

(c) 試験装置および試験方法

γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験の系統図を 図 3.2-3 に示す。試験装置の外観を 写真 3.2-4 ~6 に示す。試験装置は DBC 試験片を水蒸気温度 250、300 および 350°C で曝露しつつ γ 線照射する環境を実現するため、水蒸気発生器、水蒸気過熱器、水蒸気曝露容器、水蒸気冷却器、水蒸気凝縮器気水わかる離器および凝縮器回収器から構成される。また、不慮の停電時の温度降下に伴う空気の流入を防止するため、Ar ガス置換装置を具備した。DBC 試験片の温度制御は試験片直近に設置した熱電対で管理した。 γ 線の照射線量率は事前に試験片容器内の試験片設置位置に線量計(アミノグレイ)を設置し、1h 照射時間あたりの照射線量を測定した。DBC 試験片の設置状況を 写真 3.2-7 に示す。

(d) γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験の実績

DBC 試験片の水蒸気曝露試験実績を以下に示す。

- ・加熱時間 : 2, 133h (実績)
- ・ γ 線照射時間 : 2, 111h (実績)
- ・ γ 線線量率 : 250°C—8.0kGy/h、300°C—9.7kGy/h、350°C—9.6kGy/h
- ・ γ 線照射線量 : 250°C—16, 888kGy、300°C—20, 476kGy、350°C—20, 265kGy

DBC 試験片近傍に設置した熱電対の温度記録の例を 図 3.2-4 に示す。設定した水蒸気曝露温度でほぼ安定していた。

(e) DBC 試験片の腐食状況

試験終了後に取出した DBC 試験片の外観写真を 写真 3.2-8 に示す。加熱温度 250°C の試験片はまだ金属光沢を呈しているが、温度が上昇するにつれて褐色へと変色していた。その他、外観上大きな変化はみられなかった。DBC 試験片の重量測定結果を 表 3.2-1 に示す。いずれの試験片も重量変化は微差であり、腐食による重量増加はみられなかった。一方、 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験直後の洗浄前試験片を SEM (Scanning Electron Microscope : 走査型

電子顕微鏡) 観察した結果、写真 3.2-9 に示すように SUS316L の加熱温度 350℃のすきま面の極表層で割れ状の痕跡を確認した。その後の超音波洗浄実施後の試験片観察では割れは確認できなかった。外観上確認できないひび割れなどを確認するため、蛍光探傷試験を実施した。蛍光探傷試験の方法を表 3.2-2 に示す。また、蛍光探傷試験の結果を写真 3.2-10 に示す。その結果、表面に割れは観察されなかった。そこで、DBC 試験片を中心から切断し、断面を観察することにより割れの有無の確認を行った。切断した試験片は Au 蒸着、Cu めっきを施し、樹脂埋込、研磨後に光学顕微鏡にて観察した。切断位置を図 3.2-5 に示す。写真 3.2-11 に示すように何れの試験片にも割れは観察されなかった。

(f) DBC 試験片のストラウス試験条件による腐食後の組織観察

γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片を切断し、ストラウス試験条件による腐食後の組織観察を実施した。試験片は断面が観察面となるように約 2mm で切断した。切断後の試験片断面を鏡面研磨し、ストラウス腐食試験に供した。腐食は JIS G 0575 に準拠して実施した。腐食試験は 500ml セパラブルフラスコに Cu 板を設置し、硫酸・硫酸銅水溶液を 500ml 添加、液中の Cu 板上に試験片を置いて接触させながら沸騰条件で浸漬した。図 3.2-6 に試験の操作手順、写真 3.2-12 試験装置外観を示す。腐食時間は 200h とした。写真 3.2-13~14 に示すように試験後の試験片を光学顕微鏡および SEM で観察した結果、25Cr-35Ni-EHP 鋼および SUS316L とともに結晶粒の圧延方向への流れが観察でき、SUS316L では加工フローが顕著であった。また、写真 3.2-15 に示すように SEM によるすきま面の表面観察結果では結晶粒をはっきり観察できた。しかしながら、今試験結果から割れは認められなかった。

(g) SUS 製メッシュの腐食状況

すきま条件を実現するために挟んでいる SUS304 製メッシュの腐食状況を確認した。外観写真を写真 3.2-16 に示す。また、SEM 写真を写真 3.2-17 に示す。観察の結果、温度の上昇とともに DBC 試験片との接触面が腐食している状況を確認した。腐食はメッシュ全面には到達しておらず、接触面にとどまっていた。

3.2.1.2 高温熱時効処理したクラッド材のシャルピー衝撃試験による破壊抵抗性評価

クラッド材の γ 線照射場では温度や材料組成に依存して延性低下や破壊靱性低下が生じる。これらを保守的に評価するため、高温革新炉の照射効果の模擬条件となる劣化ノーズ温度の 750℃で熱時効処理を施したクラッド材について、V ノッチ底からの合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼 (残り) の厚さなどをパラメータとしたシャルピー衝撃試験による破壊抵抗性評価を実施した。

(a) 試験条件

高温熱時効処理したクラッド材のシャルピー衝撃試験による破壊抵抗性評価試験の試験条件を以下に示す。

- ・温度 : 750℃、RT-非時効処理材

- ・加熱時間：1,500h（計画）
- ・試験片種：① 板組「EHP/SUS316L」のクラッド材
② 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材

(b) 供試材（シャルピー衝撃試験片）

供試材の外観写真およびシャルピー衝撃試験片の加工要領を図 3.2-7～8に示す。板組「EHP/SUS316L」のクラッド材については昨年度、Vノッチ底からの合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さを 1mm、2 および 3mm と変化させて衝撃試験を実施したが、界面から剥離し、正しい値を求めることができなかった。このため、今年度は合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さを 3、4 および 5mm とし、SUS316L 側に V ノッチを付けることにより適正な衝撃値を得ることとした。板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材は接合界面に Ni インサート材が存在することから良好な接合性を有すること期待して、昨年度と同様に V ノッチ底からの合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さを 1mm、2 および 3mm と変化させてシャルピー衝撃試験片を製作した。

(c) 熱時効処理

熱時効処理は写真 3.2-18に示すように上記のシャルピー衝撃試験片を石英ガラス管に封入し（石英管内の環境：Ar ガス、約 50kPa）、マッフル炉中にて 1,500h 加熱した。マッフル炉中の石英管近傍に熱電対を設置し、温度を監視した。熱時効処理時の温度履歴の例を図 3.2-9に示す。設定温度で安定して加熱できていた。熱時効処理後のシャルピー衝撃試験片の外観を写真 3.2-19に示す。

(d) シャルピー衝撃試験

所定の熱時効処理後、JIS Z 2242 に準拠してシャルピー衝撃試験を室温にて実施した。衝撃試験機の初期エネルギーは 300 J である。シャルピー衝撃試験結果を表 3.2-3に示す。表中には比較のため、平成 26 年度のデータを含めた。シャルピー衝撃試験後の試験片外観を写真 3.2-20に示す。平成 26 年度に実施した試験と同様、Ni インサートがないクラッド材はいずれも破断に至らなかった。一方、Ni をインサートしたクラッド材の非熱時効処理材（RT と記したもの）では破断に至らないまでも剥離の現象はなく、明らかに Ni インサートが接合性に寄与していることが伺えた。750℃熱時効処理により脆化が進行しているものの、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さが増すにつれて横膨出量が増えている結果から 25Cr-35Ni-EHP 鋼の健全性が確認できる結果となった。破断面の SEM 像を写真 3.2-21に示す。非熱時効処理材と 750℃熱時効処理材の断面を比較すると、明らかに熱時効処理によって延性破面が消失していたが、合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の断面には延性破面が残っていた。

3.2.1.3 γ 線照射場時効処理したクラッド材の経年材質変化

中・高温革新炉の照射効果の模擬条件となる劣化ノーズ温度域（それぞれ 350～450℃および 650～750℃）で γ 線照射場熱時効処理を施したクラッド界面の組成わかる析および、さらにそれらをストラウス試験条件で腐食させた後のマイクロ組織などの経年材質変化データを

取得した。

(a) 試験条件

供試材の明細および γ 線照射場時効材質変化試験条件は以下のとおりである。供試材の外観を写真 3.2-22 に示す。試験片は約 $10 \times 10 \times 10$ mm 程度に加工し、Ar ガス—約 50kPa の雰囲気中で石英管に封入した。

- ・試験片種 : ① 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材 (Ni 層約 $600 \mu\text{m}$)
② 板組「EHP/SUS316L」のクラッド材
③ 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材 (Ni 層約 $60 \mu\text{m}$)
- ・試験片形状 : 約 $10 \times 10 \times 10$ mm (試験片中央近傍にクラッド界面を含む)
- ・加熱 (時効) 温度 : 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材—350、400 および 450°C
板組「EHP/SUS316L」および「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材—650、700 および 750°C
- ・加熱時間 (時効) : 1,500h (計画)
- ・ γ 線線量率 : 15kGy/h (計画)
- ・ γ 線照射時間 : 1,500h (計画)

(b) 試験装置

試験装置の外観を写真 3.2-23 に示す。試験装置は γ 線照射施設内の円筒線源、加熱用の管状セラミックヒータ、ステンレス鋼製の管状セラミックヒータ収容容器、ヒータ温調用制御盤および収容容器内のガス置換機構から構成される。封入済み石英管の表面に温度制御および測温用熱電対を張り付け、管状のセラミックヒータ内の中央部に設置した。各温度条件に適用させる管状セラミックヒータ 6 個は加熱領域ごとに上下にわかるけて (上段 : $650 \sim 750^\circ\text{C}$ 、下段 : $350 \sim 450^\circ\text{C}$)、ステンレス鋼製のヒータ収容容器内へ設置した。熱時効処理時の温度履歴の例を図 3.2-10~11 に示す。設定温度で安定して加熱できていた。収容容器内の温度上昇防止と腐食性ガス (空気の放射線わかる解で生成する窒素酸化物) の置換を目的に He ガスを通気させた。ステンレス鋼製のヒータ収容容器は γ 線照射室内の円筒線源の内部に設置した。ヒータ線および熱電対、ガス通気用のステンレス鋼管は γ 線照射室から厚さ 1.3m のコンクリート壁貫通孔を介して外部へ導き、制御装置へ接続した。 γ 線の照射線量率は経時試験後にセラミックヒータ内の試験片設置位置に線量計 (アミノグレイ) を設置し、1h あたりの照射線量を測定した。なお、比較材としての γ 線照射を施さない試料はマッフル炉にて熱時効処理を施した。

写真 3.2-22 に石英管に封入した試験片の γ 線照射場時効処理後の外観を示す。

(c) γ 線照射場時効処理の実績

γ 線照射場時効処理の実績は以下のとおりである。

- ・加熱時間 : 1,578h (実績)
- ・ γ 線照射時間 : 1,536h (実績)

- ・ γ 線線量率 : 350°C—24.4kGy/h、400°C—23.6kGy/h、450°C—25.0kGy/h、
650°C—15.8kGy/h、700°C—16.0kGy/h、750°C—16.5kGy/h
- ・ γ 線照射線量 : 350°C—37,478kGy、400°C—36,249kGy、450°C—38,400kGy、
650°C—24,268kGy、700°C—24,576kGy、750°C—25,344kGy

(d) γ 線照射場時効処理後の試験片加工

組成わかる析およびマイクロ組織観察試験片は、板組「EHP/SUS316L」および「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材については 10×10×3mm 程度に切断し、クラッド界面を含む面を鏡面研磨で仕上げた。板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材については 10×10×3mm 程度に切断後、40°Cに加熱した 20%硫酸水溶液中に浸漬させて A533B を全溶解させ、その後、鏡面研磨を行った。 γ 線照射場高温時効処理後の試験片外観を写真 3.2-24 に示す。

(e) クラッド界面近傍の組成わかる析

γ 線照射有無の時効処理材について EPMA (Electron Probe Micro Analyzer : 電子線マイクロアナライザ) による線わかる析を実施した。線わかる析は ZAF 補正法による簡易組成わかる析である。クラッド界面近傍を 200 μ m にわたり 1 μ m ピッチで線わかる析した。板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材については Ni 層が 600 μ m あるため、EHP/Ni 界面および Ni/A533B 界面の 2ヶ所をわかる析した。板組「EHP/SUS316L」および「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材については 1ヶ所とした。

図 3.2-12~18 に板組「EHP/SUS316L」のクラッド材の線わかる析結果を示す。図 3.2-19~25 に板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の線わかる析結果を示す。図 3.2-26~39 に板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の線わかる析結果を示す。表 3.2-4 に γ 線照射場時効処理後のクラッド界面の Ni 拡散傾向の比較および図 3.2-40 に板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 750°C 時効処理材の Ni の濃度プロファイル比較を示す。

Cr 析出層の有無から鋭敏化を判断すると、板組「EHP/SUS316L」のクラッド材では顕著に鋭敏化が進行しているのに対して、板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材では鋭敏化がまばらであった。これらは、Ni インサートにより SUS316L からの C の拡散が抑制され、Cr 炭化物の形成が緩和されているためと推察される。また、板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材では 450°C と低温条件ではあったが、Ni をインサートしているにもかかわらず鋭敏化が進行していた。

各クラッド材の γ 線照射の有無、加熱 (時効) 温度による Ni 組成の変化傾向を比較すると、板組「EHP/SUS316L」のクラッド材では 25Cr-35Ni-EHP 鋼と SUS316L の組成に大きな差がないことから各条件での組成変化傾向に差はなかった。板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の EHP/Ni 界面では試験温度が高いほど Ni が 25Cr-35Ni-EHP 鋼へ拡散する傾向がみられた。また、Ni/SUS316L 界面では 700°C までは拡散せず、750°C で SUS316L へ拡散する傾向がみられた。また、 γ 線照射の有無では、照射なしより照射ありの方がより拡散する傾向がみられた。板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の EHP/Ni 界面では、試験温度が 350~450°C と低いことから Ni の拡散には至らなかった

(f) ストラウス試験条件による腐食後のマイクロ組織観察

ストラウス試験条件による腐食は JIS G 0575 に準拠して実施した。試験の操作手順は前述の図 3.2-6 と同じである。腐食試験は 500ml セパラブルフラスコに Cu 板を設置し、硫酸・硫酸銅水溶液を 500ml 添加し、液中の Cu 板上に試験片を置いて接触させながら沸騰条件で浸漬した。腐食時間は、板組「EHP/SUS316L」および「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材については 200h、板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材については 20h である。写真 3.2-25~27 に光学顕微鏡組織、写真 3.2-28~30 に SEM 像を示す。写真 3.2-31 および写真 3.2-32 に板組「EHP/SUS316L」および「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 750°C 熱時効処理材および板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450°C 熱時効処理材の比較写真を示す。板組「EHP/SUS316L」のクラッド材では顕著に粒界腐食が進行しているのに対して板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材では粒界腐食の進行はまばらであった。また、板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材では 450°C と低温条件ではあったが、粒界腐食が進行していた。これらは前記の線わかる析結果と同様であった。

3.2.1.4 まとめ

(1) γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験によるクラッド用素材の耐食性評価

γ 線照射場腐食試験による現行材 SUS316L に対するクラッドの合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の耐食性や耐環境誘起割れ抵抗性の優位性を評価するため、すきま環境を模擬した DBC 試験片を用いた試験を実施した。250、300 および 350°C の水蒸気曝露温度を実機環境の水準として設定し、 γ 線照射場において約 20MGy 照射した。その結果、25Cr-35Ni-EHP 鋼では割れは認められなかった。また、SUS316L では高応力場である圧痕部の極表層においてのみ割れが確認できたが、粒界や貫粒割れには至らず、蛍光探傷検査においても割れを確認するができなかった。すきま条件を実現するために設置した SUS304 製メッシュが DBC 試験片と接触した微小域において水蒸気温度に依存して腐食が増加する傾向を示した。

(2) 高温熱時効処理したクラッド材のシャルピー衝撃試験による破壊抵抗性評価

ステンレス鋼の γ 線照射場においては温度や材料組成に依存して延性或破壊靱性低下が生じる。過年度においては、Ni インサートのない板組「EHP/SUS316L」のクラッド材の 750°C \times 1,500h 熱時効処理後のシャルピー衝撃値を求めたが、接合界面の剥離により実用材として問題であったことから、今年度は Ni インサートのある板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材について同条件でデータを取得した。その結果、V ノット底の合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さを 1mm、2 および 3mm と増加するに従ってシャルピー衝撃値が大きくなる傾向を示し、かつ横膨出量が増加しており、25Cr-35Ni-EHP 鋼によるクラッド材の熱時効に対する抵抗性が存続し、健全性が保たれることが明らかとなった。

(3) γ 線照射場時効処理したクラッド材の経年材質変化

板組「EHP/SUS316L」のクラッド材および板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の γ 線照

射場時効処理による接合界面の変質程度（金属原子の移動程度）を EPMA わかる析、さらにストラウス試験条件による腐食後のマイクロ組織観察により調査し、熱時効処理なしのクラッドまま材と比較した。Ni インサートのない板組「EHP/SUS316L」のクラッド材においては、 γ 線照射場時効処理によって界面近傍で 25Cr-35Ni-EHP 鋼からの Cr の拡散とそれに対応した Ni の基地金属への拡散が生じ、見掛け上、組成傾斜の拡散域の幅が低減していた。界面近傍の σ 相形成が関わるものと推定される。Ni インサートのある板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材では、Fe-Cr-Ni 系の相安定化と思われる 25Cr-35Ni-EHP 鋼への Ni 拡散が熱時効処理材および γ 線照射場熱時効処理材ともに確認できるが、 γ 線照射場時効処理材でのみ弾出損傷効果とみられる SUS316L への拡散がみられた。板組「EHP/A533B」のクラッド材では Ni インサートがないため、Cr 炭化物の生成によって鋭敏化が顕著となる。Ni インサートのある板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材では Cr 炭化物の析出は少ないものの、 γ 線照射効果によって界面近傍に若干の生成をみた。これらの現象はストラウス試験条件による腐食後の界面近傍の腐食領域の程度と良く一致していることが明らかとなった。

3.2.2 環境適用性の数値解析

革新炉や軽水炉の圧力容器鋼や炉内構造材、炭素鋼配管の EHP ステンレス鋼によるクラッド化を念頭におき、開発したクラッド材等の γ 線照射場における環境適用性に係わる数値解析を実施した。

3.2.2.1 クラッド材の耐食性・耐 EAC 性の保持条件評価に資する解析

(1) 相互拡散わかる析の目的

一般のステンレス鋼は添加される Cr によって耐食性能を獲得している。しかしながら、700°C前後の熱影響により Cr は C と結合・炭化物を生成して粒界腐食を起こすことが知られている（鋭敏化）。一方、EHP ステンレス鋼は一般のステンレス鋼に比べ不純物を少なくすることにより耐食性を向上させており、炭化物生成による鋭敏化を抑制することができる。特に、原子力発電に用いられる部材は放射線の照射効果を含め、物理的あるいは化学的に過酷な環境にあるため、EHP ステンレス鋼による被覆処理などによる耐食性、耐 EAC 性の向上が安全性向上に重要な役割を担うと考えられる。

本評価で対象とする SUS316L と EHP ステンレス鋼のクラッド材においては、加熱や γ 線照射の効果によって SUS316L と EHP ステンレス鋼の間で Cr や Ni が相互に拡散する可能性がある。拡散により EHP ステンレス鋼の Cr や Ni の濃度が低下すると局所的な粒界腐食を促進させ、耐食性能の低下を引き起こす。このため、加熱温度や加熱時間、 γ 線照射量、 γ 線照射時間等でどの程度拡散が進行するかを把握することは EHP ステンレス鋼の実機適用の観点から重要である。

実機では運転履歴や部材の適用箇所に応じて相互拡散の促進要因となる加熱・照射の条件が様々に変わり得る。相互拡散わかる析の目的は、EHP ステンレス鋼を含んだクラッド材への加熱、 γ 線照射試験に対する相互拡散評価モデルを確立することにより、実機に EHP ステンレス鋼を適用する場合に腐食に耐えうる厚さ等の条件を決定、整備することである。

(2) 相互拡散モデルの構築

過年度に検討した相互拡散に係わる知見および既往の研究成果を基に相互拡散モデルを構築した。これまでの元素の拡散に係わる検討では、平成 24 年度にベース材と合せ材を接合する際の固相および液相インサートのベース材に対する拡散過程の予測について(文献 1)、平成 26 年度にクラッド材に対する相互拡散影響に係わる評価について(文献 2)、その内容をまとめてきた。接合後の元素の拡散を考慮する本解析では、平成 26 年度に行われたクラッド材に対する相互拡散影響に係わる評価の検討結果である 1 次拡散方程式による評価を参考とする。

(a) 仮定

成 26 年度に行ったクラッド材に対する相互拡散影響に係わる評価および文献 3 を参考に金属中の元素の拡散領域について仮定を設定した。

板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材に含まれる各元素は接合前に界面垂直方向に一定割合の重量濃度でわかる布しているものとし、接合面では不連続に変化する。加熱、照射中は元素濃度に依存しない非定常状態拡散が起こり、加熱、照射終了とともに相互拡散も進展が終了すると仮定する。また、EHP ステンレス鋼と Ni インサート材は半無限棒を接合させたものとしてモデル化を行う。さらに、試験片と空気の境界の効果による拡散への影響は小さく無視できるとする。すなわち、試験片の外側、内側で濃度プロファイルに差はないものとする。

(b) 相互拡散の支配方程式

上記の仮定よりクラッド材中の各元素の拡散は式 (3.2-1) の 1 次元拡散方程式によって表すことができる(文献 4)。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3.2-1)$$

ここで、 c は重量濃度(単位：-)で、 D は拡散係数(単位： $\mu\text{m}^2/\text{h}$)、 t は加熱あるいは照射時間(単位：h)、 x は位置(単位： μm)を表す。 D は濃度依存せず、試験素材の端点や Ni インサート位置での重量濃度が変わらないという仮定から式 (3.2-2) のとおりに解析式を得ることができる。

$$c(t, x) = c_1 \operatorname{erf}\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{4Dt}}\right) + c_0 \quad (3.2-2)$$

$\operatorname{erf}(x)$ は以下の式 (3.2-3) で定義される誤差関数である。

$$\operatorname{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.2-3)$$

誤差関数の性質から式 (3.2-2) に含まれるパラメータは図 3.2-41 に示す対応関係となる。

(b) 相互拡散を特徴付けるパラメータ

評価はEPMAわかる析によって得られた濃度プロファイルに評価モデルで示した式(3.2-2)を適合させることにより拡散係数に加熱・照射試験を乗じた Dt (単位: μm^2)を見積もる。関数形の適合には最小2乗法で行う。濃度プロファイルと関数形の適合から Dt を決定した後、試験毎の加熱・照射時間で除することにより拡散係数を見積もる。見積もられた拡散係数の温度依存性は次の式(3.2-4)に従うことが考えられる。

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q\beta}{R}\right) \quad (3.2-4)$$

ここで、 D_0 は振動数因子 (単位: $\mu\text{m}^2/\text{h}$)、 Q は原子が固体中を拡散するための活性化エネルギー (単位: J/mol)、 R は気体定数 (単位: $\text{J}/\text{K}/\text{mol}$)、 β は逆温度 (単位: $1/\text{K}$)である。式(3.2-4)の両辺について対数を取るによりアレニウスプロットに従うことがわかる。

$$\ln D = -\frac{Q}{R}\beta + \ln D_0 \quad (3.2-5)$$

(3) 相互拡散評価フレーム

相互拡散わかる析を行う際の評価フレームを以下に取りまとめた。評価フレームは試験・解析・評価の3つで構成される。

(a) 試験

EHP ステンレス鋼と一般ステンレス鋼等とのクラッド材について実機への適用性の観点から次の項目を試験条件として試験を行う。

① 接合材選定

原子炉圧力容器や炉内構造物、配管等に用いられる代表的なステンレス鋼や低合金鋼としてSUS316LやA533Bがある。この2種類の鋼材をEHP ステンレス鋼に接合したクラッド材を試験の対象とする。さらに、これらの鋼材をEHP ステンレス鋼に接合、剥離防止のために挿入するNi インサート材は相互拡散に影響を与え得るため、Ni インサート材の厚さを変えた試験を行う。

② 加熱と照射

SUS316LやA533Bが使用される実機の構造物の外部環境は様々である。相互拡散わかる析では特に影響の大きいと思われる照射および照射による加熱に着目する。照射については γ 線の吸収線量率と照射時間を試験の条件とする。照射による加熱に関しては加熱時間と加熱温度を試験の条件とする。

③ 測定

EHP ステンレス鋼およびステンレス鋼や低合金鋼に含まれる主要元素はFe、Ni、Crである。CrとNiは耐食性能の向上に重要な元素であり、特にCrは炭化物による鋭敏化の点から着目すべき元素といえる。測定する物理量については金属の拡散現象をわかる析する際に一般的に測られる重量濃度とする。

(b) 解析

試験結果から種々の試験条件における相互拡散の影響を適切に評価するため、以下の点に

着目して解析を行う。

① 相互拡散モデル構築

金属中の元素が相互拡散する状況をモデル化する。既往の研究成果を参考としつつ、妥当と考えられるモデル化を行った上で定式化を行い、相互拡散を定量的に評価することを目指す。試験では実機の環境を完全に再現することは難しいため、定式化に際しては相互拡散モデルを基に予想ができるような入力パラメータを選択する。

② 相互拡散モデルによる計算

定式化された相互拡散モデルに基づき、試験結果に対する相互拡散を特徴付ける拡散係数等のパラメータについて計算を行う。

③ 妥当性確認

計算で得られた相互拡散を特徴付ける拡散係数等のパラメータについて既往の研究成果等を基に妥当性を確認する。妥当でない場合には試験あるいは相互拡散モデルの改善を検討、必要に応じて再度試験または相互拡散モデル構築を行う。

(c) 評価

試験結果および解析結果を踏まえ、相互拡散の影響を評価する。

① 解析結果の比較

各々の試験や解析が妥当である場合には各試験によって得られた相互拡散を特徴付ける拡散係数等のパラメータについて比較を行う。比較によって Ni インサート材の有効性や相互拡散への γ 線照射効果を確認する。

② 実機適用性のわかる析

試験の条件に適合する解析から得た相互拡散を特徴付けるパラメータについて実機環境に対応付けをすることにより実機環境下での長期相互拡散の影響を見積もる。相互拡散の影響を見積もることができれば、実機においてどの程度の EHP ステンレス鋼の被覆が必要であるかという目安値を得ることができる。

図 3.2-42 に相互拡散評価フレームの全体像をフロー図の形式で示す。

(4) 相互拡散わかる析の試行

上記の相互拡散評価フレームにのっとり今年度実施した試行結果を示す。相互拡散わかる析の試行では全体の評価フレームの相互拡散モデルによる計算までを行うこととする。

(a) 試験

① 接合材選定

評価の対象とする EHP ステンレス鋼に対するベース材を SUS316L とし、60 μ m 厚の Ni インサートを施したクラッド材を評価対象とした。

② 加熱と照射

相互拡散わかる析では本事業で実施した γ 線照射場熱時効処理材および熱時効処理材を対象とした。対象としたクラッド材の加熱条件、照射条件を表 3.2-5に示す。

(b) 拡散を特徴付けるパラメータの解析結果

試行によって得られた各試験、各測定元素の拡散係数についてアレニウスプロットを行った。Fe の拡散係数に対するアレニウスプロットの結果を図 3.2-43 に示す。試行の結果、板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の濃度プロファイルに基づき Fe の拡散係数を決定した。中央値のみの評価では温度が上がるにつれて拡散係数が大きくなるというアレニウス依存性の傾向を確認し、EPMA わかる析による実測の結果を含め定性的に同様の傾向を示すことを確認した。

3.2.2.2 クラッド材の経年材質変化と力学的評価に資する解析

(1) 熱時効処理後のクラッド材を対象とした衝撃解析の目的

熱時効脆化の極大温度で熱時効処理したクラッド材については、シャルピー衝撃試験における衝撃時のクラック底での割れの発生までの十わかるな吸収エネルギーを担保できる EHP ステンレス鋼の有効肉厚評価が必要であり、熱時効後のクラッド材の耐衝撃性を評価できるような数値解析的手法を確立することにより試験と数値解析の両面からの耐衝撃性に関する有効性を評価することができる。

前年度実施したクラッド材の衝撃試験解析では、クラッド材内側で内面破壊が起きる影響により吸収エネルギーが EHP ステンレス鋼単体の衝撃値よりも大きくなるなど、材料特性の設定方法に課題が残った。また、解析に対応するクラッド材のシャルピー衝撃試験においてもクラッド材の接合界面への衝撃力の伝播によって接合界面での剥離が発生し、クラッド材そのものの耐衝撃性能評価ができなかったため、接合界面での耐剥離性を担保するため、Ni インサートしたクラッド材について耐衝撃性を評価する必要がある。

本年度は、Ni インサート材を挟んだクラッド材を対象に切欠きの応力集中や破壊靱性を考慮した素材特性の設定や母材の衝撃刃衝突部位での先行的な破壊を防ぐモデル化を行い、汎用衝撃・構造解析プログラム「LS-DYNA」を用いてシャルピー衝撃試験を模擬した衝撃解析を実施した。

(2) 解析モデル

材料特性を決めるための SUS316L の単体試験片および EHP ステンレス鋼の単体試験片、さらに合せ材 EHP ステンレス鋼の厚さを変えた 3 種類のクラッド材試験片を対象に前年度作成した解析モデルの改良を行った。衝撃試験解析の概要図を図 3.2-44 に示す。試験片および試験装置の形状は JIS B 7722 および JIS B 7740 に従っており、試験片の水平断面を対象とした 2 次元要素で解析用のメッシュを作成している。試験片となるクラッド材はベース材が SUS316L、合せ材が EHP ステンレス鋼で、合せ材には V ノッチが入っている。受け台と衝撃刃は剛体要素でモデル化し、境界条件として衝撃刃には初期速度を与え、受け台は完全固定としている。試験片と受け台の干渉部わかるは固着しない接触条件としている。

破断の模擬は試験片の中央鉛直方向に予め破断面を想定して V ノッチ底部から鉛直方向に向かって 2 重節点と接触面を定義し、Mises 応力が破断応力を超えると節点が離れるように

設定した。ベース材の SUS316L と EHP ステンレス鋼の接合面は Ni インサートによる接着効果があるため、解析上は同一接点とした。

(3) 素材特性の設定

解析モデルの改良においては、FEM シミュレーションによりシャルピー衝撃挙動解析の妥当性を検証した文献 5 を参考として、試験片のモデルを 4 つの部位にわける、それぞれに応力集中や破壊靱性を考慮した異なる素材特性を与えた。各部の素材特性部位を 図 3.2-45～47 に示す。

- ・ V ノッチ底先端から 0.5mm までの部位（素材特性①）には、応力集中を考慮して 2 次剛性と破壊塑性歪を低下させた物性値
- ・ 切欠き先端 0.5mm から内側 1mm までの部位（素材特性②）には、破壊靱性に支配されるため、2 次剛性を高くした物性値
- ・ 衝撃刃の衝突部から 1mm までの部位（素材特性③）には、先行して内面破壊が起きないように破壊ひずみを高くした物性値
- ・ 衝突部から離れた部位（素材特性④）については、延性特性であることを考慮して引張試験で得られる物性値

と同等の値をそれぞれ設定した。750°C×1,500h 熱時効処理した後の SUS316L および EHP ステンレス鋼それぞれの単体について解析モデルでシャルピー衝撃試験による吸収エネルギーが近似するようにトライアンドエラーの解析を繰り返して各部の素材特性にあった物性値を決定した。決定した EHP ステンレス鋼の物性値を 表 3.2-6、SUS316L の物性値を 表 3.2-7 に示す。また、物性値を決定した際に単体で衝撃試験解析を行った時の吸収エネルギーを 表 3.2-8 に示す。

クラッド材試験片モデルでの素材特性は単体の時と同じように設定した。したがって、合せ材（EHP ステンレス鋼）については素材特性①～③、ベース材（SUS316L）については素材特性②～④をそれぞれ適用した。

(4) 衝撃解析

項 3.2.1.2 で実施したシャルピー衝撃試験に合わせて 750°C×1,500h 熱時効処理をしたクラッド材を対象とした衝撃解析を実施した。クラッド材の解析対は条件 1（V ノッチ底からの合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さ 1mm）、条件 2（同 2mm）および条件 3（同 3mm）の 3 種類である。解析用メッシュ 図 3.2-48～50 に示す。

クラッド材の衝撃解析による変形履歴 図 3.2-51～53 に示す。V ノッチ底からの合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さの違いにより変形挙動に大きな相違はないが、合せ材が厚くなるとわずかに破壊が始まるまでの粘り強さがみられる。いずれの条件においても亀裂が入り始めると一気に亀裂が進展し破壊に至る。破壊後の形状は曲げによる残留変形が残っておらず、脆性破壊の挙動を模擬できているといえる。また、モデルの改良効果により前年度の解析でみられたベース材の内面で先行的に発生する亀裂は発生していない。

クラッド材の衝撃解析で得られた吸収エネルギーの結果を 表 3.2-9 示す。条件 1 の吸収エ

エネルギーは 125J で、SUS316L 単体の場合の吸収エネルギー20J を 100J 以上上回っている。また、条件 2 および 3 の吸収エネルギーはそれぞれ 172 および 175J と、大きな差は出ないが、条件 1 と比較して 50J 程度大きく、25Cr-35Ni-EHP 鋼単体の吸収エネルギーよりは 50J 近く小さくなっている。

合せ材の V ノッチ底厚さ別に項 3.2.1.2 で実施したシャルピー衝撃試験とクラッド材の衝撃解析の吸収エネルギーを比較したグラフを図 3.2-54 に示す。25Cr-35Ni-EHP 鋼、SUS316L の単体の結果は物性値を決定する際に試験結果に近づくよう合せ込みをした際のものである。クラッド材の吸収エネルギーは V ノッチ底厚さによらず各条件ともに試験結果とそれほど差のない結果が得られている。したがって、今回実施したような部位ごとに素材特性を変えて単体の吸収エネルギーを合せるモデル化手法によって FEM 解析によるクラッド材の耐衝撃性をある程度評価することが可能であることが検証できた。今回の FEM 解析においては、Ni インサートしたクラッド材の場合には V ノッチ底厚が 1mm で耐衝撃性能を担保できるという結果が得られた。

3.2.2.3 まとめ

(1) クラッド材の耐食性・耐 EAC 性の保持条件評価に資する解析

クラッド材の耐食性・耐 EAC 性の保持条件評価に係わる解析では、EHP ステンレス鋼の粒界腐食影響の把握に資する相互拡散評価フレームを構築し、相互拡散わかる析の施行を行った。施行内容と試行結果は下記の通りであった。

- ・評価フレームを構成する要素は試験、解析、評価であり、今年度は解析までの試行を行った。
- ・EHP ステンレス鋼と SUS316L のクラッド材について濃度プロファイルに基づき Fe の拡散係数を見積もった。
- ・試行の結果、拡散係数のアレニウスプロットを得た。これにより解析結果が試験と定性的に同じ傾向を示すことを確認した。

(2) 照射誘起拡散を考慮したクラッド材の経年材質変化と力学的評価に資する解析

照射誘起拡散を考慮したクラッド材の経年材質変化と力学的評価に係わる解析では、クラッド材の耐衝撃性能を数値解析的に評価するため、解析のモデル化や解析方法を検討し、シャルピー衝撃試験を模擬した衝撃解析を実施した。

- ・破壊靱性を考慮して部位ごとに素材特性を変えて与え、単体の吸収エネルギーを試験結果と合うように物性値を決定した。
- ・上記の方法により V ノッチ底厚さを変えたクラッド材の衝撃解析についても耐衝撃性能を示す指標となる吸収エネルギーに関してシャルピー衝撃試験の結果と近似する結果を得ることができた。
- ・V ノッチ底からの合せ材 25Cr-35Ni-EHP 鋼層の厚さが 1mm で耐衝撃性能を担保できるという結果となった。

3.2.3 試験と解析による環境適用性の考察

平成 27 年度は、接合性能の評価試験結果が良好で、実用性の高い動的拡散接合材である 25Cr-35Ni-EHP 鋼による圧延クラッド材に対する環境適用性評価試験を実施した。本事業では、図 3.2-55 に示す耐照射性の中で 25Cr-35Ni-EHP 鋼自体の基礎情報が少ない γ 線照射場の環境適用性評価を主体として実施した。当該材の適用先としての低中温運転の現行軽水炉と高温運転の高速増殖炉や超臨界圧水炉等の革新炉の環境適用性の要求条件の違い（図 3.2-56）を念頭におき、 γ 線照射場熱時効による材質変化や高温水蒸気中の腐食／環境誘起割れの評価試験に関して、ステンレス鋼の γ 相の安定性に依存した金属組織学的特性の違いを考慮した最適な解析評価の条件を選定した。主な留意点と評価の視点は 図 3.2-57 および 図 3.2-58 に示す通りである。本事業で評価対象としたクラッド材は上記の双方の炉に適用できる板組「EHP/(Ni)/SUS316L」のクラッド材および現行軽水炉へ適用できる板組「EHP/(Ni)/A533B」のクラッド材である。その中で、特に、Ni インサートの有効性、必要なクラッド肉厚、さらに環境誘起割れの抑制等に対する 25Cr-35Ni-EHP 鋼の優位性評価に必要な基礎情報の取得に力点を置いた。

3.2.3.1 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験によるクラッド用素材の耐食性評価

平成 26 年度までの事業では、450℃以上の高温側の γ 線照射場の水蒸気中のすきま腐食や酸素中の内圧クリープ試験を行い、酸化性ガスの吸着する材料表面では材料側から放出される低速電子励起による原子状酸素の直接的作用の関わる腐食反応に支配されることを明確した（図 3.2-59）。

平成 26 年度は、クラッドのベース材について γ 線照射場加熱条件における経年材質変化の低速電子励起界面反応が重要となる水蒸気すきままでの環境誘起割れ評価を実施した。当該現象は原子状酸素の直接反応の高酸素ポテンシャルでの酸化反応が関係しており、表面に Cr 酸化物を直接生成する低 Ni の SUS316L では表面で高次酸化物 Cr_2O_3 を生成して気相へ逃散するため、酸化膜の保護性の喪失による酸化膜成長の加速傾向が明確となった（図 3.2-60 左図）。当該現象は低速電子励起界面反応の影響が大きくなる比表面積の大きいすきま条件では、自由表面と比較して著しい酸化膜成長が確認された（図 3.2-60 右図）。また、内圧クリープ条件では酸化クリープによる原子状酸素の基地金属への侵入が促進されて、高温側では過飽和となった O による内部酸化物の生成の促進、低温側では O の優先拡散する結晶粒界の脆化を招くことが明確となった。Ni と Cr 量が高く、Ni と Fe 主体の混合スピネル外層を形成して拡散障壁層となる Cr_2O_3 を主体とした内層の形成能の高い 25Cr-35Ni-EHP 鋼ではいずれ条件でも優れた耐食性を示した（図 3.2-61）。図 3.2-62 右図に示すように γ 線照射場の軽水炉の BWR 相当の沸騰伝熱条件では上記に対応した酸化膜の生成機構の異なりが明瞭に現れ、保護性が保持される 25Cr-35Ni-EHP 鋼に対して、現行 SUS304L では Cr が酸化膜中に濃縮されず、環境側へ逃散し、 O の鋼中への拡散浸透挙動が明確となった。それは、酸素ポテンシャルの高い条件では 図 3.2-62 左図に示すように材料表面での Cr_2O_3 の平衡蒸気圧が高くなり、容易に逃散してしまう傾向と対応している。一方、従来の軽水炉の環境誘起割れは水溶液中の SCC を想定して試験解析してきたが、粒内応力腐食割れ（Transgranular Stress Corrosion

Cracking／以下、TGSCC と略す）から粒界応力腐食割れ IGSCC（Intergranular Stress Corrosion Cracking／以下、IGSCC と略す）への複雑なわかる岐挙動や高吸収線量で高温となる BWR 制御棒鞘管の単サイクルでの破損等の現象の説明が困難であった。本事業では、 γ 線照射場特有の腐食挙動を想定して、高温化している割れのすきま内の局所的水蒸気環境における上記の内部酸化機構の重要性に鑑みて、新たな環境誘起割れのモデリングを実施してきた。

平成 27 年度は、上記の前年度の試験解析結果を踏まえて、SUS316L と 25Cr-35Ni-EHP 鋼に関して 250～350℃の軽水炉温度域の γ 線照射場の水蒸気中のすきまでも SCC が発生する可能性の評価試験を実施した。軽水炉領域の SCC での機械的要因では転位等の格子欠陥が準安定となりクリープ現象が生じず、残留応力が重要となるため、それを規定できる 2 枚のブリネル圧痕試験片の間にすきま材として SUS304 製メッシュを挟んだ DBC 法を選定した。なお、既報告の DBC 試験は、250℃の酸素飽和水中および MgCl₂ 沸騰液での SCC 試験を実施しており、25Cr-35Ni-EHP 鋼はいずれの腐食環境中でも SCC を生じなかったが、SUS316L は明瞭な塩化物割れを確認している。今年度の試験では、上記で得られている γ 線照射効果による金属組織変化を考慮した別途の予備照射試験を実施していないため、DBC 試験後材から評価用の断面片を切り出して、ストラウス試験条件による腐食により鋭敏化の進行状況を評価した。約 8 kGy/h の γ 線吸収線量率で約 1,500h 照射時効処理した DBC 試験片について外観検査の結果、SUS316L に割れ発生痕跡を見出したが、浸透探傷検査およびブリネル圧痕部の断面観察から表層上のものであることがわかった（図 3.2-63）。25Cr-35Ni-EHP 鋼では割れの痕跡も見出されず、すきま内面の腐食性状も良好であった。なお、メッシュに用いた SUS304 には残留応力の大きい網線の凸部に温度に依存した統計確率的な割れの発生が認められた（図 3.2-64）。DBC 試験片には予備照射を行っていないことや負荷した残留応力の関係もあり、明瞭な割れ発生状況が見出されなかったが、高い残留応力が想定される SUS304 製メッシュには γ 線照射場水蒸気環境において従来のタイプと異なる SCC の発生を見出した。従来の水溶液中の SCC の場合には電気化学的反應支配の湿食の機構のため、水熱力学的に水の解離度積が極大となる 250～300℃でもっとも割れが生じやすく、300℃以上の水蒸気中では生じないことになる。従って、今回の環境誘起割れの機構は過年度の 450℃以上の γ 線照射場の酸化性ガス環境での酸素原子による内部酸化や粒界脆化の新しい機構の環境誘起割れが軽水炉温度域での水蒸気中でも生じることと解釈することができる。併せて、これまでに軽水炉で経験されてきた腐食損傷事例の SCC の内、すきまや割れ先端での複雑な IGSCC のわかる岐伝播過程や応力的に発生が抑制される溶接金属への割れの伝播過程は従来の電気化学的反應支配の腐食機構や破壊力学的機構を念頭にした皮膜破壊型の SCC では説明が困難であった。それらに関しては、今回の試験結果から原子状酸素の高い酸素ポテンシャルと原子半径の小さい侵入型固溶原子の高い輸率による内部酸化や粒界脆化が γ 線照射効果と相まって促進される機構である可能性が高い。それは、従来の SCC とは全く異なる割れ伝播機構として、今後、試験データの蓄積と新しいモデルの構築が重要となる。

発電炉の実機条件での炉内構造材料における照射効果に関しては、速中性子や加速器を用いた高い dpa/s の短時間照射試験を基にし、約 20dpa 程度で飽和する Ni や Cr 等の照射誘起

偏析 (Radiation Induced Segregation/以下、RIS と略す) に基づいて IASCC の機構説明がなされてきた。しかし、現実的には、もっとも IASCC が厳しいとされる制御棒鞘管では僅かに 1 サイクルの低照射量で破損しており、IASCC の発生の敷居値も 1dpa 以下と小さい可能性が大きい。過去には、鋭敏化が重要な課題となり、本試験の SUS316L のような低炭素仕様の非鋭敏化鋼が開発されたが、それは中高温度での短時間にみられる鋭敏化の知見に基づいている。γ線照射場の 350°C で水蒸気中試験を行った 25Cr-35Ni-EHP 鋼と SUS316L のストラウス試験条件による腐食後の DBC 断面中央部の腐食性状の SEM 写真を図 3.2-65 に示す。当該照射時効条件で γ 相が安定な 25Cr-35Ni-EHP 鋼は試験片のブリネル圧痕に近い強加工部と非加工部のミクロ的金属組織には大きな違いを生じていない。一方、γ 相安定性が低い現行 SUS316L は加工により粒内の粗大迂りやマルテンサイト変態を生じるため、400°C ノーズのスピノーダルわかる解による MPC (Martensitic Path Corrosion) 型の低温鋭敏化に伴い、非加工部と強加工部では明瞭な腐食性状の違いが顕在化しており、当該材の発電炉の炉心材料の腐食損傷で経験されたように、IGSCC と TGSCC 双方の高い感受性を持つことが示唆される。従って、軽水炉温度域における低炭素仕様の SUS316L が残留応力の負荷で抑制できるとする現行対策には照射時効に伴う金属組織変化を生じるため、長期的健全性の保持対策の妥当性の評価が必要といえる。次項に記すクラッド材の経年材質変化の電気化学的評価試験では、γ線照射場では低温でも C の拡散が促進され、母相中の C の溶解度の減少とともに γ線照射効果の関わる粒界に優先拡散する C と Cr 等の主要元素組成の変化により低温の鋭敏化が促進される可能性が大きく、水蒸気中の励起酸素が関わる局所的な高温酸化型の機構と相まって、環境誘起割れの促進要因と考えられる。なお、PWR で 1 次系の SCC が少ない事象は本研究結果から水蒸気発生炉の BWR と異なり、水蒸気を生じ難い加圧型で、かつ H ガス注入効果により低速電子励起酸素が生成困難な条件として説明可能である。低速電子励起界面反応の重要性は水蒸気等の酸化性ガス条件と材料界面から励起した原子状酸素の空間濃度の高いすきま条件であることが重要である。その具体的示唆として、PWR ではすきま部を持つバップルフォーマーボルトの多量の SCC 破損事例や Zircalloy-4 燃料被覆管の酸化膜がブリークアウェイして皮膜割れした後の酸化膜の異常成長挙動、また PWR でも低速電子励起界面反応の重要性を示唆していると解釈できる。本事業で実施した γ線照射下での環境誘起割れ機構では低 dpa/s での効率的な照射効果と低速電子励起界面反応による原子状酸素の強い酸化脆化作用の双方が重要と考えられ、当該機構を包括できるグラフィックシミュレーションによるモデル化の基礎検討 (図 3.2-66) を実施しており、割れの発生および進展の支配因子要因と割れの各進行段階での数値解析に必要な境界条件設定に必要な試験データが蓄積できれば、従来の SCC モデルで説明困難であった環境誘起割れの具体的な解明と評価が可能となる。

3.2.3.2 高温熱時効処理したクラッド材のシャルピー衝撃試験による破壊抵抗性評価

クラッド材の実機適用に際して、実用環境ではさらに照射時効による接合界面の経年材質変化が促進されるため、それに適した高度の接合性能が要求される。適用先となる高温炉の原子炉容器や炉内構造物では、現行材 SUS316L が供用温度域で時効脆化を生じてシャルピー

衝撃値が許認可基準を下回る実用化の課題があり、それを解決する手段として 25Cr-35Ni-EHP 鋼によるクラッド材の有効性評価が重要となる。模擬時効条件は昨年度に実施した各母材の時効効果の温度と時間依存性の評価結果から衝撃値が極小値となる 750℃×1,500h の保守的条件を選定した (図 3.2-67)。評価試験に供したクラッド材は Ni インサートなし、ありの 2 種類で、V ノッチ底からの 25Cr-35Ni-EHP 鋼の厚さを 1~3mm に変えたシャルピー衝撃試験片を用いた。シャルピー衝撃試験の結果、Ni インサートなし材では接合界面から剥離して破壊エネルギーが吸収されてしまうため、衝撃試験自体が完遂できなかった (図 3.2-68)。当該結果から接合性能上から不適合と判断した。一方、Ni インサートしたクラッド材ではいずれも上記の剥離を生じずに衝撃試験を実施でき、良好な接合性能が確認された。耐衝撃性には短時間の破壊工程の中でき裂の発生と伝播の両過程を含み、全吸収エネルギーでは前者の寄与率が大きいことが知られている。当該効果により SUS316L と 25Cr-35Ni-EHP 鋼の相対肉厚以上に衝撃値が改善できる可能性がある。測定結果から約 2mm 以上の 25Cr-35Ni-EHP 鋼の合せ材の厚さがあればき裂の発生の抑制効果により十わかるな衝撃値の確保が容易である結果を得た (図 3.2-69)。当該結果は相互の材料の機械的性質データを基にした破壊力学的挙動としてのシャルピー衝撃試験の 25Cr-35Ni-EHP 鋼および SUS316L の機械的性質データを基にした FEM 解析により試験結果との整合性を確認することができた。SUS316L の耐衝撃値、1mm 以上の肉厚で敷居値を達成できる (図 3.2-70)。なお、当該結果と次項で記すクラッド材の照射時効試験材の界面の成り変わる変化やストラウス試験条件による腐食状況の観察結果から 25Cr-35Ni-EHP 鋼の拡散による変質層幅が Ni インサートにより約 1/2 に以下に低減できることも明確になり、当該材を候補材に選定した。上記の衝撃値や表面欠陥や接合界面の照射誘起変質等を総合的に考慮しても 2mm の肉厚があれば実用クラッド材として適用できる。

3.2.3.3 γ 線照射場熱時効処理したクラッド材の経年材質変化

(1) 高温炉用の板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材

クラッド材の長期健全性では、長期供用期間中の γ 線照射場熱時効に伴う接合界面での材質変化域の拡大による性能低下が重要となる。Ni インサートありのクラッド材に関して 650、700 および 750℃ の 3 条件で、約 1,500h の吸収線量 8kGy/h での γ 線照射場熱時効処理と熱時効処理を施した。接合界面近傍の経年材質変化は EPMA の主要元素の濃度プロファイルわかる析、さらにそれらをストラウス試験条件により腐食させた後のマイクロ組織観察により評価した。転位等の格子欠陥が熱力学的に不安定なり、空孔による体拡散が増大する 500℃ 以上の高温側の材質変化は主要元素の相互拡散支配となるため、インサート材の Ni の濃度プロファイルの時効変化に着目して評価した。ステンレス鋼の時効脆化で重要となるのは、時効温度と合金組成が関係した Fe-Cr-Ni 系状態図上の相変化である (図 3.2-71)。25Cr-35Ni-EHP 鋼は広範囲の実用温度域で γ 相の単相が安定であるが、Ni 量が少なく Cr や Mo 等を含む SUS300 系ステンレス鋼などでは脆く、耐食性の低い金属間化合物の σ 相の生成域を持つことが重要な課題である。SUS316L の場合には、さらに数%の Mo を含有するため、凝固時の粒界反応に伴う Mo の 2 次元的化合物を結晶粒界沿いに生成し易い。それらは残留

δ 相を含めて、高温時効での σ 相析出の大きな促進要因となる。ステンレス鋼の材質変化に伴う耐食性の変化はアノードわかる極曲線として示され、評価対象となる水環境の腐食電位に対応した適切な電気化学的手法が適用できる(図 3.2-72)。平成 26 年度に実施した板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材ではシャルピー衝撃試験において接合部の剥離が確認され、その原因が上記の σ 相の影響であることを定電位エッチングやコリオ腐食試験により明らかにした(図 3.2-73)。750°Cの時効材には接合界面に明瞭な σ 相の生成がみられ、SUS316Lの母相中にもわかる布している。当該接合界面の相変化は主要元素の EPMA わかる析結果にもみられる。同じ合金系なので組成ピークの変化量は小さいが、25Cr-35Ni-EHP 鋼の接合面近傍にも σ 相形成元素の Cr の濃縮、それ先には Ni の相対濃縮を生じている(図 3.2-74)。板組「EHP/SUS316L」のクラッド材の接合界面の健全性の確保には前項のシャルピー衝撃試験での剥離防止のほかに 25Cr-35Ni-EHP 鋼への SUS316L の不純物の拡散による鋭敏化領域の拡大を抑制することが重要となる。鋭敏化度評価用のストラウス試験条件による腐食では鋭敏化ノーズ温度の 650°C(図 3.2-75)と、より C の溶解度が高く、鋭敏化が回復する高温側の 750°C(図 3.2-76)のように鋭敏化に伴う結晶粒界の腐食挙動が Ni インサート有無で明瞭に異なっており、Ni インサートによる不純物拡散の障壁効果が明瞭である。

経年材質変化におよぼす γ 線照射効果は、保持時間が 1,500h 程度で、吸収線量も 10kGy/h 程度の試験条件であったが、明瞭に現れた。実用性の確認された板組「EHP/Ni/SUS316L」クラッド材に関して、時効効果による相互拡散のモデルを図 3.2-77 に示す。主要元素の EPMA わかる析の結果、クラッドまま材、熱時効処理材および γ 線照射場熱時効処理材の Cr および Ni の濃度プロファイルに大きな違いが見出された(図 3.2-78~79)。熱時効処理材に Ni インサート材中に Cr の濃縮と枯渇がみられるのは図 3.2-71 の Fe-Cr-Ni 系の平衡状態図上、SUS316L が Cr の濃縮した金属間化合物 σ 相の析出域温度域となるため、SUS316L への Ni の拡散が抑制されるわかる、逆に 25Cr-35Ni-EHP 鋼への拡大傾向を示している。しかし、 γ 線照射場熱時効処理材ではコンプトン散乱により同エネルギー相当の電子による照射効果を受けるため、主要元素の格子間原子への弾出効果の促進により上記の制約を受けずに SUS316L へも Ni の拡散が促進される傾向がうかがわれる。上記のクラッド材の時効処理材の Ni プロファイルの相互の差わかるによる Ni の拡散域の違いを体拡散の観点から評価した結果をアレニウス依存性として図 3.2-80 に示す。 γ 線照射効果わかるに相当する活性化エネルギーはそれの熱時効に対して約 1/3 と小さい。それは、弾き出された格子間原子の移動エネルギーに相当する妥当性の高い値である。なお、弾出損傷速度の大きい速中性子による照射効果では、高温ガス炉の ALLOY800 の制御棒材の高温クリープ試験から拡散促進による定常クリープの促進効果が明確にされている。しかし、 γ 線照射で同様の効果が見出された報告はほとんどなく、今回が初めてのケースである。異種材料の組成傾斜のクラッド材を用いた試験により γ 線の照射効果を明確に見出すことができたといえる。

(2) 軽水炉用の板組「EHP 鋼/(Ni)/A533B」のクラッド材

上記のように、高温側の時効に伴う経年材質変化は体拡散支配となるが、それに対して、450°C以下の軽水炉温度域では転位等の格子欠陥が熱力学的に準安定となり、侵入型原子と

の相互作用を生じ易くなるため、原子半径の大きい置換型固溶原子の結晶粒界をまたがる長距離拡散が困難となり、結晶粒内の拡散に留まる傾向を有する。そのため、結晶粒界面での組成変化が助長される。これまでの軽水炉温度での重照射試験では、弾き出された主要元素中原子半径のもっとも小さいNiの優先的な長距離拡散によるRISが明確化しており、Niの結晶粒界での濃縮とそれに伴いステンレス鋼の耐食性保持の不働態Crが12wt%以下となる相対的な枯渇領域が生じて、IASCC感受性が高まることが重要課題になっている。しかし、現実的には、RISが増大するのは数dpa以上の高照射量であり、IASCCの感受性が高まる数dpa以下の照射効果と対応しているかは疑問が残る。クラッド合せ材の25Cr-35Ni-EHP鋼は当該機構による結晶粒界のCr濃度の低下量が母材濃度に対して20dpaの弾出損傷内で、母材中のCr濃度の約10at%内の低下量で飽和することに着目して、Cr量を25wt%Crの組成仕様としている。それにより、25Cr-35Ni-EHP鋼は例えRISの進行条件においても15at%以上の十わかるなCrが結晶粒界に残存でき、これまでの研究炉での中性子照射試験でも数dpaでIASCCを発現する現行ステンレス鋼の課題を生じないことを確認している。しかし、IGSCCが基本的に結晶粒界での鋭敏化と同様のCr欠乏域の生成とするならば、現行の低炭素仕様のSUS316Lでは450℃以下で過飽和となるC等の侵入型の不純物原子を多量に残存しているため、その格子欠陥相互作用による粒界拡散とCrの相互作用による低温鋭敏化が促進される。併せて、450℃以下で準安定となるSUS300系ステンレス鋼は図3.2-71左上図に示すように残留フェライトやマルテンサイトのミクロ的なCr濃淡相わかる離のスピノーダルわかる解により耐食性が低下するMPCと称する腐食挙動の生成域を生じる。冷間加工材ではそれは結晶粒内に生じるが、溶体化処理材でも転位網の集まりとも考えられる結晶粒界での照射誘起組成変化やC等の侵入型固溶原子の固着化によるCrの固定化等に伴う低温鋭敏化を生じる可能性がわかってきている。

本事業の25Cr-35Ni-EHP鋼によるクラッド材では接合時にA533Bから侵入した侵入型固溶原子のCの拡散域が当該温度域での熱時効や γ 線照射場熱時効によりどのように拡大し、 $Cr_{23}C_6$ の粒界析出によるCr欠乏層生成の鋭敏化領域の拡大を生じるかが健全性評価や腐食代の評価上の重要な視点となる。図3.2-81にはNiインサート有無によるクラッドまま材自体の金属組織変化とNiインサートしたクラッド材の450℃熱時効処理材の結果が示してある。Niインサート有無はCの拡散による接合界面の25Cr-35Ni-EHP鋼のCr炭化物の析出域の生成に対する影響が倍以上大きく、NiインサートによるC等の不純物の接合時の拡散の抑制効果が重要である。それは、EPMAによる接合界面を挟んだ線わかる析結果からも明瞭である(図3.2-82)。Niインサートなしの左図ではクラッドまま材にもCr炭化物の析出ピークがみられ、350℃の熱時効処理によりその領域が拡大している。一方、Niインサートしたクラッド材ではその傾向が極小に抑えられている。当該結果から実用候補材として板組「EHP/Ni/533B」のクラッド材を選定して、 γ 線照射を含む熱時効処理に伴う界面近傍での経年材質変化を検討した。相互拡散モデルは図3.2-83を想定している。450℃以下であっても照射効果により置換型固溶元素のCrやNiの拡散が促進される可能性が想定されるが、低温鋭敏化挙動の支配的要因としては γ 線の電磁波による長距離拡散の促進効果を含めたC等の拡散挙動と想定される。しかし、軽元素のCはEPMAでのわかる解能や感度が低く、また有効測定深さが小

さい Auger や XPS の表面わかる析法では表面の C のコンタミを非常に受け易いことから C の結合し易いパートナーで、定量性の高い Cr に着目して EPMA による Cr 濃度プロファイルの変化を評価した。図 3.2-84 はクラッドまま材、熱時効処理および γ 線照射場熱時効処理材の Cr 濃度プロファイルの変化を比較したものである。熱時効処理材と γ 線照射場熱時効処理材の Cr 濃度プロファイルの違いは照射効果の有無と想定される。図 3.2-85 は SUS316 の熱時効処理に伴う耐食性の低下傾向の TTC 線図である。当該試験での 300~450°C は前述の MPC と通常の Cr 炭化物析出型の低温鋭敏化域にある。ストラウス試験による鋭敏化に伴う粒界腐食傾向の違いは図中に示すように γ 線照射場熱時効処理材の場合、格子欠陥との相互作用が関わる MPC のノーズ域では、熱時効処理材より以上に大きく鋭敏化域が拡大している。写真 3.2-33~34 は当該傾向の温度依存性の違いを評価したものである。下図の熱時効処理材では通常の Cr 炭化物析出型の低温鋭敏化から想定される Cr 拡散支配に伴い、鋭敏化域が温度とともに拡大している。一方、上図の γ 線照射場熱時効処理材では 400°C のノーズ域で顕著な鋭敏化域の拡大を生じている。より高温の 450°C では γ 線照射効果による C の広域拡散の進行により C 濃度の低下域が拡大して鋭敏化領域が狭くなったものと想定される。鋭敏化は過飽和となった C 濃度に対応した Cr の結合に伴う枯渇による粒界腐食抵抗性の低下である。それは、C 濃度に対応した Cr の拡散挙動としてみる事ができる。図 3.2-86 に EPMA わかる析で得られた Cr の拡散プロファイルから得た拡散定数のアレニウス依存性を示す。熱拡散の活性化エネルギー支配のアレニウス型温度依存性を示す。熱時効処理材の結果をみると、両方ともに Cr 拡散の温度依存性を反映しているが、 γ 線照射効果の部わかるは高温時効結果のような低い活性化エネルギーの値を示していない。その理由は当該クラッド系での低温鋭敏化での Cr の拡散には C の拡散が関係しているため、双方の温度依存性が関わっていると推察される。

3.2.4 結言

平成 27 年度までに試作した板組「EHP/(Ni)/SUS316L」および板組「EHP/(Ni)/A533B」の動的拡散接合クラッド材の環境適用性を γ 線照射含む熱時効効果や腐食/環境割れに関する試験・解析を行い、さらに用途目的に対応した必要肉厚を解析評価した。(図 3.2-87)。

- (1) SUS316L への 25Cr-35Ni-EHP 鋼のクラッド化では Ni インサートが接合性能の担保と 25Cr-35Ni-EHP 鋼の変質層の拡大の抑制に不可欠である。A533B への 25Cr-35Ni-EHP 鋼のクラッド化では Ni インサートにより A533B からの C の拡散による 25Cr-35Ni-EHP 鋼の鋭敏化域を抑制できるなど、25Cr-35Ni-EHP 鋼の必要肉厚の低減を含めて Ni インサートの適用が有効であることを明確にした。
- (2) 液体金属冷却高速増殖炉 (Liquid Metal Fast Breeder Reactor : LMFBR) の SUS316L 製原子炉容器の時効脆化に伴う耐衝撃性を許認可の敷居値以上に担保するには Ni インサートした 25Cr-35Ni-EHP 鋼によるクラッド材の適用が接合界面の剥離抑制に不可欠であり、き裂発生抑制効果により約 2mm 程度の薄肉で十わかるに達成可能となる。時効に伴う Ni インサートしたクラッド材の界面近傍の材質変化は熱時効と γ 線照射時効で明瞭に異なり、高温の体拡散支配域での γ 線の照射効果の重要性の知見を得た。

- (3) 軽水炉温度域用の板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450°C以下の 25Cr-35Ni-EHP 鋼の経年材質変化は動的拡散接合時に生成する高 C 濃度の Cr 炭化物生成域からの C の拡散に伴う鋭敏化域の拡大である。熱時効処理材では高温側ほど鋭敏化域が拡大するが、 γ 線照射場熱時効処理材では格子欠陥と C の相互作用により加工材の低温鋭敏化ピークと対応 400°C で鋭敏化域の鞍点を示す。8kGy/h 程度の γ 線照射で軽水炉温度域での照射効果の知見を得た。
- (4) 過年度の SUS316L の水蒸気すきま腐食や O ガス中の高温クリープ試験で内部酸化や割れを見出され、本年度は軽水炉温度の 250~350°C で 25Cr-35Ni-EHP 鋼と SUS316L の各々に対して SUS304 製メッシュを挟んだブリネル鋼球押し込み 2 重試験片 (DBC) を γ 線照射場の常圧水蒸気中で実施した。割れは各材料側には生じなかったが、もっとも耐食性の低い SUS304L 製のメッシュの凸部には割れが発生し、温度とともに増大する水蒸気割れの知見を得た。

25Cr-35Ni-EHP 鋼と SUS316L や A533B のいずれのベース材との動的拡散接合でも Ni インサートが接合性能や時効効果が係わる経年材質変化の抑制に対して明瞭な優位性を示すことが明確となった。25Cr-35Ni-EHP 鋼は革新炉および現行軽水炉の破壊力学上の安全性や腐食および環境誘起割れの抑制用の薄肉クラッド材として十わかるな機能を果たすことが確認された。従来、材料側の照射効果に関しては速中性子による弾出損傷を中心に評価されていたが、dpa/s の大きい高エネルギー粒子線のカスケード損傷よりも dpa/s の小さい電磁波の γ 線によるコンプトン散乱電子の方がフレンケル欠陥の再結合を生じ難く、長期的な経年材質変化におよぼす影響の大きい可能性が明確になった (図 3.2-88)。また、侵入型固溶原子は低温でも拡散係数が大きいこともあり、照射効果では無視されてきたが、格子欠陥との相互作用による拡散の促進効果の重要性が見出された。一方、それらの経年材質変化が係わる腐食や環境誘起型割れに対する腐食環境側の放射線作用では、従来の軽水炉の水化学では放射線わかる解の G 値だけで評価されてきたが、それだけでは不十わかるであることが明確になった。実水炉環境は液相、気相の水蒸気を含む水熱力学系であり、従来の水化学解析手法の範囲を超えた水蒸気/材料界面特有の低速電子励起界面反応による直接的な原子状酸素や水素による放射線作用が重要な役割を果たしていることが明確になった。今後の軽水炉の安全性の確保に、各種の用途に適用できる EHP 仕様のステンレス鋼の低廉実用材料技術と技術基準化および γ 線による照射効果や放射線作用の新たな学術的研究の拡充による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と考えられる (図 3.2-89)。

[参考文献]

- 1) 株式会社 神戸製鋼所：“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”，平成 24 年度文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業原子力システム研究開発事業，平成 25 年 3 月
- 2) 株式会社 神戸製鋼所：“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”，平成 26 年度文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業原子力システム研究開発事業，平成 27 年 3 月
- 3) 仲村圭史，坂上康德，菊池潮美：“Cu-Ni/Cu/Cu-Ni 積層材料の抵抗特性”，日本金属学会誌，

Vol. 71 (2007) No. 2, p 270-274

- 4) 光田章一, 上田重朋: “電着クロムによるステンレス鋼の拡散被覆について”, 金属表面技術, Vol. 23 (1972) No. 2, P 89-94
- 5) 澤本佳和, 田中直樹: “脆性破壊を考慮した鋼素材の応力、ひずみ関係のモデル化”, 鹿島技術研究所年報, 第 50 号 2002. 9. 30, P47-54

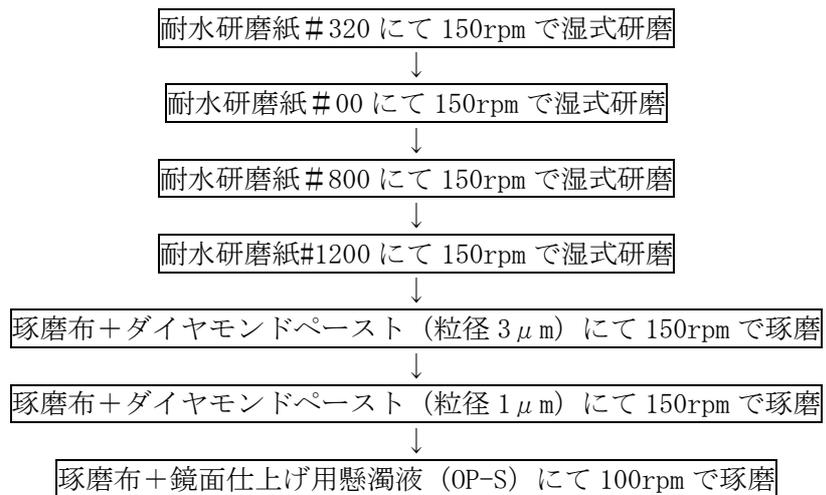


図 3. 2-1 DBC 試験片の研磨方法



写真 3. 2-1 DBC 試験片の圧痕加工用ブリネル硬度計の外観

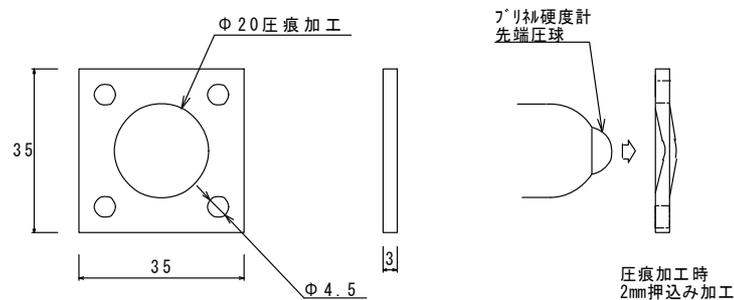
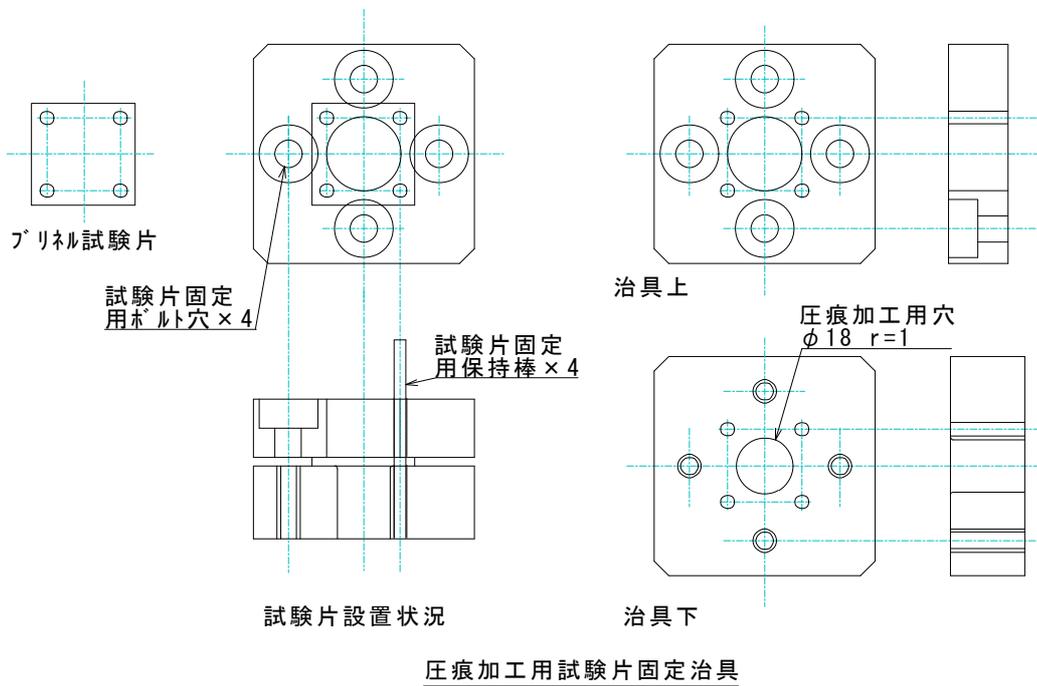
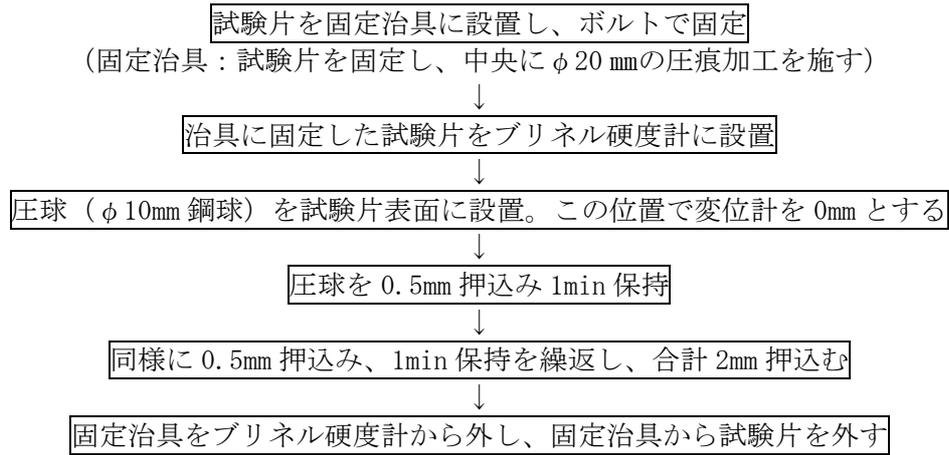


図 3.2-2 DBC 試験片の圧痕加工方法

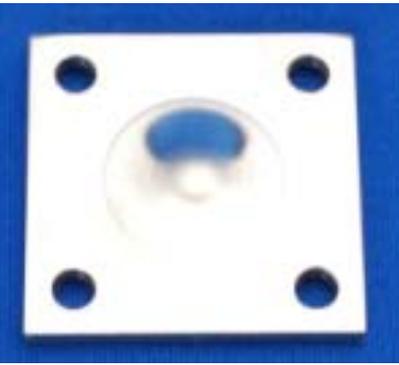
	凸面	凹面
25Cr-35Ni-EHP 鋼		
SUS316L		

写真 3. 2-2 圧痕加工後の DBC 試験片の外観

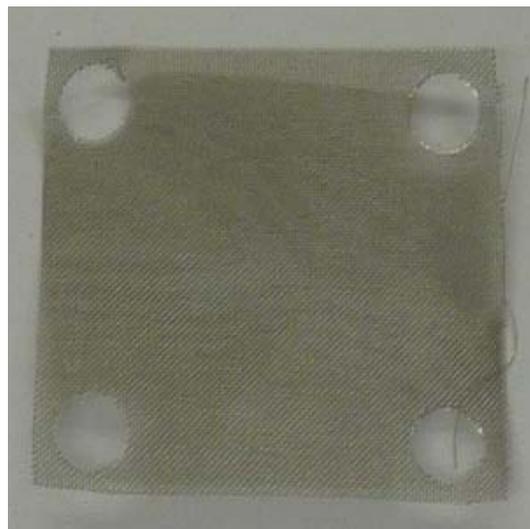


写真 3. 2-3 SUS304 製すきま材の外観 (100 メッシュ、0.2mmt)

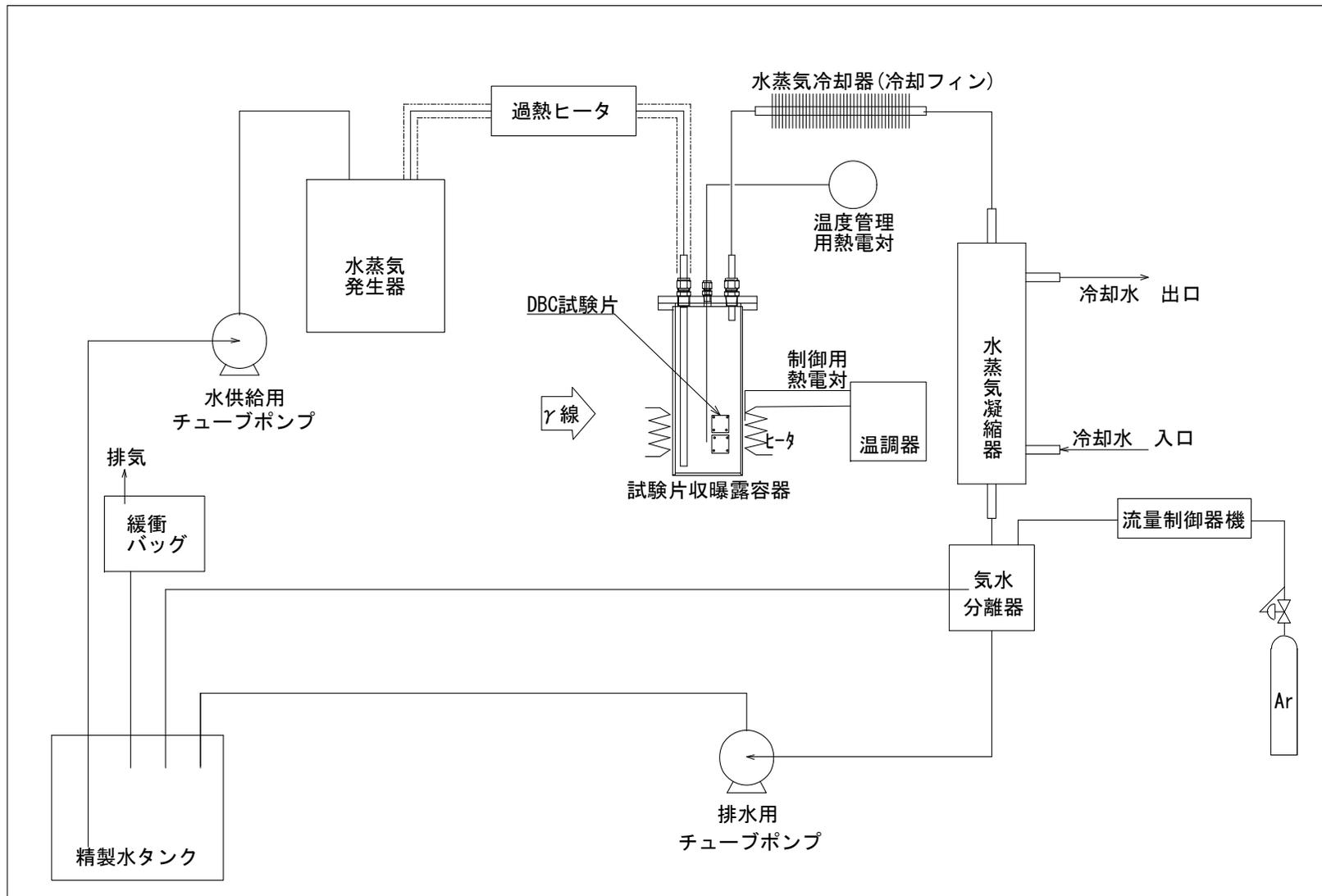


図 3.2-3 γ線照射場水蒸気環境 DBC 試験の系統図

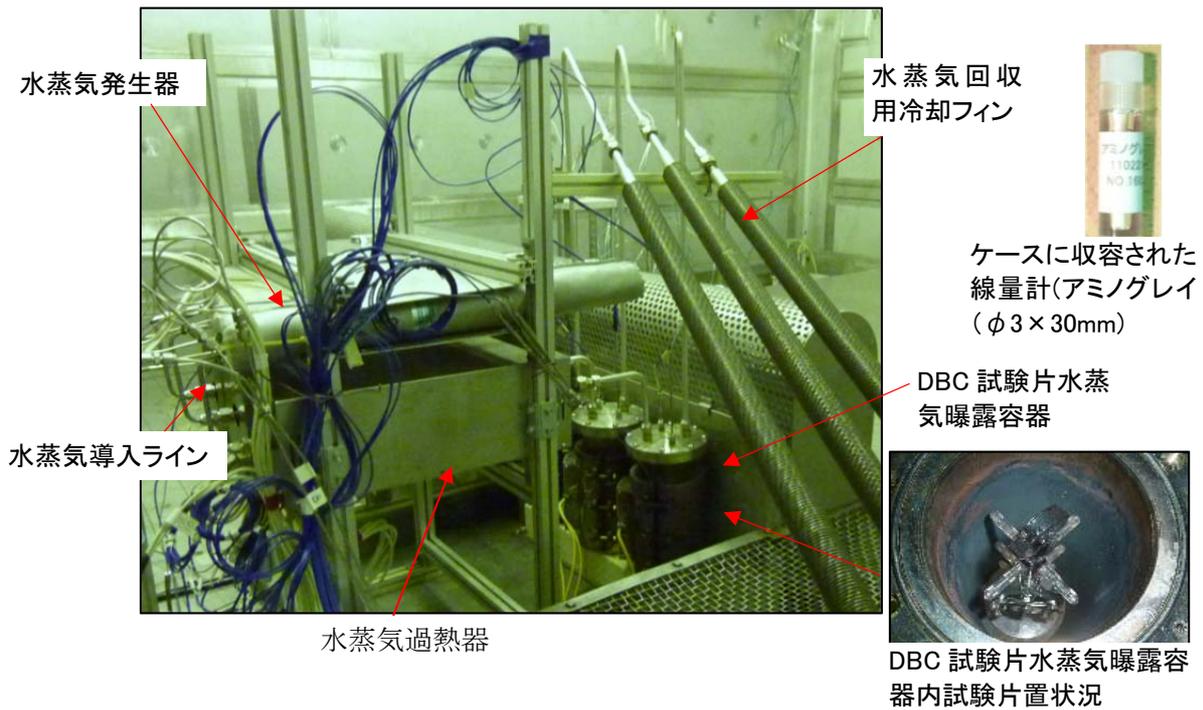


写真 3.2-4 γ線照射場水蒸気環境 DBC 試験装置の外観-その 1 (γ線照射セル内)

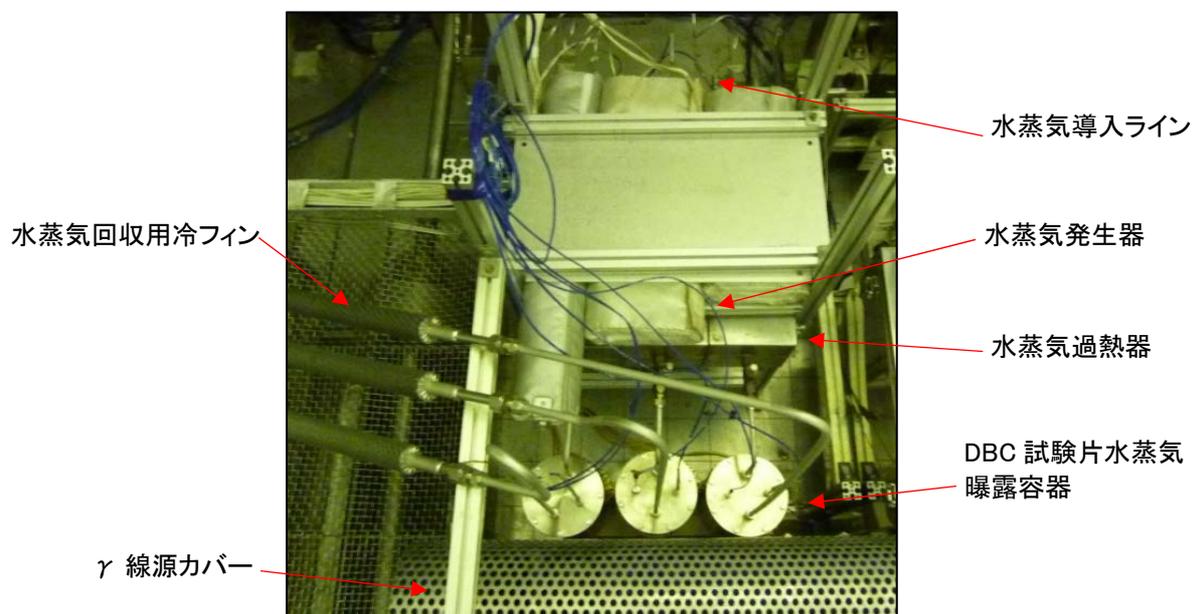


写真 3.2-5 γ線照射場水蒸気環境 DBC 試験装置の外観-その 2 (線照射セル内)

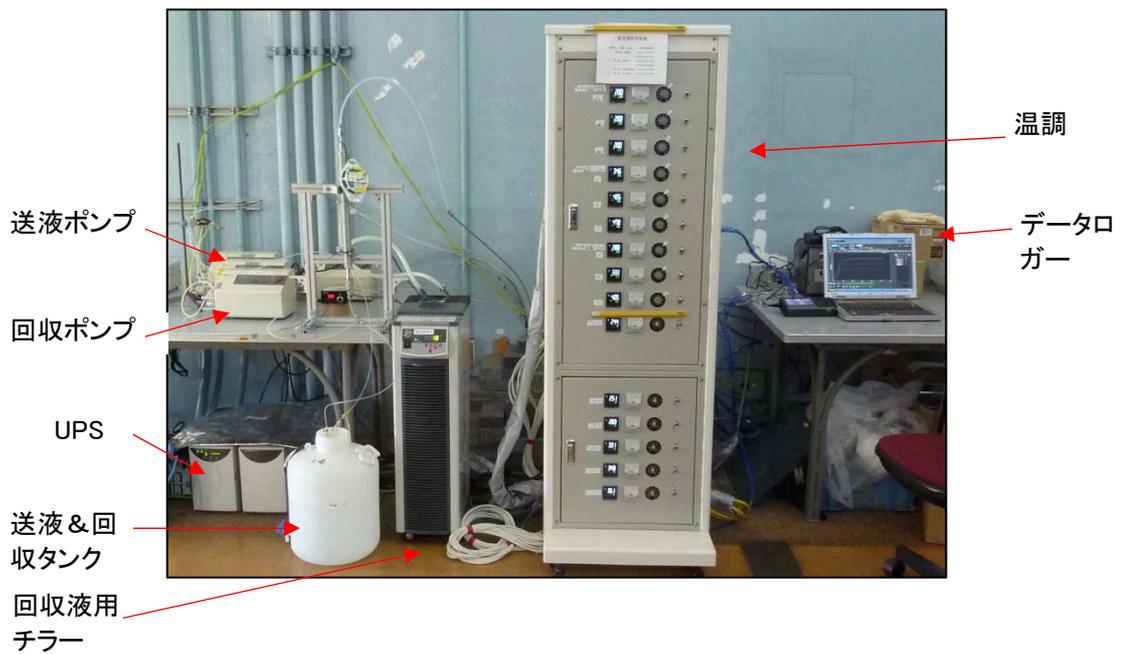


写真 3.2-6 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験装置外観-その3 (γ 線照射セル外)



写真 3.2-7 石英ガラス製ホルダへの DBC 試験片の設置状況

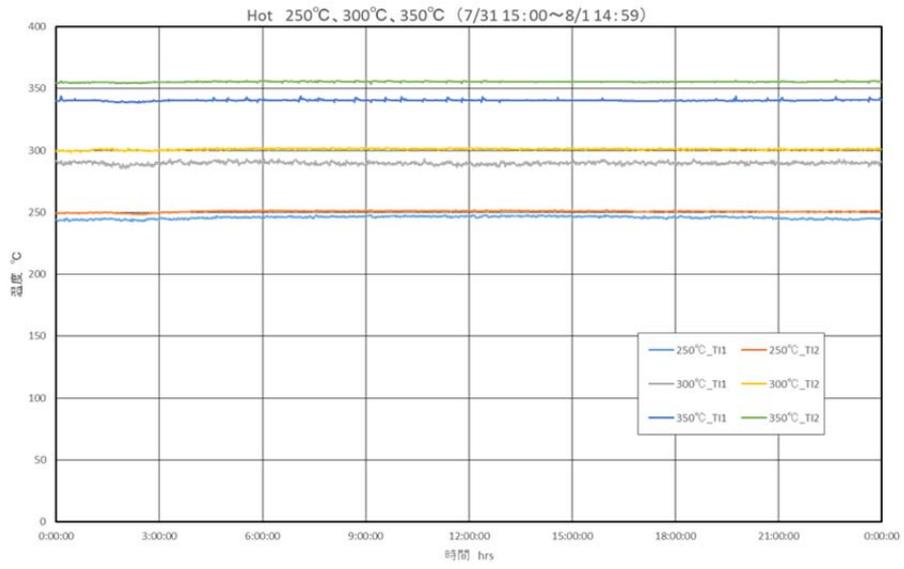
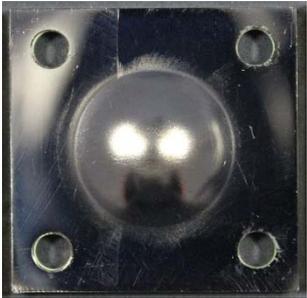


図 3.2-4 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験の水蒸気曝露温度の記録の例

25Cr-35Ni-EHP 鋼			
温度	250℃	300℃	350℃
凸面			
凹面			

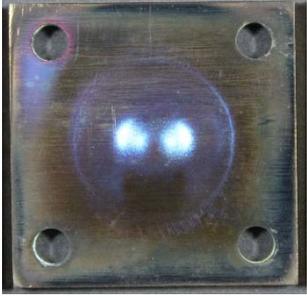
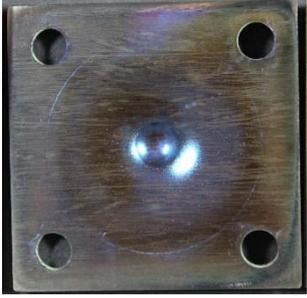
SUS316L			
温度	250℃	300℃	350℃
凸面			
凹面			

写真 3.2-8 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片の外観

表 3.2-1 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験片の試験前後の重量変化

鋼種		25Cr-35Ni EHP						SUS316L					
照射温度	°C	250		300		350		250		300		350	
線量率	kGy/h	7.98		9.70		9.59		7.98		9.70		9.59	
合わせ部面		凹面	凸面	凹面	凸面	凹面	凸面	凹面	凸面	凹面	凸面	凹面	凸面
試験片No.		C2	C3	C4	C5	C6	C11	L16	L17	L18	L19	L22	L23
試験前 重量 g	1	26.0094	25.5781	26.1328	26.6851	26.5218	26.2536	27.3300	27.6653	26.7087	27.6319	26.1285	25.7368
	2	26.0088	25.5802	26.1331	26.6844	26.5221	26.2532	27.3301	27.6656	26.7086	27.6314	26.1289	25.7360
	3	26.0091	25.5799	26.1333	26.6848	26.5219	26.2535	27.3302	27.6652	26.7084	27.6318	26.1284	25.7365
	平均	26.0091	25.5794	26.1331	26.6848	26.5219	26.2534	27.3301	27.6654	26.7086	27.6317	26.1286	25.7364
試験後 重量 g	1	26.0084	25.5789	26.1319	26.6834	26.5208	26.2528	27.3302	27.6651	26.7084	27.6312	26.1284	25.7356
	2	26.0084	25.5789	26.1319	26.6834	26.5208	26.2528	27.3303	27.6649	26.7083	27.6313	26.1283	25.7356
	3	26.0084	25.5788	26.1319	26.6834	26.5208	26.2528	27.3303	27.6649	26.7084	27.6312	26.1283	27.7356
	平均	26.0084	25.5789	26.1319	26.6834	26.5208	26.2528	27.3303	27.6650	26.7084	27.6312	26.1283	25.7356
試験前後 の重量差 g		0.0007	0.0005	0.0012	0.0014	0.0011	0.0006	-0.0002	0.0004	0.0002	0.0005	0.0003	0.0009
	平均	0.0006		0.0013		0.0009		0.0001		0.0003		0.0006	

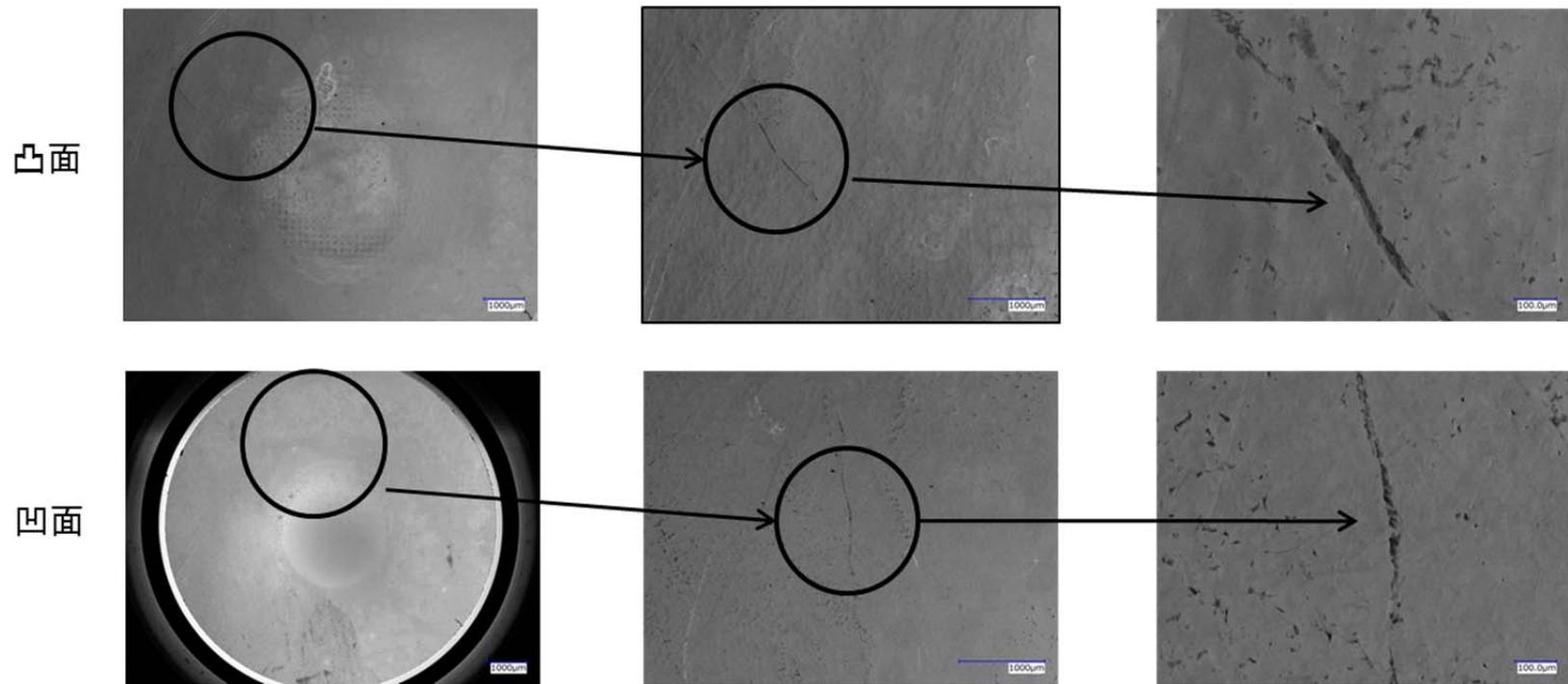


写真 3. 2-9 SUS316L の γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片の SEM 像 (350°C × 1, 500h)

表 3.2-2 蛍光探傷試験の要領

操作手順	実施内容
前処理	洗浄液 (FR-Q) を用いて表面の油脂、汚れ等を除去し、欠陥部を開口させた後、充わかるに乾燥
浸透処理	後乳化性蛍光浸透液 (AP-6) を塗布。浸透時間は 10min 放置して欠陥部に浸透液を充わかるに浸透
除去 / 洗浄処理	表面の浸透液を乾いたキムワイプで除去後、さらに洗浄液 (FR-Q) を軽く含ませたキムワイプで表面の浸透液を充わかるに除去
現像処理	現像剤 (FD-S) は充わかる攪拌した後、薄く均一に塗布。現像時間は 30min 以上放置し乾燥
観察	暗所でブラックライトを照射し試験片表面を観察する。割れは黒地に緑色の指示模様として現れる

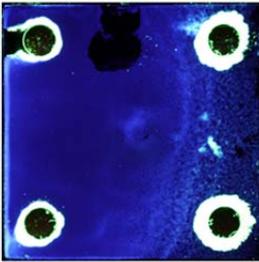
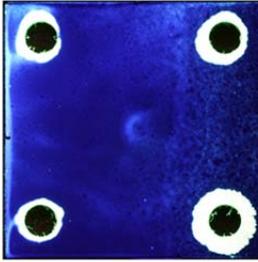
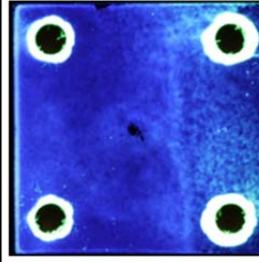
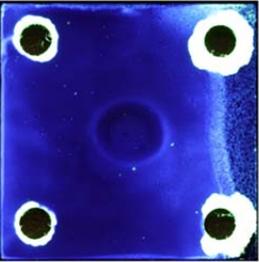
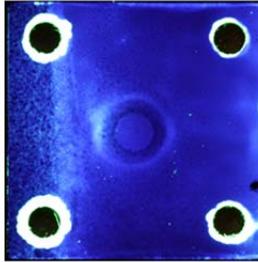
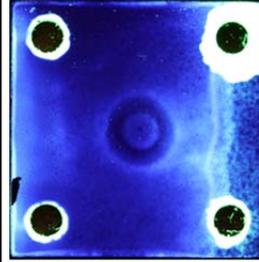
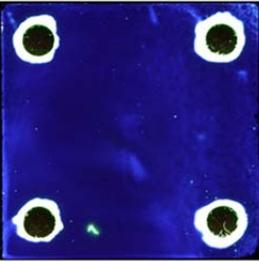
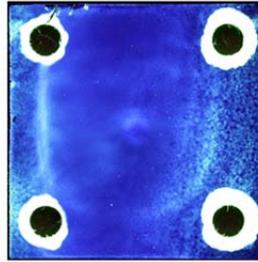
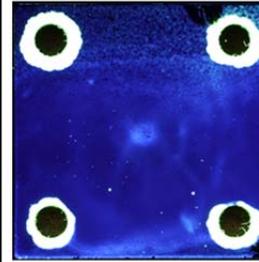
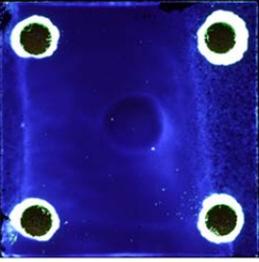
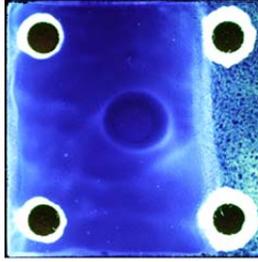
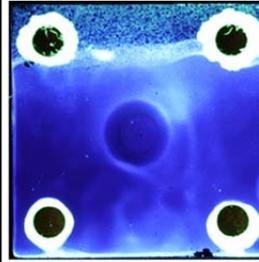
鋼種	観察面	水蒸気暴露温度		
		250℃	300℃	350℃
SUS316L	凸面			
	凹面			
25Cr-35Ni -EHP 鋼	凸面			
	凹面			

写真 3.2-10 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片の蛍光探傷試験結果

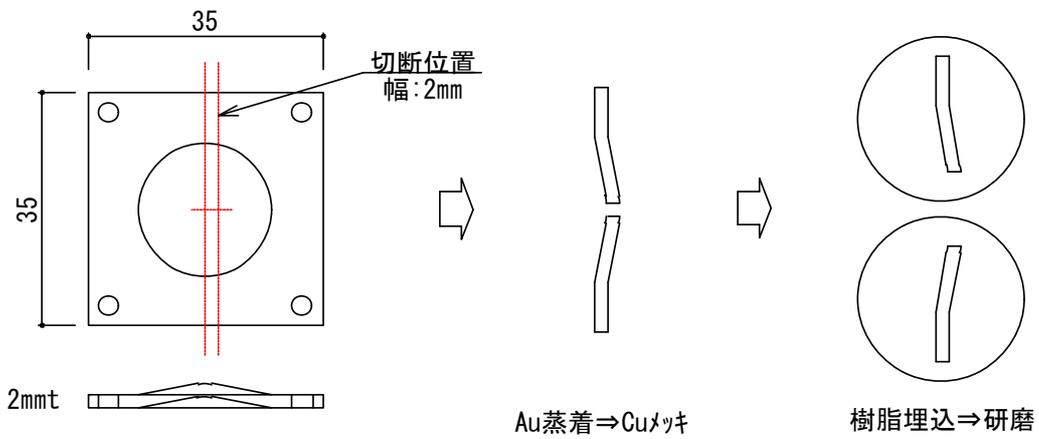
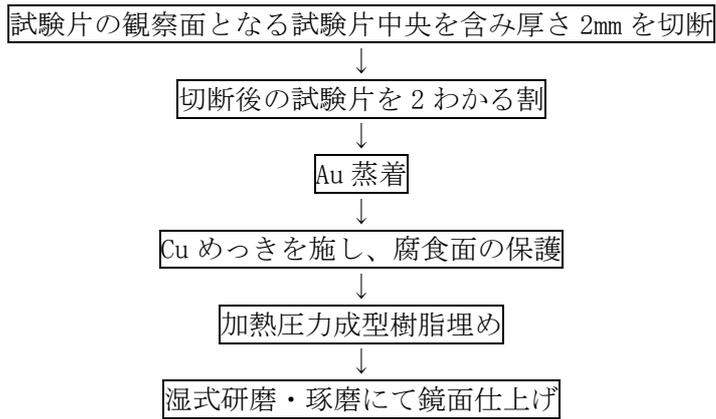


図 3.2-5 DBC 試験片の断面観察のための加工要領

すきま面	25Cr-35Ni-EHP 鋼
凹面	
凸面	
すきま面	SUS316L
凹面	
凸面	

写真 3.2-11 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の試験片断面の光学顕微鏡写真
(試験温度：350℃)

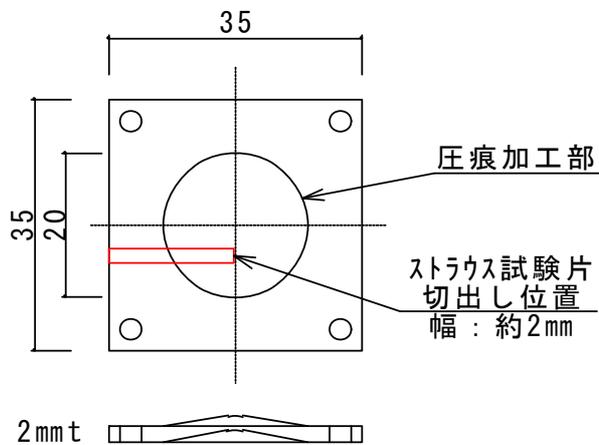
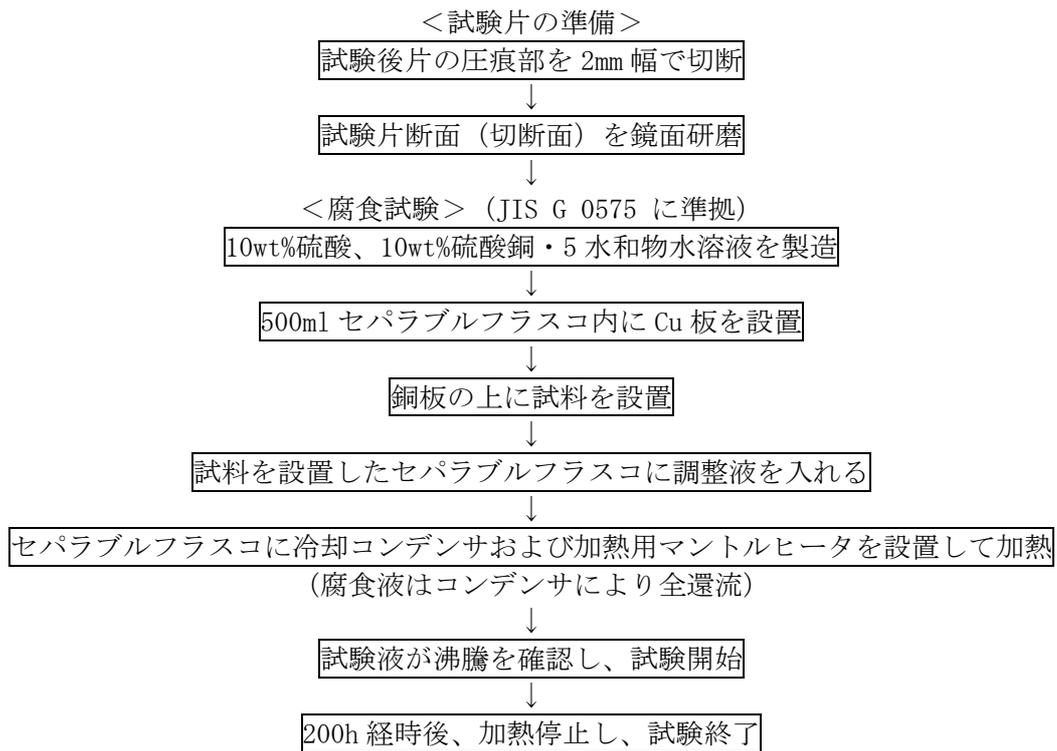


図 3.2-6 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片による
ストラウス試験条件による腐食の要領



写真 3. 2-12 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片の
ストラウス試験条件による腐食状況

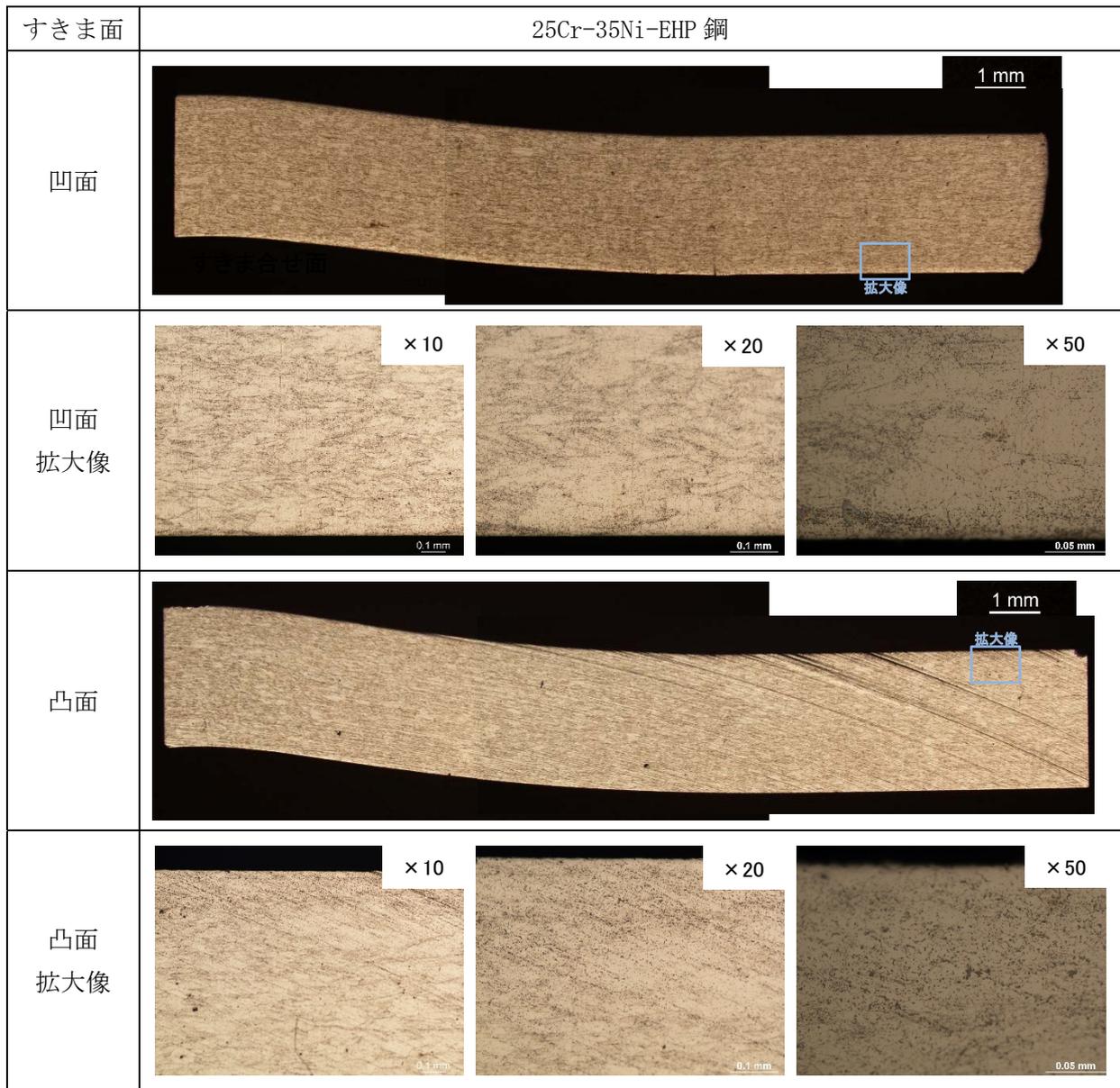


写真 3.2-13 25Cr-35Ni-EHP 鋼の 350℃ γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片の
ストラウス試験条件による腐食後の光学顕微鏡写真

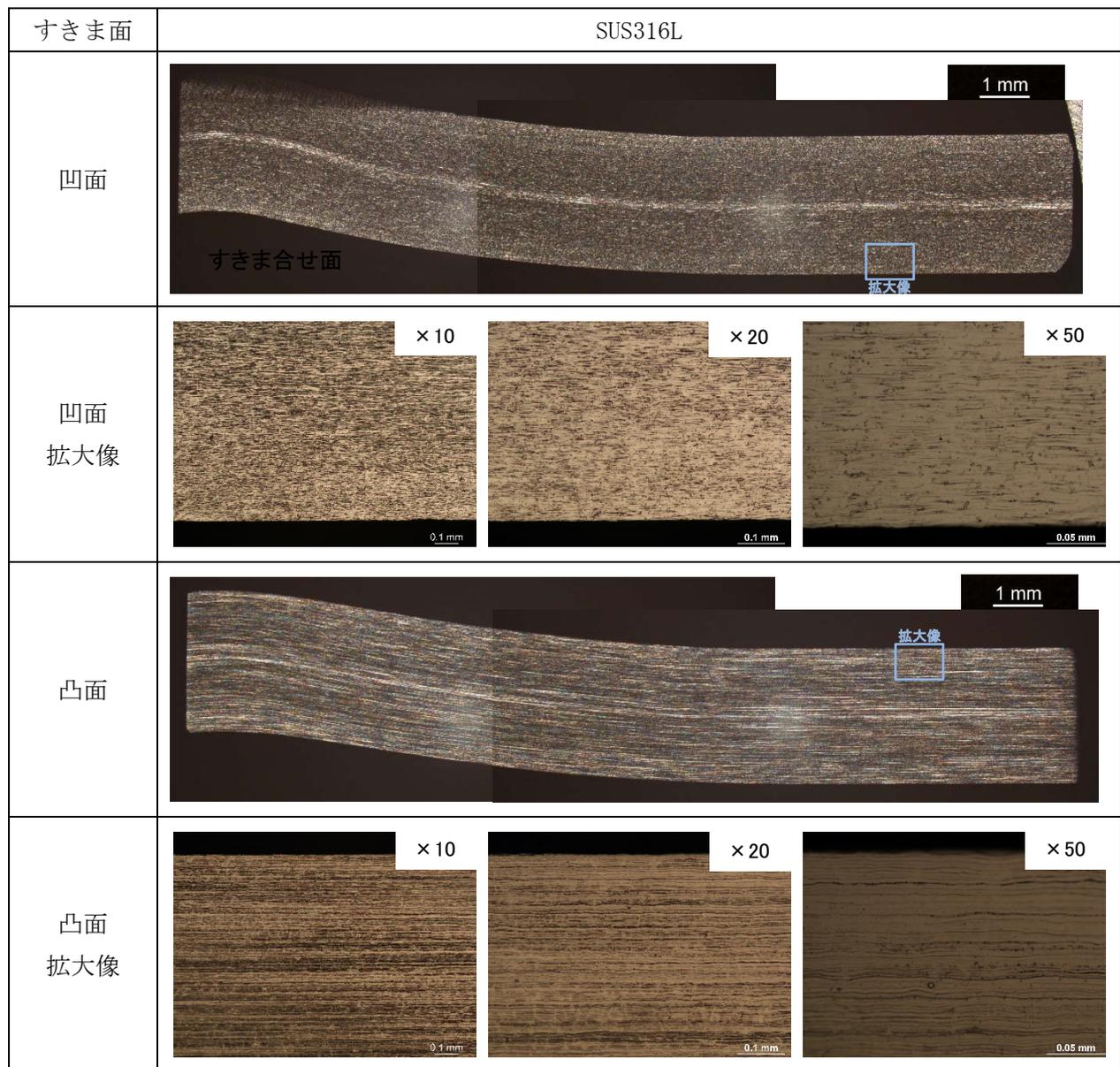


写真 3.2-14 SUS316L の 350℃ γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片による
ストラウス試験条件による腐食後の光学顕微鏡写真

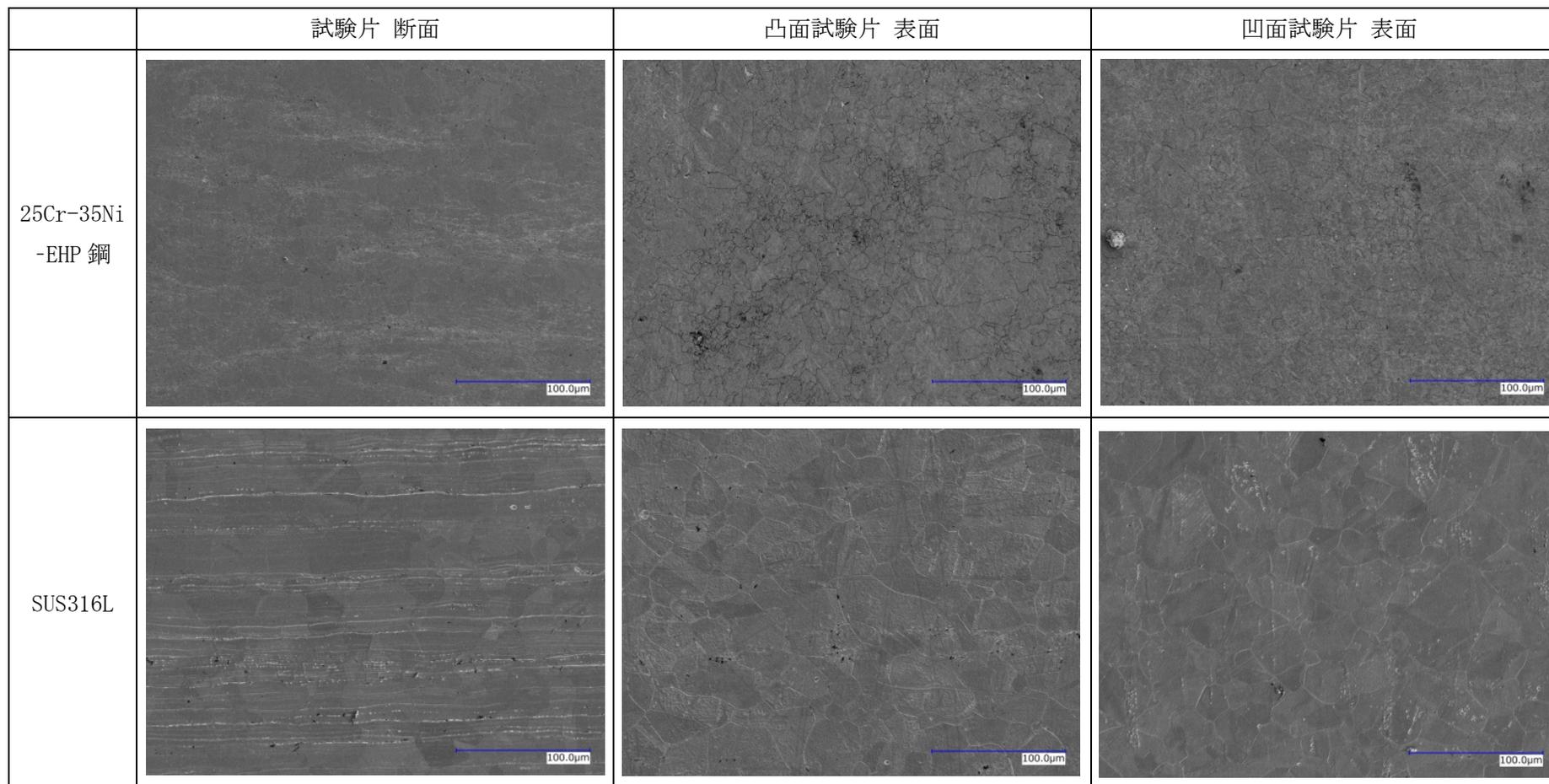


写真 3.2-15 350°C γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後の断面試験片によるストラウス試験条件による腐食後の SEM 像 ($\times 1,000$)

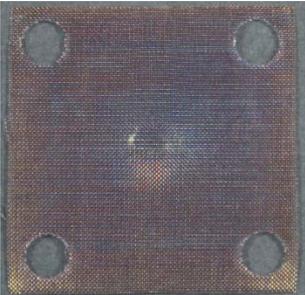
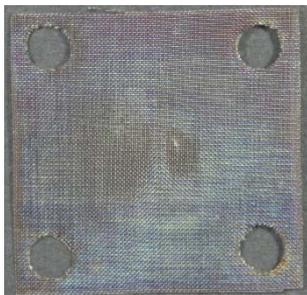
温度	250℃	300℃	350℃
すきま材 メッシュ (SUS304)			

写真 3.2-16 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験後のすきま材 (SUS304 製メッシュ) の外観

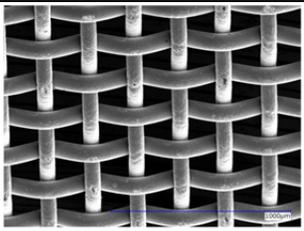
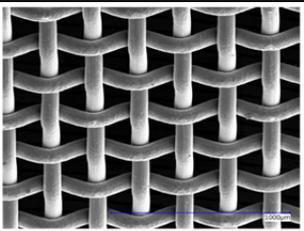
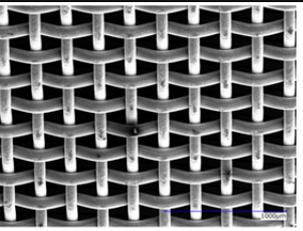
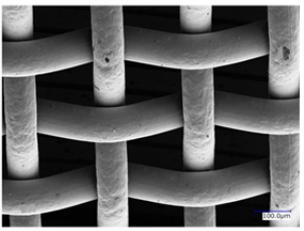
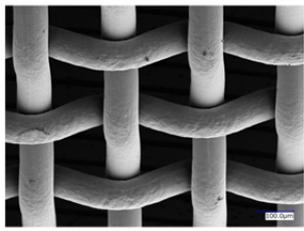
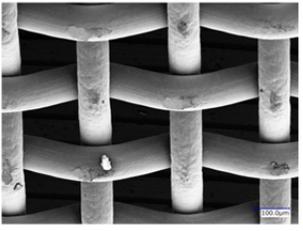
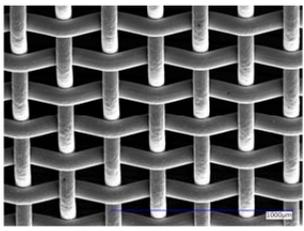
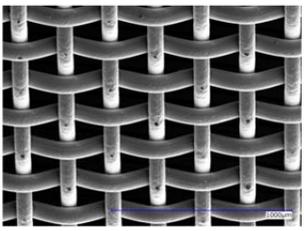
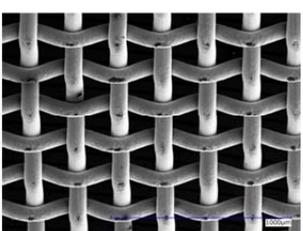
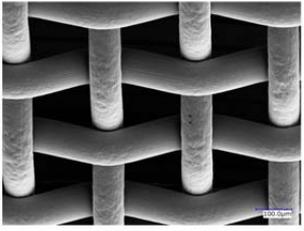
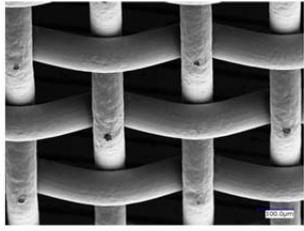
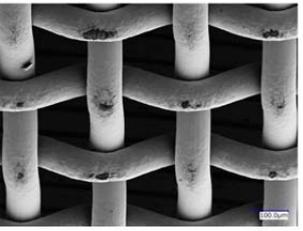
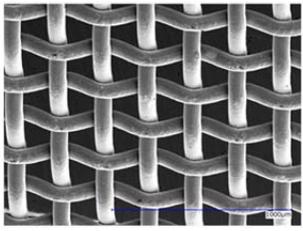
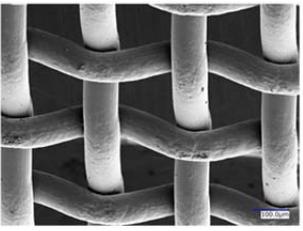
インサート材	SEM 倍率	水蒸気曝露温度		
		250°C	300°C	350°C
SUS304 メッシュ No.1	× 200			
	× 400			
SUS304 メッシュ No.2	× 200			
	× 400			
インサート材	SEM 倍率	未使用品		
SUS304 メッシュ	× 200			× 200
	× 400			× 400

写真 3. 2-17 γ 線照射場水蒸気環境 DBC 試験片のすきまに配置した SUS304 製メッシュの SEM 像

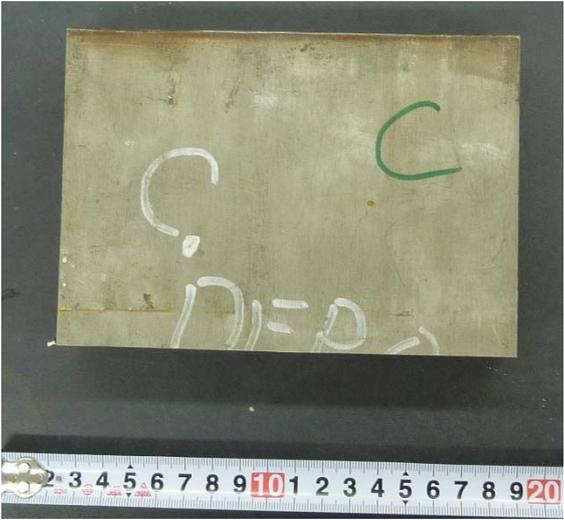
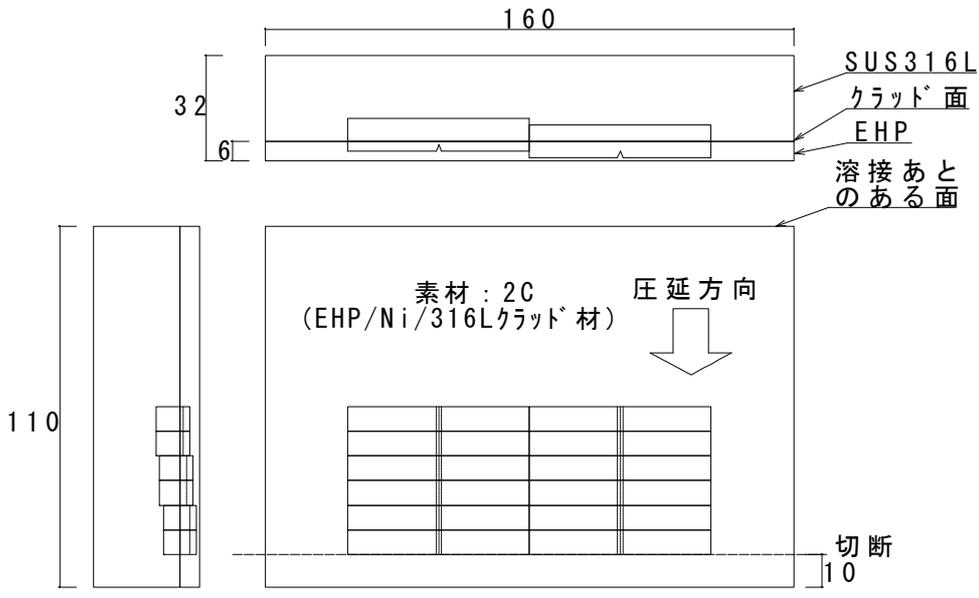
履歴	平成 26 年度試作材	
略号	2C	
品種	圧延クラッド材	
圧延率	77%	
板組	EHP(6t) / Ni めっき / SUS316L(24t)	
加工要領		
	<ul style="list-style-type: none"> ・ EHP 鋼側に 2mm V ノッチ ・ EHP 鋼の厚さ : 3、4、5mm → V ノッチ底の EHP 鋼残り厚さ : 1、2、3mm 	

図 3.2-7 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材のシャルピー衝撃試験片の加工要領
(合せ材 EHP 鋼側ノッチ)

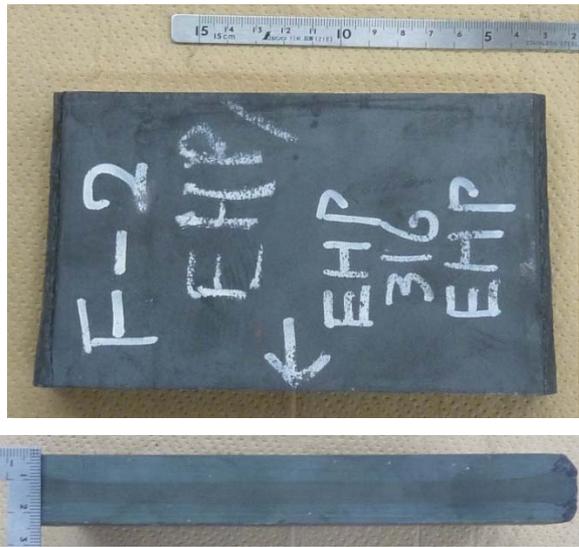
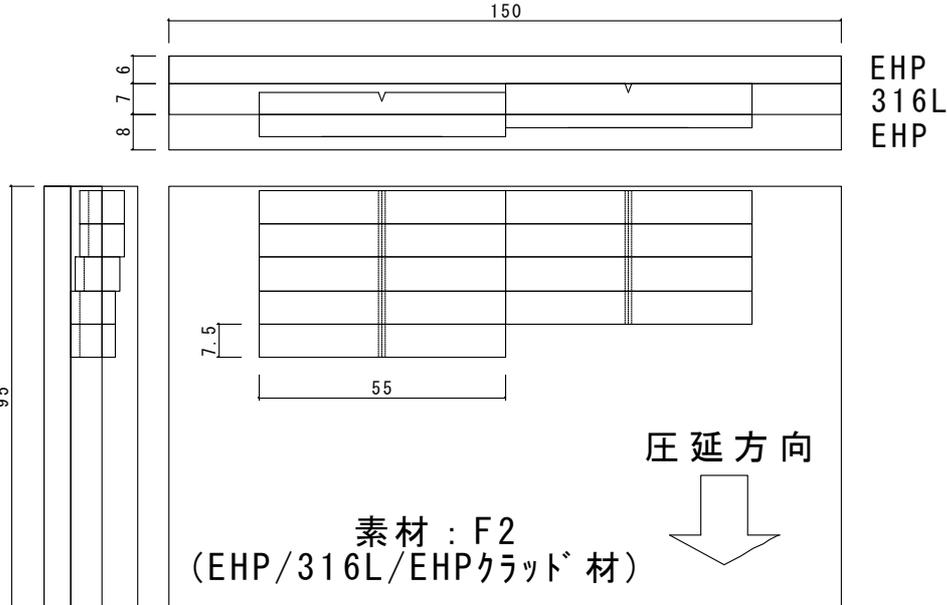
履歴	平成 24 年度試作材	
略号	F-2	
品種	圧延クラッド材	
圧延率	70%	
板組	EHP (6t) / SUS316L (9t) / EHP (6t)	
加工要領		
	<ul style="list-style-type: none"> • SUS316L 側に 2mm V ノッチ • EHP 鋼の厚さ : 3、4、5mm 	

図 3.2-8 板組「EHP/316L」のクラッド材のシャルピー衝撃試験片の加工要領
(ベース材 SUS316L 側ノッチ)

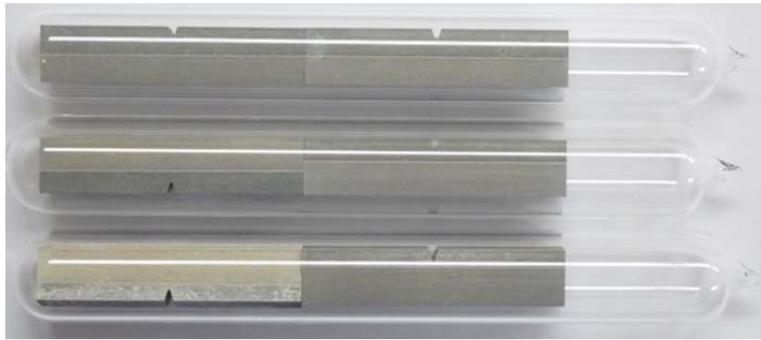


写真 3.2-18 シャルピー試験片の熱時効処理のための石英ガラスへの封入状態

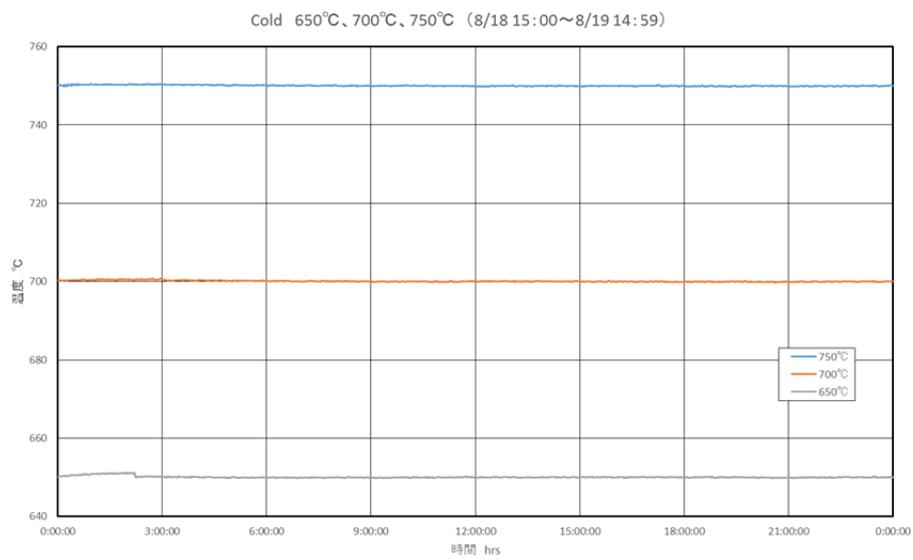


図 3.2-9 熱時効処理時の温度履歴の例
(板組「EHP/316L」および「EHP/Ni めっき/SUS316L」)

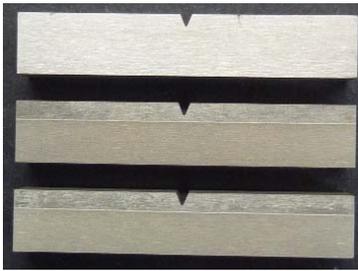
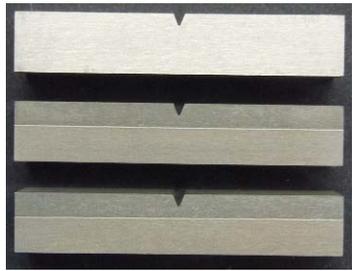
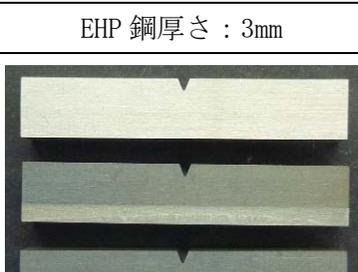
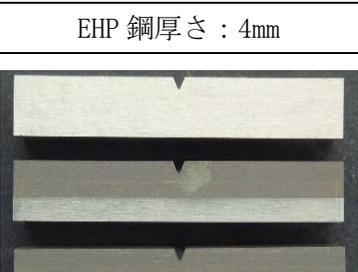
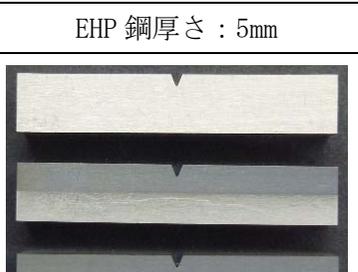
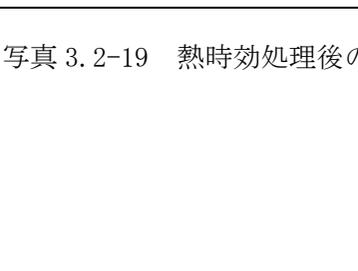
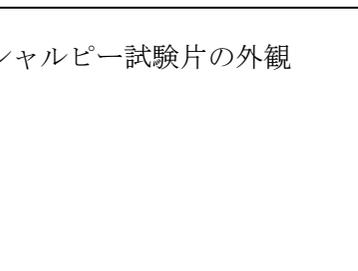
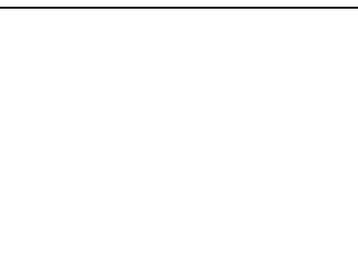
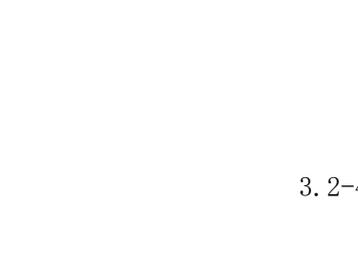
EHP 鋼側にノッチ		EHP 鋼厚さ：1mm	EHP 鋼厚さ：2mm	EHP 鋼厚さ：3mm
板組「EHP/Ni めっき/ SUS316L」	熱時効処理なし			
	熱時効処理材			
SUS316L 側にノッチ		EHP 鋼厚さ：3mm	EHP 鋼厚さ：4mm	EHP 鋼厚さ：5mm
板組「EHP/ 316L」	熱時効処理なし			
	熱時効処理材			

写真 3.2-19 熱時効処理後のシャルピー試験片の外観

表 3.2-3 熱時効処理材のシャルピー衝撃試験結果 (H26 年度結果を含む)

試験片仕様		雰囲気	温度	時間	繰り返し数	EHP/SUS316Lクラッド材				EHP/Ni/SUS316Lクラッド材			
						吸収エネルギー	衝撃値	延性破面率	横膨出量	吸収エネルギー	衝撃値	延性破面率	横膨出量
						°C	Hrs	n=	J	J/cm ²	%	mm	J
Vノッチ EHP側	EHP厚さ1mm	Ar ガラス封入	RT	-	1					283	471	-	-
			750	1500	1/2	193	322	100	2.20	101	168	100	1.35
			750	1500	2/2	221	368	100	2.21	113	188	100	1.19
	EHP厚さ2mm		RT	-	1					271	452	-	-
			750	1500	1/2	247	412	-	-	160	266	100	1.71
			750	1500	2/2	261	435	-	-	155	258	100	1.52
			RT	-	1					265	441	-	-
			750	1500	1/2	240	400	-	-	181	301	100	1.96
			750	1500	2/2	247	412	-	-	177	295	100	1.87
Vノッチ 316L側	EHP厚さ3mm	Ar ガラス封入	RT	-	1	228	381	-	-				
			750	1500	1/2	80	133	-	-				
			750	1500	2/2	75	126	-	-				
	EHP厚さ4mm		RT	-	1	237	396	-	-				
			750	1500	1/2	103	172	-	-				
			750	1500	2/2	74	123	-	-				
			RT	-	1	208	347	-	-				
			750	1500	1/2	128	213	-	-				
			750	1500	2/2	127	212	-	-				
備 考		<p>適用規格 : JIS Z 2242 (05) 衝撃試験温度 : RT (22-23°C) 試験片形状 : 55mmL × 10mmH × 7.5mmW 2mmV ノッチ 試験機の初期エネルギー : 300J</p> <p>* 青字は、大型の試験機を使用(試験機の初期エネルギー: 800J) * 茶字は、240J(初期エネルギーの80%)以上のため参考値(JIS規格より) 延性破面率、横膨出量が「-」の試料は、未破断 網掛け部のデータは、H26年度実施分データ</p>											

加熱時刻	EHP/SUS316L		EHP/Ni/SUS316L	
なし				
なし				
なし				

写真 3.2-20 熱時効処理材のシャルピー試験後の試験片外観
 (板組「EHP/316L」および「EHP/Niめっき/316L」)

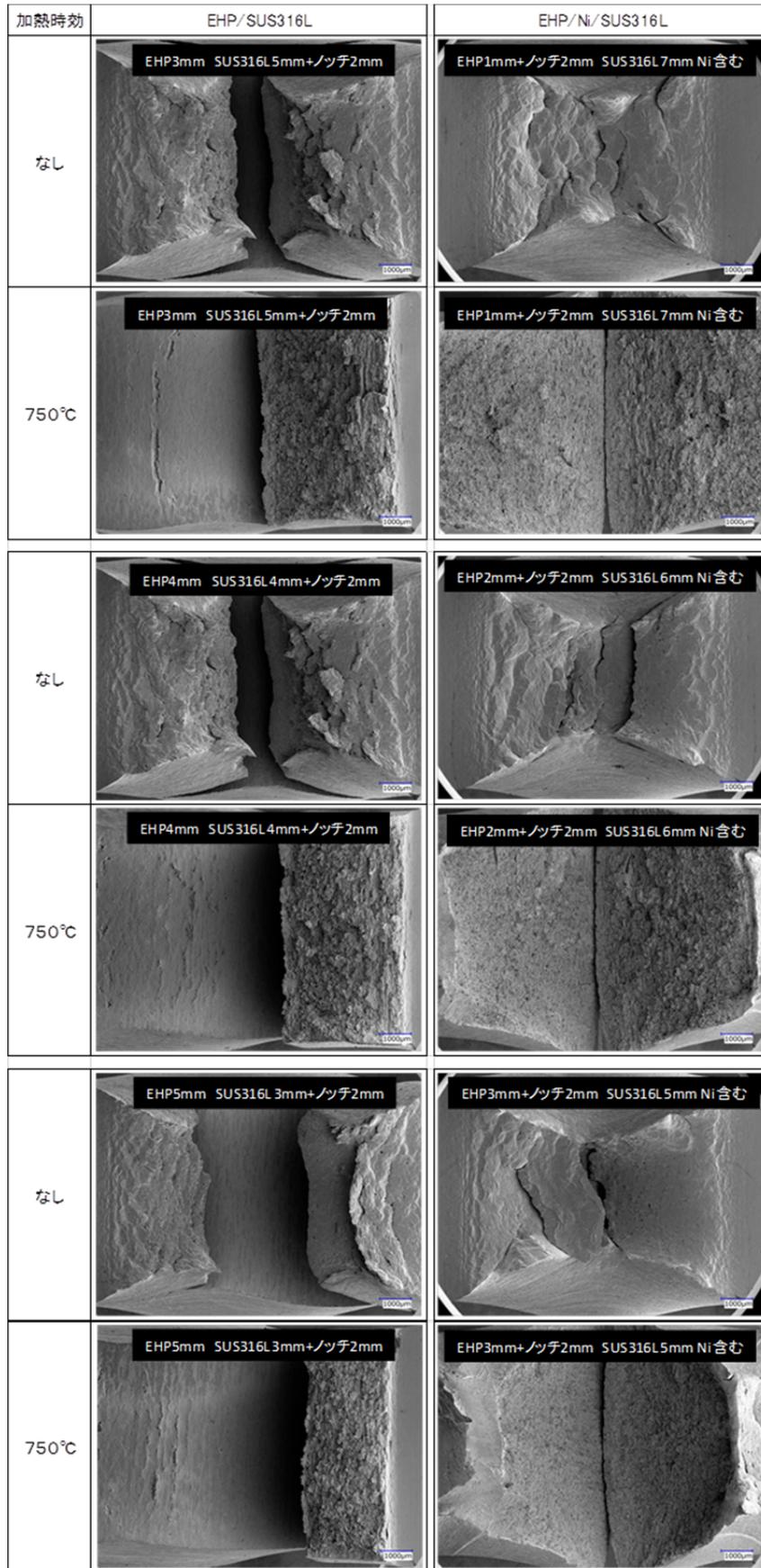


写真 3. 2-21 熱時効処理材のシャルピー試験後の破断面の SEM 像

	略号	B-2 (H24 年度試作材)	C-3 (H24 年度試作材)	2C (H26 年度試作材)
	板組	EHP(4t) / Ni / A533B(6t)	EHP(7t) / SUS316L(8t)	EHP(6t) / Ni めっき / SUS316L(24t)
	形状	10t × 145w × 100L	15t × 160w × 100L	30t × 160w × 140L
供試材	外観			
		熱時効条件および処理後の外観	350, 400, 450°C 	650, 700, 750°C 

写真 3.2-22 γ 線照射場熱時効試験の供試材外観および石英管封入—熱時効処理後の外観

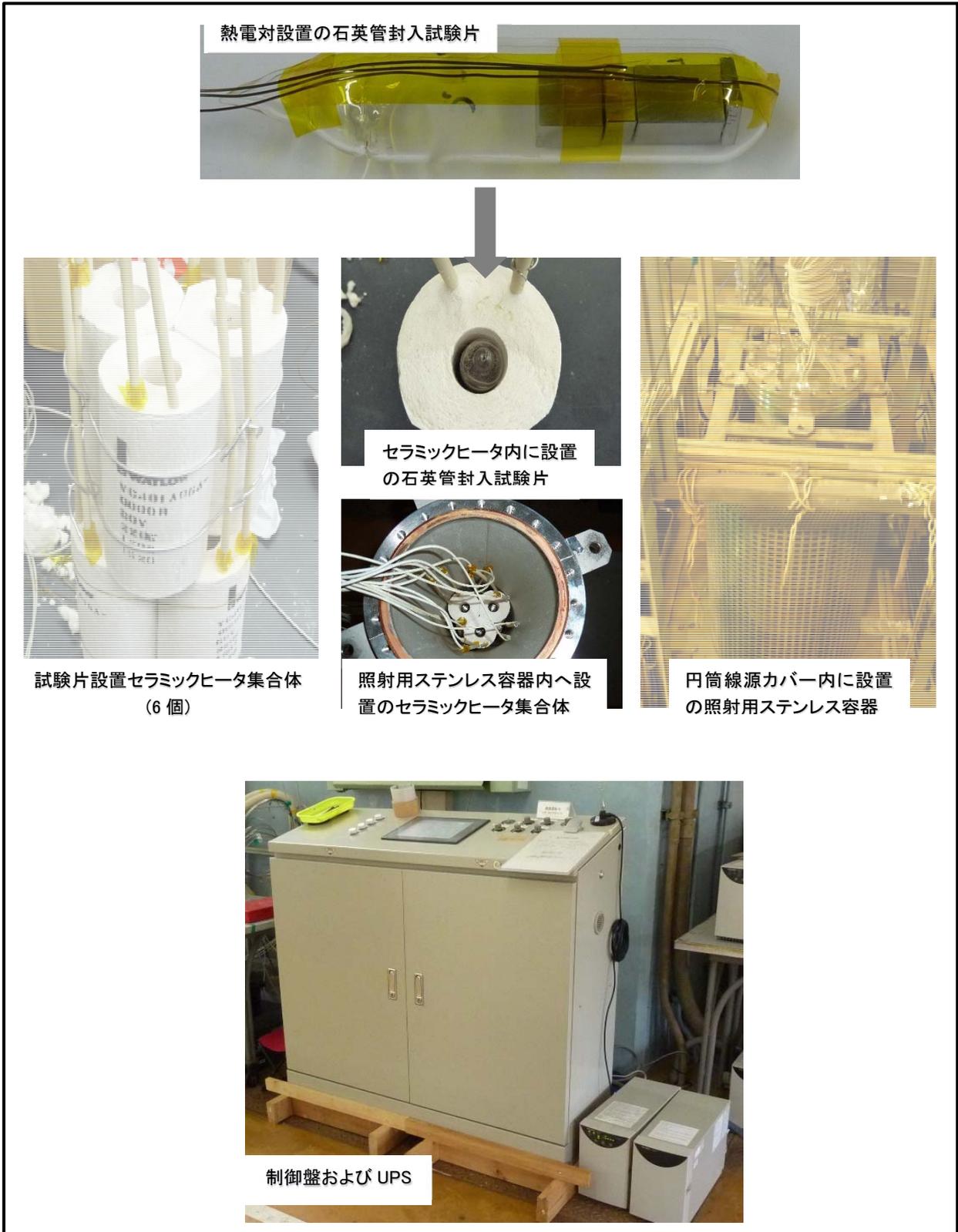


写真 3.2-23 γ 線照射場熱時効試験装置の外観

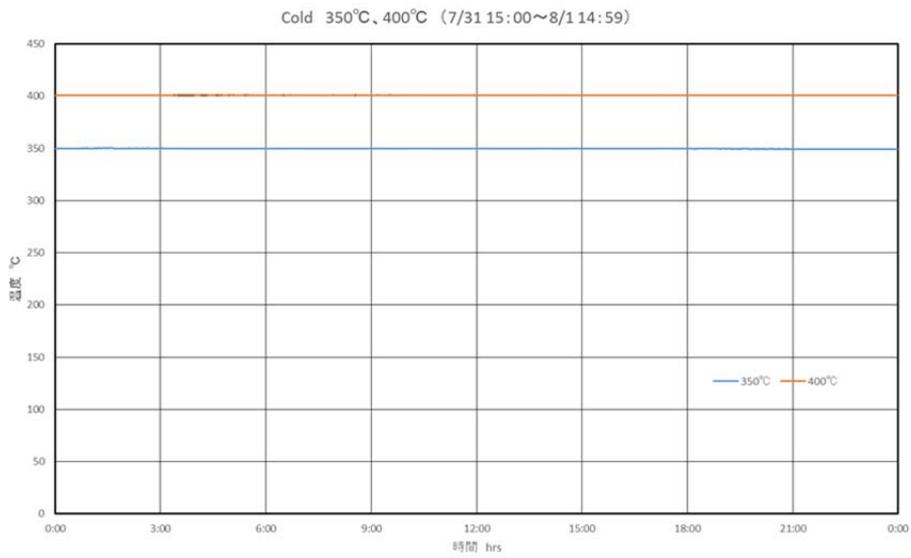


図 3.2-10 熱時効処理の温度履歴の例
 ・板組「EHP/Ni/A533B」：350, 400°C

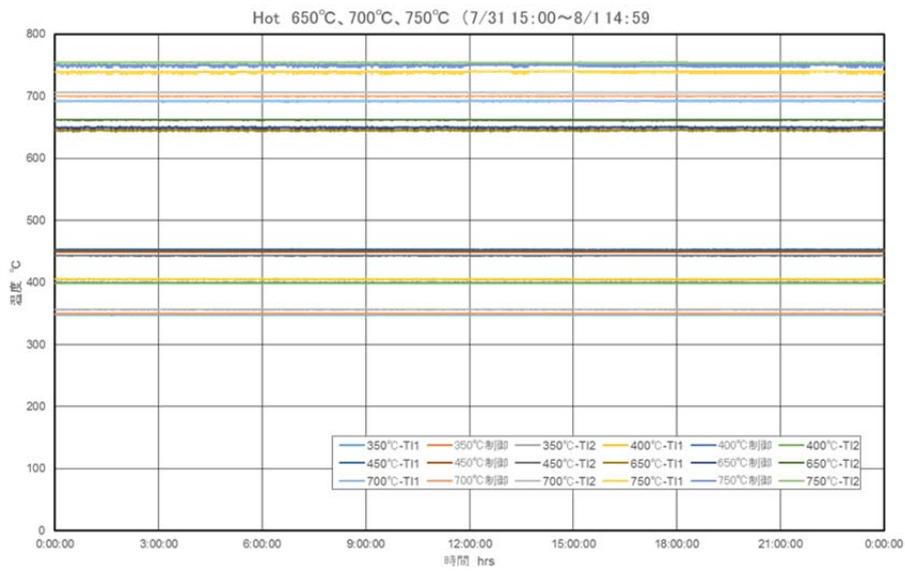
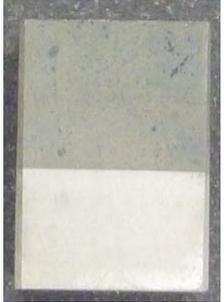


図 3.2-11 γ 線照射場熱時効処理の温度履歴の例
 ・板組「EHP/316L」：650~750°C
 ・板組「EHP/Ni めっき/316L」：650~750°C
 ・板組「EHP/Ni/A533B」：350~450°C

板組	EHP/316L		
温度	650°C	700°C	750°C
γ線照射なし			
γ線照射あり			

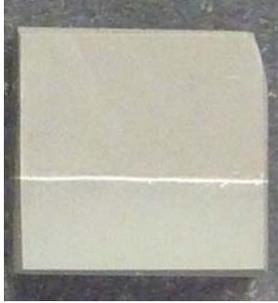
板組	EHP/Niめっき/316L		
温度	650°C	700°C	750°C
γ線照射なし			
γ線照射あり			

写真 3.2-24 熱時効処理およびγ線照射場熱時効処理後の試験片外観

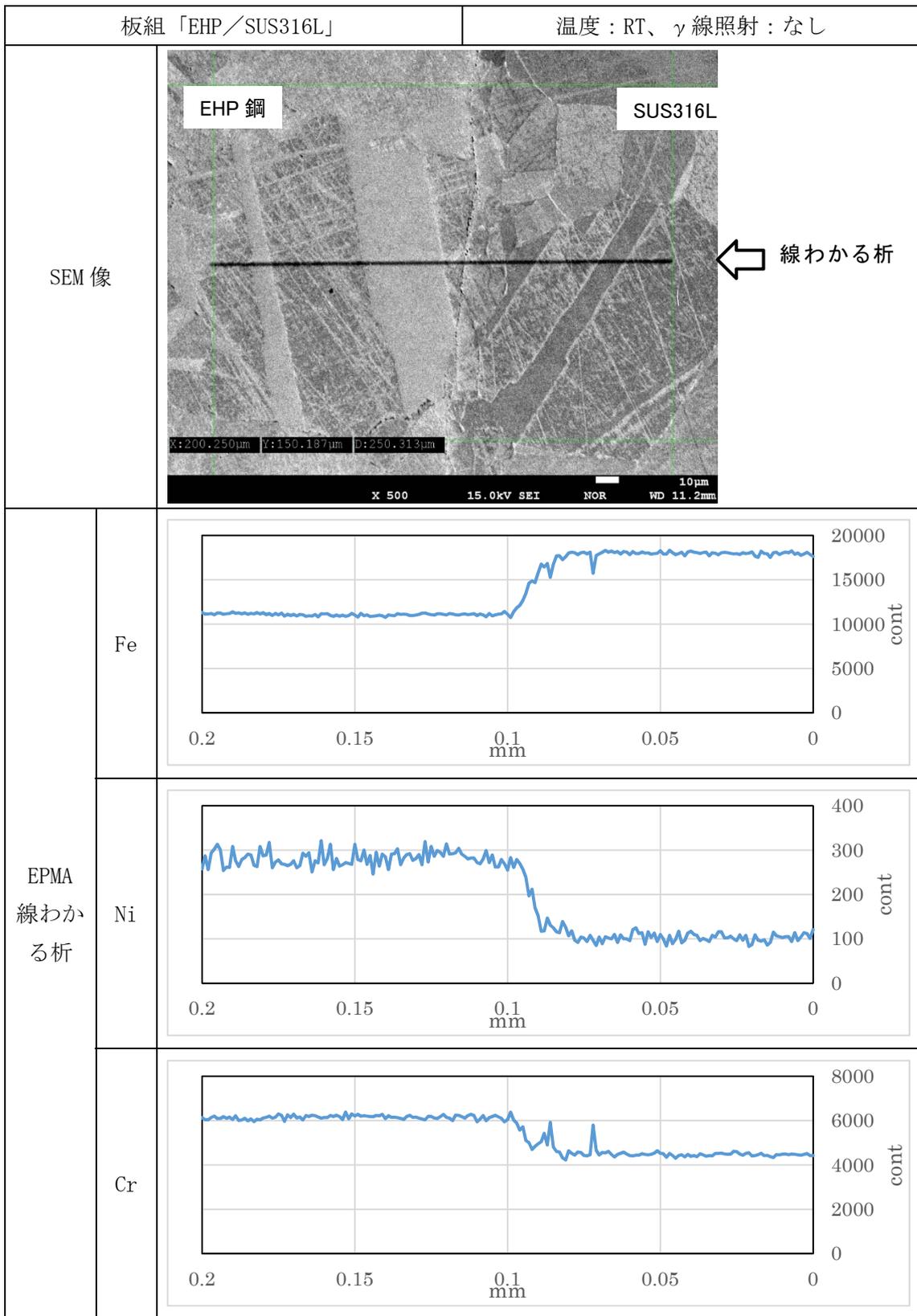


図 3.2-12 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の未処理材の界面近傍の EPMA わかる析結果

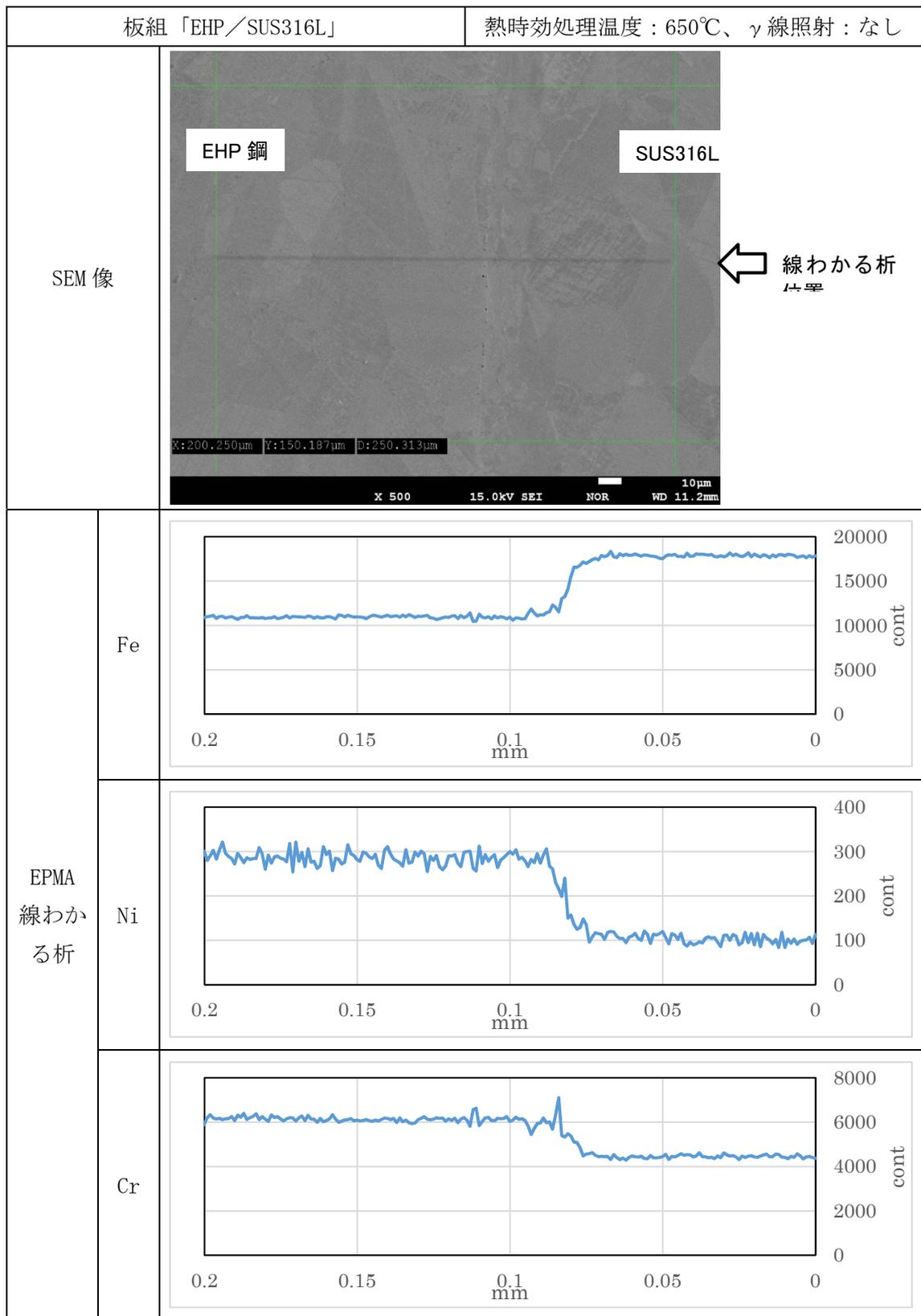


図 3.2-13 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 650℃熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

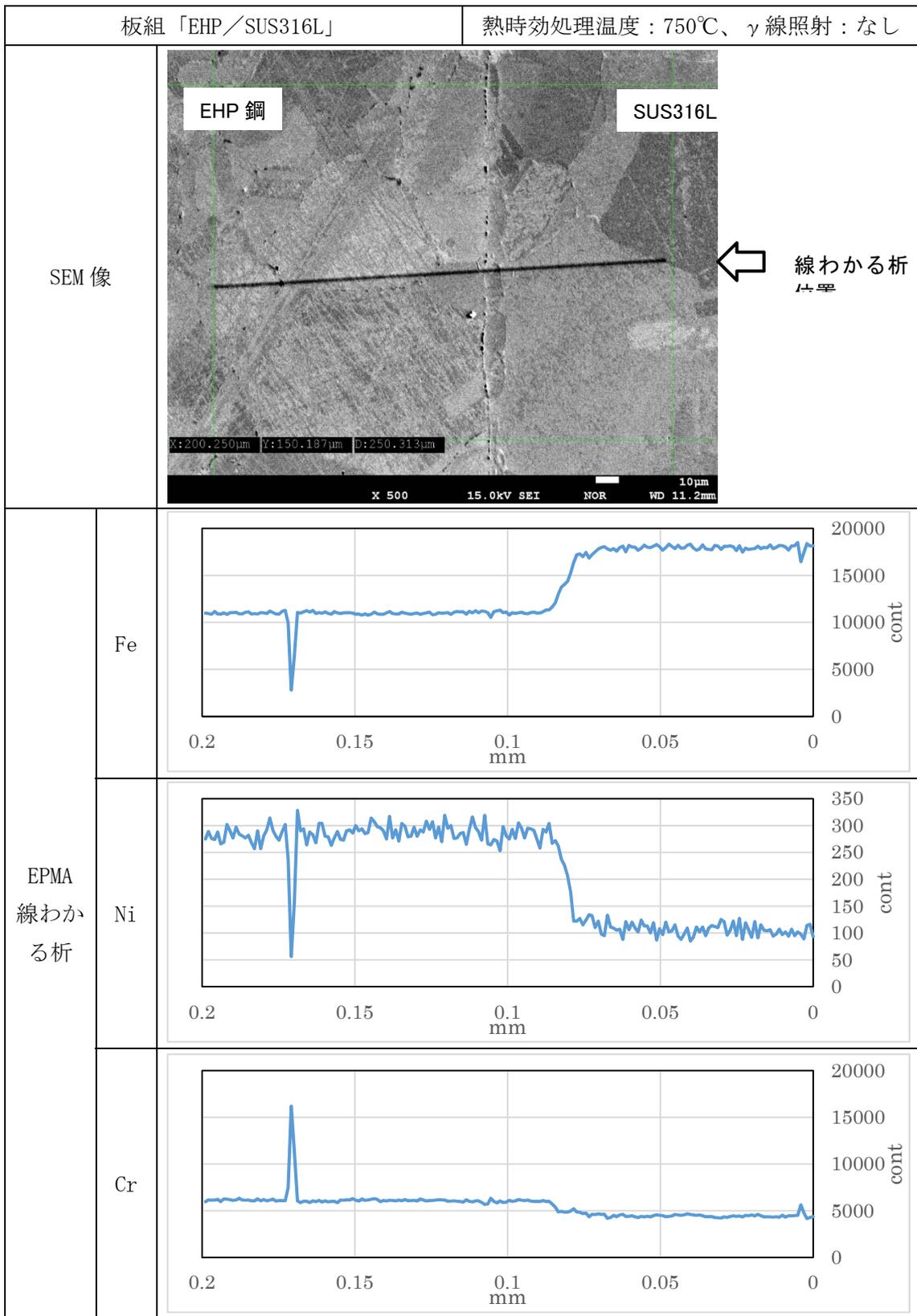


図 3.2-14 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 700℃熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

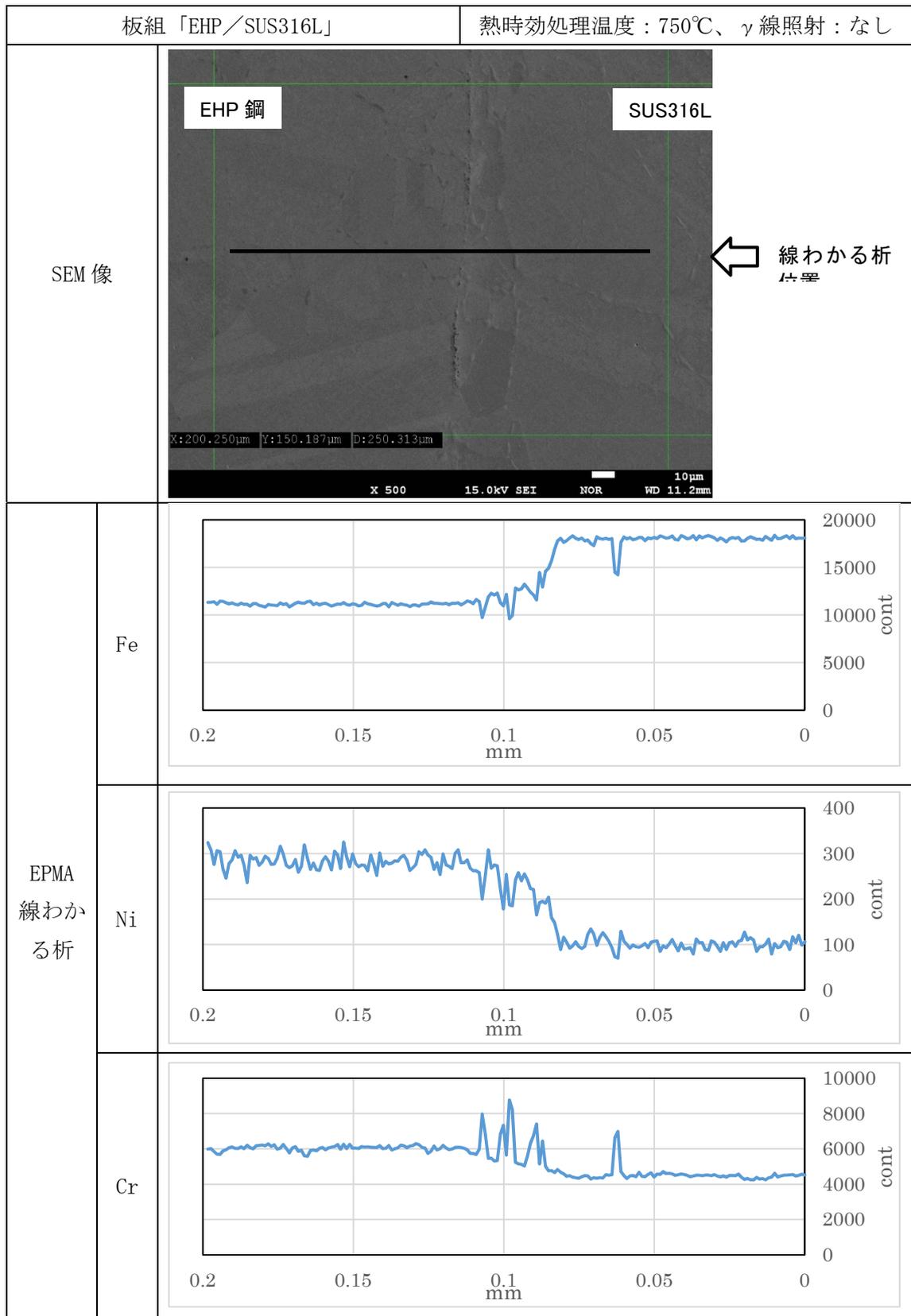


図 3.2-15 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の750℃熱時効処理後の界面近傍のEPMA わかる析結果

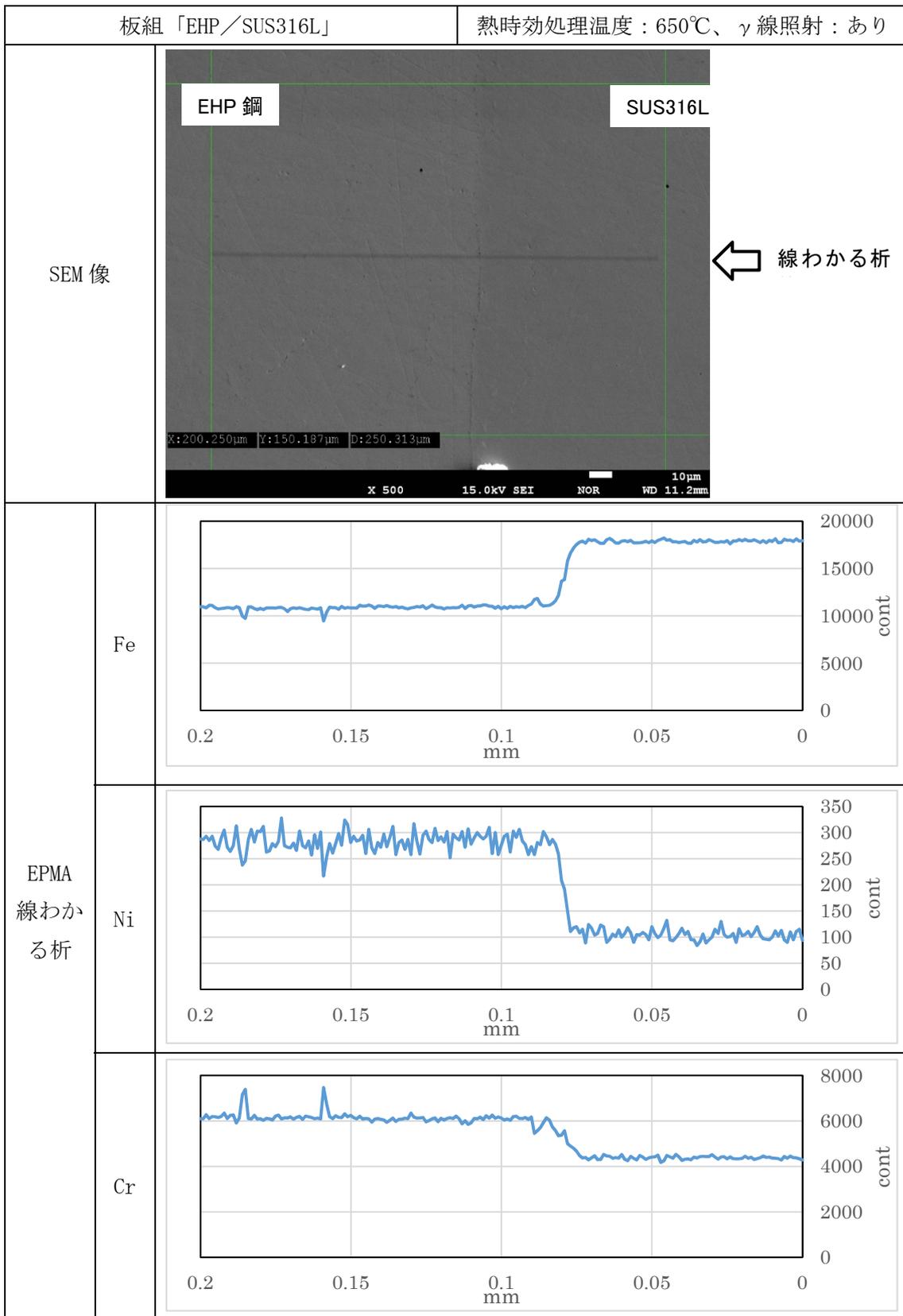


図 3.2-16 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 650℃ γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

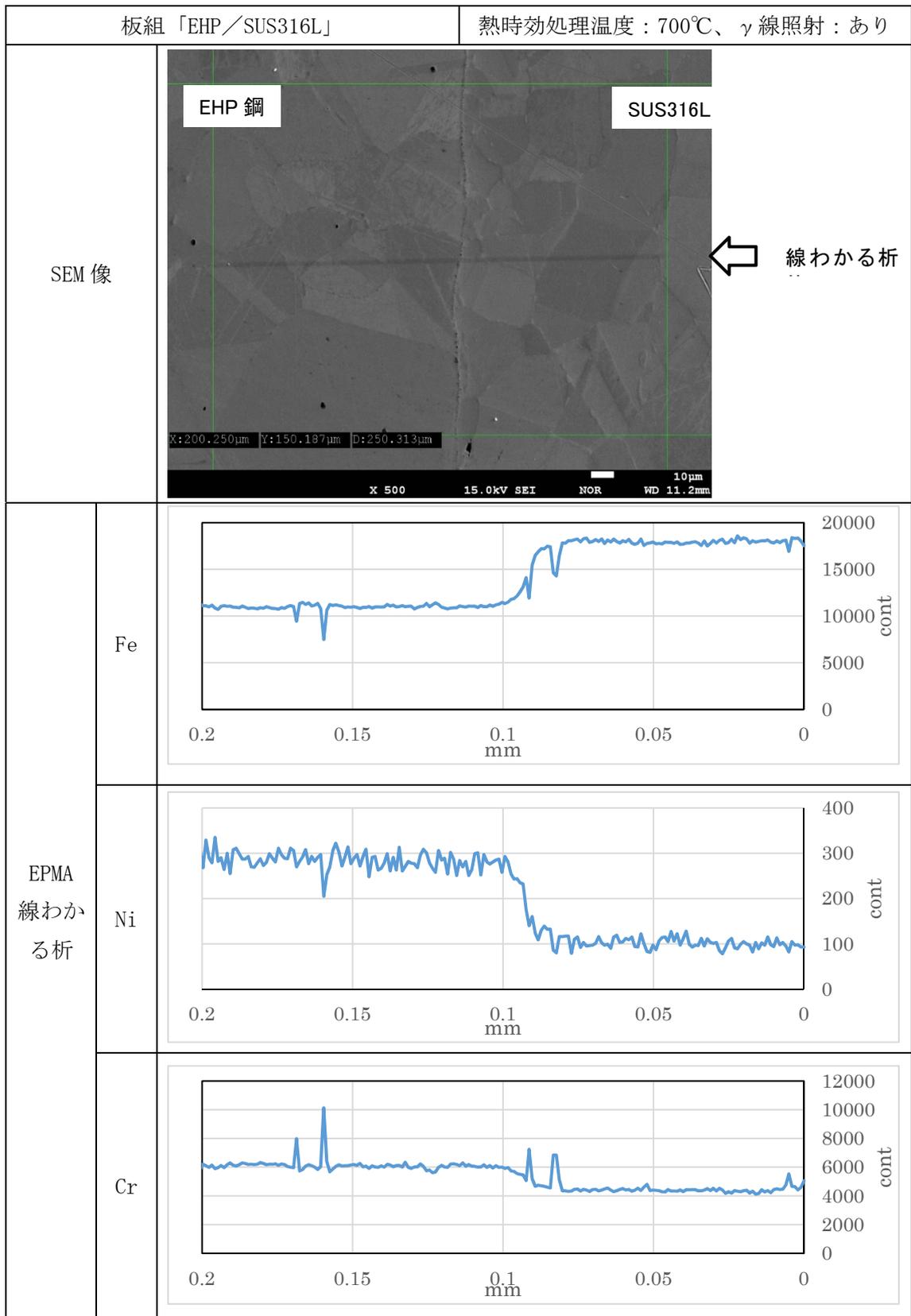


図 3.2-17 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の700℃ γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍のEPMA わかる析結果

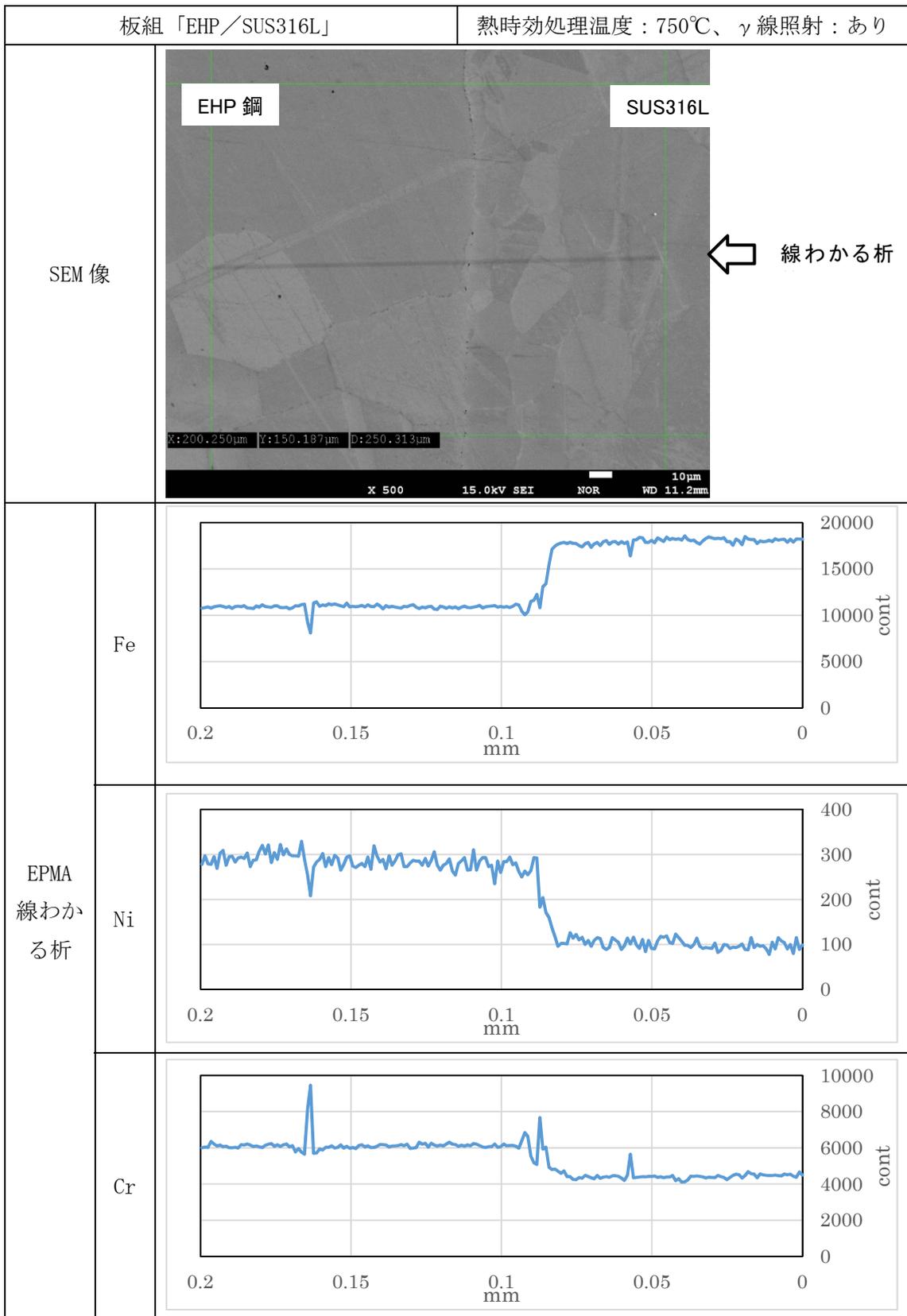


図 3.2-18 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の 750℃ γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

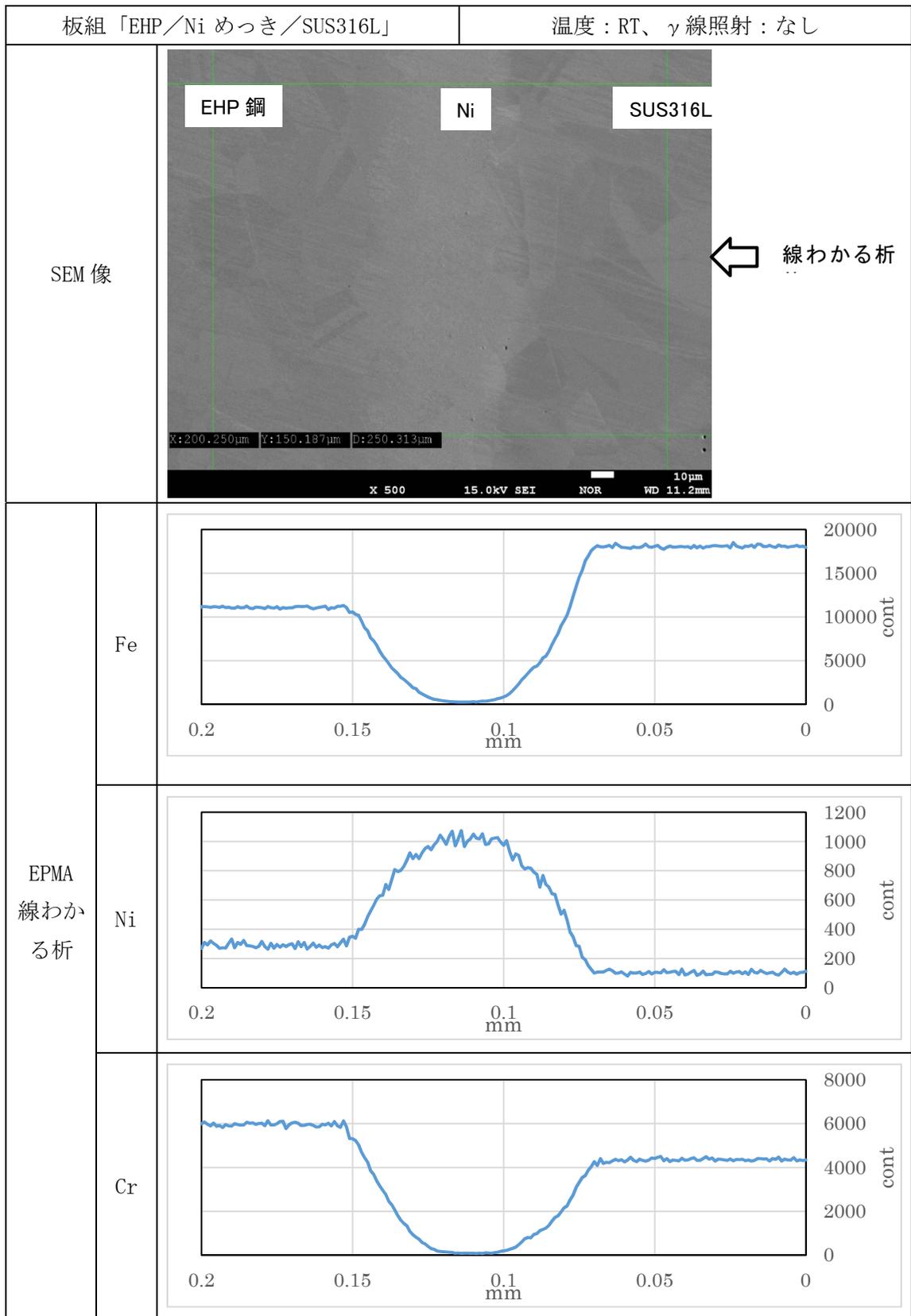


図 3.2-19 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の未処理材の界面近傍の EPMA わかる析結果

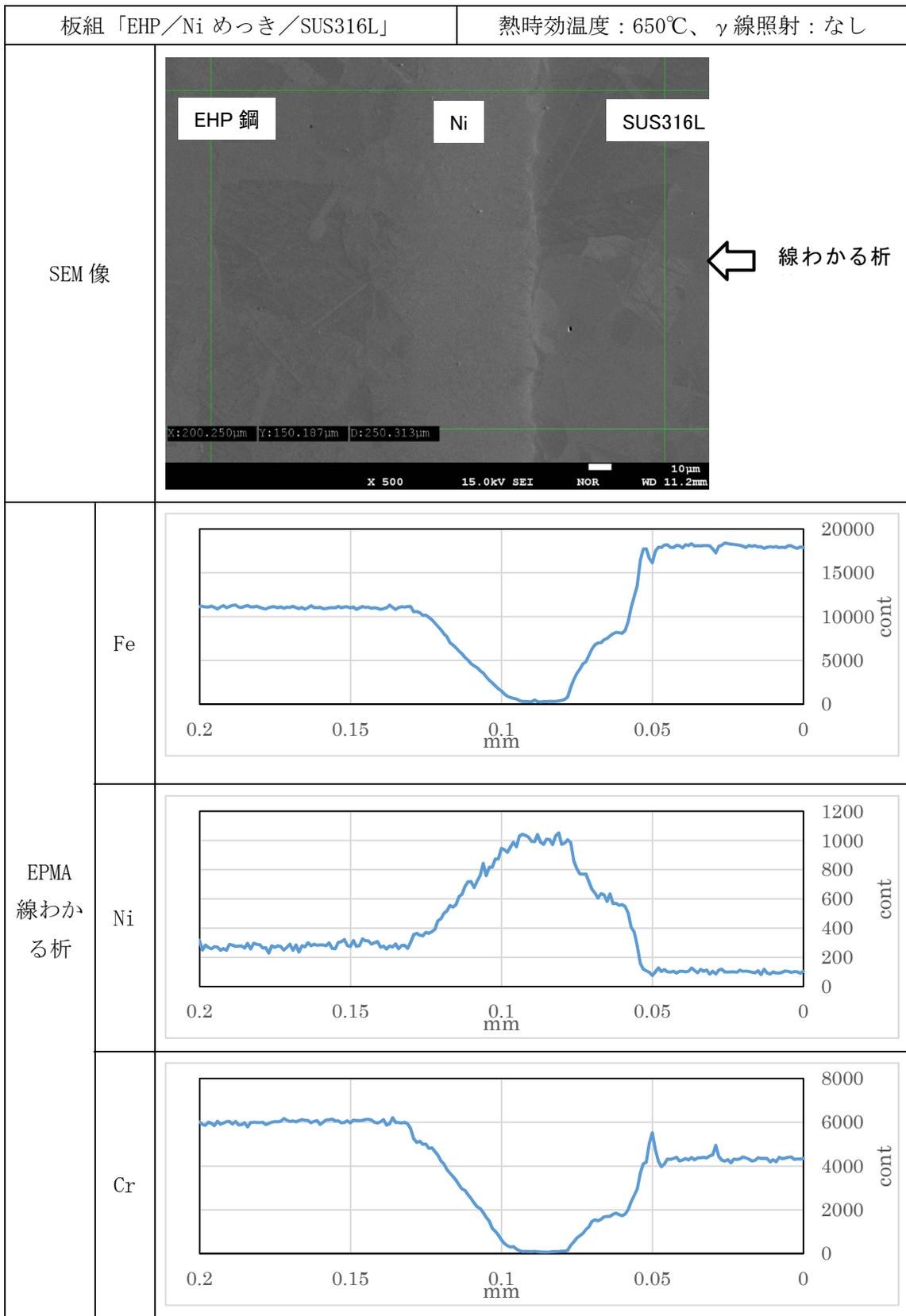


図 3.2-20 板組「EHP/Niめっき/SUS316L」のクラッド材の 650℃熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

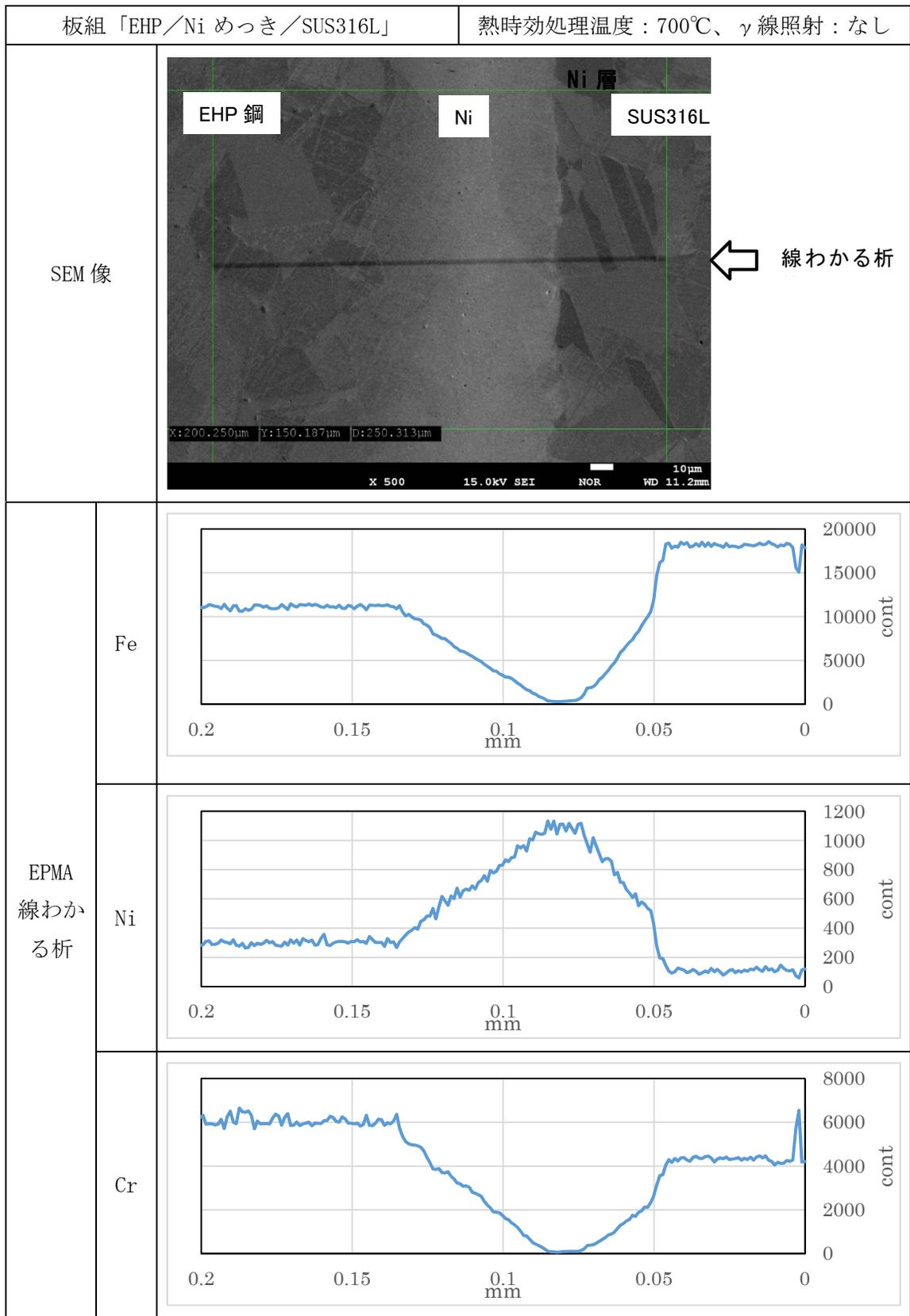


図 3.2-21 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 700℃熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

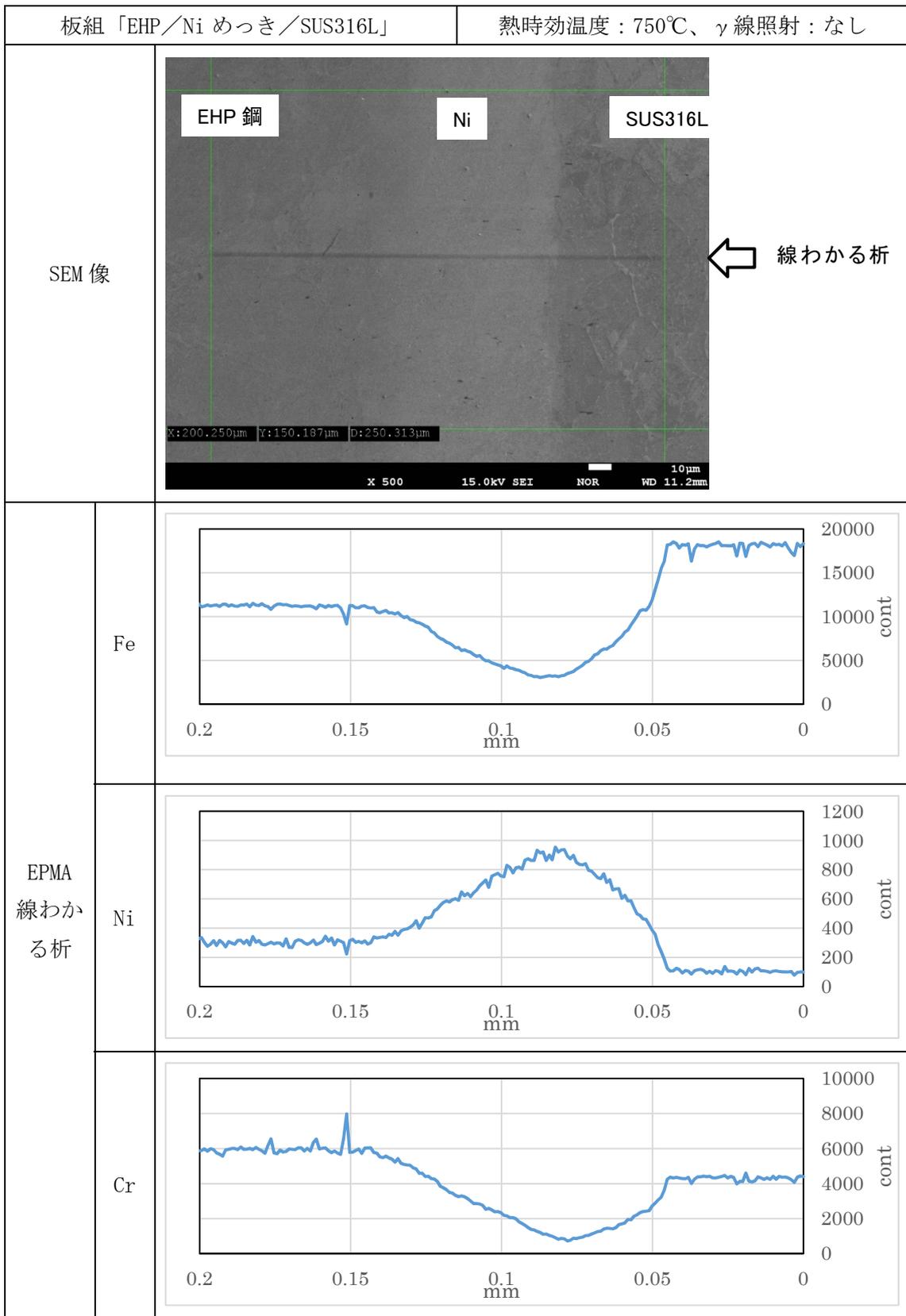


図 3.2-22 板組「EHP/Niめっき/SUS316L」のクラッド材の750℃熱時効処理後の界面近傍のEPMA わかる析結果

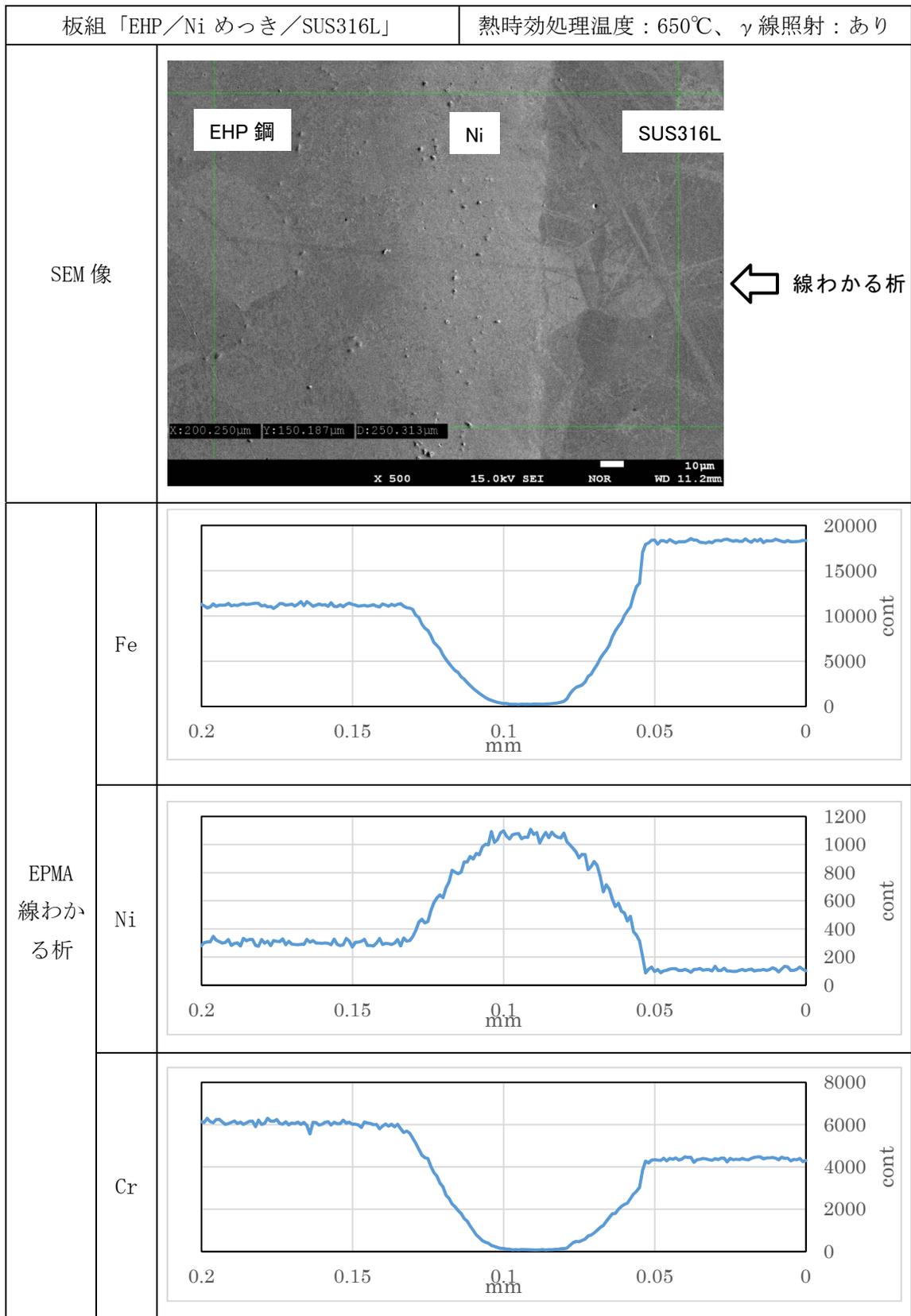


図 3.2-23 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 650℃ γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

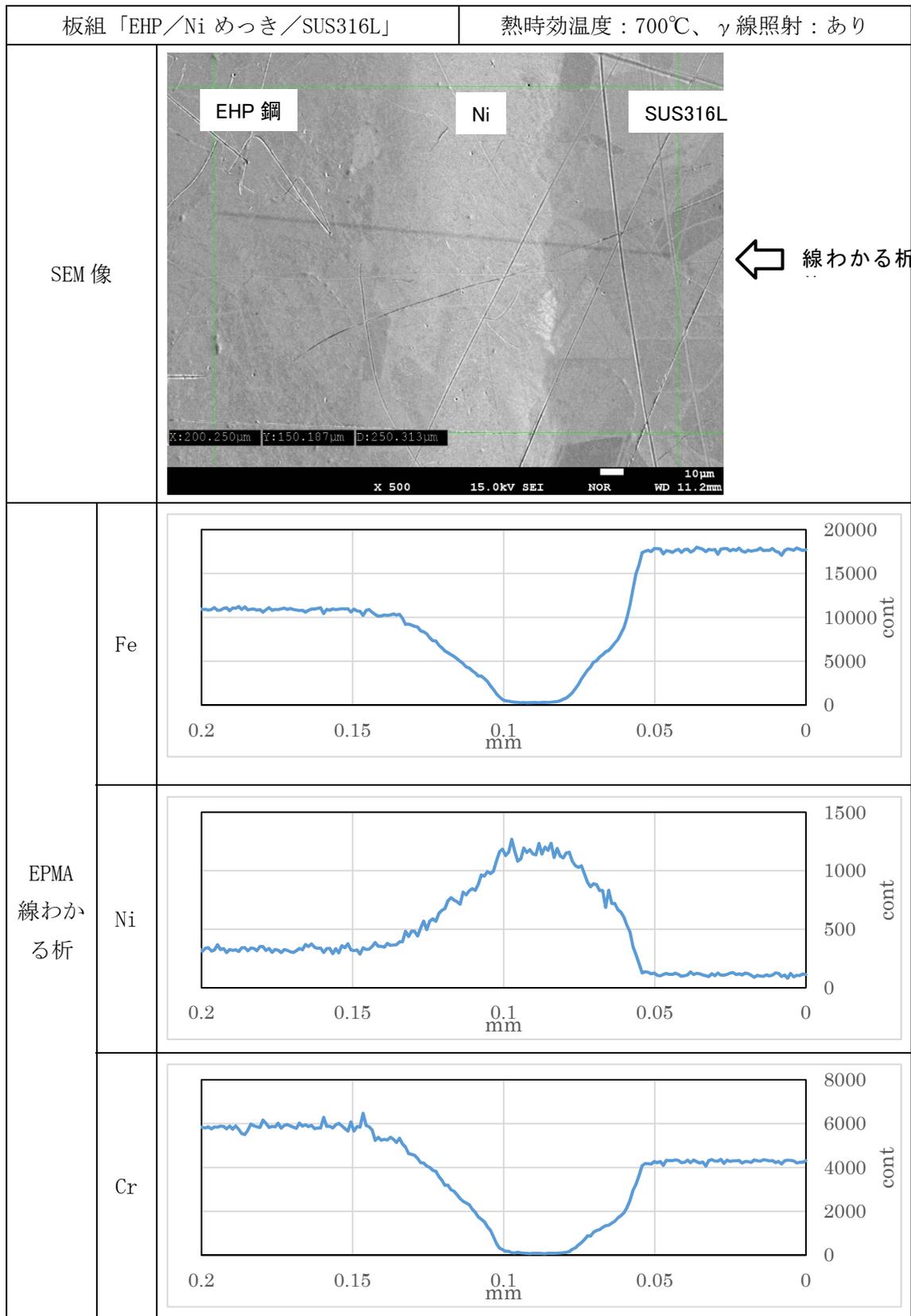


図 3.2-24 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 700℃ γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

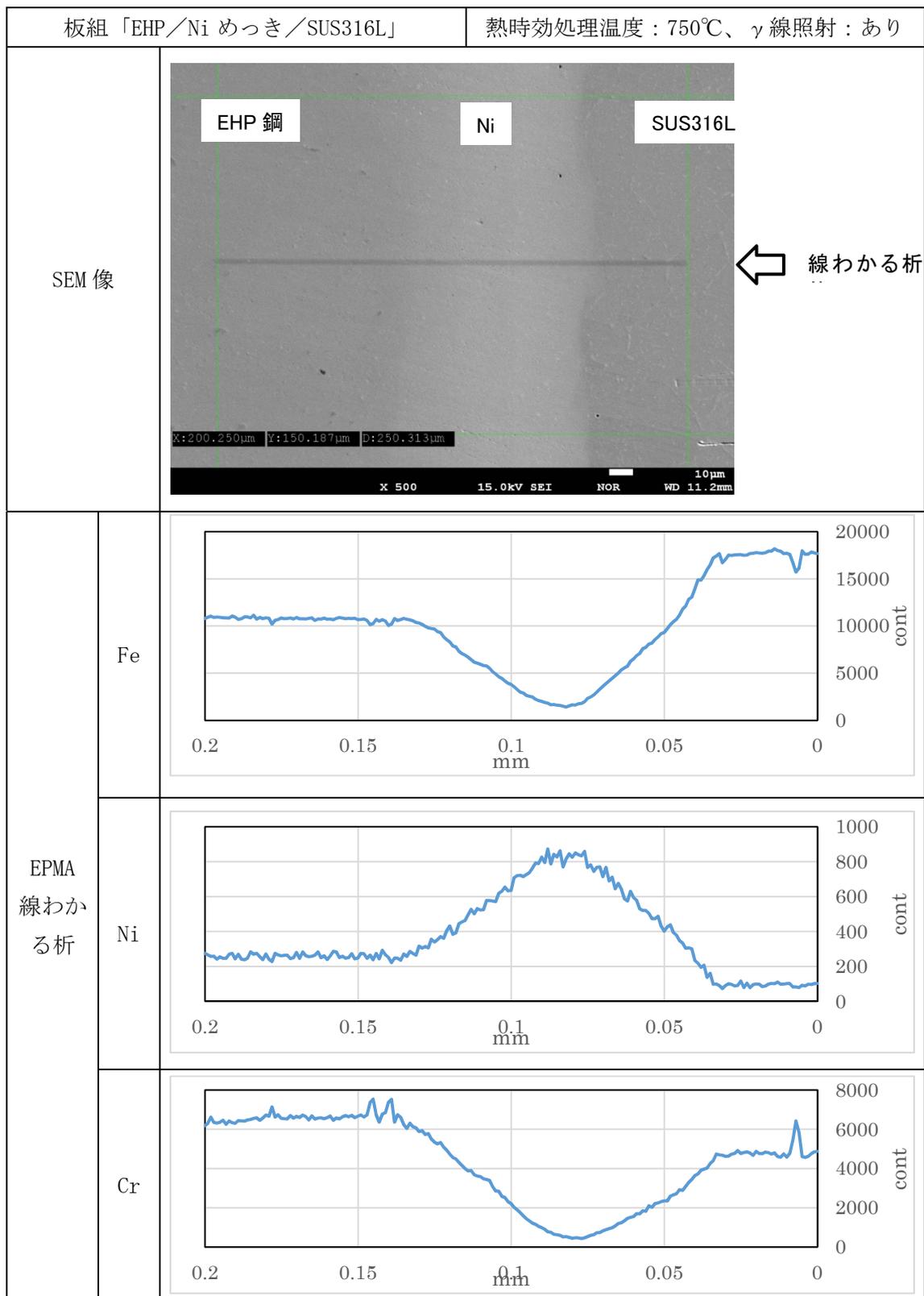


図 3.2-25 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の 750℃ γ 線照射場熱時効処理後の界面近傍の EPMA わかる析結果

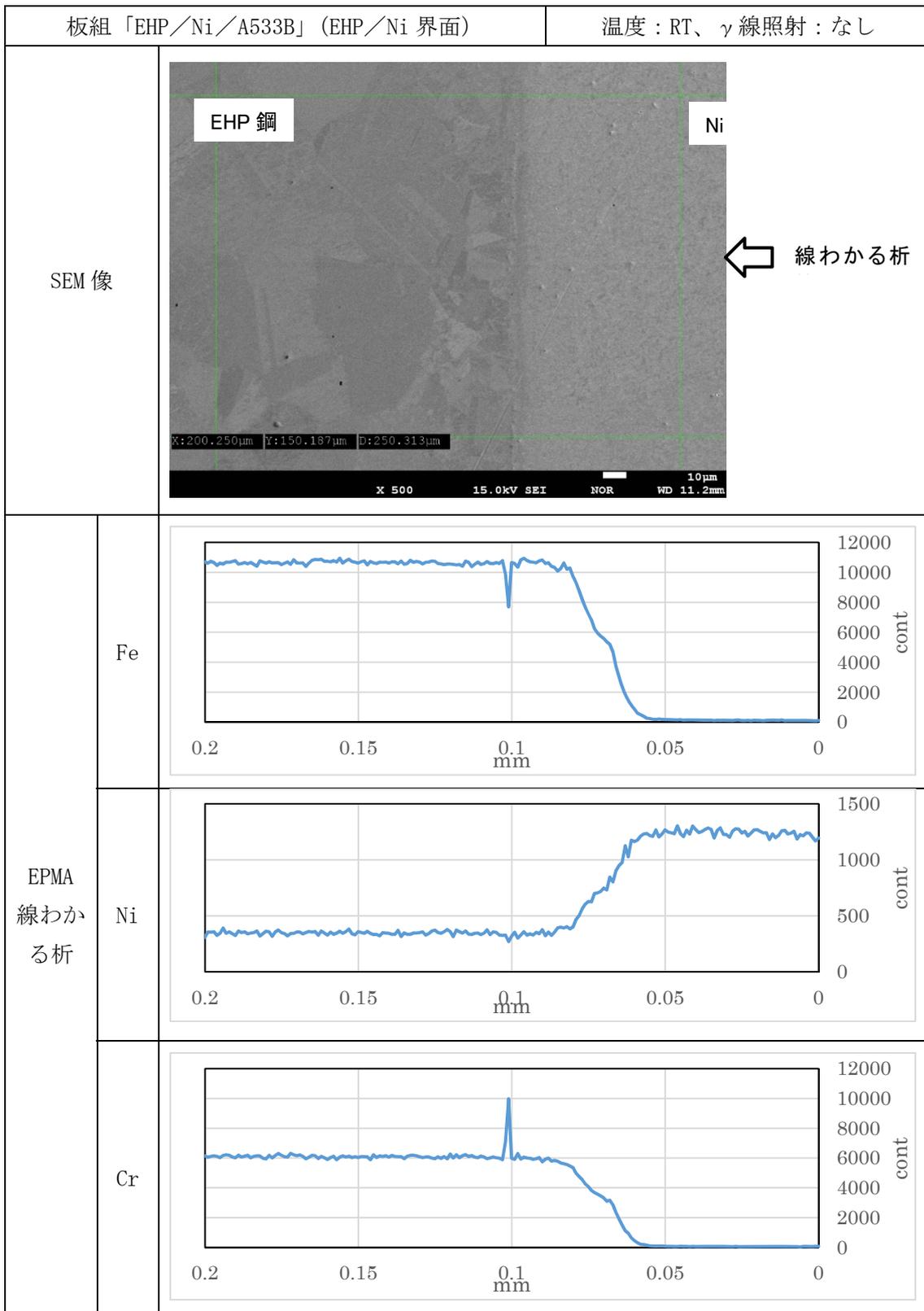


図 3.2-26 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の未処理材の EHP/Ni 界面近傍の EPMA わかる析結果

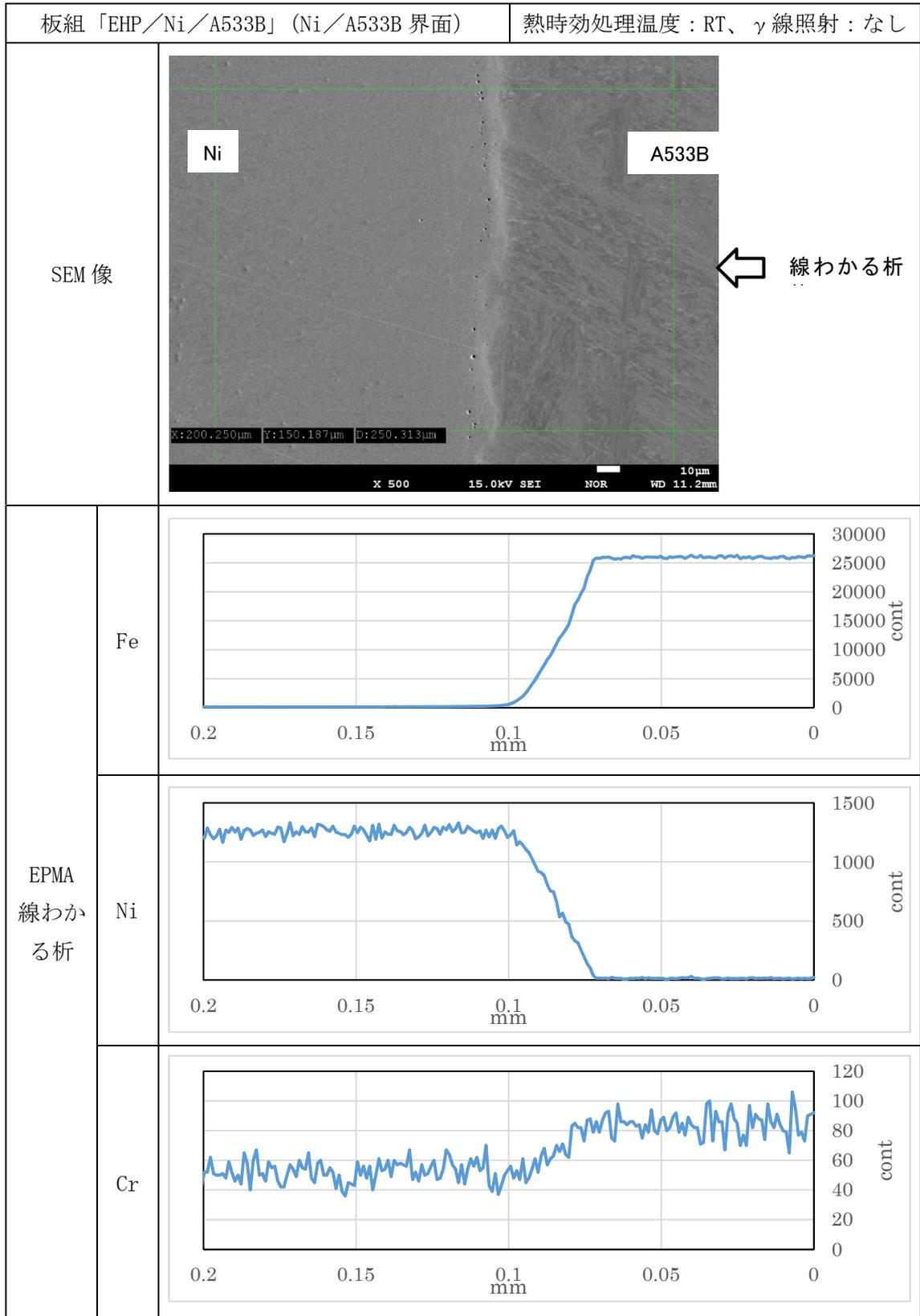


図 3.2-27 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の未処理材の Ni/A533B 界面近傍の EPMA わかる析結果

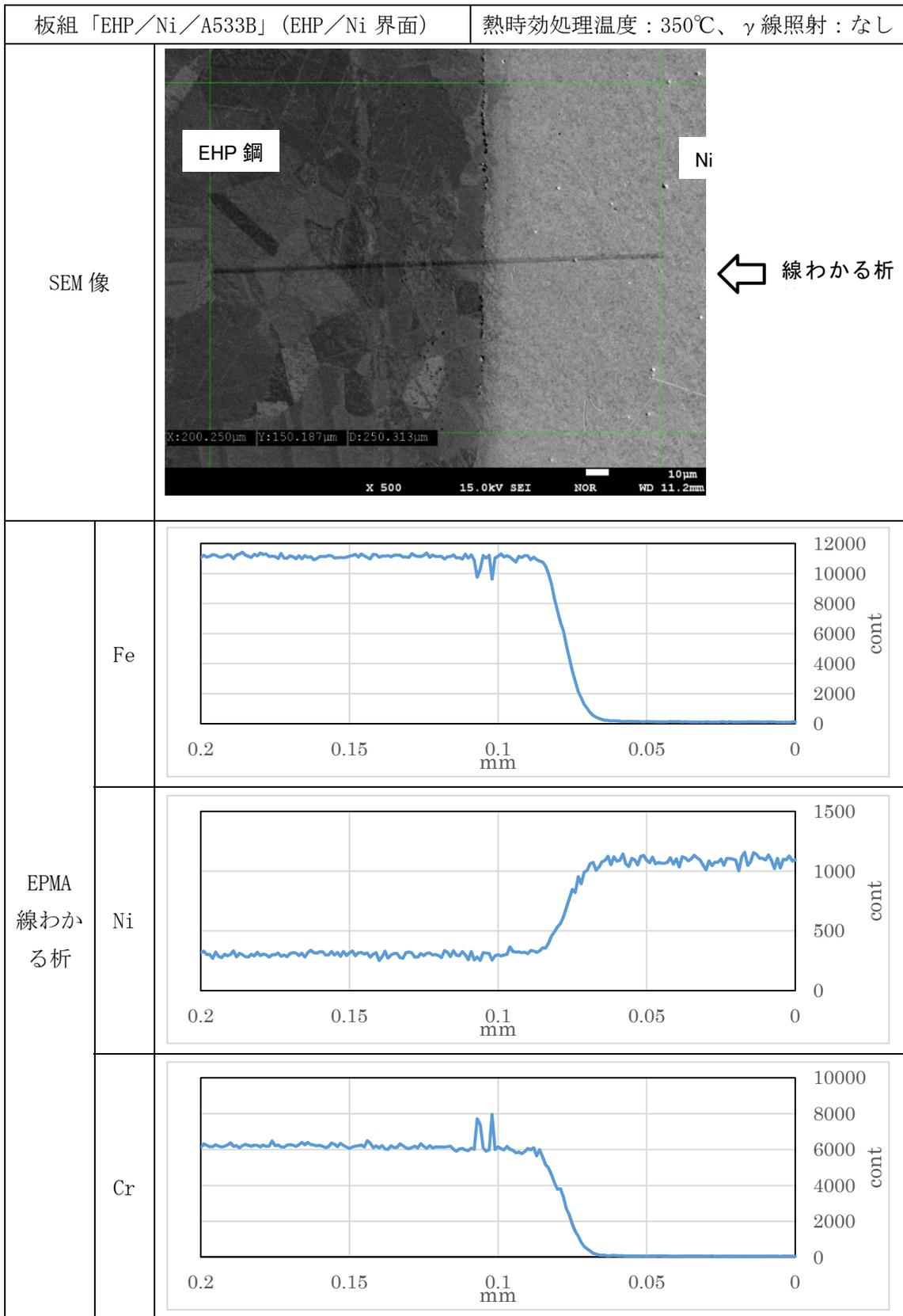


図 3.2-28 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA わかる析結果

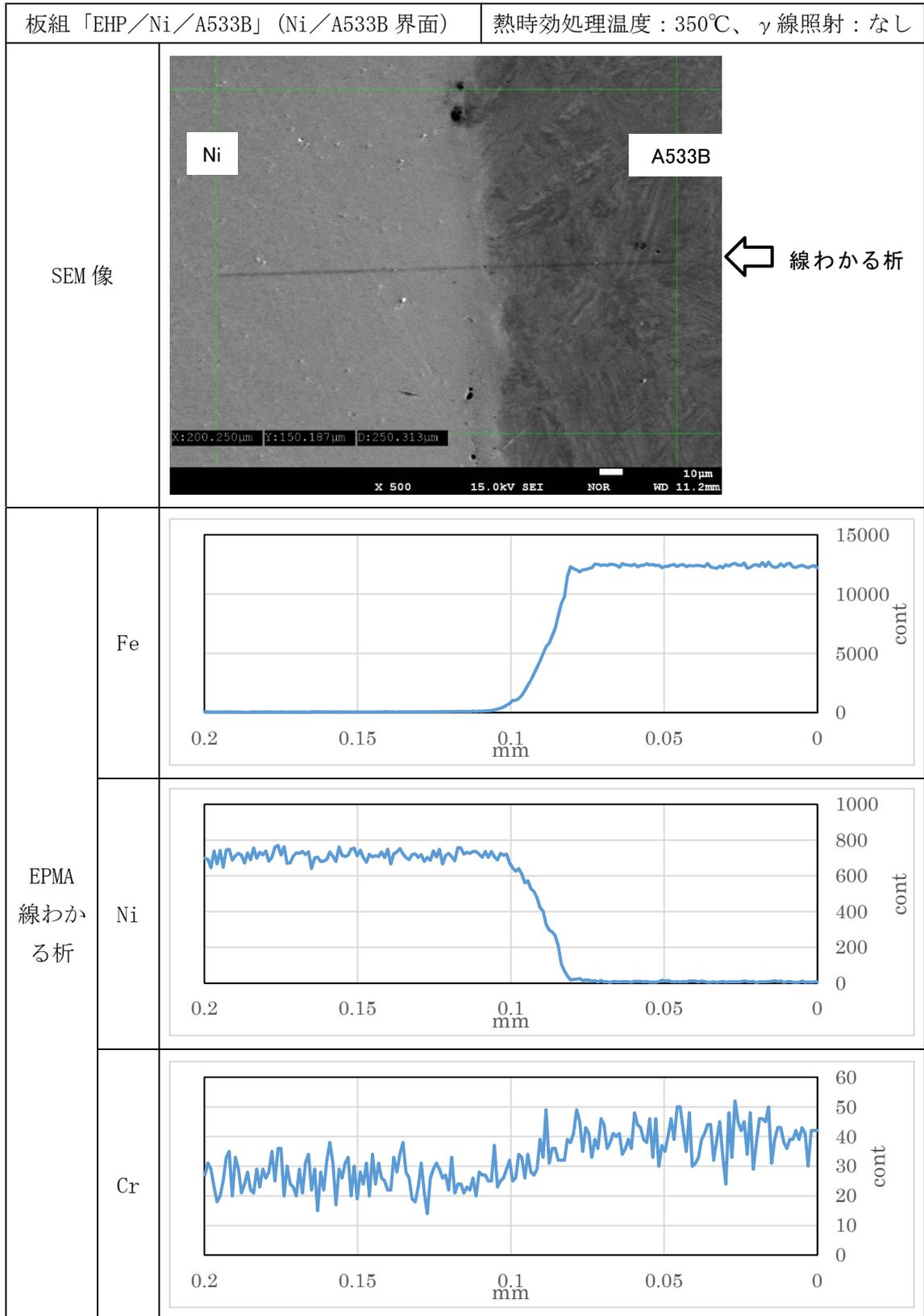


図 3.2-29 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA わかる析結果

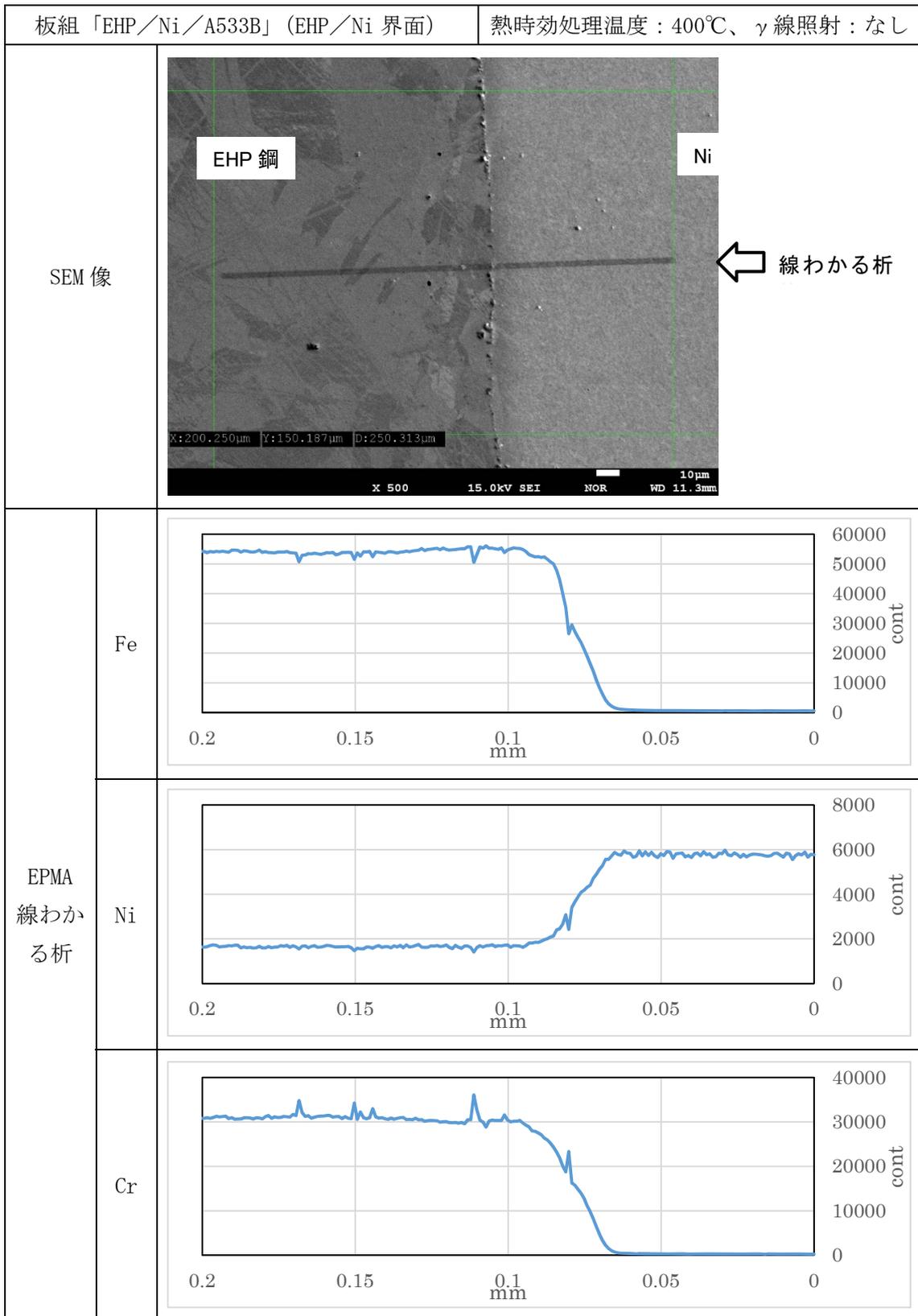


図 3.2-30 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400℃熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA わかる析結果

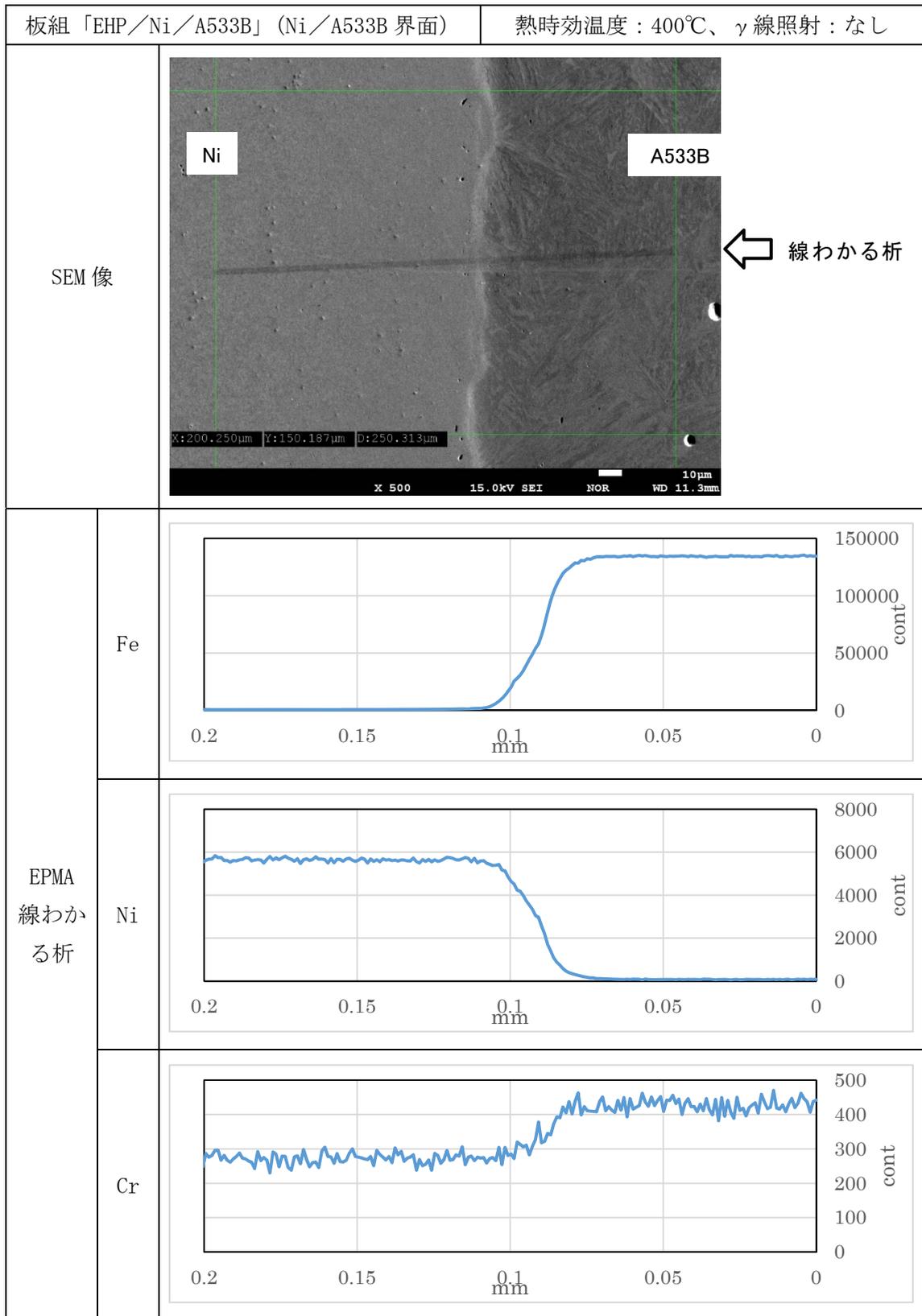


図 3.2-31 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の400℃熱時効処理後のNi/A533B界面近傍のEPMAわかる析結果

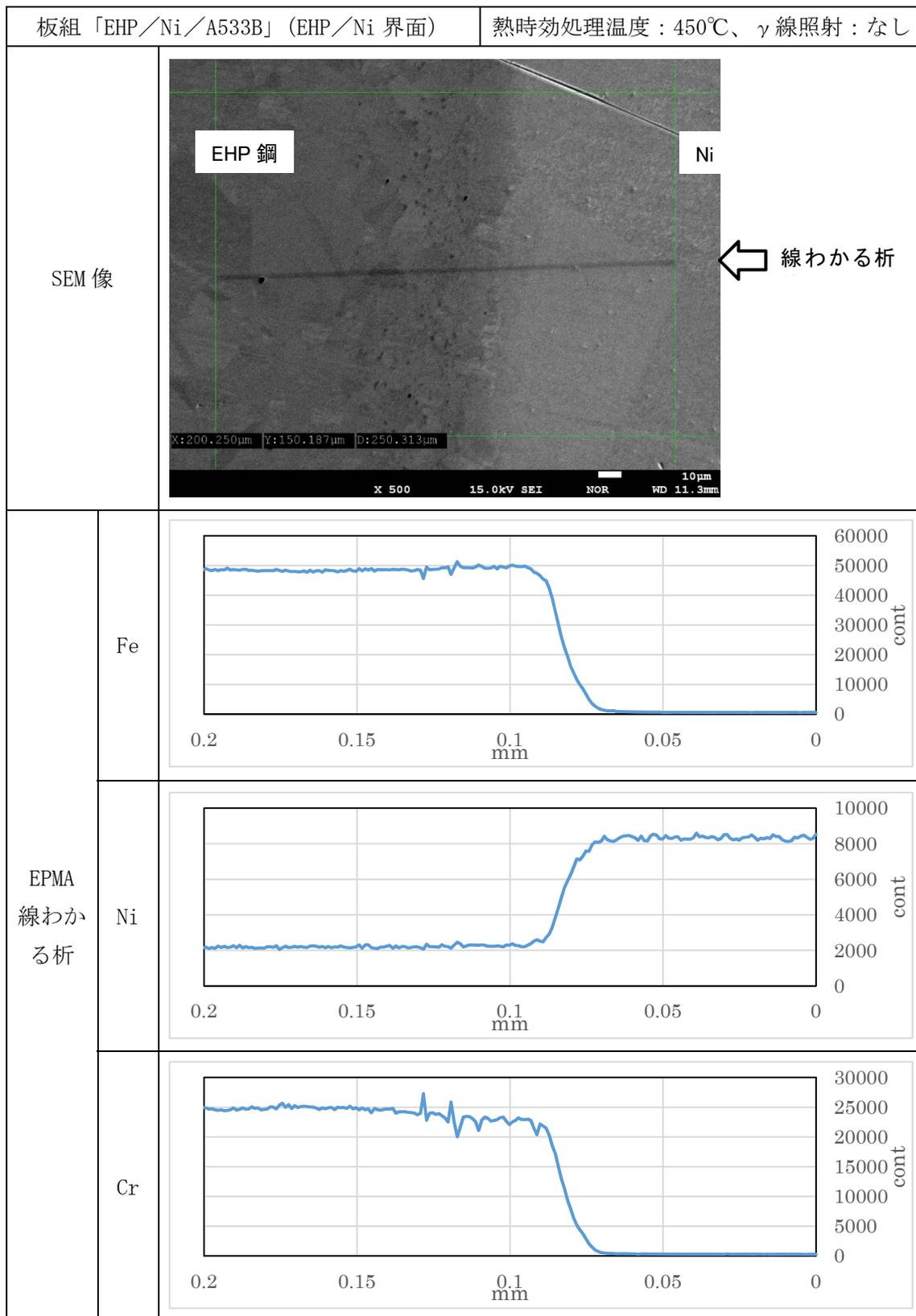


図 3.2-32 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450℃熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA わかる析結果

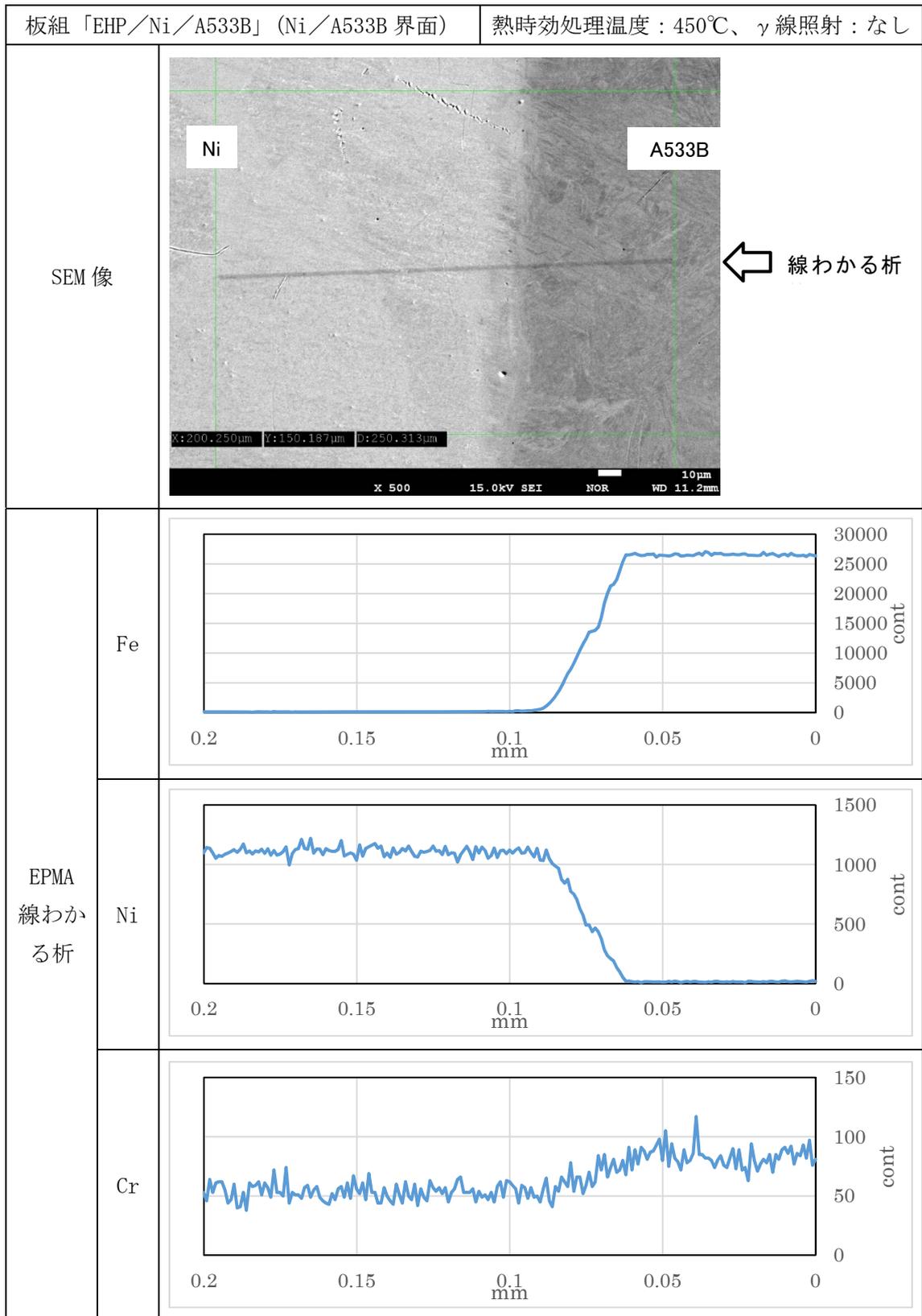


図 3.2-33 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の450℃熱時効処理後のNi/A533B界面近傍のEPMAわかる析結果

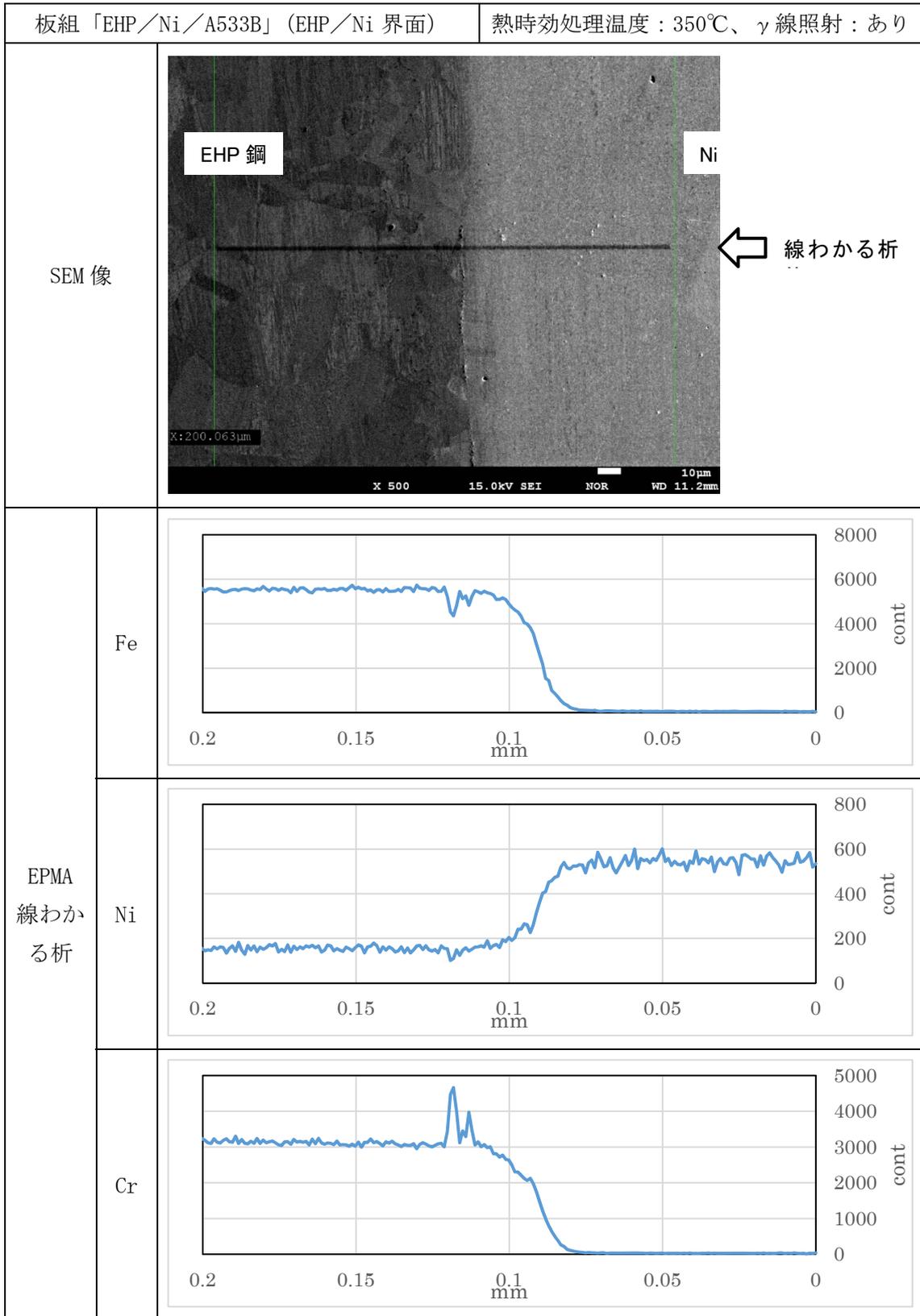


図 3.2-34 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃ γ 線照射場熱時効処理後の EHP/Ni 界面近傍の EPMA わかる析結果

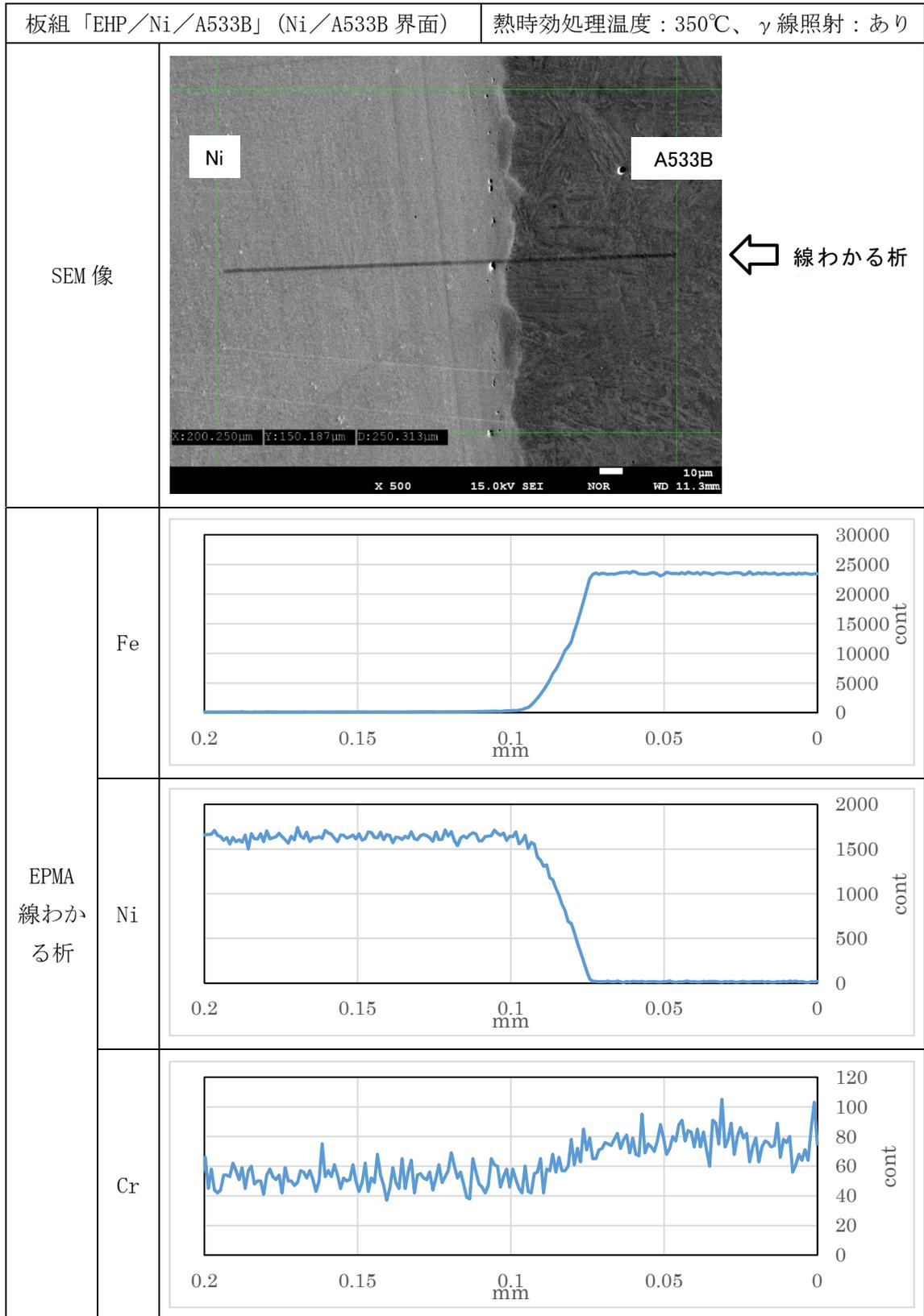


図 3.2-35 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 350℃ γ 線照射場熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA わかる析結果

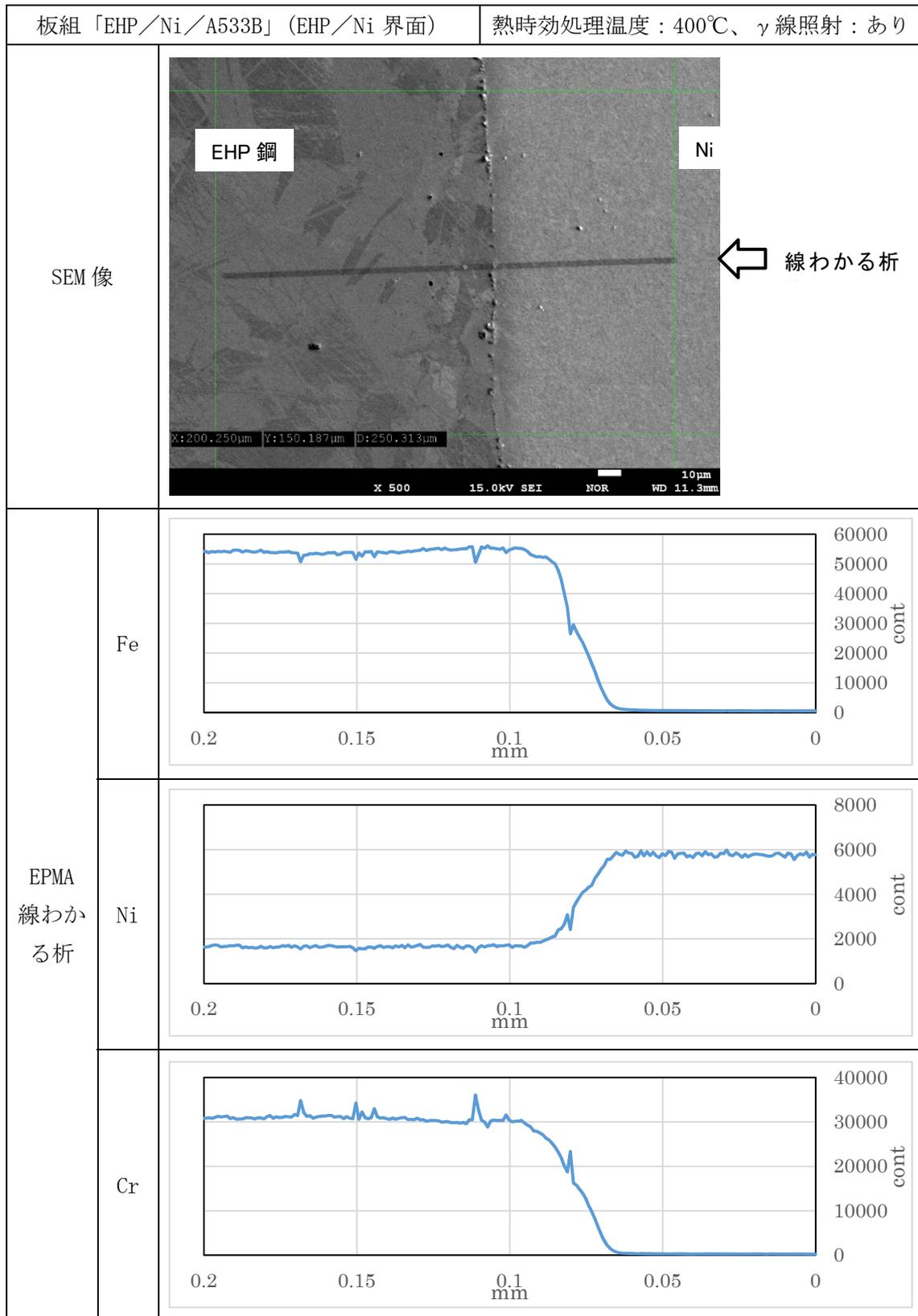


図 3.2-36 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の400℃ γ 線照射場熱時効処理後のEHP/Ni界面近傍のEPMAわかる析結果

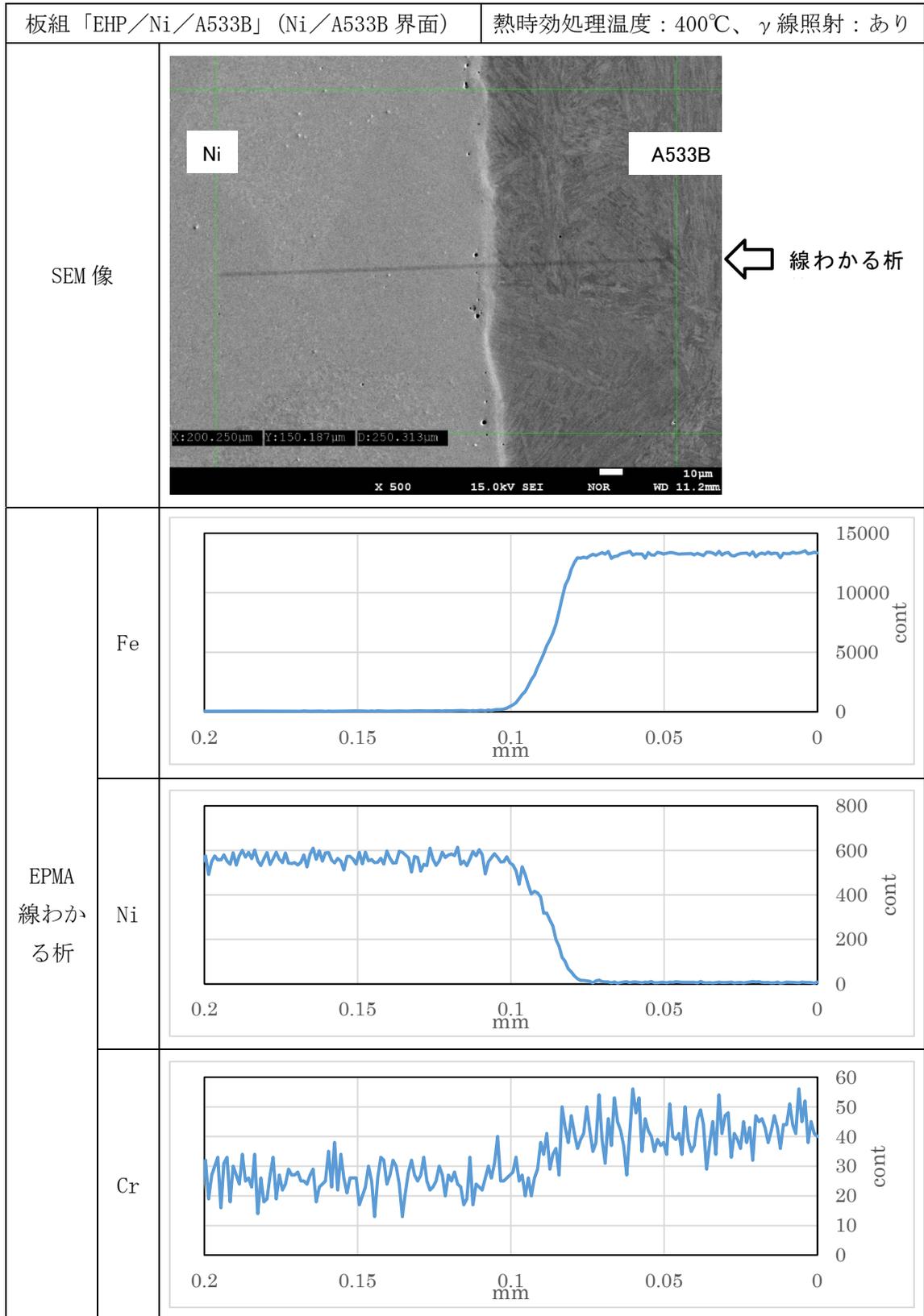


図 3.2-37 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400℃ γ 線照射場熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA わかる析結果

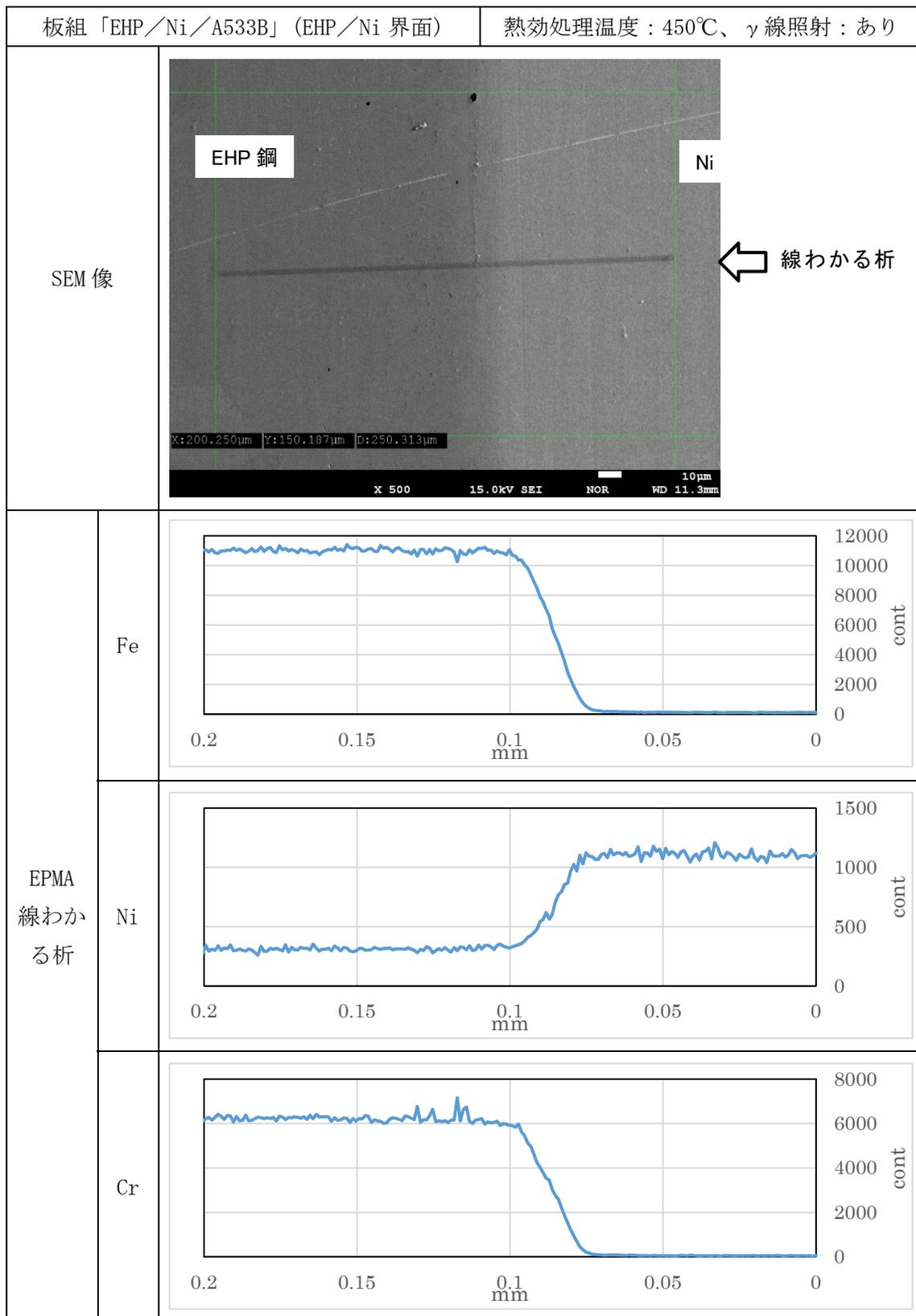


図 3.2-38 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の450°C γ 線照射場熱時効処理後のEHP/Ni界面近傍のEPMAわかる析結果

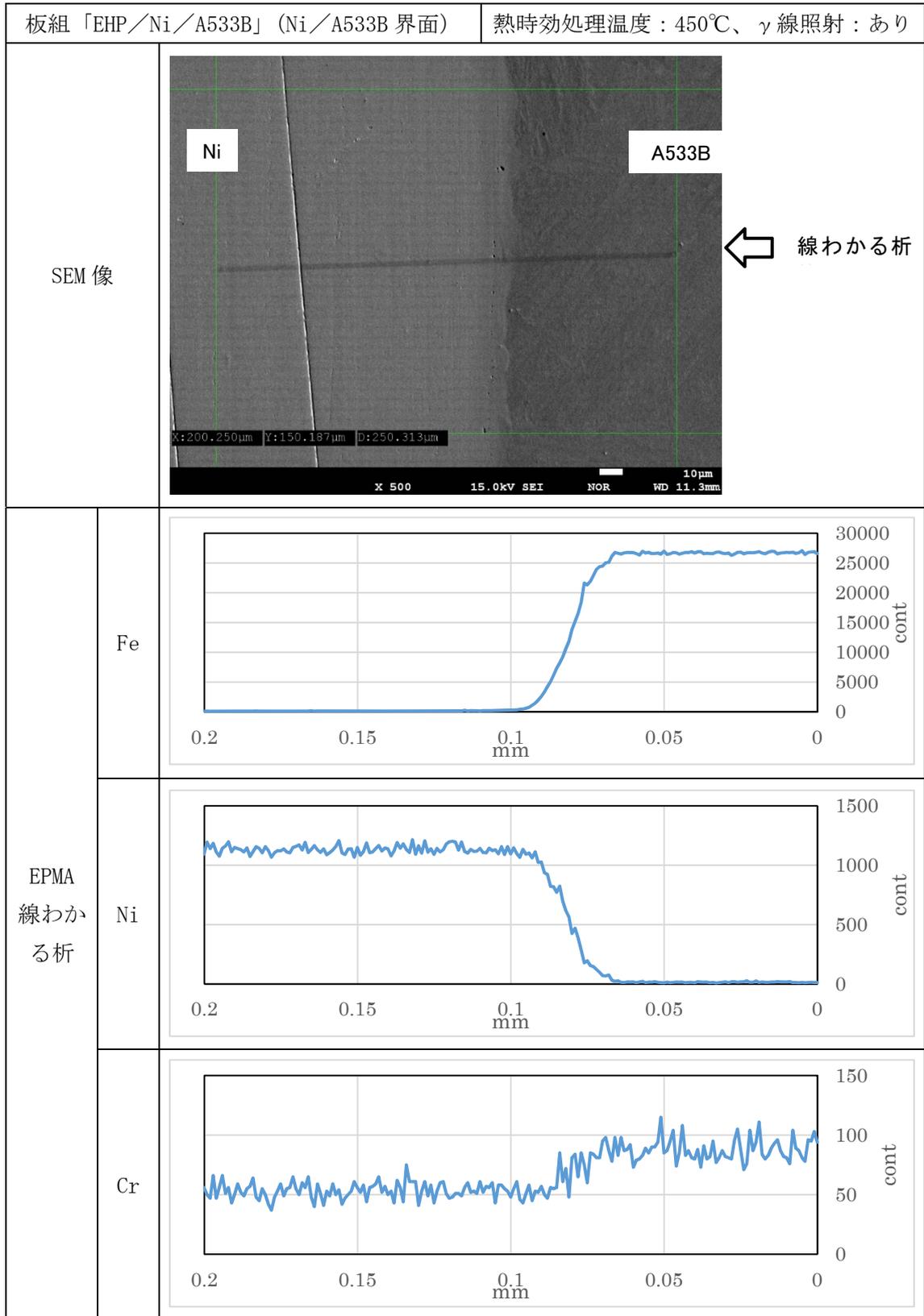


図 3.2-39 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 450℃ γ 線照射場熱時効処理後の Ni/A533B 界面近傍の EPMA わかる析結果

表 3.2-4 熱時効処理後のクラッド材の界面近傍の Ni 拡散傾向の比較 (単位: mm)

γ線照射	板組、界面					
	熱時効温度 (°C)	EHP/SUS316L	EHP/Ni めっき/SUS316L		熱時効温度 (°C)	EHP/Ni/A533B EHP/Ni
			EHP/Ni	Ni/SUS316L		
なし	RT	0.0070	0.0310	0.0270	RT	0.0230
	650	0.0090	0.0360	0.0261	350	0.0160
	700	0.0080	0.0431	0.0281	400	0.0160
	750	0.0080	0.0551	0.0351	450	0.0241
あり	650	0.0050	0.0330	0.0280	350	0.0200
	700	0.0090	0.0381	0.0251	400	0.0281
	750	0.0060	0.0540	0.0450	450	0.0231
備考	測定は界面近傍の Ni 組成の変化傾向のみられる距離とした					

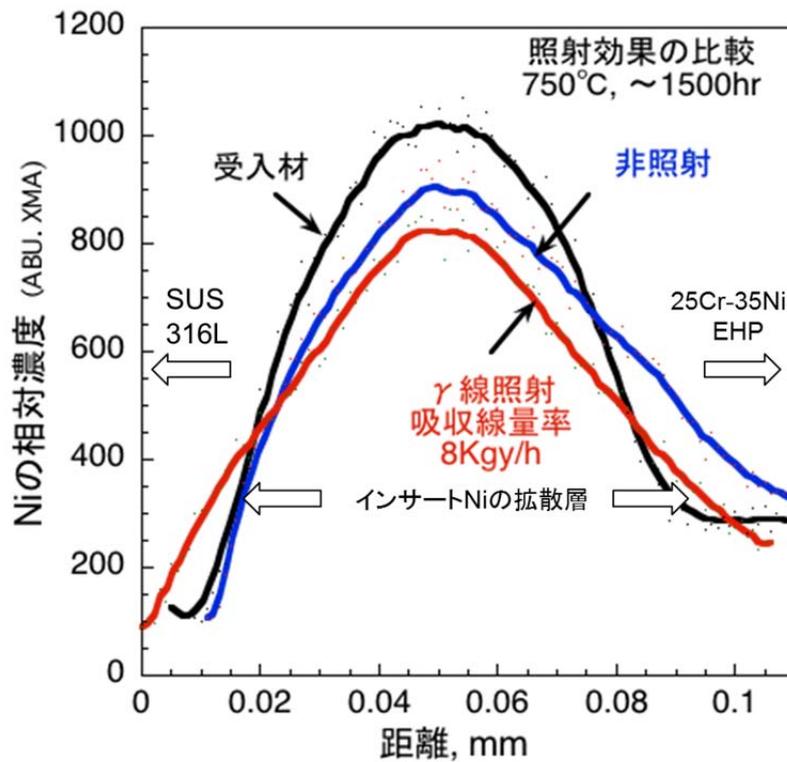


図 3.2-40 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理による Ni 濃度プロファイル

熱時効 条件	γ 線照射なし			γ 線照射あり		
	×10	×20	×50	×10	×20	×50
RT						
650°C						
700°C						
750°C						

写真 3.2-25 板組「EHP/SUS316L」クラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による腐食後の光学顕微鏡写真

* 25Cr-35Ni-EHP 鋼部の写真、下部は SUS316L との界面

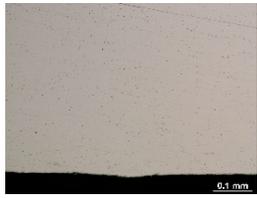
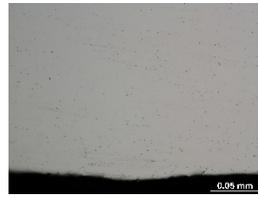
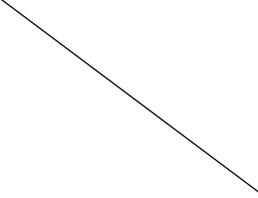
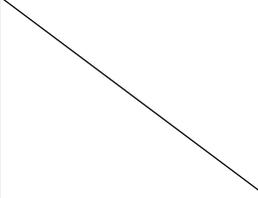
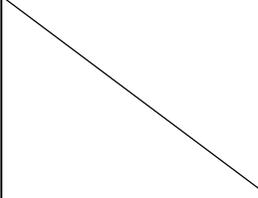
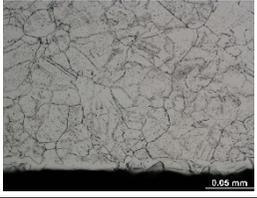
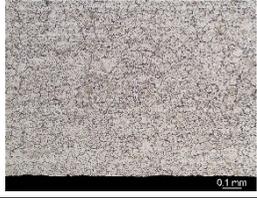
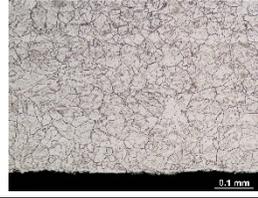
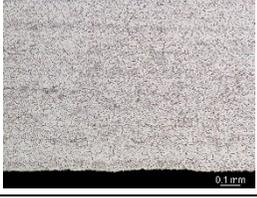
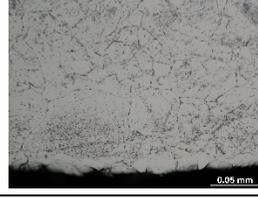
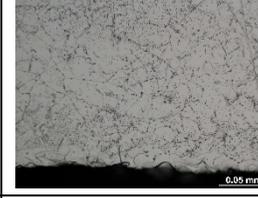
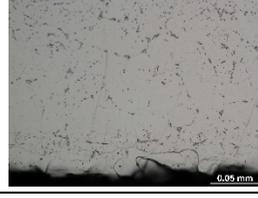
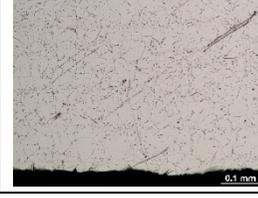
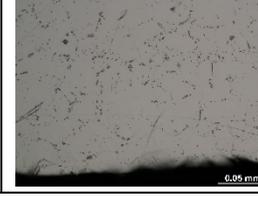
熱時効 条件	γ 線照射なし			γ 線照射あり		
	×10	×20	×50	×10	×20	×50
RT						
650°C						
700°C						
750°C						

写真 3.2-26 板組「EHP/Niめっき/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による腐食後の光学顕微鏡写真

* 25Cr-35Ni-EHP 鋼部の写真、下部はNiとの界面

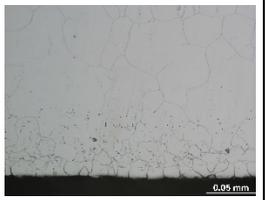
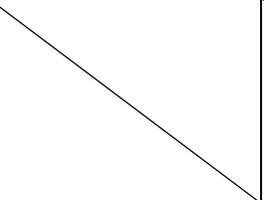
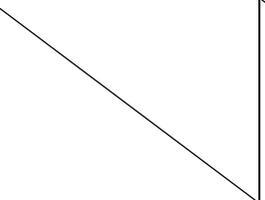
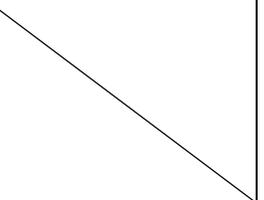
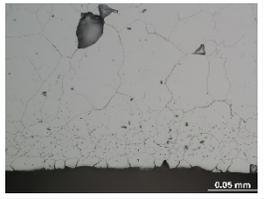
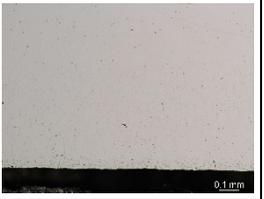
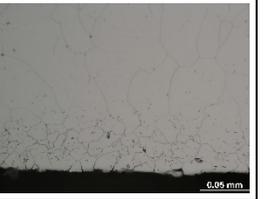
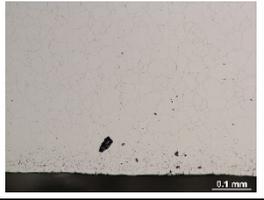
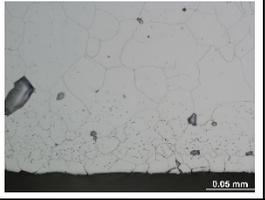
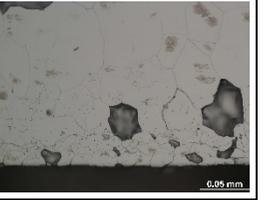
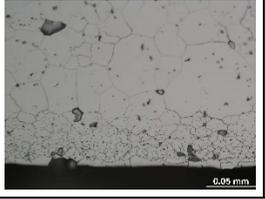
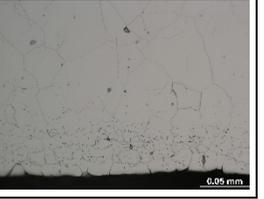
熱時効 条件	γ 線照射なし			γ 線照射あり		
	$\times 10$	$\times 20$	$\times 50$	$\times 10$	$\times 20$	$\times 50$
RT						
350°C						
400°C						
450°C						

写真 3.2-27 板組「EHP/Ni/A533B」クラッド材の熱時効処理ーストラウス試験条件による腐食後の光学顕微鏡写真

*25Cr-35Ni-EHP 鋼部の写真、下部はNi との界面

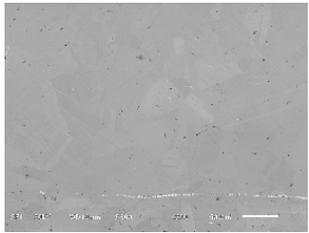
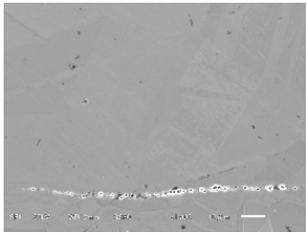
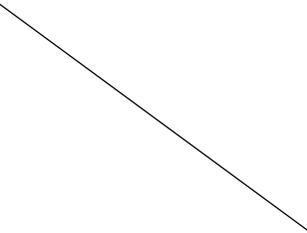
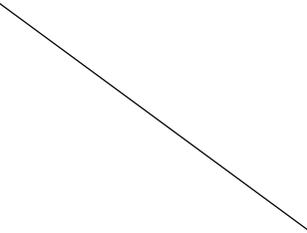
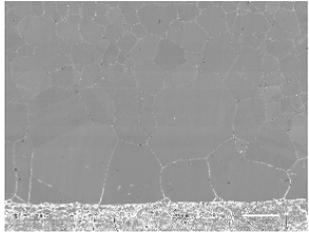
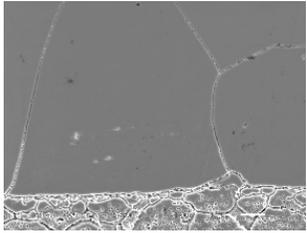
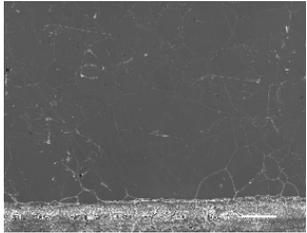
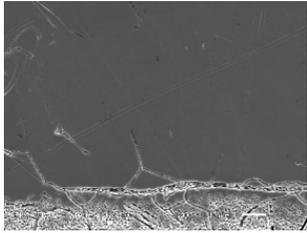
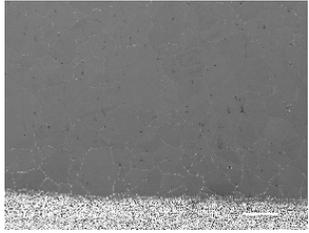
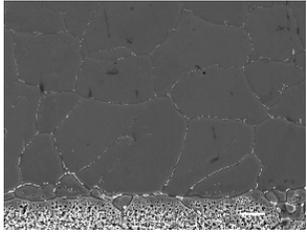
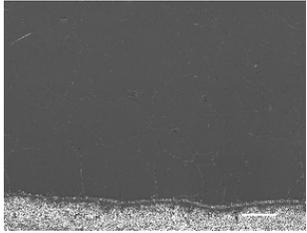
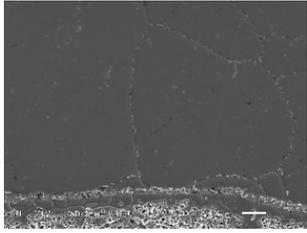
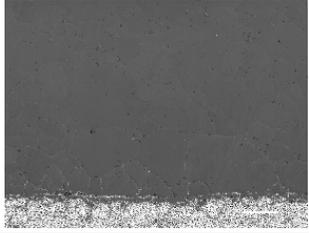
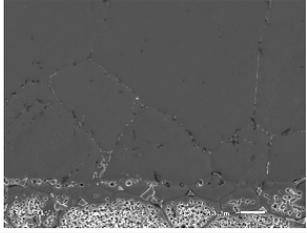
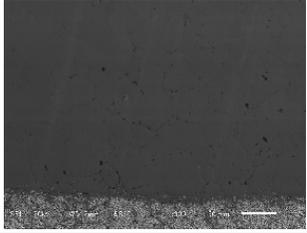
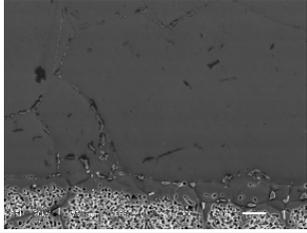
熱時効 条件	γ 線照射なし		γ 線照射あり	
	×300	×1000	×300	×1000
RT				
650°C				
700°C				
750°C				

写真 3. 2-28 板組「EHP/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による腐食後の SEM 像
 *25Cr-35Ni-EHP 鋼部の写真、下部は SUS316L との界面

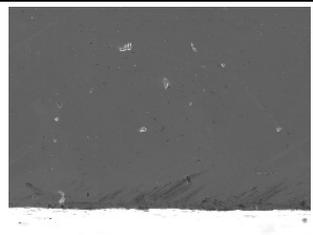
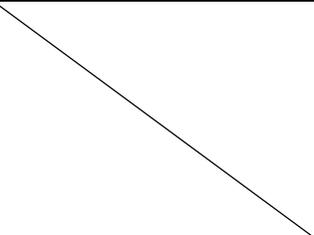
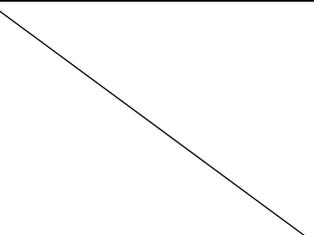
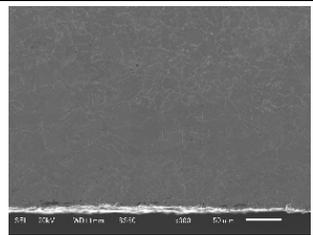
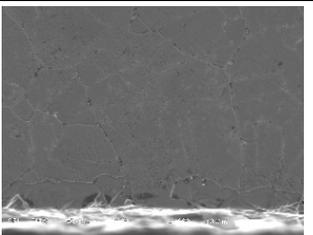
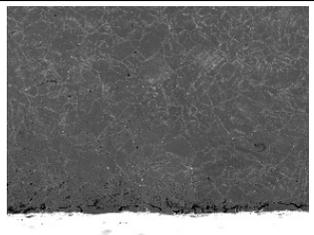
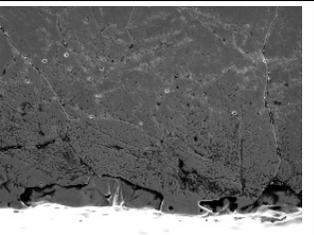
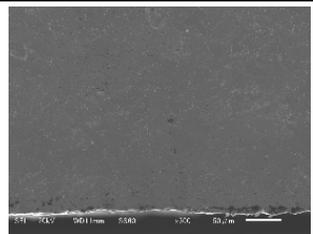
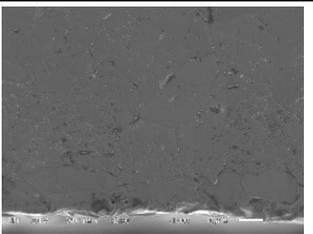
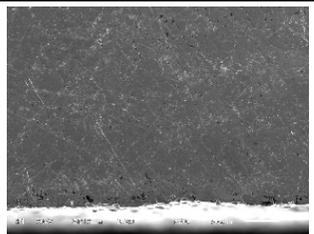
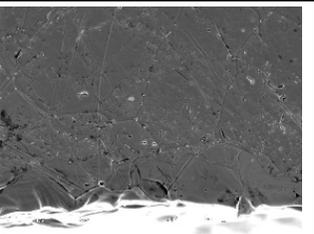
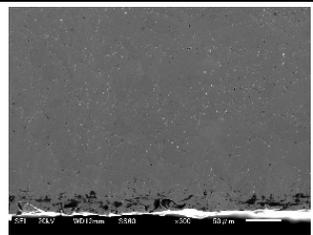
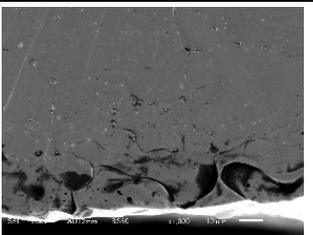
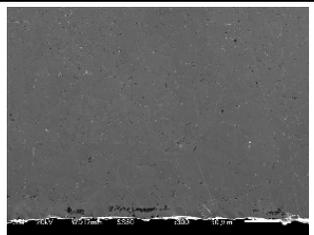
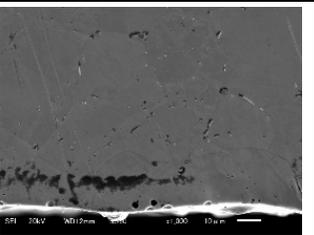
熱時効 条件	γ 線照射なし		γ 線照射あり	
	×300	×1000	×300	×1000
RT				
650°C				
700°C				
750°C				

写真 3. 2-29 板組「EHP/Ni めっき/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理—ストラス試験条件による腐食後の SEM 像

* 25Cr-35Ni-EHP 鋼部の写真、下部は Ni との界面

熱時効 条件	γ 線照射なし		γ 線照射あり	
	×300	×1000	×300	×1000
RT				
350°C				
400°C				
450°C				

写真 3.2-30 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効処理—ストラウス試験条件による腐食後の SEM 像

* 25Cr-35Ni-EHP 鋼部の写真、下部は Ni との界面

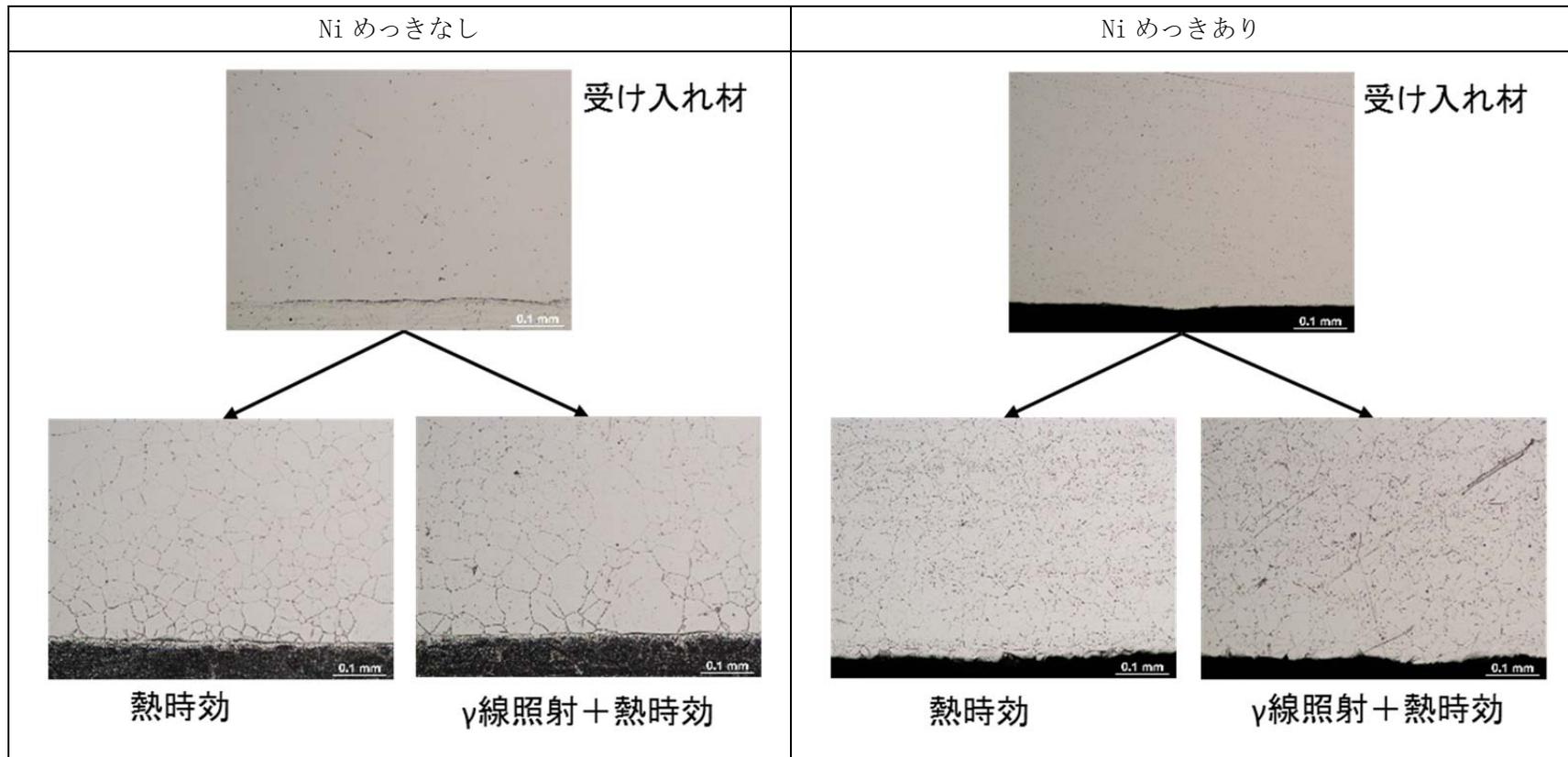


写真 3.2-31 板組「EHP/(Ni めっき)/SUS316L」のクラッド材の 750°C×1,500h 熱時効処理における 25Cr-35Ni-EHP 鋼の材質変化の違い

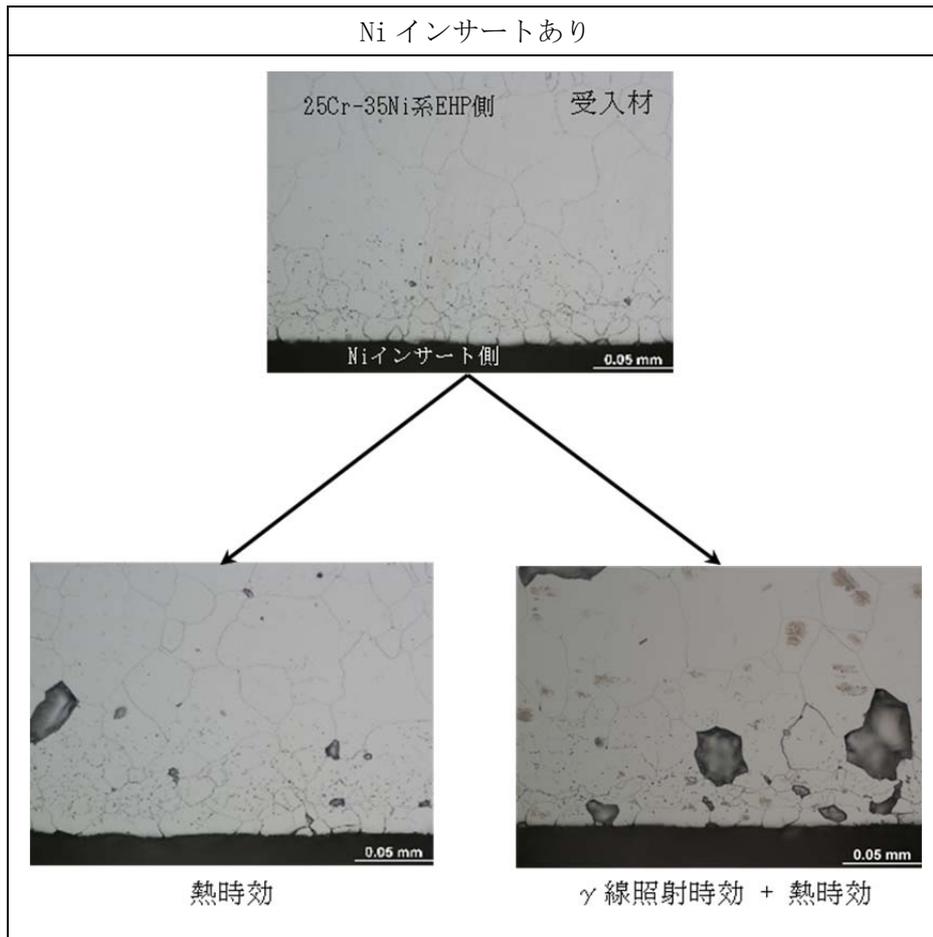


写真 3. 2-32 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の 400℃×1, 500h 熱時効処理における 25Cr-35Ni-EHP 鋼の材質変化の違い

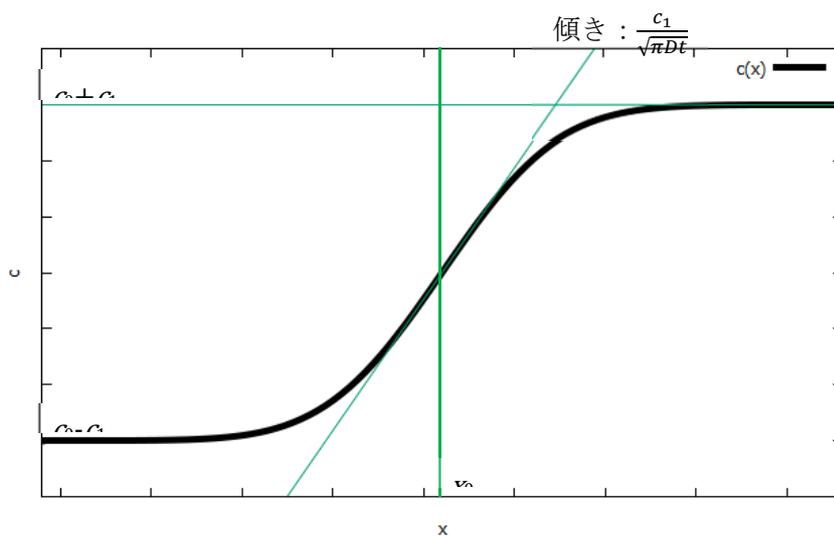


図 3. 2-41 濃度プロファイルを表現する関数形

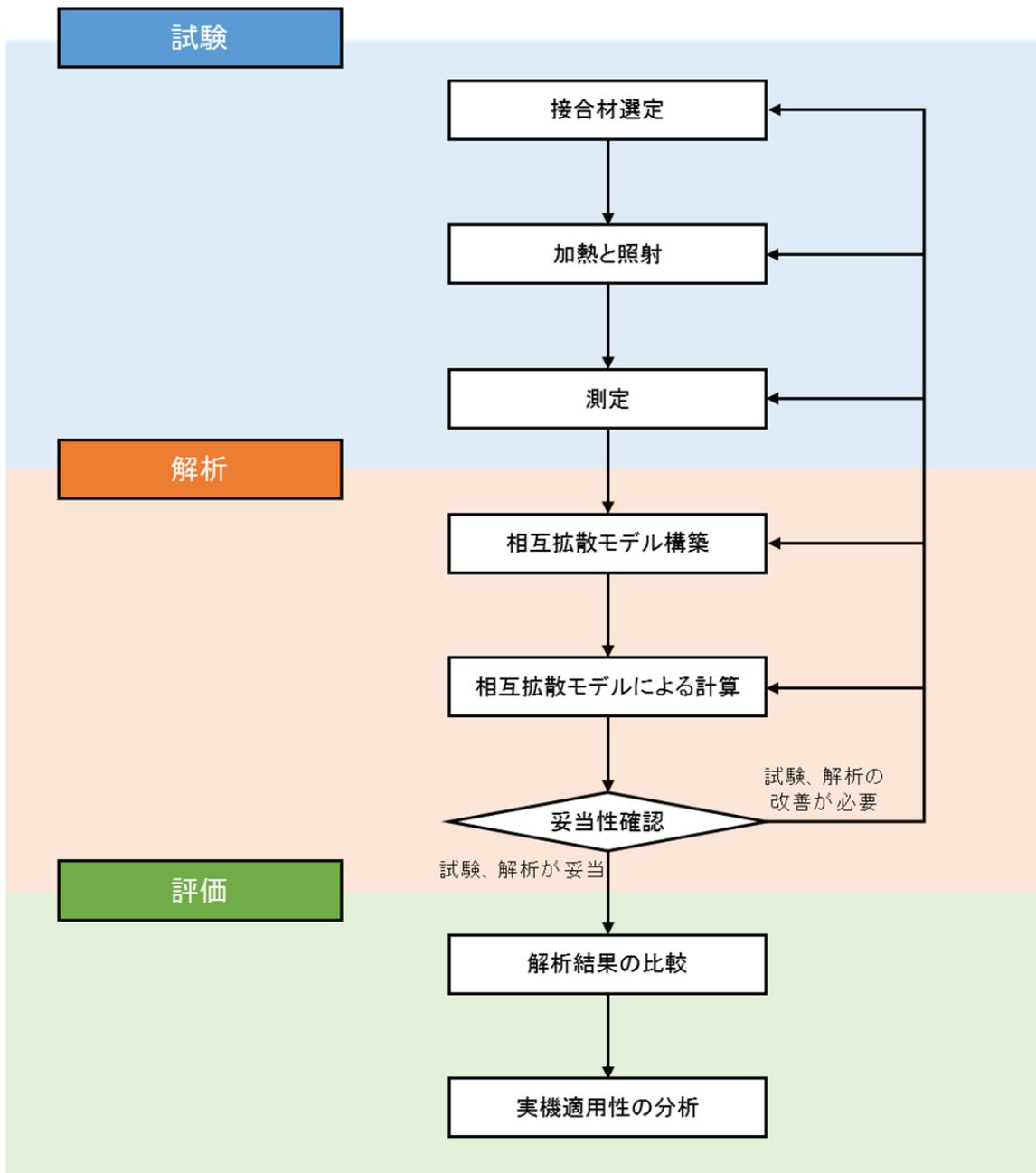


図 3.2-42 クラッド界面の相互拡散わかる析のフロー図

表 3.2-5 相互拡散わかる析の対象とした試験とその条件

処理	板組	熱時効条件		γ線照射条件		測定元素
		温度	実績時間	線量	実績時間	
		℃	h	kGy/h	h	
γ線照射場 熱時効	EHP/Ni/ SUS316L	650	1,578	15.8	1,536	Fe, Cr, Ni
		700	1,578	16	1,536	Fe, Cr, Ni
		750	1,578	16.5	1,536	Fe, Cr, Ni
熱時効	EHP/Ni/ SUS316L	650	1,500	-	-	Fe, Cr, Ni
		700	1,500	-	-	Fe, Cr, Ni
		750	1,500	-	-	Fe, Cr, Ni

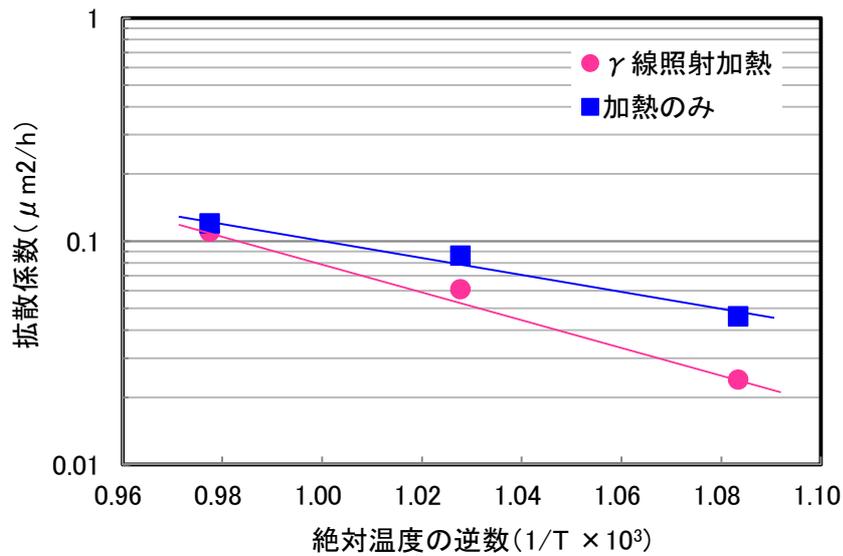


図 3.2-43 各試験の Fe の拡散係数に対するアレニウスプロット

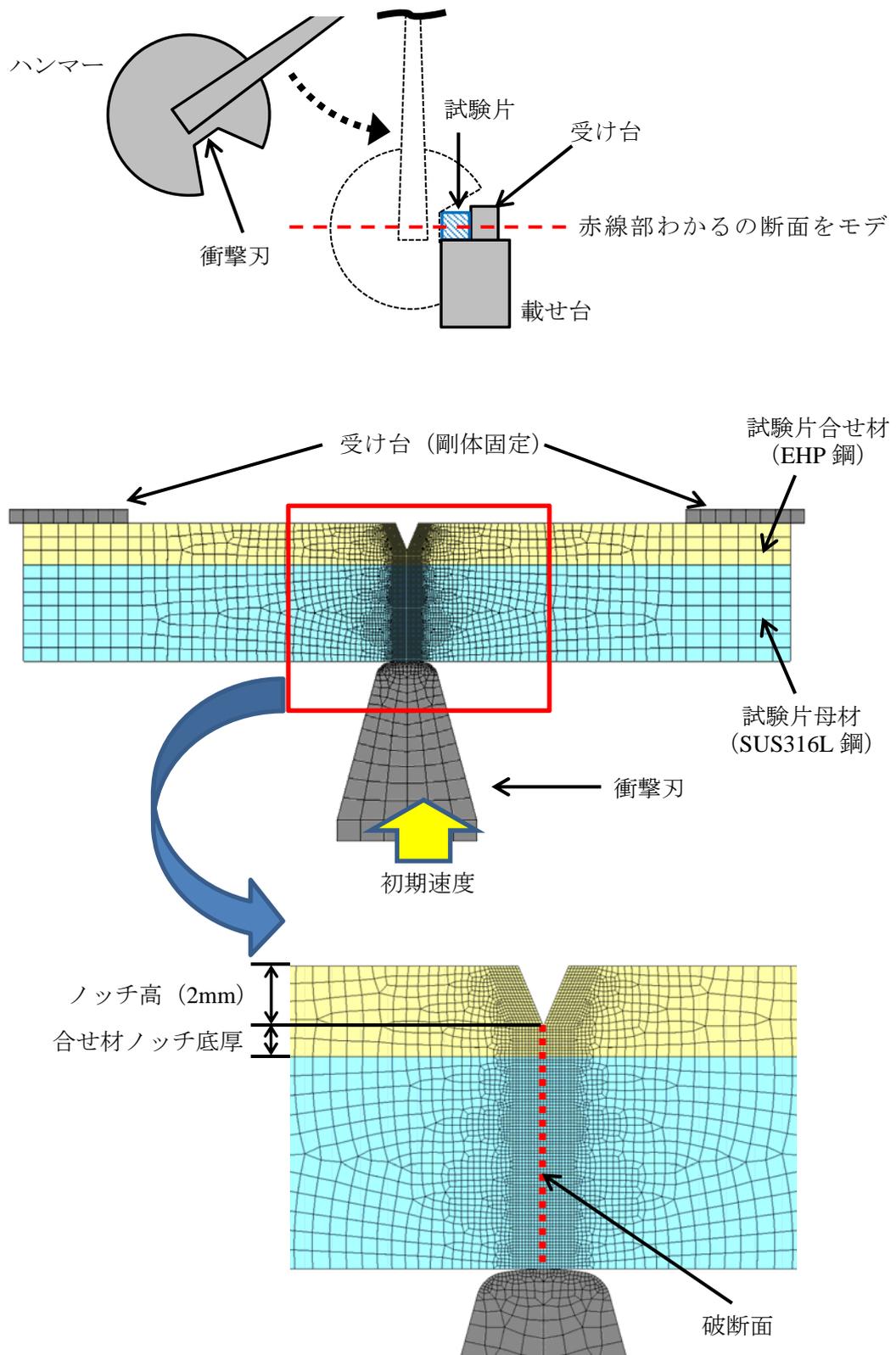


図 3. 2-44 解析モデル図

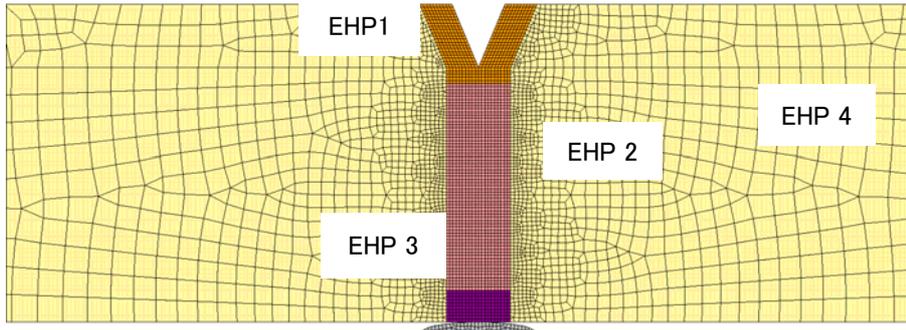


図 3.2-45 25Cr-35Ni-EHP 鋼単体の素材特性部位

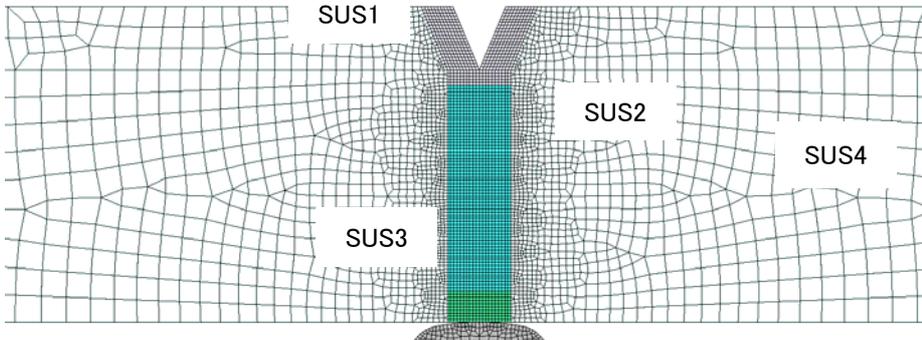


図 3.2-46 SUS316L 単体の素材特性部位

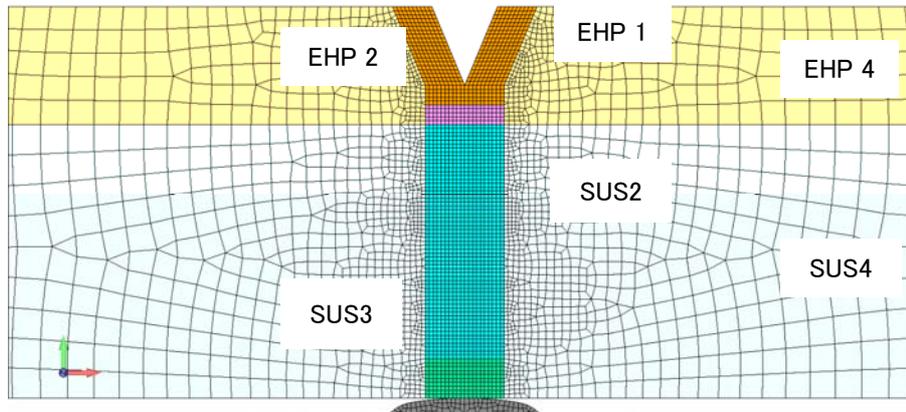


図 3.2-47 クラッド材の素材特性部位

表 3.2-6 25Cr-35Ni-EHP 鋼の部位別素材特性

部位	素材 ID	2 次剛性 (N/mm ²)	破壊塑性歪み (-)
① ノッチ先端	EHP1	100	0.1
② 脆性破壊部	EHP2	5000	0.3
③ 衝突部	EHP3	5000	0.6
④ その他	EHP4	500	-

表 3.2-7 SUS316L の部位別素材特性

部位	素材 ID	2 次剛性 (N/mm ²)	破壊塑性歪み (-)
① ノッチ先端	SUS1	100	0.1
② 脆性破壊部	SUS2	244	0.3
③ 衝突部	SUS3	244	0.6
④ その他	SUS4	200	-

表 3.2-8 物性値決定後の 25Cr-35Ni-EHP 鋼と SUS316L の吸収エネルギー

品種	吸収エネルギー (J)	
	実測値	解析値
25Cr-35Ni-EHP 鋼	217	208
SUS316L (試験結果は 700°C、800°C の平均値)	20	20

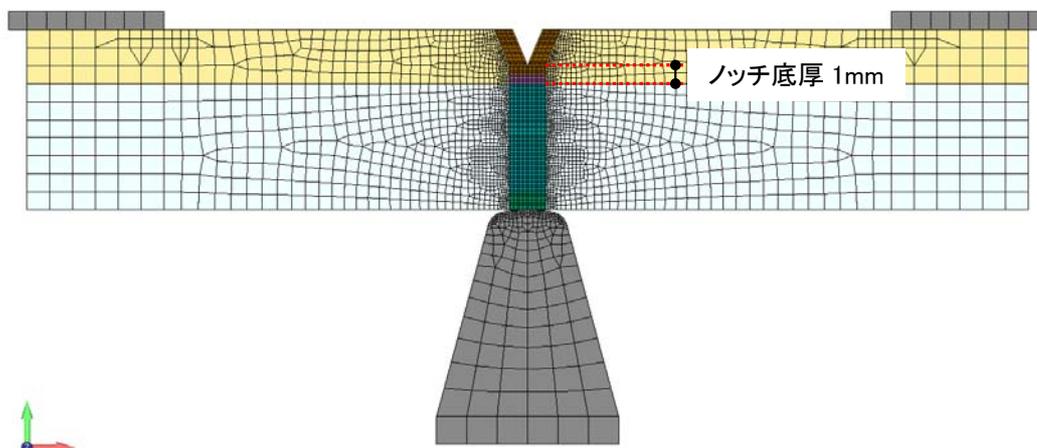


図 3.2-48 解析メッシュ図 (条件 1 : V ノッチ底の合せ材 EHP 鋼の厚さ 1mm)

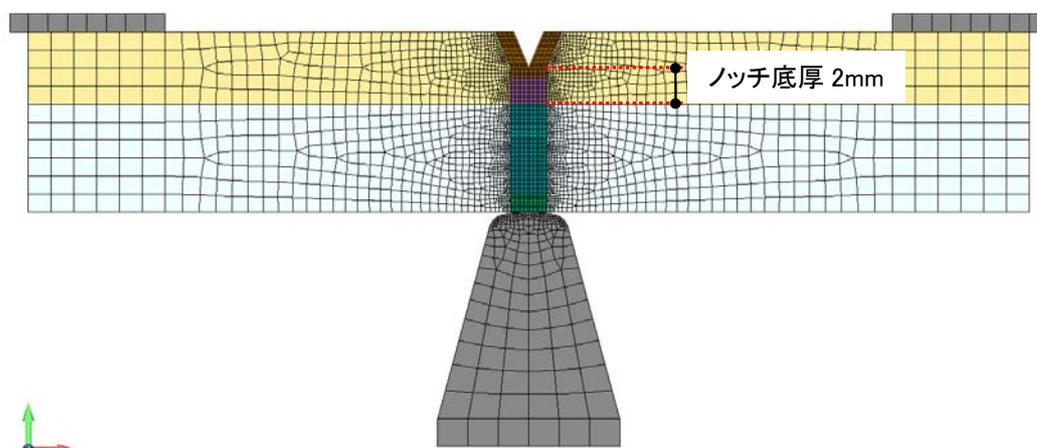


図 3.2-49 解析メッシュ図 (条件 2 : V ノッチ底の合せ材 EHP 鋼の厚さ 2mm)

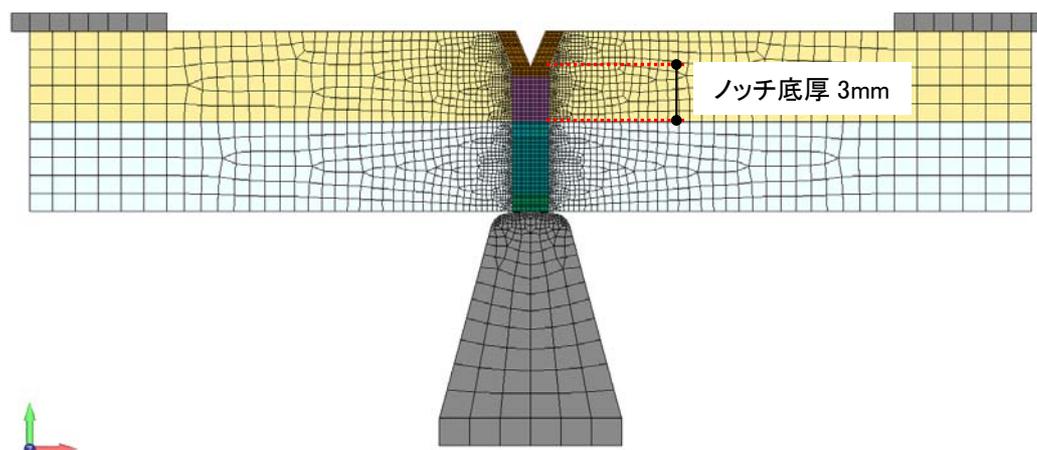


図 3.2-50 解析メッシュ図 (条件 3 : V ノッチ底の合せ材 EHP 鋼の厚さ 3mm)

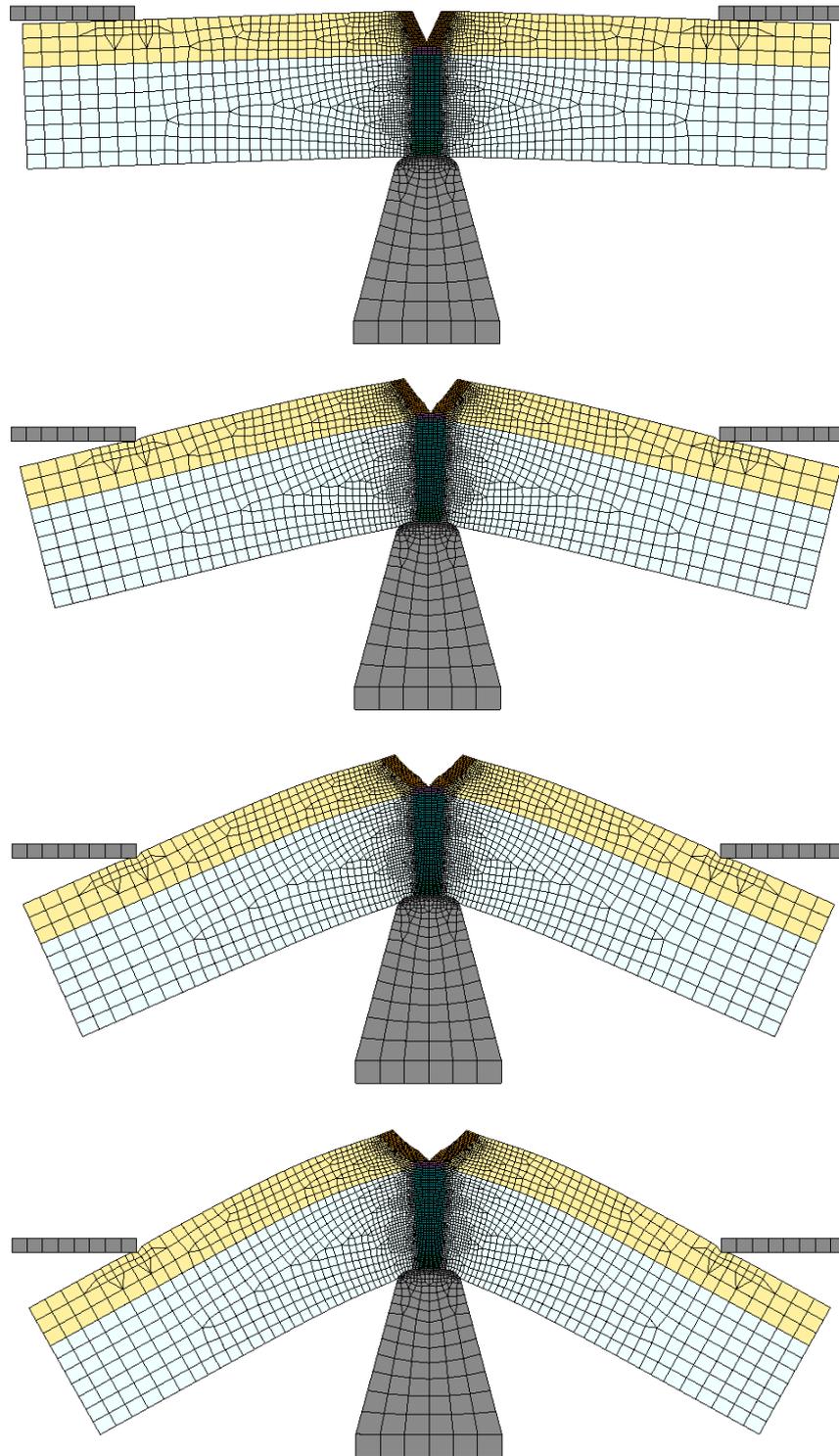


图 3.2-51(a) 衝擊解析变形履歴図 (条件 1) -1/2

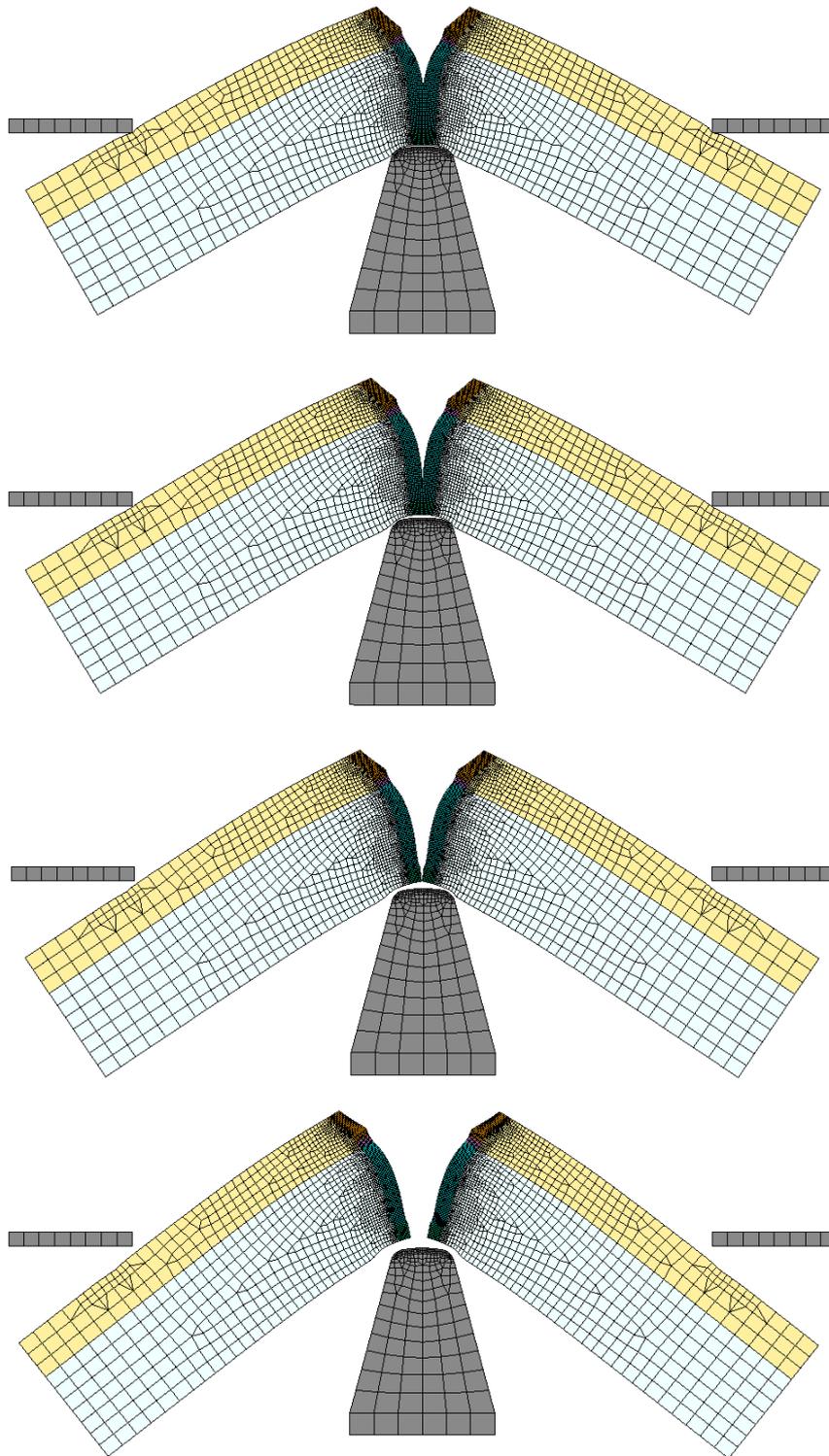


图 3.2-51 (b) 衝擊解析變形履歷圖 (條件 1) -2/2

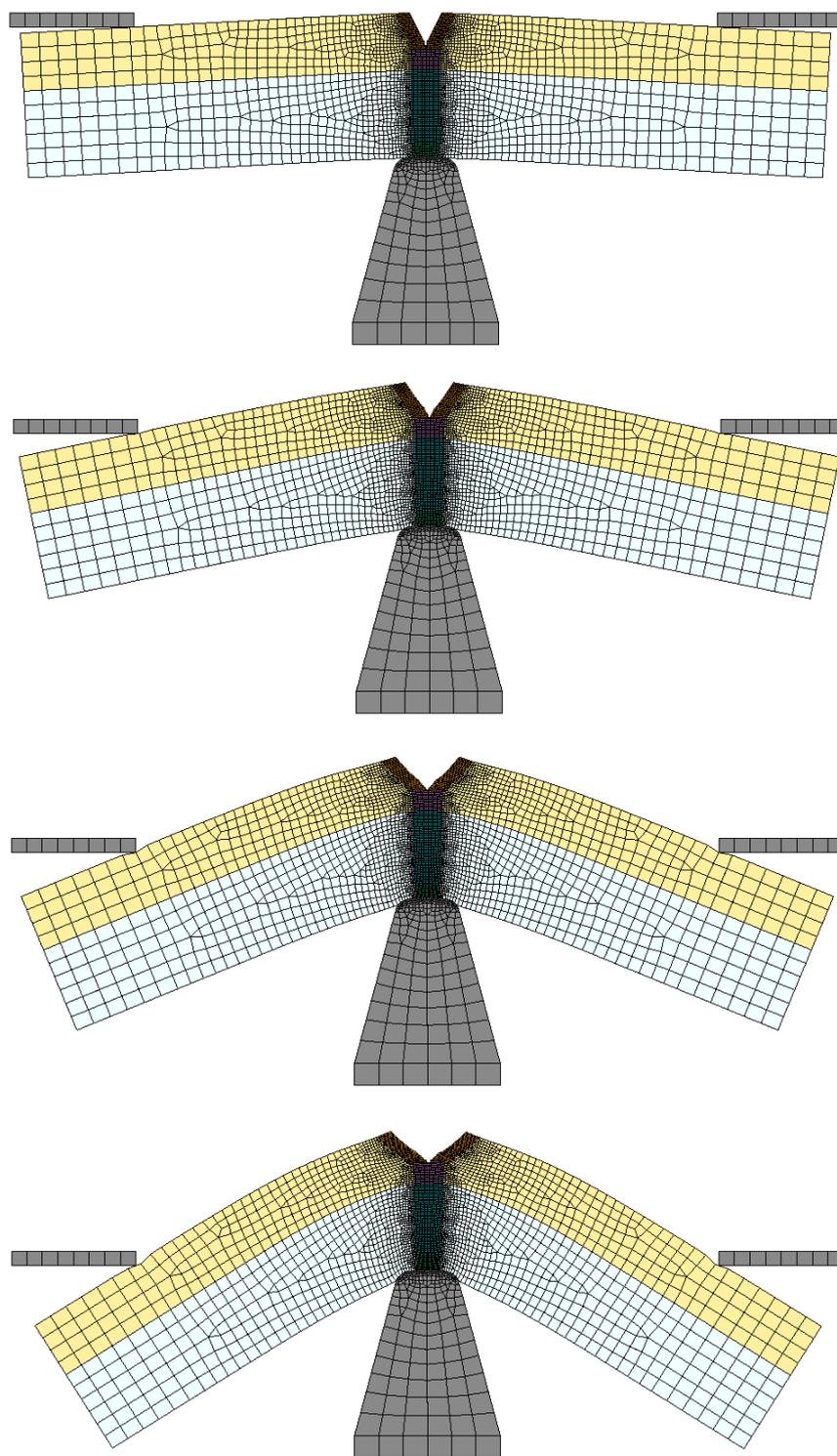


图 3.2-52(a) 衝擊解析变形履歴図 (条件 2) -1/2

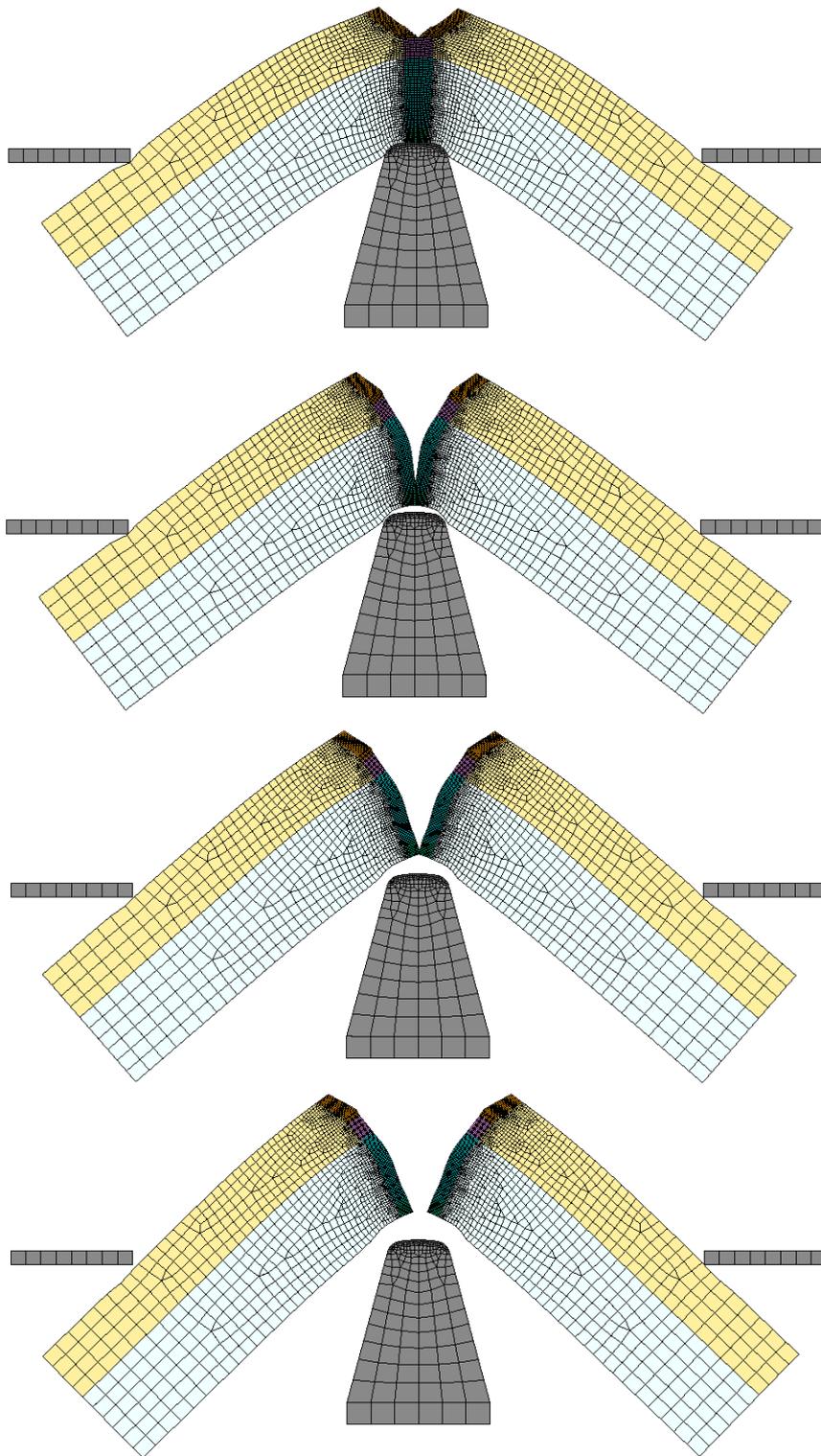


图 3.2-52(b) 衝擊解析變形履歷圖 (條件 2) -2/2

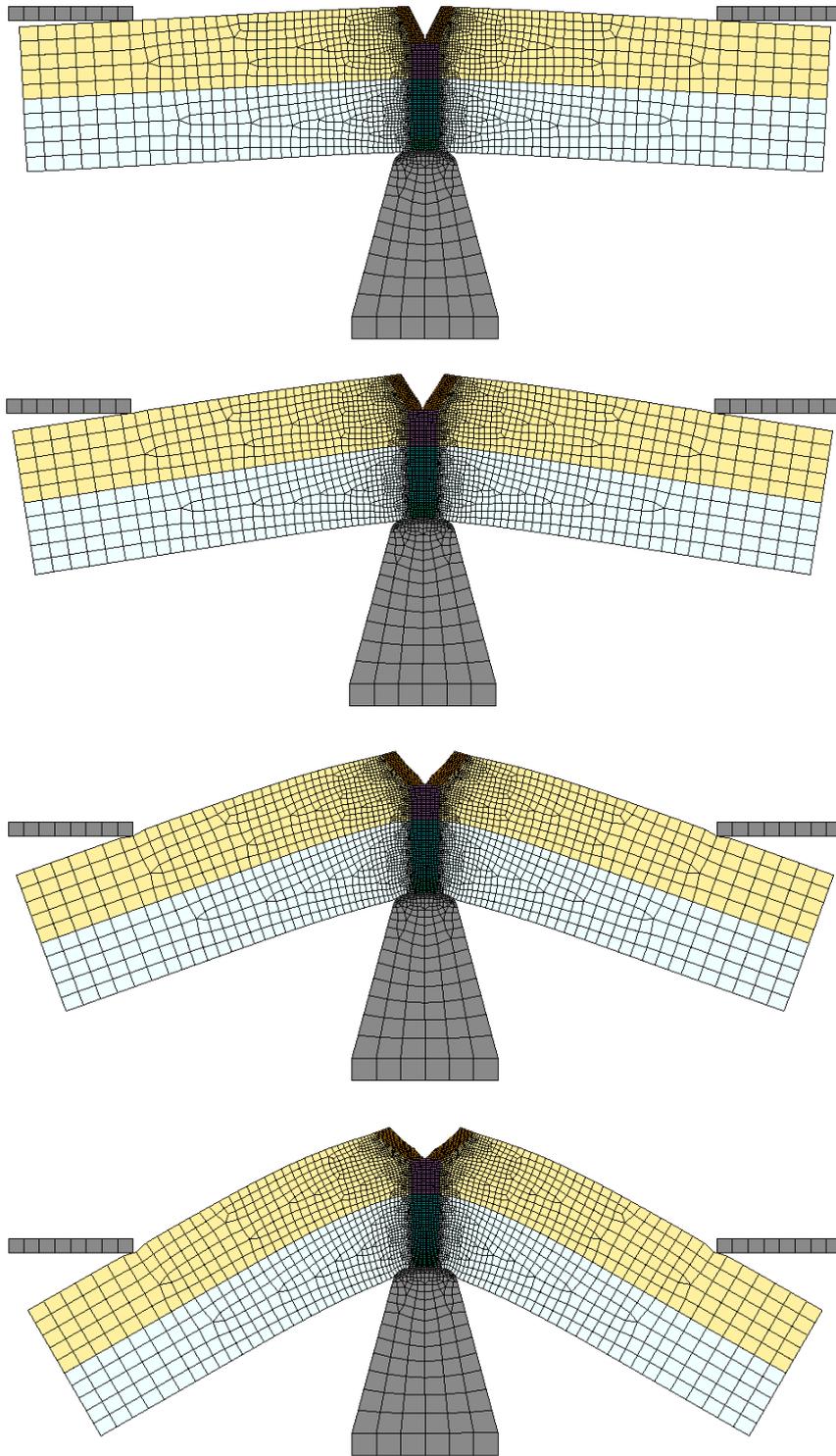


图 3.2-53(a) 衝擊解析变形履歴図 (条件 3) -1/2

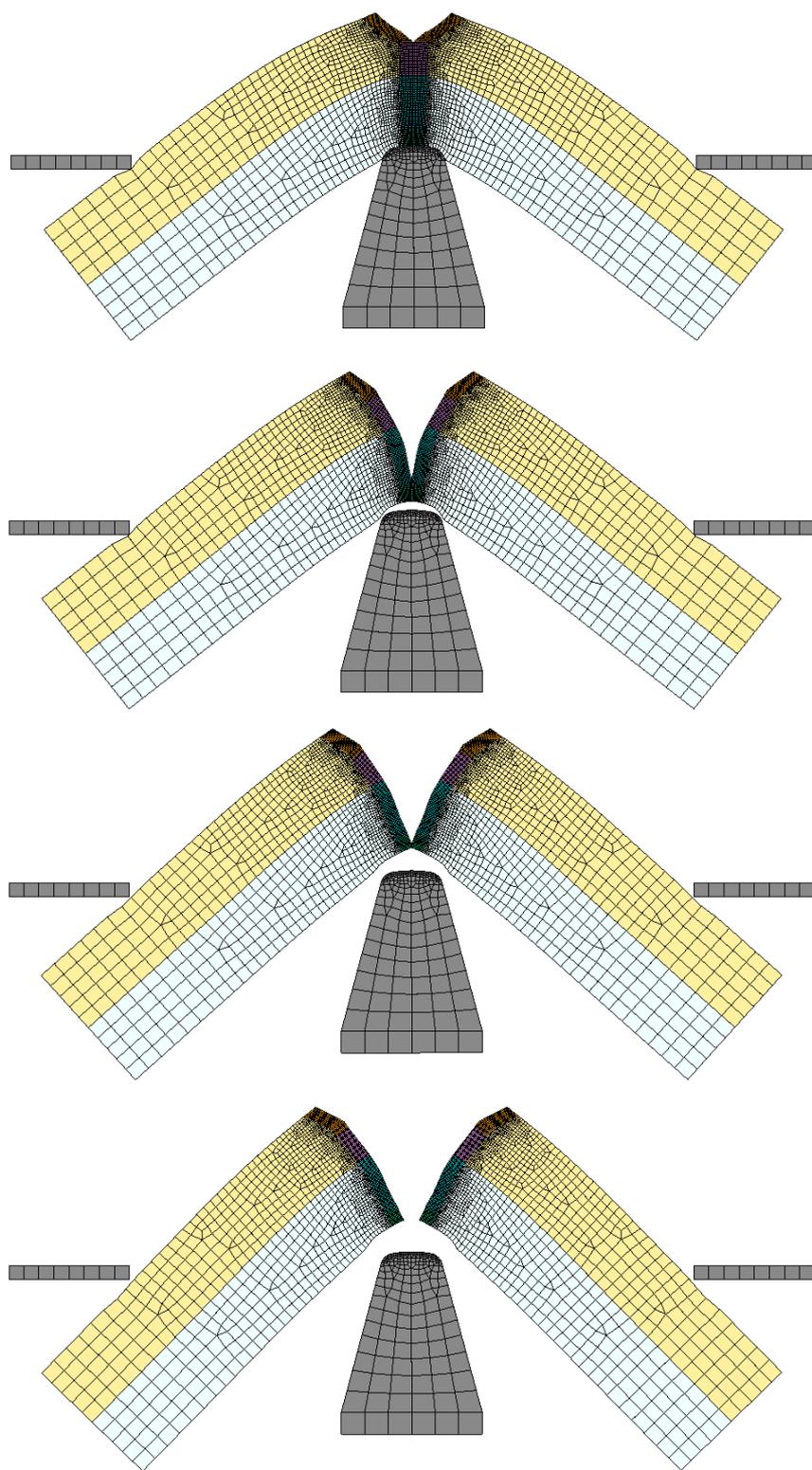


图 3.2-53(b) 衝擊解析變形履歷圖 (条件 3) -2/2

表 3.2-9 衝撃試験解析での吸収エネルギー

ケース	V ノッチ底の合せ材 EHP 鋼の厚さ	吸収エネルギー
条件 1	1mm	125 J
条件 2	2mm	172 J
条件 3	3mm	175 J

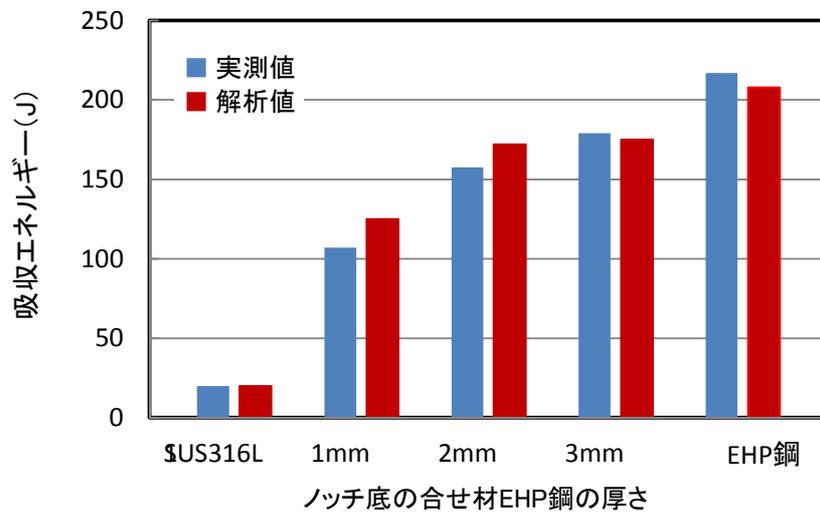


図 3.2-54 シャルピー衝撃試験吸収エネルギーの実測値と解析値の比較

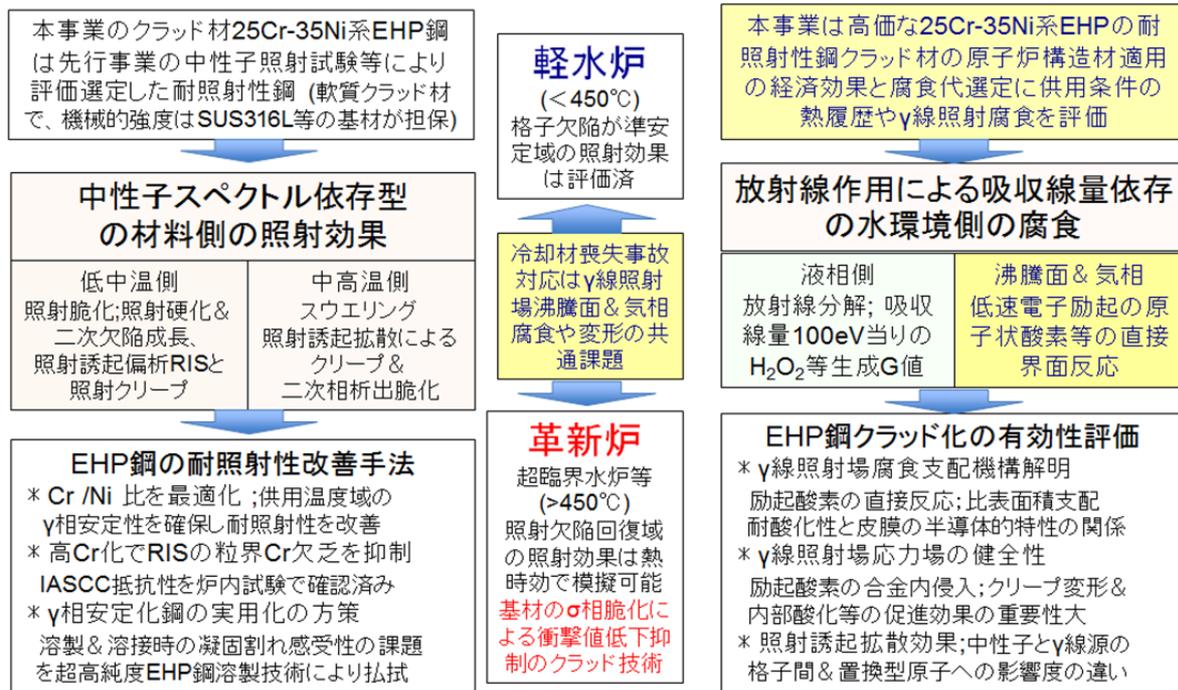


図 3.2-55 原子炉等への EHP 鋼によるクラッド材の環境適用性に要求される耐照射性

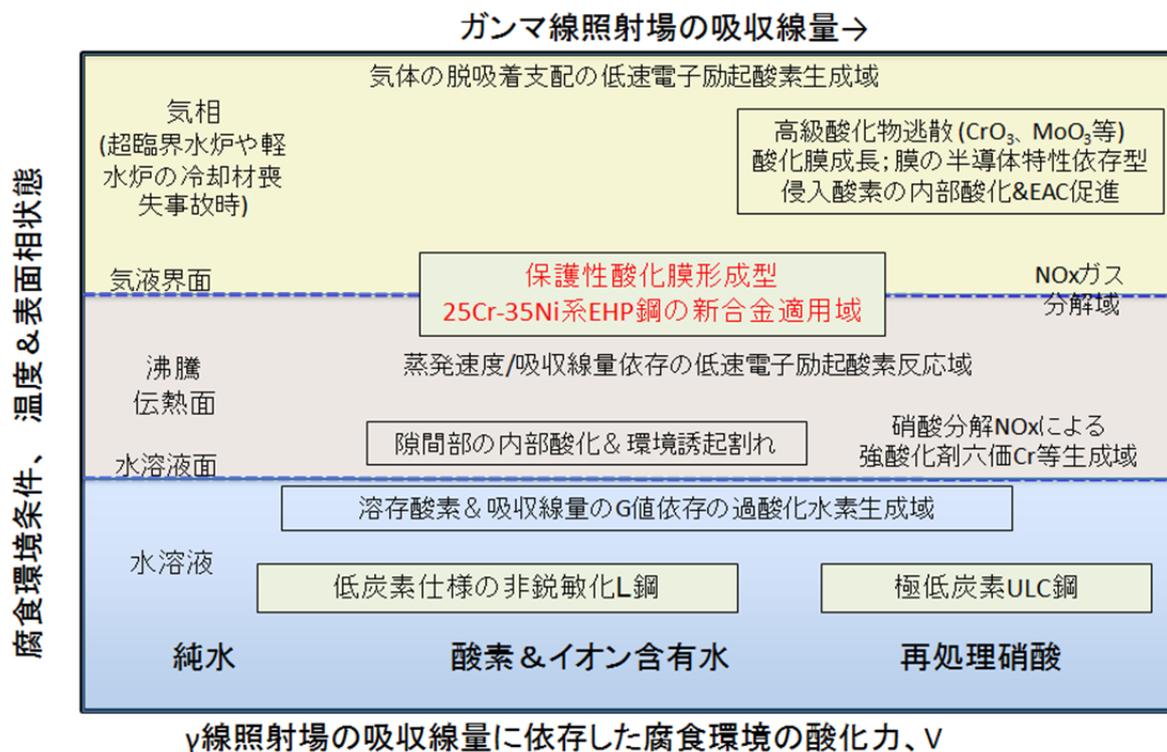


図 3.2-56 原子力システム機器による構造材料に対する環境適用性の要求条件の違い

現行部材	適用部位	現行課題	クラッド技術	達成目標
軽水炉の 圧力壁用 低合金鋼	圧力容器等 (SUS309クラッド)	腐食溶出、EAC	EHP-SUS片面薄板 ライナー施工	腐食とEACの 抑制
	給水系配管	流動水中腐食	EHP-SUS内面 ライナー管	放射性クラッド 生成の溶出低減
軽水炉の 液相&高温 蒸気相 の炉心 構造材 (SUS316L& インコネル等)	炉内金物 (シュラウド、制御棒等)	EAC	EHP-SUS両面薄板ライ ニング施工/強化薄板	腐食とEACの 抑制
	再循環系配管 (SUS300系L鋼)	EAC	EHP-SUS内面 ライナー管	EACの抑制
	高強度炉底材 (インコネル等)	EAC	表面のEHP-SUS薄板 肉盛り施工	溶接割れ起点の EAC抑制
	耐摩耗性材(制御棒、 シール、フック、ボルト等)	エロージョン・コ ロージョン等	析出強化型Ni基EHP合 金のクラッドと無垢	長期耐久性確保
高速炉の 構造材料 (SUS316L)	原子炉容器	照射時効脆化 (中高温 σ 相脆化と 475°C型脆化)	EHP-SUS両面薄板 ライニング施工	延性材による LBB対応の 破壊靱性確保

図 3.2-57 原子炉用材料に想定している EHP 鋼によるクラッド材の適用対象と達成目標

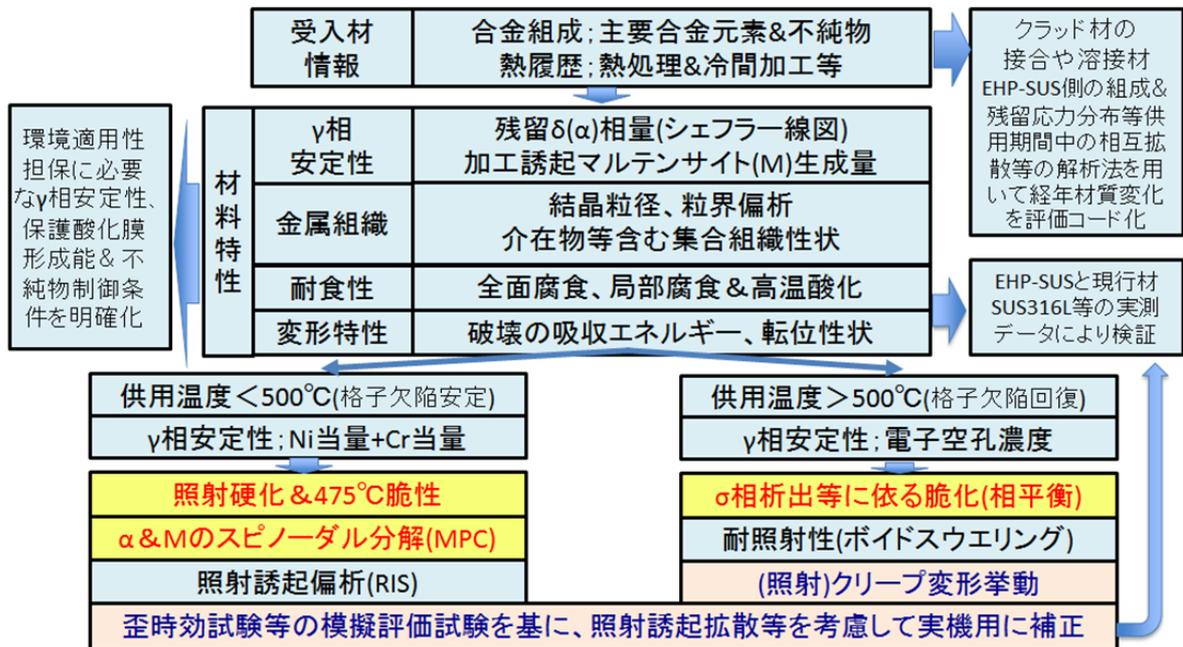


図 3.2-58 平成 27 年度の EHP 鋼によるクラッド材の環境適用性評価上の主要な 2 つの視点



図 3.2-59 基盤知見の乏しい γ 線照射場水蒸気特有の環境誘起割れ EAC の重要度評価

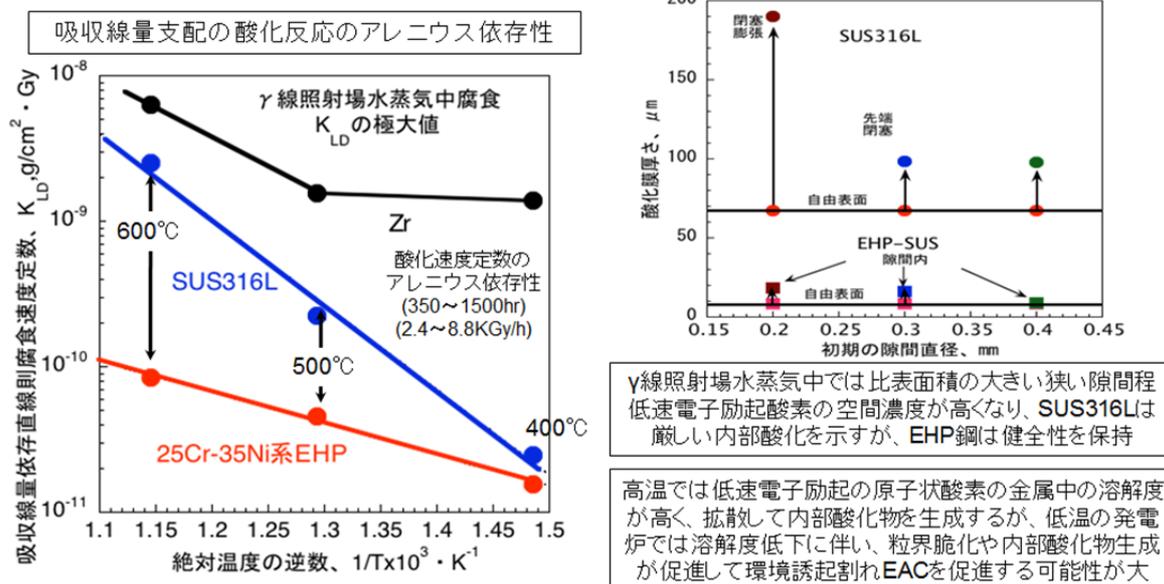
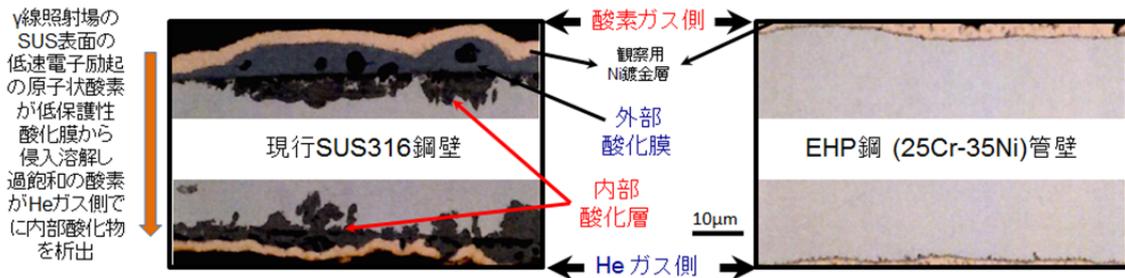


図 3.2-60 過年度までの 400℃以上の γ 線照射場水蒸気中の酸化やすきま腐食評価の知見

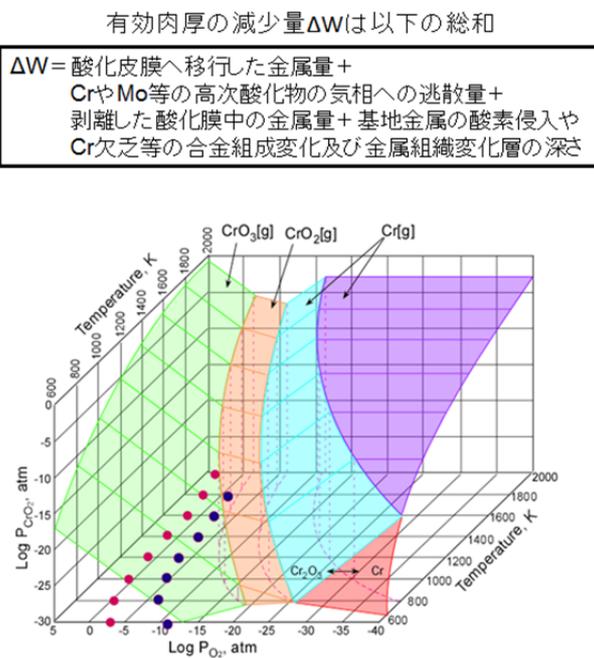
※内部酸化とすきままでの低速電子励起酸素による腐食促進効果の重要性を明確化

材料名	自由表面腐食 (常圧水蒸気) (15KGy/h)	隙間腐食 (常圧水蒸気) (15KGy/h)	内圧クリープ (常圧酸素) (30KGy/h)	γ 線照射場の 環境適用性が 大きく異なる要因
25Cr-35Ni系 EHP合金 (LWR(クラッド等))	高温側でも 保護性に優れた二層 酸化膜が生成して、 耐酸化性を保持	励起酸素量が増大す る高酸化力の隙間条 件でも酸化膜の健全 性を保持	高温酸化の影響を受 けず応力指数依存の アレニウス型の定常 クリープ速度を維持	外層スピネルが拡散 バリアのCr酸化物内 層生成促進、全温度 域の耐酸化性を担保
SUS316系鋼 (LWR&LMFBR)	低保護性単一膜に伴 い、温度上昇と共に、 酸化膜成長、逃散、 剥離、内部変質等が 促進	隙間狭窄化に伴う励 起酸素量が増大によ り、不均一酸化物や 内部酸化等の隙間腐 食が促進	LMFBR仕様鋼は高温 クリープ強度に優れる が耐酸化性が低く、 応力場で不均一酸化や 内部酸化が促進	高輸率の単一酸化膜 に伴いCr ₂ O ₃ やMoO ₃ の生成/逃散、酸化膜 成長&内部酸化や酸素 透過による変質促進

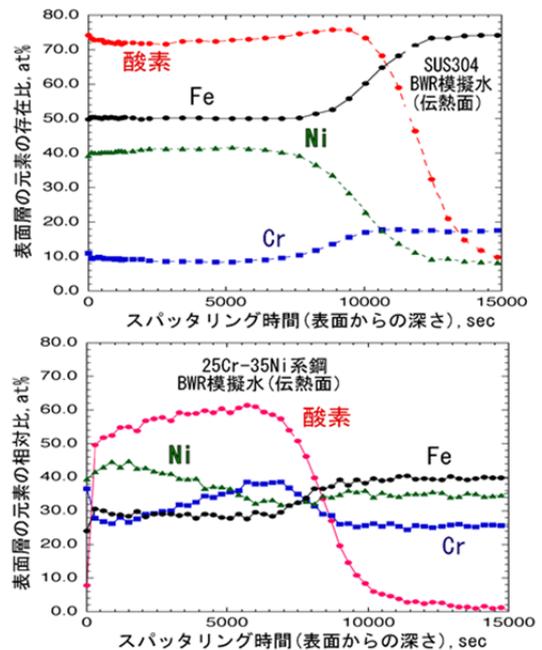


内圧クリープ試験管断面の表面近傍性状; 内圧117.5MPaのHe、外側/常圧酸素600°C、30kGy/h、~2500hr
(現行材SUS316L鋼は低速電子励起の原子状酸素の侵入拡散による内部酸化物生成&脆化が促進)

図 3.2-61 過年度の 400°C以上の高温側の γ 線照射場酸化性ガス環境適応性のまとめ



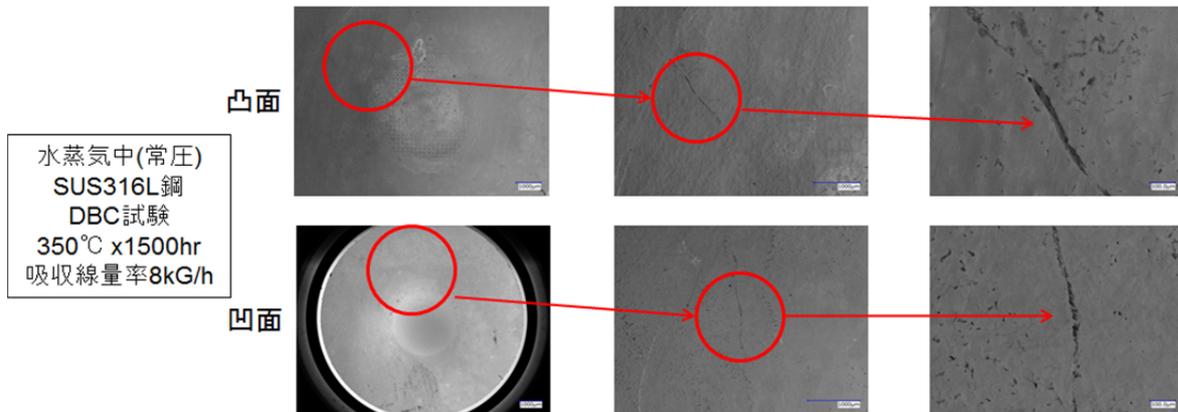
酸素ポテンシャルによる高次酸化物の気相への逃散挙動



γ 線照射場の沸騰水蒸気腐食表面の深さ方向分析例

図 3.2-62 γ 線照射場の高酸素ポテンシャル (高酸化電位) 条件での耐酸化性評価に関する因子

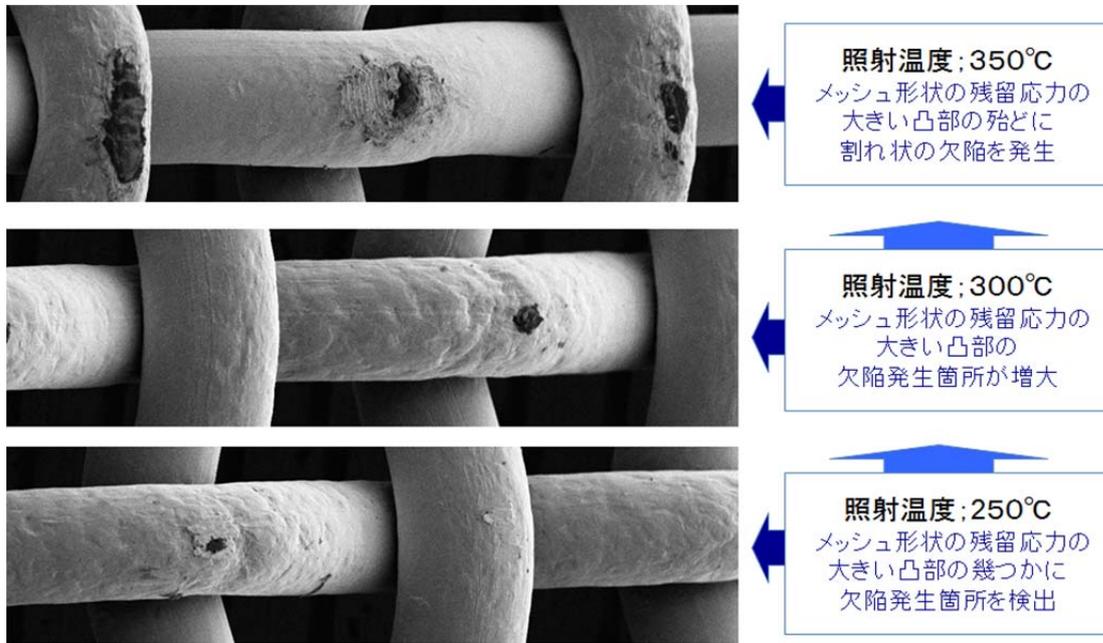
SUS316L鋼の γ 線照射場水蒸気中のDBC試験材の隙間凹凸面には割れ発生の痕跡を検出



SUS316L鋼のSCCは水相で起こり、水蒸気中の耐食性は良好とされていたが、 γ 線照射の水蒸気中では、高温側の内部酸化と同様に、隙間壁面の低速電子励起反応で生成する原子状酸素により、低温側でも、輸率が高い原子状酸素の基地金属への侵入による粒界脆化や内部酸化が関わる環境誘起割れが明確化

25Cr-35Ni系EHP鋼は、高温側と同様に保護性の高い二層酸化膜を生成できるので
発電炉温度域で優れた環境誘起割れの抵抗性を有することを確認

図 3.2-63 350℃ γ 線照射場水蒸気中 DBC 試験後の外観写真



SUS304鋼メッシュ(網線径:100 μ m)のSEM写真(常圧水蒸気中、8KGy/h、1500hr)

図 3.2-64 γ 線照射場水蒸気中 DBC 試験のすきま用 SUS304 鋼製メッシュの SEM 写真
→試験温度による違い

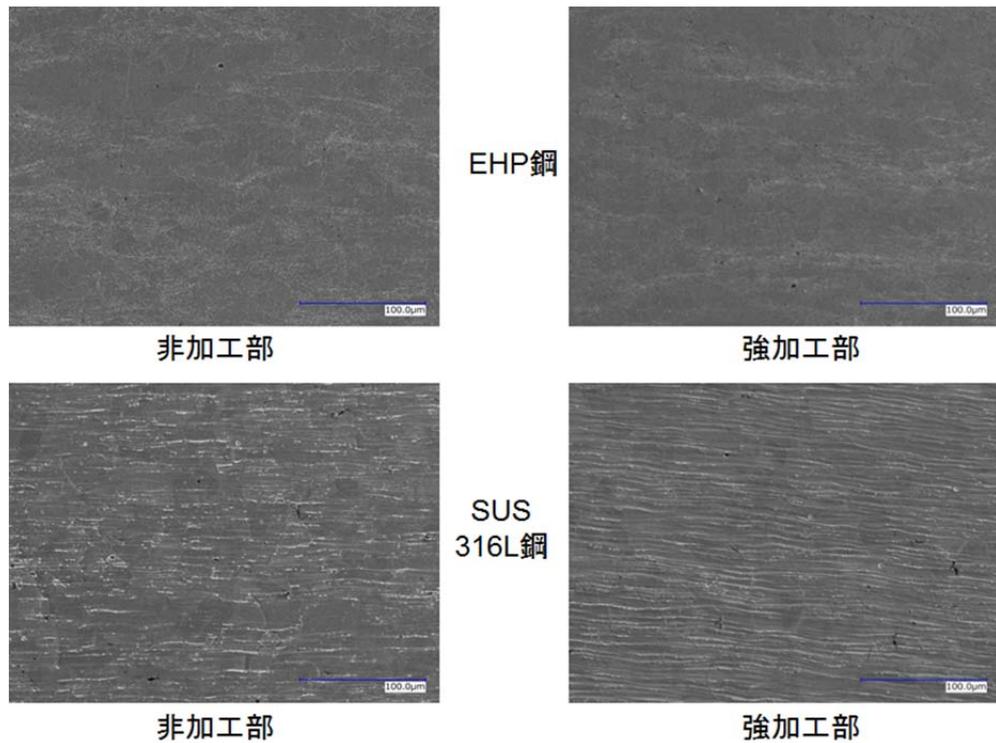


図 3.2-65 350℃ γ 線照射場水蒸気中 DBC 試験後の断面片のストラウス試験条件による腐食後の状況

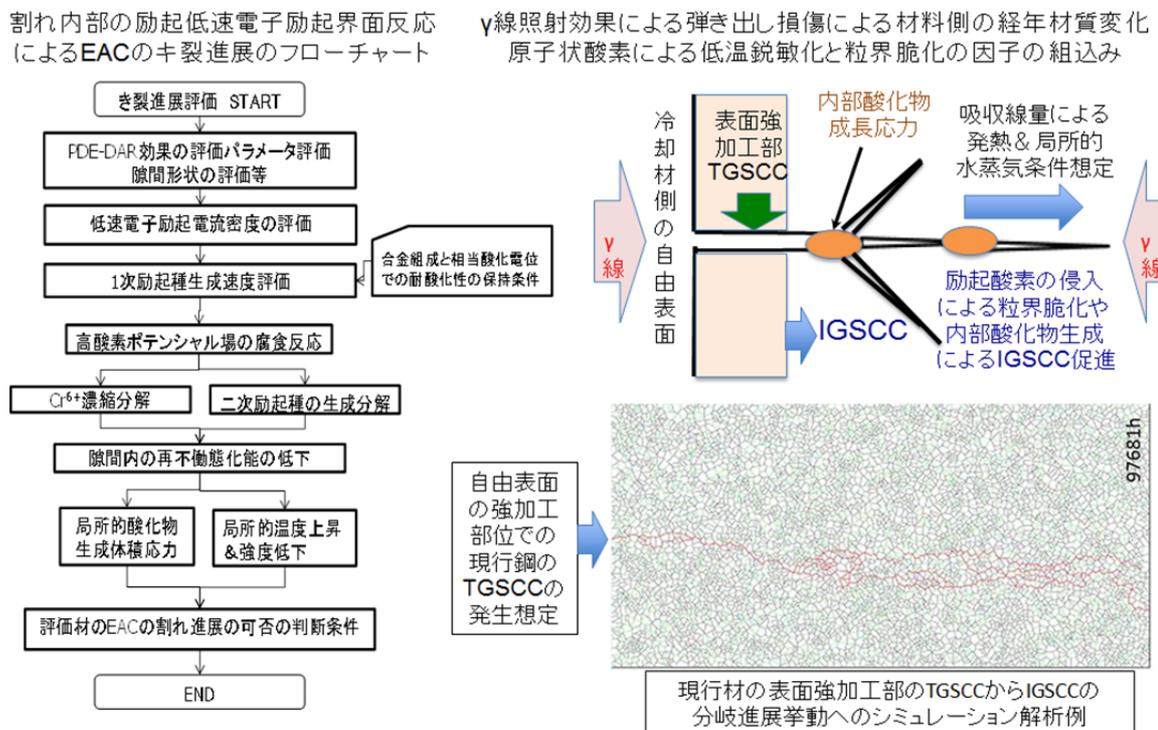
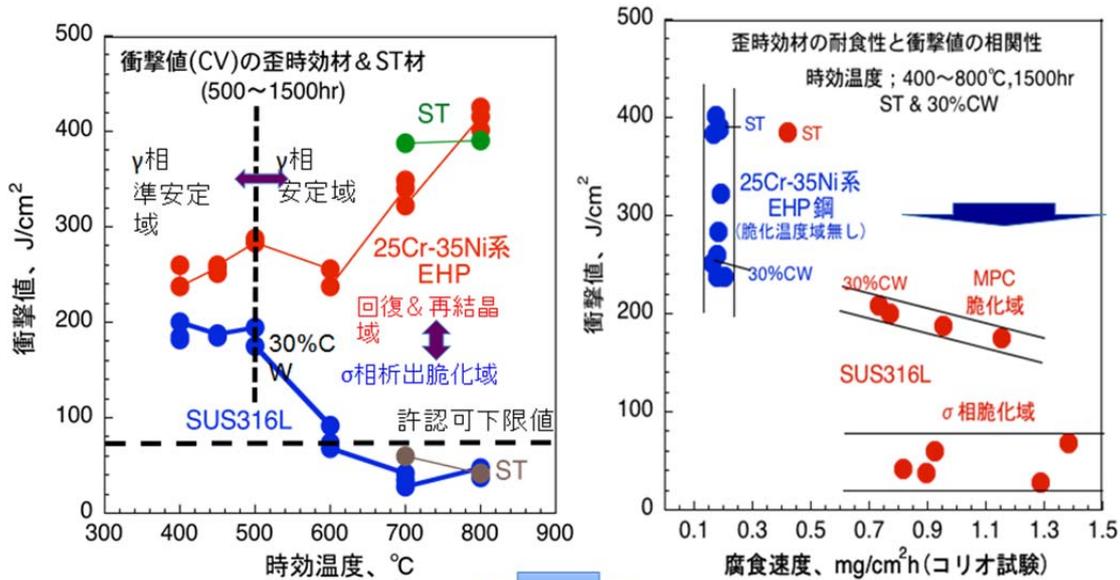


図 3.2-66 新 EAC 知見による現行軽水炉の γ 線照射場炉内構造物の割れのモデル化



EHP鋼とSUS316L鋼の熱時効試験結果を基に、クラッド材の時効条件を750°Cx1500hrに選定

図 3.2-67 熱時効脆化の知見に基づく γ 線照射効果や時効条件の選定

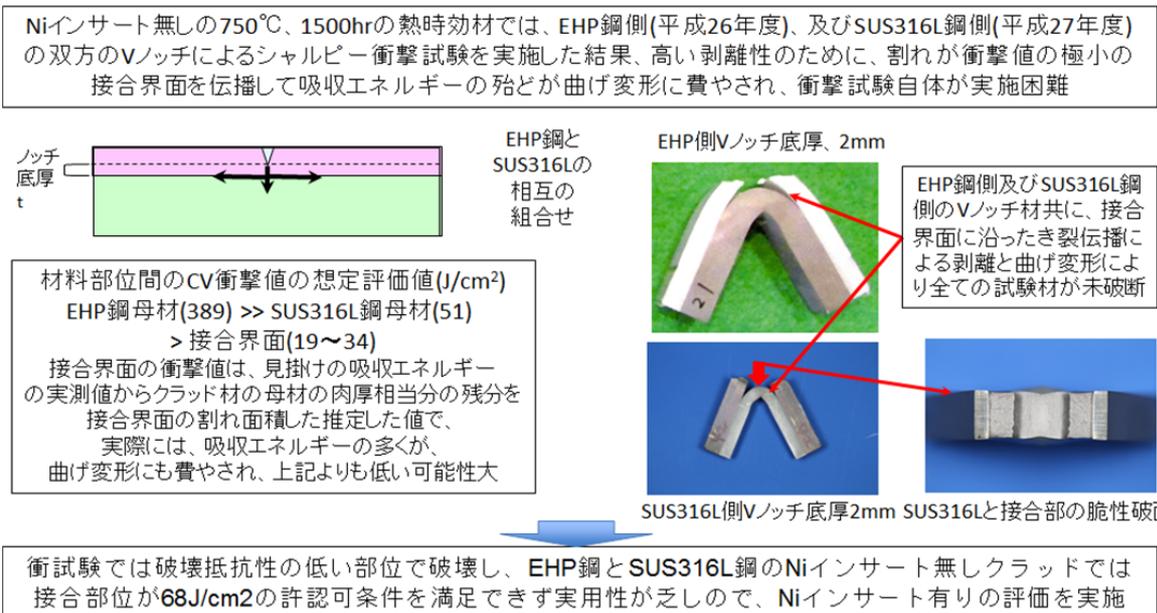


図 3.2-68 過年度の Ni インサートなしのクラッド材 (板組「EHP/SUS316L」) の 界面剥離の課題

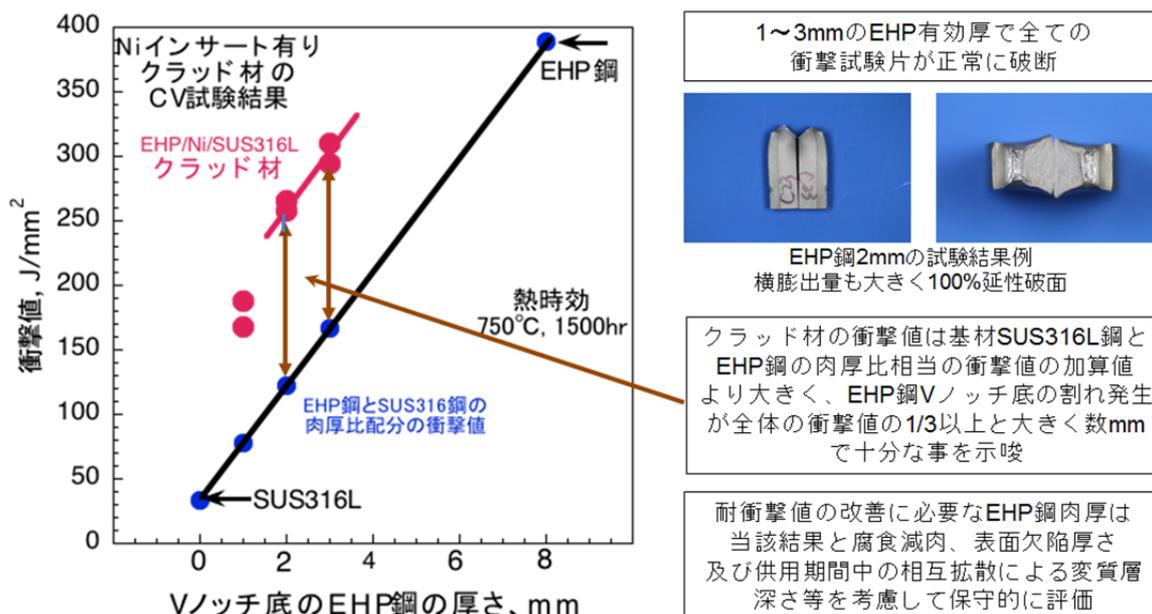


図 3.2-69 当該年度の Ni インサートありクラッド材（板組「EHP/Ni/SUS316L」）の良好な耐衝撃性

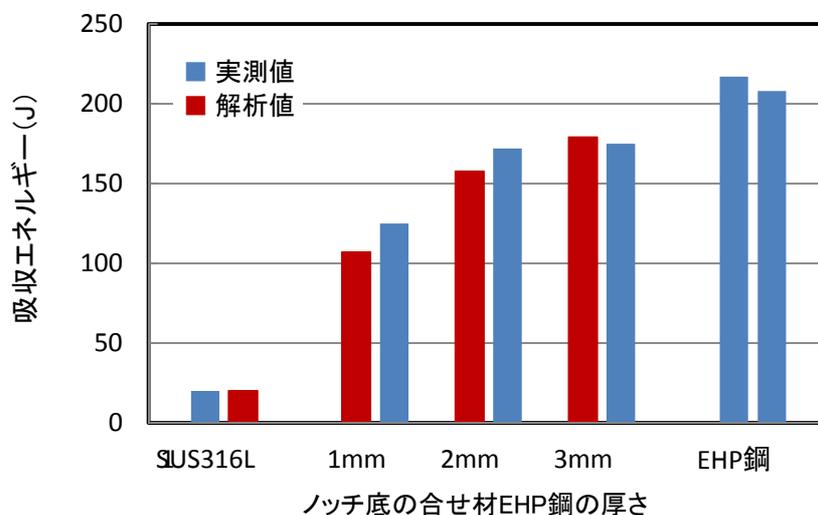


図 3.2-70 熱時効処理したクラッド材の V ノッチシャルピー衝撃値の FEM 法による破壊力学的解析値と実験値の比較

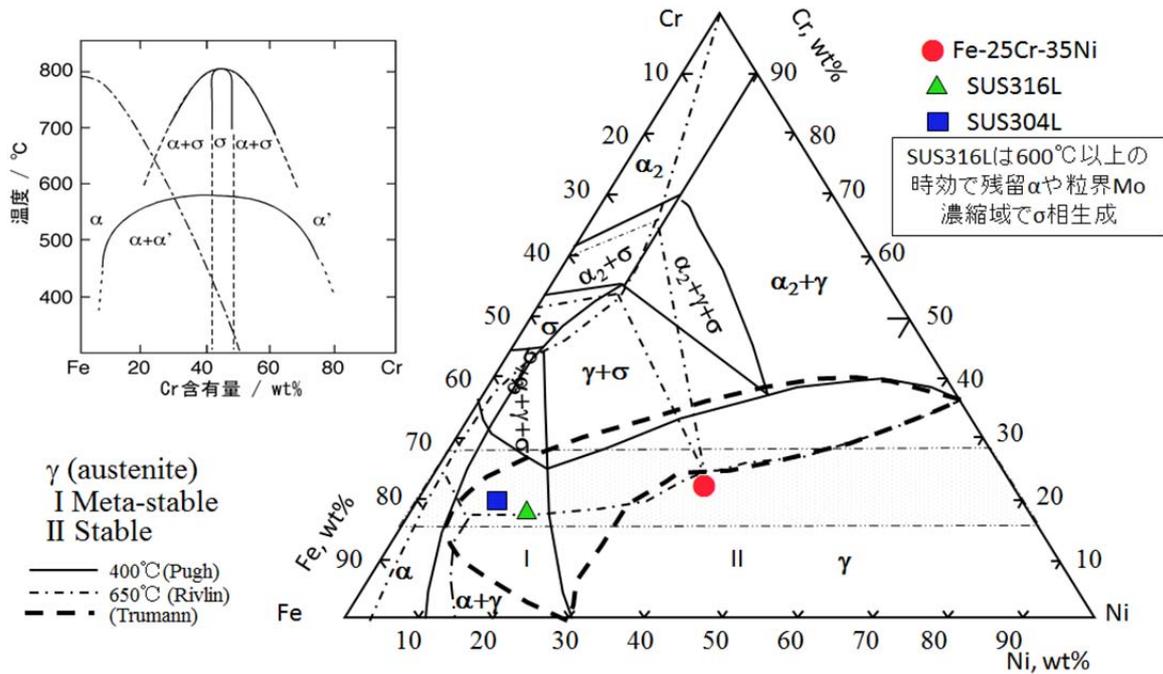


図 3.2-71 板組「EHP/(Ni)/SUS316L」のクラッド材の時効効果上重要な Fe-Cr-Ni 系平衡状態図

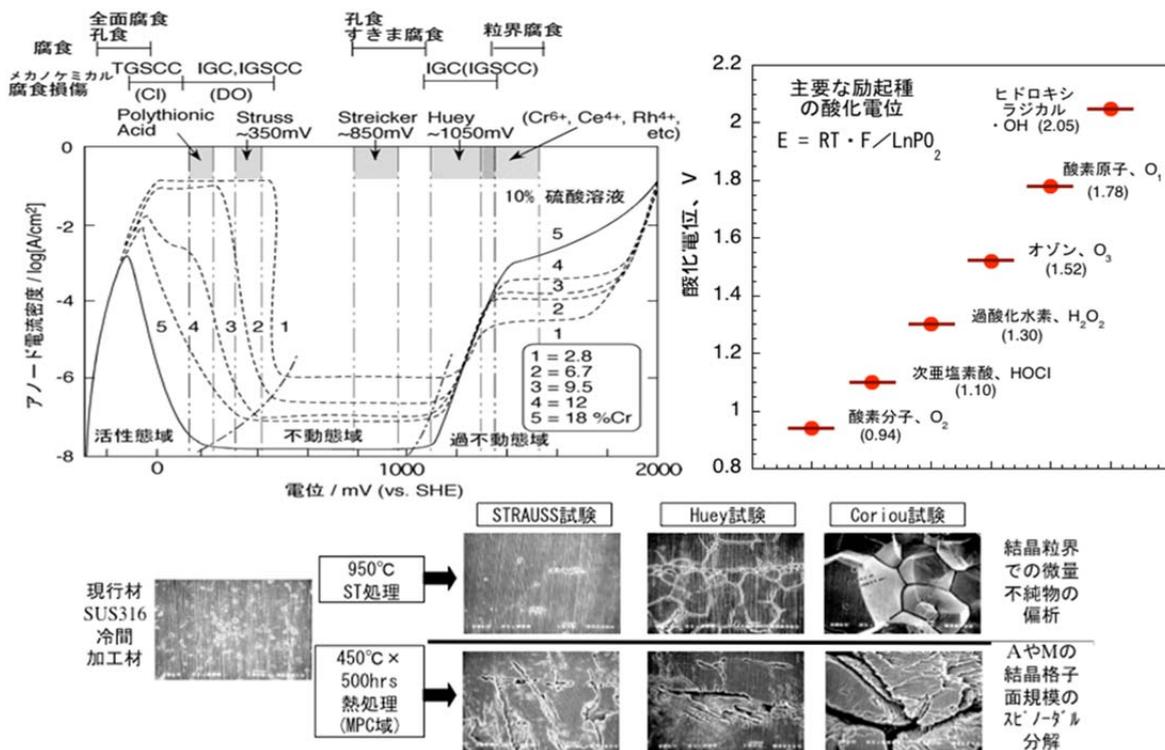


図 3.2-72 クラッド材の時効材質変化評価用の腐食電位に対応した電気化学的評価法

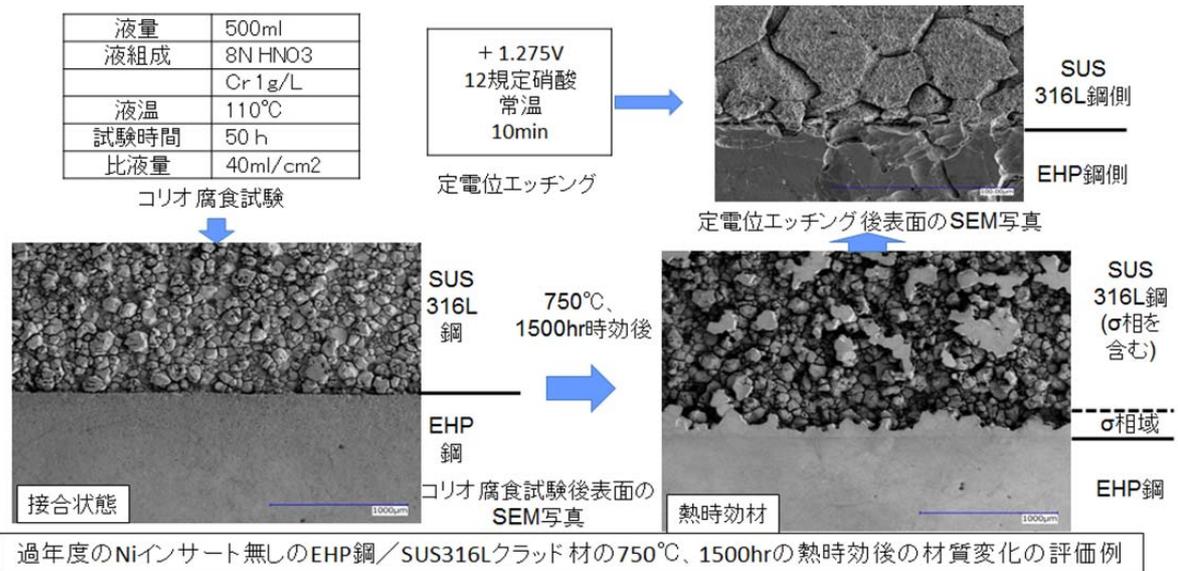
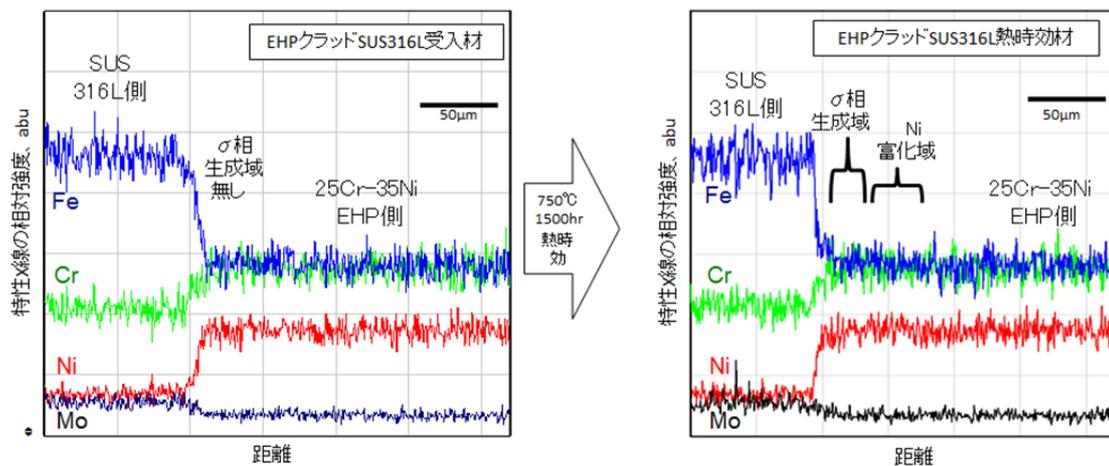


図 3.2-73 Ni インサートなしのクラッド材 (板組「EHP/SUS316L」) の
時効材質変化の σ 相生成挙動



SUS316L鋼の25Cr-35Ni系EHP鋼クラッド材では、受入状態(左図)では、動的拡散接合時の拡散層生成により、接合部位に合金組成濃度傾斜域が明瞭に見られるが、熱時効後は接合面近傍でのEHP鋼側でのσ相形成能の促進効果により拡散層領域へのEHP鋼側からのCrの優先拡散と、それに対応したNiの基地金属側への拡散を生じており、見掛け上、受入材の動的拡散接合時の組成傾斜の拡散層域の幅が低減。接合面近傍のσ相形成は熱時効脆化と対応。

図 3.2-74 Ni インサートなしのクラッド材 (板組「EHP/SUS316L」) の
時効に伴う界面の組成変化

650°C、1500hr時効後、活性態～不動態電位域のストラウス浸漬試験後表面をOM観察
丁度、粒界析出-鋭敏化のノーズ温度であり、SUS316L鋼からの不純物拡散によるγ線照射効果が顕著

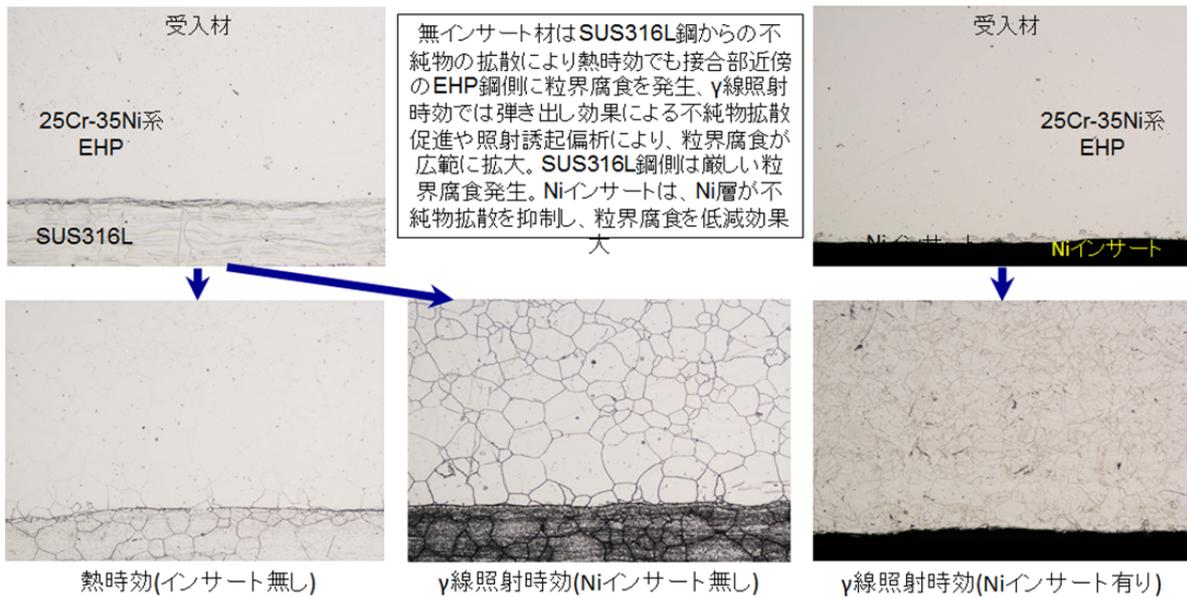


図 3.2-75 板組「EHP/(Ni)/SUS316L」のクラッド材の 650°C熱時効処理による 25Cr-35Ni-EHP 鋼の材質変化の違い

750°C、1500hr時効後、活性態～不動態電位域のストラウス浸漬試験後表面をOM観察
鋭敏化ノーズ温度以上の高温での拡散促進と、不純物の溶解度の増大により鋭敏化領域が減少

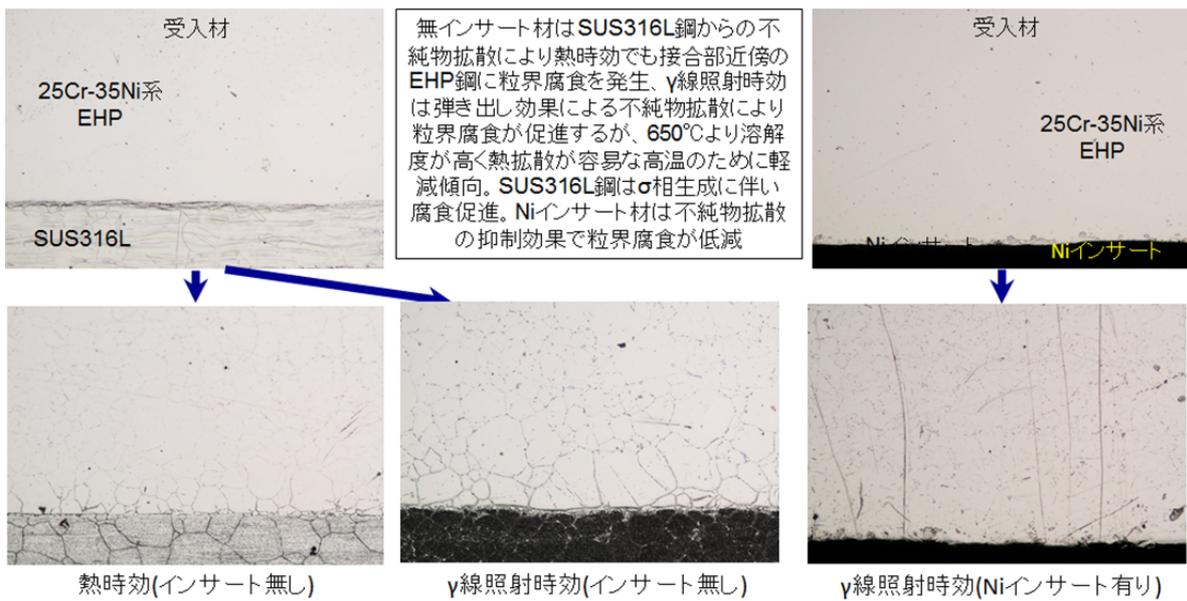
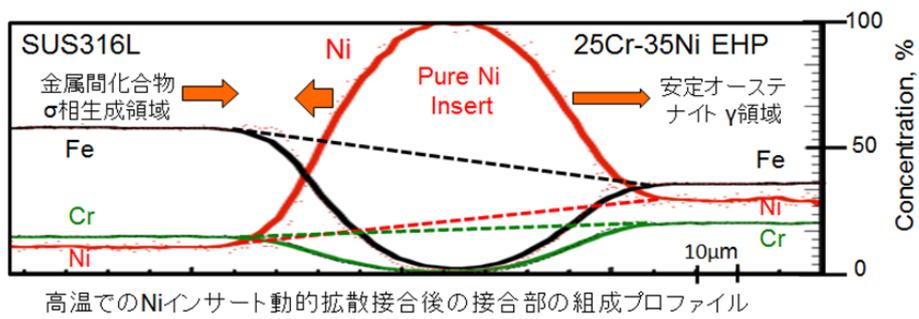


図 3.2-76 板組「EHP/(Ni)/SUS316L」のクラッド材の 750°C熱時効処理による 25Cr-35Ni-EHP 鋼の材質変化の違い



詳細解析は主要金属元素の濃度プロファイルを基にしたフィック法則を適用するが、時効による材質変化挙動の概略に関して、簡易解析法を用いて評価。最も化学ポテンシャルが高く、且つ主要金属元素の中で原子半径が小さく輸率の高いインサート材のNiが組成変化を支配していることから、その拡散プロファイルから両鋼側への浸透深さLの実測値を用いて、以下の関係からγ線照射効果を含む時効効果を評価

上図のNi拡散層の初期条件からの成長幅をLとし、熱平衡と照射効果の直線則の拡散を想定すると

熱時効 L_T 、γ線照射時効 $L_A = L_T + L_R$ (γ線照射効果分)

$(dL/dt) = D/L$ 、 $L^2 = Dt$ 、Niの拡散係数; $D = D_{0T} \exp(-Q_T/RT)$; t; 時効時間

$K_{PT} = L_T^2/t = D_{0T} \exp(-Q_T/RT)$ 、 $K_{PR} = L_R^2/t = D_{0R} \exp(-Q_R/RT)$ 、 $\ln(L^2/t) = K_0 - Q/RT$

$D_{0R} = K_{dpa-\gamma}$ (γ線の弾き出し効果)、 $Q_R = Q_T - Q_j = Q_M$ (熱平衡のNi原子の拡散の移動分、 Q_T の約1/3)

図 3.2-77 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材のγ線照射含む時効誘起材質変化モデル

SUS316LはFe-Ni-Cr状態図上のσ相形成域にあり、且つσの形成能と溶製凝固時の粒界反応性の高いMo含有に伴い650℃の時効条件では、σ相の主体となるCrがNiインサート層を介して25Cr-35Ni系EHP鋼から供給されSUS316L鋼側で濃縮し、NiのSUS316L側への拡散を抑制

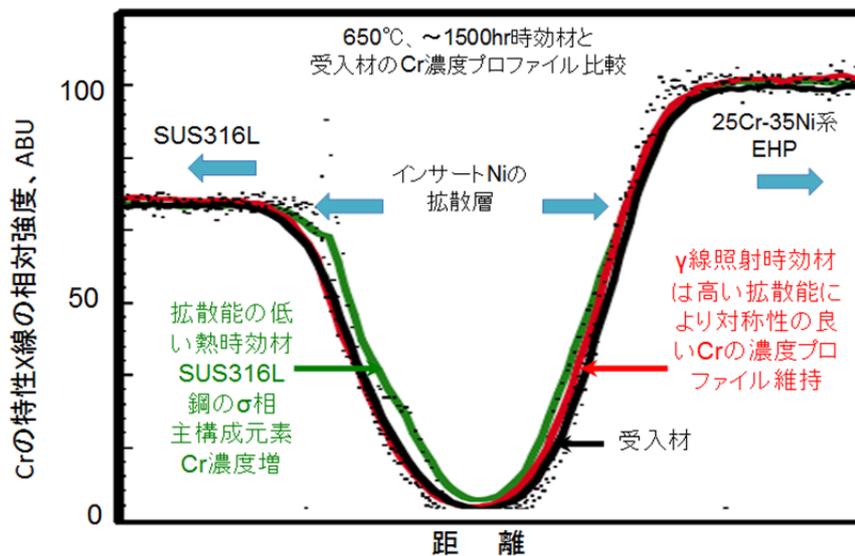


図 3.2-78 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理条件によるCr濃度プロファイル変化

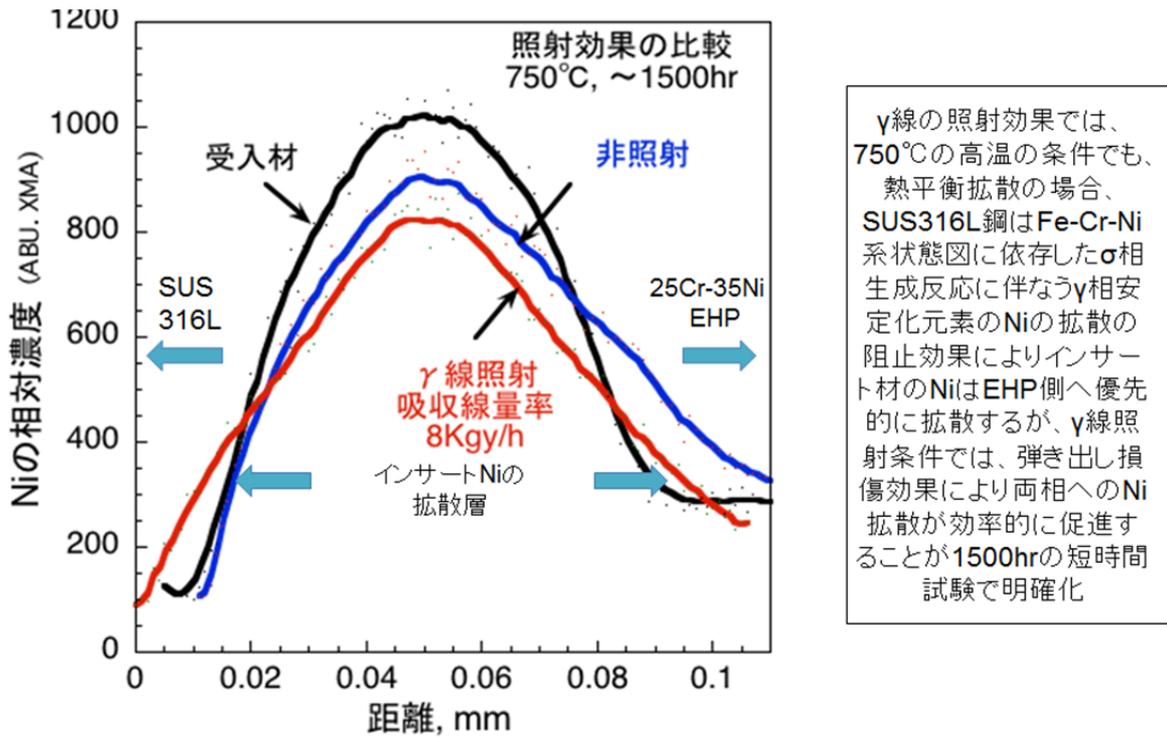


図 3.2-79 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の熱時効処理条件による Ni 濃度プロファイルの違い

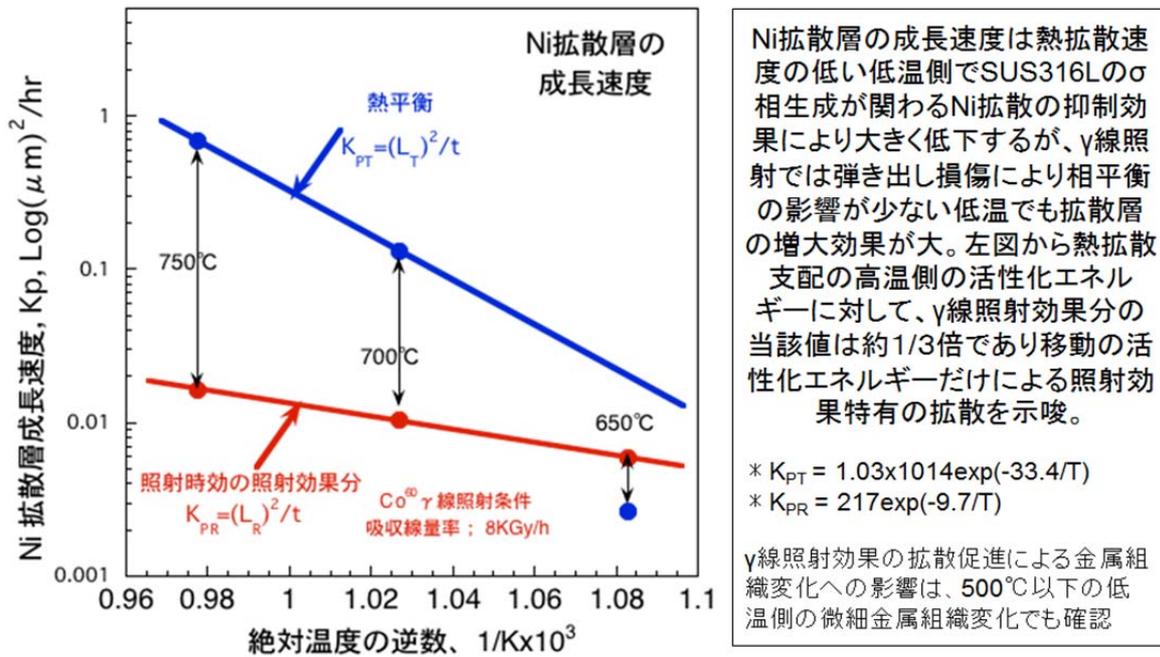
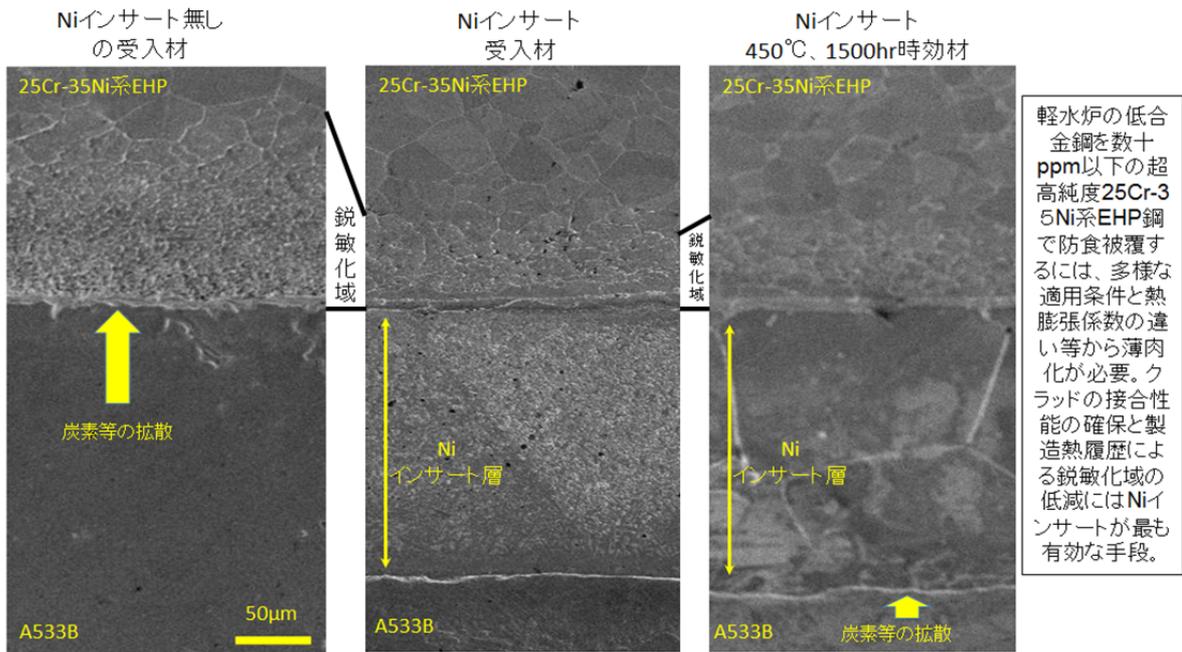


図 3.2-80 板組「EHP/Ni/SUS316L」のクラッド材の Ni 拡散層成長速度のアレニウス依存性



定電位腐食試験後表面のSEM写真(高電位域でエッチング、1,275mV 室温12N硝酸溶液、10min)

図 3.2-81 板組「EHP/A533B」のクラッド材のNi インサートの有無による金属組織変化域の違い

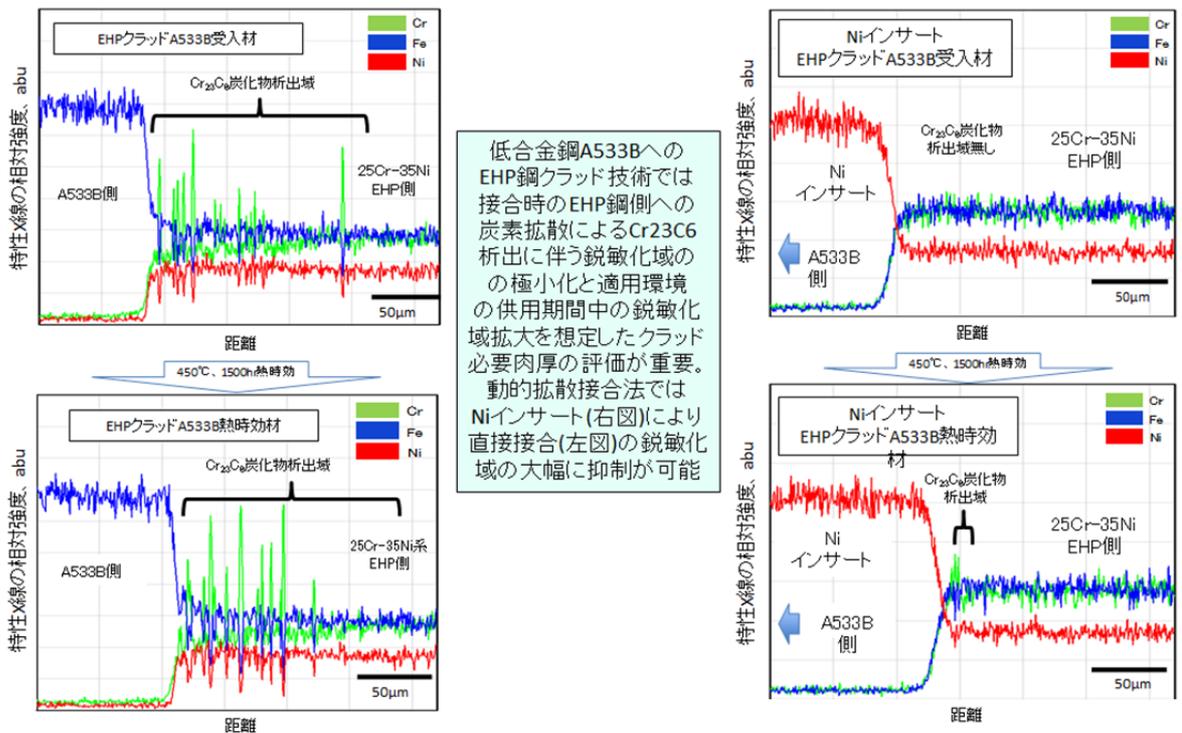
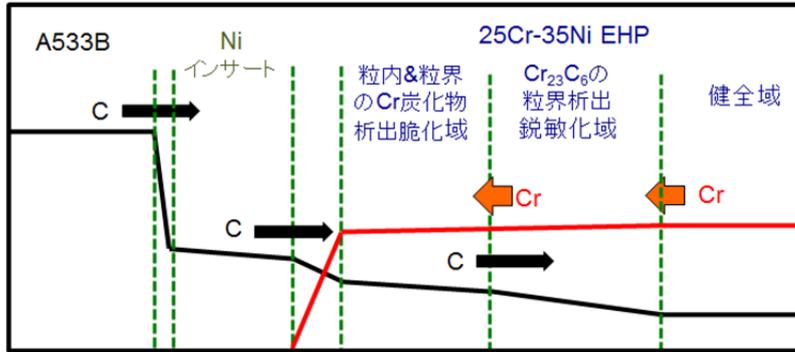


図 3.2-82 板組「EHP/A533B」のクラッド材の界面での主要元素の組成変化の違い

* 目的: A533B鋼への25Cr-35Ni系EHP鋼のクラッド化は、軽水炉での压力容器や配管等の圧力壁材に長期供用する低合金鋼の腐食溶出を抑制し、炉心での放射性クラッド生成を低減と耐SCC性による基地での疲労割れや水素脆化の発生を抑制。
 * 開発対象材: クラッド施工性能と低合金鋼からの炭素等の流入防止の評価からNiインサート材を選定。
 * 評価項目: 軽水炉での長期供用に伴うNiを介した低合金鋼からの炭素等拡散によるEHP鋼の鋭敏化域の評価。
 * 評価方法: 350°C、400°C、450°Cの3温度で、熱時効(T)及び照射時効(R, 8KGy/h)を行い、EHP鋼の鋭敏化域の成長速度をXPSによるCrプロファイルで評価し、経年材質変化域をモデル化して腐食代の評価に反映。



クラッド材の時効に伴う炭素CとEHP鋼中Crの組成プロファイル変化の模式図

図 3.2-83 板組「EHP/A533B」のクラッド材の熱時効処理に伴う経年材質変化のモデル図

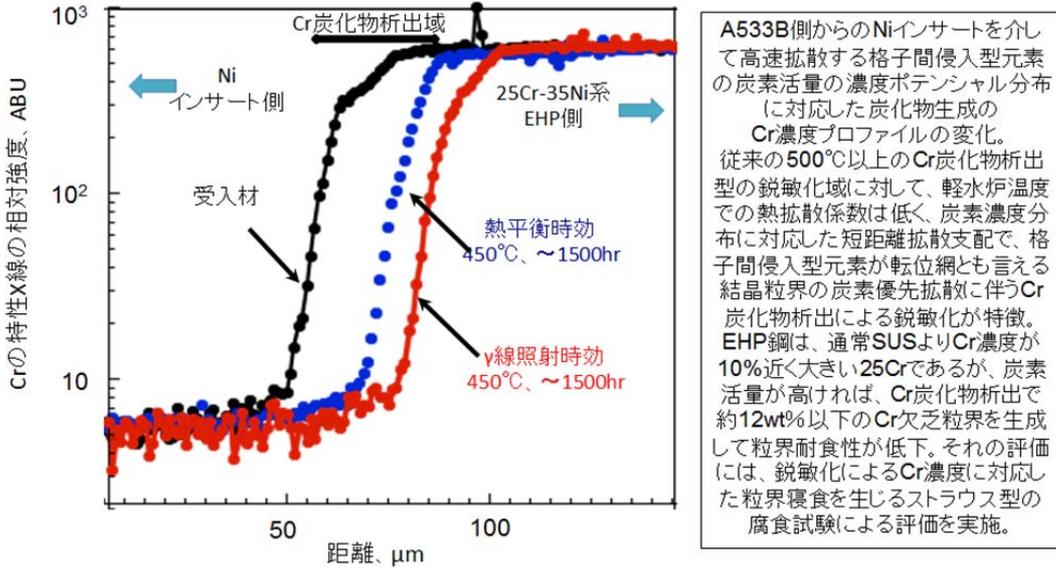


図 3.2-84 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効条件による25Cr-35Ni-EHP 鋼の組成変化の違い

γ線照射効果: 弾き出し損傷速度と照射温度に依存した照射欠陥性状と格子間侵入型元素の炭素の相互作用
 * 低温側; 各種の照射欠陥が炭素を捕獲 / Cr炭化物生成の抑制と溶解促進
 * 中間温度400°C; 炭素をトラップした二次照射欠陥の成長 / Cr炭化物生成型の鋭敏化の促進
 * 450°C以上; 照射欠陥の拡散消滅に伴う炭素やCrの拡散促進 / 拡散域増大による鋭敏化域の見掛け上の低下

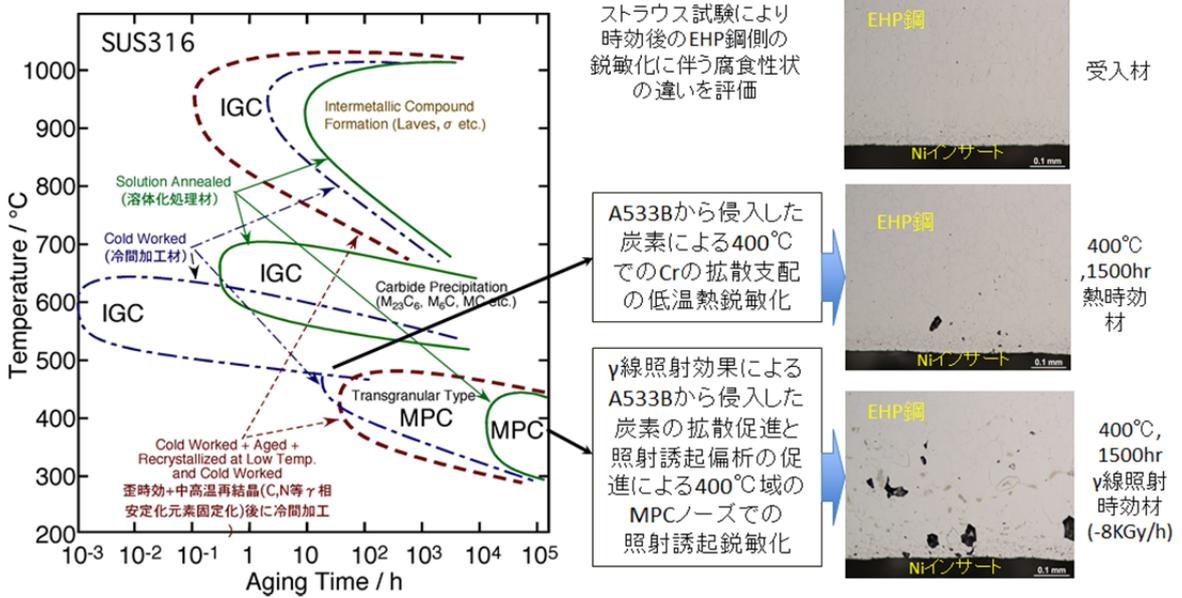


図 3.2-85 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材のE25Cr-35Ni-HP 鋼の材質変化におよぼす熱時効処理条件の影響

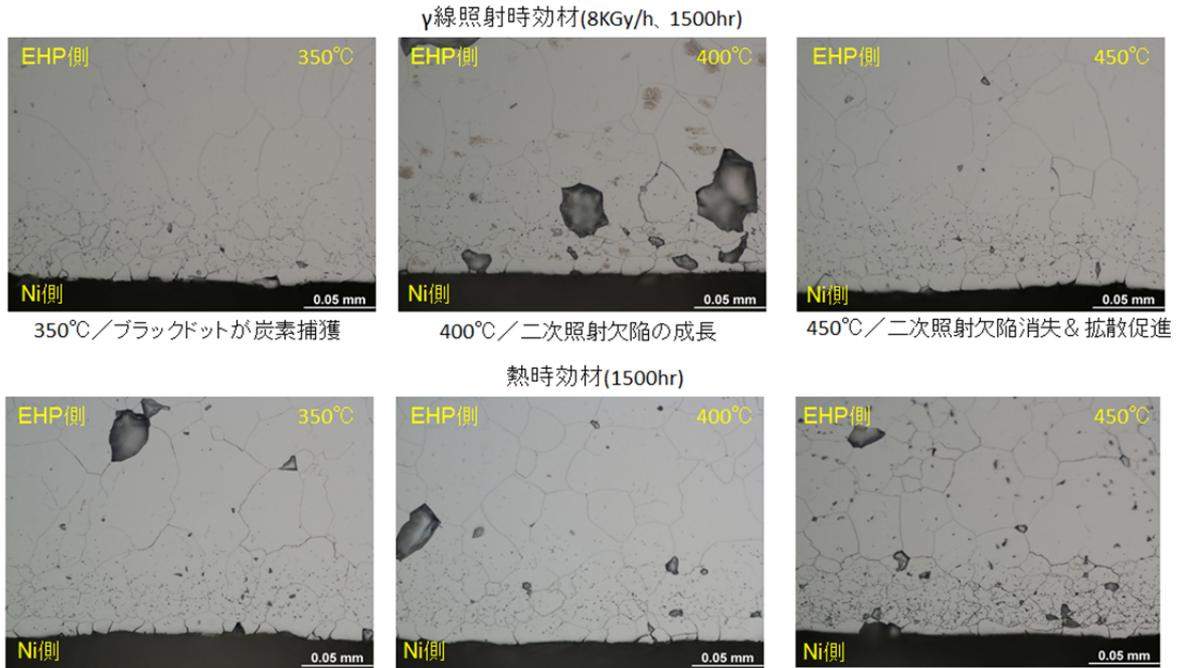


写真 3.2-33 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効処理条件による腐食状況の違い (光学顕微鏡写真)

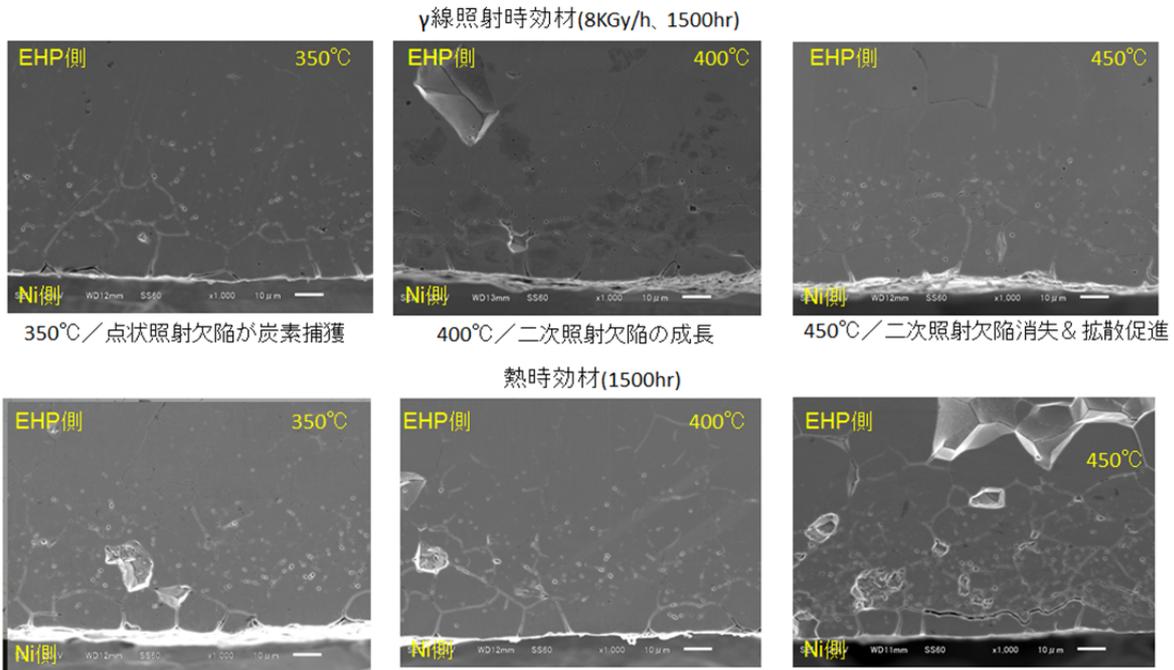


写真 3.2-34 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材の熱時効処理条件による腐食状況の違い (SEM 写真)

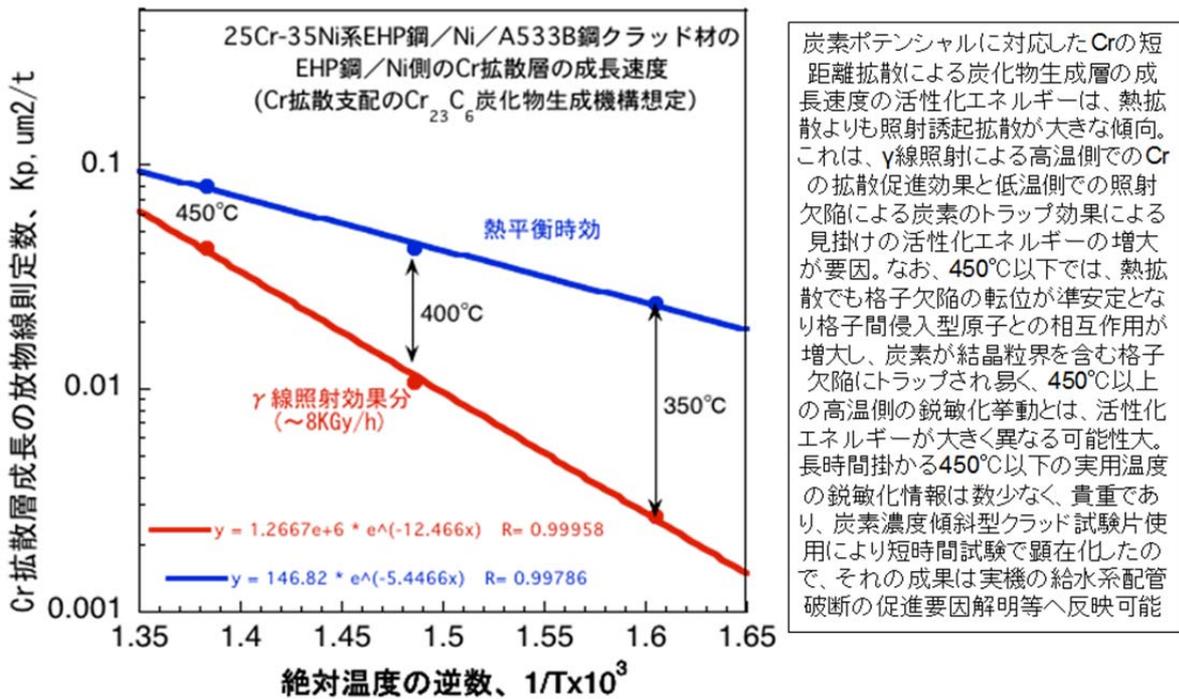


図 3.2-86 板組「EHP/Ni/A533B」のクラッド材のCr 拡散層成長速度定数のアレニウス依存性

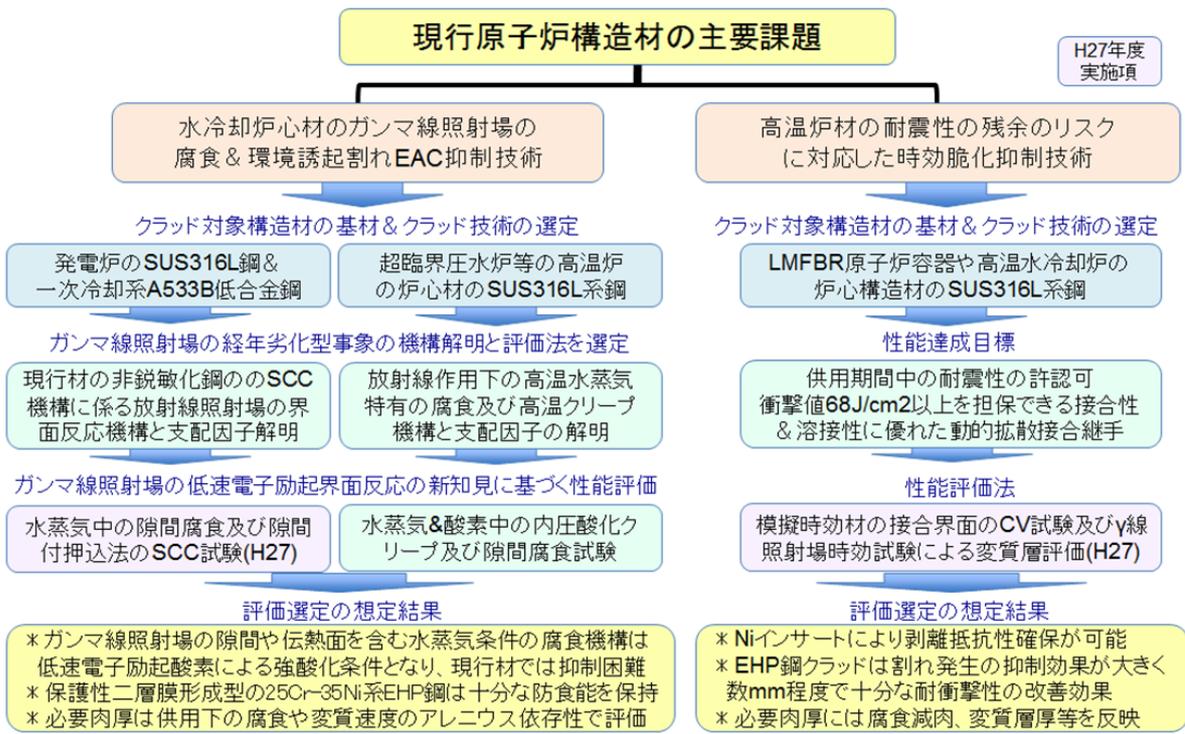


図 3.2-87 現行原子炉材への EHP ステンレス鋼によるクラッド化の環境適応性の技術的成立性の集約

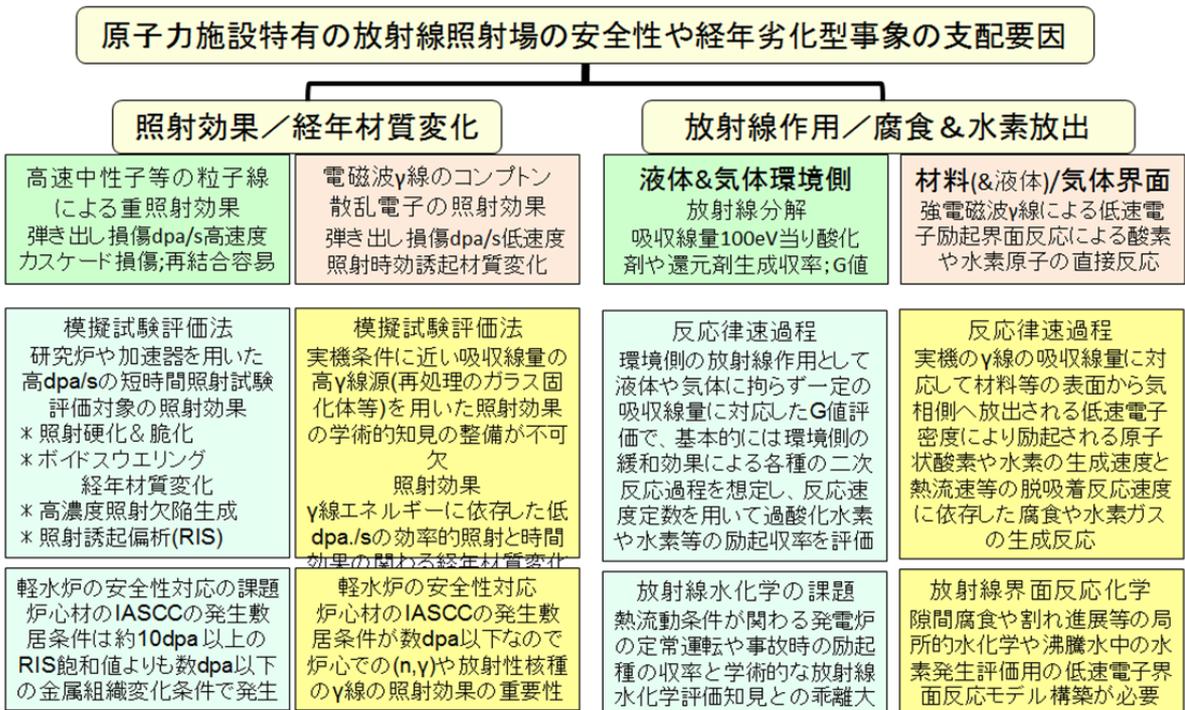


図 3.2-88 本研究で得た γ 線照射環境の安全性に関わる新たな学術的知見整備の必要性

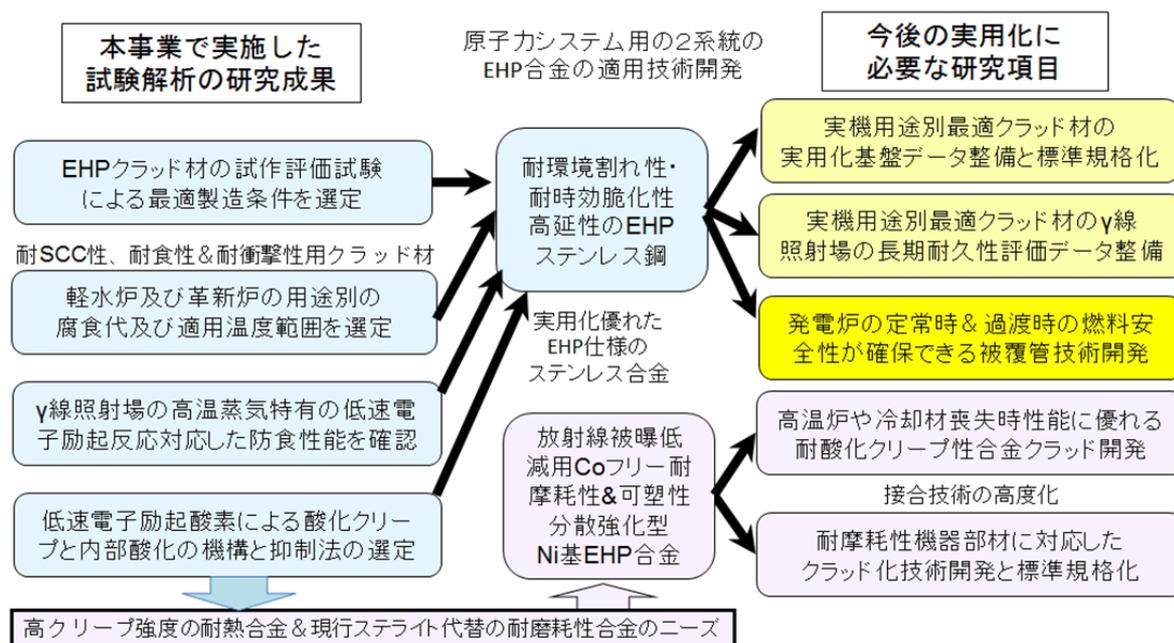


図 3.2-89 原子力施設の安全性確保用の EHP ステンレス鋼の実用化の実施項目

3.3 接合技術の選定評価（再委託先：大阪大学、福井工業大学）

3.3.1 はじめに

原子炉圧力容器は高温・高圧の水を内包する重要機器であり、放射性物質の閉じ込め障壁として、設計、製作段階で高い信頼性が要求されるとともに、運転開始後はその健全性が十分に維持される必要がある。原子炉圧力容器の材料には約200mmの厚さの強靱な低合金鋼であるMn-Mo-Ni鋼が用いられており、不純物や腐食した物質が放射化され、冷却水系が循環する恐れがあることから胴部内面には5mmほどステンレス鋼が内張されている。現行規定の溶接材料を適用した溶接継手では、母材以上にフェライト相の残留量やMnの含有量が多く、フェライトの青熱脆性や中高温での σ 相の生成による脆化およびMnの粒界偏析による耐食性の低下が起るため、上記の経年劣化事象が母材以上に生じ易くなり、機器の局部腐食や環境誘起割れによる閉じ込め機能の低下や寿命低下が重要な課題となっている。主要構成元素以外を不純物としてその残留量を100ppm程度以下としたEHP（Extra High Purity）ステンレス鋼を使用することにより結晶粒界における不純物の偏析が大幅に低減され、経年劣化事象である粒界腐食や粒界応力腐食割れ等が大幅に抑制できることが示唆されている。EHPステンレス鋼の大きな特徴はPやS等の有害不純物の残留量を制御できるため、 δ フェライトやMn添加等の成分調節が必要でないことである¹⁾。

α 系鋼材と γ 系鋼材の異材溶接ではボンド部でのマルテンサイト状組織が生成され、衝撃性能の低下や割れの原因となることが報告されている²⁾。そのため、EHPステンレス鋼を用いた構造物や製品の安全性、信頼性の向上のためには低合金鋼への肉盛溶接ボンド部における溶接健全性を明らかにすることが重要となる。

圧力容器の安全性、信頼性を向上させるため、溶接後熱処理（Post Welding Heat Treatment / 以下、PWHTと略す）は極めて重要な製造工程の1つである。しかし、ステンレスクラッド鋼については、適正な熱処理方法を決定することは困難といえる。すなわち、ステンレスクラッド鋼の熱処理を考える場合には合せ材、ベース材およびその複合材としての特性を十分に理解して熱処理を行うかどうか、またその場合には熱処理結果を十分考慮して条件設定したうえで施行することが必要になる。

そこで、本研究ではEHPステンレス鋼による既存鋼へのレーザクラッド溶接技術の確立のため、低合金鋼への肉盛溶接ボンド部におけるボンドマルテンサイトの形成条件を明らかにし、シェフラー組織図を用いた形成条件の予測を試みた。また、PWHTによる溶接ボンド部の浸炭層、脱炭層の形成ついて定量的に評価した。

3.3.2 異材継手の溶接ボンドに関する研究の現状と課題

(1) オーステナイト系ステンレス鋼の溶接性

圧力容器にはステンレスクラッド鋼を始め、さまざまなクラッド材料が使用されている。クラッド材料の種類としては圧延クラッド材、爆着クラッド材および肉盛りクラッド材の3種類が主なものであり、用途に応じて使い分けられる。クラッド材溶接時の注意点としては、

ベース材側溶接の際、合せ材の成分の混入を防ぐことや合せ材側初層溶接時にベース材からの希釈を低く抑えることが挙げられる。

オーステナイト系ステンレス鋼は耐食性、耐熱性、延性および低温靱性に優れているため、化学工業、石油精製、火力発電および原子力プラント等の構造材料として幅広く利用されている。このうち、SUS310Sは完全オーステナイト系ステンレス鋼であり、耐食性、高温引張特性およびクリープ特性に優れた鋼種であり、SUS304およびSUS316などの準安定オーステナイト系ステンレス鋼と比較して耐食性および耐熱性が要求される過酷環境での使用が可能である^{5,6)}。しかしながら、SUS310Sなどの完全オーステナイト系ステンレス鋼においては、溶接時に高温割れが発生しやすいことが課題として挙げられる³⁻¹⁶⁾。

原子力施設においては、特有の過酷な使用環境を考慮し、高耐食性のオーステナイト系ステンレス鋼を適用する必要があるため、高純度化と合金組成の抑制法が長年研究されてきた。その結果、従来の改良鋼で粒界損傷を完全に避けることができない原因は結晶粒界に偏析して粒界結合エネルギーを低下させる不純物元素であり、C、P、S、N、Oなどの不純物元素の総量を100ppm以下とすることが耐食性と溶接施工性性能の改善に有効であることがわかった。

EHPステンレス鋼は複合溶製法を用いてPやS等の主要不純物を100ppm以下とする清浄化効果により現行ステンレス鋼製の耐硝酸性機器の課題である過不動態特有の粒界腐食が抑制され、耐食安全性を確保して長寿命化を図ることが可能となる。しかしながら、すべてをEHP化するには機械的強度の低下や製造コストの増大が課題となる。これらの課題を克服するため、低合金鋼の表面にEHPステンレス鋼を肉盛溶接する必要があり、その機器への適用に際しては、溶接継手にベース材並の耐食性を担保できる溶接施工法の適用が不可欠となる。

(2) α 系、 γ 系異材継手の溶接ボンドに関する研究の現状と課題

α 系鋼材と γ 系鋼材とをはじめとする異材継手の溶接は、あらゆる工業分野における機器構造物の性能上、経済上などの面から日常欠かせないものとなっている。しかしながら、異材継手の溶接あるいは肉盛りでは溶融や拡散にともなう溶接金属およびボンドでの脆化相の生成や後熱処理あるいは使用時における加熱、冷却がボンドの冶金現象におよぼす影響など、解明されるべき問題が極めて多い。

これまで α 系、 γ 系異材継手の溶接ボンドに関して以下の報告がある。

乾ら²⁾は溶接棒中のNi量が20%以下の低Ni量ではボンドマルテンサイトが生じることからNiによりボンドマルテンサイトの生成が抑制されると報告している。また、溶接金属中のNi量が35%以下の範囲で予熱がボンドマルテンサイトの生成を助長することが報告されている。さらに、ボンドマルテンサイトの生成予測としては以下の報告がある。ベース材、溶接棒それぞれの成分をNi、Cr当量の換算した後、シェフラー組織図上にそれらの点をプロットし、両点の線分上で溶込み率に応じて溶接金属組織の点を決定する。さらに、ベース材と溶接金属の両成分点の50%の点（1：1に内分した点）をボンドの組織とし、シェフラー組織図上に

この点をプロットする。すると、従来のA+M（オーステナイト+マルテンサイト領域）曲線をかかなり高Ni当量、高Cr当量側へ移行しなければならないという結果が出ている。

井川ら^{17~18)}は異材継手の溶接におけるボンドはかなりの幅（ $\sim 100\mu\text{m}$ ）を有し、ボンドの中心は溶融境界から離れた溶接金属側にあるとして定義している。また、ボンドマルテンサイトはボンド全域にわたって一様に生成されるものではなく、溶融境界に接する溶融金属の湯流れのよどみ箇所（アーク直下ではなく、その両端）に多く生成されると報告している。さらに、ボンドマルテンサイトの生成量は α 系母材中のC量によって影響され、C量とともにその生成量は増すが、ある程度以上のC量になると逆にその生成量は減じられると報告がある。650°Cの後熱処理においてボンドは加熱の初期には軟化を示すが、加熱時間が2h程度になると逆に硬化をはじめ、7h程度をすぎると著しく硬化するという報告がある。

(3) クラッド鋼の溶接ボンドに及ぼすPWHTの影響

PWHTは圧力容器の安全性、信頼性を向上させるための極めて重要な製造工程の一つであり、かなり多くの規格基準などによってかなり厳格に要求されており、実際には、材料の種類、厚さ、溶接継手の状態、使用条件などに基づいて、その要否と条件を定めて実施する必要がある。PWHTの第一の目的は溶接残留応力の緩和にあり、圧力容器の安全性確保に大きな効果をもたらす。

合せ材はクラッド鋼製造時のCr炭化物などの炭窒化物の析出、 σ 相および δ フェライト等の異相の生成、あるいは加工硬化層に残存など種々の問題を生じる可能性がある。これらは合せ材の耐食性、耐応力腐食割れおよび延性等の低下を招く。合せ材に適した熱処理を施す場合、これらの異相を消失させるために固溶化熱処理がステンレスクラッド鋼製造後、施行されている。しかしながら、合せ材がオーステナイト系の場合は、固溶化熱処理温度が1,000°C以上の高温であるため、ステンレスクラッド鋼を固溶化熱処理した場合、ベース材のオーステナイト結晶粒粗大化による延性および靱性の低下、ベース材と合せ材間で生じる元素の相互拡散による脱炭あるいは浸炭、さらにはその後の冷却時のひずみの発生等の問題が生じる。しかし、合せ材の炭素含有量を0.02%程度以下に抑え、さらに熱間圧延圧着のための素材加熱時に合せ材のステンレス鋼中のCr炭化物や σ 相等が固溶するのに必要な温度に十分保持した後、圧延温度ならびに冷却速度を厳密に制御すれば前述の異相の生成はかなり防止でき、クラッド鋼製造後の固溶化熱処理を省略することが可能になる。

また、ベース材に適した熱処理を施す場合は、要求するベース材の性能により差異はあるが、加熱温度の条件では合せ材のCr炭化物などの析出物が十分に固溶せず、また、ステンレス鋼の種類によってはベース材の適正熱処理温度への保持中に逆に σ 相等の異相が生成する恐れがある。ベース材の強度や靱性確保が目的の場合あるいはベース材が低合金鋼の場合は、焼きならしあるいは焼入れ後、焼戻し処理が一般に行われる。また、ステンレスクラッド鋼の冷間加工もしくは溶接後に応力除去焼鈍を施工するものがある。この場合、ステンレスクラッド鋼は500~700°C程度に長時間保たれるため、合せ材がオーステナイト系ステンレ

ス鋼の場合は、粒界にCr炭化物が析出し耐食性を劣化させる。一方、CrとMoの添加量の多いステンレス鋼では、475℃脆化による冷間曲げ加工性の低下あるいは σ 相の生成などの問題が生じる。このため、ステンレスクラッド鋼の熱処理法を単純に述べることは非常に困難であり、ステンレスクラッド鋼の熱処理を考える場合には、合せ材、ベース材およびその複合材としての特性を十分理解して熱処理を行うかどうか、また行う場合にはその熱処理結果を十分考慮して条件設定をしたうえで施工することが必要になる。

そこで、EHPステンレス鋼による既存鋼へのレーザクラッド溶接技術の確立のため、低合金鋼への肉盛溶接ボンド部におけるボンドマルテンサイトの形成条件を明らかにし、シェフラー組織図を用いた形成条件の予測を試みた。また、PWHTによる溶接ボンド部の浸炭層、脱炭層の形成について定量的に評価した。

3.3.3 供試材および実験方法

(1) 供試材

試供材料としてベース材に低合金鋼A533B、溶加材に25Cr-35Ni-EHP鋼を用いた。各鋼種の化学組成を表3.3-1に示す。

(2) レーザ単パス溶接試験

レーザ溶接装置の概略図を図3.3-1に示す。

A533B鋼に対して溶込み率を変化させたレーザビードオンプレート溶接を実施した。試験片表面を耐水研磨紙800番まで機械研磨し、アセトン洗浄により脱脂した後、試験に供した。試験片の形状を図3.3-2、用いた溶接条件を表3.3-2に示す。

(3) 溶接後熱処理

レーザ肉盛試験片に対してPWHTを模擬した時効処理を施した。表3.3-3に熱処理条件を示す。

(4) 組織観察方法

組織観察面を耐水研磨紙4,000番まで、さらに1 μ mダイヤモンド粒子にて機械研磨し、腐食した。溶接金属を観察する際には腐食液に10%シュウ酸水溶液を用い、陽極に試験片、陰極にステンレス板を用い電解腐食を行った。ベース材を観察する際には腐食液に3%ナイトール(エタノール97%+硝酸3%)を用い、15sの条件で腐食を行った。観察には光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope/以下、SEMと略す)を用いた。

(5) 元素分析方法

溶接金属の各元素の分布状況を調査するため、波長分散型X線分析装置(Electron Probe

Micro Analyzer／以下、EPMA と略す) による面分析を行った。分析面を耐水研磨紙 4,000 番まで機械研磨後、バフ研磨で鏡面まで仕上げた試験片を分析した。点分析にはエネルギー分散 X 線分光器 (Energy Dispersive X-ray Spectrometer／以下、EDS と略す) による分析を行った。

(6) 電子後方散乱回折法

析出相同定のため、SEM を用いて SEM 内で発生する後方電子線回折 (Electron Backscatter Diffraction／以後 EBSD と略す) の測定による結晶方位解析を実施した。耐水研磨紙 4,000 番まで、さらに $1\mu\text{m}$ ダイヤモンド粒子にて機械研磨し、平滑な鏡面に仕上げた。その後、機械研磨による加工層を除去するため、20%硫酸メタノールを用いて電解研磨を行い、結晶方位解析用試料とした。

(7) 硬さ試験

母材、溶接金属、HAZ 部の硬さをビッカース硬さ試験により調べた。その際の荷重は 3g、荷重時間は 20s とし、複数回測定後最大値と最小値を除いた値の平均値を採用した。

3.3.4 手法開発・評価試験 (再委託先: 大阪大学)

3.3.4.1 シェフラー組織図上でのボンドマルテンサイトの形成条件範囲の検討

ベース材に低合金鋼 A533B、溶加材に 25Cr-35Ni-EHP 鋼を用いて単パスレーザ肉盛溶接を行った。本研究ではレーザ走行速度、フォーカス距離を一定とし、出力、ワイヤ供給速度を選定してレーザ肉盛溶接した。製作した試験片の溶接条件と希釈率を表 3.3-4 に示す。これらの 6 条件についてボンドマルテンサイトが確認されるか検討を行った。また、その結果を基にボンドマルテンサイトの形成条件をシェフラー組織図を用いて予測する検討を行った。

福井工業大学における検討結果を基にボンドマルテンサイトの形成条件を検討した。本研究の結果をシェフラー組織図上に適用するにあたって、ボンド部とする点をプロットする際、溶接金属部と母材部の内分について考える。まず、シェフラー組織図に各希釈率の溶接金属部とする点をプロットした結果を図 3.3-3 に示す。

この溶接金属部と母材の点を任意の比で内分していき、No.1 および No.2 がオーステナイト域、No.3 および No.4 がオーステナイト+マルテンサイト域、No.5 および No.6 がマルテンサイト域となる範囲を調べた。図 3.3-4 に各比で内分した結果を示す。

この結果から溶接金属部と母材を 2.5:1~4:1 の範囲内で内分することによりシェフラー組織図を用いてボンドマルテンサイトの形成が整理できると考えられる。乾ら⁴⁾の報告によるとボンド部の平均組成を母材組成と溶金成分の 50%と仮定して、その点をボンド部の組織として推定するには、従来の A+M(オーステナイト+マルテンサイト領域)曲線をかなり高 Ni 当量、高 Cr 当量側へ移行させなければならないとしている。その際の結果を本研

究の予測方法に当てはめることにより本手法の有効性を検証した。その結果を図 3.3-5 に示す。ボンドマルテンサイトが確認された点を赤色、確認されなかった点を青色でそれぞれ示した。溶接金属部と母材を 1.4:1 で内分したところ、本研究の方法でシェフラー組織図上に適用することができた。この 1.4:1 という内分比は本研究で導き出した 2.5:1~4:1 というものより内分比よりやや小さくなっている。これは溶加材の違いによるものであり、溶加材に通常のオーステナイト系ステンレス鋼を用いているため、25Cr-35Ni-EHP 鋼に比べて湯流れを良くするとされる C、Si、P の含有量が多い。そのため、ボンド部付近での溶加材成分の割合が増え、25Cr-35Ni-EHP 鋼を用いた際と比較すると内分比が小さくなったと考えられる。

以上より異材接合におけるボンドマルテンサイトの形成をシェフラー組織図を用いて予測することが可能であるものと判断される。

3.3.4.2 溶接ボンド部組織に及ぼす PWHT の影響

通常、原子力プラントの圧力容器として使用されている低合金鋼の場合、溶接を行った際に PWHT を行うことが義務付けられている。そこで、PWHT による溶接ボンド部へ影響を調べ、健全性を明確にしておく必要がある。本研究では、実機を想定してベース材に低合金鋼 A533B、溶加材に 25Cr-35Ni-EHP 鋼を用いた。実施工におけるレーザ肉盛溶接条件を想定してボンドマルテンサイトの生じていない試料を調査対象とした。

(1) 浸炭層および脱炭層の形成

保持時間を変化させた 500、550 および 600°C 試験片について生じた浸炭層および脱炭層の幅を測定した。得られた浸炭層幅を表 3.3-5、脱炭層幅を表 3.3-6 に示す。浸炭層、脱炭層ともに時効条件が高温、長時間になるにつれて層の幅が増加することがわかる。また、保持時間の平方根と浸炭層および脱炭層の関係を図 3.3-6 および図 3.3-7 に示す。浸炭および脱炭の反応層幅は保持時間の平方根に比例して増加していることから保持時間に対して放物線則に従っているといえる。

(2) 浸炭および脱炭の速度論的検討

浸炭、脱炭は放物線的に従うため、拡散律速であることがいえる。そのため、脱炭層幅

$d_c (\mu\text{m})$ および浸炭層幅 $d_b (\mu\text{m})$ はそれぞれの速度定数 K_c, K_b と時間 t との間に $d_c \propto \sqrt{K_c t}$ 、

$d_b \propto \sqrt{K_b t}$ という関係があると考えられる。そこで、図 3.3-6~7 から求めた速度定数 K_c 、

K_b 値をアレニウスプロットした結果を図 3.3-8~9 に示す。層の成長速度は脱炭層のほうが浸炭層に比べ大きいことがわかる。また、これより算出した浸炭層および脱炭層幅の成長予測式をそれぞれ式 (3.3-1)、式 (3.3-2) に示す。

$$d_c = \sqrt{\exp\left(17.718 - \frac{11638}{T}\right)t} \quad (3.3-1)$$

$$d_b = \sqrt{\exp\left(27.146 - \frac{16084}{T}\right)t} \quad (3.3-2)$$

ここで、T:保持温度(K)、t:保持時間(h)である。

さらに、アレニウスプロットより浸炭の活性化エネルギー Q_c は 97.8 kJ/mol、脱炭の活性化エネルギー Q_b は 134 kJ/mol と算出された。純 Fe 中の C 拡散の活性化エネルギーは 80~150 kJ/mol 程度であることから²¹⁾ 浸炭および脱炭現象は C の拡散律速であると推察される。

(3) 法定 PWHT 条件における浸炭および脱炭現象の予測

ベース材である低合金鋼 A533B に対する法定の PWHT 条件を表 3.3-7 に示す。

実際の原子炉圧力容器を想定した場合、圧力容器はベース材約 200mm に対して溶接部の厚さが約 5mm であるため、法定の PWHT 条件は最低保持温度が 590℃、保持時間が 1h となる。この条件における溶接ボンド部の浸炭層および脱炭層幅は式 (3.3-1)、式 (3.3-2) から $d_c=8.3 \mu\text{m}$ 、 $d_b=76.5 \mu\text{m}$ と予測される。

3.3.5 接合技術解析技術（再委託先：福井工業大学）

3.3.5.1 A533B/25Cr-35Ni-EHP 鋼単パスレーザー肉盛溶接部のボンドマルテンサイトの組織学的検討

ベース材に低合金鋼 A533B、溶加材に 25Cr-35Ni EHP 鋼を用いて単パスレーザー肉盛溶接を行った。本研究ではレーザー走行速度、フォーカス距離を一定とし、出力、ワイヤ供給速度を選定してレーザー肉盛溶接した。製作した試験片の溶接条件と希釈率を表 3.3-4 に示す。これらの 6 条件についてボンドマルテンサイトが確認されるかの検討を行った。

(1) 組織観察

各希釈率における単パスレーザー肉盛溶接部のボンド部付近の組織観察を行った。組織観察の結果を写真 3.3-1~6 に示す。No.5 と No.6 のボンド部付近に偏析帯がみられた。

(2) 元素分析

各希釈率における元素分布への影響を調査するため、EPMA による元素分析を行った。元素分析の結果を図 3.3-10~15 に示す。希釈率が高くなるにつれて溶接金属部側の Cr と Ni の濃度の低下することがわかる。

(3) 結晶方位解析

析出相を同定するため、EBSD を用いて各希釈率における溶融境界に接する溶融金属の湯流れのよどみ箇所（アーク直下ではなく、その両端）の結晶方位解析を行った。その結果を図 3.3-16に示す。赤色が γ 相、緑色が α 相と判定された領域を表す。また、各希釈率におけるボンド部の γ 相の割合を図 3.3-17に示す。希釈率が大きくなるにつれて溶接金属の γ 量が減っていることがわかる。EBSD 結果から 56.1%以上の溶込み率のボンド部において γ 相の中に α 相が検出された。

(4) 硬さ分布

No.1～5 の試験片の溶融境界線の垂直な方向の硬さ分布について調べた。その結果を図 3.3-18に示す。希釈率 56.1%と 63.7%の試験片で溶接金属部よりボンド部の硬さが大きいことがわかる。また、希釈率 69.6%の試験片では溶接金属部が全体的に硬化した。

(5) 考察

EBSD の測定による結晶方位解析結果についてマルテンサイトは α 相と判定される。そのため、硬さ測定の結果をふまえると希釈率が 56.1%と 63.7%の試験片でボンド部にマルテンサイトが発生しているといえる。すなわち、ボンドマルテンサイトが希釈率 47～70%程度の範囲内で形成することが考えられる。EBSD の測定結果では希釈率 69.6%と 79.7%の溶接金属部が全体的に α 相となっていたが、これはシェフラー組織図から溶接金属部の組織が A+M（オーステナイト+マルテンサイト）域に相当する。そのため、溶接金属全体にマルテンサイトが生じ、硬くなったと考えられる。

組織にみられる偏析帯について希釈率の大きいものにみられることから元素分析結果より Ni 量が減少しており、シェフラー組織図からもマルテンサイト組織であることは明らかである。この偏析帯は溶接金属全域にわたって一様に生成されるのではなく、ビード底部に著しくみられる。一般に、ビード底部は母材がガウジングされたような形になり、溶融母材が周辺に押しやられた状態になる。ビームが通過した瞬間、周辺に押しやられた溶融母材が再びその個所を埋めるような状態になる。そのため、その個所は母材成分に富んだことになり、偏析帯が著しく現れたと考えられる。

これまで、ボンドマルテンサイトは幅を持った層状のものであると考えられてきたが、EBSD の解析結果からは、No.3 と No.4 の試験片について島状の α 相が認められた。希釈率 63.7%の試験片のこの部分について元素濃度を調べた。点分析を行った個所を付記した。また、その結果を表 3.3-8に示す。ボンド付近に確認できたマルテンサイトと島状に形成されたマルテンサイトの Cr 量、Ni 量がほぼ同じである。そのため、溶加材とベース材の混合程度が同じであると考えられ、この島状に形成された α 相もボンドマルテンサイトであるといえる。したがって、ボンドマルテンサイトは層状だけでなく島状に分布していることもあり、組織観察からは判断できないこともあるため、EBSD の解析結果や硬さ測定の結

果から判断するのが適切であるといえる。

3.3.5.2 溶接ボンド部組織に及ぼす PWHT の影響

通常、原子力プラントの圧力容器として使用されている低合金鋼の場合、溶接を行った際に PWHT を行うことが義務付けられている。そこで、PWHT による溶接ボンド部へ影響を調べ、健全性を明確にしておく必要がある。本研究では、実機を想定してベース材に低合金鋼 A533B、溶加材に 25Cr-35Ni-EHP 鋼を用いた。実施工におけるレーザ肉盛溶接条件を想定して、ボンドマルテンサイトの生じていない試料を調査対象とした。

(1) 元素分布

レーザ肉盛試験片に対して PWHT を模擬した時効処理を施した。レーザ肉盛試験片はワイヤ供給量 16mm/s、レーザ走行速度 5mm/s、出力 1.5kW の条件で肉盛溶接を行い、ボンドマルテンサイトの生じていない希釈率 19.6%のものを用いた。

元素分布への時効の影響を調べるため、EPMA による元素分析を行った。溶接まま材と保持時間を変化させた 500、550 および 600°C 試験片の EPMA によるボンド部の元素分布を 図 3.3-19~34 に示す。保持温度 500°C、保持時間 5s の時効を施した試料では浸炭現象は確認されず、それ以外の条件で時効を施した試料ではベース材側からの浸炭現象が確認された。また、時効条件が高温、長時間になるほど浸炭層の幅が増加することがわかった。

(2) 硬さ分布

溶接まま材と保持時間を変化させた 600°C 試験片の熔融境界線に垂直な方向の硬さ分布について調べた。結果を 図 3.3-35 に示す。1、3、10 および 24h の試験片で溶接金属部側のボンド部が硬化した。そのため、浸炭現象が生じたといえる。5s の試験片については層が薄いため、硬さでは確認することができなかった。また、HAZ 部がボンド部へ向けて徐々に硬さが低下したことから脱炭現象も生じているといえる。また、500、550 および 600°C 試験片について保持時間とボンド部の硬さの関係を 図 3.3-36 に示す

(3) 組織観察

溶接まま材と保持時間を変化させた 500、550 および 600°C 試験片について溶接ボンド部の母材側の組織観察を行った。その結果を 写真 3.3-7~9 に示す。すべての時効材でボンド付近が白色を示し、脱炭現象が確認された。

(4) 法定 PWHT 条件におけるボンド部特性の予測

ベース材である低合金鋼 A533B に対する法定の PWHT 条件を 表 3.3-7 に示した。

実際の原子炉圧力容器を想定した場合、圧力容器はベース材約 200mm に対して溶接部の厚さが約 5mm であるため、法定の PWHT 条件は最低保持温度が 590°C、保持時間が 1h となる。

この条件における溶接ボンド部の浸炭層および脱炭層幅は阪大報告からそれぞれ 8.3、76.5 μm と予測される。脱炭現象に関しては、脱炭幅が大きいことから C の濃度勾配が緩やかになり、[図 3.3-35](#) からわかるように硬さに対してあまり影響しないことがわかる。そのため、ボンド部の健全性について考える場合は、浸炭現象による硬化を危惧する必要がある。浸炭現象に関しては、法定の PWHT を施すと [図 3.3-36](#) から溶接ボンド部の硬さが最大でも Hv300~350 程度であると予想され、低温割れや靱性劣化の危険性は低いと考えられる。

以上より、低合金鋼への 25Cr-35Ni-EHP 鋼のレーザクラッド材は法定の PWHT を施しても溶接ボンド部の健全性は確保できるといえる。

3.3.6 まとめ

3.3.6.1 手法開発・評価試験

本研究では 25Cr-35Ni-EHP 鋼による既存鋼へのレーザクラッド溶接技術の確立を目的とし、ボンドマルテンサイトの形成条件について調査した。また、溶接ボンド部に及ぼす PWHT の影響について検討した。以下に本研究で得られた結果を総括して述べる。

- (1) 低合金鋼 A533B に対して溶加材 25Cr-35Ni-EHP 鋼により単パスレーザ肉盛溶接を行い、ボンドマルテンサイトの生成条件を調べた。希釈率 56.1% と 63.7% の試験片からボンドマルテンサイトが形成された。また、希釈率が 69.6% 以上になると溶接金属部全体がマルテンサイトとなることがわかった。このことから、ベース材に A533B、溶加材に 25Cr-35Ni-EHP 鋼を使用した場合、ボンドマルテンサイトは希釈率がおおよそ 47~70% の範囲内で発生することがわかった。
- (2) 低合金鋼 A533B に対して溶加材 25Cr-35Ni-EHP 鋼とした場合の溶接ボンド部の組織はシェフラー組織図において溶接金属部と母材を 2.5 : 1~4 : 1 の範囲内で内分することで得られた。すなわち、異材接合における溶接ボンド部の組織をシェフラー組織図上に適用することが可能であり、ボンドマルテンサイトの生成予測ができるものと推察された。
- (3) PWHT の保持時間の平方根と浸炭層および脱炭層厚さのプロットは直線関係を呈しており、生成挙動が拡散律速であった。低合金鋼 A533B に対して溶加材 25Cr-35Ni-EHP 鋼とした場合の溶接ボンド部における浸炭層および脱炭層厚さをアレニウスプロットより予測可能にした。また、算出した浸炭および脱炭の活性化エネルギーはそれぞれ 97.8 kJ/mol、134 kJ/mol であり、純 Fe 中の C 拡散の活性化エネルギーは 80~150 kJ/mol 程度であることから浸炭および脱炭現象は C の拡散律速であると推察された。

3.3.6.2 接合技術解析技術

本研究では、25Cr-35Ni-EHP 鋼による既存鋼へのレーザクラッド溶接技術の確立を目的とし、ボンドマルテンサイトの組織学的検討を行った。また、溶接ボンド部に及ぼす PWHT の影響について検討した。以下に、本研究で得られた結果を総括して述べる。

- (1) ボンドマルテンサイトは層状に分布するだけでなく、島状に分布しているものもある。

また、ボンドマルテンサイトを同定するには組織からでは判断できず、EBSD や硬さの測定結果から判断するべきであることがわかった。

- (2) 溶接金属側のボンド部には浸炭による硬化がみられたが、母材側のボンド部には脱炭による硬さ変化は顕著には現れなかった。脱炭層はCの濃度勾配が緩やかになるため、硬さに対してあまり影響しないことがわかった。
- (3) 低合金鋼 A533B の法定の PWHT 条件で熱処理を施した場合、25Cr-35Ni-EHP 鋼を用いた溶接ボンド部では硬さが最大でも Hv300~350 程度であると予測でき、ボンド部の健全性は確保されることが明らかとなった。

[参考文献]

- 1) 日本溶接協会, “核燃料サイクル施設へ適用する超高純度仕様のオーステナイト系 EHP ステンレス鋼の溶接施工技術に関して”, 2009)
- 2) 乾正弘: “異材継手の溶接に関する研究”, 1971)
- 3) 長谷川, 他: “ステンレス鋼便覧”, 昭和 48 年, 日刊工業新聞社
- 4) 鈴木: 鉄と鋼, 46(1960)
- 5) 片山聖二: “完全オーステナイトステンレス鋼 SUS310S の溶接凝固割れの改善に関する基礎的研究”, 大阪大学学位請求論文, (1981)
- 6) 田村: 溶接学会誌, 41 (1972), 2, 127~147
- 7) H. Thielsch: Welding Journal, 29 (1950), 12, 577~621
- 8) J. C. Borland et al.: British Welding Journal, 7(1960), 1, 22~59
- 9) 鈴木, 他: 溶接学会誌, 29 (1960), 1, 35~43
- 10) W. T. DeLong, Welding Journal, 53 (1974), 7, 273~286
- 11) F. C. Hull: Welding Journal, 46 (1967), 9, 399~409
- 12) 益本, 他: 溶接学会誌, 41 (1972), 11, 1306~1314
- 13) H. Fredriks et al.: British Welding Journal, 15 (1968), 4, 178~182
- 14) A. Bernstein et al.: Welding Journal, 44 (1965), 11, 504~508
- 15) 川島, 他: 溶接学会誌, 39 (1970), 6, 565~575
- 16) V. Kujanpaa, N. Suutala, T. Takalo and T. Moisio: “Correlation between solidification cracking and microstructure in austenitic and austenitic-ferritic stainless steel welds”, Weld. Research Int., 9 (1979), No.2, 55~76
- 17) 井川博, 新成夫, 乾正弘: “ α 系 γ 系異材継手の溶接ボンドに関する研究 (第 1 報)”, 溶接学会誌, 第 43 卷, 第 2 号, (1974)
- 18) 井川博, 新成夫, 乾正弘: “ α 系 γ 系異材継手の溶接ボンドに関する研究 (第 2 報)”, 溶接学会誌, 第 43 卷, 第 3 号, (1974)
- 19) 日本金属学会, “金属データブック”, 20~21

表3.3-1 供試材の化学成分 (mass%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti
A533B	0.18	0.2	1.42	<0.004	0.0008	0.56	0.12	0.52	—
25Cr-35Ni-RHP	0.0006	<0.01	<0.01	0.001	0.00018	34.69	24.65		0.19

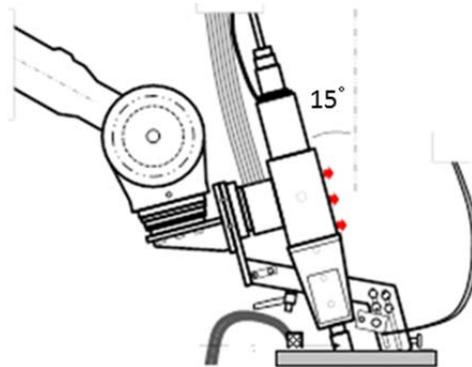


図3.3-1 レーザ肉盛溶接の模式図

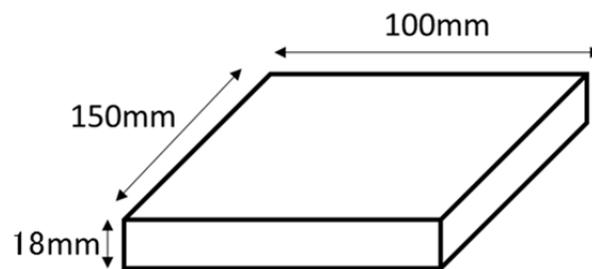


図3.3-2 レーザ肉盛溶接用ベース材A533Bの形状

表3.3-2 レーザ肉盛溶接条件

Welding speed (mm/s)	5
Laser power (kW)	1~4
Wire feeding speed (mm/s)	7~16
Beam spot radius (mm)	3.2
Shield gas	Ar
Gas flow rate (L/min)	50

表3.3-3 PWHT 条件

Temper temperature	500, 550, 600°C	3×5=15
Holding time	5s, 1h, 3h, 10, 24h	

表 3.3-4 レーザ肉盛溶接試験条件

No.	V wire (mm/s)	V weld (mm/s)	Laser power (kw)	Dilution rare(%)
1	8	5	1.5	33.5
2	8	5	2.0	46.9
3	7	5	1.5	56.1
4	8	5	2.5	63.7
5	8	5	3.4	69.6
6	8	5	4.0	79.7

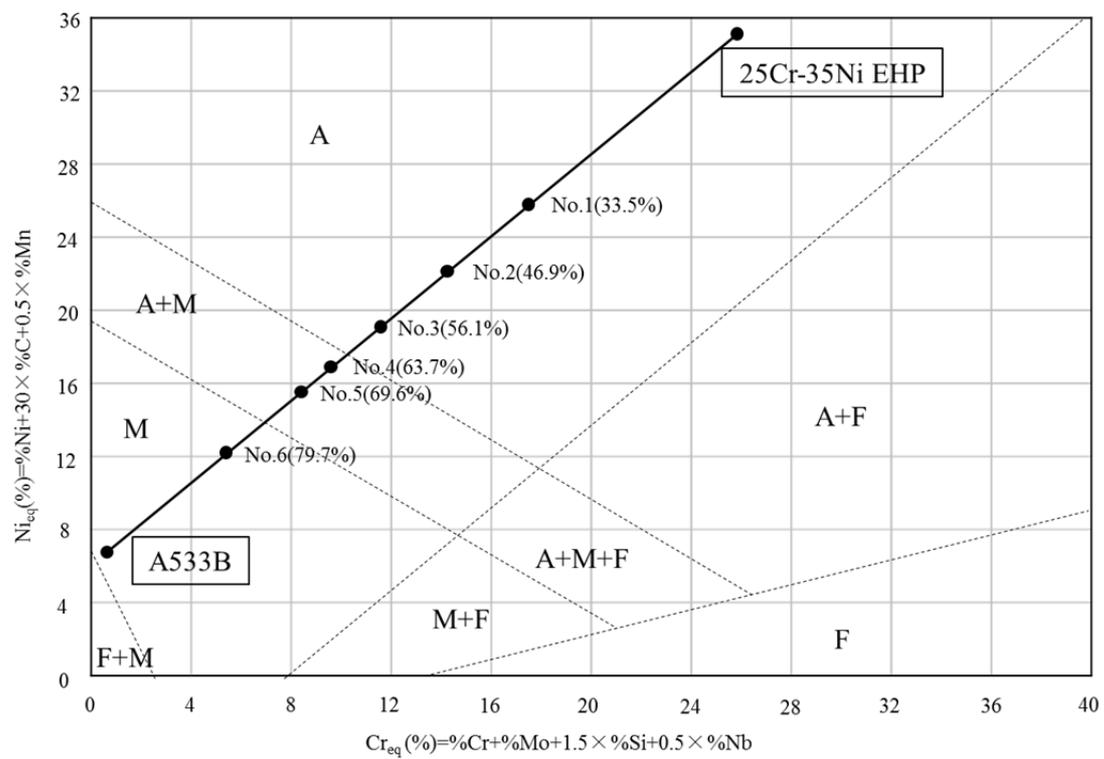
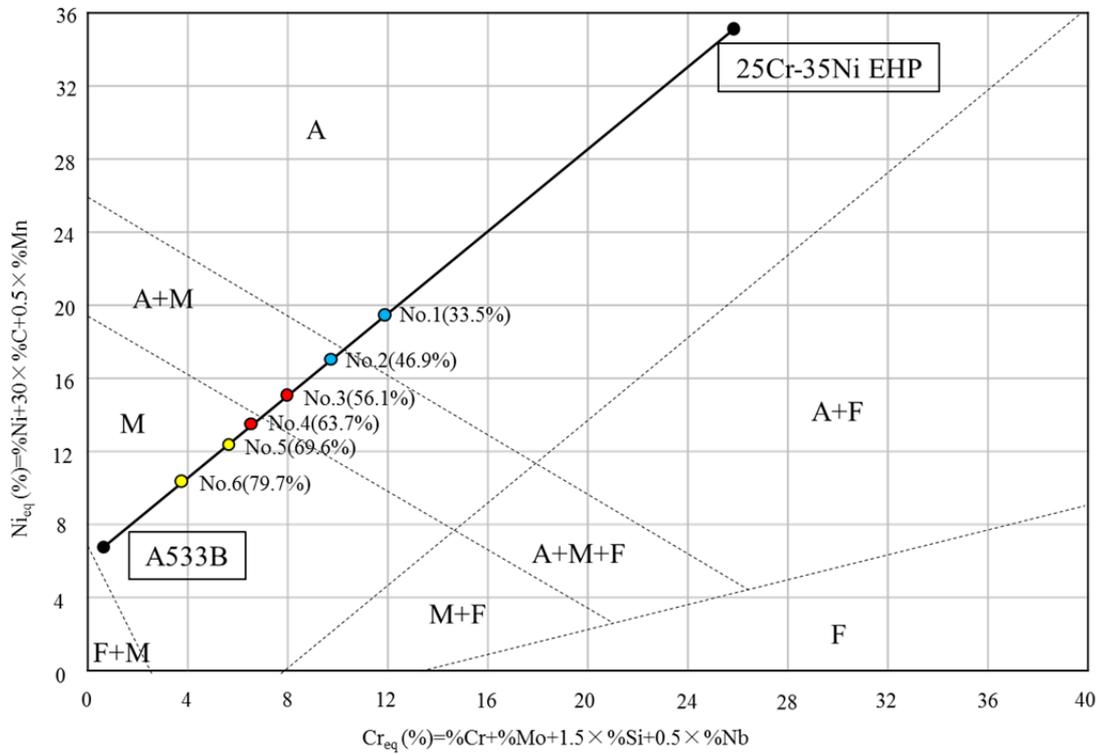


図 3.3-3 シェフラー線図におけるレーザ肉盛溶接条件による希釈率の関係

(a) 2 : 1 (weld metal : base metal)



(b) 2.5 : 1 (weld metal : base metal)

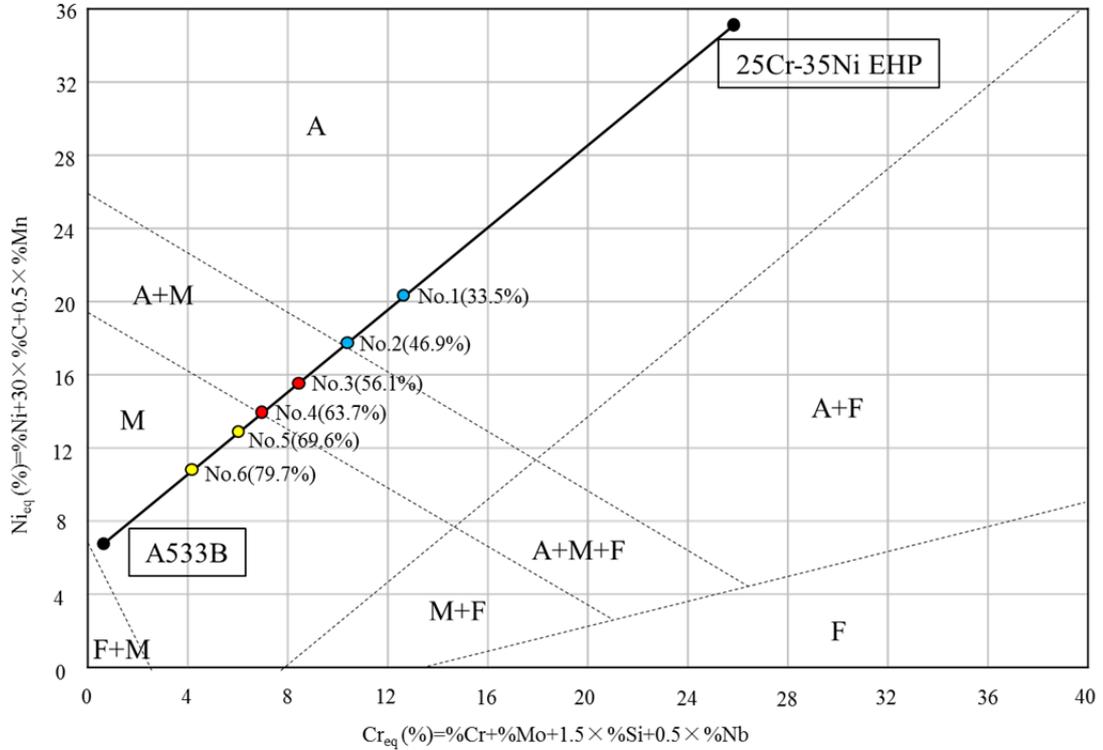
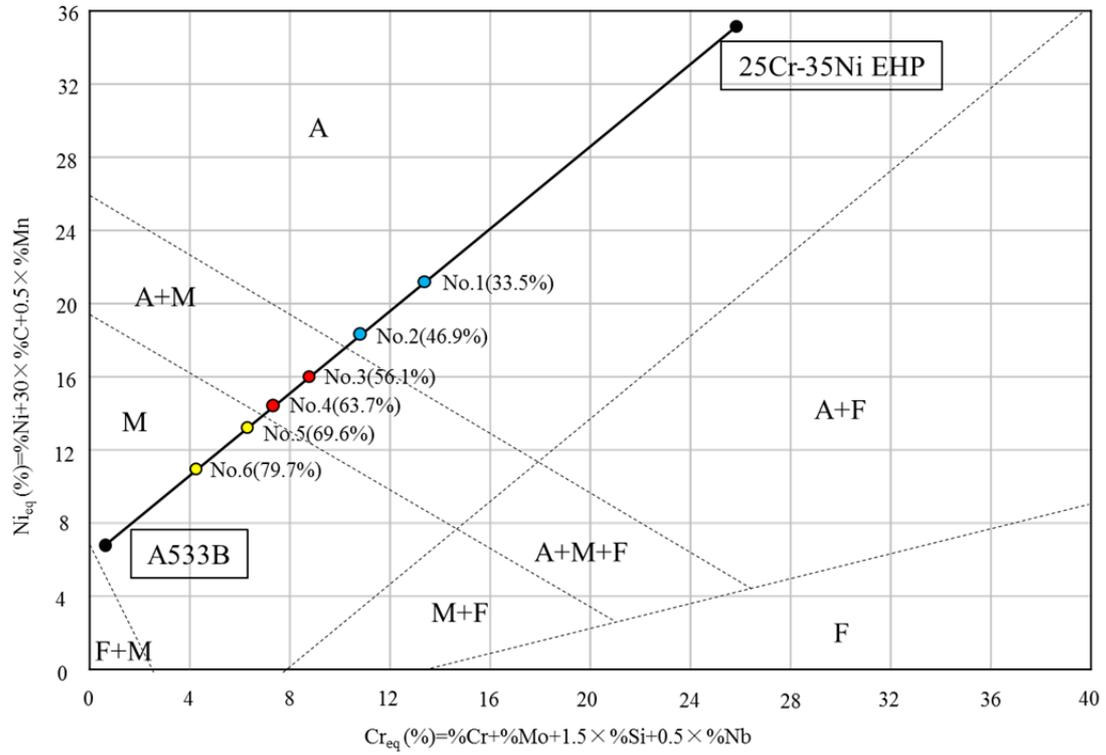


図 3.3-4-1 レーザ肉盛溶接金属部と母材を任意の比で内分したシェフラー線図-1

(c) 3 : 1 (weld metal : base metal)



(d) 4 : 1 (weld metal : base metal)

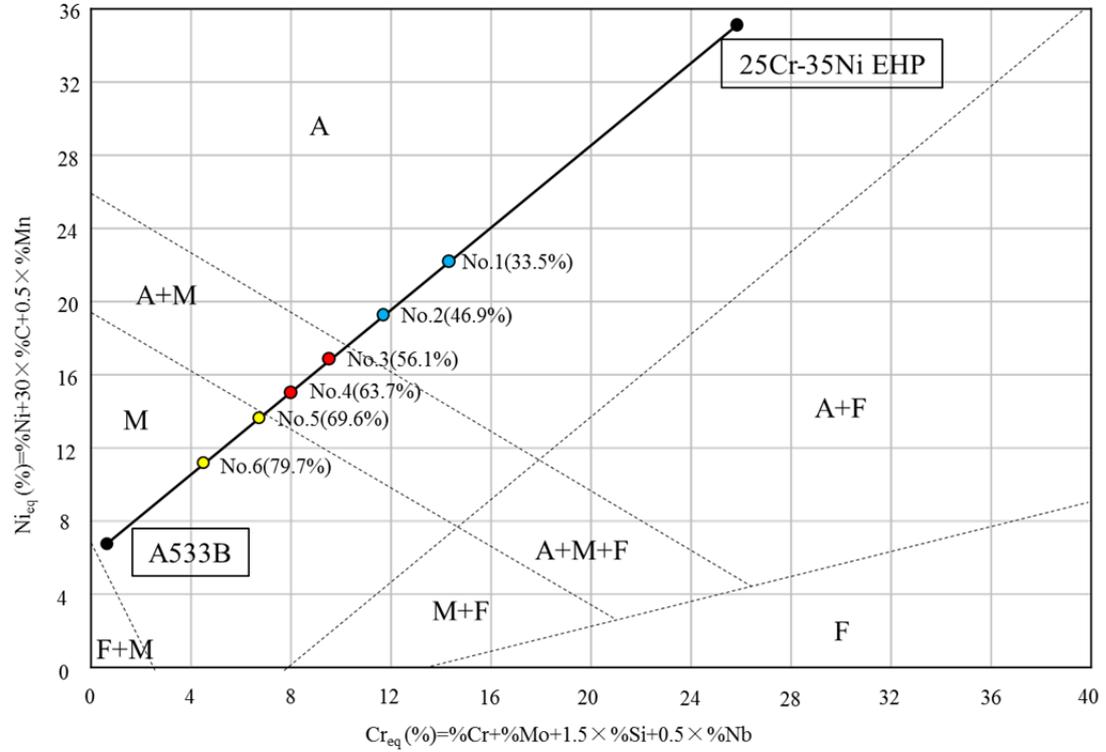


図 3.3-4-2 レーザ肉盛溶接金属部と母材を任意の比で内分したシェフラー線図-2

(e) 4.5:1 (weld metal : base metal)

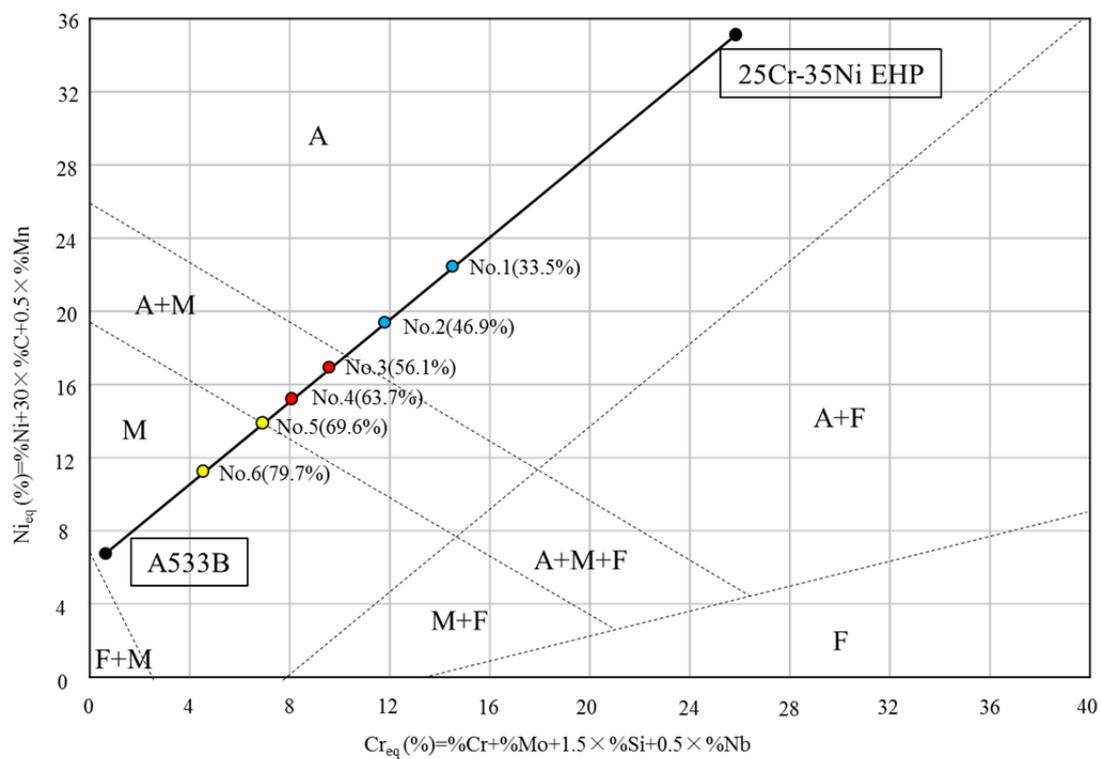


図 3.3-4-3 レーザ肉盛溶接金属部と母材を任意の比で内分したシェフラー線図-3

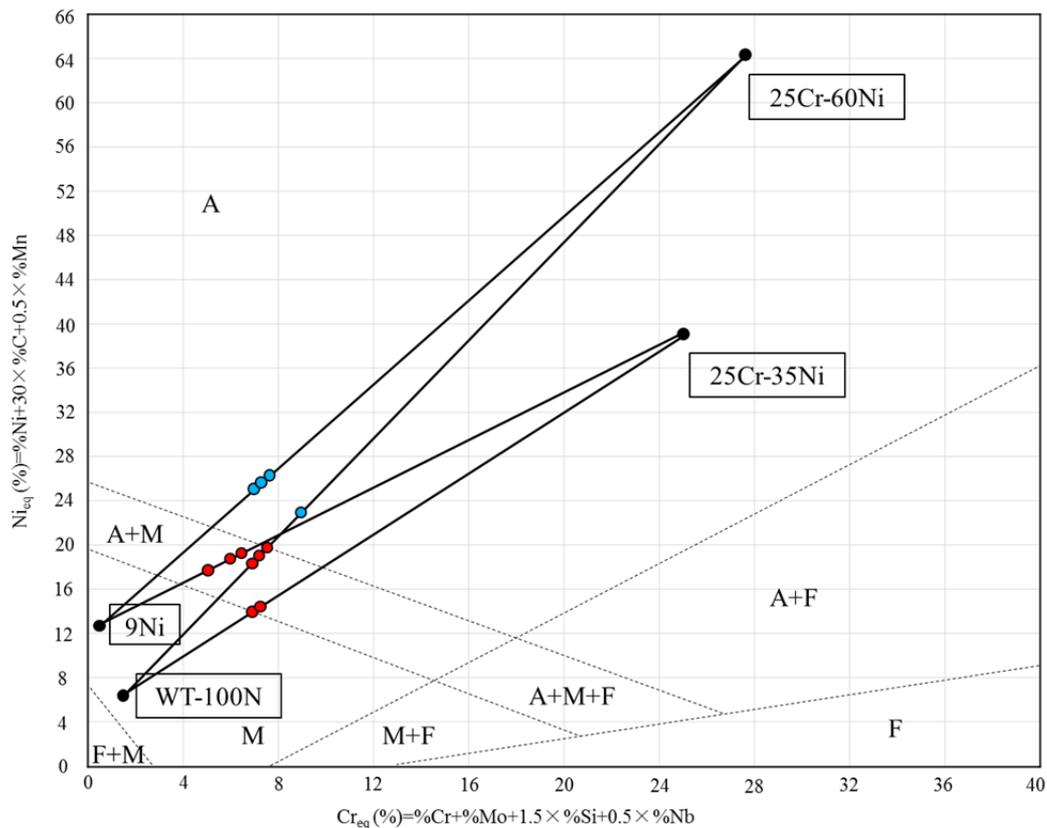


図 3.3-5 レーザ肉盛溶接金属部と母材を任意の比で内分したシェフラー線図

表 3.3-5 PWHT による浸炭層幅 (μm)

Holding time		5s	1h	3h	10h	24h
Width (μm)	500°C	0	4	8	11	19
	550°C	1	8	13	20	26
	600°C	3	17	22	33	38

表 3.3-6 PWHT による脱炭層幅 (μm)

Holding time		5s	1h	3h	10h	24h
Width (μm)	500°C	3	37	67	54	119
	550°C	10	59	74	148	211
	600°C	16	74	177	251	370

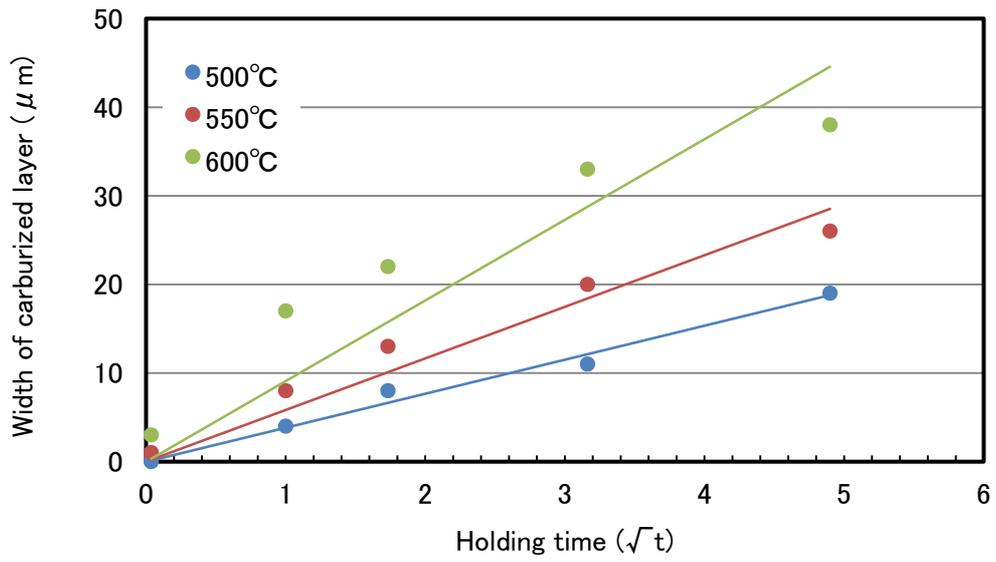


図 3.3-6 PWHT における保持時間と浸炭層幅の関係

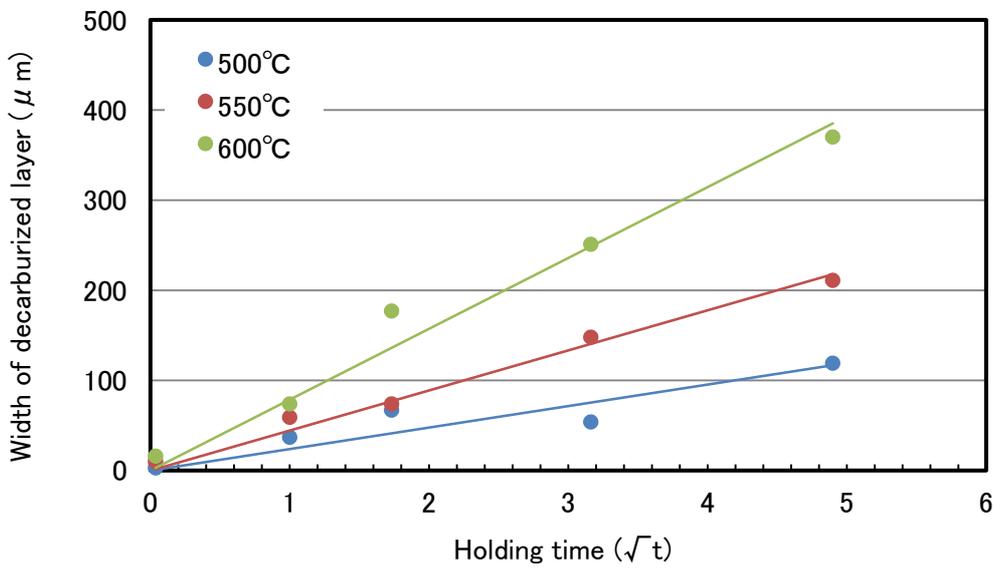


図 3.3-7 PWHT における保持時間と脱炭層幅の関係

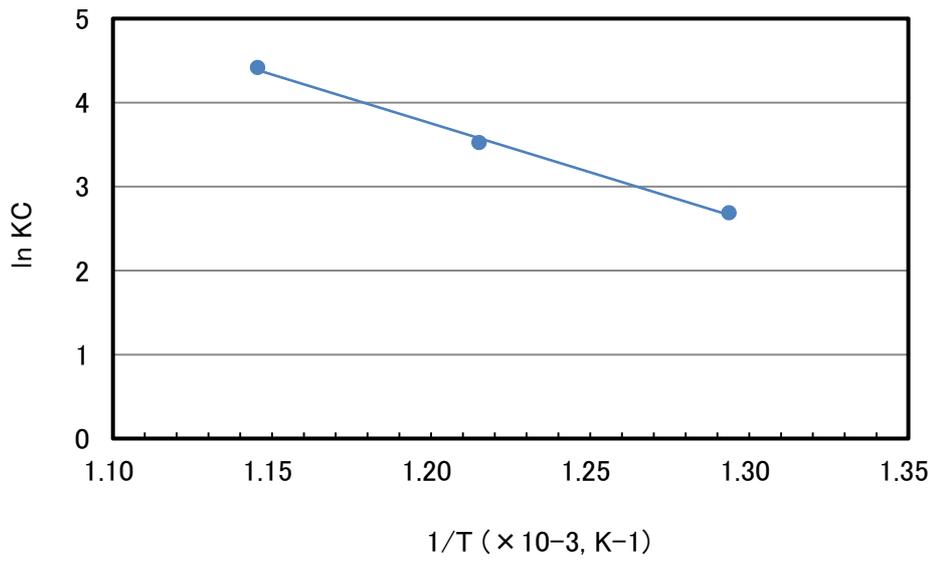


図 3.3-8 PWHT による浸炭層幅の成長速度のアレニウスプロット

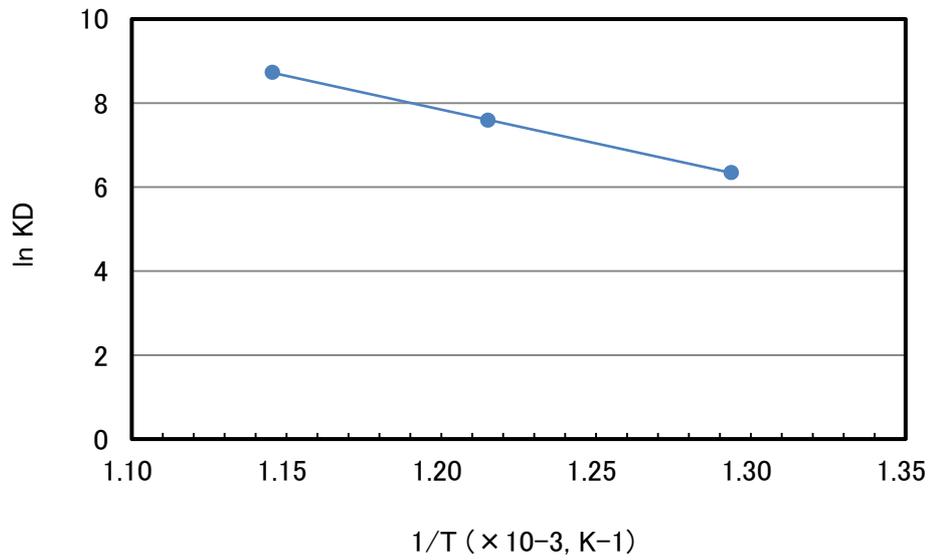


図 3.3-9 PWHT による脱炭層幅の成長速度のアレニウスプロット

表 3.3-7 低合金鋼 A533B に対する PWHT の法定条件

Lowest temperature (°C)		590
Holding time (h)	Bond thickness	$W/25$ ($W \leq 50$) $(150+W)/100$ ($W > 50$)
	Minimum	1

W : Thickness of weld layer (mm)

No.1

Base metal: A533B
Clad metal: 25Cr-35Ni EHP
Welding speed: 5mm/s
Wire feed speed: 8mm/s
Laser power: 1.5kW

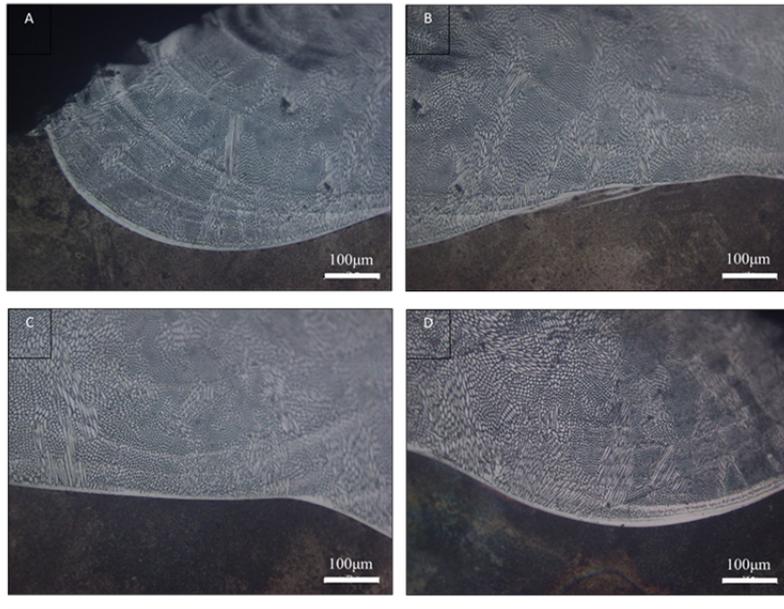
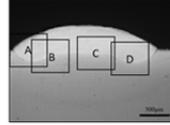


写真 3.3-1 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 33.5%)

No.2

Base metal: A533B
Clad metal: 25Cr-35Ni EHP
Welding speed: 5mm/s
Wire feed speed: 8mm/s
Laser power: 2.0kW

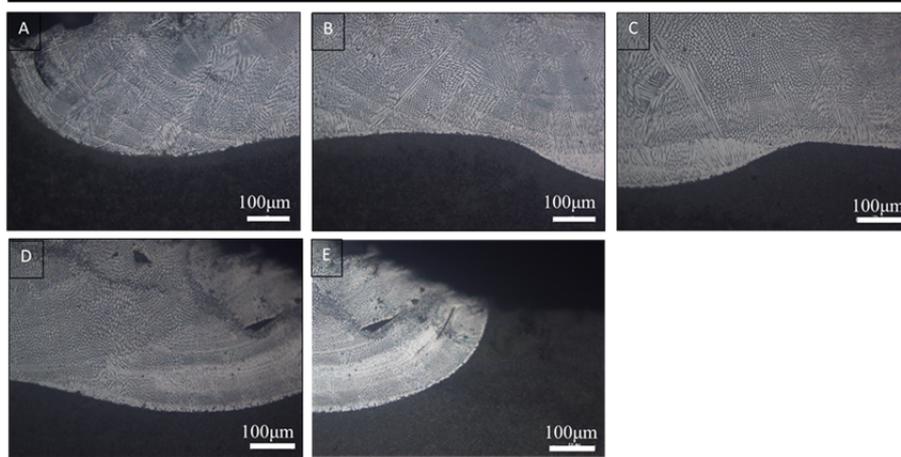
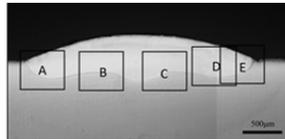


写真 3.3-2 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 46.9%)

No.3

Base metal: A533B
Clad metal: 25Cr-35Ni EHP
Welding speed: 5mm/s
Wire feed speed: 7mm/s
Laser power: 1.5kW

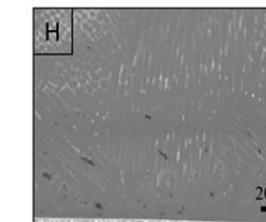
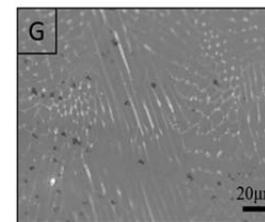
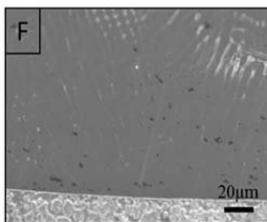
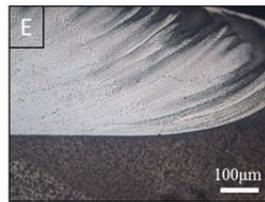
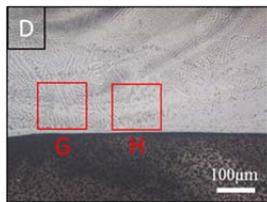
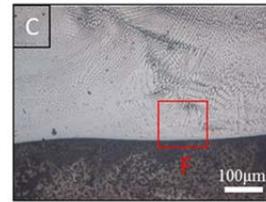
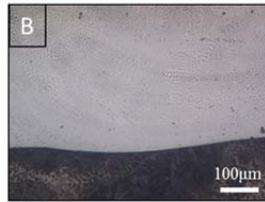
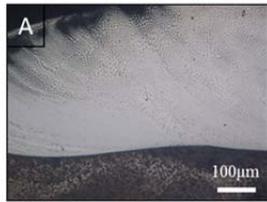
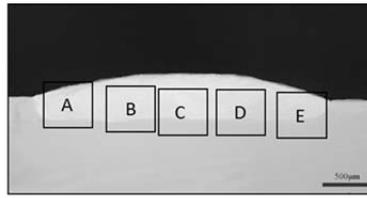


写真 3.3-3 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 56.1%)

No.4

Base metal: A533B
Clad metal: 25Cr-35Ni EHP
Welding speed: 5mm/s
Wire feed speed: 8mm/s
Laser power: 2.5kW

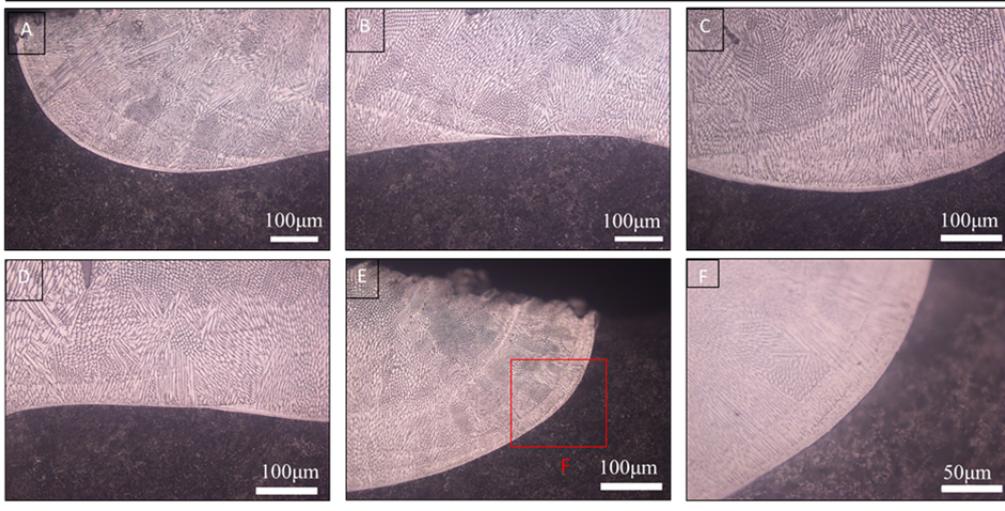
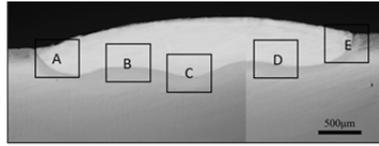


写真 3.3-4 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率: 63.7%)

No.5

Base metal: A533B
Clad metal: 25Cr-35Ni EHP
Welding speed: 5mm/s
Wire feed speed: 8mm/s
Laser power: 3.0kW

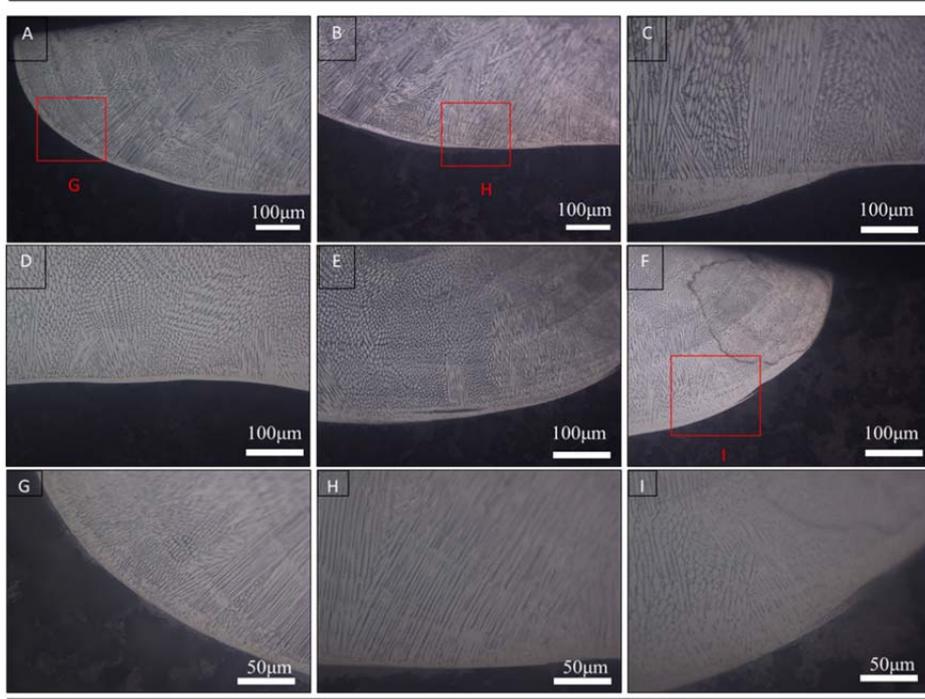
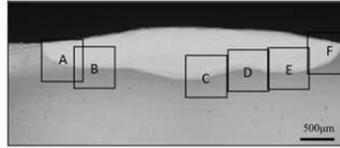


写真 3.3-5 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 69.6%)

No.6

Base metal: A533B
Clad metal: 25Cr-35Ni EHP
Welding speed: 5mm/s
Wire feed speed: 8mm/s
Laser power: 4.0kW

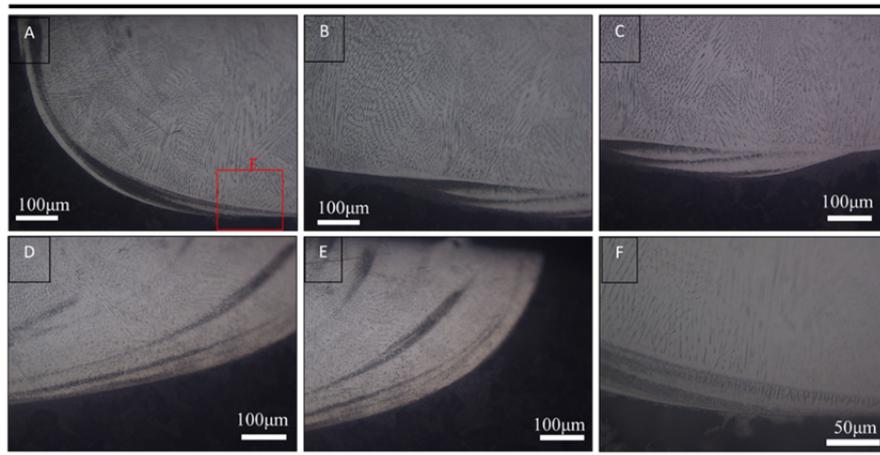
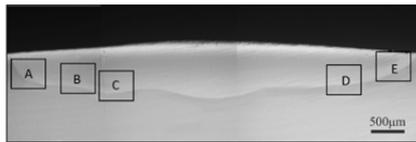


写真 3.3-6 レーザ肉盛溶接金属部のマイクロ組織 (希釈率 : 79.7%)

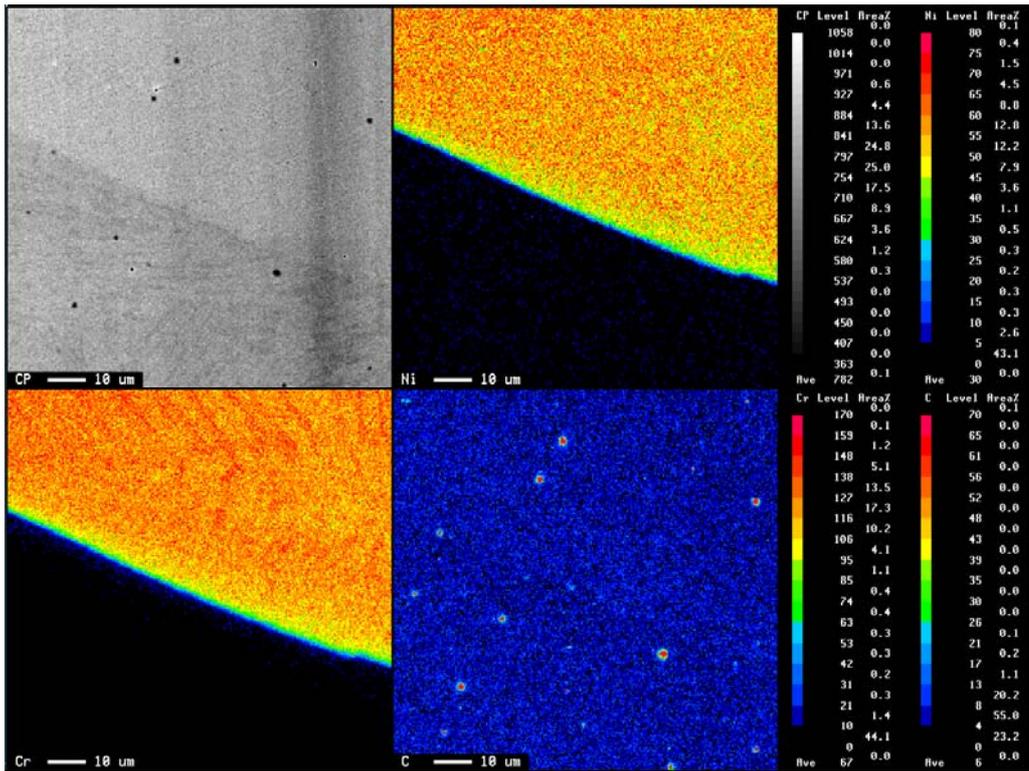


図 3.3-10 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率 : 33.5%)

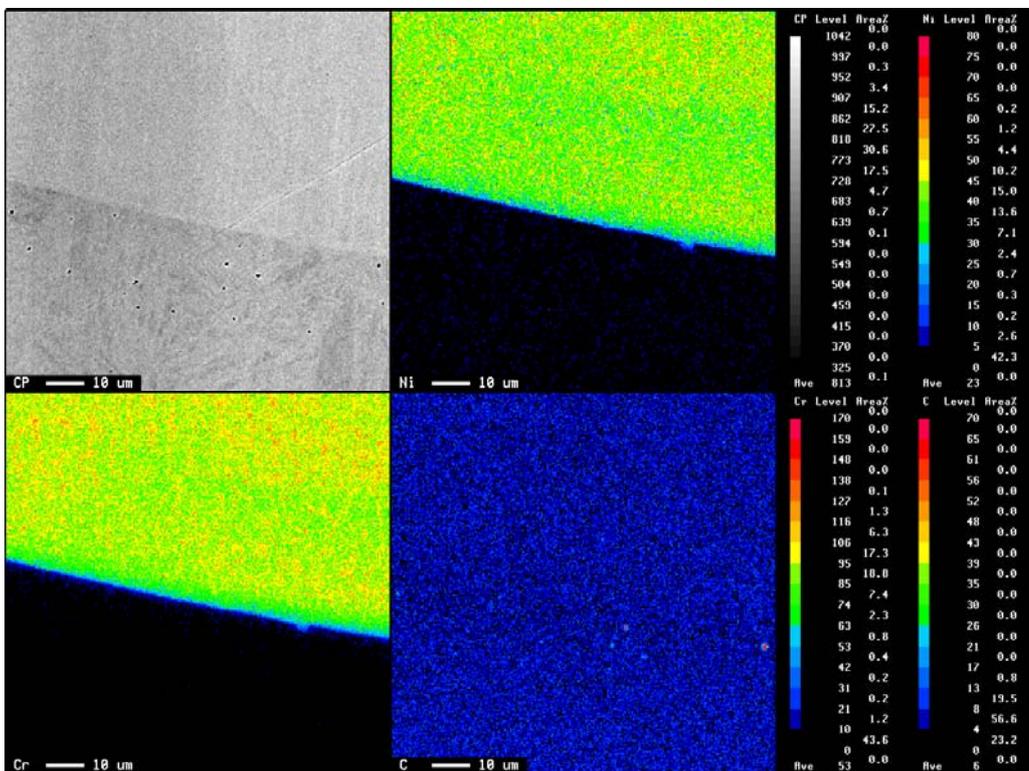


図 3.3-11 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率 : 46.9%)

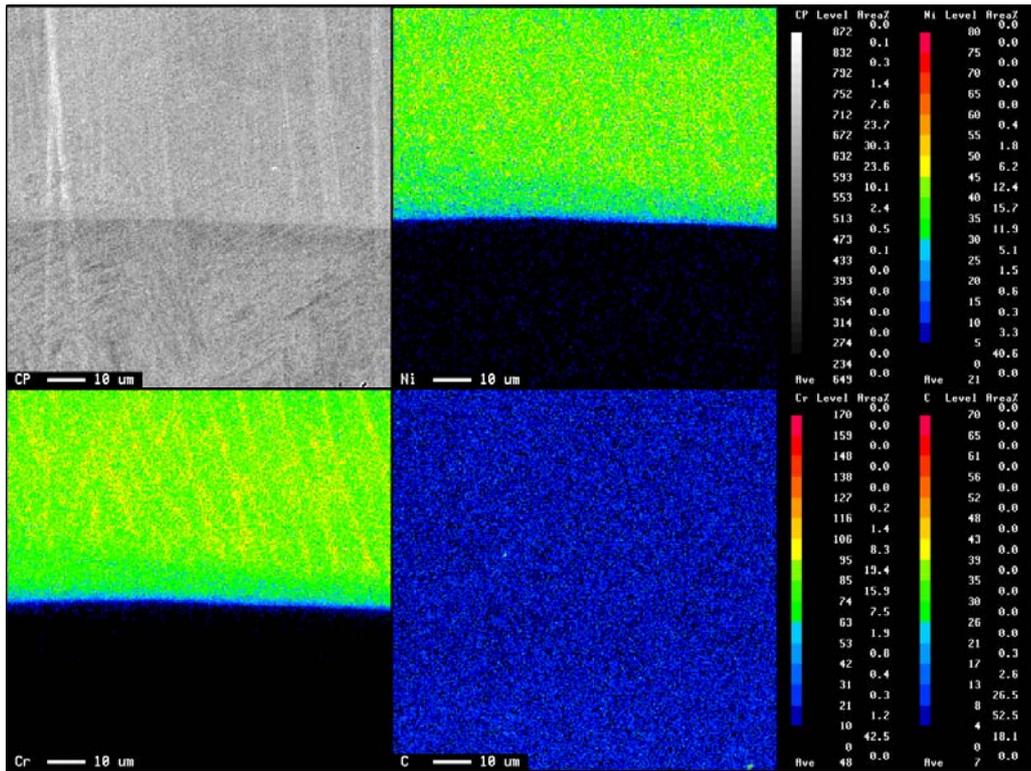


図 3.3-12 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析（希釈率：56.1%）

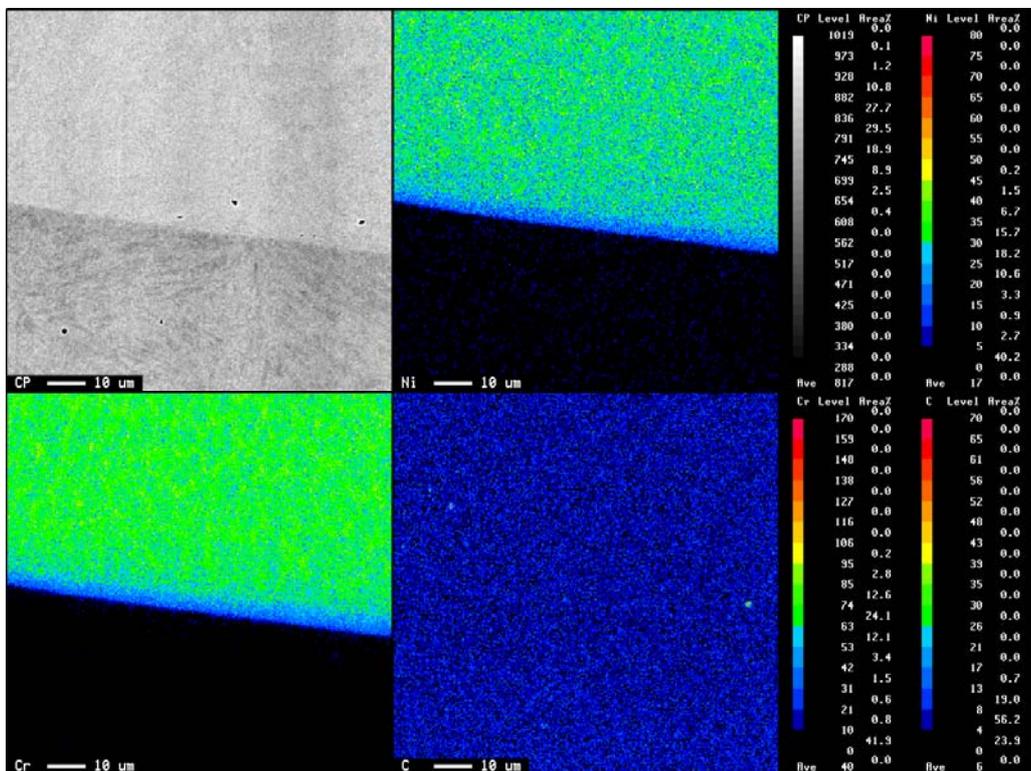


図 3.3-13 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析（希釈率：63.7%）

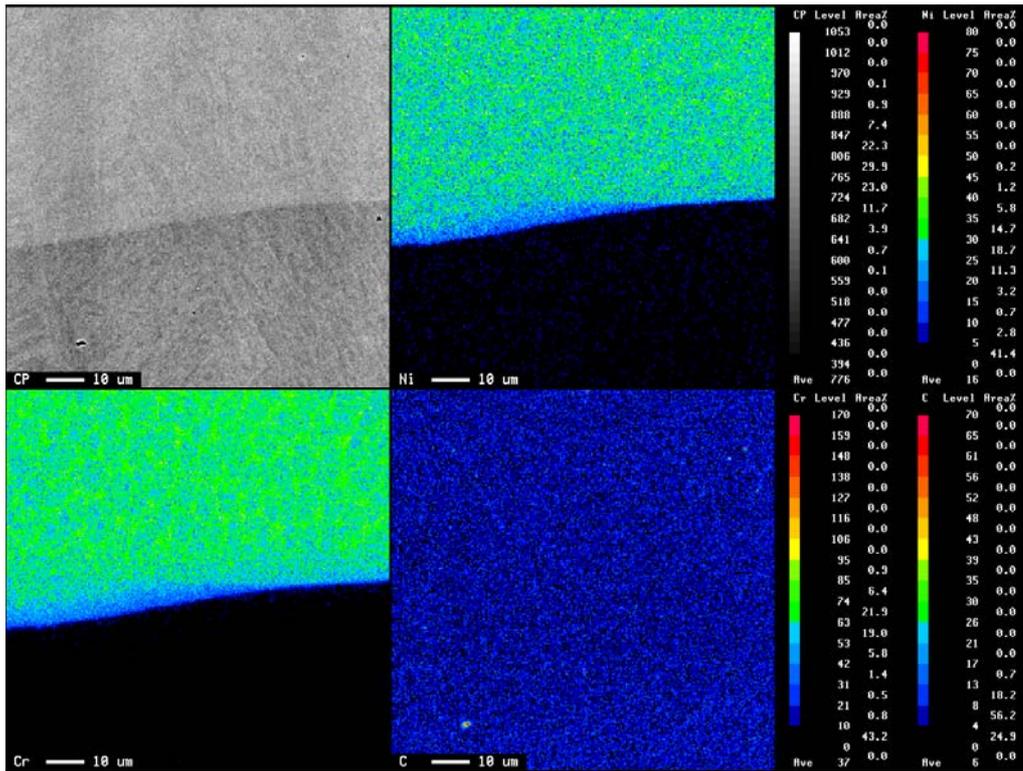


図 3.3-14 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率 : 69.6%)

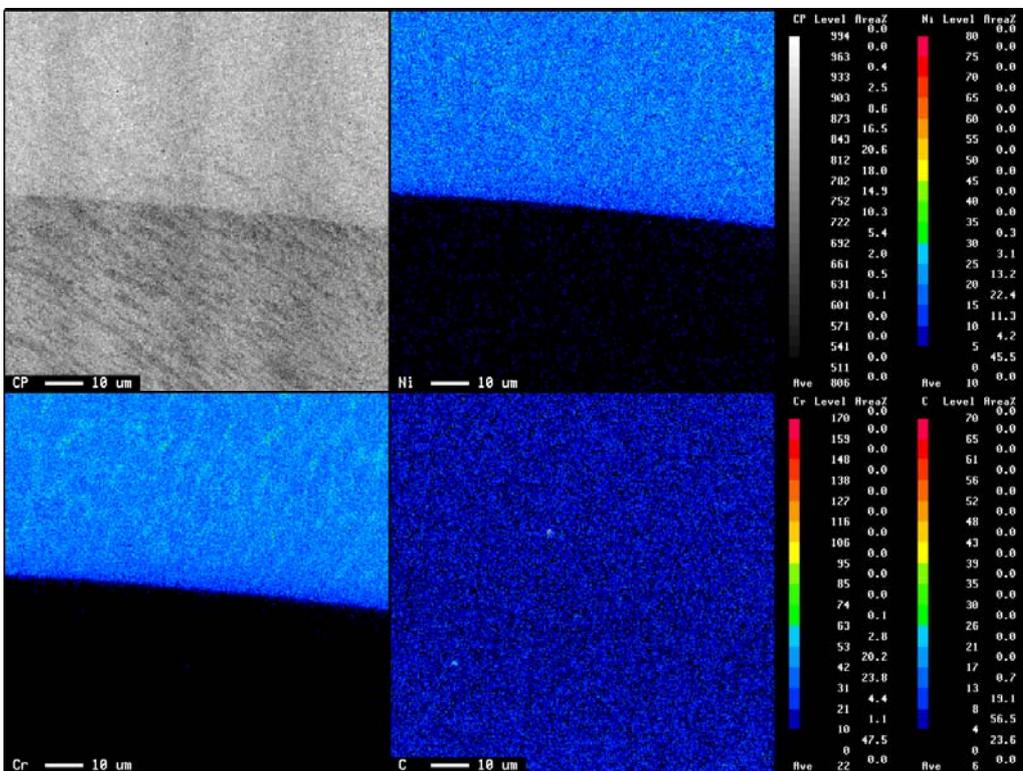
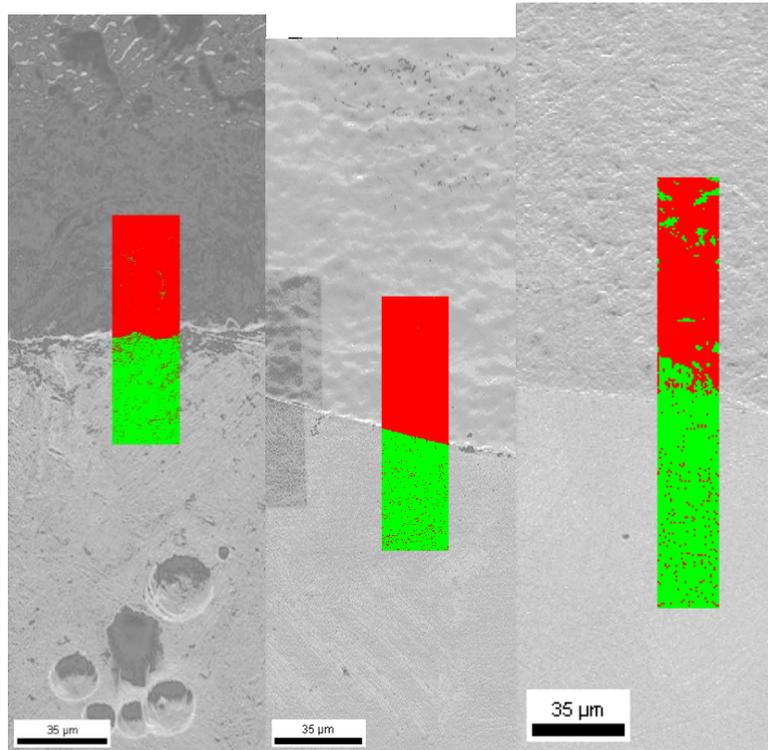
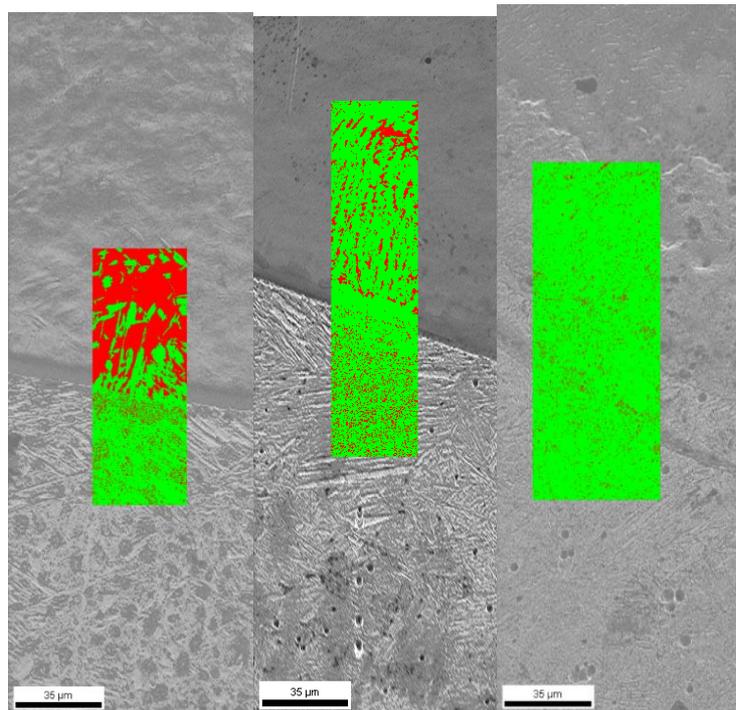


図 3.3-15 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA による元素分析 (希釈率 : 79.7%)



(a) No.1 (希釈率 : 33.5%) (b) No.2 (希釈率 : 46.9%) (c) No.3 (希釈率 : 56.1%)



(d) No.4 (希釈率 : 63.7%) (e) No.5 (希釈率 : 69.6%) (f) No.6 (希釈率 : 79.7%)

図 3.3-16 レーザ肉盛溶接溶金部の結晶方位解析結果

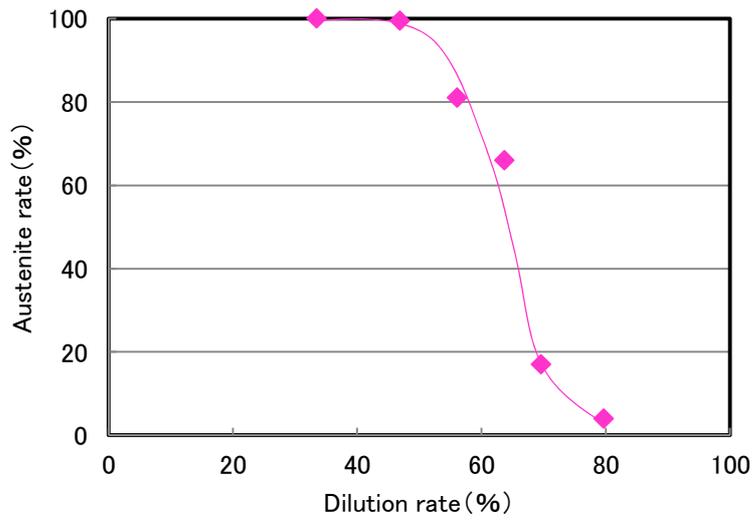


図 3.3-17 レーザ肉盛溶接溶金部の希釈率とオーステナイト率の関係

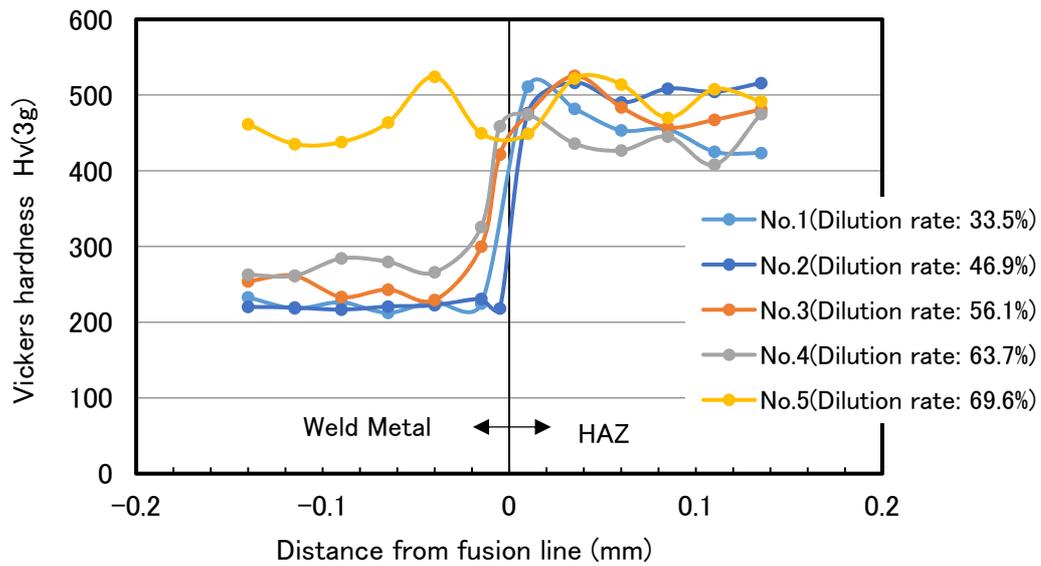
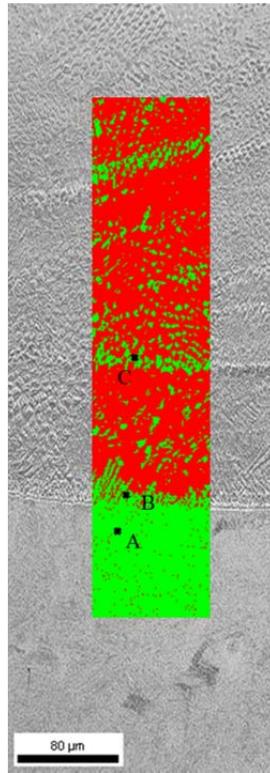


図 3.3-18 レーザ肉盛溶接溶金部のビッカース硬さ分布

表 3.3-8 レーザ肉盛溶接溶金部の EDS 分析結果 (mass%)

	Fe	Cr	Ni
A	100	0	0
B	80.26	6.93	12.80
C	80.60	7.08	12.33



[レーザー肉盛溶接溶金部の EDS 分析位置]

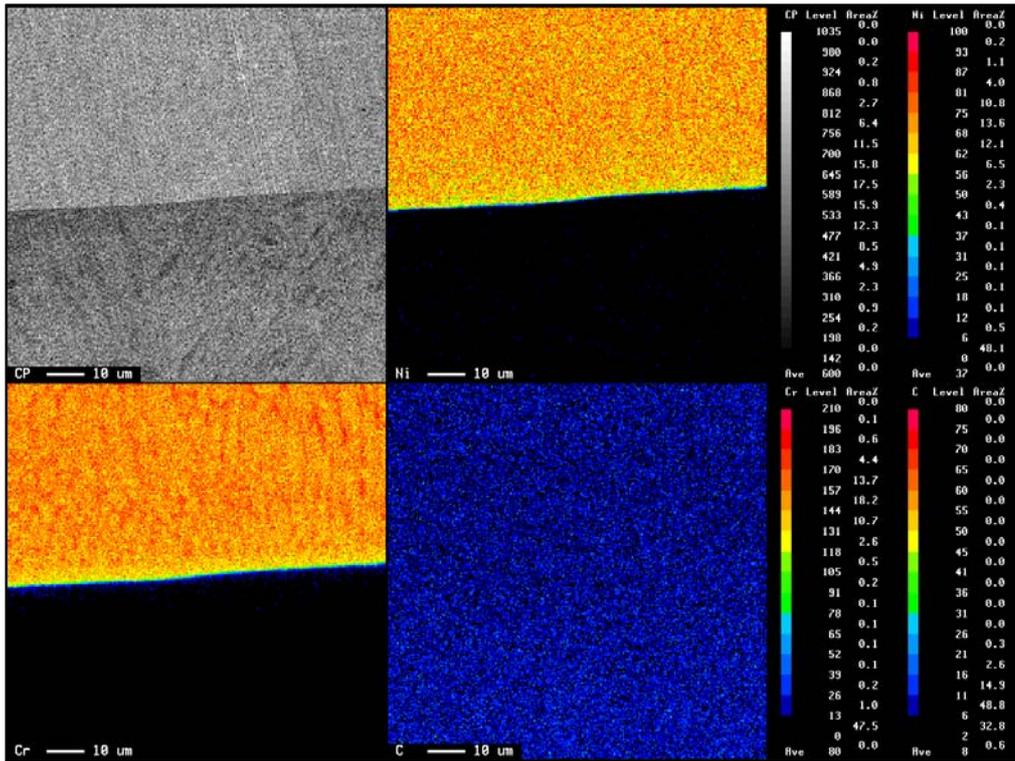


図 3.3-19 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (As welded)

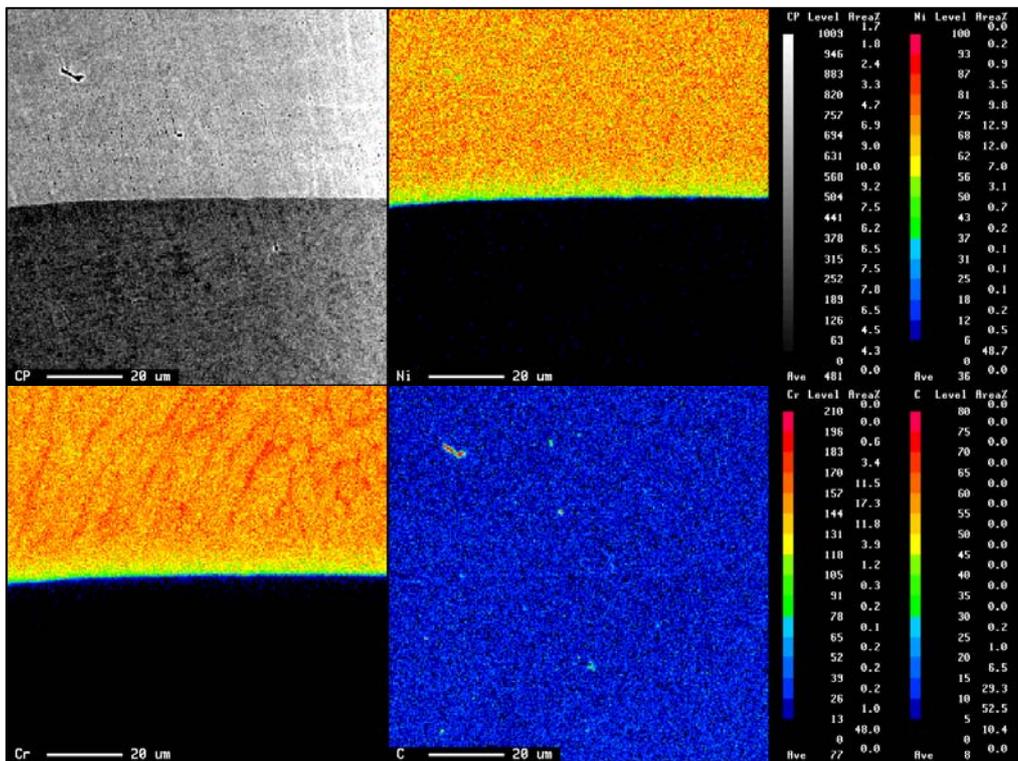


図 3.3-20 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件: 500°C x 5s)

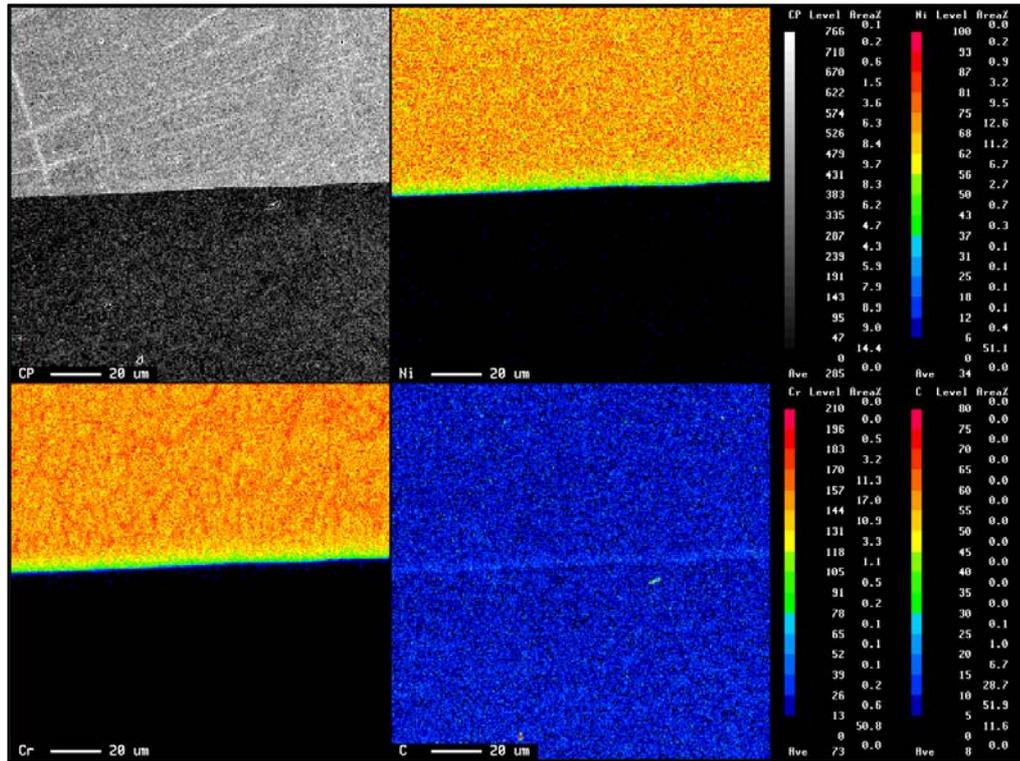


図 3.3-21 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果（時効条件：500°C×1h）

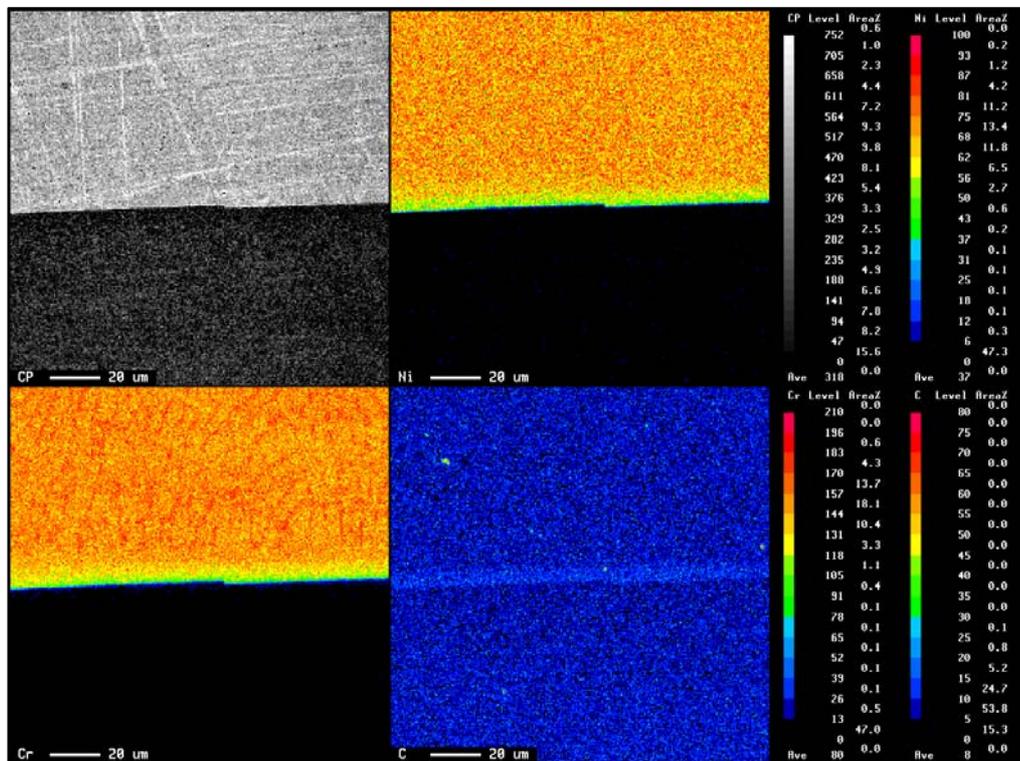


図 3.3-22 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果（時効条件：500°C×3h）

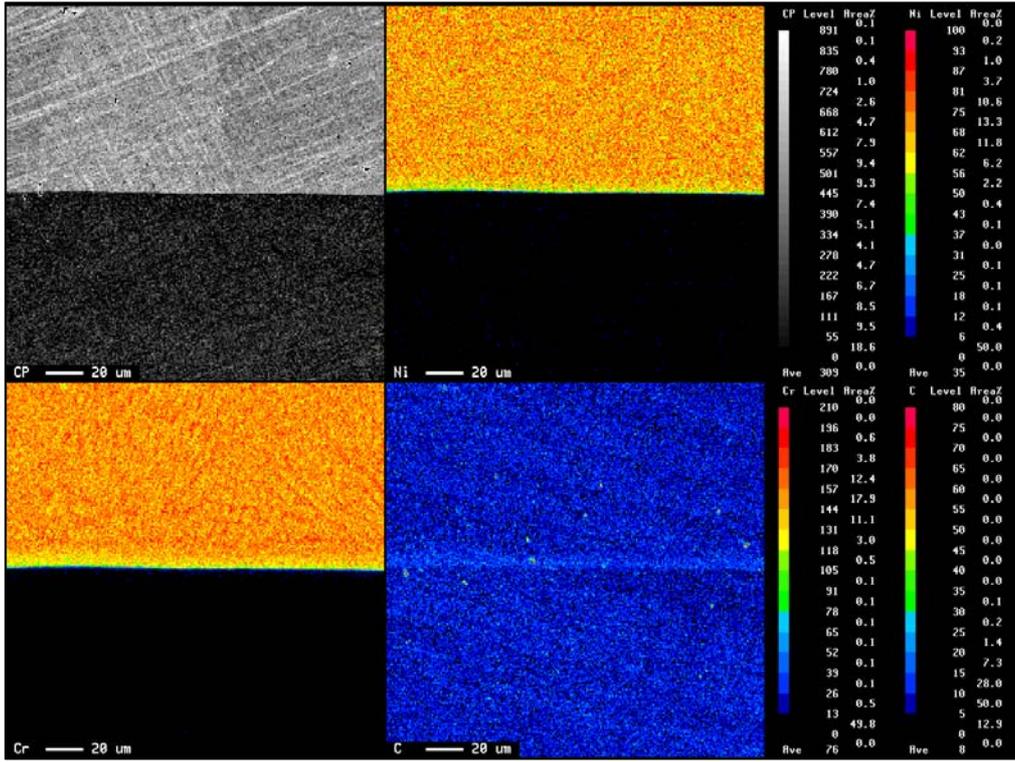


図 3.3-23 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 500°C × 10h)

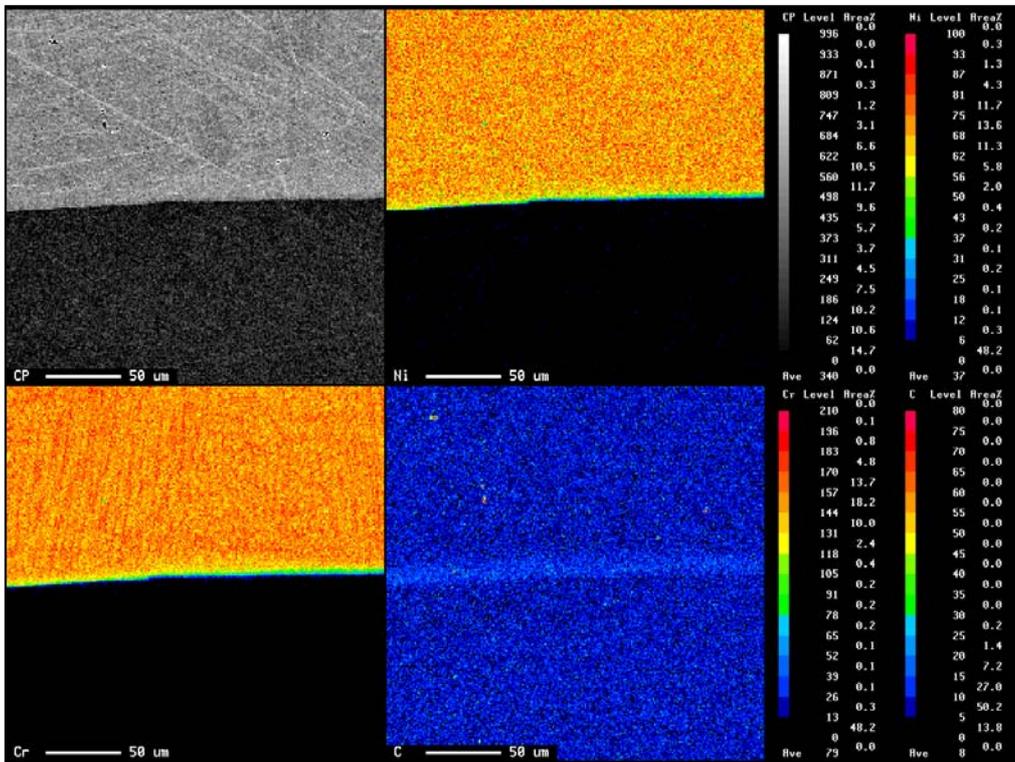


図 3.3-24 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 500°C × 24h)

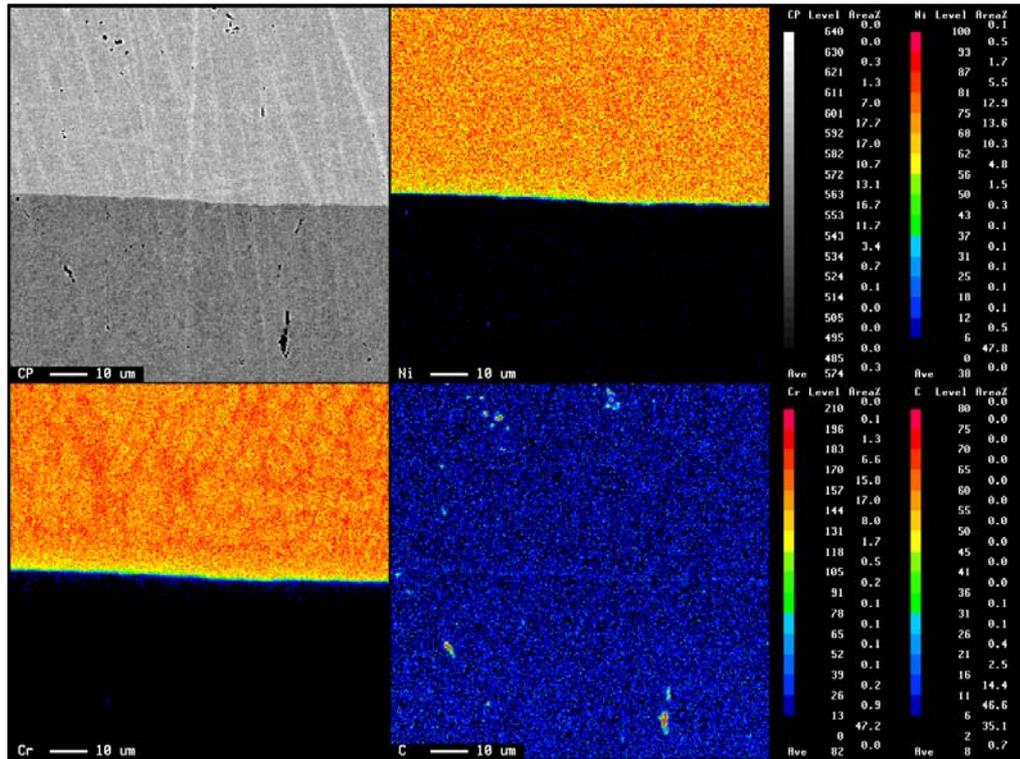


図 3.3-25 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果（時効条件：550°C×5s）

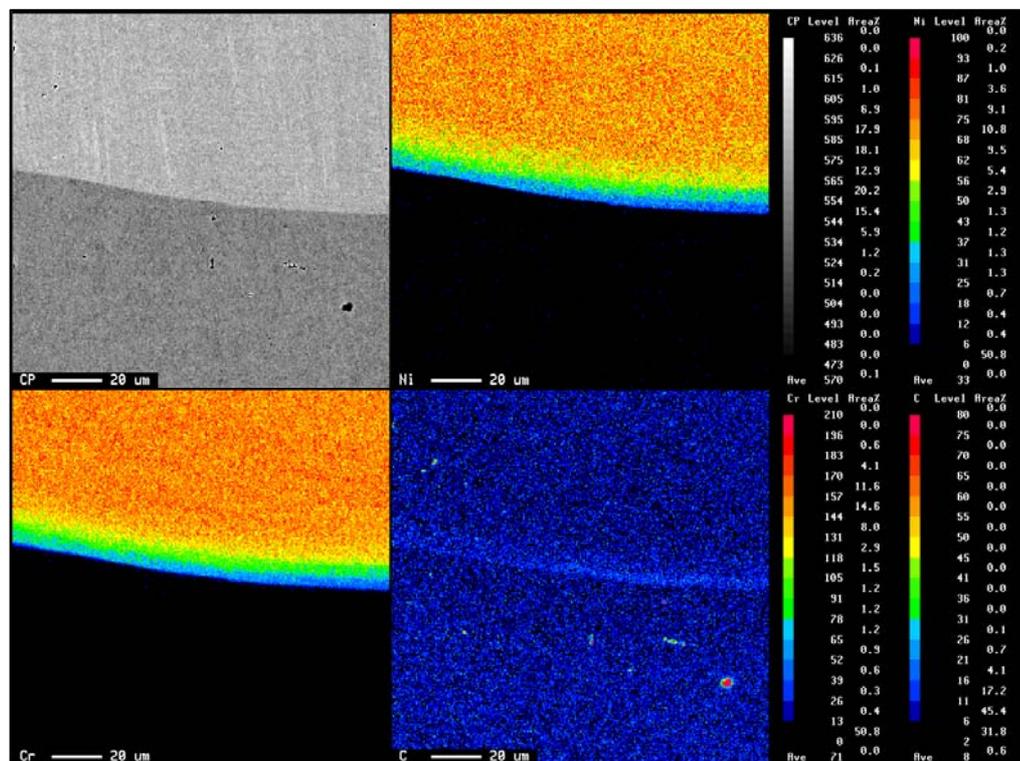


図 3.3-26 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果（時効条件：550°C×1h）

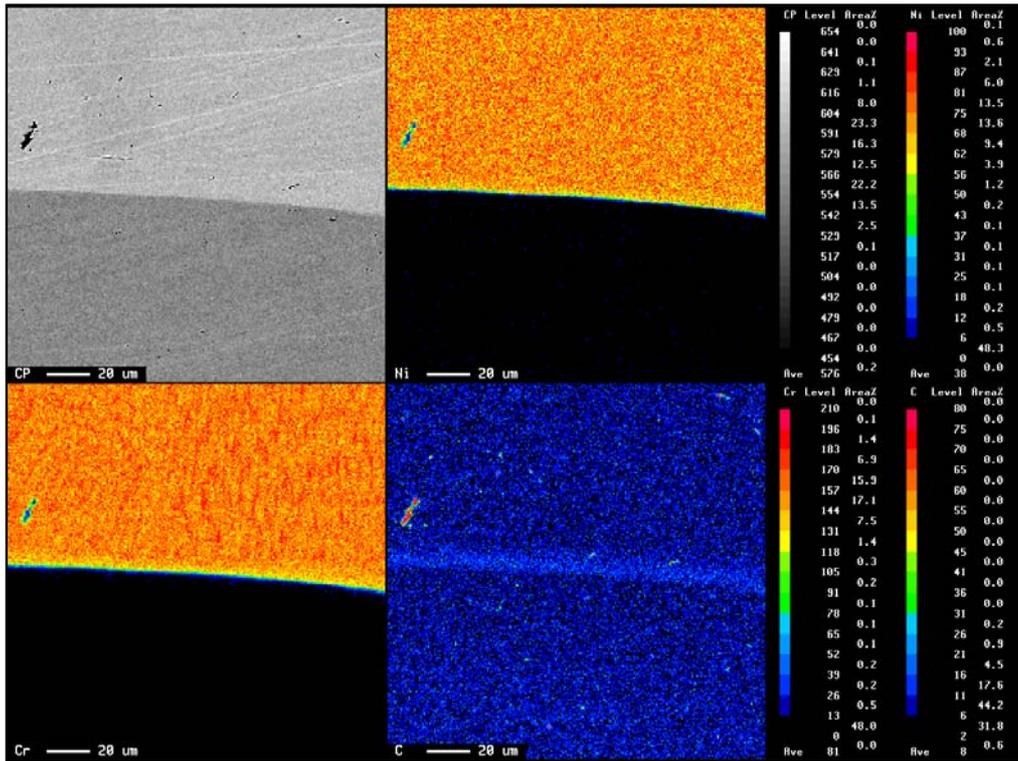


図 3.3-27 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 550°C×3h)

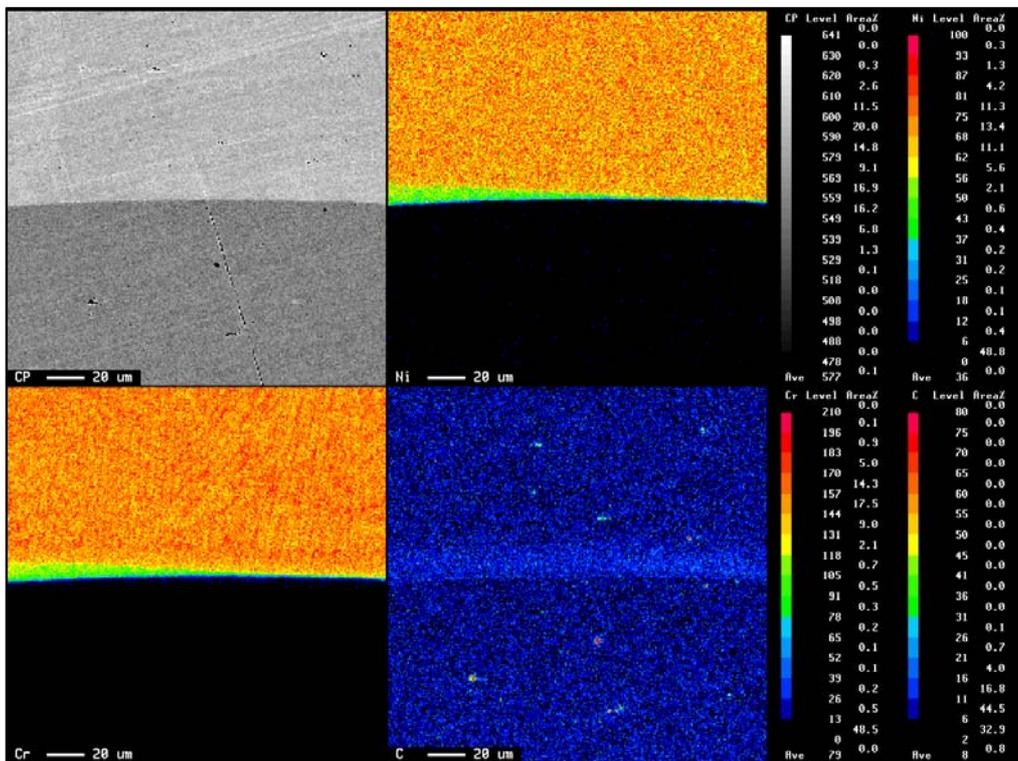


図 3.3-28 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 550°C×10h)

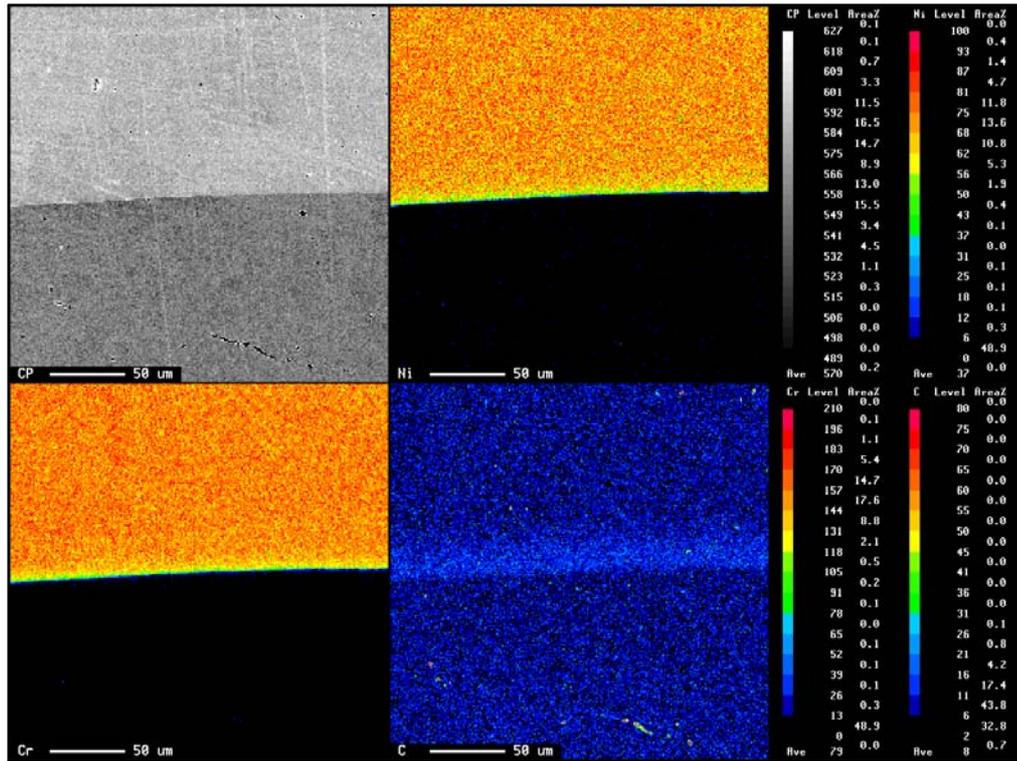


図 3.3-29 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 550°C × 24h)

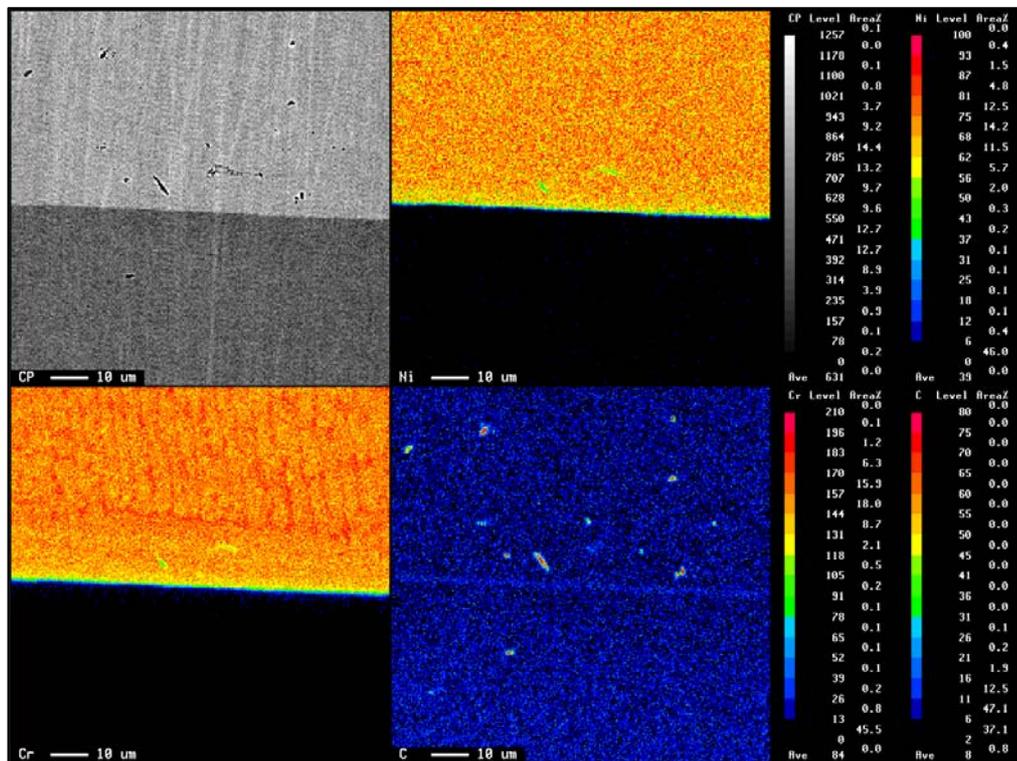


図 3.3-30 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 600°C × 5s)

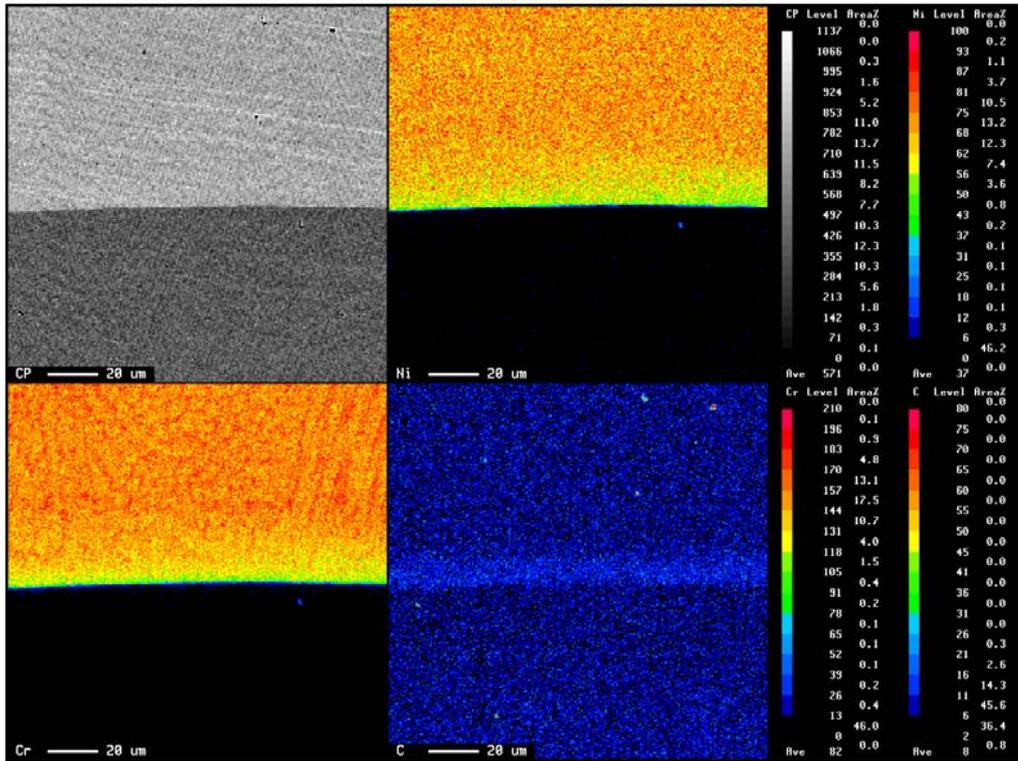


図 3.3-31 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 600°C×1h)

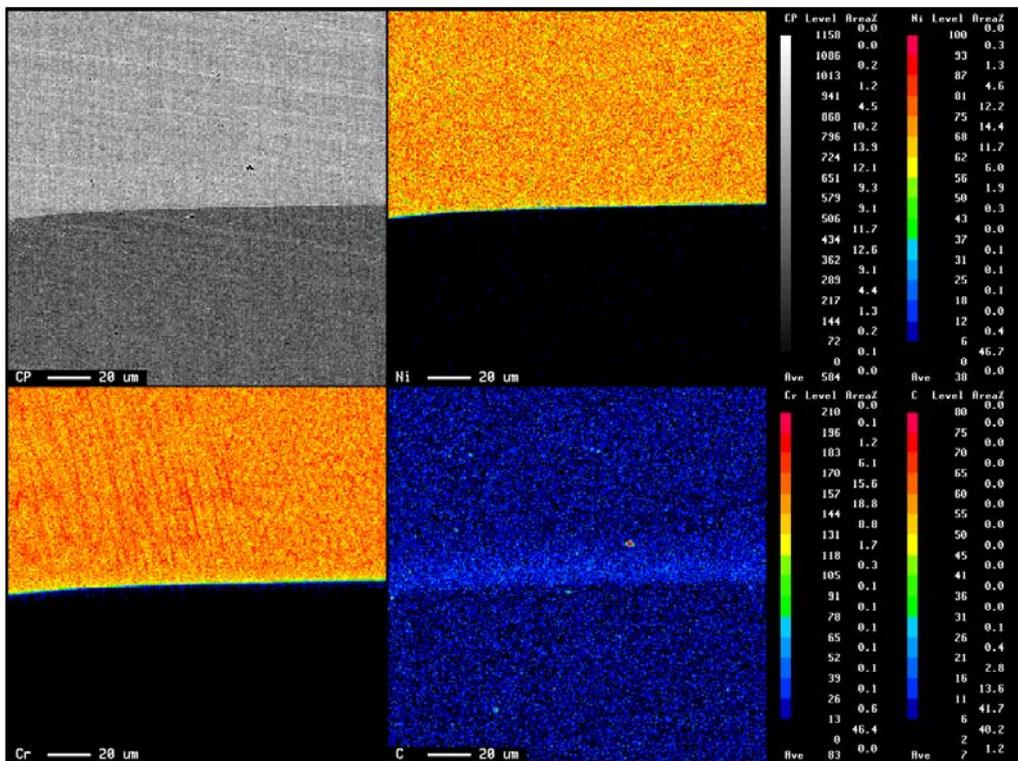


図 3.3-32 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果 (時効条件 : 600°C×31h)

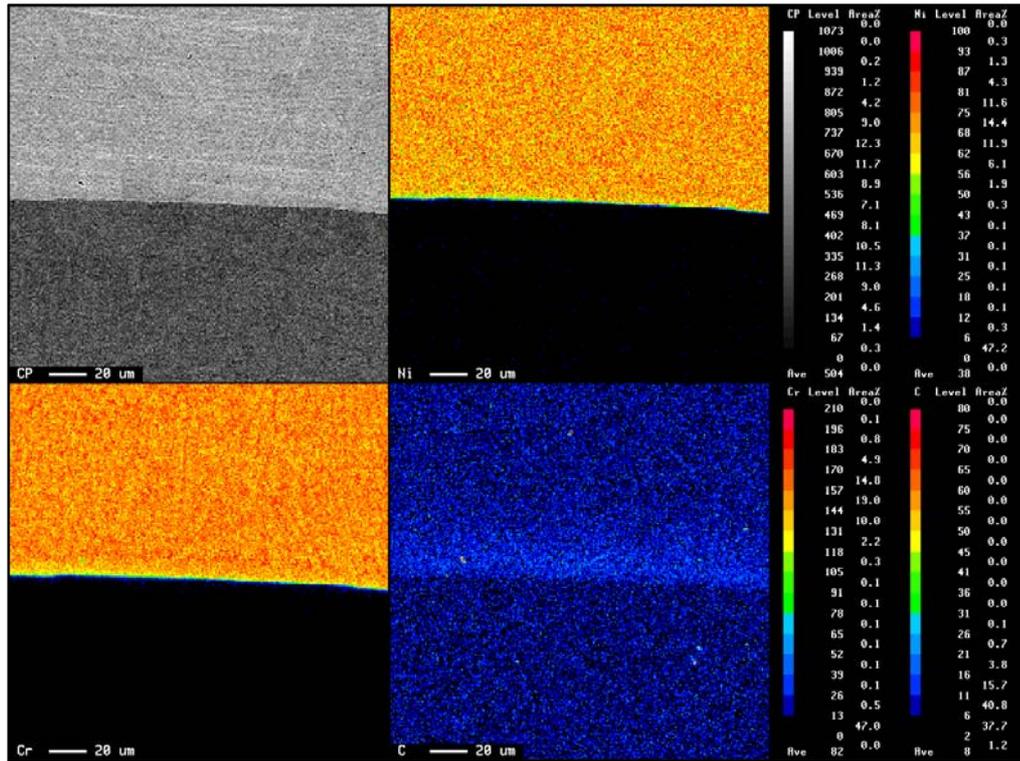


図 3.3-33 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果（時効条件：600°C×10h）

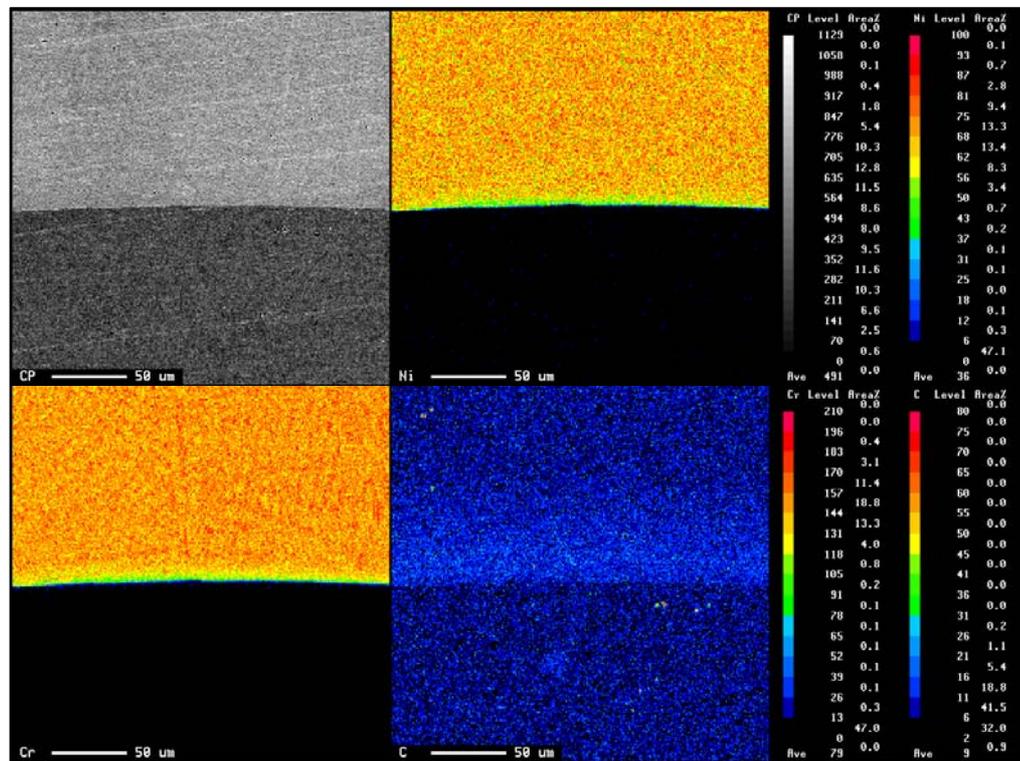


図 3.3-34 レーザ肉盛溶接溶金部の EPMA 面分析結果（時効条件：600°C×24h）

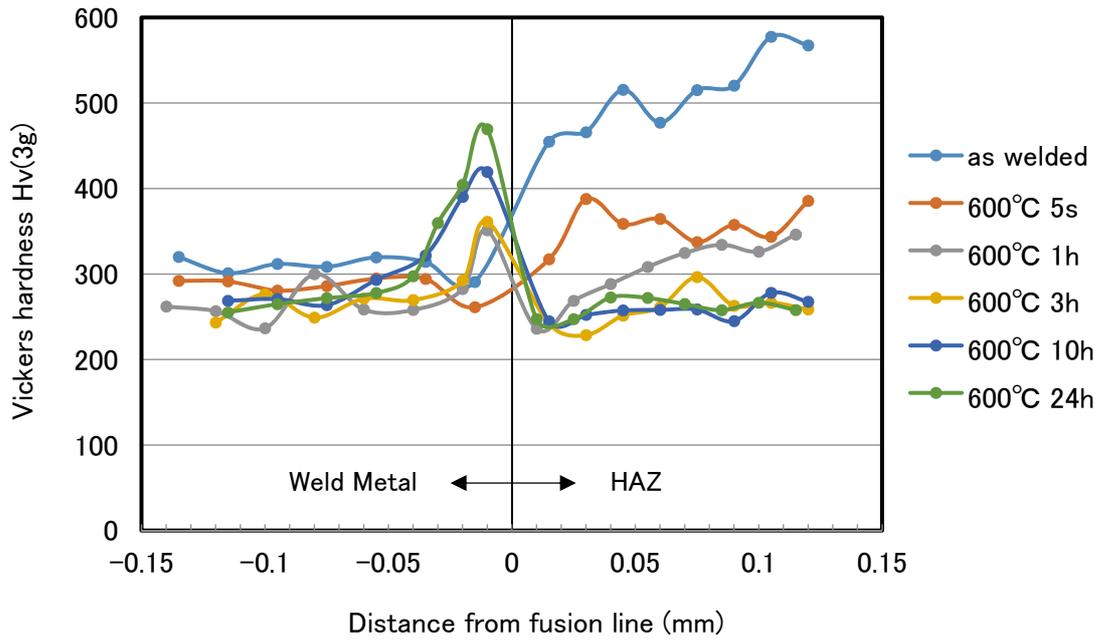


図 3.3-35 レーザ肉盛溶接溶金部の PWHT (600°C) によるビッカース硬さ分布

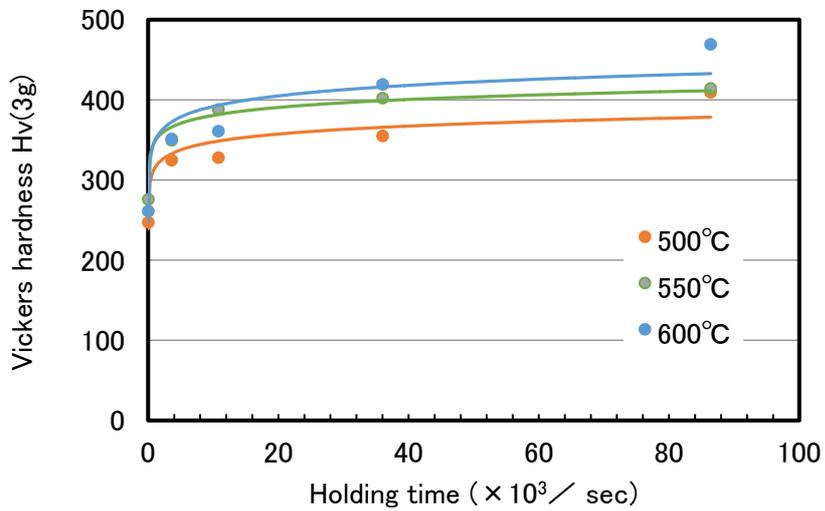


図 3.3-36 レーザ肉盛溶接溶金部の PWHT によるビッカース変化

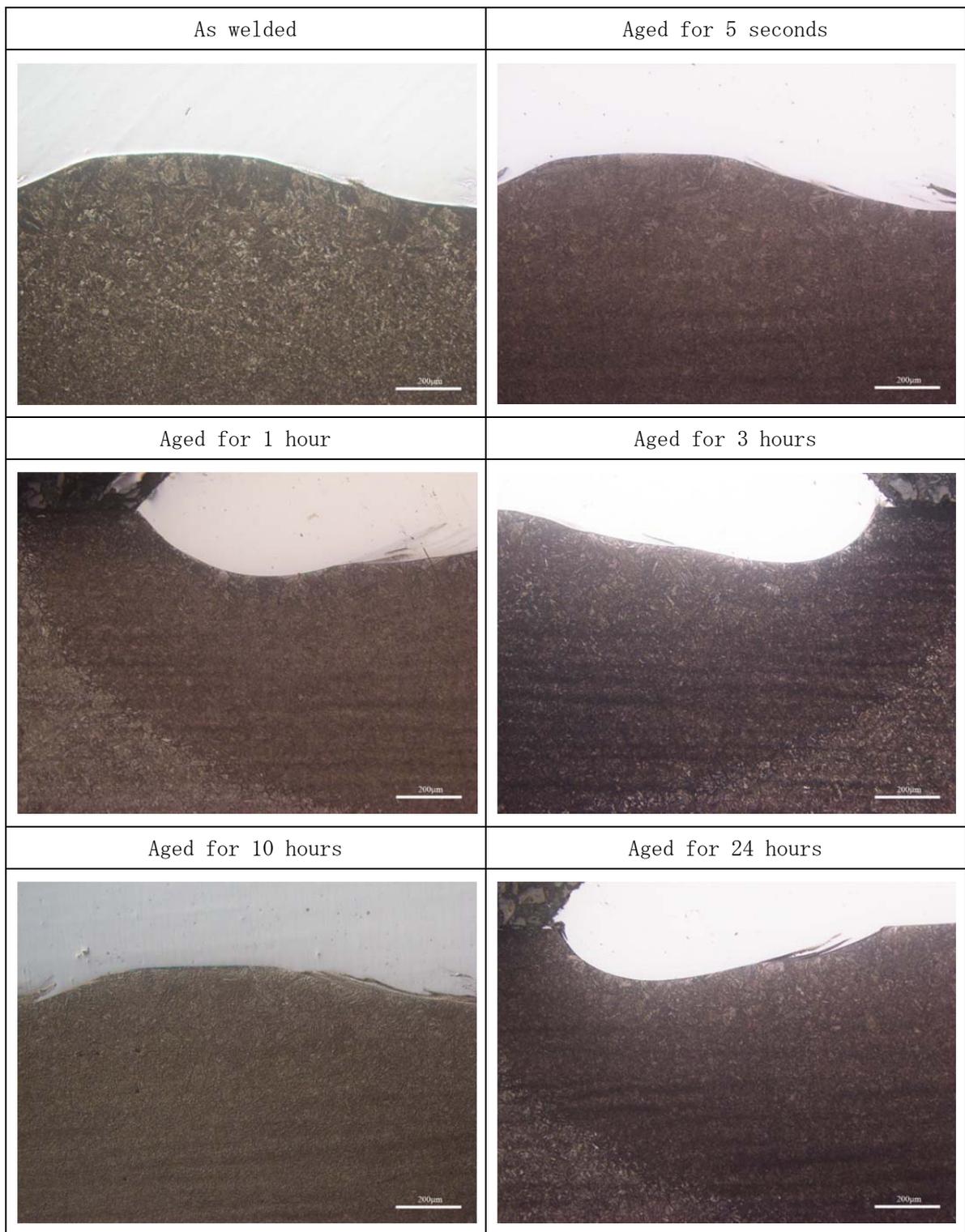


写真 3.3-7 レーザ肉盛溶接金属部の時効処理後 (PWHT) のマイクロ組織 (時効温度 : 500°C)

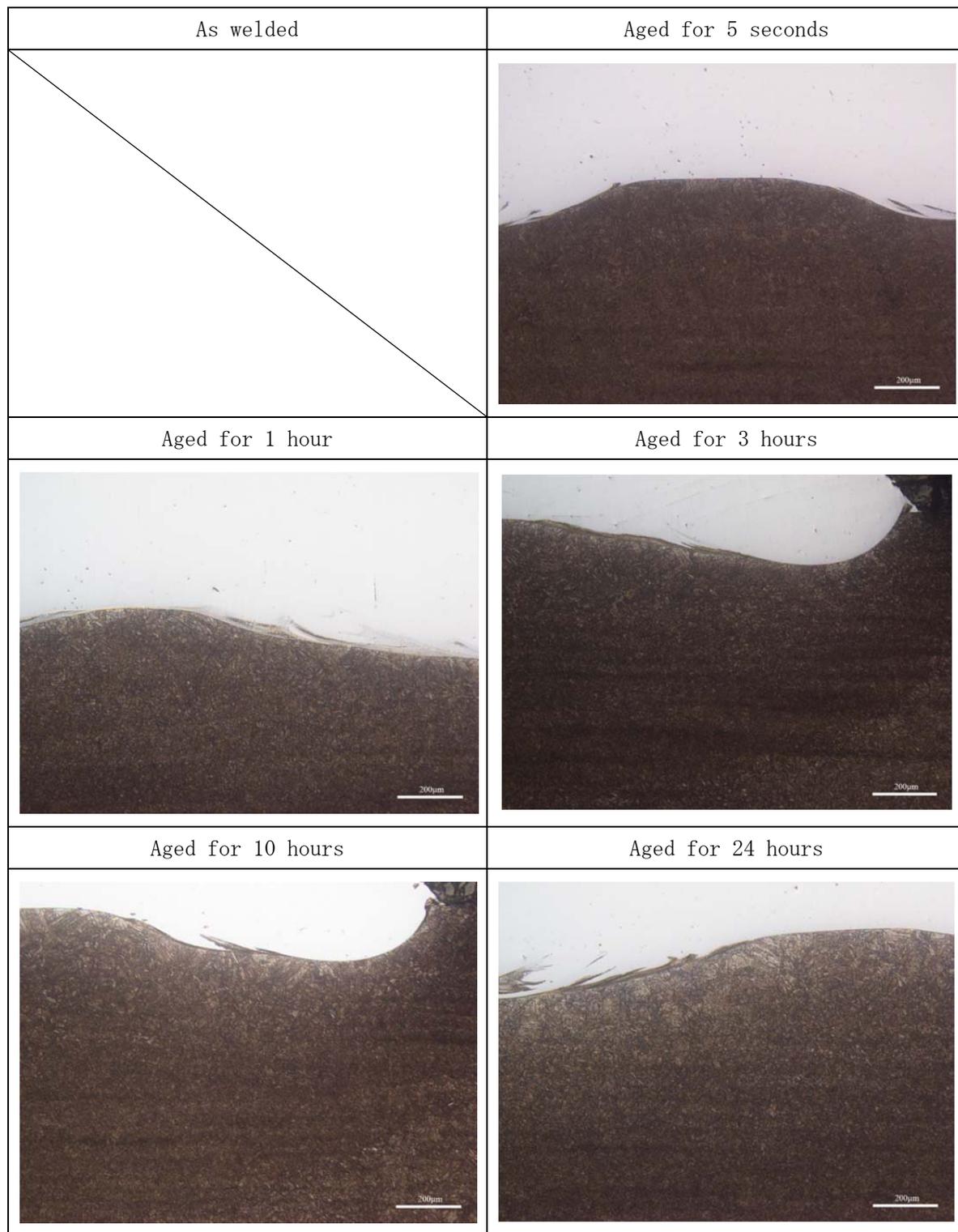


写真 3.3-8 レーザ肉盛溶接金属部の時効処理後 (PWHT) のマイクロ組織 (時効温度 : 550°C)

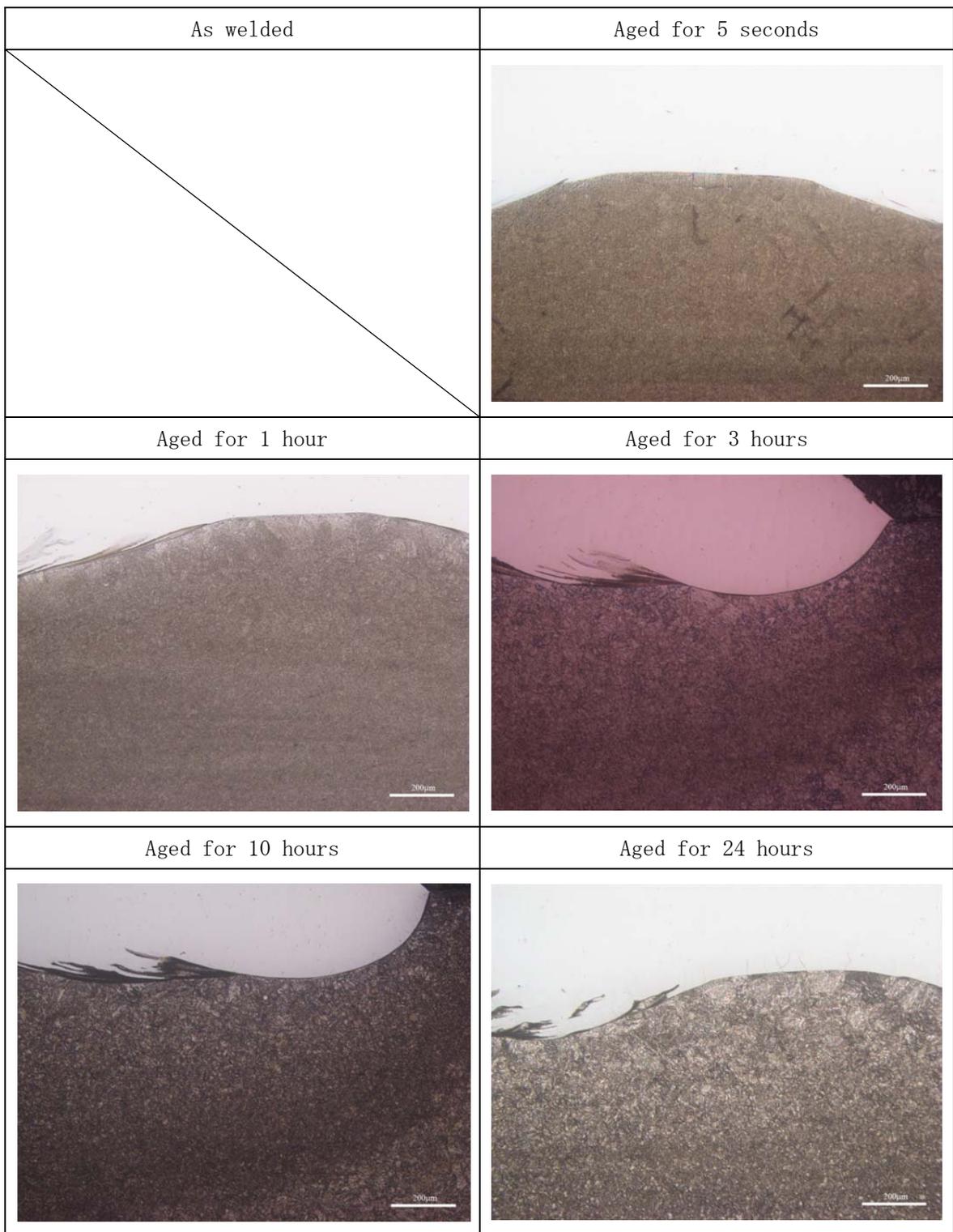


写真 3.3-9 レーザ肉盛溶接金属部の時効処理後 (PWHT) のマイクロ組織 (時効温度 : 600°C)

3.4. 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるとともに、実施計画等を協議するため打ち合わせを行った。

平成27年5月12日 福井工業大学

平成27年5月20日 大阪大学

平成27年5月26日 三菱総合研究所

3.5 まとめ・評価

本業務の4年間の結果についてまとめ、開発材の技術的適用性を評価した。

4. 平成 27 年度の成果のまとめ

原子力プラント安全性の向上に資するため、耐照射性と耐食性に優れた EHP 仕様の高 Cr-高 Ni 系の安定オーステナイト系ステンレス鋼（以後、EHP ステンレス鋼と呼ぶ）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の開発を実施した。

4.1 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。

4.2 開発材の環境適用性評価（再委託先：三菱総合研究所）

過年度の成果を踏まえて、 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した。また、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を評価した。

4.3 接合技術の評価選定

4.3.1 手法開発・評価試験（再委託先：大阪大学）

レーザクラッドによるEHPステンレス鋼被覆法の実機適用に向けた施工健全性および接合性能を評価し、適用性をまとめた。

4.3.2 接合技術解析評価（再委託先：福井工業大学）

EHP ステンレス鋼のレーザクラッド溶接部の組織学的評価を行い、実機適用における溶接部の健全性を検証した。評価試験では、試料作製装置を用いて試験片を準備した。