

## 課題目標・目的及び研究成果

研究開発課題名（研究機関名）： <div style="text-align: center;"> <b>次世代再処理機器用耐硝酸性材料技術の研究開発</b>                      （株式会社神戸製鋼所）                 </div>	
研究開発の実施者 機関名：(株)神戸製鋼所                      代表者氏名：中山準平 機関名：(独)原子力機構                      代表者氏名：井岡郁夫 機関名：(大)大阪大学                      代表者氏名：西本和俊 機関名：日本原燃(株)                      代表者氏名：高奥芳伸	
研究期間及び予算額：平成 17 年度～平成 20 年度（4 年計画）      1,494,316千円 平成 17 年度                      141,007 千円 平成 18 年度                      765,691 千円 平成 19 年度                      309,478 千円 平成 20 年度                      278,140 千円	
項 目	内 容
1. 目的・目標	<p>大幅高燃焼度や MOX 燃料等の酸化剤生成元素 Pu 及び MA（以下、総称して TRU と称する）や FP 濃度の高い使用済燃料に対応した次世代再処理や群分離プロセスに必要な強酸化性硝酸用オーステナイト系ステンレス鋼や Ni 基合金等を開発する。具体的には、合金中の不純物元素（C、O、N、P、S 等）の総量を 100ppm 以下とする超高純度 (Ultra High Purity : UHP) 仕様の中間製品を製造できる複合溶製技術や共材及び異材の溶接・接合技術を開発し、さらに実用環境での適応評価試験等を実施して、原子力用構造材としての基準化に必要な材料特性データを取得・整備する。</p> <p><b>【研究開発項目(1) UHP 合金設計と材料特性データの整備】</b></p> <p>① UHP 合金設計                      無粒界腐食型ステンレス鋼については、Fe/Cr/Ni の主要合金成分及び粒界腐食抑制のための不純物元素や Mn 等の有害元素の制御条件を選定する。                      高 Cr-W-Si 系 Ni 基合金については、主要合金元素 W、Si 等の組成範囲、構造材製造技術に必要な凝固・加工工程での高温割れ抑制の不純物制御条件を選定する。                      Nb 系合金については、機械的性質に有害な C、O、N 等不純物制御条件を選定する。</p> <p>② 材料特性データ整備                      再処理硝酸系での粒界腐食発生要因の微視的解析を含めて、耐食性、機械的性質及びクリープや疲労の耐久性試験データを取得し、原子炉規制法に基づく原子力用構造材の基準化に必要な材料特性データを整備する。</p> <p><b>【研究開発項目(2) 複合溶製法等の UHP 中間製造技術開発】</b></p>

① 複合溶製技術の開発

ステンレス鋼、Ni 基合金及びNb 系合金等の UHP 仕様構造材の製造技術として、低品位溶解原料を用いて主要不純物（目標：C+O+N+P+S $\leq$ 100ppm）やアルカリ金属等の有害元素を低減出来る真空磁気浮上誘導溶解方式の Ca ハライド還元精錬 [CCIM-CaF] 法とコールドハース（CHR 水冷銅製堰）方式の電子ビーム [EB-CHR] 法を組合せた複合溶製技術を開発するため、以下を実施する。

1) CCIM-CaF 溶製実験装置の開発

CCIM-CaF 溶製実験装置を設計、製作する。また、CCIM-CaF 還元精錬法により P、S、Pb、Bi 等の非揮発性不純物を効率的に除去する技術を開発する。

2) EB-CHR 溶製実験装置の開発

EB-CHR 溶製実験装置を設計、製作する。また、EB-CHR 溶製条件を最適化して前段の CCIM-CaF 法で除去困難な C、O、N やアルカリ金属 Na 等の揮発性不純物及び還元精錬による残留不純物 Ca の除去技術を開発する。

3) 複合溶製法の不純物除去能の評価

複合溶製法による不純物の除去能を実験及び性能評価モデルによる解析によって評価する。

② 中間製品製造技術開発

UHP 仕様の EB-CHR 鋳塊の形状や材料特性等と次世代湿式再処理機器用構造材の仕様や要求特性を考慮した熱間・冷間加工や熱処理及び製品形状に対応した溶接・接合継手に最適な製造工程を開発する。

【研究開発項目(3) UHP 仕様合金の溶接・接合継手技術の開発】

① 無粒界腐食型ステンレス鋼の溶接・接合継手技術の開発

高 Ni 化に伴う溶接割れや高温割れ発生等の抑制に必要な溶接材料中の P+S 等不純物の制御条件及び TIG 溶接施工条件を溶接継手の金属組織や成分偏析の微視的解析により明確にする。

② 高 Cr-W-Si 系 Ni 基合金の溶接・接合継手技術の開発

不純物による溶接割れ等に加えて、当該合金特有の金属間化合物生成に伴う溶接継手性能低下を抑制するため、溶接材料成分設計及び施工法を含めた TIG 溶接技術を最適化する。

③ Nb 系合金の溶接・接合継手技術の開発

高融点金属として現行再処理機器材料の Ti 合金や Zr 等と同程度の溶接施工条件を設定し、規格化に必要な溶接施工法を検討する。

④ 異材接合技術の開発

ステンレス鋼配管と Ni 基合金や Nb 系合金の異材接合法として、金属間化合物の生成抑制等を考慮した最適な接合法を開発する。

【研究開発項目(4) UHP 合金の硝酸環境適応性検討】

① 次世代湿式再処理機器用材料仕様の検討

高速増殖炉 MOX 使用済燃料等の次世代湿式再処理における硝酸プロセス機器の仕様を調査し、UHP 仕様合金への要求仕様や適応範囲等

	<p>を検討する。</p> <p>② UHP 合金の実用材料特性評価 閉じ込め機能や発火・爆発防止が要求される再処理用耐硝酸性機器の設計検討に必要なUHP仕様合金の適応性を実用環境模擬評価試験等により評価する。</p>
<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果</li> <li>・ 副次的な成果</li> <li>・ 論文、特許等</li> <li>・</li> </ul>	<p><b>【研究開発項目(1) UHP 合金設計と材料特性データの整備】</b></p> <p>[得られた成果]</p> <p>① UHP 合金設計 UHP 合金設計では、上記の三系統の合金の適用対象の再処理硝酸機器の要求仕様を念頭に、溶接継手を含めた機械的特性や耐食性の評価試験等と数値解析を実施して、最適な合金組成範囲や金属組織制御条件を選定した。</p> <p>無粒界腐食型ステンレス鋼では、JIS 規格の SUS310 系及び A800 系 (25Cr-35Ni) 鋼に関して、耐硝酸性の確保に必要な Cr 量を 25wt%Cr (24-28wt%) として、加工熱処理を含む熱履歴を考慮し、<math>\alpha</math> 相等の二次相の析出による脆化や耐食性低下を抑制するためのオーステナイト相の安定化に必要な Ni 量を、熱力学的平衡計算 (Thermo-Calc) と試作溶製材の金属組織観察により評価して、各々、19-26wt%と 35-38wt%を選定した。また、汎用のミルアニールの熱履歴でも高酸化電位の粒界腐食が十分に抑制できる不純物の制御条件を、コリオ腐食試験と統計解析により評価し、主要不純物 <math>C+O+N+P+S \leq 100\text{wpp}</math> の他の付帯条件として、<math>B \leq 0.5\text{wppm}</math>、<math>Mn \leq 0.05\text{wt\%}</math>、<math>Si \leq 0.05\text{wt\%}</math>を選定した。</p> <p>高 Cr-W-Si 系 Ni 基合金では、過不働態が生じ難い耐食性の担保と熱間加工性や溶接施工性の確保の双方から W と Si の合金量の最適化が重要であり、金属間化合物等の二次相生成挙動の数値解析と W と Si 濃度を変えた試作材の評価試験を実施して、30wt%Cr-(8-10)wt%W-(2-2.5) wt%Si の組成範囲を設定した。</p> <p>Nb-W 系合金は、高融点の bcc 金属特有の性質として、耐食性や機械的強度の改善のための合金元素量や、C、O、N 等の不純物の残留量に対応した延性低下や延性-脆性遷移温度 (DBTT) の上昇が課題であり、W 添加量や不純物の制限条件を試作溶製試験により評価した。現行の耐震性上の重要な制約となる DBTT の 0°C 以下の担保条件として、W 量を 5wt%(4-6wt%)、及び C、O、N の主要不純物を 0.015wt%以下に選定した。その選定材は、現行材の R-Zr と比較して、引張強度が若干低いクリープ強度が高いため、冷間加工材の適用を含めた機器設計で対応できる。</p> <p>② 材料特性データ整備 材料特性データ整備では、実用再処理機器としての許認可を念頭に、日本機械学会の「発電用原子力設備規格」に対応した新材料の要求特性項目を選定して、評価試験を実施した。評価対象材は、①の評価対象とした SUS310 系 (25wt%Cr-20wt%Ni) と A800 系 (25wt%Cr-35wt%) 系の無粒界腐食型ステンレス鋼、Ni-30wt%Cr-8-10wt%W-2-2.7wt%Si 系合金、及び Nb-5-10wt%W として、チェック分析、ミクロ組織観察、硬さ試験、常温及び高温引張試験、シャルピー衝撃試験、疲労試験、クリープ試験及び耐食性試験を実施して、原子力用構造材の標準規格や技術基準の策定に必要な材料特性デー</p>

タとして整備した。

**【研究開発項目(2)複合溶製法等のUHP中間製造技術開発】**

[得られた成果]

① 複合溶製技術の開発

i) CCIM-CaF 溶製実験装置の開発

整備した CCIM-CaF 溶製実験装置の運転・性能確認試験を行い、さらに、無粒界腐食型ステンレス鋼について、Fe 源に SUS スクラップなどの低品位の溶解原料を使用した場合の高レベル P、S 等の不純物除去技術などの溶製技術を評価・確立した。具体的には P、S、N、Sn などを除去する Ca 還元精錬と Si、B、Ca などを除去する真空酸化精錬を組合せた複合溶製試験を実施し、目標とする EHP 仕様合金 (P、S、N: 原料中数百 ppm レベルを機器分析限界 (<5ppm) 以下に低減、Si: 数千 ppm レベルを 100ppm 以下に低減、B: 50ppm を 1ppm に低減) を溶製しうる基礎技術を確認した。

ii) EB-CHR 溶製実験装置の開発

整備した EB-CHR 溶製実験装置の運転・性能確認試験を行い、さらに、高 Cr-W-Si 系 Ni 基合金及び Nb-W 合金について、矩形鋳型鋳造などにおける均質鋳塊の製造技術の評価・確立した。具体的には、酸化鉄 (焼結酸化鉄) を装入する超高真空脱 C 精錬溶製試験を実施し、CCIM-CaF 装置で溶製した鋳塊中の C 量 30~50ppm を 10ppm 以下に低減できることを確認した。また、鋳塊製造技術として従来の丸型鋳型の他に矩形鋳型を用いて鋳塊を溶製する EB 溶解技術開発を実施し、EB 溶解方式により複雑形状の鋳塊を溶製する基本技術が確立できた。

② 中間製品製造技術開発

i) 複合溶製法による UHP 仕様合金製品の特性評価

UHP 合金鋳塊から板材を製造した場合の総合性能の評価を実施した。SUS310Ti 系及び 25Cr-35Ni-Ti 系無粒界腐食型ステンレス鋼については、所望の熱間圧延板材を得ることが出来、組織観察、引張試験、シャルピー衝撃試験及び疲労試験を実施し、JIS 規格を満足することを確認した。また、耐食性評価として過不働態条件の厳しい腐食試験 (コリオ腐食試験) を実施し、粒界腐食が発生しないことを確認した。30%Cr-10%W-2.5%Si 系 Ni 基合金及び Nb-5%W 合金についても所望の熱間圧延板材を得ることが出来た。

次に、複合溶製時の C、Si、Mn、P、S 等の不純物元素の精錬制限値を見極めるため、不純物元素濃度の異なる無粒界腐食型ステンレス鋼の鋳塊を溶製し、耐食性評価試験を実施した。この結果から、粒界腐食を防止するための複合溶製時の不純物元素の精錬目標値として、以下を設定した。

(a) 第一条件: B 量 < 0.2ppm

(b) さらに、以下の制限が必要

C 量 < 0.004%

Si 量 < 0.25%

P 量 < 0.01%

なお、Mn 量: 3.0%でも粒界腐食なし

S 量: 0.01%でも粒界腐食なし

ii) 溶接・接合継手の評価試験

無粒界腐食型ステンレス鋼 (SUS310Ti 系及び 25Cr-35Ni-Ti) について、次世代再処理機器用構造材料として必要な溶接継手性能の評価試験を実施した。非破壊検査としての浸透探傷試験及び放射線透過試験の結果、いずれも有意な欠陥を認めず、JIS の規定を満足した。さらに、溶接継手の溶着金属のガス成分チェック分析、断面マイクロ組織観察、硬さ測定、常温引張試験、シャルピー衝撃試験、表・裏曲げ試験、疲労試験を実施し、規定値を満足した。コリオ腐食試験では、粒界腐食を起こさないことを確認した。

iii) 加工・熱履歴の評価試験

Nb-W合金の板材製造に必要な耐高温酸化性や温・熱間加工性に関するデータを取得した。Wが5wt%～10wt%の二元系Nb合金の試作材を板材に加工し、その母材及び溶接継手の材料特性を評価した。大気中の酸化挙動の評価から、温間圧延時の予熱温度は700℃が限界で、500℃以下を良好な範囲と選定した。引張試験では、試験温度によらず、伸びが約60%、絞りが約90%を示し、電子ビーム溶解の清浄化効果による良好な温・熱間加工性が確認された。溶接継手の施工性能では、現行再処理機器用のTIG溶接を適用して評価した。低W側の合金は、現行のR-Zr並の溶接継手性能を示したが、高融点金属材料なので施工性能の再現性が一層重要であり、電子ビームやレーザー等を施工条件に応じて適用することの有用性が示唆された。母材と同様に溶接継手も機械的強度の増大と共に、DBTTが上昇するので、低W合金を用いた適切な機器設計の必要性が示唆された。

【研究開発項目(3) UHP 仕様合金の溶接・接合継手技術の開発】

[得られた成果]

① 無粒界腐食型ステンレス鋼の溶接・接合継手技術の開発

25Cr-35Ni-Ti 系無粒界腐食型ステンレス鋼の溶接割れ (バレストレイン) 試験において発生した割れは、凝固割れと延性低下割れであると判断された。鋼中のP+S量が減少するに伴い、凝固脆性温度範囲 (BTR) および延性低下温度範囲 (DTR) は大幅に縮小した。各種オーステナイト系ステンレス鋼の BTR あるいは DTR を比較した結果、25Cr-35Ni-Ti 系ステンレス鋼において、低い高温割れ感受性を保障するためには、P+S量が約60ppm以下であることが望ましいものと推察された。また、25Cr-35Ni-Ti 系無粒界腐食型ステンレス鋼の TIG 溶接金属の再熱割れ感受性も十分に低いことが明らかとなった。さらに、25Cr-35Ni-Ti 系ステンレス鋼に対して La を適正に (本鋼種の場合は、約30ppm) 添加することにより、超高純度化された材料に対しても、高温割れのさらなる抑制効果が期待できることが明らかとなった。したがって、EHP ステンレス鋼は非常に優れた溶接性を有し、溶接施工技術を一変させる革新性を有することが明らかとなった。

② 高 Cr-W-Si 系 Ni 基合金の溶接・接合継手技術の開発

高 Cr-W-Si 系超高純度 Ni 基合金 (RW 合金) の溶接割れ試験において発生した割れは、すべて凝固割れであった。Si 量を低減させた RW 合金では凝固脆性温度範囲 (BTR) が縮小したが、依然として高い凝固割れ感受性を有することがわかった。また、凝固偏析によってセル境界に Si が著しく濃化することから、高 Cr-W-Si 系超高純度 Ni 基合金の高温割れ感受性を支配する主たる要因は、Si であると推察された。

③ Nb 系合金の溶接・接合継手技術の開発

Nb-5%W 電子ビーム溶接継手では、第二相の析出や溶接欠陥のない組織が得られた。溶接金属において結晶粒は著しく粗大化し、HAZ (heat affected zone) では再結晶によって組織が等軸化する様子が観察された。溶接金属が最も軟化し、HAZ もやや軟化することがわかった。Nb-5%W 電子ビーム溶接継手の伸びおよび絞りについては母材と同等であったが、引張強さについては約 75%程度の低い値にとどまることがわかった。Nb-5%W 電子ビーム溶接継手の上部棚エネルギー値および下部棚エネルギー値は母材と比べて低下した。母材の延性-脆性遷移温度が約 230K であるのに対し、電子ビーム溶接継手延性-脆性遷移温度は約 300K であった。これらのことより、Nb-5%W 電子ビーム溶接継手では靱性値が低下することがわかった。Nb-5%W レーザ溶接継手でも、溶接部の組織形態は電子ビーム溶接継手と類似することが明らかとなった。TIG 溶接継手の引張強さは電子ビーム溶接継手より約 11%下回った。HAZ 軟化の程度は TIG 溶接の方が顕著であり、HAZ 軟化域が電子ビーム溶接継手と比較して 5 倍以上に拡大することがわかった。

#### ④異材接合技術の開発

Nb-5%W と SUS304ULC の異材接合性について調査した。Nb-5%W/SUS304ULC 固相接合界面において、FeNb および  $Fe_7Nb_6$  からなる硬化層の形成が認められた。接合温度の上昇とともに引張強さが改善し、接合温度 1073K において最大引張強さ約 200MPa (Nb-5%W 母材の約半分程度の値) となったが、接合温度 1473K になると引張強さが低下した。継手の破断はいずれも界面に生成した Fe-Nb 系金属間化合物より生じた。界面生成層の成長とともに強度が上昇し、生成層厚さが約 8 $\mu$ m になると最大強度を示すが、それより成長すると逆に強度が低下する傾向が見られた。Nb-5%W/SUS304ULC、Nb-5%W/Ta および Ta/SUS304ULC 爆発接合界面では、爆発接合特有の波状の界面形態が観察された。Nb-5%W/SUS304ULC では界面にわずかな  $Fe_7Nb_6$  が形成するが、硬化は生じないことが確認された。Nb-5%W/Ta 界面における渦状の領域は Nb および Ta の固溶体により構成されており、硬化が生じないことがわかった。Nb-5%W/SUS304ULC 爆発接合継手は接合界面近傍の Nb-5%W 母材で破断し、せん断強さは母材強さとほぼ同等となった。Nb-5%W/Ta および Ta/SUS304ULC 爆発接合継手のせん断強さは Nb-5%W/SUS304ULC と比較してやや低い値を示すが Ta 母材で破断し、脆弱な Fe-Nb 系金属間化合物を全く形成しないことより信頼性の高い接合継手の実現できるものと判断された。

#### 【研究開発項目(4) UHP 合金の硝酸環境適応性検討】

[得られた成果]

##### ① 次世代湿式再処理機器用材料仕様の検討

- (1) 次世代湿式再処理において耐食材料として要求仕様を求めため、次世代湿式再処理における硝酸プロセスを調査し、次世代湿式再処理法の候補の内、腐食環境的に厳しくなるとされる簡素化溶媒抽出法／－処理量 200tU/y－ (平均燃焼度 15 万 MWd/t、4 年冷却) を選定した。
- (2) 選定したプロセスにおいて、腐食に影響を与える腐食性イオンとして知られている U, Pu, Np, Am, Ru, Rh, Pd, Ce を中心に工程毎の分布を調査した。調査のベースは実用化戦略調査研究の物質収支とし、

不足している情報は MIXSET-X を用いた計算により算出し、腐食性イオンの各プロセスにおけるマスバランスシートを作成した。

- (3) マスバランスシートから得られた腐食性イオンの濃度を考慮した上で、溶解槽、Pu/U 濃縮缶、高レベル廃液濃縮缶の 3 機器を腐食環境の厳しい機器として選定した。
- (4) 硝酸プロセス検討で得られた腐食環境における材料要求特性を調査するため、軽水炉再処理工場で幅広く用いられている耐硝酸性ステンレスである R-SUS304ULC 鋼に対し浸漬試験を実施した。結果として溶解槽条件での定常腐食速度は 2 mm/y 以上、Pu/U 濃縮缶条件での定常腐食速度も 1 mm/y 以上、高レベル廃液濃縮缶ホルマリン分解方式条件での定常腐食速度は 0.7 mm/y 程度、及び、減圧沸騰方式条件での定常腐食速度は 0.5 mm/y 程度である事が確認された。また、その腐食形態は粒界腐食優先型の全面腐食であった。
- (5) 浸漬試験の実施結果から、次世代再処理材料へ要求される仕様として、燃料分離精製系では現行材である R-SUS304ULC 鋼の 7~10 倍程度の耐食性が求められることを確認した。また、同様に廃液処理系では R-SUS304ULC 鋼の 3~5 倍程度の耐食性が求められることを確認した。

## ② UHP 合金の実用材料特性評価

項目①で検討した次世代湿式再処理条件を模擬した環境において、開発材である無粒界腐食型ステンレス鋼のうち 25Cr-35Ni-Ti 系、高 Cr-W-Si 系 Ni 基合金のうち 8W-2.4Si 系、及び、Nb-10W 合金がどの程度の耐食性能を有するかの確認試験を実施し以下の結果を得た。

- (1) 25Cr-35Ni-Ti は R-SUS304ULC の 3 倍程度の耐食性を示した。しかしながら、ホルマリン分解方式を想定した高レベル廃液濃縮缶条件では R-SUS304ULC と同等の耐食性しか示さなかった。
- (2) 高 Cr-W-Si は白金族を含まない環境では R-SUS304ULC の 10 倍以上の耐食性を示した。白金族を含む環境では R-SUS304ULC の 2~3 倍程度の耐食性を示すことが確認された。
- (3) Nb-W 合金は本研究で想定した溶解槽、Pu/U 濃縮缶、ホルマリン分解方式を想定した高レベル廃液濃縮缶、減圧沸騰方式を想定した高レベル廃液濃縮缶の各条件を模擬した全ての環境において腐食速度が 0.01mm/y 以下と優れた耐食性を示した。

これらの成果から、使用環境を適切に選定することにより、25Cr-35Ni-Ti は現行 R-SUS304ULC の代替として、高 Cr-W-Si は R-SUS310ULC の代替として、また、Nb-W 合金は Zr の代替として次世代再処理環境に十分適用可能であることを確認した。

## 【事業全体】を通して

「無粒界腐食型ステンレス鋼」の仕様は、当初、UHP 溶製技術と特殊な二段加工熱処理による金属組織制御の組合せが必要ではとの認識に立っていた。しかし、複合溶製法の不純物の除去能力の向上と、不純物元素の影響度解析による除去の目標値の明確化等により、通常の汎用鋼仕様のミルアニールの熱履歴でも無粒界腐食化が十分に達成可能となった。高 Cr-W-Si 系 Ni 基合金では、当初、高 Cr 高 Si 系のために従来は鑄造合金であり動的拡散接合のクラッド化程度が可能と考えていたが、合金成分の調整等により TIG 溶接でも現行の技術基準を満足する継手性能が得られ、適用範囲の拡大が可能となった。

一方、Mo 入りの SUS316L 鋼は、通常の熱履歴でも粒界反応による Mo の粒界偏析が生じ易く UHP 技術の適用性が懸念されたが、やはり高酸化電位での粒界腐食が抑制出来ず、軽水炉での高酸化電位での SUS316L の IGC や IGSCC の発生要因の裏付けが得られた。

「複合溶製法等の UHP 中間製品製造技術開発」では、CCIM を用いた Ca ハライド還元精錬により従来の溶製法では困難とされていた P が予想以上に除去可能なこと、さらに S や O、N、Sn、Pb 等が想定以下のレベルまで除去できることが明確となった。また、C は 0 とのブロードワールド平衡反応に支配され、双方の残留量のバランスが崩れると EB 溶解で残存した場合には除去が困難であることが課題となったが、CCIM に酸化精錬を導入することにより C の残留を防ぐことが可能となった。また、CCIM 精錬での還元剤 Ca の残留量を低くする精錬条件の最適化等により、EB 溶解での負荷が少なくできるようになった。それらにより、ステンレス鋼に対しては、上記の想定以上の高レベルの無粒界腐食型の鋼塊を定常的に溶製できることが確認できた。また、溶製材から、圧延板材、鍛造板材、管、溶接リヤ等の素材を試作し、従来の加工技術で問題なく成型加工できることが確認できた。さらに、UHP 素材を UHP 溶接リヤで溶接する試験も実施し、従来の溶接技術で問題なく溶接でき、工業規格を満足できることも確認できた。

「UHP 仕様合金の溶接・接合継手技術の開発」では、ステンレス鋼の超高純度化により、高 Ni 系鋼であっても、現行材では不可避とされた凝固割れが全く生じず、高温割れだけになる全く新しい知見が得られた。その成果として、共材溶接が適用出来るようになったことと共に、溶接補修技術として高熱負荷のレーザー溶接等を用いた補修技術の適用が可能であることが判り、現行の原子力用機器の現実的な補修技術等の適用範囲が広がった。

「UHP 仕様合金の硝酸環境適応性検討」では、高速増殖炉 MOX 使用済燃料を対象とした次世代湿式再処理プロセスでは、TRU や FP 等の酸化剤を形成し易い金属元素や触媒効果を持つ白金元素等の濃度が大幅に増大するため、現行の湿式再処理機器に比べて厳しい腐食環境となることを想定していたが、選定した簡素化溶媒抽出法の U 精製系の機器に対する模擬液腐食試験の結果、実際に、現行の主要材料の R-SUS304ULC 鋼の数倍以上の高耐食性が求められることが確認された。次世代再処理環境を模擬して素材及び溶接継手の腐食試験を実施した結果、極低炭素鋼等の従来材料に比べて数倍以上の耐食性を示すことを確認し、次世代再処理機器への適用性を明確にできた。これらに対応しうる手段として、UHP 化や W 及び Si のような造膜元素の複合添加により不働態～過不働態腐食域でも優れた耐食性を有する材料の実用化が挙げられる。そのためには、これらの溶製・構造材の製造技術及び溶接施工技術の開発が不可欠であり、本事業の必要性が再確認された。

これらの成果に基づき、日本溶接協会の委員会にて、UHP 仕様ステンレス継手の再処理機器への適用性を審議頂いた。この結果、UHP 仕様ステンレス継手を再処理機器に用いても、これまで国から提示されている通達等の再処理技術基準と矛盾することはなく、技術的に問題ないとの答申が出され、日本溶接協会の報告書として出版された。

以上、本事業によって、UHP 仕様合金を用いることにより、次世代再処理機器の最大の懸案事項であった硝酸環境下の腐食問題が解決



できる見通しが得られた。

今後は、実機を想定した構造部材としての技術開発と耐久性試験、及び実機環境で重要となる放射線作用境下の腐食試験等により実用性を明らかにしていきたい。

【論文、特許等】

- ① I. Ioka, C. Kato, K. Kiuchi, J. Nakayama, “Susceptibility of intergranular Corrosion for Extra High Purity Austenitic Stainless Steel in Nitric Acid”, 16th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16-48776, Florida, May 11-15 (2008).
- ② I. Ioka, C. Kato, K. Kiuchi, J. Nakayama, “Intergranular Corrosion for Extra High Purity Austenitic Stainless Steel in Boiling Nitric Acid with Cr(VI)”, Journal of Power and Energy System, Vol. 3, No. 1, pp. 31-37 (2009).
- ③ I. Ioka, J. Suzuki, T. Motoka, K. Kiuchi, J. Nakayama, “Influence of Impurities on Intergranular Corrosion of Extra High Purity Austenitic Stainless Steels”, 17th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17-75531, Brussels, July 13-16 (2009).
- ④ 井岡、鈴木、丸山、木内、中山、“再処理硝酸用高 Cr-W-Si 系 Ni 基 EHP 合金の最適組成域の検討”、日本機械学会関東支部第 15 期総会講演会、水戸、平成 21 年 3 月。
- ⑤ 井岡、米川、丸山、木内、中山、“再処理硝酸用 Nb-W 系 EHP 合金の最適組成域の検討”、日本機械学会関東支部第 15 期総会講演会、水戸、平成 21 年 3 月。
- ⑥ 井岡、鈴木、本岡、木内、中山、“超高純度オーステナイトステンレス鋼の粒界腐食に及ぼす不純物の影響”、日本原子力学会春の年会、東京、平成 21 年 3 月。
- ⑦ Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Yuto OKABE, Kentaro HATA, Kiyoshi KIUCHI and Junpei NAKAYAMA : “Hot Cracking Behaviour of High-Purity Type 310 Stainless Steels”, Welding in the World, 投稿中。
- ⑧ Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Yuto OKABE, Kentaro HATA, Kiyoshi KIUCHI and Junpei NAKAYAMA : “Hot Cracking Behaviours of High-Purity Type 310 Stainless Steels”, FABTECH International and AWS Welding Show 2008, Professional Program, October (2008), Las Vegas (USA).
- ⑨ Kazuyoshi SAIDA, Kentaro HATA, Kazutoshi NISHIMOTO and Junpei NAKAYAMA : “Hot Cracking of Type 310 High Purity Stainless Steels”, Proceedings of the 8th International Symposium of the Japan Welding Society, November (2008), Kyoto (Japan), p. 253.
- ⑩ Kazutoshi NISHIMOTO, Kazuyoshi SAIDA, Yuto OKABE, Kentaro HATA, Kiyoshi KIUCHI and Junpei NAKAYAMA : “Hot Cracking Behaviours of High-Purity Type 310 Stainless Steels”, IIW Intermediate Meetings, Doc. IX-H-698-08 & IX-H-682-08, November (2008), Kyoto (Japan).
- ⑪ Kazuyoshi SAIDA and Kazutoshi NISHIMOTO : “Weldability of Ultra High-Purity Stainless Steels”, The Inter-University Research

	<p>Seminar 2007, November (2007), Hiroshima (Japan).</p> <p>⑫ 才田, 西本, 木内, 中山, “SUS310 系超高純度ステンレス鋼の高温割れ感受性評価, -超高純度・高耐食合金の溶接性に関する研究 (1) -”, 溶接学会 平成 19 年度秋季全国大会 〈溶接学会全国大会講演概要 第 81 集 (2007) p. 98-99〉.</p> <p>⑬ 才田, 西本, 木内, 中山, “高純度化による SUS310 系ステンレス鋼の高温割れ感受性の変化原因, -超高純度・高耐食合金の溶接性に関する研究 (2) -”, 溶接学会 平成 19 年度秋季全国大会 〈溶接学会全国大会講演概要 第 81 集 (2007) p. 100-101〉</p> <p>⑭ 才田, 西本, 木内, 中山, “無粒界腐食型 25Cr-35Ni 系超高純度ステンレス鋼の高温割れ感受性, -超高純度・高耐食合金の溶接性に関する研究 (3) -”, 溶接学会 平成 20 年度春季全国大会 〈溶接学会全国大会講演概要 第 82 集 (2008) p. 148-149〉</p> <p>⑮ 才田, 西本, 木内, 中山, “超高純度オーステナイト系ステンレス鋼の高温割れ感受性”, 特殊材料溶接研究委員会資料 SW-07-09, (2009) 〈日本溶接協会〉</p> <p>⑯ 中山, ”次世代再処理機器用耐硝酸性材料技術の研究開発”, 原子力 Eye, Vol. 54, No. 3 (2008), P80</p> <p>⑰ 中山, 木内, ”超高純度ステンレス合金「EHP」”, 配管技術, No. 7, (2009), P8</p> <p>⑱ 中山, ”次世代原子力システム用超高純度ステンレス合金の開発”, 関西原子力懇談会, 大阪, 平成 21 年 1 月</p> <p>⑲ 日本溶接協会報告書, ”核燃料サイクル施設に適用する超高純度仕様のおーステナイト系 EHP ステンレス鋼の溶接施工技術に関して” JWES-EHP-0801 (2009)</p>
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実施計画の進捗</li> <li>・革新的なブレイクスルー</li> <li>・成果及び発展性</li> </ul>	<p><b>【実施計画の進捗】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・計画通りに実施できた、と評価できる。</li> </ul> <p><b>【革新的なブレイクスルー】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・期待以上の特性の材料が実現できることが明らかとなった。</li> <li>・適用分野は再処理だけにはとどまらずに、苛酷な環境に材料を晒す分野を抱える産業に広く適用できる可能性を持った研究開発で、ブレイクスルー的な要素はきわめて高い。</li> </ul> <p><b>【成果及び発展性】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・特別に新規な手法による研究開発ではないが、不純物を制御することにより、耐食性の高い材料開発を着実に進めていると評価できる。</li> <li>・再処理機器としての材料開発に大きな進展があった。同時に、それらは材料として他の原子力分野の過酷な条件下で使用の材料として大きな展開が期待される。</li> <li>・不純物除去メカニズム及びその定式化は、スケールアップの際に重要な技術要素であると思われる。</li> </ul>
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新しい材料で、原子力分野、他の分野への利用が期待できる。これについても積極的に取り組んでほしい。</li> <li>・規格基準等への反映もされ、実用的な成果として適切にフィードバックされている。</li> <li>・規模の拡大と、これに伴う新たな課題を解決することが必要となる</li> </ul>

	う。課題を十分に整理しながら研究開発を進めることを期待する。
--	--------------------------------