

# 先進再処理機器用の超高純度(EHP) ステンレス鋼の開発

井岡 郁夫<sup>1)</sup> 木内 清<sup>2)</sup> 中山 準平<sup>\*\*</sup>

## 1. はじめに

我が国は国内資源が乏しいこともあり、資源をできるだけ効率よく使っていかねばならない。原子力エネルギー利用においても、ウラン燃料を1回のみ燃焼させて廃棄するよりも、使用済み燃料から利用可能なウランやプルトニウムを回収再利用して、最大限有効活用していく必要がある。そのため重要な設備が再処理施設である。再処理施設においては、沸騰状態の濃硝酸を用い、酸化性の強い核分裂生成物(FP)などを含有するために極めて厳しい腐食環境になることが知られている。海外での腐食事例の解析や国内で昭和52年(1977年)より運転を続けている東海再処理施設におけるトラブルの経験を経て、ステンレス鋼中の不純物元素の影響が明らかにされ、六ヶ所再処理施設用に極低C, P, SのSUS304ULC鋼が開発・実用化されてきた<sup>(1)</sup>。

ところで、今後のエネルギー需要を考えると、近々開始されるMOX(ウランとプルトニウムの混合酸化物)燃料の使用に対応した先進再処理施設が必要となる。先進再処理施設では、現行のものよりも多くのFP等を含有する使用済み核燃料を扱うことが予測され、腐食環境はますます厳しいものになる。そのために、現行のSUS304ULC鋼に比べて、数倍以上の耐硝酸腐食性に優れる鋼材が必要となる。これまでの数多くの研究成果より、再処理環境でのステンレス鋼の腐食は粒界腐食であり、その主因は粒界に析出した非金属介在物であることが知られている<sup>(2)</sup>。そのため、ステンレス鋼の高

純度化は自明の結論ではあるが、実機適用を前提とすると、数百トンの工業生産が可能な製造法に基づいた材料開発が必須となる。

本報では、実機製造プロセスと材料の成分範囲を同時に考慮して、先進再処理機器用材料を目的とした、強酸化性環境で優れた耐食性を有する超高純度(EHP: Extra High Purity)<sup>†</sup>ステンレス鋼を開発したので紹介する。

## 2. 現状と問題点

現行の再処理施設においては、使用済み燃料を溶解させる強酸化性の沸騰硝酸環境では金属ジルコニウム等の耐食合金が使用され、減圧により硝酸の沸点を低下させ酸化力を弱めた沸騰環境ではステンレス鋼が使用されている。ステンレス鋼は、不動態電位域ではCr主体の保護性の高い酸化膜により優れた耐食性を示すが、腐食電位が高くなるとともに粒界腐食が生じやすくなり、過不動態遷移電位以上では激しい粒界腐食を起こす。粒界腐食低減を目的に採用した減圧条件においても、蒸気加熱部でこの電位に到達し、SUS304ULC鋼に粒界腐食が生じることを明らかにした<sup>(3)</sup>。粒界腐食は、C, P, S, Si等の不純物元素化合物の結晶粒界での偏析が主因であるため、これらの不純物を実用レベルの極限まで取り除く超高純度化により、材料本来の耐食性が発現できると考えて基礎研究を実施してきた。

さらに、実用化には低廉化と品質保証が担保できる商用規模の溶製技術が必要であり、ステンレス鋼の新しい複合溶製技術とそれに基づいた最適成分範囲を併せて検討し、EHPステンレス鋼を開発した。

## 3. 開発技術

現行の真空二重溶解(真空アーク溶解+真空高周波溶解)鋼では、セラミックス製のルツボからの不純物の混入により高純度化が妨げられるので、開発する新溶製技術ではルツボからの汚染を抑制できるコールドクルーシブルを採用し、磁気

\* 日本原子力研究開発機構

1)原子力エネルギー基盤連携センター サブリーダー

2)原子力基礎工学研究部門 嘱託

\*\* 株式会社神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー次長  
Development of Extra High Purity Stainless Steel for  
Advanced Reprocessing Process; Ikuo Ioka\*, Kiyoshi Kiuchi\*,  
Junpei Nakayama\*\*(\*Japan Atomic Energy Agency. \*\*Kobe  
Steel, LTD.)

† EHPは、神戸製鋼所の登録商標である。

2009年11月25日受理

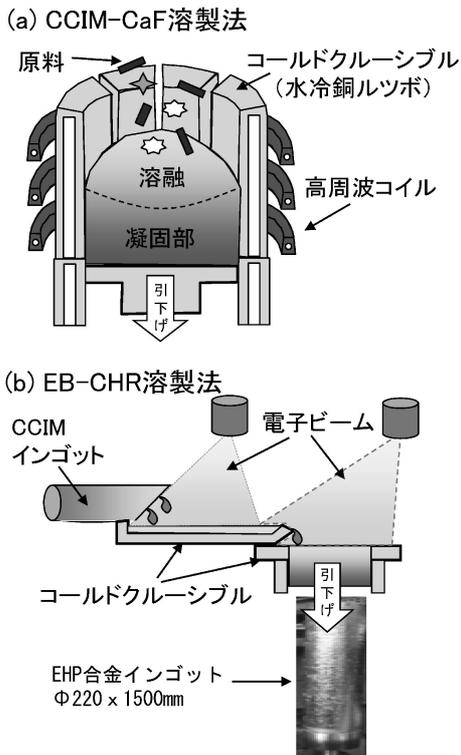


図1 超高純度ステンレス鋼の複合溶製法.

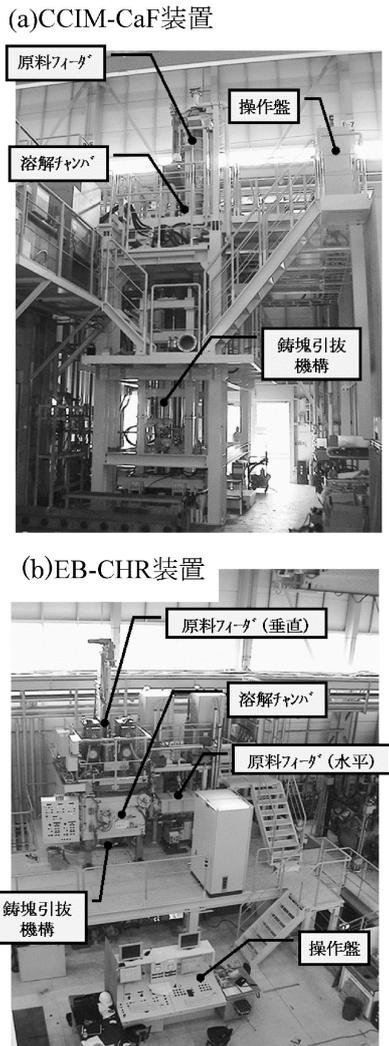


図2 CCIM-CaF装置とEB-CHR装置の外観.

浮遊により壁面との接触を極力低減した。また、原料中のPやSなどの不純物は、フッ化カルシウムにより除去する還元精錬法を適用した。さらに、揮発性不純物を効率的に除去するとともに、還元精錬法で残留しやすいCaを除去するため、高真空で、十分な溶湯表面積を確保できる2種類の水冷銅ハースを装備する電子ビーム溶解法を組み合わせた。

試験装置は、実用製造プロセスへの展開を考慮して、直径200 mm以上、重量数百 kgのインゴットが製造でき、かつ連続铸造が可能な構造を前提として設計・製作した。

上記の目標をもとに開発した複合溶製技術は、図1に示すように前段のコールドクーシブル高周波誘導溶解-CaF還元精錬法(CCIM-CaF)と後段のコールドハース電子ビーム溶解法(EB-CHR)からなる<sup>(4)</sup>。

図2には、今回製作した複合溶製試験装置の外観を示す。その規模は、前段のCCIM-CaFの高さで約10 m、後段のEB-CHRの高さで約7 mである。

#### 4. 開発材の特性

再処理硝酸環境を模擬した沸騰硝酸中でのコリオ腐食試験(1 g/lの6価Crを含む8規定沸騰硝酸中で、24時間毎4回浸漬)の結果を図3に示す。

試験片は、開発したEHPステンレス鋼(310EHP)、比較のための現行SUS304ULCとSUS310ULCである。各材料の化学組成を表1に示す。310EHPの腐食速度は、SUS304ULCに比べ5分の1以下に、SUS310ULCに比べ半分に低減できた。図4に腐食試験後の試験片の表面状態を示す。SUS304ULC、SUS310ULCでは、粒界腐食が認められたが、310EHPでは部分的な粒界腐食が認められたものの、優れた耐粒界腐食性を示し、EHP化の有効性を確認した<sup>(5)(6)</sup>。

また、EHP化は溶接割れの要因であるP、Sも低減できるので、溶接割れ抵抗性の改善も期待できる。310EHPの溶接割れ抵抗性の評価も実施した。図5に、310系のトランスバレストレイ試験結果を示す。310EHPでは、凝固割れがほとんど認められなかった<sup>(7)</sup>。従来は、Mn等の添加元素の使用により溶接割れ抵抗性を向上させ耐食性を犠牲にしていたが、310EHPでは、母材と同組成の溶接材を用いる共材溶接が可能である。

#### 5. 実用化の状況と特許

本複合溶製技術により、原材料に原子力級のスクラップを

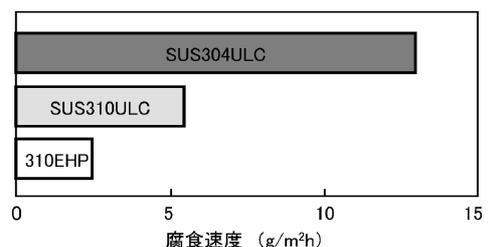


図3 コリオ腐食試験結果.

表 1 開発材と現行材の化学組成 (mass%).

材 料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	B/ppm
SUS304ULC	0.010	0.39	1.10	0.011	0.0010	10.6	18.1	0.12	2
SUS310ULC	0.005	0.18	1.24	0.005	0.0010	20.2	25.9	—	<10
310EHP	0.0006	0.0013	0.0001	0.0004	0.0002	21.7	24.5	0.0003	0.1

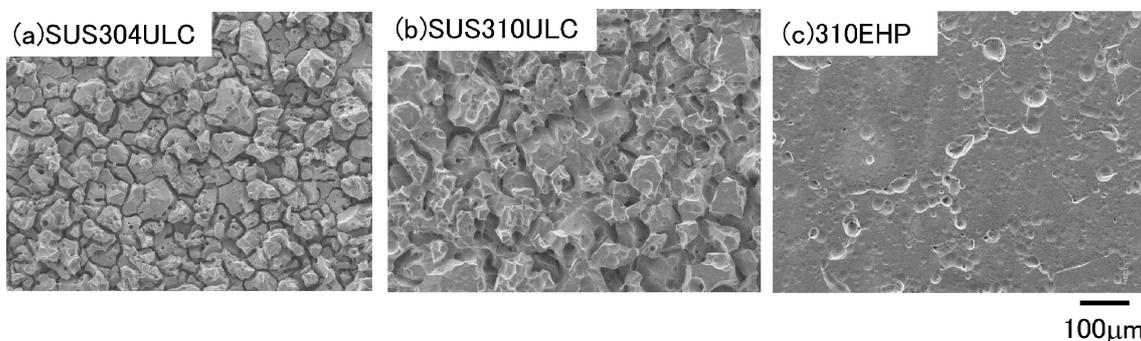


図 4 コリオ腐食試験後の表面状態.

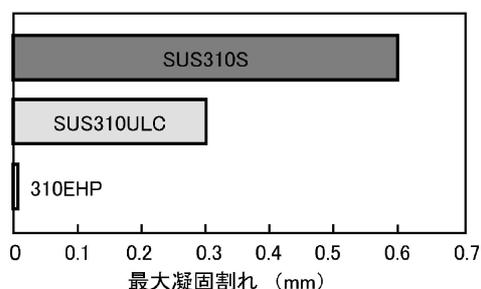


図 5 凝固割れ感受性の不純物依存性.

使用して実用製造プロセスに繋がる約 500 kg (直径 220 mm, 長さ 1500 mm) の試験インゴットを安定的に溶製し, EHP ステンレス鋼の実用化の目処を得た. 製造した材料は, 不純物量が 100 ppm 以下に抑えられ, コリオ腐食試験により再処理施設用鋼材として優れた耐粒界腐食性を有することも確認した.

実際に先進再処理機器用材料として適用するには, いくつかの規格・標準等に反映させていく必要があるために, 現在各種学協会への働きかけを進めている. 一例として, 日本溶接協会に申請した結果では, EHP ステンレス鋼の共材溶接が適用可能であることが判断された<sup>(8)</sup>.

また, 現行再処理施設への EHP ステンレス鋼の適用においても, 粒界腐食の抑制により, 寿命の延伸と機器の信頼性

の確保を容易にすることが可能となるため, 現行再処理施設の一部の代替機器用構造材としての適用を念頭に, 310EHP の実用特性データの取得・評価を進めている. 海外では再処理機器用の高性能ステンレス鋼の技術開発はほとんど実施されておらず, 今後の使用機器に関して, 英国や仏国では EHP ステンレス鋼の適用に興味を示しており, EHP ステンレス鋼が, 海外でも適用される状況になりつつある.

本件に関する特許は, 3 件である.

本開発技術は, 文部科学省の原子力システム研究開発事業の研究開発課題「次世代再処理機器用耐硝酸性材料技術の研究開発」の成果を含みます<sup>(9)</sup>. 関係各位に謝意を表します.

## 文 献

- (1) 住谷 寛: 原子力工業, **38**(1992), 55.
- (2) 日本原子力学会編: 次世代再処理技術の課題, (1991).
- (3) 木内 清: 日本原子力学会誌, **31**(1989), 229.
- (4) 中山準平: 原子力 eye, **54**(2008), 60.
- (5) 木内 清: 日本原子力学会誌, **48**(2006), 47.
- (6) I. Ioka, C. Kato, K. Kiuchi and J. Nakayama: J. Power & Energy Systems, **3**(2009), 31.
- (7) 木内 清, 井岡郁夫: 原子力 eye, **55**(2009), 54.
- (8) 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, JWES-EHP-0801 (2009).
- (9) 中山準平: 原子力システム研究開発事業平成20年度成果報告会[資料集], 科学技術振興機構, CD-ROM, (2009).