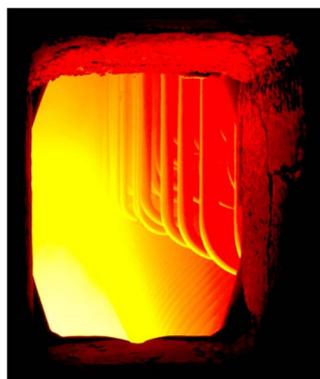


A-USC(700°C級先進超々臨界圧発電)ボイラ向け 材料開発の取り組み

Materials Development for A-USC Boiler



齋藤 伸彦*1
Nobuhiko Saito

駒井 伸好*2
Nobuyoshi Komai

住吉 泰生*3
Yasuo Sumiyoshi

竹井 康裕*4
Yasuhiro Takei

北村 雅樹*4
Masaki Kitamura

東海林 剛*5
Tsuyoshi Tokairin

石炭火力の高効率化技術として有望な700°C級A-USC(Advanced Ultra Super Critical)ボイラの実現には、従来ボイラよりも大幅に高い温度に耐えうる高強度Ni基合金や先進フェライト系鋼の開発・検証が不可欠である。これまでに長時間クリープ破断強度および製造技術の検証ほか、水蒸気酸化特性および石炭灰による高温腐食特性の評価を行い、必要な強度や耐食性を有し、耐圧部の製作の問題がないことが確認できた。2015年5月から既設ボイラに伝熱管パネルを追設し、A-USCボイラ模擬環境下で検証を行なっている。今後、保守技術として、クリープ損傷評価技術や非破壊検査技術の開発も進め、A-USCボイラの早期実現を目指していく。

1. はじめに

発電設備のCO₂排出量と燃料費の抑制の観点から、経済産業省主催の協議会によって取り纏められた『次世代火力発電に関わる技術ロードマップ』⁽¹⁾にて、発電設備の高効率化を進め、環境負荷を低減する方針が打ち出されている。石炭火力においては、蒸気温度を700°Cまで高めたA-USC(Advanced Ultra Super Critical)の実現が高効率化のための重要技術として位置づけられている。このような状況の中、日本国内では、2008年度より経済産業省の補助事業として、700°C級A-USCボイラの開発プロジェクト(以下、国プロ)が進められている。プロジェクトには、国内の主要メーカ・研究機関((株)IHI, (株)東芝, 富士電機(株), 新日鐵住金(株), ABB日本ベレー(株), 岡野バルブ製造(株), 東亜バルブエンジニアリング(株), (国)物質・材料研究機構, 三菱日立パワーシステムズ(株), 三菱重工業(株))が参画しており、協調して開発が進められている。当社は中核メンバーとして本プロジェクトに参画し、A-USCボイラ用材料の特性検証のほか、製造性の検証を行なってきた。さらに、共同で既設ボイラに伝熱管パネルを追設し、A-USCボイラ模擬環境下で検証を行なっている。ここでは、これまでに当社が取り組んできたA-USCボイラ材料の開発・検証成果について紹介する。

2. A-USCボイラの概要

A-USCボイラは、埋蔵資源が豊富な石炭を燃料とした汽力発電技術であり、従来の石炭焚ボイラの最終蒸気温度を更に100°C高めたものである。そのため、ボイラの基本構成は従来ボイラと

*1 技術統括本部総合研究所材料研究部

*2 技術統括本部総合研究所材料研究部 主席研究員 工博 技術士(金属部門)

*3 三菱日立パワーシステムズ(株)エンジニアリング本部電力計画部 主幹技師

*4 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術部ボイラ開発部 主席技師

*5 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術部ボイラ開発部 主席技師 工博

同じであり、発電所の周辺設備なども大きな変更がなく、大半がそのまま適用できると考えられる。そのため、急激に増加している経年石炭火力のリプレース需要への活用が期待されている。また、海外の石炭火力にも容易に適用でき、世界レベルで CO₂ 削減に貢献できる石炭有効利用技術の一つである。

図1に 100 万 kW 石炭火力プラントの CO₂ 排出量の比較を示す⁽¹⁾。従来の超々臨界圧火力(USC:Ultra Super Critical)に比べて、A-USC では CO₂ 排出量を約 12%低減できる。また、USC と比べて 10%(相対値)近くの効率向上が期待できることから、将来予想される二酸化炭素の貯蔵(CCS:Carbon Dioxide Capture and Storage)との組合せにおいても高効率を維持することができる。更に、開発された超高温材料は、石炭火力のみならず、今後益々の高温化が進む GTCC(Gas Turbine Combined Cycle)プラントのボトムサイクル(蒸気タービン、排熱回収ボイラ)にも適用可能であり、その技術的な拡がりについても注目が集まっている。

図2に A-USC プラント基本構成図⁽²⁾を、図3にボイラ機器の構成材料⁽³⁾を示す。高温強度特性および耐食性などの観点から、蒸気温度が 700°C以上となる伝熱管、主蒸気管および再熱蒸気管には、耐熱性に優れる Ni 基合金の適用が計画されている。また、高価な Ni 基合金の使用量を減らし、経済性を向上させるため、蒸気温度 650°C以下の主要配管には、可能な範囲で先進フェライト系鋼を適用する計画である。

以上述べたとおり、A-USC の実現化のためには 600°C超で使用する Ni 基合金や先進フェライト系鋼の開発と検証のほか、製造法の確立が重要である。



図1 100 万 kW 石炭火力プラントの CO₂ 排出量の比較⁽¹⁾

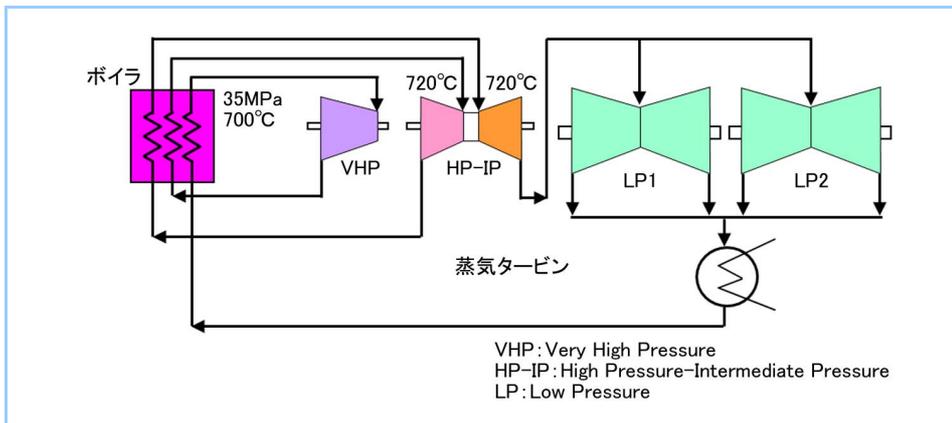


図2 A-USC プラント基本構成図⁽²⁾

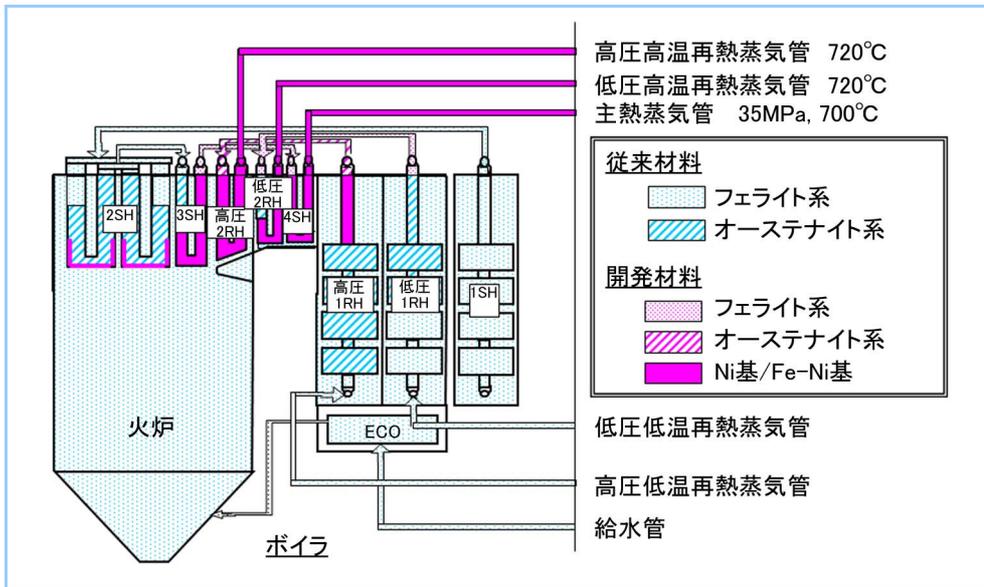


図3 ボイラ機器の構成材料⁽³⁾

3. ボイラ要素技術開発

A-USC ボイラ向け候補材料の選定のため、ボイラ要素技術開発として、耐圧部の製造技術開発のほか、クリープ強度検証や耐食性の評価を行なった。

3.1 候補材料

表1に A-USC ボイラ用候補材料を一覧にして示す。Ni 基合金においては、国内で開発された HR6W⁽⁴⁾、HR35⁽⁴⁾および Alloy141⁽⁵⁾に加え、欧米で A-USC 候補材料として評価実績のある Alloy617、Alloy263 および Alloy740 の計6合金を候補材とした。このうち、優れた加工性と高温強度特性を有する HR6W、HR35 および Alloy617 は厚肉大径管候補である。伝熱管にはこれら3合金に加え、 γ' 相 (Ni₃(Al, Ti) の金属間化合物) の析出量を増加させて更なる高強度化を図った Alloy263、Alloy740 および Alloy141 も候補材としている。先進フェライト系鋼は、従来の改良 9Cr-1Mo 鋼に対し、Co や B の添加により高温強度の改善と溶接熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) のクリープ強度低下の抑制などを考慮して開発された高 B-9Cr 鋼、低 C-9Cr 鋼および SAVE12AD の3鋼種 (いずれも国内開発材) を対象とした。図4に各種試験に供試した材料の外観を示す。板材、小径管および大径管の大半は国内の素材メーカーにて製作されたが、Alloy617、Alloy141、Alloy263 および Alloy740 の小径管については、海外素材メーカーからも調達し、各種試験に供試した。

表1 A-USC ボイラ候補材料の一覧

材料呼称		組成	厚肉大径管	小径管
HR6W	Ni 基	45Ni-23Cr-7W	・高温部管寄せ連絡管 ・主蒸気管 ・高温再熱蒸気管	・高温部伝熱管
HR35	Ni 基	50Ni-30Cr-4W-Ti		
Alloy617	Ni 基	Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al		
Alloy263	Ni 基	Ni-20Cr-20Co-6Mo-2Ti-Al	—	
Alloy740	Ni 基	Ni-25Cr-20Co-2Nb-2Ti-Al	—	
Alloy141	Ni 基	Ni-20Cr-10Mo-2Ti-Al	—	
高 B-9Cr 鋼	先進フェライト系鋼	9Cr-3W-3Co-Nb-V-B	・管寄せ ・連絡管 (約 650°C まで)	・伝熱管 (従来高 Cr 鋼と同程度の温度領域)
低 C-9Cr 鋼	先進フェライト系鋼	0.035C-9Cr-2.4W-1.8Co-Nb-V		
SAVE12AD	先進フェライト系鋼	9Cr-3W-2.6Co-Nb-V-B		

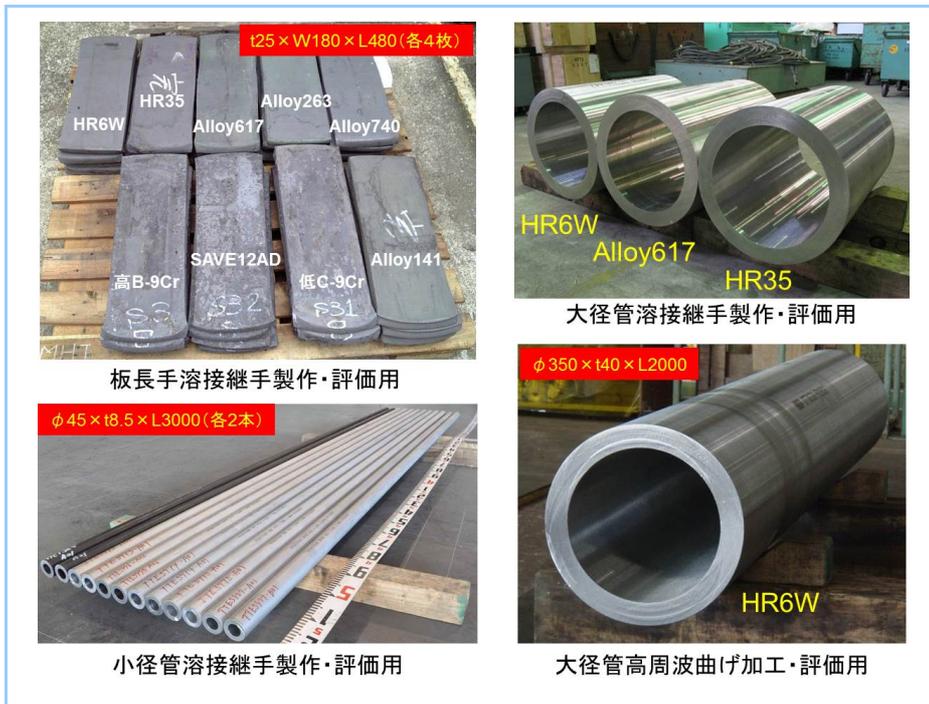


図4 供試材の外観

3.2 製造技術の確立

(1) 溶接技術

小径管の溶接は狭開先の自動GTA(Gas Tungsten Arc)溶接にて行い、溶接材料は共金系を使用した。また、Ni基合金は溶接まま、先進フェライト鋼は溶接後熱処理を施して、各種材料特性の評価に供試した。溶接継手部の金属組織は一般的な組織を呈しており、硬さ分布にも異常は認められなかった。また、機械的特性も概ね素管と同等の特性であり、良好な特性を有していた。

3合金の大径管の溶接は狭開先の自動GTA溶接にて行い、HR6Wのみ現地溶接も考慮し、被覆アーク溶接にて行った。溶接材料および溶接後熱処理の条件は小径管と同じとした。なお、試験にはφ350×t40mmの大径管を用いた。図5にHR6W大径管の全姿勢自動GTA⁽⁶⁾および被覆アーク溶接施工状況を一例として示す。溶接後の断面組織調査の結果、Alloy617溶接継手のHAZ部において、微小な割れが認められた。この割れは発生時期や形態などから、高温割れと推察され、素材メーカーと共同でボロンなどの微量成分の添加量を減じるとともに、溶接入熱を考慮して、施工条件の最適化を行なった。その結果、再製作したAlloy617の溶接継手において高温割れを抑制することに成功した⁽⁷⁾。溶接継手部の材料特性については、いずれの材料も良好な結果が得られ、実機適用の目途を得た。

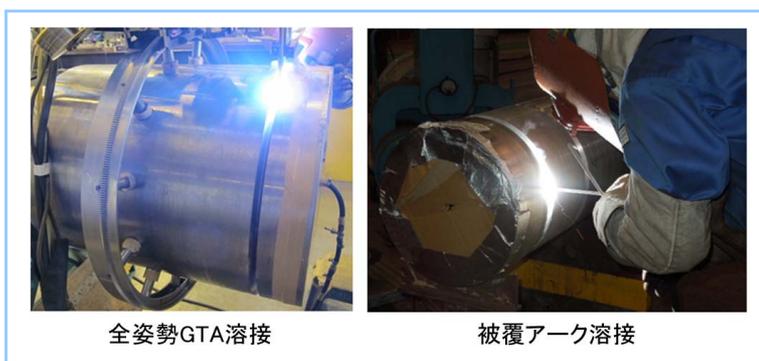


図5 HR6W大径管の溶接施工状況

(2) 曲げ加工技術

ボイラ過熱器管、再熱器管には各種曲げ加工が必須であるので、従来の工作基準に従って曲げ加工を試みた。ここで、曲げ加工は、冷間曲げおよび熱間曲げの2種とし、冷間曲げおよび熱間曲げ半径はそれぞれ2.5D(Dは管外径)および1.5Dとし、曲げ加工後は、Ni基合金は素管と同じ条件にて再固溶化熱処理を、先進フェライト鋼(SAVE12ADのみ)は再焼ならし・焼戻し熱処理を実施した。

曲げ加工後の外表面に異常は認められず、加工性も良好であった。曲げの頂部における横断面の扁平率や曲げ外側の肉厚減少率は、一般にボイラ用鋼管の曲げ加工で経験される範囲内にあり、特に問題なかった。また、曲げ加工部の引張、圧縮および中立部の位置の組織および硬さ等は概ね素管と等しく、これらの特性は良好と判断された。

大径管の曲げ加工試験には $\phi 350 \times t40\text{mm}$ のNi基合金(HR6WとAlloy617)および先進フェライト鋼(SAVE12ADのみ)の厚肉鋼管を使用した。本曲げ加工試験も、従来鋼と同様の方法、具体的には高周波によって局所的に円周状に加熱しながら、ローラを介して管を押し曲げた。図6に曲げ半径4DでのHR6W大径管の曲げ加工状況を示す。曲げ加工後は、Ni基合金(HR6WとAlloy617)は素管と同じ条件にて再固溶化熱処理を、先進フェライト鋼(SAVE12AD)は再焼ならし・焼戻し熱処理を行い、種々材料特性の調査を行った。いずれの材料特性も素管のそれにはほぼ等しく、曲げ加工後に適切な再熱処理を行なうことで、素管と同等の材料特性に戻すことができた。

(3) モックアップ製作

開発した製造技術の検証を目的に、HR6Wにて過熱器および再熱器出口管寄せ管台と過熱器伝熱管パネルのモックアップを製作した。ここで、過熱器および再熱器の出口管寄せは、700MW級A-USCボイラを想定し、管寄せ母管部の寸法はそれぞれ $\phi 558.8 \times t138\text{mm}$ および $\phi 635 \times t72\text{mm}$ とした。また、管寄せ部に放射線検査筒管台および温度計保護筒も設置した。図7に過熱器出口管寄せ管台モックアップの外観と管寄せ中央部に設けた円周溶接部の縦断面マクロ組織を示す。t138mmの肉厚を有する円周溶接部に割れなどの溶接欠陥は認められず、健全な溶接継手が製作できた。モックアップの製作を通じて、ここで採用した溶接および曲げ加工技術の実機構造物への適用性が検証できた⁽⁷⁾。



図6 HR6W大径管の曲げ加工状況

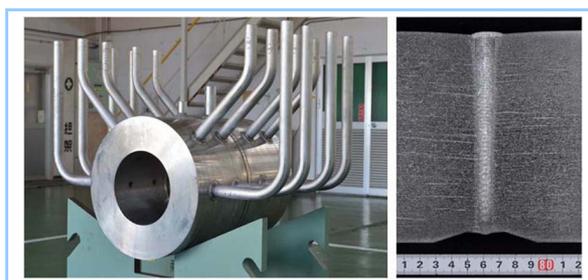


図7 HR6W過熱器出口管寄せ管台モックアップの外観および円周溶接部の縦断面マクロ組織

3.3 再熱割れ感受性評価技術

日本に先駆けて実施された欧州の実缶試験ではAlloy617配管溶接部に割れが発生した事例があり⁽⁸⁾、これは溶接部の残留応力が運転時に緩和する際に発生する割れと考えられる。一般的にNi基合金は従来ボイラの主要配管に適用されているフェライト系鋼に比べ、凝固割れや上述した再熱割れが発生しやすいと考えられ、十分な検証が必要であるが定量的な評価法が存在しなかった。そこで、Ni基合金の各候補材料の再熱割れ感受性の評価法として、溶接残留応力を模擬して、三点曲げによってひずみを付与した試験片を、そのまま運転時の温度である700℃まで加熱保持し、割れ発生有無を定期的に確認することで、再熱割れ感受性を評価する方法を開発した⁽⁹⁾。

初期ひずみ付与量は残留引張応力の大小に相当するので、小さな初期ひずみ量で、早期に割れが発生する材料ほど、再熱割れ感受性が高いと判断できる。さらに、割れ発生までに生じたクリープひずみを FEM 解析にて求めて、初期ひずみとクリープ歪みの関係線図を作成することで、実機溶接部の再熱割れの発生リスクを定量評価することが可能である。また、本手法を用いることで、最適な対策(溶接後熱処理など)の効果の評価も可能である。

3.4 長時間クリープ強度検証

A-USC ボイラの配管や管寄せ管台はクリープを考慮した設計が必須である。そのためには母材はもちろんのこと、溶接継手部や曲げ加工部、さらに溶接金属部のクリープ強度検証が重要である。以下に溶接継手部の検証結果について述べる。

(1) 板溶接継手

ボイラ材料の許容引張応力の指標となる 10 万時間のクリープ破断強度の検証を目的に、各候補材料の溶接継手部の長時間クリープ試験を実施中である。図8に一例として Ni 基合金候補材料の板溶接継手の 700°Cにおけるクリープ破断特性および断面マクロ組織を示す⁽¹⁰⁾。700°Cのクリープ破断強度は Alloy263, Alloy740 および Alloy141 が他に比べて高く, Alloy617, HR35, HR6W の順に低くなっている。試験温度が更に高い場合には、これら合金間の強度差は小さくなる傾向が認められた。従来, Ni 基合金では高強度フェライト系耐熱鋼溶接部で報告されているような HAZ での破壊によるクリープ強度低下は報告されていなかったが、溶接部の長時間クリープ破断試験によって、一部の Ni 基合金においては、HAZ 破断を呈すものが認められたため、10 万時間試験の継続による溶接継手強度の検証が重要であると考えられる。

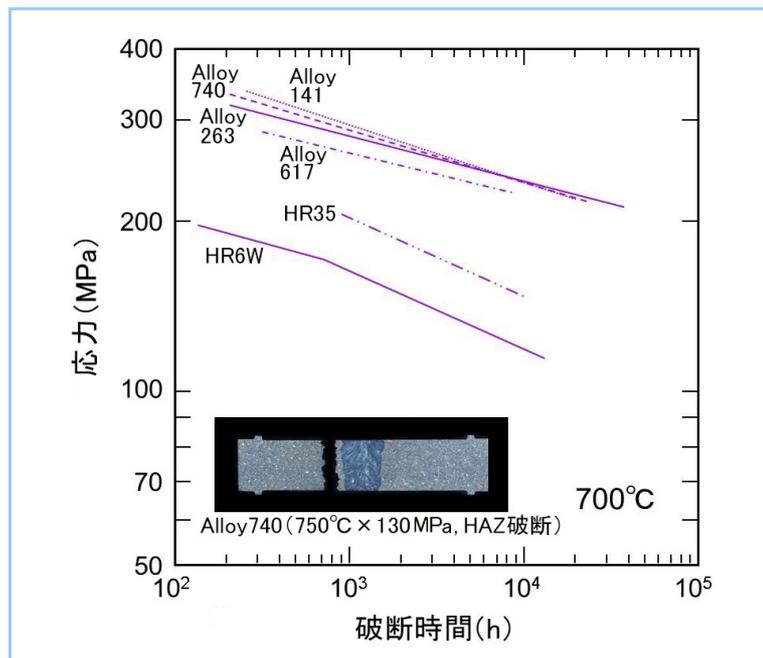


図8 Ni 基合金板溶接部のクリープ破断特性および断面マクロ組織

(2) 大径管溶接継手

図9に HR6W 大径管溶接継手のクリープ破断特性を母材と比較して示す。また、図9とは別に国プロ以外で取得した小径管継手データを含めてクリープ破断試験の最長評価時間は7万時間に達している⁽⁶⁾。本材料では、溶接継手部のクリープ強度はいずれの温度領域(700°C~800°C)においても母材部と同等以上の特性を示している。また、破断データの外挿によって求めた700°C×10万時間のクリープ破断強度は国プロの目標強度である90MPa以上を満足する見込みである。先進フェライト系鋼についても第一候補材料である SAVE12AD 大径管溶接継手の約3万時間のクリープ破断データを取得済みで、10万時間の試験データを取得すべく継続実施中である。

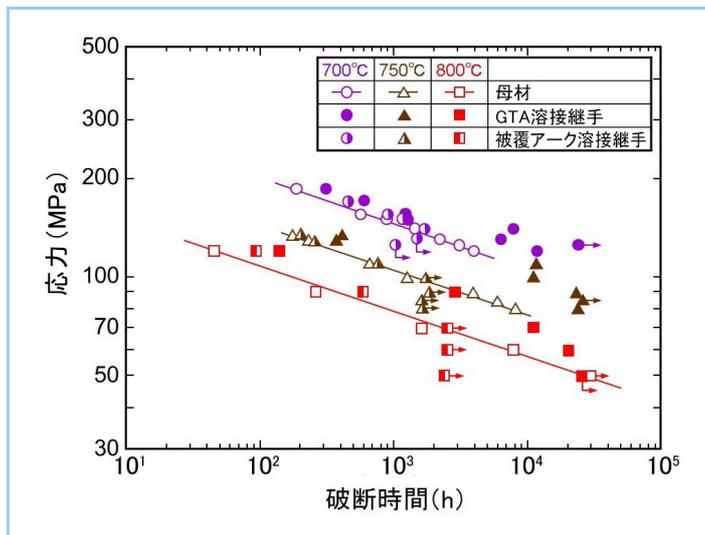


図9 HR6W 大径管溶接継手のクリープ破断特性

3.5 水蒸気酸化と高温腐食特性評価

高温伝熱管および配管の内面には、過熱蒸気との反応により水蒸気酸化スケールが生成し、伝熱障害でメタル温度が上昇してクリープ損傷が加速し、また、剥離スケールの堆積による管閉塞や蒸気タービンのエロージョンなどの問題が生じることがある。A-USC ボイラ候補材の Ni 基合金では、想定使用温度が従来鋼より高い 700℃以上の高温域であり、且つ現用のオーステナイト系ステンレス鋼に比べて添加元素が多く、スケール成長速度や性状について不明点が多い。そこで、高温水蒸気環境下での実験室試験により、Ni 基合金候補材の水蒸気酸化特性について検討した。

試験は、反応管内に試験片を設置し、所定温度の高温蒸気中に暴露して行った。高温水蒸気は N₂ ガスにより溶存酸素を低減させたイオン交換水を電気炉で過熱して生成させた。試験温度は 700, 750 および 800℃の3条件で、最長1万時間まで実施した。試験後には、スケール成長挙動は断面スケールの内層平均厚さ、スケール性状は組成分析により評価した。図 10 に水蒸気酸化特性として、供試材の1万時間試験後の水蒸気酸化スケール(内層)の平均厚さを示す⁽¹¹⁾。A-USC ボイラ高温部相当の 700 および 750℃の水蒸気環境下では、Ni 基合金のスケール厚さは、材料間の顕著な差は認められず、何れも約5 μm 程度であった。現用オーステナイト鋼の 25Cr 鋼(火 SUS310J1TB)に比べてスケール厚さは薄く、耐水蒸気酸化性に優れるといえる。800℃では、1万時間データで比較した場合、HR6W 以外の Ni 基合金の方が 25Cr鋼よりもわずかにスケール厚さが厚い傾向が認められたが、何れも 10 μm程度であり、実用上の問題はないと考える。

配管に比較して、火炎に直接晒(さら)される伝熱管においては、管外面の温度は管内部の蒸気温度に比べさらに高く、最終過熱器や再熱器の伝熱管においては、最高 750~800℃に達することが想定される。一般に Ni 基合金は耐食性に優れているものの、このような温度域では高温での酸化に加えて、石炭灰による高温腐食が懸念される。そこで、種々の石炭燃料性状を考慮した高温腐食試験によって、既存材との高温腐食特性の比較を行なった。試験は標準合成灰(1.5molNa₂SO₄+1.5molK₂SO₄+1.0molFe₂O₃)を用い、塗布法にて、SO₂ 濃度 0.20Vol.%のガス中で実施した。ここで、試験温度は 650℃および 700℃としたが、これはこの温度領域で石炭灰が溶融し、特に腐食が激しいためである。試験後には、外観観察のほか、スケール除去後の重量変化を評価した。

図 11 に高温腐食特性として、供試材の Cr 含有量と腐食試験における平均単位重量減の関係を示す⁽¹²⁾。ここで、Cr 含有量は各材料の耐食性を支配する主要構成元素であり、単位重量減は腐食による減肉量を示す値である。Cr 含有量が大いほど、腐食減量は小さくなり、Cr 含有量の

多い Ni 基合金は耐食性も良好であった。650℃と比較して、700℃では同一 Cr 含有量でも、Ni 基合金の方がオーステナイト系ステンレス鋼よりもわずかに腐食減量が多い傾向が認められた。これは SO₂ ガス中の S と Ni の反応性が高いことや腐食生成物の溶融により腐食が促進されるためと推測されるが、それでも既存のオーステナイト系ステンレス鋼の 650℃(USC 曝露環境相当)における耐食性と大差ないことから、実用上の問題はないと判断される。

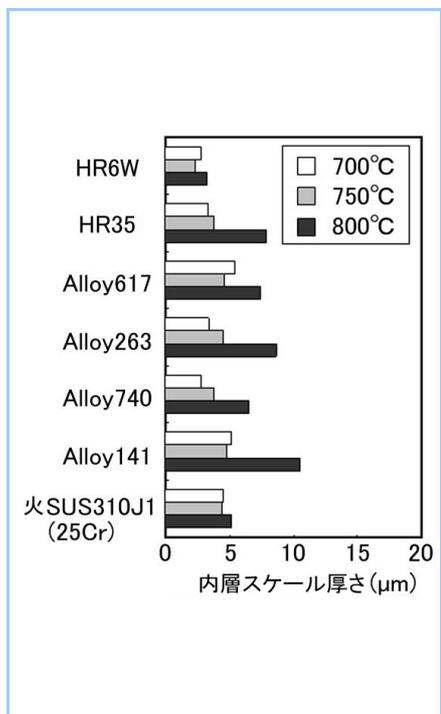


図 10 水蒸気酸化特性

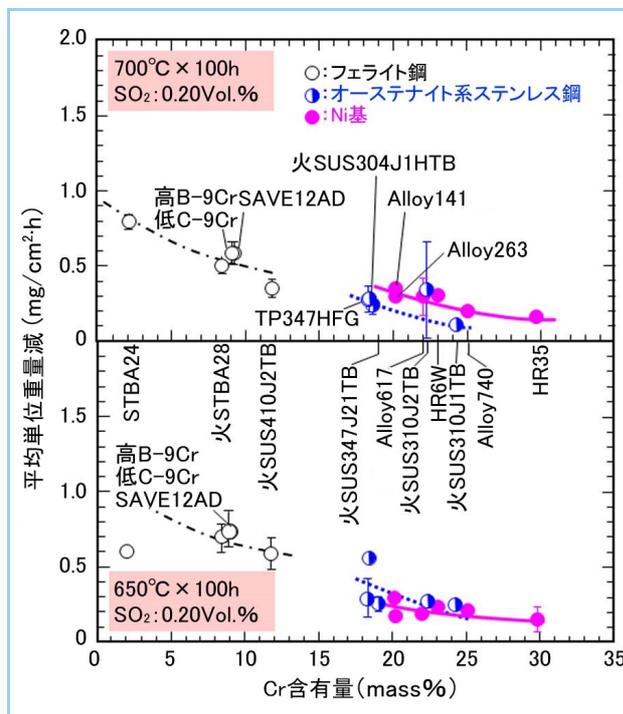


図 11 高温腐食特性

4. 実機検証試験への取り組み

候補材料や開発した製造技術を検証するため、2015 年5月から福岡県大牟田市の(株)シグマパワー有明 三川発電所の協力を得て、実機検証試験を開始した。本試験では、実機ボイラに伝熱管パネルを追設し、管寄せ管台、配管、高温弁およびタービンケーシングなどと共に、700℃ 蒸気環境下で運転を行っている。伝熱管パネルには、A-USC 候補材料の HR6W, HR35, Alloy617, Alloy263 および Alloy740 の他、比較材として既存のオーステナイト系ステンレス鋼の火 SUS304J1HTB および火 SUS310J1TB を挿入している。また、配管は全て HR6W であり、当社で製作した円周溶接継手と熱間曲げ加工部も試験材として挿入している。この他、HR6W 製の高温弁や Alloy625 製のタービンケーシングも挿入されている。

図 12 に HR6W 配管の実機挿入状況を示す。本試験は約1万時間継続する計画であり、試験終了後は抜管調査を行い、耐食性および種々材料特性の経年変化データを採取し、A-USC ボイラ材料の健全性を確認する予定である。

実機検証試験と平行して、配管候補の Ni 基合金の保守技術として、クリープ損傷評価技術と非破壊検査技術の開発を開始した。クリープ損傷評価法については、Ni 基合金のクリープ損傷に伴う素過程や破壊形態の調査を行うと共に、クリープ中途止め材に対して、既存の寿命評価法であるボイド法や硬さ法の適用性検討を行っている。また、非破壊検査技術に関しても、超音波の難透過材である Ni 基合金に対する適用性の検討を進めている。今後、これら技術の開発を進め、実用化していく予定である。この他、耐用温度 800℃の Ni 基合金として、高強度化と熱間加工性を両立させた USC800 を開発・実用化中⁽¹³⁾であり、今後の更なる蒸気温度上昇のニーズに対応可能な材料開発にも取り組んでいく。

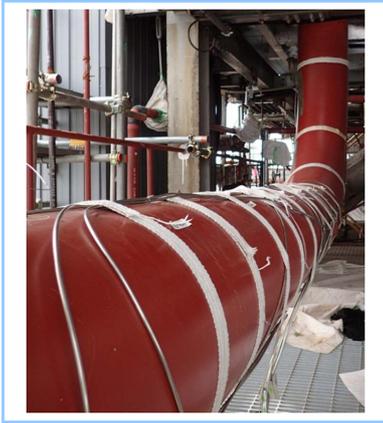


図 12 HR6W 大径管の実缶試験挿入状況

5. まとめ

石炭火力の高効率化の重要技術である A-USC ボイラの実現のため、ボイラ材料の実用化研究として、製造技術の確立、長時間クリープ強度検証および高温腐食と水蒸気酸化特性の評価を行い、実機適用の目途を得た。長時間クリープ強度検証は、10 万時間のクリープ破断強度を検証するため継続して評価していく。さらに、2015 年5月から実機検証試験を開始し、A-USC ボイラ材料の健全性の検証に取り組んでいる。今後、保守技術として、クリープ損傷評価技術や非破壊検査技術の開発も進め、A-USC ボイラの早期実現を目指していく。

参考文献

- (1) 経済産業省, 次世代火力発電に係る技術ロードマップ中間とりまとめ(案), (2015)
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/004_01_00.pdf
- (2) 中村真二ほか, A-USC (700°C級先進超々臨界圧発電)の技術開発と展望, 三菱重工技報 Vol.48 No.3 (2011) p.8~15
- (3) Fukuda, M. et al., Advanced USC Technology Development in Japan, Proceedings of Seventh International Conference Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, (2014) p.24-40
- (4) Semba, H. et al., Development of Fe-Ni and Ni-base Alloys without γ' Strengthening for Advanced USC Boilers, Proceedings of 9th Liege Conference on Materials for Advanced Power Engineering, (2010) p.360-370
- (5) 青木宙也ほか, Ni 基超合金 USC141™ の 700°C 級 A-USC ボイラーチューブへの応用, 日立金属技報 Vol.30 (2014) P.8~16
- (6) Tokairin, T. et al., Metallurgical Investigation of Orbital Narrow Gap HST Weldment of Ni based Alloy Pipe, Proceedings of 13th international Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, (2015)
- (7) Saito, N. et al., Fabrication trials of Ni-based alloys for advanced USC boiler application, Proceedings of Seventh International Conference Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, (2014) p.190-201
- (8) Schmidt, G. et al., Component Test Facility for a 700° C Power Plant, COMTES700, (2012)
- (9) Saito, N. et al., Evaluation of Reheat Cracking Sensitivity in Ni-based Alloy for Advanced USC Boilers, Proceedings of the 11th International Conference Advanced High-Temperature Materials Technology for Sustainable and Reliable Power Engineering (123HiMAT-2015), (2015)
- (10) Komai, N. et al., Evaluation of Creep Rupture Strength in Ni-based Alloy Weldments for an Advanced USC Boiler, Proceedings of Seventh International Conference Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, (2014) p.903-913
- (11) Shimizu, M. et al., Steam oxidation properties of candidate materials for 700° C A-USC boilers, 2nd EPRI-NPL Workshop on Scale Exfoliation From Steam-Touched Surfaces National Physical Laboratory, (2012)
- (12) Tanaka, Y. et al., Hot Corrosion Properties of Ni-based Alloys used in an Advanced-USC Boiler, Proceedings of Seventh International Conference Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, (2014) p.1422-1431
- (13) Imano S. et al., Development and Trial Manufacturing of Ni-base Alloys for Coal Fired Power Plant with Temperature Capability 800° C, Proceedings of Seventh International Conference Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, (2014) P.202-214