

# 700°C級 A-USC ボイラ実証のための実缶試験結果

## Result of Boiler Component Tests for 700°C A-USC Plant

大熊喜朋	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 基本設計部 主幹
青木裕	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 技師長
室木克之	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 基本設計部 主幹
高井幸心	調達企画本部調達エンジニアリング部 主査
久布白圭司	技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 主査 博士（工学）

石炭火力の CO<sub>2</sub> 排出量削減対策の一つとして、当社では 700°C 級先進超々臨界圧 (A-USC) 火力発電ボイラ技術の開発を実施してきた。A-USC は火力発電設備の蒸気条件を高めることにより、発電端効率の向上を実現するものであり、既存火力発電設備の延長線上に位置する技術であるため、ほかの CO<sub>2</sub> 排出量削減技術と比べて開発要素が少ないという利点がある。A-USC ボイラ開発の集大成として石炭焚き商用機に試験伝熱面を挿入し、700°C 蒸気を導入する実缶試験を実施し、2016 年には約 13 000 h の試験運転を完了した。抜管した試験伝熱面の評価を実施した結果、問題がないことを確認した。

700°C Advanced-Ultra Super Critical (A-USC) technology, developed by IHI, is one of the solutions for reducing CO<sub>2</sub> emissions from coal-fired power plants. A-USC is achieving higher efficiency by raising the steam parameters of the plant to reduce CO<sub>2</sub> emissions. Since raising the steam temperature is an extension of the conventional technologies, the A-USC solution has the advantage of less development tasks compared to other solutions. Pursuing A-USC technology development, the demonstration test loop of 700°C-class verification test loop was installed in a commercially operated coal-fired boiler and testing in which the steam temperature exceeded 700°C has already been completed in October 2016. Total operating hours has reached approximately 13 000 hours and various testing for sample tubes has been conducted.

## 1. 緒言

経済性に優れ、世界各地で産出される石炭は、各国で火力発電用燃料として広く用いられている。我が国のエネルギー政策においても、3E+S<sup>(1)</sup>の観点から引き続き重要な電源として位置づけられており、経済産業省が 2015 年度に策定した長期エネルギー需給見通し<sup>(2)</sup>では 2030 年度における総発電電力量のうち 26%程度は石炭火力が担うとしている。ただしパリ協定をはじめとした地球温暖化対策として CO<sub>2</sub> 排出量の削減は必須であり、上記の前提として石炭火力の高効率化と CO<sub>2</sub> 排出量の削減が求められている。

我が国では、石炭火力発電の発電端効率の向上を目的に、世界に先駆けて蒸気温度の向上を実現させてきた。1990 年代には、まず超々臨界圧 (Ultra Super Critical: 以下、USC) 条件の再熱蒸気温度で 593°C を実現し<sup>(3)</sup>、2009 年には再熱蒸気温度は 620°C に到達した。2020 年には 630°C に到達する見込みである。

石炭火力のさらなる高効率化を実現する方法として、

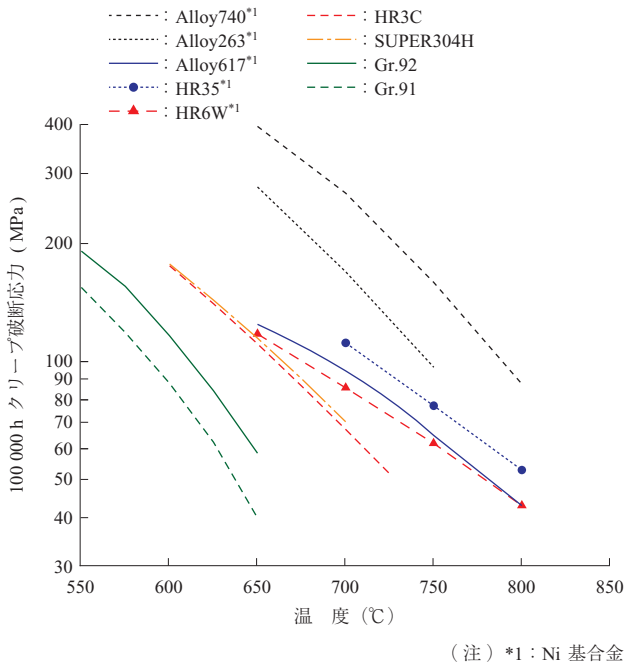
700°C 級先進超々臨界圧 (Advanced-Ultra Super Critical: 以下、A-USC) 発電技術が注目されている。現状商用機の最高条件である主蒸気 600°C 級 USC 技術の蒸気温度を主蒸気・再熱蒸気 700°C 級まで上げることで、送電端での発電効率を相対値で 10% 程度上昇させることが可能となる (CO<sub>2</sub> 排出量で 10% 程度の削減に相当) 技術である。

## 2. A-USC 技術について

### 2.1 A-USC 技術の特徴

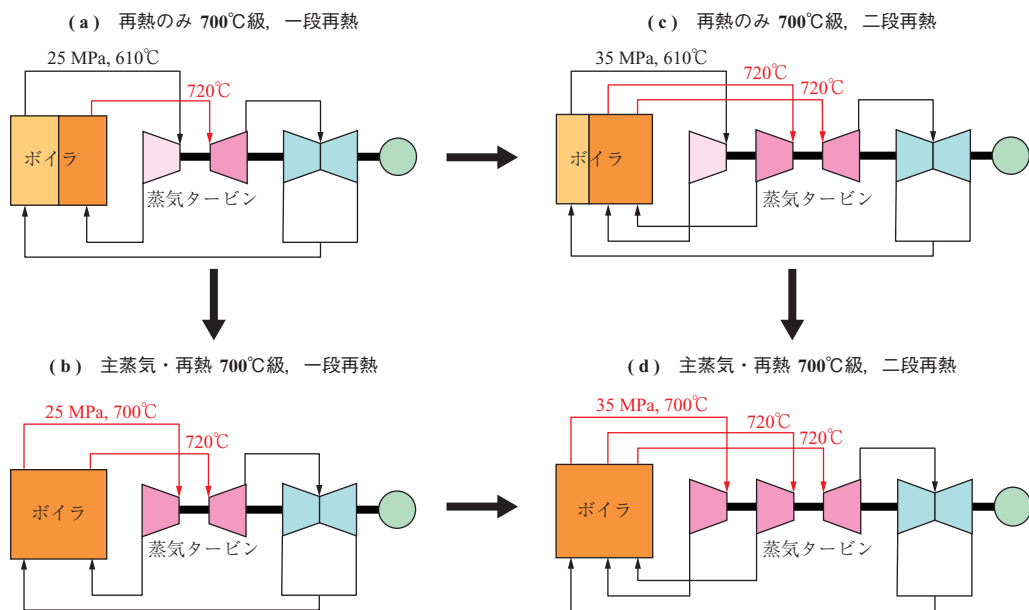
従来の 600°C 級 USC 技術では、その高温高压条件に耐え得る材料として、高 Cr フェライト鋼 (Gr.91, Gr.92 など) やオーステナイト鋼 (SUPER304H, HR3C など) が開発され、適用されてきた<sup>(4)</sup>。第 1 図<sup>(5)</sup>にボイラ材料の 100 000 h 破断強度を示す。700°C 級 A-USC 技術では、図のように 700°C 前後で 600°C 級 USC 向けの高 Cr フェライト鋼やオーステナイト鋼と同等の強度を有するニッケル基 (以下、Ni 基) 合金を開発、適用していくことが必要となる。

一方で A-USC 技術は、Ni 基合金といった開発材料を



第 1 図 ボイラ材料の 100 000 h 破断強度<sup>(5)</sup>  
 Fig. 1 100 000 h creep rupture strength of boiler materials<sup>(5)</sup>

適用する必要があるものの、ボイラ・タービンといったシステム構成そのものは従来の石炭火力発電システムと同様である。第 2 図<sup>(6)</sup>に A-USC 条件の段階的かつフレキシブルな導入を示す。図のように多様かつ段階的な商用適用が可能である。新設プラントへの適用はもちろん、既設設備の発電端効率向上の改造、たとえば、再熱のみ 700°C 化や、プラント付帯設備を流用し、ボイラ・タービンのみの更新など、お客様のニーズに合わせた適用が可能であ



第 2 図 A-USC 条件の段階的かつフレキシブルな導入<sup>(6)</sup>  
 Fig. 2 Step by step development of A-USC unit<sup>(6)</sup>

る。また、A-USC 技術は、従来の石炭火力発電システム向けに開発されたバイオマスやアンモニア混焼といったほかの CO<sub>2</sub> 排出量削減技術と組み合わせることも可能であり、既存の技術とも親和性が高い。

## 2.2 A-USC ボイラの開発

上記のような背景から、2008～2016 年度にかけて経済産業省・資源エネルギー庁の補助事業（2016 年度は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）助成事業）「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発プロジェクト」（以下、A-USC 開発国プロ）が実施され、国内の材料メーカ、タービンメーカ、弁メーカおよびボイラメーカが参画して開発が進められてきた。当社は、ボイラメーカとして参画し、ボイラ技術の開発を実施してきた。A-USC 開発国プロのスケジュールを第 3 図<sup>(7)</sup>に示す。

A-USC 技術には、ボイラ伝熱管・配管材料として従来の石炭ボイラでは用いることのなかった Ni 基合金を適用することから、溶接技術、加工技術の確立が必要となる。これら製造技術の確立に向けて、2008～2012 年度までの間、主要要素技術開発に取り組み、その検証としてボイラ管寄せなどのモックアップ製作を実施した。これと並行して、2011 年度からボイラ技術開発の集大成として実缶試験の計画に着手、2013 年度から実缶試験に向けた設計・製造を行った。これらの開発フローを第 4 図<sup>(5)</sup>に模式的に示す。実缶試験設備は、商用石炭焼きボイラの一部を改造・設置した後、2015 年 5 月に長時間実缶試験を開始

項目	年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
システム設計		システム設計・経済性									
ボイラ技術	材 料	高温大径管・伝熱管開発									
		長時間クリープ試験									
	製造・加工	溶接・曲げ加工									
タービン技術	材 料	材料試験・試作									
		ロータ・ケーシング・ボルト材開発									
		長時間クリープ試験									
高温弁技術		材料試験・試作									
ボイラ・タービン実缶試験		試験計画			製作			試験			

第 3 図 A-USC 開発国プロセススケジュール<sup>(7)</sup>

Fig. 3 Development schedule of A-USC national project in Japan<sup>(7)</sup>

し、2016 年 10 月には目標としていた約 13 000 h の運転時間を達成し、予定どおり終了した。当社はボイラメーカーとして、ボイラ要素技術の開発および実証機の据付け・試運転・実缶試験監視業務を実施してきた<sup>(8)</sup>。

実缶試験完了後は 700℃ 蒸気条件下で試験を実施した伝熱管、配管などの機械的特性や組織観察といった基本的な評価を行い、商用機の設計・製造にかかる技術を確立した。

A-USC ボイラの開発については既報<sup>(5)</sup>にて要素技術開発の結果を中心に紹介しているが、本稿では実缶試験の計画概要、試験設備製作・据付け、試験状況の概要を紹介する。また、実缶試験完了後の試験材の調査結果についても紹介する。

### 3. A-USC 実缶試験概要および結果

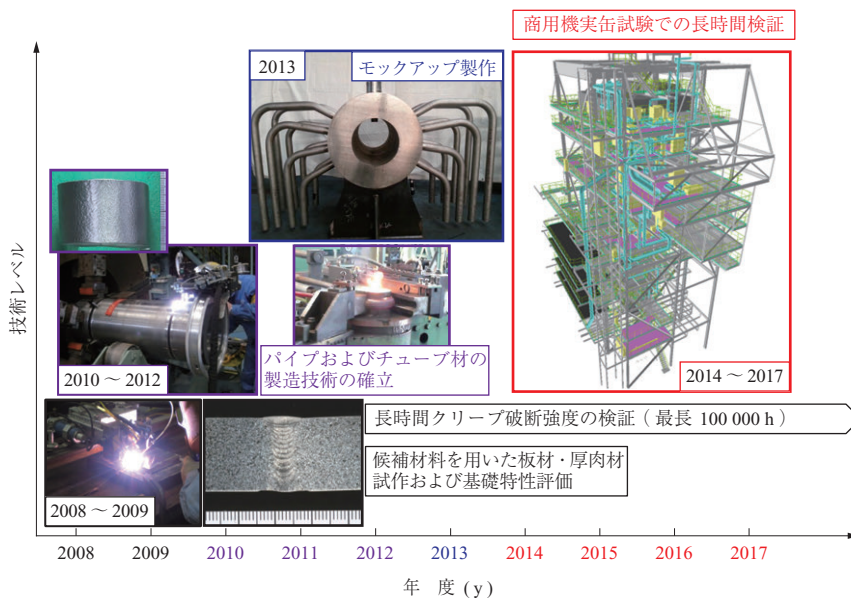
#### 3.1 実缶試験の概要

実缶試験設備は、A-USC ボイラおよび弁などのプラント付帯設備開発の集大成として、石炭燃焼ガス環境下や、高温（700℃）および高圧蒸気条件など、実験室レベルでは再現の難しい条件で、長時間の検証試験を行うことを目的として実施した。

具体的には石炭焚きボイラ内に試験伝熱面を設置し、700℃ 蒸気を発生させた。同時にボイラ炉外に設置した試験装置に 700℃ 蒸気を通し、10 000 h 以上の運転を行った。そして、各設備の健全性を検証した。第 5 図<sup>(9)</sup>に実缶試験設備概略系統図を示す。

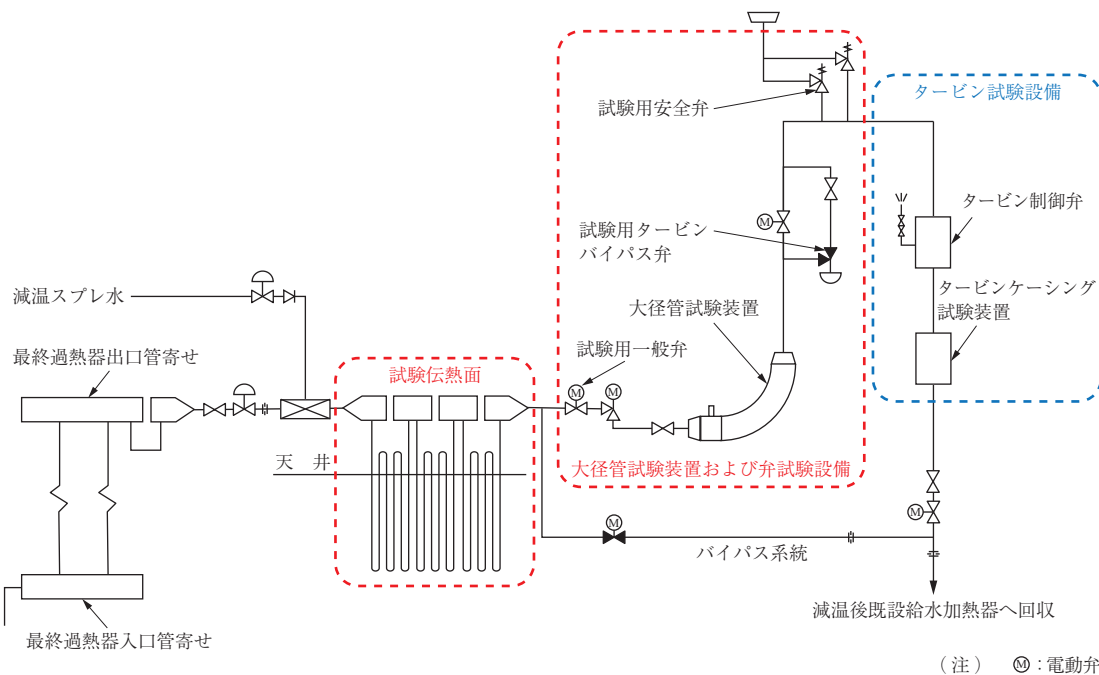
既設石炭焚きボイラの最終過熱器出口から蒸気を抜き出し、試験伝熱面により 700℃ まで加熱して、ボイラ炉外へ抜き出し、炉外に設置した試験用一般弁、大径管試験装置、試験用タービンバイパス弁、試験用安全弁、タービン制御弁、タービンケーシング試験装置へそれぞれ 700℃ 蒸気を流す構成とした。タービンケーシング試験装置を出た蒸気は 300℃ 程度まで減温し、既設発電設備へ回収した。また、炉外側試験設備については、バイパス系統を設け、既設発電設備を運転しながら、炉外側試験設備の点検・補修などが可能な系統計画とした。

試験伝熱面は、既設石炭焚きボイラの最終過熱器を改造し、700℃ 蒸気を確保するのに必要な 3 枚の伝熱面を実缶試験用に入れ替え、これを直列に接続することにより、既



第 4 図 A-USC ボイラの開発フロー<sup>(5)</sup>

Fig. 4 The development plan of A-USC boiler<sup>(5)</sup>



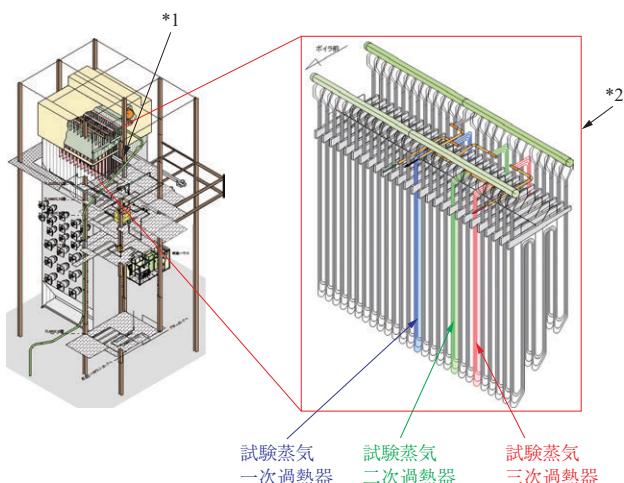
第 5 図 実缶試験設備概略系統図<sup>(9)</sup>  
 Fig. 5 The conceptual diagram of A-USC component test system<sup>(9)</sup>

設設備の 540℃レベルから 700℃まで蒸気温度を上昇できるようにした。また、試験伝熱面のうち、蒸気温度が 700℃レベルとなる最下流側の試験伝熱面（試験蒸気三次過熱器）に Ni 基合金開発材を主に設置した。第 6 図<sup>(10)</sup>に、既設ボイラ鳥かん図および試験伝熱面構成を示す。

実缶試験概略スケジュールを第 7 図<sup>(9)</sup>に示す。実缶試験計画に当たっては、2011 年度から計画検討を開始し、2012 年度に設置場所を確定、前述のような系統計画・配置計画といった基本計画を実施した。

年度 項目	2011	2012	2013	2014	2015	2016
全体計画		→				
運用計画		→				
詳細設計			→			
官庁申請		工事計画書対応 溶接安全管理審査 溶接事業者検査対応	→	→		
機器製造 据付け			機器製造 据付け	→	→	
試験 撤去			試験運転	試験運転	→	撤去

第 7 図 実缶試験概略スケジュール<sup>(9)</sup>  
 Fig. 7 Overall schedule for boiler component test<sup>(9)</sup>



(注) \*1: 既設ボイラの最終過熱器 3 パネルを試験伝熱面において更新  
 \*2: 既設最終過熱器出口蒸気の一部を直列に配置した試験蒸気一次過熱器～試験蒸気三次過熱器へ通し 700℃蒸気を生成

第 6 図 既設ボイラ鳥かん図および試験伝熱面構成<sup>(10)</sup>  
 Fig. 6 Bird's-eye view of existing boiler and verification test loop superheater arrangement<sup>(10)</sup>

つづいて、設備詳細設計を開始するとともに、商用機の改造に必要な改造工事の官庁への申請、溶接施工法の取得などの必要な官庁申請手続きを 2013 年度に実施した。また 2014 年度にボイラ、タービン、弁メーカーにて、各々試験設備を製作し、2014 年の年末から 2015 年 4 月にかけて設置工事を、2015 年 5 月に試験設備試運転をそれぞれ行い、試験運転を開始した。

### 3.1.1 実缶試験設備の設計

実缶試験における試験伝熱面については、将来の商用機と同等構造を配置し、長時間運転における健全性の確認を目的として行った。また、要素開発で確立した溶接技術、加工技術、熱処理要領に基づき試験伝熱面を製作することで、各製造技術の妥当性についても検証を行った。併せて

将来の商用機と同様の官庁への申請、溶接施工法の取得などを実施し、製造プロセスについても問題がないことを検証した。

具体的には、前述のとおり 700℃級商用機で Ni 基合金伝熱面の設置が想定される最終過熱器部位に伝熱面を配置した。蒸気温度が 700℃レベルとなる試験蒸気三次過熱器に、要素開発で検証を行ってきた各 Ni 基合金開発材である HR6W, HR35, Alloy617, Alloy141, Alloy263, Alloy740 を配置した。第 8 図<sup>(9)</sup>に試験蒸気三次過熱器の各 Ni 基合金開発材の配置を示す。

また、蒸気温度が 650℃レベルとなる試験蒸気二次過熱器の一部に 9Cr 鋼開発材である SAVE12AD を配置し、同様に検証を行った。

試験伝熱面で得られた 700℃蒸気をボイラ炉外側へ供給する配管は、試験用蒸気量が 4 t/h と少なく、配管径が小さいため商用機同等サイズの大径管試験体を炉外に設置する計画とした。第 9 図<sup>(10)</sup>に大径管試験体の概要図を示す。試験伝熱面と同様に 700℃蒸気条件下での 100 000 h 以上の長時間運転における健全性の確認が目的であるとともに、配管サポート方法や保温材選定などの実機構造の検証も実施した。また、熱間曲げにて作製したバンド管も試験体の一部として、併せて健全性の検証を行った。

### 3.1.2 実缶試験装置の製作および据付け

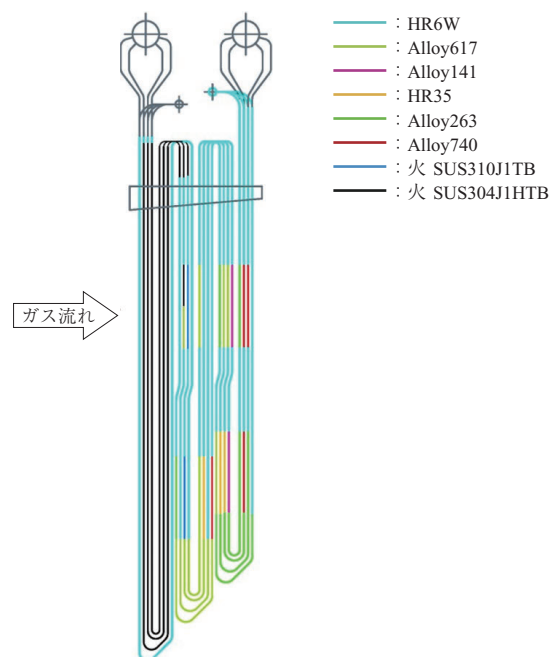
2014 年度に本格的な試験設備製作に着手し、A-USC 開発国プロでの実缶試験参加各社が試験設備の製作を実施した。当社はボイラメーカーとして試験伝熱面、大径管試験設備を分担して製作した。第 10 図<sup>(9)</sup>に試験伝熱面製作状況、第 11 図<sup>(9)</sup>に大径管試験体の製作状況を示す。大径管試験体などは実機と同様、製作後に水圧試験を行い、健全性を確認した。

各社の試験設備製作に引き続き、2014 年末から 2015 年 4 月にかけて、既設石炭焚きボイラへの試験設備の設置工事を実施した。その代表例として、第 12 図<sup>(9)</sup>に試験伝熱面の吊込み状況を示す。関係各社の試験設備についても設置工事を実施し、2015 年 4 月に予定どおりすべての設置工事を完了した。既設石炭焚きボイラおよび実缶試験設備を第 13 図<sup>(10)</sup>に示す。

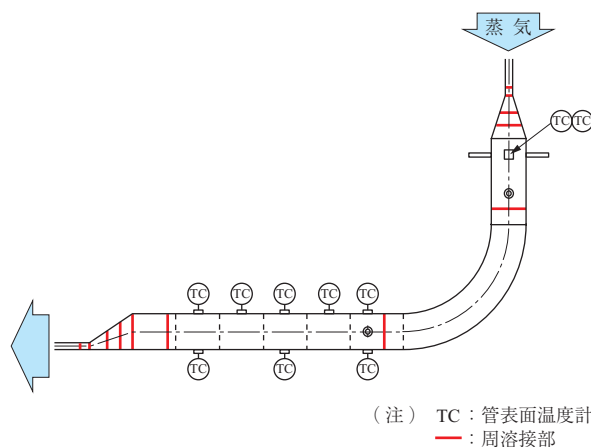
## 3.2 実缶試験結果

### 3.2.1 実缶試験設備の運転結果

試験装置の設置工事完了後、試験設備の試運転調整を経て、2015 年 5 月から長時間実缶試験を開始した。第 14 図<sup>(9)</sup>に 700℃運転時の状況（設備制御装置の操作・監視



第 8 図 試験蒸気三次過熱器の各 Ni 基合金開発材の配置<sup>(9)</sup>  
Fig. 8 Ni based alloy arrangement in the no.3 test loop<sup>(9)</sup>



第 9 図 大径管試験体の概要図<sup>(10)</sup>  
Fig. 9 Conceptual drawing of large diameter piping test component<sup>(10)</sup>



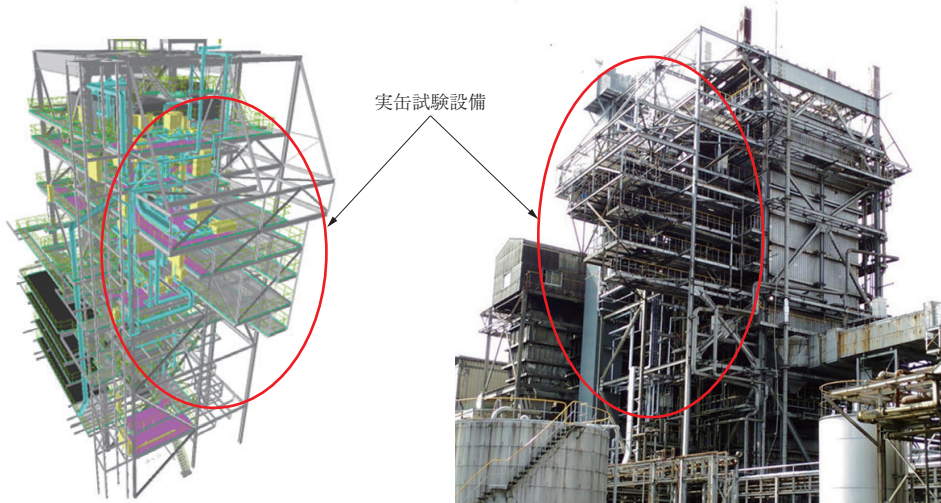
第 10 図 試験伝熱面製作状況<sup>(9)</sup>  
Fig. 10 The 700℃ verification test loop welded at the IHI Aioi Works<sup>(9)</sup>



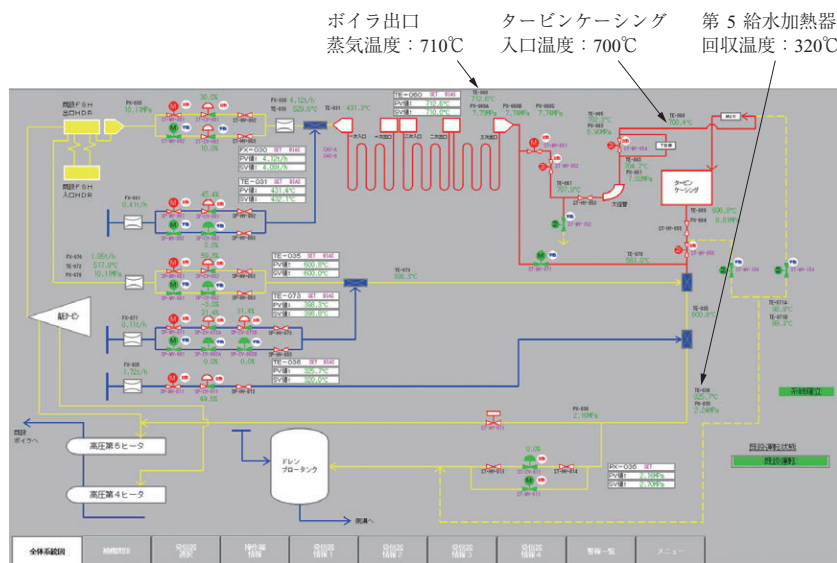
第 11 図 大径管試験体の製作状況  
Fig. 11 Welding of large diameter component



第 12 図 試験伝熱面の吊込み状況<sup>(9)</sup>  
Fig. 12 Installation of a 700°C A-USC verification test loop<sup>(9)</sup>



第 13 図 設置完了後の既設石炭焚きボイラおよび実缶試験設備（株式会社シグマパワー有明 三川発電所）<sup>(10)</sup>  
Fig. 13 The facility for 700°C A-USC boiler verification test at the Mikawa Power Plant of Sigma Power Ariake Co., Ltd.<sup>(10)</sup>



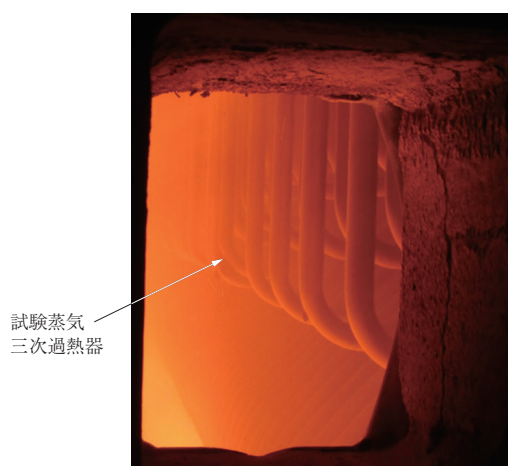
第 14 図 700°C 運転時の状況（制御装置の操作・監視画面）<sup>(9)</sup>  
Fig. 14 Control system diagram during 700°C operation<sup>(9)</sup>

画面)を示す。ボイラ炉外側の試験装置で 700℃ 蒸気温度を確保するために、ボイラ試験伝熱面出口では、おおむね 710℃ の蒸気温度を確保するように調整した。

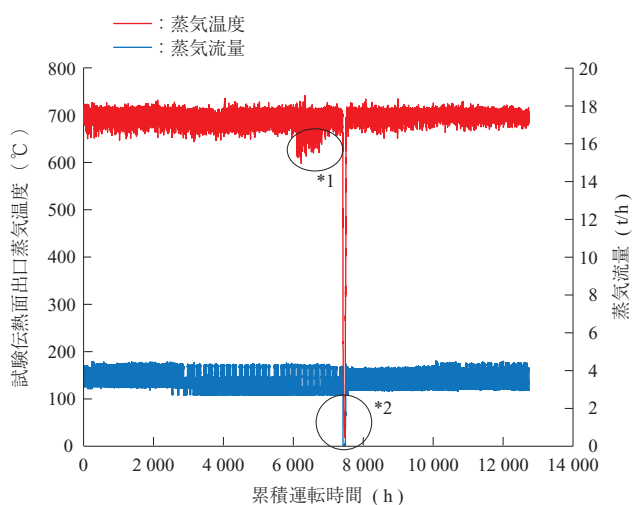
第 15 図<sup>(10)</sup>に試験運転時の試験伝熱面状況を示す。また、第 16 図<sup>(9)</sup>に試験期間の蒸気温度および蒸気流量、第 17 図<sup>(9)</sup>に試験設備運転例(蒸気流量・蒸気温度)を示す。第 17 図に示したように、既設発電設備が負荷変動運転を行っていたため、これに合わせて試験設備の蒸気温度も若干変動があるものの、おおむね 700℃ を継続する運用を行った。2016 年 10 月まで約 13 000 h 試験運転を継続し、予定どおり実缶試験を完了した。

### 3.2.2 実缶試験抜管材の評価結果

実缶試験において、挿入した配管が問題なく使用された

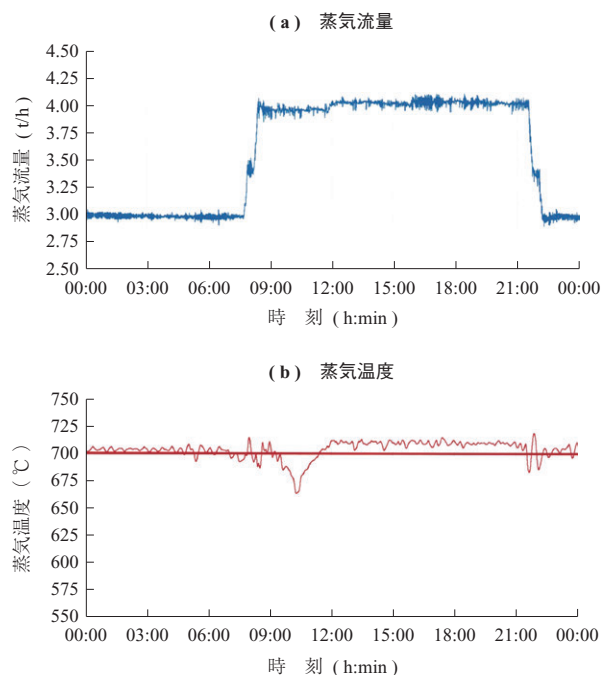


第 15 図 試験運転時の試験伝熱面状況<sup>(10)</sup>  
Fig. 15 Test loop view during 700°C operation<sup>(10)</sup>



(注) \*1: 低負荷運用時間帯増加による試験蒸気温度低下時間帯増加  
\*2: 停缶工事に伴う、ユニット停止-起動

第 16 図 試験期間の蒸気温度および蒸気流量<sup>(9)</sup>  
Fig. 16 Steam temperature at test loop outlet and steam flow rate during testing operation<sup>(9)</sup>



第 17 図 試験設備運転例(蒸気流量・蒸気温度)(日間)<sup>(9)</sup>  
Fig. 17 Steam temperature at test loop outlet and steam flow rate under typical daily operation<sup>(9)</sup>

かどうかを評価するため、健全性評価を実施した。代表例として、実缶試験後の伝熱管の断面マクロ観察結果およびミクロ組織を第 18 図<sup>(9)</sup>に示す。配管は HR6W, Alloy617 および Alloy263 であり、いずれも温度 700℃ にて約 13 000 h 使用した。配管の大きな減肉は認められず、異常な組織は認められなかった。外面スケールおよび内面スケール観察結果を第 19 図<sup>(9)</sup>に示す。極端な水蒸気酸化スケールなどは観察されなかった。次に、HR6W 溶接部、Alloy617 および Alloy263-HR6W の異材溶接部について、外観観察、PT 検査結果および断面マクロ観察結果を第 20 図<sup>(10)</sup>に示す。いずれの溶接部においても、表面に割れなどは確認されなかった。断面ミクロ観察も実施したが、割れ、クリープポイドなどはいずれも観察されなかった。2018 年 7 月現在厚肉配管などについても調査を実施しているが、割れなどは確認されていない。以上より、実缶試験後のサンプル管が健全に使用できたことを確認した。

## 4. 結 言

A-USC ボイラ実現に向けて、伝熱管・配管候補材料の Ni 基合金について、大径管および小径管の加工、溶接といった製造技術を確認し、これらの検証のためモックアップ製作を実施し、良好な結果を確認した。これらの集大成として 2015 年から 2016 年にかけて、商用石炭焼きボイ

項目	材 料		
	HR6W	Alloy617	Alloy263
断面マクロ観察			
ミクロ組織			

第 18 図 実缶試験後の伝熱管の断面マクロ観察結果およびミクロ組織<sup>(9)</sup>

Fig. 18 Macroscopic and microstructure observations of boiler tubes cross section after the test<sup>(9)</sup>

項目	材 料		
	HR6W	Alloy617	Alloy263
外面スケール観察結果 (ボイラ炉側)			
内面スケール観察結果 (蒸気側)			

第 19 図 外面スケールおよび内面スケール観察結果<sup>(9)</sup>

Fig. 19 Scale observation on the outer and inner surfaces of the tubes after the test<sup>(9)</sup>

項目	材 料					
	HR6W-HR6W		HR6W-Alloy617		Alloy263-HR6W	
継手部の外観観察						
PT 検査結果						
継手部マクロ観察結果						

第 20 図 同材および異材継手部の外観観察、PT 検査結果および継手部マクロ観察結果<sup>(10)</sup>

Fig. 20 Appearance observations, penetrant test (PT) inspections and cross-section macroscopic photographs for HR6W weld joint, HR6W-Alloy617 dissimilar weld joint and Alloy263-HR6W dissimilar weld joint<sup>(10)</sup>

ラに開発材を挿入した実缶試験を実施し、700℃蒸気条件下で約 13 000 h の運転を行い、予定どおり試験を完了し、商用化へ向けた設計・製造技術の確立にめどが立った。

今後は、実缶試験抜管材の評価を完了させるとともに、2017 年度から開始された NEDO の助成事業「次世代火力発電等技術開発／次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」において保守技術の高度化を図り、A-USC の早期商用化に向けて開発を継続していく所存である。

### 参 考 文 献

(1) 経済産業省：ホームページ「日本のエネルギーのいま：政策の視座」（オンライン）入手先 < [http://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/energy\\_policy/energy2014/seisaku/index.html](http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/energy_policy/energy2014/seisaku/index.html) >（参照 2018-

1-9）

(2) 経済産業省：ホームページ 資料 3「次世代火力発電協議会（第 6 回会合）資料 5 次世代火力発電に係る技術ロードマップ案」（オンライン）< [http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen\\_nenryo/pdf/018\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/018_03_00.pdf) >（参照 2018-1-9）

(3) 馬木秀雄, 梶谷一郎, 国広孝徳, 戸塚丈博, 中代雅士, 糸 亮一：Super 9Cr 鋼大径板巻溶接鋼管の 700 MW 石炭専焼ボイラへの適用 石川島播磨技報 第 31 巻 第 5 号 1991 年 9 月 pp. 339 - 345

(4) 宮下克彦, 安藤 栄, 梶谷一郎, 小沢政弘, 矢矧浩二, 海宝 哲：橘湾火力発電所 1 号ボイラ (1 050 MW) の計画概要 火力原子力発電 第 48 巻 第 4 号 1997 年 4 月 pp. 430 - 436



- (5) 久布白圭司, 野村恭兵, 松岡孝昭, 中川博勝, 室木克之: 700°C級先進超々臨界圧 (A-USC) プラント実現へ向けたボイラ技術開発 IHI 技報 第 55 巻 第 4 号 2015 年 12 月 pp. 81 - 91
- (6) 経済産業省: ホームページ「次世代火力発電協議会 (第 5 回会合) 資料 5 A-USC の技術展開戦略」(オンライン) 入手先 < [http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy\\_environment/jisedai\\_karyoku/pdf/005\\_05\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/005_05_00.pdf) > (参照 2018-1-9)
- (7) 高野伸一, 青木 裕, 久布白圭司, 富山信勝, 中川博勝: 700°C級先進超々臨界圧 (A-USC) ボイラ技術の開発 IHI 技報 第 49 巻 第 4 号 2009 年 12 月 pp. 185 - 191
- (8) 室木克之: Ni 基合金が拓く高効率な発電ボイラへの道 IHI 技報 第 55 巻 第 4 号 2015 年 12 月 pp. 28 - 31
- (9) Y. Okuma, K. Kubushiro, M. Kitamura, Y. Tachiwana and M. Fukuda: Overview and Result of Components Test on Commercial Coal Fired Boiler in Japanese National A-USC Project 43rd MPA-Seminar (2017. 10)
- (10) M. Fukuda and T. Nishii: The Japanese Program on Developments for New High Efficiency Power Plants and Progress in 700°C A-USC Technology Development 41st MPA-Seminar (2015. 10)