700℃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	
久有	百白	圭	司	技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 主查 博士 (工	学)

石炭火力の CO₂ 排出量削減対策の一つとして,当社では 700℃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 CO₂ 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℃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 CO₂ emissions from coal-fired power plants. A-USC is achieving higher efficiency by raising the steam parameters of the plant to reduce CO₂ 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⁽¹⁾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⁽²⁾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 CO₂ 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 CO₂ 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℃を実現し⁽³⁾, 2009年には再熱蒸気温度は 620℃に到達した. 2020年に は 630℃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℃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℃級 USC 技術の蒸気温度を 主蒸気・再熱蒸気 700℃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(CO₂ 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℃級 USC 技術では、その高温高圧条件に耐 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⁽⁴⁾. 第1図⁽⁵⁾にボイラ材 料の 100 000 h 破断強度を示す. 700℃級 A-USC 技術で は、図のように 700℃前後で 600℃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⁽⁵⁾ Fig. 1 100 000 h creep rupture strength of boiler materials⁽⁵⁾

適用する必要はあるものの,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**⁽⁶⁾ 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℃ 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,お客さまのニーズに合わせた適用が可能であ 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 CO₂ 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⁽⁷⁾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、主な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**⁽⁵⁾に模式 的に示す.実缶試験設備は、商用石炭焚きボイラの一部を 改造・設置した後、2015 年 5 月に長時間実缶試験を開始



Fig. 2 Step by step development of A-USC unit⁽⁶⁾

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									
	材 料	高温大径管・伝熱管材開発								
ボイラ技術		長時間クリープ試験								
	製造・加工	溶接・曲げ加工								
	材料	材料試験・試作								
タービン技術		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・ターヒ				試測	 <i> </i> 	I \$	し作	試	験	

第3図 A-USC 開発国プロスケジュール⁽⁷⁾ **Fig. 3** Development schedule of A-USC national project in Japan⁽⁷⁾

し,2016年10月には目標としていた約13000h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⁽⁸⁾.

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⁽⁵⁾ 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,10000 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**⁽⁹⁾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⁽⁵⁾ Fig. 4 The development plan of A-USC boiler⁽⁵⁾



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

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**⁽¹⁰⁾ 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⁽⁹⁾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		_	\rightarrow			
官庁申請	工事言	画書対応 溶接安全 溶接事業	管理審査 者検査対応			
機器製造 据 付 け		柞	機器製造 ■ 拒	付け		
試 験 撤 去			試運転	 		撤 去♠

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

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**⁽⁹⁾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 th 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**⁽¹⁰⁾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ベンド管も試 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**⁽⁹⁾に試験伝熱面製作 状況,**第11図**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⁽⁹⁾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⁽¹⁰⁾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⁽⁹⁾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⁽⁹⁾ **Fig.8** Ni based alloy arrangement in the no.3 test loop⁽⁹⁾



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



第 10 図 試験伝熱面製作状況⁽⁹⁾Fig. 10 The 700°C verification test loop welded at the IHI Aioi Works⁽⁹⁾



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⁽⁹⁾ Fig. 12 Installation of a 700°C A-USC verification test loop⁽⁹⁾



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)⁽¹⁰⁾ **Fig. 13** The facility for 700°C A-USC boiler verification test at the Mikawa Power Plant of Sigma Power Ariake Co., Ltd.⁽¹⁰⁾



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

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⁽¹⁰⁾に試験運転時の試験伝熱面状況を示す.また,第16 図⁽⁹⁾に試験期間の蒸気温度および蒸気流量, 第17 図⁽⁹⁾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16図 試験期間の蒸気温度および蒸気流量⁽⁹⁾





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

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⁽⁹⁾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⁽⁹⁾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⁽¹⁰⁾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、クリープボ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立し, 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, 商用石炭焚きボイ

IHI 技報 Vol.58 No.3 (2018)



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⁽⁹⁾

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







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⁽¹⁰⁾
 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⁽¹⁰⁾

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13000h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 > (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>(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, 粂 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
 (1050 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

IHI 技報 Vol.58 No.3 (2018) 45

- (5) 久布白圭司,野村恭兵,松岡孝昭,中川博勝,室 木克之:700℃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 > (参照 2018-1-9)
- (7) 高野伸一,青木 裕,久布白圭司,冨山信勝,中 川博勝:700℃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)