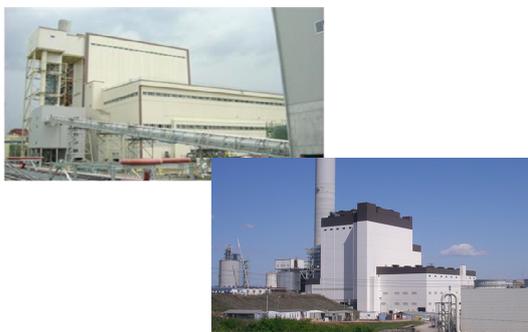


三菱日立パワーシステムズ(株)の ボイラ事業及びボイラ技術動向

Mitsubishi Hitachi Power Systems Ltd.
Its Boiler Business and Technology Development



釜口 泰宏*¹
Yasuhiro Ukeguchi

酒井 和人*¹
Kazuhito Sakai

國領 繁光*²
Shigeharu Kokuryo

斉藤 一彦*³
Kazuhiko Saito

須藤 隆之*⁴
Takayuki Suto

山下 登敏*⁵
Takatoshi Yamashita

三菱重工業(株)と(株)日立製作所の火力部門が統合し、三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)が発足したが、統合前の両社では、それぞれの燃焼方式にてクリーンに石炭を有効利用する技術を発展させてきた。本稿では、これまでの両社のクリーンコール技術に対する取り組みの歴史と最新の技術動向、また両社統合後のボイラ技術の開発動向について報告する。

1. はじめに

2014年2月に三菱重工業(株)と(株)日立製作所の火力部門が統合し、三菱日立パワーシステムズ(株)が発足した。火力発電向けボイラでは、これまで旋回燃焼、対向燃焼の燃焼方式にて、よりクリーンに石炭エネルギーを活用すべく、統合前の両社において、それぞれ独自の技術を開発、発展させてきた。本稿では、これまでの両社のクリーンコール技術に関する技術開発の歴史を紹介し、最新のクリーンコール技術動向、及び両社統合によるシナジー効果を活かしたボイラ技術開発の取り組み状況について報告する。

2. クリーンコール技術

2.1 USC(超々臨界圧)発電プラント

1990年代より、燃料として安価な石炭の採用が増加するとともに環境保全型発電プラントへのニーズが高まった。こうしたニーズに応じてMHPSでは汽力発電の効率向上施策として、蒸気条件の高温化・高圧化を図ってきた。現在、最新鋭のプラントではUSC(超々臨界圧)と呼ぶ24.1MPag 593℃以上となる蒸気条件を適用している。USC発電は石炭を高効率でクリーンに使用する技術として期待され、日本国内のみならず、海外においてもUSC発電プラントの普及が進んでいる。

図1にMHPSが納入した汽力発電設備の蒸気条件と運転開始年を示す。1968年に最初の超臨界圧(SC)油焚きボイラとなる中部電力(株)知多火力3号機(500MW 24.1MPag 538/538℃)を製作、納入した。その後、燃料は油からガス、石炭と変遷し、1981年に石炭焚きとして最初のSCボイラである電源開発(株)松島火力1号機(500MW 24.1MPag 538/538℃)を納入した。1990年代に各種高強度フェライト鋼が開発され、それまで製作困難であった600℃級の高温部位の管寄せや主配管の製作が可能になると、環境保全型発電プラントを目指し、プラント効率を改善す

*1 三菱日立パワーシステムズ(株) ボイラ技術本部 副本部長

*2 三菱日立パワーシステムズ(株) ボイラ技術本部 ボイラ戦略部 課長 技術士(機械部門)

*3 三菱日立パワーシステムズ(株) ボイラ技術本部 ボイラ戦略部 主席技師

*4 三菱日立パワーシステムズ(株) ボイラ技術本部 ボイラ技術部 課長 技術士(機械部門)

*5 三菱日立パワーシステムズ(株) ボイラ技術本部 呉ボイラ技術部 課長

るため更なる蒸気温度向上に取り組んでいった。1995 年に再熱蒸気温度に 593℃を採用した USC 石炭焚きボイラである北陸電力(株)七尾大田火力1号機(500MW 24.1MPag 566/593℃)を納入し、それ以降、徐々に主蒸気温度、再熱蒸気温度を向上した。1997 年に主蒸気温度を 593℃に上げた電源開発(株)松浦火力2号機(1000MW 24.1MPag 593/593℃)、1998 年には主蒸気温度、再熱蒸気温度ともに 600℃となった中国電力(株)三隅火力1号機(1000MW 24.5MPag 600/600℃)、2000 年には再熱蒸気温度に 610℃を採用した電源開発(株)橋湾火力2号機(1050MW 25.0MPag 600/610℃)を納入している。

図2は MHPs が納入した石炭焚き USC/SC ボイラの実績を示している。前述の通り、USC/SC ボイラは日本国内だけでなく、海外でも普及しており、MHPs はこれまで 153 缶を製作し全世界に納入している。

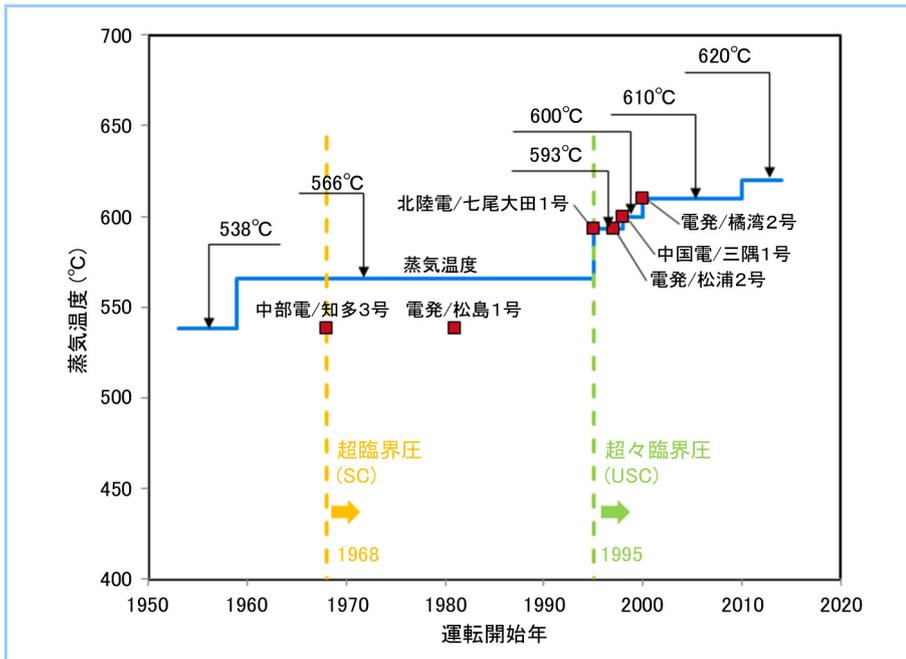


図1 汽力発電設備の蒸気条件と運転開始年

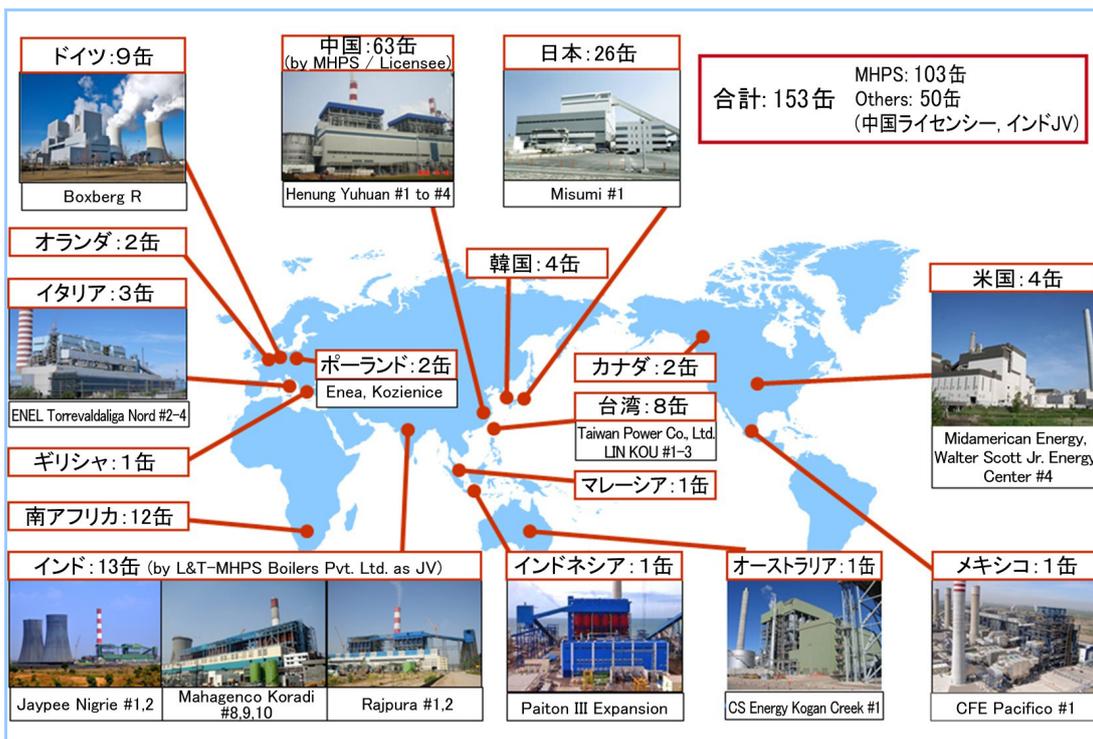


図2 石炭焚き USC/SC ボイラ主要納入実績

2.2 低品位炭への取り組み

近年石炭焚き発電プラントの燃料として良質な瀝青炭だけでなく、亜瀝青炭や褐炭のような安価な低品位炭へのお客様からのニーズが高まっている。また低品位炭が多い山元発電の海外案件においても環境への配慮から蒸気条件に USC/SC を採用するケースが増えており、低品位炭焚き且つ USC/SC の発電プラントが増加している。

こうした中、MHPS も積極的に低品位炭焚き USC/SC ボイラのプロジェクトに取り組んでおり、これまで培った豊富な低品位炭焚き技術を基に USC/SC ボイラへ展開している。図3には MHPS がこれまで経験した発電プラントの設計炭^{注)}実績を ASTM (America Society for Testing and Materials; アメリカ材料試験協会) の分類に従って示しており、褐炭焚きボイラから無煙炭焚きボイラまで様々な炭種のボイラを納入し、豊富な知見を得ていることが分かる。こうした知見を活かし、近年、お客様からのニーズが高まっている低品位炭に対応した最適なボイラ設計を行い、低品位炭向けに信頼性の高い高効率な USC/SC ボイラを供給している。

注) 石炭火力発電所の設計時に適用可能範囲となる石炭性状を設定すること

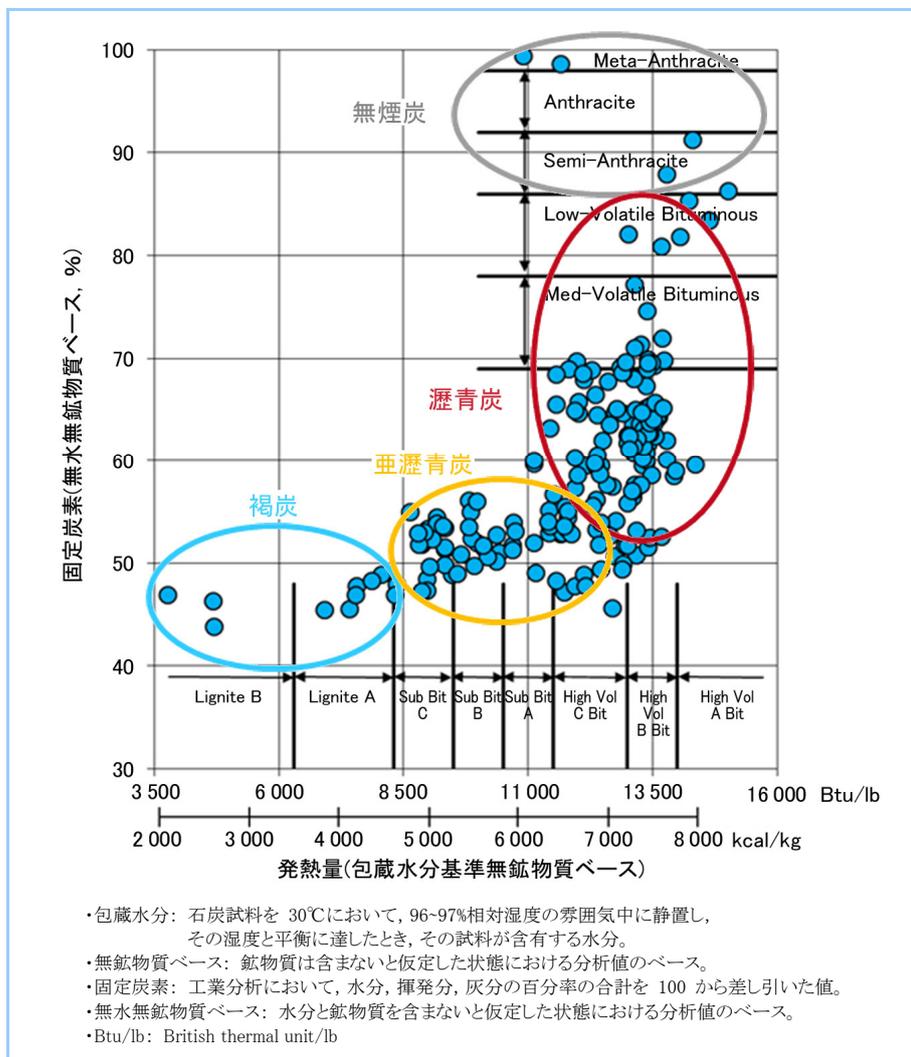


図3 MHPS の設計炭実績

図4にインドネシア初となる SC ボイラの Paition III の外観及び主要仕様を示す。燃料は水分30%のインドネシア亜瀝青炭である。図5はドイツの褐炭焚き USC ボイラの Boxberg R の外観及び主要仕様である。ドイツ産褐炭は非常に高水分であることで知られ、本ボイラの石炭水分は約60%である。図6は MHPS とインドの現地企業 Larsen & Toubro 社との合弁企業である LMB 社によって建設された Rajpural 号の外観及び主要仕様を示す。燃料は灰分30%の高灰分瀝青炭となっている。

これらのプロジェクトはいずれも低品位炭焼きであり、SC 又は USC の蒸気条件を採用している。そして MHPS の石炭に対する幅広い実績と知見をボイラ設計に反映しており、非常に信頼性の高いボイラとなっている。



定格出力：	866MW
蒸発量：	2 695 t/h
主蒸気：	538 °C / 24.9 MPag
再熱蒸気：	566 °C
運開：	2012年4月
燃料：	亜瀝青炭
効率：	約2~3%良好*1

*1: 標準的な亜臨界圧発電設備
(16.7MPag, 538/538°C)の効率に対する相対差

図4 インドネシア亜瀝青炭焼き超臨界圧(SC)ボイラ Paiton III



定格出力：	1 x 670MW
蒸発量：	1 760 t/h
主蒸気：	600 °C / 29.4 MPag
再熱蒸気：	610 °C
運開：	2012年10月
燃料：	ドイツ褐炭
効率：	約5~6%良好*1

*1: 標準的な亜臨界圧発電設備
(16.7MPag, 538/538°C)の効率に対する相対差

図5 ドイツ褐炭焼き超々臨界圧(USC)ボイラ Boxberg R



定格出力：	700MW
蒸発量：	2 322 t/h
主蒸気：	565 °C / 24.1 MPag
再熱蒸気：	593 °C
運開：	2014年2月
燃料：	瀝青炭
石炭灰分：	約30%
効率：	約4~5%良好*1

*1: 標準的な亜臨界圧発電設備(16.7MPag, 538/538°C)の効率に対する相対差

図6 インド高灰分炭焼き超臨界圧(SC)ボイラ Rajpura 1号

2.3 低 NO_x 燃焼システム

蒸気条件向上を図った USC/SC 技術に加えて、燃焼面からも環境保全に対応するため、石炭燃焼の技術開発に取り組んでいる。図7に示すように1980年代より、継続して低NO_x燃焼技術の開発を行っており、現在は旋回燃焼用バーナとして M-PM バーナ(M-PM:Multiple Pollution Minimum バーナ)、対向燃焼用バーナとして NR3 バーナ(NR:NO_x Reduction, 中, 小容量対象)及び NR4 バーナ(主に大容量対象)が最新モデルとなっている。これらのモデルでは保炎を強化し、火炎内脱硝による低 NO_x 化を促進したバーナである。保炎を強化することで、本来、低 NO_x 化とは相反する灰中未燃分の低減も可能となった。

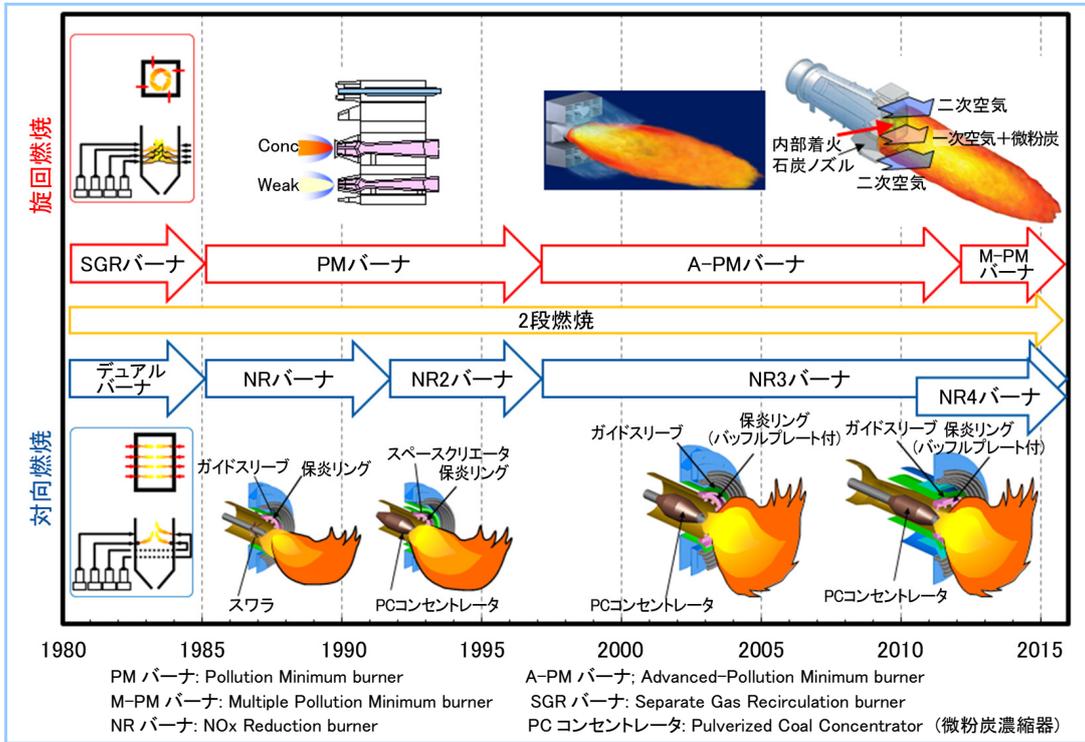


図7 低NOx 燃焼技術開発の歴史

3. 最新のクリーンコール技術動向

3.1 A-USC(先進超々臨界圧プラント)

石炭焚き発電プラントの効率向上を図るために、従来の微粉炭火力の発電方式の延長として蒸気条件の更なる高温化を目指し、A-USC(先進超々臨界圧プラント)の技術開発に取り組んでいる。A-USCは蒸気温度の目標値を700℃以上、送電端効率(高位発熱量基準)の目標値を46~48%とし、経済産業省からの補助金を受けて、国家プロジェクトとして進められている。

蒸気温度を700℃以上とするための技術開発項目は、主に材料、製作技術、寿命評価方法である。現在、図8に示すようなスケジュールで開発を行っており、2008年から2012年度までは開発材を含む候補材の基礎試験を中心に実施し、2013年度からは700℃の蒸気を用いた候補材の実缶試験に取り組んでいる。

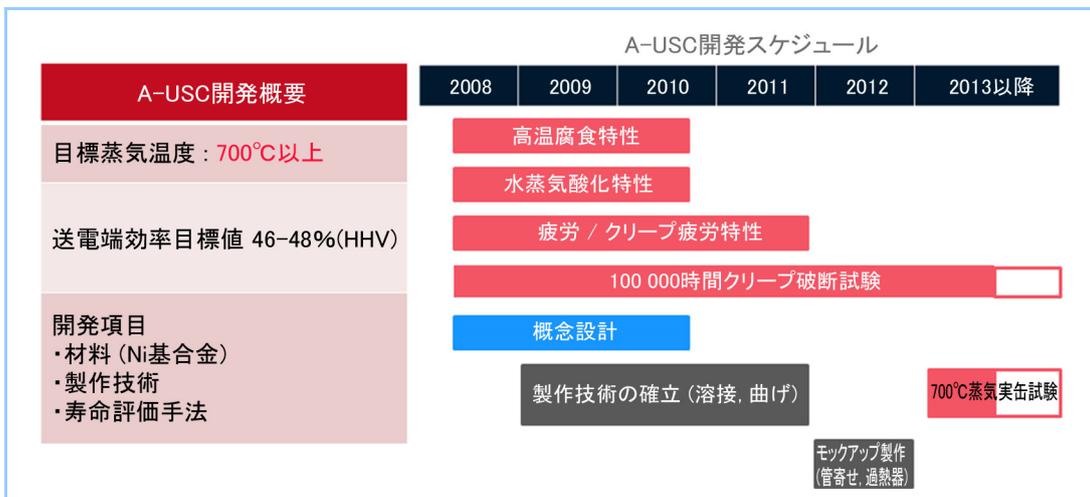


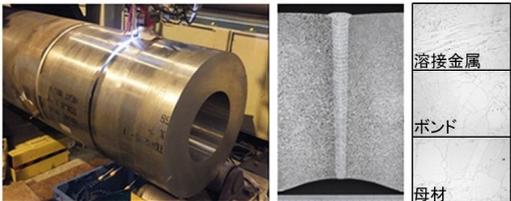
図8 先進超々臨界圧(A-USC)ボイラの開発スケジュール

候補材の基礎試験については、水蒸気酸化試験、高温腐食試験、溶接試験、曲げ加工試験、材料の長時間信頼性評価、実機耐圧部構造のモックアップ製作試験を実施し、以下の結果を得ている。図9に溶接試験、曲げ加工試験、モックアップ製作試験の状況を示す。

- 水蒸気酸化試験…最長 10000 時間の水蒸気酸化試験を行い、スケール性状を調査するとともに同一使用条件下での既存材との比較で耐酸化性は同等以上であることを確認した。
- 高温腐食試験…候補材の高温腐食試験を行い、腐食挙動を明らかにするとともに同一使用条件下での既存材との比較で耐腐食性は同等以上であることを確認した。
- 溶接試験…各候補材の板、小径管及び大径管の溶接技術を確立した。
- 曲げ加工試験…各候補材の小径管及び大径管の曲げ加工試験を実施し、現有設備で欠陥なく所定の寸法で健全な曲げ加工を行うことができる技術を確立した。
- 材料の長時間信頼性評価…各候補材の溶接継手及び曲げ加工部の長時間クリープ試験を実施中であるが、これまで得られた破断データは、母材強度と同等である。
- 実機耐圧部構造のモックアップ製作試験…蒸気温度 700℃以上を想定した過熱器及び再熱器出口管寄せ及び過熱器伝熱管コイルのモックアップ製作試験を行い、実機構造物としての製作性を検証した。

- ◆ A-USC技術を達成するために、新しいニッケル基合金を開発した。
- ◆ MHPSは溶接試験、曲げ試験、モックアップ製作などの各種試験を実施した。
- ◆ MHPSは溶接継手部を含む材料の100 000時間クリープ強度を確認する試験を継続実施している。(MHPSは現時点で一部候補材の90 000時間試験データを保有)

大径管の溶接試験



配管サイズ：φ558.8 x 138t マクロ/ミクロ組織

溶接方法：狭開先自動TIG溶接

材料：HR6W(次世代700℃蒸気のA-USCボイラ用高強度高耐食性Ni基合金鋼)

HR6Wの高周波曲げ試験



加熱温度：1050-1150℃

(φ350 x 40t, 曲げ半径：1400mm, 曲げ角度：50°)

HR6W管寄せのモックアップ製作



図9 A-USC ボイラの候補材開発試験

3.2 IGCC(石炭ガス化複合発電)

IGCC はコンバインドサイクルシステムと石炭ガス化プロセスを組み合わせることで石炭の高効率化を図ることが可能な発電システムである。図 10 は IGCC の技術概要及び日本国内のプロジェクト(実証機及び商用機モデル)を示している。MHPS はいずれのプロジェクトにも参画しており、空気吹き、酸素吹き、の両方式に取り組んでいる。

空気吹きガス化方式のIGCCについては、電力会社各社が共同で設立した(株)クリーンコールパワー研究所において出力 250MW 級実証機プロジェクトが実施されたが、2013 年3月にすべての試験が完了し、商用機の建設が技術的に可能な段階となった。なお、本実証機は常磐共同火力(株)に移管され、勿来 10 号機として商用機に転用された。2013 年には 3917 時間の連続運転を記録し、世界記録を大幅に更新した。

空気吹き IGCC は前述の勿来 250MW 実証機で実証された後、出力 500MW 級の大型 IGCC のプロジェクトが 2020 年初頭の運転開始を目標に計画されている。このプロジェクトは、東京電力(株)の広野火力発電所と、同社などが出資する常磐共同火力(株)の勿来発電所にそれぞれ大型のIGCCを建設するもので、福島県の経済再生を後押しする産業基盤や雇用機会の創出が期待されている。

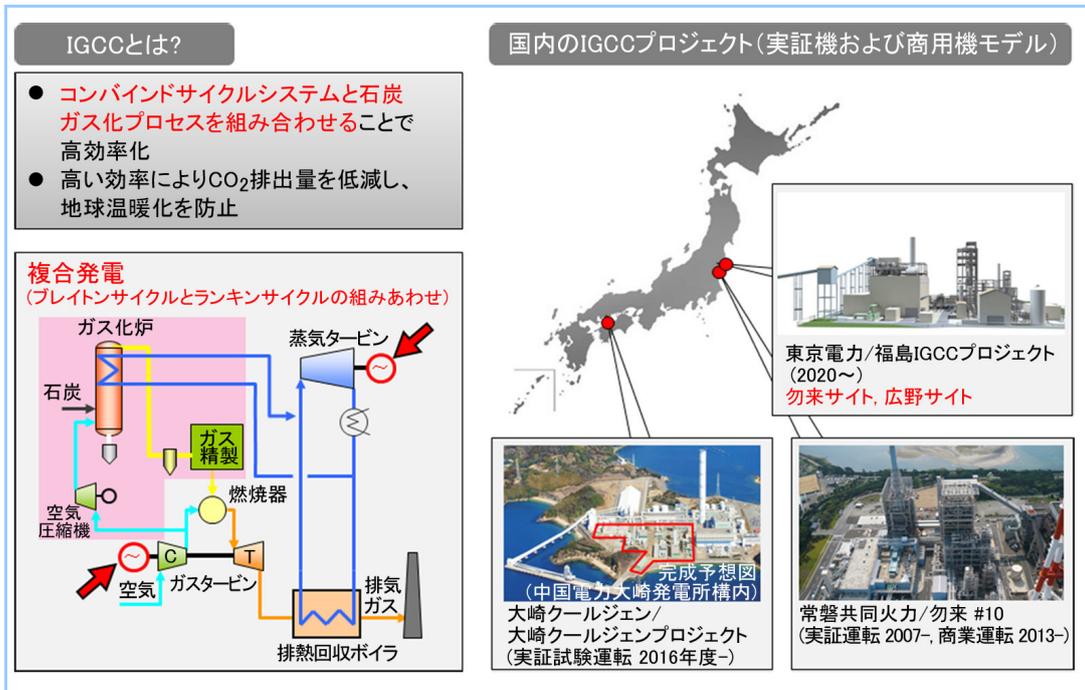


図 10 石炭ガス化複合発電(IGCC)システムの技術概要及び国内プロジェクト

昨年 MHPS を含めた共同企業体が東京電力(株)より、“世界最新鋭の石炭焚き火力発電所プロジェクト”の設計業務を受注し、設計を開始した。本プロジェクトでは、最新式ガスタービンの採用により効率向上を図り、最新の USC 発電プラントよりも CO₂ 排出量を低減する計画である。また高水分低品位炭など幅広い炭種適合性を持ち、勿来 250MW IGCC 実証機で実証された IGCC システムを設計に反映する。

一方、酸素吹きガス化方式では中国電力(株)と電源開発(株)が共同で設立した大崎クールジェン(株)が取り組んでいる“酸素吹き石炭ガス化複合発電(酸素吹き IGCC 技術)”, “CO₂ 分離・回収型 IGCC”及び“CO₂ 分離・回収型 IGFC (石炭ガス化燃料電池複合発電技術)”に関する大型実証試験(経済産業省補助事業)プロジェクトに参画している。本プロジェクトは第1段階として酸素吹き IGCC 実証, 第2段階として CO₂ 分離・回収型 IGCC 実証, 第3段階として CO₂ 分離・回収型 IGFC 実証を計画しており, 中国電力(株)大崎発電所構内において 2013 年3月に実証試験設備の建設工事に着工している。第1段階の実証試験運転は 2016 年度内に開始される計画である。

4. 技術開発動向

統合によるシナジー効果を発揮し、更なる高効率、高信頼性のボイラプラントを提供すべく新技術開発を加速している。ここでは新燃焼技術開発のための新大型燃焼設備、及びボイラ非破壊検査技術の相互活用状況について紹介する。

2014 年 10 月に、[図 11](#) に示す石炭燃焼量4t/h という世界最大級の容量を持つ燃焼試験設備を竣工した。三菱重工業(株)と(株)日立製作所(含旧バブコック日立(株))の燃焼技術を一体化して、低 NO_x、低未燃分、低空気過剰率など、ボイラ性能の根幹をなす燃焼技術の高度化を実現するのが狙いである。また、燃料は実機で使用される瀝青炭、亜瀝青炭、褐炭、無煙炭、バイオマス、石油コークス、残渣油など多岐にわたる種類を対象としており、価格の安い低品位燃料に対する燃焼評価機能を大幅に高めて、お客様にとって最大のニーズである燃料費低減と稼働率向上、さらには環境負荷低減に貢献していく。本燃焼試験設備は、実機ボイラ火炉内でのバーナ流動・燃焼状態の正確な再現と、これを評価する燃焼計測装置の高度化など、最先端の技術開発を支える設備機能の強化を実現している。



図 11 4t/h 燃焼試験設備の外観

図 12 に示すように、最新鋭試験データをシミュレーションに反映して CFD の精度向上を図り、シミュレーションによる燃焼試験結果の推定と効果的な試験実行、並びに実機性能予測の高精度化が可能となる。

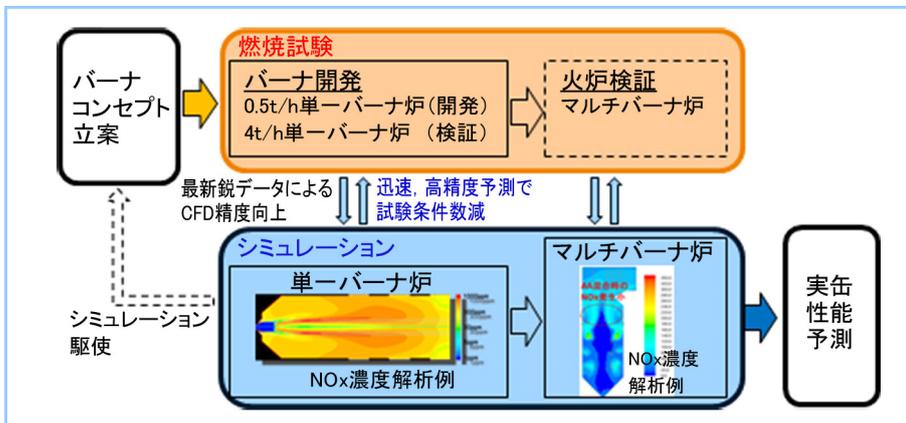


図 12 4t/h 燃焼試験データの活用状況

またアフターサービス分野において、プラント信頼性向上に貢献している検査技術については、これまで統合前の両社にて開発・実用化した検査技術を相互に活用し効果を上げています。特に、高温配管溶接部の管内部の微小クリープ損傷検出に有効なフェーズドアレイ UT 法は、手法を一本化するとともに、高度化/高速化を目的とした特殊な超音波センサを開発し、既に相互の対象ユニットに適用を図っている。また図 13 に示す、伝熱管を効率的に肉厚計測できるインナー UT などの特殊検査技術についても相互活用を計画しており、更なるシナジー効果が期待できる。

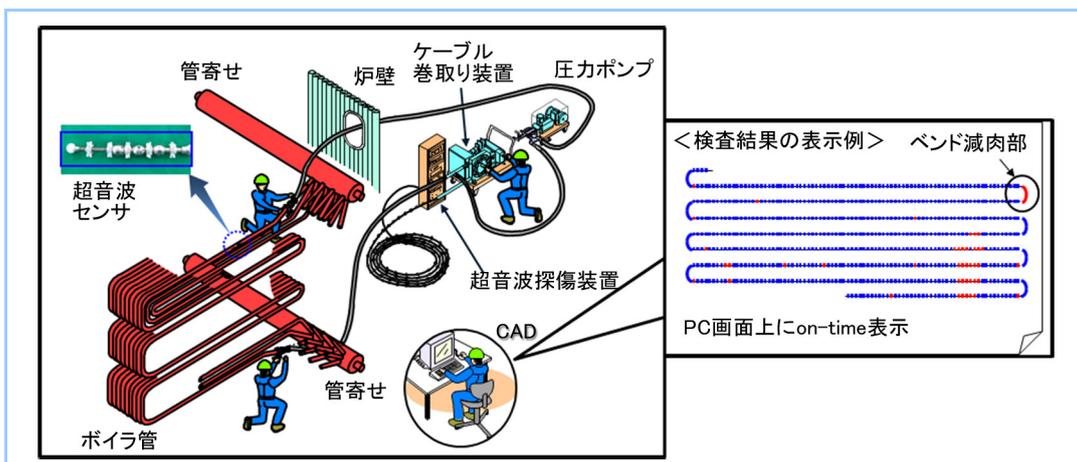


図 13 インナー UT 検査の概要 (管内面からの肉厚計測)

5. まとめ

MHPS は、三菱重工業(株)と(株)日立製作所の火力部門統合によるシナジー効果を発揮させ、燃料多様化やクリーンコール技術の更なる向上を図っていく。これまでもクリーンコール技術として石炭焚き USC/SC ボイラを 153 缶納入しているが、様々な炭種での実績から高品位の瀝青炭だけでなく、亜瀝青炭、褐炭や高灰分瀝青炭などの低品位炭にも対応した最新技術の USC ボイラを提供し、今後も環境保全の面から社会へ貢献していく。A-USC や IGCC といった最先端の高効率石炭発電技術の開発も行っている。A-USC は経済産業省からの補助金を受けて、国家プロジェクトとして進められており、現在、700℃の蒸気を用いた候補材の実缶試験に取り組んでいる。IGCC に関しては、空気吹きガス化方式は既に勿来 250MW 機にて実証・商用化し、現在は出力 500MW 級の大型 IGCC プロジェクトに取り組んでいる。酸素吹きガス化方式では中国電力(株)と電源開発(株)が共同で設立した大崎クールジェン(株)が取り組んでいる“酸素吹き IGCC”、“CO₂分離・回収型 IGCC”及び“CO₂分離・回収型 IGFC”に関する大型実証試験(経済産業省補助事業)プロジェクトに参画している。

統合前の両社の燃焼方式(旋回燃焼, 対向燃焼)に対応した新燃焼試験炉やアフターサービスでの最新の検査技術の相互活用など様々な面でシナジー効果を発揮している。今後は新設プロジェクトのみならず、アフターサービスの分野でも相互活用を図り、お客様に対して MHPS 製品・技術の価値最大化に努めていく。