

北陸電力(株)敦賀火力 2 号 700 MW 石炭だきボイラの計画と運転実績

Design Features and Trial Operation of Tsuruga No.2 700MW Coal-Fired Boiler

原動機事業本部 佐藤 進^{*1} 松田 政彦^{*2}
長崎造船所 橋本 貴雄^{*3} 若林 嘉幸^{*4}
技術本部 橋本 彰^{*5}

北陸電力(株)敦賀火力 2 号 700 MW 超臨界圧変圧運転石炭だきボイラは、高性能・信頼性の実証された既設 1 号 500 MW ボイラの設計思想を踏襲した相似設計とし、さらに 593/593°C の高蒸気条件かつ、最新燃焼技術の A-PM バーナ、新 A-MACT, MRS ミルを適用し、最高レベルの低 NO_x、低未燃分性能と優れたボイラ運転特性を実証することができた。本報では、計画概要と、良好な試運転結果について以下の項目等に関し報告する。(1) 最新燃焼技術適用による極低 NO_x・未燃分の実現、(2) 優れたボイラ運転性能と石炭専焼最低負荷 15 % の達成。

The 700 MW coal-fired supercritical sliding pressure boiler at Hokuriku Electric Power Co., Inc., Tsuruga Thermal Power Station No. 2 was designed based on the high-performance, reliable No.1 500 MW boiler. Applying elevated steam of 593/593°C, MHI's state-of-the-art low-NO_x combustion A-PM burner, A-MACT and MRS pulverizer technology, this boiler has achieved the highest combustion performance with extremely low NO_x emission and unburned carbon together with outstanding boiler operation. This paper reports the design features and operation results of the boiler, e.g., (1) extremely low NO_x and unburned carbon due to cutting-edge combustion and (2) superior boiler operating performance and minimum 15% load in exclusive coal firing.

1. ま え が き

北陸電力(株)敦賀火力 2 号 700 MW ボイラは、最新鋭の多炭種だき超臨界変圧貫流ボイラとして計画・建設され、順調な試運転を経て平成 12 年 9 月 28 日に営業運転を開始した。本ボイラでは、既設 1 号 500 MW ボイラ⁽¹⁾の建設・運転経験を反映するとともに、新世紀の石炭火力として求められる高効率運転、多炭種対応、中間負荷運用、環境保護対策等に応じた当社先進技術を採用しており、その特徴と運転実績を紹介する。

主な設計上の特徴は下記のとおりである。

- (1) 高性能・信頼性が実証された既設 1 号 500 MW ボイラの基本設計思想を踏襲した相似設計による信頼性確保
- (2) 高温蒸気条件 (24.1 MPa×593/593°C) 採用と変圧運転による全負荷域高効率運転
- (3) 耐高温腐食性、水蒸気酸化性及び高温強度に優れた新材料 (火 SUS 310 J 1 TB, 火 SUS 304 J 1 HTB, 火 SUS 410 J 3 TB/TP⁽²⁾, 火 STBA 24 J 1⁽²⁾) の適用による高温蒸気条件ボイラの信頼性向上
- (4) 多炭種対応 (使用候補炭 128 炭種)
- (5) A-PM (Advanced-Pollution Minimum)⁽³⁾バーナ及び新 A-MACT (Advanced-Mitsubishi Advanced Combustion Technology) 採用による極低 NO_x 燃焼 (150 ppm 以下) の達成
- (6) 回転式と固定式の 2 段の分級器を組込んだ MRS (Mitsubishi Rotary Separator) ミルの採用による灰中未燃分 (5 % 以下) と石炭専焼最低負荷 (15 % ECR) の低減

- (7) バックパス分配ダンパ方式再熱蒸気温度制御の採用による設備の簡素化と補機動力の低減
- (8) ボイラ自動制御、ミルバーナ自動化制御等の最新総合制御システム DIASYS-SEP (Digital Intelligent Automation System-Software Enriched Processor) の適用による制御機能の向上
- (9) 狭あいな敷地に適した SBS (Steel Structure Boiler Simultaneous Construction) 据付工法採用による工期短縮

2. 多炭種対応と高温蒸気条件化

本ボイラの主要仕様を表 1 に、側面を図 1 に示す。試運転には表 2 に示す 4 種類の石炭が用いられた。

火炉体格は多炭種対応 (使用候補炭 128 炭種) を考慮して設計し、垂れき青炭の混焼も可能なよう配慮しており、基本的に 1 号ボイラの相似形として選定された。

593/593°C の高温蒸気条件に対応するため、耐圧部材料面では高温強度材を使用して信頼性を確保している。

新材料として過熱器管・再熱器管の高温加熱部には 18 Cr 鋼 (火 SUS 304 J 1 HTB), 25 Cr 鋼 (火 SUS 310 J 1 TB) を、高温非加熱部には 2 Cr 鋼 (火 STBA 24 J 1), 12 Cr 鋼 (火 SUS 410 J 3 TB) を採用し、また、主蒸気管・高温再熱蒸気管には 12 Cr 鋼 (火 SUS 410 J 3 TP) を採用した。

3. 極低 NO_x 燃焼と灰中未燃分低減対策

NO_x 及び灰中未燃分低減対策として、中国電力(株)三隅 1 号 1 000 MW ボイラ⁽⁴⁾で事業用に初適用した A-PM バーナ、新 A-MACT 炉内脱硝法及び 2 段分級器 MRS ミルを組

*1 ボイラ技術部長

*4 火力プラント設計部陸用ボイラ設計課長

*2 ボイラ技術部ボイラ技術一課

*5 長崎研究所火力プラント研究推進室長

*3 火力プラント設計部次長

表1 ボイラ主要仕様
Boiler major specifications

ボイラ形式		三菱超臨界変圧貫流ボイラ放射再熱形（屋内式）		
火炉形式		スパイラル形ホッパボトム単炉形		
負荷時 最大連続	蒸気流量	主蒸気	2 120 000 kg/h	
	蒸気圧力	過熱器出口	25.0 MPa	
	蒸気温度	過熱器出口 再熱器出口	597℃ 595℃	
燃 料		石炭、A-重油（25 % MCR 容量）		
燃焼方式 （NOx 低減対策）		旋回燃焼方式 （A-PM バーナ＋新 A-MACT 法）		
微粉炭燃焼方式		単位直接加圧方式		
通風方式		平衡通風		
一次空気通風方式		コールドプライマリエアファン方式		
起動用熱回収方式		ボイラ再循環ポンプ方式		
蒸気温度 制御範囲	主蒸気 再熱蒸気	最大蒸発量～30 % 負荷 最大蒸発量～50 % 負荷		
蒸気温度 制御方式	主蒸気 再熱蒸気	給水/燃料比，スプレー ガス分配ダンプ，空気過剰率， スプレー（負荷変化時，危急用）		
主要補機	微粉炭機	三菱 MRS	6 台	
	押込通風機	動翼可変ピッチ軸流式	2 台	
	一次空気通風機	動翼可変ピッチ軸流式	2 台	
	誘引通風機	動翼可変ピッチ軸流式	2 台	
	空気予熱器	再生回転式縦軸型	2 台	
	脱硝装置	乾式アンモニア接触還元法	2 基	

表2 使用石炭性状
Used coal properties

				レミントン 炭	ワーク ワース炭	サツイ炭	ブレア ソール炭
高位発熱量		湿炭	kJ/kg	29 220	29 530	28 760	28 470
全水分		受入	wt %	8.2	9.8	10.0	17.7
工業分析	固有水分	恒湿	wt %	2.8	3.5	5.5	6.2
	固定炭素	恒湿	wt %	49.7	51.9	43.0	57.1
	揮発分	恒湿	wt %	34.3	34.3	44.5	28.5
	灰分	恒湿	wt %	13.2	10.3	7.0	8.2
燃料比			—	1.45	1.51	0.97	2.00
元素分析	炭素	無水	wt %	72.80	75.14	74.16	74.21
	酸素	無水	wt %	6.69	7.49	10.81	10.51
	水素	無水	wt %	4.81	4.98	5.85	4.49
	窒素	無水	wt %	1.54	1.70	1.30	1.61
	全硫黄	無水	wt %	0.36	0.42	0.53	0.42
粉碎性			HGI	48	50	40	59

合せた最新低 NOx・低未燃分燃焼システムを採用した。

(1) A-PM バーナ

石炭バーナには従来の連続風箱型 PM バーナに比べ、一層の低 NOx 化を実現するとともに、分割型としたことで風箱ダンプ数の削減、バーナ部アクセスの改善が図られ、シンプルでメンテナンス性、信頼性、耐久性に優れた当社最新鋭の超低 NOx A-PM バーナ（図2参照）を採用し

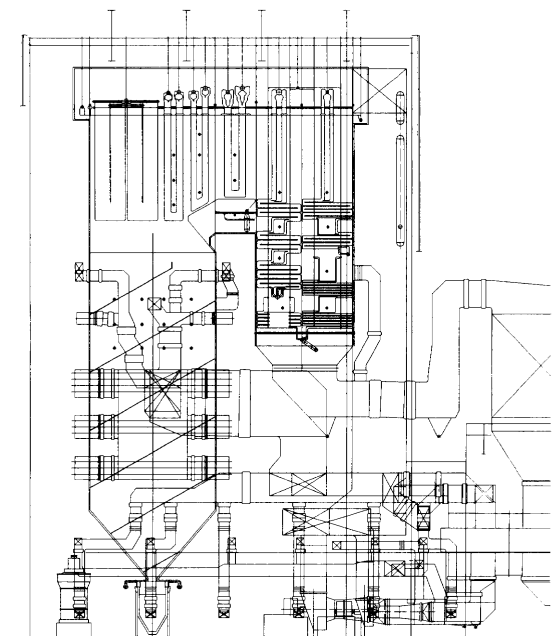


図1 敦賀2号ボイラ側面 伝熱面、主要補機、バーナ風煙道ダクト等の配置を示す。
Boiler general arrangement side view

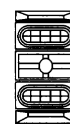
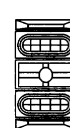
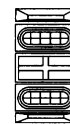


図2 A-PM バーナ 低 NOx で着火安定性に優れ、かつシンプルでメンテナンス性、信頼性、耐久性に優れたバーナである。
Outline drawing of A-PM burner

た。PM バーナは火炎を石炭・空気混合比の高い濃混合気炎と、混合比の低い淡混合気炎に分離することで低 NOx 化を図るバーナであるが、A-PM バーナでは単一火炎内にて同軸上に濃混合気炎・淡混合気炎に分離することで低 NOx 化を図ると同時に、外周の濃混合気炎により着火安定性を維持している。つまり、バーナ全体での着火の向上を図り、より高温で低空気比の NOx 還元域を形成し、バーナ単体のみならず後述のアディショナルエアとの組合せにより火炉全体を使って超低 NOx 燃焼を実現しているものである。

(2) 新 A-MACT 炉内脱硝法

新 A-MACT（図3参照）は、主バーナ上部に炉内脱硝のための十分な NOx 還元域を確保した後、未燃分の燃焼完

結用にアディショナルエア (AA) の投入ポートを火炉コーナ部と各壁中央部に 2 段設けたマルチ AA 投入方式を採用しており、従来の単一段 AA 投入方式に比べると AA と火炎との混合が促進され未燃分の燃え切り性が向上することで、同一未燃分で一層の NO_x 低減を図っている。

(3) MRS ミル

ミルには、回転式セパレータにより高微粉度を実現し既設 1 号ボイラでもその高性能が実証されている従来 MRS ミル⁽⁵⁾に、さらに固定式セパレータを組み込み 2 段分級とすることで一層の高微粉度運転を安定して実現する MRS ミル (図 4 参照) を採用した。

図 5 のとおり、MRS ミルでは未燃分発生に支配的な 100 メッシュ (149 μ m) 以上の粗粉量を大幅に低減できるが、回転式セパレータで分級された粗粉がテーブル上の原炭表面にたい積するためローラかみ込み時にスリップ振動を起し高微粉度での安定運転が困難となる。したがって、これに固定式セパレータを組み込んで粗粉をテーブル中心に戻し

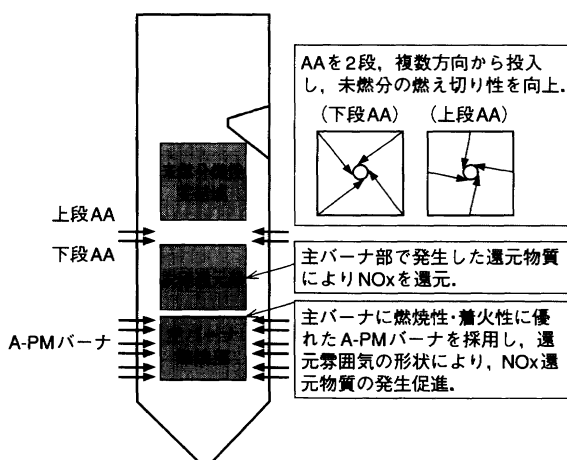


図 3 新 A-MACT 炉内脱硝法 Aディショナルエア (AA) を 2 段、複数方向から投入し、未燃分の燃え切り性の向上及び NO_x 低減を図っている。
New A-MACT DeNO_x system

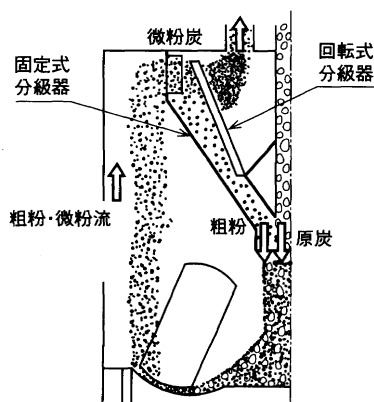


図 4 MRS ミル 回転式と固定式を組合せた 2 段分級器により、分級後の粗粉を原炭と均一に混合させ、高微粉度域でのミル振動を抑制する。
MRS pulverizer

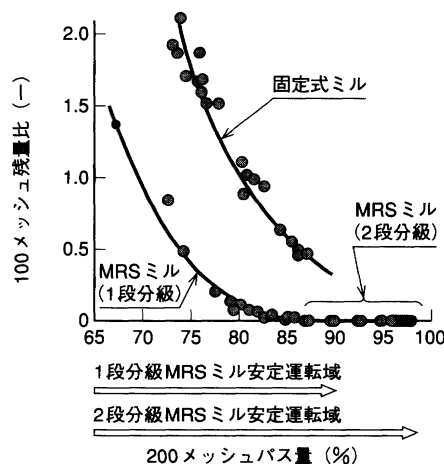


図 5 微粉度特性 2 段分級器 MRS ミルより、高微粉度での安定運転が可能である。
Fineness of pulverized coal

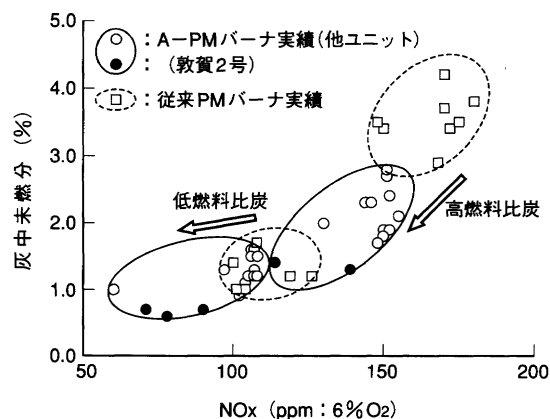


図 6 NO_x・灰中未燃分実績 A-PM バーナ、新 A-MACT と MRS ミルの組合せにより、極低 NO_x・低未燃分を実現した。
Results of NO_x emission and unburned carbon ratio in fly ash

原炭と均一に混合させることによりミル振動を抑制でき、200 メッシュパス 90 % 以上の高微粉度域においても安定した運転を実現している。

(4) 低 NO_x・低灰中未燃分の実現

NO_x・灰中未燃分の燃焼性能は、従来 PM バーナと MRS ミルの組合せに比べ格段に優れた結果 (図 6 参照) を得るとともに、空気過剰率も 100 % 負荷にて 15 % 以下での運用が可能であり (図 7 参照)、優れた低 O₂ 燃焼性能を実現している。

4. ボイラ性能

性能試験結果のボイラ効率を図 8 に示す。

A-PM バーナ+新 A-MACT、MRS ミルによる未燃損失の低減及び低空気過剰率運転の実現等により、ボイラ効率実測値は 100 % 負荷から 15 % 最低負荷に至るまで保証値又は計画値を十分上回る良好な結果が得られ、プラントの高効率運転に大きく貢献していることを確認した。

また、蒸気温度特性は、SH スプレーやガス分配ゲンパ等の

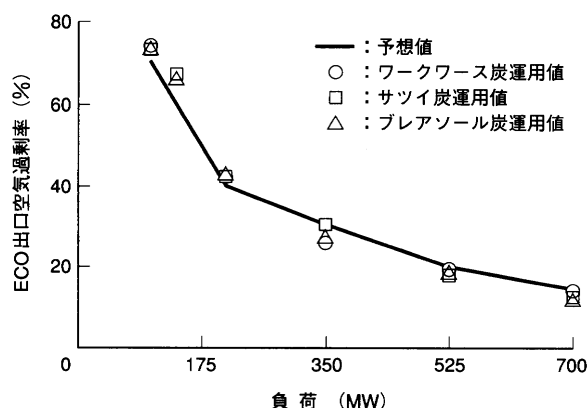


図7 空気過剰率 燃焼安定性に優れ、低空気過剰率燃焼を実現した。
Low excess air performance

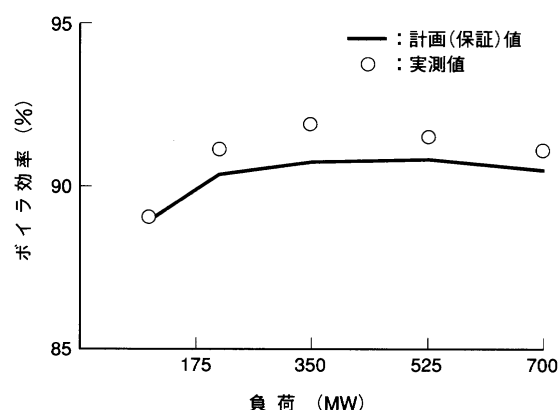


図8 ボイラ効率 低空気過剰率、低未燃分の達成で全負荷域での高効率運転を実現した。
Boiler efficiency at performance test

制御パラメータが適正範囲の下ですべての使用炭で全負荷域にわたり、計画どおりの主蒸気・再熱蒸気温度が維持できた。

制御には、ファジイ手法を用いた火炉・伝熱面状態推定による新しい多炭種対応の制御方式⁽⁶⁾を導入し、試運転調整中の広範囲性状の4炭種にて良好な制御性を確認した。また、石炭専焼最低負荷15%にて安定して連続自動運転が可能であることを確認した。

5. 負荷変化・起動特性

APC調整は4つの負荷バンド域（バンドI：530 MW → 700 MW，バンドII：380 MW → 560 MW，バンドIII：315 MW → 420 MW，バンドIV：210 MW → 315 MW）にて、負荷変化率はバンドI～III域：4%/min，バンドIV域：2%/minにて実施した。最新総合制御システム DIASYS-SEPの適用により、出力、圧力、蒸気温度の偏差は管理値以内に収まり、良好な結果が得られた。

ユニット起動試験結果についても各起動モードにて、ほぼ計画どおりの時間内に起動可能で、また、BRP（ボイラ再循環ポンプ）停止でのホット起動も問題なく起動可能なことを確認した。

6. SBS 工法

本ボイラは狭あいな敷地の中での据付けが要求されたことから大規模なゾーンモジュール工法⁽⁷⁾が適用できないため、鉄骨建方と並行して主配管、ダクト、微粉炭管等の先行取込みを行い、天井大梁・上部耐圧部の一体吊り上げを行うSBS工法を採用した。

本工法の採用により、工場でのモジュール化、ブロック化の範囲を拡大し、ジャストインタイムの物流管理を行うことで、現地資材置場の削減、現地の人員削減による宿舎・通勤等の混雑解消、配船隻数の削減による荷揚げ作業のふくそう緩和、現地工事量の平準化が可能となり、鉄骨建方から火入れまでの建設工期を22箇月とすることができ、同時に、現地高所作業の削減により安全性も向上できた。

7. む す び

敦賀火力2号ボイラは、高性能・信頼性の実証された既設1号ボイラの設計思想を踏襲した相似設計とし、さらに高蒸気条件かつ、最新技術のA-PMバーナ+新A-MACT、MRSミルを効果的に組み合わせることにより、ボイラ静特性・燃焼性能面では最高レベルの低O₂燃焼、低NO_x、低未燃分性能を発揮し、優れた環境適合性とボイラ性能を実証することができた。さらに、運転制御面においても高い多炭種対応能力と動特性、起動特性、最低負荷運用を含め、優れた中間負荷運用特性を実現していることが確認できた。

当社は、敦賀火力2号ボイラの完成により得られた貴重な経験を今後の設計に反映するとともに、社会に求められる技術の開発、改善に一層の努力を続けていく所存である。

最後に、本ボイラの建設に当り基本計画から試運転に至るまで、終始御指導、御協力頂いた北陸電力(株)の関係者各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 中島文也ほか，最新鋭500 MW石炭だき超臨界圧変圧運転ボイラの運転実績，三菱重工技報 Vol.29 No.1 (1992)
- (2) 駒井伸好ほか，新種ボイラ用鋼管材（HCM 2 S及びHCM 12 A）の実機実証試験，三菱重工技報 Vol.34 No.2 (1997)
- (3) 金子祥三ほか，最新鋭低NO_x A-PMバーナ，三菱重工技報 Vol.32 No.1 (1995)
- (4) 金子祥三ほか，中国電力(株)三隅1号1000 MWボイラの計画と運転実績，三菱重工技報 Vol.36 No.1 (1999)
- (5) Kawamura, T. et al., New Approach to NO_x Control Optimization of NO_x and Unburnt Carbon Losses, the 1989 Joint Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, EPRI.
- (6) 森山 功ほか，多炭種対応新制御技術の開発，三菱重工技報 Vol.35 No.1 (1998)
- (7) 高橋 伯ほか，大型石炭だきボイラのゾーンモジュール工法，三菱重工技報 Vol.32 No.1 (1995)