

垂直管火炉方式 1 000 MW 石炭だきボイラの完成

1 000 MW Coal Fired Supercritical Sliding Pressure Operation Boiler with Vertical Furnace Waterwall

原動機事業本部 金子祥三*¹ 橋本貴雄*²
丸田得志*³
長崎造船所 佐藤進*⁴ 甲斐徳親*⁵

世界で初の垂直管火炉方式の超臨界圧変圧運転石炭だき 1 000 MW ボイラにおいて良好な成果が次のように得られたので、ボイラの計画概要と試運転結果を報告する。(1) 垂直管火炉方式 1 000 MW ボイラの高い信頼性、(2) 低 NOx 燃焼技術の採用による NOx 150 ppm 以下、灰中未燃分 3 % 以下の実現、(3) 燃焼の向上等による高いボイラ効率 (性能試験結果 91.6 %)。

The first 1 000 MW coal fired supercritical sliding pressure operation boiler with vertical furnace wall has achieved the following successful results. This paper reports the design features and trial operation results of this boiler. (1) High reliability of vertical furnace waterwall using rifled tubing. (2) NOx of 150 ppm and 3 % of unburnt carbon in fly ash by advanced combustion technology with low NOx burner, in-furnace NOx reduction system and high fineness pulverizer. (3) High boiler efficiency of 91.61 % by combustion improvement.

1. ま え が き

世界で初めて 1 000 MW 超臨界圧変圧運転ボイラの火炉壁に垂直管構成を採用した相馬共同火力発電(株)新地発電所 2 号ボイラは、平成 7 年 7 月に営業運転を開始し、以来順調に運転を続けている。ボイラの主要仕様を表 1 に、側面図を図 1 に示す。本報では本ボイラの設計上の特徴である垂直管火炉方式の運転実績を紹介する。

表 1 ボイラ主要仕様
Boiler major specifications

最大連続負荷時	蒸気流量	主 蒸 気	3 080 000 kg/h
		再 熱 蒸 気	2 610 500 kg/h
	蒸気圧力	過熱器出口	255 kgf/cm ² G
		再熱器出口	44.4 kgf/cm ² G
		再熱器入口	46.4 kgf/cm ² G
	蒸気温度	過熱器出口	542℃
再熱器出口		567℃	
再熱器入口		302.1℃	
給水温度	節炭器入口	281.8℃	
燃 料	石炭、重油(50 % MCR 容量)		
燃 料 方 式	旋回燃料方式		
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	BCP 方式		
蒸 気 温 度 制 御 範 囲	主 蒸 気	MCR~30 % ECR	
	再 熱 蒸 気	MCR~50 % ECR	
蒸 気 温 度 制 御 方 式	主 蒸 気	給水/燃料比、スプレー	
	再 熱 蒸 気	ガス分配ゲンバ、バーナ角度、再循環ガス、スプレー(危急用)	
ボイラ主要補機	微 粉 炭 機	三菱 MRS ミル	6 台(予備 1 台)
	押 込 通 風 機	動翼可変軸流	2 台
	一 次 空 気 通 風 機	動翼可変 2 段軸流	2 台
	誘 引 通 風 機	動翼可変 2 段軸流	2 台
	空 気 予 熱 器	再生回転式	2 台
脱 硝 装 置	乾式選択接触還元法	2 基	

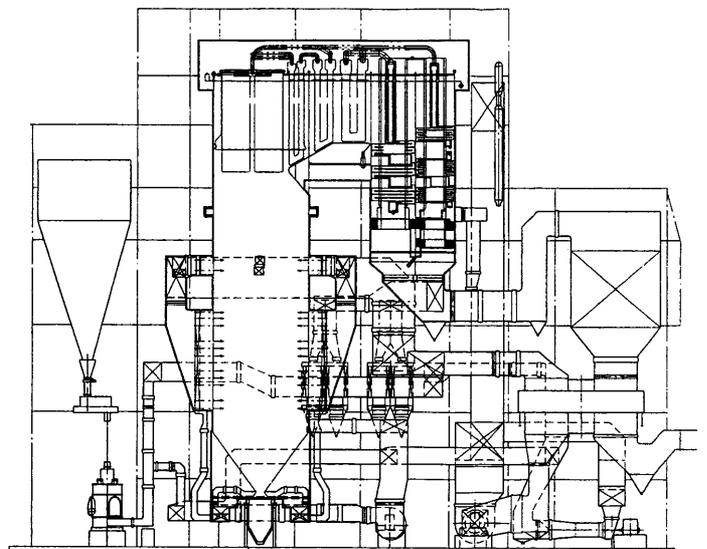


図 1 新地 2 号ボイラ側面図 伝熱面、主要補機、バーナ風煙道ダクト等の配置を示す。
Boiler general arrangement side view

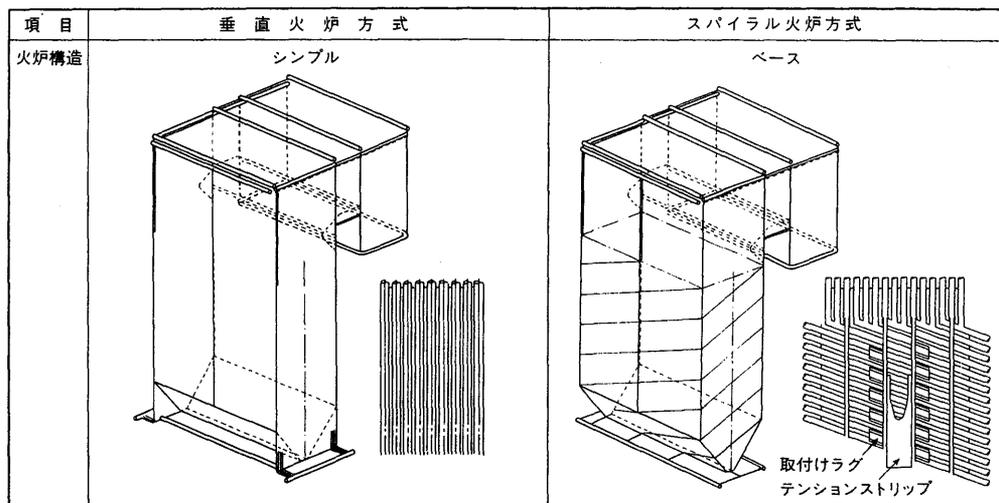
表 2 建設・試運転工程
Construction and trial operation schedule

内 容	年 月	内 容	年 月
着 工	平成 3 年 8 月	受 電	平成 6 年 2 月
立 柱	平成 4 年 7 月	ボイラ点火	平成 6 年 8 月
ヘッダ揚げ	平成 5 年 3 月	併 入	平成 6 年 10 月
水 圧	平成 5 年 10 月	運 開	平成 7 年 7 月

また、本ボイラには多炭種だきや環境保護等のニーズに対応するため最新技術が数多く盛り込まれており、表 2 の建設及び試運転工程の概要に示すように、試運転には 13 種類 (表 3 参照) の石炭が用いられた。

前記技術に加え、本ボイラが多炭種特性についても併せて紹介する。

*1 原動機技術センターボイラ技術部長 *4 火力プラント設計部主査
*2 原動機技術センターボイラ技術部ボイラ技術一課長 *5 火力プラント設計部主務
*3 原動機技術センターボイラ技術部ボイラ技術一課



(a) 火炉方式の比較

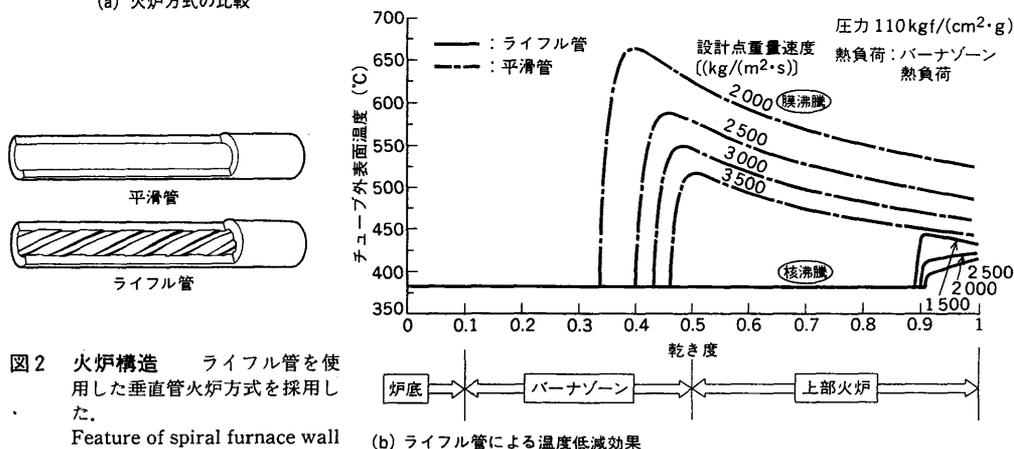


図2 火炉構造 ライフル管を使用した垂直管火炉方式を採用した。
Feature of spiral furnace wall

(b) ライフル管による温度低減効果

表3 使用炭性状例
Examples of used coal properties

			M炭	SL炭	N炭	B炭	
全水分	受入	wt %	10.6	10.4	8.5	17.2	
高位発熱量	恒湿	kcal/kg	6990	6580	6840	6790	
工業分析	固有水分	恒湿	wt %	3.6	5.1	2.5	6.4
	灰分	恒湿	wt %	10.3	9.7	14.5	7.5
	揮発分	恒湿	wt %	31.0	44.7	28.3	28.0
	固定炭素	恒湿	wt %	55.1	40.5	54.7	58.1
粉砕性	HGI	—	54	51	55	68	
灰軟化性	軟化点	ASTM	°C	1300	1200	>1500	>1500
	融点	ASTM	°C	1480	1235	>1500	>1500
	流動点	ASTM	°C	1500	1480	>1500	>1500

2. 垂直管火炉方式の高い信頼性

超臨界圧変圧運転ボイラでは、火炉流体が亜臨界圧となる中間負荷帯における水及び蒸気側の熱伝達率低下への対策が必要である。従来は火炉水冷壁管の冷却に必要な流体重量速度を確保するため、図2(a)に示すように火炉壁管を傾斜させたスパイラル構造とし火炉壁管本数を減らすことで管内流体速度を2~3倍に高めて対応していたが、構造が複雑で、系統圧損が高く運転動力も高いという欠点があった。

当社ではライフル管（内面溝付きの伝熱促進管）が優れた伝熱流動特性を持つことに着目した。ライフル管内面の溝によって蒸気膜が破壊されるため、高蒸気含有率（高乾き度）まで膜沸騰状態となり難く核沸騰を維持可能であり、メタル温度の抑制が可能

となる。このため、図2(b)に示すとおり、ライフル管の場合はメタル温度を十分低く抑制でき、設計重量速度を1500~2000 kg/(m²·s)程度まで下げても全く問題のない設計が可能である。

研究所における各種試験により、ライフル管は平滑管と比べて少ない管内流体重量速度で安全性を同等以上に確保することを確認した上で⁽¹⁾、このライフル管を使用した垂直管火炉方式を旋回燃焼方式と組合せて実用化した⁽²⁾。

この火炉方式は、安全性の向上に加え下記の利点を有する。

- (1) 重量速度が低いので圧力損失が少なく運転動力を節減できる。
- (2) 単純な構造のため火炉支持が容易で付着金物類が少なく、さらに現地溶接数が少ないため、信頼性、据付、保守性に優れている。
- (3) 石炭だきユニットではスラッグの脱落が容易で火炉壁付着灰量が少ない。
- (4) 蒸発管の全圧力損失に占める加熱部摩擦損失の割合が少ないため、火炉熱吸収量変動時の流量変化が少ない。

本火炉方式は既に、ガスだきボイラでは中部電力(株)川越1, 2号700 MWボイラに、石炭だきボイラでは九州電力(株)松浦1号700 MWボイラ、中部電力(株)碧南1号700 MWボイラに採用され、数多くの知見を蓄積してきた。今回、世界で初めての1000 MW垂直管火炉方式のボイラの計画に際しては、これらの経験を反映して徹底した事前検証・設計改善を行った。

この結果、試運転期間中の各種試験にて本火炉方式の信頼性が予想どおりであることが実証された。図3に100% ECRの超臨界圧域、及び50% ECRの亜臨界圧域における火炉燃焼室出口の流体温度分布を示すとおり、安定した均一な出口温度分布が得

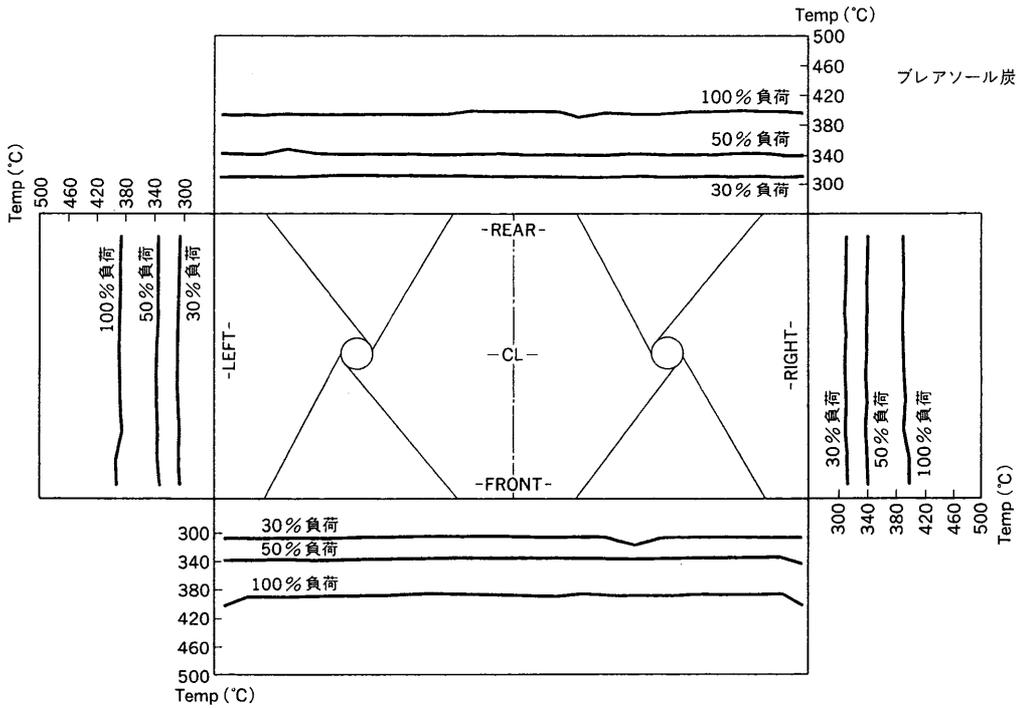


図3 火炉出口流体温度分布
各負荷で安定かつ均一な出口温度分布が得られた。
Furnace outlet fluid temperature profile

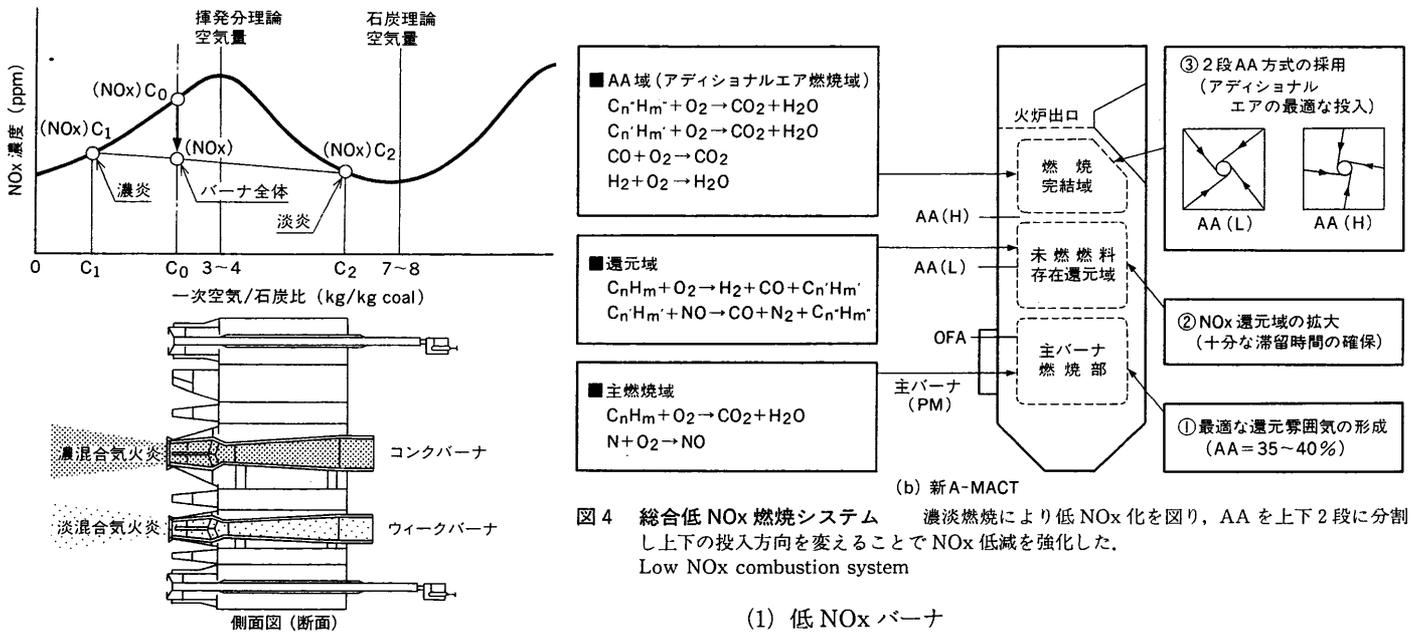


図4 総合低NOx燃焼システム 濃淡燃焼により低NOx化を図り、AAを上下2段に分割し上下の投入方向を変えることでNOx低減を強化した。
Low NOx combustion system

(1) 低NOxバーナ

本ボイラでは低NOxバーナとして下記の特徴を有するPMバーナ⁽⁴⁾を、8コーナに1段の予備を含み合計6段、48本設置している。

- (a) 低NOx運転時においても未燃分の発生が少ない。
- (b) 濃混合気火炎に特有の低負荷における優れた着火安定性を有する。

(2) 新アドバンストMACT

主バーナと一体化したオーバファイアエア (OFA) ポートの上部にNOx還元のための十分な空間を確保してアディショナルエア (AA) ポートを設け一層のNOx低減を図っている⁽⁶⁾。本方式を新アドバンストMACTと呼んでいる。

(3) 高微粉度MRSミル

ミルは図5に示す世界最大級の130t/hミルが6台(予備1台)設置してある。ミルの上部には回転式セパレータ(MRS)を組み込み、高微粉度の達成と分級性能の向上を図り、特に未燃分発生に支配的な100メッシュ(149×10⁻³mm)以

られた。

相馬共同火力発電(株)新地2号ボイラは、本火炉方式を採用した3缶目の石炭だきユニットであるが、予想どおり高い信頼性が確認され、世界から注目される⁽⁹⁾垂直管火炉方式超臨界圧変圧運転ボイラが完成した。

当社では引続き、本火炉方式を採用した東北電力(株)原町1号や中国電力(株)三隅1号の1000MWボイラで同等以上の成果を目指すとともに、今後計画される新設ボイラへの採用を提案していくこととしている。

3. 低NOxと低灰中未燃分の達成

NOx及び灰中未燃分低減対策として図4(a), (b)に示す低NOxバーナ、炉内脱硝(新アドバンストMACT)及び高微粉度MRSミルを組合せた総合低NOx燃焼システムを採用している。



図5 回転分級器付 130 t/h ミル 世界最大級のミル (1000 MW ボイラでミル運転台数 5 台).
130 t/h pulverizer with rotary separator

上の粗粉量を大幅に削減している。

また、このミルはローラと粉碎テーブルライナが直接接触しない構造であり、ミルの振動が起り難い設計としてある。さらに、ミル内に石炭がたい積し難いように考慮されており、ミル火災も起り難い安全な構造としてある。

図6に総合低NOx燃焼システムの調整を行った燃焼試験の結果を示す。NOx 180 ppm、灰中未燃分5%以下という計画に対し、燃料比、N分とも高くNOx、灰中未燃分とも増加する傾向にあるN炭を含めたすべての試運転使用炭で大幅な低減が確認され、NOx 150 ppm、灰中未燃分3%を十分下回るレベルが実現できた。

4. ボイラ性能

試運転期間中の性能試験の結果を図7に示す。MRSミルの粗粒低減効果による低空気過剰率運転（定格負荷時10~15%）の実現や未燃損失の低減により計画値89.2%に対し米国SL炭で91.61%と十分に高い効率が得られた。

またボイラ側所内率も2.1%の計画に対し約1.7%と低減できた結果、高い発電効率43.34%（計画値41.9%）の実現に貢献することができた。

5. むすび

近年の地球的規模での環境問題及び燃料事情から、石炭だき火力発電プラントに対し、従来からの多炭種対応、中間負荷運用機能に加え、プラント効率の向上と万全の公害対策が要求されている。ここでは、これらの要求を満たして建設された相馬共同火力発電(株)新地2号ボイラの概要について紹介したが、世界的に注

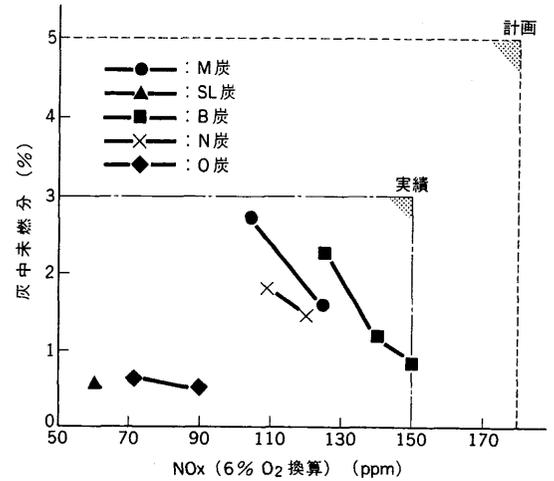


図6 NOx未燃分特性 NOx 150 ppm以下灰中未燃分3%以下を実現。
NOx v.s. unburnt carbon in fly ash for various coal

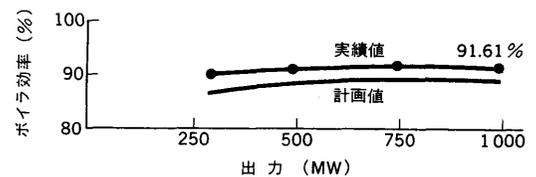


図7 ボイラ効率 (SL炭) 高いボイラ効率が得られた。
Boiler efficiency for SL coal at performance test

目を集める垂直管火炉方式の超臨界圧変圧運転ボイラが1000 MWボイラとして優れた運転結果を得たことによって、本方式に対する高い評価が確立された。今後、垂直管火炉方式への関心が一層高まることが予想され、本報告が新鋭火力発電設備の計画を行う上で関係各位の参考となれば幸である。

当社はこの貴重な経験を今後の設計に反映するとともに、更なる技術の研さんに努め、電力事業関係各位の御期待にこたえて火力発電プラントの新たなニーズに対応していく所存である。

最後に本ボイラの建設に当たり基本計画から試運転に至るまで、終始御指導、御協力いただいた相馬共同火力発電(株)の関係者各位に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Iwabuchi, M et al., Heat Transfer Characteristics of Rifled Tube in Near Critical Pressure Region, Presented at the Seventh International Heat Transfer Conference, September, 1982
- (2) 河村ほか, 垂直蒸発管形大容量超臨界圧変圧運転貫流ボイラ, 三菱重工技報 Vol.17 No.2 (1980)
- (3) Franke J. (Siemens AG) et al., Evaporator Designs for Benson Boilers (State of the Art and Latest Development Trends), VGB Kraftwerkstechnik 73, Number, 1993
- (4) 高橋ほか, 微粉炭焚き低NOxPMバーナの開発, 三菱重工技報 Vol. 18 No.3 (1981)
- (5) Takahashi, Y. et al., Development of Mitsubishi "MACT" in-furnace NOx Removal Process, Presented at U. S. - Japan NOx Information Exchange, Tokyo, Japan, May, 1981