

神鋼神戸発電所1号機的设计

Design for Kobe Power Station No.1



中 村 眞 二 仲 西 正 孝
菅 沼 博 丸 山 隆

神鋼神戸発電(株)神鋼神戸発電所1号機700 MW石炭焚きプラントは、世界最大級の電力卸供給設備として平成14年4月に営業運転を開始した。本プラントの主要設備であるボイラ/タービン設備は一括三菱重工業が担当し最新の技術を適用している。本報では、これら機器に適用した最新技術の紹介とこれまで多くの時間を要していたタービン建屋内のプラント配管計画にコンカレントエンジニアリングの手法を適用したので、この概要を紹介する。

1. ボ イ ラ

1.1 超臨界圧変圧運転貫流ボイラ

ボイラ主要仕様を表1に、ボイラ側面図を図1に示す。

- 1989年に当社が世界で初めてライフル管を使用した垂直管型超臨界圧変圧運転ボイラを製作し、当社実績は現在建設中の2缶を含め神鋼神戸1号ボイラで合計10缶となる。ライフル管を使用した垂直管火炉方式には、以下の利点がある。
- (1) 火炉壁管内の重量速度が低いので、圧損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が少なく、信頼性、据付け、保守性に優れている。
 - (3) 石炭焚きユニットでは、スラ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、火炉熱吸収変動時の流量変化が少ない。
 - (5) 超臨界圧変圧運転ボイラの経験が少ない客先にとってなじみ深いドラム型と同じ火炉構造であり、取扱いが容易。
- 昨今、この垂直管火炉方式の変圧運転貫流ボイラが欧米に

おいて注目を集めている中、当社は世界で唯一豊富な実缶実績を持つメーカとして、今後も信頼性の高い垂直管火炉ボイラを納入していく予定である。また、蒸気温度特性は、SHスプレーやガス分配ダンパ等の制御パラメータが適正範囲の下ですべての使用炭にて全負荷域にわたり、計画どおりの主蒸気・再熱蒸気温度が維持できた。

ボイラ主要補機についても独自技術である三菱型再生式空気予熱器及び三菱製軸流式押込通風機、誘引通風機及び遠心式一次通風機を採用した。

1.2 低NO_xの実現

都市部に隣接した立地条件に伴い、本ボイラでは非常に厳しい環境数値保証を求められている。

この対策としてNO_xに対しては、三菱旋回燃焼にA-PMバーナ(Advanced-Pollution Minimum)、炉内脱硝(A-MACT)、高微粉度MRS(Mitsubishi Rotary Separator)及び排煙脱硝装置を組み合わせた低NO_x燃焼システムを採用した。

(1) A-PMバーナ

石炭バーナには当社の基本技術である濃淡燃焼を適用

表1 ボイラ主要仕様

ボイラ形式	放射再熱式変圧貫流型垂直管火炉ボイラ(屋内式)	
	主蒸気流量	2 340 000 kg/h
最大連続 負荷時	過熱器出口蒸気圧力	25.00 MPa
	過熱器出口蒸気温度	542
	再熱器出口蒸気温度	568
燃 料	石炭、重油(30%容量)	
燃焼方式	A-PMバーナ、A-MACT法による旋回燃焼	
微粉炭燃焼方式	単位直接加圧方式	
通風方式	平衡通風	
起動時熱回収方式	ボイラ再循環ポンプ方式	
蒸気温度 制御方式	主蒸気	給水/燃料比、スプレー
	再熱蒸気	ガス分配ダンパ
		スプレー(危急用)

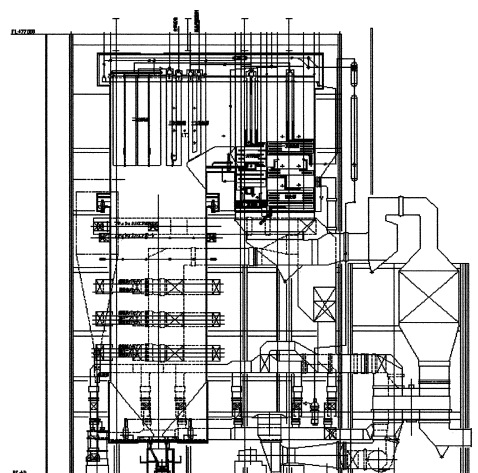


図1 ボイラ側面図

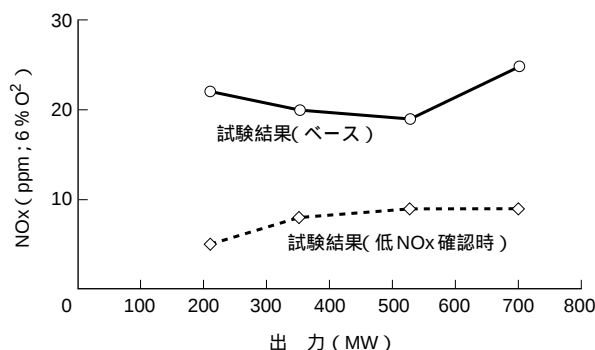


図2 NOx実績



図4 蒸気タービン外観

表2 石炭性状

	標準炭	低燃比炭	高燃比炭
高位発熱量 (kJ/kg)	28980	29060	28520
全水分 (wt/%)	10.0	12.0	12.8
工業分析	固有水分 (wt/%)	6.5	4.9
	固定炭素 (wt/%)	53.9	48.9
	揮発分 (wt/%)	30.9	26.1
	灰分 (wt/%)	11.6	11.0
燃料比 (-)	1.74	1.23	2.22
元素分析	炭素 (wt/%)	72.90	74.80
	酸素 (wt/%)	8.62	12.85
	水素 (wt/%)	4.83	5.58
	窒素 (wt/%)	1.21	1.10
	全硫黄 (wt/%)	0.47	0.38
粉砕性 (HGI)	54	51	61

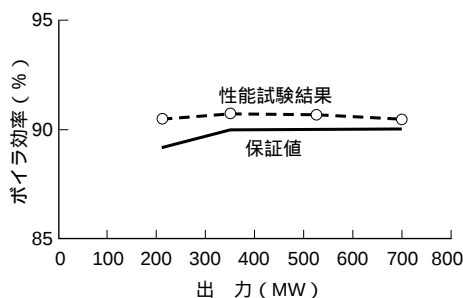


図3 ボイラ効率

表3 蒸気タービン主要仕様

項目	仕様
型式	一軸4流排気式再熱復水形
出力	700 MW
蒸気条件	
主蒸気圧力	24.1 MPa
主蒸気温度	538
再熱蒸気温度	566
回転数	3600 rpm
真空度	-96.3 kPa
最終翼長	40 インチ
給水加熱器	8

1.4 ボイラ性能

性能試験結果のボイラ効率を図3に示す。高い燃焼性能を有するA-PMバーナ+A-MACT及びMRSミルの採用により、ボイラ効率実測値は100%負荷から30%最低負荷に至るまで保証値又は計画値を十分に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。

1.5 ゾーンモジュール工法

現地工事期間の短縮を図るべく、ボイラのモジュール化を徹底し、ゾーンモジュール工法、ボイラ胴切りモジュール工法を採用した。これに関しては、重工技報 Vol.38 No.2 (2001-3) に詳しく記載している。

2. 蒸気タービン

図4に神鋼神戸1号タービンの外観を、表3に蒸気タービンの主要仕様を示す。

タービンは高圧、中圧タービンを一体フレームとしたコンパウンド車室と低圧タービン2車室を一つの軸でつないだタンデムコンパウンド型式であり、当社としては3車室構造の最大容量機となる。高圧タービンは、単流設計であり、調速段1段及び反動段8段から成る。中圧タービンは高圧タービンと対向の単流設計であり、反動段5段から成る。高中圧タービンロータは主蒸気、再熱蒸気温度は、従来のコンベンショナル火力と同様であるが、当社と(株)神戸製鋼所にて共同開発した630級に対応可能な先進12Cr(MTR10A)の一体鍛造ロータが採用されている。低圧タービンは複流設計であり、各流は40インチISB最終翼群を含む反動段5段から構成されている。40インチISB最終翼は60Hz機用スチール翼としては世界最長であり、高砂製作所での実物大供試翼による回転振動試験、実負荷試験用タービン(最終3段を有

し、これまでの連続風箱型PMバーナから一層の低NOx化を実現した。さらに、分割型としたことで風箱ダンパ数の削減、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低NOx A-PMバーナを採用した。

(2) A-MACT炉内脱硝法

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)を投入するA-MACT炉内脱硝法を採用した。

(3) MRSミル

回転式セパレータにより高微粉度運転を安定して実現するMRSミルを採用し、良好な微粉度特性を得るとともに低NOx・低未燃分燃焼に大きく貢献した。

(4) 排煙脱硝装置

以上の低NOx燃焼装置に加え、更なるNOx低減のため、豊富な実績を有する排煙脱硝装置を採用した。

図2にボイラ出口NOx実績値を示す。全負荷帯にわたり良好な性能を確認している。

1.3 多炭種対応

本ボイラは、世界各地から供給される幅広い瀝青炭(設計瀝青炭全16炭種)に対応した設計としている。当社で開発した多炭種対応制御¹⁾を適用することで、低燃料比炭から高燃料比炭まで3炭種のみを用いた試運転調整により設計16炭種に対して所定の蒸気温度特性・燃焼特性が得られるようにしている。

表2に試運転時に使用した石炭性状を示す。

する試験タービン)による検証を平成10年にすべて完了し世界に先駆けて開発・実機に適用されたものである。また、この40インチISBを包む車室は軸受を基礎支持する構造や、高性能排気室を採用した高性能・高信頼性を有する最新鋭低圧タービンフレームである。

神鋼神戸1号タービン発電設備は国内最大のIPPプラントであると同時に、地域密着型の都市型発電設備であることから、夜間の部分負荷運用、日中の抽気運用を始めとして様々な条件にて運転されることを想定して計画されている。

2.1 設計上の特徴

従来の大容量火力機538/566 蒸気タービンは中圧入口部に調速段出口の蒸気を導入し、中圧入口翼溝部を冷却しているのに対して、神鋼神戸1号タービンでは、ロータ材に630 級先進12Cr鋼を採用していることから、この冷却構造を廃止し、更なる性能向上に寄与する設計を採用している。また低圧タービンには、十分な検証がなされたスチール40インチ最終翼や、軸受基礎支持構造、高性能排気室等の高性能・高信頼性技術が採用されている。

2.1.1 高温用材料

超高温ガスタービンディスク材として長年の使用実績がある10Cr6Co鋼を基にCoの高温域で炭化物を安定化させる特徴をいかし、蒸気温度630 の使用範囲で優れた高温強度と靱性を確保した先進12Crロータ(MTR10A)を開発し、神鋼神戸1号に採用している。

また、従来機では566 の蒸気に直接さらされる動翼には高温クリープ対策としてオーステナイト系超合金鋼を採用していたが、先進12Crロータ材に対して製鋼方法のみを変えて開発された先進12Cr動翼材(MTB10A)も採用している。

2.1.2 40インチISB低圧タービン

低圧最終段には700 MW機として排気損失が最適な40インチISBを採用している。1980年代後半における3600 rpm機のスチール最長翼は、33インチクラスで、当時として40インチ最終翼はTi合金で製作していた。当社では、1990年初めからインテグラルシュラウド構造及び大型翼根を採用したISB最終翼群を開発し、その豊富な設計と運転実績を基にスチール翼による40インチまでのシリーズ化を完成させた。

また、排気室形状は最新CFDを用い、最終翼と一体で解析・設計することにより排気損失の低減を図っている。低圧車室は外車室と軸受支持部を別体とし、軸受を基礎に設置する構造を採用することで、軸受部が車室変形の影響を受けないことから軸安定性の更なる向上を図っている。

2.2 運転実績と実機検証結果

2.2.1 630 対応12Crロータ

神鋼神戸1号実機ロータの各位置から採取した試験片の機械的性質は図5に示すとおり、全域にわたって均一分布となっている。

また、中心孔の超音波探傷検査においても良好な結果が得られている。

2.2.2 40インチISB低圧タービン

40インチISB最終翼を含む低圧タービンは工場での回転振動試験や車室も実機と完全に同じ構造を模擬したフルスケー

ル実負荷試験を通じて、信頼性、性能を総合検証し、実機に適用した。そして平成15年4月の初回定検でも、その健全性が確認された。

2.2.3 軸振動

軸振動はユニットの運転性を示す重要な要素である。定格出力運転時に各軸受部で計測した軸振動レベルを図6に示す。同図に示すように、軸振動レベルも十分小さく非常に安定した運転が達成されている。

2.2.4 性能

本ユニットは高中圧一体フレームとして最大級の700 MW蒸気タービンであり、高中圧タービンには完全三次元設計反動翼を、低圧タービンには40インチISB最終翼群を採用するとともに、排気部形状も最適化し高効率確保のための最新設計を実施した。

その結果、引渡性能試験においてタービン効率は図7に示すように全負荷において計画値(保証値)を上回っており、大容量高性能火力機であることを確認した。

3. プラント配管設計

プラント配管設計では、配管ルート計画とともにハンガー計画は重要であり配管設計時間に大きな影響を与えることになる。以下に配管ルート計画とハンガー計画を同時期に実施するコンカレントエンジニアリングによる合理化を行ったの

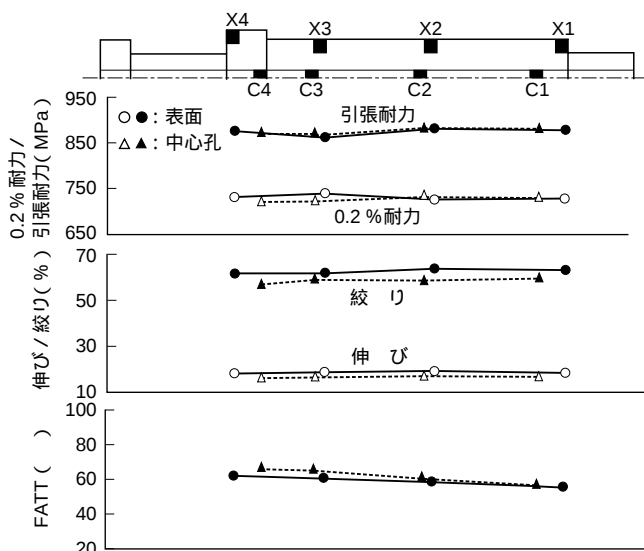


図5 高中圧ロータの品質

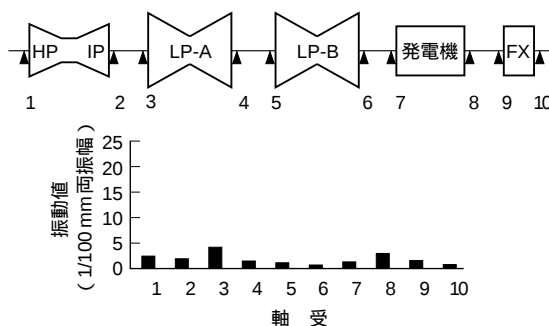


図6 軸振動計測例

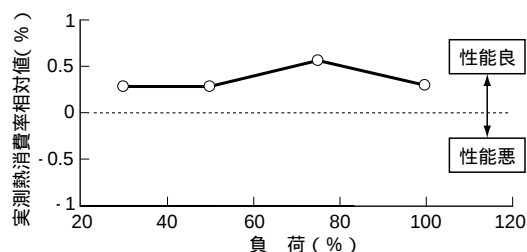


図7 タービン性能試験結果

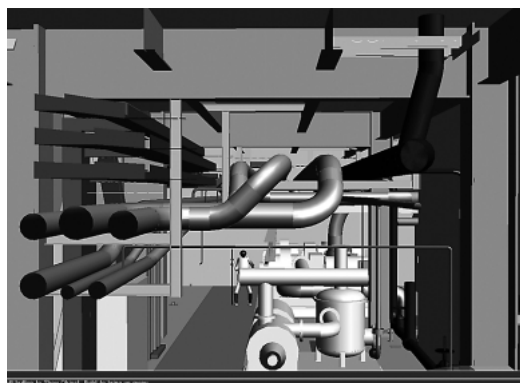


図9 コンカレントエンジニアリングによる設計例

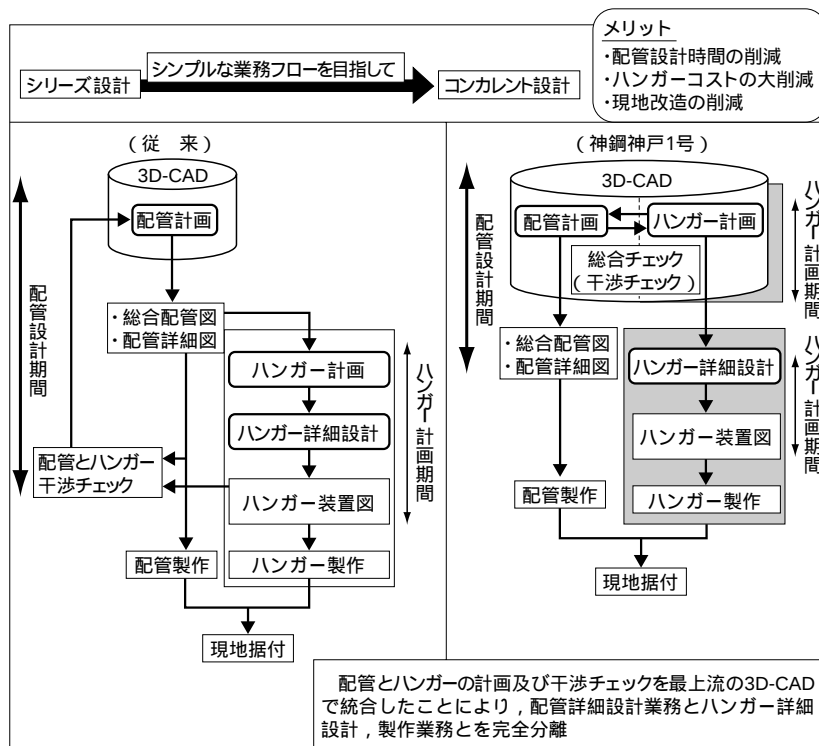


図8 ハンガー設計手法の変更

で以下に概要を報告する。

3.1 設計手法の変更

図8(従来)に示すように従来のハンガー設計は、三次元CADを使用し設計された総合配管図/配管詳細図及び建置図面等の二次元の図面をハンガーマーカへ提示し、ハンガー計画/詳細設計及び製作を任せていた。この過程では、メーカーより一度入手したハンガー詳細図をもとに干渉チェック及び経済設計のチェックを行い、必要に応じ、配管ルートの計画に戻って調整を実施するという手戻り作業をしながら最適な計画を詰める、いわゆるシリーズ設計を行っていた。

これに対し、本プロジェクトでは近年のハードウェアの急激な性能向上により三次元設計で最も重要な機能である干渉チェック機能が十分活用できるようになったこともあり図8(神鋼神戸1号)に示すコンカレントエンジニアリング手法を採用した。

この手法の主な特長は以下のとおりである。

- (1) ハンガー専門エンジニアリング会社にも基本設計のみを発注し、社内で構築した配管三次元CADモデルを用いて、ハンガー基本計画と配管計画を共同で実施する。
- (2) 三次元CADモデルで干渉等の総合チェックを実施する(コンカレントエンジニアリング)。
- (3) 基本設計確定後にハンガー詳細設計、製作をメーカー数社に引き合い競争力のある価格を引き出す。

3.2 コンカレントエンジニアリングによる効果

コンカレントエンジニアリングをベースとした設計手法の適用により以下の効果が得られた(図9参照)。

- (1) 手戻り作業がなくなり設計工数の大幅な削減が図れた。
- (2) 三次元CADを用いることにより早くて正確な設計ができ、以下に示すとおり配管及びハンガーの最適設計がより

確実なものとなった。

b ハンガ - 重量削減によるコスト大幅低減。

b ハンガー形状の最適化。

b ハンガー配置の集約等による部品点数の削減。

三次元CADモデルによる干渉チェックがよりきめ細かく確実に行え現地改造工事がほとんど無くなった。

4. ま と め

神鋼神戸発電所1号機は、ここに紹介した最新の技術を活用した世界最大級の電力卸供給設備として期待どおりの性能を発揮している。また、本プラントは都市部に立地しておりボイラの大型モジュール適用など設計/建築全般にわたり細かな配慮を払っている。本プラントで得られた成果は、今後のプラント計画/建設に大いに貢献できるものと確信している。

参 考 文 献

- (1) 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(1999-1) p.22



中村 眞二
原動機事業本部
火力プロジェクト部
プラント技術一課長



仲西 正孝
原動機事業本部
火力プロジェクト部
配置土建技術課主幹



菅 沼 博
原動機事業本部
ボイラ技術部
ボイラ技術一課



丸山 隆
原動機事業本部
タービン技術部
タービン技術開発課