高効率石炭火力発電プラント

High-Efficiency Coal Fired Power Plant

森谷新一* *Shin'ichi Moriya*　酒井和人** *Kazuhito Sakai*
浦　勝巳* *Katsumi Ura*　坪内邦良*** *Kuniyoshi Tsubouchi*

奥が2号機ボイラ

第2号機タービンの据付け状況

東北電力株式会社原町火力発電所第2号機の建設状況
世界初の600/600 ℃蒸気温度を採用した石炭燃焼1,000 MW火力発電プラントの建設が急ピッチで進められている。

世界で初めての24.5 MPa(250 kg/cm²·g)600/600 ℃の高蒸気条件を採用することによって高性能化を図った1,000 MW石炭燃焼火力発電プラントの建設が，東北電力株式会社原町火力発電所第2号機で1998年7月の営業運転開始を目指して進行中である。ここに日立製作所とバブコック日立株式会社は，この設備の主要機器メーカーとして，1,000 MW蒸気タービン・発電機設備と2,890 t/hボイラ設備を納入する。

この発電プラントの建設にあたっては，主蒸気や再熱蒸気の高温化に対応して高強度材料の採用と構造に考慮を払うとともに，最新技術による高効率化・高信頼性化を図っている。また，運転支援技術の拡充によっていっそうの省力化を達成している。

さらに，設備の設計から現地作業の細部にわたり，経済的適正化にも考慮を払った技術を適用することにより，総合的にバランスのとれた設備としている。

*日立製作所 日立工場　**バブコック日立株式会社 呉工場　***日立製作所 電力・電機開発本部 工学博士

1. はじめに

大容量火力発電プラントの高効率化技術には，蒸気条件の高圧化・高温化，タービン最終段翼の長大化などが有効である。最近の傾向としては，主蒸気圧力は従来の24.1 MPa(246 kg/cm²･g)からあまり上昇しない24.5 MPa(250 kg/cm²･g)程度として，温度だけを593～600 ℃とした発電プラントが建設されるようになっている。これは，1980年代から開発研究を推進しているUSC(Ultra Supercritical)発電プラント技術開発の成果の中から，600 ℃までの高温化が図れる，比較的設備コストに影響の小さい9Cr，18Cr鋼系ボイラ材料および12Cr鋼系タービン材料が，いち早く実際の設備に取り入れられた結果である。

日立グループでは，ボイラ技術をバブコック日立株式会社が，蒸気タービン技術を日立製作所が中心となってそれぞれ研究開発を推進している。今回，東北電力株式会社原町火力発電所第2号機(以下，原町2号機と言う。)1,000 MW発電プラントの建設で，初めてこの技術を総合的に適用することができた。また，高温化のほかにも各種の性能向上のための新技術を採用し，先行実績機に比べて発電端効率で2.7%(相対)の向上を達成している。

ここでは，火力発電設備の高効率化を目指して，総合的な見地から開発を推進してきた1,000 MW実発電プラントの概要について述べる。

2. プラント計画

発電プラント計画諸元を先行実績機と比べて**表1**に示す。主な特徴は次のとおりである。

(1) 高蒸気条件の採用

このプラントでは，高蒸気条件の採用による高効率化と経済性を追求した結果，圧力24.5 MPa(250 kg/cm²･g)と温度600/600 ℃の組合せが採用された。これにより，発電効率を先行実績プラントに比べて約2.7%(相対)向上させることができた。また，ボイラ蒸発量も先行実績プラントに対して約6%(190 t/h)程度低減できた。

なお，高蒸気条件の採用によって一次側(3,000 r/min：高圧-中圧)と二次側(1,500 r/min：低圧)の負荷分担が従来機から変更となったので，発電機容量の見直しを行っている。

(2) システム構成

ヒートサイクル構成(抽気，給・復水系統)や冷却水系統などのシステム構成については，先行実績プラントと同等とした。

表1 発電プラント計画の諸元比較

高蒸気条件の採用などにより，先行実績機に比べて約2.7%(相対)の熱効率向上を図った。

項目			単位	先行実績機	原町2号機
基本計画条件仕様	定格出力		MW	1,000	1,000
	蒸気条件		MPa	24.1(246 kg/cm²･g)	24.5(250 kg/cm²･g)
			℃	538/566	600/600
	燃料		—	石炭専焼	
	出力		MW	1,000	1,000
	復水器真空		kPa	−97.06(728 mmHg)	−97.06(728 mmHg)
主機仕様	ボイラ	形式	—	屋外型超臨界圧貫流変圧	
		蒸気圧力	MPa	25(255 atg)	25.4(259 atg)
		蒸気温度	℃	542/567	604/602
		蒸発量	t/h	3,080	2,890
	タービン	形式	—	2軸形4流排気	
		回転数	r/min	3.000/1,500	3,000/1,500
	発電機	形式	—	横置円筒回転界磁形	
		容量	MVA	634.8/519.9	652.9/475.2
		励磁方式	—	サイタリスタ	サイタリスタ

3. 蒸気タービンの新技術

50 Hz向け1,000 MW蒸気タービンは，従来41インチ長翼を用いたクロスコンパウンド(2軸形)機を採用している。したがって新設計要因は，600/600 ℃に対応する高強度材料の採用と，内部効率向上のための新技術採用にある。

566 ℃を超える高温用タービン材料や構造技術は1981年から鋭意開発してきた[1]。実機に適用するにあたっては，試作品による確認試験を含めて十分に検討を加え，**図1**に示す各種技術を採用した。

3.1 高温用新材料

600 ℃蒸気に直接当たる弁類や蒸気導入管には9Cr-1Mo鋼を，中圧No.1内部車室には12Cr鋳鋼を，また高圧内部車室にはCr-Mo-V-B鋳鋼(1.3Cr1.1Mo0.3V0.001B)をそれぞれ採用した(**図1**参照)。

また，代表的なものについては下記に述べるように，試作品による確認試験を実施した。

(1) 主蒸気導入管の試作：鍛造による曲げ管の製造性と材料強度，および高圧外部車室(Cr-Mo-V鋳鋼)との構造溶接性を確認

(2) 主蒸気止め弁用弁室の試作：自由鍛造による整形性と材料強度，および構造溶接性を確認

なお，高圧・中圧部に使用する新12Crロータ材や新12Cr翼材については700 MW先行実績機に適用済みのため，確認試験は不要であった。

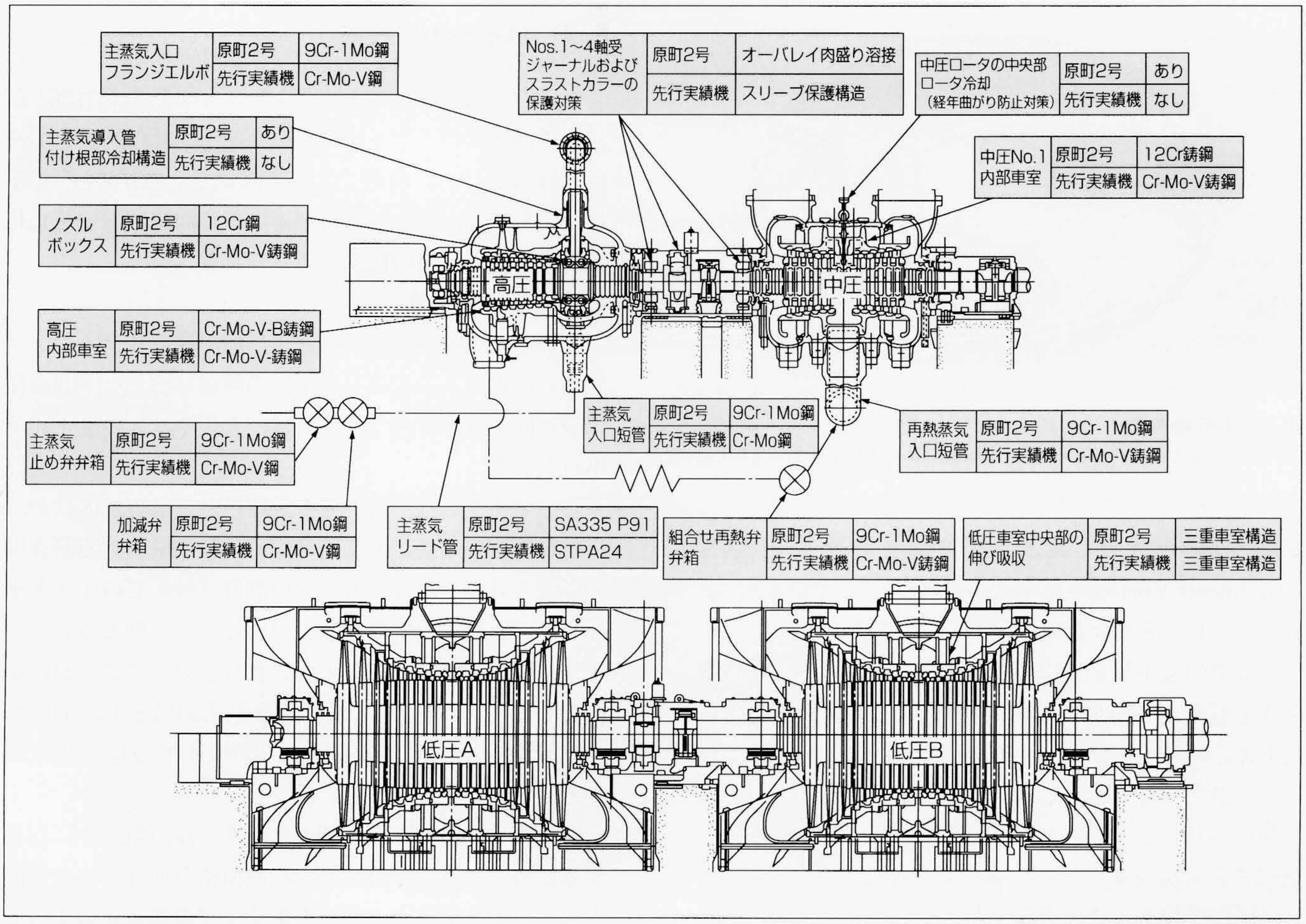

図1　原町2号機1,000 MW蒸気タービンの新技術
600/600 ℃対応技術として，原町2号機では高温用新材料と新構造を採用した。

3.2　高温用新構造

同様に，高温用材料とあわせて信頼性向上のために採用した新構造についても下記のとおり確認を行った。

(1)　軸受部のオーバレイ施工技術：新12Crロータ材の主軸受部については，従来のスリーブ焼きばめによる保護策に代えて，オーバレイ方式を採用した。また，本機ではスラストカラー部の保護も必要なので，その施工技術を実物大ロータ片を用いて確認した。

(2)　主蒸気導入管・構造溶接部の冷却技術：9Cr-1Mo鋼の導入管とCr-Mo-V鋳鋼の外部車室との構造溶接部を低温蒸気によって冷却する構造を採用した。その冷却効果については解析によって確認した。

3.3　高効率化新技術

高温化による熱効率向上に加えて，最新のAVN (Advanced Vortex Nozzle)を適用して効率向上を図った(**図2**参照)。なお，この新ノズルの効果は最近運開した145 MW機ほかによって確認ができている。

3.4　経済的適正化検討

この1,000 MW機では，高圧および中圧外部車室素材の海外調達，および中圧外部車室に組合せ再熱弁・弁室を構造溶接した状態(**図3**参照)で現地に搬入して据付け工数低減を図るなど，経済的適正化を図った設計も取り入れている。

3.5　将来技術の展望

以上述べたほかに，現在，さらに新しい技術開発が進行しているので，今後設計する1,000 MW級蒸気タービンでは，下記に示す技術の採用も可能となる。

(1)　長翼化：1,000 MW機では，従来41インチ長翼(50 Hz)や43インチ長翼(60 Hz)が使われている。より大きいものとしては，52インチ長翼を開発している[2]。さらに，現在48インチ長翼の開発が進行中であり，これらと組み合わせることにより，冷却水温度に最適な形式選定が可能となる。

(2)　高効率化：AVN理論によってタービン段落(ノズル

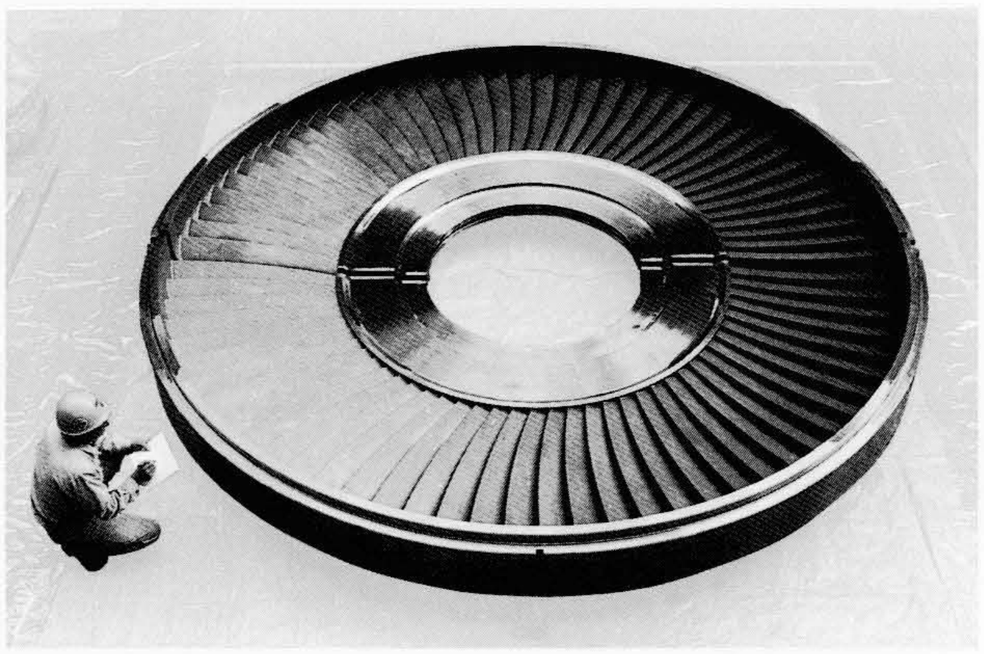

図2　高性能AVN
原町2号機では，高圧初段を除く全段落に新ノズルを採用している。

と動翼)を一括して解析し，最適化を図ったAVS(Advanced Vortex Stage)の開発を完了している[3]。これによるいっそうの高効率化も可能である。

(3)　経済的適正化を推進する観点から，いっそうの海外調達と軽量化を図り，ブロック輸送などの技術を開発していく。

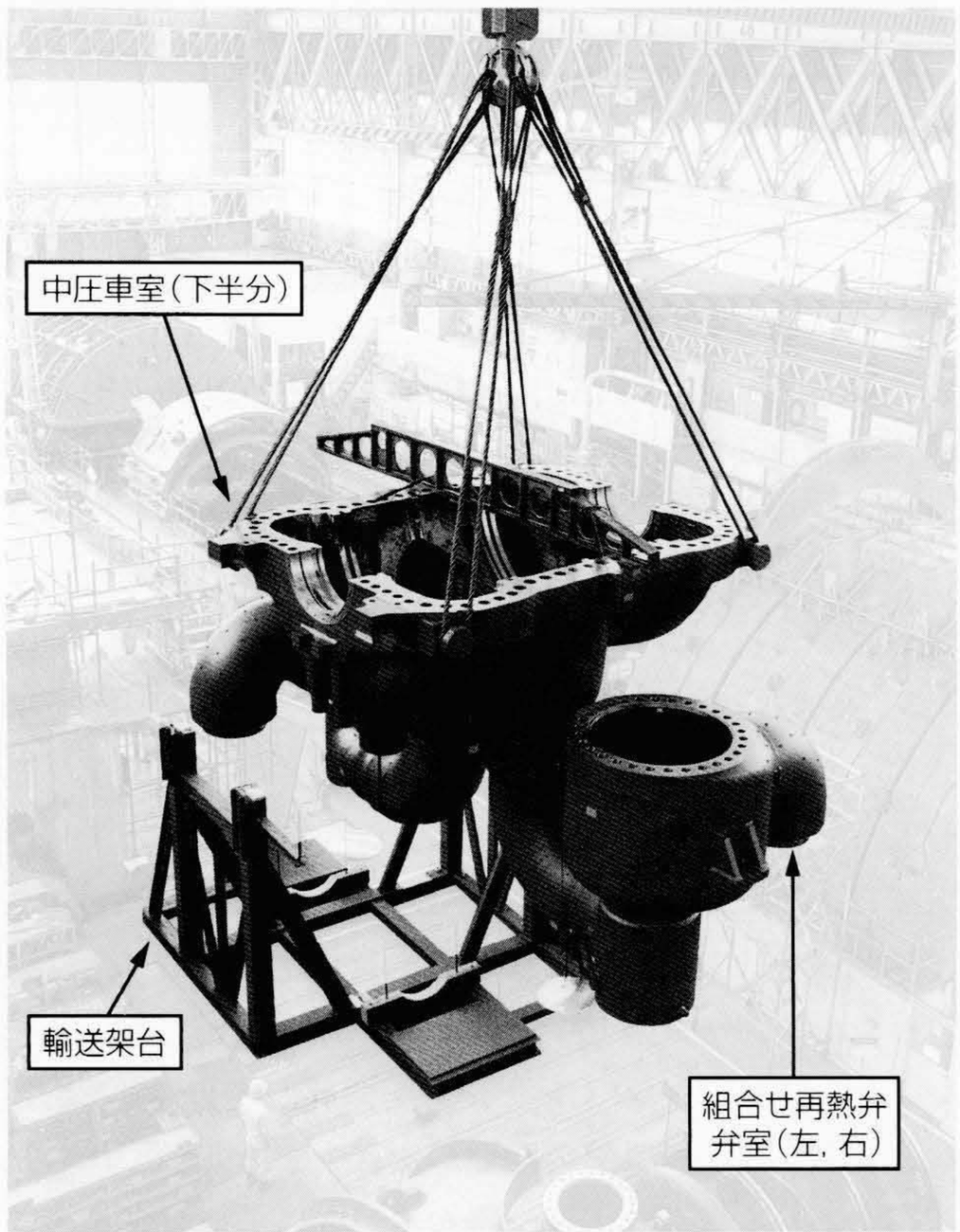

図3　中圧車室の輸送形態
現地据付け作業工数低減のため，組合せ再熱弁弁室は中圧車室(下半分)に工場で溶接してから一体で輸送した。

4．ボイラの新技術

高効率，運用性重視というニーズを満足するため，信頼性の高いスパイラル水壁を持つ変圧運転ベンソンボイラを採用した。このボイラの特徴である600/600℃対応技術としては，過熱器や再熱器の伝熱面積配置の適正化と高温・高強度材の採用があげられる。

4.1　ボイラの構造

火炉サイズは，燃焼性能および使用炭のスラッギング特性の観点から決定されるが，過熱器と再熱器伝熱面積の合理的な設計を行うためには，火炉サイズの適正化が不可欠である。

このボイラでは，海外産多炭種の歴青炭専焼のほか，一般に灰溶解温度が低く灰付着が比較的激しい亜歴青炭の混焼も計画されている。大型燃焼試験炉でのテストを通じて，一般的な歴青炭との混炭比を低く抑えることにより，歴青炭とほぼ同等の灰付着特性を示すことを確認している[4]。亜歴青炭の混炭比を最大30%とし，混炭する歴青炭を適正化することで火炉サイズの適正化を図った。

このボイラの側面図を**図4**に示す。高蒸気条件に対応するため，過熱器や再熱器の伝熱面積を増加させた設計としている。上述のように火炉サイズの適正化によって過度の伝熱面積の増加を抑制し，ボイラの応答性を損なわないように配慮している。さらに，過熱器には三段スプレー方式を採用する一方，再熱蒸気温度制御にはガス再循環とパラレルガスダンパ方式を併用し，炭種差によるボイラ特性差に対応することとしている。

4.2　高温・高強度材の採用

高蒸気条件採用にあたっては，高強度材を適用して耐圧部の厚肉化を抑えて熱応力を緩和するとともに，圧力損失の上昇を抑えることが必須である。このボイラでは，次に示す高強度材を採用して薄肉化を図り，信頼性を向上させた設計とした。

(1)　つり下げ過熱器伝熱管には火SUS304J1HTB(18Cr9Ni3CuNbN)を採用した。この材料は高温強度が非常に高く，大幅な薄肉化が可能となっている。この採用にあたっては，強度特性はもちろんのこと，溶接性，加工性についても慎重にテストを繰り返し，問題のないことを確認した[5]。

(2)　つり下げ再熱器には，先行機である500 MWボイラ(蒸気温度：566/593℃)ほかで実績がある火SUS321J1HTB(18Cr10NiTiNb)を採用した。600℃採用にもかか

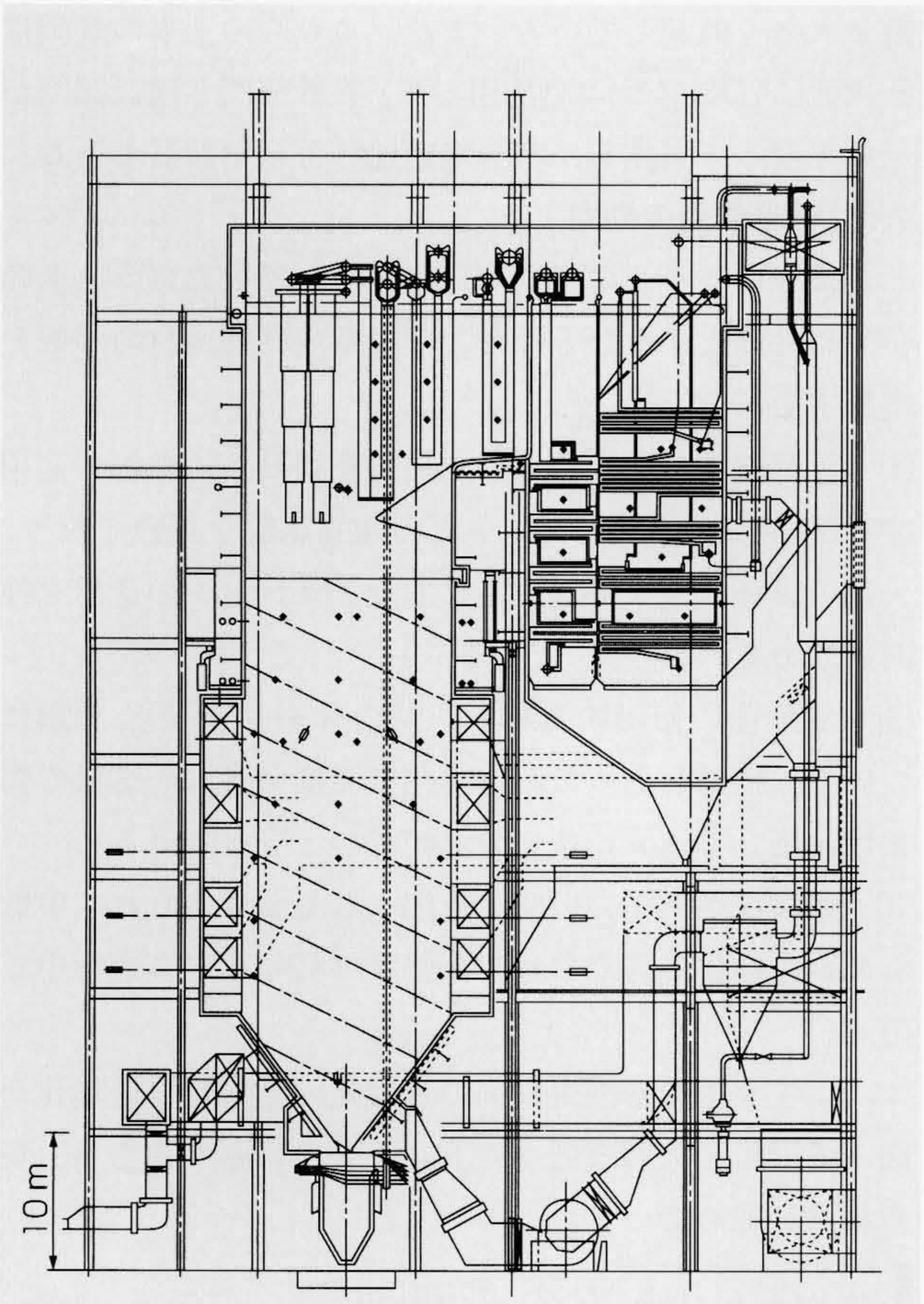

図4　原町2号機ボイラの側面図
火炉サイズの適正化，および過熱器・再熱器伝面配置の合理化により，良好な応答性を持つように配慮している。

わらず，その高強度のために，従来ボイラと同等の肉厚とすることができた。

(3)　二次過熱器出口から四次過熱器出口間の管寄せや連絡管・主蒸気管には火STPA28(9Cr1MoVNb)を，二次再熱器出口管寄せから再熱蒸気管には火SCMV28をそれぞれ適用した。この材料は，538/566℃ボイラでも採用実績がある，信頼性の高い高強度フェライト材である。

4.3　燃焼新技術

石炭燃焼ボイラの高効率化のためには，燃焼効率の向上が必須である。バブコック日立株式会社は，火炎内脱硝を基本原理とする日立NRバーナに続いて，高温還元炎の強化を図っていっそうの低NOx化，および燃焼効率の向上を実現した日立NR2バーナを開発した(**図5**参照)。先行の500 MW，1,000 MWボイラに引き続いて，このボイラにも大容量バーナ42本を設置している。また，バーナ性能の向上により，低空気過剰率での運用がどの炭種でも可能となり，節炭器出口15%としてボイラ効率の向上を図っている。

さらに，**図6**に示す世界最大級の大容量ローラ式微粉炭機(MSP300)を6台設置している。微粉粒度を向上させるために回転式分級機を採用し，灰中未燃焼分を低減する計画である。

4.4　据付け工事の合理化

このボイラの据付けでは，最新式のACE(Area Composite Erection)工法を採用した。同期化工法の拡大に加

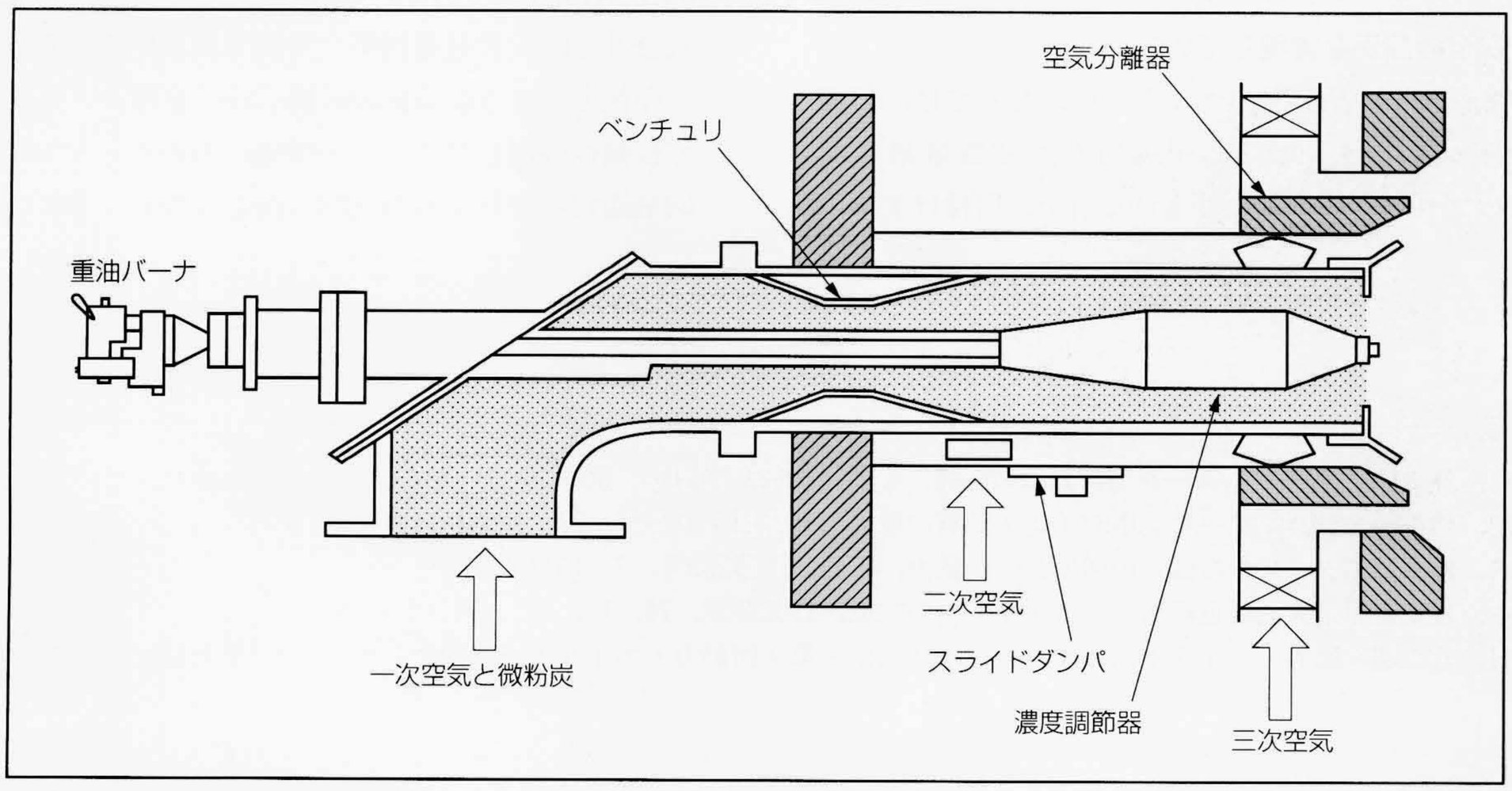

図5　日立NR2バーナの側面図
従来の日立NRバーナに比べて濃度調整器や空気分離器を加え，高温還元炎強化による火炎内脱硝の促進を図っている。

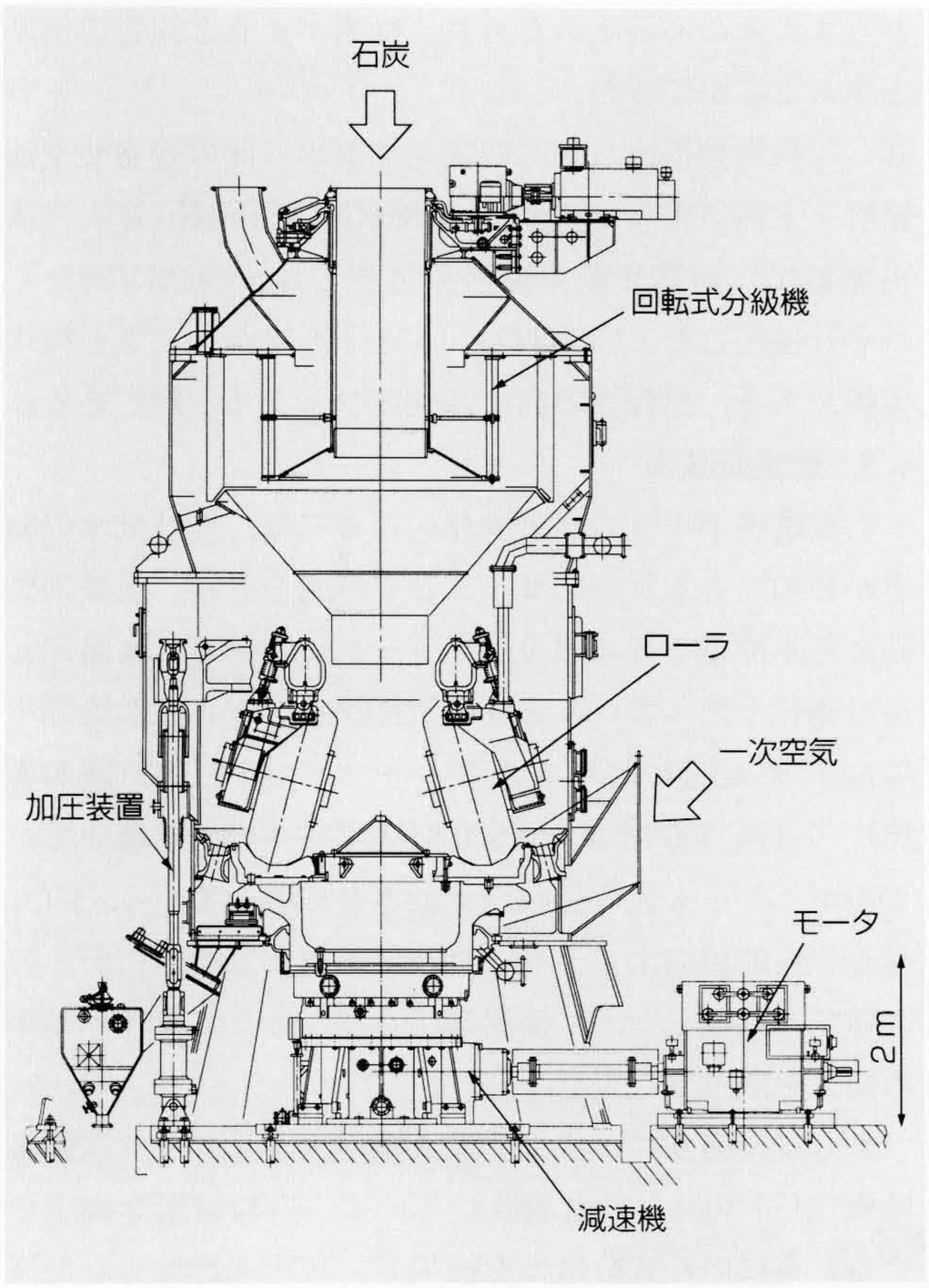

図6　大容量MPS300タイプローラミル
回転分級機を備え，微粉粒度を向上させた設計としている。

え，製品の大型化，ブロック化を指向したモジュール工法，および鉄骨はり・グレーチングを一体化してパネルつり上げを行うフロアユニット工法を駆使し，工事の合理化と安全の確保を実現している。

大型モジュール品などのつり上げにあたっては，新開発の油圧ジャッキシステムを採用して総質量最大約2,100 tのブロックの一括つり上げを行い，据付け工事工数を大きく低減している。また，これらの工事の計画は三次元CADシステムを活用して，設計部門と建設部門が一体となって実施し，安全性確保に万全を期している。

4.5　将来技術の動向

今後もいっそうの高効率化を目指して火力プラントの蒸気条件向上が進むと考え，次の新規高強度材の評価を実施中である。

(1)　蒸気温度の上昇に対しては，管寄せ，連絡管に適用する9～12%Crフェライト鋼の確性試験を進めており，一部の鋼種についてはすでに次期プラントへの適用を検討中である。

(2)　伝熱管に使用する18～25%Crオーステナイト鋼についても検討を進めており，蒸気温度レベルや燃料の腐食性に応じて適宜に使い分けが可能となっている。

(3)　今後は蒸気圧力の向上も図られると考えられ，中低温部の厚肉化を防ぐための高強度材料の検討も進行中である。

(4)　ボイラ構造や燃焼設備の合理化・簡素化・軽量化を図って近年の大幅な低コストニーズに対応するため，鋭意検討を進めている。

5. おわりに

ここでは，火力発電プラントの高効率化を目指して，総合的な見地から開発を推進してきた，9Cr，18Cr鋼系ボイラ材料，および12Cr鋼系タービン材料を使用した1,000 MW実発電プラントについて述べた。蒸気条件を24.5 MPa(250 kg/cm²·g)600/600 ℃として，東北電力株式会社原町火力発電所第2号機で建設中である。

今後ともさらに技術の研鑽(さん)を積み，より高性能で信頼性の高いプラントの開発に努めるとともに，経済的最適化についても意欲的に検討していく考えである。

参考文献

1)　志賀，外：USCタービンロータ用耐熱鋼の開発，金属，1992年11月号，50～56
2)　池内，外：大容量蒸気タービン用52インチ長翼の開発，火力原子力発電，**37**，1，34～44(昭61-1)
3)　坪内，外：蒸気タービンの最近の開発動向，動力，第45巻，第232号，7～15(1996)
4)　福本，外：世界最大変圧運転石炭火力プラントの完成，日立評論，**76**，10，687～692(平6-10)
5)　田村，外：超々臨界圧ボイラ用高強度材の実用化技術，第4回動力・エネルギー技術シンポジウム(平6-12)