

813 MW 石炭専焼 USC タワー型ボイラの運転実績

813 MW Coal-Fired USC Tower Type Boiler

佐藤 勇太	エネルギー・プラントセクタープロジェクトセンターボイラ PJ 統括部
高野 伸一	エネルギー・プラントセクタープロジェクトセンターボイラ PJ 統括部 部長
海宝 哲	エネルギー・プラントセクタープロジェクトセンターボイラ PJ 統括部 主幹
平山 功一	エネルギー・プラントセクタープロジェクトセンターボイラ PJ 統括部 主査

当社は、高発電効率を実現する USC（超々臨界圧）ボイラの技術および豊富な運転実績をもち、近年重要な役割を担っている石炭火力発電の CO₂ 排出量削減とランニングコストの削減に貢献している。2013 年 7 月にお客さまへ引き渡したドイツのリューネン発電所（発電端出力 813 MW）は、USC タワー型ボイラを採用し、低位発熱量ベースで約 46% という世界最高クラスの送電端熱効率を実現した。当社は、ボイラ EPC コントラクターとして本発電所の建設に携わり、ボイラおよび環境設備の設計、製作・調達、据付け、試運転を一貫して実施した。本稿ではプロジェクト概要、USC タワー型ボイラの計画概要と特徴、および試運転実績を紹介する。

IHI has contributed to achieving the global requirement of reducing CO₂ emission and operational costs in coal-fired power plants through improving thermal efficiency by introducing USC (Ultra Super-Critical) boilers. These boilers were developed based on our state-of-the-art technology and abundant experience. IHI supplied USC tower type boilers for Lünen Coal-Fired Power Plant (813 MW of gross output) owned by Trianel Kohlekraftwerk Lünen GmbH & Co. KG and delivered them to the client in July 2013. We successfully achieved 46% net thermal efficiency in the LHV base, which places these it among the world's most efficient coal-fired power plants. IHI was the EPC contractor and responsible for the boiler and air quality control systems (AQCS). This paper presents the project outline, design features and commissioning results of the plant.

1. 緒 言

石炭は世界中に広く分布しているため、比較的価格が安定しており埋蔵量も多いエネルギー資源である。このため、石炭火力発電の需要は今後も伸張していくと期待される。一方、石炭火力発電は単位発電量当たりの CO₂ 排出量がほかの発電方法に比べて多いことから、排出量を削減する取組みがなされている。当社が豊富な設計の見識および建設・運転実績をもつ USC（Ultra Super-Critical：超々臨界圧）ボイラもその一翼を担っている。

USC ボイラの採用によってプラント熱効率が上昇し、発電量当たりの燃料使用量が減るため、CO₂ の総排出量を削減することができる。同時に、燃料コストも削減できるため、CO₂ 削減と省ランニングコスト化の観点から、USC ボイラの需要は全世界的に高まっている。

また、ドイツをはじめとするヨーロッパでは、風力発電や太陽光発電といった再生可能エネルギーの割合が増進しており、その発電量は天候や時間帯によって大きく変動する。こうした背景から、再生可能エネルギーの発電量変動分を吸収できる高い運用性が石炭火力発電にも求められて

いる。

本稿で紹介するトリアネル社（Trianel Kohlekraftwerk Lünen GmbH & Co. KG）のドイツ・リューネン発電所は、高効率と高運用性という市場要求を満足する発電所である。

2. プロジェクト概要

トリアネル社のドイツ・リューネン発電所は発電端出力 813 MW の石炭火力発電所であり、2013 年 7 月に無事お客さまに引き渡された。第 1 図に全景を示す。



第 1 図 トリアネル社ドイツ・リューネン発電所全景
Fig. 1 Trianel Lünen Power Plant

本プロジェクトはドイツ SIEMENS 社とコンソーシアムを組成（第 2 図）し、当社はボイラおよび付帯設備の EPC（Engineering, Procurement and Construction）コントラクターとして、ボイラおよび燃焼設備、環境設備について、基本設計から詳細設計、製作、機器調達、現地据付け、試運転まで一貫して実施した。本工事は当社初のヨーロッパにおける EPC 工事となった。

3. 計画概要と特徴

3.1 基本仕様

第 3 図にボイラ全体組立図、第 1 表にボイラ基本仕様を示す。本ボイラは主蒸気温度 600℃、再熱蒸気温度

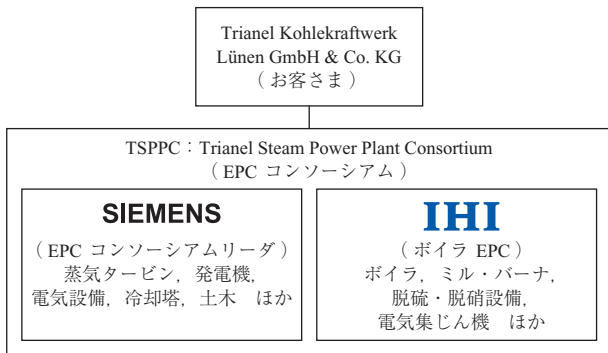
610℃、主蒸気圧力 28.7 MPa の USC ボイラである。型式はヨーロッパでは一般的なタワー型を採用した。日本では門型が主流であるが、タワー型は敷地専有面積が小さく、都市部や狭あい地への設置に適しており、国内においては電源開発株式会社磯子火力発電所新 1 号・新 2 号への納入実績がある。

ボイラおよび環境設備の主な仕様を第 2 表に、システム構成図を第 4 図に示す。微粉炭機（ミル）および微粉

第 1 表 ボイラ基本仕様
Table 1 Boiler specifications

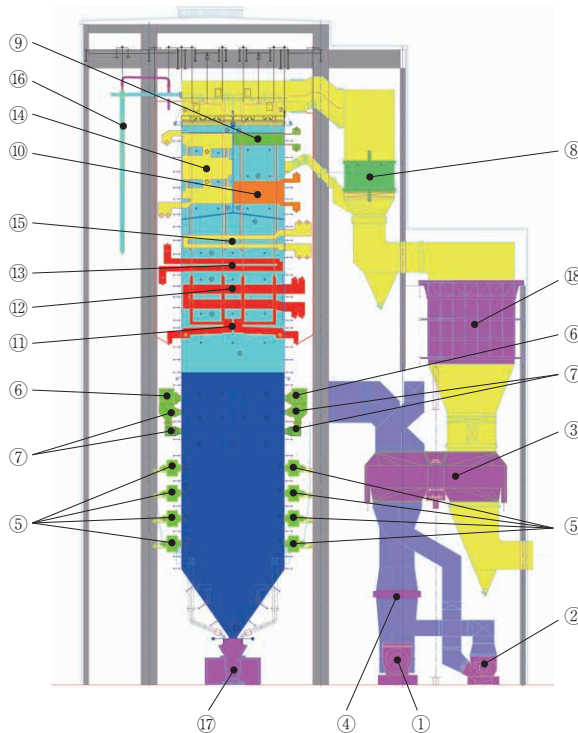
項	目	単 位	仕 様
ボイラ型式		-	変圧運転用超臨界圧貫流形再熱式タワー型
最大連続負荷時	蒸気流量	過熱器出口	t/h 2 225
		再熱器出口	t/h 1 793
	蒸気温度	過熱器出口	℃ 600
		再熱器出口	℃ 610
	蒸気圧力	過熱器出口	MPa 28.7
		再熱器出口	MPa 6.2
給水温度	節炭器入口	℃ 309	
設計大気温度		℃	9
燃 焼 方 式		-	対向燃焼
通 風 方 式		-	平衡通風
石炭専焼最低負荷		%	25
負 荷 変 化 率 *1		%・min ⁻¹	4

（注）*1：60～90%負荷間、VDI/VDE（ドイツ技術者協会の規格）3508 の定義に準ずる負荷変化率



（注）EPC：Engineering, Procurement and Construction

第 2 図 プロジェクト体制
Fig. 2 Project structure



- （注）①：押込通風機
②：1 次通風機
③：再生式空気予熱器
④：蒸気式空気予熱器
⑤：バーナ
⑥：OAP（オーバエアポート）
⑦：SAP（サイドエアポート）
⑧：1 次節炭器
⑨：2 次節炭器
⑩：1 次過熱器
⑪：2 次過熱器
⑫：3 次過熱器
⑬：最終過熱器
⑭：1 次再熱器
⑮：2 次再熱器
⑯：汽水分離器および汽水分離器ドレンタンク
⑰：ボトムアッシュ処理設備
⑱：脱硝触媒

第 3 図 ボイラ全体組立図
Fig. 3 General arrangement of the boiler

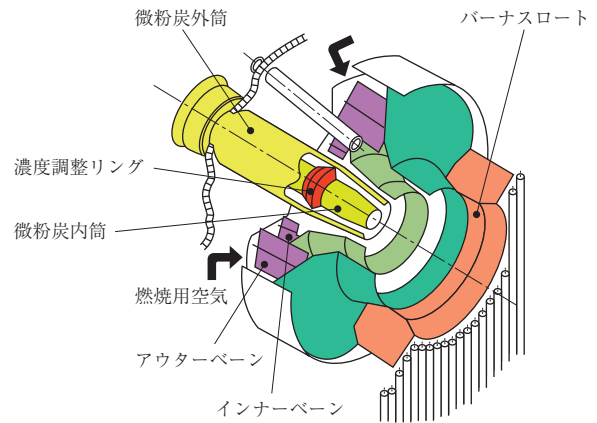
第 2 表 主要設備仕様

Table 2 General specifications of major equipment

名 称	型 式	供 給 者	台 数
微 粉 炭 機 (ミ ル)	IHI-VS 25S	IHI	4
微 粉 炭 バ ー ナ	ワイドレンジバーナ	IHI	32
押 込 通 風 機	軸流ファン	TLT Turbo	1
1 次 通 風 機	遠心ファン	TLT Turbo	1
誘 引 通 風 機	軸流ファン	TLT Turbo	1
再 生 式 空 気 予 熱 器	回転式縦軸型 (クォートセクタ式 ユングストローム型)	Balcke Dürr	1
脱 硝 設 備	乾式アンモニア接触還元法	IHI	1
脱 硫 設 備	湿式石灰石膏法	Andritz	1
集 じん 機	電気集じん機	Balcke Dürr	1
ボトムアッシュ 処 理 設 備	乾式コンベア	Clyde Bergemann	1
フライアッシュ 処 理 設 備	圧縮輸送式	Claudius Peters	1

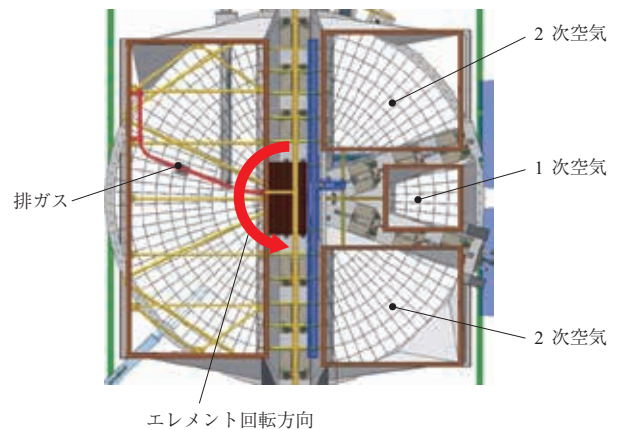
炭バーナは当社製を採用し、微粉炭バーナについては高運用性を達成するため、多くの実績があるワイドレンジバーナを採用した。ワイドレンジバーナは第 5 図に示すとおり、微粉炭外筒内に微粉炭の濃度分布を調整するリングをもつ。これによって、バーナ部で微粉炭濃度が低くなる低負荷域でも安定した燃焼が可能となる。当バーナ採用による運用性の向上については 3.4 節で述べる。

また、空気-ガス系統は 1 系統であり、大型ファンや再生式空気予熱器 (GAH)、環境設備はすべて 1 台構成である。当社は 800 MW 級の発電所における 1 系統の実績がなかったため、各設備設計に当たっては、機器大型化に伴う問題がないか十分検討し、必要に応じて仕様の見直しを行った。一例として、大型化に伴ってリーク率の増加が懸念された GAH については、従来レベルのリーク率を確保するため、国内事業用で多く採用されているトライ

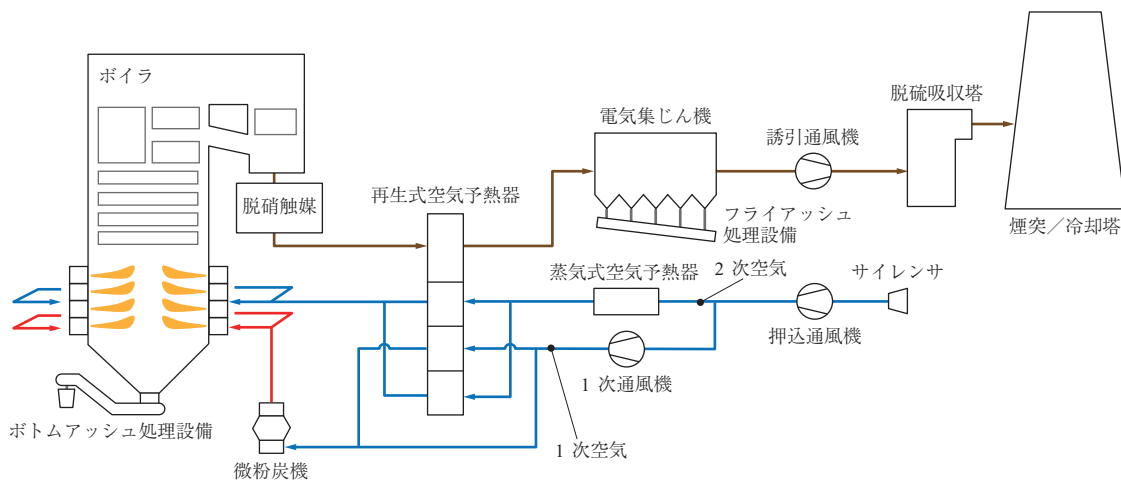


第 5 図 ワイドレンジバーナ構造
Fig. 5 Structure of a Wide Turndown Burner

セクタ型ではなく、クォートセクタ型を採用した。クォートセクタ型は 1 次空気室を二つの 2 次空気室で挟む構造をとっており (第 6 図)、これによって 1 次空気から排ガスへのリーク空気量を低減、従来レベルのリーク率を確保した。



第 6 図 クォートセクタ型 GAH 平面図
Fig. 6 Plan view of the quart sector type GAH



第 4 図 ボイラおよび環境設備のシステム構成図
Fig. 4 System flow diagram of the boiler and air quality control systems

3.2 石炭性状

設備計画用の石炭は南アフリカ炭やロシア炭など、ドイツ国外から輸入される瀝青炭 14 種類である。性能保証炭の性状を第 3 表に示す。各設備計画に当たっては、すべての炭種で専焼運転ができるように、各炭種の特徴を十分考慮した設計を行った。

3.3 高効率化

USC 条件採用による発電効率向上に加え、再熱蒸気温度制御にパラレルパスデザインを採用することによって、さらなる高効率化を図った。パラレルパスデザインは、後部伝熱部である火炉上部のガスパスを再熱器側と過熱器側の二つに分け、各ガスパス出口に設置されたダンパによってそれぞれに流れるガス量を調整し、再熱蒸気温度を制御するものである。損失の要因となる水スプレヤガス再循環ファンが不要になるため、プラントの熱効率を向上させることができる。

3.4 高運用性

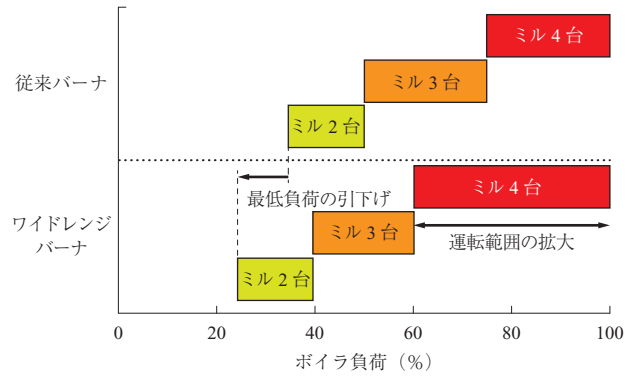
3.1 節で述べたワイドレンジバーナの採用によって、同一ミル台数における運転範囲の拡大と石炭専焼最低負荷の引下げ（25%負荷、194 MW）を実現した（第 7 図）。

同一ミル台数の運用範囲が拡大することによって、広い負荷帯でミル起動・停止をすることなく負荷変化が可能となり、電力需要に合ったスムーズな負荷追従を実現した。また、石炭専焼最低負荷を引下げることで、再生可能エネルギーの発電量が多く、電力需要が低い場合も、発電所を停止することなく最低負荷で運転を継続することが可能になる。このため、発電所起動・停止時の熱ロスと高価な起動用油燃料を節約できる。

第 3 表 性能保証炭性状

Table 3 Properties of the performance guarantee coal

項目	単位	仕様
銘柄	-	性能保証炭
発熱量 (到着ベース)	低位発熱量 MJ/kg	25.95
工業分析 (到着ベース)	水分 %	7.5
	灰分 %	12.6
	揮発分 %	24.8
全硫黄分	固定炭素 %	55.0
		%
元素分析値 (無水無灰ベース)	炭素 %	84.2
	水素 %	4.8
	窒素 %	1.9
	酸素 %	8.4
融点	初期変化点 °C	1250
粉碎性指数	-	49



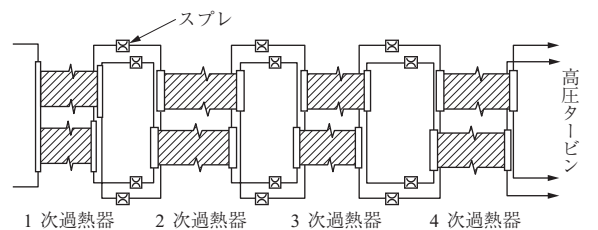
第 7 図 ワイドレンジバーナ採用時の運用範囲
Fig. 7 Operating range when using a Wide Turndown Burner

石炭専焼負荷の引下げに当たっては、脱硝入口ガス温度にも十分配慮した。低負荷では脱硝入口ガス温度の確保が難しくなるため、節炭器バイパスシステムを採用し、節炭器を通過するガスの一部をバイパスさせることで、所定のガス温度を確保した。

3.5 USC 条件に対する信頼性確保

USC 蒸気条件のボイラの信頼性を確保するため、EN 規格（ヨーロッパ統一規格）との整合性を十分確認のうえ、豊富な実績と知見をもつ材料を採用した。過熱器や再熱器における加熱部には SUPER304H® を、非加熱部には 9Cr 材を採用した。また、EN 規格には特有の管肉厚に対する制限があり、これに準拠するためには管寄せの本数を増やす必要があったため、第 8 図に示すように管寄せを 2 本、連絡管を 4 本としたアレンジを採用している。さらに、各伝熱面出口の連絡管を左/右、中央/端側で入れ替え、蒸気温度のアンバランスを最小化している。

また、火炉壁管には実績が豊富な 13CrMo4-5（ASME SA213T12 相当）を採用した。タワー型の変圧貫流ボイラの場合、蒸気条件が高温・高圧になると火炉出口蒸気温度も引き上げられる傾向にある。このことから、一般的にヨーロッパのタワー型ボイラ市場では、13CrMo4-5 よりも高温強度に優れた 7CrMoVTiB10-10（ASME SA213T24 相当）が火炉壁管に採用されていた。同材料



第 8 図 過熱器連絡管アレンジ
Fig. 8 Arrangement of super-heater tubes

は、高温強度に優れる一方でパネルとしての製作が難しいことで知られている。当社でも炉壁パネルのモックアップ試験を行い、評価の結果、採用を見送った経緯がある。

本ボイラは電源開発株式会社磯子火力発電所新1号・新2号と同様の設計思想に基づき、火炉上部に放射型過熱器を適切に配置することで、高い主蒸気温度でも火炉出口蒸気温度を適性範囲に抑制し、火炉壁管に従来同様のASME SA213T12相当材を適用した。

3.6 ヨーロッパ法規、規格および安全要求への対応

本プロジェクトはEU圏に製品を納めるため、ボイラをはじめとする各機器にCEマーク認証が義務付けられている。ボイラに関しては、PED（Pressure Equipment Directive：圧力容器指令）に適合するため、整合規格（EN規格）に準拠した設計・製作を行い、第三者機関であるNotified Bodyの審査と承認を受けた。

また、REACH（ヨーロッパ化学品規制）に則り、ヨーロッパへの輸入が制限されている物質を使用しないよう、原材料から副資材、梱包材に至るまで、綿密な確認と管理を行った。

さらに、お客さまの要求によって発電所全体でIEC 61511に準じたHazard and Risk Analysisを行い、人に危害が加わるプロセスに関しては計器・制御装置・操作端をSIL（Safety Integrity Level）対応とし、従来以上に信頼性の高いシステムを実現した。

4. 試運転実績

4.1 性能試験結果

第4表に性能試験の結果を示す。送電端発電量および

第4表 性能試験結果

Table 4 Performance test results

項目	目	100%負荷	
		計画値	性能試験結果
送電端出力	MW	746.2	755.1
送電端熱効率 (低位発熱量基準)	%	45.57	45.87
NO _x 排出量	mg/m ³ _N ^{*1}	100	84
SO _x 排出量	mg/m ³ _N ^{*2}	200	168
CO 排出量	mg/m ³ _N ^{*2}	200	76
煤じん排出量	mg/m ³ _N ^{*2}	20	2

(注) *1: Dry6% O₂ ベース
*2: Dry 実 O₂ ベース

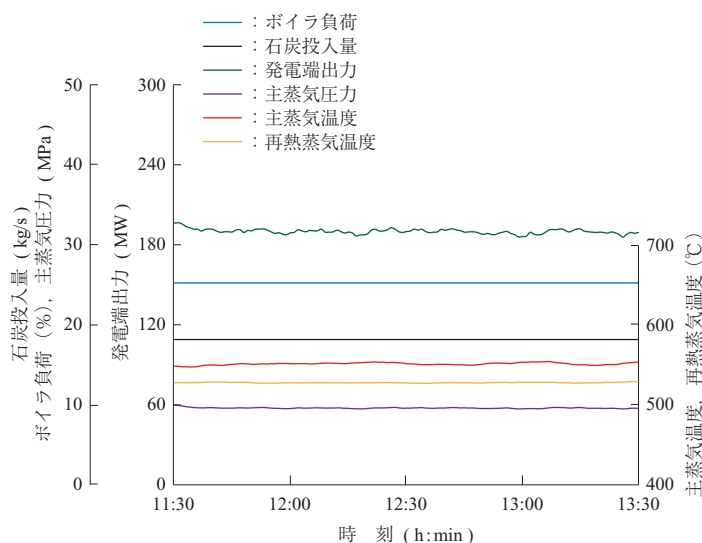
送電端熱効率がそれぞれの計画値を満足していることを確認した。今回達成した約46%という送電端熱効率は、石炭火力発電における世界最高クラスの効率である。

同様に、NO_xやSO_xなどの環境値についてもすべて計画値を満足していることを確認した。

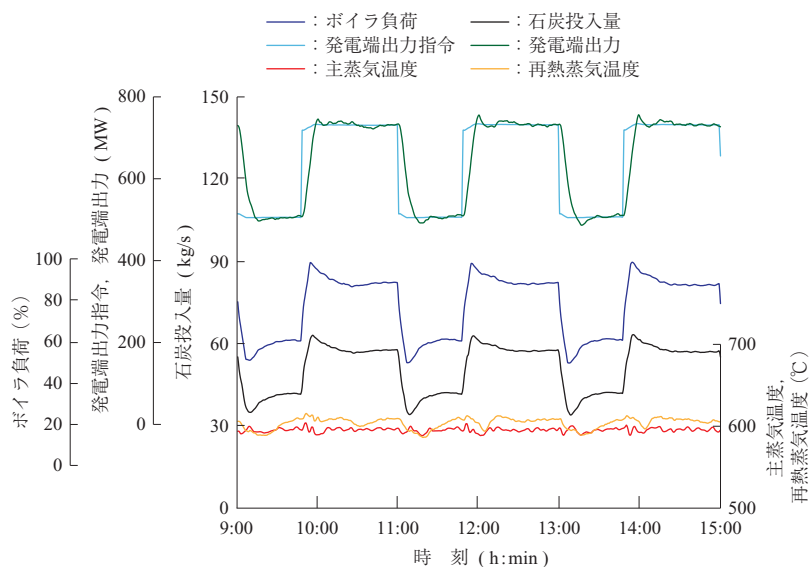
4.2 運用性の確認

石炭専焼25%負荷における運転状態を第9図に示す。この結果から、主蒸気温度および主蒸気圧力にほとんど変動がなく運転状態が安定していることが分かる。また、炉内の火炎状態も良好であったことから、ワイドレンジバーナの採用によって、安定した25%石炭専焼運転が達成できていることを確認した。

第10図に60~90%負荷間で実施した負荷変化試験の結果を示す。負荷変化中および負荷変化後の運転状態は安定しており、負荷変化率については計画の4%・min⁻¹を達成した。ミル運用範囲を広げたことによって、負荷変化中のミルの起動・停止なく、指令に追従したスムーズな負荷変化を実現した。



第9図 石炭専焼最低負荷運転
Fig. 9 Minimum load operation with pure-coal firing



第 10 図 負荷変化試験結果
Fig. 10 Load swing test result

5. 結 言

本稿ではリューネン発電所のプロジェクト概要および計画概要と特徴を述べた。また、試運転実績から、市場要求である高効率と高運用性を本発電所が達成していることを紹介した。

高効率、高運用性をもつ石炭火力発電の需要はこれからも高まっていくと期待される。当社は、リューネン発電所をはじめとする国内外の工事で得た経験と知見を活かし、市場要求に合致し、かつ高品質な石炭火力発電の提供を続けていきたい。