

米国超臨界圧石炭焚き火力発電設備の完成

Completion of Super Critical Thermal Power Plant in USA

高島 正 Sei Takashima

住田 忠 Tadashi Sumida

秋元 修平 Shuhei Akimoto

那須 俊一 Shunichi Nasu



図1 米国ミッドアメリカン・エナジー社ウォルタースコットジュニア発電所4号機のプラント全景
左手前がタービン建屋、中央の高い建物がボイラ建屋、右には冷却塔、および4号機用煙突がある。

日立製作所およびバブコック日立株式会社、日立アメリカ社は、米国アイオワ州のミッドアメリカン・エナジー社納めの超臨界圧石炭焚き火力発電設備一式を2003年に受注し、所定の性能を満足し、計画どおり2007年に引き渡しを完了した。

この発電設備は、蒸気条件が最高水準の25.3 MPa・g、566°C/593°C、PRB炭燃焼超臨界圧変圧貫流ボイラで、タービン型式はTC4F-40(タンデムコンパウンド、低圧部4流、低圧最終段翼長40インチ)を採用している。また、環境設備として脱硝装置や脱硫装置などを設置し、NOx(窒素酸化物)、SOx(硫黄酸化物)、煤塵などの環境規制値に対応している。

1. はじめに

日立製作所およびバブコック日立株式会社(以下、BHKと記す。)、日立アメリカ社(以下、HALと記す。)は、ミッドアメリカン・エナジー社(MidAmerican Energy Company)(以下、MECと記す。)納めウォルタースコットジュニア発電所4号機(Walter Scott Jr. Energy Center Unit 4)(以下、WSEC4と記す。)出力790 MW事業用超臨界圧石炭焚(だ)き発電設備を2003年に受注し、契約どおり2007年に完成させた(図1参照)。

この設備は、超臨界圧石炭焚きプラントとしては米国で15年ぶりとなるものであり、北米での先行機カナダEPCOR社納めジェネシー3号機(Genesee Phase 3)の高効率タービン、ベンソンボイラ技術が評価されたことから受注に至った。

ここでは、米国MEC納め超臨界圧石炭焚き火力発電設備のプロジェクト概要、蒸気タービン・発電機設備、ボイラ・環境設備、エンジニアリング・調達、および建設工事について技術的側面から述べる。

2. 超臨界圧発電所のニーズ

運用開始年月と蒸気条件との関係を図2に示す。日本国内では超臨界圧火力発電所が1990年代以降、継続的に建設されており、高温化技術の開発・蓄積およびその継承が行われてきた。日立製作所が今回納入したMEC向け発電設備は、米国では15年ぶりとなる超臨界圧発電所である。

現在、欧州ではCO₂排出権の観点から、2012年までの完成に向けて、高効率である超臨界圧発電所の建設ラッシュとなっている。日立製作所および日立パワーヨーロッパ社では、ドイツでこの最新技術を用いた超臨界圧発電所を建設中である。

3. プロジェクト概要

3.1 立地条件

ウォルタースコットジュニア発電所は米国の中部、アイオワ州カウンシルブラフス市のミズーリ川沿いに位置している。気温では、冬季に-23°F(約-30°C)、夏季に114°F(約46°C)が仕様書規定される地域である。

発電所への空路でのアクセスは、ネブラスカ州オマハ空港から約16 kmと比較的近く利便性が高い。陸路では幹線道路I-80の分岐から約10分程度の距離であり、陸路での利便性も高い。また、ミズーリ川沿いに位置しているため、水路での輸送も可能な立地条件である。

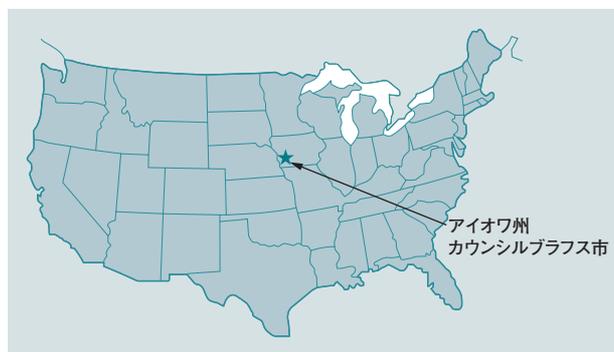


図3 プラントの立地点

米国アイオワ州カウンシルブラフス市に立地し、内陸ではあるが比較的アクセスのよい地点である。周りにはトウモロコシ畑が広がっている。

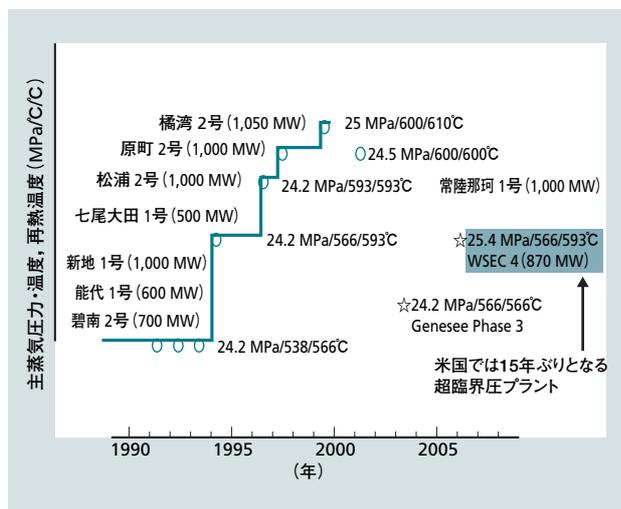
プラントの立地点を図3に示す。

3.2 プロジェクト体制

プロジェクト体制を図4に示す。顧客であるMECは、同発電所に3機の既設石炭焚き発電設備を有する電力会社であり、主契約者は、Mitsui & Co. Energy Development, Inc.である。日立グループは、発電所のEPC(Engineering, Procurement, Construction)を一括実施し、そのうち、日立製作所はタービン・発電機設備の納入、BHKはボイラ設備の納入、HALはBOP(Balance of Plant)および土木・建設・据付けなどを所掌した。また、BOPのエンジニアリングは、Sargent & Lundy社も所掌した。

3.3 プラント主仕様

プラントの基本計画条件や主機条件の主仕様を表1に示す。



注:略語説明 WSEC4(Walter Scott Jr. Energy Center Unit 4)

図2 蒸気条件の変遷

日立製作所が納入した発電所(ボイラ単体を含む。)の蒸気温度、圧力条件を運用開始時期ごとに示す。日本国内では2000年に主蒸気温度600°Cを達成している。今回納入のミッドアメリカンプロジェクトでは運用実績を重視する要求から、主蒸気温度566°Cを採用した。

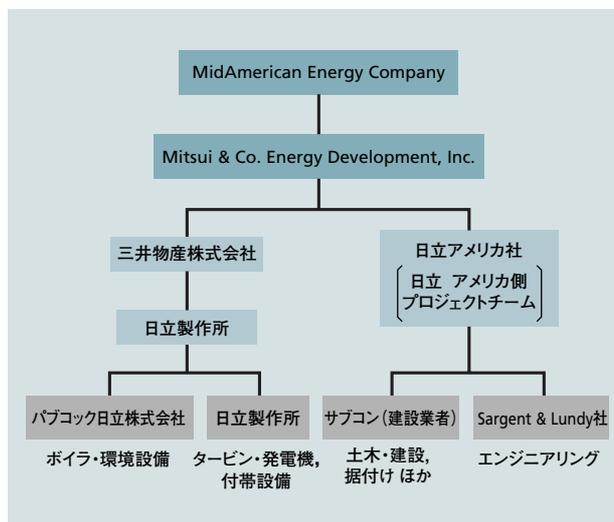


図4 プロジェクトの契約形態

日本側は日立製作所およびパブコック日立株式会社が機器の供給、米国側は日立アメリカ社が機器発注および工事などを担当した。

表1 プラントの主仕様

基本計画条件とボイラ、タービン、発電機の主な仕様を示す。

項目		単位	WSEC4	
基本計画条件	定格出力	MW	790 (Net)	
	蒸気条件	MPa・g	25.3	
		℃	566/593	
	燃料	—	石炭 (PRB炭)	
主機条件	ボイラ	型式	—	
		蒸気圧力	MPa・g	26.2
		蒸気温度	℃	570/595
		蒸発量	t/h	2,530
	タービン	型式	—	くし型4流排気
		回転数	min ⁻¹	3,600
		排気真空度	mmHg	722
	発電機	型式	—	横置き円筒回転界磁型
		容量	MVA	1,025

注:略語説明 PRB (Powder River Basin)

4. 蒸気タービン・発電機設備の概要と結果

4.1 蒸気タービン

このプロジェクト向けの蒸気タービンは海外納め火力発電用蒸気タービンとしては、納入当時、日立製作所の納入実績中で最大出力のタービンであった(性能試験時発電端出力869.9 MW)。

タービン型式にはTC4F-40 (タンデムコンパウンド、低圧部4流、低圧最終段翼長40インチ)を採用した。

高効率発電のため蒸気タービン入口温度・圧力は566℃・25.3 MPa・gを採用した。この蒸気条件に対応するため、主蒸気止め弁・蒸気加減弁・再熱弁の弁体部に9Cr鍛鋼を、高中圧部のロータ・内部ケーシングには12Cr鍛鋼という高温材料を採用した。

タービン自体の効率・信頼性向上対策として、高圧部および低圧部のタービン動翼の先端カバー部にCCB翼 (Continuous Cover Blade)を採用した(図5、図6参照)。



図5 高・中圧タービンの輸送

高・中圧タービンは工場を組み立てた後、一体輸送した。



図6 タービン発電機の外観

左から発電機、低圧タービンの外観を示す。

4.2 発電機の概要

このプロジェクト向け発電機は、火力発電所納めの二極発電機としては日立製作所の実績中最大容量となる1,025 MVAタービン発電機が採用された。従来の最大容量である800 MVA機に対して約1.3倍の容量アップとなる。設計にあたっては日立製作所が従来有していた技術をベースに、要素としては十分に検証された技術を加えることで信頼性を高めている。

5. ボイラ・環境設備の概要と結果

5.1 ボイラ設備

ボイラの燃料には、低硫黄PRB (Powder River Basin) 炭が指定されていた。PRB炭は灰軟化温度が低く、火炉での灰溶着 (スラッキング) が厳しいため、火炉での熱吸収量低下を考慮して十分な火炉容積を確保するなど、PRB炭に対応した火炉設計を採用した。

PRB炭の特徴を表2に示す。PRB炭は灰中カルシウム分が多く、火炉での溶着灰はガラス質で硬いために、従来の蒸気式や空気式の灰除去装置では除去することが困難である。このため、このボイラでは高圧放水式の灰除去装置を設置し、硬質溶着灰の除去を可能とした。高圧放水式灰除去装置では、火炉各部の熱負荷を監視することで、灰が付着した個所を特定して効果的に除去することができる。また水流を移動させることで広範囲の灰除去が可能であり、PRB炭燃焼時においても火炉での熱吸収量低下を抑制することができる。ボ

表2 PRB炭の特徴

一般的な瀝(れき)青炭との比較により、PRB炭の特徴を示す。表中の値は概略値である。

	PRB炭	一般的な瀝青炭
1 発熱量 (MJ/kg)	20	26
2 水分 (%)	30	10
3 燃料比 (固定炭素÷揮発分)	1.0	1.6
4 灰軟化温度 (℃)	1,150	1,500
5 灰中酸化カルシウム (%)	20	5

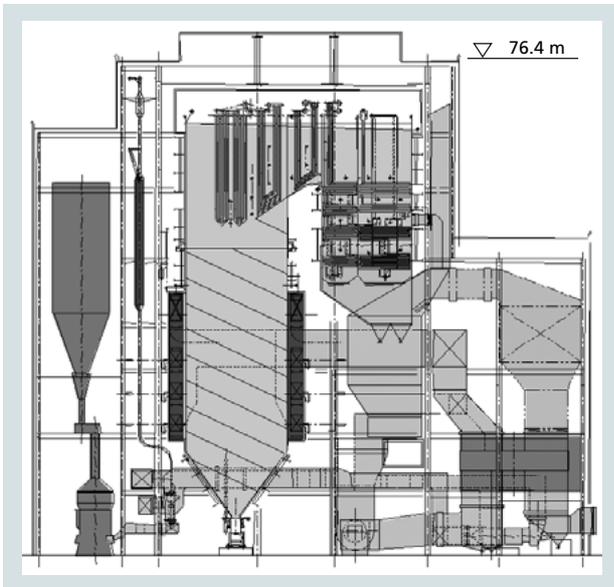


図7 ボイラの概要

高さ76.4 mの超臨界圧変圧貫流ボイラの概要を示す。スラッキング(火炉の灰溶着)が厳しいPRB炭を考慮し、十分な火炉容積を確保している。

イラの概要を図7に示す。

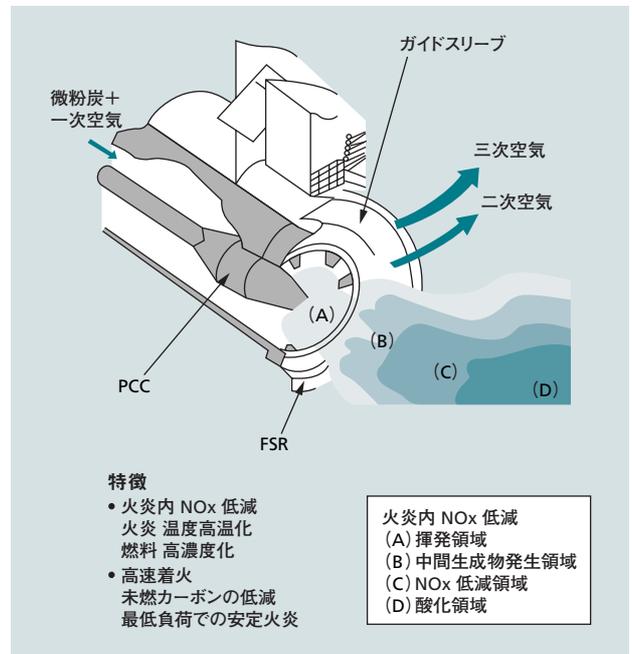
燃焼システムでは、排ガス中のNO_x(窒素酸化物)低減を目的に、最新式の低NO_x微粉炭バーナである日立「HT-NR3バーナ」およびオーバーエアポートによる二段燃焼を採用した。

このバーナは、バーナ近傍で燃料の空気との混合を抑制し、バーナ近傍の火炎内に強い還元領域を形成することにより、火炎内脱硝反応によるNO_x低減を図る。また、一次空気ノズル内に設置された微粉炭濃縮器(PCC:Pulverized Coal Concentrator)およびノズル先端の保炎リング(FSR:Flame Stabilizing Ring)による急速着火の促進により、燃焼効率の向上(未燃分低減)を可能としている。HT-NR3バーナの特徴を図8に示す。

詳細設計では、三次元CAD(Computer-aided Design)システムを活用し、ボイラ本体、付属配管および補機との取り合いを視覚的/有機的に把握することにより、設計段階での配置調整の効率化を図り、かつ現地での建設支援ツールとしても活用した。

建設工事においては、国内プラントで培った技術であるフロアユニット工法および同期化工法を採用した。フロアユニット工法とは、地上面で一定範囲の床を含めた部材を事前に組立をしてからつり上げ設置する工法である。一方、同期化工法とは、大径配管やダクト類を鉄骨部材と同時につり上げて設置する工法で、いずれも高所作業の低減および組立効率の向上を可能とするものである。さらに伝熱管の自動溶接なども取り入れ、建設工事の効率化を図った。

性能面においても、性能試験および信頼性試験で所定の性能を満足していることを確認した。



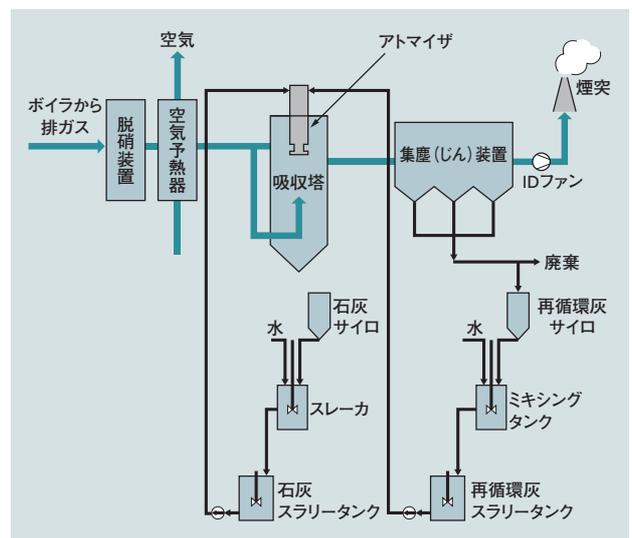
注:略語説明 PCC(Pulverized Coal Concentrator), FSR(Flame Stabilizing Ring)

図8 日立「HT-NR3バーナ」の特徴

最新式の低NO_x微粉炭バーナである日立「HT-NR3バーナ」の特徴を示す。

5.2 環境装置

環境装置としては、脱硝装置(Selective Catalytic Reduction), 脱硫装置(Dry Flue Gas Desulfurization), バグフィルタ集塵(じん)装置(Pulse Jet Baghouse), 水銀除去装置(Mercury Emissions Control)を設置し、NO_x, SO_x(硫黄酸化物), 煤(ばい)塵などの環境規制値に対応する設備としている。米国では、これらの環境装置はAQCS(Air Quality Control System)と総称されている。環境装置の概略システムを図9に示す。



注:略語説明 ID(Induced Draft)

図9 環境装置の概略システム

脱硝装置はバブコック日立製の板状触媒を採用した。SO_xを吸収する吸収塔はDry FGD(半乾式脱硫)方式、集塵装置にはバルスジェット式バグフィルタを採用した。

脱硝触媒は石炭灰が詰まりにくい特徴を有するBHK製の板状触媒とし、さらにPRB炭焼きプラントの実績をベースに耐久性を持つように改良した。使用する還元剤は尿素(液体または固体)が指定されており、これを加水分解してアンモニアが得られるシステムを採用した。

脱硫装置はSO_xおよび煤塵を含んだボイラ排ガスを吸収塔に導入し、SO₂吸収剤スラリーをアトマイザにより微細な液滴で噴霧することによって、スラリー液滴中の石灰が排ガス中のSO₂と接触して脱硫反応を起こす。SO₂を吸収した粒子、未反応石灰粒子は、ボイラからの燃焼灰とともにバグフィルタ集塵装置で捕集され、ガス中から除去される。SO₂吸収剤スラリーは、石灰石を貨車から受け入れた後に、水と混合して製造する石灰スラリーと、集塵装置で集塵された未反応石灰を含む灰を再利用するリサイクル灰スラリーから成り、未反応石灰を再利用することで石灰石を効率的に利用する。

6. エンジニアリング・調達

6.1 エンジニアリング

日立製作所、BHKは国内の超臨界発電の実績に基づき、タービン・発電機およびボイラの設計を実施した。HALはBOPの設計を所掌し、日立製作所、BHKの設計実績を基に設計を実施した。なお、米国ではPE(Professional Engineer)による図面の承認が必須となっており、エンジニアリングを米国のエンジニアリング会社であるSargent & Lundy社に発注した。

6.2 機器調達

EPCプロジェクトでは広範囲にわたる機器の調達が必要となり、米国で200社以上の会社に発注した。

これら200社以上の会社の特徴、例えば性能、品質などについて把握することができた。今後のプラント納入時における顧客への推奨など、積極的に活用していく予定である。

なお、日立製作所、BHKの超臨界圧発電所の建設の経験から、一部主要機器については、日本国内の会社から調達したのもあった。

7. 建設工事

7.1 建設工事概要

EPCプロジェクトでは、土木工事、建物工事、機器据付け工事など、発電所の建設にかかわるすべての工事について実施した。また、HALはカウンシルブラフスのサイトに事務所を設け、建設および試運転業務を行った。

サイト事務所の組織構成として、サイト所長、コンストラクションマネージャを筆頭に、タービン建設、ボイラ建設、土木・建築、試運転、プロジェクト管理、安全衛生、QA(Quality Assurance)などのグループを組織し、プロジェクトに臨んだ。

このプロジェクトは2003年の土木着工から2007年の営業運転開始に至るまで、安全に最も重点を置いて工事を進め、1件の死亡事故もなく完成することができた。

7.2 プロジェクトの特殊事項

(1) 井戸

この発電所では、河川水が利用できなかったため、合計6基の井戸を建設し、井戸水を利用することが計画された。日立製作所および日立グループ会社にとっては、井戸の建設は初の試みであり、井戸専門業者と連携を図って井戸建設に必要な許認可を取得し、井戸の試掘を経て井戸建設を行い、計画どおりの水量を確保することができた。

井戸水を発電所に利用するには、井戸水の軟水化が必要であり、今回はその装置についても納入した。

(2) 輸送

この発電所は米国アイオワ州に立地しており、寸法・重量の制限から陸送ができないため、河川で大型構造物、重量物を輸送した。日本からの輸送品などはヒューストンでバージに積み替え、ミズーリ川を北上して輸送した。主変圧器のバージ輸送状況を図10に示す。発電所にはバージの水切り設備がなかったため、必要な許認可を取得後、今回の輸送用にバージ用水切り設備を建設して使用した。

8. おわりに

ここでは、米国ミッドアメリカン・エナジー社納め超臨界圧石炭焼き火力発電設備のプロジェクト概要、蒸気タービン・発電機設備、ボイラ・環境設備、エンジニアリング・調達、および建設工事について述べた。

従来実績に比べ大容量の蒸気タービン、発電機を製作・納入し、現在、順調に運転中である。この経験を基にさらに大容量化した蒸気タービン、発電機の設計、製作が行われてい



図10 主変圧器のバージ輸送

主変圧器をバージでミズーリ川を北上し、発電所まで輸送した。

る。ボイラについてもPRB炭というスラッキングの厳しい石炭であったが、その設計、製作、試運転を経て、現在も順調に稼動中である。エンジニアリングについては、米国のエンジニアリング会社との協調設計という試みを実施して完成できた。

プラント建設後、試運転を行い、性能面においても所定の性能を満足し、計画納期に引き渡しを実施することができた。

このプラントは、引き渡し後、米国電力業界の総合情報誌「Power」による「2007 Plant of the Year賞」をはじめとして、複数の賞を受賞した。環境負荷の低減と高効率化の先進技術の展開を評価されたものと言える。

現在、地域は異なるが、欧州では引き続き火力発電所の建設が活発である。日立グループは、これらの経験を反映さ

せ、より高効率かつ環境適応性の高い発電所の建設を進めることで、社会に貢献していく考えである。

このプロジェクトが計画どおり完成したことは、関係者の昼夜を問わない努力の成果である。最後に、サイトチームをはじめとするプロジェクト関係者各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 立石, 外:海外EPC火力発電への取り組み—米国ミッドアメリカンプロジェクトの計画概要—, 日立評論, 87, 2, 165~170(2005.2)
- 2) R. Peltier : MidAmerican's Walter Scott, Jr. Energy Center Unit 4 earns POWER's highest honor, Power August 2007, Vol. 151, No.8(2007.8)

執筆者紹介



高島 正

1979年日立製作所入社, 電力グループ 火力事業部 ヴォルサム推進本部 プロジェクトエンジニアリング部 所属
現在, 欧州プロジェクトのプロジェクトマネジメント業務に従事



秋元 修平

1978年バブコック日立株式会社入社, 呉事業所 火力技術本部 所属
現在, 事業用ボイラのプロジェクト推進に従事



住田 忠

1994年バブコック日立株式会社入社, 呉事業所 火力技術本部 ボイラ設計部 所属
現在, 事業用ボイラの基本設計に従事



那須 俊一

1992年日立製作所入社, 電力グループ 火力事業部 ヴォルサム推進本部 プロジェクトエンジニアリング部 所属
現在, 欧州エレクトラベルプロジェクトのプロジェクトマネジメント業務に従事