

# アメリカにおける 900 MW 亜瀝青炭専焼超臨界圧ボイラの 計画と試運転実績

## Design & Operating Result of 900 MW Supercritical Steam Generator Firing Sub-Bituminous Coal in USA

榎 本 聖 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

アメリカテキサス州 Sandy Creek 発電所向けに納入した超臨界圧ボイラの計画と運転実績を報告する。本ボイラは、高水分で低灰融点の特徴であるアメリカ西部亜瀝青炭に各種配慮を払った同炭の専焼ボイラであり、かつアメリカ最大級の容量となる高効率な超臨界圧ボイラである。本プロジェクトを通して、超臨界圧ボイラで高水分亜瀝青炭専焼に対応できることが検証できた。今後、この成果を活用し、国内外の石炭焼きボイラに対する適用炭種の拡大および高効率化の要求に応える製品、技術を提供していく。

This paper describes the design and operating result of a supercritical steam generator delivered to Sandy Creek Energy Station in the state of Texas. This steam generator is designed to combust Powder River Basin ( PRB ) coal, a type of sub-bituminous coal extracted in the Western United States. Many special considerations were required in order to design the steam generator to use PRB coal which has high moisture, a low ash fusion temperature, and other characteristics unfavorable for combustion. We are firmly confident that the expertise and experience gained through the project will promote the improvement of thermal power plant efficiency and the utilization of a wider variety of coal around the world.

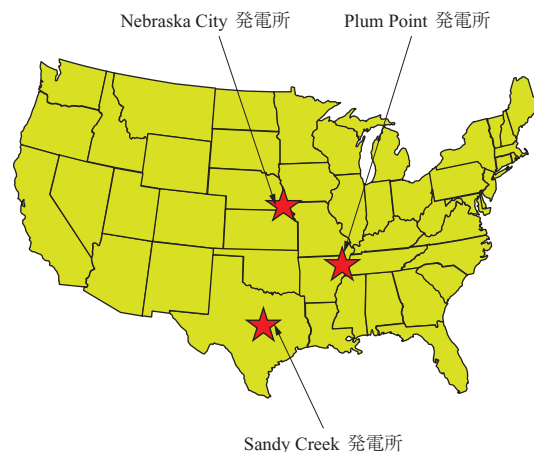
### 1. 緒 言

当社は、アメリカテキサス州 Sandy Creek 発電所向けに変圧運転用超臨界圧貫流再熱式ボイラ（送電端出力、900 MW：以下、超臨界圧ボイラ）および脱硝設備を納入し、2013年5月に引き渡しを完了した。また、これまで当社がアメリカ向けに納入した、Nebraska City 発電所向け2号機ボイラ（亜臨界圧自然循環型、送電端出力：660 MW）と脱硝設備、および Plum Point 発電所向け1号機ボイラ（亜臨界圧自然循環型、送電端出力：665 MW）と脱硝設備は、それぞれ2009年5月、2010年9月に商用運転を開始している<sup>(1)</sup>。これら3プロジェクトは、アメリカのエンジニアリング会社である Black & Veatch 社、据付け会社である Zachry 社、土建会社である Kiewit 社の共同企業体のもとで、当社はボイラおよび脱硝設備を納入し、据付けならびに試運転の指導員を派遣するプロジェクトである。

当社がアメリカに納入した、これらの3プラントは、いずれもアメリカ西部<sup>れき</sup>亜瀝青炭（Powder River Basin Coal：以下、PRB炭）の専焼ボイラとして計画された（第1図）。当社は、亜臨界圧自然循環型ボイラである既納2プロジェクトでの計画ならびに運転実績を踏まえ、

PRB炭専焼対応として、①30%超の石炭中全水分に対する1次空気系・燃焼系への配慮②20%超の灰中Ca（カルシウム）量および灰融点1100℃程度の灰に対するボイラのスラッキング（伝熱管への溶融灰の付着）・ファウリング（伝熱管への凝縮した灰の付着・堆積）対策、といった設計指針を確立している。

本稿で紹介する、Sandy Creek 発電所向け超臨界圧ボイラ（以下、本ボイラ）は、アメリカ向け既納2プロジェクトで検証されたこれらの知見を基にPRB炭専焼超臨界



第1図 当社納入PRB炭専焼ボイラ  
Fig. 1 IHI's steam generators to combust PRB coal

圧ボイラとして計画された。本稿では、本ボイラ（第2図）について、設備概要、据付け・試運転実績を紹介する。

## 2. プロジェクトの概要

### 2.1 計画石炭性状

本ボイラは、アメリカで1970年代から使用されているアメリカ国産の亜瀝青炭であるPRB炭を専焼するボイラとして計画された。

一般的なPRB炭の性状を第1表に示す。PRB炭の特徴としては、①全水分が30%程度（計画最大32%）と高水分であること②灰融点が1100℃程度と低灰融点であること③揮発分が30%と高揮発分であること④灰中Ca量が20%を超過すること⑤発熱量が5000 kcal/kg以下と低発熱量であること、などが挙げられる。

### 2.2 ボイラ設備仕様ならびに特長

PRB炭専焼への対応のために、本ボイラの設計上、特に配慮した点を以下に述べる。これらは、当社燃焼試験



第2図 Sandy Creek 発電所向けボイラ全景  
Fig. 2 Sandy Creek Energy Station

第1表 PRB炭代表性状  
Table 1 Typical characteristics of PRB coal

| 項目         | 単位      | 仕様       |
|------------|---------|----------|
| 発熱量（到着ベース） | kcal/kg | 4 700 *1 |
| 全水分        | %       | 29.4     |
| 固定炭素       | %       | 34       |
| 揮発分        | %       | 31       |
| 灰融点（軟化点）   | ℃       | 1 140    |
| 灰中Ca量      | %       | 20.8     |

（注） \*1：高位発熱量（HHV：Higher Heating Value）

設備での亜瀝青炭燃焼試験結果およびアメリカ向け既納2プロジェクトでの計画・運転実績を反映したものである。本ボイラの設備仕様概要を第2表に、ボイラ全体側面図を第3図に示す。

#### 2.2.1 火炉計画

瀝青炭（灰融点：1300～1500℃程度）と比較して、低灰融点（1100℃）であるPRB炭専焼であることを考慮し、瀝青炭焚きボイラで培った技術や当社燃焼試験設備での亜瀝青炭燃焼試験結果およびアメリカ向け既納2プロジェクトでの計画・運転実績を反映し、スラッキング・ファウリングを防止する対策を計画した。具体的には、火炉容積を当社瀝青炭専焼ボイラに比較して10%程度増加させることによって、①火炉出口ガス温度の低減によるファウリング防止②火炉熱負荷の低減によるスラッキング防止、といった配慮を行った。また、スラッキングへの対策として、火炉に水スートブロワを配置した。

#### 2.2.2 後部伝熱面計画

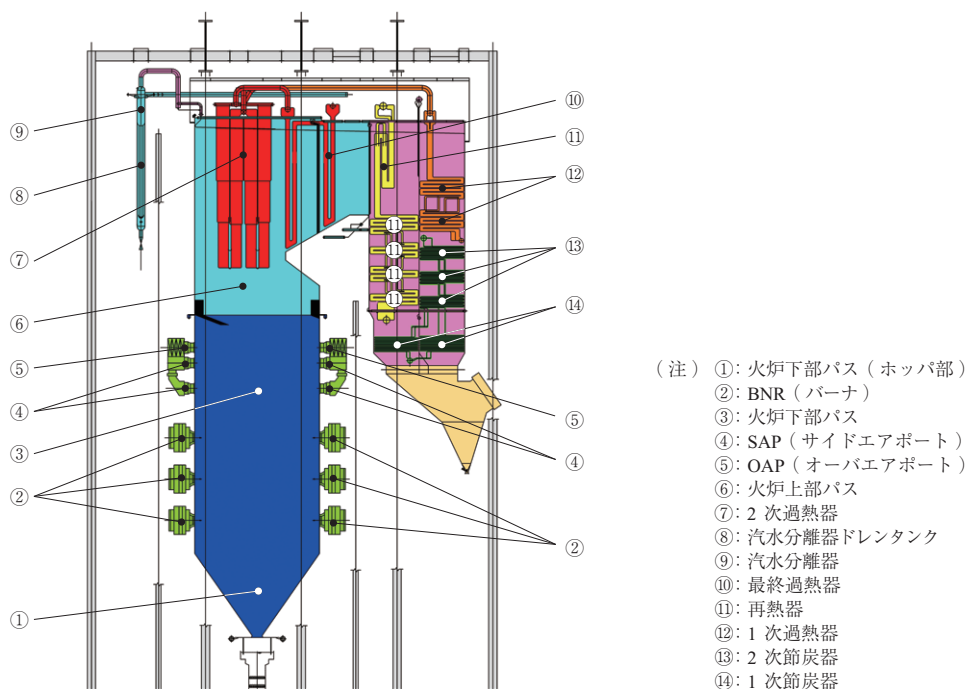
石炭灰中のCa成分が多いPRB炭の燃焼では粒子径の小さい灰が多く発生し、この微粒子灰のボイラ蒸気伝熱管表面でのファウリングによる伝熱面の閉塞が懸念された。

第2表 設備仕様概要

Table 2 General specifications of Sandy Creek Energy Station

| 項目      | 単位    | 仕様             |               |               |
|---------|-------|----------------|---------------|---------------|
| ボイラ形式   |       | 変圧運転用超臨界圧貫流再熱式 |               |               |
| 通風方式    |       | 平衡通風           |               |               |
| 燃料      |       | アメリカ西部亜瀝青炭 *1  |               |               |
| 最大連続負荷時 | 蒸気流量  | 主蒸気            | klb/h (t/h)   | 6 295 (2 856) |
|         |       | 再熱蒸気           | klb/h (t/h)   | 5 140 (2 332) |
|         | 蒸気圧力  | 過熱器出口          | psi (G) (MPa) | 3 864 (26.6)  |
|         |       | 再熱器出口          | psi (G) (MPa) | 711 (4.9)     |
|         | 蒸気温度  | 過熱器出口          | °F (°C)       | 1 086 (586)   |
|         |       | 再熱器出口          | °F (°C)       | 1 082 (583)   |
| 給水温度    | 節炭器入口 | °F (°C)        | 565 (296)     |               |
| 最高使用圧力  | 過熱器出口 | psi (G) (MPa)  | 4 777 (32.8)  |               |
|         | 再熱器出口 | psi (G) (MPa)  | 877 (5.9)     |               |

（注） \*1：Powder River Basin Coal



第3図 Sandy Creek 発電所向けボイラ全体側面図  
 Fig. 3 General arrangement of Sandy Creek Energy Station steam generator

この対策として、後部伝熱面計画において、① バンク高さの制限によるストブローイング効果の向上 ② 伝熱面間隔のワイドピッチ化 ③ 後部伝熱面低温部の通過ガス流速の上昇による微粒子灰の付着防止、といった各種配慮を行った。

### 2.2.3 高蒸気条件対応

火炉・伝熱面計画での PRB 炭専焼対策のもと、日本国内の瀝青炭焚き変圧運転用超々臨界圧貫流ボイラ (Ultra Supercritical Boiler : USC ボイラ) と同等の材料選定を行った。第3表に本ボイラにおける各伝熱面の主な適用材料を示す。

### 2.2.4 ミル計画・バーナ計画

PRB 炭の全水分は 30% を超えるため、その対策とし

て、乾燥能力・粉砕能力に優れた大型ミルを採用した。また、バーナについては、当社で多くの実績のある瀝青炭に比べて、PRB 炭は高水分・低発熱量であるため、石炭乾燥と石炭搬送を兼ねる 1 次空気量は相対的に増加し、かつ微粉炭中の水分量が増加することが予想され、バーナの燃焼安定性を高めることが必要であった。アメリカ向け既納 2 プロジェクトでは、計画段階において当社燃焼試験設備で、PRB 炭での燃焼試験ならびにシミュレーションによる流れ解析を行い、バーナ計画に反映している。

### 2.3 据付け工事

据付け工事はお客さまの所掌となっており、現地指導員を派遣し、お客さまへの据付け指導を行うことが当社の責務であった。プロジェクト体制は、亜臨界圧自然循環型ボイラである既納 2 プロジェクトと同様であった。

アメリカでは、長期間新設の大型石炭焚き火力の計画が凍結されていたこともあり、超臨界圧ボイラの据付け経験者が不足していた。このことから当社は、① ヘリカル構造を火炉水冷壁の特徴とする当社の超臨界圧ボイラの構造説明 ② 据付け要領説明および現地指導員派遣による据付け工法の指導 ③ 分かりやすい据付け図面の提供といった全面的なサポートを実施し、予定どおりの工程で据付けが完了した。

第3表 各伝熱面の代表的な適用材料  
 Table 3 Material selection for heat transfer tube

| 伝熱面                  | 適用材料 (代表)                                 |
|----------------------|-------------------------------------------|
| 火 炉 壁                | ASME SA213T12                             |
| 1 次 過 熱 器            | ASME SA213T12                             |
| 2 次 過 熱 器            | ASME SA213T91                             |
| 3 次 過 熱 器<br>(最終過熱器) | ASME CodeCase2328-1<br>[火 SUS304J1HTB 相当] |
| 最終過熱器出口管寄            | ASME SA335P91                             |
| 再 熱 器                | ASME CodeCase2328-1<br>[火 SUS304J1HTB 相当] |
| 再熱器出口管寄              | ASME SA335P91                             |

## 2.4 運転結果

### 2.4.1 ボイラ燃焼調整～性能試験

据付け工事と同様に、ボイラ試運転、および性能試験についてもお客さまの所掌で実施し、当社からは試運転、および性能試験の段階で現地指導員を派遣した。2013年4月に性能試験を実施し、ボイラ性能が保証性能をすべて満足していることを確認した。性能試験は、計画上の最大連続蒸発量に相当する運転条件 (Maximum Continuous Rating : MCR) で実施し、安定した運転を確認した。第4表に主要運転データを示す。ボイラ効率、環境性能ともに計画値を十分満足する性能が得られた。

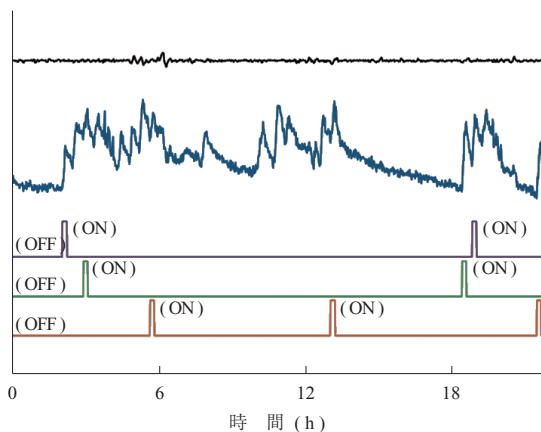
### 2.4.2 スラッキング・ファウリング対策

スラッキング・ファウリングによる伝熱面への灰付着によって、火炉および後部伝熱面の取熱量が経時的に低下しやすい特性をもつが、運転実績から、適切にスートブロウを実施することによって、取熱量の低下は計画の範囲内に抑制されることを確認した。このことから、火炉および後部伝熱面の構造・配置計画上の配慮の妥当性が検証されたとともに、スートブロウ配置が適切であることが確認された。第4図に、スートブロウ運用時の最終過熱器取熱の

第4表 性能試験結果 (代表)  
Table 4 Result of performance test

| 項目    | 計画                   | 実績                           |                              |
|-------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| ボイラ効率 | 87.4%                | 87.6%                        |                              |
| 環境値   | 脱硝出口 NO <sub>x</sub> | 30 ppmd@6%O <sub>2</sub> 以下  | 28 ppmd@6%O <sub>2</sub>     |
|       | ボイラ出口 CO             | 150 ppmd@6%O <sub>2</sub> 以下 | 101 ppmd@6%O <sub>2</sub> 以下 |

— : ユニット出力  
 — : 最終過熱器取熱  
 — : 最終過熱器スートブロウ  
 — : 最終過熱器スートブロウ  
 — : 最終過熱器スートブロウ



第4図 スートブロウ運用時の最終過熱器取熱の変化  
Fig. 4 Trend of heat transfer rate in final superheater with soot blower operation

変化を示す。

以上の結果から、アメリカ向け亜臨界圧自然循環型ボイラの既納2プロジェクトで培った火炉・後部伝熱面計画でのPRB炭専焼に対する設計指針の妥当性を、変圧運転用超臨界圧貫流ボイラにおいても確認することができた。

### 2.4.3 火炉パス出口メタル温度

燃焼性/灰付着性に影響を受ける火炉パス出口メタル温度について確認した結果を第5図に示す。火炉壁は、隣接した伝熱管の間にフィンを溶接した伝熱面で構成され、節炭器で温められた水はこの火炉パスで超臨界水となる。火炉パスへの灰付着量が多くなると、火炉パス出口での温度がばらつきやすくなるが、PRB炭専焼である本ボイラの火炉パス出口温度の分布は、当社の国内瀝青炭専焼USCボイラと同等の安定した分布となっていることを確認した。

### 2.4.4 ミル・バーナ計画

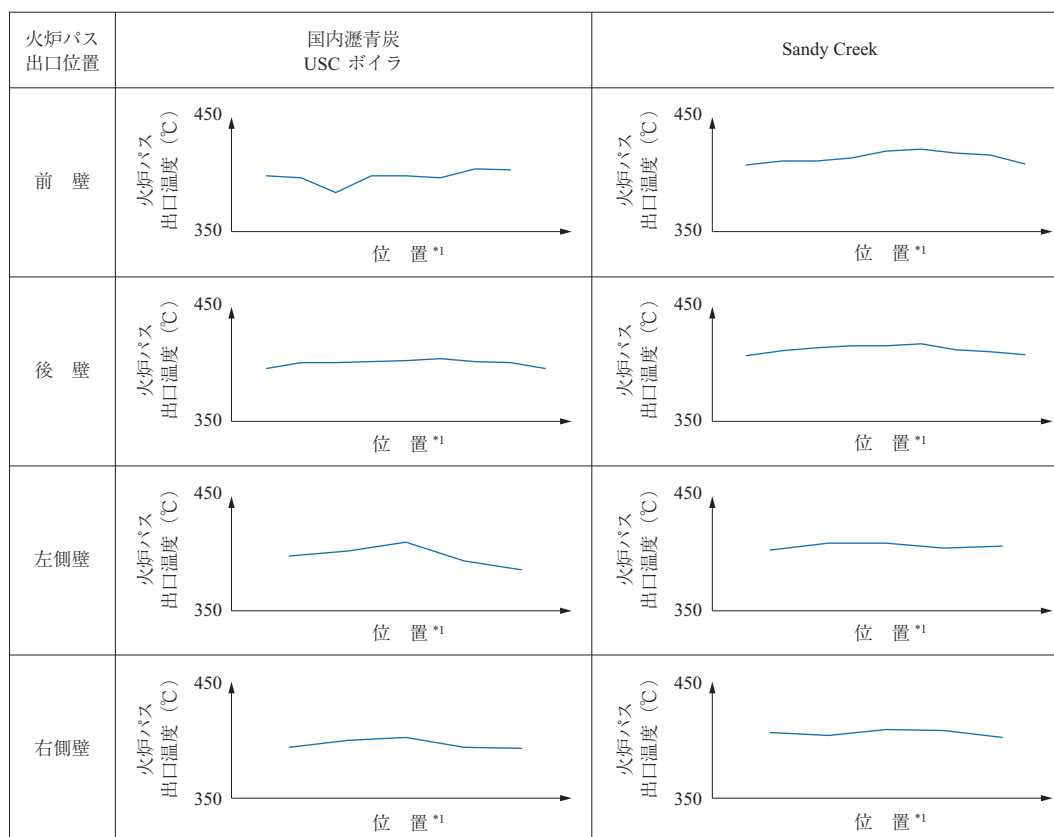
ボイラ定格負荷での静定運転時の主要ミル運転データを第5表に示す。運転実績から、計画容量を十分に確保可能であることが確認できた。

バーナでの着火・燃焼も良好であり、また、灰中未燃分・NO<sub>x</sub>は計画値を下回っていることから、バーナ性能について、当社計画の手法が有効であり、PRB炭を始めとする高水分な瀝青炭に対応したミル・バーナの計画が可能であることを検証した。

## 3. 結 言

当社はこれまで、Omaha Public Power District 社 Nebraska City 発電所向け2号機ボイラおよびLS-Power 社 Plum Point 発電所向け1号機ボイラと、2機のアメリカ向け亜臨界圧自然循環型ボイラでの計画・製造・建設・試運転サポートを通して、PRB炭専焼ボイラ計画における設計上の知見、およびアメリカにおける石炭火力据付け・試運転の経験を積んできた。本稿で紹介したSandy Creek発電所向け超臨界圧ボイラは、これら当社の過去のアメリカ向けプロジェクトにおいて培った知見・経験を超臨界圧ボイラに適用したものである(第6表)。本ボイラにおける運転実績から、安定して計画性能を満足することを確認でき、当社のPRB炭専焼に対する設計計画上の配慮が超臨界圧ボイラにも適用することが可能であることを確認できた。

超臨界圧ボイラである本プロジェクトおよび亜臨界圧自然循環型ボイラである過去の2プロジェクトでは、燃料



(注) \*1: 火炉外側から各壁を見た位置を示す。

第 5 図 火炉バス出口温度分布の比較  
Fig. 5 Distribution of furnace wall outlet temperature

第 5 表 主要ミル運転データ  
Table 5 Representative operation data of pulverizer

| 項 目                    | 単 位         | 計 画       | 実 績       |
|------------------------|-------------|-----------|-----------|
| 給 炭 量<br>(ミル 1 台あたり)   | klb/h (t/h) | 186 (84)  | 183 (83)  |
| 微 粉 度<br>(#200 メッシュ通過) | %           | 70 以上     | 77        |
| ミル 入口 空気 量             | klb/h (t/h) | 349 (158) | 333 (151) |
| ミル 入口 空気 温度            | °F (°C)     | 567 (297) | 550 (288) |
| ミル 出口 空気 温度            | °F (°C)     | 149 (65)  | 138 (59)  |
| 原 炭 中 水 分 量            | %           | 27.3      | 26.1      |

炭としてアメリカ国内産炭である PRB 炭を燃料炭として  
いるが、瀝青炭との比較として、高水分・低発熱量・低灰  
融点といった性質は、PRB 炭に限らず一般的な亜瀝青炭  
に共通した性質である。このことから、ファウリング・ス  
ラッキングへの対策など、これらの PRB 炭専焼ボイラに  
おいて適用された設計上の配慮事項は、広く国内外の亜瀝  
青炭専焼ボイラに適用可能である。よって、本プロジェクト  
で検証された知見や得られた経験は、高効率 USC プラ  
ントをより多くの炭種に適用させる要求の実現に寄与する  
ものと確信する。

第 6 表 当社のアメリカプロジェクト概要  
Table 6 IHI's project in USA

| 項 目     | 仕 様                          |                           |                            |
|---------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| プラント名称  | Nebraska City                | Plum Point                | Sandy Creek                |
| ボイラ形式   | 単胴自然循環型再熱式                   |                           | 変圧運転用超臨界圧貫流再熱式             |
| 燃 料     | アメリカ西部亜瀝青炭 (PRB 炭)           |                           |                            |
| 客 先 名 称 | Nebraska City Power Partners | Plum Point Power Partners | Sandy Creek Power Partners |
| 送電端出力   | 660 MW                       | 665 MW                    | 900 MW                     |
| 契 約 日   | 2005 年 5 月                   | 2006 年 2 月                | 2007 年 8 月                 |
| 運 開 日   | 2009 年 5 月                   | 2010 年 9 月                | 2013 年 5 月                 |

— 謝 辞 —

本プロジェクトの実施に際し、多大なご協力をいただいた共同事業体であり直接のお客さまでもある Sandy Creek Power Partners の関係各位に対して、ここに記し、お礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 武藤寛也：米国亜瀝青炭専焼ボイラの計画と運転実績，火力原子力発電 平成 22 年度火力原子力発電創立 60 周年記念大会 2010 年 2 月 pp. 259 - 263