

高効率褐炭焼きボイラの商業化に向けて

Development of High Efficiency Lignite-Fired Boiler for Commercial Use

花岡 亮 エネルギー・プラントセクターエネルギーシステムセンターボイラプロジェクト統括部 主査
Benedikt Tressner⁽¹⁾ Steinmüller Engineering GmbH Project Manager Consulting

今後の石炭焼き発電設備用の燃料として、低品位炭利用の拡大が予想されている。特に現時点で未利用であることから燃料コスト低減が期待されること、および地産地消の観点から低品位炭のなかでも褐炭を燃料とした褐炭焼き発電設備市場の拡大が予想されている。当社としても、この褐炭焼き発電設備市場に参入するため、褐炭焼きボイラ技術の確立と高効率・低コスト化が可能となる予乾燥褐炭焼き設備による差別化技術の開発を行っている。このなかで、ヨーロッパで褐炭焼きボイラ設備に関する知見を豊富にもつ Steinmüller Engineering GmbH 社（SE 社）をグループ会社とした。本稿では高効率褐炭焼き発電設備市場参入に向けた IHI グループの取組みについて紹介する。

The utilization of low grade coal is expected to increase in the future as the main source of coal fuel for coal fired power plants. The market for low grade coal firing power station equipment is expected to expand especially with the spread of the use of lignite-firing due to the low fuel cost, as it is not being utilized at the moment, and because it can be produced locally for mine-mouth power plants. IHI has a market entry strategy for lignite-fired power plants. That is why IHI is developing distinctive technologies to establish lignite firing technology and develop high efficiency/low cost lignite-fired power plants. As part of our strategic plan, IHI became shareholders of Steinmüller Engineering GmbH, a German company with rich experience in lignite-fired boilers in Europe. This paper introduces IHI's strategy for entering the market of lignite-fired power plants.

1. 緒 言

世界の可採石炭の半分は褐炭を含めた低品位炭であり、燃料コスト低減・地産地消の観点から褐炭焼き発電設備市場の拡大が予想されている。

褐炭は炭化度の低い（若い）石炭であるため高水分、低炭素含有量、高酸素含有量、低発熱量などの特性があり、乾燥すると低温酸化による発熱・自然発火するため輸送に適さず、山元発電として利用されることが多い。低融点の灰分を多く含むこともあり、燃焼設備設計には特別な配慮が必要である。

拡大が期待される褐炭焼き発電設備市場に向けて、当社は、これまで培ってきた瀝青炭、亜瀝青炭^{れき}焼き USC（Ultra Supercritical：超々臨界圧）ボイラの設計、製作、据付けのコア技術に基づき、高効率褐炭焼きボイラの確立に取り組んでいる。褐炭焼きボイラ技術の確立に際しては、当社の保有する国内最大級の燃焼試験設備を活用した試験や、最新の CFD（Computational Fluid Dynamics）技術による評価に加え、褐炭焼きボイラの知見を豊富にもつドイツの Steinmüller Engineering GmbH 社（以下 SE 社、詳細は後述）が 2014 年 6 月に IHI グループの一員となり、この知見を最大限活用し、褐炭焼きボイラの設計

信頼性を確保することになっている。

また、主要な褐炭焼き発電設備市場であるヨーロッパおよび東南アジアにおいて、これまで適用されている褐炭焼き燃焼技術は、大型ボイラ用としては、高温の火炉内の燃焼ガスと遠心ファンタイプのミルを用いて褐炭の乾燥と粉碎を同時に行う褐炭生焼きシステム、中小型ボイラ用としては、循環流動層燃焼システムとなっている。これらの従来技術は、褐炭中の高水分による熱損失が大きいことによって、発電設備として高効率を実現することが難しいという点が最大の課題となっていた。このため、高水分の褐炭を燃焼前に予乾燥することができれば発電設備の高効率化が可能となることから、褐炭予乾燥技術の開発が多くのメーカーで取り組まれている。

当社としても、自社のもつ流動層技術を応用した褐炭予乾燥システムの開発を進めており、発電設備の高効率化のための差別化技術とするため、精力的に取り組んでいる。

本稿では、この褐炭焼き発電設備市場に向けた、IHI グループの具体的活動の詳細と進捗について紹介する。

2. 褐炭焼きボイラ技術の信頼性確保

当社は、信頼性の高い褐炭焼きボイラ技術を早期に確立するため、褐炭焼きボイラに関する豊富な経験をもつエン

エンジニアリング会社である SE 社を、2014 年 6 月 Siemens AG 社から IHI グループに迎えた。SE 社の概要は以下のとおりであり、SE 社と当社との間で進められている褐炭焚きボイラ技術に関する協業の概要について紹介する。

2.1 SE 社概要

SE 社は、ドイツ Köln 近郊の Gummersbach に本社を構えるエンジニアリング会社であり、2003 年 4 月に設立された。主な事業は発電用ボイラ、化学プラント向け熱交換器、発電用ボイラ向けバーナなどの燃焼設備および脱硫・脱硝装置などの環境装置に関する、① コンサルタント事業 ② エンジニアリング事業 ③ エンジニアリング + 主要機器供給事業であり、ドイツのみならず東欧・トルコ・南アフリカほか、世界各国で事業を展開している。

褐炭焚きボイラ技術は褐炭炭鉱のあるドイツを中心に技術開発が進められてきており、ドイツのボイラメーカーであった旧 L. & C. Steinmüller GmbH 社（以下、旧 LCS 社）は、ドイツ国内外に多くの褐炭焚きボイラの納入実績がある。SE 社は多くの旧 LCS 技術者を有しており、褐炭焚き発電設備に対する豊富な技術・ノウハウを踏まえて、後述するような褐炭焚きボイラのバーナ改造などを実施している。

また、当社のボイラ事業部門（SBU）と SE 社とは、旧 LCS 社の時代から構築されてきた人的交流があり、切磋琢磨しながらお互いの技術力向上に注力してきた。当社が遂行したドイツ国内の発電設備プロジェクト（Trianel 社 Lünen 発電所向け 813 MWe ボイラ）のサポートを SE 社が実施するなど、技術・人材双方で継続して協調を図っている。

2.2 SE 社の褐炭焚きプロジェクト実績

ヨーロッパには、発電設備に対する褐炭利用の長い歴史があり、褐炭使用において運用率 90%以上、プラント効率 43%（低位発熱量ベース）を達成できるまでになった。褐炭の広大な市場ポテンシャルは東南アジアにもあるが、発電設備での有効利用はまだ不十分な状況である。

前述のとおり、SE 社は、褐炭焚き発電設備に強みをもった会社である。第 1 表に SE 社の主な褐炭焚きプロジェクト実績を示す。特に燃焼設備関連には、累積 18 000 MWthermal 相当の発電設備に対し、Steinmüller RSM® バーナを適用した褐炭燃焼技術を用いて、最新環境基準に適合するための改造工事を数多く請け負っている。

本項では、第 1 表の 2 番目に記載の Maritsa East 3（4×227 MWe）向け褐炭焚き燃焼システム供給と、3 番目に記

第 1 表 SE 社の主な褐炭焚きプロジェクト実績
Table 1 Steinmüller Engineering's track record with lignite technology

プロジェクト所掌	依頼主
320 MWe 褐炭焚きボイラ低 NO _x 化燃焼システム改造工事 Kostolac PS B1, PE Industry, Serbia	PE Electric Power Industry, Belgrade, Serbia
4 × 227 MWe 褐炭焚きボイラ褐炭燃焼システム改善工事 Maritsa East 3 PS Unit 1-4, Maritsa, Bulgaria	Contour Global, Sofia, Bulgaria
2 × 600 MWe 褐炭焚きボイラ燃焼システム改造工事 Niederaußem PS Unit G and H, Germany	RWE AG, Essen, Germany
11 × 250 MWe 褐炭焚きボイラウォールエアシステム詳細設計 Jämschwalde PS, Germany	Vattenfall Europe Generation AG & Co KG, Cottbus, Germany
11 × 250 MWe 褐炭焚きボイラ低 NO _x 燃焼システムの基本計画 Jämschwalde PS, Germany	Vattenfall Europe Generation AG & Co KG, Cottbus, Germany
500 MWe 褐炭焚きボイラ見積計画 Turów PS, Poland	Doosan Babcock Energy Ltd, West Sussex, UK
2 × 640 MWe 褐炭焚きボイラ低 NO _x バーナ改造概念設計 Neurath PS, Unit D and E, Germany	RWE Power AG, Essen, Germany
345 MWe 褐炭焚きボイラ NO _x 低減可能性検討 Sostanj PS Unit 5, Slovenia	Siemens d.o.o. Bratislavka 5, SI-1000, Ljubljana, Slovenia
330 MWe 褐炭焚きボイラ見積検討 Turceni PS Unit 6, Romania	Doosan Babcock Energy Ltd, West Sussex, UK

載の Niederaußem PS Unit G and H（2 × 600 MWe）向けエンジニアリングサービスについて紹介する。

2.2.1 Maritsa East 3

Maritsa East 3 発電所は、ブルガリア南東部に位置し、4 × 227 MWe の発電設備を有するブルガリア国内最大級の発電設備であり、ロシア製ボイラが 1970 年代後半に建設された。燃料は近接する Maritsa East 炭鉱の褐炭を使用しているが、褐炭のなかでも比較的高水分、高 S 分、高灰分かつ低発熱量といった特徴をもち、ボイラ計画・性能評価に十分な配慮が必要な炭種である。本発電所は今世紀初頭に民営化され、その後大規模改修工事が計画された。そのなかで環境規制値（Directive 2010/75/EU で規定）を見越した NO_x 排出量低減が掲げられた。本工事でのお客さまからの具体的な技術要求と目的は以下である⁽²⁾。

- (1) NO_x 排出濃度を 400 mg/Nm³ から 180 mg/Nm³ に低減する（ともに 6% O₂、ドライベース）。
- (2) ボイラ効率向上のため、ボイラ出口空気比を 1.2 から 1.15 に低減する。
- (3) CO 排出濃度は 180 mg/Nm³ 以下を維持する。（6% O₂、ドライベース）
- (4) 火炉腐食を避ける。
- (5) 火炉の灰付着（スラッキング）を避け、蒸気条件などの各プロセス値は燃焼改善前と同等とする。

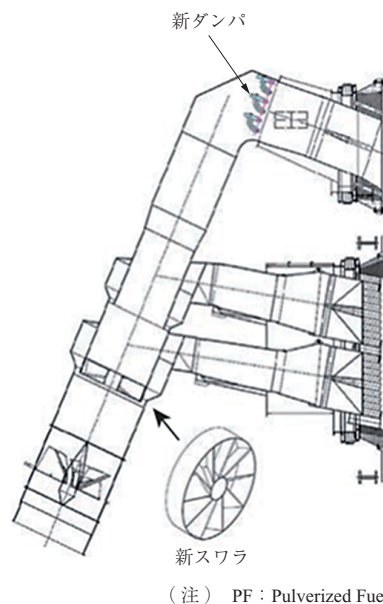
上記目標を達成するために、SE社は燃焼システムを抜本的に見直した。

バーナについては、Steinmüller RSM®バーナを適用し、燃焼用空気と石炭の混合を促進させるため両者の流速差を大きく取れるような計画にするとともに、保炎板による燃焼安定性を確保できるものとした。さらに over-fire-air システムを適用することで、これら CO 濃度上昇を抑制しつつ、NO_x 低減を図った。また各壁面に新たな空気供給ノズル (Side-wall-air system : SWA) を設置することによって火炉壁腐食、スラッキング抑制を図っている。

これらの新燃焼システムの導入では、バーナ近傍の 1 次燃焼ゾーン高さ低減と、バーナ上の 2 次燃焼ゾーンの高さ拡大によって石炭の滞留時間の適正化を図り、NO_x 低減と CO 上昇抑制 (燃え切り性確保) の両立を達成した。

バーナへの燃料供給システムに対してはダクト形状の見直し、および新たなスワラやダンパの設置によって、石炭流の吹込み状況を最適化した。第 1 図に新スワラおよび新ダンパを示す。この計画には、発電用・産業用ボイラの燃焼シミュレーション (以下、燃焼 CFD) に豊富な実績をもつ RECOM Service GmbH 社 (以下、RECOM 社) と協調を行い、燃焼 CFD を実施、計画の適切性を確認するとともに、設備の最適化を実施した。

また、設計の最適解を得るため、3D CFD とモデルバーナ (10 分の 1 サイズ) を適用し、CFD 上の解をモデルバーナでの試験で実証した。このモデルを第 2 図に、CFD の結果を第 3 図に示す。モデルの試験結果と CFD

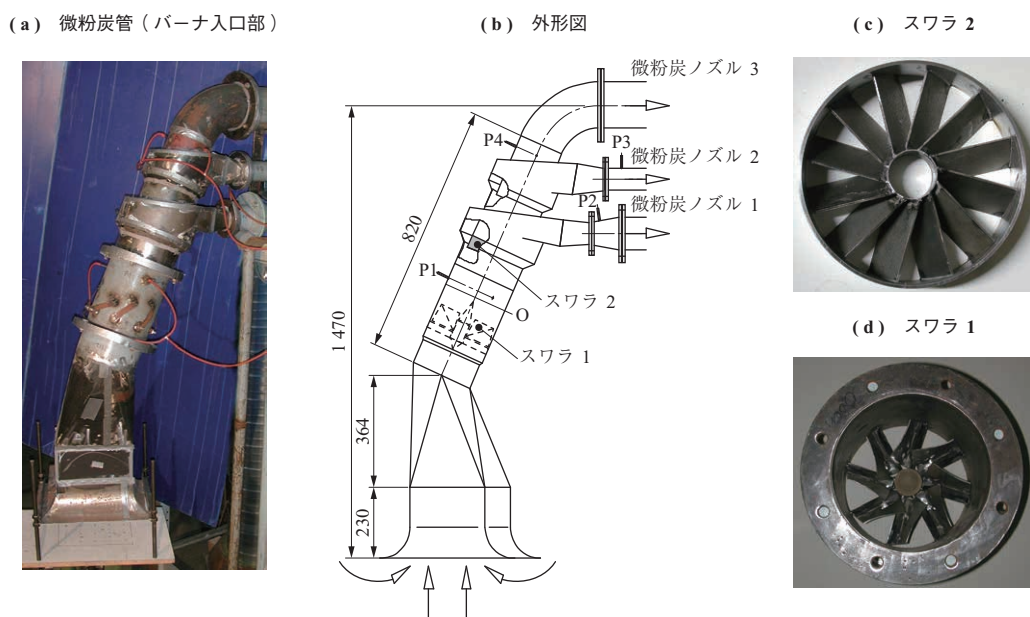


第 1 図 新スワラおよび新ダンパ
Fig. 1 New PF concentrator and vapor dampers

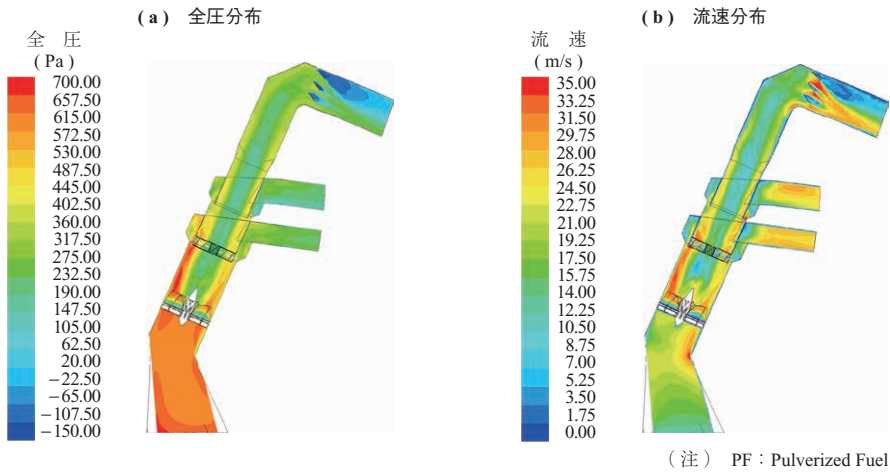
計算結果は良く一致しており、計画段階だけでなく実機試運転での各種調整による燃焼挙動の事前把握においても有用であった。

以下に燃焼 CFD 結果の例を示す。第 4 図にバーナレベルでの炉内ガス温度等温面の比較を示す。改造後 (第 4 図 - (b)), ガス温度分布が均一化されることが確認できる。

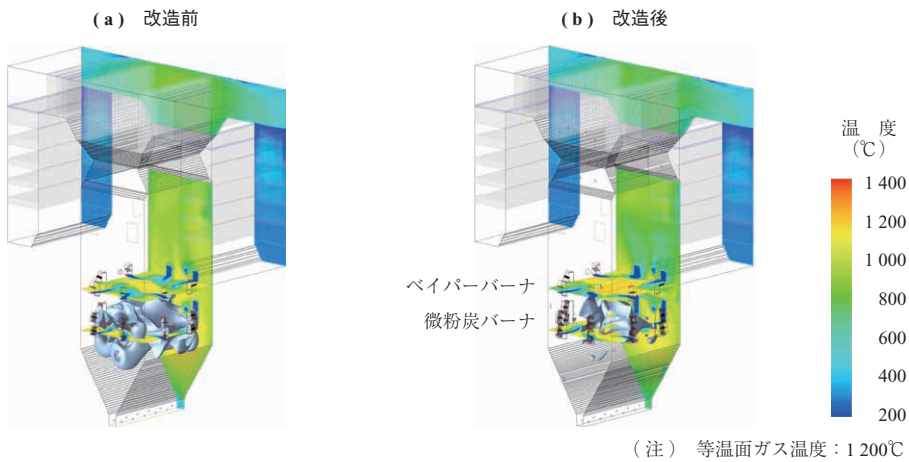
また第 5 図に CO 濃度分布を示す。一般に空気過剰率を低減すると CO 濃度は上昇することが知られているが、本改造を実施することによって空気過剰率を 1.2 から 1.15 に低減しても、改造前と同等レベルの CO 濃度を確



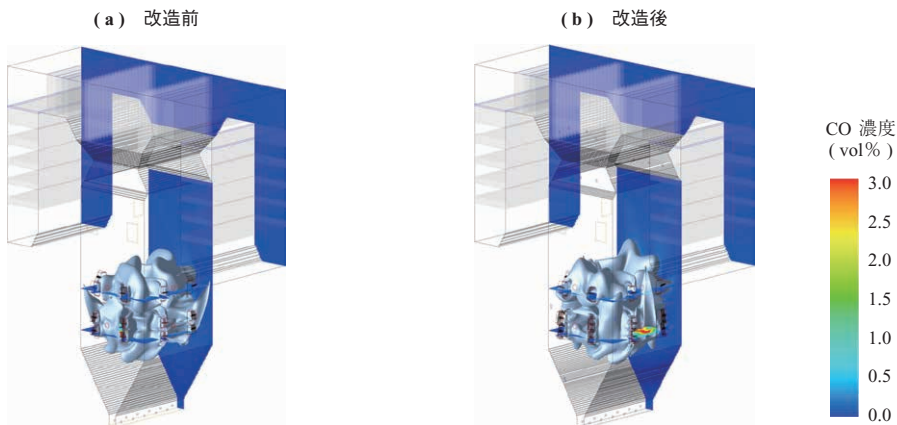
第 2 図 微粉炭管 (バーナ入口部) 試験用モデル (単位 : mm)
Fig. 2 Physical model (unit : mm)



第3図 新スワラおよび新ダンバのCFD結果
Fig. 3 CFD results for the new PF concentrator and the vapor dampers



第4図 炉内ガス温度等温面の比較
Fig. 4 Comparison of isosurface temperature



第5図 CO濃度比較
Fig. 5 Comparison of CO-production

保できることが確認された。

本改造工事は、契約から工事開始までが5か月と非常に短納期であったものの、問題なく完了し、所定の性能を満足することが確認できた。第2表に改造前と改造後のボイラ性能比較を示す。

2.2.2 Niederaußem PS Unit G and H

Niederaußem 発電所はドイツ中西部に位置し、ドイツ4大電力会社の一つであるRWE AG社(以下RWE社)が所有・運営する発電所である。燃料は近隣で産出されるRhenish lignite(ライン川流域褐炭)を用いており、燃料

第 2 表 改造前と改造後のボイラ性能比較

Table 2 Boiler performance parameters before and after revamp

項目	単位	改造前	改造後 (目標値)	改造後 (実績値)
NO _x	mg/m ³ *1	350 ~ 400	< 180	150 ~ 180
CO	mg/m ³ *1	< 60	< 180	30 ~ 80
空気比 (火炉出口)	-	1.2	1.15	1.1
ボイラ効率	%	~ 83.5	-	~ 83.5 + 1.0
火炉壁近傍における O ₂ 濃度 0.5% 未満領域の割合	%	-	30	< 5

(注) *1: 標準状態, 6% O₂ ドライベース

代が安価であることから重要な電源の一つと位置付けられている。

従来、褐炭焚き発電設備はベースロード電源と位置付けられていたが、昨今の再生可能エネルギーの台頭によって、中間負荷運用を余儀なくされつつある。

Niederaußem PS Unit G and H は発電出力 600 MW と比較的規模の大きな褐炭焚き発電設備であるが、計画時の空気過剰率が 1.35 と比較的高いことが NO_x 濃度高、火炉内での燃焼遅延の要因となっており、定格負荷運転時の NO_x 濃度高、スラッキングによる頻繁な停缶・灰除去作業、NO_x 濃度高による部分負荷運転制約といった課題を抱えていた。

2012 年にこれを解決するため、SE 社は RWE 社から改善案・改造案の検討、燃焼 CFD の実施を依頼された。

SE 社は燃焼性改善を図るため、Steinmüller RSM® バーナによるバーナの適正化を実施、併せて、over-fire-air システムのポート流速の適正化による空気・燃焼ガスの混合促進、ポート配置の適正化などの対策を立案した。

本結果に基づき、RWE 社で Unit G の改造工事を実施、所定の効果を確認することができた。またその後、RWE 社で同対策を同型缶である Unit H に対しても実施している⁽³⁾。

2.3 SE 社との褐炭焚きプロジェクトにおける協業

2.3.1 ドイツ国内向け案件に対する試設計

次に、当社の褐炭焚き発電設備に対する取組みの一例として、ドイツ国内向け案件に対しての試設計について、以下に示す。

本案件では、お客さまからプラント効率向上を目的として、USC 蒸気条件を求められるとともに、燃料中の水分による損失を抑制できる予乾燥褐炭の混焼が計画条件として提示された。

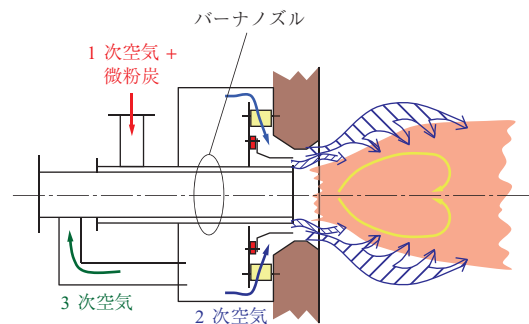
前述のとおり、当社と SE 社は、SE 社が IHI グループとなる以前から技術協力関係にあり、本案件についても協

調して試設計を実施した。

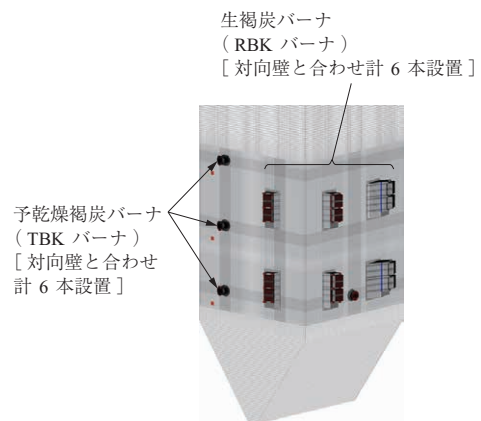
USC ボイラであるとともに、生褐炭および予乾燥褐炭の複合燃料条件への対応が必要であったため、本プロジェクトでは、各々が得意とする SE 社の褐炭生焚き技術と当社の USC ボイラ技術に加え、当社がそれまでに開発完了していた予乾燥褐炭バーナ (TBK バーナ) を組み合わせる構成とした。TBK バーナの概略図を第 6 図に示す。また、生褐炭バーナ (RBK バーナ) との配置関係を第 7 図に示す。

この新設計条件に適合したバーナ配置、および火炉計画は、生褐炭・予乾燥褐炭の混焼特性を蓄積しているデータを基に想定し、また、両社のボイラ設計技術を基盤として十分な協議を行った。さらに、本計画炭は灰障害に対する十分な配慮が必要であり、当社と SE 社の知見を共有して伝熱面配置などの基本計画を固めた。

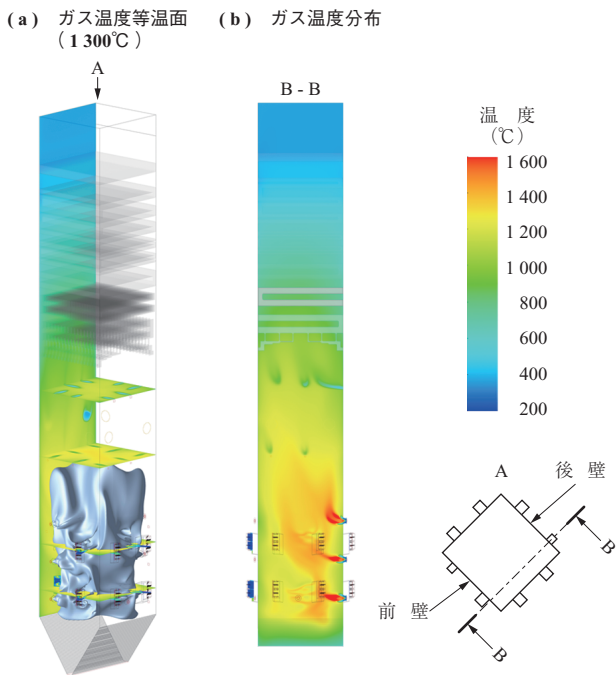
知見の乏しい生褐炭・予乾燥褐炭混焼時の燃焼特性については、RECOM 社と協調して燃焼 CFD を実施し、想定した基本計画・設計との整合性を確認しながら計画の検証を実施した。適切な均一性が確認できるとともに、ガス温度特性も計画と合致していることを確認できた。第 8



第 6 図 予乾燥褐炭バーナ (TBK バーナ)
Fig. 6 Burner for pre-dried lignite (TBK burner)



第 7 図 予乾燥褐炭バーナと生褐炭バーナの配置図
Fig. 7 Arrangement of burners for pre-dried lignite and burner for raw lignite



第 8 図 生褐炭・予乾燥褐炭混焼 燃焼 CFD 結果一例

Fig. 8 Example of CFD result for raw/pre-dried lignite mixed combustion

図に生褐炭・予乾燥褐炭混焼燃焼 CFD 結果の一例を示す。

2.3.2 東南アジア案件に対する試設計

褐炭の性状は、産地・石炭層によって発熱量・水分・灰分・灰特性という基本条件が大きく異なる。このため、瀝青炭発電設備のように、標準的な機器構成で計画できるものではなく、計画案件によって計画炭性状・範囲に適切な機器構成を採用することが重要である。

当社と SE 社は、当面の東南アジア褐炭焼き案件に対して、東南アジア褐炭性状を踏まえた生褐炭焼きボイラにも取り組むため、最適となる機器構成、ボイラ構造などの試設計を実施している。生褐炭焼きボイラの全体組立図を第 9 図に示す。

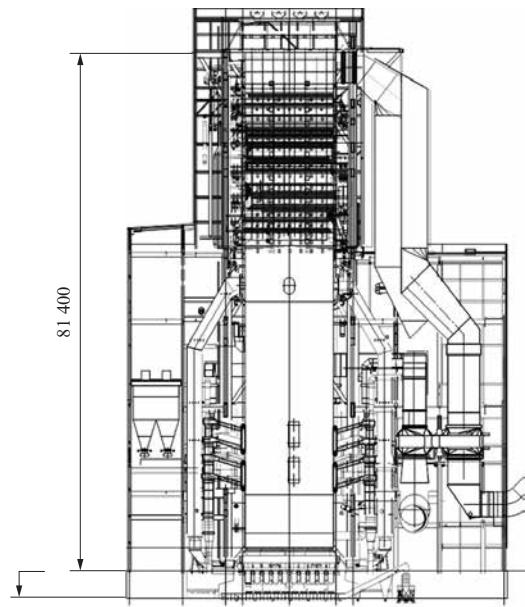
3. 褐炭乾燥機の開発

褐炭焼き発電設備高効率化の最大のメニューは予乾燥褐炭焼き技術であり、ボイラのみならず、より高効率・低コスト化が可能な予乾燥褐炭乾燥設備が重要である。

当社では褐炭予乾燥による効率改善を最大化できるように、熱源となる蒸気の潜熱回収を行うなどの特長をもった褐炭乾燥機の開発を行っている。

4. 結 言

今後、さらなる利用拡大が見込まれる褐炭に対し、SE



第 9 図 生褐炭焼きボイラ全体組立図 (単位: mm)

Fig. 9 Overall boiler arrangement for raw lignite firing (unit : mm)

社の褐炭焼きボイラ技術と当社の高効率・高品質ボイラ技術との融合を図り、信頼性の高いボイラ計画を確立し、東南アジア案件を中心とした褐炭焼きプロジェクトへの早期参入を目指す。全世界的要求である CO₂ 削減に寄与するため、高効率褐炭焼きプラントである予乾燥褐炭焼きプラントの実現に向けて、予乾燥褐炭設備も含めた技術開発を平行して精力的に推進し、信頼性確保・経済性向上に取り組んでゆく。

参 考 文 献

- (1) B. Tressner, T. Iwasaki, H. U. Thierbach, T. Will, B. Zimmermann and R. Kriegeskotte : Application of European lignite-fired boiler technology into Southeast Asia market Paper ID: ICOPE-15-1159, Proceedings of the International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15)
- (2) R. Kriegeskotte, Q. D. Ferdinando, H. U. Thierbach and B. Zimmermann : Modernisation of a lignite-fired steam generator – Reduction of NO_x emissions VGB POWERTECH Vol. 93 (2013. 10) pp. 47 – 50
- (3) D. Sommer, P. Olkowski, D. Rösenberg and H. J. Wüllenweber : Furnace-based optimisation of a lignite-fired steam generator VGB POWERTECH Vol. 92 (2012. 10) pp. 64 – 68