

環境調和型の火力発電システム

Development of Environmentally-conscious Thermal Power System

稲恒 芳郎

Inatsune Yoshiro

菅澤 貢

Sugasawa Mitsugu

福田 祐治

Fukuda Yuji

木村 肇

Kimura Hajime

地球温暖化対策として、CO₂排出量削減のための新技術や、石炭を有効利用した環境調和型の火力発電システム技術が求められている。日立グループは、日立製作所電力システム社が中心となり、CO₂を回収・貯留するCCS技術、CO₂低減を図るバイオマス燃焼、および褐炭乾燥技術など、石炭を燃やすと発生するCO₂やNOxなどを減らし、環境負荷を抑える技術の開発を進めている。今後も化石燃料と再生可能エネルギーのベストミックスにより、経済性を考慮しながらCO₂排出量抑制に寄与する技術開発に取り組んでいく。

1. はじめに

世界的な経済発展に伴ってエネルギー需要が増加しており、地球温暖化対策が重要な課題となっている。石炭火力発電は、燃料である石炭の資源量が豊富で地域的偏りが少なく、かつ安価であることから、これまで主要なエネルギー供給源として各国で重要な役割を担ってきた。また、2011年の東日本大震災を契機として、従来以上にその重要性が見直されている。しかし、CO₂排出量が多いことが課題となっており、日立グループは、低炭素社会へ向けて石炭火力発電に関するさまざまな取り組みを進めている。

ここでは、石炭火力発電所の排出ガスからCO₂を回収するCCS (Carbon Capture and Storage: CO₂の回収・貯留) 技術を用いた実証試験プロジェクト、CO₂低減のために石炭中のバイオマス混燃比率を増加させた技術、および石炭火力発電の省エネルギー化の一環として、低品質炭有効利用の効果的な技術である褐炭乾燥技術の概要について述べる。

2. 環境対応技術のグローバル展開

日立グループは「環境ビジョン2025」において、「2025年度までに製品を通じて年間1億トンのCO₂排出抑制に貢献する」ことを宣言しており、グローバルな低炭素社会

の実現に向けて技術開発を推進している。とりわけ、発電部門はそのうちの約7割を担っており、化石燃料と再生可能エネルギーのベストミックスにより、経済性を考慮したCO₂抑制に寄与する技術開発に積極的に取り組んでいる。具体的には、高効率化技術として、700°C級A-USC (Advanced Ultra-supercritical: 先進超々臨界圧火力発電技術) とIGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle: 石炭ガス化複合発電)、再生可能エネルギーとして、太陽熱、太陽光、風力およびバイオマスの利用、排ガス処理技術では脱硫、脱硝、また、CO₂回収技術では化学吸収法と酸素燃焼法をそれぞれ開発している。その開発のロードマップと開発ビジョン、装置系統およびその関連研究設備の外観を図1に示す。

これらの技術を開発するにあたり、日米欧の3拠点から成るグローバル体制を構築し、現地の大学や国立研究機関とも連携している。

700°C級A-USCでは、高温高压に耐える材料開発がキー技術であり、欧州の拠点である日立パワーヨーロッパ社と共同で電力会社やドイツの大学と連携し、基礎試験から実機試験に至るまで幅広く開発を進めている。

化学吸収法や排ガス処理に関しては、米国の拠点である日立パワーシステムズアメリカ社と共同で、DOE (U.S. Department of Energy: 米国エネルギー省) 研究機関に委託して化学吸収液の検証を進めている。また、日立パワーシステムズカナダ社と連携し、カナダのサスカチュワン州電力公社 (Saskatchewan Power Corporation) (以下、サスクパワー社と記す。) とCO₂回収技術に関する共同実証プロジェクトを開始した。

再生可能エネルギーに関しては、バイオマス混合燃焼や半炭化燃料の有効利用、従来火力の高速負荷変化技術の開発を行っている。今後、東南アジアなどで利用が高まると

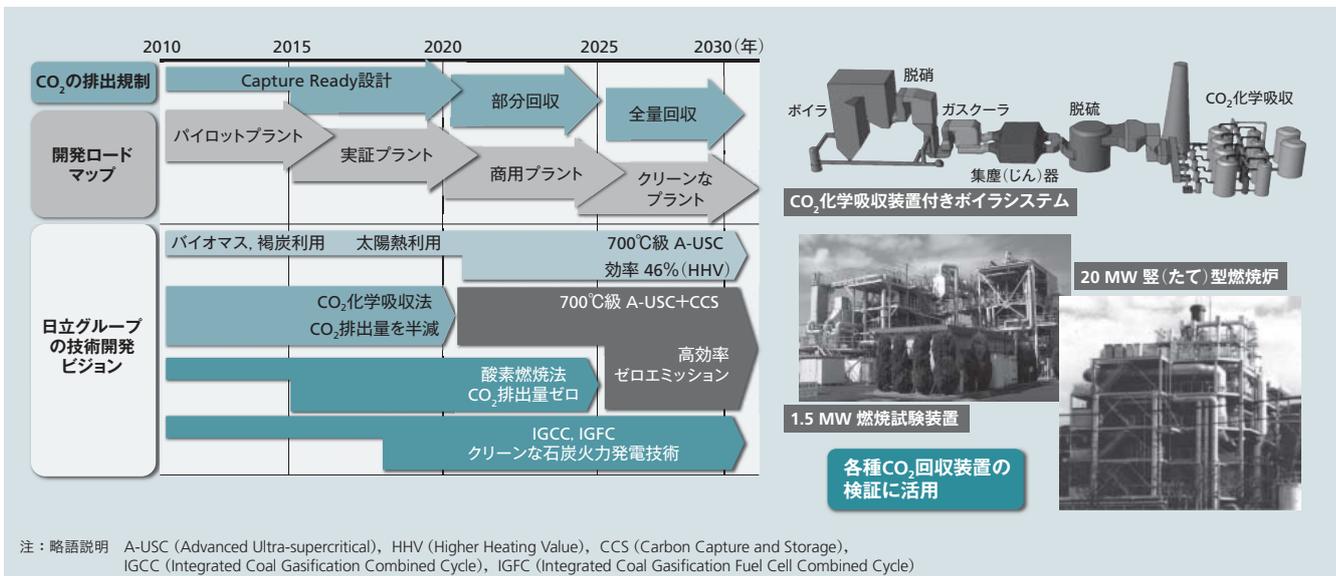


図1 | 日立グループの環境対応技術ロードマップ

日立グループは、化石燃料と再生可能エネルギーのベストミックス技術を提供していく。

考えられる高水分褐炭の燃焼技術（乾燥、直接燃焼など）についても、日立パワーヨーロッパ社と協調して開発を進めている（図2参照）。

3. CO₂回収技術

(1) カナダにおける実証試験

日立グループは、サスクパワー社と共同でCO₂回収実証試験プロジェクトを開始した。この試験場所は、サスクパワー社が所有するサスカチュワン州エステバン市近郊のシャンド石炭火力発電所（298 MW）であり、CCS技術開発の先進地域であるカナダ中西部に位置している。両社協力の下、CO₂回収の技術とノウハウを集約し、大型の商用機を見据えた設備全体の信頼性、経済性などを総合的に実証・評価するのが目的である。

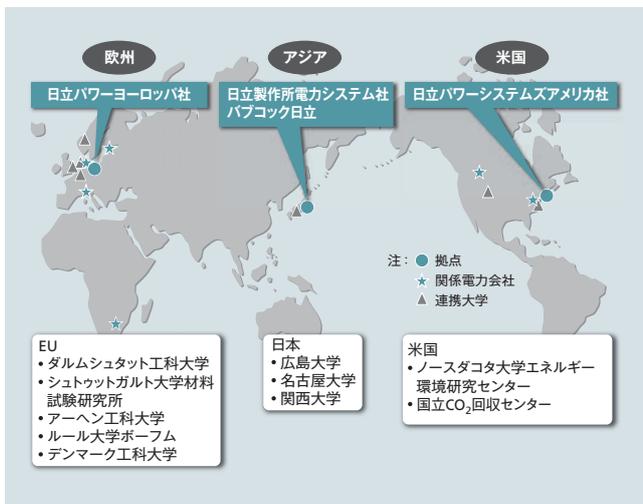


図2 | 日立グループのグローバル研究体制

日立グループは、各国拠点、大学、国立研究機関と連携して研究開発を進めている。

実証試験設備の系統を図3に示す。煙突入口の排ガスを抜き出し、脱硫して吸収塔に導入する。吸収塔では排ガス中に吸収液を噴霧してCO₂を吸収させ、再生塔に送ってCO₂を回収したあと、再び吸収塔に戻して循環させて連続的にCO₂を回収する系統になっている。煙突からの吸収液の飛散防止策や吸収液の有効利用、省エネルギー化を考慮した設計を採用した。

CO₂回収実証試験設備の完成予想図を図4に示す。シャンド発電所建屋を背景に、CO₂実証試験装置の外壁内部を示している。鉄骨建屋内に見える高い円筒状の装置が吸収塔であり、隣接して再生塔を配している。試験開始は2014年の中頃を予定している。

この実証試験の計画条件を表1に示す。装置規模は、将来の商用機のスケールアップを考慮して、排ガス量は実機

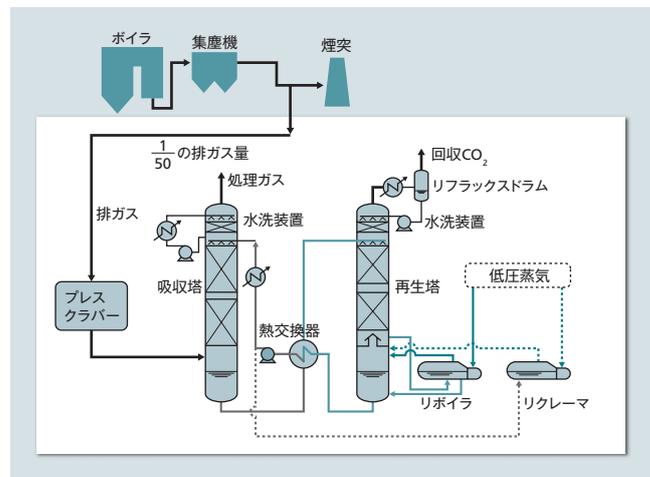


図3 | カナダにおけるCO₂回収実証試験設備の系統図

煙突入口の排ガスを抜き出して吸収塔に導入し、CO₂を吸収液に吸収させる。再生塔でCO₂を放出したあと、吸収液を再び吸収塔に戻すことによって連続的にCO₂を除去するプロセスである。



図4 | CO₂回収実証試験設備の完成予想図

サスカチュワン州のシャンド石炭火力発電所建屋を背景にしたCO₂回収装置の完成予想図を示す。

表1 | カナダでの実証試験の計画条件

商用機のスケールアップを考慮した仕様としている。

項目	設計条件
燃料	カナダ産褐炭
排ガス量	22,750 m ³ (Normal)/h
温度	40 °C
CO ₂ 濃度	15.5 %
CO ₂ 回収効率	90 %
CO ₂ 処理量	120 t/日

の約 $\frac{1}{10}$ 相当、CO₂処理量は120 t/日、CO₂の回収効率は90%としている。

この試験に用いるCO₂の吸収液は、1990年代前半の東京電力株式会社との共同研究により、横須賀火力発電所での実ガス実証試験で培った技術をベースに開発した「H3-1」である。

このプロセスの重要な性能は、吸収液のCO₂吸収性能、およびCO₂回収に要するエネルギーの低減である。

CO₂の吸収液として標準的に用いられるアミン類であるMEA (Monoethanolamine: モノエタノールアミン) とH3-1を比較して図5に示す。H3-1は吸収液の必要液量で35%、必要エネルギー量でMEAよりも26%低くなっている。これは、米国ノースダコタ大学の環境エネルギー研究センター(EERC: Energy and Environmental Research Center)に委託して得られた試験結果であり、その評価により、米国国立研究所の一つである国立CO₂回収センター(NCCC: National Carbon Capture Center)での評価試験も実施することになった。

(2) その他の実証試験

日立グループは、ガス焚(だ)き用のCO₂回収試験を2012年末にノルウェーの研究機関と実施する予定である。石炭焚きに加えて、種々の燃料に対応したCO₂回収技術の確立が期待されている。

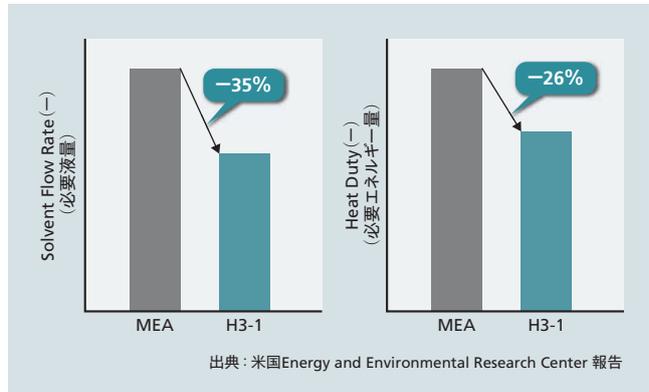


図5 | 吸収液の性能比較図

「H3-1」吸収液は、標準的な吸収液であるMEA(モノエタノールアミン)に比べ、必要液量、必要エネルギー量ともに、大幅に低減できるという試験結果を得ている。

4. バイオマス燃焼技術

4.1 概要

既設の石炭焚き火力発電所においてバイオマス混焼率を増す場合、専用のミル(粉碎機)を追加設置する必要があり、所内動力の増加や設置スペースの確保などの課題が生じる。これらに対応するため、追加設備と改造コストを抑制して高い混焼率を確保できる方式として、既設ミルを活用した燃焼システムの実用化を推進している(図6参照)。

目標混焼率は、国内でのCO₂排出量削減目標25%に鑑み、25 cal%を設定した。この開発は「バイオマス専用粉碎方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」において、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)との共同研究(2010~2013年度)において推進中であり、これまで達成した成果について述べる。

4.2 開発成果

(1) バイオマス粉碎ミル

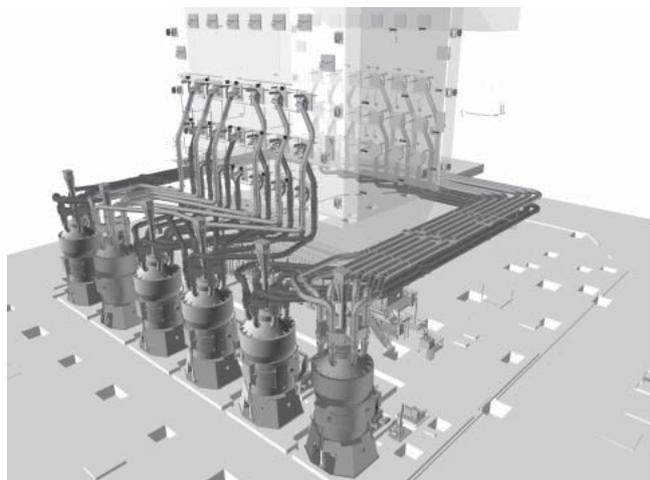


図6 | 既設燃焼システムを活用したバイオマス混焼設備

既設の石炭ミル(粉碎機)とバーナを、バイオマス共用機に改造することにより、プラント全体で25 cal%のバイオマス混焼を達成する。バイオマス共用ミルは石炭専焼も可能であり、予備ミルとしての機能も維持している。

草本系や木質系など複数種のバイオマスの要素試験評価を行い、目標の混焼率を達成するための適正構造の提案、安全性(防爆)の評価、および腐食性の評価を行った。

まず、5種のバイオマスペレットを用いて専用粉砕の要素試験を行った。バイオマス種ごとに粒度や粉砕動力に大幅な差異があり、また、粒度は一部のバイオマス種(パーク)を除き、ペレット成型前の原料粒度以上には細くならないことを確認し、システム構築に必要となる知見を得た(図7参照)。

次に、専用粉砕によって高い混焼率を達成する際の課題であるバイオマス排出性を向上させる適性構造を要素試験によって検討した。縦(たて)型ローラミルの分級機能を抑制することで、粉砕後のバイオマスを効率よくミル外へ排出可能なことを把握した。その手段として、一次分級(重力分級)抑制にはダブルウォール、二次分級(遠心力分級)抑制には縮流部位をそれぞれ設置することとした。この構造を取り入れたミルの外観を図8に示す。

安全性に関しては、粉塵(じん)爆発を避けるための検討を行った。スイッチグラスは爆発下限O₂(酸素)濃度が19 vol%であることを確認し、ミル入口O₂濃度を18 vol%として運用することとした。

腐食性に関しては、排ガス再循環系のガス組成評価を化学平衡計算によって行った。スイッチグラスの場合、排ガス再循環系(O₂濃度18 vol%)におけるミル出口SO₃(三酸化硫黄)濃度は0.1 ppmと小さく、ミルおよび送炭管での腐食の危険性は低いという結果が得られた。

(2) バイオマス専用バーナ

パイロット規模のバイオマス専焼用シングルバーナ試験装置により、スイッチグラス専焼時の燃焼性評価を実施した。バーナには、褐炭やバイオマスの低O₂搬送ガスでの燃焼に対応できる保炎強化型のNR-LEバーナを基本構造として用いた(図9参照)。

前述のスイッチグラスの場合の搬送ガスO₂濃度18

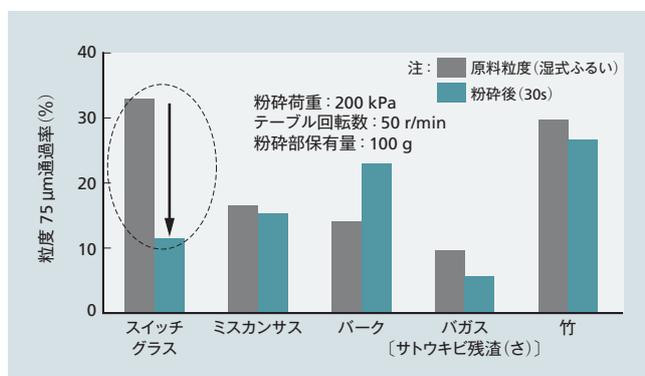


図7 | 各種ペレットの微粉の生成特性
 パークを除き、原料粒度以上の粉碎性は確認されなかった。特にスイッチグラスは、他のバイオマス種と比較して粉砕が困難であることを確認した。

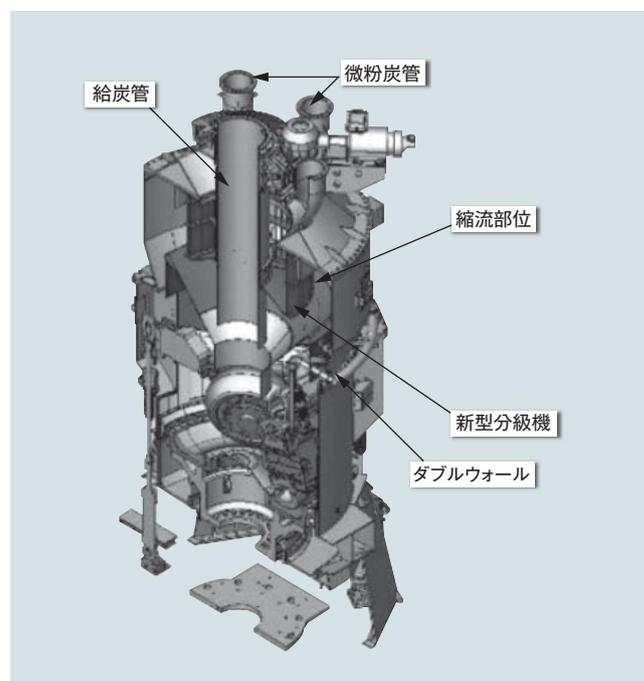


図8 | バイオマス-石炭共用ミル
 一次分級および二次分級の機能を抑制することで、バイオマス粉砕時の排出量を確保する。同一構造で石炭専焼も可能となるように開発した。

vol%の条件下において、バーナ負荷を使用範囲の40%から70%まで安定して燃焼できることを確認した。その際のNO_x(窒素酸化物)、CO(一酸化炭素)の各濃度は、石炭(豪州産バルガ)の専焼時と比較して同等、あるいはそれ以下であった。また、灰中未燃分は、バイオマス中の灰分が少ないことに起因して石炭よりも高いものの、燃焼効率は石炭以上であった(表2参照)。

(3) バイオマス混焼システム

ボイラ火炉での運用において、燃焼上の問題がないことを大型の燃焼設備を用いて実証した。バイオマスは、専焼バーナにはスイッチグラスを、混焼バーナにはスギをそれぞれ使用した。石炭は豪州産バルガを使用した。専焼バーナにはシングルバーナ試験で検証した専焼バーナを、混焼バーナには石炭バーナを用い、混焼比率を目標値25 cal%

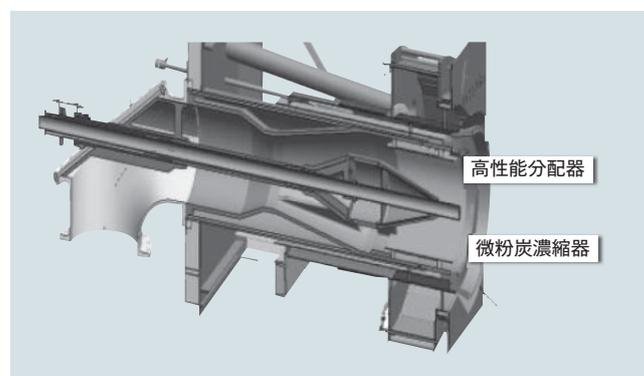


図9 | バイオマス-石炭共用バーナ
 低品位炭対応として開発したNR-LEバーナを基本構造とし、低酸素雰囲気下での安定燃焼を確保する。

表2 | シングルバーナ装置での専焼特性

灰中未燃分はバイオマス中の絶対灰量が少ないため、石炭と比べて相対的に大きな値となっているが、燃焼効率は良好である。NOx、COなどの排出は、石炭専焼時と比較して同等あるいは同等以下であった。

燃料	スイッチグラス	石炭（豪州産バルガ）
NOx	137 ppm (6%O ₂)	136 ppm (6%O ₂)
CO	0 ppm (実O ₂)	13 ppm (実O ₂)
灰中未燃分	8.7%	6.2%
燃焼効率	99.6%	99.0%

の前後で20 cal%から33 cal%の間で変化させて燃焼性能を評価した。専焼バーナの着火に問題はなく、安定な火災が形成された。混焼率増加に伴ってNOxは低下し、COの副次的生成はほぼ見られなかった。また、灰中未燃分もほぼ増加しなかった。

(4) 実機ボイラ性能予測とシステムの成立性検討

代表検討例として、バイオマス25 cal%混焼時における主要機器前後のガス状態量の検討結果を図10に示す。爆発下限が厳しい木質系（マツ）を想定し、バイオマス搬送ガス中のO₂濃度を11 vol%で計算して評価した。石炭専焼に比べ、ガス温度の増加は数度、ガス量の増加は数パーセントというレベルであり、設備構成上で問題のない範囲であることを確認した。

(5) 開発成果のまとめ

以上のとおり、粉碎要素試験やシングル／マルチバーナ炉試験などによって特性を把握し、現状石炭火力でのバイオマス混焼率25 cal%の実用化の見通しを得た。今後は、木質系の試験評価を追加して検証範囲を広めるとともに、連続式パイロットミルによる検証や排ガス処理システムの試験検証、および総合評価を行い、運用方法も含めた全体

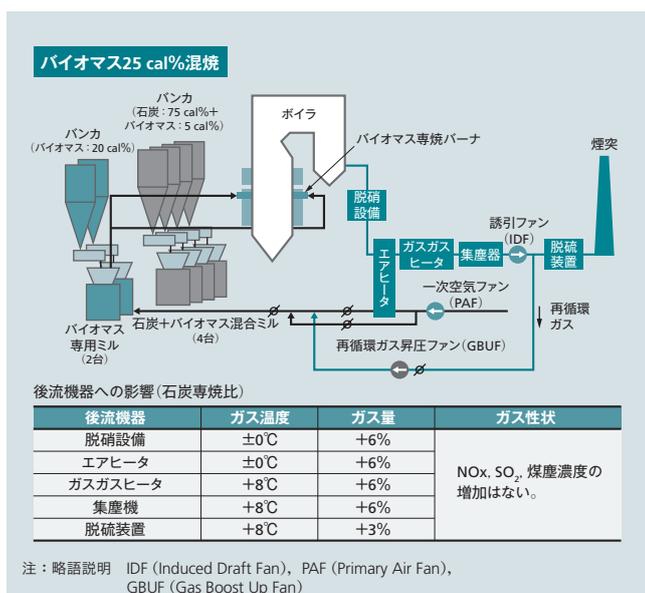


図10 | ボイラ後流機器への影響（石炭専焼に対する比）

石炭専焼に比べ、ガス温度やガス量の増加は設備構成上で問題のない範囲であることを確認した。

システムを完成させる予定である。

5. 褐炭乾燥技術

5.1 概要

高水分褐炭は、水分損失が多く送電端効率が低い。また、褐炭は乾燥させると自然発火しやすい特徴を持っている。長年、乾燥技術開発は進められているものの、乾燥機自体が大きいため発電用プラントへの適用は難しく、実用化されていないのが現状である。そこで、日立グループは、高水分褐炭の有効利用に効果的な乾燥技術の開発を進めている。

5.2 褐炭乾燥機の開発

(1) 試験装置

褐炭を効率よく乾燥させることを考慮し、空気流動層方式を選択するとともに、独自の移動式流動コンベアを組み込んだ。試験装置の外観を図11に示す。

(2) 試験結果

乾燥試験結果を図12に示す。試験結果のとおり、褐炭中水分を20%まで乾燥させることに従来は50分程度を要していたが、6分程度と短時間で可能になった。また、乾燥時の温度も、従来は100℃程度であるのに対して50℃程度に低減できた。

短時間で乾燥できることから、保有炭が少なくなり、小型化が可能になる。概略配置の比較を図13に示す。従来は乾燥装置を別スペースに設置する必要があったが、新開発装置はボイラ建屋内に設置可能となる。

また、乾燥温度が高い従来の乾燥装置は、蒸発した水分のpHが低く乾燥装置材質が腐食するため、ステンレスを使用する必要があった。新開発の乾燥装置は乾燥温度が低いいため、蒸発した水分のpHは通常の水と同等であり、炭素鋼の使用が可能となる。

安全性については、試験中に採取した微粉で爆発試験を実施した結果、静電気レベルでは爆発しないことを確認し

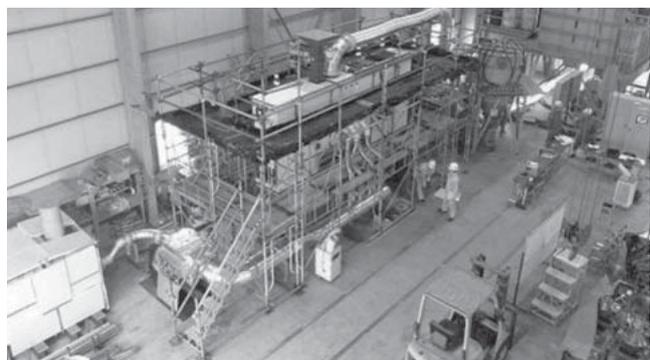


図11 | 褐炭乾燥要素試験機

空気流動層方式を採用し、独自の移動式流動コンベアを組み込んでいる。

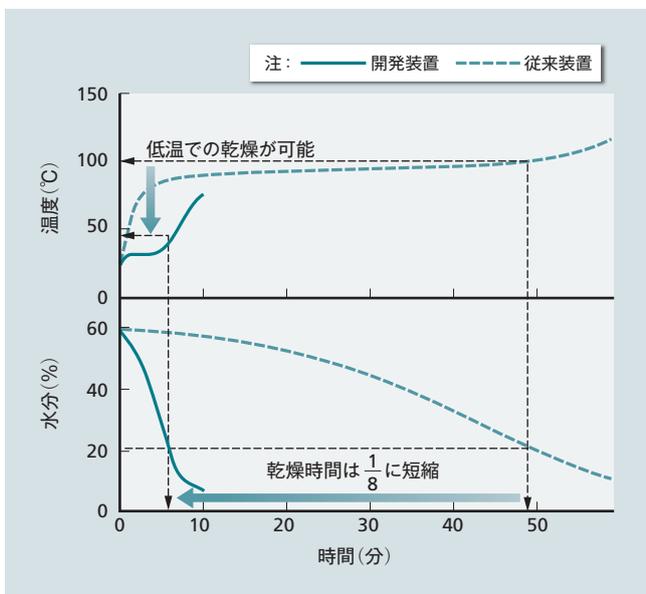


図12 | 褐炭乾燥要素試験の結果
開発装置では、従来装置に比べて乾燥温度は $\frac{1}{2}$ 、乾燥時間は $\frac{1}{8}$ にそれぞれ低減された。

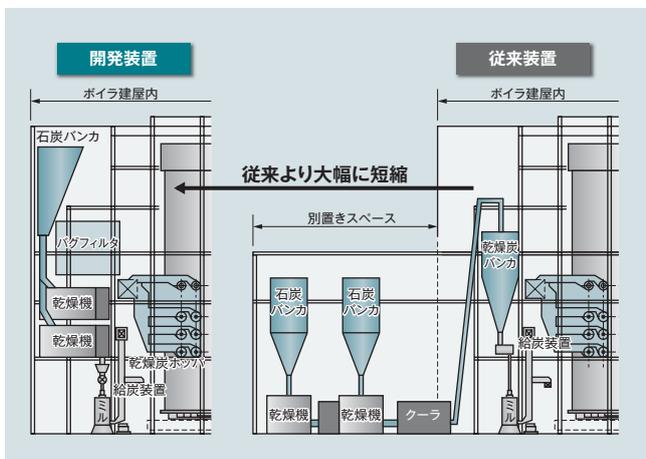


図13 | 概略配置の比較
新開発の乾燥装置は別置きスペースが不要となり、ボイラ建屋内に設置可能である。

た。また、試験中にCO可燃ガスの監視をしていたが、COの発生はなかった。送電端効率は、当初目標の2ポイント程度の向上が見込めることを確認した。

以上のように、当初の開発目標を満足する結果を得ており、今後は実運用を考慮した最終検証を実施する予定で

表3 | 褐炭乾燥機の開発装置と従来装置の性能比較
発電用プラント褐炭乾燥機の開発装置は、従来装置に比べて短時間乾燥、低温、小型化を達成した。

項目	開発装置	従来装置
石炭中水分	60%→20%	-
乾燥時間	10分以内	30～60分
乾燥装置サイズ	小型化(ボイラ建屋内配置)	別置
乾燥装置材質	炭素鋼	ステンレス
温度	60℃以下	100℃前後
安全性(粉塵爆発)	粉塵爆発しない	-
安全性(可燃ガス)	可熱ガスなし	-
送電端効率	2ポイント向上	-

ある。
(3) 開発成果のまとめ
この開発品は従来品に比べ、乾燥時間、温度、サイズそれぞれに大幅な低減を図ることが確認できた(表3参照)。

6. おわりに

ここでは、石炭火力発電所の排出ガスからCO₂を回収するCCS技術を用いた実証試験プロジェクト、CO₂低減のために石炭中のバイオマス混燃比率を増加させた技術、および石炭火力発電の省エネルギー化の一環として、低品質炭有効利用の効果的な技術である褐炭乾燥技術の概要について述べた。

日立グループは今後も技術開発を進め、地球温暖化防止に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 河崎, 外: 環境調和型石炭火力発電に向けた取り組み, 日立評論, 92, 4, 295～299 (2010.4)
- 2) Results of the Pilot-Scale Solvent Evaluations, 2010 NETL CO₂ Capture Technology Meeting, September 13-17, 2010, Pittsburg, PA
- 3) 馬場: バイオマス専用粉碎方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発, NEDO平成23年度バイオマスエネルギー関連事業成果報告会 (2012.2)
- 4) NEDO, バブコック日立: バイオマス専用粉碎方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発, NEDO平成23年度中間年報 (2012.3)
- 5) 金本: バイオマス専用粉碎方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発, 粉体工学会第48回夏期シンポジウム講演論文集, 33-34 (2012.7)

執筆者紹介

- 稲垣 芳郎**
1981年バブコック日立株式会社入社, 日立製作所 電力システム社 火力事業統括本部 ボイラ事業部 グローバル開発本部 開発推進部 所属
現在, 環境関連のグローバル開発推進事業化に従事
- 福田 祐治**
1979年バブコック日立株式会社入社, 呉研究所 所属
現在, ボイラ, 環境関連の技術開発に従事
日本金属学会会員, 日本機械学会会員, 腐食防食協会会員
- 菅澤 貢**
1981年バブコック日立株式会社入社, エネルギープラント本部 所属
現在, ボイラ燃焼関係の技術開発に従事
- 木村 肇**
1989年バブコック日立株式会社入社, 火力技術本部 ボイラ設計部 所属
現在, 火力発電ボイラ技術の開発・設計に従事