

環境調和型石炭火力発電に向けた取り組み —CCS(Carbon Capture and Storage)技術の開発—

Development of Environmentally-friendly Clean Coal Power Plant Technologies

河崎 照文 大島 光信 五十嵐 瑞貴
Kawasaki Terufumi Oshima Mitsunobu Igarashi Mizuki
勝部 利夫 木山 研滋
Katsube Toshio Kiyama Kenji

世界は地球温暖化対策に向けて大きく動いており、エネルギー関連技術の開発は転換点にある。日立グループは、グローバルな研究開発体制の下、これまでに培った種々の環境技術をベースにCO₂の分離・回収技術などCCS技術の実用化に取り組んでおり、低炭素社会実現に向けた開発を進めている。

1. はじめに

世界的な経済発展に伴ってエネルギーの需要が増加しており、地球温暖化対策は重要な課題となっている。中でも、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、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いる。しかし、そのCO₂排出原単位が大きいことが課題となっており、低炭素社会へ向けた新たな取り組みとして、CO₂を分離・回収し貯留するCCS (Carbon Capture and Storage) 技術の開発が強く求められている。日立グループは、これまでに培った種々の環境技術を基にCCS技術の実用化に取り組んでいる。

ここでは、CCSに関連する規制動向と、CCS技術開発における日立グループの開発ビジョン、およびCO₂分離・回収方式のうち化学吸収法と酸素燃焼法について述べる。

2. 規制動向と開発ビジョン

2.1 規制動向

EUでは、2008年12月に採択されたCCS指令¹⁾の中で、2015年以降に新設される定格300 MW以上の新設発電所について、当初検討された500 g/kWhのCO₂排出規制(約40%の削減に相当)は見送られたものの、いわゆる「Capture Ready」の規定が定められた。Capture Readyとは、プラントにCO₂回収装置を将来設置できるように、あらかじめ設計しておくことである。すなわち、石炭火力発電所は、

適当な貯留サイトが確保できるなどの条件が整えばCO₂回収装置に必要な設置スペースを確保しなければならない。また、欧州委員会は、CCS実証機建設を促進するため2009年10月にEU経済再生プログラムとして6件の実証案件に約10億ユーロを投入することを決定した。さらに、2010年2月には、EU-ETS指令改正²⁾に基づき2015年12月31日以前に稼動することを条件に、化学吸収、酸素燃焼、IGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle: 石炭ガス化複合発電) などの技術の実証プロジェクト合計8件に資金支援を行うことを決定した。

また、英国政府は、2009年4月、新設石炭火力発電所に対してCCS設置の義務づけを発表し、今後4件の実証機建設を行うための施策構築を表明している。

一方、米国でも2009年発足のオバマ政権下で温室効果ガス排出規制に向けた動きが加速している。まず、連邦議会下院で2009年6月、クリーンエネルギーおよび安全保障法案³⁾が可決された。これを受けて上院ではクリーンエネルギー雇用および米国発電法案⁴⁾の審議を開始し、同年11月、環境・公共事業委員会を通過した。現在、法制化に向けた審議が進められている。この法案には、2020年以前に認可される石炭火力はCO₂排出量を50%削減すること、2020年以降のものは65%削減することが盛り込まれている。また、2010年2月に発表された大統領覚書では、2016年までに5~10件のCCS実証プロジェクトを行うと具体的施策が示されている。

このように、欧米では、石炭火力発電に対してCO₂の排出規制(部分的回収)の動きが具体化し、2015年を目安に複数のCCS技術の実証を行うことが現実のものとなっている。

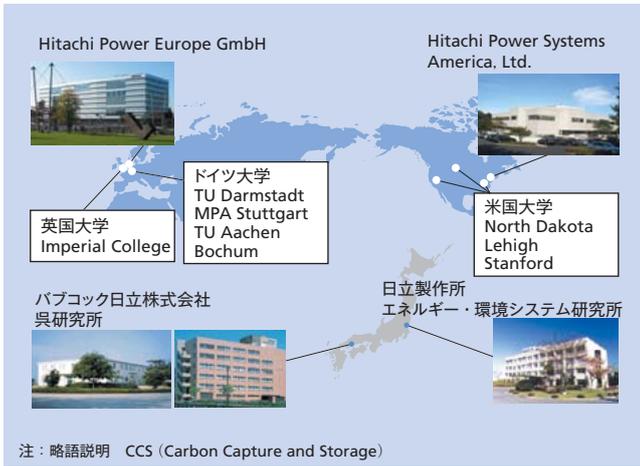


図1 | 日立グループのCCS技術開発連携
日立グループは、日米欧の各拠点でのCCS技術開発に加え、欧米の大学、研究機関との連携による技術開発にも取り組んでいる。

2.2 日立グループの開発ビジョン

欧米の動向を踏まえ、日立グループは日米欧の3拠点から成るグローバルな連携体制を構築し、現地の研究機関とも連携して石炭火力の高効率化とCCS技術の開発に取り組んでいる(図1参照)。

具体的には、(1) 700°C級A-USC (Advanced Ultra Super Critical)、(2) CO₂回収技術である化学吸収法と(3) 酸素燃焼法、(4) IGCCという、四つの技術を開発している(図2参照)。A-USCは発電効率を飛躍的に向上させる技術であり、化学吸収法は既存の発電所へ追設することが容易でCO₂の部分回収も可能な技術、酸素燃焼法はCO₂の全量回収を効率的に行うことができる技術である。さらに、IGCCは石炭をガス化して水素を主な燃料として発電する究極のクリーンな技術である。これら四つの技術を融合することにより、NO_x(窒素酸化物)、SO_x(硫黄酸化物)、CO₂などの排出を極限まで低減し、かつCO₂回収に伴う効率低下も補うことができ、経済的にも成り立つ次世代石

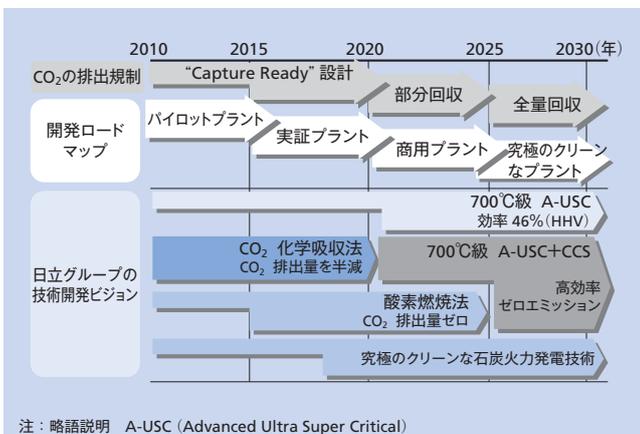


図2 | 日立グループのCCS事業ビジョン
日立グループは、二つのCO₂回収技術(化学吸収法、酸素燃焼法)、IGCC、およびA-USCという四つの技術を並行して開発し、次世代石炭火力発電の実現をめざしている。

炭火力が完成する。以下では、このうちCO₂回収技術の化学吸収法と酸素燃焼法について述べる。

3. 化学吸収法の開発

3.1 概要

化学吸収法によるCO₂除去技術は、天然ガス精製工程や化学プラントで実績のある技術である。しかし、石炭火力発電プラントに適用するにあたっては、その熱損失から発電効率が大幅に低下することや、排ガス中に含まれるSO₂(二酸化硫黄)などの酸性ガスが吸収液を劣化させるなどの課題を解決する必要がある。

日立グループは、1990年代初めから研究開発を開始し、基礎試験、実ガスパイロット試験での実証試験により、石炭焚ボイラ排ガスに適した吸収液と装置を開発している。現在は、海外グループ会社と連携して実用化を進めており、日立パワーシステムズアメリカ社(Hitachi Power Systems America, Ltd.)は、米国エネルギー省からの補助金により、電力会社と連携して石炭焚火力用CO₂化学吸収装置の設計を進めている。

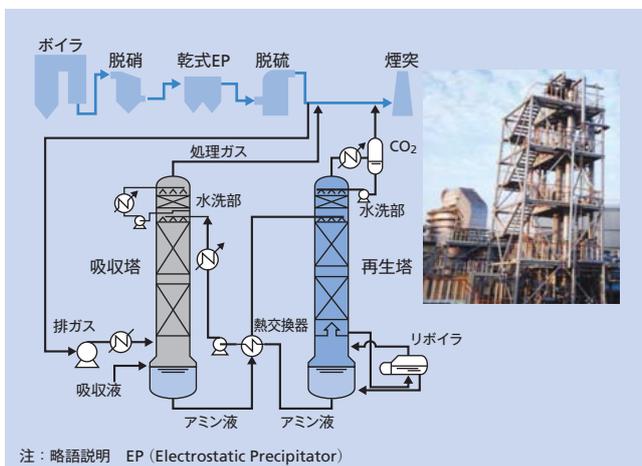
3.2 吸収液の開発

吸収液の開発には、基礎実験装置と合わせてベンチ装置を用いた⁵⁾(図3参照)。この装置は吸収塔、再生塔および液循環装置から成り、ボイラ排ガスを模擬した混合ガスを用い、種々の条件で評価ができるものである。これまでに多くの吸収液サンプルについてスクリーニング試験を行い、石炭焚ボイラ排ガスに適したアミン吸収液「H3」を開発した。

従来の吸収液は主に天然ガス採掘時のCO₂除去工程で使われており、石炭焚ボイラの排ガス中の酸性ガスや酸素に弱かった。また、処理ガス量が格段に多くなるため、装置設計上、吸収液の熱特性や流動特性などの基礎物性も十



図3 | ベンチスケール実験装置
排ガスを模擬したガスを使用することにより、石炭焚ボイラ排ガスに適した吸収液の諸特性を評価した。



注：略語説明 EP (Electrostatic Precipitator)

図4 | 1,000 m³N/hパイロット装置および外観
吸収液「H3」をはじめとする数種の吸収液で試験を実施し、その優位性を確認した。

分に考慮しなければならない。そこで、種々あるアミンの中から適切なものを選び、さらに添加剤などを加えて最適化を図った。

3.3 実ガス実証試験

日立グループが開発したアミン吸収液「H3」を用い、東京電力株式会社との共同研究として、東京電力横須賀火力発電所に排ガス処理量1,000 m³N/hのパイロット装置を設置し、実ガス実証試験を実施した^{(6),(7)} (図4参照)。

種々の特性試験によって性能を確認した後、2,000時間の長期連続運転試験を実施した。その試験結果の一例を図5に示す。30 ppmのSO₂を含む排ガスの試験においても安定した高いCO₂除去性能を確認した。除去率は平均で90%を超えており、回収したCO₂の純度は99%以上の高い値が得られた。また、CO₂の回収に要したエネルギーは、標準となるMEA (monoethanolamine) 液に比べて20～30%の改善が見られた。現在、アミン吸収液のさらなる性能改善に取り組んでいる。

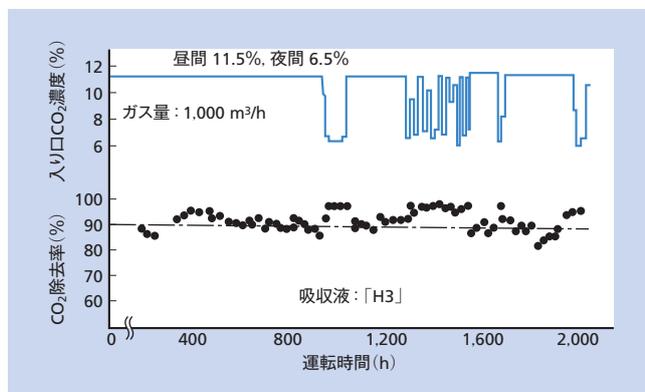


図5 | 連続運転試験結果
2,000時間連続運転試験の結果を示す。実ガスでも平均で90%を超えるCO₂除去性能を確認した。なお、CO₂除去率が変化しているのは条件変化試験の実施による。

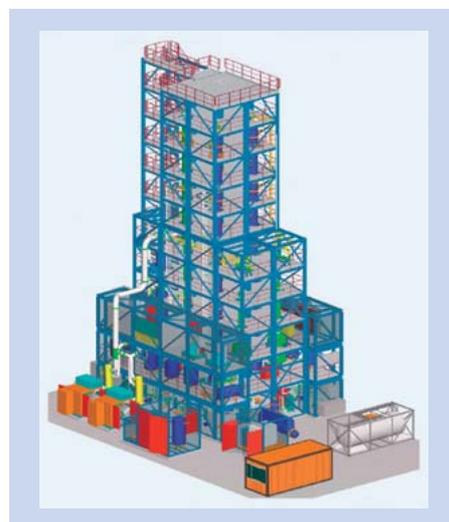


図6 | 5,000 m³N/hパイロット装置の概要
欧州での実機排ガスを使った試験のために設計したパイロット装置の概要を示す。ドイツの電力会社との共同研究で、2010年半ばから既設発電所で評価試験を実施する予定である。

一方、世界では多くの種類の石炭が使われており、排ガス中の酸性ガス濃度や灰分などが異なる。そこで、日立グループは欧州での実機排ガスを使った試験も行う予定である。この装置は処理ガス量が5,000 m³N/hのパイロット装置 (図6参照) で、日立パワーヨーロッパ社 (Hitachi Power Europe GmbH) が中心となり、ドイツの電力会社との共同研究として、2010年の半ばから既設の発電所で評価試験を実施する予定である。新たに改良された吸収液の試験も実施する。

3.4 最適システムの構築

CO₂回収プラントを石炭火力発電プラントに組み込むためには相互のインタフェースを考慮し、最適なシステムを構築する必要がある。主な検討項目を以下に示す。

(1) 吸収塔入り口での脱硫

石炭燃ボイラ排ガスに含まれるSO_xは吸収液を劣化させるため、CO₂回収装置入り口では少なくとも10 ppm以下にする必要があると言われている。そこで、多くの場合は吸収塔の上流に新たにスクラバーを設置する構成が検討されている。しかし、日立グループでは、既存の脱硫装置において99%以上の高脱硫率の実績を多数有しており、特段のスクラバーを設けない設計も可能である。

(2) 再生塔への蒸気供給 (蒸気タービンの抽気)

蒸気タービンの実績も多く、抽気による効率低下を最小限に抑える蒸気系統を開発している。また、排ガスの排熱を回収して、タービン側からの供給蒸気量の低減を行うシステムの開発も進めている。

(3) CO₂圧縮機の排熱利用

回収したCO₂ガスは貯留のために圧縮・輸送あるいは



図7 | CO₂液化用遠心圧縮機

中国向け尿素プラントに納入したCO₂液化用遠心圧縮機の外観を示す。大気圧力のCO₂ガスを18.3 MPaまで二つのケーシングで昇圧するもので、8,200 kW 蒸気タービンで駆動される。

圧縮・液化される。回収したCO₂ガスには水分が多く含まれており、この工程で生じる水分や圧縮熱の回収はシステム効率を高めるために重要な因子である。また、大量のガスを処理することから圧縮動力の低減も不可欠である。日立グループは、尿素合成などの各種プラントにおけるCO₂の遠心圧縮機を製造しており、多くの実績を持っている⁸⁾(図7参照)。現在、これらの技術を利用したシステム全体の効率向上などの開発も進めている。

4. 酸素燃焼法の開発

4.1 概要

酸素燃焼法は、支燃ガスとして、空気の代わりに酸素を再循環排ガスで希釈して用いる方法である(図8参照)。

排ガスの成分のほとんどがCO₂と水分となるため、水分を除去するだけでCO₂を圧縮・液化でき、化学吸収装置のような大がかりの回収装置を必要としない。また、燃焼ガス量は空気燃焼の場合よりも少なくなるため、ボイラや煙道をコンパクトにできる。しかし、実用化にあたっては、支燃ガスの変更に伴う燃焼安定性や伝熱特性の変化、および排ガス再循環によって濃縮されたSO_xによる腐食などの課題がある。

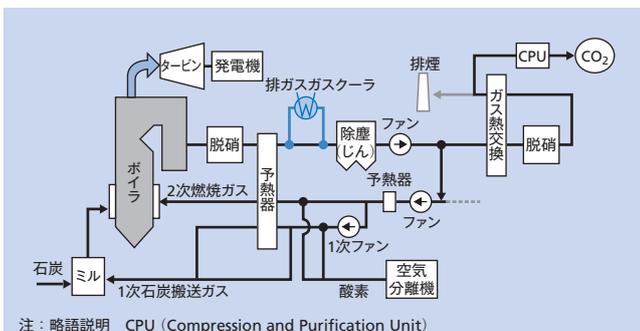


図8 | 酸素燃焼システムの例

支燃ガスとして酸素と再循環ガスの混合ガスを用いることにより、排ガスのほとんどがCO₂と水分となり、CO₂回収が簡素化される。

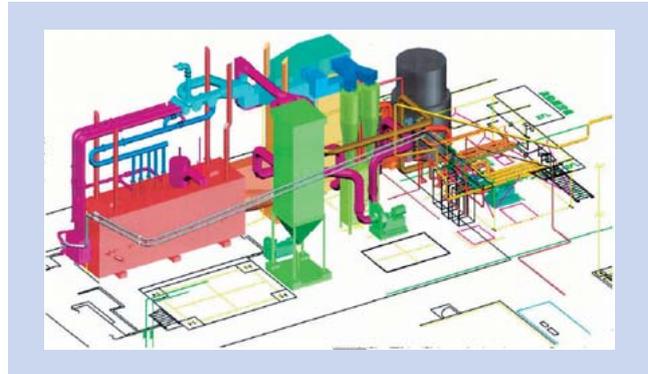


図9 | 4 MWth燃焼試験炉のイメージ

実機のバーナ基本構造を模擬し、酸素燃焼特有の排ガス再循環時の燃焼特性および伝熱特性を評価できる試験設備である。

日立グループは、長年、石炭焚ボイラの開発を推進してきており、世界トップレベルの試験評価設備(基礎試験設備、パイロット試験設備)と数値解析技術を有し、これらを駆使した開発を進めている。さらに、海外の電力会社と連携してスケールアップなどの実用化開発に取り組んでいる⁹⁾。

4.2 酸素燃焼バーナの開発

酸素燃焼では排ガスの主成分がN₂(窒素)からCO₂に替わる。CO₂はN₂に比べ、消炎効果が高く、火炎の安定性が低下する。そこで、酸素燃焼条件でも火炎安定性の高いバーナを新たに開発した。このバーナの開発には図9に示す燃焼試験炉を用いた。

この装置は、バーナの基本構造を模擬でき、排ガスの再循環によるCO₂や水分の濃度を変化させて、燃焼特性および伝熱特性を評価できる。

また、日立グループは、日立パワーヨーロッパ社を拠点として欧州プロジェクトにも参加しており、実証機へ向けた開発を進めている。ドイツのシュワルツプンペ(Schwarze Pumpe)石炭火力発電所において30 MWthクラスのバーナ燃焼試験を行い、スケールアップに伴う信頼性を評価している(図10参照)。



図10 | Schwarze Pumpe石炭火力発電所の30 MWth発電実証プラント

30 MWthクラスのバーナ燃焼試験およびスケールアップに伴う信頼性を評価可能な石炭焚火力の酸素燃焼実証プラントである。



図11 | 燃焼・排煙処理一貫評価設備
燃焼から排煙処理まで一貫して試験のできるボイラメーカーで唯一の大型設備である。

4.3 排ガス循環システムの開発

燃料と酸素の反応による排ガスの容積流量は、空気燃焼に比べ約 $\frac{1}{3}$ となるため、排ガス中の三酸化硫黄 (SO_3) の濃度は約5倍となり、排ガスラインの腐食のポテンシャルが増大する。そこで、新たに日立式再循環システムを開発して、煙道での SO_3 濃度を腐食の問題がないレベル (1 ppm以下) に低減した。本システムも含め、燃焼から排煙処理まで一貫して試験のできる大型設備 (図11参照) を用いて全システムの検証を行った。

5. 今後の展開

日立グループは、欧米のCCS実証計画を現地の電力会社と連携して推進している。化学吸収法については、米国ミシガン州、カナダのサスカチュワン州、ドイツ、オランダのプロジェクトに、酸素燃焼法については、ドイツ、フィンランドのプロジェクトに参画している。これらのプロジェクトを通じて国際的な連携を進め、CCS技術を既存の発電技術に統合し、その経済性や信頼性といった商用化課題を検討し克服していく。

CO_2 貯留法の一つである石油増進回収 (Enhanced Oil Recovery) はすでに実用化されており、古い油田に CO_2 を圧入して原油を取り出すことができる。その経済効果は大きい。当社が開発した CO_2 回収技術と輸送・貯留の技術を合わせてCCS技術の実用化を推進していく。

6. おわりに

ここでは、CCSに関連する規制動向と、CCS技術開発における日立グループの開発ビジョン、および CO_2 分離・回収方式のうち化学吸収法と酸素燃焼法について述べた。

2009年10月、国際エネルギー機関はCCSテクノロジーロードマップを公表した¹⁰⁾。それによると、2050年に CO_2 排出レベルを半減するには、2020年時点において全

世界で100件のCCSプラントが、2050年時点では3,400件ものプラントが必要である。これは、地球環境の保全のためにCCS技術が欠くことのできないものであることを示している。日立グループは、今後も技術開発を進め、世界の温暖化防止に貢献する所存である。

参考文献

- 1) EU CCS指令, DIRECTIVE 2009/31/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide
- 2) EU ETS指令改正, DIRECTIVE 2009/29/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009
- 3) 米国下院クリーンエネルギーおよび安全保障法案 (第111会期HR.2454), American Clean Energy and Security Act of 2009
- 4) 米国上院クリーンエネルギー雇用および米国発電法案 (第111会期S.1733), Clean Energy Jobs and American Power Act of 2009
- 5) 山田, 外: SO_2 を含有する石炭火力発電所排ガスからの CO_2 の除去技術, 日本エネルギー学会誌 (1996.8)
- 6) 吉川, 外: 火力発電における脱硝・脱硫・ CO_2 除去技術, 日立評論, 90, 5, 404~407 (2008.5)
- 7) H. Oota, et al.: CO_2 Removal Technology from the Thermal Power Plant Flue Gas, The Fourth Japan-Korea Symposium on Separation Technology (1996.10)
- 8) 福島, 外: 遠心圧縮機の流体関連振動事例の紹介, ターボ機械, Vol.36, No.2 (2008)
- 9) T.Marumoto et al.: Feasibility study on oxy-combustion retrofit of an existing coal-fired power plant, Power Gen International (2009.12)
- 10) テクノロジーロードマップ CCS: IEA Technology Roadmap Carbon Capture and Storage (2009.10)

執筆者紹介



河崎 照文
1980年日立製作所入社, 電力システム社 ボイラ事業部 所属
現在, 次世代火力発電システムの開発と事業化に従事
日本機械学会会員, 触媒学会会員



大島 光信
1984年日立製作所入社, 電力システム社 国際電力営業本部 所属
現在, 欧米を中心とした電力事業の営業活動に従事



五十嵐 瑞貴
2002年日立製作所入社, 電力システム社 国際事業戦略本部 国際企画推進部 所属
現在, グローバル化推進事業に従事



勝部 利夫
1975年バブコック日立株式会社入社, 呉事業所 プラント技術本部 所属
現在, CCS開発プロジェクト推進に従事



木山 研滋
1980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, 発電用ボイラ燃焼装置の開発・設計に従事
日本機械学会会員, 火力原子力発電技術協会会員