

火力発電におけるCO₂削減技術

CO₂ Reduction Technology for Thermal Power Plant Systems

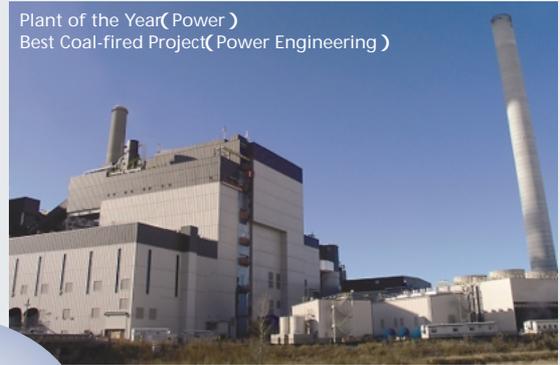
伊藤 修 Osamu Ito
千野 耕一 Koichi Chino

齊藤 英治 Eiji Saito
圓島 信也 Shinya Marushima

Christian Bergins
呉松 Song Wu



石炭ガス化発電パイロットプラント
(CO₂回収試験を実施予定)



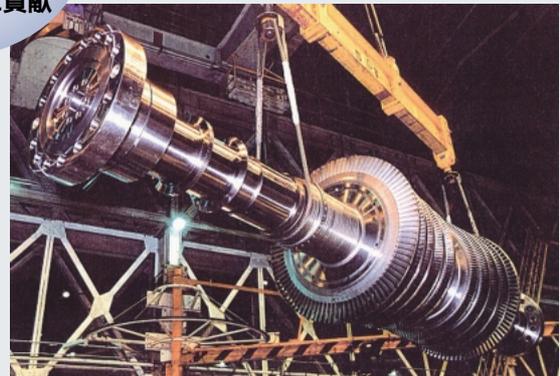
Plant of the Year(Power)
Best Coal-fired Project(Power Engineering)

米国納め超臨界圧石炭火力プラント
(電力専門誌にて各種賞を受賞)

高効率化,
CO₂回収技術で
世界のCO₂削減に貢献



3 MW A-HATシステム検証機
(効率はコンバインドサイクルと同等)



600 級高圧タービン
(世界トップクラスの効率)

注:略語説明 A-HAT(Advanced Humid Air Turbine)

図1 地球温暖化抑制に貢献する日立グループの火力発電技術

世界の発電分野の主力である火力発電機器のCO₂削減を実現するために、日立グループは、石炭ガス化発電の実用化、超々臨界圧石炭火力発電技術、ガスタービン火力の高効率化、CO₂回収の可能な石炭火力発電方式の開発に取り組んでいる。

地球温暖化抑制に対する国際的な取り組みの中で、少なくとも今後数十年は発電の主力と見込まれる火力発電からのCO₂排出抑制のため、発電効率の向上、CO₂回収技術の実用化が喫緊の課題となっている。

日立グループは、(1)700 級超々臨界圧石炭火力、(2)石炭ガス化発電、(3)高効率ガスタービン、(4)新たな熱サイクル方式の開発により、さらなる高効率化をめざしている。

また、現在、石炭ガス化発電でのCO₂回収試験、CO₂回収に適した酸素燃焼式石炭ボイラの開発を通して、エネルギー損失の少ないCCS(二酸化炭素回収・貯留)技術の実用化に取り組んでいる。

1.はじめに

石炭、天然ガスなどの化石燃料による火力発電設備容量は、2030年に向けて世界的に倍増する勢いだが、地球温暖化問題の高まりを背景に、CO₂排出量を削減する技術の早期実用化が求められている。

日立グループは、これまで世界トップレベルの超々臨界圧石炭火力発電技術、ガスタービン複合発電技術などを開発してきた(図1参照)。

ここでは、さらなる高効率化とCCS(Carbon Capture and Storage)実用化のための取り組み、および火力発電における研究開発状況について述べる。

2. 社会潮流

2007年12月にインドネシアのバリ島で開催された気候変動枠組条約第13回締約国会議(COP13)において、2013年以降の地球温暖化対策の枠組み構築が合意された。世界全体の協力により、温暖化対策に必要な技術開発の加速と、各国への高効率技術の展開が期待される。

IEA(International Energy Agency:国際エネルギー機関)は、生活水準の向上と、2030年までに世界人口が約65億人から約83億人に増加することにより、エネルギー消費量は世界全体で約1.6倍増加すると予測している(図2参照)。用途別では発電の割合がいちばん大きく、2030年には45%を占める見込みである。

家庭における一人当たりのエネルギー消費量を、OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development:経済協力開発機構)加盟国と非加盟国に分けて図3に示す。OECD加盟国では電力とガスを主なエネルギー源として生活しているのに対し、世界人口の80%以上を占めるOECD非加盟国では、エネルギー源の60%以上が炊事や暖房に用いる薪(まき)である。IEAによれば、世界で約16億人がまだ電気を使用できない環境にあり、今後、中国やインド、および開発

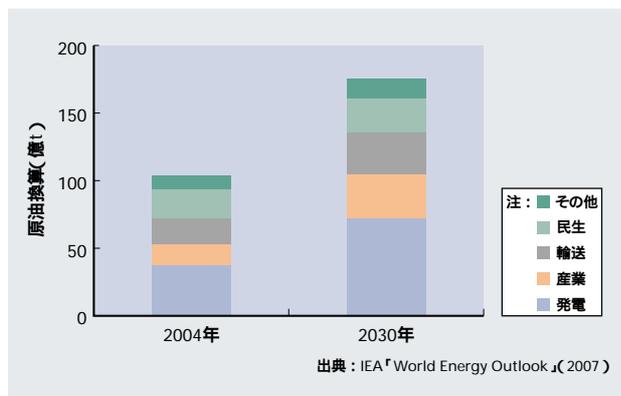
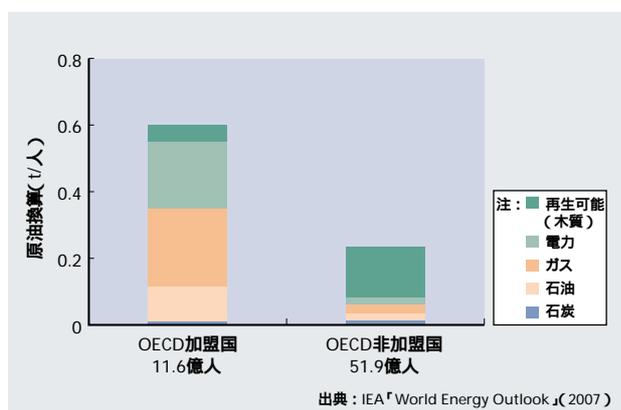


図2 世界のエネルギー需要の増加予測
エネルギー消費量は、世界全体で約1.6倍増加する。



注:略語説明 OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development)

図3 家庭における一人当たりのエネルギー消費量
OECD非加盟国での電力消費量は今後大幅に増加すると予測される。

途上国の経済発展によって送電網が整備され、所得水準の向上とともに家庭における電力消費量が大幅に増加すると予測されている。

地球温暖化抑制に寄与する風力発電や太陽光発電は、2030年には2004年の10倍以上に増加する見通しであるが、その発電量は全体の約7%である。2030年における発電エネルギー源の約70%は化石燃料に依存する。

地球温暖化の抑制には原子力発電への期待が大きい、現状価格で採掘できるウラン資源量は80年分ほどしかない。現状の軽水炉の代わりに高速増殖炉が導入できると、ウラン資源量を50倍以上も有効に活用することができるため、高速増殖炉の開発が鋭意進められているが、商用化は2050年ごろと予想されている。したがって、当面は発電のエネルギー源は化石燃料に頼る必要があり、CO₂排出量を抑制する技術の開発が不可欠である。

3. 石炭火力発電での取り組み

3.1 700 級A-USCの開発

石炭火力発電は、蒸気サイクルを高温高压にするほど高効率になる。しかし、高温化は材料クリープ強度の低下や熱膨張を引き起こし、高压化は流れの漏れ損失や構造の変形をもたらす。そのため、蒸気サイクルの高温高压化を達成するには、材料や機械設計技術の飛躍的な前進が必要である。

1980年代から2000年にかけて、日本では600 級超々臨界圧発電USC(Ultra Supercritical)技術開発が実施された¹⁾。この開発を通じて、高強度で安価なフェライト鋼が開発され、かつ強度・伝熱などの設計技術が世界最高レベルに向上した。その結果、東北電力株式会社原町火力発電所第2号機をはじめとした圧力25 MPa、温度600 の蒸気条件を持つ商用機の実用化に成功した。IEAの報告による各国の石炭発電効率の比較を図4に示す。

日本の石炭火力発電はUSC開発に成功したため、現在、世界で最も高い効率で運用されており、2009年には、620 の世界最高の再熱温度条件を持つ電源開発株式会社磯子火力発電所新2号機が運転を開始する予定である。日立グループは、この技術を北米の最新鋭の超臨界圧火力発電プラントに適用し、CO₂抑制に貢献している^{2,3)}。

一方、欧州では35 MPa、700 以上のA-USC(Advanced Ultra Supercritical)蒸気発電技術で、効率50%をめざした石炭火力プラントを開発するTHERMIEプロジェクトが1998年から開始された。ドイツのHitachi Power Europe GmbHは、このプロジェクトに参画し、ボイラの実用化をめざしている。現在のUSCで適用されているフェライト鋼の使用限界は650 を下回るため、700 以上の蒸気条件に耐えるにはガスタービンなどで使われているNi合金を適用しなければならない。しか

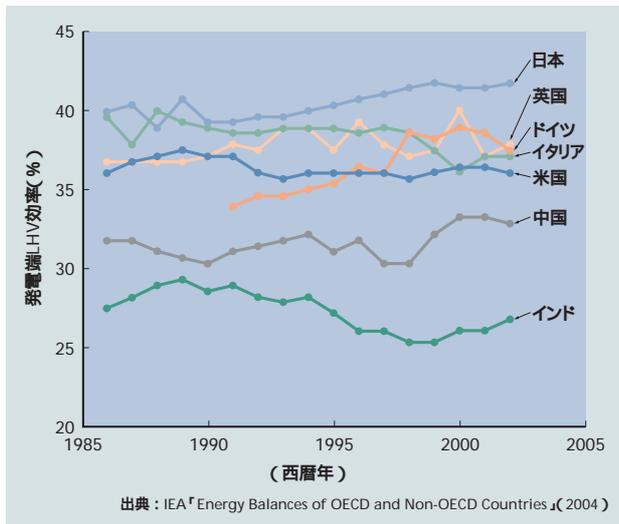


図4 各国の石炭火力発電効率
600 級国家プロジェクトの成果により、1990年以降、日本の石炭火力発電効率は世界で最も高い。



図5 FENIX-700大型鋼塊の外観
この材料の700 10万時間クリープ破断強度は100 MPaを超えるものである。現在、約8 t、直径850 mmの試作をクリアした。

し、Ni基合金は素材製造過程で生じる温度変化に対して組織が不安定になりやすく、大型素材の製造中に材料組織が変わる偏析が問題になる。ガスタービン材として数キログラムの材料で高い強度が得られるNi基合金でも、蒸気タービンやボイラで使用される数トン規模の大型素材で設計強度を満足することは難しい。欧州では約10年をかけてNi基合金の材料選定を終え、製造性の課題を克服しつつ、配管材やバルブ材について実蒸気条件下の材料特性試験が行われている。

700 級A-USCの開発は、「日本においてもCool Earth 50」の枠組みの中で推進される計画である。このプロジェクトの事前検討として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発」を通じ、700 級A-USCに利用できるNi基合金ロータ材FENIX-700の開発を行った(図5参照)。

FENIX-700は偏析が皆無であり、実用化が期待される素材の一つである。700 級A-USCのプロジェクトでさらなる高効率化を達成し、CO₂削減に努めていく。

3.2 CO₂回収型石炭ガス化複合発電の開発

石炭ガス化発電システムは、石炭を蒸し焼きにしてガス化したうえでガスタービン燃料とし、排熱を蒸気タービンで回収して複合発電するシステムで、IGCC(Integrated Coal Gasification Combined Cycle)と呼ばれる次世代高効率発電の有力候補である。

日立グループは、2001年から電源開発株式会社が進めているEAGLEプロジェクト(多目的石炭ガス製造技術開発)において、石炭ガス化発電システムの運転研究に参画している⁴⁾。このガス化炉は空気から窒素を分離した酸素ガスに石炭微粉を同伴し、炉内に巡回させて供給することを特徴とする(図6参照)。石炭、酸素はバーナ上段と下段から供給し、酸素比を個別に制御する。下段酸素量は、炉内温度が灰の流動点以上となるように設定し、スラグ溶解を促進する。上段酸素量は、ガス化炉全体での酸素量がガス化炉全体で最適になるように低めに設定し、ガス化を促進する。この運用により、炭種に応じて適正に酸素を配分し、高効率なガス化が可能となる。

EAGLEプロジェクトでの石炭処理量150 t/日の運転研究を通じ、世界トップレベルの性能を達成した(表1参照)。

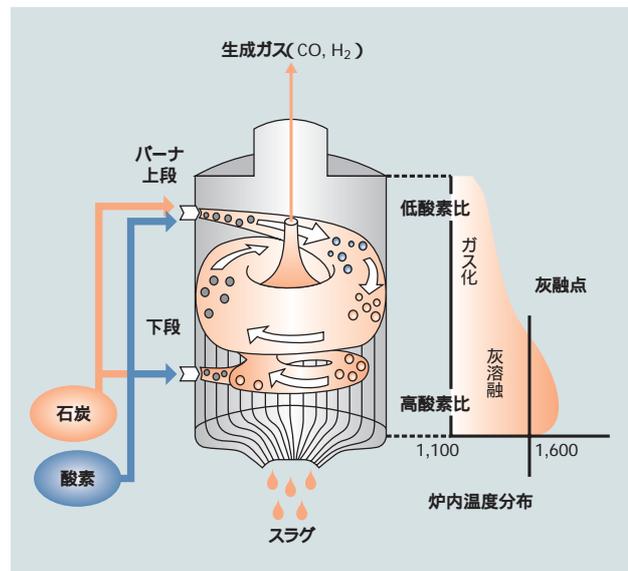


図6 石炭ガス化のコンセプト
巡回流で粒子飛散を抑制、酸素配分を炭種ごとに適正化している。

表1 EAGLEパイロットプラントの運転実績
ガス化とガス精製における運転実績を示す。

	項目	内容	運転実績
ガス化	変換効率	冷ガス効率 炭素ガス化率	82% 99%
	信頼性	長時間連続運転	1,015時間
	運用性	多炭種対応	5炭種
	除去性能	H ₂ S、COS除去 ダスト除去 ハロゲン・NH ₃ 除去	< 1 ppm < 1 mg/Nm ³ < 1 ppm

注:略語説明 EAGLE(Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity)

今後、大型化のための技術開発を進めていくが、商用機設計に数値シミュレーションは不可欠である。日立グループは、加圧/常圧炉のガス化基礎試験結果をガス化炉反応シミュレータに反映して高精度化し、スケールアップの課題を抽出して商用機の信頼性を確保していく(図7参照)。

IGCCはガスタービンに投入する前の高圧ガスからCO₂を除去できるため、CO₂回収の点で総合効率が優れると期待されている。EAGLEプロジェクトでは、2008年10月から世界に先駆けてCO₂回収パイロット試験を実施する。ガス化炉、ガス精製設備、空気分離機器、ガスタービンで構成される既設の系統においてガス精製設備横の450 m²の区画にCO₂吸収塔、再生塔などの機器を配置する。H₂S吸収塔を出た2.3 MPaの高圧ガスから1,000 Nm³/hを抽気し、ガス中のCOはシフト反応と呼ばれる反応でCOをCO₂へ転換して、CO₂とH₂を主成分とするガスを化学吸収法により、CO₂回収装置で処理する(図8参照)。商用機クラスのCO₂回収設備の低コスト化、効率向上に向けたノウハウを蓄積していく。

3.3 酸素燃焼型石炭火力の開発

従来の石炭火力は空気と石炭を燃焼させるため、CO₂を回収するには排ガスのN₂とCO₂を分離処理する必要がある。酸素燃焼方式では、燃焼前に空気から窒素分を除去するため、排ガスの主成分はH₂OとCO₂となる。燃焼時の酸素量はCO₂を再循環させて調整する(図9参照)。システムは実績ある石炭プラントに類似するため、実用化に近いCO₂削減型石炭火力として欧州を中心に注目されている。特にドイツでは、酸素燃焼の実証試験が計画されており、Hitachi Power Europe GmbHを拠点として欧州プロジェクトに参加し、システム設計を進めている。

日立グループは基礎研究分野において、「ドイツのノルライネ=

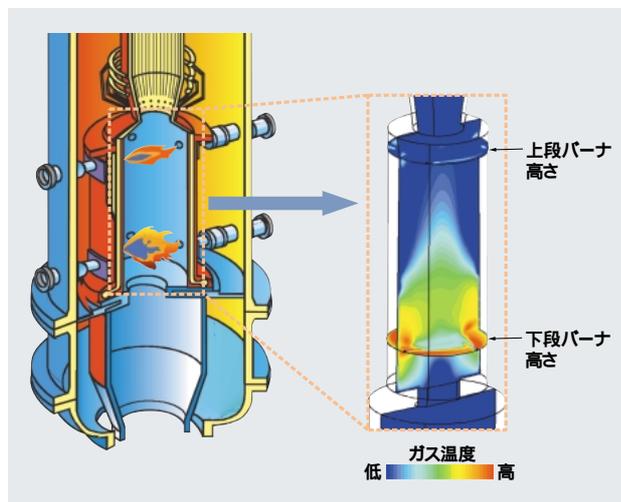
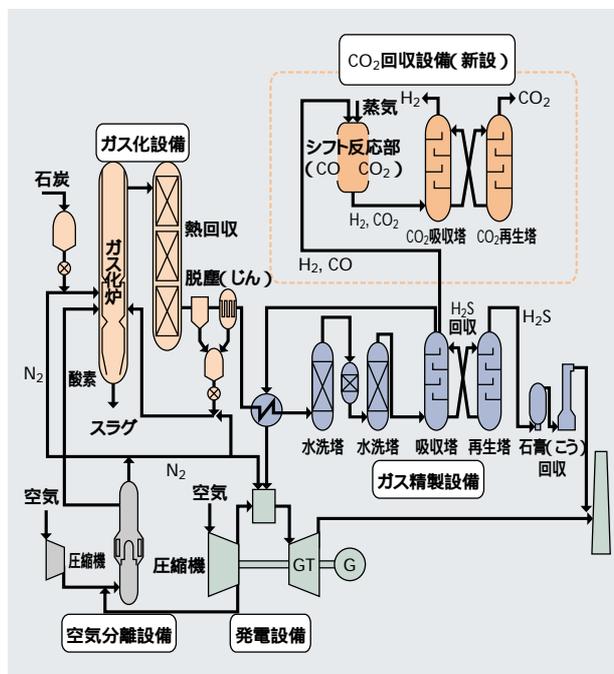


図7 石炭ガス化炉の熱流動解析結果
EAGLEプロジェクトで得られたデータに基づき数値シミュレーション技術を高精度化し、信頼性の高い商用機的设计に取り組んでいる。



注:略語説明 GT (Gas Turbine), G (Generator)
図8 EAGLEパイロットプラントの系統構成
既設設備から1,000 Nm³/hのガスを抽気し、CO₂回収性能を確認する。

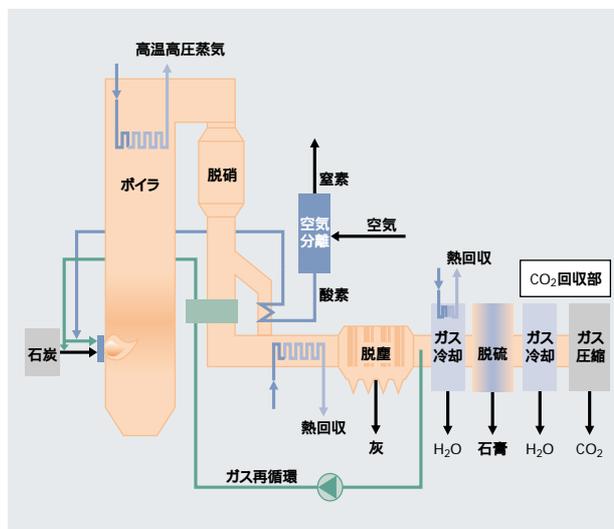


図9 酸素燃焼のシステム概念
酸素燃焼ボイラの基本性能を検証するため 欧州でパイロット試験を計画している。

ヴェストファーレン州と火力発電所のCO₂削減技術での共同宣言を交わし、有力大学との共同研究を開始した。また、アーヘン工科大学との共同研究では、大学所有の酸素燃焼試験炉を共用し、基礎的な燃焼データを取得して、酸素燃焼ボイラの信頼性向上のため数値解析技術⁵⁾の高度化を図っていく予定である(図10参照)。

4. ガスタービン火力発電での取り組み

4.1 A-HATの開発

ガスタービン発電サイクルの工夫により、高効率を達成しCO₂排出を削減する技術としてA-HAT(Advanced Humid Air



図10 ドイツアーヘン工科大学の酸素燃焼試験装置
CO₂削減に対応する石炭燃焼技術開発をドイツの大学と連携して進めている。
(写真提供:アーヘン工科大学, Courtesy of © Peter Winandy)

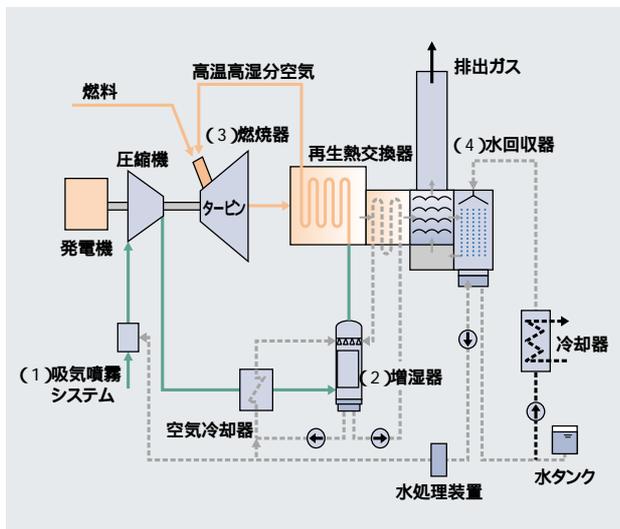


図11 A-HAT系統の概要
A-HATにより、ガスタービン単体でコンバインドサイクルと同等の効率を達成する。

Turbine)の開発に取り組んでいる⁸⁾。A-HATの系統構成を図11に示す。このシステムは湿分空気を利用した再生サイクルである。圧縮機入口に設けた吸気噴霧と、再生熱交換器上流に設けた増湿器において主流ガスを加湿する。加湿した水分は水回収器で回収し、補給水量を低減する。蒸気タービンを利用せずに、ガスタービン単体でコンバインドサイクルと同等の出力と効率を達成する。機器構成が単純で、運転制御が容易であり、燃焼器でのNO_x発生量が少ないという特徴がある。

2004年から資源エネルギー庁の補助事業として小型の3 MW級システム検証機を開発し、2007年3月に3,985 kWを達成した。発電端熱効率は40 LHV(Lower Heating Value)%を超え、燃焼器NO_x排出量はNO_x10 ppm以下を確認した。水回収量を図12に示す。加湿量のほとんどを回収することができ、A-HATシステムの成立性を確認した⁷⁾。

今後、さらに性能、信頼性、運用性、経済性など多方面からの実証を進める予定である。

4.2 ガスタービン要素技術

日立H-25ガスタービンを図13に示す。日立グループは、ガスタービン自体の高効率化、環境負荷低減を目標に要素技術開発に取り組んでいる⁸⁾。

(1) タービン

翼冷却効率を高め冷媒流量を低減するために、伝熱促進のメカニズムを数値解析により明らかにしている。LES(Large Eddy Simulation)という高精度乱流モデルによる冷却通路内面の熱流動解析結果を図14に示す⁹⁾。同図(a)からリップ先端を回りこむように蛇行する流れができており、同図(b)からはその流れに応じて伝熱面中央およびリップ上面に高い熱伝達率が得られていることがわかる。これらの解析結果により、乱流促進リップのさらなる高性能化を進めている。

(2) 圧縮機

高効率だけでなく、コスト低減のために段数を削減した高負荷設計が要求される。そのため空力設計では、多目的最適化手法を用いた翼形設計や三次元スタッキング手法による新型翼の開発を進めている。この翼形設計技術に、多段流れ解析を組み合わせることで高性能化を図っている(図15参照)。

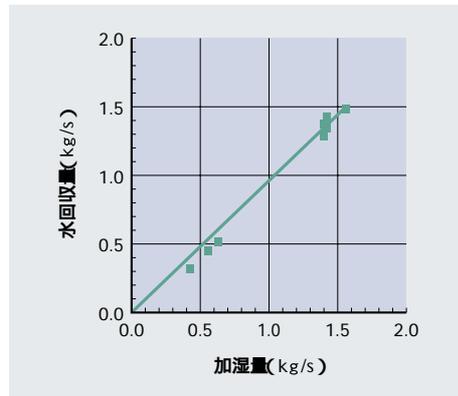


図12 水回収量
加湿量のほとんどを回収し、補給水を低減している。

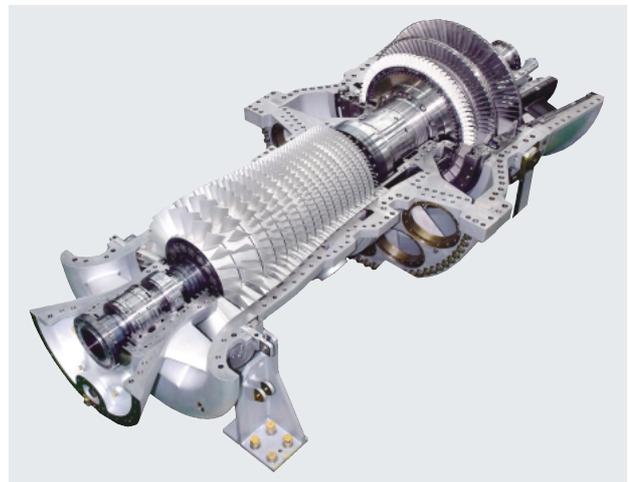


図13 H-25ガスタービン
上ケーシングを開放し、内部ロータを示す。

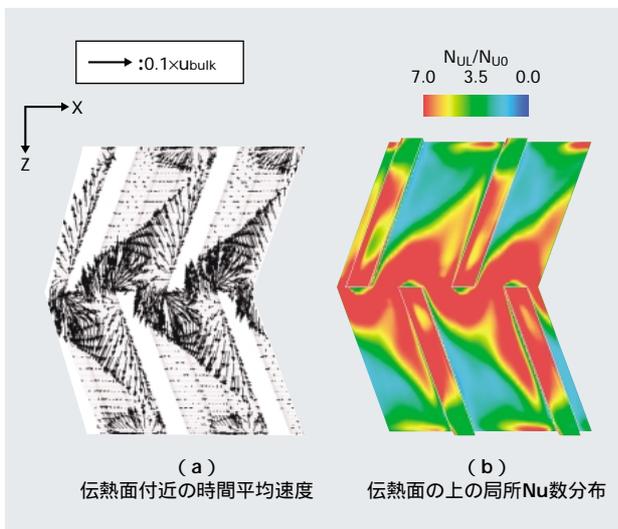


図14 翼冷却通路内の熱流動解析
乱流促進リップによって伝熱促進し、冷却効率を高めている。

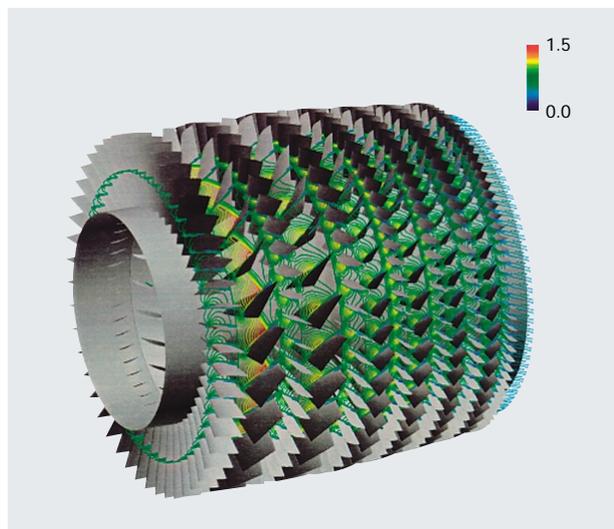


図15 多段流れ解析
翼列どうしのマッチングを考慮して高性能化を図っている。

5. おわりに

ここでは、さらなる高効率化とCCS実用化のための取り組み、および火力発電における研究開発状況について述べた。

火力発電機器での新たな開発においては、経済性、長期信頼性の確保などの課題を着実に解決する必要がある。日立グループは、これまでの火力プラント開発の経験をもととして、先端数値解析シミュレーションを駆使することにより、開発製品の信頼性を高め、今後も地球温暖化の抑制のために、高効率火力発電機器の開発、CO₂回収技術の実用化に取り組んでいく考えである。

参考文献など

- 1) 日本機械学会:P-SCD353 700 級超々臨界圧(A-USC)発電技術に関する調査研究分科会成果報告書(2007)
- 2) R. Peltier, et al.:MidAmerican's Walter Scott, Jr. Energy Center Unit4 earns POWER's highest honor, Power Vol.151, No.8, pp.28-36(2007)
- 3) Power Engineering Magazine, http://pepei.pennnet.com/
- 4) 中村:多目的石炭ガス製造技術開発の現況, 日本エネルギー学会誌, 86, 321-325(2007)
- 5) K. Yamamoto, et al.:LES of Pulverized Coal Simulation, Thermal Science & Eng., Vol.15, No.4, pp.223-24(2007)
- 6) H. Kuroki, et al.:Development of Elemental Technologies for Advanced Humid Air Turbine System, ASME Turbo EXPO 2006
- 7) 圓島:高温分空気を利用したガスタービン発電システム(A-HAT)の開発, 火力原子力発電大会(2006)
- 8) 池口:若き研究者と情熱, 第34回日本ガスタービン学会定期講演会(2006)
- 9) Y. Horiuchi, et al.:Improvement of Heat Transfer Performance of Turbulence Promoter Ribs, ASME Turbo EXPO 2006

執筆者紹介



伊藤 修
1985年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 石炭科学プロジェクト 所属
現在, 微粉炭ボイラ燃焼技術の研究開発に従事
工学博士
エネルギー・資源学会会員



圓島 信也
1992年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 ターボ機械研究開発センター ガスタービンプロジェクト 所属
現在, ガスタービンの研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員, 日本ガスタービン学会会員



千野 耕一
1974年日立製作所入社, 電力・電機業務本部 新事業開発推進本部 所属
現在, 電力・電機製品の開発企画に従事
工学博士
日本機械学会会員, 日本原子力学会会員



Christian Bergins
2006年Hitachi Power Europe GmbH入社, R&D/ Patents Licenses 所属
現在, 酸素燃焼, CO₂回収, 褐炭ボイラの研究開発に従事
工学博士



齊藤 英治
1987年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 ターボ機械研究開発センター 蒸気タービンプロジェクト 所属
現在, 蒸気タービンの研究開発に従事
日本機械学会会員



呉 松
2006年Hitachi Power Systems America, Ltd.入社, Advanced Tech., Commercial Operations Gr. 所属
現在, CO₂回収を含むクリーンコール技術の研究開発に従事
Ph.D.
The Air & Waste Management Association 会員