

低炭素社会に貢献する電力供給システム

Electric Power Supply Systems to Realize Low-carbon Society

佐藤 康生

Sato Yasuo

柴田 強

Shibata Tsuyoshi

Christian Bergins

浦瀬 賢治

Urase Kenji

加藤 修治

Katoh Shuji

低炭素社会を実現していくためには、多様な発電方式について、高効率化や温暖化ガス削減の技術開発が必要となる。2035年までの世界エネルギー需要を想定した場合、火力・水力・原子力・新エネルギーの重要性は変わらないと予想される。日立グループは、このような想定の下、将来の電力供給システムを支える技術を確立するための研究開発を進めている。なかでも石炭火力におけるCO₂回収技術や高効率ガスタービン技術の開発、原子力発電のグローバル展開の取り組み、風力・太陽光発電の系統連系における電力品質確保、可変速揚水システム、および新エネルギーの普及を支えるスマートグリッド技術などに力を入れている。

1. はじめに

IEA (International Energy Agency: 国際エネルギー機関) のWorld Energy Outlook 2010によると、2035年までの世界エネルギー需要を見た場合、火力(石炭・石油・ガス)・原子力・再生可能エネルギーが重要なエネルギー供給源に

なることが予想されている¹⁾(図1参照)。石炭・石油については、OECD (Organization for Economic Co-operation and Development: 経済協力開発機構) 加盟諸国で使用削減される以上に、中国ほかの非OECD諸国の需要が伸びる。原単位当たりのCO₂排出量が少ないガスの利用が急増する一方で、原子力およびバイオマス・新エネルギーを含む再生可能エネルギーの利用も進むと見込まれている。

ただし、電源比率の具体的な数値については、幅を持って考える必要がある。IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) ではさまざまなシナリオを分析している。熱も含むエネルギー供給において、再生可能エネルギーの利用を2030年に最大43%導入できる可能性がある一方で、過半数のシナリオでは17%程度になると想定している²⁾。

さらに、2011年3月の東日本大震災により、世界的にエネルギー政策の見直しが始まる可能性がある。特に日本においても、CO₂排出量削減やエネルギーセキュリティ確保の観点も含めて、改めて将来の電源構成の在り方について議論が始まっているところである。

このように電力供給システムの開発は、今後も、世界的な経済状況・社会情勢に強く影響を受けていくであろう。その中でも、持続的な低炭素社会実現に貢献するために、日立グループは、火力・水力・原子力・再生可能エネルギーを中心に将来に向けた研究開発を進めている。

また同時に、原子力発電の安全性・信頼性への取り組みも強化している。東日本大震災の津波による福島第一原子力発電所での一連の事象は世界を大きく揺るがせた。日立製作所も福島原子力発電所プロジェクト推進本部の設立、米国のスリーマイル島原子力発電所やウクライナのチェルノブイリ原子力発電所における復旧対策において豊富な実績を有する米国大手の電力会社やエンジニアリング会社と

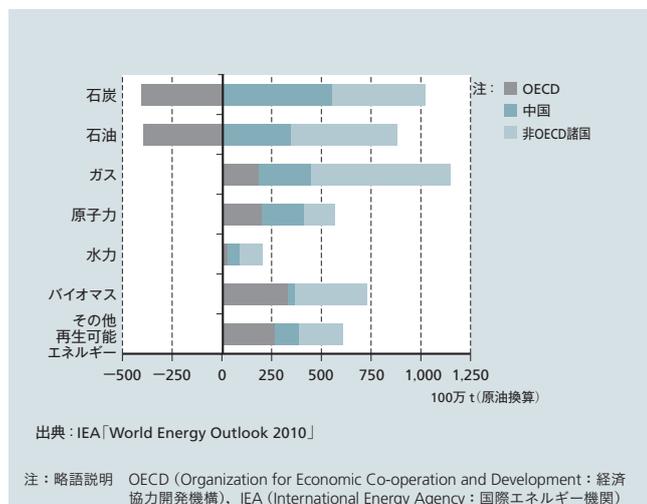


図1 | 今後のエネルギー需要の増減 (原油換算量, 2008年~2035年) IEA発行のWorld Energy Outlookでは、今後も火力・原子力・再生可能エネルギーのいずれも重要なエネルギー源であることを指摘している。

連携した日米合同専門家チームの立ち上げなど、総力を上げてこの問題に取り組んでいる。福島第一原子力発電所への対応はもちろんのこと、このような災害に対する原子力発電の安全性・信頼性を向上させるべくメーカーとして貢献していく所存である。

ここでは、火力発電分野と原子力発電分野、新エネルギーの有望技術である風力・太陽光発電の電力系統連系における取り組み、および新エネルギーの普及を支えるスマートグリッド技術の研究開発状況について述べる。

2. 火力発電での取り組み

日立グループは、従来型石炭火力として世界最高効率を誇る600°C級USC (Ultra Super Critical：超々臨界圧発電) プラントでは、国内8機、海外23機の納入実績を持つ。高効率ガスタービンでは、30 MW級「H-25」を世界で130台以上納入しており、火力発電プラントの高効率化を通じて世界のCO₂排出削減に貢献してきた。また、さらに進んだ技術として、(1) 700°C級A-USC (Advanced USC：先進超々臨界圧発電)、(2) 石炭火力からのCO₂回収 (化学吸収法、酸素燃焼法)、(3) IGCC (Integrated Coal Gasification Combined Cycle：石炭ガス化複合発電)³⁾、(4) 高効率ガスタービンAHAT (Advanced Humid Air Turbine) を開発しており、いずれも2015～2020年での大型実証試験/商用化をめざしている。以下では、このうちCO₂回収技術とAHATシステムについて述べる。

2.1 化学吸収法の開発

石炭火力発電所の排ガスからCO₂を分離回収する代表的な方法として、有機アルカリ液であるアミン水溶液を用いた化学吸収法がある。日立グループでは、石炭焚ボイラ排ガスからのCO₂回収に適した独自のアミン吸収液を開発し、化学吸収システムの構築を進めてきた。この開発液を用いて、東京電力株式会社と共同で排ガス処理量1,000 m³N/hのパイロット設備にて2,000時間の連続運転を実施し、平均CO₂回収率90%を安定して達成した^{4), 5)}。また、排ガス中の酸性ガスによる劣化を低減した改良吸収液を開発し、これを適用した実証試験を、処理ガス量5,000 m³N/hのパイロット装置を用いて、欧州の既設石炭火力で2011年から開始する予定である (図2参照)。

このほか、2010年にカナダのサスクパワー社 (Saskatchewan Power Corporation：サスカチュワン州電力公社) と日立製作所の間で締結したCCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) などの低炭素エネルギー技術における開発協力協定に基づき、同国における実証試験を計画中である。今後は、熱効率を向上できる排熱利用システムを構築し、さら



図2 | 5,000 m³N/hパイロット装置の外観

実機排ガス試験が可能なパイロット装置の外観を示す。ドイツ電力会社と共同で2011年中に欧州既設石炭火力で評価試験を開始する予定である。

なる性能改善を進める。

2.2 酸素燃焼法の開発

酸素燃焼法は、燃焼用空気の代わりに、空気から分離した純酸素を再循環排ガスで希釈したガスを用いて石炭を燃焼させる方法である。この方式を石炭火力に適用することで、排ガスの主成分はCO₂とH₂Oとなり、冷却によりH₂Oを除去することで効率よくCO₂を回収できる。ボイラなどの基本システムは従来型の石炭火力プラントに類似しており、化学吸収法と並んで実用化に最も近いCO₂回収型石炭火力として欧州を中心に注目されている⁶⁾。

日立グループでは、Hitachi Power Europe GmbHを拠点として欧州の実証プロジェクトに参加し、システム設計を進めている⁷⁾。2010年にはドイツのSchwarze Pumpe 石炭火力発電所で30 MWth級のバーナ試験を実施し、酸素燃焼モードにて安定燃焼が実現できることを確認した (図3参照)。今後は、この試験で得られた知見に基づいて、燃焼シミュレーションを活用した設計技術を高度化し、250 MW級の大型実証プロジェクトへの参画をめざす。

2.3 高効率ガスタービンAHATの開発

発電サイクルの革新によってガスタービンシステムを高効率化し、CO₂排出を削減する技術としてAHATの開発に取り組んでいる。このシステムは、ガスタービン排熱を利用して燃焼用空気を予熱する再生サイクルを基本とし、こ

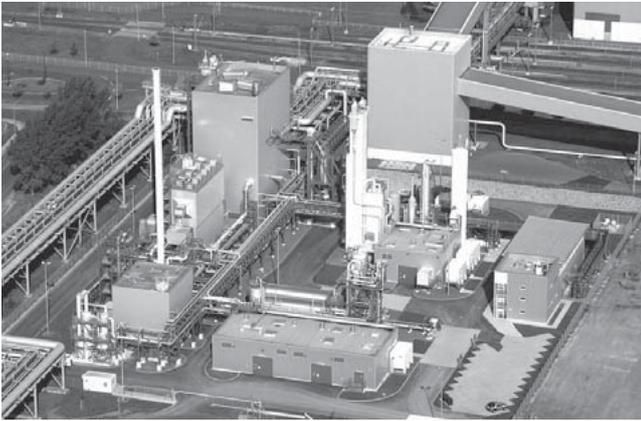


図3 | Schwarze Pumpe石炭火力発電所の酸素燃焼実証プラント
30 MWth級のバーナ燃焼試験が可能な酸素燃焼ボイラ実証プラントである
(Courtesy of Vattenfall)。

れに燃焼用空気への湿分添加を組み合わせた次世代のガスタービンシステムである(図4参照)。湿分添加によってタービンを駆動する流体の質量流量と比エンタルピが増加するため、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が期待できる。

2004年度から、財団法人電力中央研究所および住友精密工業株式会社と共同で、経済産業省の補助事業として3 MW級システム検証機の開発を進め、2007年3月に発電端出力3,985 kW、発電端効率40 LHV (Lower Heating Value) %を達成し⁸⁾、システムの成立性を確認した。現在は、40 MW級ガスタービンによる実用化要素技術試験設備を建設中であり、2011年度に運転を開始する計画である。この試験設備でさらなる効率向上技術を蓄積し、100~200 MW級商用機の市場投入をめざして開発を進める。

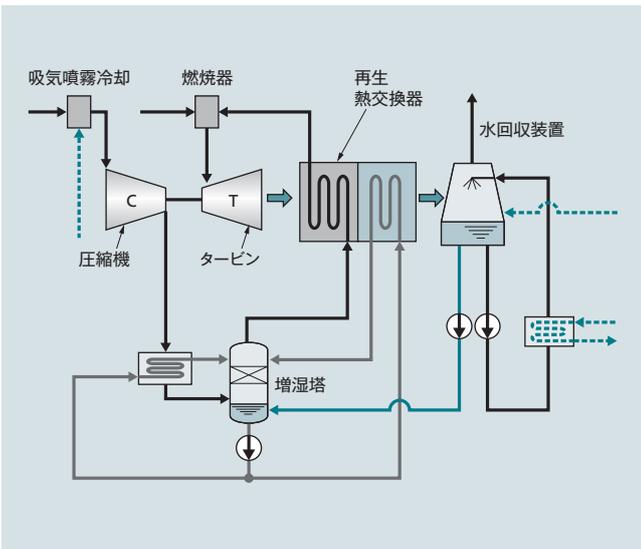


図4 | AHAT系統図
AHAT (Advanced Humid Air Turbine) により、ガスタービン単体でコンバインドサイクルと同等の効率を達成する。

3. 原子力発電での取り組み

3.1 ABWRの建設

BWR (Boiling Water Reactor : 沸騰水型軽水炉) は安全性・信頼性をさらに向上させるべく研究開発が続けられており、その最新型であるABWR (Advanced BWR : 改良型沸騰水型原子炉) は世界で唯一運転実績のある第3世代炉と位置づけられている。

初号機である東京電力柏崎刈羽原子力発電所6号機(1,356 MWe : 1996年11月運転開始)、同7号機(1,356 MWe : 1997年7月運転開始)に続き、中部電力株式会社浜岡原子力発電所5号機(1,380 MWe : 2004年1月運転開始)と北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機(1,358 MWe : 2005年3月運転開始)はすでに営業運転を開始している。中国電力株式会社島根原子力発電所3号機と電源開発株式会社大間原子力発電所は現在建設中であり、これらを含め日本で建設・計画されている原子力プラント14基(1,930万kW)のうち10基(1,382万kW)がABWRである。日立グループはすでに営業運転を開始しているABWRの4基すべての建設に携わっており、現在建設中のABWRも、日立GEニュークリア・エナジー株式会社がその主要部分を担っている⁹⁾。福島第一原子力発電所の事象に対する水平展開も踏まえ、より安全で信頼されるプラントの建設に貢献したい。

3.2 グローバル市場へ

国内市場で培ったABWR建設技術と経験をベースにグローバル市場へ展開する。日立製作所は2007年の米国General Electric Company (GE社)との原子力事業統合以降、両社の強みを生かした海外展開に取り組んできた。市場ニーズに応じてABWRとESBWR (Economic and Simplified BWR : 革新型単純化沸騰水型原子炉)の提案を行っているが、特に実績が重要な決定要因となる新規導入国市場では、国内での継続的な建設プロジェクトを有するABWRを主力製品と位置づけている。

福島第一原子力発電所の事象に対する海外原子力市場の反応は国によりさまざまである。アジアや中東などの新規導入国では、福島の実験を精査し必要な対策を反映することを前提に、原子力推進政策の維持を表明している国も多い。こうした国々の期待に応えられるように、安全で信頼できる製品・技術の提供に取り組んでいく。

4. 新エネルギー(風力・太陽光)発電での取り組み

CO₂排出量削減と化石エネルギー消費削減の観点から、風力・太陽光発電関連システムのニーズが高まっている。日立グループは、国内最大級の13 MWメガソーラーシ

テムを建設中であり、今後国内外に拡販する予定である。また、風力発電機ビジネスとしては、富士重工業株式会社と共同で開発したSUBARU風車を拡販しており、「中部電力御前崎風力発電所（2 MW機、11基）」、国内初の港湾外風力発電施設「ウインド・パワーかみす」（2 MW機7基）など、40 MW以上の運開実績がある。株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービスは、ドイツENERCON社の風車約270 MWの国内運開実績を持ち、風力発電所の運営にも力を入れている。さらに、グローバルな市場拡大に対応して、日立グループは風力発電機工場の増設や中国向け風力PCS（Power Conditioning System）の納入を進めている。風力発電機は、製造能力を2013年までに現在の1.7倍となる2,400台／年へ増強し、2015年には世界シェアトップクラスをめざしている。

風力・太陽光発電は自然エネルギーを利用しているため、気象条件によって発電量が変化して、電力系統の電圧変動・周波数変動の原因となる。そこで、日立グループでは前述した変動を抑制する系統に優しい風力発電・太陽光発電システムを実現するための技術開発に力を入れている。

4.1 系統電圧変動

系統の電圧変動を抑制するには、出力する有効電力（ P_w ）に対応した無効電力（ Q_w ）を出力すればよい。日立グループでは、前述の変動を抑制する系統インピーダンス（ $R + jX$ ）が不明な状況下で、適切な無効電力をオートチューニングで推定し、出力する技術を開発した（図5参照）。この電圧変動抑制技術は、関西電力株式会社と共同で、関西電力の系統解析用ミニモデルAPSA（Advanced Power System Analyzer）に実機と同等の制御を搭載した風

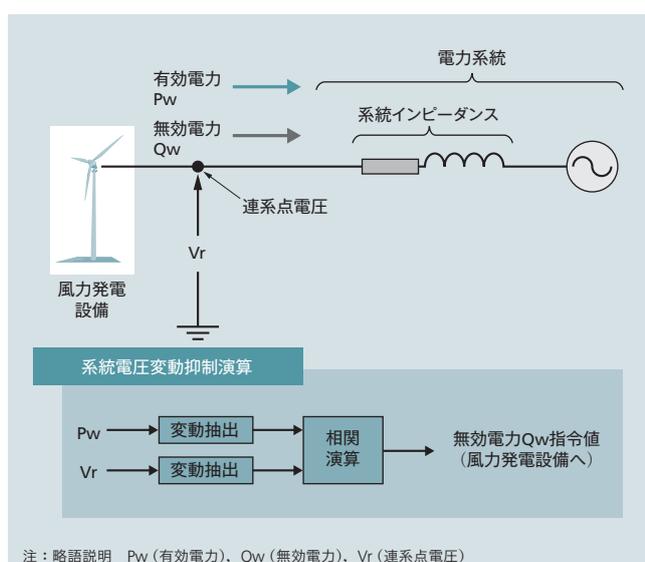


図5 | 無効電力による系統電圧変動抑制

最適な無効電力値〔 $Q_w = P_w \times (R/X)$ 〕をオートチューニングで推定して出力することにより、系統電圧変動を抑制できる。

力ミニモデルを連系して試験を実施し、効果検証済みである¹⁰⁾。

4.2 系統周波数変動

有効電力出力変動によって生じる系統周波数変動を抑制するために、蓄電池応用技術とファーム制御技術を開発している。

蓄電池応用技術は、風力発電の出力変動を蓄電池で補償することを狙っているが、蓄電池コストが高いことがネックとなる。そこで、必要な蓄電量をできるだけ少なくする蓄電池制御技術を開発し¹¹⁾、蓄電池併設の出力変動緩和型風力発電所を運転開始した。

一方、ファーム制御については、ファーム内の各風車の出力状況を考慮して、各風車に個別の出力制限値を調整することにより、ファームとしての出力変動を抑制しつつ、出力制限を緩和する技術を開発済みである¹²⁾。今後、実サイトでの検証を実施する。

4.3 その他

落雷などで系統電圧が急変すると、風力発電や太陽光発電などが次々に離脱して系統崩壊に至る懸念がある。これに対して、系統事故時の運転継続性を確保するFRT（Fault Ride-through）技術や、弱い系統に接続された発電機の動揺を風力発電機から無効電力を出力して抑制するPSS（Power System Stabilizer）技術などを開発している。風力発電機を用いたPSS技術は、関西電力と共同で開発し、実機と同様の制御回路とAPSAを用いて効果検証済みである¹⁰⁾。

さらに、電圧が歪んでいる系統に新エネルギーシステムを接続した際に発生してしまう高調波電流を抑制する技術も開発し、山梨県北杜市の大規模太陽光発電システムにて実証検証を完了した¹³⁾。

5. 可変速揚水発電システム

関西電力と日立グループが開発した「可変速揚水発電システム」は、従来の揚水発電システムと比較して、揚水運転と発電運転のどちらでも高速に電力を制御する機能を有している。このような特徴から、従来、主に火力発電によって行われていた需給調整を可変速揚水発電システムが分担できる。これにより、火力発電の運転時間を短縮して、CO₂排出量の低減に貢献してきた。

さらに、発電量の安定供給が難しい風力発電や太陽光発電の比率が増大した電力系統であっても、可変速揚水発電システムが需給調整を担うことで、電力の安定供給に貢献することが可能である。

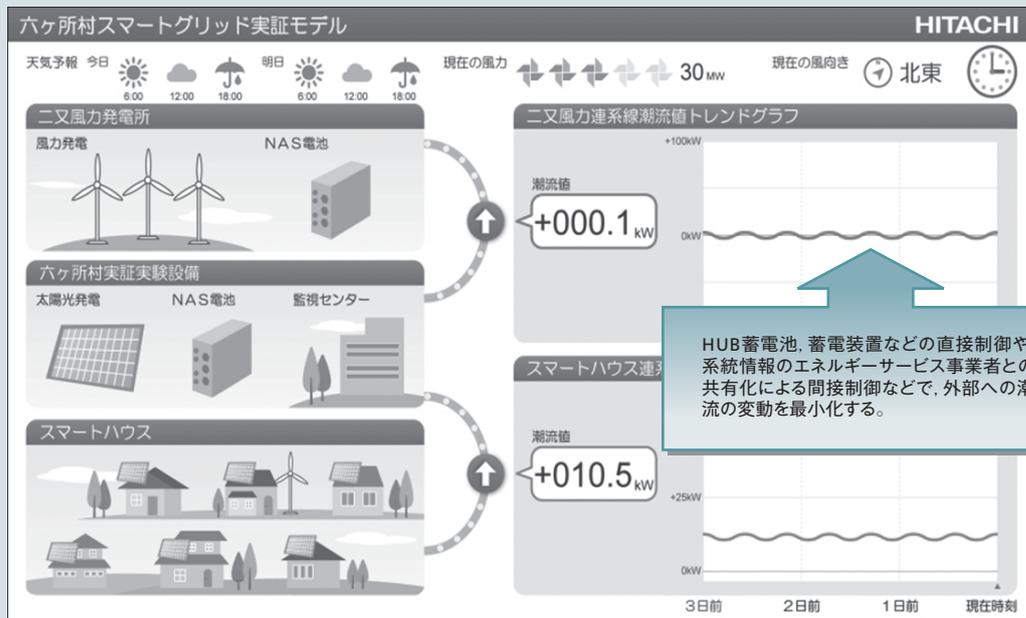


図6 | 青森県六ヶ所村スマートグリッド実証試験の画面例
潮流監視、電圧・電流監視、スマートハウス需給監視に加えて、自然エネルギー発電と需要状況に応じた蓄エネルギー制御なども実施している。

関西電力大河内発電所には日立製の世界最大容量可変速揚水発電システムが2台据え付けられており、15年以上にわたる安定運転の実績がある。

揚水発電所には上下二つの調整池(ダム)が必要となるが、環境破壊を防ぐためにも立地条件が大きな制約を受ける。これに対し、すでに建設され運用中の揚水発電設備を可変速化するという技術開発にも取り組んでおり、1970年代に建設された関西電力奥多々良木発電所で、可変速化されたシステムが2013年から運用を開始する予定である。

6. スマートグリッドでの取り組み

温暖化防止の観点では、多様な分散型電源の普及を支える小規模電力システムの開発が重要となる。IEAによる予測では、2010年からの20年間の電力投資のうち、43%が小規模電力システムに向けられると考えられている¹⁾。

日立グループは、マイクログリッド技術を応用して、コミュニティ向けのエネルギー監視制御技術を開発している。国内外各地で進められているスマートグリッド実証試験にも参画している。

まず、青森県六ヶ所村スマートグリッド実証試験では、自然エネルギーを最大活用して上位システムからのエネルギー供給を最適化する電力コントロールセンターを検証している。潮流監視、電圧・電流監視、自動検針によるスマートハウスの需給監視に加えて、自然エネルギー発電と需要状況に応じた蓄エネルギー制御なども実施している。また、各情報を住民に提供して、住民参加型の需要誘導の検証も

進めている(図6参照)。

また、日立グループは、日米スマートグリッド実証実験にも参画している。2009年度に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から「米国ニューメキシコ州における日米スマートグリッド実証事業」を受託し、他参画企業と共同推進している。ロスアラモス郡の実際の電力システムに適用する実証システムとして、鉛蓄電池を含む複数種別蓄電池のハイブリッド運用や太陽光発電の交流変換器PCSの高度運用の検証を進めている。

日立グループは、PCS以外にも、パワーエレクトロニクスを応用した各種のFACTS(Flexible Alternating Current Transmission Systems)機器を開発している¹⁴⁾。系統安定度向上や電圧変動抑制のみならず、周波数変換や直流送電も可能とする技術である。これらの活用により、スマートグリッドの柔軟な運用を実現している。

東日本大震災によってエネルギーの安定供給が損なわれた事態を受け、スマートグリッドは、コミュニティの電力供給システムとしての価値も見直されていくと予想される。日立グループは、国内外各地のスマートグリッド実証試験で蓄積した知見を活用しながら、前述した新エネルギーの取り組みや、コミュニティ向けのエネルギー監視制御技術、FACTS機器、およびAMI(Advanced Metering Infrastructure: 先進的メータリングインフラ)の構築を通して、スマートグリッド構築に継続的に貢献していく所存である。

7. おわりに

ここでは、火力発電分野と原子力発電分野、新エネルギーの有望技術である風力・太陽光発電の電力系統連系における取り組み、および新エネルギーの普及を支えるスマートグリッド技術の研究開発状況について述べた。

最適な電力供給システムの姿は、地域特性あるいは時代背景に依存して変化するものである。地球規模で低炭素社会を確実に進めるために、日立グループは、ここで紹介した火力・原子力・再生可能エネルギー、またスマートグリッドの技術を組み合わせて、グローバルに環境配慮型の電力供給システム構築に貢献していく所存である。

参考文献など

- 1) IEA : World Energy Outlook 2010 (2010.11), <http://www.worldenergyoutlook.org/>
- 2) IPCC : Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (2011.5), <http://www.ipcc-wg3.de/publications/special-reports/srren>
- 3) 長崎, 外 : 新たな石炭利用技術の事業化への取り組み, 日立評論, 92, 4, 291~294 (2010.4)
- 4) 吉川, 外 : 火力発電における脱硝・脱硫・CO₂除去技術, 日立評論, 90, 5, 404~407 (2008.5)
- 5) H. Oota, et al. : CO₂ Removal Technology from the Thermal Power Plant Flue Gas, The Fourth Japan-Korea Symposium on Separation Technology(1996.10)
- 6) 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)
- 7) C.Bergins, et al. : Overall System Development for Oxyfuel Combustion, 1st IEA GHG International Oxyfuel Combustion Conference (2009.9)
- 8) S.Higuchi, et al. : Test Results from the Advanced Humid Air Turbine System Pilot Plant-Part 1, Overall Performance, ASME Turbo Expo 2008 GT2008-51072 (2008.6)
- 9) 浦瀬 : ABWRの建設と世界市場への展開, 日本機械学会誌 Vol.114, No.1109 (2011.4)
- 10) 大類, 外 : 可変速制御風車の高度制御化, 電気学会B部門研究会 (2010.8)
- 11) Oohara, et al. : Strategy for Improved Control of Hybrid System Consisting of Wind, Power and Battery Storage, Renewable Energy (2010. 6)
- 12) 近藤, 外 : ウィンドファーム出力制御の実験的検討, 電気学会全国大会予稿集 (2011.3)
- 13) Ito, et al. : Harmonic current reduction control for grid-connected PV generation systems, IPEC (2010.6)
- 14) 小海, 外 : 低炭素社会を支える電力系統安定化ソリューション, 日立評論, 92, 8, 580~583 (2010.8)

執筆者紹介



佐藤 康生

1994年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター スマートシステム研究部 所属
現在, スマートグリッド・電力系統制御技術の研究開発に従事
IEEE会員, 電気学会会員



柴田 強

1991年日立製作所入社, 日立研究所 エネルギー・環境システムセンター 所属
現在, 微粉炭ボイラおよびCO₂回収技術の研究開発に従事
日本鉄鋼協会会員



Christian Bergins

2006年Hitachi Power Europe GmbH入社, Research & Development 所属
現在, 酸素燃焼, CO₂回収, 700°C級A-USC, 褐炭ボイラの研究開発に従事
工学博士



浦瀬 賢治

1986年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 原子力技術部 所属
現在, 原子力プラント建設のプロジェクト業務に従事
電気学会会員



加藤 修治

1990年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター パワーエレクトロニクスシステム研究部 所属
現在, 電力変換システムの研究・開発に従事
CIGRE会員, 電気学会会員, 日本セラミックス協会会員