

低炭素社会の実現に向けた 電力・エネルギー分野の技術開発

Technology Development in Field of Electricity and Energy for Low Carbon Society

池口 隆 河崎 照文 斉藤 英世
Ikeguchi Takashi Kawasaki Terufumi Saito Hideyo
飯塚 元信 鈴木 洋明
Iizuka Motonobu Suzuki Hiroaki

世界のエネルギー動向と、求められる技術

世界の人口は現在約68億人で、30年後には30%の増加が予想されている。一方、生活水準の向上などにより、今後30年でエネルギー消費は約60%増加し、良質なエネルギーである電気の消費量は約80%増加する見通しである¹⁾。日立グループでは電力システム社を中心に、火力発電、原

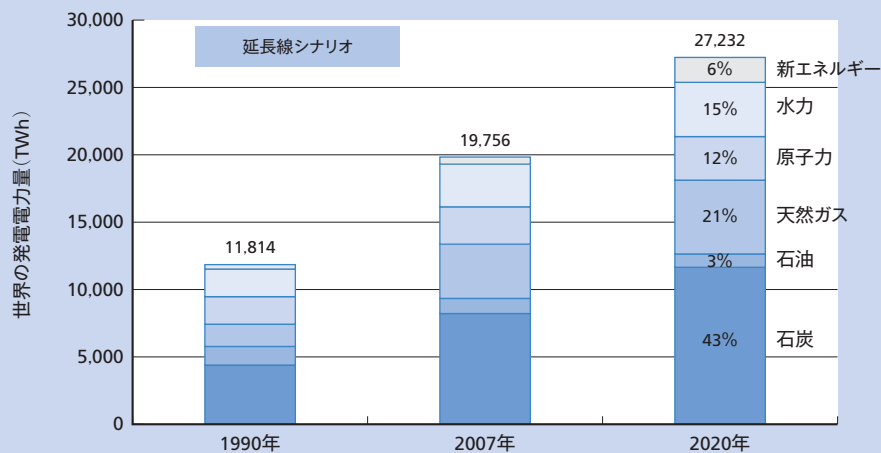
子力発電、水力発電、風力・太陽光発電などの技術開発に取り組んでおり(図1参照)、海外拠点・パートナーとの協創により、世界中の顧客に対しニーズに適合した発電設備を提供している。

発電電力量を燃料別に見た場合、現在、石炭、石油、天然ガスを用いた火力発電が約7割を占めている。現在の延長線上でエネルギー需給構造が推移する「延長線シナ



図1 | 日立グループの発電技術

日立グループは、火力発電、原子力発電、水力発電、風力・太陽光発電などの高効率発電システムを開発し、グローバルな低炭素社会の実現に貢献していく。



出典：IEA（国際エネルギー機関）「World Energy Outlook 2009」

図2 | 世界の発電電力量の推移

新エネルギーが増加するが、今後10年は火力発電、原子力発電、水力発電が引き続き基幹電源を担う。

リオ」に基づけば、この傾向が今後10年は変わらず、風力・太陽光発電などの新エネルギーは増加するが、火力発電、原子力発電、水力発電が引き続き基幹電源として位置づけられる¹⁾ (図2参照)。

原子力発電、水力発電、風力・太陽光発電は発電時にCO₂を排出しないため、これらの割合を増やすことは地球温暖化防止にも寄与する。また、火力発電はベース電源としての役割に加えて、需要変動に対応する負荷調整電源としての役割があり、発電システム全体で考えたときにきわめて重要な役割を果たしている。今後も火力発電を利用していく中で、先進国首脳会議で合意された2050年までに世界全体の温室効果ガスを半減するという目標を達成するに

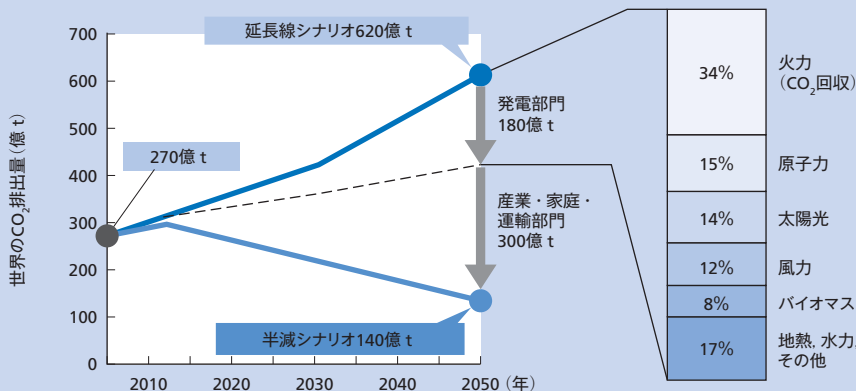
は、発電効率の向上に加えて、火力発電で発生したCO₂を分離・回収する技術を実用化する必要がある²⁾ (図3参照)。

火力発電への取り組み

日立グループでは、グローバルな研究開発体制の下で、石炭、石油および天然ガスに対応した高効率発電技術の研究開発を推進している。

石炭火力の高効率化

石炭燃料は、単位熱量当たりの価格が石油の $\frac{1}{3}$ ～ $\frac{1}{2}$ と安いことと、資源量が豊富で世界中に遍在していることがメリットであり、図2で示したように世界の発電電力量



出典：IEA（国際エネルギー機関）「Energy Technology Perspectives 2008」

図3 | 世界のCO₂排出抑制シナリオ

温暖化対策として、発電部門への期待が大きい。

の約4割を占めている。

石炭火力発電の効率向上は、蒸気温度と蒸気圧力の上昇によって達成され、現在は蒸気温度600℃、発電出力1,000 MW級のプラントが建設されている(図4参照)。600℃級**超々臨界圧発電**^(a)(USC: Ultra Super Critical)の開発は日本が先行し、1990年以降、日本の石炭火力発電の効率は世界で最も高い。圧力も25 MPaと臨界圧を超えて、超臨界状態の水蒸気となっている。

日立グループは、建設中も含め国内8機、海外23機のUSC建設実績がある。最近の事例としては、南アフリカ共和国のEskom社Medupi発電所(発電出力80万kW)の建設に取り組んでおり、2010年1月にボイラ設備の据付けを開始し、2012年の初号機運転をめざしている。

石炭火力発電のさらなる高効率化をめざし、700℃級先進超々臨界圧発電(A-USC: Advanced USC)の開発が進められている。欧州ではTHERMIEプロジェクトが1998年から開始され、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。日本においても経済産業省の補助事業で開発が進められている。日立グループは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「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³⁾。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。日立グループは、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排出削減に努めていく。

石炭火力の環境負荷低減

石炭火力発電所から排出される環境負荷物質であるNO_x(窒素酸化物)、SO_x(硫黄酸化物)、CO₂などの排出濃度は、ほかの燃料を利用する火力発電所に比べ、同一発電量基準では高く、これらを低減する技術が特に要求される。

環境負荷物質のうち、NO_xは燃焼方法の改良によって削減可能であり、日立グループではバーナや炉内の燃焼方式の開発によって低NO_x化を進めてきた⁴⁾。排ガス中に残留する環境負荷物質は、脱硝・集塵(じん)・脱硫装置などから構成される排煙処理システムにより除去される⁵⁾。日立グループの脱硝触媒はその形状が板状で、灰による閉塞(そく)や摩耗が生じにくく、国内外の石炭火力発電所で高い信頼性を得ている。脱硫装置では、高ガス流速、高濃度スラリー、高液密度スプレーといった新しい技術を開発し、コンパクトで高い脱硫

(a) 超々臨界圧発電

石炭火力発電は、石炭の燃焼によってボイラで発生させる蒸気を高温・高圧にするほど効率が高くなる。この温度と圧力の条件によってプラントの種類は分けられ、温度566℃、圧力24.1 MPaで超臨界圧、温度593℃以上、圧力24.1 MPa以上になると超々臨界圧(USC)と呼ばれる。従来型の亜超臨界圧発電(温度538℃、圧力16.7 MPa)と比較して、超臨界圧では約5%、超々臨界圧発電では約7%のCO₂排出量を削減できる。また、蒸気温度をさらに高め、700℃級になると先進超々臨界圧(A-USC)と呼ばれ、現在開発が進められている。

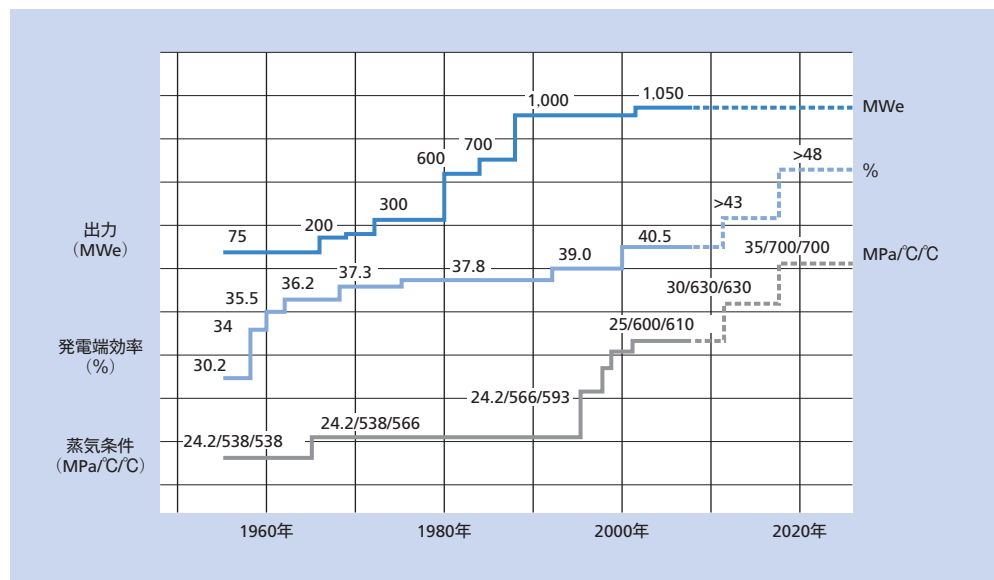


図4 | 石炭火力発電の高効率化
蒸気条件の改善により、発電効率の向上を図っている。

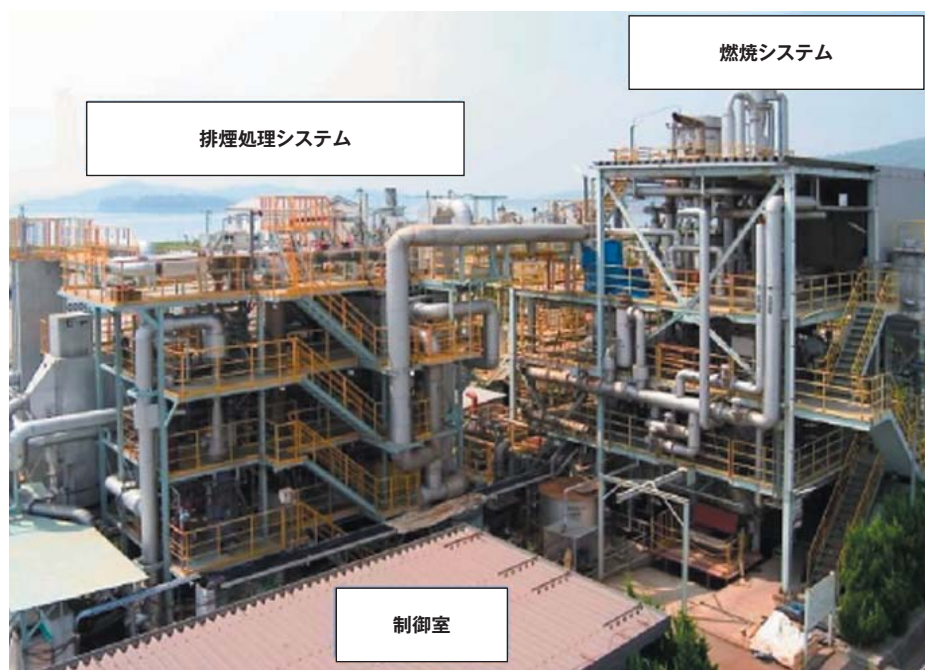


図5 | 燃焼排煙処理一貫試験設備 (2,000 ㎡m³/h)
世界各国の石炭を燃焼した際の排煙処理特性を評価し、設計に反映する。

性能と除塵性能を実現している。さらに、世界中の幅広い性状の石炭に対応するため、種々の排煙処理装置を備えた試験設備を用いて開発を継続中である(図5参照)。

CO₂排出量の大幅な削減のためには、CO₂の分離・回収技術の実用化が必要である。CO₂回収技術には、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**化学吸収法**^(b)と、CO₂の全量を効率的に回収できる**酸素燃焼法**^(c)がある。化学吸収法に関して、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、石炭ボイラの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、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火力用CO₂化学吸収装置の設計を進めている。

酸素燃焼法は、燃焼用空気の代わりに、空気から分離した酸素を再循環排ガスで希釈して用いる方法である。日立グループは、長年、石炭ボイラの開発に携わっており、世界トップレベルの試験評価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。加えて、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。

また、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石炭ガス化発電システムIGCC(Integrated Coal Gasification Combined Cycle)の開発にも取り組んでいる。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)に参画し、石炭処理量150 t/日の運転研究を通し、ガス化とガス精製において高い性能を達成した。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、総合効率が優れると期待されている。日立グループは、世界に先駆けて実施したCO₂回収パイロット試験において目標性能が得られることを確認しており、今後、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計画である。

IGCCおよびCO₂回収の取り組みについては、本特集の論文「新たな石炭利用技術の事業化への取り組み」、石炭焚ボイラのCO₂回収については論文「環境調和型石炭火力発電に向けた取り組み」、特に欧米におけるCO₂回収の取り組みについては、

(b) 化学吸収法

CO₂の分離・回収技術の一つ。火力発電所などでの燃焼後の排ガスを、CO₂のみを溶解するアルカリ性溶液(アミン、炭酸カリウム水溶液など)に通し、CO₂を吸収させる。その後、吸収液を加熱することにより、CO₂を放出させ、回収する方法。

(c) 酸素燃焼法

CO₂の分離・回収技術の一つ。空気に代えて酸素で燃焼を行うと、排ガス中のCO₂が高濃度となり、それを冷却することによって効率よくCO₂を回収できる。

(d) AHAT

Advanced Humid Air Turbineの略。高湿分空気利用ガスタービンシステム。通常のガスタービンコンバインドサイクルでは、ガスタービンの排熱により蒸気を発生させ蒸気タービンを運用するが、AHATでは増湿装置を利用して燃焼用圧縮空気の湿分を増やし、ガスタービン自体の出力向上を図る。排ガスボイラと蒸気タービンを必要とせず、ガスタービン燃焼後の排熱を有効に回収して発電できるため、高効率、低コストで、優れた運用性を有する。また、高湿分燃焼器により、脱硝装置なしで低NOx排出を実現できる。

(e) BWR

Boiling Water Reactorの略。沸騰水型原子炉。減速材や冷却材として軽水（水）を用いた軽水炉には、BWRとPWR（Pressurized Water Reactor：加圧水型原子炉）がある。BWRは、原子炉圧力容器内で沸騰させた水から発生する蒸気を、直接タービンに送って発電する方式。

(f) ABWR

Advanced BWRの略。改良型沸騰水型原子炉。BWRの運転経験に基づく改善と、最先端技術の導入により、熱効率と最大出力を向上させている。原子炉内の冷却材を循環させるポンプを原子炉圧力容器内に取り込んだダイナミックポンプ、原子炉出力の制御を行う制御棒を出し入れする改良型制御棒駆動機構、建屋一体型鉄筋コンクリート製格納容器などの採用により、原子炉建屋の体積減少、建設期間の短縮、設備利用率の向上、安全性の向上などが図られている。

論文「CO₂回収装置を有する高効率石炭火力発電所」で詳細に紹介する。

ガスタービンの高効率化

日立グループが供給している発電出力30 MWクラスのH-25ガスタービンは、信頼性の高さと、同クラスにおける効率の高さから、国内外から多数の発注を受け、受注台数は100台を超えている。また、その適用分野は、電力向け、一般産業用、石油・ガス分野と多岐にわたっている⁶⁾。H-25は、圧縮機の高効率化、タービン翼冷却効率の向上などにより、ガスタービン単体で発電端熱効率35% LHV (Lower Heating Value) を達成しており、さらに蒸気タービンと組み合わせたコンバインドサイクル効率は50% LHV以上に達している。このH-25をベースに開発した80 MW級ガスタービンの適用事例について、本特集の論文「高効率ガスタービンH-80の開発」で紹介する。

また、発電サイクルの工夫により発電効率を向上する技術として、AHAT^(d)の開発に取り組んでいる。このシステムは湿分空気を利用した再生サイクルであり、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。資源エネルギー庁の補助事業としてシステムの成立性を確認済みであり、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³⁾。

原子力発電への取り組み

日立グループは、BWR^(e)に一貫して取り組んできた。商用化からすでに40年が経過しているBWRでは、さまざまな技術開発を経てプラント出力の大容量化が進み、現在は安全性、運転性、経済性などに優れた発電出力1,350 MWクラスのABWR^(f)が実用化されている（図6参照）。日立グループは、グローバル市場に対しても、パートナーであるGE-Hitachi Nuclear Energy Americas LLCとともに、ABWRなどの最先端BWRプラントを提供できる体制を構築している。

次世代BWRの開発

国内の大規模なリプレース時代に備え、かつ世界的な原子力発電への期待に原子力のリーディング国として応えるために、大型国家プロジェクトである次世代軽水炉開発が2008年度からスタートした。日立グループは電気事業者や国の指導を得ながら、財団法人エネルギー総合工学研究所を中核機関として、プラントメーカー、ゼネコンなどとともに、原子力産業界一丸となって次世代BWRの開発を強力に推進していく。

日立グループが推進している要素開発には、(1) 超高燃焼度燃料、(2) スペクトルシフトロッド (SSR) 燃料、(3) 新建設工法 (SC構造工法)、(4) 免震装置、(5) 材料・水化学の高度化、(6) 運用高度化のためのプラントデジタル化、などがある。新しいシステムや機器の開発は、高度シミュレーション技術を活用した現象の理解と開発効率の向上、大規模実証試験による性能と信頼性の確認を両輪として進めている。

高度シミュレーション技術としては、炉心核熱水力特性解析、気液二相流解析、音響振動解析、腐食環境解析などの開発に取り組んでいる⁷⁾。大規模実証試験としては、各種の熱流動試験、材料照射試験、地震時健全性確認試験、保全技術確認試験が実施できる設備を整備している。2009年には、BWRの実際の運転圧力・温度で蒸気と熱

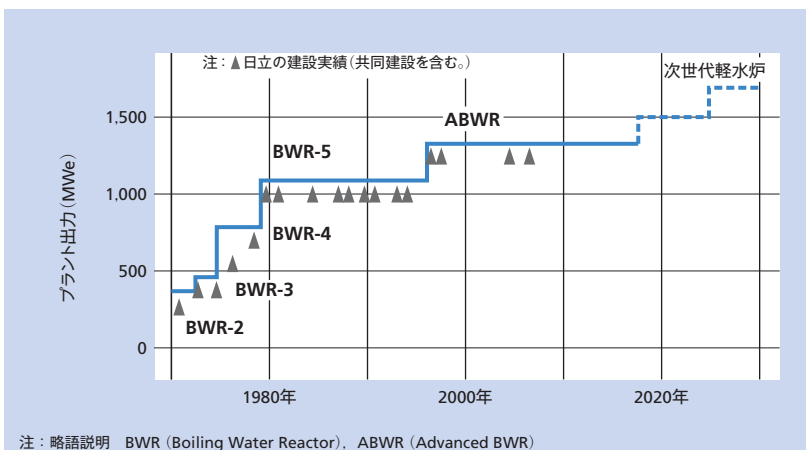
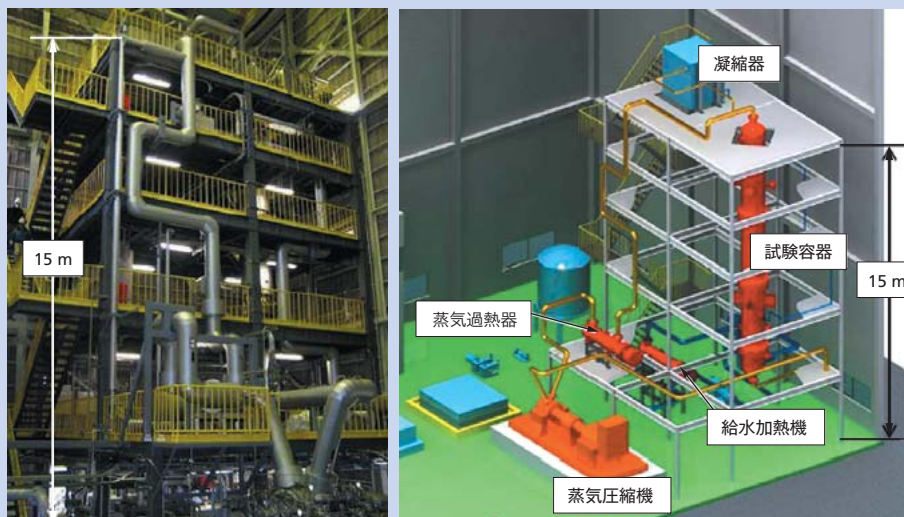


図6 | 日本におけるBWRの開発経緯

日立グループは40年という長年にわたり、継続的に原子力発電所を建設してきた。



注：略語説明 HUSTLE (Hitachi Utility Steam Test Leading Facility)

図7 | 多目的蒸気源試験設備「HUSTLE」

BWRの実際の運転圧力・温度で蒸気と熱水を供給できる試験設備であり、高性能・高信頼性機器の開発に活用していく。

水を供給できる世界最大級の試験設備 HUSTLE (Hitachi Utility Steam Test Leading Facility) を建設した (図7参照)。この装置を活用し、次世代BWRの高性能・高信頼性機器や、既存のBWRの性能を向上する機器の開発を推進していく。

次世代BWR開発の詳細は、本特集の論文「大規模建設時代に向けた次世代BWRの開発」で紹介する。

高度保全技術

原子力発電プラントの高経年化に伴い、保全の重要性はより高まっており、日立グループは、長期安定運転とともに、設備利用率の向上、発電所の作業従事者の被ばく線量低減などに寄与する、高度保全技術の実用化に取り組んでいる⁸⁾。高経年化プラントの長期安定運転のためには、機器の重要度に応じた適切な検査技術の適用により機器の健全性を確認するとともに、水質環境改善や機器の更新などにより運転中の不具合発生を防止することが求められている。

本特集の論文「エネルギーインフラを支える高度検査技術」では、発電プラント保全技術として開発してきた高度検査技術の特徴を紹介する。

燃料サイクル技術

原子力を長期安定な電気エネルギーの供

給源とするためには、石油と同様に有限であるウラン資源を数十倍有効に活用できる**高速増殖炉**⁹⁾を含む、燃料サイクルの確立が必須となる。日立グループは、中間貯蔵、燃料再処理、高速増殖炉、廃棄物処理処分などの事業、および技術開発を積極的に推進している。例えば、高速増殖炉に関しては、一次系を中心とした「もんじゅ」までの実機機器開発・製作・メンテナンス経験を生かし、実証炉は2025年ごろ、実用炉は2050年ごろの運転開始をめざして、システム概念構築や機器、熱流動、材料・構造技術開発に取り組んでいる。

この分野の取り組みについては、本特集の論文「将来の低炭素社会を実現するための原子燃料サイクル技術」で詳細に紹介する。

水力発電への取り組み

わが国の発電方式が1960年ごろに「水主火従」から「火主水従」に転換して以来、水力発電の開発は主に**揚水発電**^(h)に向けられてきた。揚水発電では、経済性向上の観点からスケールメリットが追求され、大容量化が進んできた。大容量化するには、高落差化と大流量化があるが、水量を増すよりも落差を高くしたほうが、土木設備および機械が小型化できることから、高落差

(g) 高速増殖炉

天然ウランのほとんどを占めるが、軽水炉では燃料とならないウラン238を活用し、プルトニウムを燃料として利用しながら生産する原子炉の形式。ウラン238が、核分裂の際に生じる中性子を吸収するとプルトニウムに転換することを利用し、原子炉でウランを核分裂させてエネルギーを取り出し、発電する一方で、燃料となるプルトニウムを生産できる仕組み。

(h) 揚水発電

発電所の上部と下部に高低差をつけた二つの調整池をつくり、夜間など電力需要の少ない時間帯には余剰電力を利用して下部から上部へ水をくみ上げておき、昼間の電力需要が増える時間帯には上部から下部に流下させて発電する水力発電の型式。急激な電力需要の変化に対応する調整電源の役割も担っている。このうち可変速揚水発電は、揚水時のポンプ回転数を可変とすることで消費電力を細かく調整できることから、特に夜間の電力系統安定化に寄与している。

地点の開発が促進された。日立グループが納入した製品の中で記録的な高揚程・大容量に対応したものとしては、揚程700 m・出力400 MW級の東京電力株式会社葛野川発電所ポンプ水車が挙げられる⁹⁾。

大容量化が進んだ技術的背景としては、(1) 水車の心臓部であるランナ部流れ解析技術と、ランナ内および出入口部流れの測定技術の向上、(2) これらを基礎としたキャビテーション性能の改善や不安定現象の解明、(3) 有限要素法による応力解析、ひずみ量計算、振動解析など構造設計技術の向上が挙げられる。

風力・太陽光発電などの新エネルギーの増加に伴い、電力の需給調整が大きな課題となってくるが、可変速揚水発電システムは夜間の揚水時でも高速で電力の需給調整を行うことが可能であり、系統安定化技術として、その社会的なニーズが非常に高まっている。この日立グループの可変速揚水発電システムについては、本特集の論文「地球温暖化防止に貢献する可変速揚水発電システム」で紹介する。

2020年にかけて大きく伸びると予想されているのが風力発電と太陽光発電である(図8参照)。

風力発電システム

風力発電では富士重工業株式会社との協業により、日本で立地点の多い丘陵・山岳地において約8%の出力向上が可能な2 MW **ダウンウィンド型風車**⁽ⁱ⁾を開発した¹⁰⁾。国際標準に規定される風車に比べ、耐風速の向上、規格を超えた正極雷への耐性確保なども図っている。制御方式には、可変速揚水発電システムにも適用されている有効電力優先制御を適用している。この方式では、有効電力を直接制御するので、風速が変動しても電力変動が少ない安定した電力を供給できる。

発電機には、回転子と固定子それぞれに巻線を備えた4極空冷式発電機を採用し、電力変換器で回転子の磁界を制御することで、広いロータ速度範囲に追従した運転を可能としている。

また、出力1,400 V定格対応のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を採用し、発電機端の電圧を一般の風力用発電機の690 V程度から約2倍に高電圧化し、ナセルに設置される発電機とタワー基部に設置されるコンバータ間の送電電力損失を低減している。

(i) ダウンウィンド型風車

風車のブレードをタワー(風車の軸部分)より風下に設置する風車型式。これに対し、ブレードがタワーよりも風上に位置する型式をアップウィンド型と言う。ダウンウィンド型は安定性が高く、特に山岳地や丘陵地において高効率で安定した発電出力を実現する。

新エネルギーへの取り組み

地球温暖化対策の観点から風力・太陽光発電などの新エネルギーの導入が世界的に進展している。新エネルギーの中でも、

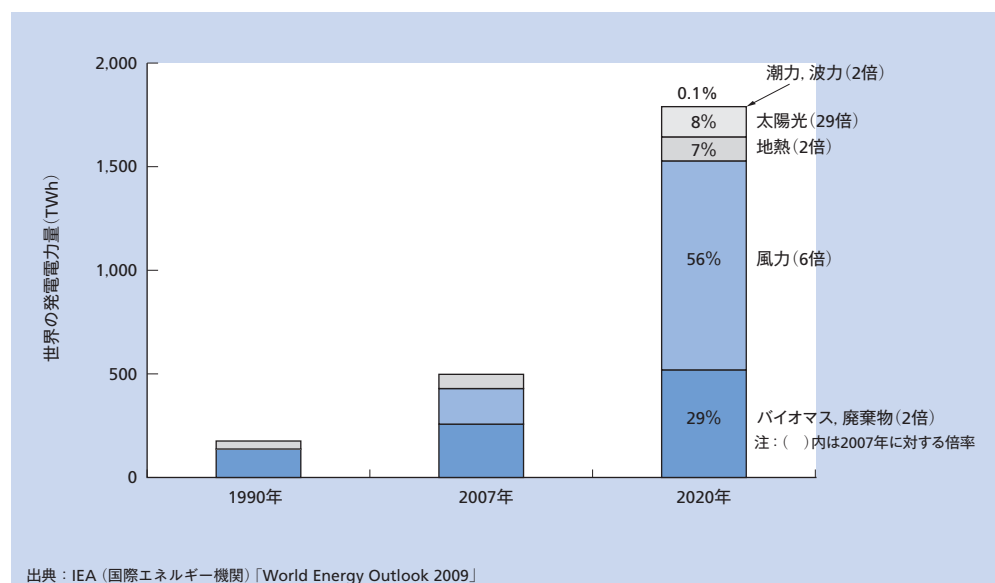


図8 | 新エネルギーによる発電電力量の推移

2020年に向けて、風力発電と太陽光発電の増加が予想されている。

今後、地形、台風、雷などの制約により、風力発電の立地が難しかった地域を中心に、本風車の普及を推進していく。

太陽光発電システム

大規模太陽光発電システムでは、NEDOの実証研究において、株式会社NTTファシリティーズからの再委託により、系統安定化機能を持った400 kW級の大容量PCS (Power Conditioning System) を開発した¹¹⁾。開発したPCSでは、発電による有効電力とともに、電力系統の状況に応じて適当な量の無効電力を連系インバータから出力することで、系統電圧の変動を抑制する機能や、系統擾(じょう)乱時運転継続機能(FRT: Fault Ride Through)などを実現している。日立グループはPCS以外にも、監視制御システム、変圧器、遮断器などの、さまざまな機器・システムを幅広く手がけており、これらの技術をベースに電力系統の安定化に寄与する大規模太陽

光発電システムを提案していく。

新エネルギー大量導入時代の課題と対策技術については、本特集の論文「次世代送配電ネットワーク構築に向けた対応技術」で紹介する。

2025年度までに年間1億 tのCO₂排出抑制に貢献

以上、電力システム社を中心に取り組んでいる火力、原子力、水力、風力・太陽光などの発電技術の特徴と今後の取り組みについて述べた。

日立グループは「環境ビジョン 2025」において、「2025年度までに、世界全体で日立グループ製品により年間1億 tのCO₂排出抑制に貢献すること」を宣言している。本稿で紹介した発電技術は、CO₂排出抑制に大きく貢献するものとして期待されており、新技術の開発を積み重ね、グローバルな低炭素社会の実現に貢献していく。

参考文献

- 1) IEA, World Energy Outlook 2009
- 2) IEA, Energy Technology Perspectives 2008
- 3) 伊藤, 外: 火力発電におけるCO₂削減技術, 日立評論, 90, 5, 398~403 (2008.5)
- 4) 木山, 外: 微粉炭焚きボイラにおける最新の低NOx燃焼技術, 日立評論, 91, 3, 284~289 (2009.3)
- 5) 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)
- 6) 荒井, 外: 日立H-25ガスタービンの特徴と適用例, 日立評論, 90, 2, 174~179 (2008.2)
- 7) 石井, 外: 原子力プラントの高度シミュレーション技術, 日立評論, 91, 2, 218~223 (2009.2)
- 8) 坂下, 外: 原子力発電所の高経年化に対応した高度保全技術, 日立評論, 91, 2, 204~209 (2009.2)
- 9) 池田, 外: 700 m・400 MW級超高揚程大容量ポンプ水車, 日立評論, 82, 2, 185~190 (2000.2)
- 10) 松信, 外: 大型風車「ダウンウィンド2 MW機」の開発—日本の環境に適合した風力発電システム—, 日立評論, 91, 3, 306~309 (2009.3)
- 11) 三村, 外: 大規模太陽光発電システムの開発, 日立評論, 91, 3, 310~313 (2009.3)

執筆者紹介



池口 隆
1972年日立製作所入社、電力システム社 所属
現在、電力システム社を中心に研究開発の指導に従事
日本機械学会会員、日本ガスタービン学会会員、可視化情報学会会員



飯塚 元信
1978年日立製作所入社、電力システム社 日立事業所 電機プラントシステム部 所属
現在、回転電機の開発に従事
電気学会会員



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



鈴木 洋明
1981年日立製作所入社、電力システム社 新事業開発推進本部 所属
現在、電力システム社、社会・産業インフラシステム社の研究開発企画に従事
エネルギー・資源学会企画実行委員、日本原子力学会会員、日本機械学会会員



斉藤 英世
1971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 事業企画本部 所属
現在、原子力プラントの設計・開発に従事
日本原子力学会会員、日本機械学会会員