

再生可能エネルギー活用の動向と東芝の取組み

Trends in Power Generation Systems Utilizing Renewable Energy, and Toshiba's Approach

柴垣 徹

■ SHIBAGAKI Toru

再生可能エネルギーを活用した発電システムは、地球環境に優しく、温暖化ガスの排出が少ない、時代の要請に応えるものである。

東芝は、従来から水力発電や地熱発電などのシステム開発とその供給に携わってきたが、現在は更に幅広く、風力発電や太陽光発電など多くのシステムに取り組んでいる。将来に向けては、海流発電などの様々な新技術開発を行い、再生可能エネルギーの活用を、より広い分野で発展させ続けている。効率向上や、安定供給、負荷追従性など多くの課題に取り組みながら、多様な市場のニーズに応えるシステムを提供していく。

Power generation systems utilizing renewable energy respond to the demands of the present era from the perspective of Earth consciousness and low greenhouse gas emissions.

Toshiba has been engaged in the development and supply of a number of systems in this field, including wind and photovoltaic (PV) power generation systems, in addition to conventional hydroelectric and geothermal systems. We are also developing a wide variety of innovative technologies aimed at realizing new types of power generation including ocean current power generation. In response to a broad range of market needs, we are making continuous efforts to provide solutions to issues including improvement of efficiency, stable supply of electric power, and flexibility to cope with load variability.

再生可能エネルギーを取り巻く環境

2010年現在、水力を含む再生可能エネルギーが世界の総発電電力量に占める割合は19.7%であり、総発電電力量が増大するなかで2030年には29.0%に拡大する見込みである(囲み記事参照)。

当初再生可能エネルギーは、1970年代の石油危機以降に石油の代替エネルギーとして実用化が進み、1980年代後半に地球温暖化問題が顕在化してからは温暖化対策として、欧州を中心に導入が進んできた。

そして2000年代に入り、米国と中国で大規模な政策的支援が進んだことも導入促進の一助となり、導入量は急速に増えている。政策的支援の中心となる再生可能エネルギー固定価格買取制度(FIT: Feed in Tariff)やRPS制度(Renewable Portfolio Standard)は、これまでに世界数十か国で採用されている。

欧州はFITで世界の再生可能エネルギー市場を先導してきた。デンマークが1970年代後半に欧州で初めて導入したのについて、ドイツが1991年に導入した。それ以降各国で導入が進み、2007年時点で欧州連合(EU)加盟国27か国中、20か国以上が導入している。

中国では、中央政府が再生可能エネルギー法を2006年に施行し、(1)送電企業が電力を買い取ることの義務化、及び(2)低利融資・税制優遇措置を決めた。これにより、一次エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの比率を2020年に15%まで引き上げるという目標を発表し、約30兆円規模の投資を行うとした。

わが国でも、FITに関する法案が2012年7月に施行され、買取り対象を風力、中小水力、地熱、及びバイオマスにも拡大したうえで、非住宅用や事業用太陽光も含めた全量を買取りることになり、加速的な普及が期待されている。

いずれの地域でも、再生可能エネル

ギーは自国の純国産エネルギーであり、化石資源の枯渇とそれに伴う価格高騰のリスクや、地球環境問題とあいまって、様々な補助が政策的に行われている。将来に向けた発電方式として、市場の拡大が進むものと期待できる。

各発電方式の特徴

再生可能エネルギーを活用した発電システムには、水力発電や、地熱発電、風力発電、太陽熱発電、太陽光発電、バイオマス発電、波力発電、潮流発電、海流発電などがある。それぞれの設備利用率を図1に示す。

設備利用率は地熱発電がもっとも安定しており、二酸化炭素(CO₂)排出量も石炭火力の1/50以下と非常に少ないため、理想的な発電方式である。しかし地下の浅部に地熱資源がある国は限られており、わが国の他にはインドネシア、ケニアなど数か国以外あまり活性化していないのが現状である。

発電設備の将来動向と再生可能エネルギー発電の位置づけ

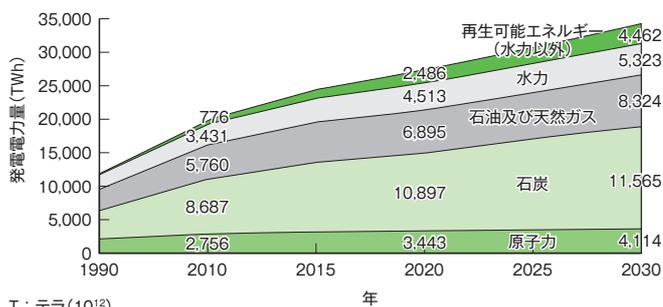
電力需要は開発途上国を中心として伸長し、2030年の世界の発電設備容量は2010年からの伸び率が1.66倍と予想されている。そうしたなかでCO₂排出量が少ない再生可能エネルギー発電が期待されており、世界発電電力量における伸び率は2010年から2030年では232.6%と予想されている。世界の総発電電力量に占める割合も2010年の19.7%から2030年

には29.0%と、総発電電力量の増大を大幅に上回る伸張を遂げて、電力供給の中に確固たる地位を占めるものと見られている。

電力需要は中国やインドをはじめとした開発途上国で大きく伸長し、2030年の世界の発電設備容量は2010年からの伸び率が表Aようになる。総発電設備容量は5,183 GWから8,588 GWに増加する見込みであり、中でも中国は2.2倍、インド

は3.5倍に伸長する見込みである。

これに伴いCO₂排出総量の増加が予想され、先進国と途上国の別なく、CO₂排出量が少ない再生可能エネルギー発電や発電効率向上によるCO₂排出削減が強く求められていくものと考えられる。



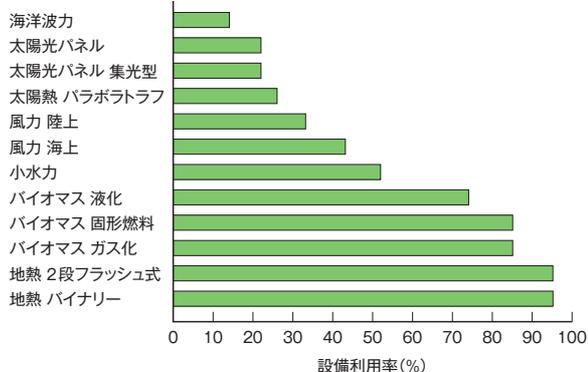
T: テラ(10¹²)
*「World Energy Outlook 2012」¹⁾のデータに基づき作成

図A. 世界の発電電力量の推移

表A. 世界各地域の発電設備容量の伸び

国又は地域	発電設備容量 (GW)		伸び (倍)
	2010年	2030年	
日本	275	351	1.28
アジア	260	565	2.17
インド	189	663	3.51
中国	997	2,228	2.23
北米	1,308	1,594	1.22
南米	237	423	1.78
中東	214	387	1.81
韓国・豪州	155	235	1.52
欧州	981	1,319	1.34
東欧	186	207	1.11
ロシア	236	306	1.30
アフリカ	145	310	2.14
合計	5,183	8,588	1.66

*「World Energy Outlook 2012」¹⁾のデータに基づき作成



*日本機械学会誌「地熱発電システム」²⁾のデータに基づき作成

図1. 各種発電方式の設備利用率 — 設備利用率は各種発電方式により大きな違いがある。
Rate of utilization of various power generation systems

一方、太陽光と風力は世界中で利用可能なエネルギーであるため、地熱やバイオマス発電に比べて設備利用率は劣るが、急速に発展している。しかし、これらの発電方式による発電単価は高く、事業性を成立させるために買取り価格にプレミアをつけた場合、電気料金の高騰につながるおそれがある。

このように、各方式には、長所と課題があるため、各国の事情を考慮して使い分けるとともに、個々に課題を解消するよう技術開発を進めることが重要になる。

各種の再生可能エネルギーを活用した発電システムの概要と原理、東芝の取組み、及び今後の動向について、以下に述べる。

太陽光発電システム

システムの概要

近年、太陽光発電システムの導入量の伸びが非常に顕著である。世界的に見ると、2009年時点では累積導入量が23 GW程度であったが、2011年には69 GWに達している。このうち、欧州が51 GWと全体の約75%を占めている。また、2011年の1年間での世界の導入量は、29.7 GWで、やはり、欧州が同様な比率を占めている。また、導入量の多かった国は、イタリア、ドイツの順番で、それぞれ、9.3 GW及び7.5 GWであった。他の地域では、2.2 GWの中国、1.9 GWの米国が多い。

国内でも、FIT施行後は、各電力会社が各地でメガソーラーシステムの建設を進めるなど、これまで伸びの小さかった産業用市場でも導入の加速が見られる。

当社も、太陽光システム機器の供給だけでなく、社内の数か所に合計8 MW程度の発電所を計画している。当社横



図2. 東芝 横浜事業所内に設置した太陽光発電所 — 1.5 MWの出力を持ち、2013年3月に発電を開始した。

PV power generation plant installed at Toshiba Yokohama site

浜事業所では、1.5 MWの太陽光発電設備が2013年3月から発電を開始した(図2)。

■原理、発電方式と東芝の取組み

太陽光発電システムは、太陽電池モジュール、架台、パワーコンディショナ(PCS)、受変電機器、及び監視装置で主に構成され、蓄電池応用をはじめとした周辺技術によりその電力品質が保持される。

また、太陽電池モジュールで発電した直流電力は、PCSにより系統周波数の交流電力へ変換された後、送電系に送られるため、発電事業性の評価には、これら機器の性能と信頼性が鍵となる。

特に、太陽電池モジュールの選定は、ユーザーの設置環境や、発電量と価格の優先度などのニーズを考慮して行うのが重要である。当社は、主要なパネルのいくつかについて、当社府中事業所内の実証設備で、発電効率などの性能に加えて、信頼性評価データを収集し、その評価結果を提案に生かしている。

また、当社製PCSは、低負荷領域から高い変換効率を誇り、朝夕の日射量が少ない時間帯でも高効率の変換を実現している。例えば、500 kW機の最大効率は出力50%時で97.7%を達成し(図3)、当社太陽光発電システムの競争力向上に大きく貢献している。

■今後の動向

太陽光発電は、普及が進む一方で、

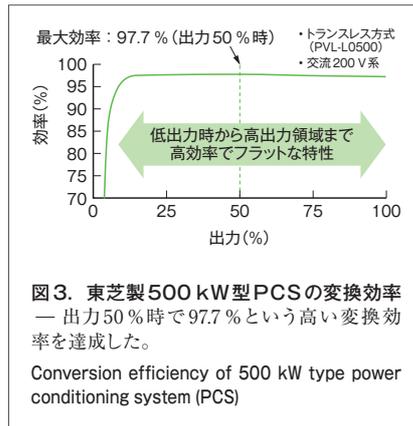


図3. 東芝製500 kW型PCSの変換効率 — 出力50%時で97.7%という高い変換効率を達成した。

Conversion efficiency of 500 kW type power conditioning system (PCS)

天候に左右される不安定な電源であるため、送電系統へ影響を与えることに加え、発電単価が高く、このままのペースで開発が進めば、電気料金の高騰を招くおそれがある。また、大規模な太陽光発電では、広大な土地が必要になるため、事業用の土地価格や系統へのアクセスなどが事業性を左右する。

今後、送電網の増強や、トータルでのシステムコスト低減のための技術開発がますます重要になるであろう。

風力発電システム

■システムの概要

風力発電システムは、再生可能エネルギー発電方式の中で、もっとも市場規模の大きな発電システムである。

当社は、このような環境の風力発電市場に参入するため、韓国ユニスン社との協業を、2011年5月から開始した。

風力発電は、欧州や、中国、米国など、大陸の風況の良い地点で大規模なウインドファームを中心とした開発が進められてきた。しかし新たに設置するのに適した土地が少なくなってきたため、更に安定して強い風況である洋上が新たな市場として注目され始めている。

一方、わが国は、台風や落雷といった風力発電には厳しい環境下にあり、安定した稼働率維持が大きな技術課題となっている。このため、欧米に比べて開発は遅れているものの、前述のFITに加え、耐風速・耐雷技術の進歩によ

り、今後はわが国でも開発が加速されると期待される。

■原理、発電方式と東芝の取組み

風力発電システムは、風のエネルギーで風車翼を回転させ、このときの回転エネルギーを発電機によって電気エネルギーへと変換する。

一般の火力発電と異なり、風車の回転数は風速に左右され、発電機で発電した電力はPCSで一度直流電力に変換し、更に系統周波数の交流電力に変換して系統へ連系する。

風車は、このように多くの電気品をシステム内に持つため、前述の耐風速・耐雷技術だけでなく、電気系や制御系の効率向上や耐環境技術の開発も重要である。例えば故障頻度では、これら電気系のトラブルが多いことが課題の一つである。

当社は、ユニスン社製風車のPCSや変圧器といった電気品に、東芝グループによる国産製品を採用して、発電効率を高めるとともに安定した制御を行い、稼働率に優れた風力発電システムを提供している。

また、風のエネルギーは風速の3乗に比例して増大するため、風車を設置する場所の風況のよしあしが発電の事業性を大きく左右する。当社は、機器だけでなく、建設に際して風力機器の配置を最適化するためのシミュレーション技術を用い、発電事業者への支援も含めて取り組んでいる。

2013年2月に発電を開始したウクライナのプラントの例では、2月からの1か月間の稼働率は97%、設備利用率は50%を超えるといった、安定した運用実績を達成している。

■今後の動向

陸上の適地は現在までに開発が進み、また、風力発電の風エネルギーは陸上より海上のほうが優位なため、今後の大きな市場として洋上がもっとも注目されている。

発電原価を抑えることは再生可能エネルギーの共通の課題であるが、特に風力発電では今後の発展の鍵である。とりわけ洋上では、機器の大容量化によるkW当たりの建設コストの抑制と、メンテナンスフリーの信頼性技術の確立が競争力を高めるために必須であり、当社は、他社をしのぐ10 MW級の洋上風力発電機の開発に着手するとともに、土木工事や送電技術を含むEPC（設計、調達、及び建設）協業のための洋上風力発電システムの研究を開始した。

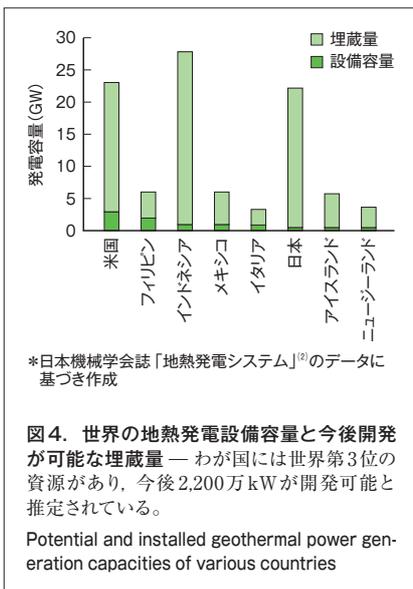
地熱発電システム

■システムの概要

地熱発電システムに関しては、わが国に世界第3位の資源量が存在し、天候などに左右されず、設備利用率の高い発電が安定して可能である。わが国のメーカーが地熱発電プラントの世界シェア約70%を占めており、技術的に優位な状況にある。更にCO₂の排出量が少ないという特長を持っている。

世界の国々の地熱設備容量と今後開発が可能な埋蔵量を図4に示す。

世界的に、現在活用されている資源に比べて未開発の埋蔵量は多く、わが国の場合約2,200万kWの埋蔵量があると推定される。これは全電力会社10



社の合計設備容量の11%にも満たないが、地熱発電の設備利用率は90%以上で安定した発電量を得ることができるので、他の再生可能エネルギーと合わせれば日本のエネルギー自給率を高めることが可能である。

地熱発電のライフサイクルを通してのCO₂排出量は、石炭火力発電の約1.5%であり、他の再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電に比べても少ない。

■原理、発電方式と東芝の取組み

地熱発電は、地下のマグマのエネルギーにより熱せられた、地下1,000～3,000 mに存在する熱水や蒸気を地中から取り出し、そのエネルギーによりタービンを回し、発電機で電気エネルギーに変換する発電システムである。

地熱発電には、次の三つの方式がある。

- (1) ドライスチーム式
- (2) フラッシュ式
- (3) バイナリサイクル式

地中から取り出される蒸気の温度に応じてもっとも効率的な方式が、これらの中から採用される。

地中からの蒸気が乾き蒸気ならばドライスチーム式、比較的温度が高くて蒸気割合が多い場合はフラッシュ式（気液二相流をタンク内で減圧して蒸気だけを取り出し発電する方式）、熱水が主流の場合は低沸点媒体を用いたバイナリサイクル式が採用される。

当社は、どの方式の地熱システムにも対応できる技術を持っているが、現在では、開発地点が多くて経済性に富むフラッシュ式の設置が80%以上を占めている。

地熱発電用蒸気タービンは、火力や原子力用のものと基本的な構造は同じであるが、地熱蒸気中には塩化物や硫化物など特有の腐食成分が含まれるため、この腐食成分に対して信頼性を維持する技術が、実用化するための重要な課題となる。

当社は、1966年に運転を開始した出

力20 MWの岩手県松川地熱発電所の建設以来、約半世紀にわたって運転実績や腐食に対する様々な研究開発を行ってきた。

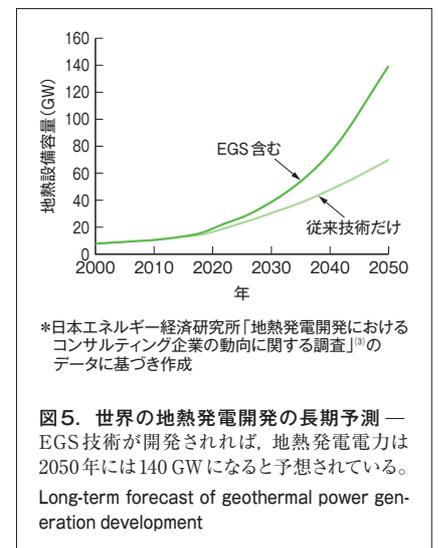
2002年に米国カリフォルニアのガイザース発電所に設置したプラントは10年間連続運用され、その後の開放点検でも健全性が確認されて、腐食に対する技術が世界的にも極めて優れていることを実証した。

■今後の動向

世界の地熱発電開発の長期予測を図5に示す。2050年には従来技術での開発予測量として70 GW、高温岩体発電（EGS）技術が開発されれば合計で140 GWと予測されている。

今後、大型の地熱発電システムの開発も見込まれ、これまでに培った信頼性技術に加え、建設場所それぞれでの地熱蒸気の条件に応じて、最適な性能を実現できる地熱システムを提案することが重要になろう。

また、国内ではFITが施行されているため、これに対応して開発期間が短く、地元の温泉組合などとの共存も可能な2 MW級の小型地熱発電プラントを商品化し、わが国の地熱発電の発展に寄与していくことも目指している。タービンを小型化することで敷地面積を最小限に抑えて景観へ配慮するとともに、



生産井からの蒸気や熱水を発電利用後に全量地下に還元することや、1～2本の温泉井戸でも発電可能なシステムを実現しており、温泉湧出量へ影響しないよう配慮したプラントとしている。

水力発電システム

■システムの概要

水力発電システムは、再生可能エネルギーによる発電方式の中で、もっとも古くから実用化され、またもっとも適用が進んでいる発電システムである。

北米やオセアニアなどの先進国では、新規プラントの開発は少なくなっているが、運転開始から40年以上経過して老朽化した発電所の再開発や水車及び発電機の部分更新による出力アップが盛んに行われている。

また、電力が十分確保されていない開発途上国では、新規プラントの開発も盛んに進められており、2003年から2012年にかけて年平均30 GW近くが発注されている。このうちの70%近くは、中国、ブラジル、及びインドで占められている⁽⁴⁾。

一方国内では、大規模な水力発電所の開発はほぼ終わっているが、利用可能な水力エネルギー（包蔵水力）のうち58%以上は未開発で、そのほとんどが3万kW未満の中小水力とされている（図6）。

これらは発電出力が小さいことや開発地点が奥地にあることから、その経済性が課題とされていた。しかし3万kW未満の中小水力発電所にFITが適用されることとなったことから、今後中小水力発電所の開発が加速されると考えられる。

■原理、発電方式と東芝の取組み

水力発電システムは、水の位置エネルギーを電気エネルギーへ変換させて発電する方式である。

水力発電は、主要な発電方式の中でもっともCO₂の排出量が少ないことに加えて、次のような特長がある。

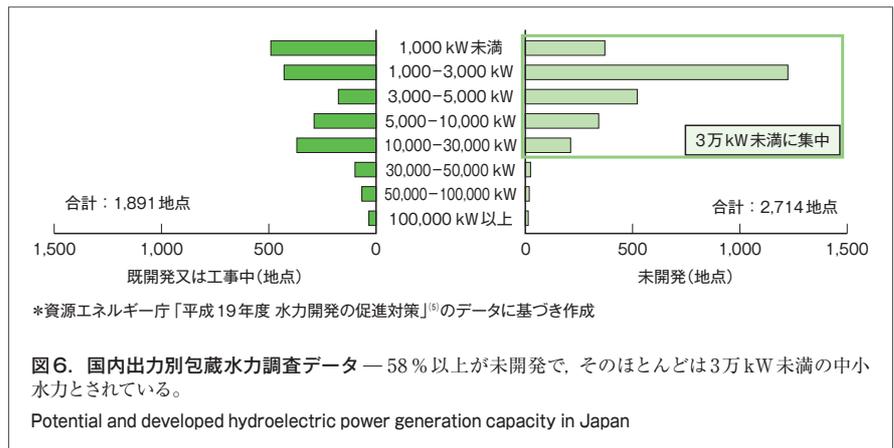


図6. 国内出力別包蔵水力調査データ — 58%以上が未開発で、そのほとんどは3万kW未満の中小水力とされている。

Potential and developed hydroelectric power generation capacity in Japan

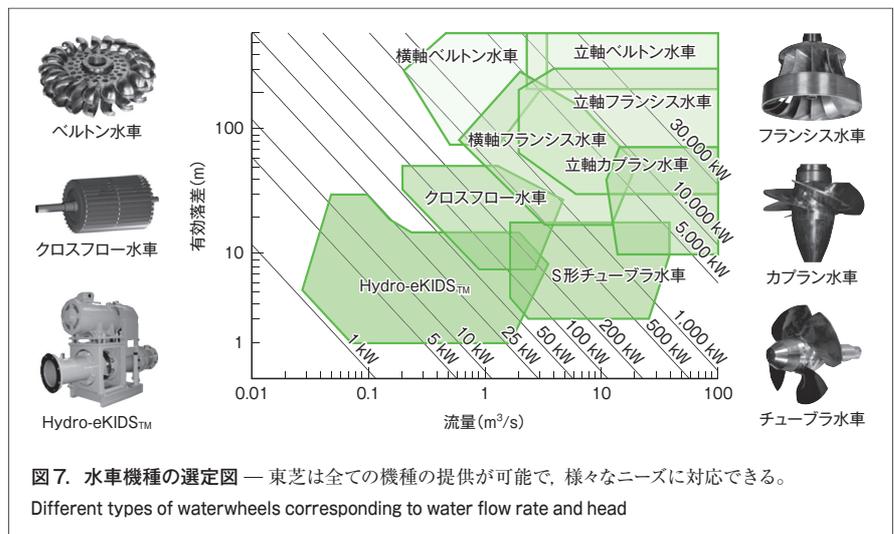


図7. 水車種類の選定図 — 東芝は全ての種類の提供が可能で、様々なニーズに対応できる。

Different types of waterwheels corresponding to water flow rate and head

- (1) 高効率
 - (2) 始動、停止が早い
 - (3) 急速な負荷変動に追従可能
 - (4) 設備が簡単で運転や保守が容易
- 水車は、落差や流量の違いで適用する機種が異なるが（図7）、当社は全ての機種の提供が可能で、様々なニーズに対応できる。

また当社は、水の位置エネルギーではなく、水の流速から発電できる画期的な小水力発電システム Σ Flow™ を開発した。このシステムを適用することにより、農業用水路など落差がほとんどない流路でも、水のエネルギーをむだなく発電に利用できる。

■今後の動向

今後の長期予測でも、2009年から2020年の間には、中国、インド、及び南

米を中心に300 GW近く設備が増加すると言われており⁽¹⁾、新設の開発は引き続き安定して進められていくと考えられている。また、先進国を中心に運転開始から40年以上経過して老朽化した発電所の更新や再開発も増加してくるものと考えられる。

一方国内でも、FITの施行や環境問題などの社会情勢から、中小水力の新規プラントの開発や老朽化した発電所の再開発と部分更新が進められると考えられる。

また、再生可能エネルギーの普及に伴い、自然条件による変動を平準化する需給調整機能を増やす必要があり、揚水発電システム、特に入出力調整を高速で行える可変速揚水発電システムの需要が増えてくるものと考えられている。当社は、世界で初めての可変速揚水発

電システムを1990年12月に実用化させて以降、6プラントの実績を持っている。

その他の再生エネルギー活用発電

■ バイオマス発電

バイオマス発電は、植物などの生物体を燃料とするボイラで蒸気を発生させ、タービン発電機で発電するシステムである。地熱発電の次に設備利用率が高い発電方式であるが、燃料調達の難易が事業性を左右する。

国内では、間伐材などを原料とした木材チップを燃料とした発電方式が主流であるが、化石燃料に比べ単位質量当たりの発熱量が低く、大規模化すると燃料輸送コストが大きな負担になる。このため、比較的小規模な発電システムが計画されている。

■ 太陽熱発電

太陽光から大きな鏡状の設備で油などの熱媒体に集熱し、熱交換器で蒸気を発生させてタービン発電機で発電する太陽熱も注目されている再生可能エネルギーの一つである。

しかし、このシステム単独では、適性地域が限られることや夜間の運転ができないことにより、発電単価の低減が難しく、当社は経済性に不利と判断している。

ただし、**図8**に示すように火力発電の給水系統にこのシステムを付加することで日中の発電量が増加するため、日照

条件の優れた地域では魅力的なシステムであると考えている。当社は現在、火力発電所の熱効率向上に向けた太陽熱付加システムの経済性評価のため、(株)神戸製鋼所及び慶應義塾大学と共同で、環境省の「風車・太陽熱・バイオマスボイラを組み合わせたバイナリー発電に関する技術開発」で、淡路島に実証試験設備を建設中である。今後この実証データを基に、太陽熱システムの最適化を図り、市場の拡大を目指している。

■ 海流発電

海洋エネルギー利用は、潮流や波力、海洋温度差など、いくつかの発電方式が提案されている。安定したエネルギー源の一つとして期待されており、それぞれ開発が進められている。

当社も、年間を通じてわが国の沿岸付近を流れる黒潮など、巨大な海流のエネルギーを利用する海流発電について独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の支援のもとに開発を進めている。発電装置を海底から係留して海中に浮遊させる発電システム開発を担当し、実証試験を計画している (**図9**)。

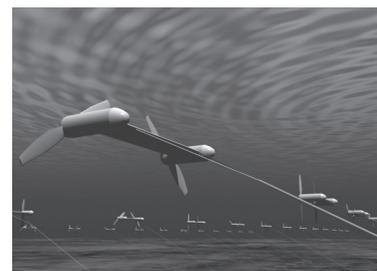


図9. 水中浮遊式海流発電システム — 発電装置を海底から係留して海中に浮遊させ、海流のエネルギーを利用して発電するシステムである。

Floating type current turbine system

る発展につながるよう、鋭意研究開発を進めていく。

また、再生可能エネルギーの利用だけでなく、火力発電所の高効率化や排出されるCO₂を分離回収するシステムについても提案活動を行い、実証プラントの実現に向けた取組みも継続している。

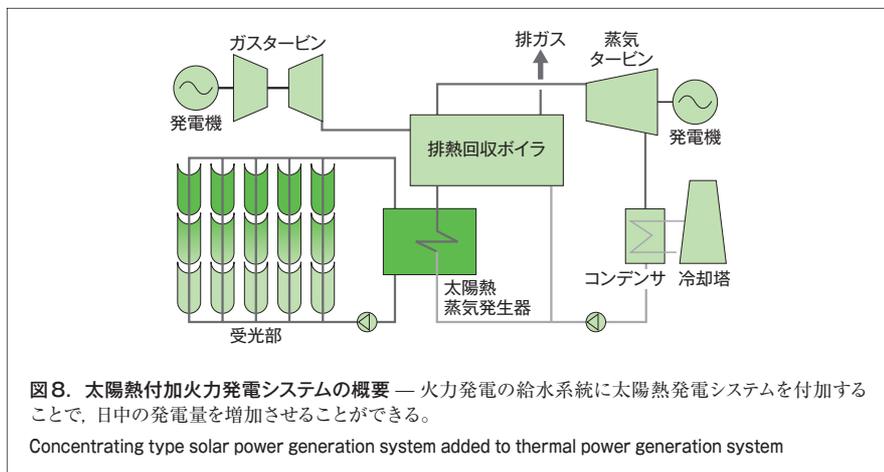
子どもたちが安心して暮らせる社会と地球環境を構築するため、今まで培った技術を高度化し発展させて、経済性に優れ、安全で安心して実用に供することができる発電システムを提供し、社会貢献の一翼を担う事業を発展させていく。

文 献

- (1) International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2012. Paris, IEA, 2012, 668p.
- (2) 谷口晶洋 他. 地熱発電システム. 日本機械学会誌. 112, 1085, 2009, p.274-277.
- (3) 日本エネルギー経済研究所. 地熱発電開発におけるコンサルティング企業の動向に関する調査. 2011.
- (4) McCoy, R. et al. "Hydro Turbines & Generators". McCoy Power Reports. 2013, 17p.
- (5) 資源エネルギー庁. "平成19年度 水力開発の促進対策". 資源エネルギー庁ホームページ. <<http://www.enecho.meti.go.jp/hydraulic/data/dl/080418.pdf>>, (参照2013-05-19).

低炭素社会の実現に向けて

わが国は様々な純国産の再生可能エネルギーを持っている。当社は、これを有効に電力に変換するシステムが、更な



柴垣 徹
SHIBAGAKI Toru

電力システム社 火力・水力事業部参事。
再生可能エネルギーに関する事業を統括。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.