

# 環境負荷を低減する新エネルギー発電システム

Advanced Energy Supply Systems for Low Environmental Emissions

村上 俊明

MURAKAMI Toshiaki

加藤 政一

KATO Masakazu

木崎 康巳

KIZAKI Yasumi

京都議定書の批准に伴い、発電分野においてもいっそうの環境負荷低減が必要となっている。東芝では、従来型発電プラントの更なる効率向上はもちろんのこと、環境負荷を低減する新しい発電システムの開発に取り組んでいる。再生可能エネルギー利用の一環として、マイクロ水力発電システムやマイクロ風力発電システム、及び風力発電導入を促進する系統連系装置を製品化した。また、燃料を水素リッチに改質して環境負荷を低減する、化学再生発電システムを開発している。

Ratification of the Kyoto Protocol will require further significant reductions in greenhouse gas emissions in the power generation field. Toshiba is developing advanced power supply systems with low environmental emissions, as well as improving the efficiency of conventional power systems. As part of the movement toward use of renewable energy, micro-hydroelectric generation equipment, micro wind power generation equipment, and grid-interconnected equipment that promotes the introduction of wind power systems are now on the market. Moreover, chemically recuperated power generation systems, which reform fuel to hydrogen-rich fuel and reduce environmental emissions, are also being developed.

## 1 まえがき

京都議定書の批准に伴い、エネルギー発電分野において、地球温暖化ガス排出量のいっそうの削減が必要となっている。東芝では、従来型発電プラントの更なる効率向上はもちろんのこと、環境負荷を低減する新しい発電システムとして、水力、風力、太陽光などの再生可能エネルギーを有効利用するシステムや、燃料を改質して燃焼させる新発電システムの開発に取り組んでいる。

水力発電は自然エネルギーを利用したクリーンな発電システムであり、近年、設置が容易な発電規模の小さいマイクロ水車が国内外で注目を浴びている。最近の解析技術の適用により低コスト化と高性能化を実現している。

風力発電は、国内でも多数建設が進められているが、水力発電と同様に、コンパクトで環境に優しいマイクロ風車も注目されている。太陽光発電も含めた再生可能エネルギー発電は、従来型エネルギーの補完や、途上国における非電化地域への電力供給の観点から期待されている。

一方、大容量風力発電所(ウインドファーム)の建設にあたっては、電力品質に影響を与えないようにする系統連系装置が重要となる。当社では回転型や半導体を用いた静止型の連系装置の開発を進めている。

また、再生可能エネルギーの活用による二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)削減以外に、発電燃料を水素リッチに改質することでCO<sub>2</sub>排出量を削減することが可能である。このような発電システム

では改質器や燃焼器の開発が重要であり、それらを組み合わせた発電システムとしての効率向上が必要となる。

ここでは、まず当社で取り組んでいるマイクロ水車とマイクロ風車の開発状況、及びこれらと太陽光発電設備とを組み合わせた地域電力供給システムについて述べる。次に、風力発電の更なる導入を可能とする系統連系装置として、回転型、静止型の二つのタイプについて示し、最後に、燃料改質による化学再生発電システムについて述べる。

## 2 再生可能エネルギー

### 2.1 マイクロ水車(Hydro-e KIDS<sub>TM</sub>)

既存ダムの河川維持放流水の活用、農業・工業用水や工場排水の活用、途上国での地域電化促進などを目的として、広範囲に適用できる、標準ユニットによる低コストで高性能のマイクロ水車を開発した。

マイクロ水車は図1に示すように、横軸プロペラ水車と三相交流誘導発電機(又は、三相交流同期発電機)をベルトで接続した構造であり、発電機出力によりS型、M型、L型(落差2~15m、流量0.1~3m<sup>3</sup>/s、発電出力5~200kW)、及び、より小流量、小容量側への適用を狙ったSS型(落差2~10m、流量0.06~0.2m<sup>3</sup>/s、発電出力1~10kW)の4機種を標準ユニットとしている。

開発にあたっては、図2に示したように流れ解析を駆使して高効率化を達成した。ガイドベーンは、流量調整、及びラ

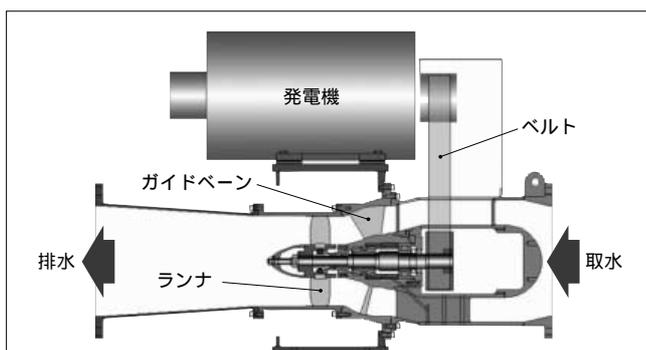


図1. マイクロ水車の構造 - マイクロ水車は、プロペラ水車と発電機をベルトで接続した構造である。  
Schematic view of micro-hydroelectric generation equipment

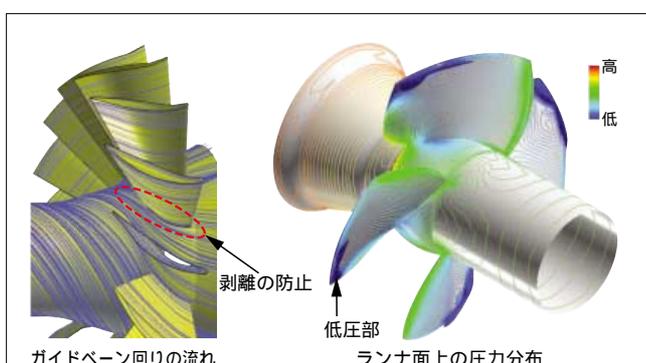


図2. ガイドベーンとランナの流れ解析 - ガイドベーンやランナなどの流れ解析の結果を設計に反映し、高効率のマイクロ水車を開発している。  
Flow simulation of guide vane and runner

ランナに入る流路を構成する部材として設けられるが、ガイドベーン形状をパラメータとした流れ解析により、剥離（はくり）による損失が発生しない形状を選定した。より小流量、小容量のSS型については、一定流量地点への適用が主であるためガイドベーンを省略し、標準パイプを用いた管胴型ケーシングの採用と併せて、構造の簡素化による低コスト化とメンテナンス性を重視した設計とした<sup>(1)</sup>。

また、キャビテーションの発生は運転領域の制約や効率の低下、ランナの浸食などを引き起こすおそれがある。図2のランナ面上の圧力分布の解析結果が示すように、キャビテーションは羽根外周部の低圧部付近で発生することが明らかとなり、模型試験によって発生箇所や大きさを検証した。これらの解析結果をランナの形状設計に反映している。

以上に述べたマイクロ水車は、単独ユニットでの使用だけでなく、流量が適用範囲を超える場合は並列設置、また、落差が単独ユニットの適用範囲(15 m)を超える場合は直列設置、及び並列設置と直列設置の組合せなど、使用環境に応じてフレキシブルな機器配置が可能となっている。

例えば、インドネシアのオレジョ多目的ダムに納入した事

例では、ダムからの放流水を、直列設置で合計200 kWの発電に利用している。今後、国内外での活用が期待される。

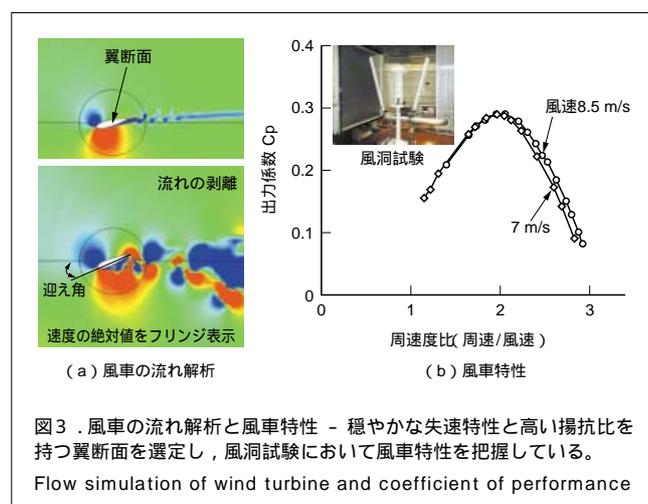
## 2.2 マイクロ風車

プロペラ型に比較して、低速回転・低騒音など環境適応性が良く、頻繁な風向変化がある日本の風況に適した垂直軸直線翼型マイクロ風車を開発した。

ブレードは繊維強化プラスチック(FRP)製の3枚翼とし、起動風速は2 m/s、定格出力は400 W(定格風速12 m/s、回転数400 rpm)、最大出力は600 Wである。

強風域において風車を停止するカットアウト風速は13.7 m/sで、電気ブレーキ、回転検出電磁弁作動の機械式ブレーキ、及び遠心トリガによる完全機械式ブレーキの三重のブレーキシステムとし、60 m/sまでの耐風速試験により、翼を含む全体システムの安全性を検証している。

風車は風向が絶えず変化し、また、風に対向して回転していることから、翼の迎え角の変動範囲が大きいことが他の流体機械と大きく異なる点である。図3に示した流れ解析結果は、迎え角の増大とともに流れの剥離が拡大するようすを示しており、これらの結果を参考として、穏やかな失速特性と高い揚抗比(揚力と抗力の比)を持つ翼断面を選定した。



横軸を周速度比(風車周速の風速に対する比)、縦軸を風車の出力係数(風車を取り出したエネルギーの風を持つエネルギーに対する比)で評価した特性試験結果において、風車と発電機を合わせた総合出力係数のピーク値(0.27 ~ 0.29)を保持するように、風車の回転数を制御している。

以上に述べたマイクロ風車システムは、支柱に太陽電池パネルを設置したハイブリッド発電システムを標準ユニットとし、これらのカスケード化や段積み化などによる容量アップを進めている。

## 2.3 小規模電力システムへの適用<sup>(2)</sup>

NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の“太陽

光発電システム等国際共同実証事業”において、前述の小水力発電設備(25 kW × 2台)と太陽光発電設備(67.5 kW : 30 kWの集中設備と、7.5 kWを5地点に分散配置)を用いた小規模電力系統の実証試験が、2002年から2005年にかけてカンボジアにおいて行われている。太陽光+小水力発電という再生可能エネルギーを組み合わせることで、無電化地域への電力供給や再生可能エネルギーの導入・普及の促進を図るものとして期待される。

### 3 風力発電導入を促進する系統連系装置

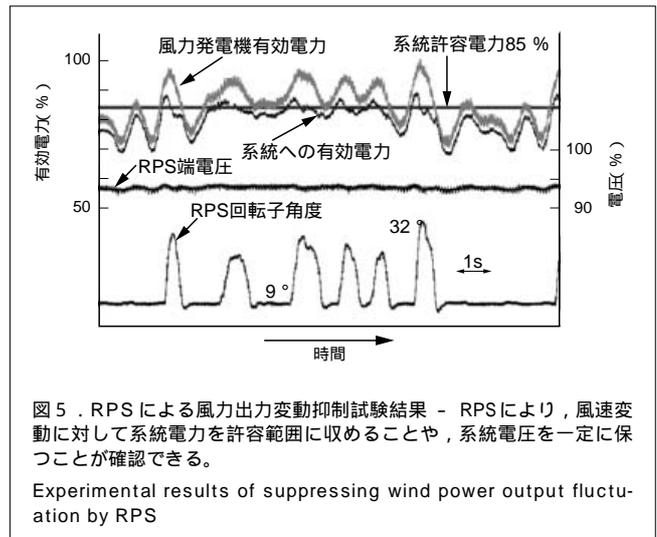
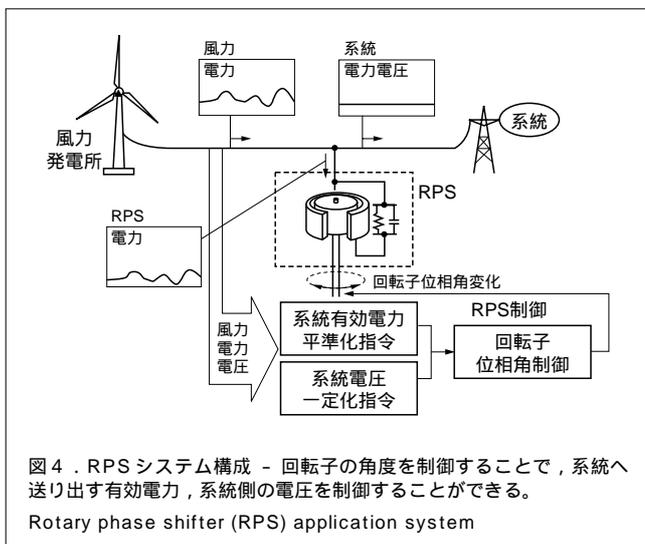
再生可能エネルギーを利用する発電のなかで、風力発電はコスト的にももっとも現実的な選択肢であり、国内では各所で、大規模プラントから小規模プラントまで建設されている。

しかしながら、風力発電に適した地点は送電系統の末端で短絡容量の小さいエリアにある場合が多く、発電出力変動や、誘導発電機風力プラントの並入・解列により瞬時電圧低下を含む電圧変動など、電力品質に影響を与えるケースがある。現在の連系要件ではこのような電力品質への影響を厳しく規制しているため、電力品質を維持することで多くの風力発電を連系することができる装置を開発した。

#### 3.1 回転型位相調整器(RPS : Rotary Phase Shifter)

RPSは、構造上は一種の誘導機であり、系統条件に応じて回転子の位置を制御することで必要な電力制御を行うものである。図4は、風力発電の出力変動抑制に用いた場合のシステムである。

実際の風力発電を模擬した装置を用いて試験した結果、図5に示すように、RPS回転子角度の変化により、風力発電出力変動を系統許容電力値以内に抑制できることが確認された。風力発電側では最大限の有効電力を出力し、RPSで系統許容電力値を超える風力出力を吸収させることで、風



力発電量を増加させることが可能である。

RPSは後述の静止型連系装置とは異なり、メカニカルな制御を行うため、数百ミリ秒以下の高速な変動には追従できないが、秒オーダーで変動する実際の風力の出力変動抑制には十分である。しかも、構造上は誘導機であるため、高調波発生がないこと、過負荷耐量が大いこと、更に静止型と比較して安価であるという特長がある。

ここで述べたRPSは、NEDO及び経済産業省の産業技術実用化開発費補助事業により開発したものであり、現在、プロト機を用いた実証試験を準備している。

#### 3.2 静止型連系装置<sup>(3)</sup>

数百kVA以上の大容量風力発電機では、風速変動による出力変動の抑制や並入・解列時の影響を避けるために、周波数変換装置(静止型連系装置)による連系方式が注目されている。風速変動により変化する同期機の交流出力をいったん直流に変換し、再び商用周波の交流に変換する装置である。

この装置では、風車の回転数変化による発電周波数変化を系統周波数に変換する機能を持たせることで、風のエネルギーを有効に利用できる。静止型連系装置の場合、広範囲の回転数に対応できるので、発電機のギャレス化、力率制御による高効率発電化、有効・無効電力独立制御による発電電力の品質改善などが可能である。

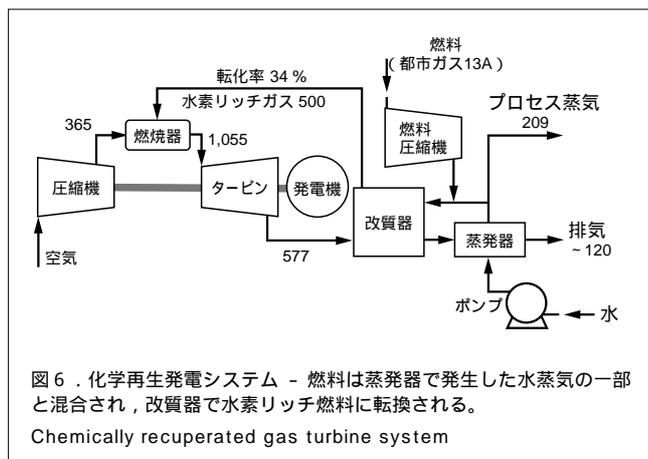
### 4 化学再生発電システム

エネルギーの有効利用やCO<sub>2</sub>排出量削減に関心が高まるなかで、分散型発電システムは、今後一段の普及が期待されている。従来、中小規模の分散電源では、ディーゼルエンジンやガスエンジンシステムを用いたコージェネレーションシステムが利用されてきたが、燃料電池や中小型ガスタービンを用いた高効率なシステムも開発されている。

当社は、水蒸気と混合した燃料を水素リッチガスに転換させる改質反応により排熱を回収する、化学再生発電システムの開発に取り組んでいる。

#### 4.1 システム構成

図6に示した都市ガスを燃料とする4 MWクラスのガスタービンシステム構成において、燃料は蒸発器で発生した水蒸気の一部と混合され、内部に触媒を充てんした改質器を通して燃焼器へ送られる。一般にガスタービンの排熱温度は500～600で、メタンの完全な改質反応温度(800以上)より低い、それでも部分的な改質反応が進行し、図示した例では34%の転化率となっている<sup>(4)</sup>。



このシステムの特長を電気出力を最大活用するモードと比較すると、6.5 MWで42%の発電効率となり、4 MWのシンプルサイクルや6 MWの蒸気噴射サイクルがそれぞれ30%及び36%となるのに対して、高い値が得られている。

また、熱出力を最大活用するモードにおいても、総合熱効率は70%を超えており、化学再生サイクルは広い熱電比(熱出力と電気出力の比)で高効率運転が可能である。

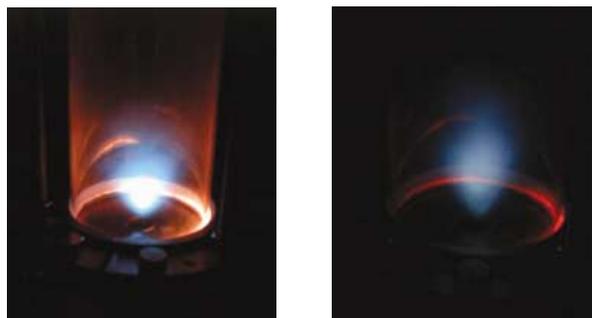
以上に述べたように、高効率でCO<sub>2</sub>の排出削減が可能となり、また、燃料の燃焼特性からNO<sub>x</sub>の排出量も少なく、環境に対する負荷が小さい発電システムといえることができる。

#### 4.2 要素技術

改質器はシンプルな多管式の熱交換器とし、改質管径と管群配置形状は圧力損失と伝熱性能を考慮しつつ、システム全体の性能に与える影響を考慮して最適化を行った。

一方、燃焼器においては、水素リッチガスにおいても安定した燃焼を継続することを検証した(図7)。水素は無色の火炎となるために、都市ガスと比較して火炎の色が薄いことが特徴である。

以上、化学再生発電システムについて述べたが、このシステムの実用化が期待される。



(a) 都市ガス

(b) 水素リッチガス

図7 . 都市ガスと水素リッチガスの燃焼 - 水素リッチガスにおいても安定な燃焼を継続している。

Combustion of natural gas and hydrogen-rich gas

## 5 あとがき

環境負荷低減を可能とする新エネルギー発電システムとして、水力、風力、太陽光などの再生可能エネルギー利用システムや、風力発電の導入を促進する系統連系装置、燃料を改質して燃焼させる化学再生発電システムについて述べた。電気事業者による新エネルギーなどの導入に関する特別措置法の制定や電力自由化などの最近の動きとあいまって、ここに述べた新発電システムの活用が広がることを期待している。

## 文 献

- (1) 篠原 朗,ほか .水の有効利用 - マイクロ水力発電装置 .東芝レビュー .58 ,7 , 2003 ,p.54 - 57 .
- (2) Focus NEDO .2 ,7 ,2003 ,p.5 - 6.
- (3) 茂瀬忠男,ほか .資源の有効活用を支援するパワーエレクトロニクス .東芝レビュー .57 ,8 ,2002 ,p.8 - 11.
- (4) 中垣隆雄 .化学再生ガスタービンコージェネレーションシステム .設計工学 .37 ,12 ,2002 ,p.620 - 625.



村上 俊明 MURAKAMI Toshiaki, D.Eng.

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 技監,工博。エネルギー機器全般の構造健全性評価に従事。日本機械学会,日本原子力学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



加藤 政一 KATO Masakazu, D.Eng.

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター エネルギーソリューション開発部部长,工博。各種エネルギーソリューションの開発に従事。IEEE フェロー,IEE,CIGRE,電気学会会員。英国技術士。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



木崎 康巳 KIZAKI Yasumi

東芝エンジニアリング(株)エコシステム事業推進部主査。新エネルギー応用機器の開発に従事。ターボ機械協会会員。Toshiba Engineering Corp.