

# 小水力発電システムの最新技術

## State-of-the-Art Technologies for Micro-Hydroelectric Power Generation Systems

中原 裕輔

■ NAKAHARA Yusuke

久保 幸一

■ KUBO Koichi

相馬 宏昭

■ SOMA Hiroaki

2012年7月から施行された「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」により、売電を目的とした小水力・超小型水力発電のニーズが今後拡大していくと予想される。

このようなニーズに対応するため、東芝は開放水路向け超小型水力発電システム  $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup> を開発した。 $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup> は、従来の管路設置型水車とは異なり、開放水路に水車・発電機ユニットを沈め、流れのエネルギーを発電エネルギーに変換するシステムで、フローガイドによる水車出力の増幅、簡易な設置方法、永久磁石発電機の適用、及び売電を可能にする低圧系統連系機能を持ちかつ外部電源不要の制御システム、といった特長がある。

また、落差を利用して発電する単機出力200 kW以下の小水力発電所向け Hydro-eKIDS<sup>TM</sup> は、既に開発して多くの納入実績を持つが、低圧系統連系が可能になることで、売電を含めたより幅広い用途での利用が期待される。

The number of micro-hydroelectric power generation systems is expected to increase for the purpose of selling electric power following the enforcement of the Act on Special Measures Concerning Procurement of Renewable Electric Energy by Operators of Electric Utilities in July 2012.

To meet this market requirement, Toshiba has developed the "Pico Hydraulic Power System" for open waterways. Unlike a conventional hydroelectric turbine installed in a water pipeline, in this system the hydroelectric turbine generator unit is installed in an open waterway such as a canal, where it converts the energy of the water flow into electrical energy. The system incorporates the following technological advancements: (1) a booster mechanism to increase output energy through the flow guide structure, (2) simple site assembly of the turbine generator, (3) a dedicated permanent magnet generator (PMG) for the control unit, and (4) a control system consisting of the PMG control unit and a power conditioning system (PCS) that can be connected to a low-voltage grid without the need for an initial starting power supply. We have also developed the Hydro-eKIDS<sup>TM</sup> series of axial-flow hydroelectric turbine generator units for micro-hydroelectric power generation stations of up to 200 kW in capacity, and delivered a number of systems since 2001. By using the control system of the Pico Hydraulic Power System, the Hydro-eKIDS<sup>TM</sup> series can be connected to a low-voltage grid for the sale of electric power.

## 1 まえがき

東芝は、需要が高まっている小水力発電へのニーズに応えるため、水車と発電機一体型の発電ユニットである Hydro-eKIDS<sup>TM</sup> を2001年に開発し、これまでに32地点、48台を納入してきた。Hydro-eKIDS<sup>TM</sup> は、2～16 m程度の低い落差でも発電でき、自家消費だけでなく、電力系統への供給電力としても活用されている。

一方、国内では2012年7月から「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」(以下、再生可能エネルギー特措法と略記)が施行された。この中で、特に200 kW未満の小容量の水力発電システムには、1 kWh当たり34円という比較的高い売電単価が設定されたことから、売電を目的とした小容量水力発電所を設置する機運が高まっている。

当社はこのようなニーズに対応するため、Hydro-eKIDS<sup>TM</sup> に加えて、開放水路に設置可能な超小型水車発電機システムである  $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup> を新たに開発した。

ここでは、 $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup> の開発経緯及びそれを構成する各部の技術的特長と、Hydro-eKIDS<sup>TM</sup> の特長及び市場動向について述べる。

## 2 $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup>

当社は、水路に沈めるだけで発電が可能なシステムとして、超小型水車を開発した。開発当初は、非常用電源システムとして、安価な水車発電機を製作することを主眼に開発を進めていた。しかし、2012年7月から再生可能エネルギー特措法が施行され、1 kWh当たり34円の売電収入を得ることが可能になったことから、次に示す開発指針の下に、発電システムの開発に取り組んできた。

- (1) 流速を電力に変換する発電システム(流速3 m/sで発電出力2 kW)
- (2) 大規模な土木工事が不要な設置方法
- (3) ギヤ増速機なしでメンテナンスが容易
- (4) 低圧系統連系が可能なシステム

以下に、このシステムを構成する水車部、発電機部、及び電気・制御システムの詳細について述べる。

## 2.1 $\Sigma Flow_{TM}$ 水車部

一般的な水力発電は、落差を利用して位置エネルギーを水車翼でトルクに変換して発電する。一方、 $\Sigma Flow_{TM}$ のような開放水路に設置する水車は、流れる水の運動エネルギーを水車翼でトルクに変換して発電する。 $\Sigma Flow_{TM}$ の概念を図1に、その外観を図2に示す。

ここで、水車出力 $P$  (W) は式(1)で表される。

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times V^3 \times \eta / 100 \quad (1)$$

$\rho$  : 水の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  : 水車羽根車の翼掃過面積 (m<sup>2</sup>)

$V$  : 流速 (m/s)

$\eta$  : 水車効率 (%)

開放水路設置型水車の特徴は、式(1)に示すように、 $P$ が $V$ の3乗に比例することである。すなわち、水車羽根車を通る水の流速が大きいほど、出力は増大する。

当社はこの特性に着目して、水車羽根車近傍の流速を増大

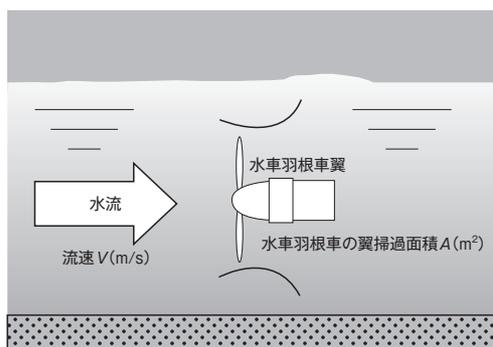


図1.  $\Sigma Flow_{TM}$  発電の概念 — 開放水路中に設置された水車の羽根車翼部を通る水の速度が、発電エネルギーに変換される。

Concept of Pico Hydraulic Power System



図2.  $\Sigma Flow_{TM}$  — 羽根車、羽根車周囲のフローガイド、及び発電機を一体構造とし、支柱で上方から支持する構造である。

Pico Hydraulic Power System

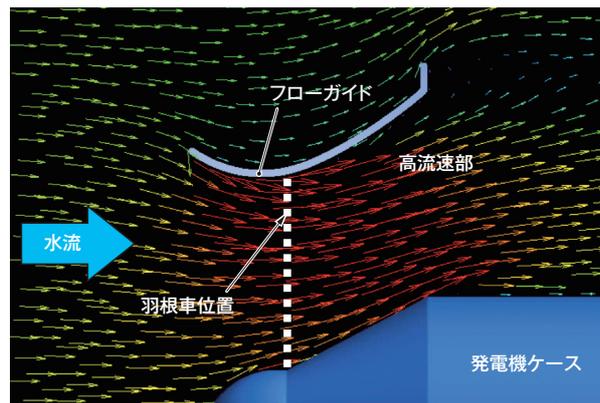


図3. フローガイドの効果 — フローガイドの入口径を羽根車径よりも大きくし、更に出口径を拡大するとともに出口外縁につばを設けた構造にすることにより、羽根車を通過する流速をフローガイド入口よりも増大できる。

Effect of flow guide

させるブースタ機構とフローガイドを開発した。

フローガイドは、水車入口径を羽根車径よりも大きくして、羽根車に水が流入しやすくするとともに、出口径を拡大し、かつ出口外縁にフローガイド外周部の流れを妨げるようなつば部を設けていることが特長である。フローガイド周りの流れのようすを解析した結果を、図3に示す。

図3中の赤色部分ほど流速が大きく、青色部分ほど流速が小さい。フローガイドの効果により、水車羽根車近傍の流速が効果的に増大していることがわかる。

また従来の軸流水車タイプの羽根形状の場合、開放水路中では障害物となり、水が羽根車の周りを避けて通るため、流速を効果的に回転に変換できるように高速回転型の翼形状を採用している。

これらの工夫を反映した $\Sigma Flow_{TM}$ 水車の基本仕様を、表1に示す。

## 2.2 $\Sigma Flow_{TM}$ 発電機部

$\Sigma Flow_{TM}$ は、開放水路内の流速を利用するため水車の周辺流量が一定ではなく、また案内羽根もないことから、回転速度が変化する。このため、 $\Sigma Flow_{TM}$ の出力周波数は一定にならないので、直流変換装置と逆変換装置により周波数変換

表1.  $\Sigma Flow_{TM}$ 水車の主要仕様

Main specifications of Pico Hydraulic Power System

項目	仕様
定格出力	3 kW
定格流速	3 m/s
定格出力時の回転速度	約 1,000 min <sup>-1</sup>
フローガイド外径	760 mm
羽根車(ランナ)外径	500 mm
本体重量(発電機を含む)	約 100 kg

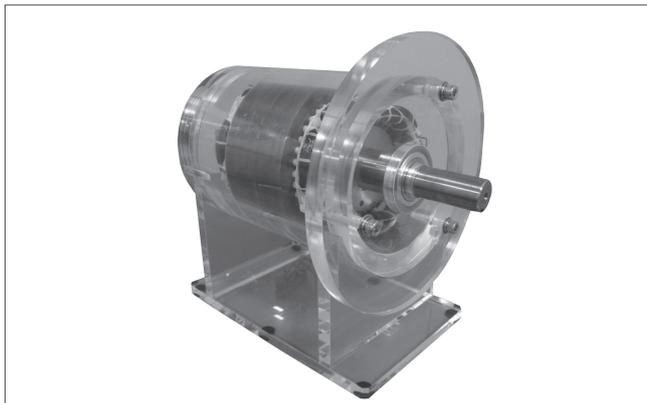


図4.  $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup>専用PMG — 発電機はギヤを介さず、水車と直接接続される。  
Skeleton model of dedicated PMG for Pico Hydraulic Power System

表2.  $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup>専用発電機の仕様  
Specifications of dedicated PMG for Pico Hydraulic Power System

項目	仕様
定格出力	3 kW
定格電圧	200 V
定格周波数	90 Hz
冷却方式	直接外皮冷却

し、常にシステムと同じ周波数を出力できるように制御している。これに対応するため、発電機はインバータとコンバータによる制御性がよい永久磁石発電機 (PMG) を採用した。

発電機の構造を図4に、 $\Sigma$ Flow<sup>TM</sup>専用発電機の仕様を表2に示す。

### 2.3 電気・制御システム

$\Sigma$ Flow<sup>TM</sup>の電気・制御システムは、水車回転数を制御して水車出力を直流電力に変換する水車制御ユニットと、直流を商用周波数の交流電力に変換する系統連系パワーコンディショナ (PCS) から成り、単相三線200 Vの系統連系に加え、単相100 Vの自立運転も可能にした (図5、図6)。

水車制御ユニットは、系統連系時には定格出力を上限として水車出力が最大となるように回転速度を制御し、自立運転時には負荷の消費電力と水車出力が等しくなるように回転速度を制御する。水車制御ユニットの発電可能な回転速度の範囲を500 ~ 2,500 min<sup>-1</sup>とすることで、案内羽根などの機械的な調整機能がなくても、低流速から大流速までの運転を可能にしている。

系統連系PCSには、系統連系ガイドラインの低圧連系 (逆潮流あり) で必要とされる保護機能が含まれており、発電電力を売電することも可能である。

始動時の水車制御ユニット、系統連系PCSの直流コンデンサへの充電、及び制御装置への電源供給は、全てPMGの電

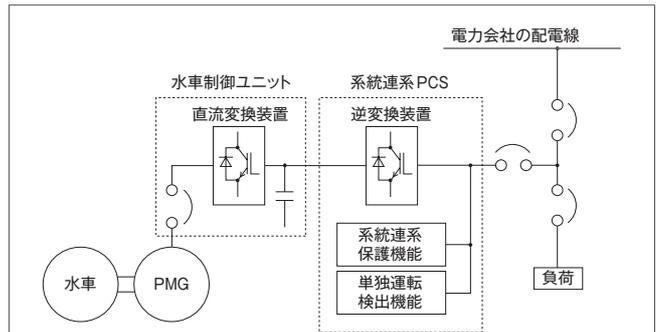


図5. 電気・制御システム単線結線図 — 水車制御ユニットでPMG出力を直流電力に変換した後、系統連系PCSで商用周波数の交流電力に変換する。

Single-line diagram of PMG control unit and PCS



図6. 電気・制御システム屋内収納盤 — 屋内収納盤 (800 (幅) × 500 (奥行き) × 1,600 (高さ) mm) には、上から住宅用分電盤、系統連系PCS、及び水車制御ユニットが収められている。

PMG control unit and PCS

力で賄われ、外部電源は不要である。

発電可能な流速になると自動的に発電を開始し、流速が低下して発電電力が制御などの動力を賄えなくなると、自動的に発電を停止して待機状態になる。

## 3 Hydro-eKIDS<sup>TM</sup>の特長及び市場動向

Hydro-eKIDS<sup>TM</sup>は、落差を利用して発電する水車と発電機一体型の軸流型水車発電ユニットである。

概略の断面構造を図7に示す。管路に直接接続されたケーシングの中に水車羽根車が入っており、水車の軸に発生したトルクをベルトにより発電機に伝達し、電力を発生させる仕組みである。

Hydro-eKIDS<sup>TM</sup>には、以下の特長がある。

- (1) 流量と落差に応じた6種類のラインアップにより、幅広いニーズに対応可能 (図8)

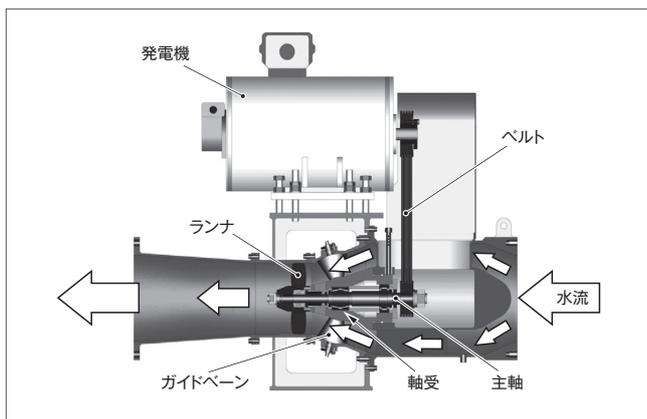


図7. Hydro-eKIDS™概略断面図 — 管内の水流による水車ランナの回転が、ベルトを介して発電機に伝達されて発電する。  
Cross-sectional outline of Hydro-eKIDS™

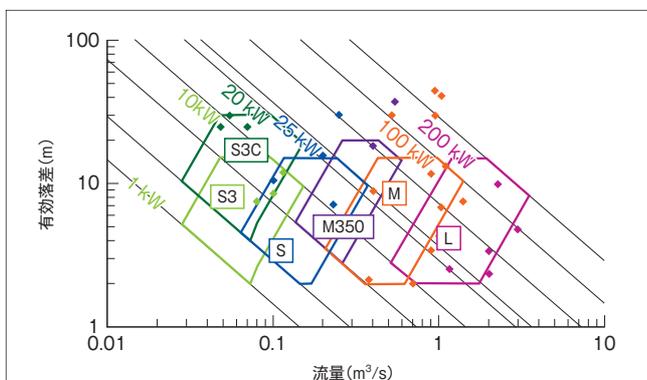


図8. Hydro-eKIDS™の機種ラインアップと納入実績 — 6種類のラインアップで、幅広い仕様に対応可能である。  
Lineup and deliveries of Hydro-eKIDS™

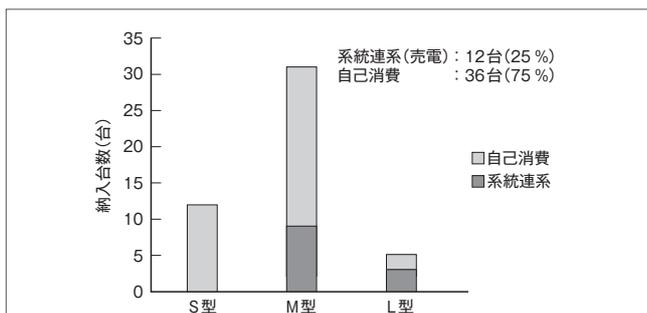


図9. Hydro-eKIDS™の納入実績 — 系統連系（売電）の実績は12台で、全体の納入台数48台の25%である。  
Deliveries of Hydro-eKIDS™

- (2) 流量と落差に応じて、並列あるいは直列に配置して使用可能
- (3) 据付と調整が容易で、コンパクトな水車と発電機一体構造
- (4) 消耗品には市販品を使用し、メンテナンス費用を低減

2001年以降、Hydro-eKIDS™を32地点、48台納入してきた。Hydro-eKIDS™納入実績の内訳を図9に示す。

Hydro-eKIDS™は、系統連系（売電）及び自己消費のいずれの用途でも導入可能であるが、これまでの実績では、系統連系で使用されているのは、全体の25%である。また、L型では60%が系統連系で使用されているが、M型では系統連系の割合は30%、S型は全て自己消費利用である。これは、これまでの売電単価が低く、経済性評価により自己消費を選択するケースが多かったものと考えられる。

しかし、2012年7月の再生可能エネルギー特措法により200kW未満の小水力発電には34円/kWhの高い売電単価が設定されたことから、数kW～50kWの低圧系統連系範囲の小水力発電に対しても系統連系のニーズが高まっている。当社は、Hydro-eKIDS™の幅広いラインアップと低圧連系技術の応用により、このニーズに対応していく。

#### 4 あとがき

当社は、Hydro-eKIDS™のラインアップと、新たに開発したΣFlow™により、小水力・超小型水力発電における水資源利用方法及び低圧系統連系の可能性を広げ、再生可能エネルギー特措法の施行により今後拡大する顧客の幅広いニーズに対応していく。



中原 裕輔 NAKAHARA Yusuke

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部参事。  
水力発電機器のエンジニアリング業務に従事。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.



久保 幸一 KUBO Koichi, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部、博士（工学）。水車性能開発に従事。日本機械学会、ターボ機械協会会員。  
Power and Industrial Systems Research & Development Center



相馬 宏昭 SOMA Hiroaki

電力システム社 府中事業所 発電システム制御部。  
発電システム制御や保護リレー装置の設計に従事。  
Fuchu Complex