

# 大型の水力発電所向けハイブリッドサーボシステム

## Hybrid Servo System for Large Hydropower Station

磯野 与志雄 ISONO, Yoshio

笹川 剛 SASAKAWA, Takeshi

老朽化した水力発電設備の更新工事において、20 MW を超える大容量水車に対し、初めてハイブリッドサーボシステム（HSS）を導入した。富士電機と電源開発株式会社は、共同開発した“HSS による入口弁操作”と“アキュムレータ複合制御”の導入により、システム構成の簡素化、保守の合理化、信頼度向上を図り、従来に比べて HSS 適用範囲の拡大とコストダウンを可能にした。この改良技術は、再生可能エネルギーである水力発電の発展に大きく貢献できるものと認められ、令和元年度新エネルギー財団会長賞を受賞した。

In a replacement project for aging hydropower facilities, Fuji Electric introduced our hybrid servo system (HSS), which is the first for large-capacity turbines exceeding 20 MW. Fuji Electric and Electric Power Development Co. Ltd. jointly developed “inlet valve operation with HSS” and “control system that combines HSS and an accumulator”. Using these technologies simplified the system configurations, streamlined the maintenance and increased the reliability, eventually allowing HSS to expand the application and decrease the costs. These enhanced technologies were recognized as a major contribution to the development of hydropower generation, a renewable energy source and were awarded the New Energy Foundation Chairman’s Award.

### 1 まえがき

国内の水力発電所は、戦後の復興期を支える主要電源として 1950 年代から盛んに建設された。その多くが運転開始から 50～70 年ほどが経過し老朽化が進み、更新時期を迎え、大規模な設備更新が行われている。

電源開発株式会社（J-POWER）の静岡県にある秋葉第一発電所では、運転開始から約 60 年間経過して老朽化した設備の一括更新工事をすることにした。

J-POWER は、富士・フォイトハイドロ株式会社（FVH：水力発電設備の設計、製作、据付、試験に特化した富士電機とフォイトハイドロ社が共同出資して設立した会社）と検討を進めた結果、設備信頼度の向上、安全性・保守性の確保、コストダウンなどさまざまな観点から、水車操作機構に、最新のハイブリッドサーボシステム（HSS：Hybrid Servo System）の導入を決めた。

このシステムは、従来の圧油装置に比べて環境リスクが低く、機器の簡素化・省スペース化が可能で保守性に優れているが、水車に適用できる大容量の電動サーボモータがないという課題があるため、大容量水車への実績がなかった。

本稿では、課題を克服し、2 万 kW 以上の大容量水車への複数ユニットからなる HSS の採用と、J-POWER と FVH が 2 件の特許を取得している HSS の新しい制御方法などについて述べる。

### 2 HSS の導入の経緯、課題

#### 2.1 HSS の導入の経緯

図 1 に従来の油圧式のシステム構成を示す。水力発電所では、水車の上流側に設けた入口弁を使って、運転・停止

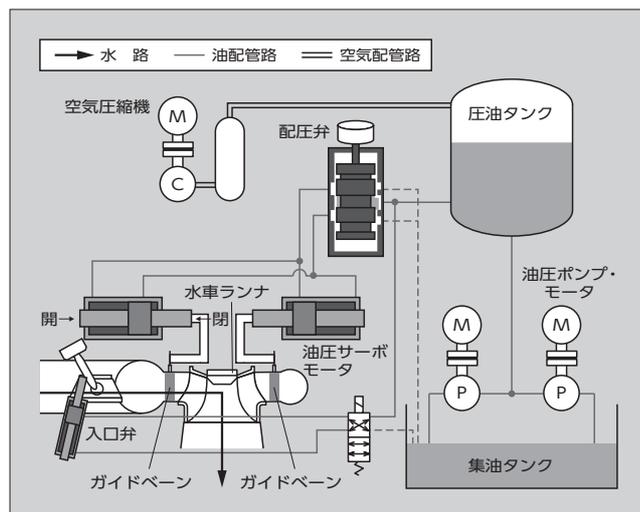


図 1 従来の油圧式のシステム構成

に伴い水路を開閉する。ガイドベーン（案内羽根）を水車ランナの手前に設け、この開度を調整することで水量を増減し、出力を調整している。

入口弁とガイドベーンの操作には、従来、油圧サーボモータを用いる油圧式が主に使用されてきた。しかし、多くの補機を必要とするため保守・点検の負担が大きいこと、数千リットル以上もの操作油を必要とするため漏油した場合の環境へのリスクが大きいことなどが課題であった。一方、油を使わない電動サーボモータを用いる電動式は、周辺機器が大幅に簡素化できるが、操作力が小さく、適用範囲が小容量水車に限られるという課題があった。

そこで、2002 年に FVH は世界で初めて、中・小容量向け水車の操作機構に油圧式と電動式を融合した HSS を開発した。図 2 に、HSS の基本装置構成を示す。入口弁の操作機構を除いて、従来の油圧サーボモータを、圧油タ

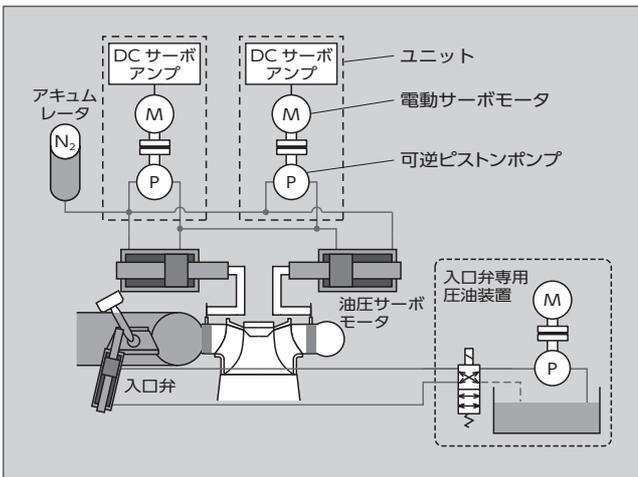


図2 HSSの基本装置構成

ンクなど圧油装置を使わない電動サーボモータに替えたことが特徴である。HSSは、簡素で無駄のない装置構成で、油量や部品点数の削減、省スペース化を実現した。

しかし、大容量水車向けに十分な容量を持ったDC電源の電動サーボモータがないため、大容量水車では従来の油圧式を選定するしかなかった。

2014年に発電所出力45,300kW(22,650kW×2台)の秋葉第一発電所の一括更新プロジェクトが始まった。J-POWERとFVHは、HSSを過去に採用実績がなかった大容量水車への導入に挑んだ。

### 2.2 大容量水車へのHSS導入の課題

秋葉第一発電所のような大容量水車に中・小容量水車向けのHSSの設計思想をそのまま適用すると、11kWより大きな容量のDC電源電動サーボモータがないため、複数のユニット並列の装置構成とする必要があり、部品点数が多くなり、保守の負担増が懸念された。なお、本稿では図2に示すとおり、DCサーボアンプと電動サーボモータ、可逆ピストンポンプの組合せをユニットと称する。

そこで、J-POWERとFVHは、大容量機へHSSを採用するに当たり、ユニット台数を増やさずに、かつ装置構成を単純にしつつ要求仕様を満足できるように、HSSを改良することにした。これを実現する上で、次に示す課題があった。

#### (1) 入口弁の操作機構における課題

HSSを適用する場合、入口弁を開閉させるために入口弁専用の操作機構が別に必要となる。秋葉第一発電所の入口弁はφ3,600mmと大口径で十分な容量のDCモータがなく電動式は採用できないため、当初は油圧式の入口弁専用操作機構を設置することとしていた(図2)。しかし、油を使った補機が増えるという課題があった。

#### (2) 多ユニット構成における課題

大容量水車にHSSを適用するためには、多ユニット構成となることから、部品点数の増加や設備信頼度、保守性、コストなど多くの課題があった。また、多ユニット構成のHSSでは、1ユニットでも故障すれば、水車を停止しな

ければならない重故障に相当するので、故障時の復旧迅速性や設備稼働率も課題となっていた。

## 3 HSSの改良

### 3.1 HSSによる入口弁操作

出力調整に伴い、HSSは操作油圧を常に変動や反転しながらガイドベーンを操作している。一方、運転中は入口弁の全開状態を保持するため、一定油圧を印加し続ける必要がある。従来のHSSでは、入口弁とガイドベーンの操作機構は別々に設けていた。しかし、ガイドベーン操作用のHSSでガイドベーンと入口弁の両方を操作できれば、入口弁専用の操作機構を省略し、コストダウンが可能になる。

さまざまな検討を行い、水車の起動停止時には、基本的に入口弁とガイドベーンの同時操作が不要な点に着目し、HSS故障時のバックアップとしてガイドベーン急閉鎖用に設けたアキュムレータ(蓄圧器)を活用することにした。図3に改良後HSSの装置構成を示す。従来の入口弁専用

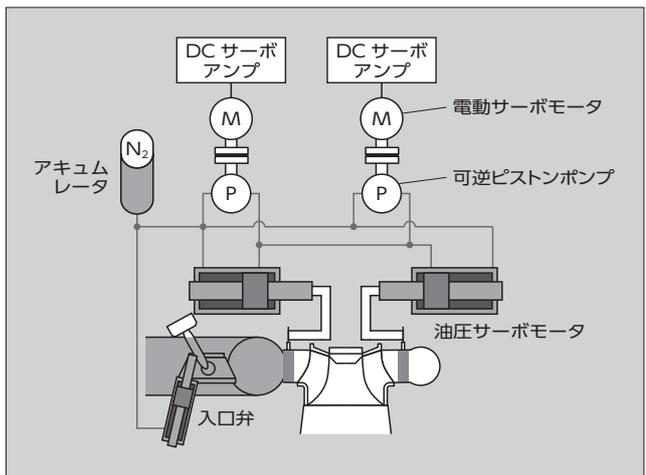


図3 改良後HSSの装置構成

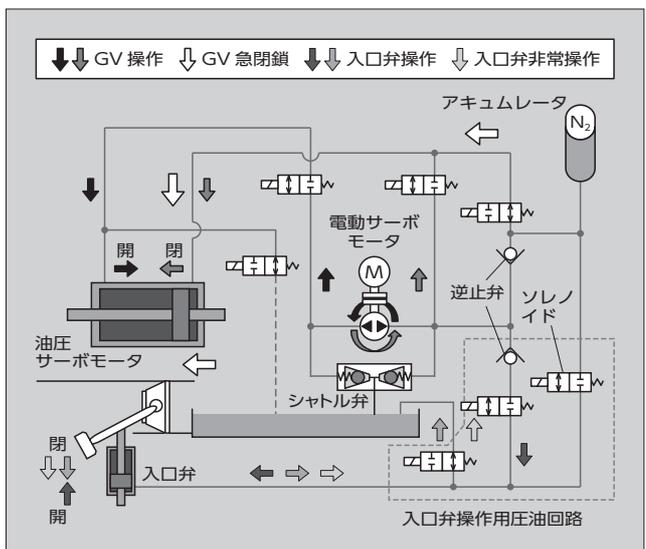


図4 改良後HSSの入口弁操作システム

圧油装置に替わり、アキュムレータを入口弁操作に用いた。また、図4に改良後HSSの入口弁操作システムを示す。油圧回路に三つのソレノイドと一つの逆止弁を追加したことにより、HSSで入口弁の操作が可能となった。

これにより、制御装置、保護装置を含む入口弁専用の油圧装置を省略した非常にシンプルな装置構成が実現した<sup>(2)</sup>。

### 3.2 アキュムレータ複合制御

次に、HSSの制御について説明する。図5に従来の負荷遮断概念図、図6にアキュムレータ複合制御の負荷遮断概念図を示す。図5と図6では、入口弁操作用圧油回路は省略した。また、負荷遮断とは、送電線の事故などにより、運転中の発電機の負荷が遮断され、水車の回転数が急上昇する状態を極力軽減するべくガイドベーンを急閉鎖する一連の動作のことである。

従来のHSSの負荷遮断の場合、図5に示すように、各ユニットの電動サーボモータ、可逆ピストンポンプが連動して、急閉鎖と调速制御を行う。水車の容量が大きくなると、ユニット数を増やす必要があった。また、多ユニット構成のHSSにおいて1ユニットでも故障すれば、要求性能（負荷遮断時のガイドベーン急閉鎖と调速制御）を満足できなくなるため、水車を停止しなければならない。少しでも発電所の稼働率を上げるため2ユニット構成のHSSにおいて、1ユニットでも運転継続が可能な方法を検討した。

図5に示すシステムには、HSSのバックアップとしてアキュムレータが設けられている。事前に蓄圧した油を使うことで、HSSが故障しても高速でガイドベーンを急閉鎖し水車を安全に停止することができる。ただし、一方向の単純操作なので、負荷遮断時の调速制御（定格回転速度からの偏差によりガイドベーンの開度を調整すること）はできない。一方、今回開発した図6に示すアキュムレータ複合制御仕様のHSS<sup>(3)</sup>では、ユニット1台でも、あらゆる状況に対応できるように、それぞれの長所をうまく組み合わせる方法とした。負荷遮断直後の回転速度の偏差が大きい時はアキュムレータで急閉鎖し、ガイドベーン開度ある

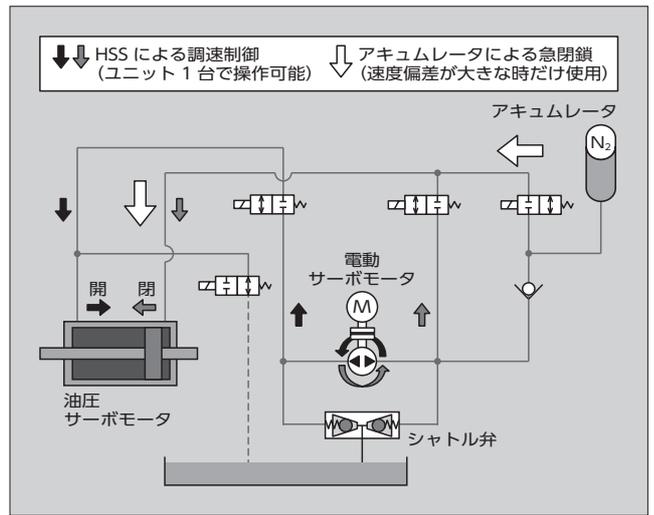


図6 アキュムレータ複合制御の負荷遮断概念図

いは速度偏差が小さくなればユニット1台で调速制御に切り替える。

図7にユニット2台（従来仕様）と1台（アキュムレータ複合制御）における4/4（最大出力）負荷遮断時のオシロスコープの波形を示す。ユニット2台の場合には、発電機回転速度の上昇率 $\Delta N$ が49%であるのに対して、ユニット1台（アキュムレータ複合制御）の場合には $\Delta N$ は51%であった（表1）。

ユニット1台でもアキュムレータと組み合わせることで、ユニット2台と同程度の負荷遮断操作が可能であることを確認した。

ユニット2台運転に比べるとユニット1台のアキュムレータ複合制御では多段折れの閉鎖特性となっている。しかし、回転速度に異常はなく、滑らかに制御が移行できおり、次のことが確認できた。

(a) 不動時間 $\tau$

遮断器が開放してからガイドベーンが動き出すまでの不動時間 $\tau$ は0.15秒で、十分な即応性を確保している。

(b) 等価閉鎖時間 $T_c$

腰折れがなく同じスピードでガイドベーンを全閉する場

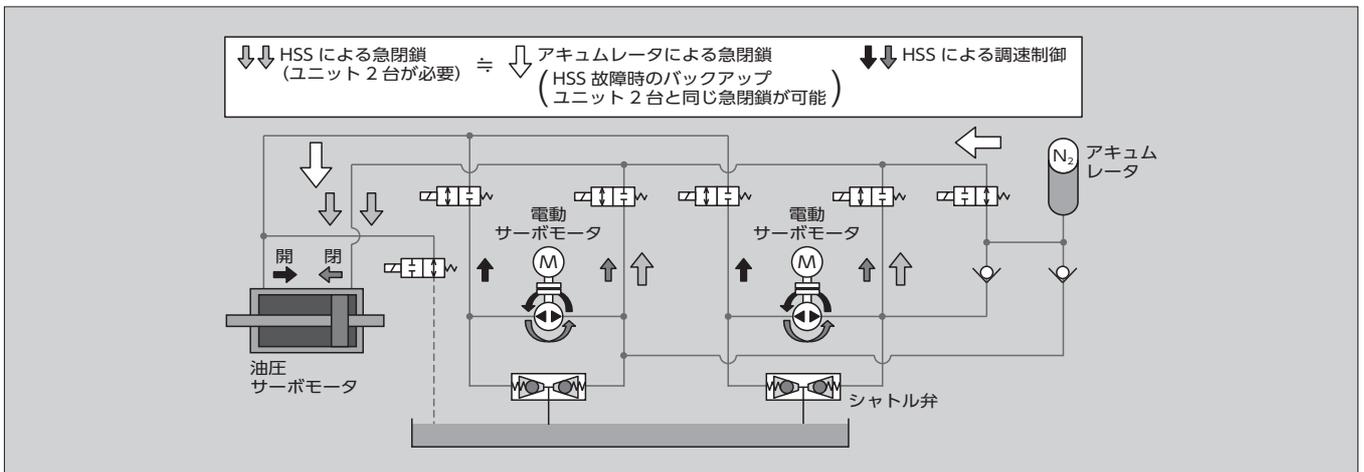


図5 従来の負荷遮断概念図

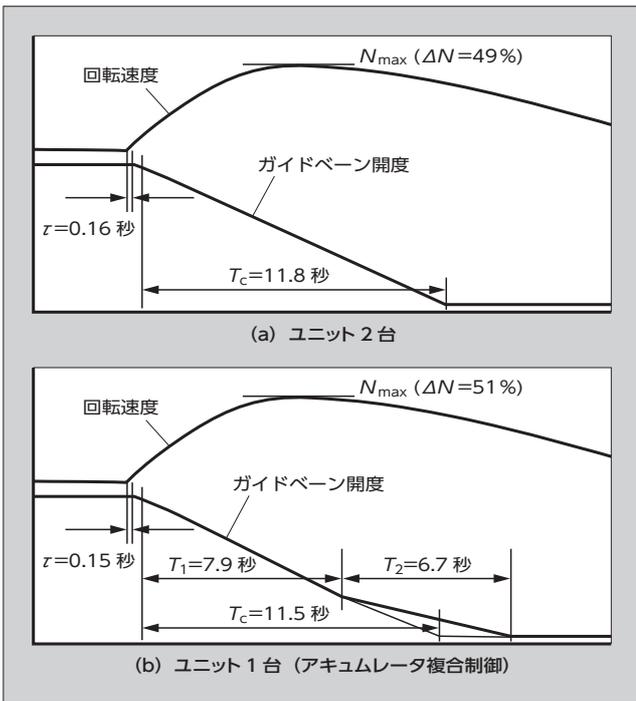


図7 4/4 負荷遮断時のオシロスコープ比較図

表1 負荷遮断試験結果

項目	ユニット台数	
	2台	1台
遮断出力P	23,700 kW	24,100 kW
不動時間τ	0.16秒	0.15秒
回転速度上昇率ΔN	49%	51%
等価閉鎖時間T <sub>c</sub>	11.8秒	11.5秒

合に要する等価閉鎖時間  $T_c$  は 11.5 秒で、十分な負荷遮断性能を確保している。

当初の設計では、2ユニット構成のHSS(図3)が必要だった水車に対して、今回開発した新しい制御方法により要求性能を満たす1ユニット構成のHSSを図8に示す。通常は図3の2ユニット構成で運用しており、1ユニット

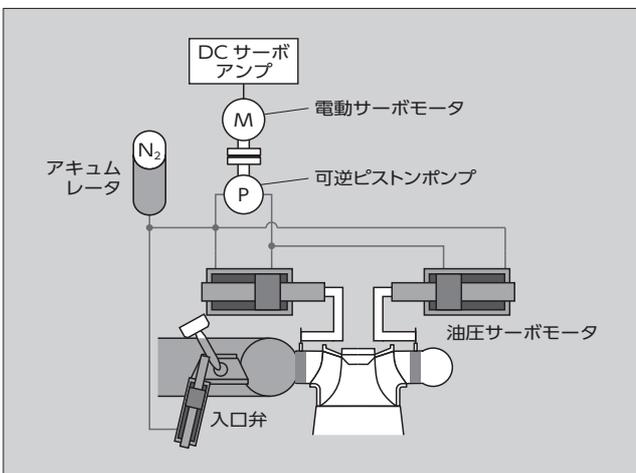


図8 改良後に可能となったシステム構成

故障時に図8のシステム構成に自動で切り替わり、事故停止することなく運転継続が可能となり、設備信頼度の向上を実現した。今後、HSSはユニット2台のシステム構成とともに、コストメリットが高いユニット1台のシステム構成も、顧客のニーズに合わせて提供していく。

#### 4 HSSの優位性と可能性

今回の開発により、入口弁専用の操作機構が不要になり、入口弁操作にHSSを活用することにより電動化範囲を拡大した。

また、ガイドベーン操作において、従来のHSSの考え方では電動サーボモータの容量は、水車の要求仕様(16秒以下での急閉鎖)を基に設計していた。しかし、アキュムレータ複合制御を適用すると、通常の開閉時間(60秒)を基に設計できるので、HSSの電動サーボモータの設備容量が約1/2となり、コストダウンが可能となった。また、このアキュムレータの複合制御により、従来のHSS単独の時よりも2倍以上の設備の稼働が可能となるため、HSSの適用範囲を大幅に大容量化できるようになった。

HSSの新しい機構と制御方法を開発したことにより、既設機や従来技術に比べ、次の優位点がある。

##### (1) 油流出リスクによる環境影響の低減

操作油量が既設5,700Lから400Lに93%削減した。

##### (2) シンプルなシステム構成による保守簡素化

圧油装置・圧油タンク・コンプレッサ・入口弁専用圧油ユニットなどの補機が不要となり、さらにサーボアンプの自己診断機能や従来の圧油装置が備えていた油ストレーナが不要となり、日常点検業務を大幅に削減できた。

##### (3) コンパクト化による省スペース

操作油の高圧化でサーボモータを大幅にコンパクト化した。さらに、複合制御の採用により必要なユニット台数を減らし、機器設置スペースを50%以下に削減した。

図9に更新前後の実際の機器構成の比較を示す。

##### (4) 安全性・復旧迅速性

自動復帰式電磁弁を用いて油圧シーケンスを工夫し、電源喪失などの異常時であっても、確実にガイドベーンおよび入口弁を閉鎖できるシステムを実現した。HSSを構成する油圧機器は短納期で信頼性の高い汎用品を採用し、設備信頼度や安全性、復旧迅速性を向上させた。

##### (5) コストダウン

HSSユニット2台のところを、1台で運転が可能となり、入口弁専用の圧油装置が不要となった(表2)。

##### (6) 適用範囲の拡大

従来電動化できなかった大口径・大容量の入口弁や大容量水車にHSSの適用が可能となった。

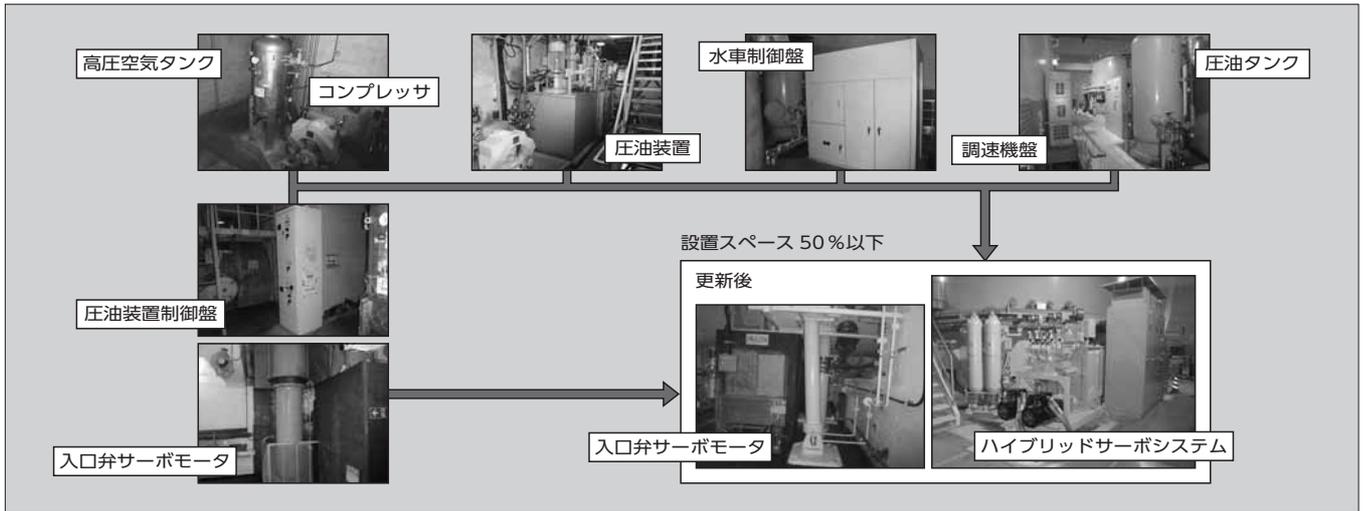


図9 更新前後の機器

表2 コストダウン効果

内容	イニシャルコスト	ランニングコスト
入口弁専用圧油装置の省略	トータルで80%削減 ○コストダウン：圧油装置、圧油装置制御回路 ○コストアップ：ソレノイド、逆止弁	トータルで100%削減 ○入口弁専用圧油装置がなくなり、メンテナンスそのものが不要
ユニット台数削減 (2台→1台)	トータルで35%削減 ○コストダウン：ユニット1台減 ○コストアップ：制御ソフトウェア	トータルで40%削減 ○1台分の定期点検や故障対応が不要 ○アンプユニット交換 (10年ごと×1台) が不要



図10 新エネルギー大賞受賞

5 新エネルギー大賞受賞

現在、FIT や補助金を利用した水力発電設備のスクラップ & ビルド (S&B : Scrape & build) 案件が多くあり、また、オーバホール工事に合わせて、油圧サーボモータを用いたシステムから、操作油が削減できて環境リスクを低減し、コンパクトで保守性に優れ、コストダウン可能なHSSの適用が拡大しつつある。さらに、補修部品の納期が長期化する傾向にある電動サーボモータを採用している発電所において、保守性や故障時の復旧の迅速性を向上させるため、HSSに更新する案件も、今後増えてくることが予想される。

再生可能エネルギーの主力電源化に向けて、太陽光発電や風力発電の導入促進が予想される中、水力発電は系統の安定化には柔軟な出力調整能力を確保できる再生可能エネルギー電源であるため、今後さらにその期待は高まるものとする。

なお、J-POWER と富士電機が開発したハイブリッドサーボシステム技術は、設備信頼度・保守性の向上とコストダウンを同時に実現し、今後の水力導入拡大に貢献できるものとして評価され、令和元年度新エネルギー財団会長賞を受賞した<sup>(4)</sup>。図10に、表彰式の様子を示す。

6 あとがき

大型の水力発電所向けハイブリッドサーボシステムについて述べた。

今回の開発に当たっては、前例のない操作補法・制御への挑戦となるため、電源喪失時でも安全かつ確実に水車を停止させる油圧回路設計、速度偏差をより速く確実に捉える検出方法の在り方、インタロック条件の設定など、設計、製作、試験の各断面においてさまざまな課題に直面したが、各担当者の不断の努力と水力の有効活用につながる新技術を開発したいという強い思いによって完成させることができた。ここに、あらためて全関係者に深く感謝の意を表す。

また、1950年代に国内の水力開発が盛んに行われ、大容量化が進められた水力発電所が今、S&Bの時期を迎えている。秋葉第一発電所の一括更新工事においては、HSSの新技術の開発を始め、いろいろな新技術を積極的に導入して、“次の60年も、人々から求められる安全・安心で安定したエネルギーを提供し続ける、環境に優しく保守性の優れた水力発電所”に生まれ変わらせることができた。

今後とも、環境に優しく保守性の優れた技術を供給できるように、着実に新技術を開発および導入を進めていく所存である。

#### 参考文献

- (1) 笹川剛ほか. “老朽化水力発電設備の近代化更新技術”. ターボ機械. 日本工業出版, 2019, vol.47, no.2, p.71-80.
- (2) 電源開発株式会社. 富士・フォイトハイドロ株式会社. ハイブリッドサーボシステムおよびそれを備えた水車操作機構. 特許第6139041号. 2017-02-20 (出願日).
- (3) 電源開発株式会社. 富士・フォイトハイドロ株式会社. ハイブリッドサーボシステム. 特許6298207号. 2017-09-29 (出願日).
- (4) 一般財団法人新エネルギー財団ホームページ. 令和元年度新エネルギー財団会長賞 “水力発電所ハイブリッドサー

ボシステムの改良・導入”. [https://www.nef.or.jp/award/kako/r01/b\\_05.html](https://www.nef.or.jp/award/kako/r01/b_05.html), (参照2020-07-03).



#### 磯野 与志雄

水力発電のシステム技術、営業・技術に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部発電事業部水力プラント部兼富士・フォイトハイドロ株式会社営業部。



#### 笹川 剛

水力発電所の現場保守・運用業務、水力開発計画・設計・建設業務に従事。現在、電源開発株式会社再生可能エネルギー本部水力発電部プロジェクト推進室。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。