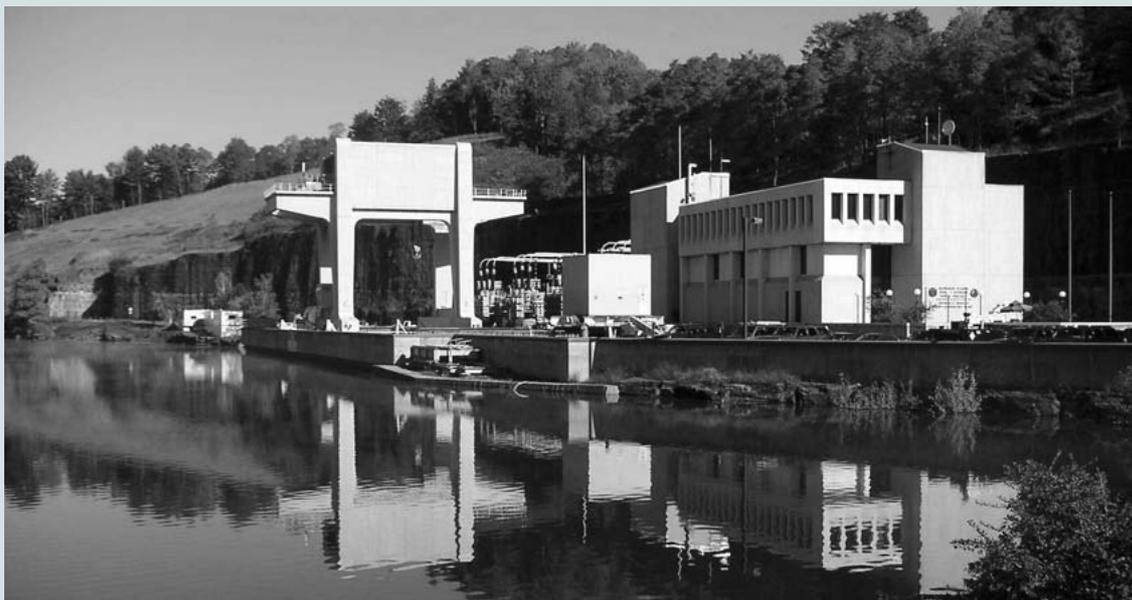


# 米国大型揚水発電所ポンプ水車の特性改善 —ニューヨーク州電力局ブレンハイム・ギルボア発電所300 MWポンプ水車—

Performance Improvement of Pump-turbine for Large-capacity Pumped Storage Power Plant in USA

谷 清人 Kiyohito Tani

奥村 博司 Hiroshi Okumura



(a)



(b)



(c)

図1 ブレンハイム・ギルボア発電所と更新ランナ，再生前後の入口弁

半地下式の揚水発電所(a)は、ハドソン川上流のスコハリー(Schoharie)渓谷のダムを下池としている。広範囲な安定運転を可能としたポンプ水車ランナのつり込み作業を(b)に、再生後の入口弁(手前)と取出し後の入口弁(奥)を(c)にそれぞれ示す。

地球環境への配慮や、エネルギー資源の有効活用の観点から、既存の水力発電所の主要機器を最新技術で更新し、運用効率の向上、出力増大が図られている。特に、米国では1970年代に導入された300 MW級の大容量ポンプ水車・発電電動機の更新工事が進められている。

ポンプ水車の特性改善には最新の流体解析技術が用いられており、流動状態を詳細に解明しながら形状開発が行われている。その結果、現状の運用ニーズに合致した機器更新が進行している。

## 1. はじめに

1970年代の電源構成の多様化と原子力発電所の導入に伴い、米国では300 MW級のポンプ水車を複数台設置した大型揚水発電所の建設が進められた<sup>1)</sup>。これらの発電所は30年以上の運転によって機器が老朽化していることと、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) を駆使した流体設計による特性改善が可能なることから、ポンプ水車の主要機器を入れ替える機器更新案件が始まってきている。特に、現状の発電所の運用ニーズから、建設時に比べて広範囲な

水車出力領域での安定運転や、揚水時間の短縮を可能にする揚水量増加、メンテナンス周期の延伸などが求められている。当然ながら、環境に配慮し、コスト低減にもつながるように、更新工事における作業の効率化、期間短縮も求められている。

日立製作所が米国へ納入した4揚水発電所のうち、ニューヨーク州電力局納めのブレンハイム・ギルボア (Blenheim-Gilboa) 発電所において、ランナ更新を伴うLEM (Life Extension and Modernization) プロジェクト<sup>2)</sup>の入札が実施され、他社と競争の末、日立製作所が受注した。2009年3月時点では、全4台中の2台の更新工事が完了し、3台目の工事、4台目の機器製作が進行中である(図1参照)。

ここでは、ニューヨーク州電力局ブレンハイム・ギルボア発電所において、顧客要求の特性改善を実現した流体設計と、完了した2台分の機器製作、および現地工事について述べる。

## 2. プロジェクト概要

ブレンハイム・ギルボア発電所は、ニューヨーク市から約160 km北のハドソン川上流のスコハリー (Schoharie) 渓谷に位置しており、日立製作所がポンプ水車と発電電動機などの主要機器を納入し、1973年に運転を開始した。300 MWのポンプ水車を4台有する揚水発電所である。更新前後の仕様の改善分を含めて発電所の仕様を表1に、プロジェクトの概要を表2に示す。更新工事を行うには、以下のような背景があった。

揚水発電所としては、電力需要の時間変化に合わせ、発電運転時の出力を変化させる運転が要求される。設計点から離れた運転状態では、流れのはく離や渦発生に伴う振動などの非定常現象により、機器の運転状態が不安定になりや

表1 ポンプ水車の仕様と特性改善

発電運転の運転可能範囲が57 MWから150 MW以上に拡大している。揚水量も約18%増大している。

		更新前	更新後
発電	最大水車出力	300 MW	
	最高有効落差	342 m	
	運転可能範囲 (発電機出力)	203~260 MW	140~290 MW
揚水	最高全揚程	359 m	
	最大揚水量	74.9 m <sup>3</sup> /s	88.2 m <sup>3</sup> /s

表2 更新プロジェクトの概要

更新工事、新規製作部品などプロジェクトの概要を示す。

更新対象	ポンプ水車4台
検証試験	模型試験・現地試験
更新工事	既設機分解 ランナ更新 工場修理・現地修理 再組立
新規製作部品 (1台分)	入口弁 上カバー・ボトムリング

すい。そのため、機器更新においては広範囲で安定運転が可能なポンプ水車が求められる。

一方、日本国内の揚水発電所では昼間に発電運転し、夜間に揚水運転する運用が一般的であるが、ブレンハイム・ギルボア発電所では平日に発電し、週末に揚水する運用が多いことが特徴である。そこで、電力の購入が必要な揚水運転時間を短くするために単位時間当たりの揚水量が多いポンプ水車が不可欠となる。

さらに、エネルギー源の有効利用のため、機器更新では、ポンプ水車の効率向上も求められる。

前述した特性改善のほかに、更新後の機器の寿命を延ばすために主要機器の新規製作や再生が行われている。今回は、更新工事の作業の効率化と期間短縮のために、4台のランナと初号機の上カバー、ボトムリングだけを新規に製作し、後続号機は前号機から取り出した既設部品を再生利用する方法を採用している。なお、最終号機の既設部品は廃棄する予定である。

## 3. 特性改善のための形状開発

### 3.1 数値流体解析

特性改善のために、ポンプ水車の流体構成要素の中で更新もしくは改造が可能な部品を対象に形状開発を行った。設計時にその形状の有効性を検証するために、CFDに基づく流体解析を用いた<sup>3)</sup>。目的とする解析対象と解析時間を考慮して、図2の全体モデル解析と図3の一流路モデル解析を使い分けている。全体モデル解析は効率向上だけでなく、各流体構成要素の相互干渉が問題となる現象のシミュレーションに効果的である。今回はランナ下流の吸出し管に発生する螺旋(らせん)渦の振れ回りによる振動の設計検証に用いた。また、一流路モデル解析は各要素の特性のチューニングに有効である。

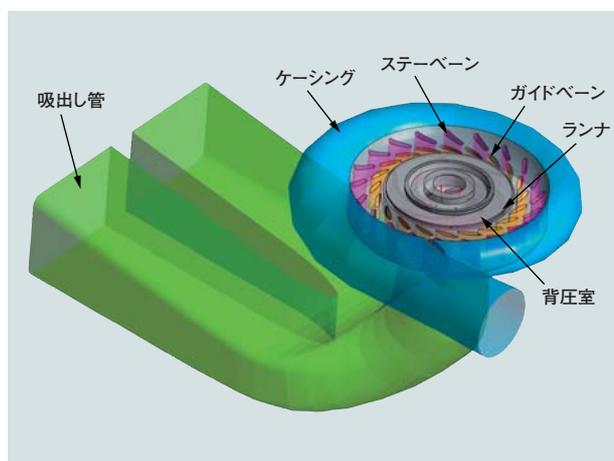


図2 全体モデル解析の解析対象

水車の流体構成要素をすべて解析対象とすることで、各構成要素の相互干渉が反映でき、高精度の解析が可能である。

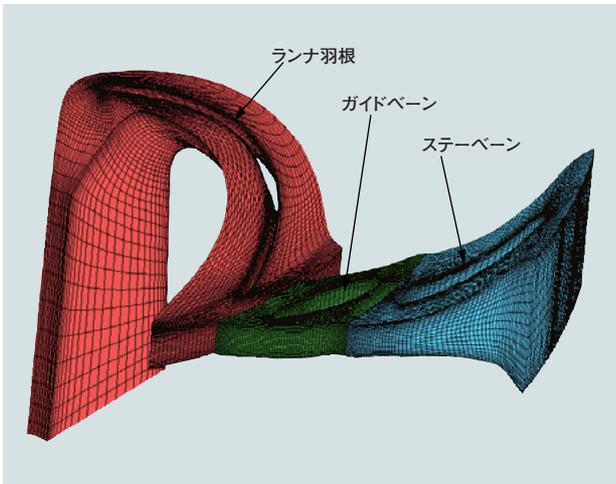


図3 一流路モデル解析の解析格子  
各要素の流動状況を詳細にシミュレートすることができる。

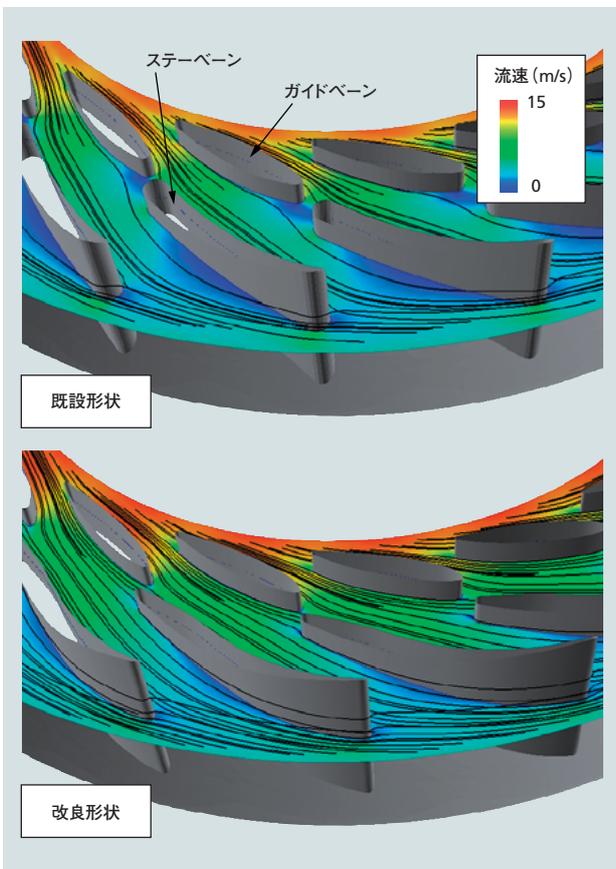


図4 ステーベーン・ガイドベーン形状変更による特性改善  
既設形状ではステーベーン手前側とガイドベーン先端部に低速域(濃い青色の部分)があり、流れが形状に沿っていないが、改良形状では形状に沿ったスムーズな流れが実現されている。

### 3.2 改善形状

ランナの羽根枚数を増やして特性改善を行うという選択肢もあるが、顧客指定により、羽根枚数は既設機と同じ7枚とし、形状変更だけでの特性改善を行った。また、実機ランナ羽根の材料として鋳造よりも内部品質が高く価格の安い圧延鋼板を使用することを想定し、形状設計時から実機製作方法を考慮して形状を最適化した。

さらに、効率特性改善の主要要素として、固定案内羽根のステーベーンと可動案内羽根のガイドベーンの形状もCFDによる最適化を図った。既設形状と改良形状の水車運転の流れパターンを図4に示す。既設形状では効率低下につながるステーベーンでの流れのはく離、ガイドベーンでの低速域が発生しているが、改良形状では明らかに改善されていることがわかる。実機においては、ガイドベーンは新品への更新、ステーベーンは現地にて既設品の改造という形で特性改善を行った。

また、ランナ更新に合わせて、回転部であるランナと固定部のライナで構成されるシール部の形状変更も行っており、効率改善に寄与している。

### 3.3 模型試験による検証

CFD評価によって最適形状を導出しているが、最終的には、実機との縮尺比 $\frac{1}{12.13}$ の模型ポンプ水車を製作し、国際規格IEC60193:1999に準拠した模型試験により、水力特性を検証した。更新形状の絶対値だけでなく、既設形状での試験も行い、改善量も評価して更新形状の有効性も確認した。

## 4. 更新前後の特性比較

### 4.1 水車運転範囲

既設のポンプ水車ランナは最大出力側と部分出力側の運転領域でランナ直下に螺旋渦に起因する振動が発生しており、発電機出力で203~260 MWの運転に限定されて使用されていた。ランナ形状の改良設計により、この螺旋渦を発生させる流れを抑制することができた。これは模型試験で運転制限に関する水圧脈動を計測しており、既設において発生

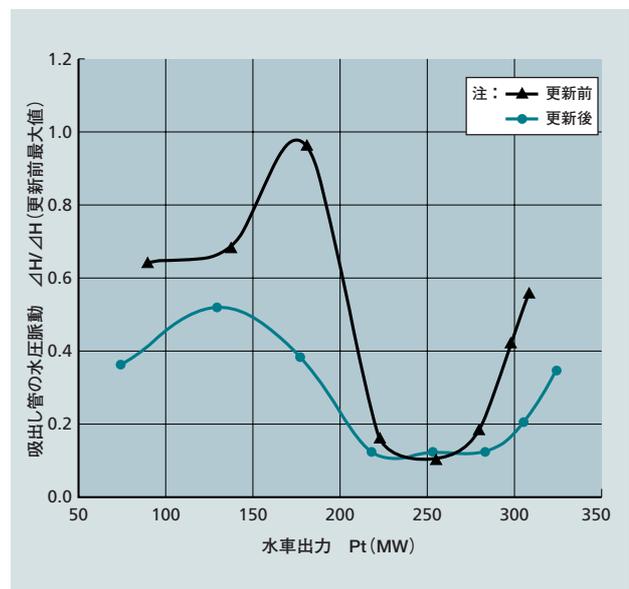


図5 水車運転における吸出し管の水圧脈動  
模型ポンプ水車の水圧脈動試験において、更新後の安定運転範囲が広がっていることを確認している。

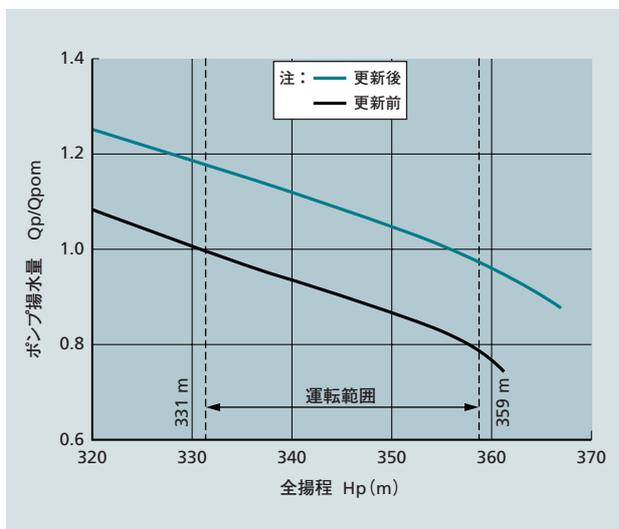


図6 ポンプ運転におけるポンプ揚水量の増加  
全運転範囲で揚水量が18~20%増加している。

していた振動が低減されていることを確認している(図5参照)。実機の試験においても、全有効落差で発電機出力140 MWから最大出力までの運転が可能であることを確認している。つまり、運転可能範囲が1台当たり57 MWから150 MW以上に拡大しており(4台では600 MW以上)、電力システムの負荷調整用電源としての活躍が期待される。

## 4.2 ポンプ揚水量

今回のランナ形状の改良設計では、他の流体性能も向上しつつ、図6に示すように全運転範囲で揚水量が増大している。特に、最大揚水量も $74.9 \text{ m}^3/\text{s}$ から $88.2 \text{ m}^3/\text{s}$ と約18%増加しており、短時間で効率的な運転が可能となっている。

## 5. 実機製作および現地改造工事

### 5.1 実機ランナ

実機ランナは鋳鋼のクラウン、バンドに鋼板の羽根を溶接で組み立てる方法で製作した。溶接性を考慮して、13Cr5Niステンレス鋼を用いた。ランナ外径は約6 m、羽根枚数は7枚である。更新ランナのつり込み作業状況を図1(b)に示す。

#### 執筆者紹介



#### 谷 清人

1993年日立製作所入社、電力グループ 日立事業所 水力設計部 所属  
現在、水力発電所水車の流体設計に従事  
工学博士  
日本機械学会会員、ターボ機械協会会員

## 5.2 機器更新

ランナのような形状変更を伴わない機器は、既設品を取り出して、腐食や損傷部位の修理、部品の改造を現地もしくは工場返送によって行うことが多い。これは新品と交換する方法に比べて費用は少ないが、発電所の停止期間が長くなる。特に、ブレンハイム・ギルボア発電所は1条4分岐(上部貯水池からの1本の導水管がポンプ水車の直前で4本の導水管に分岐するタイプ)であり、入口弁を取り出している期間には工事に関係しない3台も運転できない。この停止期間を短くするために、初号機用は入口弁を新製し、次号機からは、先行機から取り出した入口弁を修理して再利用する方法を採用している。なお、入口弁は口径2.8 mである。同様に、主要機器である上カバー、ボトムリングもこの方法を用いている。

夏場の電力需要のピーク期を避けるために、工事は秋に開始して春に完了するように1年に1台のペースで進められている。2010年5月に4台すべての更新工事が完了する予定である。

## 6. おわりに

ここでは、ニューヨーク州電力局ブレンハイム・ギルボア発電所において、顧客要求の特性改善を実現した流体設計と、完了した2台分の機器製作、および現地工事について述べた。

大型揚水発電所は導入機として約30~40年の働きを経た後、最新技術で現状のニーズに適合した高効率で環境負荷がより少ない機器へと生まれ変わってきている。日立製作所は、今後とも、既設品の更新案件の分野でも高効率な水力発電機器を提供していく。

#### 参考文献など

- 1) 高瀬, 外:最近のアメリカ向け大容量ポンプ水車および発電電動機, 日立評論, 53, 2, 182~187(1971.2)
- 2) New York Power Authority,  
<http://www.nypa.gov/press/2005/050113a.htm>
- 3) K. Shimmei, et al.:Some Examples of Application of STAR-CD on Hydraulic Turbines-Turbo-machinery using Incompressible Fluid, CDAJ User's Meeting, Yokohama(2004)



#### 奥村 博司

1974年日立製作所入社、電力グループ 日立事業所 水力設計部 所属  
現在、水力発電所水車の構造設計に従事  
ターボ機械協会会員