

北米における既設水力発電所の 大規模改修への取り組み

Approach to Large-Scale Refurbishment of Hydroelectric Power Plants in North America

武田 克

■ TAKEDA Masaru

利用可能な水力エネルギー量（包蔵水力）が豊富な中国や、アジア、中南米などの発展途上地域では、経済成長に伴って電力需要も伸びており、新規の水力発電所の建設が数多く計画されている。一方、経済が成熟した北米地域では、水力発電は今も重要な位置づけにあるが、新規の水力発電所の建設に代わり、既設発電機器の改修が水力発電ビジネスの中心となっている。

東芝は、北米地域での水力発電事業に特化した東芝インターナショナル米国社のデンバー事務所を拠点として、他社製の水力発電機器を含めた大規模改修事業を展開している。

In recent years, there has been a conspicuous increase in demand for electricity accompanying the economic growth in developing countries. In countries having an abundance of potential hydroelectric power, including China, other Asian countries, and countries in South America, a large number of projects for the new construction of hydroelectric power plants are in progress. In economically developed North America, on the other hand, where hydroelectric power generation still plays an important role, the refurbishment and replacement of existing equipment are mainly being planned rather than new construction.

Toshiba is vigorously promoting the large-scale refurbishment of existing hydroelectric power plants in North America, including hydroelectric power equipment manufactured by other companies, through activities based at the dedicated office of Toshiba International Corporation in Denver, Colorado.

1 まえがき

近年、環境問題に対する関心の高まりから、世界各国で水力や、風力、太陽光など再生可能エネルギーの利用促進や、環境関連技術への投資などが国家政策として進められている。

水力発電は、古くから世界的に利用されている再生可能エネルギーであり、水力発電による発電電力量は世界の総発電電力量の19%を占めている。世界最大の電力消費国である米国においても、電源構成が石炭焚き（だき）火力発電から天然ガス火力発電及び原子力発電に移行しつつあるなかで、中国、カナダ、ブラジルに次ぐ発電量を誇る水力発電は今も重要な位置づけにある。2013年の水力発電電力量は、米国の総発電電力量の6.5%にあたる270 GWhであった。

水力発電の利点としては、次のものが挙げられる。

- (1) 化石燃料を燃焼させないので、環境汚染が少ない
- (2) エネルギー源の水は自然より得られ、火力発電などに比べて相対的に運転・保守コストが低い
- (3) 信頼性の高い技術が確立されている

しかし水力発電はその建設時に、ダム及び土木構造物への多額の投資や建設地住民の移転などを考慮する必要がある。また特に米国では、さけなど魚の生息域や魚道など、自然環境への影響にも考慮が必要である。

これらのことから、米国では新規の水力発電所の建設は限

られ、発電機台数の増加は2016年が4台、2017年が2台の計画となっており、既設発電機器の改修によって発電電力量が維持・増大が図られている。

東芝は、ミシガン州ラディントン揚水発電所6台及びワシントン州ウェルズダム発電所9台の水車と発電機の改修事業をはじめとする、6か所の水力発電所での大規模改修事業を受注してきた。

ここでは、当社が実施している米国における水力発電所の改修工事への取り組みについて述べる。

2 水力発電機器の改修

米国では、1960年代から1970年代にダム建設のピークがあり、この時期に設計、製造された水力発電機器が順次改修されている。

顧客が発電機器の改修時に期待する項目として、以下が挙げられる。

- (1) 発電機器寿命の延伸
- (2) 信頼性の向上
- (3) 発電出力の増大

水力発電機器の改修や発電出力の増大工事は、対象の既設機器がどのように設計され、製造されたかを知ることから始まる。

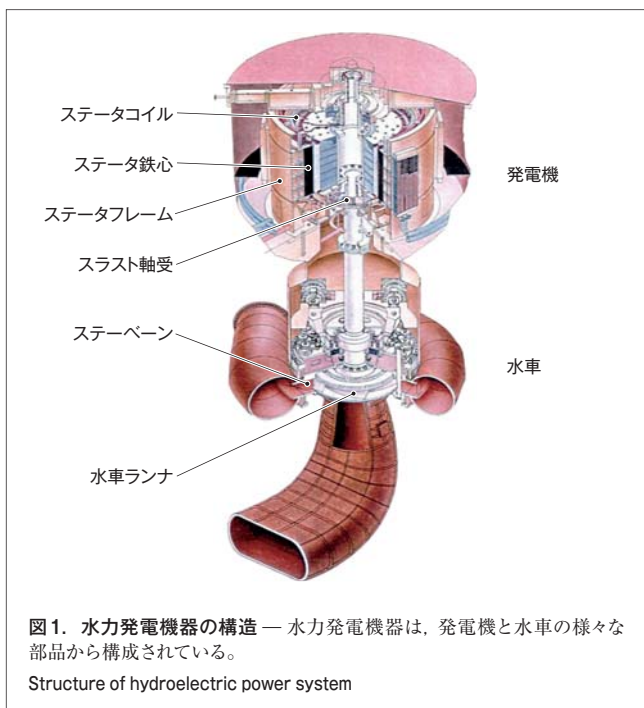


図1. 水力発電機器の構造 — 水力発電機器は、発電機と水車の様々な部品から構成されている。
Structure of hydroelectric power system

当社は、これまでに納入した水力発電機器の改修ビジネスから、他社製の水力発電機器の改修ビジネスまでその事業を拡大しており、リバースエンジニアリングによって他社製の水力発電機器を再現設計することは非常に重要である。リバースエンジニアリングには既設機器の図面や、設計パラメータ、試験検査記録などを参考にすが、運転開始から長い年月を経過したプラントではそれらが紛失している場合もある。そのような場合には、機器の寸法測定などの現地調査の結果に基づいて再設計が行われる。

顧客が期待する今後30年以上の機器寿命の延伸、及び発電出力の増大を実現する場合の多くでは、水車ランナの新規製作及び既設流路の改造、並びに発電機のステータフレーム、ステータ鉄心、ステータコイル、及びスラスト軸受の新規製作や改修が行われる(図1)。

2.1 水車流路形状の改造

改修工事の大きな目的の一つである、性能向上を達成するための手段として、既設流路の改造を行うことがある。主な改造例としては延長ピースの取付けがある。これは、回転部である水車ランナに均等に水流を導くステーパーン(固定羽根)の流路損失を低減するため、既設ステーパーンの入口部と出口部に溶接で延長ピースを取り付けるもので、溶接する構造物が多く、寸法のばらつきを考慮した慎重な溶接が必要になる。

2.2 発電機ステータフレーム

1970年代以前に設計、製造された発電機には、ステータ鉄心の締付けに問題を抱えるものもある。これは、ステータフレーム最下段の棚板がステータ鉄心を締め付けるためのクランププレートとして機能するように設計されたステータフ



図2. ステータ鉄心のバックリング — 40年間運転した発電電動機に発生したステータ鉄心のバックリングである。
Buckling of stator core lamination

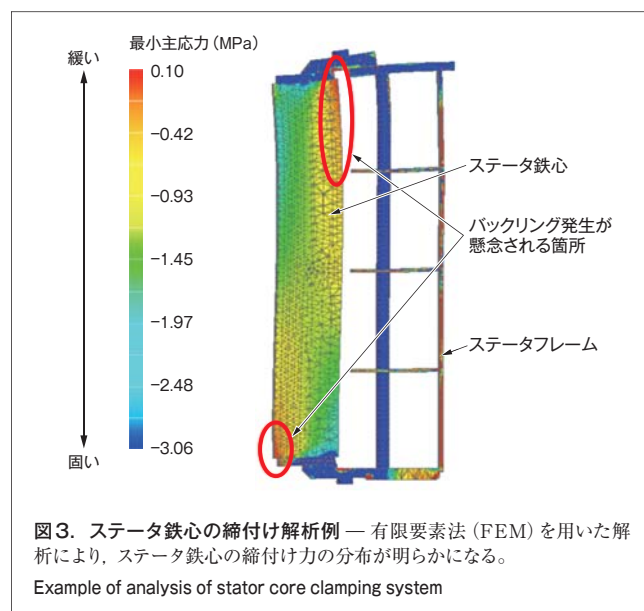


図3. ステータ鉄心の締付け解析例 — 有限要素法 (FEM) を用いた解析により、ステータ鉄心の締付け力の分布が明らかになる。
Example of analysis of stator core clamping system

レームに見られる⁽¹⁾。ステータ鉄心の重量がステータフレームに加わり、この荷重によって外側間隔片の鉄心を締め付ける機能が低下する。この結果、運転・停止サイクルの中で、熱によるステータの伸縮が繰り返され、ステータ鉄心の分割面にせり上がり(バックリング)が生じる(図2)。

当社はこれまでの設計・製造技術の蓄積により、ステータ鉄心の締付け解析を行ってバックリングが起らないステータ鉄心の締付け標準構造を確立しており、バックリング発生に対する安全率を向上させている(図3)。

2.3 発電機ステータコイル

発電機部品において、経年劣化の影響がもっとも顕著に現れるのがステータコイルである。

発電機の発生電流による電機子銅損は、ステータコイル内の発熱になる。ステータコイルは銅素線と絶縁層から成るが、両

者の熱膨張率の違いは絶縁層の剥離を引き起こす要因となり、ステータコイル絶縁が経年劣化する要因の一つとなっている。

電力需要のピーク時に電力供給を行う水力発電所や揚水発電所では、起動及び停止のサイクルが頻繁で過酷な熱応力下での運転を強いられる。改修後30年間にわたって健全な運転を継続するには信頼性の高い絶縁システムが必要で、当社はIEEE（電気電子技術者協会）規格に準拠した次の試験により絶縁システムの性能検証を行っている。

- (1) 熱サイクル試験 (Thermal Cycle Test)
- (2) 課電劣化試験 (Voltage Endurance Test)

熱サイクル試験では、F種絶縁の場合、コイルへの通電によりコイル温度を46分間掛けて40℃から155℃に上昇させ、また46分間掛けて40℃に送風冷却する。この92分間を1サイクルとして、500サイクルを繰り返すことで起動・停止時の熱ストレスを模擬する⁽²⁾。

課電劣化試験では、ヒータプレートによりステータコイルを100℃に加熱し、IEEE規格で規定された電圧（発電機の定格電圧が14.4kVの場合は、31.3kV）を印加して400時間耐えられるかどうかで絶縁性能を実証する。

改修時に顧客が期待する項目の一つである発電出力の増大は、このステータコイルによるところが大きい。

ステータコイルは、適用される絶縁材料や製造プロセスの改善などにより絶縁性能が向上し、旧来機に比べ単位厚さ当たりの電界強度を大きくできる。これによって、絶縁層を薄くしてスロット内に占める銅材料を増やすとともに、熱伝達率に優れた絶縁テープを採用してコイルの温度上昇を抑えることで、発電出力の増大が図れる。おおむね20%の発電出力の増大が見込める場合が多い。ステータコイルの熱サイクル試験の例を図4に示す。



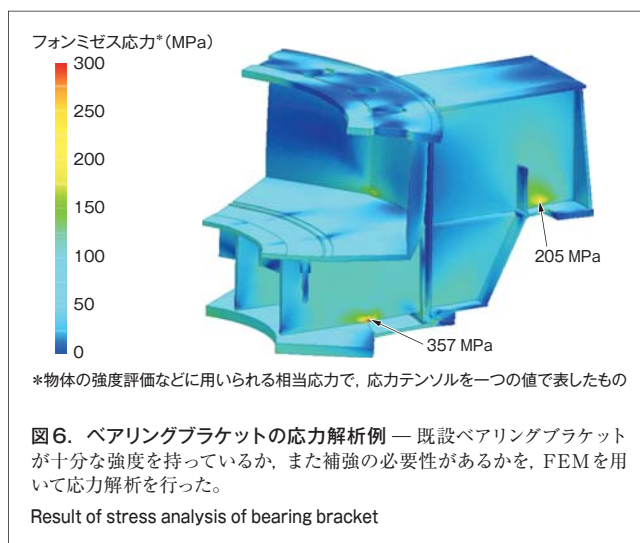
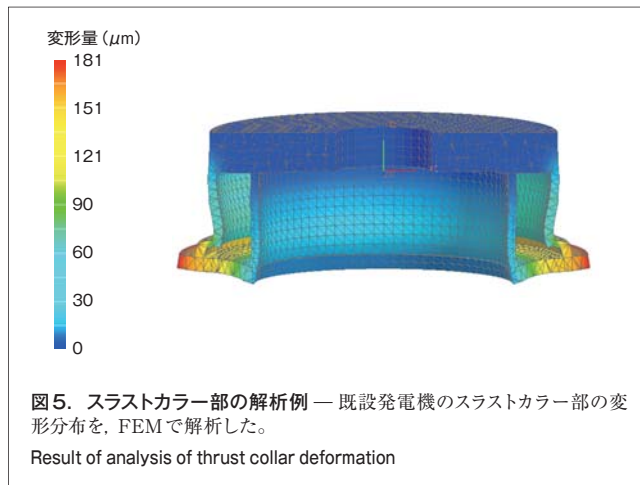
図4. ステータコイルの熱サイクル試験 — 熱サイクル試験は、ステータコイルを加熱できるヒータプレート上に配置して行われる。
Stator bars installed in jig for thermal cycle test

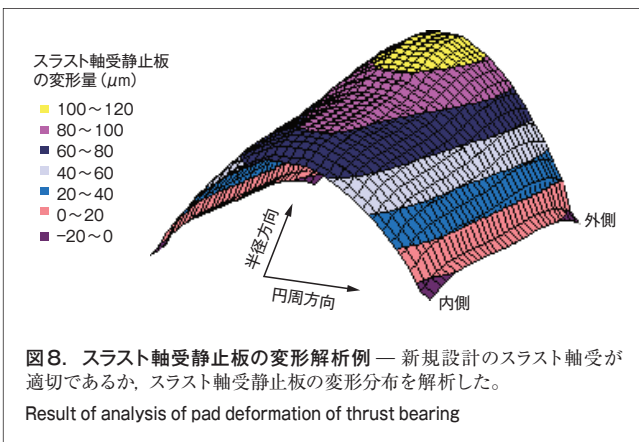
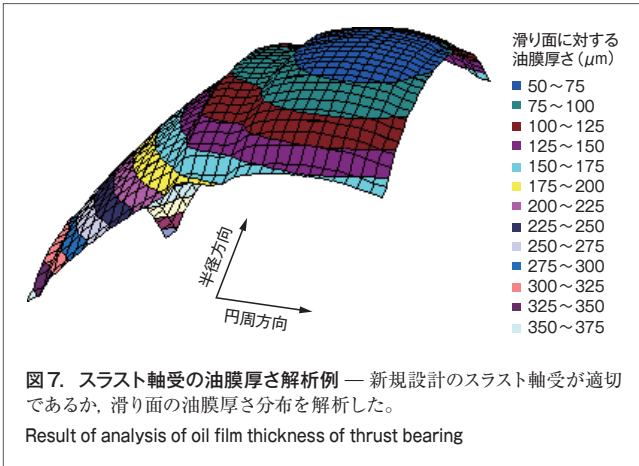
2.4 スラスト軸受

6台の水車が設置された水力発電所の水車改修で約300MWの総発電出力の増大が図られた例もあり、原動機である水車による発電出力の増大も期待できる。

水車・発電機回転部の重量及び水推力はスラスト軸受によって支えられるが、水車の発電出力の増大に伴い水推力による荷重が増加する場合があります。水推力の増加の影響を把握することが発電出力の増大において重要である。

従来からスラスト軸受に問題を抱えている機器には、軸受構造物の強度不足や軸受静止板の不十分な設計が原因の場合があるので、その原因究明と改善設計のために強度解析及び軸受性能解析を行う。既設発電機の設計が適切であったかどうかに関するスラストカラー部の解析例を図5に示す。また、既設ベアリングブラケットが十分な強度を持っているかの応力解析例を図6に示す。更に、スラスト軸受滑り面の油膜厚さ解析例を図7に、スラスト軸受静止板の変形解析例を図8に示す。これらの解析に基づいて、スラスト軸受に関する問題の究明や性能向上のための設計を進めている。





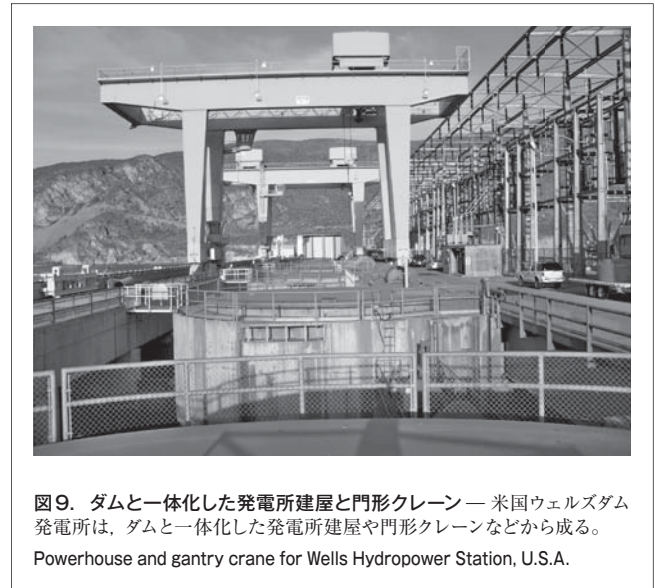
3 米国における現地工事

改修工事は出水量が減少する秋から春にかけて実施されるが、多くの水力発電所が寒冷地に位置する米国での工事は、天候の影響を十分に考慮した計画が必要になる。長大な製品は降雪季の前に発電所への搬入を完了させ、改造や修理のための発電所から現地工場への搬出も降雪季を避ける必要がある。

わが国ではあまり見られないが、米国の水力発電所には発電所建屋が川をせき止めるダムと一体化し、発電機器の上には建屋がなく、大型部品は鋼板製の発電機カバーを開け、ダム堰堤(えんてい)を走る屋外の門形クレーンで搬入・搬出作業を行うところがある(図9)。このような発電所では、強風時にクレーンは使用できず、雨天時も搬入・搬出作業は制限される。

部品搬入作業が頻繁に発生する発電所の改修では、ファスナで容易に開閉できるテントを敷設して天候の影響を極小化している。

当社が米国で手掛けている水力発電所の改修事業は、水車ランナの更新や、水車固定部埋設品の現地補修、発電機固定子の現地組立、軸受の補修や更新など広範囲にわたり、下請け施工業者の選定や、安全衛生管理を含めた現地施工要



領書の作成、品質管理など現地でのエンジニアリング業務は多岐にわたる。

更に米国では、発電所までの内陸輸送でいくつかの州境を越える際にそれぞれの州で規制が異なり、州ごとの安全衛生管理や、品質管理、下請け業者管理などに関する法令が適用されるため、各州の特殊性をエンジニアリングに反映させる必要がある。

4 あとがき

当社は、東芝インターナショナル米国社のデンバー事務所を北米地域における水力発電ビジネスの拠点として営業・技術活動を行っている。先ごろ工事部門も設立し、機器供給から、据付工事、試験調整までの水力発電事業を、東芝グループ内で一括して請け負う体制も整えた。

今後も、東芝グループによる北米地域の既設発電機器の改修事業に取り組んでいく。

文献

- (1) 同期機固定子鉄心の損失低減技術調査専門委員会編。“固定子鉄心の構造”同期機固定子鉄心の損失低減技術。電気学会 産業応用部門 回転機技術委員会。2008, 電気学会技術報告 1139, p.14 - 15.
- (2) Istad, Maren, et al. A Review of Results From Thermal Cycling Tests of Hydrogenerator Stator Windings. IEEE Trans. Energy Convers. 26, 3, 2011, p.890 - 903.



武田 克 TAKEDA Masaru

電力システム社 火力・水力事業部 水力プラント技術部主務。
水力発電システムの総合エンジニアリング業務に従事。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.