

**IEA 水力実施協定 ANNEX 11 水力発電設備の更新と増強
第二次事例収集（詳細情報）**

事例のカテゴリーとキーポイント

Main : 2-a)電気機械装置の技術革新と適用拡大

Sub : 2-c)土木建築分野の技術革新、適用拡大、新材料

| | |
|-------------|---|
| プロジェクト名 | : 田子倉発電所一括更新工事 |
| 国、地域 | : 日本、福島県 |
| プロジェクトの実施機関 | : 電源開発株式会社 |
| プロジェクトの実施期間 | : 2004年～2012年 |
| 更新と増強の誘因 | : (A) 老朽化／故障頻発 |
| キーワード | : 一括更新工事 (Refurbishment of hydropower plant)、 水車(Turbine)、発電機(Generator) |

要旨

JPOWER 電源開発では、1999年に社内にワーキンググループを設置し、高経年水力発電設備 17 発電所（主機 32 台）を対象に一括更新工事の可能性検討を行った。その結果、最初の設備として田子倉発電所が選定された。田子倉発電所は、1961年に 380,000kW で運転を開始し、主にピーク電源として、首都圏の経済活動を支える重要な電源であり、今後もその価値は大きく変動しない。一括更新工事は 2004年 11月～2012年 5月に順次 4台の主要機械の更新工事を実施し、最大出力 400,000kW の水力発電所として更新された。田子倉発電所が選定された理由、更新機器範囲の決定、設計、工法、工事実績および一括更新の効果について報告する。

1. プロジェクト地点の概要（改修前）

田子倉発電所は、日本有数の豪雪地帯である福島県南会津郡只見町にあり、福島県と新潟県の県境を流れる阿賀野川水系只見川の上流部に位置する総貯水容量 $494 \times 10^6 \text{m}^3$ の田子倉ダムの直下に設置された最大出力 380,000kW (水車発電機 4 台) の国内最大級の水力発電所である。只見川は、群馬県と福島県にまたがる尾瀬沼（標高 1,665m）に源を発し、尾瀬ヶ原湿原を通り、越後山脈の東側を北流して、会津若松市近郊で阿賀野川と合流し、その後、西流して新潟県に入り、新潟平野を貫流して日本海へ注いでいる。その流路延長は 272km、流域面積は 7,710km² に及び、阿賀野川本流を含めて数多くの発電所が建設されている。田子倉発電所は、昭和 30 年（1955 年）9 月に着工、昭和 35 年（1960 年）5 月に第一期工事（水車発電機 3 台、発電所出力 285,000kW）が竣工し、昭和 36 年（1961 年）11 月に第二期工事として 4 号機が営業運転開始をした。田子倉発電所で発生した電力は、主にピーク時電源として首都圏の経済活動を支える重要な電源となっている。

図-1 に田子倉発電所位置図、図-2 に只見川電源地帯縦断図を、表-1 に田子倉発電所主要諸元（電気関係機器は一括更新前の諸元）を示す。



図-1 田子倉発電所位置図

● 只見川電源地帯縦断面図

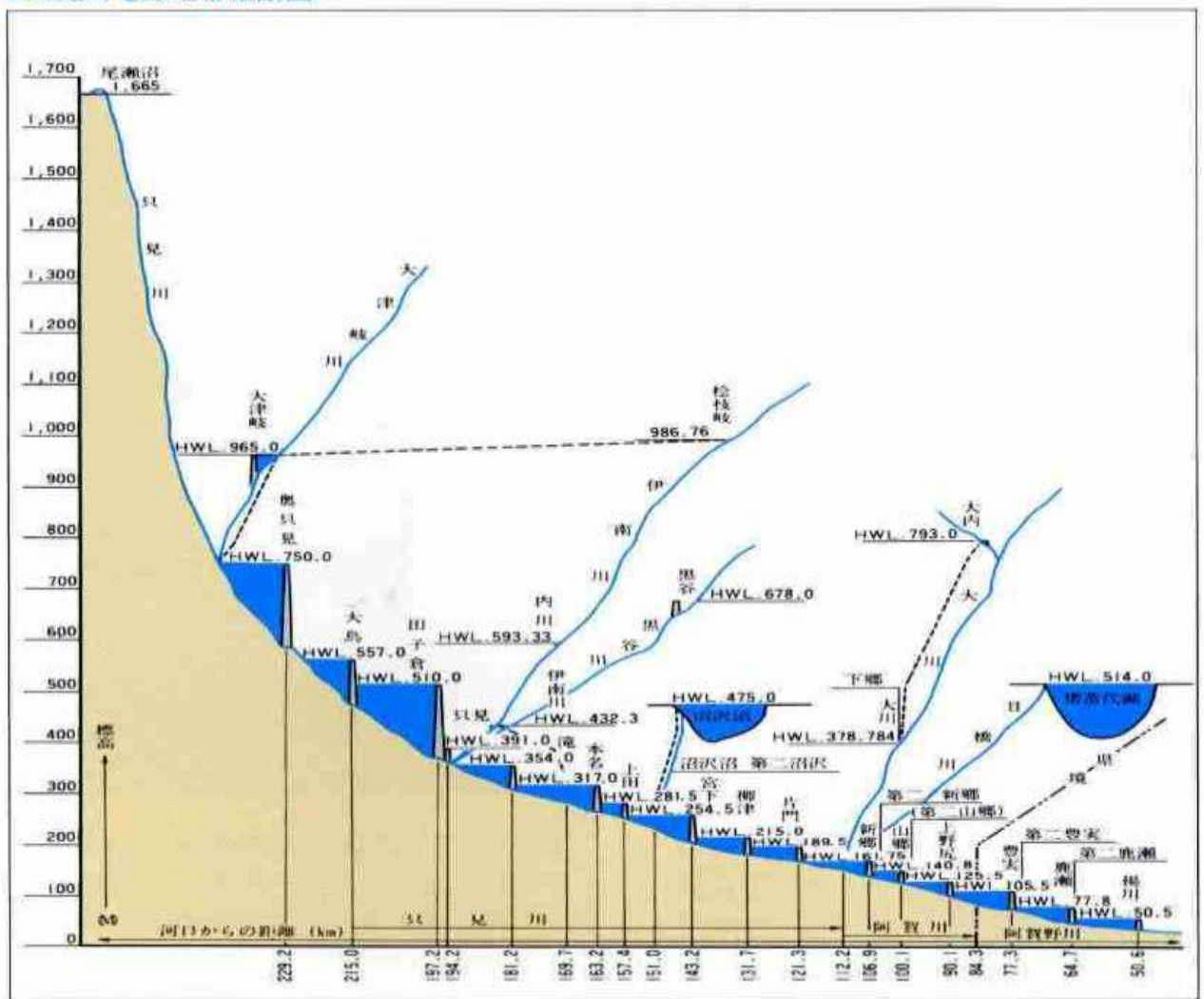


図-2 只見川電源地帯縦断面図

表-1 既設田子倉発電所主要諸元

| | | | |
|-------|------------|------------------------------------|--------------------------|
| 認可出力 | 最大 / 常時 | (kW) | 380,000 / 43,200 |
| | 常時尖頭 | (kW) | 170,300 |
| 使用水量 | 最大 / 常時 | (m ³ /s) | 420 / 55.07 |
| 有効落差 | 最大 / 常時 | (m) | 105 / 93.82 |
| 貯水池 | 全容量 / 有効容量 | (10 ⁶ m ³) | 494 / 370 |
| | 満水位 | (EL.m) | 510.00 |
| | 利用水深 | (m) | 52 |
| | 湛水面積 | (km ²) | 9.95 |
| ダム | 形式 | | コンクリート重力式 |
| | 頂長×高さ | (m) | 462×145 |
| ダム | 体積 | (10 ³ km ³) | 1,949.5 |
| | ゲート×門数 | | ラジアル×4 |
| 水圧管路 | 条数×亘長 | (m) | 4×123.5 |
| | 内径 | (m) | 5.0 ~ 4.4 |
| 水車 | 定格出力 | (kW) | 108,000 |
| | 台数 | (台) | 4 |
| 発電機 | 定格出力 | (kVA) | 105,000 |
| | 周波数 | (Hz) | 50 |
| 主要変圧器 | 定格容量 | (kVA) | 105,000 |
| | 電圧 (一次/二次) | (kV) | 13.0 / 287.5, 275, 262.5 |

2. プロジェクト (更新/増強) の内容

2.1 誘因と促進要因 (具体的なドライバー)

① 状態、性能、リスクの影響度等

(A)-(a) 老朽化/故障頻発-効率向上

近年の流体解析技術 (CFD) を適用した水車設計に適用と回転速度の 1 ランク高速化により最大効率、部分負荷効率を改善し、発電所出力を 380,000kW から 1 台あたり 5,000kW の増出力し、400,000kW に増強した。

(A)-(b) 老朽化/故障頻発-耐久性、安全性、信頼性向上

発電機、補機を含めて一括で新製に更新したため、水車上、下カバー、発電機フレーム、上下ブラケットなど鋼製製品製品の溶接部の経年クラック、疲労破壊、発電機固定子および回転子巻線の絶縁破壊、回転部分の疲労破壊、軸受けメタルへの樹脂メタル採用、および給水、圧油装置、各種センサーの更新により、大幅にプラントの耐久性、安全性、信頼性を新規プラント相当まで引き上げることが出来た。

(A)-(c) 老朽化/故障頻発-低コスト化

機器の一括発注と海外サブベンダーの採用により、部分更新を継続して実施するより、安価な調達を可能とした。

(A)-(d) 老朽化／故障頻発－保守性の向上

主要機械から補機、制御装置まで一括に新製としたため、初期故障を除けば、故障発生の確率が新規発電プラント相当まで改善されていると考えられ、故障対応、点検時の範囲等が合理化され、保守性を向上させている。

② 価値(機能)向上

最大出力の増強により、ピーク電源価値が付加され、発生電力量も増加した。

③ 市場における必要性

(該当なし)

2.2 経緯

- 1961年 田子倉発電所(既設)の全台営業運転開始
- 1999年 高経年発電所17箇所について一括更新工事の可能性検討し田子倉発電所を選定
- 2004年 田子倉水力発電所 4号機一括更新工事着工
- 2006年 4号機一括更新工事竣工
- 2006年 2号機一括更新工事着工
- 2008年 2号機一括更新工事竣工
- 2008年 3号機一括更新工事着工
- 2010年 3号機一括更新工事竣工
- 2010年 1号機一括更新工事着工
- 2012年 1号機一括更新工事竣工 全ユニット竣工

2.3 内容(詳細)

2-a) 電気機械装置の技術革新と適用拡大

2-c) 土木建築分野の技術革新、適用拡大、新材料

(1) 主要機器一括更新計画の策定

主要機器一括更新計画は、平成11年から社内にワーキンググループを設置し、選定された一般水力発電所17発電所(主機32台)を対象に検討を行った。検討対象発電所の選定基準を以下に示す。

- ・平成11年時点で運転開始後50年程度経過した発電所
- ・経年50年未満の発電所でも老朽化が進行した大容量の発電所
- ・揚水発電所およびダムを含めた再開発計画のある発電所は除く

運転開始後50年程度経過した発電所とした理由は、当社は昭和29年～40年に運転開始した発電所が多数(36発電所、主機63台)あり、それらは近年に水車ランナ等の大形機器の更新の予定があり、かつ、入口弁、調速機、励磁装置、補機等の更新が計画されている発電所が多かったことによる。

検討は、平成11年度に概略検討を実施して17発電所を4発電所に絞り込み、平成12、13年度に4発電所について詳細検討を行った。最終的には、従来方式の部分更新を継続する場合(水車埋設部は更新できない)と、一括更新を行なった場合について経済評価を行い、一括更新の経済性のほうが良い結果を得たことなど総合的に評価し、平成14年度に田子倉発電所一括更新工事の実施を決定した。

(2)主要機器一括更新工事のメリット

主要機器を一括で更新することによるメリットとして以下が挙げられる。

①発電所の延命化

将来更新が必要となる電気設備を同時期に一括して更新を行うことにより、水車・発電機の老朽化から生じる不具合を低減し、発電所の延命化を図ることができる。

②設備信頼度の向上

電気設備を一括更新し、水車・発電機を新製することにより、最新、最適設計の採用等により設備信頼度の向上を図ることができる。

③発生電力、発生電力量の増加

最新設計技術の採用に伴う機器効率の向上、既設設備の運用実態から最適運転点が設定可能等により、発生電力、発生電力量の増加が見込める。

④将来における発電停止日数の抑制

従来のように部分的な取替・補修を継続していく、点検項目・頻度の増加、作業期間の長期化、突発的事故に伴う計画外停止の増加などにより、設備停止日数は増加傾向となるため、機器を新製化することで将来的な停止日数を抑制することができる。

⑤保守業務の省力化

老朽化した水車・発電機を一括更新し、新製機器とすること、最新技術の採用により、点検頻度、点検項目が低減となり、保守業務の省力化を図ることができる。

⑥技術力の向上、技術継承

今回のような特殊大型工事を経験する事により、技術力向上が可能であり、今後は発電所の新設工事のみならず特殊なスクラップ・アンド・ビルド工事に関して、コンサルタント業務も含め対応可能となる。

⑦その他

水車発電機の高速度（小型化）や、一括更新とすることによるまとめ買い効果等により設備更新費用の低減を図ることができる。田子倉発電所の場合、水車操作油圧を上げることにより入口弁操作時間の短縮（6分⇒3.5分）ができ、系統並列までの時間短縮を図ることができる。

(3)主要機器一括更新工事の範囲

主要機器一括更新計画に関する基本的な考え方を以下に示す。

- ・ 水利諸元：最大使用水量は既設発電所で水利使用許可を受けた値とする。（変更なし）
- ・ 電気設備：機器の基本構成は変更しない。性能・構造面から今後、長期的に運転を継続するために取替、補修が必要な主要設備を一括更新する。
- ・ 土木設備：水車・発電機の更新に伴う掘削部の改修のみ実施し、主要設備は変更しない。田子倉発電所4号機一括更新工事では、ケーシングおよび発電機バレルが流用可能であったことから、水車更新範囲は入口弁、上下カバー、スピードリング、ガイドベーン、上部吸出し管、発電機更新範囲は発電機基礎を除く全更新となり、土木工事は、スピードリング、下カバー、上部吸出し管の更新に必要な範囲に限定することができた。図-3 にユニット当りの更新範囲を示す。

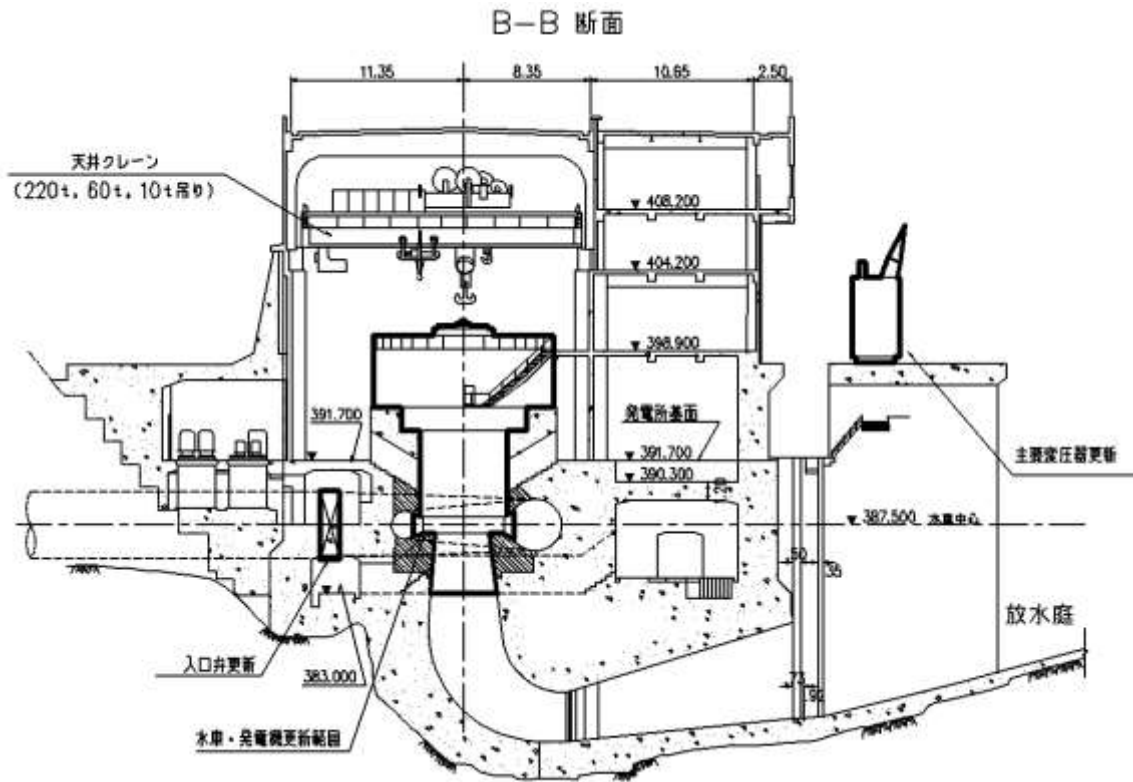


図-3 田子倉発電所一括更新工事範囲（ユニット当り）

(4)一括更新前後の機器仕様比較

表-2 に一括更新前後の機器仕様、写真-1 および 2 に一括更新前後の田子倉発電所の全景を示す。

表-2 田子倉発電所主要機器の仕様比較

| 項 目 | | 単 位 | 更 新 前 | 更 新 後 | |
|-------|----------------------|----------|---------------------|------------|---------|
| 発電所出力 | | (kW) | 380,000 | 400,000 | |
| 水車 | 形式 | | 立軸フランシス水車 | 立軸フランシス水車 | |
| | 出力 | 最大 | (kW) | 108,000 | 102,300 |
| | | 基準 | (kW) | 102,000 | 102,300 |
| | | 最低 | (kW) | 45,000 | 48,000 |
| | 有効落差 | 最大 | (m) | 118.2 | 120.6 |
| | | 基準 | (m) | 105 | 106.8 |
| | | 最低 | (m) | 67 | 66.0 |
| | 使用水量 | 最大 | (m ³ /s) | 100.7 | 94.2 |
| | | 基準 | (m ³ /s) | 107.8 | 105 |
| | | 最低 | (m ³ /s) | 81 | 80.8 |
| 回転速度 | (min ⁻¹) | 167 | 188 | | |
| 製作者 | | 三菱重工業(株) | 三菱重工業(株) | | |
| 発電機 | 形式 | | 閉鎖風道循環型 | 水冷熱交換器形 | |
| | 定格出力 | (kVA) | 105,000 | 112,000 | |
| | 定格電圧 | (kV) | 13.2 | 13.2 | |
| | 力率 | | 0.9 | 0.9 | |
| | 周波数 | (Hz) | 50 | 50 | |
| | 製作者 | | 三菱電機(株) | 三菱電機(株) | |
| 主要変圧器 | 形式 | | 普通三相油入式 | 特別三相油入式 | |
| | 定格容量 | (kVA) | 105,000 | 112,000 | |
| | 電圧 (一次/二次) | (kV) | 13.0/275.0 | 12.8/275.0 | |
| | 製作者 | | 三菱電機(株) | 三菱電機(株) | |



写真-1 田子倉発電所全景（更新前）



写真-2 田子倉発電所全景（更新後）

(5)更新機器の設計条件と検討結果

更新機器の基本的な設計条件を以下に示す。

高速度化：必要吸出し高さを確保できる範囲で主機の高速度化を図る。

短絡比：100MVA 以上は 1.0、100MVA 未満は 0.8 とする。

最大出力：既設発電所の最大出力は最低限確保する。

水車効率：既設機は水車模型試験結果の実機換算式を統一し、更新機は JIS 規格の実機換算式とする。

発生電力量：既設ダム運用実績から最適運転点を求めて、発生電力量を可能な限り増やす。

検討の結果、発電所出力は最大使用水量を変更せずに、機器性能向上と基準有効落差の見直しにより、増出力を図ることができた。（既設発電所出力に対し 20,000kW 増の 400,000kW）

水車は運転実績調査による最適設計を行い、設計上の基準有効落差を 106.8mに見直すとともに、回転速度を 1 ランクアップして 188min^{-1} とした。

発電機基礎の流用に当たり、発電機の各運転状態（停止時、制動時、定常運転時、単相短絡時、地震時等）において発電機基礎（固定子基礎部 8ヶ所、下部ブラケット基礎部 8ヶ所）に作用する荷重条件を求め、それらが土木構造物に対して問題ないことを確認した。

(6)水車効率向上について

更新水車の効率アップは以下の 3 要因によるものと考えられる。

①流体解析（CFD：Computer Fluid Dynamics）の適用

既設水車の設計当時には CFD 技術なく、ケーシング、ステーベーン等の形状が水車効率に及ぼす影響に関する精度が低く、最新の流体設計手法と比較するとロスが多い設計となっている。今回更新する水車は、最新の流解析技術を適用してスピードリングおよびランナベーンの形状を改善した。これにより最高効率点だけでなく、定格出力の 40～50% の部分負荷帯の効率向上を達成できた。

②回転速度の高速化

立軸フランス水車の最新設計において最も効率が良くなる比速度は 180～190 [m-kW] であると言われている。今回の水車更新では定格回転速度を上昇させることにより、基準有効落差時の比速度は既設 158 [m-kW] に対して 185 [m-kW] となり、機器効率の向上が図れた。

※水車の比速度とは、実物水車と幾何学的に相似な模型水車が単位落差（1m）において単位出力（1kW）を発生する場合の回転速度である。図-4 に水車効率比較（基準落差）図を示す。

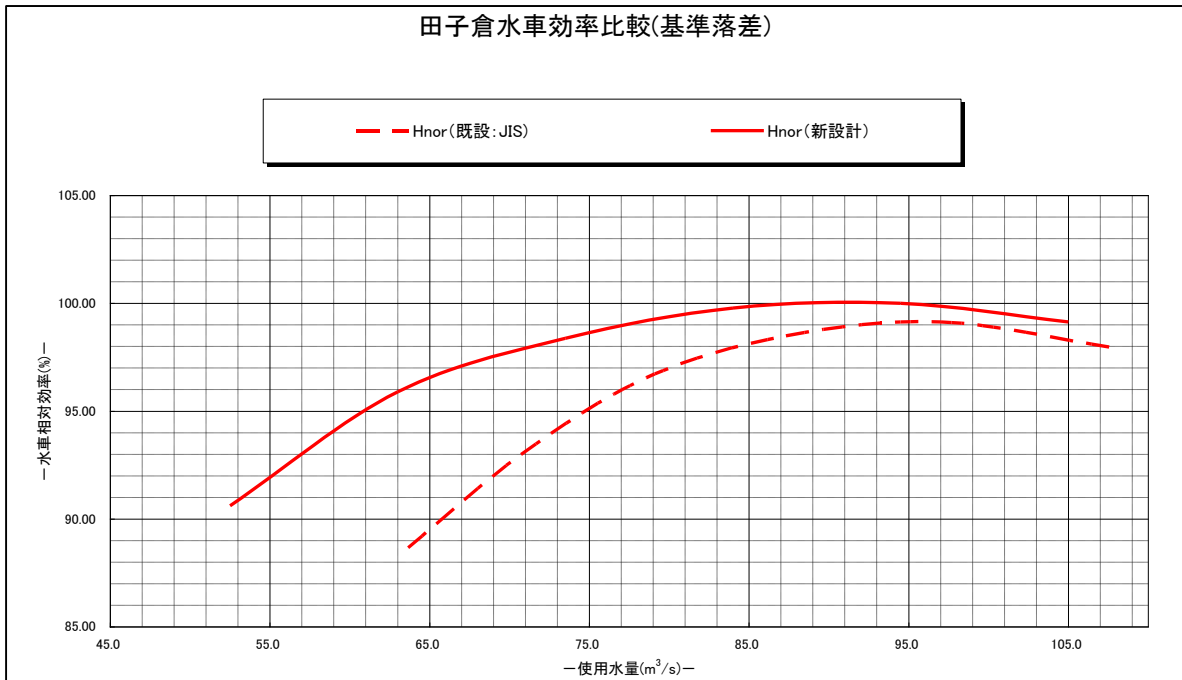


図-4 水車効率比較（基準落差）

③水車設計ポイントの変更

H10 年度～H13 年度の 4 年間の運転実績（ダム水位、使用水量、出力等）を調査分析し、水車設計ポイントを運転頻度が最も高い領域（有効落差、使用水量）に近づけた。図-5 に田子倉ダム水位運用図を示す。

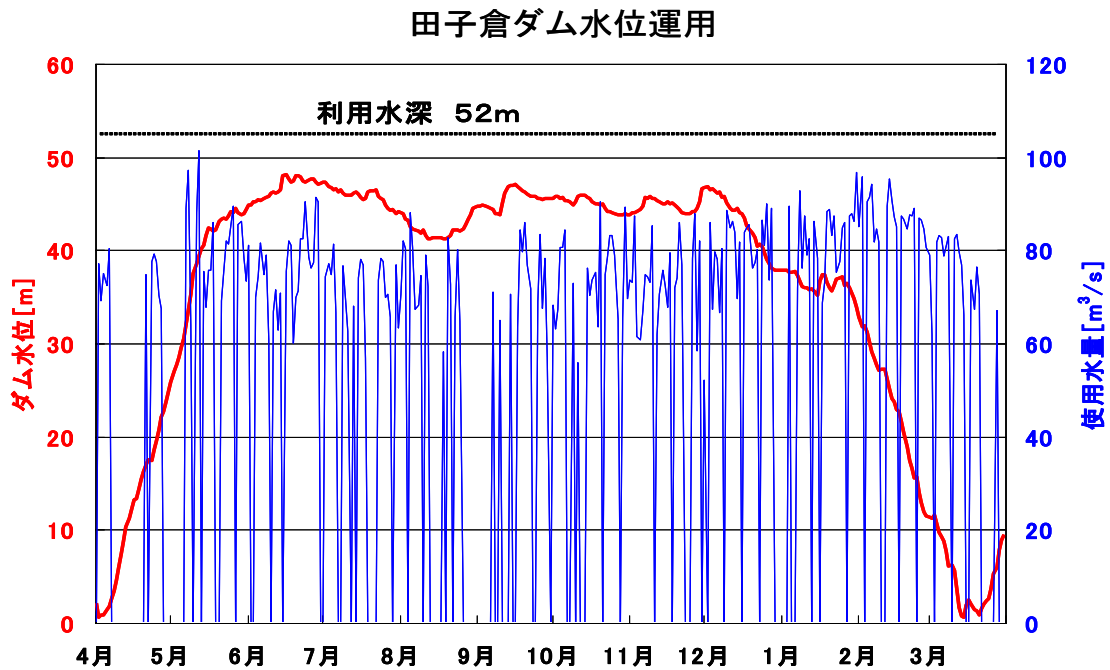


図-5 田子倉ダム水位運用図（ダム水位 EL. 458. 00m＝利用水深 0m）

(7)一括更新工事の施工

運転中の隣接機に注意を払いながら、4号機、2号機、3号機、1号機の順に一括更新工事を約2年間(工事期間は18ヶ月)で、コストダウンを目指して海外サブベンダーを適用したが、順次当初工程どおり、2012年5月に最後の1号機の一括更新工事を終えることが出来た。

3. プロジェクトの特徴

3.1 好事例としての要素（注目点）

- ・ 高経年発電所の一括更新による、コストダウン、信頼性の回復
- ・ 水車回転速度に効率向上を目指して、1ランクアップの回転速度を採用
- ・ 流れ解析技術（CFD）を採用した高効率水車の採用
- ・ 運用実績から設計点の見直し
- ・ 渦巻きケーシングの利用
- ・ 海外サブベンダー利用によるコストダウンとそれに必要な品質管理体制

3.2 成功の理由

一括更新工事の対象発電所の選定時に、部分更新を続けた場合と一括更新工事を採用した場合の経済性の比較を行い、最も良い値となった田子倉発電所を採用した。田子倉発電所は、規模が大きく、重要な発電所にもかかわらず、比較的により主要部品の更新が実施されておらず、一括更新によるまとめ買いによるコストダウンを大きく享受できた。

また、海外サブベンダーの適用により、コストダウンを目指したが、サブベンダー工場での製作時に、品質のチェック、工程管理を重点的にを行い、当初の品質を確保することが出来た。それでも、小さな不適合は数多く発生しており、現地および本社技術者の努力と元請製作者と海外サブベンダーとの協力により、所定の品質をクリアできたと考えている。

既設水車の設計点で、現在の技術では高比速度化による効率改善メリットを大きく受けられる点にあった。加えて、コンクリートに埋設されている渦巻きケーシングの状態が良く、鋼板溶接構造のために、スピードリング、ステーベーンを切り離し、再溶接することが可能であった。また、回転速度の変更によるコンパクト化が、コンクリートの掘削も最小限にとどめて土木工事費の圧縮が可能となった。コンクリート掘削が少なかったことは、他号機の運転中に更新対象機械の撤去、据付が実施でき、停止電力量を最小化できたことの一因でもある。

4. 他地点への適用にあたっての留意点

高経年機器に対して、部分更新を継続した場合と一括更新を採用した場合の経済性検討を実施・判定する必要があると考えられる。稼働中の機器を停止した上での投資となるため、効率上昇、コストダウン、信頼性向上、保守業務の軽減および将来の停止削減などの便益を正確に把握し、対象プラントごとに評価する必要がある。

5. その他（モニタリング、事後評価）

更新/増強工事終了後に、定められたインターバルでのモニタリングは実施していない。一括更新工事が当初計画どおりの、性能向上、経済性、その他の便益が得られたか、事後評価を実施している。概略以下の項目を評価した。

①工事实績

予定どおりの工期で海外での製作、現地据付が問題なかったことと同時に、品質は適切に確保できていることを確認した。本更新工事で経験した各種不適合事項は水平展開を行なった。

②性能と経済性

計画時の効率、出力増加を達成できているかについては、更新後の年間運転記録から、新旧の発生電力量を算定し、その効果を確認した。工事が当初予算以内で完工され、発生電力量の増分と合わせて、経済性が計画通り担保されていることについても確認を行った。

③延命効果と信頼性向上

一括更新工事で、懸案となっていた固定子コイルの絶縁低下などの事項が補機も含めてすべて解決された。一括更新工事の前後の故障発生件数を評価し、信頼性向上を確認した。

④技術的知見の習得

海外製品の製作、据付に関する工程、品質管理に関する知見を得ることができた。ケーシングを流用しスピードリングを更新する再開発手法は、世界初になる（当社調べ）。田子倉発電所のような大規模発電所の一括更新は、コストダウンと性能・信頼度向上の両立を図れる手法であり、経年運転していく発電所を維持していく発電事業者として競争力を維持していく有効な手法であった。

また、本工事において撤去した機器を使用し、発電機、水車および主要変圧器の余寿命評価の精度を向上するための研究開発を実施し知見を得た。

⑤人材育成、技術継承

建設工事や大規模工事が減少していく中、今後の水力発電における競争力を維持・強化するため、各号機毎に入社 10 年以内の若年技術者を最低 1 名配置し、設計・施工管理業務に従事させ、技術継承を図った。

6. 参考情報

6-1 参考文献

- 1) 平成 18 年度 NEF 中小水力技術に関する実務研修会
田子倉発電所主要機器一括更新工事の設計、計画及び施工
- 2) Hydro 2007 New technical solution for the refurbishment of hydropower plant
- 3) 2007 年 1 月 電気評論_平成 18 年・電源開発における技術革新のあゆみ「1. 田子倉発電所主要機器一括更新」

6-2 問合せ先

会社名: 電源開発(株)

URL: www.ipower.co.jp