



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 : 1-d) アセットマネジメント、戦略的アセットマネジメント、ライフサイクル・コスト分析
1-c) 水系一貫水資源管理（総合開発計画、水利権等）
1-f) 環境保全および改善
2-b) 保護と制御に関するシステムの改良
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	: Waitaki 発電所改修計画
国、地域	: 北オタゴ、ニュージーランド
プロジェクト実施機関	: Meridian Energy 社
実施期間	: 2013 年 ~ 2017 年
更新と増強の誘因	: (A) 老朽化／故障頻発 (D) 安全性向上の必要性 (E) 第三者要因に対する必要性
キーワード	: 経年化したダム、発電所および発電機器、耐震性能向上、河川流量合意を満足する信頼ある運転

要旨

Waitaki 川にある Waitaki 水力発電所は 80 年以上稼働しており、タービンおよび発電機プラントの大部分が変わっておらず、耐用期間終了の主な兆候が見られる。これを受けて、2008 年にすべての発電所および資産を含む全資産レビューが開始された。Waitaki でのレビューには全面的な資産状態、性能、リスク評価が含まれ、包括的な改修プロジェクトの範囲が定義され、資金調達が承認された。作業範囲には、以下が含まれる。

- ・ ダムと発電所の更新
- ・ 水門橋脚の土木改修
- ・ 南河岸の土木改修
- ・ 水門のレールおよびホイール
- ・ 発電機の電氣的保護装置の更新
- ・ 発電機の消火装置の更新
- ・ クレーンの更新および改修
- ・ 取水口スクリーンの交換
- ・ 3 号機の再稼働

1. プロジェクト地点の概要（改修前）

Waitaki 発電所は、ニュージーランド南島の Waitaki 川の最下流部位置し 1934 年に運開した。8 カ所の水力発電所から構成され、Meridian 社が 6 カ所、Genesis 社が 2 カ所を所有する（図 1 及び表 1 参照）。

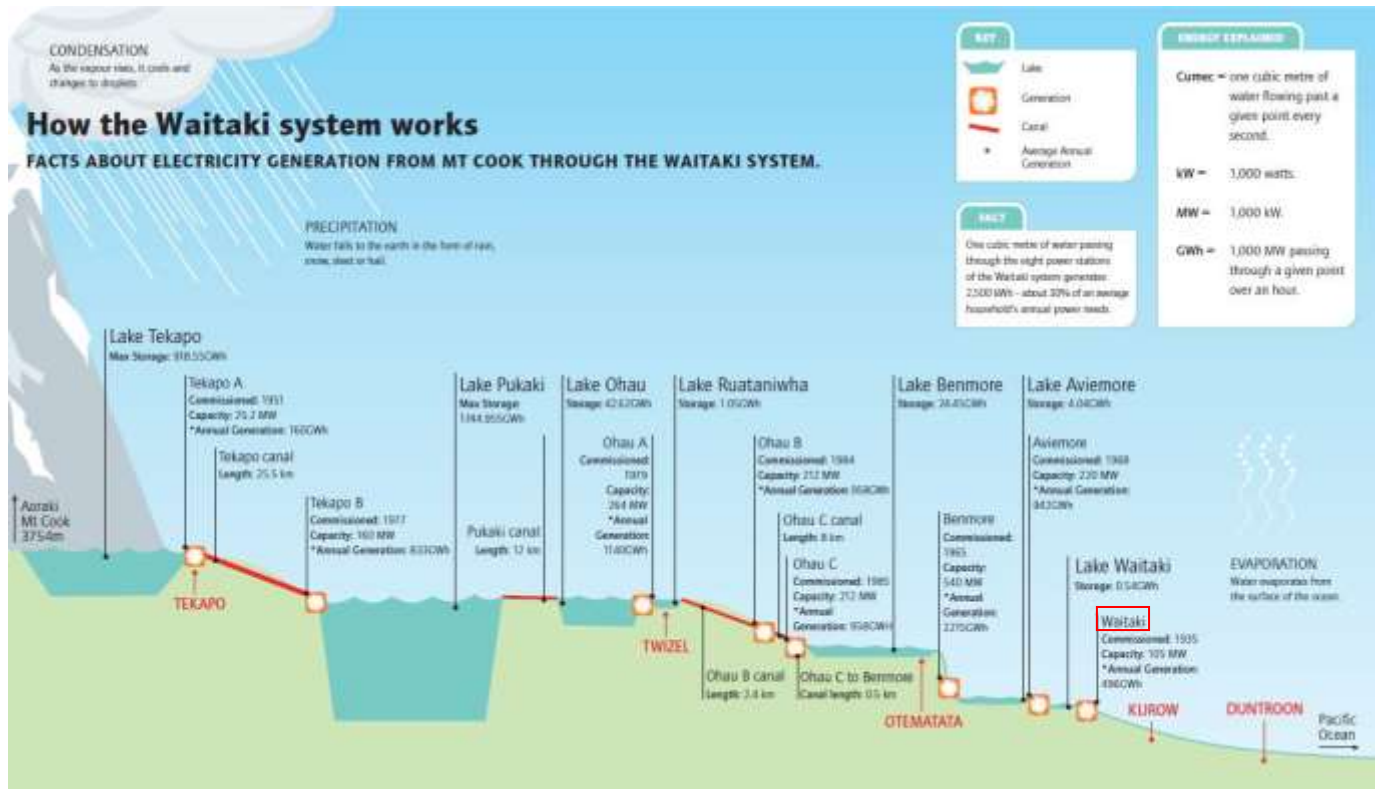


図 1 Waitaki 川の水力開発

表 1 Waitaki 水系水力設備

水力発電所名	発電容量	所有者
Waitaki	90 ¹ MW	Meridian Energy
Aviemore	220 MW	Meridian Energy
Benmore	540 MW	Meridian Energy
Ohau C	212 MW	Meridian Energy
Ohau B	212 MW	Meridian Energy
Ohau A	264 MW	Meridian Energy
Tekapo B	160 MW	Genesis
Tekapo A	25 MW	Genesis
Waitaki 水系の合計	1723 MW	

Waitaki 発電所は、1930 年代に不況期の失業対策として、人力で建設された。1934 年に運開したが、このプロジェクトは、近代的建設機械を使用することなく、人力のつるはしとシャベルで建設されたニュージーランドで最後の大建設工事であった。コンクリートアーチ重力越流式ダムである。Waitaki 発電所は現在、6 台の水車発電機により年間約 490GWh 発電している。

¹ Waitaki 発電所は 1998 年に 3 号機のガイドベーンが故障してから、発電出力が 105MW から 90MW に減少している。

下図（写真中）は発電所の建設と発電所出力増加の歴史を示す。



図2 Waitaki 水力発電所の特徴

Waitaki 発電所の特徴：

- ・1934年：ダムとオリジナルの発電所建屋は1929年代に設計され、不況期に人力で建設され1934年に運開した。
- ・1934年：1、2号機が運転を開始。水車は現在も稼働中。発電機固定子は1979年と1983年にコイルを巻替えた。
- ・1940年：3号機を追加設置、運開。1950年代半ばに水車を更新、1998年ガイドベーン操作機構故障、以来運転を停止している。
- ・1947年：4号機を追加設置、運開。1950年代半ばに水車更新。
- ・1949年：5号機を追加設置、運開。水車は現在も稼働中。
- ・1954年：発電所建屋を拡張し、6、7号機を追加設置、運開。水車は現在も稼働中。
- ・1970年代後半～1980年：ワイタキ川上流開発が進み、運開。
- ・1991年：3～7号機発電機固定子コイル絶縁材に樹脂を注入し、残り寿命の10年延伸を図る。その後22年間運転は継続しているが、ほとんどの技術者が将来的に故障すると推測している。
- ・水車発電機6台×15MW、合計発電所出力90MW。3号機は1998年に運転停止。

Waitaki 発電所の上流に他の水力、ダム、他の水管理施設を建設するまで、発電出力は Waitaki で最重要視されていた。それこそ、Waitaki の発電設備容量が最初の建設から1950年代後期まで増加した理由である。

Waitaki プロジェクトの現在の運転は、ダム下流の流量を資源に基づき合意された最低水位に維持することで、Waitaki 川下流の流量変化を均等化することである。合意された制限内で、Waitaki からの放水量の変化率も制御する。

合意された標準最低流量を満たすには、2 基の Waitaki 発電ユニットを常時稼動する必要がある。Waitaki 発電所の平均流量は、4 基の発電ユニットによる放水量に相当する 360m³/秒である。現在の 6 基の設備容量のうち、5 号機および 6 号機は使用頻度が低く、通常は流入量が多いか、または電力需要が高いときに使用される。通常の年には、4 基の発電ユニットが約 70%～85%の時間に稼動する。

表 2 に、主要タービンおよび発電機の履歴を示す。

表 2 Waitaki 発電所のタービンと発電機

Waitaki 発電機 ユニット	タービン型式と詳細	発電機詳細
1,2 号機	1934 年運開。フランシス水車、設計落差 21.3m、5, 6, 7 号機より若干大きなランナ呑み口径、設計流量 95m ³ /s、メーカー：Boving 社	公称出力 15MW。ガイド軸受は回転子の上、下端。空冷式発電機。メーカー：English Electric 社
3,4 号機	各々1940 年、1947 年に運開。斜流水車（フランシスランナブレードでランナバンドなし）。設計落差 21.3m、設計流量 95m ³ /s、メーカー：English Electric 社	公称出力 15MW、ガイド軸受が回転子の下側にある従来の傘型軸受構造、空気／水冷式発電機、メーカー：English Electric 社
5,6,7 号機	5 号機は 1949 年、6,7 号機は 1954 年に運開。フランシス水車、設計落差 21.3m、1, 2 号機水車ランナ呑み口径より若干小さい、設計流量 95m ³ /s、メーカー：Boving 社	3, 4 号機と同じ

2. プロジェクト（更新/増強）の内容

2.1 誘因および具体的なドライバー

Waitaki ダムと発電所は、高経年化したインフラ設備や機器の事例を有する多くの分野がある。それぞれ一例ずつ以下に示す。

主誘因

(A)-(b) 老朽化／故障頻発—耐久性、安全性、信頼性向上

土木および発電設備の改修

全ての発電機を通して固定子の状態は非常に劣悪で、寿命に達していると評価された。1991 年に、3～7 号機については固定子巻線絶縁材の中に樹脂を注入し、残り寿命の延伸を図った。これは注目すべき方法で、推測した 10 年間の延伸を十分に達成している。1、2 号機の固定子巻線は、1970 年代後半と 1980 年代前半に交換されたが、これもまた非常に劣悪な状態にある。

もし 3～7 号機発電機固定子巻線に障害が生ずれば、（施工した）樹脂注入工法では固定子巻線と固定子鉄心を樹脂被膜で固めてしまっているので補修は実用的ではないと思われる。エンジニアリング評価を基に、発電機固定子巻線の絶縁障害は水車発電機にとって重大な故障モードであり、何れかの 1 台のユニットに発生した故障は、引き続き他のユニットでも起こる可能性が高い。

二次的誘因(1)

(D)-(a) 安全性向上の必要性—安全性の向上

ダムおよび発電所建屋の安全性増強

Waitaki 発電所建屋の構造物耐震リスク評価では、発電所下流側柱、発電所と取水ダム間の屋根トラスと支持梁構造は大地震時には壊れやすいということが示された。下図は Waitaki 発電所の標準断面を示す。耐震強度を評価するため三次元動的構造解析が行われ、2500 年に一度の年超過確率(AEP)地震に対して発電所建屋が耐えるためには比較的小規模の補強が必要であることが分かった。

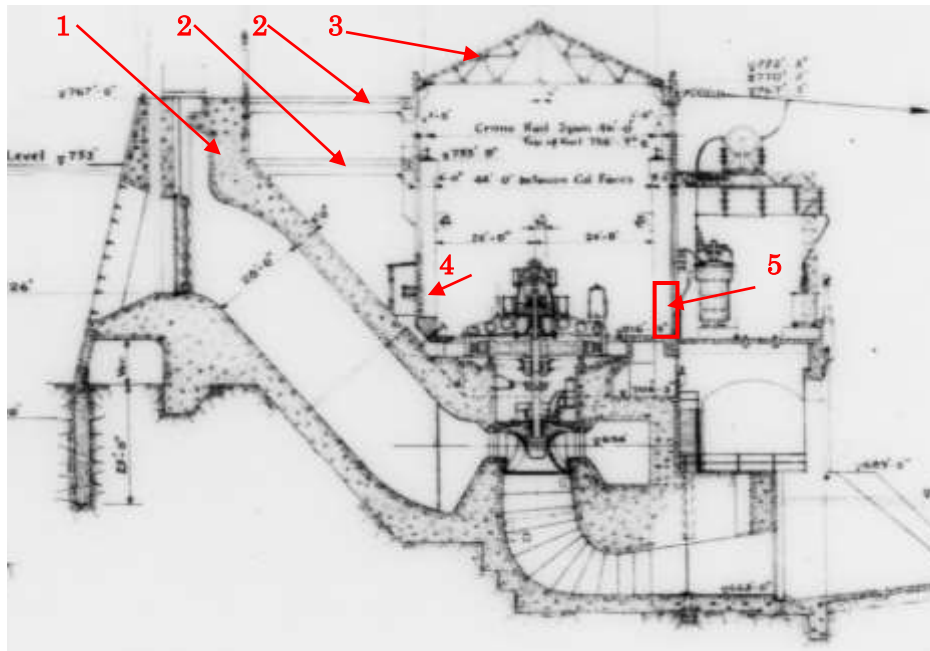


図 3 Waitaki 川水力発電所の標準断面図

要点

1. 取水ダム—耐震強度問題なし
2. 発電所建屋柱と取水ダム間の鉄筋コンクリート支持梁—ダムと発電所建屋間の接合部は地震に弱い
3. 発電所建屋／屋根鉄骨トラス構造—地震に弱い
4. 発電所建屋の鉄筋コンクリート柱、上流側—耐震強度問題なし
5. 発電所建屋の鉄筋コンクリート柱、下流側—赤枠で示されている柱の下部 2～3m の部分は地震に弱い

2014 年 3 月時点では、耐震強度が弱いと指摘された箇所の妥当性、あるいは、そうではなく改修工事が必要かどうか確認するために、更に耐震モデル解析が進められている。

ダムの詳細な構造安全性評価で地震時のダムの健全性が確認された。重大事態が起こった時にダム監査廊へのアクセスを維持するチャンスが確認された。このことは、揚圧力低減用排水孔 (uplift drains) の長期的管理の改善を可能にさせるだろう。

二次的誘因 (2)

(E)-(a) 第三者要因に対する必要性—持続的な運用

水辺流量と流量上昇率に関する同意を満たす必要がある発電機器

Waitaki 発電所は、上流発電所群からの流入量の変動を緩和するために貯水池を使いながら、最小流量とランピング率（水位変化率）に関する「環境的に許可された」要件を、合意資源を満たすように Waitaki 川下流での河川流量の変化を滑らかにしている。Waitaki 発電所での信頼性の高い運転は、上流側発電所群での電力市場に応じたフレキシブルな運転を可能にし、収益を最大化し、かつ、貯水量を管理することができる。このような信頼性の高いレベルを達成するために、Waitaki 発電所の少なくとも 2 台の発電ユニットは常時運転することが求められる。

2.2 経緯

Waitaki 改修プロジェクト調査の一環として、技術分野、運転および環境影響、第三者への潜在的影響を含め、すべての資産が評価された。充実したビジネスケースを作成し、復旧工事を進める資金調達承認を取得するため、事前 F/S 調査およびその後の F/S 調査が実施された。

一部の複雑かつ固有の復旧工事に関する範囲と費用を確定するため、専門家と実際の請負業者の施工者早期参加方式（ECI）を使用して、実用的なソリューションを開発し、現実的な費用見積もりを提示した。

事前 F/S 調査および F/S 調査において、「予期しない出来事が起こらないこと」とプロジェクト目標が妥当であることを保証するため、事業および管理に関して頻繁なやりとりが実施された。さらに、事前フィージビリティ調査およびフィージビリティ調査では、Meridian 社に利益をもたらす機会も評価された。事前 F/S 調査および F/S 調査は、完了するまで約 3 年かかった。プロジェクト範囲を決定するプロセスは、以下の「必須」作業活動の優先順位に基づいて決められた。

- ダムと発電所の更新
- 水門橋脚の土木改修
- 南河岸の土木改修
- 水門のレールおよびホイール
- 発電機の電氣的保護装置の更新
- 発電機の消火装置の更新
- クレーンの更新および改修
- 取水ロスクリーンの交換
- 道路交差点の更新

タービンと発電機の更新は、耐用期間終了の問題に対処し、追加発電エネルギーの利益をもたらす手段として特定されたが、費用が高くなる。「予備」発電容量を使用できる（通常、6 基の設備容量に対し、4 基が 70%~85%の時間に稼働する）Waitaki 発電所の状況に基づき、代替案が検討された。技術経済評価を経て、3 号機を再稼働することで利用可能な発電容量を増加させることが決定された。Waitaki 発電所は、7 基の発電ユニットによる 105 MW の全容量に戻る。3 号機を再稼働すると、以下が実現するものと考えられた。

- 発電所固定子またはその他のユニットに関連する故障を考慮して十分な発電容量を提供し、Meridian へのリスクを許容範囲内に収める
- コストのかかるタービンと発電機の更新を延期する

このアプローチの一部として、すべての Waitaki 発電ユニットが通常どおり維持されるが、事後保全に基づいて稼動する。ただし、このアプローチは、発電容量を追加的に利用できるために Waitaki で実行可能であると判断されたにすぎず、Meridian 社は残りの水力または風力ポートフォリオをこの方式で運営するわけではないことを指摘しておく。さらに、発電所固定子故障の重大な影響を最小限に抑えるため、追加的なリスク緩和作業が実施された。この故障は想定される事象であり、発電ユニットの交換を引き起こす。これらの作業には、防火装置および電氣的保護装置の更新を含む。

資金調達の承認は、2012 年 12 月に取得された。詳細な設計、調達、物理的な復旧工事は、2013 年初めに開始され、すでにいくつかの作業パッケージが実施されており、完了するまで 4 年ほどかかる見通しである。2017 年に完了予定となっている。

2.3 内 容（詳細）

計画時になされた主な検討

プレ F/S と F/S では、課題、リスク、工事範囲、（環境）緩和コストを確認、明確に定義し、様々な選択肢について経済性の分析を行った。この分析は、Waitaki 発電所の全ての設備資産、それに、技術的な、運用上の、また環境上の課題に係わるリスク（これらは第三者に及ぼすリスクも含むが）をカバーした。資金の貸付承認のためにローバストな投資対効果検討書（business case）が作成できるように、より複雑で他に類を見ないリスクの、十分なスコーピングとコスト見積もりが施された。いくつかの工事パッケージについては、実行可能な工法を策定し現実的なコスト見積を行うため経験豊かな請負業者を早期に雇い入れる ECI（Early Contractor Involvement, 早期デザイン・ビルド）方式を取り入れた。

プロジェクトの実施中、あらゆる部署で、そして管理者との間でも、当然のごとく、また、プロジェクトの目標が妥当であることを確実にするために、頻繁にコミュニケーションがとられた。また、Meridian 社に利益をもたらす機会は評価された。プロジェクトの 3 年間、外部コンサルや請負者に加えて、Meridian 社内部のエンジニアリング、アセット・マネジメント、運転の各部門から多くの助力を得た。ダムと発電所建屋構造に関する詳細な耐震検討も行われた。

プロジェクトの範囲は、（Waitaki 発電所が最下流に位置し河川の流量管理を行う施設であることから、）これまで継続してきた信頼性の高い水力発電と安全で確実な河川管理を行うという能力に影響を与えるような重要なリスクと問題のマネジメントを基本としてまとめられた。これらは以下を含む：

- ダムの耐震性能・最近の安全性評価の結果では、ダムおよび付帯設備が最大想定地震（MCE）に確実に耐えることが確認された。しかし、MCE による影響を制限することができる特定改善点があった。
- スルース・ゲートのレールと車輪・ゲートは、地震発生後の状況により貯水池水の緊急放流を求められるが、既設ゲートのレールと車輪は、大地震でダメージを受けそうである。
- 発電所建屋の耐震性・発電所建屋は、2500 年超過確率(AEP)の地震で欠陥ありと評価された。
- 南側河岸（右岸）浸食・河岸は侵食され、主洪水吐の放流時あるいは洪水発生時に、開閉所へのリスクをもたらす。
- 柱の損傷・ゲートの下流域が浸食されコンクリート柱の基礎を脅かしている。これはゲート操作に制限を与えている。

- 発電所の補助装置 - 多くの補助装置が寿命が不適合であり、必ず対処すべき安全衛生上の危険因子も含んでいる。
- 発電機器 - すべての水車発電機ユニットは、劣悪で寿命に等しい状態にあり、確実な運転が継続できるか不確かな状況である。重要な故障モードとして、発電機固定子の絶縁不良が特定されており、樹脂を注入していない1、2号機と絶縁用に樹脂を注入した3から7号機両方に問題がある。

特定されたリスク軽減のための水車発電機の増強は、発電電力量増加の便益ももたらしたが費用も嵩んだ。Waitaki 発電所は“予備的な”発電容量を持っているが（概ね4台の発電機で年間収益の80%以上を生み出している）、3号機を復帰させることで発電容量を増やすことが計画されている。Waitaki 発電所は、発電機7台で全容量設備105MWに復帰することになる。

3号機を再稼働する主な理由は、（3号機自身の）発電機固定子の潜在力、あるいは現在稼働中の他6台の関連不具合に応じた追加の発電出力を生み出すことである。これは事実上 Meridian 社に、既設水車発電機のリスク軽減のために計画した高価な水車発電機の更新を延期させることになるだろう。しかし、これは何らかの潜在的な機器の欠陥が1台に含まれていて、それが発電所に少しダメージをもたらすことを確認するためである。例えば、1、2号機は大量の油を含んだ塵芥が固定子のコアと巻線に堆積して火元となることが懸念されたので、保護装置と火災鎮静装置の増強が、空冷式発電機1、2号機の固定子洗浄作業と共に計画されている。前述のように、重大な特定された発電ユニットの故障リスクは、発電機固定子絶縁不良（故障）であり、何れかの号機で固定子故障が起これば、他の号機でも同様の故障が相次いで起こるかもしれない。

分析では、予定した発電機と水車の更新を少なくとも4～5年延期することは経済的利益をもたらすことを示している。しかし、修繕に時間あるいは高い費用を要するいかなる設備故障も、経済評価と投資対効果検討書しだいではあるが、水車発電機更新の引き金（誘因）となる。

発電機ユニット更新が実施される時、4台のユニットが平均70～85%の稼働時間であるため、7台のユニット全てが増強されるのは好ましくと考えられる。従って、この段階（現段階）では4台のユニットの更新が推奨される。今後4～5年の間にこれといったユニットの故障がなければ、発電機と水車更新の経済性と投資対効果検討書は見直されるであろう。

1-c) 水系一貫水資源管理（総合開発計画、水利権等）

Waitaki 発電所は、Waitaki 川下流の流量変化を均等化して、資源に基づく合意を満たす。これらの合意は、最低流量およびランピング速度に関する「環境面で認められる」要件を含み、貯水池とユニット流出流を操作して、上流の発電所からの流入量変化を緩和することで満たされる。Waitaki の信頼できる性能により、上流の発電所を柔軟に運転して市場の要求を満たし、貯水量を管理し、発電による収益を極大化することができる。要求される信頼性レベルを達成するには、少なくとも2基の Waitaki 発電ユニットを常時稼働しなければならない。（上記の説明は、対応するキーポイントに含まれるポイントとは多少異なる。）

1-d) アセットマネジメント、戦略的アセットマネジメント、ライフサイクル・コスト分析

このプロジェクトは、80 年経過した Waitaki 水力発電所の、主要な資産全体に及ぶ改修計画である。Waitaki の水車発電設備の大半は元のままであり、寿命を迎えていることを示している。戦略的な資産の見直し評価により、発電を継続するための問題点とリスク、また、逆にどのような機会が可能なのか、これらの問題点とリスクおよびその経費を削減するにはどのようなことを行わなければならないのかを決定した。ライフサイクル・コスト分析は、改修事業を進めること、リスク管理、経済性、および運用面をカバーする投資対効果検討書への情報を提供した。

1-f) 環境保全および改善

Waitaki プロジェクトは、先に述べたように Waitaki 川下流の河川管理（最小流量と水位変化率（ランピング率）の確保義務）のために不可欠なものである。

2-c) 土木建築分野の技術革新、適用拡大、新材料

既設炭酸ガス消化装置は動作するだろうが、重大なダメージを防ぐことはできないかも知れない。Meridian 社は不活性ガス充満消火設備と強化煙探知システムの更新に併せて水力発電機の増強を実施していき、Waitaki 発電所すべてのユニットに設置されるであろう。

3. プロジェクトの特徴

3.1 好事例要素

資産管理およびリスク管理：プロジェクトは、Meridian 社の戦略的資産管理計画プロセスの成果として特定された。プロジェクト範囲は、Waitaki が信頼できる水力発電を提供し、安全で信頼できる下流の制御を行う（Waitaki 発電所は Waitaki 川で最も下流にある水力発電および水管理施設であるため）能力に影響を及ぼしうる主なリスクと問題を管理することに基づいて策定された。

構造安全性レビュー：Meridian 社は、国際的な専門家のピアレビュー対象となる Waitaki ダムの厳密な構造安全性レビュープロセスを実施した。評価結果では、故障や貯水池の制御されない放水を伴うことなく、ダムがサイトの最大想定地震や推定最大洪水事象に十分耐えたと結論付けられた。これらは、同サイトに建設される新規ダムに適用されるものと同じ負荷条件および安全条件である。

ダムと発電所構造物に関する地震モデリングも実施され、必要な復旧工事が改修計画に含まれている。

コストのかかるユニット更新の代替案：タービンと発電機の更新は、耐用期間終了の問題に対処し、追加発電エネルギーの利益をもたらす手段として特定されたが、費用が高くなる。「予備」発電容量を通常使用できる Waitaki の状況に基づき、3 号機を再稼働することで利用可能な発電容量を増加させることが決定された。発電所固定子またはその他のユニットに関連する故障を考慮して十分な発電容量を提供し、Meridian 社に許容リスクを提示し、コストのかかるタービンと発電機の更新を延期する。

3.2 成功の理由

このプロジェクトは、80 年経過した Waitaki 水力発電所の、主要な資産全体に及ぶ改修計画である。Waitaki 水車発電設備の大部分は元のままであり、寿命を迎えていることを示している。戦略的な資産の見直し評価により、発電を継続するための問題点とリスク、また、逆にどのような機会が可能なのか、これらの問題点とリスクおよびその経費を削減するにはどのようなことを行わなければならないのかを決定した。ライフサイクル・コスト分析は、改修事業を進めること、リスク管理、経済性及び運用面をカバーする投資対効果検討書への情報を提供した。

4. 他地点へ適用にあたっての留意点

将来のプロジェクトを評価し実施する重要な段階として、過去のプロジェクトの教訓を活用することが Meridian 社の方針である。これには、技術、環境、社会、プロジェクト、契約管理のあらゆる面が含まれる。Waitaki 発電所改修プロジェクトの全体的成功を受け、多くの適用ポイントが将来のプロジェクトに採用される見通しである。以下に最も重要なものを示す。

- 厳格な資産およびリスク管理プロセスを使用して、改修プロジェクトの範囲を特定し、定義する
- すべての改修イニシアチブの時期を最適化し、費用の重複と発電所稼働率への影響を避ける
- 支出とプラント性能低下の代償とのバランスを取り、最適な時間枠の範囲内で作業を予定する
- 資産改修の具体的要件を全体的な資産ポートフォリオ戦略に合わせて調整する
- 引き続き、改修のあらゆる事項における Meridian 社作業員の能力を育成する

5. その他（モニタリング、事後評価等）

状態、リスク、プラント性能を含むすべてのプロジェクトパラメータは、資産管理プロセスの一部として定期的に監視、蓄積、分析される。この情報は、現在の保守業務および将来の改修作業の基準として使用される。

6. 参考情報

6.1 参考文献

- 1) Hydro Power Engineering Exchange (HPEE) Conference, August 2014, Hobart, Tasmania
- 2) Electrical Engineers Association (EEA) Conference, June 2014, Auckland, New Zealand

6.2 問合せ先

会社名: Meridian Energy Ltd.

URL: <https://www.meridianenergy.co.nz/>