

平成 29 年度水力発電の導入促進のための事業費補助金（水力発電事業性評価等支援事業）のうち技術情報の調査事業 報告書（概要版）

1. 事業概要および目的（IEA 水力実施協定の概要を含む）

(1) 事業概要および目的

エネルギー自給率が低い我が国において、水力発電は再生可能エネルギーの中でも安定的な電力供給を長期に亘り行うことが可能な電源と位置付けられており、2015 年（平成 27 年）7 月に決定した「長期エネルギー需給見通し」においても、2030 年（平成 42 年）の電源構成として、8.8～9.2%の水力発電が見込まれている。

非化石エネルギーである水力発電は、純国産でクリーンな再生可能エネルギーであるという特徴を有しており、地球温暖化に対応するためにも開発・導入を支援していく必要がある。

しかし、水力発電のための開発地点は小規模化、奥地化しているため、経済上の課題が存在する。また、自然・社会環境面からの制約などもあり、開発に際しては他事例などを参照に創意工夫を施し、課題克服をしていかねばならない。つまり、今後の中小水力開発を推進するためには、国内外で活用されている既設発電所の再開発技術や中小水力導入技術情報等を収集し、開発地点の自然条件などを加味した上で地点ごとに丁寧に適用していくことが重要となってきている。

このため、本事業では、国際エネルギー機関（IEA）の「水力技術と計画に係る実施協定」（以下「水力実施協定」という。）に参画する新エネルギー財団あるいは新エネルギー財団が指定する海外委員を支援し、他の参加国と共同で実施する水力発電に係る調査研究、水力発電に係る最新の技術情報あるいは政策情報の共有活動を通して、国内水力事業者が必要とする水力開発の促進に係る情報をタイムリーにわかりやすく提供することを目的とする。

(2) IEA 水力実施協定の概要

IEA（International Energy Agency：国際エネルギー機関）は、エネルギーの安全保障および持続可能なエネルギー需給構造の確立を目的として、1974 年に設立された国際機関であり、OECD 加盟 35 カ国のうちの 29 カ国が参加（2016 年 8 月時点）している。図-1.2.1 に示すように、IEA では、理事会の下に 5 つの常設部会が設置されている。常設部会の一つであるエネルギー研究技術委員会（CERT：Committee on Energy Research and Technology）には、各種エネルギー技術の調査・研究開発に関する 4 つの作業部会が設けられており、各作業部会の中に組織された国際協働プログラム（実施協定）を支援している。実施協定では、OECD 非加盟国や国際組織を含む各種機関と共同研究が推進されている。2018 年現在、再生可能エネルギー作業部会（REWP：Working Party on Renewable Energy）で 10 の実施協定（Implementing Agreement）が、また、エネルギー研究技術委員会全体では 40 以上の実施協

定が活動している。

水力実施協定は、再生可能エネルギー作業部会の中の実施協定の一つであり、1995年の締結以来、加盟国等がこれまでに蓄積した水力技術を集結し、世界レベルでの水力開発の更なる促進に資することを目的に活動を行っている。

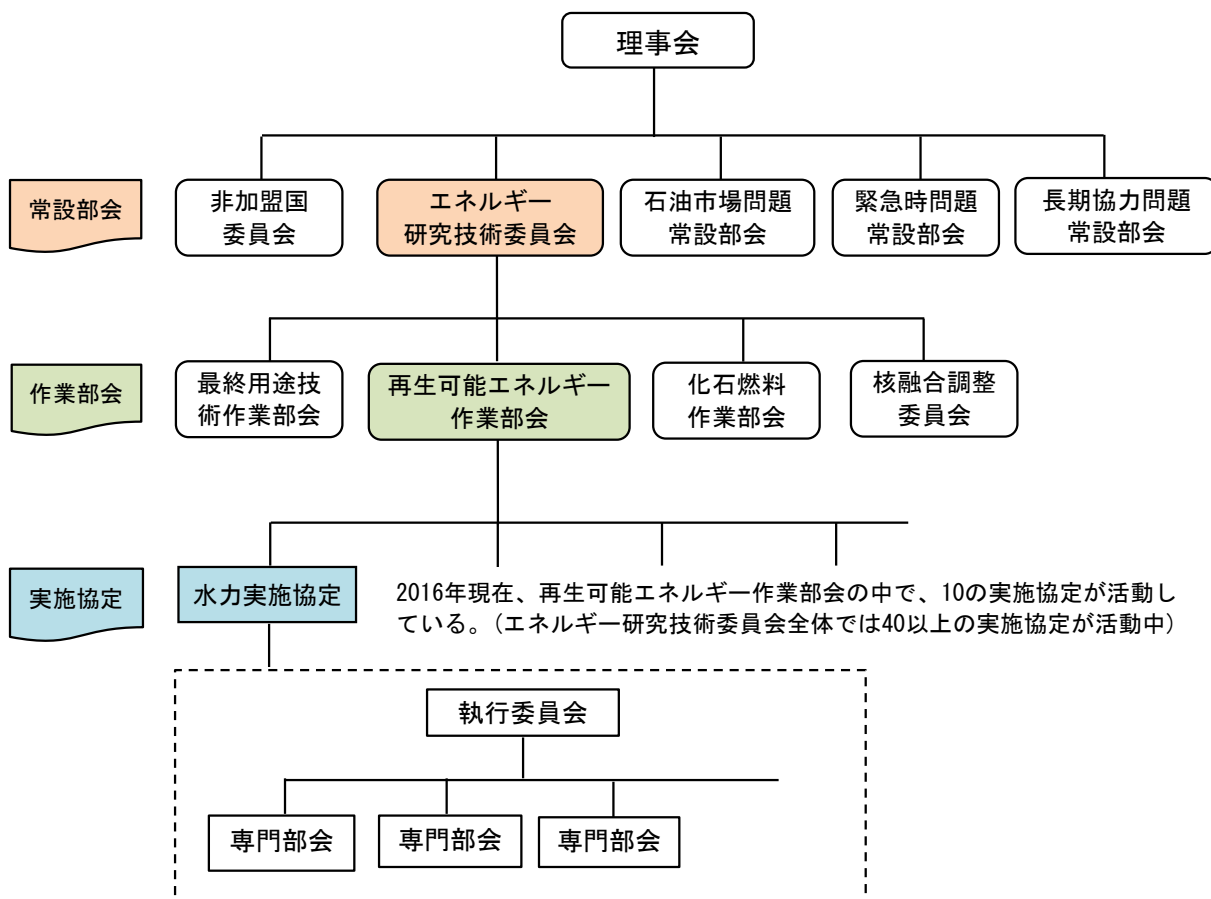
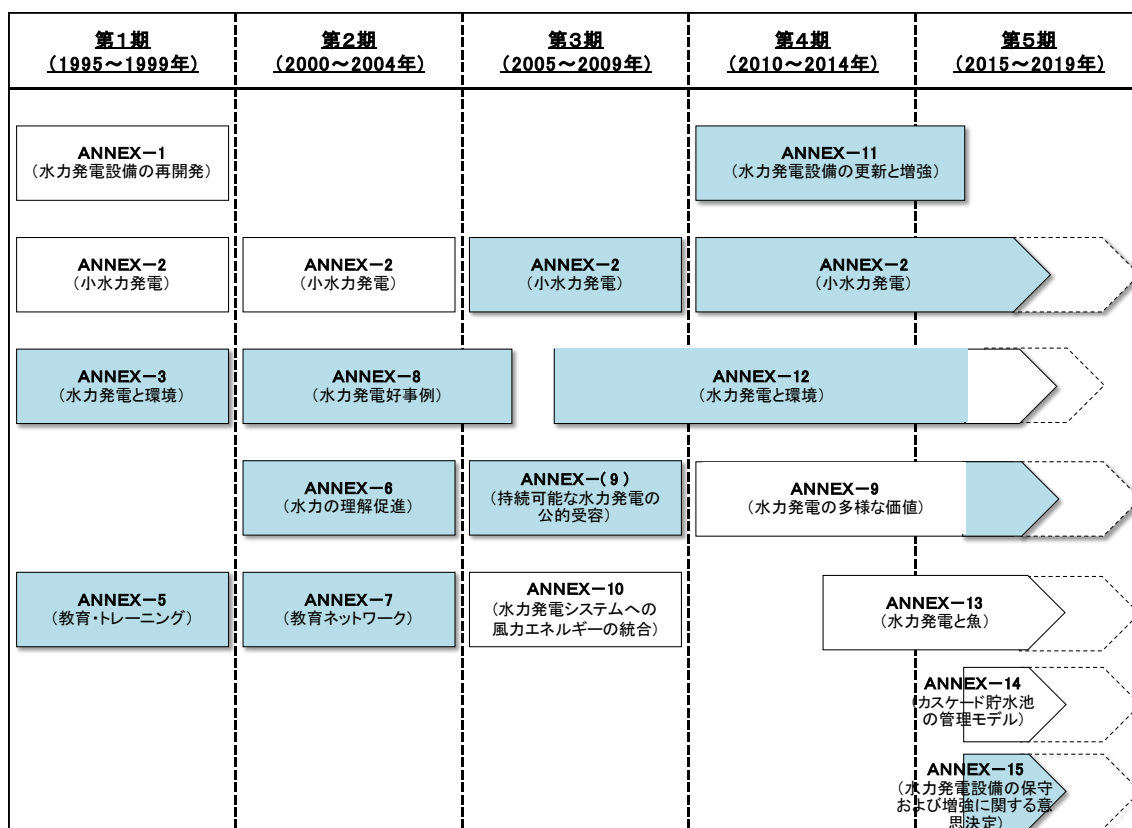


図 1.1 国際エネルギー機関(IEA)の組織

IEA 水力実施協定は、その1つの活動期間を5年間としてさまざまな課題に取り組んでおり、第1期(1995~1999年)、第2期(2000~2004年)、第3期(2005~2009年)、第4期(2010~2014年)の活動に続いて、2015年3月から第5期(2015~2019年)の活動を実施している。水力実施協定の活動は、全参加国の代表により構成される執行委員会と、テーマ毎に設立される専門部会(Annex)により行われている。専門部会活動の変遷を図1.2に示す。



ANNEX-O 日本が参加した専門部会
(ただし、第4期の2011年度、日本はAnnex-2へは参加していない。)

図 1.2 各活動時期の専門部会(Annex)

今年度は第5期の3カ年目にあたり、Annex-2「小水力」、Annex-9「水力発電の多様な価値」、Annex-12「水力発電と環境」、Annex-13「水力発電と魚」、Annex-14「カスケード貯水池の管理モデル」およびAnnex-15「水力発電設備の保守および増強に関する意思決定」の活動が推進されている。そのうち、今年度、日本としては、Annex-2、Annex-9 および Annex-15 の活動に主に参画した。なお、Annex-15 に関しては、日本が執行責任者(OA; Operating Agent) となって取り組んでいる Annex である。

2. 事業実施結果 (執行委員会、専門部会、国内委員会等)

(1)IEA 水力実施協定 執行委員会 (ExCo)

執行委員会 (Executive Committee; ExCo) は、参加各国の代表者1名ずつから構成されるIEA 水力実施協定の最高意思決定機関である。参加国は、オーストラリア、ブラジル、中国、フィンランド、フランス、日本、ノルウェー、アメリカの8カ国である (2016年3月1日現在)。執行委員会には、議長 (Chair) と事務局 (Secretary) が置かれ、議長は、IEA水力実施協定を代表する。2018年3月から、Mr. Alex Beckitt (オーストラリア (ハイドロタスマニア)) が議長に就いている。また、事務局はMr. & Ms. Nielsen (オーストラリア) が務めている。

執行委員会は、次のような役割を担っている。

- 本協定の5ヶ年に亘る活動計画の立案と承認
- 本協定の年度予算の審議と承認
- 国際社会および参加各国の電力エネルギー・水力発電・その他再生可能エネルギー（Renewable Energies; REs）起源電力等の直近の動向、政策、課題、技術開発等に関する情報の共有
- 具体的な活動を推進する専門部会（Annex）に関する審議と承認、及びその活動の支援
- ウェブサイトを通じた各種情報の展開（<http://www.ieahydro.org/>）
- IEAの枠組みの下で活動する、再生可能エネルギーに関する他の実施協定との連携、情報の共有、など

今年度は、2017年10月に臨時執行委員会、2018年3月に本執行委員会が、それぞれスペインおよびアイスランドで開催された。以下に両会合を経た各Annexにおける審議結果等を記載する。

【主な審議結果等】

（Annex-2について）

- ・ サブタスクA3（政策と経験）について、カナダPaul Norrisが各国のCountryレポートまとめをリードしており、まとまり次第IEAのWEBにアップされる予定である。
- ・ サブタスクA5（地域社会における持続可能な小規模水力発電）については、サブタスクリーダーを務めている日本から、昨年度完成した報告書内容に関する広報普及活動の実施結果を報告した。また、次年度には同報告書内容に基づき、持続可能性のある小水力の好事例のコンセプトを整理したガイド書を完成させる予定である。
- ・ 新課題案として挙がっている”Hidden Hydro“について、今後の検討方針案を日本から提示し、Hidden Hydroを以下の3つのタイプに分類し、それぞれのタイプごとにサブタスクを設置して活動を進めていくことが合意された。
 - タイプⅠ：包蔵水力の考え方、調査方法
 - タイプⅡ：ダム運用見直し、嵩上げ等増強
 - タイプⅢ：従来みられていなかった落差・流量の利用（維持流量、灌漑用水、下水処理利用など）
- ・ 新課題案”Hidden Hydro“の今後の活動としては、新たなAnnexとして活動していくこととし、次年度の夏ごろに専門家会合を開催するか、10月開催予定の臨時執行委員会、もしくはそれ以前に会合の場を設けて、米国、ノルウェー、オーストラリアを中心にAnnexの名称や今後の取り組み方針について議論される予定である。

（Annex-9について）

- ・今年度でこれまでの活動成果であるサマリーレポートおよびその要約版であるエグゼクティブサマリーが完成したため、フェーズⅠとしての活動は終了となる。フェーズⅠのサマリーレポートおよびエグゼクティブサマリーについては、IEA水力実施協定ウェブサイトからダウンロードが可能である。今後はフェーズⅡとしてAnnex-9活動を継続する。
- ・フェーズⅡとしては、従来から取り組まれていた水力発電のエネルギーとしての価値と水管理としての価値の両方をさらに深掘りする予定であり、エネルギーとしての価値については特に変動型再生可能エネルギー（VRE）が系統に大量導入された場合の系統安定化としての価値、水管理の価値については気候変動への対応力としての価値も議論される予定である。
- ・フェーズⅡの活動については、IEA本部の活動との連携も視野に入れて、本水力実協定の上位機関であるREWP等への情報提供をしていくことが重要との方向性が示された。なお、実務者レベルでのIEA主催のアドバイザリー会合が2018年6月に日本で開催される予定となっているため、本Annex-9のメンバーからも出席することが重要という見解が示された。
- ・日本としては昨年度からAnnex-9に参加しており、今年度はフェーズⅡ活動に繋がる以下の取組みを実施した。
 - i) 欧州における揚水発電事業の状況調査
 - ii) 水力発電の価値に関する国内既存研究の事例提供
- ・フェーズⅡ活動については今後IEA本部との連携を検討していくうえで、日本が実施した上記2件はともに重要な内容であるとして、英語化したレポートを速やかに提出するようIEA水力実施協定事務局から強く要請された。

(Annex-12について)

- ・これまでの活動成果として、ダム貯水池からの温室効果ガス放出量評価に関するガイドラインを2巻公表している。今年度は『Management, Mitigation and Allocation of GHG Emissions』のガイドラインVol.3を完成させ、IEA水力実施協定ウェブサイトへ公開した。
- ・今後は、温室効果ガス放出に関して以下のポジションペーパーを作成する予定としている。
 - i) ダム貯水池からの温室効果ガス放出量評価を実施している各団体による解析方法の比較検討
 - ii) 水力開発への投資を検討する際の温室効果ガス放出量に関する基準策定の検討
- ・2018年12月より本格活動を再スタートすることとし、再開に向けた関係各国との調整（事例提供依頼等）を実施する予定としている。将来的な活動としては、ハイドロケベック（カナダ）やハイドロタスマニア（オーストラリア）による貯水池の炭素バランスによる気候変動への影響、水力発電所のライフサイクル分析によるGHG評価プロセス、貯水池の蒸散のバランス等を分析していく方針である。

(Annex-13について)

- ・今年度の主な活動としては、2017年5月にEUと共同でワークショップを開催し、魚保護に関連するモニタリング手法の新技术や河川環境に関する規制基準値のあり方などについて発表・パネルディスカッションが実施された。
- ・今後の活動予定として、魚類管理の好事例を元に魚類管理に係るロードマップを作成する予定である。また、2018年にオーストラリアで魚道会議を開催予定である。

(Annex-14について)

- ・今年度の主な活動としては、2017年11月に中国でワークショップを開催した。また、ダム貯水池所有者等へのアンケートを実施し、中国でのカスケード式貯水池群の管理に係るケーススタディーの報告書のドラフト版を完成させた。さらに、国際河川におけるカスケード貯水池群の管理事例を収集した。
- ・臨時執行委員会および本執行委員会ともにOAである中国からの出席が無かったため、当時水力実施協定議長であったノルウェーから状況報告がなされた。
- ・現在は中国とノルウェーが活動に参加しているが、他国からの参加も募集された。

(Annex-15について)

- ・昨年度よりAnnex活動を正式に進めていくために議論を重ね、今年度実施された2017年10月の臨時執行委員会において説明した当該Annex実施計画書改定案に対して、会合参加者から概ね理解を示され、2018年3月に開催された第34回執行委員会において、関係者の承認が得られ、OA、IEA水力実施協定の議長と事務局のサインがなされた。当面オーストラリア、ノルウェーが参加していくこととなった。今後は、提案書に沿って、2018年12月までに各国から事例収集について進めて行くことで合意された。

3. 当事業の実施により日本として有益となる情報収集結果

(1) Annex-15

・HYDRO2017での収集情報

今年度参加した国際会議 HYDRO2017 において、Annex-15 に関連するアセットマネジメントあるいはリスクマネジメントに係わる 8 論文を以下に整理する。

- ✓ アセットマネジメントに関する論文 (HY-13)、
- ✓ モニタリングに着目したもの (HY-18、HY-19)、
- ✓ データベースの構築に着目したもの (HY-20)、
- ✓ 主要機器の更新に着目したもの (HY-23)、
- ✓ 災害リスクに関わる論文 (HY-4)、
- ✓ 堆砂リスクに関わる論文 (HY-10)、
- ✓ 水力発電所の再開発に関する論文 (HY-11)

1) [HY-13] How a combination of hydro expertise, condition monitoring, and digital technology provides more flexible hydro turbines (アセットマネジメント)

エネルギー環境の変化により水力発電所をより柔軟に運転する要請が高まっているなか、水力発電に関わる各種機械の設計領域を外れて運転することにより、摩耗が進行しメンテナンス費用が増大する傾向にある。既存の設備をその種の運転に備え事前に正確に評価すること自体、手間もかかり費用も増大する。

GEのアセット性能管理方法(Asset Performance Management (APM))[以下 APM と記載]は、設計時の想定とは異なる運転方法への評価が可能になったばかりではなく、より多くの発電所に対して運転上の柔軟性を可能とする道を開くこととなる。このモニタリング・システムではデジタルツインにより専門的知識・知見(expertise)を診断、予測ソフトを組み込み、リアルタイムで蓄積するターボ機器部品の累積摩耗を評価する。その結果により、有効残存寿命を調整することが可能となる。このシステムは将来に予測される運転方法による摩耗も予測できる。更には、GEのクラウド(Internet Of Things and Predix System)と連携を取ることによって、(他の)機器との比較、複数の機器(発電機)で構成される場合においては、ある期間においてメンテの最適化、損傷に伴うコスト削減のためにどのユニットを運転すべきかの提案もすることができる。

水車のフレキシビリティ(可動範囲)を改善するためのデジタル技術には精度とコストのレベルにおいて様々な対応がある。水車のき裂による損傷に関して残存有効寿命をほぼリアルタイムで計算するための分析例として、運転履歴と実際の機器のデジタルツイン(digital twin)の成果として整理される Damage Hill Chart「DHC」を紹介。水力における技術的課題はDHCを求めることである。

DHCを求める様々な方法及びこの分野における最近の研究は、デジタルによる取り組みによって進歩し、ホットスポットの推定にも及び、損傷計算がエッジ(現場)における専用のモニタリングからもたらされることを示した。

より簡便な手法として、ランナーのき裂を履歴解析(Expert history data analysis)により分析した事例として、運転データと同種機器の応力測定データベースと組み合わせることで一次の評価ができることを示した。この手法では既存のデータを使用するのでコストは低い。したがって、複数の機器からなる機械に適用して残存寿命により詳細な検討を要する機器を選択することができる。このアプローチは、運転者と設計者がそのための解析又はデーター・マイニング・ツールを使用する共通のプラットフォームでデータを共有することにより可能となる。

DHCの活用例に関しては物理的なモデル(デジタンツイン)により適応外範囲を削減することによる適応の柔軟性の拡大について述べた。既存の発電所でこの適用事例は殆ど無いが、現場における解析技術(エッジプロセッシング)の利用によって、不安定な状態をリアルタイムでモニタリングし、制御コマンド・遠隔操作(通信)との最

適化が可能となった。

以上の手法は補助的なもので、水力の分野へのデジタルによるソリューションへの展開を示唆するものである。さらには、設備群（フリート）としての信頼性をより高め、最適化するための技術（手法）開発が望まれる。

2) [HY-18] Implementation of a monitoring platform (アセットマネジメント・モニタリング)

スペインの ENDESA の Ebro-Pyrenees 地方 (UPH Ebro-Pirineos) を管轄する水力発電部が所掌する 47 の大規模ダムに対してモニタリングデータを管理する新しい方法 (solution) を導入した事例紹介。

必要なソフトのツールを構築し、ユーザー志向のシステムにするためには、ダムの安全性を評価するモニタリングに関する知見を恒久的な形で組み込むことが重要である。ソフトウェアに対する主な条件は、①ウェブベース (web-base) の技術であること、②異なる役割、ユーザーのプロフィールを使うこと、であり、その結果全てのシステム構成 (configuration) に関してレビュー、改善が可能となる。

この手法では現有設備との整合を取った新規の制御系システムを設計・開発した。その結果、ダムのセンサー、履歴データ (historical data)、中央データベースとの同期が可能になった。

ENDESA によって構築されたプラットフォームにより、47 の大型ダムのモニタリングデータを効率良く評価・管理することができるようになった。データを集中化し、インターネットを介して全てのモニタリング装置に容易かつフレキシブルにアクセスできるようになったことにより、ダムの運用をより安全・効率的に行うことが可能となった。モニタリングデータを異なる方法で表示・解析することが可能になったことにより、対象とするダム挙動を目的に沿って評価することが可能になった。

ソフトの導入を円滑に進めるにはダムの安全管理とモニタリング技術に関する知見を活用することが必須である。

3) [HY-19] Aloha : A system for surveillance and safety of hydraulic structures

(アセットマネジメント・モニタリング)

Aloha と呼ばれる Sixtense-Digital 社 (以下 SD 社) が開発したモニタリングプロセス (現地の検出器 (management of sensors) 及び仕事の流れ、解析、決定、報告) をカバーするソフトの導入に関する報告。

導入したのは CNR と SHEM (両社ともフランスの電力会社)。両社が管理する水力発電設備の長寿命化、安全規則のより厳しい適用の中で、新たな技術の出現に合わせた設備監視ツールについても変革が迫られているなか、ALOHA プロジェクトが進められた。

Aloha は SD 社によって ScanPrint ソフトから開発されたもので、関与する人間は全て

ウェブのインターフェースを介して構造物の検査及び調査などから測定値を得、それを認証、表示、編集することができる。CNR と SHEM の特定の要求を満たすために固定型のワークステーションとモバイルのツールには革新的なモジュールが開発された。

Aloha プロジェクトでは、モニタリングを最適レベルのものとし、関連部門間の情報共有を確実なものとするために、パラメーターの設定かつアクセスが容易でなければならない。解決すべき課題は次の通り。

- a) 信頼性の担保及び試験測定均質化
- b) ニーズ向けの人間工学的なツールによる試験測定プロセスの改良
- c) 測定結果の解析の改良
- d) グラフィック出力の均質化の促進
- e) 構造物のモニタリングと意思決定の促進
- f) 時間短縮
- g) 保守の改善と IT ツールの開発

上記のため、以下の分野に IT のツールを導入こととなった。

- a) 水力構造物を調べるための機器とセンサーの管理
- b) 測定値の妥当性のための作業の流れ
- c) 解析及び図形編集ツールを介した測定値の使用範囲の拡大
- d) 予め定められたフォーマットによる報告書の作成
- e) 遠隔通信が途絶えた倍のフェール・セーフを含む試験測定値を得るためのモビリティの解決

Aloha 特有の機能として、①広範な測定を可能とする広い意味での資産管理(property management)が可能となる設備管理機能、②試験測定結果の認証機能、③ユーザーの要求を満たすとともにかれらの運転(operation)を容易にするための、予め定めたシナリオに基づくグラフィック機能、④オフラインでタブレット又はスマートフォンから表示(readings)又は観察記録を入力することができるモビリティツール、が開発された。

Aloha プロジェクトチームはユーザーが必要とする全ての機能的仕様を作成することとしていた。この点に関しては十分考慮され、正しい方向に向けて取り組みがなされた。この規模のプロジェクトにおいては今後のユーザーの関与が必須であり、彼らの機能的な要求事項や人間工学面からの期待に対応する必要がある。このプロジェクト成功は、今後のユーザー自体をプロジェクトの当初の段階から参加させたことによるところが大きい。

4) [HY-20] The use of modern mathematical tools and OPC technology for monitoring and maintenance of hydropower plants (アセットマネジメント・データベース)

オートメーション産業分野での主要な情報通信技術となっている OPC 技術(OLE for Process Control[1])を、スロバキアの Drava River Power Company (DEM)が運用する水力

発電所(HHPs)に適用し、水力発電所の状態監視保全(Condition-Based Maintenance)への適用について検討。

OPC に付随するツール(例 OPC 基準の特定のクライアントアプリケーション)は、従来の SCADA の機能を拡張するために最も広く使われている。この通信技術は数学的環境 (MATLAB/SIMULINK)にも適用され、各現場のマイコン及びデータベース等から”生”及び履歴データ (historical data)を取り出して、システムモデリング及び識別 (identification)のために使用される。このような強力な数学的環境を OPC 技術と組み合わせる方法は、現在のプロセス制御システムの使い方に対する見方に対して極めて重要なインパクトがある。OPC と MATLAB/SIMULINK のシナジーから発生する高度な可能性に注目し、スロバキアの DEM が運用する水力発電所(HHPs)にこれら二つの技術を導入した。

DEM 社が 2014 年に抽出したニーズに対し OPC ベースの技術を導入し、プロセスデータ収集、アーカイブ化、プロセスデータの表示(representation)の簡便化・改良などにより HPPs の運転を詳細に分析することとした。導入された OPC システムの考え方は、プロセスデータを種々のソースから収集し、それをウェブでアクセス可能な環境で表示することである。履歴データベース(Proficy Historian database = GE Intelligent Platforms)上に構築したシステムは、異なるプロセス (技術的システム) と Drava River 沿いに設置されている 8 基のデータベースからデータを収集する。現在約 10,000 のデータが履歴データベースに保存されており、HPPs の運転を詳細に検討するうえでの基本となっている。

既存のツールによってプロセスデータを初めて詳細に解析(deep analysis)した結果に対して、専門家は、さらに大きなデータとより複雑な計算を伴う問題に対し、現状のツールでは不十分と結論付けた。さらに、HPPs の保守の人間の経験は当該システムの将来に対するビジョンに対して極めて大きな影響があり、その結果、今後のシステム開発の焦点を HPPs のモニタリング、メンテ、水力発電の最適スケジューリングを進展させる方向に見直した。この方針に基づき、2016 年、ANN モデル (人工ニューロン)などを含む強力な MATLAB/SIMULINK の数学的環境を導入するとともに、HPPs のモニタリング、メンテに使用する専用の Web のアプリを導入した OPC ベースのシステムを更新した。

ここで提示した話題は単に理論上のものではなく、前記のシステム (OPC ベース) と MATLAB/SIMULINK 環境とのシナジーに関する幅広い背景の中で考慮すべである。その結果としてシミュレーション、水力発電スケジュール管理、HPPs の CBM の分野で色々新たな可能性に道を開くものである。このペーパーを書いている現状において、ANN モデルを適用する上での唯一の欠点はこれらのネットワークを訓練するために必要な時間である。使用する人工ニューロン(artificial neurons)の数によっては 10 時間以上も要することである。この懸念もコンピューターの進歩の速さを考慮すれば些細なも

ので、今後の進展によっていずれ電力事業で使用する人工ニューロンネットワークモデルが開発されると期待される。

5) [HY-23] Systematic methodology for condition assessment and residual lifetime evaluation (アセットマネジメント・機器更新計画)

水力発電所は長期間に亘って、場合によっては水力以外の発電プラントやその他の産業の資産と異なり設計寿命を超えて運転される。世界的には 100 年を越えて今なお運転しているものもある。しかしながらいつか寿命に達する。ある時点では機器又はシステムの更新がよりメリットがある場合、又は更新が必須となる場合がある。オーナーにとって重要なことは主要機器の更新をどの時点で実施することが最適であるかを明確にすることにある。

Norconsult (ノルウェーのエンジニアリング会社) は過去何年をかけて、外国を含む発電所の主要機器に関して余寿命を推定するための手法を開発してきた。この手法により発電所オーナー (または運転者) が長期の計画・予算の検討に役立てることを目的としている。この手法は資産取引における評価(due diligence)又は借り換えのために発電所の健全性、技術的状态(technical status)、余寿命を定量化する際にも利用される。

余寿命評価の要点は、発電所の主要機器の余寿命を体系的にかつ種々の手法と情報とともに評価することである。まず、全体としての余寿命と主要機器の状態を評価する。この場合、世界的に認知されたガイドラインやクライテリアを使う。このようにして主要機器が寿命のどの時点にあるかを明らかにする。この結果求まる余寿命を基準として寿命に影響のある因子、例えば他ユニットの同種機器情報、特定の機器に関する運転・保守データ、疲労、破壊力学等の機械的要因、さらには、そのプラント又は機器特有の要因を考慮して数値を調整する。

水力発電所機器の正確な寿命を設定するために必要な基準はない。水力発電所は車、飛行機等と異なり、設計、材料選択、[製作の]技能、運転条件、水質、メンテの時期と実施したメンテの質、システムに対する重要さの程度が発電所毎に大きな違いがある。これらの違いは機器の経済寿命に大きく影響する。このような条件にあるものの、文献、契約書、統計からの推定は可能である。

発電所機器の設計の違いが大きいこと及び機器毎の運転条件が異なるために残存寿命の算定には容易ではないものの、同種の発電所の経験を系統的に取り込むことにより、残存寿命評価結果は確たるものとすることができる。これは、一つの不正確な評価又は仮定は結果を支配しないと”多くの影響の効果”(effect of large numbers of effect)によるもので、実施した全ての独立した評価をウェイト付けることによって達成される。

6) [HY-4] Risk assessment for dams of different type (災害・リスクアセスメント)

ベイズ理論 (Bayesian hierarchical modeling) によるダム事故の頻度の解析によるリスク評価に関する研究。

大規模水力構造物の安全にかかる考え方は時代とともに変遷する。一般住民の安全確保のためには既存のダムの運転の経験及びダムの災害から学ぶことが重要。

歴史的ダム事故の解析に当たっては、Energy-related Severe Accident Database(ENSAD)に登録されているデータに基づいている。ENSADはPaul Sherrer Institute (PSI)にて1990年代に構築されたデータベースであり、種々のエネルギー関連の分野、化石(燃料)、再生及び原子力の事故[Hirschberg et al, 1998; Burgherr and Hirschberg, 2014]に係る情報が網羅されている。

本研究ではOECD域内外の国におけるダムの型及び目的に対してベイズ理論を適用して事故の頻度を評価した。この方法は、ダムの安全について、従来の手法では対応が難しかった情報が少ない集団に対する解析を可能とすることができる。更に、この手法ではダムの事故頻度に関する傾向に対する時間依存性を示した。

様々なタイプのダムのリスクを評価するためには、事故頻度(accident frequencies)の解析が最初のステップとなる。ダムのタイプ毎の解析結果から、OECD域内のバットレス及びアーチダム、OECD域外の重力ダムに関して最も高い頻度(frequency values)を得た。同時に解析結果の「不確かさ」に関する指標(uncertainty intervals)はOECD域内のバットレスダム、OECD域外のアーチダムが高い値を示した。この組み合わせは(事故)データの少なさと一致する。

全体としてベイズ理論による経時変化の解析は解析した全てのダムの形式及び目的に対して、一部を除き低下傾向となった。また、経時変化関わる3種の手法による比較結果では、アーチダムを除き、良好な一致を確認した。このことはベイズ理論によって事故の頻度に関する経時変化(傾向)をモデル化することの妥当性を確認するものである。

ベイズ理論により、ダムのある期間を一つの値としてモデル化し、計算上可能な時間幅毎に頻度を計算することが可能になる。この結果、解析した時間幅に対して事故頻度の経時変化を比較評価することが可能となる。今後、データの追加により、計算上の不確かさを抑制するとともに、事故頻度以外のダム特性(例えばダム年齢)も解析可能となる。

7) [HY-10] Sustainability: Financial implications for the design and operation of dams

(堆砂・リスクアセスメント)

ダム貯水池を持続可能とするために、堆砂に対する計画設計保守に関わる財政的な選択肢について論述。

ダム貯水池の有効容量は堆砂のために減少傾向にあり、現在の設計、運転及び保守方法はダムの持続可能性を削ぐものである。ダム貯水池によるプロジェクトの利益は

年数とともに漸減し、最終的には運用を停止(decommission)するか、更新(rehabilitation)が必要となる。ダムに関する現在の方法の問題点は、費用対効果分析(Cost-Benefit Analysis:CBA)が不完全であることにある。

CBA は 1930 年代に米国で発生した方法で、プロジェクトに関して幾つかの選択肢に対して費用対効果を分析する方法である(George et al 2016)。選択肢毎の比較を容易にするため、正味現在価値(Net-Present Value:NPV)により年間コスト(資本費、運転・保守費)と効果(水力発電収入、付帯的収入、他)を比較評価するが、この方法では各年における費用と効果を共通の式で NPV に換算することにより、費用対効果のみならずそれぞれの選択肢の長所・短所の比較・対比が容易になる。また、CBA では年間の費用効果評価のためには「設計寿命」が必要となる。

NPV の年当たりの費用・効果を算定するために用いる割引率は金の時間的価値を考慮するものであり、利率と同じで、現在のある金額は将来においてはそれ以上の価値があると考えられる。現時点のある金額を投資することにより、利息を得ることができるためである(George et al. 2016)。年間の費用効果を NPV に考慮するためには、解析の期間を決める必要がある。この期間が「設計寿命」である。これは純粋に経済的な概念であり、物理的なインフラの耐久性、寿命ではない。ダムの CBA では多くの場合 50 年を設計寿命としてきた。より長い「設計寿命」は NPV を割引率で評価する限り何の意味もない。

NPV による評価方法を考慮すると、ダムは歴史的に設計寿命中に流入する堆砂を収容する前提で計画・建設されたものであり、理屈のうえでは例えば 50 年後に堆砂は想定量に達しているために、リハビリ又は廃止することになる(Annandale et al,2016)。このことは将来の世代にとっては持続可能なアプローチとは言えない。将来の世代はダムの(物理的)寿命中に現世代と同レベルの利益を享受できない。ダムの建設に多大な資金と期間を要すること、さらに新たなダムサイトが無いことを考慮すると、既存のダムの有用性(有効容量)を減ずる方法は持続可能とは言えない。

そのため、従来的一定(指数関数)の割引率に関する討議が進んでいる。例えば George ら(2016)は、現在の割引率に対して双曲線又は論理的な割引率を議論している。いずれの代替割引率も金の将来の価値を維持するものであり、その結果、堆砂対策としてプロジェクト開始の段階で投入資金を増やす方向に働く。これらの代替割引率に関してはさらなる研究が必要であるものの、持続可能な CBA を編み出すためには有望である。

例えば、堆砂管理(sediment management)をプロジェクトの開始の段階で付与(afforded)することにより、当初のファイナンス基準の割引率を将来に亘り徐々に下げることが可能となり、プロジェクトの現在価値を増やすことになる。現在価値が高まることにより、入ってくる堆砂を現実的な範囲で下流に流すことなどの対策が可能となり、将来にわたって収益が確保されることになる。かくして、収入が増え継続するために、過剰堆積による損害等を防止できる。

また、財政上の手法としては、①受益者負担の原則の強化、②将来の保守又は廃止専用に対する回転資金又はエスクロー資金の準備、③プロジェクトに対する退職基金又は保険証券の構築、などが提言されている。また、計画に対する方法論として、①ダム設計のフィージビリティスタディの段階で適用するライフサイクルコスト解析(LCCA)、②最終的な収益に着目し、投資に対する容認可能な利益を確保するために水力発電プロジェクトにおいて請求すべき電気料金に着目した平準化電力コスト(Levelised Cost of electricity,LCOE)、などについても記述している。

ダムは持続可能性を考慮のうえ設計、建設、運転することが益々重要になっているため、CBA においては、①将来の利益を現在に比較してより大きくする割引率を使用すること、②堆砂管理方策(strategies)を実行することによって回避される損害をプロジェクトの当初の段階で考慮すべきである。さらに、ここで提案した財政手法と方法論(LCCA 及び LOCE)による堆砂管理のための財政的説明責任を高めることによって、堆砂管理のための永続的な資金確保が可能となる。

8) [HY-11] The challenge of a rehabilitation project: Experience from the commissioning of the Mount Coffee generating units, Liberia (再開発事例)

内戦で運転が停止していたリベリアのマウント・コーヒー発電所(64MW)のリハビリ(出力増と更新)に関わる課題について紹介。

同発電所は 1967 年に建設され、1973 年の設備容量は 73MW である。リベリアで 1990 に勃発した内戦により発電所は停止を余儀なくされた。反乱軍はマウント・コーヒー発電所を奪取して、発電を停止し、洪水吐ゲートの操作を停止した。この結果アースダムでは越流が発生し、ダムの一部では岩盤まで浸食された。その後、発電所の設備の殆ど、水力発電関係の金属物、埋め込まれていない機械電気設備が略奪された。

2003 年二度目の内戦が終結した際には殆どの電力インフラは破壊され、国にとって電力開発は緊急の課題であった。マウント・コーヒー発電所のリハビリは国の再建を象徴する一つのプロジェクトとなっていた。ジャングルの植生で覆われた発電所のリハビリには、残存していた発電所建屋、水路及び水車等埋込部品等に関する詳細な評価により、再使用可能なものを決定しなければならない。水車発電機が広い出力範囲で安定して運転できるか、さらに、周波数調整機能に問題が無いかなども重要な確認範囲に含まれる。

この発電所はリベリアの電力系統上の主要な発電所であり、その役割を果たすためには広い出力範囲で安定して運転できる機能の確保が必須となるため、プロジェクトの早い段階で理論的に解析した。しかしながら、これらの課題に満足に対応できたか否かは試運転になるまで確認できなかった。また、2回に分けて建設され 33 年の運転に関する主要な書類と図面が残されていないことが大きな問題となった。完工事の配筋図面(as-build reinforcement)がないために、建物の構造健全性が確定できず、さらに、

水路に関しても完工時の図面が確認できなかった。ただし、4基の水車の鋼製ライナー、スパイラルケース、ドラフトチューブは良好な状態と評価された。これらの個所に関してはサンドブラスト、塗装を行い、その後再度検査を行うこととした。

発電所の出力を上げるために、新規の水車を選択するに際しては既存のコンクリート構造物と水路の使用が大きな制約となった。有効落差は約 20m であるので、カプラン水車であれば元のフランシス水車と比較して、必要なフレキシビリティが確保され、運転幅も大きくなる。しかしながら、フランシス水車ピットの中にカプラン水車を据え付けるためには、水車の設置高さを変更しなければならない。プロジェクトとしては、カプラン水車採用のための水路及び建物の大きな改修は工程的にできないことからカプラン水車の採用は断念し、低揚程向けの背丈の高い独特のフランシス水車を選定した。また、電気機械設備の選定に関しては、主にユニット出力、効率及びキャビテーション特性を基に発電効率を最適化することを目的とした。

時間的制約により、モデル試験のための時間は無かったため、水力設計や全てのタービン特性は流体解析(CFD)を基準とし、固定ベーンにおける流れの剥離発生による効率低下に対応し、固定ベーンの改造などを実施した。その他、同期速度を維持するためのガバナの性能と負荷変化の際の水路の動的安定性の確保、ダムと洪水吐の天端嵩上げ、非常用放水路の追加、当初の放水路ゲートの補強なども実施した。

欧州投資銀行(EIB)とドイツ政府が共同の資金提供による発電所のリハビリプロジェクトは、幾つかの課題に直面したものの首尾よく進み、初号機の運転開始を 2016 年 12 月 15 日とする厳しい工程を達成することができた。マウント・コーヒー発電所は国連の Millennium Development Goals の一つであり、リベリアに対して信頼性の高い再生可能エネルギーを供給することとなった。さらに、発電所設備は近年において過酷な問題に直面した国の再建に向けて大きく貢献するものである。

(2) Annex-9

今年度日本が実施した欧州における揚水発電の運用状況調査結果より、変動型再生可能エネルギー (VRE) 大量導入に伴い水力発電の価値評価が向上している事例 3 件を以下に記す。

1)揚水増設によって柔軟な調整力がより確保された事例

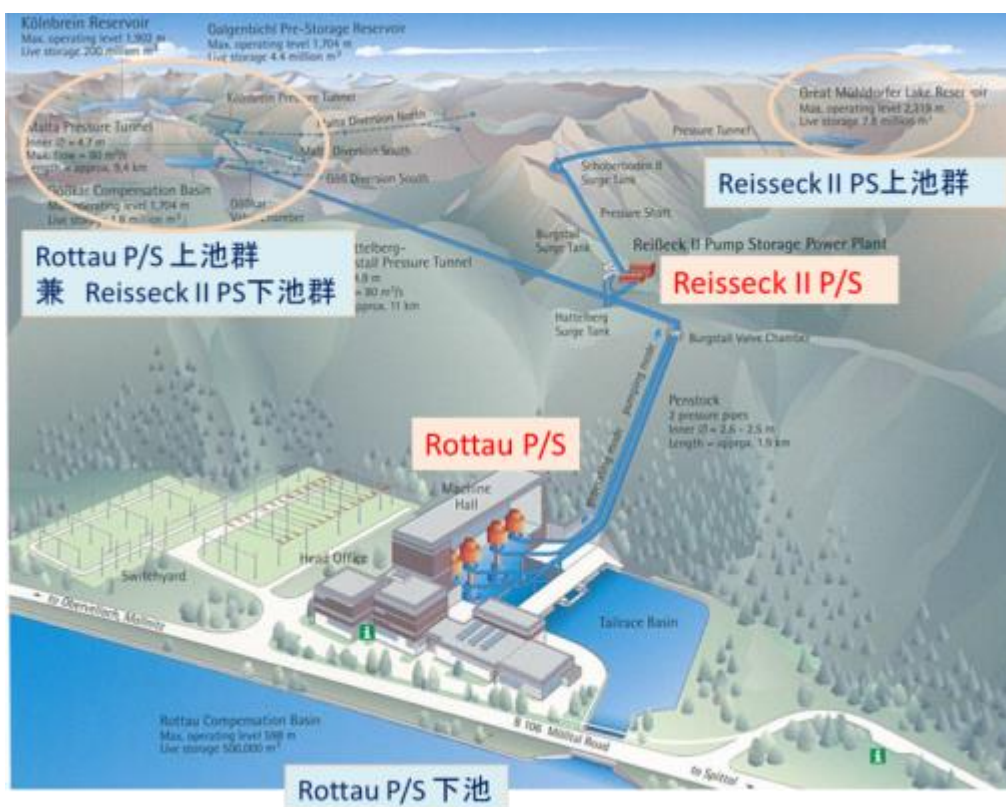


図 3.1 Malta-Reisseck II システムイメージ

オーストリア、カリンシア地方に位置する Malta 発電所群の最下流にある Rottau 発電所は、2 台の縦軸ペルトンタイプのターナリーユニットおよび 2 台の一般水力機を持つ。Rottau 発電所は 1979 年より運転開始しているが、別水系の既設発電所に活用していた貯水池を上池として活用し、Rottau 発電所水圧鉄管上に合流させる形で、Reisseck II 発電所を増設した。Reisseck II 発電所は可逆式揚水発電所として 2016 年に運転開始した。

最新の運用状況としては、Rottau 発電所および Reisseck II 発電所を統合化させた運用を実施しており、スポット市場および調整力市場へ柔軟に参画している。どの市場にどの程度応札するかについては、ウィーンにあるトレーディング部門が気象予測、流出予測等を実施したうえで決定しているとのこと。特徴的な 1 ヶ月の運用実績として以下の 2 例を紹介する。

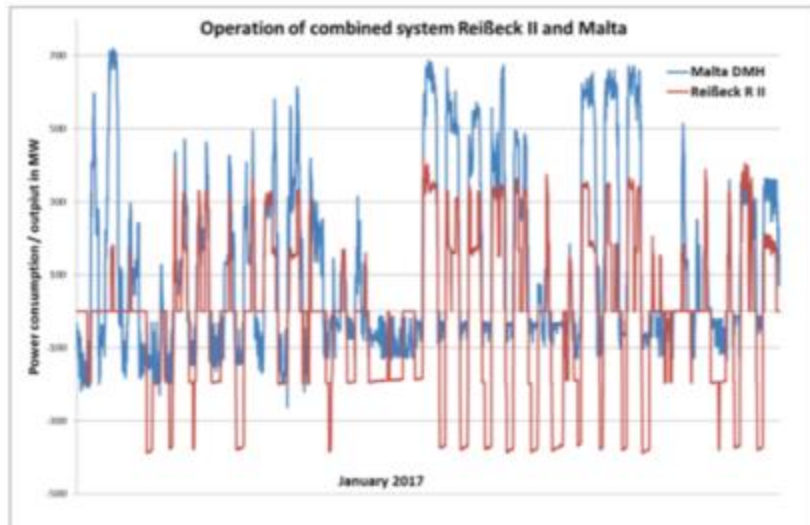


図 3.2 Rottau および Reisseck II 発電所運転状況(2017 年 1 月の 1 ヶ月間)

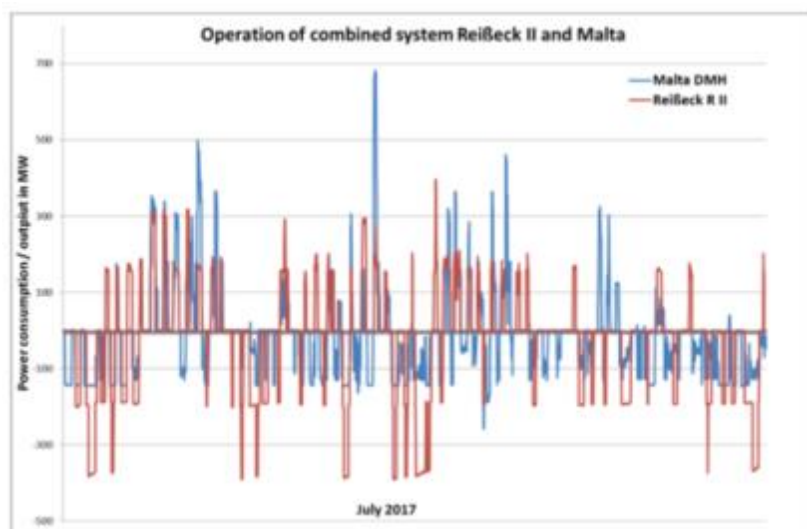


図 3.3 Rottau および Reisseck II 発電所運転状況(2017 年 7 月の 1 ヶ月間)

2017 年 1 月の EPEX-SPOT 価格の特徴

- ・ ピーク価格が 40～130€/MWh
- ・ ベース価格が 30～100€/MWh
- ・ 価格差平均値が約 12€/MWh、20€/MWh を超える日も数日あった

2017 年 7 月の EPEX-SPOT 価格の特徴

- ・ ピーク価格が-10～45€/MWh
- ・ ベース価格が 5～40€/MWh
- ・ 価格差平均値が約 1€/MWh、3€/MWh を超える日は 6 日のみであった

2017年1月は従来の運用、すなわち夜間および週末の低需要・価格時の揚水運転、ピーク需要・価格時の発電運転で問題なく収益を確保できる典型的な事例。

一方2017年7月は、ドイツとオーストリアのジョイント価格帯において、風力と太陽光の再エネ優先接続の影響が大きく出ており、ピークの時間がほとんど無く、価格幅も小さいうえに、ネガティブプライスの場合もある。

そのような状況下では、従来の定速揚水にとっては運転する機会が限られ、事業としては困難な状況である。しかし、Malta-Reisseck II では、Reisseck II で下した水を Malta のターナリーで活用できるため、両方の発電所を活用した調整力市場への参入が可能であり、稼働率も悪くない状況と言える。

2)風力とのコンバインド小型揚水建設による最新プロジェクト

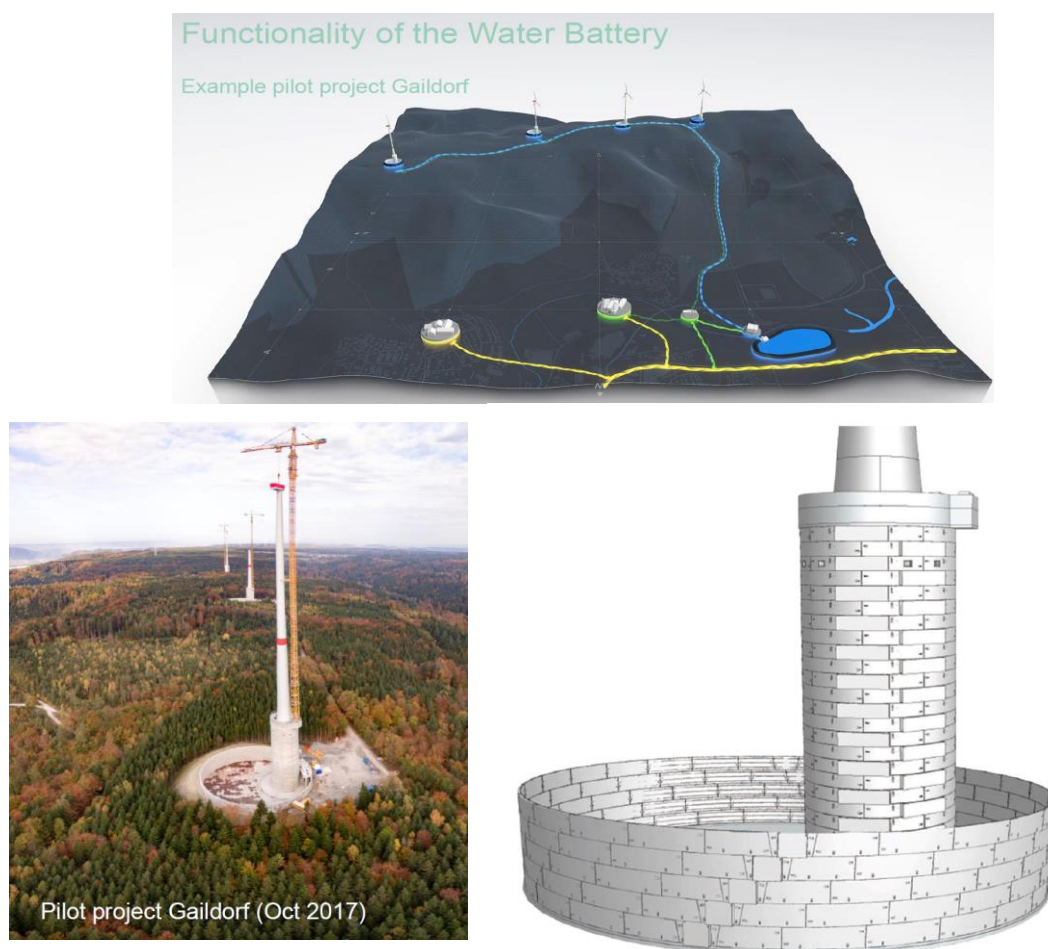


図 3.4 Gaildorf 発電所全景および貯水設備イメージ

ドイツ南西部ガイルドルフに位置する風力発電所建設プロジェクトであり、風力発電所敷地内に上部貯水設備を設け、下部貯水池は新設することで小規模な揚水発電所を新規で建設しているプロジェクト。出力 16MW の可変速機を設置予定であり、2018 年中に運転開始予定である。風力発電の余剰分を利用して揚水できるため、風力と揚水を総合的に管理することで、合理的かつ柔軟な発電運用が可能になる。

3)既設揚水発電所の運用変更事例

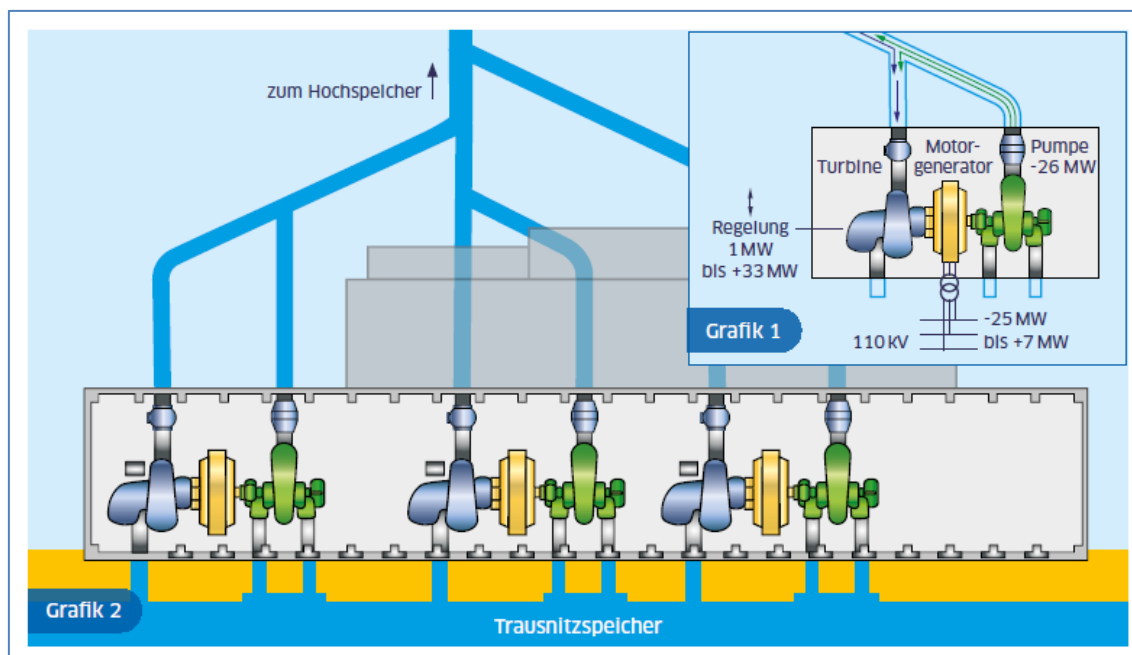


図 3.5 Reischach 発電所水圧鉄管設置イメージ

ドイツ、トラウスニッツに位置する Pfreimd 発電所群は合計 137MW の出力をもつ ENGIE グループが所有する揚水発電所群である。そのうち主要な揚水発電所が 1955 年に運転開始した Reischach 発電所であり、横軸フランシスターナリーユニットを 3 台有し、合計 106MW の容量をもつ。運転開始当初は、発電、揚水を同時に実施する運用は実施していなかったが、市場に対して柔軟に運用することを目指し、2015 年に発電揚水同時運転の実施可否検討が行われた。CFD 解析の結果、水圧鉄管も既存の状態でも利用可能という結果が得られたため、2016 年より発電揚水同時運転を実施するハイドロリックショートサーキット (HSC) 運用を開始した。

HSC 運用により、みかけ出力値 0 を維持することにより、入出力の反応時間が格段に速くなるため、調整力市場のうちのプライマリー市場への参画も可能となる。

4. 有益情報取得が見込まれる今後の活動内容

IEA 水力実施協定の今後の活動内容のうち、特に日本の水力発電事業に有益な情報取得が

見込まれる活動内容を以下に示す。

(1) Annex-15

電気事業者が実施しているアセットマネジメントの事例調査を実施することにより、水力発電設備の資産価値を向上させるために重要な役割を果たしている項目の特定を目指す。

調査活動は以下の2段階で実施する。

段階-1：資産管理や意思決定の手法と技術

段階-2：資産価値向上の目標

段階-1 では、各電気事業者が実施しているアセットマネジメントの事例を収集して、下記に示すような手法や技術を分類、抽出する。

1) 設備の性能、機能の向上に関する手法、技術

- 設備保全方法（維持管理費の低減）
- 設備の点検、診断、寿命予測、補修、更新等に関する新技術（ライフサイクルコストの低減）
- 出力や効率の向上のための技術
- 電力市場の変化に対応するための設備改善策

2) 設備の価値の向上に関する手法、技術

- リスクマネジメント
- 補修、更新と比較の対象になった代替案（廃止や売却も含む）
- アセットマネジメントのための計算ソフトウェア
- 電力市場の変化に対応するための運用方法改善策（設備の改良を伴わないで価値を向上させる方法）

段階-2 では、段階-1 で収集した事例を整理して、意思決定の特徴を分類するとともに、アセットマネジメントで資産価値を向上させるために重要な役割を果たしている項目を抽出する。

(2) Annex-2 において提案された新課題案“Hidden Hydro”

本テーマにおいて検討予定の3つのタイプに関して、情報取得が見込まれる内容を以下に記す。

1) Type I 包蔵量水力の調査・分析方法

各国の未利用包蔵水力の調査・分析方法を調査・比較することにより、今までの我が国での調査方法で見落としていた包蔵水力が見出せる可能性がある。

2) Type II ダム運用見直し

既設発電所における水運用見直しによるkWhおよびkW増強を図るための各国の推進・補助政策、適用されている新技術などが参考となり導入できる。

3) Type III 未利用落差の有効利用

既設利水構造物を利用した未利用水力の利用拡大による発電電力量(kWh)の増大を図るための各国の推進・補助政策、適用されている新技術・コスト低減方法などが参考となり導入できる。

(3) Annex-9 フェーズ II

Annex-9 の次フェーズで実施予定の内容のうち、貯水池や揚水発電所が有する貯蔵能力が、VRE が大量導入された場合に担うと考えられる、系統上のバランシングおよび安定性・信頼性提供に係わるエネルギーサービスの役割についての検討については、今後の水力発電を適切に価値評価していくために重要な取組みであるといえる。

以 上