

# Hydro2019セッションの概要



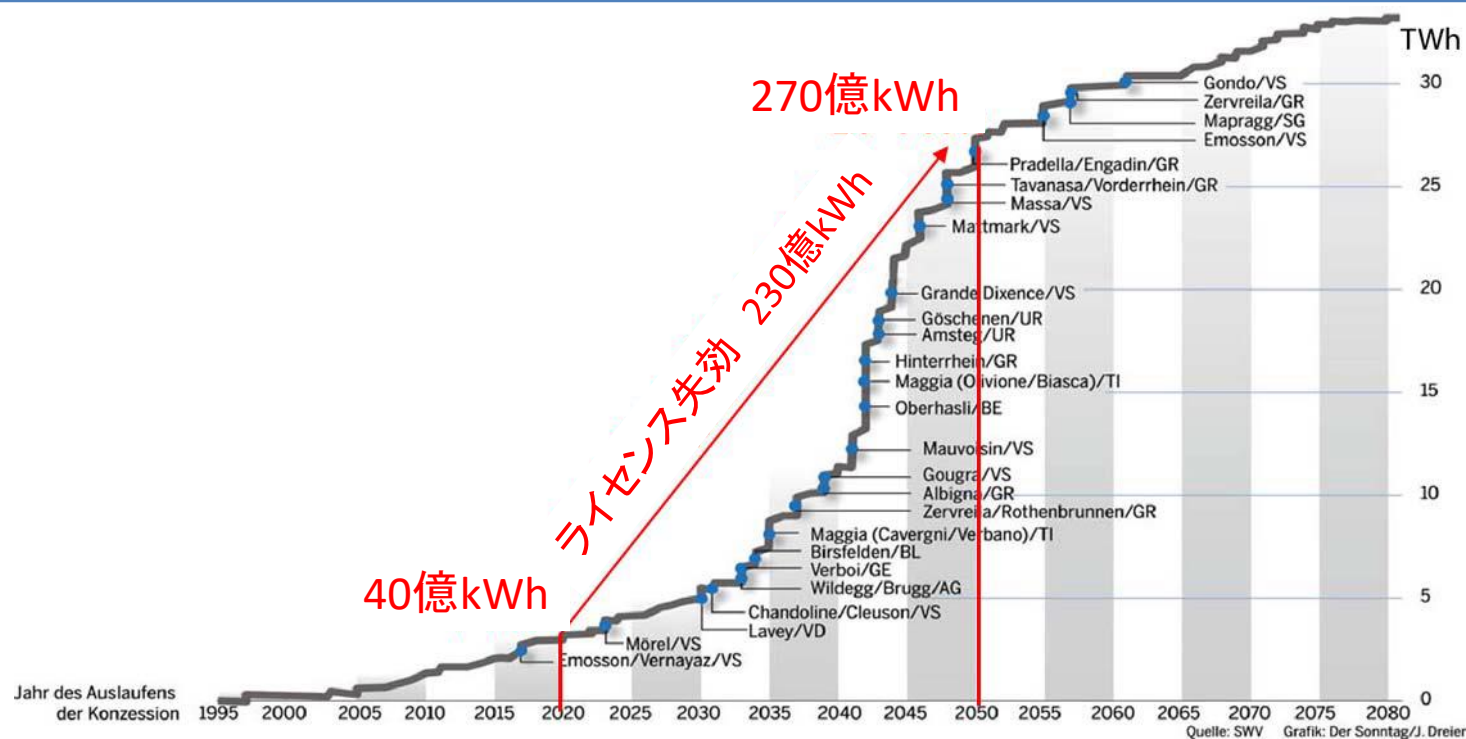
No	テーマ	No	テーマ
1	将来の開発機会	17	ダム:安全マネジメント
2	土木:設計、建設、改修	18	運転制御
3	ファイナンス:イノベーション	19	気象被害
4	水力機械:モデリング	20	ダム:監視
5	プロジェクト計画	21	O&M
6	土木:材料	22	越境プロジェクト
7	ファイナンス:法律および契約	23	ダム:地震リスクと故障メカニズム
8a	水力機械:運転	24	電気工学と系統課題
8b	水力機械:環境、改修	25	環境
9	将来のトレンド	26	放流設備
10	コンクリートダム	27	水力発電の柔軟性
11	ファイナンスワークショップ	28	小水力
12	ファイナンス:グリーンボンド	29	環境:魚類保護
13	圧カトンネル	30	改修と機能向上
14	セキュリティ	31	デジタル技術
15a	揚水発電:プロジェクト	32	堆砂マネジメント
15b	揚水発電:技術的側面	33	社会的側面
15c	揚水発電:イノベーション	34	設備景観
15d	揚水発電:統合	35	組織強化
16	気候変動	36	河川運用

# 「隠れた水力の可能性を引き出すためのアプローチ(スイス)」

Hydro2019 Session9「Future trends in hydropower (IEA session)」より抜粋

## セッション概要および背景

スイス連邦評議会が策定したエネルギー戦略2050によると、水力発電による年間発生電力量を2020年から2050年にかけて364億kWhから386億kWhへ増加させる目標が掲げられており、この増加分の50%は小水力によるものである。この目標を達成するには潜在的な水力の開発が必要であり、環境への影響を最小限に留めるため既設設備を活用した開発を優先する。既存の上下水設備や人工水路へ新たに小水力発電設備を設置するほか、既設水力発電所の改修機会を利用する。同国では、2020年から2050年にかけて既設水力発電所の**約70% (年間発生電力量230億kWh相当) がライセンス失効**となるため、ライセンス更新に伴う増出力が期待される。このような背景をふまえ、スイスにおける小水力(発電、小規模揚水発電)や既設発電所改修のプロジェクト事例を紹介する。



2080年までにライセンスが失効する水力発電所

# 「隠れた水力の可能性を引き出すためのアプローチ(スイス)」

Hydro2019 Session9「Future trends in hydropower (IEA session)」より抜粋

## 小水力発電プロジェクト

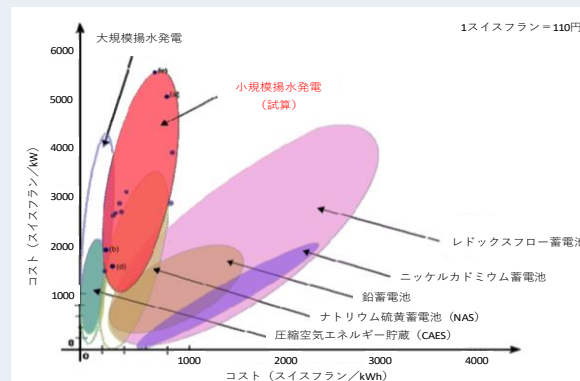
スイスでは、約30年に亘り既設設備(上下水設備や灌漑設備等)への小水力発電設備の設置が進められてきた。**既設設備を活用**することで、新たに土木工作物を設置する必要がなく、環境への影響や設備投資を低減できる他、O&Mも既設設備の人員を兼ねることができる。また、得られた電力を既設設備の動力としてローカルで利用すれば、系統への接続が省略可能となる。2018年現在、同国内には年間発生電力量約1億5,000万kWhに相当する小水力発電設備(270機以上)が設置されている。



(例)小水力発電所

## 小規模揚水発電プロジェクト

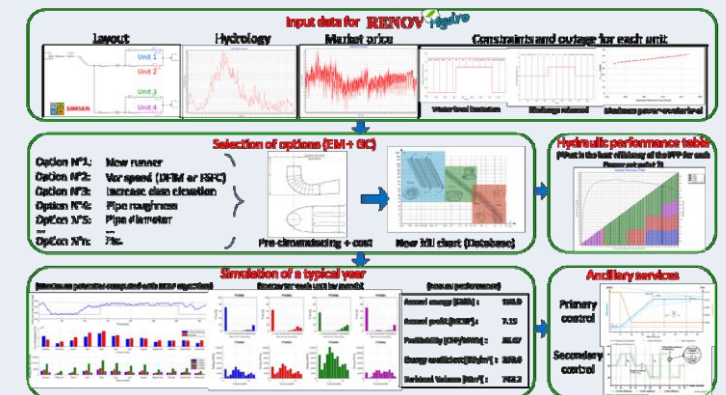
揚水発電は、世界各国で大規模なエネルギー貯蔵技術として導入されており、2018年現在その容量は約1億6,000万kWである。スイスでは、**既存の河川を利用した500~1万kWの小規模揚水発電に着目**し、そのポテンシャルに加え、他のエネルギー貯蔵技術と比較した場合の競争力について検討している。10地点のケーススタディによると、小規模揚水発電への投資コストは大規模揚水発電より若干高いが、蓄電池より安価な10万円/kWh以下の水準と試算されており、今後の導入が期待される



エネルギー貯蔵技術のコスト比較

## 既設発電所改修プロジェクト

2050年にかけてライセンス更新を必要とする発電所が多数を占めており、その所有者は適切な増出力を伴う改修を進めていかなければならない。増出力の検討では、設備配置・ダム流入データ・電力市場価格等を総合的に考慮し、投資コストと次のライセンス期間における収入を見極めたうえで、改修仕様を決定する。**ローザンヌ工科大学(EPFL)が、無数のシナリオの検討を効率的に実施する「RENOVHydro」と呼ばれるツールを開発**したことから、既設発電所の所有者は、このツールを利用して適切な改修仕様を迅速に決定することができ、同国のエネルギー戦略に寄与している。



RENOvHydroによるワークフロー

# 「既設一般水力発電所の揚水発電所への変更(スペイン)」

Hydro2019 Session15(a)「Pumped-storage projects」より抜粋

## セッション概要および背景

近年、変動再エネが大量導入される状況において電力貯蔵が果たす役割の重要性が高まっている。揚水発電は、蓄電池よりも容量当たりのコストが小さく、また大きな貯蔵容量を提供できる一方、新規建設の場合はライセンス取得や建設工事に時間を要するデメリットがある。**既設の一般水力発電所を流用して揚水発電所へ変更**することで、初期投資を抑制するとともに、タイムロスなく大きな貯蔵容量を確保することができる。この変更においては、経済的および技術的条件を満足する必要がある。

### 揚水発電所のプロジェクト範囲と初期投資額

プロジェクト範囲	初期投資額(ユーロ/kW)
新規建設	1,500~2,000
上部貯水池+発電所(下部貯水池流用)	800~1,500
発電所(上部および下部貯水池流用)	500~1,000
<b>既設一般水力を揚水発電へ変更</b>	<b>100~300</b>

### 揚水発電所への変更において満足すべき条件

経済的条件	技術的条件
<ul style="list-style-type: none"><li>揚水運転に制限を与えないよう、貯水池への平均流入量は新設のポンプ水車設計使用水量および貯水池の貯水容量に対して十分小さいこと。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>土木工事範囲が最小限となるような設計とする。</li><li>貯水池の運用に制限を与えないよう、既設発電所の貯水池水位の運用範囲において新規ポンプ水車での揚水運転が可能なこと。</li><li>ポンプ水車のキャビテーションによる壊食を回避するため、下部貯水池水位に対してポンプ水車の設置レベルを低くする。</li></ul>

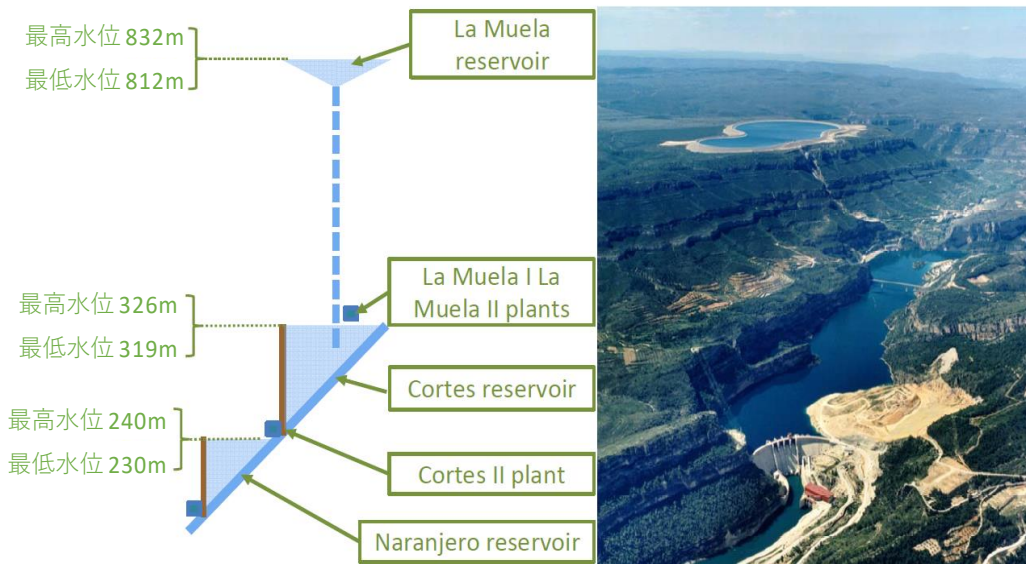
# 「既設一般水力発電所の揚水発電所への変更(スペイン)」

Hydro2019 Session15(a)「Pumped-storage projects」より抜粋

## Cortes II 発電所

スペインのIberdrola社は、Cortes II発電所(14万kW×2機)を揚水発電所へ変更するプロジェクトの検討を進めている。Cortes II発電所は、欧州最大規模のLa Muela揚水発電所(La Muela I : 21万1,600kW×3機、La Muela II : 22万500kW×4機)の下流に位置し、Cortes貯水池の水を発電に利用している。発電に使用した水は、下流のNaranjero貯水池へ貯留される。同発電所の年間平均運転時間は1,032時間、その負荷率は40%であり、また貯水池への平均流入量は貯水容量に対して十分小さいため経済的条件を満足している。

検討中プロジェクトの仕様は、技術的条件をふまえ**既設発電所相当**となっている。なお、キャビテーションによるポンプ水車の壊食を回避するためポンプ水車のレベルに対して下部貯水池の最低水位を僅かに高く設定している。また土木工事範囲を最小限にするためポンプ水車の直径は既設水車と同等の設計としているが、ポンプ水車は同サイズの水車と比較して使用水量が減少してしまう。サイズを変更せずに使用水量を増加させるには回転速度を増加させる必要があり、ケーススタディを実施している。この結果をふまえIberdrola社は、ポンプ水車の直径を大きくして使用水量を増加させることも視野にいれながら、2019年末までに詳細設計を完了させる予定としている。



Cortes II 発電所の水系

### 検討中プロジェクトの仕様

検討中プロジェクトの仕様	既設発電所	検討中プロジェクト		
	上部貯水池(Cortes)	最高水位: 326m 最低水位: 319m	最高水位: 326m 最低水位: 319m	
下部貯水池(Naranjero)	最高水位: 240m 最低水位: 230m	最高水位: 240m 最低水位: 234~236m		
水車/ポンプ水車レベル	228m	228m		
有効落差	最高落差: 96m 最低落差: 79m	最高落差: 90~92m 最低落差: 79m		
水車/ポンプ水車直径	新設は既設と同等			
回転速度	150rpm	条件1 187.5rpm	条件2 200rpm	条件3 205rpm
最大使用水量	163m <sup>3</sup> /s	85m <sup>3</sup> /s	85m <sup>3</sup> /s	68m <sup>3</sup> /s
最大揚水量	—	59m <sup>3</sup> /s	73m <sup>3</sup> /s	90m <sup>3</sup> /s

# 「定速揚水発電の可変速化(オーストリア)」

Hydro2019 Session15(b)「Technical aspects of pumped storage」より抜粋

## セッション概要および背景

オーストリアのVerbund社は、同社が所有するターナリー式のLimberg I揚水発電所(水車: 5万6,000kW × 2, ポンプ: 6万5,000kW × 2, 1956年運開)の改修を計画している。その方針は、ターナリー式から可逆式へ変更するとともに調整能力の高い可変速揚水とし、さらに出力を増加させるものである。既設の水車位置でスパイラルケーシングを流用してポンプ水車を設置し、既設のポンプを撤去したスペースを利用して可変速制御装置を設置する予定である。



既設発電所断面図および改修案



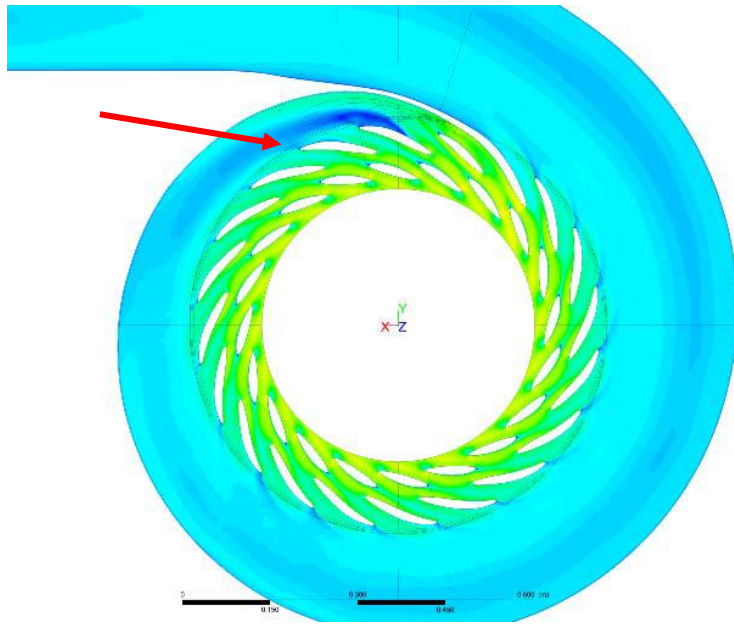
発電機室

### プロジェクトの仕様

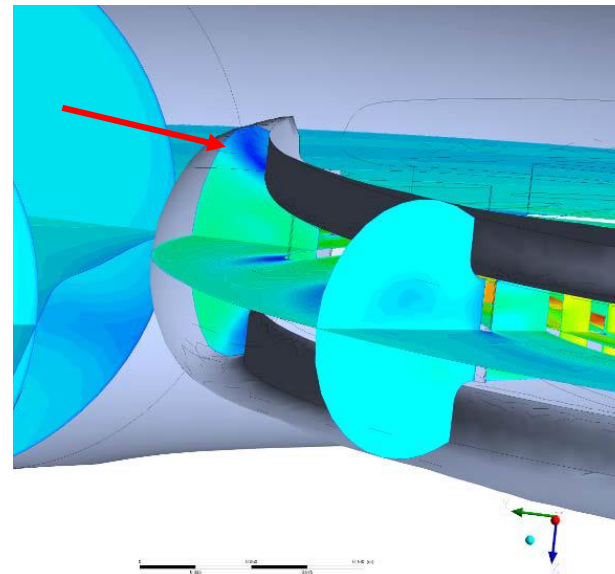
	既設	改修後
ユニット数	水車 × 2 ポンプ × 2	ポンプ水車 × 2
回転速度	500rpm	450~750rpm
有効落差	446-288m	既設と同様
最大使用水量	36m <sup>3</sup> /s	44m <sup>3</sup> /s
最大出力	水車: 56MW ポンプ: 65MW	80MW

## 水流剥離対策

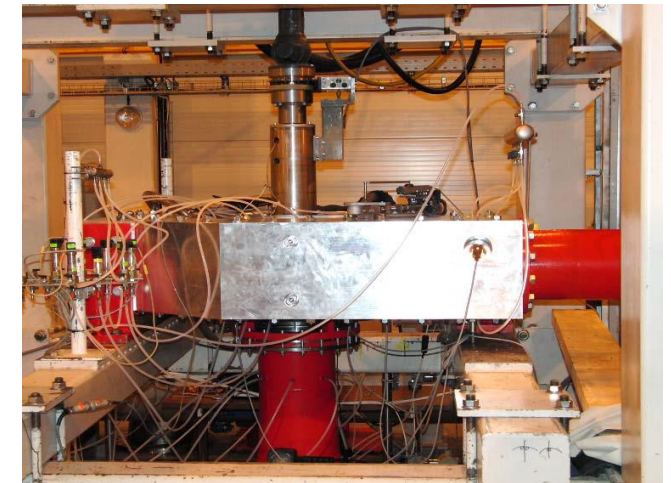
既設のスパイラルケーシングは水車用に設計されたものであり、改修後のポンプ利用や出力増加における整流作用を確認する必要がある。チェコ共和国に拠点を置くLitostroj Engineering社がポンプ水車の製作者として選定され、同社はCFD(Computational Fluid Dynamics)によりスパイラルケーシング内部の水の流れを解析した。その結果、ポンプ利用時にスパイラルケーシング終端部付近の固定羽根において、エネルギーロスの原因となる**水流剥離が確認**された。この終端部の流路を狭くすることで水流剥離を抑制できるが、スパイラルケーシングは古い鑄造物であるため内部を溶接で改修することは困難と判断した。この代替策として**スパイラルケーシング終端部の固定羽根の長さを短く**することで水流が改善されることを確認し、モデル試験においても良好な結果が得られている。



スパイラルケーシング終端部の水流剥離



CFD解析



試験機

# 「地下貯水式揚水発電所(オーストリア)」

Hydro2019 Session15(c)「Innovations in pumped storage」より抜粋

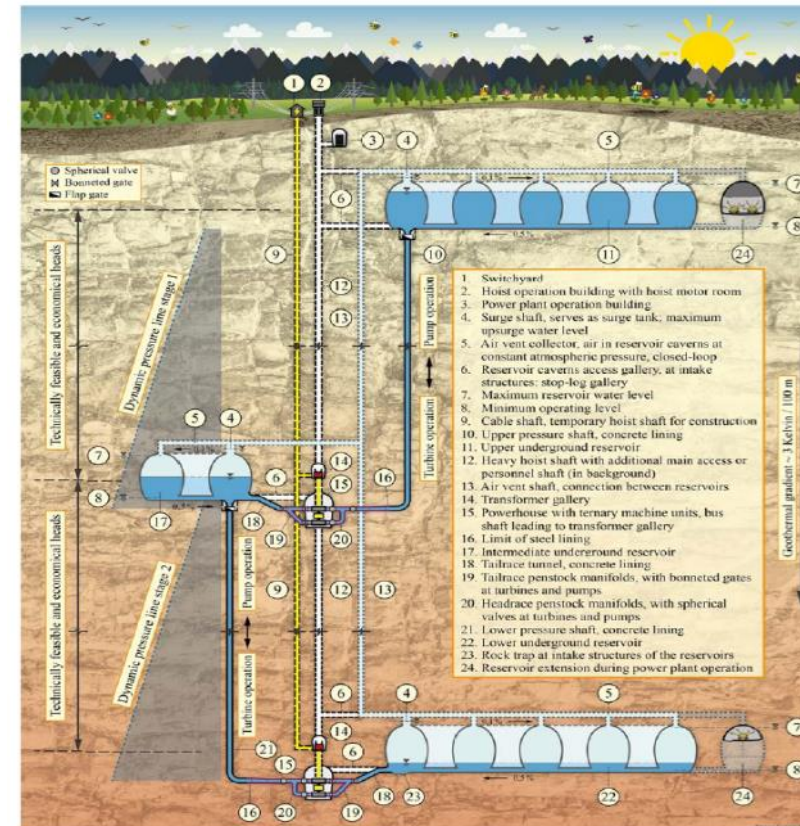
## セッション概要および背景

揚水発電は大規模なエネルギー貯蔵技術として、そのニーズは高まっているが、従来の地上貯水式揚水発電は、地形などの特性から、その開発に適した地点は限られている。また昨今は、自然保護に関する規制が厳しくなっており、新たなライセンス取得が困難な状況である。一方で地下貯水式揚水発電は、貯水スペース含め全ての設備を地下に設置することから、地上貯水式と比較して開発地点を柔軟に選定することができ、また環境負荷も小さいと考えられており、オーストリアのグラーツ工科大学の研究者が、その開発方式について提案した。

## 地下貯水式二段揚水発電所

まず地下貯水式揚水発電の共通の特徴として、上部および下部貯水スペース、発電所を地下の任意の場所に設置するため、貯水スペースから発電所までの圧力水路を最短距離で設計可能となる。圧力水路は強固な岩盤箇所を掘削して利用するため、ライニング処理のみで鉄管が不要となる。また貯水スペースは河川等から隔離されているため堆砂により貯水容量が減少する懸念はなく、必要に応じて水平方向に拡張させることも可能である。

地下貯水式二段揚水発電は、上部および下部貯水スペースに加えて中間貯水スペースが設けられ、発電所は下部貯水スペースと中間貯水スペースの高さにそれぞれ設置される。中間貯水スペースを設けることにより、それぞれの圧力水路へのストレスが低減され、**圧力水路の径を小さく設計できるため開発コストを抑えられる。**



地下貯水式二段揚水発電の断面図

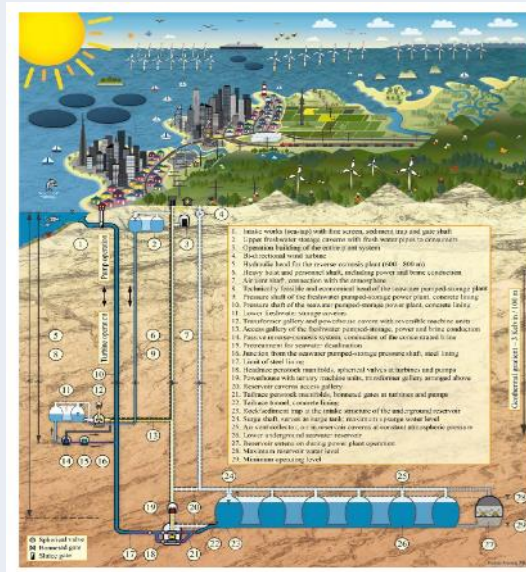


# 「地下貯水式揚水発電所(オーストリア)」

Hydro2019 Session15(c)「Innovations in pumped storage」より抜粋

## 地下貯水式海水揚水発電所

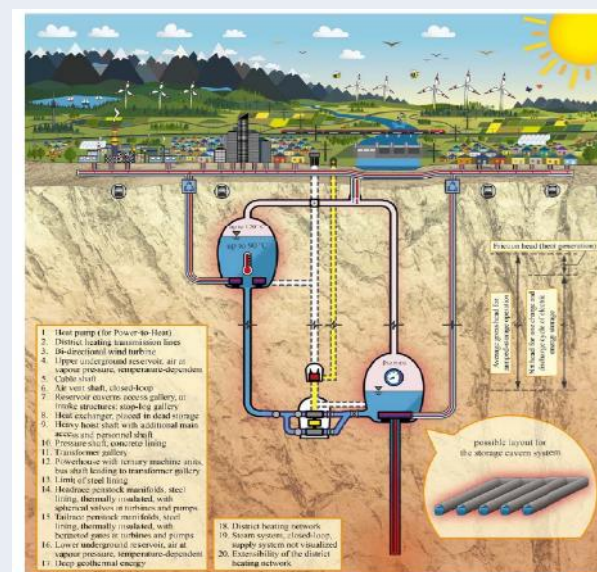
従来の海水揚水発電は、開発地点に限られる淡水の揚水発電の代替として、海を下部貯水池として利用し、人工の上部貯水池を建設することで開発されてきた。地下貯水式海水揚水発電は、海を上部貯水池として利用し、下部貯水池および海水用の発電所を地下に設置するものであり、さらに**海水淡水化設備と淡水用の発電所を併設すれば、電力需給の他に水資源にも寄与することになる**。海水淡水化において、逆浸透膜を用いる場合、海水を高圧ポンプで昇圧した状態で通過させる必要があるが、地下貯水式海水揚水発電を利用する場合は、落差による圧力を活用できるため高圧ポンプが不要となる。



地下貯水式海水揚水発電の断面図

## 地下貯水式地熱揚水発電所

地下貯水式地熱揚水発電は、地熱を活用して地下貯水式揚水発電の貯水スペースにヒートポンプを併設するものである。都市部において、このシステムを適用できれば電気および熱の効率的なエネルギー供給が可能となる。ただし、このシステムにおいて高温の水を揚水発電に利用することになるため、これに対応した機械設計が求められる。なお、揚水発電の過程で生じるエネルギー損失(水路損失等)は、**熱エネルギーとして再利用されること**になるため、**システム全体としてのエネルギー損失を大幅に低減することができる**。



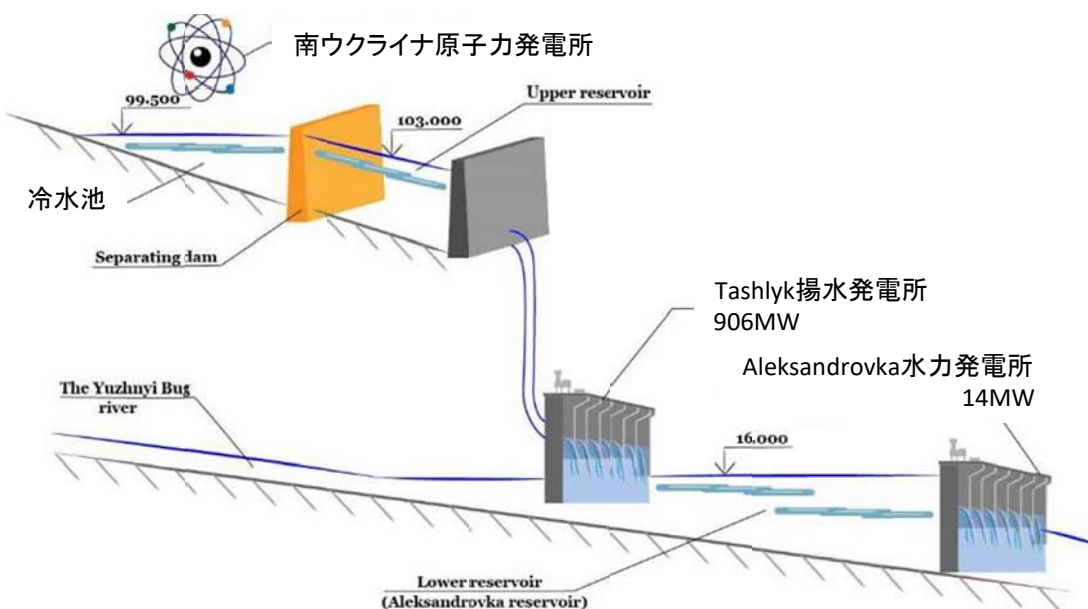
地下貯水式地熱揚水発電の断面図

## セッション概要および背景

ウクライナでは、変動再エネが増加する一方、火力への依存度を低減する方針であり、需給調整電源として水力への期待が高まっていることから、新規揚水発電所の計画や建設が進められている。同国南部に位置するTashlyk揚水発電所は、発電容量90万6,000kW(15万1,000kW×6機)と揚水容量126万6,000kW(21万1,000kW×6機)の計画で、2006年と2007年にそれぞれ1機ずつ運開し、残りは建設中となっている。同発電所は、南ウクライナ原子力発電所(100万kW×3機)の冷水池内にダム(Separating dam)を設けて冷水池の一部を上部貯水池として利用し、Aleksandrovka水力発電所(1万4,000kW)の貯水池を下部貯水池として利用する構成である。

## 噴水プールの設置

上記に伴い原子力発電所の冷却容量が減少してしまうため、発電所敷地内に噴水プールを新たに設置して冷却容量を確保した。



南ウクライナ複合発電施設の構成



南ウクライナ原子力発電所冷却用の噴水プール

# 「間欠的な再エネと大型揚水発電のバランス(イギリス)」

Hydro2019 Session15(d)「Pumped storage integration」より抜粋

## セッション概要および背景

英国では、石炭火力や原子力のベースロード電源が相次いで閉鎖する一方、風力や太陽光の変動再エネが増加しており、システムの慣性力低下や系統周波数の調整が課題となっている。これを解消するために蓄電池の導入が進められてはいるが、揚水発電が担う周波数調整の役割は以前にも増して重要になっている。

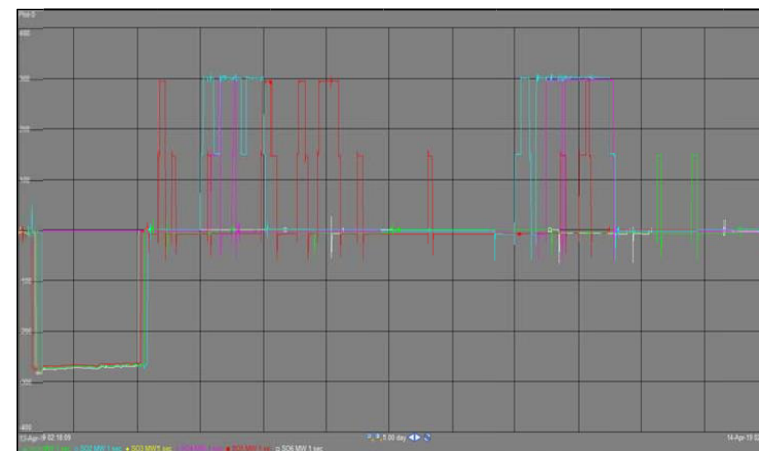
### Dinorwig揚水発電所の例

同国の北ウェールズに位置するFirst Hydro社所有のDinorwig揚水発電所(30万kW×6機, 1984年運開)は、揚水運転と発電運転の他に調相運転が可能であり、停止から発電運転(0kW→+172万8,000kW)までは約90秒要するのに対して、調相運転から発電運転(-5,000kW→+132万kW)までは約12秒で遷移可能である。調相運転でのスタンバイにより、系統周波数が規定値以下に低下した場合でも、制御装置はこれを検知して調相運転から発電運転へ即座に運転モードを切り替えることで、周波数維持に貢献することができる。

同発電所は、2019年4月のある日には24時間の内に3機の発電運転で13回の周波数低下に対応し、また同年6月のある日には、全6機が発電運転と調相運転のやり繰りで周波数維持に努めた。

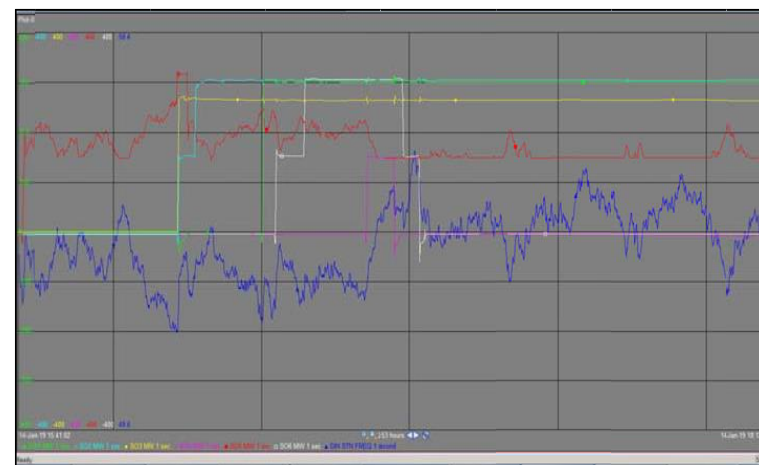
このように英国の揚水発電は、系統安定のために過酷な運転を求められており、今後さらにその役割は不可欠なものになると考えられる。

2019年4月



No.1ユニット  
No.2ユニット  
No.3ユニット  
No.4ユニット  
No.5ユニット  
No.6ユニット

2019年6月



No.1ユニット  
No.2ユニット  
No.3ユニット  
No.4ユニット  
No.5ユニット  
No.6ユニット  
周波数

# セッション27「水力発電の柔軟性」 ※Annex9関連

## セッション概要

水力発電（一般水力および揚水）は、出力変化の柔軟性や電力貯蔵を提供できることから、電力システムの安定に多大な貢献を果たしている。一方で、この水力発電の価値が適切に評価されているかは疑問である。本セッションでは、変動再エネが大量導入されるなか、水力発電が電力システムや電力市場へどのような貢献をもたらしているかに着目する。

No	発表概要
1	ホワイトペーパー「Flexible hydropower providing value to renewable energy integration」の紹介。変動再エネの導入レベルによって、時間軸（sec, min, hour, day, month, year）で求められる柔軟性は異なる。水力（流れ込み式、貯水池式、揚水）は、幅広い時間軸での貢献が可能。
2	オーストラリアでは、変動再エネ導入ブームに伴い、水力開発も勢いを増している。電力市場においては、石炭火力依存から変動再エネへの転換が図られ、電力システムの安定性確保や変動再エネ出力予測が課題となっている。水力開発ポテンシャルは限られているものの、近年では、電気事業者や国立大学により揚水開発ポテンシャルの検討が進められている。
3	スイスでは、発電電力量のうち水力が60%を占めている。近年ではエネルギー戦略2050のもと、原子力の廃止や水力開発（小水力開発や既設設備の増出力改造）が進められている。
4	電力貯蔵技術は、変動再エネの大量導入において電力システムが必要とする柔軟性に貢献しているが、米国の電力市場のルールは、これに対して十分な報酬を与える仕組みとなっていない。連邦エネルギー規制委員会は、2018年にオーダー841を発行し、電力市場に電力貯蔵のメニューを追加することとした。
5	ポルトガルのエネルギー計画では、2030年には全供給力のうち再エネが80%、2050年には100%に達する見込みである。EDPの需給シミュレーションによると、日間の電力価格volatilityが拡大し、変動再エネ抑制の必要性も生じることから、揚水が担う役割は益々重要になっていく。
6	米国では、エネルギー省がHydroWIRESイニシアティブを発表し、研究機関を中心として、現在および将来的な水力発電の価値、運用制約のマネジメント、さらなる柔軟性を提供するための技術開発に関する検討を進めている。
7	Andritz hydro社は、今後変動再エネ導入が進む一方、蓄電池の設置コスト低下が見込まれることから、さらに優れた柔軟性の提供に向けて水力発電と蓄電池のハイブリッド運用についてケーススタディを行った。蓄電池の併用によって、水力による周波数調整（ガイドベーンサーボモータ駆動）を軽減させることが可能となる一方、蓄電池の動作回数増加は、その寿命に影響するため、課題としても挙げられている。