

可変速を含む揚水発電の価値と 活用拡大の可能性

2026年 3月 4日

一般社団法人 日本電機工業会

水力発電WG 主査

森 淳二



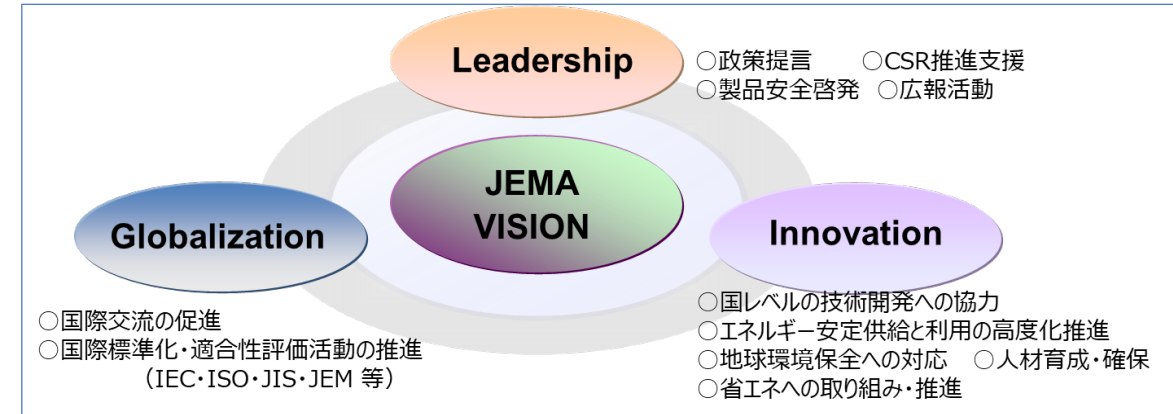
- 01 JEMAにおける水力発電分野の取り組み
- 02 揚水発電の位置づけ
- 03 2050年CNに向けた揚水発電活用の可能性
- 04 京極発電所の事例紹介
- 05 まとめ

01

JEMAにおける水力発電分野の取り組み

■ 日本電機工業会 (JEMA)

- ◇ 設立：1948年
- ◇ 会員数：288社（正会員185社 賛助会員103社） 2026年2月現在
- ◇ 取扱製品：
電力・産業システム機器（ボイラー・タービン・変圧器他）、
原子力プラントおよび機器、家電機器（白物家電機器）、
新エネルギー発電システムおよび機器



■ 水力発電WG：2021年10月設立

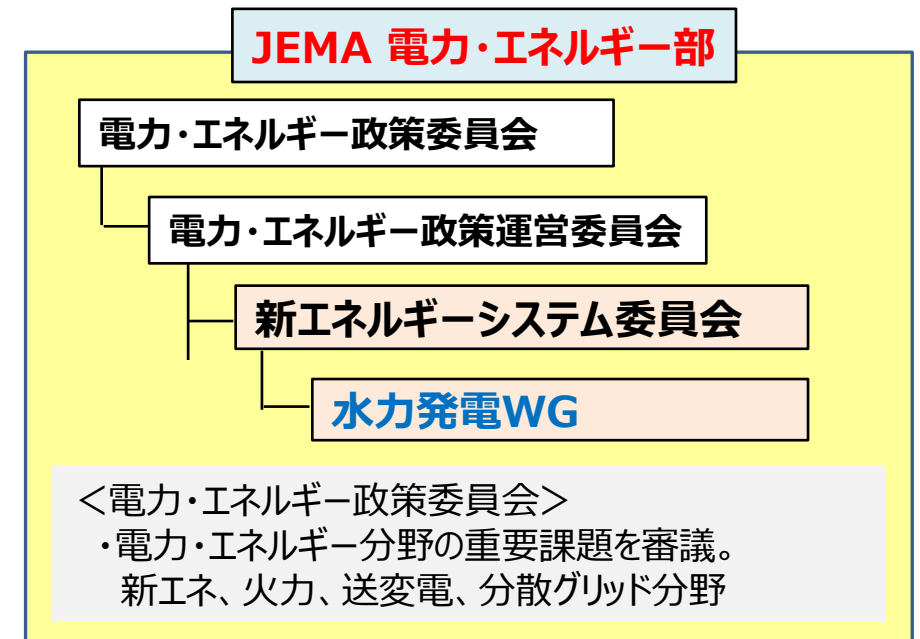
- ・水力発電は、純国産で、優れた安定供給性を有し、調整力としての活躍も期待できる脱炭素電源。
揚水発電は、太陽光発電や風力発電の大量導入に不可欠な調整力や、安定供給の砦として、近年その重要性が再認識されている。
- ・再エネ主力電源化、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、水力発電／揚水発電の活用促進・導入拡大に関して、水力発電機器メーカーの立場から、業界意見をまとめ発信していく。

<WG構成社>：4社

- ・水力発電機器の国内の主要4メーカーで構成。
大規模揚水から数kWのマイクロ水力まで多種多様な機種に対応。
- ・水資源の最大活用に寄与する高性能水車技術揚水発電技術など、水力発電／揚水発電に関する議論を展開。

東芝エネルギーシステムズ(株)
日立三菱水力(株)

富士電機(株)
(株)明電舎



製造メーカーの立場で水力発電の地位向上に向けた活動を推進

◆提言活動 ～脱炭素化への水力発電／揚水発電の貢献～

➤ 水力発電の最大限の導入拡大に向けた意見発信

- ・「第7次エネルギー基本計画へのJEMA提言」水力分野
- ・各種パブコメへの意見発信（GX2040ビジョン案等）

➤ 資源エネルギー庁、事業者団体、提言団体等との連携

- ・資源エネルギー庁「水力発電未利用ポテンシャル活用に向けた勉強会」
- ・新エネルギー財団「水力委員会」参加
- ほか、水力発電関係団体・有識者との意見交換 など

◆業界全体の課題解決に向けた対応 ～人材育成・人材不足～

➤ 講演会の主催 第120回 新エネルギー講演会 水のチカラで未来を動かせ！～水力発電のこれからを語ろう～

- ・人材育成モチベーション向上、学生・若手水力従事者に向けて、講演会を企画・開催。メーカーの若手エンジニア中心に登壇。

●日時：12月23日（火）13:30～16:40

●形態：Web／JEMA会議室

●聴講者数：約570名（Web＋会議室）

- ・企業局、大規模水力事業者 他

[JEMA YouTubeにアーカイブ動画](#)

＜構成＞

- 基調講演 資源エネルギー庁 電力基盤整備課
水力発電の利用拡大に向けた施策など
- 一般講演 メーカー4社による発表
若手・中堅技術者による最新動向紹介。
- パネルディスカッション 若手技術者4名×政府
若手エンジニアが水力への思いを語る。



＜政府×若手技術者によるパネルディスカッション＞

◆広報活動 ～水力発電／揚水発電の価値を発信～

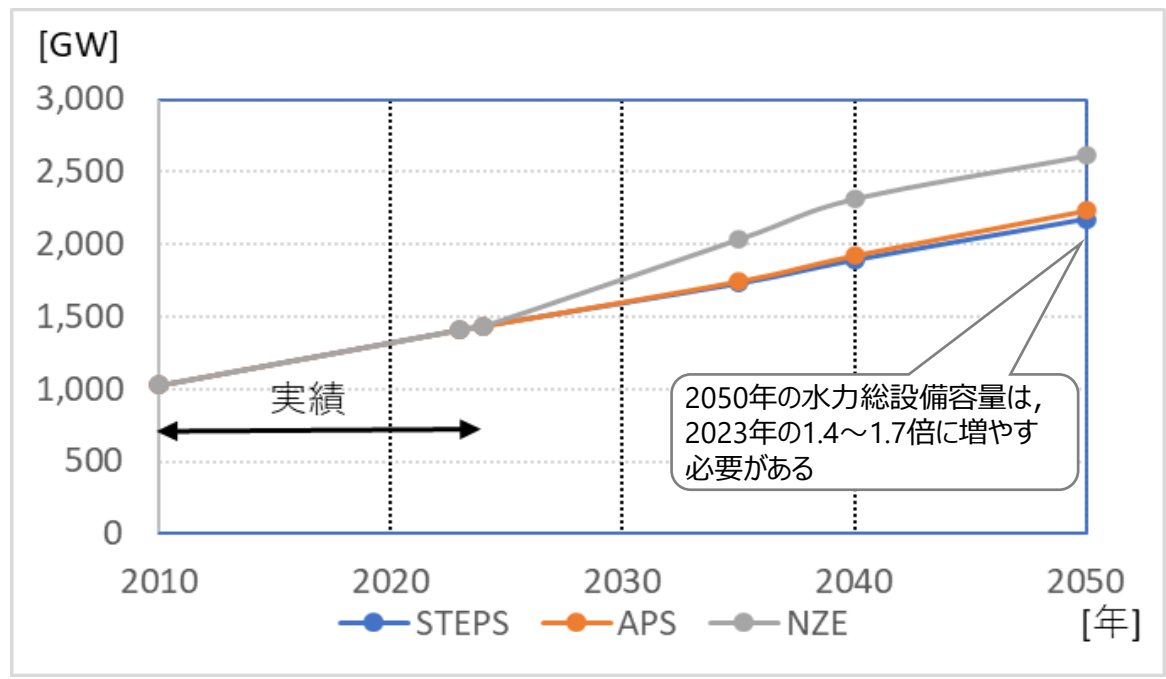
- JEMA機関誌「電機」への投稿、ウェブサイトを通じた広報活動

02

揚水発電の位置づけ

水力・揚水は、2050年CNに向け、今後も必要とされる電源

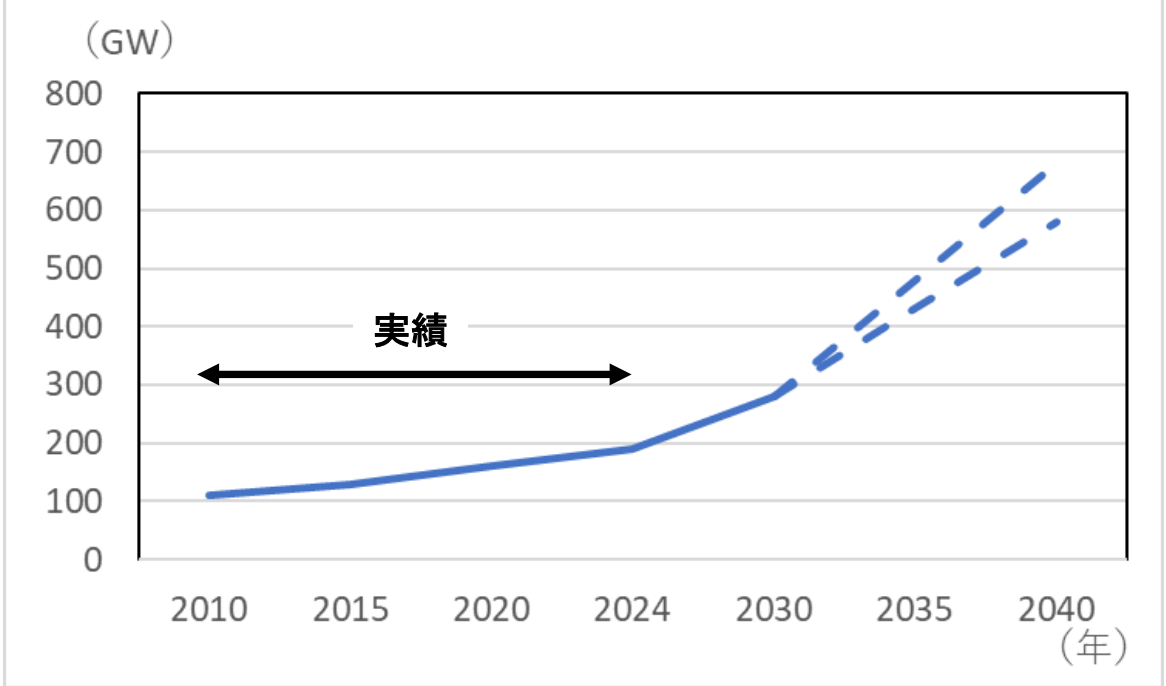
各シナリオでの水力総設備容量予測



出典：IEA World Energy Outlook2025を基にJEMAで作成

水力発電は、出力が安定した再エネとされており、2050年までに2023年比1.4～1.7倍の設備容量が必要とされる

揚水発電の総設備容量予測



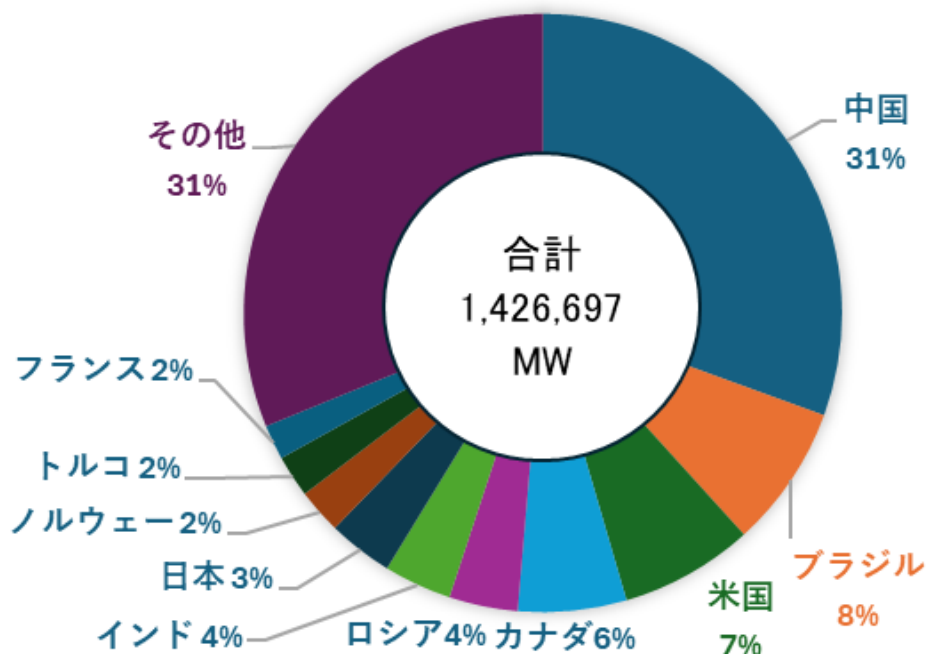
出典：IHA World Hydro Outlook2025を基にJEMAで作成

変動再エネの増加とともに、「揚水発電は、2030年までに世界全体で約90GW、それ以降は年30～40GWの建設ペースへと一段と加速される可能性がある」とされている。

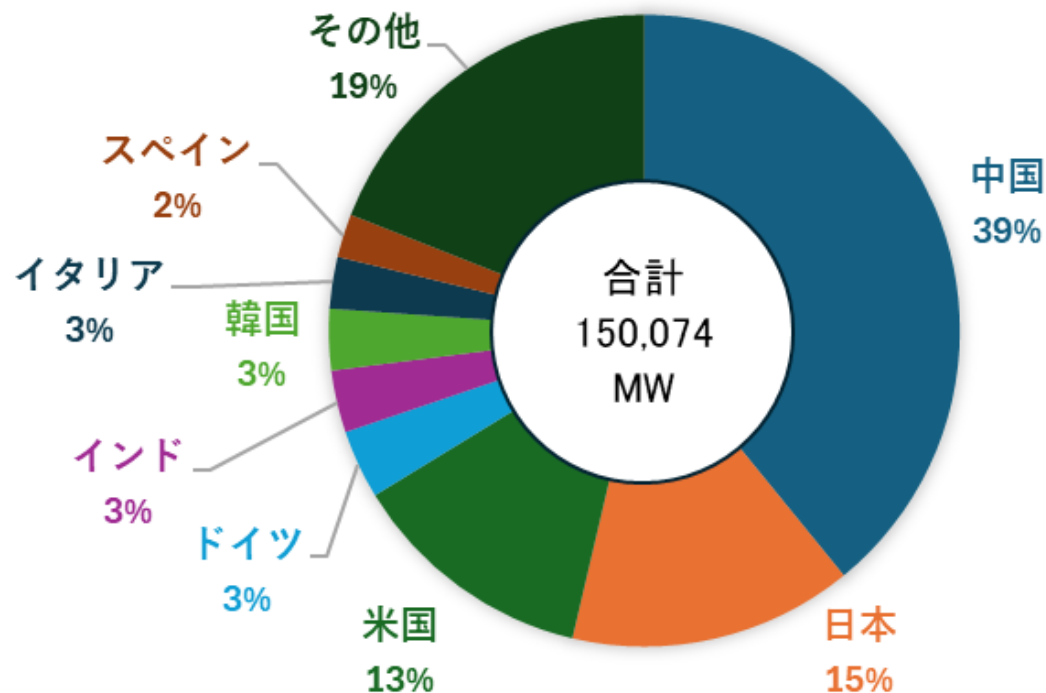


日本は水力大国であり、中でも揚水の比率は高く、その設備容量は世界第二位

水力発電（揚水を含む）の設備容量

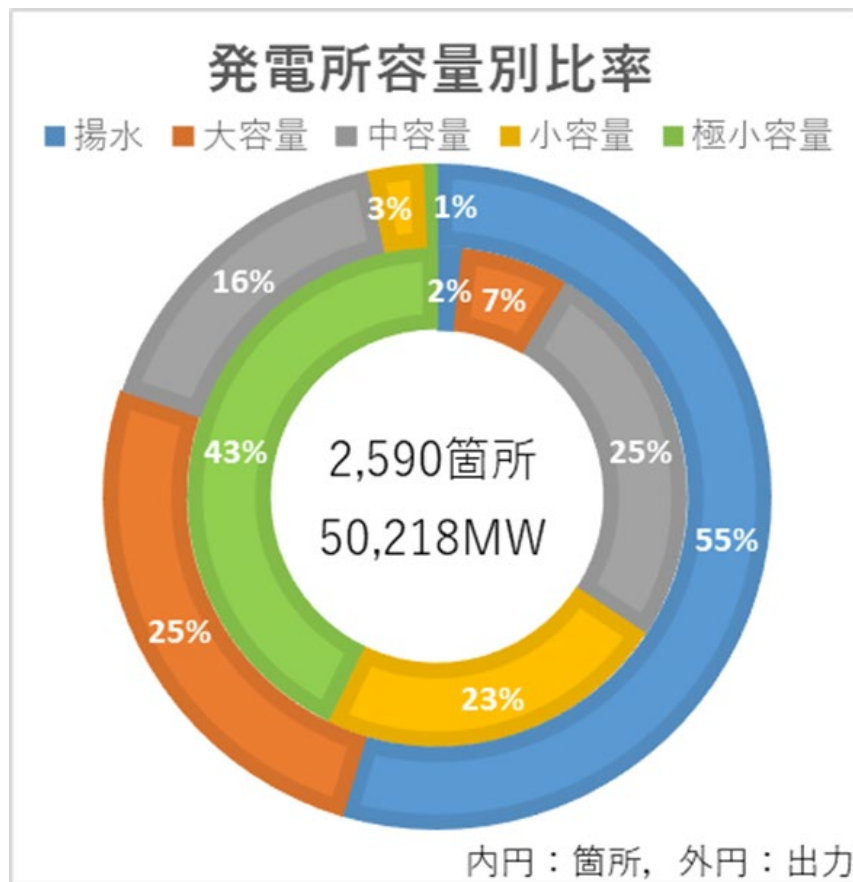


純揚水発電の設備容量



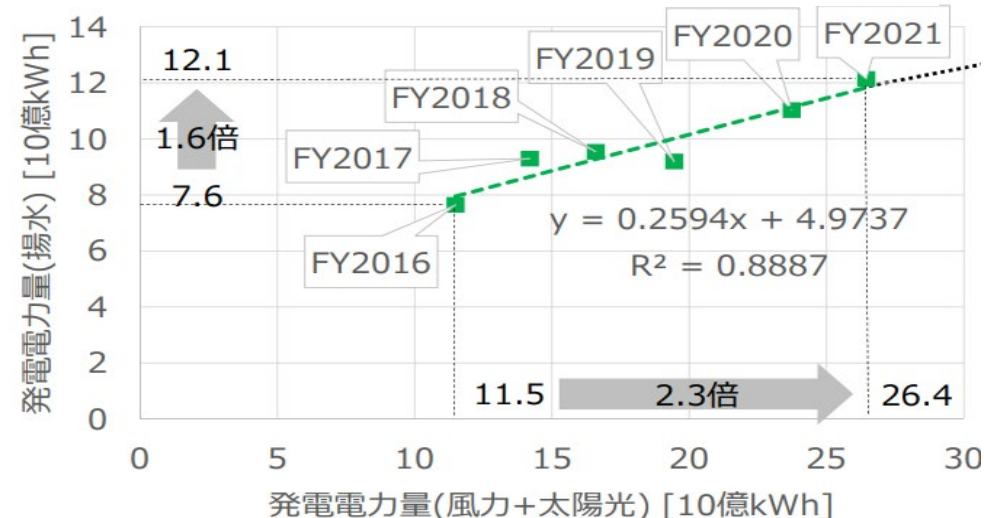
出典: IRENA Renewable Energy Statistics 2025(https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_DAT_RE_Statistics_2025.pdf)に基づきJEMAで作成

水力設備の半分以上は揚水，稼働率は上昇してきているが，古い設備が多い



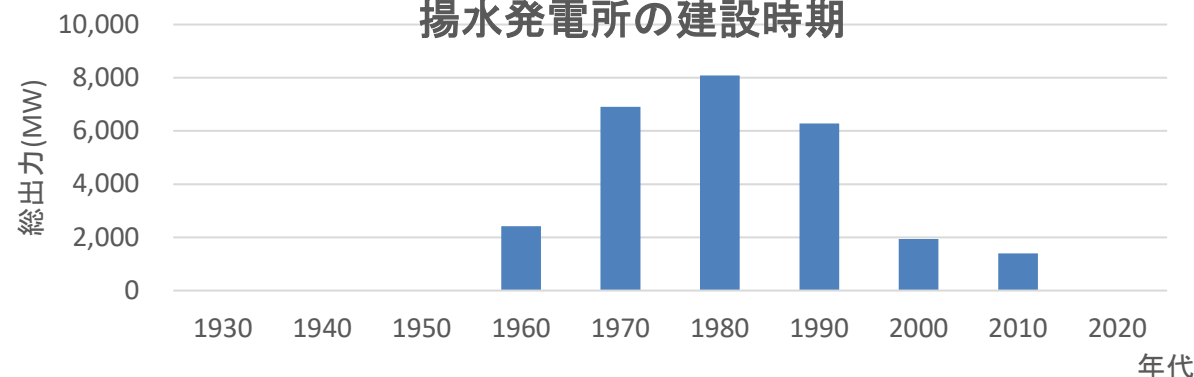
2024年9月JEMA調べ

風力・太陽光発電電力量に対する揚水の発電電力量



出典：資源エネルギー庁「第2回将来の電力需給に関する在り方勉強会 資料4」

揚水発電所の建設時期

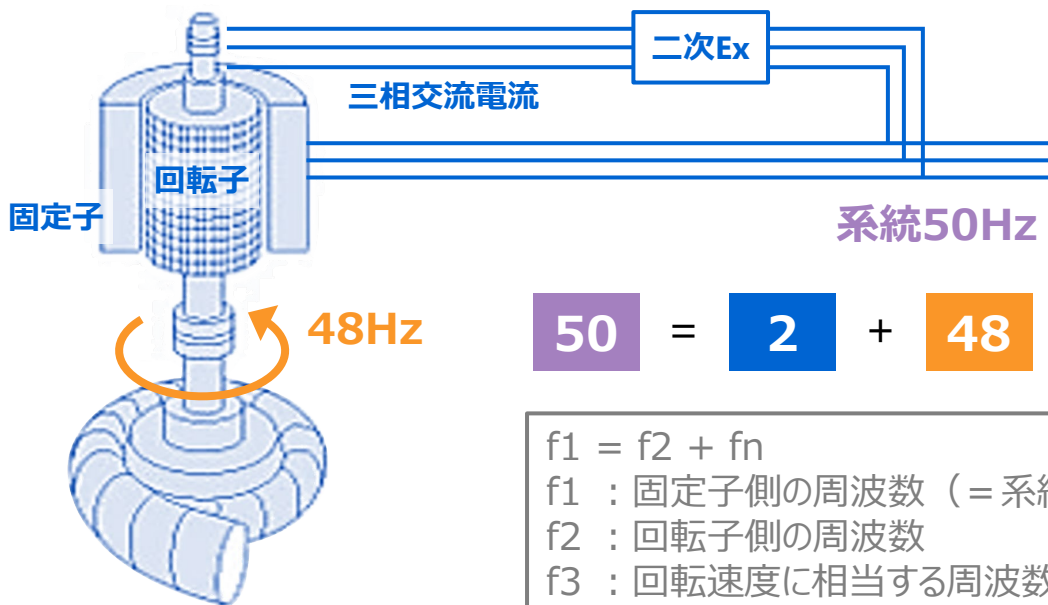


出典：揚水発電システムによるエネルギー貯蔵技術の現状とこれからの展望，日本エネルギー学会機関紙 えねるみくす，100(2021) 資源エネルギー庁統計・データ/発電事業者の発電所数・出力から作成

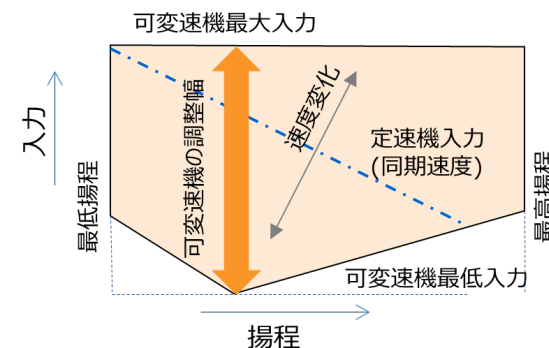
可変速揚水発電システムの目的としくみ

可変速揚水発電システムは、揚水時の入力調整が可能

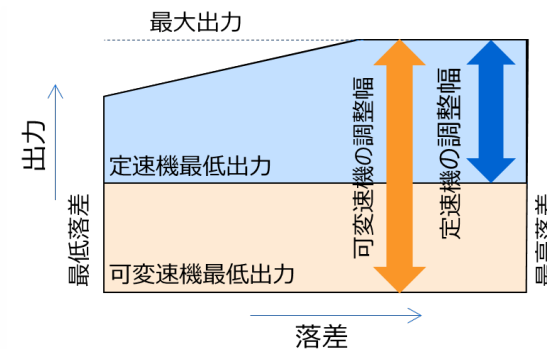
- ポンプ特性上、回転速度が一定の場合は揚程により入力値が一点となるが、それを可変にするために、回転速度を変えられるようにしたのが「可変速揚水発電システム」
- 定速機は同期機で、直流励磁（磁石を一定速度で機械的に回転させている）
可変速機は二重給電交流機で、低周波交流で励磁し、同期速度との差分を低周波交流の回転磁界で補填（ゆっくり回っている磁石を機械的に回転させ、合計値を一定にさせている）
- 可変速揚水発電システムは、発電運転時の出力調整幅も大きくとることが可能



1) 揚水運転時に入力調整が可能

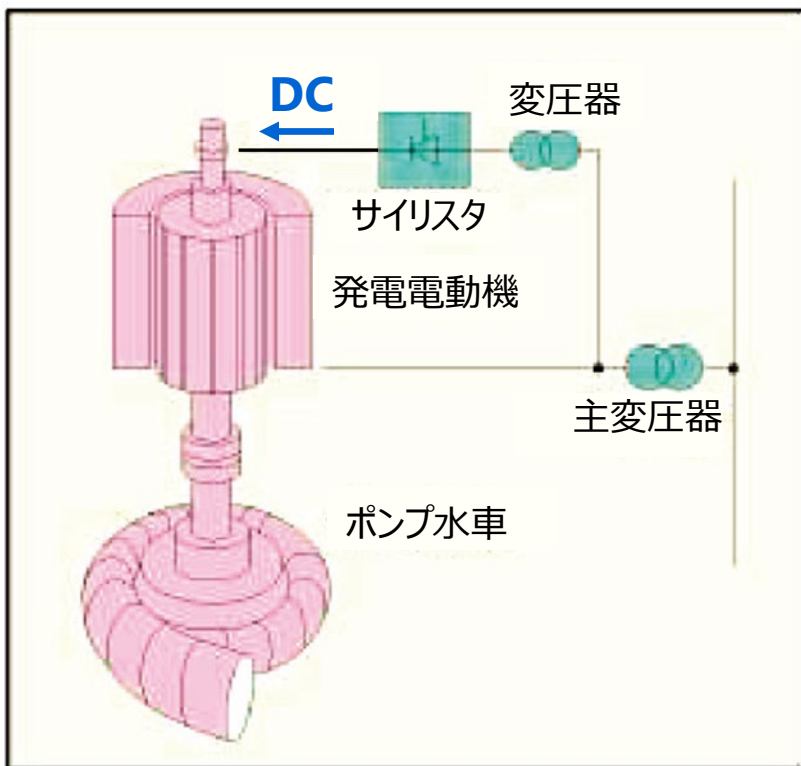


2) 発電運転時の出力調整幅の拡大



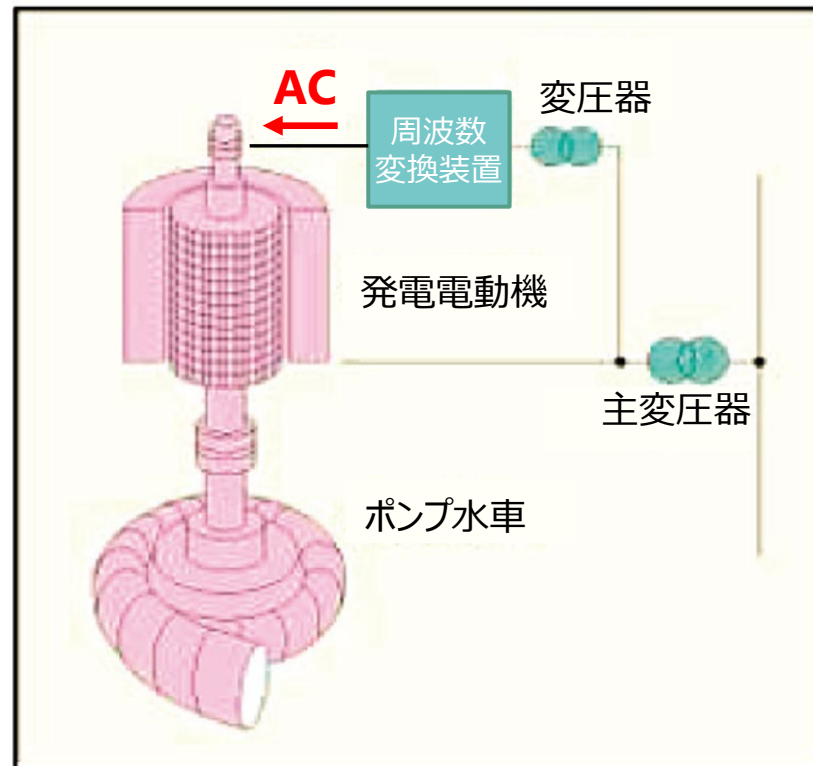
可変速揚水発電システムは交流励磁により速度を変化させることが可能

定速揚水発電システム



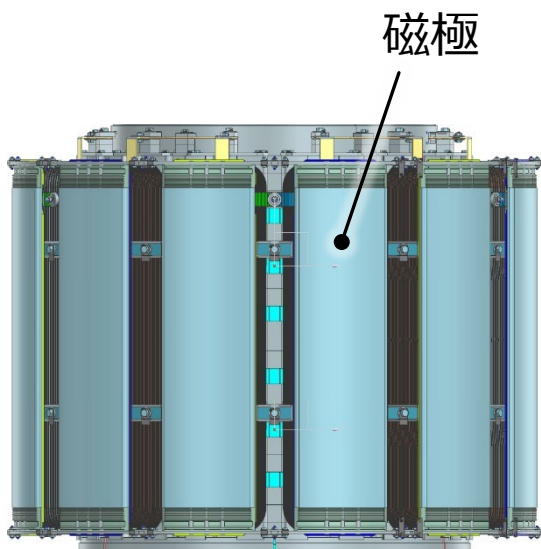
定速発電電動機は同期機のため直流励磁

可変速揚水発電システム



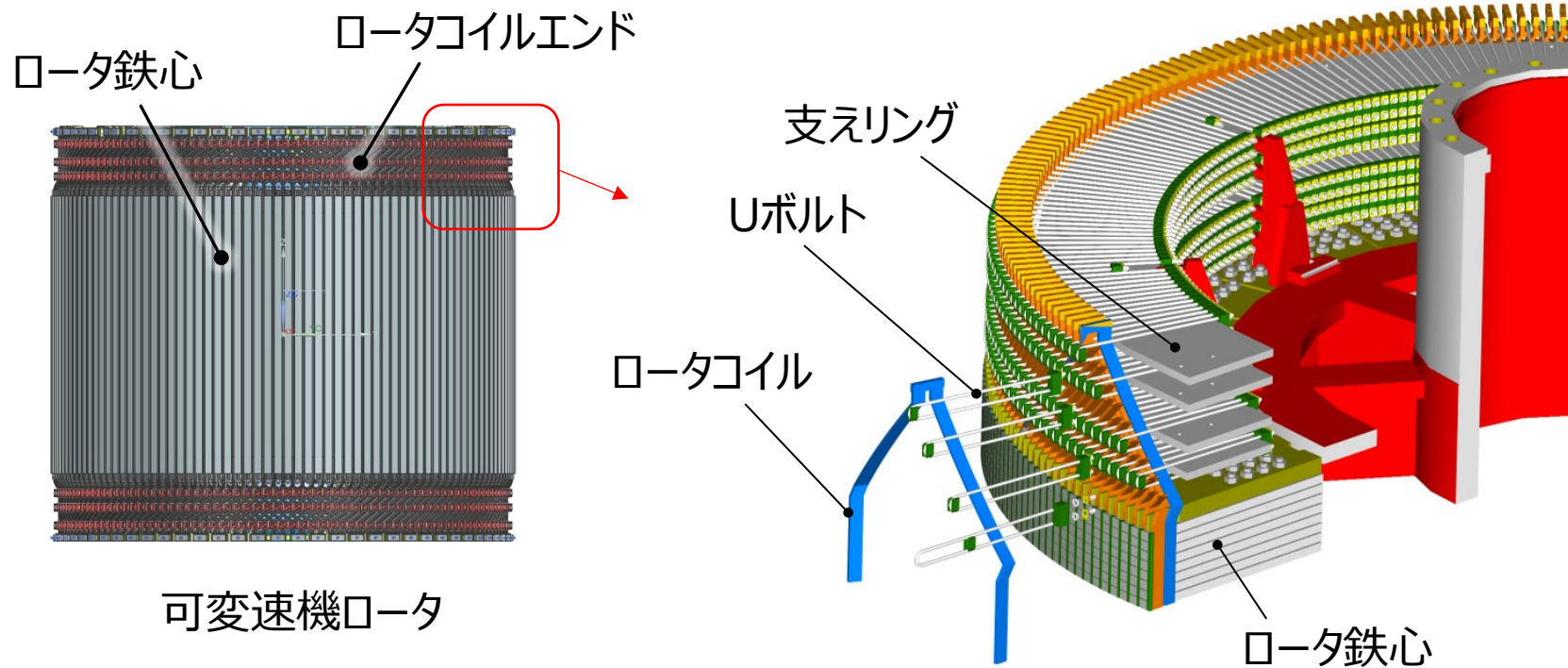
可変速発電電動機は低周波交流励磁

定速機



定速機ロータ

可変速機



可変速機ロータ

可変速機ロータコイルエンド支持構造

ロータコイルは三相巻線型であり、ロータ鉄心の上下にオーバーハングする。運転中に生じる遠心力に対し、ロータコイルの端部を支持する構造が、可変速機の特徴となる。Uボルトに代表されるボルト支持方式、バインド線方式、エンドリング方式がある。

揚水と蓄電池は同じ蓄電設備であるが、それぞれに特徴がある

内容	揚水定速機		揚水可变速		蓄電池
	発電	揚水	発電	揚水	
発電電力量 (2019年)	137GWh (27.5GW×5Hで算出)				1.2GWh (2030年まで家庭、業務・産業用24GWh 目標)
出力容量	100MW~数1000MW				~100MW
貯蔵継続時間 (蓄電容量)	5 ~ 14時間、平均7.9時間				~6時間
総合効率 (充放電効率)	70%~85%				80%~90%
運転可能出力範囲	最低出力以上の任意出力	出力固定	一定範囲で出力変化可能		充放電とも任意の出力設定
起動時間	数分 (1~10分)				数秒から1分
出力応答時間	数秒				数秒
発電・充電切換	発電と揚水の間で切替のための10~15分程度停止が必要				停止なし連続
電圧調整 (調相)	有	有	有	有	可
慣性力	メカニカル	メカニカル	シンセティック	シンセティック	シンセティック
電圧維持力 (短絡容量)	有	有	有	有	無
ブラックスタート対応	有	—	無	—	無
稼働年数	40~60年				10年~20年 (目標)
サイクル寿命	13000~20000回				2000~3500回
建設期間	10年程度以上				1年以内程度
開発進め方	大規模開発				規模に応じて部分開発可能
系統連系点	基幹系				基幹系、ローカル系
建設コスト	20万円/kW、2.3万円/kWh		データ無し		4.6万円/kWh (リチウム)、3.9万円/kWh (NaS)

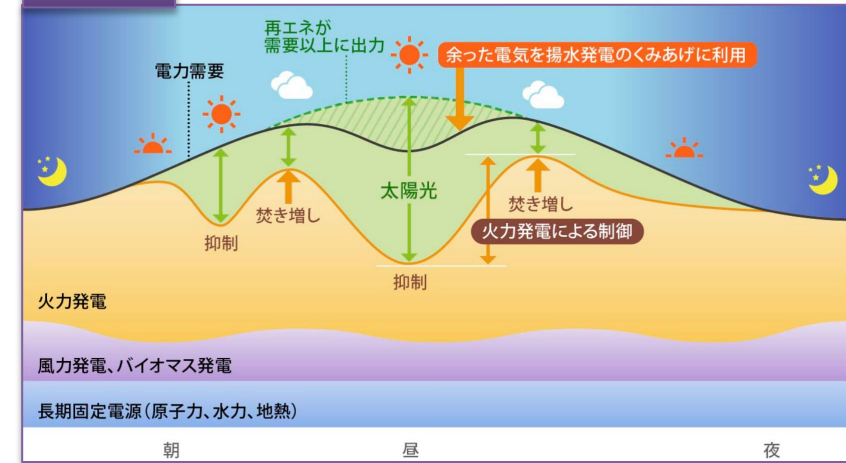


出典：産業競争力懇談会COCN「カーボンニュートラル実現に向けた水力発電システム 最終報告書(2022)」より
<https://www.cocn.jp/report/ce620bdd0297866152bbef9c4e5685e8786c34b7.pdf>

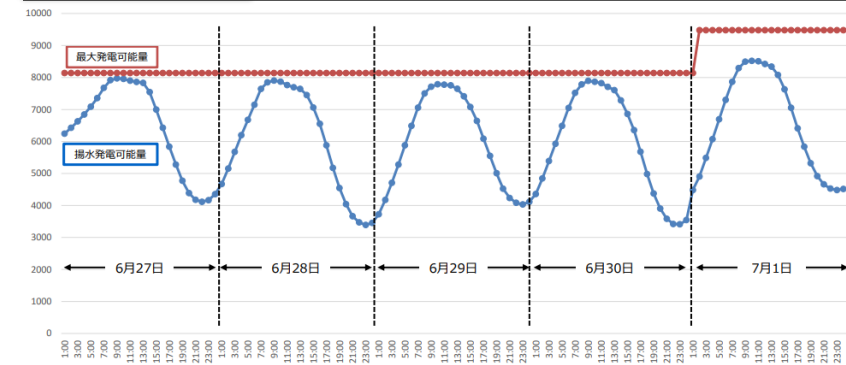
市場が整備されつつあるが、揚水の機能すべて対価がある訳ではない

機能	定速機	可変速	市場
負荷平準化 (ピークシフト)	余剰電力時に揚水、電力不足時に発電して需要曲線を平準化	同左	卸電力市場(kWh) 時間帯価格差を収益化(揚水=買い, 発電=売り)
供給力	ピーク需要時の供給力を確保	同左	容量市場(kW)
供給予備力 (持続的バックアップ)	需要・再エネ予測外れやユニット脱落後の電力供給回復を支援	同左	需給調整市場(ΔkW) 三次調整力①②
調整力 (周波数調整・負荷追従)	秒～分オーダーの需給偏差に対し、指令に追従して発電出力を増減、または起動・停止	揚水でも周波数調整可 発電運転時の調整幅は定速機よりも大	需給調整市場(ΔkW) 一次, 二次①② 一部、送配電事業者との揚水随意契約 余力活用契約(容量市場で調整機能ありで落札した電源に付随する契約)
ブラックスタート (系統復旧起動)	広域停電時, 外部電源なしで起動し, 系統復旧を足場的に支援	同左	ブラックスタート機能公募
電力貯蔵	長時間の貯蔵が可能。貯蔵量はダム貯水量に依存。再エネ余剰吸収も可能	同左	無し
系統電圧調整 (無効電力供給)	無効電力を注入/吸収し電圧維持	定速機よりも高速制御が可能	無し
系統安定度・慣性供給	大型同期機として慣性や短絡容量を提供し, 周波数低下率や同期化力を改善	パワエレによる高速制御することにより, 定速機よりも抑制可	無し

調整力



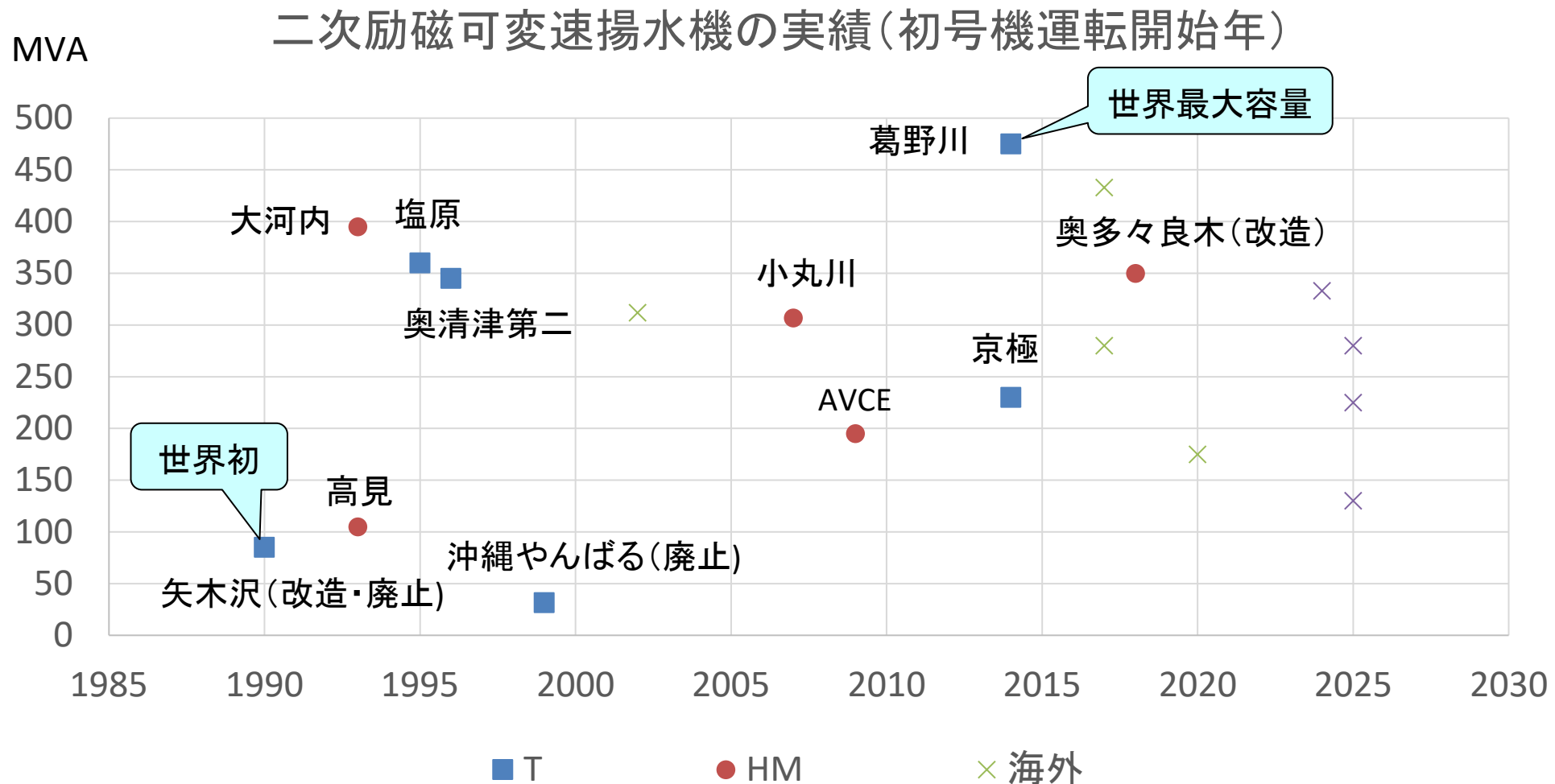
供給予備力



出典: 資源エネルギー庁

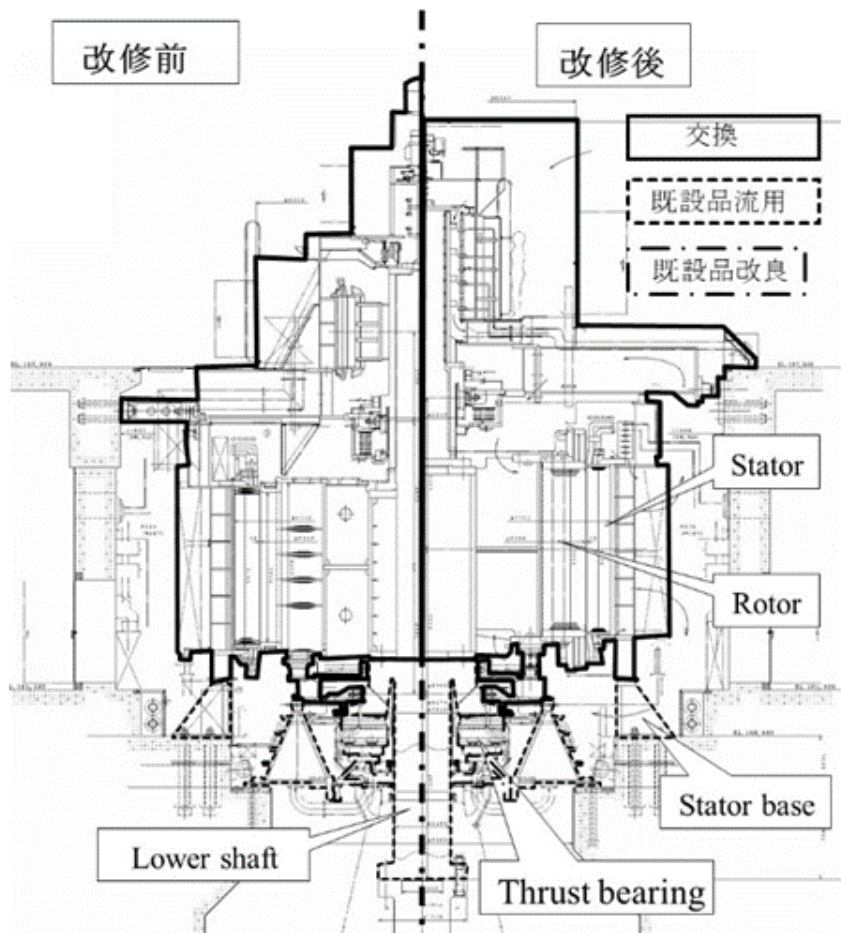
HP(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoyousuihatuden.html>)

可変速揚水は日本で発祥・発展した技術，再エネ導入拡大により海外で増加



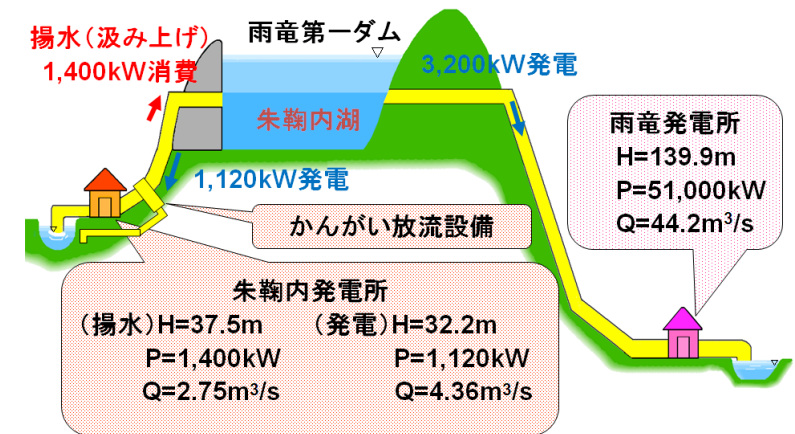
発電最大出力303MW、揚水最大入力320MWは不変。水車部分負荷効率を向上し、揚水方向は±45MWのシステム電力調整能力を実現。

揚水所において既設揚水ポンプを可変速揚水発電設備に更新



- ### 改良工事における工夫点
- ① 工事費削減のため、主要変圧器など他の主要機器は流用するので、それに合わせた**可変速用ランナへの交換**
 - ② 既設発電所の**限定されたスペースを考慮**した、各種の機器寸法設計
 - ③ 既設機器への影響を考慮した、**励磁装置室を掘削**する工法

発電電動機は、左図に示すように**突極型から円筒型へ取り換え**。既設の天井クレーンを流用するため、はずみ車効果と回転子荷重の最適バランス化を図る必要がある。



海外では中容量機にフルコンバータ可変速を適用

オーストリア国VERBUND社 Malta Oberstufe 発電所
 ・定格容量 2×60MW
 ・1979年運開、2021年～2022年に、Modular Multilevel Converter (MMC) を用いた可変速化を実現

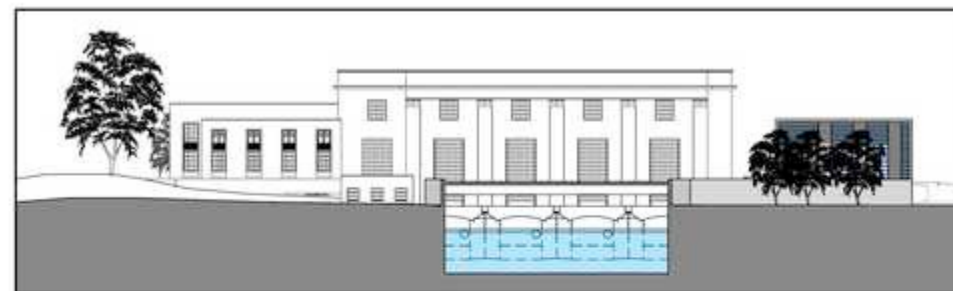
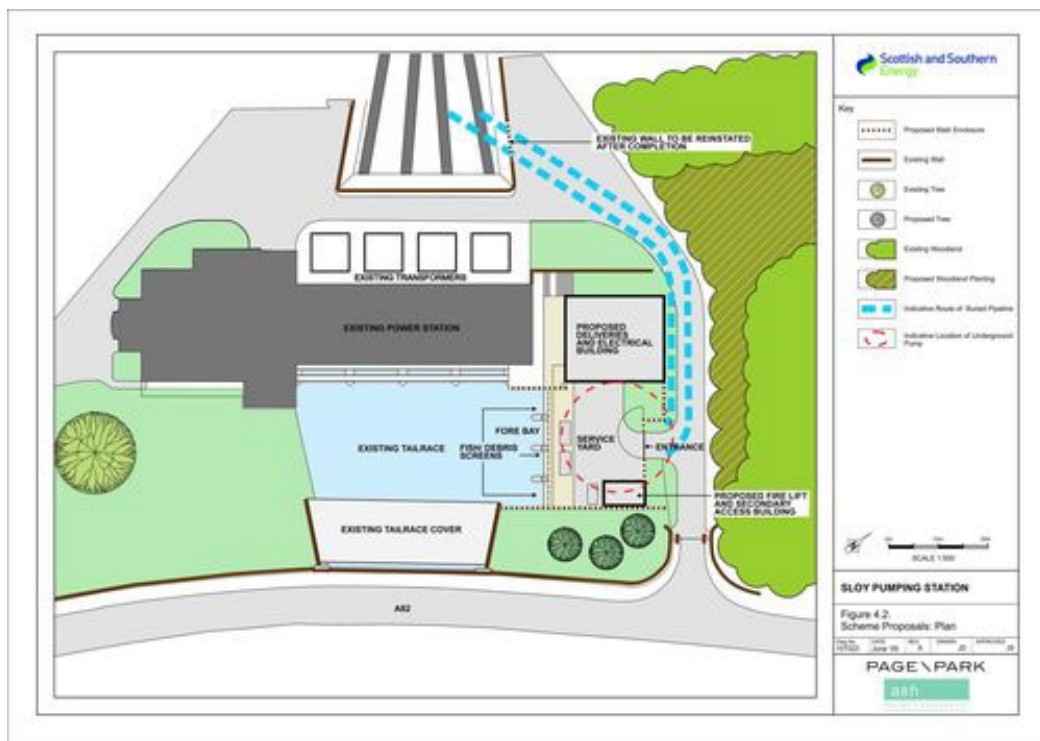
オーストリア国VERBUND社 Limberg I 発電所
 ・(旧) 容量 113MW (2台)
 ・1956年運開、2021年～2022年に可変速化

出典：森淳二、震明克眞、中村彰吾、増子利健、「2050年カーボンニュートラルに向けた水力発電の貢献 ～JEMA水力発電WGの取組み～」 JEMA機関誌「電機」特集 10月号

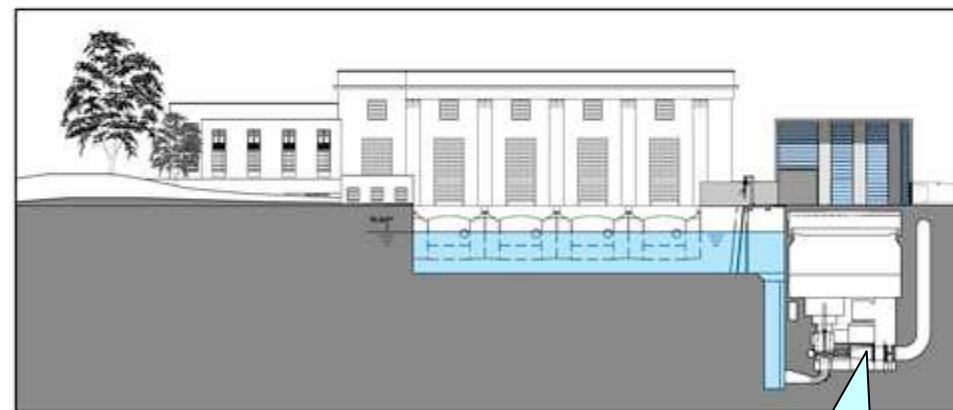
出典：平成25年度新エネルギー財団会長賞「標準部品を使用した可変速揚水発電所の新設」ホームページより



- 英国SSE(Scottish and Southern Energy plc)は、Sloy水力発電所（150MW、1959年製）に隣接する、揚水発電所を再開発するという計画を2023年5月に発表した。
- カスケード状に水力発電所が配置されている河川は世界中におびただしい数が存在する。それらを揚水化していけば、土木コストを抑えつつ、蓄エネルギー装置を増設することが可能である。



before



after

揚水発電機器

出典: <https://www.ashdesignassessment.com/sloy-pumping-station>
https://www.sserenewables.com/media/ygvl2vb5/sser-sloy-public-consultation-brochure_single-page-web.pdf

03

2050年CNに向けた揚水発電活用の可能性評価

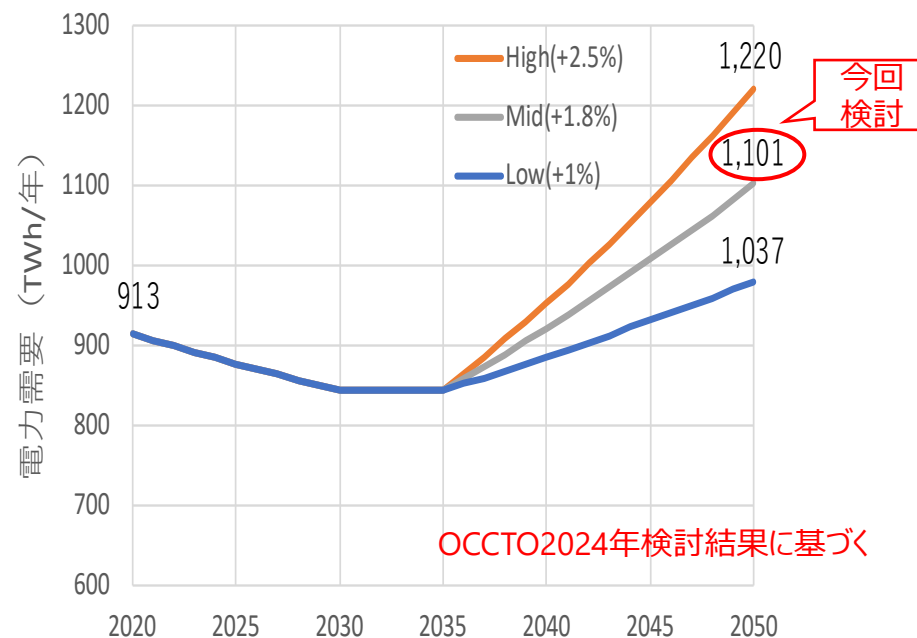
長期電源計画モデルによる揚水活用の可能性評価の実施

- ✓ 第7次エネルギー基本計画が2025年2月に閣議決定
 - 2035年以降, データセンタやAIにより需要が増加に転じるものと想定
- ✓ 2050年カーボンニュートラル(CN)に向けた電源構成の検討が進む中、再エネ(VRE)の導入拡大に伴う調整力の確保が課題



- ✓ 第7次エネ基に基づく長期電源計画モデルを開発し、2050年CNをコスト最小で達成する電源構成の推移を計算し、揚水発電の活用を分析
 - EDC調整力(予備力)の他、LFC調整力の確保を制約
 - 電源の運用を1年365日×24H(3H毎)×25年(5年毎)で評価

需要想定



想定需要に対し「電源と連系線の固定費 + 変動費」を最小化する設備容量を計算

大規模線形最適化 (LP) モデル

- 目的関数 北海道～九州(9エリア)、連系線：10+HVDC

$$\sum_{y=2020}^{2050} rr(y) \left\{ \sum_{\text{エリア}} \sum_{\text{電源種別}} (\text{電源固定費} + \text{電源変動費}) + \sum_{\text{連系線}} \text{連系線固定費} \right\}$$

資本費 + 運転維持費
燃料費 + CO2輸送貯留費

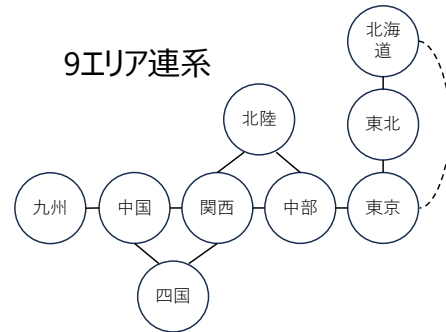
制約条件

- 既設電源
- 設備容量の上下限制約
- 需給バランス
- EDC調整力(運転予備力)
- LFC調整力
- 設備利用率
- 連系線

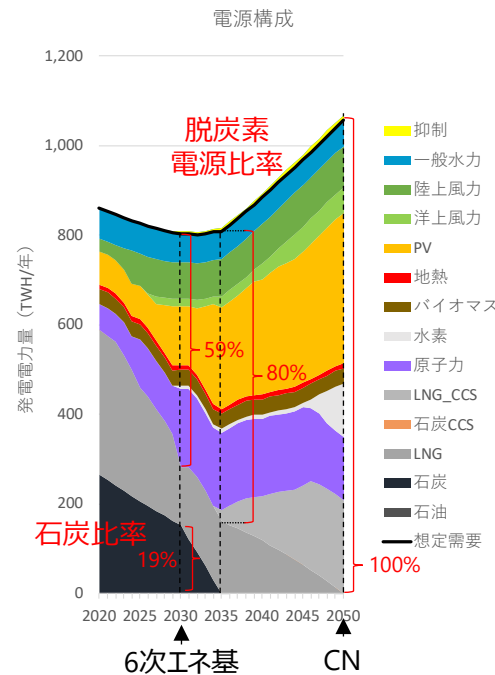
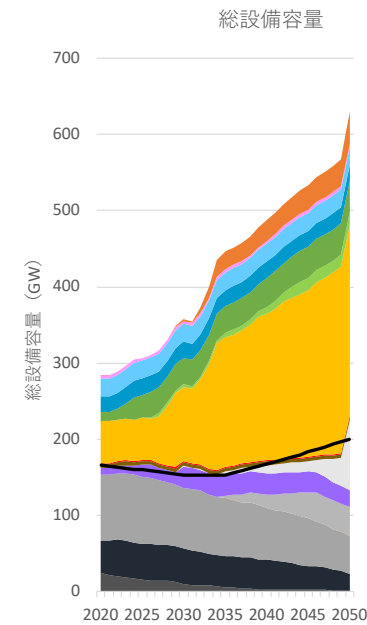
$$\sum_{\text{電源種別}} \text{電源LFC供給量} \geq \text{LFC必要量}$$

$$= \sqrt{\sigma_{dem}^2 \text{需要}^2 + \sum_{VRE種別} \sigma_{VRE}^2 VRE出力^2}$$

→区分線形近似した十分条件で評価



計算結果例



9エリア合計

長期電源計画モデルの入出力データ

入力（公開情報に基づき設定）

- 電力需要想定データ
- 電源データ（費用・運転条件）
- 燃料データ
- 連系線費用データ
- 既設電源・連系線容量データ
- 建設予定電源・連系線データ
- 予備力・LFC調整力必要量係数
- 燃料消費量・CCS貯留量上限
- 政策目標（石炭、脱炭素電源比率等）

7次エネルギー基本計画および
コスト検証WG

長期電源計画モデル

コスト最小の電源容量・発電計画の計算
（設備廃止は稼働年数により決定）

2025～2050年（5年ごと）
（年間365日/3時間ごと）

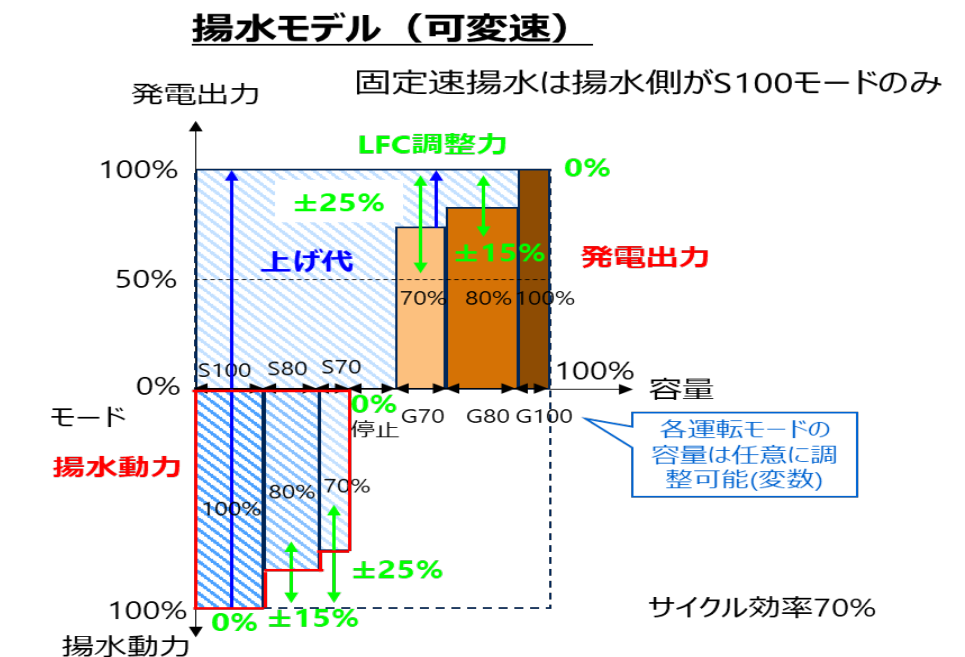
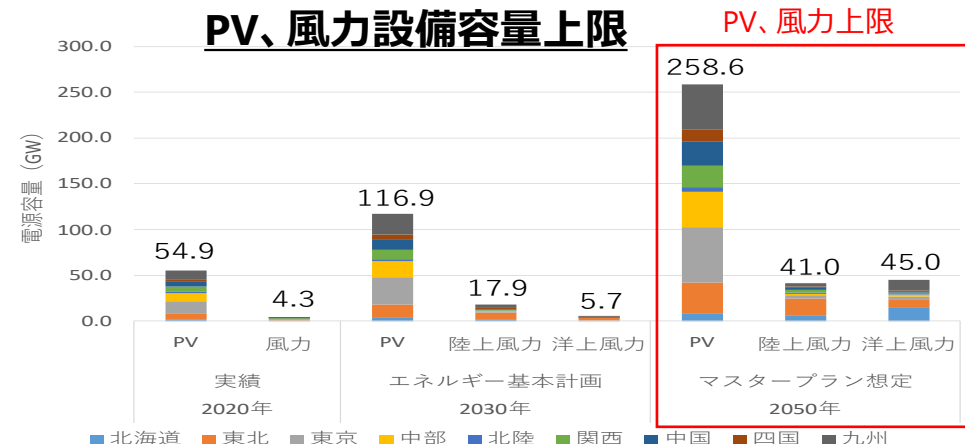
出力

- 電源容量の推移
- 時間ごとの発電電力量、予備力・LFC調整力供給量
- 連系線容量の推移
- 時間ごとの連系線潮流、予備力・LFC調整力融通量

（エリア・電源種別ごと）

7次エネ基, コスト検証WG報告書などの公開情報によりモデルを設定

エリア	北海道～九州 (9エリア)、連系線：10+北海道東京間HVDC	
期間	2025～2050年度 (25年間、5年ごと)	
時間解像度	設備更新周期：5年、時間断面数：2,920/年(3時間ごと8断面/日)	
電力需要	2020年度実績データを基に以下で比例倍 2020～2030年: 年率0.8%減少、 2030～2035年: 増減なし、 2035～2050年: 年率1.8%増	
電源容量	既設電源	制約として考慮、廃止は火力50年、原子力60年、水力100年
	原子力	許可済：2025年、審査中：2030年再稼働、寿命に停止期間は除く
	CCS付火力、水素	2030年度導入開始
	PV、風力	マスタープラン2050年想定を上限、廃止は30年
	揚水	2030年以降に新增設、可変速化可能、 固定速は発電のみLFC機能有り、可変速は揚水もLFC機能有り
	蓄電池	LFC機能有り、廃止は15年
電源諸元	発電コスト検証WG報告書などにに基づき設定 運転継続時間：揚水8H、蓄電池3H	
CCS制約、水素制約	CCS制約: 年間1億トン、水素制約: 年間1,000万トン	
政策	石炭火力	2030年度19%、2035年度0%
	脱炭素電源	2030年度59%、2035年度80%、2050年度100%



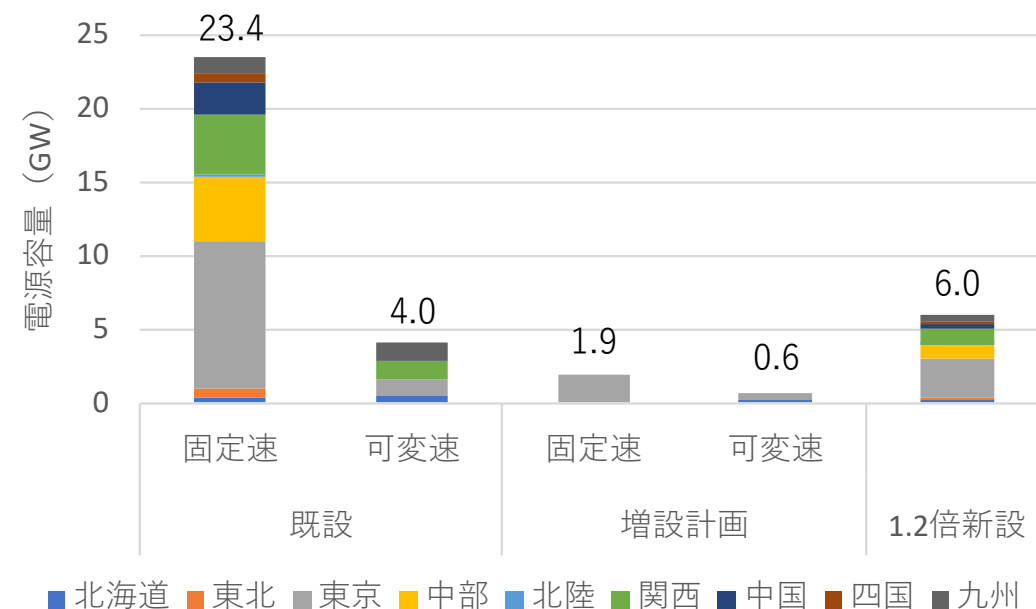
蓄電池LFC機能有、固定速揚水可変速化、揚水新增設を評価

表2 分析ケース

ケース	蓄電池LFC機能	固定速揚水可変速化	揚水設備容量上限
1	あり	なし	既設 + 増設計画
2		あり	
3			(既設 + 増設計画) × 1.2
4			新設可 (上限撤廃)

※揚水可変速化の建設コストは揚水建設コストの3分の1を想定

揚水 定速機：ポンプ運転時の出力一定・・・LFC調整力ゼロ
 可変速機：ポンプ運転時も出力可変・・・LFC調整力あり

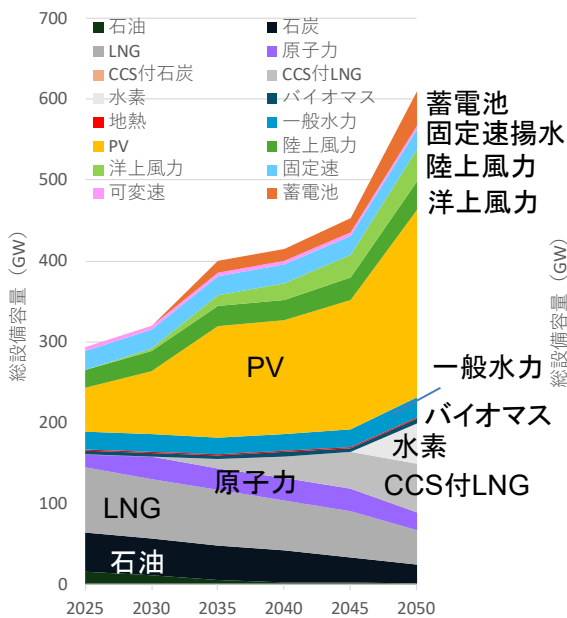


揚水新增設の計画値と容量1.2倍までの設備容量増分

可変速化, 揚水新設を増やすことが, 社会便益に繋がる

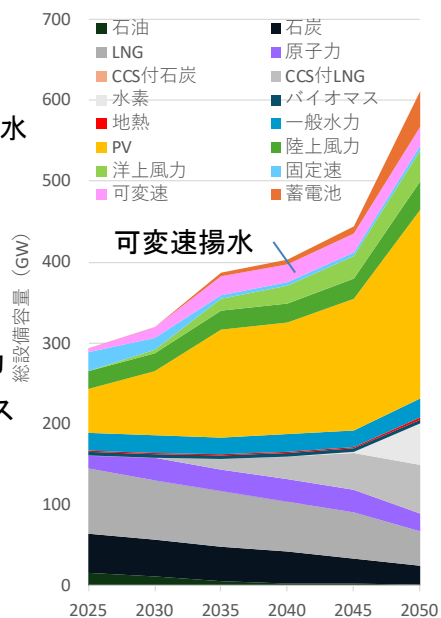
ケース1

総設備容量



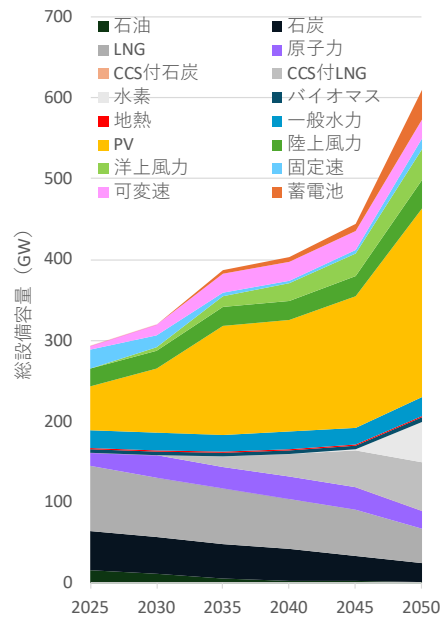
ケース2

総設備容量



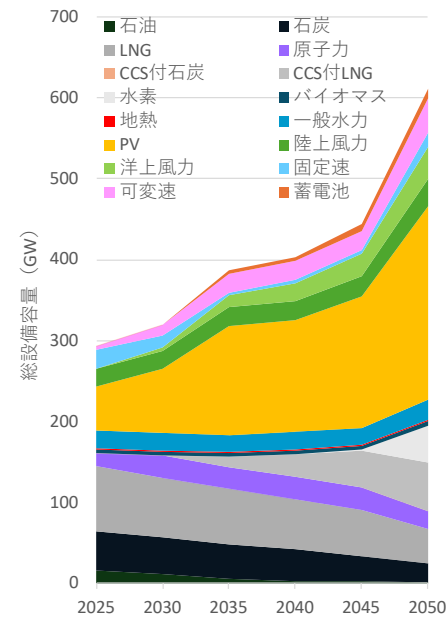
ケース3

総設備容量



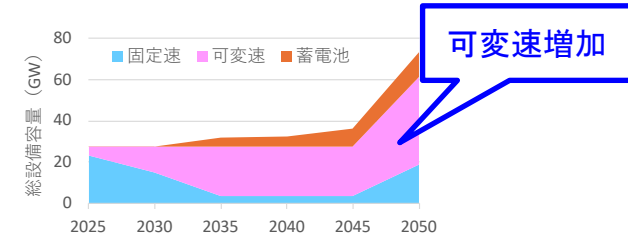
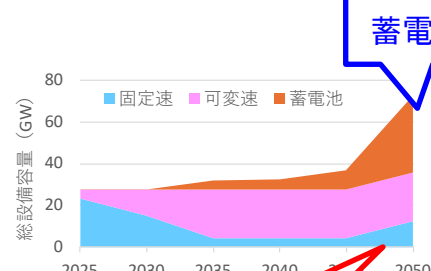
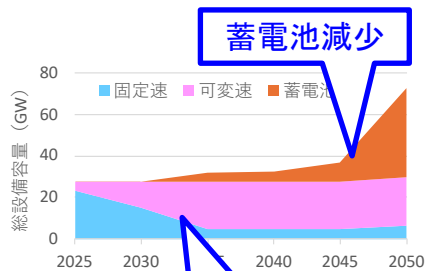
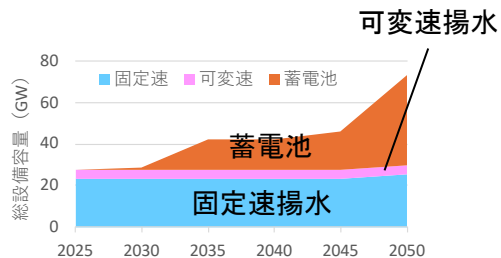
ケース4

総設備容量



発電設備容量

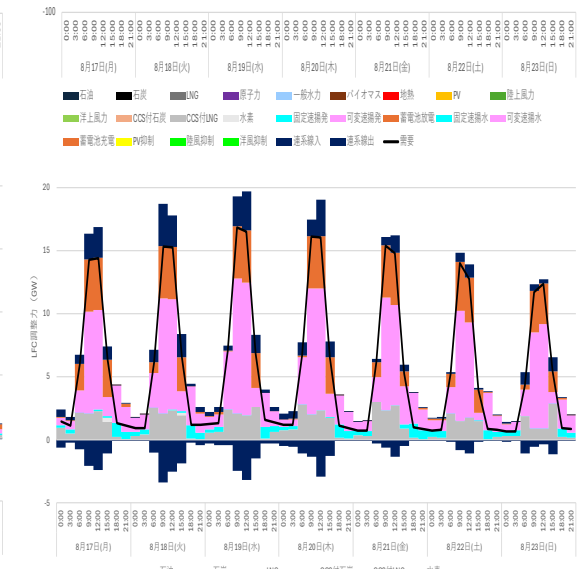
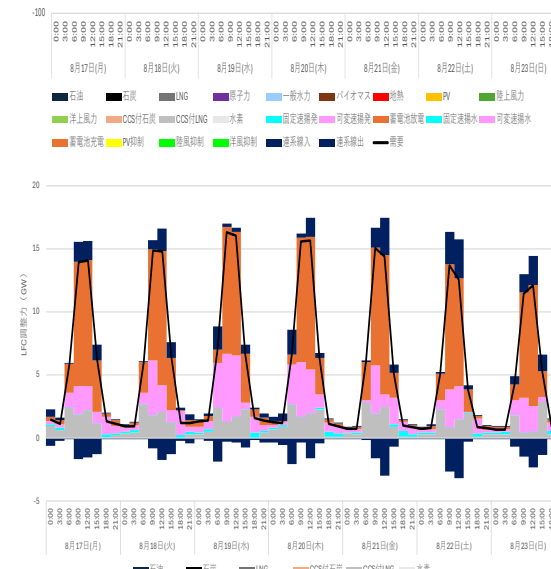
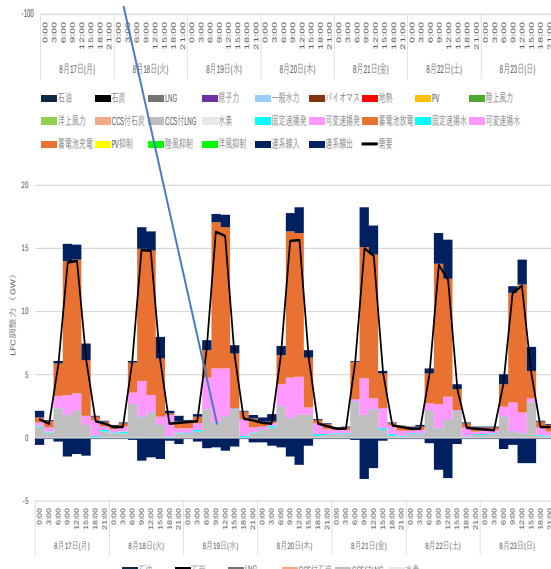
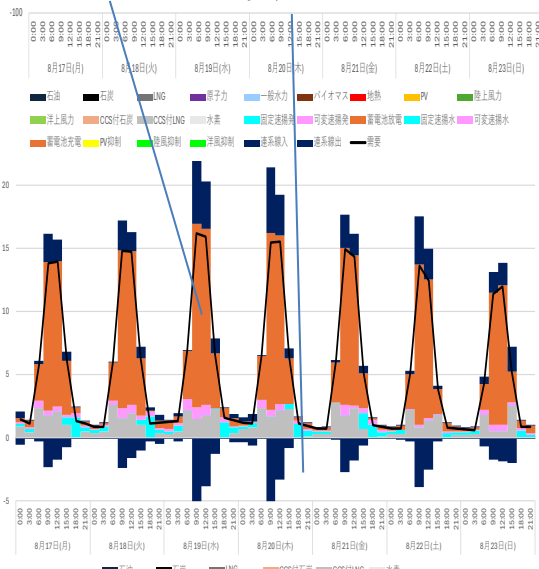
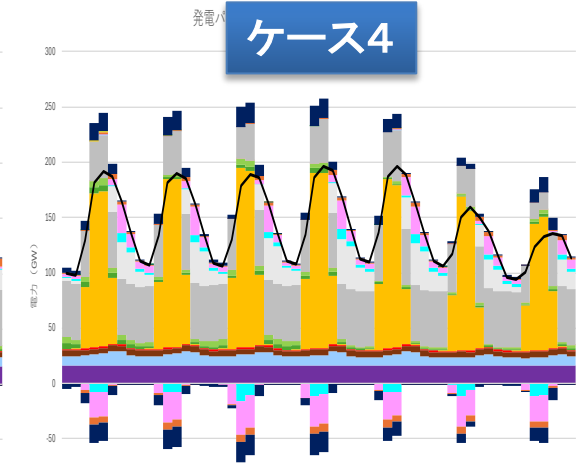
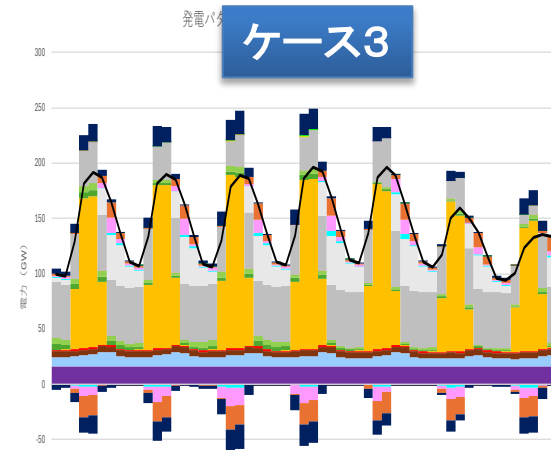
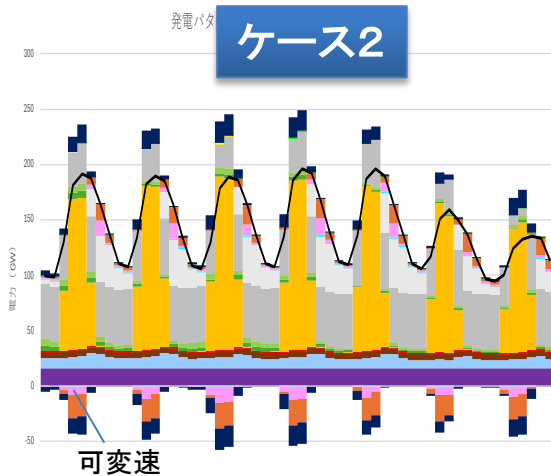
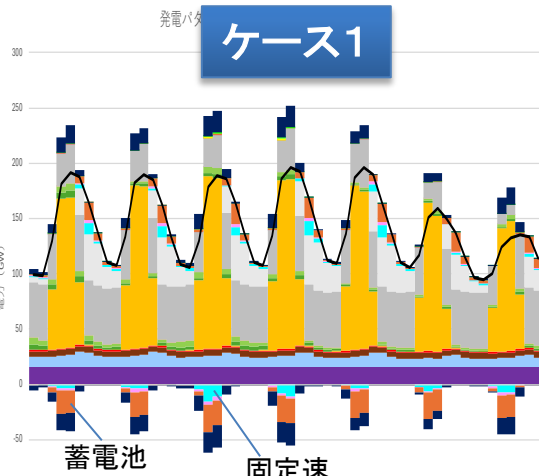
蓄電設備の容量



蓄電能力・LFC調整力は、可変速化・揚水増設により蓄電池から揚水へシフト

発電パターン

LFC調整力



04

京極発電所の事例紹介

京極発電所は、北海道唯一の純揚水発電所として活躍

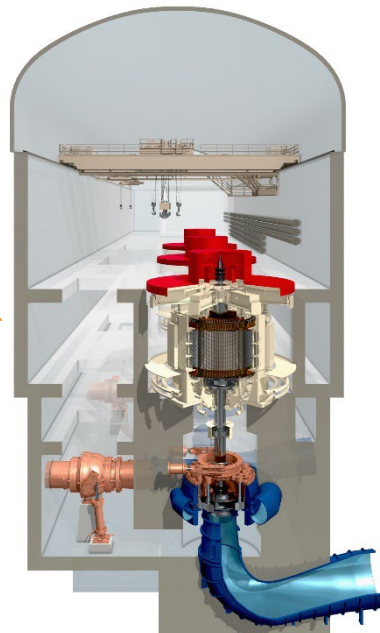


京極発電所の全景

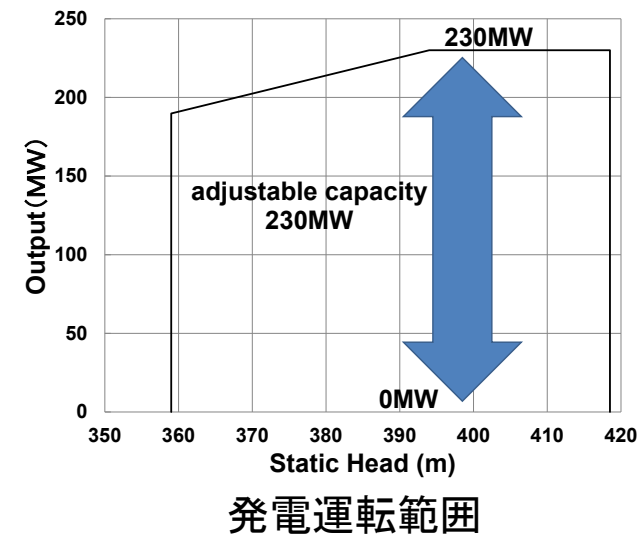
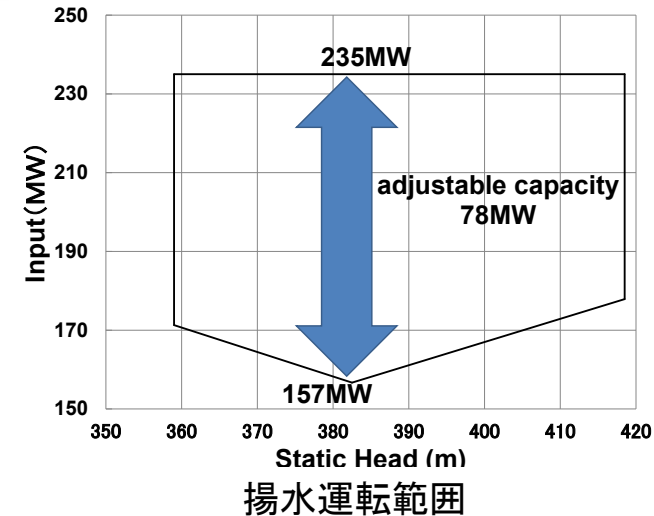
出典: 北海道電力HP(https://www.hepco.co.jp/energy/water_power/kyogoku_ps.html)

京極発電所の主な仕様

項目	定格事項
最大出力	600MW
運転開始	1号機: 2014年, 2号機: 2015年
使用水量	190.5m ³ /s
雄高落差	369m
ポンプ水車	208MW/230MW
発電電動機	230MVA/230MW
回転速度	500min-1-±5%

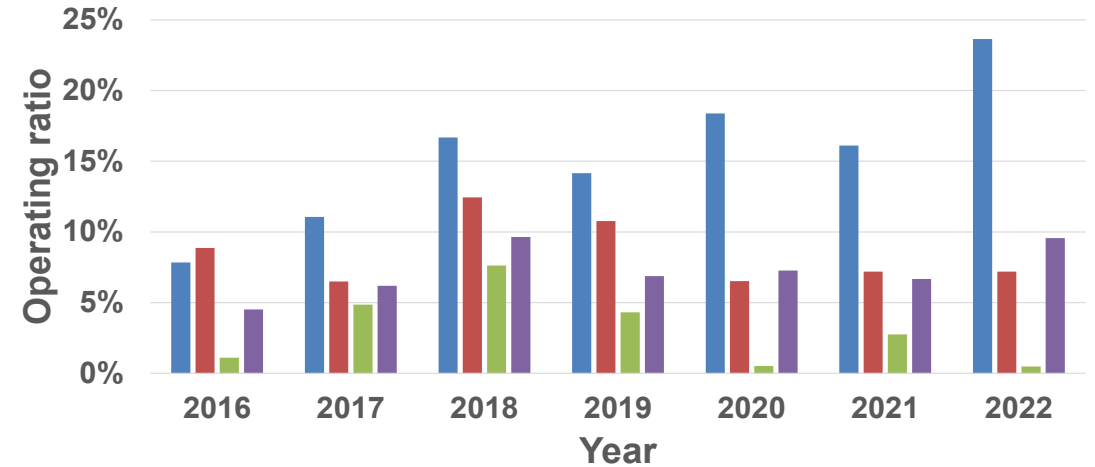
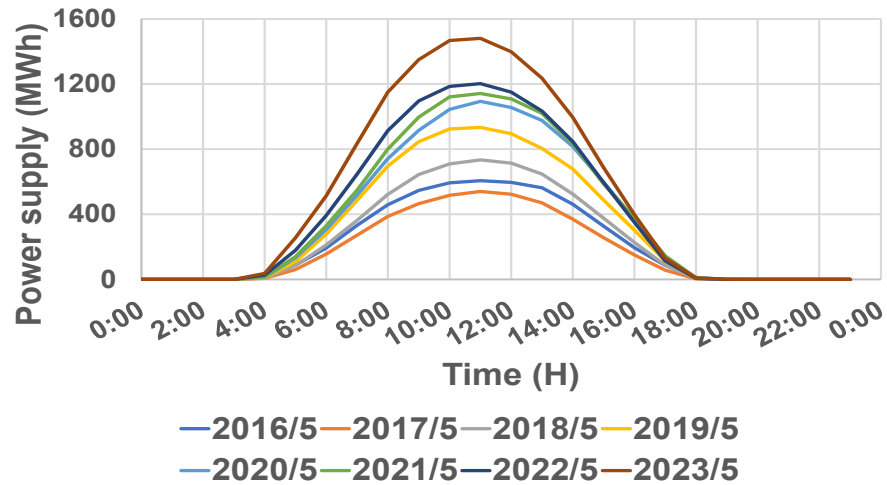
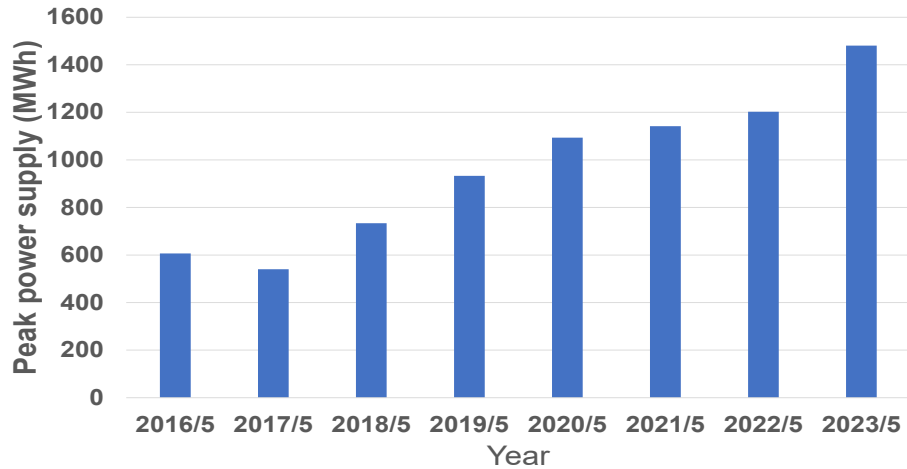


回転速度を変えることで、揚水運転時の入力を調整できる。また、発電運転時の下限出力も低減でき、京極発電所ではゼロ出力まで運転している。



出典: Cigre 2023 Features and Operating Conditions of Adjustable Speed Generator-Motor for Kyogoku Pumped Storage Hydro Power Station

太陽光発電の出力が増加するにつれて、発電運転時間が延びている



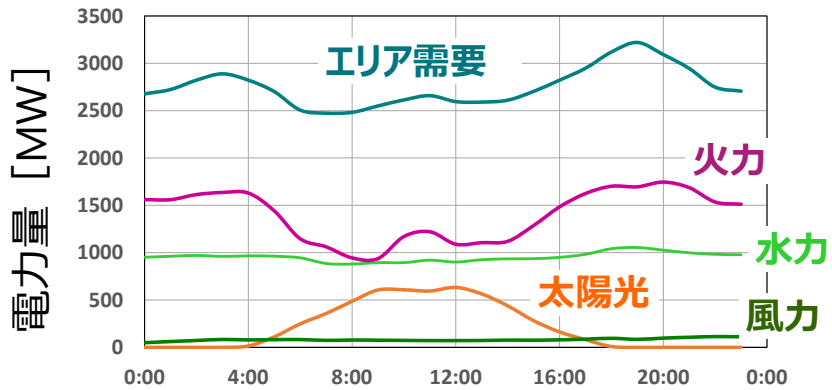
- Generating mode
- Synchronous Condenser mode in Generating direction
- Synchronous Condenser mode in Pumping direction
- Pumping mode

太陽光発電の発電量は年々増加傾向にある。
 京極発電所の運転は、揚水運転時間は横ばいであるものの、
 発電運転時間が顕著に増加している。
 これは、部分負荷での運転時間が延びていることが考えられる。

運転事例 (2)

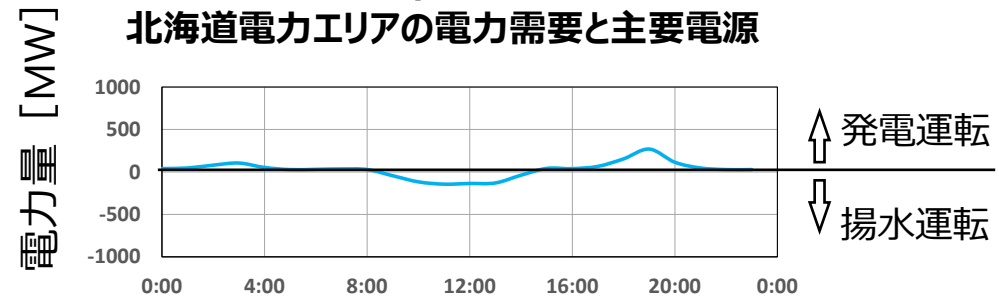
太陽光、風力発電の増加に伴い揚水発電所による調整量も増加

2016



2016年5月15日

北海道電力エリアの電力需要と主要電源



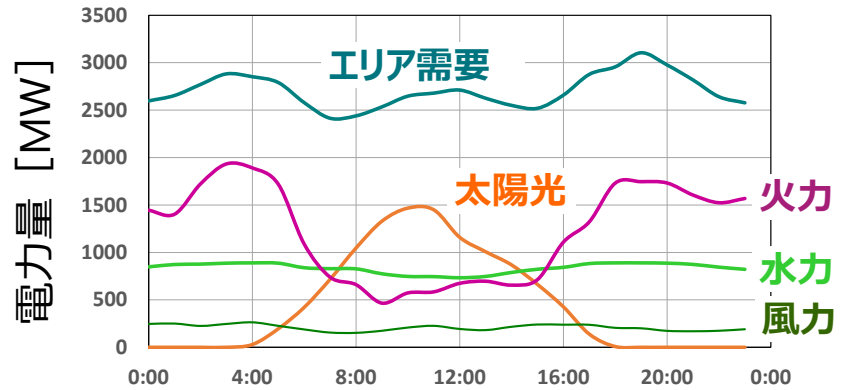
2016年5月15日

北海道電力エリアの揚水発電所稼働状況

出典：ほくでんネットワーク北海道エリアの需要実績より集計

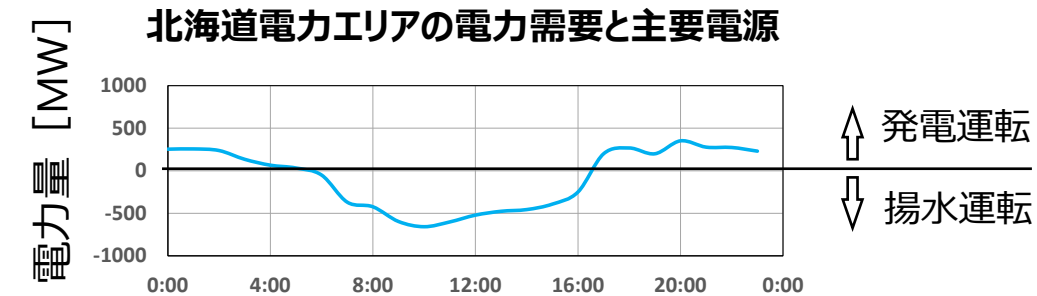
太陽光、風力発電の割合はピーク時で全体の35%程度。需要と供給のバランスは主に火力発電所の出力で調整。

2022



2022年5月15日

北海道電力エリアの電力需要と主要電源



2022年5月15日

北海道電力エリアの揚水発電所稼働状況

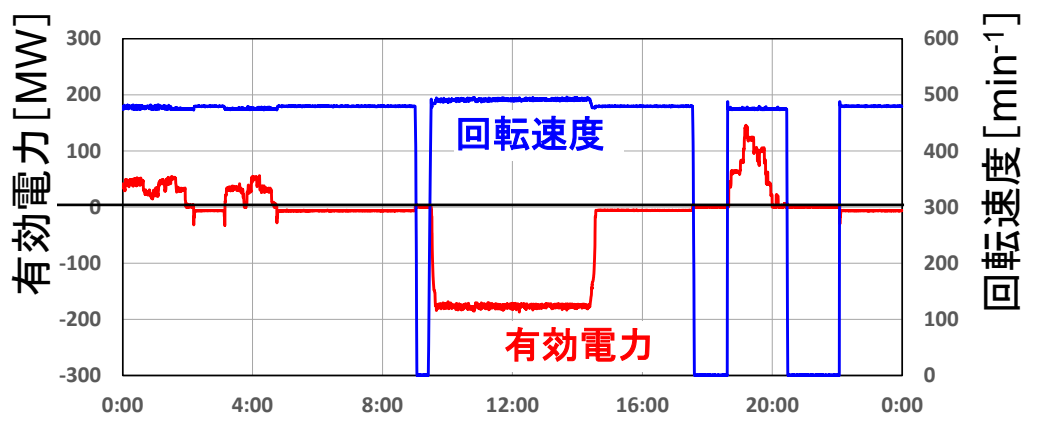
出典：ほくでんネットワーク北海道エリアの需要実績より集計

太陽光、風力発電の割合はピーク時で全体の63%まで拡大。需要と供給のバランスをとるため、火力発電の出力を減らし、更に揚水発電所の揚水運転で調整。

揚水運転により需要と供給のバランスを柔軟に調整

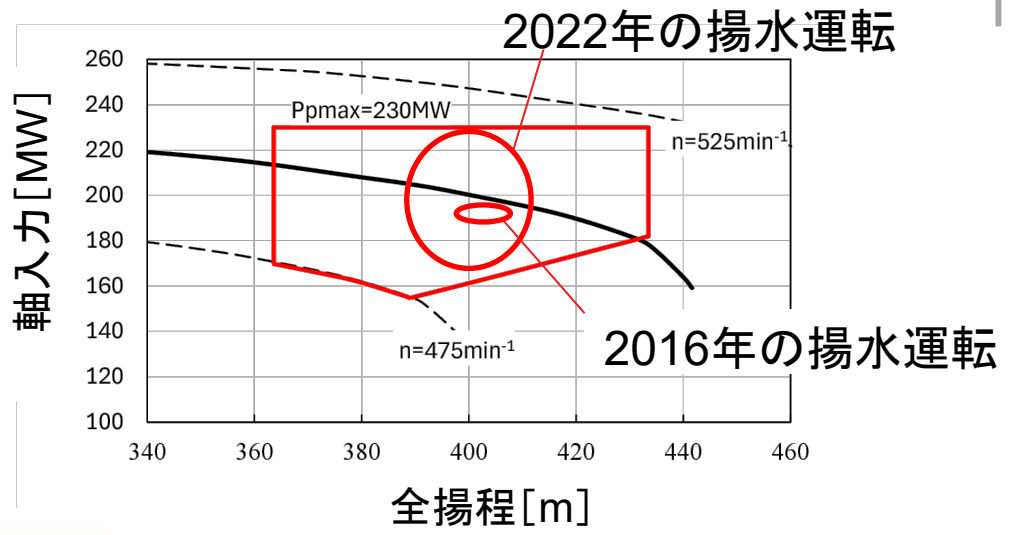
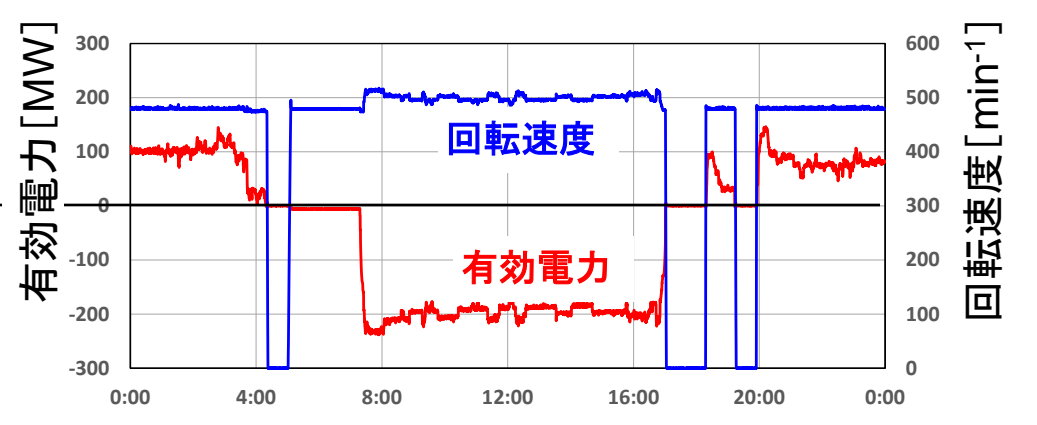
2016

発電 ↑
揚水 ↓



2022

発電 ↑
揚水 ↓

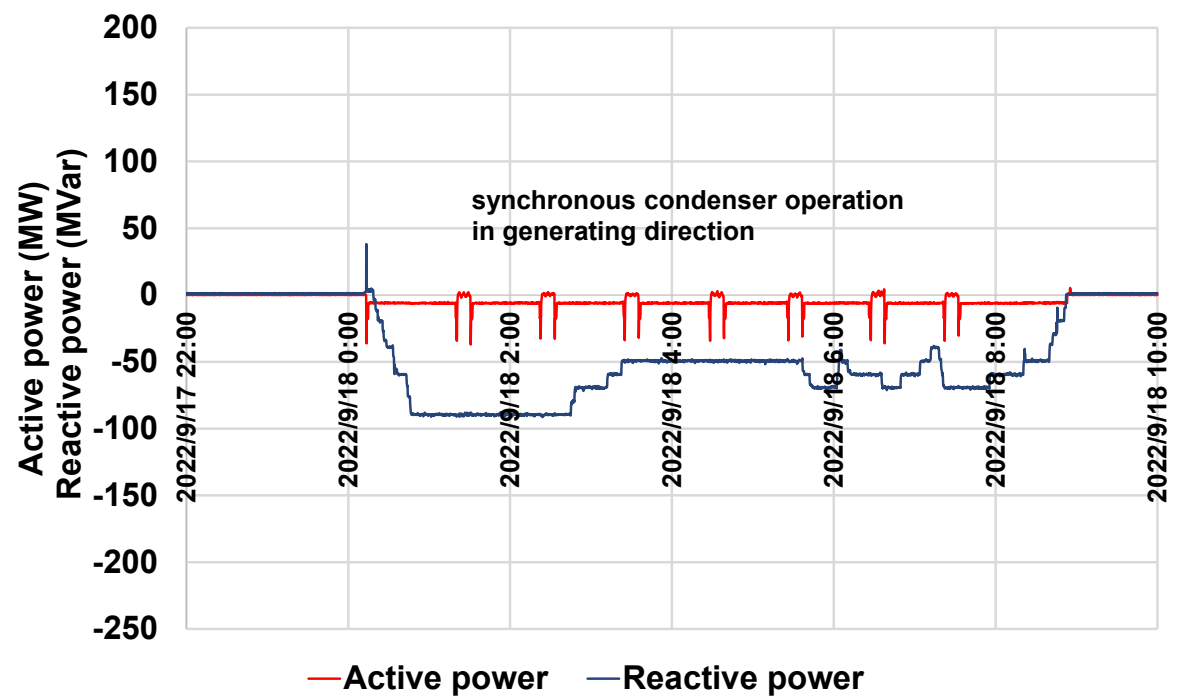


2016年に比べて2022年の運転では、揚水運転中に頻繁に回転速度を変えながら、有効電力（入力）を調整していることが確認できる。

運転事例 (4)

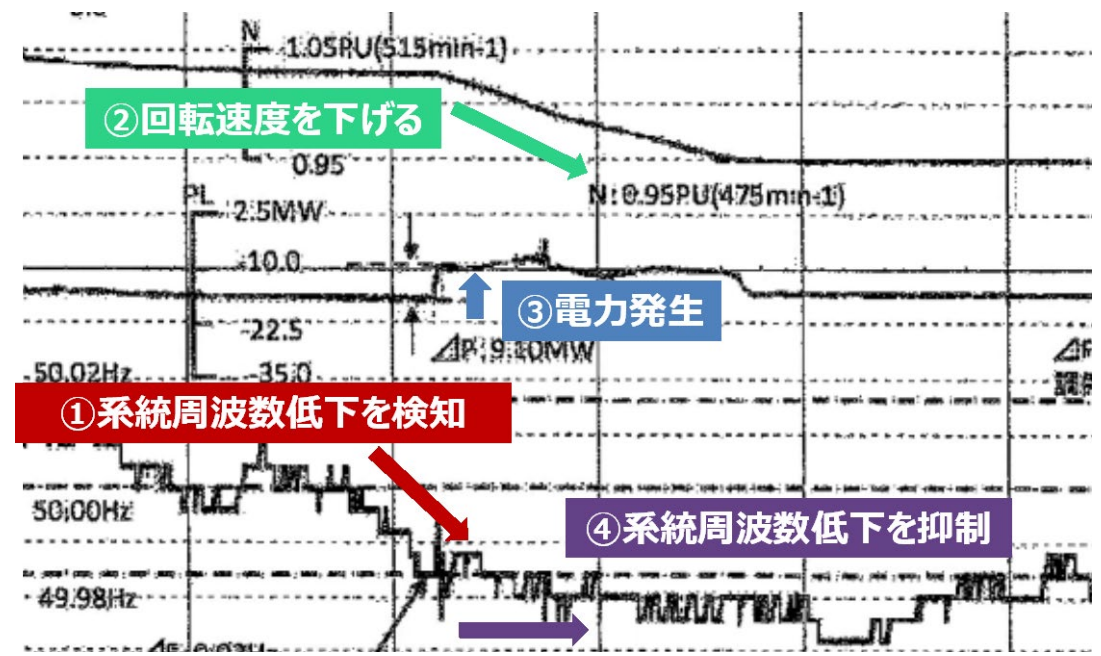
京極発電所は、系統安定化に向けた特殊運転の機能を付加

連続調相運転



ドラフトから冷却水を給排水しているが、調相運転中に水の入れ替え運転を行い、長期連続運転を可能としている。

フライホイール運転機能



系統周波数の変化を検知し、回転速度を上下させることで、エネルギーの充放電が可能。パワエレを使った高速制御により、変動再エネの短時間での変動に追従できる。

05

まとめ

1. 世界的に、再生可能エネルギーが増加するのに伴い、揚水発電は増えてくると考えられる。日本の揚水発電の稼働率も上昇してきているが、古い設備が多い。
2. 可変速揚水発電は、揚水運転時にもLFC運転ができることが特長で、世界的に需要が高まってきている。
3. 市場化が進んできているものの、揚水の価値の全てが評価されている訳ではない。
4. 公開情報を用いた長期電源計画シミュレーションでは、既設揚水の可変速化、揚水の新設が、コストミニマムに寄与するとの結果が得られた
5. 京極発電所の事例の様に、揚水の使われ方は変化してきている。
6. 今後、揚水は更に活躍する機会が増えると考えられるため、適切な評価が得られることを期待する。