

揚水発電の現状について

関西電力株式会社
再生可能エネルギー事業本部
横谷 亮

2022年11月18日



1. 当社水力の紹介

- (1) 位置図
- (2) 一般水力ご紹介
- (3) 揚水一覧
- (4) 水力の割合・kWh実績

2. 揚水について

- (1) 揚水の仕組み
- (2) 使われ方の変化
- (3) 調整力確保の仕組み
- (4) 保有している価値
- (5) 維持に必要なこと
- (6) 国大の議論状況

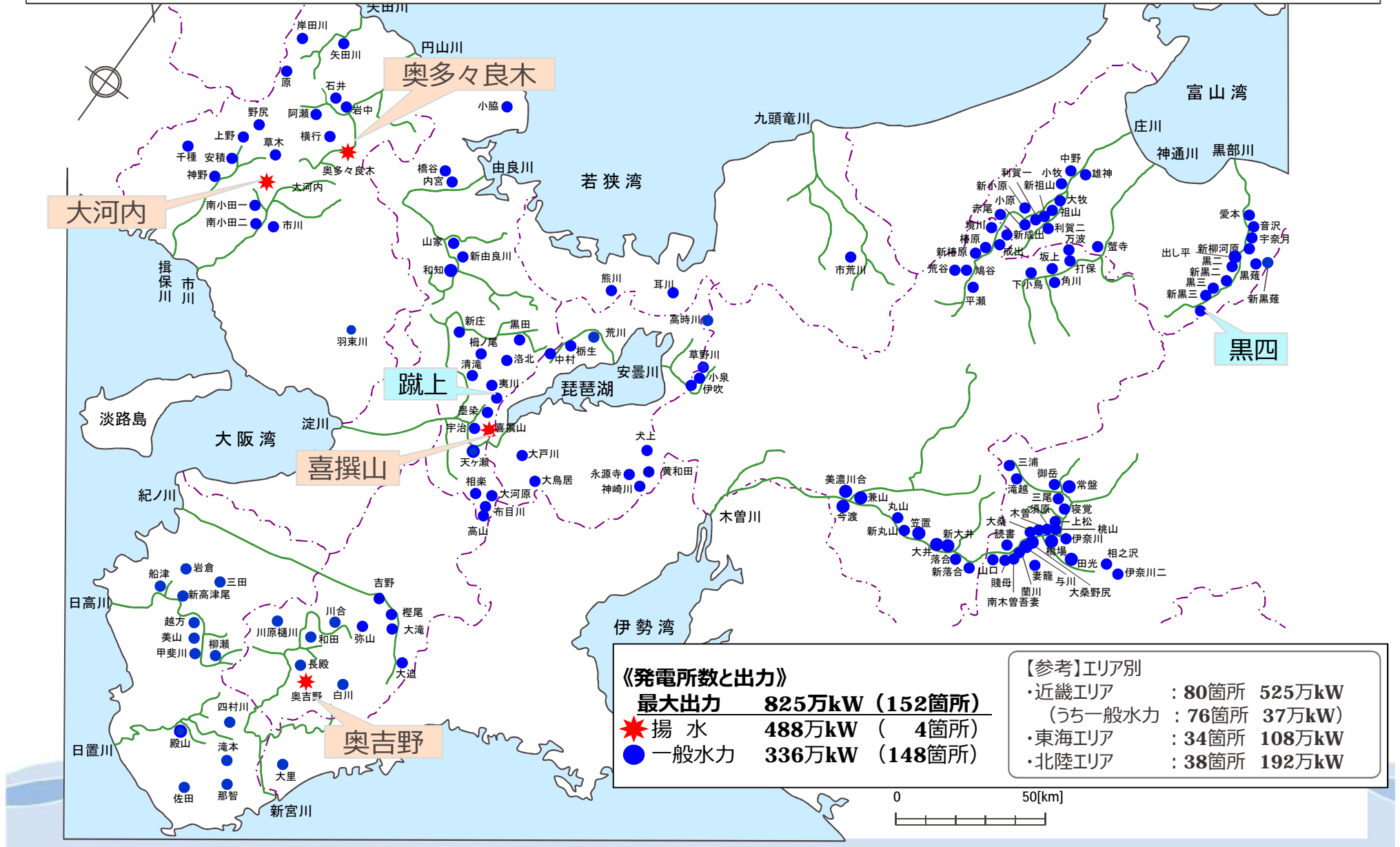
1. 当社水力の紹介

- (1) 位置図
- (2) 一般水力ご紹介
- (3) 揚水一覧
- (4) 水力の割合・kWh実績

2. 揚水について

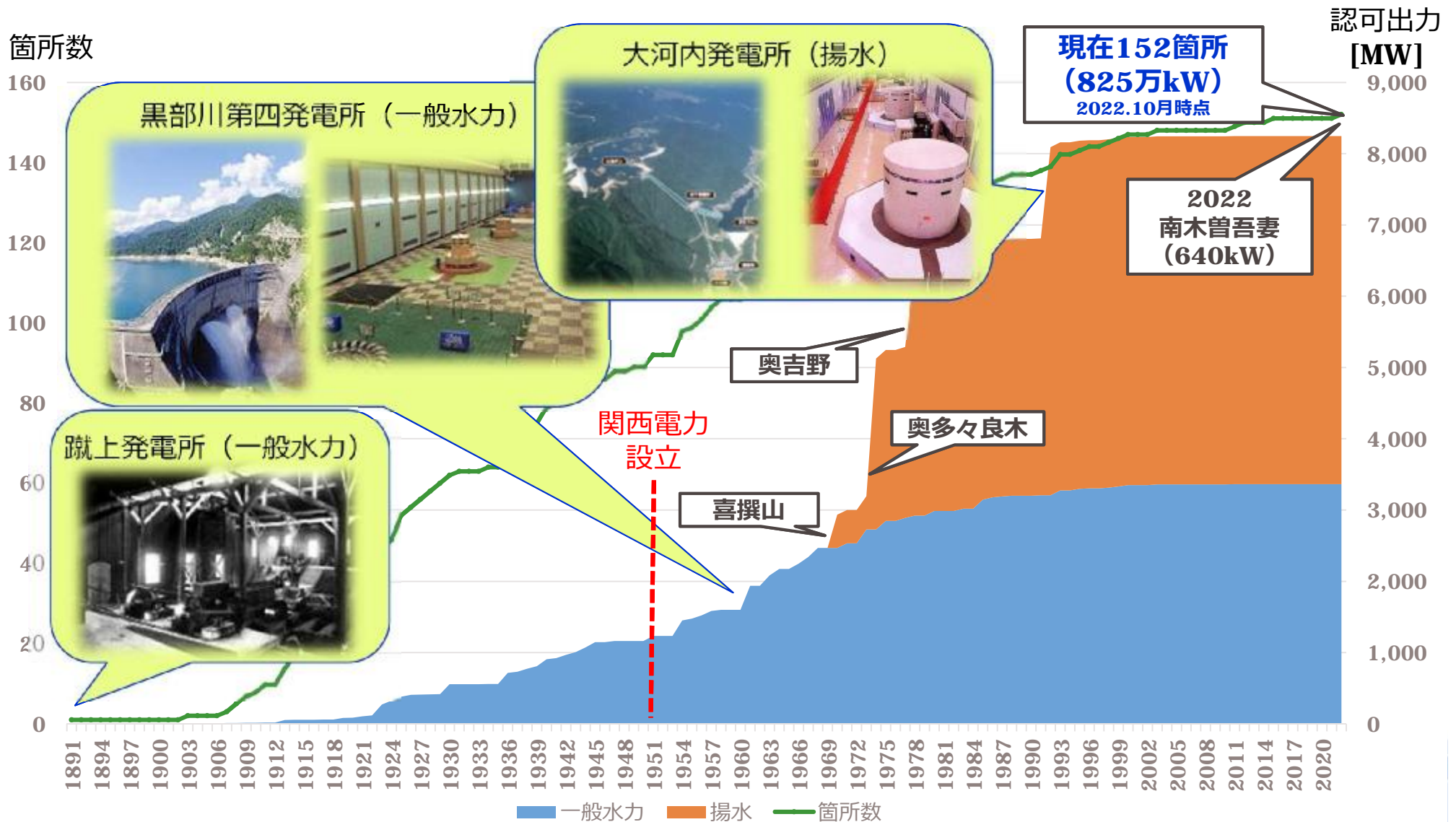
- (1) 揚水の仕組み
- (2) 使われ方の変化
- (3) 調整力確保の仕組み
- (4) 保有している価値
- (5) 維持に必要なこと
- (6) 国大の議論状況

○ 当社は、**152箇所**の**水力発電所**（**一般水力発電所:148箇所**、**揚水発電所:4箇所**）を保有しており、**近畿エリア**だけでなく、**東海、北陸エリア**にも位置。



当社の水力開発の歴史について

- 1891年に運開した日本最古の事業用水力発電所である蹴上発電所(131歳)をはじめとし、現在までに多くの発電所を建設してきた歴史がある。(平均76歳)
- 水力は、適切なメンテナンスにより恒久的に有効活用できる純国産のクリーンエネルギー。



	蹴上	黒部川第四	南木曾吾妻
発電所名			
所在地	京都府	富山県	長野県
方式	水路式 (琵琶湖から引水)	ダム水路式 (黒部ダム)	ダム式 (維持流量発電)
出力	4,500kW	337,000kW	640kW
補足	<ul style="list-style-type: none"> 1891年に運転を開始した日本で最初の事業用水力発電所 	<ul style="list-style-type: none"> 戦後の高度経済成長期の深刻な関西の電力不足を解消するために社運をかけて開発 	<ul style="list-style-type: none"> 残された大規模開発地点は限定的であり、至近では中小水力を開発 当社で最も新しい発電所(2022年7月運開)

当社の揚水発電所一覧

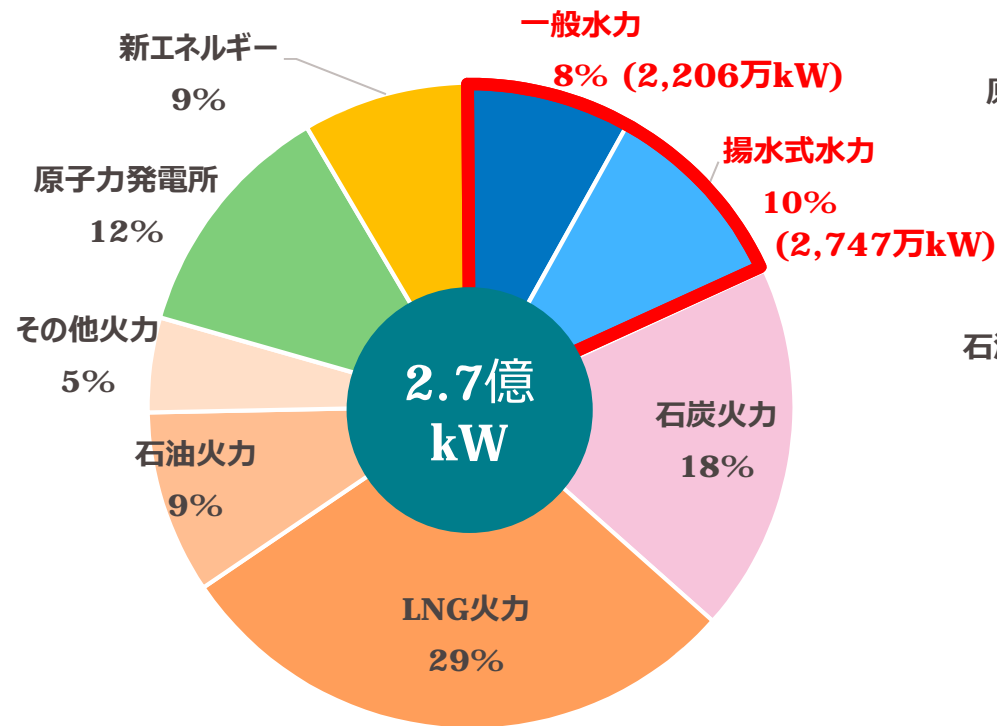
可変速機

6

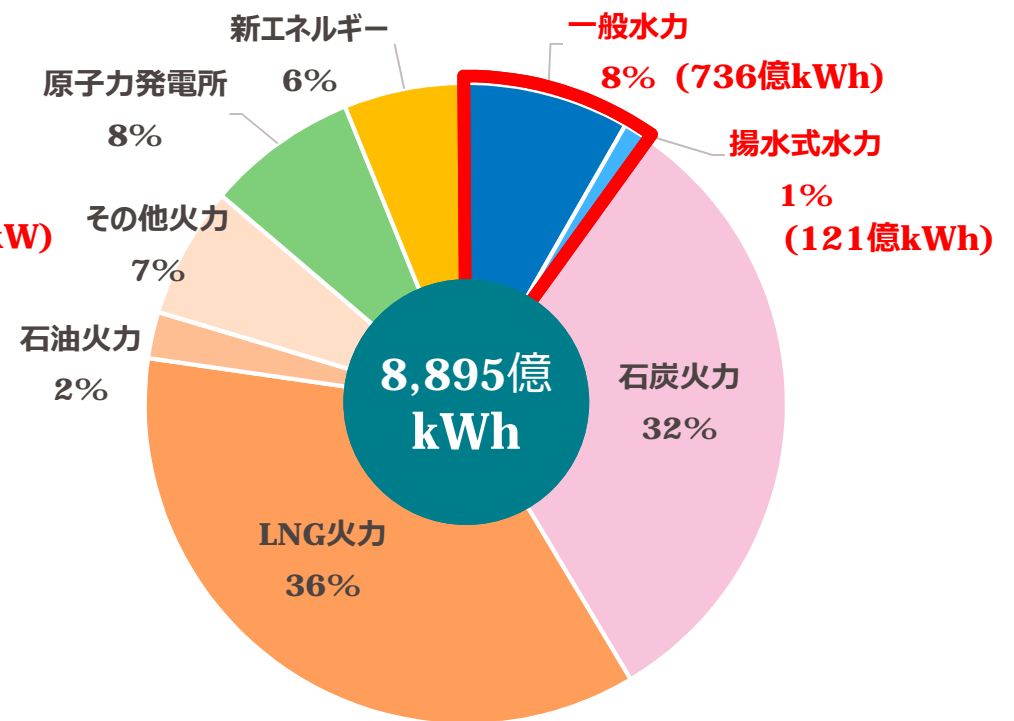
発電所名	認可最大出力 (万kW)	ユニット	定格出力 (万kW)	営業使用開始 年月日	備考
喜撰山 (京都府)	46.6	1号	23.3	1970年1月	
		2号	23.3	1970年7月	
奥吉野 (奈良県)	120.6	1号	20.1	1979年6月	
		2号	20.1	1979年10月	
		3号	20.1	1980年4月	
		4号	20.1	1979年2月	
		5号	20.1	1978年9月	
		6号	20.1	1978年6月	
奥多々良木 (兵庫県)	193.2	1号	30.3	1974年6月	可変速機
		2号	30.3	1974年7月	可変速機
		3号	30.3	1975年6月	
		4号	30.3	1975年4月	
		5号	36.0	1998年6月	
		6号	36.0	1998年4月	
大河内 (兵庫県)	128.0	1号	32.0	1992年10月	
		2号	32.0	1994年7月	
		3号	32.0	1995年6月	可変速機
		4号	32.0	1993年12月	可変速機

- 一般水力発電所と揚水発電所をあわせて、設備容量は約20%、発電電力量は約10%を占めている。(2021年度実績)
- また、揚水発電所は需給調整のために用いられることが多いため、設備容量に比べて発電電力量は少ないのが特徴である。

【設備容量 (2022年3月時点)】



【発電電力量 (2021年度実績)】



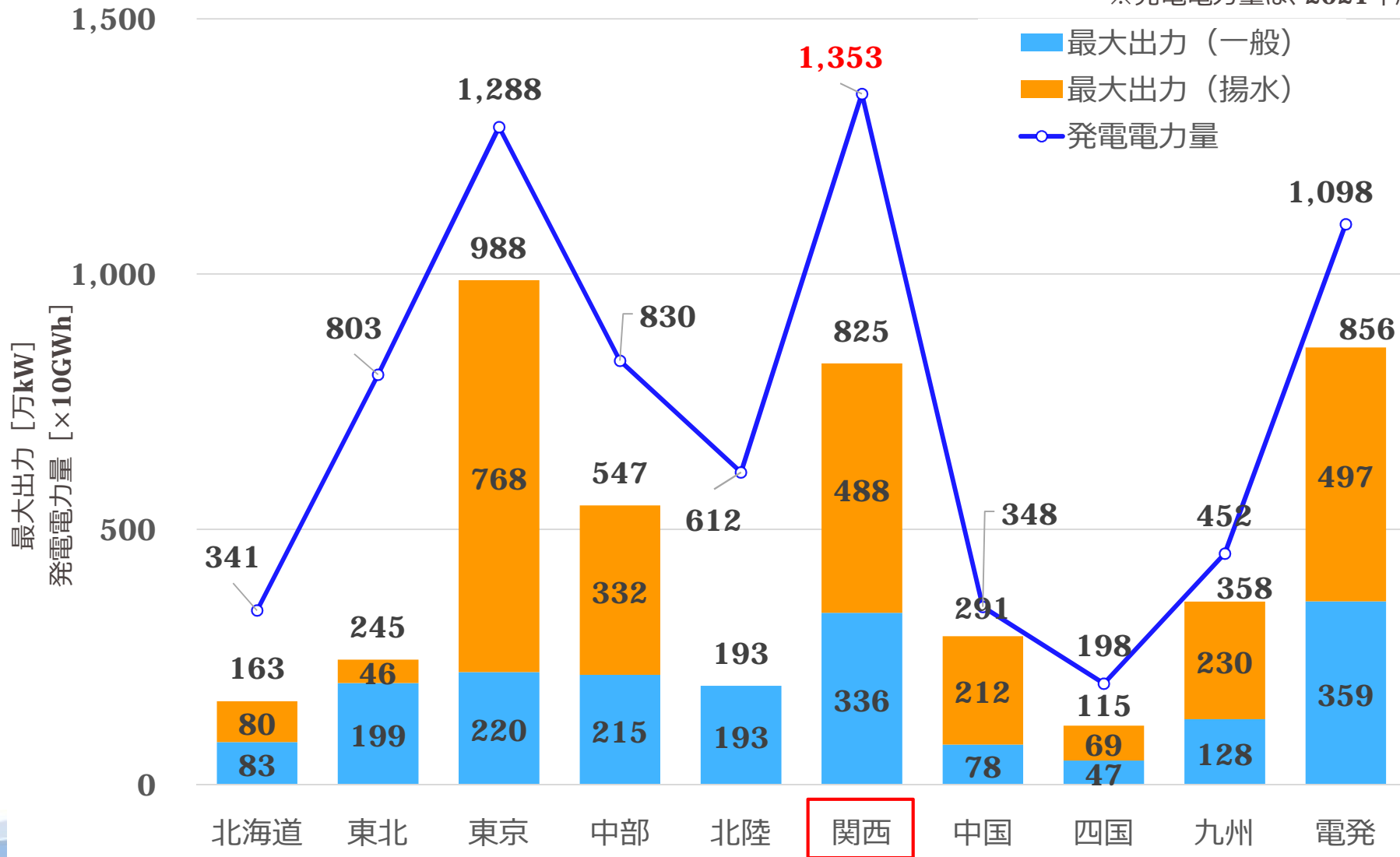
資源エネルギー庁電力調査統計表をもとに作成

https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html#r03

○ 当社水力は、国内水カトップの発電電力量を有し、カーボンニュートラル社会実現へ貢献。

《国内水力の最大出力と発電電力量》

※最大出力は、2021年度末時点
 ※発電電力量は、2021年度実績



資源エネルギー庁電力調査統計表をもとに作成

https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html#r03

1. 当社水力の紹介

- (1) 位置図
- (2) 一般水力ご紹介
- (3) 揚水一覧
- (4) 水力の割合・kWh実績

2. 揚水について

- (1) 揚水の仕組み
- (2) 使われ方の変化
- (3) 調整力確保の仕組み
- (4) 保有している価値
- (5) 維持に必要なこと
- (6) 国大の議論状況

- 上部と下部の2ヶ所に貯水池をつくり、**電気が比較的使われない時や供給力が余っている時に下部貯水池の水を上部貯水池にポンプで汲み上げて、電気が多く使われる時に水を落として発電**することで、電力需給の安定に貢献。※約30%のエネルギーロスが発生

揚水発電のしくみ (水の流れ→、電気の流れ→)

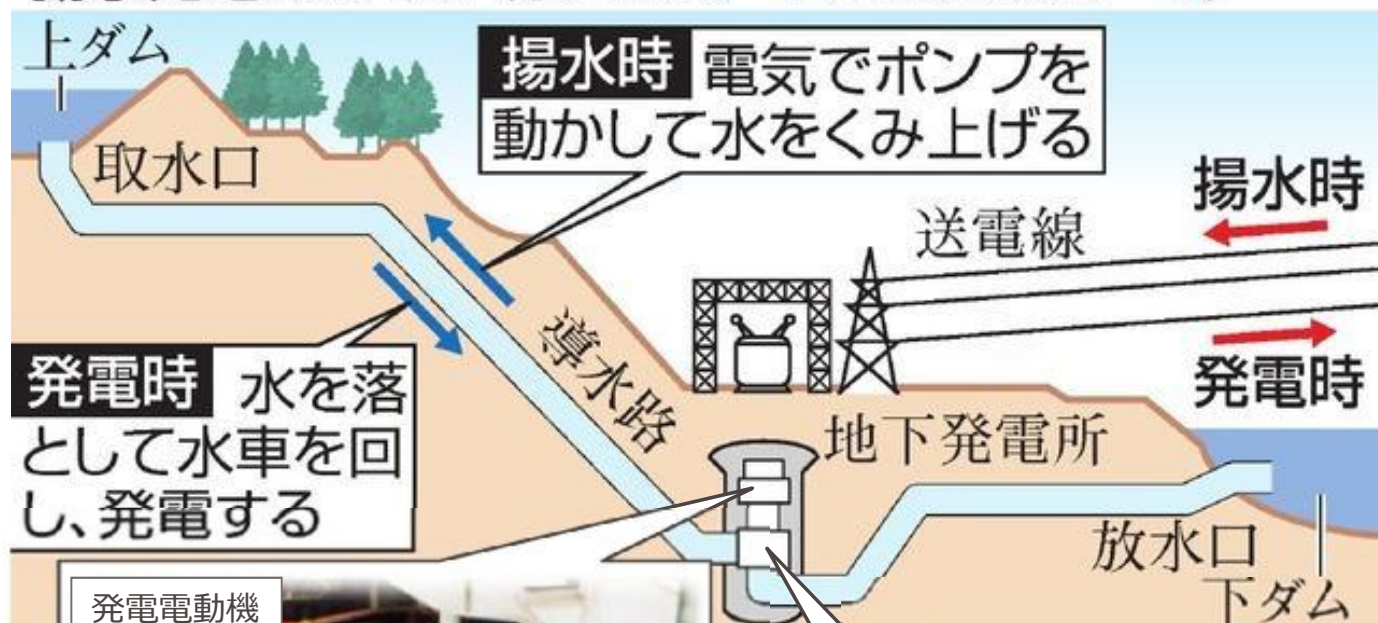
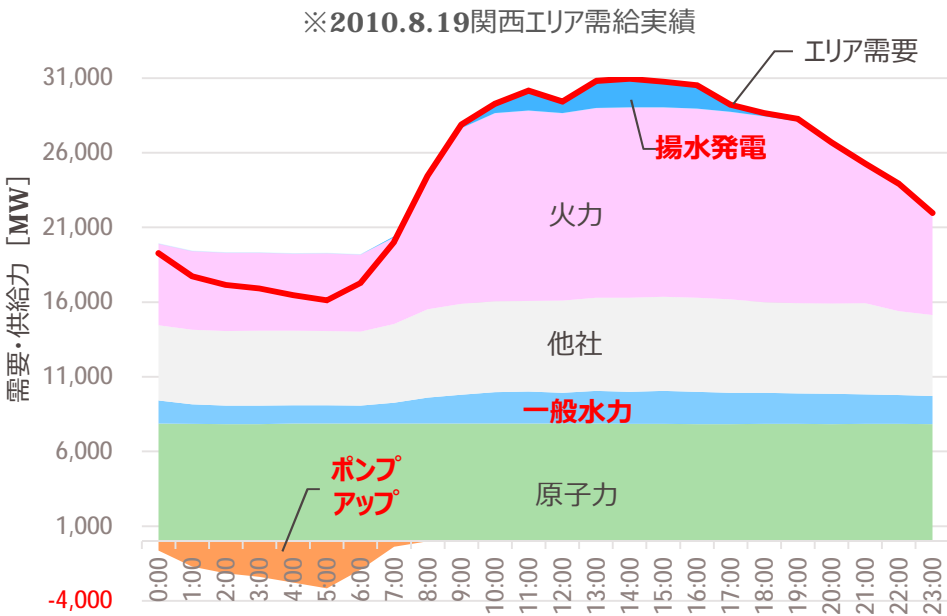


図 (揚水発電のしくみ) は朝日新聞デジタルより引用

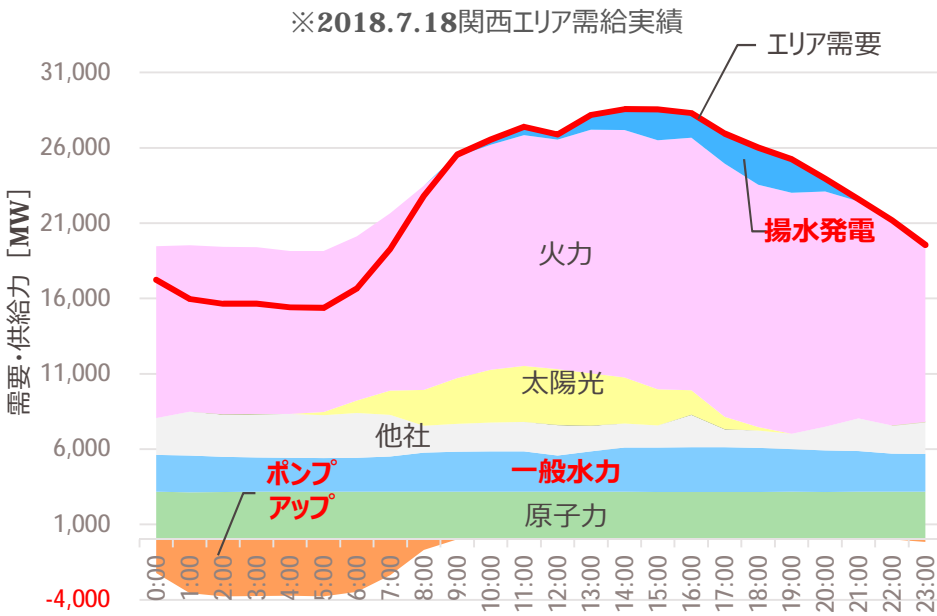
<https://www.asahi.com/article/photo/AS20220323002589.html>

夏季

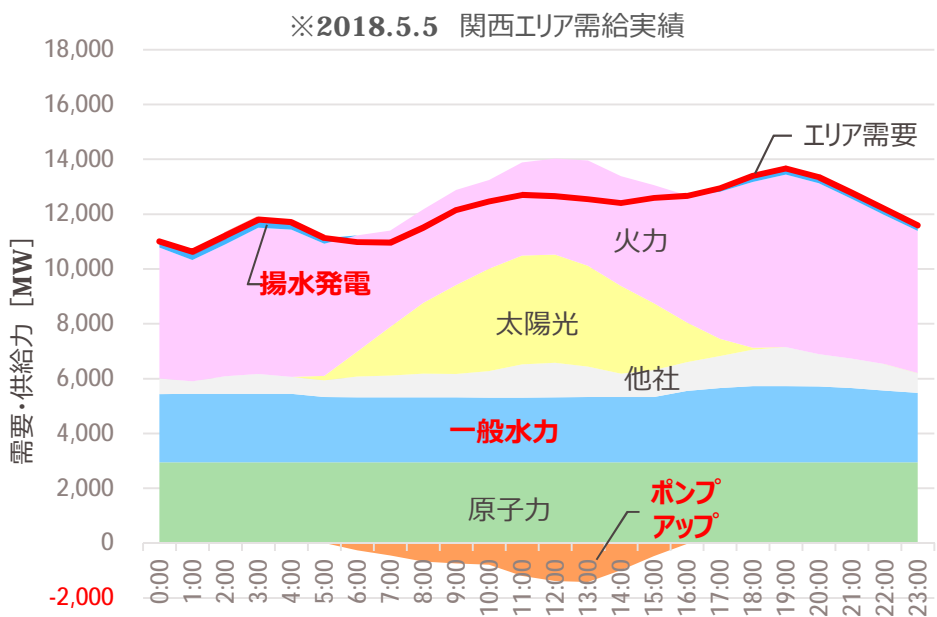
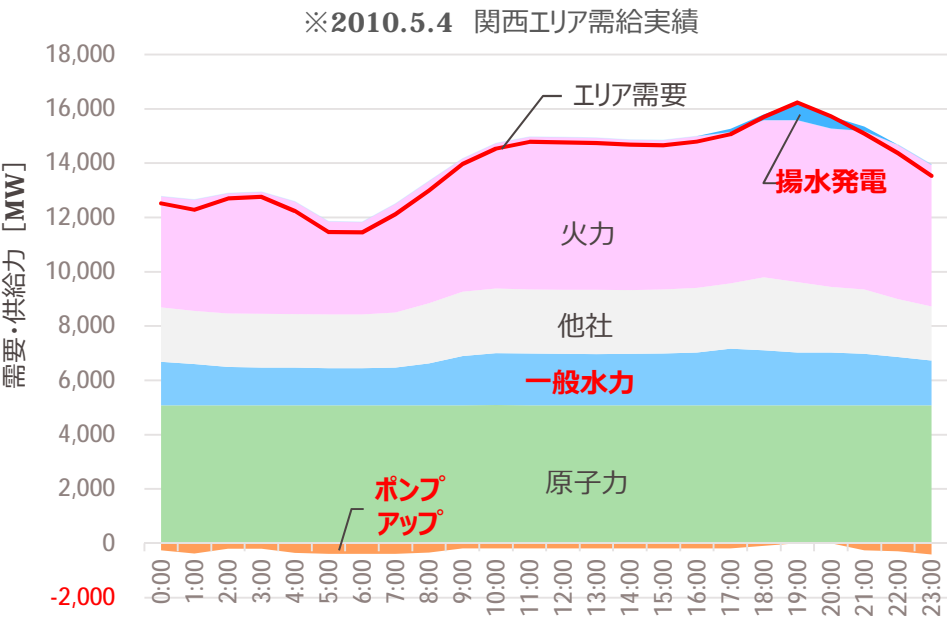
従来

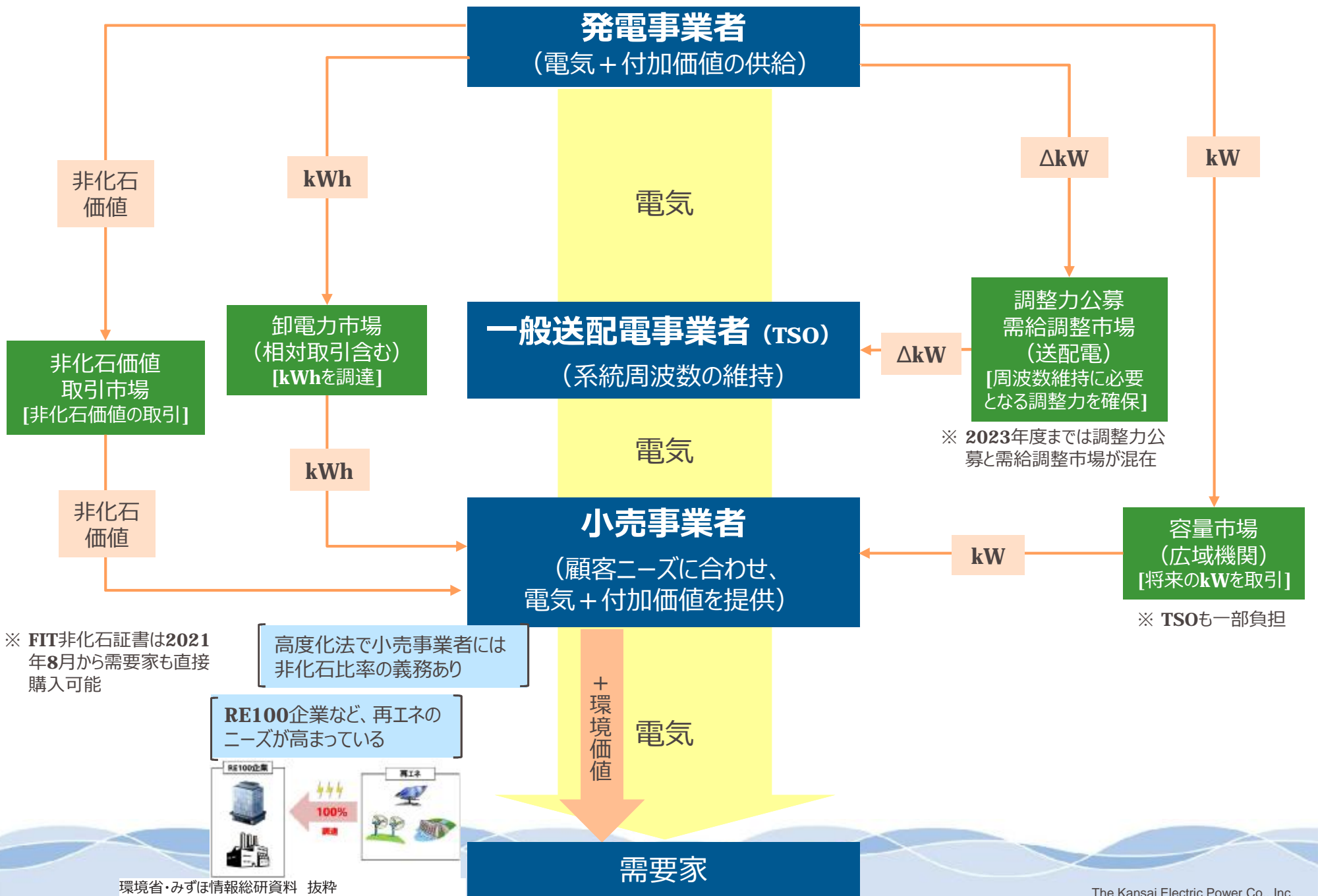


近年

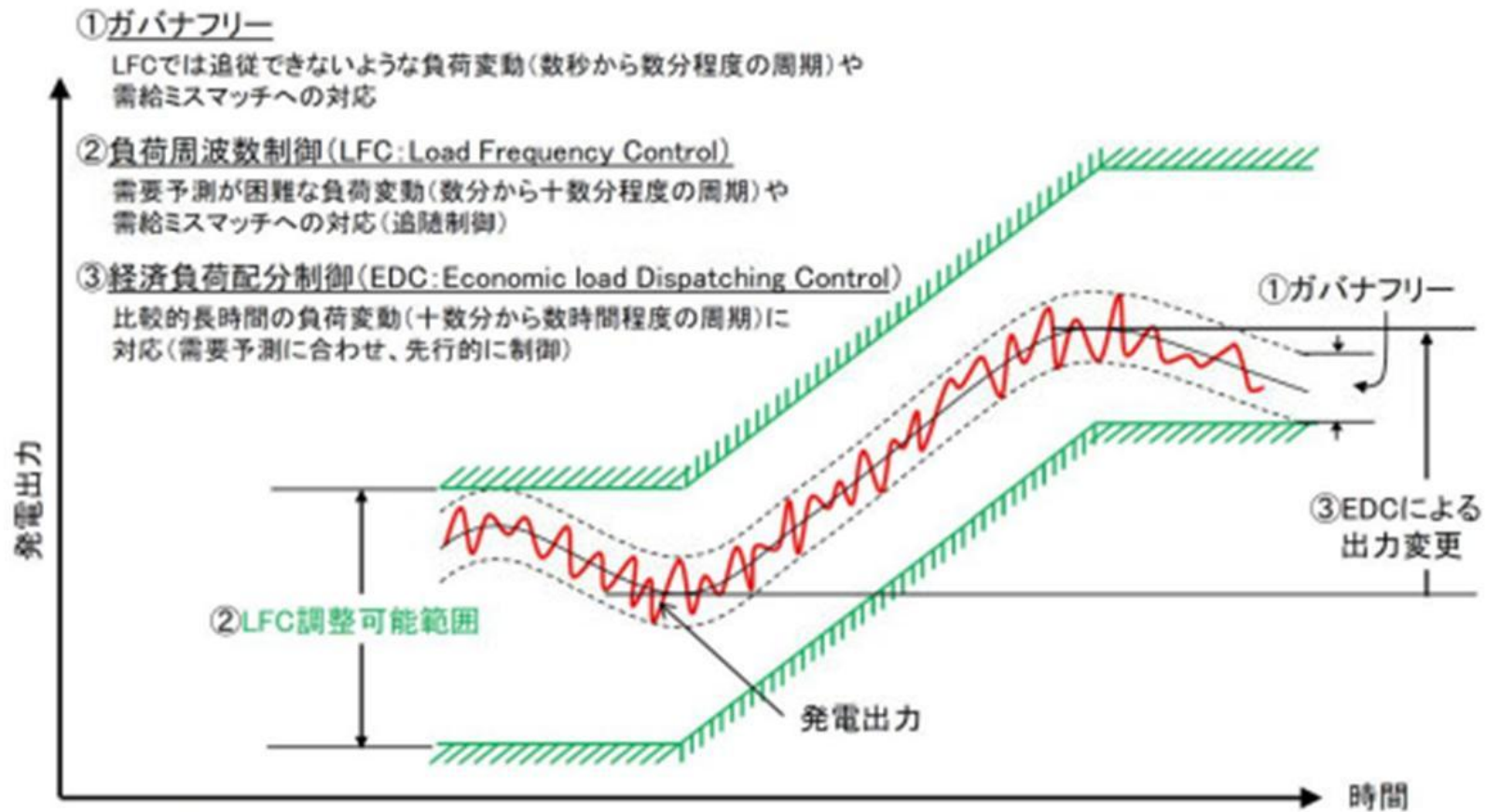


ゴールデンウィーク



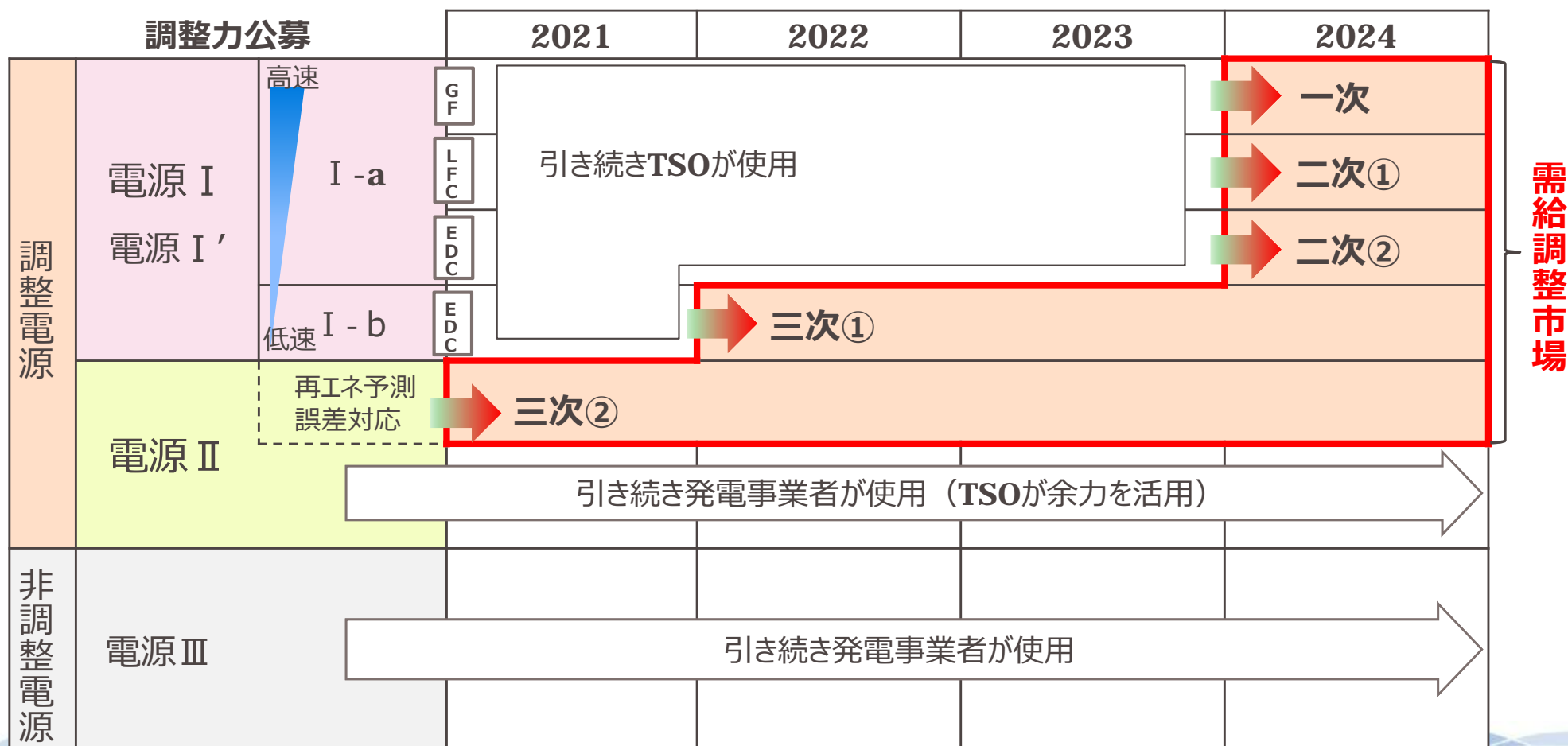


- TSOは、刻一刻と変わる需要と供給力に対し、需給バランスを一致させることで周波数を維持。
- 周波数維持にあたっては、調整力を有した火力・揚水等を活用し、需給の変動周期に応じ、①ガバナフリー (GF)、②負荷周波数制御 (LFC)、③経済負荷配分制御 (EDC) による発電機の出力量調整を組み合わせ、周波数を調整している。



電気学会技術報告 第1100号(平成19年9月)をもとに作成

- 調整力は**TSO**が確保・活用することになるが、調整力確保の仕組みは変化を迎えている。
- 現行の調整力公募の電源 I / I' 及び電源 II の一部が、**段階的に需給調整市場に移行**。
- 市場の商品は**5種類**（一次～三次②）に分類され、このうち**三次①②が導入済み**。



(参考) 需給調整市場における商品の要件(簡易指令システムが中給システムに接続された場合)

	一次調整力	二次調整力①	二次調整力②	三次調整力①	三次調整力②
英呼称	Frequency Containment Reserve (FCR)	Synchronized Frequency Restoration Reserve (S-FRR)	Frequency Restoration Reserve (FRR)	Replacement Reserve (RR)	Replacement Reserve-for FIT (RR-FIT)
指令・制御	オフライン (自端制御)	オンライン (LFC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン (EDC信号)	オンライン
監視	オンライン (一部オフラインも可※ ²)	オンライン	オンライン	オンライン	オンライン
回線	専用線※ ¹ (監視がオフラインの場合は不要)	専用線※ ¹	専用線※ ¹	専用線 または 簡易指令システム	専用線 または 簡易指令システム
応動時間	10秒以内	5分以内	5分以内	15分以内※ ³	45分以内
継続時間	5分以上※ ³	30分以上	30分以上	商品ブロック時間(3時間)	商品ブロック時間(3時間)
並列要否	必須	必須	任意	任意	任意
指令間隔	- (自端制御)	0.5~数十秒※ ⁴	数秒~数分※ ⁴	専用線: 数秒~数分 簡易指令システム: 5分※ ⁶	30分
監視間隔	1~数秒※ ²	1~5秒程度※ ⁴	1~5秒程度※ ⁴	専用線: 1~5秒程度 簡易指令システム: 1分	1~30分※ ⁵
供出可能量 (入札量上限)	10秒以内に 出力変化可能な量 (機器性能上のGF幅 を上限)	5分以内に 出力変化可能な量 (機器性能上のLFC幅 を上限)	5分以内に 出力変化可能な量 (オンラインで調整可能 な幅を上限)	15分以内に 出力変化可能な量 (オンラインで調整可能 な幅を上限)	45分以内に 出力変化可能な量 (オンライン(簡易指令 システムも含む)で調整 可能な幅を上限)
最低入札量	5MW (監視がオフラインの場合は1MW)	5MW※ ^{1,4}	5MW※ ^{1,4}	専用線: 5 MW 簡易指令システム: 1 MW	専用線: 5 MW 簡易指令システム: 1 MW
刻み幅(入札単位)	1kW	1kW	1kW	1kW	1kW
上げ下げ区分	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ	上げ/下げ

※¹ 簡易指令システムと中給システムの接続可否について、サイバーセキュリティの観点から国で検討中のため、これを踏まえて改めて検討。

※² 事後に数値データを提供する必要あり(データの取得方法、提供方法等については今後検討)。

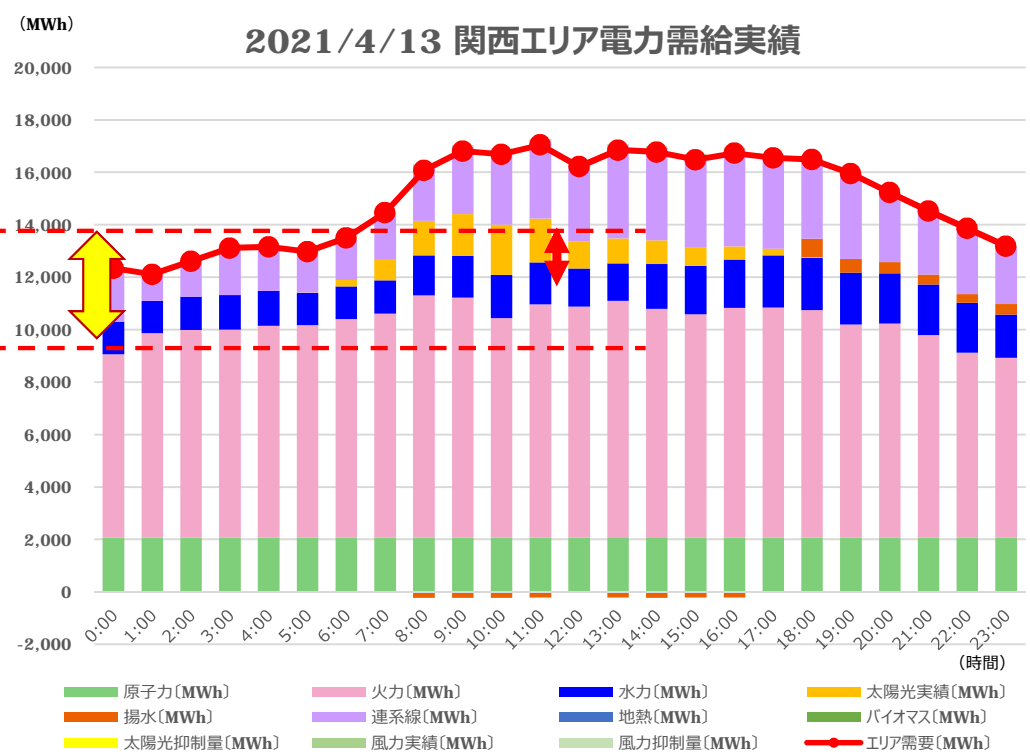
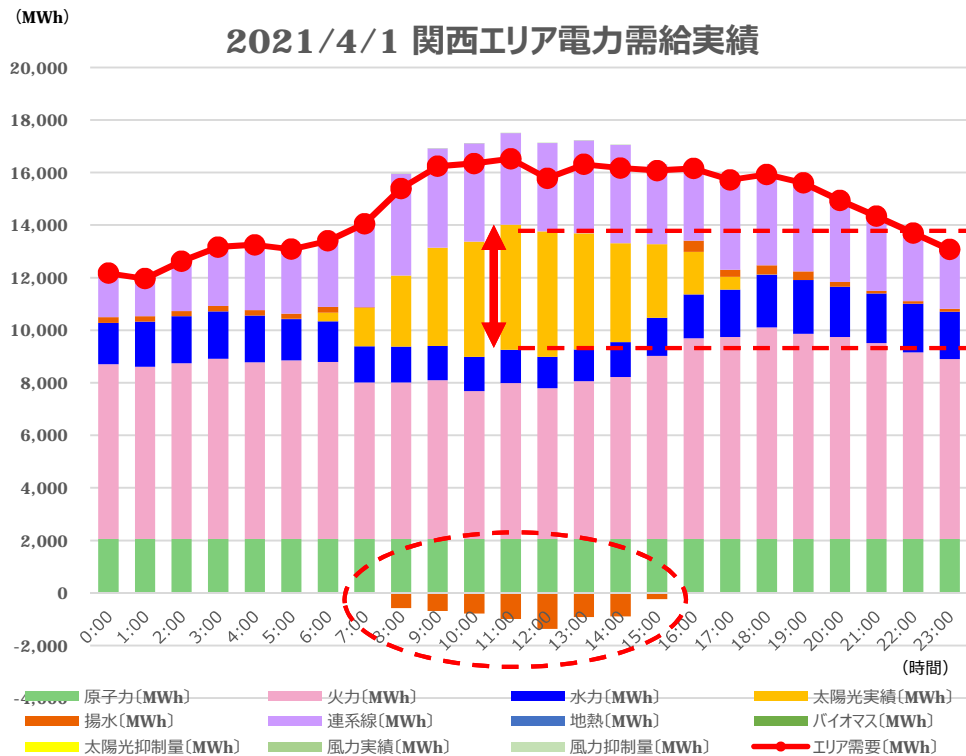
※³ 沖縄エリアはエリア固有事情を踏まえて個別に設定。

※⁴ 中給システムと簡易指令システムの接続が可能となった場合においても、監視の通信プロトコルや監視間隔等については、別途検討が必要。

※⁵ 30分を最大として、事業者が収集している周期と合わせることも許容。

※⁶ 簡易指令システムの指令間隔は広域需給調整システムの計算周期となるため当面は15分。

- エリア総需要量に大きな違いはないが、天候が異なれば太陽光実績に大きな差が生じている。
- 太陽光の出力変動に対し、送配電事業者が事前に確保した火力や揚水といった調整力を活用し、エリア需要と供給力のバランス調整を実施しており、揚水は、太陽光が多く発電している昼間帯でのポンプ運転が増加している。



天候	気温：℃ (平均/最高/最低)	降水量：mm	日照時間：時間
薄雲一時晴	16.3/24.1/10.0	0.0	10.6

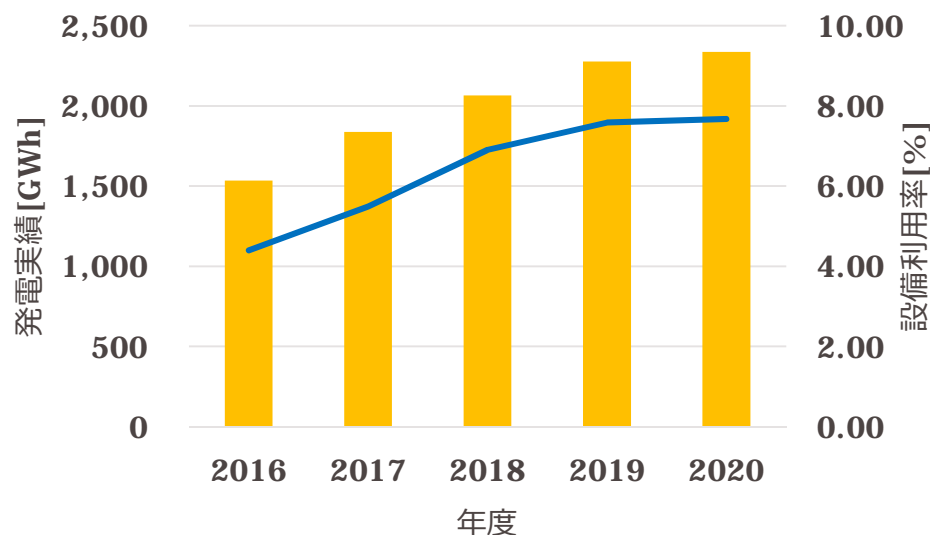
天候	気温：℃ (平均/最高/最低)	降水量：mm	日照時間：時間
曇時々雨	17.9/22.4/14.9	5.0	0.8

※気象関係データ：気象庁H.P（大阪地点の過去実績より） 関西エリア需給実績データ：関西送配電H.Pをもとに作成

- 九州エリアでは、太陽光発電の普及量（発電実績）に比例して揚水発電の設備利用率が増加しており、系統安定化に大きく寄与している。
- 関西エリアでは太陽光発電が普及量（発電実績）は増加しているものの、系統容量全体への影響は限られており、揚水利用率への影響は限定的である。
- 変動再エネの導入が進展することで、調整力として揚水の活躍機会が増加していくものと思料。

【九州エリア】

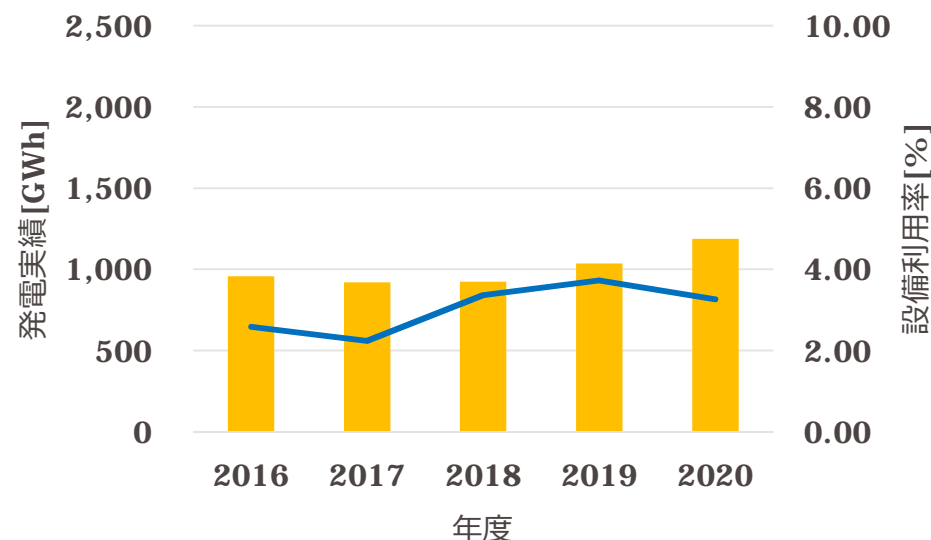
太陽光の発電実績と揚水の設備利用率



■ 新エネ (太陽光) — 揚水 (発電)

【関西エリア】

太陽光の発電実績と揚水の設備利用率



■ 新エネ (太陽光) — 揚水 (発電)

※ 1 : 新エネ (太陽光) 出力は九州電力、関西電力の実績ではなく、関西エリア、九州エリアの太陽光の出力値

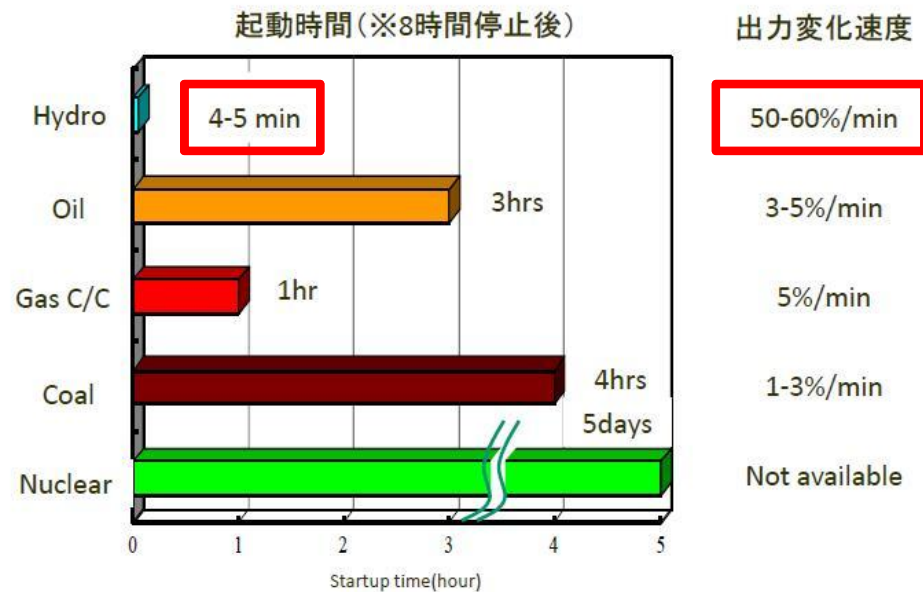
※ 2 : 設備利用率 = (発電電力量 ÷ 設備容量) × 8,760時間

- 系統安定化のためには、より早く応動できることが望ましい。
- **起動時間の短さ、出力変化の速さは他電源では代替のできない揚水発電の持つ価値（強み）**であり、**系統安定化のためにTSOからニーズ**があるものと思慮。

1-4 揚水発電の特徴（1）

6

揚水発電は、停止状態から4～5分で起動でき、出力変化速度も速い。



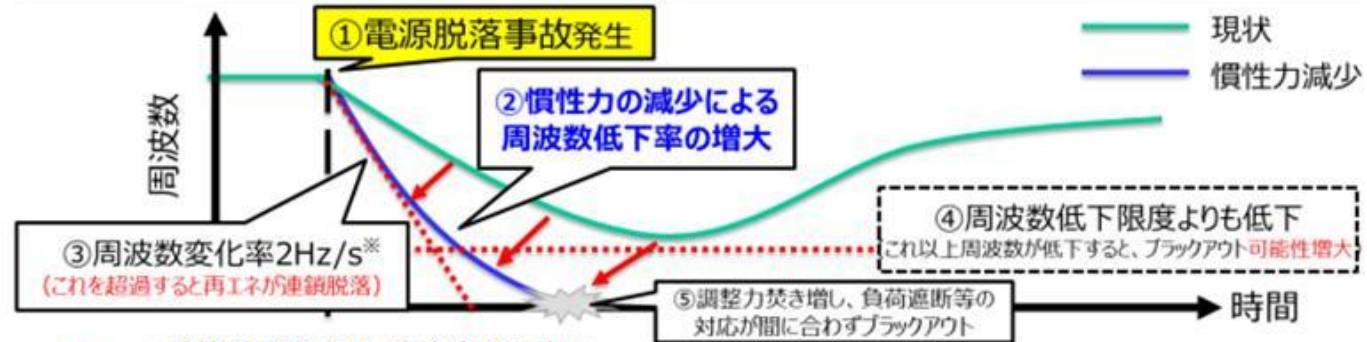
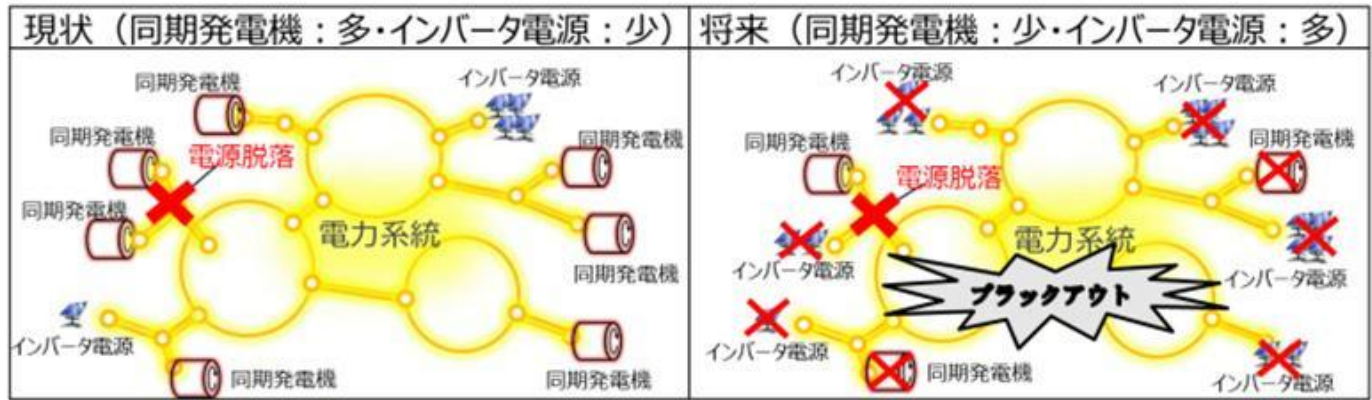
無断複製・転載禁止 2017.7.14 東京電力ホールディングス株式会社

- 揚水を含めた同期電源のもつ慣性力や同期化力は、電力の安定供給に必要不可欠。
- 再エネ電源の導入拡大により、インバータ電源（非同期電源）が増加し、慣性力が減少することで、大規模電源脱落時の系統崩壊リスクが顕在化。

同期電源が減少した場合に顕在化するリスク

6

● 送電線の2回線故障時等に、大規模な電源が脱落することがあります。その際、インバータ電源（非同期電源）の比率が高いと、電源が連鎖的に脱落する可能性があります。

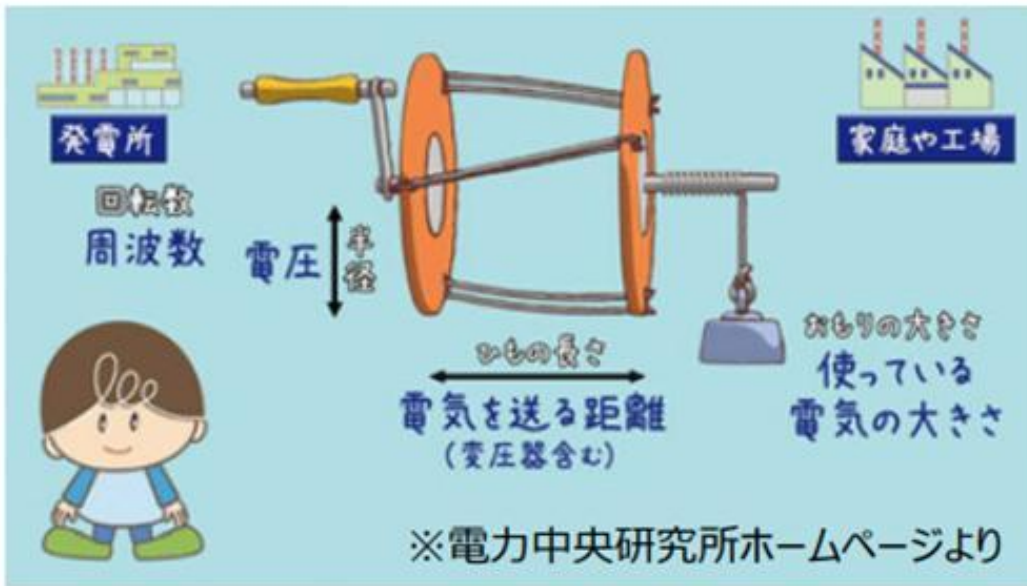


※分散型電源における事故時にも運転を継続するための要件（FRT要件）

同期電源のイメージ

3

● 電力系統を流れる交流の電気は、円盤とそれを繋ぐひもによりハンドルを回す力が伝わるイメージに例えられ、安定して電力を送るために、それぞれの要素を適切な大きさに保つ必要があります。



右図において、
・ハンドル = 発電機
・おもり = 需要
とした場合、

安定して電力を送るための要素

▶ 周波数

ハンドルの回転数を一定に保つ必要があります。

▶ 電圧

円盤の半径を一定の大きさに保つ必要があります。

▶ 系統安定度

力を伝えるひもの数やおもりの大きさが突然変動した場合でも、ひもがねじれることがないように、ひもの長さや本数、力の大きさなどを決めておく必要があります。

電力中央研究所公式YouTubeでわかりやすく説明されていますので是非ご覧ください。

※電力中央研究所公式YouTubeチャンネル

<https://youtu.be/OqVyMDLKOLw>



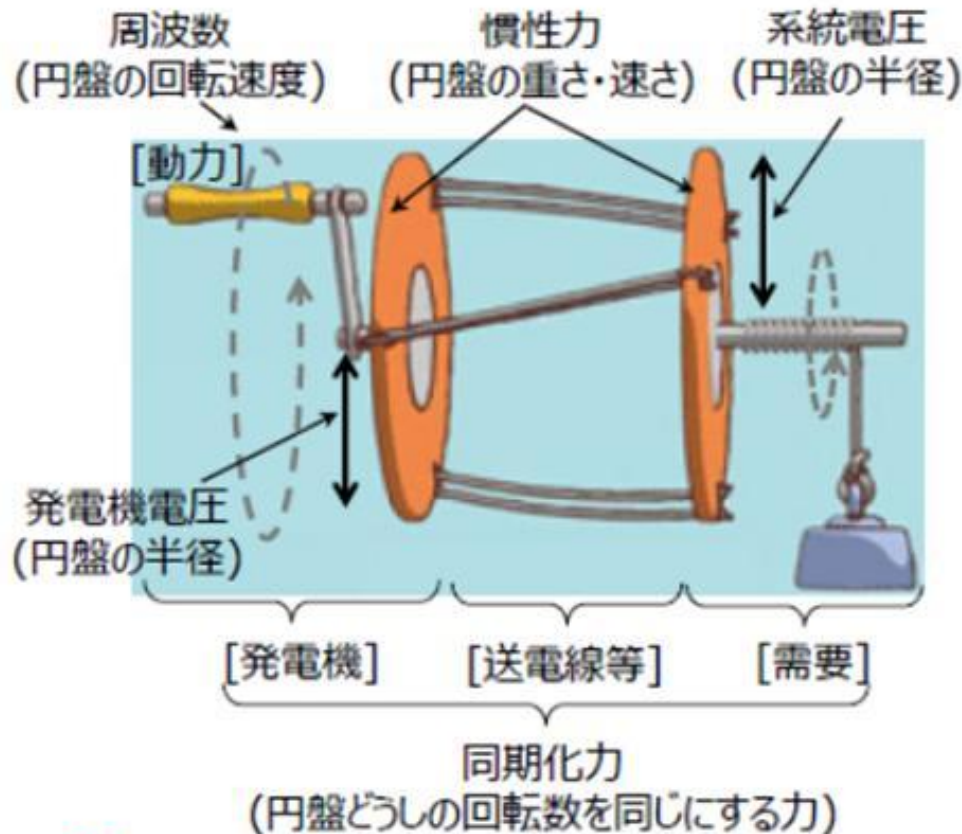
送配網協議会

©Transmission & Distribution Grid Council

電力系統における慣性力・同期化力のイメージ

4

- 同期電源が持つ回転エネルギーは、慣性力や同期化力を保有しており、これらは電源が脱落する事故等が発生した場合でも、安定に電気を送るための大切な要素です。



＞ 慣性力

円盤の重さに相当し、これが重いと、ハンドルを回す力やおもりの大きさが変わっても、一定の間は同じ速度で回り続けようとする力が生じます。

＞ 同期化力

円盤どうしの回転数を同じにする力で、円盤どうしのつながりが強いほど、ハンドルを回す力やおもりの大きさが変わり、片方の円盤の回転数が変わっても同じ回転数に戻る力が働きます。



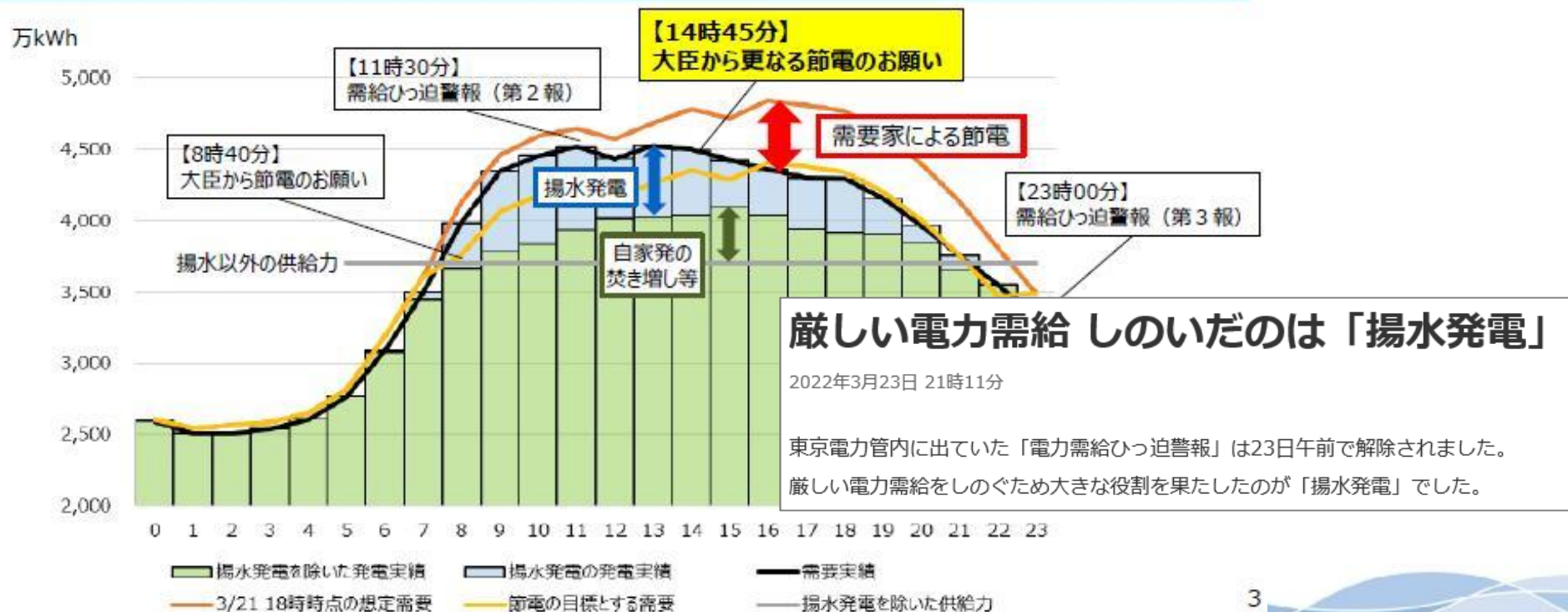
送配電網協議会

©Transmission & Distribution Grid Council

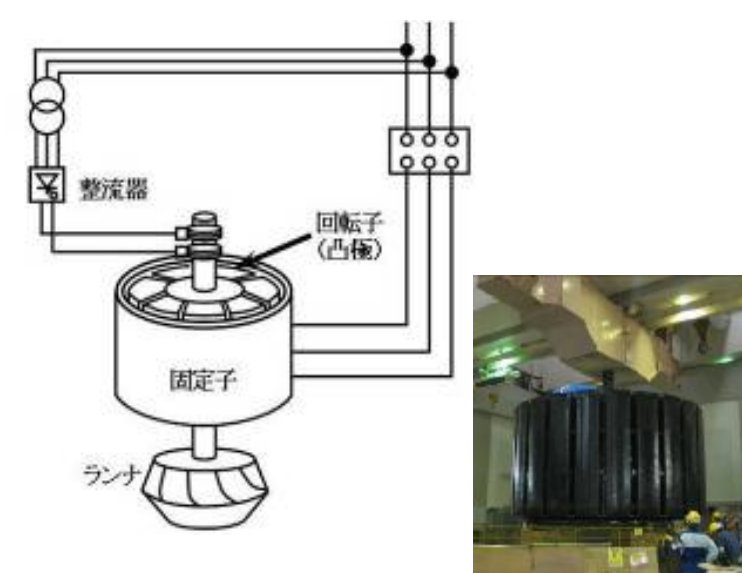
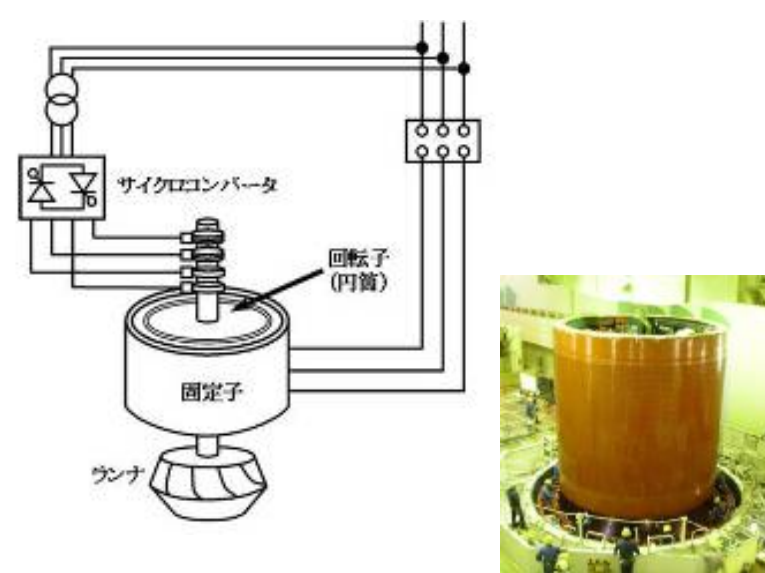
- **2022年3月に発生した東日本での電力需給ひっ迫**において、**最後の砦として揚水発電が活躍**、電力の安定供給のために必要不可欠な電源であることが幅広く認知。

東京電力管内の節電要請と電力需要の推移

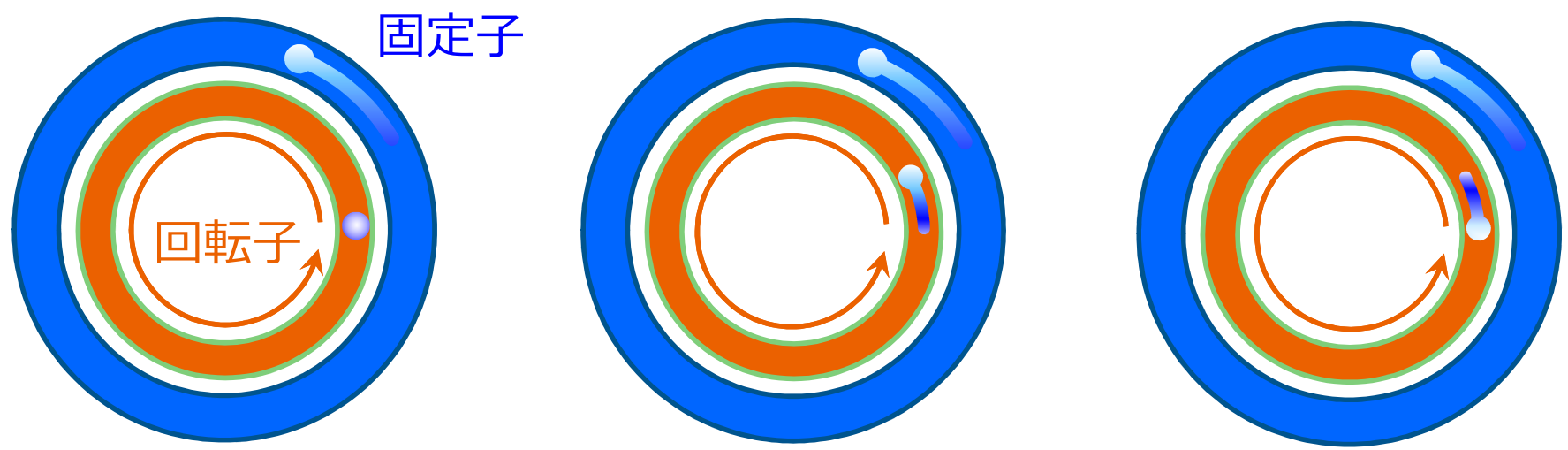
- 22日の東京電力管内の電力需要は**15時頃まで高水準で推移し、目標とする節電量を大きく下回った**ため、**想定以上の揚水発電でカバー**した。
- その結果、揚水発電の水が枯渇し**広範囲の停電が生じる恐れが高まった**ことから、経産大臣が臨時会見にて更なる節電を要請。**15時以降、節電量が急速に拡大**（目標量の約7割を達成）し、自家発の焼き増し等と相俟って**大規模停電を回避**。



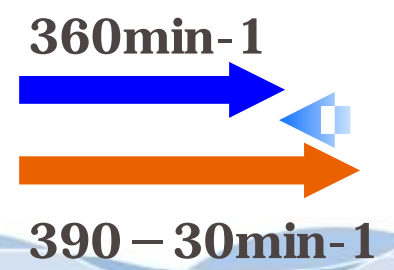
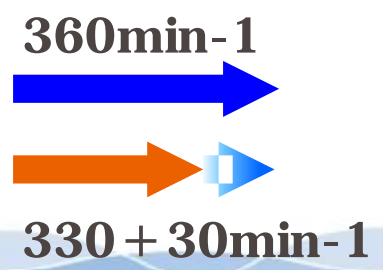
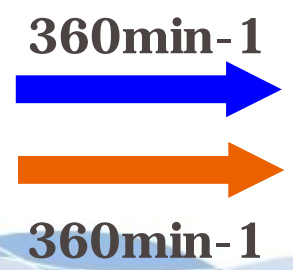
- **揚水運転時の発電電動機の回転速度を可変**にして、揚水動力（電力消費量）を細かく制御することで、**短周期の周波数調整を行う**ことが可能。
 （通常の揚水発電システム：電動機は一定速度・一定電力で運転）

	定速機（固定速度）	可変速機
システム	 <p>整流器 回転子（凸極） 固定子 ランナ</p>	 <p>サイクロコンバータ 回転子（円筒） 固定子 ランナ</p>
回転子	固定ポール	三相分布巻線
励磁	直流 励磁	サイクロコンバータによる交流励磁
短周期の周波数調整機能	発電運転のみ	発電運転および揚水運転

- 固定子コイルには、系統周波数（60Hz）により回転磁極が発生する。
- 定速機では、この速度で回転子も物理的に回転する。
- **可変速機**では、励磁周波数を変化させることで回転子の回転磁極を変化させ、回転子の物理的な回転速度を変化させることが可能。これにより、揚水動力を細かく制御可能。

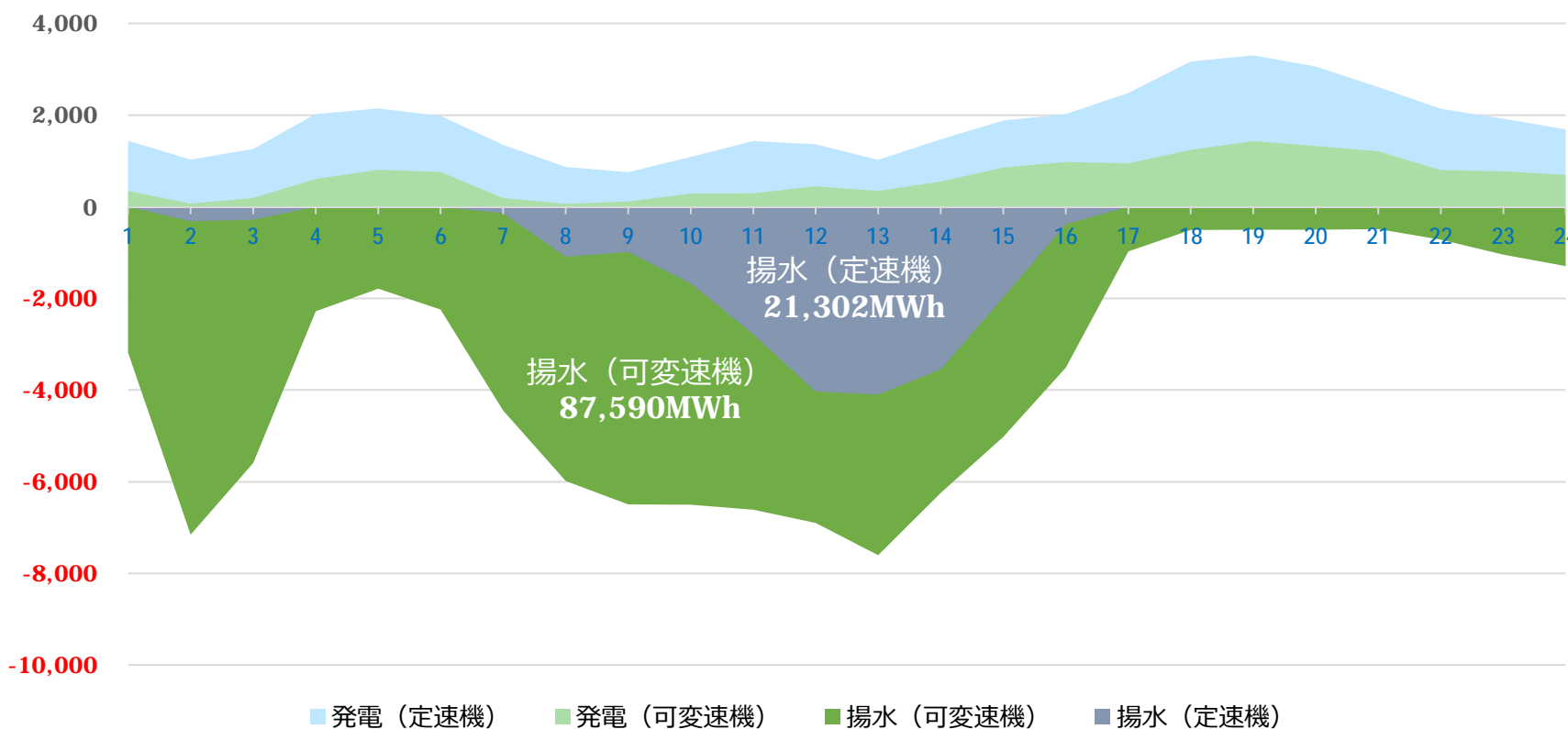


固定子の磁極の移動速度 (例)



- 奥多々良木発電所では可変速機が高稼働になっている。
- 特にGWなど電力需要の端境期では、太陽光といった変動再エネの割合が増え、系統に並列している火力等の調整電源が減少することで、余剰電力の発生や周波数調整力の不足といった課題が想定される。
- その両方の課題を同時に解決できるのが可変速揚水であり、送配電事業者の系統運用において大きな役割を果たしていると思慮。

【MWh】 2020年5月 奥多々良木発電所 時間帯別電力量



- 揚水発電機はオーバーホールのタイミングに協調して、更新時期を迎えた設備を取替（除却・新設）することで、長期的な活用が可能。

オーバーホール（OH）工事の概要

- Ⅰ **OH**とは水車発電機を全て分解し、各
部品の点検、手入れ、消耗品取替や
修理を行うもの。（点検により確認された不具合も
修理する）
- Ⅰ 各部品を組立後、有水試験等により
機器の健全性を確認したうえで営業運
転を再開する。
- Ⅰ 標準的な工事期間は以下のとおり。

工事期間	
分解	1か月
手入れ 消耗品取替 修理	5か月
組立 試験	3か月
全体	約9か月

工事写真

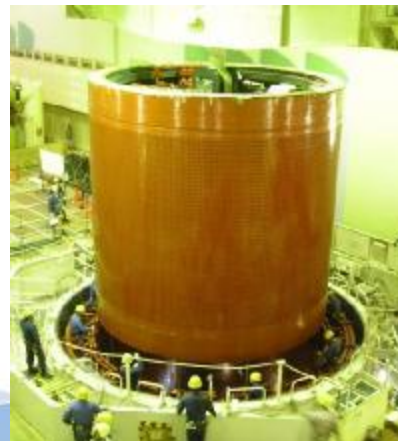
<分解点検前>



<分解点検中>



<発電電動機の吊り出し>



<水車ランナの吊り出し>



- 揚水発電設備のライフサイクルのイメージは以下のとおり。
- **主要設備の更新時期が重なる場合は、投資金額が一定程度巨額**になるため、**投資回収の予見性が必要**。

(論点5の参考) 揚水発電設備の各設備のライフサイクルのイメージ

- 揚水発電設備の更新は以下のようなイメージとなり、全面更新は約80～100年に1度。
- 揚水発電設備は、一定期間ごとに行うオーバーホールに協調した設備更新が必要。そのうち、**オーバーホールを実施する際に主要設備の更新を行う場合、投資金額が一定程度巨額となることから、投資環境によっては、休止に至る電源も存在。**

品目(工事)	投資規模※3	工事タイミング※4				
		20~25年	20~25年	20~25年	20~25年	20~25年
オーバーホール※1	15億円	20~25年	20~25年	20~25年	20~25年	20~25年
水車ランナ※2	15~20億円	30~80年			30~80年	
水車埋設物	20~40億円	80~100年			80~100年	
発電機(固定子)	15~30億円	40~50年		40~50年		40~50年
発電機(回転子)	20~30億円	80~100年			80~100年	
水圧管路	50~100億円	80~100年			80~100年	
主要変圧器※3	20~45億円	40~50年		40~50年		40~50年
制御盤	15億円	20~25年	20~25年	20~25年	20~25年	20~25年

主要設備更新のタイミング

全面更新のタイミング

※1: オーバーホール(修繕)費用のみで、取替設備の金額は含まない。

※2: 河川環境により摩耗状況が異なるため、地点毎に取替周期は大きな差がある。

※3: 発電機電圧を系統電圧まで昇圧し系統へ連系するための変圧器

※4: 過去実績等を元に作成。新設以降更新のないものもあり、エスケレ等も含めて更に上振れの可能性がある。また、リプレースとなると、更に除却工事費用が必要。

※5: イメージであり、使用状態によって各設備の取替周期は前後。

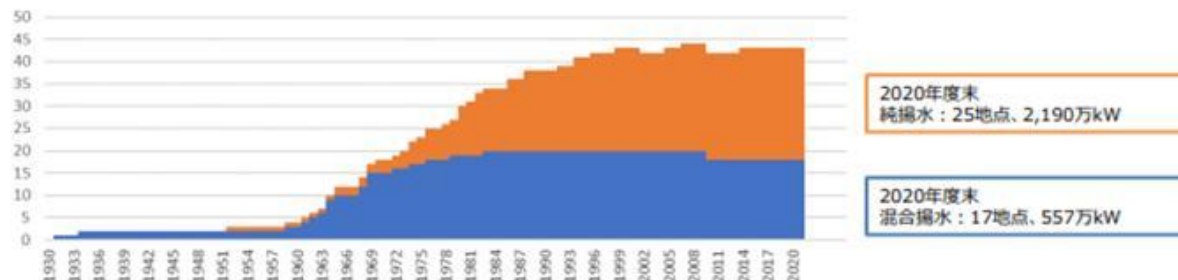
(出典) 事業者からのヒアリングにより資源エネルギー庁作成

- 揚水発電は、調整力・緊急予備力としての役割の特性上、現行の市場・制度下においては、採算性の確保が難しい発電方式。
- しかしながら、電力貯蔵と慣性力の機能を兼ね備え、カーボンニュートラル社会実現に向けて大きな役割を担う電源であり、採算性の向上が優先課題として、国大でも議論されている。

揚水発電の課題（揚水発電の採算性の改善等）

- 揚水発電は、揚水時のロスや運用コストの高さから、需要ピーク時などの利用に限られ、**稼働率が低く、採算性の確保が難しい発電方式**。また、1950年代から始まった揚水発電は、2030年までに建設後約60年経過する発電所が約250万kW分存在。廃止・機能停止のリスクが一層向上。
- 再エネの自然変動性を平準化する蓄電機能とCO2を排出しない慣性力を大規模に有するのは現時点で揚水発電のみであり、その**維持・機能強化を図るためには、採算性の向上が優先的な課題**。
- 採算性向上には、収入機会の拡大、効率性の向上及びコストの削減の2つの側面があり、それぞれの観点から今後の対応策について深掘していく。
- また、採算性向上に加えて、電源投資の確保の議論に合わせ、揚水発電の新規開発の可能性についても検討していくことが重要となる。

＜揚水発電地点数の推移＞



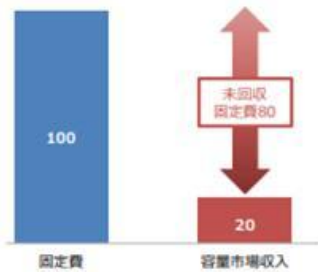
- 現状、可変速に代表されるようなポンプ側の価値については、市場制度で商品化されていないが、採算性向上等に向けた検討課題として、国大でも認識されている。
- 今後、カーボンニュートラル社会実現に向け、変動性かつインバータ電源（非同期電源）の再エネが導入拡大することが想定されるため、大容量グリーンバッテリーである揚水の最大限の活用を目指していきたい。

(参考) 揚水発電の課題 (揚水発電の採算性の改善等)

<2025年度の揚水発電における収入と費用>

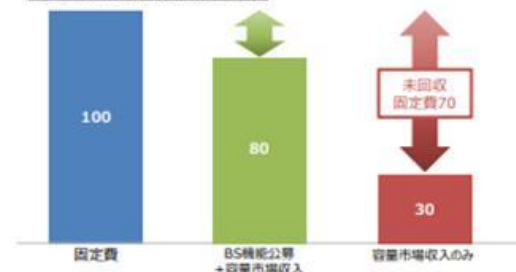
【可変速純揚水】

- ・固定費100に対して容量市場収入は約20
- ・残り固定費80は市場回収が必要となる



【固定速純揚水】

- ・固定費100に対して容量市場収入は約30
- ・ブラックスタート(BS)機能公募に採択されない場合は、固定費70について市場回収が必要となる



出典：事業者へのヒアリングを通じて経済産業省作成
注）ある特定の事業者の純揚水の収支構造を抽象化したものであり、全事業者の平均値等ではないことに留意

<採算性向上等に向けた検討課題例>

方向性	今後の見通し、課題
市場における下げ調整力の商品化の検討	優先給電ルールを前提とする市場設計の中では下げ調整力は商品化されておらず、今後、ゾーン制やノード制など市場主導型の導入に併せて検討
固定速揚水における市場参加機会の拡大の検討	需給調整市場における、固定速揚水の参加機会の拡大可能性の検討
発電機会の拡大可能性の検討	AI等を活用した再エネ予測と上池の運用の高度化などにより、発電機会を失わず、稼働率を向上させる可能性及び支援策の検討
方向性	今後の見通し、課題
発電所の管理コストや揚水時のロス・コスト低減の可能性の検討	遠隔化が可能な制御機器の導入を通じた運用高度化など、蓄電時のロス・コストの低減を図る可能性及び支援策の検討
その他	再エネ拡大に向け、揚水発電の新規開発の可能性及び支援策の検討

ご清聴ありがとうございました