

【産業競争力懇談会 2021年度 プロジェクト 中間報告】

【カーボンニュートラル実現に向けた水力発電システム】

2021年10月15日

産業競争力懇談会 **COCN**

【エクゼクティブサマリー（中間）】

1. 本プロジェクトの基本的な考え方

エネルギー基本計画において、2020 年 10 月に表明された「2050 年カーボンニュートラルの実現」および 2021 年 4 月に表明された「2030 年の CO₂ 排出量を 46%削減、更に 50%の高みを目指して挑戦を続ける新たな削減目標の達成」に向けたエネルギー政策の道筋を示すことが重要とされている。

2021 年 7 月に発表された「エネルギー基本計画（素案）」において、2030 年の再生可能エネルギー（以下、再エネ）比率は 36～38%と示されており、増加の大部分は、太陽光発電(PV)と風力の変動性再エネである。変動性再エネが増加することで、電力需要の変化に加え、電力供給側も変化するため、需給バランスの調整がより難しくなることが課題であり、電力系統の柔軟性(Flexibility)が必要となる。

再エネの 1 つである水力発電、および、変動性再エネの大量導入に欠かせない調整力の供給が可能である揚水発電は、柔軟性の高いシステムと言えるが、エネルギー基本計画(素案)においてその重要性は示されているものの、活用、導入促進に向けた具体策が示されておらず、十分な議論がなされていないように見受けられる。

そこで、2050 年にカーボンニュートラルの実現、また、2030 年の CO₂ 排出量を 46%削減、更に 50%削減の高みを目指すために、世界第 6 位の発電設備容量を持つ水力発電および揚水発電に出来得る施策を立案し、その評価をする実証プロジェクトや合理的評価手法を確立する「国プロ」を立ち上げることを目的とし、本プロジェクトを推進していくこととした。

2. 検討の視点と範囲

(1) 水力発電、揚水発電の置かれている現状と課題の整理

2021 年 7 月に示されたエネルギー基本計画（素案）や 2021 年 6 月に発行されたエネルギー白書から、水力発電、揚水発電の置かれている現状と課題を整理した。

2015 年の長期エネルギー計画で示された再エネ比率 22～24%に対し、2021 年 7 月に発表された「エネルギー基本計画（素案）」では再エネ比率 36～38%に引き上げられた。このうち、水力の占める割合は、前者が 8.8～9.2%で、後者は約 10%とされ、一見増加しているように見えるが、省エネ促進により、総発電電力量が 10,650 億 kWh 程度から 9,300～9,400 億 kWh 程度に削減されていることにより、水力発電による発生電力量は、計算上 937～980 億 kWh から、930～940 億 kWh へと減っている。

それでも 2020 年の発電電力量約 875 億 kWh に比べて約 7%増加させる必要があり、エネルギー基本計画(素案)では、「現行ミックス達成に向けた施策強化」する電源として水力発電の記載があるが、その具体策は示されていない。

また、「自然変動電源(太陽光・風力)の拡大に伴い、周期が短い変動から長い変動まで、それぞれの変動に応じた調整力を効率的かつ効果的に確保し、需給バランスを維持する方策を強化し、さらに進化させていくことが必要となる」ことに対し、「当面は火力発電・揚水発電を

活用」することが示されているが、現状や将来の使用頻度には言及されていない。

2021 年度エネルギー白書においても、蓄電能力の評価が新たに加えられ、日本は揚水発電の設備容量が 27.5GW と中国に次ぐ世界 2 位の設備容量を保持していることが示されているが、設備利用率は僅か 4.6%^(注1) と十分に活用されていないことには言及されていない。

(2) 世界の水力発電、揚水発電の取り扱い動向調査

IEA（国際エネルギー機関）、IHA（国際水力発電協会）、IRENA（国際再生可能エネルギー機関）および欧州や米国などの国家、国家機関の水力発電システムの施策動向を公開文献で調査した。

IEA による日本を含む国際的水力特別市場調査は 2021 年に初めて実行、報告書が発行され、同報告でも、変動性再エネの増加に伴い水力発電や揚水発電の必要性は高まるため、活用促進や新設の建設を推進し、様々な柔軟性サービスを提供するべきであることが示唆されている。

これら報告書では、揚水発電の経済合理性が論じられ、放電時間 4 時間を境に長い側は揚水発電、短い側は蓄電池の方が有利であるという記載が見受けられる。

また、欧州では、EU が助成金を捻出し、大学、電力会社、メーカー、研究機関やコンサルタントなどが集まり、水力 (HYDRO) の柔軟性 (FLEXibility) を増強 (eXtend) するための「XFLEX HYDRO Project」を 2019 年から 4 年計画で実施し、評価が進められている。

米国エネルギー省 (DOE)・IHA が主導で、「揚水発電に関する国際フォーラム」(70 以上の多国間銀行、研究機関、NGO、公的・民間企業、13 の政府が参加) が形成され、2050 年脱炭素化目標へのエネルギー分野における揚水発電の必要性およびそれに必要な政策提言が纏められた。

電力系統連系の状況や地形など、欧米と日本では状況が異なるため、今後、欧米の経済評価や XFLEX HYDRO PROJECT 等の実証プロジェクトの内容を吟味するとともに、日本において、水力発電や揚水発電の経済評価方法や、カーボンニュートラル実現に向けての活用方法を検討し、提言につなげていく。

(3) 日本での制度・規制調査

電力システム改革により、卸電力市場 (kWh) や非化石価値市場が創設されたが、需給調整市場 (Δ kW)、容量市場 (kW) は現在移行の途中で検討が進められており、更に同期化力や慣性力、電圧調整能力なども議論の最中にある。また、システム統合を反映した電源別限界費用の議論も進められている。

調整力は稼働している火力機の調整では不足する分を揚水機の立ち上げで補っていることから、揚水機の利用率は低くなる傾向がある。しかし、変動性再エネの導入が進んでいる地域では、火力発電での調整が困難となり、再エネの普及に併せて揚水の利用率が増加傾向にある。更に変動性再エネの導入が進むと、上記以外の地域でも揚水の利用率は一層高まると想定されるが、揚水発電の多い地域と変動性再エネの導入量が多い地域が異なること、揚水時の調整力が評価されていないことが、課題となる。

現在の市場では、水力発電は卸電力市場(kWh)や非化石価値を、揚水発電は需給調整市場(Δ kW)や容量市場(kW)が目指す市場となるが、今後、揚水時の調整力や、同期化力、慣性力、電圧調整能力などの評価が定まってくるか否かも含めて市場動向を見極め、どのように評価を得ていくべきかを検討していく。

水力発電や揚水発電の運用変更、新規導入に当たっては、ダム運用、河川水の使用変更、河川や地域環境への影響評価などの規制、制度が絡み、経済産業省、国土交通省、農林水産省、環境省や地方自治体との調整も必要と考えられる。この辺りも今後整理していく。

3. 産業競争力強化のための提言および施策

世界的にみると、欧米では、国家レベルでカーボンニュートラルに向けて、水力発電や揚水発電の役割は重要であることをまとめた調査報告書が最近発行されており、その導入や活用の促進策の検討や実証検証プロジェクトが推進されている。

制度、規制に関しては、日本において、既に市場化されている卸電力市場、非化石取引市場、一部市場化されている需給調整市場や容量市場に関しては、引き続き議論が行われている。また、議論が始まっている統合コストの考え方や、揚水時の調整力、慣性力、同期化力、無効電力供給力等の系統安定度に関する制度、カーボンプライシングなどは、水力発電や揚水発電の評価を高める可能性がある。

上記を踏まえ、関係省庁におかれては、カーボンニュートラルに向けて水力発電や揚水発電の出来得ることを検討するとともに、導入や活用促進するための施策や制度、規制に関して協議させて頂ける場を設けて頂くことをお願いしたい。

今後、本プロジェクトでは、EUのXFLEX HYDRO PROJECTを範とした実証検証プロジェクトや合理的評価手法を確立するための「国プロ」の提案を目指している。提案の際には、そのご支援をお願いしたい。

また、制度や規制に関しても、提言の可能性を探っていくので、提案の際には、ご検討をお願いしたい。

水力産業界としては、水力発電および揚水発電の導入や活用促進、また柔軟性を更に高めることによって、カーボンニュートラルの実現に貢献していくことを目指していく。

4. 最終報告書に向けた検討上の課題と展開

これまでの検討において、水力発電、揚水発電の置かれている現状と課題を整理し、世界の事例、日本の制度、制約を調査したが、府省との関連性を含め、更に調査を行っていく。

世界の事例は、そのまま日本に当てはめられるとは限らないことは課題である。そのため、日本と制度の近い国々の事例を参考にし、日本において、カーボンニュートラルを実現するために、水力発電、揚水発電が出来得ることを立案し、その効果を評価するための実証プロジェクトの組成を検討していく。また合理的な評価手法に関する研究の必要性についても議論していく。

(注 1) 設備利用率：年間発電電力量(MWh)／設備容量(MW)／8760(h)

2020 年度（2021 年 3 月）の経済産業省資源エネルギー庁「統計表一覧」を基に算出した値。

揚水運転は含まれていないので、揚水発電所の場合小さめの数字になる。

【目 次】

プロジェクトメンバー	1
1. プロジェクトの背景と目的	3
2. 技術・システム課題整理	4
2. 1 水力発電システムの特徴と課題	4
2. 2 世界の施策調査	6
2. 3 世界の実用事例、実証プロジェクト.....	9
2. 4 経済性評価法調査・課題整理	15
3. 制度・規制課題整理	19
3. 1 制度・関連規制調査・課題整理	19
4. 産業競争力強化のための提言	24
5. 今後の活動について	25
参考文献	26

【プロジェクトメンバー】

#	区分	企業・大学・法人名*	氏名
1	共同リーダー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	森 淳二
2	共同リーダー	日立三菱水力株式会社	震明 克眞
3	メンバー	株式会社 IHI	小坂 佳史
4	メンバー	株式会社 IHI インフラシステム	首藤 祐司
5	メンバー	旭化成株式会社	村木 謙吾
6	メンバー	旭化成株式会社	加戸 良英
7	メンバー	ENEOS 総研株式会社	藤生 潔
8	メンバー	鹿島建設株式会社	間宮 尚
9	メンバー	関西電力株式会社	横谷 亮
10	メンバー	関西電力株式会社	横山 祐弥
11	メンバー	関西電力株式会社	太田 俊彦
12	メンバー	関西電力株式会社	大嶋 慶一
13	メンバー	関西電力株式会社	原 智行
14	メンバー	九州電力株式会社	三根 浩二
15	メンバー	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）	中矢 哲郎
16	メンバー	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）	福田 浩二
17	メンバー	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）	上田 達己
18	メンバー	電源開発株式会社	中澤 孝彦
19	メンバー	東京電力リニューアブルパワー株式会社	梅田 成実
20	メンバー	東芝エネルギーシステムズ株式会社	廣田 達也
21	メンバー	日立三菱水力株式会社	吾郷 浩朗
22	メンバー	日立三菱水力株式会社	長沼 一裕
23	メンバー	日立三菱水力株式会社	大友 隆彦
24	メンバー	日立三菱水力株式会社	佐藤 皓大
25	メンバー	富士電機株式会社	小倉 英之
26	メンバー	富士電機株式会社	白川 正広
27	メンバー	北陸電力株式会社	橋本 学
28	メンバー	北海道電力株式会社	高峰 尚
29	メンバー	株式会社三菱総合研究所	田野中 新
30	メンバー	株式会社三菱総合研究所	伊藤 陽人
31	メンバー	株式会社三菱総合研究所	江崎 宏至
32	メンバー	三菱電機株式会社	前田 英昭
33	メンバー	三菱電機株式会社	齊藤 英和

34	メンバー	三菱電機株式会社	倉持 壮男
35	メンバー	三菱電機株式会社	福田 明
36	メンバー	三菱電機株式会社	森 一之
37	アドバイザー	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）	仁木 栄
38	COCN 担当 実行委員	ソニーグループ株式会社	島田 啓一郎
39	COCN 担当 実行委員	株式会社東芝	斉藤 史郎
40	COCN 担当 実行委員	三菱電機株式会社	水落 隆司
41	COCN 担当 企画小委員	ENEOS 株式会社	中山 慶祐
42	COCN 担当 企画小委員	三菱電機株式会社	金枝上 敦史
43	COCN 事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	山口 雅彦
44	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	五日市 敦
45	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	佐藤 桂樹
46	COCN 副事務局長	一般社団法人 産業競争力懇談会	武田 安司
47	COCN 事務局	一般社団法人 産業競争力懇談会	中塚 隆雄
48	プロジェクト 事務局	東芝エネルギーシステムズ株式会社	宮崎 保幸
49	プロジェクト 事務局	東芝エネルギーシステムズ株式会社	浅野 和仁
50	プロジェクト 事務局	東芝エネルギーシステムズ株式会社	大塚 正樹
	— 以上 —		

【本 文】

1. プロジェクトの背景と目的

2020 年 10 月の首相所信表明において、「我が国は、2050 年までに、カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すこと」が示された。

それを受けて 12 月にグリーン成長戦略が発表され、その中で再生可能エネルギー（以下：再エネ）の課題として、「最大限導入。系統整備、コスト低減、周辺環境との調和、蓄電池活用。」が謳われている。

一方で、揚水発電システムは、電気エネルギーを位置エネルギーとして蓄えることができる巨大な蓄電池であり、日本の発電設備の 10%の設備容量を占めるが、その稼働率は低く、発電電力量は総電力量の僅か 1.1%と十分に活用されているとは言えない。また、ダム式水力発電所でも、運用次第で調整が可能と考えられる。

これらのことから、2050 年カーボンニュートラル実現に向けて電力系統の柔軟性を高める手段として、水力発電システムの有効活用をするための技術開発は、有望なテーマと考えられる。

2050 年カーボンニュートラルを達成するためには、変動する再生可能エネルギー（以下：変動性再エネ）を最大限導入することが不可欠である。変動性再エネが増加することによって、電力需要だけでなく、電力供給も変動することになり、需給バランスの調整はより難しくなることが課題となり、電力系統の柔軟性を高める必要が生じる。水力発電はそれ自体が再エネであり、また揚水発電と同様に柔軟性の高いシステムと言える。そのため、本プロジェクトでは、水力発電および揚水発電を最大限活用する施策を立案し、可能であれば、その施策もしくは柔軟性を更に高める実証試験を行うプロジェクトの組成を目標とする。

検討は、技術・システムと、制度・規制の 2 面で進める。技術・システムについては、水力発電は、自身が再エネの 1 つであり、また揚水発電を含むダム式水力としては、蓄エネシステムとして変動性再エネの導入量促進に寄与できる一面がある。そこで、以下（１）、（２）の側面での有効性検討を行う。

（１）再エネの 1 つである水力としての柔軟性向上施策

（２）変動性再エネ、蓄電池との共存、協調制御

制度・規制に関しては、再エネとしての水力での発電電力量を増やすこと、揚水発電を含むダム式水力の活用促進を図ることに寄与する制度や、規制緩和に関して検討する。制度や規制緩和に関しては、既に運用中のもの、議論が進んでいるもの（卸電力市場、非化石価値取引市場、需給調整市場、容量市場など）や今後議論されと考えられるもの（系統安定度に関するもの、カーボンプライシングなど）にも注視する。

各検討要素に対し、ベンチマーク、課題抽出を行い、それらを整理すると共に、課題解決策の立案と、可能であれば、実証プロジェクトとしての検証方法の立案を行う。規制・制度に関しては、OCCTO 等での議論も参考に、可能であれば、提言を検討していく。

2. 技術・システム課題整理

2. 1 水力発電システムの特徴と課題

(1) 水力発電システムの特徴

水力発電は、季節や時間による発電出力の変動が小さい電力の安定供給に優れた電源として、エネルギー基本計画で位置づけられている。また、燃料費が不要で変動費が少なく、CO₂ 排出量の少ないクリーンなエネルギーでもある。この安定供給性から一般水力（流れ込み式水力発電）はベースロード電源として、揚水式水力発電（揚水発電）は、発電電力量の調整が容易で高い負荷追従性を有することから、ピーク電源としての役割を担ってきた。さらに揚水発電は、水の位置エネルギーとして蓄電が可能ことから、余剰電力の調整にも利用されてきた。

カーボンニュートラルに向け、エネルギー基本計画で定める長期エネルギー需給見通し、すなわちエネルギーミックスの実現に向け、再生可能エネルギーの導入には、電源の特性に合わせた導入拡大施策が必要である。

水力発電の発電容量増加や稼働率の向上は、表 2.1-1 に示す水力発電が有する、数秒から十数分の周期をもつ短周期・中周期の電力変動に対する調整力（出力調整幅、出力変化率）と、数分程度で起動停止可能な調整力の拡大となる。調整力の拡大は、変動性再エネの導入量増大時の電力システムの安定運用および電力の安定供給に大きく寄与する。

表 2.1-1 水力発電所の出力調整幅、出力変化率、起動時間

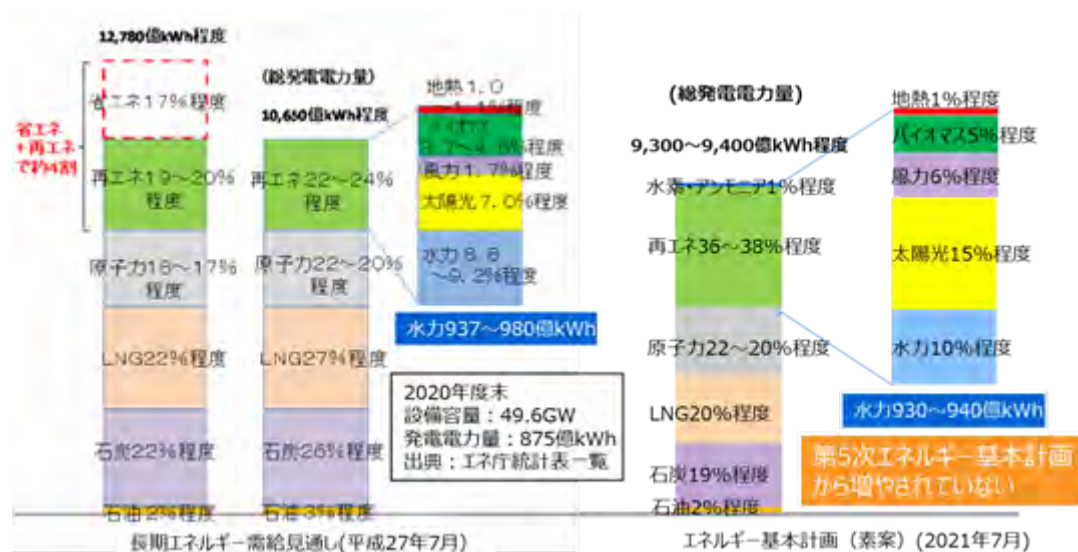
	流込式	調整池式	貯水池式	揚水式		
概要	河川の自然流量をそのまま利用する発電方式	1 日～1 週間程度の負荷の変動に対応できる調整池を有し、ピーク時に発電する方式	季節的な河川の流量変化を大貯水池で調整し発電する方式	発電運転	揚水運転	
					可変速機	定速機
ガバナフリー運転	×	△	○	○	○	×
LFC 調整能力	×	△	○	○	○	×
出力調整能力	×	○	○	○	○	×
出力調整幅	—	50 程度～100 %			70 程度～100 %	—
出力変化	—	1 分程度（出力調整幅内の出力変化）				—
起動／停止	—	3～5 分／1～2 分			5～10 分／1～2 分	
主な役割	ベース供給力	ピーク供給力調整力	ピーク供給力調整力	ピーク供給力調整力予備力	揚水動力調整力	揚水動力

出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版[1]

(2) 水力発電の課題

2050 年カーボンニュートラルに向けて、再生可能エネルギーの最大限の導入が必要とされている。水力発電は、現在最も活用されている再生可能エネルギーであるが、2021 年 7 月に発表されたエネルギー基本計画（素案）[2]において、2030 年のエネルギーミックスに占める割合は 10% 程度で、平成 27 年 7 月に発表された長期エネルギー計画[3]と変わらない値とされている。（図 2.1-1）

水力発電を増やす施策も強化するとされているが、具体的な施策は示されていない。



中小水力に適用されていた FIT 制度は 2021 年度で終了し、2022 年度から FIP 制度に変わる。これまで FIT 制度においても、新設の建設は少なく、老朽化した設備の更新が多く行われたため、設備容量としては 30 万 kW 程度しか増えていない[4]。FIP 制度の基準価格は、FIT 制度の調達価格と同額にされる見込みであり、老朽化更新は一定量促進されると考えられるが、現時点で足りない設備容量を増やすのには、効果が得られるとは考えにくい。

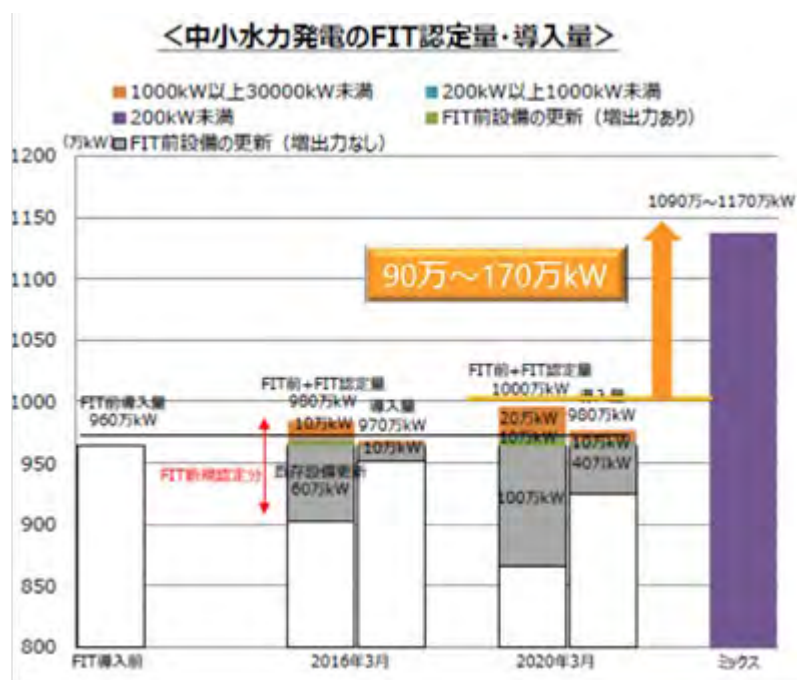


図 2.1-2 FIT 制度導入後の中小水力の設備容量 [4]

2021 年エネルギー白書 [5] では、「2050 年カーボンニュートラルに向けた気候変動対策の強化や太陽光や風力発電等の自然変動電源の大量導入など、エネルギーを巡る情勢はこれまで以上に大きく変わってきている。エネルギーセキュリティの観点から重視すべき項目は、時代を経て拡大しているため、従来型のエネルギーシステムの指標に加え、①気候変動対策とレジリエンス、②再エネ大量導入とデジタル化、③脱炭素燃料への転換に関する指標を追加する」ことが示された。①の中で蓄電能力が評価項目とされ、「蓄電容量」が指標となり、日本は他国に比べて揚水発電設備の容量が多く、発電設備容量に占める蓄電設備の率が高いと評価されている。しかしながら、設備利用率は、4.6%と低く、十分に活用されていないことは記載がされていない。

【第133-5-2】蓄電容量



図 2.1-3 蓄電容量比較 [5]

これらの課題を踏まえ、水力発電システムの発電量拡大や稼働率向上、調整力拡大に向けた、世界の施策、経済性評価法、制度・関連規制の公知文献による調査を行う。

2. 2 世界の施策調査

IEA（国際エネルギー機関）、IHA（国際水力発電協会）、IRENA（国際再生可能エネルギー機関）および、EU や米国などの国家、国家機関の水力発電システムの施策動向を公開文献で調査した。

（1）IEA（International Energy Agency）

Hydropower Special Market Report: Analysis and forecast to 2030 [6]

新 Net Zero Emission by 2050 シナリオ実現に向け、世界各国（日本を含む）の水力発電容量、建設改修計画、投資額を整理し、主要国の動向をもとに電源の安定確保や変動性再生可能エネルギーとの協調にポテンシャルを有する水力発電の経済性を高める制度改革など、政策支援の必要性を提言。

水力発電の活用を政府が加速するため IEA が提言する 7 つの優先分野を以下とした。

- ・水力発電をエネルギーと気候政策の議題に引き上げる
- ・すべての水力開発に合理化された規則と規制を伴う堅牢な持続可能性基準を実施する

- ・電力セキュリティのための水力発電の重要な役割を認識し、その価値を報酬メカニズムに反映させる
- ・老朽更新を奨励するための措置を講じて既存の水力発電所が有する柔軟性を最大化する
- ・揚水発電の拡大を支援する
- ・発展途上国の持続可能な水力開発のための適切な資金調達を実動させる
- ・水力発電所が提供する複数の公益価値を確実に評価するための措置を講じる

IEA Hydro Technical Report: VALUING FLEXIBILITY IN EVOLVING ENERGY MARKETS [7]

変動性再生可能エネルギー（VRE）の大量導入に対応する電力システムの柔軟性ニーズは世界的に類似するが、一方で、各国や各地域で異なる予測・計画・運用や電力市場制度の改良等の取り組みが行われている。14 の国や地域を対象とした IEA2018（表 2.2-1）で定義される柔軟性サービスに関する調査、VRE と水力発電の関わりを観点とする 7 カ国の事例を通じ、注目事項を報告。

この中で、水力発電は、多くの国で秒オーダーから年間にわたる広い時間スケールの柔軟性サービスの役割を担っており、短期の系統周波数調整、電圧安定化から長期のエネルギー貯蔵に至るまでの柔軟性の提供が可能な特有の特性を持っている。

長期契約により低リスク投資を提供することが必要である。ブラジルでは公募による 15～35 年の長期購入契約で大規模投資が行われた（2008-2015 年に 65GW 投資、48%が水力）。カナダ Hydro Quebec は 3 年契約で風力電力の調整を担っている。

電力市場間の柔軟性サービス商品の共通化により効率的な設備運用が可能となる。水力発電が多い北欧では、短期調整力 aFRR (Automatic Frequency Restoration Reserve) は 2022 年に共通運用となり、2024 年までに欧州市場との取引が運用される予定で、ノルウェーからスイスに及ぶ地理的に広域の取引や融通が可能となる。

水力発電の柔軟性発揮には送電容量も重要で、ノルウェーやオーストラリアで直流送電がこの役割を担う例がある。ノルウェーとデンマーク間の Skagerrak4 HVDC は、送電容量 700MW のうち 110MW がデンマークの風力向け調整力に割当てられている。

表 2.2-1 時間軸毎の柔軟性サービス [7]

Flexibility type	Short-term			Medium term	Long-term	
Time scale	Sub-seconds to seconds	Seconds to minutes	Minutes to hours	Hours to days	Days to months	Months to years
Issue	Ensure system stability	Short term frequency control	More fluctuations in the supply / demand balance	Determining operation schedule in hour- and day-ahead	Longer periods of VRE surplus or deficit	Seasonal and inter-annual availability of VRE
Relevance for system operation and planning	Dynamic stability: inertia response, voltage and frequency	Primary and secondary frequency response	Balancing real time market (power)	Day ahead and intraday balancing of supply and demand (energy)	Scheduling adequacy (energy over longer durations)	Hydro-thermal coordination, adequacy, power system planning (energy over very long durations)

（２）IHA（International Hydropower Association）[8]

IEA World Energy Outlook 2020 が、コロナパンデミック後を、国家政策シナリオ (STEPS)、遅延回復シナリオ (DRS)、持続可能開発シナリオ (SDS)、新ネットゼロエミッション (NZE2050) の 4 シナリオで分析。本レポートに対し IHA が次の見解を示した。全シナリオで水力発電は、主要供給、貯蔵、調整力確保を要するクリーンエネルギー移行に重要。エネルギー貯蔵、電力系統安定性等の重要分野で、持続可能な水力発電が提供するサービスの適切評価の為に適切な政策と規制の枠組み整備が必要。

（SDS）に対する予想

- ・ 2030 年までに石炭火力よりも水力発電は多くの電力を発電
- ・ 2040 年までに主にアジア太平洋地域で 850GW 近くの新設の水力発電設備容量が必要

（STEPS）に対する予想

- ・ 水力発電は依然緩やかな成長が見込まれ、2030 年まで世界最大の低排出電力源であり続ける
- ・ 柔軟性ニーズが高まるにつれて水力発電は瞬時の電力品質の改善から季節変動バランス調整まで、幅広い時間スケールにわたる幅広いシステムサービスを提供する。

（３）IRENA（International Renewable Energy Agency）[9]

水力発電は変動性再生可能エネルギーの導入増加に重要な役割を果たす。水力発電の容量は、2030 年までに 25%、2050 年までに 60%増加する必要がある。貯蔵やエネルギーの柔軟性を提供する揚水発電の容量は 3 倍に増加する必要がある。

電力システムの高速かつ頻繁なランピング電力変動対応等のニーズを反映した水力発電運用の変更や、気候変動が水の供給や貯水池の必要性に与える影響評価を含む発電計画法が必要となる。実現可能な政策、市場環境、投資を拡大するための共通の枠組み、十分に準備されたプロジェクトがあれば、水力発電は今後数十年にわたって重要な技術の一つとなる。

（４）EU 議会

Pumped storage development in Europe [10]で、揚水発電拡大開発奨励と要請。

揚水発電に関する規制の障壁を取り除き、二重課金、税金等の市場の取り込みを遅らせたり妨げたりする可能性のある障害排除を許可することを推奨、また EU 加盟国は、揚水貯蔵能力を強化する方法を模索するよう求めている。EU 議会産業研究エネルギー委員会は揚水発電がエネルギー貯蔵で優れている技術と認知、エネルギー貯蔵は脱炭素経済移行に不可欠であると言及。

（５）米国 DOE（Department of Energy、米国エネルギー省）[11]

米国水力発電および揚水発電開発と業界動向全体像を調査報告。米国の水力発電は電力システムの柔軟性（周波数調整、電圧制御、ブラックスタート）のために幅広く利用されており、容量は 52GW のプロジェクト開発中で増加見込み。揚水発電は、米国のエネルギー貯蔵容量の 93%を占めており、他の全ての貯蔵技術を合わせた容量と同程度の速さで増加中。揚水発電は 4~16 時間のエネルギー貯蔵コストが最も低い技術オプションであり続ける。（注：最も低コストなエネルギー貯蔵

は圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）であるが、世界で2例のみである）

柔軟性を高める変更例として、上部貯水池の運転レベルを上げることや、柔軟性を制限する変更例としてランプレート（ランプレートの制限追加や強化、最低流量の増加を上げている。再認可の半数以上でレクリエーション施設や環境対策（魚道構造物の設置、環境性能を向上するタービン交換など）の追加や改善が必要とされた。

（6）米国 EIA（U.S. Energy Information Administration 米国エネルギー情報局）[12]

米国の揚水発電施設は月平均往復効率 79% で稼働し、実用規模の蓄電池は 82% で稼働。貯蔵測定基準の技術が重要である。

（7）NREL（The National Renewable Energy Laboratory: 国立再生可能エネルギー研究所）[13] [14]

北米（米、加、国間連系を含む）全体の低炭素な将来グリッドを支える大量の風力、太陽光、水力の導入の課題と機会を解析、水力は現状維持の条件。水力を活用運用すれば、現状の水力柔軟性で系統柔軟性の 3% システム投資の抑制、再生可能エネルギーの発電抑制の低減（9.9% を 9.2% へ減）、火力運用の低減（1.6% 減）、炭素排出低減（1.3% 減）に寄与する見込みがある。

国際機関、国家ともに変動性再生可能エネルギーの増加に伴い、水力発電や揚水発電の必要性が高まり、様々な柔軟性サービスを提供するとしている。ただし、各国の電力システムの事情や電力市場の相違から具体的な柔軟性サービスは異なり、水力発電や揚水発電の運用ニーズは異なっている。

2. 3 世界の実用事例、実証プロジェクト

水力発電システムの発電出力増加、稼働率や利用率の向上、調整力等の価値向上に関し、世界で実用または実証プロジェクトとして実施されている内容を公知文献で調査した。

（1）EU XFLEX HYDRO Project [15]

欧州では、2030 年 EU 再生可能エネルギー 32% 以上導入目標に向け、EU 議会で揚水発電システムの活用促進が提案され、賛成多数で可決された。また、EU が助成金を捻出し、スイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）が中心となり、電力会社、メーカー、研究機関やコンサルタントなど 19 の団体、企業が集まり、「XFLEX HYDRO Project」を 2019 年から 4 年計画で実施している。このプロジェクトは、文字通り、水力（HYDRO）の柔軟性（FLEXibility）を増強（eXtend）しようというものである。

プロジェクトの目的は、政府、規制当局、業界向けのポリシーと市場の推奨事項とともに、水力発電所全体で同様技術の採用を増やすためのロードマップを提供することとしている。

プロジェクトでは、揚水発電、エネルギー貯蔵（揚水と電池）、流込式水力発電を網羅するよう、

ポルトガル、フランス、スイスの数か所の発電所を対象に FS や実証を計画。

対象水力プラントおよび、電力システムの柔軟性向上機能として、対象とするアンシラリーサービスおよびプロジェクトで検証実証される技術は、以下の通りである。

対象水力発電プラント

ポルトガル: Frades 2 (390MW 可変速揚水)、Alqueva (4×130MW 揚水)、Alto Lindoso (2×317MW)、
Cançada (2×31MW)

フランス : Grand Maison (8×157MW 揚水、4×157MW)、Vogelgrün (4×35MW)

スイス : Z' Mutt (併設アドオン可変速揚水 1×4.5MW)

対象アンシラリーサービス

プロジェクトで対象とする既存および将来予想されるアンシラリーサービスは次の通りである。

Synchronous inertia: 同期慣性力、周波数変化率を改善

Synthetic inertia: 仮想慣性力、制御ロジックで慣性相当を実現

Fast Frequency Response (FFR): 高速周波数応答

Frequency Containment Reserve (FCR): 1次調整力、30秒以下の応答、図 2.3-1

Automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR): 2次調整力、30秒～15分以下の応答

Manual Frequency Restoration Reserve (mFRR): 3次調整力、15分～1時間の応答

Replacement Reserve (RR): 3次調整力、発電機起動停止

Voltage/reactive power control (Volt/var)

Black start

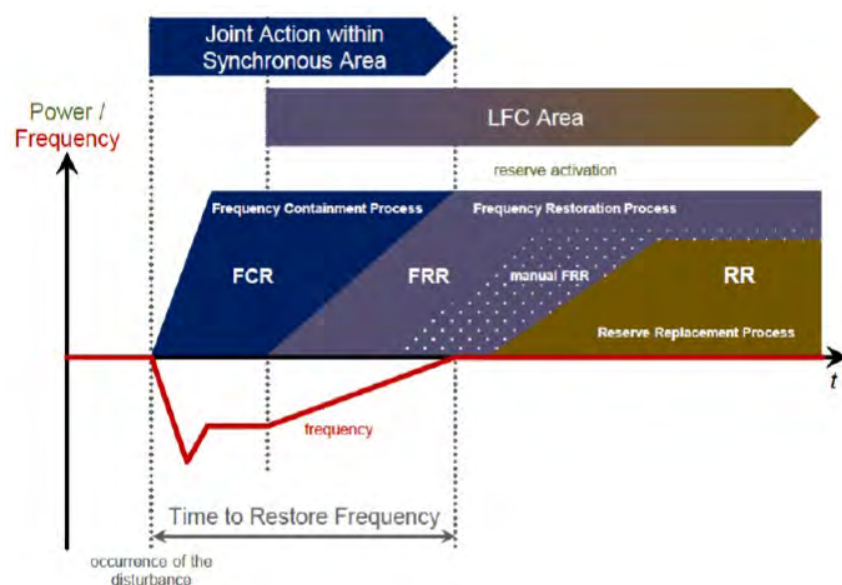


図 2.3-1 負荷周波数制御（LFC）の時間分担 [16]

検証技術

- ・デジタル化ツール（スマート発電所スーパーバイザー：Smart Power Plant Supervisor）

プラントデータ取得と健全性監視で、保守必要性の判断やプラント停止時間を削減。プラントの効率向上の他、柔軟性向上運転時の機器ストレスをモニタリングする。

プラント運用者が、系統柔軟性向上運転をする際意思決定ツールとしても利用する。

- ・蓄電池システムとの統合制御

流れ込み式水力発電所で蓄電池システムとのハイブリッド制御で電力システムに対して高速出力応答サービス（fast response services）を提供し、発電プラントの可用性と柔軟性を向上。

流れ込み式水力発電所である Vogelgrun に蓄電池システム（800kW-200kWh）を併設し、短時間エネルギー貯蔵と周波数制御機能を追加すると同時に、既存のカプラン水車の制御要件の軽減で、水車の摩耗が減少する。

- ・循環水路式揚水発電（HSC：Hydraulic short circuit）

揚水発電所で循環水路を利用し発電と揚水を同時に運転する。発電所が発電または揚水のいずれで運転していても、逆回転の必要なしに急速に運転モードを切り替えられる。発電と揚水の両モードの運転で、電力システムに対して周波数調整や慣性の柔軟性を提供する。

新しいペルトン水車である Grand Maison と、2つのポンプ水車を備えた Alqueva、可変速機では Frades2 で実証する。

- ・二重給電誘導機（DFIM：Doubly-Fed Induction Machine）による可変速化

運転動作範囲を拡大し、グリッドの柔軟性機能を追加すると同時に、年間効率と残存寿命の改善を目的。HSC モードで DFIM を実行することにより、電力調整範囲を拡張することも評価する。可変速ポンプ水車は、揚水モードでも電力調整と負荷追従が可能になる。Frades2 で実証する。

- ・フルサイズコンバータ（FSFC：Full-Size Frequency converter）による可変速化

既設水車の同期発電機と FSFC の統合による可変速プラントへのアップグレード化。可変速化により電力システムへの柔軟性機能とプラント運用機能が向上する。Z' Mutt で実証する。

将来の電力システムに必要なサービス、対応する市場、実証技術の関係をアンシラリーサービスマトリックス（図 2.3-2）に示す。このマトリックスは、プロジェクトのレポートフレームワークを提供し、アンシラリーサービスに関連する水力発電プラントの新たな機会について業界の利害関係者への通知に役立つ。初期段階では、各アンシラリーサービスに対して現在どのようにデモンストレーションが実行されているか、これらのサービスが市場フレームワークにどのように関連しているかを示す。プロジェクト進行により、マトリックス内容は更新される。

Stage one of the Ancillary Services Matrix

ANCILLARY SERVICES											● Not currently capable of providing the service ● Capable, but could be enhanced ● Currently capable of providing the service								
SYNCHRONOUS INERTIA		SYNTHETIC INERTIA		FAST FREQUENCY RESPONSE (FFR)		FREQUENCY CONTINGENCY RESERVE (FCR)		AUTOMATIC FREQUENCY RESTORATION RESERVE (AFRR)		MANUAL FREQUENCY RESTORATION RESERVE (MFR)			REPLACEMENT RESERVE (RR)		VOLTAGE/VAR CONTROL		BLACK START		
Site/Timescale		0 s		<300 ms		15-2 s		<30 s		30 s - 15 min		<15 min		>15 min		>1 s		N/A	
DEMONSTRATIONS	Z MUTT		T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P			FS
																		VS (FSFC)	
																		VS & SPPS	
	FRANES 2		T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P		FS	
																		VS (DFIM)	
																		VS & SPPS & HSC	
	GRAND MAISON		T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P		FS	
																		FS, SPPS & HSC	
			T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P		FS	
																		FS & SPPS	
ALQUEVA																		FS & HSC	
																		FS, SPPS & HSC	
																		VS (FSFC) & SPPS	
ALTO LINDOSO & CAMICADA																		FS	
																		FS & SPPS	
																		VS (FSFC/DFIM) & SPPS	
VOGELGRUN																		FS Kaplan	
																		FS, SPPS & HBI	
																		VS (FSFC) Propeller	
																		VS, SPPS & HBI	
Original terminology		Inertia		Primary frequency control (FC)				Secondary (FC)		Tertiary (FC)		Voltage control		System re-start					
Emerging frameworks		BILATERAL CONTRACTS (GB)		GB/IR/NORD				FCR coop.		PICASSO/IGCC		MARI		TERRE		BILATERAL CONTRACTS		BILATERAL CONTRACTS	
MARKET FRAMEWORK																			

図 2.3-2 アンシラリーサービスマトリクス (T: タービン、P: 揚水) [15]

国内の需給調整市場の取引内容と相違があるが、水力発電プラントの柔軟性向上施策として、デジタル化ツールと循環水路式揚水発電は参考になる。蓄電池との統合制御は高速な系統周波数制御の必要性によるが、水力発電プラントへの蓄電池併用により高速な発電出力の調整に加え、水車の過酷な運転軽減による摩耗軽減の考え方は参考になると考える。

2 重給電誘導機による可変速揚水システムは国内で実用化され運用されており、日本が先行する技術である。

(2) 英国 Drax 社 慣性力供給サービス [17]

現状の系統周波数は大型回転発電機（同期機）の慣性力によって保たれている。太陽光発電や風力発電等の変動性再生可能エネルギーは、電力変換器を介した非同期連系電源であり、これら変動性再生可能エネルギーの増加により、火力発電等の同期発電機が減少すると電力システムの慣性が低下し、電力システムの安定性も低下する。発電設備や送電設備のトラブルなどで、電力システムに対する入力之急に失われると、系統周波数が大きく低下する。系統周波数低下が一定値以上になると電力システムを安定に保つことができなくなり、最悪の場合、ブラックアウト（全域停電）に至る。

同期発電機は、電力システムの周波数変化を自律的に小さく保つ慣性を有し、慣性が高いほど系統事故時の系統周波数の変化率（ROCOF: Rate of Change of Frequency）を小さく抑え、系統周波数低下幅が小さくなり、電力システムの安定性が高くなる。慣性力は発電機とタービンなど重量物が一体となり回ることから提供される。

変動性再生可能エネルギーの導入が進む英国では、系統周波数を 1%変動内に収めるため、系

統運用者（ESO: National Grid Electricity System Operator）が慣性力を調達する動きが出ている。ESO は“安定入札 the Stability Tender”を通じて、約 5 石炭火力発電所に相当する慣性を調達した。英国 Drax 社は、世界初の系統システムサポートサービスを提供した 5 社の内、最初の発電業者である。

Drax 社は、保有する 440 MW-Cruachan 揚水発電所の既設発電機 1 機で、ESO に慣性などの重要なシステムサポートサービスを提供、発電無しで系統安定性に寄与し、風力や太陽光発電の系統連系に貢献している。

発電機 1 機の水車を毎分 600 回転で無負荷運転し、同期調相機（ただし、電圧/無効電力制御の有無は不明）相当として発電出力ゼロで運用し、慣性力を提供する。同期調相機は系統周波数に同期して回転し、系統周波数が急激に低下すると、回転エネルギーが発電出力として電力システムに供給され系統周波数の低下を抑制するように寄与する。

日本国内の需給調整市場では、現時点、慣性力の市場取引メニューは無い。変動性再生可能エネルギーが増加した将来に市場取引メニューとなる可能性はあるが、発電停止中の既設の水力発電システムを同期調相機相当として運用可能とすることで既設水力発電システムから慣性力を提供し、電力系統をカーボンフリーで運用、水力発電システムの価値向上に寄与する可能性がある。

（３）水力発電システムと浮体式太陽光発電のハイブリッド発電

浮体式太陽光発電システムは、国内外で実運用されており、例えば国土が狭いオランダやシンガポールでは、海や貯水池への太陽光発電設置を積極的に行っている。

世界最大級の浮体式太陽光発電は中国・安徽省の 40MW メガソーラー設備で、国内最大は千葉県市原市の山倉ダムの千葉・山倉水上メガソーラー発電所の 13.7MW である。

浮体式太陽光発電システムは、太陽光発電用の用地確保の他、貯水の蒸発量削減、貯水池の藻の発生抑制、太陽光パネル冷却による発電効率の向上の価値が言われている。

一方、太陽光パネル、モジュールの湿気対応、腐食、水域汚染や電気系統の絶縁対応、美観や環境影響に留意が必要と言われている。

米国 国立再生可能エネルギー研究所 (NREL : National Renewable Energy Laboratory) の分析 [18] によると、水力発電所が存在する水域の 20% に浮体式太陽光発電システムの設置を想定すると、世界 379,068 の淡水水力発電所貯水池に設置ができ、太陽光発電システムだけで全世界年間 7.6 テラワットの電力、年間発電の約 10,600 テラワット時を出力できると推定している。なお、この数値には、水力発電分は含まれない。

水力発電システムと浮体式太陽光発電システムによるハイブリッド発電の構成を図 2.3-3 に示す。水力発電と太陽光発電の変電所を共通化することで送電システムの利用率が向上し、送電コストを削減できる。さらに、太陽光発電の最大出力は乾季となるが、水力発電の最大出力は雨季とな

ることが多く、発電出力を調整可能な水力発電と、出力が変動する太陽光発電の発電計画、運用を補完的に協調最適化、発電制御を高度化することで発電コストの低減が図れる。

また、揚水式発電と浮体式太陽光発電をハイブリッド化すると、余剰な太陽光発電電力を貯蔵水力を介して蓄電できる利点もある。

なお、水力発電と浮体式太陽光発電のハイブリッド発電システム化に際しては、浮体式太陽光発電のコストを評価して、水力発電容量に比して適切にその発電容量を設定すること、ハイブリッド発電システムの運用・制御の高度化、関連する制度や規制への対応が必要である。

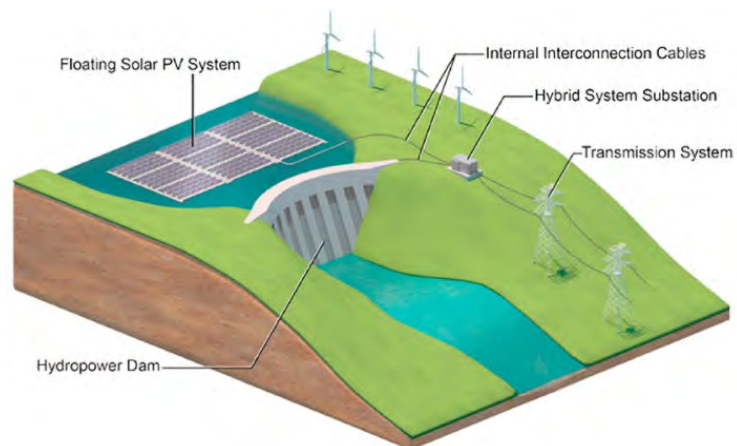


図 2.3-3 水力発電と浮体式太陽光発電のハイブリッド発電構成 [18]

2. 4 経済性評価法調査・課題整理

IEA（国際エネルギー機関）および、EU や米国などの国家、国家機関の経済性評価方法と国内での総合資源エネルギー調査会の議論を、公開文献を基に調査した。

水力も発電の一種であるので、まず LCOE (Levelized Cost of Electricity) により評価されるのが通例である。ただし、揚水発電の場合は揚水動力の買電コストが存在するので、それらを意識した LCOS (Levelized Cost of Storage) という概念も、IEA から整理した形で提案されている。一方、LCOE や LCOS が発電所単位でコストを明らかにしようとしているのに対し、変動性再エネを系統に受け入れるための統合コストを考えるべきであるという考え方もある。実際、この統合コストの一部を考慮した発電コスト LCOE* が、最近の総合資源エネルギー調査会で言及されている。2030 年断面を考えた場合、統合コストは火力の部分負荷運転による燃料費増大分と揚水の損失分である。この概念をカーボンニュートラル社会へ延長しようとする、セクターカップリングが進んでいるため電力だけではクローズできず、新たな研究が必要になると考えられる。

以上はすべて kWh 価値であるが、水力／揚水発電システムのアンシラリーサービス（ΔkW 価値）の価値を評価しようという試みは未だわずかである。実際の市場価格がいくつか報告されているが、それがカーボンニュートラル社会でいくらになるのか、あるいはいくらであるべきかについて言及しているところを見ない。

（１）公表されている揚水の LCOE

IEA は図 2. 4-1 [6] に示す通り、2020 年時点で、揚水発電は蓄電池に比べてコストが安いシステムであるとしている。DOE の 2019 年レポート [19] では、揚水の Total Project Cost を、106 - 200 USD/kWh 代表値 165 USD/kWh と記載している。DOE の 2021 年レポート [11] のグラフも、IEA の図 2. 4-1 [6] 表示も、ほぼこの数字と合致している。欧米においては、2020 年時点で、揚水が最も経済的な蓄エネルギー装置であると認識されている。

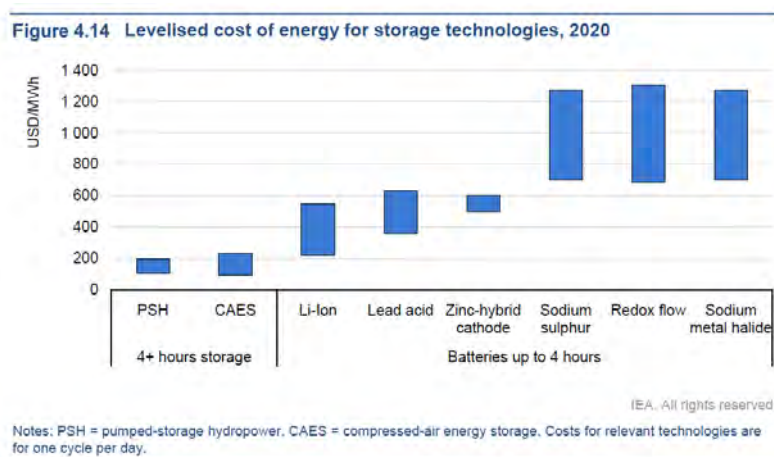


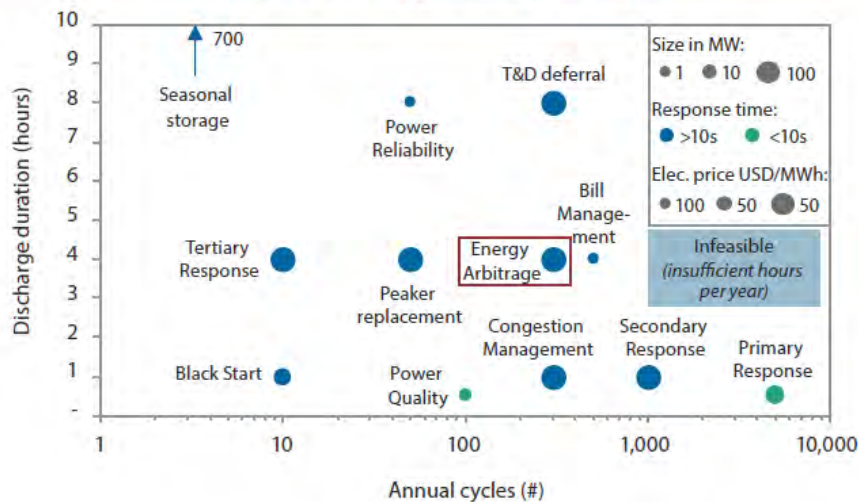
図 2. 4-1 IEA の 2020 年における蓄電システムの LCOE 比較 [6]

（２）LCOS によるアンシラリーサービス市場の整理と将来予想

LCOS は、揚水に限らずすべての蓄エネルギー装置に適用可能な概念であるが、蓄エネルギーと

言っても、裁定取引のためのものか、あるいは系統周波数維持のために一瞬だけエネルギーを蓄えているのか、あるいは冬季の需要を賄うために数百時間の季節間調整をしているのか、電力系統への投資を繰り延べしているのか等、様々な形態が存在する。IEA は、それらを、放電時間と年間放電回数と言う概念で整理することを、図 2. 4-2[20]に示されるような形で提案している。

Figure 6.15: Assigned couples (cycles per annum, discharge duration) for concrete modelling for each listed application of Table 6.1



Note: The couple assigned to arbitrage is ($N_{cyc} = 300$ cpa, $\tau^d = 4$ h).

Source: Schmidt et al. (2019).

図 2. 4-2 1 回の放電時間と年間放電回数で整理したアンシリャー市場の位置づけ[20]

IEA も引用している研究者ら[21]は、英国の市場制度の中で、2040 年に最も経済的な蓄エネルギー装置は何かという研究結果を発表している、図 2. 4-3[21]に示されるように、2020 年断面では揚水が最安になるところと蓄電池(Li-Ion)が最安となるところの境が1回の放電時間が1時間近傍であるが、2040 年断面では、10 時間近傍となると結論付けている。

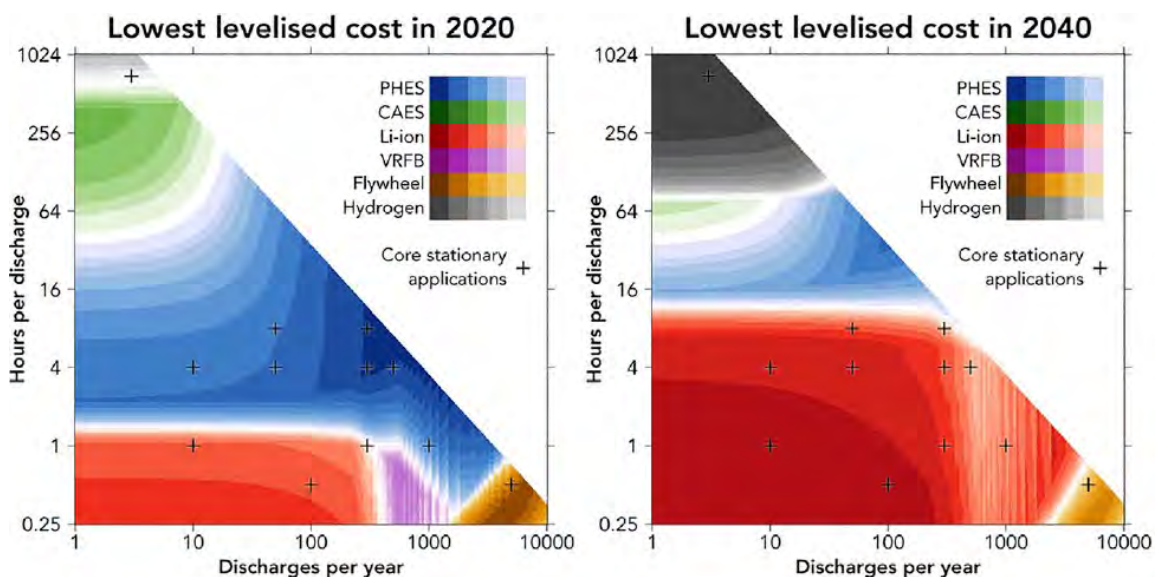


図 2. 4-3 1 回の放電時間と年間放電回数ごとの最安となる蓄電システム評価[21]

先の IEA レポート[6]でも、揚水発電 PSH は 4 + hours と記載されており、他国（中南米、オーストラリアや米国）のレポート[23][24][25]でも、4 時間以上の長時間の電力貯蔵は揚水、それ以下の短時間は Li-Ion 電池と言う論調が見られる。この論文のセンセーショナルな結果がその方向性を導いているのかどうかは分からないが、我が国でこれと同じ景色になるのかどうか、見極める必要がある。

（３）我が国における揚水コストの認識の一例（LCOE＊）

エネ庁 総合資源エネルギー調査会 発電コスト検証 WG ならびに基本政策分科会において、「システム統合を反映した統合コストの一部を考慮した発電コスト（仮称）」（LCOE＊）が議論されている。

LCOE＊は、あるエネルギーミックスに対し各種の電源を一定量（限界的に）増加させたとき、電力システム全体で変化する費用をとらえ、これを、当該電力を増加させた正味の発電電力量で除した費用を、当該電源の追加によって発生するコストと定義する。この評価によって、例えば、現状のエネルギーミックスに、さらに太陽光を追加した場合に発生する、火力の起動停止や揚水損失などのコストを反映した、電源別のコスト比較を行うことができるとしている。試算結果は図 2.4-4 の通り、PV や風力、原子力の LCOE に対して、火力の起動停止、揚水損失などの負担分が上乗せされている。

この上乗せ分には揚水動力費などが含まれており、これが現時点の我が国における揚水コストの認識の一例となっている。一方、カーボンニュートラル社会が出現したときに、電力システム全体で変化する費用を捉えるためには、エネルギーのセクターカップリングまで考慮する必要がある、今後さらに検討が必要になると思われる。

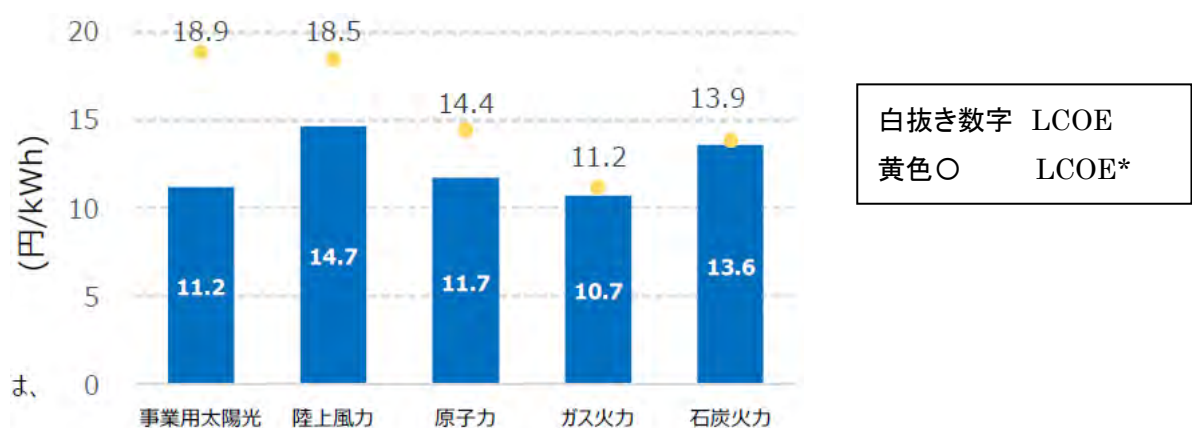


図 2.4-4 2030 年エネルギーミックスでの委員有志による LCOE＊ 試算結果[22]

（４）アンシラリーサービスの市場価格

表 2. 4-1 は、IEA レポート[7]に記載されている市場調査結果である。エネルギー（kWh 価値）に比べて、アンシラリーサービスの価値（ΔkW 価値）は評価されていないように見受けられる。

表 2. 4-1 アンシラリーサービス価格の市場調査結果[7]

Service Type	min	max	mean
Energy	15. 10 USD/MWh	198. 00 USD/MWh	59. 91 USD/MWh
Frequency Response	3. 74 USD/MW-h	62. 5 USD/MW-h	26. 0 USD/MW-h
Spinning Reserve	0. 47 USD/MW-h	17. 98 USD/MW-h	11. 29 USD/MW-h
Non-spinning Reserve	3. 79 USD/MW-h	3. 79 USD/MW-h	3. 79 USD/MW-h
Reactive Power	1. 80 USD/MW-h	3. 54 USD/MW-h	2. 67 USD/MW-h

他に、米国 PJM が State of the Market Report を公開しており、その中でアンシラリーサービスの市場価格が 1999 年から現在まで記録・公開されているが、その価格帯は、表 2. 4-1 の min のレベルであるというのが実情である。カーボンニュートラル社会の実現の際に、この価格はどうあるべきか、さらに研究が必要になると思われる。

（５）ライフタイムコストの試算例

揚水は建設に時間が掛かり、投資回収の予見性に劣ると言われているが、逆に、一旦完成するとその寿命は極めて長い。80 年にわたるライフタイムコストを試算した事例を図 2. 4-5[26]に示す。揚水（PSH）の競争力が十分あることを示しているが、一方これは、様々の条件の下で計算された数値であり、我が国においてどのようなになるのか、研究が必要であると思われる。

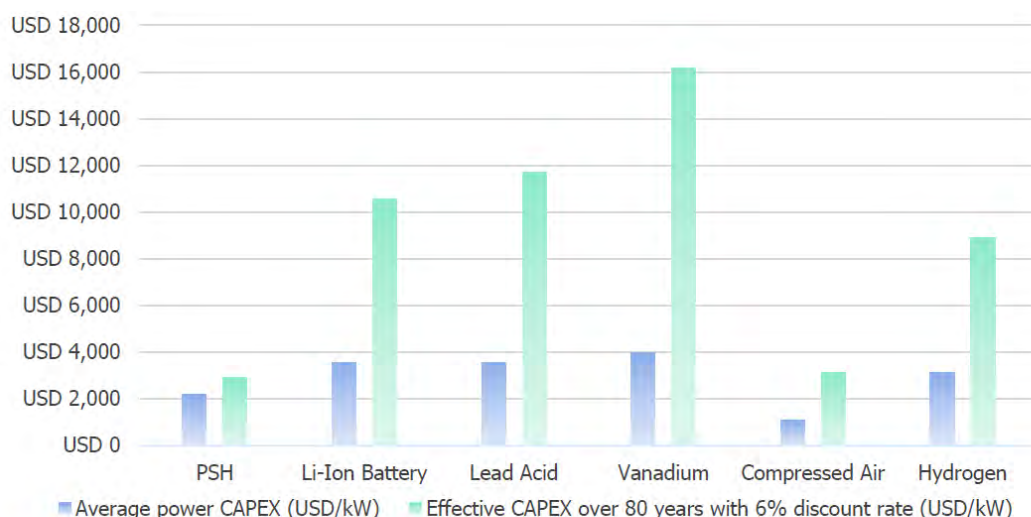


Figure 3. Comparison of effective lifetime costs over 80 years for energy storage systems with 10 hours of discharge duration.

図 2. 4-5 各種蓄エネルギー装置の 80 年間のライフタイムコストの比較[26]

3. 制度・規制課題整理

3. 1 制度・関連規制調査・課題整理

本章では、水力発電および揚水発電の価値に関わりの強い国内制度をまとめる

(1) 電力各事業者と市場の関係

電力システム改革の第3弾により、2020年4月から送配電部門の法的分離が行われ、発電、一般送配電、小売の3つの事業者に分けられた。

図3.1-1に示すように、電力取引市場の主なプレーヤーは発電事業者、送配電事業者（TSO）、小売事業者で構成されている。

表3.1-1 電力取引市場における各プレーヤーと市場の関係

プレーヤー	市場との関係
発電事業者	電気価値（kWh）に加えて調整力（ΔkW）、非化石価値等を各種市場を介して提供する。
送配電事業者（TSO）	送配電設備の維持管理とともに、電力システムの運用を行い、安定的な電力供給に必要な供給力（kW）、調整力（ΔkW）を確保する。
小売事業者	電気価値（kWh）とともに非化石価値等を市場から調達し、これらを組み合わせて需要家へ販売する。

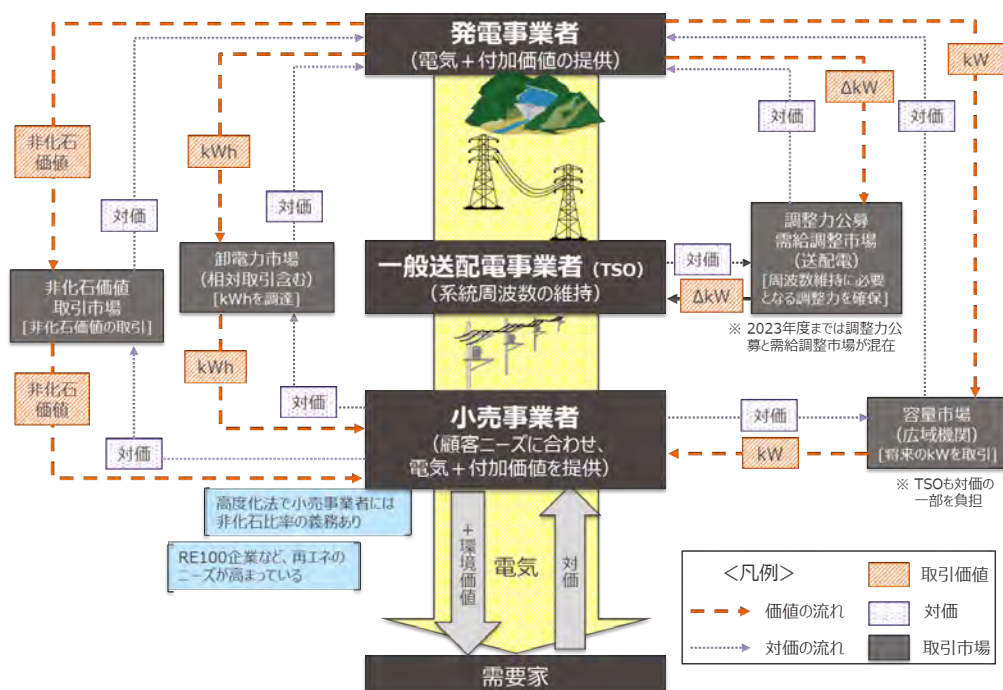


図3.1-1 電力市場における各事業者の位置づけ

（２）水力発電の価値と課題

カーボンニュートラルの宣言以降、RE100 を掲げる企業が増えている。非化石価値取引市場では電気価値に加えて非化石価値が市場取引されており、小売事業者は電気価値と環境価値を組み合わせ販売するメニューが増えている。また、2021 年 8 月からは再エネ価値取引市場へは需要家も参加できるようになり、今後市場の活性化が期待される。

水力発電の価値は再エネの中でも出力が安定している点が挙げられる。図 3.1-2 に示すように、水力発電は他の再生可能エネルギーと比較して発電電力量が多く、かつ 24 時間安定して発電できる特徴を持つ。

太陽光発電で RE100 を達成しようとする場合、太陽光発電が発電できない夜間は、火力発電等の電源を利用し、火力発電分は非化石証書を購入してオフセットする必要がある。RE100 企業の中には電気は市場から調達し、別途非化石証書を市場から調達することでオフセットを考えている企業もあるが、水力発電であれば非化石証書によるオフセットでなく、水力、すなわち再生可能エネルギー電源そのもので賄え、質を求める需要家ニーズに応えることができる。

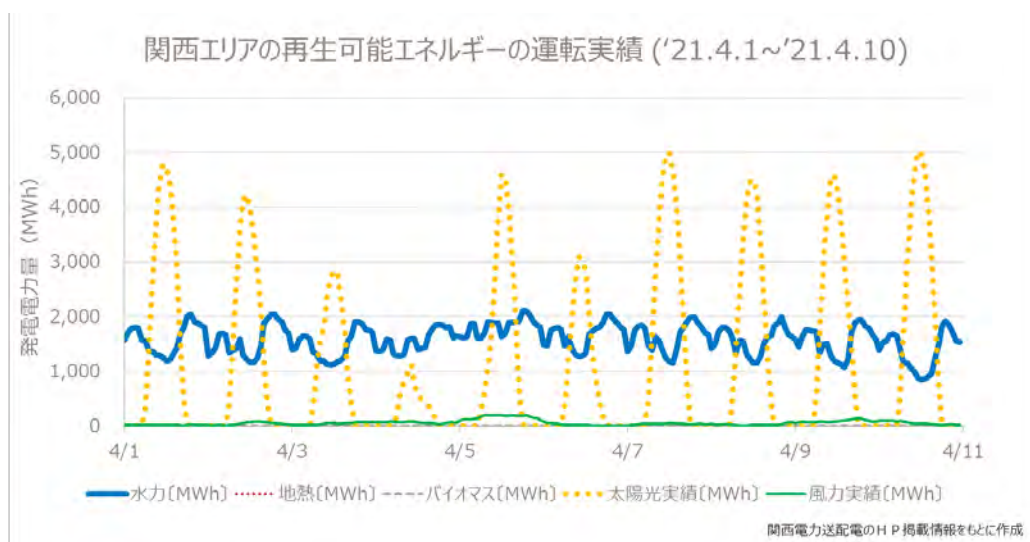


図 3.1-2 関西エリアの再生可能エネルギーの運転実績

（３）揚水発電の価値と課題

揚水発電は、調整力公募または需給調整市場を通じて送配電事業者（TSO）に調整力を提供し、TSO の系統周波数維持に活用される。太陽光発電など出力変動の大きい再生可能エネルギーの普及拡大で、揚水発電の役割は大きくなると想定する。

エネ庁の統計データを基にした設備利用率のグラフを図 3.1-3 示す。グラフの左が九州電力、右が関西電力を示している。棒グラフが各エリアの太陽光の発電電力量の実績を示し、折れ線が揚水の設備利用率を示している。太陽光発電が普及拡大している九州電力は揚水発電の設備利用率が高く、昼間の太陽光発電の余剰吸収に揚水が活用されていることが想定できる。

これは、現行の制度は、稼働している火力機の調整では不足する分を揚水機の立ち上げで補うことになるため、関西電力のように変動再エネの導入量が比較的少ない地域では揚水機の利用率が低く、九州電力のように変動再エネの導入量が進んでいる地域では、火力機での調整が困難となり、揚水機の利用率が高くなることを示している。

全国的に変動再エネの導入が進むと、揚水の利用率は高まってくると想定されるが、揚水発電の多い地域と変動再エネの導入量が進む地域は必ずしも一致しないこと、また、再エネ導入には揚水の活用が不可欠と考えられる一方、揚水時の調整力が評価されていないことが課題と言える。

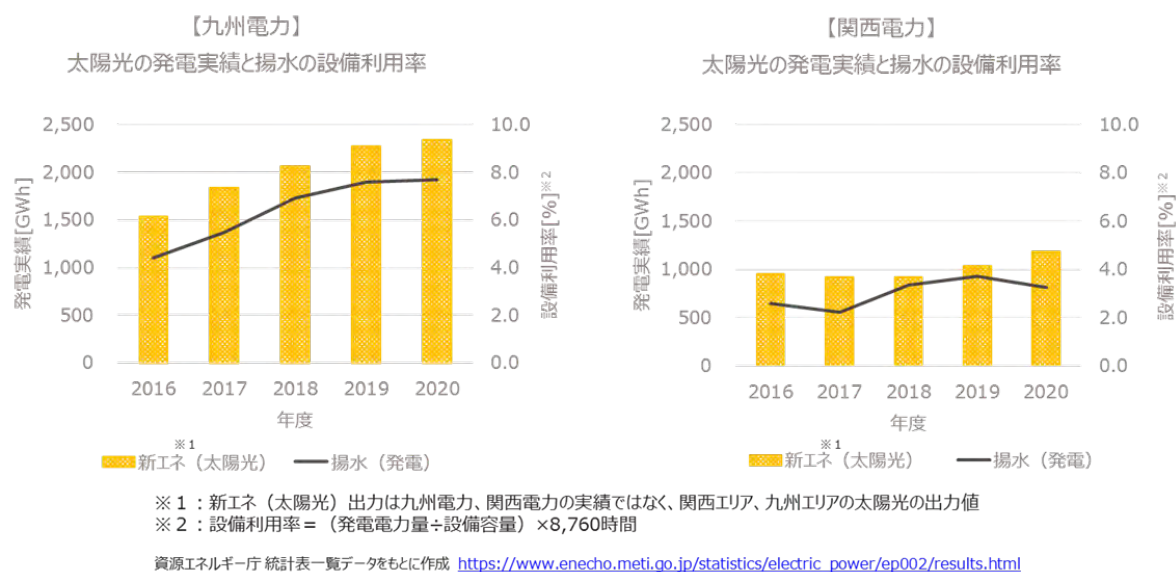
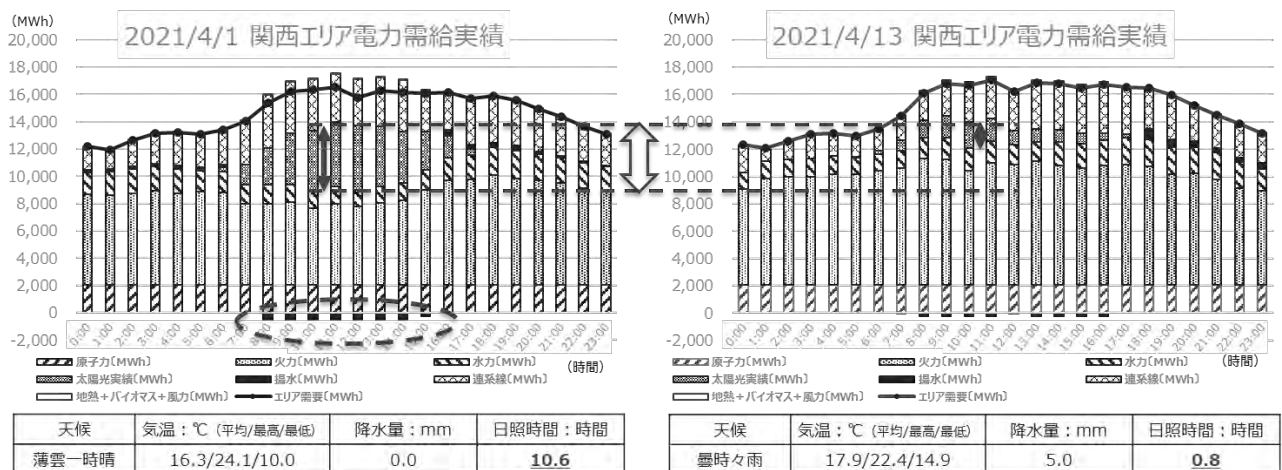


図 3. 1-3 揚水発電の設備利用率の推移

また、1 日の需給実績から揚水発電の稼働状況を確認した。エリアの総需要が変わらない2日のデータで比較する（図 3. 1-4）。図 3. 1-4 の左は晴れの日、右は曇りの日を示している。

晴れた日は 8:00～15:00 の時間帯で太陽光発電の発電量が多くなっているが、同時間帯で揚水が稼働していることが確認できる。揚水発電の役割が太陽光発電の普及拡大に貢献していることが確認できる。



※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より

図 3.1-4 太陽光の出力変動に対する揚水稼働状況（関西エリア）

このように、揚水発電は主に一般送配電事業者が必要とする調整力として活用されている。

調整力を確保するための仕組みとして、調整力公募と需給調整市場がある。図 3.1-5 は調整力公募と需給調整市場の関係を示しているが、現在は調整力公募から需給調整市場へ移行する過渡期となっている。調整力公募の電源Ⅰ、Ⅰ' は一般送配電事業者が必要量を募集し、一般送配電事業者専用の電源として需給調整に活用されている。2024 年度にかけて段階的に移行していくが、2021 年度から需給調整市場三次調整力②の募集が行われており、太陽光発電などの再エネ予測誤差へ対応するための調整力として揚水が活用されている。制度は変化して行くが、TSO が調整力として活用するかどうかのポイントという点は変わらない。



図 3.1-5 調整力確保の仕組み

需給調整市場では、応答時間に応じて商品区分されている。図 3.1-6 のように、揚水発電は他の電源と比較して出力変化速度が速い特徴を有しているが、需給調整市場では応動時間の条件を満たすものは全て同一評価となっている。出力変化速度が早いほど系統安定化への貢献度は大き

く、同じ商品区分に位置する商品の中でも一般送配電事業者からのニーズは大きいと考えられるため、揚水発電の価値の見える化が重要と考える。

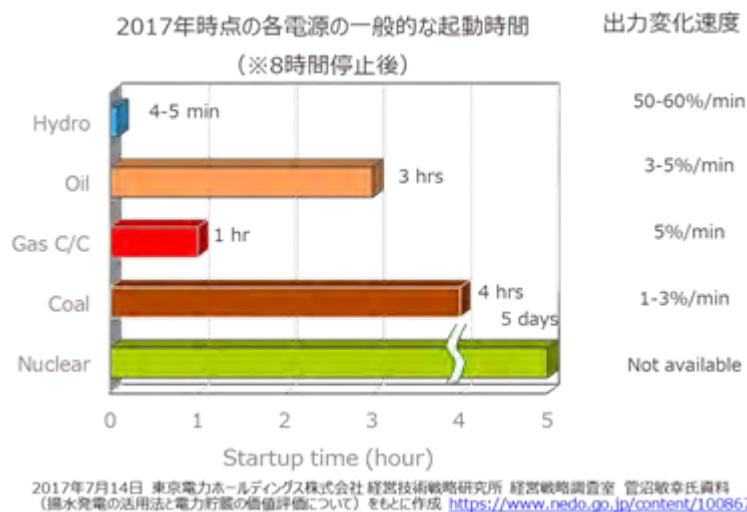


図 3.1-6 揚水発電の出力変化速度

また、水力発電や揚水発電の運用変更、新規導入に当たっては、ダム運用、河川水の使用変更、河川や地域環境への影響評価などの規制、制度が絡み、経済産業省、国土交通省、農林水産省、環境省や地方自治体との調整も必要と考えられる。この辺りの整理も必要となる。

4. 産業競争力強化のための提言

エネルギー基本計画において、2020 年 10 月に表明された「2050 年カーボンニュートラルの実現」および 2021 年 4 月に表明された「2030 年の CO2 排出量を 46%削減、更に 50%の高みを目指して挑戦を続ける新たな削減目標の達成」に向けたエネルギー政策の道筋を示すことが重要とされている。

しかし、2021 年 7 月に発表された「エネルギー基本計画（素案）」において、再エネの 1 つである水力発電、および、変動性再エネの大量導入に欠かせない調整力の供給が可能である揚水発電に関し、その重要性は示されているものの、活用、導入促進に向けた具体策が示されておらず、十分な議論がなされていないように見受けられる。

世界的にみると、欧米では、国家レベルでカーボンニュートラルに向けて、水力発電や揚水発電の役割は重要であることをまとめた調査報告書が最近発行され、また、その導入や活用の促進策の検討や実証検証プロジェクトが推進されている。

制度、規制に関しては、日本において、既に市場化されている卸電力市場、非化石取引市場、一部市場化されている需給調整市場や容量市場に関しては、引き続き議論が行われている。また、議論が始まっている統合コストの考え方や、慣性力、同期化力、無効電力供給力等の系統安定度に関する制度、カーボンプライシングなどは、水力発電や揚水発電の評価を高める可能性がある。

上記を踏まえ、関係省庁におかれては、カーボンニュートラルに向けて水力発電や揚水発電の出来得ることを検討するとともに、導入や活用促進するための施策や制度、規制に関して協議させて頂ける場を設けて頂くことをお願いしたい。

今後、本プロジェクトでは、EU の XFLEX HYDRO PROJECT を範とした実証検証プロジェクトや合理的評価手法を確立するための「国プロ」の提案を目指している。提案の際には、そのご支援をお願いしたい。

制度や規制に関しても、提言の可能性を探っていくので、提案の際には、ご検討をお願いしたい。また、制度や規制が府省をまたがる場合には、調整をお願いしたい。

5. 今後の活動について

本プロジェクトは、本年より2年計画で検討を進めている。

2年間の概略スケジュールは以下を予定している。

1年目：①ベンチマーク調査、②日本としての課題整理、③課題の解決案検討・評価

2年目：④課題の解決の具体策検討、⑤実証プロジェクトあるいは経済性を含めた検証方法の立案

また、本年のスケジュールは以下の通りとしている。

これまでの検討において、水力発電、揚水発電の置かれている現状と課題を整理し、世界の事例、日本の制度、制約を調査したが、府省との関連性を含め、更に調査を行っていく。

世界の事例は、そのまま日本に当てはめられるとは限らないことは課題である。そのため、日本と制度の近い国々の事例を参考にし、日本において、カーボンニュートラルを実現するために、水力発電、揚水発電が出来得ることを立案し、その効果を評価するための実証プロジェクトの組成を検討していく。また合理的な評価手法に関する研究の必要性についても議論していく。

	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
プロジェクト会議	第1回キックオフ ▼	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	
成果報告			中間報告案作成 中間報告提出▽ 中間報告公開▽				最終報告案作成 最終報告提出▽ 最終報告公開▽			
COCN行事					府省別懇談会▽		全体会議（大臣・国会議員）▽			
(1)技術・システム課題整理										
①海外施策調査・日本の課題整理		(1)-①								
②経済性評価法調査・課題整理		(1)-②								
③課題具体策案の検討・提示					(1)-③					
(2)制度・規制課題整理										
①制度・関連規制調査・課題整理		(2)-①								
②制度・規制緩和策検討・評価					(2)-②					

参考文献

1. NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版、NEDO、2014年2月
2. 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会（第46回会合）資料2 エネルギー基本計画（素案）、経済産業省 資源エネルギー庁、2021年7月
3. 長期エネルギー需給見通し、経済産業省、平成27年7月
4. 第61回 調達価格等算定委員会 資料1 国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案、経済産業省、2020年9月
5. 令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）、経済産業省 資源エネルギー庁、2021年6月
6. Hydropower Special Market Report: Analysis and forecast to 2030, IEA, June 2021
7. Valuing Flexibility in Evolving Energy Markets: Current Status and Future Outlook for Hydropower, IEA, June 2021
8. World Energy Outlook 2020 says Covid response can reshape the future of energy, with renewables taking centre stage, waterpowermagazine.com, Oct. 2020
9. Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050, IRENA, April 2020
10. Pumped storage development in Europe, waterpowermagazine.com, October 2020
11. U.S. Hydropower Market Report, DOE, Jan. 2021
12. Pumped storage hydro, utility-scale batteries return about 80% of the electricity they store, Hydro Review, 2021.2
13. The North American Renewable Integration Study: A U.S. Perspective, NREL, June 2021
14. The North American Renewable Integration Study: A Canadian Perspective, NREL, June 2021
15. REPORT SUMMARY FLEXIBILITY, TECHNOLOGIES AND SCENARIOS FOR HYDROPOWER, XFLEX HYDORO
16. D2.1 Flexibility, technologies and scenarios for hydro power, XFLEX HYDORO, Nov. 2020
17. Why spin a turbine without generating power?, Drax.com, Feb. 2020
<https://www.drax.com/power-generation/why-spin-a-turbine-without-generating-power>
18. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential, Renewable Energy, Volume 162, December 2020, Pages 1415-1427
19. Energy Storage Technology and Cost Characterization Report, DOE, July 2019
20. Projected Costs of Generating Electricity 2020, IEA, December 2020
21. Oliver Schmidt, Sylvain Melchior, Adam Hawkes, Iain Staffell, "Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies", Joule, Volume 3, Issue 1, 2019, Pages 81-100, ISSN 2542-4351
22. 資源エネルギー庁総合資源エネルギー調査会、第48回基本政策分科会資料1、2021年8月
23. State of Charge: Energy Storage in Latin America and the Caribbean, IDB, May 2021
24. GenCost 2020-21 Consultation draft, CSIRO, 2020.12
25. 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment, DOE, December 2020
26. International Forum on Pumped Storage Hydropower Executive Summary, September 2021

一般社団法人 産業競争力懇談会（COCN）

〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2－2－1

日本プレスセンタービル 4 階

Tel : 03-5510-6931 Fax : 03-5510-6932

E-mail : jimukyoku@cocn.jp

URL : <http://www.cocn.jp/>

事務局長 山口雅彦