

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

日本における蓄電池システムとしての 揚水発電のポテンシャルとコスト（Vol.4） －気候変動に対応した提案－

令和 4 年 3 月

Potential Capacity and Cost of Pumped-Storage Power in Japan (Vol. 4):
Proposals for Climate Change

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2021-PP-04

概要

太陽光発電や風力発電などの変動する再生可能エネルギー（VRE）の年間発電量に対する割合が我が国をはじめ各国でも増えており、今後電力系統の安定化のため、電力貯蔵および調整機能として揚水発電や蓄電池の重要性が注目されている。LCS では、これまで下池として既存の多目的ダムを活用した小規模の分散した安価な新揚水発電を提案してきた。2020 年の提案書では新揚水発電所ポテンシャルやコストの精度を高めるため、実際の地形等に基づき全国の開発可能な蓄電設備可能容量と発電コストを種々の条件で計算した。その結果、実質的に開発可能な年間蓄電可能容量のポテンシャルは 180 ～ 420 TWh/ 年、発電コストは 19 ～ 21 円 / kWh であり、新揚水発電は将来の有力な蓄電システムであることを示した。

本提案書では、今後の気候変動の影響で洪水や渇水が現状の 2 倍の頻度で生じる可能性がある予測に鑑み、政府が実施している防災対策に沿って新揚水発電の仕様を見直した。その結果上池の貯水容量を増やすことなどで、政府の防災対策の一つであるダムの嵩上げに匹敵する機能が期待でき、その工事費はダムの嵩上げ工事費の 40% 減であった。

これらの見直しで年間蓄電可能容量のポテンシャルは 2020 年提案書の 1.7 倍の 700 TWh/ 年に増量できた。また、全国に広く分布する新揚水発電の揚水用電源として、今後開発可能な太陽光発電と風力発電のポテンシャルと分布状況を調べた結果、新揚水発電のポテンシャルの約 8 倍のポテンシャルがあり、分布も新揚水発電と同様各地域に広く分散しており、今後、送電線網や配電システムを構築すれば、新揚水発電を十分活用できることが分かった。

Summary

The ratio of variable renewable energy (VRE), such as solar and wind power generation, to annual power generation is increasing in Japan and other countries, and the importance of pumped storage power generation and storage batteries as power storage and regulation functions is attracting attention as a means of stabilizing the power system in the future. LCS has proposed small-scale, distributed, and inexpensive new pumped storage power generation utilizing existing multipurpose dams as lower ponds. In the 2020 proposal, in order to improve the accuracy of the potential storage capacity and cost figures for the new pumped storage power generation plant, the nationwide potential storage capacity that can be developed and the power generation cost were calculated for various conditions based on the actual topography, etc. As a result, the annual potential storage capacity that can be practically developed is 180 to 420 TWh/year, and the power generation cost is 19 to 21 JPY/kWh, indicating that the new pumped storage power generation is a promising power storage system for the future.

In this proposal, the specifications of the new pumped storage power generation plant were reviewed in line with the disaster prevention measures implemented by the government, in light of the prediction that floods and droughts may occur twice as often as they do currently owing to the climate change in the future. As a result, by increasing the water storage capacity of the upper pond for example, a function comparable to the raising of dam bodies, which is one of the government's disaster prevention measures, could be expected, and the construction cost would be 40% less than the construction cost of raising the dam body.

Through these reviews, the annual potential storage capacity could be increased to 700 TWh/year, which is 1.7 times the 2020 proposal. In addition, as a result of the investigation into the potential and distribution of solar and wind power generation that could be developed in the future as power sources for pumping water for the new pumped storage power generation that is widely distributed throughout the country, the potential is about eight times greater than that of the new pumped storage power generation, the distribution is widely dispersed in each region as the new pumped storage power generation, and it was found that the new pumped storage

power generation can be fully utilized if a transmission line network and a distribution system is constructed in the future.

目次

概要

1. 緒言 1

2. 方法 3

 2.1 流域治水プロジェクトの現状 3

 2.2 新揚水発電設備の治水・利水への適用 4

 2.3 新揚水発電所の仕様の改善 5

3. 結果と考察 7

 3.1 仕様の変更 7

 3.2 ポテンシャルとコスト 7

 3.3 ポテンシャル増量の可能性（オプション条件） 9

 3.4 ダム嵩上げ工事との比較 11

 3.5 揚水用電力の確保と太陽光 / 風力発電のポテンシャル分布 11

 3.6 新揚水発電所開発の今後の課題 14

4. まとめ 15

5. 政策立案のための提案 15

参考文献..... 17

1. 緒言

2021年10月、政府による第6次エネルギー基本計画[1]が示された。その概要は、2050年にカーボンニュートラルを目指すべく、途中地点の2030年には温室効果ガス排出量46%削減（2013年比）および再生可能エネルギーの比率を36-38%とするなど目標値を前基本計画よりも引き上げた。目標の方向性は評価できるが、欧州各国の目標には及ばず、さらに2050年の電源構成の具体的な目標が記されていないことや実現のための課題が多いことなどが指摘されている[2]。いずれにしても、2050年に向けて再生可能エネルギーが主要電源化されていくことになるが、日本でポテンシャルの多い太陽光発電と風力発電は典型的なVRE電源でありその活用には十分な電力調整機能を持つ蓄電池や水素などのエネルギー貯蔵設備が不可欠である。蓄電池や水素技術への期待は大きいもののコストや安全性確保の課題もあり改善の余地がある。LCSではエネルギー貯蔵設備として既存の多目的ダムを活用した新揚水発電を提案しており、蓄電池などとともに適材適所で活用すべきと考えている。新揚水発電は前年までにポテンシャルやコストについて詳細に検討してきたが[3-5]、ダムを活用する以上、将来の気候変動の影響を考慮して、特に昨今の異常気象に対応した治水/利水計画に沿った検討が必要である。IPCCでは既に、2011年発行の“IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”のなかで、『気候に適応した水管理の必要性』を訴えており、気候変動は多くの国において極端な洪水や旱魃の頻度の増加に繋がり、エネルギーのみならず水資源管理の不確実性が増すとしている[6]。そして、気候変動に適応した水管理の必要性のため、水力システムは将来の多目的水インフラの重要な構造物と位置付けている。また、我が国では国土交通省が2021年3月、全国109の1級水系全てにおいて『流域治水プロジェクト』を策定・公表し、『流域治水』の現場レベルでの取り組みをスタートした[7]。これは昨今の激甚化した水害に対応するため、これまでの河川管理者が主体の治水対策に加え氾濫域も含めて一つの流域として捉え、あらゆる関係者が協議し、流域全体で水害軽減に取り組むプロジェクトである。

LCS提案の新揚水発電も既存のダムを活用する以上、この流域治水に沿う必要があり、本報では以下を提案する

- ① 新揚水発電が再生可能エネルギーの貯蔵や調整機能だけでなく、気候変動による災害の軽減にも資する提案であることを示す。
- ② 洪水だけでなく、旱魃にも有効であることを示す。また、これらの検討の中で可能な限り蓄電容量増量の可能性を検討する。
- ③ 揚水用の電力として、主に太陽光発電の余剰電力利用の可能性を示す。
(今後開発可能な太陽光発電の設置場所の分布と揚水発電所建設候補地の分布との関連を示す。ただし、適切な送電網の構築が条件となる。)

なお、図1到新揚水発電の模式図を、表1到新揚水発電所の基本仕様を示す（2020年度提案書[5]と同じ）。

(1) 全体図

多目的ダムのダム湖を下池として利用する [5]。下池の規模や立地により、設置できる新揚水発電所は1基から約150基とばらつく。



(2) 新揚水発電所1基

上池、管水路、発電所からなる。

上池：落差 200 m の台地を造成、掘削して建設

工事用道路：上池と発電所に通じ、保守用道路としても利用

管水路：地表から浅い場所に埋設

発電所建屋：ダム湖畔を造成して建設、内部にタンデム型水車/発電機を設置

下池：既存の多目的ダム湖を利用

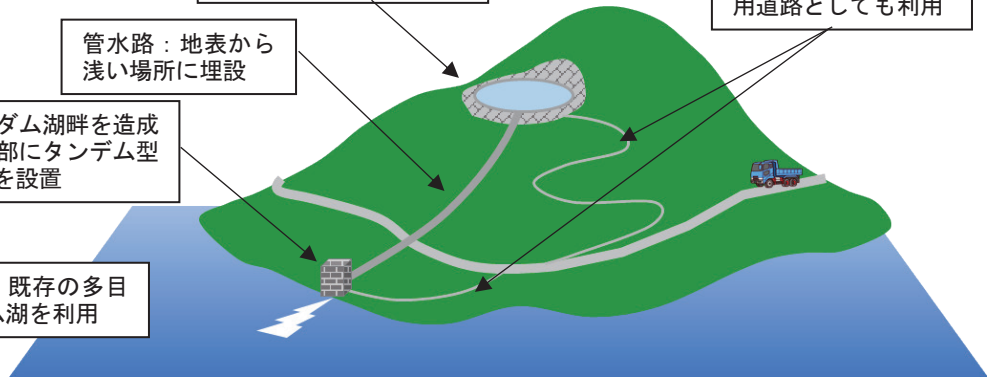


図1 新揚水発電所の模式図

表1 新揚水発電所の基本仕様 (詳細は2019年度提案書 [4] 参照)

項目	内容
水車 ポンプ 発電電動機	タンデム型水車ポンプ 可変速発電電動機
上池の貯水容量 V_u ($\times 10^3 \text{ m}^3$ /基)	131 (61 MWh/基/回 (5h) 相当分)
流量 (m^3/s)	7.3 (総合効率85%のとき)
有効落差 (m)	200
上池と下池の距離 (m)	1500以内
設備容量 (MW/基)	12.1 (総合効率85%のとき)
蓄電設備可能容量 (MWh/基/回 (5h)/日)	61 (総合効率85%のとき)
有効貯水容量 V_{L0} ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	各ダムの利用可能な最大貯水容量
可能貯水容量 V_{L1} ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	各ダムの有効貯水容量の20%
各ダムの蓄電設備可能容量 (MWh/ダム/回 (5h)/日)	$61 \times V_{L1} / V_u$
各ダムの年間蓄電可能容量計 (MWh/ダム/回/年 (300日))	$61 \times V_{L1} / V_u \times 300$
全国の年間蓄電可能容量計 (MWh/全ダム/回/年 (300日))	$\Sigma (61 \times V_{L1} / V_u \times 300)$

2. 方法

2.1 流域治水プロジェクトの現状

2.1.1 気候変動を踏まえた計画へ見直し

国土交通省は今後の治水計画を、従来の「過去の降雨実績に基づく計画」から「気候変動による降雨量の増加などを考慮した計画」に見直した。その結果、表2のような影響があると計算されている[8]。これは、現在の降雨量を基準にした場合の2050年頃の降雨量の変化倍率から洪水の流量や洪水の発生頻度の変化を計算した結果である(気温2℃上昇の場合)。その影響は大きく、雨量の変化は1.1倍程度であるが、治水計画の目標とする規模(年超過確率1/100)の洪水の流量の変化倍率は約1.2倍になり、その規模の洪水の発生頻度は約2倍になる。

表2 降雨量、流量の変化倍率と洪水発生頻度の変化(近年と2050年頃の比較)

	降雨時	流量	洪水発生頻度
気温2℃上昇	約1.1倍	約1.2倍	約2倍

- ・降雨量の変化倍率が1.1倍であるが、治水計画の目標とする規模(年超過確率1/100:その規模を超過する洪水が平均して100年に1度の割合で発生することを示す)の洪水の流量変化は約1.2倍になる。
- ・現在の河川計画で目標としている降雨量や流量では、その規模の洪水の発生頻度は約2倍になる。

2.1.2 気候変動とダム

一方、気候変動の影響は洪水のみならず渇水のリスクもあり得る。小島ら[9]は気候変動に伴う各ダムの流況変化を予測し、対策に必要なダムを調べた結果、全国のダムの約90%に何らかの影響緩和策を図る必要があるとしている。具体的な運用方法はハード面の対策としてダムの嵩上げ工事で貯水容量を増すことなど、またソフト面の対策として事前放流などであるが、それぞれ課題はあるものの、国土交通省の流域治水プロジェクトの対策案としては採用されている。

2.1.3 流域治水プロジェクト

流域治水プロジェクトは国土交通省各地方整備局が当該河川流域について関係者が協働して、水害を軽減させる協議会を設立し、治水対策を計画的に推進するためのものである。すなわち、流域治水プロジェクトは表2に示す予測される気候変動の脅威に対し、不確実性もあるため必ずしも回避できる対策を示すものではないが、水害等を可能な限り軽減させる対策をまとめたものである。2021年3月に全国の109の1級水系と12の2級水系で策定・公表されているが、内容は河道掘削、雨水貯留槽整備、利水ダムの事前放流、ダム再生(長寿命化や嵩上げなど)、ダム新設、砂防、森林整備など、共通する対策があげられている。ここでは109の1級水系について策定された対策を分析し、新揚水発電がこれらの対策と同等の効果を発揮できる設備になり得ることを示す。

図2は109の1級水系の流域治水プロジェクトで策定された治水対策とその採用割合を対策別にまとめたものである([7]を元にLCS作成)。

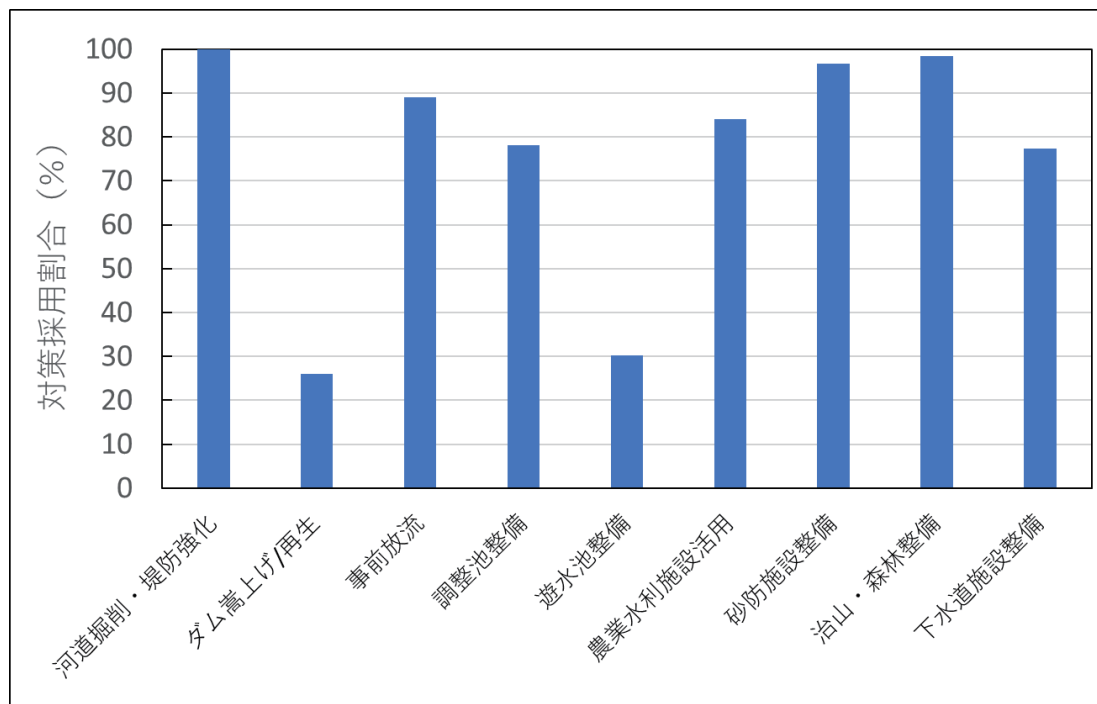


図2 全国109の1級水系（119河川）の各治水対策とその採用割合（%）
〔7〕を元にLCS作成）

全国の109の1級水系で計画されている流域治水対策の内、河道掘削、砂防施設整備、治山・森林整備計画などは95%以上の河川で実施予定である。ダム関連の対策では対象流域内のダムによる事前放流が最も多く、約90%の河川で計画されている。しかしダムの嵩上げや、新設ダム建設などは30%以下と少ない。ダムの嵩上げは、貯水容量の追加を低コストで実施できる有効な対策とされているが、元のダムの構造や地形などによって方法やコストが異なり、全てのダムに適用出来るわけではない。また、事前放流は、ダムのハード面の改造は基本的に不要ではあるが現状では気象予測が難しく、放流後に予報通りの雨が降らない場合は利水分の補償をする必要があるうえ、ダムによっては排水用の設備の追加工事が必要な場合もあり、具体的な実施には課題も多い。

以上を勘案すると、新揚水発電所の建設は、上池が調整池の追加に相当するため、将来の電力調整用貯蔵機能だけではなく異常気象時の治水・利水機能も有し、流域治水プロジェクトの対策の一つであるダム嵩上げと同等以上の対策になり得る。

2.2 新揚水発電設備の治水・利水への適用

新揚水発電は図1に示すように下池としての既存の多目的ダム、ダム周辺の高台に設けられた上池、およびダム湖岸に建設された発電所と圧力配管により構成されている。通常は下池より上池へ揚水された水量を必要時に発電所の水車に放流して発電することにより、VRE電源などの調整を行うが、上池に大きな容量を持たせることにより、ダムの治水・利水の観点からは下池である既存の多目的ダムの貯水量の一部を下流へ排水することなく、上池へ移動させることができる。すなわち揚水発電所の建設は、運用上の工夫で揚水発電の機能に加え、既存ダムの嵩上げと同等の貯水容量増加と排水機能を持つことになり治水・利水に資することができる。この方法は既に既存揚水発電所でも、効果の検証された事例もある[10]。以下にその一例として既存の揚水発電所の治水運用事例（京都府宇治市喜撰山発電所）の概要を示す。

喜撰山発電所は上池に喜撰山ダム（有効貯水量 $5,326 \times 10^3 \text{ m}^3$ ）、落差 219 m、水量 $240 \text{ m}^3/\text{秒}$ 、下池に天ヶ瀬ダム（有効貯水量 $20,000 \times 10^3 \text{ m}^3$ ）を持つ大規模な揚水発電所であり、最大出力は 460 MW である。揚水発電として利用する上池の有効貯水量は下池有効貯水量の約 27% であり、新揚水発電と規模は異なるが上池貯水量の下池貯水量に対する比率はほぼ同等である。国土交通省近畿地方整備局が検証した運用方法は、以下のとおりである。

① 上池の残量を放流 / 発電し、上池を空にする。

（下池が満水に近い時は事前放流などで下池の容量を空けておく）

② 豪雨が降り、下池の貯水量が増え始めて洪水の可能性が高まったら上池へ揚水し、下池の水位上昇を遅らせることにより、下流への洪水を軽減する。

この揚水発電所のポンプは揚水速度を制御できないポンプであるなど、運用上の制約はあるものの洪水の条件を変えても一定の洪水軽減効果があることが検証できたとしている。また、運用においてはいくつかの課題もあることから現時点（平成 21 年検証時）では治水計画に含めることはできないが、国土交通省は緊急時の対応策として設備所管の電力会社に協力要請をしていくとしている [10]。

本事例は、約 10 年前の事例で、既存の揚水発電設備を使った検証ではあるが、上池へ揚水し、池のダムの水位上昇を抑えることで下流の洪水を軽減できることを検証できた意義は大きい。

そこで、本提案ではこれまでの新揚水発電の仕様の一部を変更することで、利水量を変えずに治水容量を増し、洪水を軽減できる方法を提案する（図 3）。

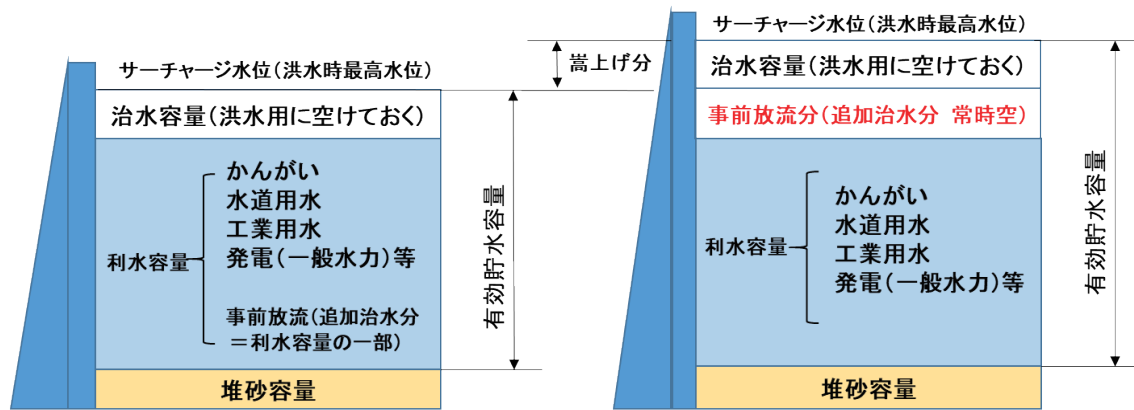
2.3 新揚水発電所の仕様の改善

(1) 図 3 (a) に一般的な多目的ダムの貯水量の容量配分を示す。通常多目的ダムは治水容量分（空）と利水容量を加えた有効貯水量を持っている。この場合利水容量の一部を事前放流分として洪水時に下流へ放流し、洪水を軽減するのが事前放流である。事前放流する場合は利水者との事前の合意が必要で、放流後に利水容量が回復しない場合は補償が必要となる。

(2) 図 3 (b) に嵩上げ工事をした場合を示す。事前放流分を嵩上げした場合、治水容量が増えるため、事前放流もその合意も不要となる（ただし、嵩上げによる容量増加分まで）。

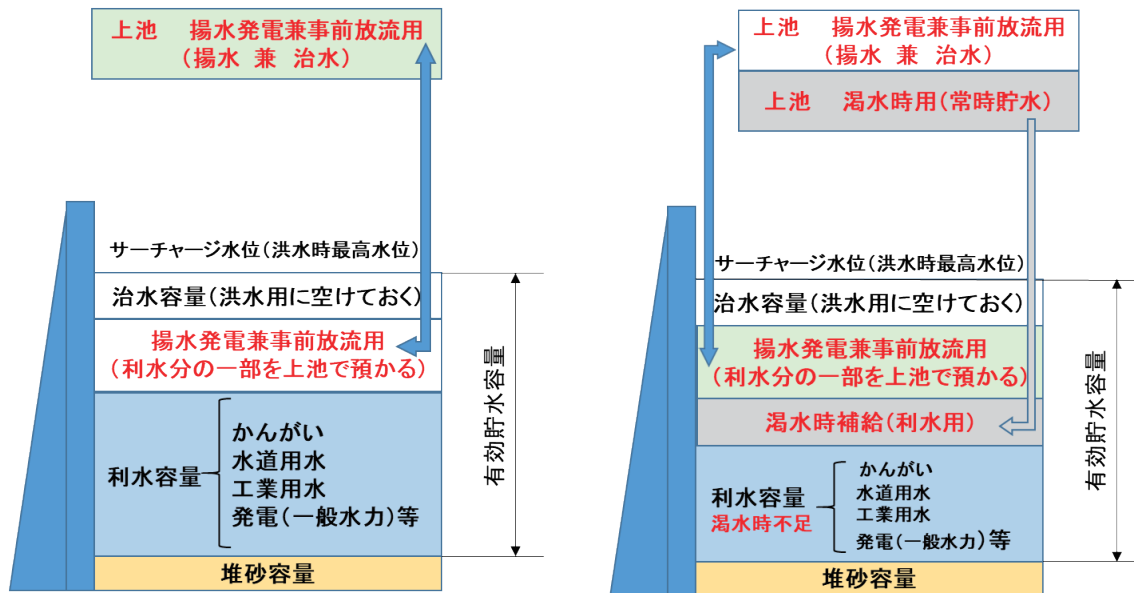
(3) 図 3 (c) に嵩上げ工事なしで、揚水発電の上池を利用する場合を示す。すなわち、事前放流分を揚水容量分とし、上池に揚水（一時貯水）することで事前放流相当分の治水効果確保と揚水発電を行えるようにする。通常時はこの揚水容量（事前放流分）を上下させることで揚水発電を稼働できる。洪水時は揚水発電を停止し、この揚水容量を上池へ揚水して下池の治水容量を増やすことで嵩上げと同等の治水機能を発揮できる。この揚水容量は下流へ放流しないため、洪水後はダム水量を元通りに調整可能である。通常時と洪水時はこれで対応できるが、渇水時や緊急に利水容量が必要になった場合は利水容量が不足し揚水発電が十分できないため、図 3 (d) のようにする必要がある。

(4) 図 3 (d) に洪水時だけでなく渇水時や緊急に利水分が必要になった場合にも対応できるように上池の貯水容量を増設した場合を示す。早魃等で利水容量が不足した場合に備え、上池に例えば揚水容量と同程度貯水できる容量を増設し、常時貯水しておく。渇水時に下池であるダムへ補給し被害を軽減できる。揚水発電用とは別の貯水量であるため、ある程度渇水時でも揚水発電ができるが、状況により揚水発電用と渇水時用相互に融通が可能である。この渇水時用の貯水分は揚水発電の動作により貯水分が下池の水量と入れ変わるため滞留せず水質は保たれる。



(a) 多目的ダムの典型的な容量配分例 (現状)

(b) 事前放流用を追加の場合 (常時空 要ダム嵩上げ)



(c) 揚水発電の上池を利用する場合

(d) 揚水発電の上池に渇水時貯水容量を設けた場合

図3 一般的な多目的ダムの貯水量の容量配分

以上のように、新揚水発電は仕様を図3(d) のようにすることで、ダムの嵩上げ工事なしで治水 / 利水 / 揚水発電ができるため、将来の気候変動に対応する電力貯蔵やVRE電源の調整に加え、防災・減災にも資する電力貯蔵方式となり得る。また、ダムの嵩上げ工事について、排水設備がないダムには排水設備工事が必要であるが、新揚水発電は揚水ポンプ機能もあり、新たな排水設備は基本的に不要であるため、コスト面でも有利である。

3. 結果と考察

ここでは、前項で示した気候変動に対応した新揚水発電所のポテンシャルとコストを示す。そのうえで、さらにポテンシャルを増量する可能性についても考察する。

3.1 仕様の変更

上池の貯水容量を検討するにあたり、全国の多目的ダムの貯水率（利水容量と有効貯水量の比）の現状を調査した結果、貯水率の低いダムではおおむね 50 ～ 60%程度であった [4]。前記図 3 (d) のように渇水用貯水容量を上池に建設する場合は揚水発電用 + 渇水用貯水量の合計はこの範囲に収めるものとする（上池の貯水量は既存の当該ダムの貯水率以下とする）。ここでは上池の貯水量（合計）を下池となる多目的ダムの有効貯水量の仮に 50%とする（揚水発電用を 25%、渇水用貯水量を 25%）が、地域状況により適切に設定する。また、できるだけ発電ポテンシャルを多くするため落差を現状 200 m から 250 m に増す。これらをまとめると本提案書の新揚水発電の基本仕様は表 3 のようになる。

表 3 本提案書の新揚水発電の基本仕様

（蓄電ポテンシャル増量のため上池貯水容量の増量や落差の拡大により表 1 の仕様を更新）

項目	内容
水車 ポンプ 発電電動機	タンデム型水車ポンプ可変速発電電動機
上池の発電用貯水容量 $V_u (\times 10^3 \text{ m}^3/\text{基})$	164 (95 MWh/基/回 (5h) 相当分)
上池の渇水時貯水容量 $V_{u2} (\times 10^3 \text{ m}^3/\text{基})$	164(渇水時発電コストに含めず)
流量 (m^3/s)	9.1 (総合効率 85%のとき)
有効落差 (m)	250
上池と下池の距離 (m)	1,500 以内
設備容量 (MW/基)	19 (総合効率 85%のとき)
蓄電設備可能容量 (MWh/基/回 (5h)/日)	95 (総合効率 85%のとき)
有効貯水容量 $V_{L0} (\times 10^3 \text{ m}^3)$	各ダムの利用可能な最大貯水容量
可能貯水容量 $V_{L1} (\times 10^3 \text{ m}^3)$	各ダムの有効貯水容量の 50%
各ダムの蓄電設備可能容量(MWh/ダム/回 (5h)/日)	$95 \times V_{L1}/V_u$
各ダムの年間蓄電可能容量計(MWh/ダム/回/年(300 日))	$95 \times V_{L1}/V_u \times 300$
全国の年間蓄電可能容量計(MWh/全ダム/回/年(300 日))	$\Sigma(95 \times V_{L1}/V_u \times 300)$

3.2 ポテンシャルとコスト

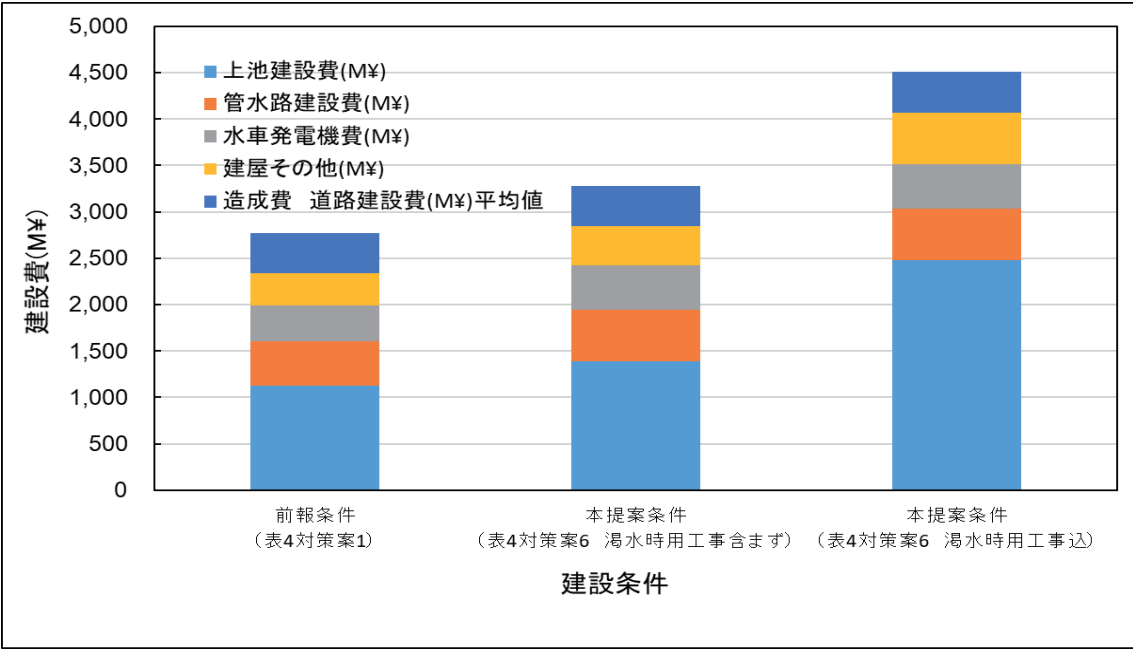
表 3 の新揚水発電の日本全国のポテンシャルおよび 1 基当たりの設備コストと発電コストを表 4 に示す（ポテンシャル計算方法は前報 [5] と同じで条件比較のため結果を併記。コスト計算方法は前報 [4] と同じ。ただし、上池建設費の渇水時に備えた容量拡大分の建設費は発電用コストに含めないことを基本とする）。

表4 新揚水発電所の条件による蓄電可能容量とコストの関係

対策案		地形条件の考慮の有無 条件/課題	A. 有効貯水 容量利用率 (%)	B. 巨大 ダム利 用(有効 貯水容量 1億m ³ 以 上)	C. 設備 コスト (円/Wh)	D. 発電 コスト(円 /kWh)	E. 蓄電 設備可 能容量 (MWh/基 /回/日)	F. ダム 数	G. 設置可 能な上池 数	H. 蓄電 設備可 能容量 全国合 計 (GWh/ 回/日)	I. ダム 平均蓄 電設備 可能容 量 (GWh/ダ ム/回/日)	J. 年間 蓄電可 能容量 全国合 計(TWh/ 年)
前 報 条 件 「 5 」	0	無(貯水20%をすべて揚水発電 で利用可能とし、全揚水発電所を 同規格で建設、2019年度提案書 [6]対策案A案)	20	無	45	20	61	1,000	14,900	910	0.9	270
	1	有	20	無	45	21	61	930	9,640	590	0.6	180
	2	有	30	無	35	19	91	930	9,640	880	0.9	260
	3	有	20	有	45	21	61	960	15,280	930	1.0	280
	4	有	30	有	35	19	91	960	15,280	1,400	1.5	420
	5	有	20、北海道・東 北のみ30	無	41	20	70	930	9,640	660	0.7	200
本 提 案 書 条 件	6	有 2050年 気候変動による災害(洪水・間伐)対策を考慮したもの 発電用水量は25%、落差は25% 増の250mとし設備容量を上記の 約1.5倍とした。 渇水時対策用上池工事費含まず ①内は渇水時対策用上池工事費 を含めた場合 揚水電力費は12円/kWhとした。	25% 上池容量は発電用25% 渇水時対策用 25%合計で50%	有	35 (47)	18 (21)	95	960	15,280	1,450	1.5	440

表4において、本提案（対策案6）における設備コストは35円/Wh、発電コストは18円/kWhであり、前報[5]のいずれの条件よりも低い。これは有効貯水容量利用率が25%で前報の最大条件30%よりも低いものの落差を前報より50m高くし250mとしたためである（落差200～250mが地形上可能であることは前報[5]で調査済み）。この場合の全国の蓄電可能容量は年間440TWhで前報条件よりも多い。ただし、上池建設費のうち渇水時対策用に設けた容量分の工事費は設備コストと発電コストには含めていない（この工事費は発電設備用ではなく渇水時対策用であるため。参考に渇水時用の工事費も含めた場合の設備コストは47円/Wh、発電コストは21円/kWhとなる。（）内に併記する）。

また、これらの建設費内訳を図4に示す。前報では、1基当たり平均約27億円（有効貯水容量利用率20%、落差200m）であった建設費は本提案の条件では約33億円（有効貯水容量利用率25%、落差250m）と高くなるが、発電量が多くなるため設備コスト、発電コストとも低減する。渇水時対策用の上池貯水量増分額は約12億円であるが、本提案書の新揚水発電の建設費にはこの増額分は含めておらず、この増額分を含めると建設費は45億円となる。



	前報条件 (表4対策案1)	本提案条件 (表4対策案6 渇水時用工事含まず)	本提案条件 (表4対策案6 渇水時用工事込)
上池建設費(M¥)	1,130	1,390	2,480
管水路建設費(M¥)	480	560	560
水車発電機費(M¥)	380	470	470
建屋その他(M¥)	340	420	560
造成費 道路建設費(M¥)平均値	440	440	440
合計(M¥)	2,770	3,280	4,510
設備コスト(¥/Wh)	45	35	47
発電コスト(¥/kWh)	21	18	21

図 4 新揚水発電所 1 基の建設費内訳（建設条件による比較）

3.3 ポテンシャル増量の可能性（オプション条件）

前項において、本提案によるポテンシャルとコストを示したが、さらに年蓄電可能容量のポテンシャル増量の可能性をオプション条件として以下に検討する。ただし、実現可能性については今後の課題とし、オプション条件と結果を表 5、建設費等を図 5 に示す。

表 5 年蓄電可能容量のポテンシャル増量可能性検討結果

増量対策案 オプション条件	倍率 条件など	年蓄電可能容量 (TWh)	設備容量 (GW)	設備利用率 (%)
2021 提案書原案	水量 25% 落差 250m	440	290	17
①水量増 25→30%	1.2 倍 渇水対策リスク増	$435 \times 1.2 \div 520$	350	17
②回数 1 回/1 日→1.2 回	1.2 倍 運転方法要工夫	$435 \times 1.2 \div 520$	290	21
③落差 250,300m 半々	1.1 倍 落差 300m 実現率 50%と仮定	$435 \times 1.1 \div 480$	320	17
混合策	—	—	—	—
①+③		580	380	17
②+③		580	320	21
①+②		630	350	21
①+②+③		700	380	21

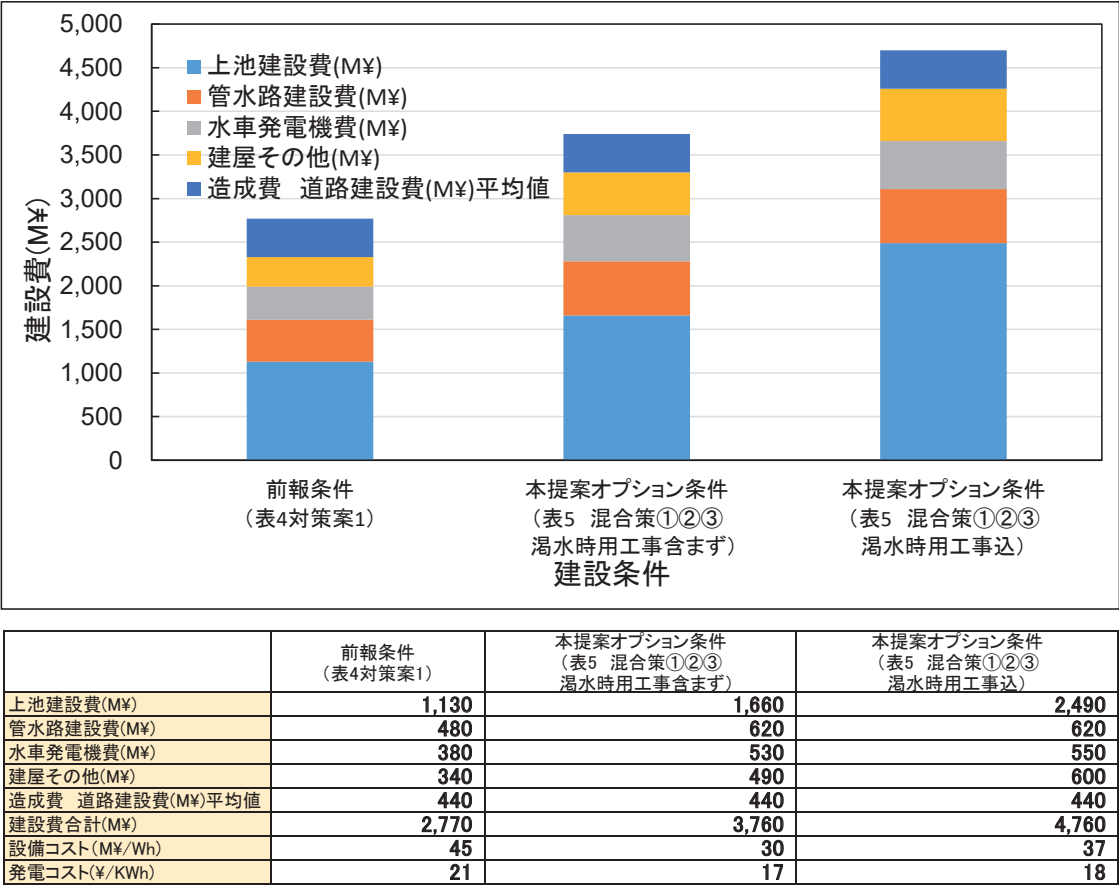


図5 新揚水発電所1基の建設費内訳（ポテンシャル増量可能性条件別検討 参考）

オプション条件として、以下の3案とその組み合わせを検討した。

- ・オプション条件①：上池の貯水量は、下池である既存の多目的ダムの貯水率以上には想定できないため、3.1 項より既存ダム有効貯水容量の 50%を上限とすると、揚水発電用に 30%、渇水時対策用に 20%、上池合計貯水容量 50%とする。これで本提案書の基本仕様の発電用貯水容量を 1.2 倍に増量できる（30% / 25% = 1.2 発電量も 1.2 倍）。ただしこの場合渇水対策用の貯水量は 25 から 20%に減少するため、渇水時の余裕分が減ることになる。
- ・オプション条件②：設備利用率を基本提案の 17%（5 h / 回 / 日）から 21%（6 h / 1.2 回 / 日）に上げ、発電量を 1.2 倍にする。ただし、設備は同じとし、揚水回数を 1 回 / 日から 1.2 回 / 日に変えるため、運転条件（揚水用電力の確保や揚水発電のタイミングなど）を工夫する必要がある。よって発電単価は低下するが、設備単価は変わらない。
- ・オプション条件③：落差を基本提案の 250 から 300 m にすることで、発電量を増やすが 250 m の地点をすべて 300 m に変更することは上池用の適地が減る。落差 300 m の適地数を 250 m の適地数の 50%と仮定すると落差の平均は 250 m → 275 m になるため 10%の発電量増加が見込める。

これらのオプション条件①②③を全て実施すると発電量は本提案基本仕様（表 3）の年蓄電可能容量 440 TWh / 年の約 1.6 倍の 700 TWh / 年に増量可能となる。また建設費は増加するが発電量も増えるため発電単価は約 1 円 / kWh 低下し 17 円 / kWh、設備コストは 5 円低下し 30 円 / Wh となる（上池の渇水時対策用建設費を含めると、それぞれ 18 円 / kWh、37 円 / Wh となる）。

3.4 ダム嵩上げ工事との比較

本提案書では、新揚水発電所の上池の貯水容量を揚水発電に必要な貯水量の約2倍とすることで（本提案書の表4対策案6）、ダムの嵩上げに匹敵するような治水／利水機能を追加している。この場合の建設コストと増加容量について嵩上げ工事との比較を行うと以下になる。

表6は最近のダム嵩上げ工事の事例のまとめである。嵩上げ工事費用と内容の分かる事例は少ないが3例について調べた[11-13]。

表6 ダム嵩上げ工事費と増加貯水量についての新揚水発電追加工事費との比較

ダム名	有効貯水容量 (×1000m ³)	嵩上げ量(m)	総事業費(億円)	増加貯水容量 (×1000m ³)	上池増加容量当 たり工事費(億円 /181×1000m ³)	貯水容 量 増加率 (%)
兵庫県引原	21,950	2	200	900	40	4
岩手県四十四田	35,500	2	300	7,500	7	21
新潟県笠堀	13,300	4	50	1,800	5	14
平均	23,583	2.7	183	3,400	17	13
新揚水上池	181(*1)	標準の倍掘削	12.3	181	12	16(*2)

(*1)：上池の揚水発電に必要な貯水容量の10%増し（余裕分）

(*2)：各ダムに必要な上池の建設可能率65%[5]（25%×0.65≒16%）

表5の事例のように、ダムの嵩上げ工事費は嵩上げ量2m～4mで総事業費は50～300億円と変化するが、これは元のダムの状況や地形によることが大きく影響している。嵩上げ工事により増加した貯水容量の上池1か所の増加容量分に換算した工事費は5～40億円で平均17億円であった。一方、新揚水発電の増加容量に対する上池1か所の工事費の加算分は12.3億円であり、平均値ではあるがダム嵩上げ工事費よりも40%安価であった。またこの嵩上げにより増加できる有効貯水量の増加率は4%～21%で平均13%であった。新揚水発電の上池の増加容量を下池（各多目的ダム）の有効貯水容量の25%とする場合、各ダムの新揚水発電の上池建設可能率が約65%[5]であるため、全国の上池貯水容量の増分は全ダムの有効貯水容量の16.3%（25%×0.65≒16%）であり、ダム嵩上げと同等以上の増分となる。よって、本提案書による上池貯水容量の増加工事による治水／利水対策はダム嵩上げ工事に匹敵する効果があることが分かる。

3.5 揚水用電力の確保と太陽光／風力発電のポテンシャル分布

前項までに洪水や渇水時対応を加味した新揚水発電のポテンシャルと発電コストを示したが、ここでは揚水に必要な電力の確保について可能性を示す。2050年の電源構成としては太陽光と風力発電のポテンシャルが日本に豊富にあり、今後の再生可能エネルギーの主力になると思われるが、そのポテンシャルの分布についてはLCS提案書[14]で示されている。左記の提案書によれば太陽光と風力発電の2050年におけるポテンシャルと本提案の揚水発電のポテンシャルの大きさと分布は図6のような関係にある。太陽光と風力発電の年発電量のポテンシャルは約5,600TWh（風力発電は環境省資料[15]による）で、揚水発電のポテンシャルは約700TWhである。送電線ネットワークの構築と運用上の工夫は必要だが、揚水用の電源は十分確保できることが分かる。

また、図7にはそれらポテンシャルの国内の分布を示す。図7(a)は太陽光発電のポテンシャル分布と新揚水発電のポテンシャルの分布を重ねたもの。図7(b)は（太陽光＋陸上風力）発電のポテンシャル分布と新揚水発電のポテンシャル分布を重ねたものである。いずれも全国に満遍なく分布しており、ネットワークの効率的な構築に適した位置関係にある。

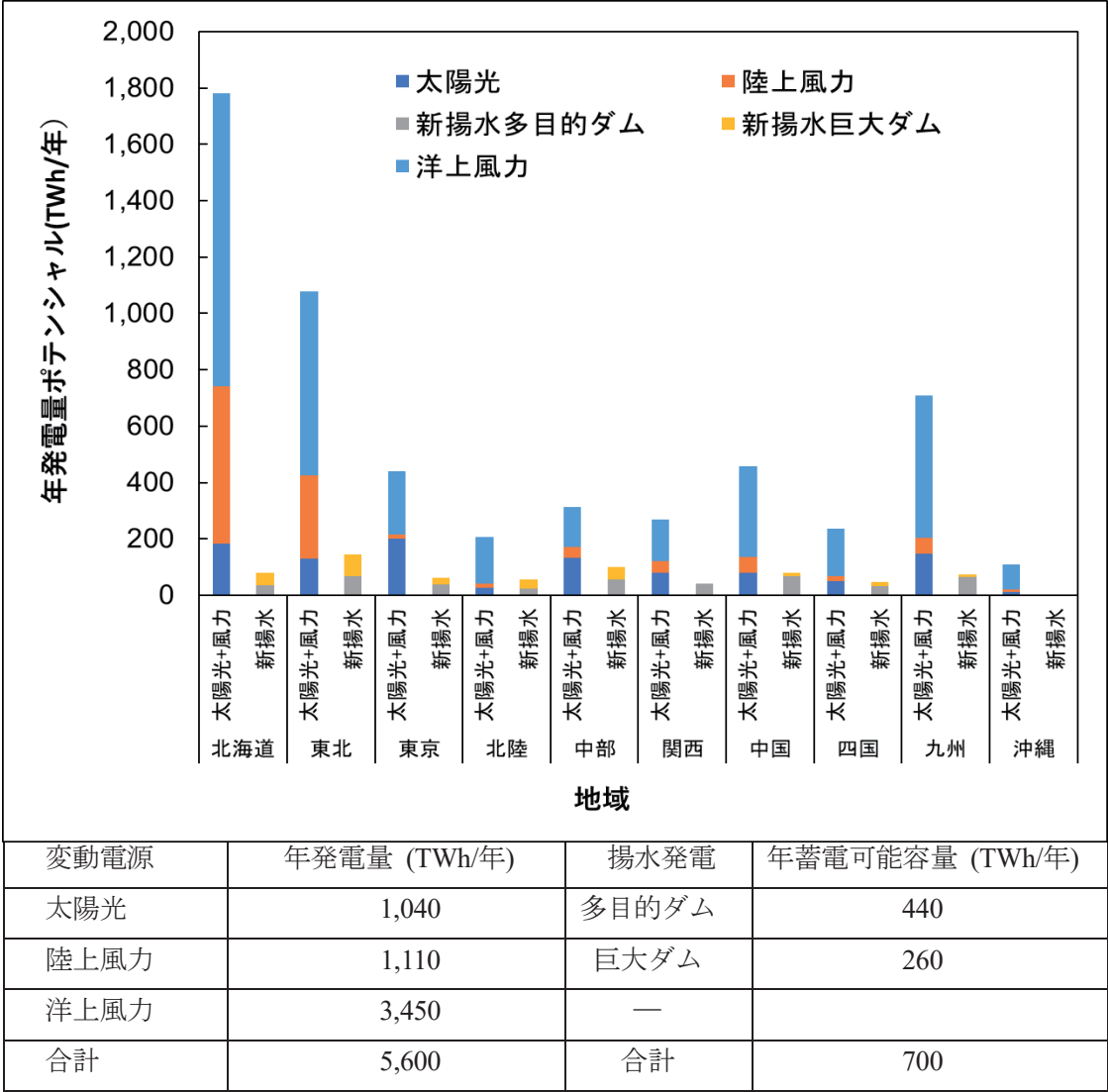
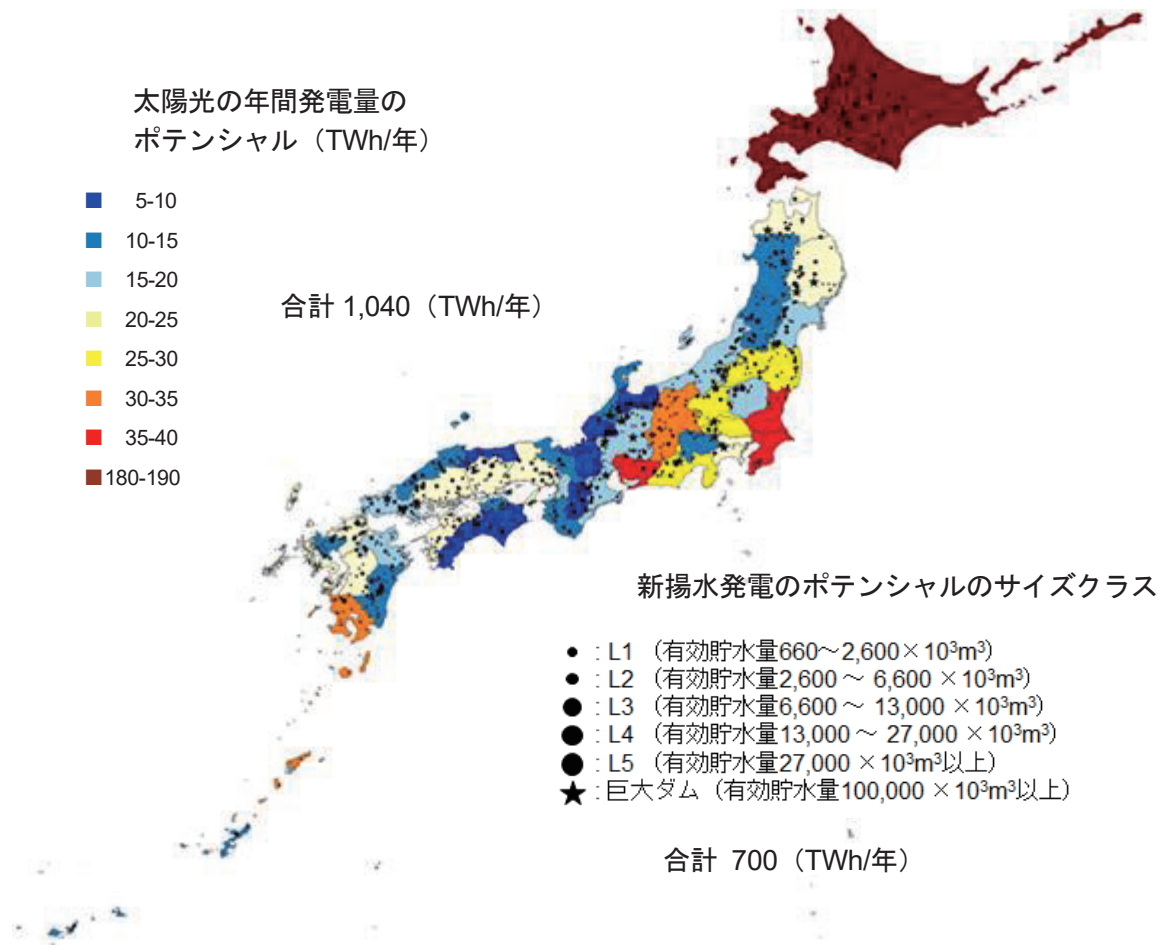


図6 2050年太陽光／風力発電と本提案の新揚水発電のポテンシャル分布と年発電量（[14]より引用）

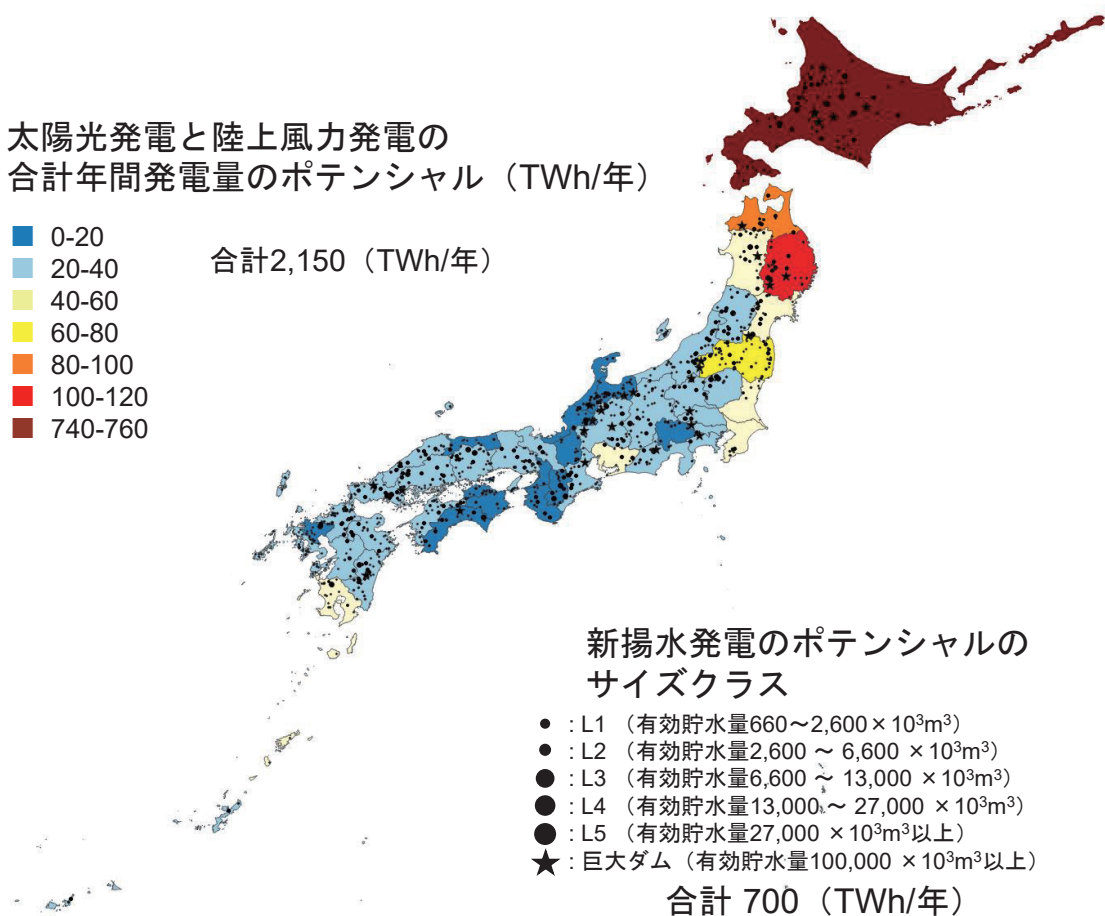


(a) 太陽光発電と新揚水発電のポテンシャルの全国分布状況

太陽光発電と陸上風力発電の 合計年間発電量のポテンシャル (TWh/年)

- 0-20
- 20-40
- 40-60
- 60-80
- 80-100
- 100-120
- 740-760

合計2,150 (TWh/年)



新揚水発電のポテンシャルの サイズクラス

- : L1 (有効貯水量660~2,600 × 10³m³)
- : L2 (有効貯水量2,600 ~ 6,600 × 10³m³)
- : L3 (有効貯水量6,600 ~ 13,000 × 10³m³)
- : L4 (有効貯水量13,000~ 27,000 × 10³m³)
- : L5 (有効貯水量27,000 × 10³m³以上)
- ★ : 巨大ダム (有効貯水量100,000 × 10³m³以上)

合計 700 (TWh/年)

(b) (太陽光 + 陸上風力) 発電と新揚水発電のポテンシャルの全国分布状況

図7 太陽光発電 / 陸上風力発電 / 新揚水発電のポテンシャルの全国分布状況 [15]

3.6 新揚水発電所開発の今後の課題

(1) 前提案書 [5] で示した課題としては以下の3点であった。

- ①送電設備の設置コストの検討。
- ②全国の新揚水発電所の蓄電設備可能容量分布と電力需要分布に応じた、送電システムやネットワーク構築の検討。
- ③ 揚水のための電源のコストや調達方法についての検討。

このうち本報では、②、③について、太陽光、風力発電の発電量ポテンシャルとその分布について示し、十分な揚水電力供給能力と適切な相互の位置関係があることが分かった。今後、送電線周りの建設コストを含めた新揚水発電の総合的コストの評価をする必要がある。

(2) さらに、新揚水発電の仕様については今後の気候変動に対応できるように新たな視点を加えたが、既存の多目的ダムの貯水量を活用する以上、それらの具体的な建設手順などについては、多目的ダムの管理者や治水 / 利水の受益者との防災方法を含めた幅広い意見の集約と総合的な提案が必要である。これらを円滑にもれなくやり遂げるためにも電源構成の確立だけでなく社会全体への影響を考慮しながら計画 / 実行できる組織形成が望まれる。

(3) 送電線ネットワークの構築とその運用ルール（配分、料金制等）や制御方法の確立が必要。

4. まとめ

(1) LCS ではエネルギー貯蔵設備として既存の多目的ダムを活用した新揚水発電の設置や、蓄電池などの活用を提案してきた。新揚水発電は前年までにポテンシャルやコストについて詳細に検討してきたが [3-5]、ダムを活用する以上将来の気候変動の影響を考慮して、特に、昨今の異常気象に対応した治水 / 利水計画に沿った検討が必要である。

(2) 国土交通省では 2021 年 3 月全国 109 の 1 級水系全てにおいて『流域治水プロジェクト』を策定・公表し、『流域治水』の現場レベルでの取り組みをスタートした [7]。これは昨今の激甚化した水害に対応するため、これまでの河川管理者が主体の治水対策に加え氾濫域も含めて一つの流域として捉え、あらゆる関係者が協議し、流域全体で水害軽減に取り組むプロジェクトである。LCS 提案の新揚水発電も既存のダムを活用する以上、この『流域治水』に沿う必要があり、本報ではその対策案を提案した。

(3) 具体的には、上池の貯水容量として、蓄電に必要な貯水容量に加え、治水や渇水時用の水量を貯水できる容量を確保できるように建設することで、ダムの嵩上げと同等の機能を持たせるようにした。

(4) また新揚水発電の蓄電設備可能容量をできるだけ増量できるよう貯水量の増量、落差の最大化、設備稼働率の増加などを可能な範囲で見直し、ポテンシャルの増量を図った結果、新揚水発電の年蓄電可能容量は最大 700 TWh/ 年で、設備コストは 30 円 /Wh、発電コストは 17 円 /Wh (揚水用電力コスト 12 円 /kWh、上池の渇水に備えた拡張分工事費は含めず) となった。

(5) 本報提案の上池の貯水容量に治水 / 利水の容量を持たせる方法は、ダムの嵩上げ工事に匹敵する機能が期待でき、その工事費はダムの嵩上げ工事費程度以下が見込める。よって、本報提案の新揚水発電は新揚水発電建設費にダムの嵩上げ工事費程度を付加することで、将来電源構成に必要な蓄電地の機能と、洪水 / 渇水対策機能を併せ持つことができる。

(6) 揚水用の電力確保は 2050 年には再生可能エネルギー電源から得る必要があるが、新揚水発電所近辺に見込める太陽光発電と、風力発電のポテンシャル (5,600 TWh/ 年) と分布を調べた結果、新揚水発電のポテンシャル (700 TWh/ 年) の分布と同様に全国に満遍なく分布しており送電線の整備と運用ルールの構築は今後の課題であるが各地域とも十分に確保可能であることが分かった [14]。

5. 政策立案のための提案

(1) 本提案書では、2020 年度提案書 [5] の続報として新揚水発電について今後の気候変動の影響を加味した対策について検討を加えた。その結果、2050 年頃には気候変動の影響で洪水 / 渇水が現状よりも約 2 倍の頻度で生じる可能性があり [8]、既存の多目的ダムを活用する新揚水発電においても防災対策を同時に行う必要があることが分かった。国土交通省では防災対策として『流域治水プロジェクト』を策定しており [7] 本提案書もこれに沿って検討した結果、上池の貯水容量を増量することにより、前記プロジェクトの一つである治水 / 利水対策としてのダムの嵩上げと同等の効果が期待できる可能性を示した。

(2) 同時に、新揚水発電の蓄電可能設備容量の見直しも行い、最大で 700 TWh/ 年のポテンシャルがあることを示した。新揚水発電は太陽光や風力発電などの VRE を主とする将来の電源構成に向けた調整用の電力貯蔵設備であるとともに、気候変動による洪水や渇水対策用の設備にもなり得る有望な設備である。

(3) また揚水に必要な電力として、太陽光と風力発電のポテンシャル (最大 5,600 TWh/ 年) [14]

とその分布は新揚水発電のポテンシャル分布と同じく全国に量的にも位置的にも満遍なく分布しており、適切な送電ネットワークの構築とその運用により、将来の主要電源となる太陽光と風力発電などの VRE 電源の調整に貢献できる。

（４）課題としては送電線ネットワークの構築とその運用ルール（配分、料金制等）や制御方法の確立が必要である。

（５）これらを円滑にもれなくやり遂げるためにも今後の電源構成の確立だけでなく社会全体への影響を考慮しながら計画／実行できる実施主体の組織形成が望まれる。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁 HP, “第6次エネルギー基本計画”,
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>, 令和3年10月。(アクセス日
2021年10月28日)。
- [2] 自然エネルギー財団 HP, “第6次エネルギー基本計画(案)の評価点と問題点”,
<https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20210922.php>, (アクセス日2021年10月
20日)。
- [3] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとして
の揚水発電のポテンシャルとコスト”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年
1月。
- [4] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとして
の揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.2)”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター,
2020年2月。
- [5] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “日本における蓄電池システムとして
の揚水発電のポテンシャルとコスト (Vol.3)”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター,
2021年2月。
- [6] IPCC, 2011: “IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”, 5,
Hydropower, http://www.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Ch05.pdf, (アクセス日2021年10月20日)。
- [7] 国土交通省 HP, “流域治水プロジェクト”, https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/index.html, (アクセス日2021年10月20日)。
- [8] 国土交通省 HP, 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会, “気候変動を踏まえた
治水計画のあり方提言”, [https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/04_](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/04_teigenhonbun.pdf)
[teigenhonbun.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/04_teigenhonbun.pdf), 令和元年10月, (アクセス日2021年10月20日)。
- [9] 小島ら, “気候変動がダムの治水・利水機能に及ぼす影響の評価指標化の提案”, 土木学会論
文集 B1 (水工学) Vol.74, No.5, I_1333-I_1338, 2018。
- [10] 国土交通省近畿地方整備局, “「緊急時における喜撰山ダム等の既存設備の有効活用に関する
検討について」の再検討について”,
https://www-1.kkr.mlit.go.jp/river/iinkaikatsudou/yodo_sui/qgl8vl0000007j90-att/090514kisen2.pdf, (ア
クセス日2021年10月20日)。
- [11] 兵庫県県土整備部土木局河川整備課「引原ダム ダム整備事業」,
<https://web.pref.hyogo.lg.jp/ks04/documents/r01-s-04-hikiharadam1.pdf>, (アクセス日2021年10月
20日)。
- [12] 国土交通省東北地方整備局水管理・国土保全局治水課「北上川上流ダム再生事業四十四ダム」,
https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/h3008/pdf/sanko2.pdf, (アクセス
日2021年10月20日)。
- [13] 新潟県概要資料, “五十嵐川災害復旧助成事業における笠堀ダム嵩上げの検証に係る検討”,
https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/h3008/pdf/sanko2.pdf, 平成24年
11月, (アクセス日2021年10月20日)。
- [14] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “国土の有効利用を考慮した太陽光発
電のポテンシャルと分布”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2022年3月。
- [15] 環境省, “令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に
関する委託業務報告書”, P123, 令和2年3月。

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

日本における蓄電池システムとしての
揚水発電のポテンシャルとコスト（Vol.4）
－気候変動に対応した提案－

令和4年3月

Potential Capacity and Cost of Pumped-Storage Power in Japan (Vol. 4):
Proposals for Climate Change

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2022.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 主任研究員 浅田 龍造（ASADA Ryuzo）
研究員 河原崎 里子（KAWARASAKI Satoko）
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ 8 階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2022 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。