

お詫びと訂正

2020年7月31日に発行いたしました本誌「Vol.70, No.1 特集：エネルギー・環境」におきまして、記載に誤りがございましたので以下のように訂正いたします。

ご愛読いただいている皆さま、ならびに関係各位にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。

46ページ 右段下：

『戸島正剛』

誤： 機械事業部門 開発センター 技術開発部

正： 技術開発本部 機械研究所

『久保洋平』

誤： 機械事業部門 開発センター 技術開発部

正： 技術開発本部 機械研究所

(解説)

圧縮空気エネルギー貯蔵システム

猿田浩樹*・佐藤 隆 (博士(工学))・中道 亮・戸島正剛・久保洋平

Compressed Air Energy Storage System

Hiroki SARUTA・Dr. Takashi SATO・Ryo NAKAMICHI・Masatake TOSHIMA・Yohei KUBO

要旨

CO₂排出量削減の観点から、再生可能エネルギーの不安定な出力を平準化するための大規模蓄電設備の普及が待望されている。圧縮空気エネルギー貯蔵システムは、長時間かつ大容量のエネルギーを貯蔵するのに適している。とくに、岩塩層が広く分布する北米や中華人民共和国などにおいては、その岩塩層中に形成した地下空間を圧縮空気の貯蔵に用いると設備のkWh単価を低下させることができる。応答性は1 MWクラスの大型の実証設備で取得したデータをもとにしており、指令に対して秒単位で追従することができている。さらに、圧縮空気エネルギー貯蔵システムの今後の展開を述べる。

Abstract

Large-scale power storage equipment for leveling the unstable output of renewable energy has been expected to spread in order to reduce CO₂ emissions. The compressed air energy storage system described in this paper is suitable for storing large amounts of energy for extended periods of time. Particularly, in North America, China and other areas, where rock salt layers are widely distributed, using underground spaces formed in the rock salt layers to store compressed air can reduce the unit kWh cost of equipment. The equipment's responsiveness was obtained on the basis of the data for large-scale demonstration equipment of 1 MW class, verifying that the equipment can respond to commands within seconds. This paper further describes the future development of the compressed air energy storage system.

キーワード

再生可能エネルギー, CO₂排出量削減, 圧縮空気, エネルギー貯蔵, スクリュー式圧縮機, スクリュー膨張機, 電力出力変動緩和, 大規模蓄電

まえがき = 近年、気候変動抑制に関するパリ協定により課された温室効果ガスの排出削減要請に加え、太陽光発電や風力発電の発電単価の大幅な低下により、再生可能エネルギーの導入が世界的に急速に進んでいる。

しかしながら、再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電の発電電力は、日照や気象条件によって安定しないという問題がある。このため、そのまま系統連系すると電力系統に対する擾乱(じょうらん)要因となる。その結果、電力需給のバランスが崩れて周波数変動を引き起こし、最悪の場合、大規模な停電を引き起こす可能性がある。風力や太陽光のような再生可能エネルギーは需要と一致させるように制御することはできないことから、需要と供給のアンマッチが生ずる。このアンマッチの緩和は主に火力発電出力の調整により行われているが、不安定な出力を平準化して調整負荷を減らすことができれば、再生可能エネルギーの活用を後押しすることができる。このため、発電出力の平準化が可能な大規模蓄電設備の普及が、CO₂排出量削減の観点から求められている。

このような背景から当社は、一般財団法人エネルギー総合工学研究所からスクリュウ式の圧縮機・膨張機を用いた新たな圧縮空気エネルギー貯蔵(Compressed Air Energy Storage, 以下CAESという)システムを受注・納入し、同研究所と早稲田大学が2017年4月から一年

半にわたって行った実証試験に供した。なお本実証試験は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDOという)が進める「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」の一環として進めたものである。

本稿では、当社が設計製造したCAES設備の性能を紹介するとともに、当社における今後の展開を述べる。

1. CAES設備

当社のCAES技術は、スクリュウ式圧縮機によってまず圧縮空気をタンクに貯蔵する。つぎに、この貯蔵した圧縮空気をスクリュウ式膨張機で膨張させ、膨張機に直結した発電機を駆動して発電する。また、圧縮時に発生した圧縮熱を熱媒で回収し、膨張機に流入する前の圧縮空気を予熱することによって充放電効率を改善することを特長としている。また、機器からの放熱ロスによる充放電効率の低下を低減するための断熱対策を施している。

それぞれ充電時および放電時のCAESシステムのフローを図1および図2に示す。これらを比較すると分かるように、圧縮空気と熱媒のフローの方向は反対であるが、その主要構成機器は充電時と放電時でほぼ同一である。スクリュウ圧縮機を使用する場合、スクリュウを逆回転させることによってそのままスクリュウ膨張機として使用することができる。これは、圧縮機兼膨張機としてシス

* 機械事業部門 開発センター

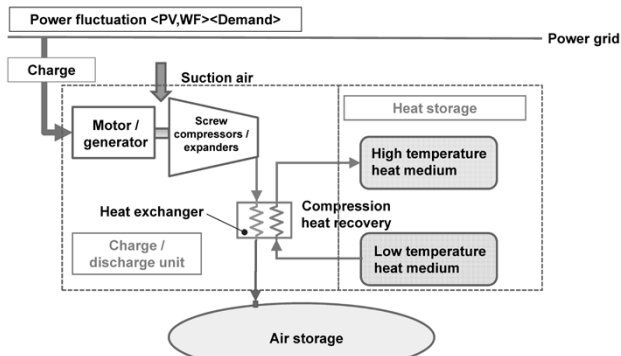


図1 圧縮空気エネルギー貯蔵システムのフロー（充電時）
Fig.1 Charge flow of compressed air energy storage (CAES) system

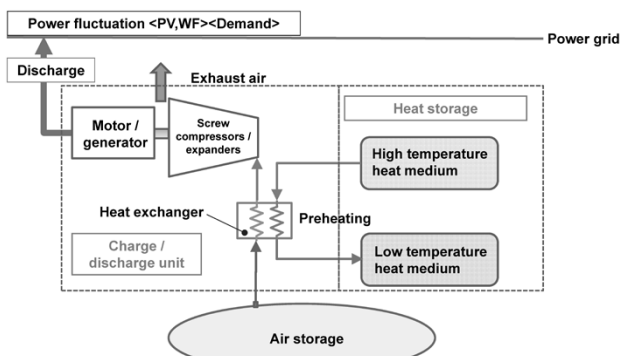


図2 圧縮空気エネルギー貯蔵システムのフロー（放電時）
Fig.2 Discharge flow of CAES system

テムを構成することもできることを意味する。このようにすることによって設備をコンパクトにできるだけでなく、設備コストを大幅に抑制することができる¹⁾。

2. 実証設備の概要

当社では、断熱式CAES技術の開発を行うに際して、まず神戸総合技術研究所内に50 kWクラスの小型プロトタイプ機を設置し、各種の基礎試験を行った。つづいて、この小型プロトタイプ機で知得したノウハウを生かして、一般財団法人エネルギー総合工学研究所に1 MWクラスの大型実証設備を納入した。本章では、この二つの設備の概要を説明する。

2.1 50 kW小型プロトタイプ機

当社神戸総合技術研究所内に設置した50 kWクラスの小型プロトタイプ機の外観を図3に示す。この設備は、当社の汎用オイルフリースクリュウ圧縮機（出力55 kW）をベースに、CAES技術の実験用に圧縮機と膨張機に改造したものである。圧縮空気を貯蔵する蓄圧タンクは、内容積7.6 m³、耐圧0.97 MPaGの鋼製タンクを4本設置している。

この社内実験設備は2016年2月から発電試験を開始し、圧縮機および膨張機の試運転、熱交換器の性能試験などを行った。この試験を通じて得られた知見は、1 MWクラスの大型実証設備の設計・製作に生かすことができた。

2.2 1 MW大型実証設備

図4は静岡県賀茂郡東伊豆町に設置されていた1 MWクラスの大型実証設備（以下、伊豆実証設備という）である^{2), 3)}。この設備は、東京電力ホールディングス株

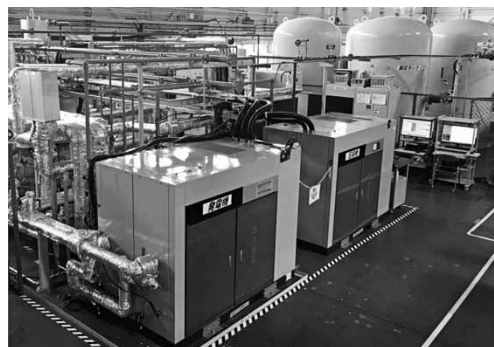


図3 50 kW小型プロトタイプ機の外観
Fig.3 Appearance of 50 kW small-scale prototype



図4 1 MW大型実証設備の外観
Fig.4 Appearance of 1 MW large-scale demonstration plant

式会社 東伊豆風力発電所に隣接して設置され、経済産業省による2017年3月の使用前検査を経て、同年4月に稼働した。その後、2018年10月に同発電所が閉所するまでの1年半にわたり、一般財団法人エネルギー総合工学研究所と早稲田大学が風力発電所の発電電力の変動緩和に関わる各種実験を行った。

この設備は、充電ユニット、蓄熱ユニット、放電ユニットと名付けた三つのユニットから構成された500 kWの基本ユニットを2セット並列接続しており、最大入出力電力1 MWの充放電が可能である。

各ユニットは、当社工場から実証試験地までの搬送作業や現地での据付工事などが容易にできるように、20フィートコンテナ相当の大きさの筐体（きょうたい）とした。このため、圧縮空気タンクの据え付けも含めた据付工事の期間を、1箇月以内に抑えることができた。規格化されたコンテナ内に収納することは、運用開始後のメンテナンス作業を容易にできるというメリットもある。また、定期点検時や故障修理時に設備全体を停止させることを避ける目的で、複数の基本ユニットを並列に接続した。図5、図6にそれぞれ、充電ユニットおよび放電ユニットの概要を示す。いずれも、内部構造を透視可能な斜視図、正面図、および上面図を示している。

充電ユニット内には、当社標準の160 kWクラスの二段型オイルフリースクリュウ空気圧縮機の本体部分を3台収納し、その下部に熱交換器を配置した。台数制御と回転数制御を組み合わせることによって500 kWまでの連続的な出力制御を可能にした。圧縮時に発生する圧縮熱は、熱交換器によって熱媒で吸収し、蓄熱ユニット内に収納した熱媒タンクに貯蔵した。熱媒の最高温度は、汎用圧縮機が使用可能な200℃以下に抑えた。

いっぽう放電ユニット内にも、160 kWクラスの二段型オイルフリースクリュウ空気圧縮機の本体部分を4台収

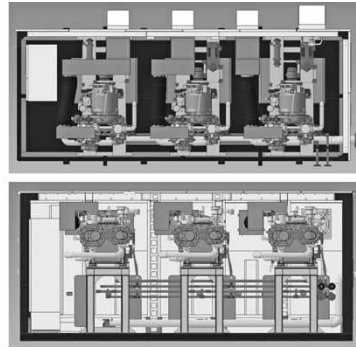
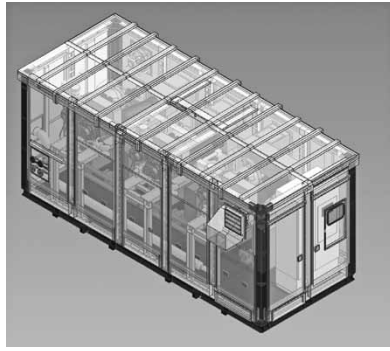


図5 500 kW 充電ユニット
Fig.5 500 kW charging unit

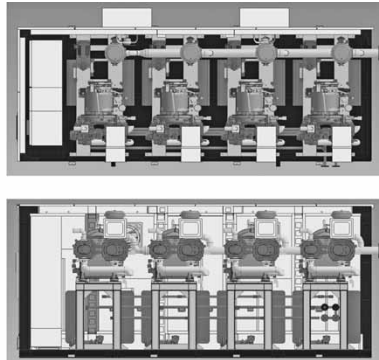
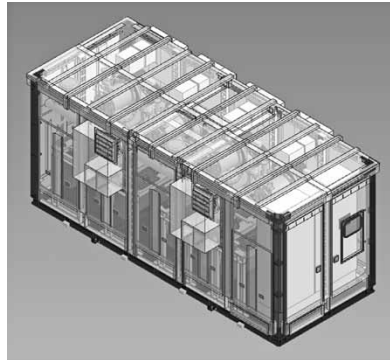


図6 500 kW 放電ユニット
Fig.6 500 kW discharging unit

納し、圧縮時の回転方向と逆方向に回転させることによって膨張機として機能させた。圧縮機と膨張機の台数が異なるのは、充放電効率を考慮したことによる。蓄熱ユニットの高温熱媒を熱源として熱交換器によって空気タンクの常温レベルの圧縮空気を加熱して高温の圧縮空気とする。これを膨張機に給気して大気との圧力差トルクでスクリュを回して発電機を駆動した。

3. 伊豆実証設備の性能

伊豆実証設備は、スクリュ式の圧縮機と膨張機とを使用している。このため、従来のCAESシステムで使用されているターボ式の圧縮機および膨張機を使用する場合に比べて、充電指令や放電指令に対して応答性がよいという特長がある。本章では、伊豆実証設備の運転により得た応答性を中心に説明する。

3.1 立ち上がり性

伊豆実証設備において、待機状態から1 MWの最大充電状態に立ち上げた際の応答特性の一例を図7に示す。また、1 MWの最大放電状態に立ち上げた際の応答特性の一例を図8に示す。図7、図8において、縦軸のゼロが充放電ゼロの状態を示しており、マイナスの値は充電状態（圧縮機稼働状態）を、プラスの値は放電状態（膨張機稼働状態）を示す。

図7、図8に示すように、指令値（signal）を受けて30秒前後で、停止状態から最大充電、あるいは放電電力に到達することができている。このことから、風力発電所の出力変動緩和用途に十分使用可能であるといえる。

数十MWクラスのより大規模な設備となっても、単位ユニットを並列に増設することで対応できることか

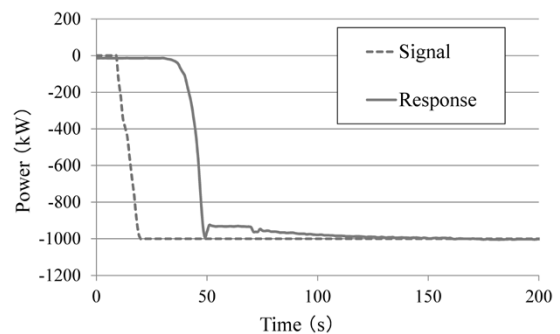


図7 充電時の応答時間
Fig.7 Response time in charging

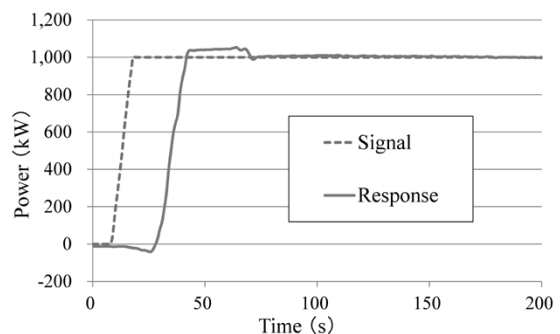


図8 放電時の応答時間
Fig.8 Response time in discharging

ら、立ち上がりの応答時間は大きくは変わらないと考えられる。停電時のバックアップ電源として考えた場合、瞬停対策のための機器は別途必要であるが、大電力を比較的早期に供給できる設備として活用可能である。

3.2 指令追従性

風力発電所の発電出力は風況によって大きく変化するため、その変動を緩和するためには出力指令に対する応

答性が重要になる。

伊豆実証設備の指令追従性を評価するに際して、アメリカ合衆国北東部の送電会社であるPJM Interconnection LLC (PJM) が応答確認試験用として公開している模擬指令(Reg.D)⁴⁾を使ってCAES設備の応答性を評価した。図9はその結果の一例である。

図9の電力指令は、PJMにて公開されるReg.D Normalized Self-Test Signalをプラスマイナス500KW最大値としてスケーリングした波形を用いている。PJMの応答性パフォーマンス評価方法に基づき、CAES設備の応答特性を測定した。その評価結果を図10に示す。評価は、正確性 (accuracy score), 遅延時間 (delay score), 精密性 (precision score) の三点からなされる。各スコア評価式を以下に示す。

$$Accuracy\ Score_{\delta=0\ to\ 5\ min} = \gamma_{Signal, Response(\delta, \delta+5\ min)}$$

$$Delay\ Score = Abs\left|\frac{\delta-5\ Minutes}{5\ Minutes}\right|$$

$$Error = Avg\ of\ Abs\left|\frac{Response-Regulation\ Signal}{Hourly\ Average\ Regulation\ Signal}\right|$$

$$Precision\ Score = 1 - \frac{1}{n} \sum Abs(Error)$$

ここで、 γ : 相関係数,

n : 単位時間あたりのサンプリング数

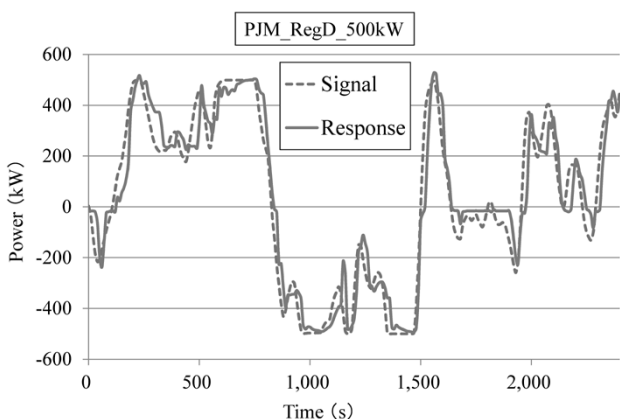


図9 PJM Reg.D信号に対する応答
Fig.9 Response to PJM Reg.D signal

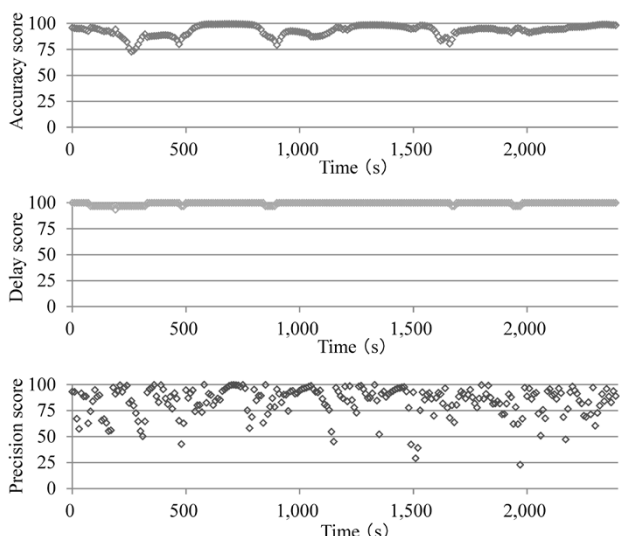


図10 PJM テストの結果
Fig.10 Results of PJM performance scores

伊豆実証設備では40分間テストの各スコアの単純平均は、accuracy : 93.3, delay : 99.46, precision : 84.12が得られ、三つの平均値92.29という高いスコアを記録することができた。PJMは、周波数調整市場の参入条件として、40分間の連続するテスト信号に対するパフォーマンススコアが75ポイント以上必要としている。伊豆実証設備での上記スコアは十分に電力市場における調整力として使用可能なレベルと考えている。なお、圧縮空気の貯蔵量や、Reg.Dテスト波形のスケーリング幅などの条件を変更して何度か試験を行い、75ポイントを満たすパフォーマンスを確認済みである。

4. 今後の展開

4.1 性能向上とコストダウン

伊豆実証設備において、オイルフリースクリュウ圧縮機をキーコンポーネントとする設備が風力発電所の出力変動の緩和に使用できることは確認できた。しかしながら、CAES設備を普及させていくためには、性能向上とコストダウンが必要である。

現在当社では、充電ユニットと放電ユニットとを共用化することによって性能向上とコストダウンの両方を実現することを検討している。また、圧縮空気貯蔵タンクの容積を削減することができることから、貯蔵圧力を高圧化することも検討している。

現在検討中のスクリュウ圧縮機を充放電兼用とし、最大貯蔵圧力を2 MPaGまで高めた充放電兼用ユニットの概要を図11に示す。このユニット内には、最大吐出圧力1 MPaGのスクリュウ圧縮機を3台、最大吐出圧力2 MPaGのスクリュウ圧縮機を1台配置し、いずれも圧縮機兼膨張機として使用可能としている。台数制御と回転数制御を組み合わせることによって555 KWまでの連続的な出力制御を可能にしている。

図11に示した例よりさらに高圧のスクリュウ圧縮機を組み合わせることで5 MPaG程度まで昇圧することも検討している。

4.2 海外展開

再生可能エネルギーの導入が進んでいる諸外国、とくに北米と中華人民共和国ではCAES設備の具体的な導入

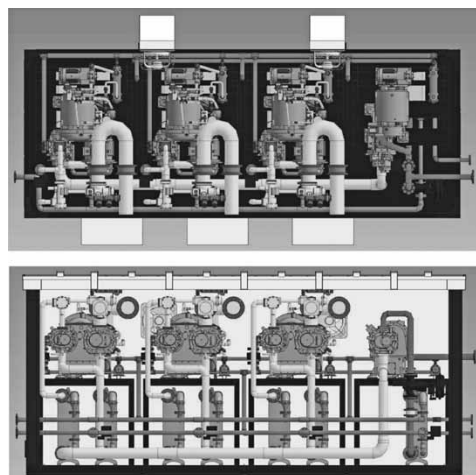


図11 555 kW 充放電兼用ユニット
Fig.11 555 kW charging and discharging unit

計画がある。中華人民共和国では、数十MWのCAES設備の建設が国家プロジェクトとして江蘇州において始まっている。

これらの国々でCAES設備が評価されている理由として、日本国内に存在しない地下岩塩層の存在がある。例えば北米においては、テキサス州からカンザス州を経てカナダ アルバータ州に至るロッキー山脈東側の平原部や、五大湖東側などに地下岩塩層が広く分布している。この地下岩塩層は、岩塩採掘だけでなく、岩塩層に形成された地下空間が天然ガスなどの地下備蓄に利用されている。この地下空間は密閉性に優れていることから、圧縮空気の貯蔵タンクとして利用した場合、大容量のエネルギー貯蔵を廉価に実現できる可能性がある。例えば、一般的なMWを超える大規模リチウムイオン電池の蓄電時間は4時間から長くても8時間程度である。岩塩採掘洞などの巨大な地下空間を確保できたCAES設備では、その蓄電時間を24時間から48時間程度に大幅に延長することができる。

先に述べたロッキー山脈東側の平原部は、アメリカ合衆国における風力発電所の適地とおおむね一致している。したがって、この地域における風力発電所の発電電力の抑制や、風力発電由来の電力による計画発電などが期待できる。さらに、停電時におけるバックアップとして、ある程度の大きさのコミュニティをカバーする電源としての活用も期待できる。

岩塩層に形成した地下空間を圧縮空気の貯蔵タンクとして利用したCAES設備のコンセプトを図12に示す。図12においては、風力発電所の送電線にCAES設備を連系した例を示しているが、太陽光発電所と連系することもできる。

地上に設置する設備は充放電ユニットを収納したコンテナと電気設備のみとなる。北米においては設置面積はあまり問題にならないが、地上部分の設備をコンパクトにまとめることができ、リチウムイオン電池と似通った外観の設備となる。

当社は2019年度に、NEDOが進める「エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業実証要件適合性等調査」において、「大規模電力貯蔵を実現するための圧縮空気地下貯蔵設備の実証研究（北米）」として採択された。これを受けて現在、北米地域を中心に

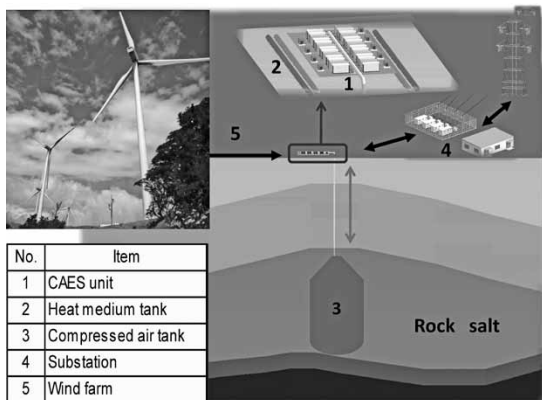


図12 岩塩空洞を利用したCAES設備
Fig.12 CAES plant using rock salt cavern

CAES設備の展開可能性を探索中である。

むずび=放電継続時間が長い長時間貯蔵仕様の大規模な電力貯蔵設備に関して、貯蔵可能な電力量(kWh)に対する設備コストの割合、すなわちkWh単価において、圧縮空気エネルギー貯蔵設備は他の電力貯蔵設備に対して優位(廉価)になり得る。とくに、岩塩採掘洞などの地下空間を圧縮空気貯蔵タンクとして利用する場合は、リチウムイオン電池などの化学的二次電池より廉価となり、数千円/kWhの大規模蓄電設備を構成できる可能性がある⁵⁾。

北米や中国、中東欧などには岩塩層が広く存在している。したがって、圧縮空気エネルギー貯蔵設備が普及することによって、これらの地域における再生可能エネルギーの導入促進に資することができると考えている。

最後に、当社の圧縮空気エネルギー貯蔵設備を実証機として採用していただき、伊豆における実証試験に関連して当社に多大のご指導とご助言を賜った一般財団法人エネルギー総合工学研究所と早稲田大学に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 戸島正剛ほか. 日本エネルギー学会誌. 2016, Vol.95, No.3, p.180-187.
- 2) 堂本宗宏ほか. クリーンエネルギー. 2017年12月号, p.13-20.
- 3) 松隈正樹. 冷凍. 2017年5月号, Vol.92, No.1075, p.351-356.
- 4) PJMウェブサイト. <https://www.pjm.com>, (参照2018-01-24).
- 5) K Mongird et al. Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. July 2019, p.6.1-6.2.



猿田浩樹
機械事業部門 開発センター



佐藤 隆
機械事業部門 開発センター



中道 亮
機械事業部門 開発センター
技術開発部



戸島正剛
機械事業部門 開発センター
技術開発部



久保洋平
機械事業部門 開発センター
技術開発部