［調査研究報告］

多様性を増す蓄エネルギー技術
～再エネ大量導入時代の選択肢～

川村　太郎※（プロジェクト試験研究部 副部長　主管研究員）

岡崎　徹※※（プロジェクト試験研究部 主管研究員）

徳永　貴道※※※（プロジェクト試験研究部 主任研究員）

渡邉　建次※※※※（プロジェクト試験研究部 副参事）

1．はじめに

2050年までに温室効果ガスの排出量実質ゼロを目指すことが，2020年10月の菅内閣の所信表明で宣言された。2021年7月の「第6次エネルギー基本計画」の素案では，電源構成に占める再生可能エネルギー（再エネ）の割合を，2030年目標で36～38％としており，現在，実現のための具体的な方策が各方面で議論されている。

再エネのうち，主要な役割を担う太陽光や風力は，いわゆる変動性の再エネであり，出力が日照や風況に影響される。また，設備利用率は太陽光で13%，風力で20～30%程度であり，その出力だけで電力需要を安定的に賄うのは難しい。電源構成における変動性再エネの割合が少ない段階では，火力発電などの調整力で電力の需要と供給をマッチさせることができる。

しかし，変動性再エネの導入量は2030年以降も増え続けると予測され，これらが主力電源として機能するためには，デマンドレスポンスなどの需給調整方法に加え，電力のエネルギー貯蔵技術が必要となると考えられる。現状で，代表的なエネルギー貯蔵技術は蓄電池や揚水だが，それ以外にも，例えば大容量や長時間のエネルギー貯蔵に向く蓄エネルギー技術が開発・実用化されている。将来の変動性再エネ大量導入時代においては，これらの技術を適材適所で配置し，電力系統全体の安定性を確保することが現実的といえる。

本稿では，比較的大容量・長時間のエネルギー貯蔵のニーズに応えるための，有力な選択肢として期待される，蓄熱や圧縮空気による蓄エネルギー技術について紹介する。

2．各種蓄エネルギー技術の特徴と役割

代表的な蓄エネルギーとして，蓄電池，揚水，水素のほか，蓄熱や圧縮空気によるものなどが挙げられる。蓄熱や圧縮空気による蓄エネルギー技術の詳しい原理や特徴は，次章以降に述べるが，いずれも電力をいったん熱や圧縮空気の状態で貯蔵し，必要時に発電に利用するものである。発電には蒸気タービンや膨張機を用いるものが主で，一般に，蓄熱による技術は「蓄熱発電」，圧縮空気による技術は「圧縮空気エネルギー貯蔵」（CAES）と呼ばれる。

各種の蓄エネルギー技術は，出力および容量によって，得意とする領域が異なっている[(1)(2)]。**図1**に，各技術が担う領域を示す。蓄熱

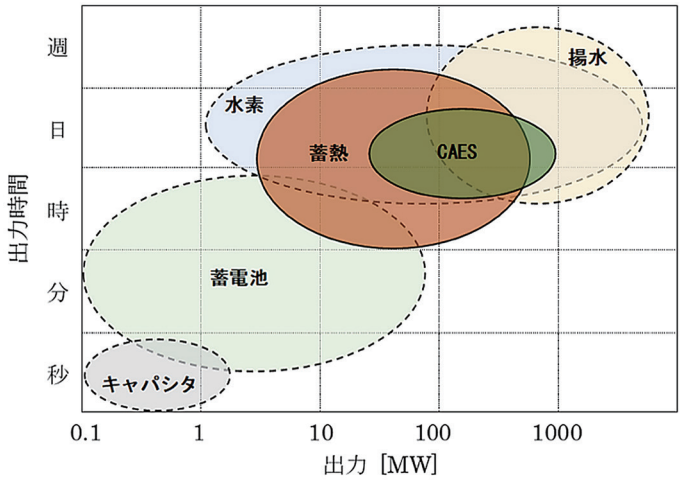

図１　各種蓄エネルギー技術が担う領域

発電は，出力が数 MW ～数百 MW，出力時間は数時間～数十日（容量では数十 MWh ～ TWh 程度），CAES は，出力が数十 MW ～数百 MW，出力時間は数時間～数日（容量では数十 MWh ～数 GWh 程度）の使用に向いている。蓄熱発電や CAES は，蓄電池に比べて高出力，揚水や水素よりは小容量の用途に適しているとされ，設備コストが安価なことから，蓄電池よりも効率が低くとも経済的な使用方法があるとして，開発が急速に進行しつつある。

なお，蓄熱発電や CAES の時間応答性は，0→100% 出力が数秒～数分程度とされている。一方，蓄電池は数十ミリ秒以下であることから，変動性再エネ大量導入時の系統安定性への寄与を考えると，瞬時の変動よりも数分～数時間程度の変動を緩和する用途に適していると考えられる。

３．蓄熱

（１）原理，特徴，課題

① 概要

蓄熱は身近で，生活の中にも利用されている。湯たんぽや，昔のアイロンなどがその最たるものであろう。魔法瓶もある種の蓄熱である。これらは，最初に機器や媒体が使用に最適な温度に熱せられ，徐々に温度が下がっていく。温度が下がると言うことは，その熱の価値も下がると言うことで，これらの蓄熱方法は，発電用途や工業用途には用いられない。

発電用途としての蓄熱は，一定時間，一定温度を出すように工夫されている [(3)]。そこには様々な蓄熱原理（顕熱，潜熱，化学反応など）が用いられており，多種多様な技術がある。また，様々な形式が提案されており，２つに分類できるものでもないが，ここではシステム構成の視点から，以下に代表的な２タンク型と１タンク型を紹介する。

②２タンク型

２タンク型は太陽熱発電で 10 年以上の実績を持つ商用技術である。

その動作原理は図２のとおりで，蓄熱前には低温タンクには低温の熱媒が満たされている。蓄熱時には，再エネ電力をヒータで変換した熱や工場廃熱などで，この低温タンクから取り出された熱媒を暖める。暖められた熱媒は高温タンクに貯蔵される。放熱時にはこの熱媒がポンプで吐出され，熱交換器で高温

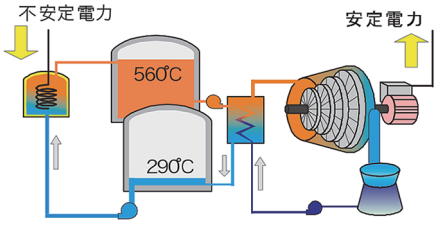

図２　２タンク型の蓄熱原理

高圧蒸気を発生させ，蒸気タービンを駆動することで熱エネルギーを電気エネルギーに変換する。この部分は石炭火力と同じである。プロセス応用でも熱交換器で必要温度を取り出すことができる。この過程をへて冷えた熱媒は，再び低温タンクに導入され，貯蔵される。

熱媒には硝酸塩混合物が用いられることが多い。これは，硝酸塩混合物は肥料にも使われており安価・安全なためである。この高温タンクは米国の大型太陽熱発電所にて直径40mのものが建設されており，600℃近くの熱媒温度を保持しながら，放熱損失は１日１%以下である。非常にタンクが大きく，貯える量に対して表面積が小さいため，なかなか放熱しない。

高温タンクと低温タンクが分かれているため，蓄エネルギー量の把握が容易で，かつ最後まで一定の温度を放出することができる。また，蓄熱と放熱の動作を同時に行える。豊富な実績から，安心して建設できることも１つの長所であろう。以前，米国の太陽熱発電所で施工ミスに起因するトラブルがあったが，その経験を元に建設された太陽熱発電所は，当初想定よりも良い運転実績を出している[(4)]。

課題は，硝酸塩を使ったシステムは既に開発し尽くされた感があり，今後の大きなコストダウンの可能性が少ない，ということであろう。これに対して，塩化物塩や炭酸塩を用い，より高温で蓄熱することで，エネルギー密度を上げ，かつ，熱電変換の高効率化を目指す開発も行われている。前述のように熱電変換部は石炭火力と同じであり，蒸気温度を上げるほど効率が向上するためである。石炭火力と親和性が高いため，既存の石炭火力を蓄熱発電に転換するプロジェクトも進められている。

③１タンク型

１タンク型は，２タンク型よりも安価な蓄熱を狙ったものであり，近年，開発が盛んになっている。１タンク型は，発電目的としては商用化されていないが，製鉄業などで熱風炉，あるいはリジェネバーナなどとして実用化されている。蓄熱時には，**図３**のように蓄熱材の満たされたタンクの片端からヒータや工場廃熱で熱せられた気体あるいは液体の熱媒体を注入し，タンクに詰められた蓄熱材を順に暖めていく。蓄熱材を逆の端まで暖めれば蓄熱完了である。蓄熱材の中で，温度勾配が生じるため「サーモクライン型」とも言われる。放熱時には，蓄熱時と逆の端から低温の熱媒体を注入し，高温に暖めて取り出す。その後の熱電変換の工程は前述の２タンク型と同じである。１タンク型の場合は，蓄熱と放熱は同時に行えない。

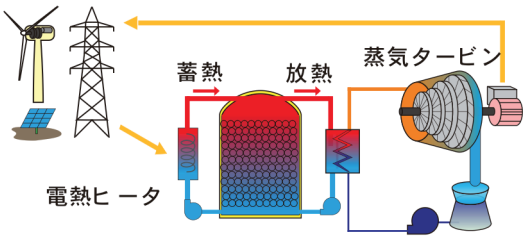

図３　１タンク型の蓄熱原理

２タンク型と比べてタンクが１つで済むことや，蓄熱材に安価な砕石や砂，コンクリートなどを採用することができるため，高い経済性が得られると考えられている。現実には商用レベルの物はまだ稼働していないため，その経済性は確認出来ていない。安全性については，２タンク型以上に高いと期待される。

課題としては，全ての蓄熱エネルギーを放熱しようとすると，終了間際で出力温度が低下することと，長期保存すると，タンク内が均熱化してしまう点が上げられる。また，「サーマルラチェッティング」という，内蔵する蓄熱材の熱膨張・収縮の繰り返しによるタンクの損傷の恐れがあること，蓄熱材そのものの劣化（微小片化）が懸念される。

（２）開発状況と実施例

最新の民間による開発例を**表１**に示す。一部，後述の圧縮空気によるエネルギー貯蔵等も含むが，いずれも何らかの蓄熱を利用している。特筆すべきは，民間でも電力会社が積

表１　世界の民間蓄熱発電の開発状況

	研究段階	パイロット	技術的に完成
発電専用	MALTA/Duke Energy Energy-Dome 中部電力	Siemens-Gamesa Seas-nve HighView/Enlasa（チリ） HighView/住友重機 EPRI/Southern Co. Brenmiller/NYPA 神戸製鋼所（A-CAES）	硝酸塩2タンク RWE （蓄熱部として） MOLTEX,,TerraPower, Terrestrial,東芝/富士電
電熱併給		1414degrees EnergyNest/Siemens-Energy Eco-Tech-Ceram SaltX/Vattenfall TEXEL	STORASOL Azelio
確認中	247Solar, aalborgCSP, Almina, Antora, Brayton, CCT, CHESTER, Ecogen, Ecovat, Element16, Graphite Energy, KELVIN, Kraftblock, KYOTO, Lumenion/Vattenfall, MAN/ABB, MGA, Pintail, Quantum Graphite, Stiesdel		

極的に関わっている点で，表の中では下線を引いて示した。

電力会社主導案件の中で最も進んでいるのは米国電力研究所（EPRI/Southern）によるもので，2019 年に検討を開始し，2021 年に試験運転開始の予定で進んでいる。規模は 10MWh で，後述のシーメンス－ガメサ社の 130MWh と比べて 10 分の 1 の大きさであるが，実際の火力発電所に導入して試験するという意味は大きい。ここは耐熱コンクリートを蓄熱材に採用した 1 タンクシステムで，蓄エネルギーコストを大きく下げることを目標としている。ニューヨーク州電力公社（NYPA）はその米国電力研究所に近いシステムである。デューク・エナジー社は，送電端－送電端の蓄エネルギー効率が 60% 近いとの情報もあるマルタ社の技術を検討している。ここは 600℃近い蓄熱と，マイナス 100℃程度の蓄熱の両方を採用することで，この温度帯の熱機関としては破格の高効率を得られる，としている。

欧州ではシーメンス－ガメサ社の岩石による蓄熱発電が最も進んでおり，2019 年よりハンブルクにて，**図４**に示す 130MWh（熱）クラスのパイロットプラントを運転しており，2021 年中には準商用機を建設するとされている[(2)]。面白いのは，同じグループのシーメンス－エナジー社が岩石ではなくコンクリート蓄熱の技術を保有するエナジーネスト社と組

（出所：シーメンス－ガメサ社）

図４　シーメンス－ガメサ社の砕石蓄熱発電設備

んでいることで，蓄熱発電は，用途によって最適なシステムが異なる，ということである。

技術的にこなれた２タンクシステムは，原子力の分野で，主に小型モジュール炉（SMR），あるいは次世代原子炉と呼ばれるシステムに併設されようとしている。原子炉は定常運転するのが最も経済性がよく，需要に合わせた発電をするのは得策ではない。そこで低需要時には蓄熱し，高需要時には炉と蓄熱の両方からの熱を蒸気タービンに導入することで，変動する需要に対して合わせた発電をする。

蓄熱発電は，蓄電池と比べて効率が低く，非合理的に見える。しかしある一定時間以上の蓄エネルギーを行うには蓄エネルギーコストが圧倒的に安い蓄熱発電が有利となる。これを傍証するものとして，太陽熱発電と太陽光発電のハイブリッドを建設する動きを紹介する[(5)]。ここでは太陽光発電の出力も熱に変換し，蓄熱して安定発電させる。世界の脱化石燃料の潮流より，トルクメニスタンのような世界第12位の天然ガス生産国でさえ，太陽熱発電の導入を検討し始めた[(6)]。太陽光発電と蓄電池の組み合わせでは，日没後４時間までしか安定発電できないからである。他にも，何らかの補助金は受けて居るのであろうが，ヨルダンの難民キャンプでは太陽光発電による夜間電力確保のため，アゼリオ社の蓄熱発電を導入することが計画されている[(7)]。アゼリオ社のシステムは潜熱利用で，上記システムとはかなり構成が異なるが，13kWと小さな容量をモジュールとして追加することでスケールアップが可能であり，かつ，高温の廃熱も利用できるため，バイオディーゼルの製造工場にも納品しようとしている。

４．CAES

（１）CAESの原理，特徴，課題

CAESは，1978年にドイツで初めて商用化されたが，当時のシステムは，火力発電所のガスタービン発電設備に併設するものであり，圧縮空気エネルギー貯蔵 - ガスタービン（CAES-GT）と呼ばれる。通常のガスタービン発電では，燃焼器に燃料と圧縮空気を送り込むが，CAES-GTでは，この圧縮空気を一時的に空気の貯蔵設備に貯めておき，必要時に燃焼器へ送り込む。これにより，電気料金が安い時間帯に空気を貯め，高い時間帯には圧縮機の動力を節約しつつ高圧ガスが得られるため，経済性が向上する。ただし，燃料を使用するために，発電には二酸化炭素排出を伴う。

2005年頃からは，二酸化炭素排出抑制と蓄エネルギー技術の開発という社会的要請から，化石燃料を用いないCAESの開発が進行している。これは，「断熱圧縮空気エネルギー貯蔵」（A-CAES）および「等温圧縮空気エネルギー貯蔵」（I-CAES）と呼ばれる。

A-CAESは，電力を使って圧縮機を運転し，空気を４～７MPa程度（もしくはそれ以上）に圧縮する。それを，高圧の状態で空気の貯蔵設備に蓄え，発電時には，この高圧空気で膨張機を運転することで電力を取り出す。これにより，蓄電池のように電力を一時的に蓄え，必要時に電力を得ることが可能となる。さらに，充放電効率向上のため，空気を圧縮する過程で生じる熱を再生熱として蓄熱槽に蓄え，膨張前にその熱で圧縮空気の温度を上昇させてから膨張させる仕組みを備えるシステムも開発されている。再生熱を利用しない場合は，充放電効率は30%程度であるが，再生熱を利用すると，充放電効率が50～60%程度まで向上させることが可能であり，現状ではこちらが主流となっている。A-CAESの概念図を**図５**に示す[(8)]。

I-CAESは，空気の圧縮 - 膨張と，空気貯蔵設備により，充放電する仕組みはA-CAESと同様であるが，界面活性剤を添加した水と，気泡となっている空気を一緒に圧縮することで，発生した熱を水にも蓄え，膨張時にはその熱を利用する。これにより，等温変化に近い圧縮・膨張過程を実現している。A-CAES同ように，このように熱をうまく利用するこ

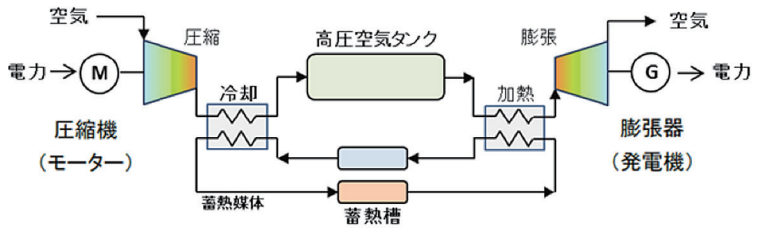

図５　A-CAES の概念図 (8)

とで，充放電効率が 50 ～ 60％に向上するとされている。

商用化と普及の拡大を見据えた場合，課題となるのは，空気の貯蔵スペース・貯蔵方法と設備費のコストダウンあろう。

圧縮空気の貯蔵には，地下の岩塩層を用いるのが一般的である。岩塩層による空気貯蔵は，岩塩を採掘した後の空洞を利用するもので，北米や欧州では多く存在することに加えて，空洞が巨大であり，気体が漏れにくい構造をしていることから，使い勝手が良い。しかし，日本のように岩塩層がない地域においては，別の空気貯蔵方法を選択する必要がある。岩塩層以外の空気貯蔵方法としては，地下の帯水層や枯渇油ガス田を利用する方法，地下にコンクリートなどで構造物を設置する方法，海底や湖底で風船状の貯蔵設備を設置する方法，地上に高圧タンクを設置する方法などが挙げられる。**表２**にそれぞれの特徴を示すが，空気貯蔵方法により，技術的困難さとコストが大きく変わる。したがって，地理的条件を考慮したうえでの空気貯蔵方法の選択や，逆にコストの安い空気貯蔵方法が適用できる地域を探すことが事業採算性の確保と普及において重要となる。

なお，類似の技術として空気を液化して貯蔵するシステムもある。これは，「液化空気エネルギー貯蔵」（LAES）と呼ばれるもので，圧縮空気を 4 ～ 7 MPa で貯蔵する場合，体積は常圧の空気に比べて約 40 分の 1 ～ 70 分の 1 となるが，液化空気の場合は，おおよそ 700 分の 1 の体積で貯蔵することができる。つまり，空気貯蔵設備がコンパクトであることが大きな特徴である。一方で，空気を液化するため，再生熱の利用や圧縮膨張のためのシステムが，CAES に比べて複雑になる。ここでは詳細は割愛するが，LAES は欧州や中国などで建設が進んでおり，普及の拡大が期待されている。**表２**に LAES の空気貯蔵の特徴もあわせて示す。

また，圧縮機，膨張機，発電機，再生熱利用システムなど，個別の構成要素は，各々ある程度成熟した技術であるが，例えば圧縮機と膨張機を共用にして，充電・放電時に切り

表２　空気貯蔵方式とその特徴

空気貯蔵方法	設置の容易さ	設備コスト	実績
岩塩層	比較的容易	1～10ドル/kWh	ほとんどの商用機で採用
帯水層	地質構造の調査が必要	地質調査により比較的高額	天然ガス貯蔵で実績あり
地下構造物	構造物の建設が必要	構造物建設により比較的高額	一部の商用機で採用
枯渇油田ガス田	比較的容易	岩塩層と同程度の可能性あり	天然ガス貯蔵で広く実績あり
水中	水中に構造物が必要	地下構造物と同程度と予測	ハイドロストアー社が技術保有
地上タンク	比較的容易	土地代により比較的高額	実証機で広く採用
液化空気	比較的容易 設置スペース小	付帯設備により比較的高額となる可能性	複数の商用機の建設･運転が進行中

替えることで設備費を縮小するなどの工夫が重要となる。再生熱利用においては，蓄熱の媒体として混合塩類，加圧水や砕石などの顕熱を利用する方法や，無機塩類などの相変化による潜熱を利用するもの，顕熱と潜熱を組み合わせたものなどが検討されており，初期の設備コストや材料費を押さえつつ，効率的に熱利用する技術の開発が求められる。

（2）開発状況

① CAES-GT

1978 年にドイツ連邦共和国のハントルフにおいて世界初の大型商用 CAES-GT が建設された。空気貯蔵は，地下 600 m，容積 310,000 m^3 の岩塩層で行い，圧縮空気を 4.8-6.6 MPa で貯める。発電はガスタービンにより出力 290 MW であり，圧縮空気による発電時間は 2 時間，充放電効率は 42% 程度とされている [(9)]。

1991 年には，米国アルバータ州マッキントッシュで，CAES-GT が運転開始された。空気の貯蔵はハントルフと同ように岩塩層であり，地下 450 m に，容積 538,000 m^3，圧力 4.5 ～ 7.6 MPa で貯蔵する。発電出力は当初は 110 MW，圧縮空気による発電時間は 26 時間だったが，1998 年に設備が拡大され，総出力 226 MW となっている。ハントルフの設備との違いは，ガスタービンからの排熱を，圧縮空気の予熱に用いることで，これにより，充放電効率が 52% 程度まで向上している。なお，上記 2 つの設備は現在も稼働しており [(10)]，CAES-GT に限らず，CAES 全般に共通して，耐用年数は 30 ～ 50 年と長い。

日本では，1990 ～ 2001 年に，通商産業省が新エネルギー財団に委託し，北海道上砂川町で実証試験が行われた。空気の貯蔵は，炭鉱跡にゴムライニングで気密性を確保した空洞が用いられ，４～８ MPa で貯蔵された。圧縮にはレシプロ圧縮機を使用し，発電出力はガスタービンにより 2 MW，圧縮空気による発電時間は 3.5 時間であり，2001 年に 390 時間余りの運転を行った [(11)]。

② A-CAES および I-CAES

日本では，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の「電力系統出力変動対応技術研究開発事業／風力発電予測・制御高度化／蓄エネルギー技術を用いた出力変動制御技術の開発」（2014 ～ 2019 年）において，早稲田大学，（一財）エネルギー総合工学研究所，㈱神戸製鋼所の共同により，出力 1 MW，容量 0.5 MWh の A-CAES を静岡県賀茂郡河津町で実証した [(12)]。圧縮機および膨張機にはオイルフリーのスクリュー式を採用し，空気の貯蔵には地上タンクを用いた。

本実証試験により，風力発電の変動緩和に A-CAES が有効であることを示すとともに，商用機においては圧縮機と膨張機を共用することや，空気貯蔵には地下空洞を利用することの重要性などが確認された。実証試験施設の概観を**図 6** に示す [(8)]。

現在，世界で稼働中または稼働予定の主な A-CAES の施設を**表 3** に示す。

図 6　NEDO 事業による CAES 実証試験施設の外観 [(8)]

実証機では空気貯蔵に地上タンクを用いているが，商用機では岩塩層や地下空洞が採用されている。図７にハイドロストアー社のA-CAES設備の概念図を示す[13]。同社は，表中のカナダのオンタリオ州と，オーストラリアの南オーストラリア州のプロジェクト手掛けているが[14]，空気貯蔵に地下空洞に設けた空気の貯留槽の圧力を，静水圧で一定に保持する仕組みを採用しているのが特徴である。これにより，一定圧力の圧縮空気を膨張機に導入することができ，発電出力を安定的に得るのに有利となる。ただし，地上に水圧維持用の水だまりを設けるため，土地と静水圧を地下の構造物に伝えるためのシステムが必要となることから，単純な岩塩層の空気貯蔵と比べて設備コストが高くなり，技術的にも難易度が増す。

再生熱利用システムでは，実証，商用とも，ほとんどが顕熱方式を採用している。これは，顕熱を利用したシステムで，これまでに集光型太陽熱発電プラントで多く採用されており，運転実績が豊富であることが大きな理由と考えられる。

一方，潜熱を利用したシステムは，一定温度の熱出力が得られやすいことや，エネルギー密度が高く，設備をコンパクトにできるメリットがあることから，今後の技術開発の進展次第で潜熱を採用する事例が増える可能性がある。

表３　世界で稼働中または稼働予定の主な A-CAES 施設

プロジェクト名	場所	目的	開始年	出力(MW)	容量(MWh)	空気貯蔵	再生熱蓄熱
TICC-500	中国 精華大	実証	2014	0.5	0.5	地上タンク	顕熱
Chinese Academy of Sciences, CAES demonstration plant	中国 Guizhou	実証	2017	2.8(充電) 10(放電)	40	地上タンク	顕熱
Pilot scale demonstration of AA-CAES	スイス Biasca	実証	2017	0.7	-	岩塩層	潜熱,顕熱 および ハイブリッド
Zhongyan Jintan CAES	中国 Jiangsu	商用	2017	50-60	200-300	岩塩層	顕熱
Goderich A-CAES facility	カナダ Ontario	商用	2019	22(充電) 1.75(放電)	7	岩塩層 (静水圧)	顕熱
Feicheng A-CAES Centre	中国 Shandong	商用	2019	50-1250	7500	岩塩層	顕熱
Angas A-CAES facility	オーストラリア South Australia	商用	2022 (予定)	5	10	亜鉛層 (静水層)	顕熱

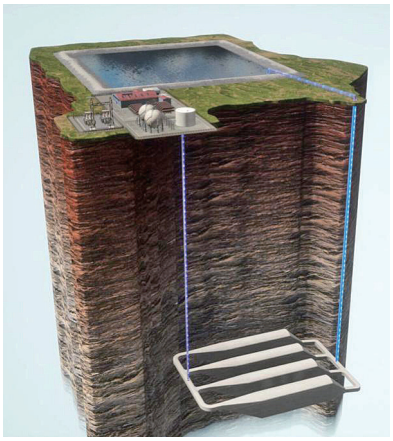

図７　ハイドロストアー社の A-CAES 概念図[13]

I-CAESについては，ここ数年での大型実証は，2013～2015年にサステインエックス社（SustainX）がアメリカ政府の補助を受けて実施した，1.5 MWの実証例にとどまる。I-CAESは前述のように水と空気を一緒に圧縮/膨張させて，加温された水と空気を一緒に貯蔵槽に貯める。この実証例では，地上のタンクを採用したが，商用化を見据えた地下設備で実施するには，放熱などの問題が懸念される。現状でI-CAESの開発は，A-CAESに比べて遅れているといわざるを得ないが，今後の技術開発の進展によっては，再び注目を浴びる可能性もある。

5．蓄熱技術の電力平準化における役割

上述のとおり，太陽光発電や風力発電といった変動性再エネの出力は日照や風況に影響される。**図8**は2017年4月30日の九州地方の電力の需要と供給を示したものである[15]。現状の変動性可能エネルギーの導入量でも，昼間の太陽光発電の出力増により需要に対して供給が大幅に上回るケースがある。このような場合，優先給電ルールに基づき，揚水動力の活用や火力発電所の出力抑制・停止，他エリアを結ぶ連系線を活用することで需要と供給をバランスさせている。そのような対応をしてもなお供給が需要を上回る場合には，太陽光発電や風力発電の出力制御を行っている。

今後は，2030年，更には2050年へ向けて，変動性再生可能エネルギーが大量に導入されていくことで，出力抑制される電力量が大幅に増加することが懸念される。そのようなとき，数十MWh～TWhという比較的大容量の蓄エネルギーに向いている蓄熱やCAESといった蓄エネルギー技術は，これらの電力を大量吸収（蓄エネルギー）するニーズに応える，有力な選択肢と考えられる。

加えて，大容量の蓄エネルギーに向き，かつ設備コストが安価な蓄熱やCAESのような技術については，貯めた電力を当日に開放するといった使い方だけではなく，数日～数週間程度先に電力を開放するといった運用方法も可能である。これは，電力の平準化のみならず，蓄エネルギーした電力を卸電力市場のスポット価格が高い時に合わせて売電するといった新たなビジネスモデルの形成に寄与する可能性もある。

6．まとめ

蓄熱およびCAESについて，特徴や課題，実施例などについて紹介した。将来の変動性再エネ大量導入時代において，蓄エネルギー技術は必須であり，各種の蓄エネルギー技術の開発が進められている。蓄熱やCAESは，

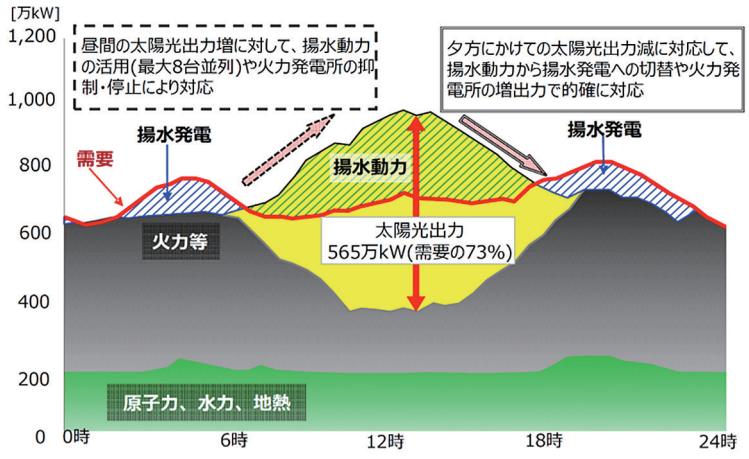

図8　九州の電力需給実績（2017年4月30日）[15]

比較的高出力，大容量の蓄エネルギーに向いており，電力平準化においては蓄電池と水素・揚水の中間的な領域で，その特徴が活かされるであろう。

また，これまで，蓄エネルギー技術は，それ自体が電力を生み出すわけではないため，ともすれば電力系統における「お荷物」のような扱いであったが，蓄熱やCAESは容量あたりの設備コストが安価である利点もあるため，電力価格の変動や，各種の電力市場を利用した新たなビジネスモデルが創出される可能性もある。

ここ数年の蓄熱およびCAESの技術開発の進展は目覚ましく，急速に技術の成熟も進んでおり，今後の動向が注目される。

参考文献

（1）米国国立再生可能エネルギー研究所，“Energy Storage Possibilities for Expanding Electric Grid Flexibility, Analysis Insights,”2016

（2）シーメンス - ガメサ社ホームページ，https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise

（3）岡崎　徹，“蓄熱発電の最新開発動向，”化学工学，Vol. 83 No.9, 2019, pp.521-523

（4）ソーラーペイシズホームページ，https://www.solarpaces.org/moroccos-ourazazate-noor-iii-csp-tower-exceeds-performance-targets/

（5）HELI SCSP ホームページ，https://helioscsp.com/morocco-pioneers-pv-with-thermal-storage-at-800-mw-midelt-cocentrated-solar-power-project/

（6）ファイナンシャルエクスプレスホームページ，https://thefinancialexpress.com.bd/views/can-solar-energy-be-generated-in-old-gas-power-plants-1629037918

（7）ベストホームページ，https://www.bestmag.co.uk/industry-news/azelio-plans-25-mw-energy-storage-installations-jordan

（8）NEDO ニュースリリース，“圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）システムの実証試験を開始”，2017 年 4 月 20 日 https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100756.html

（9）Crotogino F, Mohmeyer KU, Scharf R,“Huntorf CAES: more than 20 years of successful operation,”Solution Mining Research Institute Spring Meeting, 2001

(10) Foley A, Díaz Lobera I,“Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio”, Energy, 57, 2013

(11) 中北智文，小林英夫，奥原厳，高橋克行，安田友芝，「圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン（CAES-G/T）の開発」，石川島播磨技報，43（3），2003, pp.102-107

(12)（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），「電力系統出力変動対応技術研究開発事業，風力発電予測・制御高度化／予測技術系統運用シミュレーション（Ⅰ）風力発電予測・制御高度化（3）蓄エネルギー技術を用いた出力変動制御技術の開発」，平成 26 年度～平成 30 年度成果報告書，2019 年 2 月

(13) Lobner P,“New Grid-scale Energy Storage Alternatives to Batteries”, The Lyncean Group of San Diego, 2021

(14) ハイドロストアー社ホームページ，https://www.hydrostor.ca/

(15) 資源エネルギー庁，「なぜ，太陽光などの『出力制御』が必要になるのか？～再エネを大量に導入するために」，https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/qa_syuturyokuseigyo.html