

脱炭素社会に向けて開発進む蓄熱発電

2021/2

三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室
稲田 雄二

Summary

- 再生可能エネルギー普及と季節性の要因により、需要を上回る電力が発生、余剰電力問題が引き起こされていることから、捨てずに蓄電する仕組み、蓄電技術が求められている。
- 蓄電にはバッテリーをはじめさまざまな技術があり、それぞれに適切な規模・運用範囲がある。蓄熱発電は大規模、長時間の蓄電に適した技術で、既存技術の組み合わせで構成され、高信頼性、低コストが特長。
- エネルギー事業者も、これまでのバッテリーを主とした蓄電から、今後は蓄熱発電や水素貯蔵などの実用化が進むことで、蓄電時間と容量、コスト、需要と送電系統との兼ね合い、立地条件などの観点から最適な蓄電技術の組み合わせを考えることが必要になる。

蓄エネルギー・蓄電がなぜ必要なのか？

再生可能エネルギー（再エネ）の普及により、太陽光発電では日射量が豊富なときや風力発電では適度な風が続く良い条件では再エネによる発電が一時的に需要を上回り、余剰電力が発生する場合がある。このような余剰再エネは電力系統を不安定にし、停電の原因にもなりかねない。そのため、太陽光や風力発電の発電を停止させる出力制限という規制をかけ、余剰再エネが発生しないよう電力系統の安定化を図っている。

多国間の電力系統連携が整備されている欧州でも余剰再エネが発生した際は、出力制限がかけられる。本来であればCO₂削減に貢献するはずの再エネが有効活用されず、再エネ事業者への補償金もドイツで7億ユーロにも上るなど経済的な問題にもなっている。

再エネは、太陽光があるときや風が吹いているときしか発電できず、火力発電のように電力需要に合わせて発電を調整することができない。CO₂削減の切り札である一方、調整が効かない電力であることが弱点である。今後も普及が進む再エネにより余剰電力が大量に発生すると予想されることから、余剰電力をいったん蓄えて必要なときに必要な量を供給できる蓄電設備の整備が急務となっている。

蓄電技術として注目される蓄熱発電

蓄電技術には、本稿で取り上げる蓄熱発電のほか、バッテリー、揚水発電、圧縮空気貯蔵、水素貯蔵など実用段階や開発中のさまざまな技術がある（図表1）。バッテリーは電気を電気のままで蓄える技術で、

パソコンや携帯電話などさまざまな機器で実用化されている。また、太陽光発電を設置している家庭でも一部普及が見られるなど一般的な蓄電技術である。これに対し電気を他のエネルギーに変換して蓄える方式もある。代表格がダムによる揚水発電である。余剰電力でダムに大量の水を汲み上げ一時的に保管、必要な時に水を落として水力発電を行う。揚水発電は電気を位置エネルギーに変換して貯蔵する蓄電設備である。このほかには、電気で圧縮空気を作る圧縮空気貯蔵（物理エネルギーに変換）、水を電気分解して水素を作って貯蔵する水素貯蔵（化学エネルギーに変換）がある。

図表1 蓄電技術の例

蓄電技術	技術の概要	技術的課題
バッテリー Batteries	化学エネルギーで貯蔵。リチウムイオン、フローなど多種。比較的短時間変動に有効。 蓄電時間の目安：数分から数時間	低コスト化と長寿命化。長時間・大容量でのスケールメリットが効きにくい。
揚水発電 Pumped Storage Hydropower	水の位置エネルギーで貯蔵。出力は大きく可変。しかし、入力時（揚水時）は可変速揚水でもあまり大きな調整ができない。 蓄電時間の目安：数時間から数日（原子力の夜間余剰電力対応）	コストは地形に依存し建設に好適な場所は残り少ない。
蓄熱発電 Thermal Energy Storage (TES)	物質の蓄熱。顕熱、潜熱、化学蓄熱がある。蓄熱部は15ドル/kWhという低コスト。電熱変換、蓄熱、熱電変換が独立して設計可能。 蓄電時間の目安：数時間から数日	出力可変速度が遅い。発電時の熱損失が大きい。
圧縮空気貯蔵 Compressed Air Energy Storage (CAES)	地下空洞やタンクに圧縮空気貯蔵。LNG方式と、燃料を使わず空気の圧縮膨張で発電する方式、圧縮膨張の際に蓄熱を使うタイプもある。 蓄電時間の目安：数分から数時間	商用化したプラントは地下空洞を利用。好適な場所が限定される。
水素貯蔵 Hydrogen Energy Storage	水を電気分解して水素として貯蔵。貯蔵は高压タンク、液化、水素吸蔵合金など。水素化合物（アンモニアなど）での輸送貯蔵も可能。 蓄電時間の目安：数日から数週	水素製造の低コスト化、全体システムの効率化、大規模系統接続実証試験の必要性。

出所：エネルギー総合工学研究所の資料を基に三井物産戦略研究所作成

蓄熱発電も蓄電技術の一つで、その基本的なコンセプトは、再エネによる余剰電力が発生したときに電気を熱に変換し、熱として一時的に蓄え、電力需要が高くなる必要な時に熱を電気に変換して電力を供給することである（図表2）。近年、蓄熱技術が進歩し、実証プラントでの検証が積み重ねられるなど、商業規模の実装に向けた開発が進められ注目され始めている。

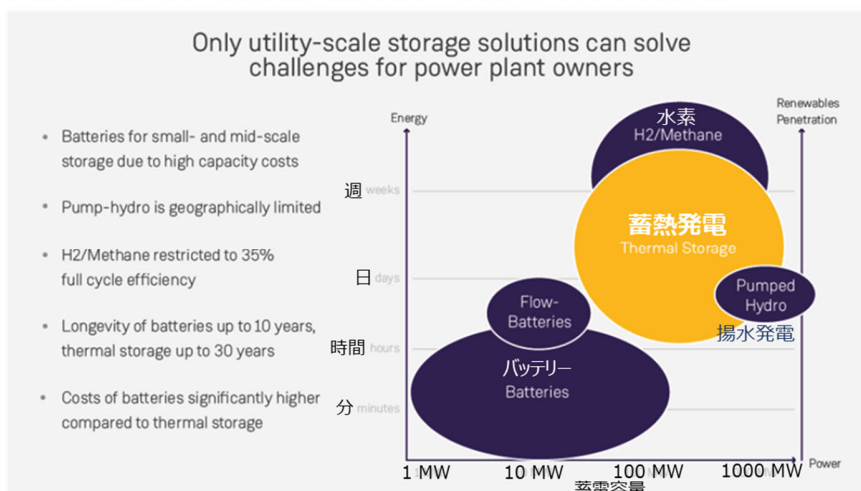
図表2 蓄熱発電の概要



出所：北海道大学大学院資料を基に三井物産戦略研究所作成

蓄電技術にはそれぞれに蓄電容量や蓄電時間の違いがあり、蓄熱発電の開発メーカーの一つである Siemens-Gamesa は図表3のように各種蓄電技術を位置付けている。

図表3 さまざまな蓄電技術の容量、蓄電時間の位置付け



出所：Siemens-Gamesa資料

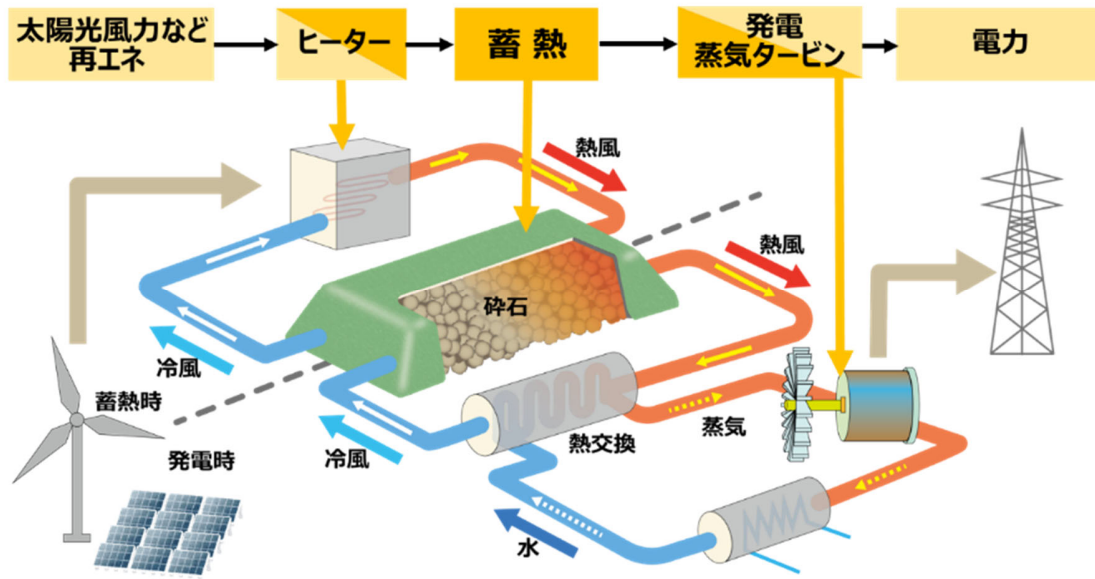
バッテリーは小規模から中規模の蓄電容量（～100MW¹）で蓄電時間は数時間程度までが適切な規模感とされている。蓄熱発電や揚水発電、水素貯蔵はバッテリーよりも大きい容量（100～1,000MW）を蓄電できる。蓄電可能な時間は、原子力の夜間余剰電力を蓄電する揚水発電が数時間から数日、蓄熱発電は数時間から数日、水素貯蔵は数日から数週間の蓄電が可能であると評価している。大容量、長時間の蓄電には、蓄熱、揚水、水素が適しているとされるが、揚水はダム建設に適した用地の確保が困難、水素は開発段階の技術でありコスト高も懸念されるなど課題がある。一方、蓄熱発電は大容量・長時間の蓄電に対応でき、既存技術で構築できることや立地の制限が緩やかであること、加えて、同規模での蓄電で有望な水素と比べてもコストが低くなる可能性があるなど、優れた特長がある。

蓄熱発電の仕組み

蓄熱発電の基本的な原理や機器の構成をSiemens-Gamesaが開発中の蓄熱発電を例に紹介する（図表4）。蓄熱発電は①電気を熱に変換する「電熱変換」、②熱を貯める「蓄熱」、③熱を電気に変換する「熱電変換」という3つの要素技術で構成される。Siemens-Gamesa の設備では、電気ヒーターで空気を加熱することで電気を熱に変換、加熱された空気は熱風となり、蓄熱材の石（火成岩の碎石）に吹き付けられて、蓄熱される。この蓄えられた熱は必要な時に熱風として取り出され、熱交換器で蒸気を製造、蒸気タービンで熱から電気へ変換する。

¹ MW（メガワット）はエネルギー（電力）の単位。1MWは一般家庭約250軒分の電力を示す。MWh（メガワットアワー）はMWの電力を1時間供給できるエネルギー量（電力量）を示す。同じく、MJ（メガジュール）、kcal（キロカロリー）もエネルギー量の単位で、1MWh=3,600MJ=860,000kcalの関係である。

図表4 蓄熱発電の構成例



出所：Siemens-Gamesa、エネルギー総合工学研究所の資料を基に三井物産戦略研究所作成

ほかの事例を見ても、①の「電熱変換」ではシーメンスと同様、石油化学プラントなどで普及している産業用ヒーターが採用される。このヒーターはドライヤーの原理と同じく、電気で熱を帯びた熱線を気体が通過することで加熱されるというシンプルな原理である。③の「熱電変換」でもシーメンスと同様、発電所で一般的な蒸気タービン発電が採用されることが多い。他方、②の「蓄熱」については多様な技術が開発されている。それらは、石やレンガ、液体熔融塩に熱を蓄える「顕熱蓄熱」と、化学物質や合金が高温で固体から液体へ相変化する際に蓄えられる熱を利用する「潜熱蓄熱」の二つの方式に大別される（図表5）。

図表5 蓄熱方式の概要

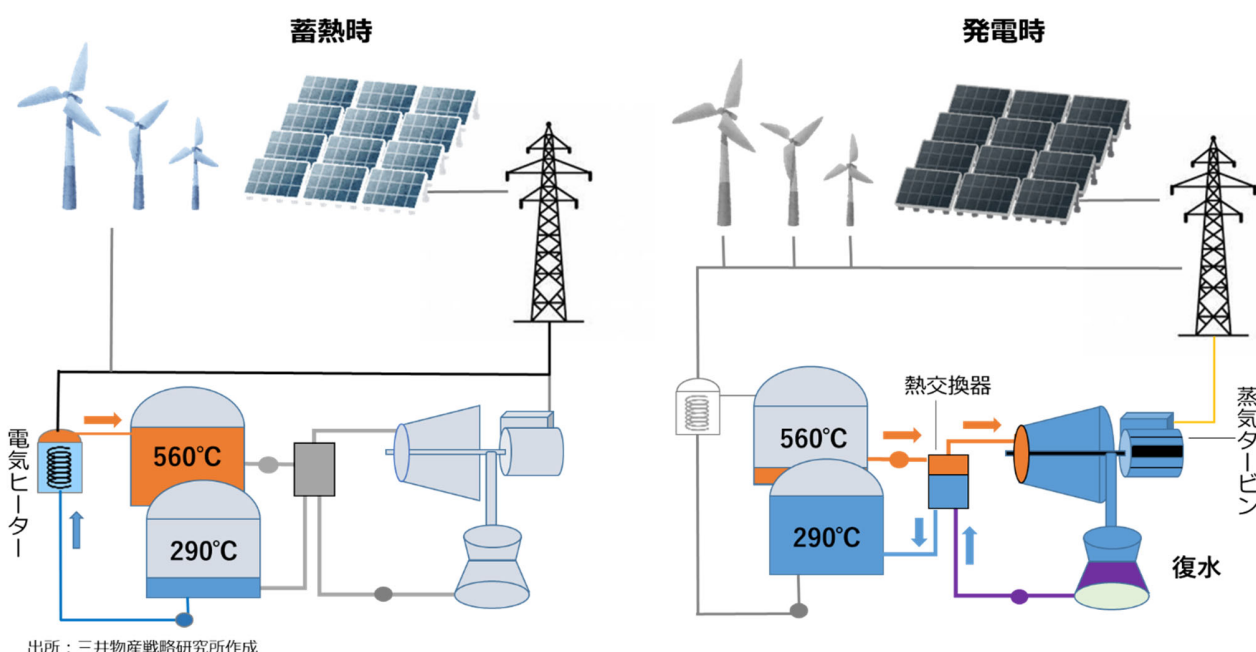
蓄熱方式	技術の概要	実用例	蓄熱発電への応用
顕熱蓄熱	固体や液体の蓄熱を利用。 (相変化なし)	水、レンガ、コンクリートなどの蓄熱温度差利用。 熱風炉のレンガ加熱、再生式バーナーの排ガスによるセラミック加熱など。	液体では熔融塩（硝酸塩）が太陽熱発電で実績。固体では石（火山岩など）やコンクリートなど開発中。
潜熱蓄熱	固体⇔液体 相変化の蓄熱を利用。 蓄熱量が顕熱蓄熱より大きい。	温熱での蓄熱実用例はない。 冷熱では夜間電力による氷の蓄冷で昼間の冷房利用がある。	開発中。 塩水化物、パラフィン、有機化合物、熔融塩、合金の相転移など応用研究。

出所：エネルギー総合工学研究所の資料を基に三井物産戦略研究所作成

顕熱蓄熱ではSiemens-Gamesaの例のように石による蓄熱が開発中だが、熔融塩を用いた蓄熱は太陽熱発電において既に実用化段階に達している。蓄熱に使われる熔融塩は硝酸ナトリウムと硝酸カリウムを混合した硝酸塩が多い。蓄熱発電は比較的安価な蓄電設備であることは先に述べたが、ここで使用される硝酸塩もまた、入手が容易で安価な材料である。硝酸塩は常温では固体だが約220℃で溶けて液体となり、600℃まで液体状態を保持することができる物質である。この性質を利用して、200～600℃の間の熱を蓄熱

する。図表6に溶融塩による蓄熱と発電のイメージを示す。ここでは、溶融塩が2つのタンクを介して、蓄熱と発電を繰り返す動作を描いている。蓄熱時は電気ヒーターで溶融塩を560℃まで加熱してタンク内で蓄熱する。発電時は560℃の溶融塩で熱交換機により水蒸気を発生させ蒸気タービンで発電する仕組みとなっている。熱交換機で水蒸気発生後290℃まで温度が下がった溶融塩はタンクを介して再びヒーター加熱され蓄熱するという循環を繰り返す。この技術は、余剰再エネの蓄電ではまだ導入されていないが、太陽熱を直接利用する溶融塩蓄熱発電は実用化されている（図表7）。一方、潜熱蓄熱は顕熱蓄熱より蓄熱量が大きく、蓄熱部をコンパクトにできることから今後の開発が期待される。

図表6 溶融塩による蓄熱と発電のイメージ



図表7 スペイン Andasol Solar Power Station 太陽熱発電
(100MWe 蓄熱 2,000MWh)

太陽熱発電プラント全景



溶融塩蓄熱発電設備



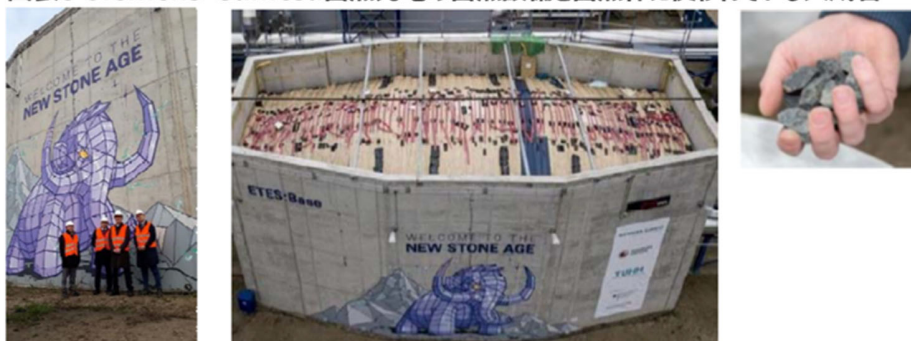
出所：SENER Energyウェブサイト。三井物産戦略研究所が説明付記

世界の蓄熱発電開発事例

岩石利用の蓄熱発電：Siemens-Gamesa

Siemens-Gamesaが開発中の蓄熱発電は図表4で紹介したように、火成岩を砕いた碎石に熱を蓄えて蓄熱して発電する。約1,000トンの火成岩碎石を480℃まで熱し24時間蓄熱可能なデモプラントがドイツで稼働している（図表8）。電力は1.5MW蒸気タービンで供給

図表8 Siemens-Gamesa蓄熱発電の蓄熱設備と蓄熱体に使われている火成岩



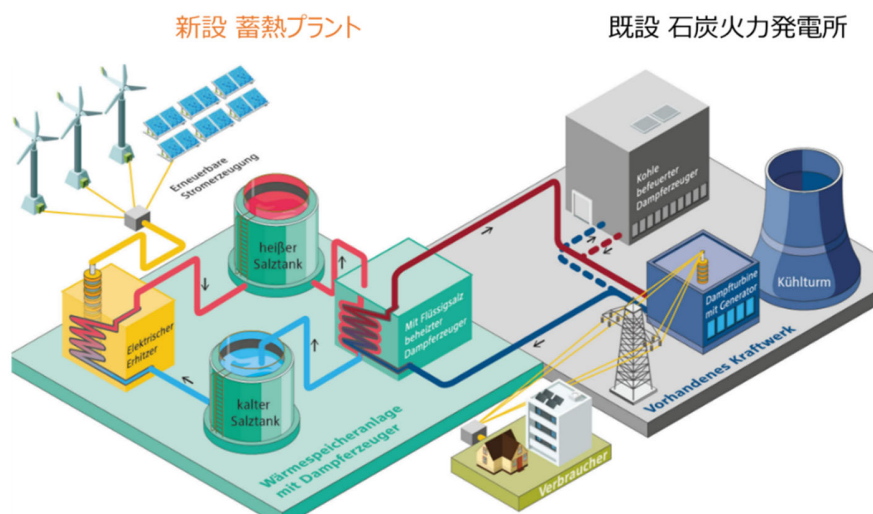
出所：Siemens-Gamesa

され、電気を蓄熱し再び電気をつくる全体の効率は25%である。将来的には蓄熱温度を600～700℃まで高温化し、全体の発電効率45%の実現を目標としている。電熱変換に産業用ヒーターを採用、安価な火成岩を蓄熱材に使用、実績ある蒸気タービンで発電するなど、既存技術と安価な素材で設備を構築している。そのため、Siemens-Gamesaによるとバッテリーと比較して設備コストが10分の1に抑えられるという。今後は蓄熱規模5倍30MWのパイロットプラントの実証を経て、2025年頃には100MW蓄熱規模のコマーシャルプラントを実現する計画が示されている。

石炭火力発電所と蓄熱の併設：RWE、アーヘン工科大学

蓄熱設備を既設の石炭火力発電所に併設して、CO₂削減を図る試みがドイツの電力会社RWEとアーヘン工科大学等で進められている（図表9）。余剰再エネで熔融塩を加熱して蓄熱し、この熱と石炭燃焼による熱の両方から蒸気を作って発電する仕組みである。余剰再エネを捨てずに有効活用でき、また、再エネの蓄熱

図表9 独RWEの既設石炭火力発電所と蓄熱の併用



Schematic representation of the conversion of a coal power plant to a heat storage power plant.

出所：RWE資料。三井物産戦略研究所が説明付記

から発電する分はCO₂排出量がゼロ扱いとなるので石炭火力発電所全体のCO₂削減が可能となる。RWEは蓄熱との併設を石炭火力発電廃止までのCO₂削減対策として位置付けるほか、石炭火力発電の廃止以降は完全な蓄熱発電所へ転換することを構想している。

小型の蓄熱設備：Eco-Tech Ceram

フランスのEco-Tech Ceramは排熱を利用した小型の蓄熱設備を開発している(図表10)。通常は煙突を通じて大気中に放散されてしまう工場排熱をセラミックに蓄熱して回収し、工場内の熱源として再利用する。蓄熱温度は600℃、2MWまでの蓄熱が可能とされ、熱利用のほか、蓄熱装置を複数設置することで発電も可能とするコンセプトを持つ。余剰再エネ

図表10 仏Eco-Tech Ceramの蓄熱ソリューション



出所：Eco-Tech Ceram資料。三井物産戦略研究所が説明付記

を吸収する蓄熱発電設備開発は大型のものが主流ななか、このような小型の、排熱利用の蓄熱設備の開発も進められている。一次エネルギーの40%は排熱として捨てられていることはエネルギー利用効率向上の重要な課題であり、排熱蓄熱設備は今後注目すべき動向と考えられる。

まとめ

国や企業がネットゼロエミッション目標を掲げ、その達成に向けて再エネの導入はますます拡大していく。現在のように余剰再エネを捨てるのではなく、今後はその有効活用が求められ、蓄電の重要性が増してくる。現時点ではバッテリーが蓄電の中心的な技術であるが、バッテリーは短時間・小容量の蓄電に適し、長時間・大容量の蓄電には蓄熱発電も有効であるとの理解が進むと考えられる。エネルギー事業者も、これまでのバッテリーを主とした蓄電から、今後は蓄熱発電や水素貯蔵などの実用化が進むことで、蓄電時間と容量、コスト、需要と送電系統との兼ね合い、立地条件などの観点から最適な蓄電技術の組み合わせを考える必要がある。

蓄熱発電、特に潜熱の蓄熱材開発は途上の技術であり、技術成熟度が上がりコストが低減されるかは今後の技術開発によるが、その普及促進について注目すべきである。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。