

長時間エネルギー貯蔵技術

ー 圧縮空気貯蔵、蓄熱発電に普及の可能性ー

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：インダストリーイノベーション室 稲田 雄二

知財分析：知的財産室 石黒 隆介

Biz Tech フォーカス 2025

なぜこの技術を取り上げるのか

ネットゼロ達成に向けて再エネはますます導入拡大されるが、変動が大きいため主力電源になるためには需要に合わせた貯蔵能力が必須となる。長時間エネルギー貯蔵（LDES：Long Duration Energy Storage）は、長時間にわたる電力貯蔵を可能にする技術であり、再エネと組み合わせることで、不安定な電力供給を平準化する。低コストかつ十分な蓄電容量をもつ圧縮空気貯蔵や蓄熱発電といったLDES技術が開発されている。

Summary

- 再エネの主力電源化のためには、LDES技術が不可欠とされる。従来の蓄電技術であるバッテリーや揚水発電に加え、圧縮空気貯蔵、蓄熱発電、フローバッテリー、重力貯蔵などの開発が進んでいる。
- 圧縮空気貯蔵や蓄熱発電は、LDESの中でも低コストかつ安全性の高い点で注目されている。これらの技術開発は実証段階から商用段階へと移行しつつあり、今後2～3年で普及が期待される。

1. 長時間エネルギー貯蔵（LDES）とは

再エネは、太陽光や風力が利用可能なときにしか発電できず、火力発電のように電力需要に応じた柔軟な調整が難しい。CO₂削減の切り札である一方、調整が効かないことが弱点として挙げられる。今後も増加する再エネにより、電力需要を上回る余剰電力が大量に発生することが予想される。このため、余剰電力を一時的に蓄え、必要なときに必要な量を供給するための蓄電設備の整備が喫緊の課題となっている。

1-1. LDESの技術概要

LDESの技術概要および技術的課題を図表1に示す。LDESは、6時間以上の電力貯蔵を可能とする技術と定義される。この技術は、送電網を介して電力を一定時間貯蔵し、需要に応じて適切な量を送電し、需給バランスの調整を図るものである。現在、最も使用されているのが①バッテリーであり、これはLDESの中では電力をそのまま貯蔵する技術である。一方、電力を他のエネルギーに変換して蓄える方式も存在する。LDESにはさまざまな方式があり代表的な例として、②蓄熱発電：電気を熱に変換して貯蔵し、必要な際に再び電力に変換する方式、③圧縮空気貯蔵：電力で空気を圧縮し圧縮空気としてエネルギーを貯蔵する方式、④フローバッテリー：化学反応を利用して電力を蓄え放電する方式、⑤重力貯蔵：重量物を高所に持ち上げ、位置エネルギーとして貯蔵する方式などが挙げられる¹。

¹ 揚水発電や電力を水素に変換して貯蔵する方式（水素変換）もLDESだが、揚水発電は既存技術であること、水素変換は3～5年程度で社会実装されると予想しづらいことから、本稿では対象外の技術としている。

バッテリーは、電力を直接貯蔵するため、エネルギー効率が90%以上と非常に高い。一方、蓄熱や圧縮空気などのLDESは、電力を熱や圧縮空気に変換し、再び電力に戻す過程を経るため、エネルギー効率が50~70%とバッテリーに比べて低い。しかし、大規模な電力貯蔵が必要となる場合は、低コストな長時間貯蔵を実現する可能性があり、社会実装に向けた開発が進められている。また、LDESのここ10年間の特許出願は着実な増加傾向にあり、特に空気と熱を蓄エネ媒体とする技術の進展が注目される。

図表 1 : 長時間エネルギー貯蔵技術の概要



蓄エネ技術	技術の概要	技術的課題など
バッテリー Batteries	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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 	<ul style="list-style-type: none"> □ 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
蓄熱発電 Thermal Energy Storage (TES)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 物質の蓄熱。顕熱、潜熱、化学蓄熱がある ■ 蓄熱部は15\$/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 	<ul style="list-style-type: none"> □ 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)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 地下空間やタンクに圧縮空気貯蔵 ■ 空気の圧縮膨張で発電する方式や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：数時間から数日 	<ul style="list-style-type: none"> □ 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
フローバッテリー Flow Battery	<ul style="list-style-type: none"> ■ 液体電解質を用いて電力を蓄えるシステム ■ 2種類の化学物質を溶解させた液体をタンクに蓄え、ポンプで循環させることで充放電する ■ 蓄電時間の目安：数時間から数日 	<ul style="list-style-type: none"> □ 初期コストが高い □ バナジウムを使用する場合は供給リスクの懸念 □ 電解液が液体であるため、液漏れ対策が必要
重力貯蔵 Gravity Energy Storage	<ul style="list-style-type: none"> ■ 物体を高い位置に持ち上げ、その位置エネルギーを利用して電力を蓄える ■ コンクリートブロックなどの重い物体をクレーンなどで高い位置に持ち上げ、落下する際に発生する運動エネルギーを電力に変換 ■ 蓄電時間の目安：数時間から数日 	<ul style="list-style-type: none"> □ 高い位置に重量物を持ち上げる必要があるため、一定の広さの土地で安定した地盤が必要 □ 地形が複雑な場所では設置が難しいこともある

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

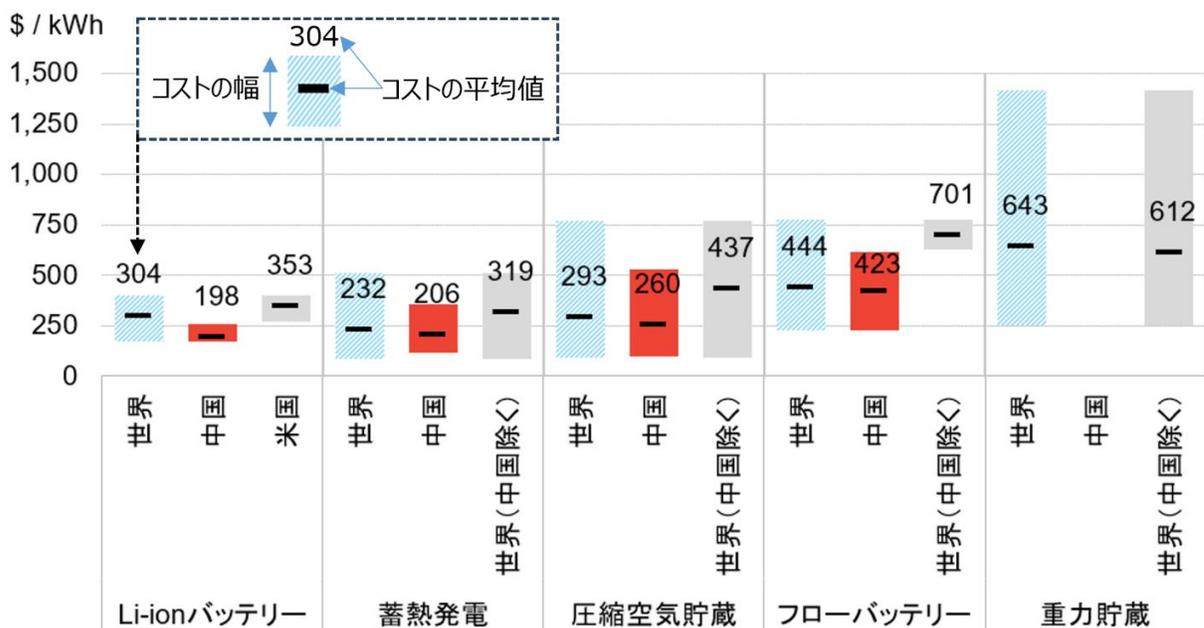
1-2. LDESのコスト

図表2に2023年時点における各LDES技術のコストを示す。重力貯蔵の世界平均コストは最も高く、電力貯蔵1kWh当たり643ドルである²。

次にフローバッテリーの444ドル/kWh、リチウムイオンバッテリー（Li-ion）の304ドル/kWh、圧縮空気貯蔵の293ドル/kWhと続き、最もコストが低いのは蓄熱発電で232ドル/kWhとなっている。

中国製のコストは世界の平均値を下回っており、特にリチウムイオンバッテリーは、世界で最も低コストである。そのため、中国では、蓄熱発電や圧縮空気貯蔵といった低コストのLDES技術であっても、リチウムイオンバッテリーに取って代わることは難しいと考えられる。

図表 2 : LDESのコスト



出所：BloombergNEFから三井物産戦略研究所作成

2. 注目すべき動向

現在、世界平均コストの比較で、Li-ionバッテリーと比較して安い、もしくは同レベル技術は蓄熱発電と圧縮空気貯蔵となっている。蓄熱発電は、電気を熱に変換し、岩石や熔融塩に熱を貯蔵、電力が必要なときに熱から蒸気をつくりタービンで発電する技術である³。ここでは、注目すべき動向として、圧縮空気貯蔵を取り上げる。この方式では、電力を用いて圧縮機を稼働させ、空気やCO₂などを圧縮し、気体あるいは液体として地下空間やタンクに貯蔵する。蓄えた圧縮エネルギーは、電力需要に応じて解放され、空気タービンなどの発電機で電力に変換される（図表3[a]）。空気やCO₂といった気体を作動流体に使うため、

² 重力貯蔵にダム式、揚水発電は含まれない。

³ 蓄熱発電については、「脱炭素社会に向けて開発進む蓄熱発電」（三井物産戦略研究所、2021年2月）参照。

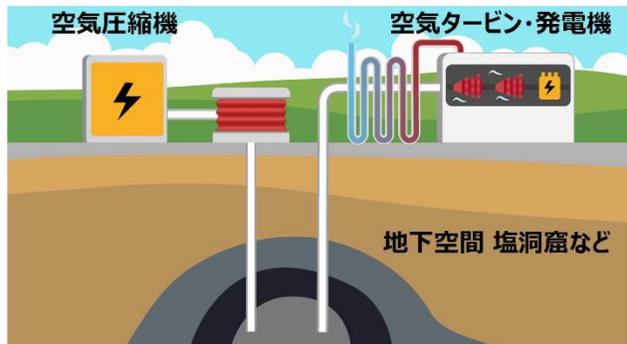
安全性が高い。また、気体を圧縮して発電する技術はすでに確立されたシンプルなものであり、適した地下空間を確保できるなど、低コストを実現する条件がそろえば今後普及が見込まれる。

中国国家エネルギー貯蔵会社は、300MW級の圧縮空気エネルギー貯蔵施設を2024年4月に稼働させている（図表3[b]）。この施設では、圧縮空気を地下約1000mに広がる塩洞窟に貯蔵する。塩洞窟は、岩塩の採掘後に形成される洞窟であり、密閉性と安定性に優れているため、高圧空気の貯蔵に適している。このような自然環境を利用することで、地上にタンクを設置する場合と比較してコストを削減できる。

（伊）Energy Domeは、2022年から2.5MW級の液化CO₂エネルギー貯蔵設備を運用している（図表3[c]）。この技術では、気体のCO₂を貯蔵タンク（ドーム）に入れ、電力を用いて圧力をかけ、冷却することで液体化し貯蔵する。電力が必要な際には、液体化したCO₂を沸騰させて気体に戻し、タービンを駆動させて発電する仕組みである。液化することで、気体よりも高密度のエネルギーを貯蔵でき、貯蔵タンクの体積を削減できる利点がある。同社は米ウィスコンシン州で20MWの液化CO₂エネルギー貯蔵設備の建設を発表しており、これが実現すれば約18,000世帯に10時間分の電力を供給できるとしている。上記2社に加え、（蘭）Corre Energy、（英）Highview Power、（加）Hydrostorなど、多くのスタートアップが、空気や水といった気体や液体を蓄エネ媒体とするエネルギー貯蔵技術の開発を進めている（図表3[d]）。

図表3：圧縮空気貯蔵の仕組みと事例

[a] 地下空間を利用した圧縮空気貯蔵



[b] 中国国家エネルギー貯蔵会社の300MW級圧縮空気エネルギー貯蔵施設

[c] Energy Domeの液化CO₂エネルギー貯蔵設備

[d] 圧縮空気貯蔵のスタートアップ例



出所：

(a) 三井物産戦略研究所

(b) 新華社 <https://jp.news.cn/20240413/87aef01fd9374488855ed9fe2e786b6d/c.html> (2024年12月4日参照)

(c) Energy Dome

<https://energydome.com/energy-dome-signs-first-u-s-contract-with-alliant-energy-for-commercial-scale-deployment-of-its-co2-battery/> (2024年12月4日参照)

3. 今後の展望

LDES技術は、初期開発段階から実証段階、さらには商用規模へ移行しつつある。本稿では、特に圧縮空気貯蔵が技術的およびコスト面で優位性を示し、実用段階に入りつつあることを示した。

米国エネルギー省はLDESの重要性を認識し、2023年に最大2億8,600万ドルの資金をLDES技術の開発に提供すると発表した⁴。このうちEnergy Dome (Columbia Energy Storage Project) など6社が3,900万ドルを受け取り、実証規模の技術開発を進めている。政府の資金援助や投資家からの出資が活発化する中、LDES開発は加速しており、2～3年以内には社会実装が本格化すると考えられる。

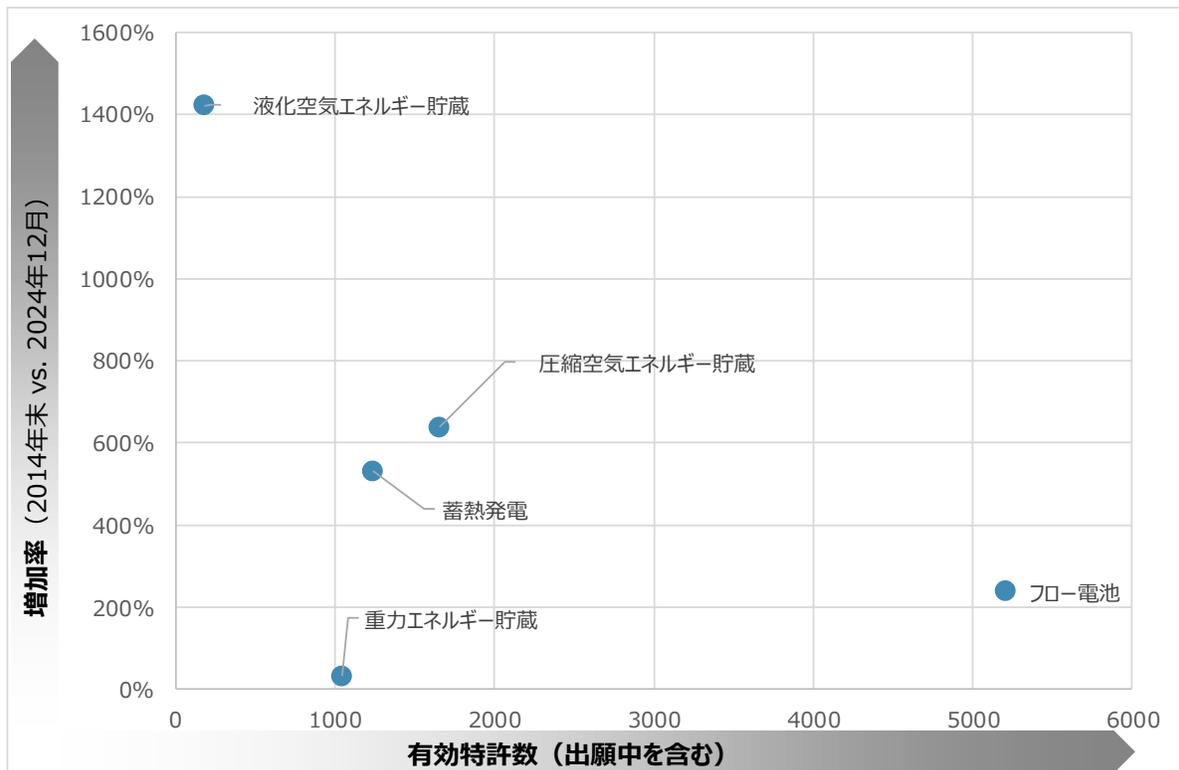
⁴ US Department of Energy “Long-Duration Energy Storage Demonstrations Projects Selected and Awarded Projects”

長時間エネルギー貯蔵技術（LDES）に関する知財分析

長時間エネルギー貯蔵（LDES）を、フロー電池、圧縮空気エネルギー貯蔵、液化空気エネルギー貯蔵、蓄熱発電、重力エネルギー貯蔵の5つの技術別に分類した。それぞれと関連性の高い特許を特定（2024年12月時点で出願中を含む有効特許数⁵は9,142件）して、技術別、上位プレーヤー別の分析を行った。

図表4は、LDESの各技術の有効特許数とその増加率を比較した結果で、横軸が有効特許数、縦軸が2024年12月時点と2014年末時点での有効特許数を比較した増加率を表している。長時間エネルギー貯蔵技術のなかでも、フロー電池の特許数が特に多く、それと比較して少ないものの液化空気エネルギー貯蔵、圧縮空気エネルギー貯蔵、蓄熱発電は近年大きく特許数を伸ばしている。

図表4：有効特許数、増加率（技術分類別）



出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

図表5では、LDES関連の各技術の特許数における上位プレーヤーを比較した結果、いずれの分野でも中国の研究機関の存在感が大きいことが明らかとなった。フロー電池において、特許数でトップの（中）Chinese Academy of Sciences（CAS）の傘下で2位の（中）Dalian Institute of Chemical Physics（DICP）は、従来の2倍以上の出力密度を持つバナジウムフロー電池スタックを開発したことを2024年1月に発表している。

⁵ 出願された特許、および審査を経て特許権としての権利行使が可能な状態にある特許の総数。

図表5：有効特許数（技術別上位プレイヤー）

フロ-電池			圧縮空気エネルギー貯蔵			液化空気エネルギー貯蔵		
#	企業・研究機関	特許数	#	企業・研究機関	特許数	#	企業・研究機関	特許数
1	(中) Chinese Academy of Sciences	432	1	(中) Chinese Academy of Sciences	155	1	(中) Chinese Academy of Sciences	33
2	(中) Dalian Institute of Chemical Physics	290	2	(中) China Huaneng Group	145	2	(中) Technical Institute of Physics & Chemistry	29
3	(日) Sumitomo Electric	160	3	(中) State Grid Corp	130	3	(中) State Grid Corp	12
4	(中) DALIAN RONGKE POWER TECHNOLOGY	128	4	(中) Tsinghua University	103	4	(中) ZHONGLV ZHONGKE ENERGY	9
5	(韓) LG Chem	90	5	(中) Xi'an Jiaotong University	87	5	(中) China Huaneng Group	7
6	(韓) Korea Institute of Energy Research	74	6	(中) PowerChina	86	6	(中) Shijiazhuang Tiedao University	6
7	(韓) Lotte Chemical	72	7	(中) China Southern Power	66	7	(中) ARREON ENTHALPY ENERGY TECH	5
8	(米) ESS Technology	63	8	(中) China Three Gorges	50	8	(中) HEBEI HCIG GUORONG ENERGY	5
9	(米) TRC COMPANIES INC	52	9	(中) State Power Investment	42	9	(中) HEBEI JIANTOU ENERGY STORAGE TECH	5
10	(中) Ansteel Group	50	10	(中) North China Electric Power University	41	10	(中) State Power Investment	5

蓄熱発電			重力エネルギー貯蔵		
#	企業・研究機関	特許数	#	企業・研究機関	特許数
1	(中) China Huaneng Group	98	1	(中) State Grid Corp	22
2	(中) Xi'an Jiaotong University	66	2	(中) Chinese Academy of Sciences	21
3	(中) Chinese Academy of Sciences	59	3	(中) China Huaneng Group	12
4	(中) State Grid Corp	38	4	(中) Xi'an Jiaotong University	12
5	(中) Zhejiang University	30	5	(中) State Power Investment	10
6	(中) Huaneng Power International	24	6	(中) China Southern Power	8
7	(中) China Energy Investment	23	7	(個人) YANG YIYONG	8
8	(中) Haier	23	8	(仏) CEA	7
9	(中) Tsinghua University	20	9	(中) North China Electric Power University	7
10	(中) North China Electric Power University	19	10	(個人) CHEN MING	6

出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

稲田 雄二 Yuji Inada / シニアプロジェクトマネージャー

専門分野：エネルギー変換技術、低炭素燃料、炭素除去技術、プラントエンジニアリング

石黒 隆介 Ryusuke Ishiguro / シニアマネージャー

専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

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、当社およ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、当社およ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。