



 **TSC Foresight**

Innovation Outlook

Version 1.0 増補版

サステナブルエネルギー分野

2026年6月

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
イノベーション戦略センター

目次

3-1	サステナブルエネルギー分野	1
3-1-1	分野の俯瞰	1
3-1-2	解決すべき社会課題(M)	3
3-1-3	社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向	6
(1)	『貯める』に係る市場動向	6
(2)	『貯める』に係る技術動向	10
(3)	『貯める』に係る政策動向	22
3-1-4	社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 長期エネルギー貯蔵システムによる変動性再エネ最大活用	31
3-1-5	取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例	37
(1)	経済的先進 LDES	37
(2)	LDES 運用方法の検討	38
コラム	注目技術 1 無線給電の展望	41

3-1 サステナブルエネルギー分野

3-1-1 分野の俯瞰

エネルギーは移動や輸送、製造産業における熱や動力、人々の生活に必要な環境の維持、情報処理などで必要とされる。エネルギーは、自然界や周囲の環境に化石燃料、熱、光、風力など、様々な形態で存在している(一次エネルギー)が、これらのエネルギーを我々が便利に利用するためには、採掘等により取り出し、あるいは、目的に応じて電気やガス、ガソリン等の二次エネルギーに転換し(『創る』)、それらを有効に『使う』必要がある。また、『創る』過程と『使う』過程の間には一般に需給ギャップがあるため、そのギャップを埋めるために『貯める』過程や、相互に調整する『整える』過程が必要となる。そこで、この節では、『創る』『貯める』『使う』及び『整える』の四つの過程を俯瞰して議論する(図 3-1-1)。

『創る』過程には、バイオマスなどを含む火力発電、水力発電、原子力発電、地熱発電、太陽光発電(PV)、風力発電や燃料電池といった電力を得る技術に加え、熱エネルギーへの転換技術、天然ガスの採掘、水素の製造、バイオ燃料の合成といった燃料等を得る技術がある。Innovation Outlook では、近年、エネルギーの脱炭素化が大きな課題となっていることを踏まえ、再生可能エネルギー(以下「再エネ」という。)のみならず、CCS(CO₂の回収・貯留)等により脱炭素化した化石エネルギーを含む持続可能なカーボンニュートラル社会の実現に貢献する様々なエネルギーを「カーボンニュートラルエネルギー(CN エネルギー)」として取り扱う¹。

『貯める』過程については、電力を位置エネルギー(揚水発電など)、熱エネルギー、化学的エネルギー(蓄電池、水素をはじめとするエネルギーキャリアなど)といった別のエネルギー形態に変換して蓄え、必要に応じて電力に変換する技術がある。くわえて、変換した熱エネルギーを熱のまま利用する技術や、そもそも熱として得られる熱エネルギーを長時間保持し、必要に応じて熱や電力として利用する技術もある。

『使う』過程については、エネルギーを利用する技術全てが該当するわけであるが、持続可能なエネルギーシステムを目指す観点から、今回の Innovation Outlook では、省エネ技術(電力を利用する機器の効率向上、ヒートポンプ技術など)や、電化技術、あるいは水素等の脱炭素燃料への転換技術などに着目し、整理を行った。

『整える』過程には、エネルギーの需給のバランスを空間的あるいは時間的に調整する技術が該当し、近年注目が高まっている技術の例としては、電力であれば直流送電、調整力や系統慣性確保、エネルギーマネジメントシステムに関する技術が挙げられる。また、水素などのエネルギーキャリアの輸送技術なども含まれる。

ただし、エネルギーに関する技術は様々で、それらが四つの過程のどれか一つに分類されるとは限らない。例えば、電気分解による水素製造は、エネルギーを『創る』技術である一方で、『貯める』システムの一部となる技術でもある。また、水素輸送(『整える』過程)には、当然なが

¹ 脱炭素エネルギーとしては、原子力エネルギーも期待されているが、NEDO法の規定により、NEDOでは原子力関係の研究開発は実施しないこととされているため、今回の検討対象からは除外している。

ら、貯蔵技術(『貯める』過程)も不可欠となる。このように、現実のエネルギーシステムを考えた場合には、複数の過程の技術が、相互に関係している点には留意が必要である。

2025年に公開の Innovation Outlook Ver. 1.0 では、四つの過程のうち『創る』『貯める』に焦点を絞って議論した。この増補版では『貯める』について改めて議論する。なお、残る二つの過程については将来議論する予定である。

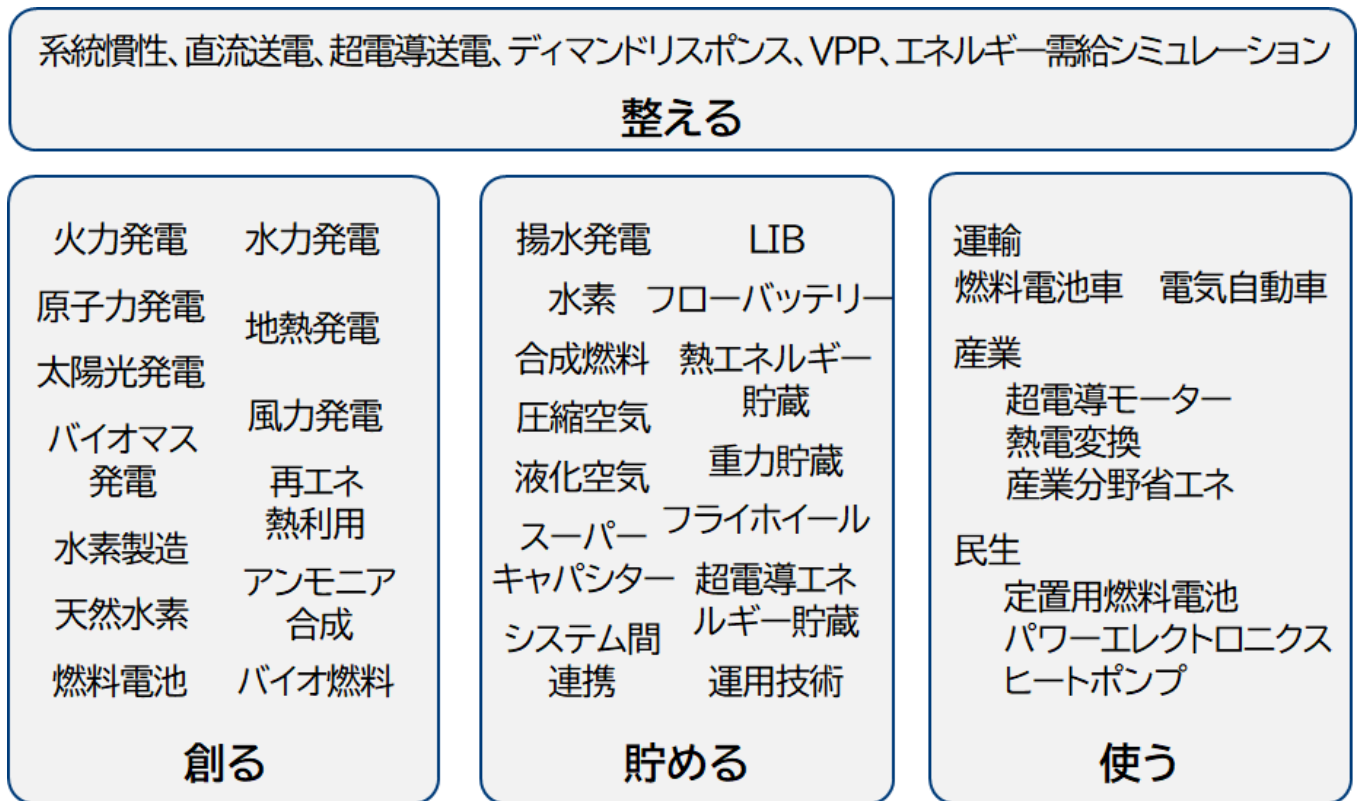


図 3-1-1 エネルギー技術の全体俯瞰図(記載の技術はあくまで例示)

3-1-2 解決すべき社会課題(M)

『貯める』ことが必要になっている背景には二つある。

一つは再エネの一層の導入を進めるにあたり、その変動性を克服する必要があることである。CN 社会の実現に向け、太陽光発電や風力発電といった変動性再エネ(VRE)の導入が加速している。それに伴い、新たなニーズが生じる。

図 3-1-2 は『貯める』過程、すなわちエネルギー貯蔵について、得られる出力を縦軸に、横軸にはその出力を連続して得られる時間(連続出力時間)をとり、種々のニーズを図示したものである。これまでは短時間の供給電圧の低下や停電から種々の設備を保護し運転を継続するための小規模の非常用電源、大規模災害時における社会活動継続のための事業所向け非常用電源、エネルギー安全保障リスク低減のための備蓄が主なニーズであった。

ところが、変動性再エネの導入拡大に伴い日常的な出力調整が必要となってくる。変動性再エネの出力は予測可能ではあるものの、短時間で急変することがあり、需要側との調整が難しい。特に需要が少ない時間帯に余剰電力が発生し、逆に需要が多い時間帯に供給不足が生じる問題がある。すなわち、太陽光や風力の短周期変動を平準化するための短時間の調整(秒~数時間)や、昼間の太陽光発電の余剰電力を貯め、夜間に放出するための日単位の調整(数時間~1日)が必要となってくる。

くわえて、曇天無風や台風といった再エネの発電が困難な悪天候(数日~1、2週間)への備え、季節による発電量の変動を補うための備蓄、後述の大規模災害への備えといったニーズも生じてくる。

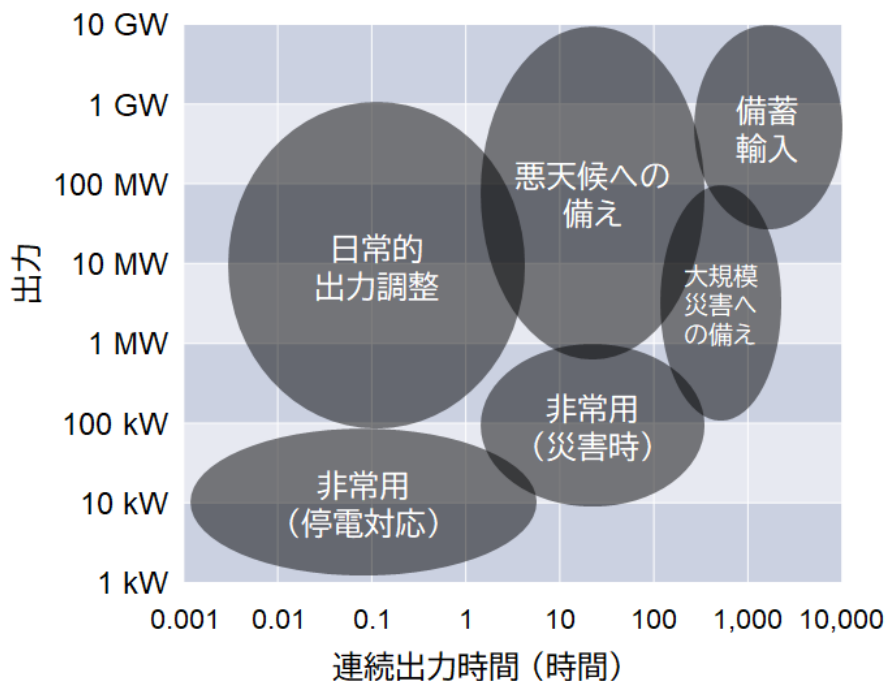


図 3-1-2 エネルギー貯蔵の社会的需要

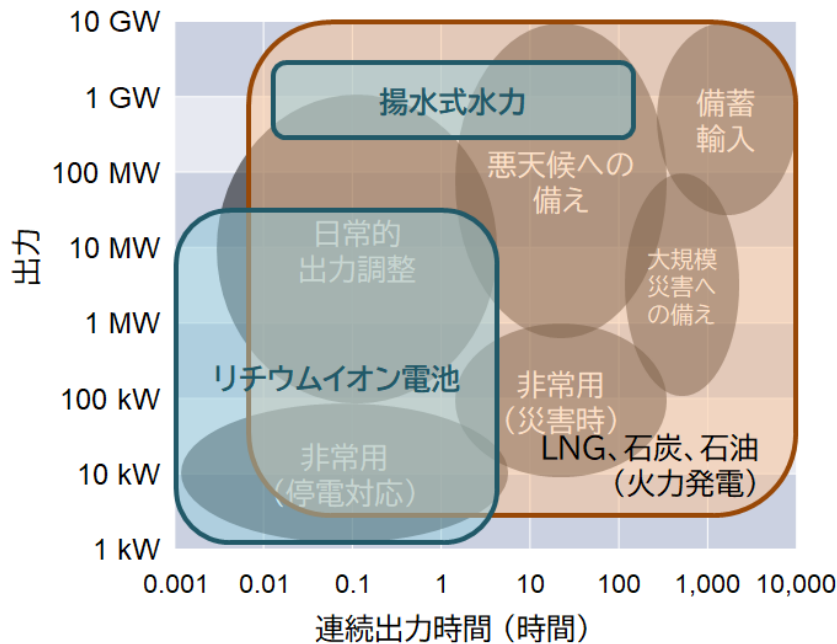


図 3-1-3 社会的需要に対する現在のエネルギー貯蔵手段

これらのうち、数 kW から GW の出力範囲、連続出力時間でいえば数分から数千時間を超える広い範囲のエネルギー貯蔵は、これまで主に天然ガス、石炭、石油といった化石燃料が担ってきた(図 3-1-3)。CN 社会においてこれら化石燃料から脱却するためには、図 3-1-3 の多様なニーズを満たす必要がある。そこには以下三つの課題がある。

1) 需給バランスの確保

日常的出力調整のため、揚水発電は現在、昼間の太陽光発電の余剰電力を貯め、夜間に放出する役割を担っている。しかし、その容量は現状では十分ではなく、より広範な導入が求められる。しかし、導入可能な適地は限られており、拡張に制約がある。

近年、日本でも定置用蓄電池の導入が進んでいる。しかし、蓄電池の価格が下がってきている現状を踏まえたとしても、大規模な系統運用を支えるには、膨大なコストが必要となる。安価な蓄電池についてはサプライチェーンの観点からの懸念もある。

2) 系統安定性の維持

電力系統は電圧や周波数を一定範囲に維持する必要があるが、変動性再エネの変動により系統が不安定になる可能性がある。CN 社会においては火力発電や揚水発電などの調整力をもつ電源には限りがあることから、そうした調整機能を強化する新たな技術の導入が求められている。

3) 長期的な変動への対応

季節変動を含む長期的な変動への対応には、化石燃料に代わる CN なエネルギーキャリアとして水素(液体水素やアンモニアなど)、バイオ燃料や合成燃料といった再生可能燃料の活用が期待されている。水素は燃料電池を用いた直接発電、タービンによる発電、燃焼による熱利用など多様な用途がある。しかし、製造コストの低減や輸送・貯蔵の効率向上が課題となっている。

このような課題を解決するため、新たなエネルギー貯蔵技術の活用が不可欠となっている。もう一つは、災害等に対するレジリエンスの向上や特定資源リスクの低減である。

近年、自然災害は発生頻度の増加と被害規模の拡大が同時に進行している。線状降水帯の発生により、短時間に局地的な豪雨が集中し、住宅地を巻き込む大規模な土砂災害や河川氾濫が各地で発生している。また、大型で勢力の強い台風の上陸により、送電鉄塔や配電設備が倒壊・損傷し、広範囲で長時間の停電が生じる事例も少なくない。さらに、地震による津波や地盤被害は、電力・ガス・交通といった社会インフラを同時に寸断し、避難や物資輸送、医療活動に深刻な支障を与えている。こうした災害時には、中央集約型のエネルギー供給に依存するほど復旧に時間を要する傾向がある。そこで、大規模災害への備えの観点から、太陽光発電や蓄電池、非常用電源を地域単位で分散配置し、平常時から活用しつつ、非常時にも最低限の電力を確保できる地域分散型のエネルギー環境の構築が求められている。

また、『貯める』技術を導入・維持するために必要となる資材・資源や関連製品が、特定の国や地域に強く依存している点についても懸念が高まっている。とりわけ蓄電池に不可欠なニッケル、コバルト、リチウムといった重要鉱物は、産出国が限られているうえ、地政学的リスクや資源ナショナリズムの影響を受けやすく、価格高騰や供給途絶が生じる可能性が常に存在する。実際、国際情勢の変化や輸出規制、鉱山開発の停滞などにより、調達の不確実性が顕在化する事例も見られる。こうした状況下では、設備の新設だけでなく、長期的な保守・更新が滞り、災害対応力やエネルギーの安定供給に支障を来すおそれがある。このため、サプライチェーンの多様化はもとより、代替材料の開発や蓄電池に依存しないエネルギー貯蔵・供給技術の開発や導入が必要となっている。

これらの背景を踏まえ、『貯める』に関して、『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』と『災害等に対するレジリエンス向上・特定資源リスクの低減』を解決すべき社会課題に掲げることとした。

3-1-3 社会課題を取り巻く国内外の市場・技術・政策動向

(1) 『貯める』に係る市場動向

(i) 市場の年次推移・見通し

エネルギー貯蔵に関する投資額の推移を図 3-1-4 に示す。それぞれ増加している中で、揚水、水素等を除くエネルギー貯蔵の投資額がとりわけ多く、2024 年には\$60B に達し、2020 年に比べて 12 倍に増加している²。

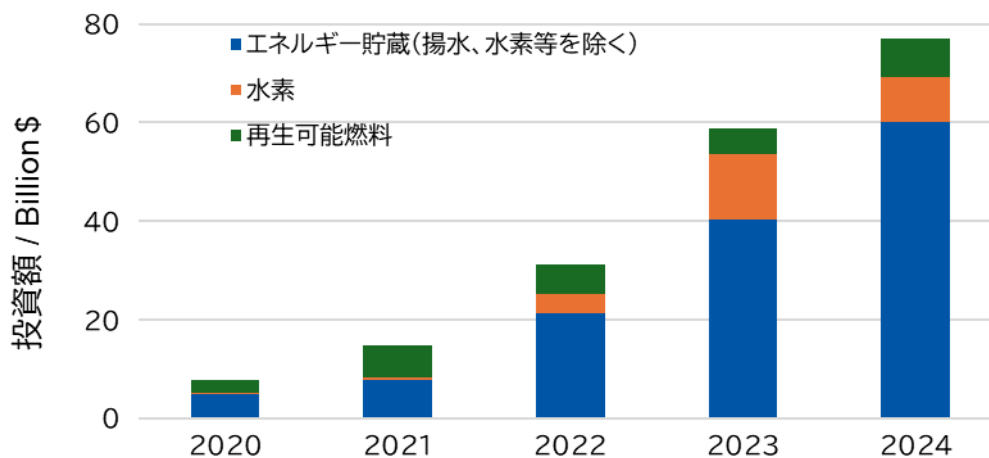


図 3-1-4 エネルギー貯蔵に関する貯蔵手法ごとの投資額の推移³

出所: BloombergNEF

世界のエネルギー貯蔵市場規模の予想は Dimension Market Research が発表している⁴。2024 年に\$58.9B に達する見込みで、さらに 14.8%の CAGR で成長し、2033 年までに\$204.8B の市場規模に達するとしている。

年単位の世界のエネルギー貯蔵の新規導入規模は、定格出力でみると、2025 年に 92 GW で、2035 年には 243 GW に拡大すると予測されている(図 3-1-5)⁵。容量(GWh)ベースでは 2025 年に前年比 22.7%となる 247 GWh が見込まれ、2035 年には 1,033 GWh に達すると予測されている(図 3-1-6)。これは CAGR で 15.4% に相当する。

² Bloomberg NEF. Investing In the Low-Carbon Transition. Bloomberg NEF. (オンライン)
<https://www.bnef.com/themes/t1ar6egoynte00?language=en> (2025 年 10 月閲覧)

³ エネルギー貯蔵(揚水、水素等を除く): 定置用リチウムイオン電池、圧縮空気、フローバッテリー等、新興技術を含む。水素: 水電解装置、熱化学、パイプライン、地下貯蔵を対象として集計。

⁴ Dimension Market Research. Energy Storage Market. (オンライン)
<https://dimensionmarketresearch.com/report/energy-storage-market/#overview/> (2025 年 1 月閲覧)

⁵ 2H 2025 Energy Storage Market Outlook (Bloomberg NEF, 2025 年 10 月)
<https://www.bnef.com/insights/37795?language=en>

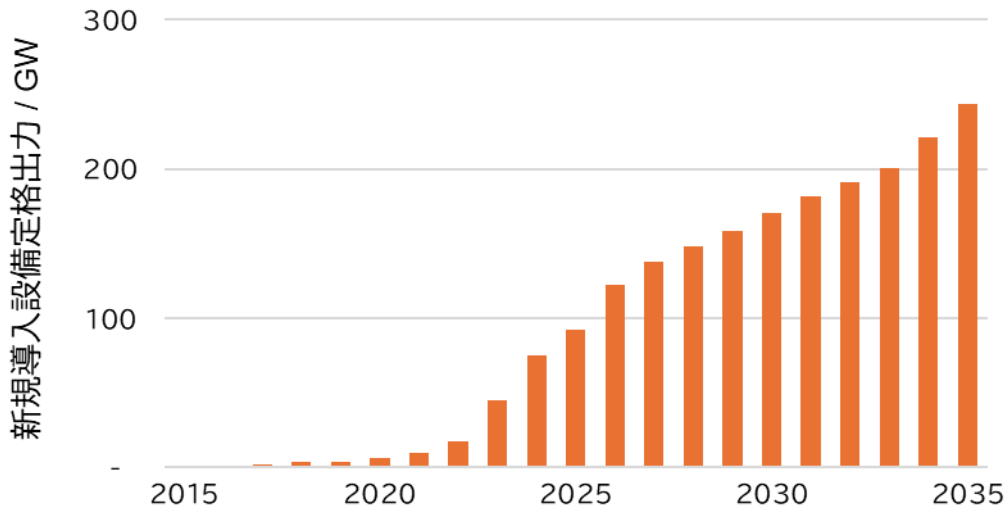


図 3-1-5 世界のエネルギー貯蔵の年間新規導入設備定格出力⁵

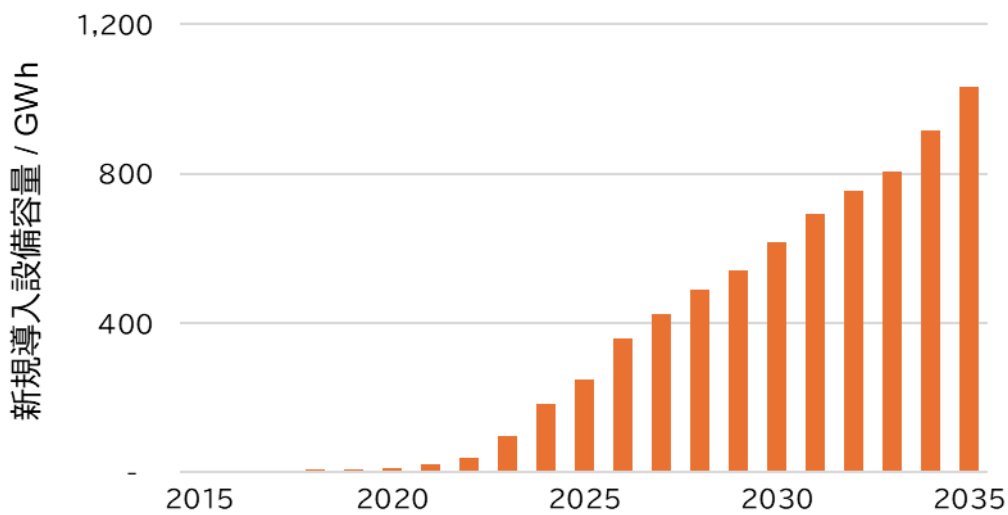


図 3-1-6 世界のエネルギー貯蔵の年間新規導入設備容量⁵

Bloomberg はさらに、エネルギー貯蔵のうちリチウムイオン電池(LIB)を除いたものを LDES(LDES:Long Duration Energy Storage)と定義し、その推移も発表している。それによれば、世界の LDES の新規導入設備定格出力は 2025 年にわずか 2 GW だが、2035 年には 17 GW に増加すると予想している(図 3-1-7)。容量ベースでは 2025 年に 10 GWh のところ、年平均 28.0% で成長し、2035 年には 118 GWh に達するとしている(図 3-1-8)。その結果、エネルギー貯蔵に対する割合は 2025 年の 4.0% から 2035 年には 11.4% にまで拡大する。累積では 2035 年に 718 GWh に上ると予測されている(図 3-1-9)。すなわち、エネルギー貯蔵の中でも特に LDES の成長が著しいことが分かる。

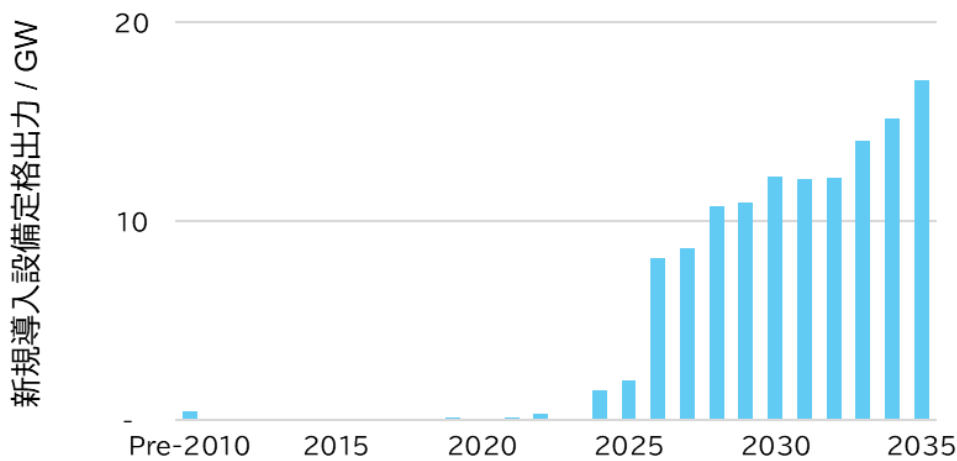


図 3-1-7 世界の LDES の新規年間導入設備定格出力⁵

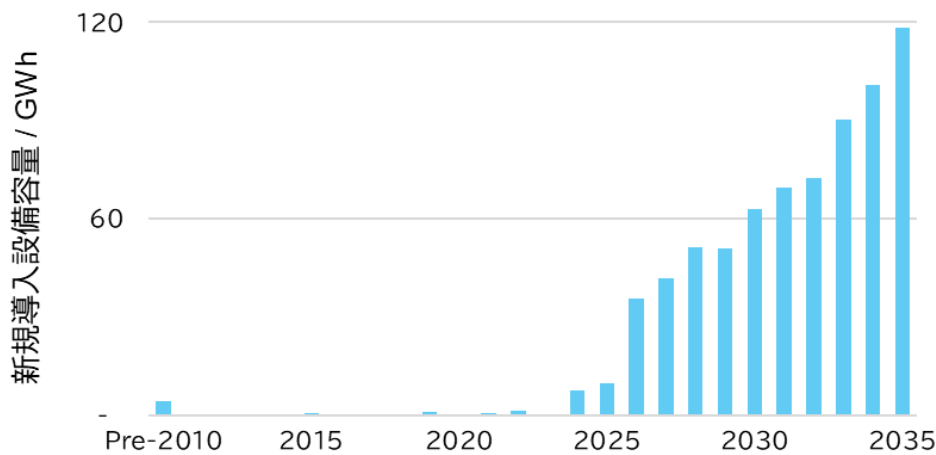
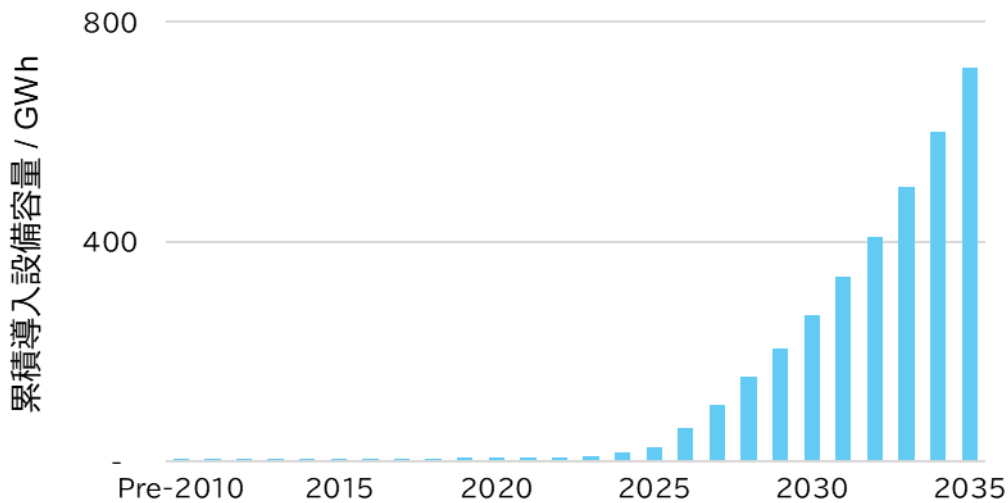


図 3-1-8 世界の LDES の年間新規導入設備容量⁵


 図 3-1-9 世界の LDES の累積導入設備容量⁵

(ii) スタートアップの創出と投資の活況

エネルギー貯蔵の中でも LDES に関しては、2010 年代後半からスタートアップの設立が本格化し、特に再生可能エネルギーの主力電源化が進展した 2020 年前後以降、その動きが急速に活発化している⁶。世界的に見ると、LDES 関連スタートアップの数は 2016 年頃から増加傾向にあり、2022 年までの約 6 年間で約 45%増加したとされる。ニュースレターCTVC 及び LDES National Consortium Annual Workshop によれば、重力、熱、圧縮ガスなど電池に依存しない多様な手法を対象として多くのスタートアップが設立されていることが分かる。

これに伴い、ベンチャーキャピタルやプライベートエクイティからの資金流入も拡大し、近年で大型の資金調達を実現している。情報源の違いによる差はあるものの、2021 年を境に急増し、\$1B を超える投資を集めていることが分かる。こうした動きは、変動性再エネの大量導入を背景に、LDES が将来のエネルギーシステムに不可欠な要素として認識され始めたことを示している。

(iii) 業界組織の設立や国際会議・展示会の活発化

エネルギー貯蔵に関する業界組織としては、EASE、LDES Council、LDES National Consortium などがある。

2011 年、ブリュッセルにて EASE(European Association for Storage of Energy、欧州エネルギー貯蔵協会) が設立されている。EASE は、エネルギー貯蔵バリューチェーン全体にまたがる約 70 の組織(電力会社、技術サプライヤー、研究機関、配電・送電事業者など)が参加する組織で、欧州におけるエネルギー貯蔵技術の導入と市場形成を主導する団体として位置づけられている。

⁶ The long and the short of energy storage tech(Grace Donnelly, Oliver Booth, 2023)
<https://www.ctvc.co/ldes-long-duration-energy-storage-tech/> (2026 年 3 月閲覧)

2021年にはエネルギー貯蔵の中でも長期に注目した LDES Council (LDES 協議会)が設立されている。LDES 技術企業やエネルギー関連企業、投資家など 24 社が創設メンバーとして参画し、現在は 24 か国・60 社以上が参加する非営利組織へと拡大している。

2023年には DOE の支援により LDES National Consortium(長期エネルギー貯蔵国家コンソーシアム)が設立されている。これは、LDES 技術の商業化を加速するための全国的な協働プラットフォームで、Sandia National Laboratories を中心とする六つの国立研究所が主導し、LDES を「10 時間以上の電力供給が可能な貯蔵技術」と位置づけている。産業界・自治体・投資家・研究機関など 200 以上の組織が”Teaming Partners”として参加し、技術開発、制度設計、投資・市場形成、系統接続、安全性など、商業化に向けた課題の整理と解決策の検討を共同で進めている。

国際会議や展示会では Energy Storage Summit、Energy Storage Global Conference、World Renewable Energy Congress(WREC)、IEEE Power & Energy Society General Meeting、LDES Expo (Shanghai International Long-Duration Energy Storage and Flow Battery Exhibition)などがあり、2020 年以降 LDES を主要テーマとしてとりあげられるようになってきている。

(2)『貯める』に係る技術動向

(i) 論文発表数で見る学術的動向

学術的動向の代表的な指標として Clarivate 社の Web of Science™ を用いて 2000 年から 2025 年の論文発表数について調査した⁷。データベースは Web of Science™ に収録されている Core Collection の中で、Document Types が Articles⁸と登録されているものを対象とした。検索は原則として Smart Search 機能を用い、Topics に調査対象のキーワードを入力して行った。

その結果、エネルギー貯蔵に関する論文発表数のうち、2025 年で最も多いのは水素で、次いで LDES、LIB、電磁氣的エネルギー貯蔵の順であった。ここ 10 年の伸びを見ると LDES が 4.4 倍で最も急激に増えている。LDES でエネルギーを貯蔵するときのエネルギー形態には様々なものがあるが、熱エネルギー、電気化学的エネルギー、力学的エネルギーいずれも 10 年間で約 5 倍の勢いで増加している。機械的エネルギーの手法には大きな偏りはなく、最も報告が多い圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)でも力学的エネルギー貯蔵全体の 8%に過ぎなかった。特定の手法に偏らず、様々な技術が検討されていることを物語っている。

論文発表数を著者の所属機関が属する国で整理すると、いずれも中国、米国が 1 位、2 位だが、LIB では日本が 4 位、水素では 3 位と上位につけている。一方、LDES に関して日本は 9 位にとどまっている。しかし、1 位との差は他のカテゴリーに比して大きく

⁷ 検索は 2025 年 12 月～2026 年 2 月に行った。データベースは毎日のように更新されるが、2024 年以前の論文発表数についてはその影響はほとんどないと考えられる。2025 年の論文発表数については、検索のタイミングにわずかに依存する。

⁸ Articles の他、Proceedings Paper、Early Access、Book Chapters などがある。

なく、前後の順位との差も小さい。今後の取組によっては遅れを取り返せる可能性があると考えられる。

以下にその詳細を説明する。

エネルギー貯蔵に関する論文は電磁氣的エネルギー貯蔵(Electromagnetic)、リチウムイオン電池(LIB)、水素(Hydrogen)、長期エネルギー貯蔵(LDES)の四つのカテゴリーに分類して調査した。電磁氣的エネルギー貯蔵の論文はスーパーキャパシター(super capacitor)もしくは超電導磁気エネルギー貯蔵(SMES)のキーワードを含むものとして検索した。リチウムイオン電池(LIB)の論文は lithium battery のキーワードで検索した。この中には一次電池や次世代のリチウム硫黄電池などもわずかに含まれるが、検索式で分離するのは複雑であることから、それらは排除しなかった。水素によるエネルギー貯蔵については水素(hydrogen)のキーワードのみで検索した。電気分解による水素製造、燃料電池、アンモニアや有機ハイドライドといったエネルギーキャリアへの変換やエネルギーキャリアからの脱水素、水素タービンのみならず、一般的な水素化・脱水素反応、水素燃焼、水素脆化など多種多様な論文が該当する。エネルギー貯蔵に直結しないものも多数含まれると思われるが、直結するか否かを個別に判断するのは困難なばかりか、恣意的と受け止められかねない。そのため、絞り込みは行わなかった。LDESはエネルギー貯蔵(energy storage)のキーワードを含み、上記の電磁氣的エネルギー貯蔵、LIB、水素に該当しない論文とした。なお、これら四つは相互に大きく異なるものの、多様な技術への適用を研究する論文や、比較検討するのが目的の総説があるため、一つの論文が複数のカテゴリーでカウントされることがある。

これら四つのカテゴリーで検索された 2025 年度の論文発表数の総和は約 12 万報であった。その内訳を図 3-1-10 に示す。水素に関する論文が半分以上を占める。LDES(20%)は次に多く、LIB(15%)を上回っている。図 3-1-11 では 2015 年を 1 として、ここ 10 年の増加を整理した。伸びが大きいのは LDES で、この 10 年間で 4.4 倍となっており、特に注目が集まっていることが分かる。続いて電磁氣的が 3.2 倍、LIB が 2.6 倍、水素が 2.0 倍であった。

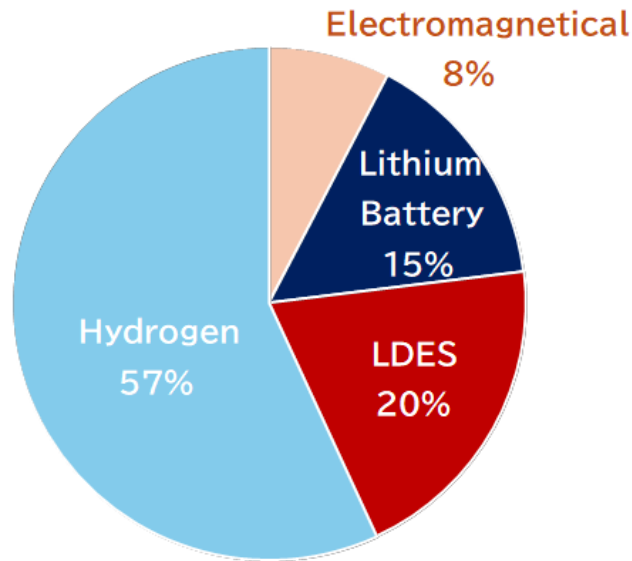


図 3-1-10 エネルギー貯蔵に関する論文発表の内訳(2025 年)

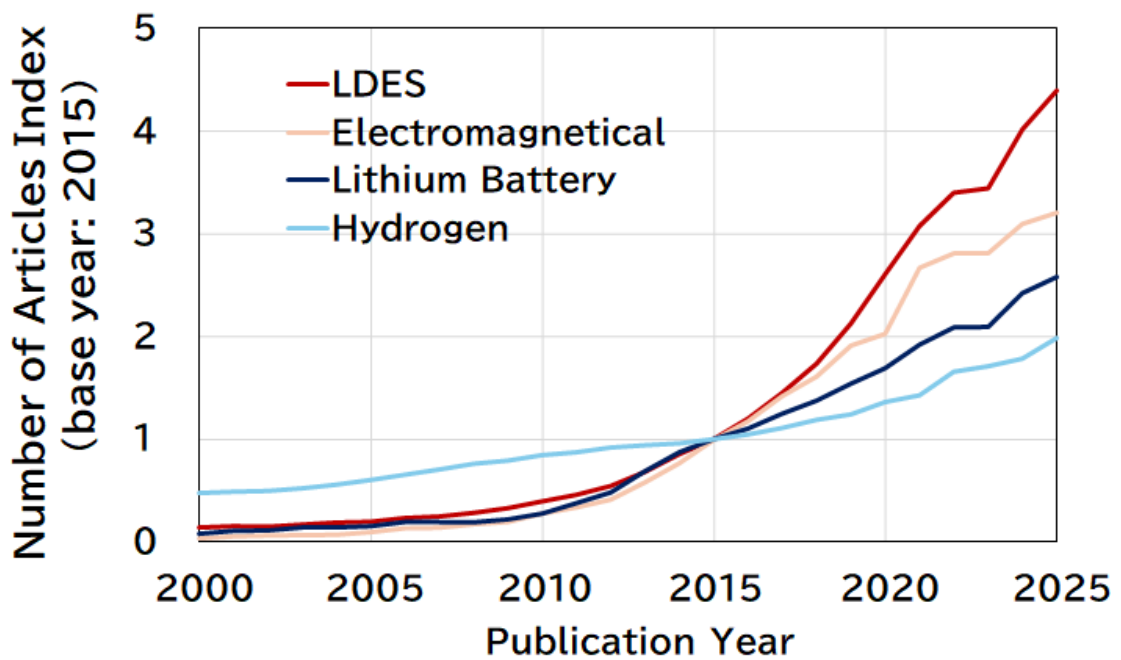


図 3-1-11 主なエネルギー貯蔵手法に関する論文発表数の推移
(2015 年の論文発表数を 1 とした相対値)

LDES について、エネルギー貯蔵時のエネルギー形態で論文を分類すると、熱エネルギー(36%)、電気化学的エネルギー(33%)が多く、次いで力学的エネルギー貯蔵(18%)となっている(図 3-1-12)。それらの伸びは特にどれかが大きいということはなく、いずれも 5 倍程度(年あたり 17.5%増)の急成長を見せている(図 3-1-13)。

力学的エネルギー貯蔵では CAES、液化空気エネルギー貯蔵(LAES)の伸びが大きく、2025 年の論文発表数でも CAES が最大であった。しかし、全体に占める割合は CAES でも 8%であり、大きくない。多種多様な検討が進められているためであると考えられる(図 3-1-14、3-1-15)。

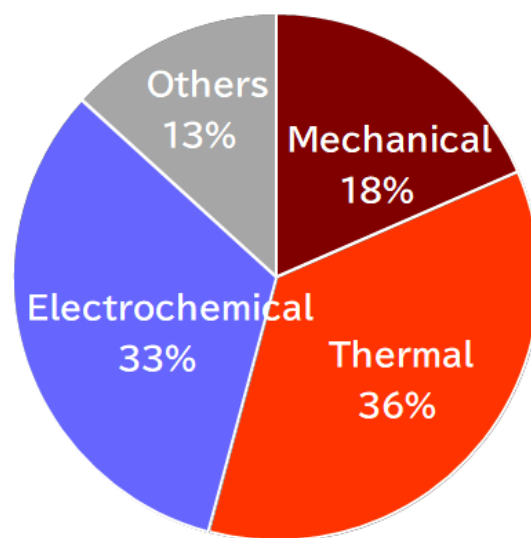


図 3-1-12 LDES に関する論文発表のエネルギー貯蔵形態ごとの内訳(2025 年)

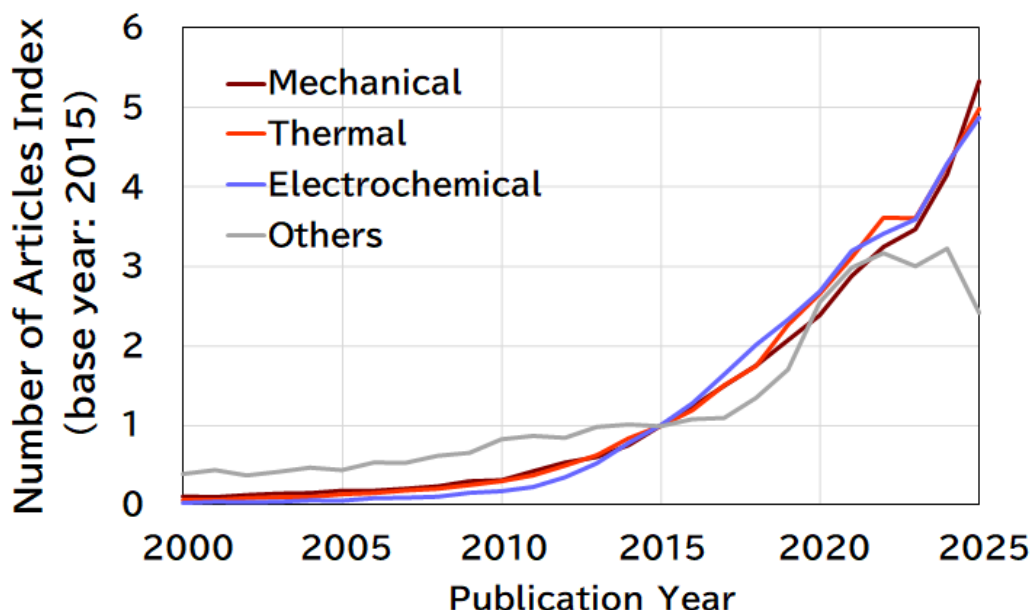


図 3-1-13 LDES の論文発表数のエネルギー貯蔵形態ごとの推移(2015 年の論文発表数を 1 とした相対値)

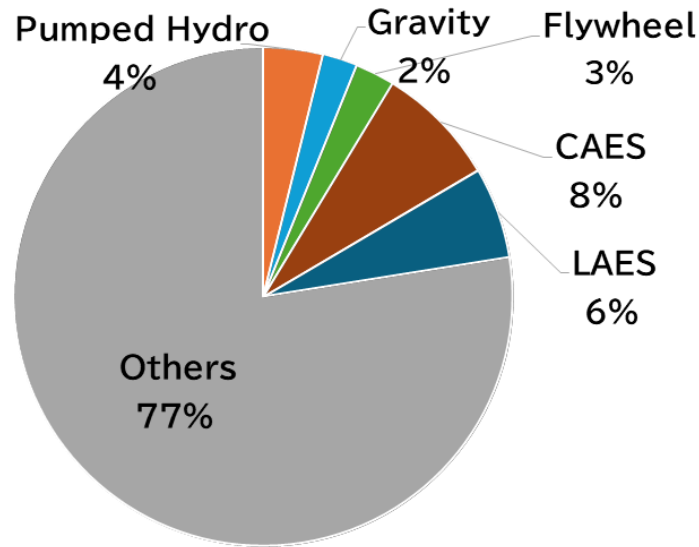


図 3-1-14 機械的エネルギー貯蔵に関する論文発表の手法ごとの内訳(2025 年)

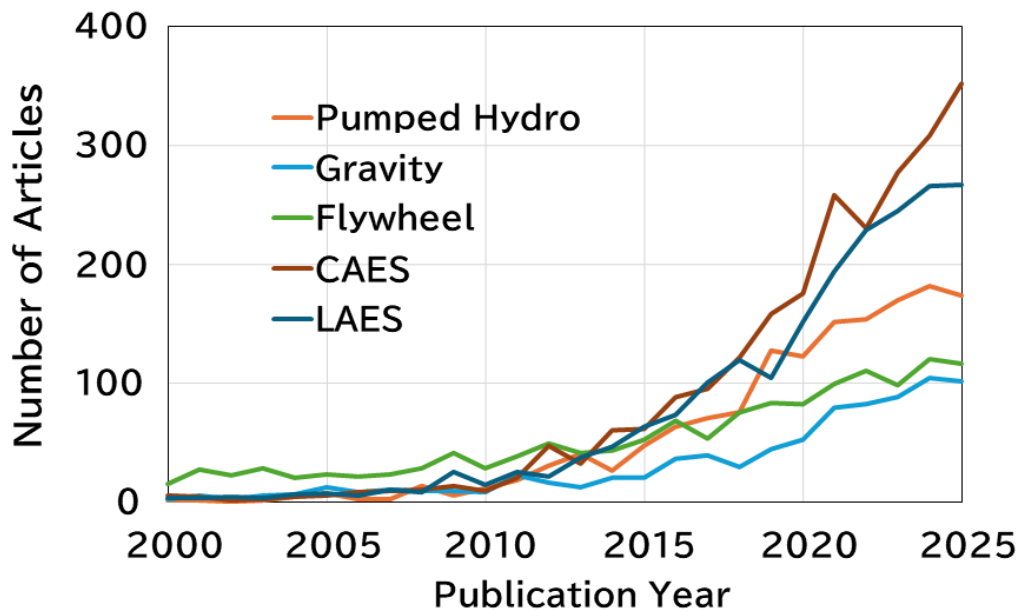


図 3-1-15 機械的エネルギー貯蔵の論文発表数の手法ごとの推移

論文発表数を国別で比較すると、LIB に関しては以前から強みがあり公的、民間を問わず多くの研究開発資金が投入されていることから、日本は、中国、米国、韓国に次ぐ 4 位につけている(図 3-1-16)。水素でも同様、日本は中国、米国に続いて 3 位となっている(図 3-1-17)。一方、LDES に関して日本は LDES で 9 位にとどまっている(図 3-1-18)。しかしながら、1 位の中国との差は LIB ほど大きくなく、くわえて、7 位のオーストラリアから 13 位のイランまでは日本との差が±10%以内と小さい。このことから、今後の取組によっては遅れを取り返せる可能性があると考えられる。

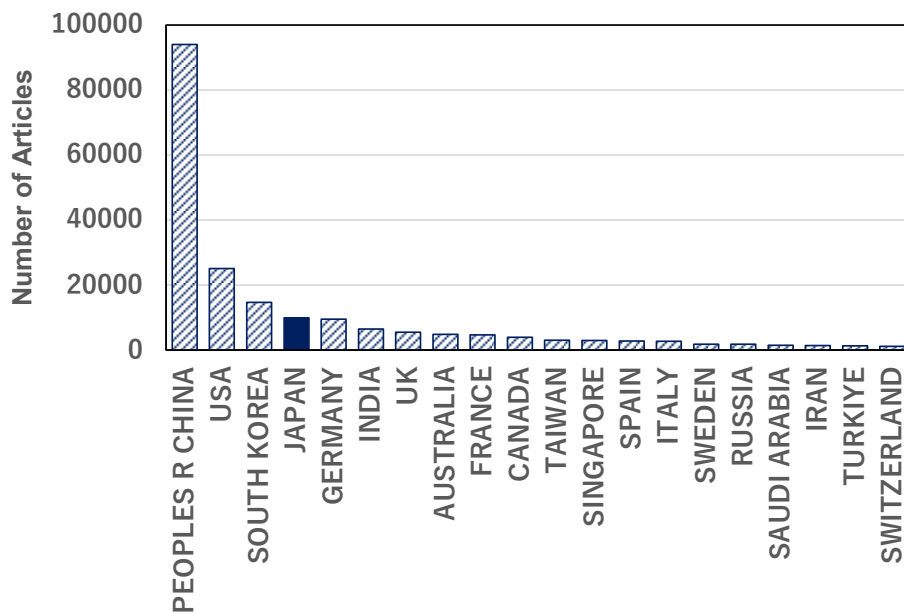


図 3-1-16 LIB に関する論文発表数の国別比較

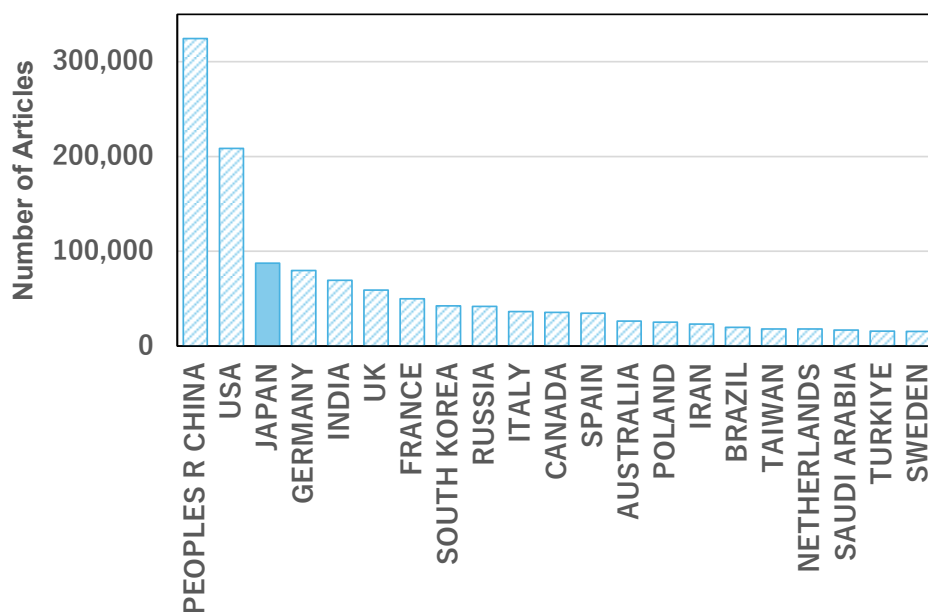


図 3-1-17 水素に関する論文発表数の国別比較

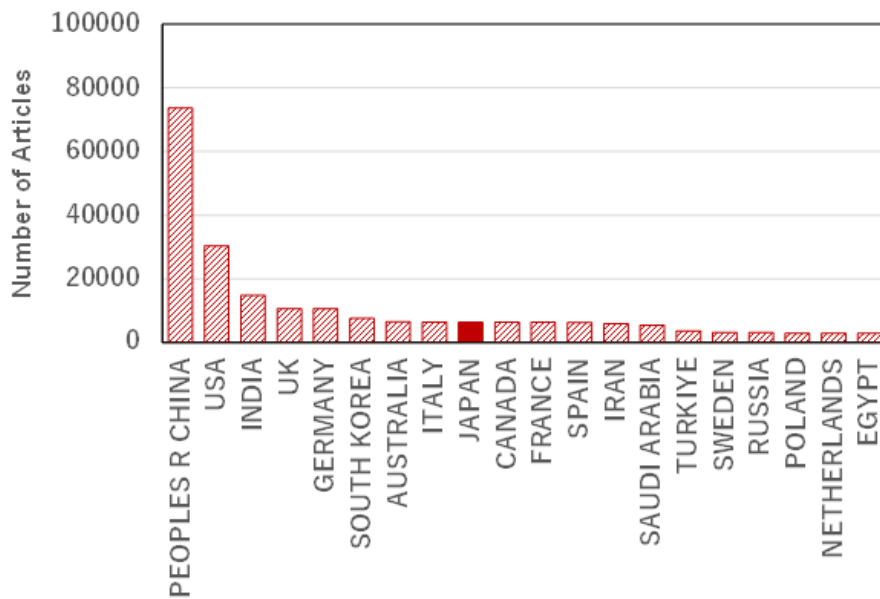


図 3-1-18 LDES に関する論文発表数の国別比較

(ii) 研究者コミュニティの動向

IEA の TCP や 学術界の専門家による動きも活発化している。特に 2020 年以降は LDES への注目が高まっている。

IEA の Energy Storage TCP は 1975 年に発足したが、当初の主対象は揚水発電や短時間の電力調整、建築・地域向けの蓄熱などが中心であり、長期・季節間のエネルギー貯蔵は限定的な位置づけであった。しかし、2010 年代後半以降、再生可能エネルギーの主力電源化が進展し、日内調整を超えた需給ギャップへの対応が課題として顕在化したことで、LDES を明確に意識した Task が立ち上がり始めた。特に 2019 年に開始された Task36 (Carnot Batteries) は、電力を一度熱に変換して長時間貯蔵する概念を整理し、電池以外の長期貯蔵技術に注目を集める契機となった。その後、2022 年に Task42 (中時間帯貯蔵による系統柔軟性) が、2023 年には Task44 (Hi-CBest: 産業用カルノーバッテリー) や Task45 (大規模・季節間蓄熱の普及促進) が相次いで発足し、数十時間から季節単位の貯蔵を前提とした検討が本格化している。近年は、電池依存を前提としない技術群を横断的に扱う点が特徴となり、LDES は Energy Storage TCP の中核的テーマの一つとして急速に存在感を高めている。

IEEE Power & Energy Society General Meeting では 2024 年以降、長期エネルギー貯蔵 (LDES) を明示的に扱うパネルが設けられている。LDES の経済性、技術特性、市場・制度面での課題が体系的に議論されている。これは、LDES が学術的・技術的にも電力システム設計上の重要要素として認識され始めたことを示している。

こうした海外の動きに合わせ、国内学会でも動きが見られている。

日本機械学会では、2021 年に動力エネルギーシステム部門に「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」が設置され、電池に限定されない長期エネルギー貯蔵を含むエネルギーストレージの体系的検討を開始した。2023 年以降は、動力・エネ

ルギー技術シンポジウム等の定期的な講演会において、エネルギー貯蔵を明示的に含むオーガナイズド・セッションが拡充され、LDES が次世代エネルギーシステムの構成要素として議論されるようになった。これらの活動を背景に、2024 年には学会として「カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言」が公表され、長時間エネルギー貯蔵の重要性が公式に位置づけられた。

電気化学会主催の電池討論会では、2023 年頃から、車載用途中心の高エネルギー密度電池に加え、定置用・長時間放電を意識したフロー電池やナトリウム系、金属空気電池等に関する発表が増加し、安全性や寿命、資源制約の観点から LDES 的価値が重要な評価軸として定着しつつある。一方、日本エネルギー学会では、2024 年以降、学会誌や大会特集において系統安定化や再生可能エネルギー主力化を支える長期エネルギー貯蔵が明示的に取り上げられ、電力・熱・燃料を横断した社会実装課題として議論が深化している。これらの動きは、LDES が個別技術を超えた横断的テーマとして国内学会に定着しつつあることを示している。

化学工学会では、エネルギー部会を中心に、2022 年頃から蓄熱や化学蓄熱、熱輸送、物質変換を伴うエネルギー貯蔵が体系的に議論されている。2024 年以降は「エネルギー貯蔵セミナー」や部会横断型シンポジウムが新設され、電池に依存しない長時間エネルギー貯蔵(LDES)を支える材料・プロセス・システムの研究が社会実装を意識して扱われている。

(iii) 海外スタートアップの先進的な取組

ここでは、変動性再生可能エネルギーの大量導入を支える長期エネルギー貯蔵(LDES)に関する海外の先進的な取組を俯瞰する。近年注目を集める LDES 技術は、方式や形態こそ多様であるものの、共通して「低コストで大容量のエネルギーを長期間貯蔵する」ことを強く志向している点に特徴がある。その実現に向け、多くの技術が高効率や高性能を闇雲に追求するのではなく、汎用材料や既存インフラの活用、出力部と容量部を分離した構造設計、長寿命・低劣化といった割り切った設計思想を採用している。これにより、希少資源や高価な専用部材への依存を抑えつつ、貯蔵容量の拡大に伴う kWh 当たりコストの低減を図っている。こうした LDES は、短時間調整を担う蓄電池とは競合するものではなく、数日から季節単位の需給ギャップへの対応や、極端気象・災害時のレジリエンス確保といった役割を補完的に担う技術として位置づけられる。以下に紹介する事例は、LDES が単一の解ではなく、将来のエネルギーシステムにおいて用途や立地条件に応じて組み合わせられる技術群であることを示している。

a) ENERGY VAULT の G-VAULT™(重力貯蔵)⁹

ENERGY VAULT は、スイス及び米国に拠点を有するスタートアップ企業であり、重力を利用した長期エネルギー貯蔵技術「G-VAULT™」を開発している。同技術は、コンクリートまたは複合素材で作られたブロックを、余剰電力を用いてクレーンで高所に積み

⁹ <https://globe.asahi.com/article/15410315> (2026 年 3 月閲覧)

上げ、電力需要時にこれらを降下させることで発電する重力エネルギー貯蔵システムである。中国国家エネルギー局が主導する「新エネルギー貯蔵実証実験事業」の一環として、中国上海郊外の江蘇省如東市に建設され、地域送電網と接続された世界初の商用重力蓄電施設として、2024年5月に試運転に成功した。本システムは、定格出力25MW、蓄電容量100MWh(将来的には3.7GWhまで拡張予定)を有し、高さ120mの構造体で構成される。往復エネルギー効率は80%超、運用期間は35年を想定している点が特徴である。さらに、AIと高度なソフトウェアを活用した複数クレーンの協調制御(群制御)技術に強みを持ち、2024年にはTimes誌の「THE BEST INVENTIONS OF 2024」に選出されるなど、国際的にも注目を集めている。

b) Gravitricity の GraviStore™(重力貯蔵)¹⁰

Gravitricityは、英国エディンバラに拠点を置くスタートアップ企業であり、重力を利用した長期エネルギー貯蔵技術「GraviStore™」を開発している。同技術は、鋼鉄ケーブルで吊り下げた重りを上下させることで電力を貯蔵・放出する重力エネルギー貯蔵システムであり、特に坑道や鉱山ホイストなどの既存採掘インフラを再利用できる点に特徴がある。2021年には、エディンバラのリース港において高さ15mの試験用リグを用いた250kW規模の系統接続型実証プロジェクトを実施し、25トンの重り2基を用いた発電に成功した。本システムは、オンデマンドで1秒未満の応答が可能であり、周波数調整など高速な系統安定化用途への適性も有している。また、複数の重りを連続的に降下させる独自の制御技術により、従来モデルと比べて発電量を約8倍に拡大するとともに、コストを最大50%削減できる可能性を示した。これにより、低コストかつ柔軟性の高い長期エネルギー貯蔵技術として注目を集めている。

c) Energy Dome の CO₂ Battery(圧縮ガス貯蔵)¹¹

Energy Domeは、イタリア・ミラノに本社を置き、米国マサチューセッツ州などにも拠点を有する2020年創業のスタートアップ企業であり、二酸化炭素を作動流体として用いる長期エネルギー貯蔵技術「CO₂ Battery」を開発している。同技術は、余剰電力を用いてドーム型ガスホルダー内のCO₂を圧縮・液化して貯蔵し、電力需要時には蒸発・膨張させてタービンを回すことで発電する圧縮ガス型のLDESである。往復エネルギー効率は75%以上、耐用年数は30年以上とされ、設備投資額はリチウムイオン電池の約0.6倍に抑えられる点が特徴である。設置面積は200MWhで5haと説明されている。

2022年にはイタリア・サルディニア島において、世界初となる商用規模(20MW/200MWh)のCO₂ Batteryを設置したほか、米国ウィスコンシン州ではDOEの支援\$30Mを受けた同規模プロジェクトが進行している。Breakthrough Energyやジャパンエナジーファンドなどが出資し、米Alliant Energyや伊ENGIE、印NTPCとい

¹⁰ <https://gravitricity.com/gravistore-projects/> (2026年3月閲覧)

¹¹ <https://energydome.com/co2-battery/> (2026年3月閲覧)

ったエネルギー事業者との契約実績も有するなど、国際的な事業展開が進んでいる。2025年10月には日揮が日本市場での協業検討を目的としたMOUを締結している¹²。

d) Antora Energy(熱エネルギー貯蔵)¹³

Antora Energyは、米国を拠点とするスタートアップ企業であり、高温熱エネルギーを利用した長期エネルギー貯蔵技術を開発している。同社の技術は、安価で豊富に入手可能な炭素ブロックに電力を直接通電することで熱エネルギーとして蓄える点に特徴があり、従来の蓄熱技術では材料制約などから約600℃が上限とされてきたのに対し、最大で約2400℃という極めて高温でのエネルギー貯蔵を可能としている。この結果、体積当たりのエネルギー密度は一般的な蓄電池の約4倍に達するとされている。貯蔵した熱はそのまま利用するほか、熱光起電力(TPV: Thermophotovoltaic)半導体を用いた電力化も検討している。独自に技術を有するTPV半導体のエネルギー変換効率は約40%と世界最高水準を達成している。高価な材料や複雑な構造に依存せず、炭素というコモディティ素材と高温動作という一つの技術的ブレークスルーを組み合わせることで、大規模化と低コスト化の両立を目指しており、産業用途を含む長期エネルギー貯蔵技術として注目を集めている。

e) Polar Night EnergyのSand Battery(熱エネルギー貯蔵)¹⁴

Polar Night Energyは、フィンランドを拠点とするスタートアップ企業であり、砂や類似の固体材料を用いた熱エネルギー貯蔵技術「Sand Battery」を開発している。同技術は、余剰電力を用いて砂を高温に加熱し、その熱を長期間蓄え、必要に応じて産業用途や地域暖房向けに供給するものである。フィンランドのカンカーパーに設置された実証設備では、加熱出力200kW、蓄熱容量8MWhの砂電池が2022年から稼働している。また、Loviisan Lämpö社と共同で、100MWh規模の砂電池を2025年夏に完成させるなど、商用規模への展開も進んでいる。蓄熱媒体としては、地元産の天然砂に加え、セラミック製造時に生じる副産物であるソープストーンを活用するなど、資源制約の小さい材料選定が特徴である。さらに、高さ14m、幅15mのコンテナ型構造を採用し、1か月以上のエネルギー貯蔵を可能とする点や、地域暖房ネットワークへの熱供給に加え、フィンランドの送電事業者Fingridが運営する予備電力市場や需給調整市場にも参加可能な規模を有する点から、大規模かつ実用的な長期エネルギー貯蔵技術として注目されている。

¹² 日本市場に「CO2 バッテリー」、日揮と伊企業が協業検討(日経BPニュース 2025/11/5)

<https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/news/00001/05393/?ST=msb> (2026年3月閲覧)

¹³ 【新金脈】アメリカで見た、未来の電池がすごい(NEWSPICKS、2023年4月)

<https://newspicks.com/news/8325376/body/> (2026年3月閲覧)

¹⁴ Solution for clean energy's big problem (Polar Night Energy、2025)

<https://polarnightenergy.com/reference/solution-for-clean-energys-big-problem/> (2026年3月閲覧)

f) Quidnet Energy(揚水発電)

Quidnet Energy は、米国を拠点とするスタートアップ企業であり、地下地層を活用した揚水発電型の長期エネルギー貯蔵技術を開発している。同社の技術は、地層中に水を通さない「レンズ層(lens)」を人工的に形成し、余剰電力を用いて地上のため池の水を加圧して地下に送り込み、レンズ層下部に水を貯蔵するものである。電力需要時には、井戸のバルブを開放して圧力を解放し、地上に戻る水でタービンを回して発電する仕組みとなっている。米国 ARPA-E の DAYS プログラムにおいて成果を挙げており、現在は商品化に向けた開発段階にあるとされる。コスト面では、従来の揚水発電や蓄電池と比較して約半分のコストでの実現を目指しており、発電コストは 5 セント/kWh を目標としている。1 か所あたり 1~10MWh 規模の貯蔵能力を有し、充放電の繰り返しによる劣化が小さい点や、米国内に広範な導入ポテンシャルがあるとされている点から、地理的制約の少ない長期エネルギー貯蔵技術として注目されている。

g) Renewell の Gravity Well(重力貯蔵)¹⁵

Renewell は、米国を拠点とするスタートアップ企業であり、使用されていない石油・ガス井を活用した重力型エネルギー貯蔵技術「Gravity Well」を開発している。同技術は、休止した井戸内に長い円筒形の錘を設置し、余剰電力を用いて錘を巻き上げることで位置エネルギーとして電力を貯蔵し、需要時には錘を降下させて発電する仕組みである。米国の石油・ガス井の平均深度は約 5,200 フィート(約 1,600m)とされており、この深さを活用することで、1 井戸当たり 40~500kWh 規模の電力供給が可能とされている。既存の掘削済みインフラを再利用する点に大きな特徴があり、資本コストは約 5 ドル/kWh、均等化貯蔵コスト(LCOS)は 0.063 ドル/kWh と、低コストな長期エネルギー貯蔵の実現が期待されている。米国及びカナダには 260 万本を超える利用可能な井戸が存在するとされ、地理的制約が小さく、大規模な展開ポテンシャルを有する点から、資源循環とエネルギー貯蔵を両立する LDES 技術として注目されている。

(iv) 国内の取組

短期のエネルギー貯蔵としては、NEDO 超電導応用基盤技術研究開発などにおいて SMES に関する大規模な研究開発に取り組んできた。

蓄電池に関しては、NEDO において次世代全固体蓄電池材料評価・基盤技術開発(SOLID-Next)、電気自動車用革新型蓄電池開発 RISING3 やグリーンイノベーション基金事業次世代蓄電池・次世代モーターの開発などにおいて大規模に研究開発に取り組んでいる。文部科学省においては JST 革新的 GX 技術創出事業において蓄電池領域を設定して次世代の電池開発に取り組んでいる。

水素に関しては 1974 年に発足したサンシャイン計画の時から主要な研究テーマで、水素吸蔵合金や燃料電池を中心に長期的かつ大規模に取り組んでいる。近年はグリーンイノベーション基金事業において、大規模水素サプライチェーンの構築、製鉄プロセ

¹⁵ Oil Wells That End Well(Renewell) <https://renewellenergy.com/>(2026年3月閲覧)

スにおける水素活用、再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造、燃料アンモニアサプライチェーンの構築などに取り組んでいる。

一方で長期エネルギー貯蔵をまとめた研究開発プロジェクトはない。レドックスフロー電池は 1980 年代にムーンライト計画で電池技術の一つとして研究が開始されたものである。現在実用化しているものの、バナジウム電解液の低コスト化やサプライチェーンリスクが課題として残っており、大規模な普及には至っていない。CAES については神戸製鋼所が NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」(2014～2018 年度)のもとで静岡県河津町に建設しているが、実用化に至っていない。

こうした中、近年、LDES に関して新たな技術が芽生えつつある。以下に国内企業の公表されている取組の例を紹介する。海外スタートアップの取組と同様、単純に高効率や高性能を追求するのではなく、既存インフラの活用や、利用環境に応じた必要な性能の見直しなどを通じて、LDES 実用化に不可欠な経済性の解決に挑んでいる。現時点で長期エネルギー貯蔵の技術開発の受け皿がないため、企業等の事業者は NEDO 先導研究プログラムや環境省事業などの幅広い公募枠に申請し、一部の事業者のみ予算を獲得しているのが現状で、未公表の多様な LDES 技術が企業の中で検討されていると考えられる。

a) 清水建設の Hydro Q-BiC(水素吸蔵合金)¹⁶

清水建設は、通常は重量がネックとなり利用範囲が限定される水素吸蔵合金を、建物内であれば重量制約が比較的緩い点に着目し、再生可能エネルギー由来の余剰電力で水素を製造し、安全に蓄えるエネルギー貯蔵システムを構築している。水素を高圧で保持しないため高圧ガス保安法の適用を受けず、建物内でも柔軟に設置できる点が特長である。必要時には燃料電池で発電し、スマート BEMS (ビルエネルギーマネジメントシステム)により最適制御された電力を供給する。2019～2021 年に郡山市総合地方卸売市場で 14 kW の実証を行い、2021 年 5 月からは北陸支店で 100 kW システムを稼働させている。

b) 住友重機械工業の LAES¹⁷

住友重機械工業は、LAES 技術を活用した LDES システムの商用運転を、2025 年 12 月 1 日に開始した。本システムは広島ガスと連携し、広島ガス廿日市工場内に建設されたもので、液化空気の生成時に LNG 冷熱を利用して充電効率を高める”世界初”の商用運転事例である。規模は 5 MW×4 時間の貯蔵(充電 4 MW)で、空気を液化して貯蔵し、需要時に気化・膨張させて発電する仕組みを採用している。LAES は大規模化が容易で、立地制約が比較的小さいという特長をもつ。

¹⁶ NEDO 長期エネルギー貯蔵(LDES)ワークショップ 講演 7(2025 年 8 月 7 日)
<https://www.nedo.go.jp/content/800031038.pdf>(2026 年 3 月閲覧)

¹⁷住友重機械工業 <https://www.shi.co.jp/info/2025/6kgpsq000000o62f.html>
<https://www.shi.co.jp/products/energy/cryobattery/index.html>(2026 年 3 月閲覧)

c) 東芝の岩石蓄熱

東芝は、電力需給調整に貢献するため、国内初となる岩石蓄熱設備(500 kWh)を設置し、熱挙動特性の評価手法を確立して、熱エネルギーを高効率に制御可能なシステムを開発している。環境省の令和 6 年度「地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業」に採択され、2025 年度末までに機器を製作し、2026 年より新東海製紙工場で実証試験を実施する予定である。

(3)『貯める』に係る政策動向

2024 年 COP29 で発表された「世界エネルギー貯蔵・送電網誓約(Global Energy Storage and Grids Pledge)」では、2030 年までに世界全体で 1,500GW のエネルギー貯蔵定格出力を確保するという野心的な目標を掲げ、再生可能エネルギーの安定供給に向けた国際的な連携が加速している。これにより、各国は長期エネルギー貯蔵(LDES)を含む多様な技術の導入を急ピッチで進めている。

特にアメリカや中国、欧州主要国では、再エネ導入の急拡大に伴う再エネ出力変動や出力抑制への対応として、10 時間以上の蓄エネルギーを可能とする LDES の導入目標や制度整備、補助金制度、研究開発支援が体系的に進められている。トランプ政権の影響を注視する必要があるが、例えば、アメリカのカリフォルニア州では 2030 年までに 15GW の LDES 導入目標を掲げ、ニューヨーク州やバージニア州なども GW 単位の導入目標を設定している。

一方で日本は、2030 年までに蓄電池導入量 24 GWh という設備容量の目標を掲げているものの、定格出力(GW)の明確な目標は未設定であり、おもに系統用蓄電池に対し政府が導入支援を行っている状況である。国内では、『貯める』価値の社会実装については、市場原理にゆだねられているため、欧米諸国に比べて投資が進まないといった印象が否めない。

再エネの大量導入に伴う出力抑制や需給ギャップの拡大が国内でも顕在化しつつある中、長時間貯蔵技術の社会実装に向けた明確なロードマップと制度的支援の強化が急務となっている。

以下にその詳細を説明する。

(i) 国際的な導入目標

COP29(2024 年 11 月 アゼルバイジャン)で発表された「世界エネルギー貯蔵・送電網誓約(Global Energy Storage and Grids Pledge)」では、再生可能エネルギーの導入を加速させるため、エネルギー貯蔵に関し次の目標が掲げられている¹⁸。

1) エネルギー貯蔵容量の拡大

- ・ 2030 年までに世界全体で 1,500 GW(2022 年比 6 倍)のエネルギー貯蔵容量を目指す。
- ・ 対象はバッテリーだけでなく、揚水発電、熱エネルギー貯蔵、グリーン水素など多様な技術。

¹⁸ <https://cop29.az/en/pages/cop29-global-energy-storage-and-grids-pledge> (2026 年 3 月閲覧)

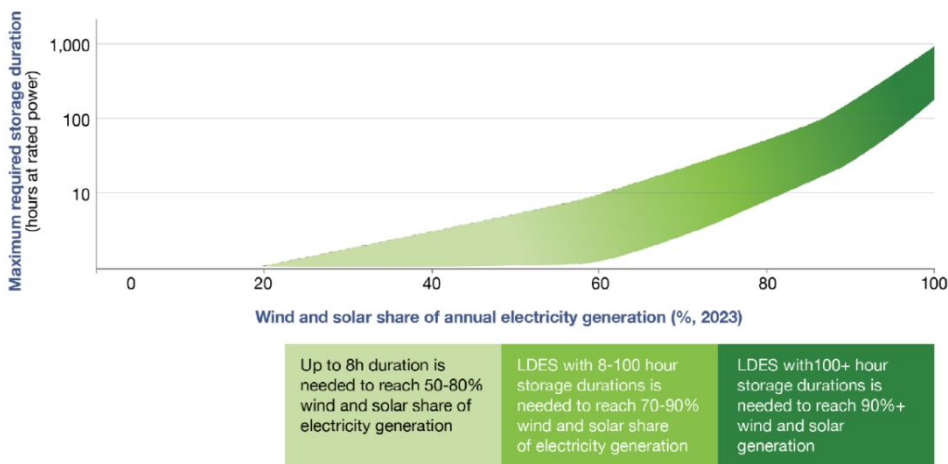
その他、2)送電網の拡張・改修、3)再エネ3倍目標との連携、4)国際協力と投資の促進と続く。この誓約には米国、EU、中国、インド、日本など多くの国が賛同しており、どの国もそれぞれの事情に合わせ、未来のエネルギー社会に向けて行動している。

(ii) 各国の政策

太陽光発電や風力発電を中心とした、変動性再生可能エネルギー（VRE: Variable Renewable Energy）は発電量が天候に左右されるため、従来の火力発電のような需要変動に併せて出力を調整することができない。このことから、脱炭素化を目指しつつ、電力安定供給を実現するため、エネルギー貯蔵技術の社会実装ニーズが高まっている。変動性再エネの導入が進むにつれて必要となるエネルギー貯蔵の時間が増加し、変動性再エネによる電力供給が全体の70～90%に達すると、8時間から10時間の長期エネルギー貯蔵が必要になるとの報告がある(図3-1-19)¹⁹。

このため、諸外国では再生可能エネルギーの導入を主な背景に、LDESの導入目標の設定や開発支援が実施されている。

Illustration of how storage duration needs increase with greater VRE integration^m



Source: Depicted from Albertus, P., Manser, J. S., & Litzelman, S. (2020). Long-duration electricity storage applications, economics, and technologies. *Joule*, 4(1), 21-32. ;

図 3-1-19 変動性再エネの電力割合増加に伴って必要となる貯蔵時間¹⁹

a) 各国の LDES 導入状況

LDES Council の 2024 Annual report によると、各地域における LDES の導入状況は図 3-1-20 のとおりである。LDES 技術プロジェクトは、北米、中東、欧州、オーストラリアに集中しており、特に北米と欧州がこの分野で先進的に進んでいる。中東では、新たに電気化学的貯蔵設備の導入が増加すると予想されているが、オーストラリアと北米は、それぞれ約 80%と 50%が機械的貯蔵になると予想されている¹⁹。アジアでは、中国が圧縮空気やフロー電池技術を含むプロジェクトを展開している。

¹⁹ 2024 Annual Report(Long Duration Energy Storage Council, 2024)
<https://solarvision.org/wp-content/uploads/2024-09-long-term-storage2024.pdf> (2026年3月閲覧)

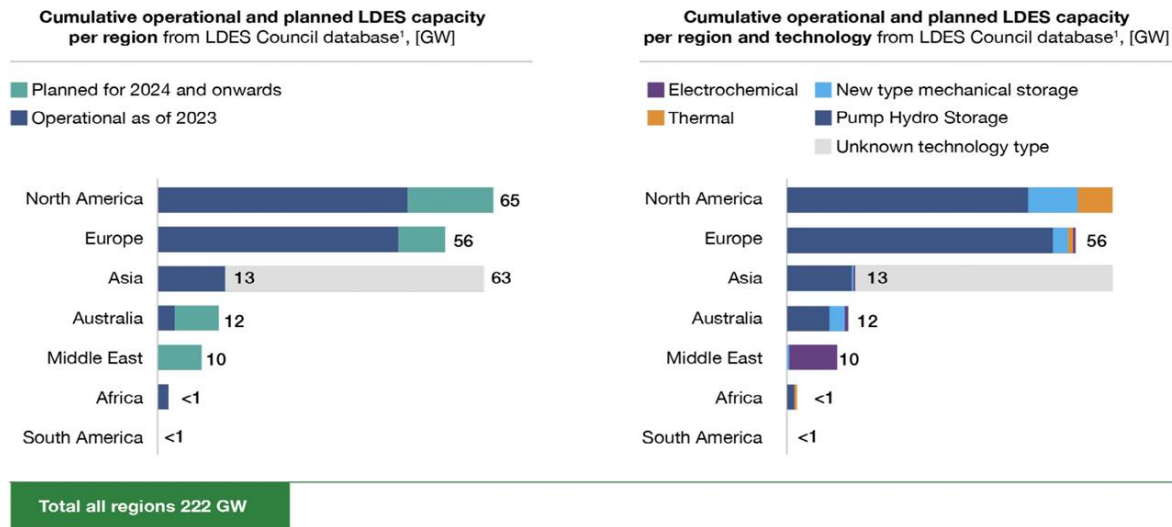


図 3-1-20 各地域における LDES の導入状況¹⁹

こうした中、2024 年以降、中国の設備導入が相次いで発表され、注目を集めている。前述の ENERGY VAULT が江蘇省で試運転に成功した重力エネルギー貯蔵はその一つである。

中国では近年、新型エネルギー貯蔵設備の導入が急速に進展している²⁰。2024 年末時点で運転を開始した新型エネルギー貯蔵設備は 74GW/168GWh に達し、世界全体の設備容量の 40%超を占める規模となった。第 14 次五か年計画開始以降、その規模は約 20 倍に拡大し、年平均成長率は 130%を超えている。導入技術も多様化しており、電気化学的貯蔵に加え、圧縮空気エネルギー貯蔵、蓄熱利用、フライホイールなど複数の技術ルートが並行して展開されている。国家能源局は 2025 年に 56 件の新型エネルギー貯蔵実証プロジェクトを公表し、実証と大規模化を通じた技術成熟と社会実装を国家主導で加速させている。

b) 主要国の LDES 社会実装に向けた取組状況

各国が支援する LDES 技術について表 3-1-1 に、また、各国の LDES 技術開発のための支援策を表 3-1-2 に示す。

米国、英国、ドイツ、スペインなど、2030 年代に再エネを 40~50%程度導入する目標を設定している国や地域において、特に短期間(2030 年頃)で社会実装を可能にするような TRL の比較的高い技術の実証支援をする国が多い。また、技術開発については、英国やドイツなど社会実装に向けたコスト削減につながる技術の開発への支援、もしくは、10 時間を超えるようなより長時間のエネルギー貯蔵に関する支援が多くなっている。

²⁰ AFP BB News 2026/1/12
<https://www.afpbb.com/articles/-/3615965?act=all&pid=28755268> (2026 年 3 月閲覧)

LDES の代表的な研究支援として米国 ARPA-E の DAYS プログラムがある。このプログラムは、複数日分のバックアップ電力の確保や変動性再エネ導入の後押しを目的に、長時間放電が可能で、かつ LCOS を一定水準で維持できる技術の開発を支援するものである。2018～2021 年に総額 30 百万ドルで実施され、放電時間 10～100 時間、LCOS 5¢/kWh-cycle、往復効率 50%以上(最低 33%)を共通目標に掲げ、長期エネルギー貯蔵技術の実用化に向けた研究開発を促進した。

LDES に取組む企業が事業化をして長期的に収益を得られるかについては、UK の CAP and Floor 政策や中国のように国として LDES 導入促進を進めるような電力市場設計を検討する方針を示している国は僅かであり、他の国では LDES に特化したような規制・インセンティブにつながるような政策はほとんどない。これは、LDES に取組む企業にとっては、将来的に事業を継続していけるか、資金投資を受ける上でも障壁となり得ると想定される。

表 3-1-1 各国の LDES 支援と対象技術

対象国	社会実装に向けた支援			支援対象技術
	研究開発	実証	その他(事業者へのインセンティブを含む)	
米 21,22,23,24,25	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・税額控除。 ・一部地域でグリッド接続手数料免除。 	<ul style="list-style-type: none"> ・機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵。電気化学的貯蔵、Power to Gas。 ・DOE 目標(2030 年に 2020 年比でコスト 90%削減できる貯蔵技術。) ・ARPA-E 目標(\$0.05/kWh のコストでこの貯蔵を提供することを目標に、長期エネルギー貯蔵技術の開発に資金を提供。)
英	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・グリッド接続手数料免除。 ・CAP and Floor 制度。(TSO と契約/グリッド接続により充放電に関わらず収益がえられる。) 	<ul style="list-style-type: none"> ・機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵、電気化学的貯蔵、Power to Gas。
中国	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・不明(事業者、PJ に対して様々なインセンティブがある可能性あり。) 	<ul style="list-style-type: none"> ・電気化学システム(バッテリーなど)、圧縮空気エネルギー貯蔵、フライホイールシステム、スーパーキャパシター等(揚水は除外)。
日本	※	※	<ul style="list-style-type: none"> ・脱炭素電源オークション。 	<ul style="list-style-type: none"> ・圧縮蓄電、液化空気蓄電、重力蓄電等(検討中)。

※一部補助事業にて支援

²¹ DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>(2025 年 3 月閲覧)

²² https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-07/Storage%20shot%20fact%20sheet_071321_%20final.pdf (2025 年 3 月閲覧)

²³ DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/oced/office-clean-energy-demonstrations> (2025 年 3 月閲覧)

²⁴ DOE ホームページ, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy | Department of Energy (2025 年 3 月閲覧)

²⁵ ARPA-E, Duration Addition to electricity Storage (DAYS) Overview, 2021

表 3-1-2 各国の主要な LDES 技術開発支援

対象国	技術開発支援概要
米 26,27, 28,29, 30	<ul style="list-style-type: none"> ・ DOE:LDES(10 時間以上貯蔵可能)の商業化に向けた開発、実証を支援。 ✓ Energy Storage Grand challenge ✓ Long Duration Storage Shot ・ Office of Clean Energy Demonstrations (OCED) LDES に対して \$505M の資金を調達。これらの資金を利用し、研究・実証フェーズのプロジェクトへの助成金や融資などの財務支援を実施。(Demonstration Project) ✓ LDES pilot program:多様な LDES 技術について、商業化と実用規模の実証に向けて支援。2024 年 9 月に総額 \$100M の支援プロジェクトを募集。 ✓ LDES Demonstrations program:商業化に向けた実証試験を支援。2022 年 11 月に 349M ドルを支援。 ✓ LDES Joint program:DOE と国防総省 (DOD) の協力を通じて、政府施設で LDES 技術を実証 2022 年 11 月に \$30M を支援。 ・ Office of Energy & Renewable Energy (EERE) ・ ARPA-E 「技術概念の創出」「技術概念の検証」「研究環境下での技術開発・施策」を支援。 助成期間は、最長 3 年、1 件当たりの投資総額は \$2~5M、最大 \$20M が原則。 DAYS:2018 年より、10 時間から 100 時間にわたって電力網に電力を供給するエネルギー貯蔵システムの研究開発プロジェクトを支援。 ・ 45Q (税額控除)
英 ³¹	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2021 年に LDES コンペを開始し、二つのコンペストリームで最大 6800 万ポンドの資金提供。 ・ Ten Point Plan:貯蔵設備に 1 億ポンドの資金提供。 ・ BEIS:大型貯蔵設備に対して 2000 万ポンド、貯蔵設備コスト削減に対して 900 万ポンド資金提供。 ・ UK Research Institute:貯蔵設備の研究開発に 3 億 3000 万ポンド資金提供。 ・ Green Industries Growth Accelerator:洋上風力、ネットワーク、炭素回収、利用・貯留、水素、原子力など、主要なネットゼロセクターにおける高度な製造能力を加速させる Green Industries Growth Accelerator に 9 億 6,000 万ポンドを拠出。
独 32,33	<ul style="list-style-type: none"> ・ SINTEG プログラム、SPRIND LDES チャレンジ ・ 研究開発:希少材を使わない 10 h 以上貯蔵可能な技術の研究開発へ資金提供。 ・ 実証支援:規制緩和による実証支援、実証資金提供。 ・ Climate and Transformation Fund(CTF):連邦財務省が主導する特別基金による資金を提供。

²⁶ DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>(2025 年 3 月閲覧)

²⁷ DOE ホームページ, Long Duration Storage Shot | Department of Energy (2025 年 3 月閲覧)

²⁸ DOE ホームページ

<https://www.energy.gov/oced/office-clean-energy-demonstrations> (2025 年 3 月閲覧)

²⁹ DOE ホームページ, [Office of Energy Efficiency and Renewable Energy | Department of Energy](#) (2025 年 3 月閲覧)

³⁰ Duration Addition to electricity Storage (DAYS) Overview (ARPA-E, 2021)

³¹ GOV.UK, Longer Duration Energy Storage (LoDES) Demonstration Programme: successful projects
<https://www.gov.uk/government/publications/longer-duration-energy-storage-demonstration-programme-successful-projects> (2025 年 3 月閲覧)

³² SIX TEAMS RECEIVE UP TO ONE MILLION EUROS FOR THE DEVELOPMENT OF THEIR "LONGDURATION ENERGY STORAGE" CONCEPTS(SPIN-D, 2022 年 12 月)

³³ ドイツ連邦政府ホームページ(BMWK - Bundeskabinett beschließt Wirtschaftsplan des Klima- und Transformationsfonds (KTF))

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/08/20230809-bundeskabinett-beschliesst-wirtschaftsplan-des-ktf.html> (2025 年 3 月閲覧)

西	<ul style="list-style-type: none"> 再生可能エネルギーによる革新的な貯蔵設備併設プロジェクトに対する補助金 (Recovery, Transformation and Resilience Plan, PERTE ERHA scheme) 再生可能エネルギー技術機器 (特にソーラーパネル、風力タービン、ヒートポンプ、電解槽) と貯蔵技術の国内メーカーに直接助成金を提供。 TRL が 6~8 であっても対象となる。ただし、プロジェクトは完成時に TRL9 でなければならない。 経済的実行可能性と短期間での完成がプロジェクトの採択基準となる。採択時の評価について、8 時間を超えるプロジェクトは全て同じスコアが与えられる。(長期貯蔵技術が必ずしも優遇されない可能性。) 効率が 65% (蓄電システムに関連する全ての要素からの損失を含む) 未満のプロジェクトは、効率基準において 0 点とする。 2021 年に、2026 年までに商業運転を開始する独立型及び共同設置型の貯蔵施設の開発を支援するために €620M を割り当てることを発表。 2022 年に、€50M 規模のエネルギー貯蔵に関する研究開発プロジェクトを公募。2023 年に 2 回目の公募を実施 (€150M 規模)。 1 プロジェクトまたは 1 企業あたり最大 €15M の補助金を支給 (中小企業の場合、適格コストに対する最大補助率は 65%。ただし、少なくとも 2 時間の蓄電、少なくとも 1MW の容量、少なくとも 40% の再生可能エネルギー資産とのハイブリッド化が必要)。 (申請期間 2023 年 1 月~3 月)
伊	<ul style="list-style-type: none"> 自然エネルギー、貯蔵技術メーカーに開発支援のための補助金。
中国	<ul style="list-style-type: none"> 2024 年初頭、中国の国家エネルギー局は、56 の新型エネルギー貯蔵パイロットリストを発表 (そのうち、11 は CASE プロジェクト)。 エネルギー戦略的保証拠点を設置し、技術実証や制御システム、政策ガイダンス、ビジネスモデルの開発を促進 (特に新疆ウイグル自治区は、風力発電との併設やエネルギー貯蔵設備の建設を進める。24 年 9 月には中国華電集団有限公司による 1 GW 二酸化炭素圧縮空気貯蔵総合エネルギー模範プロジェクト起工式を実施。最大 8 時間のエネルギー貯蔵を目指す。)
豪	<ul style="list-style-type: none"> ARENA: エネルギー貯蔵のための部分的なプロジェクト費用を支援。 Clean Energy Finance Corporation: 低排出経済支援プロジェクトに 64 億豪ドル。
日本	<p>(LDES に特化した支援は検討中。)</p> <ul style="list-style-type: none"> GX 経済移行債を活用 (系統用蓄電池等電力貯蔵システム導入支援事業) 蓄電以外の LDES を含めた導入支援フェーズの技術について CAPEX 支援を検討。 補助対象: 6 時間以上の長時間の充放電が可能であり国内での商業事例が限定的な新規技術 (圧縮蓄電、液化空気蓄電、重力蓄電等の LDES 含む)。

表 3-1-3 米国 ARPA-E DAYS プログラムの実施プロジェクト

研究タイトル	実施機関	助成額	技術概要+開発内容
Sulfur-Based Aqueous Air Battery for Long-Duration Storage	Form Energy	\$3.9M	硫黄系水溶液電池: ・安価な硫黄を活用した長時間貯蔵用電池セル ・電解液の化学安定性と反応制御技術 ・システム統合とコストモデル開発
Separator-Free Zinc-Bromine Flow Battery	Primus Power + Columbia Electrochemical Energy Center	\$3.5M	亜鉛-臭素フロー電池: ・セパレータ不要のセル構造 ・電解液の腐食抑制技術 ・長寿命化と低コスト化のための材料開発
Geomechanical Pumped Storage for Grid Applications	Quidnet Energy	\$3.2M	地圧型ポンプ貯蔵: ・地下岩盤に圧水を注入する貯蔵システム ・高圧水の保持・回収技術 ・発電タービンとの統合設計
Supercritical CO ₂ Heat Pump and Power Cycle	Echogen Power Systems	\$3.0M	CO ₂ 熱ポンプ+発電: ・超臨界 CO ₂ を用いた熱エネルギー貯蔵 ・高効率熱交換器とタービン設計 ・往復効率向上のためのサイクル最適化
Low-Cost Sulfur-Manganese Flow Battery	United Technologies Research Center	\$3.0M	硫黄-マンガン系フロー電池: ・低コスト無機化学電解液の開発 ・耐久性の高い電極材料 ・システムスケールアップ設計
Solid-State Thermal Battery with TPV Conversion	Antora Energy	\$3.0M	固体熱電池(炭素+TPV): ・炭素ブロックを 2000℃以上で加熱する蓄熱体 ・熱光発電(TPV)セルの高効率化(>40%) ・断熱構造と安全性設計
ENDURING: High-Temperature Particle Storage with Brayton Cycle	NREL	\$2.79M	高温粒子蓄熱+ガスタービン: ・1100℃超の粒子を使った蓄熱システム ・粒子搬送と保温技術 ・ブレイトンサイクルタービンとの統合
STORES: Thermochemical Energy Storage Using Mg-Mn-O	Michigan State University	\$2.0M	熱化学蓄熱(Mg-Mn-O): ・酸化還元反応を利用した蓄熱材 ・反応器のモジュラー設計 ・サイクル耐久性と反応速度の最適化
Reversible Brayton Cycle with Molten Salt Storage	Brayton Energy	\$1.99M	熔融塩+逆転ブレイトンサイクル: ・高温熔融塩の蓄熱タンク ・逆転タービン設計と熱交換器 ・システム効率向上のための流体制御
Reversible Fuel Cell Using Hydrogen Peroxide	University of Tennessee, Knoxville	\$1.5M	再可逆燃料電池(過酸化水素系): ・液体燃料として過酸化水素を利用するセル ・高効率電極触媒の開発 ・安全な燃料循環システム設計

c) 各国の LDES 技術開発状況の整理

ここで整理した各国の LDES 導入における背景と各技術の特徴を考慮し、各国の LDES に取り組む背景と技術、LDES 導入により期待する効果を一元的に整理する(表 3-1-4)。

米国や英国については、国や地域での VRE 増加に伴い早期に LDES 導入を進めようとしている。したがって、特定の技術に偏るのではなく、早期の社会実装につながる TRL の高い技術の実証、コスト削減を積極的に支援している。一方で、100 時間を超えるような長時間のエネルギー貯蔵が可能になる技術の必要性が認知されてきており、両国ともこれらへの支援も併せて実施している。再エネ導入率の高い国でも、送電網の増強が進んでいる国でも、比較的短時間のエネルギー貯蔵技術の導入支援をしているにとどまっている。中国については、国家戦略として、LDES を位置づけ、国内の地域の特色、発電設備に合わせた技術を積極的に導入促進している。具体的な支援規模については不明だが、様々な技術の大規模化とコスト削減を進めながら早期の社会実装を実現し、将来的な海外展開を目指している。

表 3-1-4 各国の LDES 開発状況の整理

国	LDES 導入背景	各国の LDES 技術支援対象	導入を進める技術	期待する役割
米	<ul style="list-style-type: none"> 2035 までに 100% クリーン電源の実現。 出力抑制によるコスト増加。 	<ul style="list-style-type: none"> 10 時間以上の充放電が可能。 早期(2030 年)に低コストで実装できる技術。 より長期(100 時間以上)充放電可能な技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵、電気化学的貯蔵、Power to Gas。 	<ul style="list-style-type: none"> 早期の社会実装。 低コスト 慣性、同期化力。 10 時間以上の夜間、冬場のピーク対応。
英	<ul style="list-style-type: none"> 2035 年までに電力セクター脱炭素化の促進(脱石炭火力)。 電力供給網の信頼性向上。 系統混雑緩和によるコスト削減。 	<ul style="list-style-type: none"> TRL が5以上で早期(2030 年)に社会実装できる技術。 100MW、6 時間の充放電が可能(今後更に長期となる可能性)。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械的貯蔵(揚水を除く)、熱貯蔵、電気化学的貯蔵、Power to Gas。 	<ul style="list-style-type: none"> 早期の社会実装。 日中・夜間で 6 時間程度の充放電。 今後より長期(100 時間程度の必要性)が議論。 慣性、同期化力。 大容量。
独	<ul style="list-style-type: none"> 2030 年までに再エネ 80%。2035 年までに電力セクターの脱炭素化。 長期の天候不順(暗い風)への対応。 	<ul style="list-style-type: none"> 希少材を使わない 10 時間以上充放電可能な技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 蓄電。 Power to Gas (水素) 	<ul style="list-style-type: none"> 早期の社会実装。 従来は日中のピーク対応。 100 時間程度の長期充放電が可能な技術。 大容量。 慣性、同期化力。
中国	<ul style="list-style-type: none"> 2025 年再エネ発電量 50% 国家目標:2030 年までに新エネルギー貯蔵の完全な社会実装。 	<ul style="list-style-type: none"> 新型エネルギー貯蔵は商業化初期から大規模化発展段階に入り、大規模商業化応用の条件を備える。 電気化学蓄積エネルギーの向上、システムコストの 30%以上削減。 火力、原子力発電プラントなど既存電源に併設する新エネルギー貯蔵技術の開発。 100MW 級圧縮空気エネルギー貯蔵技術の実現。 MW 級フライホイールエネルギー貯蔵技術などの機械エネルギー貯蔵技術の開発。 水素エネルギー貯蔵、熱(冷)エネルギー貯蔵などの長時間スケールのエネルギー貯蔵技術の開発。 	<ul style="list-style-type: none"> 電気化学システム(バッテリーなど)、圧縮空気エネルギー貯蔵、フライホイールシステム、スーパーキャパシター等(揚水は除外)。 	<ul style="list-style-type: none"> 早期の社会実装。 大容量。 低コスト。 海外での市場競争力。 慣性、同期化力。
豪	<ul style="list-style-type: none"> 2030 年までに 100% 自然エネルギーで供給。 ニューサウスウェールズなど一部地域で再エネ抑制率が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電導入にあわせバッテリーの導入を支援。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状は機械的貯蔵や電氣的貯蔵(バッテリー)が主となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 早期社会実装。 慣性、同期化力。 (それほど需要は多くない)

3-1-4 社会課題の解決のために取り組むべき領域(F): 長期エネルギー貯蔵システムによる変動性再エネ最大活用

『貯める』に深く関係する社会課題である『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』及び『災害等に対するレジリエンス向上・特定資源リスクの低減』の解決に向けて、取り組むべき主要な領域の全体像を図 3-1-21 に整理した。それを踏まえ、この中で『長期エネルギー貯蔵による変動性再エネ最大活用』をフロンティア領域等として提案した。

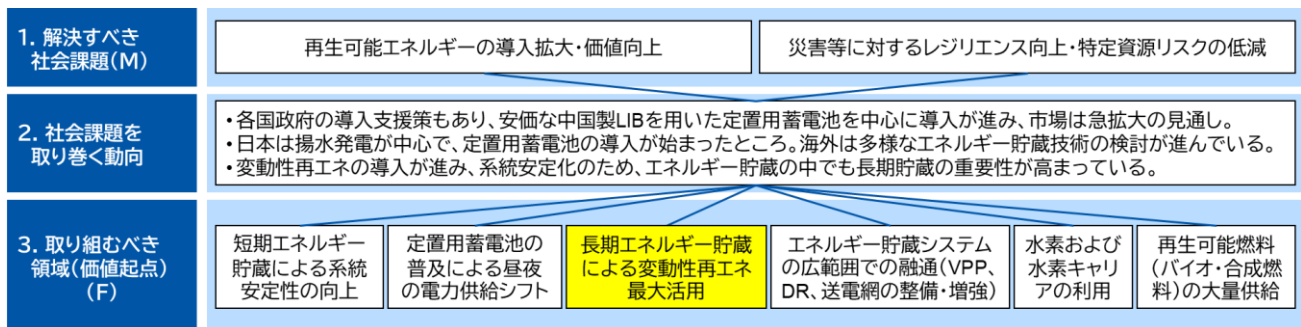


図 3-1-21 再エネの導入拡大・価値向上のために『貯める』に関して取り組むべき領域

その理由について改めて詳述する。

『貯める』に関する二つの社会課題『再生可能エネルギーの導入拡大・価値向上』及び『災害等に対するレジリエンス向上・特定資源リスクの低減』に対し、これらを解決するために取り組むべき領域には以下のものがある。

(i) 短期エネルギー貯蔵による系統安定性の向上

再生可能エネルギーやインバータ電源の増加により、電力系統では周波数や電圧の変動が生じやすくなっている。こうした課題に対し、短期エネルギー貯蔵は秒から数時間の時間スケールで需給変動を吸収し、系統の安定運用を支える重要な技術である。近年は蓄電池技術の高度化により、高速な応答性と一定の貯蔵容量を兼ね備え、系統安定化に幅広く貢献できるようになっている。くわえて、ミリ秒から秒オーダーのごく短時間領域では、スーパーキャパシターや超電導磁気エネルギー貯蔵(SMES)が限定的に補完的役割を果たし得る。

(ii) 定置用蓄電池の普及による昼夜の電力供給シフト

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、時間帯による需給の偏りが生じやすくなっており、定置用蓄電池は電力供給の柔軟性を高める手段の一つとして位置づけられる。一方、その普及にあたっては、電池セルや主要部材の生産が中国を中心とする特定地域に依存している点が、供給安定性やコスト面での課題となっている。とりわけ、リチウム、ニッケル、コバルトといった重要鉱物への依存は、地政学的リスクや価格変動の影響を受けやすい。このため、研究開発においては、蓄電池の長寿命化による資源使用量の抑制に加え、国内での電池リサイクル技術の高度化、使用済み電池からの有価金属回収、さらにはナトリウム系電池など資源制約の小さい次世代電池技術の開発が重要となる。

(iii) 長期エネルギー貯蔵による変動性再生エネルギー最大活用

再生エネルギーの導入拡大に伴い、需給調整能力の向上のみならず、余剰電力の有効活用の観点からも、エネルギー貯蔵技術の社会実装の重要性が高まっている。IEA『World Energy Outlook 2018』でも再生エネルギーの導入フェーズが高まるごとに、Energy Storage の社会実装の蓋然性が高まるとしている。国内でも春や秋の低需要期を中心に、太陽光発電をはじめとする変動性再生エネルギーが出力制御指令を受ける回数が既に増えている。

今後、更に変動性再生エネルギーの導入拡大を図るためには、日内変動に加え、暗い嵐とも呼ばれる曇天無風が続き、太陽光発電・風力発電が十分に発電できない場合に備えたエネルギー貯蔵が必要となる。

(iv) エネルギー貯蔵システムの広範囲での融通

再生可能エネルギーの主力化に伴い、エネルギー貯蔵は設備単体の性能向上だけでなく、広域で柔軟に融通できる環境整備が重要となっている。地域ごとに異なる需給特性や系統制約を踏まえると、貯蔵設備を分散的に最適運用する仕組みが不可欠である。このため、広域系統連系の強化、デジタル技術を活用したエネルギーマネジメント、複数拠点の貯蔵設備を統合制御する技術や制度整備を進め、貯蔵の価値を最大限引き出すことが求められる。

(v) 水素及び水素キャリアの利用

再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、日内調整を超えた週単位から季節単位の需給ギャップへの対応が課題となっている。水素は、電力を化学的エネルギーとして大量かつ長期間貯蔵できるエネルギーキャリアであり、こうした長期エネルギー貯蔵の有力な選択肢として位置づけられる。また、アンモニアや有機ヒドライドといった水素キャリアは、輸送・貯蔵の柔軟性を高める手段として期待されている。一方で、変換効率やコストの面では依然として課題が多い。このため、研究開発においては、水電解装置の高効率化・低コスト化に加え、水素及び水素キャリアの貯蔵・輸送技術の高度化、利用段階での発電・燃焼技術の高効率化を一体的に進めることが重要となる。

(vi) 再生可能燃料の大量供給

再生可能エネルギー由来の燃料としては、水素やアンモニアの他、バイオエタノール、バイオディーゼル、e-Fuel などの液体燃料も重要な選択肢となる。これらの燃料は、既存の燃料インフラや利用設備を活用できるため、貯蔵・輸送・利用に関する追加的な制約が比較的小さい点に特徴がある。一方で、大量供給の実現に向けては、製造コストの低減が最大の課題であり、原料調達から製造プロセスまでを含めた全体最適が求められる。くわえて、原料や燃料の調達先が特定地域に偏ることによる供給リスクを低減するため、国内外における調達先の確保や多様化、持続可能性を考慮したサプライチェーンの構築が重要となる。

3-1-2 節で説明したとおり、変動性再エネの導入、自然災害の頻発化、激甚化、国際社会の不安定化に伴い、エネルギー貯蔵には様々なニーズが加わり、その重要性が増している。

これらのニーズの大半は化石燃料が担ってきた。今後、これをほかの手段で置き換えるには、必要な容量が極めて大きい。蓄電池の利用は連続出力時間の長い方向に拡大していくと見込まれる。しかし、価格が下がってきている現状を踏まえたとしても、膨大なコストが必要になることから、数時間を超える範囲をカバーするのは容易でない。また、水素の利用技術が進展しても、製造・貯蔵・輸送のエネルギー効率向上が課題となっている。再生可能燃料についても製造コストが課題で、いずれも十分な量が市場に出回るにはまだ時間を要するものと考えられる。このことから、蓄電池、水素や再生可能燃料を補うためのエネルギー貯蔵技術が必要となる(図 3-1-22 の赤点線部分)。そこで、連続出力時間が数時間以上のこの範囲を『長期エネルギー貯蔵による変動性再エネの最大活用』領域としてフロンティア領域等に提案する。

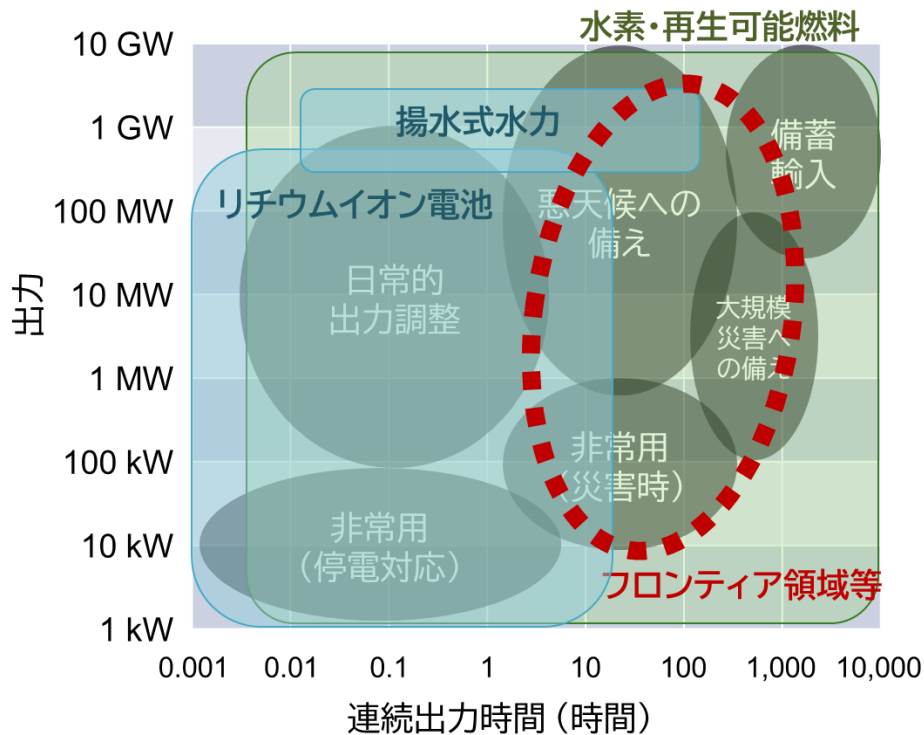


図 3-1-22 エネルギー貯蔵技術のフロンティア領域等

エネルギー貯蔵の手法には、SMES や LIB、LDES、水素などがあり、LDES には重力エネルギー貯蔵や熱エネルギー貯蔵など様々な手法がある。これらを横軸とし、縦軸にサプライチェーンの川上、すなわち素材・部材から、構成機器、製品・設備、更には利用者に近い運用までをとり、エネルギー貯蔵に必要な技術をマッピングした(図 3-1-23)。日本に強みがある技術には下線を引いている。



図 3-1-23 貯蔵手法とサプライチェーンを軸にとったエネルギー貯蔵に必要な技術のマッピング

LDES の範囲の様々な要素技術には、日本企業が強い技術が至る所にある。そうした強い技術は、特に、川上の素材・部材に概ね対応するエネルギー保持技術、構成機器に概ね対応するエネルギー変換技術に多く見られる。その一方、図中赤破線で囲ったシステムレベルでの低コスト化の取組は限られている(以下「経済的先進 LDES」という)。欧米では 2020 年以降、LDES 分野で従来の電池の枠を超えた革新的なアイデアを採り入れるスタートアップが急増し、大規模実証も次々と進んでいる。この領域での取組が遅れば LDES の大半を海外からの輸入に頼らざるを得なくなり、長期的に見てエネルギー安全保障を揺るがしかねない。また、国内での導入を進めるためには日本の気候や送電網などの環境に応じた運用方法の検討も必要となる(赤破線で囲って「LDES 運用方法の検討」と記載した部分)。そのため、LDES の中でも特に『経済的先進 LDES』と『LDES の運用方法の検討』に注目して取組を進める余地がある。

当該フロンティア領域等の①将来性(成長性・社会課題)、②技術・アイデアの革新性、③日本の優位性、④民間のみで取り組む困難性、⑤重要経済安保技術、⑥その他特筆すべき理由については次のとおり評価される。

①将来性(成長性・社会課題)

先に述べたようにエネルギー貯蔵市場は、2024年の589億ドルから2033年までに2,048億ドルに達するとの予測があり、高い将来性が期待できる。このうちLDESに関しては、海外で革新的な技術として近年急速に注目が高まり、米国や欧州、中国を中心に政府機関やベンチャー企業が様々な研究開発を加速している。LDESの年平均成長率は容量(GWh)ベースで28.0%に上り、エネルギー貯蔵全体に占めるLDESの割合は2025年の4.0%から2035年には11.4%に拡大すると予想されている。

また、仮に、国内において変動性再エネにより電力の40%を確保しようとした場合、朝夕の不足電力発生時には年間で数十日程度、約100GWh規模の蓄電容量が必要となるとの試算もある³⁴。

②技術・アイデアの革新性

欧米では2020年以降、LDES分野で従来の電池の枠を超えた革新的なアイデアを採り入れるスタートアップが急増し、大規模実証も次々と進んでいる。例えば重力を使う「巨大クレーン蓄電」や、廃坑・油井をそのまま蓄電インフラに変える発想、CO₂を液化して貯める「CO₂バッテリー」、2400℃の超高温で熱を蓄える炭素ブロック、地層を人工的に加圧して揚水の代わりに使う地下貯蔵など、既存の発電・蓄電では考えられなかった仕組みが取り入れられ、有効性の検証が進んでいる。

同時期に学术界でもLDES研究が急伸し、関連論文は10年で4.4倍とLIBを上回る勢いで増加し、IEA TCPやIEEEなど主要会議でも2020年代からLDESが主要テーマとして扱われ始めた。こうした「既存技術の前提を覆すアイデア」が次々誕生したことが、2020年以降の欧米での急速な活発化の大きな原動力となっている。

③日本の優位性

日本はLDESに必要な様々な要素技術に強みをもつ。

LDESでは一般に電力を他のエネルギー形態と相互に変換する技術や変換したエネルギーを保持する技術が要素技術として必要になる。熱エネルギーによる貯蔵でいえば、日本企業が得意とするヒートポンプ等の各種省エネ技術、ガスタービン、発電機、ベアリング等の技術を生かせる可能性がある。重力、慣性力、圧縮空気、熱による長期エネルギー貯蔵でも動力モーター、発電機、ベアリング等の技術が利用できる。日本が学術的に強みをもつ材料分野や化学分野はエネルギー貯蔵媒体、断熱材、エネルギー貯蔵化学媒体等の点から化学的エネルギーによるLDESの要素技術への貢献が期待される。

³⁴カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会報告書(一般社団法人日本機械学会動力エネルギーシステム部門カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会、2024年7月)

NISTEP(科学技術・学術政策研究所)の2024年のデルファイ調査において、エネルギー貯蔵に関する「エネルギー変換」及び「エネルギーシステム」は国際優位性があるとされている³⁵。

④民間のみで取り組む困難性

長期エネルギー貯蔵システムは、スケールメリットの発揮に大規模設備の実証が不可欠であり、そのための初期投資額は相当に大きく、単独で負担するには民間企業にとってリスクが過大となる。また、革新的なコンセプトや多様な技術シーズを実証レベルまで具体化するには、中小企業を含む幅広い主体からの提案が不可欠であるが、その具現化には研究開発費や設備費などの外部支援が欠かせない。さらに、長期エネルギー貯蔵は電力システム全体の需給調整や系統安定化に直接影響するため、送配電事業者の協力や制度的調整が不可避であり、政府・事業者・産業界が一体となって取り組む体制が求められる。

⑤重要経済安保技術

変動性再エネの最大活用は、エネルギー供給の安定性を高め、我が国のエネルギー安全保障を強化するうえで極めて重要である。とりわけ LDES は、エネルギーの日常的な需給変動を吸収し、自然災害や海外からの外的リスクに左右されにくい強靱なエネルギーシステムを構築する基盤技術となる。また、希少資源への依存が小さい国産技術の開発が進めば、地政学的リスクや市場変動への脆弱性を低減でき、経済安全保障の観点からも大きな意義を有する。

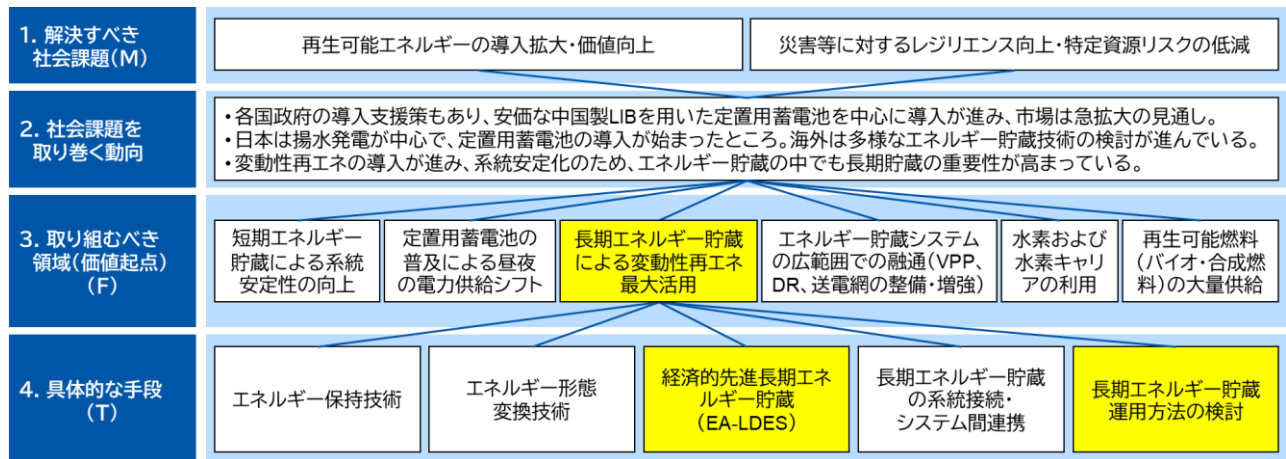
米国は CETs(Critical and Emerging Technologies)として 18 の技術を選んでおり、そのうちの一つにクリーンエネルギーの生成と貯蔵(Clean Energy Generation and Storage)がある³⁶。さらに、その技術範囲をより具体的に表す重要分野(key subfields)として蓄電池(Batteries)とは別にエネルギー貯蔵(Energy storage)を取り上げている。すなわち、蓄電池でカバーできないエネルギー貯蔵技術の分野があることを意識し、蓄電池と並んで重要視している。

³⁵ 第 12 回科学技術予測調査 科学技術等の中長期的な将来予測に関する調査(デルファイ調査)【速報版】(文部科学省 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測・政策基盤調査研究センター 動向分析・予測研究グループ、2024)

³⁶ CRITICAL AND EMERGING TECHNOLOGIES LIST UPDATE, A Report by the FAST TRACK ACTION SUBCOMMITTEE ON CRITICAL AND EMERGING TECHNOLOGIES of the NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL(2024年2月)
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/CMR-PREX23-00185928/pdf/CMR-PREX23-00185928.pdf>
 (2026年3月閲覧)

3-1-5 取り組むべき具体的手段(T)のテーマ例

LDES を実現するための手法には重力エネルギー貯蔵、熱エネルギー貯蔵など様々なものがある。それぞれ得意な貯蔵容量(時間)範囲、出力範囲がある。また、それらの組合せや、技術開発によって更なる長時間、大容量が実現する可能性もある。このため、どれかの手法にターゲットを絞るのは賢明でない。むしろ、前述の図 3-1-23 で示した、『経済的先進 LDES』及び『LDES 運用方法の検討』を中心に取り組むことが望ましい(図 3-1-24)。ここでは、それぞれについて、具体的な手段のテーマ例について述べる。



EA-LDES: Economical Advanced Long-Duration Energy Storage

図 3-1-24 長期エネルギー貯蔵システムの MFT ロジックモデル

(1) 経済的先進 LDES

LDES の社会実装には優れた経済性が鍵となる。一方で機動性や設備サイズなどの要求は厳しくない。実際、3-1-3(2)の(iii)海外スタートアップの事例から見てきたのは、高効率や高性能を闇雲に追求するのではなく、汎用材料や既存インフラの活用、出力部と容量部を分離した構造設計、長寿命・低劣化といった割り切った設計思想の採用が一定の成果を上げていることであった。すなわち、これまで日本が蓄積してきた技術を最大限に活かしつつも、日本の既存の環境や設備との融合、見過ごされていた価値の活用などを通じた低コスト化は可能だと期待される。例えば次のような方向性がある。

- ・ スケールメリットが見込める技術
- ・ 既存の施設の使用や廃棄物の再利用
- ・ 安全性の高い設計(設備以外にかかる費用の削減)
- ・ 電力以外の価値の利用(熱、慣性力など)
- ・ 成熟した安価な技術の有効活用、組合せ(耐久性の向上や維持費の低減)
- ・ 直接必要のない制約からの解放(重量あたりのエネルギー密度、耐振性、高速応答性)
- ・ その他日本の強みを生かして LDES を実現するための方策

こうしたアイデア・技術を発掘して前に進めるには二つの方法が考えられる。一つは目的である実用化時のコストターゲット(例えば均等化貯蔵コスト(LCOS)で 10 円

/kWh-cycle)を明確に掲げた上で、スケールアップによってその実現可能性や隠された技術的課題を明らかにすることである。企業各社が有する技術のTRLは様々であり、それらに応じた研究開発の支援があるべきであろう。米国 ARPA-E では LCOS を \$0.05/kWh-cycle と定めて研究開発を支援する DAYS プログラムを実施している。この手法には学ぶべきところがある。

また、既存の施設の利用など、自由な発想、アイデアが解決につながることを期待される。これを実現するにはダイバーシティが必要である。LDES の研究開発に集中してきた研究者や企業のみならず、これまで関わってこなかった専門家の参入が有効であろう。機械や化学工学の専門家のみならず、触媒化学や高分子合成の専門家、あるいは生命工学の専門性も役立つかもしれない。

(2) LDES 運用方法の検討

LDES の運用方法に関する検討は、カーボンニュートラルが不可逆的に進行する電力システムにおいて、安定性と経済的な持続性をいかにして両立させるかという、極めて複合的かつ高度な課題への応答である。その本質は、単に余剰電力を時間的に移動させることにあるのではない。数日から数週間に及ぶ供給途絶に対する保険としての機能と、非効率な火力発電設備の休廃止などによる同期発電機の離脱によって失われる系統慣性の補完という、二重の役割を具体的な運用モデルに落とし込む作業が必要となる。

運用の前提としてまず認識しなければならないのは、再生可能エネルギーの主力電源化に伴う需給調整の要求の質的な変化である。現在、系統用蓄電池市場の主流となっている LIB による蓄電システムは、充放電効率が 90%前後と非常に高く、日内変動の平準化には極めて有効な技術である。しかし、そのコスト構造は出力(kW)と容量(kWh)が線形に連動しているため、8 時間を超えるような長時間の放電を行おうとすれば、バッテリーセルそのものを比例的に増やす必要があり、経済的な限界に直面する。

これに対して、CAES、LAES、圧縮 CO₂ エネルギー貯蔵、熱エネルギー貯蔵といった LDES 手法は、出力部(タービン)と容量部(タンク)が分離されたディカップリング構造を有している。そのため、容量部を増やすだけで容量単価(円/kWh)を低減しつつ大容量化が可能であり、欧米などで懸念される曇天無風(Dunkelflaute)の期間を埋める役割が期待されている³⁷。しかし、これらの LDES には充放電効率が低く、かつ稼働頻度が極端に少ないという弱点がある。そのため、通常の卸電力市場でのアービトラージのみでは投資回収が困難となる Missing Money 問題に直面するのが現状である。

こうした経済的な課題以上に、電力システムの運用面で深刻な懸念事項となっているのがシステムの安定性、すなわち系統慣性と短絡電流の確保である。従来の電力システムでは、周波数及び電圧の維持や事故時からの回復において、同期発電機がもつ回転エネルギーが周波数変動に抵抗する系統慣性と、定格の数倍にも及ぶ短絡電流の供給能力が不

³⁷ An Assessment of Resource Drought Events as Indicators for Long-Duration Energy Storage Needs https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-35955.pdf (2026 年 1 月閲覧)

不可欠な役割を果たしてきた。現在、カーボンニュートラルの加速に伴い、これまで系統形成の一翼を担い、系統慣性や短絡電流の供給源として機能してきた非効率な火力発電設備の休廃止が進行している。これにより、系統安定化に寄与する同期発電機が減少する一方で、太陽光発電設備、風力発電設備及び蓄電所といった非同期電源であるインバータ電源が急増しており、系統の強靭性が根底から揺らぎかねないという深刻な危機感が顕在化している。

例えば、インバータ電源の比率が一定水準を超え、同期化力が希薄化すると、保護リレーが故障電流を検知できずに動作しなかったり、わずかな需給不均衡で連鎖的な系統崩壊が発生したりする危険性が高まる。この課題に対して、自律的に電圧位相を形成するグリッドフォーミングインバータへの期待が寄せられているが、特別高圧系統への適用には物理的障壁が存在する。パワー半導体は銅巻線に比べて熱容量が極めて小さく、同期発電機のような大きな過電流に耐えられない。このため、事故時の保護協調や変圧器励磁突入電流への対応において、大幅なコスト増を招く、あるいは保護機能の不要動作による遮断を誘発するリスクがある。

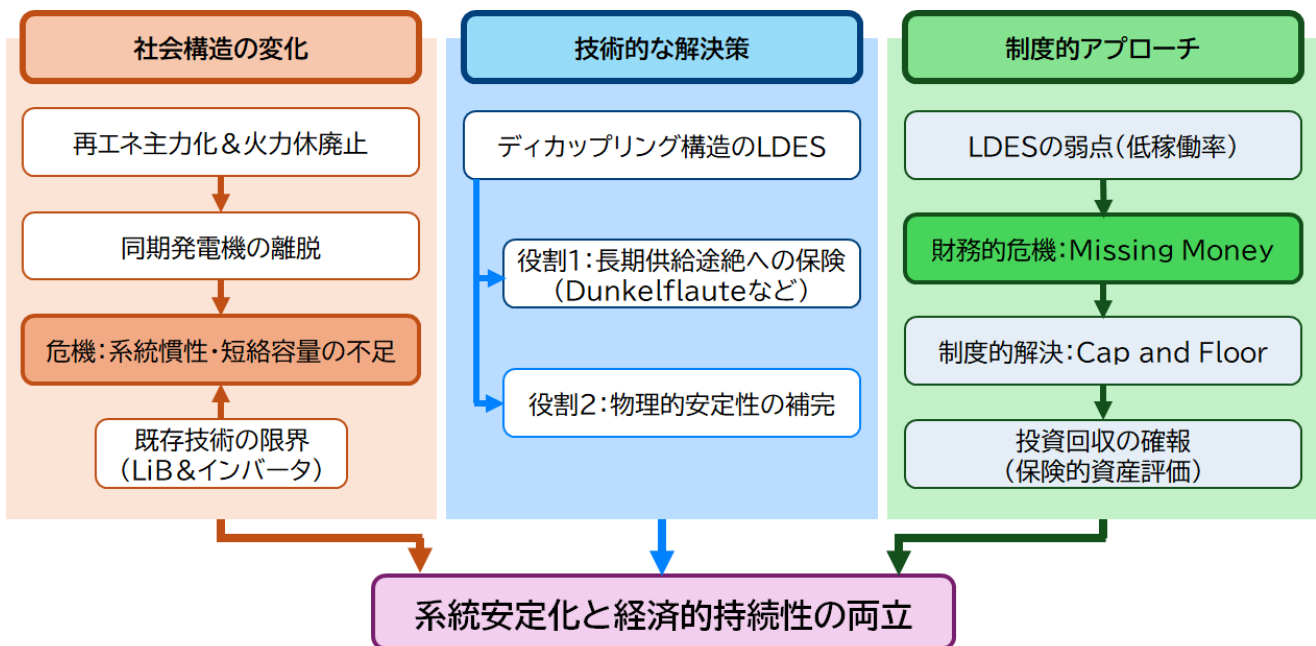
現時点において、フライホイールと発電機から構成される同期調相機と大規模蓄電システムによるインバータ電源を同一地点で連系するハイブリッド型系統安定化設備³⁸は極めて有効な解決策の一つであると考えられる。この運用形態を採用することで、同期調相機が系統慣性と短絡電流を提供して系統強度を維持し、一方でインバータ電源が高速な周波数調整とエネルギー供給を担うことができる。このように互いの弱点を補完し合うことで、インバータ側の過剰な設備投資を抑制しつつ、システム全体の安定性を確保できる。また、この設備の代わりにタービン発電機を有するLDESを配置することも、系統の強靭化に資する対応策と成り得る。

このような技術運用を社会実装するためには、市場設計の刷新が不可欠となる。LDESの真価は、頻繁な充放電によるエネルギー供給(kWh)よりも、稀頻度ではあるが致命的な供給支障を回避するための設備容量(kW)としての価値、すなわち系統の回復力にあるからである。現状の容量市場では、4時間程度といった短時間の蓄電システムが増加するとピークが平準化され、LDESがもつ長期間の供給能力や系統安定化への寄与度といった価値が正当に評価されない懸念がある。

そのため、英国で検討が進められているCap and Floorメカニズムのような制度設計の導入が強く望まれる。これは、事業者の収益に下限(Floor)を設けて投資リスクを低減しつつ、異常高騰時には上限(Cap)を設けて消費者負担を抑制するというものである。この仕組みは、LDESを単なる市場取引の対象としてではなく、Dunkelflauteのような極端事象に備えるための系統運用の保険的資産として位置づけるものであり、稼働率に依存しない確実な投資回収を可能にするアプローチと言える。また、将来的には系統慣性の提供で報酬を得られる仕組みも必要であると考えられる。

³⁸ Two become one: Siemens Energy combines two technologies to stabilize the Irish grid
<https://www.siemens-energy.com/us/en/home/press-releases/two-become-one-siemens-energy-combines-two-technologies-to-stab.html> (2026年1月閲覧)

結論として、LDES の運用検討においては、リチウムイオン電池との効率比較のみに終始するべきではない。図 3-1-25 に示すように、上述の社会的背景、技術的課題および制度的対応の関係性を整理すると、火力発電設備の減少に伴う系統安定化能力の不足を補完すべく、長期間の供給途絶リスクへの対応力と、LDES による系統安定化機能（系統慣性・短絡電流などの提供）なども検討する必要がある。そして、その経済的持続性を支えるためには、Cap and Floor などのようなリスク遮断型の政策枠組みとの一体的な運用設計が不可欠である。



- ・ 現状の危機:脱炭素化に伴う火力発電設備の休廃止と、それに伴う系統形成の要である同期発電機の離脱、および物理的な慣性・短絡容量の深刻な喪失。
- ・ LDESの役割:ディカップリング構造による長期供給途絶(Dunkelflaute)への保険的機能、および回転機等を活用した物理的な系統安定化能力の提供。
- ・ 経済的解決策:低稼働率に起因するMissing Money問題の克服、およびCap and Floorメカニズムの導入による投資予見性の確保と確実な社会実装。
- ・ 目指す姿:LDESの技術的特性とリスク遮断型の政策枠組みの統合による、電力システムの系統安定化と経済的持続性の高次元での両立。

図 3-1-25 社会構造の変化に対応する技術・制度両面からの系統安定化戦略

コラム 注目技術 1 無線給電の展望

(1) 技術の概要

無線給電(Wireless Power Transfer:WPT)とは、電線(ワイヤ)を用いず、送信側から空間を隔てて電力を伝送し、受信側でこれを受け取って利用する技術である。センサー、モビリティ、ロボット、ドローン、宇宙機器など、給電がボトルネックとなる用途において、従来の有線給電やバッテリー交換に代わる基盤技術として注目されている。

表1 無線給電方式の分類と伝送距離・用途

方式	伝送距離・用途
電磁誘導方式	数 cm 程度の近距離で高効率。スマートフォンや EV ワイヤレス充電に実用化。
磁気共鳴方式	数十 cm～数 m の中距離伝送が可能。複数機器同時給電などへの応用が進展。
マイクロ波方式	数 m～km 級の長距離伝送が可能。指向性制御や安全性確保が課題。
レーザー方式 (光無線給電)	高い指向性・長距離伝送が可能で、受光素子を介して電力を供給。

(2) なぜ今、レーザー給電に注目するのか

これらの方式の中でも、近年とりわけ注目されているのがレーザー給電(光無線給電)である。レーザー給電は、送信側で生成したレーザー光を空間伝送し、受信側の光電変換素子で電力に変換する方式であり、以下の特徴を有する。

- 高い指向性による長距離・選択的給電
- アンテナサイズ制約が小さく、小型・軽量機器に適合
- 電磁ノイズ影響が小さく、周波数ひっ迫問題を回避可能

特に我が国は、光源(半導体レーザー)、光学系、受光素子といったレーザー給電の中核技術において、長年にわたり国際的な競争力を有してきた。また、宇宙太陽光発電(Space Solar Power Systems:SSPS)を背景とした基礎・基盤研究の蓄積に加え、近年では 1km 級の屋外実証や、スタートアップによるドローン向け応用など、社会実装に向けた技術進展も見られている。

(3) 想定される応用分野と価値

レーザー給電は、従来の給電手段では困難であった領域に新たな価値を提供する(表2)。これら分野では、「電力を貯める」発想から、「必要な場所に、必要なときに送る」発想への転換が求められており、レーザー給電はその中核技術となり得る。

表2 レーザー給電の主な応用分野と期待効果

応用分野	期待される価値
ドローン	長時間滞空、バッテリー交換の不要化
被災地・離島	インフラ未整備地域へのオンデマンド給電
HAPS (High Altitude Platform Station)	高高度プラットフォームへの継続給電
宇宙インフラ	衛星間給電、月・宇宙拠点への展開

(4) 今後の研究開発・制度設計の論点

他方、レーザー給電の社会実装に向けては、技術・制度両面での課題整理が不可欠。特にドローン、HAPS、宇宙インフラといった新領域では、単なる要素技術開発にとどまらず、システム設計思想、運用シナリオ、制度との接続を含めた研究開発が求められる。

無線給電、とりわけレーザー給電は、エネルギー供給の在り方そのものを変革し得るポテンシャルを有する。今後は、基礎・基盤研究の深化と並行して、具体的な社会実装シナリオを見据えた研究開発・実証を戦略的に推進することが重要である。

表3 社会実装に向けた課題例

課題	概要
変換効率の向上	レーザー給電では、送信側での電力から光への変換、空間伝送、受信側での光から電力への変換という段階を経るため、システム全体としてのエネルギー効率が課題。
安全性の確保	レーザー光は高い指向性を有する一方、人体や物体に照射された際の影響を考慮する必要がある。異常時の即時遮断などシステムレベルでの安全設計が不可欠。
屋外・長距離環境での信頼性	屋外・長距離のレーザー給電では、雨や砂塵などの天候、大気の揺らぎなど実環境特有の不確実性が性能に影響する。
用途別のルール整備	電力・通信・光学・航空宇宙といった複数の規制分野にまたがるため開発段階から標準化・ルール形成を見据えた実証が重要。

TSC Foresight

Innovation Outlook Version 1.0 増補版

サステナブルエネルギー分野

2026年6月1日発行

作成メンバー

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
イノベーション戦略センター(TSC)

■センター長	岸本 喜久雄
■事務局長	田辺 雄史
■サステナブルエネルギー分野	
・ユニット長	原 重樹
・研究員	岩井 智昭
	福富 広幸
	赤木 泰章
	加藤 浩瑞
・フェロー	矢部 彰
	仁木 栄

●本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5200(イノベーション戦略センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料はイノベーション戦略センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。