

蓄電池以外のエネルギー貯蔵システム(LDES)の 技術動向・課題整理

MRI 三菱総合研究所

2024年11月11日

エネルギー・サステナビリティ事業本部

目次

- 蓄電池以外のエネルギー貯蔵システム(LDES)の技術動向・課題整理 P. 4

調査の背景・目的

目的

- 国内外においてLDESの導入が検討されている中で、LDESの必要性・意義・課題を、正確に把握し共通認識を持つことが重要である。
- ここでは、各技術の特徴やユースケース・コストの整理を行い、今後の政策検討における論点出しをすることを目的とした。

報告内容

1 LDES導入の必要性、各技術の特徴・コスト比較

- 国内外でLDES導入が検討されている理由・必要性、世界における導入や実証支援等の動向を整理した。
- 現状の各技術のコスト、社会への実装段階のレベルを整理した。
- 将来的な各技術のコストを比較整理した。
- 貯蔵システムにおいて技術が確立しているLIBと各技術の特徴を比較整理した。
- 各技術のユースケースを整理した。
- 上記整理を踏まえて、LDESの必要性や普及の意義について、ご議論いただきたい。

2 ヒアリングによる課題・現状の整理

- LDES開発・導入事業者へのヒアリングを通して、課題と現状を整理した。
- 上記整理を踏まえて、LDESの課題や現状について、ご議論いただきたい。

蓄電池以外のエネルギー貯蔵システム(LDES)の 技術動向・課題整理

LDESの分類・調査対象範囲

- LDESは、主に電気化学式、機械式、蓄熱式、化学式に分類できる。
- 本調査は、将来的な新しい技術として期待される機械式、蓄熱式、化学式を対象として調査を実施した。

分類

概要

例

電気化学式

- ・ 電気化学反応を利用してエネルギーを貯蔵・放出するシステムを示す。小容量のものから大容量のものまで幅広く実用化されている。

- ・ LIB
- ・ レドックスフロー電池
- ・ ナトリウム・硫黄電池

機械式

- ・ 位置エネルギーや運動エネルギーにて貯蔵するシステムを示す。例えば、外部から調達した電気エネルギーにより重量物を持ち上げて位置エネルギーとして貯蔵し、必要な時に落下させることで電気エネルギーに変換するという機構となる。

- ・ 揚水
- ・ 重力蓄電
- ・ CAES^{注1}、LAES^{注2}
- ・ CO₂バッテリー

蓄熱式

- ・ 熱エネルギーにて貯蔵するシステムを示す。例えば、固体媒体等の蓄熱材の熱容量を利用して熱エネルギーを貯蔵し、この熱を使用してタービンを駆動して電力を生成する機構となる。

- ・ 岩石蓄熱
- ・ PTES^{注3}

化学式

- ・ 化学結合の形成を通じて電気を貯蔵するシステムを示す。例えば、電気でガスを製造し、高圧タンク等に貯蔵し、ガスを電気に変換する機構となる。

- ・ PtGtP^{注4}

本調査の対象範囲

注1：圧縮空気貯蔵システム。注2：液化空気貯蔵システム。注3：ヒートポンプ技術を使った蓄熱蓄電システム。注4：電気をガスに変換し、ガスを電気に変換するシステム。

出所) LDES Council, "Net-zero power Long duration energy storage for a renewable grid", 閲覧日: 2024年10月21日,
<https://www.ldescouncil.com/assets/pdf/LDES-brochure-F3-HighRes.pdf>, を基にMRI作成

LDES導入の必要性

- 変動性再生可能エネルギーの導入拡大、レジリエンス向上のニーズ、資源調達リスクの低減といった背景から、世界中で特定資源に依存せず安価に長時間エネルギーを貯蔵する技術の必要性が増していく。
- LDESは、資源調達リスクが低く、長時間率においてLIBと比較してコストが低い傾向にあるため、将来的に重要性が高まることが想定される。

LDES導入が必要な背景とその概要

背景	概要
変動性再生可能エネルギーの導入拡大	・ 世界中で変動性再生可能エネルギー(VRE)の導入が加速しており、系統安定化のため安価な長時間の蓄電能力や慣性力提供の重要性が高まっている。
レジリエンス向上のニーズ	・ 世界中で災害リスクが高まっているため、長時間の停電時などに対応出来るような蓄電システムのニーズが高まっている。
資源調達リスクの低減	・ LIBはリチウムなどの希少資源に依存しているため、資源調達リスクの低い蓄電システムが求められている。

LDESに対する世界の支援動向

- 各国で支援の方法や対象となる技術が異なるが、LDESの導入促進に向けて、導入・実証支援、設備投資控除等の支援が拡大している。

LDESに対する支援の各国の主な動向

分類	国	開始時期	制度名	対象	概要
実証支援	英国	2021	Longer Duration Energy Storage Demonstration competition	LDES(4時間以上、LIB・揚水等既存技術は除く)	革新的なLDES技術実証のためのコンペティションでTRL※6/7とTRL4/5の2分野で募集(合計6,900万ポンド超)。 ※ TRLは技術成熟度の尺度で、TRL4～7は検証～実証レベルである。
	米国	2022	Long Duration Energy Storage Program(CA州)	LDES(8時間以上)	2022年度よりLIBではないLDES技術支援のために設置(最大3億3,000万USドル)、2022-23で3件(計1億4,000万USドル)が採択済。
		2024	Long-Duration Energy Storage Pilot Program(全米)	LDES(10時間以上)	LDES技術の実証を支援することを目的として、超党派インフラ法によって最大1億ドルの資金を提供。
導入支援	豪州	2022	Advancing Renewables Program	LDESを含む再生可能エネルギーへの移行、グリーン水素の商業化、鉄鋼業の脱炭素化	豪州再生可能エネルギー機構(ARENA)が再生可能エネルギー推進プログラムの一環として、ブローケンヒルの廃坑内に建設するA-CAESプロジェクトに、4,500万豪ドルの助成金を条件付きで提供。
	スペイン	2023	Mecanismo de Recuperación y Resiliencia	LDES(スタンドアロン型蓄電・蓄熱システム、揚水)	2023年8月、環境移行・人口問題省(MITECO)は2026年までに稼働するLDESに対し、プロジェクト費用の40～65%をカバーする助成金を開始する旨を発表(合計2億8,000万ユーロ)。
税額控除	カナダ	2023	Clean Technology ITC	LDESを含む定置型蓄電設備やクリーンエネルギーを生成する設備等	2035年までに総額930億ドルの支援を行うClean Economy ICTの一環として、2023年3月28日から2034年12月31日までに取得した設備の資本コストにかかる税額を最大30%控除。

出所)英国:GOV.UK, “Longer Duration Energy Storage Demonstration (LODES) competition (closed to applications)”, 閲覧日:2024年10月21日, <https://www.gov.uk/government/collections/longer-duration-energy-storage-demonstration-lodes-competition>

米国: Department of Energy, Office of Clean Energy Demonstrations, “OCED Announces \$100 Million for Non-Lithium Long-Duration Energy Storage Pilot Projects”, 閲覧日:2024年10月21日, <https://www.energy.gov/oced/articles/oced-announces-100-million-non-lithium-long-duration-energy-storage-pilot-projects>, California Energy Commission, “Long Duration Energy Storage Program”, 閲覧日:2024年10月21日, <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/long-duration-energy-storage-program>

豪州:ARENA, “Repurposing Broken Hill mine for renewable energy storage using compressed air”, 閲覧日:2024年10月21日, <https://arena.gov.au/news/repurposing-broken-hill-mine-for-renewable-energy-storage-using-compressed-air/>

スペイン:IDAE, “Proyectos innovadores de almacenamiento eléctrico independiente, almacenamiento térmico y almacenamiento mediante bombeo reversible, dentro del PERTE ERHA”, 閲覧日:2024年10月21日, <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/proyectos-innovadores-de-almacenamiento-electrico-independiente>

カナダ:Government of Canada, “Government of Canada Launches the First Clean Economy Investment Tax Credits”, 閲覧日:2024年10月21日, <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2024/06/government-of-canada-launches-the-first-clean-economy-investment-tax-credits.html>

LDESの実証事例

- 国内外の主なLDESの実証事例を以下の表に整理した。
- 商用化は2020年代後半以降になる技術が多いことが想定される。

国内外の主なLDESの実証事例（揚水は広く商用化済みのため除く）

貯蔵方法	対象技術	エリア	所在地	実施期間	ステータス	規模	参画企業	概要
機械式	重力蓄電	中国	江蘇省南通市	2023年～	試験運転中	25MW/ 100MWh	Energy Vault/ 中国天楹/ アトラス・リニュー アブル	系統接続に成功。 世界初の商用化を目指している。
	CAES	カナダ	Goderich	2019年～	商用稼働中	1.75MW, 10MWh以上	Hydrostor	商用運転中。 塩洞窟を活用している。
	LAES	日本	住友重機械工業 廿日市工場	2025年～	商用実証 プラント 建設中	4.99MW/ 19.96MWh	住友重機械工業 広島ガス Highview Power	商用実証プラント。 2025年5月に稼働予定。
	CO ₂ /バッ テリー	イタリア	サルデーニャ島	2024年～	商用プラント 建設中	20MW/ 200MWh	Energy Dome	世界初の商業運転を計画して いる。
蓄熱式	岩石蓄熱	日本	不明	2022年度	実証終了	500kWh	東芝エネルギーシ ステムズ 中部電力 丸紅	環境省の令和4年度委託業務 として4500万円の補助を受け、 2023年3月まで実施。
	PTES	日本	不明	2023年度	実証終了	600W	ESREE Energy	環境省の令和5年度補助金に よりF/S及び原理検証を実施。 令和6年度補助金にも採択済。
化学式	PtGtP (水素)	日本	高砂水素パーク	2023年～	実証稼働中	入力:5.5MW(AWE) 出力:40MW(100%専 焼)、450MW(30%混焼)	三菱重工業 HydrogenPro	PtGはAWE・SOEC、GtPは ガスタービンという構成。 2025年に30%混焼で商用化 予定。

出所)Energy Vault HP,閲覧日:2024年10月8日,<https://www.energyvault.com/projects/cn-rudong>,HYDROSTOR HP,閲覧日:2024年10月8日,<https://hydrostor.ca/projects/the-goderich-a-caes-facility/>,
住友重機械工業 HP,閲覧日:2024年10月8日,<https://www.shi.co.jp/info/2023/6kgpsq000000ltpc.html>,Energy Dome HP,閲覧日:2024年10月8日,<https://energydome.com/energy-dome-announces-funding-commitments-from-breakthrough-energy-catalyst-and-the-european-investment-bank-to-support-construction-of-its-first-standard-commercial-scale-co2-battery/>,東芝 HP,閲覧日:
2024年10月21日, <https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2022/11/news-20221121-01.html>, 環境省,閲覧日:2024年10月21日,https://siz-kankyoku.com/wp-content/uploads/2024/10/R5_sec_ESREE_Energy.pdf,三菱重工業株式会社 HP,閲覧日:2024年10月8日,<https://www.mhi.com/jp/news/220214.html>

LDESにおける現状のコスト、技術レベル

- LDESの技術によっては、現在のCAPEXがLIBよりも高いものもあるが、今後の技術開発によって将来的にはさらに低減すると期待されている。
- 揚水・CAESについては商用化レベルであるものの、その他LDESについては実証フェーズのものも多い。

コスト、技術レベルの現状比較

分類	対象技術	標準的な容量	CAPEX ^{注1} (10時間率)	OPEX ^{注1} (10時間率)	応動時間	充放電効率 ^{注2}	寿命	技術レベル
電気化学式	LIB ^{注3}	～数百MW	4.3万円/kWh ^{*1}	0.1万円/kW ^{*1}	1秒未満	80%以上 ^{*2}	13年 ^{*2}	商用化
機械式	揚水	数百MW～数GW	5.0万円/kWh ^{*1}	0.4万円/kW ^{*1}	15分 ^{*2}	70～85% ^{*3}	60年 ^{*2}	商用化
	重力蓄電	数百kW～数GW	6.6万円/kWh ^{*1}	0.4万円/kW ^{*1}	1秒未満 ^{*4}	80% ^{*5}	30年以上 ^{*5}	実証～商用化(時期不明)
	CAES	数十～数百MW	1.6万円/kWh ^{*1}	0.2万円/kW ^{*1}	1分 ^{*6}	52% ^{*2}	60年 ^{*2}	商用化
	LAES	数十～数百MW	2.7～7.9万円/kWh ^{*1}	0.2～0.4万円/kW ^{*1}	1分 ^{*7}	50～55% ^{*2}	30年以上 ^{*7}	実証～商用化(2026年初頭見込み) ^{*7}
	CO ₂ バッテリー	数～数十MW	3.2万円/kWh ^{*8}	0.3万円/kW ^{*8}	—	75%以上 ^{*9}	30年以上 ^{*9}	実証～商用化(2024年内見込み) ^{*9}
蓄熱式	PtHtP	数百kW～数十MW	4.4万円/kWh ^{*1}	0.5万円/kW ^{*1}	5～300秒 ^{*10}	電気のみ:40% 熱電供給:90% ^{*11}	30年以上 ^{*11}	実証(商用化時期不明)
化学式	PtGtP (水素)	入力:数百～数GW 出力:数百kW～数百MW	4.3万円/kWh ^{*1}	0.3万円/kW ^{*1}	—	50%以下	30年 ^{*2}	実証～商用化(2025年見込み) ^{*12}

注1:1USD=144円(2023年度実績年平均値)として日本円に換算 注2:充放電効率はインプットする電力量/アウトプットする電力量 注3:LIBの応動時間、寿命は一般的な数値を記載 注4:データは様々な諸元に基づく代表的なコストを反映したものであることに留意。

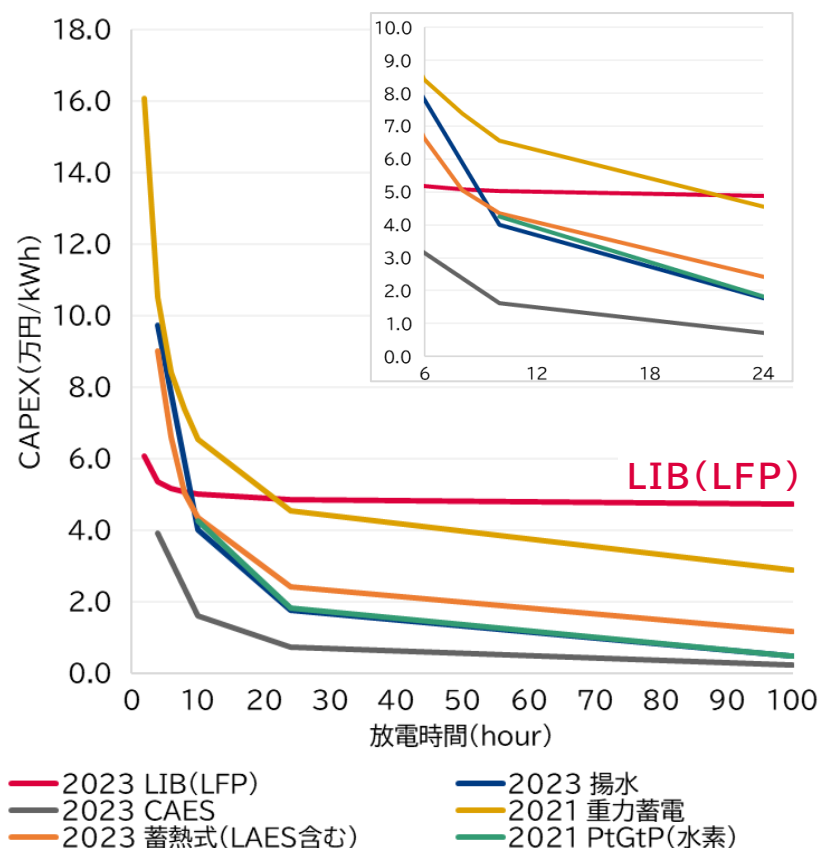
出所)*1 PNNL「Energy Storage Cost and Performance Database v2024」より、100MW10時間率の値を引用。重力蓄電と水素は2021年度のデータ。LIBはLFPのデータ。PtHtPはLAESも含むデータ。*2 DOE「Energy Storage Grand Challenge Cost and Performance Assessment 2022」*3 NREL「Annual Technology Baseline」*4 Grabitricity HP *5 Energy Vault「Ground breaking energy storage technology Enabling a planet powered by renewable resources」*6 PNNL Pacific Northwest National Laboratory HP より(<https://caes.pnnl.gov>) *7 Highviewpower HP *8 Energy Dome社へのヒアリングより。この数字はイタリアの商業機の初号機における実績値であり、本邦におけるCAPEX額は現在精査中とのこと。また、更なるCAPEXの低減に向けた技術開発などを進行中であることに留意。*9 Energy Dome「LDES National Consortium Workshop 2024」*10 Renewable and Sustainable Energy Reviews 159 2022「Evaluating emerging long duration energy storage technologies」*11 California Energy Commission「Antora Energy Comments Re Draft Solicitation Concept for Energy Storage Innovations to Support Grid Reliability,TN #253877」*12三菱重工株式会社 プレスリリース

LDESとLIBにおけるkWh当たりのCAPEX比較

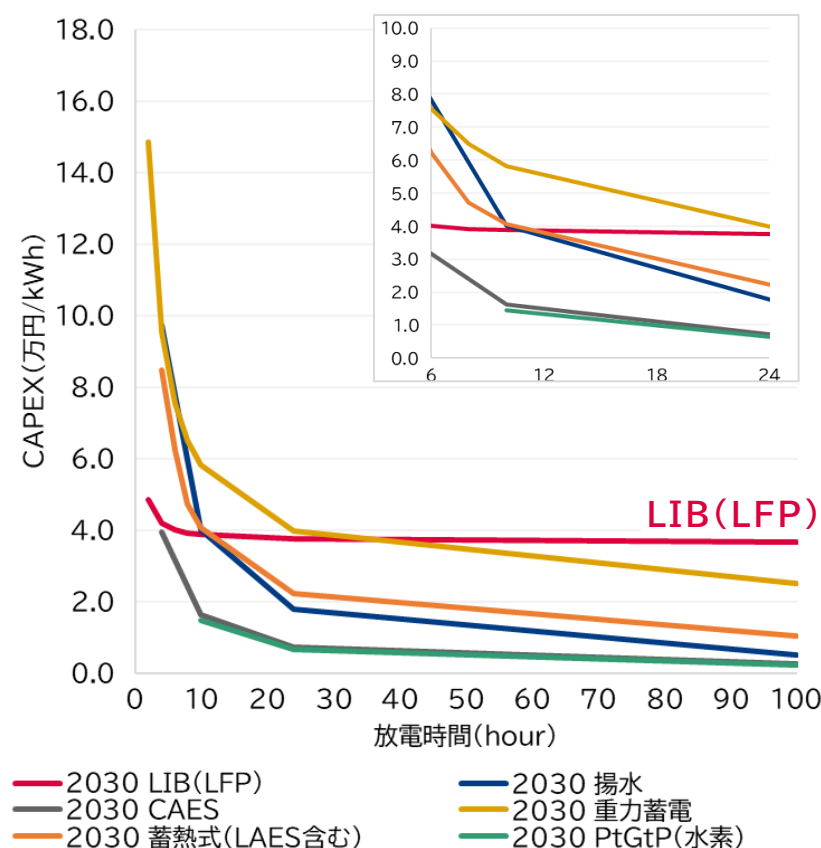
- LDESは放電時間が長くなるにつれてkWh当たりのCAPEX^注の低下が大きい。
 - CAPEXデータは、様々な諸元に基づく代表的なコストを反映したものであることに留意。
- 2030年度ではLIBのCAPEXが大きく低下するものの、放電時間が長くなるとLDESの方がCAPEXが低くなる傾向は変わらない。

放電時間とCAPEX(万円/kWh)の関係(2023年度)

※重力蓄電、水素は2021年度データ



放電時間とCAPEX(万円/kWh)の関係(2030年度)



注: 1\$=144円(2023年度実績年平均値)として日本円に換算

出所) Pacific Northwest National Laboratory, "Energy Storage Cost and Performance Database v2024", 閲覧日: 2024年10月21日, https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC_Cost_Performance_Database_v2024.xlsx より、100MW規模のデータを基にMRI作成

LIBと比較した際のLDESのメリット・デメリット

- LDESのメリット・デメリットを傾向として整理を行った。LIBと比較すると、低コストでの長時間kWhの供出が可能、慣性力提供が可能、耐用年数が長い、資源制約が小さい、火災のリスクが低い等の傾向がある。

LIBと比較した際のLDESのメリット/デメリットの比較

分類	対象技術	メリット		デメリット	
電気化学式	LIB	✓ 技術が確立している ✓ 応動時間が早い ✓ 充放電効率^注が高い(90%以上) ✓ 制度面での整理が進んでいる		✓ 容量劣化がある ✓ 耐用年数が短い ✓ 火災のリスクがある ✓ 希少資源を使用し資源制約が大きい場合がある	
機械式	揚水 重力蓄電 CAES LAES CO ₂ バッテリー	✓ 低コストで長時間kWh供出可能 ✓ 慣性力提供が可能 ✓ 耐用年数が長い ✓ 火災のリスクが低い ✓ 資源制約が小さい	✓ (他のLDESと比較して)充放電効率が高い(50～85%程度) ✓ 熱利用による高効率化が可能(LAES)	✓ 応動時間が遅い ✓ 充放電効率が低い ✓ kW単価が高い	✓ 立地制約がある
蓄熱式	岩石蓄熱 PTES		✓ 熱供給が可能		✓ 技術成熟度が低い ✓ (他のLDESと比較して)充放電効率が低い(50%程度)
化学式	PtGtP		✓ 生成した水素を燃焼等他の用途に利用可能		✓ (他のLDESと比較して)充放電効率が低い(30～40%程度)

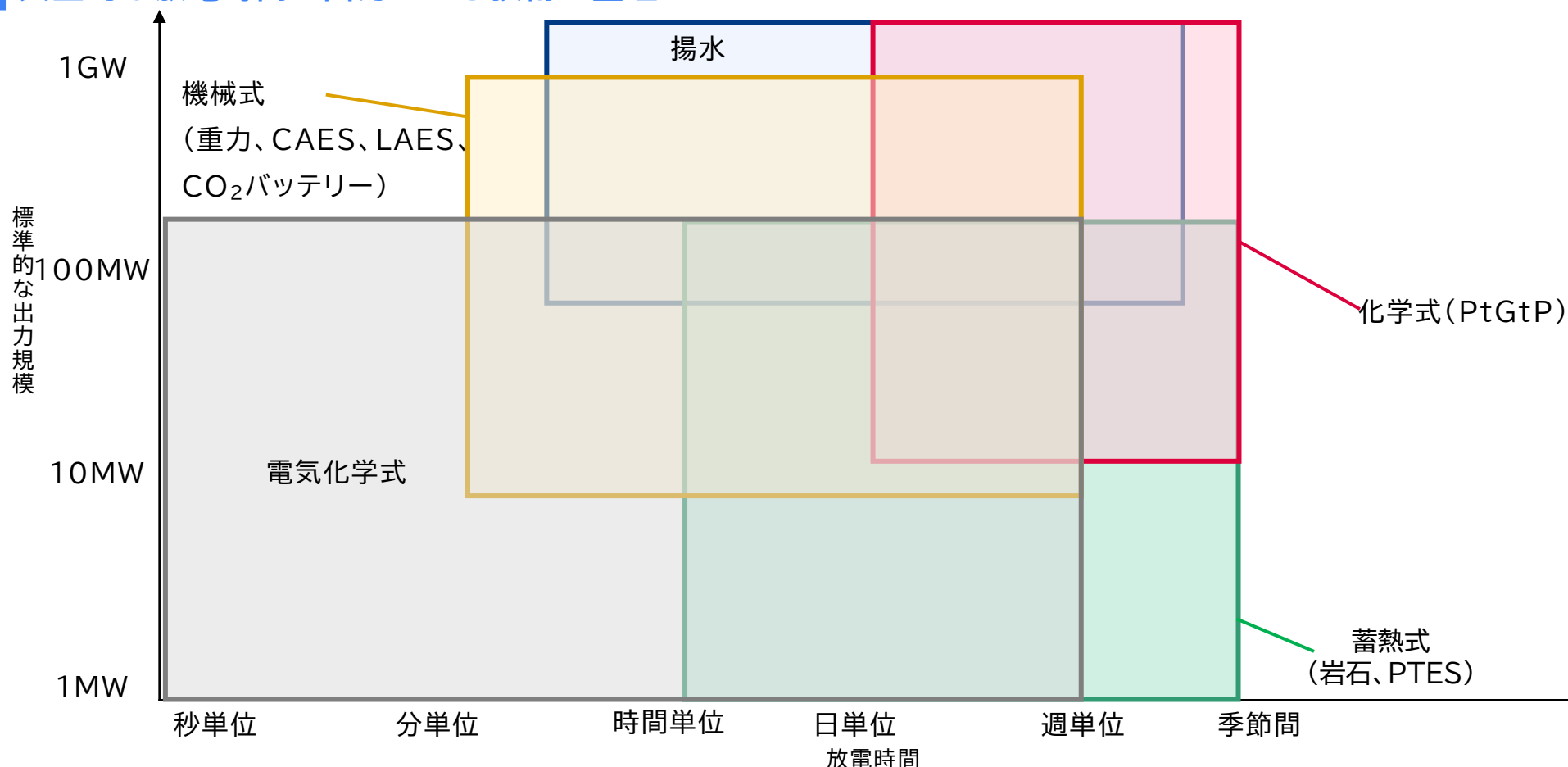
注：本資料における「充放電効率」は出力電力/入力電力とする。

出所)事業者へのヒアリングを基にMRI作成

LDESのユースケース

- 縦軸を典型的な出力規模、横軸を典型的な放電時間として、電気化学式、揚水、機械式、蓄熱式、化学式を以下の通り整理した。
- LDESは数日以上という長期間の充放電が可能となる。変動性再生可能エネルギーの拡大に伴い、長時間の貯蔵ニーズが高まり、LDESの必要性が高まると考えられる。

典型的な放電時間と出力による技術の整理



出所) "European Association for Storage of Energy, "Energy Storage Target 2030 and 2050(2022/5)", 閲覧日: 2024年10月7日, <https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2022/06/Energy-Storage-Targets-2030-and-2050-Full-Report.pdf>よりMRI作成

LDES事業者へのヒアリング結果

- LDES業者へのヒアリングを実施した結果を踏まえ、現状と課題を以下の通り整理した。

項目	事業者ヒアリングの結果
現状のコスト	● 現状は<u>技術開発に係るコストが大きい</u>。 ● LIBと比較して、長時間率になるとkWh単価が安くなるため、<u>スケールメリットが出やすい</u>。 ● LDESは充放電効率が低いため、<u>ロス分に対する託送料金、賦課金のコストが高くなる</u>。 ● 蓄電池・揚水における課題と同様、<u>容量拠出金相当額を支払う必要がある</u>。
現在及び将来想定されるユースケース	● 実証段階の技術が多いが、国内にて<u>既に容量市場に落札し、需給調整市場・卸電力取引市場との取引予定</u>がある事業も存在する。 ● 海外ではトーリング契約を締結している事業も存在する。 ● 10時間以上という長期間における充放電が可能となるため、<u>再生可能エネルギーのアフリーマッチング注への対応や離島における電源活用等にも活用が期待</u>される。 ● <u>慣性力提供やブラックアウト</u>への対応も可能となるため、<u>システムの安定性確保への貢献</u>も期待される。 ● 技術によっては広大なスペースが必要になる等、<u>立地制約が課題</u>となる技術もある。
導入拡大に向けた要望	● 導入支援だけではなく、<u>技術開発や実証に対しても支援拡充の検討に期待</u>。 ● 蓄電所としての機能があるため、蓄電池や揚水と同様に<u>特別措置法への適用の検討に期待</u>。 ● 蓄電池や揚水における課題と同様に、ピーク時に充電しない場合は、<u>容量拠出金相当額を免除する等の支払いに関する見直しの検討に期待</u>。 ● 長期脱炭素電源オークションにおいて10時間以上等の長時間率の応札枠を設けることや慣性力の提供を評価する等、<u>LDESの提供価値を評価する仕組みの検討に期待</u>。

注：24時間365日、100%リアルタイムにて、需要家の設備と同じ送配電網に接続する再エネ電源による電力を使用するという考え方。24/7 Carbon Free Energy Compactにて提唱されている。

LDESの現状整理

● LDESにおける現状は下記の通りである。

- 時間率が長くなるにつれてkWhあたりで見たときのCAPEXが小さくなるため、長時間率を活かすことができるユースケース（中長周期でのタイムシフト等）での活用が期待されている。
- LDESに対する更なる導入・実証・技術支援や、特別措置法や長期脱炭素電源オークション等の制度の整理が期待されている。

ヒアリング・文献調査から得られた結果

□ : 文献調査
□ : ヒアリング

コスト	- 各国で支援の方法や対象となる技術が異なるものの、導入・実証支援や税額控除等のLDESに対する支援が世界中で拡充しつつある。 - LDESは時間率が長くなるにつれてkWhあたりで見たときのCAPEXが小さくなる。 2023年度から2030年度にかけてLIBのCAPEXは5.0万円/kWhから3.9万円/kWhに低下することが見込まれているが、時間率が高い場合にはLDESの方がCAPEXが小さい傾向に変わりはないことが想定されている。 ※100MW10時間率のデータ - 現状は技術開発に係るコストが大きく、国内において技術開発や実証に対しての支援が不足。 - LDESは充放電効率が低いため、ロス分に対する託送料金や賦課金の影響が大きい。
ユースケース	- 技術によっては、週や季節単位という長期間における充放電が可能。 - 電力システムの柔軟性・継続的な信頼性、回復力、セキュリティの確保が可能となるため、電力システムを発展させること、離島での安定供給、防衛基盤や医療等の重要セクターへの長時間の電力供給が可能。 - 実証段階の技術が多いが、国内において既に容量市場に落札し、需給調整市場・卸市場と取引想定の実業も存在する。 - 海外ではトーリング契約を締結している事業も存在する。 10時間以上という長期間における充放電が可能となるため、再生可能エネルギーのアフリーマッチングへの対応や離島における電源活用等にも活用が期待される。 - 慣性力提供やブラックアウトへの対応も可能となるため、システムの安定性確保への貢献も期待される。
導入拡大に向けた要望	- 導入支援だけでなく、技術開発や実証に対しての支援拡充。 - 電気事業法、特別措置法等の関連法令や、容量拠出金相当額の支払いに関する制度の見直し検討に期待。 - 長期脱炭素電源オークションにおいて10時間以上等の長時間率の応札枠を設けることや慣性力の提供を評価する等、LDESの提供価値を評価する仕組みの検討に期待。

未来を問い続け、変革を先駆ける

MRI 三菱総合研究所