



再生可能エネルギー電源の有効利用のための 長期電力貯蔵システム

織原 大

産業総合技術研究所

再生可能エネルギー研究センター (READ)

エネルギーネットワーク研究チーム 主任研究員

2025年6月13日

マイクログリッド研究会

自己紹介

- 氏名：織原 大（おりはら だい）
- 学位：博士（工学）
- 経歴：
 - 2005 – 2008 新潟県立三条高等学校
 - 2008 – 2012 東北大学 工学部 情報知能システム総合学科
 - 2012 – 2017 東北大学大学院 工学研究科 電気エネルギーシステム専攻
 - 2017 – 2019 同 助教
 - 2019 – 産業技術総合研究所
再生可能エネルギー研究センター
エネルギーネットワーク研究チーム 主任研究員
- 専門分野：
 - 電力システムの安定性解析および安定化制御（グリッドフォーミング・擬似慣性）
 - 再エネ主力電源化に向けた需給運用最適化（電力貯蔵・水素）
- 委員等：
 - 産総研－福島大学 連携大学院 客員准教授（博士課程学生募集中）
 - 電気学会論委員(B1)
 - IEC TC 8 国内委員

産業技術総合研究所

- ・ 日本に3法人しかない特定国立研究開発法人の1つ
- ・ 研究職員約2,300名。全国12拠点。
- ・ 8つの研究領域：



エネルギー
・ 環境



生命工学



人間・情報
工学



材料・化学



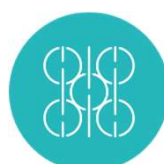
エレクトロ
ニクス・製造



地質調査



計量標準



量子・AI

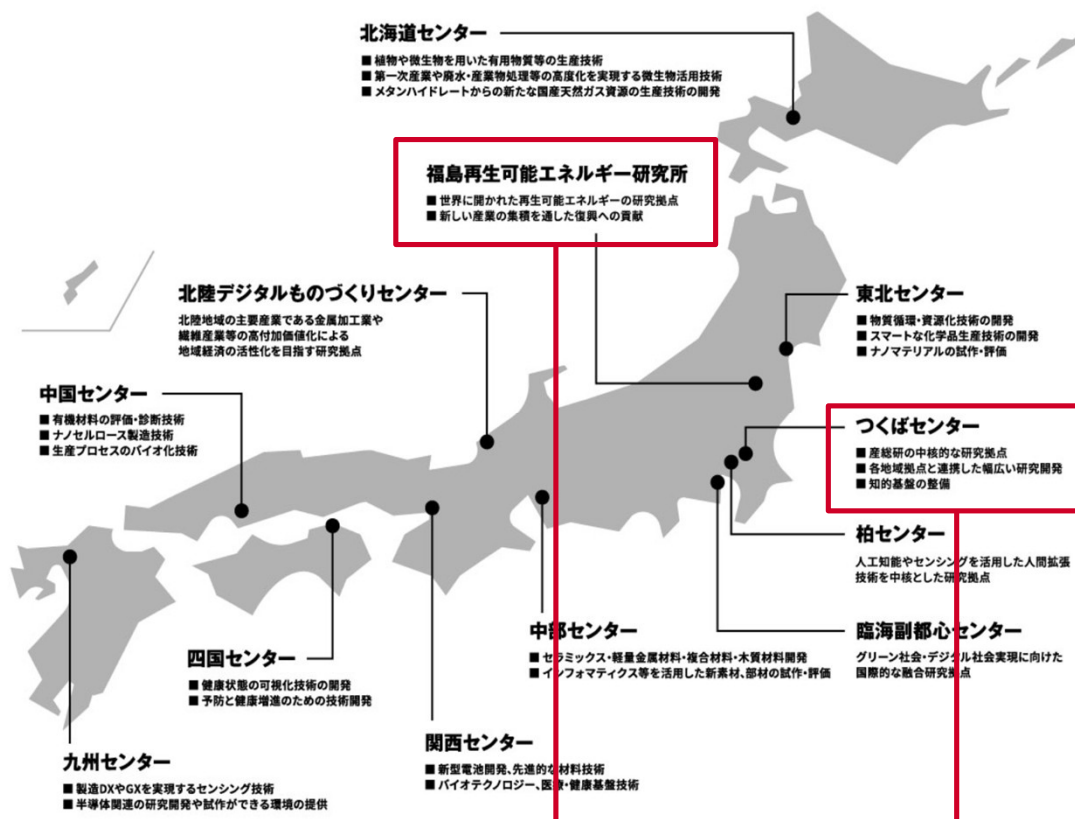
再生可能エネルギー研究センター

… 再エネ，水素，電力系統…

ゼロエミッション国際共同研究センター

… CN，データ駆動型DSR，…

(他5ユニット)



再生可能エネルギー研究センター／エネルギーネットワーク研究チーム



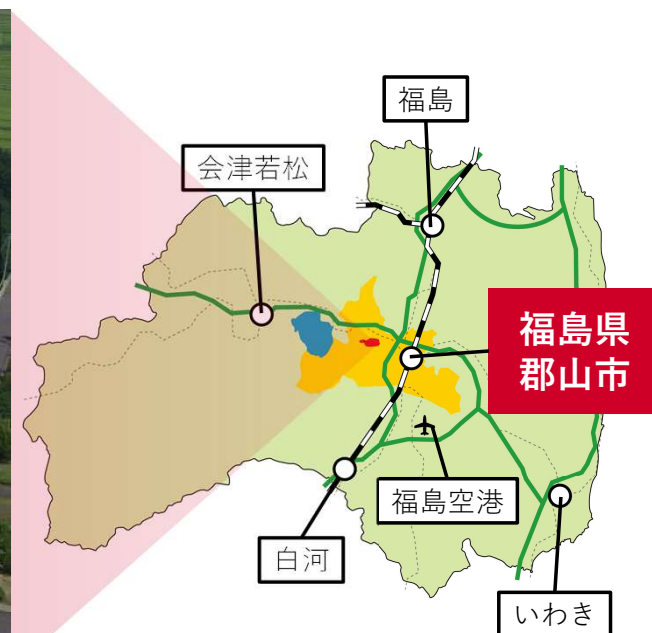
■エネルギーネットワーク研究チーム

研究者	4名
特別研究員(PD)	1名
客員研究員	11名
招聘研究員	1名
技術スタッフ	5名
派遣職員	4名
リサーチアシスタント	1名
技術研修	2名

合計 29名

■主な連携先
電力会社／重電・インバータ
メーカー／自動車／鉄道など

福島再生可能エネルギー研究所（FREA）



- 政府の「東日本大震災からの復興の基本方針」に基づき
2014年4月、福島県郡山市に開所
- 再エネに特化した我が国唯一の国立研究拠点
- 独創的な再エネ技術を研究開発し世界に発信
- 企業支援・人材育成を通じて復興支援に貢献

総人員

304名（2025年3月時点）

研究職 47名 技術職 1名 事務職 17名
契約職員 81名 産学官制度来所者等 158名

研究予算

2023年度：約99.2億円

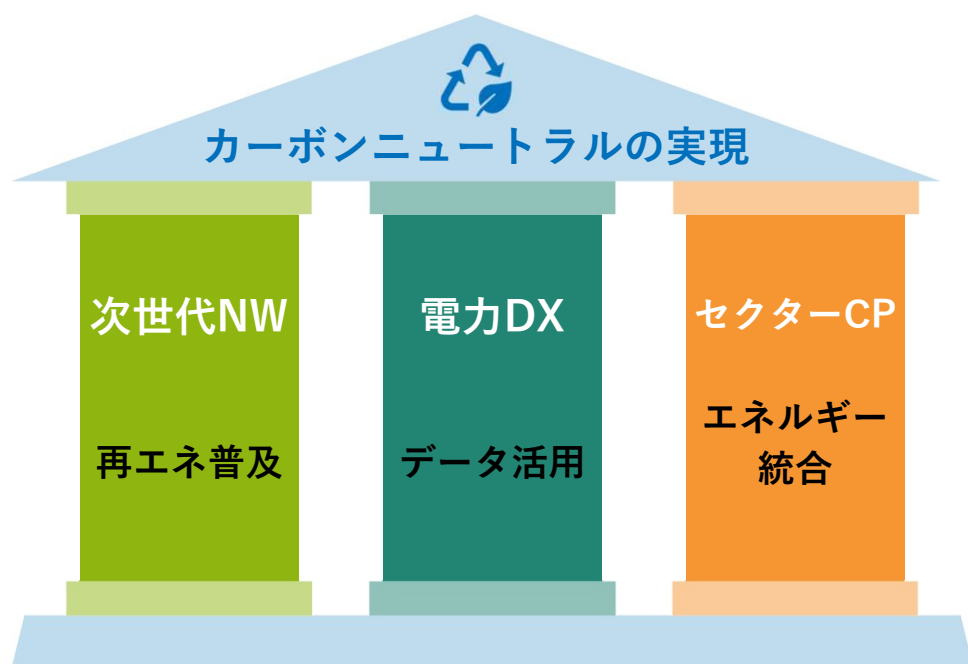
（施設整備に伴う補助金含む）

エネルギーネットワーク研究チーム：ビジョン

ミッション

「次世代電力ネットワークの研究開発により、カーボンニュートラル社会の実現に貢献します。」

チームの目標



3つの技術開発の柱



次世代NW (ネットワーク)
再エネ普及と電力系統の高度化



電力DX (デジタルトランスフォーメーション)
電力データ活用と市場促進



セクターCP (セクターカップリング)
電力・熱・水素等の統合活用

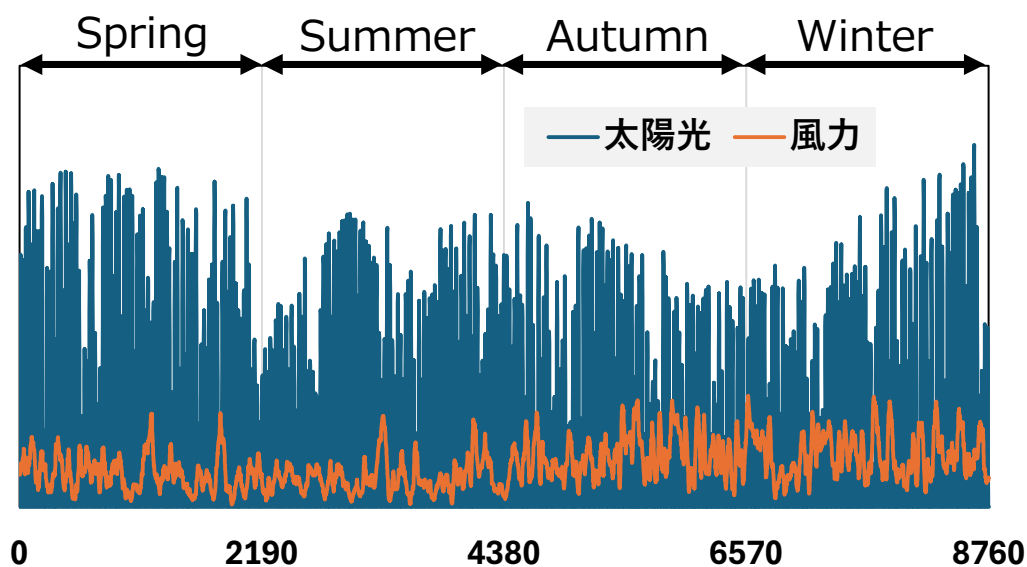
導入

- 長期電力貯蔵（Long-Duration Energy Storage, LDES）の必要性
- 本日の講演内容

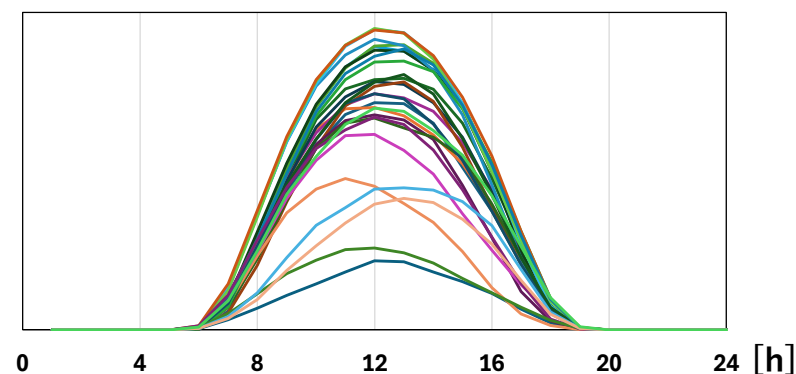
再生可能エネルギーの出力変動特性

■年間の太陽光・風力の発電プロフィール

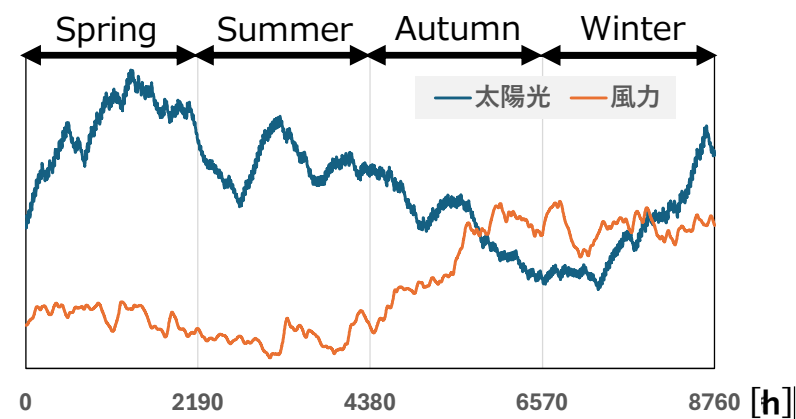
[(OCCTOマスタープラン (ベースケース))]



- 様々な周期の変動が含まれる
 - 日変動：1日の中での出力変動
(原因：日間の日射変動など)



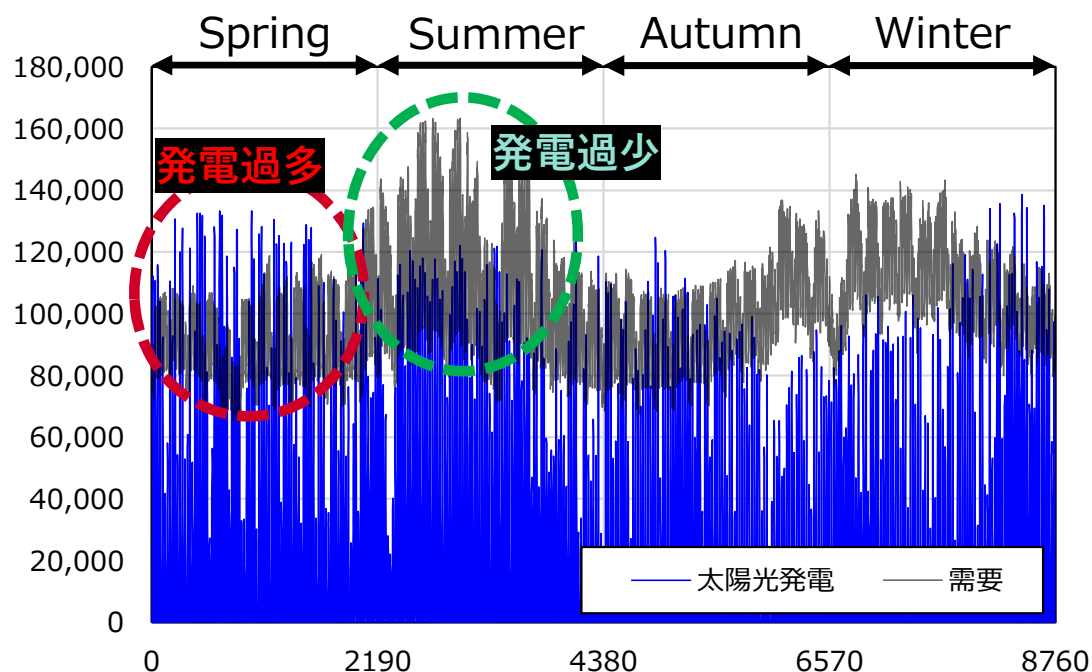
- 季節変動：1年の中での出力変動
(原因：季節による日射・風速・気温等の変動)



電力需給における再エネ季節変動の影響

■需要と再エネ出力(太陽光)の年間プロフィール

[(OCCTOマスタープラン (ベースケース))]



	発電過多期 (春など)	発電過少期 (夏など)
再エネ 余剰	頻繁に発生 出力抑制増大	希頻度
火力 発電	負担少ない 稼働率低下の懸念	負担多い 設備容量維持が必要

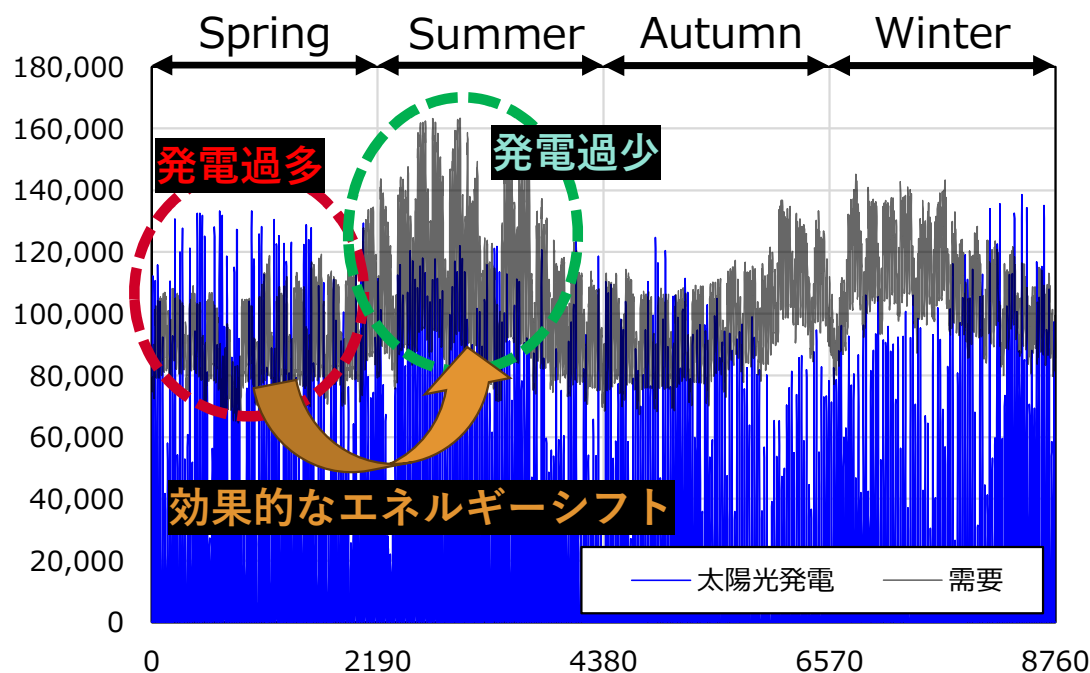
再エネ利用率・火力発電の経済性の悪化が懸念される

注意：日変動レベルでも同様の問題は生じる

長期電力貯蔵（LDES）による季節変動対応

■需要と再エネ出力(太陽光)の年間プロフィール

[(OCCTOマスタープラン（ベースケース）)]



【Long Duration Energy Storage, LDES】

- 発電過多期の余剰エネルギーを長期に貯蔵し、発電過少期に放電するような電力貯蔵システム
- 季節変動対応…シーザナルストレージ
- 再エネ出力抑制の回避・低稼働率の火力発電の廃止に貢献できる
- Wh容量／W容量を高くとれる技術が適している
 - 揚水発電（PHES）
 - 水素貯蔵（H2ES）
 - 圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）
 - レドックスフロー電池（RFB）
 - 固体重力エネルギー貯蔵（SGES）、など

Long Duration Energy Storage, LDES

長時間エネルギー貯蔵とは、化学的、熱的、機械的、電気化学的など様々な形でエネルギーを貯蔵し、
8時間から数日、数週間、あるいは季節に至るまで、長期にわたってエネルギーや熱を供給する

LDES Council HP: <https://www.ldescouncil.com/>

電気化学的 (Electrochemical)

化学反応を通してエネルギーを貯蔵

- ・ フロー電池
- ・ **金属陽極電池**
- ・ 金属空気電池



Hours to days

機械的 (Mechanical)

運動・位置・圧力エネルギーへの変換

- ・ 揚水発電
- ・ 重力ベース
- ・ 圧縮空気貯蔵



Hours to days

熱 (Thermal)

熱交換、熱を伴う化学反応を通して貯蔵

- ・ 顕熱
- ・ 潜熱
- ・ 熱化学反応



Hours to days

化学的 (Chemical)

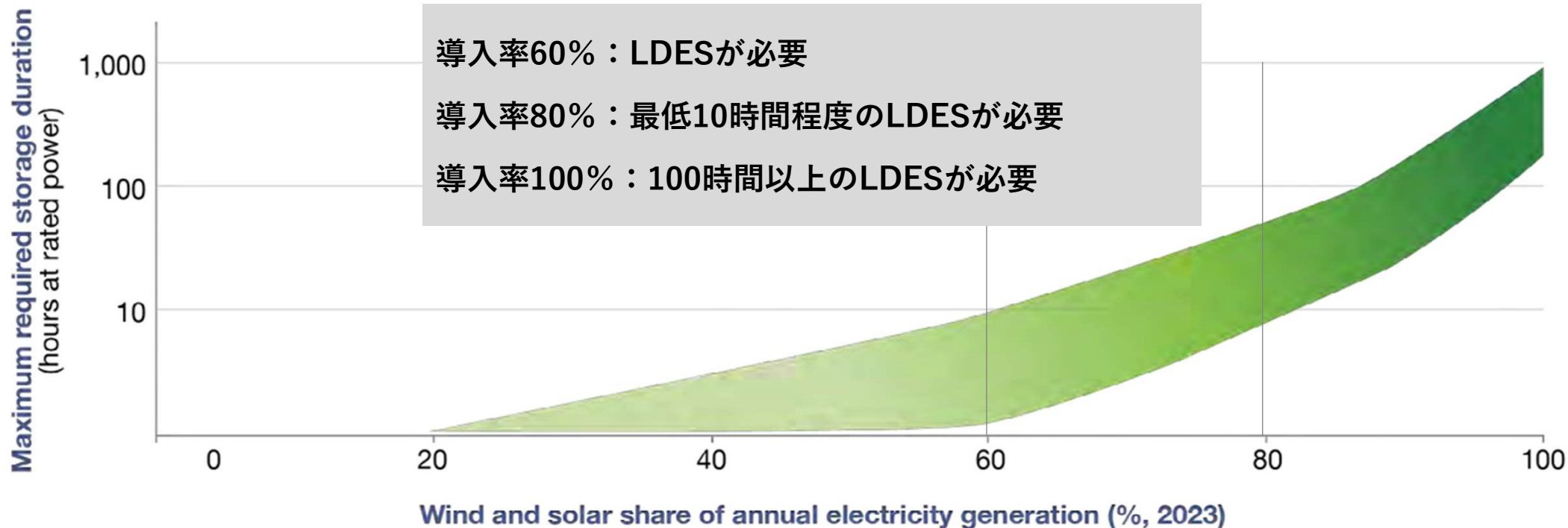
化学物質の生成によりエネルギーを貯蔵

- ・ **水素**
- ・ **アンモニア**
- ・ 炭化水素／アルコール



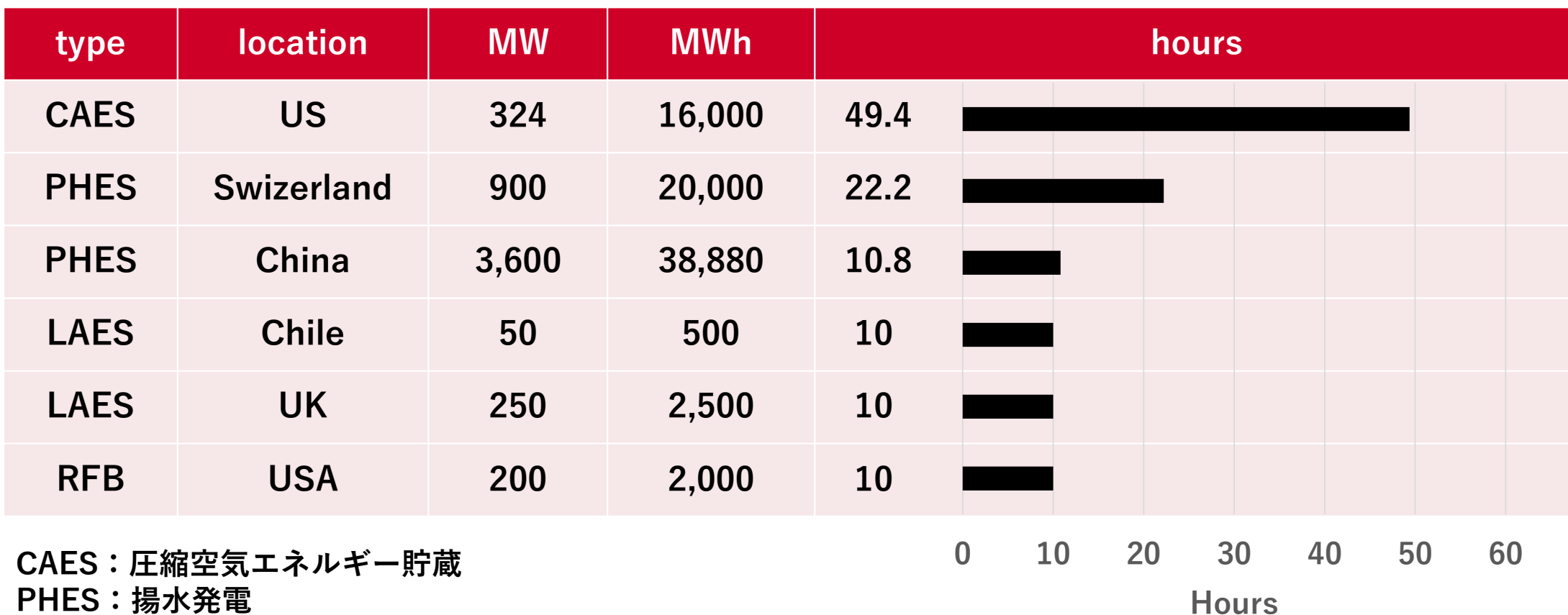
Seasonal

自然変動電源の導入率と最大貯蔵時間率の関係



Up to 8h duration is needed to reach 50-80% wind and solar share of electricity generation	LDES with 8-100 hour storage durations is needed to reach 70-90% wind and solar share of electricity generation	LDES with 100+ hour storage durations is needed to reach 90%+ wind and solar generation
--	---	---

LDESの導入（計画）の状況



CAES：圧縮空気エネルギー貯蔵

PHES：揚水発電

LAES：液化空気貯蔵

RFB：レドックスフロー電池

■ 研究内容紹介

日本におけるシーズナルストレージとしてのLDESの活用可能性の基礎検討

■ 概要

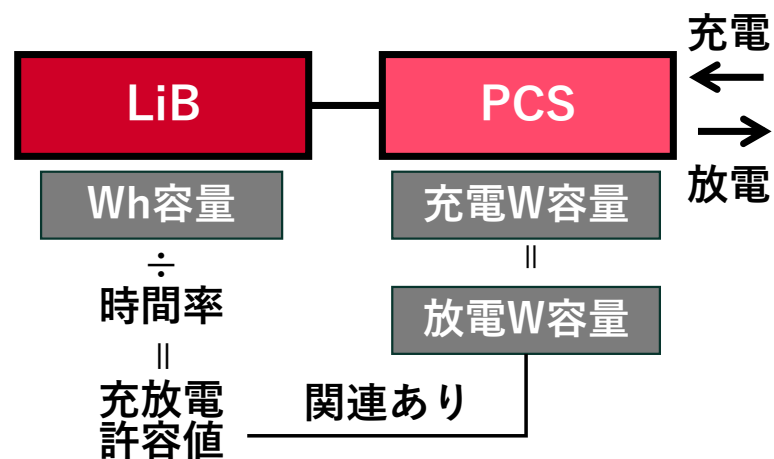
- ・ アプローチ：LDESを考慮した年間の需給運用計画を定式化+求解
- ・ 以下の項目を中心に評価
 - ・ 総運用費の変化
 - ・ 火力発電の運用の変化
 - ・ LDESの必要導入量
 - ・ LDESに適した電力貯蔵技術

想定・アプローチ

- モデル・解析方法・解析条件

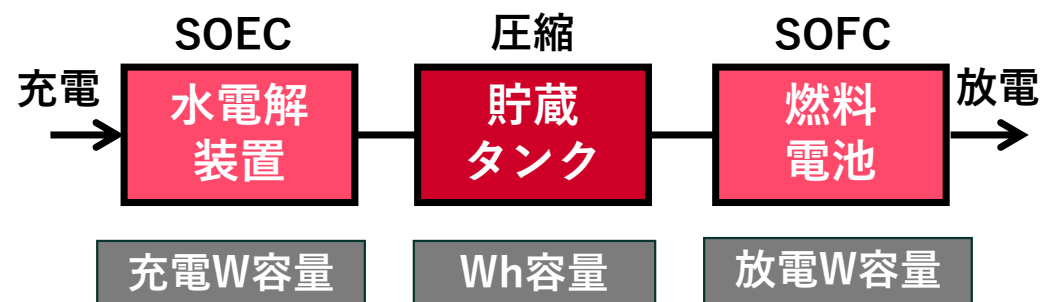
リチウムイオンバッテリー (LiB)

広く普及している電力貯蔵
充放電効率が**高い**
自己放電あり
設計の自由度が低い
(Wh容量とW容量が紐づく)



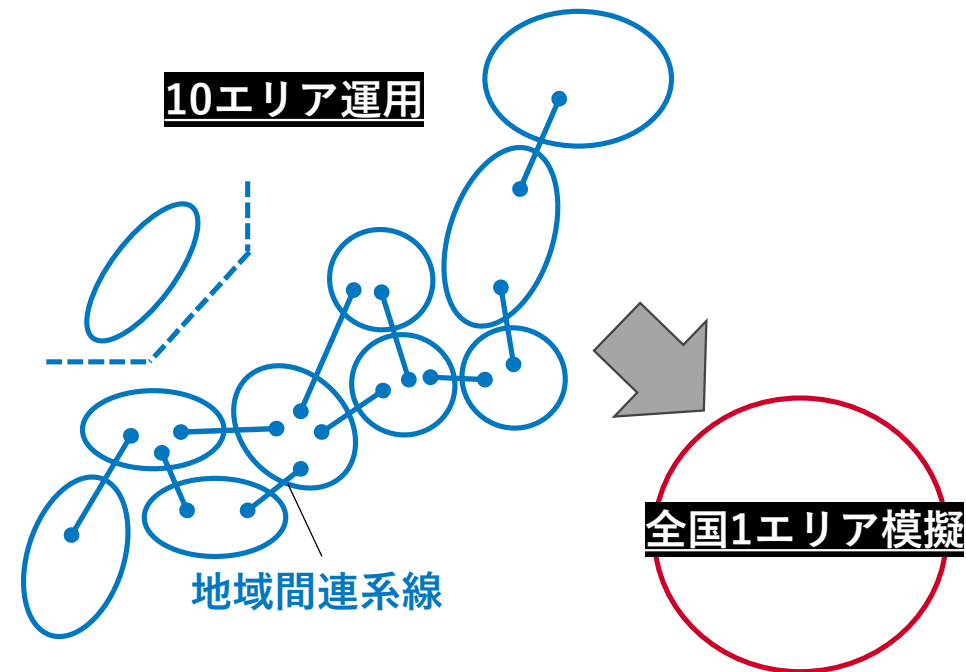
水素貯蔵システム (H2ES)

実証段階
充放電効率が低い
自己放電なし⇒長期貯蔵に向く
設計の自由度が高い
(Wh容量とW容量をそれぞれ最適化可能)



対象システムのモデリング

- 対象系統：2050年における日本全国
 - 連系線を見直し全国を1エリアとして模擬
(計算負荷の制約より)
- 系統データ：OCCTOマスタープランを参照
 - 需要・再エネ出力データ：そのまま流用
 - 電源ユニットデータ：
 - マスタープランではユニットデータは非公開
 - JEPXの発電情報公開システム (HJKS) より
現況に基づいたユニットデータを整備
(約400ユニットを定義)
- LDDES：
 - LiB：サイクル効率：85%，自己放電 5%/month
 - H2：サイクル効率：54%，自己放電 0%/month



■ 一般的な電源起動停止計画問題にLDESを組み込み

- 目的関数：火力発電の燃料費 + 起動費の最小化

$$\min \sum_t \sum_g C_{g,t}(p_{g,t}, u_{g,t})$$

- 制約条件：

- 需給バランス制約
- 最小出力制約
- 最小起動・停止時間制約
- 調整力制約（計算負荷軽減のため省略）
- 連系線潮流制約（計算負荷軽減のため省略）
- 最大電力貯蔵量・最大充放電電力制約
- 電力貯蔵量の運用制約
- 電力貯蔵量の境界条件： $E_{e,0} = E_{e,end}$

- 自己放電を考慮した電力貯蔵量 $E_{e,t}$ の時間変化の模擬

$$E_{e,t} = \underbrace{(1 - \varepsilon_e)E_{e,t-1}}_{\text{自己放電}} + \underbrace{\eta_e p_{chr,e,t}}_{\text{充電}} - \underbrace{\frac{1}{\gamma_e} p_{dis,e,t}}_{\text{放電}}$$



貯蔵されている電力量が、時間経過に対して一定の割合で損失するようにモデリング

* 自己放電率は実際には充電状態・温度などにも依存

計算結果

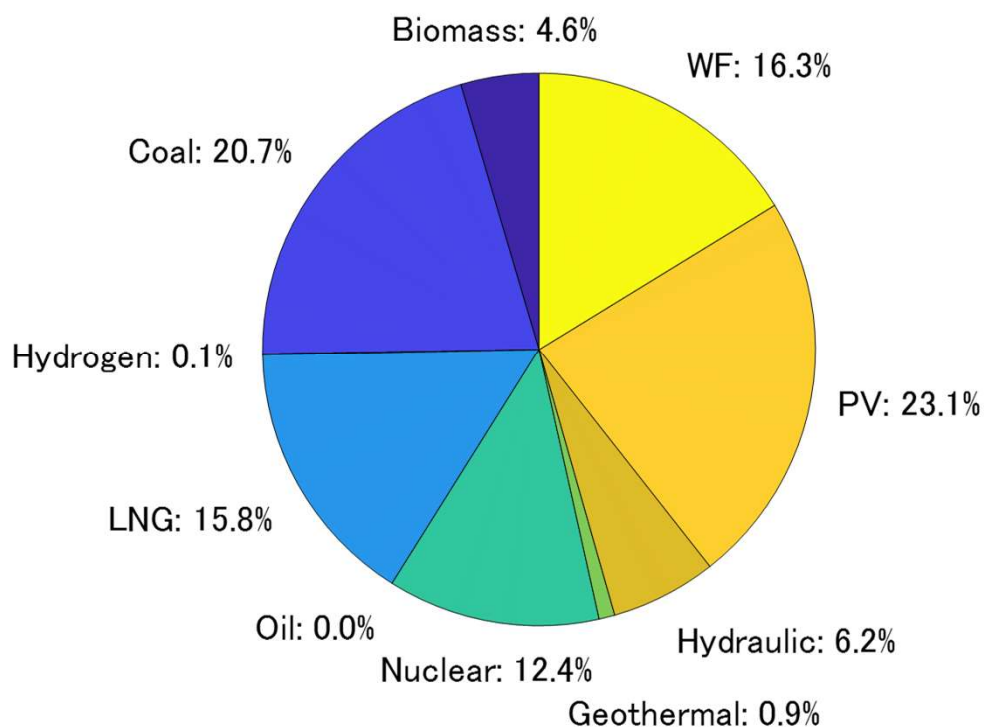
ベースケース（LDES導入なしのケース）

2050年における需給最適化計算の結果

■ エネルギーバランス

総需要：1,248.4TWh

(従来需要：805 + 脱炭素：182.8 + 電化：260.7)



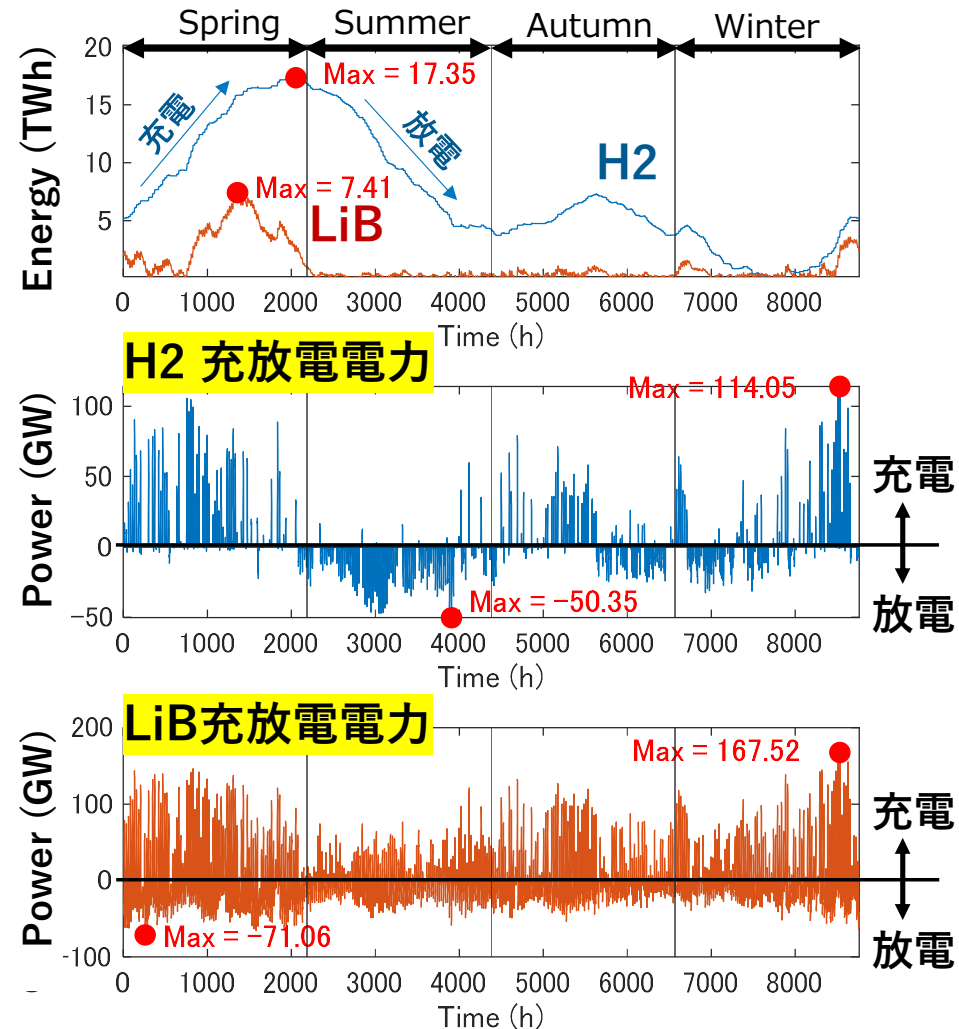
■ 再エネ出力・抑制量

	発電量(TWh) 抑制前	抑制量(TWh)	抑制率(%)
太陽光	307.43	16.24	5.28
風力	206.60	2.08	1.01
合計	514.03	18.33	3.57

20円/kWhで換算すると
3,665億円相当

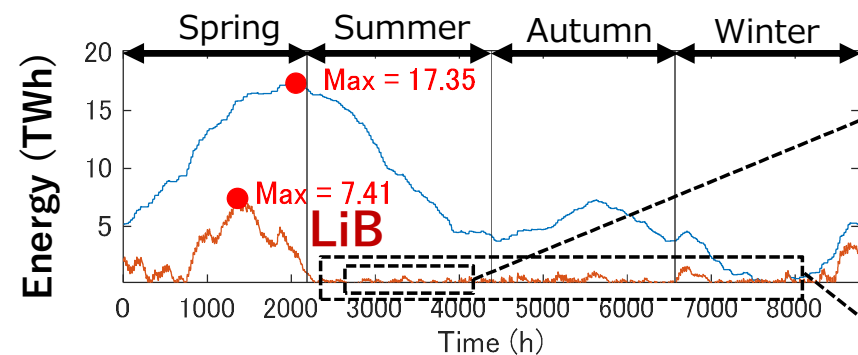
LiBと水素貯蔵の年間の最適運用のパターン比較

■ 容量無限大ケース：設備容量を過剰に設定し、最大で必要となる設備規模の情報を抽出



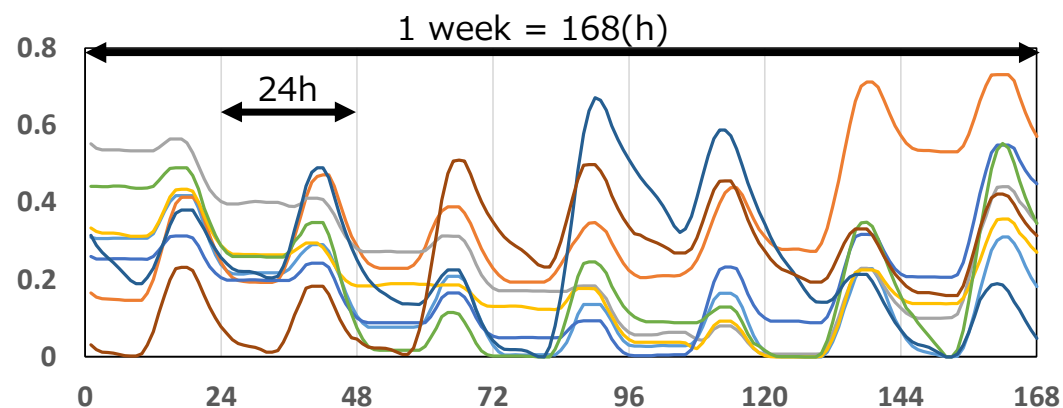
- H2（水素）貯蔵：
 - シーズナルな挙動を確認（春に集中的に充電⇒夏に集中的に放電）
 - 秋・冬はそれぞれで充電と放電がバランス
- LiB：
 - 一時的に2か月程度の長期の充放電が見られるが、基本的に充電電力量は極めて低い値で推移
 - **自己放電によるロス回避のために日間での運用が中心**

LiBの最適年間運用における充放電周期について

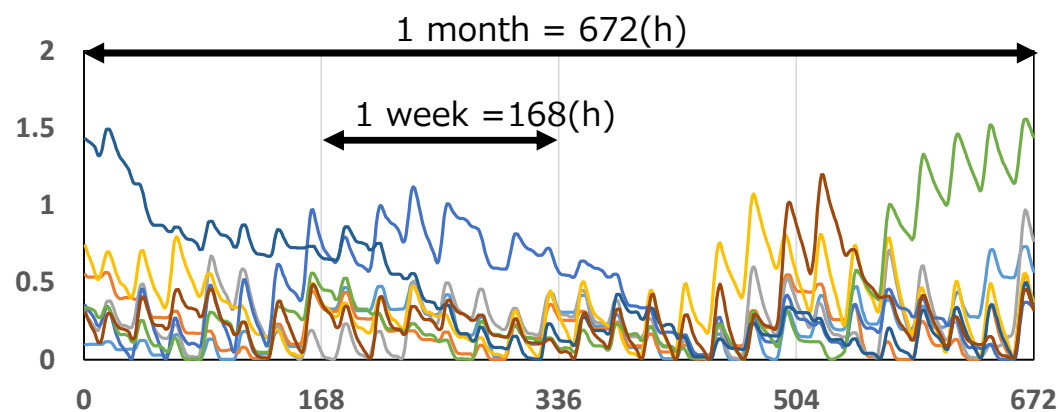


- 基本的には日間のサイクルで充放電
(昼間に充電・夕刻から放電)
- 頻度は低いが、1~2週間程度のサイクルも発生

■ LiBの週間の運用パターン (8週分: 3024-4368(h))

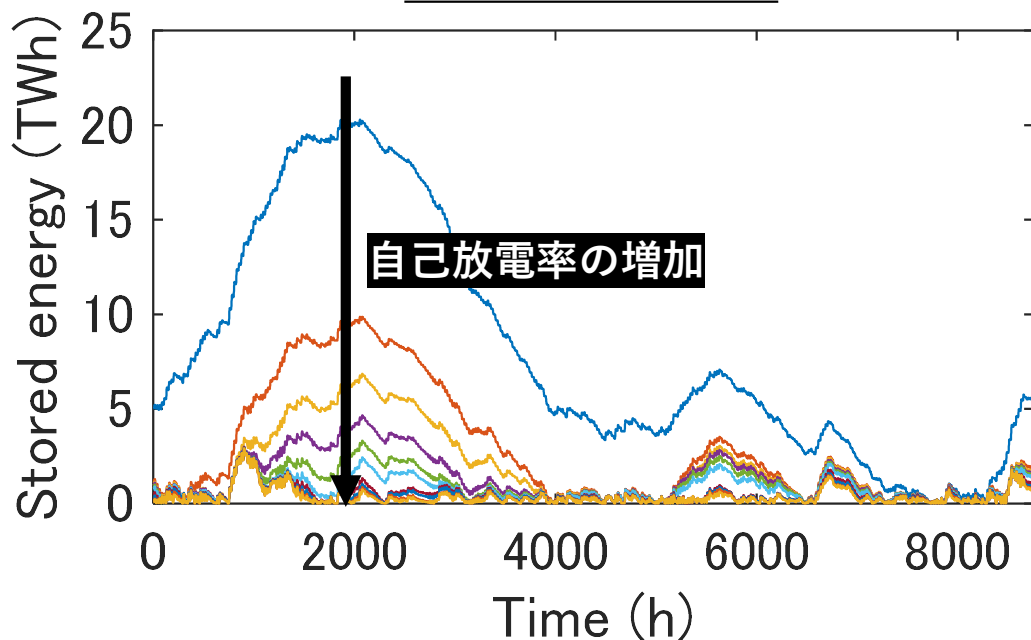


■ LiBの月間の運用パターン (8か月分: 2688-8064(h))



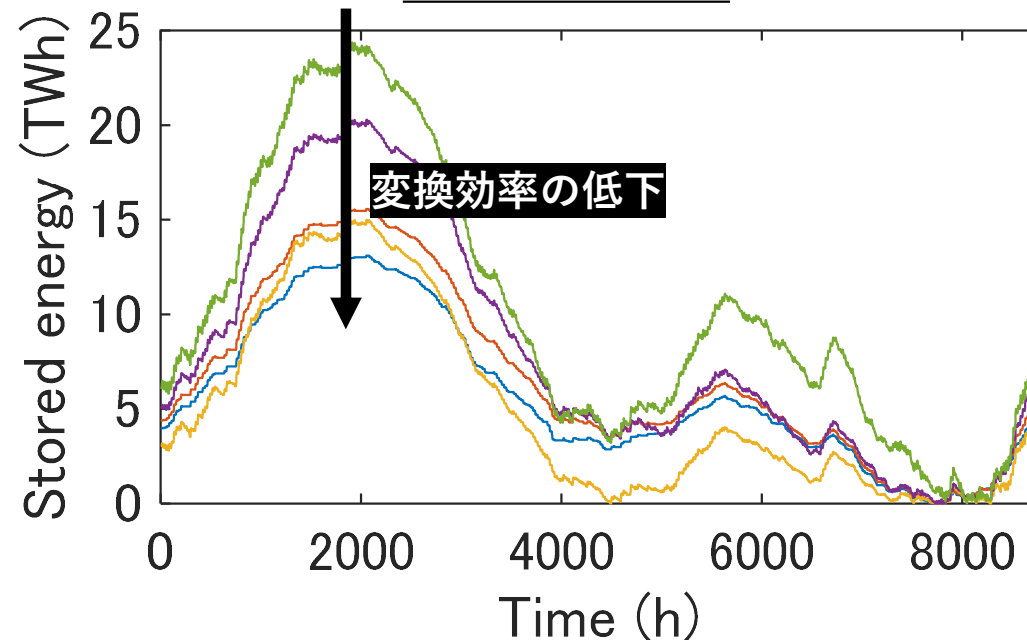
【参考】 自己放電率と変換効率の影響の切り分け：年間運用パターン

自己放電率の影響



- 自己放電率の増加
→ 最大貯蔵量が低下，運用期間が短期化
- 年間の総充電量は変化なし
…余剰の吸収量に影響なし

変換効率の影響

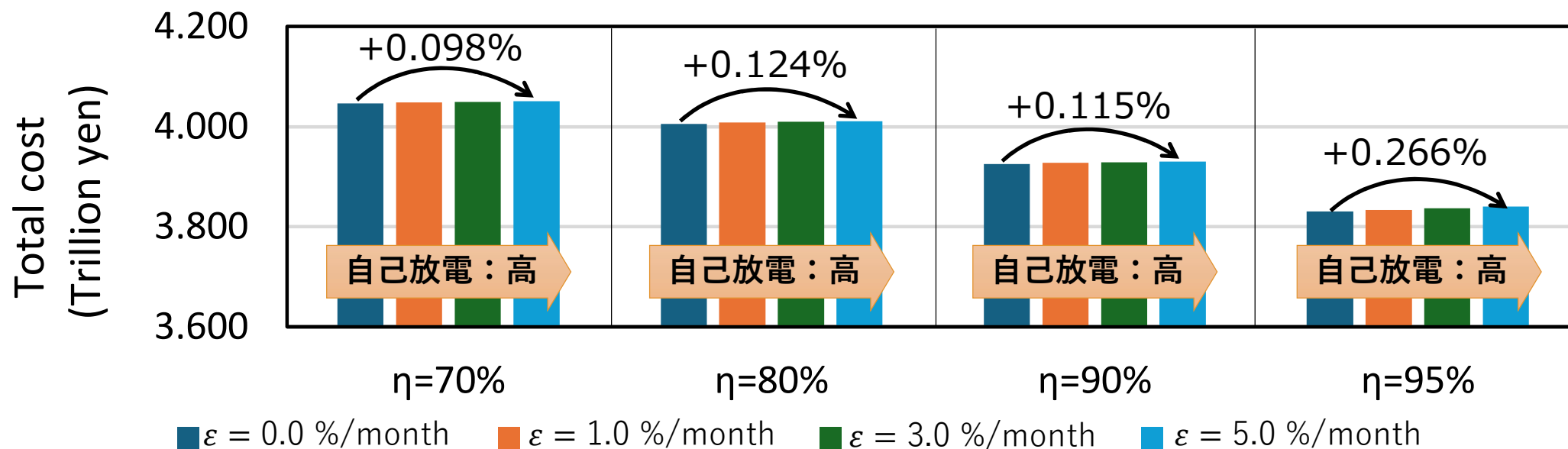


- 変換効率の低下
→ 最大貯蔵量が低下，運用期間は影響なし
- 低効率になると他の高効率機器が優先して使用される

【参考】運用コストに対する自己放電率・変換効率の影響

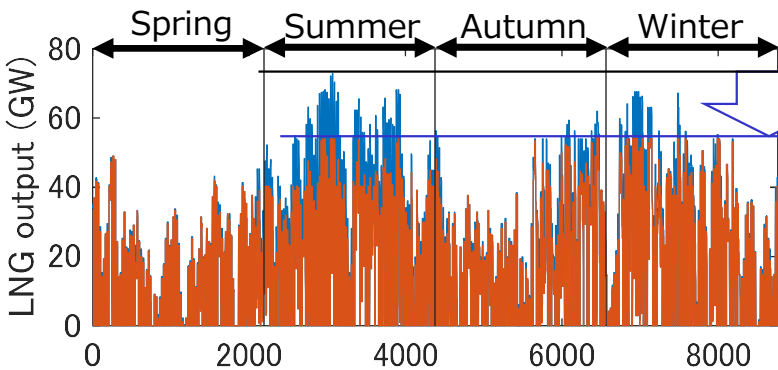
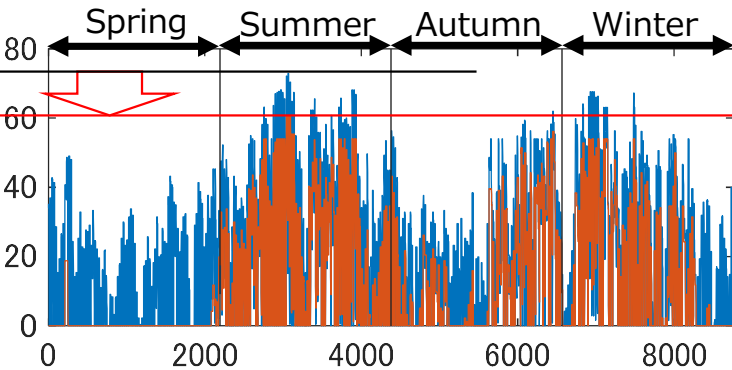
- 自己放電率の増加に対して、総コストの増加は小さい。
 - 自己放電率が高くても、長期の運用を避けることでその影響を回避できることを示している。
- 充放電効率の影響が比較的顕著
 - 効率が高いほど再エネ余剰を無駄なく活用できる

■充放電効率・自己放電率による系統運用コストの変化



LDES導入による火力発電の運用の変化

■LNG火力の年間出力変化（総出力）

Type	H2	LiB
年間変化	 ■ LDESなし ■ LDESあり	 ■ LDESなし ■ LDESあり
春季の運用	LDESが充電に集中するため LNG出力への影響が少ない	LDESは放電も積極的に行うため LNG出力を低減
夏季の運用	LDESが集中的に放電し LNG火力の最大出力を低減	LDESは集中的に放電できないため LNG出力の低下への貢献は限定的
効率の影響	低効率のため 代替できる火力発電量がそもそも少ない	高効率のため 代替できるLNG火力発電量が多い

コスト比較：LDESの固定費

■LDESの所要容量

	LiB	H2
充電・放電能力 (GW)	167.5	114.1(充) 50.4(放)
貯蔵能力 (TWh)	7.4	17.4
時間率 (hour)	44.2	152.5

■容量単価

ESS type	設備費 (万円/kW・万円/kWh)	耐用 年数	年換算 コスト	参考
LiB：kWh価格	4	10	0.4	[1]
(LiB kW価格)	(1)			
H2：水電解(SOEC)	2.07	15	0.14	[2]
H2：貯蔵(タンク, 30atm)	3.35	15	0.22	[2]
H2：発電 (SOFC)	32.2	15	2.15	[3]

■コスト

	総コスト (兆円/年)	充電 (兆円/年)	貯蔵 (兆円/年)	放電 (兆円/年)
LiB	29.6	(0.16)	29.6	(0.07)
水素貯蔵	39.5	0.16	38.3	1.08

- ・ H2, LiBともにコストの支配的要因はWh容量
- ・ Wh容量を独立に設計できるあるいはWh容量単価が低い貯蔵技術はLDESとしての利用価値が高い
- ・ H2-LiB比較においても、LDES向けの構成だと比較的成本差は小さい

[1] 三菱総研, 「定置用蓄電システムの目標価格および導入見通しの検討」

[2] JST低炭素社会戦略センター, 「固体酸化物形燃料電池システム (Vol.7) - 高温水蒸気電解の技術およびコスト評価 -」

[3] JST低炭素社会戦略センター, 「固体酸化物形燃料電池システム - 要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと 科学・技術ロードマップ」

コスト比較：火力発電の運用費・固定費を考慮した比較

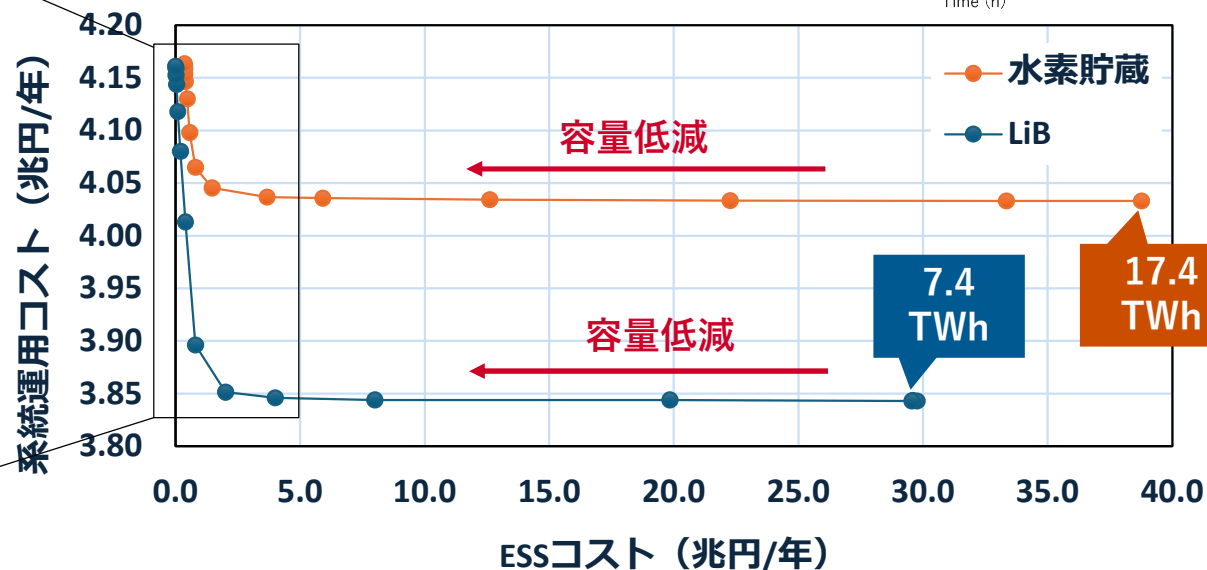
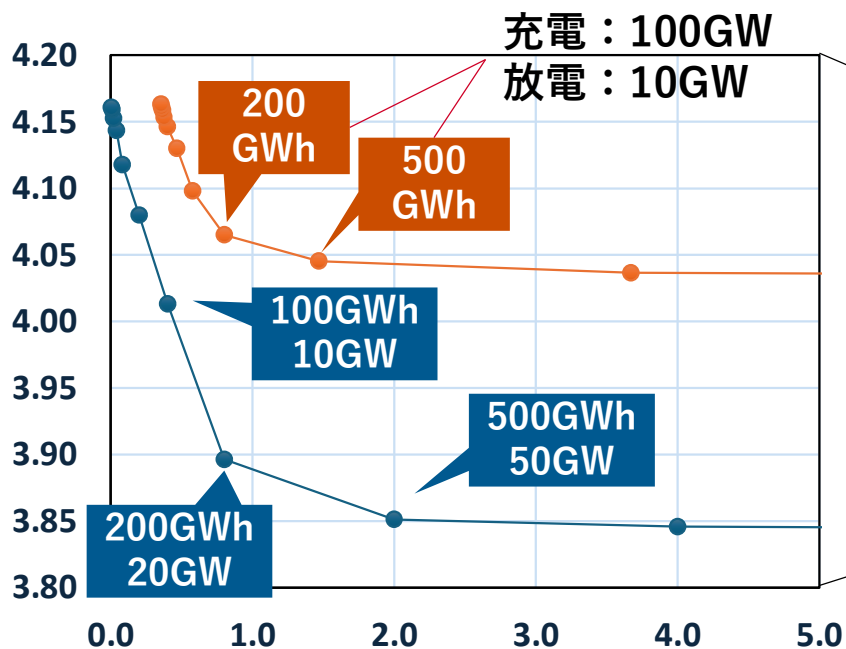
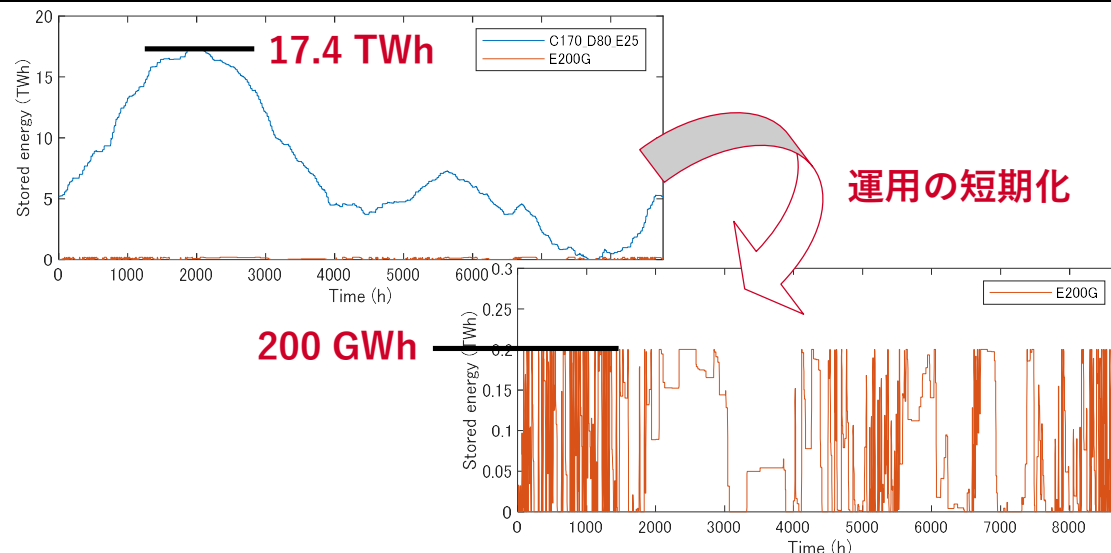
- LDESの導入により、火力の発電電力量・設備容量の低減が期待できる
- LDESの経済的な導入効果の観点から上記コストを考慮してH2ーLiBを比較
(コストは発電コスト検証ワーキング報告書 (R7) を参照)

	運用コスト (兆円)	LNG固定費 削減量 (兆円/年)	CO2対策 費用削減量 (兆円)	削減量 合計 (兆円)		LDES コスト (兆円/年)
LDES なし	4.16					
H2	4.03 (▲0.13)	0.24	0.05	0.42	大きく 乖離	39.5
LiB	3.84 (▲0.32)	0.18	0.12	0.62		29.6

- H2は適切なタイミングでの放電によりコスト低減効果を高めている
- LiBは変換効率が高く、再エネ余剰を有効に活用できる

コスト検討：Wh容量の低減による経済性改善の評価

- Wh容量を低減したときの運用コスト変化を評価
- 数百GWh程度までは火力運用費の増加を抑えつつ
ESSのコストを低減できる…現実味のある規模感
 - 長く貯めこまずに細かく放電しても火力の燃料費の削減効果は大きく変化しない



まとめ

本日の講演内容のまとめ

- 再エネ主力電源化に向けて、再エネ電力の有効活用のための長期電力貯蔵（LDES）が世界各国で検討されている状況
- LDES導入による電源運用の変化や経済性への影響、LDESに適した技術に関する基礎検討を実施普及が進むLiBと長期貯蔵への期待値が高い水素貯蔵を比較
- シーズナルな充放電には莫大なWh容量が必要だが、それに見合う火力発電の縮小効果を得ることは現状のコスト見通しの元では難しい。Wh容量が比較的小さい電力貯蔵により日間運用を積極的に行うことでも火力発電コストの低減効果は大きくは損なわれず、実現性は高いと考えられる。
- LiBと水素貯蔵との比較において、LDESとしてはコストの支配的要因はWh容量であり、Wh容量単価が低い水素貯蔵も大きく経済性が劣るとも言い切れない。LiB同様普及に向けたコスト低減のための研究開発が期待される。

- カーボンニュートラル実現に向けた外的要因の発動に際しての再検討
 - LDESの導入コストに対して火力発電のコスト低減効果が限定的であることから、今後再エネ導入の進展に伴い自然にLDESが増加することは考えづらい
 - 炭素税等のカーボンニュートラル実現に向けた加速要因がどの程度設けられるかが重要な要素となる
- 立地面積の制約を考慮した貯蔵技術間の比較検討
 - LiBは普及が進められているものの、LDESとしての期待は比較的低く、原因としてWh容量単価が高いこと、設置面積が広がってしまうことなどが挙げられる。
 - 水素貯蔵やレドックスフロー電池、CAESなど、Wh容量の増加に対して柔軟な設計が可能、あるいはWh容量単価が比較的低い技術はLDESとしての活用価値が高い

ご清聴ありがとうございます

共同開催ウェビナー

Zhar Research 社・グローバルインフォメーション

ZharResearch × GII Global Information

長期エネルギー貯蔵(LDES)の 未来と技術動向： グリッドからマイクログリッドまで

6/24 火

14:00～ Zoomウェビナー

参加費無料



<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000003596.000071640.html>

参考

市場化に向けた準備状況（Electrochemical）





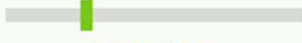
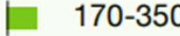



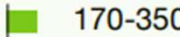




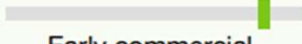
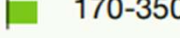


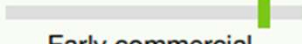
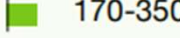
Market readiness of Electrochemical (power-to-power) LDES technologies

Category	Technology	Market readiness	Storage duration (hours)	Round-trip efficiency (%)	Geographical footprint (kWh/m ²)
Electrochemical (power-to-power)	Vanadium Flow batteries	Early commercial	4-24+	60-80%	20-50
	Lithium-Ion (LFP, NMC)	Commercial	2-10	85-96%	90-95
	Sodium-Ion	Early commercial	4-20	60-85%	2-43
	Zinc Air	Early commercial	10-100	40-45%	2-43
	Zinc Bromine Flow	Early commercial	4-12	60-70%	2-43
	Iron Air	Early commercial	100	40-45%	2-100
	Non-Metal chemical storage	Emerging	0-200	40-50%	300-1500

Ref., LDES Council, 2024 LDES Annual Report

市場化に向けた準備状況（Chemical）

Market readiness of Chemical LDES technologies

Category	Technology	Market readiness	Storage duration (hours)	Round-trip efficiency (%)	Geographical footprint (kWh/m ²)
Chemical (power-to-power)	Hydrogen	 Emerging	 500-1000	 28-40%	 5-50
	Ammonia	 Emerging	 170-350	 35-40%	 98
	Methanol	 Emerging	 170-350	Not available	Not available
Chemical (power-to-x)	Hydrogen	 Early commercial	 500-1000	 40-70%	 5-50
	Ammonia	 Early commercial	 170-350	 35-40%	 98
	Methanol	 Early commercial	 170-350	Not available	Not available