

日本機械学会 動力エネルギーシステム部門
CNに向けたエネルギー貯蔵技術研究会 報告会
蓄エネセミナー

2024年3月14日（木）16:20～16:45
早稲田大学西早稲田キャンパス

カーボンニュートラルに向けた エネルギー貯蔵システムの役割

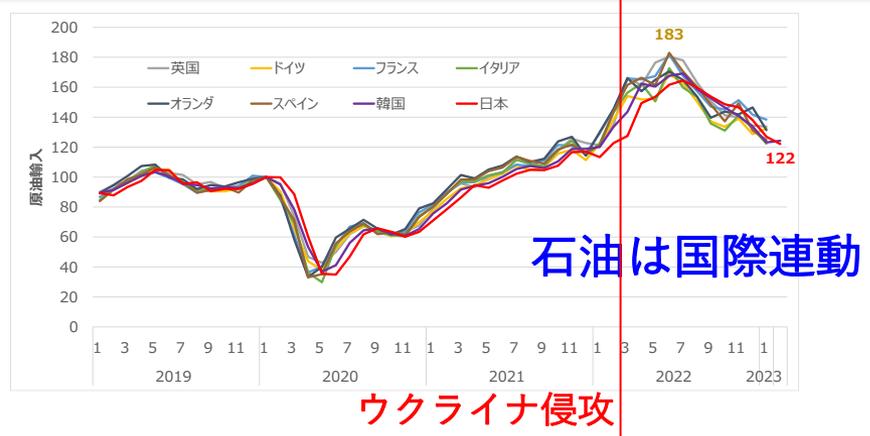
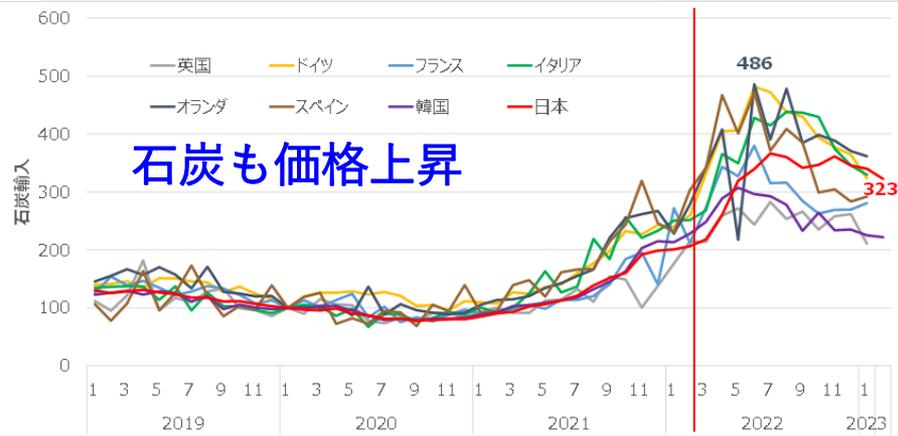
中垣 隆雄



早稲田大学 創造理工学部

School of Creative Science and Engineering, Waseda University

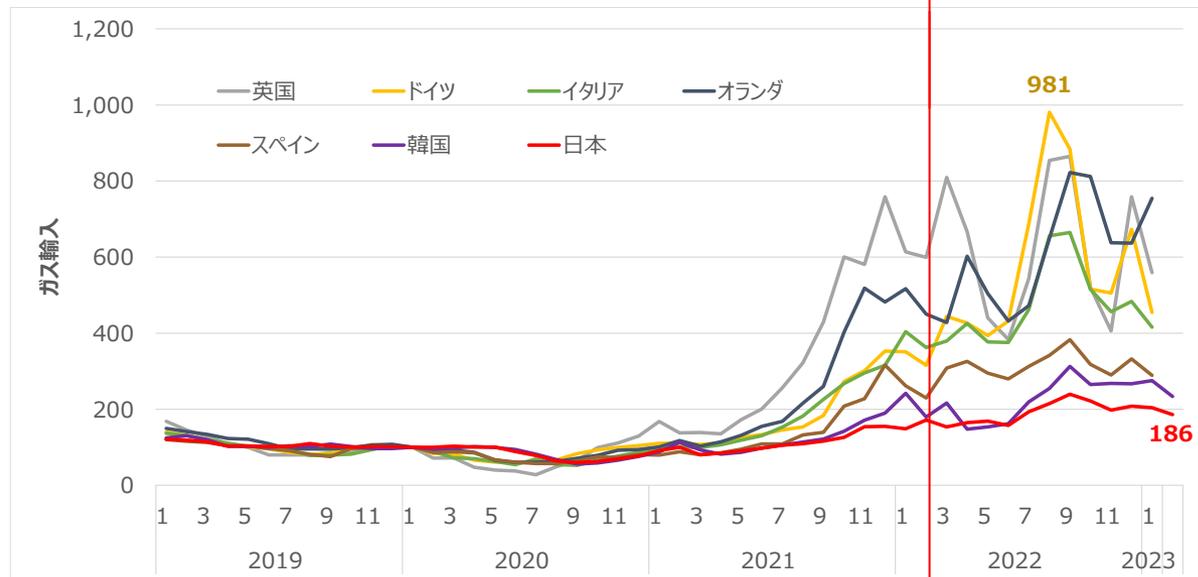
※当該資料に関するお問い合わせはtakao.nakagaki@waseda.jpへ



エネルギー白書2023から引用

世界的に再認識
 再エネ ↗ ≠ 火力 ↘
 低炭素燃料の
 LNG需要 ↗

(日本は長期契約で比較的安定だが) 今後安くなる要因は見当たらない

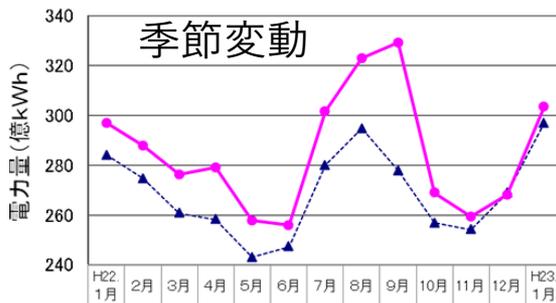
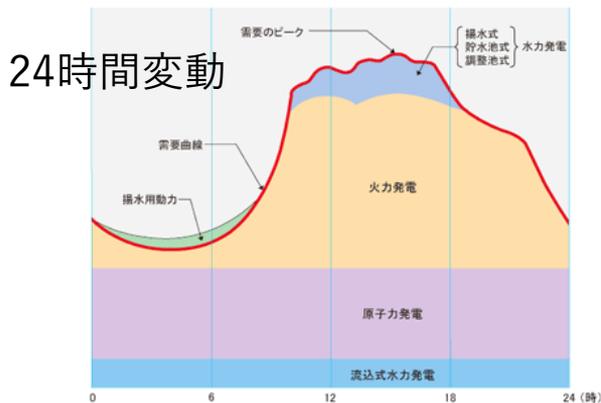


LNGの大量長期間備蓄は本質的に困難

国内備蓄 石油7300万kL (240日分) LPG260万トン (100日分)

これらを代替できるCNなエネルギーキャリアの選定, 少しでも自給率Up...

様々な周期の変動吸収・レジリエンスのための**備蓄**



災害・紛争時の一時的な大変動

物質生産・エネルギー変換

エクセルギー消費
(アメニティ創出)

- 電力, 動力
- 熱, 冷熱

廃物 (エントロピー) の生成と処理

- 温室効果ガス (CO₂)
- 廃熱
- 廃棄物など

エネルギー・物質収支が変動を許容し, 時空間的に破綻せずに成立することが前提.

考慮すべき事項として,

- 資源の安定供給 (枯渇や政治的リスクを含む)

- 経済性
- 温暖化防止
- 災害, 事故リスク
- 環境への影響 など.

境界外からのインプット

(物質輸送を伴うエネルギー源)

- 化石燃料 (天然ガス, 石油, 石炭)
- バイオ系燃料
- ウラン
- その他のエネルギーキャリア (水素など)

- 付随して必要な稀少金属, 希土類など
- 工業上必要なその他の資材

津々浦々の送電, 物流

製品

蓄エ

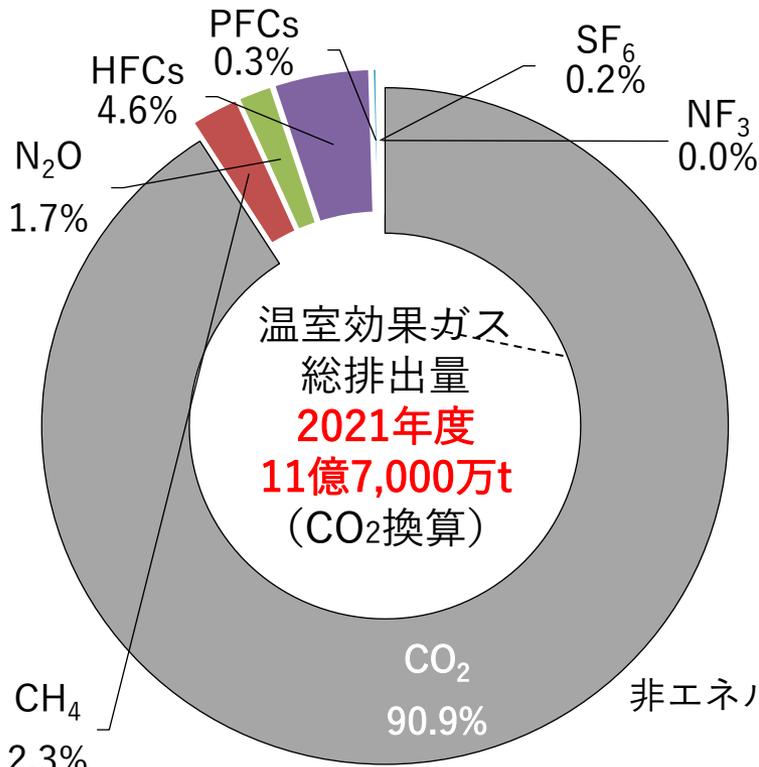
資源リサイクル

境界内の生成・ストレージ

- 太陽光, 風力等による国内再生可能エネルギー電力
- 国内のバイオ系燃料

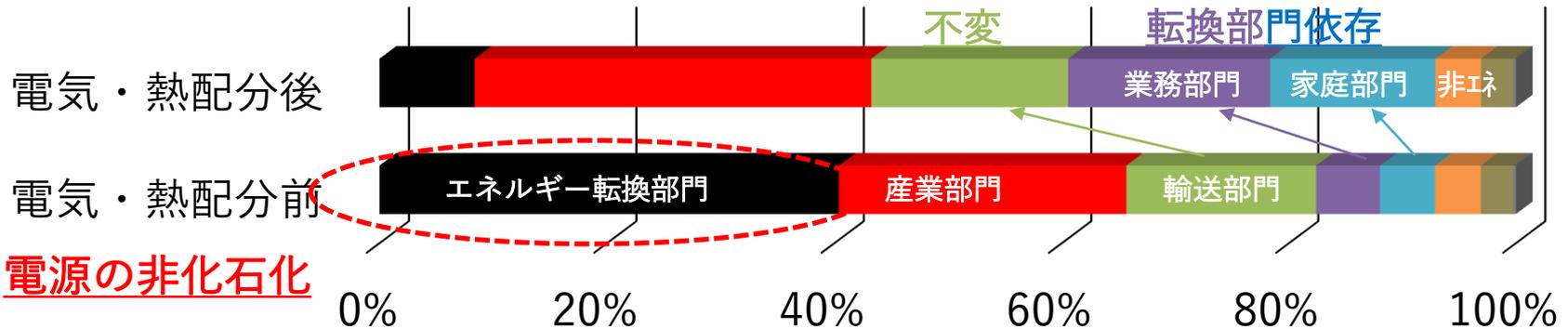
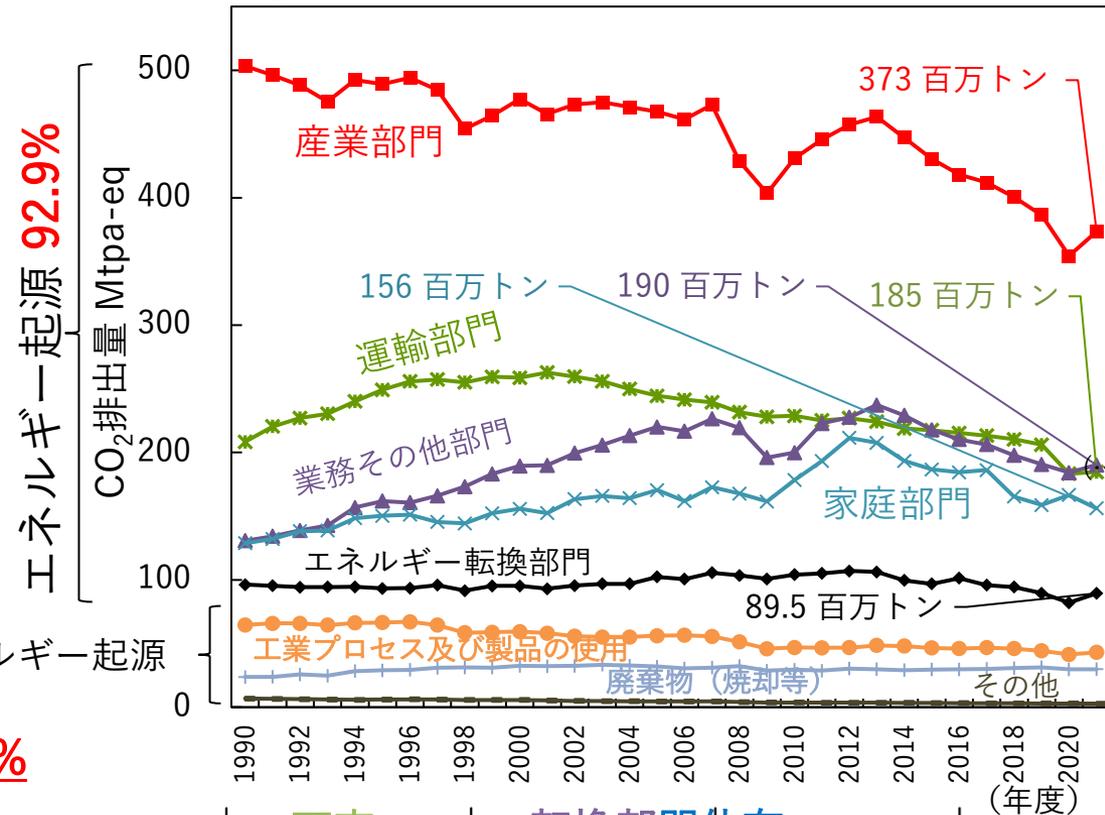
- ◆ Sustainable
- ◆ Economically affordable
- ◆ Stably accessible

民生のCNはエネルギー転換部門に依存

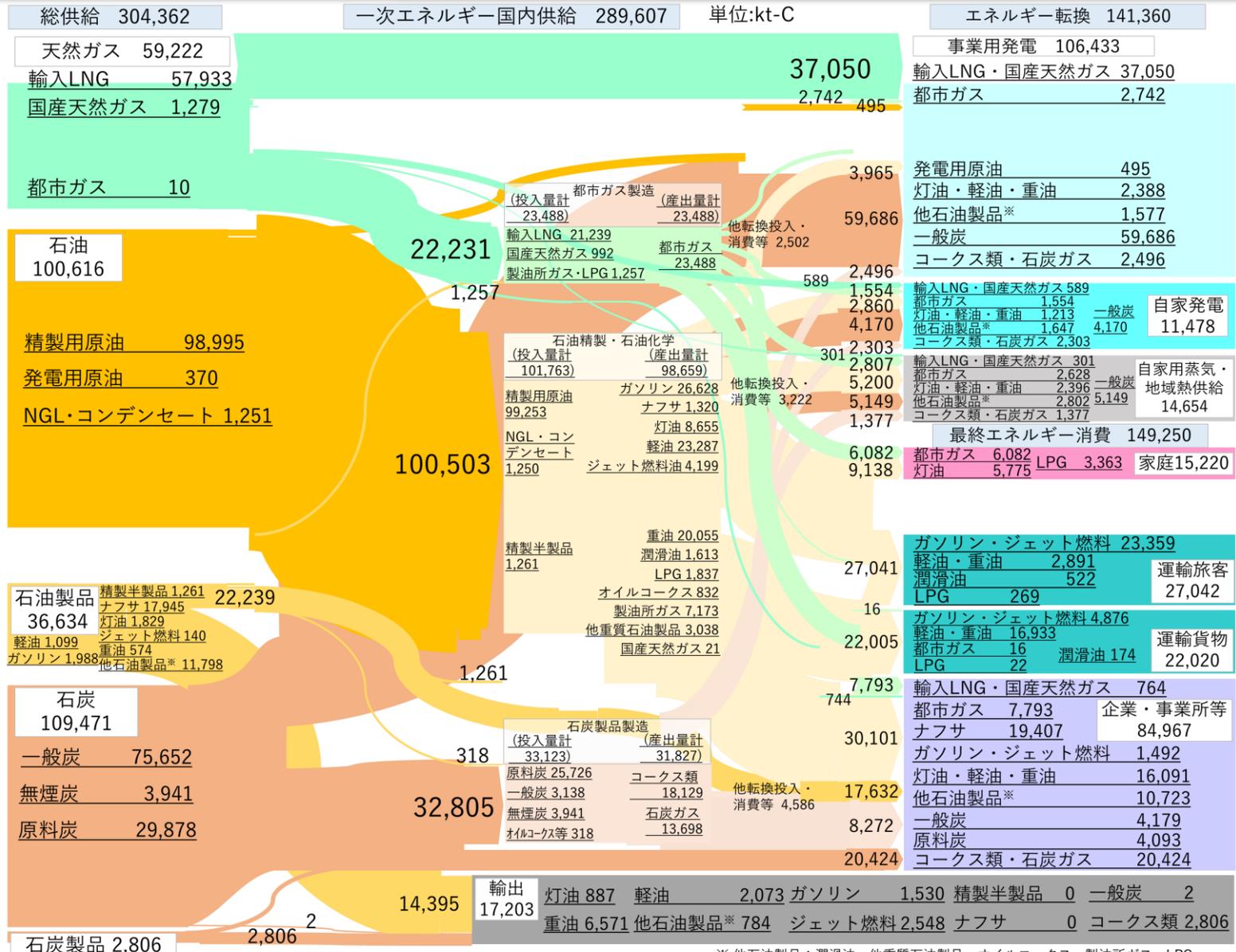


エネルギー起源のCO₂がGHGの84.4%

CO₂の部門別排出量（電気・熱配分後）の推移



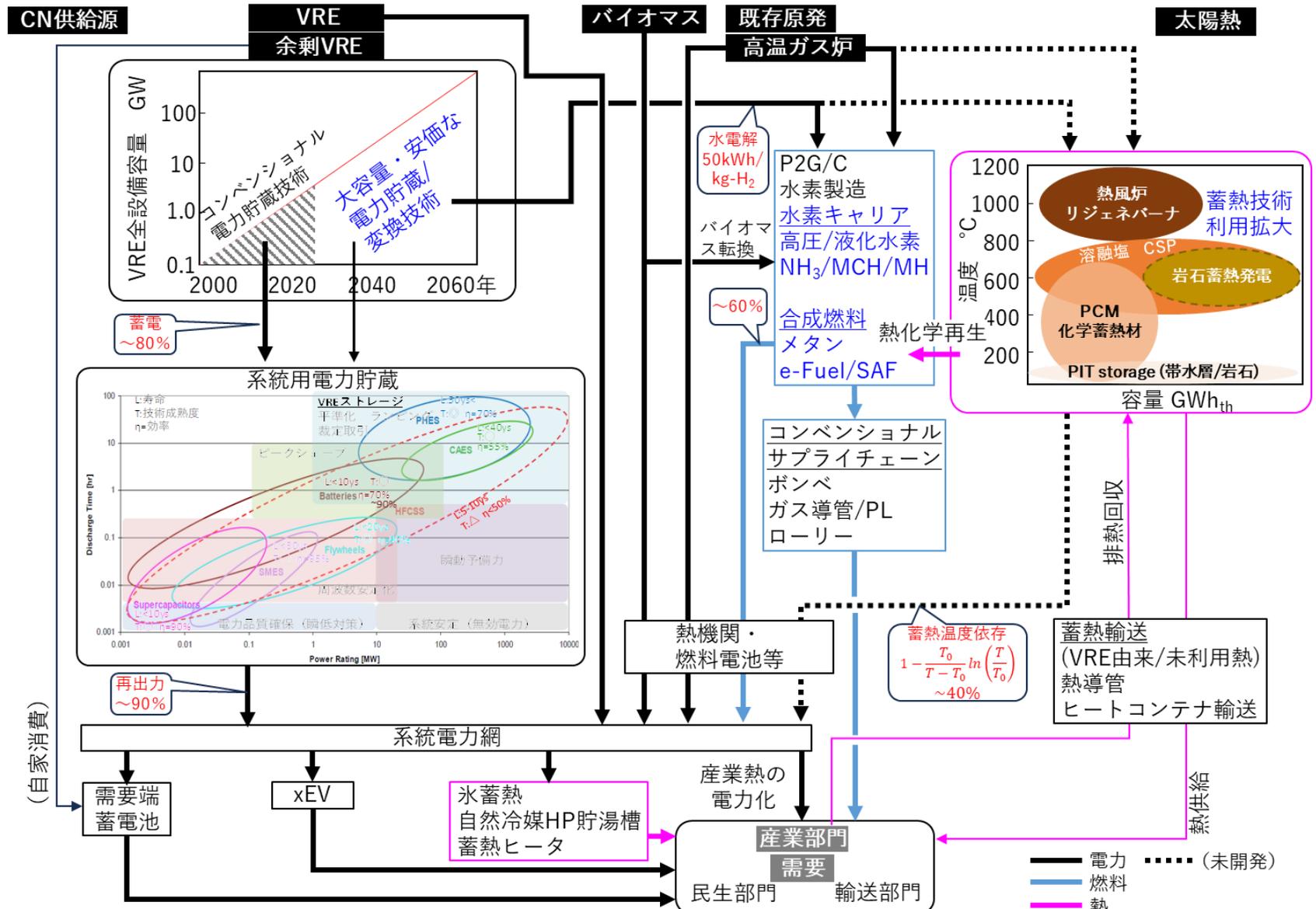
化石燃料 億年単位のエネルギーストレージ



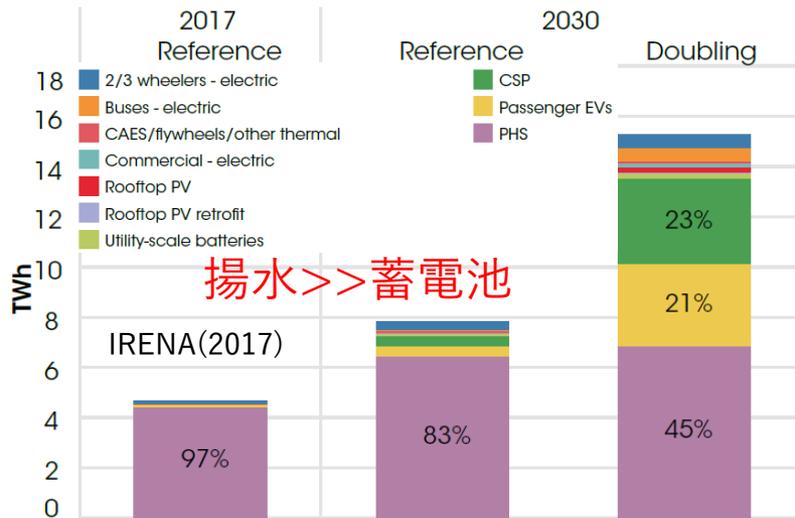
※ 他石油製品：潤滑油、他重質石油製品、オイルコークス、製油所ガス、LPG
 出典：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計（2020年度）」を基に作成

CN供給源 ⇒ (ストレージ) ⇒ 需要

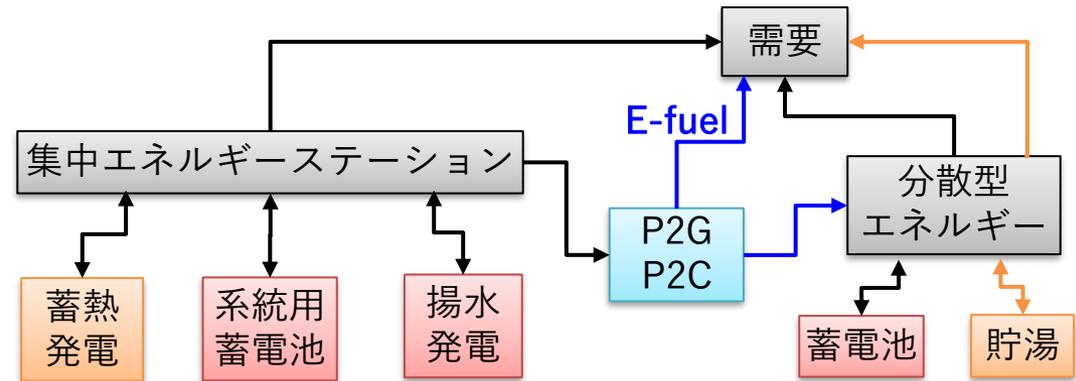
2050年までにGX実現とCN達成 ⇒ 一次エネルギーの脱化石化 + 効用・便益の電力化 ※青文字は実装すべき技術



エネルギー貯蔵の普及と用途



電力貯蔵だけでなく、熱・燃料にも利用



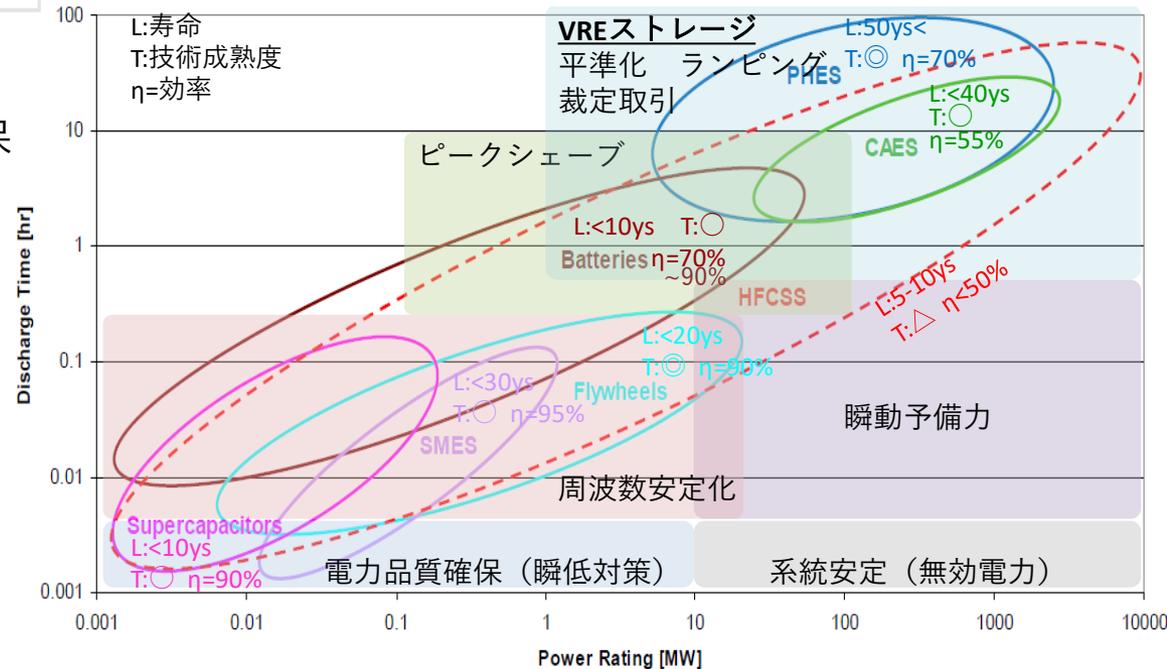
TRL・往復効率・速度容量特性

電力貯蔵のこれまで：

- 小容量短期間：系統安定化，品質確保
- 大容量長期間：負荷平準化

これから：

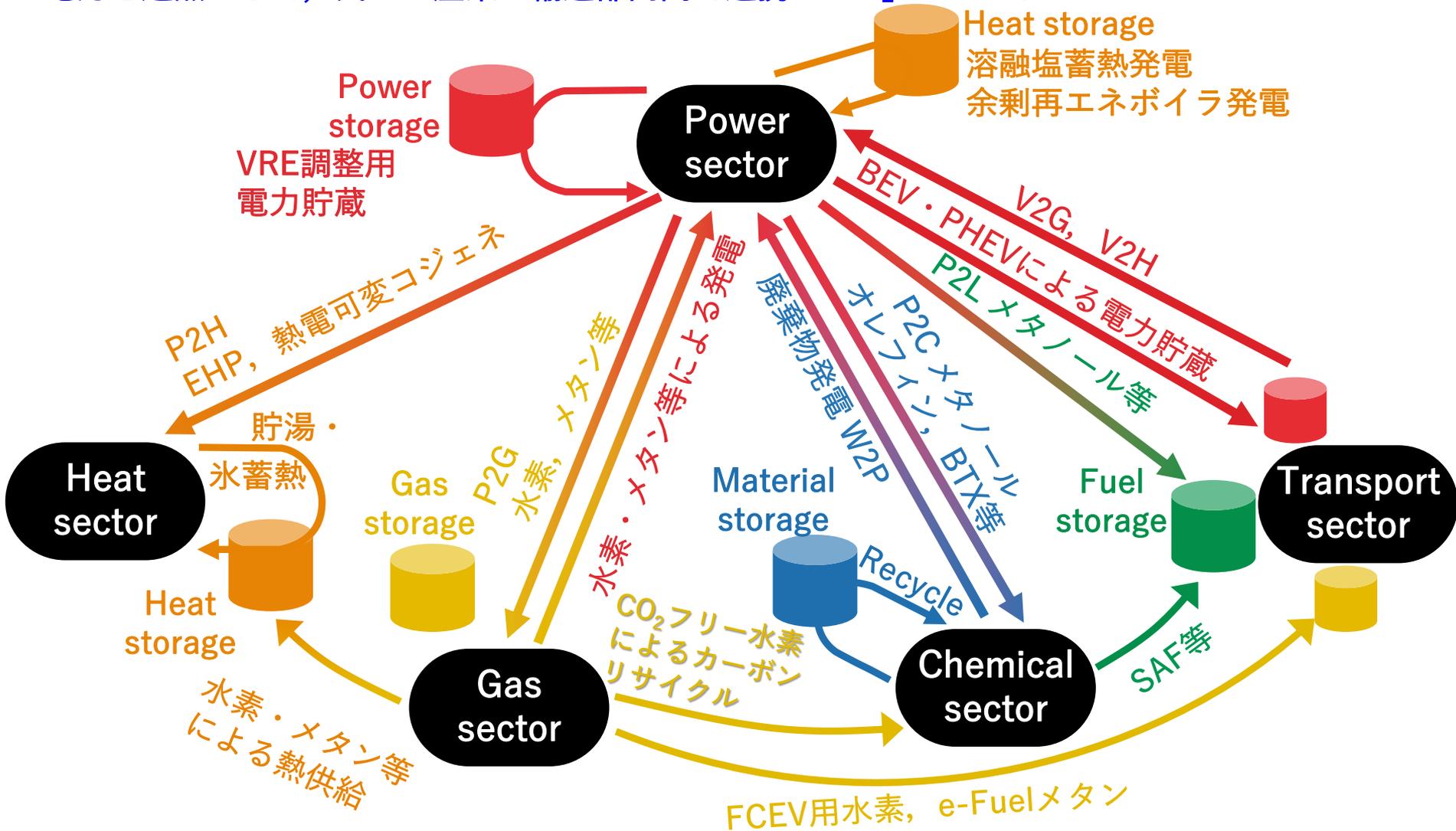
- 余剰VREの出力抑制回避
- ⇒ CN達成，投資回収 ⇒ 需要創生
- ・グリーン水素製造 (P2G, L, C)
- ⇒ 電力，輸送，ものづくりなど
- ・熱生成 (P2H(2P))
- ⇒ 熱の直接利用，再発電
- ・CDR駆動エネルギー など



Citation: storED Project Report 2.1 Report summarizing the current Status, Role and Costs of Energy Storage Technologies

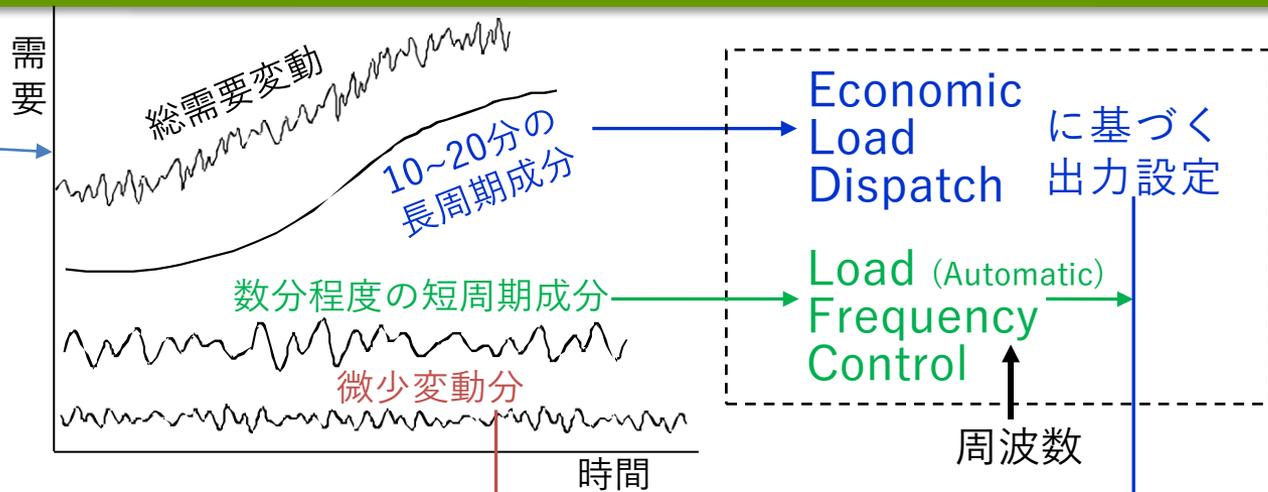
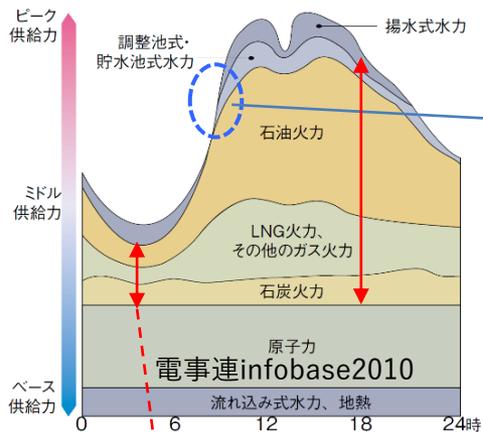
電力起点のエネルギー貯蔵と部門間連携

コンベンショナル電力貯蔵 = 電力負荷平準化, 安定化のためのストレージ
 ⇒ 電力を起点として, 民生・産業・輸送部門間で連携「P2X」にシフト

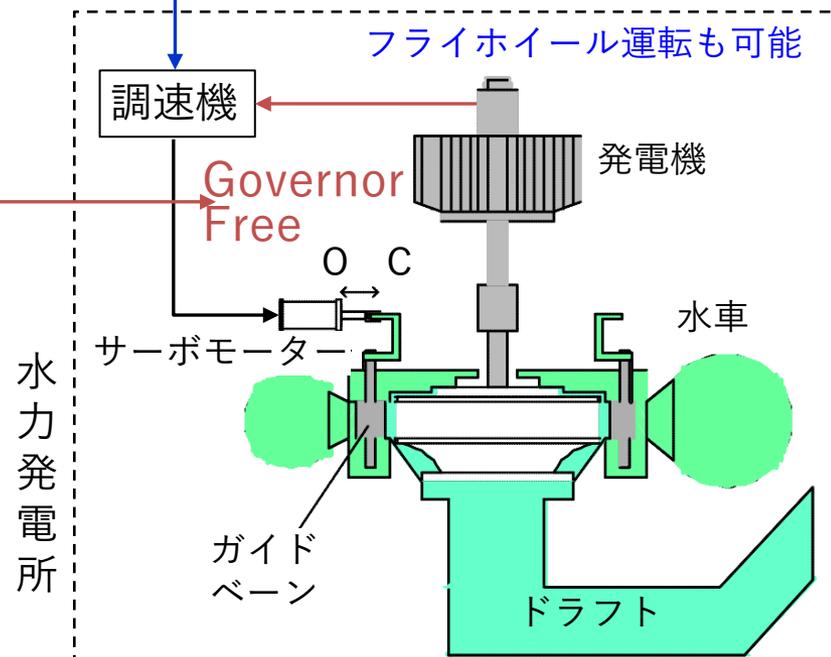
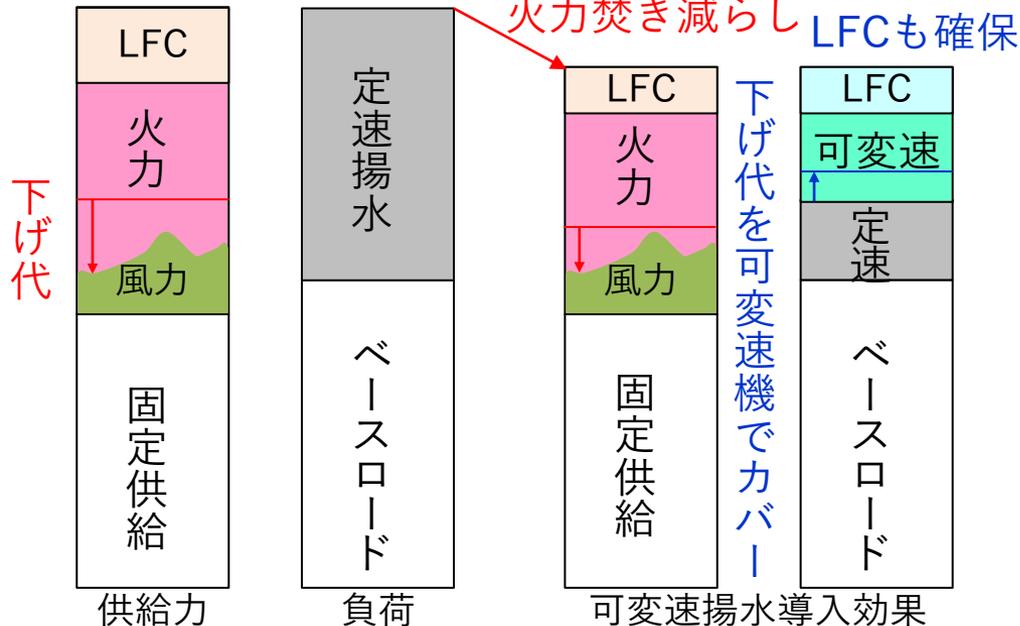


Handbook of Energy Storage, Springerを基に独自に加筆

火力・水力の慣性力提供と周波数調整



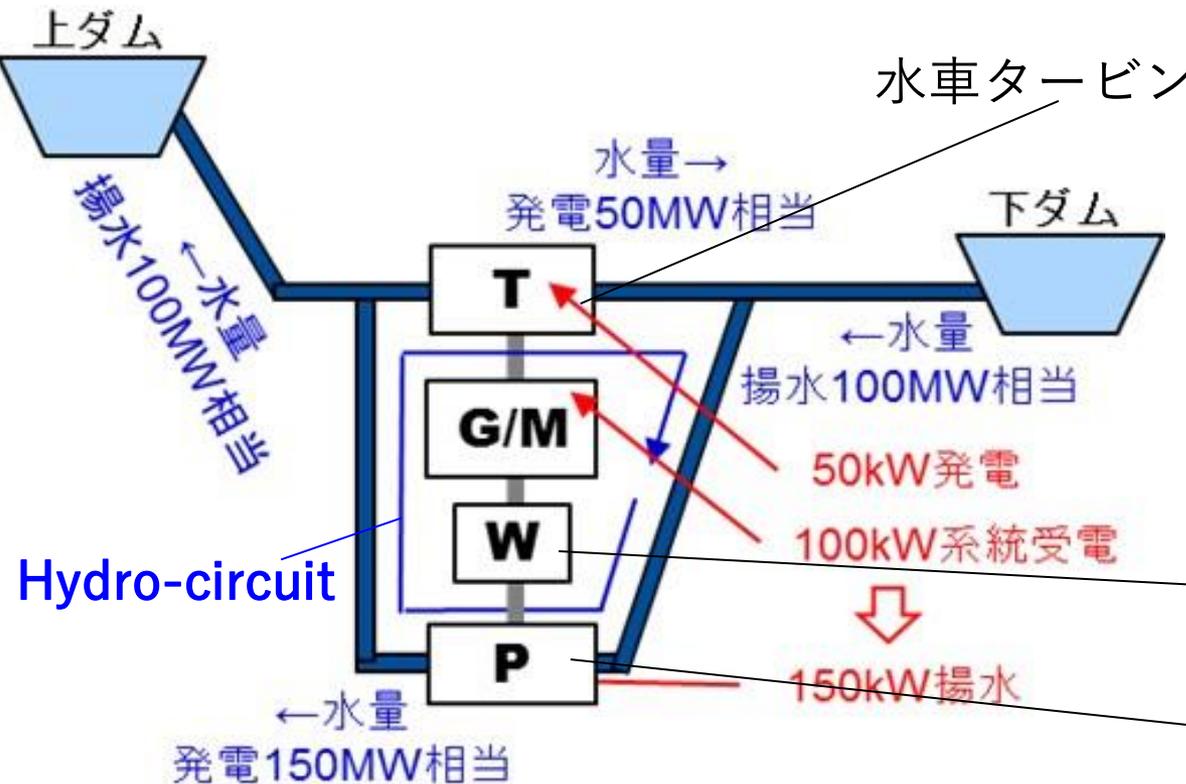
需要の少ない時は
LFCマージンが少ないので可変速揚水を活用



<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90126a12j.pdf>より作成

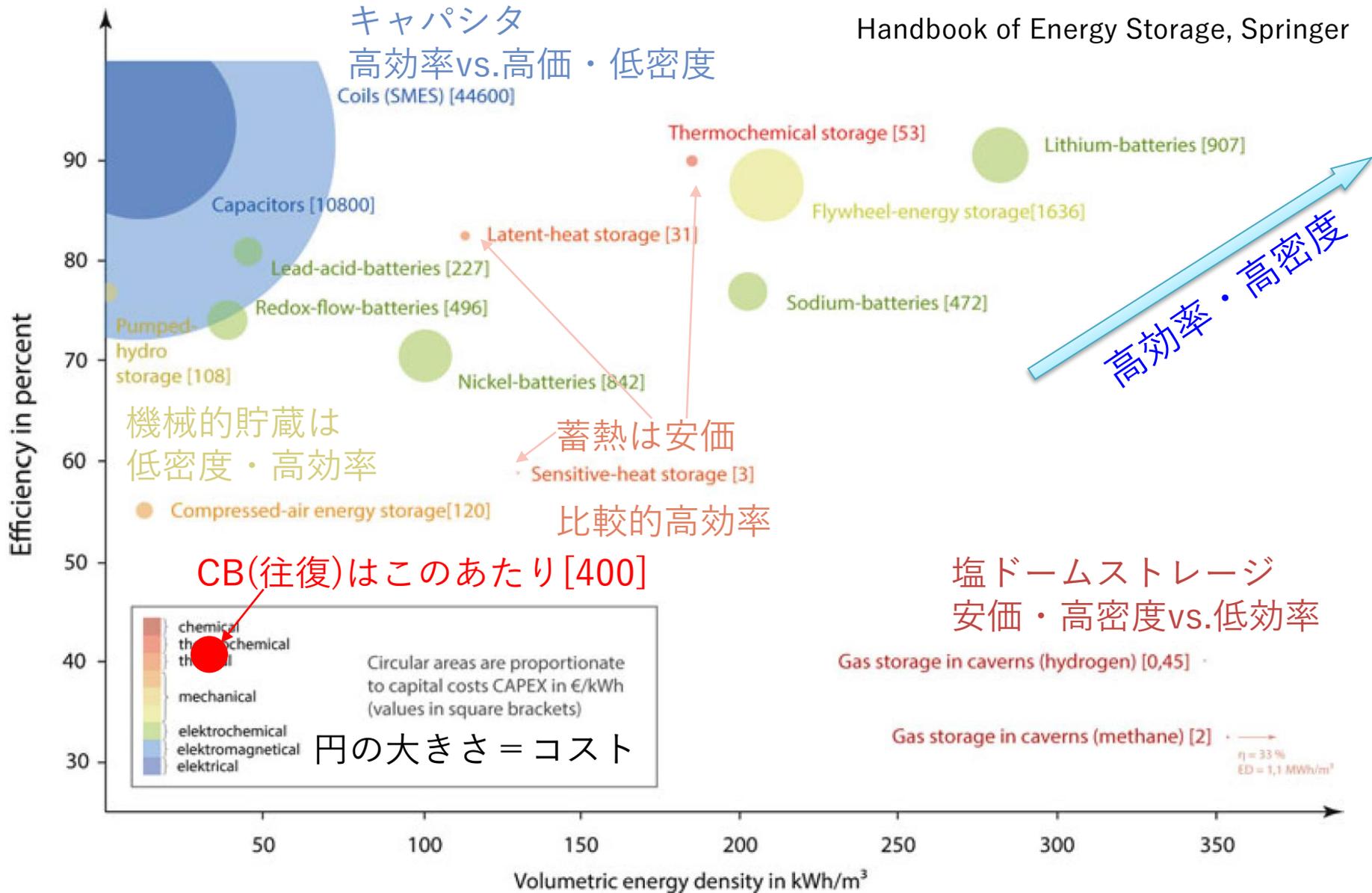
揚水発電のバッテリー的運用例

- ✓ 水車 + 発電・電動機 + トルクコンバータ + ポンプで構成
- ✓ フルコンバータ (Converter Fed Synchronous Machine; CFSM) 方式
 - 発電・電動機の一次側に設置された同容量のコンバータが並列運転
 - 任意の回転速度で運転可能なシステム (Voith Hydro社のTernary unit)



2015年度NEDO委託事業(早稲田大学, 東京電力, 三菱総研)「再生可能エネルギー連系拡大に資する需給調整用の揚水発電等の水力発電所に関する技術動向調査」報告書を参照

エネルギー貯蔵技術の体積密度と往復効率



蓄電池の初期コストとサイクル耐性の予測

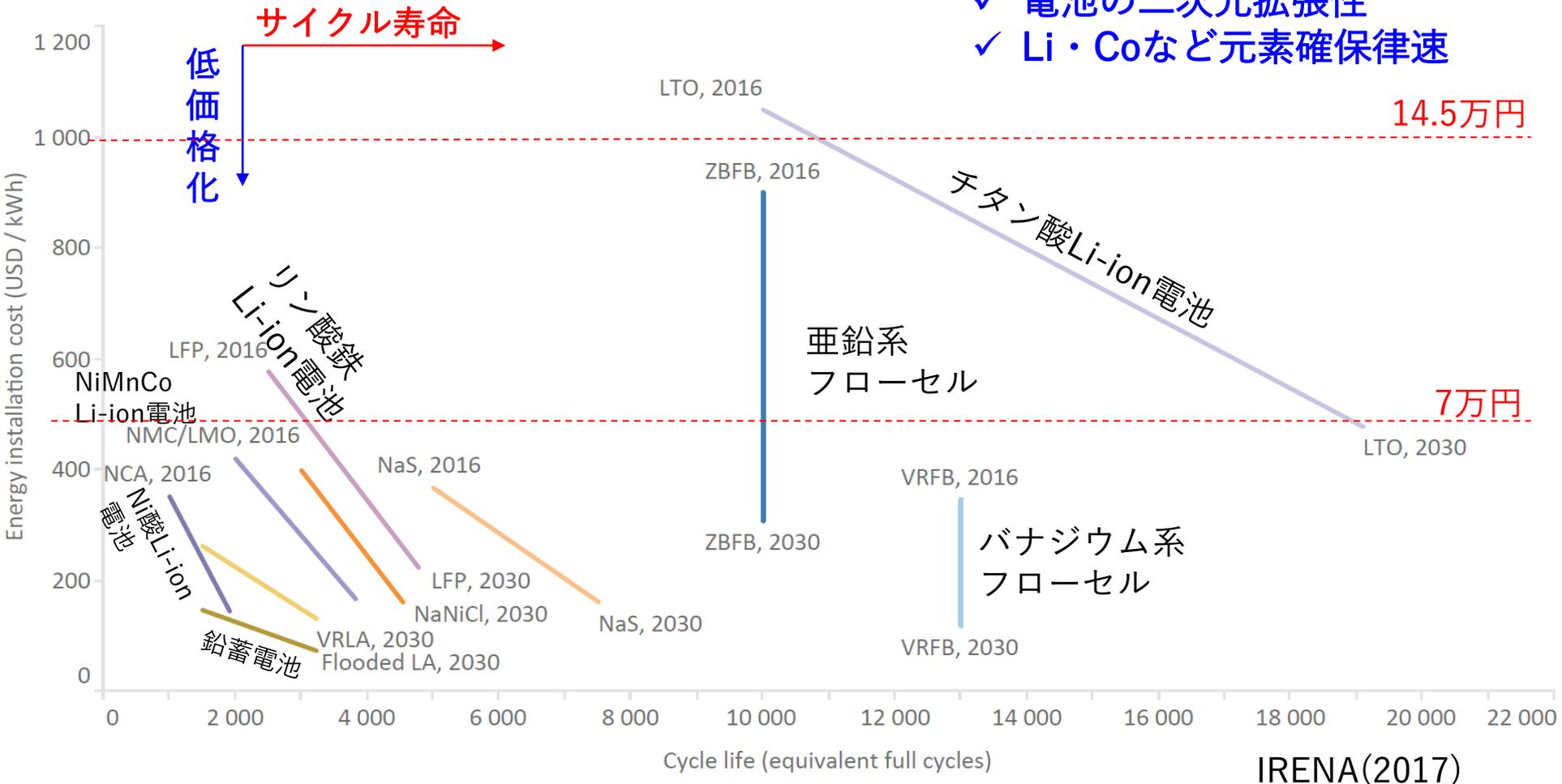
参考：国内システムコスト18.7万円/kWh(2019)⇒7万円/kWh(ストレージパリティ)

METI, 第3回定置用蓄電システム普及拡大検討会 資料4

「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 (三菱総研)」より

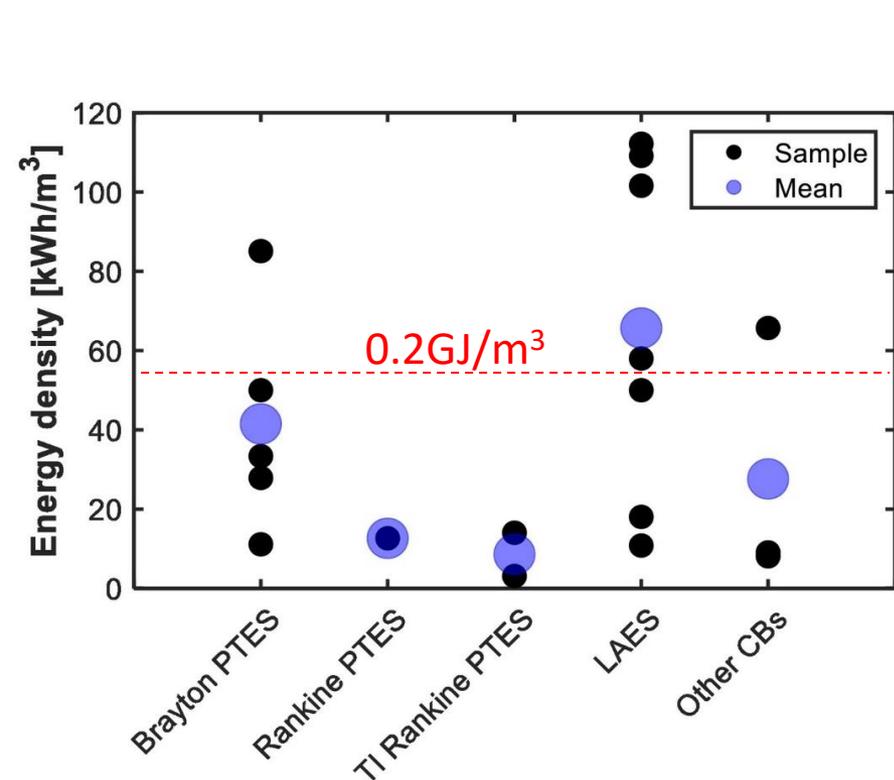
電気化学的貯蔵の課題

- ✓ 電池の二次元拡張性
- ✓ Li・Coなど元素確保律速

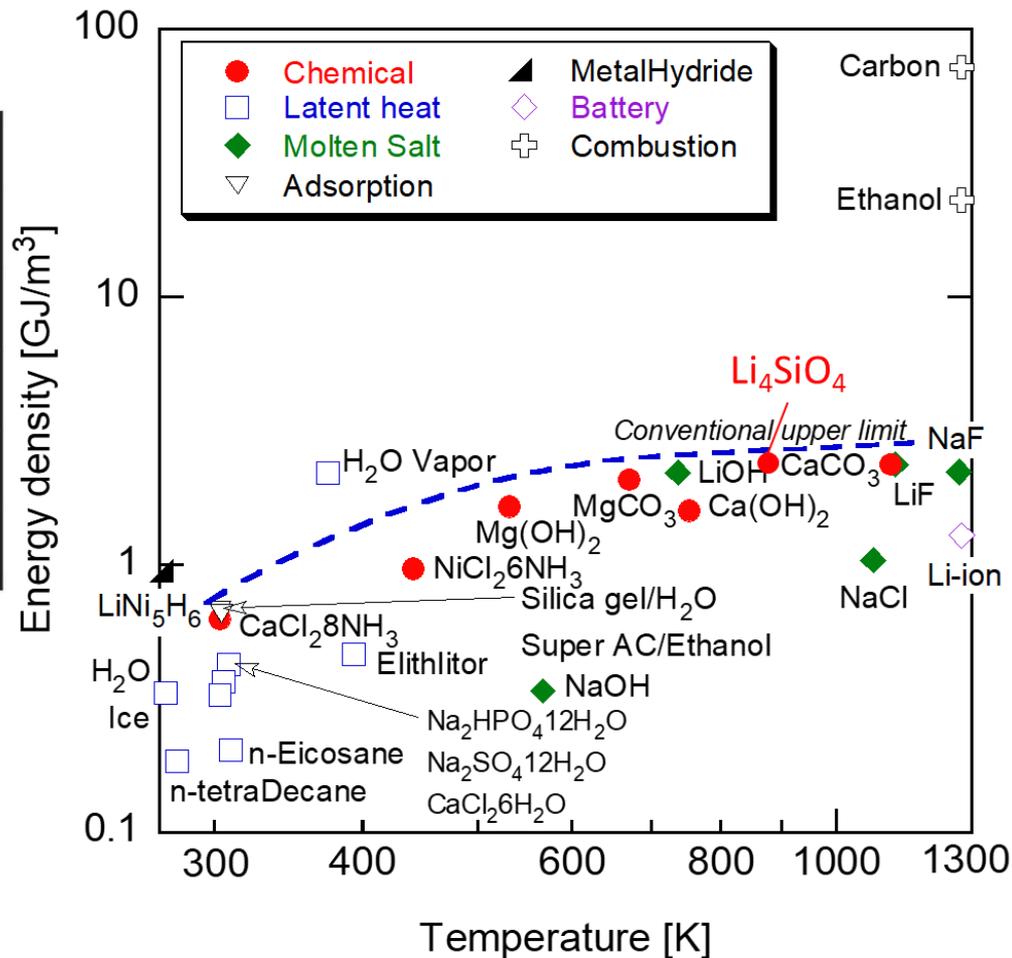


IRENA(2017)

蓄熱媒体とCBのエネルギー密度



PTES: Pumped Thermal Energy Storage
 LAES: Liquid Air Energy storage
 CBs: Carnot Batteries



亀山・加藤, "骨太のエネルギーロードマップ", 化学工業社 (2005)に加筆

材料のエネルギー貯蔵密度と作動温度の関係
 化学反応は生成物基準で固体粒子空隙率60%を考慮

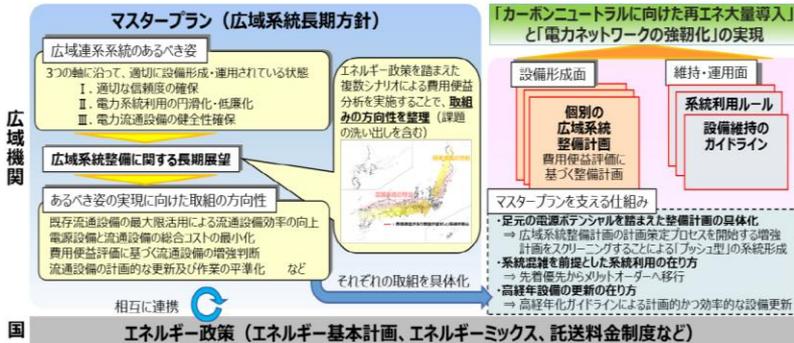
VREを最大限直送利用シナリオで試算

マスタープランの中間整理（概要）

中間整理の位置づけ：これまでの議論に基づき、将来の不確実性を分析するために設定した複数シナリオによる分析結果と、その結果から導かれる第1次の系統増強案をとりまとめたもの。エネルギー政策に対し電力ネットワーク面での分析をフィードバックするものであり、最終的な系統増強の結論ではないことに留意が必要。

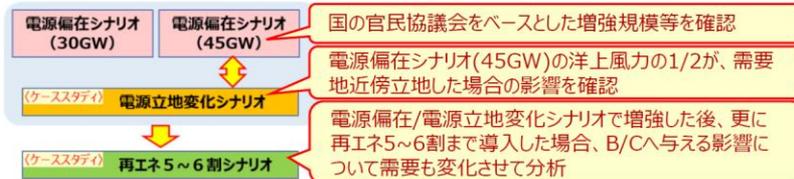
1. マスタープランの目的

マスタープランは、個別の系統整備計画を検討する際の考え方を示す長期方針であり本方針に基づく取組を具体化させることで、「カーボンニュートラルに向けた再エネ大量導入」と「電力ネットワークの強靱化」の実現を目指す。



2. 広域系統整備に関する長期展望の分析（取組の方向性を整理）

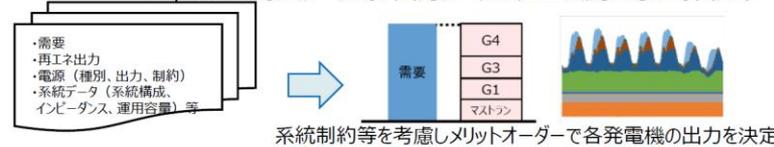
<複数シナリオ>「電源偏在シナリオ(2ケース)」と、ケーススタディ2シナリオで分析。



<シミュレーションツール・前提条件>

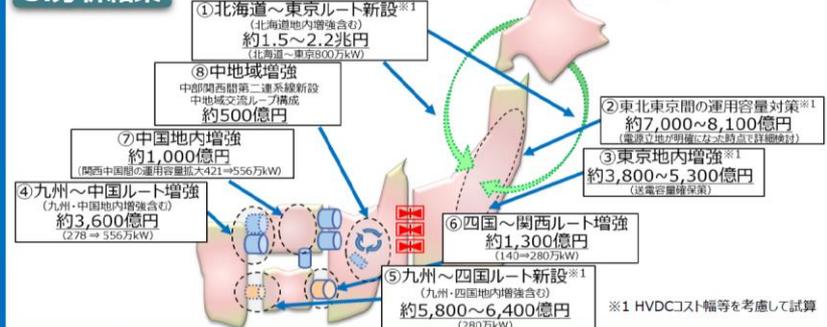
起動費を含む総コスト(燃料費+CO2対策コスト)が最小になる発電計画を作成するメルットオーダーシミュレーション。8,760時間の系統状況を想定。

需要：現行エネルギーミックスの需要に足下2019年度の実績を加味して算出。
電源構成：現行エネルギーミックス、供給計画のうち大きい方を設定。洋上風力は30,45GW導入ケースで、出力カーブは陸上風力のもので代用。



3. 分析結果

<電源偏在シナリオ(45GW)の検討結果>



- 電源偏在シナリオ(30GW, 45GW)は、国の「洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会」の現実的なエリア別導入量に基づいて増強案を検討したもの。
- ケーススタディでは電源立地を既設備・需要に基づく設定としており、**実際は追加コスト等が発生する可能性がある**。また再エネ5~6割シナリオでは**再エネの余剰活用を含めた需要側対策も今後検討する必要がある**。

| シナリオ | 官民協議会ベース（電源ポテンシャル考慮） | | | |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 電源偏在シナリオ (30GW) | 電源偏在シナリオ (45GW) | 電源立地変化シナリオ (45GW) | 再エネ5~6割シナリオ |
| 分析項目 | 電源偏在シナリオ (30GW) | 電源偏在シナリオ (45GW) | 電源立地変化シナリオ (45GW) | 再エネ5~6割シナリオ |
| 系統増強の投資額 (NW増強コスト) | 約2.2～2.7兆円 (約0.2～0.26兆円/年) | 約3.8～4.8兆円 (約0.36～0.45兆円/年) | 約1.5～1.7兆円 (約0.13～0.16兆円/年) | 約2.0～2.6兆円 (約0.19～0.24兆円/年) |
| 再エネ出力制御率 (増強後・太陽光・風力) | 約2% | 約4% | 約4% | 約39% (需要側の対策が必要) |
| 再エネ比率 | 37% | 42% | 42% | 53% |

注) 偏在する電源等を大消費地に送電するための連系線等の背骨系統の増強コストのみを記載。また、調整力確保、慣性力・同期化力低下等の対策コストは含んでいない。HVDC送電の海底ケーブル工事は漁業補償費を含みます。水深等を考慮したルート変更によるコスト増の可能性あり。

4. 感度分析およびその結果から得られたエネルギー政策への示唆・課題

- ケーススタディの分析では、偏在電源の一部緩和により増強コストを抑制できるため**エネルギー政策面で電源立地誘導なども含めて検討が進むことが期待される**。
- 「再エネ5~6割シナリオ」の分析では、全国的に再エネ出力制御が発生し(増強後39%)、また電力需要をパラメータとした感度分析では、電力需要の増加により再エネの余剰電力が有効活用され、B/Cが向上するため、**水素転換や蓄電池を考慮したシナリオなどの検討も進めていく**。
- 系統増強のリードタイムも踏まえると、**早期に整備計画として進めていくべきもの**については、**増強案の具体化についても検討を進める**。

5. あるべき姿の実現に向けた取組の方向性

早期に整備計画として進めていくべき増強案を具体化するとともに、混雑を前提とした系統利用ルールや高経年設備更新に係るガイドラインの策定を進めていく。

既存アセットと新技術

動力協会誌2023年春号

OCCTOマスタープラン再エネ5～6割シナリオ，出力抑制39%（2050メインとの位置づけ）

| | | | |
|-------|--------------|--------------|--------------------------------------|
| 抑制電力量 | TWh/y | PJ/y | ※日本の電力需給はおよそ1000TWh/y，TPEDは20000PJ/y |
| | 331.4 | 762.8 | |

揚水発電の寄与率

| | | | | |
|------------|---------|------|-------|--------------|
| 発電の設備容量 GW | 持続時間 Hr | 稼働日数 | PJ/y | 揚水フル活用のカバー率 |
| 27 | 8 | 330 | 256.6 | 33.6% |

エネファーム ヒートポンプ・蓄熱センター調べ

| | | | | | | | |
|------|-------|--------|------------------------|------|-----|--------------|-------------|
| 累積台数 | 貯湯量 L | 沸上げΔTK | 総蓄熱量 kJ/day | 稼働日数 | COP | 吸収再エネ電力量PJ/y | 寄与率 |
| 800万 | 370 | 35 | 4.384×10^{11} | 360 | 3 | 52.6 | 6.9% |

蓄電池（2019のデータ）

三菱総研調べ

| | | | | | |
|--------|----------|------|--------|------|--------------|
| 累積 GWh | 単純総容量 PJ | 稼働日数 | 有効ΔSOC | PJ/y | 寄与率 |
| 9.6 | 0.0346 | 360 | 0.6 | 7.47 | 0.98% |

岩石蓄熱の場合

（SIEMENS GAMESA実証試験を基に推算すると38000倍の規模）

| | | | | | | | |
|--------|---------------------|------------|------|------|------------|---------------------|---------------------------|
| 岩石重量 t | 体積換算 m ³ | 仕様 MWh/day | 稼働日数 | Δ利用率 | 吸収電力量 GJ/y | 岩石体積 m ³ | 深さ10mでの面積 km ² |
| 1000 | 800 | 27.6 | 330 | 0.6 | 19638 | 3100万 | 3.11 |

水素製造の場合

| | | | |
|-------------|-----------|------------|---------------|
| 変換係数 kWh/kg | 水素製造量 t | NEDO2050目標 | 2000万トンに対する寄与 |
| 50 | 4,799,557 | | 24% |

| | | | | | |
|---------|-------|--------|------|---------|------------|
| | 2017 | 2020 | 現在 | 2030 | （第6次エネ基修正） |
| 水素ST | 100 | 160 | 161 | 900 | |
| FCV | 2,000 | 40,000 | 5170 | 800,000 | （トラックバス合計） |
| エネファーム※ | 22万 | — | 48万 | 530万 | （300万） |



※エネファームは水素と直接関係はないが，同戦略に記載のため参考

エネルギー貯蔵システムの展望

- CN達成のエネルギー源はVRE電力が主役 + 原子力, バイオマス
- エネルギートランジションで見過ごされがちな事項
 - ものづくりや輸送を含む便益・効用のCN
 - Contingencyの備蓄燃料, 自給率向上
- VRE主役におけるエネルギー貯蔵の新体系
 - セクターカップリング
 - トランジション, インフラのレガシー, 残り26年のスピード感
 - 変換効率, 容量, 密度, コスト, サイクル耐性
 - エクセルギー的価値観のパラダイムシフト
- 大規模集中発電サイドのエネルギー貯蔵と機能
 - 回転慣性力, 同期化力提供で系統安定貢献
 - 定速機の可変速化 揚水発電の例
- 有望なP2Xは何か?
 - 蓄電池や水電解水素は普及ギアチェンジ期待
 - ローテク, ローリスク, ローコスト = 蓄熱技術の注目度が低い
⇒ 蓄熱発電, 蓄熱輸送ももっと推進すべきではないか?