

再生可能エネルギー導入拡大に貢献する蓄熱発電とその工業熱利用

(一財)エネルギー総合工学研究所

岡崎 徹

t-okazaki@iae.or.jp



IAE The Institute of Applied Energy

本日の内容

- 蓄熱発電の概要と、その経済性
 - － 概要、世界のPJリスト(各PJの詳細は後ほど)
 - － PV電力の夜間利用時の経済性検討
 - － JEPX利用のビジネスモデル
 - － 国内水素製造
- 蓄エネルギーの必要性
- 世界の蓄熱発電開発状況
- 蓄熱技術の詳細
- 電熱変換技術の重要性



世界の民間・蓄熱発電開発

赤字は電力会社、斜体は蓄圧・冷熱も使うシステム

2021.10改訂

	研究段階	パイロット	技術的に完成
発電専用	MALTA/Duke Energy EnergyDome(LAES) 中部電力	Siemens-Gamesa Seas-nve HighView/Enlase(チリ)(LAES) EPRI/Southern Co. Brenmiller/NYPA 神戸製鋼所(A-CAES)	硝酸塩2タンク RWE (以下原子力の蓄熱部として) MOLTEX, TerraPower, Terrestrial, 東芝/富士電
電熱併給	Kraftblock	1414degrees EnergyNest/Siemens-Energy Eco-Tech-Ceram SaltX/Vattenfall TEXEL	Azelio STORASOL
確認中	247Solar, aalborgCSP, Almina, Antora, Brayton, CCT, CHESTER, CsolPower, Ecogen, Ecovat, Element16, Graphite Energy, KELVIN, KYOTO, Lumenion/Vattenfall, MAN/ABB, MGA, Pintail, Quantum Graphite, SOLID, Stiesdel (この枠内は直接のコンタクトがまだ無い)		

LAES; Liquid Air Energy Storage

A-CAES; Advanced Compressed Air Energy Storage

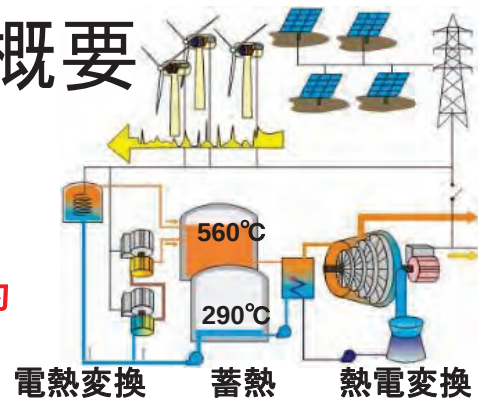
The Institute of Applied Energy



蓄熱発電の概要

蓄熱発電システムの構成

- 電力⇒蓄熱⇒安定電力(低効率)
- 蓄熱材(硝酸塩)が非常に安く長期で経済的
- 各プロセスが別々に設計可



構成要素の分析

プロセス	長所	課題	対策
電熱変換	成熟技術	低利用率⇒低コスト化(現状: ヒータ5万円/kW→1万円)	回転発熱機=低コスト化 & 慣性力、短絡電流の付加
蓄熱	成熟技術 低コスト	現時点でも低コスト しかしさらに低コスト化	1タンク式、潜熱、化学蓄熱など
熱電変換	成熟技術 慣性力 短絡電流	成熟技術で開発余地小 高効率化	超臨界CO ₂ タービン、ブレイトンサイクル、熱PV



The Institute of Applied Energy



各種蓄エネルギー技術の比較

技術名	技術概要	課題
揚水発電	水の位置エネルギーで貯蔵。	建設に好適地は 限定
圧縮空気貯蔵	地下空洞に圧縮空気＋(大型はLNG利用)	好適地は 限定
水素貯蔵	水の電気分解。車両にも電力にも	低コスト化、大規模 実証試験 。伸びしろ有り
蓄熱発電 (ETES)	蓄熱部は15\$/kWh-th以下という低コスト	発電時ロスが大きい。スケールメリット有り 成熟技術で 夢が無い (!!?)
蓄電池	化学エネルギーで貯蔵。	低コスト化と長寿命化。スケールメリットが効きにくい。伸びしろ 無い(?)
フライホイール	回転エネルギー利用。極めて早い入出力	パワー大、蓄エネルギー量小
スーパーキャパシタ	さらに早い入出力	低エネルギー密度、保持時間短



需要時発電の経済性検討

$$\begin{array}{c}
 \text{需要時発電} \\
 \text{のコスト}
 \end{array}
 =
 \frac{\begin{array}{c} \text{発電コスト} \\ \text{(充電費)} \end{array}}{\begin{array}{c} \text{蓄積効率} \end{array}}
 +
 \frac{\begin{array}{c} \text{設備費} \end{array}}{\begin{array}{c} \text{寿命} \end{array}}$$

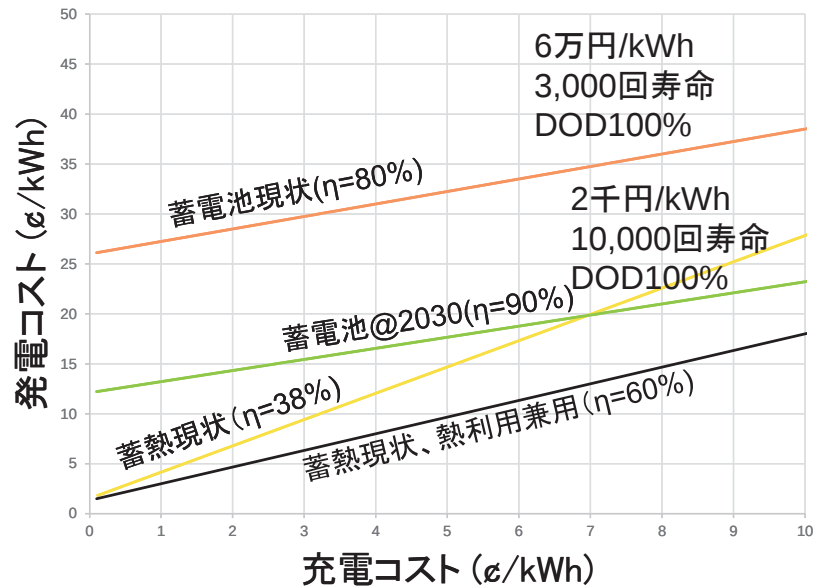
変動費

固定費



発電コストには蓄電費と効率が重要

PV電力夜間利用時の電力コスト



岡崎 他; 電気学会論文誌B Vol.138 No.4



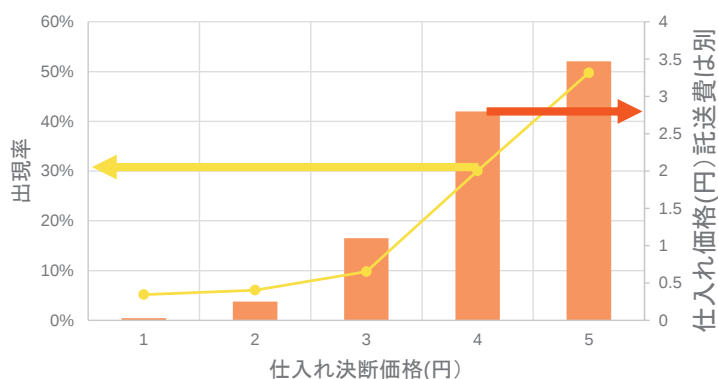
米CNBC: Li-Ionは限界

<https://www.youtube.com/watch?v=EoTVtB-cSps>

電池は10～20倍の改良が必要。
蓄熱など、他の蓄エネルギー技術が必要。



JEPX@2020九州からの経済性検討

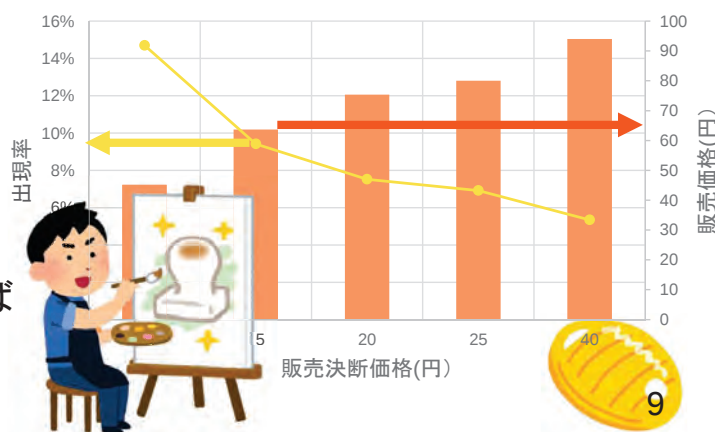


- 市場価が4円以下なら必ず買う、との条件で運用すると平均2.7円/kWhの仕入れ値となる
- 4円以下の出現率は30%
- 今後0円出現率は増加

- 一年を通じ、市場価が15円以上なら売る、とすると平均で62円/kWhで売れた
- 15円以上の出現率は10%

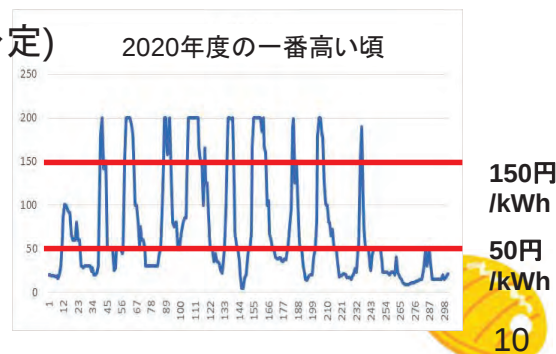
- 蓄熱発電で、時間考慮しなければ
4年で投資回収

IAE The Institute of Applied Energy



電力市場を利用したピークシフト促進

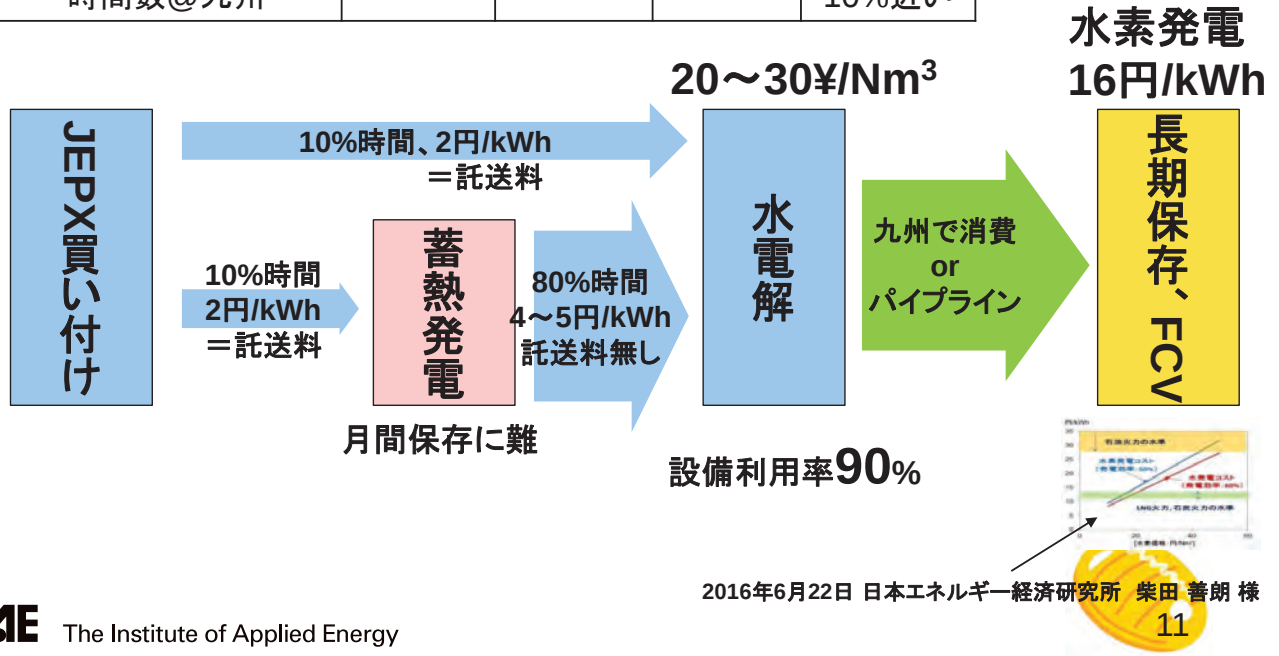
- 高値(売り)と安値(買い)を前日に入札
- 蓄熱発電なら、**買値の3倍**以上で売れば良い(33%効率の場合)
 - ゼロ円時間が増えているので効率は比較的重要で無い
 - 託送料金はどうなるか、が問題
- 蓄電池なら、20円/kWh以上の値差が必要(充放電損料が主)
- ピークシフト促進を電力市場で実現
 - 10年以内**に投資回収の試算例有り
 - 将来的には**設備コスト低下vs乱高下減少**で収束する
- 蓄熱発電、電池と比較評価しています
- 詳細、お問い合わせください(有償配布予定)



IAE The Institute of Applied Energy

国内水素製造・JEPX利用@九州

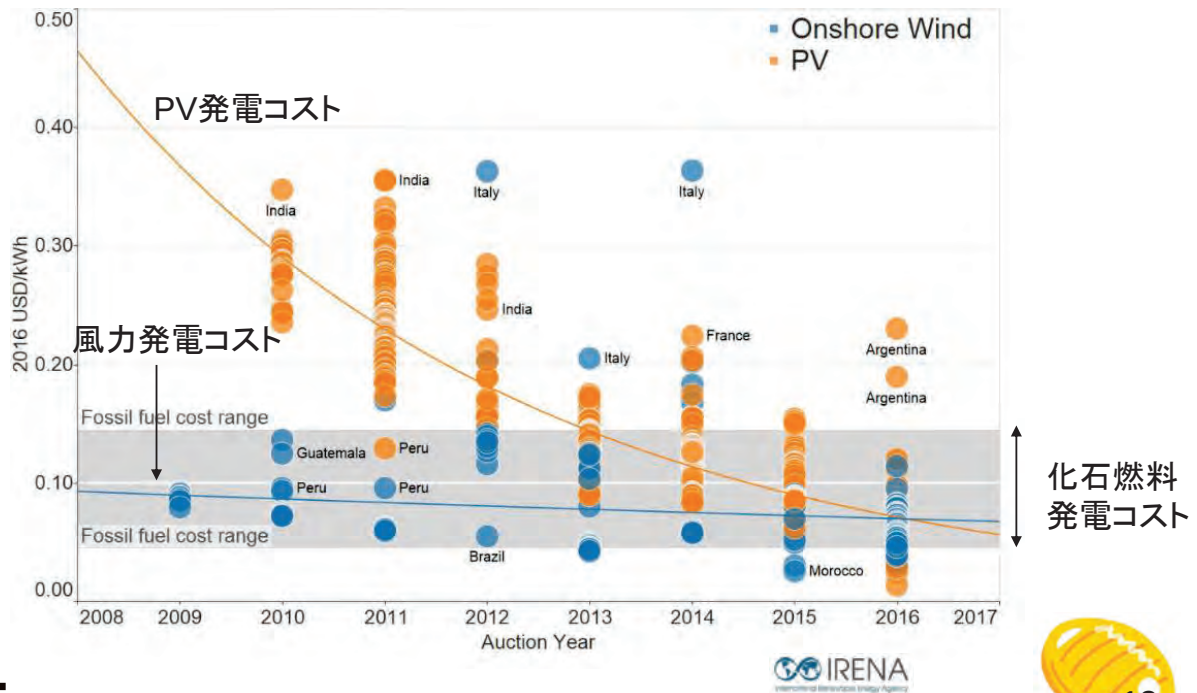
年	2018	2019	2020	2021上期
1円/kWh未満の30分 時間数@九州	64	720	908	(738) 10%近い



- 蓄熱発電の概要と、その経済性
- 蓄エネルギーの必要性
 - 世界の発電コストは急激に低下
 - ところが再エネ=LNG火力だった。これの打破には蓄エネルギーが必須
 - 蓄エネで急激にコストダウンできるもの、出来ないもの
- 世界の蓄熱発電開発状況
- 蓄熱技術の詳細
- 電熱変換技術の重要性

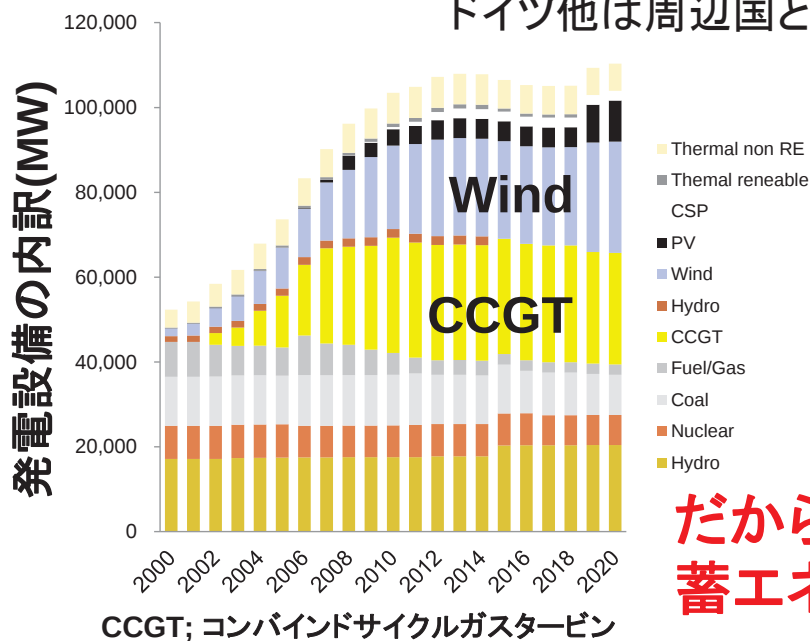
急速に低下した再エネコスト

随時性実現コストを**無視**している事に注意



再エネ ≒ LNG火力が現実

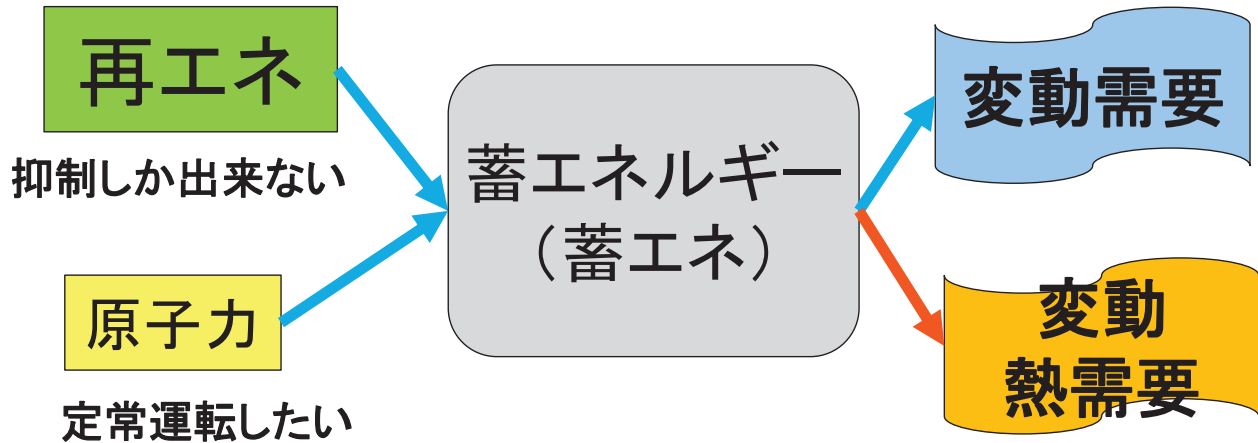
電力的に孤島のスペインの実態
ドイツ他は周辺国との融通に頼っている



だから、脱炭素には
蓄エネルギーが必須



脱炭素化に蓄エネルギー必須



IRENA、蓄熱発電レポート

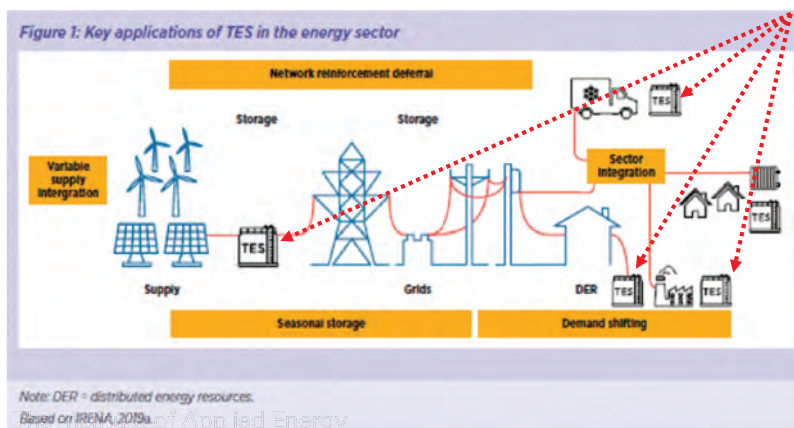
- 蓄熱発電が重要、蓄電池とは用途が違う
- 熱／熱の効率を主に記載

問題

- 日本の**関係者・存在感、ゼロ**
－ 執筆陣、オブザーバ等だれも居ない



様々な容量・タイプの蓄熱があちこちに配置される



電池はPVの様にコストダウンするか

2次元製品: PV、TV、半導体



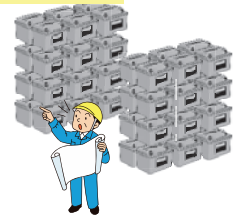
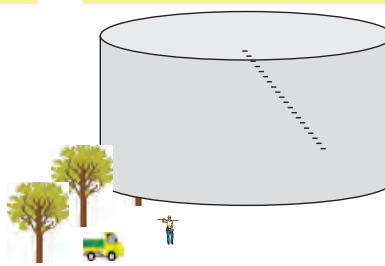
$\text{kW} = \text{電圧} \times \text{電流}$

エネルギーを通過・変換

薄膜製品なので**材料コスト不要**

製品コスト＝設備減価償却
製造速度増で低コスト

3次元製品: 蓄電池、蓄熱



$\text{kWh} = \text{電圧} \times \text{電流} \times \text{時間}$

エネルギーを貯蔵

体積削減は**理論限界あり**

製品コスト＝材料価格



- 蓄熱発電の概要と、その経済性
- 蓄エネルギーの必要性
- 世界の蓄熱発電開発状況
 - 急速に増え始めた南北アメリカ大陸
 - 着実に進む欧州、熱の工業利用も
 - 追いかけはじめた日本
- 蓄熱技術の詳細
- 電熱変換技術の重要性



南北アメリカ大陸の蓄熱発電

	蓄熱材	熱電変換	効率	規模、備考
EPRI / Southern	コンクリート 600°C	蒸気タービン	30~40%	10MWh-e そろそろ 試験開始
NYPA / Brenmiller	碎石 600°C	蒸気タービン	30~40%	?
Duke / MALTA	硝酸塩 & 炭化水素	ブレイトンガス タービン	60%程度?	?
Enlase / HighView (チリ)	液体空気、 碎石	ガスタービン	60%程度?	50MW-500MWh-e
チリの石炭火力廃止 / RWE(独)	—	—	—	2024までに1.7GW、 2040までに5.2GW

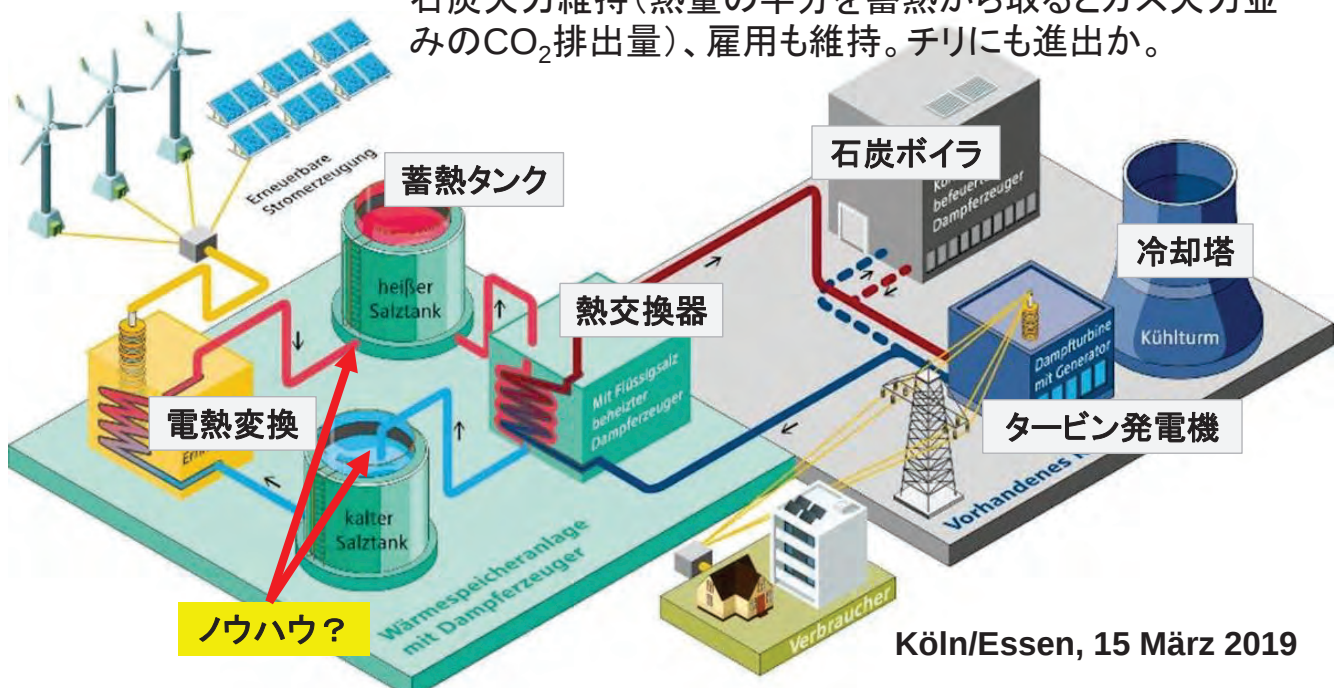


『熱機関技術者は、再エネと反対側の人間。だから誰も思いつかなかった』
by Prof. Robert Laughlin(ノーベル物理学賞)、MALTAの考案者



独RWE社の石炭火力資産活用

石炭火力維持(熱量の半分を蓄熱から取るとガス火力並みのCO₂排出量)、雇用も維持。チリにも進出か。

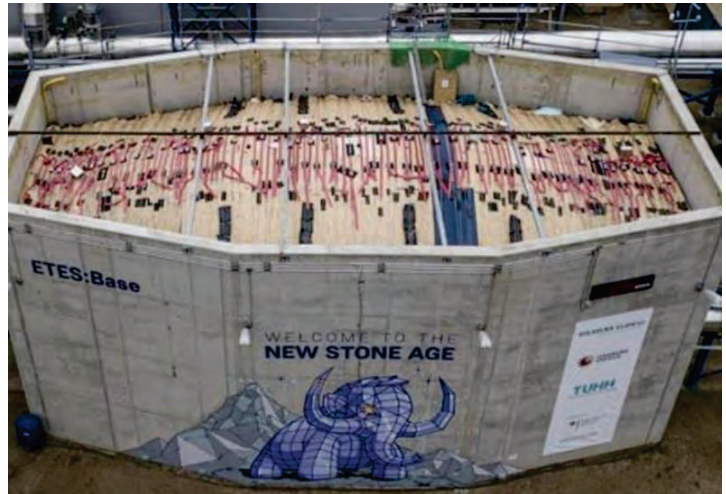


<https://news.rwe.com/wegweisendes-pilotprojekt-im-rheinischen-revier-entsteht-ein-warmespeicherkraftwerk/>



独Siemens-Gamesa

- ・ 碎石と空気での蓄熱、究極の安全性
- ・ 5.4MW(th)入力、120MWh(th)(22h)、1MWe出力
- ・ 600°C超で蓄熱
- ・ 蓄熱時間は1日～数日、ヒートロス1%以下/日

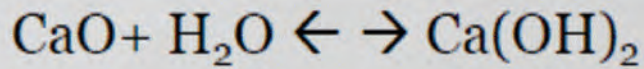


仏ECO-Tech Ceram

- ・ 瓦メーカーのTEGULYS社に納入、省エネ
- ・ https://www.youtube.com/watch?v=Ma2bVMiWd_U
- ・ 熱の発生時間が異なる焼結炉と乾燥炉の連携
- ・ 蓄熱材は、廃棄物を焼結(有償で引き取り)
- ・ 1000°Cまで貯められる、今回は2MWh-600°C
- ・ モバイルソリューション、**熱が運べる事も実証**

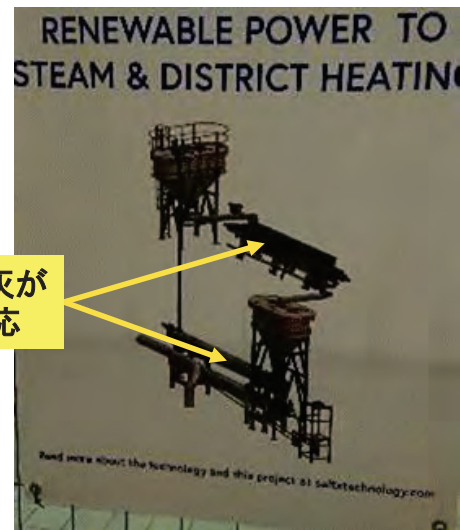


独Vattenfall / SaltXの化学蓄熱



可逆反応を利用
凝縮を防ぐために粒子にナノ
コートを追加(ここに特長)

スクリーンで生(消)石灰が
運ばれつつ、化学反応

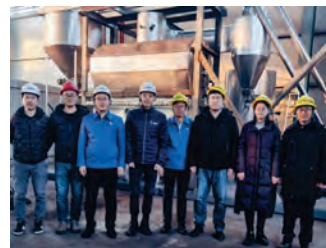


化学蓄熱が最大の特徴

- ・蓄熱密度が高い
- ・長期保存可能

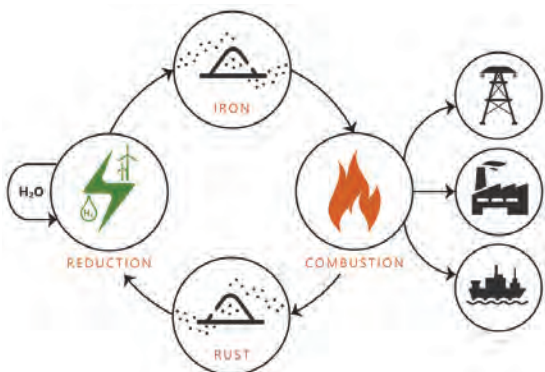
今回は、160～450℃の熱供給
発電はしない(将来は考えている)
流動床にシステム変更、中国で実施

IAE The Institute of Applied Energy



SOLID社:鉄粉蓄熱(化学蓄熱)

- ・鉄粉は、石炭と同じ重量あたりエネルギー密度
 - ・鉄粉を燃焼させ、熱源として電力、熱利用、船舶推進など。
 - ・石炭と異なり、燃えた後の残渣(錆)持ち帰り
 - ・デモとしてビール工場の蒸気源、石炭動力船に導入
- ・還元が課題
 - ・製鉄業で水素還元法が普及すれば、可能性あり?



Royal Swinkels Family Brewersでビール醸造に



石炭動力船の再エネ化

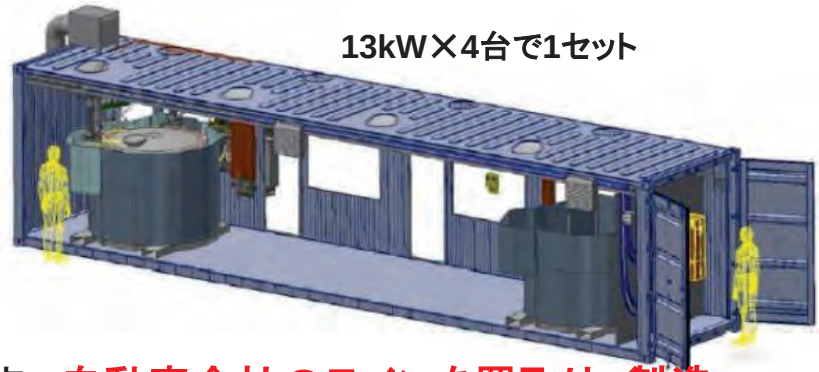


IAE The Institute of Applied Energy



Azerio、スターリング式

- モロッコで試験運転開始済み、アルミ潜熱。効率30%程度
- 米・biodico社（バイオディーゼル製造）へ120MW納入(予定)
 - 計画
 - 2021-13kWe
 - 2022-15MWe
 - 2023-35MWe
 - 2024-70MWe
- ヨルダンにも25MW
- 量産で低コスト化
- ↓素晴らしい製造拠点。自動車会社のラインを買取り、製造
- <https://www.youtube.com/watch?v=LsTYALSu56E&t=8s>
- TEXEL社は水素吸蔵合金利用で同様なシステム

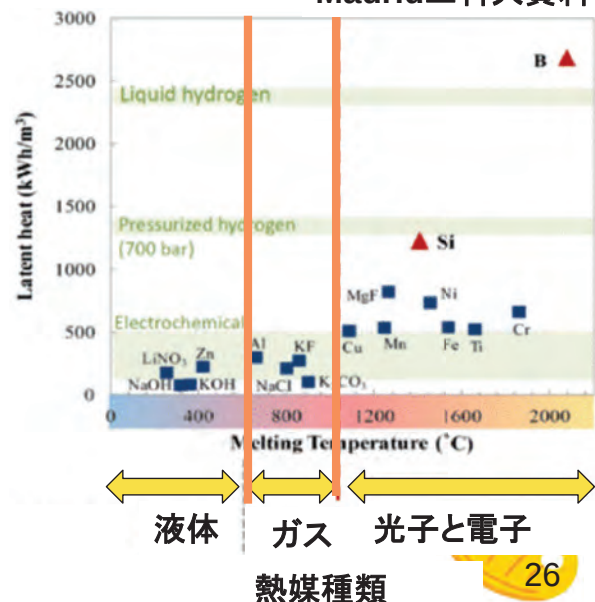


豪1414degrees

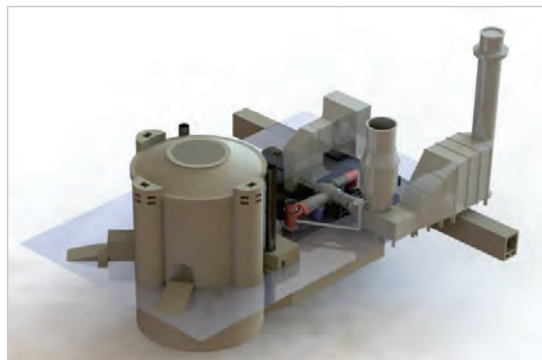
- SiとBは潜熱大きい。Siのコストは2から4 \$ / kg、1400°C近い蓄熱
- ビール会社への納品は、不調?(2019.8から続報無し)



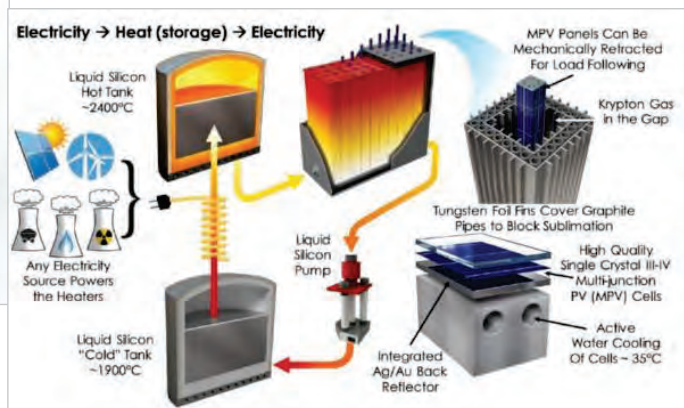
Madrid工科大資料



学術界から一部

MITのFIRES、**1600°C**を煉瓦に蓄熱

MITの2400°C蓄熱、Siまたは鉄採用
熱PVで50%変換効率目標



独・DLR(航空宇宙センター)はカルノーバッテリーWSをIEA Annex 36で主催

英・バーミンガムは蓄熱発電を強化

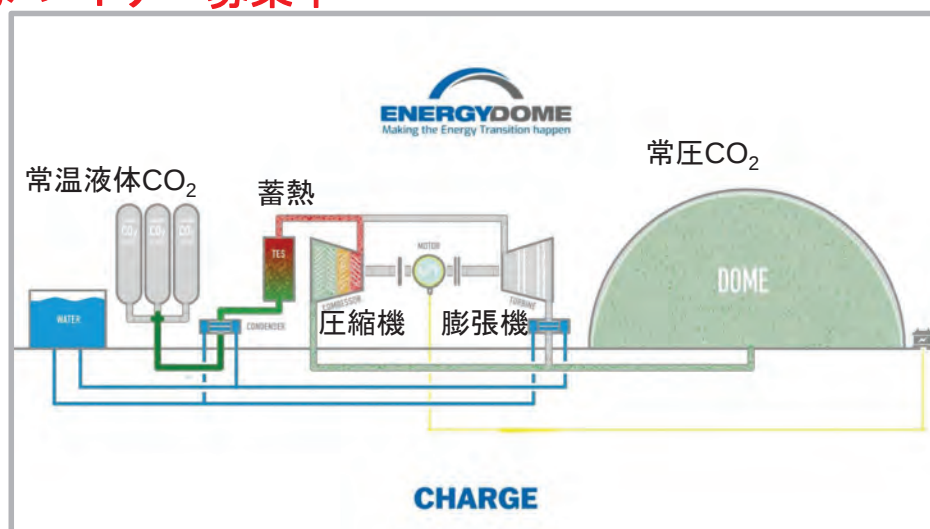
ローレンスバークレイは蓄熱チームを立上げ

<https://appliedenergyscience.lbl.gov/news/article/kaur-leader-new-thermal-energy-group>

期待の伊EnergyDome(LAES)

LAES; Liquid Air Energy Storage

- これもMALTAと同様、発想の転換。60%近い効率の可能性
- 大きな常圧エアバッグが必要
- **開発パートナー募集中**



既存システムの脱炭素化移行可能性に係るアンモニア燃焼時のNOx削減や蓄熱等技術評価・検証事業

【令和3年度要求額 70百万円（新規）】 環境省

アンモニア燃焼時のNOx削減や岩石等への蓄熱システムの効果等を技術的に評価し、既存システムを段階的に脱炭素型のものに移行させることが出来るかを検証します。

1. 事業目的

- ・既存の火力発電等をゼロエミッション火力等に移行させていく可能性を持つアンモニアの燃焼時にCO2排出量を低減しつつ、NOxの排出をどの程度低減させられるかを評価します。
- ・岩石等への蓄熱により、どの程度安価かつ効果的に電力の貯蔵が可能となるかを評価します。
- ・上記のような既存システムを最大限有効活用し、脱炭素型のものに円滑に移行が可能となりうるかを検証します。

2. 事業内容

(1) アンモニア燃焼時のNOx低減技術評価・検証事業

- ・アンモニアを混焼や専焼することにより、既存の火力発電等をゼロエミッション火力発電等に移行させていくためには、CO2の排出削減と同時にNOxの排出低減が必要となることから、その技術的な可能性を評価・検証する。具体的には、アンモニアを燃焼した火力発電等のCO2排出削減割合やNOx排出を低減させる燃焼手法や脱硝技術の適用に関する文献調査等を実施する。

(2) 安価な岩石等への蓄熱による蓄エネ効果技術評価・検証事業

- ・岩石等への蓄熱技術は、設備費の安価さが見込まれるが、その技術的・経済的な課題は明らかではない。そのため、要素技術の縮小試験機やシミュレーションを用いて効果的な設備仕様を検討し、ビジネスケース毎の経済性評価を実施する。

3. 事業スキーム

■事業形態	委託事業
■委託先	民間事業者・団体等
■実施期間	令和3年度

4. 事業イメージ

(1) アンモニア燃焼時のNOx低減技術評価・検証事業

アンモニア燃焼時のNOx低減技術・脱硝技術等に関する調査

(2) 安価な岩石等への蓄熱による蓄エネ効果技術評価・検証事業

設備仕様の検討・ビジネスケース毎の経済性評価を実施

お問い合わせ先： 環境省 地球環境局 地球温暖化対策課 地球温暖化対策事業室 電話：03-5521-8246、水・大気環境局 大気環境課 電話：03-5521-8198

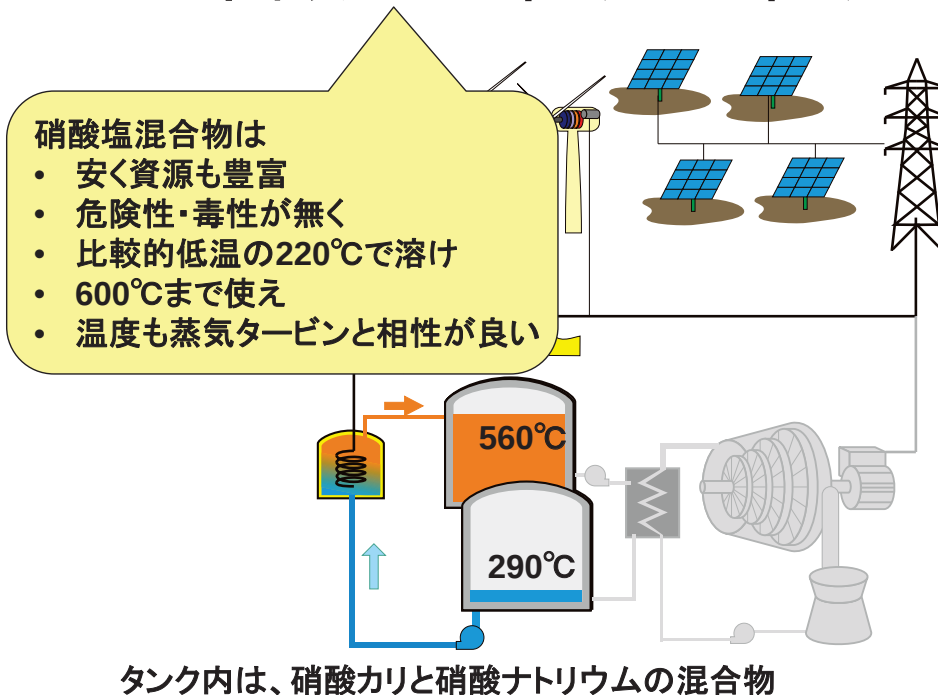
- ・ 蓄熱発電の概要と、その経済性
- ・ 蓄エネルギーの必要性説明
- ・ 世界の蓄熱発電開発状況
- ・ 蓄熱技術の詳細
 - － どんな種類があるか
 - － 具体的プロセス
- ・ 電熱変換技術の重要性

各種蓄熱技術

	原理	影響因子	課題
液体顕熱	物質の温度差	比熱、比重、可能温度差	硝酸塩は商用化 高温化のため塩化物塩、炭酸塩蓄熱材を別途仕込む場合も
固体顕熱	物質の温度差 多くは蓄熱材と熱媒が異なる	比熱、比重、可能温度差	大規模設備がまだ無い 蓄熱材の劣化・粉化 熱媒の圧損(動力)
潜熱	相変化時の熱量	融点、融解熱	相変化前後の物性値変化(熱伝導度、体積等)
化学	可逆化学反応	反応熱	繰返し性、抜熱



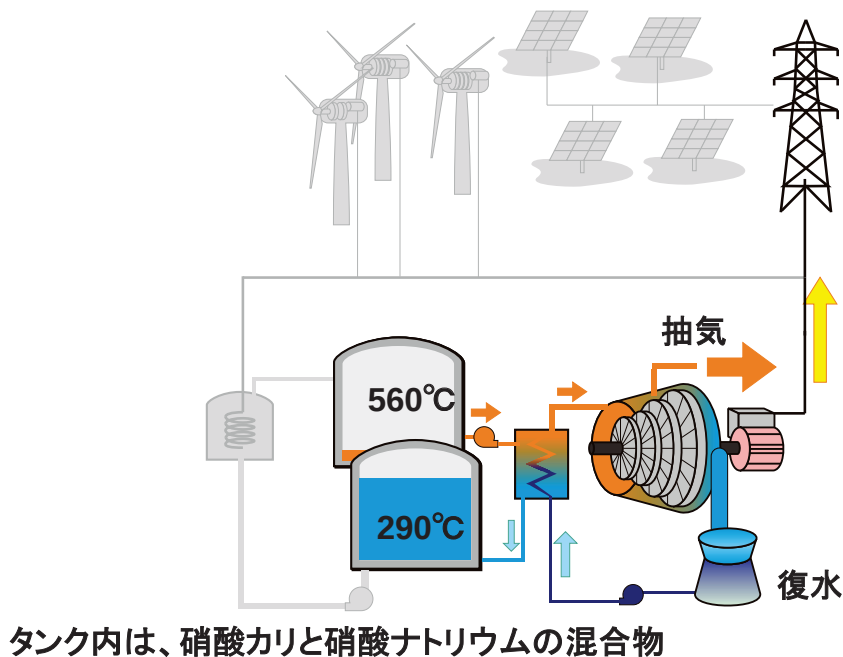
硝酸塩式蓄熱の蓄熱動作



蓄熱と発電が同時に可能

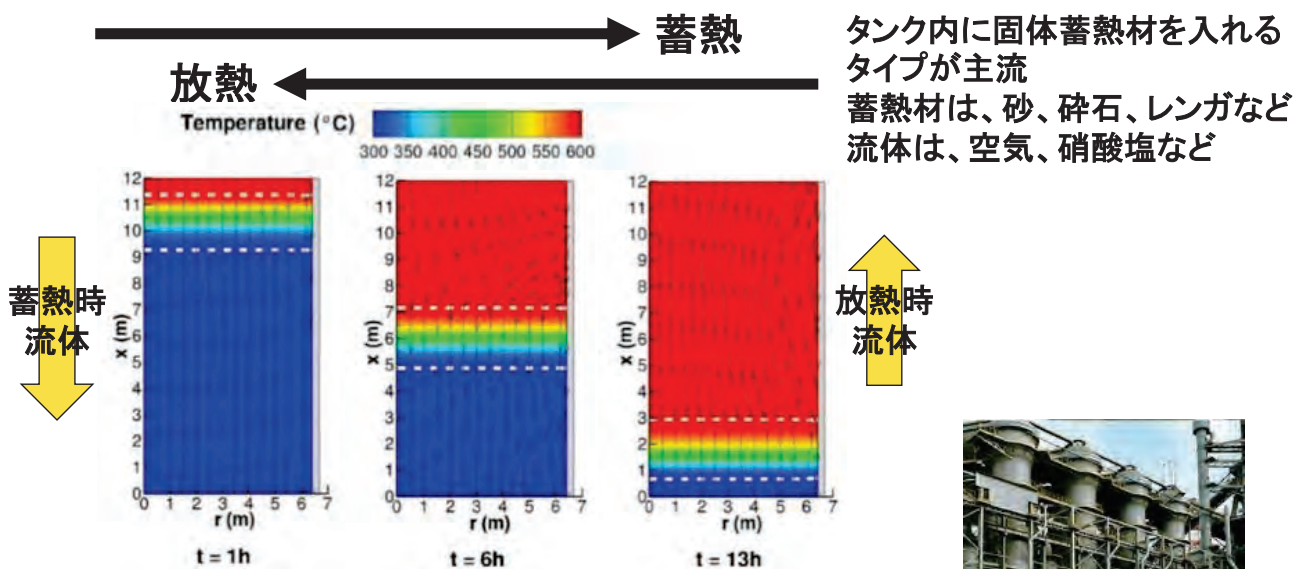


硝酸塩式蓄熱の発電動作



蓄熱と発電が同時に可能

1タンク式 固体顕熱蓄熱



熱風炉(新日鉄住金エンジニアリング殿HPより)

顕熱蓄熱の設置面積

蓄熱(TES)は意外とコンパクト



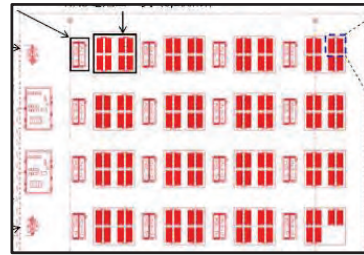
40m直径タンク

蓄熱: Crescent Dune(米)

1.1GWh、 $\Delta T=270^{\circ}\text{C}$

赤点線内が蓄熱発電部

敷地100×140m



蓄電、**0.3GWh**

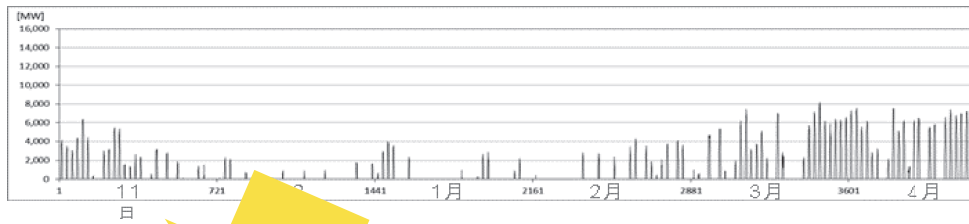


- 蓄熱発電の概要と、その経済性
- 蓄エネルギーの必要性説明
- 世界の蓄熱発電開発状況
- 蓄熱技術の詳細
- 電熱変換技術の重要性
 - 再エネ大量導入時の電力から熱変換の重要性

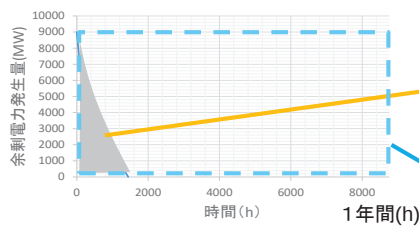


電熱変換低コスト化が重要

半年分の余剰電力発生予想



これを1年分、大きい順番に並べ替えると
(デュレーションカーブと言われる)



余剰電力を全て取り込む設備にすると

取り込むkWh

= 設備利用率

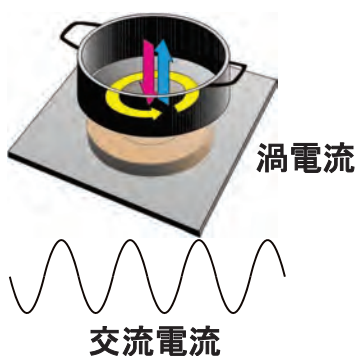
設備として本来
取り込めるkWh



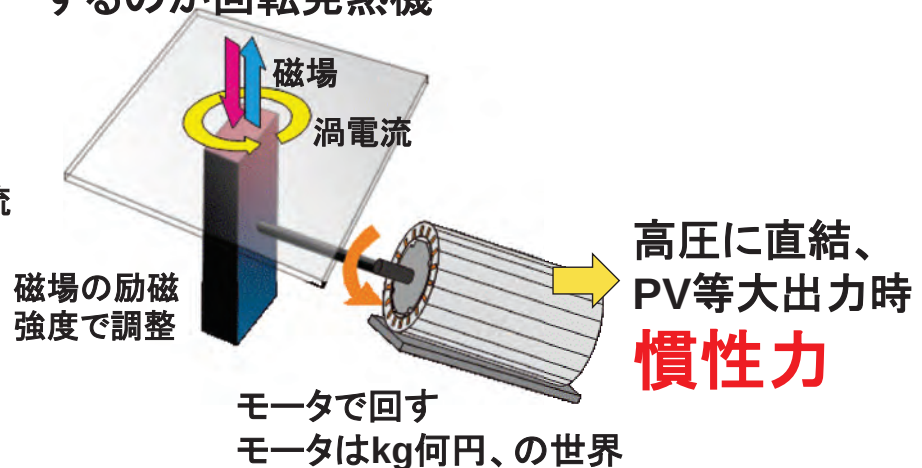
この抵抗ヒータが高く、5万円/kW

電熱変換低コスト化に回転発熱機

IHコンロは交流電流で
磁場を変化させ加熱



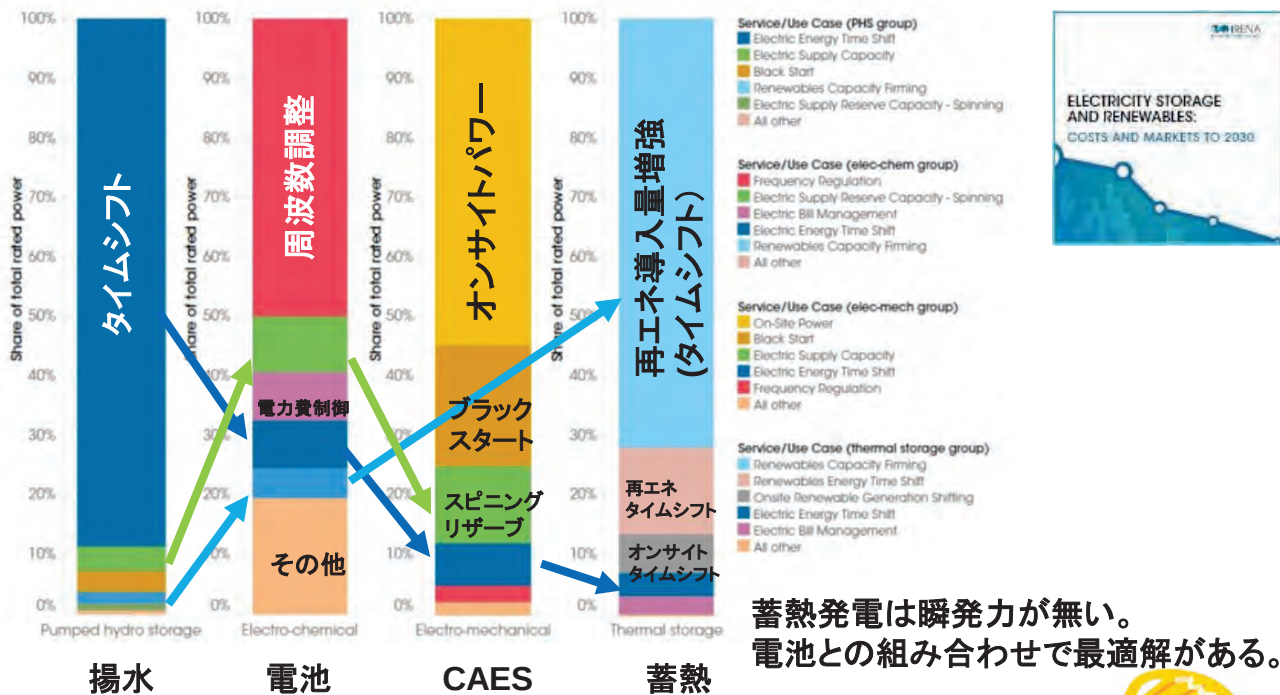
磁石をモータで回して加熱
するのが回転発熱機



1万円/kW 目指せるが、前例ゼロ

エネルギー蓄積技術の棲み分け

Figure ES2: Global energy storage power capacity shares by main-use case and technology group, mid-2017



おわりに

- 再エネ導入拡大に、蓄熱発電が有効との理解が拡大中。原子力にも有効。
- 熱の工業利用にも試行中
- ただし蓄熱発電は他の蓄エネルギーと補完関係。
 - 蓄熱発電は石炭火力的な性格
- 発電設備構成、需要形態、規模、立地、様々な観点から最適な技術を選択することが重要。