

カーボンニュートラル時代に向けた 部門間の熱バリューチェーンの提案

中垣 隆雄



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

CN時代に向けた熱エネルギーの役割

2025年8月7日 第34回日本エネルギー学会大会@東北大学
新エネ・水素分野基調講演 異業種間の炭素／熱バリューチェーンを提案

◆ CN達成目標の困難さの再認識

2050年まで残りたったの25年, "ニューメディア"水素普及に顕著な遅れ
エネルギー⇒需要の電力化&電源の非化石化: **ソリューションは明確**
物質生産⇒Cフローで1/10だがソリューションは多岐, コスト不透明
✓ 技術面: エネルギーと物質生産のプロセスは不可分
✓ 社会経済面: 自給率は度外視? 雇用は? リスキングの時間?
→巨額の設備投資が必要なHtAものづくり産業の意思決定困難

CN到達はあきらめないが, 以下の視点の必要性を再確認

- ✓ AffordableなTransition →コスト, 時間: 到達前に総崩れ
- ✓ Social Inertiaを見越す →意思決定困難で笛吹けど踊らず
- ✓ エネルギー消費の6割は熱需要 →熱とCO₂のデカップリング

具体的には何を? "オールドメディア"によるバリューチェーン

- ✓ 1社1業界だけではもはや無理→部門間・異業種連携
- ✓ **炭素/熱の介在による価値の連鎖**=バリューチェーン

熱エネルギーの特性に基づくバリューチェーン

時空を超えたエネルギー利用のための「電気」「化学」「熱」の相互変換

気まぐれなVREとの付き合い方

- ✓ 出力制御を前提: 超大容量kW(採算度外視の低稼働率VRE) or
- ✓ **貯蔵を前提: VREとストレージのベストミックス**

電気・動力 (エクセルギー)

- 利便性の高い二次エネルギー, 化石→再エネ(VRE)にシフト
- 電力負荷平準化, 安定化のためのストレージ=従来の電力貯蔵
- × **同時同量・大容量LDESが必要**

+ 発電単独ではなく, 民生・産業・
輸送の部門間連携「P2X」にシフト

化学エネルギー

- 長期保存・可搬 ex. 水素キャリア
(アンモニア, 合成炭化水素など)
- × **需要端でエネルギー変換が必要**

化学⇄熱相互変換のValue

- 熱の階層化: **役割分担**
- 熱×化学反応による**多機能化**

熱エネルギー

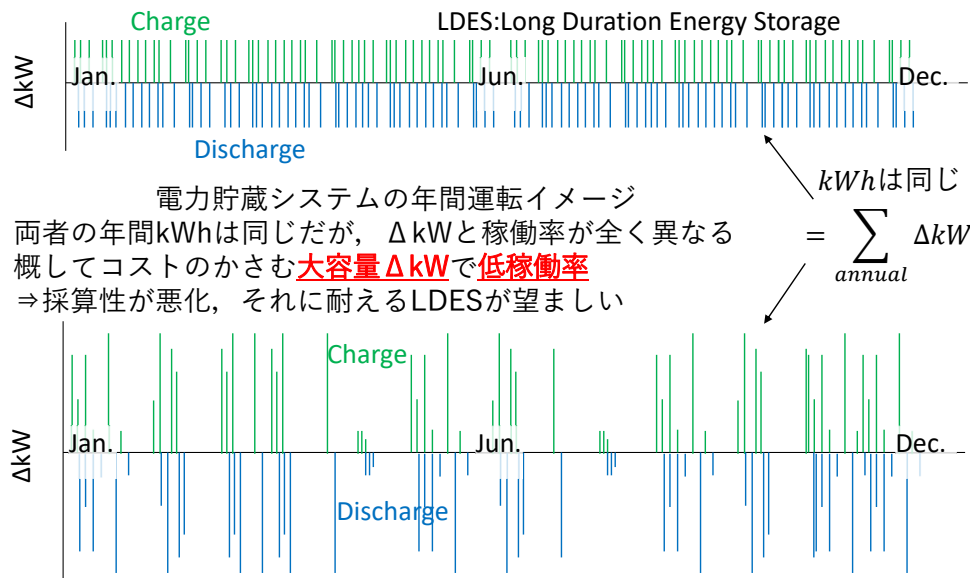
- 民生需要端 <100°C
- 産業需要 ~2000°C
- エネルギー変換で不可避に発生
- ローテク, ローリスク, ローコスト: 大容量・安価が可能
- △ **化学に準ずる時空間シフト**

熱によるバリューチェーン ①

P2H

- 大容量・AffordableなLDES
- 電力系統の同期化力/調整力の提供
- 蓄熱輸送**
- 時空間シフト

低稼働率でも採算が取れるLDESが必要



引用：東京科学大学GXI VISION2050

「社会的慣性を見越したアフォーダブルな移行でカーボンニュートラルを達成」

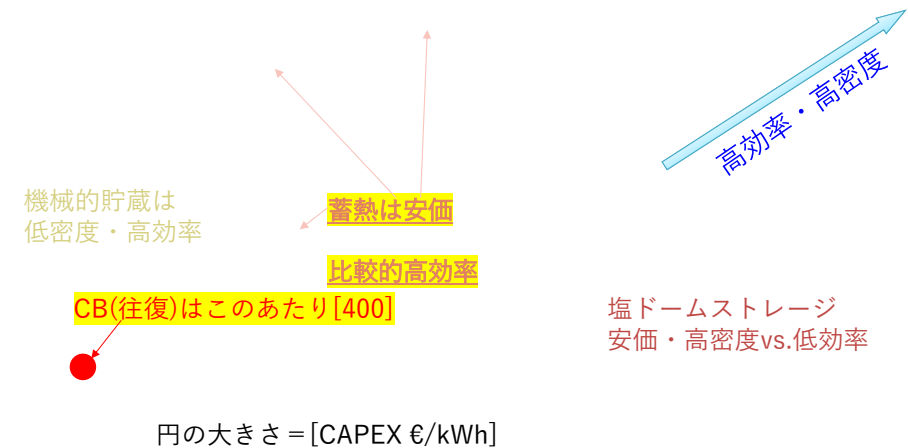
早稲田大学 創造理工学部 ◆ School of Creative Science and Engineering, Waseda University

5

エネルギー貯蔵技術の体積密度と往復効率

キャパシタ
高効率vs.高価・低密度

Handbook of Energy Storage, Springer

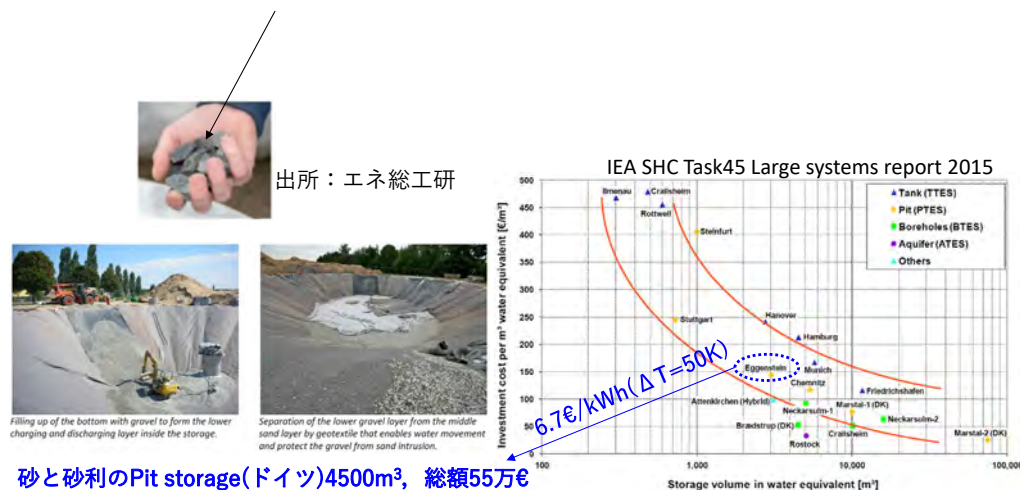


早稲田大学 創造理工学部 ◆ School of Creative Science and Engineering, Waseda University

6

大容量・安価な熱ストレージの例

Power to Heat to Power (P2H2P)
→コンベ火力の慣性力・同期化力提供



早稲田大学 創造理工学部 ◆ School of Creative Science and Engineering, Waseda University

7

100TWh/y余剰電力への量的寄与



出典：NREL

揚水発電 27GW >100%

出典：
Panasonic

日本の
年間電力需要
≒ 1000TWh/y



出典：次世代自動車振興
センター

水素145万トン
NEDO目標の7.2%



出典：IEA

系統用蓄電池 10GWh
3.4%

エコキュート 28%
累積1000万台普及済み

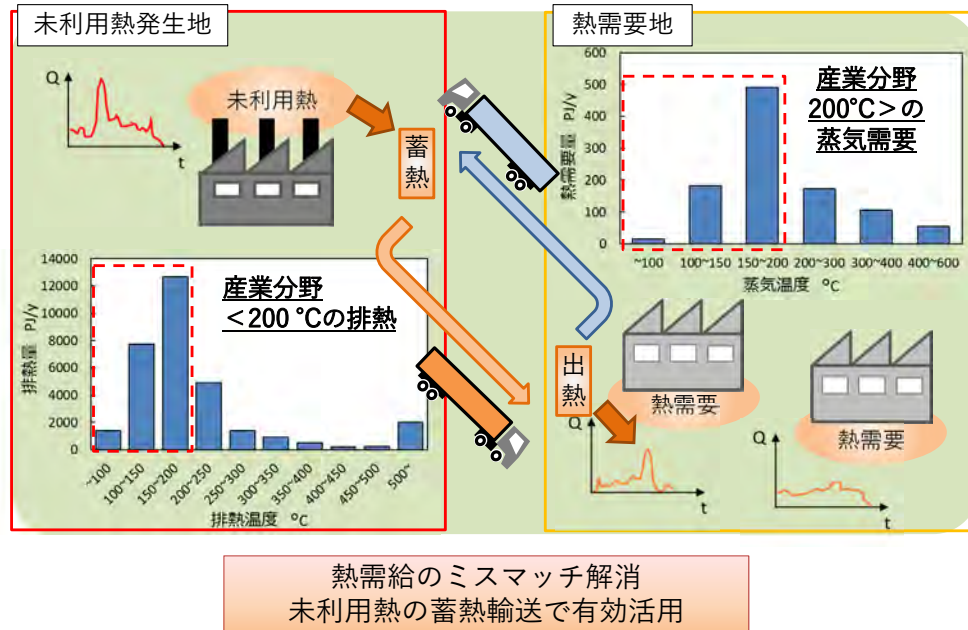
出典：SIEMENS GAMESA

岩石蓄熱発電
東京ドーム20個分 = 100%

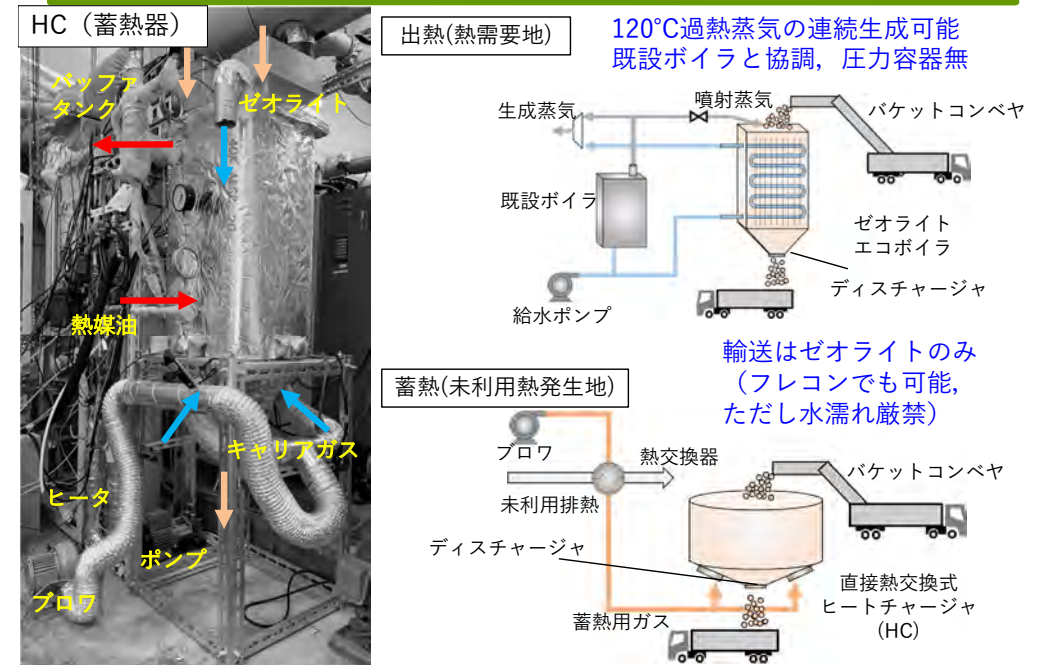
早稲田大学 創造理工学部 ◆ School of Creative Science and Engineering, Waseda University

8

未利用熱は蓄熱輸送でバリューチェーン



蓄熱輸送システムの徹底的な低コスト化



熱によるバリューチェーン ②

階層化と役割分担

- ・ 高効率化, 省エネ
 - ・ 高価なCN燃料消費低減
- ⇒ HtA産業のAffordableなCN移行

Hard-to-abate産業 品質≒温度

板ガラス製造 溶融1600℃

製鉄工程

還元・溶融
羽口は2300℃

DOI:10.1109/EPTC.2017.8277587

http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/chapter_2/2d_2_img.html

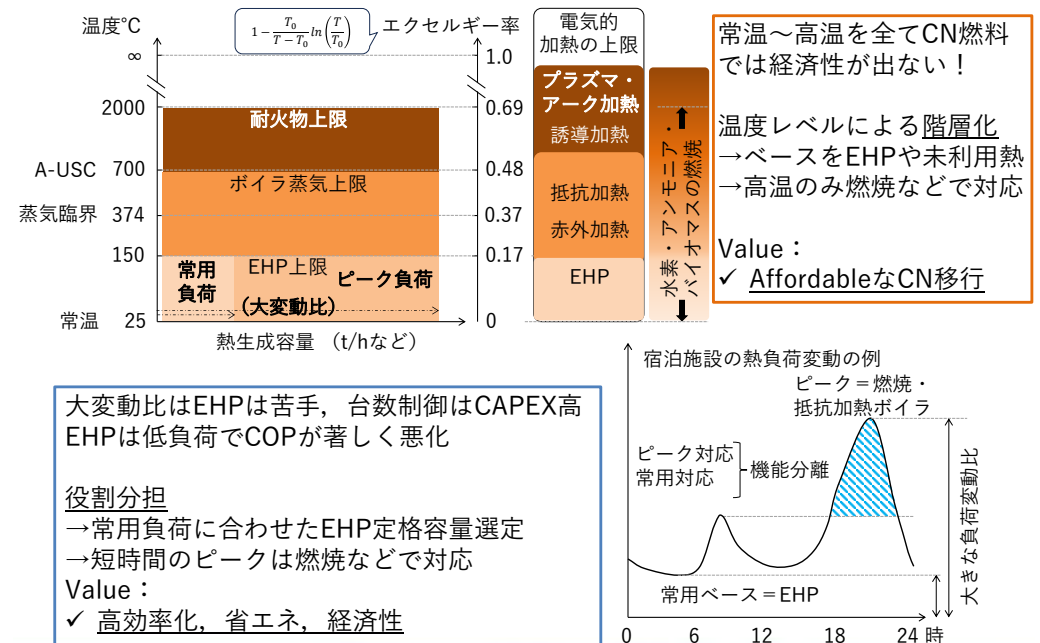
Source セメント(クリンカ)製造
McKinsey & Company (2019)
Laying the foundation for zero-carbon cement

熱分解 1500℃+石灰石からもCO₂

産業熱の電化は温度で役割分担

引用：日本エレクトロヒートセンターホームページ

熱発生機器CNにおける階層化と役割分担

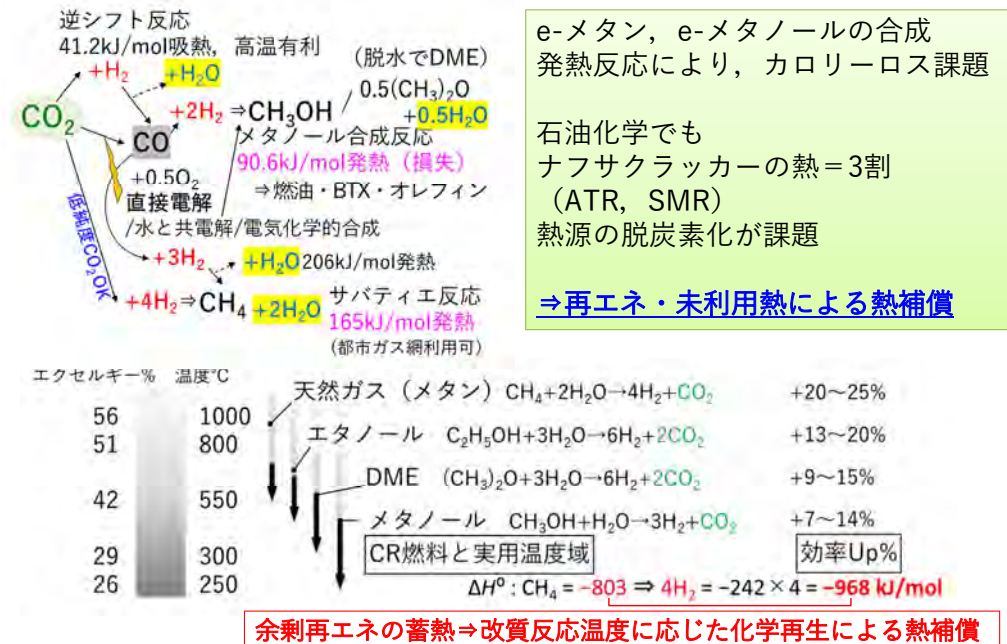


熱によるバリューチェーン ③

熱×化学反応による多機能化

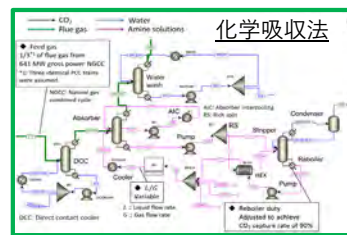
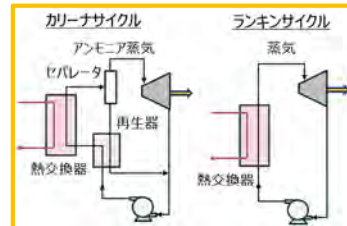
- メタネーション熱補償
- 発生不可避な熱によるCO₂回収 (廃棄物焼却、データセンター)

CO₂⇒e-fuelで損失熱⇒H₂再転換時の熱補償



炭素循環製鉄のメタネーション発熱利用

電炉では高級鋼×⇒高炉転炉法, CO₂×
水素還元: 吸熱反応×⇒炭素循環製鉄
メタンを合成して吹き込み: 発熱損×
発電・CO₂回収でバリューチェーン

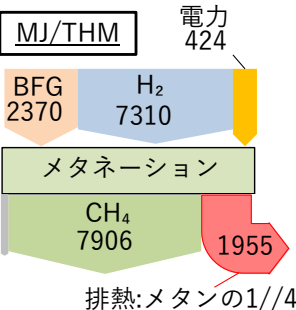


メタネーション反応
CO + 3H₂ → CH₄ + H₂O
ΔH = -206 kJ/mol

メタネーション
高温+低温の2段階反
応器で構成
⇒BTGで電力回収

メタネーション
発熱反応: 低温有利
(300°C程度が一般的)

低温排熱 ~200°C
アミン法のCO₂分離
回収の再生熱利用
(COURSE50, 廃棄物
焼却でも可能)



DXが牽引するGX ワット・ビット連携の必要性

【データセンターの分布図】 大規模DCの8割が東京・大阪圏



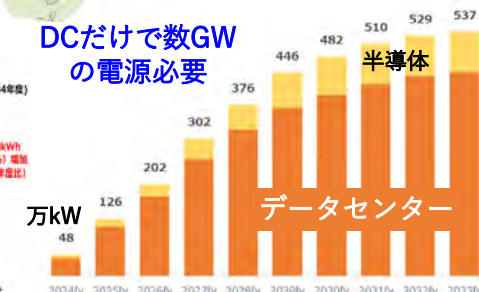
METI, デジタル
インフラ整備に
関する有識者会
合(2024)

洋上風力適地

原子力発電

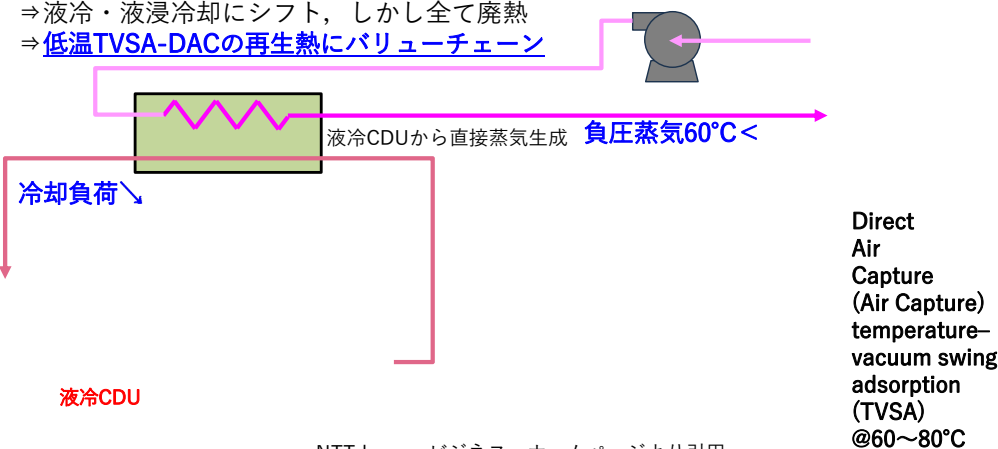
CO₂フリー
電源は大都
市圏と乖離

DCだけで数GW
の電源必要



さらにワット・ビット+ジュールの連携

データセンターの冷却課題 増え続ける消費電力
・20kW/ラックを超えると空冷では間に合わない!
・Power Usage Efficiency(PUE)
=DCルーム全体消費/IT機器消費≈1.5程度
・電力需要の約半分は空調で消費
METIベンチマーク制度 PUE↓ 2030年目標
⇒液冷・液浸冷却にシフト, しかし全て廃熱
⇒低温TVSA-DACの再生熱にバリューチェーン



熱のバリューチェーンのまとめ

- Social Inertiaを見越したAffordableなTransition
- エネルギー消費の6割は熱需要
- 一社・一業種では最早無理, 部門間連携が必要
- ✓ 熱を介在したバリューチェーン
- ◆ P2Hと蓄熱輸送でVRE導入アシスト
 - 大容量・AffordableなLDES=P2Hで電力系統の同期化力/調整力の提供
 - 蓄熱輸送で時空間シフト
- ◆ 階層化と役割分担で高効率化と省エネの価値提供
 - 電力化+最低限のCN燃料利用で役割分担
 - 品質=温度, HtA産業の一足飛びのCN達成の困難さを見越した移行
- ◆ 熱×化学反応による多機能化
 - メタネーション熱補償 発電と化学再生
 - 発生不可避な熱によるCO₂回収 (廃棄物焼却, データセンター)

謝 辞

- 本発表は、JST COI-NEXT「ビヨンド・“ゼロカーボン”を目指すCo-JUNKANプラットフォーム」の成果を含みます。
- 東京科学大学「GXI VISION 2050」、日本動力協会誌「エネルギーと動力」No.300、ボイラ協会誌「ボイラ研究」No.443から引用しています。
- 本年8月7日東北大で開催された第34回日本エネルギー学会大会での基調講演の内容を含みます。
- この他、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」での議論から、本発表に多くの示唆をいただきました。関係者各位に心より感謝申し上げます。

