

# CO<sub>2</sub>冷凍サイクル-ハイドレートサイクルの ハイブリッド化による電力用バッテリーの開発

2025年7月14日

国立大学法人 北海道国立大学機構  
北見工業大学工学部 地球環境工学科  
小原伸哉

# 研究の背景

## CO<sub>2</sub>冷凍サイクル-ハイドレートサイクルのハイブリッド化による 電力用バッテリーの開発



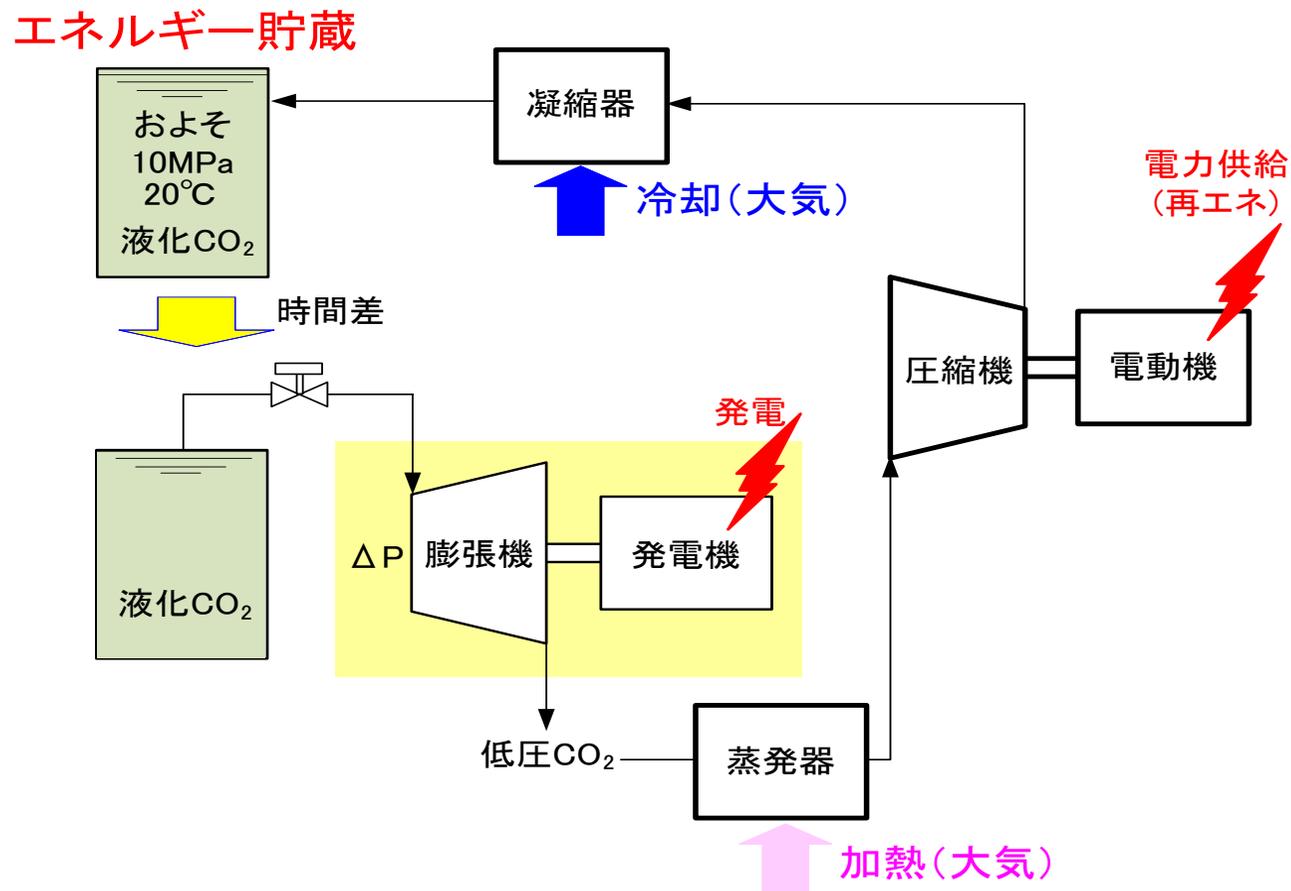
写真：EnergyDome社（イタリア）

太陽光や風力などの変動再エネを大量に導入するには、電力の需給差の変動を抑制するための大容量バッテリーが必要です。しかしながら、電気化学反応を用いた2次電池では、性能を維持できる充放電回数に制限があります。

そこで本研究の目的は、**充放電回数の制限や、自己放電の無い安価な物理電池を開発して、電力系統での変動再エネの導入割合を大きく増加させることを目的**としています。

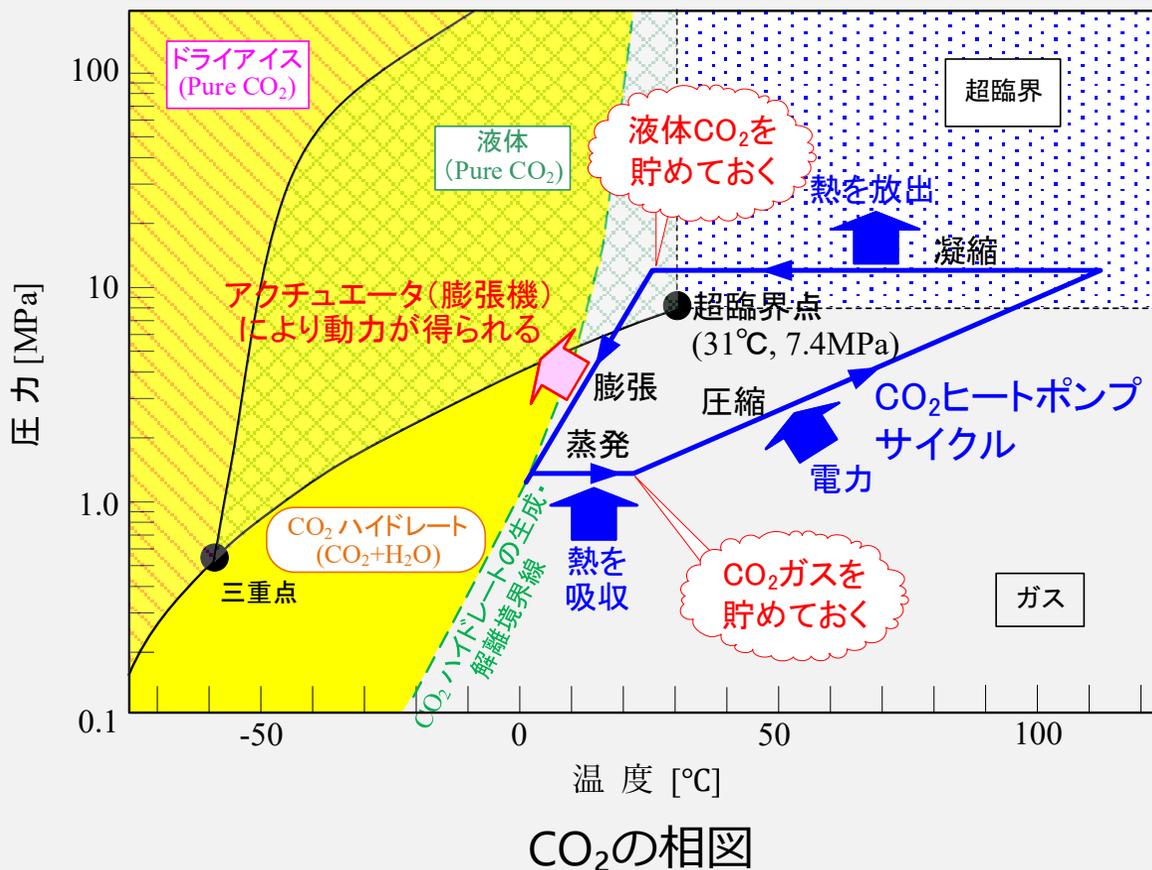
# 蓄エネルギー・物理電池の着想

CO<sub>2</sub>ヒートポンプサイクルによる、高圧液体CO<sub>2</sub>を用いたエネルギー貯蔵



# 蓄エネルギー・物理電池の着想

## ヒートポンプサイクルによる蓄エネルギー

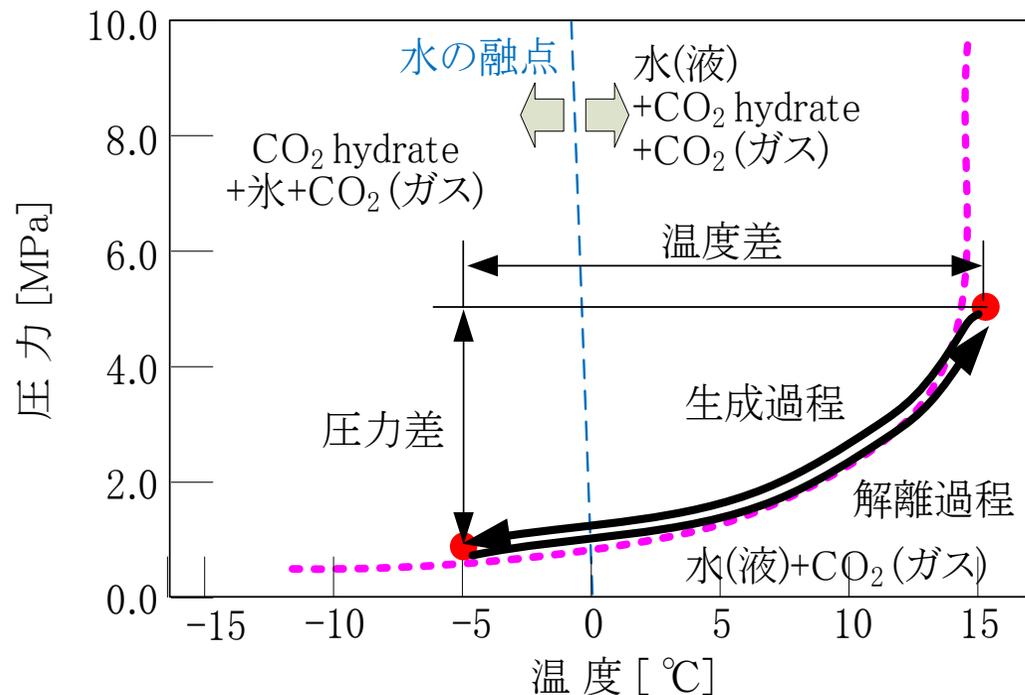


- CO<sub>2</sub>ヒートポンプサイクルでエネルギー貯蔵する場合の特徴：
- 長所
- 蓄電池として利用できる
  - システム構成が容易で装置コストが安い
  - 充放電効率がそこそこ良い
  - 充電回数による性能低下がない

### 短所

- エネルギー密度が低い
- 低温条件では性能低下

# CO<sub>2</sub>ハイドレートの状態図（温度－圧力線図）



左図は、CO<sub>2</sub>ハイドレートの状態図（温度と圧力の関係）です。

-5°Cの低温熱源と15°Cの高温側熱源により、4.5MPa-1.5MPa≒3MPaの圧力差が得られます。

CO<sub>2</sub>ガスで大きな圧力差が得られますので、これを**アクチュエータ（膨張機）**に与えることで、**動力が得られます。**

# ガスハイドレートの種類と温度-圧力特性

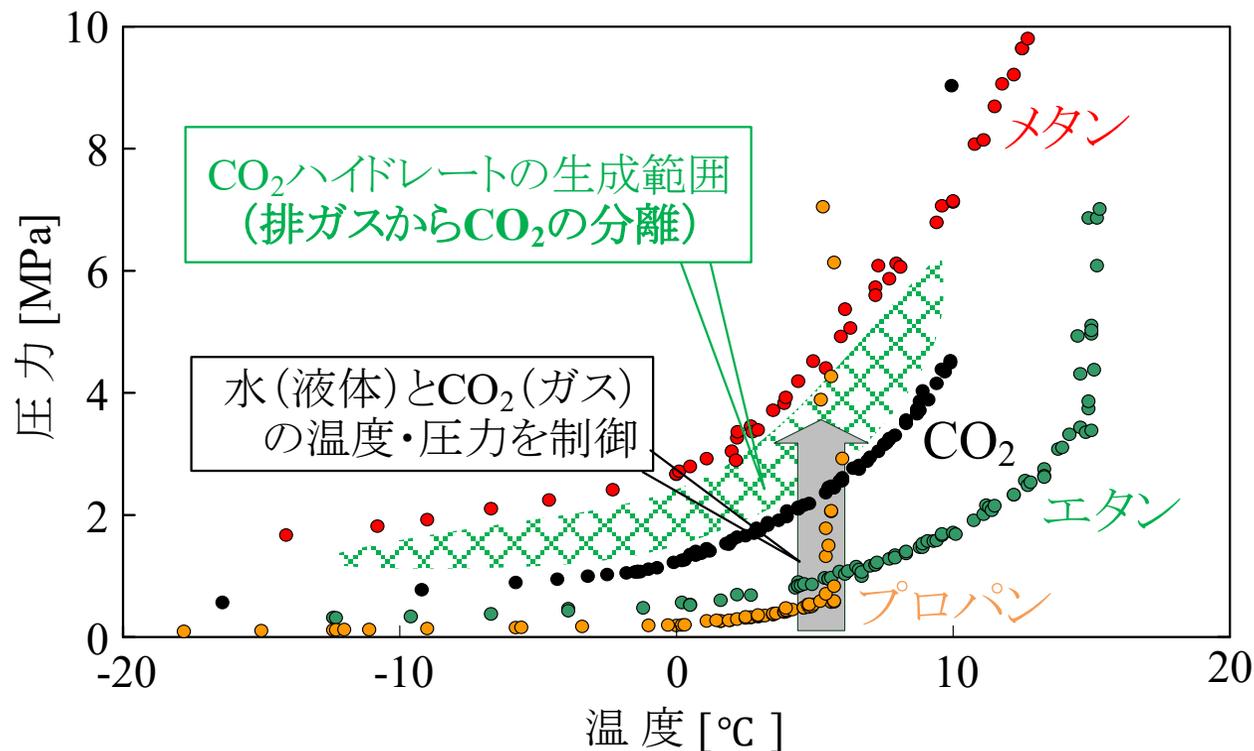
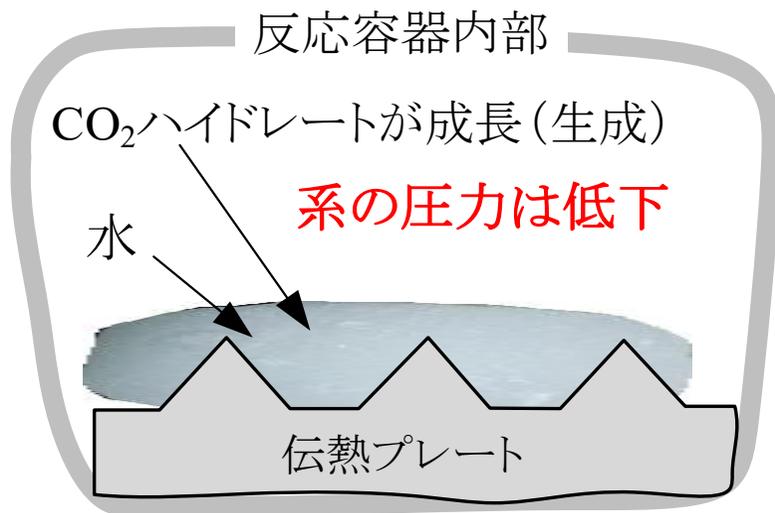


図 各種ガスハイドレートの状態曲線の実験結果

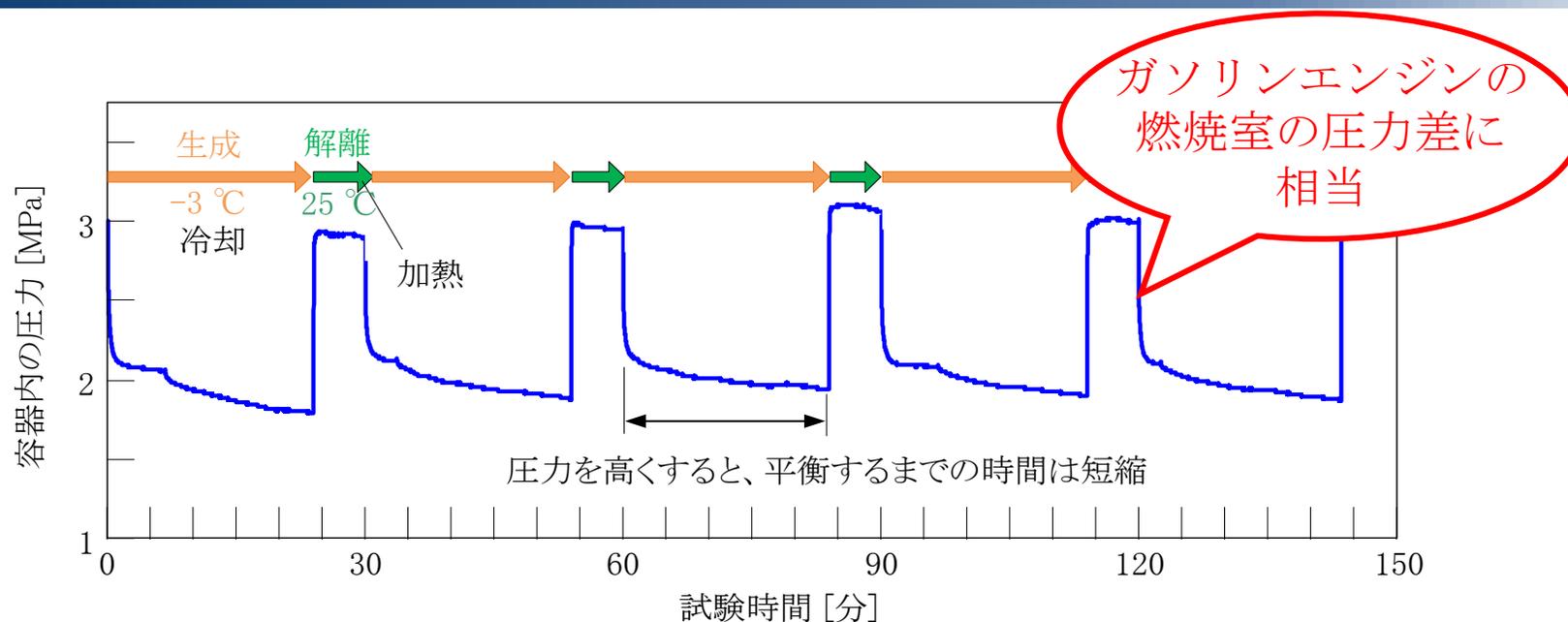
# CO<sub>2</sub>ハイドレート



伝熱速度、拡散速度が重要。  
特に攪拌は生成量に大きく影響する。



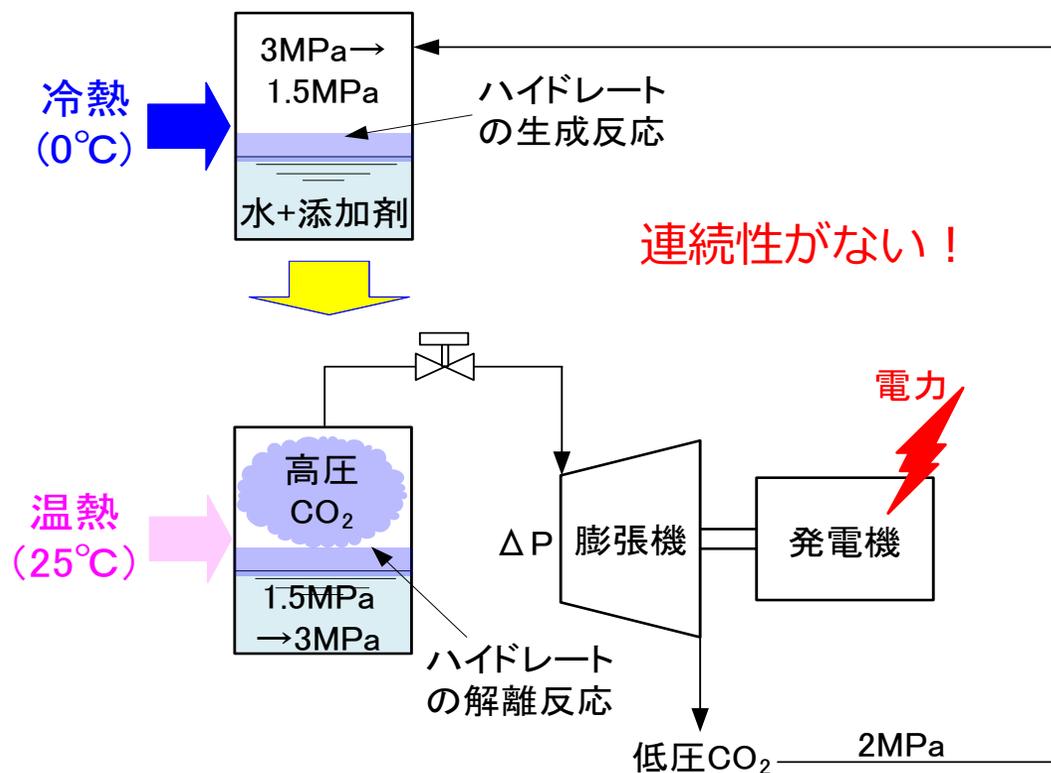
# CO<sub>2</sub>ハイドレート熱サイクルの実験結果例



純水とCO<sub>2</sub>ガスで満たされた高压容器を、**例えば-3°Cの冷却と25°Cの加熱を繰り返すと、図に示す熱サイクルが得られます。**この例では、初期圧力およそ3MPaの容器を冷却することで容器内にはCO<sub>2</sub>ハイドレートが生成し、この際に容器内の圧力は概ね1.5MPaまで低下します。

一方、**容器を25°Cで加熱するとCO<sub>2</sub>ハイドレートの構造が壊れて、取り込まれていたガス(CO<sub>2</sub>)が急激に放出します(解離)。**これにより、容器内の圧力は初期圧力(3MPa)に戻ります ⇒ **実験は差圧を1.5~2MPaで行っています。**

# CO<sub>2</sub>ハイドレートによる蓄電・発電の基本原理



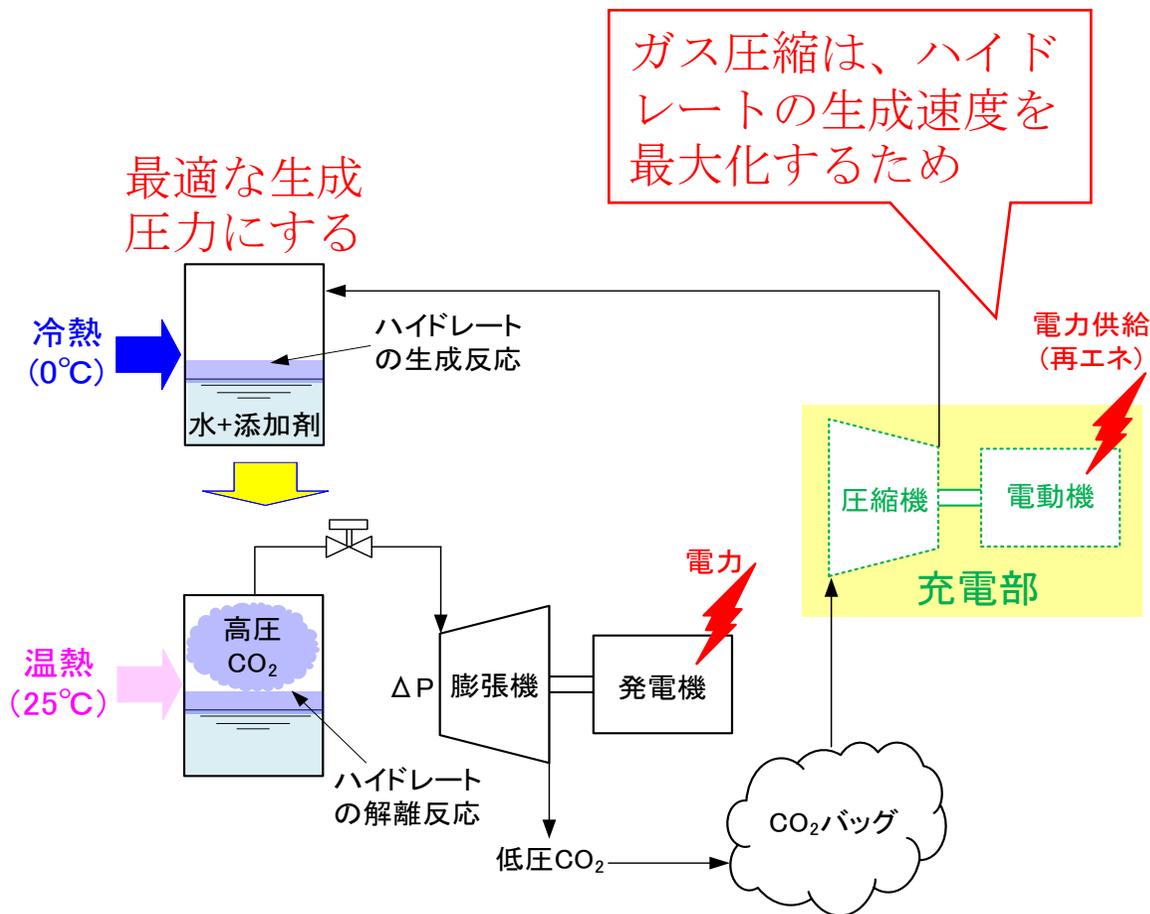
CO<sub>2</sub>ハイドレートでエネルギー貯蔵する場合の特徴：

- 数十°Cの小温度差発電
- 100°C以下の未利用熱から電力が得られる
- 温度条件が合えば未利用熱だけで電力を発生？
- 装置コストが安い

短所

- 2次電池比べて低いエネルギー密度  
⇒装置が大きい

# CO<sub>2</sub>ハイドレート熱サイクルによる蓄電システム



蓄電池として利用する場合

充電部を設けたCO<sub>2</sub>ハイドレート熱サイクルによるエネルギー貯蔵の特徴：

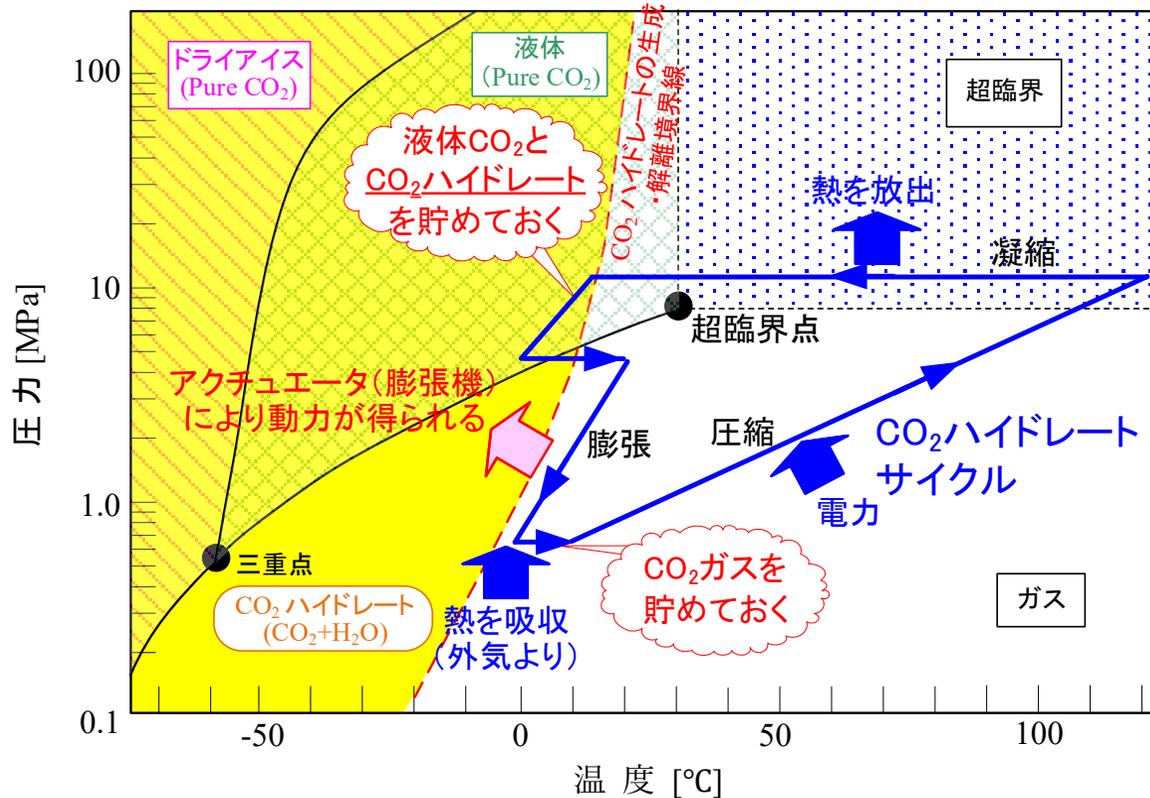
- 充放電効率が良い
- 充電回数による性能低下がない
- 装置コストが安い
- エネルギー密度は増加
- 低温条件ほど性能向上

短所

- 2次電池比べて低いエネルギー密度  
⇒装置が大きい

# エネルギー密度の増加と低温性能の改善

## CO<sub>2</sub>ハイドレートサイクルによる蓄エネルギー (CO<sub>2</sub>ハイドレート+液化CO<sub>2</sub>の気化潜熱を貯蔵)



CO<sub>2</sub>ハイドレートサイクルでエネルギー貯蔵する場合の特徴：改善される点

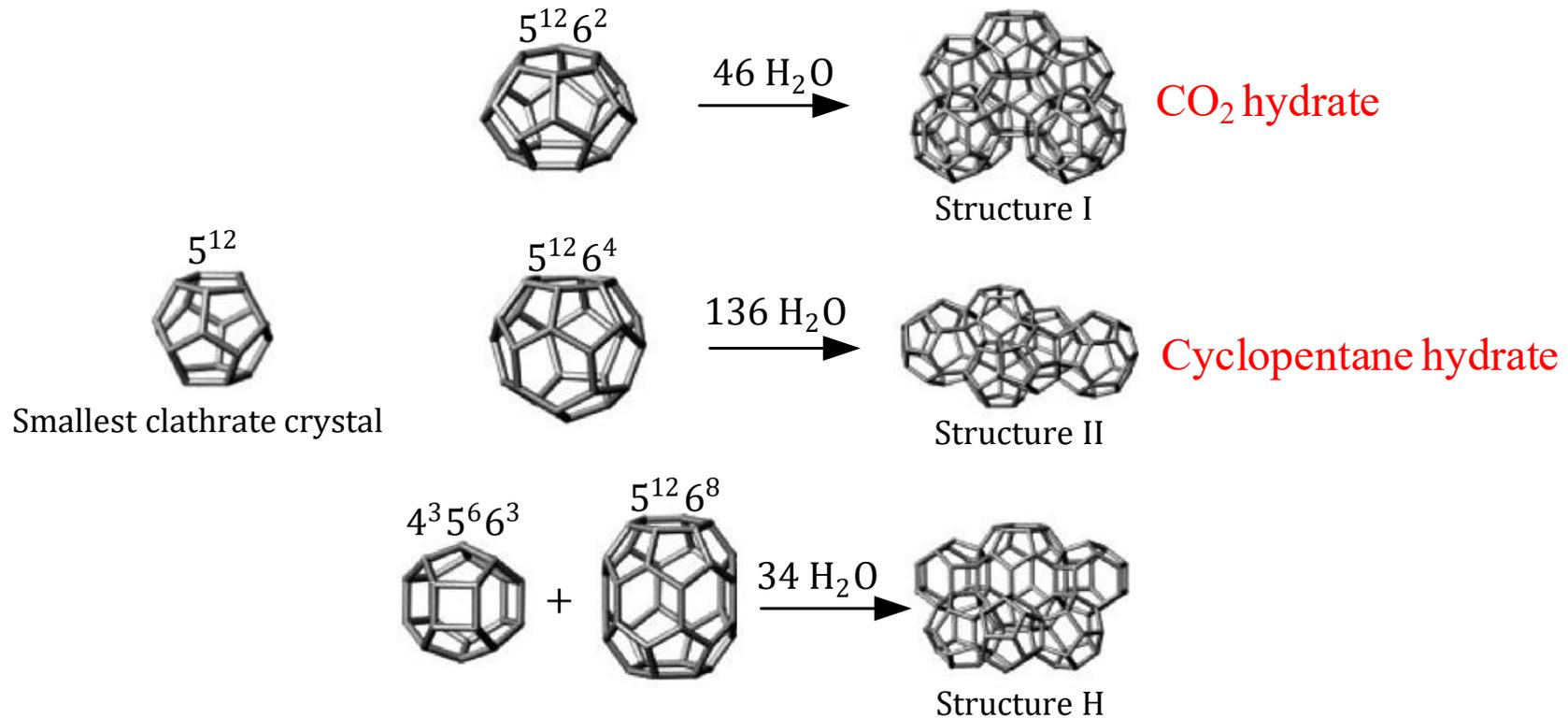
- 蓄電池として利用できる
- システム構成が容易
- 充放電効率がそこそこ良い
- 充電回数による性能低下がない
- 装置コストが安い
- エネルギー密度の増加
- 低温条件での性能向上

短所

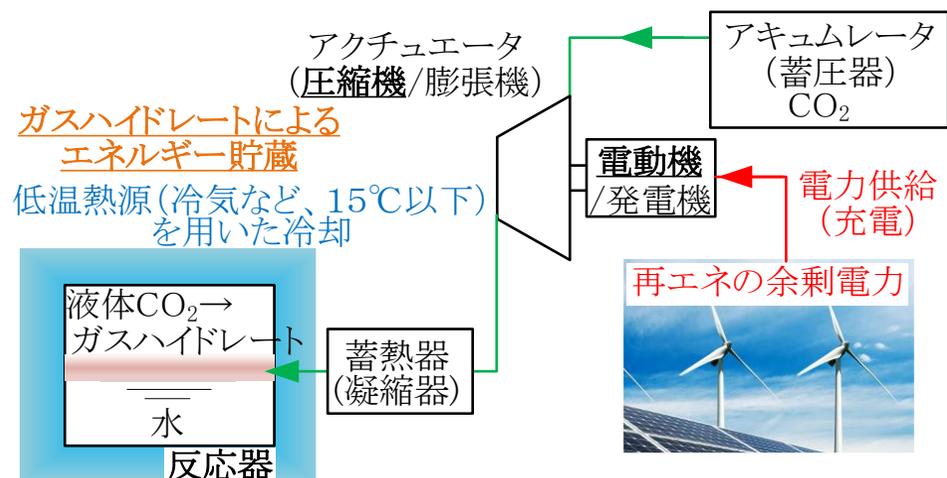
- 2次電池比べて低いエネルギー密度  
⇒装置が大きい

CO<sub>2</sub>の相図およびCO<sub>2</sub>ハイドレートの生成・解離曲線

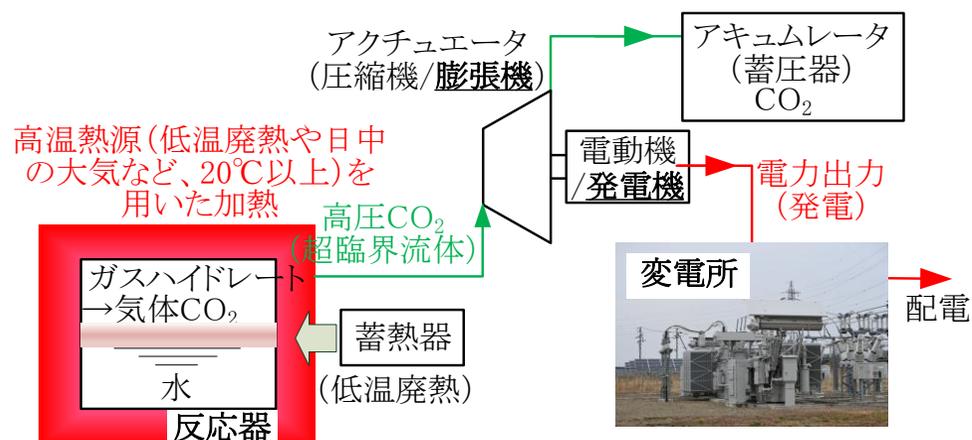
# 添加剤によるホスト構造（水素結合）の変化



# CO<sub>2</sub>ハイドレートによるエネルギー貯蔵と充電運転、 発電（放電）運転



充電運転



発電（放電）運転

図は、本研究で目指す、  
CO<sub>2</sub>ハイドレート熱サイクルによる、  
カーボンニュートラルな蓄放電システムの  
構成例です。

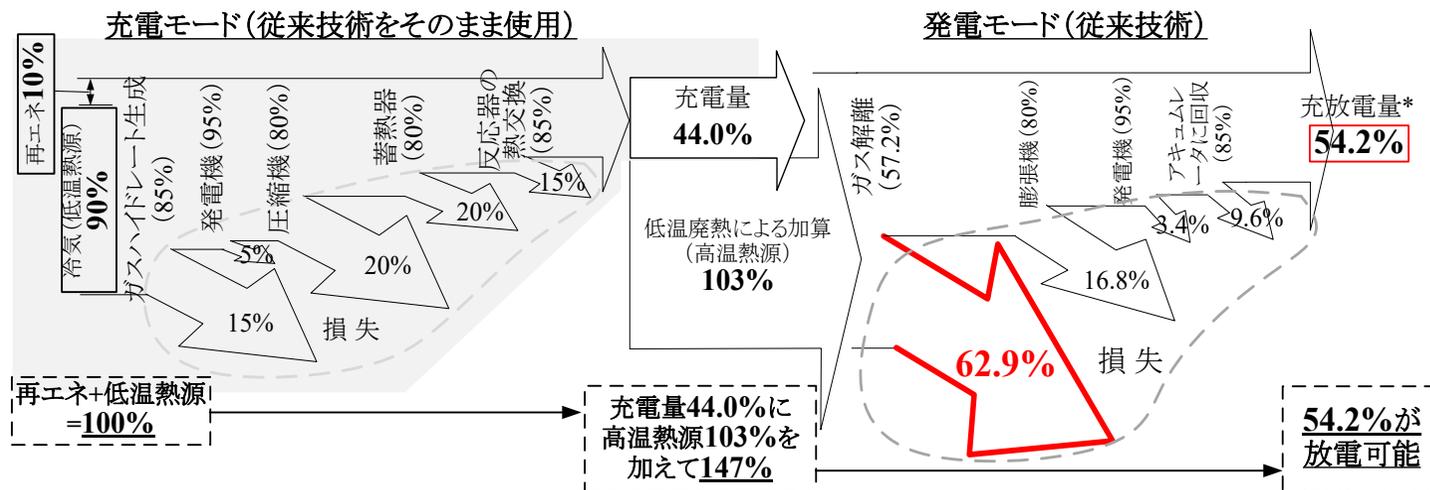
## <充電運転>

再生可能エネルギーの余剰電力と  
低温熱源（外気など、15°C以下）で反応器に  
CO<sub>2</sub>ハイドレートを生成させます。

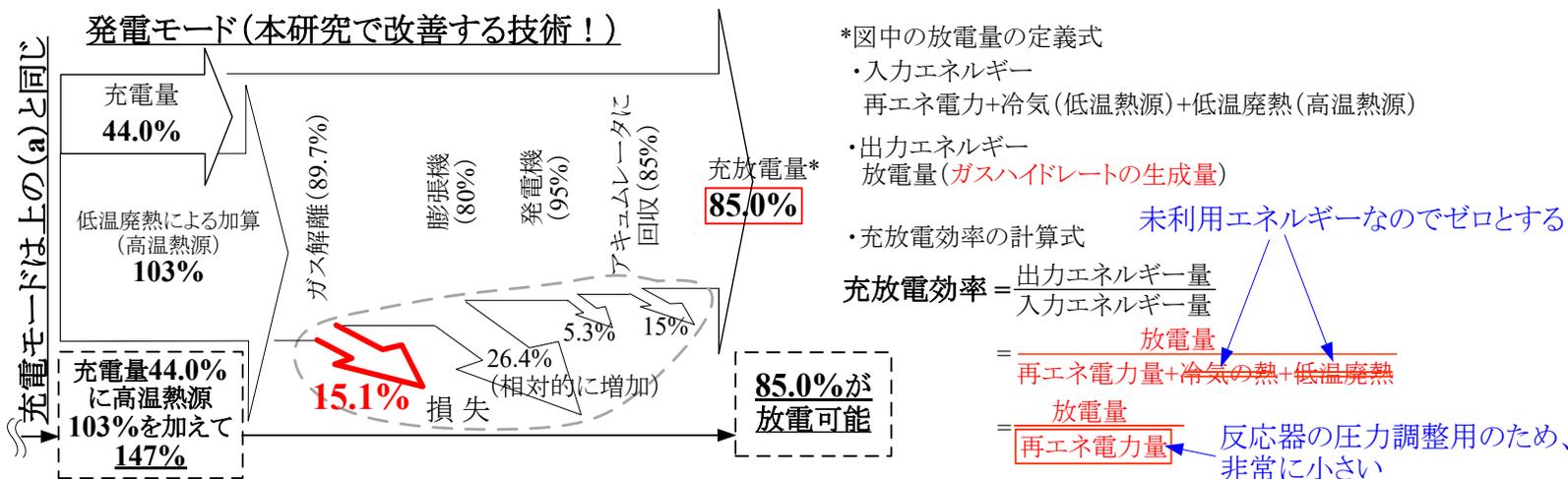
## <発電（放電）運転>

高温熱源（低温廃熱など、25°C以上）を反応器に与えて、CO<sub>2</sub>ハイドレートを解離させることで、高圧ガスを発生させます。  
この高圧ガスをアクチュエータ（膨張機）に与えて同期発電機を運転します。

# CO<sub>2</sub>ハイドレート熱サイクルを用いた蓄放電装置のエネルギーフローと課題



(a) 現在の蓄電装置のエネルギーフロー



(b) 本研究開発で改善する発電モードのエネルギーフロー

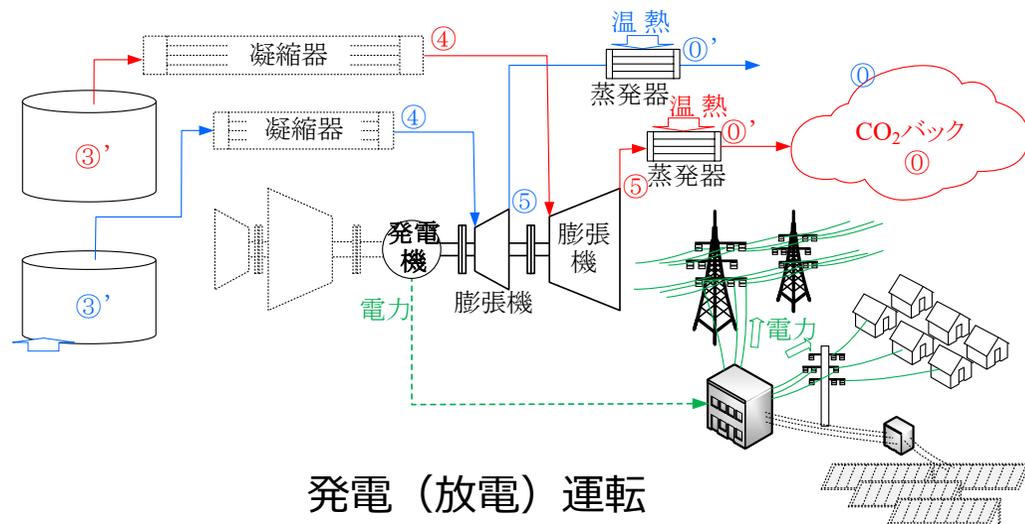
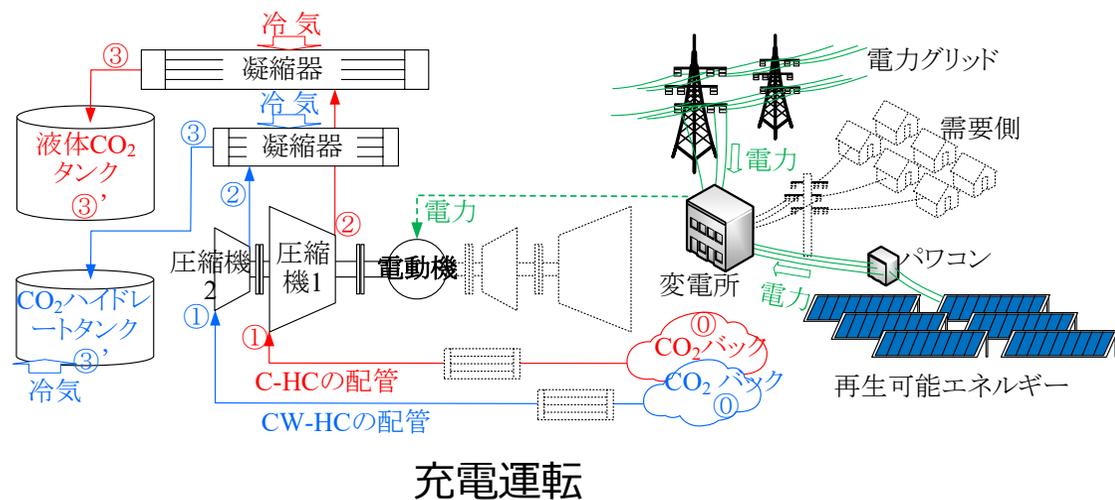
# 助成研究の概要

研究課題名

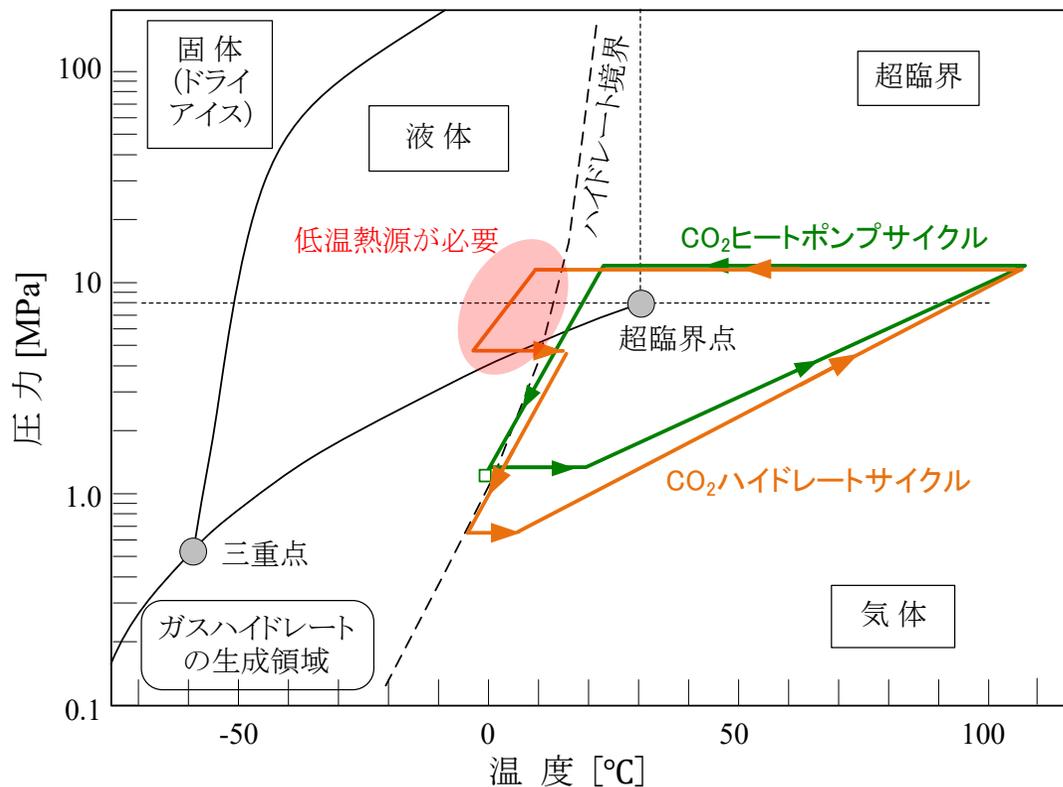
CO<sub>2</sub>冷凍サイクル-ハイドレートサイクルのハイブリッド化による電力用バッテリーの開発

## 1. 研究開発概要

- 国内で概ね200℃以下の低温廃熱は、1次エネルギー消費のおよそ7割を占めており、**低温廃熱の回収はCO<sub>2</sub>排出抑制に大きな効果がある**
- 充放電回数や低温環境で性能劣化がなく、しかも希少金属をほとんど使わず、安価なCO<sub>2</sub>ハイドレートサイクルによる電力変換技術が独創的である
- 理論上では提案技術を導入することで、貯留されたCO<sub>2</sub>に応じた火力発電の発電量を上回る電力を、低温廃熱や外気から得られる
- CO<sub>2</sub>ハイドレートサイクルから、**充放電効率54.2%の蓄電を行えるが、これを85%に改善する**
- 本助成の終了時には、競合技術 (NAS電池、充放電効率85%、エネルギー体積密度160kWh/m<sup>3</sup>) と同程度の充放電効率で、エネルギー体積密度130kWh/m<sup>3</sup>程度のCO<sub>2</sub>ハイドレート蓄放電システムを開発する



# CO<sub>2</sub>ヒートポンプサイクルとCO<sub>2</sub>ハイドレート熱サイクルのハイブリッド化による適用温度の拡大



緑線はCO<sub>2</sub>ヒートポンプサイクルで、オレンジ線はCO<sub>2</sub>ハイドレートサイクルです。

CO<sub>2</sub>サイクルは冬季などの低温条件では効率が低下しますが、CO<sub>2</sub>ハイドレートサイクルは低温条件で増加します。

したがって、外気温（季節）によって2つのサイクルを使い分けることで、1年を通して効率の高い蓄放電システムが達成できます。

# おわりに

## 「低温廃熱を電力に変換」する技術

充電量よりも放電量が多いため、本システムは発電機として扱える。

未利用エネルギーなのでゼロとする 反応器の圧力調整用

・充放電効率の計算式

$$\text{充放電効率} = \frac{\text{出力エネルギー量}}{\text{入力エネルギー量}} = \frac{\text{放電量}}{\text{再エネ電力量} + \text{冷気の熱} + \text{低温廃熱}} = \frac{\text{放電量}}{\text{再エネ電力量}}$$



有機ランキンサイクルの例（篠田株）

	適用 kW	熱源(高温側)°C	カルノー効率%	機械効率%	発電効率%
<b>ORC (有機ランキン)</b>					
レシプロ	10~100	80~300	75~93	50~80	5~20
ターボ	数100			60~85	
スクリー	10~数100			30~60	
スクロール	1~10	80~120	75~83	40~70	7~12
<b>熱電素子</b>					
ビスマステルル系	通常用	100~150	80~87		4~6
鉛テルル系など	高温用	200~600	90~97		7~8
<b>本システム</b>	試作要素の組み合わせ	35~100	43~80	40~70	充放電効率 48※1 540※2

※1 高温熱源を加味した場合、※2 高温熱源を加味しない場合

現在、社会実装に向けて以下の課題に取り組んでいます

- ・ 低温熱源の温度条件を高温化させる取り組み
- ・ 解離の改善による充放電効率の増加
- ・ 小型システムの試作
- ・ 経済性能
- ・ その他

ご清聴ありがとうございました。  
また、研究助成に感謝を申し上げます。