

「15°C以下の低温熱」と「数10度の高温熱」で駆動する CO₂ハイドレート熱サイクルによる蓄電・発電設備

北見工業大学 工学部 機械電気系
教授 小原 伸哉

2024年10月 1日

研究の背景

概ね 200°C 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、この低温廃熱の回収は社会的に大きな課題である。そこで 100°C を下回る低温廃熱に対応でき、数十 $^{\circ}\text{C}$ の小温度差で駆動できる、CO₂ハイドレート熱サイクルの工業利用を研究している。

研究開発の概要

- CO₂ハイドレート (CHR) 熱サイクルでは、
- ・ 0°C 程度の低温熱源でCHRが生成
(添加剤を使うと 15°C まで対応)
 - ・ 20°C 程度の高温熱源で高圧解離ガスが発生
 - ・ 熱源の入れ替えで繰り返し仕事を得る

したがって、寒冷地などの冬期の外気と、日中の太陽熱あるいは低温廃熱などで電力を発生させることができる。

また、CHRを貯蔵して、任意の時間にこれを温めて高圧解離ガスを発生させることで、バッテリーと同様な扱いが可能。

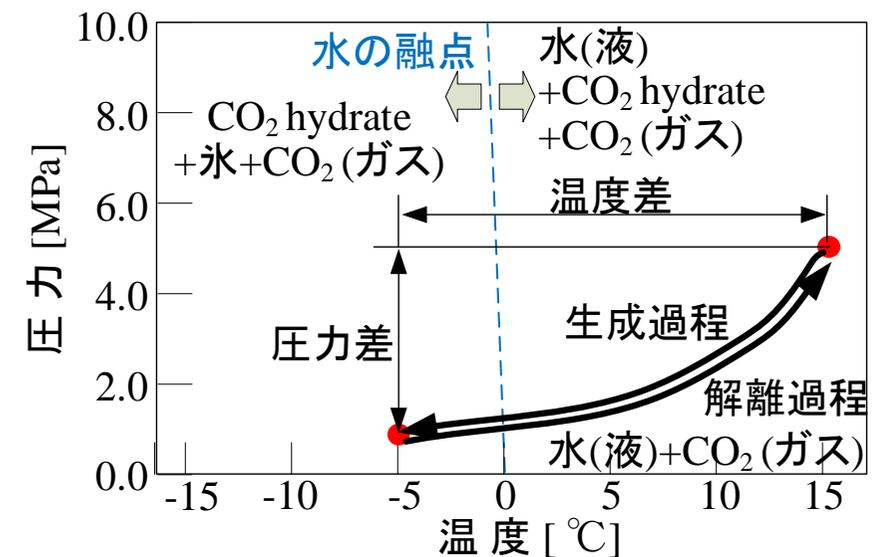


図 CO₂ハイドレート (CHR) の生成と解離

従来技術とその問題点

既に実用化されている「**100℃を下回る低温廃熱に対応でき、数十℃の小温度差で駆動できるアクチュエータ及び発電機**」には、熱電素子と有機ランキンサイクルがあるが、いずれも変換効率は10%以下である。

このため、100℃を下回る廃熱回収には広く利用されるまでには至っていない。

研究開発の目標（蓄電池として利用する場合）

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ある。しかしながら、電気化学反応を用いた二次電池では、性能を維持できる充放電回数に制限があり、揚水発電を上回る経済性が課題になっている。本研究では廃熱などの未利用熱を電力に変換できる物理電池に着目して、安価で充放電回数による性能劣化のほとんどない電力貯蔵装置を開発する。

表 電力用二次電池の性能比較

比較項目(例)	現在の性能	現在の目標	目標(揚水発電)	EnergyDome (CO ₂ サイクル)	リチウムイオン	NAS電池
①コスト	およそ6万円/kWh	4万円/kWh	2.3万円/kWh	3万円/kWh	6~9万円/kWh	3~5万円/kWh
②寿命	10年?	20年	40年~	30年	500サイクルで劣化	15年 4500サイクル
③エネルギー体積密度	15.7kWh/m ³	67kWh/m ³	140kWh/m ³	67kWh/m ³	200kWh/m ³	160kWh/m ³
④充放電効率の平均	54.2%	80%	90%	75~85%	95%	75~85%

研究開発の社会的な意義

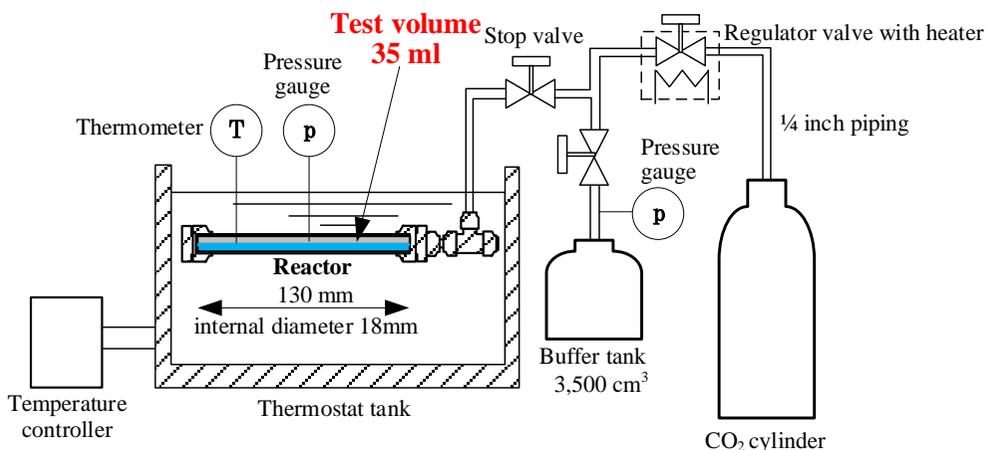
本研究開発が進むと、低温廃熱の電力への変換、安価な大容量蓄電池が達成され、変動再エネの大量導入、災害時の電源確保、ゼロカーボンに向けた地域マイクログリッドに貢献できる。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 世界で我々のチームが先行している。
- 低温熱源 0°C と高温熱源 25°C で数MPaの高圧を繰り返し操作できるため、発電に使える。
- 添加剤の効果を確認しており、低温熱源 15°C と高温熱源 25°C でも発電可能。
- 低温熱源 -3°C 、高温熱源 25°C の小温度差で、充放電効率 54.2%を確認。
- 最も損失の大きい部分が明確となっており、現在はこれを改善することで充放電効率80%を目指す。
- 発電のほか、低温に強い蓄電池としても利用可能。

CHRの生成・解離によるエネルギー貯蔵実験

試験システム



(a) 基礎試験装置 (水平二重管反応器)

実験結果の例

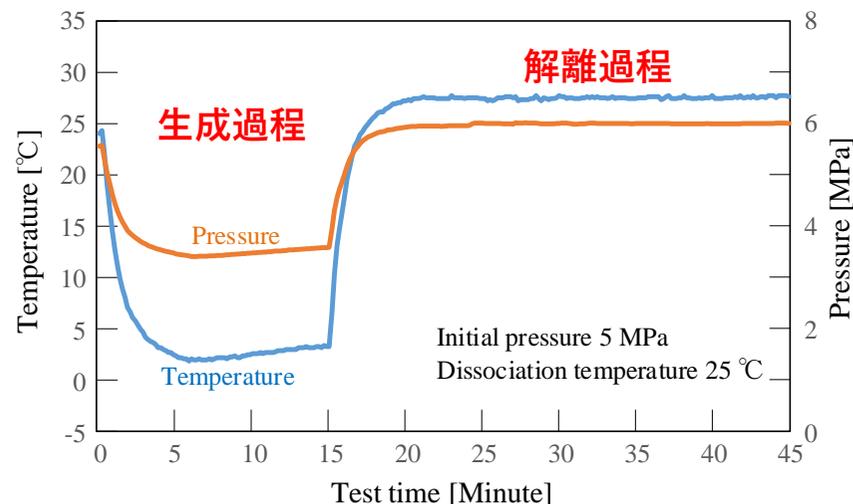
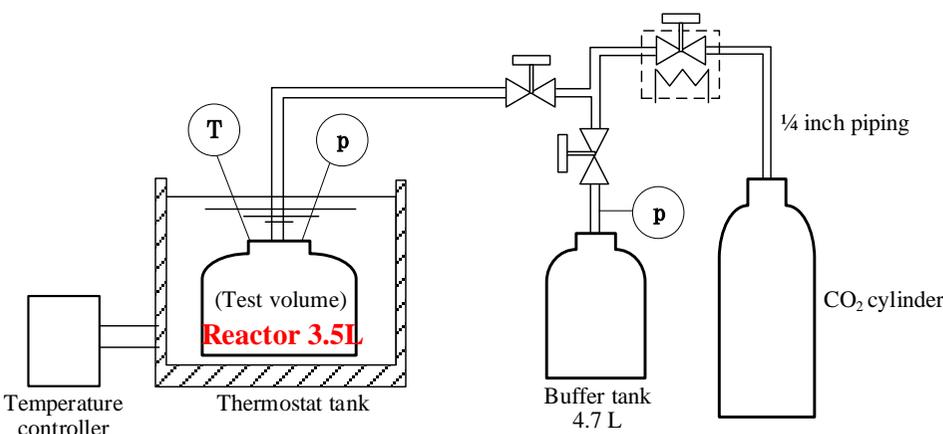


図 CHRの生成・解離実験



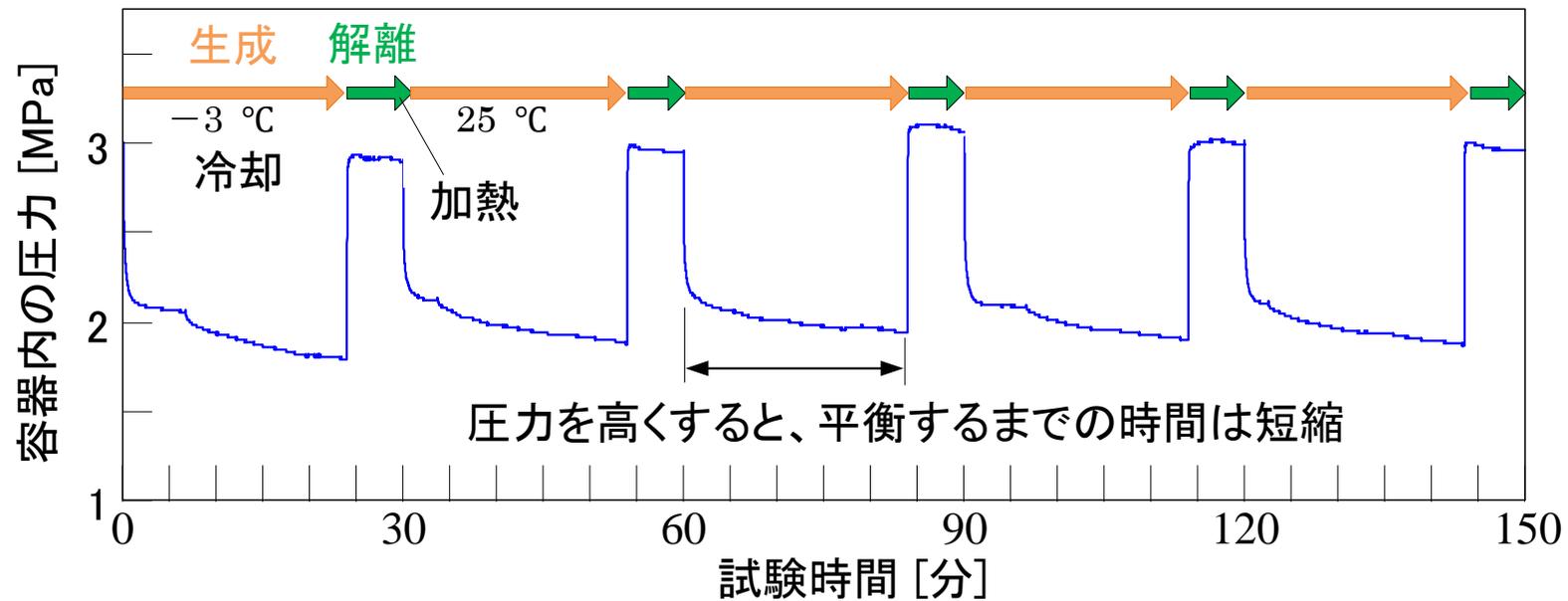
(b) 小型試験装置 (3.5L反応器)

図 CHR生成・解離試験装置

基礎試験装置では、冷却開始後15分以内で生成量の8～9割が得られる。解離も数分で終了。一方、小型試験装置では生成に数時間、解離に数十分を要する。

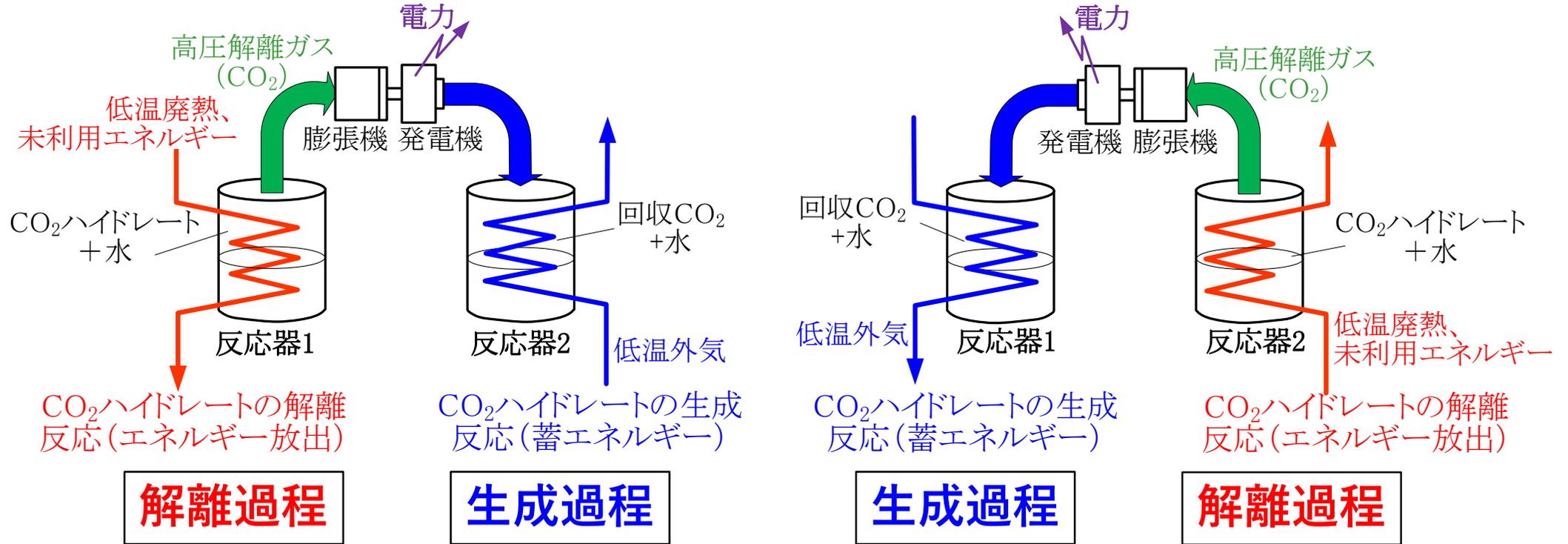
⇒ 熱交換の性能が生成・解離（充放電）の時間に強く影響する

CHR熱サイクル



冷熱（15°C以下）と温熱（20°C以上）で、数MPaの高圧を繰り返し操作できる。

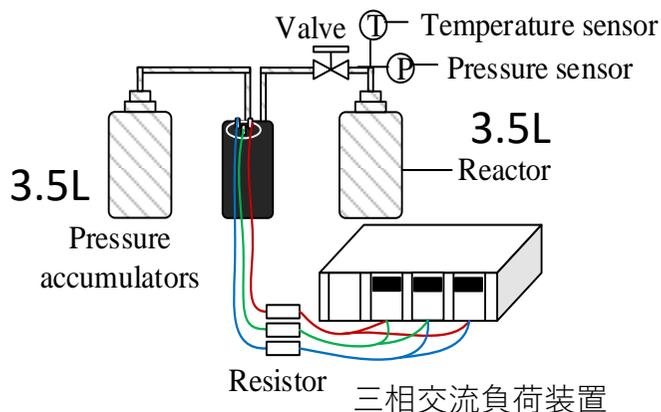
CHR熱サイクルによる発電方法



2つの反応器で「生成」と「解離」を交互に繰り返す

発電実験

試験システム

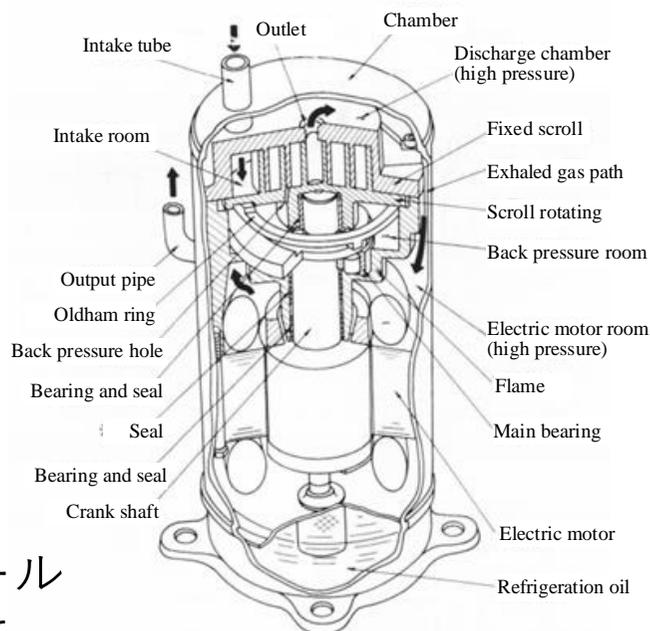


☒ 高圧解離ガスによる発電試験システム

市販の電動機一体型の密閉式スクロールコンプレッサを膨張機・発電機として使用して、CHR熱サイクルから電力を発生させた。

CHR生成温度 -3°C 、解離温度 25°C の小温度差で、発電効率54%を確認。

膨張機・発電機

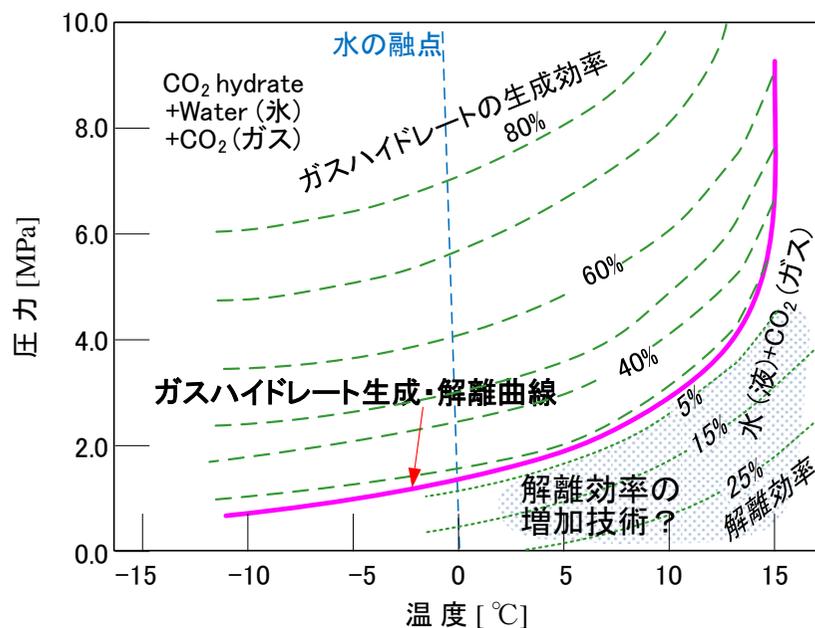


(密閉式のスクロールコンプレッサを使用)

☒ 電動機内蔵の密閉式コンプレッサ

実験結果の例

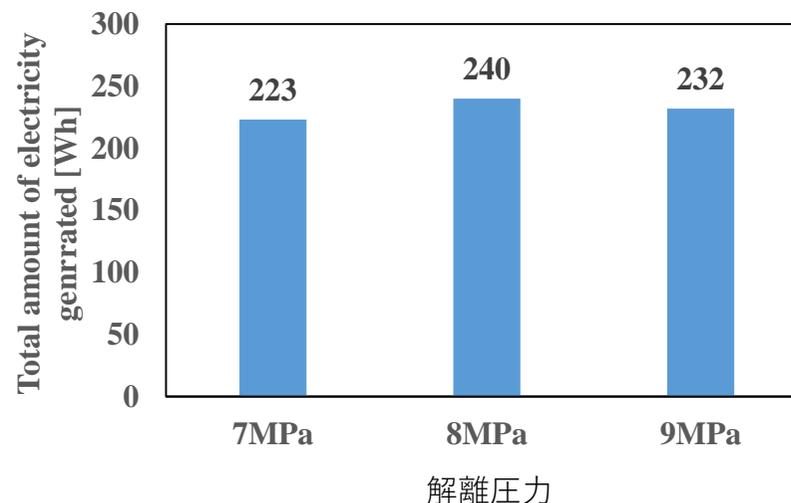
生成・解離効率



☒ CHRの状態と生成・解離効率の実験結果
(基礎試験装置)

CHRの生成・解離効率は攪拌により増加することが知られている。

発電量



☒ 解離圧力と発電量の結果
(小型試験装置)

発電効率はアクチュエータ（膨張機）の性能特性に依存する。CO₂ヒートポンプ用の圧縮機を膨張機として使用しているため、高い解離圧力が必要となっている。

研究の状況とこれまでの結果

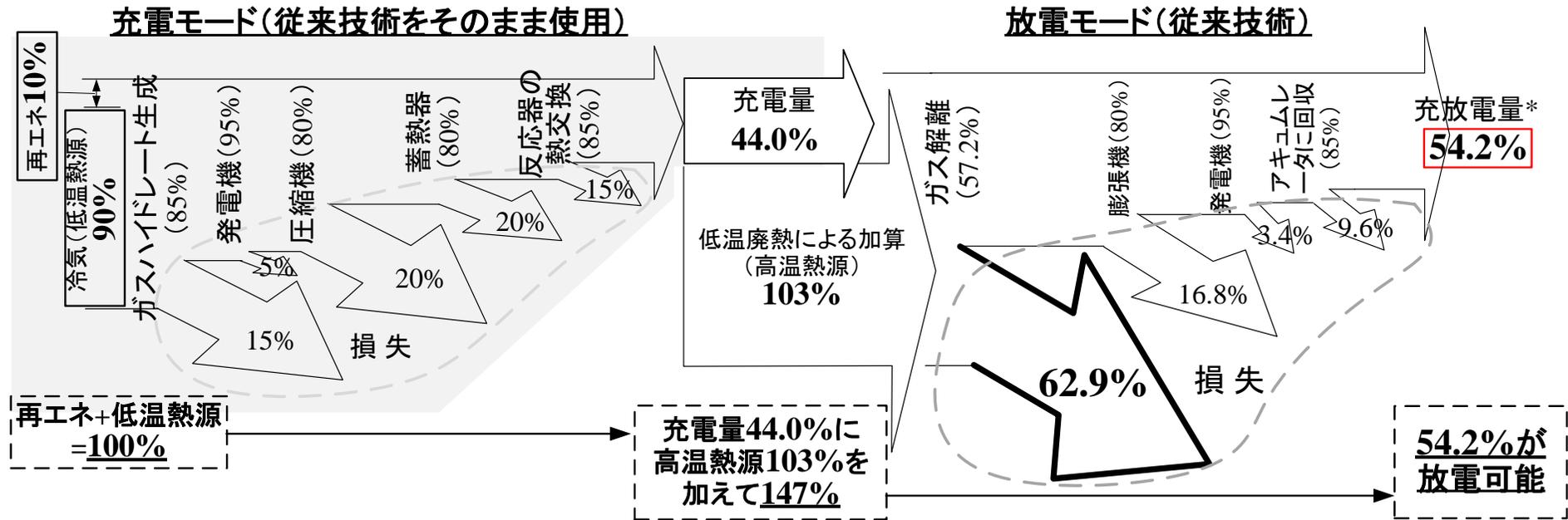


図 CHR熱サイクルを用いた電力貯蔵のエネルギーフロー

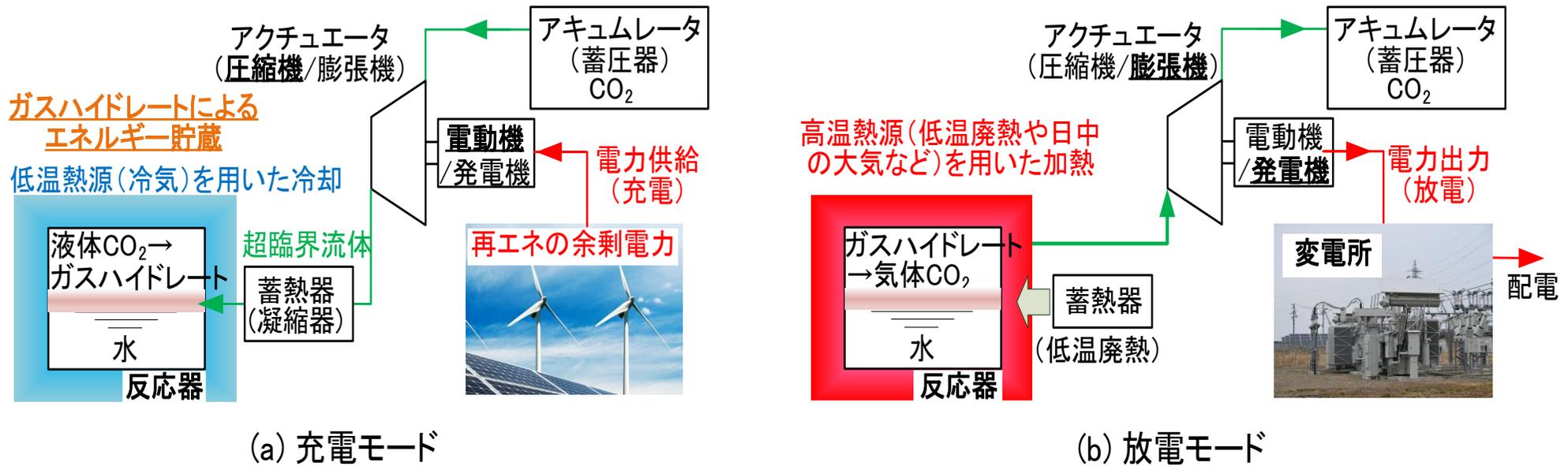
-3°Cと25°Cの小温度差をCHR熱サイクルに与えてアクチュエータ（膨張機）を駆動し、充放電効率54.2%を達成している。しかしながら、放電モードではガス解離に62.9%の大きな損失が確認されている。この原因は、三相界面（水（液）、ガスハイドレート（固体）、CO₂（気体））での分子の拡散速度と、反応に伴う潜熱の伝熱速度が阻害されているためと考えられる。そこで、三相界面での分子の拡散と、反応に伴う潜熱の熱移動を大幅に増加させる取り組みを行っている。

想定される用途

- 本技術の特徴は、 15°C 以下の外気と数十 $^{\circ}\text{C}$ の低温廃熱から電力が得られることで、**二次電池として適用**することで、省エネと脱炭素化のメリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、**未利用エネルギー（熱）からの発電**が期待される。
- また、 CO_2 ハイドレートの状態変化に着目すると、 **CO_2 の貯蔵、排ガスなどからの CO_2 分離、低温熱の蓄熱**といった分野や用途に展開することも可能と思われる。

想定される用途(1)

蓄電池(数kWh~数百MWh)



<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CO₂ハイドレートを生成させます。

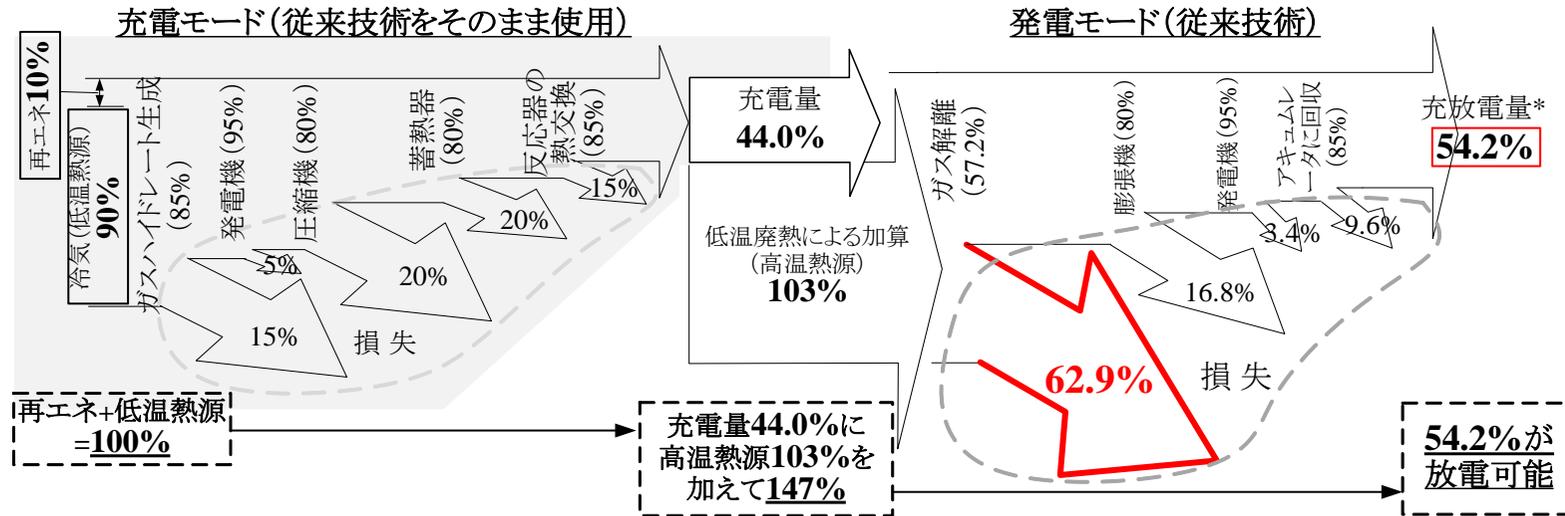
<発電(放電)運転>

高温熱源 (低温廃熱など、25°C以上) を反応器に与えて、CO₂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。

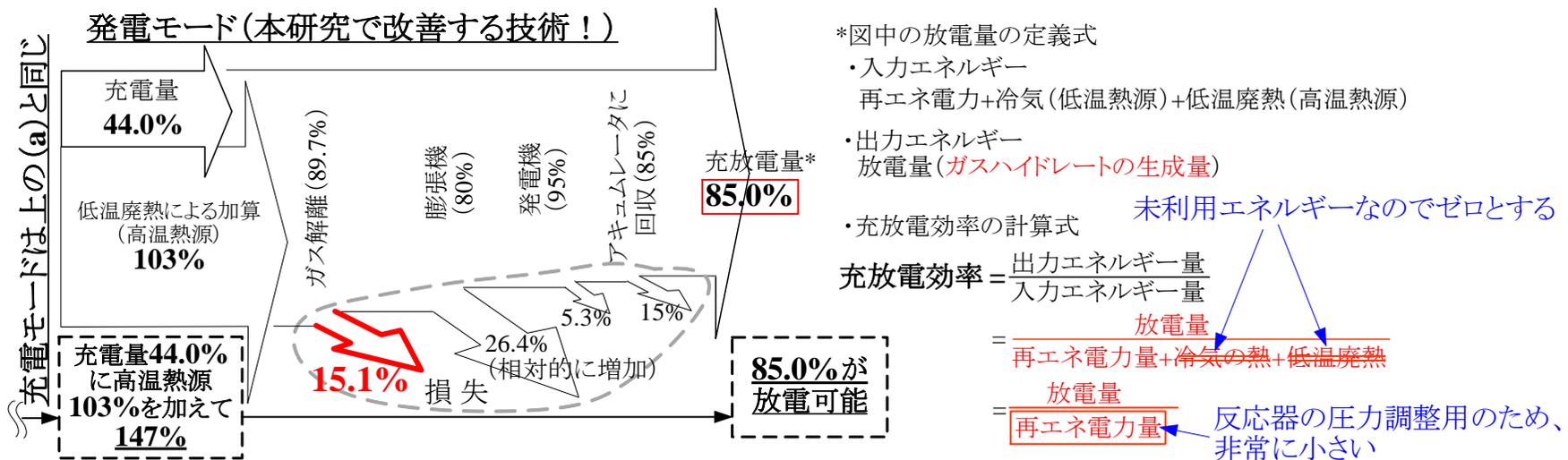
この高圧ガスをアクチュエータ (膨張機) に与えて同期発電機を運転します。

想定される用途(2)

低温廃熱・未利用熱の電力への変換



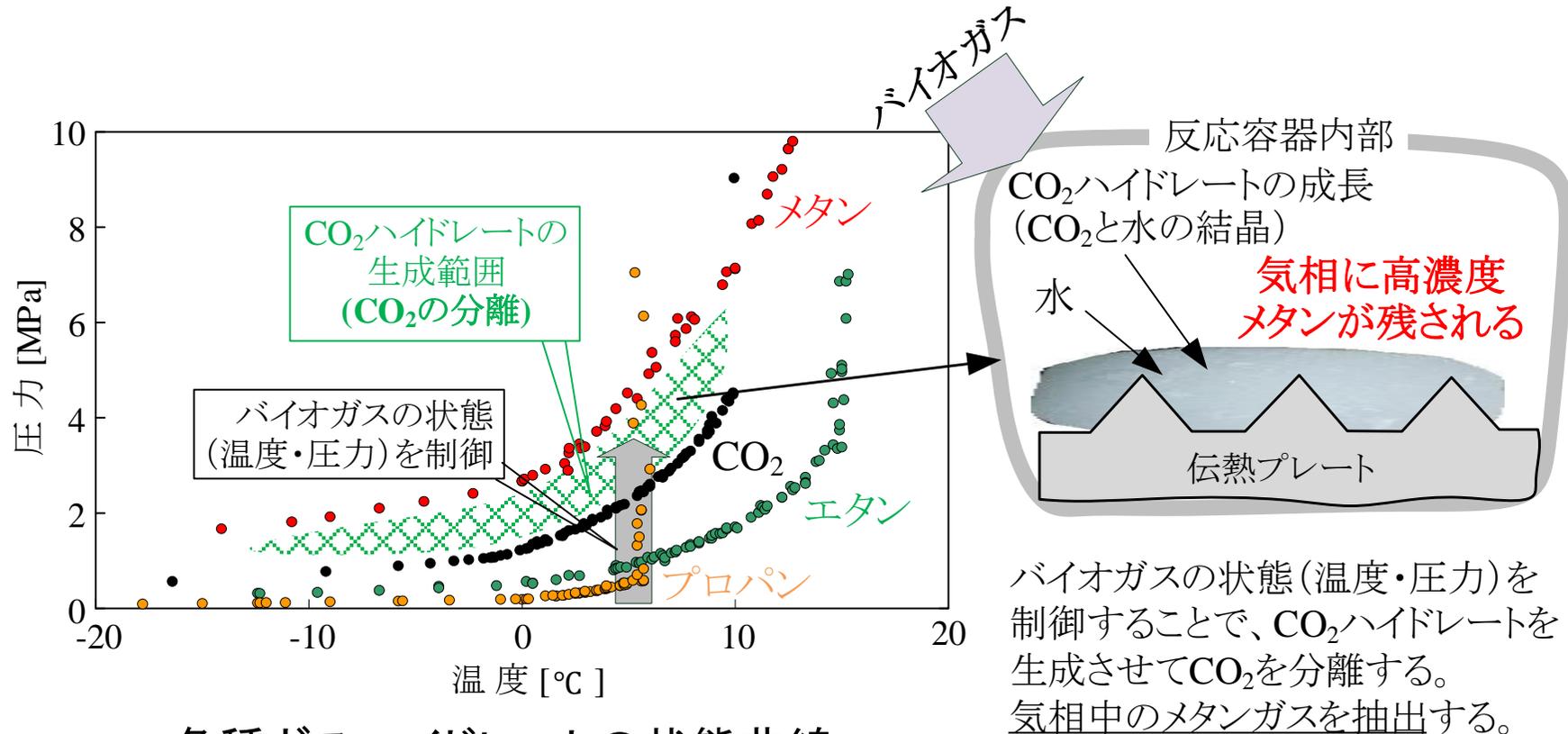
(a) 現在の蓄電装置のエネルギーフロー



(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

想定される用途(3)

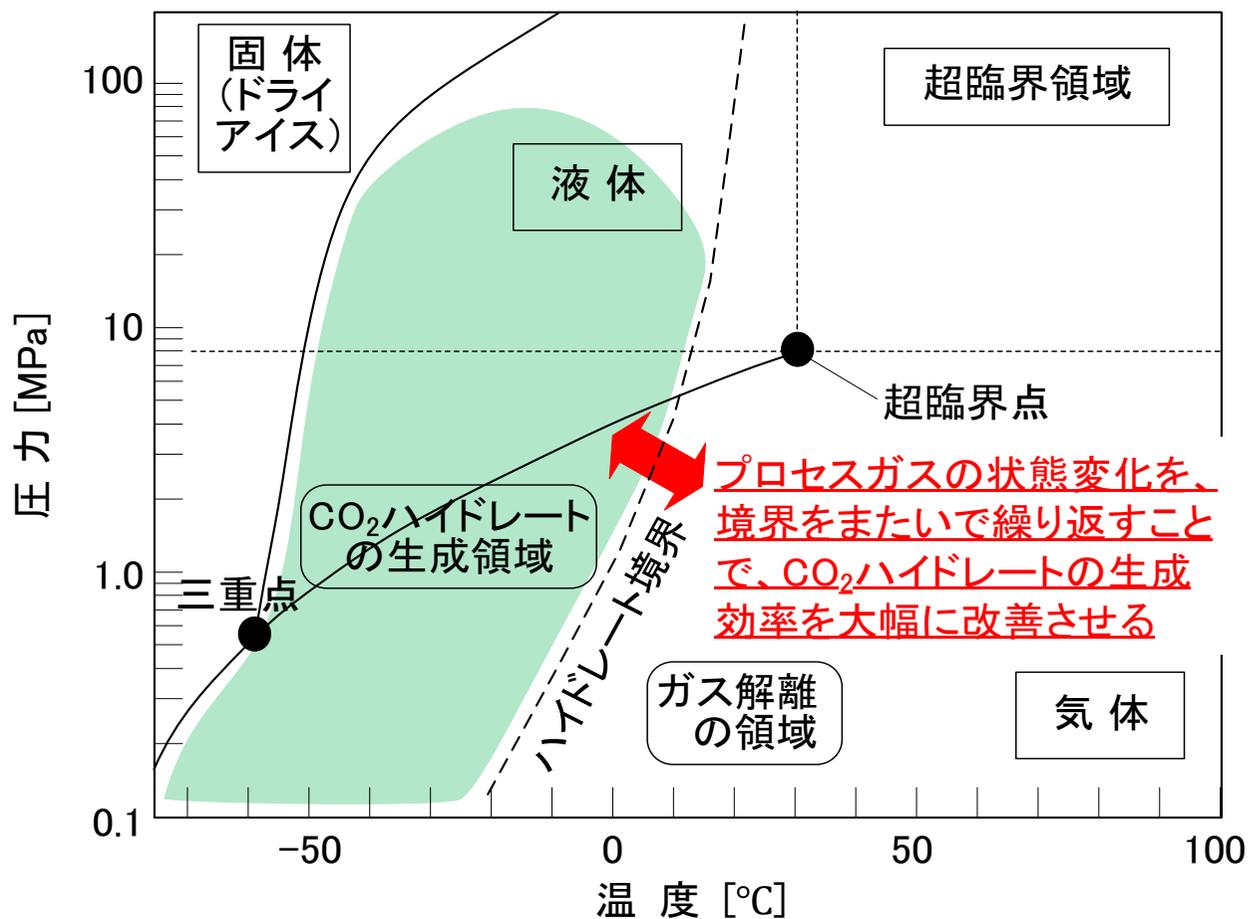
CO₂の貯蔵



各種ガスハイドレートの状態曲線

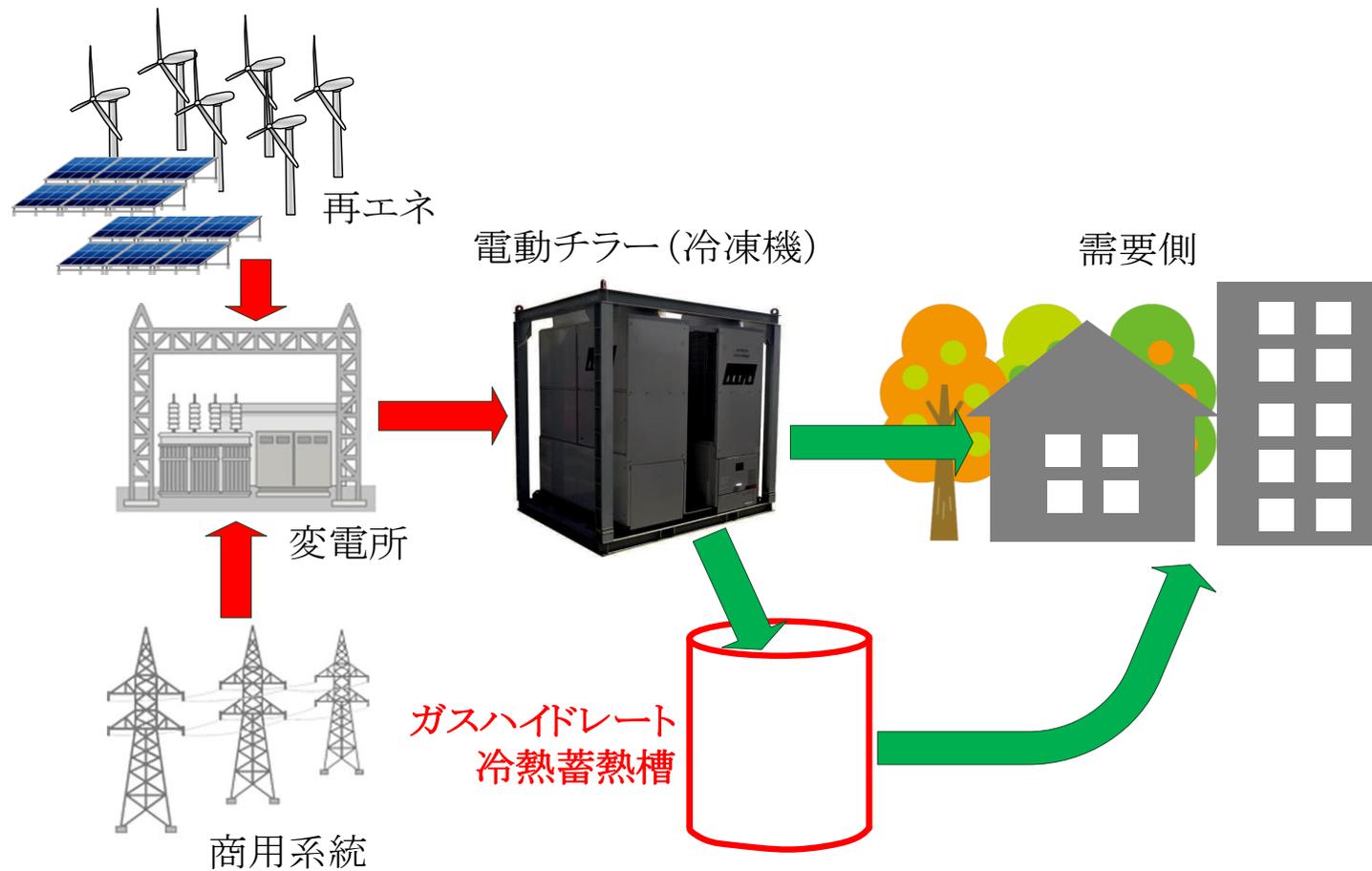
想定される用途(4)

排ガスやバイオガスからのCO₂の分離



想定される用途(5)

冷熱の蓄熱



実用化に向けた課題

- 現在、発電システムについては充放電効率54%まで開発済み。しかし、さらなる効率の増加（26%）と、体積の低減（1/4）が未解決である。
- 今後、効率及び体積の改善に強く関わる反応（伝熱）速度について調査して最適化をする。
- 実用化に向けて小型システムの試作を行っており、システム全体での動作確認を進めている。これまでは要素ごとの性能を確認。
- 本研究による「CO₂ハイドレートサイクル」と「液体CO₂サイクル」の組み合わせにより、広範囲の外気温に適用可能な発電システムを確認中。

企業への期待

- 未解決のエネルギー体積密度の改善については、既製のCO₂ヒートポンプの熱交換技術を参考にすることで克服できると考えている。
- 電力や熱エネルギーに関心がある、またはこれらの技術に関心を持つ、企業との共同研究などを希望。
- また、エネルギー環境分野の技術開発を行う企業、廃熱や利用エネルギーによる脱炭素技術の展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は廃熱や未利用エネルギーを回収して、電力や冷熱に変換して利用できるため、**省エネや脱炭素化について企業に貢献できる**と考えている。
- さらに、CO₂の貯蔵や分離に応用できるため、**脱炭素ビジネスの応援**をできると考える。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術相談。
- 分散型エネルギーに関する技術相談。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : アクチュエータ装置及び発電システム
- 出願番号 : 特願2011-185592
- 出願人 : 北海道国立大学機構
- 発明者 : 小原伸哉、山田貴延、高橋信夫

産学連携の経歴

- 2023年-現在 株式会社 双日イノベーション・テクノロジー研究所と共同研究実施
- その他多数

お問い合わせ先

北見工業大学 知的財産センター（研究協力課）

TEL 0157-26-9152

FAX 0157-26-9155

E-mail chizai@desk.kitami-it.ac.jp