

## 圧縮－吸着ハイブリッドヒートポンプサイクルの提案 —代替フロン冷媒から自然冷媒への転換に向けて—

### 1. 発表者：

シャシ ジョハイル アーマト<sup>\*</sup> (東京大学 大学院工学系研究科附属総合研究機構 特任助教)  
徐 偉倫 (東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻 講師)  
大宮司 啓文 (東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻 教授)  
Arun Majumdar (スタンフォード大学 機械工学科 教授)

### 2. 発表のポイント：

- ◆ CO<sub>2</sub>を用いたヒートポンプは通常 8-10 MPa 程度の高圧で運転する。これに対し、本研究で提案する圧縮－吸着ハイブリッドヒートポンプに CO<sub>2</sub>と金属有機構造体を適用すると、半分程度の圧力で運転しても、同程度の暖房成績係数を示す。
- ◆ 冷媒を圧縮、膨張させて熱を取り出す蒸気圧縮ヒートポンプサイクルと多孔質材料がガスを吸着する現象を利用した吸着ヒートポンプサイクルを組み合わせたハイブリッドヒートポンプサイクルを提案した。
- ◆ 冷媒と多孔質材料の組み合わせを開発することにより、さらに低い圧力で成績係数を向上させることが期待できる。本研究で提案する圧縮－吸着ハイブリッドヒートポンプサイクルは代替フロン冷媒から自然冷媒への転換に貢献すると考えられる。

### 3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻の大宮司啓文教授の研究グループとスタンフォード大学機械工学科の Arun Majumdar 教授が新しいヒートポンプサイクル「圧縮－吸着ハイブリッドヒートポンプサイクル」の概念を提案しました。このヒートポンプサイクルは冷媒（一般にはフロンガス）を圧縮、膨張させて熱を取り出す蒸気圧縮ヒートポンプサイクルと多孔質材料がガス（一般には水やアルコール）を吸着する現象（注1）を利用した吸着ヒートポンプサイクルを組み合わせたハイブリッドヒートポンプサイクルであり、それぞれのヒートポンプサイクルの限界を超えるものです。本研究で提案する圧縮－吸着ハイブリッドヒートポンプサイクルにおいては、このヒートポンプサイクルに適した冷媒と多孔質材料の組み合わせを開発することにより、さらに低い圧力で成績係数（COP）（注2）を向上させることが期待でき、代替フロン冷媒から自然冷媒への転換に貢献すると考えられます。本研究成果は、2022年11月3日（米国東部夏時間）に米国科学誌「Cell Reports Physical Science」のオンライン版に掲載されました。

### 4. 発表内容：

ヒートポンプはエアコンや冷蔵庫などに用いられる加熱・冷却技術であり、-100℃から100℃程度の温度帯において、少ない投入エネルギーで周囲から多量の熱エネルギーを取り出す技術です。代替フロン冷媒ヒートポンプは高い成績係数（COP）を持ちますが、依然として冷媒の温室効果が大きいため、グリーン冷媒ヒートポンプへの転換が求められています。自然冷媒 CO<sub>2</sub>ヒートポンプは環境には好ましいですが、超臨界状態（8-10 MPa）まで加圧して運転するため、COPは必ずしも高くありません。一方、蒸気圧縮式ヒートポンプとは別に、熱駆動型の吸着式ヒートポンプにも注目が集まっています。多孔質材料が

水やアルコールなどを吸着する現象を利用し、太陽熱、排熱などの高温の熱エネルギーを入力として冷水をつくることを主な目的としています。環境に優しい物質を作動媒体とすることができますが、サイクルの複雑さから、一般に装置は大きく、導入コストが高くなります。蒸気圧縮式ヒートポンプと吸着式ヒートポンプを比較すると、機械装置の動作原理は大きく違いますが、発熱、吸熱のメカニズムはそれほど違いません。いずれも圧力、温度を制御することにより、作動媒体間、あるいは作動媒体と多孔質材料の間の分子間相互作用を制御し、所望の温度で発熱、吸熱をさせています。本研究では、この基本的な発熱、吸熱のメカニズムに着目し、圧縮-吸着ハイブリッドヒートポンプサイクルを提案しました。

図 1 に圧縮-吸着ハイブリッドヒートポンプサイクルの概念図を示します。基本的な動作原理は蒸気圧縮式ヒートポンプと同じですが、冷媒 (CO<sub>2</sub>) と吸着剤 (金属有機構造体 (MOF)) (注 3) が一緒に冷媒回路を循環します。CO<sub>2</sub> ガスは圧縮機で圧縮されると高温になります。高压側 (吸着器) では高温の CO<sub>2</sub> ガスが MOF に吸着し、その際に吸着熱を周囲へ放出するため高い暖房の効果が得られます。吸着剤がない場合でも、高温の CO<sub>2</sub> ガスから周囲へ温度差により熱を放出するため多少の暖房の効果はあります。しかし、同じ圧力、温度域では、CO<sub>2</sub> は周囲に熱を放出した後も気体状態のままですので、あまり高い暖房の効果は期待できません。(CO<sub>2</sub> ガスは多孔質材料に吸着する、あるいは液化するなどにより発熱します。これらの熱を利用することで高い暖房の効果が得られます。) したがって、通常の CO<sub>2</sub> ヒートポンプでは、高い暖房の効果をj得るために CO<sub>2</sub> を超臨界状態 (8-10 MPa) まで加圧します。CO<sub>2</sub> ガスは膨張弁 (キャピラリーチューブ) を通過する際に圧力が低下し、膨張することにより低温になります。低压側 (脱着器) では低温の CO<sub>2</sub> が MOF から脱着し、脱着熱を周囲から吸収するため冷房の効果が得られます。

吸着剤 MOF は一般には粉体であり、冷媒回路を循環させることは容易ではありません。しかし、この循環の概念は理想的なヒートポンプサイクルの性能予測において重要です。また、実際の装置においては、MOF の粉体を循環させる代わりに、MOF の粉体が入った二つの圧力容器を用意し、交互に吸着、脱着を行うバッチ式運転などが考えられます。吸着器を圧力 4 MPa、温度 343 K、脱着器を圧力 0.6 MPa、温度 298 K と仮定し、冷媒に CO<sub>2</sub>、吸着剤に代表的な MOF の一つである MOF-5 の熱物性値を用いて熱力学平衡モデルのサイクル計算を行ったところ、このサイクルの暖房 COP は 3.67 と推定されました。また、僅かな圧力変動で吸着量が大きく変化する MOF、吸着熱が大きい MOF などが本研究で提案するヒートポンプサイクルに適していることがわかりました。材料開発により、さらなる COP の向上が期待されます。

本研究は、JST-CREST 研究領域「ナノスケール・サーマルマネージメント基盤技術の創出」「ナノ空間材料に内包された水の吸着・移動の熱制御 (課題番号: JPMJCR17I3)」の支援を受けました。また、東京大学大学院工学系研究科ダイキン工業社会連携講座「次世代空調技術の創成」において実施されました。

[https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/1111097/1111097\\_2017.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/1111097/1111097_2017.html)

<https://daikin-utokyo-lab.jp/programs>

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Cell Reports Physical Science」(オンライン版：11月3日)

論文タイトル：Concept of a hybrid compression–adsorption heat pump cycle

著者：Jubair A. Shamim, Gunjan Auti, Hibiki Kimura, Shubo Fei, Wei-Lun Hsu, Hirofumi Daiguji\*, Arun Majumdar\*

DOI 番号：10.1016/j.xcrp.2022.101131

アブストラクト URL：https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101131

## 研究グループの構成：

シャミン ジョハイル アーマト (東京大学 大学院工学系研究科附属総合研究機構 特任助教)

アチ グンジャン (東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻 博士課程)

木村 響 (東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻 修士課程)

費 舒波 (研究当時：東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻 博士課程)

徐 偉倫 (東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻 講師)

大宮司 啓文 (東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻 教授)

Arun Majumdar (スタンフォード大学 機械工学科 教授)

## 6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻

教授 大宮司 啓文 (だいぐうじ ひろふみ)

<報道に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

## 7. 用語解説：

(注1) 吸着：吸着とは、界面原子が近接した分子と結合し、界面自由エネルギーを小さくしようとする現象である。一方、吸着していた物質が界面から離れる現象を脱着と言う。また、吸着される物質を吸着材と言い、工業的には小さな細孔をたくさん持つ多孔質材料を吸着材として用いる。

(注2) 成績係数 (COP: Coefficient of Performance)：エアコン、冷凍機などのヒートポンプのエネルギー消費効率を表す指標の一つで、消費エネルギーに対する施される冷房、または暖房の比率として計算される無次元の数値である。COP=冷房能力または暖房能力÷消費エネルギー

(注3) 金属有機構造体 (MOF: Metal Organic Framework)：金属と有機配位子からなる結晶性の多孔質材料のこと。金属の種類や有機分子の組み合わせ方によって多様な構造体を形成できるため、目的の機能に応じた材料設計ができる。

8. 添付資料：

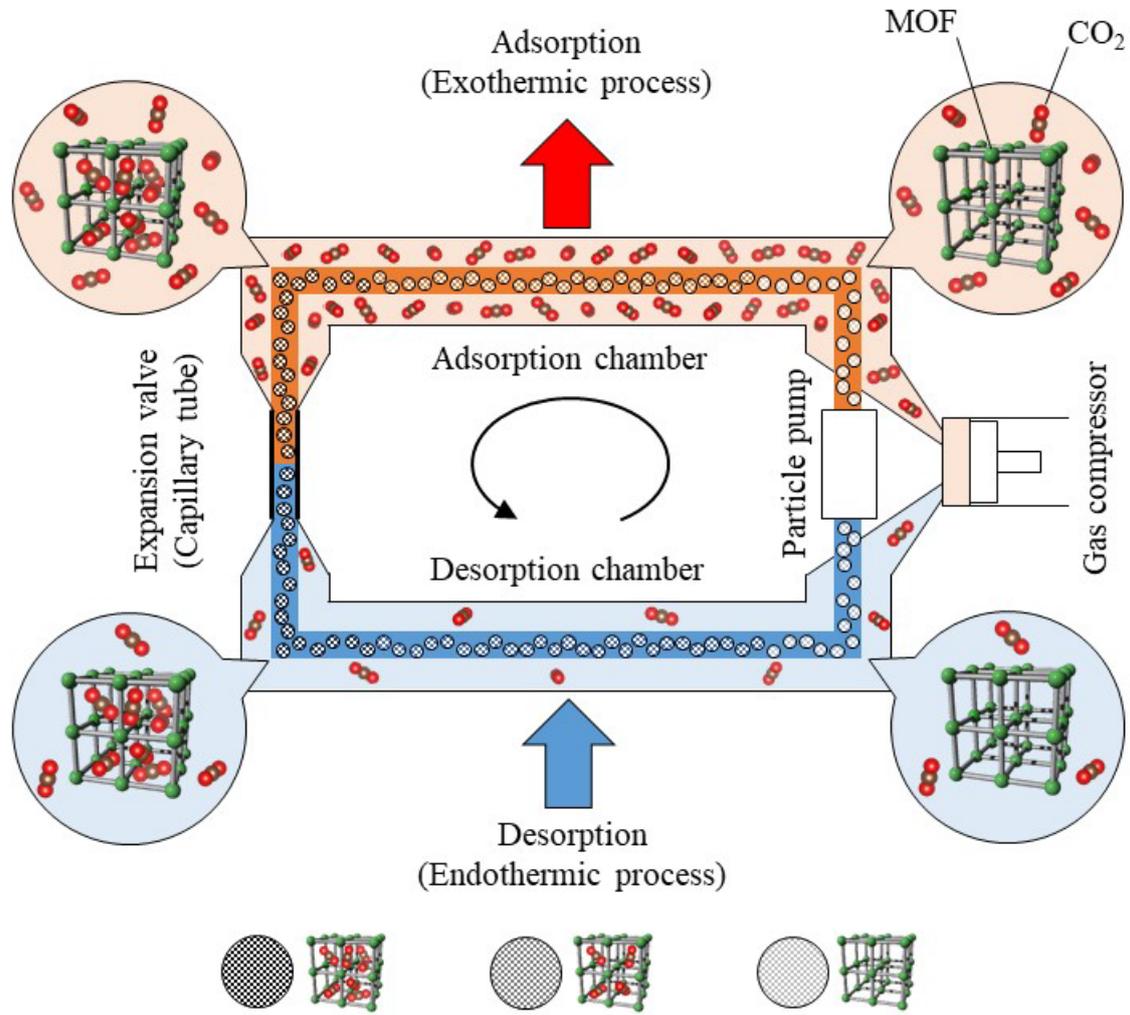


図 1. 圧縮-吸着ハイブリッドヒートポンプサイクルの概念図