



IEA HPT Magazine No 3/2019



国内版第 46 号 (2020 年 6 月 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター発行)

# Heat Pumping Technologies MAGAZINE

A HEAT PUMP CENTRE PRODUCT



David Catalini, University of Maryland, USA

"ONE WAY TO TACKLE GLOBAL WARMING IS TO DEVELOP HEAT PUMPING CYCLES USING SOLID-STATE REFRIGERANTS"

VOL.37 NO 3/2019

ISSN 2002-018X

HPT マガジン国内版は、ヒートポンプセンター(IEA HPT TCP の事務局、在スウェーデン)が発行する IEA Heat Pumping Technologies MAGAZINE を日本語要約したものです。原文の IEA HPT MAGAZINE は、ヒートポンプセンターのホームページ <https://heatpumpingtechnologies.org/the-magazine/> からダウンロードが可能です。

# ヒートポンプ技術 マガジン

VOL.37 NO.3/2019

## この号では・・・

ヒートポンプ-単なる用語では、この技術が加熱に使用されることを意味します。そして、長年にわたり、ヒートポンプ技術 TCP では、加熱に焦点が当てられてきました。しかし、これはゆっくりと変化しています。これまで以上に多くの人々が冷却用の設備を購入できるようになったため、世界中で、なるべく気候影響が大きい冷媒を使用しない新しい冷却技術の必要性が高まっています。したがって、HPT Magazine のこの号のトピックは、「未来への冷却」です。これが、現在の HPT 加盟国以外でも興味を持つことを願っています！

冷却の必要性の高まりから生じる課題は、序文で指摘されています。そこでは、この課題に対処するために、ヒートポンプ技術における技術協力プログラム、すなわち Annex53 で現在行われていることも概説されています。この Annex は、新しいヒートポンプ技術における技術協力プログラム戦略の結果です。

この号には 2 つのトピック記事が掲載されており、それぞれがヒートポンプ技術にとって目新しい冷却技術について説明しています。それらの 1 つは、ガスの電気化学的圧縮がヒートポンプまたは冷凍サイクルでの機械的圧縮をどのように置き換えることができるかを説明しています。もう 1 つは、現在の冷媒の代わりとして、いわゆる熱量効果材料である固体状態の冷媒を冷却システムでどのように使用できるかを調査しています。

一部の記事は注目分野以外のものです。トピックス以外の記事の 1 つは、熱電池を使用したヒートポンプアプリケーションに焦点を当てています。別の例では、デンマークの産業用ヒートポンプの状況を取り上げています。この問題にはオランダの戦略的展望も含まれており、コラムは東ヨーロッパのヒートポンプ技術の弱い市場に光を当てています。

それでは、読書をお楽しみください！

Johan Berg、編集者

ヒートポンプセンター

-ヒートポンプ技術に関する技術協力プログラム (HPT TCP) の  
中心的なコミュニケーション

- 3 まえがき
- 4 コラム
- 5 ヒートポンプ技術のニュース
- 8 注目のニュース：ヨーロッパのポジティブエネルギー地区 一定義付けが進んでいます
- 9 ヒートポンプ技術における技術協力プログラム進行中の Annex
- 24 オランダの戦略的展望：気候協定 (Marion Bakker)

## 特集記事

- 26 エネルギーシステムで使用する電気化学膜技術 (Joe Baker)
- 29 弾性発熱冷却 (David Catalini)

## その他の記事

- 33 地中熱ヒートポンプの活用を可能にし、建物の電力需要を調整する地下熱電池の開発 (Xiaobing Liu)
- 39 デンマークのエネルギーシステムにおける産業用ヒートポンプ - 現在の状況、その可能性と展望 (Benjamin Zühlsdorf)

- 43 イベント
- 44 ナショナルチームの連絡先

Copyright:  
© Heat Pump Centre (HPC)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without prior written permission of the Heat Pump Centre, Borås, Sweden.

Published by Heat Pump Centre  
c/o RISE - Research Institutes of Sweden,  
Box 857, SE-501 15 Borås, Sweden  
Phone: +46 10 516 55 45

Disclaimer HPC:  
Neither the Heat Pump Centre, nor any person acting on its behalf:

- makes any warranty or representation,
- express or implied, with respect to the accuracy of the information, opinion or statement contained herein;
- assumes any responsibility or liability with respect to the use of, or damages resulting from, the use of this information

All information produced by Heat Pump Centre falls under the jurisdiction of Swedish law.

Publisher:  
Heat Pump Centre  
PO Box 857, S-501 15 BORÅS  
SWEDEN  
Tel: +46-10-516 55 12  
hpc@heatpumpcentre.org

[www.heatpumpingtechnologies.org](http://www.heatpumpingtechnologies.org)

Editor in chief: Monica Axell  
Technical editors: Caroline Haglund Stignor, Tommy Walfridson, Markus Lindahl, Martin Larsson, Johan Berg, Ulrica Örnemar, Kerstin Rubenson, - Heat Pump Centre.

Front page: Shutterstock

ISSN 2002-018X  
<https://doi.org/10.23697/7tg9-hs87>

まえがき

## 冷却と冷蔵： その未来には何があるのか？

**世界的な人口の増加と経済の改善**、特に発展途上国では、空調（AC）、除湿、冷蔵の世界的な需要の大幅な増加につながると予測されています。国際エネルギー機関（IEA）のレポート、Energy Technology Perspectives 2016 では、AC エネルギー消費と付随する温室効果ガス排出量は、2050 年までに、非 OECD 諸国では 2013 年のレベルの 4.3 倍、OECD 諸国では 1.2 倍に増加すると予測されています（もし需要の増加を緩和するアクションがない場合）。同様に、英国バーミンガム大学の 2015 年のレポート Doing Cold Smarter によると、冷凍の需要は食品の保存と保管に関連しており、食品の需要は 2010 年に比べて 2050 年までに 70% 増加すると予想されます。



需要の大幅な増加により、世界のエネルギーと気候の目標を達成するのがはるかに難しくなります。この課題に対処するには、短期的および長期的な世界規模の行動が緊急に必要です。間違いなく当面の短期的なアプローチの 1 つは、世界中の既存の「クラス最高」の AC および冷凍機器とシステムの展開を最大化することです。長期的な RD&D が必要であり、先進的な高効率技術ソリューションを開発する必要があります。

長期的なニーズに対応するため、2018 年に HPT 実行委員会は HPT Annex53 【Advanced Cooling / Refrigeration Technologies Development】の設立を承認しました。メンバーには現在、中国、ドイツ、イタリア、韓国、スウェーデン、米国が含まれます。目標は、RD&D の結果を共有して、将来の冷凍および AC システムの開発状況を向上させることです。関心のある技術には、2 つの明確な経路があります。よく知られ、広く使用されている蒸気圧縮（VC）システムに基づくものと、ますます調査が進められている非伝統的な冷却手法です。VC テクノロジーにはこれまで何十年もの RD&D がありました。これは継続的であり、VC ベースのシステムは、今後数十年にわたって多くのアプリケーションにとって最適なシステムであり続ける可能性があります。しかし、それらはまた、さらなる冷媒制限に対して脆弱です。非伝統的な技術（例：磁気熱量（MC）、弾性熱量（EC）、電気化学圧縮（ECC）、膜ベースのシステムなど）は、従来の意味での冷媒に依存しないため、一般的にこの課題の影響を受けません。ただし、これらのアプローチを市場投入するにはさらなる開発が必要です。HPT Magazine のこの号のトピック記事は、現在開発中の 2 つの魅力的な非伝統的な技術、すなわち熱弾性冷却と電気化学圧縮の概念に関する詳細な情報を提供します。

**Van D. Baxter, ORNL, USA, Reinhard Radermacher** メリーランド大学, USA

Annex53 OA

## 東ヨーロッパを詳しく調べる必要がある理由

**市場統計は素晴らしいことです。**特に、ヒートポンプの売上高に関しては、年間 2 桁成長率が報告されています。最も重要な再生可能な冷暖房技術であるヒートポンプの流通に関しては、欧州は正しい方向に向かっているようです。ただし、建築部門の完全な脱炭素化には、さらに高い成長率が必要です。また、欧州の政策立案者は、適切な枠組み条件を迅速に作成することが求められます。

欧州ヒートポンプ協会 (EHPA) の市場統計を詳しく見ると、ヨーロッパの売上高の地域分布に大きな格差がある状況が明らかになっています。ヒートポンプのほぼ 90% が 10 か国で販売されており、スカンジナビア諸国が最も普及率が高くなっています (1 人あたりのシステム設置台数)。ただし、南東ヨーロッパ諸国および東ヨーロッパ諸国のほとんどは入手可能な数値がありません。これらの国のヒートポンプは、日の当たらない存在になるかも知れず、技術を確立するための道のりはまだ長いと思われれます。

この理由は多岐にわたり、おそらく経済状況だけで説明することはできません。私は最近、オーストリアの週刊誌「Die Furche」でブルガリアの政治学者 Ivan Krastev の非常に興味深いインタビュー記事を読みました。彼は、東ヨーロッパ諸国の民主主義と人口統計学の関係、およびこれらの国々の現在の政治状況と欧州連合崩壊の可能性のある兆候への影響について研究しています。彼の意見では、現在の政治危機の原因の 1 つは、冷戦の終結後、西側が独自の考えに従って東側を「社会化」し、それを「社会的に受け入れられる」ようにした方法にあると言います。この種の強制的な「模倣」により、東側諸国は自分たちが単なるコピーであると感じ、よりよく知る方法で西側諸国から絶えずコメントされるようになりました。別の側面は、教育を受けた有能な労働者の大規模な移住です。社会は先見の明のある野心的な人々を失うだけでなく、投資したお金とノウハウも失います。その結果、数十億ユーロが東から西にシフトしています。結果として生じる人口統計学的危機は恐怖を引き起こし、それがポピュリストと極端な政党の増加につながり、それらはそれ自身が強く国家主義的であり、親ヨーロッパとしての性格が殆どありません。これはヨーロッパに共通する決定を複雑にし、遅らせます。そして、それはエネルギーと気候政策に影響を及ぼします。この問題を解決するには、地元の人々がより密接に関与し、地域の状況を考慮に入れる必要があります。

これらの仮説を東ヨーロッパ諸国のヒートポンプの限られた分布に結びつけるのは、無理があり、恣意的でさえあるように思われるかもしれません。いずれにせよ、政治主体にとっての課題の側面を浮き彫りにしていますが、これらはおそらく私たちが知らないことも、認識していることもあります。その課題の解決は、これらの国におけるヒートポンプの確立と建築部門の脱炭素化に不可欠かも知れません。

**THOMAS FLECKL**  
コンピテンスユニット長 持続可能な熱エネルギーシステム  
AIT オーストリア工科大学, Austria



## HPT TCP welcomes Annex 55

ANNEX  
55

快適性と気候ボックス

世界のクリーンエネルギーへの移行のペースと規模は、気候目標に合致していません。エネルギー関連の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量は、2018年に1.7%増加しました。建物部門は、これらの排出量の28%を占めています。温熱快適性に対する世界的なニーズの高まりは、世界中の温室効果ガスの排出に大きく寄与しており、再生可能エネルギーへの移行は遅すぎます。

### 目的

このプロジェクトの目標は、いわゆるコンフォートアンドクライメートボックス(CCB: Comfort and Climate Box)ソリューションの開発を通じて、スマートで統合された加熱、冷却、エネルギー貯蔵ソリューションの市場開発をスピードアップすることです。2020年から2050年までの世界中の建物部門で、年間500 Mtoeのエネルギー節約を実現する費用対効果の高い技術の可能性があります。ヒートポンプには、熱による炭素排出量を大幅に削減する可能性があります。それらをCCBのエネルギー貯蔵および制御と組み合わせることにより、電力グリッド内の再生可能エネルギー、風力や太陽光などの割合を増やし、グリッドのバランスを取り安定させ、建物への最適な供給を保障することにより、エネルギー部門の脱炭素化に貢献することもできます。

詳細については、Annex ホームページをご覧ください：

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex55/>



## ピーター・リッター・フォン・リッティンガー 国際ヒートポンプ賞のノミネートは誰ですか？

3年ごとにピーター・リッター・フォン・リッティンガー国際ヒートポンプ賞が国際IEAヒートポンプ会議に関連して授与されます。ピーター・リッター・フォン・リッティンガー国際ヒートポンプ賞は、空調、ヒートポンプ、冷凍の分野で最高の国際的な賞です。

ピーター・リッター・フォン・リッティンガー国際ヒートポンプ賞は、1855年にアッパーオーストリアの製塩所で最初の省エネ型ヒートポンプシステムの設計と設置を行ったピーター・リッター・フォン・リッティンガーにちなんで命名されました。この賞は、エネルギー効率の高いヒートポンプ技術の研究、政策立案、および応用における国際協力の進展に対する顕著な貢献に対して授与されます。

<https://heatpumpingtechnologies.org/about/rittinger-award/>で基準、以前の受賞者の詳細を読み、候補者を推薦してください。



2017年オランダ・ロッテルダムでの第12回IEAヒートポンプ会議でのリッティンジャー賞受賞者

ヒートポンプ技術のニュース 2020 年の IEA ヒートポンプ会議へようこそ

予定を空けておいて下さい！  
IEA ヒートポンプ会議 5 月 11-14 日 済州、韓国 2020



2019 年 1 月 1 日	アブストラクト受付開始
2019 年 6 月 30	アブストラクト締切
2019 年 11 月 15 日	論文提出締切
2020 年 2 月 15 日	論文最終締切
2020 年 5 月 11-14 日	13 回 IEA Heat Pump Conference

2020 年 5 月 11 日月曜日から 5 月 14 日木曜日まで、第 13 回 IEA ヒートポンプ会議が済州島で開催されます。テーマ「ヒートポンプ - グリーンワールドのためのミッション」では、地球規模の気候変動に対処し、必要な行動を議論することを目指しています。

#### これまでの会議

今回の会議は、国際エネルギー機関（IEA）の Heat Pumping Technologies TCP（ヒートポンプ技術における技術協力プログラム）が開催する一連の会議の第 13 回目となります。これまでに開催された会議は、オーストリア（1984 年）、米国（1987 年、2005 年）、日本（1990 年、2011 年）、オランダ（1993 年、2017 年）、カナダ（1996 年、2014 年）、ドイツ（1999 年）、中国（2002 年）、スイス（2008）。日本と中国での成功した歴史の後、アジアで開催されるのは 4 回目のヒートポンプ会議、そして韓国では初めての開催です。

#### 会場

会議会場は済州市にあるラマダブラザホテル済州で、済州空港から簡単にアクセスできます。済州島は東南アジアの

有名な休日の行先であり、美しいビーチ、火山、そして素晴らしい料理があります。世界遺産に登録されている済州火山島と溶岩洞窟があり、参加者と同伴される方々は間違いなく美しい島の訪問を楽しんでいただけたと思います。観光のほかに、さまざまなテクニカルツアーが計画されています。

#### 会議の目的

信頼性が高く確認された技術としてのヒートポンプは、さまざまなエネルギー源への幅広い用途を備えた省エネおよび温室効果ガス削減のための重要な機器です。今回の会議は、ヒートポンプの最新技術について議論するフォーラムとして、関連技術に関する市場、政策、および標準の情報に関する貴重な知識を交換します。国内外の企業の製品や技術を共有するための展示会が会議会場で開催されます。

## 会議トピックス

会議プログラムの中には、以下の問題に関する数多くの最先端のプレゼンテーションがあります。

- ▶ ヒートポンプ技術の最近の進歩
- ▶ 環境に優しい技術
- ▶ システムとコンポーネント
- ▶ フィールドデモンストレーションと多分野用途
- ▶ 研究開発
- ▶ ポリシー、基準、および市場
- ▶ 国際的な活動

## 会議の仕組み

- ▶ 著名な研究者による基調講演と全体講演
- ▶ 革新的なヒートポンプ技術、用途、市場に関する口頭およびポスター発表
- ▶ ヒートポンプ装置の展示
- ▶ 関連プロジェクトやヒートポンプ技術協力プログラムの Annex に関するワークショップ
- ▶ テクニカルツアー
- ▶ 観光プログラム
- ▶ 懇親会

## 論文審査プロセス

アブストラクトの提出は終了しました。アブストラクトは地域コーディネーターによって審査され、著者には受け入れが通知されました。本論文の提出のメ切は11月1日まででしたが、11月15日まで延長されました。

## 組織

この会議は、IEA ヒートポンプ技術協力プログラムの実行委員会を代表して、国際組織委員会 (IOC) および開催国組織委員会 (NOC) によって組織されています。

Per Jonasson IOC 会長、スウェーデン冷凍ヒートポンプ協会 スウェーデン

Sophie Hosatte IOC 副会長、CarnetENERGY、カナダ

前山 英明 IOC 副会長、HPTCJ  
(ヒートポンプ蓄熱センター)

Min Soo Kim NOC 会長、ソウル国立大学 韓国

Minsung Kim 会議事務局、チョンアン大学 韓国

詳細については、第13回 IEA ヒートポンプ会議の会議 Web サイトを参照してください。

<http://www.hpc2020.org/>



済州の風景と Ramada Plaza Hotel の夜景



## ヨーロッパのポジティブエネルギー地区-定義付けが進んでいます

数年前から、ポジティブエネルギー地区、つまり PED (Positive Energy Districts) に関して、ヨーロッパに関心が寄せられてきました。しかし、PED が実際に何であるかについての完全な共通定義は存在しません。これを変えるために、現在、その枠組みの定義作成に複数の加盟国が参加しています。

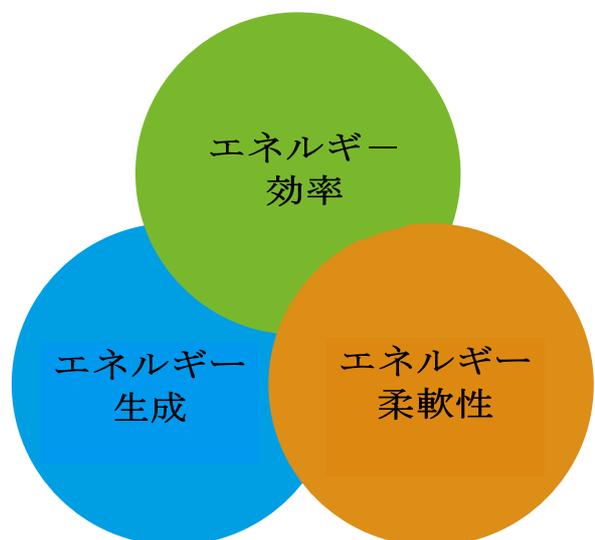
PED の基本的な定義は、特定の期間に消費するよりも多くのエネルギーを生成することです。しかし、PED の概念を使用して変革を促進するには、他の側面も定義に含める必要があります。それは、エネルギー効率、エネルギーの柔軟性、エネルギー生産です。欧州の取り組みは、これら3つの機能間の最適化に努めるとともに、再生可能エネルギー導入と温室効果ガスの削減の必要性を強調することです。

ほとんどの場合、PED には多くの異なるエネルギー源が必要です。これらのうち、ヒートポンプは、その可能性よりしばしば必然な選択肢の1つになります。残りのエネルギーシステムと統合すると、柔軟なサービスに貢献できます。たとえば、断続的な電力生産の導入を促進します。また、廃熱を適切に処理するためにも使用できます。ヒートポンプは、再生可能な電気で作動する場合、温室効果ガスの排出がゼロの完全に再生可能な代替手段も提供します。

欧州の考え方は、非常に具体的な定義を作成することではありません。これは、前提条件が国や都市によっ

て大きく異なり、つまりすべての PED を同じ方法で作成できないという理解に基づいています。その代わり、技術、エネルギーのニーズ、方針、およびその他の場所による状況に左右されない枠組みの定義が検討されています。

EU に対する共通の PED 定義の必要性は、2025 年までに少なくとも 100 の PED を作成することを目的とする組合の目標に由来し、それは各加盟国に少なくとも 1 つはあります。すでに取り組みが進んでおり、一般的で広く受け入れられている枠組みを定義することは、作業をさらに強化するための進行役と考えられます。



## ヒートポンプ技術における技術協力プログラム進行中の Annex

HPT TCP 内のプロジェクトは Annex として知られています。Annex への参加は、プロジェクトの特定の目的に関してだけでなく、国際的な情報交換によっても、国内の知識を高めるための効率的な方法です。Annex は限られた期間での活動です。その目的は研究から新技術の実装まで異なる場合があります。

FUEL-DRIVEN SORPTION HEAT PUMPS	43	AT, <b>DE</b> , FR, IT, KR, SE, UK, US
HYBRID HEAT PUMPS	45	CA, DE, FR, <b>NL</b> , UK
DOMESTIC HOT WATER HEAT PUMPS	46	CA, CH, FR, JP, <b>NL</b> , KR, UK, US
HEAT PUMPS IN DISTRICT HEATING AND COOLING SYSTEMS	47	AT, CH, <b>DK</b> , SE, UK
INDUSTRIAL HEAT PUMPS, SECOND PHASE	48	AT, CH, <b>DE*</b> , DK, FR, JP, UK
DESIGN AND INTEGRATION OF HEAT PUMPS FOR nZEB	49	AT, BE, <b>CH</b> , DE, NO, SE, UK, US
HEAT PUMPS IN MULTI-FAMILY BUILDINGS FOR SPACE HEATING AND DHW	50	AT, <b>DE</b> , FR, IT, NL
ACOUSTIC SIGNATURE OF HEAT PUMPS	51	<b>AT</b> , DE, DK, FR, IT, SE
LONG-TERM MEASUREMENTS OF GSHP SYSTEMS PERFORMANCE IN COMMERCIAL, INSTITUTIONAL AND MULTI-FAMILY BUILDINGS	52	FI, NL, NO, <b>SE</b> , US, UK, DE
ADVANCED COOLING/ REFRIGERATION TECHNOLOGIES DEVELOPMENT	53	CN, DE, IT, KR, <b>US</b>
HEAT PUMP SYSTEMS WITH LOW GWP REFRIGERANTS	54	IT, JP, KR, <b>US</b>
COMFORT AND CLIMATE BOX	55	AT, IT, <b>NL</b> , SE, US

 NEW    \*) Operating Agent from Germany, but no other parties from the country participate.

ヒートポンプテクノロジー参加国に関するテクノロジーコラボレーションプログラムは次のとおりです。

オーストリア (AT)、ベルギー (BE)、カナダ (CA)、中国 (CN)、デンマーク (DK)、フィンランド (FI)、フランス (FR)、ドイツ (DE)、イタリア (IT)、日本 (JP)、オランダ (NL)、ノルウェー (NO)、韓国 (KR)、スウェーデン (SE)、スイス (CH)、英国 (UK)、および米国 (US)。

**太字の赤い文字は、オペレーティングエージェント（プロジェクトリーダー）を示します。**

**ANNEX 43** **燃料駆動吸着ヒートポンプ**

Annex43 の中では、産業界と学術パートナーのコンソーシアムが協力して、燃料駆動吸着ヒートポンプの市場での受け入れ拡大活動を実施しています。市場の障壁と機会を特定し、典型的な暖房システムにおけるこの種のヒートポンプの性能を定量化し、最適なシステムレイアウトの特定、標準化されたパフォーマンス評価の技術手順を提案します。吸着技術は、家庭用暖房のガス消費量を 40% (既存の製品) 削減、節約量を 60% に増加させる可能性があり、それだけの GHG 排出抑制の利点があります。

**序論**

ヒートポンプ市場は、電気駆動圧縮技術が優位を占めます。技術的停滞期間を経て、20 世紀の終わりに、主に熱駆動冷却の対応として、熱駆動吸着技術が「再発見」されました。近年、ガス火力の吸着ヒートポンプは、主に既存の建物で、暖房および衛生的な温水を作るための効率的なソリューションとして認められています。それらは、電力供給網への要求を減らし、将来の異なる供給源 (例えば、バイオガス、電力の燃料ガス変換) と既存設備とを使ったエネルギーミックスにおける全体的なエネルギー消費をバランスさせる可能性がある電気駆動ヒートポンプの補完的技術と見なされています。この技術は、特に既存の建物では効率的であり、再生可能エネルギーを大量に使用する次世代の効率的な凝縮ガスボイラーとしてよく見られます。この Annex は、産業界と学界の専門家の協力により、この初期段階において技術をサポートすることを目的としていました。

需要側のエンドユーザーとして、市議会および大規模な住宅団地を所有する住宅会社は、重要なターゲットグループです。供給側では、ヒートポンプ製造業者、

電力会社、技術コンサルタント、計画立案者/設置業者に対応しています。さらに、政府は炭素排出のない社会の将来発展のための境界条件を設定しているため、政治的意思決定者が関心を持っています。

**Annex43 の結果**

Annex 中では、市場の要求と可能性についての共通の見解が様々な市場で見いだされました。とりわけ、これは下記レポートにつながりました。

[ミッションイノベーション：冷暖吸着ヒートポンプのイノベーションチャレンジ。](#)

家庭用のガス (天然ガス、バイオガス、水素など) ヒートポンプは、世界の生産量が年間 1,300 万を超える凝縮ボイラー (中国、韓国、英国が最大の個別市場) の後継となった場合、非常に大きな潜在市場です。吸着技術は、家庭用暖房のガス消費量を 40% (既存の製品) 削減し、節約量を 60% に増加させる可能性があり、それだけの GHG 排出抑制の利点があります。

技術に関係なく、吸着ヒートポンプが主流システムとして確立されるための主要な課題は、コストの大幅な削減です。20kW 未満の容量の唯一の製品は少量生産であり、小売コストは約 10,000 ユーロです。年間 100,000 を超える生産があれば、スケールメリットにより、コストが 3,000 ユーロに下がる可能性があると言われています。また、低容量のシステム (約 10kW) と、設置に特別なスキルを必要としないコンパクトなユニットが必要です。

Annex では、吸着および吸収ガスヒートポンプ (GHP: Gas Heat Pumps) の両方について進行中のいくつかの開発に関する進展がありました。ミラノ工科大学 (イタリア) では、プレート式熱交換器 (PHE: Plate Heat Exchanger) に基づく水アンモニア吸収ガスヒートポンプが開発中であり、コンパクト性と供給温度が高い条件での効率の両方の点で有望な結果を示しています (図 1 参照)。また、Ariston (イタリア) は住宅市場向けの吸収ガスヒートポンプに取り組んでいます。

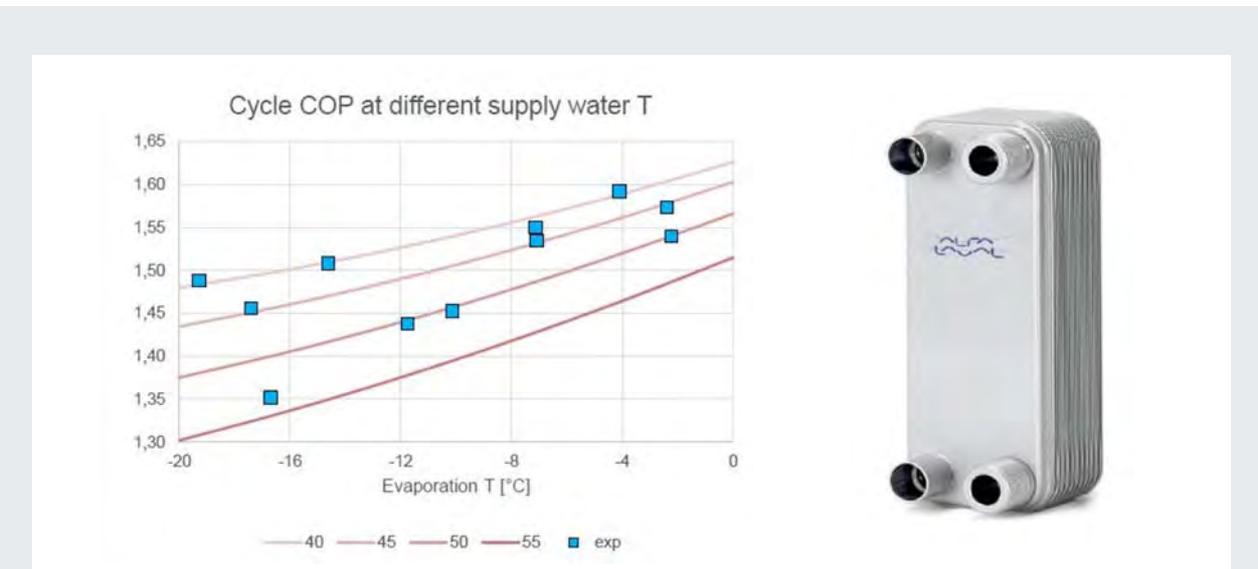


図 1 : 公称負荷の 75%での単一チャンネル PHE 吸着器 (アルファラバル) によって達成された実験結果の多項式補間 (Politecnico di Milano、プロジェクト i-GAP)

Warwick 大学 (英国) は、有望な新しい吸着装置の設計により、活性炭とアンモニアを作動流体として使用する吸着ガスヒートポンプの開発のための資金を受け取りました (図 2)。Fraunhofer ISE (ドイツ) は、業界パートナーのコンソーシアムとともにゼオライト水ベースの GHP の開発に取り組み、バインダーベースのコーティング技術を開発しました (図 3)。

Sorption System Simulation プログラム (SorpSim) は、Oak-ridge National Laboratory (ORNL, USA) および Purdue University (USA) によって開発され、使いやすい機能とパラメーター分析関数を使用して、幅広い吸着サイクルの柔軟な定常状態シミュレーションおよび分析を行います (図 4)。Annex43 参加者からの提案で開発されたアイソサーモデータベース SorpPropLib は、外部ライブラリとして SorpSim に動的にリンクされ、SorpSim GUI でシミュレーションと等温線照会機能をサポートしています。これにより、ユーザーは吸着ヒートポンプ用の新しい材料の効果を評価できます。

いくつかのシミュレーション研究が行われました、例えばさまざまな建物タイプ、気候、および熱分配システム向けのガス駆動吸着ヒートポンプの可能性を導きます。凝縮ボイラーと比較して、既存の製品では最大 40% の一次エネルギー使用の節約が可能であり、進行中の開発では 60% の節約が可能であることが示されています。

**EHPA ワーキンググループ熱駆動ヒートポンプ**

欧州ヒートポンプ協会 (EHPA) 内では、ワーキンググループの熱駆動ヒートポンプ (WG-TDHP) は、ネットワーク、政策および法律情報、業界と学界とのやり取り、効率的で費用対効果の高いヒートポンプで暖房市場に参入するための一般的な戦略など Annex43 の作業の一部を継続しています。

**Contact**

OA は Peter Schossig です。  
 Fraunhofer ISE、ドイツ  
[peter.schossig@ise.fraunhofer.de](mailto:peter.schossig@ise.fraunhofer.de)



図 2: 「ケバブの設計」: アンモニア吸着用のコンパクトな活性炭を備えた新しいフィン付きチューブおよびシェル吸着器 (Warwick 大学)

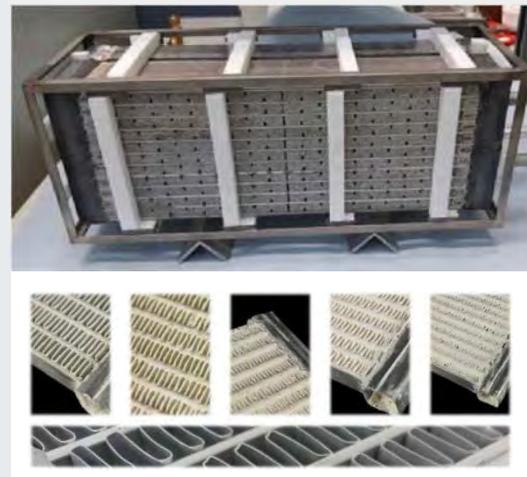


図 3: 直接結晶化コーティング (華氏) を備えたアルミニウム繊維熱交換器 (Fraunhofer) に基づくコンパクトなゼオライト-水吸着モジュール (Fahrenheit)、上図 新しいバインダーベースのゼオライトコーティング (Fraunhofer)、下図

**Annex ウェブサイト**

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex43/>

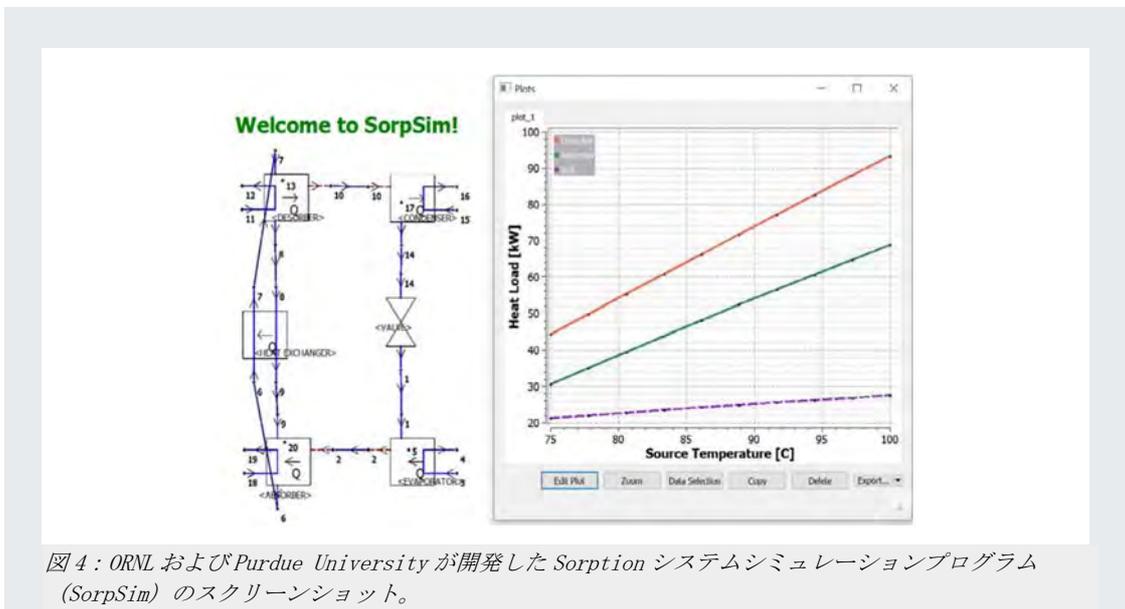


図 4: ORNL および Purdue University が開発した Sorption システムシミュレーションプログラム (SorpSim) のスクリーンショット。

ANNEX  
47

地域冷暖房システムの  
ヒートポンプ

一般に地域暖房、特にグリッドに接続されたヒートポンプは、エネルギーグリッドと将来の供給において重要な役割を果たすと予測されています。地域暖房の導入により、ヨーロッパの暖房需要の最大 50%をカバーすることが可能になり、ヒートポンプは地域暖房グリッドにエネルギーの約 25%を供給することができます。エネルギーシステムにおける地域暖房の割合が大きい Heat Roadmap Europe 4 シナリオ (HRE4) は、現在の状況と比較して、CO<sub>2</sub> 排出量を 70%以上削減できることを示しています。

ヒートポンプは、さまざまな方法で将来の地域暖房グリッドの重要な技術となります。

- 1: ヒートポンプは、発電量が変動する場合にバランスを取る技術として機能します。
- 2: ヒートポンプは、エネルギーシステムから化石燃料を段階的に廃止します。
- 3: ヒートポンプは超低温 (60°C未満) および極低温 (45°C未満) の地域暖房グリッドで使用可能です。
- 4: ヒートポンプにより、地域暖房グリッドのグリッド損失を最小限に抑えることができます。

序論

地域暖房が化石燃料を段階的に廃止する方法であることを徐々に多くの国が認識しているため、地域暖房システムのヒートポンプに関する Annex47 は、IEA ヒートポンプ技術 TCP の重要な Annex です。Annex は現在完成しており、すべてのレポートとケーススタディは [Annex ウェブサイト](#) で入手できます。プロジェクトグループは、オーストリア、デンマーク、スウェーデン、スイス、英国のメンバーで構成され、プロジェクト期間中、地域暖房におけるヒートポンプへの関心が他の

国で高まっています。「マルチベクトルエネルギーシステムおよび熱ネットワークでのヒートポンプの実装による柔軟性」に関しては、後継の Annex が開始される可能性が最も高いでしょう。

市場概況

HRE4 プロジェクトは、欧州の都市部の大部分において地域暖房 (DH) が費用効率の高いソリューションであり、研究に含まれる 14 か国の総熱需要の少なくとも半分を提供しながら、CO<sub>2</sub> 排出量と冷暖房部門の一次エネルギー需要を効率的に削減できることを示しました。その結果に基づいて、プロジェクトは、大規模なヒートポンプ (HP) が柔軟で安全な供給システムを開発するために、将来の DH システムで大きな役割を果たすことを示唆しています。

HRE4 プロジェクトによると、暖房セクターにおける DH の欧州シェアは、**2050 年までに 12% (現在の値) から 50%に増加**するはずですが、これは、欧州の暖房部門における重要な変化であり、エネルギー部門の CO<sub>2</sub> 排出量を大幅に削減するために、DH は費用対効果が高く不可欠である可能性があることを示しています。HRE4 プロジェクトでは、3 つの主要なシナリオが開発されました。

- ▶ **BL 2015** - 2015 年のデータに基づく、冷暖房部門の現在の状況を表すベースラインシナリオ。図 1 を参照
- ▶ **BL 2050** - このシナリオは、貯蓄や RES などに関する現在合意されているポリシーの下でのベースラインシナリオの開発を表しますが、システムの脱炭素を改善するための追加措置はありません。
- ▶ **HRE 2050** - 省エネを含む再設計された冷暖房部門を備えた高度に脱炭素化されたエネルギーシステムを表すシナリオです。このシナリオは実証済みのテクノロジーのみに基づいており、持続不可能な量のバイオエネルギーには依存しません。

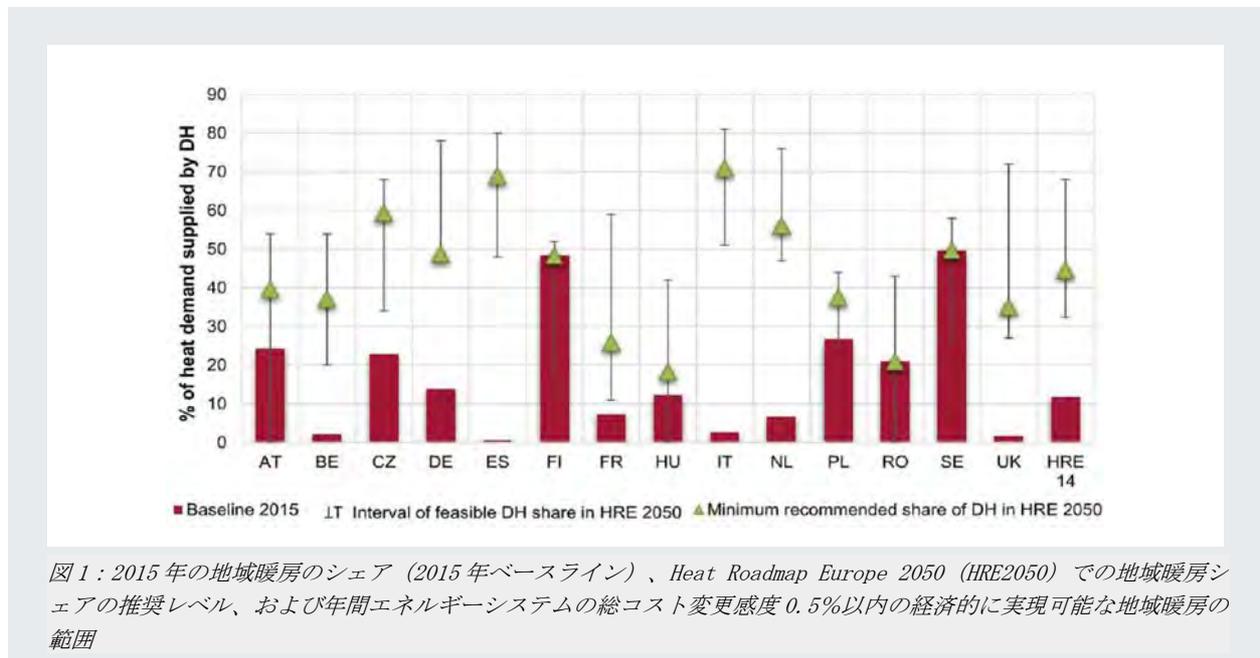


図 1: 2015 年の地域暖房のシェア (2015 年ベースライン)、Heat Roadmap Europe 2050 (HRE2050) での地域暖房シェアの推奨レベル、および年間エネルギーシステムの総コスト変更感度 0.5%以内の経済的に実現可能な地域暖房の範囲

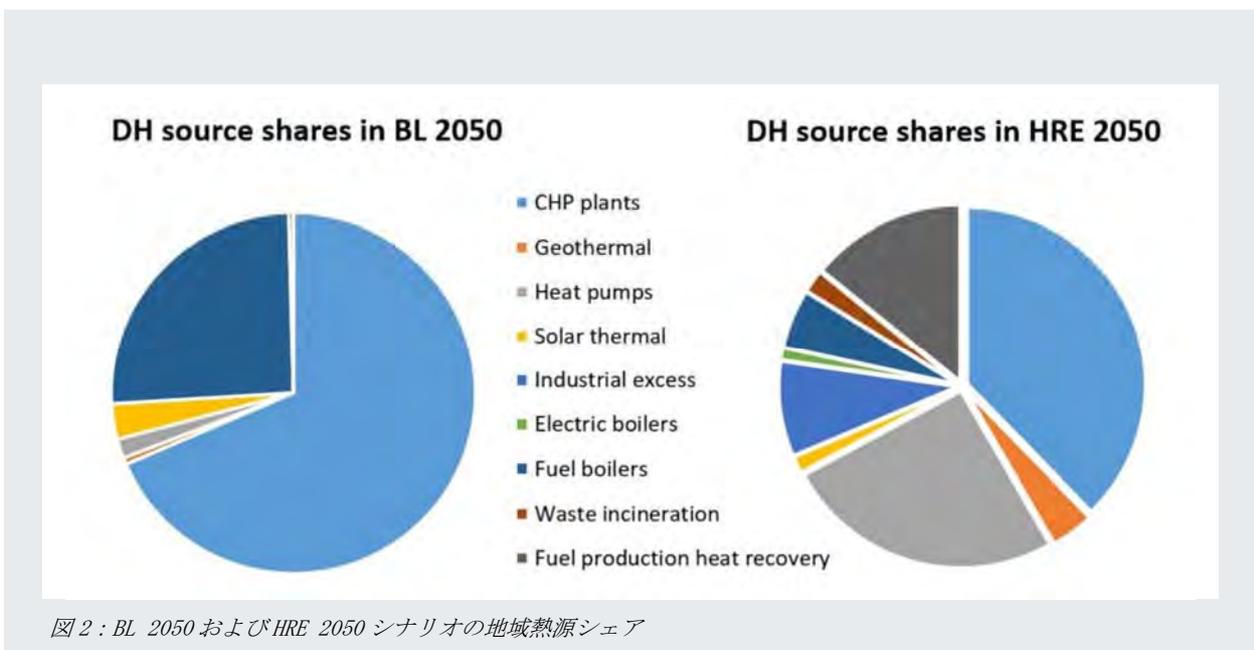


図2：BL 2050 およびHRE 2050 シナリオの地域熱源シェア

2050年のモデル化されたエネルギー効率シナリオ（HRE 2050）では、DHは大部分が脱炭素エネルギー源によって供給され、**総DH需要の25%が大規模HP**によって占められています。図2を参照してください。このシナリオでは、DHにより多くのエネルギーが供給され、システムの柔軟性と供給のセキュリティが向上します。HRE 2050シナリオは、2020年にBL2050シナリオよりもはるかに多くの脱炭素DHを達成できることを示しており、**CO<sub>2</sub>排出量を70%以上削減**します。

#### デモンストレーションプロジェクト

Annex47の主な目的の1つは、地域暖房グリッドでのヒートポンプの実装と統合に関する可能性を示すことです。そのため、さまざまな実装事例を示すアイデアカタログを作成することが目的でした。プロジェクトグループは、ヒートポンプが地域暖房グリッドに統合されている39の異なるケースを説明することができました。すべてのケースは、[Annex47のWebページ](#)に掲載されています。

#### さまざまな概念/解決策のレビュー

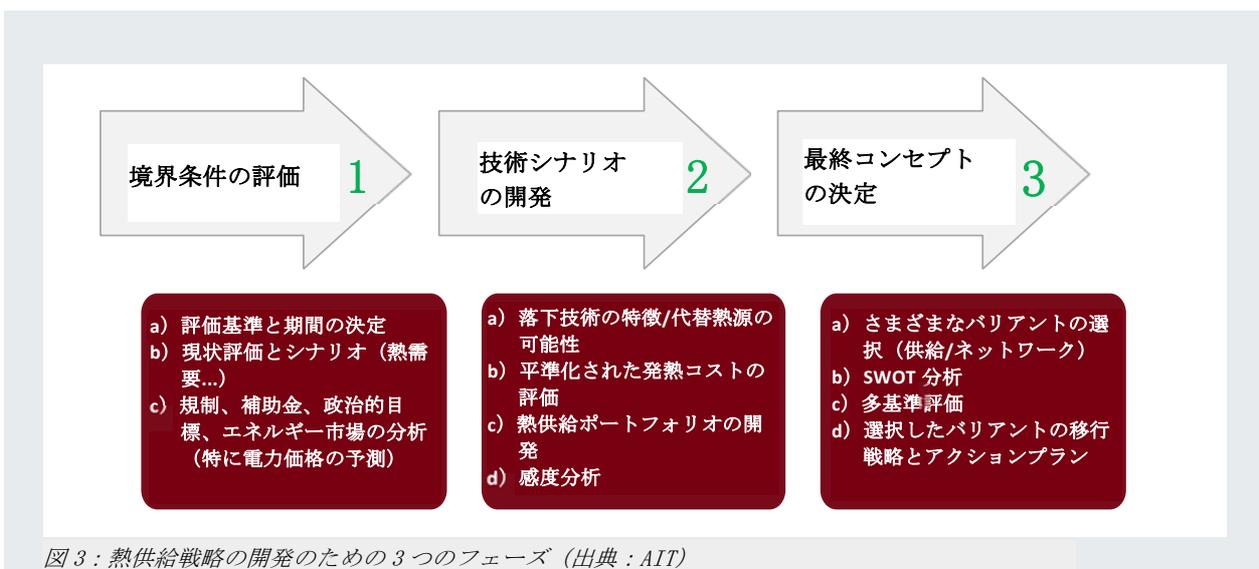
この研究は、1980年代以降、特にスカンジナビア地域で、大型ヒートポンプが地域暖房ネットワークに統合されたことを示しています。地域の暖房ネットワークの普及と、太陽光発電（PV）や風力などの変動する電力源のシェアの増加は、電力価格の低下と結びついています。現在、スウェーデンは地域冷暖房ネットワークでヒートポンプを使用している先駆者です。地域暖房需要の約7%はヒートポンプによって生み出されています。他の国では、ヒートポンプ市場は主に一戸建ておよび多世帯住宅の供給のためのデバイスで構成されています。多くの暖房ネットワークではシステム温度が高いため、システムの費用対効果を保証するためには、適応したコンセプトが必要です。したがって、fit4power2heatなどの現在の研究プロジェクトの目的は、さまざまなエネルギー市場に参加し、魅力的な代

替手段としてのヒートポンプを確立することです。特にここ数年、地域の冷暖房（DHC）ネットワークにおけるヒートポンプの統合を促進するために、ヨーロッパ全体で多くの取り組みが開始されたことに言及する必要があります。

とりわけ、経済的な運用の基礎は、システムの正しい設計と油圧との統合です。さまざまな動作モードによって利点を実現できます。一価動作の代わりに、ピーク負荷時間用の追加の熱発生器により、投資コストとリスクの大部分を節約できます。

さらに、システムの最適な動作を実現するために、さまざまな回路オプションを使用できます。どのフレームワーク条件が存在するかに応じて、効率の観点から、したがってコストの観点からもかなりの可能性を活用することができます。熱源システムとヒートシンクの正しい設計は、ヒートポンプ自体の寸法と同じくらい重要な役割を果たします。

最初の手がかりとして、AITは社内Excelベースのツールを開発しました。このツールを使用して、実現可能性と費用対効果を事前に見積もることができます。簡単な計算の助けを借りて、それらをすでに実現しているプラントと比較することで、最初の結論を導き出すことができます。計画されたプロジェクトに関する詳細情報があればあるほど、初期評価はより正確になります。VBAとツールに統合されたデータベース、およびユーザーインターフェイスを使用してExcelに変換することで、特別なソフトウェアの予備知識がなくても、比較的簡単に計算を実行できます。したがって、基礎となるデータベースの迅速かつ簡単な適応も保証されます。電気駆動の圧縮ヒートポンプに加えて、熱作動ヒートポンプも使用されます。アプリケーションの分野に応じて、さまざまなテクノロジーの利点を活用できます。



上記の調査によって達成された結果を参照して、地域暖房ネットワークにおけるヒートポンプの重要性と貢献が指摘されました。さらに、ヒートポンプを中央ストレージユニットと組み合わせて運用するための「ベストプラクティス」戦略に関する推奨事項が提示されました。

- ▶ 動的な価格設定と需要側管理 (DSM) を備えたヒートポンプは、動的な操作が燃料と電力の価格の変動を打ち消すため、市場リスクに対してより弾力性があります。
- ▶ ヒートポンプは、熱生成ポートフォリオを拡大することで地域暖房システムの柔軟性を高めます。これにより、迅速な試運転と低い起動コストで高い反応性を実現し、安定しない電力市場と熱電池を有効利用できます。
- ▶ ヒートポンプを使用して、再生可能な熱生成を増やすことができます。さらに、低温熱源と代替熱源 (廃熱など) を使用できます。

### 実施の障壁、可能性、解決策

地域暖房ネットワークは、特に都市部の将来のエネルギーシステムに不可欠です。ヒートポンプの統合は、DH ネットワークへの投資リスクを軽減し、供給の安全性を高め、CO<sub>2</sub>排出を削減し、パリで合意された COP 21 の目標に貢献できます。現在、ヨーロッパの地域暖房ネットワークでは、ヒートポンプは小さな役割を果たしています。

ヒートポンプの大規模な統合の障壁は、とりわけ、熱源の欠如 (多くの場合、分散された少量でのみ利用可能) または熱源の低温レベル (低効率) です。同様に、ほとんどのオペレーターは (既存の) 地域の暖房システムでのヒートポンプの統合と操作に関する経験がまだありません (よく知られているバイオマスまたはガスペースの発電ユニットと比較して)。

もう 1 つの障壁は、ヒートポンプの効率を低下させる既存の熱ネットワークの高温です。さらに、これらのネットワークの高温は、特に住宅の建物で高い熱損失

をもたらす、非常にエネルギー効率の高い建物では熱ネットワークをほとんど持続不可能にします。したがって、低温ネットワーク対応は、これらのネットワークでのヒートポンプの使用を増やすのに役立ちます。

それにもかかわらず、近年では、地域暖房事業者の間でヒートポンプの採用が増えています。これにより、タスク 2 に示すように、多くの革新的なヒートポンププロジェクトが生まれました。

DH ネットワークにおける発熱プラントの最適な組み合わせは、さまざまなパラメーターに依存し、各ネットワークに対応して個別対応になります。地域暖房ネットワークの持続可能な熱供給の概念を開発する方法はタスク 3 で説明されており、図 3 に示す 3 つのフェーズで構成されています。

かなりの割合の代替熱源を含む持続可能な熱供給を達成するには、より多くの実証サイトの実施が必要です。

成功要因は次のとおりです。

- ▶ 強力なパートナー (企業、研究所、新興企業など) ;
- ▶ プロジェクト (デモ、ベストプラクティス、体験の表示、HP をインストールする動機) ;
- ▶ 実践による学習 (「会費を支払う」意思がある先駆者が必要)
- ▶ エネルギー空間計画 (廃熱の局所化、二重インフラストラクチャの回避) ;
- ▶ 標準化されたソリューション (R&D、コストの低下/規模の経済)。
- ▶ 価格のシグナル (化石燃料の使用に対する; クリーンエネルギーに対する税金と賦課金の負担を軽減する)。

### Annex ウェブサイト

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/>

### Contact

OA は、デンマーク DTI の Svend V. Pedersen です。  
[svp@teknologisk.dk](mailto:svp@teknologisk.dk)

**ANNEX 48** 産業用ヒートポンプ 第二段階

産業用ヒートポンプ（IHP）は、アクティブな熱回収デバイスです。Annex の目的は、産業での利用の増加によるエネルギー消費と GHG 排出の削減に必要な産業用ヒートポンプの世界的な活動を理解することです。Annex48 の目標は、政策立案者、協会、および産業向けの簡潔で明確な情報資料の開発と配布に集中することです。

最新のワークショップは、2019年8月28日にモントリオールで開催された IIR 国際冷凍会議で7つのプレゼンテーションとパネルディスカッションが行われました。

**R. Jakobs** は、1980年代以降の産業用ヒートポンプ Annex 歴史、および現在の研究の主な目標について主題を紹介しました。

**V. Wilk** は、オーストリアの産業におけるエネルギー効率の向上について話しました。IHP の70を超える興味深い例が収集されています。特に食品業界では、10~100 kW の範囲で、暖房用の内部熱需要を伴う加熱と冷却の同時アプリケーションが特定されています。他の用途は、吸収および圧縮機 HP を伴う煙道ガス凝縮用の地域暖房用の発電所です。

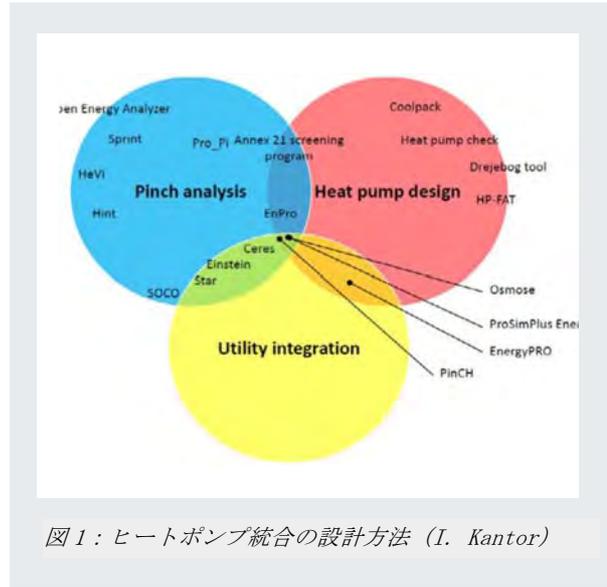


図1：ヒートポンプ統合の設計方法 (I. Kantor)

**I. Kantor** は、スイスでプロセスにおける IHP の最適な配置を特定しました。彼は、ピンチ解析とヒートポンプ統合の設計方法の最新技術に関する概要を説明しました。図1を参照してください。

**N. Hewitt** は、英国で IHP アプリケーションを発表しました。高温ヒートポンプの研究により、200℃までの遷臨界流体の方向が示されました。ヒートポンプと有機ランキンサイクルの組み合わせについて議論され、地域暖房グリッドの有望な改善ステップとして、低温度ネット（LoT-NET）の野心的な可能性が示されました。

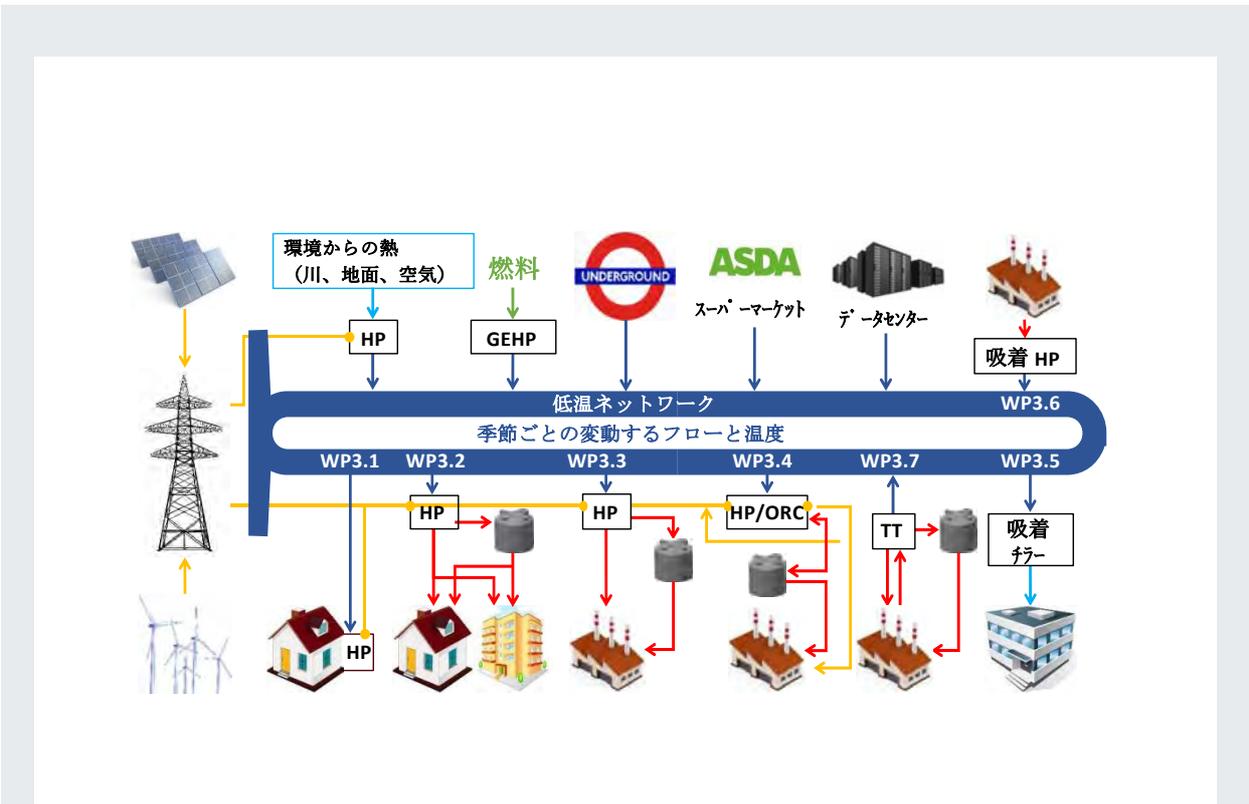


図2：地域暖房グリッドの低温度ネットの可能性 (N. Hewitt)

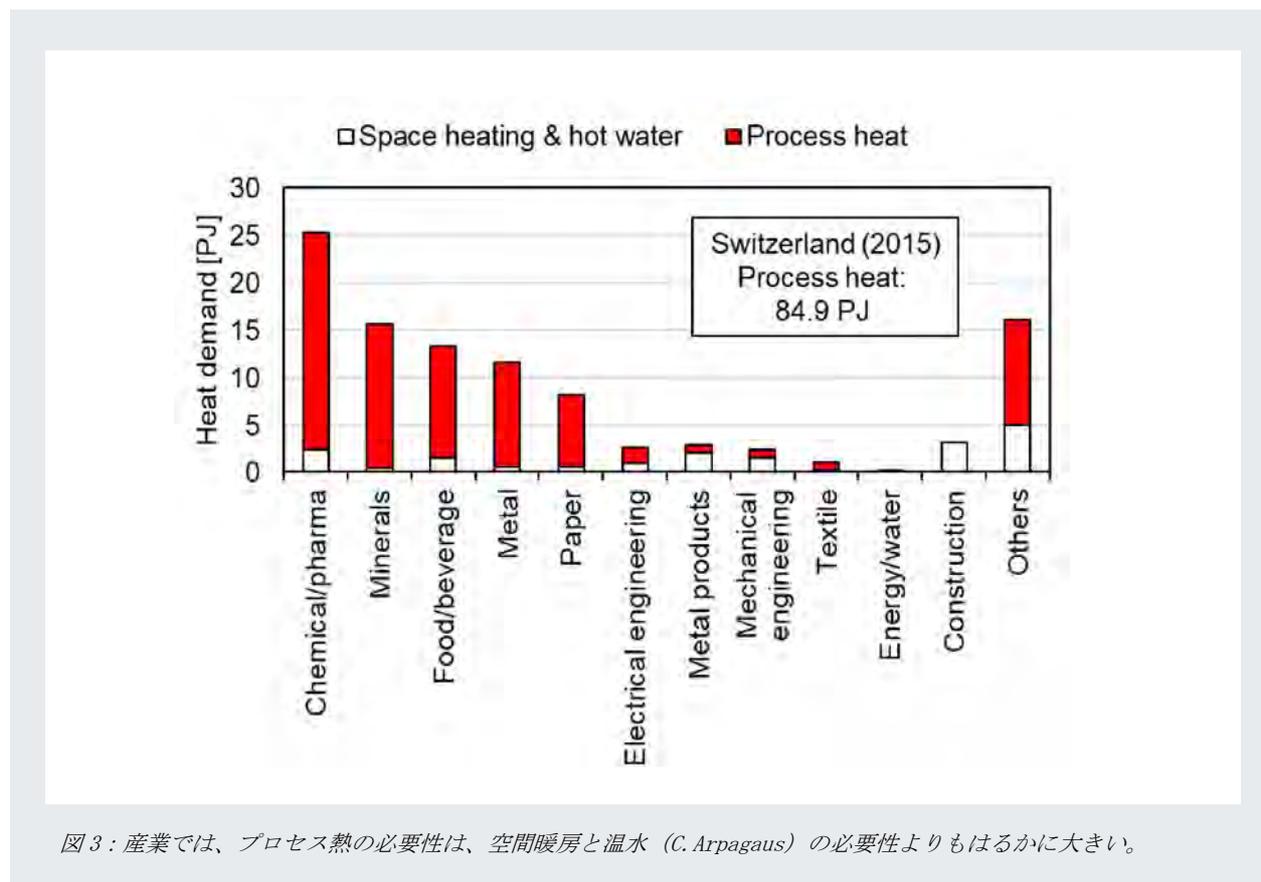


図3：産業では、プロセス熱の必要性は、空間暖房と温水 (C. Arpagaus) の必要性よりもはるかに大きい。

B. Zühlsdorf は、特にデンマークの地域暖房および産業向けの IHP アプリケーションを発表しました。彼は彼の国のエネルギーシステムの特別な政治的目標について議論しました。詳細については、この雑誌号の記事 P39 を参照してください。

IHP を使用した地域暖房は、100 MW 以上の暖房能力です。すべての関係者が状況を理解し、ソリューションが標準化され、計画をサポートするためのさまざまなツールが利用可能になります (計画ガイドライン、必要なすべての情報、考えられるシナリオの構造化概要、インスピレーションとベストケースの例、計算ツールを含む)。ヒートポンプは、地域暖房に適したソリューションになりつつあります。

内山氏は、日本の産業用ヒートポンプのグッドプラクティスの評価を発表しました。GHG 排出の緩和目標の話題から始め、2030 年には 26%削減、2050 年には 80%、2100 年には 100%になります。グッドプラクティスの 112 のサンプルについて、アプリケーションセクター、供給温度、一次エネルギー、CO<sub>2</sub>、エネルギーコストの節約の効果を示しました。ベストプラクティスの選択は、特別な基準分析によって行われました。ベストプラクティスに必要な 4 つの重要な項目は次のとおりです。低温熱の回収またはリサイクル、蒸気の熱損失の減少、異なる生産プロセスと同時加熱と冷却動作のための個別熱供給。

C. Arpagaus は、スイスの産業におけるヒートポンプの重要性の高まりを示しました。優先度 1 は食品産業、2 は化学産業、3 は金属製品です。図 3 も参照してください。

チーズ工場の熱源としてサーバルームからの廃熱を利用することは、地域の熱源とヒートシンクの需要を組み合わせる低温

ネットのさらに有望な例でした。詳細については、HPT Magazine issue 2/2019, p 23 の記事を参照してください。

**Annex ウェブサイト**

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex48/>

**Contact**

OA は、ドイツ IZWe.V. の Rainer M. Jakobs です。  
[Jakobs@izw-online.de](mailto:Jakobs@izw-online.de)

ANNEX  
49nZEB のための  
ヒートポンプの  
設計と統合

ほぼゼロエネルギーの建物 (nZEB: Nearly Zero Energy Buildings) の建築技術の概念は、ほぼゼロのエネルギー消費を達成するための要件が 2019 年 1 月 1 日に EU の建物のエネルギー性能指令 (EPBD: Energy Performance of Buildings Directive) に従ってすべての新しい公共建物に導入されたため、重要性を増しています。2021 年の初めまでの約 1 年で、この要件はすべての新しい建物に拡張されます。家庭用温水 (DHW: Domestic Hot Water) と空間冷却も重要性が増しており、ヒートポンプは、特に高性能建物の要件と多機能運転の有利な境界条件において、高効率という独自の特徴により nZEB 建築技術としてすでに十分に認知されています。IEA HPT Annex49 では、ほぼゼロエネルギーの建物でのヒートポンプの適用と統合が詳細に調査されています。

タスク 1、最先端の分析、参加国における nZEB のさまざまな定義の比較が行われます。これに対しては、さまざまな調和の試みはされておりますが、結果として各国の定義がまったく異なってしまっているためです。このため、各国の目標レベルの話しをすることも困難です。

タスク 2、タスク 3、およびタスク 4 では、ヒートポンプの統合と設計、および nZEB が実現されたヒートポンプを搭載した案件のモニタリングを単一の建物だけでなく、建物のグループと周辺地域についても調べます。一部の国では、これらのタスクは相互にリンクされており、モニタリングプロジェクトはシミュレーションによって並行して分析されます。

たとえば、ドイツでは、8 つのプラスエネルギーシングルファミリーハウスの継続的なモニタリングプロジェクトがあり、低温熱グリッドを使用する 2 つの中央容量制御地上熱源ヒートポンプによって供給されます。図 1 (左) を参照してください。セントラルヒートポンプ

はセントラル蓄熱としても機能します。88kWp の大規模な PV システムが住宅に設置されているため、PV 電力の自己消費にヒートポンプを運転することにより、負荷管理の選択肢が拡大されます。さらに、PV バッテリー用のストレージが含まれています。家庭用温水は、熱グリッドを熱源として使用するブースターヒートポンプを備えた分散型 DHW ストレージによって加熱されます。対応するシミュレーション研究 (図 1 右) は、システムの性能評価と、PV の自己消費とグリッドの相互作用に関する制御の最適化を扱っています。

モニタリングの結果より、中央の地下熱ヒートポンプの良好なパフォーマンスが確認され、COP のシステム限界で 5.4 および 6 の季節性能係数 (SPF) に達します。2 つのヒートポンプとソースポンプを含む、発電システム全体の効率が 5.6 と計算されており、シミュレーション値よりもさらに優れています。分散型ブースターヒートポンプでは、モニタリングデータから、SPF=4.1 (ポンプ除く)、4.0 (ポンプ含む) の結果を得ました。ただし、ブースターヒートポンプはカスケードシステムであり、熱グリッドを熱源としています。制御の最適化 (図 1 右) に関して、電気および蓄熱を備えたヒートポンプの需要側管理 (DSM: Demand Side Management) は、PV 発電の自己消費を増加させ、バッテリー蓄電を削減します。シミュレーションによって評価されたケーススタディでは、直接 PV 消費量が 21% 増加する一方で、バッテリー入力が 10% 削減され、グリッドへの入力が 11% 削減されました。

Annex49 のさらなる中間結果は、2020 年 5 月に韓国済州で開催される IEA ヒートポンプ会議での Annex49 の半日のワークショップで発表されます。

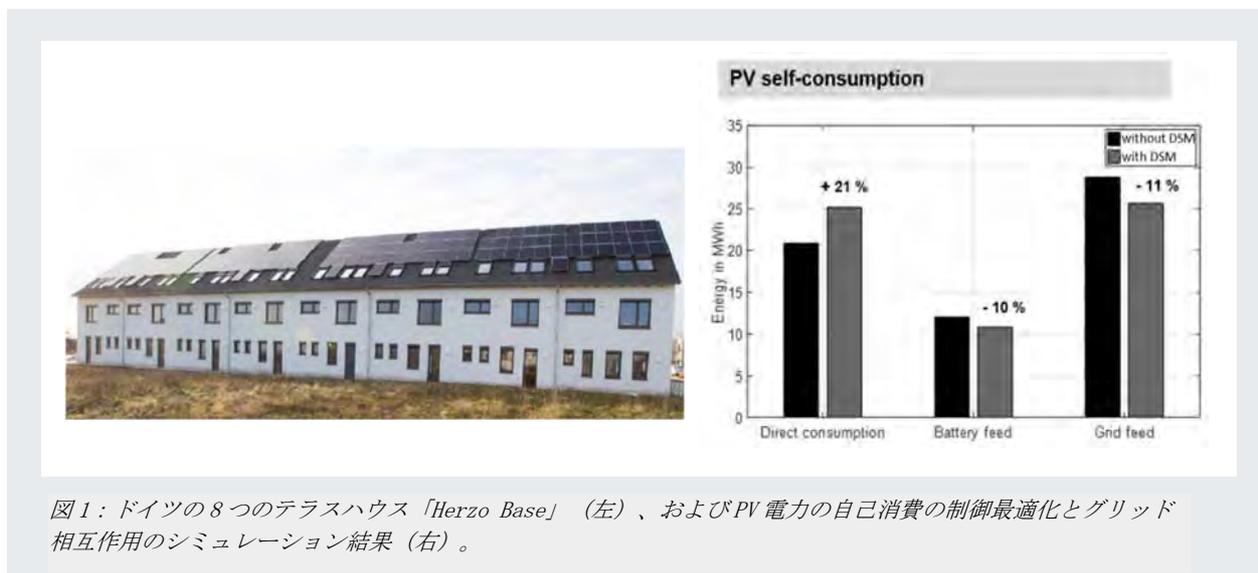
## Annex ウェブサイト

<http://heatpumpingtechnologies.org/annex49/>

## Contact

OA は、スイス SFOE の Carsten Wemhoener です。

[carsten.wemhoener@hsr.ch](mailto:carsten.wemhoener@hsr.ch)



ANNEX  
52商業、教育機関向けおよび  
多世帯ビルにおける GSHP  
システム性能の長期的測定

HPT Annex52 -商業、施設、および複数家族向けの建物の GSHP システムの長期パフォーマンス監視は、現在その中間点に達しています。2019年8月現在、7か国がこのAnnexに参加しています（スウェーデン、米国、フィンランド、ノルウェー、ドイツ、英国、オランダ）。5月のフィンランドでの第3回Annex52専門家会議で、計装ガイドラインの最初の概要が提示および議論され、より大きく複雑なGSHPシステムに適用できる新しいシステム境界スキーマ（[SEPEMO](#)スキーマの拡張）が導入されました。これまでのところ、Annexは、SPFの報告がある合計55のGSHPシステムについて説明する65件の出版物、4件の公開された国際会議論文、2件の査読付きジャーナル論文から成る注釈付きの文献を作成しました。HPT Annex52の重要な目標の1つは、大規模な商用GSHPシステムに少なくとも1セットのオープンアクセス監視データを提供することでした。Naicker and Rees (2018) および Spitler and Gehlin (2019) が公開した2つの学術論文誌はどちらも、将来の研究で研究者や開発者が使用できる高品質のオープンアクセス測定データを提供しています。

Naicker and Rees (2018) は、イギリスのLeicesterにある大学の建物に供給されるGSHPシステムの季節的なシステムパフォーマンスファクターを示しています。SEPEMOレベルC1およびH1の季節ごとのパフォーマンスファクターが提示され、SEPEMOレベルH1、H2、およびH4に対応するSPF1、SPF2、およびSPF4と呼ばれる冷却および加熱の組み合わせのSPFも定義されています。著者は、サイクル時間の減少とともにサイクル損失が増加し、SPF2とSPF4がコンプレッサーの3分前に循環ポンプを起動するポンプ制御の影響を受けることを示しています。低負荷条件下で、短いサイクルで、揚水のエネルギー消費はヒートポンプのエネルギー消費の30%にもなることがあります。バッファタンクの組み込み、小容量の「リードヒートポンプ」の使用、可変速コンプレッサーの使用など、システムパフォーマンスを改善するためのいくつかのアプローチが特定されています。

Spitler and Gehlin (2019) は、スウェーデンのストックホルムにある複合商用GSHPシステムの1年間のモニタリングデータを分析しています。建物の所有者は、建物内のGSHPシステムに関する長年の経験があり、システムは経験豊富なスタッフによって徹底的に装備および監視されています。SEPEMO境界H2、H3、およびC2のSPF値が計算されます。建物では気流率の測定が利用できないため、システム全体のCOPおよびSPFを計算できません。著者は、システムが設計値と一致する空間加熱を提供し、提供される冷却が設計で予想されるよりも約4倍高いことを示しています。重要な発見は、測定されたCOPは、ヒートポンプへの流体温度の入力よりも、提供される加熱と冷却の量の影響が大きいことです。加熱COPは、流体温度が低くなると実際に高くなり



図1：英国レスターのDeMontfort大学Hugh Astonビルでの博士課程学生Selvaraj Naicker。写真：J.D. Spitler



図2：Studenthuset GSHPシステムで確認された問題の1つは、過剰なポンプ能力でした。写真：J.D. Spitler

ます。これは、機器運転中の割合が高く、ポンプやユニット制御ボードなどの「寄生」負荷の影響が少ないからです。対レジオネラ防護システムとDHW再循環システムは常に稼働しているため、夏にはCOPが1に接近します。さらに、ボアホール回路の最小流量設定値は、循環ポンプによる過剰な流量と過剰なエネルギー消費につながります。このペーパーには、大規模なGSHPシステムのパフォーマンス測定に関する文献の包括的なレビューが含まれています。著者は、以前の文献や既存の境界定義スキーマでは扱われていない商業ビルのSPFおよびCOPの計算におけるいくつかの問題を特定しています。これらの問題の1つは、換気ファンが使用する電気の扱いです。その主な目的は換気を提供することですが、かなりの量の加熱と冷却も提供します。

Annex52の作業内の次の手順は、計装と測定のガイドラインを使用して進行中の作業を完了し、さまざまなシステム境界に役立つ重要な性能指標を定義することです。4回目のAnnex52専門家会議は、9月16～17日にロンドンで開催されました。5回目の専門家会議は、2020年春にドイツで開催されます。Annex52の作業と結果の最新情報は、Annex Webサイトに継続的に掲載されています。



図3：ストックホルム大学の学生寮。  
クレジット写真：J.D. Spitler

### 参考文献

- [1] Abuasbeh, M., Acuña, J.: 2018. ATES System Monitoring Project, First Measurement and Performance Evaluation: case study in Sweden. IGSHA Research Track 2018, Stockholm, Sweden, September 18th 2018.
- [2] Andersson, O., Rydell, L.: 2018. The HT-BTES in Emmaboda, Sweden – Lessons learned and Further Actions. Enerstock 2018, Adana, Turkey, April 2018.
- [3] Gehlin, S. and J.D. Spitler. 2019. IEA HPT Annex 52 – Measuring GSHP system long-term performance. European Geothermal Congress 2019 in Den Haag, the Netherlands. June 11-14 2019.
- [4] Gehlin, S., Spitler, J.D., Larsson, A., Annsberg, Å.: 2018. Measured Performance of the University of Stockholm Studenthuset Ground Source Heat Pump System. Enerstock 2018, Adana, Turkey, April 2018.
- [5] Naicker, S. S. and S. J. Rees. 2018. Performance Analysis of a Large Geothermal Heating and Cooling System. Renewable Energy 122:429–42. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.099> (Measurement data available as open access at <http://archive.researchdata.leeds.ac.uk/272/>).
- [6] Spitler, J.D. and S.E.A. Gehlin. 2019. Measured performance of a mixed-use commercial-building ground source heat pump system in Sweden. Energies 2019, 12, 2020; doi:10.3390/en12102020. Open access at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/2020>

### Annex ウェブサイト

<http://heatpumpingtechnologies.org/annex52/>

### Contact

OA は、スウェーデン浅部地熱エネルギーセンター (Swedish Centre for Shallow Geothermal Energy) の Signhild Gehlin です。  
[signhild@geoenergicentrum.se](mailto:signhild@geoenergicentrum.se)

## ANNEX 53

## 高度な冷却/冷凍 テクノロジー開発

特に発展途上国での人口の増加と経済の発展により、部屋の冷却、除湿、冷蔵の世界的な需要が大幅に増加すると予測されています。これにより、世界のエネルギーと気候の目標を達成することが非常に困難になります。この課題に対処するため、HPT は、冷却および冷凍システムの効率を向上させるための長期的な RD&D に重点を置いた Annex53 を承認しました。関心のある技術には、よく知られ広く使用されている蒸気圧縮 (VC: Vapor Compression) システムに基づくものと、ますます調査が進められている非伝統的な冷却手法の両方が含まれます。

前回のレポート (HPT Magazine issue 1/2019/) 以降、IEA HPT TCP の最新メンバーである中華人民共和国が Annex に正式に参加しました。4 つの大学を代表する Annex テクニカルエキスパートチームがあり、弾性熱量冷却、電気熱量冷却、非共沸冷媒を使用した高度な VC サイクル、および吸収圧縮サイクルの調査を計画しています。

Annex すべての参加者は、それぞれの技術プロジェクトと現在までの進捗状況を説明するためにタスク 1 レポートを準備しています。ここでは 4 つの例を紹介します。エイムズ研究所 (Ames, アイオワ州、米国) プロジェクトの目標は、ガドリニウム (Gd) ベースの密度磁気熱量 (Magnetocaloric: MC) 材料を使用して 35K の温度スパンまたは 308K の高温環境 (ヒートシンク温度) での上昇をサポートする高出力密度磁気熱量 (MC) システムのシステムレベルのパフォーマンスを実証することです。性能目標には、10Hz 以上の動作周波数、1 テスラ以下の磁場、最新の MC システムと同等またはそれ以上の効率が含まれます。MC AMR システムの動作周波数を上げると、電力密度が増加し、より小さな磁場でよりコンパクトなデバイスが実現します。

2 番目の例には、オークリッジ国立研究所 (ORNL) での高性能 MC 再生器の開発が含まれます。図 1 に示すように、高周波数での効率的な動作には、圧力損失の少ない高多孔質の再生器が不可欠です。数値モデル、有限要素モデル、およびベンチテストを使用して、高周波熱交換の再生器の概念とサイズコンポーネントを評価します。

西安交通大学と GREE (格力: 中国のメーカー) による別のプロジェクトは、低品位熱エネルギーで駆動される新しいクラスの弾性熱 (EC) 冷却システムの開発を目指しています。コンセプトは、高温形状記憶合金で作られた熱活性化アクチュエータを使用して、低温形状記憶合金冷媒を駆動することです。システムの可能性に関する理論的調査は、2019 年に完了しました。モデル化の結果、80°C の熱源を適用して冷却装置を駆動できることが示されました。このような低品質の熱エネルギー源は、太陽熱集熱器、PV-T 集熱器、またはエ

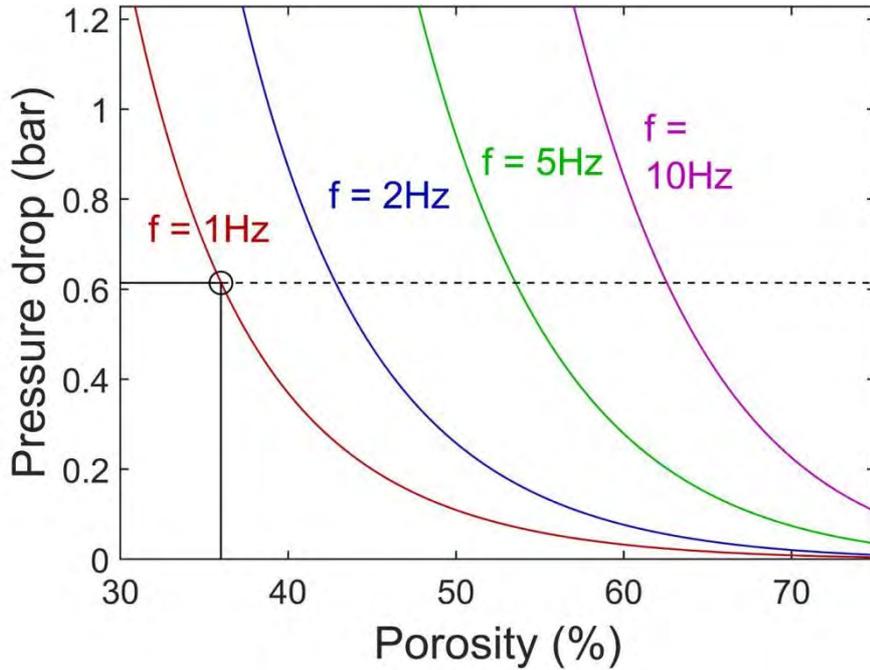


図1：直径200  $\mu\text{m}$  のGd 球体の充填層で構成されるアクティブ磁気再生装置 (AMR) を通過する水の圧力損失。米国エイムズ研究所提供

エンジンジャケット冷却剤です。次のステップは、推定温度上昇が25Kで冷却能力が10Wの概念実証システムの現在の設計を最適化することです。プロトタイプは2020年第2四半期に完成し、概念を物理的に証明することを目的とした広範なテストを予定しています。

最後に、メリーランド大学 (UoMD) には、電気化学圧縮(ECC)に関連する進行中のプロジェクトがあり図2に概略的に示されています。ECCは、電気化学プロセスを介して流体を選択的に移動することができる大量輸送デバイスであり、可動の機械部品を必要としません。UoMDは、VCヒートポンプサイクルで使用できる可能性があるアンモニアECCシステムを調査しています。さま

ざまな動作条件下で定常状態のパフォーマンスを測定するための実験が進行中です。さらに、企業パートナーと協力して、大量のガスを圧縮できるスケールアップされたアンモニアECCを開発および評価しています。これまでのところ、彼らは1.5~9.5 barの連続アンモニア圧縮を検証し、等エントロピー効率を最大70%に達しました。

第2回Annex会議は、10月22~23日にドイツのFreiburgにあるフラウンホーファー研究所で開催されました。その会議と結果の詳細は、次号で更新されます。

**Annex ウェブサイト**

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex53/>

**Contact**

OAは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) の Van D. Baxter

[vdb@ornl.gov](mailto:vdb@ornl.gov)

米国メリーランド大学の Reinhard Radermacher

[raderm@umd.edu](mailto:raderm@umd.edu)

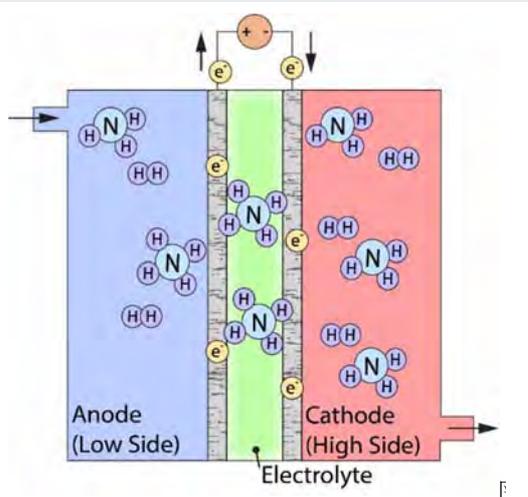


図2：アンモニアECCの概略図。米国メリーランド大学提供

**ANNEX**  
**54**

**低 GWP 冷媒**  
**ヒートポンプシステム**

空調システムの世界的な使用が今後 30 年間で 3 倍に増加すると予測されており、特に暑い地域では顕著で、冷却による電力需要も増加すると予測されています (IEA、2018)。現在の高 GWP 冷媒をより迅速に低 GWP 冷媒に切り替えることができなければ、この需要の増加により高 GWP 冷媒の消費量が大幅に増加します。

Annex54 は、高 GWP HFC のフェーズダウンを加速するために、空調およびヒートポンプシステム用の低 GWP 冷媒の適用を促進することにより、この気候に悪影響を与える傾向を逆転させることを目的としています。Annex54 は、この目標を達成するために、低 GWP 冷媒用に最適化されたコンポーネントとシステムの設計ガイドラインを開発する予定です。現在の Annex54 の参加者は、イタリア、日本、韓国、米国です。3 か国 (オーストリア、ドイツ、スウェーデン) は、Annex54 への参加を検討しています。

Annex54 は、1 月 12 日に米国アトランタでのキックオフミーティングから始まりました。Annex54 は、8 月 26 日にカナダのモントリオールで開催された第 25 回 IIR 会

議 ICR2019 で、「低 GWP 冷媒用ヒートポンプ」に関する 2 つのワークショップを開催しました。Annex 参加国からの専門家とドイツからの招待講演者により、7 つのプレゼンテーションが開催されました。以下は、プレゼンテーションの概要です。

1. Piotr A. Domanski 博士 (米国標準技術研究所) は、「次世代冷媒のスクリーニング」を発表しました。彼は、低 GWP 冷媒のスクリーニング結果を発表し、R-410A の直接 HFO 置換え候補はないと結論付けました。GWP と可燃性のトレードオフが必要で、新しい機器への再設計を推奨しています。

2. 米国の空調・暖房・冷凍研究所 Wang 博士は、「安全な冷媒移行の確保」について発表しました。彼は空調・暖房・冷凍研究所の低 GWP 代替冷媒評価プログラム (AREP) を紹介し、可燃性冷媒を使用するための米国の道筋を提示しました。

着火確率ではなく着火時の深刻度を理解するため、彼は、A2L および A3 冷媒の部屋全体のテストのため、可燃性冷媒に関する AHRTI のプロジェクト 9007 を共有しました。彼は、HVACR 機器で使用する冷媒検知器の特性を評価し、燃焼副産物のリスク調査を実施し、将来の研究プロジェクトとして緩和要件の有効性を評価することを提案しました。

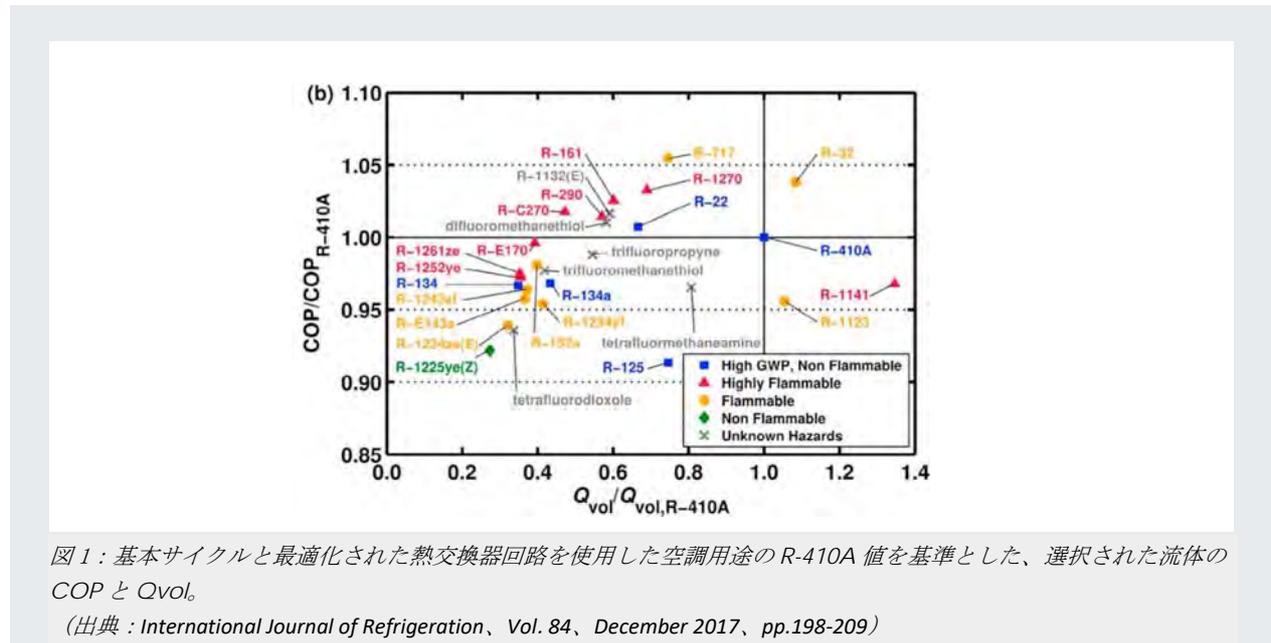


表 1: 空調・暖房・冷凍研究所の全室規模試験の研究プロジェクト 9007 の進捗

機器	A2Ls	A3 (R290)
PTAC	×	×
ミニスプリット		×
RTU	×	
住宅用 AC	×	
リーチインクーラー	×	×
ウォークイン	×	
サービスエラーと電気フィードスルー障害	×	

表 2 : R410A 置換品の性能

名	クラス	GWP (AR4)	容量冷却	COP 冷却	能力暖房	COP 加熱	差分 T_排出[°C]	P 排出	エバゲライド [K]
R-410A	A1	2088	100%	100%	100%	100%	0	100%	0.1
R-32	A2L	675	105%	100%	105%	100%	+ 17.2	102%	0,0
R-466A	A1	766	99%	100%	97%	100%	+ 8.0	95%	1,2
HDR-147	A1	<400	95%	103%	93%	101%	+ 10.8	89%	3,8
HDR-139	A1	<300	92%	103%	90%	100%	+ 14.0	86%	5,2

3. Politecnico di Milano の Luca Molinaroli 教授は、「小型の水-水ヒートポンプでの R134a、R1234ze (E)、および R1234yf の使用の実験的分析」を発表しました。2 つの HF0 の動作は、圧縮機の速度を上げることで R134a レベルに合わせることができますが、COP はさらに低下します。R1234yf は、R1234ze (E) よりも高い COP を示しました。彼は R450A と R513A のテストを計画しました。

4. 東京大学の飛原英治教授は、「日本で実施されている A2L 冷媒のリスク評価」を発表しました。A2L 冷媒のリスク評価に関する日本の共同研究の結果を発表し、炭化水素などの可燃性ガスの安全な使用のためのリスク評価が進行中であると述べました。

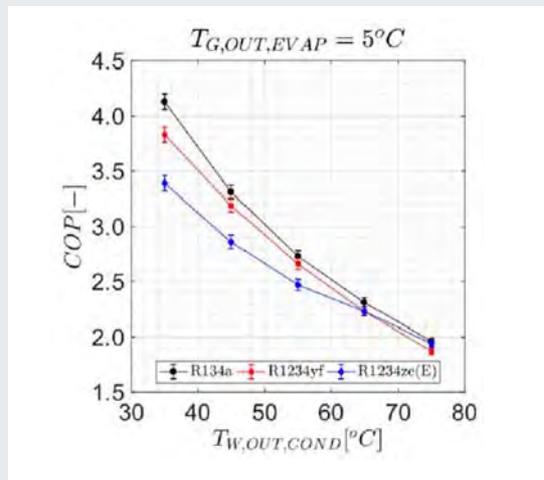


図 2 : R134a、R1234yf、R1234ze のテスト結果

5. 米国ハネウエルの Samuel Yana Motta 博士は、「ヒートポンプシステム用の低 GWP 冷媒」について発表しました。R410A の 4 つの代替品を比較し、R-466A (GWP <750) は、A1 クラスの冷媒の中で R410A 同じサイズ/設計の圧縮機と熱交換器を使用します。

6. フラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所の Lena Schnabel 博士は、「R290 Researches at Fraunhofer ISE」を発表しました。彼女は、ヒートポンプの R290 の充填量削減と、漏れの防止、検出、および制御の取り組みを紹介しました。

ワークショップの後、IIR と IEA HPT の間の協力について

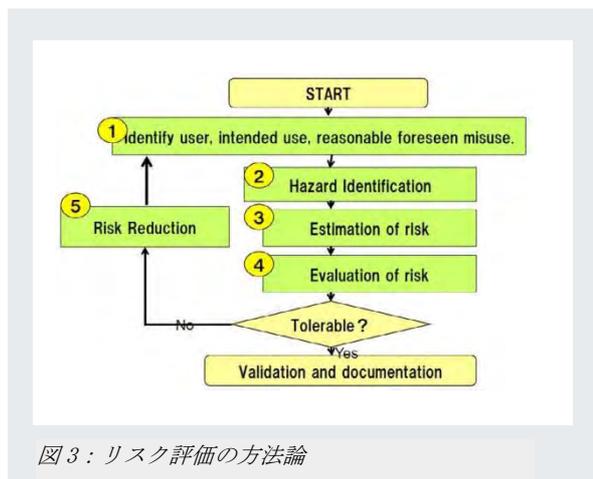


図 3 : リスク評価の方法論

て話し合うために、Annex 54 は IIR 委員会 B1 および B2 との合同会議を開催し 45 名の参加者を集めました。合同会議の後、加盟国からの参加者は、ビジネス参加者によるタスク 1 の進捗状況を議論し、2020 年の会議を計画するための短いビジネス会議を行いました。

すべてのプレゼンテーション資料、会議の議題、議事録、および出席者リストは、Annex Web サイトから入手できます。

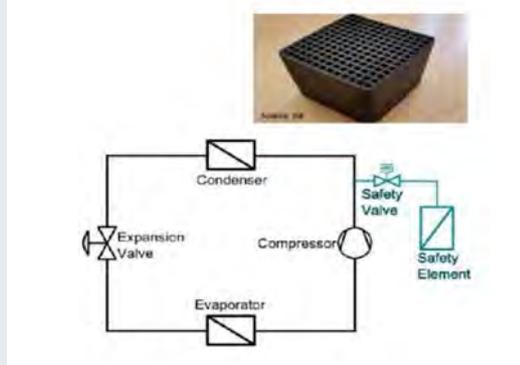


図 4 : 収着材料を使用した冷媒の捕捉

Annex ウェブサイト

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex54/>

Contact

OA は、米国メリーランド大学環境エネルギー工学センターの Dr. Yunho Hwang です。 [yhhwang@umd.edu](mailto:yhhwang@umd.edu)

ANNEX  
55

快適性と気候ボックス

ヒートポンプとストレージで構成される統合システムは、加熱と冷却に再生可能エネルギーの使用を促進するための重要な技術オプションです。ヒートポンプとストレージを組み合わせることにより、次のようないくつかの問題に取り組むことができます。

- ▶ 電力網の負荷のバランスと制御。
- ▶ 再生可能な(ローカル/地域)の入力(つまり、太陽熱、太陽光 PV) のより大きなシェアの獲得。
- ▶ 経済性、CO<sub>2</sub>排出量、時間当たり燃料使用の最適化
- ▶ 建物に最適な供給セキュリティを提供します。

この Annex は、ECES (IEA TCP のエネルギー貯蔵) でも設定されていて、いくつかの国から幅広い関心を集めています。現在、13 か国が Annex への参加を真剣に検討していると表明しています。すべての参加が正式に承認されているわけではありませんが、HPT または ECES のいずれかを介して、オーストリア、ベルギー、カナダ、中国、フランス、ドイツ、イタリア、スウェーデン、オランダ、スイス、トルコ、英国そしてアメリカが参加する予定です。

作業パッケージ

作業パッケージのリーダーが任命され、前回の会議(10月17~18日、ドイツのフライブルク)で、WPの詳細が議論されました。

- WP 1 -スイス-市場の概要
- WP 2 -英国-プロトタイプリング
- WP 3 -イタリア-テストと標準化
- WP 4 -スウェーデン-ロードマップ
- WP 5 -オランダ-普及とコミュニケーション

ほとんどの作業パッケージでは、主な作業はまだ開始されていません。しかし、ほとんどの参加国では、少なくとも1つのプロジェクトに資金が提供されており、実際の快適性と気候ボックス (CCB) の「現実世界」のテストを含むいくつかの貢献が期待されています。

WP 1 は 2020 年半ばまでにほぼ完成するはずですが、この WP は、次の作業パッケージの基盤として機能する最近のプロジェクトに焦点を当てる必要があります。これらの「予備」プロジェクトの多くは、フライブルク会議で発表されました。

我々は、各参加国の現在の作業の状態を示すための標準的な「国のステータス形式」に同意しています。図 1 に示すようにオランダでは、CCB の 9 つの品質基準のそれぞれに信号機スケールを使用する表現にしています。例えば、オランダでは、適合性とスマートグリッド対応が現在の最も大きな障害になると考えていますが、統合設計と効率はオランダ市場で大きな問題を引き起こすとは考えられていません。

プランニング

フライブルクでの会議の後、10月にニュルンベルクで開催された欧州ヒートポンプサミット (EHPS) でワークショップを行いました。

このワークショップでは、完了または進行中の Annex の知見をこの Annex の作業に統合することを目指しました。

Annex ウェブサイト

<http://heatpumpingtechnologies.org/annex55/>

Contact

OA は、オランダのビジネス開発部門の Peter Wagener です。

[Wagener@dhpa-online.nl](mailto:Wagener@dhpa-online.nl)



図1: オランダのステータスインジケータ図

## オランダの戦略的展望：気候協定

Marion Bakker, Netherlands Enterprise Agency,  
オランダ

オランダは 2030 年までに、1990 年比で温室効果ガスの排出を 49%削減することを目指しています。100 を超えるオランダの関係者（政府、企業、NGO の混合）が共同で、国家気候協定に定められた一連のまとまりのある提案に取り組んできました。建設環境部門では、2030 年までに約 150 万戸の既存住宅と 100 万戸の公共ビルをより持続可能にする必要があります。現在の天然ガス政策の段階的廃止により、ヒートポンプ技術の大きな役割が予測されています。このすべてを可能にするために、多数のコミットメントが設定され公表されています。



[この記事ダウンロードして共有する](#)

### 国家気候協定

オランダの国家気候協定の主な目標（記事の最後のリンクを参照）は、1990 年のレベルと比較して、2030 年までに国内の温室効果ガスの排出量を 49%削減することです。この目標を達成する方法に関する協議は、5 分野のプラットフォーム（環境、モビリティ、産業、農業、土地利用、電気）と複数のセクター（イノベーション、労働、金融、空間計画）に影響する課題の範囲で行われました。各分野のプラットフォームには、2030 年までに実現する必要がある Mton CO<sub>2</sub> 換算排出量の削減に関するセクター固有の目標が割り当てられました（合計 48.7Mton）。

### 構築環境

2030 年の排出量削減目標である 3.4Mton の建造環境の削減を達成するために、主な焦点は、2021 年までに持続可能性への取り組みのペースを年間 50,000 戸以上の既存住宅にまで増やすこと、また 2030 年までに年間 200,000 戸までに加速しなければなりません。構造化アプローチが採用され、一度に1つの地区に取り組みます。地方自治体は、2021 年末までに利害関係者やエンドユーザーと協議して熱に関する移行ビジョンを策定することで、この点で重要な役割を果たし、天然ガスの使用廃止の段階的タイムテーブルを策定します。潜在的な代替エネルギーインフラ（将来的には全電気、熱、グリーン、または将来的には水素ガスの可能性）は、2030 年までに移行が計画されている地区に設定され、市当局は社会的費用と便益およびエンドユーザー向け統合費用に関する見通しを示します。

好ましい解決策は、地区ごとに異なる場合があります。エリアが密集して開発されている場合、多くの高層ビルが含まれている場合、または 1995 年以前に建設された家がある場合は、地域暖房グリッドが最適なソリューションになる可能性があります。その地域に広々とした地区に設置された新しい家が含まれている場合は、全電気式のソリューションの方が良いかもしれません。多くの地域では、天然ガスネットワークは 2030 年以降もそのままであり、グリーンガスにも使用できます。ハイブリッドヒートポンプと組み合わせたボイラーを使用して、持続可能であろうとなかろうと、より少ないガスを断熱して燃焼させることで、賢明な一次解になるかもしれません。ただし、家の状態だけが関連する要因ではありません。エネルギー供給以外の地区の住民の希望は、そのペース

と利益を等しく評価します。住宅協会はまた、家賃を維持し、今後数年間は天然ガスとは異なる暖房供給に接続するために、家賃と電気料金の月額費用が上昇しないという条件の下で重要な役割を果たします。

すでに多数のコミットメントが行われており、下記の全てのコミットメントが目標達成には必要です。それは、加熱グリッドの構築、断熱ソリューションの適用、またはヒートポンプの設置により大幅なコスト削減を達成する方法に関するコミットメントです。またエネルギー税の修正に関するコミットメントです。これには、電化製品へのより低い課税と、天然ガスを使用する商品へのより高い課税が含まれます。また私たちの足元の地面から、またはオランダの大規模な地表水からの、より再生可能な加熱に関するコミットメントです。種々の改装工事が行われている場合、魅力的なローン条件で、すべての住宅購入者が住宅を断熱する機会に関するコミットメントです。これらのコミットメントは気候協定に定められています。2030 年の目標を達成し、2050 年のビジョンを実現するために、セクター間の統合アプローチを形作りま

構築された環境分野のプラットフォームは、一方ではさい先の良いスタートを達成しようとし、他方ではスケールアップと将来への対策の水平展開の条件と要件を開発する段階的で実用的なアプローチを提案しています。住宅に関しては、インセンティブ化と地区指向の管理のアプローチが選択されています。個人レベルでは、建物の所有者は、不動産をより持続可能にするためのインセンティブを提供することもできます。このアプローチは、テナントの低エネルギー料金を通じて持続可能性への取り組みを取り戻すことができれば成功します。これらの投資に資金を提供し、エネルギーの節約とコスト削減によって手頃な価格にするためには、数多くの革新と大幅なコスト削減が必要になります。この目的のために、天然ガスのない地域のテストベッド（Proeftuinen Aardgasvrije Wijken）と革新プログラムが開始されました。これにより、体系的に実験し、学習し、さらに費用対効果の高いアップスケールと現在の政権の任期を超えた技術実装を進めることができます。

ガスを使用しない（または使用量を減らした）加熱装置の開発は本格的です。ミッションドリブンイノベーション

## 戦略的展望

ンプログラム (MMIP: Mission Driven Innovation Program) は、持続可能な暖房システムの急速な成長のための技術的および社会経済的イノベーションに焦点を当てています。目的は、既存のタイプのデバイスおよびシステム (5年未満で利用可能)、新しい概念の開発 (5年以上で利用可能) および対応するサービスを改善することです。さらに、このプログラムは、範囲、快適性 (騒音、熱)、統合能力、および手頃な価格 (住宅費用) に関するユーザーの関心と熱意を促進することを目的としています。イノベーションは主に、既存の居住状況での適用可能性、システムレベルでの全体的なコストの削減、および天然ガスを使用しないソリューションへの加速に焦点を当てます。持続可能な熱に対する急激に増大する需要を満たすために、新しい持続可能熱源と冷却源へのアクセスを提供する必要があります。

これを可能にするには、多数のコミットメントが必要です。次の価格設定と補助金の組み合わせは、すでに設定されているか発表されています。

- ▶ ISDE 補助金制度 (小規模ヒートポンプ)、1 億ユーロ/年。
- ▶ 家主負担、年間 1 億ユーロの割引。
- ▶ 家主のためのエネルギー投資手当、2020 年から 2023 年まで年間 5,000 万ユーロ。
- ▶ 気候変動予算基金による近隣アプローチとリノベーションアクセラレータ、それぞれ 2020 年から 2021 年まで 1 億ユーロ、2020 年から 7000 万ユーロ/年。
- ▶ 私有財産所有者向けの非回転式熱基金、年間 5,000 ~ 8,000 万ユーロ。
- ▶ 複数年のミッション駆動型イノベーションプログラム (構築環境)、4,000 万ユーロ以上。
- ▶ 持続可能性への投資をより短期間で回収することにより、持続可能性を改善するためのより強いインセンティブを提供するために、エネルギー税が変更されます。政府は、財政赤字に影響しないバージョンを選択しました。天然ガスの最初のブラケットのエネルギー税率は、2020 年に  $\text{m}^3$  あたり 4 セント、その後 6 年間で  $\text{m}^3$  あたり +1 セント増加します。家計は企業よりもこの変化の恩恵を受けます。
- ▶ 300,000 ユーログリーンディール教育インストーラーヒートポンプ (教育センター)。

## 結論

EHPA 統計では、オランダはヒートポンプの売り上げの伸びでヨーロッパの上位 3 か国に入っていることがすでに示されています。同時に、手頃な価格とヒートポンプの設置品質 (騒音、快適性) に懸念があります。オランダ気候協定から提案されたバランスのとれたコミットメントのパッケージにより、革新的なコンソーシアムが手頃な価格で確実なソリューションを提案することを導きます。IEA 技術協力プログラム (TCP) ネットワークのフレームワーク内のプロジェクト (Annex と呼ばれる) は、この観点で非常に有用であり、今後数年でさらに有用になるでしょう。

## リンク集

- [1] <https://www.government.nl/documents/parliamentary-documents/2019/06/28/letter-to-the-house-of-representatives-about-the-proposal-for-a-national-climate-agreement>
- [2] <https://www.government.nl/topics/climate-change/Climate-policy>
- [3] <https://www.bakermckenzie.com/en/insight/publications/2019/07/highlights-of-the-dutch-climate-agreement>

表 1: セクターごとの 2030 年までの排出削減目標。

セクター	2030 年までの CO <sub>2</sub> 換算削減目標 (Mton)
業界	14.3
輸送	7.3
建物	3.4
電気	20.2
農業および土地利用	3.5
合計	48.7



マリオンバックナー  
M.SC.  
オランダ企業庁/  
IEA HPT TCP NL delegate  
オランダ  
[marion.bakker@rvo.nl](mailto:marion.bakker@rvo.nl)  
<https://doi.org/10.23697/arah-6j83>

## エネルギーシステムで使用する電気化学膜技術

Joe Baker, Longsheng Cao, Yunho Hwang, Chunsheng Wang, Reinhard Radermacher  
 米国メリーランド大学

この記事は電気化学コンプレッサーに関するもので、機械プロセスではなく化学プロセスでガスを圧縮できる物質輸送デバイスです。さまざまな作動流体の固体ポンピングは、膜内の電気化学プロセスによって達成できます。燃料電池で電気を生成するために機能する同様の原理は、選択されたガスを低濃度のリザーバーから高濃度のリザーバーに確実に移動させるために利用できるため、ヒートポンプおよび空調にも実用的です。この記事では、電気化学的アンモニア圧縮と電気化学的除湿、およびそれらの潜在的な用途の2つを紹介します。これらのテクノロジーのパフォーマンスとこれらのテクノロジーを最も効果的に使用するための戦略を詳述する経験的知見を提示します。



[この記事ダウンロードして共有する](#)

### 序論

世界中のほぼすべての商用ヒートポンプと冷凍ユニットでは、有用な加熱と冷却に必要な仕事を機械的コンプレッサーが供給します。しかし可動部品に依存しない代替方法もあります。電気化学コンプレッサー（EC: Electrochemical Compressor）は、機械的なプロセスではなく、化学的なプロセスでガスを圧縮できる大量輸送デバイスです。EC は水素燃料電池で使用されるものと同じイオン交換膜を使用しますが、燃料電池は電位を生成するためにガスを消費しますが、EC は作動流体に最終的変化を引き起こすことなく電気を消費します。

電気化学的水素圧縮現象は数十年前から知られており、現在市販の水素 EC デバイスを購入できます。しかし、最近の実験では、ガス状アンモニアや水蒸気などのさまざまな作動流体で電気化学的圧縮が可能であることが実証されています[1]。この記事では、EC の2つのアプリケーション、電気化学的アンモニア圧縮と電気化学的除湿について説明します。

現在のプロジェクトの目的は、従来の機械式コンプレッサーに匹敵する効率で、実用的な圧力比でのアンモニア蒸気の定常状態圧縮を実証することです。アンモニア EC は、蒸気圧縮ヒートポンプサイクルおよびエネルギー貯蔵用途での使用の可能性について調査されています。さらに、電気化学的水輸送は、個別の顕熱冷却と潜在冷却の手段として、空調用途に適用できます。

### 電気化学圧縮装置

EC デバイスは、3つの主要コンポーネントで構成されています：ガス分配チャンネル、電極、および膜です。図1に示すガス分配チャンネルは、多孔質の導電性材料で作られた電極に作動流体を供給します。電気化学反応は、電極とイオン交換膜の両方のアセンブリである膜電極アセンブリ（MEA: Membrane Electrode Assembly）で発生します。外部電圧が2つの電極に供給されます。外部電圧の下で、作動流体はキャリアガスと反応してイオンを形成します。その後、イオンは膜を横切ることができ、それは電子を透過しません。イオンが反対側の電極に到達すると、イオンはその構成分子に再形成されます。このプロセスは、

反対の濃度勾配が存在する場合でも、膜全体にイオンを押し出すことができます。これが、この現象から有効な圧縮を得る方法です。EC セルの図を図1に示します。

単一のセルは実用的な量の圧縮仕事量を提供しませんが、いくつかの圧縮セルを一緒に積み重ねて、圧力上昇または作動流体の質量流量を増加させることができます。2つのコンプレッサーを直列に組み合わせると、合計圧力比が増加し、2つのコンプレッサーを並列に組み合わせると、合計流量を増加させます。アンモニア EC は必要な圧力比を1段階で達成できるため、セルを直列に組み合わせる必要はありません。代わりに、現在の研究では、いくつかの並列接続を作成しようとしています。

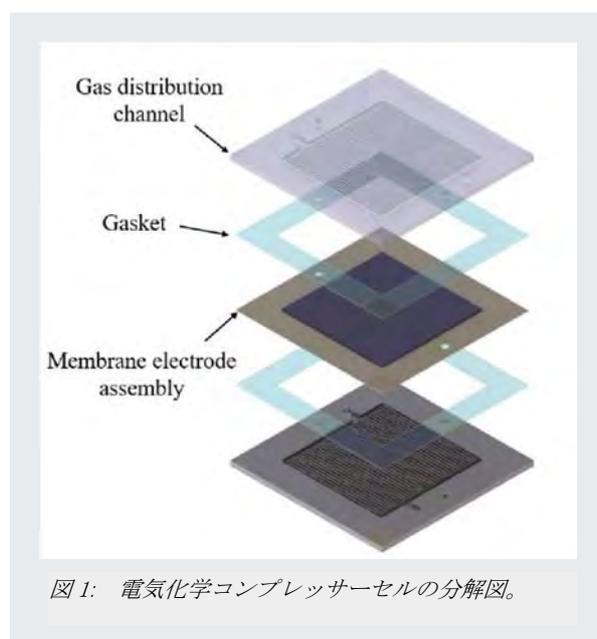
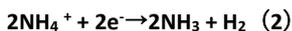


図1: 電気化学コンプレッサーセルの分解図。

### 電気化学的アンモニア圧縮

アンモニアは、世界で最も一般的に生産される化学物質の1つであり、最も古くから知られている冷媒の1つであり、オゾン層破壊と地球温暖化の可能性はごくわずかです。さらに、アンモニアの製造にカーボンニュートラル原料とプロセスエネルギーが使用される場合、液体アンモニアはアンモニア燃料電池およびアンモニア駆動内燃機関のカーボンニュートラル燃料として使用できます。このようなエネルギー貯蔵用途では、アンモニアの高圧貯蔵が必要です。そのため、冷凍とエネルギー貯蔵の両方の用途に効率的なアンモニア圧縮機が必要になります。

アンモニア EC は、一連の電気化学的半反応式に依存します。前半の半反応式では、アンモニアはキャリアガスとして作用する水素と反応し、以下の式 (1) に従ってアンモニウムイオンを形成します。次に、イオンは陽イオン交換膜を介してアノードからカソードに移動し、その後、後半の半反応が発生します。後半の半反応式では、式 (2) に従って、アンモニアイオンが反応して高圧でアンモニアと水素ガスを改質します。このプロセスを図2に示します。



さまざまな圧力比でアンモニア EC をテストし、それぞれの消費電力を観察しました。室温での化学量論的な入口条件について、入口ガス流を約 40%の相対湿度に加湿しながら、観察された中で最大の EC 性能を図3に要約します。図では、流体流量のグラム/秒あたりのコンプレッサー消費電力が圧力比に対してプロットされています。アンモニアの EC 曲線は、EC の支配的な電気化学法則と、最高パフォーマンスのテスト条件でのセル内の観測損失に基づいて作成されました。アンモニアの EC 曲線は、理想的な等温圧縮の曲線と同じ勾配を持ちます。これは、観測された実験では、EC の電力消費が小さすぎて温度が上昇しないためです。したがっ

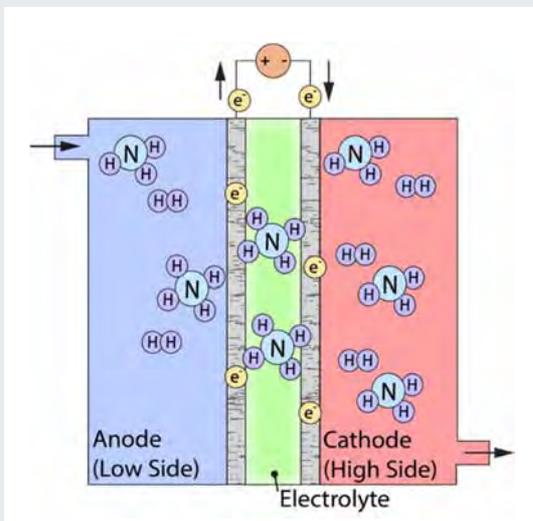


図2：電気化学的輸送の図  
キャリアガスとして作用する水素を含むアンモニア

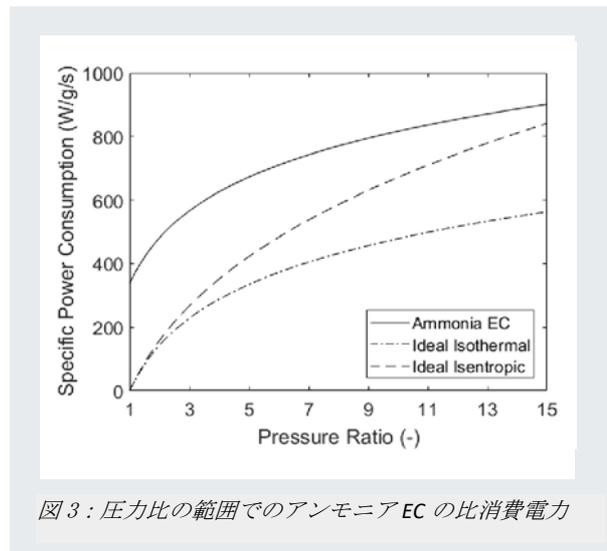


図3：圧力比の範囲でのアンモニア EC の比消費電力

て、小規模の圧縮プロセスは等温であると言われてい

### 電気化学除湿

別の関心ある分野は、除湿用途の水蒸気の電気化学的輸送についてです。現在、除湿の最も一般的な方法には、水蒸気の凝縮または乾燥剤の吸収があります。電気化学プロセスはこれらの技術のいずれにも依存していないため、興味深い代替手段を提供します。電気化学膜の除湿に関する以前の研究成果では、研究者は、不十分な物質移動によって除湿性能が制限される可能性があることを観察しました[2]。ただし、膜水輸送へのこの新しいアプローチでは、電氣流体力学（EHD: Electro Hydro Dynamic）効果を引き起こす高電圧場が、膜を通る水蒸気輸送の速度を増加させる可能性があります。生鮮食品を乾燥させるための食品加工で使用されるこの効果は、流体境界層を不安定化し、膜表面近くの水の分圧を増加させることにより、物質移動速度を増加させます。

アンモニア EC とは異なり、電気化学除湿器は負電荷イオンの移動に依存しているため、陰イオン交換膜を使用してプロセスを完成させます。除湿の原理は、以下の式 (3) の反応により、酸素が水蒸気とともに電気化学的に還元され、カソードに水酸化物が形成されることです。その後、式 (4) で説明されているように、アノード側で水酸化物が酸化されて酸素と水に戻ります。



水蒸気と酸素のモル比は2に固定されており、除湿比とは無関係で、どのような動作条件下でも除湿の安定した速度を保証します。膜を通る水の移動を増加させるために、高電圧源を使用して EHD 力を発生させます。これは、主空気流の水蒸気を膜に押しやるのに役立ち、水蒸気の効果的な物質移動を促進します。図4は、このプロセスを示しています。

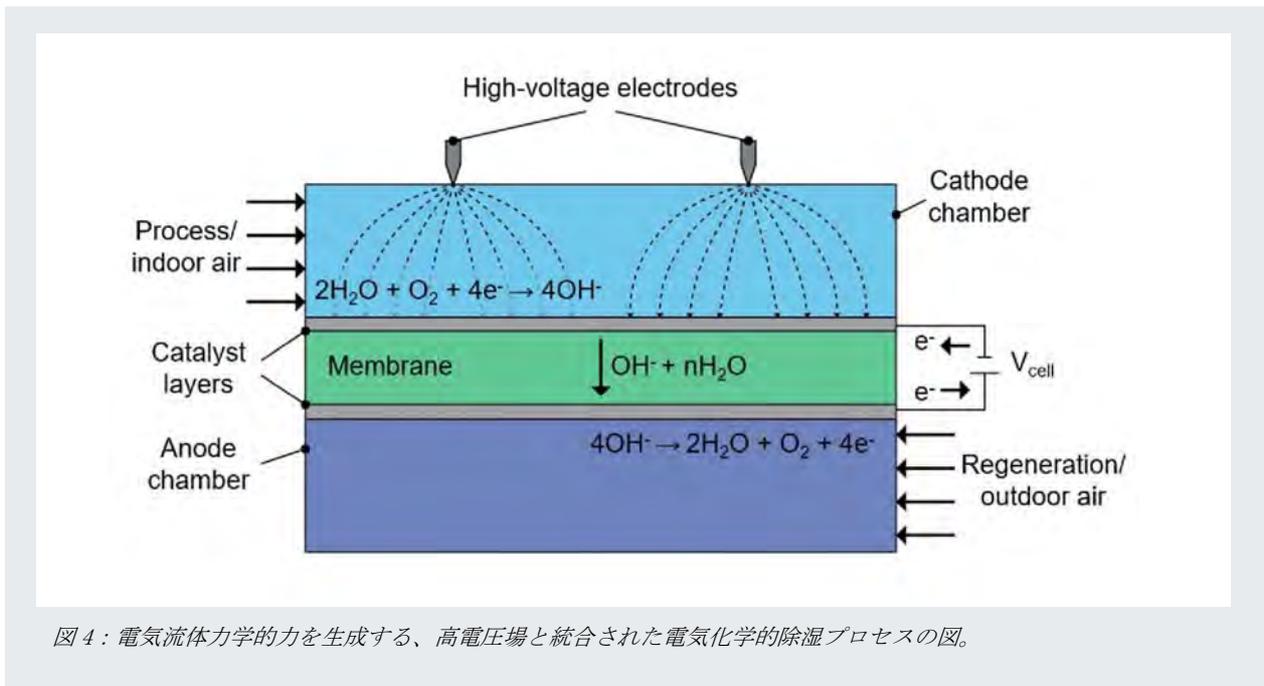


図4：電気流体力学的力を生成する、高電圧場と統合された電気化学的除湿プロセスの図。

膜内の水輸送にはいくつかの可能なモードがあります。主に、電気化学反応によって支配される水の移動である電解水の輸送があります。また、濃度勾配による水の動きである拡散水輸送もあります。最後に、電気浸透輸送があります。これは、負に帯電した水酸化物イオンとの双極子相互作用による膜を通る水の移動の現象です。この研究の目標は、電気浸透移動を最大化し、水分子の寄生抵抗を最小限に抑えながら、安定した電解輸送速度を維持する電気化学除湿の方法を開発することです。

この水分除去方法の基本的な利点は、結露に依存しないことです。蒸気圧縮除湿機は、水蒸気を結露させて液体水を分離するために、露点以下まで水蒸気を冷却する必要がありますが、EC 除湿プロセスには最終的に相変化はありません。したがって、唯一のエネルギー消費は、電解プロセスに必要なエネルギーです。進行中の研究では、実際の操作条件下で陰イオン交換膜内の水輸送速度を決定するための実験を行っています。さらに、EHD コンポーネントの利点を調査し、従来の除湿の最新技術と比較した電気化学除湿器の有効性を判断します。

### 結論

両方の電気化学コンプレッサー (EC) テクノロジーは、エネルギーシステムでの使用を目指しています。アンモニア EC は、アンモニアを冷媒として使用してヒートポンプまたは冷凍サイクルを駆動するために使用できます。さらに、エネルギー貯蔵技術での使用についてアンモニア EC が調査されています。実験により、一定の範囲の圧力比で、合理的なエネルギー消費で定常状態のアンモニア圧縮が達成できることが明らかになりました。さらに、EC を使用して希釈ストリームからアンモニアを分離することができます。実用的なエネル

ギーシステムへの EC の統合には課題がありますが、この技術は、アンモニアの製造にカーボンニュートラル原料とプロセスエネルギーが使用される場合、カーボンニュートラル燃料として使用するためのアンモニアの液体貯蔵など、高い圧力比を必要とするアプリケーションでの可能性を示しています。

水 EC は、空調アプリケーションでの潜在的な冷却負荷を減らすための除湿器として使用できます。電気流体力学 (EHD) コンポーネントは、水の移動速度を高め、膜内の寄生的拡散損失を減らすのに役立ちます。

### 参考文献

- [1] Y. Tao, Y. Hwang, R. Radermacher, and C. Wang. 2019. Experimental study on electrochemical compression of ammonia and carbon dioxide for vapor compression refrigeration system. *Int. J. Refrig.*104, 180–188.
- [2] R. Qi, D. Lia, and L. Zhang. 2017. Performance investigation on polymeric electrolyte membranebased electrochemical air dehumidification system. *Appl. Energy* 208, 1174–1183.

**JOE BAKER**  
メリーランド大学  
米国

**Corresponding Author**  
**YUNHO HWANG**  
**RESEARCH PROFESSOR**  
メリーランド大学  
米国

[yhhwang@umd.edu](mailto:yhhwang@umd.edu)  
<https://doi.org/10.23697/2v1j-ej20>

## 弾性発熱冷却

David Catalini, Nehemiah Emaikwu, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, Ichiro Takeuchi,  
米国メリーランド大学

蒸気圧縮サイクル（VCC: Vapor Compression Cycle）を使用すると、冷媒が大気中に漏れたときにオゾン層破壊や地球温暖化が促進されるなど、予期しない環境被害が発生しました。この問題に取り組む1つの方法は、固体状態の冷媒（カロリー材料）を使用して冷却サイクルを開発することです。カロリー材料の主な特徴は、外部場の適用により固相の相転移を誘発することが可能であり、これが断熱温度上昇または等温エントロピー変化に変換されることです。この作業では、このカロリー効果を冷却に使用する主な手順と、弾性発熱冷却システムについて説明します。



[この記事ダウンロードして共有する](#)

### 序論

蒸気圧縮サイクル（VCC）は、過去100年にわたって開発および最適化され、住宅および産業用建物、および車両の冷却を提供しています。しかし、その使用により、冷媒が大気中に漏れたときにオゾン層破壊や地球温暖化が促進されるなど、予期しない環境被害が生じています。このため、環境コストをかけずに、優れた代替冷却技術を開発してVCCを置き換えることが重要です。この問題に取り組む1つの方法は、固体は大気中に漏れることがないため、固体冷媒を使用してヒートポンプサイクルを開発することです。カロリー材料は、固体冷媒として使用できます。これらの新しいシステムは、VCCよりもエネルギー効率が高いことも望まれます。最大の課題は、より良い性能の材料を開発し続けることであり、同様に重要なことは、これらの材料をシステムに効率的に統合することです。

一般的に言えば、カロリー材料の主な特徴は、外部場の適用により固相の相転移を誘発することが可能であるということです。この相転移の特定の特徴は、材料に依存しますがそれは常にエントロピーの大きな変化を伴います。エントロピー変化は、外部場が断熱的に適用または除去されるときに材料の温度変化として、

および一定の外部場の下での材料と周囲との間の熱交換として現れます。

カロリー材料が反応する外部場の種類に基づいて、それらは磁気熱量（磁場により相変化が誘導される）、電気熱量（電場により相変化が誘導される）および弾性熱量物質（応力場によって相変化が引き起こされる）に分類されます。この最後のカテゴリがこのレポートで注目しているカテゴリです。

### 弾性熱量冷却技術の開発

この研究では、市販の弾性熱量合金を使用しました。概念的に、それを固体冷媒として使用するには、4つのプロセスを適用する必要があります（図1を参照）。

冷却サイクルの主な目的は、熱を低温レベルから高温レベルにポンピングすることです。電源サイクルでは、仕事の出力を生成するために熱を供給する必要があります。ヒートポンプサイクルは、パワーサイクルの逆です。したがって、ヒートポンプサイクルとパワーサイクルは非常に類似した方法で分析できます。弾性発熱材料は、さまざまな構成でシステムに統合できます。

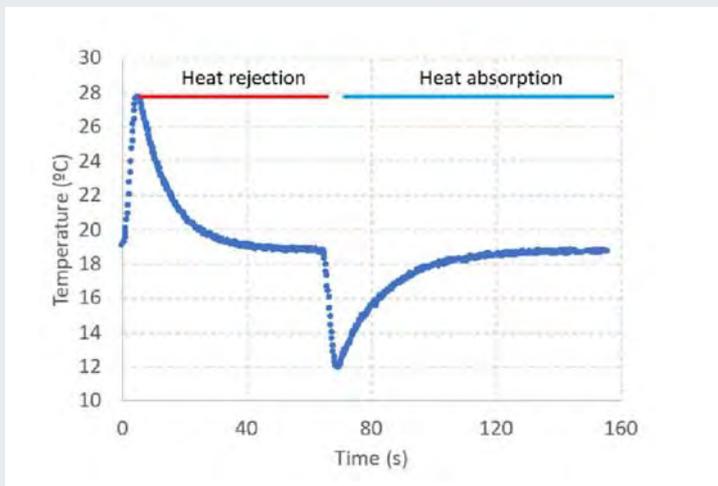


図1：弾性熱量合金の負荷時と除荷時の温度変化。

- 1) 負荷：材料に断熱的に応力が加えられ、温度が上昇します。
- 2) 熱除去：応力を維持しながら、材料はヒートシンクに熱を放出することにより元の温度まで冷却されます。
- 3) 除荷：応力は材料から断熱的に除去され、相転移が逆転し、温度が室温より低くなります。
- 4) 熱吸収：材料は熱源から熱を吸収し、温度を元の温度に戻し、サイクルを再開できます。プロセスのこのステップの間、材料は冷却を供給します。

例 1 : 内部熱回収を伴う弾性熱量冷却サイクル

例として、反転したブレイトン熱力学サイクルを使用することにより、弾性熱ヒートポンプサイクルが達成されました (Qian 他, 2015)。ブレイトンサイクルは、パワーサイクルにおける定圧熱機関の熱力学的動作を表します。逆ブレイトンサイクルは、冷却を供給するためにネットワーク入力が必要です。それは、上記の 4 つのステップと達成可能な温度上昇を改善するための 2 つの熱回収ステップで構成されています。図 2 左は、冷却システムの概略図を示しています。中央のクロスバーを左右に動かすことにより、2 セットの弾性材料に負荷をかけ、または徐荷を行うことが出来ます。弾性熱量ベッド #1 の左端と弾性熱量ベッド #2 の右端が固定されています。クロスバーが中央にあるとき、両方の弾性熱量ベッドは半分まで圧縮されます。ベッド #1 を完全に圧縮するためにクロスバーが左端まで移動すると、ベッド #2 が完全に解放されます。ベッド #2 を完全に圧縮するためにクロスバーが右端まで移動すると、ベッド #1 は完全に解放されます。ベッドは互いに対向しているので、一つのベッドの搬出作業を回復することが可能であり、各サイクルで供給される必要がある作業の必要量を減少させる、反対側のベッドのローディングを補助するためにこれを使用します。2 つの弾性熱量材料をタンデムで動作させることにより、熱交換ステップ後にそれらに保存された熱エネルギーを使用して、負荷と除荷の前に各ベッドを予熱および予冷し、内部で熱交換することも可能です。この概念をさらに進めるには、材料が固体であるため、弾性熱量材料とシンクおよび蓄熱器の間で熱を交換するための熱伝達流体が必要であることに留意ください。オレンジ色のチューブは弾性熱量材料をヒートシンクに接続し、水色のチューブはそれらを蓄熱器に接続し、紫色のチューブは弾性熱量材料を互いに接続します。バルブ V1 から V8 および HRV を開くか閉じることにより、正しいステップで熱伝達流体を貯湯槽、シンク、または内部熱交換器に送ることができます。

図 2 右は、エントロピーと温度プロットのさまざまなステップの表現を示しています。操作シーケンスに関連する状態ポイントは次のとおりです。

1. サイクルは状態点 1 から始まり、弾性発熱物質層 #1 がオーステナイト相にあり、応力が増えられています。材料は、状態 1' に達するまで圧縮されます。それは、臨界応力に達し、マルテンサイト変態が始まる瞬間です。同時に、ベッド #2 の弾性熱量材料は状態ポイント 4 にあり、除荷時に逆変換が開始されると 4' になります。
2. 応力の増加は、変換が完了するまで続き、状態ポイント 2 に達します。このプロセス中に、変換の熱が放出され、弾性熱量材料の温度が上昇します。同時に、ベッド #2 の弾性熱量材料の応力は減少し続け、逆変換を完了し、温度を下げて状態点 5 に達します。
3. バルブ 1 と 3 は開いており、ポンプ 1 が起動し、熱伝達流体をベッド 1 からヒートシンクに向かって流します (バルブ 2 と 4 は閉じたままです)。ベッド #1 の弾性熱量材料は冷却され、状態 3 に到達しますが、応力はまだかかっています。同時に、バルブ 6 と 8 が開き、ポンプ 2 が起動し、熱伝達流体をベッド #2 から熱源に向かって流します (バルブ 5 と 7 は閉じたままです)。ベッド #2 の弾性発熱材料は加熱されて、状態 6 に達し、応力はかかりません。
4. 応力が除去される前に、ベッド #1 の材料は、状態 6 の瞬間にあるベッド #2 の材料と熱交換できるようにすることで、状態 4 にさらに冷却できます。これが紫色のチューブの目的です。バルブ 1~8 は閉じ、ポンプ 1 と 2 はオフ、HRV は開き、HR ポンプはオンになります。理想的には、ベッド #1 の材料は状態 6 の温度と等しくなる状態 4 の温度に達し、ベッド #2 の材料は状態 3 の温度と等しくなる状態 1 の温度に達する必要があります。
5. ベッド #1 の応力は取り除かれ、除荷すると、オーステナイトへの逆変態が始まると材料は状態 4' に達し、

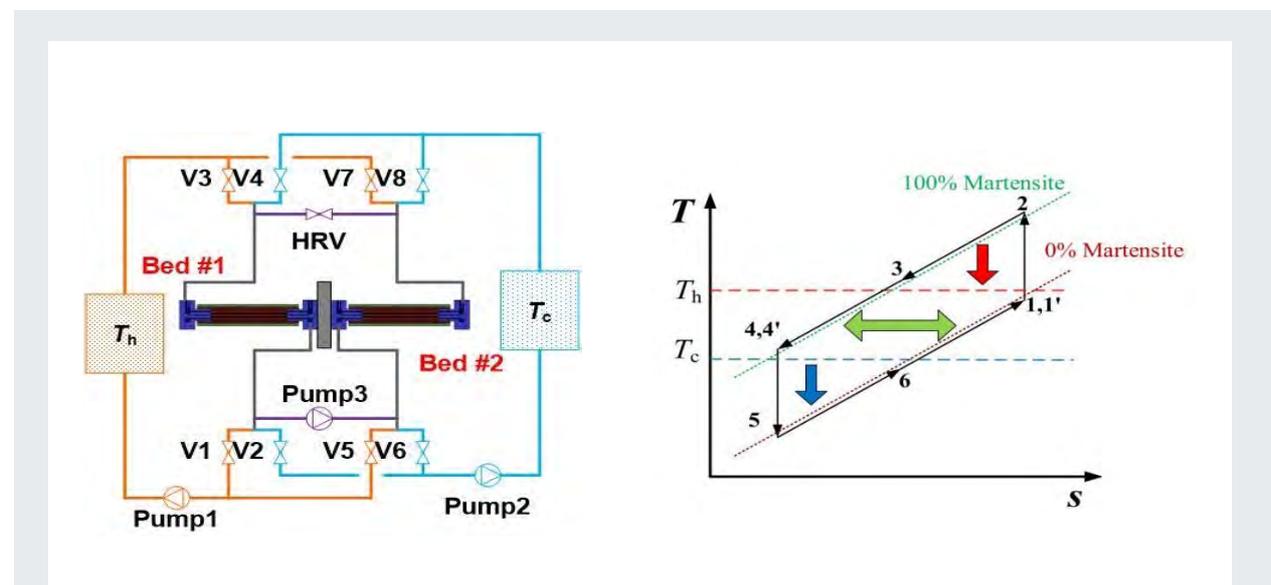


図 2 : 左 : 冷却システムの概略図 右 : 弾性熱量冷却に適用される逆ブレイトンサイクルの熱力学的表現

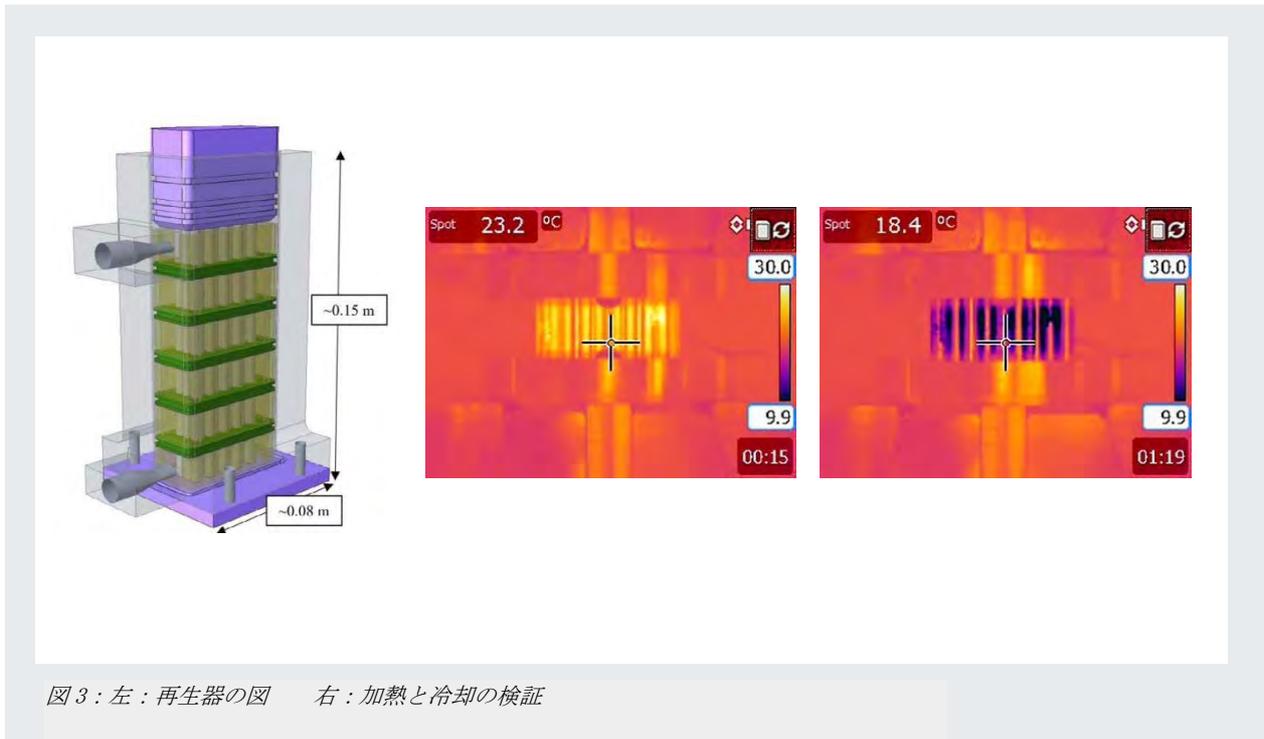


図3：左：再生器の図 右：加熱と冷却の検証

逆変態が完了すると状態5に達します。これにより、ベッド#1の弾性熱量材料の温度が低下します。同時に、ベッド#2内の材料はロードプロセスを開始し、順変換が開始されると状態1'になり、変換が完了すると最終的に状態2になります。これにより、ベッド#2内の材料の温度が上昇します。

6. バルブ2と4が開いており、ポンプ2が起動し、熱伝達流体をベッド#1から蓄熱器に向かって流します（バルブ1と3は閉じたままです）。ベッド#1の弾性発熱材料は加熱されて、まだ除荷されている状態6に達します。同時にバルブ5と7が開き、ポンプ1が起動し、熱伝達流体をベッド#2からヒートシンクに向かって流します（バルブ6と8は閉じたままです）。ベッド#2の弾性熱量材料は冷却され、状態3に達します。応力はいかりません。この後、熱回収ステップによりすべてが元の状態に戻り、サイクルが再開されます。

### 例2：「アクティブな」弾性熱量再生器

システムを統合する別の方法は、弾性熱量材料でアクティブな再生器を作成することです（Tušek 他, 2016）。再生器は、蓄熱型の熱交換器です。冷たい流体と熱い流体が同じ流路を交互に流れるため、熱伝達は断続的です。高温流体が伝熱面上を流れると、高温流体からの熱エネルギーが再生器の壁に蓄えられ、そのため高温流体が冷却されます。冷たい流体が後で同じ通路を流れると、再生器の壁が熱エネルギーを放出し、それが冷たい流体に吸収されます。定常状態の動作中、再生器の長さに沿って温度勾配が発生し、高温端がヒートシンクに接続され、低温端が蓄熱器に接続されます。「パッシブ」とは異なり、「アクティブ」弾性熱量再生器と呼ばれます。これは、弾性熱量材料が順方向（または逆方向）の変換が行われるときに、蓄熱媒体と熱源（またはシンク）の二重の機能を果たすためです。

前の構成（例1）とこの構成（例2）の違いは、専用の熱回収ステップがないことです。さらに、高温流体と低温流体が通路を交互に流れるときに、再生器に沿って温度勾配が発生します。磁気熱量および弾性熱量材料では、温度上昇に関して材料の機能が大幅に向上していることが測定されています。これまでに発表された最大の温度上昇は、実験室のプロトタイプで19.9Kです（Engelbrecht 他, 2017）。開発の初期段階にある別のプロトタイプは現在メリーランド大学で開発中であり（Emaikwu 他, 2019）、図3で見ることができます。23本のチューブの単一ステージの圧縮が正常に達成され、加熱と冷却の検証も図3に見ることができます。

再生器の設計は、弾性熱量合金の短いチューブの層状スタックで構成され、変形は圧縮によって引き起こされます。再生器内の流れのパターンは、シェルアンドチューブ熱交換器で観察できるものと似ています。チューブの長さは、座屈が防止されるように計算されます。チューブ間の距離は、システムの構造的安定性、熱伝達係数、圧力降下に影響を及ぼすと考えられ、最も重要な変数の1つです。

### 結論

最近の環境問題により、地球温暖化係数やオゾン層破壊係数の高い冷媒を使用せず、現在の蒸気圧縮技術よりも効率的な冷却技術の開発が重要な研究テーマになっています。弾性熱量冷却技術の開発はかなり新しいものですが、ここ数年で進歩がありました。このペーパーでは、システム統合オプションの2つの例を示しました。1つは専用の熱回収プロセスを使用し、もう1つはシステムに再生器を組み込むことで熱回収プロセスを回避しています。プロトタイプシステムの冷却能力はまだ商用アプリケーションの要件からはほど遠いものの、温度上昇性能は増大しており、必要な最小要件に近づいています。

参考文献

Emaikwu, N., Catalini, D., Muehlbauer, J., Takeuchi, I., Radermacher, R., & Hwang, Y. (2019). Development of a Cascade Active Elastocaloric Regenerator. ASME®2019 ES 第 13 回エネルギー持続可能性に関する国際会議は、夏季熱伝達会議と共同開催されました

Engelbrecht, K., Tušek, J., Eriksen, D., Lei, T., Lee, C. Y., Tušek, J., & Pryds, N. (2017).

A regenerative elastocaloric device: Experimental results. Journal of Physics D: Applied Physics.

<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8656>

Qian, S., Ling, J., Hwang, Y., Takeuchi, I., & Radermacher, R. (2015). Modeling and Optimization of a Novel Heat Recovery Design for Thermoelastic Cooling Systems.

In Volume 6B:

Energy. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-52624>

Tušek, J., Engelbrecht, K., Eriksen, D., Dall'Olio, S., Tušek, J., & Pryds, N. (2016). A regenerative elastocaloric heat pump. Nature Energy. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.134>

**DAVID CATALINI**

メリーランド大学 環境エネルギー工学センター  
米国

**Corresponding Author**

**YUNHO HWANG**

**RESEARCH PROFESSOR**

メリーランド大学 環境エネルギー工学センター  
米国

[yhhwang@umd.edu](mailto:yhhwang@umd.edu)

<https://doi.org/10.23697/b9d9g-qd3>

INFORMATION

## Become a subscriber

### The Heat Pumping Technologies Magazine

Three times a year, the Heat Pump Centre issues the Heat Pumping Technologies Magazine. The Magazine can be found at the HPT web site and is free of charge. At the same time as the Magazine is launched, a Newsletter is distributed. The Newsletter contains shorter versions of the Magazine articles with links to the full Magazine and is a good reminder that there is a new Magazine issue to read.

Read our Magazine and become a subscriber at:

<https://heatpumpingtechnologies.org/the-magazine/>



## 地中熱ヒートポンプの活用を可能にし、建物の電力需要を調整する地下熱電池の開発

Xiaobing Liu、Joseph Warner、Mingkan Zhang、Ming Qu、Liang Shi、Kaushik Biswas、  
米国

革新的な地下熱電池 (UTB: Underground Thermal Battery) は、効率的なヒートポンプ運転のための安定したヒートシンクまたは熱源だけでなく、断続的な再生可能電力供給と建物の変動する熱需要との mismatch を克服するための熱エネルギー貯蔵も提供することができます。この記事では、概念設計、ラボテスト、モデリングなど、UTB の最近の開発を紹介します。最初の結果は、UTB が建物の望ましい快適性と利便性を犠牲にすることなく、効率的な空調とアクティブな需要側管理の両方を可能にする可能性があることを示しています。



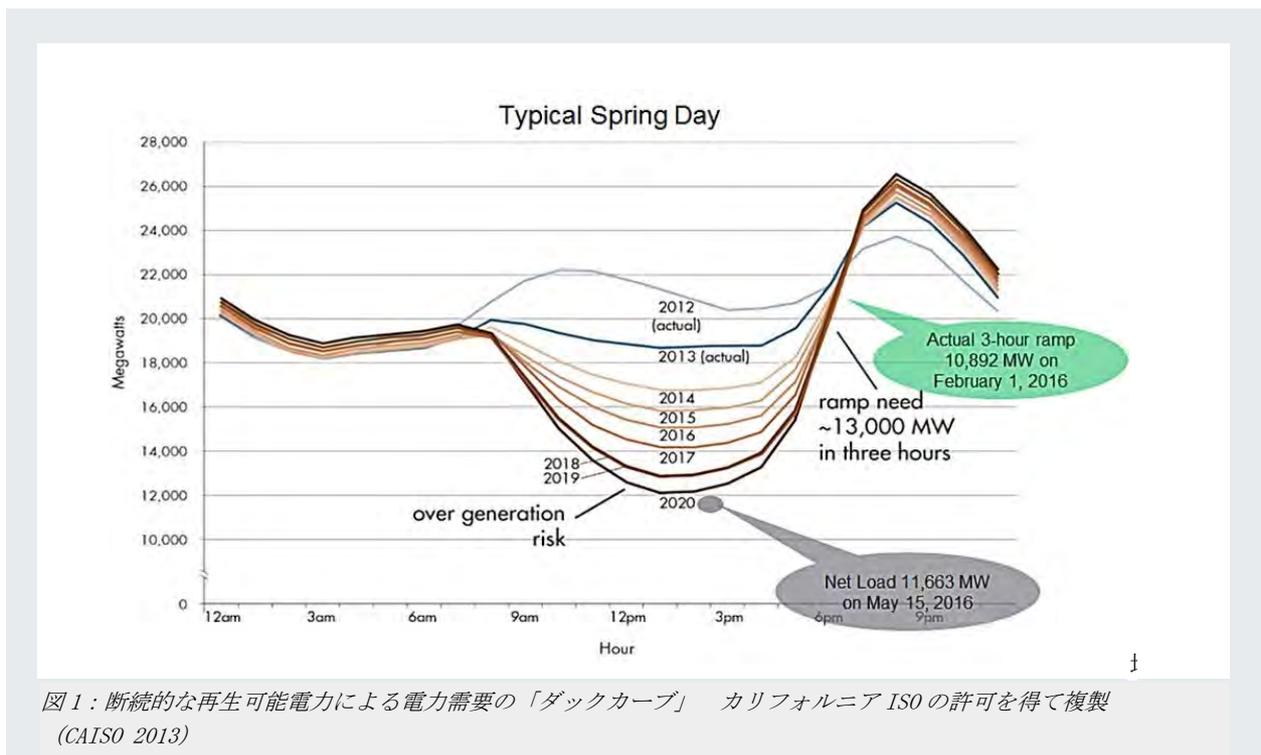
[この記事ダウンロードして共有する](#)

### 序論

地中熱ヒートポンプ (GSHP: Ground Source Heat Pump) は、空間暖房、空間冷房および温水のためのエネルギー効率の高い技術です。米国では、高効率のために既存の冷暖房システムに GSHP を後付けすることで、1 年あたり 6 兆メガジュールの一次エネルギーを節約できると推定されています (Liu 他. 2019a)。GSHP システムは、地面の熱交換器 (GHE: Ground Heat Exchanger) を利用して、冬は地面から熱を抽出し、夏は地面に熱を排出します。垂直ボア地中熱交換器 (VBGHE: Vertical Bore Ground Heat Exchanger) は、信頼性と設置面積が小さいので、米国で最も一般的に使用されている GHE です。ただし、GSHP システムの総設置コスト (NYSERDA 2017) の 30% 以上を占める VBGHE の高い設置コストは、米国での GSHP のより広範な採用を制限しています。VBGHE のコストを削減するこれまでの取り組みは、主にボアホール内の熱伝達の改善に焦点を合わせてきました。ただし、ボアホールの直径が小さい (<0.15 m) た

め、性能の向上とコスト削減の可能性が制限されています。最近の研究 (Liu 他. 2018) では、ボアホールの熱伝達を改善するコスト削減の可能性は 30% 未満であり、地面の熱伝導率に依存すると結論付けられました。米国で GSHP をより広く採用するには、GHE の設置コストを大幅に削減できる新しい GHE 設計が待ち望まれています。

一方、近年、断続的な再生可能発電によりグリッド内の電力需要が大きく変動するため、電力システムの安定性が懸念事項となっています。図 1 に示す「ダックカーブ」現象は、断続的な再生可能電力供給とグリッドの需要の mismatch を反映しています。急速な立ち上げと電力需要の大きな変動は、グリッド運用上の大きな課題です。さらに、過剰な再生可能発電を削減する必要があります。そのため、再生可能電力の使用が制限されます (NREL 2015)。「ダックカーブ」現象を低減できるなら、グリッドの安定性と費用対効果を大幅に改善することができます (Klein 他. 2016)



## その他の記事

建物で消費される電力の約 40%が、暖房、冷房、給湯などの熱需要に使用されるため (IEA 2018)、蓄熱は、断続的な再生可能電力供給と変動する建物の電力需要間のミスマッチを解決するための効果的な方法になる可能性があります。

革新的な低コストの地下熱電池 (UTB) が発明され、効率的なヒートポンプ動作のための安定したヒートシンクまたは熱源だけでなく、断続的な再生可能電力供給と建物の熱需要の不整合を克服する熱エネルギー貯蔵も提供します。この記事では、コンセプト設計、ラボテスト、モデリングなど、UTB の最近の開発を紹介します。

### 低コストの地下熱交換器としての UTB

図 2 (a) は、低コスト GHE として設計された UTB のプロトタイプです。それは水で満たされ、地面の浅い地下に埋められたタンクです。UTB の蓄熱容量を増やすために、中央にらせん状の熱交換器があり、水中に吊るされた特注の相変化材料 (PCM: Phase-Change Material) のパネルがあります。本格的な UTB は直径 1m、深さ 6m であるため、従来の VBGHE で使用されていた小径で深いボアホールの設置よりも低コストでオーガードリル装置を使用して設置できます。図 2 (b) に示すように、UTB の 5 分の 1 の小規模なプロトタイプが構築され、その性能の評価テストが行われました。フルスケール UTB、小規模 UTB、および従来の VBGHE の寸法を表 1 に示します。

UTB の短期および長期のパフォーマンスを評価するために、詳細な 3D 数値モデル (Zhang 他. 2019) と 1D 数値モデル (Warner 他. 2019) の両方が開発されました。数値モデルは、小規模 UTB プロトタイプからの実験データについて検証されています。

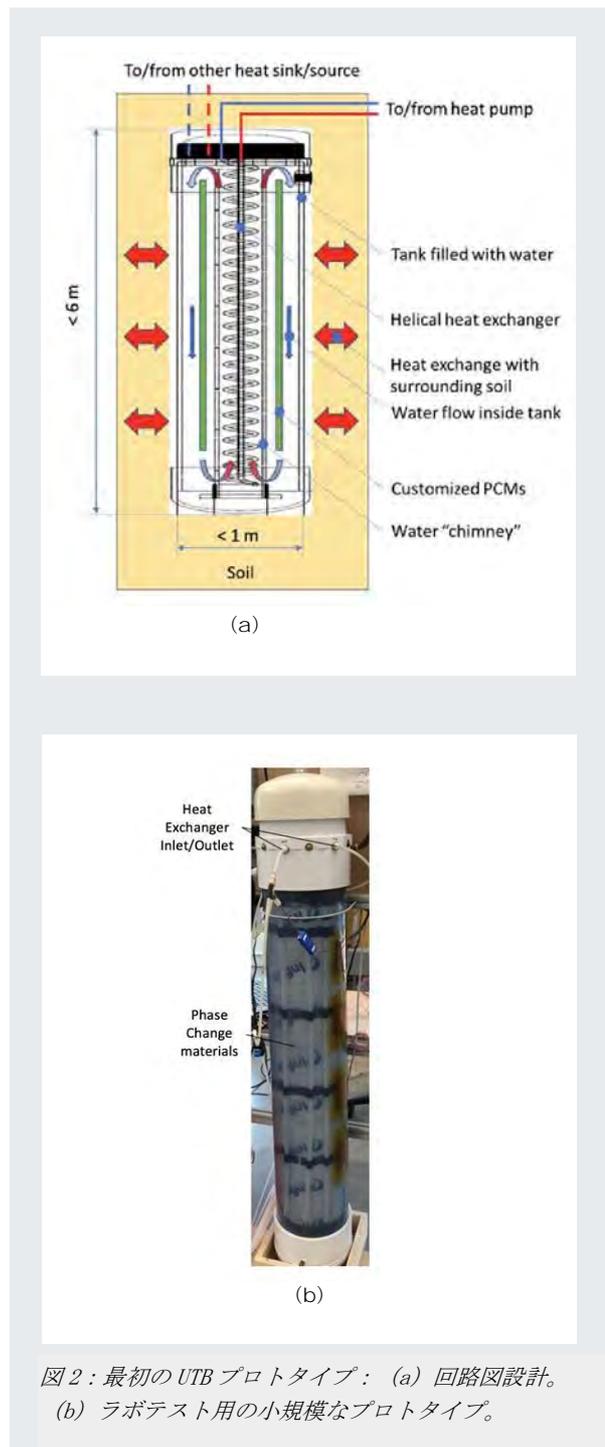


表 1: 従来の VBGHE、フルスケール UTB、および小規模 UTB の寸法

寸法	VBGHE ボアホール	フルスケール UTBS	小規模 UTB
深さ (m)	61	6	1.2
直径 (m)	0.15	1	0.2
容積 (m <sup>3</sup> )	1.08	5.49	0.04
表面積 (m <sup>2</sup> )	28.8	22.3	0.9
表面積対体積比	26.7	4.1	20.3

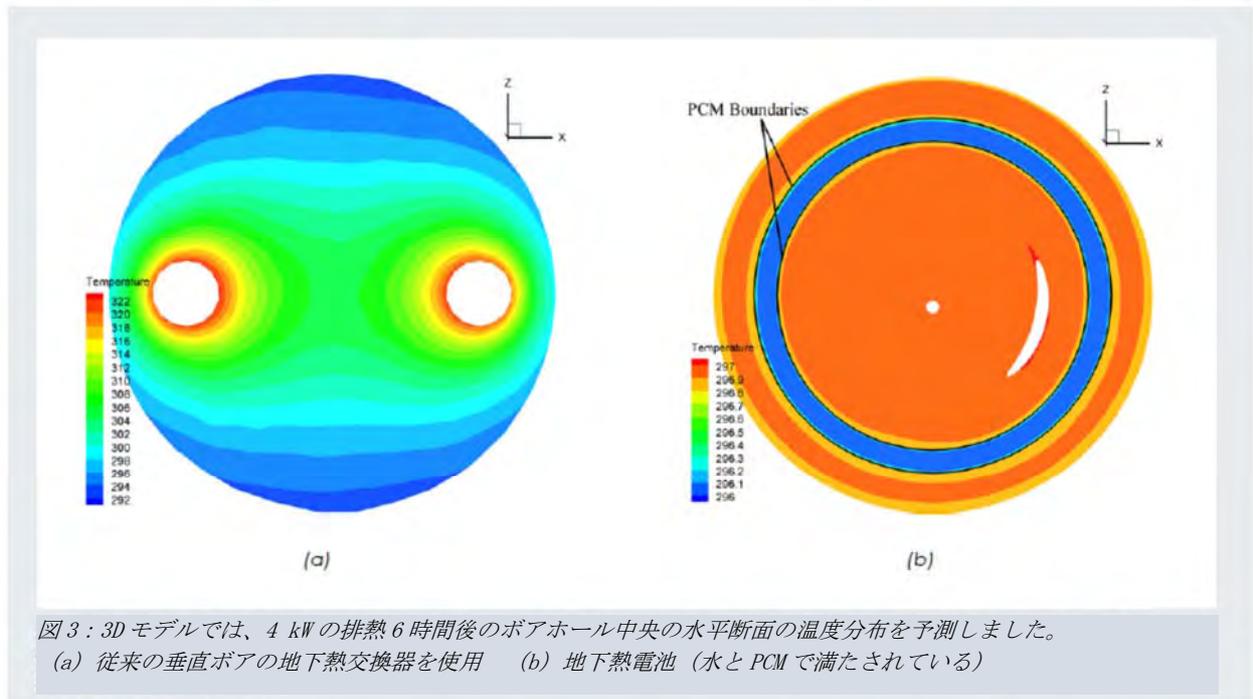


図3：3Dモデルでは、4 kWの排熱6時間後のボアホール中央の水平断面の温度分布を予測しました。  
(a) 従来の垂直ボアの地下熱交換器を使用 (b) 地下熱電池（水とPCMで満たされている）

図3は、3Dシミュレーションで予測された、一定の入熱（4 kW）を6時間印加した後のフルスケールUTBと従来のVBGHEの温度応答の比較を示しています。従来のVBGHEは、熱伝導流体を介して熱伝導流体と周囲の固体材料（漆喰や土壌）の間で熱を交換します。熱媒液とボアホールの壁を取り巻く色が大幅に異なることで示されるように、熱媒液と周囲の土壌の間には大きな温度差があります。対照的に、UTBに排熱されるか、UTBから抽出される熱は、タンク内で自然な対流を引き起こし、UTBの均一なオレンジ色で示されるように、タンクの水温が均一化されています。UTBの大きな熱容量は、

従来のVBGHEの温度よりもはるかに低い温度を維持します。

図4は、次の3つの異なる小規模プロトタイプタンク内の充填の場合の流出液温度測定結果を示しています。水のみ（UTBベースライン）、水とPCMの両方（PCMを含むUTB）、および乾燥砂のみ（バスケット熱交換器をエミュレートするため）の3つです。同じ入熱（75W、フルスケールUTBへの9.375 kW入熱に相当）に応答して、バスケット熱交換器の流出液温度が他の2つの構成よりもはるかに速く上昇したことは明らかです。これ

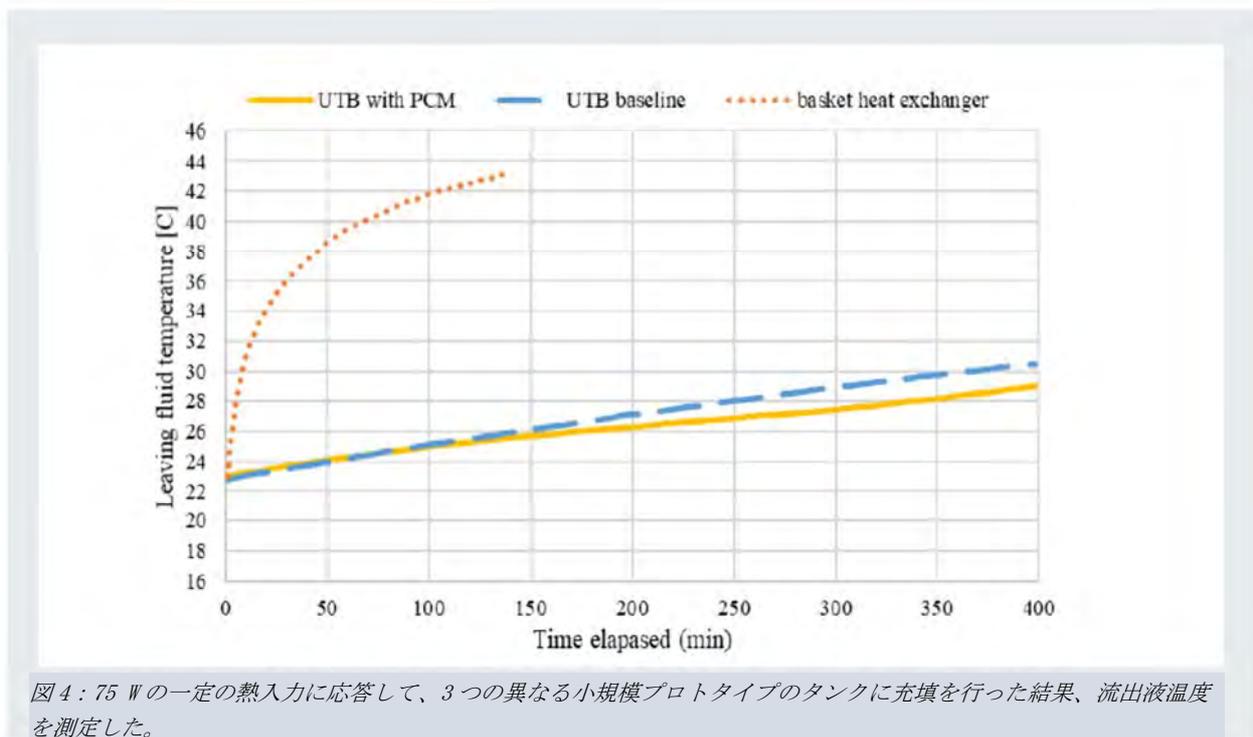


図4：75 Wの一定の熱入力に応答して、3つの異なる小規模プロトタイプのタンクに充填を行った結果、流出液温度を測定した。

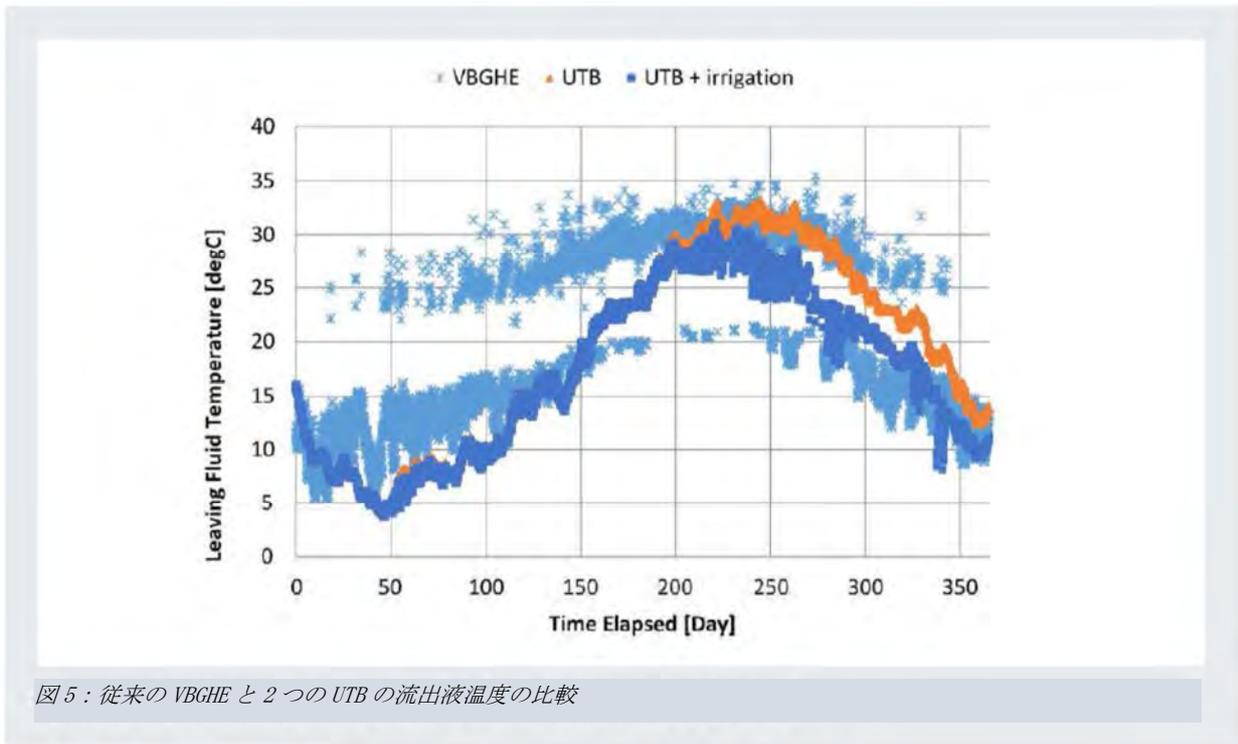


図5：従来のVBGHEと2つのUTBの流出液温度の比較

は、バスケット型熱交換器が熱伝導のみによって熱を伝達するため、熱交換器内の流体と周囲の砂との間に大きな温度勾配が生じるためです。対照的に、水は砂に似た低い熱伝導率を持ちますが、UTB内の水の自然対流によりタンクの水はよく混合され（つまり、水タンク全体の大きな熱容量が利用され）その結果温度上昇は遅くなります。PCMの融解プロセスは、温度上昇をさらに遅くします。

図5は、1年間の運用中に2つのUTB（直径0.8 m、深さ6 m）と従来のVBGHE（深さ61 m、直径0.15 mのボアホールに設置：テネシー州ノックスビルの住宅用GSHPシステム）からの流体温度を予測する1Dモデルを示しています。図5に示すように、UTBはVBGHEに見られるような流出液温度の日々の大きな変動を防いでいます。ただし、UTBの体積に対する表面積の比率が小さいため、VBGHEと比較して、周囲の土壌との熱交換の量と速度が制限されます。その結果、夏の間、タンクの水温は上昇し続け、UTBの年間最高流出液温度はVBGHEのそれよりもわずかに低くなります。シミュレーション結果は、2つのUTBを使用してVBGHEを置き換えると、地下熱伝導率が高い (>2.67W/mK) 場所でのGSHPシステムの運用コストを約2%節約できることを示しています。図5は、夏季にGSHPシステムで調整された家の芝生散水システムと統合することにより、夏季にUTBの流出液温度を下げることで、ヒートポンプの性能をさらに改善できることも示しています。この場合、UTBの温水は定期的に洗い流されて芝生に散水し、冷たい水道水はUTBを補充して冷却能力を回復します。特に、既存の散水で使用されていたもの以外に、追加の水消費は必要ありません。予備コスト分析によると、大口径の浅いボーリング孔の掘削にケーシングが必要ない場合、2つのUTBの設置コストはVBGHEの設置コストよりも39%低くなる可能性があります (Warner 他, 2019)。

### ロードシフト用のデュアル機能 UTB

UTBは、地中熱交換に加えて熱エネルギー貯蔵を可能にするためにさらに開発されています (Liu 他, 2019b)。図6は、デュアル機能を備えたUTBの2番目のプロトタイプです (特許出願中)。それは通常の水タンク内に小さな密閉された内部タンクを設置する構成となっています。内側のタンクは、絶縁体 (PCMの熱伝導率が低い) とエネルギー貯蔵媒体の両方として機能する特注のPCMで満たされたブランケットで包まれています。熱交換器が内部タンクに沈められ、別の熱交換器が環状部に設置されます。この設計により、冷水または氷を内部タンクに保存することができ、これにより、グリッドのピーク時間中にヒートポンプの電力消費をなくすように、直接冷却を行うことができます。UTBの環状部は、地下熱交換器として使用されます。

2番目のプロトタイプUTBを、水冷凝縮器と空冷凝縮器の両方を備えたデュアルソースヒートポンプと統合することにより、図7に示すように、再生可能な電力供給と建物の熱需要に基づいて複数の動作モードを利用できます。オフピーク時 (夕方遅くや早朝など)、または再生可能電力の過剰生産時 (午後の早めの時間など) には、ヒートポンプは空冷凝縮器を使って最大容量で稼働し、空間冷却と同時に内部タンクに冷水または氷を作ります (モード1)。ピーク時間、または午後の遅い時間で電力需要が増加している間は、貯蔵された冷水または氷を使用して建物を直接冷却し、ヒートポンプを停止します (モード2)。氷が溶け、タンク内部の水温が直接冷却できる温度しきい値を超えると、ヒートポンプを運転し、水冷凝縮器を使用して空間冷却を実施し、UTBの環状部に熱を放出します (モード3)。環状部内の水は周囲の土壌と内部タンクの両方によ

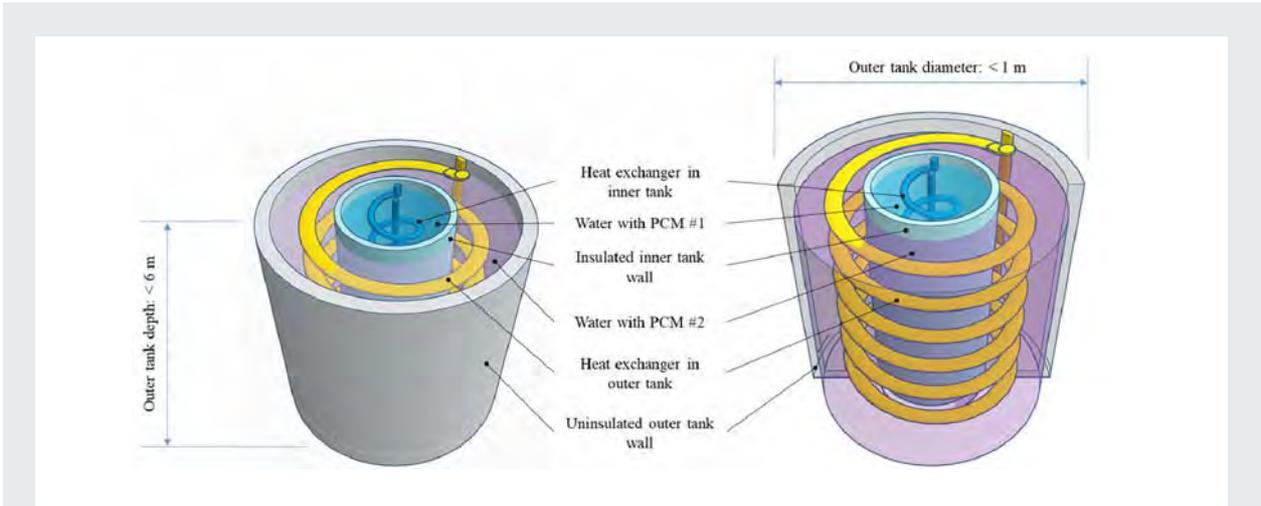


図6：UTBの2番目のプロトタイプの大略図

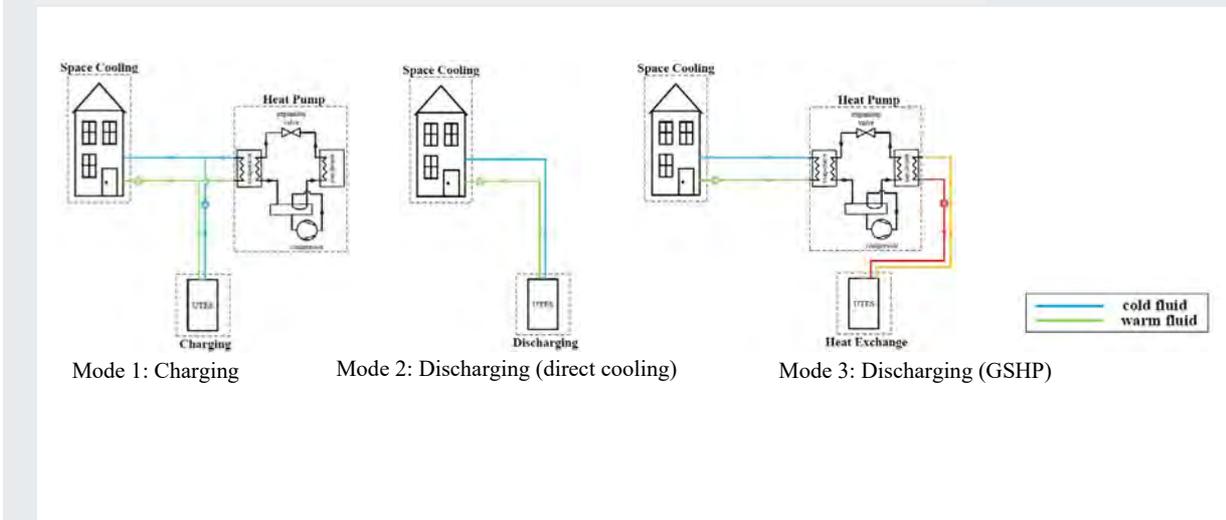


図7：冷却運用のデュアル機能地下熱電池の複数の動作モード。

て冷却され、ヒートポンプは効率的に作動するため、電力消費は低くなります。冷却貯蔵モード（モード1）と放熱モード（モード2および3）は毎日交互に行われるため、UTBのPCMは凍結と融解の間でより頻りに循環します。したがって、PCMはUTBの流出液温度の急激な変化を緩和するのに効果的です。

デュアル機能UTBの5分の1スケールの小規模プロトタイプも構築され試験されました。図8は、周囲温度が制御されたラボスペースにプロトタイプを設置したときの14時間の試験の温度応答を示しています。図8から、6時間の充電期間（モード1）で、タンク内の水が17°Cから3°Cに冷却され、環状部内の水が13°Cを超えていることがわかります。直接冷却期間（モード2）では、一定の入熱（35 W、フルスケールUTBの4.375 kW冷却負荷に相当）が内部タンクに排出され、内部タンク（HX1）の熱交換器からの水温が2時間で3°Cから16°Cに上昇しました。内部タンクの蓄熱容量を増やすことで、低温での直接冷却を延長することができます（例：氷製造やPCMの追加）。2時間の直接冷却操作の後、UTBを地下熱交換器として（UTB環状部のHX2を介して）実行し、35 Wの入熱を15分間隔でオン/オフして、GSHP動作の部分的負荷条件をシミュレートしました。

UTBの流出液温度は、約6時間20°C未満に維持されます。これにより、GSHPを高効率で運転できます。

従来の蓄熱技術（例：氷蓄熱）に対するデュアル機能UTBの主な利点は、ハイブリッド設計により、建物の熱負荷（加熱と冷却の両方）を効率的に満たしながら、電力需要パターンを形成できることです。UTBは地面に埋まっているため、断熱材や建物の床面積が不要になるだけでなく、ヒートポンプを効率的に動作させるためのヒートシンクまたは熱源として地下を利用します。さらに、熱エネルギー貯蔵と地下熱交換器を1つのデバイスに統合することにより、同じ目的のために複数の個別のコンポーネントを使用するよりも安価にできます。

### 結論

地中熱交換器の新しい設計である地下熱電池（UTB）が開発されました。ラボテストとコンピューターシミュレーションの結果は、UTBが従来のVBGHEと同じパフォーマンスを達成できることを示しました。予備的なコスト分析では、同様の年間パフォーマンスを達成する

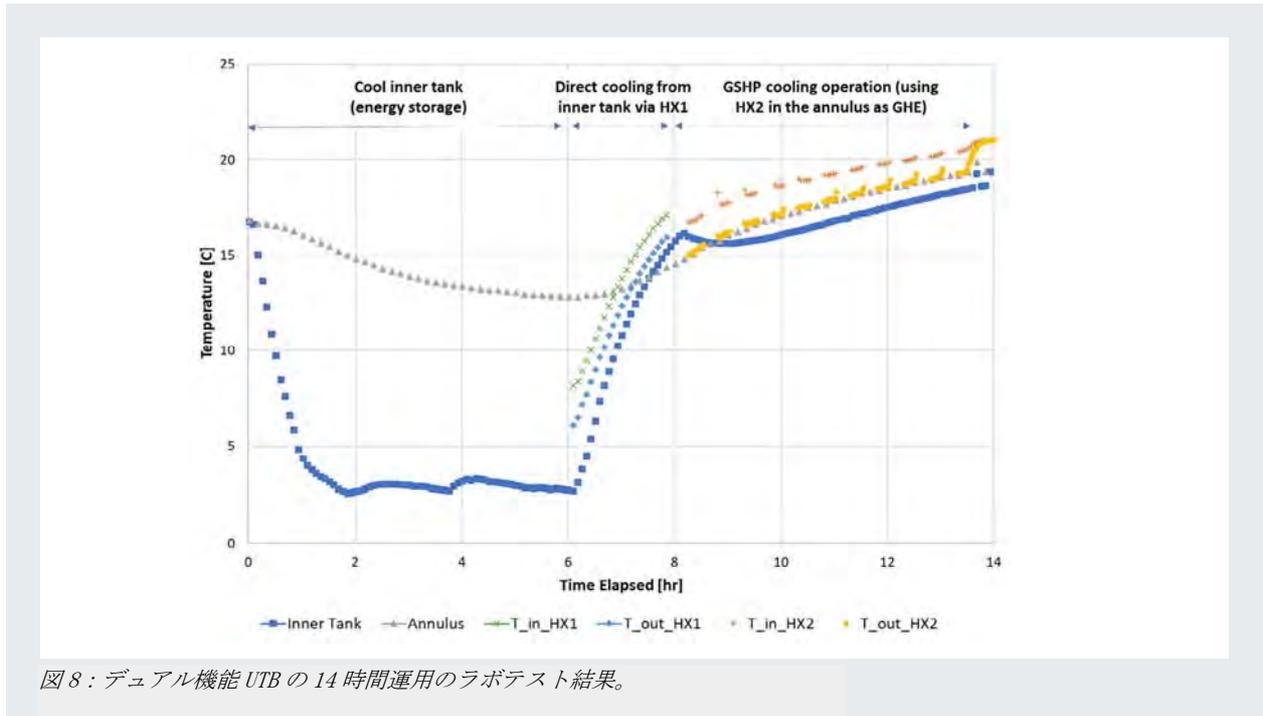


図8：デュアル機能 UTB の 14 時間運用のラボテスト結果。

ために、UTB の設置コストは従来の VBGHE の設置コストよりも 39%低くなる可能性があることが示されています。UTB のさらなる開発により、有効な熱エネルギー貯蔵が可能になり、断続的な再生可能電力供給と変動する建物の熱需要との不一致を克服するために使用できます。建物の望ましい快適性と利便性を犠牲にすることなく、効率的な空調と能動的な需要側管理の両方に新しいソリューションを提供します。

**謝辞**

この論文で提示された研究は、米国エネルギー省によって資金提供されています。

**参考文献**

CAISO (2013). What the Duck Curve Tells us about Managing a Green Grid.

[https://www.caiso.com/Documents/2011-08-10\\_ErrataLTPPTestimony\\_R10-05-006.pdf](https://www.caiso.com/Documents/2011-08-10_ErrataLTPPTestimony_R10-05-006.pdf)

IEA (2018) Energy technology Perspectives 2017. <https://www.iea.org/etp/>

Klein, K., Langner, R., Kalz, D., Herkel, S., and Henning, H. (2016). Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany. Applied Energy, 162, 853-867. doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.107

Liu, X., Y. Polsky, D. Qian and J. Mcdonald. 2018. Analysis of Cost Reduction Potential of Vertical Bore Ground Heat Exchanger. ORNL/TM-2018/756. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory

Liu, X., P. Hughes, K. McCabe, J. Spitler, and L.Southard. 2019a. GeoVision Analysis Supporting Task Force Report: Thermal Applications—Geothermal Heat Pumps. ORNL/TM-2019/502. Oak Ridge, Tennessee:

Oak Ridge National Laboratory.

Liu, X., L. Shi, M. Qu, and J. Warner. 2019b. A Preliminary Study of a Novel Heat Pump Integrated Underground Thermal Energy Storage for Shaping Electric Demand of Buildings. GRC Transaction, Vol. 43, 2019.

NREL (2015). Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65023.pdf>

NYSERDA, 2017. Renewable Heating and Cooling Policy Framework. <https://www.nyserdera.ny.gov/Researchers-and-Policymakers/Clean-Heating-and-Cooling>

Warner, J., X. Liu, L. Shi, M. Qu, and M. Zhang. 2019. A Novel Shallow Bore Ground Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump Applications—Model Development and Validation. In Press, Applied Thermal Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114460>

Zhang, M., X. Liu, K. Biswas and J. Warner. 2019. A 3D Numerical Investigation of a Novel Shallow Bore Ground Heat Exchanger Integrated with Phase Change Material. Applied Thermal Engineering 162 (2019) 114297. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114297>

**XIAOBING LIU**  
**R&D STAFF**  
 オークリッジ国立研究所  
 米国  
[liux2@ornl.gov](mailto:liux2@ornl.gov)  
<https://doi.org/10.23697/m575-0v03>

## デンマークのエネルギーシステムにおける産業用ヒートポンプ ー 現在の状況、その可能性と展望

Benjamin Zühlsdorf, Wiebke Meesenburg, Pernille H. Jørgensen and Brian Elmegaard,  
デンマーク

ヒートポンプは、デンマークのエネルギーシステムの移行における重要な技術であると考えられています。この技術は、地域暖房のいくつかの施設で実証されましたが、産業用途での実施例は限られています。地域暖房環境での R&D の焦点は、規模の拡大と運用の問題だけでなく、さらなる利点の開拓にシフトしています。産業用アプリケーションでは、ヒートポンプの最適な統合を簡素化し、より高い供給温度を実現することに重点が置かれています。この記事では、現在の状況を要約し、産業用ヒートポンプの分野における現在および将来の開発の概要を説明します。



[この記事ダウンロードして共有する](#)

### 序論

デンマークは、再生可能エネルギーの生産量を総需要の 55% に増やし、2030 年までにエネルギー効率を 33% 高めることなどにより、温室効果ガス (GHG) を 40% 削減することを目指しています。2017 年の電力生産における再生可能エネルギーの割合は 64% でした。このうち風力発電は 43% でしたが、熱供給の大部分はバイオマスと廃棄物の焼却によるもので、ガス、石油、石炭などの化石燃料も使っています。これにより、総エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合は 33% になります。これらの境界条件は、全体的なエネルギー効率の改善に加えて、電気で駆動するヒートポンプの実装による GHG 排出の潜在的な削減をもたらします。

したがって、ヒートポンプはデンマークのエネルギーシナリオで重要な役割を果たし、アプリケーションの数を増やすことを目的とした多くのプロジェクトがあります。この記事では、地域暖房および産業におけるヒートポンプの状況の概要を示し、さらなる開発が必要な分野について説明します。

### 地域暖房のヒートポンプ

総供給能力約 120 MW の 77 の産業用ヒートポンプ設備が特定され、そのうち 66 が地域暖房関連です。地域暖房におけるヒートポンプの幅広い分布と現在増加している需要は、いくつかの異なる要因に関連しているようです。

確かに、主要な要因は、地域暖房事業者が社会経済的コストを主要な基準として考慮する法的義務があることです。さらに、境界条件はヒートポンプにとってより有利になっていることに留意ください。公共サービス義務の継続的な段階的廃止および暖房目的で使用される電力に対する税金の削減により、電力価格は下落しています。さらに、地域暖房システムのヒートポンプは、エネルギー効率の改善に対する補助金の対象となります。

ヒートポンプが広く要求されているもう 1 つの要因は、この技術が関係するすべての関係者に知られ、承認されていることにあります。地域暖房ネットワークのオペレーターは、ヒートポンプの特性と、それらを最も有利な方法で統合する方法を知っています。統合プロ

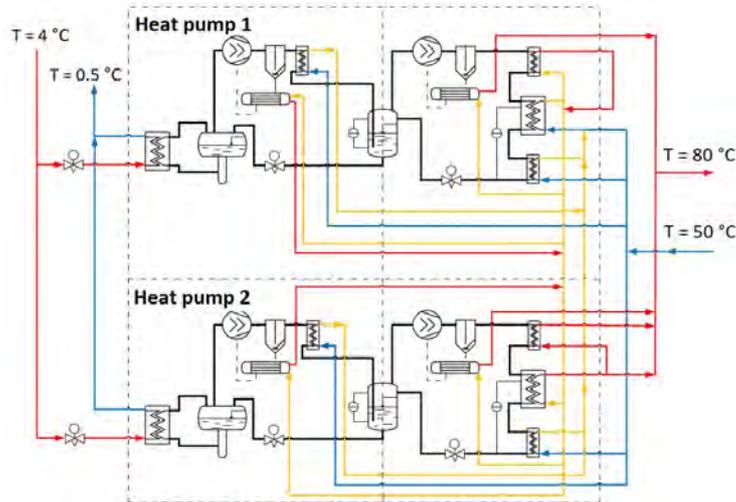


図 1: ソース側が海水を使用し、2 台のヒートポンプが並列に接続されている構成での SVAF プロジェクトの 2 台の 2 ステージ R-717 ヒートポンプのシステムレイアウト

## その他の記事

セスは、適用をイメージするための事例や計画ツールを含む詳細なガイドラインやカタログなど、公開されている情報資料によってサポートされています[1]。

また、ヒートポンプのサプライヤが提供するソリューションはより標準化されており、エンジニアリングの労力が軽減されています。

ヒートポンプ技術は地域暖房の確立された技術になったと結論付けられる可能性があり、今後数年間でいくつかのプロジェクトが続くことが予想されます。予想されるアプリケーションの増加は、さらなる研究開発の需要につながる特定の課題に関連しています。以下に予想される課題の概要を示し、それに対応する開発プロジェクトを紹介します。

### 熱源

地域暖房供給用のヒートポンプの普及は、かなりのサイズの熱源が要求されます。コペンハーゲンは、2025年までにカーボンニュートラルになることを計画しており、最大 300 MW の地域暖房供給能力がヒートポンプでカバーされると期待されています。一般に、さまざまな特性を備えたさまざまな熱源があります。

- ▶ 燃焼廃ガス
- ▶ 産業過剰熱
- ▶ 地熱源
- ▶ 廃水
- ▶ 地下水
- ▶ 湖や川の水
- ▶ 海水
- ▶ 大気

これらの熱源には、設置と操作に関するさまざまな特性があり[2, 3]、地理的条件に依存したり、量が制限されたりすることがあります。ボイラーからの廃ガスおよび産業の過剰熱は、比較的高い温度で利用できることが多く、したがって、ネットワークの近くに位置する場合、有望な熱源となります。地熱源はその場所によって制約を受けますが、設置には現在の開発状況では、特定の投資リスクを伴います。地下水の利用は、事前調査のために大きな初期費用が掛かる可能性があり、地下水の水質の影響に関する懸念の対象となっています。デンマークでは、デンマークのすべての大都市で海水が豊富に利用可能であるため、湖、川その他、特に海からの水を利用することが有望です。空気は別の潜在的な熱源であり、特に他の熱源へのアクセスが制限されている小規模ネットワークで使用されます。ただし、それは多くの場合、広い土地を要し、蒸発器ファンからの騒音が懸念され、寒い時期には霜取りが必要です。

最大容量 100MW のヒートポンプの熱源として、浄化された排水と海水を使用する可能性を探るために、地域暖房の大型ヒートポンプに関する研究開発プロジェクト SVAF が開始されました[4]。5MW の熱供給を備えた図 1 および表 1 に記載されている実証プラントが建設されました。このプラントは、アンモニアを冷媒として使

表 1: SVAF プロジェクトのヒートポンプの設計仕様

システム	スクリーコンプレッサーを備えた 2 台の直列接続された 2 ステージ R-717 ヒートポンプ		
ソース	媒体	海水	排水
	温度	4°C→0.5°C	10°C→4°C
	熱流	3672 kW	3732 kW
シンク	媒体	地域暖房	
	温度	50°C→80°C	
	熱流	5194 kW	5177 kW
性能	出力	1635 kW	1552 kW
	COP <sub>h</sub>	3.2	3.3

用する 2 つの 2 ステージヒートポンプユニットで構成されています。ヒートポンプは、シンク側で直列に接続され、ソース側で並列および直列の両方で動作できます。このプロジェクトの目的は、これらの熱源の運転知見を収集すると同時に、プラントの耐用年数を通じて最適な運転を保証する戦略を開発することです。このプラントは 2019 年春に稼働を開始し、90°C までの供給温度を含むさまざまな容量と温度で性能試験を実施しています。

### 運転パラメータの調整と予知保全

SVAF でテストされた大規模ヒートポンプは、供給温度や熱源温度の季節変動などの境界条件の変化、および熱交換器の汚れなどによるコンポーネントの性能の変化の影響を受けます。ヒートポンプシステムは比較的複雑であり、その制御システムは、希望の温度やサイクルの中間圧力などの 18 の設定点を含みます。それに応じて、最適な動作条件を見つけることが要求され、2 つの戦略がテストされます。

まず、検証済みの数値モデルを使用して感度を調査し、設定値を調整します[5]。これにはさらに、進行中の劣化に対応するためにコンポーネントパラメータの継続的な調整が必要になる場合があります。数値的に要求されます。第二に、稼働中のプラントの変動による感度を分析するためにテストされます。これにより、より正確な結果が得られますが、操作への直接的な影響は避けられません。

さらに、ヒートポンプの動作パラメータの監視、数値シミュレーションとの比較により、いくつかのコンポーネントの状態が観察されます。これらの観察により、熱交換器の汚れや一般的なコンポーネントの摩耗に起因する、必要なクリーニングとメンテナンスのダウンタイムの予測とスケジューリングが可能になります。

### ヒートポンプの二次的な利点を活用する

コペンハーゲンの地域暖房に最近設置された別のユニットは、倉庫とクルーズ船のターミナルへの熱供給のため、Nordhavn の新しい開発エリアにあります。このユニットは、Johnson Controls / Sabroe が提供する

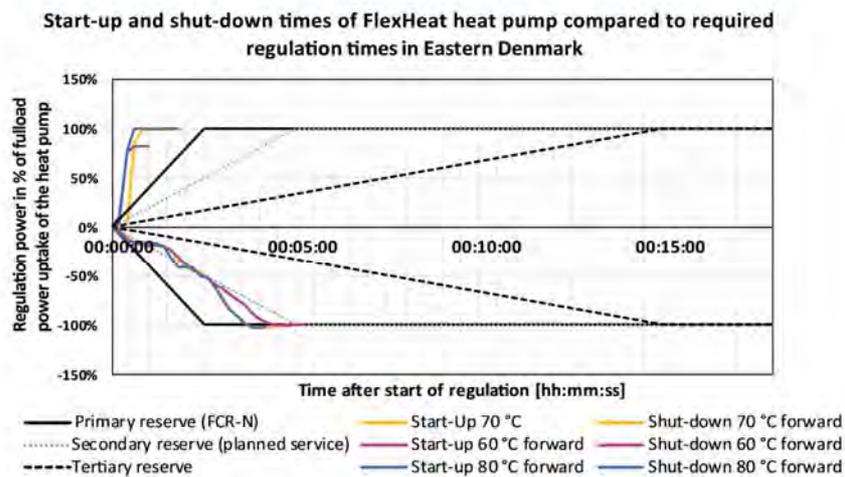


図2: Nordhavn Project のヒートポンプの実現可能に必要な調整力

800kW のヒートポンプユニットです。200kW の直接電気加熱ユニットと約 5MWh の蓄熱が組み合わされています。システムは、都市ネットワークの残りの部分に接続することなく、孤立した構成で需要を供給します。これにより、システムは柔軟な動作のテストに最適になり、コスト最適動作、地域暖房需要のピークシェーピング、電力システムへの補助サービスの配信などの二次的な利点を活用できます。初期テストが行われ、図2に示すように、2次および3次の予備電力を供給できることが示されました。ヒートポンプのさらなる開発が期待されており、より迅速な規制を可能にし、サプライヤが提供する運転限度を超えるリスクを回避します。

### 産業用ヒートポンプ

産業用途でのヒートポンプの統合は、かなり難しいことがわかっています。境界条件はより多様であり、統合のレベルに追加の自由度があり、利用可能な技術はアプリケーションの全範囲をカバーしていません。

### 統合のレベル

プロセスの多様性に加えて、プロセス統合のレベルにもある程度の自由度があります。エネルギー効率対策とヒートポンプを使用した電化プロセスの実施は、次のレベルで分類できます。

1. サブプロセス間の相互作用のないプロセスレベルでの統合
2. 異なるサブプロセス間の潜在的な接続を伴うプロセスレベルでの統合
3. プロセスとのさまざまなレベルの相互作用を持つユーティリティレベルでの統合

Bühler 他[6]は、さまざまな可能性を研究し、プロセスとの高度な相互作用を持つユーティリティレベルのシステム、つまり、さまざまな温度レベルでのさまざまな熱回収ループとプロセス熱供給が、最高の熱力学的および経済的性能を示すことを見出しました。ただし、プロセスレベルでの統合により、段階的な実装が可能

になり、既存のプラントでの統合により適している場合があります。そのため、ヒートポンプユニットの最適な配置は、技術的および経済的な制約だけでなく、エネルギー効率対策を実施する会社の戦略にも依存しています。

### 高温ヒートポンプ

工業用ヒートポンプの困難な統合に加えて、高温ヒートポンプの開発には技術的な課題があります。需要の分析により、100℃を超える温度の熱を必要とするいくつかのプロセスが特定されています。例としては、120℃以上の熱を必要とする滅菌プロセス、200℃以上の熱を必要とする乾燥プロセス、300℃までの要求を伴う化学プロセスおよび精製所があります。ただし、容易に入手できるヒートポンプシステムは、100℃～150℃の供給温度に制限されています。排出量補償のある天然ガスボイラーは中期的な代替手段と見なされますが、バイオマスボイラーと電気ボイラーは長期的な代替手段と見なされます。これにより、将来のエネルギーシナリオで高温ヒートポンプがどのような役割を果たすかという疑問が生じます。

Zühlsdorf 他[7]は、プロセス熱供給のためのヒートポンプベースのユーティリティシステムの技術的および経済的実現可能性を分析しました。この研究では、異なる燃料コストシナリオを考慮した2つのケーススタディで2つの技術を評価しました。2020年のデンマーク、ドイツ、ノルウェーの燃料コストに対応する3つのシナリオと、風車やPVなどの再生可能な発電機の運用に対応する1つのシナリオがありました。CO<sub>2</sub>を使用した逆ブレイトンサイクルとカスケード式多段蒸気圧縮システムの両方が検討されました。2つのケーススタディは、210℃で8.2MWの供給を伴う粉乳生産のための噴霧乾燥機の適用と、最大280℃で50MWを供給するアルミナ生産の事例研究でした。

図3は、両方のケースと両方の技術、および代替の熱供給技術の特定の平準化されたコストを示しています。

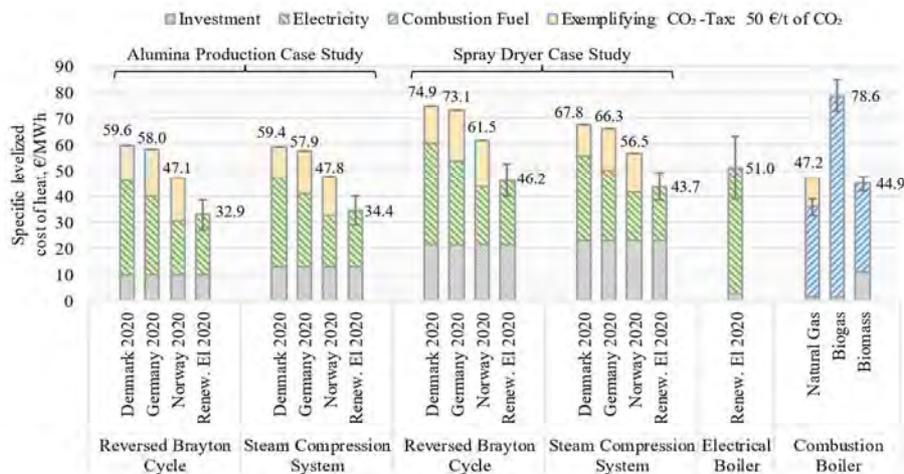


図3：電気および燃焼ベースのボイラーと比較した、多段式ウォーターフォール蒸気圧縮システム（熱源：110°C→60°C、ヒートシンク：140°C→280°C&50 MW）およびR-744を使用した逆ブレイトンサイクルのスプレッドライヤーのケーススタディ（熱源：50°C→25°C、ヒートシンク：64°C→210°C&8.2 MW）のアルミナ生産の平準化した熱のコスト[7]

熱の平準化されたコストは、投資、燃料コスト、電気コスト、およびCO2排出に対する税金に分けられます。結果は、再生可能エネルギー源からの電力を使用するヒートポンプソリューションは、天然ガスボイラー（CO2税50ユーロ/トン）およびスプレッドライヤーケースのバイオマスと比較して経済的に競争力があることを示しています。さらに、同様のヒートポンプソリューションは、アルミナ生産の場合、バイオマスボイラーとガスボイラーの両方よりも優れています。

考慮されたコンセプトは、市販されている石油およびガス産業のコンポーネントに基づいていましたが、提案されたコンセプトでは実証されていませんでした。

### 結論

地域暖房におけるヒートポンプの設置数は大幅に増加しています。この技術は多くのアプリケーションで成功裏に実証され、開発の焦点はスケールの拡大、運用上の問題、二次的な利益の活用に移りました。産業用アプリケーションの状況では、システムの複雑さの増大と高温熱供給に関する技術的制約が制限要因と見なされます。しかし、進行中の開発と変化する境界条件は、実例数の増加を助けて地域暖房と同様の普及を可能にすることが期待されます。

### 参考文献

[1] Danish Energy Agency (Energistyrelsen). Working group for large heat pumps (Rejsehold for store varmepumper). Drejbog for Store Varmepumper, Inspirationskatalog for Store Varmepumper, Varmepumpeberegner 2019. <https://ens.dk/ansvarsomraader/varme/rejsehold-store-varmepumper> (accessed May 27, 2019).

[2] Pieper H, Ommen T, Bühler F, Lava Paaske B, Elmegaard B, Brix Markussen W. Allocation of investment costs for large-scale heat pumps supplying district heating. Energy

Procedia 2018. 147:358–67.

doi:10.1016/j.egypro.2018.07.104.

[3] Pieper H, Ommen T, Elmegaard B, Brix Markussen W. Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating. Energy 2019. 176:156–70. doi:10.1016/j.energy.2019.03.165.

[4] HOFOR A/S, CTR, VEKS A/S, Innoterm A/S, Dansk Miljø & Energistyrelsen A/S, Alfa Laval Aalborg A/S, et al. Store elvarmepumper til fjernvarme (Large heat pumps for district heating) SVAF, Phase 2 n.d. [https://energiforskning.dk/en/projects/detail?program=All&teknologi=All&field\\_bevillingsaar\\_value=&start=&slut=&field\\_status\\_value=All&keyword=svaf&page=0](https://energiforskning.dk/en/projects/detail?program=All&teknologi=All&field_bevillingsaar_value=&start=&slut=&field_status_value=All&keyword=svaf&page=0).

[5] Jørgensen PH, Ommen T, Markussen WB, Elmegaard B. Performance Optimization of a Large-Scale Ammonia Heat Pump in Off-Design Conditions. Proceedings of the 8th IIR Conference: Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies, 2019, p. 8.

[6] Bühler F, Zühlendorf B, Nguyen T-V, Elmegaard B. A comparative assessment of electrification strategies for industrial sites: Case of milk powder production. Applied Energy 2019. 250:1383–401. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.071.

[7] Zühlendorf B, Bühler F, Bantle M, Elmegaard B. Analysis of technologies and potentials for heat pump-based process heat supply above 150 °C. Energy Conversion and Management: X 2019. doi:10.1016/j.ecmx.2019.100011.

**BENJAMIN ZÜHLSDORF**

PHD

デンマーク技術研究所、エネルギーおよび気候  
デンマーク

[bez@dti.dk](mailto:bez@dti.dk)

<https://doi.org/10.23697/vwb5-h430>

## Events 2019/2020

This section lists workshops, conferences etc. related to heat pumping technologies.

### 2019

19-21 November  
7th International Conference On Energy Research and Development  
State of Kuwait  
<https://www.ashrae.org/conferences/topical-conferences/7th-international-conference-on-energy-research-development>

4-6 December  
50th International HVAC&R Congress and Exhibition  
Beograd, Serbia  
<https://www.ashrae.org/conferences/ashrae-endorsed-conferences/international-hvac-r-congress-and-exhibition>

9-12 December  
2019 Buildings XIV International Conference  
Clearwater Beach, Florida, USA  
<https://www.ashrae.org/conferences/topical-conferences/2019-buildings-xiv-international-conference>

### 2020

1-5 February  
ASHRAE Winter Conference  
Orlando, Florida, USA  
<https://www.ashrae.org/conferences/2020-winter-conference-orlando>

12-14 February  
Energise 2020: Energy Innovation for a Sustainable Economy  
Hyderabad, India  
<https://www.energiseindia.in/>

15-17 April  
6th IIR Conference on Sustainability and the Cold Chain (ICCC 2020)  
Nantes, France  
<http://www.iifir.org/clientBookline/recherche/NoticesDetaillees.asp?VIEWALL=TRUE&ToutVisualiser=1&INSTANCE=exploitation&iNotice=1&ldebut=>

11-14 May  
13th IEA Heat Pump Conference 2020  
Jeju, South Korea  
<http://hpc2020.org/>

7-11 June  
9th International Conference on Caloric Cooling and Applications of Caloric Materials (Thermag IX)  
College Park, Maryland, USA  
[https://www.ashrae.org/File%20Library/Conferences/ASHRAE%20Endorsed%20Conferences/DRAFT%20Thermag2020-3\\_VA1\\_Redlined.pdf](https://www.ashrae.org/File%20Library/Conferences/ASHRAE%20Endorsed%20Conferences/DRAFT%20Thermag2020-3_VA1_Redlined.pdf)

27 June - 1 July  
ASHRAE Annual Conference  
Austin, Texas, USA  
<https://www.ashrae.org/conferences/2020-annual-conference-austin-texas>

1-3 July  
Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning  
Hangzhou, China  
<https://10times.com/acra-hangzhou>

1-3 July  
8th Iberian-American Congress of Refrigeration Science and Technology (CYTEF 2020)  
Pamplona, Spain  
<http://www.unavarra.es/cy-tef2020/?languaged=1>

13-16 July  
Purdue International Compressor Engineering, Refrigeration & AC, High Performance Buildings Conferences  
West Lafayette, Indiana, USA  
<https://engineering.purdue.edu/Herrick/Conferences/2020>

26-29 July  
Rankine 2020 Conference - Advances in Cooling, Heating and Power Generation  
Glasgow, United Kingdom  
<https://ior.org.uk/rankine2020>

12-14 August  
2020 Building Performance Analysis Conference & Simbuild  
Chicago, Illinois, USA  
<https://www.ashrae.org/conferences/topical-conferences/2020-building-performance-analysis-conference-simbuild>

16-21 August  
2020 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings  
Pacific Grove, California, USA  
<https://aceee.org/conferences/2020/ssb>

14-16 September  
Indoor Environmental Quality Performance Approaches - Transitioning from IAQ to IEQ  
Athens, Greece  
<https://www.ashrae.org/conferences/topical-conferences/indoor-environmental-quality-performance-approaches>

1-2 October  
The Fourth International Conference on Efficient Building Design  
Beirut, Lebanon  
<https://www.ashrae.org/conferences/topical-conferences/the-fourth-international-conference-on-efficient-building-design>

6-9 December  
14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants (GL 2020)  
Kyoto, Japan  
<https://biz.knt.co.jp/tour/2020/12/gl2020/program.html>

# National Team CONTACTS

## AUSTRIA

Mr. Thomas Fleckl  
Austrian Institute of Technology  
Tel: +43 50550-6616  
[thomas.fleckl@ait.ac.at](mailto:thomas.fleckl@ait.ac.at)

## BELGIUM

Ms. Jozefien Vanbecelaere  
Beleidsmedewerker PVen  
Warmtepompen  
Tel: +32 2 218 87 47  
[jozefien.vanbecelaere@ode.be](mailto:jozefien.vanbecelaere@ode.be)

## CANADA

Dr. Sophie Hosatte Ducassy  
CanmetENERGY  
Natural Resources Canada  
Tel: +1 450 652 5331  
[sophie.hosatte-ducassy@canada.ca](mailto:sophie.hosatte-ducassy@canada.ca)

## CHINA

Prof Xu Wei  
China Academy of Building Research  
Tel: +86 10 84270105  
[xuwei19@126.com](mailto:xuwei19@126.com)

## DENMARK

Mr. Svend Pedersen  
Danish Technological Institute  
Tel: +45 72 20 12 71  
[svp@teknologisk.dk](mailto:svp@teknologisk.dk)

## FINLAND

Mr. Jussi Hirvonen  
Finnish Heat Pump Association  
Tel: +35 8 50 500 2751  
[jussi.hirvonen@sulpu.fi](mailto:jussi.hirvonen@sulpu.fi)

## FRANCE

Mr. Paul Kaaijk  
ADEME  
Tel: +33 4 93 95 79 14  
[paul.kaaijk@ademe.fr](mailto:paul.kaaijk@ademe.fr)

## GERMANY

Dr.-Ing. Rainer M. Jakobs  
Informationszentrum Wärmepumpen  
und Kältetechnik - IZW e.V  
Tel: +49 61 63 57 17  
[email@izw-online.de](mailto:email@izw-online.de)

## ITALY

Dr Maurizio Pieve  
ENEA, Energy Technologies Dept.  
Tel: +39 050 621 36 14  
[maurizio.pieve@enea.it](mailto:maurizio.pieve@enea.it)

## JAPAN

Mr. Tetsushiro Iwatsubo  
New Energy and Industrial Tech-  
nology Development Organization  
Tel: +81-44-520-5281  
[iwatsubotts@nedo.go.jp](mailto:iwatsubotts@nedo.go.jp)

Mr. Hideaki Maeyama  
Heat Pump and Thermal Storage  
Technology Center of Japan (HPTCJ)  
Tel: +81 3 5643 2404  
[maeyama.hideaki@hptcj.or.jp](mailto:maeyama.hideaki@hptcj.or.jp)

## NETHERLANDS

Mr. Tomas Olejniczak  
Netherlands Enterprise Agency (RVO)  
Tel: +31 88 60 233 17  
[tomas.olejniczak@rvo.nl](mailto:tomas.olejniczak@rvo.nl)

## NORWAY

Mr. Rolf Iver Mytting Hagemoen  
NOVAP  
Tel: +47 22 80 50 30  
[river@novap.no](mailto:river@novap.no)

## SOUTH KOREA

Mr. Hyun-choon Cho  
KETEP  
Tel: +82 2 3469 8872  
[energykorea@ketep.re.kr](mailto:energykorea@ketep.re.kr)

## SWEDEN

Dr. Emina Pasic  
Swedish Energy Agency  
Tel: +46 16 544 2189  
[emina.pasic@energimyndigheten.se](mailto:emina.pasic@energimyndigheten.se)

## SWITZERLAND

Mr. Stephan Renz  
Beratung Renz Consulting  
Tel: +41 61 271 76 36  
[renz.btr@swissonline.ch](mailto:renz.btr@swissonline.ch)

## UNITED KINGDOM

Mr. Oliver Sutton  
Department for Business, Energy &  
Industrial Strategy  
Tel: +44 300 068 6825  
[oliver.sutton@beis.gov.uk](mailto:oliver.sutton@beis.gov.uk)

## THE UNITED STATES

Mr. Van Baxter – Team Leader  
Building Equipment Research  
Building Technologies Research &  
Integration Center  
Tel: +1 865 574 2104  
[baxtervd@ornl.gov](mailto:baxtervd@ornl.gov)

Ms. Melissa Voss Lapsa – Coordinator  
Building Envelope & Urban Systems Research  
Building Technologies Research & Integration  
Center  
Tel: +1 865 576 8620  
[lapsamv@ornl.gov](mailto:lapsamv@ornl.gov)

### International Energy Agency

The International Energy Agency (IEA) was established in 1974 within the framework of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) to implement an International Energy Programme. A basic aim of the IEA is to foster co-operation among its participating countries, to increase energy security through energy conservation, development of alternative energy sources, new energy technology and research and development.



### Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies (HPT TCP)

International collaboration for energy efficient heating, refrigeration, and air-conditioning.

#### Vision

Heat pumping technologies play a vital role in achieving the ambitions for a secure, affordable, high-efficiency and low-carbon energy system for heating, cooling and refrigeration across multiple applications and contexts.

The Programme is a key worldwide player in this process by communicating and generating independent information, expertise and knowledge related to this

technology as well as enhancing international collaboration.

#### Mission

To accelerate the transformation to an efficient, renewable, clean and secure energy sector in our member countries and beyond by performing collaborative research, demonstration and data collection and enabling innovations and deployment within the area of heat pumping technologies.

#### Heat Pump Centre

A central role within the HPT TCP is played by the Heat Pump Centre (HPC). The HPC contributes to the general aim of the HPT TCP, through information exchange and promotion. In the member

countries, activities are coordinated by National Teams. For further information on HPC products and activities, or for general enquiries on heat pumps and the HPT TCP, contact your National Team on the address above.

The Heat Pump Centre is operated by RISE Research Institutes of Sweden.



Heat Pump Centre  
c/o RISE Research Institutes of Sweden  
P.O. Box 857  
SE-501 15 Borås  
Sweden  
Tel: +46 10 516 55 12  
[hpc@heatpumpcentre.org](mailto:hpc@heatpumpcentre.org)

[www.heatpumpingtechnologies.org](http://www.heatpumpingtechnologies.org)

この HPT Magazine の効果的な活用のため、今後改善を図っていきたいと考えておりますので、忌憚のないご意見、ご要望などを下記事務局までお寄せ下さい。

事務局連絡先：(一財) ヒートポンプ・蓄熱センター 国際・技術研究部  
IEA HPT TCP 日本事務局 前山 英明  
TEL: 03-5643-2404 FAX: 03-5641-4501  
e-mail: [maeyama.hideaki@hptc.j.or.jp](mailto:maeyama.hideaki@hptc.j.or.jp)