



# The Future of Heat Pumps

World Energy Outlook Special Report

International Energy Agency

Translation provided by



**Heat Pump & Thermal Storage Technology Center of Japan**

一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター

<https://www.hptcj.or.jp/>

# INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

---

The IEA examines the full spectrum of energy issues including oil, gas and coal supply and demand, renewable energy technologies, electricity markets, energy efficiency, access to energy, demand side management and much more. Through its work, the IEA advocates policies that will enhance the reliability, affordability and sustainability of energy in its 31 member countries, 11 association countries and beyond.

This publication and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

## IEA member countries:

Australia  
Austria  
Belgium  
Canada  
Czech Republic  
Denmark  
Estonia  
Finland  
France  
Germany  
Greece  
Hungary  
Ireland  
Italy  
Japan  
Korea  
Lithuania  
Luxembourg  
Mexico  
Netherlands  
New Zealand  
Norway  
Poland  
Portugal  
Slovak Republic  
Spain  
Sweden  
Switzerland  
Republic of Türkiye  
United Kingdom  
United States

The European Commission also participates in the work of the IEA

## IEA association countries:

Argentina  
Brazil  
China  
Egypt  
India  
Indonesia  
Morocco  
Singapore  
South Africa  
Thailand  
Ukraine

今日、世界中の家庭、オフィス、学校、工場などの建物における暖房方法の多くは、依然として化石燃料、特に天然ガスに大きく依存している。これが大量の温室効果ガス排出につながることは長らく明らかであり、現在の世界的なエネルギー危機は、より手頃な価格で信頼性が高く、クリーンな建物の暖房方法への移行が急務であることを痛感させるものである。

このような状況において、建物や産業部門において効率よく熱を供給できるヒートポンプは、暖房・加熱をより安全で持続可能なものにするためのキーテクノロジーである。また、コスト競争力が急速に高まり、世界中でますます多くの政府、企業、消費者の関心を集めている。しかし、ヒートポンプの現状とエネルギーシステムにおける将来の役割に関する包括的かつ世界的な調査は今までのところ行われていなかった。今回の「World Energy Outlook」の特別報告書は、そのギャップを埋めることを目的としている。

我々の詳細な分析によると、これまでに発表された各国政府の政策プランによってヒートポンプの使用が大幅に拡大し、暖房用途のガス、石油および石炭の使用量に明確な影響を与えることが分かっている。ヒートポンプには、2030年までの、少なくとも5億トンに及ぶ世界の二酸化炭素排出量の削減ポテンシャルがある。欧州にとって、ヒートポンプはロシア産ガスへの依存を減らすための重要な手段である。なぜならば、建物の暖房という欧州最大のガス需要を2030年までに少なくとも210億立方メートル削減することができるからである。

一方、この特別報告書では、ヒートポンプの生産と導入を増大するために対処すべき重要なボトルネックを示している。消費者が初期費用の負担を克服してヒートポンプがもたらす節約の恩恵を受けるには、政府の支援が不可欠である。これは、低所得世帯をエネルギー危機から守るための緊急の優先事項である。ヒートポンプを設置する職人も不足しており、電気技師や技術者、設置作業員は、既に欧米企業では確保するのが大変な職種となっている。

ヒートポンプの役割が大きくなると、政策立案者が電力安定供給への影響に十分な注意を払うことも必要となる。ヒートポンプの導入と建物の省エネを同時に行うことでこれらのリスクを軽減でき、さらに、電力網の適切な計画と一緒に導入すれば、スマート制御の活用によりヒートポンプをグリッド資産に変えることができる。

本報告書への協力に関して欧州復興開発銀行に感謝する。また、パリの IEA 本部で 10 月に我々が開催したヒートポンプに関する有意義なワークショップに参加し、貴重な視点と見識を共有して頂いた世界各国の政府、産業界、学界からの 120 名を超える高度な知識を有する代表の方々にも感謝する。また、同僚のローラ・コッツィ (Laura Cozzi) の優れたリーダーシップの下、タイムリーかつ包括的な本報告書の作成に迅速に取り組んだ IEA チームにも大いに謝意を表したい。エネルギーおよび気候危機に対処する上で、ヒートポンプが重要な役割を果たすための道をどのように切り開くのか、この差し迫った時期に世界中の意思決定者に情報を提供することが役立つと確信している。

ファティ・ビロル  
国際エネルギー機関事務局長  
Dr Fatih Birol  
Executive Director  
International Energy Agency



本調査は、国際エネルギー機関（IEA）の他の部局の協力のもと、持続可能性・技術・見通し局のWorld Energy Outlookチームによって作成された。本調査は、チーフエネルギーモデラーであり、エネルギー需要見通し部門の責任者である**Laura Cozzi**によって計画および指揮された。**Yannick Monschauer**はプロジェクトのコーディネーターを務め、筆頭著者となった。**Daniel Wetzel**はコーディネーターと執筆サポートを担当した。**Stéphanie Bouckaert**はモデリング開発を監督した。

その他、IEAの主な執筆者は以下の通りである。**Justina Bodláková**（労務とサプライチェーン）、**François Briens**（コスト）、**Olivia Chen**（雇用）、**Daniel Crow**（気候と影響）、**Davide D'Ambrosio**（データサイエンス）、**Víctor García Tapia**（見通し）、**Timothy Goodson**（見通しと投資）、**Pauline Henriot**（デマンドフレキシビリティ）、**Bruno Idini**（コストとレポート作成）、**Hyeji Kim**（手頃な価格とコスト）、**Arthur Rogé**（政策とEUフォーカス）、**Fabian Voswinkel**（産業、Fガスおよび非コスト障壁）。**Marina Dos Santos**のサポートは必要不可欠であった。

**Chiara Delmastro**と**Rafael Martínez-Gordón**は、モデリングを主導し、エネルギー技術・政策チームとともに大いに貢献した。

その他、**Ashley Acker**、**Ana Alcalde Báscones**、**Oskaras Alšauskas**、**Caleigh Andrews**、**Elisa Asmelash**、**Yasmine Arsalane**、**Vittoria Chen**、**Julie Dallard**、**Nouhoun Diarra**、**Michael Drtil**、**Will Hall**、**Ilkka Hannula**、**Paul Hugues**、**Martin Husek**、**Martin Küppers**、**Kazuhiro Kurumi**、**Toru Muta**、**Aloys Nghiem**、**Max Schönfisch**、**Carlo Starace**、**Monica Troilo**、**Gianluca Tonolo**および**Anthony Vautrin**による貴重な貢献を得ることができた。

**Trevor Morgan**は編集責任者を務めた。**Erin Crum**はコピーエディターを務めた。

さらに、IEAのシニアマネジメント層や多くの同僚からも貴重なコメントやフィードバックをいただいた。特に、**Keisuke Sadamori**、**Dan Dorner**、**Tim Gould**、**Paolo Frankl**、**Timur Gül**、**Brian Motherway**、**Araceli Fernandez Pales**の諸氏である。

本レポートおよびウェブサイト資料の作成について、IEAのCommunications and Digital Office（コミュニケーションおよびデジタル局）、特に**Jad Mouawad**、**Curtis Brainard**、**Hortense de Roffignac**、**Astrid Dumond**、**Tanya Dyhin**、**Grace Gordon**、**Jethro Mullen**、**Isabelle Nonain - Semelin**、**Julie Puech**、**Robert Stone**、**Clara Vallois**、**Gregory Viscusi**、**Lucile Wall**、**Therese Walsh**および**Wonjik Yang**の助力に感謝する。IEAのOffice of the Legal Counsel（法律顧問局）、Office of Management and Administration（総務局）、Energy Data Centre（エネルギーデータセンター）より、本レポートの作成を通じて支援を受けた。

欧州復興開発銀行（**Nigel Jollands** 氏、**Greg Gebrail** 氏、**Lyza Rossi** 氏）とIEAのヒートポンプ技術協力プログラム（HPT TCP）（**Caroline Haglund Stignor** 氏、**Monica Axell** 氏、**Metkel Yebiyo** 氏、**Stephan Renz** 氏、**Morgan Willis** 氏、**Benjamin Zühlsdorf** 氏、**Christoph Reichl** 氏）と独立コンサルタント（**David Wilkinson**）ら、外部機関のご協力にも謝意を表す。

欧州復興開発銀行、欧州ヒートポンプ協会、シーメンス・エナジー、フィースマンおよびIEAク

リーンエネルギー移行プログラム（IEA Clean Energy Transition Programme）による支援と情報提供がなければ、本プロジェクトは実現し得なかった。

2022年10月初旬、パリのIEA本部で政府、主要メーカーおよび学界のハイレベルな代表者120名が参加してコンサルテーションワークショップが開催され、参加者から今回の分析に対する貴重な見識、フィードバックおよびデータをご提供いただいた。それらの情報提供に感謝する。

多くの政府高官や国際的な専門家が情報を提供し、本レポートの素案を精査した。その際のコメントおよび提案は、非常に価値のあるものであった。参加者は以下の通りである。

Dries Acke 氏	SolarPower Europe
Daniele Maria Agostini 氏	エネル
Monica Axell 氏	スウェーデン国立研究所、ヒートポンプセンター
Marion Bakker 氏	オランダ企業庁
Marco Baresi 氏	ターボデン
Pascal Barthe 氏	エネルギー転換省（フランス）
Aurélie Beauvais 氏	Euroheat & Power
Veerle Beelaerts 氏	European Heating Industry (EHI)
Stefano Bellò 氏	Assoclisma
Antonio Bouza 氏	米国エネルギー省
Susanne Buscher 氏	連邦経済・気候保護省（ドイツ）
Tomas Caha 氏	Sako CZ
Emmanuel Chabut 氏	EDF
Alberto Coronas 氏	ロビラ・イ・ビルジリ大学（スペイン）
Marco Dall'Ombra 氏	Assoclisma
Bianca De Farias Letti 氏	気候変動委員会（英国）
Raymond Decorvet 氏	MAN エナジー・ソリューションズ
Stefano Demattè 氏	アリストン
Naoko Doi 氏	日本エネルギー経済研究所
John Dulac 氏	サンゴバン
Thomas Fleckl 氏	オーストリア工科大学
Duncan Gibb 氏	Regulatory Assistance Project
Monique Goyens 氏	欧州消費者機構
Joan Groizard 氏	エネルギー多様化・省エネルギー研究所（スペイン）
Benjamin Haas 氏	エンジー
Caroline Hagelund Stignor 氏	スウェーデン国立研究所、ヒートポンプセンター
Christian Hüttl 氏	シーメンス・エナジー
Taku Inamura 氏	経済産業省（日本）
Nicolas Jensen 氏	ボッシュ
Andrej Jentsch 氏	地域暖房・冷房に関する IEA 技術協力プログラム
Nigel Jollands 氏	欧州復興開発銀行
Arno Kaschl 氏	欧州委員会（気候行動総局）
Paul Kenny 氏	通信・気候変動・環境省（アイルランド）

Stephan Kolb 氏	フィースマン
Sanjeev Kumar 氏	欧州地熱エネルギー協議会
Pawel Lachman 氏	Port PC
Rebecca Lamas 氏	欧州大学院
Francisco Laverón Simavilla 氏	イベルドローラ
Christian Maaß 氏	連邦経済・気候保護省（ドイツ）
Silvia Madeddu 氏	シュナイダーエレクトリック
Josephine Maguire 氏	アイルランド持続可能エネルギー庁
Tom Marsik 氏	国立再生可能エネルギー研究所
Nick Meeten 氏	Applied Energy
Vincent Minier 氏	シュナイダーエレクトリック
Masashige Morishita 氏	経済産業省（日本）
Thomas Nowak 氏	欧州ヒートポンプ協会
Karl Ochsner sen.氏	Ochsner Heat Pumps
Alan Pears 氏	RMIT 大学（オーストラリア）
Eloi Piel 氏	Euroheat & Power
Maurizio Pieve 氏	イタリア新技術・エネルギー・持続可能経済開発局
Reinhard Radermacher 氏	メリーランド大学（米国）
Stephan Renz 氏	ヒートポンプ技術に関する IEA 技術協力プログラム
Rowena Rodrigues 氏	グレン・ディンプレックス
Hugo Sancho 氏	エネルギー転換省（フランス）
Bans Sanli 氏	OECD トルコ共和国代表部
Wolf-Peter Schill 氏	ドイツ経済研究所
Andreas Scholz 氏	Data Ahead
Peter Schossig 氏	フラウンホーファー研究機構太陽エネルギーシステム 研究所
Jas Singh 氏	世界銀行グループ
Shintaro Tabuchi 氏	資源エネルギー庁（日本）
Tom van Ierland 氏	欧州委員会（気候変動総局）
Jozefien Vanbecelaere 氏	欧州ヒートポンプ協会
Uta Weiß 氏	アゴラ・エネルギーヴェンデ
Mark Winkler 氏	エディンバラ大学、英国エネルギー研究センター
Miki Yamanaka 氏	ダイキン
Kristian Yde Agerbo 氏	Lun
Benjamin Zühlsdorf 氏	デンマーク技術研究所、エネルギー・気候部門

本著作物は、IEA事務局の見解を反映したものであるが、必ずしも個々のIEA加盟国や特定の資金提供者、支援者または協力者の見解を反映したものではない。IEA、本著作物に貢献した資金提供者、支援者または協力者のいずれも、本レポートの内容（本レポートの完全性または正確性を含む）に関して、明示または黙示を問わず、いかなる表明または保証を行うものではなく、本著作物のいかなる使用または依拠に対しても責任を負わないものとする。

本文書および本文書に含まれる地図は、いかなる地域の地位または主権、国際的な国境および境界の画定、ならびにいかなる領土、都市または地域の名称にも影響を与えるものではない。

ご意見・ご質問は下記までお願いします。

Laura Cozzi

Directorate of Sustainability, Technology and Outlooks

International Energy Agency

9, rue de la Fédération

75739 Paris Cedex 15

France

電子メール: [weo@iea.org](mailto:weo@iea.org)

*World Energy Outlook* の詳細については、[www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo) をご参照ください。

序文 .....	3
謝辞 .....	5
エグゼクティブサマリー .....	11
はじめに.....	15
<b>1 ヒートポンプ導入の見通し</b> .....	<b>17</b>
1.1 はじめに.....	18
1.2 温熱需要.....	21
1.3 建物用ヒートポンプ .....	25
1.4 産業用ヒートポンプ .....	36
1.5 地域暖房用ヒートポンプ .....	41
<b>2 ヒートポンプ導入促進の影響</b> .....	<b>45</b>
2.1 はじめに.....	46
2.2 エネルギー安全保障.....	46
2.3 電力系統とデマンドフレキシビリティ .....	48
2.4 エネルギーの手頃な価格 .....	52
2.5 公衆衛生と環境.....	54
2.6 雇用創出.....	59
<b>3 障壁と解決策</b> .....	<b>63</b>
3.1 はじめに .....	64
3.2 コスト障壁.....	65
3.3 消費者採択に対するコスト以外の障壁 .....	74
3.4 製造における制約 .....	78
3.5 熟練設置業者の不足 .....	80
<b>Annexes</b>	
Annex A. 技術コストと経済的な支援制度.....	87
Annex B. 定義 .....	93
Annex C. 参考文献.....	101



## ヒートポンプは安定的で持続可能な暖房を実現する実証済みの手段

CO<sub>2</sub> 排出係数の低い電力を動力源とするヒートポンプは、安定的で持続可能な暖房への世界的な移行の中心となる技術である。現在販売されているヒートポンプは、天然ガスボイラの 3~5 倍エネルギー効率が高い。ヒートポンプは化石燃料価格の急騰にさらされている家計の負担を軽減し、その役割は現下の世界的なエネルギー危機によってますます急務となっている。世界の天然ガスの 6 分の 1 以上が建物の暖房用に用いられており、欧州連合 (EU) の場合、この値は 3 分の 1 になる。ヒートポンプの多くは冷房も供給可能であるため、2050 年に冷暖房の両方を必要とする地域に住む 26 億人が別途エアコンを設置する必要がなくなる。建物の暖房は、年間 4Gt の CO<sub>2</sub> 排出の原因になっており、これは世界全体の排出量の 10% に相当する。化石燃料を使用するボイラの代わりにヒートポンプを導入することで、現在の電源構成であっても、すべての主要な暖房市場で温室効果ガスの排出量が大幅に削減される。電力システムの脱炭素化に伴い、この効果はさらに高まるであろう。

世界全体の暖房需要における 2021 年のヒートポンプのシェアは 10% 程度であったが、導入が急速に加速している。ヒートポンプのシェアは、灯油暖房や他の電気暖房の割合と同程度であるが、暖房の 40% 以上を占めるガス暖房や、15% を占める地域熱供給に比べると低い。国によっては、ヒートポンプがすでに最大の熱源になっている。ノルウェーでは建物の 60% にヒートポンプが設置されており、スウェーデンとフィンランドでも 40% 超であり、ヒートポンプは寒冷地に不向きであるという議論を覆している。2021 年、世界全体の販売台数は 15% 増加しており、過去 10 年間の平均の 2 倍であった。EU での成長率は約 35% であり、エネルギー危機を踏まえるとさらに加速すると見込まれる。実際、ポーランド、オランダ、イタリア、オーストリアでの 2022 年上半期の販売台数は前年同期の約 2 倍であった。中国は引き続き新規販売の最大の市場であり、北米はヒートポンプを導入している住宅の数が現在のところ最多である。これらの地域は日本や韓国とともに、業界最大手メーカーが本拠地を置く重要な製造拠点でもある。

政府のエネルギー安全保障と気候変動への取り組みにより、ヒートポンプは暖房と給湯の脱炭素化の主要な手段になるだろう。本報告書では、世界各国の政府が発表したエネルギーおよび気候関連の誓約のすべてが完全かつ期限どおりに達成されるシナリオを検討している。このシナリオでは、暖房の脱炭素化に最適な実証済みの技術として、世界全体のヒートポンプ容量が 2021 年の 1,000 GW から 2030 年までに約 2,600 GW に急拡大し、建物暖房需要全体に占めるヒートポンプの割合は 10 分の 1 から約 5 分の 1 にまで急増する。その結果、天然ガスの需要は 800 億立方メートル (80 bcm)、暖房用灯油が日量 100 万バレル、石炭が石炭当量 5,500 万トン減少する。全体として、ヒートポンプが 2030 年までの世界全体の建物暖房用化石燃料の削減量のほぼ半分を占め、残りが他の省エネ対策によるものとなる。1.5°C という世界的な気候目標に合致するシナリオでは、ヒートポンプの普及が加速し、2030 年までに容量が約 3 倍となり、暖房におけるシェアは 4 分の 1 に達する。

ヒートポンプは、産業部門の加熱需要および地域熱供給にも対応可能である。現在、大型のヒートポンプは最高 140~160°C の熱を供給できるが、技術革新と設計改善により、さらなる高温

供給も可能となる。現在、最も一般的な産業用ヒートポンプは 140～160℃よりも低温の熱を供給するものである。製紙、食品、化学の各業界は、短期的に最大の機会を有しており、これらの産業を合わせた加熱需要の約 30%がヒートポンプで対応できる。ヨーロッパだけでも、昨今の天然ガス価格高騰によって大きな打撃を受けているこれら 3 業界の 3,000 施設に 15GW のヒートポンプを設置可能である。

### ヒートポンプが特にヨーロッパにおいてガス輸入の早期削減に貢献する

天然ガスが暖房用燃料として最も多く使用されており、ガス価格が最も上昇している EU において、ヒートポンプによる暖房用天然ガス依存の低減ポテンシャルは特に大きい。EU の気候目標に沿ったシナリオでは、ヒートポンプの販売台数が 2021 年の 200 万台から 2030 年には 700 万台まで増加し、遅くとも 2030 年より早期にロシアのガス輸入を終了するという REPowerEU の目標達成に貢献する。この展開により、天然ガスの消費量は 2025 年に約 7 bcm、2030 年までに約 21 bcm 削減される。これは、2021 年のロシアからの EU へのパイプラインによる輸入量の約 15%に相当する。

### 建物の改修を並行して行うことで電力負担を軽減する

ヒートポンプの導入加速による世界の電力需要の増加は不可避であるが、省エネルギーとデマンドレスポンス対策によって電力システムへの影響を大幅に減らすことができる。気候に関する政府公約が達成された場合、建物分野の暖房や産業分野の加熱に占める電力の割合は、2021 年から 2030 年の間に倍増し、16%になる。同時に、世界の電力需要は 4 分の 1 増加するが、このうちヒートポンプによるものは 10 分の 1 未満である。住宅のエネルギー効率の改善を行わずにヒートポンプを設置した世帯の場合、冬場の電力デマンドが約 3 倍になるおそれがある。住宅の省エネ性能を 2 段階（たとえば、ヨーロッパ諸国では D から B に）上げることで、暖房エネルギー需要を半分にし、必要となるヒートポンプのサイズを抑え、消費者の出費を抑え、電力デマンドの増加を 3 分の 1 減らすことができる。さらに、慎重な系統計画とデマンドサイドマネジメントを施すことにより、暖房の電化に伴い必要となる配電網増強を緩和し、2030 年までに増強すべき調整可能な発電容量を最小限に抑えることができる。

### ヒートポンプの導入加速はさまざまな恩恵をもたらす

ヒートポンプは、ライフサイクルコストの観点で消費者の出費を抑え、燃料価格の影響を避ける。ヒートポンプを使用している家庭や企業は平均的に、ガスボイラを使用している家庭や企業よりも光熱費が少ない。光熱費の節約により、今日の多くの市場において高額なヒートポンプの初期費用は（市場によっては補助金が無くても）相殺される。ヒートポンプの経済性は今日のエネルギー価格高騰の中で改善されており、家計負担の減少額は米国での年間 300 米ドルからヨーロッパでの 900 米ドルにおよぶ。低所得世帯の初期費用を適切に支援することで、ヒートポンプはエネルギー貧困に対処し、天然ガスボイラからの移行によって低所得世帯の収入の 2～6%に相当する光熱費を節約することができる。

ヒートポンプへの切り替えは、温室効果ガス排出の削減と大気汚染改善にも貢献する。各国の気候目標に沿ったヒートポンプの導入加速により、2030年までに世界のCO<sub>2</sub>排出量を0.5 Gt削減できる。しかし、フロン系冷媒（強力な温室効果ガス）の不用意な漏洩があると、気候に対するヒートポンプの好影響が減少するおそれがある。それでも、今日の冷媒を想定すると、ヒートポンプはCO<sub>2</sub>排出係数の高い電力で運転する場合でも、ガスボイラと比較して温室効果ガスの排出量を20%以上削減可能である。この削減量は、電力がよりクリーンな国では80%にもなる可能性がある。特に中国の石炭など、世界中の建物の燃焼暖房によって引き起こされる大部分の大気汚染物質や、関連したその他の有害物質も減少する。

需要増によるヒートポンプの増産と設置工事の拡大により、雇用が創出される。我々のシナリオでは、ヒートポンプの供給における雇用は、世界全体で2030年までに約3倍の約130万人になる。設置に関わる雇用が最も拡大し、メンテナンスおよび製造関連の仕事も増加する。その結果、特に中程度の技能を有する職人に多くの雇用機会が与えられることとなる。

### 早期導入に向けた障壁の克服には協調的なアクションが必要

ヒートポンプの普及を加速させるためには、さまざまな障壁を克服する必要がある。主な障壁としては、ヒートポンプの購入と設置にかかる初期費用が他の暖房設備に比べて高いこと、消費者の採択を妨げるコスト以外の要因、製造上の制約、有資格の設置業者の潜在的な不足などが挙げられる。これらの障壁に対処し、より高い導入率を達成するには、各国政府とヒートポンプ産業が協調した取り組みが必要である。

長期的に見れば省コストであっても、高額な初期費用により消費者が躊躇するおそれがある。Air-to-Air ヒートポンプの購入・設置費用は通常3,000~6,000米ドルである。一方、Air-to-Water ヒートポンプは、最も安価なモデルでも、既存のラジエーターシステムの変更を含めるとほとんどの主要暖房市場で天然ガスボイラと比較して2~4倍高価である。現在、世界30か国以上で経済的インセンティブが利用可能であり、これは現在の暖房需要の70%以上をカバーしている。各国の補助金により、最も安価なヒートポンプが消費者にとってガスボイラ新設と同等のコストとなる。追加のインセンティブとしては、低所得世帯（ポーランドのような）や高効率モデル（カナダのような）を対象にしたものが考えられる。一部の国では、電気料金とエネルギー税の仕組みによってヒートポンプが化石燃料ボイラに比べて不利な立場に置かれているが、料金と税は、消費者がよりクリーンで高効率な選択ができるような形とするべきである。

現在、コスト以外のさまざまな障壁により、消費者がヒートポンプの採用を躊躇している。これらには、情報の不足、建物所有者とテナントとで投資者と受益者が分かれてしまうこと（スプリット・インセンティブ）、建築規制などがある。いくつかの国では、建築基準法の調整（チェコなど）、消費者のための「ワンストップショップ」の設置（アイルランドなど）、スプリット・インセンティブに対処するための新たなビジネスモデルの奨励といった措置（特に、北米、英国、ドイツ）が講じられているが、一層強力な取り組みが必要である。ヒートポンプ採用率の低い集合住宅や業務用建築物にヒートポンプを導入する際の障壁への対処に、特に配慮が必要である。

有資格設置業者の不足が多く、主要暖房市場ですでにボトルネックとなっており、職人の大規模な再教育が必要となっている。我々のシナリオでは、世界全体に必要な専任の設置業者は2030年までに4倍になる。同様の技術を持つ暖房技術者、配管工、電気技師の既存の認定資格にヒートポンプを組み込むことで、訓練の要求事項を減らすことができるだろう。ヨーロッパ全体で採用されているような経済的インセンティブも利用して新たな職人を専門的な訓練プログラムに引き付けることも考えられる。

### 政府機関は産業界と協力してサプライ側のハードルを下げる必要がある

大手メーカー各社は最近、主にヨーロッパにおいて、ヒートポンプの生産能力や関連事業の拡大に40億米ドル以上を投資する計画を発表した。今後4年間のヒートポンプ設置台数は、過去10年間に設置された台数とほぼ同じになるであろう。米国をはじめいくつかの国では、サプライチェーンの脆弱性に対応して、国内の製造能力増強にインセンティブを提供している。サプライチェーンを強化するための的を絞った措置とともに、長期的な政策の一貫性と規制の確実性は、メーカーが事業拡大を検討する際に依然として重要である。特にフロン系冷媒の規制は、冷媒の排出抑制の必要性とコスト、安全性、省エネ性、およびサプライチェーンに関して考慮すべき事項とのバランスを取る必要がある。

各国の気候目標に沿ったヒートポンプの導入加速は十分に実現可能であるが、政策立案者と産業界による一層の取り組みが必要である。各国の気候目標を達成するためにこの10年間で必要となるヒートポンプの市場拡大は、これまでに太陽光発電や電気自動車で見られたほど急激なものではないが、IEAの2050年ネットゼロ達成シナリオの軌道に乗せるには、さらなる加速が必要であろう。追加で必要となる先行投資は相当なものであり、2030年までに年間1,600億米ドルに達するが、経済全体の燃料消費の削減はこうしたコスト増を上回る。現在の高値が継続すればなおさらである。政府機関と産業界は、根強い市場の障壁に対処し、エネルギー安全保障、手頃なエネルギー価格、排出量の早急な削減など今日の最も差し迫った問題解決にヒートポンプを十分に役立てる上で重要な役割を担っている。

ロシア連邦のウクライナ侵攻とそれに続く欧州への天然ガス供給削減の決定により、世界は1970年代以降で最大のエネルギー危機に陥っている。欧州が震源地であるものの、エネルギー価格の高騰は世界中の家庭や企業を直撃しており、世界的な気候危機の影響がますます明らかになる中、各国政府が化石燃料への依存を減らすための緊急の取り組みを強化するさらなる要因になっている。

本報告書では、エネルギー安全保障と気候変動対策の両方に対処するためにヒートポンプが果たしうる役割を評価し、2030年までにヒートポンプの導入を促進するために必要な具体的措置に焦点を当てる。ヒートポンプは、ガスおよび石油燃焼ボイラを代替することで、EUのロシア産化石燃料への依存度を下げることができる。<sup>1</sup>長期的には、2050年までに二酸化炭素のネットゼロエミッションを達成する取り組みの一環として、熱供給の脱炭素化において主要な役割を果たすと見込まれている。ヒートポンプは、建物や地域暖房ネットワークに設置することで暖房と冷房の両方を提供でき、産業部門では低温および中温の熱を供給することができる。ヒートポンプはエネルギー効率が非常に高いため、家庭と企業の両方の光熱費を削減することが可能である。CO<sub>2</sub>排出係数の小さい電力を使用している限り、ヒートポンプによる温室効果ガスの排出量は今日の標準的な暖房機器に比べてはるかに少なくなる。

ヒートポンプは冷暖房用として設計することができるが（リバーシブルヒートポンプ）、本報告書では暖房に焦点を当てている。2022年3月に採択された、2030年より早期に天然ガスのロシアからの輸入をゼロにするというEUの政策目標を踏まえて、欧州におけるヒートポンプの導入が同地域のガス需要に与える影響に特に焦点が当てられている。

本報告書の構成は以下の通りである：

- 第1章では、まずヒートポンプとは何かやその仕組みについて説明し、次に2050年までの暖房需要の見通しについて述べ、現在と将来のエネルギーミックスの違いと地域毎の建築物ストックの変遷を明らかにする。さらに、2030年までの期間に焦点を当てて、建物分野、産業分野および地域暖房におけるヒートポンプの導入に関する世界全体と各地域の詳細な予測と、エネルギー需要、排出量、投資ニーズへの影響について説明する。
- 第2章では、ヒートポンプの導入の加速がエネルギー安全保障、電力システムと需要のレジリエンス、エネルギーの手頃な価格、公衆衛生、環境および雇用創出に与える影響についてより詳細に説明する。
- 第3章では、ヒートポンプ設置の初期費用、その他の市場障壁、製造などのサプライチェーンの制約、熟練職人の不足など、ヒートポンプの導入を阻む主な潜在的障壁と、それらに対処するための主な政策オプションについて評価する。

<sup>1</sup>ロシアからのガス輸入への依存を減らすためのIEAの10項目計画（[iea.li/gas-reliance](https://www.iea.org/gas-reliance)）を参照



## ヒートポンプ導入の見通し

機運は高まっているか？

## 要約

- 暖房における化石燃料使用量の削減は、差し迫ったエネルギー安全保障のリスクに対処し、不安定なエネルギー価格から家庭や企業を守り、気候目標を達成することを同時に行うために不可欠である。世界の建物関連のエネルギー使用量の約半分は暖房に使われ、今日では天然ガスが主要源であり、年間**760 bcm**が消費されている。その割合はEUで高く、建物分野の暖房によるガス消費量は電力部門よりも多い。その他の化石燃料と合わせて、**2021**年には暖房で直接および間接的に**4 Gt**を超えるCO<sub>2</sub>が排出された。これは世界のエネルギー関連のCO<sub>2</sub>排出量の**10%**にあたる。
- ヒートポンプは建物の暖房と給湯を脱炭素化するための主要な手段である。現在、建物に設置されているヒートポンプの容量は計**1,000 GW**超である。気候とエネルギー安全保障に関する各国の目標が達成されると想定する発表誓約シナリオ（以下、**APS**シナリオ）では、**2030**年までに容量が**2,600 GW**まで増加すると見込まれている。これにより、建物の暖房需要全体に占めるヒートポンプの割合は、**2021**年の約**10%**から**20%**に押し上げられるであろう。これらのヒートポンプの多くはリバーシブルであり、冷房も提供できる。**2050**年までに、**26**億人がかなり冷暖房需要のある地域に住むことになる。
- ヒートポンプは、**APS**シナリオでの**2030**年における建物暖房用化石燃料使用量の世界全体における削減量のほぼ半分に貢献する。ヒートポンプは、天然ガス需要を**80 bcm**以上減少させ、灯油需要を**1 mb/d**（**100**万バレル/日）減少させるのに役立つ。さらに、石炭使用量は無視できるレベルまで減少する。ヒートポンプは、**2030**年までの電力需要を約**9%**増加させるが、冬季のシステム全体のピーク負荷をわずかに増加させるだけである。これは、ほとんどの地域で新たに発電容量を設けることなく吸収できるが、特に配電網においては、ネットワークの安定性を確保するために慎重な系統計画が必要となる。
- EUは、**REPowerEU**での目標を達成するため、**APS**シナリオでヒートポンプによる天然ガスの急激な減少を見込んでいる。EU全体でのヒートポンプの年間設置台数は、**2021**年のわずか**200**万台から**2030**年には約**700**万台に到達する。この急激な増加によってガス消費量は**2025**年には約**7 bcm**減少し、**2030**年には**21 bcm**減少する。これは、**2021**年にEUがロシアから輸入する量の約**15%**に相当する。
- ヒートポンプによって、今日の天然ガス消費量の約**5分の1**を占める産業部門の化石燃料需要も削減される。現在、さまざまなセクターにおける**100°C**未満の低温プロセスの熱に使用ができるが、**150°C**までのプロセスに利用可能な技術が商業化されており、さらなる高温も技術的に可能である。**2030**年の産業用熱需要の約**40%**はヒートポンプに適した温度である。また、地域暖房ネットワークを別の目的のために再利用して、大規模なヒートポンプを使用することも可能である。欧州のいくつかの国では、**2040**年までに暖房ネットワークを脱炭素化することを目標としている。

## 1.1 はじめに

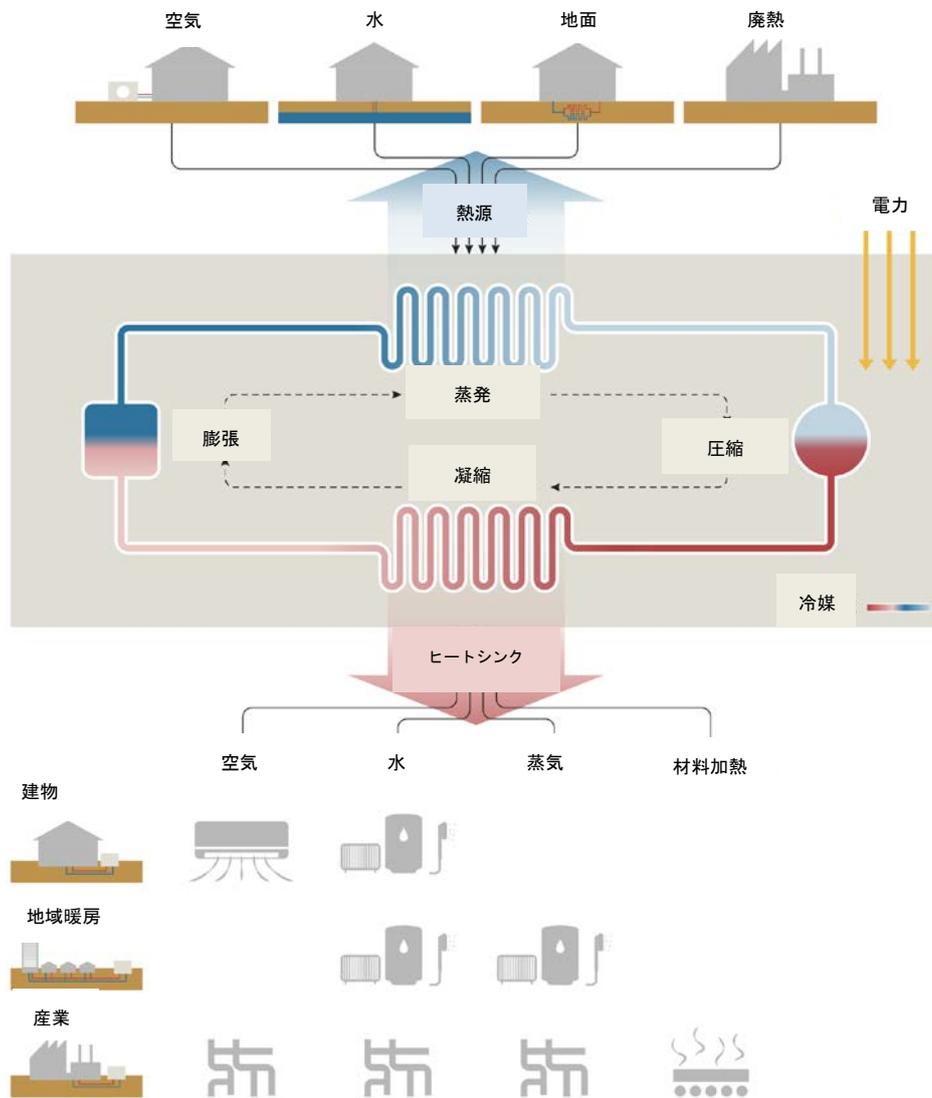
本章では、2022年10月に発表されたWorld Energy Outlook (WEO) の最新版 (IEA, 2022a) で描かれたシステム全体のエネルギーシナリオの予測に基づいて、ヒートポンプ設置の見通しと建物や産業部門での暖房/加熱によるエネルギーミックスへの影響を評価する。ここでは、世界各国政府がエネルギー関連と気候関連の公約を全て予定通りに達成すると想定した**発表誓約シナリオ (APS)** に重点が置かれている。これは、本レポート全体を通して、具体的な実施計画に裏打ちされているという条件で、今日既に実施されている政策の下で世界のエネルギーシステムがどのように発展するかを説明している**公表政策シナリオ (STEPS)** と対比されている。これらの比較は、ヒートポンプ導入を加速させるためにさらなる取り組みが必要なところを明らかにすることを目的としている。場合によっては、APSシナリオの予測は、**2050年ネット・ゼロ・エミッション (NZE) シナリオ**とも比較される。NZEシナリオは、世界平均気温を産業革命前の水準から+1.5°Cで安定させるために、2050年までにエネルギー排出量をネットベースでゼロに削減する道筋を示すものである。シナリオと予測の詳細は、WEO 2022に記載の通りである。

ヒートポンプでは、冷蔵庫やエアコンで見られるものと同じような技術が使用されている。ヒートポンプは、周囲の空気、地中に蓄えられた地熱エネルギー、近隣の水源、工場からの廃熱などの熱源から熱<sup>1</sup>を取り出す。そして、その熱を増幅して必要な場所に移動させる (図1.1)。ほとんどの熱が生成されるのではなく移動されるため、ヒートポンプはボイラや電気ヒーターなどの従来の加熱技術よりもはるかに高効率で、ランニングコストを抑えることができる。熱の形で出力されるエネルギーは、電気の形でヒートポンプに電力を供給するのに必要なエネルギーの、通常、数倍である。たとえば、一般的な家庭用ヒートポンプの成績係数 (COP) は約4である。すなわち、エネルギー出力は運転に使用する電気エネルギーの4倍である。これにより、現在のモデルはガスボイラよりも3~5倍エネルギー効率が高い。ヒートポンプは、ハイブリッド構成で他の暖房設備 (一般にガス) と組み合わせることが可能である。

ヒートポンプ自体は、冷凍サイクルによって冷媒を移動させる圧縮機と熱源から熱を取り出す熱交換器で構成されている。次に、熱は別の熱交換器を介してヒートシンクに渡される。建物内では、熱はラジエーターや床下暖房などへ空気または温水システムにより供給される。ヒートポンプは、タンクに接続してサンタリー用の温水を生成したり、温水システムにフレキシビリティを持たせたりすることができる。また、ヒートポンプの多くは、冬季の暖房需要に加えて、夏季に冷房を提供することも可能である。産業部門では、温風や温水、蒸気を供給したり、材料を直接加熱したりするためにヒートポンプが使用されている。商業または産業用途や地域暖房ネットワークにおける大型ヒートポンプは、住宅用途よりも高い入力温度を必要とすることから、産業プロセス、データセンター、廃水の廃熱が利用されている。

<sup>1</sup>物理的には、温度が絶対零度 (0ケルビンまたは-273°C) より高いときには常に熱エネルギーが存在している。

図 1.1 ▶ ヒートポンプの仕組み



IEA. CC BY 4.0.

一般的な住宅用ヒートポンプは、4 単位の熱出力を供給するために 1 単位の電力入力しか必要とせず、このサイクルを逆にして冷房を提供することが可能である。

注:補助エネルギー源を天然ガスなどの他の燃料とすることも可能であるが、今日のヒートポンプのほとんどは電気を動力源としている。

ヒートポンプの効率は、熱源によって大いに左右される。冬期は、地面や外部水の熱源が外気よりも暖くなるため、地中熱ヒートポンプや水熱源ヒートポンプは空気熱源ヒートポンプよりも消費電力が少なく、COPが大きくなる。これは特に、空気熱源ヒートポンプのデフロストによって余分なエネルギーが消費される可能性がある寒冷気候の場合に当てはまる。しかし、地中熱ヒートポンプは、地下熱交換器、すなわち深い垂直ボアホールまたは地表から1m以上の深さに埋設した大規模な配管網を必要とするため、設置費用が高くなる。また、水熱源ヒートポンプを近くの河川や地下水、廃水に接続することもコストがかかる可能性がある。

これらの理由から、地中熱ヒートポンプや水熱源ヒートポンプは一般に空気熱源ヒートポンプほど普及していない。全世界で販売されている建物用ヒートポンプのほぼ85%は空気熱源ヒートポンプである。これは、設置に最も手間がかからないためである。それらの多くはエア・トゥー・エアユニットであるが、加熱が中心の地域ではエア・トゥー・ウォーター（または温水）ユニットの普及が進んでいる。欧州では、他の地域よりも空気熱源温水システムが一般的であり、全販売台数の約半分を占めている。地中熱ヒートポンプやヒートポンプをガスボイラなどの他の加熱源と組み合わせたハイブリッドヒートポンプは、今日の世界の販売台数のごく一部であるが、国によってはかなりの割合を占めている。地中熱ヒートポンプの主要市場であるスウェーデンでは、4軒に1軒の住宅にこのようなモデルが装備されている。中華人民共和国（以下、中国）においても地中熱ヒートポンプの市場は順調に成長しており、石炭ベースの加熱に取って代わることが多く、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量削減と大気汚染改善に役立っている。

戸建てやアパートでは、1台または複数台の小型ユニットの使用、集合住宅や業務用建築物では、複数のユニットに冷暖房を提供する集中型ユニットの使用が可能である。アジアでは、個別設置のエア・トゥー・エアユニットが集合住宅で一般的である。しかし、特に欧州では、集合住宅における制限により、戸建て住宅以外ではヒートポンプが一般的ではない。集中型ヒートポンプは、集合住宅や業務用建築物全体に熱を供給できるが、今日設置されているヒートポンプの総容量に占める割合は小さい。たとえば欧州では、2021年に販売されたユニットのうち、集合住宅向けの大型集中型ユニットはわずか10%であった（EHPA、2022）。業務用建築物は、暖房需要に加えて、病院、スーパーマーケットでの食品冷凍、オフィスでの大型サーバールームなど、年間を通じた相当の冷熱需要があるため、集中型ヒートポンプに特に適している。商業システムでは、熱需要を満たすために冷却の排熱を利用することで、高効率を達成し、電力消費を最小限に抑えることができる。

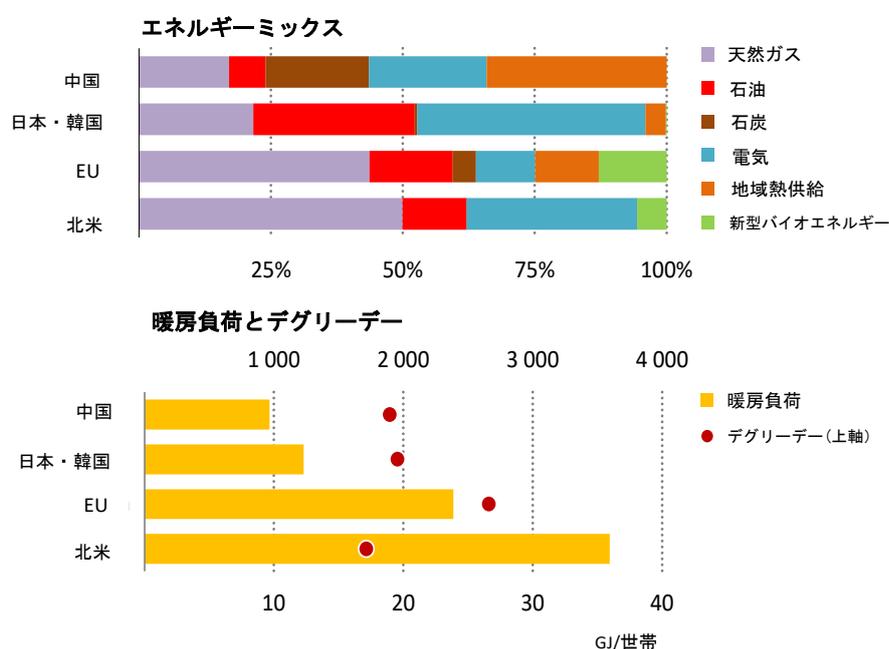
ヒートポンプ技術は成熟しているため、原理上は生産と設置を迅速に拡大することが可能である。しかし、設置費用が割高であることや、熟練職人の不足などサプライチェーン上のさまざまな制約など、導入の拡大には多くの障壁がある。市場や規制の障壁を減らしてサプライチェーンを強化するための協調的な取り組みが必要であり、昨今増加している、ヒートポンプの普及を促進するための政府の新しい政策やロードマップに反映されている。とりわけ、欧州連合（EU）のREPowerEU計画と米国（US）のインフレ抑制法があり、どちらも2022年に採択されたものである。

## 1.2 温熱需要

現在、温熱は世界のエネルギー消費量のかなりの割合を占めており、CO2排出の主要な発生源となっている。2021年の暖房・給湯用の世界のエネルギー需要は62エクサジュール（EJ）に達し、建物のエネルギー消費の約半分を占め、建物から直接排出されるCO2は2.5ギガトン（Gt）に及び、これは、建物から直接排出される量の約80%である。電力と地域暖房からの間接的な排出を考慮すると、CO2の値は4 Gtのまで上昇する。

1

図 1.2 ▶ 主要国・地域の家庭用暖房、2021年



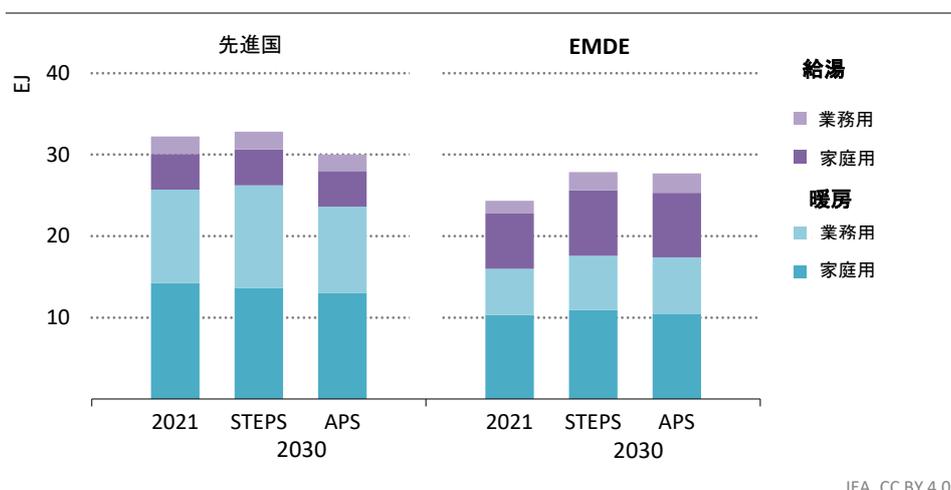
IEA. CC BY 4.0.

天然ガスは建物の暖房用エネルギーの主要な形態であり、世界の暖房用エネルギー需要の約45%を占めている

注:GJ=ギガジュール、HDD=暖房デGREEデー。HDD は地域間の比較を可能にする標準化された加熱需要の指標である。実際の温度と標準的な基準温度を比較することによって、特定の場所の寒さを測定する。この分析では、基準温度18℃が想定され、湿度の影響も考慮されている。

エネルギー需要のレベルは、主に気候、世帯規模、居住空間、建物の断熱性、暖房機器の種類と品質によって、国や地域間で家庭によって大きく異なる(図 1.2)。温熱需要全体の約70%は暖房用であり、残りは温水用である。また、温熱用のエネルギーミックスも異なる。天然ガスは建物の温熱用エネルギーの主要な形態であり、世界の温熱エネルギー需要の42%を占めている。世界の天然ガス需要の6分の1は建物の温熱用であり、EUではこの数字が3分の1まで上昇する。次いで石油が15%、電気が15%、地域暖房（特に、中国、北欧と東欧、中央アジア）が11%となっている。バイオマスと石炭の直接利用がその差を埋めている。温熱用の燃料構成は、主要な温熱需要の地域間で大きく異なるが、東アジアを除くと、いずれの地域でもガスが優勢である。

図 1.3 ▶ STEPS および APS シナリオにおける地域・部門別の建物の暖房・給湯サービス需要、2021年と2030年



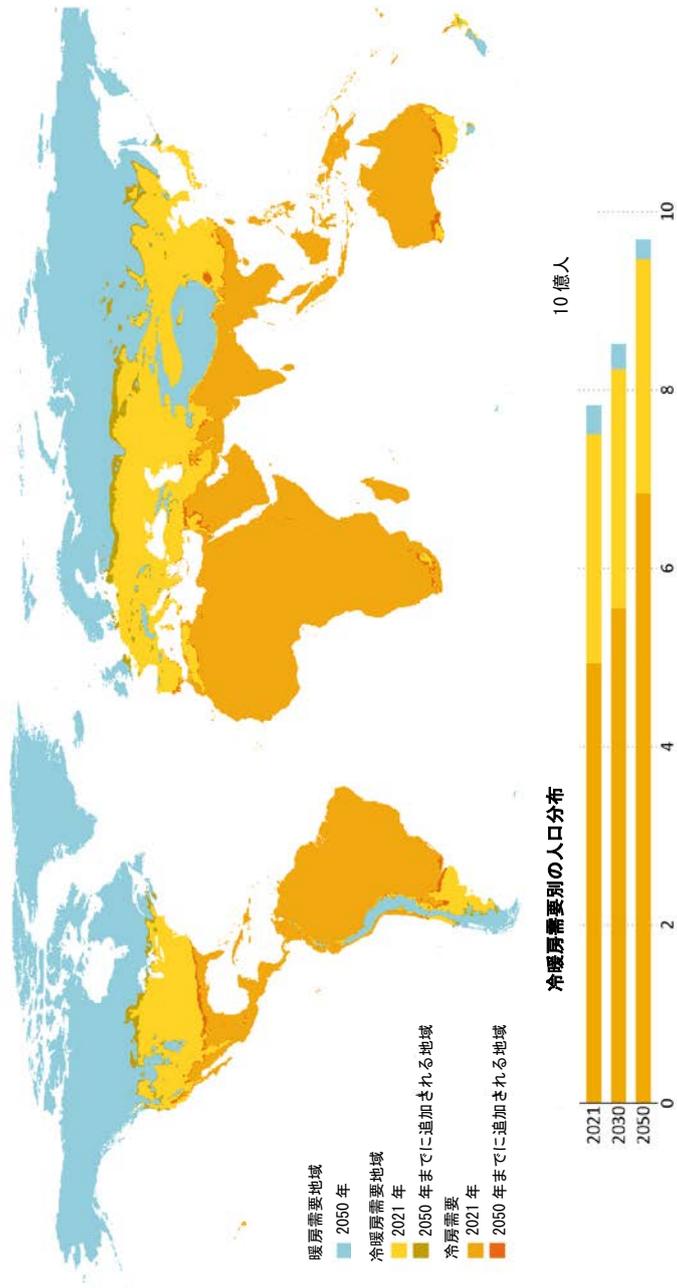
IEA. CC BY 4.0.

先進国では建物外壁の改善により温熱需要が抑制される一方、新興国では建築物ストックの拡大により需要が押し上げられている

注: EMDE=新興国・発展途上国

暖房を必要とする世界の人口の大半は既に利用しているため、温熱需要の見通しは比較的予測しやすくなっている。現在、世界人口の約40%は、少なくとも1年のある時期に暖房が必要になる気温を経験する地域に住んでいる。北半球を中心とするこれらの地域の人口は、今後数十年間、概して安定した状態が保たれると予想される。しかし、繁栄の高まりは、特に新興国・発展途上国において、温熱需要全体を押し上げる可能性がある。これは、人々が新しく大きな住宅に転居し、温熱サービス、特に温水の使用を増やすためである。ただし、効率の向上がこの増加の一部を相殺する可能性はある。また、経済活動の増大は、商業ビルの温熱需要も押し上げることになる。STEPSおよびAPSシナリオともに、新興国における建物の温熱需要全体は2021年から2030年の間に大幅に増加し、主に温水によって牽引されるとみられる(図1.3)。対照的に、先進国の温熱需要は、STEPSシナリオでは効率向上が単身世帯の増加を相殺するため概して安定する一方、APSシナリオでは特に建物外壁の改善によって建物の効率を高める一層の取り組みにより、暖房需要がやや減少する。

図 1.4 ▷ STEPS シナリオでの地域別の冷暖房需要、2021 年および 2050 年



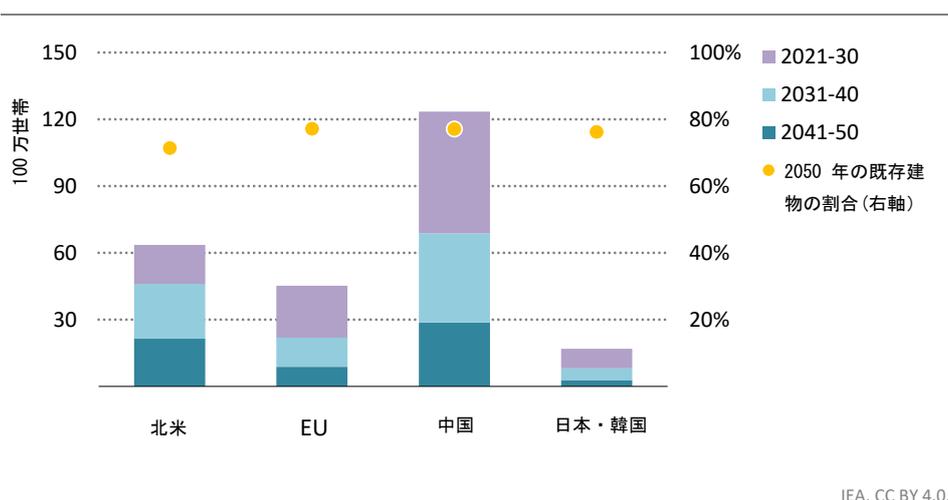
IEA, CC BY 4.0.

暖房を必要とする地域では2050年まで人口がほとんど増加しないのに対して、冷房需要がある地域では25%増加する

注:暖房と冷房は、基準温度 18°C で計算した暖房デGREE (HDD) の HDD (18°C) が 1,000 (°C日) 以上と基準温度 10°C で計算した冷房デGREE (CDD) の CDD (10°C) が 1,000 (°C日) 以上の地域を意味する。指標の詳細については IEA (2020a) を参照し、HDD と CDD の詳細については IEA (2022b) を参照のこと。

長期的には、暖房需要が大きい地域での温熱用エネルギー使用量全体は、気候変動のために減少すると予想される（ただし、これらの地域や他の地域での冷房需要の増加によってある程度は相殺される）。逆に、2050年までに世界のほぼすべての人が公衆衛生上のリスクをもたらす熱波に直面し、ほとんどの地域で空調の使用の増加が促進される（WEO 2022の冷房に関するセクション5.7も参照）。ヒートポンプは冷暖房を提供できるため、1年の異なる時期に冷暖房を必要とする地域の新築建物や熱源改修に適した選択肢になる可能性がある。暖房需要と冷房需要の両方を必要とする地域に住む人の数は、STEPSシナリオでは2050年までに約3%増加して26億人になる見込みである（図 1.4）。暖房を必要とするほとんどの地域では、今日建設されている建物の大部分が2050年にも使用されていると考えられる（図 1.5）。これは、暖房での化石燃料の使用量を減らすには、効率の向上と低炭素暖房技術への転換が必要になることを意味している。また、暖房の脱炭素化のためには、新築の建物がゼロカーボン対応であることを保証する強力な建築基準法も必要とされる。

図 1.5 ▶ 主要国・地域の10年ごとの世帯増加、2021-2050年



IEA. CC BY 4.0.

2050年の建築物ストックの4分の3は、北米とEUで今日既に建っており、それらを合わせると現在の世界の温熱需要の40%以上を占めている

注: 中国の予測解体率は、現在の解体率よりも低く想定されている。

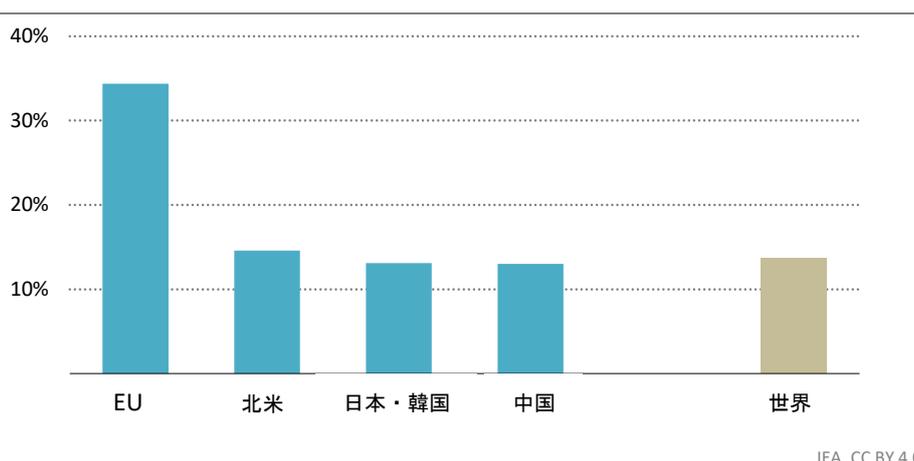
## 1.3 建物用ヒートポンプ

### 1.3.1 世界の展望

2021年の世界のヒートポンプ販売台数は2020年比で13%増加し、EUで約35%の急速な成長を示した（図 1.6）。近年の販売台数の増加にもかかわらず、ヒートポンプは2021年に世界の建物の温熱需要の約10%を満たしているに過ぎない。今日、居住用建物および非居住用建物に設置されているヒートポンプの容量は1,000ギガワット（GW）以上を占めており、<sup>2</sup>その約半分が北米に設置されている。多くのユニットは温暖な気候で使用されており、主に冷房用に使用されているが、主要な熱源を代表するものでもある（1年の数カ月間）。しかし、今日のヒートポンプの普及率は、欧州の最も寒い地域で最も高く、長年にわたる政策支援のおかげで、ノルウェーでは建物全体の温熱需要の60%を満たし、スウェーデンとフィンランドでは40%以上を満たしている（Rosenow他、2022）。

1

図 1.6 ▶ 主要地域における建物のヒートポンプの販売台数の年成長率、2021年



ヒートポンプの設置台数が多いのは北米であり、市場規模が大きいの中国であるが、今日最も急成長している市場は欧州連合（EU）である

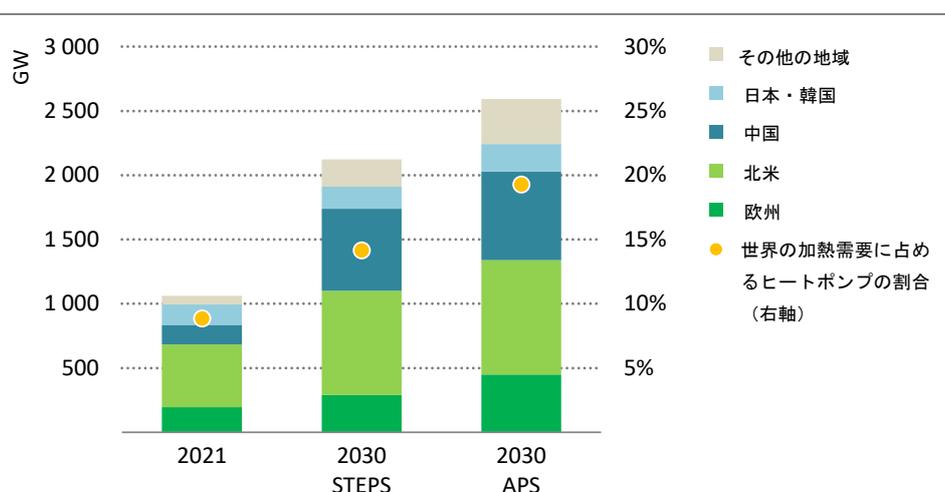
出典:AHRI（2022）、Chinabaogao（2022）、EHPA（2021）、JRAIA（2022）に基づくIEAの分析。

STEPSシナリオで示されているように、米国インフレ抑制法を筆頭として、導入を加速するためにヒートポンプ政策とインセンティブの大幅な増強が設定されている。

<sup>2</sup> 地域間の相互比較を容易にするために、ヒートポンプは出力容量のワット数で測定されている。ヒートポンプストックの平均容量は、地域間で大きく異なる。北米や欧州などの地域では平均して5 kW～10 kWの大型ヒートポンプが使用されるが、アジアでは小型ヒートポンプ（3 kW～5 kW）がよく使用されている。このことに基づくと、単一の住居や部屋のヒートポンプ容量に相当する世界平均は約5 kWと考えることができる。容量選定は建築物ストックや気候によっても左右される。集合住宅の集中型ユニットの容量は20 kWを超えており、大型商業建築の集中型ユニットは100 kWを超える可能性がある。

STEPSシナリオでは、2030年までに建物のヒートポンプの世界の容量は2,100 GW以上まで増加し、世界の建物の暖房需要の14%を占める（図 1.7）。ヒートポンプに対する政策支援は、多くの主要な暖房地域で実施されている。現在、世界の居住用建物の暖房需要の70%以上をカバーする地域で補助金を利用できる。<sup>3</sup>また、既存建物の最低エネルギー性能基準と新築建物の建物エネルギー基準がいくつかの国で導入されている。一方、化石燃料ボイラの禁止は現在、デンマーク、フランス、オランダ、ノルウェーを含むさまざまな国において国家レベルで実施され、米国とカナダなどでは地方レベルで実施されている。

図 1.7 ▶ 国・地域別シナリオ別建物のヒートポンプ容量、2021年と2030年



IEA. CC BY 4.0.

APSシナリオでは、2030年にヒートポンプによって暖房需要の約20%がまかなわれ、中国、北米および欧州も主要市場として残る

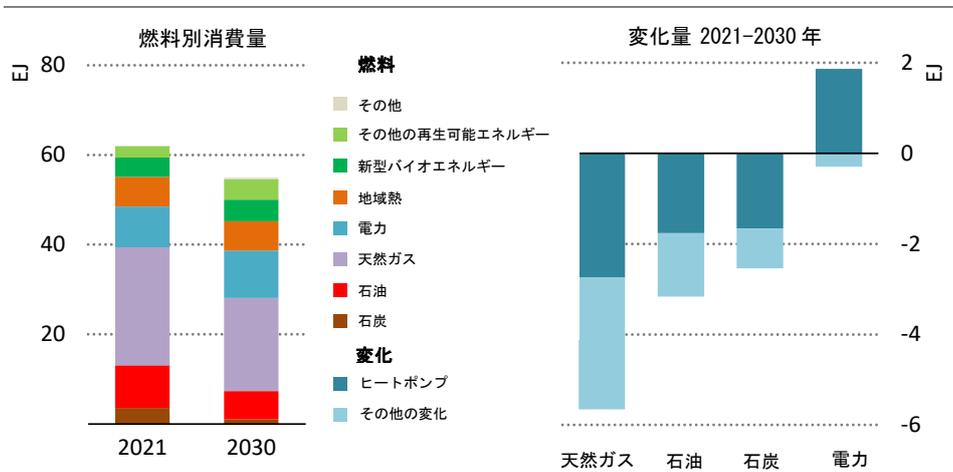
国の気候およびエネルギー安全保障の目標を達成するためには、ヒートポンプに対する政策支援を強化する必要がある。これらの目標が達成されると仮定したAPSシナリオでは、ヒートポンプの容量が2030年までに約2,600 GWまで増加し、部門の暖房需要の約20%が賄われる。たとえば、ロシア連邦（以下、ロシア）からの天然ガス輸入を2030年より早期に止めるREPowerEUの目標を達成するためには、APSシナリオではEUのヒートポンプ台数がほぼ3倍になり、約4,500万台に達することが必要である。

ヒートポンプは、APSシナリオで2030年までに建物の化石燃料使用量を削減する上で主要な役割を果たす。暖房・給湯用のヒートポンプの直接使用量は、2021年から2030年の間に世界で29%減少し（STEPSシナリオでは16%）、そのほぼ半分がヒートポンプによるものである（図 1.8）。

<sup>3</sup> これらには主に国家レベルの政策が含まれており、地方レベルの政策が国の温熱需要のかなりの割合をカバーしている日本と中国は含まない。

残りの燃料使用量の削減は、建物のエネルギー効率の向上、特に建物外皮の改善によるものであり、自動ホームコントロールや非住宅建築物のビル管理システムの採用が含まれる。ガスは化石燃料の総エネルギー節約量の最大の割合を占めており、その使用量は2030年までに1,600億立方メートル（bcm）以上、すなわち21%減少するが（STEPSシナリオでの減少はわずか50 bcm）、その約半分はヒートポンプによるものである。どちらのシナリオにおいてもEUが最大のガス節約量に貢献する。欧州へのガス供給を削減するロシアの決定とその結果による価格の高騰により、各国政府は天然ガスやその他の化石燃料からの転換を促す政策を早急に強化するように迫られている。意欲的な2030年の気候目標を掲げている他の主要ガス輸入国においても、主にヒートポンプの利用の拡大により、建物でのガス使用量が大幅に減少している。

図 1.8 ▶ APS シナリオにおける建物での暖房・給湯用の世界のエネルギー消費量、2021-2030年



IEA. CC BY 4.0.

ヒートポンプは、APS シナリオによる 2030 年までの暖房・給湯における化石燃料の需要 29%削減の半分以上を占め、天然ガス需要の削減が最大である

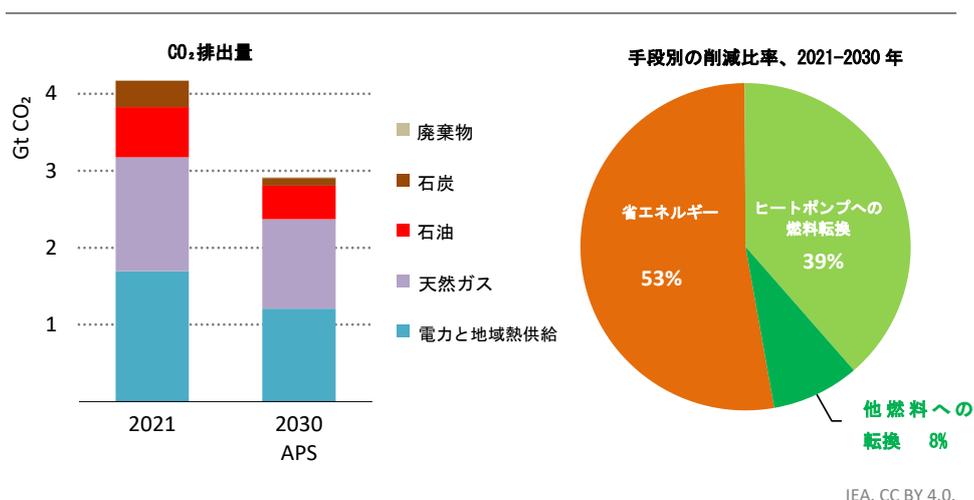
また、ヒートポンプは、2つのシナリオにおいて建物の温熱用の大量の石油と石炭にとって代わる。天然ガスが流通していない地域で現在主に見られる石油ベースの暖房設備は、APS シナリオにおいても急速な減少を続け、2021年の世界の温熱需要の15%から2030年には約11%に減少し、STEPSシナリオよりもやや速い減少となる。ヒートポンプはこれらの減少に主に寄与する要因である。家庭での石炭暖房は、APSシナリオにおいて、2030年までにほぼ廃止される。これは、大気環境を改善するための中国における強力な目標と活動によって牽引され、特に都市周辺部と農村部でヒートポンプが大半の石炭使用を置き換える。

APSシナリオにおけるヒートポンプの早期導入は世界の電力需要を押し上げるが、ヒートポンプの効率が高いため、化石燃料の節約量がこれを大きく上回る。ヒートポンプでの電力使用量は2倍になり、500テラワット時（TWh）を超え、これは2021年から2030年にわたる電力需要の増加全体の約9%に相当する。ほとんどの地域では、既存の発電容量でこの需要の増加に十分対応できるが、一部の国では配電システムをはじめとする配電網をアップグレードするための追

加投資が必要になる。2030年までの脱炭素化目標が達成されれば、電力部門での化石燃料使用量は約5分の1に減少するため、このシナリオではヒートポンプによる電力需要の増加は、電力部門の化石燃料需要の増加にはつながらない。この減少はG7諸国とEUで最も速い。2030年までにAPSシナリオにおける暖房・給湯の燃料構成で水素が果たす役割はごくわずかである。主な理由は、水素の変換、輸送および使用に付随するエネルギー損失を考慮すると、建物で使用するための水素技術は、ヒートポンプやその他の利用可能な選択肢よりもはるかに効率が悪いためである（IEA、2022c）。

化石燃料から電気式ヒートポンプへの転換は、建物の暖房の脱炭素化に大きく貢献する。発電による間接的な排出を含む全世界の暖房・給湯に付随するCO<sub>2</sub>排出量は、APSシナリオにおいて2030年までに1.2 Gt以上、すなわち25%以上減少する（図 1.9）。ヒートポンプは、この削減量の約5億トン（Mt）、すなわち約40%を占め、これは2021年のカナダの排出量にほぼ匹敵する。EUと米国を中心とする先進国は、ヒートポンプによる加熱関連の排出量の減少の約4分の3を占めている。再生可能発電の漸進的な増加は、時間の経過とともにヒートポンプによる排出量の節約を増大させる。

図 1.9 ▶ APSシナリオにおける建物での暖房・給湯からの世界のCO<sub>2</sub>排出量、2021-2030年

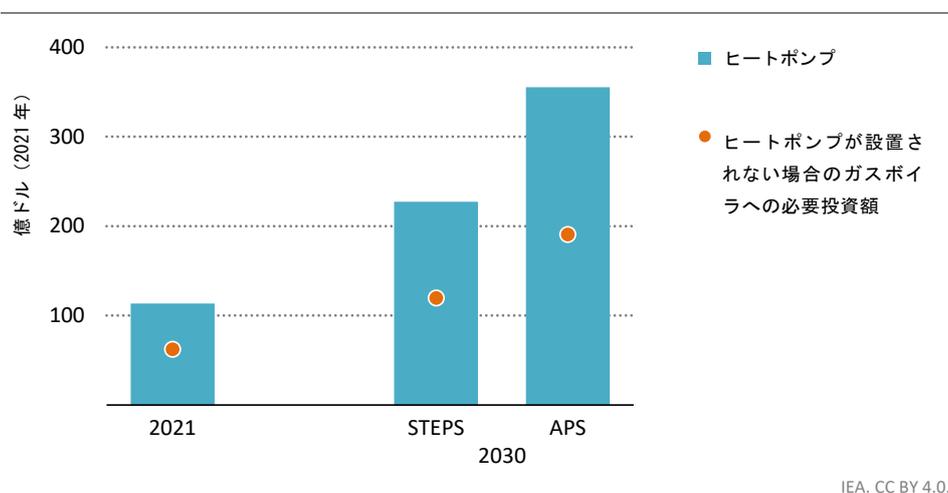


ヒートポンプはAPSシナリオにおいて2030年までに世界のCO<sub>2</sub>排出量を500 Mt削減し、建物の暖房・給湯の直接および間接的な排出量削減の合計の約40%に相当する

APSシナリオにおけるヒートポンプの導入率は、住宅や商業ビルのオーナーが機器設置に多くの費用を費やしたことを意味する。世界の投資額は2030年までに3倍となり、2021年の実質ドル換算で3,500億ドルに達する（図1.10）。これは、2021年に全世界で太陽光発電（PV）と風力発電に投資された金額とほぼ同じである。コンデensingガスボイラなどの従来の熱源機器を購入することに対して、ヒートポンプに投資することの割増額は、2030年に約1,600億ドルであるが、その大半は今日の主要市場で既に利用可能な政策的インセンティブによって補われている（STEPSシナリオにおいても考慮されている）。しかし、これらの増分コストは、特に世界的な

エネルギー危機が続いた場合、経済全体で節約できる燃料費で賄うことができる。（第3章）。

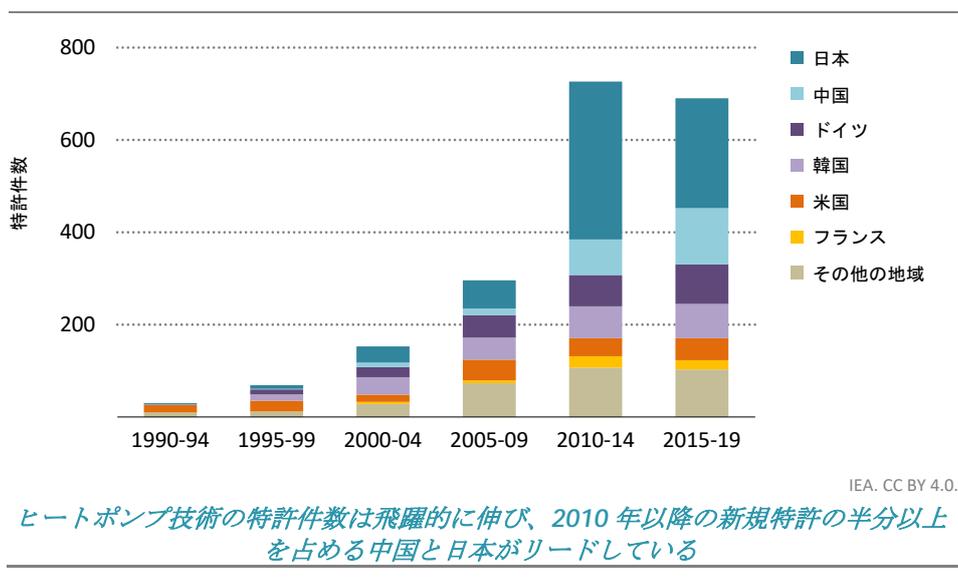
図 1.10 ▶ シナリオ別の建物のヒートポンプに対する世界の投資額、2021年と2030年



APS シナリオにおいてヒートポンプの投資額は2030年に3倍の3,500億ドルに達し、すべての新しい暖房設備が代わりにガスボイラである場合の必要額より1,600億ドル多くなる

さらに、研究と技術革新のニーズを満たすために、ヒートポンプ関連の研究、開発および実証（RD&D）への投資を強化する必要がある（ボックス1.1）。IEAに報告されているヒートポンプとチラーの研究に対する公的支出は年間約3,000万ドルで、2010年の約4倍に増加している。ヒートポンプのスタートアップとスケールアップに対する世界の投資は、2016年から2021年にかけて約6倍に増えた（欧州委員会、2022a）。技術革新の指標となるヒートポンプの特許件数は、2005～09年に比べて2015～19年は2倍以上に増え、中国と日本が全体の半分を占めている(図1.11)。

図 1.11 ▶ 国別のヒートポンプ技術の特許件数、1990-2019年



出典：PATSTATデータに基づくIEAの分析

ボックス 1.1 ▶ 次世代ヒートポンプのRD&D

過去数十年にわたって、ヒートポンプの性能は効率や騒音などの観点で大幅に向上している。たとえば、スイスのエア・トゥー・ウォーターヒートポンプの場合、1990年代初頭からCOPが70%以上増加している（スイス連邦エネルギー局、2020）。しかし、追加の研究と技術革新によって、さらなるメリットが得られる可能性がある。RD&Dの取り組みでは現在、スマートでフレキシブルな機能、騒音の低減、効率の向上、よりコンパクトな設計、設置の容易さの向上、使用する材料や冷媒に付随する環境フットプリントの低減に重点が置かれている。政府や産業界によって実施されている主要なRD&Dプログラムの下で進捗状況を共有することは、世界中で革新的な技術の導入を加速し、コストと排出量を削減するのに役立つ可能性がある。

IEAのヒートポンプ技術協力プログラム（HPT TCP）と建物の安価な冷暖房に関するイノベーション・コミュニティ（ミッション・イノベーション・イニシアチブ）は、ヒートポンプのRD&D協力を推進する重要なフォーラムである。HPT TCPでは、冷熱と温熱を同時に必要とする商業用途を含め、ヒートポンプの使用を最適化することにより、システムとリソースの効率を向上させる可能性を探っている。その一例として注目すべきは、地域や都市レベルの超低温熱システムでの利用において、ヒートポンプはヒートシンクとヒートソースとして同時に利用できるという二つの特性である。エアコンは大量の廃熱を発生させるが、うまく設計されたシステムでは家庭用温水を作るために回収することができる。

長期的なRD&Dの取り組みにより、ヒートポンプは寒冷地であっても採用され得る選択肢となった。しかし、この技術を極寒地でも効率的に適用するために、次世代のヒートポンプには、より広い温度帯域での効率向上が必要になる。また、断熱が困難であったり、高温の暖房システムが必要な場所など、建物の改修を行う上で最も困難な条件下において、ヒートポンプを適応させるためにも進展が必要である。そのためには、部品開発とシステム設計の継続的な

研究が必須である。米国エネルギー省は最近、極寒地での技術導入を加速させるために、住宅用寒冷地ヒートポンプ技術チャレンジを開始した（US DOE、2022）。また、気候ニーズによって差別化された最適化ヒートポンプソリューションは、機器のコストも下げる可能性がある。

高効率で費用対効果の高い加熱ソリューションの開発を飛躍させるための下地を作るには、市場導入にはまだほど遠い技術の研究を強化することも必要とされる。それらには、固体（磁気熱量、熱電、弾性熱量など）やガス（ブレイトンサイクル、スターリングサイクルなど）などのヒートポンプ用の非伝統的な圧縮技術も含まれる。弾性熱量ベースの冷却システムの初期の結果は特に有望である。

注:このボックスは、スウェーデン調査研究所ヒートポンプセンターの Caroline Haglund Stignor 氏、Monica Axell 氏および Metkel Yebiyo 氏と HPT TCP 議長 Stephan Renz 氏と共同で作成した。

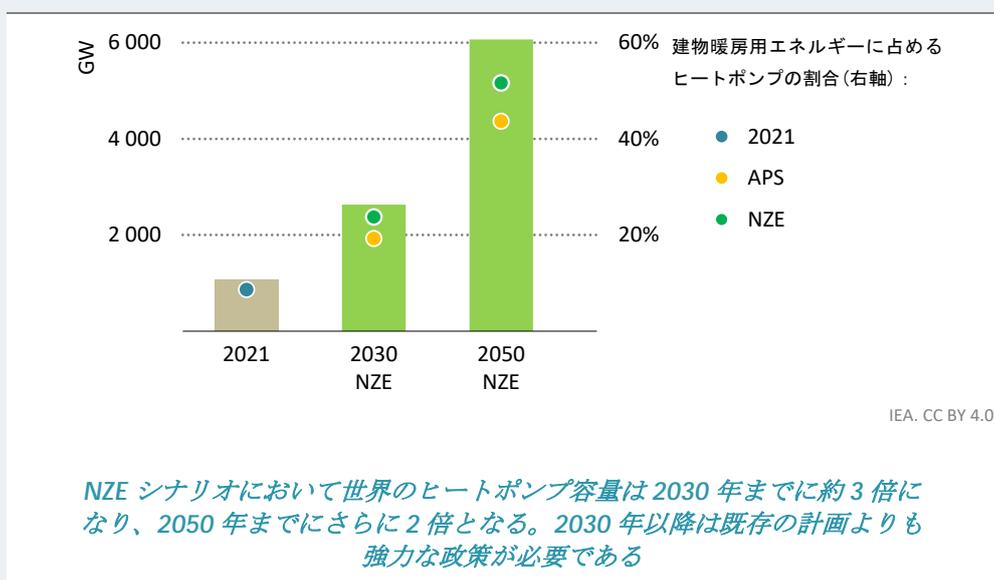
APS シナリオレベルの導入を達成するには、より強力な経済的インセンティブや既存および新築建物への化石燃料ボイラの設置に対する規制など、政策支援の強化がさらに必要である（第3章参照）。NZE シナリオにおいて、APS シナリオよりもさらに迅速なヒートポンプの導入を支援する鍵となる施策は、2025年以降の化石燃料ボイラの新規販売の禁止である（ボックス 1.2 参照）。

#### ボックス 1.2 ▶ NZE シナリオにおけるヒートポンプの導入

今世紀半ばまでに世界がCO2排出量ネットゼロの目標を達成するというNZEシナリオでは、世界中に設置されているヒートポンプの容量が2030年までに約3倍になり、2050年までにさらに約2倍になる（図1.12）。これは、2030年に世界の温熱需要の少なくとも24%がヒートポンプによって満たされ、現在の約3倍の割合になることを意味する。2050年までに、この割合は52%に到達する。

いくつかの国における最近の意欲的な政策、特に米国のインフレ抑制法、EUのREPowerEU、日本のグリーントランスフォーメーション（GX）は、すでにヒートポンプの普及を促進し、メーカーと設置業者に強力な市場シグナルを送っている。これらは、2030年に向けて世界をNZEシナリオの軌道に乗せるにはほぼ十分であるが、特に新興国において2030年以降も軌道に乗せるのに必要となる導入加速を継続するためには、さらなる政策的取り組みが必要になる。NZEシナリオでは、技術革新と補助金によるエンドユーザーに対するヒートポンプコストの大幅な削減、炭素ペナルティの強化、2025年の化石燃料ボイラの新規販売の禁止によって導入が促進される。

図 1.12 ▶ APS および NZE シナリオにおける世界のヒートポンプ容量と暖房需要のカバー率、2021-2050年



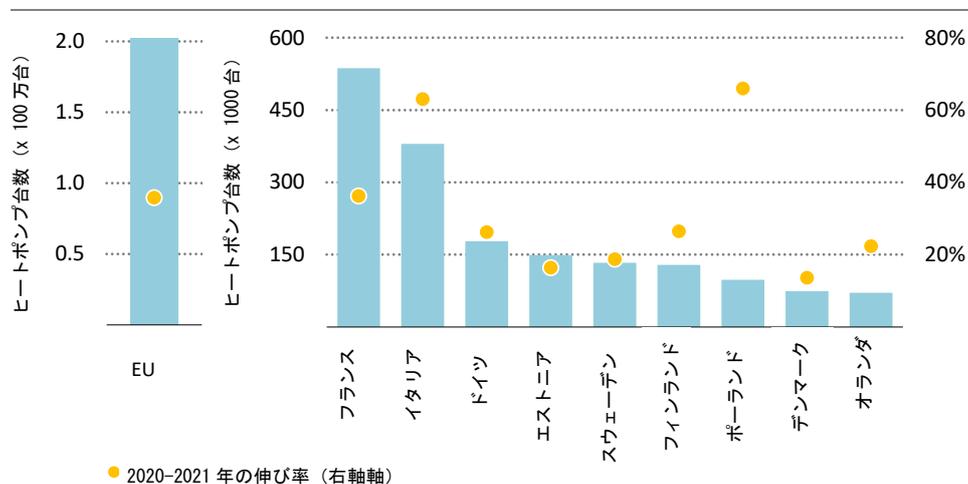
### 1.3.2 EU での重点的な取り組み

ロシアによるウクライナ侵攻とそれに続くロシア産ガス輸入の停止は、欧州を広範な経済的・社会的影響を伴う重大なエネルギー危機に追い込んだ。これを受けて、欧州委員会は2022年5月にREPowerEU計画を発表した。この計画は、ロシアからEUへの化石燃料の輸入を迅速に段階的に廃止し、ガスの輸入を2030年より早期に終了させることを目標としており、これはAPSシナリオで完全に達成される。REPowerEUは、ガスの供給源を多様化するとともに、エネルギー効率の改善とクリーン燃料への転換を加速させるための施策を数多く打ち出している。これらの施策は、2021年に発表されたEUのFit for 55パッケージに既に含まれている施策を強化するものである。このパッケージは、（1990年比で）2030年までに温室効果ガス（GHG）の正味排出量を少なくとも55%削減することを目的とし、EU法を改正および更新する一連の提案である。

主にガスボイラからヒートポンプへの置き換えによって建物の天然ガス使用量を削減することは、REPowerEUにとって不可欠である。2021年、建物におけるEUのガス使用量は150bcmに達し、電力部門を上回ってEUのガスの最大用途となり、EUのエネルギー関連CO<sub>2</sub>排出量の11%を占めた。フランス、イタリア、ポーランドなどの主要市場における強力な政策支援に後押しされて、ヒートポンプの販売台数は既に急速に伸びており、2021年には35%急増して約200万台に達している（図1.13）。ヒートポンプが石炭、石油ボイラ、さらには効率の低い伝熱ヒーターを置き換える場合もある。たとえばポーランドでは、クリーンエネルギー補助金と大気環境の懸念を動機とした石炭ボイラの地域レベルでの使用禁止の双方により、2021年に販売台数は66%上昇した（Morawiecka and Rosenow、2022）。イタリアでは、エネルギー効率の向上を目的とした建物のリノベーションにかかる費用の最大110%に相当する税額控除を提供する新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の景気回復措置である「スーパーボーナス」によって販売台数が60%以上急増し

た。

図 1.13 ▶ EU と主要加盟国におけるヒートポンプの販売台数と伸び率、2021 年



IEA. CC BY 4.0.

EU 全体のヒートポンプ販売台数は 2021 年に約 35% 増加して 200 万台になり、フランス、イタリア、ポーランドなどの各国での強力な政策支援によって後押しされた

出典: EHPA (2022)、PORT PC (2022) に基づく IEA の分析

表 1.1 ▶ ヒートポンプ導入のための 主な欧州政策目標

国	年	目標
EU	2030	2022 年比で 3,000 万台のヒートポンプを追加で設置する
ベルギー	2030	ヒートポンプによる最終エネルギー消費量を 2018 年の 5 倍に増加させる
フランス	2023	ヒートポンプの総設置台数を 270~290 万台に到達させる
ドイツ	2024	年間 50 万台のヒートポンプを設置する
	2030	600 万台のヒートポンプストックを達成する
ハンガリー	2030	ヒートポンプによる最終エネルギー消費量を 2020 年の 6 倍に増加させる
イタリア	2030	ヒートポンプによる最終エネルギー消費量を 2017 年の 2 倍に増加させる
ポーランド	2030	ヒートポンプによる最終エネルギー消費量を 2020 年の 3 倍に増加させる
スペイン	2030	ヒートポンプによる最終エネルギー消費量を 2020 年の 6 倍に増加させる
英国	2028	年間 60 万台のヒートポンプを設置する

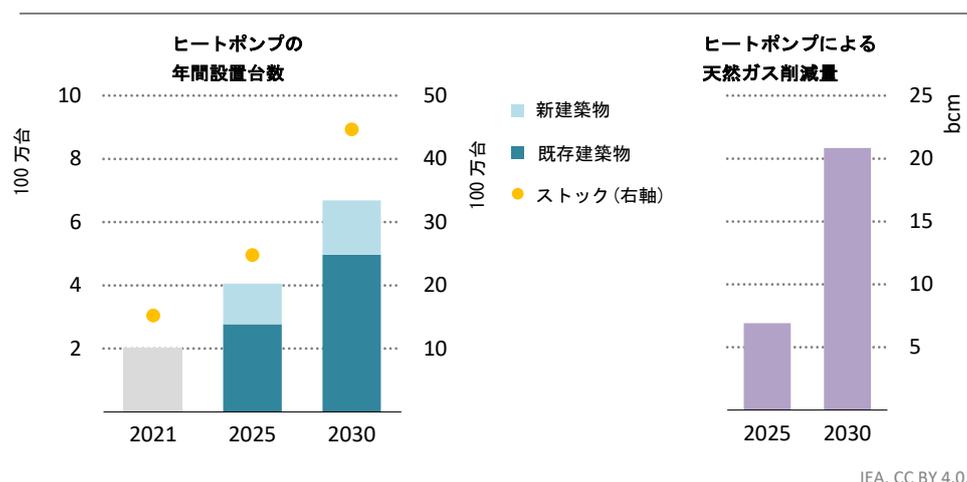
出典: 欧州委員会 (2022b)、フランス、環境連帯移行省 (2022)、Clean Energy Wire (2022)、英国政府 (2020)、イタリア政府 (2019)、スペイン政府 (2019)、Toleikyte and Carlsson (2021)。

多くのEU諸国は最近、ヒートポンプに対する政策支援を強化しており、EUは2022年に再び記録的な設置台数を達成する見込みである。ポーランドでの販売台数は上半期に倍増し、オランダ、イタリア、オーストリアでも同様の傾向が報告され、フィンランドとドイツでは高い伸び率が報告された (Mathiesen他、2022)。英国の他に、いくつかのEU諸国は近年、意欲的な導入目標を発表している (表1.1)。REPowerEU計画は、これらの最新の政策や市場動向を強化する

ことを目的とし、それらに基づいて構築されており、現在の個々のヒートポンプの導入率を2倍にして、2022年から2030年の間に3,000万台を新規に設置することを目標としている。この計画では、地域および共同暖房を開発および近代化し、産業熱を利用する新規プロジェクトに組み込むことで、大規模ヒートポンプの導入を加速させることも目指している。

EUのヒートポンプ販売台数は、上記の目標を考慮したAPSシナリオにおいて、2025年までに400万台に達し、2030年までに約700万台に到達する。その結果、建物内での加熱用のガス消費量は2025年に7bcm、2030年に21bcm減少する。これは、今日のロシアからの輸入量の15%にほぼ相当する(図1.14)。ヒートポンプは、現在から2030年までの建物暖房用ガスの削減量全体の約3分の1に貢献し、省エネ改修が残りの大部分を占める。このシナリオでは、平均で2.5~3%の既存の建築物ストックが毎年改修され、それらの大部分がヒートポンプの設置を伴う。全EU加盟国を対象とする新しい建物エネルギー基準も、ヒートポンプの採用を支持している。

図 1.14 ▶ APSシナリオにおけるEUのヒートポンプ設置台数・ストック台数と累積天然ガス削減量(2021-2030年)

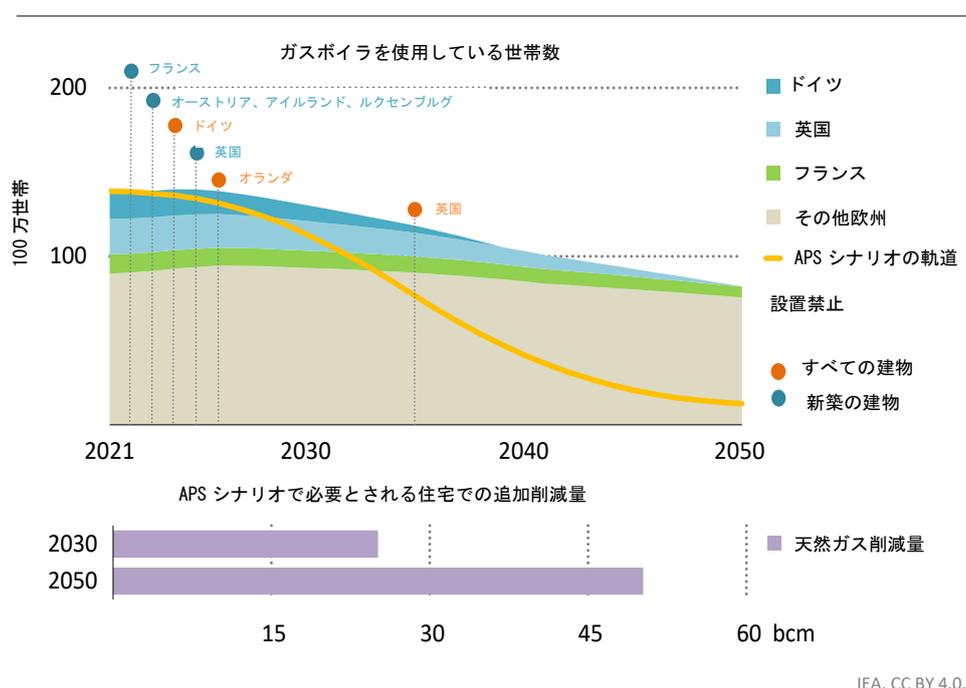


新規ヒートポンプの設置により、APSシナリオにおいてガス消費量は2025年に7bcm、2030年に21bcm削減され、今日のロシアからの輸入量の15%にほぼ相当する

EUと各国の目標を確実に達成するためには、新たな政策措置が必要である。ヒートポンプを含む総合的な改修にインセンティブを提供する政策は、住宅ストックのエネルギー改修率の倍増を目的として2020年に開始されたEUリノベーション・ウェーブ・イニシアチブに含まれる施策など、今日、多くの国のエネルギー効率化パッケージの基礎となっている。ヒートポンプの導入をさらに奨励するため、欧州の9カ国がガスおよび石油ボイラの全国的な禁止を発表または実施したが、他の4カ国は石油ボイラのみを禁止を発表した。これらの禁止の中には、新築建物での設置のみを対象とするものもあれば、既存建物での取替も対象とするものもある。EUで公表されている化石燃料ボイラの禁止により、2030年までに約1,600万世帯が代替の加熱設備に転換する必要があり、そのうち1,000万世帯はガスボイラであり、7.5bcmの天然ガスが節約されるこ

とになる。すべての新規暖房設備がヒートポンプとなれば、これはAPSシナリオにおける2030年までのヒートポンプへの転換の約半分に相当する。すべてのEU加盟国が2025年から化石燃料ボイラの新規設置禁止を実施した場合、2030年までに4,800万世帯が代替加熱設備に転換する必要がある。これらの60%のみがヒートポンプに移行したとしても、APSシナリオにおけるヒートポンプの移行と同等になる（図1.15）。また、禁止はメーカーに明確かつ安定した長期的展望を提供することとなる。

図 1.15 ▶ 欧州で実施および発表されたガスボイラ禁止の影響と APS シナリオとの残りの加熱需要ギャップ (2021-50年)



APS シナリオにおいて2050年の天然ガス節約量を達成するためには、2050年までにネットゼロの目標を掲げるすべての国が2030年までにすべての種類の建物で化石燃料ボイラの新規設置を禁止する必要がある

注: ガスボイラの設置禁止は、デンマークでも2013年に新築の建物を対象に導入され、ノルウェーでは2017年にすべての建物を対象に、オランダでは2018年に新築の建物を対象に導入された。ドイツなどの一部のケースでは、禁止が明示されておらず、ガスボイラでは達成できない再生可能エネルギー割合の義務による。

欧州に優秀な製造拠点があるにもかかわらず、アジアからのヒートポンプと部品の輸入はここ数年増加している。輸入への依存を制限するために、欧州委員会は必要に応じて資金調達を容易にすることで国内生産を増加させる計画である。REPowerEUは規制の枠組みを強化し、ライフサイクルの持続可能性を確保し、技術革新を支援することによって、欧州のヒートポンプサプライチェーンを強化し、より持続可能なものにすることも目標としている。また、ヒートポンプ産業で働く人々を訓練および再教育するEUのスキル協定の下で大規模なスキルパートナーシップを確立することも提案している（第3章参照）。

## 1.4 産業用ヒートポンプ

電気式ヒートポンプは、産業部門においてプロセス熱を供給する大きな可能性を持っている。産業プロセスの複雑さのために、ヒートポンプは一般に特定の用途に合わせて調整する必要がある。建物で使用されるものとは異なり、必要な出力温度も大幅に高いため、産業用ヒートポンプは一般に、より高い入力温度を必要とする。今日、産業用ヒートポンプは、特に製紙、食品、化学産業界における100°C未満の低温プロセスに主に使用されている（表1.2）。ただし、約100°Cの廃熱を入力として利用できる場合は、150°Cまでの出力温度はすでに達成することが可能である。150°Cから200°Cの温度の場合、ヒートポンプは特殊な冷媒と圧縮機を必要とするが、それらの技術はまだ初期試作段階である。

表 1.2 ▶ 温度範囲別の産業用ヒートポンプの技術成熟度

温度範囲	技術成熟度レベル (TRL)	プロセス例
<80 °C	● TRL 11:市場にて安定して実証済み	製紙:脱墨 食品:濃縮 化学:バイオ反応
80 °C to 100 °C	● TRL10:商業化され競争力があるが、大規模導入は未達成	製紙:漂白 食品:低温殺菌 化学:沸騰
100 °C to 140 °C	● TRL 8 - 9:関連する環境における世界初の商業化	製紙:乾燥 食品:蒸発 化学:濃縮
140 °C to 160 °C	● TRL 6-7:商業段階前の実証	製紙:パルプ沸騰 食品:乾燥 化学:蒸留 各種産業界: 蒸気生産
160 °C to 200 °C	● TRL 8 - 9:小規模 MVR システムおよび熱変換器に対する世界初の商業適用  ● TRL 4-5:初期～大型プロトタイプ	各種産業界: 高温蒸気生産
>200 °C	● TRL 4:初期プロトタイプ	各種産業界: 高温プロセス

成熟度レベル: ● TRL 1 to 5   ● TRL 6 to 7   ● TRL 8 to 11

注:MVR=自己蒸気機械圧縮。TRL は特定のプロセスやヒートポンプ容量によって異なる可能性がある。

出典:Maruf 他 (2022) に基づく IEA 拡張 TRL を用いた表示 (IEA, 2020b)。

産業用ヒートポンプは、温度リフト、すなわち入力温度と出力温度の差が30～50℃の範囲にある場合、COPが3を超えて非常に高効率になる可能性がある。温度リフトが大きい場合、COPは一般に低くなる。しかし、中間熱交換器またはカスケードサイクルを組み込むことなどにより（これによりヒートポンプはカスケード熱交換器によって連結された2つの単段サイクルとして作動）、効率損失を制限する方法でヒートポンプを構成することができる。しかし、このようなヒートポンプシステムは通常、コストが大幅に高くなる。

ヒートポンプと同様の方法で、自己蒸気機械圧縮（MVR）機器で蒸気を使用する（つまり、電気を利用して熱をより高温に高める）ことに関心が高まっている。一般的なヒートポンプのように閉ループで作動する場合、水はサイクル内の冷媒として機能することができる。その物理的特性により、環境や火災の危険による制約を受けることなく、他の冷媒流体よりも高い目標温度を達成することができる。オープンサイクル構成では、低压蒸気または復水から高温蒸気を作ることが可能である。蒸気は産業部門で好まれる熱媒体の1つであるため、この技術は産業用加熱需要を満たすのに適している。

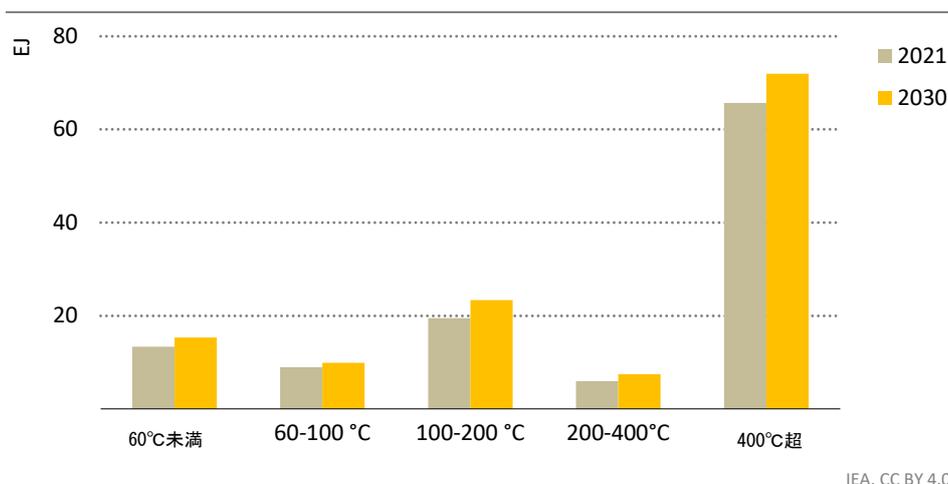
公的資金はソリューションの開発と商業化を加速させるのに役立ち、自動車産業界における金属の表面処理や繊維産業界における乾燥や洗浄などの新しい用途への道を開く可能性がある。EUイノベーション・ファンドが産業適用を含む実証プロジェクトを支援する一方、ホライズン・ヨーロッパプログラムはこの分野の研究および技術革新プロジェクトに資金を提供している。

200℃以上の温度では、現在のところヒートポンプよりも産業プロセスの直接電化の方が一般に望ましい（Madeddu他、2020）。このような技術は数多く開発されていたり、すでに使用されていたりする。たとえば、BASF、SABICおよびLindeは最近、炭化水素原料を化学産業用の重要な基材に分解するのに必要な約850℃の反応熱の供給に化石燃料に代えて電気を使用するパイロット規模のスチームクラッカーの建設を開始した（BASF、2022）。それでもなお、技術革新によって、より高温のヒートポンプが実現可能になる可能性がある。

水素燃焼は、産業部門においてCO<sub>2</sub>排出係数の低い熱を供給するもう1つの選択肢である。水素の最大の可能性は、ヒートポンプが作動せず、直接電化が難しい高温用途である。しかし、低温の熱および蒸気用のボイラでは、水素が天然ガスに代わる可能性も技術的にある。しかし、ヒートポンプや直接電化に比べて、水素ベースの熱は、電気分解による低排出水素の製造に伴う損失とそれに伴う高コストのために、全体的な効率が低いという問題がある（技術コストの比較については、図1.18を参照）。

他のクリーンエネルギー技術の中でも、ヒートポンプは特に低温プロセス向けの産業用熱生産の脱炭素化において重要な役割を果たし、化石燃料の需要を迅速に削減することができる。APSシナリオにおいてプロセスの熱要求事項は2030年まですべての温度範囲で増大し続けるが、200℃未満のプロセスからの熱需要の割合は40%弱のままである（図1.16）。

図 1.16 ▶ APS シナリオにおける温度別の世界の産業プロセス熱需要、2021 年および 2030 年



ヒートポンプは特に低温プロセス向けの産業用熱生産の脱炭素化において重要な役割を果たすことができる

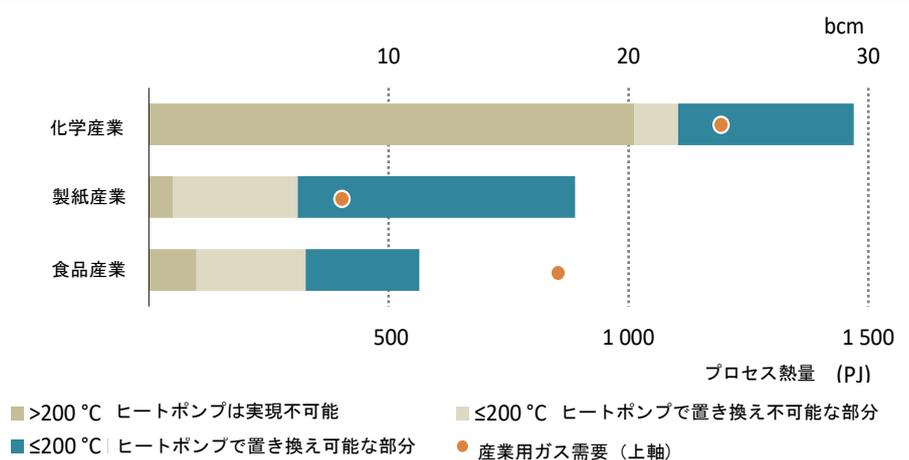
産業用ヒートポンプの可能性はセクターによって異なる (Marina 他、2021)。製紙業界では、原則として、すべての温度範囲にわたるプロセス熱需要の約 65%を産業用ヒートポンプによって満たすことができるが、大幅なシステム変更が必要になる場合がある。食品業界では、高温の廃熱の利用可能性が限られているため、主に 150°Cまでの温度が必要とされる場合、全プロセスの約 40%をヒートポンプによってカバーすることが可能である。この閾値未満の熱需要の約 3分の2は、現在の廃熱利用の可能性に基づいてヒートポンプによって満たすことができる。しかし、隣接する産業用施設からの追加熱源が得られた場合や蒸気の代わりに温水を使用することなどによって、プロセスがより低温で作動するように変更された場合、その可能性は一層高くなる。ほとんどのプロセスで非常に高い温度が必要とされる化学産業界では、ヒートポンプでカバーできるのはプロセス熱需要の約 4分の1に過ぎない。ただし、そのセクターの低温プロセスは、同じ敷地内の他のプロセスからの相当量の廃熱の恩恵を受ける。これら 3つの産業部門の総加熱需要の約 30%は今日のヒートポンプ技術で対応することができる。これらの産業部門における低温加熱用の天然ガスは、2021年に世界で 60bcm 消費された。欧州だけでも、合計容量 15GW のヒートポンプを、これら 3つの産業セクター全体で約 3,000 の設備に実装することが可能である (図 1.17)。

産業用ヒートポンプの設計と技術仕様は、住宅用とは大幅に異なることが多い。より高温が必要であることに加え、十分な高温の生成に必要な熱源を供給するために、産業用施設において一般に産業廃水や排気を利用することができる。ただし、より高い温度を提供する必要があり、大量に使用されるため冷媒<sup>4</sup>に対する要求事項は異なり、環境や火災の危険の観点で課題がある。

<sup>4</sup>住宅用ヒートポンプでは、R134a や R32 などのハイドロフルオロカーボン (HFC) が主に使用されるが、プロパンなどの炭化水素や二酸化炭素の使用も増えている。産業用ヒートポンプでは、ハイドロフルオロオレフィン (HFO) やアンモニア、イソブタン、シクロペンタンが冷媒として主に使用されている。さらに、高温水蒸気プロセスの冷媒として水を使用することも可能である。冷媒については、第 2 章で詳細に論じている。

また、産業用ヒートポンプはより高圧で作動することが多く、より太い配管を必要とする。一方、圧縮機はより高温で作動できることが必要である。

図 1.17 ▶ 欧州における温度レベル別産業用ガス需要およびプロセス熱需要と ヒートポンプへの置き換えの可能性、2019 年



IEA. CC BY 4.0.

食品・製紙業界は、産業用ヒートポンプを大規模に導入し、エネルギー使用量、ガス需要およびCO2排出量を削減できる有力な候補である

注:PJ = ペタジュール。欧州 = EU と英国。

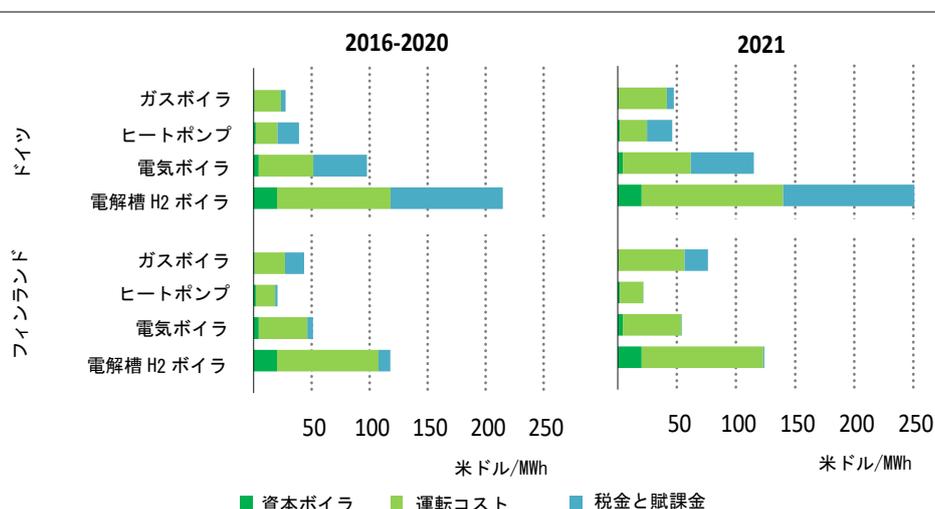
出典:欧州委員会 (2016) および Marina 他 (2021) に基づく IEA の分析。表 1.2 の TRL に基づく実現可能性。

産業プロセスにおいてヒートポンプに転換するには、特別な計画、設計、製造および設置が必要である。同じ産業部門内で類似プロセスを実行している施設間でも要求事項は異なる可能性がある。産業用ヒートポンプは、特定のプロセスや温度設定に対して設計されることが多いため、大量生産する機会が制限され、設計および製造コストが押し上げられる。また、新規プロセスにヒートポンプを設置する場合と既存プロセスにヒートポンプを組み込む場合とでは、コストと実現性に違いがあり、後者の方がはるかに複雑になる可能性がある。新規プロジェクトでは、ヒートポンプメーカーと協力して、特定のプロセスや産業サブセクターにおける産業用ヒートポンプの標準温度設定 (例: 入口温度や温度リフトの範囲) を確立することによって恩恵を受けることができる。この協力により、機器の製造と設置を合理化してコストを削減できる。一部の産業部門には、特有の運転要求事項がある。たとえば、食品産業界のヒートポンプで使用される冷媒は、製品との接触に関する要求事項が厳しく、食品の安全性を保証するために追加の熱サイクルが必要な場合がある。

建物セクターと同様、ヒートポンプの採用には依然としてコストが大きな障壁となっている。機器や設置および関連するプロセス変更の費用は高額になることが多いが、産業分野では運転コストほど決定的なものではない。さらに、現在の電力市場の設計と税制は、多くの国や地域の産業部門で電力使用よりも天然ガスを優遇していることが多い。しかし、電気価格の値上げ

を上回る最近のガス価格の大幅な上昇によって、ヒートポンプの投資対効果が向上している。電気税や賦課金が比較的高く、2020年まではガスボイラの方がヒートポンプより平均的に競争力が高かったドイツなどの国では（図1.18）、2021年後半のガス価格の上昇によってヒートポンプの方が有利になり、ロシアによるウクライナ侵攻以降の継続的な価格上昇がその効果を増大させている。さらに、2022年にドイツで行われた電気価格の改革により、税金と賦課金が大幅に引き下げられ、産業用ヒートポンプの持続的な成長軌道が可能になっている。フィンランドでは、化石燃料の使用を抑制する目的で、産業部門の電気税がEUの最低レベルであるメガワット時（MWh）あたり0.50ユーロに引き下げられたため、エネルギーコスト環境は近年、ヒートポンプに有利なものになってきている。

図 1.18 ▶ ドイツとフィンランドにおける産業用熱生成の平均均等化コスト



IEA. CC BY 4.0.

### 最近のガス価格の上昇と税制変更により、ヒートポンプがドイツとフィンランドで産業用熱を生成する最も安価なソリューションになった

注: 資本コストは全体コストに比べて非常に低い。図ではバーを認識できないことがある。運転コストには、エネルギーおよび配送料金とガスボイラの CO2 価格も含まれている。電解槽 H2 ボイラの資本コストには、オンサイト水素製造の想定を含む。運転コストには、電気価格と水素の電力熱変換効率が考慮されている。

多くの国では、産業用ヒートポンプの初期コストと情報障壁を下げるための政策が導入されている。たとえばドイツでは、営利企業のエネルギーおよびリソース効率化のための連邦資金調達プログラムの補助金によって、プロジェクトあたり1,500万ユーロを上限に、ヒートポンプの初期コストの最大55%を補うことができる。他の欧州諸国でも同様の制度を実施したり、省エネルギー義務制度の一環として産業用ヒートポンプの支援を提供したりしている。ブラジルでは、PotencializEEプログラムによって、ヒートポンプなどのクリーンかつ高効率な技術を特定する施設を支援するために、産業部門における省エネルギーの専門家向けの訓練が提供されている。工場の垣根を越えてより多くの廃熱を利用できるようにするためには、追加のインセンティブが必要である。蓄熱により、廃熱のさらに多くの部分の利用が一層可能になる。ヒートポンプの可能性を最大化するためには、より強力な産業効率目標と、監査、技術開発および世界

初の商業ユニットの導入に対する資金提供が鍵である。最後に、さまざまな産業用加熱設備は、特に新興国・発展途上国において、追加のエネルギー入力やヒートポンプを使用しなくても、廃熱を統合することでさらに最適化できる。

## 1.5 地域暖房用ヒートポンプ

1

個別設置のヒートポンプは、技術的制約や経済的制約、その他の制約のために、人口密度の高い都市部や産業部門など、特定の状況にある建物では好ましい暖房設備にならない場合がある。このような場合、または既存の熱源をより効率的に活用するために、地域暖房が実現可能なソリューションになる可能性がある。大型ヒートポンプは、既存ネットワークを拡張したり、新規ネットワークを開発したりすることで、建物や商業施設、産業用地に地域熱を供給することができる。たとえば、EUでは、現在6,000万人が地域熱供給によって供給され、さらに8,000万人が既存ネットワークのある都市に住んでいる（Euroheat & Power、2022）。

地域暖房の脱炭素化の可能性は、現在のところほとんど手つかずであり、依然として化石燃料が世界の地域熱供給の約90%を供給し、2つの最大の市場である中国とロシアではさらに割合が高い。世界の地域熱供給量の20%を占める欧州において、炭素原単位は世界平均を3分の1以上下回るが、再生可能エネルギーの割合は熱供給の4分の1のみ、ヒートポンプはわずか1%に過ぎない。現在、欧州の4カ国（オーストリア、デンマーク、フィンランド、スウェーデン）は、2030年から2040年の間に地域暖房ネットワークを脱炭素化する目標を掲げており、デンマークは2030年までに地域熱供給の約3分の1をヒートポンプで供給する予定である（Euroheat & Power、2022、Energistyrelsen、2022）。

廃水から熱を回収するヒートポンプを用いた地域熱供給設備は、1980年代から存在している。最新のプロジェクトでは、データセンター、地下鉄のトンネル、産業施設、電解槽などからの廃熱を利用したり、利用が計画されたりしている。1986年に建設されたストックホルムのHammarbyverketは、世界最大のヒートポンプを用いた地域熱供給設備であり、市全体の熱ネットワークにとって不可欠である（HPT TCP、2018）。2006年には、ヘルシンキのカトリヴァラ公園の地下にも大規模な複合冷暖房プラントが建設された（Helen Ltd、2020）。廃水の熱を地域暖房や給湯に利用し、同時に冷たい海水を地域冷房に利用している。廃水熱再利用プロジェクトは、他の欧州諸国の他に、オーストラリア、カナダ、中国、日本、米国で実施され、成功を収めている。

地域暖房ネットワーク用の他のヒートポンプ技術も登場している。ベルリンにあるオフィス向け冷却プラントからの廃熱を同市の地域暖房ネットワークに供給する斬新な大型ヒートポンプは、シーメンス・エナジーとVattenfall Wärme Berlin AGによって最近完成され、2022年末に運転が開始される予定である。熱容量は最大8メガワット（MW）で、夏季には約3万世帯に温水を供給し、冬季には約3千世帯に熱と温水を供給することができる。EUが資金提供するHEATLEAPプロジェクトは、COPが最大8の大型ヒートポンプを備えた地域暖房ネットワークのエネルギー集約型産業からの廃熱回収のメリットを実証することを目指している（HEATLEAP、2022）。

廃水を地域暖房に利用する可能性は、ほとんど手つかずのままである（Wastewater Heat Online、2022）。浴室やキッチンからの廃温水には大量の熱エネルギーが含まれており、高温ヒートポンプや地域暖房ネットワークを使用して回収し、再利用して家庭に戻すことができる。最近の分析では、欧州の約4,000の排水処理プラントが既存ネットワークに近接していることが示されている（欧州委員会、2020）。これらの発電所を合わせると、年間175 TWhの熱を供給することができ、これは現在の欧州の地域熱供給の約5分の1に相当する。廃水ネットワークの熱マッピングを使用すると、都市の下水設備の熱源をさらに利用可能になる。

特別目的事業体などの民間および公共機関が関与するパートナーシップや革新的ビジネスモデルは、ネットワーク転換を効果的に推進することができる。ただし、地域暖房プロジェクトは通常、公的な経済的支援に頼っている。たとえばフランスでは、年間5億ユーロを超える熱基金が、クリーンな地域暖房の普及の促進に役立っていることが証明されている。ドイツ政府は最近、30億ユーロの資金調達制度を立ち上げた。この制度では、フィージビリティスタディと転換計画を支援し、さらに脱炭素化された地域暖房ネットワークの資本コストと運転コストの両方を補助することによる体系的アプローチに従うものである（BMWK、2022）。また、個々の化石燃料による暖房を、再生可能エネルギーや廃熱に置き換えるのに適した熱源を特定するために、都市や地域社会が熱供給計画に関与することも重要である。エストニアで採用されているような地域暖房ゾーン政策により、各都市は特定の地域内の建物に対して、指定された熱消費量の閾値を超える場合に地域暖房ネットワークへの接続を義務付けることが可能である。

世界の地域熱供給プラントで生成された熱の約40%は産業セクターに供給される。産業部門の使用者は高温の熱を必要とすることが多いため、ネットワークの供給温度を下げる可能性に影響する。しかし、ヒートポンプを使用して地域の分配所の温度を上げることで解決できる場合もある。中国は産業用地域熱利用をリードしており、2010年の約35%から増加して2021年には世界全体の約55%を占めている。対照的に、ロシアの割合は2010年の35%超から減少して25%未満まで低下した。

### ボックス 1.3 ▶ サラエボの地域暖房用ヒートポンプ

ボスニア・ヘルツェゴビナの首都で最大の都市であるサラエボの地域熱供給設備は天然ガスまたは重油を使用しているが、地域暖房が供給されていない家庭では主に薪や石炭が暖房に使用されている。その結果、暖房が市の空気環境悪化の主な原因となり、冬季には硫黄や窒素の酸化物や粒子状物質が常に安全なレベルを超えている。

市の化石燃料への依存を減らすために、欧州復興開発銀行（EBRD）は市当局と協力して、大規模な集中型水熱源ヒートポンプを導入している。現在、2つのプロジェクト案が検討されている。2,500万ユーロのプロジェクトには、近隣の排水処理プラントからの年間平均気温10°Cの処理済み廃水を利用する18MWのヒートポンププラントの建設が含まれている。約2100万ユーロの2つ目のプロジェクトには、年間平均気温12°Cの上水を利用した21MWのヒートポンププラントの建設が含まれている。両方のプロジェクトが実施された場合、サラエボの地域暖房ネット

ワークでのヒートポンプによる生成の割合は約 40%に達することになる。最終的な投資の決定は、2023 年の第 1 四半期に下される予定である。

大気環境の改善や年間最大 1 万 6 千トンの CO2 排出量の削減に加え、これらのプロジェクトは、現在のエネルギー危機に端を発する天然ガス供給のコストと安定に関する懸念への対処という点でも役立つ。長期的に、サラエボのヒートポンプによる地域暖房はさらに大きな可能性を秘めている。市の下水廃熱をフル活用する第 2 期プロジェクトでは、さらに 18 MW が供給可能となる予定である。



## ヒートポンプ導入促進の影響

## 燃料転換

## 要約

- 世界的なエネルギー危機により、エネルギー安全保障が再び注目されている。電気式ヒートポンプは、輸入化石燃料への依存を減らすことができる。APS シナリオでのヒートポンプの導入により、建物における世界全体のガス需要は 2030 年までに 2021 年比で 80 bcm 削減され、そのうち EU は 21 bcm を占める。暖房用の石油の輸入も、特に日本と韓国において大幅に削減される。しかし、停電時においても重要な暖房供給を確実に継続できるようにする上では新たなリスクが生じる。
- 電気式ヒートポンプの導入促進は、APS シナリオにおいて、特に建物での電力需要を急増させ、建物と産業部門での暖房・加熱用の燃料構成における電力の割合は、2021 年から 2030 年にかけて全世界で 2 倍の 16% となり、総電力使用量が 24% 押し上げられる。この需要の増加に対応するには、顧客との接続、配電網、発電容量およびフレキシビリティを向上させるために電力部門への投資を大幅に増やすことが必要になる。スマート技術を搭載したヒートポンプは、2021 年から 2030 年までに EU の需要側のフレキシビリティを 2 倍以上に増加させる上で重要な役割を果たし、フレキシビリティ・リソース全体に占める割合は 2021 年の 8% から 2030 年には約 12% に跳ね上がる。
- 平均的に、ヒートポンプを導入している家庭は、ガスボイラを使用している家庭よりも光熱費が少なく、特に再生可能エネルギーに主に依存するシステムでは、価格高騰の影響を受けにくい。2021 年に、ガスボイラからヒートポンプに切り替えた家庭は光熱費の大幅な節約を享受した。低所得世帯では、このような節約は収入のかなりの割合を占める可能性があり、主要な暖房市場では 2~6% になる。電気料金と燃料税は、消費者がヒートポンプを選ぶことを妨げないように改革する必要がある。
- ヒートポンプへの切り替えは、温室効果ガス排出量の削減と大気環境の改善に貢献する。APS シナリオでは、2021 年から 2030 年にかけて建物の暖房に起因する主要な大気汚染物質の排出量が 15~40% 削減され、燃料の燃焼による暖房関連のその他の危害が低減される。今日の冷媒を想定すると、ヒートポンプはガスボイラと比較して温室効果ガスの排出量を、CO<sub>2</sub> 排出係数の高い電力で運転する場合で少なくとも 20%、より電力がクリーンな国では最大 80% 削減する。フロン系冷媒から切り替えると、この範囲は 30~90% にシフトする。地球温暖化係数の大きいフロン系冷媒の規制にあたっては、排出抑制の努力とコスト、安全性、省エネ性およびサプライチェーンについて考慮すべき事柄とのバランスをとり、正味の排出削減量を最大化する必要がある。
- APS シナリオでは、ヒートポンプ供給における世界の雇用は 2021 年から 2030 年にかけて約 3 倍の 130 万人を超える雇用者数になる。新規雇用の 3 分の 1 は中国、20% は欧州、15% は北米であり、これらの地域では設置および製造の能力が最も速く拡大すると見込まれている。新規雇用のほとんどは設置に関わるものである。これには、新しい職人を採用して訓練するための大規模な取り組みが必要である。

## 2.1 はじめに

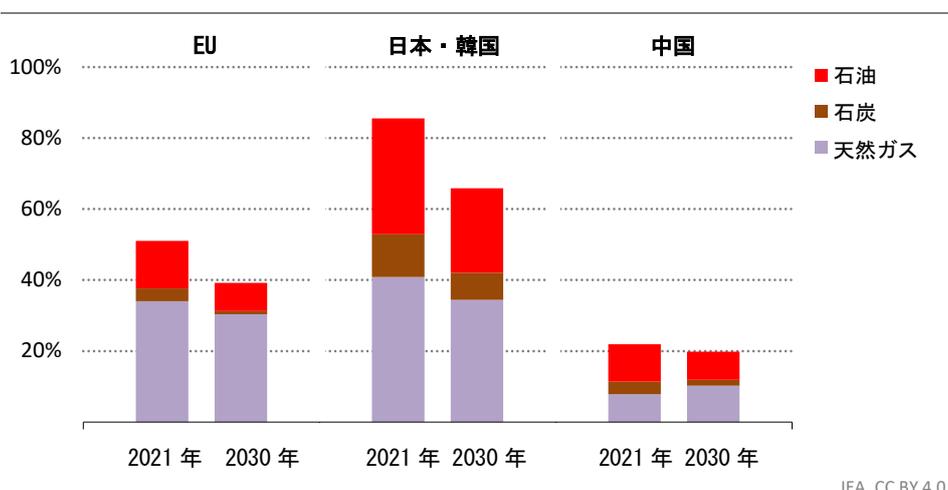
ヒートポンプの導入加速は世界のエネルギーセクターに広範囲にわたる影響を与え、経済活動と環境に対して、気候上のメリットにとどまらない重要な波及効果をもたらす。これは加熱用の化石燃料の使用量を減らし、供給停止に対する脆弱性を抑制し、全輸入国の輸入代金の削減に貢献し、生産国の場合には燃料が輸出用に解放される。しかし、ヒートポンプが増えると、電力需要が高まり、特に冬季の供給の安定を確保するために、システムのアップグレードと電力システムの運用のフレキシビリティを改善する必要性が生じる。ヒートポンプを設置するための高い初期コストは、貧困世帯に対するエネルギーの手頃な価格にも影響を及ぼす。ヒートポンプへの転換が環境や人間の健康に与える影響はほとんどの場合、圧倒的にプラスであるが、リスクがないわけではない。多くのモデルの冷凍サイクルで使用されているフロン類（Fガス）は、強力な温室効果ガス（GHG）である。適切な取り扱いにより、フロン類の影響を軽減することができ、代替冷媒に置き換えることが可能であるが、どちらのソリューションにも追加のコストと課題がある。また、ヒートポンプの生産を増やすことで、経済成長と雇用創出の新たな機会が生れるが、製造、設置、保守および認証に関する職人の訓練が必要になる。このセクションでは、これらの影響を順番に検討し、政策立案者がさまざまな優先事項のバランスを取る機会について明らかにする。

## 2.2 エネルギー安全保障

今日、建物や産業用の熱の生成は化石燃料が中心であり、その多くは輸入されているため、各国は供給停止に対して脆弱になっている。建物内の暖房・給湯のみで世界のガス需要の5分の1、EUのガス使用量の3分の1以上を直接占め、建物の暖房はEUにおける天然ガスの最大の単独用途となっている。ガスが発電や地域熱の生成に果たす役割を考慮すると、EUにおける建物内での暖房の割合はさらに大きく、40%を超える。暖房は、米国と主に北半球のその他いくつかの国において、ガスの最大の最終用途セクターでもある。

ロシアによるウクライナ侵攻により、エネルギー安全保障に関する懸念が特に欧州において再び表面化した。欧州では、冬季にガス供給が不足するという極めて現実的なリスクによって、快適性や健康に対する明らかに有害な影響を伴って、数百万人が暖房を十分に利用できなくなる恐れがある。ヒートポンプは、建物のエネルギー効率改善と相まって、暖房に使用される輸入化石燃料への依存を減らすことができる。EU、日本および韓国は、建物内でボイラを運転するため、また建物を暖房するための発電および地域熱の生成のために、輸入燃料に大きく依存している。2021年にはEUにおける加熱用のエネルギー使用量の50%以上が直接的または間接的に燃料の輸入に依存しており、ガスが群を抜いて最大の割合を占めている。日本と韓国では、輸入依存度が90%に近づき、石油とガスが輸入の中心となっている（図 2.1）。また、中国も建物の暖房を燃料の輸入に依存しているが、その程度は低い。APS シナリオでは、主にヒートポンプの設置がガスおよび石油需要に与える影響により、輸入依存度はEUとその他の国で低下する。

図 2.1 ▶ APS シナリオにおける主要地域・国での建物暖房・給湯における 輸入化石燃料の割合（燃料別）



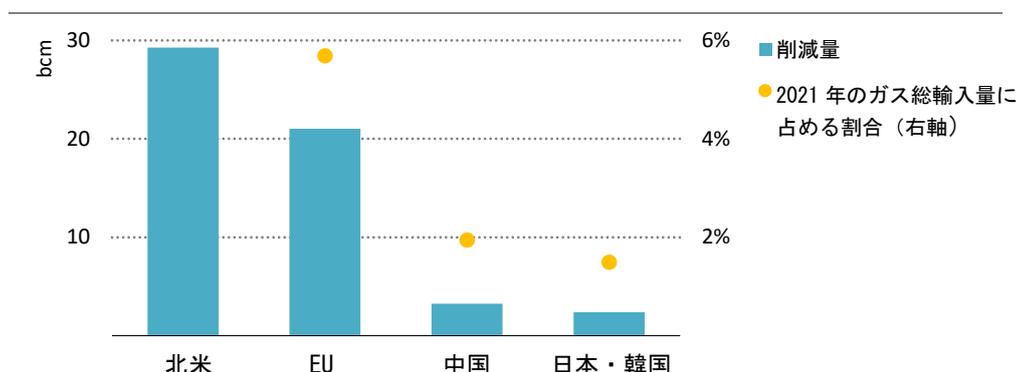
主にヒートポンプがガス、石油需要に与える影響により、APS シナリオにおいて燃料輸入への依存度はEU、日本・韓国で急激に低下する

注:暖房用電力の発電と地域暖房に用いられる化石燃料を含む。

2022年3月に発表されたEUのロシア産天然ガスへの依存度を下げるためのIEAの10項目計画では、ガス需要を削減し、潜在的な不足を緩和する対策が明らかにされている（IEA、2022a）。暖房用ガス消費の抑制は、本計画と、IEAが欧州委員会と協力して策定した「Playing My Part」イニシアチブの中心をなすものである（IEA、2022b）。ヒートポンプの導入を加速し、ガスボイラの設置を段階的に廃止する行動を即時に実施することが重要である。APSシナリオでは、ヒートポンプの設置を増やすことにより、今日と比較して2030年までに建築セクターのガス需要が世界で80 bcm減少し、そのうち21 bcmはEUにおけるものである（図2.2）。

ヒートポンプへの転換には、他にもエネルギー安全保障上の懸念がある。暖房用の電気の使用量が増えると、停電の影響にさらされる可能性が高くなり、寒冷地では公衆衛生上の深刻な懸念が生じる可能性がある。さらに、停電は暖房需要が最も高い悪天候時に発生することが多い。とは言え、暖房需要がある多くの国では、長時間の大規模停電はまれである。持続的な暖房の供給を必要とする地域におけるバックアップ用暖房ソリューションや非常時の集合場所、さらに蓄電池や蓄熱と組み合わせた分散型エネルギーリソースの幅広い導入によって、暖房需要のピーク時配電網負荷を軽減し、前述のリスクを低減できる可能性がある。化石燃料ボイラと組み合わせたハイブリッドヒートポンプも、特に寒冷地において、建物の完全な脱炭素化は妨げられるが、停電の影響は軽減することができる。

図 2.2▶ APS シナリオにおける主要地域・国のヒートポンプ導入による建物 天然ガス需要削減量、2021-30年



IEA. CC BY 4.0.

APS シナリオにおけるヒートポンプの導入拡大によってもたらされるガス需要の削減は、輸入国、特に EU でガス輸入を削減する

## 2.3 電力系統とデマンドフレキシビリティ

電気式ヒートポンプの導入加速は、APSシナリオにおいて、特に建物における電力需要の若干の増加につながる。世界の最終エネルギー消費量全体に占める電力の割合は、2021年の20%から2030年には24%に上昇する。先進国では、22%から27%以上に急上昇する。建物と産業部門での加熱用の燃料構成に占める電力の割合は、2021年から2030年にかけて世界で倍増し、16%になる。主要な暖房地域では、これによる電力需要量の増加は2021年から2030年で約1.5%~2.5%と小さいが、ピーク需要が大幅に増加する可能性がある。これにより、電力部門への投資の大幅な増加が必要となる可能性がある。ヒートポンプを追加する世帯では、冬期のピーク需要が約3倍になる可能性がある。しかし、住宅のエネルギー効率を2段階改善すると（例：デンマークにおけるDからB）、暖房エネルギー需要は半分になり、必要なヒートポンプのサイズが小さくなり、消費者の支出を削減し、電力デマンドを3分の1減らすことができる。

これらの投資には、いくつかの形態が考えられる。

- 通常コストを負担している消費者の受電設備を更新する。多くの場合、ヒートポンプの設置には、更新受電設備の更新による容量の増加が必要である。
- 電気自動車（EV）などの他の最終用途技術とともに、ヒートポンプの幅広い普及によって負荷が大幅に増加する低電圧配電システムを更新する。
- 暖房期間中の十分なリソースを確保できるよう、発電容量やフレキシビリティ源を追加する。ヒートポンプによる需要増への対応に必要な追加的なフレキシブルな発電容量を決定するために、地域毎に固有の評価を実施することが必要である。たとえば、フランスの

送電系統運用事業者である RTE は、省エネ改修目標が達成されるシナリオにおいて、2035年までは新規の電源容量の必要性が無いことを明らかにした。ただし、建物の省エネ改修が最小限に留まる場合は、新規の電源容量が必要になることも分かった。

受電に関する投資ニーズは地域によって異なる。米国では、受電設備はすでにエアコン用のサイズになっていることが多く、通常はヒートポンプの追加に対応できる。対照的にイタリアでは、一般的な世帯が現在契約している容量はわずか3 kW であり、最大容量6 kW の単相メーターが使用されている。ヒートポンプを設置すると、ピーク需要が容易にこのレベルを超える可能性があり、各世帯がアップグレードされた接続の費用を支払うが必要になる。政策立案者はヒートポンプの設置に対する経済的な支援を決定する際は、需要家の受電設備の更新コストも考慮する必要がある。

配電系統更新の必要性も大きく異なる。フランスでは、電気抵抗加熱が一般的であるため、それに合わせて受電設備と配電系統が発展してきた。しかし、暖房が伝統的に主として化石燃料ボイラによって供給されてきたドイツなどの国では、一般に配電系統が住宅用建築物で普及している電気加熱に対応するように構築されていない。電気加熱が現在制限されている地域では、EVの急速な採用を伴うヒートポンプの導入によってピーク需要が大幅に増加し、配電系統を更新する必要性が高まる可能性がある。

蓄電池と同時に分散型再生可能エネルギーを導入するなど、配電系統管理に対する他のアプローチによって、電線更新の必要性を低減できる。APSシナリオにおいて、世界の分散型太陽光発電の容量は、2021年から2030年にかけて3倍以上に増加する。系統を物理的に強化する必要性についても、デマンドサイドの負荷管理によって低減できる（ボックス2.1）。低圧配電線のデジタル化は、混雑の管理や電力系統アセットの監視と遠隔制御の強化に貢献し、系統の必要な部分のみを対象とすることで更新のコストを削減できる。特に、古い変圧器を電圧調整技術が組み込まれた新しい変圧器に交換すると、コストを下げることができる。

### ボックス 2.1 ▶ 系統安定性のためのヒートポンプのデマンドサイドフレキシビリティーの利用

ドイツのヒートポンプメーカーであるフィースマンとドイツの送電系統運用事業者（TSO）であるTenneTおよび50Hertzは、再生可能エネルギー発電の変動に対処し、系統安定性を確保する際に温水ヒートポンプによって提供することが可能なデマンドサイドフレキシビリティーの価値を実証するパイロットプロジェクトを最近開始した。フィースマンは、この計画への参加に同意した顧客のヒートポンプのフレキシビリティーを集約し、その結果得られるエネルギー量をEquigy Crowd Balancing Platform（小規模負荷のアグリゲーターが電力需給調整市場に参加できるようにするデータ交換）を介して系統運用者に提供し、ピーク期間での負荷を低減する。TSOが特定の系統ノードに対するオファーを受諾した場合、集約されたヒートポンプユニットの熱出力、ひいては電力使用量は、特定の期間にユニットを停止または出力低下させることによって削減される。室内温度を保つために、熱は温水バッファータンクに蓄えられる。温水暖房設備と建物自体の熱慣性（特に十分に断熱されている場合）によっても、通常は数時間かかるヒートポンプのスイッチを切ることによる温度への影響が抑制される。顧客には、負荷低減に対す

る貢献度に応じて報酬が支払われる。

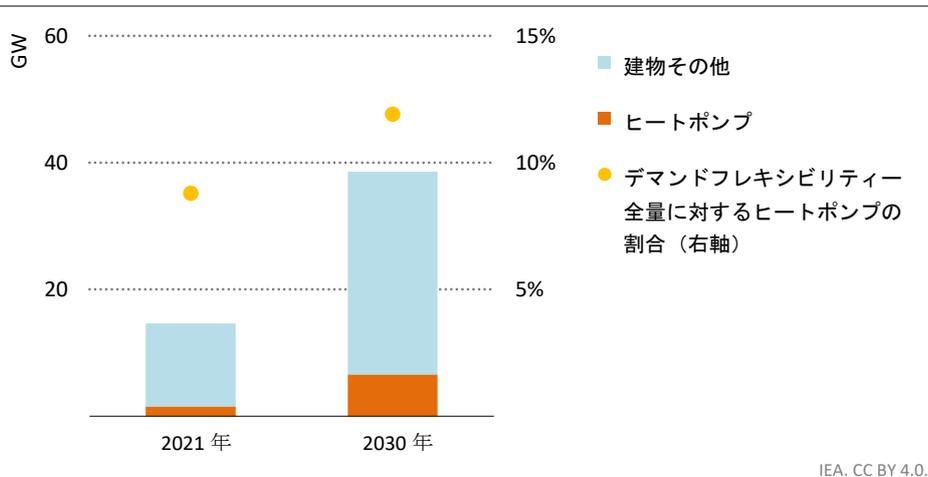
パイロットプロジェクトの目標は、100台のヒートポンプを含めることである。将来のプロジェクトでは、有意な系統安定化サービスを提供するために、ユニットの集団をさらに大きくすることが必要である。さらに、より広範な採用に向けては、複雑な認証基準や需給調整・アンシラリーサービス市場における住宅消費者のデマンドサイドフレキシビリティに対する報酬の不足などの障壁を取り除く必要がある。

暖房のための電力使用量の増加は、電力需要の時間的および季節的変動の原因となり、特に寒波の際には電力需要がより顕著に急増する可能性がある。しかし、冬季のピーク期間中に電力需要全体への影響を軽減するようヒートポンプを柔軟に使用できる可能性は大いにある。APSシナリオでは、ヒートポンプは2030年冬季にEU全体の住宅電力消費量の約15%を占め、暖房・給湯にヒートポンプを使用する世帯の電力需要の最大70%を占めることになる。ヒートポンプは、2021年から2030年の間にEUのデマンドサイドフレキシビリティを3倍以上にする上で重要な役割を果たし、フレキシビリティリソース全体に占める割合は2021年の9%から2030年には約12%に急増する（図2.3）。太陽光発電を備えた建物には、昼間の自家消費を最大化するために負荷をシフトするという追加の利点がある。

ヒートポンプが電力系統のフレキシビリティに貢献する可能性を引き出すには、デジタル技術の採用が必要である。ヒートポンプのフレキシビリティを利用するためには、遠隔でスイッチのオン・オフができるように自動化が必要である。このフレキシビリティは、通信および制御機能をユニットに内蔵している必要がある。最低エネルギー性能基準によって機器に基本レベルの制御性を有することを課すことが考えられる。今日販売されているヒートポンプの大半は、すでに制御機器を接続できるため、需要対応機能が可能になっている。しかし、多くのメーカーが独自のシステムを使用しているため、相互運用性が制約される可能性がある。機器の監視だけでなく遠隔操作が可能となるようヒートポンプがデータを送受信できることをメーカーに義務付ける規制は、スマート制御の普及に向けた第一歩となる可能性がある。また、建物は、フレキシビリティが必要なときに系統から信号を受け取り、エネルギー消費をうまく管理するために、より適切に接続され、より自動化されることが必要である（IEA、2021b）。

また、電気料金の引き下げか系統運用者からの別途支払いによってヒートポンプの所有者が系統にフレキシビリティサービスを提供することを奨励する市場ベースのインセンティブも必要である。市場設計の変更によって、ヒートポンプの持つフレキシビリティがアグリゲーターやサプライヤーによって適切に評価され、その価値がより低額な料金という形で消費者に確実に還元することが可能である（IEA、2021a）。政策立案者は、消費者のプライバシーと選択の保護を確保しつつ、制御性を可能にするエネルギープロバイダーモデルを促進することができる。

図 2.3 ▶ APS シナリオにおける EU のデマンドサイドフレキシビリティ全量に対する、フレキシビリティ最大需要時のヒートポンプと他の建物電力用途の割合



IEA. CC BY 4.0.

ヒートポンプは APS シナリオにおいて主要なデマンドサイドフレキシビリティリソースとして出現し、建物と暖房設備の熱慣性とともピーク時の電力使用量を削減する

注:建物その他には、冷凍と電化製品を含む。

エンドユーザーの熱的快適性に影響を与えることなく、電力システムのフレキシビリティに貢献する温水ヒートポンプの可能性を最大化するためには、温水の貯蔵またはヒートポンプ停止中の非電氣的な加熱手段の設置、暖房設備の改善、さらに建物の断熱の改修も必要である。十分に断熱されている建物では、数時間にわたってヒートポンプの電源を切っても室内温度への影響はほとんどない。建物外皮の省エネがシステムのフレキシビリティにもたらすメリットは、IEA 「建物とコミュニティにおけるエネルギー (EBC)」 プログラムの取り組みによって実証されている (IEA、2019)。しかし、ほとんどの建物は、先進国であっても断熱性が低く、ヒートポンプがデマンドサイドフレキシビリティにおいて役割を果たす可能性が限定されている。たとえば日本では、リアルタイムの天気予報を利用して屋上太陽光発電の予想発電量プロファイルを生成することでヒートポンプの使用を最適化する住宅建築物用のエア・トゥー・ウォーターヒートポンプが2022年に購入可能になった。現在のところ、ヒートポンプのフレキシビリティの活用、多くのパイロットプロジェクトがあるにもかかわらず、ニッチなソリューションにとどまっている (表2.1)。

ハイブリッドヒートポンプも、フレキシビリティを高めるための選択肢の一つである。たとえばオランダ政府は、システムの混雑の管理を支援するために、ハイブリッドヒートポンプを新築建物のデフォルトオプションとすることを提案している (オランダ企業局、2022)。

表 2.1 ▶ ヒートポンプのフレキシビリティーの可能性を活用するパイロットプロジェクト

国	プロジェクト名	説明
スイス	Generalized Operational FLEXibility for Integrating Renewables in the Distribution Grid	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 0~5%ピーク需要低減</li> <li>● 5.5%の自家消費増加</li> </ul>
デンマーク	EcoGrid EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ヒートポンプを使用する270世帯最大167 kWのピーク低減を実現(5分間隔)</li> </ul>
英国	Crowdflex	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 使用時間帯別料金制度の適用で電気自動車を持たない世帯の毎日の夕方ピークを平均12%低減</li> </ul>
オランダ	Power-to-Heat for Renewable Energy Integration: Technologies, Modeling Approaches, and Flexibility Potentials	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1時間のフレキシビリティーイベント中に、ヒートポンプが2.5 kWの柔軟性容量を提供</li> </ul>

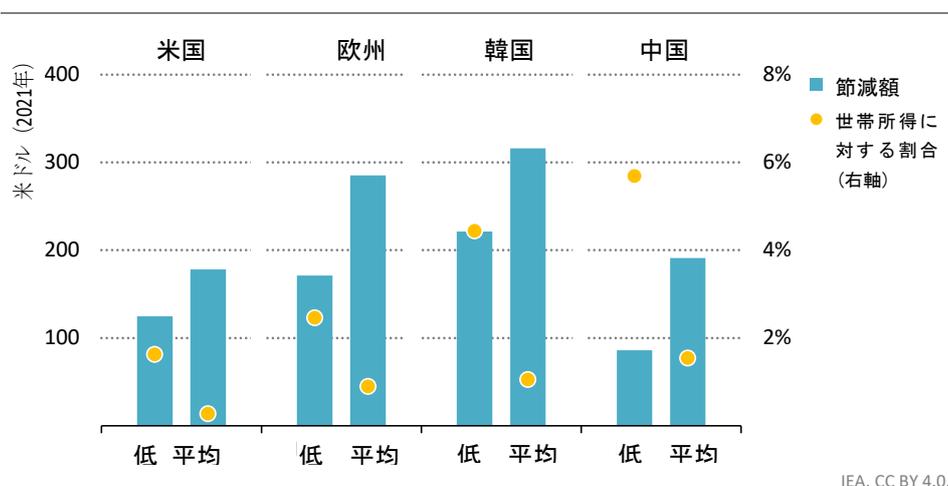
## 2.4 エネルギーの手頃な価格

エネルギー価格の上昇は、インフレ圧力を高める主な原因であり、世界の多くの地域で世帯の購買力と生活水準を押し下げている。各世帯は2021年に平均で所得の約7%をエネルギーに費やし、そのうち約2分の1は家の中で消費するエネルギーである。暖房地域では、熱が世帯の光熱費の大半を占めることが多い。これは、エネルギーサービスの提供が少ない一方で、一般に、所得のかなり高い割合をエネルギーに支払っている貧困世帯の場合はさらに高くなる可能性がある。

世界中の世帯の光熱費が急上昇し、場合によっては2倍になっている。世界中の各国政府は、世帯の光熱費の上限（フランス、英国など）、直接現金給付（ドイツなど）、ガス需要確保のための長期供給契約（中国、韓国など）などの支援策を導入することで価格高騰に対応している。2022年9月時点のエネルギー価格の高騰から消費者と企業を保護するために、世界中の各国政府は合計で約5,500億米ドルを割り当てており、本レポートの発行の時点でさらに多くのことが検討されている。

ヒートポンプに転換することによるコスト節減の可能性にもかかわらず、多くの消費者は、特に現在の危機の間は、多額の初期設置費用のために既存の暖房設備を経済的な理由で交換することができない。このコストを削減することは、ヒートポンプの導入を拡大するための鍵となる（第3章参照）。貧困世帯はこの費用を捻出できないため、暖房設備の交換が必要な場合に最も安価な交換オプションを選択する可能性が最も高く、高価なガス暖房に固定されるリスクがある。さらに、クリーンエネルギーへの転換が進むにつれてガスネットワークへの投資がますます回収される場合、ガス暖房のコストは時間とともに上昇する可能性がある。政府によっては、これらの障壁に対処するために、低所得世帯のために省エネ改修やヒートポンプに対する絞った補助金を提供している。現在、欧州を中心に合計12カ国がこのような政策を実施し、世界の暖房需要の約3分の1がカバーされている。

図 2.4 ▶ 主要地域 / 国においてガスボイラからヒートポンプに転換した世帯の光熱費の節減額、2021年



ガスボイラからヒートポンプに転換した世帯は光熱費の大幅な節約を享受し、総所得に占める割合では貧困世帯で節約が最大である

注:低 = 低所得世帯、平均 = 平均所得世帯。節減額は運転コストに基づき、初期コストは含まれない。この分析は、地域 / 国全体の平均的な電力およびガス価格と各地域 / 国の代表的な都市（デトロイト、ストックホルム、ソウル、北京）における暖房および温水に対する平均的な世帯の需要に基づいている。

貧困世帯は、ヒートポンプへの転換による節減額が裕福な世帯よりも少なくなり、投資回収期間が長くなる可能性がある。これは、貧困世帯が一般的に小さな家に住み、コストを押さえるために暖房を使用する頻度が少ないためである。しかし、貧困世帯は一般に効率の低い住宅に住んでいるため、節約の可能性が高くなり、投資回収期間が短くなる。低所得者向け住宅は一般に、平均的な住宅ストックよりも省エネ性が低い。いずれにせよ、貧困世帯がヒートポンプの設置やヒートポンプへの転換の恩恵を受けられるようになるためには、前払いの経済的支援が必要である。

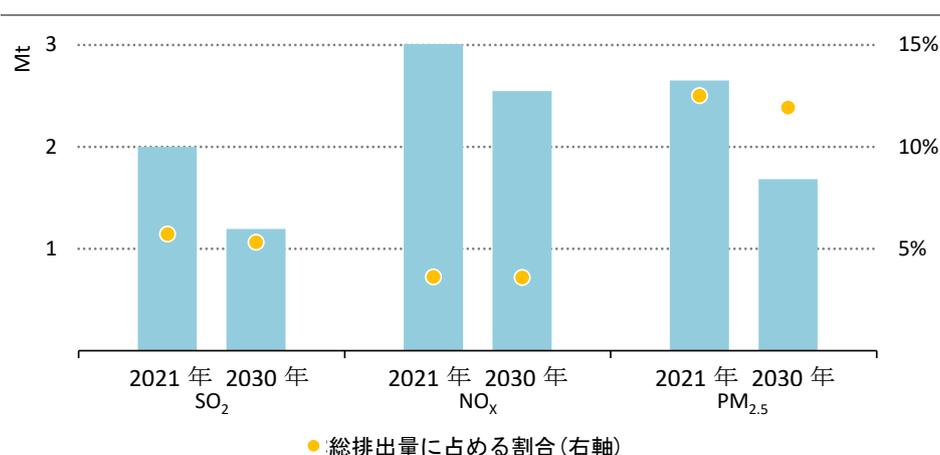
電気料金や燃料税は、消費者によるヒートポンプの設置を妨げられることがないように、慎重に設計する必要がある（第3章参照）。今日の一部の電気料金は、平均よりも多くの電力を消費する世帯に対してより高い料金を請求したり料金を上乗せしたりすることで、省エネルギーを促進するように設計されている。しかし、これは電気式ヒートポンプに転換した世帯に不利益をもたらす可能性がある。一部の電力会社は、電気加熱や電気自動車を使用している消費者に対して特別な従量制の電気料金または特別料金を提供し、これらの購入意欲を削がないようにしている。使用時間帯別料金は、暖房を最適化するスマートコントロールと組み合わせた場合、定額料金と比較してヒートポンプの運転コストを削減することに役立つ可能性がある。また、配電システムの信頼性とフレキシビリティの向上にも貢献する。エネルギー税と炭素価格制度は両方とも、化石燃料の使用よりも CO2 排出係数の低い電力が不利にならないように設計することが必要である。

## 2.5 公衆衛生と環境

### 2.5.1 大気汚染

ヒートポンプ技術の普及は、大気環境の改善や公衆衛生の向上に貢献する可能性がある。石炭、石油およびバイオマスによって行われる建物の暖房・給湯は、住宅内と外気の汚染の原因となる。2021年には、汚染された空気を吸うことで毎日19,000人以上が通常より早く死亡し、その大半は新興国・発展途上国で発生している（IEA、2022c）。

図 2.5▶ APS シナリオにおける建物内の暖房・給湯のための燃料燃焼による主要大気汚染物質の排出量



IEA. CC BY 4.0.

APS シナリオにおける暖房・給湯の電化は、2021年から2030年の間の建物からのすべての主要大気汚染物質の排出量の大幅削減の根拠になっている

出典:IIASA (2022) および IEA。

微小粒子状物質大気汚染（PM<sub>2.5</sub>）の排出の約8分の1は、建物内の暖房・給湯のための燃焼活動、主に暖房用ストーブやボイラでの薪や石炭の使用によって引き起こされている。排出量全体への寄与は小さいものの、建物内の熱サービスも、主にガスボイラからの窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）の排出や、暖房用のストーブやボイラで使用される石炭やボイラで使用される石油からの二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）の排出の原因になっている。APS シナリオでは、建物内の暖房・給湯からのすべての主要大気汚染物質の排出量は主にヒートポンプの導入によって2021年から2030年の間に15～40%減少する（図 2.5）。

また、ヒートポンプへの大規模な転換は、化石燃料の燃焼に付随する他のリスクも防ぐことができる。たとえば、整備不良の暖房用ストーブやガスボイラは一酸化炭素を排出し、毎年約4万人が死亡していると推定され、爆発や火災のリスクに関連する危険もある（IHME、2022）。

### 2.5.2 F ガス

ヒートポンプの環境問題には、潜在的な難点がある。他の暖房技術に対するヒートポンプの主な魅力は、特にヒートポンプを作動させるために必要な電力がCO<sub>2</sub>排出係数の低いエネルギー

源から生成した場合に、温室効果ガスの排出量を削減する可能性である。しかし、ヒートポンプの普及に伴い、ヒートポンプユニット内で冷媒として使用されている F ガスが排出されるリスクがある。強力な温室効果ガスである F ガスの排出は、暖房用の化石燃料から転換することで得られる気候上のメリットの一部を相殺する恐れがある。

ヒートポンプ、冷蔵庫およびその他の冷却装置で今日使用されている F ガスの主な種類は HFC であり、世界の F ガス生産量の 85%以上を占めている (UNEP、2017)。1987 年に採択された成層圏オゾン層を破壊する化学物質を段階的に廃止する画期的な多国間環境協定であるモントリオール議定書の下、ほとんどが段階的に廃止されているオゾン層破壊物質の代替物質として、F ガスは広く採用されていた。F ガスは世界の温室効果ガス排出量の約 2.4%を占めている (IPCC、2022)。ヒートポンプやエアコンの普及が進み、その使用を抑制するための対策がとられなければ、今後数年間に排出量は急速に増加する可能性がある。世界気温の 1.5°C 上昇に適合する気候変動に関する政府間パネル (IPCC) のシナリオは、2021 年から 2030 年の間に F ガスの排出を約 75%削減することを意味している。大気中での寿命が短く地球温暖化係数 (GWP)<sup>1</sup>が高いため、F ガスの排出を直ちに削減すれば、世界の気温上昇に迅速に影響を与え、技術のロックインを回避することができる。

2016年に、モントリオール議定書のキガリ改正は、Fガス排出による気候への影響に取り組むため、Fガスの生産と消費を80~85%段階的に削減し、先進国では2036年までに、発展途上国・新興国では2047年までに達成するよう求めた。2022年10月の時点で、世界の温室効果ガス排出量の80%以上を占める締約国が改正に署名している。EUは、2022年4月に欧州委員会が改定案を提示したFガス規制を主に使用した段階的削減パスを実施している。すべての一体型および小型スプリット型ヒートポンプと空調設備システムに対するGWPが150を超える冷媒の禁止を提案している。

<sup>1</sup>GWPにより、さまざまな温室効果ガスを気候への影響の観点で比較することが可能になる。これは、ある温室効果ガスによって吸収される熱量として定義され、同じ質量のCO<sub>2</sub>によって吸収される熱量の倍数として表される。大気中でのガスの寿命の違いを説明するために、最も一般的な測定基準は100年GWPであり、排出時から100年間にわたって吸収される熱量に相当する。特に断りのない限り、本レポートでは100年GWPを使用している。

表 2.2 ▶ 住宅用 ヒートポンプの一般的な冷媒と代替品

分類	冷媒	GWP	可燃性	TFA 生産
従来型 HFC	R-410a R-134a	2 088 1 430	不燃性 (A1)	0% 7-20%
炭化水素 (HC)	R-290 (プロパン) R-1270 (プロペン) R-600 (ブタン) R-691 (ペンタン)	≤3	強燃性 (A3)	0%
低 GWP HFC	R-32	675	微燃性 (A2L)	0%
HFC/HFO 混合	R-454B	490	微燃性 (A2L)	30%
HFO	R-1234yf R-1234ze	4 <1	微燃性 (A2L)	100% <10%
CO <sub>2</sub>	R-744 (二酸化炭素)	1	不燃性 (A1)	0%

注:GWP 値は、IPCC 第 4 次評価報告書 (AR4) からのものである。30%以上の不確実性が表明されている。政策における閾値は、主にその反復に基づいている。今のところ、一部の値は IPCC AR5 および AR6 において更新されている。TFA 生産は、排出された冷媒が大気中でトリフルオロ酢酸 (TFA) に分解される比率であり、寿命が非常に長く、環境と人間の健康に有害である。比率が高いほど有害である。

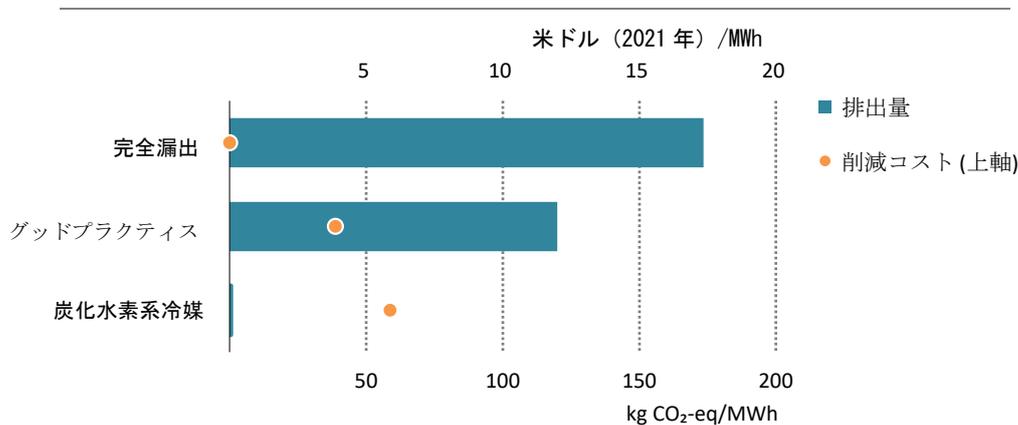
出典:UBA (2021)。

F ガスの排出は、ガスの生産時、(ヒートポンプ内などの) 冷凍サイクルの製造時および製品の使用中や廃却時の漏えい時に発生する。ヒートポンプからの排出は、定期的な保守と必要に応じた適切な廃棄およびリサイクルによって削減することができる (ダイキン、2022)。しかし、旧式の装置を取り扱うための効果的なシステムは、世界的に整備されていない可能性がある。現在の現場でのベストプラクティスでは、世界中のヒートポンプからの F ガス排出量を 3 分の 1 削減することができるが、この推定値は地域やヒートポンプの機種によって大きく変化する。さらに、GWP の低い F ガスや、GWP は大幅に低いものの技術的に複雑であったり、より高価であったりする炭化水素、HFO または CO<sub>2</sub> などの代替冷媒も使用できる (表 2.2)。たとえば、プロパンは可燃性が高いため、EU の建築規制では冷媒としての使用が制限されている。冷媒サイクルがすべて屋外に配置されるモノブロック温水ユニットの設置でこの問題は回避できるが、スプリットシステムもヒートポンプを大多数の建物で使用可能にする重要な選択肢の 1 つである。改訂された国際電気標準会議 (IEC) 規格<sup>2</sup>は 2022 年 5 月に発表され、EU での正式な整合化の過程にあるが、EU 法に従って各メーカーによってすでに採用することができる。システムが追加の安全要求事項を満たす場合、室内冷媒サイクルを備えた小規模なスプリットシステムに十分な可燃性冷媒を充填することができる。大規模なシステムの場合、提案されている F ガス規制では、GWP は 750 未満の HFC 冷媒を依然として認めている。可燃性冷媒の設置および廃棄時にも安全な取り扱いを確保し、世界中の事故を最小限に抑えるために、国連環境計画 (UNEP) は、Refrigerant Driving License (冷媒取扱免許) プログラムを立ち上げた。このプログラムは、先進国と新興国・発展途上国の間での冷媒の安全な取り扱いに関するベストプラクティスの知識交換と訓練を促進するものである (UNEP、2018)。

<sup>2</sup>電気式ヒートポンプ、空調機・除湿機への特定要求事項に関する IEC-60335-2-40 (IEC、2022)。

冷媒負荷とそれらに付随する環境および安全上のリスクを低減するには、技術革新が必要である。たとえば、ドイツの研究プロジェクトでは、4.7 の COP で容量 1kW あたりわずか 10g のプロパン冷媒を使用するヒートポンプの試作品試験に成功したが、現在のシステムでは通常、その 6 倍の量が使用されている (Fraunhofer ISE、2022)。一部のメーカーは、HFC R-32 などの GWP レベルが低い代替 HFC も開発している。R-1234yf および R-1234ze などの HFO は可燃性が低く、オゾン層を破壊せず、GWP が大幅に低い、環境と人間の健康に有害であるおそれがある。<sup>3</sup> CO2 冷媒は可燃性ではなく、毒性が非常に低く、GWP は 1 である (Patenaude、2015)。しかし、それらを使用するには、より高い運転圧力と強力な圧縮機が必要であり、ヒートポンプの製造と使用においてエネルギーと材料をより多く必要とする。その物理的特性から、CO2 は給湯器や特定の産業・商業用途など、温度差の大きい特定のユースケースで効率を高めることができる。

図 2.6 ▶ 年間有効熱出力 1 MWh あたりのヒートポンプ冷媒による生涯温室効果ガス排出量および冷媒オプション別の削減コスト



EA. CC BY 4.0.

専門的な保守、リサイクルおよび代替冷媒の使用により、冷媒の漏えいによる排出量を大幅に削減することができる

注: kg CO<sub>2</sub>-eq= CO<sub>2</sub>等価キログラム数 GWP が 2,000 の基準冷媒ミックス。生涯温室効果ガス排出量は、運転中および廃棄時の冷媒漏えいによる温室効果ガス排出量を含む。

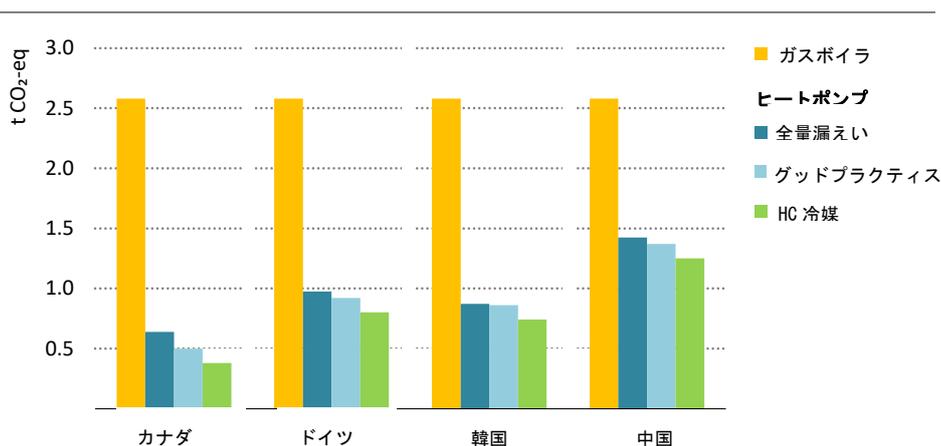
出典:Purohit and Höglund-Isaksson (2017) に基づく IEA の分析。

<sup>3</sup> HFOは、大気中でTFAに変換され、寿命が非常に長く、環境と人間の健康に有害であることから、ペルフルオロアルキルおよびポリフルオロアルキル物質 (PFAS) と見なされている。PFASに関する将来の規制により、EUでの使用が禁止される可能性がある (欧州化学物質庁、2022)。

ヒートポンプの冷媒による温室効果ガス排出削減で最も可能性が高いのは、HFCから炭化水素への置き換えであるが、可燃性の課題が追加される（図2.6）。HFC R-134aを使用した平均的な住宅用ヒートポンプの生涯CO<sub>2</sub>等価排出量の6~40%は冷媒漏えいに関連しており、電源構成、ヒートポンプ性能、および寿命末期の冷媒回収の有無によって変化する。この割合は、電力生産の脱炭素化が進むにつれて増大することになる。

今日のフロン系冷媒と全量漏えいを前提とすると、排出量の多い電力で運転した場合でもヒートポンプは高効率ガスボイラと比べて温室効果ガスの排出量を依然として 20%以上削減する。世界のエネルギー消費量の 70%を占める地域では、排出量削減は 45%が超え、よりクリーンな電源構成の国では 80%に到達する。これらの値は、代替冷媒により、それぞれ 10%ポイント改善することができる。大きな変動は主に、冷媒の選択ではなく、発電の排出原単位の違いによるものである。図 2.7 は、気候条件と電力の CO<sub>2</sub> 排出原単位に基づく 4 カ国の排出削減を図解している。

図 2.7 ▶ 冷媒オプション別、ガスボイラとヒートポンプの年間有効熱出力 1MWh あたりの 生涯温室効果ガス総排出量



IEA. CC BY 4.0.

ヒートポンプに転換すると、気候条件や電力構成に関係なく排出量が大幅に減少する。F ガス排出量に対処すると、さらに排出量を削減することができる。

注: CO<sub>2</sub> - eq = CO<sub>2</sub> 等価トン数、HC = 炭化水素。ヒートポンプの排出量の節約は、効率が 90%で、F ガス排出量が WP = 2,000 の冷媒ミックスを使用したガスボイラと比較されている。障害温室効果ガス総排出量は、運転と廃棄における電力使用と冷媒の漏えいによる温室効果ガス排出量を含む。電力の CO<sub>2</sub> 排出係数:カナダ (119 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh)、ドイツ (352 g/kWh)、日本 (416 g/kWh)、中国 (549 g/kWh)。カナダの気候はオンタリオ州、日本は中部、中国は中国北部に基づいている。

出典:Purohit and Höglund-Isaksson (2017)、Purohit 他 (2022a) および Kowalski と Szałański (2019) に基づく IEA の分析。

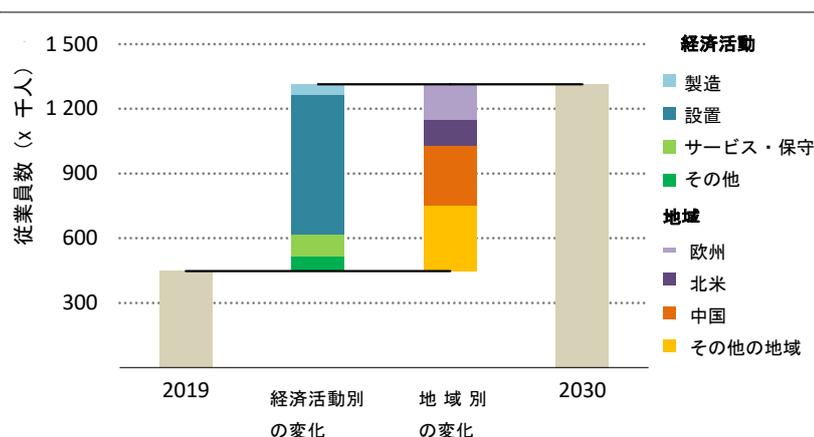
フロン系冷媒が現在と同じように使用され続けた場合、NZEシナリオでは2030年までに、世界のヒートポンプストックは約740 MtのCO<sub>2</sub>に相当する温室効果ガスを蓄えることになる。これは、オーストラリアの年間温室効果ガス総排出量の約2倍である。今日の保守とリサイクルのベストプラクティスが世界中で適用されたとしても、これらの排出量の3分の1しか阻止されず、排出を防ぐことはできず、世界の気温上昇を1.5°Cに抑えることが困難になる。

非 HFC 冷媒への切り替えは技術的に可能であるが、技術的影響とコストの影響のために、リスクによってヒートポンプの導入は妨げられる。重要なのは、冷媒を既存のユニットで単純に入れ替えられないことである。もはや HFC に大きく依存していないヒートポンプメーカーもあるが、生産プロセスを変更し、別の部品や材料を使用することが必要になるメーカーもある。製造や設置工事に携わる職人は、可燃物に関する追加の訓練を必要とする場合がある。そのため、安定的かつ意欲的な規制の枠組みが投資の確実性を高めるために重要である。短期的に、政策行動の重要な焦点は、古い機器から従来の高 GWP 冷媒が大気中に排出されるのを防ぐために、漏洩防止および強制的なリサイクルの体制を構築することでなければならない。F ガスの漏洩は機器の耐用年数の間と最後に発生するため、新しい機器にこれらの冷媒を使い続けることは、2050 年以降も F ガスが依然として排出されることを意味する (Purohit 他、2022b)。政策立案者は、HFC の段階的な廃止を加速するための施策が、HFC 漏えいの気候への悪影響をはるかに上回る気候上のメリットを持ったヒートポンプの普及強化を妨げないようにすることが必要である。これは、効率やその他の技術的品質を大きく損なうことなく、GWP の低い代替品が利用可能な機器に対して HFC の使用を最小限に抑えることを意味する。

## 2.6 雇用創出

ヒートポンプの導入が急速に拡大すると、ヒートポンプの製造や設置、さらに組み立てに必要なさまざまな材料や部品の製造に携わる労働力の相応の拡大が必要となる。これは、職人を採用および訓練するための大規模な推進を意味する。2019年には、世界で約45万人がヒートポンプの製造、計画および設置、卸売、サービスおよび保守に直接携わっている (図 2)。設置はヒートポンプのバリューチェーンの中で最も労働集約的な部分であり、21万人が雇用されていると推定される。中国は、特に南部で、多くの建築物ストックが夏季の冷房と冬季の暖房の両方でヒートポンプに頼っているため、設置業者が最も多い国である。エア・トゥー・ウォーターヒートポンプと地中熱ヒートポンプは一般に設置工事あたり多くの労働時間を必要とするため、セクターでの雇用者数が増え、市場の拡大に伴って新たな職人を採用する必要性が増大する。ヒートポンプの直接雇用は、製造、サービス、保守を合わせて約半数を占めている。設置業者と同様に、中国のヒートポンプ製造労働力は約 55,000 人と最大で、世界のヒートポンプ製造における40%のシェアに一致し、ヒートポンプの約4分の1が生産されている米国が中国が続いている。

図 2.8 ▶ APS シナリオにおける活動別、地域・国別ヒートポンプ雇用の変化、2019-2030 年



IEA. CC BY 4.0.

ヒートポンプは主に設置と保守で2030年までに80万人の新規雇用を創出し、大規模な採用と訓練の推進が求められる

注:その他には、卸売と輸送を含む。

ヒートポンプ供給における世界の雇用は、APSシナリオにおいて2030年までに約3倍の130万人以上に拡大する。メーカーと設置業者がREPowerEUイニシアチブとその他の国のヒートポンプ導入計画における意欲的な目標に対応するため、欧州の労働力は約3倍になる。予測される世界のヒートポンプ労働力の成長と同時に、より高効率な建物の建設や建物外皮の断熱改修を行う職人が約70万人増加すると考えられる。一体型ヒートポンプシステムは、家庭用太陽光発電パネルや蓄電池の設置に関わる雇用の創出も促進する。

APSシナリオにおけるヒートポンプ関連の雇用の成長は、設置に集中している。必要とされるヒートポンプ設置業者の数は、APSシナリオにおいて85万人に上昇し、約65万人の増加となる。需要が最も成長しているのは、中国とその他のアジア太平洋地域である。欧州における設置業者数は、主にEUと英国での急速な普及により3倍に増加する。さらに、2030年までに世界中で設置される追加のヒートポンプを保守およびサービスするために、約17万人の職人の増員が必要とされる。これらの職人をすべて採用して訓練することは、相当な作業になる。現在の暖房に関連する職種の労働市場が逼迫していることを鑑みると、これらの職種をすべて充足できるかどうかについて、産業界ではすでに懸念がある（第3章参照）。

ヒートポンプ製造における雇用数は、高効率な新工場の稼働に伴う労働生産性の向上により、世界全体で約40%増と、より緩やかに増加する。革新的なセンサー制御とプログラミングは、製造プロセスを合理化し、組み立てラインの効率を向上させることができる。一方、さまざまなタイプのヒートポンプに対応するモジュール設計と標準化された部品と3Dプリント技術により、製造時間と労働投入量を削減することができる（RHCおよびEHPA、2021）。ヒートポンプ製造関係の雇用は、中国、北米および欧州に集中しており、これらの地域に今日の製造能力の大部分があり、主要メーカーが2030年までの期間に能力拡大に最も多くの投資が向けられている。

欧州と米国で稼働する新しい製造工場は、サプライチェーンの重要な部分をオンショア化する最近の政策の動向を反映している（第3章参照）。それらの地域では人件費が高いため、今日ほとんどのヒートポンプと部品が製造されているアジア太平洋地域よりも製造コストが大幅に高いが、自動化によって下げることが可能である。しかし、溶接などの多くの製造活動は、労働集約型であり続ける。

ヒートポンプ産業には、バリューチェーンにわたり、さまざまなスキルセットを持つさまざまなタイプの専門職が必要とされている。製造職人は、機械化された機器を操作し、他の家庭用、産業用電化製品の製造での仕事と同様に手作業を実行できることが必要である。一方、設置では、熱損失を計算し、ヒートポンプのサイズを調整し、配管工事および電気作業を実行できる高度に熟練した加熱の専門家が1人以上必要である（第3章参照）。これらのスキルの多くは、製造や暖房産業の類似職種とのスキルと互換性があるため、ガスボイラ設置業者などの化石燃料暖房産業分野の職人に代替キャリアパスがもたらされ、新規職人の採用が容易になる（地域の規制と関連する必須資格の影響あり）。

ヒートポンプの労働力を世界中で拡大するためには、特に設置業者にとって、訓練が重要である。業界団体やメーカーに提案されるものも含めて、設置訓練プログラムは、都市部だけでなく地方も対象にする必要がある。エアコン産業部門と同様に、今日のヒートポンプの製造と設置のセクターは男性が優位に立っている。ジェンダーバランスを改善するための取り組みは、訓練および採用プログラムと一体化することが可能である。また、ヒートポンプ職人は一般に、平均的な建設作業員に対して約25%高い賃金を得ているが、これは国によってかなり異なる。しかし、訓練には費用がかかるため、新規応募者を思いとどまらせてしまう可能性がある。実習生に対する適正な報酬と再訓練制度に対する公的資金提供は、このセクターに職人を引きつけるための重要な手段である。労働組合代表は、より良い労働条件、安全基準、公正な賃金を促進するのに貢献する。米国では、省エネルギーセクターの一部としてのヒートポンプでは、平均よりも高い労働組合結成率となっている（US DOE、2022）。



## 障壁と解決策

## 市場の活性化

## 要約

- ヒートポンプの普及促進は、さまざまな障壁の克服にかかっている。障壁の主なもの、設置の初期費用、消費者の採択を妨げるコスト以外の要因、製造上の制約、有資格設置業者の潜在的な不足である。これらの制約を緩和し、APS シナリオで想定する導入率を達成するためには、各国政府とヒートポンプ産業界が協調した取り組みが必要である。
- ランニングコストが低いことは、地域によっては補助金なしでも、耐用年数にわたってコスト競争力を発揮できることを意味するが、ヒートポンプの購入と設置にかかる初期費用が他の暖房設備に比べて高いことは、多くの消費者を思いとどらせる可能性がある。現在、政策的支援によって Air-to-Air ヒートポンプの設置費用はほとんどの主要な暖房市場でガスボイラと同等であるが、Air-to-Water ヒートポンプの設置費用は依然として 2~4 倍にもなる。30 カ国以上で経済的な支援が行われており、その多くで低所得世帯（ポーランドなど）や高効率モデル（カナダなど）に対して追加的な支援が提供されている。エネルギー税制を改革し、家庭の暖房用の燃料と電力に公平に CO2 ペナルティを課すことによって、ランニングコストを下げ、ヒートポンプを経済的に魅力のあるものにするのが可能である。
- 複雑な認可プロセス、情報の不足、ビルオーナーとテナントとで投資者と受益者が分かれてしまうこと（スプリット・インセンティブ問題）などコスト以外の多くの障壁が、今日多くの国々においてヒートポンプが消費者に採用されにくい主な理由となっている。いくつかの国では、許認可手続きを簡素化し（チェコなど）、消費者のための「ワンストップショップ」を設置する（アイルランドなど）対策が講じられているほか、スプリット・インセンティブ問題に対処するための新たなビジネスモデルが奨励されており、特に北米や英国、ドイツで顕著であるが、いずれの国においてもより強力な取り組みが必要とされている。
- 大手メーカー各社は最近、主に欧州において、ヒートポンプの生産能力拡大や関連する取り組みに 40 億ユーロ以上を投資する計画を発表した。しかし、特に半導体や銅に影響を及ぼすサプライチェーンのボトルネックが製造コストを押し上げ、ヒートポンプの生産能力拡大が阻まれる恐れがある。米国をはじめとする数カ国は、国内の製造能力を増強するためのインセンティブで対応している。さらなる投資を促すためには、サプライチェーンを強化するための的を絞った措置とともに、長期的な政策の一貫性と規制の確実性が必要である。
- 多くの主要な暖房市場で既に問題となっている有資格設置業者の不足は、ヒートポンプの導入を阻害する危険性がある。APS シナリオでは、フルタイムの設置業者の需要が 2030 年に 4 倍の 85 万人を超える。同様の技術を持つ配管工や電気技師の既存の認定資格にヒートポンプを組み込むことで、訓練の要求事項を減らすことができるだろう。欧州全域で利用されているような経済的なインセンティブも利用して新しい職人を専門的な訓練プログラムに引き付けることも可能である。

### 3.1 はじめに

APS シナリオで想定する程度までヒートポンプの導入を加速させることは、多くの障壁を克服することにかかっており、それらには世界共通のものもあれば、特定の国や地域に固有のものもある。本章では、需要側（顧客によるヒートポンプの採用を妨げるコストその他の市場障壁）と供給側（製造の拡大や熟練設置業者数に関する現実的な制約）の両面で、建物におけるヒートポンプの主な障壁に焦点を当てる。これらの障壁に対処するための主要な政策オプションを表 3.1 にまとめ、本章の残りの部分で詳細に述べる。

ヒートポンプの製造に必要な原材料、機器、部品の供給に対する潜在的な制約など、ヒートポンプの組み立てと設置よりも上流にあるサプライチェーンの障壁については、2023 年 1 月に発表予定の IEA 報告書 *Energy Technology Perspectives 2023* で詳細に取り上げる。

表 3.1 ▶ ヒートポンプの導入加速の主な障壁と対応する政策の概要

障壁	政策
需要側	<p><u>初期費用:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 助成金</li> <li>● 低金利融資</li> <li>● 税金還付</li> <li>● グリーンローン</li> <li>● 代替ビジネスモデル</li> </ul>
コスト障壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中・大規模プロジェクトのリスク軽減計画</li> </ul> <p><u>運転コスト:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 電力と化石燃料の課税のリバランスと補償をとまなう CO<sub>2</sub> 課税</li> <li>● 電力料金改革</li> <li>● 建物の断熱や熱分配システムの更新に対する支援</li> <li>● 設置後の品質および制御の設定</li> <li>● ユーザー教育</li> </ul>
消費者の採用に対する非コスト障壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 消費者向けワンストップショッププラットフォームと比較ツール</li> <li>● スプリット・インセンティブ問題に対応するための暖房の代替ビジネスモデルの促進および支援</li> <li>● 景観、騒音および建築許可の規制変更</li> <li>● 複数所有者の建物における意思決定ルールの見直し</li> <li>● 賃貸物件または引き渡し時の最低省エネルギー要件</li> <li>● 暖房技術の性能表示</li> <li>● 消費者向け情報キャンペーン</li> <li>● 暖房システム交換の決定について情報を与える独立した無料の診断</li> </ul>

表 3.1 ▶ ヒートポンプの導入加速の主な障壁と対応する政策の概要（続き）

障壁	政策
供給側	
製造上の制約とサプライチェーンの脆弱性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 政策支援と規制の長期的確実性、および産業界への意見募集を含む今後の規制変更に関する透明性</li> <li>● 各国におけるヒートポンプ導入目標およびロードマップ</li> <li>● メーカーへの経済的な支援を含む産業政策</li> <li>● ヒートポンプ部品サプライチェーンの確保</li> </ul>
熟練設置業者の不足	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 暖房、換気および空調（HVAC）、建設および電気工事業者の既存資格認定制度へのヒートポンプの統合</li> <li>● HVAC 工事業者に追加の資格認定取得を促すインセンティブ</li> <li>● メーカーが実施する訓練の強化と設置プロセスの簡素化</li> <li>● 幅広いカリキュラムによる国際的に標準化された資格認定制度</li> <li>● 信頼を構築し、業者に長期的な雇用の見通しを提供するための各国のヒートポンプ導入目標およびロードマップ</li> </ul>

状況の特異性に合わせてこれらの政策戦略を設計、調整するためには、信頼性の高いデータが必要だが、実際には不足していることが多い。特に、熱需要、産業プロセス需要、廃熱源に関するデータ（たとえば、熱マッピング技術を使用したもの）が必要である。また、建物および暖房システムストックの特性、市場の発展、設置および維持にかかる費用、設置した設備の実際の性能に関するデータも必要である。各国政府は、政策決定プロセスと投資決定の両方により良い情報を提供するためにデータ収集を改善する取り組みを強化する必要がある。

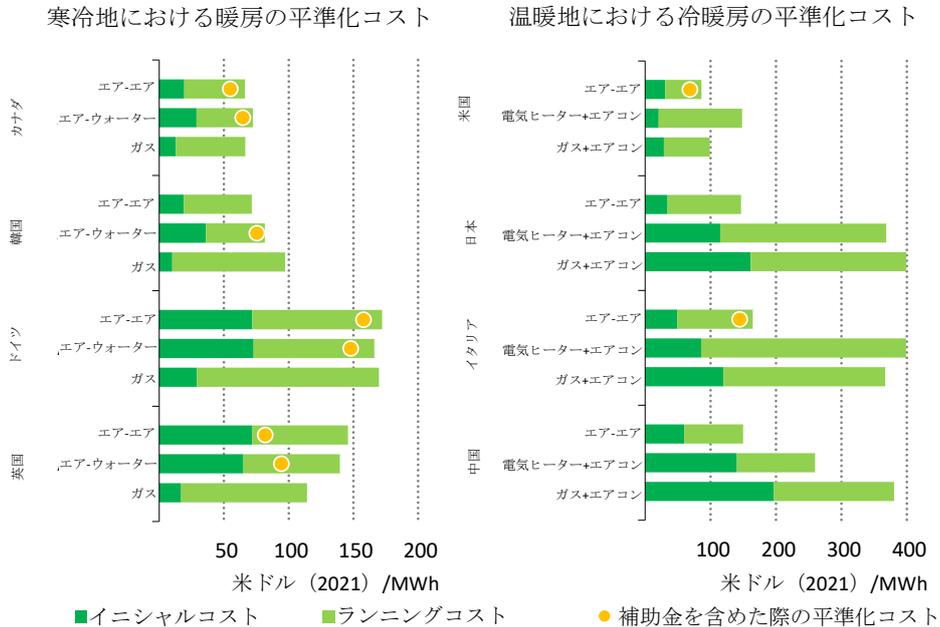
### 3.2 コスト障壁

他の暖房技術に対するヒートポンプの総合的なコスト競争力は、初期購入価格、運転および保守コスト（運転に必要な電力の価格を含む）、耐久性、助成金や税還付などの経済的インセンティブを含む要因の組み合わせによって決まる。多くの市場において、ヒートポンプは一般に、石油やガスボイラなど従来型の化石燃料を用いた暖房機器と比較すると、経済的インセンティブを考慮しても初期費用が高いが、エネルギー効率が非常に高いため、耐用年数を通じたランニングコストが低くなるというメリットがある。

今日、ヒートポンプのコスト競争力は、これらすべての要因の違いによって国毎に大きく異なっている。APS シナリオで予測される 2021 年の平均的な機器価格と燃料価格に基づく、寒冷地の平均的な家庭を暖房するための新しいヒートポンプは、たとえ補助金が無くても、大半の主要暖房市場で天然ガス潜熱回収型ボイラより安価である（図 3.1）。しかし、英国など一部の国では、ヒートポンプにコスト競争力を持たせるために補助金が必要である。耐用年数にわたるヒートポンプのコストがすでに最も安価であっても、初期費用の負担を軽減するために助成金や低金利融資などの経済的インセンティブが依然必要となる可能性がある。これは、初期費用の負担によって建物所有者がまずヒートポンプを設置することを躊躇する可能性があるためである。

図 3.1▶

主要国における住宅用ヒートポンプと代替機器の冷暖房の平準化コスト、2021年



低い運転コストにより、ヒートポンプはたとえ補助金がなくても今日の主要暖房市場においてガスボイラに対して競争力がある

注:エア-エア=エア・トゥー・エアヒートポンプ、エア-ウォーター=エア・トゥー・ウォーターヒートポンプ、ガス=ガス潜熱回収型ボイラ、電気ヒーター=電気抵抗ヒーター、AC=エアコン。冷暖房の平準化コストでは、機器と設置の資本コスト、燃料および定期保守のコストを含む運転費用を考慮して、機器の耐用年数にわたって1MWhの冷暖房を提供するための平均コストが推定される。この分析では、各代表国の1つの代表的な都市の冷房・暖房デグリーデーを想定し、その国の平均エネルギー価格を使用した。寒冷地にはトロント、ソウル、ベルリン、エディンバラを使用し、温暖地の代表的な都市にはワシントンD.C.、京都、ローマ、上海を使用している。機器の中程度の市場価格とAPSシナリオで予測する燃料コストを用いた。耐用年数は、ガスボイラは17年、エア・トゥー・エアヒートポンプは15年、エア・トゥー・ウォーターヒートポンプは18年と仮定した。電気抵抗ヒーターとエアコンには、10年の耐用年数を仮定した。

3.2.1 初期費用の削減

ヒートポンプの購入と設置にかかる初期費用を削減することは、家庭をはじめとする消費者にとってヒートポンプの魅力を高めるために重要である。機器のコストは、技術の種類(エア・トゥー・エア、エア・トゥー・ウォーター、地中熱)、定格容量、製造品質、機能や、市場の成熟度により国や地域によってもかなり異なる。後者の要因は、電気・配管工事や貯湯タンクなどの設置および付帯費用にも影響し、その必要性は各設置の具体的な構成によって大きく異なる。人件費の違いによって、さらに各国の初期費用は異なる。

ほとんどの市場において、住宅用ヒートポンプの初期費用(設置を含む)は、一般に化石燃料ボイラよりもはるかに高いが、同じ技術であっても、費用の差の程度は国内でも各国間でも大きく異なる(Annex Aの図A.1参照)。それにもかかわらず、デンマークや日本などの一部の成熟市場では、特に配管工事や設置費用の削減により、小規模住宅で新設する場合、最も安価な

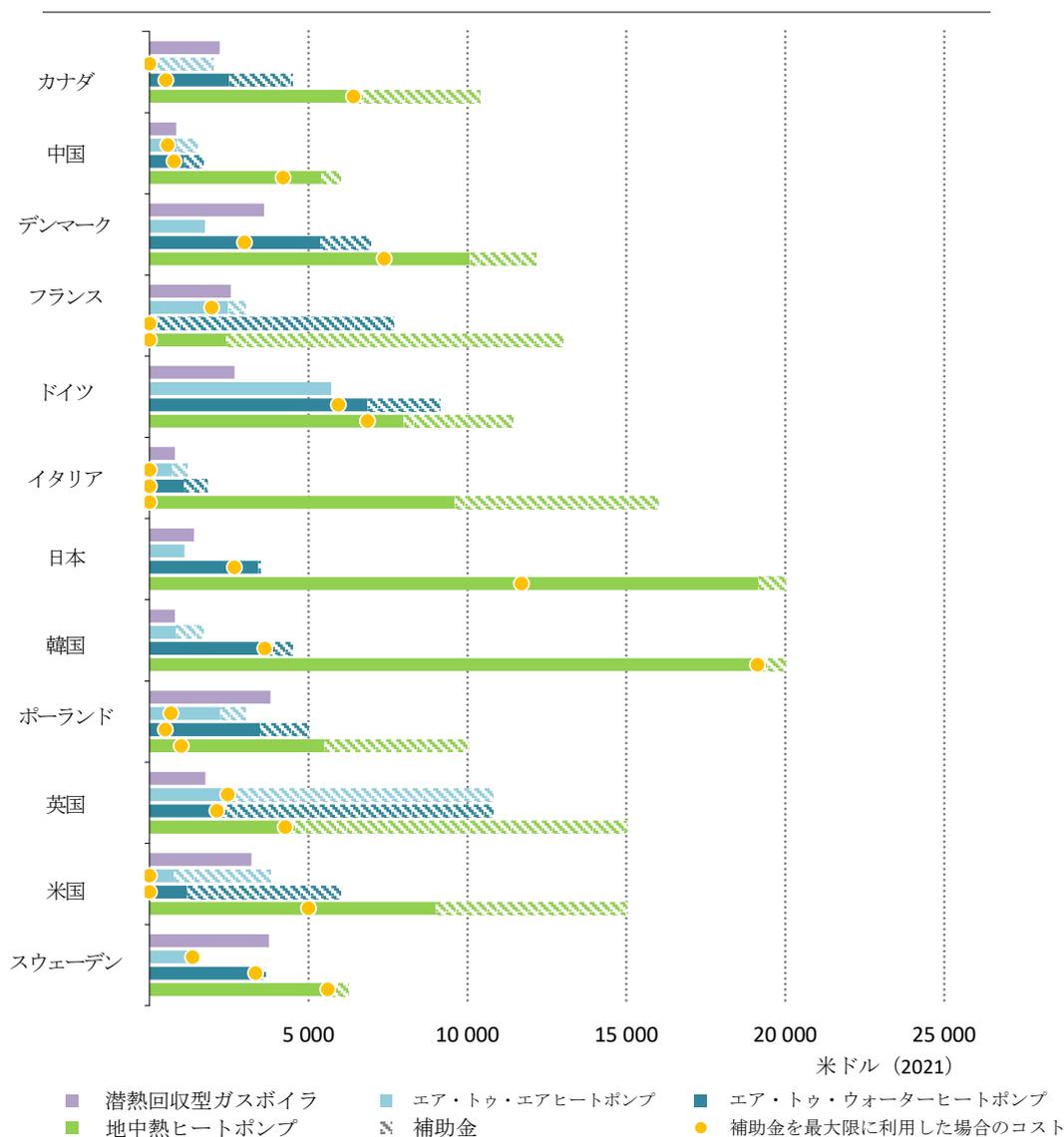
ダクトレスのエア・トゥー・エアヒートポンプモデルはガスボイラよりも安価になっている（図 3.2）。ただし、ダクトレスのエア・トゥー・エアシステムの場合、複数の暖房ゾーンがある大規模世帯では複数台のヒートポンプが必要になるため、一般的にガスボイラより高価になる。温水（エア・トゥー・ウォーター）ヒートポンプはエア・トゥー・エアヒートポンプより高価であり、最も安価なモデルであってもすべての主要市場でガスボイラより依然として高価だが、早くからの政策でヒートポンプが幅広く採用され設置費用が安価になったスウェーデンは例外である。地中熱ヒートポンプは、地下熱交換器を設置するために必要となる土木工事や掘削がシステムの総価格の半分以上を占めることがあり、いずれの国でも最も高価な種類の技術である。（ただし、耐久性と効率がはるかに優れているため、平準化コストベースでは競争力を持つ可能性がある）。冷暖兼用のヒートポンプを導入することで、個別のエアコンを設置する追加コストが不要になり、1年のある期間冷房需要がある気候においては暖房のためのコストを効果的に下げることができる。

ヒートポンプの初期費用はガスや石油ボイラに比べて高いため、ヒートポンプの生涯コストが大幅に低くなる可能性があっても、一部の家庭にはとても購入する余裕がない。この障壁を克服するために、多くの国がヒートポンプへの補助金を導入して普及を促している。現在利用可能な補助金のうち最も少ないものを考慮しても、フランスや米国など一部の国では、エア・トゥー・エアおよびエア・トゥー・ウォーターヒートポンプの初期費用は両方ともガスボイラの初期費用を下回っている。ポーランドのように低所得世帯がより多くの補助金を受ける権利がある場合、ヒートポンプのコストメリットはさらに大きくなる可能性がある。カナダなどの国では、一般的に高価な最高効率モデルに対して補助金も多くなっている。

また、既存住宅でヒートポンプに転換する場合、追加コストが発生する可能性があり、それがヒートポンプを選択する際の障壁にもなっている。古い住宅では、ヒートポンプの容量に応じてより高い電力負荷に対応するために電気システムを増強しなければならないこともある。さらに、ヒートポンプを低温で作動させることで高効率の恩恵を受けるためには、既存の放熱器を大型のものや床暖房、強制対流式の暖房システムに更新する必要がある場合もある。<sup>1</sup>これらの更新のコストは、ヒートポンプを設置する総費用の  $\frac{1}{3}$  を占める可能性もある。

<sup>1</sup>化石燃料ボイラは、一般的に 60~80°C の出力温度で作動する。ヒートポンプは 55°C 以上の熱、潜在的には 70°C までの熱を発生できるが、出力温度が上昇すると性能は低下してしまう。

図 3.2 ▷ 主要国における主な住宅用暖房技術の最安価モデルの機器・設置費用、2022 年



IEA. CC BY 4.0.

エア・トゥー・エアヒートポンプは一部の市場ではガスボイラよりも安価となる可能性があるが、エア・トゥー・ウォーターおよび地中熱ヒートポンプの競争力を高めるためには補助金が依然鍵となる

注:費用には機器とその設置費を含む。補助金には、各国において受給資格がある世帯に支給される国の経済的支援の最低水準を計上する。中国と日本では、国レベルの補助金は提供されていない。イタリアなど一部の国では、購入価格を上回りうる補助金が提供されている。

表 3.2 ▶ 世界における住宅用ヒートポンプに対する経済的支援策のカバー率、2022年

経済的支援の種類と主な特徴	国数	世界の住宅用暖房に占めるシェア
<b>助成金</b>	<b>30</b>	<b>70%</b>
<b>ヒートポンプのみを対象とする支援</b>		
主に熱の生産に使用されるもの	27	47%
古い住宅に設置されるもの	20	28%
電気のみで作動するもの（ハイブリッドを除く）	16	11%
化石燃料暖房設備からの置き換え	12	34%
主として居住する住宅に設置するもの	12	15%
<b>基準額の設定</b>		
費用に対する割合とし、上限額を設定	16	39%
ヒートポンプ技術による	10	16%
その他の要因による	6	3%
<b>追加支援</b>		
高効率機器	18	29%
低所得世帯	12	34%
集合住宅でなく戸建て住宅に設置されるヒートポンプ	4	2%
不利な地域（例：地域暖房がない）に設置されるヒートポンプ	4	2%
化石燃料暖房システムからヒートポンプへの置き換え	3	7%
<b>所得税還付</b>	<b>9</b>	<b>33%</b>
<b>ヒートポンプのみを対象とする支援</b>		
古い住宅に設置されるもの	5	12%
本宅に設置するもの	3	6%
<b>基準額の設定</b>		
購入・設置価格に対する割合とし、上限額を設定	7	30%
購入価格と同額	2	2%
効率・省エネ効果に応じ、購入・設置価格より高額	1	3%
<b>追加支援</b>		
化石燃料暖房システムからヒートポンプへの置き換え	1	<1%
<b>VAT（付加価値税）払い戻し</b>	<b>5</b>	<b>12%</b>
<b>VAT 率</b>		
ヒートポンプの購入および/または設置に対して軽減	5	12%
ヒートポンプの購入および/または設置に対して非課税	1	4%
<b>低金利融資</b>	<b>24</b>	<b>29%</b>
<b>融資</b>		
低金利および金額・満期の条件	20	18%
ゼロ金利および金額・満期の条件	7	13%

注：日本と中国を除く国レベルの政策に基づく分析。日本と中国には、地方レベルの制度しか存在しないが、国内暖房需要のかなりの割合がカバーされている。

主要な暖房市場では全体的に広範囲かつ多様な経済的インセンティブ制度があり、政治的な意思、国の政策戦略、地域の要因の違いが反映されている（表 3.2）。多くの国において、ヒートポンプ設置の経済的な援助は、既存の化石燃料ボイラが廃棄される場合のみ利用可能である。これらの国々を合わせると、世界の暖房需要の 1/3 以上を占めている。

助成金は最も一般的な政策手段であり、現在 30 カ国で利用可能であるが、これらの国を合わせると世界の暖房需要の 70%を占めている。一部の国では、低所得世帯向けのヒートポンプ購入・設置費用の全額とは言わないまでも、大半が助成金で賄われる。フランスや英国などの国では、ガスボイラの代替機器に対する VAT を軽減したり完全に撤廃したりしている。一部の国では所得税還付が適用されている。たとえば、イタリアのスーパーボーナス制度では、ヒートポンプを含む建物の大規模改修にかかる費用の最大 110%に相当する税還付が提供される。しかし、直接的な助成金や補助金とは対照的に、税還付は消費者に大抵 2 年、最長 5 年遅れて届く。低金利または無金利融資、グリーンモーゲージ、特定融資返済制度（例：消費に応じた支払い方式）は、多くの国で広く利用可能である。中・大規模な地中熱ヒートポンププロジェクトの場合、掘削に伴う経済的なリスクを制限する制度がフランスを筆頭に一部の国で使用されている（Georisk、2021）。消費者にとって、提供されているさまざまな種類の経済的な支援の対象となる資格や申請方法に関する情報を入手することは困難である。これを容易にするため、一部の国では「ワンストップショップ」を設置して促進している。Electric Ireland Superhomes はその一例にすぎない。

その他の政策的アプローチも、ヒートポンプの購入・設置にかかる初期費用を低減するのに役立つ。適切な規制環境は、消費者が負担する初期費用を削減または排除することで、消費者の経済的負担を軽減し、代わりに賃貸や Heat-as-a-Service モデル（次章参照）などによって、使用量に応じて費用を返済できるようにする、新しいビジネスモデルや融資モデルの出現を可能にする。必要に応じて、規制当局はガスネットワーク切断料金など、採用を妨げるその他の初期費用の障壁を取り除くべきである。

ヒートポンプの購入・設置費用は、市場が拡大し、サプライヤーがスケールメリットの恩恵を受けるにつれて、今後 10 年間で実質的に徐々に低下すると予想される。ヒートポンプの製造における最大のコスト構成要素は圧縮機、熱交換器、電子機器であり、これらを合わせると空気熱源ヒートポンプのコストの約 2/3 を占める（US DOE、2016）。大規模な自動化によって生産コストを削減できる可能性はかなりあるが、メーカーが生産能力を拡大するために必要な多額の投資に踏み切るには、強力で安定した政策のシグナルが必要である。部品、設置、修理、保守のコストの削減につながる部品の標準化や品質管理試験などの産業全体にわたる対策によって、より急速なコスト削減を促進できる可能性がある。また、メーカーはプラグアンドプレイ設計の開発により、設置をより早く、より簡単に、より安価にすることも可能である。同じ地域の同様の建物に一連の設置工事を図ることで（たとえば、建物の省エネルギー改修のためのオランダ発祥の Energiesprong アプローチを利用）、物流コストの相互負担に役立つ可能性がある（Energiesprong、2021）。より成熟した市場では、設置業者間の競争の激化もコストを下げる圧力になると予想されている。

全体として、ヒートポンプの初期費用総額は、最大 40%減少する可能性がある（Heptonstall and Winskel、近刊予定、Agora Energiwende、2022）。しかし、ヒートポンプのエネルギー性能や使用が許可されている冷媒の種類に関する規制の強化、そして、大規模なエネルギー改修を必要とする既存の建物にヒートポンプが次第に導入されることによる改修コストの上昇など、上記の傾向に逆行する可能性のある他の要因の影響により、コストの見通しは依然として非常に不確実である。

### ボックス 3.1 ▶ ヒートポンプのための EBRD 融資

欧州復興開発銀行（EBRD）は、暖房設備の脱炭素化の手段としてヒートポンプの急速な導入を支援している。Green Economy Financing Facility（グリーン経済ファイナンス・ファシリティ）を通じて、EBRD は 170 を超える地域金融機関と 2,300 の技術提供者のネットワークと協力し、グリーン技術への投資を希望する企業や住宅所有者を支援している。特に東ヨーロッパと南東ヨーロッパでは、すでに 8,000 万ユーロ以上をさまざまなプロジェクトに直接投資し、3 万台のヒートポンプの設置が可能になっている。さらに、融資資金により、ポーランドとルーマニアにおける省エネルギーを重視した建物の改修プログラムの一環としてヒートポンプの導入が支援されている。

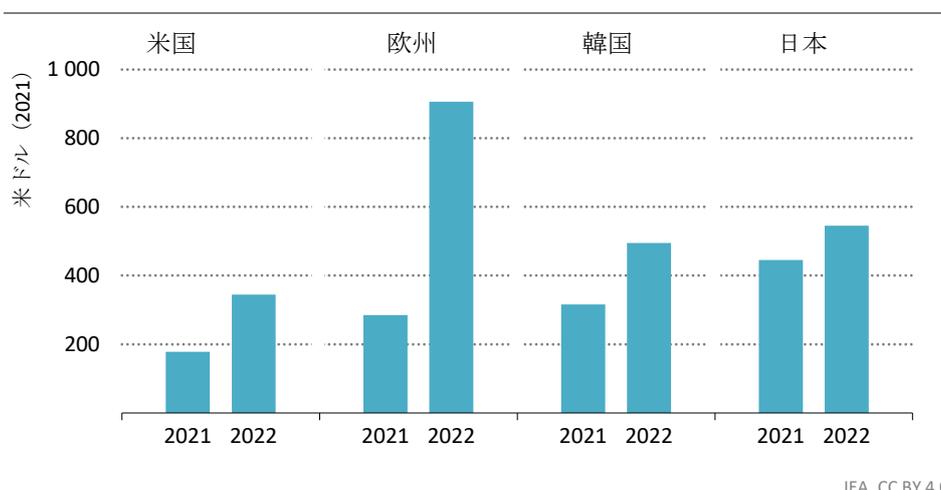
ヒートポンプの導入を支援するために、EBRD は 4 つの主な手段を利用している。

- 特定市場のヒートポンプ技術の普及拡大を最適化するための、ヒートポンプに関する分析の支援
- ヒートポンプの導入障壁の解消に向けた各国政府との協力と、最低性能基準の策定支援
- 地域暖房用への産業用ヒートポンプ（特にバルカン半島西部）および大規模エネルギー改修と新築プロジェクトの両方への建物毎のヒートポンプを設置する地方自治体のインフラ顧客の支援
- 銀行部門を通じたグリーン経済融資の強化

### 3.2.2 運転コストの削減

ヒートポンプのランニングコストは、現在のエネルギー危機以前より主な暖房市場においてすでにガスボイラよりも低くなっていた（図 3.3）。欧州では、この優位性がここ数カ月で拡大し、欧州の平均的な家庭で年間 900 米ドル以上が節約されている。これは、料金上昇抑制のための政府による介入もあり、家庭の電力料金の上昇幅がガス料金よりも小さかったためである。

図 3.3 ▶ 主要な地域 / 国においてガスボイラからヒートポンプに転換した家庭の光熱費節減額、2021、2022 年



ガス価格の高騰により、大半の国でガスボイラに対するヒートポンプの運転時のコスト優位性が増大している

注:2022 年のエネルギー料金の節約額は、VAT の引き下げ、直接補助金、電力およびガス料金の値上げ上限など、料金上昇を抑えるための 2022 年 9 月までの政策介入を考慮に入れたものである。分析は、地域 / 国の平均的な電力およびガス料金と、各地域・国の代表都市（デトロイト、ストックホルム、ソウル、新潟）における平均的な世帯の暖房・給湯需要に基づく。  
出典:Energy-Control Austria、MEKH および VaasaETT（2022）に基づく IEA の分析。

一部の国では、依然としてガスが電力よりも有利な税制の恩恵を受けているため、燃料税の改革の余地がかなり残されている。一方、税金のリバランス対策が講じられている国もある。たとえば、オランダの税制改革では、電力の税率が下がりガスの税率が上がったため、ヒートポンプの稼働がガスボイラよりも一層安価になった。新築建物へのガス接続の禁止が 2018 年に導入され、すでにヒートポンプの需要増加につながっている（RAP、2022a）。デンマークでは 2021 年、税金が住宅用電気料金の半分以上を占めていたが、住宅所有者やテナントは家の暖房がヒートポンプで行われている場合、電力 1 キロワット時あたりわずか 0.1 ユーロセントという低い税率を支払っている（IEA、2021）。

また、カーボンプライシングも、化石燃料技術と低炭素技術の間の競争を公平にするのに役立つ。特に電力の CO<sub>2</sub> 排出係数が小さい地域では、ヒートポンプの競争力を大幅に向上させる可能性がある。今日、世界中の 20 カ国以上が建築物部門の CO<sub>2</sub> 排出量に価格を設定している（世界銀行、2022）。スウェーデンでは、1991 年の炭素税の導入とその後の税率の着実な引き上げによって、石油ボイラからヒートポンプへの大規模な転換が推進されている。スウェーデンの炭素価格は、2022 年に CO<sub>2</sub> 1 トン当たり 118 ユーロに達し、世界最高水準となっている。その結果、石油ボイラは大部分が段階的に廃止され、今日ではヒートポンプが暖房設備販売の 90% 以上を占めるようになった。

いずれの場合も、エネルギー課税およびカーボンプライシング策では、分配への影響を考慮する必要がある。最も脆弱な人々を保護するための補償措置が必要になる可能性があるが、この

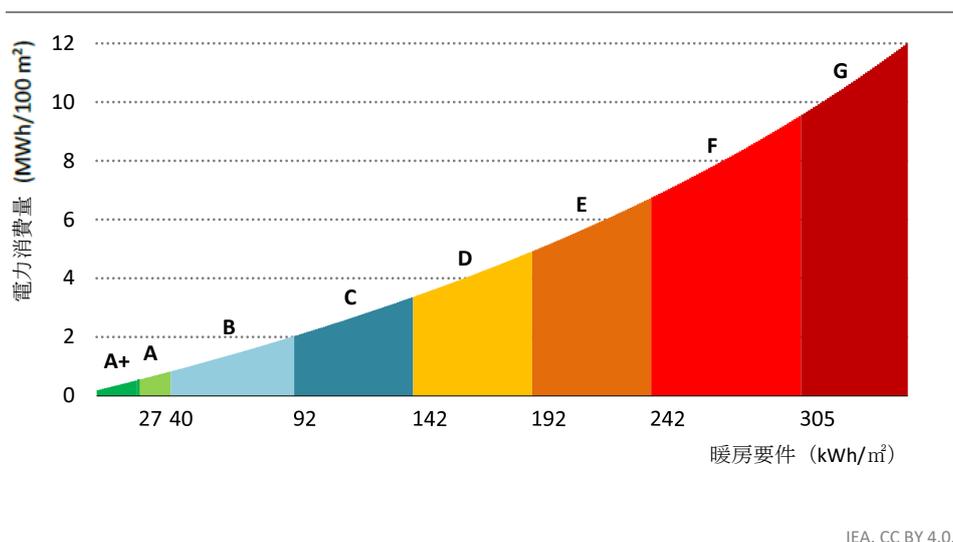
資金は燃料税や炭素税の引き上げによって生じる追加の歳入で賄うことができる。その歳入は、ヒートポンプやその他のクリーンエネルギー技術への補助金に使うこともできる。

また、電気料金もヒートポンプのランニングコストを低減するように設計することができる。建物や温水タンクの熱慣性は、ヒートポンプをフレキシブルに運転する大きな可能性をもたらし、オフピーク時の電力消費を可能にする。このフレキシビリティは、時間帯別料金やダイナミックプライシングと自動運転によって金銭的に評価される必要がある。たとえば **Electric Ireland** は昼間料金の約半額の夜間料金を提供しており、ヒートポンプの所有者は特に夜間に機器が作動するようにプログラムすることができる（**Electric Ireland、2022**）。計量、通信およびアクティブ制御機能の統合により、ヒートポンプのデマンドレスポンス能力を高め、運転コストを最小限に抑えることができる。また、電力システム全体のバランスをとり、ヒートポンプの大規模導入がピーク需要に与える影響を軽減することもできる。フレキシブルな運転により、ヒートポンプを屋上の太陽光発電と組み合わせることも可能になる。これにより、相当の初期費用を伴うことになるが、運転コストをさらに削減できる。

省エネ性の向上によっても、ランニングコストは低減可能である。省エネ基準やラベリングによって促進される高断熱の建物と高効率なヒートポンプは、一定の空間や水量を温めるために必要なヒートポンプの容量を削減し、運転と設置のコストを削減する上で不可欠である。また、これにより温水の温度を低くすることもでき、ヒートポンプをより高効率かつ安価に運転できるようになる。デンマークでは、ヒートポンプによる電力消費量が、最も低い効率評価の住宅に比べて最も高い効率評価の住宅では最大 30 倍少ないことが分かっている（図 3.4）。住宅のエネルギー効率を 2 段階（例：D から B へ）改善すると、暖房エネルギー需要が半分になり、消費者のお金を節約することができる。IEA の **Energy Efficiency Market Report 2022** では、断熱とヒートポンプの関係が詳細に論じられている（IEA、2022a）。

ヒートポンプのランニングコストは、運転および保守の良し悪しによっても左右される。耐用年数を通して高効率かつ最適なコストで作動するために、ヒートポンプの所有者は、適切な取り扱いと、資格を持つ技術者による徹底的な保守の必要性について知らされている必要がある。空気熱源ヒートポンプは、時間の経過とともに汚れで目詰まりし、電力消費量の増加や機器の早期磨耗、さらに運転騒音の増大につながる可能性がある。また、冷媒も時間の経過とともに漏れやすくなり、効率が低下するだけでなく、気候変動の原因にもなる（第 2 章参照）。現在、大型ヒートポンプには冷媒漏洩警告システムが市販されており、これを住宅用設備に展開すれば、性能低下の原因を特定し、冷媒ガスの放出を回避するのに役立つ可能性がある。

図 3.4 ▶ デンマークの建築物省エネルギー等級別の年間ヒートポンプ電力消費量、2022 年



デンマークのヒートポンプによる電力消費は、最も低い効率評価の住宅に比べて最も高い効率評価の住宅では最大 30 倍少ない

注: m<sup>2</sup>=平方メートル。絶対値は、デンマークの建築分類に基づくものである。各クラスの閾値は、地域の気候条件によって異なる。クラス A2015 は A として表示され、クラス A2020 は A+として表示されている。電力消費量は、床面積 100m<sup>2</sup>に対するものである。

出典:デンマークエネルギー庁 (2022) に基づく IEA の表示。

### 3.3 消費者採択に対するコスト以外の障壁

コスト以外にも、ヒートポンプの消費者による採択にはその他さまざまな障壁がある。特に、ヒートポンプの設置に関する制限、ヒートポンプのメリットに関する情報の欠如、建物所有者とテナントとのスプリット・インセンティブ問題である。これらの障壁は、コストほど実際に具体的ではないが、多くの消費者が他の暖房設備よりもヒートポンプを選ぶことを躊躇する大きな要因になっている。これらに対処する措置を講じなかった場合、多くの消費者を思いとどまらせ、技術の導入を阻害する可能性がある。多くの国で、いくつかの障壁に対処するためのプログラムが展開されている。それらを強化し、より広く適用するためには、さらなる取り組みが必要である。

#### 3.3.1 新規設置に対する制限

ヒートポンプの設置には、大半の国で多数の制限、認可および実際的な制約事項がある。設置工事では、通常、建築、消防、土地利用および電気に関する法律と規制を順守しなければならない。また、美観や騒音を懸念する住宅所有者や建築協会からの許可、さらに計画規則に基づく地方自治体からの許可も必要な場合がある。小規模世帯、特に集合住宅では、ヒートポンプを設置するために必要な外部スペースがない可能性があり（集中型ヒートポンプによる解決策もあるが[IEA、2022b]）、室外の圧縮機ユニットを建物の外面に取り付けることが問題となることもある。許可の取得や実際的な制約を回避するシステム設計には時間とコストがかかり、消費

者が途中で断念する可能性がある。地域暖房や業務用途で下水廃熱を利用する水熱源ヒートポンプの場合、規制によって熱交換器を通過した下水管からの廃水の経路変更が禁止されている可能性がある。

ヒートポンプの導入促進のために、許可手続きを緩和した国もある。たとえば、チェコでは、容量 20 kW までの屋外住宅用ヒートポンプは現在、建築許可の申請から免除されている。欧州委員会は最近、欧州連合全域でヒートポンプの許認可プロセスの期限短縮を課すことを提案した（欧州委員会、2022）。また、小型ヒートポンプについては計画の許可を必要としない国も多い。一部の国では、複数所有者の建物に対し、ヒートポンプやその他のクリーン技術の導入に対しては単純な過半数のみを要求するように緩和されている。掘削規制によって掘削深さが制限されることがある地中熱ヒートポンプの場合、一部の政府では、より多くの設置工事を可能にするために許容深度を大きくしている。地熱の利用可能性と規制要件に従って地域を特定、分類する地熱マップは、地熱ヒートポンププロジェクトの許認可手続きの合理化に役立つ可能性がある（BRGM、2022）。

しかし、他の多くの制限は、ほとんどが法域にある。健康、安全、居住性などを実質的に改善しない冗長な制限や煩雑な制限を特定するには、ヒートポンプに適用されるすべての規制、法律および許可プロセスの包括的な見直しが必要である。このプロセスは、地方、国および国際的な多数の機関が関与する複雑なものである可能性があるため、強力で中央集権的な組織によって実施されることが必要である。この領域での経験を各国間で共有することにより、官僚的手続きの廃絶のベストプラクティスを推進できる可能性がある。

### 3.3.2 信頼できる情報の欠如

消費者が他の暖房設備ではなくヒートポンプを選択するという決定を下すためには、ヒートポンプに関する信頼できる情報を得ることが不可欠である。ヒートポンプ設備の比較、設置業者の選択、許可の取得、関連補助金の取得といったプロセスは非常に複雑で時間がかかる可能性がある。調査によれば、ヒートポンプの購入を検討した消費者の多くが最終的に購入を見送った理由として、これらの障壁を挙げている（dena、2022）。

エネルギーラベルは、消費者が最もエネルギー効率の高い暖房設備を特定するのに役立つ重要な手段である。ほとんどの場合、エネルギーラベルは、冷暖房技術に対する最低エネルギー効率基準が施行されている地域で義務付けられている（110 カ国で同様の基準が採用されているかその計画がある）。エネルギー効率に加えて、ラベルには消費者の指針になるスマートレディネス、リサイクル性および騒音低減の特性が含まれるべきである。また、ヒートポンプの性能に関する消費者の誤解を解くために、情報、啓蒙活動も行うことができる。多くの消費者は、効率や騒音といったヒートポンプの性能に近年大幅な改善があったことを知らない。コミュニティレベルでの対話を促進する取り組みによっても、技術に対する消費者の信頼を高め、得られた教訓を共有し、ヒートポンプへの転換を検討している住宅所有者に情報を伝えることができる（RAP、2022b）。消費者が設備を比較し、ライフサイクルコストを評価し、認定設置業者を選び、融資を受け、補助金を申請するのを支援するワンストップショップの利用を推進する

国もある。特に、既存の暖房設備が突然故障して既存の暖房設備の交換を迫られた際に、大半の消費者が代替設備を検討することなく単純な機器の置き換えを選ぶことになるような「苦渋の購入」の場合に消費者が十分な情報を得た上で選択できるようにすることができるだろう。国によっては苦渋の購入が暖房設備購入の最大 60%を占めることがある（Nesta、2021）。ワンストップショップは、設置業者が見込み客にアプローチするのにも役立つ。他のアプローチとしては、エネルギー事業者が省エネプログラムを通じて第三者の比較ツールを提供することを義務付けることや、エネルギー事業者、メーカー、設置業者のネットワークに対して、こうした取り組みのコストの負担を義務付けることが考えられる。エネルギー事業者自身が提供する助言よりも信頼できると思われるであろう無料の第三者によるエネルギー診断を提供することも、消費者が十分な情報を得た上で暖房設備の交換を決定するのに役立つ可能性がある。

### 3.3.3 建物所有者とテナントの間のスプリット・インセンティブ問題

建物所有者とテナントの間のスプリット・インセンティブ問題は、ヒートポンプなどのより効率的な暖房設備の採用を含む、建物の省エネ投資によく見られる障壁である。建物の所有者は、ヒートポンプが不動産売却価格に大きなプレミアムを加えることができるとしても、将来的に家賃や不動産再販価格の上昇でコストを回収できるか確信がない場合、ヒートポンプへの支出を増やすことに慎重になる場合がある（Shen、2021）。家主がヒートポンプや他のクリーンエネルギー技術に投資するインセンティブを高めるため、住宅所有者が家賃の総額を暖房費節約額の一定割合だけ引き上げて、その利益をテナントと分け合うことを認める法律を可決した国もある。また、賃貸時や販売時の最低省エネルギー要件も、ヒートポンプへの投資を促進することができる。たとえば、フランスでは2023年以降、省エネルギー評価が最低クラス（G）の物件は賃貸できなくなる他、評価がFとGの住居は、少なくとも評価がEに達するように改修するまで家賃値上げ禁止の対象となる。

エネルギー性能契約や Heat-as-a-Service 契約など、先行投資コストを削減または排除する融資モデルも、スプリット・インセンティブ問題という障壁の克服に役立つ可能性がある。そこでは、ヒートポンプへの投資が抱える経済面、性能面、技術面のリスクが専門のサービス会社や事業者任せられ、初期費用が所定の期間、定額料金で、場合によっては実際のエネルギー節約量に基づいて回収されるような建物所有者とテナントの間の合意が必要となる（表 3.3）。現在、主要な暖房市場で利用できるモデルの大半は、融資に代わる選択肢を提供することを目的としている。ヒートポンプがサービス会社の所有物のままになる場合もあり、不動産所有者の経済的リスクが軽減される。

表 3.3 ▶ ヒートポンプの普及を促進する主なビジネスモデル

モデル	説明	例
エネルギー性能契約 (EPCs)	エネルギーサービス会社 (ESCO) は、シェアード・セイビングス契約またはギャランティード・セイビング契約に基づき、法人顧客との長期 EPC の下でヒートポンプの設置、所有および運転を行う。	英国の再生可能熱インセンティブプログラムの下で使用
Heat-as-a-Service	ヒートポンプ、保守、熱が専門の ESCO から住宅協会、住宅所有者または事業者に対して提供される。節約金額が保証され、単一の定額料金で、一括サービスとして長期的に提供される。	欧州を中心に多くの国で試行中
ペイフォーパフォーマンス	顧客は省エネ量に応じてヒートポンプ機器の固定レンタル料金を支払う。	カリフォルニア州、オレゴン州、ニューヨーク州などの米国で使用
On-bill Financing	ヒートポンプの設置および機器の費用は、物件に付帯する公共料金を通じて返済される長期融資で賄われ、将来のテナントに譲渡することができる。	カナダのいくつかの州で使用
不動産評価クリーンエネルギー	住宅や業務用物件へのヒートポンプの設置は、その不動産に付帯する融資によって資金を調達し、10~20 年間にわたる固定資産税への上乘せとして返済する。将来のテナントへの譲渡が容易になり、金利も優遇される。	北米において広く使用
従来の機器リース	ヒートポンプは所定の期間にわたって所有者にリースされ、その後所有権が使用者に移転される。	ドイツ等の国で利用可能
クリーンエネルギー中間貸付	ヒートポンプに投資する建物所有者に貸し出すために、大手銀行が地元の小規模な銀行に資金を貸し出す。このモデルにより、大量の融資を多くの小規模な投資機会に向けることができる。	EBRD などの多国籍開発銀行によって広く導入されている。EBRD では、追加承認なしで支援を受けられる技術のデータベースである Green Technology Selector を利用して融資決定を迅速化している。

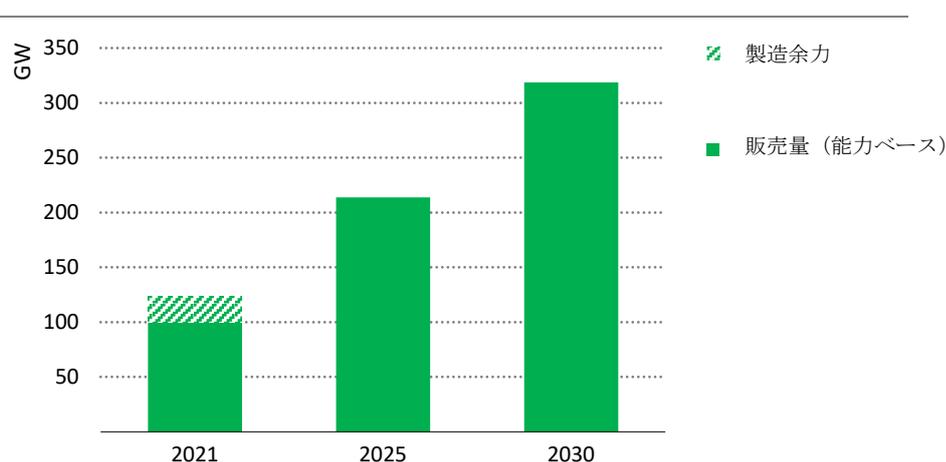
3

出典: Catapult Energy Systems (2022)、Urban (2021)、EBRD (2022)。

### 3.4 製造における制約

APS シナリオで想定されている規模での世界的なヒートポンプの導入加速は、製造能力の大幅な拡大にかかっている。メーカーが需要の増加に対応する能力は、材料や部品の入手可能性、ビジネスや投資の環境、規制や法の制約事項を含む様々な要因によって制約される可能性がある。本レポートの主な焦点ではないが、政策立案者はこれらの潜在的な制約を認識し、民間部門の対処に対する支援方法を特定する必要がある。今日、世界中で販売されているヒートポンプの大半は、中国、米国、欧州、日本および韓国で製造されている。現在、既存の工場には製造余力があり、2021年の総生産能力の約20%に相当する。しかし、APSシナリオで想定されている販売の増加を2年間満たすのにも十分ではない(図3.5)。圧縮機、熱交換器、冷媒などの基本材料や特殊部品の供給も急速に拡大させる必要がある。

図 3.5 ▶ APSシナリオにおける現在と今後想定されるヒートポンプの販売台数および現在の製造余力



IEA. CC BY 4.0.

ヒートポンプの製造余力は製造能力全体の約20%に相当するが、APSシナリオでの販売数の伸びを2年間満たすのにも十分ではない

出典:Global Research View によって提供されたデータに基づく 2021年のIEAの分析。

サプライチェーンの制約により、ヒートポンプおよび主要部品の製造、特に過去2年間の半導体やチップセットの製造にすでに影響が出ている。世界的な不足により、暖房、換気および空調(HVAC)産業ではすでにコストの上昇と生産の遅れが生じている。銅、鉄、アルミニウム、溶接用の銀、一部のプラスチックの価格上昇もコストを押し上げている(First Citizens Bank、2022)。これらの材料の一部、特に銅は、クリーンエネルギーへの移行が進むにつれて、引き続き高い需要が見込まれている、住宅用の空気熱源ヒートポンプには、主に配管とバルブに約15~20キログラムの銅が含まれており、機器コスト全体の約10%を占めている(国際銅協会、2022、英国政府、2016)。産業界では、コスト削減のために主要部品に銅の代わりにアルミニウムを使用することが検討されている(Bloomberg News、2021)。住宅用温水ヒートポンプは一

般に、同等の凝縮ガスボイラと比べて 2 倍以上のアルミニウム、15 倍以上の銅および真鍮が含まれている。<sup>2</sup>

中長期的に、廃棄物管理規制によるヒートポンプ、エアコン、化石燃料ボイラ廃棄物の回収とリサイクルが増加して銅、アルミニウム、鉄の第二の供給源となり、採掘に伴う影響を抑える可能性がある。欧州連合では現在、ヒートポンプとエアコンは、廃棄機器の収集、処理および回収の基準を定める WEEE（電気電子廃棄物）指令の対象となっている（欧州連合、2012）。

ヒートポンプ製造への国内投資を刺激し、サプライチェーンのボトルネックに対処し、イノベーションを促進する政府の役割はますます大きくなっている。いくつかの国は最近、重要なクリーンエネルギー技術の製造の国内回帰を目指す政策を導入しており、その中には、米国の国防生産法など、ヒートポンプを明確に対象としているものもある。その他、EU の欧州半導体法および重要原材料法など、半導体や重要な鉱物の製造を対象としたものもある。導入目標、化石燃料ボイラの禁止、消費者インセンティブに加えて、ヒートポンプの研究開発支援などの製造インセンティブを提供している国もある。これらはすべて、メーカーが生産能力を拡大する際の市場の確実性を高めるものである。英国政府が計画中の別の施策では、ボイラメーカーの暖房設備販売全体に占めるヒートポンプの割り当てやその引き上げが検討されている（英国政府、2022）。規制の不確実性を少なくすることは、メーカーが生産の拡大に取り組む上で鍵となる。欧州連合では、欧州委員会の提案に基づき現在審議中の新 F ガス規制が 2024 年発効予定であり、ヒートポンプや他の技術のメーカーによる F ガス使用の制限が明確になる予定である（第 2 章参照）。

大手メーカー各社は最近、ヒートポンプの生産能力拡大や関連取り組みに 40 億ユーロ以上を投資する計画を発表した。発表のほとんどは欧州のプロジェクトに関するものだが、新規プロジェクトの公表が一般に少ない他の地域においても生産能力は増加する予定である（表 3.4）。

<sup>2</sup> PEP（2022）および Assoclima との個人的なコミュニケーション（2022 年 11 月）に基づく。

表 3.4 ▶ 欧州の主要なメーカーにより最近発表されたヒートポンプ生産への投資

会社	地域 / 国	投資配分	投資額 (ユーロ)	完了日
Vaillant	EU	ヒートポンプと省エネルギー	1 億 3,000 万	2022～2023 年
Hoval	リヒテンシュタイン、スロバキア	ヒートポンプ	6,000 万	2023～2024 年
Clivet (Midea Group)	イタリア	ヒートポンプ	6,000 万	2024 年
三菱	トルコ、英国	ヒートポンプと空調和機	1 億 2,800 万	2024 年
ボッシュ	欧州	ヒートポンプ	3 億	2025 年
ダイキンヨーロッパ	ベルギー、チェコ、ドイツ、ポーランド	ヒートポンプ、デジタル化、研究開発、サービス能力	12 億	2025 年
スティーベル・エルترون	ドイツ	ヒートポンプ	6 億	2025 年
NIBE	スウェーデン	ヒートポンプ	4 億 6,000 万	2025 年
フィースマン	ポーランド	ヒートポンプとその他グリーンソリューション	10 億	2025 年
パナソニック	チェコ	ヒートポンプ	1 億 4,500 万	2026 年

注:三菱 (1 億 1,300 万米ドル+1,500 万英ポンド) と NIBE (50 億スウェーデン・クローネ) についてはユーロに換算。

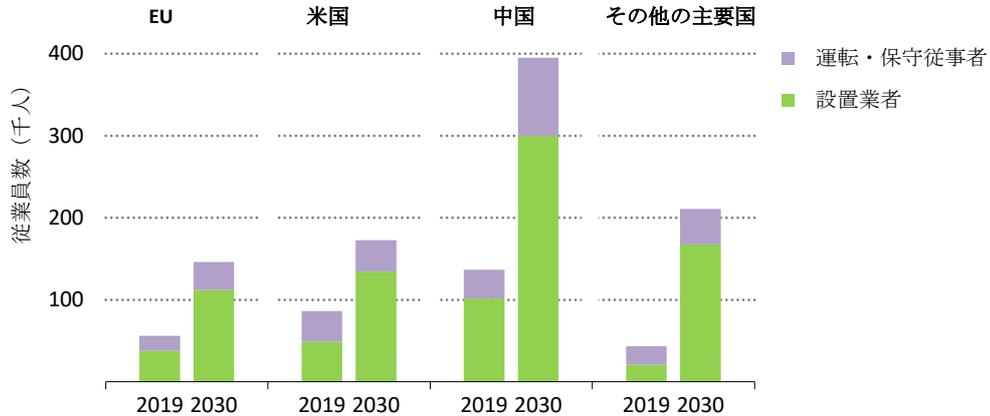
出典:Vaillant Group (2022)、Business Solutions (2021)、Hoval (2022)、Quanlin (2022)、三菱 (2022)、Walker (2021)、ボッシュ (2022)、ダイキン (2022)、Klingauf (2022)、NIBE (2022)、フィースマン・グループ (2022)、パナソニック (2022)。

### 3.5 熟練設置業者の不足

APS シナリオにおける世界的なヒートポンプ導入の急速な拡大には、サプライチェーンの各段階、特に設置において労働力の大幅な増加が必要となる (第 2 章参照)。今日、世界中のヒートポンプ従事者の約半数が設置作業に従事し、さらに 1/4 はヒートポンプの保守とサービスに従事している。設置業者の需要は APS シナリオにおいて 2030 年までに 4 倍になり、85 万人を超えると予測されている (図 3.6)。新たな設置業者はすべて、認定されたプログラムの下で十分な訓練を受ける必要がある。

すでにいくつかの国では、熟練した設置業者の不足がヒートポンプの導入のボトルネックになり始めている。ヒートポンプの設置に必要なスキルは、建設業における多くの標準的な職種のものと同様だが、追加の専門的スキルが必要である。物件の評価、設計のための熱負荷計算、既存の暖房設備および電気配線の部分的な更新などがそれにあたる (表 3.5)。OJT で習得できるスキルもあるが、その他のスキル、特にヒートポンプの容量選定、掘削、電気工事、冷媒の取り扱いには、訓練を受けた有資格者が必要となる。設置と電気のスキルの両者は同じ資格制度に含まれることが多いが、カナダなど一部の国では、個別の職種が必要とされる。地中熱ヒートポンプの場合、掘削や溝掘り、パイプの熱融着、地質解析などの追加の資格が必要となる。石油・ガス分野の熟練した掘削技術者は、このような仕事を担当するのに適している。

図 3.6 ▶ APS シナリオにおける地域 / 国別のヒートポンプ関連雇用



IEA. CC BY 4.0

3

世界のヒートポンプ労働力全体の約半分を占める設置業者の需要は APS シナリオにおいて 2030 年までに約 65 万人増加する

注:O&M=運転および保守。その他の主要国=オーストラリア、ニュージーランド、カナダ、日本、韓国、ユーラシア、その他の欧州。

表 3.5 ▶ フェーズ別にヒートポンプの設置に必要な典型的なスキルと職種のマップ

スキル	職業	ヒートポンプの種類
<b>サイジングとヒートポンプシステム設計</b>		
既存暖房インフラと物件の断熱の現地評価	一般的な建設業者、ヒートポンプ設置業者	すべて
熱損失および暖房熱負荷計算	ヒートポンプ設置業者	すべて
設計、部材選定、システム配置検討	ヒートポンプ設置業者	すべて
圧力損失計算、熱伝導率評価	ヒートポンプ設置業者	すべて
<b>設置</b>		
溝掘りと掘削	認定掘削業者	地中熱
配管の接合と配管工事	配管工、ヒートポンプ設置業者	すべて
冷媒の取り扱い	F ガス認定を有するヒートポンプ設置業者 可燃物取扱資格を有するヒートポンプ設置業者	現場での F ガス冷媒の取り扱いを伴うシステム 現場での炭化水素冷媒の取り扱いを伴うシステム
<b>電気工事</b>		
電気配線	電気技師、ヒートポンプ設置業者	すべて
<b>システム構成</b>		
システムの最終設定、冷媒ガスの安定化	ヒートポンプ設置業者	すべて

設置業者の水準を維持することは、業界の成長にとって依然として不可欠である。業者のスキル不足は、システム性能の低下や、水漏れや電気系統の問題といった保守上の問題の長期化の原因となり、メーカーが提供する保証や住宅保険の条件に抵触したり、ヒートポンプ業界に対する風評被害のリスクをもたらしたりするおそれがある。さらに、ヒートポンプの性能に関する時代遅れな考え方に基づいて活動し続けている設置業者が多いため、ボイラを交換する際に相談すると、消費者にヒートポンプの採択を思いとどませようとするおそれがある。いずれの主要市場にも規制機関や業界団体が設計した認定制度が存在するが、範囲と期間が異なっており、国際的に調和されていない。中国では、ヒートポンプを含む産業用・業務用冷凍機や空調機器のサービスを行う企業に対する自主的な資格認定が実施されている。欧州では、設置者に関連する認定を取得するか、所定の年数の関連する経験を証明することが必要である。

ヒートポンプの安全で適切な設置には訓練が必要とされるが、煩雑な認定制度は職人がこれらの資格を取得するのを思いとどませる可能性がある。追加的な訓練による負担や、費用、各地域におけるヒートポンプ需要の欠如により、職人が訓練や認定に申し込むのを躊躇させ、従来型の暖房設備ビジネスの事業主がヒートポンプへと多角化するのを思いとどませる可能性がある。これらの障壁を軽減するために、ヒートポンプの認定は、既存の資格制度に基づいて構築し、電気技師、配管工、その他の暖房、冷凍技術者向けの既存のカリキュラムや火災リスク安全訓練に組み込むことが可能である。独自の設置訓練プログラムを提供するメーカーも増えており、より対象を絞って期間を短縮することで、企業は認定設置業者の労働力をより迅速に増大することができる。メーカーと法で資格認定や訓練を標準化することは、設置業者の労働力を増大し、国や地域間での労働移動性を高められる可能性がある。石油ボイラやガスボイラの禁止や、ヒートポンプ業界の見通しの長期的な確実性を高めるその他の政策も、労働者の業界参入を後押しする可能性がある。

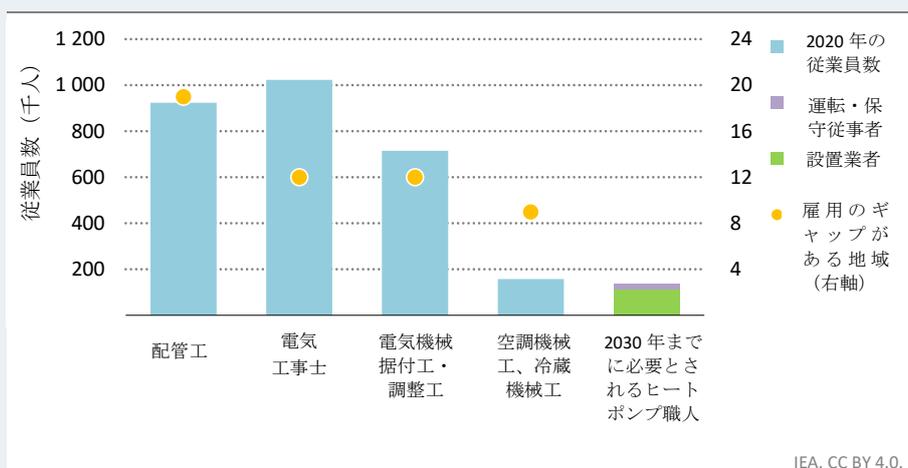
政府は、ヒートポンプ設置業者の訓練と採用を促進する上で、大きな役割を果たすことができる。産業界と協力して認定制度を更新し、職人が職業訓練を受けるためのインセンティブを提供し、実習制度を支援する必要がある。英国のように、設置業者を通じてインセンティブを提供することも可能である。オランダ、英国、EU 加盟国などのいくつかの国では、ヒートポンプ設置業者の訓練に重点を置いた政府プログラムが、特に REPowerEU の開始以来、導入されている（ボックス 3.2）。

メーカーは、より堅牢で、標準化され、設置が容易なヒートポンプを設計し、正しい設置に役立つ適切なデジタルツールやアプリケーションを設置業者に提供することによって、設置業者不足の緩和に貢献することも可能である。建物特性に関するオープンデータは、ヒートポンプの簡単な設置方法を評価し、顧客と設置業者を結びつけるデジタルツールを活用した革新的なビジネスモデルに役立つ可能性がある。

ボックス 3.2 ▶ 欧州連合におけるヒートポンプ設置業者に対する需要の増大への対応

APS シナリオに反映されているヒートポンプに関する REPowerEU の目標では、訓練を受けたヒートポンプ設置業者の数を 2019 年の約 4 万人から 2030 年までに 11 万人に増加させることが求められている。設置業者による冷媒の取り扱いを必要とするヒートポンプの設置工事には、すべての EU 加盟国で認定が義務付けられている。これは、モノブロックなどの自己完結型システムを除く、大半のシステムが該当する。キガリ改正に沿って F ガス冷媒の使用に関する制限の増加に伴って、必要な認定は F ガスの取り扱いから可燃物の取り扱いに移行する可能性がある。しかし、再生可能エネルギー指令の下での相互に承認された認定の要求事項にもかかわらず、大半の設置工事の場合、設置業者の訓練と認定の要求事項が国によって異なっている。国によってヒートポンプ市場の成熟度に大きな差があることを考えると、ヒートポンプ設置業者の訓練やベストプラクティスのノウハウの移転に関する国同士の協力は、高効率かつ高品質な設置工事を確保し、REPowerEU の目標を達成するのに役立つ可能性がある。

図 3.7 ▶ 欧州連合における労働力不足のヒートポンプ設置に関連する職業の従業員数、2020 年と 2030 年



EU 諸国の多くは、ヒートポンプ設置の鍵となる職業での労働力不足に直面している。ヒートポンプを設置するために短期間でスキルを向上できる職人の人数は 2030 年に需要を上回る可能性がある。

注:国際標準職業分類で定義されている職業。「雇用のギャップがある地域」には、3 つの自治区に分かれているベルギーを含む EU27 カ国と、スイスおよびノルウェーが含まれている。

出典:ELA (2021) に基づく IEA の分析。

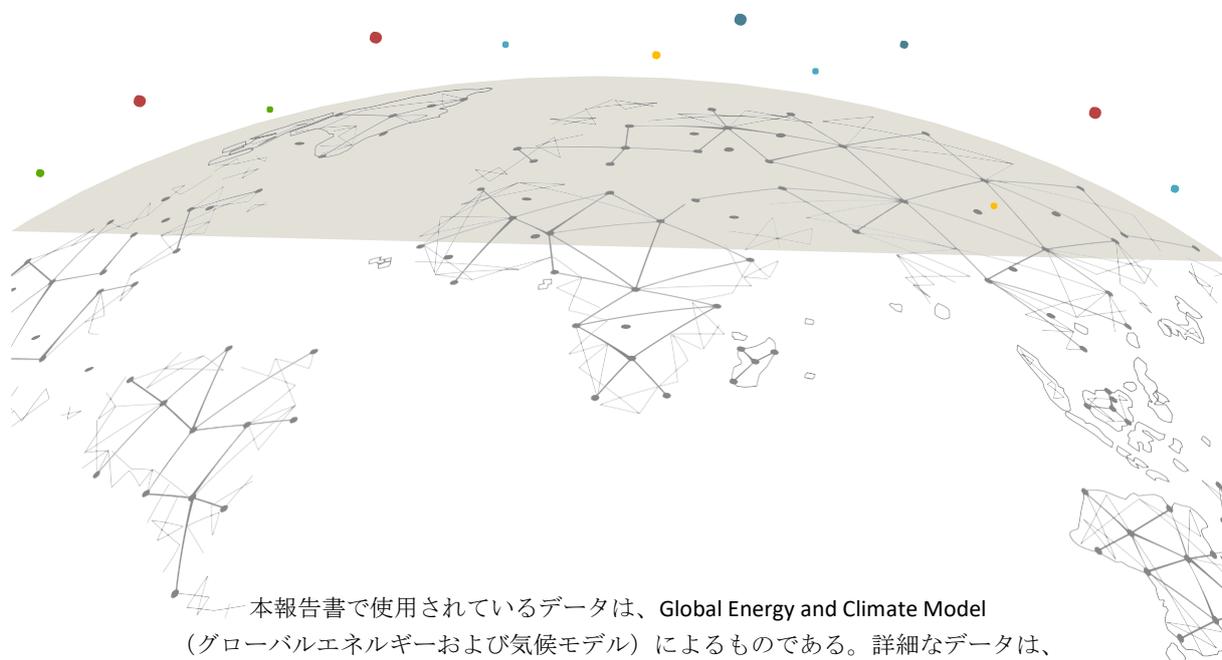
追加的な訓練による負担は、すでに逼迫している欧州の労働市場に負担をかけることになる。配管工、空調機械工、冷蔵機械工、電気機械据付工・調整工、電気工事士など、ヒートポンプの設置工事に関連するさまざまな職業で職人が不足している(図 3.7)。最近の調査では、配管工の雇用のギャップが最も多くの国から報告され、この職業はすべての経済部門の中で不足している職業の第2位にランクされている(ELA, 2021)。しかし、ヒートポンプ設置業者とヒートポンプのサービスを行っている職人の数は、関連職業における現在の雇用よりもはるかに少ないままである。そのため、ヒートポンプに特化した訓練を既存の認定制度に組み込むことと、すでに関連する職業に就いている職人がヒートポンプの認定の取得に取り組むためのインセンティブを提供することに全面的に重点が置かれている。

設置業者の需要の高まりに対応するには、迅速なスキルの向上と訓練が不可欠である。いくつかの対策により、労働力不足が悪化するリスクを軽減することができる。具体的には、配管工、電気工事士、HVAC 整備士の既存の認定カリキュラムの見直し、訓練時間と再認定の最小化、訓練費用の補助、訓練の要求事項の可視性を向上し、労働移動性を改善する EU 全域での包括的な認定制度の導入などが挙げられる。

# ANNEXES

# World Energy Outlook 2022

## 背景データの検討



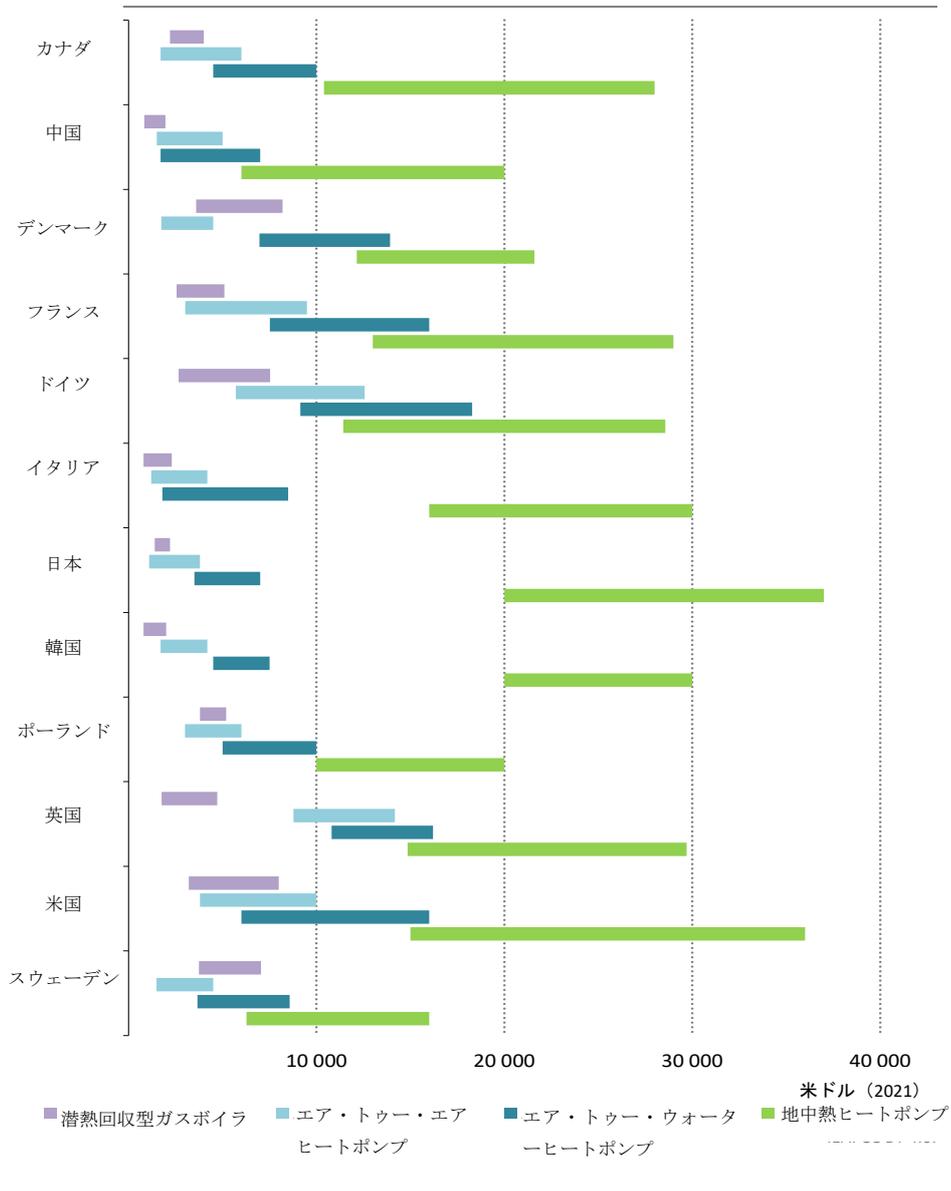
本報告書で使用されているデータは、Global Energy and Climate Model (グローバルエネルギーおよび気候モデル) によるものである。詳細なデータは、下記のリンクにある最新版のWorld Energy Outlookレポートに記載されている。

[iea.li/weo22](https://www.iea.li/weo22)

## 技術コストと経済的な支援制度

## 技術コスト

図 A.1 ▶ 主要国における技術別の初期費用の範囲、2022 年



## 経済的な支援制度

表 A.1 ▶ 主要国における住宅用ヒートポンプの経済的な支援制度、2022年9月

	助成金	税金 還付	融資
<b>オーストラリア</b>			
小規模技術証明書	●		
無金利融資制度			●
<b>オーストリア</b>			
石油とガスからの撤退	●		
Sauber Heizen für Alle (みんなのクリーンな暖房) : 個人	●		
<b>ベルギー</b>			
ブリュッセル:Primes RENOLUTION (RENOLUTION プレミアム)	●		
ワロン地域:Prime Habitation (住宅プレミアム)	●		
ワロン地域:Renopack			●
フランダース地域:My Renovation Premium (マイリノベーションプレミアム)	●		
フランダース地域:My Renovation Premium (マイリノベーションローン)			●
国:ヒートポンプの VAT 軽減税率		●	
<b>ブルガリア</b>			
省エネルギーおよび再生可能資源基金			●
税制手段		●	
<b>カナダ</b>			
グリーンホームイニシアチブ助成金	●		
グリーンホームイニシアチブ融資			●
<b>中国</b>			
北部諸省クリーン冬季暖房計画	●		
<b>クロアチア</b>			
家庭用住宅のエネルギーリノベーションプログラム	●		
<b>チェコ</b>			
Nová zelená úsporám (新グリーンセービング) :暖房設備の交換	●		
Nová zelená úsporám (新グリーンセービング) :新しい給湯器	●		
Kotlíkové dotace (ボイラ補助金)	●		
民間銀行融資			●
<b>デンマーク</b>			
Bygningspuljen (建物プール)	●		
低金利融資			●

表 A.1 ▶ 主要国における住宅用ヒートポンプの経済的な支援制度、2022年9月（続き）

	助成金	税金還付	融資
<b>フィンランド</b>			
石油およびガス暖房の置き換え計画	●		
所得税控除:基本的な改善作業		●	
<b>フランス</b>			
Ma Prime Renov'	●		
省エネルギー証書 (CEE)	●		
ecoPTZ:Eco-prêt à taux zéro (ゼロ金利融資)			●
ヒートポンプの VAT 軽減税率		●	
<b>ドイツ</b>			
効率的な建設物のための連邦基金 (BEG) :BEG EM (個別対策)	●		
効率的な建設物のための連邦基金 (BEG) :BEG WG (住宅用建物)			●
所得税法: 第 35c 条 (住宅用建物)		●	
<b>ギリシャ</b>			
セーブプログラム: εξοικονομώ	●		
セーブプログラム融資: εξοικονομώ			●
税制手段 I:法律 No. 2238/1994		●	
<b>ハンガリー</b>			
ホームリノベーション助成金	●		
住宅用グリーン資本要件割引プログラム			●
<b>イタリア</b>			
Conto Termico 2.0 (インセンティブ制度)	●		
スーパーボーナス 110%		●	
エコボーナス 65%		●	
ヒートポンプの VAT 軽減税率		●	
<b>アイルランド</b>			
SEAI 住宅エネルギー助成金ヒートポンプのエネルギー性能向上の個別助成金	●		
SEAI 住宅エネルギー助成金全額資金提供のエネルギー性能向上	●		
An Pos 住宅エネルギー改善融資			●
<b>日本</b>			
ヒートポンプ補助金プログラム	●		
<b>韓国</b>			
KEPCO (韓国電力公社) :ヒートポンプ設置の支援	●		
民間銀行融資			●

表 A.1 ▶ 主要国における住宅用ヒートポンプの経済的な支援制度、2022年9月（続き）

	助成金	税金 還付	融資
<b>ラトビア</b>			
VARAM:家庭における再生可能エネルギー資源の使用に対する支援	●		
経済省:民間住宅のリノベーションと省エネルギー	●		
国が後援する民間銀行融資			●
<b>リトアニア</b>			
環境省:再生可能エネルギー源の使用	●		
民間銀行融資			●
<b>ルクセンブルク</b>			
PRIME House 2017	●		
ヒートポンプの VAT 軽減税率		●	
KlimaPrêt:ゼロ金利			●
KlimaPrêt:金利引き下げ			●
民間銀行:エネルギーリノベーション融資			●
<b>オランダ</b>			
ISDE:持続可能なエネルギーと省エネルギーのための投資助成金	●		
全国熱ファンド低金利融資			●
<b>ニュージーランド</b>			
エネルギー効率保全局:Warmer Kiwi Homes プログラム	●		
健康住宅基準		●	
民間銀行:グリーン融資			●
<b>ノルウェー</b>			
Enova 助成金	●		
<b>ポーランド</b>			
クリーンエアプログラムクリーンエア	●		
クリーンエアプログラムストップスモッグ	●		
クリーンエアプログラム熱近代化減税		●	
Moje Ciepło（私の暖かさ）	●		
民間銀行融資			●
<b>ポルトガル</b>			
再生可能エネルギー設備融資			●
<b>ルーマニア</b>			
Casa Eficienta Energetic（エネルギー効率化住宅）プログラム	●		

表 A.1 ▶ 主要国における住宅用ヒートポンプの経済的な支援制度、2022年9月（続き）

	助成金	税金 還付	融資
<b>スロバキア</b>			
Zelená domácnostiam II（住宅向けグリーンIIプログラム）	●		
スロバキアの復興・回復計画	●		
<b>スロベニア</b>			
Eko Sklad（環境ファンド）:補助金	●		
Eko Sklad（環境ファンド）:ソフトローン（長期低金利融資）			●
<b>スペイン</b>			
PREE 5000:人口減少に直面する自治体における建物のエネルギー再生プログラム	●		
RD 477/2021 プログラム 6:住宅部門での再生可能エネルギー熱システムの導入	●		
RD 853/2021:住居用建物および公営住宅の改修	●		
<b>スウェーデン</b>			
ROT-avdrag:減税		●	
<b>英国</b>			
ボイラアップグレード制度	●		
家庭エネルギースコットランド:無金利融資			●
無料ヒートポンプ助成金スコットランド	●		
ヒートポンプの VAT 軽減税率		●	
<b>米国</b>			
住宅用再生可能エネルギー税還付:地熱ヒートポンプ		●	
インフレ抑制法:ヒートポンプ税還付		●	
インフレ抑制法:高効率電気住宅リベートプログラム	●		



## 定義

本 Annex は、単位と一般的な換算係数、燃料、プロセスおよび部門の定義、地域および国のグループ、略語と頭文字語など、本報告書を通して使用されている用語に関する一般的な情報を提供するものである。

## 単位

エネルギー	EJ	エクサジュール (1 ジュール x 10 <sup>18</sup> )
	MWh	メガワット時
	GWh	ギガワット時
	TWh	テラワット時
ガス	bcm	10 億立方メートル
質量	kg	キログラム
	t	トン (1 トン=1,000 kg)
	kt	キロトン (1×10 <sup>3</sup> トン)
	Mt	100 万トン (1×10 <sup>6</sup> トン)
	Gt	ギガトン (1×10 <sup>9</sup> トン)
通貨	100 万米ドル	1×10 <sup>6</sup> 米ドル
	10 億米ドル	1×10 <sup>9</sup> 米ドル
	USD/t CO <sub>2</sub>	二酸化炭素 1 トンあたりの米ドル
電力	W	ワット (1 ジュール/秒)
	kW	キロワット (1×10 <sup>3</sup> ワット)
	MW	メガワット (1×10 <sup>6</sup> ワット)
	GW	ギガワット (1×10 <sup>9</sup> ワット)

## エネルギーの一般的な換算係数

		変換するための乗数:		
		EJ	bcme	GWh
換算元	EJ	1	27.78	2.778 x 10 <sup>5</sup>
	bcme	0.036	1	9 999
	GWh	3.6 x 10 <sup>-6</sup>	1 x 10 <sup>-4</sup>	1

注:天然ガスは 44.1 kg あたり 1 MJ の低位発熱量とする。天然ガス当量 10 億立方メートル (bcme) との間での換算は代表的な乗数で行うが、国に固有のエネルギー密度を使用しているため、IEA バランス間で天然ガス体積を換算して得られた平均値とは異なる場合がある。全体を通して低位発熱量が使用されている。

## 定義

**建物:**建物部門には、住宅用、業務用、公共用およびその他の建物で使用されるエネルギーが含まれる。建物のエネルギー使用には、冷暖房、給湯、照明、機器および調理機器が含まれる。

**二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>):**炭素原子 1 つと酸素原子 2 つからなる気体。重要な温室効果ガス (熱を閉じ込める) である。

**クリーンエネルギー:**電力において、クリーンエネルギーには、再生可能エネルギー、原子力、二酸化炭素回収・有効利用・貯留 (CCUS) を備えた化石燃料を用いた発電、蓄電池および電力網が含まれる。効率において、クリーンエネルギーには建物、産業および、航空機燃料と内航船を除く輸送における省エネルギーが含まれる。最終用途において、クリーンエネルギーには、再生可能エネルギーの直接利用、電気自動車、建物、産業および国際海上輸送の電化、産業分野における CCUS および DAC が含まれる。燃料供給において、クリーンエネルギーには、低排出燃料が含まれる。

**石炭:**一次炭 (すなわち亜炭、コークス、一般炭) と派生燃料 (特許燃料、褐炭ブリケット、コークス炉コークス、ガスコークス、ガス工場ガス、コークス炉ガス、高炉ガス、酸素鉄炉ガス) の両方が含まれる。泥炭も含まれる。

**成績係数 (COP):**COP は、エネルギー入力に対して供給される有用なエネルギーの量 (すなわち暖房または冷房出力) を測定するために使用される比率である。COP が高いほど、装置の効率は高い。

**デマンドサイドフレキシビリティリソース:**総電力需要に影響を与えずに時間的に負荷曲線をシフトさせたり、短時間の負荷遮断や一定時間の需要強度の調整などで負荷を削減したりすることで、負荷曲線に影響を与えることができる資源を表す。

**電力需要:**総発電量から自家消費発電量を差し引き、ネット取引量 (購入量から販売量を差し引いたもの) を加え、送配電損失を差し引いたものとして定義される。

**発電量:**自家消費に必要な発電量を含め、電力のみまたはコージェネレーション (熱電併給) の発電所によって発電された総発電量として定義される。これは総発電量とも呼ばれる。

**エネルギー部門の温室効果ガス (GHG) 排出量:**エネルギー関連および産業プロセスの CO<sub>2</sub> 排出量に、エネルギー部門と産業部門から漏出、放出されたメタンおよび亜酸化窒素排出量を加えたもの。

**エネルギーサービス:**有用エネルギーを参照。

**F ガス:**冷凍冷蔵、空調、ヒートポンプなどさまざまな用途で使用されるフッ素系ガスで、冷媒サイクルの主な構成要素である。

**化石燃料:**石炭、天然ガス、石油が含まれる。

**地熱:**地熱エネルギーは、地表面下の熱である。水および／または蒸気が地熱エネルギーを地表まで運ぶ。その特性により、地熱エネルギーは冷暖房に使用したり、温度が適切な場合にはクリーン電力の発電に利用したりすることが可能である。

**地球温暖化係数 (GWP) :** この指標により、さまざまな温室効果ガスを気候変動への影響という観点から比較することができ、CO<sub>2</sub>換算の計算に使用される。CO<sub>2</sub>の GWP が 1 に設定されているため、他のすべてのガスは CO<sub>2</sub>に対して分類される。大気中のガスのさまざまな寿命を説明するための、最も一般的な指標は 100 年 GWP 値であるが、20 年 GWP 値が使われることもある。GWP<sub>100</sub> が 27 のガスは、100 年の期間で CO<sub>2</sub>の 27 倍強い影響を地球温暖化に及ぼす。

**熱 (最終用途) :**化石燃料または再生可能燃料の燃焼、直接地熱または太陽熱システム、発熱化学プロセス、および電力 (抵抗加熱または周囲の空気や液体から熱を取り出すことができるヒートポンプによる) から得られる。この分類は、建物内の暖房、給湯、調理、産業部門での脱塩、プロセス用途など幅広い最終用途を指す。冷却用途は含まれない。

**熱 (供給) :**燃料の燃焼、原子炉、地熱資源、太陽光の捕捉によって得られる。加熱や冷却に使用したり、輸送や発電のための機械的エネルギーに変換したりすることができる。業務用の販売熱量は、発電に割り当てられた燃料投入量とともに総最終消費量として報告されている。

**ヒートポンプ:**ヒートポンプは、周囲の空気、地中に蓄えられた地熱エネルギー、近隣の水熱源、工場廃熱などの熱源から熱を取り出し、その熱を増幅して、必要とする場所に伝達する。

**温水ヒートポンプ:** 水を用いてヒートポンプから配管を通じ、放熱器または床暖房を介して各部屋に熱を移動させる温水暖房設備で使用されるヒートポンプ。**投資:**投資とは、エネルギー供給、インフラ、最終需要および省エネルギーに対する設備投資である。燃料供給投資には、石油、ガス、石炭、低排出燃料の生産、変換および輸送が含まれる。電力部門の投資には、発電、電力網 (送電、配電、電気自動車用公共充電器) および蓄電池の新規建設と改修が含まれる。省エネルギーの投資には、建物、産業および運輸の効率向上が含まれる。その他の最終需要の投資には、再生可能エネルギーを直接利用するための機器の購入、電気自動車、建物、産業および国際海上輸送の電化、低排出燃料を使用するための機器、産業分野における CCUS および DAC が含まれる。データおよび予測は、プロジェクトの実施期間中の支出を反映しており、特に断りのない限り、2021 年の米ドル建ての実質ベースで表示されている。1 年間に報告された投資総額は、その年に使われた金額を反映している。

**冷暖房の平準化コスト:**冷暖房の平準化コストは、機器と設置の資本コストを考慮し、機器の耐用年数中に 1 MWh の冷暖房を提供するための平均コストを見積もる。運転費には、燃料と定期保守のコストを含む。

**CO<sub>2</sub> 排出係数の低い電力:** 再生可能エネルギー技術、低排出型水素ベースの発電、低排出型水素ベースの燃料発電、原子力発電所および CCUS を備えた化石燃料発電所などが含まれる。

**低排出燃料:** 新型バイオエネルギー、低排出型水素および低排出型水素ベースの燃料が含まれる。

B

**天然ガス:**液化状態かガス状かを問わず、主にメタンからなる、鉱床で発生するガスが含まれる。また、ガス状の炭化水素のみを産出するガス田から発生する非随伴ガスと原油生産に伴って産出される随伴ガスの両方、さらに炭鉱から回収されるメタン（炭鉱ガス）が含まれる。天然ガス液、製造ガス（都市の廃棄物、産業廃棄物、または下水から産生）および放出またはフレア量は含まれない。立方メートル単位のガス データは、高位発熱量ベースで表され、15°C、760 mmHg（標準条件）で測定されている。主に他の燃料との比較のため石油換算トンで表示されたガスのデータは、低位発熱量ベースである。低位発熱量と高位発熱量の差は、燃料の燃焼時に生成される水蒸気の気化潜熱である（ガスの場合、低位発熱量は高位発熱量より 10%低い）。

**石油:** 在来型および非在来型石油生産の両方が含まれる。石油製品には、精製ガス、エタン、液化石油ガス、航空機用ガソリン、自動車用ガソリン、ジェット燃料、灯油、軽油 / ディーゼル油、重油、ナフサ、揮発油、潤滑油、ピチューメン、パラフィン、ワックス、石油コークスなどが含まれる。

**発電:** 発電所、熱供給プラントおよびコージェネレーションプラントでの燃料使用を意味する。発電事業者のプラントと自家消費分を生産する小規模プラント（自家発電者）の両方が含まれる。

**冷媒:** 冷凍機器（ヒートポンプ、エアコン、冷蔵庫など）の冷凍サイクルを通じて熱を伝達する物質。

**再生可能エネルギー:** 発電および熱製造のためのバイオエネルギー、地熱、水力、太陽光発電（PV）、集光型太陽光発電、風力および海洋（潮流・波力）発電などのエネルギーが含まれる。

**住宅用:** 冷暖房、給湯、照明、家電、電子機器、調理など家庭によって使用されるエネルギー。

**サービス:** オフィス、店舗、ホテル、レストランなどの業務用施設内および学校、病院、官公庁などの公共施設の建物内で使用されるエネルギー。サービスにおけるエネルギー使用には、冷暖房、給湯、照明、機器、調理および脱塩が含まれる。

**太陽光発電（PV）:** 太陽光発電セルから生み出された電気。

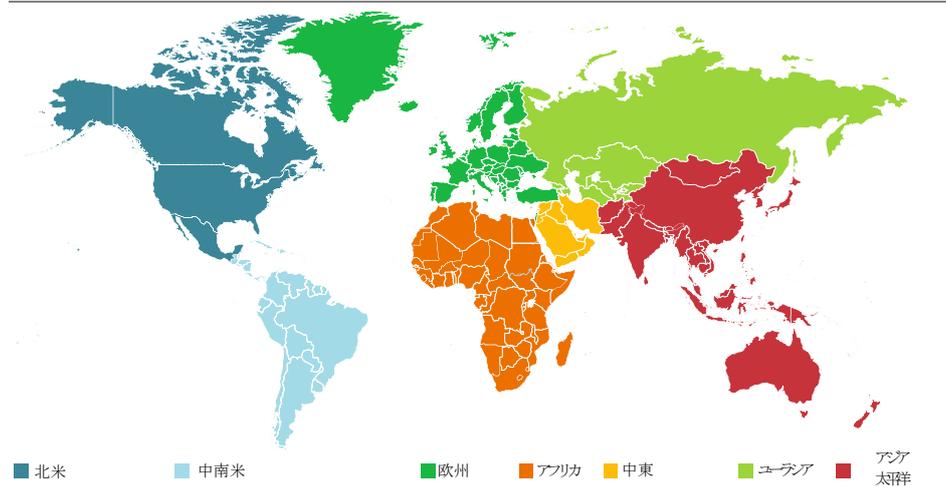
**総最終消費量（TFC）:** さまざまな最終需要部門による消費量の合計である。TFC は次の部門でのエネルギー需要に分類される。産業（製造業、鉱業、化学製品製造、高炉、コークス炉など）、運輸、建物（住宅、サービスなど）、その他（農業およびその他の非エネルギー使用など）。運輸部門に含まれる世界レベルを除き、国際海上輸送および航空機燃料は除外される。

**有用エネルギー** エンドユーザーが需要を満たすために利用できるエネルギーのことを指す。これは、エネルギーサービス需要とも呼ばれる。使用段階での変換損失の結果として、大半の技術で有用エネルギー量は対応する最終エネルギー需要よりも少なくなる。電気を使う機器は、他の燃料を使う機器に比べて変換効率が高いことが多く、単位消費エネルギーに対して、より多くのエネルギーサービスを提供できることを意味する。

**ゼロカーボン対応建物**ゼロカーボン対応建物は、エネルギー効率が高く、再生可能エネルギーを直接使用するか、電気や地域熱供給など完全な脱炭素化が可能なエネルギーを使用する。

## 地域および国のグループ

図 B.1 ▶ 主な国のグループ



注:この地図は、いかなる領土の地位または主権、国際的な国境および境界線の設定、いかなる領土、都市または地域の名称をも侵害するものではない。

**先進国:**OECD 地域グループとブルガリア、クロアチア、キプロス<sup>1,2</sup>、マルタ、ルーマニア。

**アフリカ:**北アフリカとサハラ以南のアフリカ地域グループ。

**アジア太平洋地域:**東南アジア地域グループおよびオーストラリア、バングラデシュ、朝鮮民主主義人民共和国（北朝鮮）、インド、日本、韓国、モンゴル、ネパール、ニュージーランド、パキスタン、中華人民共和国（中国）、スリランカ、台湾、その他のアジア太平洋地域の国および地域。<sup>3</sup>

**カスピ海:**アルメニア、アゼルバイジャン、グルジア、カザフスタン、キルギス、タジキスタン、トルクメニスタン、ウズベキスタン。

**中南米:**アルゼンチン、ボリビア多民族国（ボリビア）、ブラジル、チリ、コロンビア、コスタリカ、キューバ、キュラソー、ドミニカ共和国、エクアドル、エルサルバドル、グアテマラ、ハイチ、ホンジュラス、ジャマイカ、ニカラグア、パナマ、パラグアイ、ペルー、スリナム、トリニダード・トバゴ、ウルグアイ、ベネズエラ・ボリバル共和国（ベネズエラ）およびその他の中南米の国および地域。<sup>4</sup>

**中国:**中華人民共和国と香港を含む。

**発展途上アジア:**オーストラリア、日本、韓国、ニュージーランドを除くアジア太平洋地域グループ。

**新興国・発展途上国:**先進国の地域グループに含まれないその他のすべての国。

B

**ユーラシア:**カスピ海地域グループとロシア連邦（ロシア）。

**欧州:**欧州連合地域グループとアルバニア、ベラルーシ、ボスニア・ヘルツェゴビナ、北マケドニア、ジブラルタル、アイスランド、イスラエル<sup>5</sup>、コソボ、モンテネグロ、ノルウェー、セルビア、スイス、モルドバ、トルコ、ウクライナ、英国。

**欧州連合 (EU) :**オーストリア、ベルギー、ブルガリア、クロアチア、キプロス<sup>4,2</sup>、チェコ、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイルランド、イタリア、ラトビア、リトアニア、ルクセンブルク、マルタ、オランダ、ポーランド、ポルトガル、ルーマニア、スロバキア、スロベニア、スペイン、スウェーデン。

**IEA (国際エネルギー機関) :**チリ、コロンビア、コスタリカ、アイスランド、イスラエル、ラトビア、スロベニアを除く OECD 地域グループ。

**ラテンアメリカ:**中南米地域グループとメキシコ。

**中東:**バーレーン、イラン・イスラム共和国（イラン）、イラク、ヨルダン、クウェート、レバノン、オマーン、カタール、サウジアラビア、シリア・アラブ共和国（シリア）、アラブ首長国連邦、イエメン。

**非 OECD:**OECD 地域グループに含まれないその他のすべての国。

**非 OPEC:**OPEC 地域グループに含まれないその他のすべての国。

**北アフリカ:**アルジェリア、エジプト、リビア、モロッコ、チュニジア。

**北米:**カナダ、メキシコ、米国。

**OECD (経済協力開発機構) :**オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、チリ、チェコ、コロンビア、コスタリカ、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イスラエル、イタリア、日本、韓国、ラトビア、リトアニア、ルクセンブルク、メキシコ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、スロバキア、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国。

**OPEC (石油輸出国機構) :**アルジェリア、アンゴラ、コンゴ共和国（コンゴ）、赤道ギニア、ガボン、イラン・イスラム共和国（イラン）、イラク、クウェート、リビア、ナイジェリア、サウジアラビア、アラブ首長国連邦、ベネズエラ・ボリバル共和国（ベネズエラ）

**東南アジア:**ブルネイ・ダルサラーム国、カンボジア、インドネシア、ラオス人民民主共和国、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム。これらの国はすべて東南アジア諸国連合（ASEAN）の加盟国である。

**サハラ以南のアフリカ:**アンゴラ、ベナン、ボツワナ、カメルーン、コンゴ共和国（コンゴ）、コートジボワール、コンゴ民主共和国、エリトリア、エチオピア、ガボン、ガーナ、ケニア、

モーリシャス、モザンビーク、ナミビア、ニジェール、ナイジェリア、セネガル、南アフリカ、南スーダン、スーダン、タンザニア連合共和国（タンザニア）、トーゴ、ザンビア、ジンバブエ、その他のアフリカの国および地域。<sup>6</sup>

### 国に関する注記

<sup>1</sup> トルコ共和国による注記:「キプロス」に関する本文書中の情報は、島の南部に関するものである。この島のトルコ系とギリシャ系キプロス人の両方を代表する単一の当局は存在しない。トルコは北キプロス・トルコ共和国（TRNC）を承認している。国連の枠組みの中で恒久的かつ公正な解決策が見出されるまで、トルコは「キプロス問題」に関する立場を維持するものとする。

<sup>2</sup> OECD および欧州連合の全加盟国による注記:キプロス共和国は、トルコを除くすべての国連加盟国によって承認されている。本文書に記載されている情報は、キプロス共和国政府の実効支配下にある地域に関するものである。

<sup>3</sup> 次の国については個別のデータを入手できないため、総計で推定されている:アフガニスタン、ブータン、クック諸島、フィジー、仏領ポリネシア、キリバス、マカオ（中国）、モルディブ、ニューカレドニア、パラオ、パプアニューギニア、サモア、ソロモン諸島、東ティモール、トンガ、バヌアツ。

<sup>4</sup> 次の国については個別のデータを入手できないため、総計で推定されている:アンギラ、アンティグア・バーブーダ、アルバ、バハマ、バルバドス、バリーズ、バミューダ、ボネール島、英領バージン諸島、ケイマン諸島、ドミニカ、フォークランド諸島（マルビナス）、仏領ギアナ、グレナダ、グアドループ、ガイアナ、マルティニーク、モントセラト、サバ、シント・ユースタティウス島、セントクリストファー・ネイビス、セントルシア、サンビエール島およびミクロン島、セントビンセント及びグレナディーン諸島、シント・マルテン、タークス・カイコス諸島。

<sup>5</sup> イスラエルの統計データは、関連するイスラエル当局から提供され、その責任の下にある。OECD および / または IEA によるこのようなデータの使用は、国際法の条件の下でゴラン高原、東エルサレムおよびヨルダン川西岸のイスラエル入植地の地位を損なうものではない。

<sup>6</sup> 次の国地域については個別のデータを入手できないため、総計で推定されている:ブルキナファソ、ブルンジ、カーボベルデ、中央アフリカ共和国、チャド、コモロ、ジブチ、エスワティニ王国、ガンビア、ギニア、ギニアビサウ、レソト、リベリア、マダガスカル、マラウイ、マリ、モーリタニア、レユニオン、ルワンダ、サントメ・プリンシペ、セイシェル、シエラレオネ、ソマリア、ウガンダ。

### 略語と頭字語

APS	発表誓約シナリオ
CCUS	二酸化炭素回収・有効利用・貯留
CDD	冷房デGREEデー
CO <sub>2</sub>	二酸化炭素
CO <sub>2</sub> -eq	二酸化炭素換算量
COP	成績係数
EBRD	欧州復興開発銀行
EPC	エネルギー性能契約
ESCO	エネルギーサービス企業
EU	欧州連合
EV	電気自動車
F-gas	フッ素系ガス
G7	グループ・オブ・セブン
GHG	温室効果ガス
GWP	地球温暖化係数
GX	グリーントランスフォーメーション
HDD	暖房デGREEデー
HC	炭化水素

<b>HFC</b>	ハイドロフルオロカーボン
<b>HF0</b>	ハイドロフルオロオレフィン
<b>HPT TCP</b>	ヒートポンプ技術協力プログラム
<b>HVAC</b>	暖房、換気および空調
<b>IEA</b>	国際エネルギー機関
<b>IEC</b>	国際電気標準会議
<b>IPCC</b>	気候変動に関する政府間パネル
<b>MVR</b>	自己蒸気機械圧縮
<b>NO<sub>x</sub></b>	窒素酸化物
<b>NZE</b>	2050年ネット・ゼロ・エミッションシナリオ
<b>O&amp;M</b>	運用・保守
<b>OECD</b>	経済協力開発機構
<b>PFAS</b>	パーフルオロアルキル化合物 およびポリフルオロアルキル化合物
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	微粒子物質
<b>PV</b>	太陽光発電
<b>RD&amp;D</b>	研究開発・実証
<b>SO<sub>2</sub></b>	二酸化硫黄
<b>STEPS</b>	公表政策シナリオ
<b>TFA</b>	トリフルオロ酢酸
<b>TRL</b>	技術成熟度レベル
<b>TSO</b>	送電事業者
<b>UNEP</b>	国連環境計画
<b>US</b>	米国
<b>WEO</b>	World Energy Outlook

## 第1章: ヒートポンプ導入の見通し

Aalborg University (2013), Heat Roadmap Europe 2050: Second pre-study for the EU27, [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/77342092/Heat\\_Roadmap\\_Europe\\_Pre\\_Study\\_II\\_May\\_2013.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/77342092/Heat_Roadmap_Europe_Pre_Study_II_May_2013.pdf)

AHRI (Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute) (2022), Monthly Shipments, <https://www.ahrinet.org/analytics/statistics/monthly-shipments>

BASF (2022), BASF, SABIC and Linde start construction of the world's first demonstration plant for large-scale electrically heated steam cracker furnaces, <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html>

BMWK (Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz) [Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, Germany] (2022), Boost for green district heating: Federal funding for efficient heat networks (BEW) begins, <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2022/09/20220915-boost-for-green-district-heating-federal-funding-for-efficient-heat-networks-bew-begins.html>

Chinabaogao (2022), Statistics on domestic sales, domestic sales and enterprise distribution of air source heat pump industry in my country, <https://www.chinabaogao.com/data/202208/606704.html>, [in Chinese].

Clean Energy Wire (2022), Stiebel Eltron to invest 600 million euros to expand heat pump production capacity, <https://www.cleanenergywire.org/news/stiebel-eltron-invest-600-million-euros-expand-heat-pump-production-capacity>

EHPA (European Heat Pump Association) (2021), <https://www.ehpa.org/market-data>

Energistyrelsen [Danish Energy Agency] (2022), Klimastatus og –fremskrivning 2022 (KF22): El og fjernvarme (ekskl. affaldsforbrænding) [Climate status and projection 2022 (KF22): Electricity and district heating (excluding waste incineration)], [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Basisfremskrivning/kf22\\_sekternotat\\_8a\\_produktion\\_af\\_el\\_og\\_fjernvarme.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Basisfremskrivning/kf22_sekternotat_8a_produktion_af_el_og_fjernvarme.pdf), [in Danish].

European Commission (2022a), Heat Pumps in the European Union, [https://setis.ec.europa.eu/heat-pumps-european-union\\_en](https://setis.ec.europa.eu/heat-pumps-european-union_en)

European Commission (2022b), REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2022:108:FIN>

European Commission (2020), ReUseHeat: Accessible urban waste heat (Revised version) WP1 Task 1.2 Deliverable 1.4., <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cfc2bcd3&appId=PPGMS>

European Commission (2016), Mapping and analyses of the current and future (2020 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables), [https://energy.ec.europa.eu/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment-fossilrenewables-1\\_en](https://energy.ec.europa.eu/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment-fossilrenewables-1_en)

France, Ministry of Ecological Transition (2022), Pompes à chaleur [Heat pumps], <https://www.ecologie.gouv.fr/pompes-chaleur>, [in French].

GOV.UK (2020), The ten point plan for a green industrial revolution – Point 7: Greener buildings, <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution/title#point-7-greener-buildings>

Government of Italy [Ministry of Infrastructure and Transport; Ministry of Economic Development; Ministry of the Environment and Land and Sea Protection] (2019), Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima [Integrated National Plan for Energy and Climate], [https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC\\_finale\\_17012020.pdf](https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf), [in Italian].

Government of Spain (2019), Draft of the Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030, [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2019-06/ec\\_courtesy\\_translation\\_es\\_necp\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2019-06/ec_courtesy_translation_es_necp_0.pdf)

HEATLEAP (2022), HEATLEAP Project, <https://heatleap-project.eu/heatleap-project/>

Helen Ltd (2020), Katri Vala Heating and Cooling Plant, <https://www.helen.fi/en/company/energy/energy-production/power-plants/katri-vala-heating-and-cooling-plant>

HPT TCP (Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies) (2018), Heat pumps in combination with district heating increases energy efficiency at Hammarbyverket, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2018/12/annex-47hammarbyverket.pdf>

IEA (International Energy Agency) (2022a), World Energy Outlook 2022, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

IEA (2022b), Weather for Energy Tracker, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/weather-for-energy-tracker>

IEA (2022c), Global Hydrogen Review 2022, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>

IEA (2020a), Is cooling the future of heating?, <https://www.iea.org/commentaries/is-cooling-the-future-of-heating>

IEA (2020b), Energy Technology Perspectives 2020, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

JRAIA (The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association) (2022), Voluntary statistics, <https://www.jraia.or.jp/statistic/>, [in Japanese].

Madeddu, S. et al. (2020), The CO<sub>2</sub> reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat), *Environmental Research Letters*, Vol. 15/12, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbd02>

Marina, A. et al. (2021), An estimation of the European industrial heat pump market potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 139, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110545>

Maruf, N. et al. (2022), Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 53(B), <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>

Mathiesen, K. et al. (2022), Putin's war accelerates the EU's fossil fuel detox, <https://www.politico.eu/article/vladimir-putin-war-ukraine-accelerates-eu-fossil-fuel-detox/>

Morawiecka, M. and J. Rosenow (2022), From laggard to leader: How Poland became Europe's fastest-growing heat pump market, <https://foresightdk.com/from-laggard-to-leader-how-poland-became-europes-fastest-growing-heat-pump-market/>

PORT PC (2022), Ponad dwukrotny wzrost sprzedaży powietrznych pomp ciepła w I poł. 2022 roku! [Sales of air-source heat pumps more than doubled in the first half of 2022!], <https://portpc.pl/ponad-dwukrotny-wzrost-sprzedazy-powietrznych-pomp-ciepla-w-i-pol-2022-roku/>, [in Polish].

Rosenow, J. et al. (2022), Heating up the global heat pump market, *Nature Energy*, Vol. 7, <https://www.nature.com/articles/s41560-022-01104-8>

Swiss Office of Energy (2020), Qualitätsüberwachung von Kleinwärmepumpen und statistische Auswertung der Prüfergebnisse 2019 [Quality monitoring of small heat pumps and statistical evaluation of the test results 2019], <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10078>, [in German].

Toleikyte, A. and J. Carlsson (2021), Assessment of heating and cooling related chapters of the national energy and climate plans (NECPs), <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124024>

US DOE (United States Department of Energy) (2022), Residential Cold Climate Heat Pump Challenge, <https://www.energy.gov/eere/buildings/residential-cold-climate-heat-pump-challenge>

Wastewater Heat Online (2022), Case studies, <https://wastewaterheat.online/case-studies>

## 第2章: ヒートポンプ導入促進の影響

Daikin (2022), Recovery, Reclamation and Destruction of Fluorocarbons, <https://www.daikin.com/csr/environment/climatechange/fluorocarbon>

European Chemicals Agency (2022), Registry of restriction intentions until outcome, <https://echa.europa.eu/en/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>

Fraunhofer ISE (2022), Propane-based Refrigeration Circuit for Heat Pumps Achieves New Efficiency Record, <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/propane-based-refrigeration-circuit-for-heat-pumps-achieves-new-efficiency-record.html>

UBA (Umweltbundesamt) [German Environment Agency] (2021), Persistent degradation products of halogenated refrigerants and blowing agents in the environment: type, environmental concentrations, and fate with particular regard to new halogenated substitutes with low global warming potential, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistent-degradation-products-of-halogenated>

IEA (International Energy Agency) (2022a), A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas, <https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>

IEA (2022b), Playing my part - How to save money, reduce reliance on Russian energy, support Ukraine and help the planet, <https://www.iea.org/reports/playing-my-part>

IEA (2022c), World Energy Outlook 2022, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

IEA (2021a), Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources, <https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources>

IEA (2021b) Net Zero by 2050 - A roadmap for the Global Energy Sector, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IEA (2019), Examples of energy flexibility in buildings, <https://www.annex67.org/media/1921/examples-of-energy-flexibility-in-buildings.pdf>

IEC (International Electrotechnical Commission) (2022), IEC 60335-2-40:2022, <https://webstore.iec.ch/publication/62837>

IHME (Institute for Health Metrics and Evaluation) (2022), Poisoning by carbon monoxide — Level 4 cause, [https://www.healthdata.org/results/gbd\\_summaries/2019/poisoning-by-carbon-monoxide-level-4-cause](https://www.healthdata.org/results/gbd_summaries/2019/poisoning-by-carbon-monoxide-level-4-cause)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2022), Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>

Kowalski, P., & Szałański, P. (2019). Seasonal coefficient of performance of air-to-air heat pump and energy performance of a building in Poland, E3S Web of Conferences 116, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600039>

Netherlands Enterprise Agency (2022), Hybrid Heat Pumps Mandatory, <https://business.gov.nl/amendment/hybrid-heat-pump-mandatory>

Patenaude, A. (2015), CO<sub>2</sub> as a Refrigerant - Basics & Considerations, RSES journal, pp. 26-30, [https://www.rses.org/assets/rses\\_journal/0115\\_CO2.pdf](https://www.rses.org/assets/rses_journal/0115_CO2.pdf)

Purohit, P., et al. (2022a), The key role of propane in a sustainable cooling sector, Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(34), <https://doi.org/10.1073/pnas.2206131119>

Purohit, P., et al. (2022b), Achieving Paris climate goals calls for increasing ambition of the Kigali Amendment, Nature Climate Change, 12, pp. 339-342, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01310-y>

Purohit, P., & Höglund-Isaksson, L. (2017), Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005-2050 with abatement potentials and costs, <https://doi.org/10.5194/acp-17-2795-2017>

RHC and EHPA (Renewable Heating and Cooling and European Heat Pump Association) (2021), Strategic Research and Innovation Agenda for Heat Pumps: Making the technology ready for mass deployment, <https://www.rhc-platform.org/content/uploads/2021/06/RHC-ETIP-SRIA-HPs-2021v02-WEB.pdf>

RTE (Réseau de Transport d'Électricité) [Electricity Transmission Network] (2021), Energy Pathways to 2050, [https://assets.rte-france.com/prod/public/2022-01/Energy%20pathways%202050\\_Key%20results.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2022-01/Energy%20pathways%202050_Key%20results.pdf)

US DOE (United States Department of Energy) (2022), United States Energy and Employment Report, <https://www.energy.gov/policy/us-energy-employment-jobs-report-user>

UNEP (United Nations Environmental Programme) (2018), <https://www.unep.org/ozonaction/refrigerant-management-0>

UNEP (2017), Kigali Fact Sheet 2 - Current Use of HCFCs and HFCs, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/2686>

### 第3章: 障壁と解決策

Agora Energiwende (2022), Durchbruch für die Wärmepumpe: Praxis Optionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand [Breakthrough for the heat pump: Practical options for an efficient heating transition in the building stock], [https://static.agora-energiwende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-04\\_DE\\_Scaling\\_up\\_heat\\_pumps/A-EW\\_273\\_Waermepumpen\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiwende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-04_DE_Scaling_up_heat_pumps/A-EW_273_Waermepumpen_WEB.pdf), [in German].

Bloomberg News (2021), Copper Is So Pricey Now That Aircons Are Switching to Aluminum, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-09/copper-is-so-pricey-now-that-aircons-are-switching-to-aluminum?leadSource=uverify%20wall>

Bosch (2022), Thermotechnology: 300 million euros for the heat pump business, <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/thermotechnology-300-million-euros-for-the-heat-pump-business-240185.html>

Catapult Energy Systems (2022), What we do, <https://es.catapult.org.uk/>

BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) [Bureau of Geological and Mining Research, France] (2022), Greater Paris: near-surface geothermal potential mapped, <https://www.brgm.fr/en/news/press-release/greater-paris-near-surface-geothermal-potential-mapped>

Daikin (2022), Daikin Europe invests 300 million euro in new Polish heat pump heating factory, [https://www.daikin-ce.com/en\\_us/press-releases/2022/daikin-europe-invests-300-million-in-new-polish-heat-pump-heatin.html](https://www.daikin-ce.com/en_us/press-releases/2022/daikin-europe-invests-300-million-in-new-polish-heat-pump-heatin.html)

Danish Energy Agency (2022), Energimærkning af huse [Energy labeling of houses], <https://sparenergi.dk/forbruger/boligen/energimaerkning-boliger/huse>, [in Danish].

dena (2022), Heat pumps in energy consulting, <https://www.dena.de/en/newsroom/publication-detail/pub/a-survey-of-experts-the-heat-pump-in-energy-consultations/>

EBRD (European Bank for Reconstruction and Development) (2022), Green Technology Selector, <https://techselector.com/ts-en/>

ELA (European Labour Authority) (2021), Report on Labour Shortages and Surpluses, <https://www.ela.europa.eu/en/media/725>

Electric Ireland (2022), Heat Pump Price Plan, <https://www.electricireland.ie/residential/electricity-and-gas/heat-pump-price-plan>

Energie-Control Austria, MEKH and VaasaETT (2022), Household Energy Price Index (HEPI) (database), <https://www.energypriceindex.com/price-data> (accessed October 2022).

Energiesprong (2021), Serial renovation: Germany's first pilot project completed, <https://energiesprong.org/serial-renovation-germanys-first-pilot-project-completed/>

European Commission (2022), Proposal for a council regulation laying down a framework to accelerate the deployment of renewable energy,

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=COM:2022:591:FIN>

European Union (2012), Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the council on waste electrical and electronic equipment (WEEE - recast),

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:EN:PDF>

First Citizens Bank (2022), HVAC Equipment Shortage: How Will Ongoing Supply Chain Issues Affect Techs?, <https://www.firstcitizens.com/small-business/insights/skilled-trades/hvac-equipment-shortage>

Georisk (2021), Where are we with geothermal risk mitigation schemes?,

<https://www.georisk-project.eu/where-are-we-with-geothermal-risk-mitigation-schemes/>

GOV.UK (2022), A market-based mechanism for low carbon heat – Consultation,

[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1026607/clean-heat-market-consultation.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1026607/clean-heat-market-consultation.pdf)

GOV.UK (2016), Potential Cost Reductions for Air Source Heat Pumps,

[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/498962/150113\\_Delta-ee\\_Final\\_ASHP\\_report\\_DECC.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/498962/150113_Delta-ee_Final_ASHP_report_DECC.pdf)

Heptonstall, P., & Winskel, M. (forthcoming), Decarbonising home heating: An evidence review of domestic heat pump installation costs.

Hoval (2022), Hoval increases investment in heat pump production,

<https://www.hoval.co.uk/press/uk/hoval-increases-investment-in-heat-pump-production?e=>

IEA (International Energy Agency) (2022a), Energy Efficiency 2022,

<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>

IEA (2022b), Solution matrix,

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/solution-matrix/>

IEA (2021), Denmark: Strategic Market Outlook,

<https://heatpumpingtechnologies.org/publications/denmark-strategic-market-outlook/>

International Copper Alliance (2022), Home and Office: Infrastructure Reimagined

Factsheet, <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2022/02/ICA-IR-HomeOffice-202202-R4.pdf>

Klingauf, J. (2022), Wärmepumpen-Boom: Deutscher Mittelständler Stiebel Eltron investiert 600 Millionen Euro [Heat pump boom: German medium-sized company Stiebel Eltron invests 600 million euros], <https://stiebel-eltron.pressroom-rbt.com/2022/08/30/waermepumpen-boom-deutscher-mittelstaendler-stiebel-eltron-investiert-600-millionen-euro/>, [in German].

Mitsubishi (2022), Mitsubishi Electric to expand production capacity at A/C base in Turkey, <https://www.mitsubishielectric.com/news/2022/0527.html>

Nesta (2021), Interim boilers for broken heating, <https://www.nesta.org.uk/interim-boilers-for-broken-heating/>

NIBE (2022), Interim report 2, 2022 (Q2), <https://www.nibe.com/investors/pm-news-reports/2022---news-reports/2022-08-18-interim-report-2-2022-q2>

Panasonic (2022), Panasonic Accelerates Investment in Air-to-water Heat Pump production its Czech factory, <https://news.panasonic.com/global/press/en220902-2>

PEP (2022), PEP EcoPassport (database), <http://www.pep-ecopassport.org/> (accessed September 2022).

Quanlin, Q. (2022), Midea starts work on new heat pump plant in Italy, <https://www.chinadaily.com.cn/a/202210/15/WS634a007ba310fd2b29e7c96a.html>

RAP (Regulatory Assistance Project) (2022a), Levelling the playing field: Aligning heating energy taxes and levies in Europe with climate goals, <https://www.raonline.org/wp-content/uploads/2022/07/Taxes-and-levies-final-2022-july-18.pdf>

RAP (2022b), A policy toolkit for global mass heat pump deployment, [https://www.raonline.org/wp-content/uploads/2022/11/RAP\\_Heat\\_Pump\\_Toolkit.pdf](https://www.raonline.org/wp-content/uploads/2022/11/RAP_Heat_Pump_Toolkit.pdf)

Shen, X et al. (2021), Estimation of change in house sales prices in the United States after heat pump adoption, Nature Energy, Vol. 6, pp. 30-37, <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00706-4>

Urban, R. (2021), Clean Energy Financing Programs Canada, <https://www.energyhub.org/financing/#canada-wide>

US DOE (United States Department of Energy) (2016), Heat Pump Supply Chains and Manufacturing Competitiveness Considerations, [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/30005\\_Mann\\_040716-1105.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/30005_Mann_040716-1105.pdf)

Vaillant Group (2022), EIB supports the Vaillant Group's research and development for climate friendly heating solutions, <https://www.vaillant-group.com/news-stories/eib-supports-the-vaillant-group%60s-research-and-development-for-climate-friendly-heating-systems.html>

Viessmann Group (2022), Viessmann Group to invest EUR 1 billion in heat pumps & green solutions, <https://www.viessmann.family/en/newsroom/company/viessmann-group-to-invest-eur-1-billion-in-heat-pumps-and-green-solutions>

Walker, P. (2021), Mitsubishi invests £15 million in Livingston heat pump factory, <https://www.insider.co.uk/news/mitsubishi-invests-15-million-livingston-25369217>

World Bank (2022), Carbon Pricing Dashboard, <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>

## International Energy Agency (IEA)

This work reflects the views of the IEA Secretariat but does not necessarily reflect those of the IEA's individual Member countries or of any particular funder or collaborator. The work does not constitute professional advice on any specific issue or situation. The IEA makes no representation or warranty, express or implied, in respect of the work's contents (including its completeness or accuracy) and shall not be responsible for any use of, or reliance on, the work.



Subject to the IEA's Notice for CC-licensed Content, this work is licenced under a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence.

This document and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

Unless otherwise indicated, all material presented in figures and tables is derived from IEA data and analysis.

IEA Publications  
International Energy Agency  
Website: [www.iea.org](http://www.iea.org)  
Contact information: [www.iea.org/contact](http://www.iea.org/contact)

Typeset in France by IEA - November 2022  
Cover design: IEA  
Photo credits: © Gettyimages

Revised version, December 2022.  
Information notice found at: [www.iea.org/corrections](http://www.iea.org/corrections)

## The Future of Heat Pumps

### World Energy Outlook 特別レポート

CO<sub>2</sub> 排出係数の低い電力を動力源とするヒートポンプは、安定的で持続可能な暖房への世界的な移行の中心となる技術である。IEA の World Energy Outlook シリーズの特別レポートである The Future of Heat Pumps は、ヒートポンプの展望を示し、導入を加速する主な機会を特定している。また、主な障壁と政策による解決策を明らかにするとともに、ヒートポンプの普及加速がエネルギー安全保障、消費者の光熱費、雇用、気候変動への取り組みに与える影響についても検討している。

世界全体の暖房需要における 2021 年のヒートポンプのシェアは 10 %程度であったが、導入が急速に加速し、記録的な販売を遂げている。

しかし、代替技術に比べて高価なヒートポンプの初期費用を消費者が克服するためには、政府による政策的な支援が必要である。世界 30 か国以上で経済的インセンティブが既に利用可能であり、これは現在の暖房需要の 70 %以上をカバーしている。IEA の試算によれば、ヒートポンプによって世界の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 排出量は 2030 年に少なくとも 5 億トン削減される可能性があり、これは、今日の欧州のすべての自動車からの年間 CO<sub>2</sub> 排出量に相当する。

Japanese Translation of The Future of Heat Pumps IEA, 2022 .

The Future of Heat Pumps の日本語翻訳は、この出版物の公式版である英語のテキストから翻訳されています。IEA はこの出版物のオリジナルの英語版の作成者ですが、IEA はこの翻訳の正確性または完全性について一切責任を負いません。この刊行物は、一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターの単独の責任の下で翻訳されています。