

# 産業用ヒートポンプの応用

IEA Industrial Energy-related Systems and Technologies Annex13  
IEA Heat Pump Programme Annex35

## 要約

## 目 次

1. 序文	p3
2. 市場についての概要、障害、適用	p4
3. モデル計算と経済モデル	p4
4. 技術	p5
5. 適用とモニタリング	p6
6. 最終的な結論と将来への活動	p7

# 要 約

## 1. 序文

信頼ある、経済的な持続可能なエネルギー供給の確保は、環境と気候の保護と同様に 21 世紀においてのグローバルから見た重要な挑戦である。再生可能エネルギーとエネルギー効率の改善は、これらのエネルギー政策目標を達成する上で最も重要なステップである。

過去 20 年の間に驚くべき高い効率が既に達成されているが、もし最も優れた利用可能技術の導入(BAT, best available technologies)が世界的に進めば、産業の製造部門におけるエネルギー消費と CO<sub>2</sub> 排出はさらに削減できる可能性がある。

ヒートポンプは、エネルギー効率を改善し CO<sub>2</sub> 排出量を削減する技術として世界的に重要性が高まっている。特に、産業用ヒートポンプ(IHPs)は、あらゆる種類の製造プロセスとその運用に寄与することができる。IHPs は、熱源として排熱を使い、産業でのプロセス、加熱、予熱で使われる高温熱、それに産業用の冷暖房の熱を供給する。それらは、乾燥、洗浄、蒸発、蒸留など様々な用途で化石燃料消費量と温室効果ガス排出量を大幅に削減することができる。この技術が役に立つ産業としては、食品、飲料製造、木材生産、繊維工業、化学工業などが挙げられる。

運転温度が 100°C 以下のヒートポンプの導入は、多くのケースで容易と考えられているが、高温への適用については高温ヒートポンプ技術、産業プロセスへのヒートポンプの統合、それに高温で環境に優しい冷媒について追加的な研究開発活動が要求される。

このような中で、エネルギー消費と温室効果ガスの削減に積極的に貢献するためにヒートポンプを産業に普及させることを目的に IEA 実施協定の“Industrial Energy-Related Technologies and Systems(IETS)”と“Heat Pump Programme(HPP)”の共同プログラムである IEA-HPP-IETS Annex 35/13“産業用ヒートポンプの適用(Application of Industrial Heat Pumps)”が立ち上げられた。

Annex35/13 プロジェクトは、オーストリア、カナダ、デンマーク、フランス、ドイツ (幹事国 O A)、日本、オランダ、韓国、スウェーデンの参加で 2010 年 4 月 1 日に開始し 2014 年 4 月まで実施された。

本 Annex は、参加国における、産業部門のエネルギー事情と利用、ヒートポンプと適用されるプロセスの技術状況と研究開発プロジェクト、それらの応用事例、また既設と新設の産業用ヒートポンプ技術が広く適用されるビジネスケースの意思決定に関する分析である。Annex は次のタスクに分けて実施された。

Task1 : 市場の外観と適用への障害

Task2 : モデル計算と経済モデル

Task3 : 技術

Task4 : 適用とモニタリング

Task5 : コミュニケーション

## 2. 市場の外観と適用への障害

**Task1** 報告は、個々の参加国に分けてエネルギー事情の現況と産業部門のエネルギー消費、および関連するヒートポンプ市場について要約した。これらの調査結果を基に、産業用ヒートポンプを広く普及していく上で挑戦すべき課題について焦点を当て記述した。産業利用のヒートポンプは、最近、参加国で市場に導入されているが、その事例は限られている。この理由を明らかにするために、**Task1** で適用の障害について調査し、以下の結果が得られた。

### ・知識の不足

産業プロセスにヒートポンプを組み込むには、プロセスそのものの知識だけでなく、産業用ヒートポンプの適用能力に関する知識が要求される。残念なことに、企業の導入主体や意思決定者は、ヒートポンプを最も適切な方法で導入していくのに必要な両者を組み合わせる知識を有していない。

### ・企業における熱需要についての関心の低さ

ほとんどの企業において、ヒートポンプ導入に必要なプロセスの温熱と冷熱の需要に関する知識を持ち合わせていない。そのため、産業用ヒートポンプを導入していくためには熱需要の調査が必要となり費用と時間がかかる。

### ・長期の投資回収期間

石油やガスのバーナーに比べて、ヒートポンプの投資コストは高い。企業の多くが2～3年よりも短い投資回収期間を望んでいる。しかし、投資が見えれば5年以上の投資回収期間を受け入れる企業もある。これに応えるには、ヒートポンプに対して長期の運用期間と経済的に成り立つ優れた成績係数（COP）が求められる。

### ・高温での適用

技術的には、商用ヒートポンプのほとんどに温度制御の障害がある。適用事例の多くは、加熱温度が65°C以下に制限されている。理論的には産業用ヒートポンプの適用ポテンシャルは、冷媒を含む効率的なヒートポンプ技術を開発することで、加熱温度を100°C、あるいはそれ以上にまで向上できる。

**Annex** の調査により、様々な障害は解決できることが示された；短期の投資回収期間（2年以下）、CO<sub>2</sub>排出の大幅削減（50%以上）、100°C以上の高温化、それに100°C以下の供給温度は可能である。

## 3. モデル計算と経済モデル

**Task2** では、IHPsのプロセス解析が、コンピューターソフトウェア、例えばモデルによっていかに統合できるかを表している。

**Annex21** の選別プログラムを更新するためにピンチ解析を基本としたヒートポンプのプロセスへの適用が提案された。この概念の基本的な要素は以下の通りである。

- ・問題となっているアルゴリズムをユーティリティとヒートポンプの同時最適化による拡張型積み替えモデルによって置き換える。
- ・熱交換ネットワークを標準的なピンチ解析によって近似する。
- ・ヒートポンプと係わりのある高温と低温の熱流れを選定するアルゴリズムを開発する。
- ・同時最適化に使えるヒートポンプのデータベースを開発する。最適化は非線形であるため、収束可能な特別アルゴリズムが求められる。

ヒートポンプをプロセスに組み入れる方法は、H.E.Beckerによる複雑な考えによるものである（文献：Methodology and Thermo-Economic Optimization for Integration of Industrial Heat Pumps, THESE NO 5341(2012), ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE< Suisse, 2012)。結果として、そういった開発が、前例がなく、適切で、かつ要求に応えられるどうかを述べることは不可能であった。

既存モデルの広範囲な調査によって、“純粹”なピンチモデルと複雑な数学的最適化モデルとの違いを、最新のソフトウェアツールによって結び付けることが可能なことを明らかにした。ヒートポンプのプロセスへの統合に関しては、OSMOSEやCERESといったコードが有望である。

ソフトウェアのツール、方法論、最適化とは別に、ヒートポンプのデータベースの一般化に関心が高まった。そういったデータベースは、多くの目的で必要になる。典型的なデータベースとして、ヒートポンプ形式を選定する上で求められるヒートポンプの容量にあったソースとシンクの温度、それにヒートポンプが使われている高温と低温の熱流動についての詳細な情報がある。

Task2の目標は、もしTask2の新しいチームができたなら注意深く再考されるべきである。今回の報告書では、産業分野での研究組織、大企業、それにエネルギーコンサルタントについての現状技術水準が調査された。最適手法の一般化は、現状では大企業において研究グループと高度に訓練された技術グループに限りがることで難しいことが結論付けられた。恐らく、エネルギーコンサルタントが適切なピンチモデルを選ぶことになるであろう。全体から見て、我々はヒートポンプを産業プロセスに適合していくには、ピンチ解析とプロセス統合法を併せ持った組織的な方法論であるH.C.Beckerの論文が鍵となる参考文献として考えている。

#### 4. 技術

Task3 報告の範囲は、産業部門における排熱回収と将来の産業と環境の要求に合った適切なヒートポンプ技術を確認することである。

商用的に利用可能なヒートポンプは、100℃までの熱を供給するものである。産業の排熱で利用できる低い温度の熱は製造業で使われている全体のエネルギー消費の25%程度である。研究開発としては、給湯、暖房、加熱や循環に使われる給湯や100℃まであるいはそれ

以上の水蒸気の熱源として一般に 5°Cから 35°Cまでの比較的温度の低い熱を回収できる高温ヒートポンプに焦点を当てなければならない。

R134a, R-245fa, R-717,R-744,炭化水素などを使った産業用ヒートポンプの開発が近年、行われるようになってきた。しかし、温暖化影響ポテンシャルが極めて小さい天然冷媒である R-744、R-717 と炭化水素を混ぜ合わせた冷媒以外の HFC それに R-134a と R-245fa のような HFC 系冷媒の利用は、温暖化抑制面から近い将来に使用が規制される可能性がある。そこで、低い GWP の代替冷媒の開発が必要になってきている。

現時点では、R-134a の代替として R-1234yf と R-1234ze(E)が有望であると看做されており、R-1234ze(Z)は R-245fa の代替として魅力あるものと考えられている。R-365mfc は、排熱を使った水蒸気生産のヒートポンプ冷媒として望ましいと考えられているが、問題は GWP 値が大きいことにある。そこで、R-365mfc の代替冷媒開発は先の話と看做されている。以下の表は、産業用ヒートポンプに使われる現在と将来の冷媒について基本特性を示したものである。

表 冷媒の特性

Refrigerant	Chemical formula	GWP	Flammability	T <sub>c</sub> °C	p <sub>c</sub> M Pa	NBP °C
R-290	CH3CH2CH3	~20	yes	96.7	4.25	-42.1
R-601	CH3CH2CH2CH2CH3	~20	yes	196.6	3.37	36.1
R-717	NH3	0	yes	132.25	11.33	-33.33
R-744	CO2	1	none	30.98	7.3773	-78.40
R-1234yf	CF3CF=CH2	<1	weak	94.7	3.382	-29.48
R-134a	CF3CH2F	1,430	none	101.06	4.0593	-26.07
R-1234ze(E)	CFH=CHCF3	6	weak	109.37	3.636	-18.96
R-1234ze(Z)	CFH=CHCF3	<10	weak	153.7	3.97	9.76
R-245fa	CF3CH2CHF2	1,030	none	154.01	3.651	15.14
R-1233zd		6	none	165.6	3.5709	n. a.
R-1336mzz		9	none	171	n. a.	n. a.
R-365mfc	CF3CH2CF2CH3	794	weak	186,85	3.266	40.19

## 5. 適用とモニタリング

Task4 報告は、代表的な産業用ヒートポンプを導入する上での運転経験やエネルギー効果、特にフィールド試験やケーススタディーに焦点を当てている。

産業用ヒートポンプは、排熱流体の温度を入り高い有効な温度にまで高める積極的な熱回収装置の分類に入る。従って、ヒートポンプは従来の受動的な熱回収では不可能な省エネルギー特性を備えたものである。

導入の経済性は、ヒートポンプがいかにかしてうまくプロセスに組み込まれるかにかかっている。ヒートポンプのフィージブルな導入事例を示すことは基本的に重要なことである。ヒートポンプとプロセスの両面を考慮して基本的な評価基準考えることが有効になる。初

期の操作として可能な導入事例を幾つか挙げ、それによって詳細なプロジェクト計算は限られた事例について実施していくことができる。

商用化されている利用可能なヒートポンプは、それぞれが異なる運転特性と異なる運転温度を持ち範囲がある。これらの範囲は、いくつかのタイプに重なっている。このことから、適用を考えていく上で、いくつかの可能なヒートポンプのタイプが存在する。技術的、経済的、生態学的、実務的なプロセスの基準によって、最も優れたタイプが決められる。すべてのタイプに対して、回収可能期間は導入コストに直接に比例するため、ヒートポンプの導入コストを下げる可能性を調査することが重要になる。

報告書には、全部で 150 件のプロジェクトとケーススタディーを調査することで、ヒートポンプ技術の良い事例を表し、そして運転データの分析により産業プロセス、フィールド試験、商業利用への適用を表している。その際、産業用ヒートポンプの annex 定義である「加熱、換気、空調、給湯、加熱、乾燥、除湿と他の目的に使われるヒートポンプ」を考えて技術を選択している。

## 6. 最終結論と将来の活動

エネルギー消費と温室効果ガスの削減に積極的に貢献するためにヒートポンプを産業に普及させることを目的に IEA 実施協定の“Industrial Energy-Related Technologies and Systems(IETS)”と“Heat Pump Programme(HPP)”の共同プログラムである IEA-HPP-IETS Annex 35/13 “産業用ヒートポンプの適用(Application of Industrial Heat Pumps)”が立ち上げられた。

Annex35/13 プロジェクトは、オーストリア、カナダ、デンマーク、フランス、ドイツ（幹事国 O A）、日本、オランダ、韓国、スウェーデンの参加で 2010 年 4 月 1 日に開始し 2014 年 4 月まで実施された。

プログラムとその作業は、産業に関係があり、かつ産業における研究開発や適用に関する主にエネルギーと環境に関する統計データの収集が中心となって行われた。全部で 39 の研究開発プロジェクトと 115 件、特に熱源として排熱を利用する適用事例が紹介され、参加国によって分析された。

多くの企業、特に SMEs においては、実際の熱エネルギー消費に関する纏まった情報はほとんど得られず、得られても極めて限定されたものであった。個々のプロセスや関連プロセスについては、経済性や時間変化を考慮した纏まりのないデータの見積りや設定がある。それらは、異なる温度レベルと運転時間スケジュールにおいて、いくつかのプロセスを統合する際に要求されるものである。熱供給に利用できる最適な解を得るためには、異なる技術を組み合わせられなければならない。

モデル計算と経済モデルの基本的な活動 (Task2) によって、産業用 HP が異なる応用に対してどのように使われているかを定める IHP スクリーニングプログラムが更新され、また“Annex21:地球環境から見た産業用 HP の利点(1992-1996)”が示され、かつ発展された。

IHP スクリーニングプログラムが分析され、古い Visual Basic バージョンから NET フレームワークを使った最新のバージョンに変換された。この新しい変換バージョンは、原則として、修正版でありデータとモデルを拡張し更新するものであった。しかし、Task2 の実施中、著者らはこの方法を期限内に実行することが難しいと判断した。1997 年以降、このプログラムに関する進展がなかったことから著者らは更なる開発をあきらめた。リーガルテキストの関連事項の成果としては検討しなかったことを明記することにした。しかし、スクリーニングプログラムの一部、例えばデータベースは、他の目的に使えるように容易に抽出でき修正されるようにした。

本 Annex は、一年間延長された、その理由は主に Task2 の結果が得られなかったためである。参加国はモデリングやソフトウェアについて係わることに消極的で、また広範囲なソフトウェアツールについても異なる見解があって、提供者を得る見通しが立たなかった。

統計データの詳細な情報、R&D 情報、それに数多くのケーススタディが得られた Annex の結果を考えると、可能なフォローアップ Annex はピンチ解析を基本とするヒートポンプのプロセスの統合化に焦点を当てるべきである。この概念の基本要素として、次のことが挙げられる。

- ・ 課題のテーブルアルゴリズムをユーティリティとヒートポンプの同時最適化が可能な拡張されたモデルにより置き換える
- ・ 標準的なピンチ解析に用いられているように熱交換器のネットワークを近似する
- ・ ヒートポンプが結び付いている温熱と冷熱の流れを選ぶアルゴリズムを開発する
- ・ 同時最適化に利用できるヒートポンプのデータベースを開発する

こういった最適化は非線形であるために収束可能な特別なアルゴリズムの開発が必要になる。

以上