

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

第2章 産業用ヒートポンプの適用

目 次

1. 序文	p29
2. 原理	p31
3. ヒートポンプ技術	p32
3.1 適用可能なヒートポンプの評価基準	
3.2 熱力学プロセス	
3.3 高温ヒートポンプに適した冷媒	
4. エネルギーと経済モデル	p37
4.1 ピンチ解析	
4.2 EINSTEIN 専門システム	
5. 研究開発	p39
6. 参考文献	p40

第2章 産業用ヒートポンプの適用

1. 序文

信頼ある経済的な持続可能なエネルギー供給を確保していくことは、環境と気候を守ることと同時に21世紀の重要な挑戦である。再生可能エネルギーとエネルギー効率の改善は、エネルギー政策のこれらの目標を達成していく最も重要なステップである。

世界のエネルギー需要とCO₂排出量の約30% [IEA,2013] は産業起源で、特に化学製品や石油製品、鉄鋼、セメント、製紙、アルミニウムといった大きな素材産業である。これらのエネルギーがどのように使われているのか、国内外の動向、それに効率向上のポテンシャルを理解することは極めて大切である。

過去20年間に効率向上は精力的に実施されてきた一方で、利用可能な最善技術が世界規模で導入されていれば製造業におけるエネルギー消費とCO₂排出量は大きく削減されたであろう。

ヒートポンプは、エネルギー効率を改善しCO₂を削減する技術として世界でその重要性が増しつつある。ヒートポンプ市場は、多くの国々で主に住宅の空調や給湯を中心に、最近、着実に成長しつつある。高温への適用と産業へのヒートポンプ利用は、しばしば無視されてきた。その理由は、エネルギーコストの割合が企業にとって低かったことから、生産性の改善への投資がエネルギー効率の向上以上に高く優先されていたためである。また、エネルギー消費の増加が、ある意味で経済成長の指標にもなっていた。

産業用ヒートポンプは、しかし、あらゆる種類の製造工程や運転において様々な機会を提供できる。エネルギー効率を高めることは、IHPの最も際立った利点であることは確かであるが、ほとんどの会社が生産と環境の問題を解決するのにIHPがもたらせるポテンシャルを理解していない。IHPは、製造工程でボトルネックとなっている製品の生産性を高める上で最小費用の選択肢となることが可能である。事実、IHPsは産業施設において燃焼関連の排出量をコスト効率的に大幅に削減できる最も優れた方法である [Leonardo,2007]。

産業用ヒートポンプは、熱源に排熱を使っており、産業のプロセス加熱や予熱、あるいは空調に高温で熱を供給できる。それらは、産業や商業建物での加熱と冷却と同様に乾燥、洗浄、蒸発そして蒸留工程における様々な適用によって化石燃料の消費と温室効果ガス排出量を大幅に削減できる。この技術から利益が得られる産業には食品加工、木材生産、繊維、化学といったものがある。

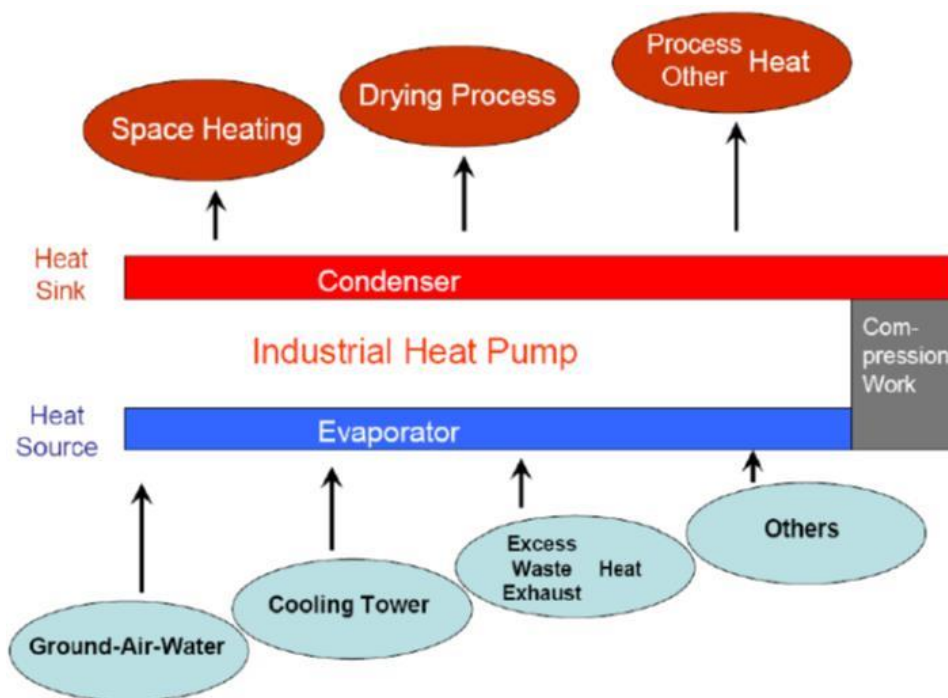


Figure 1-1: 産業用ヒートポンプのヒートソースとヒートシンク

住宅用市場では HP の製品や導入方法が標準化されている一方、産業用 HP の適用においては特異な導入になっている。加えてヒートポンプをプロセスに適用する高い専門性が鍵となっている。

本 Annex では、IHP の定義を“産業プロセスだけでなく産業用建物の冷暖房において熱回収と熱のレベル向上に使われる中高出力のヒートポンプ”とする。

IHP のエネルギー消費と CO₂ 排出量の削減ポテンシャルは膨大であり、そういった点から政策論文の 1 つとなり得るものである。IHP の市場導入には、次に述べる問題点や検討すべき課題がある。

- ・適用に関心ある温度領域における冷媒の欠如
- ・実験室と実証のプラントにおけるギャップ
- ・ヒートポンプ信頼性に関する潜在的な利用者の不確実性
- ・ヒートポンプ技術と適用に必要な知識が設計者とコンサルタント技術者に欠如

他方、IHP は暖房用ヒートポンプに比べて次の利点を持っている。

- ・低い温度での温度上昇と高温レベルにおいて高い COP
- ・年間の運転時間が長い
- ・大容量と短距離の熱輸送であれば投資費用は比較的小さい
- ・排熱と熱需要が同時に発生する場合

2. 原理

ヒートポンプは、熱機関の逆サイクルである。その原理は下図に示される。

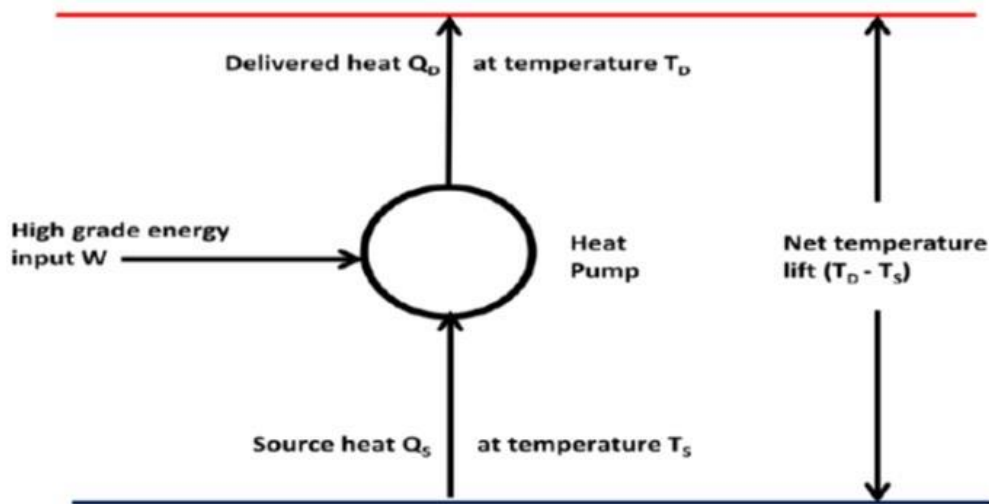


Figure 2-1: ヒートポンプの原理

熱力学第一法則から温度 T_D の高熱源の熱量 Q_D は、温度 T_S の低熱源の熱量 Q_S と投入仕事 W との間に次式が成り立つ。

$$Q_D = Q_S + W$$

暖房用ヒートポンプに比べて IHP は、熱源に地中熱や水を使うために次のような利点がある。

- ・低い温度での温度上昇と高温レベルにおいて高い COP
- ・年間の運転時間が長い
- ・大容量と短距離の熱輸送であれば投資費用は比較的小さい
- ・排熱と熱需要が同時で発生する場合

これらの利点があるにも係わらず、産業部門においてヒートポンプの導入量は極めて僅かである。

(注)

成績係数(COP)は次のように定義される。

$$COP = Q_D / W$$

次式で表されるカルノー成績係数はヒートポンプシステムで可能な上限理論値となる。

$$COP_C = T_D / (T_D - T_S)$$

実際には、達成されている COP は、 COP_C に比べてかなり小さくなる。残念なことに、それぞれの経済的な理由から IHP の異なる利用形態で COP を比較することは難しい。異なる

るエネルギー源によって駆動する場合、次式で定義される一次エネルギー比を使うことが有効である。

$$\text{PER} = (\text{分配される有効な熱}) / (\text{一次エネルギー入力})$$

上式と OP との間には次式が成り立つ。

$$\text{PER} = \eta \times \text{COP}$$

ここで、 η は圧縮機軸動力に変換される一次エネルギー効率である。

3. ヒートポンプ技術

3.1 適用可能なヒートポンプの評価基準

適用可能なヒートポンプの第一ステップは、技術的に導入可能な技術選択とそれらの経済的な導入可能性である。

IHP の単純な運転としてプロセスで明らかなシンクとソースを持つ 2、3 の流れだけから成っている場合、全体評価は通常、必要ない。これらの場合、IHP のフィージビリティと選択にはシンクとソースの特性だけが重要になる。必要なパラメータは、

- ・熱のシンクとソースの温度
- ・シンクとソースの熱負荷に関する大きさ
- ・フェーズや立地点などシンクとソースの物理的パラメータ

IHP は 50-150kW と 150 から数 MW の出力範囲で使われる。シンクとソースの温度は、どの IHP 形式がそれぞれにニーズに使われるかを決定する。これらの形式は、さまざまな方法で分類されることができる。そなわち、機械的あるいは熱的な駆動、圧縮あるいは吸収、閉サイクルあるいは開放サイクル、といった分類である。

3.2 熱力学プロセス

産業用ヒートポンプで最も重要な熱力学プロセスは、

- ・閉圧縮サイクル—電動駆動あるいはエンジン駆動
- ・機械的(MVR)と熱的(TVR)蒸気再圧縮
- ・ソーブションサイクル
- ・吸収—圧縮サイクル
- ・最近の開発技術、例えばサーモアコースティック、噴射技術

これらについては、次章で記述する。

3.2.1 機械的圧縮サイクル

シンプル圧縮閉サイクルの原理を以下に示す。

4つの異なるタイプの圧縮が圧縮閉サイクルヒートポンプに使われている；スクロール、往復動、スクリー、ターボ圧縮。スクロール圧縮機は、小型と中型の熱出力が100kW までのヒートポンプに、往復動圧縮機は約500kW まで、スクリー圧縮機は約5MW まで、そしてターボ圧縮機は2MW 以上のものに使われている。

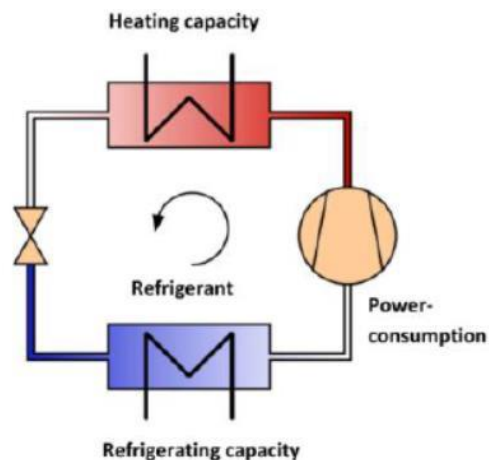


Figure 3-1: 閉圧縮サイクル

3.2.1.1 蒸気注入

エコマイザーの蒸気注入(EVI)サイクル (下図) では、熱交換器が冷媒が蒸発器に入る前に追加的な補助冷却を備えるために使われている。この補助冷却プロセスは、システムで測定される能力を増加する。補助冷却プロセスではある量の冷媒が蒸発する。この蒸発される冷媒は、液体注入と同様に圧縮機に挿入され高い圧縮比で追加的な冷却となる。

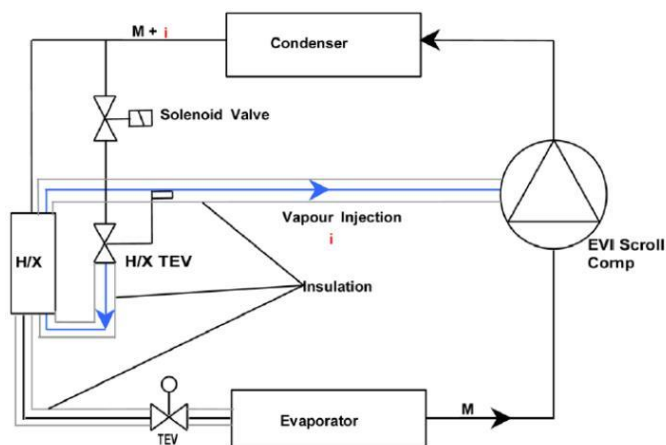


Figure 3-2: 蒸気インジェクション

3.2.2 熱圧縮サイクル

3.2.2.1 吸収ヒートポンプ

吸収ヒートポンプサイクルは、混合物の沸点が揮発しやすい純粋の作動流体の沸点よりも高いという事実が基本となっている。このことから作動流体は揮発しやすい物質と非揮発性物質の混合物となる。産業用において最も一般的な混合物は、リチウム・ブロマイド水溶液(LiBr/H₂O)とアンモニア水(NH₃/H₂O)の混合物である。

基本的な吸収サイクルには二種類ある；吸収ヒートポンプ(AHP,タイプ I)と熱変換(AHP,タイプ II)であり、それぞれが異なる目的に適している。2つのサイクルの違いは、4つの

主熱交換器（蒸発器、吸収器、脱着器、凝縮器）の圧力レベルにある。

吸収サイクルの高温熱回収システムへの適用は、新しい作動媒体の調査にかかっている。媒体の質を高めるために2種類の物質の混合物が熱力学特性、腐食、それに毒性や可燃性への安全性に対して厳しい要求を満たさなければならない。

吸収ヒートポンプサイクルの熱力学解析を基に、例えば有機化合物の調査といった新しい作動媒体への研究が要求される。

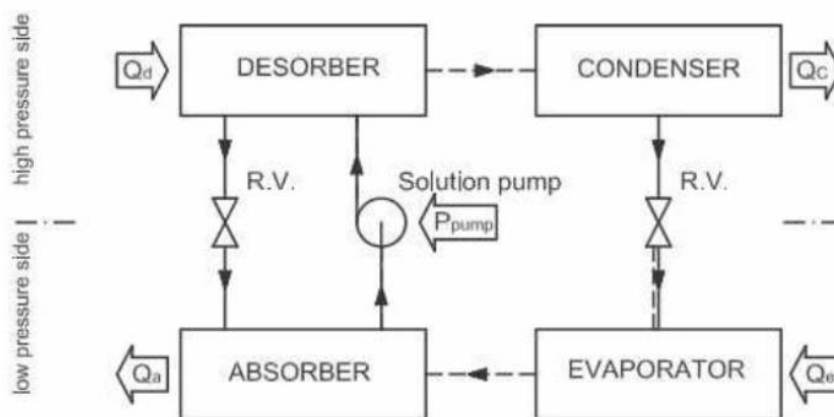


Figure 3-3: 吸収式

3.2.2.2 吸収—圧縮ハイブリッド

ハイブリッドヒートポンプは、吸収と圧縮機械の両方を組み合わせたものである。それは吸収剤と冷媒の混合物、それに圧縮機を使っている。ハイブリッドと吸収サイクルの重要な違いは、ハイブリッドヒートポンプにおける吸収器と脱着器が吸収サイクルと比べて逆の順になっていることである。すなわちハイブリッドサイクルにおける脱着は低い温度と圧力で行われ、吸収式は高い温度と圧力で行われる。

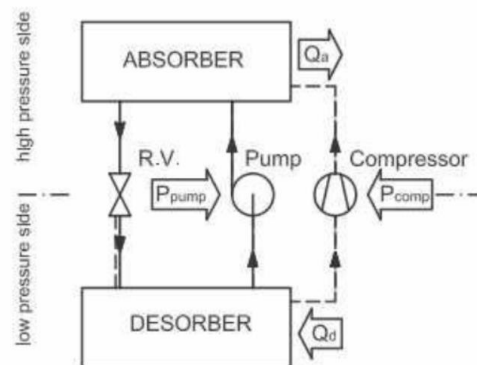


Figure 3-4: 吸収式—圧縮式ハイブリッド

3.2.3 機械的蒸気再圧縮 (MVR)

機械的蒸気再圧縮は、圧力を増加する方法で、同時に排ガス温度も増加しその熱の再利用が可能になる。MVRによって圧縮される蒸気の最も一般的なタイプは下図に示す水蒸気である。それには幾つかのシステム配置がある。最も一般的なのはセミオープンタイプで蒸気が直接圧縮されるもの（直接システムとも言われている）である。圧縮後、蒸気は熱交換器内で凝縮され、熱はヒートシンクに移される。このタイプのMVRシステムは、蒸発の最も一般的な適用法である。

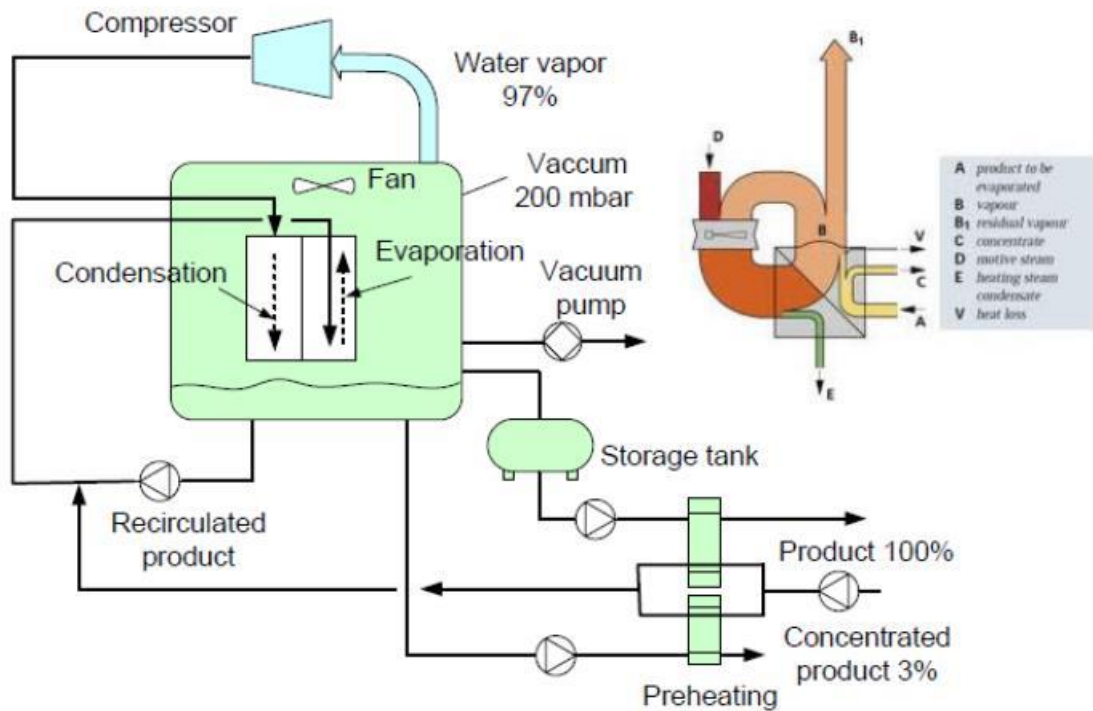


Figure 3-5: 機械式蒸気再圧縮 [Bédard, 2002]

セミオープンシステムの別のタイプは、凝縮器を無くし、蒸発器が設置されているものである。この普通でない配置は、機械仕事と低い温度の熱源を利用することによってより高い温度が要求されるプロセスフローを蒸発するのに使われる。

3.2.4 熱蒸気再圧縮 (TVR)

TVR タイプのシステムではヒートポンピングがエジェクターと高圧蒸気の助けで達成できる。そのため、この方法は単にエジェクターとも呼ばれている。原理は以下の図で示される。MVR システムとは違って、TVR ヒートポンプは機械エネルギーではなく熱によって駆動される。このことから MVR システムと比較して、特に燃料と電気代の格差が大きい状況にあると、新しい適用分野が開拓できる。

TVR タイプは、あらゆる産業サイズに利用可能である。一般的な適用分野に蒸発ユニットがある。COP は TVR からの蒸気の凝縮熱と運動する蒸気の熱入力との比で表される。

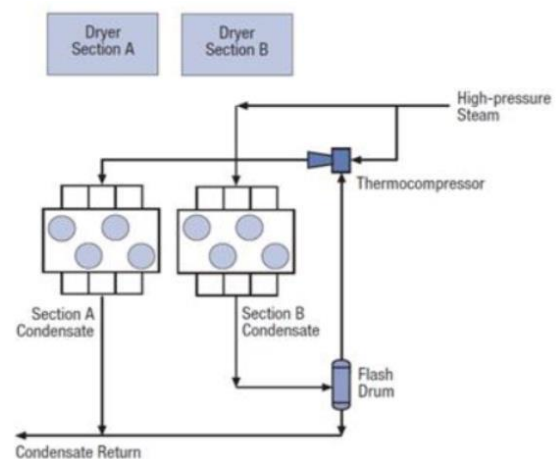


Figure 3-6: 熱式蒸気再圧縮 (日本からの事例)

3.2.5 サーマコースティック (TA)

音響エネルギーは、排熱を要求されている温度のプロセス熱にまで高める TA ヒートポンプに使われている。以下の図は、全体システムを描いたものである。TA エンジンは、右側に配置されており、140°Cの熱流動によって音響パワーを発生する。音響パワーは、共鳴器を通して TA ヒートポンプに流れる。140°Cの排熱は、この方法により 180°Cにまで高まる。全体システムは、一般に産業サイトの既存ユーティリティシステムに応用できる。

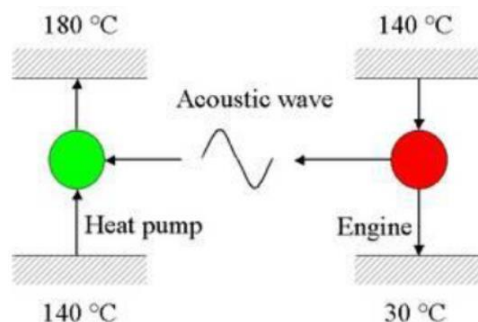


Figure 3-7: 熱音響ヒートポンプ

3.3 高温ヒートポンプに適した冷媒

産業工程の多くは、温度範囲が 90-120°Cの加熱需要である。同時に典型的な排熱温度は 30-60°Cである。それ故、効率的なヒートポンプ技術はエネルギー消費原単位(kWh/生産量)を改善する上で魅力的である。現在、最も一般的な冷媒として使われている HFCs は供給温度が約 80°Cに限られている。100°C以上の温度に対して、R&D がさらに必要になる。産業用ヒートポンプには R-134a,R-245fa,R-717,R-744 と炭化水素(HC)などが使われている。しかし、温暖化影響ポテンシャル(GWP)が極めて小さい R-744 と可燃性 R-717 や HCs 以外の R-134a と R-245fa の HFCs は高い GWP を有している。HFCs の利用は将来、温暖化防止にの点から制限されることになる。そのため低い GWP の代替冷媒の開発が要求されている。

現在、R-134a の代替として R-1234yf と R-1234ze(E)が有望である。R-365mfc は排熱を使って蒸気を発生できることからヒートポンプの冷媒として適していると考えられているが、その GWP は非常に高い。そこで、R-365mfc に代わる冷媒の開発が求められている。表は、現在並びに将来の冷媒について基本的な特性を示したものである。

Table 3-1: 産業用ヒートポンプに適したとみなされている冷媒

Refrigerant	Chemical formula	GWP	Flammability	T _c °C	p _c M Pa	NBP °C
R-290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	~20	yes	96.7	4.25	-42.1
R-601	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ - CH ₂ -CH ₃	~20	yes	196.6	3.37	36.1
R-717	NH ₃	0	yes	132.25	11.33	-33.33
R-744	CO ₂	1	none	30.98	7.3773	-78.40
R-1234yf	CF ₃ CF=CH ₂	<1	weak	94.7	3.382	-29.48
R-134a	CF ₃ CH ₂ F	1,430	none	101.06	4.0593	-26.07
R-1234ze(E)	CFH=CHCF ₃	6	weak	109.37	3.636	-18.96
R-1234ze(Z)	CFH=CHCF ₃	<10	weak	153.7	3.97	9.76
R-245fa	CF ₃ CH ₂ CHF ₂	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	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	794	weak	186.85	3.266	40.19

4. エネルギー・経済モデル

熱力学第一法則に従って、プロセスに投入されるすべてのエネルギーは、定常状態ではプロセスから出ることになる。エネルギーは、生産物、排熱やその他の損失としてプロセスから出る。

排熱の温度レベルは、プロセスの基本仕様と装置設計によって決まる。しかし、プロセスに使われている熱と排熱の温度レベルは、冷却水や空気といったユーティリティシステムの設計によって決められる。この本質的な違いは、排煙の利用を議論する際にしばしば課題評価される。

排熱の量や温度レベルは、プロセス統合法、すなわちピンチ解析によって決めることができる。この方法は強力なツールで内部での熱利用の可能性を含めて状況の全体図を描くことができる。

排熱を利用するには幾つかの競合する方法があり、どれが最も優れたものであるかは明らかでない。熱は加熱の目的に対して、また新しくあるいは改善されたプロセスの部分においてよりより良く使われるべきものである。ヒートポンピングは、今日ではシステムのある部分において一般的になっている一つの代替案であるが、別の方法によっても大きな可能性を持っている。別の方法として地域熱供給システムという外部からの供給方法もある。

ヒートポンプの可能性を拡大できるか、異なる代替案から望ましい方法を選択するかは、システム設計、プロセス統合や計画に対する高度な専門性によって決められる。プロセス統合や設計に関する設計ソフトウェアは、この段階で重要な役割を担う。しかし、この複雑な方法には多くの専門家が必要となる。

4.1 ピンチ解析

ピンチ解析は、熱力学的に成立可能なエネルギーターゲット（あるいは最小エネルギー消費量）の計算と熱回収システム、エネルギー供給方法、それにプロセス運転状態を最適化することによって化学プロセスのエネルギー消費量を最小化する方法である。それはプロセス統合、熱統合、エネルギー統合あるいはピンチ技術として良く知られている [Monard,2006]。

プロセスデータは、一連のエネルギーフローや熱流(streams)によって温度(°C)に対する熱負荷(kW)の関数として表される。これらのデータは、高温熱流(熱を放出)と低温熱流(熱を吸収)する組合せ性能曲線(composite curves)によって示されるプラントのすべての熱流と結びついている。高温と低温の性能曲線が最も狭くなる点は、ピンチ温度(ピンチポイントあるいは単にピンチ)であり、そこが最も制約となっている。この点を見出すことによって、エネルギー目標は、高温と低温の熱流間の熱を回収するヒートポンプを使うことで達成されることになる。実際に、ピンチ解析を実施すると、ピンチが交差する熱交換部分がピンチ以上の温度の熱流とピンチ以下の温度の熱流の間に見つけることができる。これらの交換を代替方法で取り除くことでプロセスはそのエネルギー目標に辿りつけるようになる。

4.2 EINSTEIN エクスペートシステム

EINSTEIN は、Expert System for an Intelligent Supply of Thermal Energy in Industry から作られた言葉である [Heigl,2014]。産業における熱エネルギー供給を最適化するには、熱回収とプロセス統合、それに効率的な温冷熱供給技術の組み合わせによる熱需要の削減の可能性を表すことができる全体論統合法(holistic integral approach)が求められる。

EINSTEIN は、産業における素早くかつ高い質で熱エネルギーを検査できる解析法である。それは方法論を記述したガイドと解析のソフトウェアツールから構成されている。

EINSTEIN の主な特徴として、次の点が挙げられる。

(1) 産業プロセスと産業の熱供給システムに対して標準化されたモデルを基本とするデータプロセッシング

(2) データの欠陥を素早く整合的に調べかつ予測できるツール。その結果、当初はわずかなデータであっても第一段階の予測が可能になる。

(3) 半自動化：ソフトウェアツールは、熱供給システムの動的シミュレーションを含めて必要となるすべての計算を自動的に行うことができ温冷熱供給に関する代替案への意思決定を支援し、その結果、標準的な検査報告を生み出すことができる。

(4) 基本的な質問事項によってデータを得る上での必要情報をシステムティックに集めることを支援する。

ソフトウェアツールは、ベンチマーキング、熱交換器ネットワークの自動設計、それに温冷熱供給システムへの設計支援といったモジュールを含んでいる。

それは、ヒートポンプのような再生可能エネルギーを基本に生産プロセスのエネルギー効率の解決に役立つ方法である。この方法によって運転費用はかなり削減できる。

EINSTEIN の利点は次の通りである。

- ・ ローカルな検査に対するノウハウの向上
- ・ エネルギー費用と CO₂ 排出量を削減
- ・ 運転費用を削減することで会社の競争力や節約効果を高める
- ・ 経済性を考慮したエネルギーコンセプトの実現に向けたロードマップ

EINSTEIN の現状は、熱回収やプロセス統合に対してヒートポンプが含まれていない。しかし、新しい EINSTEIN III プロジェクトが間もなくヨーロッパ連合研究プログラム EE-16-2014 “産業のエネルギー効率を改善する組織的なイノベーション” の一部として産業用ヒートポンプを含めて承認される段階にある。

5. 研究開発

適切なヒートポンプ技術は、産業部門委おける再生可能エネルギーをある一定量まで高めるとともに CO₂ 排出量と一次エネルギー消費量の削減に対して重要である。産業への適用を拡大することは、これらの効果を改善する上でも重要になる。特に、温水供給、温水の加熱と循環、それに高温空気の発生への高温ヒートポンプの開発と宣伝が必要となる。この方針に対して解決すべき課題として次のことが挙げられる。

- ・ 関心が高い温度領域における冷媒の欠如
- ・ 実験プラントと実証プラントの欠如

6. 参考文献

- Bédard, 2002 Bédard, N., Lessard, A.-C., Dansereau, P. La compression mécanique de la vapeur appliquée à la concentration d'acide chez NEXANS, La maîtrise de l'énergie, 2002
- Heigl, 2014 E.-M. Heigl, Ch. Brunner; Expert system for an INtelligent Supply of Thermal Energy in INdustry and other large scale applications <http://einstein.sourceforge.net> (abgerufen, März 2014)
- IEA, 2013 2013 Key World Energy Statistics, IEA International Energy Agency
- Leonardo, 2007 Leonardo energy: Power Quality & Utilisation Guide: Industrial Heat Pumps, Feb. 2007, www.leonardo-energy.org
- Morand, 2006 R. Morand, R. Bendel, R.O. Brunner, H. Pfenninger: Prozessintegration mit der Pinchmethode – Handbuch zum BFE Einführungskurs, Auflage 2006.
Oktober 2006 Im Auftrag des Schweizer Bundesamt für Energie, F&E Programm Verfahrenstechnische Prozesse VTP

以上