

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4章 Task2: モデル計算と経済モデル

目 次

1. イントロダクション	p135
1.1 産業用プロセスへのヒートポンプの統合：理論的方法のアウトライン	
1.2 産業用プロセスへのヒートポンプの統合：一般原則	
1.3 Annex21 スクリーニングプログラムの分析	
1.4 ピンチ分析に基づくスクリーニングプログラムへの最新のコンセプト	
1.5 ピンチ分析に基づく実在するソフトウェアの精査	
1.6 結論	
1.7 参考文献	
2. オーストリアチームレポート ソフトウェア	p161
2.1 TOP Energy	
2.2 EINSTEIN	
2.3 参考文献	
3. フランスチームレポート ピンチ分析による分析ツールの最先端のレビュー	p165
3.1 イントロダクション	
3.2 プロセスエネルギー統合の方法	
3.3 利害関係者	
3.4 ツール	
3.5 結論	
4. オランダチームレポート オランダでのモデリング	p190
4.1 産業用ヒートプロセスの最適化	
4.2 利用可能なツール	
4.3 どのツールが最も良いか？	
4.4 EINSTEIN	
4.5 プロセスツールとヒートポンプ技術	
4.6 参考文献	

第4章 Task 2

1. イントロダクション

Task2は、コンピューターソフトウェアでのモデリングにおいて、産業用ヒートポンプをプロセスとの統合するアウトラインを記述することを意図している。リーガルテキストでは、以下の4つの項目で構成されている。

- ・ いろいろなセクターでのソフトウェアや計算プログラムのSWAT分析
- ・ ヒートポンプがどのように適応するか検討したAnnex21での計算モデルの分析と改良。
- ・ ツールを使つての分析やTASK1の結果から、新しいモデルの開発の課題やニーズを明らかにする。
- ・ ソフトウェア開発の可能性を検討する。

Task2実施のなかで、オリジナルのリーガルテキストは、次の活動計画に修正された。

- ・ 大型の産業用ヒートポンプの製造者の情報のデータベース化。
- ・ 産業用ヒートポンプのプロセス統合ソフトウェアの概観まとめ
- ・ 産業用ヒートポンプのプロセス統合のSWOT分析
- ・ 産業用ヒートポンプのプロセス統合の原理

残念ながら、今回、Task2の完全な報告はできない。Annex35は1年延長したにもかかわらず、Task2の成果物を出すことはできなかった。これは、以下の2つの原因による。

- ・ ほとんどの参加者が、実際にモデリングなどに携わっていない。
- ・ 大変幅広い範囲で、目的がそれぞれ異なるソフトウェアがあることを、過小評価していた。

それゆえに、今回のTask2報告書のいくつかの部分では、OAや関係者が今後どのように進めていくかという観点で記述している。もし、新たにTask2をやり直すのであれば、4年間の作業の重要なアウトプットとなるものは、最新技術と産業界のニーズにもとづきゴールを再検討したことにある。

1.1 産業用プロセスへのヒートポンプの統合：理論的方法のアウトライン

プロセス統合方法やソフトウェアは、たとえば“Process Integration Implementing Agreement within the IEA”のように、多く出版されてきている。その一つは、T.Gundersen [1]による、広範囲なチュートリアルである。ソフトウェアも同じ著者のRef. [2]がある。一般的なソフトエアの解説は、Hon Loong Lam et al. [3].にある。さらに参考文献には、L.Introduction1-6 Puigjaner と G. Heyen (eds.) [4]の書物があり、概観は I.E. Grossmann, J.A. Caballero と H. Yeomans [5]がある。設計や統合・運用は1970代初期のETH Zürich とLeeds University の B. Linnhoff and J.R. Flower [6]による。

そして、この研究は、ピンチ温度解析への開発につながっていく。近年の詳細な分析のI.

C. Kempの書物“Pinch Analysis and Process Integration”と F. Maréchal [8]の概観などは、あとの章で用いている。一般的には、ピンチ温度分析では、複雑な熱プロセスの熱交換による熱回収量を求めることができる。言い換えれば、プロセスの最低必要エネルギー量を求めることができる。

統合問題の一般的解法は、あらゆる最適化技術を必要とする。I.E. Grossmannらの1983年の1983 [9]など多くの貢献は周知されるべきものである。I.E. Grossmann, J.A.

Caballero と H. Yeomansの [5] やC. Floudas “Nonlinear and Mixed-Integer Optimization, Fundamentals and Applications”, Ref. [10]などの書物により、化学プロセスへの数学的アプローチは紹介されている。

一般的な解法とピンチ温度分析の違いを知ることは重要である。ピンチ温度分析は、単純化されたカスケードモデルに制限されているので、一般的な統合手法があらゆる詳細なデータを考慮しなければならないことと比べるとずいぶん異なる。このため一般的な手法は問題が難しくなる。従い、ここではピンチ温度分析と一般的な最適化方法を別々に議論する。しかし、その差は、最新数学においては小さくなってきている。

現時点では、多くの最新最適化法の情報が多くあるが、ここでは、ヒートポンプのプロセス統合を強調する。熱交換器ネットワーク設計のソフトウェアの詳細については、ここでは省略し、プロセス統合に集中する。すなわち我々は、ヒートポンプのプロセスへの統合、ある意味では、ヒートポンプを追加するということに集中する。そうであるが、我々は熱交換器ネットワーク設計とヒートポンプの統合はかなり密接していることに気づいている。

1.1.1 ピンチ解析

ここでは、ピンチ温度分析の包括的なレビューで、ピンチ温度分析と最適化計算法を結び付けたF. Maréchal [8]に従っていく。それによると、ピンチ温度分析は3つのStepがある。

- ・ 温熱、冷熱の流れの定義
- ・ 最低必要エネルギーの計算。これはコストミニマムにつながる
- ・ 熱交換器ネットワークの設計。これは統合Step

詳細の説明の前に、ピンチ温度分析のメリットを表す。

- ・ ピンチ温度分析は、プロセスの内部のより深い洞察が可能になり、そのためには、プロセスの熱力学的理解が必要である、すなわち全体的理解がいる。エネルギー最小化やコスト最小化の考え方は、熱交換器ネットワーク設計のガイドラインになる。いくつかのソフトウェアでは、熱交換器設計のための詳細な知識が必要である。
- ・ ピンチ温度分析は成熟したカテゴリーに入るものであり、ほとんどの現在利用可能なソフトウェアツールは、このカテゴリーに入る。

ピンチ温度分析の基本は、熱力学的最適化設計をするために、個別の熱プロセスを仮想

的な統合プロセスに統合することにある。熱力学的最適化は、カスケードモデルを単純化するプロブレムテーブルアルゴリズム (problem table algorithm) によってなされる。コスト最適化は、熱交換器ネットワークの近似法による。この2つの単純化によって、ピンチ温度分析はかなり単純化される。

温度と熱負荷のダイアグラムは、温熱・冷熱の合成グラフから構成される。Fig1-1で、指示しているのがピンチ温度であり、温熱と冷熱の曲線の最接近点であり、 ΔT_{min} であらわされる。ピンチは、その温度と場所のことである。 ΔT_{min} は、温熱と冷熱の熱伝達を決めるパラメータであり、コスト最適化にも用いられる。 ΔT_{min} が小さな数値では、大きな熱交換器を表し、 ΔT_{min} の大きな値は逆をあらわす。Figure 1-1は、加熱、冷却の必要熱量もあらわしている。

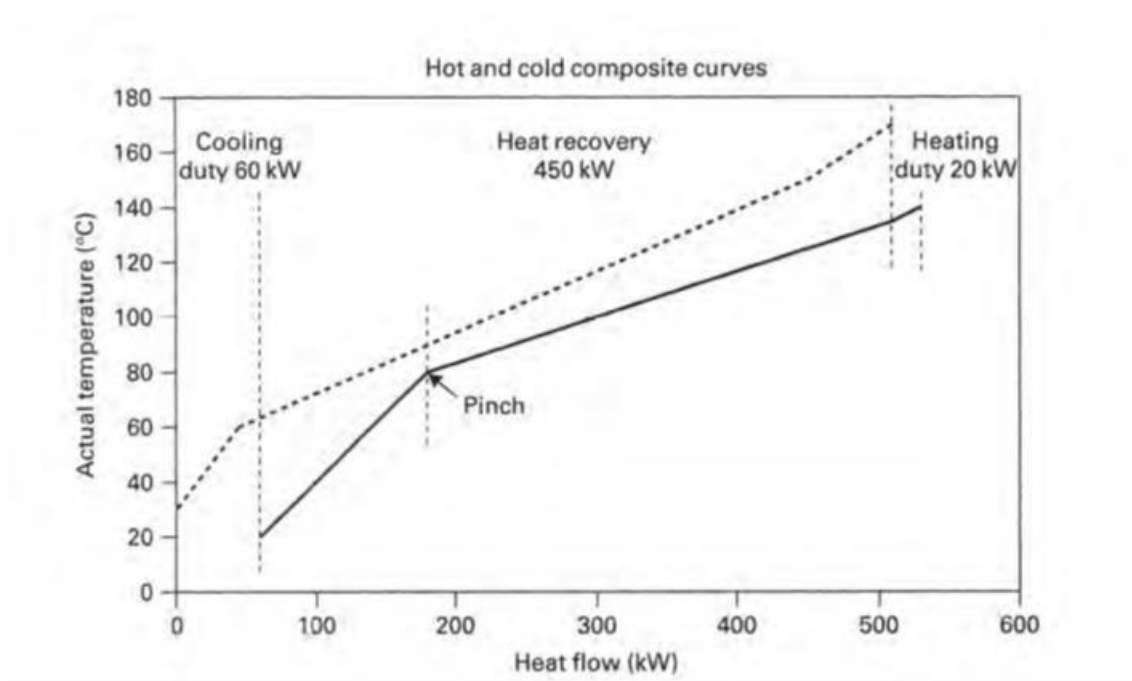


Figure 1-1: 熱複合線図; Figure taken from Ref. [7]

ピンチ温度分析のオリジナル式において、最適化のステップではヒートポンプは統合していない。熱交換器ネットワークの設計、すなわち合成ステップでは、膨大な数の組み合わせの検討がいらいます。ピンチ分析は数学的な最適化アプローチに従いません。そして、以下に説明しますが、ピンチ分析は、主にピンチの熱力学解釈によって得られる洞察に基づく逐次計算方法です。より多くの詳細は、第1.2節で説明されます。

1.1.2 最適化モデル

1983年に、S.A. Papoulias と I.E. Grossmann [9]が最適化手法を発表した。それ以来、コンピューターの進歩と解析手法の進歩により発展してきた。重要な発展は、非線形も取

り込んだI.D.L. Bogle と B.E. Ydstie,の Chapter 4 of Ref. [4], p. 383などで、今日ではルーチン化されている。

これらツールは、computer-aided process engineering tools (CAPE)と記述されている。すでに述べたように、詳細な概論は、I.E. Grossmann, J.A. Caballero と H. Yeomans [5]にある。C. Floudas [10]の書物は、複雑な非線形の基礎的な包括的な記述がある。ヒートポンプの統合の研究もいくつかなされている。ここでは、スイスのEcole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) のF. Maréchal のグループ (Refs. [11],[12] and [13])のみを紹介する。[13]は、H.C. Becker (directed by F. Maréchal)の理論で、ヒートポンプをプロセスに統合する手法とピンチ温度分析によるシステム方法論が記述されている。

一般的に、今の最適化法は熟達しており、ヒートポンプをいかなるプロセスに統合して検討することも可能である。だとすれば、問題は、どこにあるのか？多くの問題は、統合は全体システムの中である一部の問題に過ぎないということに由来している。

(1) 数式的問題 1

数式モデルは、単純な線形プログラムより相当複雑なものになっている。問題は非線形や、離散数値問題を取り込むことにより、混合非線形問題、混合離散数値問題になっていることによる。多変数になると解くことができなくなる。m個の2進数の変数を持つ混合離散数値問題では、 2^m 個の線形問題解が生じる。もしmが大きな値であれば、式の解を得ることは難しく、特別なテクニックが必要である。一般的に非線形問題は、決して除外することができない収束問題があり大変苦しみます。

(2) 数式的問題 2

一般的に、最適解は、全体最適解と局所最適解がある。熱力学的最適化では、全体最小解が求められる場合が多い。しかし、多変数であると、この見込みも小さくなる。

(3) 最適化モデルのセットアップ時の問題点

数学的なプログラミング技法をデザインと合成問題に適用するためには、代替技術の構造を仮定することが、常に必要です。(Ref.[5, p. 5]).簡単にいうと、数式プログラムを適用する際に、予見できていない代替技術では最適化できないということです。(Ref.[5, p. 5]).つまり、モデルを構築することは、エンジニアリングの素養、経験をかなり必要とする。

上部構造のいくつかのセットアップが、技術的な解決に接近するために必要でありそうです。これに加えて、最適化の処理の途中で、プロセスデータのいくつかの修正をすることが、最適化をさらによくすることができることがわかるかもしれません。

上部構造やプロセスデータの修正をするような外部の繰り返しプロセスによって、全体最適に、もっと近づくことができるでしょう。

（４）不確実性

数式は、多くの不確実性を隠してはならない。不確実性は、コスト計算での推定や、最適化ターゲットの定義などから生じている。なので、解は不確実性に依存している。そのため、コストなどのばらつきのために、局所解と全体解が、入れ替わる可能性がある。

（５）必要な能力

明らかなように、この計算を実行するためには、数式の知識と熱力学の知識が必要である。いくつかの具体的な適応が必要かもしれないが、大規模最適化プログラム実行が不可欠になる。一般的な最適化手法は、限られた研究者のみが可能である。エネルギーコンサルタントのような場合、ピンチ温度解析のほうが好まれる。

（６）ヒートポンプの統合

原理的には、ヒートポンプの統合は、特別な問題ではない。ここでのポイントは、最適化手法を適用するヒートポンプ統合モデルは、標準化されているかということである。上部構造でいろいろなヒートポンプを考慮できる可能性について、明らかにしなければならない。利用可能なヒートポンプのデータベースは無いので、それをつくることは大きな貢献になる。

1.2 産業用プロセスへのヒートポンプの統合：一般原則

1.2.1 イントロダクション

ここでは、一般的なプロセス統合について述べる。ここでの表現は、IEA work “Industrial Heat Pumps Experiences, Potential and Global Environmental Benefits”, Annex 21, 1995 (Ref. [14]).によるところがある。

ヒートポンプのプロセス統合において、重要なパラメータがある。

- ・産業用プロセス：それぞれのプロセスは独特で、またそれぞれは、熱力学的意味ではヒートシンクとヒートソースから構成されている。ピンチ温度分析を行うためには、ヒートシンク、ヒートソースの十分な理解が必要である。熱負荷と温度は本質的重要で、負荷の種類や、場所も実際の面で必要な項目である。
- ・ヒートポンプのタイプ：ヒートポンプは、いろいろな状況で適切に運用されるためにいろいろ異なる特徴がある。運用温度範囲がヒートポンプの選択範囲を制限する。効率や使用動力タイプも重要なパラメータである。
- ・エネルギーコスト：ヒートポンプ駆動エネルギーと熱にかかるコストが年間コストの大部分を占める。
- ・導入コスト：ヒートポンプの導入コストは、ヒートポンプ自身の導入コストが大部分である。しかし、それ以外も重要である。

ヒートポンプへの熱は、取り出さなければならないし、集約しなければならない。また

温熱側は分配しなければならない。ヒートポンプの高温側でも、熱分配システムは必要かもしれません。さらに、それ以外の変更点や補助機器の追加は、しばしば必要です。すなわち、熱交換器ネットワーク（下記参照）や、駆動エネルギー供給とコントロールシステムの変更などが必要になります。

1.2.2 一般的な考慮すべき点とヒートポンプのプロセス統合の原則

1.2.2.1 基礎的なピンチ解析のコンセプト

ヒートポンプを適切に統合するためには、十分な知識が必要である。その点でピンチ温度は熱力学的意味を持つので、ピンチ温度解析は有効である。Figure 1-2のように、ヒートソースとヒートシンクを分けて考える。ピンチ点以上では、熱量が不足しており、ユーティリティから追加されなければならない。もし、冷熱のユーティリティがピンチ温度以上に追加されると、その分だけ、温熱の需要が増加する。そうなので、有効な熱量は、追加された冷熱の合計とのオフセットになる。一方、ピンチ以下では、システムから取り除かなければならない余剰熱がある。十分に考慮されたシステムでは、ピンチ点以上で冷熱ユーティリティの需要はなく、ピンチ点以下で温熱ユーティリティの需要はない。

これらのことから、以下が基本的なルールになる

- ・ピンチ温度以上の温熱を冷却しない。
- ・ピンチ温度以下の冷熱を加熱しない。
- ・温熱から冷熱へ熱移動させない。

ピンチの違反は、上記ルールを満たされない時に生じる。

- ・ピンチ温度以上の温熱の抜き取り
- ・ピンチ温度以下の冷熱の加熱
- ・ヒートソースとヒートシンク間の熱移動

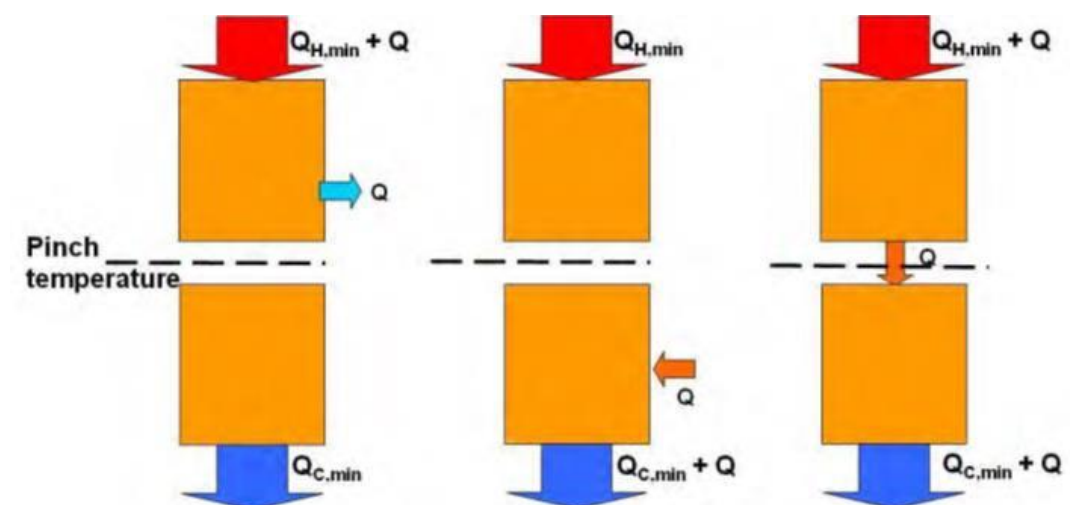


Figure 1-2: ピンチ温度ルール

1.2.2.2 理論的な状況での主な結論

Figure 1-3は、理論的にピンチ違反がないモデルである。ヒートポンプはこのように、構成されなければならない。熱がピンチ温度の下で過剰で、ピンチ温度より上で熱需要のあるヒートシンクがあるところで、ヒートポンプは統合すべきです。その場合、ピンチ点を越えて、ヒートポンプは統合され、そして、両方の温・冷熱のユーティリティの使用は減らされます。熱がピンチ温度の下で取り去られ、ピンチ温度の下へ届けられるならば、結果はヒートポンプへの駆動エネルギーの入力による分が冷却の需要の増加になります。

第3の可能性は、ピンチ温度より上で熱を抽出して、ピンチ温度より上に熱を届けることです。その場合、ヒートポンプの駆動エネルギーによって高温のユーティリティが減少することになる。このように、ユーティリティがなにかの理由で制限されている状況では、高温のユーティリティは駆動エネルギーと取り替えられることができます。実際には、たとえピンチ違反がないとしても、技術的な面や経済制約で、ヒートポンプの実際の可能性は制限されます。

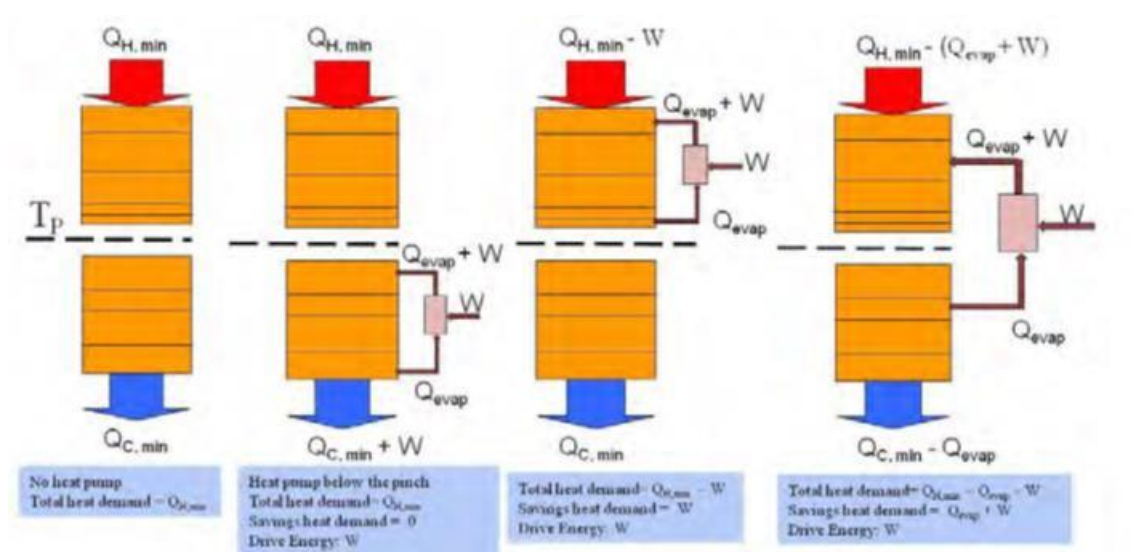


Figure 1-3: ピンチ違反なしにヒートポンプをプロセスに統合した結果

1.2.2.3 実際の状況での主な結論

実際には、いろいろな理由で、ピンチ違反がある。その場合、エネルギー消費削減のために、必ずしもピンチ温度を跨ぐ必要はない。それには、2つの可能性がある。ピンチ違反、ピンチ温度以上の冷却やピンチを越えての熱移動、ピンチ温度以上の熱の分配などを行うヒートポンプは、温熱のユーティリティを節約します。ヒートポンプに入るエネルギーとヒートポンプ駆動エネルギーの合計は、熱量の合計と同じになります。全エネルギー

バランスが確立される時は、ヒートポンプの駆動エネルギーはもちろん考慮されなければなりません。Figure 1-4の中でピンチ温度より上の冷却による状況は示されます。

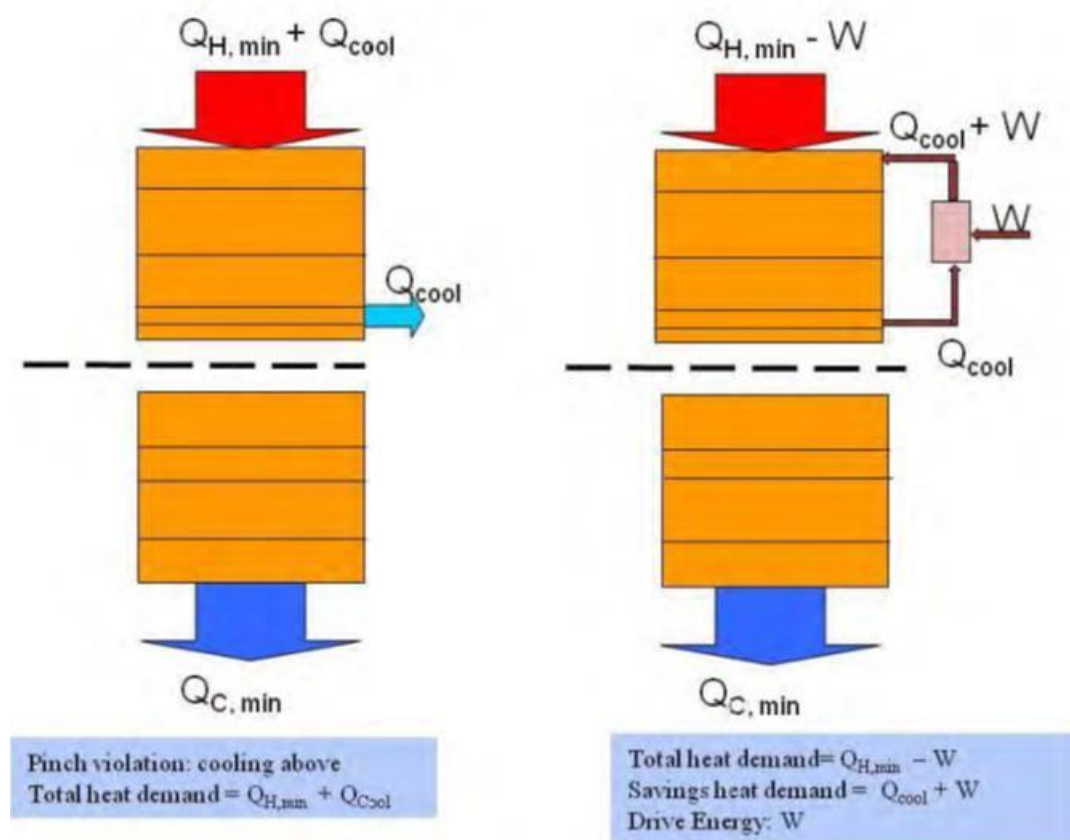


Figure 1-4: ピンチ温度以上で冷却器をプロセスに統合した結果

- ・ピンチ温度以下を加熱するピンチ温度違反をもつヒートポンプは、熱を抽出し、温熱のユーティリティを節約します。

熱の合計量は、ヒートポンプへ行く熱流れとヒートポンプ駆動エネルギーと同じになります。しかしこの場合、駆動エネルギー分は、冷却される必要があります。この状況は、Figure 1-5に図示されます。

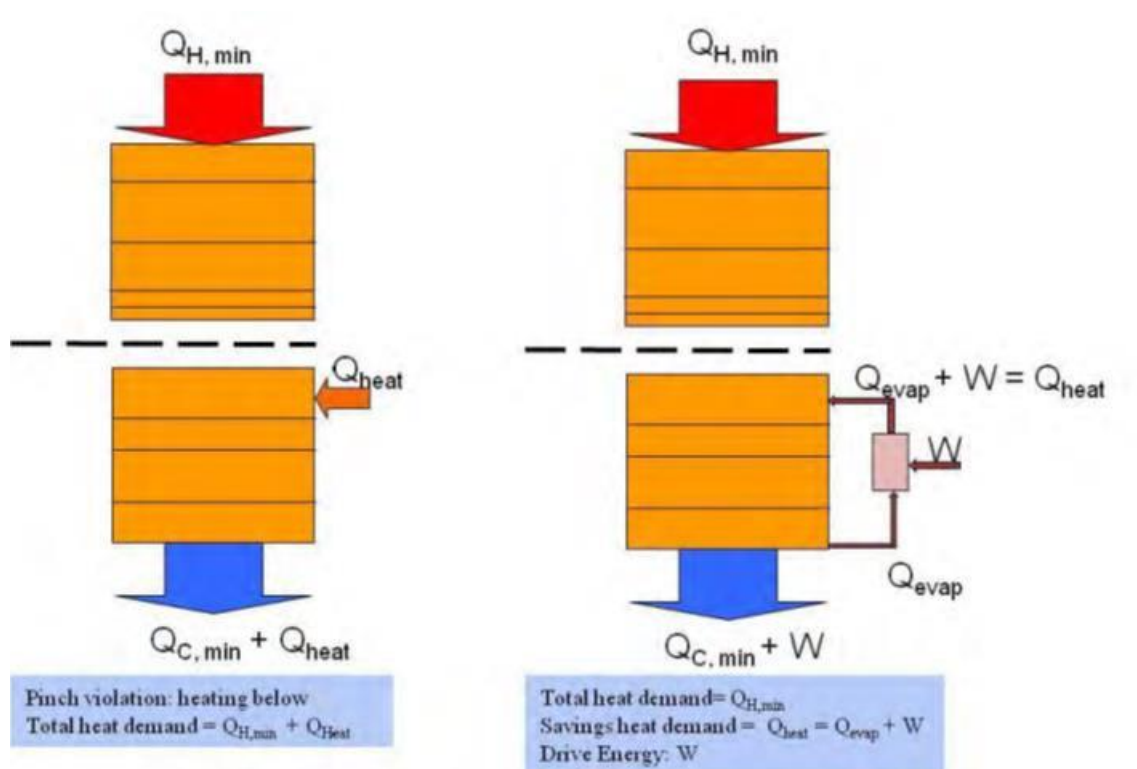


Figure 1-5: ピンチ温度以下でヒーターをプロセスに統合した結果

通常の状況でピンチ違反が存在するならば、ピンチの場所に位置していないヒートポンプもエネルギーを節約することを、この原理は示します。この事実は、それ以前の発表で述べられてきた内容とは著しく異なっており、このことは、様々な実施例をさらなる成功へと導くものであろう。

1.2.2.4 プロセスでの熱交換器ネットワークの結果

ヒートポンプのプロセス統合の結論は広範囲になる。ピンチ温度以下でヒートポンプに熱を奪われると、プロセスで利用できる熱も減少する。このことは、ヒートソース側での熱交換プロセス開始温度以下において、熱交換可能な量が減ることを意味する。この駆動力の減少は、熱交換面積の増大、もしくは熱交換器の追加を必要とする。これと同様のことは、ピンチ温度以上でも言える。一般的に、シンクとソースのサイズがその温度レベルでの理論最大サイズに近づけば、熱交換ネットワークのさらなる変更が必要になる。この変化の程度は、実際のレイアウトに依存する。冷熱と温熱を結ぶヒートポンプより、プロセス統合の中で使うヒートポンプは、多くの場合必要に迫られて、小型化していくことになるだろう。一方で、この構成は温度リフトが小さいので、高いCOPが得られるので経済的である。

1.3 Annex21スクリーニングプログラムの分析

1.3.1 イントロダクション

これまでに述べたように、プロセス統合のソフトウェアはピンチ温度分析の範疇に入る。そのなかに、最適化モデルを用いた時間のかかるケーススタディをすることなく、技術的、経済的評価ができる産業用ヒートポンプスクリーニングプログラムがある。スクリーニングプログラムは、90年代中ごろ、T.Berntssonがリーダーの (CIT-ETA)にて開発された。このスクリーニングプログラムは、Annex21のレポートに大きく貢献したので、Annex21スクリーニングプログラムと呼ばれている。このモデルは、入手可能なソフトウェア分析の出発点になる。詳細は、Ref. [14]。目的は、プロセスやヒートポンプのデータベース作成、およびヒートポンプ性能計算となる。この目的を達成するためにたくさんの機能がプログラムの中に作られた。これら機能は、・プロセスデータのデータベース、・ヒートポンプ性能のデータベース、・ヒートポンプ性能計算ツールとして利用することが可能である。アネックス21IHPスクリーニングプログラムの背後にある野心的な考え、ならびにその非常に野心的なゴールとそのユニークさは、その頃に、今日の関連の問題を取り上げていた。それゆえに、このプログラムは、このアネックスのTask 2のリーガルテキストのアイテムに直接つながるものです。

スクリーニングプログラムの著者は明示されていない。しかしこのスクリーニングプログラムは、94年のWallin and Berntssonの著作に続くものである。この著作は、アウトラインを述べているだけなので、完全な詳細な理解はできない。参考資料は2つあり、Refs. [16] and [17]、は、E. Wallinのドクター論文の中にある。明らかに、著者の最初の狙いであったジャーナルへの投稿はあきらめられている。

スクリーニングプログラムは、ピンチ温度法を使つてのヒートポンプをプロセスに統合するための重要なツールであるが、CIT-ETAによって、宣伝され販売されてことは無い。

1997年Annex21が完了してから、利用されるようになった。このスクリーニングプログラムは、いくつかの機関で使われたが、出版するようなものにはつながらなかった。1997年のAnnex21の完了以来、修正やアップデートは行われていない。

1.3.2 Annex21スクリーニングプログラムの変換

2011年のAnnex35の最初のミーティングにおいて、このプログラムのアップデートが話し合われた。参加者は、最新版作成があまりに時間のかかる作業であるかもしれないという結論に達しました、そして可能なマイナーチェンジや改善された入力データを調べるということで合意した。欠点は、R. Nordmanによって以下のように要約された。

- ・プロセスとヒートポンプの詳細な知識を要求する
- ・冷媒データが時代遅れ
- ・新しい冷媒データを追加することができない。
- ・自動操作ができないので、ユーザーの手入力が必要

- ほかのソフトウェアとのやり取り難しい。出力データ形式が悪い。
- ヘルプファイルが分かれている。
- グラフ機能がユーザーフレンドリーではない。
- 基本的なコードが利用できるが、たくさんのコーディングを必要とする新しい実装が必要

上記のリストの最後のアイテムで提案される新しいプログラムの実装と評価は、**Information Center on Heat Pumps and Refrigeration (IZW)**によってなされました。アネックス21IHPのほぼ完全なプログラム（ほんの少しアイテムがない）は、**NET**フレームワークを採用することで、時代遅れの**Visual Basic**版から最新の**Visual Basic**に変更しました。この仕事の詳細は、2つのIZWメモ[22] [23]に記載されています。1997年からのオリジナル版と2011年からのバージョンは、ほとんどすべての状況で、同一の結果を出します。

特定の状況で見つかる違いは、最初のスクリーニングプログラムで見つけられるエラーに、起因しているかもしれません。特定の状況で結果が異なるもう一つの理由は、最初のスクリーニングプログラムのソースコードとIZWに提供されるソースプログラムの不一致によるかもしれません。この不一致をはっきりすることはできませんでした。

変換されたバージョンの2つの例は、**Figure 1-6**と**Figure 1-7**に示されます。数的な結果は、最初のアネックス21IHPスクリーニングプログラムと同一です。この転換からの結論は、明らかです：新しい変換されたバージョンは、修正や、データやモデルのアップデートや拡張のために準備ができています。スクリーニングプログラム、たとえばデータベースの部分は、他の目的のために簡単に外部に抽出することができ、現代に対応していること。

File COP Composite curves Grand composite curve Result (report)

Hot streams pinch temperature	71.67	51.67
Cold streams pinch temperature	(°C)	(°C)

The economic opportunities to integrate the selected IHP type in the process will now be determined.

Multiple IHP's are assumed if the size is outside the size interval of the IHP.

The installations that represent the opportunities will be a heat pump which delivers the largest amount of heat at a specified temperature lift. The temperature lift must be selected from a plot showing the pay back period at various temperature lifts. Start by specifying the costs to be used.

Press 'OK' to start.

Start Analysis

Cost of heat source (\$/MJ)	0.00062
Cost of saved energy (\$/MJ)	0.00657
Cost of electricity (\$/kWh)	0.036
Annual operation time (hour/year)	8000
Annuity factor (1/year)	0.25
HE cost: (constant * size ^ 0.6)/constant (\$/kW)	1598.32
Annual maintenance cost (\$/kW)	5
Optional factor to adjust total installation cost	1

Selected Process:

No.	Date	Process name	Interval pinch (°C)	Current heating (kW)	Current cooling (kW)	Operation hours/year
101	Full	Phosphate fertilizer plant, Phosphoric acid plant/super green acid plant.	52	44541.12	44101.51	Unknown

Selected Heat Pump:

No.	Heat pump type	Heat output (kW)
10	Electrical motor driven closed-cycle compression, Turbo, R22	1000 to 30000

IHP for maximum energy saving		IHP for average energy saving	
Heat delivered (kW)	3441.12	Heat delivered (kW)	1720.56
Heat del./min. hot utility (%)	7.9	Heat del./min. hot utility (%)	3.95
Electricity (kW)	570.35	Electricity (kW)	268.53
Payback period (years)	2.1	Payback period (years)	2.9
Annual profit (\$)	203036.4	Annual profit (\$)	57481.06
Estimated total investment (\$)	859553.9	Estimated total investment (\$)	602057.8

Changes of accept values **Show plot** **Reset input values** **Return to Main Menu**

Figure 1-6: Annex 21 IHP スクリーニングプログラムの経済性評価のメニュー (Refs. [22] and [23]); all results (numbers) are identical with the original Annex 21 IHP screening program. 数値的な結果は、最初のアネックス21IHPスクリーニングプログラムと同一です。

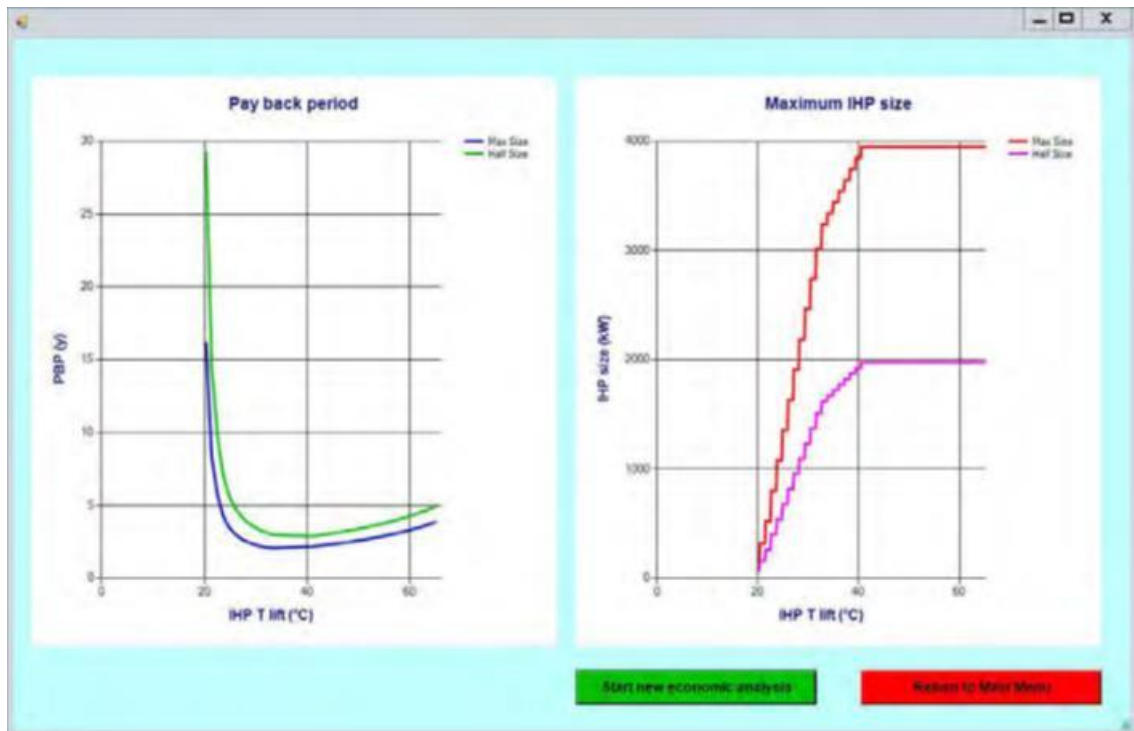


Figure 1-7: Annex 21 IHP スクリーニングプログラムの経済性評価のメニュー (Refs. [22] and [23]); the graphs are identical with those from the original Annex 21 IHP screening program. グラフの結果は、最初のアネックス21IHPスクリーニングプログラムと同一です。

1.3.3 Annex21スクリーニングプログラムの分析

2つの問題がさらに難しくしている。

- このスクリーニングプログラムの確認作業結果は出版されていない。とくに、もっと洗練されたほかのプログラムとの比較はされていない。
- E. Wallinのワークは膨大な詳細データや、近似法やアプローチ法を表しています。明らかに、選ばれたモデルやアプローチ法のみしかスクリーニングプログラムの中ありません。残念ながら、詳細なアプローチ結果は残っていません。

上記のなかの記載事項から、CIT-ETAでは宣伝されたり、商業化されておらず、詳細な記述を残すことは意図されていなかった。ここで利用できるものは、十分に公平であるはずです。

詳細な熱力学とプロセスとヒートポンプの理解に基づくWallinのワーク。このような詳細な理解は、スクリーニングプログラムを使ってヒートポンプをプロセスに統合する場合必須である。この場合、ユーザーの経験と知識にガイドされたステップバイステップの最適化の取組になる。標準的なピンチ温度法による最適化のほかには、最適化方法によるサポートはない。このアプローチは、むしろスクリーニングプログラムの使用法を複雑で時

間がかかるようにします。

スクリーニングプログラムの使い方が難しいことが、データとモデルのアップデートの大きな問題であった。しかし、スクリーニングプログラムのアップデートに対する説得力のある意見があります。それは、このプログラムの作者はこのプログラムを時代遅れのもので、アップデートの試みは失敗になると考えていることが、TASK2を実行している中で、明らかになった。1997年からこのプログラムに対しては、なにもされておらず、作者は開発をあきらめていた。リーガルテキストが、このことを考慮していなかったことを、我々は批判する。それでも、我々は、スクリーニングプログラムに含まれているヒートポンプ性能のデータベースの洞察を緩めてはいけない。我々はスクリーニングプログラムの詳細を検討しているので、このデータベースがスクリーニングプログラムの大きな部分であることを知っている。これは一般的な部分からなるものなので、少しだけのヒートポンプデータの修正だけが必要なだけである。ヒートポンプのデータは、アップデートされなければならない。

1.4 ピンチ分析に基づくスクリーニングプログラムへの最新のコンセプト

ピンチ温度分析に基づく提案された現代的なスクリーニングプログラムのコンセプトでは、F. Maréchal と S.A. Papoulias & I.G. Grossmann. のChapter 1.4.1, “*The problem table algorithm*”は、F. Maréchal (Ref. [8]) を追随したものとみなしています。一方で、chapter 1.4.2 “*The transshipment model of Papoulias and Grossmann*”は、S.A. Papoulias と I.G. Grossmannのモデルの簡単な説明とみなされています。これらの2つの引用から、ピンチ分析に基づく新しいスクリーニングプログラムのための概念は、発展しました。このモデルの中核は、予備試験プログラムによってテストされました。多くの詳細なことは、テストプログラムに取り入れられているが、すべての方程式を提示することが、必要ありません。

むしろ、数学的コンセプトの一般的な理解に強調を置くべきである。線形プログラムの式は、簡単な解法があるものである。前の章で述べたように、ヒートポンプ統合の一般的解法は議論されてきたし、いくつかのケースはH.C. Becker [13]によって、解が得られている。簡単な最適化法の代わりに、ピンチ分析法のプロブレムテーブルアルゴリズムが用いられている、ヒートポンプやエネルギーや熱交換器ネットワークすべてを同時に最適化する近似手法を、ここでは分析する。

1.4.1 数学的な最適化法として公式化されたプロブレムテーブルアルゴリズム

もともとのピンチ温度手法は、プロブレムテーブルアルゴリズムを最適化テクニックとして使っている。これはとても簡単であるが、不必要な制限もある。プロブレムテーブルアルゴリズムは最小必要エネルギーを得ることができる、具体的なヒートバランスモデルである。ヒートカスケードは、熱複合線図(Composite Curve)によって得られた温度間隔と

して表現され、そこではエネルギーバランスが計算されている。全体の温度幅に閾を与え
る標準的な手順は、熱伝達の拘束条件による。すなわち、熱力学第2法則は守られなければ
ならない。温熱の流れの温度は、 $-\Delta T_{\min}/2$ で補正され、一方冷熱の流れは、 $+\Delta T_{\min}/2$ で補
正される。

ヒートカスケードモデルのピンチ温度法の可視化はFigure 1-8にある。ベクトル $\mathbf{R}$ は、高
温から低温へのヒートカスケードをあらわす。 R_1 は冷熱で、 R_{n+1} は熱エネルギー、すなわ
ち最小必要エネルギーである。

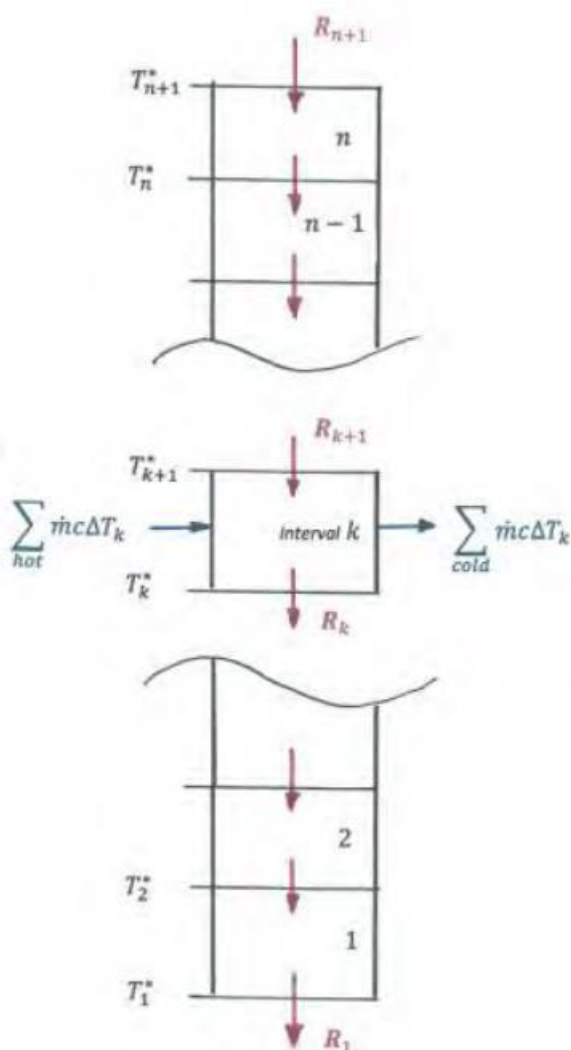


Figure 1-8:古典的なピンチ分析手法の基礎をなしている熱カスケードモデル; for
explanations see text;

corrected temperatures are labeled as T^*

*; the specific notation is given in the text.

Figure 1-8 から、2つのエネルギーだけ使われていることがわかる。温熱($\equiv \mathbb{Q}+1$)と冷熱($\equiv \mathbb{Q}1$)である。この制限の理由は単純である。なぜなら最小必要エネルギーを得るための最適化問題の特別な形式は、手動で実行されるからである。しかし、この単純さは価値もある。この制限だけで、線形プログラム法などの最適化法を採用せずに、最適化問題を解くことができる。ユーティリティの一般的な構成を考える場合には、この方法は必要になるかもしれない。ピンチ法では、この制限は全体熱複合線図を使用して、手動で最適化を実行することによって、克服されている。そして、このことは、この最適化対処可能な状況を制限していることになります。プロブレムテーブルアルゴリズムの数式は以下のようになる。独立変数 $R1$ 、 R_{n+1} にとって、以下の機能を最大化する必要がある。

(1) $\mathbb{Q} \mathbb{Q} \mathbb{Q}+1$

拘束条件は、(2)

(2) $\mathbb{Q} \geq 0 \mathbb{Q} = 1, \dots, \mathbb{Q} + 1$

熱バランスのために以下の拘束条件が追加される。

$$(3) \quad R_{k+1} - R_k + \sum_{hot\ streams} \dot{m} c_p \Delta T_K - R_k - \sum_{cold\ streams} \dot{m} c_p \Delta T_K = 0$$

$\mathbb{Q} \mathbb{Q}$ mass flow rate、 $\mathbb{Q} =$ specific heat at constant pressure、 $\Delta \mathbb{Q} = \mathbb{Q}+1 - \mathbb{Q}$

単純にするために、個々の流れインデックスは、式(3)では省略されました。これら数式は、標準の線形問題のソルバーで解かれるように、かなり簡単になっている。

1.4.2 Papoulias と Grossmann のトランスshipmentモデル

エネルギーをもっと柔軟に取り扱うよう、式(1)-(3)の拡張としてトランスshipmentモデルが検討されるかもしれない。その基本は、Figure 1-8に似たカスケードモデルである。

Papoulias と Grossmannは以下のことを書いている。

熱回収ネットワークのトランスshipmentモデルは、温熱流れと暖房ユーティリティを熱源として備えています。温度間隔はノードとして、冷熱流れと冷熱のユーティリティを最終目的としてもっています。

このように拡張方程式を方程式(1)-(3)と比較していますが、熱フローパターンは、以下の通りです：

- ・ 温度範囲が温度間隔内にある、すべての温熱流れと温熱ユーティリティから、熱は特定の温度間隔内に流入します。
 - ・ 温度範囲が温度間隔内の冷熱流れと冷熱ユーティリティに、熱は特定の間隔から流れ出します。
 - ・ 熱は、次の低い温度間隔に特定の間隔から流れます。
- この熱は、現在の温度間隔では利用されることがない残りの熱で、従って低い温度間隔へと流れなければなりません。
- ・ 熱は、より高い温度である前の間隔から、特定の温度間隔に流れ込みます。

この熱は、より高い温度間隔で利用されることができない残りの（過剰）熱です。

プロブレムテーブルアルゴリズムとの比較においてトランスシップメントモデルの主要な長所は、任意のコスト構造のもとで複雑なユーティリティ構成の最適化がかなり柔軟にできることです。

制限された組み合わせ（すなわち熱を交換することは許されない温・冷流れの組）を扱うために、このトランスシップメントモデルがどのように拡張されたかについても著者は示します。

このようなケースは、古典的なピンチ分析によって扱われることができませんでした。この章の始めに記載された表現、トランスシップメントモデルが方程式(1)-(3)の拡張と思われるかもしれないということは、翻されることもできます。：

プロブレムテーブルアルゴリズムは、特例としてトランスシップメントモデルに含まれます。一般的な最適化方法としてのトランスシップメントモデルでのプロブレムテーブルアルゴリズムの置き換えが、現代のピンチ分析プログラムに利点を提供するかどうかという問題がすぐに思い浮かびます。

有利な点が1つあるのは明らかである。“Utility Window”で必要なエネルギー情報が得られるなら、エネルギーの最適化コードは実行できる。もちろん、ユーザーは全体熱複合線図法を採用することで標準のアプローチでエネルギーの最適化を修正することはできる。我々は、クラシックなピンチ温度分析アプローチの修正が、ほかのピンチ温度法のコードですでに実現されていることを期待する。

2つ目の有利な点も明らかである。クラシックなトランスシップメントモデルのための拡大で、ヒートポンプが、ユーティリティとヒートポンプの同時最適化に組み込むことができるようになった。これについては、あとで議論する。

トランスシップメントモデルによるプロブレムテーブルアルゴリズムへの取り換えの基本的な要求は、適用のしやすさ、数学的正確さ、信頼性、妥当な計算時間である。言い換えると、この代用は、ピンチ分析モデルの単純さを減少させることになりますか？

カスケードモデルそのものが複雑なプロセスの熱力学簡略化モデルであるので、我々は数式上の最適化努力は、取るに足りないものと期待します。

トランスシップメントモデルが、提案された最新のピンチ分析プログラムで主要な役割をもっており、そして、大きなコード開発が始まる前にすべての数的な面が知られている必要があるので、数式モデルは単純なテストプログラムの形に書かれました。

1.4.3 簡単なテストプログラム

単純なテストプログラムは、かなり柔軟に書かれている。500度までの温度間隔は認められている。最適化のゴールは、エネルギー最小かコスト最小である。このトランスシップメントモデルのバージョンは、テスト版でありグラフ機能がないことを強調しておく。いろいろな具体的な状況に対しては、コードを直接修正して使用している。

適切な状況に適用された際には、プロブレムテーブルアルゴリズムのピンチ温度法の解とトランスshipmentモデルの解はよく一致する。

アネックス21のIHPスクリーニングプログラムに含まれるプロセスデータベースからとられる14の非常に異なるケースにおいて、4つの量は、比較されました。

ピンチ温度、ピンチ温度位置、温熱エネルギー、冷熱エネルギー。両者のコンピューター計算コストは、ほとんどなかった。

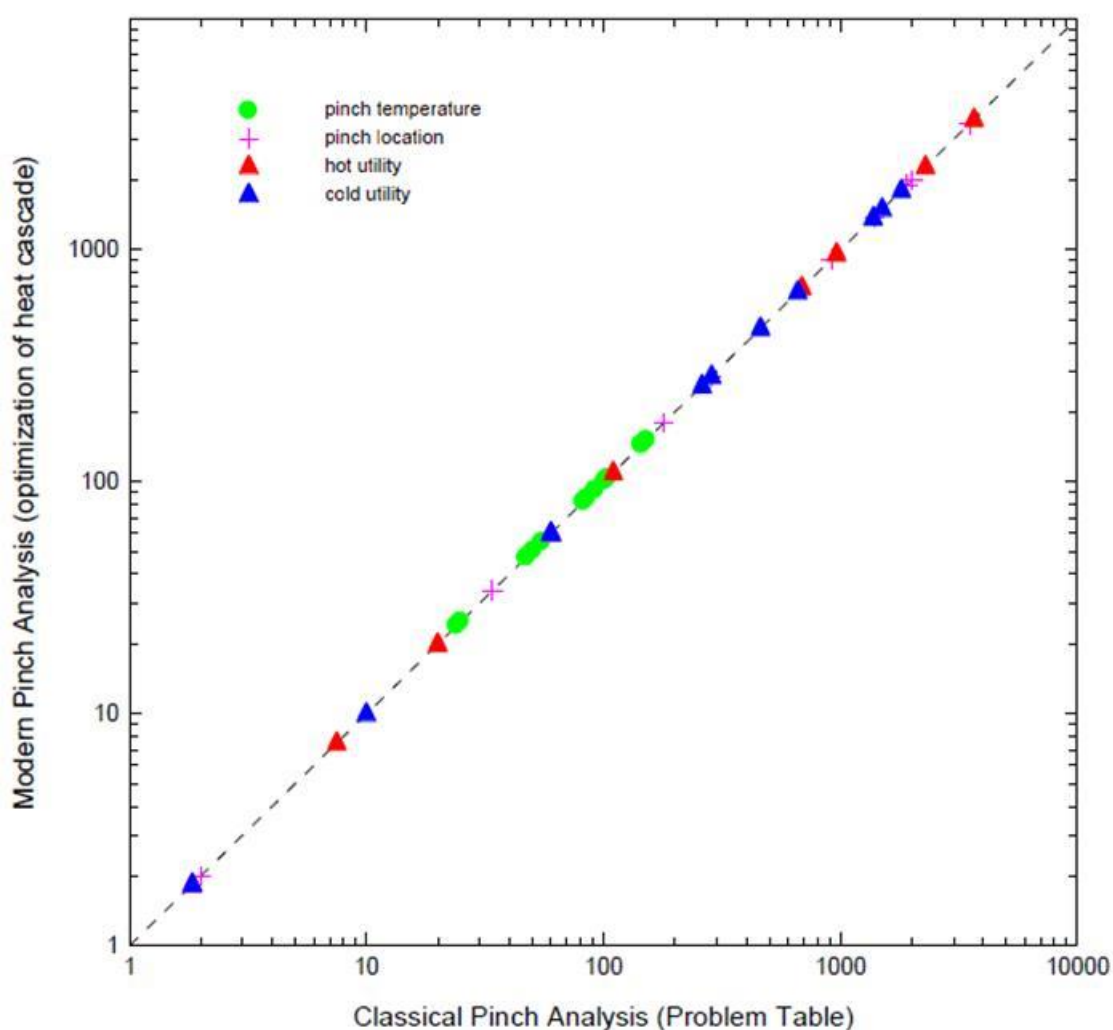


Figure 1-9: プロブレムテーブルアルゴリズムに基づく古典的ピンチ温度法による熱カスケードモデルによる解と、14のプロセスの最適手法による解の比較。完全に一致している。

プロブレムテーブルアルゴリズムの古典的なピンチ分析に従う熱カスケードモデルの解と14の異なるプロセスの最適化テクニックの比較。一致は完璧です。

ユーティリティ（温度、大量の流量、経費その他）に関する必要な情報が特定の“Utility

Window”によってコードに提供される場合、ユーティリティの最適化がピンチ分析コードのトランスshipmentモデルによってなされるという我々の考えは、どんな制限なしでも、だいたい実現できることができます。

したがって、古典的なピンチ分析での類似した拡張が、いくつかのソフトウェアツールで採用されると、我々は期待してします。更なるテストは、トランスshipmentアルゴリズムの適用性、正確さ、信頼性と短い計算時間であることを確かめました。

これらのテストはユーティリティや異なる種類の経費などの複雑な状況を含みました。そのテストにおいては、手動で実行される最適化が取るに足らないものだと思います。従って、ピンチ分析に基づくスクリーニングプログラムのためにモダンコンセプトのアプローチへの障害はありません。

1.4.4 ヒートポンプ統合へのトランスshipmentモデルの拡張

熱交換器ネットワーク上でヒートポンプをプロセスに統合させる結果は、第1.2章ですでに論じられました。ヒートポンプにおいて、熱は低い温度（熱源）からより高い温度（ヒートシンク）まで持ち上げられます。

ヒートポンプをプロセスに統合させるために、両方の条件は、トランスshipmentモデルでさらに考慮されなければなりません（すなわちカスケードで）。

ヒートポンプを統合することは、広範囲にアネックス21で議論されただけでなく、また、Figure 3-4の中でも視覚化されました。すでに第1.2章で論じられるように、温・冷熱複合線図の修正は、ヒートソース温度以下とヒートシンク温度以上での熱交換の推進力の減少を導きます。そして、それはより大きな熱交換器が必要なことを意味します。

モデリングのためには、モデルが非線形になると認めることは重要です、すなわち、熱交換のための推進力だけでなく、ピンチ点の位置は影響を受けています。

1.4.5 ピンチ分析に基づく、スクリーニングプログラムのために提案された最新のコンセプトの要素

ヒートカスケードの形での熱バランス方程式を、ピンチ分析に基づくスクリーニングプログラムのための提案されたコンセプトの最初の要素とみなします。

第2の要素は、熱交換器ネットワークです。

ピンチ分析に基づく現代のスクリーニングプログラムを作成することを我々が目指す限り、標準的なピンチ方法に類似して、熱交換器ネットワークが人工の熱交換器面積 A_{HT} によって近似されると我々は仮定しなければなりません。そして、その面積は最小限のアプローチ温度 ΔT_{min} に依存します。上のようにヒートカスケードの場合、我々は数学的に依存のタイプのみを示します。最初の温度 T_{in} から加熱される冷たい流れでは、目標温度 T_{out} , t_{a} 温熱側の流れでは、最初の T_{in} から、 T_{out} の目標値になる。F. Maréchalは、特徴的な依存性から解を導きます。

$$(4) \quad A_{ex}(\Delta T_{min}) = \frac{\dot{m}_{hot} c_{p,hot}}{(1-\kappa)U_{ex}} \left[\ln \left\{ \frac{(1-\kappa)(T_{hot,in} - T_{cold,in}) + \kappa \Delta T_{min}}{\Delta T_{min}} \right\} \right]$$

with $\kappa = \frac{\dot{m}_{hot} c_{p,hot}}{\dot{m}_{hot} c_{p,cold}}$ and $\frac{1}{U_{ex}} = \frac{1}{\alpha_{cold}} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{hot}}$

$\dot{m}$ は、質量流量、 c_p は定圧の比熱、 U は熱交換器の全体的な熱伝達係数、 α は熱伝達係数、 e はチューブの厚みです。eq. (4) は、熱交換器ネットワークのコストを見積もりを可能にし、簡単に洗練したものにすることができます。明らかに、このアプローチは、近似です。残念なことに、ピンチ分析によって見積もられたコストと、詳細な最適化に基づく分析からのコストの間のいかなる比較した結果も我々は知らないのです、この近似がどれくらいよいかについて、我々は言うことができません。この近似が、近似のエラーがヒートポンプと関係する実際のポテンシャルよりはるかに少ない状況においてだけに意味があることは明らかです。

さらにモデルのエレメントは、

- ・最適化プロセスに使われるヒートポンプのデータベースの開発。

データベースの典型的情報はヒートソースとヒートシンクの温度やヒートポンプのサイズだけでなく、ヒートポンプを適用する温熱、冷熱の流れに関する詳細な情報も含まれます。章1.3.3で述べましたが、最初のアネックス21の産業用ヒートポンプのスクリーニングプログラムのデータベースが、このプログラムの大部分です。

そのデータベースは、かなり一般的なものから成りたっており、マイナーな修正だけが必要なだけです。最も重要なのは、ヒートポンプのための入力データは、更新されなければならないということです。

- ・ヒートポンプがつながることができる温・冷熱の流れ（いくつかの温・冷流れの選択である場合があります）を選ぶためのアルゴリズムの開発。

このアルゴリズムは、Wallin's thesis [18]の中では、本当に明確ではありません。また、この問題をより深く見る試みもありませんでした。

- ・上記の非線形性は、解を収束する繰り返しを必要とします。

通常、収束は当然決して保証されることができません、しかし、この場合、非線形性にはかなりいやな特徴があるので、さらにより悪いです。その理由として、機能のいくらかは、不連続です。

たとえば、ピンチ点自体、またはサイズと特定の能力レンジ（フルパワー範囲は、個々のヒートポンプのレンジを重ねることによって理解されます）の特定のヒートポンプの価格。この分析は1つの分析につき1秒以下のとても短い計算コストという観点から、我々は準ランダムなシーケンスでモンテカルロ・テクニックを適用するつもりでした。この技術は、合理的な時間で結果を得ることが可能である。もちろん、モンテカルロ法をもっと適切なPI法にあとで交換する必要があるかもしれません。

ヒートポンプをプロセスに統合させるために、ピンチ分析において修正されたトランス

シップメントモデルでプロブレムテーブルアルゴリズムを取り代えるという提案は、熱交換器ネットワークでヒートポンプとエンジンの最適統合のための、K. HoliastosとV. Manousiouthakis [25]のアプローチに支えられています。

ヒートポンプと熱エンジンは、熱交換ネットワークの構成要素とみなされています。ピンチ分析が一つの熱交換器には対処しないように、ピンチ分析に類似して、ここでは個々のユニット（例えばヒートポンプ）毎には、取り扱われません。むしろ、熱力学アプローチは考慮され、全体ネットワーク構成での全体最適解決を可能にします。

相互干渉で最適ネットワークを構成している2つのサブネットワークが検討された：熱交換器サブネットワーク、それはネットワークの熱交換器を集計した動作を表す。熱エンジンとヒートポンプサブネットワーク、それは、駆動側ユニットの動作の集計を意味する。熱交換器ネットワークは修正式でモデリングされている。

(4)高温側のほんの少しの合成流れエンタルピーしか、冷たい合成流れへ移されないことを考慮すること。熱エンジンとヒートポンプネットワークは、利用できる（第1法則）仕事と第2法則の仕事によってモデル化されます。

そうなので、サブネットワークのヒートポンプとエンジンの動作による熱フローでのエンタルピー変化を確実にゼロにすることが必要です。

1.4.6 サマリー

修正されたトランスシップメントモデルで、もとのピンチ分析のプロブレムテーブルアルゴリズムを代えることによって、ピンチ分析に基づくスクリーニングプログラムのモダンコンセプトは開発することができます。数式面と主要な実現可能性は、すでに分析されました。しかし、このモデルの若干の詳細なところは、今後開発される必要があります。

- ・ヒートポンプがつながる温・冷熱流れ（いくつかの温・冷流れのある場合があります）を選ぶためのアルゴリズムの開発。
- ・ヒートポンプ・データベースの開発。
- ・具体的な非線形性のタイプに対処する繰り返しアルゴリズムの開発。

原則として、この分析は、ヒートポンプを統合するエンジニアリングの手順と、非常に類似していなければなりません。しかし、その解析結果のエラーがあまりに大きいならば、近似した熱交換器ネットの計算結果が、全部のアプローチを危うくするかもしれないことに、我々は気づいていなければなりません。

1.5 ピンチ分析に基づく実在するソフトウェアの精査

詳細な数学的な分析や、ユーザーサポートの詳細分析もないので、この章は分析の精査‘Scoping Analysis’と呼ばれています。しかし、主要なツール、Einsteinコードとヒートポンプの選択のために使われるモデルでの経験は、以下で報告されます。ピンチ方法に基づく分析的ツールの最先端の包括的なレビューは、Y. Beucher、J.-L. Peureux と A.

Vuillermoz.によって与えられます。そこでは、ピンチ分析を強調したプロセス・エネルギー統合の方法は議論されています。そして、アカデミックな研究所とノンアカデミックのプレーヤーらステークホルダーのリストも作られています。この編集は数年間かけたが、多数のピンチ分析ツールが存在し、新しいツールが毎年発表されているが、この編集がその完璧なリストであるとは主張しません。このレポートに示されるツールのいくつかは、今ではかなり古いものもあります。ここでは、我々がレポートで更に詳細に扱ったプログラムのみの名前をリストします。

それは、STAR and SPRINT, Pinchlight, OSMOSE, Thermoptim, CERES, Pro_Pi, PinCH, Hint, Einstein, SuperTarget, AspenEnergyAnalyzerです。

編集はかなり簡単な説明で、潜在的ユーザーに最初の方針を示すことを指向します。数学的な詳細が概要で省略されていますが、ヒートポンプの統合に関して理論的な見解から、何が期待できるかについて、著者は示します：

(1) OSMSE:

暖房システムのエネルギー統合がEcole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)のF. Maréchalによって率いたグループによって開発された。計算モデルと手順は、ヒートポンプを産業のプロセスに統合させるために開発されました。OSMOSEは、ピンチ方法に基づくツールというよりも、むしろ最適化プラットフォームです。OSMOSEはカスケードシステムの数学的なプログラミング公式化を使って、エネルギーシステムで熱フローを計算することを目指します。ヒートポンプの温・冷熱流れが、それとは別のヒートポンプや、燃焼ガスやコージェネレーション、蒸気サイクルのような他のユーティリティ流れと相互作用しているモデルなので、このアプローチはヒートポンプ統合のための唯一の実際的なアプローチです。ピンチ分析がヒートポンプ統合の原則の説明をすることができますが、ピンチ分析が主に熱回収を目標としているので、ピンチ分析はヒートポンプシステムの最適統合を計算するようになる際はほとんど使われることがないことは、ハイライトされなければなりません。

(2) CERES:

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (Mines Paristech)のCES (Centre d'Eco-efficacité des Systèmes or Centre for Systems Eco-Efficiency)によって開発された。CERESはピンチ方法を可能にするが、多くのユーティリティ（ヒートポンプ、タービンなど）の中から最適なものを選ぶようになっている最適化アルゴリズムで、さらに強化されました。

(3) Einstein

ピンチ温度法は、熱交換器ネットワークの設計のみで使われ、エネルギー選択では使わ

れない。このツールはエネルギーの決定やエネルギー最適化の組み合わせ検討は行わない。これは、いろいろなエネルギーシナリオの検討は行えて、それに基づくエネルギーや経済性や環境面での比較検討はできる。ヒートポンプ統合のモジュールを実際に使うのは難しい。V2.1には少しバグがある。

1.6 結論

Annex35は1年間延長したが、主にTASK2の結果が無かったことによるが、これまでも、配布できるものは得られていない。我々は、この無関心は、以下の2つのことによると考えている。

- ・ほとんどの参加者は、直接モデリングやソフトウェアに関わっていない。
- ・ソフトウェアが、いろいろな視点で多くの範囲をカバーしていることを過小評価している。Annex21のスクリーニングプログラムは、分析され、時代遅れのVisual Basicから、最新のNET frameworkに変換された。

この変換された新しいバージョンは、データや、モデルの修正、アップデート、拡張に対応する。しかし、TASK2の期間で、このプログラムの著者はこのプログラムは時代遅れでこのアプローチはうまくいかないと考えていることが明らかになった。1997年以降、このプログラムに対しては、何も行われていなかった。リーガルテキストのこれに対応する部分がこの状況を考慮に入れてなかったことに、我々は気がつきました。しかし、スクリーニングプログラムのある部分は、例えばデータベースなどは、データを抽出でき、他の用途で簡単に使用することができます。もともとのゴールである現代的に発展させるという観点を持ち、アネックス21産業用ヒートポンプスクリーニングプログラムのアップデートのために、ピンチ分析に基づくヒートポンプのプロセスへの一貫した統合を可能にする提案がなされています。

この概念の基本的な要素は、以下の通りです：

- ・ユーティリティとヒートポンプの同時の最適化を許す拡張したトランスshipmentモデルへのプロブレムテーブルアルゴリズムからの置換。
- ・標準的なピンチ分析の場合のような熱交換器ネットワークの近似方法。
- ・ヒートポンプをつなぐことができる温・冷流れ（いくつかの温・冷流れのある場合があります）を選ぶためのアルゴリズムの開発。
- ・同時最適化に使われるヒートポンプのデータベースの開発。

この最適化が非線形であるので、収束可能な特別なアルゴリズムの開発が必要です。ヒートポンプをプロセスに統合させるこの概念は、H. E. Becker [13] による洗練された方法よりレベルが下のものです。現在、そのようなものの開発は前例がなく、関連性や必要性については、わかりません。

純粋なピンチモデルと洗練された数学的な最適化モデルの違いが、最新のソフトウェアツールで埋められたことを、既存のモデルの分析は示しています。

ヒートポンプのプロセスへの統合に関して、いろいろなツールの中でOSMOSEまたはCERESのコードが有望です。どんなソフトウェアツール、アプローチ、最適化からも独立している、一般的なヒートポンプ・データベースは、より焦点に入らなければなりません。そのようなデータベースは、多くの目的のために必要とされます。

これで具体的なヒートポンプのタイプを選ぶことができます。データベースの典型的な情報はヒートソース、ヒートシンクの温度ならびにヒートポンプのサイズ、ヒートポンプが選ばれる温・冷流れに関する詳細情報などになります。新しいTask 2チームが設立されるならば、Task 2のゴールは慎重に再考されなければなりません。最先端技術、また研究機関、大企業、エネルギーコンサルタントなどの産業界のニーズは、詳しく調査されなければなりません。一般的な最適化方法のアプリケーションは、かなり少数の研究グループと大企業の非常に専門グループに限られていると、我々は結論します。

エネルギーコンサルタントは、ピンチ分析モデルの方を多分好むでしょう。

これは我々がH.E. Becker [13]による高度なレベルの方法よりレベルが下のモダンスクリーニングプログラムを作成するつもりであることの、主要な理由です。そして、これはヒートポンプの統合のための、標準ピンチ分析コードへのアドオンと思われるかもしれませんが、それでも、全体の文脈としては、我々はH.C. Becker (ディレクターはF. Maréchal)の理論をヒートポンプの産業プロセスへの統合のキーとなる文献だと考えます。それは、ピンチ分析とプロセス統合技術に基づく組織的方法論であるからです。

TASK2に関するOAの作業の、さらなる詳細は、IZWの内部レポートにあります。

- 01/2011: Analysis of the Annex 21 IHP Screening program [22]
- 02/2011: Upgrade of the Annex 21 IHP Screening program [23]
- 11/2012: Some thoughts regarding Annex 35/13 Task 2 report [26]
- 12/2012: Integration of heat pumps into chemical

1.7 参考文献

- [1] T. Gundersen, A Process Integration Primer, SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway, 10 May 2000, available from the Internet under “PI_Primer_0005.pdf”
- [2] T. Gundersen, A Survey on Process Integration Methods and Software, SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway, September 2000
- [3] Hon Loong Lam et al., Software tools overview: process integration, modeling and optimization for energy saving and pollution reduction, ASIA PACIFIC JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING, Asia Pac. J. Chem. Eng. 2011, 6: 696-712; Published online 2 September 2010 in Wiley Online Library
- [4] L. Puigjaner and G. Heyen (eds.), Computer Aided Process and Product Engineering, Volume 1, ISBN:3-527-30804-0, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006;

Chapter 3 we refer to has been written by F. Maréchal and B. Kalitventzeff.

[5] I.E. Grossmann, J.A. Caballero and H. Yeomans, Mathematical Programming Approaches

to the Synthesis of Chemical Process Systems, Korean J. Chem. Eng., 16(4) (1999), p. 407-426

[6] B. Linnhoff and J. R. Flower, Synthesis of heat exchanger networks. Part I: Systematic

generation of energy optimal networks, AIChEJ. 24(4) (1978), p. 633-642. Part

II: Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality, AIChEJ, 24(4) (1978), p. 642-654

[7] I.C. Kemp, Pinch Analysis and Process Integration, Elsevier, Second edition (2007)

[8] F. Maréchal, Pinch Analysis, contribution to Exergy, Energy System Analysis and Optimization – Vol 1, Exergy and Thermodynamic by C. A. Frangopoulos, Oxford Eolss Publishers Co Ltd, 2009, 978-1-8482-6614-8 pages 166-197

[9] S.A. Papoulias and I.G. Grossmann, A Structural Optimization Approach in Process Synthesis, Computers and Chemical Engineering Vol. 7, No. 6, pp. 695-734 , 1983 (three parts)

[10] C.A. Floudas, Nonlinear and Mixed-Integer Optimization, Fundamentals and Applications,

Oxford University Press (1995), ISBN 0-19-510056-5

[11] G. Spinato (Author), F. Maréchal (Supervisor), H. Becker (Assistant), Heat Pump Integration in Industrial Processes-II, Semester Project, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, January 7, 2011

[12] H. Becker, F. Maréchal and A. Vuillermoz, Process Integration and Opportunities for Heat Pumps in Industrial Processes, International Journal of Thermodynamics, Vol. 14 (No. 2), pp. 59-70, 2011

[13] Helen Carla Becker, Methodology and Thermo-Economic Optimization for Integration

of Industrial Heat Pumps, THÈSE NO 5341 (2012), ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Suisse, 2012

[14] Industrial Heat Pumps, Experiences, Potential and Global Environmental Benefits, Annex 21, Report No. HPP-AN21-1 (1995)

[15] E.Wallin and T. Berntsson, Integration of Heat Pumps in Industrial Processes, Heat

Recovery Systems & CHP, Vol. 14 (3), pp. 287-296, 1994

[16] E. Wallin and T. Berntsson, Heat Exchanger Network Consequences by Combined

Heat Pumping and Improved Heat Exchanging, to be published

[17] E. Wallin and T. Berntsson, Process Integration of Heat Pumps in Retrofitting Situations,

to be published

[18] E. Wallin, Process Integration of Industrial Heat Pumps in Grass-Root and Retrofit

Situations, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, Ph. D. Thesis 1996

[19] T. Berntsson, personal communication, Feb. 2012

[20] Minutes, First Meeting 2011, IEA HPP / IETS Annex 35/13, “Application of Industrial

Heat Pumps”, 16.6.2011, EdF-R&D, Les Renardières, Moret-sur-Loing, France

[21] see reference above, Attachment 11

[22] K. Lassmann and H.-J. Laue, Analysis of the Annex 21 IHP Screening program, IZW

internal note 1 (2011), IEA HPP – IETS Annex 35 /13, Application of Industrial Heat Pumps

[23] K. Lassmann, H.-J. Laue, Information Centre on Heat Pumps and Refrigeration IZW

e.V., internal reports available on request,

[24] K. Lassmann and H.-J. Laue, Upgrade of the Annex 21 IHP Screening program, IZW

internal note 2 (2011), IEA HPP – IETS Annex 35 /13, Application of Industrial Heat Pumps

[25] K. Holiasos and V. Manousiouthakis, Minimum hot/cold/electric utility cost for heat exchange networks, Computers and Chemical Engineering 26 (2002) 3-16

[26] F. Maréchal, personal communication

[27] K. Lassmann, H.J. Laue, Some thoughts regarding Annex 35/13 Task Report IZW Internal Report 11(2012), IEA HPP-IETS Annex 35 / 13, Application of Industrial Heat Pumps

[28] K. Lassmann, H.J. Laue, Integration of heat pumps into chemical processes: An outline of theoretical methods. IZW Internal report 12 (2012), IEA HPP-IETS Annex 35/13 Application of Industrial Heat Pumps

2. オーストリアチームレポート ソフトウェア

Task2では、製造プロセスでのソフトウェアツールのエネルギー消費、経済性などの分析を行った。使用できる計測データがないので、理論的評価のみ行った。大型ヒートポンプの産業用プロセスへの適用を評価できる利用可能なソフトウェアの調査を行った。ソフトウェアでは、時間がかからないモデリング機能が必要であり、技術的・経済的な面が考慮されていなければならない、データ入力は簡単であること、データ収集は簡単で経費が掛からないことなどが必要である。ナショナルプロジェクトでソフトウェアの購入費は認められなかったため、フリーソフトの調査に限定する。デモ版を入手し、適用性評価を試みた。この分析から、入手可能なソフトウェアに対して定量的な評価を行い、ツールが研究や産業用に利用可能か検討した。分析は以下の事柄を含む。

- ・ソフトウェアは、どのような目的に適しているか
- ・どのヒートポンプ技術が検討されているか
- ・システムデザインにおいて、どの程度柔軟か。
- ・ソフトウェアは、研究用に向いているのか、それとも実際のシステムの検討に向いているのか。

これまでの経験から、新しいソフトウェアの開発、もしくは既存のソフトウェアの改良の必要性を評価してきた。この点から、計算ツール、EES (2010), ASPEN Plus (2009)、CoolPack (2014)のシステム統合の可能性を分析してきた。EES (2010), ASPEN Plus (2009)、CoolPack (2014)は、熱力学的なヒートポンプサイクルの理論的分析を行うものであるが、複雑なシステムの最適化計算をもっていない。一方、"TOP-Energy" (2013)、"EINSTEIN" (2013)の2つのソフトウェアは最適化とヒートポンプ統合の評価ができるので、これら2つを紹介する。

2.1 TOP Energy



“TOP energy” (2013)は、Department of Technical Thermodynamics- RWTH Aachen Universityで、エネルギーシステムの解析と最適化のサポートのために開発された。ソフトウェアは共通のフレームにつながるいくつかのモジュールからなる。フレームワークは、Open / Save Project / Export,という基本機能を持ち、モジュールはエンジニアリングのタスクをうけもつ。モジュールは、eNtryが初期分析、eSimがエネルギーシミュレーション、eVariantが異なるシステムとの比較をうけもつ。TOP energyのフレームワークでは、ソフトウェアツールによりアプリケーションの階層や

構成を具体化し、エネルギー計算の解析や最適化を行う。タスクの実行は、フレームワークによってコントロールされるアプリケーションモジュールによって支援される。エネルギー分析に特化した解析は、eNtryで行われる。そこでは初期分析とデータ収集のための具体的な質問が行われる。モジュールは、入力データの確からしさをチェックし、エネルギー計算を行い、産業プロセスでの特徴的な数値で比較する。評価結果は、レポートにできるようなダイアグラムや表で出力される。

エネルギー利用の最適化は、シミュレーションモジュールSimとフローダイアグラムにより決定される。その際に、エネルギー、経済性、環境性も求められる。エネルギーシステムの経済性分析はeValueモジュールでなされる。

2種類のヒートポンプモデルが可能。

- ・ 1つは、圧縮式ヒートポンプ。TOP energyのヒートポンププロセスのなかで使われている。技術的データとは別に、経済的データも使うことができる。そこには初期コストと運転コストが記載されている。この情報で、エネルギーシステム効率の変数を、TOP Energy eValueのモジュールと比較できる。

- ・ 吸収式チラーのモジュールは、熱駆動ヒートポンプの熱挙動をあらわす。例えばソルベントのポンプのような補助電力は、考慮されない。容量に関する入力が必要である。それは、定格冷房能力、消費エネルギーを含む。さらに、冷却、再冷却、入力熱量の温度レベルを決めることができる。温度レベルとチラーの挙動の依存性は、このコンポーネントには入っていない。インプットファイルを使って、吸収式の部分負荷の挙動は特定され、簡単なケースでは、100%定格負荷と0%を直線で結ぶやり方である。

2.2 EINSTEIN



EINSTEIN (Expert System for an Intelligent Supply of Thermal Energy in Industry and other large-scale applications, 2013)は、高速で質の高い熱エネルギー監査のツールであり、エネルギー監査方法をあらわした監査ガイドと監査のすべてのステップをガイドするソフトウェアからなる。フリーで、オープンソフトウェアのEinsteinは、エネルギーやオペレーション費用の削減戦略を作成する。電力削減の標準的な対策、ポンプ、モーター、照明は良い結果が得られているが、エネルギー需要の最適化は技術的にきわめて複雑である。“eye of EINSTEIN”は、熱回収や、プロセス統合、経済性のよい加熱技術、冷却熱供給技術などを考慮している。

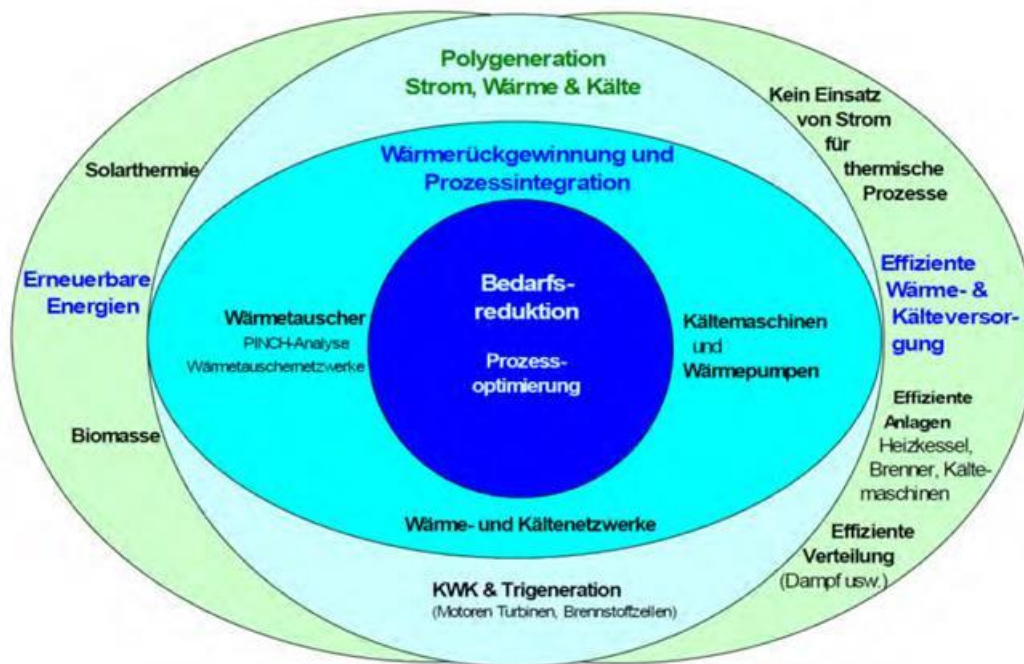


Figure 2-1: “The eye of EINSTEIN” – 熱エネルギー供給プロセスの熱管理全体的アプローチ (Schweiger et al., 2011)

このソフトウェアは、Intelligent Energy Europe (IEE) projectの成果物であり、Joanneum Research (Austria)と Sapienza University of Rome (Italy)と energyXperts.NET (Spain)が、IEA Solar Heating and Cooling and Solar PACES Programs, task 33のフレームワークの中で協力している。

EINSTEINは、産業用や病院向け、オフィスビルディング、スポーツホールなどのエネルギー監査のための全体的・統合的アプローチを導入したものである。

Einsteinは、ピンチ分析を用いての熱需要や熱交換器部でのエネルギー削減率を計算し、高効率機器や再生可能エネルギーの組み込みなど技術的代替手段を提案し評価する。

ユーザーは、データ取得から、代替手段の開発までの全プロセスをガイドされて進むことができる。このツールは、食品やパルプ産業のような、低温部と中間部の温度比が大きいところを狙っている。



Figure 2-2: EINSTEINの管理用エレメント (*EINSTEIN*, 2013)

ソフトウェアツールは、サプライシステムを再構築または最適化し、エネルギーと経済性の削減の具体的な結果を示す。代替法は、すべての主要な高効率機器を含んでいる。

2.3 参考文献

Aspen Plus, 2009 “*Aspen Plus v 7.0*”, Aspen Technology, Inc., Cambridge, Massachusetts

Brunner, C., Muster-Slawitsch, B., Heigl, E., Schweiger, H., Vannoni, C., 2010: „EINSTEIN – EXPERT SYSTEM FOR AN INTELLIGENT SUPPLY OF THERMAL ENERGY IN INDUSTRY - AUDIT METHODOLOGY AND SOFTWARE TOOL“ - Proceedings Eurosun, October 2010

CoolPack, 2013: „*CoolPack software- a collection of simulation tools for refrigeration: "Refrigeration Utilities", "EESCoolTools" and "Dynamic"*”-

Department of Mechanical Engineering (MEK), Section of Energy Engineering (ET) at the Technical University of Denmark (DTU), www.et.dtu.dk/CoolPack

EES, 2010: “*Engineering Equation Solver*”, © 1992-2010 S.A. Klein and F .L. Alvarado, Academic Professional, V8.659-3D (09/1/10), F-Chart Software, Madison, Wisconsin

EINSTEIN, 2013: Technical Description EINSTEIN, https://www.einsteinenergy.net/media/static_pages/4%20EINSTEIN%20Documentation/EINSTEIN%20Documentation.html (07.11.2013)

Schweiger, H., Vannoni, C., Brunner, C., Muster-Slawitsch, B., Kulterer, K., Bertrand, A., Minette, F., Danov, S., Facci, E., Kranjc, D., Bouquet, T., Craenen, S., 2010: Austrian Team Report - Software

2-34

„Leitfaden für EINSTEIN Audits für thermische Energie“ - Intelligent Energy Europe (Project: EINSTEIN, EIE/07/210/SI2.466708) and klima: aktiv programm: „energieeffiziente Betriebe“, der Klimaschutzinitiative des Lebensministeriums, Version: 2.0, Letzte Überarbeitung: 03/02/2011 <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien937.pdf> (18.03.2014)

3. フランスチームレポート ピンチ分析による分析ツールの最先端のレビュー

3.1 イントロダクション

プロセスのエネルギー統合は、熱交換やプロセスでのエネルギー統合によるエネルギー回収ポテンシャルを明らかにすることを意図している。歴史的に見て、これはピンチ温度分析のコンセプトによるものであった。ピンチ温度分析は、運転エネルギーや温度の評価することによって、ヒートポンプの位置づけの可能性を明らかにすることができる。

この棚卸のレビューでは、ピンチ温度分析に基づくものを明らかにする。これは、膨大なピンチ温度ツールを余すところなく表すようなリストとしない。このレビューは数年にわたって実行されたものなので、ここに表したいいくつかは、古びたものかもしれない。

3.2 プロセスエネルギー統合の方法

3.2.1 原理

このピンチ温度分析は、熱力学的アプローチによる。これは、エネルギーフローの明確化を含むが、ここでは製品の化学変化のために本当に必要なものだけを含み、製造者がこれらの機器の必要性のために取り付けた機器は除かれる。いったん、エネルギーフローリストができると、プロセスでの損失の多い個所を特定し、その改善策を提案するよう、計算が実行される。

逐次的なステップの詳細は以下の通りである。

1. 温熱フローと冷熱フローの定義。これには、プロセス全体のオペレーションと必要エネルギー量が要る。これら必要量は、流体の特性値や入口・出口温度により決定される。熱源（または熱い流れ）は、ある程度の回収可能なエネルギーを含んでいる流体か、プロセスニーズに合わせて冷却される流体を適切とします。一方、ヒートシンク（または冷たい流れ）は、プロセスで使われる前に加熱されている流体を現します。
2. 熱複合線図(Composite Curve)の作成。熱複合線図は、最小エネルギー消費量のターゲットをつくります。それは、使える熱源のプロファイルとプロセスの加熱ニーズのプロフ

ファイルからなる。これらカーブの作成のため、利用可能な全エネルギーとエネルギー需要はいくつかの温度での値を蓄積され、これらエンタルピーはダイアグラムにプロットされる。

3. ピンチ温度の決定。冷熱と温熱の熱複合線図は同じダイアグラム上にプロットされる。最小垂直ギャップ ΔT が決定され、この温度は、熱交換器内の2つの流体の可能な最小温度差である。これがピンチ点である。ピンチ温度 ΔT は、熱交換器のコストとユーティリティのランニングコストのトレードオフになる。ピンチ温度より上の温度領域は、プロセスで必要な熱の入力のみ必要とする。

一方、下の領域は、冷却のみ必要とする。そうなので、プロセスでは、高温側の熱フローから低温側の熱フローに行くことを妨げる必要がある。さもなくば、消費エネルギーはユーティリティからの入力以外にさらに必要とすることになる。

4. プロセスの最小必要エネルギーの計算。熱複合線図がピンチ点で較正されれば、最低必要エネルギー量はユーティリティの必要量と対応する。

3.2.2 必要なデータ

ピンチ温度分析に必要なデータは、加熱、冷却される流体と対応する。一般的には、以下のものになる。

- ・質量流量、エネルギー、利用可能なフローの温度とプロセスで実際必要な温度、相変化物質の潜熱。

3.2.3 結果

3.2.3.1 熱複合線図(Composite Curve)

合成曲線をつくることは、熱交換での熱回収ポテンシャルでの技術的、経済的最適化のもとに、ピンチ点の特定を可能にする。冷熱カーブを移動させることで、2つの曲線の温度差は変化し、それは必要エネルギー量の変化も意味する。すなわち、運転経費を意味するエネルギー消費量は、ピンチ温度に比例することになる。逆に、初期コストを意味する熱交換器の表面積は、ピンチ温度に反比例する。そういうことで、解決策は、選ばれた範囲条件に依存することになる。

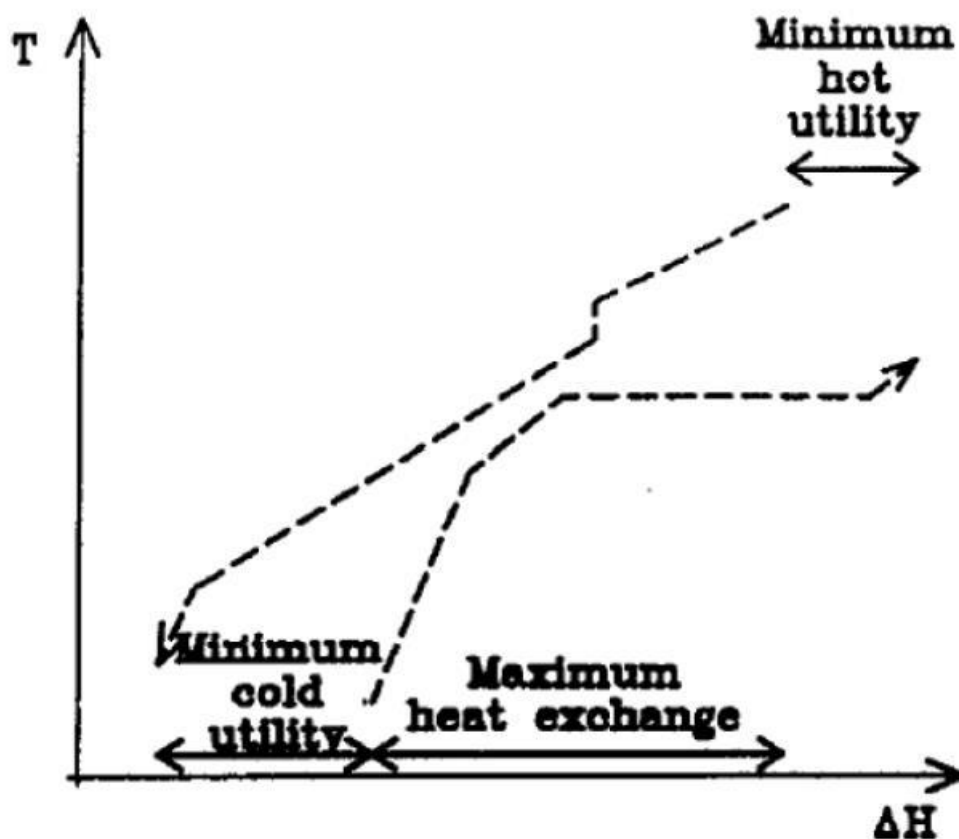


Figure 3-1:熱複合線図

3.2.3.2 全体熱複合線図(Grand Composite Curve)

2つのカーブを重ねるかわりに、2つの温熱と冷熱の差を表すエンタルピー曲線（全体熱複合線図）GCC“grand composite curve”をプロットすることが可能である。

GCCは、エネルギーユーティリティの最適化に使われる。このような最適化は、いろいろな温度レベルでの温熱、冷熱のエネルギーが可能な際に適用される。そうなので、GCCは、ヒートポンプを置くポイントを明らかにすることができる。

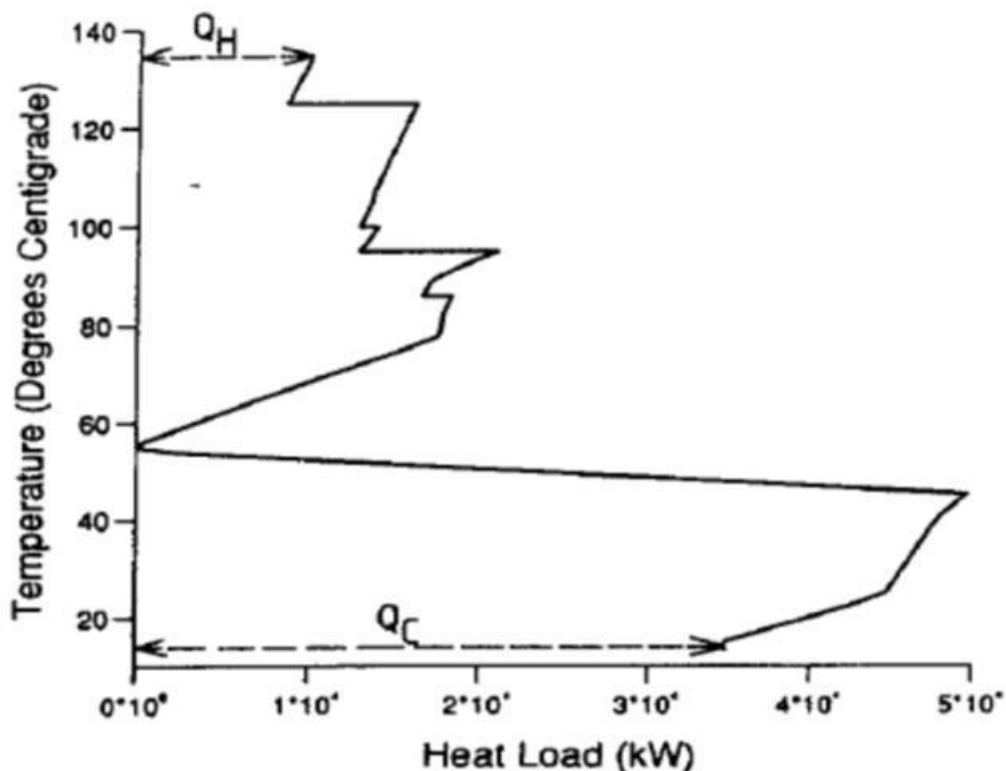


Figure 3-2: 全体熱複合線図の例

3.2.3.3 ヒートポンプの配置

ピンチ温度法とGCCによって得られたデータにより、ユーティリティとヒートポンプの配置場所の最適化が可能である。ヒートポンプは、ヒートソースはピンチ温度より下で、ヒートシンクはピンチより上に配置するようにすべきである。ピンチ温度があるということは、ヒートポンプを置くことが可能であるということを意味する。GCCカーブを見ることにより、理論COPを評価することができる。ただし、技術的、経済的な可能性は、すぐには決まらないので、ほかのツールの協力がいる。

3.2.4 長所と欠点

ピンチ温度分析は、プロセスのエネルギー削減をより増加させるなど、多くのメリットがある。

- ・ 普段捨てられるエネルギーの熱回収の最適化の研究によって、産業プロセス全体像を与えてくれる。
- ・ また、プロセスに必要なエネルギー量にエネルギー消費量を近づけ適正にする。
それは、製造プロセスからユーティリティを分離する従来のやり方と異なる。
- ・ 簡単なグラフ表現で、エネルギー消費を可視化し、エネルギー専門家や産業界のマナー

ジャーにエネルギーゲインの潜在的可能性と、この研究により見込めるエネルギーゲインをあらわせる。それにより客観的な分析データを出力することができる。

しかし、この方法では限界があり、以下に表わすような欠点がよく報告されている。

- ・地理的な情報が無いこと。実際のサイトでの冷熱温熱のレイアウトが統合の拘束条件になる可能性がある。例えば、ユーティリティサイドのフローが、生産ショップと離れている可能性がある。その場合、かなりの熱交換器ネットワークが必要になり、無視できない損失が生じる可能性があるし、ピンチ法で得たエネルギーゲインよりそのロスが大きくなるかもしれない。この点を修正するには、フローの組み合わせを考える際の要求条件もしくは禁止条件を検討する必要がある。

- ・フローの時間差。例えば不規則なパワーの需要がある場合。この問題は、しばしばバッチプロセスで起こり、ここではエネルギーフローが同時に得られないので、蓄熱システムが必要になる。このような場合、ワークスケジュールの組み替えで解決できる場合があるが、この解決策が常に可能なわけではない。

- ・プロセスにつながるうえでの技術的困難さ。この問題点は食品産業で見られる。ここでは健康面や、バクテリアへの対応が大変重要である。いろいろなエネルギーフローでの熱交換は、簡単な熱交換器では困難である。

最後に、技術的な制約は、経済制約によって増すかもしれない。IPPC指令（汚染防止の指令）のコンプライアンスでは、膨大なデータ取得が必要なので、エネルギープロセス統合は大変高価なものになる可能性がある。

3.3 利害関係者

多数の私企業は、いつでもすぐ買えるソフトウェア・プログラムを提供するが、研究機関も、研究目的で活発に研究が行われている。

3.3.1 アカデミックの研究機関

3.3.1.1 Manchester大学 (UK)

Manchester大学とCentre for Process Integrationは、プロセスエネルギー統合の分野のベンチマークになっている。Linnhoff教授は、ピンチ理論を考案し、研究している。

UMISTは、エネルギー統合のツールを提案しており、Process Integration Research Consortium (PIRC)を通して、配布されている。このコンソーシアムは、UMISTと産業界と他の研究機関からなる。PIRCは、年間のメンバーシップをもとに活動し、ツールへのアクセス権、トレーニング、ワークショップなどを行っている。UMISTはピンチ法に係る2つのソフトウェアを開発した。

- SPRINT (熱交換器ネットワークの最適化に焦点をあてている)

- STAR (石油化学のような複雑なシステムの最適化に焦点をあてている)

これらの主要な機能は、別ページで紹介する。

3.3.1.2 EPFL (スイス)

EPFLは、スイス、ローザンヌの主要な技術大学である。EPFLは、EDFとEcole des Mines de Parisとともに、ECLEERの創始者である。EPFLでは、Favrat教授を中心とした *Laboratoire d'Energétique Industrielle*が、エネルギー変換やエネルギー統合の分野でベンチマークとして認識されている。エネルギー統合は、Maréchal氏を中心にいくつかの方法、特にピンチ温度法がLCAなど環境評価方法とともに検討されている。Favrat教授の2013年の引退をうけて、LENIの研究チームは再構成された。エネルギー統合の活動はMaréchal氏のリーダーシップのもとに続けられている。LENIは、ピンチ法に基づく3つのソフトウェアを開発した。

- ・ OSMOSEは、3-47にレビューがある
- ・ Pinchlightは、OSMOSEの基本機能をもつWEBインターフェイスである。3-45に説明がある。
- ・ PinchLENIは、ソフトウェアで、Hochschule Luzernのプレゼンテーションが参考になる。

3.3.1.3 Mines Paristech (フランス)

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (Mines Paristech)は、フランスでもっとも進んだエンジニアリングスクールの一つである。そのCES (かつてCEP) は、エネルギー工学に専念している。CESは、ピンチ法に基づく2つのツールを開発した。

- ・ CERESプラットフォーム(3-49)
- ・ Thermoptim。(3-48)に記載。

3.3.1.4 Chalmers大学 (スウェーデン)

Chalmers大学は、スウェーデンで最も有名な大学の一つである。この大学では共同研究などの取組はアウトソーシングしており、CITというコンサルタントを介して行われている。CITは、CIT Industriell Energi with expertise in the field of industrial process energy integrationを含む5つの子会社をもっている。この子会社は、Pro_Piというツールを開発している。(3-51)

3.3.1.5 Hochschule Luzern / Lucerne University of Applied Science & Arts (スイス)

Lucerne大学は、1997年創立のスイスの大学である、工学・建築学科の教授が"PinCH"ツールの開発に加わっている。"PinCH"は、OFENのサポートで、ピンチ法の応用のため設計されている。PinCHは、PinchLENIツールをスタートポイントとして使用した。PinchLENIは、オープンソースでLENIラボで1990年代に設計された。しかし、PinCHは、

PinchLENIから、大きく変わっている。この大学で開発されたPinCHを(3-52)にあらわす。

3.3.1.6 Valladolid大学（スペイン）

スペインのValladolid大学の *Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente*において、ピンチ法のエネルギー統合のカリキュラムがある。しかし、この大学はベンチマークとしては認知されていない。ここではHintと呼ばれるツールを設計し、無料でダウンロードできる。(3-54)

3.3.1.7 Aalto大学（フィンランド）

前身がヘルシンキ工科大学のAalto大学は、エネルギー技術部において、エネルギー統合の研究が行われている。この研究は、製紙工場（パルプと紙を同時に生産する）のエネルギー統合に注目している。ピンチ温度とは別な方法も彼らは検討している。この大学では、HeViという熱交換器ネットワーク可視化ツールを開発している。特徴は、従来の表示方式のグリッドダイアグラムのフローをSankeyダイアグラムに結合したことである。このツールはピンチ温度を用いていない。また熱交換器ネットワークモデルをつくることもできない。ただグラフ機能は優れている。しかし、WEBで入手可能なものは2008年のもので、それ以来アップデートされていない。開発は止まっており明快なドキュメントもない。

3.3.1.8 Waikato大学（ニュージーランド）

ニュージーランドのWaikato大学は、産業エネルギー効率の部門がピンチ温度や不連続プロセスの統合について研究している。研究は、産業界と密接なパートナーシップで行われ、研究レベルとフィールドレベルのトライがある。この研究所の研究者はPRES会議に記事をよく投稿している。ピンチ法については、この研究所内でツールを開発している。これは大学の外にリリースされておらず、機能も不明である。

3.3.1.9 Instituto Superior Técnico (IST) of Lisbon（ポルトガル）

リスボン工科大学は、プロセス統合最適化の部門があり、ピンチ法について研究している。ISTは、BatchHeatやFI2EPIの開発に参加している。これはポルトガルエネルギー省とのパートナーシップで開発された。このツールはポルトガル国内のみにあり、ポルトガル語版しかないのでテストできない。

3.3.2 他のアカデミック以外の研究機関

3.3.2.1 AEE-Intec（オーストリア）

AEEは、持続可能な技術の研究機関で、独立したオーストリアの研究機関である。主に、太陽熱、省エネルギービル、高効率産業プロセスなどに取り組んでいる。彼らの研究は、不連続プロセスや蓄熱システムの大きさ、太陽熱の産業用システムへの統合などのエネル

ギー統合に注目している。AEEは、多くの監査ツールも開発している。ほとんどはピンチ温度を含んでいる。これはEinsteinと同じであり、ピンチ温度法を含んだ熱プロセス監査ツールである。Einsteinは3-54にある。

3.3.2.2 KBC Advanced Technology (イギリス)

KBCは最新の技術会社で、1979年創立で、産業プロセスに専念した会社である。KBCは、オイル産業に特化しているが、全エネルギー分野をカバーしている。2002年に、KBCはLinnhoff March Ltdを獲得した。Linnhoff March Ltdは、1983年にB. Linnhoff教授によってつくられた。彼はピンチ温度分析の創始者である。Linnhoff March Ltdの獲得に加えて、KBCは、SuperTargetのツールを受け継いだ。SuperTargetは、Linnhoff のコンセプトによりピンチ温度分析の適用の評価ができる。これは、3-57ページで紹介されている。

3.3.2.3 AspenTech (USA)

AspenTechは、1981年にMITで始まり、産業用プロセスの最適化ソフトウェアの先導者になっており、すべてのセクター、すべての問題点（モデリングやシミュレーションなど）をカバーしている。ここでのソリューションは、石油化学、化学精製、薬学に主にあるが、他の産業にも拡大している。AspenTechは、多くの範囲のソフトウェアを提供しているが、AspenONEに統合されており、5つのカテゴリーがある。

- ・ エンジニアリング
- ・ 石油供給チェーン
- ・ サプライチェーン業務管理
- ・ 先進プロセス制御
- ・ 製造システム

AspenEnergyAnalyzerツールは、上記5つのカテゴリーにフィットしている。3-58ページで説明する。

3.3.2.4 Canmet ENERGIE (カナダ)

Canmet ENERGIEは研究所で、カナダの自然エネルギー省に属しており、クリーンエネルギーの研究に特化している。ここには、450人以上の科学者や技術者がいる。仕事は、すべてエネルギーに関するものである。再生可能エネルギーや化石エネルギー建物でのエネルギー消費などである。産業界と密接に協力している。プロセス統合に専念している部署もある。プロセス統合のCanmet ENERGIEでは、ピンチ温度解析やエネルギーモデル、エネルギー分析などを統合したツールを開発している。

3.3.2.5 ProSim (フランス)

ProSimは、化学エンジニアリングのソフトウェアのリーダーであり、プロセスシミュレ

ーションや設計・エンジニアリングのサービスなどを石油、ガス、化学、薬品、その他エネルギーの5つの分野に提供する。会社の1989年のスタートは、ToulouseのEnsiacetでフローシートのツールを開発したところにさかのぼる。ProSimは、いくつかのプログラムを提供し、そのなかに、ProSimPlusやSimulis Thermodynamicsがある。ProSimの短期目標は、熱交換器ネットワークの最適化アルゴリズムを使ってのエネルギーモデルのライブラリーをつくることであったが、2010年には、このツールは、熱複合線図しか描くことはできなかった。ProSimはエネルギー統合設計で現在発展し続けているツールであり、ANRプロジェクトのVeoliaといっしょに開発が行われている。このアプローチは、ピンチ温度分析を行っているが、エネルギー分析を指向している。

3.4 ツール

3.4.1 STAR と SPRINT

Star と Sprintは、似ており、相互補完のツールである。しかし、それぞれ独立に使われる。Fig3-3にそれぞれのインターフェイスをあらわす。



Figure 3-3: Star と Sprintのインターフェイスの比較

両者は、ピンチ温度分析の基本機能、最小温度差の最適化やグラフ機能、熱複合線図などをシェアしている。Fig3-4であらわされている、プロセスチャートから熱複合線図は計算される。計算データは出力できるようになっている。

Strm	Name	TS [C]	TT [C]	DH [kW]	CP [kW/K]	HTC [kW/K.m ²]	DT [C]	Cap Cost Class
1:1 H	Refrigeration	6.0	4.0	76.0	38.0	2.0	Global	1
2:1 C	Pasto-preheating	4.0	66.0	2356.0	38.0	2.0	Global	1
3:1 C	Pasto-milkin	66.0	86.0	676.4	33.82	2.0	Global	1
4:1 H	Pasto-milkout	86.0	4.0	2773.24	33.82	2.0	Global	1
5:1 C	Pasto-creamin	66.0	98.0	119.68	3.74	2.0	Global	1
6:1 H	Pasto-creamout	98.0	4.0	351.56	3.74	2.0	Global	1
7:1 C	Evap-preheating	4.0	70.32	504.03001	7.59997	2.0	Global	1
8:1 C	Evap-1effect	70.32	70.42	904.17	9041.7	2.0	1.0	1
9:1 C	Evap-2effect	66.42	66.52	864.11	8641.1	2.0	1.0	1
10:1 C	Evap-3effect	60.82	60.92	849.8	8498.0	2.0	1.0	1
11:1 H	Concmilkout	60.82	4.0	151.479847	2.66596	2.0	Global	1
12:1 H	Cond-1effect	68.87	68.77	904.17	9041.7	2.0	1.0	1
13:1 H	Cond-2effect	65.86	65.76	864.11	8641.1	2.0	1.0	1
14:1 H	Cond-3effect	60.08	59.98	849.8	8498.0	2.0	1.0	1
15:1 H	RefCond1eff	68.87	15.0	87.8199514	1.63022	2.0	Global	1
16:1 H	RefCond2eff	65.86	15.0	80.7900928	1.58848	2.0	Global	1
17:1 H	RefCond3eff	60.08	15.0	69.7198264	1.54658	2.0	Global	1
18:1 C	YogHeat	4.0	95.0	1025.9977	11.2747	2.0	Global	1
19:1 H	YogCool	95.0	10.0	956.998	11.2588	2.0	Global	1
20:1 C	DessertHeat	4.0	90.0	817.0	9.5	2.0	Global	1

Figure 3-4: Star と Sprintのプロセスフローチャート

さらに、機能は異なっている。

・Sprintは、プロセス間や、プロセスとエネルギー側での熱交換器ネットワークの計算及び最適化のため設計されている。

・Starは、もっとも適したユーティリティの選択のため設計されており、蒸気ネットワークやCHPも解析できる。両方のツールは、石油や化学産業向けであり、ヒートポンプを含む機能はない。

3.4.2 Pinchlight

Pinchlightは、リモートサーバーを用いたWebインターフェイスでピンチ温度解析が実行できる。このサーバーは、多機能最適化プラットフォームのOsmoseと連携し、Osmoseではユーザーデータにピンチ温度解析を行うことができる。



Figure 3-5: Pinchlight のインターフェイス

5種類の入力データがある。

- ・“General”タブでは、一般的なデータを入力する。例えば、熱交換器コスト、エネルギー供給コスト、気象条件など
 - ・“Resources”タブは、エネルギー消費データ
 - ・“Energy Distributions”タブは、プロセスエネルギー需要のリスト。例えば、蒸気、温水、冷却水。ここで詳細な情報が無くとも、必要熱量を定義することができる。
 - ・“Process”タブは、プロセスの温熱冷熱のフローを定める。前提として決めてあるモジュールのデータベースは、殺菌プロセスをここでは例にしているようなプロセスのフローの決定を容易にする。
 - ・“Utilities”タブは、現地にあるエネルギーとその性能レベルのリストとをつくる。
- “Process”タブと似ているように、前もって決めたモジュールがデータ入力に使われる。

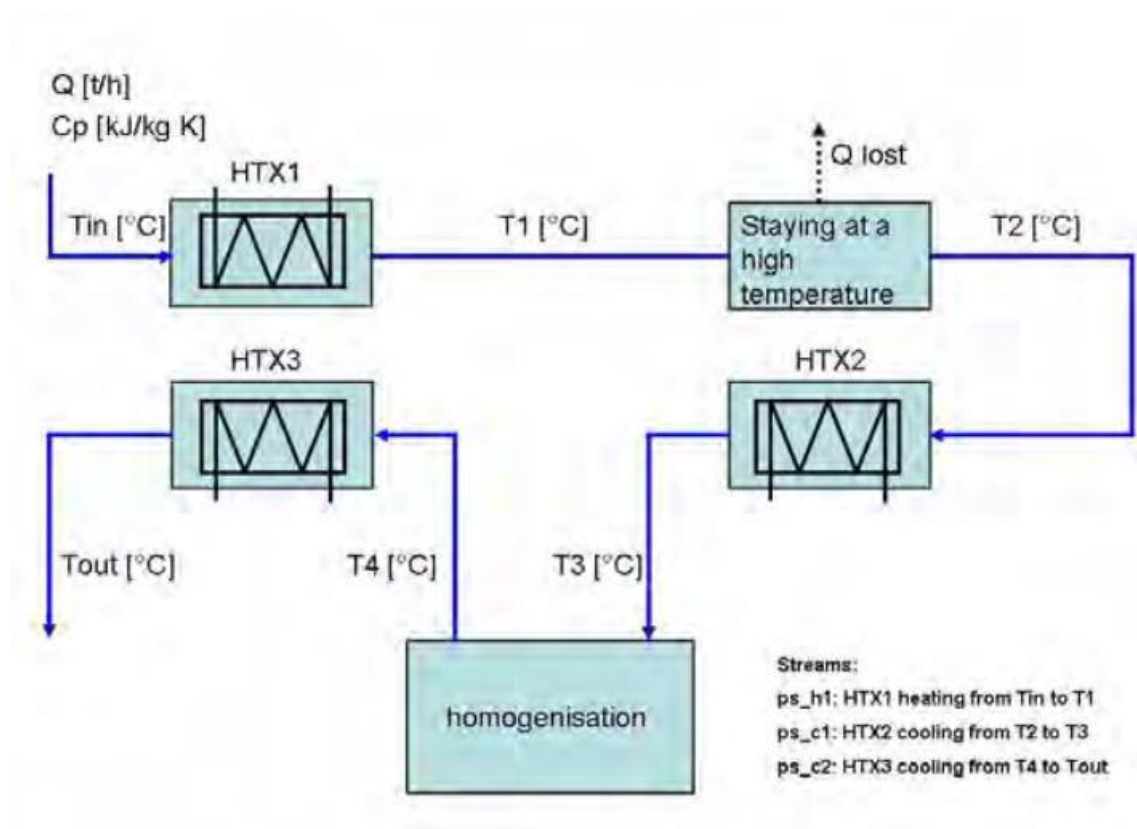


Figure 3-6:計画

一度データが入力されると、Pinchlightとともに、2つの解析を実行することができる。

・“MER”は、プロセスのエネルギー統合、ピンチ温度の最適化、最小必要エネルギー量の決定などができる。この解析は、実際のエネルギー消費と最適化されたエネルギー計算量の比較ができ、現場でのエネルギー消費のボトムアップアプローチを導く。

“Target”は、エネルギーと熱交換器ネットワークの最適化解析を行う。Pinchlightは、エネルギーの研究のため他のツールとは少し異なる。その一つには、ユーティリティはボトムアップ解析の影響を受けやすい。もう一つとして、プロセスとエネルギーの最適化は同時に行われることである。それらについては、他のツールでは、プロセスの最適化が先に行われている。別の特徴は、モジュールはいくつかのオペレーションやユーティリティを分割して考えていることである。逆に言えば、Pinchlightでは、熱交換器ネットワークのマニュアルプロットをすることができないし、このツールは実際に簡単ではない。

3.4.3 OSMOSE

OSMOSEは、EPFLによって開発されたもので、ピンチ温度解析のシステムの設計のための最適化プラットフォームである。計算モデルと計算手続きは開発されているので、OSMOSEは、産業プロセスへヒートポンプの統合に使われる。OSMOSEは、最適化される

よう、ヒートポンプの設置位置とサイズを決めることができる。また不連続プロセスでエネルギーストレージの設計検討もできる。さらに、マルチターゲットの最適化も可能である。

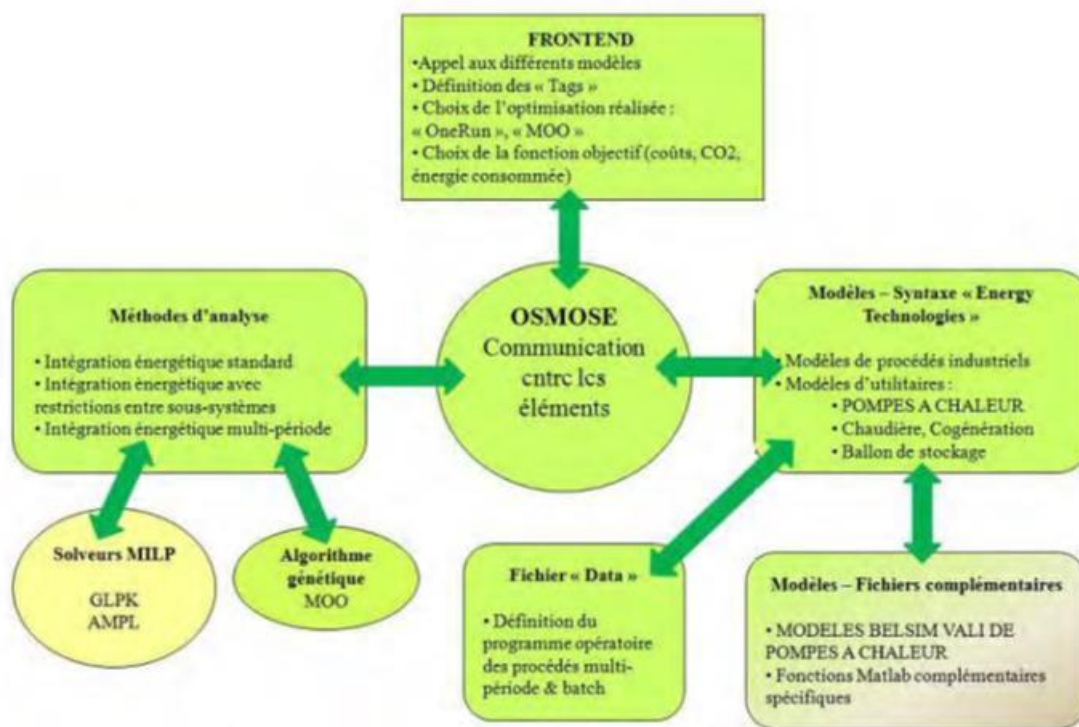


Figure 3-7: OSMOSE のワークフロー

OSMOSEのプラットフォームは、不連続プロセスでエネルギーストレージの設計検討もできる。さらに、マルチターゲットの最適化も可能であり、プロセスに導入するヒートポンプの容量と温度レベルを決定することができる。これは、他のツールにはない、有効なツールである。OSMOSEは、しかし、いくつかの欠点があり、品質を下けている。まず、これはピンチ温度に基づくツールというより、最適化プラットフォームである。つまりツールはユーザーフレンドリーではなく、長時間の訓練が必要になる。さらに、これはMatlabなど有償のソフトウェアからなり、高価になっている。

3.4.4 Thermoptim

Thermoptimは、ソフトウェアパッケージで、エネルギー変換プロセスに注目した熱力学の設計解析ツールである。ダイアグラム、フローチャート、シミュレーションエンジンなどからなり、解析的、システムのアプローチができる。

- それぞれの機能要素は、Thermoptimの適切な“primitive type”で記述される。

・フルシステムは、ビジュアルインターフェイスを介して、基本モデルを組合せることによって得られる。

そしていろいろなエネルギー変換方法が表され、ピンチ法はモデルシステムに適用され、ユーザーは熱交換器ネットワークの構成へ導かれる。

ツールの最終ゴールは教育向けである。なので、これは比較的広い領域で使われる。さらに、これは、エネルギー生成システムに向いている。

カスタマイズされた、物理、化学のライブラリーを構成することにより、計算は達成できるが、大変時間のかかる作業になる。

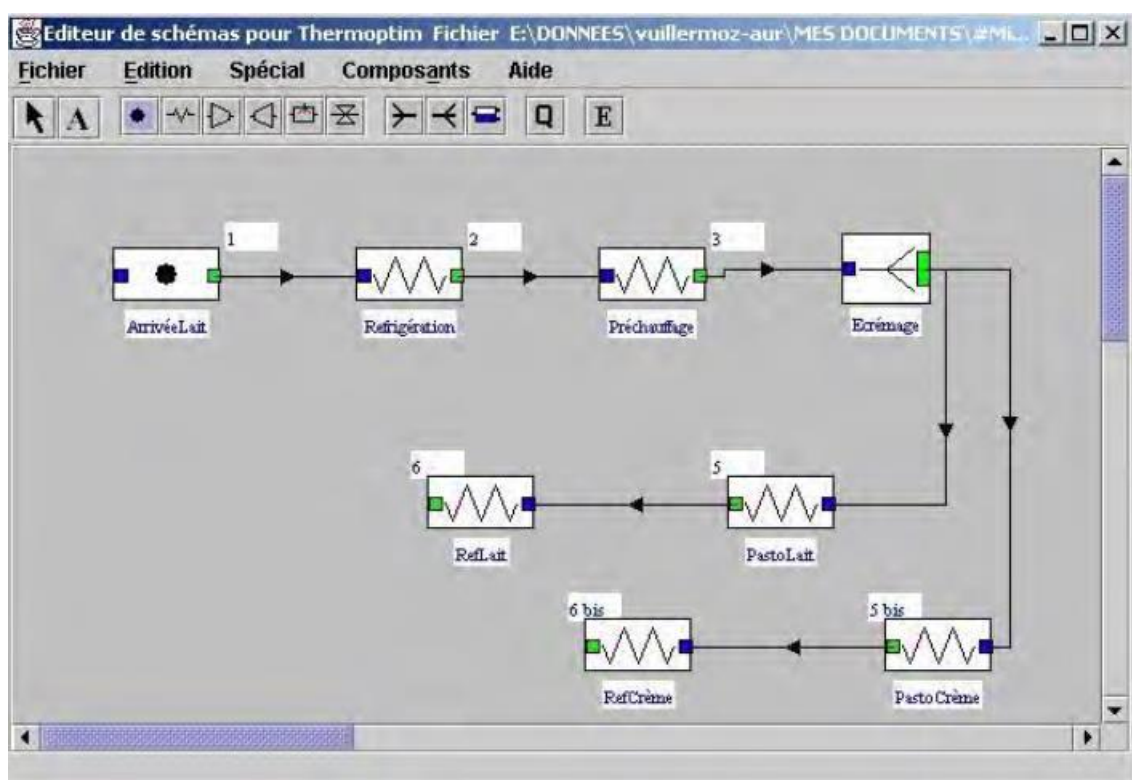


Figure 3-8: ミルク低温殺菌/スキミング・プロセスをモデル化する例

3.4.5 CERES

CERESは、ANR [French National Research Agency]の“*Chemins Énergétiques pour la Récupération d'Énergie dans les Systèmes industriels*”というプロジェクトで開発された。これにはEDFのリーダーシップのもと11のアカデミックや産業界のパートナーが参加している。その目的は、産業プロセス分野での排熱の回収、再利用の戦略を特定することであり、合理的なエネルギー使用に貢献する革新技術を育てることである。

CERESは、以下から構成されている。

- ・エネルギー統合の設計プラットフォーム

・Dymolaの環境でModelica言語で開発された産業プロセスやエネルギーモデルのライブラリー

注記：Dymolaの環境で現在開発されたモデルのライブラリーは、Dassault Systemsが所有するソフトウェア資産になっている。しかし、CERESは、フリーソフトのOpenModelicaの環境で開発されたモデルを使うことができる。

(1) CERES platform

CERESのプラットフォームはエネルギー統合のためのピンチ温度手法の研究を可能にする。この方法は、エネルギー消費を削減するエネルギー機器の選択のため設計された最適化アルゴリズムにあり、ここでは、熱交換器のインストールに必要な初期コストをパラメータにして行っている。

それにより、与えられたプロセスで、CERESのプラットフォームは以下を可能にする。

- ・ピンチ温度手法に基づき、熱回収ポテンシャルや最小必要エネルギー量を特定する。
- ・エネルギー消費と初期コストを最小化しつつ、エネルギーと熱交換器ネットワークを実施できるように最適化する。

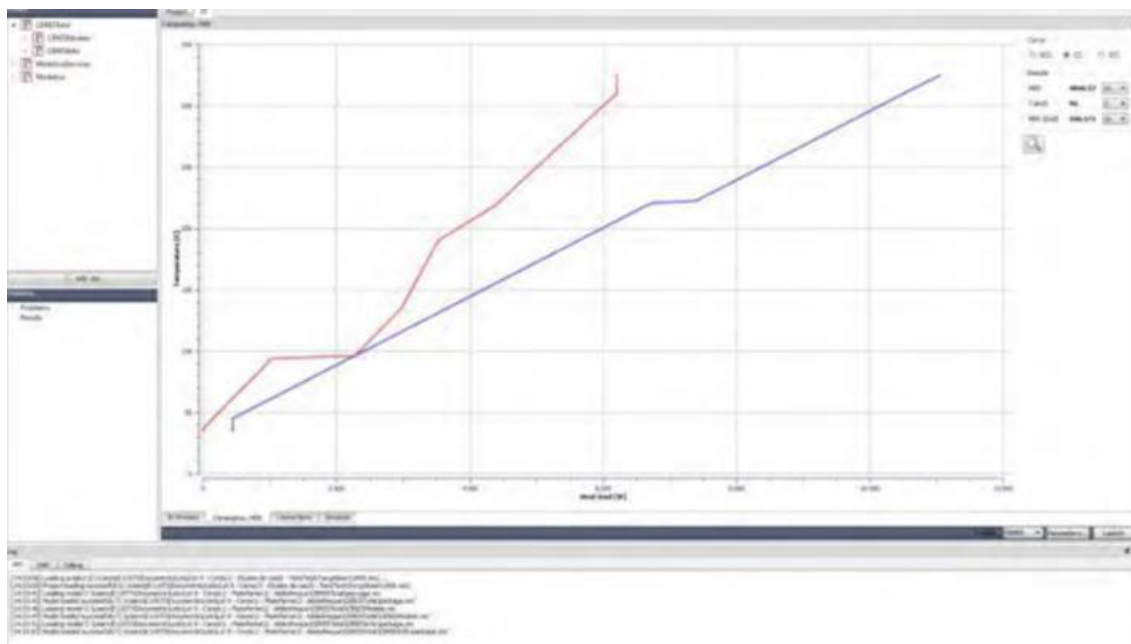


Figure 3-9: CERES のプラットフォーム熱複合線図と最小必要エネルギー

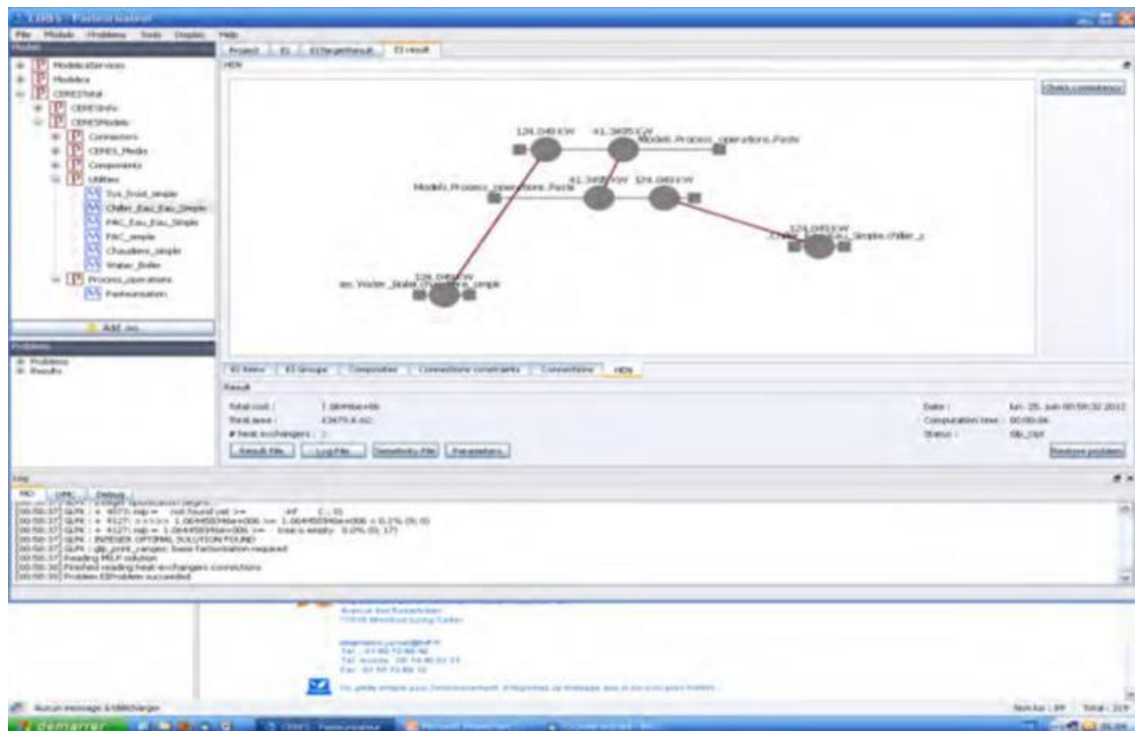


Figure 3-10: CERES プラットホーム最適化とユーティリティと熱交換器ネットワークの構築

(2) Models library

エネルギーとプロセスモデルのライブラリーは現在プロジェクトで開発中である。

Table 3-1のリストはすでに開発されプラットフォームに組み込まれているモデルである。

	Industrial processes	Utilities
Modelica models	Agri-food industry: Milk processing	Exchangers and storage Compression heat pump
	Pulp & Paper: Production of pulp and paper Metals: Cold machining	Sorption heat pump Thermoelectricity ORC

Table 3-1: CERES2のプロジェクトで開発されたプロセスとユーティリティのリスト

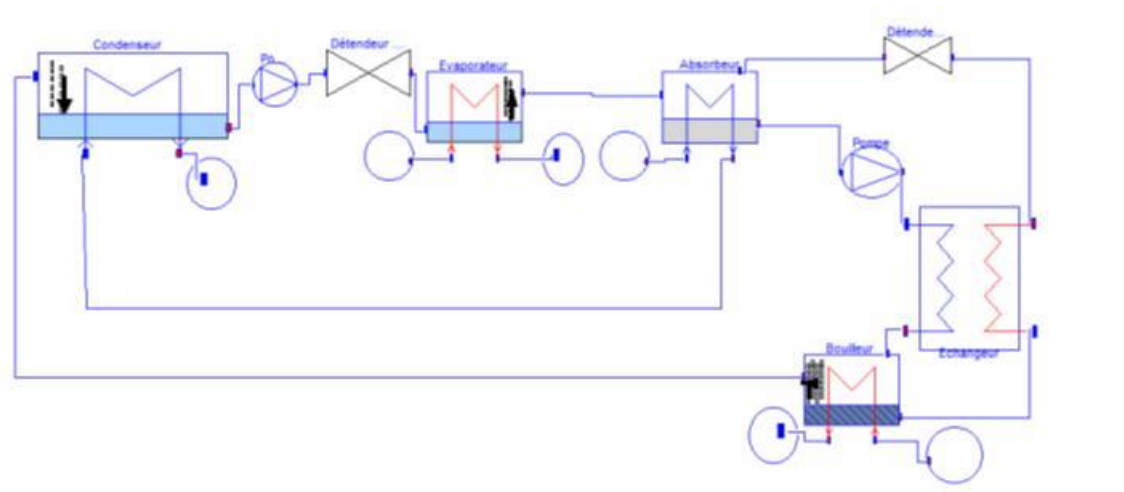


Figure 3-11: CERES library – 吸収式ヒートポンプの事例

この産業用プロセスとエネルギー回収・再利用技術のデータベースは、ユーザーによる更なるアップデートと追加により充実される。CERESのプラットフォームとModelicaのもとのモデルライブラリーはプロジェクトが終われば、すなわち2014年中旬、オープンになる。このツールはそのときに無料でアクセスできる。

3.4.6 Pro_Pi

Pro_Piは、ピンチ温度分析と熱交換器ネットワーク構成の専用ソフトである。これは単純なEXCELのマクロで記述され、ピンチ温度特定機能が追加されている。

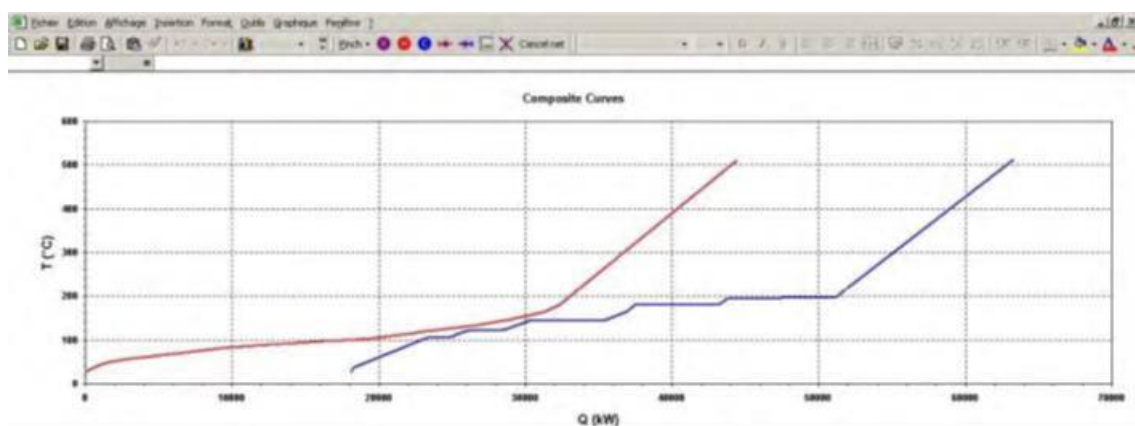


Figure 3-12: Pro_Piのインターフェイス

Pro_Piは、熱交換器を描くインターフェイスも含んでおり、簡単な教育用ソフトで、EXCELとしてそのまま使える。これは、ピンチ温度分析の基礎を含み、熱交換器ネットワークをプロットすることができる。エネルギー側のモデリングは、かなり初歩的であり、

インターフェイスは使いやすくない。

3.4.7 PinCH

PinCHは、スイスのLucerne大学で、*Office Fédéral de l'Energie* (OFEN)のもとで開発された。これでは、ピンチ温度法をプロセスまたはプロセスのセットに適用することができる。それぞれの熱フローを特定することで、運転時間を定めることができる。Ganttダイアグラムは、プロセスといろいろな生産ステップのタイムパラメータをプロットすることができる。ピンチ温度分析によると、熱複合線図は、**Time Average Method**かもしくは不連続プロセス向けの**Time Slice Method**によりプロットされる。最後に、ツールは、それぞれの区切られた時間内ごとで、熱交換器ネットワークの構成の可能性を与える。

The screenshot displays the PinCH software interface with two data tables. The top table, 'Process Stream Table', and the bottom table, 'Utility Stream Table', both contain the following data:

Name	Hot/Cold	Tin	Tout	Flow	Cp	Phase Change	Alpha	Pressure	MCp	Heat Duty	Fluid	Humidity Ratio In	Soft	Start	Stop
		[°C]	[°C]	[kg/s]	[kJ/kg·K]	[kg/s]	[1/K]	[bar]	[kJ/K]	[kW]		[kg/kg]	[kg]	[h]	[h]
C1	Hot	25	100	1	1	-	100	1	1	75	Simple	-	0	0	1.7
C2	Hot	130	180	1	3	-	100	1	3	150	Simple	-	0.8	2	-
C3	Hot	80	105	1	5	-	100	1	5	125	Simple	-	0.85	2	-
H1	Cold	115	15	1	1.1	-	100	1	1.1	132	Simple	-	0.15	1.7	-
H2	Cold	100	95	1	20	-	100	1	20	190	Simple	-	0.8	1.7	-
H3	Cold	165	125	1	3.5	-	100	1	3.5	140	Simple	-	0.85	0.8	-
H4	Cold	165	125	1	3.5	-	100	1	3.5	140	Simple	-	1.7	2	-
H5 (should be)	Cold	130	129.9	1	0	-	100	1	0	0	Simple	-	0	0.15	-

Figure 3-13: PinCHのフローデータ

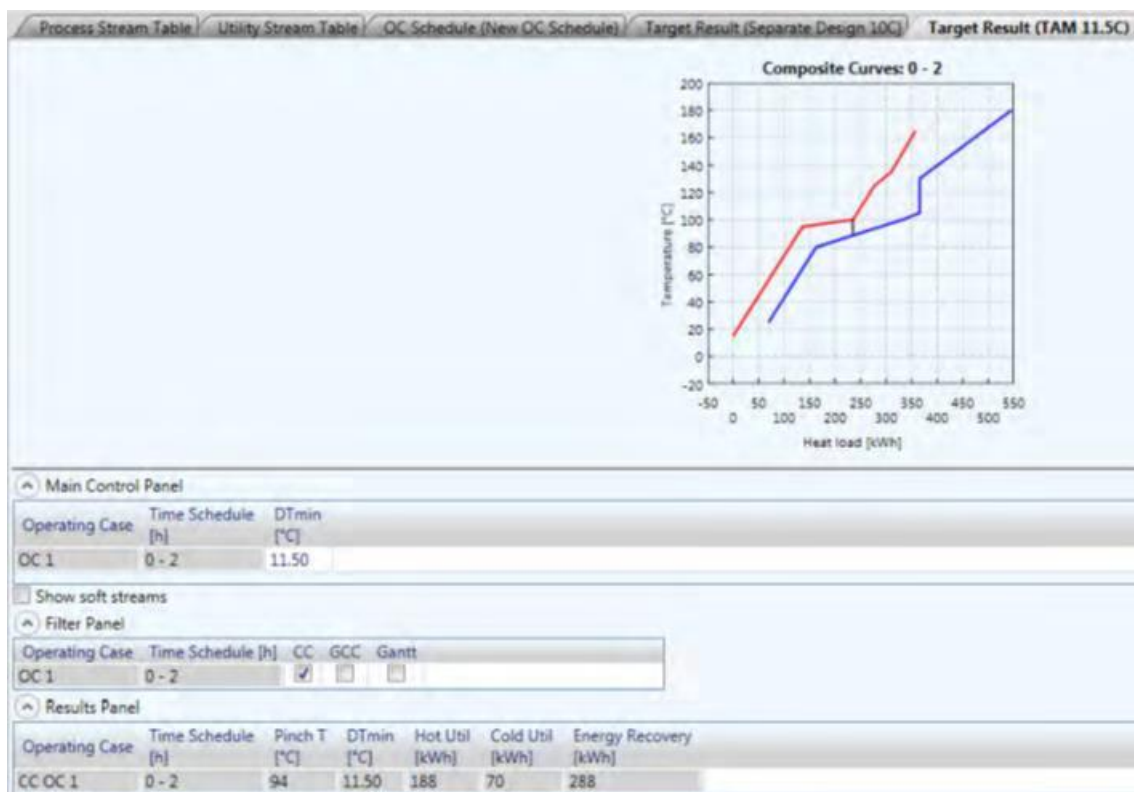


Figure 3-14: PinCHのTAM分析

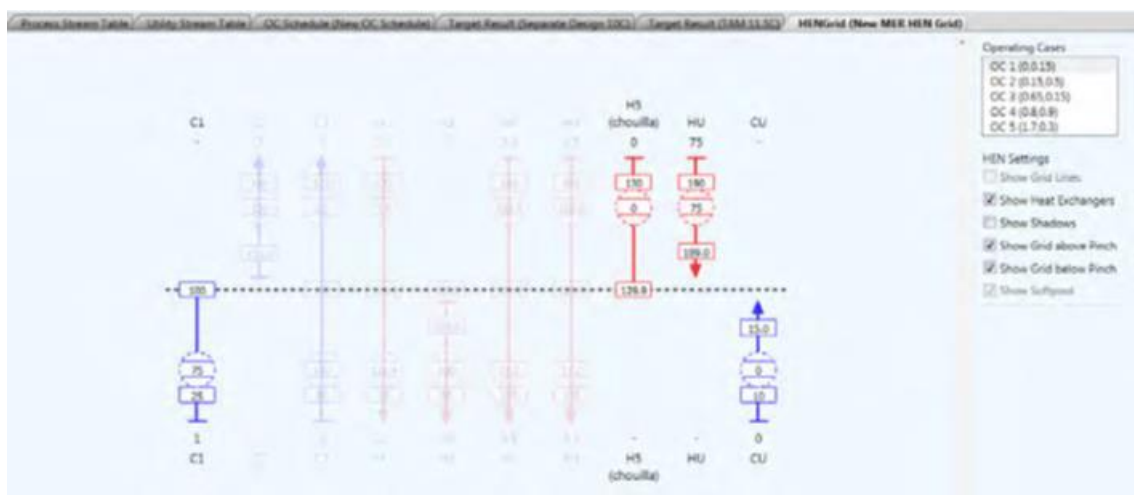


Figure 3-15: PinCHでの熱交換器ネットワークの構築

このプログラムは、有償でWEBから購入することができる。シングルライセンスは、2700スイスフラン（2250ユーロ）。2ライセンスで10%割引。5ライセンス以上で25%割引。研究や教育用であるなら低価格で購入可能。V1.0.8.1542はテスト版であり、フローの数が8までに制限されているが、長所短所を特定し、評価することができる。

(1) 長所

- ・ TAM(Time Average Method)とTSM(Time Slice Method)を使用可能
- ・ 熱交換器コスト関係の係数をパラメータにすることができる
- ・ ライセンス価格が相対的には安い
- ・ 全体熱複合線図の可視化による、ヒートポンプ、MVC（機械式蒸気圧縮）、モーターの統合の可能性
- ・ ユーティリティコストの計算の際にパラメータがプログラマブルであること。
- ・ 水を流体として使う場合は、ツールは自動的に相変化も考慮し、水のフローは分けて検討する。

(2) 欠点

- ・ 人間工学的に直観的なつくりでない
- ・ 解析を実行する前に、MERを満たした冷熱・温熱の作成が必要
- ・ 実際、必要以上の冷熱・温熱をつくるパワーをもって、最高温度以上、最低温度以下での熱フローを決める必要がある。
- ・ ヘルプ機能がない。
- ・ ORCやヒートポンプを使うことができない。PinCHはプロセスのタイミングを考慮に入れる可能性を提供します、そして、開発者は蓄熱を考慮に入れて複数期間での機能の統合を意図することができます。

3.4.8 Hint

Hintは、ピンチ解析と熱交換器ネットワークの構成のための教育ツールである。

Figure 3-16にインターフェイスを示す。このツールは、スペインのValladolid大学で開発された。熱複合線図と全体の熱複合線図とは別に、HINTは、熱交換器ネットワークを修正したり、プロットすることができる。

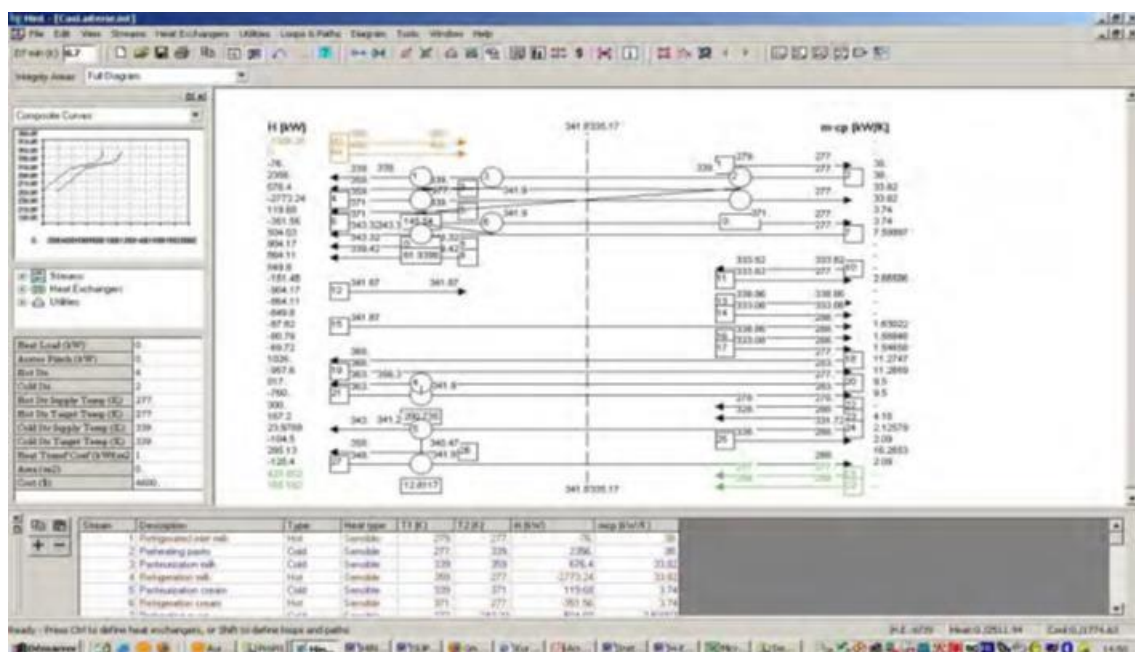


Figure 3-16: HINT のインターフェイス

HINTは、無料でダウンロードできる。これは、Linnhoffのコンセプトを含み、ピンチ温度法の十分なリソースをもち、簡単な研究は実行することができる。しかし、このソフトの開発やメンテナンスはすでに終わっているようである。さらに、オンラインヘルプはかなり貧しく、*Education for Chemical Engineers*という雑誌に記事が1度、2008年に発行されただけである。

3.4.9 Einstein

Einsteinは、“*Expert System for an Intelligent Supply of Thermal Energy in Industry and other Large-Scale Applications*”を意味する。Einsteinは、熱利用監査のためのツールで、産業用プロセスでのピンチ解析の機能と熱交換器ネットワーク設計ができる。このツールは、“*IntelligentEnergy Europe*”の資金によるプロジェクトの成果物である。

Energy Europe”:

- Einstein I (September 2007 - August 2009)
- Einstein II (July 2010 - June 2012)

Einsteinは、熱利用監査のための手段として以下のステップを含む。

- ・データ取得とプロセスモデリング。すべてのプロセスは、温度上昇、定常状態、対向流の熱交換器による冷却などを含んだ一般的な標準モデルで作成されなければならない。
- ・データの一貫性の評価

- ・プロセス最適化による、エネルギー需要の削減
- ・熱交換器による熱回収。ここでピンチ手法が使われる。Einsteinは、熱複合線図をプロットし、熱交換器ネットワークの設計は、自動設計もしくはユーザー設計のチョイスができる。

新しいエネルギーもしくは再生可能エネルギーの統合。特に、太陽熱、ヒートポンプ、CHP、高効率ボイラー。ピンチ温度は熱交換器ネットワーク設計でのみ使われ、エネルギーの選択では使われない。このツールは、エネルギーが何が最適かを決定することはできない。これは、ただいろいろなエネルギーシナリオに基づき可能性を検討し、経済面、環境面で比較することができるのみである。

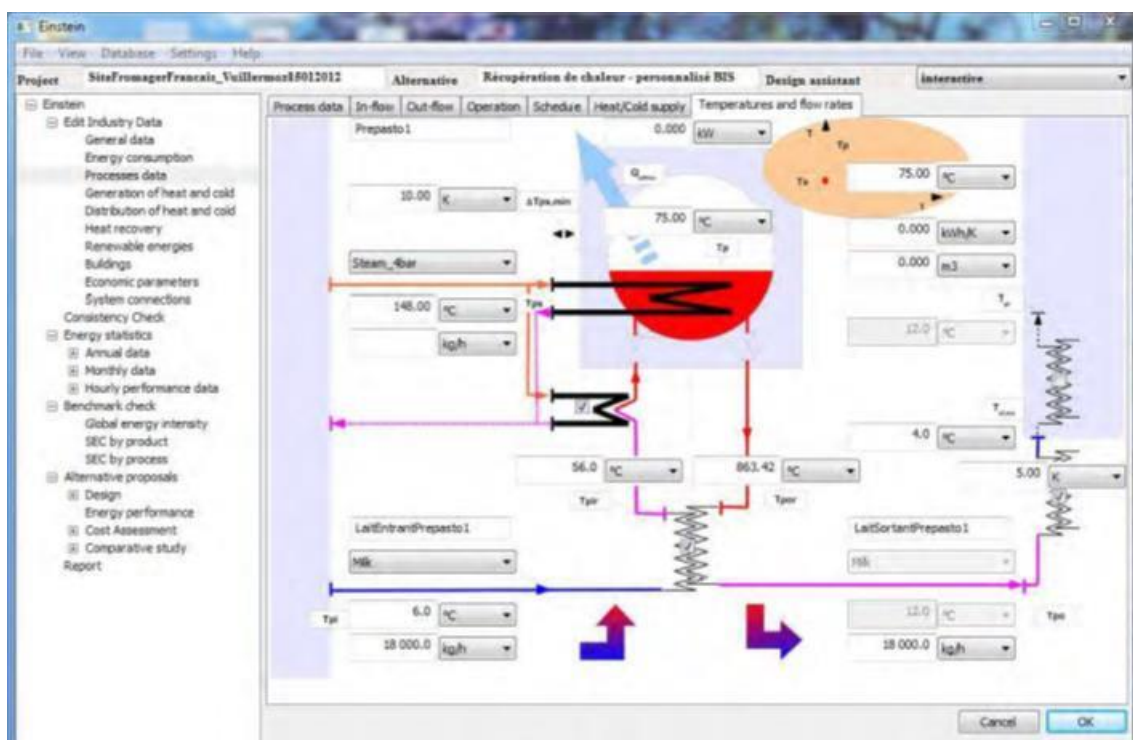


Figure 3-17: プロセスの標準モデル

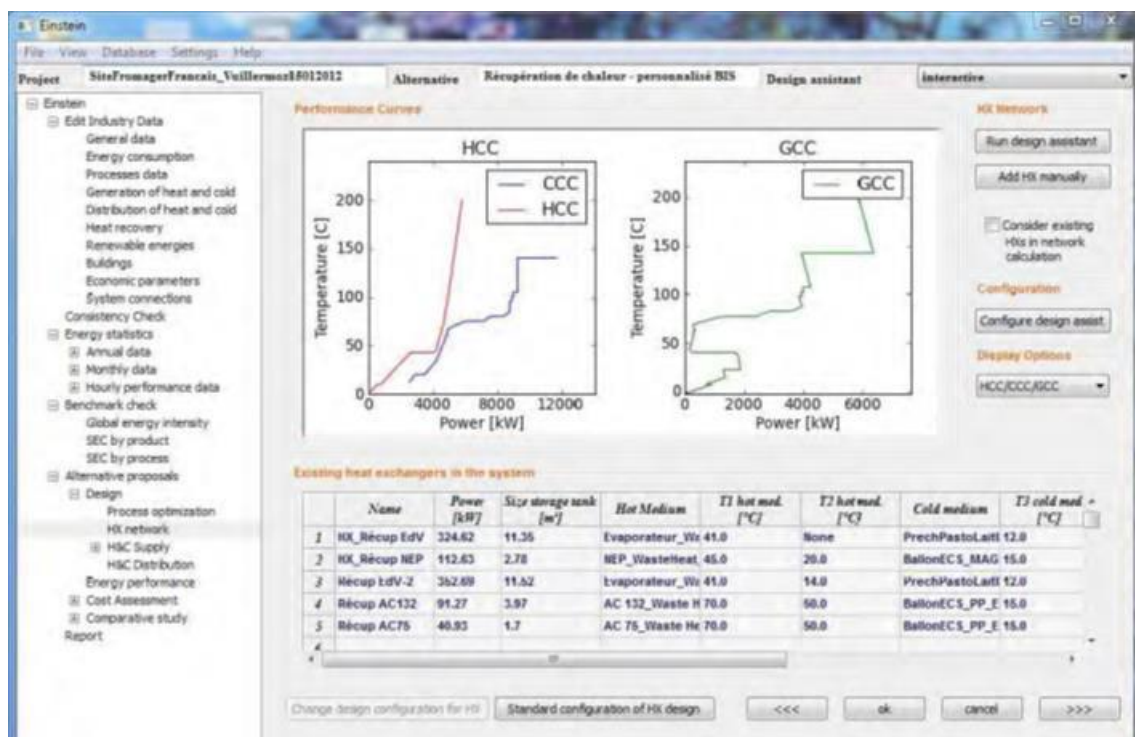
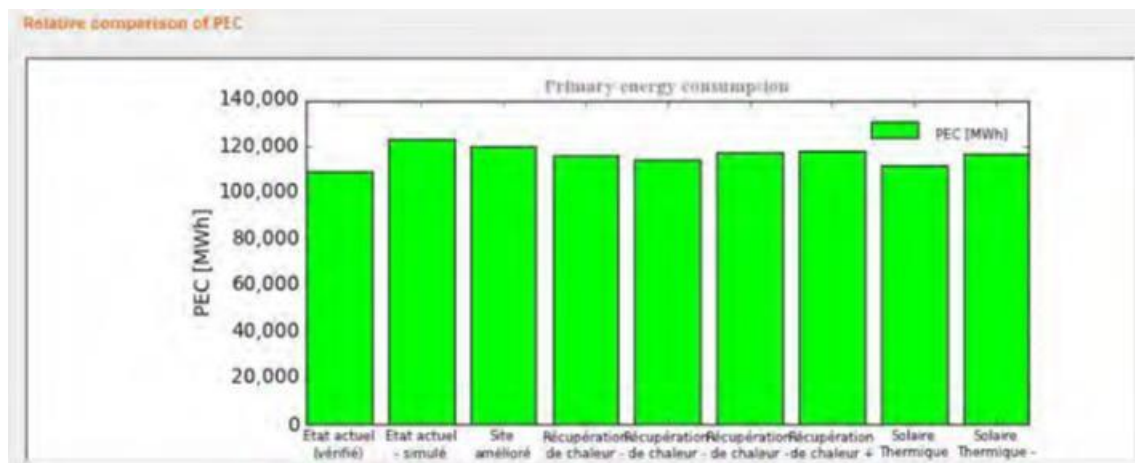


Figure 3-18: 直接熱交換による熱回収の最適化



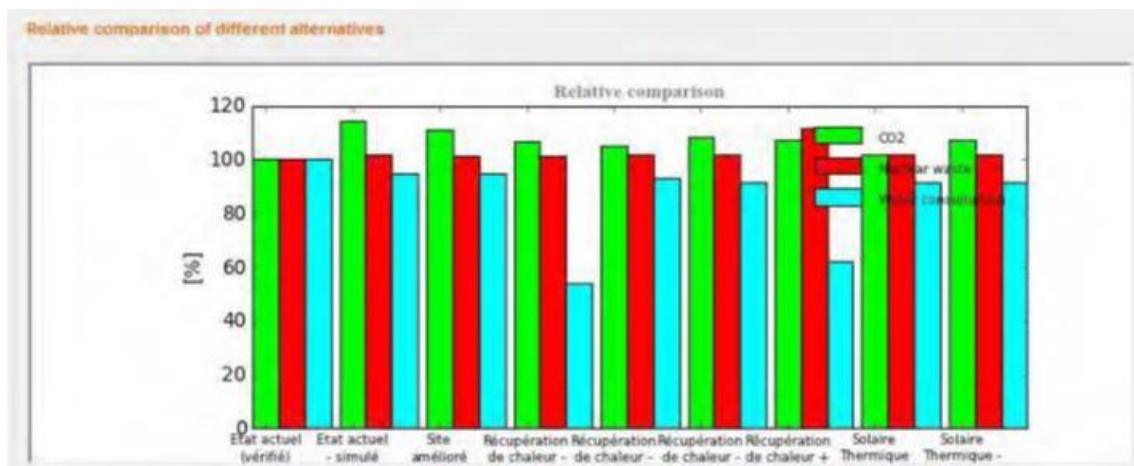


Figure 3-19: 1次エネルギー消費に依存するシナリオの比較（上）と、環境インパクトー二酸化炭素、放射性廃棄物、水の消費量（下）

ソフトウェアはインターネットからダウンロードできる。

もっとも最新バージョンは、V2.2である。

Einsteinは、いくつかの以下のパートナーらで開発された。

- ・エネルギー専門家: ドイツとスペインの技術者とエネルギーコンサルタントのネットワーク
- ・AEE Intecは、オーストリアの持続可能社会についての研究機関で、特に太陽熱やプロセスエネルギー統合を研究している。AEE Intecは熱交換器ネットワークの自動設計の最適化プログラムを提供している。

利点は、

- ・これは監査ツールなので、ピンチ温度解析だけでなく、たとえば全体の一貫性チェックなどの機能を含んでいる。
- ・熱交換器ネットワーク設計で、ユーザー設計と自動設計が容易に結合できる。
- ・熱交換器ネットワークのチャート表示が、“grid diagram”表示より見やすい。
- ・すべての経済性の計算をカスタマイズできる。またデータベースにたとえばヒートポンプなどの要素を追加できる。
- ・無料である。

欠点

- ・大変多くの機能があるので、複雑で慣れるのに時間がかかる。
- ・温熱・冷熱のフローを直接入力することはできない。モデルプロセスオペレーションを実行するためには、標準モデルに必ず従わなければならない。
- ・首尾一貫性の妥当性チェックの前には、いかなる分析もできない。これは、大変時間がかかることになる。というのは、このツールは感度が高く、エラーをなくす作業は困難

であるからである。

- ・ヒートポンプ統合のモジュールは、簡単ではない。V2.1にはバグがある。
- ・欧州の資金ファンドは終わったので、今後の実行可能性の問題が持ち上がっている。たとえば、どこが、開発、メンテ、訓練の資金を出すのか。

3.4.10 SuperTarget

SuperTargetは、産業プロセスのエネルギー統合や熱交換器ネットワーク設計の最も進んだツールであると主張している。その先進のデータ処理機能はピンチ温度分析の簡単なアプリケーションソフトを提供している。これは3つのモジュールに分かれる。

- ・ピンチ温度解析を行うプロセスモジュール

このモジュールは、最小ピンチ温度での熱と経済性の最適化と、熱交換器ネットワーク設計を提供する。その機能は、新しい設計や設備の核心に対応することができ、“**case study manager**”は、シナリオ間の簡単な比較をすることができる。そして、ある程度の変化に対してネットワークが対応できるか計算することができる。

- ・“**Column**”モジュールは、蒸留プロセスの最適化にピンチ温度分析を適用する。
- ・“**Site**”モジュールは、現地サイトでのエネルギー統合モジュール。

“**Site**”モジュールは、プロセスモジュールの中で望ましいプロセスデータを選ぶ可能性を提供します。熱交換がすべてのプロセスのすべての流れに対して可能か、または、ユーティリティネットワークだけかに応じて、いくつかのオプションは選ばれます。これに加えて、このモジュールでは、エクセルギー分析がコジェネの統合を研究するのを可能にします。**Supertarget**ツールでは、それはできませんでした。**SuperTarget**はピンチ方法の創始者によって開発されて、フィールドでの分析のベンチマークと考えられています。しかし、これはまだ化学または石油化学産業を非常に指向しており、それゆえに、特に熱交換器ネットワークを設計するためには、その機能はあまりに洗練されすぎています。同様に、ユーティリティは、熱交換器ネットワークには不適當です、そして、特に、**SuperTarget**はいかなるヒートポンプ統合も提供しません。

3.4.11 AspenEnergyAnalyzer

AspenEnergyAnalyzerは、**AspenONE**ソフトウェアセットに属しています。**Linnhoff**によって定義され、規則に従って、ピンチ方法のアプリケーションのために設計されました。**AspenEnergyAnalyzer**は、熱交換器ネットワークの手動もしくは自動デザインを提供します：自動設計の場合、最高5つの異なるデザインは可能で、ツールはヒューリスティック（自己発見的）な方法を使い、線形的な方法は使わない。さらに、これは新しいデザインと熱交換器ネットワークの追加改造を区別することができます、熱交換器追加改造では、目的は既存のネットワークに加えられる新しい熱交換器についてだけ最適化できます。このツールは、最適化の洗練された機能と熱交換器ネットワークの改造という点で**SuperTarget**

と非常に類似していることがわかりました。

3.5 結論

熱複合線図と、全体熱複合線図の解析に基づく、多くのピンチ温度解析ツールがエネルギー統合のために存在します。しかし、ほとんどのものが、ヒートポンプ導入の経済的エネルギー的恩恵を計算することができない。そうなので、ユーザーが専門家になることが要求されています。いくつかのツールは、ヒートポンプの効果を評価でき、エネルギーと経済性の観点で設置位置、設置数を提案できます。

4. オランダチームレポート オランダでのモデリング

1992年から1996年において、IEA HPP Annex 21で、産業用ヒートポンプの可能性の概観と、どのようにして産業用ヒートポンプを用いるかを定めることができる"Industrial Heat Pump Screening Program"を開発した。コンピュータプログラムは、潜在的ユーザーに産業用ヒートポンプの適用の評価を支援した。このプログラムは、ヒートポンプの経済性の決定できるよう設計された。そしてピンチ温度のコンセプトに基づき作成された。完全に最適化されたプラントの熱交換システムに対して産業用ヒートポンプの機会の特定を狙います。そして、最も経済的な産業用ヒートポンプ設計と最も少ないエネルギー消費が可能なモデルの提供を狙います。

スクリーニングプログラムは、食品、化学、石油精製、パルプ、繊維の5つの主要なセクターで、100以上の産業用プロセスを含んでいる。ここでのデータは、産業用ヒートポンプを導入評価のため利用される。そして、このプログラムは50種類以上のヒートポンプも含んでいる。最近のAnnex35のOAによる分析では、1997年以降アップデートされておらず、時代遅れになっている。純粋なピンチ温度モデルと数学的最適化モデルの違いは、現代的なソフトウェアツールでは無くなっていることを、このプロセス最適化ソフトウェアの分析は、表している。いかなるソフトウェアからも独立している、ヒートポンプのデータベースはもっと注目されるべきである。そのようなデータベースは多目的に求められている。データベースで必要な情報は、ソースとシンクの温度だけでなく、ヒートポンプのサイズなど必要である。しかし、さらに、ヒートポンプを適用する冷熱・温熱のフローの詳細も必要である。というのも、それが具体的なヒートポンプの選択を可能にするからである。

いくつかの、具体的なヒートポンプモデルやデータベースはオランダにおいてAnnexの作業の中で、利用できるものになってきた。適切にヒートポンプを統合するためには、プロセスに対する十分な知識が必要である。この点で、ピンチ温度分析は有効なツールである。19世紀にオランダで広く紹介されたにもかかわらず、プロセスモデルの利用やプロセス最適化は、まだかなり少ない研究グループか大会社の高度な専門家グループに利用は限られている。

4.1 産業用ヒートプロセスの最適化

たくさんの産業プロセス最適化ツールが利用可能であるが、どのツールがベストかということに一致した答えはない。コアプロセスから離れているケースでは、エネルギー節約のための対策コストはさらに高価になるという事実に気づくことは重要である。過去10年のオランダの複数年契約の取り組みでは、しばしばコジェネがエネルギー節約のため導入されたが、それがコアプロセスに干渉し、リスクとなっている。この複数年契約では、会社のエネルギーマネージャーが参加しており、プロセス側は参加していない。

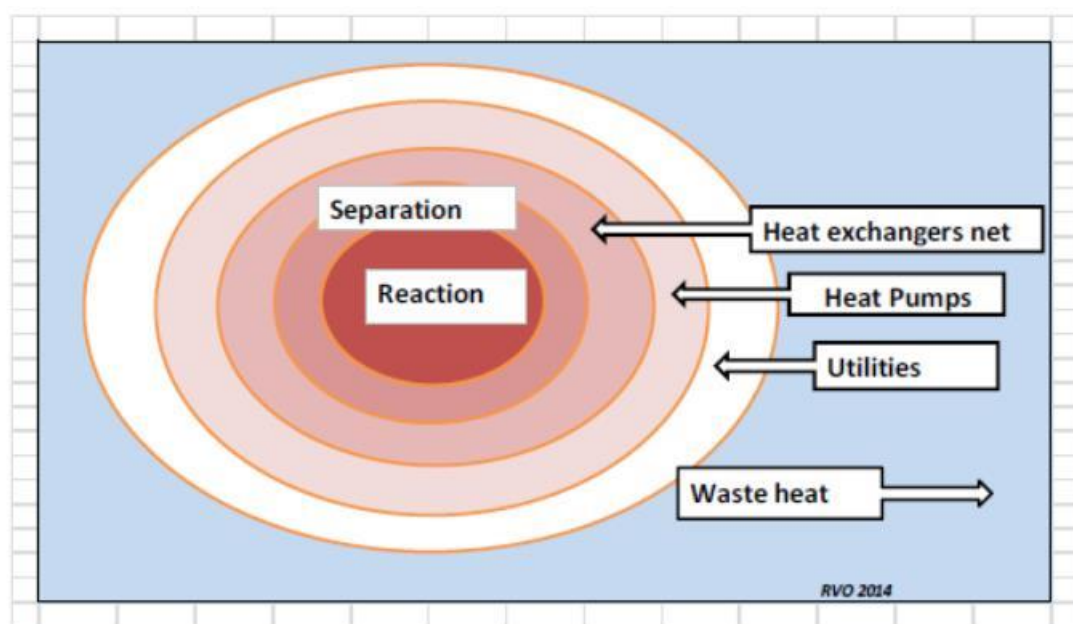


Figure 4-1: プロセスアプローチでのオニオンモデル

産業用プロセスのエネルギー効率改善のシステムアプローチは、Fig4-1の玉ねぎのようなモデルである。TRIAS-Energeticaのように、まず、プロセス最適化でエネルギー削減を仮定し、次にプロセスでのエネルギー交換について検討し、それからプロセスの外側を検討する。化学蒸留モデルで説明する。そこでは最初の殻が、反応器と分離器の最適化である。実際、そこでは年間投資額の観点でエネルギーコストなどが経済的に最適化されている。蒸留プロセスでは、“Process”は、抽出プロセスや蒸留塔の内部のコンパートメントや仕切りなどの最適化を意味します。

エネルギー消費は、熱交換器による熱統合でさらに削減される。熱交換器は、駆動するエネルギーが必要なので、熱交換器による熱統合での達成量には限界がある。

熱交換器ネットワークの最適化は、“ピンチ温度を超えて熱移動してはいけない”というルールのピンチ温度テクノロジーによってなされる。

さらに、全体熱複合線図（エンタルピーと温度の関係）はプラントが要求する最小冷熱・

温熱を導き出す。 ΔT_{pinch} 、ピンチ温度での温度差は、経済性によって決められる。つまり、その値が大きいと、熱交換器の初期コストが小さくなるがエネルギーコストはかかる。熱統合が最適化されると、3番目の殻のヒートポンプで、さらなるエネルギー消費の削減が可能になる。

化学エンジニアリングでモデリングや最適化でのプロセス統合は、一般的に大規模で多くの相互干渉があり複雑な作業である。IT技術とソフトウェアツールは、ユーザーフレンドリーなインターフェイスで速く正確な解決策を出すために大変重要である。一般的な最適化、モデリング技術のここ数年の概観を得ることは可能である。プロセスエンジニアのためのエネルギーや質量のバランス計算は多く開発されてきた。しかし、継続的な開発のためには継続的な資金が必要であるため、市場に残っているものの数は限られている。それらは、継続的な売り上げによって保たれている。

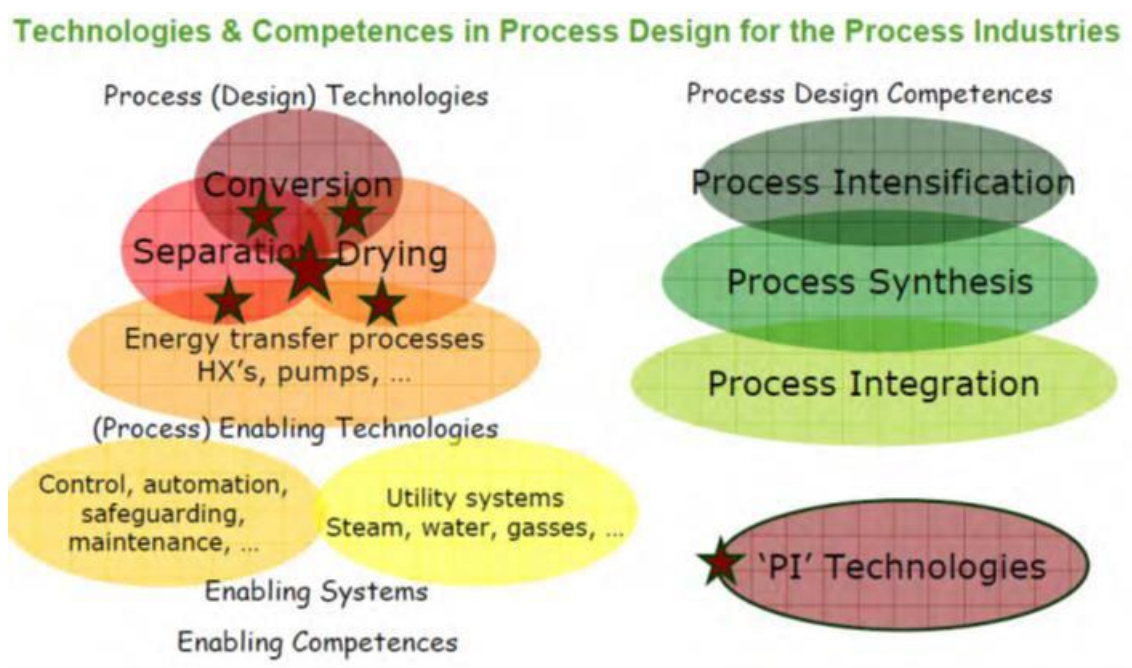


Figure 4-2: 化学産業でのプロセス設計技術(source TKI)

いろいろな有効なツールが利用可能である。それぞれが長所を主張している。

Klemeš *et al* は、化学プロセスでのバランス計算の膨大な入手可能なソフトウェアツールのリストを作成した。

(1) Aspen HYSYS (2) CHEMCAD; (3) GAMS; (4) gPROMS; (5) HEXTRAN; (6) OpenModelica; (7) PNS Solutions and S-Graph Studio; (8) PRO/II; (9) SPRINT STAR, WORK and WATER; (10) SuperTarget and (11) UniSim Design.

コンピューターがプロセスモデリングやシミュレーションにより、化学エンジニアリングを大きく変えた。化学エンジニアリングでは、正確なオペレーションモデルや効率的な

アルゴリズムに関する多くの文献を生み出してきた。これまでは多くの労力を要してきたいくつかの問題は、今日では一人のエンジニアによってなされる。同時に、プラントの自動化の発展は、リアルタイムの膨大な情報をもたらしている。これら2つの要素、プラントデータの入手性、モデルの操作性は、プロセスエンジニアリングで改善できるフィールドを広げている。グローバル時代、強烈な競争の中で、これらの利用が大変重要だと思われる。

4.2 利用可能なツール

複雑な産業プロセス用ツールは、コンサルタントにプロセス改善のアドバイスとなるヒートフローの可視化、分析用に開発されている。多くのツールは、グラフ、ダイアグラム、図など簡単に設計でき、クライアントと専門家のコミュニケーション用に使われる。

4.2.1 コンサルタント向けツール

産業界と国の経済省との複数年契約の施策のもと、会社は3年ごとに、外部の専門家により、エネルギー削減プランを作成しエネルギー削減指標で評価される。環境規制によると、複数年契約には参加していない会社も、エネルギー削減策はペイバックは5年以下でなければならない。産業界でのエネルギー削減のこのアプローチにおいて、オランダのEnterprise Agencyでは、コンサルタントが利用でき、かつ難しいプロセス決定をわかりやすいレポートに変換するツールを開発し利用している。

いくつかは、以下のとおりである。

- ・エネルギースクリーニング、エネルギーポテンシャル調査、プロセス統合分析とエネルギー監査、再生可能エネルギー調査

(1) *Energy analyses*

EEPの一部であるエネルギー分析は、エネルギーバランス、提案された対策、コストや経済性、コンサルタントレポート、3年計画のエネルギー効率向上プランからなる。

エネルギーのよりよい分析があり、熱フロー、排熱フローがマッピングされており、煙突だけでなく、クーリングタワーやコンデンサーの場所も示されている。これらの二つ技術は、簡単に見つけられます。

(2) *Energy Potential Scan*

Energy Potential Scanは、参加型モデルである。伝統的なエネルギー監査のやり方ではなく、EPSでは、会社とコンサルタントが一緒にエネルギー削減の方策を検討する。この方法は、フィリップスとNovemで開発された。ここでの2つの重要なことは、品質と、受け入れやすさである。

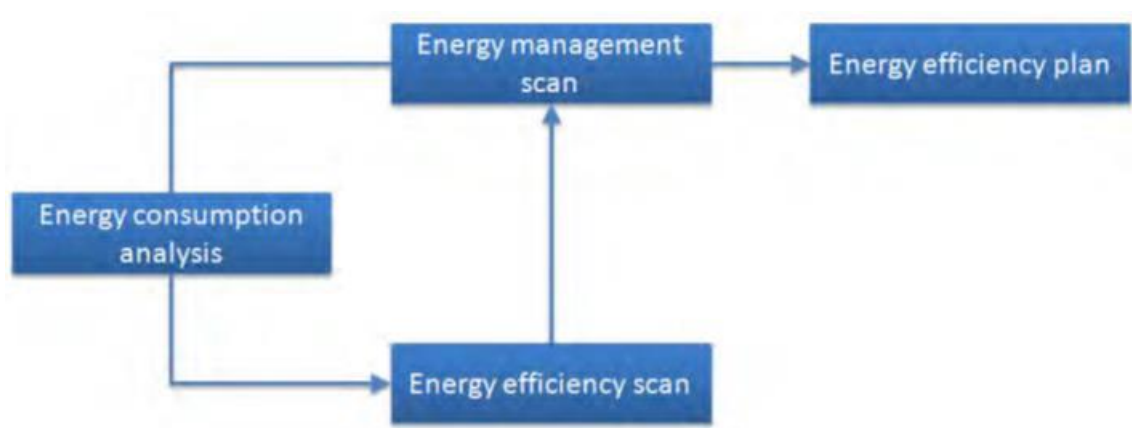


Figure 4-3: Energy Potential Scan

キーワードが受け入れやすさであることは従来のエネルギー監査と異なる点である。このエネルギー効率調査で、ブレインストーミングや経済的、技術的可能な案のアイデア出しなどが行われる。これは、マネージメントサイドの参加とキーとなる人物の参加を導いた。このような構築されたアプローチでは、大変多くのアイデアが議論される。エネルギー削減オプションは会社自身のエネルギー効率向上プランの中で開発される。

(3) *Process integration analyses*

プロセス統合分析では、すべての熱フローはマッピングされる。最大で20程度の熱フローの単純なモデルでは、単純なスプレッドシートとピンチ温度の可視化があれば十分、熱交換器ネットワークのブロックダイアグラムをエンジニアのために作成することができる。

化学産業のような大規模プロセスでは、エネルギーと経済性を最適化するためには、それぞれのプロセスに専用のソフトウェアが必要である。熱交換器と正しく適合したら、次にヒートポンプと正しく適合できるかが、ヒートポンプのデータがプログラムで利用できるならば、計算される。この最後の境界条件がヒートポンプにとって最大の問題と思われる。

ヨーロッパでは、多くのプロセス統合のソフトウェアが小さなプロセスには使われていない。それは、ソフトウェアが複雑すぎるか、小さなプロセスに対しては高価すぎるからである。さらに悪いことに、オランダ政府は90年代に幅広く紹介されたプロセス統合は受け入れられたが、これはもはや化学産業を除いてあてはまらなくなっている。欧州のプロジェクトで、熱の監査のためのEinsteinが開発された。これは無料で、Open Officeのレポート作成機能がある。単純なプロセスを持つ会社では、数日で熱統合や排熱利用、ヒートポンプ、コジェネレーション、太陽熱やバイオなどの再生可能エネルギーの利用の可能性を調査できる。Einsteinは、まだ開発中のもので、ヒートポンプ技術の情報を必要としている。

(4) Renewable Energy Scan

再生可能エネルギーの調査は、会社で再生可能エネルギーのポテンシャルを気づかせるため、オランダのEnterprise Agencyで行われた。この方法は、大きなプロセスを持たない会社やいろいろな業種の混在した会社にとって興味のあるものである。

4.2.2 可視化と分析の方法

熱フローを最適化し、熱交換器やヒートポンプで統合を行うため排熱の熱フローの利用可能性は記述されるべきである。もし利用できるデータがない、もしくは、プロセス設計が時代遅れの場合は、特定の期間にわたるプロセスで可能な場合広範囲なモニタリングを実行するように助言されます。というのは、プロセスが設計通り最適に動作しないことがしばしば痛い経験としてあるからです。

いくつかの以下の方法が、排熱フローの可視化に用いられる。

o Sankey diagram
Arrows diagram
Block diagram
Pinch diagram
Grassmann diagram

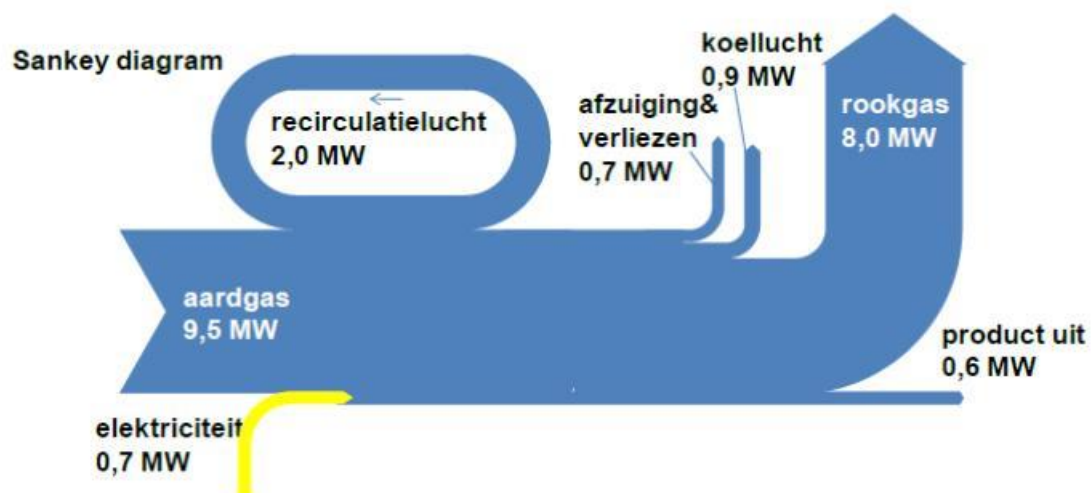


Figure 4-4: Sankeydiagram

Sankeyダイアグラムは、プロセスのエネルギーバランスの洞察を得る。矢の幅はエネルギーフローの大きさをあらわす。

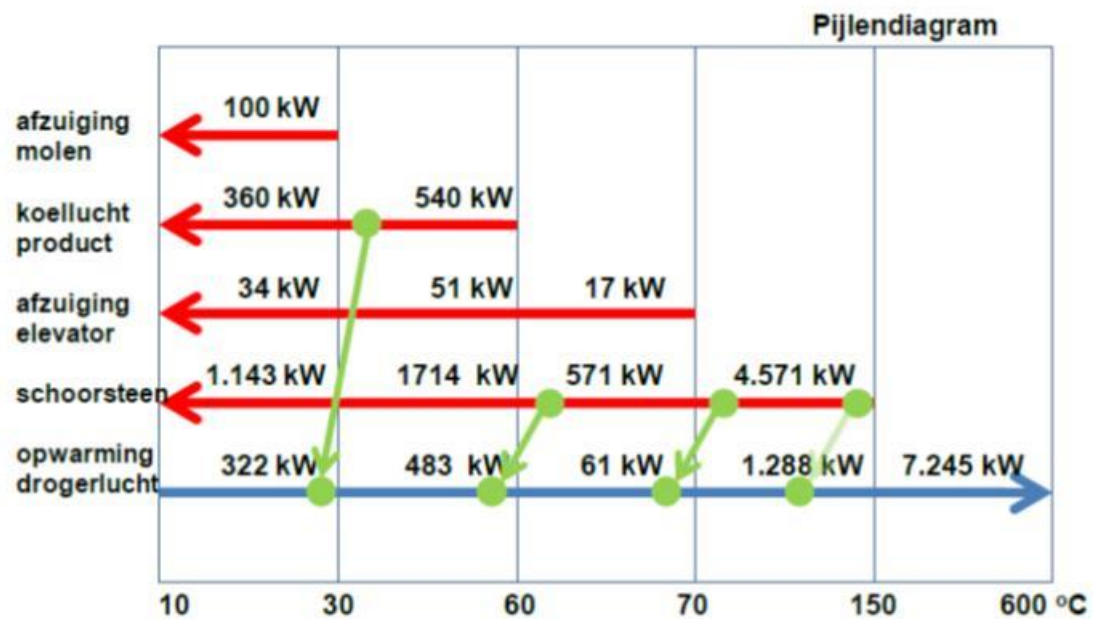


Figure 4-5: Arrows diagram

Arrowダイアグラムは、温度レベルとヒートフローを表す。熱フローの大きさとともに複雑なプロセスでの熱交換器の正しい位置を提案できる。緑色の矢は冷熱と温熱の熱交換量のポテンシャルをあらわす。

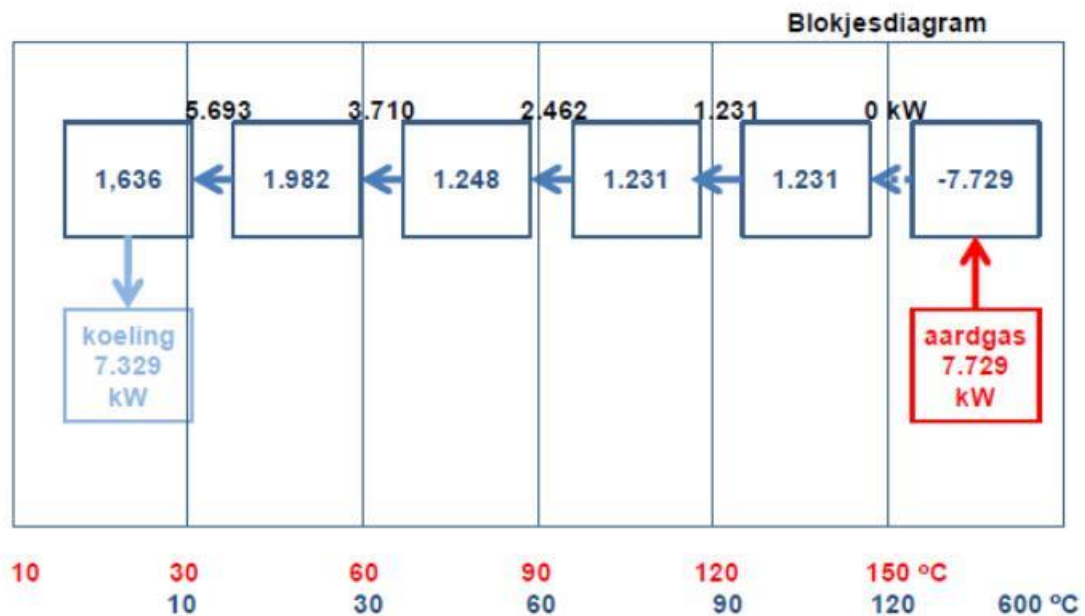


Figure 4-6: Block diagram

ブロックダイアグラムは、単純なプロセスでの熱交換器の最適なレイアウトを与える。このツールで、冷熱・温熱の容量を理論的に計算することができる。ブロック内の図は、与えられた温度帯での余剰熱の量をあらわす。これら分割部分では、余剰熱を熱交換可能にするよう置かれる。加熱されるフローは、排熱フローより温度が低くなければならない。もっとも低い温度セグメントは外部のエネルギーにより冷却される。この例では、もっとも高い温度セグメントしか熱は供給されない。

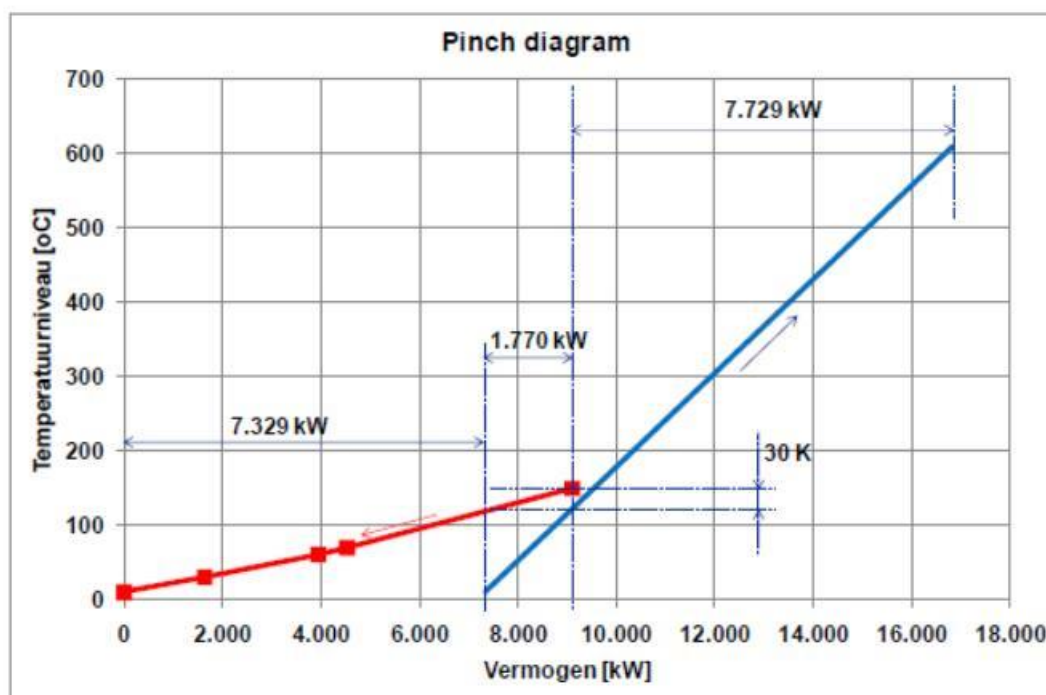


Figure 4-7: ピンチダイアグラム

ピンチダイアグラムは、容量と温度を与える。このプロセスデータは、‘verwerkt’ 温熱と冷熱の熱複合線図である。温熱の熱複合線図は、排熱カーブも含むが、すべてのプロセスフローを冷却し、一方冷熱熱複合線図では、フローを加熱します。プロセスエンジニアリング技術では、全プロセスでの温熱需要、冷熱需要を減らす目的で熱フローの統合を検討する。曲線が最も近づく点、温度がもっとも接近する点をピンチ点という。ヒートポンプがピンチ点を越えるときのみ、もっとも機能的である。この与えられたダイアグラムの例では、理論的必要最小エネルギー量は、7729kWであり、冷却能力は7329kW、1770kWの排熱はプロセスの中で再利用可能である。

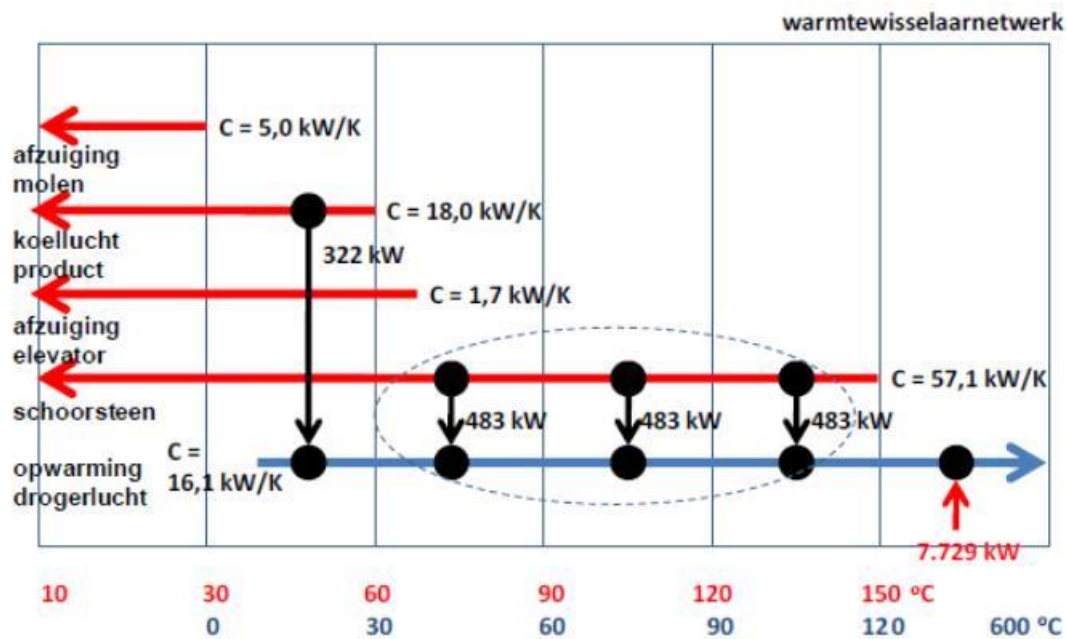


Figure 4-8: 熱交換器ネットワーク

もしピンチ温度が既知であるなら、熱交換器の設計は計算できる。複雑なプロセスでは、ソフトウェアを設計に使うことができる。簡単なプロセスでは、Arrowダイアグラムで基本的なネットワークの設計ができる。

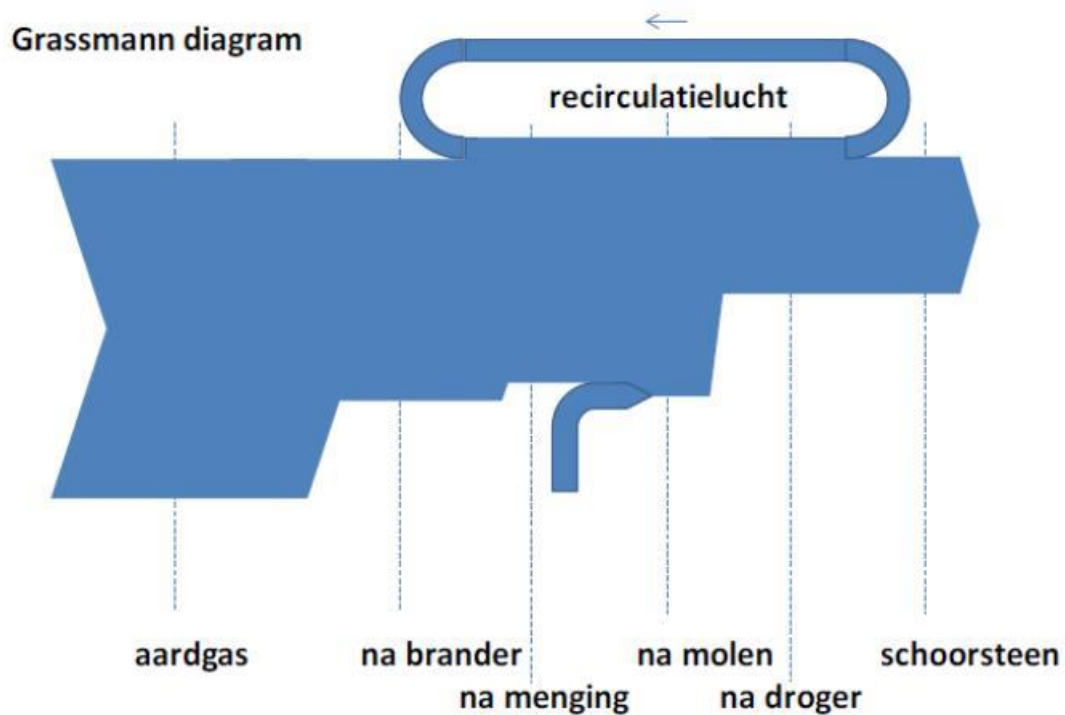


Figure 4-9: Grassman diagram

Grassmanダイアグラムはエクセルギーフローを与えることができる。エクセルギーは、エネルギーフローの質（温度レベル）の基準であり、熱からの発電量へのベンチマークになる。これは、コージェネの最適化によく使われる。

4.3 どのツールが最も良いか？

多くのツールが、産業用プロセスの最適化のために利用可能であるが、どれが最も良いかについては、多くの人の一致した答はない。プロセス最適化のいくつかのアプローチは、Fig4-1のオニオンモデルと一致している。

ランキングで並べると、o Process optimization o Process integration

o Optimisation of Utilities o Heat exchange with surrounding energy users

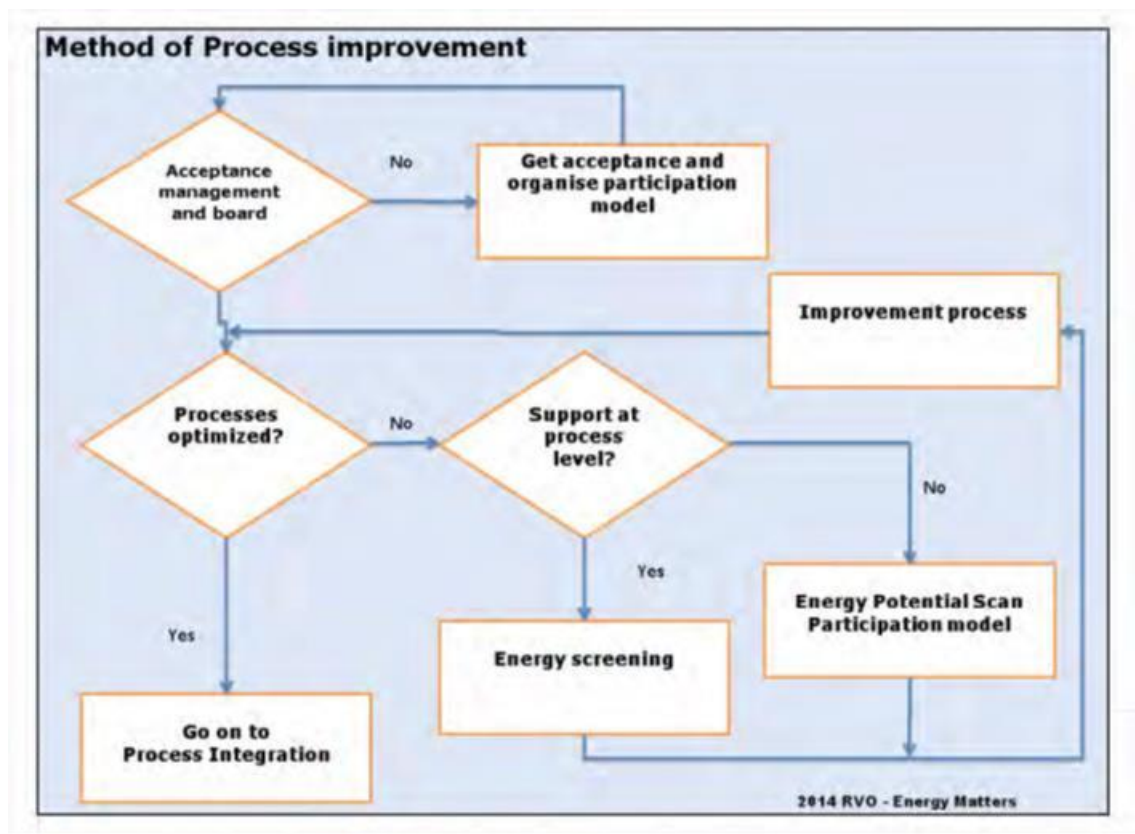


Figure 4-10: 改良プロセスのフローダイアグラム

プロセス最適化によるエネルギー削減プロジェクトは、エネルギーマネージャーの責務を超えて、エネルギーだけでなく、品質向上や生産性向上の利益をもたらす。もしプロジェクトがエネルギー削減コストのみしか得られないのであれば、ほかの競合する投資案件に利益で劣るだろう。このようなプロジェクトでは、まず決定権をもつマネージャーの信

頼を得ることが重要である。プロジェクトの最初の局面では、プロセスの改善マップに集中したほうがよい。

もとのプロセスのコアの部分から、以下のような質問点がでてくる。

- ・運転セットポイントは最適点にセットされているか
- ・熱回収はすでに導入されて、ピンチ理論に基づき最適化されているか
- ・温度はなるべく低いレベルで使われているか。インストールや輸送の簡便さから、しばしば、低品質の熱しか必要とされないところでは安い蒸気システムが導入されている。
- ・乾燥工程では、機械式乾燥システムの利用が可能か
- ・熱のフローで混合により、熱品質が低下していないか。

プロセスは、長年の改良などで、しばしば元々の設計通りには運用されていない。

プロセス統合の難しい話をする前に、モニタリングだけで大きなコスト削減が得られる場合がある。プロセスが最適化されていることが保障された時点から、プロセス統合の検討が始まる。プロセス改良のフローダイアグラムは、次に述べる流れを明らかにしている。プロセス改良のサポートや同意はマネージメントレベルの人からスタートし、次にプロジェクトのメッセージがマネージメントレベルに簡単に分かりやすく伝えることができれば、プロジェクトは開始される。その次のステップは、オペレーションレベルの人々の参加である。エネルギーポテンシャル調査は、信頼を得る優れた方法である。プロセスが最適化されていれば、プロセス統合の可能性を検討することができる。プロセスのすべてのデータが最初の局面で得られていない場合は、データ収集タスクを行わなければならない。すべてのマスバランス、温度レベル、エンタルピーレベルのプロセスモニタリングは、時間とコストがかかるが、最終的にはそれは役立つものになる。

次のステップは、データをコストも含めてのエネルギーバランスに読み込むことであり、プロセスの複雑さを分析することである。

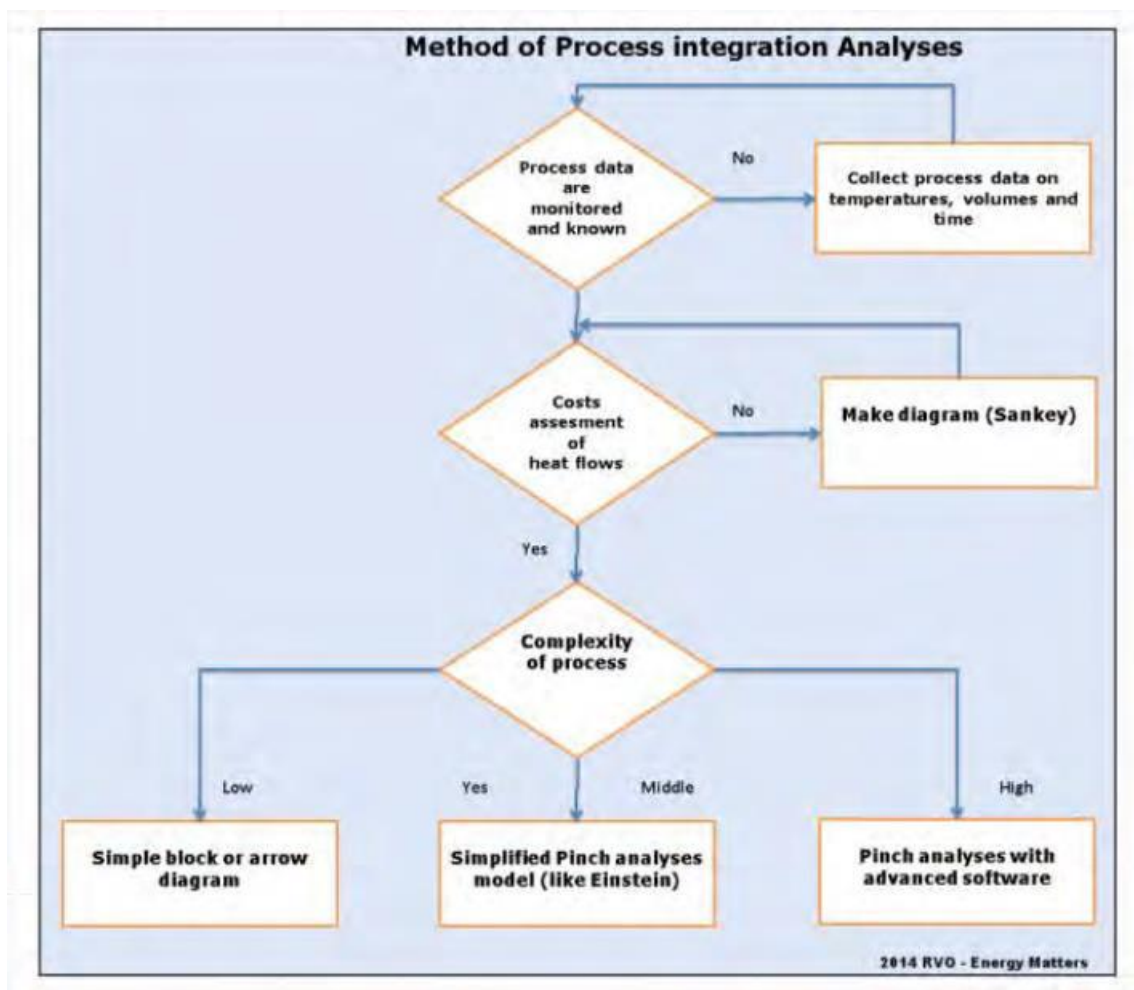


Figure 4-11: 統合プロセスのフローダイアグラム

そこで、どの程度のプロセスを統合すべきかという問題点が出てくる。日々の検討の中で、中規模の産業のインストーラーは、このようなプロジェクトの仕事を行っているので、冷却というプロセスでは、間違って冷凍設備エンジニアがしばしば呼ばれることになる。このような誤解は長い間続いてきた。しかし、ブロックダイアグラムやArrowダイアグラムでサポートできる、小さな産業の会社もたくさんある。

フローダイアグラムは、簡単なプロセスと複雑なプロセスを区別できる。複雑なプロセスに対しては、最適なプロセス統合計算にピンチ分析ソフトウェアが必要である。先にも述べたが、90年代にプロセス統合ツールは紹介されたが、これはもはや化学産業を除いて、ほとんどの産業で使われなくなっている。それゆえに、Federation of Energy Consultants (FEDEC) とともにオランダ企業庁 (RVO) はEinsteinを使つてのトレーニングを開始した。もっと複雑なプロセスでは、特別な専門のコンサルタントが先進のソフトウェアを使っている。

プロセスのすべての合理的な熱交換器が完成したときに、次にはエネルギーの最適化や排熱利用という問題にあたる。ヒートポンプは、ピンチ温度より上の部分で、排熱の温度向上に用いる可能性がある。新しく開発されたヒートポンプは従来のものと比べて、温度上昇幅が大きい。ほかの可能性は、蒸気膨張や吸収式冷却システムで、両者ともプロセスの冷却または温熱用である。さらに排熱の温度レベルがある程度あれば、ORCで排熱から発電が可能である。

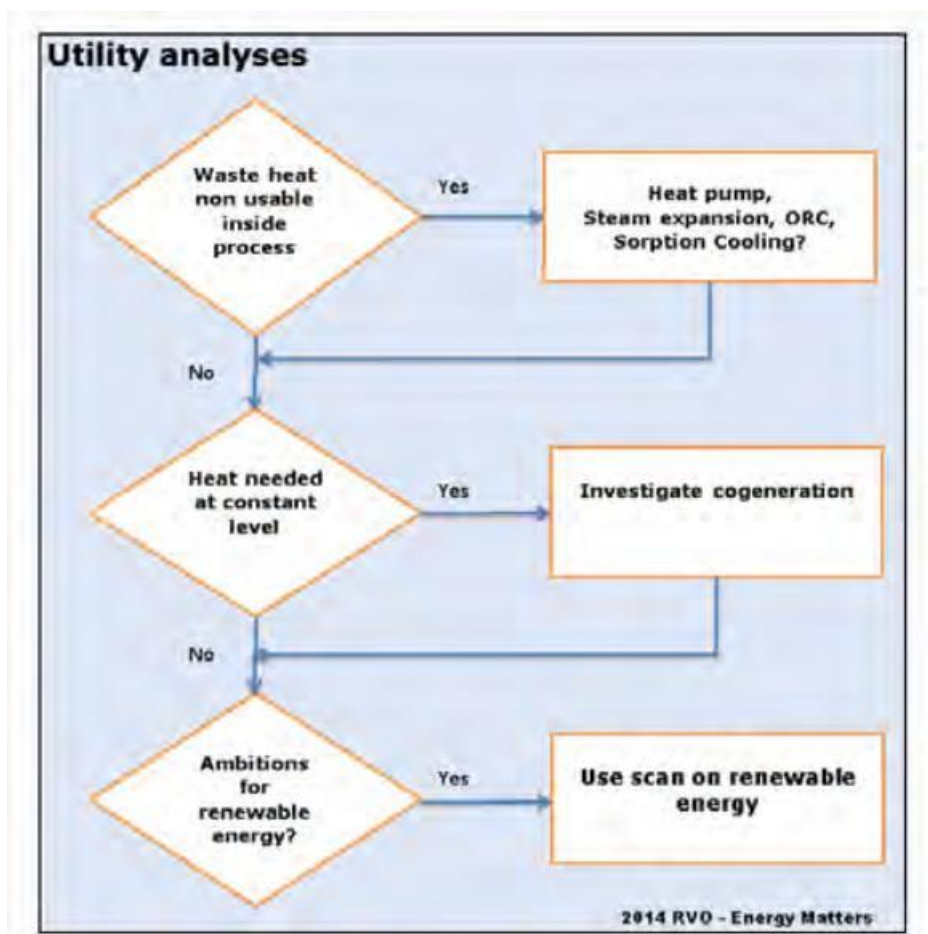


Figure 4-12: ユーティリティのフローダイアグラム

それでも、一定でかなりの量の熱がほぼ年間通して必要な場合は、コジェネレーションが答えになる。しかし、現時点では、コジェネはほとんどのケースで、経済性がない。RVOによって開発されたRenewable Energy Scanが使われることができるレベルにおいては、再生可能エネルギーのオプションは決めることができます。

コジェネレーションは、バイオエネルギーでも利用可能である。また排熱が利用可能な場合は、隣接の熱利用者の調査の可能性がある。そこでは、年間安定した熱需要に対して、熱があまり高い温度で、あまり長い距離以上搬送できないこと、特に夏にプロセス冷却が

最も重要な場合、十分な検討をしなければなりません。エクセルギー的に、最適な排熱利用オプションは、ORCで発電することであり、発生電力は電力グリッドに入れることができます。

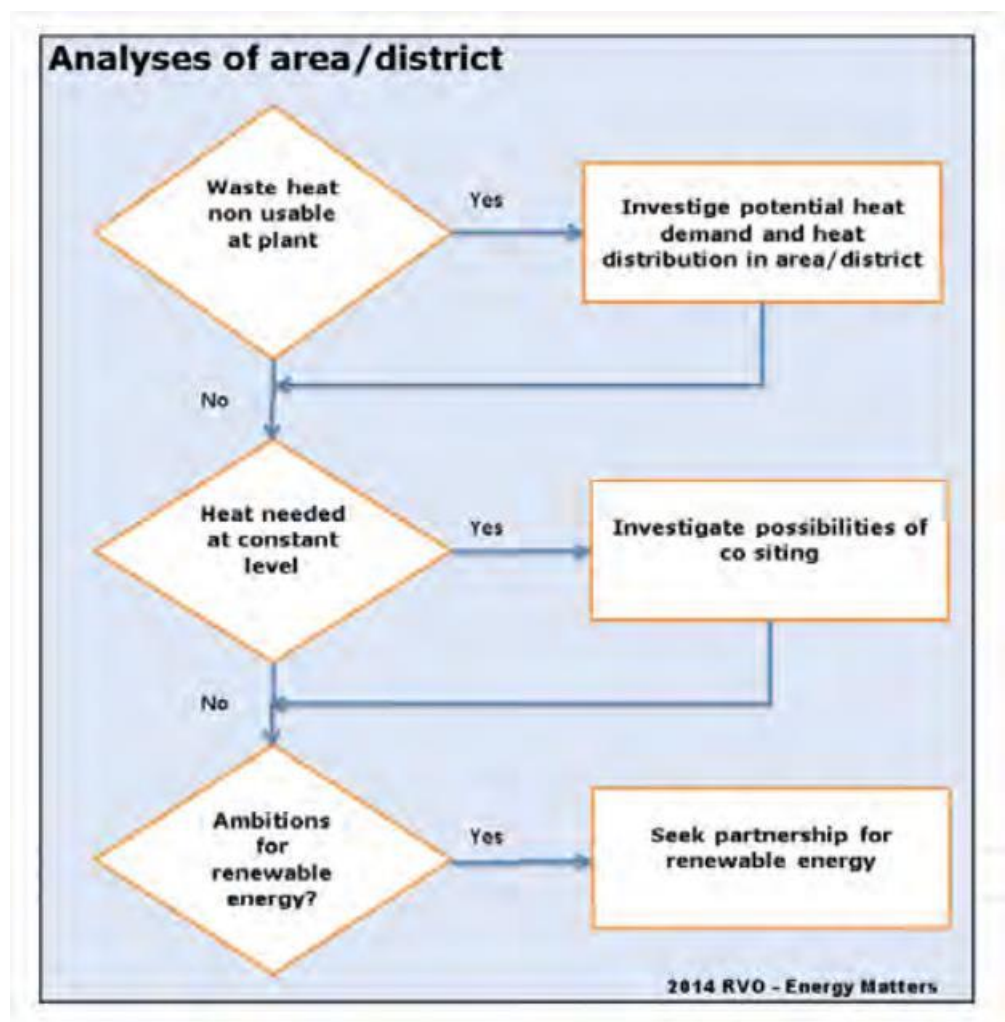


Figure 4-13: エリア探索のフローダイアグラム

4.4 EINSTEIN

熱エネルギー監査のためのEINSTEINは、European (Intelligent Energy Europe - IEE) のフレームワークの中で開発された。EINSTEIN-IIプロジェクトの中で、プロジェクトは、産業界の会社の熱エネルギー供給において、統合したエネルギー効率のよいソリューションの幅広い普及への貢献を狙っている。それには、低中温の比率の高い熱需要で、似たような熱需要プロファイルをもつ非産業用ユーザー、病院、商業センター、大規模オフィスビルディング、地域冷暖房などがある。さらに熱エネルギー供給を最適化するために、需要の減少の可能性を含む全体論的なアプローチは必要とされます。それは、与えられた

経済制約のもとでの、熱回収やプロセス統合による方法、また既存の手頃な熱供給技術のインテリジェントな組合せ方法によります。

フォローアップとして、熱エネルギー監査のためのEINSTEINツールキットを作成した。このツールキットは、監査から、データ取得、設計、代替策の定量評価についての事柄をガイドする。このツールキットと付属のデータベースは無料でオープンソースとして入手できる。これはピンチ法に基づくオープンソースのソフトウェアで、エネルギー効率向上や再生可能エネルギーの導入の可能性を示すことができる。EINSTEINのWEBでは、このツールですでに72件のエネルギー監査を実施したことをあらわしている。

- ・ EINSTEINの方法とツールは、このプロジェクトの中で、正しく整理され強化されている。そして大変多くの種類のアプリケーションに対応できることが証明されている。
- ・ EINSTEINをほかの従来の監査と比較すると、ここではエネルギー管理者が、システムティックな情報整理や、多くの代替技術の可能性評価を素早く実行できる点に違いがあります。

エネルギー効率での大きなポテンシャルがあり、プライマリーエネルギーで平均20%の削減ポテンシャルがあった。そしていくつかの会社では、ペイバックが4年を超えないという拘束条件においても60%以上の削減効果が見られた。これは、照明の電力を省いて、熱だけについて検討した場合である。多くの会社で、72社中20社で、さらなる詳細の計画に入った。また5社ではすでに提案された対策を実施している。しかし会社に対する魅力的な提案は、多くの場合、具体的な対策の実行への十分なトリガーになっていない。

Einstein Approach in Netherlands

オランダでは、欧州でも同様だが、90年代にピンチ方法に基づくプロセス統合は幅広く紹介され、受け入れられたが、化学産業を除いて多くの産業で適用されていない。エネルギーマネージャーやコンサルタントは、4.3章のエネルギーポテンシャル調査やFig. 4-11のフローダイアグラムの教育を受けるべきである。プロセスの複雑さにもよるが、EINSTEINや、それ以上のツールが使われる。RVOは、EINSTEINに基づき、FEDECとトレーニングプログラムを開発するために、ツールの研究を行い、Energy Mattersを注文した。着目しているのは、エネルギー監査者やエネルギーマネージャーの改善とエネルギーマネジメントシステムの普及である。次のステップは、産業界に関連する包括的な利用可能な情報を利用できる手段をつくることである。EINSTEINでの訓練の中で、バグや問題点などが見つかり、それは開発者と議論している。

4.5 プロセスツールとヒートポンプ技術

議論したほとんどのツールは、熱統合とヒートポンプの選択、最適設置位置に注目している。一般的にピンチソフトウェアを使う経験のあるエンジニアは、全体熱複合線図から、どこにヒートポンプを置くべきか簡単にわかる。そして、カーブのnoseからヒートポンプ

の種類もわかる。主な問題は、使用した実績の情報がほとんどないので、正しい大きさとブランドの選択が可能かどうかということである。インターネットにはたくさん情報があるが、コンサルタントは時間がないので、情報をソートすることができない。いかなるソフトウェアや最適化ツールとは独立したヒートポンプのデータベースが注目されるべきである。そのようなデータベースは、いろいろな目的で必要である。

データベースでの主要な情報は、ソースとシンクの温度情報だけでなく、ヒートポンプの大きさやヒートポンプに対して使われた冷熱温熱の詳細情報などが必要で、というのは、これらから、具体的なヒートポンプが選択できるからである。ヒートポンプがもっと効率的に使われるには、多くの検討課題がある。

- ・ピンチ温度とプラントのフレキシビリティ
- ・熱サイクルとヒートポンプの効率
- ・必要な温度上昇幅
- ・エンタルピーバランス
- ・ヒートポンプの選択と拘束条件
- ・システム構成図
- ・利用可能なエネルギー
- ・エネルギーコストと年間の投資コストなど経済性

ヒートポンプのターゲットグループはいろいろな産業に分かれているので、いくつかのヒートポンプ選択モデルは入手可能である。その3つを以下で議論する。

4.5.1 高効率な蒸留のためのヒートポンプ選択方法の習得 By [Kiss, 2012]

実際のシステムでのアプリケーションの範囲の概観は、Landolina, 2012によって与えられる。蒸留はもっとも一般的な分離システムである。しかし、40%の運用コストは化学プロセス、精製プロセスによる。蒸留は、分離の際の再沸騰のため高品質のエネルギーを必要とする、比較的低効率の熱力学プロセスである。一方で、同等の量の熱がコンデンサーで捨てられている。いくつかのヒートポンプコンセプト、捨てられるエネルギーをアップグレードすることやエネルギー削減についてが提案されている。

たとえば、蒸気圧縮式は、クローズループの熱伝達流体の温度上昇に使われる。熱式もしくは機械式の蒸気再圧縮式は、オープンサイクルで、投資コストを削減するために使われる。同様に、内部で熱統合している蒸留装置は、必要な温度上昇幅は小さくて済み、圧縮機入力も減らすことができる。その一方で、圧縮—再吸収式は、熱伝達効果を高めるため吸収サイクルを用いて、高効率で適用可能範囲を広げている。蒸留システムにヒートポンプを用いた際の、エネルギー削減効果は20%から50%である。

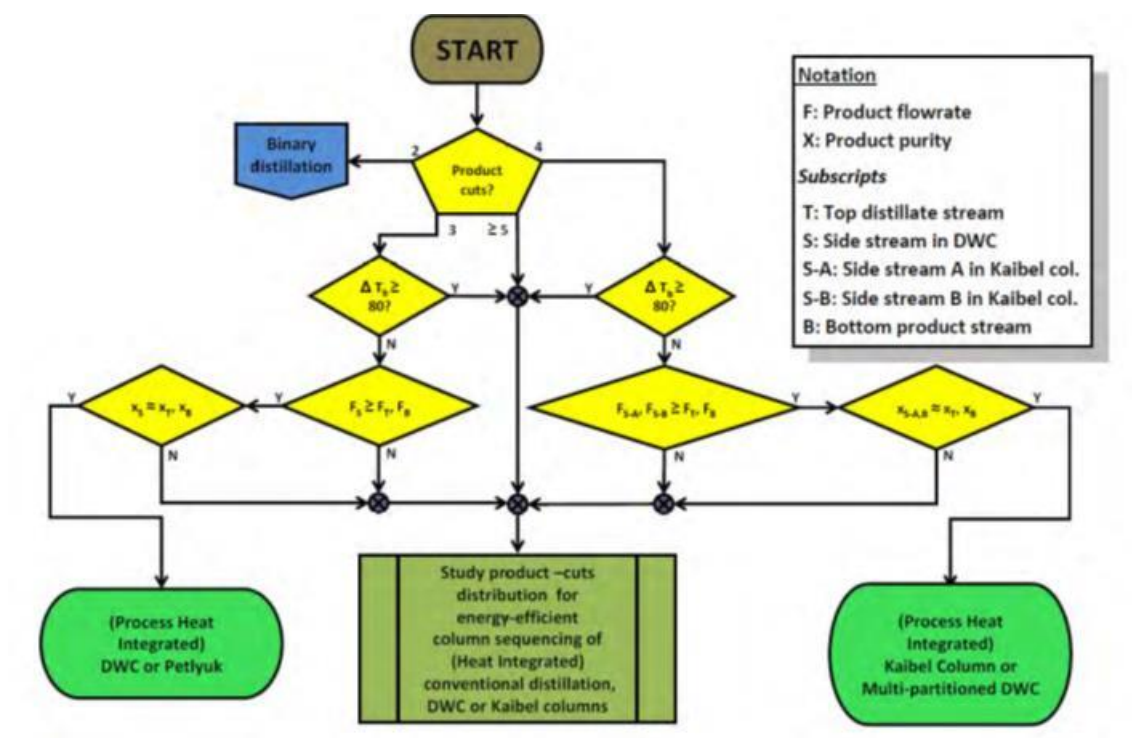


Figure 4-14: 構成

しかし、文献に書かれたエネルギー効率のいいシステムは、それぞれ別の分離作業で評価されている。それで、性能を比較することは難しく、技術の選択を複雑にしている。この問題を解決するため、ヒートポンプに特化して高効率な蒸留システムの、実際的な選択スキームを開発した。実際の適用で、もっとも有望なものだけをこの研究では選んだ。蒸気圧縮式、機械的・熱的蒸気再圧縮式、圧縮—再吸収—熱音響式ヒートポンプ、熱統合した蒸留塔、サイクル式蒸留、分離壁蒸留塔とKaibel蒸留塔。 選択条件には、分離方法のタイプ、プロダクトの流量や純度、沸騰点の温度差、再蒸発の必要エネルギー量とその温度レベルを含む。

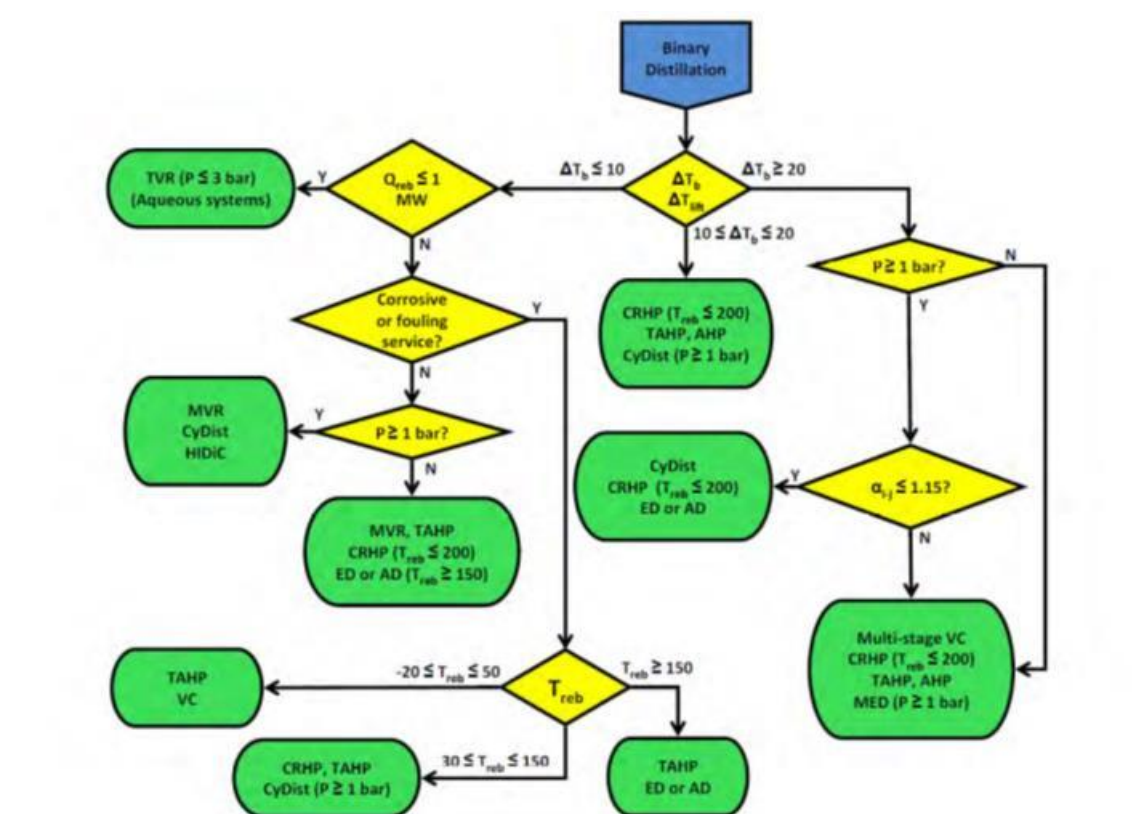


Figure 4-15:構成 2

ここで表した簡単な選択スキームは、蒸留作業での最も適した技術をすばやく表すことができる。そして、提案されたスキームで、かなりの時間とリソースの節約ができる。最終目的は、エネルギー効率のいい化学プロセスの設計を促進し、化学産業の持続可能性を向上させることである。

4.5.2 ヒートポンプモデル

もっと利用可能な一般的なモデルが、TASK2でRVOのためにKWAによって開発された。この挑戦は、オランダのコンサルタントと研究機関でのAnnex35ミーティングで始まった。プロセス産業のコンサルタントは、プロセス統合のツールに集中するのではなく、実在するツールに追加できるモデルを開発することとした。このヒートポンプモデルをソフトウェアに統合することにより、ツールに付属したものになる。そうなので新しいプロセス解析ツールが必要とは思わない。

EXCELベースのヒートポンプモデルは、理想的にはインターネット上で利用でき、WIKI-approachで開発することができ、その方法では、マーケットからモデルの詳細情報をインプットすることができ、アプリケーション例は、モデルのファクトシートとして決定される。この開発の段階までは、まだ達していない。徐々に、ユーザーからユーザーの

プロセスのデータを入力するよう導く。

- できるだけ高温のヒートソースで、ピンチ温度以下のヒートソースを探す。その温度に対応した可能な熱量を決定する。プロセスとシステム統合にとって、何がインパクトがあるか探索する。熱源の熱量と、もしくは温度を増大させるプロセスを適応させることができるかどうかを決定する。

- プロセスの熱で、ピンチ温度より高く、しかしなるべく低い温度のものを探す。プロセスでの必要な熱量と温度を決定する。

- STEP1とSTEP2で調査したヒートポンプで、どのタイプがフィットするか決定する。

ヒートソースとヒートシンクの温度、熱量と熱媒介流体は考慮すべき。

- ヒートポンプの可能性を決定する。プロセス条件でのヒートポンプ性能を考慮すべき。

- ヒートポンプの性能計算の際に、エネルギーやコストの削減量の概算は可能である。

High temperature heat pumps - information & Calculation tool

KWA
Kwaliteitsadviseurs
ARBO • ENERGIE • KWALITEIT • MILIEU

Agentschap NL
Ministerie van Economische Zaken
Landbouw en Innovatie

Introduction
This tool is developed by KWA Bedrijfsadviseurs B.V., commissioned by AgentschapNL. It contains information and calculation tools to determine the technical possibilities and economical benefits of applying high temperature heat pumps in industrial processes. The following heat pumps are addressed:

Type	System	Status
Thermal vapour recompression	Open	Existing
Mechanical vapour recompression	Open	Existing
Absorption heat pump	Closed	Existing
High temperature compression heat pump	Closed	Existing
Compression-resorption heat pump	Closed	Novel/Existing
Thermo acoustic heat pump (electric)	Closed	Novel
Thermo acoustic heat pump (fuel)	Closed	Novel
Hybrid heat pump (ECN)	Closed	Novel

This tool can be used by engineers, consultants or others that are interested in the possibilities and yields of upgrading residual heat. It gives first insights in the technical possibilities of different types of high temperature heat pumps, and in the energetic and economic savings that can be achieved.

Content of the tool

Click to start from begin **START**

Click to directly navigate to:

- General description of working principle of heat pumps
- Roadmap for application of industrial heat pumps
- Types of industrial heat pumps (novel & existing technologies)
- Quick scan to determine techno-economic feasibility
- Background information and suppliers & additional calc. sheets

HEAT PUMP PRINCIPLE
ROADMAP FOR APPLICATION
TYPES OF HEAT PUMPS
QUICK SCAN
INFORMATION & SUPPLIERS

Figure 4-16: RVO – ヒートポンプモデル選択

Quickscan analysis to determine applicable heat pump

1. Inputs to determine applicability of heat pump HOME Input field
Output field

1 Is the system open or closed? Open Answer question 2-17

'Closed system'

2 Which temperature is required for the heat sink 120 °C

3 What is the temperature of the medium leaving the heat sink? 100 °C

4 What is the source temperature 80 °C

5 The source heat will be cooled down to: 80 °C

6 The temperature differences at the heat exchanger outlet 5 K

7 Net temperature lift of the heat pump 70 K

OPEN SYSTEM

For mechanical vapour recompression:

9 What is the inlet steam pressure? 1 Bar 99.6 °C

10 Which pressure is required in the process? 2 Bar 120.3 °C

11 Net temperature lift of MVR 20.6 °C

For thermal vapour recompression:

12 What is the motive steam pressure? Bar °C

13 What is the suction steam pressure? Bar 120.3 °C

14 What is the discharge pressure? Bar °C

15 Net temperature lift of TVR °C

[Click here to calculate motive steam consumption](#)

16 Suction flow (see calculation motive steam) kg/hr

17 Motive steam consumption (see calculation motive steam) kg/hr

Figure 4-17: Quickscan の分析

このモデルのさらなる発展は、新しい、TASK2で行われる。

4.5.3 Heat Pump Check

ヒートポンプチェックは、別のオンラインの計算ツールである。これは、De Kleijn Energy Consultants & Engineers from Drutenによって開発された。このツールは、産業分野の会社に、プロセスにヒートポンプを導入する可能性判断を支援する。これはヒートポンプの適用可能性を示す。この結果から、さらなる外部のコンサルタントによる調査するかを判断できる。

SUMMARY HEAT PUMP CHECK



Input			
Waste heat source		Process	
Heat source	: Refrigeration system	Process	: Pasteuriser
Purpose installation	: Cooling+freezing	Heated flow	: Product
Refrigerant	: Other	Temperature in	: 50 °C
Condensation temperature	: 30 °C	Temperature out	: 70 °C
Cooling capacity	: 1000 kW	Heat demand	: 1000 kW
Other data			
Current heat source	: Direct gas-fired	Electricity costs	: € 0.08 / kWh
Generation efficiency	: 85%	Fuel costs	: € 0.35 / Nm3
Running hours	: 6000 hours/year	Selection heat pump	: Largest savints
Simultaneity	: 70%	Refrigerant	: Only natural
Specifications heat pump			
Heat pump type	: Mechanical heat pump with natural refrigerant Ammonia (R717)		
Capacity	: 1000 kW		
Electric power	: 196 kW		
COPh	: 5.1		
196 kW			
Waste heat in	30.0 °C	75 °C	70.0 °C Flow out
	804 kW	Evaporator	Condenser 1000 kW
Waste heat out	30.0 °C	28 °C	50.0 °C Flow in
Costs and savings			
Energy savings		Financial savings	
Reduction fuel consumption	: 562800 Nm3 per year	Fuel savings	: € 197000 per year
Extra electricity consumption	: 823200 kWh per year	Electricity costs	: € 65900 per year
Primary energy savings	: 10404 GJ per year	Financial savings	: € 131100 per year
Investment costs		Payback period	
Heat pump	: € 370000	Investment costs	: € 432100

Figure 4-18: Heat Pump Checkにより作成されたレポート

4.6 参考文献

Geelen, 2013 Monitoring van (energetische) prestaties en knelpuntenanalyse WKO-systemen in de glastuinbouw, ir. C.P.J.M. Geelen en ir. K.J.

Braber; Arnhem, December 2013

Grift, 2011 Warmtetoets industrie, Jan Grift, Allan Hart (Energy Matters),
april 2011, Projectnummer: 11.450

Kiss, 2012 Mastering heat pumps selection for energy efficient distillation,

Kiss A. A., Flores Landaeta S. J. and Infante Ferreira C. A., (2012),

Chemical Engineering Transactions, 29, 397-402

Landolina, 2012 Strategic Research Priorities for Renewable Heating & Cooling,

Cross-Cutting Technology European Technology Platform on Renewable

Heating and Cooling; Many authors edited by Simone

Landolina – European Renewable Energy Research Centres

Agency, Manuscript completed in April 2012. Brussels, © European

Union, 2012

以上

