

## 論文の内容の要旨

論文題目 Innovative Energy Saving Technologies for Heavy Chemical Industry  
(重化学産業における革新的省エネルギー技術)

氏名 松田 一夫

### 1. 緒言

本論文では、重化学産業を対象に大幅なエネルギー削減を可能とする革新的省エネ技術の研究開発を行い、その成果をまとめ、報告する。

重化学産業の工場はユーティリティ系とプロセス系にて構成される。工場は両系に対して長年省エネを追求してきた。本論文では、工場のユーティリティ系において、以前から適用されてきた熱利用解析技術（ピンチテクノロジー）を工場群全体、いわゆるコンビナート全体へ拡張するエリアワイドピンチテクノロジー(AWPT)を開発し、その技術の有効性と実用性を検証し、コンビナートで大幅な省エネを確認すると共に、省エネ事業の実現へ進めた。

一方、プロセス系へは、最近提案された「自己熱再生技術(SHRT)」の実用化開発を行った。即ち、反応器や蒸留塔に対して従来の加熱操作ではなく、プロセス流体自身が持つ熱に仕事を与えて熱を循環再利用する SHRT を適用し、従来に比べて大幅な省エネが達成できる実用化開発を行った。そしてこの技術を実機に導入する際の課題を明らかにした。

### 2. ピンチテクノロジー

ピンチテクノロジーは工場の熱回収システムの効率改善を目的として開発された。工場内の複数流体を与熱複合線と受熱複合線で表現し、熱回収システムの性能と省エネ余地を包括的に捉えるものである。

ピンチテクノロジーは2つの世代がある。第1世代はプロセス系が対象で、第2世代はユーティリティ系が対象である。

### 3. エリアワイドピンチテクノロジー(AWPT)

日本のコンビナートに立地する工場は省エネ余地が無いと言われるが、コンビナートを一大仮想工場として取り扱い、コンビナート全体の i)熱利用を解析し互いの熱融通を図ることや、ii)ユーティリティ系の効率向上のため統廃合を行うことで、従来の個別工場の枠を超え一層の省エネが図れると考えた。

しかし、工場群を面的に捉え解析しようとする、課題が4つ見出された。その解決策(4つの idea)を提案し、それらを包括した解析手法である AWPT を開発した。AWPT は、第2世代のピンチテクノロジーに新しい概念を持ち込み、コンビナートを対象に解析できるものである。

①まず、従来の解析検討では工場毎に収集データの質が異なっていた。統一的なデータ収集手法を開発した。

②従来、解析要領がなかったので、新たに次の要領を開発した。a)データの質を揃えた個別工場へ本解析手法を適用して検討条件を整えた後、b)工場群の工場データを凝縮して一大仮想工場データを創成し、c)これに改めて本解析手法を適用する。

③熱融通を解析（熱利用解析）する手法として、個別工場では利用できなかった低温排熱領域まで解析条件を拡張する **Composite curve (CC)**解析を提案し、熱融通の可能性を広げた。

④ユーティリティ系の効率評価解析手法では、従来は個別工場のコージェネ最適化解析に留まっていたが、本研究ではコンビナートを対象とするので、買電利用の内容まで範囲を拡大した **R-Curve** 解析を開発し、効率改善の可能性を広げた。

**CC** 解析と **R-Curve** 解析の結果から導出される省エネ余地を実現するために必要なシステム技術をそれぞれ3件（熱融通システム、統合エネルギー監視システム、低位熱発電システム）と1件（エネルギー共有システム）を開発した。

#### 4. エリアワイドピンチテクノロジー(AWPT)の実証

##### (1) コンビナートでの理論省エネ余地

3章で開発した **AWPT** を日本の代表的な複数のコンビナートに適用した結果、大きな省エネの余地があることを確認した。その余地は、千葉コンビナートでは、原油換算で日本のエネルギー消費量の約1日分、水島では2日分、鹿島では1.2日分に相当する。**CC** 解析は、熱融通で省エネ余地があることを立証し、低温排熱領域では低位熱発電システム技術の導入が効果的であった。また、**R-Curve** 解析は、スチームタービンをガスタービンへ置き換えることが効率向上に大きな効果があることと、ガスタービンの導入要領の指標を示した。特に **R-Curve** 解析結果からの省エネ余地は、**CC** 解析結果からのそれより4～5倍も大きく、ガスタービン導入は省エネ改善に大きな効果があることを確認した。これらの結果から **AWPT** の有効性と実用性を示した。

##### (2) 複数工場間省エネ事業におけるシステム技術の実証

千葉コンビナートでの解析結果に基づき省エネ事業を開発した。これは石油工場と隣接する化学工場の2工場間での省エネ事業である。この事業内では3章で開発したシステム技術の内、3件を導入した結果、年間原油換算で10,500kLの省エネを達成し、開発したシステム技術の有効性と実用性を立証した。

##### (3) 製鉄所での実証

製鉄所では工程間を超える熱利用は議論されていなかった。そこで、**AWPT** の **CC** 解析を製鉄所に適用した結果、排熱領域で大きな省エネ余地（18MWの電力回収）があることを確認し、**CC** 解析の有効性と実用性を立証した。

## 5. 自己熱再生技術(SHRT)

本研究では SHRT の考えに基づき、加熱炉を持つ反応系へ「自己熱再生熱循環」、蒸留系へ「自己熱再生蒸留」を適用し、圧縮機とプロセスシステムの実用性の観点から実用化開発を行った。

## 6. 自己熱再生技術(SHRT)の実用化開発

### (1) 反応系

ナフサ脱硫装置と灯油脱硫装置の反応系を対象に自己熱再生熱循環を適用し実用化開発を行った。従来の反応系は原料を加熱炉にて 300 °C (高温) まで昇温して反応器へ供給している。自己熱再生熱循環では流体を所定温度まで昇温するために反応器上流へ圧縮機を設置して断熱圧縮による温度上昇にて反応器の運転条件を満足させるプロセスシステムを開発した。この開発では圧縮機の吸込側圧力を調整して熱交換器内で反応器入口流体／出口流体の T-Q 線が非常に接近できる (Perfect heat circulation) 運転条件を探索し、確認した。これにより加熱炉が不要にでき、更に廃熱クーラの熱負荷を大幅に削減できた。その結果、エネルギー評価では、従来技術の約 20% までに低減でき、自己熱再生熱循環の有用性を示した。灯油脱硫装置は反応熱も利用したためエネルギー評価が従来技術の 17% までに低減できた。ナフサ脱硫装置の熱循環過程では全蒸発であったが、灯油脱硫装置では部分蒸発に留まったためセパレータ等が必要になり、灯油より重質な原料には本技術適用での実用化は厳しいと判った。そして、高温 (300°C 程度) での圧縮機の信頼性が重要と判った。

### (2) 蒸留系

反応系より低温での運転条件として、中温度領域で運転するベンゼンプロセスの蒸留系での自己熱再生蒸留の実用化開発を行った。既存の蒸留塔ではフィードヒータや塔底のリボイラは用役で加熱し、蒸留操作に必要な熱を確保する。一方、塔頂ガスは冷却水などで所定の温度まで冷やされ、一部は塔頂製品となり、残りは還流液として蒸留塔塔頂へ戻される。塔頂ガス冷却系のクーラはリボイラの運転温度より低温だが、リボイラと同程度の熱負荷を廃棄している。

これに対し、実用化開発の結果、塔頂ガスを分割しその自己熱を 2 台の圧縮機で高め、それぞれフィードヒータやリボイラへ供給することで、外部からの熱導入を一切不要にできるプロセスシステムを開発した。その結果、エネルギー評価では従来技術の約 20% までに低減でき、自己熱再生蒸留の有用性を示した。更に、経済性の向上を図り、1 台の圧縮機で対応する条件を検討した結果、エネルギー評価では従来技術の 24% までに低減できることを確認した。

本研究の成果を実機で実現するためには圧縮機を含む全系の長期運転での信頼性担保が重要と判った。

## 7. 総括

重化学産業の工場はユーティリティ系とプロセス系から構成される。両系とも省エネ余地は厳しいと言われていたが、ユーティリティ系において、コンビナートを一大仮想工場として取り扱う考えを構築し、コンビナート全体での i) 熱融通の可能性や ii) ユーティリティ系の効率向上の余地を解析する手法としてエリアワイドピンチテクノロジー (AWPT) を開発し、これを国内の主要な重化学コンビナートに適用した結果、大きな省エネ余地があることを確認した。この結果から上記考え方と AWPT の有効性と実用性を示した。

AWPT は4つの idea から構成され、その内、CC 解析と、R-curve 解析の結果から示される省エネ事業を実現するために、4つのシステム技術も開発した。

次に、プロセス系において、自己熱再生技術(SHRT)に基づき、ナフサや灯油の脱硫装置の反応系に対して自己熱再生熱循環、ベンゼンプロセスの蒸留系に対して自己熱再生蒸留の実用化開発を行った結果、いずれもエネルギー評価が従来技術の約 20%まで低減できることを確認し、SHRT の有用性を示した。SHRT を用いた本研究の成果を実機で実現するためには、圧縮機を含む全系の長期運転での信頼性担保が必要と判り、早期の実証装置の実現を目指す必要がある。

以上から重化学産業のユーティリティ系とプロセス系に対して研究開発したこれらの技術を適用するとエネルギー消費量が大幅に削減でき、限られた資源の有効利用に貢献できる。

ここで、SHRT は、プロセス系の技術革新であり、この技術が重化学産業へ浸透した将来の状況では、エネルギーの需要が大幅に削減され、プロセス系へエネルギーを供給するユーティリティ系の仕様や構造が大幅に変化すると考えられる。この条件での AWPT の概念の見直しが必要になると考えている。