

2014年12月16日

化学プラントの省エネルギー対策と展望

(その2) 化学プラントの廃熱発生源と省エネルギー対策

環境企画 主宰 松村 眞

本稿は2014年12月16日、化学工学会関西支部・和歌山支部が共催で開催した省エネルギーセミナー（於・和歌山）で配布した資料を加筆・修正したものである。

2. 化学プラントのエネルギー回収原則と排熱発生源

石油精製プロセスも石油化学プロセスも、目的は構成成分の変換である。原料の構成成分を製品に求められる成分構成に変換するための、単位操作の組み合わせと云ってよい。成分を変換する基幹操作は反応と分離・精製で、それぞれ化学的な根拠にもとづいて適切な操作温度と操作圧力が決まる。したがって、原料や中間製品を必要な温度と圧力に高めたり、または低めたりする操作が必要になる。原料と最終製品は常温常圧なのに、単位操作には高温、高圧、低温、低圧が求められるので、加熱すれば必ず冷却が、加圧すれば必ず減圧がともなう。このため省エネルギー対策は、加熱したら下流でその熱を回収し、加圧したら下流でその圧力エネルギーを回収するのが基本になる。実際のプラントも、この原則で広く熱回収が行われているが、温度条件の制約から回収しきれない熱が残り熱損失になる。化学プロセスの最終熱損失発生源を整理すると下記の3種類になるので、プロセスで発生する排熱は効率よく回収し、最終熱損失を少なくすることが、熱に関する省エネルギー対策の原則になる。圧力も同様に考えられるが、圧力の回収には構造の複雑な回転機が必要になるので、経済性が成り立つ圧力回収源は多くはない。化学プロセスのエネルギー回収は、温度格差を利用する方が圧力格差の利用より圧倒的に多く、回収可能なエネルギー量が大きい。

(1) 蒸留操作に必要な塔頂蒸気の凝縮冷却熱

塔頂蒸気の下流に空冷や水冷の冷却器を設置して、多くの場合に凝縮熱を外気や排水に廃棄している。プロセス流体の凝縮器や冷却器入口温度は150℃から100℃程度が多く、冷却後の温度は50℃～30℃程度が多い。通常、水冷には多管式熱交換器が、空冷には伝熱管にフィンをつけたエア・フィン・クーラーが使われている。

(2) プロセス流体を冷却するための冷却熱

石油製品や中間製品をタンクの貯蔵温度にまで冷却する排熱。排熱は多管式熱交換器を通して冷却水に廃棄している。製油所プロセス排熱の60%～70%を占める。

(3) 加熱炉とボイラーの排ガス保有熱

加熱炉やボイラーの排ガスに含まれる熱は、多くの場合に燃焼用空気の予熱や蒸気の発生に利用されるが、回収しきれない熱が 130℃～250℃の温度で大気に放出されている。

2.1 凝縮冷却熱とプロセス流体冷却熱

図 2.1 は凝縮冷却熱とプロセス流体冷却熱について、石油産業活性化センターが全国の製油所にある凝縮器と冷却器を調査した結果である。プロセス排熱の温度は広く分散しているが、温度の高い排熱源は熱量が少なく、150℃以下の排熱源は熱量が大きいことがわかる。排熱温度が高く、熱量が多いほど熱回収の費用対効果が高いので、経済性の優先順位からこのような結果になるのは当然と言ってよい。しかし少なくとも 100℃以上の排熱は、熱交換器の増設で回収可能と思われるので、今後の排熱回収を期待したい。図 2.1 の熱量を 100℃以下、100℃～150℃、150℃～200℃、200℃以上に区分したのが図 2.2 である。150℃以上の熱回収は当然だが、100℃～150℃の温度領域の熱回収が今後の大きな目標になるであろう。石油化学プラントの場合は、原料も中間製品も石油精製より沸点の低い炭化水素が多いので、排熱温度が低い傾向にある。また、石油精製プロセスより規模が小さいが、排熱分布は類似の状況を示している。

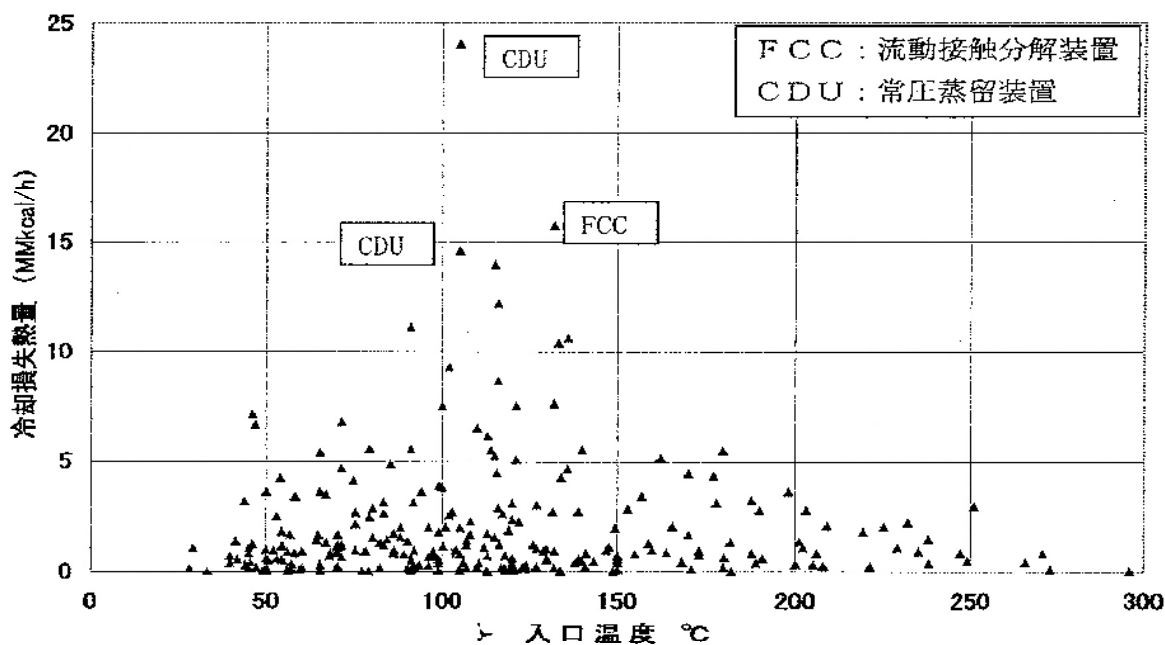


図 2.1 製油所の凝縮器冷却排熱および冷却器排熱の温度と熱量

(出典：製油所における最新省エネ技術の適用可能性調査報告書、
石油産業活性化センター・PEC-2003T-20)

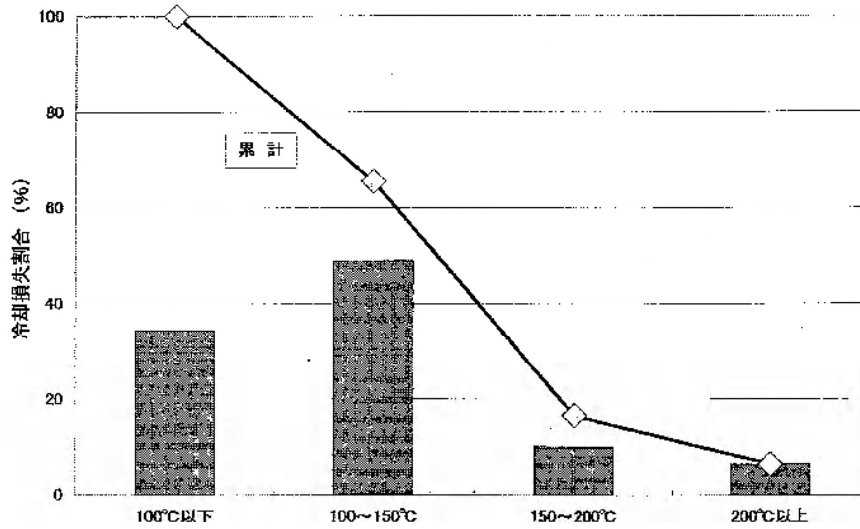


図 2.2 製油所の凝縮冷却熱とプロセス流体冷却熱の温度と熱量グラフ
 (出典：製油所における最新省エネ技術の適用可能性調査報告書、
 石油産業活性化センター・PEC-2003T-20)

2.2 加熱炉とボイラーの排熱

図 2.3 と図 2.4 は、石油産業活性化センターが全国の製油所にある加熱炉とボイラーの排熱を調査した結果である。この図から排ガス温度の 150°C~250°C の範囲が今後の排熱回収の目標になることがわかる。石油化学プラントの網羅的な調査データは得られていないが、石油精製プロセスより規模が小さいだけで、排熱分布は基本的に同じ傾向と推察される。

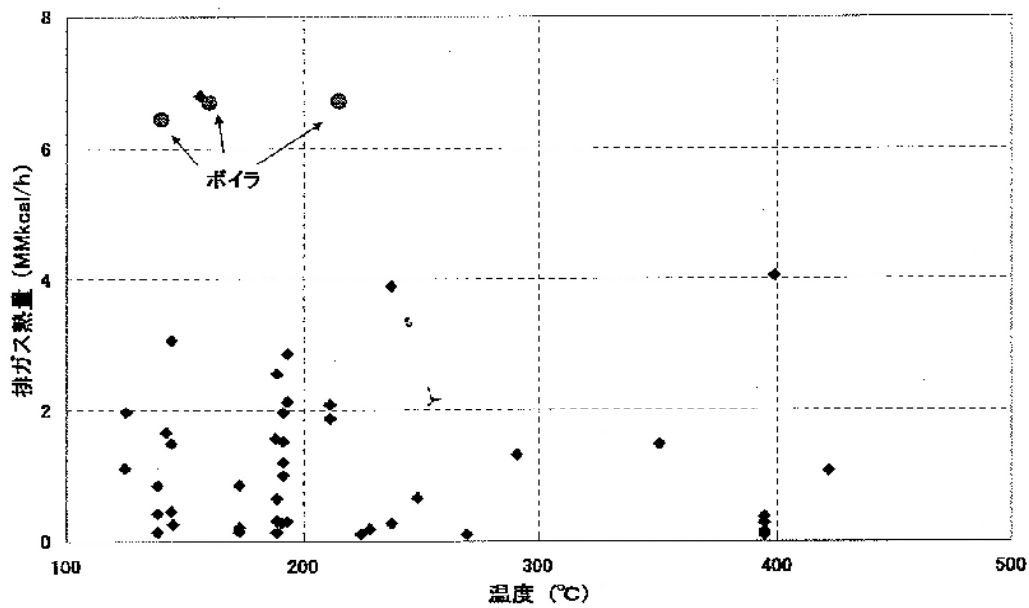


図 2.3 製油所における加熱炉・ボイラー排熱の温度と熱量分布

(出典：製油所における最新省エネ技術の適用可能性調査報告書、
石油産業活性化センター・PEC-2003T-20)

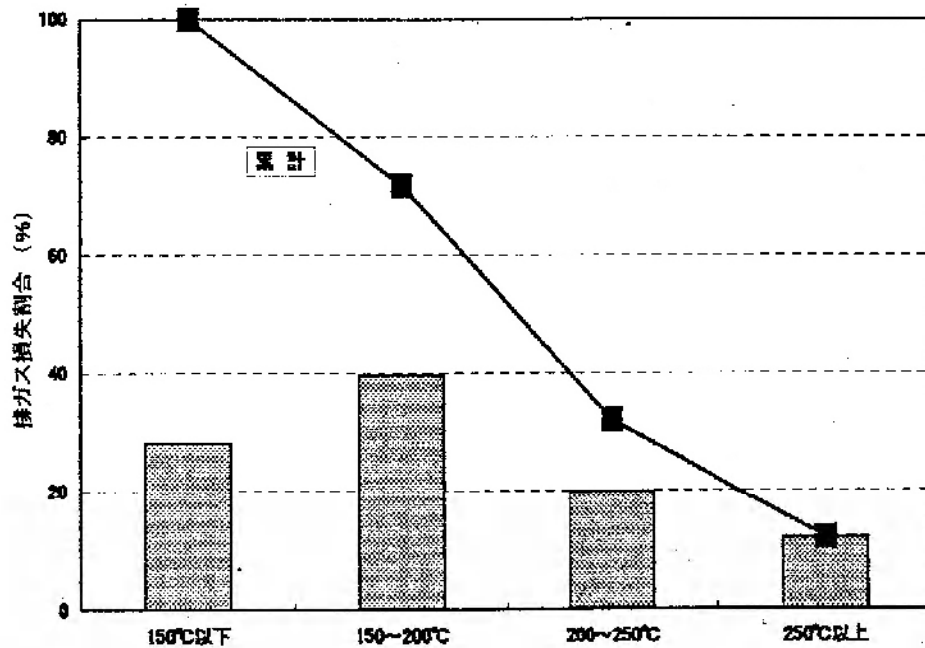


図 2.4 製油所における加熱炉・ボイラー排熱の温度と熱量グラフ

(出典：製油所における最新省エネ技術の適用可能性調査報告書、
石油産業活性化センター・PEC-2003T-20)

3. 化学プラントの省エネルギー対策テーマ

産業界の省エネルギー対策は、1970年代の2度にわたる石油価格の高騰が契機になり、1980年代に急速に波及した。初期段階で採用されたのは、日常的な設備の運転管理を改善する分野である。大きな費用が発生しないし、効果が迅速に現れるからである。それに石油危機以前はエネルギーコストが安かったので、厳格にエネルギーを管理する要求がなく、それだけにちょっとした運転管理の改善で、大きな省エネルギー効果が得られたからである。運転管理の改善が数年で一巡すると、もっとエネルギー消費量を減らすために投資のともなう設備改善が必要になった。

一般的に、生産設備のエネルギー効率を高めようとするれば、設備費が高くなる。逆にエネルギー効率を低い水準に止めれば、設備費を低く抑えることができる。設備設計の段階では、通常、設備のライフサイクルを通じた設備費用とエネルギーコストの和が最小になるように配慮する。このため、設備費に比べて相対的にエネルギーコストが低ければ、エネルギー多消費型の設備になり、エネルギーコストが高ければ省エネルギー型の設備になる。その意味で石油危機以前に建設された設備は、安いエネルギー価格を前提とするエネルギー多消費型設備だったと言えるであろう。石油危機にともなう原油価格の高騰は、設備費用とエネルギーコストのバランスポイントを、省エネルギー型に大きくシフトさせたのであり、1980年代の省エネルギー対策は、この是正活動だったのである。

したがって設備改善による省エネルギー対策には厳格な経済評価が求められ、数年で投資が回収できる範囲の対策しか採用されなかった。稼働中の設備を改善するので工事期間の制約も大きく、定期補修の時期に合わせて30日程度に制約されていた。当時は温室効果ガスの排出抑制が目的ではなかったので、単に費用対効果だけが判断の基準だった。しかし現在も今後も、そのような狭い意味での判断基準だけでは済まされない。費用対効果は重要だが、温室効果ガス排出抑制の観点から、今後は1980年代よりずっと長い投資回収期間が許容されるであろう。金利が当時よりも大幅に低いことも、設備投資の追い風になる。その結果、これまでは経済性の点で採用できなかった省エネルギー対策も、今後は普及していく可能性が高い。

化学プラントを対象とした省エネルギー対策には、二つの領域がある。一つは運転管理の改善によるもので、もう一つは設備改善によるものである。日本の石油精製業界は、1970年代から1980年代にかけてエネルギー消費原単位を7.3%低減したが、そのうち運転管理改善の寄与率が約8割で、残る2割が設備改善によるものだった。石油化学工業も同じ期間にエネルギー消費原単位を9.3%低減したが、運転管理改善の寄与率が約8割だった。しかしその後は運転管理改善の余地が少なくなったので、設備改善の寄与率が増大した。

これまで化学プラントに採用されてきた省エネルギー対策では、運転管理改善の領域では下記の実施例が多く、程度の差はあるが多くの化学プラントで採用されている。

- ① 加熱炉とボイラーの過剰空気低減（熱損失の低減）
- ② 蒸留塔の還流比低減（リボイラー熱量の削減）
- ③ 放散塔の吹き込み蒸気低減（蒸気使用量の抑制）
- ④ 反応器の水素/炭化水素比低減（水素使用量の低減）
- ⑤ 機器と配管の保温材補修・交換（放熱損失の軽減）
- ⑥ 熱交換器の伝熱管洗浄（汚れによる伝熱抵抗の低減）
- ⑦ ポンプインペラークット（動力損失の低減）
- ⑧ 計算法制御の拡大（原料や製品の条件変更や外乱に対する迅速な追随）
- ⑨ 発電量・スチーム圧・スチーム量の適正化（コージェネシステムの最適運用）
- ⑩ 運転管理目標値の厳格化（仕様要求過剰対応の抑制）

一方、設備改善の領域では下記の実施例が多く、多くのプラントで採用されている。

- ① 加熱炉に空気予熱器を設置（熱回収）
- ② 加熱炉バーナーを低過剰空気型に交換（熱損失低減）
- ③ 蒸留塔トレイや充填物を低圧力損失型に交換（動力損失低減）
- ④ 熱回収用の熱交換器増設（熱回収）
- ⑤ 排熱回収ボイラーの設置・増設（熱回収）
- ⑥ 加熱炉に給水加熱器・蒸気過熱器設置（熱回収）
- ⑦ フレアガスの回収利用（エネルギー有効利用）
- ⑧ 装置間の相互熱利用（ヒートインテグレーション、熱損失低減）
- ⑨ 圧力エネルギーの回収（動力回収）
- ⑩ コージェネレーション（電熱併給）の採用（エネルギー効率の改善）

次に示す表 3.1 は、日本の製油所が 2010 年度に実施した省エネルギー対策の内容と省エネルギー効果である。加熱炉への空気予熱器の設置が続いているのは、石油価格の高騰が背景にあると見てよいが、それだけまだ未設置の炉が残されていたのである。ヒートポンプの設置も大きな省エネルギー効果を発揮しているが、2000 年以降の圧縮機の加圧性能の向上と、圧縮効率の向上が寄与している。コンピューター利用による制御性の改善も大きく寄与しているが、IT 技術の高度化と低価格化の恩恵であろう。

表 3.1 2010 年度に日本の製油所で実施された省エネルギー対策の内容と効果

| | 省エネ対策の内容 | 省エネ効果 (原油換算 kI / 年) |
|----------|-----------------------------|------------------------|
| 精製設備への対策 | 塔槽および配管の保温・保冷の徹底 | 85 |
| | 加熱炉空気予熱器の設置・洗浄・取替え・廃熱ボイラー設置 | 4,956 |
| | 各種熱交換器の設置・洗浄 | 9,135 |
| | フレアーガスの回収 | 1,704 |
| | ヒートポンプの設置 | 14,394 |
| | 加熱炉の空気量低減 | 4,383 |
| | 精製装置間の相互熱利用 | 2,672 |
| | プロセスタービン設置 (圧力エネルギーの回収) | 2,175 |
| | ポンプ容量最適化 (インペラーカット) | 763 |
| | コンピューター制御の推進 | 10,718 |
| | 運転管理の見直し | 58,236 |
| | モーター化・コンプレッサー改良など、動力系の効率改善 | 3,265 |
| | 高効率機器の導入 | 1,566 |
| | スチームトラップ管理強化 | 1,864 |
| その他 | 33,302 | |
| 用役設備への対策 | 炉壁・各種保温材の補修・取替え | 140 |
| | 空気予熱器の設置・洗浄・取替え | 351 |
| | ボイラー空気量低減 | 118 |
| | 発電用スチームタービンの高効率化 | 97 |
| | コージェネレーションの導入 | 8,614 |
| | ポンプ容量最適化 (インペラーカット) | 56 |
| | コンピューター制御の推進 | 1,368 |
| | 運転管理の見直し | 5,834 |
| | モーター化・コンプレッサー改良など、動力系の効率改善 | 3,069 |
| | スチームトラップ管理強化 | 14,868 |
| その他 | 27,110 | |

日本石油連盟の 1980 年代の調査によると、設備改善による省エネルギー対策の 80%は、熱回収率の向上や熱損失の低減など、熱エネルギーの有効利用だった。残る 20%はオフガスやスチームコンデンセートのような物質回収と、タービンを利用する圧力エネルギーの回収だった。上記のような単位操作に付随する省エネルギー技術は重要であるが、1980 年以降、多くの対策がすでに採用されてきた。このため今後の省エネルギー対策は、単位操作付随技術だけでなく、プロセ

スの変革を含むエンジニアリング指向の対策がより大きな役割を果たすものと思われる。具体的には表 3.2 に示す対策が期待される。

表 3.2 今後の発展が期待される省エネルギーテーマ

| 運転管理の改善による省エネルギー | 設備の改善による省エネルギー |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ① 計算機制御の拡大 ② 高性能保温材の採用 ③ メンテナンス周期の適正化 ④ ヒートポンプ適用の利用拡大 ⑤ 低温排熱の回収 ⑥ 自家発電設備の高効率化 ⑦ 最適化運転の推進 ⑧ コージェネレーションの利用拡大 ⑨ 原料・製品貯蔵温度の最適化 ⑩ スチームトラップの熱損失低減 | <ul style="list-style-type: none"> ① 低温排熱のヒートポンプによる昇温利用 ② プレート熱交換器による小温度差熱回収利用 ③ 膜分離など省エネルギー型単位操作への変換 ④ 原料と副原料の変換 ⑤ 低温操作型触媒反応装置の採用 ⑥ 連続触媒再生システムの採用 ⑦ プロセス流体圧力の、膨張タービン、ハイドロリックタービンによる回収利用 ⑧ 燃料電池など分散型高効率発電システムの採用 ⑨ ガスタービン利用の拡大 ⑩ 近隣工場とのエネルギー融通 |
| <p>特長：① 新規要素技術を利用できるテーマ</p> <ul style="list-style-type: none"> ② 高度化 I T システム技術を利用できるテーマ ③ 設備管理の高度化テーマ ④ 原料や副原料の変換テーマ ⑤ 高性能触媒利用のテーマ ⑥ 地域的な協力を含むテーマ ⑦ 過去には経済性が低い理由で採用されてこなかったテーマ | |

前節で述べたように、化学プラントでは 100℃～150℃のプロセス排熱が大量に廃棄されている。このうち 100℃以上の排熱は、経済性さえ成り立てば高効率の熱交換器の利用で回収利用できるであろう。しかし 100℃以下の排熱は、プロセス側に熱需要がほとんどないであろう。したがって有効利用するとすれば、給湯や暖房の熱源として地域に供給する可能性がないか検討するのが望ましい。その場合は輸送が課題になるが、ドイツでは固体に蓄熱し、車両で輸送する方法が採用されている。もっとも望ましいのは、低温エネルギーを熱電対のように直接電力に変換する技術だが、まだ研究段階で実用化の段階にない。将来の技術開発に期待したい。

(その 3) に続く