

技術解説

Technical Review

加熱炉における効率的なエネルギー利用のすすめ

高村淑彦*

Suggestion of Effective Energy Using for Heating Furnace

Yoshihiko Takamura

Synopsis

The most important and universal problem in various industrial fields is minimizing CO₂ emissions, and its solutions for heating furnace are effective energy using and decreasing consumption of fossil fuel. The examinations of effective energy using and decreasing consumption of fossil fuel should be dealt with positively and systematically.

In this paper, the steps for saving energy will be described such as the sequence for analyzing present conditions for a whole system and be represented improvements about maintaining for burner systems, adjusting for air ratio and furnace pressure and estimating thermal loss for furnace openings quantitatively.

1. はじめに

我が国は中東の安価な石油に依存して1960年代には高度成長を達成したため、この時期には一次エネルギー供給構造における石油の占める割合が急激に増加した。1973年に第一次石油危機が勃発したことにより、石油の輸入量が大幅に減少するとともに、価格も4倍に急騰した。

この時点において、一次エネルギーに占める石油の割合は77%にも達しているとともに、その輸入先は78%が中東であったため、我が国は一次エネルギーの60%を中東に依存しているという異常な状態であった。

このような状況において、我が国は官民一体になってこの問題に取り組み、省エネルギーおよび石油代替エネルギーの開発に着手した。石油危機から数年間は経済活動が影響を受け、GDP（国内総生産）は一次停滞したが、その以後は着実に増加している。これに対し、1973年から2011年の間にGDPが2.4倍に増加しているにもかかわらず、エネルギー総使用量は1.3倍の増加

に留まっている¹⁾。

一方、1990年代に入ると、大気中の温室効果ガスによる地球温暖化が大きな問題となり始めた。我が国でも1990年10月に「地球温暖化防止行動計画」を地球環境保全に関する関係閣僚会議で決定した。また1992年にはリオ・サミットにおいて気候変動枠組条約が成立した。その後、1997年12月には気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）が京都において開催され、この会議において先進各国の排出削減目標を規定した「京都議定書」が採択された。我が国は1990年を基準年として第1約束期間（2008年から2012年）の5年間平均値で温室効果ガスを6%削減することとなった。

我が国の温室効果ガス排出量をみると、二酸化炭素の影響が全体の約90%となっていることから、この目標を達成するためには二酸化炭素の発生量を大幅に削減する必要がある。二酸化炭素の排出量を低減するための最も確実な方法は、省エネルギーによるエネルギー使用量の削減および化石燃料以外の代替エネルギー源の使用である。しかし、代替エネルギーへの転換に多

2013年11月1日受付

*東京電機大学 工学部 機械工学科, 工博 (Dr., Eng., Dep. of Mech. Eng., College of Eng., Tokyo Denki Univ.)

くは期待できないため、当面の二酸化炭素削減対策はエネルギーの有効利用、すなわち省エネルギーを一層強力に進め、化石燃料の使用量を削減することが確実な方法である。

2. 省エネルギー技術の体系

省エネルギー対策を実施する際の順序は、業種に固有のものであり個々に異なるが、すべての業種に適用可能な一般的な方法として以下の3段階に分類されている。

第1段階:管理強化,操業改善

既存の設備を前提とし、運転管理を強化したり作業方法自体を見直すことにより、その工程における無駄をできるだけ排除し、その工程で考えられる最適な操業方法を目指すものである。この段階では投資はほとんど必要とせず、必要な場合でも温度計や排ガス分析計など簡単な測定器程度である。

加熱炉において燃焼用空気量を適正量に厳密に調整することや、加熱炉ごとに決められている処理温度に厳密に調整することがこれに相当する。加熱炉の操業状況を均一にすることにより加熱炉自体の効率がよくなるだけでなく、製品の品質も向上することになり、製品の歩留りも改善されるため全体として大きな効果が期待できる。

また、第1段階を充分に行うことにより、現在使用している設備の長所や短所が明らかになり、設備更新時にも参考になる。このような経験を元にして、自社に導入する設備としてどのようなものが最適であるかが明確になり、メーカーと共同して新しい設備を開発することも可能になる。

第2段階:設備付加,設備改善

本体設備の変更はしないが、小規模の投資により設備を付加することや、一部設備の改善を実施するものである。例えば加熱炉の保温を強化することにより放散熱を低減することや、自動制御装置を採用することにより炉内温度を厳密に調整し、燃料使用量および供給空気量を最適に調整することにより、加熱炉の効率を向上するものである。

また、加熱炉では一般に排ガス温度がかなり高いため、排熱回収装置を設置して燃焼用空気の前熱に利用することが多いが、新たに排熱回収装置を設置することや、すでに設置されている場合でもさらに増強すること

がこの段階である。

省エネルギー対策を実施するとき、比較的簡単であるとの理由で、この第2段階から開始することが多いが、第1段階を十分に実施したあとに行わないと過大な投資をするおそれがある。加熱炉からの排ガスのもつ熱量は、炉内の処理温度が同一であっても供給する空気量によって大きく変化する。このため、第1段階を充分に行うことにより排ガス量をできるだけ少なくすることが必要になる。第1段階を行う前に排熱回収装置を設置し、そのあとで第1段階を実施すると排ガス量が減少して十分な熱量が得られなくなり、設置した排熱回収装置は過大となり過剰な投資をすることになる。

第3段階:プロセス変更,高効率設備の導入

第2段階までの対策を完全に実施し、現状の設備ではこれ以上の効率向上が望めないときには、設備自体を高効率なものに入れ替えることになる。このとき、従来と同様の設備と入れ替えるのではなく、第2段階までの経験を充分に生かすとともに、最新の技術についての情報を充分に収集し、メーカーと協力しながら自社に最も相応しい設備の導入をすることになる。

また、将来の動向なども見ながら、設備の処理能力、加熱熱源の種類、加熱方法、連続式かバッチ式か、さらには他の工程との連続化または工程自体の省略など生産工程全体を見直すことにまで及ぶこともある。工程が大幅に変更されるような場合には、製品性状が変化したり、生産性に影響が現れる場合があり、これらを解決するためには技術開発努力が必要になるが、期待される効果は非常に大きい。

大規模な工程の変更は、十分に時間をかけて詳細に検討しないと期待した結果が得られず、投資効果が予想したものより悪くなるばかりか、場合によっては生産工程全体として支障をきたすことも考えられる。日頃から中長期的な計画を立てておき、原料や製品の変化、エネルギー情勢、周辺技術の進歩などを考慮しながらプロジェクトチームを結成して検討を重ねることが必要である。

3. 省エネルギー対策を実施する際の基本的な考え方

エネルギーの使用状況は、業種や工場の規模、会社の歴史などにより異なるが、一般的には次のような考え方が基本になる。

(1) 目標の確認

生産工程においてエネルギーを使用するとき、エネルギーをどのような目的のために使用するかを明らかにしなければならない。加熱炉は当然のことながら材料を加熱することにエネルギーを使用するが、必要とする温度は何度であるか、加熱する速さは決まっているか、それぞれの許容幅はどの程度であるかなどを詳細に調査する。目的が決まれば、その目的を達成するための方法を幅広く調査し、材料の性質、生産量、エネルギー供給体制、既存の工程との整合性などを考慮しながら決定することになる。

また、同一の設備であっても、運転方法によりエネルギー使用量には大きな違いが出てくる。効率よく運転するための方法を考える際に注意すべきことは、省エネルギーの普遍的な目的を意識することである。つまり「必要な量のエネルギーを」「必要な強さ（圧力、温度）で」「必要とところに」「必要ときだけ」供給することを念頭に置くのである。この目的の達成を目指せば、具体的な方法がおのずと見いだされ、数多くの対策が提案されるであろう。

(2) 省エネルギー実施の3要素

省エネルギーは継続して実施することが重要であり、それぞれの段階に応じて実施する対策が異なる。しかしどのような段階にあっても必要となるのは以下の3要素である。

①記録する

エネルギー使用量と生産量からエネルギー消費原単位を計算して記録することが基本である。また、この記録を有効に利用して運転方法の改善に結びつけるために、グラフに表示してエネルギー消費原単位の変化を見ることが重要である。変化の様子が明らかになれば、効率を向上するための運転方法を検討することが可能になり、設備ごとに定められている標準的な作業方法の改訂に結びつけることができる。

②測定する

エネルギー消費原単位を記録するためには、エネルギー消費量を計測するための測定器が必要になる。また、設備を効率よく運転するには、温度や圧力などに基づく標準的な運転方法を設備ごとに決定しておくことが必要である。

設備の運転担当者は、標準的な運転方法に基づいて運

転することは当然であるが、運転中は装置の稼動状況について視覚や聴覚など人間の五感を最大限に利用しながら観察することが重要である。

③保守をする

どのような設備でも時間の経過とともに性能は低下する。新設時の効率の良い状態をできるだけ長く保ち、性能の低下をできるだけ少なくするためには保守が必要になる。設備に不具合が発生してから修理すると、大がかりな修理が必要になるだけでなく、製品の品質低下や納期遅れの原因となる。設備ごとに点検および保守する箇所と頻度を決めておき、それに沿って定期的を実施することが必要である。

(3) 省エネルギー対策の方向

工場において省エネルギー対策を実施するとき、実際に採用する対策を立案することになるが、これまでに実施された事例が数多く発表されているのでこれらを参考にすることになる。このとき、それぞれの事例が実施された背景を十分に認識しないと、自社に適した事例を見つけ出すことは難しい。すなわち、省エネルギー対策は、業種だけでなく、工場の規模、生産量、省エネルギーに関するこれまでの実績、さらには会社を取り巻く環境の変化やその省エネに対する習熟の度合い（初歩の段階であるのか高度な応用までが可能であるのか）までも含めて十分に考慮して対策を立案することになる。

省エネルギー対策の方向性を、初歩の段階から高度の段階まで各項目別に示すと Table 1 のようになる。

この中で、主なものについては以下ようになる。

①エネルギーの目的

初期の段階では、省エネルギーの目的はエネルギー使用量の削減に留まるが、エネルギーの無駄を極限まで低減すれば、それはさらに進んで製品の品質向上、職場環境の改善、地球温暖化の防止にまで及ぶことになる。

②対象とする範囲の拡大

初期の段階の省エネルギー技術は、対象とする範囲を設備の単体に限定しており、個々の設備の効率を向上すれば全体としての効率も高くなるものと考えられていた。しかし、個々の設備の効率が限界に近づくと、使用側での使用方法に目が向けられるようになり、エネルギー使用状況を調査し、適切な使用方法を検討することが多くなった。これによりエネルギー供給側での供給圧

Table 1. Trends of energy saving.

Item	Trend	
	First step	Advanced step
Aim	Improvement of qualities	
	Reduction of energy using	→ Improvement of working environment
	Prevention for global warming	
Target	Individual equipments (Partial)	→ Whole of factories and buildings (Total)
Measure	Measurable loss	→ Unmeasurable loss
Complexity	Individual technology	→ Combined technology
Principle	1st law of thermodynamics	→ 2nd law of thermodynamics Cascading transmission
Expenditure	Only for equipments	→ Equipment + Running cost + Uninstallation cost
Driving force	Regulation	→ Incentive
Know-how	Indivisual	→ Combined
Supply of energy	One way	→ Interactive

力や温度の見直しが可能となり、大幅な省エネルギーが達成できる。場合によっては、加熱源としてボイラからの蒸気を使用していたものが、別の設備からの廃熱で十分であることがわかったり、温排水を熱源とするヒートポンプで十分供給できることもある。

また、設備を単体で使用するのではなく、それらを組み合わせ、一体として使用すると、全体的な効率を大幅に向上することが可能となる場合もある。エネルギー源として電気と熱を使用する設備では、コージェネレーションにより電力と熱を同時に発生すれば、全体としての総合効率を大幅に向上することができる。

従来のエネルギー管理では、熱と電気の専門家がそれぞれ個別にエネルギー管理を実施していたが、今後は熱と電気のエネルギー源としての特質を十分に理解し、それぞれの特長を生かして使用することが求められる。このため、自分の専門とする部門の知識は従来と同じように身につけるとともに、他の分野についても知識を付け加えることにより、広い視野からエネルギーの効率的な使用を検討することが求められる。

③改善の内容

改善対策を考えると、初期の段階では損失の大きな箇所を見つけだすのは比較的容易であり、これらを改善することにより大きな効果が得られることが多い。しかし、ある程度進んでくるとこれらの改善による効果は非常に小さなものとなり、大きな損失は外面的には気がつかないようなところに存在するようになる。例えば、ほ

とんどすべての電気機器は定格に近い負荷率では高い効率を発揮するが、負荷の低いところで使用する時間が長いと平均的な効率は大幅に低下してしまう。また、加熱炉では炉自体の効率が高くても内部に装入する材料の量が少ないときには、エネルギー消費原単位で考えると非常に悪くなってしまふ。このような損失を定量的に分析し、生産量に応じた最適な操業方法を見つけ出すためには、エネルギー消費原単位を詳細に分析することが必要になる。

生産量によるエネルギー消費原単位の変化を解析することにより、操業条件によるエネルギー消費原単位の変化が明確になる。一般に、設備で消費するエネルギーは、生産量に比例する部分と生産量に関わらず一定となる固定部分に分けられるが、固定部分のエネルギーをいかに少なくして生産量とエネルギー消費量が比例することを目指すことが必要になる。

④技術の応用範囲

省エネルギー対策において基本的な項目である不使用时の停止や加熱炉の保温強化などは、どのような設備にも採用できる汎用性のある対策であるが、これらの対策を実施した後は、個々の設備に独特なものになっていく。類似の設備を使用していても処理する対象物の違い、負荷率など操業状況によってその対策の適否が違ってくるため、エネルギー使用状況を十分に把握して独自の対策を実施していくことが必要になる。しかしながら、今日では人員削減などの影響によりエネルギー管理

担当者の交代が多く、これらの技術の伝承が十分に行われなくなっていることから、担当者がエネルギーの使用状況を把握しているとは言い難くなっている。これらの問題を解決するためには、エネルギー関連のデータを社内で共有することにより、エネルギー管理の担当者だけでなく、全員の知恵を出し合って対策を進めていくことが必要となってくる。

⑤対策の進め方

基本的な対策を実施した後、さらに進んだ対策を実施するときには、それぞれの対策が全体計画の中でどのような位置を占めるかを十分に考えながら実施することが必要になる。実施する順序が間違っていたため、後から実施したものが十分な性能を発揮しなかったり、個々の対策はよくても全体としてのバランスを考えると適切ではないようなものも見受けられる。このようなことを避けるためには中長期にわたる全体的な計画を立案し、全体の中でのそれぞれの対策の位置づけを考えながら実施していくことが必要になる。省エネルギー対策があまり進んでいないような初期の段階では、目に付いたものを手当たり次第に実施していけばよいが、基本的な対策を実施した後は、中長期的な計画を立て、実施すべき順序に従って一つずつ積み重ねていくことが必要になる。

⑥エネルギー供給方式

工場においてエネルギーを使用するとき、供給担当者は使用側が要求する量を確実に供給するため、常に供給量に余裕を持たせた設備を設置する。一方、使用側は必要な量のエネルギーが供給されないと作業に支障が生じるため、供給側での事情はまったく考慮することなく実際に考えられる最大の使用量より少し多めの使用量を申告する。このため、工場の受電設備は実際の使用量から見ると過大となっており、かなりの無駄が見受けられる。受変電設備は最大負荷に合わせて設備の容量を決定するが、負荷が低い範囲で使用する時間が長くと全体としての平均効率は大幅に低下してしまう。エネルギーの使用側と供給側がこのようなお互いの事情を十分に理解して供給したり使用すれば、過大設備の導入もなくなり全体としての効率も改善することが可能となる。すなわち、エネルギー供給側が使用側の要求に基づいて一方的にエネルギーを供給するのではなく、供給側と使用側が互いにエネルギー使用方法について検討を繰り返し、互いの事情を考慮しながらエネルギーの供給と使用を行うような体制を確立することが必要になる。このよ

うな対話型のエネルギー使用体制を確立することにより、ただ単にエネルギーの使用を平準化するだけでなく、製品の品質向上および作業工程の改善にも結びつけることが可能となる。

4. 省エネルギー対策の実施方法

(1) エネルギー使用状態の把握

エネルギー管理の基本は、エネルギーの使用状態をできるだけ詳しく把握することである。エネルギー使用部署ごとの使用量や時間的な変化などを測定すれば、効果的な対策が立て易くなる。エネルギー使用状態からみると固定分と変動分に分けられるが、削減するための方策はそれぞれ異なる。それぞれについて損失がどの部分で大きいかをエネルギー使用記録や測定値から判断し、削減するための方策を検討する。

また、各エネルギー使用設備について定期的にエネルギー診断を行い、エネルギー使用状態の経時変化を見るときともに各種省エネルギー対策を立案してその効果を検討する。

(2) 対策実施効果の把握

エネルギー対策実施後のデータを実施前と比較することにより効果の把握をできるだけ正確に行う。期待どおりの効果が得られなかったときにはその原因を徹底的に追求する。このような検討を十分に行うことにより、次の対策を実施する際の予測精度が増し、独自の省エネルギー手法が確立できる。

(3) 計測器の確保および測定方法の確立

エネルギー使用状態を正確に把握するには数多くの測定器が必要になるが、そのデータをどのような目的で記録するかにより使用する測定器の種類および測定場所が異なる。測定器や測定場所の選択を誤ると本来の目的が達成されないばかりでなく、使用状況を間違えて解釈することにもなりかねない。

また、測定器は運転上必要なものとデータ記録用とは区別し、操業用としては精度よりも標示が見やすいことに重点をおくべきである。とくに事務室の室温などは室内のどこからでも現在の室温がわかるように大型の温度計を設置すべきである。また、空気吹き出し量や水の流量なども簡単な装置を工夫することにより測定が可能であり、正確な値はわからなくても設定値が守られているかどうかなどは明確に感知できる。

(4) 総合的な管理の実施

エネルギー管理担当者の職務は、エネルギー使用設備の維持、使用方法の改善および監視であるが、既に設置されている設備自体が過大容量となっており問題となることが多い。エネルギー消費設備を導入する際には、計画段階からエネルギー管理担当者を参加させ、エネルギー供給面および使用面での問題点などを検討する必要がある。

(5) 啓蒙普及活動の実施

省エネルギーを効果的に実施するにはエネルギー担当者だけでなく、従業員全体がその意識をもつことが必要になる。このため、エネルギー使用についての基礎的な知識や現状での問題点など、エネルギーの有効利用に関する情報を定期的に伝えるとよい。

5. 加熱炉を効率的に運転するための管理方法

(1) バーナの管理

① 適正なバーナの選定

各燃焼装置ともバーナは最大負荷時を基準にして取り付けられているが、実際に運転されている状況を見ると最大負荷は1日のうち数時間程度で、その他は極端に低負荷で運転されていることが多い。負荷率が低いときにはバーナを on-off させることにより加熱量を調節しているが、on-off の回数が多くなるとバーナ停止時の放熱損失が増えるだけでなく、点火と消火を繰り返すためバーナに対しても好ましくない。

燃焼量を加減して連続燃焼している場合でも、あまり低負荷で運転すると燃料の圧力が下がりバーナの霧化が悪くなるだけでなく、供給空気の数も下がるため燃料と空気の混合が十分に行われず、燃焼状態が悪くなる。このため、定格燃焼時に比べて空気比をかなり大きくしないと不完全燃焼が発生することになる。

このように、燃焼量が可変のバーナでも定格燃焼時以外では燃焼状態がかなり悪くなり損失も多くなるため、低負荷で運転する時間が長いときにはバーナを小容量のものに交換したり、小容量のものを複数個用意して、そのバーナの定格値付近で運転するようにしたい。

② バーナの手入れ

液体燃料を燃焼させるには燃料を霧化し微小液滴として空気と混合している。しかし、バーナの手入れが悪いとバーナチップの先端にカーボンが付着し、噴霧される液滴の径が大きくなるため不完全燃焼を起こしたり、液滴の分布が不均一になり空気不足の場所ができたりする。さらにひどい場合には油滴が直接バーナタイルに垂れるようになり、バーナタイルにカーボンがたまることになる。かなり多めの空気を送っても不完全燃焼が発生する場合にはバーナチップを調べてみる必要がある。

カーボンが付着する原因として、重油加熱温度の不足、噴霧圧力の低下、一次空気不足による霧化の悪化などが考えられる。このなかでも、重油の粘度は温度によって大きく変化するため、使用する燃料に適した温度まで加熱する必要がある。

(2) 空気比の調整

燃焼装置で空気量が少ない場合、不完全燃焼を起こし煙突からススが発生するため、すぐに気が付く。しかし、空気量が多い場合にはどれくらい多いか見当がつかないため見過ごされる場合が多い。ところが供給する空気量を増すとともに排ガス量も増加するため、排ガス温度を一定とした場合、排ガスの持ち去る熱量は空気量に比例して増加する。また、空気比に対する排ガス損失の割合は、排ガス温度が高くなると急激に増加する。加熱炉などでは排ガス温度が1000℃に近いので80%程度が排ガス損失となっている。

排ガス損失を少なくするためには、供給空気量を少なくして空気比をできるだけ小さくすればよいが、小さくしすぎると不完全燃焼を起こし、燃料中の可燃分が十分に燃焼熱を発生しないまま排出されるため、未燃分による損失が増えることになる。これらのことを考えると、排ガス損失を最小にするには排ガス顕熱による損失と未燃分による損失の合計が最小になるような空気比を選べばよいことになる。排ガスの顕熱は空気比にほぼ比例して大きくなり、未燃分は空気比1付近で急激に増加するため、これらを合計するとある空気比で熱効率は最大となる。このように決められる空気比は燃焼室の形状やバーナの形式によって異なるが、液体燃料の場合でも1.30以下、気体燃料であれば1.20以下に調整できるはずである。

燃料として都市ガス13Aが使用されている加熱炉において、空気比を1.30から1.10に調整した場合、燃料がどれくらい節約できるかを計算してみる。Fig. 1は排

ガス温度をパラメータとした空気比の調整による燃料節約率を示している。ここで（調整後の空気比）＝（調整後の投入空気量）／（理論空気量）、燃料節約率＝（空気比調整前の燃料使用量－空気比調整後の燃料使用量）／（空気比調整前の燃料使用量）を空気比の調整幅の0.1あたりに規格化したものである。

加熱炉の排ガス温度を900℃とすれば、Fig. 1において調整後の空気比が1.10であることから、空気比低下0.1当たりの燃料節約率は6%と読み取れる。ここでは空気比の低下が0.2であるため、燃料使用量が12%低減できることになる。

また、空気比が極端に大きい場合には燃焼温度も低下しており、加熱物への伝熱も十分に行われないため排ガス温度が上昇することも多く、燃料節約率はここで計算した値よりさらに大きくなる可能性もある。さらに、過

剰空気が多いと燃焼ガス中に多量の酸素が存在することになり、加熱炉においてはスケールの発生が促進され、加熱後のスケール処理に手間がかかるという問題も生じる。

常に適正な空気比で運転するためには排ガス分析を行って空気量を調節する必要があるが、最近では簡単な酸素分析計があるので排ガス中の酸素によって空気量の適否を判断するとよい。なお、排ガス分析は燃焼装置の出口近くの漏入空気のないところで行うようにしたい。煙道は負圧になっていることが多く、外気が進入しやすいが、このような場合には排ガス分析しても燃焼状態を判断する手がかりにはならない。燃焼管理を厳密に行うには、燃焼装置の出口に近いところに排ガス採取孔を設置すべきである。

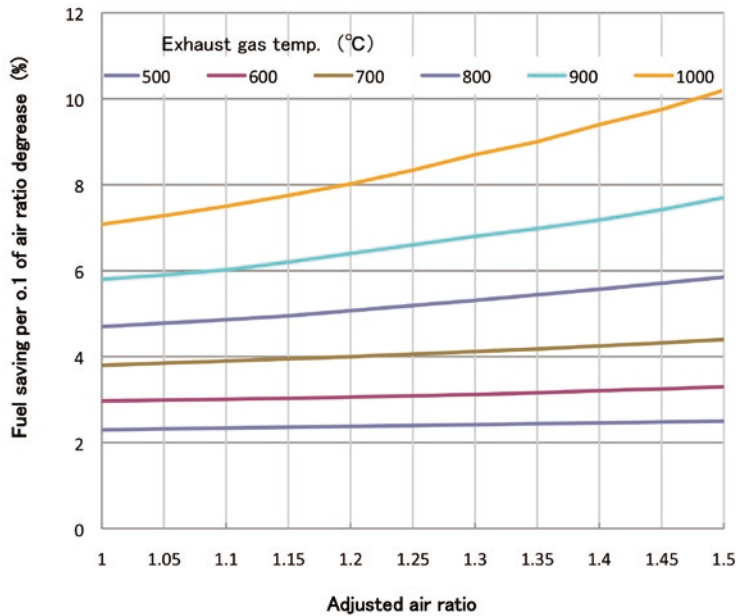


Fig. 1. Saving ratio with adjusting of air ratio (city gas, 13 A).

また、空気比を調整する場合に留意すべき点は、空気調節弁の開度と燃料調節弁の開度を比例制御していても空気比は必ずしも一定にはならないということである。これは、弁開度と流量の変化の関係が燃料と空気では異なるためである。とくに、低負荷の場合には流量の正確な調節が一層難しくなるため空気比が不安定になりやすい。また、弁開度が一定であっても調節弁の前の圧力が変われば流量が変化するので、油圧や空気圧を測定してつねに適正值に保つように心がけるべきである。

(3) 炉内圧の調整

加熱炉には材料の装入口や抽出口あるいは炉の天井や側壁部分の亀裂など多くの開口部があるため、炉内圧力の大小により炎が吹き出したり、外気を吸い込んだりする。炉内圧力が高くて放炎しているときには熱効率から考えて好ましくないばかりでなく、放炎している部分の壁を損傷したり作業所内部の環境を悪くするので、煙道ダンパの開度を調整し炉内圧を適正值にする必要がある。

炉内圧が外気より低いときには、冷たい外気を吸い込むため炉内が冷却され、炉内を所定の温度に保つには余分の燃料が必要になる。さらに、バーナには適正な空気量を送っていても、炉内は過剰空気の多い燃焼となり、排ガス量が増えるため排ガス損失が大きくなる。

炉内圧の調整が十分でないとき、燃焼ガスの噴き出しや外気の吸い込みが発生するが、このような場合の損失熱量を炉内温度 900℃、周囲温度 30℃、開口部の面積 0.1 m² について計算すると Fig. 2 のようになる。「+」は吹き出しがある場合、「-」は吸い込みがある場合を示している。吹き出しがある場合は、工場内の環境が悪化するためすぐに気が付くが、吸い込みがある場合には大量の損失があっても問題に気付くことは難しく、そのまま放置されることが多い。例えば炉内圧力が周囲よりわずかに 10 Pa 低い場合についてみると、損失熱量は 300 kW にも達することが分かる。炉内温度を 900℃、開口部の面積を 0.1 m² としているが、損失熱量は炉内温度と周囲温度との温度差および開口部面積に比例するため、他の条件についてもすぐに計算できる。

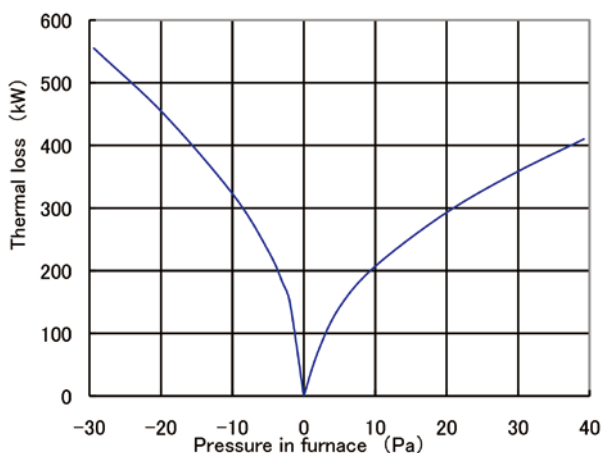


Fig. 2. Thermal loss at open end.

また、外気が侵入することにより炉内の燃焼ガスの流動状態が変わり、温度分布も不均一になるため、燃焼ガスから処理物への伝熱量も減少することになる。このほか、炉内には過剰な酸素が大量に存在するため、被熱物のスケールが大幅に増えることになる。

炉からの吹き出しや漏れ込みを防ぐには、煙道ダンパにより炉内圧力を炉床付近で + 0 Pa、すなわちほんの少し吹き出しぎみにしたり、開口部をできるだけ少なくするように努力する。なお、炉内圧力の少しの変化で吹き出し量や漏れ込み量は大幅に変化するため、ダンパの調節は慎重に行う必要がある。

加熱炉の内部では高さ方向にも圧力の分布があり、位

置が高くなるほど外気との圧力差が大きくなる。例えば、炉内温度が 1000℃ のとき、高さ 1 m につき約 10 Pa の割合で変化する。そこで、炉の底部における開口部を基準面と考え、基準面における圧力が 0 Pa となるように調整しても、基準面より上方の位置における圧力は外気の圧力より高くなり、外部との圧力差は天井付近で最高となる。

このように、加熱炉では煙道ダンパにより炉内圧力を正確に調整することが不可欠であるため、常に炉内圧力を測定しながらダンパをこまめに調節しなければならない。一方、ダンパで炉内圧力を正確に調節しても高さ方向に圧力差が生じるため、基準面以外では外部との圧力差が必ずできることになる。そこで、炉内圧を適正に調整すると同時に開口部をできるだけ少なくすることも必要である。このことから、炉の天井や側壁などのレンガの亀裂は、見つけ次第すぐに修理する様にしたい。しかし、材料の装入口などは操業上どうしても必要なものであるためやむを得ないが、次のような工夫をすることにより損失を減らすことができる。

- ・材料の大きさに応じて装入口を調節する。
- ・材料の形状をみて長手方向に断面積が小さくなるように装入する。
- ・装入口を二重にする。
- ・のれん状のカーテンを設置する。

(4) 炉壁からの放熱防止

加熱炉では炉内温度が高いため、炉壁からの放熱量が大きくなる。このため、炉壁の断熱を十分に行い、放熱量をできるだけ減らすようにしなければならない。壁からの放熱量を減らすには、炉壁を熱伝導率の低い材料で作ることが必要になる。ただし、加熱炉では、炉壁温度がかなり高くなることを考慮する必要がある。断熱材料にはいろいろな種類があるが、使用できる温度範囲が材料によって異なるため、炉壁各部の温度を計算しながら材料を決めなければならない。とくに、炉壁材料の組合せは同じでも、配列方法によって各々の材料の温度が異なるため注意する必要がある。

またバッチ式の加熱炉では、炉壁への蓄熱量も考慮しなければならない。炉壁の熱通過率すなわち断熱特性が同じであれば放熱量は同じになるが、蓄熱量は材料の熱容量によって異なる。このため、間欠的に使用することが多い加熱炉ではできるだけ熱容量の小さい断熱材を使うとよい。

(5) 操業方法の検討

これまで述べた各項目は、加熱炉自体を効率よく使用するためのものであるが、実際に問題になるのは、単位の材料を加熱するのにどれだけの燃料を使用するか、すなわち燃料消費原単位である。操業方法が同じであれば、加熱炉からの損失熱量を少なくすれば燃料消費原単位も低下するが、単位時間当りの投入量が異なれば、燃料消費原単位は大きく変化する。このため、材料の投入量は加熱炉の容量に合わせるようにしなければならない。

また、種類の異なる材料を処理するため設定温度を頻繁に変化させるときには、温度調節のための待ち時間をできるだけ短縮するような操業方法を予め検討しておく必要がある。

設定温度についても、必要な温度より一般に高めに取ることが多いが、必要以上に高く設定すると大きな熱損失となる。とくに、必要な加熱温度が高い場合には、燃焼ガス温度と被加熱物の温度差が小さいため、設定温度を少し変えただけでも燃料使用量は大きく変化する。このため、設定温度の決定は慎重に行う必要がある。

(6) 排熱の回収

加熱炉では排ガス温度が高いため、燃焼管理を十分に行っても排ガス損失が非常に大きくなる。このため、加熱炉の熱効率を飛躍的に上げるには、排ガスの顕熱を回収して有効に利用することが必要になる。

排ガスの顕熱を利用する方法にはいろいろあるが、どのような場合にも適用でき効果が高いのは、その装置自体で使用するものである。すなわち、加熱炉に挿入する原材料の予熱や、燃焼用の空気の予熱に排ガスを利用するものである。なかでも一般的なものは、燃焼用空気の予熱であり、燃料として都市ガス 13 A を使用する加熱炉において、排ガスにより燃焼用空気を予熱した場合の燃料節約率を計算してみる。Fig. 3 は予熱空気温度をパラメータとした排ガス温度による燃料節約率を示す。ここで燃料節約率は 5. (2) に示したとおりである。Fig. 3 によれば排ガス温度が 900℃ のとき燃焼用空気を 500℃ まで予熱すると、燃料使用量を約 27% 節約できることがわかる。最近では、小型の蓄熱器をバーナと一体化したリジェネレイティブバーナが、加熱炉の燃焼用空気の予熱に広く使用されている。

このほかの利用方法として、他の装置の熱源としてそのまま使用したり、温水や蒸気を発生するために排熱ボイラを設置することも考えられる。ただし、このような場合には、排熱を発生する装置と使用する装置との関係、すなわち排熱を使用する装置で必要とする熱量、温度範囲、運転時間、場所的な関係などを十分に考慮して決定しなければならない。

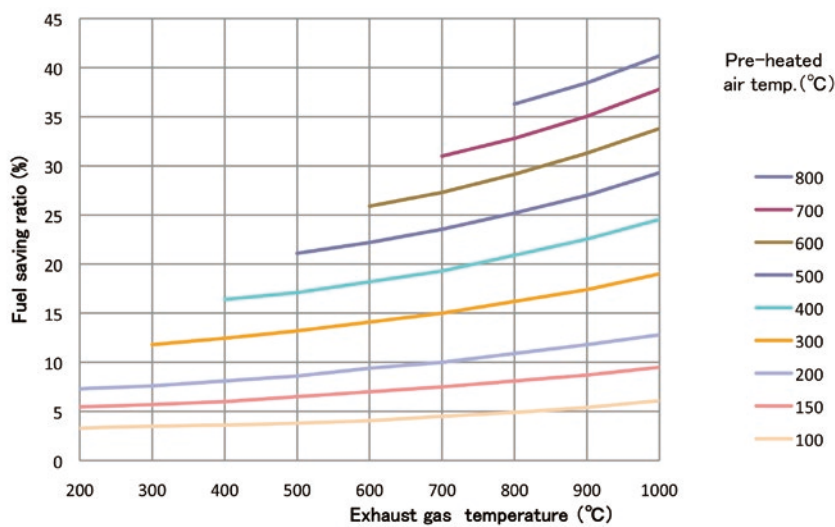


Fig. 3. Exhaust gas temperature and fuel saving ratio (city gas, 13).

おわりに

これまで主として燃料の燃焼熱を熱源とする加熱炉を中心に述べたが、電気を熱源とする加熱炉についても、燃焼用のバーナを部分を除けば、実施すべき省エネルギー対策は共通である。

加熱炉は今後も効率向上を目指してさらに運転管理を徹底すべきであるが、効率が向上する余地はあまり多くはない。効率の大幅な向上を目指すためには、加熱炉自体について発想の転換を図る必要がある。軽量で断熱性の優れた断熱材の開発、処理する材料により大きさが自由に変えられる柔軟性のある加熱炉、加熱炉雰囲気による加熱ではなく材料の直接加熱、燃焼熱と電気の併用による効果的な加熱、排ガスによる直接発電など自由な発想による画期的な加熱炉の出現を期待している。

(文 献)

- 1) エネルギー白書 2013, 経済産業省資源エネルギー庁編(2013)