



入門講座

伝熱工学-8

燃焼による高温加熱技術

High-temperature Heating Technology via Combustion

中村祐二
Yuji Nakamura

豊橋技術科学大学
大学院工学研究科 機械工学系
教授

1 はじめに

鉄鋼製品の生産過程では、製品の品質を担保するため高温状態を維持することが必要不可欠となる場面・行程が多数ある。その実現のために様々な加熱機器・加熱技術が導入されていることは周知の事実である。当然のことながら、加熱するためには何某かのエネルギーを投入する必要があるため、導入される加熱機器に対しては、十分な加熱性能以外にも省エネルギー化や脱炭素化などの(世相を反映した時代特有の)性能要求が追加される。惜しむらくは「低コストでエネルギー消費量を抑えつつ無尽蔵に加熱可能な機器」は存在しない。そのため、様々な特徴を有する加熱機器を適材適所で用いることで、生産行程全体としての最適化(コスト・生産性)を模索することになる。その意味において、導入候補となる加熱機器の特徴や能力を正しく把握することは有意義である。

具体的な例を挙げてみよう。図1に東京ガスのHPに記載

されている「鉄鋼過程における加熱要求」の模式図¹⁾を引用する。ここからわかるように、各行程で用いられる加熱機器はそれぞれ異なり、当該行程で満足すべき性能(ここでは到達温度がその一例)を満たすような選定がなされている。例えば、溶解段階においては、炉内を鉄の融点を超える高温(～1800℃)にするために電気加熱に燃焼熱を加えることでこれを達成させている。その後、取鍋受入行程、鍛造・鍛造・圧延などの加工行程で満たされる温度を保つための加熱、最終的には適正な熱処理をするための加熱等が加わり、様々な形での鉄鋼製品が出来上がる。ある場合は製品そのものを直接炎で炙ることで加熱し、あるときは製品を受ける容器(鍋)を炎で加熱する。これらは到達温度ではなく、それ以外の加熱時性能要求に応じて選択される。この例からもわかるように、加熱機器の導入はまさに「適材適所」の概念に準拠する。本稿では、特に燃焼を活用した高温加熱技術について取り上げて、加熱機器および加熱技術について解説する。前半では加熱機器の種類と特徴について整理し、後半では省エネルギー

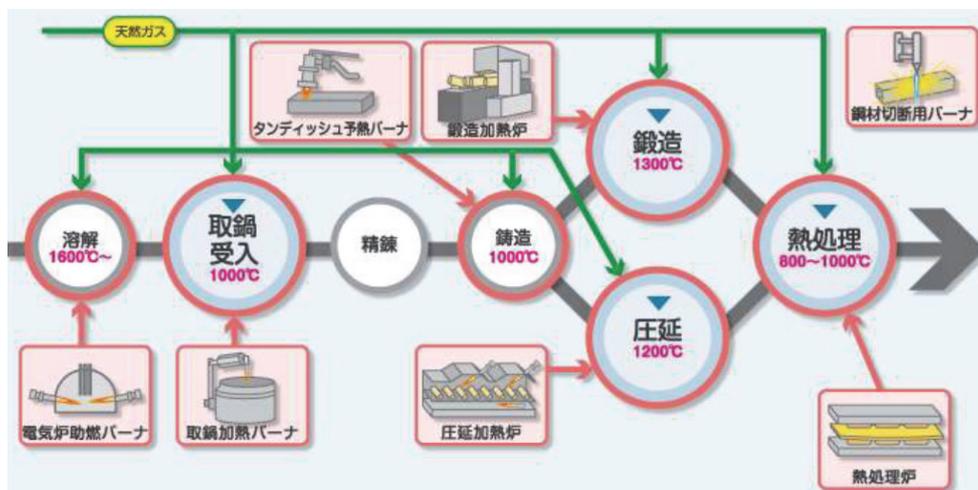


図1 鉄鋼過程における加熱プロセス(Online version in color.)

ギーあるいは低炭素化を実現する技術例を紹介する。紙面の都合により、全ての加熱機器をカバーすることはできないため、あくまで一部であることはご了承願いたい。

2 加熱装置の役割と原理

2.1 加熱機器が内包する機能：①エネルギー変換と②伝熱

一言に加熱機器といっても様々な種類があることは前記の通りである。しかしながら、その主たる用途は共通しており「被加熱物の温度を高める」ことに尽きる。より科学的に言えば、「被加熱物の内部エネルギー（顕熱）を上昇させる」ことである。保存量であるエネルギー上昇をもたらすためには、それに相当するだけのエネルギー投入が不可欠であり、手っ取り早く大量の熱エネルギーを獲得するには、化学結合などで蓄積されている化学エネルギーを熱エネルギーに変換する「燃焼」が選択されることが多い。もちろん他の形態のエネルギー変換で熱にすることもあるが（電気→熱等）、コストや変換効率を考えると燃焼に分がある。燃焼によって得られる熱エネルギーを被加熱物に「押し込む」ことで目的が達成される。このとき、化学反応により解放された熱エネルギーの「一部のみ」が加熱に使われることに留意しなければならない。まとめると、加熱装置とは「①エネルギー変換をしつつ②変換された熱エネルギーを被加熱物に伝える」という2つの機能を併せ持つデバイスでもある。したがって、加熱機器の性能や特性を理解する場合、この①②の両者に分類して考えるとわかりやすい。もちろん前者は燃焼過程であり、後者は伝熱過程である。なお、電磁波を使って直接構造物の分子運動に働きかけて内部エネルギー上昇をもたらす装置も存在するため（電子レンジ等）、全ての加熱機器を①②で分類できるわけではない。ここでははじめに断ったように、「燃焼を活用した高温加熱技術」に特化していることは再度強調しておく。

さて、加熱装置の性能評価を考えるにあたり、よくある間違いとして「大量に（熱）エネルギーが投入されれば加熱機器としては十分」という指針である。要するに加熱したけれ

ばどんどん燃料を投入すればよい、という考えである。ある意味これは正しいが、常にこれが正しいとは限らない。一例をあげてみよう。一般の鉄鋼現場においては被加熱物である鉄鋼材料は上流から下流へ輸送しながら連続的に全ての過程が連なるため、当然ながら加熱もその「移動過程」において行われる（図2）。この移動速度を U [m/s] とする（別の表記をすれば加熱行程長さ L を加熱装置内の滞在時間 τ で除したものと等しい）。 V [m³] を被加熱物の体積、 ρ [kg/m³] を密度、 C [kJ/(kgK)] を比熱、加熱装置内で被加熱物に与える熱量を Q [kJ/s] としたとき、加熱装置を通過する前の温度 (T_a) から加熱装置後の温度 (T^*) まで温度上昇させるには以下の等式（＝エネルギー保存式）が成立しなければならない。

$$\rho C \frac{T^* - T_a}{\tau} V = Q ; \rho C U \frac{T^* - T_a}{L} V = Q$$

もちろん加熱装置の役割は T^* を目的温度に到達させることである。被加熱物の密度や比熱は選べないため、ここでは選択の自由度のない「定数」として扱う。鉄鋼生産能力としては V が大きく τ が小さい（または U が大きく L が小さい）ほどよいため、それを満たすには Q を大きくすればよい（ほぼ自明である）。こう考えると「投入熱量を増やせば加熱能力が上がるじゃないか」ということに何の問題がないように見えるが、注意すべきは Q は「単位時間当たり被加熱物に投入される熱量」であり、「単位時間あたり加熱装置に投入される熱量 (Q_i)」ではないことにある。

加熱装置内に大量の燃料を投入して燃焼すれば、当然のことながら Q_i は大きくなる。入熱量 Q_i のうち、その一部は加熱装置内の温度を保つのに使われ、一部は装置外に逃げ、一部は排ガスとして捨てられ、それらの残り分が被加熱物に浸透する。燃焼のために大量に燃料と酸化剤を装置内に吹き込めば、その分排気ガスも大量となり排熱量も増える。もし Q_i を増加させた分だけ排熱が上昇すれば、被加熱物に導入される熱量 Q には何も影響しない。すなわち、いたずらに投入燃料を増やせば全て解決するわけではなく「投入した熱量のうち、

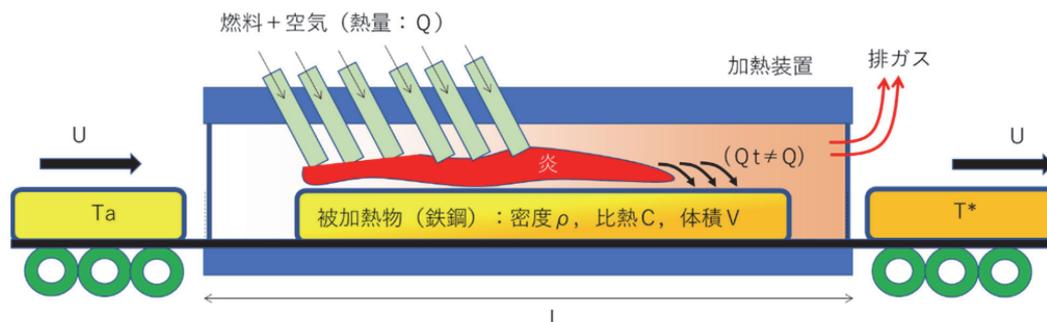


図2 移動する被加熱物（鉄鋼）に対する加熱課程の模式図 (Online version in color.)

どれだけを被加熱物に与えることができるか]が重要となる。先に示した分類の話に戻れば、 Q_f を増やすことが①であり、最後に示した点が②に相当する。もしも、投入熱量のうち多くの割合を被加熱物に与える(=熱を押し込む)ことができたなら、その加熱装置は省エネに資する。このように加熱性能を決める因子は①よりも②であることが多く、逆に言えば加熱装置個々の特徴は、如何にして②を目的を満たすように設計するかに基づく。

2.2 複数種の加熱装置が必要な理由：役割と性能による「適材適所」

上記の②、すなわち被加熱物に対してどうやって熱(エネルギー)を「押し込むか」は、先の通り「伝熱過程」である。すでに先の講座²⁴⁾で学んだ通り、伝熱には、対流熱伝達、伝導伝熱、輻射伝熱の3種類があり、熱の輸送は、単位面積当たり、単位時間あたりに輸送されるエネルギー量(熱量)を示す「熱流束」によって評価される。どの加熱形態かに依存せず、単純に熱流束が大きいほど大量に「押し込む」ことができる(もちろん加熱は表面から行われるため大きな表面積を持つ被加熱物であれば加熱には有効であるが、これは加熱装置の性能とは無関係である)。

被加熱物の表面から押し込まれた熱エネルギーは、被加熱物内部に伝導によって浸透してゆく。この浸透速度は温度勾配によって決まるため、加熱される被加熱物表面温度と内部温度の温度差を大きくすればよい。そのためには、表面に対して大きな熱流束を与えることが有効であり、これが実現すればいち早く被加熱物内部まで加熱できる。

大きな熱流束を与えるためには、高温のガスを被加熱物表面にぶつけてやればよい。これは「衝突噴流熱伝達が熱伝達率を大きくできる伝熱形態」であることに基づく。しかしながら、高温の燃焼ガスを被加熱物に対して直接射出することは、その表面へ燃焼生成物(煤などの炭素粒子)の付着や、燃焼活性種(ラジカル)による表面反応(酸化あるいは還元)が促されるため、被加熱物である鉄鋼製品の質に影響を及ぼし得る。その懸念が重視される場合、燃焼ガスを直接被加熱物に作用させることは諦めて他の伝熱方法に頼ることになる。具体的には、輻射伝熱、または、被加熱物を容器(鍋)に入れ、その鍋に燃焼ガスを当てて「間接伝熱」するなどである。前者の方法としては、高温の燃焼ガスで耐熱材料を加熱し、赤熱した耐熱材料からの輻射熱を得る場合が多い。これらの加熱方法では、直接燃焼ガスを当てるよりも加熱装置内の構造も複雑化するものの、被加熱物の表面と燃焼ガスとの間の(熱のやり取り以外の)化学および物理的な相互作用を抑えたいという要求が高い場合は選択の余地がない。逆にいえば、そのような表面への作用を気にしなくてもよい場合は、

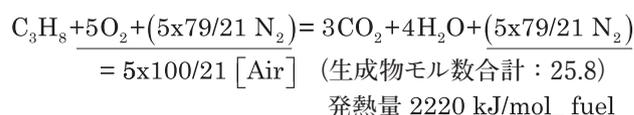
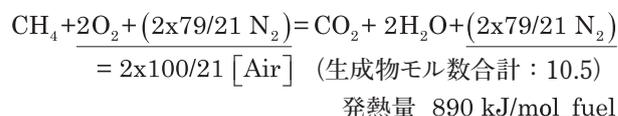
燃焼ガスを直接吹き付けて加熱する方式が採用される(溶鋼鍋を加熱する場合などはそれである)。

3 高温をもたらす燃焼原理：高酸素燃焼

①の基幹燃焼技術としてはどんなものがあるだろうか。通常の燃焼場よりも高温場の形成が求められる際、「高酸素燃焼技術」が用いられる。この原理について簡単に解説する。

様々な燃料を空気中で燃焼させて熱エネルギーを得る場合、発熱量の高い燃料を用いると高温が得られる、と思われがちである。もちろんそれはある状態では正しいが、常に正しいわけではない。発熱量が増えれば、高い熱流束を与えることが可能なので、加熱には有利に働くが、(一見矛盾して聞こえるかもしれないが)発熱量が異なる燃料でも空気中で燃焼させて到達できる最高(火炎)温度には大差はない。前者は合点がいくが、後者は直ちに受け入れ難いのではあるまいか。以下、例として、発熱量の異なる2つの燃料(メタンとプロパン)を用いて後者の説明を試みる。この説明が高酸素燃焼で高温を得る理由に直接つながる。

メタンとプロパン、それぞれ1モルが完全燃焼したときの化学反応式は以下の通りである。



燃焼は「化学エネルギーを熱エネルギーに変換する」過程であることは述べた。燃焼反応(左の反応物から右の生成物へ変化する過程)が進行すると、もともと反応物が分子構造を維持するために保有しているエネルギー(=反応物の標準生成エンタルピー)のうち、いくつかを解放した後に生成物となる。生成物も分子構造を有しており、その構造を保つためのエネルギーを保有しているが、生成物の標準生成エンタルピーの総和は、反応物のそれに比べて小さい。この差が前記の「解放したエネルギー」に相当する。そのため、各反応式が決まると、この「解放するエネルギー」も決まり、反応が進行したときに得られる熱エネルギーが決まる。これが「どの燃料が燃焼したらどれだけ熱が得られるか」が決まる原理であり、発熱量の大小はこれで決まる。

上記の反応を空気(酸素濃度約21%)を酸化剤とした場合を考えると、完全反応に必要な空気のモル数は、空気中には化学反応に全く関与しない窒素が酸素のおよそ4倍含まれる

ため、それに必要な酸素のモル数の約5倍（正しくは100/21）が必要となることわかる。つまり、たくさん発熱させようとして燃料投入量を増やせば、発熱に必要な空気量は増え、燃焼場中に大量の（発熱に関与しない）窒素がもたらされる。一方、燃焼により到達する最高温度は、解放されるエネルギーが生成ガスの内部エネルギーの上昇に等しくなることで求まる。重要な点は、熱エネルギーは生成ガス全てに分配されることである、生成ガス中のモル数が多いほど、分配しなければならない量が増え、結果的に各構成分子の内部エネルギー上昇が抑えられる、すなわち到達できる温度に制限がかかるのである。

このことを踏まえて、先ほどのメタンとプロパンの場合を考えてみよう。反応により1モルの燃料（メタンまたはプロパン）から解放されるエネルギーはメタン燃焼に比べてプロパン燃焼の方が約2.49倍大きい（=2220/890）。しかし、生成物に含まれる気体のモル数はメタンに比べてプロパンは約2.46倍である（=25.8/10.5）。つまり解放されるエネルギーが多い一方で、昇温しなければならないガスが多い。結果的に温度上昇は同じ程度にしかならない。

では生成ガス温度をさらに上げたい場合はどうするか。答えは単純で、「解放されるエネルギーを増やす」または「生成ガス中のモル数を下げる」のいずれかである。前者は特殊な燃料を用いない限り難しい（例：金属燃焼など）。一方で、酸化剤中の酸素濃度を高めると高温が得られることは経験的によく知られた話であるが、その理由は後者である。ただ、酸素を多くするというよりも、酸素「以外」のガス量を減らす（=結果的に酸素濃度が高まる）ことでそれを実現する。

なお、酸素濃度を高める、すなわち酸化剤中の酸素以外の濃度を下げることで、化学反応が変わるわけではないため、解放されるエネルギー量は変わらない（=いわゆる燃焼熱を高めているわけではない）。単に、生成ガス中のモル数を下げることで、燃焼熱の分配先を減らして到達温度を高くしているだけである。

4 加熱技術の事例

4.1 長炎燃焼技術（構造、保炎）

特に長い距離を炎で直接加熱しようとしたとき、炎の長さを長くしたい場合がある。このようなとき、バーナ口径を大きくし、バーナからのガス放出速度をあげれば火炎長は伸びる。しかしながら、あまりに早いガス放出速度を与える場合、いわゆる保炎ができなくなり、炎全体が吹き消えてしまう。吹き消えを抑制するには、バーナ直後の火炎領域（火炎の基部という意味で「火炎基部」と呼ぶ）を安定燃焼状態に保つと、その燃焼により後流の炎が保たれる。そのため、バーナ出口

にはさまざまな種類の保炎機構を備えている。以下、一部ではあるが保炎機構について紹介する⁶⁾。

パイロットバーナとはいわゆる「種火（=パイロット炎）」をバーナ基部に備えたものであり（図3参照⁶⁾）、種火により主噴流の火炎基部の吹き消えを防ごうとするものである。主流に導入する燃料の一部をパイロット炎用に分岐することで実現される。これを備えるだけで安定燃焼領域は各段に拡大する（図4参照⁶⁾。ただし、加熱用バーナは熱負荷が大きいいため、パイロット保炎方式ではバーナの熱損傷が懸念され、あまり用いられない。

高温を形成する高負荷バーナで多用される保炎機構としては、流体力学的効果を用いたものが有効である。その一例を以下に示す（図5⁶⁾）。これらは主噴流の運動量放出を活用することを目的としたものであり、例えば噴流出口直後に板を設ける（図（a））、テーパや段付き（リセス）にする（図（b））、あるいは旋回流を与える（図（c））などにより「再循環領域」を形成することで保炎する技術が有効である。この循環流により（1）局所的に速度が低い領域が形成されること、（2）燃焼生成物中の活性ラジカルが上流に運ばれること、（3）活性ラジカル以外にも高温流体が基部付近に滞留することを促進する。これらの複合的な物理的・化学的效果により、火炎基部での燃焼安定化をもたらし、吹き消え防止がもたらされる。

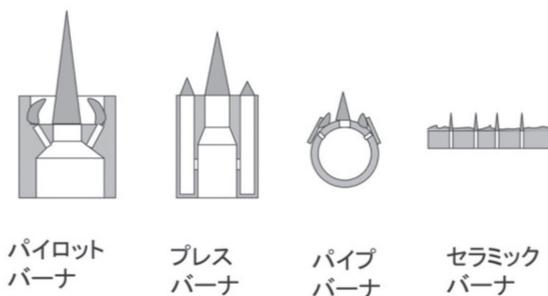


図3 各種形状を持つバーナとパイロット炎⁶⁾

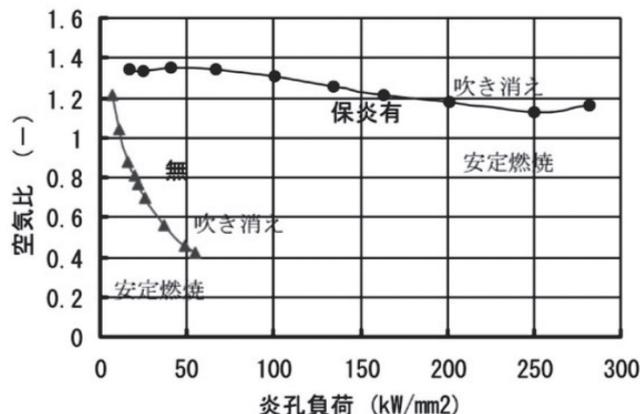


図4 パイロット炎の有無による安定燃料範囲の拡大⁶⁾

4.2 輻射加熱技術

高温の燃焼生成ガスを直接吹き付けて加熱することが望ましくない場合、輻射加熱を用いることが多い。輻射技術としてはセラミックなどの耐熱材に炎で炙って高温にしたものから輻射熱を得るものが典型的である。大きな輻射熱を得るためには、輻射源である耐熱材の温度を高めることで対応する。

輻射加熱の特徴は、輻射源である耐熱材の形状を自由に選べるため、加熱のさせ方(加熱分布等)に自由度が高いことである。形状自由度があり高温にできるものとして、耐熱金属線維またはメタルファイバー(メタルニット)などを用い、表面燃焼させることで輻射体とするものがある(図6⁷⁾)。このように被加熱物形状に合わせた最適な加熱が可能となる。なお、表面温度は800~1000℃の範囲で制御可能である。

板ではなく管形状とし、その内部で燃料ガス等を燃焼させ

て配管そのものを加熱してそこからの輻射熱を活用する加熱方法もある(ラジアントチューブバーナ。図7⁶⁾)。配管形状や流動方向は自由に制御できるため、様々な加熱装置で活用されている。最近では後述する省エネルギー型のリジェネタイプ(図7右)が多用されているが、このような省エネルギー技術を併用できるのは、配管内のガス流動方向に自由度があることに他ならない。(どちらに流しても被加熱物の加熱過程には影響しない)。

5 省エネルギー・低炭素化に向けた技術革新

5.1 リジェネバーナ

加熱装置の説明箇所でも述べた通り、加熱装置の性能は、燃焼によって解放された熱エネルギーのうちの多くの割合を

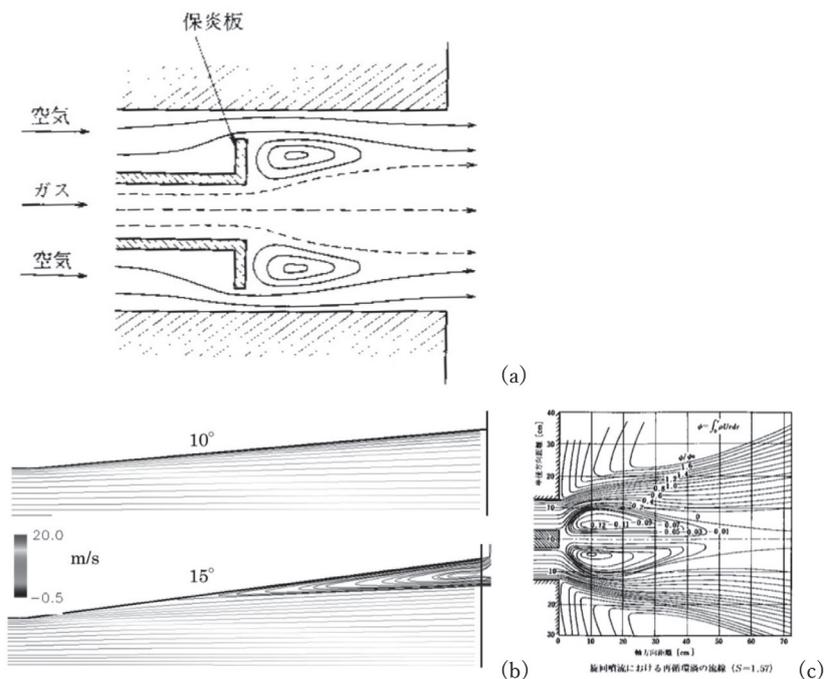


図5 バーナ出口付近に循環流を形成する方法⁶⁾。(a) 板設置、(b) テーパー、(c) 旋回流

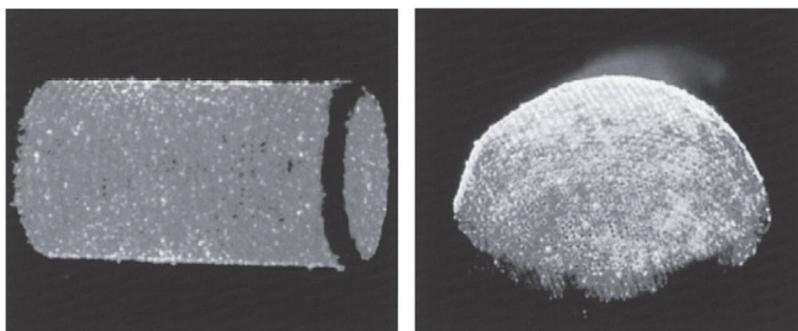


図6 メタルニットバーナの例⁷⁾

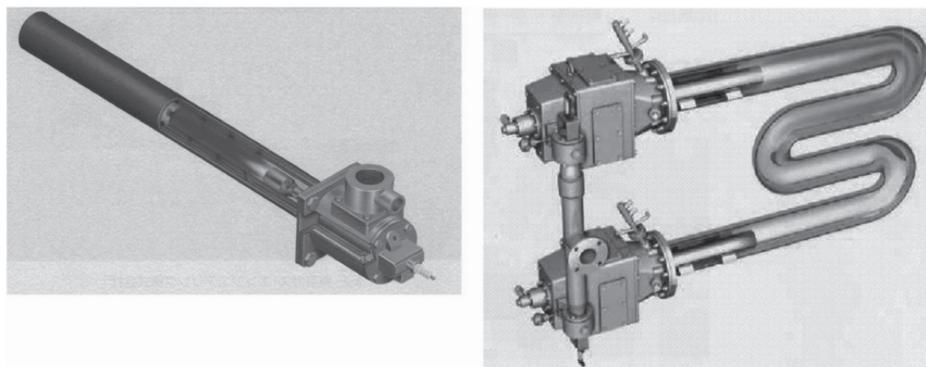


図7 ラジエントチューブバーナ (左：シングルエンド型、右：リジェネティブW型)

被加熱物内部に「押し込む」ことができればよい。逆にいえば、排熱として捨てる熱量を無駄にしなければよい。この排熱のエネルギーを利活用して燃焼しやすくさせようという技術の一つが、リジェネレーティブバーナ (通常「リジェネバーナ」) である (リジェネレーティブ=再生)。具体的には、排熱回収を行い、燃料または酸化剤の予熱に充てることで、少ない燃料でも高温場を実現させる。もちろん通常の熱交換機を用いることでもよいが、コンパクトにこれを実施するために「往復型リジェネバーナ」が提案された。図8はNEDO事業で示された方式である⁸⁾。燃料あるいは酸化剤の流路が切り替わるようになっており、出口・一口側に蓄熱体である多孔質が設置されている。排熱側の蓄熱体が十分加熱されたら流路を切り替えることで、その蓄熱分は燃料に与えることになる。これを適度なタイミングで切り替え制御を行うことで高効率で燃料消費量の少ない燃焼炉が実現できる。

先ほど、ラジエントチューブバーナのところで述べた「リジェネタイプ」とは、図7右のようにチューブ両端に蓄熱材と噴射機構が設けられており、流動方向を切り替えることで上記の高効率燃焼をチューブ内に実現したものである。流動方向を容易に切り替えることができる構造のためリジェネ機能を付加することができる。

その他のリジェネレーティブ (再生) 技術としては、高温の排ガスを燃料供給部に戻して混ぜることにより「高温の薄い燃料」として燃焼させる「排ガス再循環燃焼 (EGR) 技術」などがある。この方式でも使用する燃料量を少なくすることができるため、省エネ対策技術として期待できる。

5.2 水素・アンモニア燃焼の導入

製鉄事業そのものは、採掘される酸化鉄から酸素を引き抜く (=還元する) ためにコークスを用いる原理上、二酸化炭素を大量に発生する。脱炭素社会の実現に向け、還元過程に炭素を関与させないなどの抜本的な解決法が検討されているが、すぐさま従来法にとって代わるわけではない。したがっ

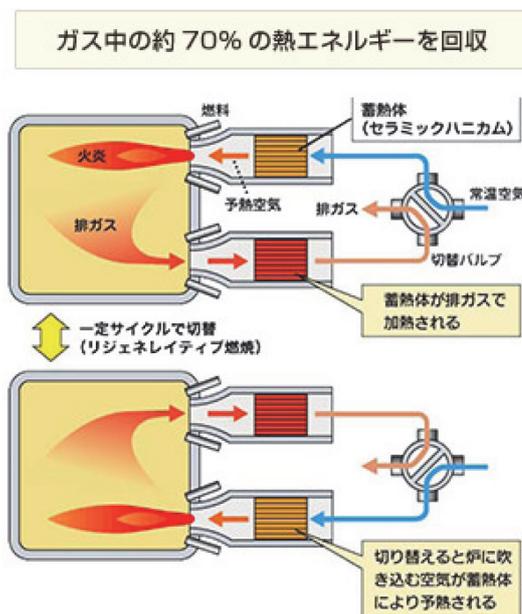


図8 リジェネバーナの仕組み⁸⁾ (Online version in color.)

て、還元以外の行程から放出する二酸化炭素の発生量を削減することが望まれる。この意味において、製鉄行程に使われる加熱装置の脱炭素化は急務である。

当然ながら炭化水素系物質を加熱装置の燃料として用いる場合、二酸化炭素の排出は不可避である。根本的な解決策は、燃料に炭素成分を含まないものを導入することである。すなわち、水素やアンモニアを加熱源燃料とし、それらの直接燃焼で発熱を賄う。既にこれらを用いた加熱装置としての開発は進んでおり、実用化に向けた段階にある。ただし、水素やアンモニアは単位重量当たりの燃焼熱が炭化水素燃料に比べて著しく低いため、2章で述べた①は期待できない。したがってその分を「高温化技術」あるいは「伝熱促進」により補う。以下、めっき鋼板製造ラインにおける脱脂行程で用いられる加熱装置の研究開発事例⁵⁾の一つである (図9)。純酸素燃焼を活用して炎の温度を高めつつ、鋼板に向けて炎を直接当てて伝熱促進を狙っている。

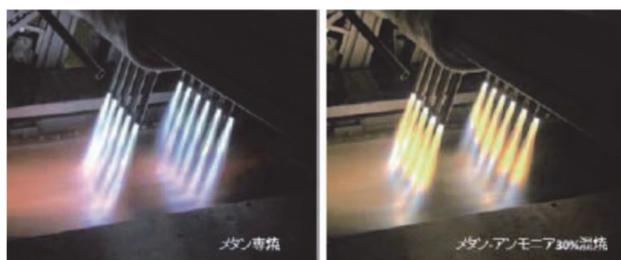
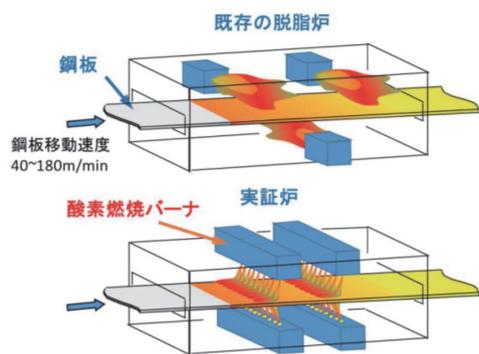


図9 めっき鋼板製造ラインにおける脱脂行程で用いられる加熱装置へのアンモニア燃焼導入例⁵⁾ (Online version in color.)

5.3 副生ガスの活用

製鉄生産現場では各種炉（高炉、転炉、コークス炉）における精錬過程で燃焼可能な副生ガスが大量に発生する。加熱装置にこれらのガスを十二分に活用することで、余計な燃料を導入することなく鉄鋼生産行程を賄うことができ、行程全体での二酸化炭素排出抑制に大きく寄与する。副生ガス種は炉によって異なるものの（表1参照）、特徴的なのは高炉や転炉ではガスの総発熱量が小さいため助燃剤の使用が求められることが多い。

この副生ガス活用はもちろん従前より行われているが、常に問題となるのは、鉄鉱石の種類によって成分割合に変動が生じることである。加熱機器の設計・開発においては、燃料を想定した上で最適となるような燃焼・伝熱手法を導入する。そのため、燃料の変動（または変更）がある場合、幅広い入力条件に耐える設計が求められる。例えば、燃焼器の要求性能としては入力値の振れ幅、すなわちターンダウンレシオを大きく取れるようなものが好んで用いられる。この点を補うものとして前記のリジネタイプを導入は適合する。脱炭素に向けた事例として水素やアンモニア燃焼をあげたが、もしこれらの副生ガスと混合して用いることを考えた場合、混合することで変化し得る燃焼特性や伝熱特性について丁寧に調べられる必要がある。

表1 鉄鋼炉で発生する副生ガスの組成（文献9より抜粋して整理）
(Online version in color.)

名称	組成 % (Vol.)						Q MJ/m ³
	CO ₂	CH ₄	C ₂ 系	CO	H ₂	N ₂	
高炉ガス	21	-	-	21	3	55	3.0
コークス炉ガス	2	28	3	7	55	5	18.6
転炉ガス	15	-	-	62	2	21	8.1

6 まとめ

本稿では、鉄鋼過程において用いられる加熱技術のうち、燃焼に特化して平易にレビューした。加熱原理と加熱手法について整理した後、加熱装置がエネルギー変換兼伝熱促進デバイスでもあることに触れた。高酸素燃焼で高温化できる原理を示すと共に様々な伝熱形態を活用して適材適所の加熱装置として設計されることを述べた。また昨今話題になっている脱炭素化に向けた技術革新の事例を述べると共に、副生ガスの応用により留意すべき点について指摘した。加熱装置は燃焼以外にも様々な技術が導入されており、紙面の都合上、全てを紹介するには至っていないが、加熱技術全般のイメージを共有できたら幸いである。

参考文献

- 1) 東京ガス株式会社（業種別ソリューション：鉄鋼），
<https://eee.tokyo-gas.co.jp/guide/industrial/steel.html>.
- 2) 永井二郎：ふえらむ，27（2022）1，21.
- 3) 櫻井篤：ふえらむ，27（2022）2，80.
- 4) 森昌司：ふえらむ，27（2022）3，126.
- 5) 沼田真明，松田泰三，萩原義之，山本康之：日本燃焼学会誌，61（2019）198，326.
- 6) 藤峰智也，仲町一郎，速川敦彦：日本燃焼学会誌，51（2009）156，85.
- 7) 十河桜子，相墨智，伊藤あすか，西川向一：日本燃焼学会誌，52（2010）162，267.
- 8) NEDO HP（実用化ドキュメント：省エネルギー），<https://www.nedo.go.jp/hyokabu/articles/201203jifma/index.html>.
- 9) 水谷幸夫：燃焼工学（第二版），森北出版，（1989）.

（2022年4月11日受付）