入 門 講 座

伝熱工学－7

高炉設備における熱交換技術の活用事例

Application of Heat Exchange Technology in Blast Furnace Facilities

倉掛　優
Yu Kurakake
日鉄エンジニアリング（株）
製鉄プラントセクター　商品技術第一部
銑鋼技術室　マネージャー

1 緒言

製鉄所のシンボルとも呼ばれる高炉は、鉄鉱石に含まれる酸素分を効率よく還元し、銑鉄を作り出す巨大な反応容器である。現在のシャフト炉での銑鉄生産は1709年にイギリスにて始まり、日本においては1857年に釜石の大橋高炉から始まり、官営八幡製鉄所での本格化を経て、以後100年以上鉄鋼業を支え続けている。その長い高炉の歴史の中では、機能向上を図る様々な新しい付帯設備が開発されてきた[1)]。

図1に、製鉄プロセスフローを示す。本稿においては、高炉設備の中でも熱交換技術が活用されている「熱風炉設備」と「熱風炉排熱回収設備」について、設備の特徴および技術の変遷（課題解決の歴史）を、特にその熱交換技術という視点で述べる。

詳細は各章にて説明するが、「熱風炉設備」とは、高炉において還元反応に必要な高温空気を連続的に供給するための設備である。「熱風炉排熱回収設備」とは、熱風炉で発生する排ガスの熱を回収し、有効利用するための設備である。

2 熱風炉排熱回収設備

2.1 設備概要

熱風炉排熱回収設備は、熱風炉で発生する約300度の熱風炉排ガスの熱を回収し、熱交換により熱風炉用の燃焼用空気や燃料ガスを予熱するための設備である。予熱することにより燃焼温度を向上させる、または熱風炉における高カロリーガスの使用割合を減らすことが可能なため、省エネルギーに資する設備として、多くの高炉に導入されている。その歴史の中では様々な方式が考案されており、現在は各国や製鉄所のニーズに合わせた方式が選択されている。中低温域の熱を取り扱うため主に金物が使用され、排ガス熱回収用の熱交換器、燃焼用空気または燃料ガス予熱用の熱交換器により構成される。

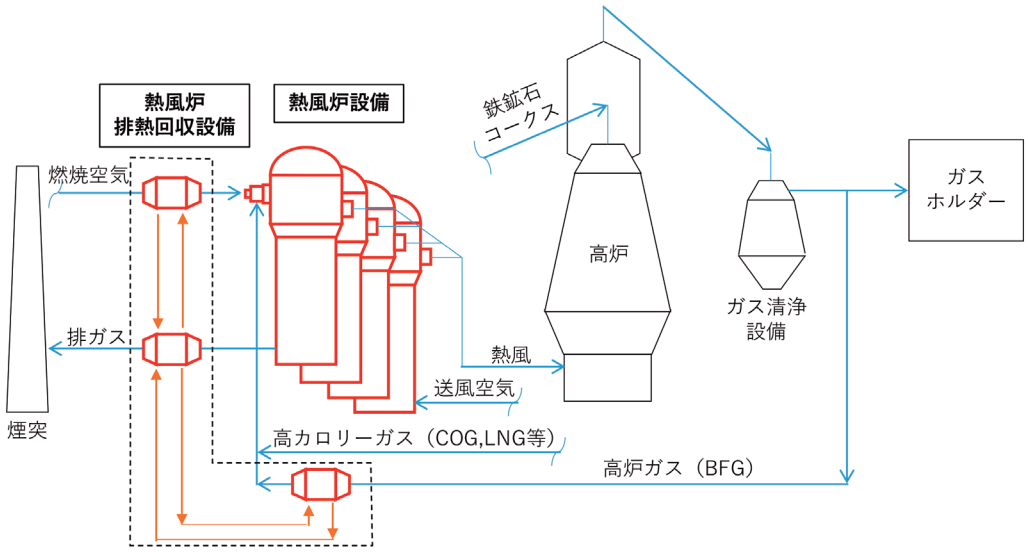

図1　製鉄プロセスフロー（Online version in color.）

2.2　技術の変遷

2.2.1　日本における熱風炉排熱回収ニーズの高まりと課題

日本においては、第一次オイルショック（1973年）と第二次オイルショック（1979年）において2度にわたり原油価格が高騰したことを契機として、それまで原油が安価であった頃は捨てられていた中低温域の熱を回収する省エネルギー技術が求められた。燃料費の割合が高い発電業界においては早くから排熱回収に取り組んでおり、大型熱交換器の開発と設置が進められた。鉄鋼業においては第二次オイルショックを契機として、当時他業界で導入が進んでいた技術を応用する形で「再生回転式」や「プレート式」が導入された。

図2にそれぞれの熱交換器概略図を示す。再生回転式は大型の伝熱エレメントが回転し、高温の排ガス側と低温の燃焼用空気側を行き来することで熱交換を行うものである。プレート式は、高温側の排ガスと低温側の燃焼用空気の通路が、隔壁を隔てて層状に重なっており、隔壁を通じて熱交換をするものである。いずれも高温ガスの熱をエレメントや隔壁を通じて低温の空気へ熱を伝える、ガス-空気の直接熱交換タイプである。このタイプの熱交換器の熱風炉への適用に際しては、以下の課題があった。

a. 可燃性ガス予熱不可
　いずれのタイプも構造上リークが懸念されるため、可燃性のガスには使用ができず、燃焼用空気のみ予熱可能。
b. 酸露点腐食の発生
　熱風炉排ガスに含まれるSOx（硫黄酸化物）起因により、一定温度以下で酸性物質が発生するため、温度変動がある熱風炉排ガスにおいては、腐食が大きな課題となった。
c. ダスト堆積による経年性能低下
　熱風炉排ガスにはダストが多く含まれており、ダストの堆積は腐食を促進させるとともに、伝熱性能低下や圧損の上昇など性能への影響が課題となった。
d. 既設の熱風炉スペースへの設置が困難
　熱交換器サイズが大きく、またダクトの大幅改造が必要なため、狭隘な既設の熱風炉スペースへの導入は困難であった。

以上のように、他業界からの排熱回収技術の転用を試みたものの、熱風炉排ガス特有の事情や製鉄所のスペース事情により、様々な課題が残った。

2.2.2　他国におけるヒートパイプ式の拡がりと課題

ヒートパイプは、1960年代に欧米にて開発された技術であり、作動液の入った閉じた菅の一端を加熱して内部の液体を蒸発させ他端で凝縮させることによって、熱を輸送する仕組みであり、欧米にて人工衛星や原子力発電に使用されたことが始まりである。その後、世界各国で熱交換器や電子機器の冷却等に用いられるようになった[2)]。

図3にヒートパイプ式の概略図および原理図を示す。ヒートパイプ式は熱媒体を介しての熱交換であるため、リークにより可燃性ガスと高温ガスが混合する危険性がなく、2.2.1項にて述べた課題a.可燃ガスへの熱交換が可能となった。また、メンテナンスフリーで安価に導入可能ということも相まって、特に1980年代より急速な経済成長を遂げた中国にて高炉の新設に合わせて導入が進んだ。一方で、2.2.1項にて述べたa.以外の課題は残ったままである。伝熱面積を確保するために、ヒートパイプには多数のフィンが設置されているが、フィン間へのダスト堆積や腐食によるフィンの損傷や脱落は深刻であった。数年で性能低下やケーシングへの腐食孔が発生するため、短い間隔での更新が必要となった。本設備はイニシャルコストを重視する国、企業には受け入れやすかったが、日本国においては省エネルギー量や長寿命が重要視されるため普及することはなかった。加えて、設備レイア

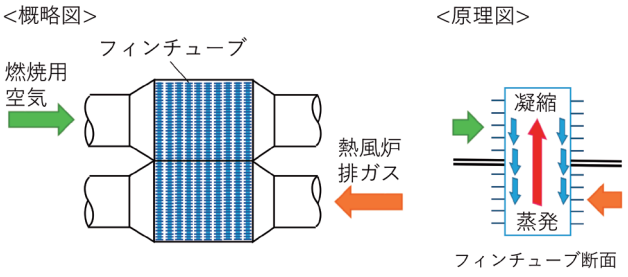

図3　ヒートパイプ式熱交換器（Online version in color.）

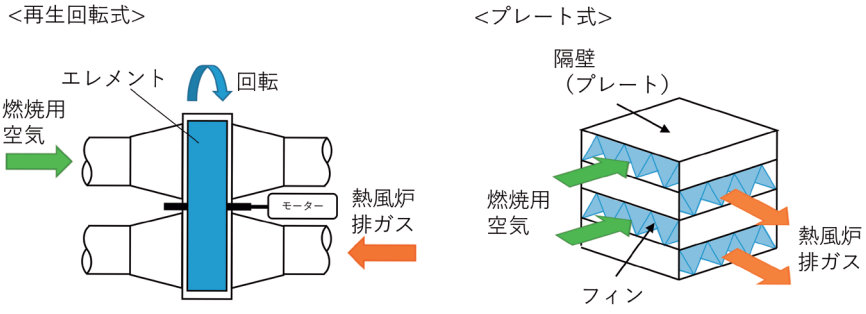

図2　再生回転式、プレート式熱交換器（Online version in color.）

ウト制約についても依然として課題であり、分離式と呼ばれる回収側と予熱側の熱交換器を分離したタイプも開発されていたが、設置高さの制約があるなど、日本の狭隘なスペースの製鉄所への適用は困難であった。

2.2.3　課題解決に向けた熱媒循環式の開発と日本における普及

日本においては、上述した課題を解決して社会要求でもある省エネルギーに応えるために、当時化学プラント等で使用されていた熱媒循環式を熱風炉排熱回収に転用する検討が行われた[3]。図4に示すように、熱媒循環式排熱回収設備は、各ガス用と空気用の熱交換器が完全に分離されており、各熱交換器を結ぶ小径の配管にて熱媒体が循環される。各熱交換器内にはバンドルと呼ばれる熱媒が通るフィンチューブの集合体が設置されており、フィンチューブ内面の熱媒体と、外面のガスにて熱交換が行われる。熱媒体はポンプにて強制循環されており、各熱交換器を循環しながら熱交換を行う。熱風炉適用に向けては、種々の課題を解決するために以下に示す様々な工夫がなされた。

a. 分離式のためリーク発生無し
ヒートパイプ式と同様に熱媒体を介しての熱交換であり、リークにより可燃性ガスと高温排ガスが混合する危険性は無いため、可燃ガスへの適用も可能である。

b. バイパス弁による酸露点コントロール（熱回収量の最大化）
図4に示すように、熱回収後の熱媒体を燃焼用空気・燃料ガス予熱側の熱交換器を通さずに排ガス熱交換器出側に戻すためのバイパスルートが設けられており、排ガス熱交換器出側のガス温度が酸露点以下にならないようにバイパス弁にて流量がコントロールされる。図5に、他方式の熱交換器と熱媒循環式の熱回収量イメージを示す。図5に示すように熱風炉から排出される排ガス温度は時間と共に変動する。また、前述した通り熱風炉から排出される排ガスにはSOx（硫黄酸化物）が含まれており、排ガス温度が酸露点（約150度）以下になると、酸が発生し腐食が起こる。それを防ぐためには排ガス熱交換器入側の排ガス温度が変動した場合でも、熱回収後の排ガス温度を常に酸露点以上に保つ必要がある。図5（A）に示す様に他方式は熱回収量を調整できないため、排ガス温度が最も低い時に排ガス熱交換器出側の温度が酸露点以下にならない様に熱回収量Qを設定しなければならない。そのため排ガス温度が上昇した場合、熱回収できずに放散される熱量（図5（A）②範囲）が大きくなってしまう。結果、熱回収量は図5（A）①範囲となる。一方、熱媒循環式はバイパス弁の操作により熱回収量を調整し、排ガス温度が低い場合でも高い場合でも排ガス熱交換器出側の温度を常に酸露点以上に維持することが可能であるため、最大限の熱量（図5（B）①範囲）を回収できる。結果、熱媒循環式は他方式よりも多くの熱量を回収することができる。

c. カセットバンドル化により洗浄可能
バンドルを取り外し可能なカセット式とすることで、フィンへのダスト詰まりを定期的に洗浄することが可能となった。また、損傷の有るバンドルのみを交換することも可能である。

d. 高いレイアウト自由度
各ガス熱交換器の配置は自由であり、各々を小口径の熱媒配管で接続するのみであるので、レイアウト自由度が高く、狭隘なスペースへの設置も可能となった。

このように、日本におけるニーズを満たすために開発され、高い省エネルギー量、長寿命、高いレイアウト自由度を実現した熱媒循環式の熱風炉排熱回収設備は、日本国内において広く普及が進んだ。近年においては、各製鉄所の事情やニーズに合わせた様々な検討が実施されている[4]。

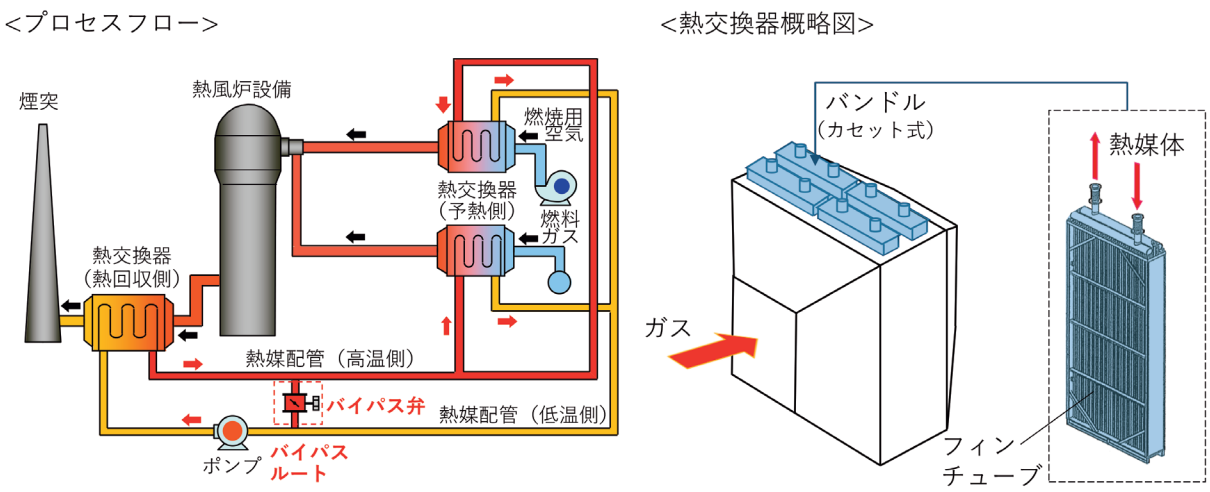

図4　熱媒循環式排熱回収設備（Online version in color.）

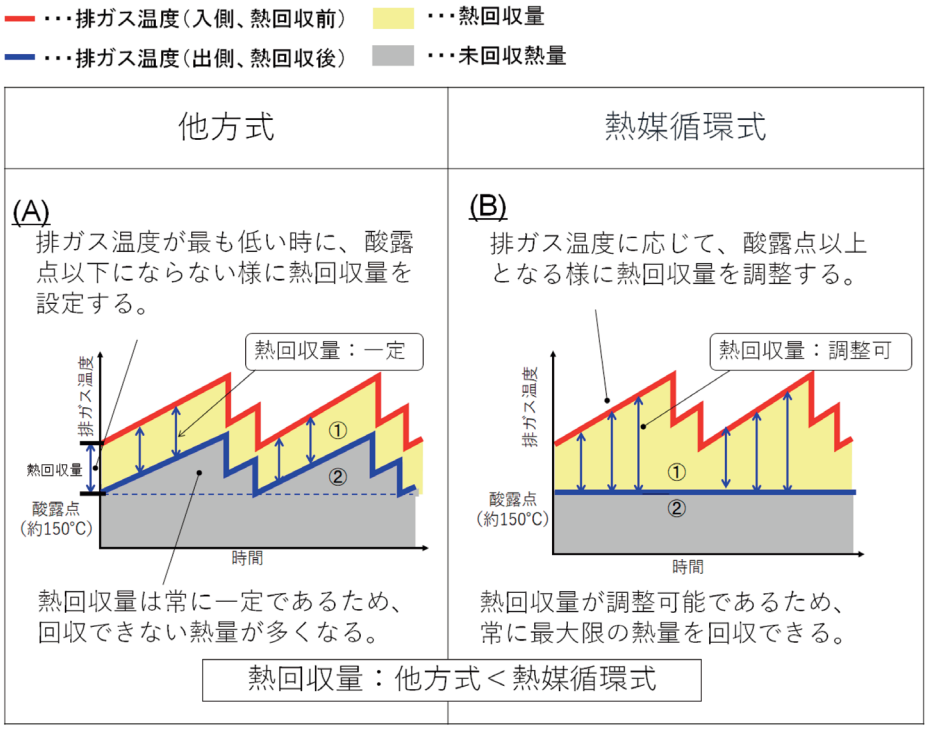

図5　他方式と熱媒循環式の熱回収量比較（Online version in color.）

3 熱風炉設備

3.1　設備概要

熱風炉設備とは、高炉において還元反応に必要な、約1200度の高温空気を連続的に供給するための設備で、「高炉へ送られる空気を予熱する蓄熱式の熱交換器」である。図6に示すように、熱風炉は蓄熱室と燃焼室で構成されており、燃焼室にはバーナーが設置され約1400度の高温の燃焼排ガスを発生させる。蓄熱室の内部にはチェッカー煉瓦と呼ばれる、蓮根のように多数の孔（カナール）のあいた蓄熱用の煉瓦が敷き詰められている。熱風炉炉内は高温雰囲気であるため、蓄熱体の材質として煉瓦が使用されている。

図7に、熱風炉の操業模式図を示す。熱風炉は通常1高炉当たり3～4基設置され、熱を蓄える「蓄熱期」と、熱をはき出す「送風期」を各々繰り返し、常に高炉に高温空気が送風されるようにサイクルがスケジュールされる。「蓄熱期」では、燃焼用空気と燃料ガスをバーナーにて燃焼させて高温排ガスを作り出し、蓄熱室内のチェッカー煉瓦の孔（カナール）を通気させることで熱を蓄える。なお、バーナーの燃料ガスは高炉ガス（BFG）が主であり、カロリー補填のためにコークス炉ガス（COG）などの高カロリーガスが添加される。「送風期」では、送風用の空気をチェッカー煉瓦に通気させることで熱交換により高温空気を作り出し、高炉へ送り出す。

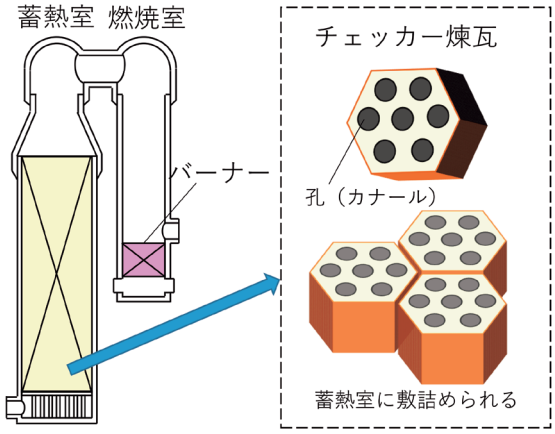

図6　熱風炉設備構成（Online version in color.）

3.2　技術の変遷

3.2.1　蓄熱体への伝熱効率向上

前述の通り、熱風炉は蓄熱式の熱交換器であり、内部が高温となるため熱交換は煉瓦の蓄熱体であるチェッカー煉瓦で行われる。燃焼排ガスや送風用空気は、チェッカー煉瓦の孔（カナール）を通過し、孔の表面を通して煉瓦とガスの熱交換が行われる。多くの場合チェッカー煉瓦は、数十m積みの重さに耐える強度を満たす肉厚が必要となることから、蓄熱容量は十分であるが、限られたサイクルタイムの中でより多くの熱交換を行うためには、伝熱面積を大きくする必要がある。チェッカー煉瓦は、金物のような形状自由度は有して

おらず、また工事に際しては職人の手で積み上げる築炉が必要なので、強度確保は勿論、その製作性や築炉性も考慮した設計が必要となる。このような状況下で伝熱面積のさらなる向上のために、特にチェッカー煉瓦の孔（カナール）の径や形が工夫されてきた。煉瓦の成型/焼成技術の発展と共に、伝熱面積の増加のためにカナールの径を小径化しカナール数量を増やす改善や、形状についても多くは丸形であるが六角形などの多角形型も考案、使用されるようになった。一方で、小径の場合にはダスト詰まりによる能力低下も懸念されるため、各社検討と実績確認を積み重ねて、形状をブラシュアップさせている。

また、その他中国においては、チェッカー煉瓦を黒体塗料で染色することで、熱伝達率を上げようとする試みも行われている。

3.2.2 蓄熱体有効利用のための偏流防止

熱交換性能に影響を及ぼすもう一つの要因が偏流である。チェッカー煉瓦に流入する燃焼排ガスに偏りが生じると、所定の蓄熱量を確保できない懸念がある。図8に、熱風炉型式の変遷を示す。

a. 内燃式

高炉法による製鉄業が広がり始めた当初は「内燃式」の熱風炉が使用された。内燃式は、1つのチャンバー内に燃焼室と蓄熱室が配置され、仕切り壁と呼ばれる煉瓦の壁で仕切られている構造である。本型式は蓄熱期における偏流が大きく、特に大型化に際しては顕著な課題となった。加えて、大型化に伴うドーム部耐火物の構造安定性も懸念された。

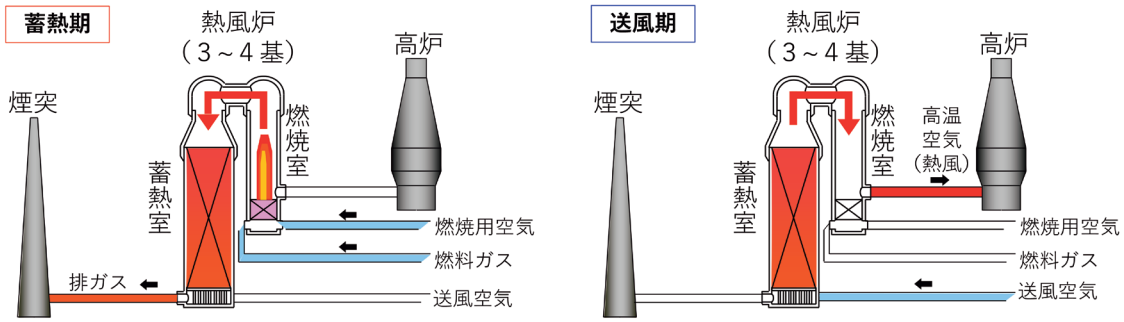

図7　熱風炉設備操業模式図（Online version in color.）

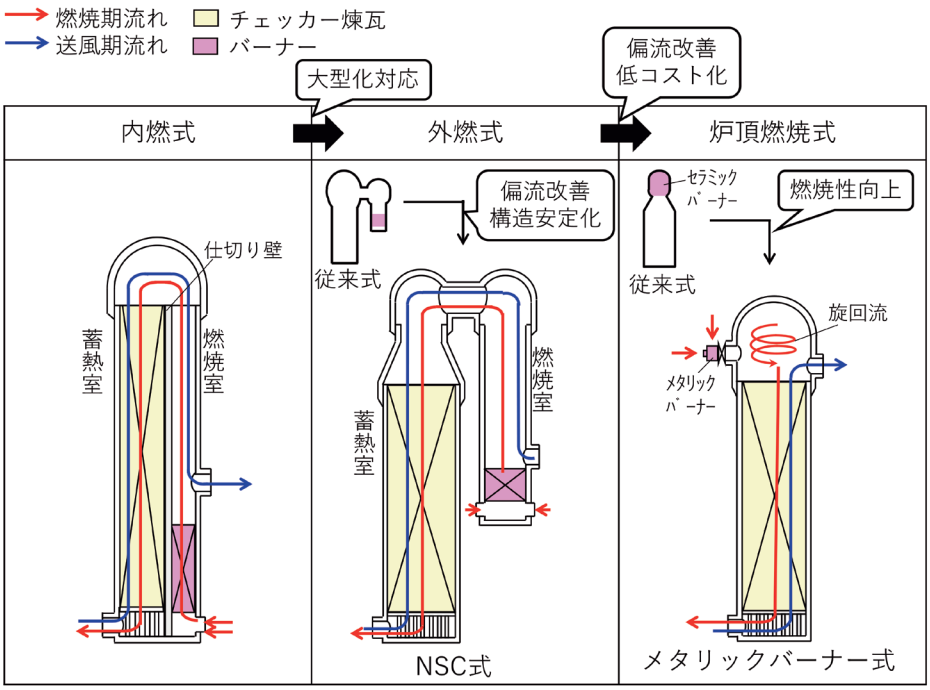

図8　熱風炉設備型式変遷（Online version in color.）

b. 外燃式

鉄鋼生産量拡大のために、高炉の大型化が進む中で、熱風炉も大型化が要求された。従来の内燃式の構造安定性懸念を払しょくするべく開発されたのが「外燃式」である。蓄熱室と燃焼室をそれぞれ別チャンバー化とすることで、より蓄熱体の容量を増やすことが可能となった。さらに、蓄熱室ドーム部を小径化し径拡大部を設けることで、偏流が起こりにくくなると共に構造安定性を確保した「NSC式」が開発され、日本、中国等に広く普及した。

c. 炉頂燃焼式

近年では更なる高機能化のために、燃焼空間を頂部に配置し炉内に旋回流を発生させることで、偏流を限りなく減らすことが出来る「炉頂燃焼式」が開発され、そのシェアを拡大している。本型式では、従来必要であった大きな燃焼室が不要となり低コスト化も実現している。また、バーナー燃焼時のロス（未燃ガス）を極力減らすために、混合燃焼性に優れたメタリックバーナーを炉頂部に搭載した、「炉頂燃焼メタリックバーナー式」も開発され、国内で導入拡大中である[5,6]。

3.2.3 更なる蓄熱体の有効利用

熱風炉設備トータルでのエネルギー効率を高めるために、更なる蓄熱体の有効利用が検討されている。図9に、蓄熱量分布のイメージ図を示す。チェッカー煉瓦の燃焼-送風サイクルにおける蓄熱量は、図中の「蓄熱量」部面積で示され、「排ガス温度」「ドーム温度」については熱風炉設備ネックで最大温度が決まっている。送風時の偏流を防止するために、蓄熱室のチェッカー煉瓦下部には空間が作られ、その空間を確保するために金物製のチェッカー受金物が使用されているが、金物製であるために耐熱温度を超えての使用はできず、同様の理由から「排ガス温度」については温度上限が設けられている。また、熱風炉の大きな損傷原因であるドーム部鉄皮の応力腐食割れ（SCC）の発生を防ぐために、SCC発生原因となるNOx（窒素酸化物）が大量発生しないように、「ドーム温度」については温度制約が設けられている。近年は、これらのネックを設備側で改善し、更なる蓄熱体の有効利用を志向する取り組みが実施されている[7]。

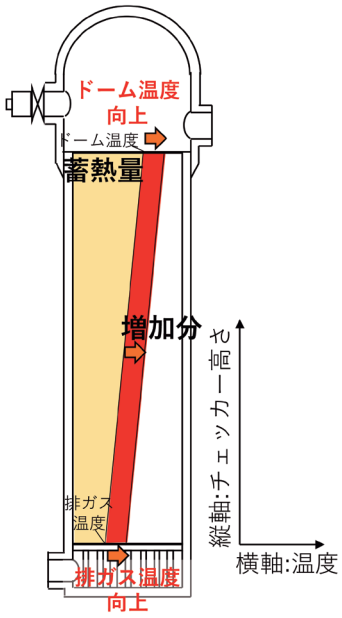

図9　熱風炉蓄熱量分布（Online version in color.）

4 結言

本稿では、高炉設備における熱交換技術の活用事例として「熱風炉設備」と「熱風炉排熱回収設備」について、設備の特徴および技術の変遷（課題解決の歴史）を述べた。本稿の事例だけをみても、その時代におけるニーズの変化に合わせて、熱交換技術をベースとした設備技術は変革を遂げており、今もなおその活用が検討されている。地球規模の課題であるカーボンニュートラルに向けても熱交換技術は重要な役割を担っており、次世代に生きる生命のためにも更なる技術の革新が求められている。

参考文献

1）新日本製鉄㈱編：鉄と鉄鋼がわかる本，(2004)，38.
2）勝田正文：日本伝熱学会誌「伝熱」，51 (2012) 217，14.
3）総合技術センター編（渡辺次郎，原信幸）：排熱機器の開発・設計と排熱利用技術，(1984)，59.
4）嶋津弘志，石川裕信，前川典正，薄井健吾，嶋村剛志：日鉄エンジニアリング技報，6 (2015)，6.
5）前川典正，井上航哉，嶋津弘志，古谷俊治，国重直樹，大下伸浩，金満秀和：日鉄エンジニアリング技報，4 (2013)，2.
6）T.Kojima，T.Taniguchi，A.Ishikawa and T.Umesaki：Replace and Start-up of New 3rd Hot Stove for Kokura No.2 Blast Furnace，AISTech 2015 Proceedings，(2015).
7）H.Kanemitsu，K.Yamamoto and H.Ishikawa：The New Hot Stove Technology by NSENGI，AISTech 2017 Proceedings，(2017).

(2022年2月28日受付)