連携記事

リジェネバーナシステム25年のあゆみ

25 Years History of Regenerative Burner System

河本祐作
Yusaku Kawamoto
中外炉工業（株）
プラント事業本部　サーモシステム事業部
バーナ開発推進部　部長

1 はじめに

大きな省エネルギー効果を発揮する（＝CO_2排出抑制効果が高い）リジェネバーナシステムの原形は100年程前からガラス溶融炉や製鐵所の高温熱風炉等で使用されていた。それらには蓄熱室が二室設けられており、一方の蓄熱室で高温燃焼排ガスの熱を格子状に積まれた煉瓦に蓄え、もう一方の蓄熱室でその蓄熱された熱で燃焼用空気を予熱させ熱回収を行っていた（図1）[1]。

工業炉用としてのリジェネバーナシステムは1980年代の英国で生まれたといわれているが、日本では殆ど導入されなかった。当時普及しなかった理由のひとつにリジェネバーナシステムは、省エネルギー効果は高いものの、火炎温度が高くなると大気汚染物質のNOx（窒素酸化物）の発生量が極めて高くなり、環境基準が厳しい日本では導入が困難と判断されていたためである。そのため長年、リジェネバーナシステムによる工業炉の省エネルギー化と環境負荷低減の両立は困難と考えられていた。しかし、1990年代初めに熱回収率を高めてもNOx発生量が増えない燃焼方法がわが国で発見され、1993年に経済産業省およびNEDOの工業炉に関するナショナル・プロジェクトが一般社団法人 日本工業炉協会を中心としてスタートした。産・官・学の共同開発国家プロジェクトは、「高性能工業炉の開発」（1993～1999年度）[2]、「高性能工業炉導入フィールドテスト事業」（1998～2000年度）などリジェネバーナシステムを搭載した「高性能工業炉」の研究開発に取り組んだ。その結果、従来方式炉に比べて30％以上の省エネルギー効果と、50％以上のNOx低減を可能とする「高性能工業炉」の開発に成功し、実用化が急速に進むこととなった。

このリジェネバーナシステムは日本の誇る「低炭素技術」のひとつとなった。

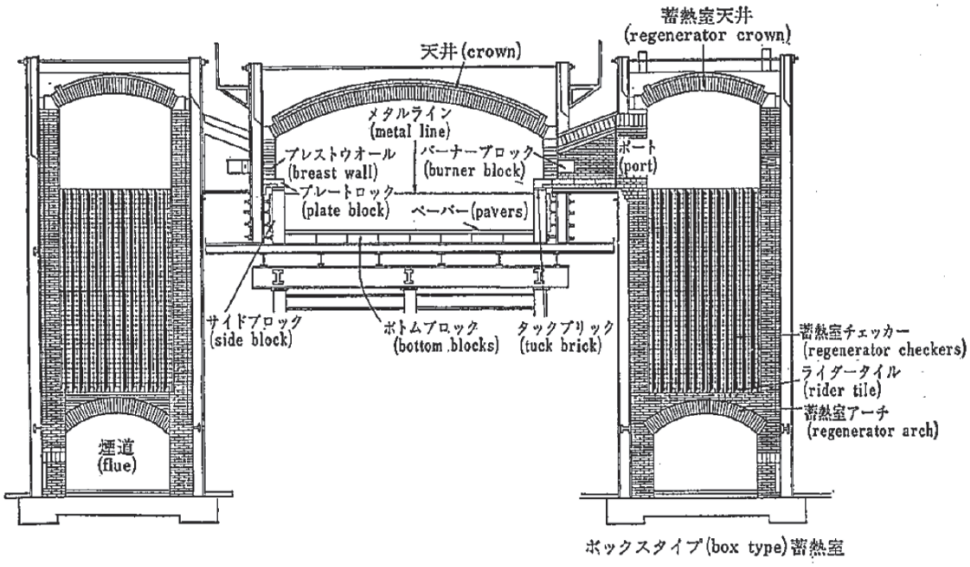


図1　ガラスタンク窯の蓄熱式廃熱回収装置[1]

13

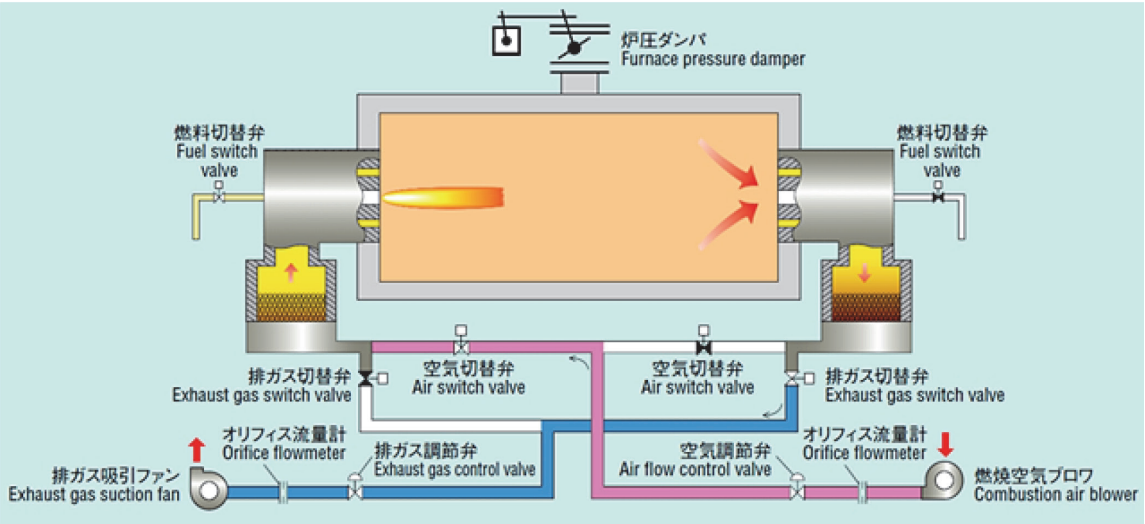


図2　リジェネバーナシステム作動原理[3)]

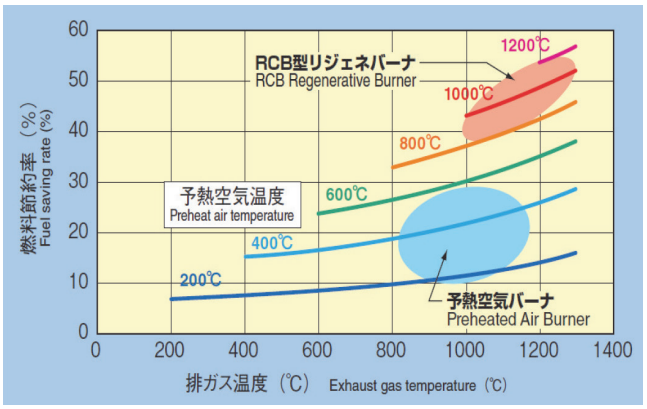


図3　排ガス温度と燃料節約率[3)]

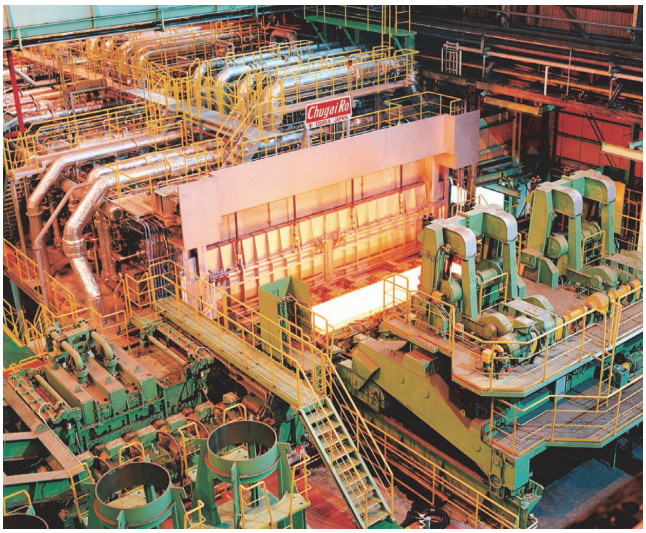


図4　省エネルギー型高性能加熱炉[3)]

2 リジェネバーナシステムとは

ここであらためてリジェネバーナシステムの作動原理を解説しておく（図2）[3)]。

一方のバーナが燃焼している間、他方のバーナは排ガス排出口の役割をはたし、吸引された排ガスはバーナに連結した蓄熱器を通過する際に蓄熱器内部に充填した蓄熱体と熱交換して200℃程度の温度まで下げられて系外に排出される。所定のサイクル時間が経過すると燃焼バーナと排ガス吸引バーナの役割が切り替わり、燃焼側の蓄熱器に供給された常温燃焼空気は、蓄熱器を通過する際に高温の蓄熱体との間で熱交換が行われ高温予熱された後、バーナに供給される。このシステムを適用することで超高温予熱空気（吸引した排ガス温度の85％以上の温度）の供給が可能になり、廃熱回収を実施しなかった場合と比較して50％以上の省エネルギーも可能となる（図3）[3)]。

リジェネバーナシステムは鉄鋼加熱炉（図4）[3)]、鍛造加熱炉、取鍋予熱装置、アルミ溶解炉など様々な熱設備に採用されている。

3 RCB型リジェネバーナの誕生

当社は1992年にRCBプロジェクトチームを結成し、リジェネバーナの歴史がスタートした。RCBとは、「Regenerative Ceramic Burner」の頭文字からとっている。翌年には英国HOTWORK社よりリジェネバーナシステムを技術導入し、実用化に向けた燃焼試験を開始した（図5）[4)]。当時のHOTWORK社製のリジェネバーナは、省エネ性能は満足できるものであったが、NOx発生量は鉄鋼加熱炉や鍛造加熱

14

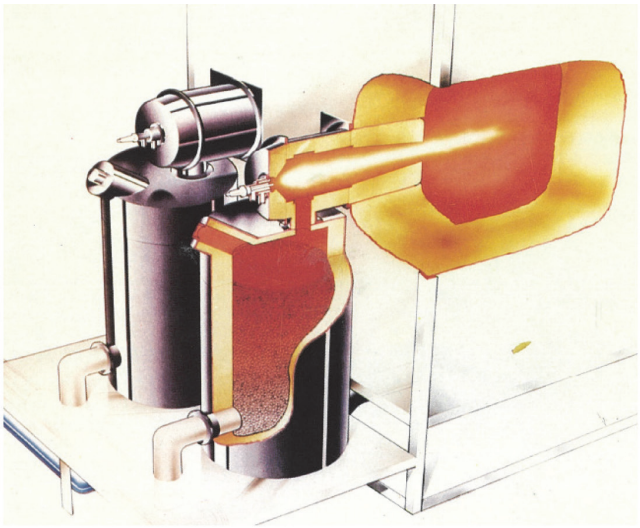


図5　HOTWORK社製リジェネバーナ[4)]

図6　RCB－FH型リジェネバーナ

炉などで使用する条件で、およそ500ppm（11％ O_2換算）と非常に高い値であり、これを如何に国内排出基準値以下に抑えるかが課題であった。理屈の上で非常に優れたシステムであっても、実際に実機で採用されなければ意味を成さない。

我々は低NOx化の第一歩として、鉄鋼加熱炉などで数多く採用されている二段燃焼式バーナをベースに設計の見直しを行なった。鉄鋼加熱炉や鍛造加熱炉などの高温炉では1200℃を超える炉内雰囲気となり、リジェネバーナシステムはその高温雰囲気をバーナに吸い込む訳である。それが意味することは、今までの「バーナの設計」では無く、「小さな炉の設計」をしなければならないということである。

二段燃焼式バーナはバーナ中央部に燃料ノズルを配置しており、そのノズルは流量や流速、差圧などを基準に孔径が決定される。燃料ノズル材質の多くは金属製のため、1200℃を超える雰囲気にさらされては忽ち溶損してしまう。そこで加熱炉のスキッドパイプなどに採用されているジャケット方式の冷却構造を取り入れた。

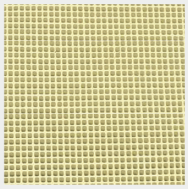
蓄熱器本体やバーナタイル、ジャケット周囲の耐火物については耐火物メーカと協議を重ね、スポーリング試験などを行ない最適な耐火物を選定した。

こうして完成したのが、RCB－FH型リジェネバーナである（図6）。

4 ボール／ハニカム議論

リジェネバーナの評価方法については様々な見方がある。中でも蓄熱器に入れる蓄熱体の形状については、リジェネバーナ導入当初に多くの議論がなされた。表1にボールとハニカムの蓄熱体比較を示す。熱交換性能、耐久性、価格などが総合的に評価されて、蓄熱媒体としての軍配はボールに上がったといえる。

表1　蓄熱体比較（ボール／ハニカム）

蓄熱体形状	ボール	ハニカム
イメージ		
燃焼空気温度	○　炉温×0.85	○　炉温×0.90
比表面積	△　200m²/m³	○　1000m²/m³
切替時間	○　60秒切替	△　30秒切替
耐スケール	○　詰まり難い	×　詰まり易い
保守	清掃	取替
耐熱衝撃	○　強い	×　弱い
コスト	○　安価	×　高価
総合判定	◎	△

5 ノズルユニットの誕生

RCB－FH型が燃料ノズルを中央部に配置した二段燃焼方式に対して、最新型のリジェネバーナは“二段燃焼技術”をさらに推し進めた“拡散燃焼技術”を採用したものに遷移し

てきている。拡散燃焼技術とは、炉内雰囲気が燃料の着火温度以上の温度域において、燃料と高温予熱された燃焼空気を適正な位置からより高速で炉内に直接吹き込み、自己排ガス循環を促し緩慢燃焼させる技術のことである。

燃料ノズルはバーナ中央では無く、炉内に直接噴射できる位置に設置されている。炉内の広範囲で燃焼反応が起こることで炉内温度分布の均一性と、大幅な低NOx性を向上させることができる。

燃料ノズルは「ノズルユニット」に進化した。点火・保炎とノズル冷却機能を燃料ノズルに設け、従来に比べてバーナ周り配管が削減でき、大幅なコストダウンが図れる。この「ノズルユニット」の誕生により、用途はリジェネバーナ用のみに留まらず、一般バーナまで様々なバーナが開発され、ラインナップが充実していった。以下に、当社最新リジェネバーナのラインナップを紹介する。

5.1　RCB－STD型（STP型）リジェネバーナ

RCB－STD型リジェネバーナは、比較的小さな燃焼容量のもので、ノズルユニットを採用した直接点火可能な拡散燃焼方式のガス焚き専用リジェネバーナである。ノズル周りはガス配管と一次空気配管となっており、非常にシンプルである（図7）[3]。

また燃焼容量の大きなものは、パイロットバーナを有したRCB－STP型となり、燃料はガスと油どちらも対応可能である（図8）[3]。パイロットバーナを燃料ノズル近傍に配置しており、燃料は直接炉内に向けて噴出される。

5.2　RCB－FD型リジェネバーナ

鉄鋼加熱炉などで多く採用されるRCB－FD型リジェネバーナは,特にNOx性能と炉内温度分布の均一性に注力したものとなっている（図9）。

炉内雰囲気温度が低い（炉の立ち上げ時など）時には、燃焼空気と混合しやすい位置に配置した一次ガスノズルで昇温する。炉内雰囲気が燃料の着火温度以上に達したときに、一次ガスノズルへのガス供給を停止して、炉内に直接配置した二次ガスノズルより燃料を噴出して拡散燃焼を行なう。これにより炉内温度が低い時の燃焼安定性と、炉内温度が高い時の低NOx性と炉内温度分布の均一性を向上させている。

5.3　セミセルフリジェネバーナ

通常リジェネバーナの基本構成は、蓄熱器が二台でそれぞれの蓄熱器に燃料ノズルが配置されたものとなっているが、セミセルフリジェネバーナは蓄熱器二台につき燃料ノズルが一本で一組の構成となっている（図10）[3]。片側の蓄熱器を通過した燃焼空気で燃焼させ、同時にもう片側の蓄熱器に排ガスを吸引させる。通常のリジェネバーナと比べて、省スペース化と機器や安全装置等のコストダウンができる。また燃焼容量の大型化にも対応可能である。

5.4　RCB－ES型セルフリジェネバーナ

セルフリジェネバーナは1台でリジェネ燃焼が可能なバーナである。比較的小容量のバーナであり、限られた炉周囲ス

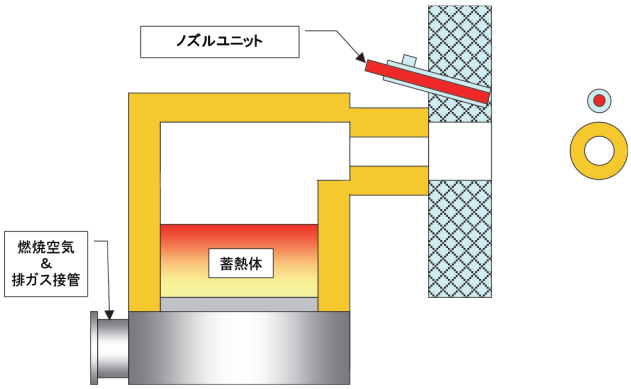


図7　RCB－STD型リジェネバーナ[3]

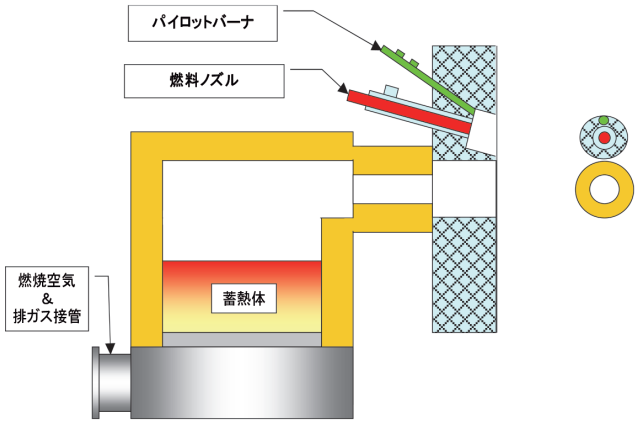


図8　RCB－STP型リジェネバーナ[3]

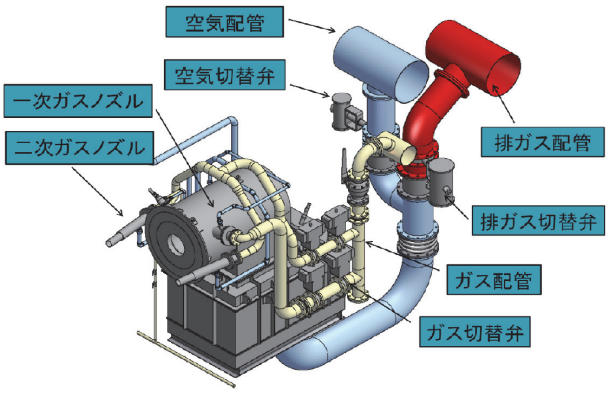


図9　RCB－FD型リジェネバーナ

ペースを有効活用することができる。最新型のRCB－ES型セルフリジェネバーナ（図11）[5]は、切替弁を内蔵した世界最小クラス・超コンパクト設計となっており、操業中でも一次空気量の増減により、火炎形状が変更できるため、長炎から高速・短炎まで火炎長さの調節ができる。これにより炉形に合わせた最適な条件での燃焼が可能となり、また炉気撹拌性能も向上し、炉内温度分布を良好に保つことができる。

5.5　取鍋予熱装置専用リジェネバーナ

製鋼プロセスにおいて高温の溶鋼を受鋼するための設備として取鍋が使用されている。1500℃の溶鋼を受鋼するためには事前に取鍋の内張り耐火壁温度を1000℃～1200℃まで加熱する必要があり、そこに用いられる装置が取鍋予熱装置である。当社はノズルユニットを採用したセミセルフ式リジェネバーナを採用して、取鍋予熱装置に最適なリジェネバーナを考案した（図12）[3]。その構造は、一本のガスノズルユニットを鍋蓋の中心に配置し、二台の蓄熱器および空気吐出口を鍋蓋の中心から直径方向に等間隔で対角線上に配置した構造となっている。併せて最適な加熱方法が可能な制御システムも構築した。

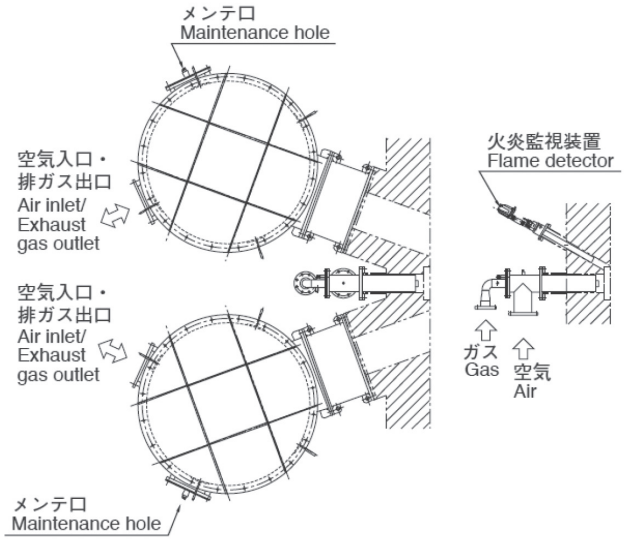


図10　セミセルフリジェネバーナ[3]

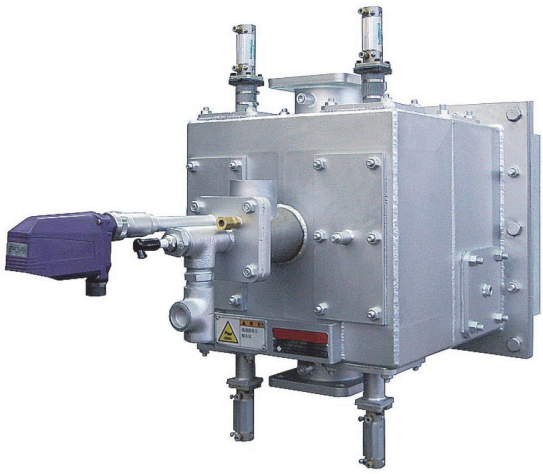


図11　RCB－ES型セルフリジェネバーナ[5]

5.6　RCB－SF型短炎リジェネバーナ

一般的にリジェネバーナは低NOx化技術の緩慢燃焼を行うことで火炎は長くなってしまう。鍛造加熱炉や熱処理炉で炉幅の狭いものでは、処理材料や炉壁等に火炎が干渉するという理由でリジェネバーナの採用が見送られたケースがあった。我々は空気流に強力な旋回をかけつつ燃料を直接炉内に吹き込むことで、短炎火炎と低NOx燃焼の両立が可能なリジェネバーナを開発した（図13）[6]。短炎燃焼することでバーナ近傍温度が上がり、効率のよい輻射伝熱が支配的となる。また処理材料までの距離を短くすることが可能となり、将来の工業炉を小型化できるといったメリットも期待できる。

6　リジェネバーナ特有の事例紹介

25年の歴史の中で、当社が経験してきたトラブルや不具合を中心としたリジェネバーナ特有の事例を紹介する。今後の設計検討の参考になれば幸いである。

6.1　バーナタイルについて

リジェネバーナと一般バーナの決定的な違いは、高温排ガスをバーナ内に吸引するかしないかである。バーナタイルに

図12　取鍋予熱装置専用リジェネバーナ[3]

17

使用する耐火物の選定は、熱的スポーリングについて細心の注意を払わねばならない。リジェネバーナ周りの炉壁耐火物の選定も同様である。また、スタッド金物の取付け位置や炉内側へのせり出しなども考慮が必要である。

図14[7]はリジェネバーナのバーナタイル周りをセラミックファイバーで構成していたために、バーナタイルが輪切りの状態で脱落・焼損した事例である。

6.2　低温腐食について

バッチ炉などで高温操業と低温操業が混在する設備では、低温操業時に結露で排ガスダクトが腐食しないように、切替時間の延長や排ガス吸引量を増加するなど、排ガス出口温度を酸露点以下に下げない対策をする必要がある。特にCOGや重油などの硫黄分含有燃料を使用する場合は、接排ガス部に耐硫酸腐食鋼を使用するなど低温腐食対策が必要になる。高効率を追い求めるあまりに排ガス温度を下げ過ぎて、このような不具合を出しては本末転倒である。

図15[8]は排ガスラインに設置した伸縮管が低温腐食により損傷した事例である。

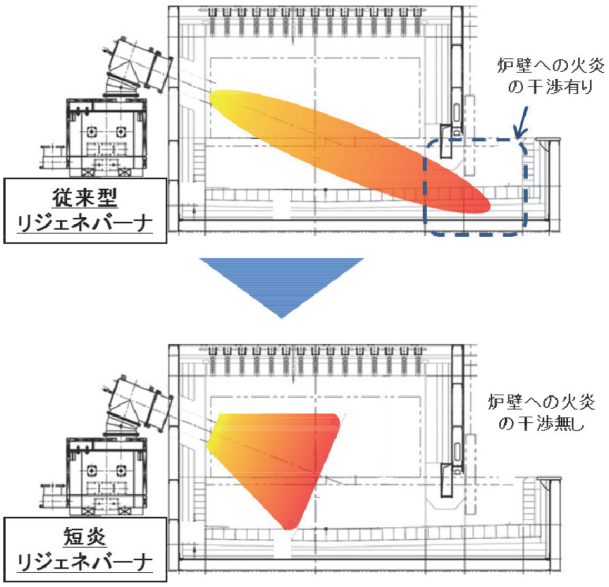


図13　RCB－SF型短炎リジェネバーナ[6]

6.3　蓄熱ボールのつまり

モリブデンが含まれている特殊鋼などを処理する場合には、モリブデン昇華による蓄熱ボールの詰まりに注意しなければならない。酸化モリブデンの昇華温度はおよそ700～800℃であるため、炉内燃焼排ガス中には幾ばくかのモリブデンが昇華した状態で含まれている。例えば1200℃の排ガスが蓄熱器上部に吸引された場合、蓄熱器下部ではおよそ200℃まで温度が下がるため、蓄熱器中間部で固体に戻って蓄熱器を詰まらせてしまい、ボールのメンテナンス頻度が増大してしまう。そのメンテナンス頻度を低減させる方法として再昇華システムを取り入れた実績もある。

図16にモリブデンの付着状況を示す。モリブデンの外観は、黄色または明るい青色の固体である。

6.4　蓄熱器耐火物の炭酸化現象

炭酸化現象とは、大気中の炭酸ガスが耐火物中の成分と反応して炭酸カルシウムを生成する現象のことである。主な現象としては、白華、粉化、チッピング、ピーピングなどがあるが、これらの現象は程度の差はあれ必ず起こる現象である。殆どの場合品質に影響は無いものの“見た目”が非常に悪い。耐火物の乾燥を行なうことで回避できるが、大型形状の蓄熱器の内部ライニングは通常、事前乾燥を行なっておらず、無

図14　焼損したバーナタイル[7]

図15　低温腐食による伸縮管の損傷[8]

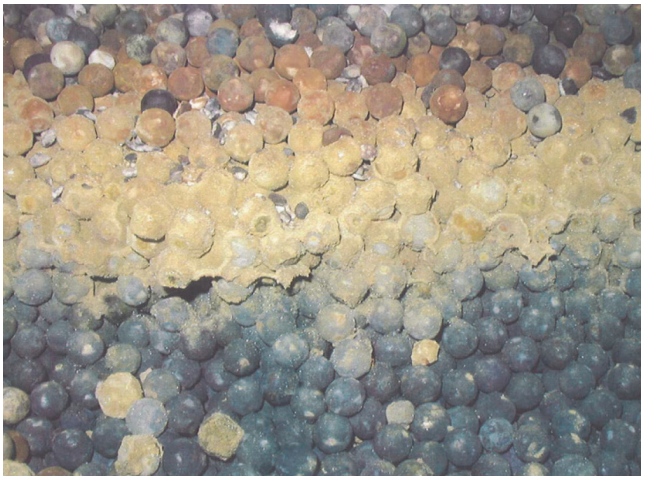


図16　モリブデン付着状況

図18　三方切替弁の外観[3)]

図17　蓄熱器内で発生した炭酸化現象（白華）

乾燥状態で長期間保管や長距離輸送する場合には注意が必要である。

図17に蓄熱器内で発生した炭酸化現象（白華）の事例を示す。

6.5　切替弁について

リジェネバーナシステムの交番切替の動作は、燃料、空気、排ガスそれぞれの切替弁で行なっており、切替時間は30～60秒が一般的な時間である。設備が連続操業の場合には、2年間で100万回を超える計算になる。緊急時の対応を考慮して、消耗品や交換部品の予備品を準備しておく必要がある。

排ガス切替弁を保温することにより、結露が予防できるとともに、シャフトと軸受け部の熱膨張差を少なくできる点でも有効である。設計時には、本体や軸受部にドレンなどが溜まりにくい配管レイアウトにしておくのも良い。

初期にはL型形状の切替弁を使用していたが、耐久性に問題があり以降、弁メーカのものを多く採用していた。最近では新しく三方切替弁を開発・内作し、順調に実績を伸ばしている（図18）[3)]。

7　おわりに

当社がリジェネバーナシステムを発売して四半世紀が経過した。この間、かつて無い様々な不具合も経験してきたが、その都度汗をかいて乗り越えてきた。この当社のRCBリジェネバーナシステムの発展にご尽力いただいた客先をはじめ、関係各位の皆様、並びに諸先輩方にこの場をお借りして御礼申し上げたい。

参考文献

1）作花済夫, 境野照雄, 高橋克明：ガラスハンドブック,朝倉書店,（1975）
2）佐藤順一：高性能工業炉の開発,（2015）
3）中外炉工業RCBカタログ：CB-250-02M.
4）中外炉工業RCBカタログ：CB-250-01.
5）河本祐作：工業加熱, 51（2014）5, 17.
6）田原広基, 河本祐作, 川端健介:工業加熱, 54（2017）3, 1.
7）日本特殊炉材株式会社：耐火物講座資料, (2001)
8）河本祐作, 松本健介：AL-ある,（2007）477, 17.

（2019年9月20日受付）