

環境調和型蓄熱式バーナの実用化と将来展望

Eco-friendly Regenerative Burner Heating System Technology Application and Its Future View

福嶋 信一郎	鉄鋼技術センター 環境・エネルギー部 主席	Shinichiro Fukushima
鈴川 豊	鉄鋼技術センター 環境・エネルギー部 統括スタッフ	Yutaka Suzukawa
秋山 俊一	京浜製鉄所 環境・エネルギー部 室長	Toshikazu Akiyama
加藤 有三	福山製鉄所 環境・エネルギー部 グループマネージャー	Yuzo Kato
藤林 晃夫	総合材料技術研究所 圧延プロセス研究部 主査	Akio Fujibayashi
多田 健	日本ファーンエス工業(株) 取締役	Takeshi Tada

地球温暖化(CO₂)問題と新たな環境問題への具体的な対策が求められている中で、省エネルギーと低NO_xを達成できる革新的技術として環境調和型(セラミックハニカム式)蓄熱式バーナが注目されている。当社は日本ファーンエス工業(株)と共同で開発に取り組み、すでに当社だけでも11基の工業炉に適用し、平均30%以上の省エネ、50%以上の低NO_x効果など目標以上の効果を上げている。今後は国内外にて地球規模での温暖化、酸性雨(低NO_x)対策の切り札として期待されている。

The environmental harmonized, ceramic honeycomb regenerative burner system is worth of note for innovative technology, due to its effective energy consumption and low in NO_x emission in being required concrete measures to protect from global warming and new environmental problems. NKK and Nippon Furnace Kogyo have jointly developed the technology and succeeded in its practical use. In NKK, this technology have been already applied to the eleven furnaces and have achieved over 30% energy conservation and over 50% NO_x reductions, etc. This system promises worldwide to provide an effective countermeasure to the global greenhouse effect and the acid rain.

1. はじめに

1973年の第一次オイルショックの15年後、1988年に地球温暖化問題への取り組みの必要性を提唱して初めて公式開催されたトロント会議からさらに15年を迎えようとしている。この間、1992年の世界環境技術開発会議で採択され、1994年3月に発効した気候変動枠組条約の締結に続き、1997年のCOP3(第3回締結国会議、京都会議)において採択され、先進各国の1990年比2010年でのCO₂削減に関する具体的な目標が定められた京都議定書も2002年米国を除く先進各国が締結しつつある。オイルショックに始まるこの30年は省エネルギー対策、そして次の温暖化(CO₂)対策へのステップアップを図った時期で、今後更に本格化しようとしている。

当社はこの間、京浜・福山両製鉄所での製鉄所単位の全員参加の省エネルギー活動をベースに、研究開発部門も合わせた全社的取り組みを行い、両製鉄所とも今日まで30%以上の省エネルギー(SAVE量)を達成している。この対策内容は製鉄プロセスの各個別設備の操業保全やエネルギー管理の強化(具体的には加熱炉の空燃比調整などの燃焼管理、ヒートパターンなどの加熱方法の管理や、設備故障低減による能

率向上など)を始め、予測計画、実行、実績管理システムやエネルギー設備の遠隔制御コントロールシステムを装備したエネルギーセンターや電力、燃料、蒸気ラインをリンクさせた排熱回収システムの設置、そしてホットコークスからの熱回収(1基で最大35MWの熱併産発電回収)、高炉炉頂ガス圧エネルギーの発電回収(1基で最大24MWの発電回収)、焼結工場およびクーラーの排熱回収(中圧、低圧蒸気回収)および転炉排熱の潜熱回収化(100m³/t以上のガス回収化)と顕熱回収などの大型排エネルギー回収および連続製造、連続焼鈍に代表されるプロセスの省略や連続化による省エネルギーなどで、1980年後半にはほぼやりつくした感があつた。

一方、環境問題においては1970年より大気汚染防止法、水質汚濁防止法に沿った対策も一段落した後、新たに温暖化(CO₂)対策とともに都市内移動発生源などからのNO_x発生の増加、最近ではSPM問題、そして廃棄物、ダイオキシン、環境ホルモンなどの諸問題、そして同時に1つの対策が次の新たな対策の必要性を生ずることへの戒めとしてLCA(ライフサイクルアナリシス)評価分析法も取り入れられてきた。このような環境下での更なる省エネルギー対策、温暖化(CO₂)対策への取り組みには環境問題も視野に入れた複

合思考による新しいテーマ発掘とシーズ技術開発が不可欠であった。そこで新たな省エネルギーの取り組みに当っては視点を改めて注力点をエネルギーの量から質的な効率改善へとシフトし、使用エネルギーレベルに応じた質（カロリーまたは温度など）を持つエネルギー供給方法や、エネルギーの質を落とさない熱回収方法などの対策や環境問題も意識した独自の技術開発の取り組みを行ってきた。

日本ファーンズ工業㈱（以下、NFK と略記する）と共同開発した環境調和型蓄熱式バーナ加熱システム技術は、限界熱回収と低 NOx 化というこれまでの取り組みでは二律背反のエネルギーと環境の問題を同時に解決するテーマに取り組み、成功したものである¹⁾。本稿ではこの環境調和型蓄熱式バーナ加熱システム技術の開発、実用化とその実績、そして将来展望について紹介する。なお、本技術は国の省エネルギー強化を受けてスタートした国家プロジェクト高性能工業炉などの技術開発プロジェクト（1993年～2000年）においての基盤技術として採用され日本発の技術開発成果のベース技術として認められている。

2. 環境調和型蓄熱式バーナ加熱システム技術の特徴

2.1 加熱炉分野のイノベーション技術^{2),3)}

加熱炉の改善は品質改善と省エネルギーの両面から取り組まれてきた。品質改善面では、搬送方法を Pusher から Walking beam に変更するとともに、加熱制御モデルを導入して表面疵とスキッドマークの改善、均熱性の確保を実現した。省エネルギー面では、輻射式熱交換器から対流型熱交換器への変更、炉体断熱・シール強化、炉壁セラミックファイバ化などハード改善、および炉圧制御最適化、空気比最適化、過加熱防止など操業改善により燃料原単位を下げた。これらの技術は、確立した技術としてほとんどの加熱炉に採用済みであり、更なる改善は困難とされていた。

環境調和型蓄熱式バーナ加熱システムは、大型連続式加熱炉の更なる省エネルギーと排ガス NOx 濃度の大幅削減を世界で初めて両立した革新的技術である。蓄熱式バーナを用いた加熱炉の熱回収方法は、Fig.1 に示すようにバーナ個々の蓄熱体で排ガスと燃焼空気との熱交換がなされる。

耐熱性の高いセラミックハニカム蓄熱体を用い炉温に近い温度の予熱空気を得れば従来の熱交換方式に比べ極めて効率的に熱回収できる。

一方、従来の燃焼器では予熱空気温度が 1200K を超えると、燃焼排ガス中の窒素酸化物濃度が激増し、排出濃度基準制約から実用に供しないと考えられていた。環境調和型蓄熱式バーナ加熱システムでは、1500K 以上の高温の予熱空気と燃料とを炉内で希釈しつつ緩慢に反応させる高温希釈燃焼技術の開発により排ガス NOx 濃度を大幅に削減できることを世界で初めて実証したものである。

この技術は、後に国家プロジェクト「高性能工業炉の開発」

で詳細に評価され、燃焼学に「高温空気燃焼」という新分野を拓いた。このように、すでに飽和状態にあると思われていた工業加熱炉技術に、「分散熱回収技術」と「高温空気燃焼技術」を導入することで、省エネルギー30%、NOx 低減 50% を実現した加熱炉分野のイノベーション技術「環境調和型蓄熱式バーナ加熱システム」が完成した。

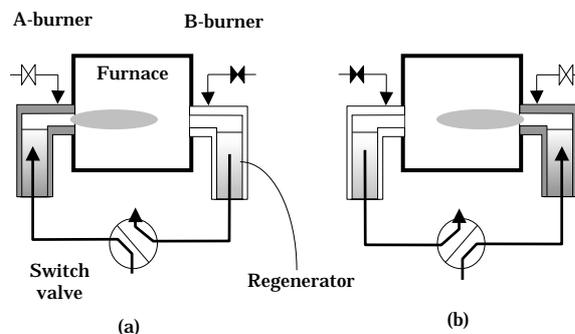


Fig.1 Regenerative burner system

2.2 限界熱回収（蓄熱体の最適化）^{4),5)}

蓄熱式バーナの開発では、蓄熱体の熱回収能力最大化とコンパクト化という、相反する課題があった。それを解決したのがハニカム蓄熱体である。ハニカム蓄熱体はボールなど他の蓄熱体に比べ幾何学的に比表面積が大きく熱交換器として最適である。また、蓄熱体の圧力損失および予熱空気温度の比較でもハニカム蓄熱体が優れている。バーナ燃焼容量とハニカム蓄熱体必要重量との関係はエネルギーバランスに基づいて計算できる。たとえば福山製鉄所熱延工場の連続式スラブ加熱炉に設置したバーナについて蓄熱体重量の計算値（実線）と実績値を示すと Fig.2 が得られる。

文献に示されたボール蓄熱体重量に比べ極めて軽量である。バーナ本体もコンパクトな設計が可能である。このようにして設計されたハニカム蓄熱体を用いた蓄熱式バーナで得られる予熱空気温度は最高 1570K（炉温マイナス 50K）と高温である。ボール蓄熱体を用いた場合の予熱空気温度は実験結果から炉温マイナス 150K 程度と推定される。

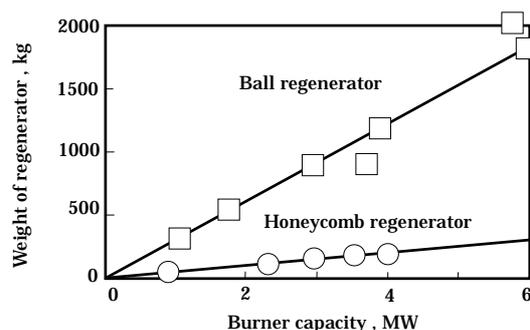


Fig.2 Relationship between weight of regenerator and burner capacity

一方、従来の金属管式熱交換器では予熱空気温度が 900K 程度である。蓄熱式バーナによる排ガス顕熱回収率は(燃料種により異なるが)70~90%であり、金属管式熱交換器では40~50%である。排ガス顕熱を回収して予熱空気の温度を高めることで省エネルギーが実現できるのである。

2.3 超低 NOx 燃焼 (高温空気燃焼の発見)

高温の予熱空気を用いた工業用燃焼器の開発では、空気中の窒素が酸化して発生する NOx (Thermal NOx) の抑制が重要とされてきた。Thermal NOx の生成についてはゼルドビッチらの研究があり、その生成は、温度、酸素濃度、滞留時間の関数であることが知られている。したがって、低 NOx 燃焼の実現には、(1) 火炎最高温度の抑制、(2) 過剰酸素供給防止、が必須と考えられる。それを具現化する方法として、本研究では、NFK が実用化した燃料 2 段燃焼バーナを Fig.3 に示すように高温空気燃焼用に改良して用いることにした。

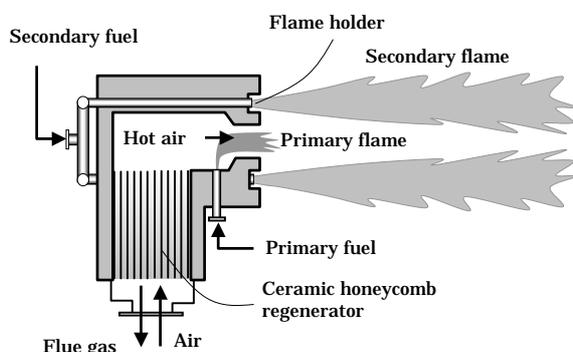


Fig.3 Schematic diagram of the newly developed regenerative burner

Fig.4 に新たに開発したバーナを用い、製鉄所副生ガス燃焼時の燃焼火炎の温度分布、酸素濃度分布、NOx 濃度分布を実験炉で測定した例を、(a) 一次燃料比率を 20%とした場合、(b) 一次燃料比率を 5%とした場合について示す。なお燃焼負荷は 1.2MW で実用バーナ相当容量である。一次燃料比率を 20%とした場合は、火炎にヒートスポットが発生し、かつヒートスポット部分の酸素濃度が高いため、ゼルドビッチ反応により Thermal NOx が激増している。

一方、一次燃料比率を 5%とした場合は、温度分布にヒートスポットがなく、かつ酸素濃度も急速に低下している。この場合の生 NOx 濃度は 80ppm (11%O₂ 換算値 40ppm) 以下と低い。これは、二次燃料と高温の空気が炉内燃焼排ガスで希釈されながら拡散燃焼したと考えられる。このように、高温の予熱空気を用いた燃焼で Thermal NOx の発生を抑制するには、燃料と燃焼空気との適切な拡散混合制御をすれば良く、燃料・空気ノズル位置、噴出速度、一次・二次燃料比率など、バーナの最適設計が必要である。

その後行われた国家プロジェクト「高性能工業炉の開発」において、本技術がその中核技術として採用され、大学を始

め多くの研究者により検証された。特に引用 Fig.5 に示す長谷川らの小型実験結果がその本質を示すデータとして引用されるようになった。この図により、高温の予熱空気を用い低酸素濃度で燃焼すれば低 NOx 燃焼が実現することが学会にも認められ、新しい燃焼の名称も「高温空気燃焼」が使用されるようになったが、その本質は Fig.4 に示した結果に他ならない。

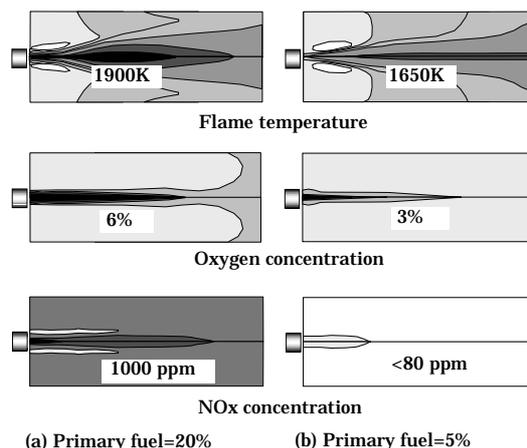


Fig.4 Comparison of flame structure of fuel staged combustion

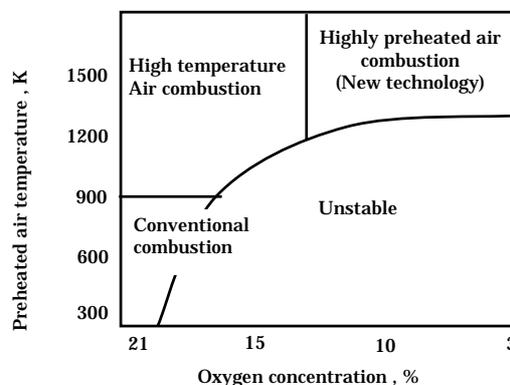


Fig.5 Combustion map by Hasegawa et al⁶⁾

2.4 多種燃料への対応

製鉄所副生ガスや天然ガス燃焼での「高温空気燃焼」は確立した技術である。本技術は油燃焼にも容易に適用できる。Fig.6, Fig.7 は、燃料種を変えて燃焼実験を行い燃焼火炎からの熱輻射分布、排ガス NOx などを比較したものである。燃料種によらず低 NOx 燃焼を実現している。熱輻射分布については差があり、輝炎を形成する油燃焼の方が熱輻射が大きく加熱効率が高くなる。A 重油燃焼においても、切り替え時の燃料ノズルパージを適切に行うことで、煤を発生させることなく高温空気燃焼を実現できた。

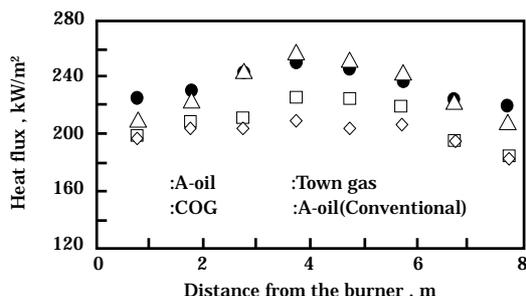


Fig.6 Comparison of heat flux for various fuels

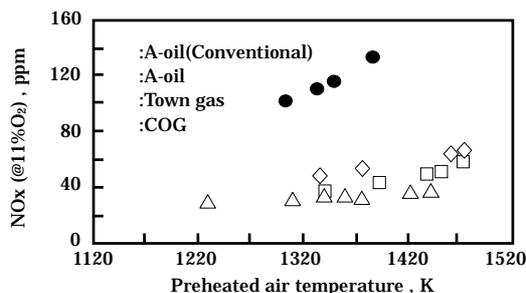


Fig.7 Comparison of NOx emission for various fuels

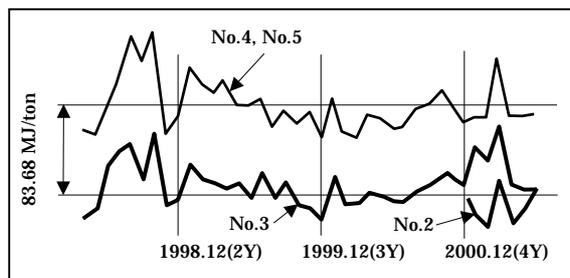


Fig.8 Comparison of unit energy consumption between conventional (No.4, No.5) furnaces and regenerative (No.2, No.3) furnaces

また、NOx 発生量についても、排ガス中 NOx 濃度低減と燃費改善による排ガス量低減の相乗効果により約 80%の大幅な削減を実現している。さらに、二次の効果として、スキッドマークが 30%以上も軽減された。これにより、今回開発した環境調和型蓄熱式バーナ加熱システム (Fig.9) が、省エネルギー・環境保全に極めて実効性の高い技術であることを立証できた。

3. 鉄鋼プロセスへの適用

3.1 鉄鋼プロセスへの蓄熱式バーナ適用の歴史

鉄鋼プロセスへの蓄熱式バーナの適用は、省エネルギー技術として 1980 年代のヨーロッパで行われたのが最初であろう。その後、蓄熱体にボールやナゲットを用いる蓄熱式バーナ技術が日本にも導入され、1994 年には水島製鉄所の連続式鋼片加熱炉に部分適用され省エネルギー効果が得られている。しかし、NOx、蓄熱体容積など、課題があった。

3.2 大型連続炉への全面適用

環境調和型蓄熱式バーナを鉄鋼プロセスの大型連続式鋼片加熱炉に全面適用し、低 NOx 燃焼と省エネルギーを世界で初めて両立したのが当社福山製鉄所第 1 熱延で 1996 年に稼動した No.3 加熱炉である。ここでは、更新前炉に対し省エネルギー 25%、NOx 削減 80%という画期的成果が得られた。さらに 2001 年稼動の No.2 加熱炉でも同様の成果が得られ、技術が確立した。

各加熱炉の燃料原単位差を Fig.8 に示すが、No.3 加熱炉の燃料原単位は稼動以来継続して No.4、No.5 (予熱空気温度 900K、従来型更新炉) 加熱炉より低い値で経過している。その差は稼動当初から約 80MJ/t 前後を推移している。この燃料原単位変動原因は、生産条件の変化のほか、蓄熱体の劣化や切り替え弁漏洩増加による熱回収低下も含まれており、それぞれ対策を講じ設計の標準化を図った。一方、2001 年 1 月に稼動した No.2 加熱炉の燃料原単位は標準設計値通りで、No.4、No.5 加熱炉より約 80MJ/t 以上の低い値で推移している。このように炉本体はもちろんのこと蓄熱体や切り替え弁を適切に設計・管理すれば当初計画通りの熱回収率が得られる。

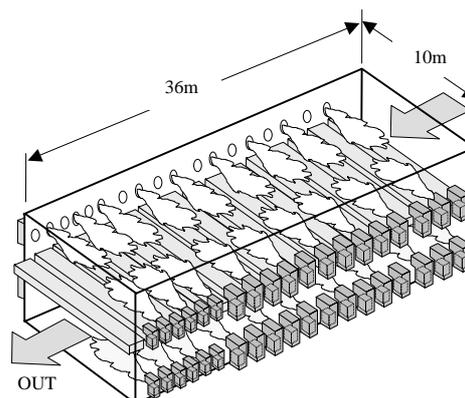


Fig.9 Slab reheating furnace with Eco-friendly Regenerative burner Heating System

3.3 大型連続炉への部分適用

既存の大型連続式鋼片加熱炉に蓄熱式バーナを部分導入することも容易である。導入方法はその目的により異なる。

3.3.1 蓄熱式バーナ増設で加熱能力アップを狙う場合

当社京浜製鉄所厚板工場では連続式加熱炉の加熱能力アップによる加熱炉集約を狙い、加熱炉装入側に蓄熱式バーナを増設する改造を実施した。この改造では、従来バーナは変更しないのでレキュペレーターが流用できる。制御系についても増設部分のみ追加すれば良い。これにより従来の 2 基操業から 1 基操業が可能になり、結果として加熱炉燃料原単位が 13%改善した。さらに、加熱能力アップを実現しながら NOx 発生濃度を規制値以下に維持することに成功している。今後は環境規制がより厳しくなるため、加熱炉改造には「環境調和型蓄熱式バーナ」の採用が必須になると思われる。

3.3.2 従来型バーナを蓄熱式バーナに交換して
省エネルギーを狙う場合

当社福山製鉄所厚板工場では連続式加熱炉の省エネルギーを狙い、加熱炉燃料の約 50%を消費する加熱帯の従来型バーナを蓄熱式バーナに交換する改造を実施した。この改造では、従来型バーナを撤去し、同じ場所に蓄熱式バーナを組み込む改造であったが、八ニカム蓄熱体を内蔵する蓄熱式バーナはコンパクトであるため、バーナピッチを変更することなく組み込みができた。なお、この改造では、加熱帯の従来バーナを撤去したためレキュペレーター能力を縮小改造する必要があった。制御系については、既設制御系を流用し、蓄熱式バーナ切り替え制御のみを追加した。これにより加熱炉燃料原単位が 9%改善された。さらに、「環境調和型蓄熱式バーナ」の採用により、NOx 発生濃度を 40%以上低減することができた。

3.4 まとめ

環境調和型蓄熱式バーナは、必要加熱容量に応じてバーナ数を増減すれば、あらゆる加熱設備に対応できる。

当社では、これまでに 11 の加熱設備に「環境調和型蓄熱式バーナ加熱システム」を適用した。それらによる省エネルギー効果、NOx 削減効果をまとめて Table 1 に示す。省エネルギー率は平均 32%で、省エネルギー量は 1212 TJ/y にも達する。また、NOx 発生量も平均 54%の大幅削減を実現した。

このような成果が評価され、「環境調和型蓄熱式バーナ加熱システム」は 1998 年度、1999 年度の 2 年連続で「省エネルギー優秀事例通商産業大臣賞」、1999 年度「大河内記念賞」、2000 年度「全国発明表彰」を受賞した。

4. 今後の展望

4.1 工業炉への効果と他分野への応用

1992 年の販売開始以来、環境調和型蓄熱式バーナは NFK より主として工業炉分野に拡販され、現在まで 263 件 1532 ペア販売されている。その客先は鉄鋼分野が約 50%、自動車製

造、非鉄分野が 40%、セラミックス、その他が 10%となっている。またすでに紹介したように 1993 年から 2000 年にかけて取り組まれたナショプロ高性能工業炉などの技術開発プロジェクトにて環境調和型蓄熱式バーナシステムを用いた高温空気燃焼技術による各工業炉への高性能化の追求とその現象解明および加熱炉、熱処理炉、溶解炉における最適設計が取り組まれ、省エネルギー（30%）、大幅な低 NOx 化、低騒音化およびコンパクト化（20%）の可能性が理論的にも解明された。引き続き実操業炉での実証試験を種々の工業炉形式にて普及拡大の意味も兼ねて行う FT 事業（フィールドテスト事業）が企画され、1998 年～2000 年の 3 年間で 167 基の試験を開始している（おのおの 4 年間試験を継続してテストデータを積み上げつつある）。なおこれら 167 基の提案時予測効果は石油換算で 16 万 kl/y の削減が見込まれている。

このように卓越した技術を他の燃焼機器へも活用すべきとの意見が高まり、1999 年から 5 年計画でナショプロ高温空気燃焼制御技術開発プロジェクト（HICOT）がスタートしている。研究開発対象としては(1) 微粉炭ボイラ、(2) 廃棄物燃焼炉、(3) 高温化学反応炉が選ばれた。これらに高温空気燃焼技術をそのまま適用することはできないため、応用するに当たっての固有の問題点の解決に取り組んでいる。この中で当社は(2) の廃棄物燃焼炉の適用に取り組み、2002 年 3 月には高温空気を最適に添加することで、従来空気比 1.7 レベルから 1.2～1.3 レベルに下げた低空気燃焼と排ガス無害化が同時に達成され、省エネルギー 30%以上、NOx 低減 30%以上を達成している⁷⁾。

高温空気燃焼の活用はこれらに留まらない。すなわち高温空気を高温流体に、燃焼を反応に置き換えて、さらなる活用フィールドを広げる試験も行われている⁸⁾。この反応器に高温流体を供給する八ニカム蓄熱体を利用した高温流体発生装置では、熱効率率 87%、速度 100m/s で温度 1579K の高温流体が得られている。

Table 1 List of regenerative burner applications in NKK

Name	Year	Application	Burner units	Fuel cut		NOx cut %
				%	TJ/y	
Fukuyama 1HOT No.3 Continuous Slab Reheating Furnace	1996	Full	76	25	294	80
Keihin Electric Furnace Ladle Heater	1996	Full	2	56	29	-
Keihin Seamless Pipe Continuous Reheating Furnace	1997	Full	60	49	56	52
Fukuyama Plate Mill No.1 Batch-type Reheating Furnace	1998	Full	12	40	111	60
Fukuyama No.3 CAL-RT	1999	Full	176	32	21	35
Keihin Plate Mill No.1 Continuous Slab Reheating Furnace	1999	Partial	16	13	212	31
Fukuyama 1HOT No.2 Continuous Slab Reheating Furnace	2000	Full	76	25	294	80
Fukuyama Plate Mill No.3 Batch-type Reheating Furnace	2000	Partial	6	37	51	53
Keihin Ingot Soaking Furnace	2000	Full	4	23	14	62
Fukuyama Plate Mill No.1 Continuous Slab Reheating Furnace	2001	Partial	30	9	65	44
Fukuyama Plate Mill No.2 Continuous Slab Reheating Furnace	2001	Partial	30	9	6	44

4.2 国内対策から海外展開へ

2001年に行われたCOP7マラケシュ会議にて批准に向けた条件が整ったことから(森林などによる吸収源による対策3.9%,京都メカニズムの適用など)2002年にかけて我が国は省エネルギー法の見直しとともに地球温暖化大綱を見直し,閣議決定した。この中にはCOP3で公約した1990年比2010年CO₂6%削減の対策概要が紹介されている。この中で高性能工業炉対策は省エネルギーとして石油換算40万kl/yの効果を期待されており,先のFT事業の効果例を考慮するとFT事業での対策基数の約2.5倍の約400基以上の対策が必要となる。それでも日本における工業炉調査結果の数値の約50%を実質的な対象(約2万基)と考えて,上記基数に従来実績を加味しても普及率は5%以下である。それゆえ2010年までの温暖化(CO₂)対策にかかる省エネルギー目標(石油換算4700万kl/y)への必要技術として,またそれ以降の温暖化(CO₂)対策に向けて当技術の普及拡大が他分野への適用拡大も含め大いに期待される。

環境調和型セラミックハニカム蓄熱バーナ加熱システムに対する期待は,高い熱回収率による省エネルギー性に加えて,極限低NO_xを追求した高温空気燃焼技術にあり,国内のみならず海外,特に環境問題に関心の高い欧州において注目されている。すなわちCO₂などの吸収源である森林保護,湖沼の酸性化対策の観点から酸性雨対策として極限低NO_x化への追求ニーズが高まっており,NFK製のセラミックハニカム蓄熱式バーナの性能確認試験が昨年より今年にかけてフランス,スウェーデン,オランダにて取り組まれている。1~2年後にはその評価がまとめられるであろう。さらには近隣諸国や発展途上国すなわち近隣アジアの韓国,中国,台湾,インドネシア,タイ,マレーシアなどの国々の他,南米ブラジルや東欧諸国などの関心も高く,今後の地球規模での温暖化(CO₂)対策,酸性雨対策技術としての適用拡大そして廃棄物燃焼,反応など他への応用展開が期待される。

参考文献

- 1) 黒瀬ほか. “エネルギー小特集”. NKK 技報. No.161(1998).
- 2) Yutaka Suzukawa et al. “Heat Transfer Improvement and NO_x Reduction by Highly Preheated Air Combustion”. Energy Conversion and Management, Vol.38, No.10-13, pp.1061-1071(1997).
- 3) NEDO. “高性能工業炉フィールド導入テスト事例集”. 1998~2000.
- 4) 石口ほか. “鉄鋼業におけるNO_x抑制技術”. 第9回日本燃焼学会・JFRC合同研究会, 1994.
- 5) Chugai Ro-Hotworks, RCBカタログ.
- 6) 長谷川. “高温空気燃焼技術の可能性”. JFRC年次大会, 1995.
- 7) 鈴木ほか. “高温空気燃焼技術を応用したストーカ型廃棄物焼却プロセス”. NEDO 高温空気燃焼技術フォーラム. pp.53-68(2001).
- 8) S. Mochida et al. “Development of Highly Preheated Turbulent-jet generator”. 3rd International Symposium RAN2001(2001).

<問い合わせ先>

鉄鋼技術センター 環境・エネルギー部

Tel. 03 (3217) 3388 福嶋 信一郎

E-mail address : Shinichiro_Fukushima@ntsgw.tokyo.nkk.co.jp