

討11

(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 喜多村実 浦本明博 ○広瀬勇
機械研究所 鈴木富雄
浅田研究所 工博 能勢和夫

1. 緒言

均熱炉における燃料消費量低減のため、当社加古川製鉄所1分塊工場では、燃焼特性・炉内熱伝達特性・鋼塊内部熱移動について研究を行ない、新しい燃焼制御技術を開発した。この技術を適用することにより、リムド鋼における燃料原単位を $115 \times 10^8 \text{ Kcal/t}$ から $25 \times 10^8 \text{ Kcal/t}$ に低減できた。本報告は、上記技術の開発過程における基礎的な技術解析結果、およびその適用条件について記述したものである。

2. 設備の概要

表-1 均熱炉の設備仕様

項目	仕様
加熱方式	上部一方向燃焼式
炉寸法	$8.2^L \times 4.5^W \times 5.1^D$ (m)
燃料	ブタンガス
発熱量	29200 (Kcal/t)
燃料流量	0 ~ 430 (Nm ³ /t)
燃料流速	最大 50 (m/sec)
空気流量	0 ~ 16000 (Nm ³ /t)
空気流速	最大 40 (m/sec)
換熱器	メタリックレキュペレータ

設備仕様は表1に示す如くであるが、さらに機能面で下記特徴を有する。(1)上部一方向焚により起りがちな炉内各部の偏熱を改善する目的で、燃料と空気の混合および燃焼ガスのフローパターンを任意に制御できる。(2)環境対策として燃料をブタンとし、バーナーには低混合型低NOxバーナーを使用している。(3)炉の気密性を高めるために、燃焼停止時には煙突のドラフトおよび燃焼用空気のリークを完全に零にできる。

3. 燃焼特性

一般に燃料の燃焼により発生した熱エネルギーを被熱物に効率よく伝熱させるためには、火炎形状の適性化、および燃焼ガスフローパターンの適正化が必要である。当社実験炉における火炎放射の解析結果、および実炉における炉内燃焼ガス温度測定結果の1例を紹介する。

3-1 火炎放射 ……近年、燃焼方法を変更することにより低NOx化を図る燃焼技術が発達したが、その中で、燃料と空気の混合速度をゆるやかにする燃焼法が最も容易で信頼性がある。このスローコンバッションによる火炎放射は1図に示すように通常バーナーより高い火炎放射能を持つことがわかり、はからずも低NOx技術と省エネ技術は合致する結果となっている。スローコンバッションにより火炎放射能が高くなるのは、輝炎放射比率が上昇するためと考えられる。

3-2 炉内燃焼ガス温度分布 ……炉内燃焼ガスフローパターンを数学的に表現することは、関連要素が多く複雑となる。そこで実際の炉において、直接水冷式センサーを用い、各種条件下での燃焼ガス温度の実測を行なった。測定値は、センサーによるガス流れの部分的乱れ、炉内閉空間における放射エネルギーの1部吸収が考えられるが実用上は問題ない範囲の誤差と考えられる。均熱炉立断面における燃焼ガス温度の実測直を等温曲線にて2図に示す。熱負荷950万Kcal/hでは反バーナー側に高温燃焼ガ

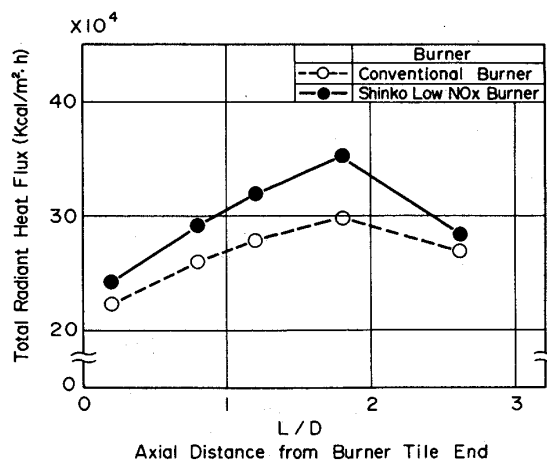


Fig.1 Effect of Burners on Total Radiant Heat Flux (Combustion Furnace)

スが集中し、急速に熱エネルギーを放射し、ガス温度低下率が高い事がわかる。一方250万Kcal/hでは最高燃焼ガス温度が低く、最高温度域が炉の中心部に位置していることがわかる。当図より炉内鋼塊への均等な伝熱を行なわすためには熱負荷を300~500万Kcal/h、バーナ容量換算25~50%の範囲で入熱を行なうのが好ましいと云える。このことは、後述する間欠燃焼法の重要な基礎情報となっている。

4. 炉内熱伝達特性

効果的な燃焼制御技術を確立するためには、各種条件下での燃焼状態を調査・解析すると共に、燃焼により発生した熱エネルギーがどのように伝達されているのかという問題を明らかにする必要がある。ここに当社にて解析した結果の概要を記す。

4-1 形態係数……均熱炉では鋼塊を自立装入しており、複雑な閉空間を形成している。従って熱伝達特性を論ずる場合、炉内内面各部間の輻射エネルギー授受関係を示す形態係数は加熱炉の場合以上に重要な問題となっている。均熱炉に鋼塊を装入した状態

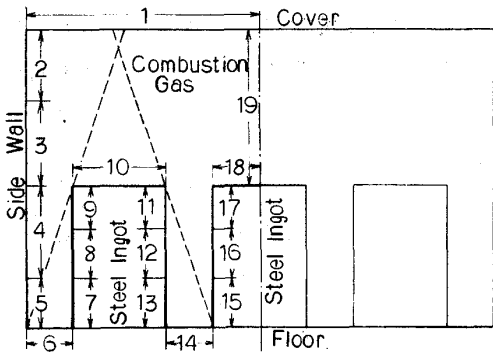


Fig 3 Cross Section of Soaking Pit with Charging Ingots and Division of inner Surface

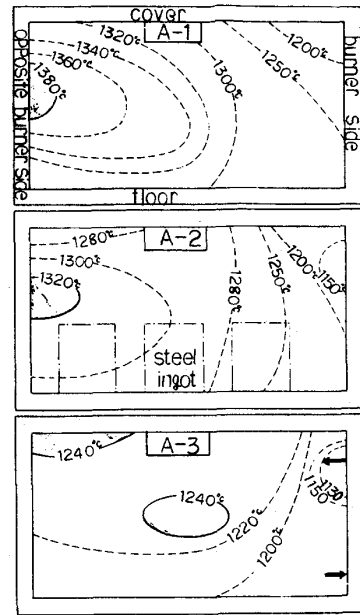
カバーから放散する全熱エネルギーの1%以下になっていることがわかる。従って均熱炉の如く鋼塊が林立している場合には、火炎を広く、均一に分散させると共に、高温の燃焼ガスを炉床近くまで大きく循環させ側壁下部・鋼塊ボトムへの伝熱量を大きくすることがより効果的な燃焼制御法と云えよう。

を正面から見た場合は図8のようであるが

左右対称なため、中央を断熱面と仮定して閉空間を形成させて次元平面問題として算定できる。この閉空間を19の面に分割し、面iから面jに到達する割合を計算すると表1のようになる。なおここでは、20 Ton鋼塊（長辺=1430mm、短辺=935mm、高さ=2670mm）を装入した場合の数値である。表1の横軸No.7・13・15は鋼塊のボトム部の形態係数に相当しており、面1、即ちカバーから受ける輻射は

表2 形態係数 (Fij) × 10⁻⁴

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		1375	1400	610	88	287	17	26	41	1541	102	66	45	387	88	199	312	648	2778
2	4202					65	30	59	134	802						61	559	331	3745
3	2438					132	105	302	1219	1184						505	215	3891	
4	1086					547	1240	3206	3208										700
5	314					2797	4399	2016	465										
6	1117	83	295	1196	3057		3057	852	343										
7	63	35	214	2481	4399	2797													
8	92	68	617	6412	2016	780													
9	147	150	2491	6416	465	314													
10	4764	811	2102																2314
11	365													314	464	2016	4399		2431
12	235													780	2016	4399	2016		544
13	163													2797	4399	2016	465		151
14	1429										343	852	3057		3057	852	343		61
15	314										464	2016	4399	2797					
16	708	71									2016	4399	2016	780					
17	1110	651	1033								4399	2016	465	314					
18	4009	670	763																4554
19	3078	1359	2479	436						830	758	169	47	17					817



No	Input energy (x10 ⁴ kcal/hr)	Fuel velocity (m/sec)	Air velocity (m/sec)
A-1	950	40	30
A-2	600	25	18
A-3	250	10	8

Fig. 2 Relation between Combustion Gas Temperature and Input Heat Energy.

4-2 熱伝達量……熱伝達量は炉壁温度・燃焼ガス温度と鋼塊表面温度との温度差により変化するものであり、一般に高い熱エネルギーを保有する鋼塊を加熱・均熱する均熱炉の場合、鋼塊のエンタルピー状態を正確に予測することが重要となる。そこで当社では要求される正確さのレベルに応じて、炉内の熱移動現象に関する数学モデルを作り詳細なシミュレーションを行ない特性値を把握した。伝熱モデルのレベルは次のようである。

- 鋼塊内部の熱移動には3次元空間モデル
- 炉内空間の熱移動には2次元空間モデル
- 炉壁内部の熱移動には1次元空間モデル
- 炉内雰囲気熱移動には0次元空間モデル

特に鋼塊内部の熱移動については、3次元空間における拡散方程式を差分近似することにより、鋼塊内部各位置における温度分布を算出し、各部の熱応力をも算定できるモデルを開発し、適用した。当伝熱モデルを使い、燃焼により発生した熱エネルギーの移動状態を総合してまとめると図4のようになる。

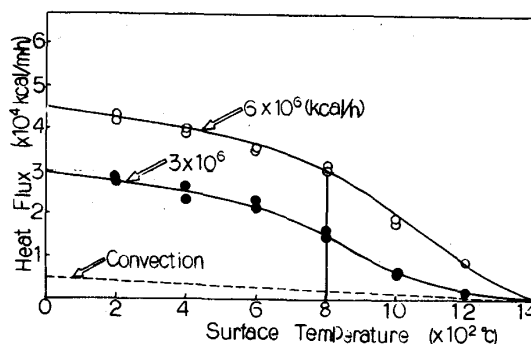


Fig4 Heat Flux on Middle Section of Ingot Surface

ここでは時々刻々と変化する鋼塊表面温度との関係において20トン相当鋼塊のミドル部における平均伝熱量が、どのように変化するかを示している。この場合、炉内全鋼塊の合計表面積は約100m²であるため伝熱効率として次のことが明らかになる。(1)入熱量6×10⁶Kcal/hの場合、鋼塊表面温度の低い領域では70～75%、800°Cで50%、1300°Cでは10%前後に伝熱効率が低下する。(2)3×10⁶Kcal/hの場合、低温域では90%、800°Cで50%の伝熱効率となっている。(3)このことより鋼塊表面温度が800°Cの時、伝熱効率としては、6×10⁶Kcal/hの入熱と3×10⁶Kcal/hの入熱が等価であることがわかる。

このようにして、鋼塊表面温度に対応した最大伝熱効率になる入熱量を選択することにより、最少エネルギー入熱量制御のための基本的条件を把握できるのである。

5. 最少エネルギーヒートパターン

前述した燃焼特性・熱伝達特性の解析は、最少エネルギー入熱量制御のために、重要な技術情報を提供するが、これだけでは適正な入熱量制御技術を確認することはできない。形態係数の項で記述した、鋼塊ボトム部への熱伝達率の低さに対する配慮、燃焼停止時における炉の気密性を高くすることが重要となる。

5-1 鋼塊保有熱量・均熱炉にて処理される鋼塊は一般に未凝固部分を持った熱塊であり適正な燃焼制御技術を確認するためには、鋼塊内部・表面の温度分布を詳細に推測することが大切である。当社で開発した、3次元空間における凝固拡散モデルにてシミュレーションさせた結果、平均エンタルピーが18×10⁴Kcal/t以上のレベルにある鋼塊は5図に示すヒートパターンを適用することにより、約25×10³Kcal/tの燃料投入で均熱することが可能であることがわかった。但しこの場合、鋼塊ボトム部のエンタルピーを高い状態に保持するために、熱伝導率の低い定盤を使用することが必要である。

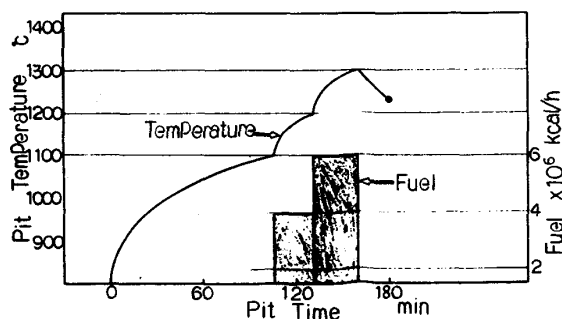


Fig5 Heat Pattern

5-2 炉の気密性保持法 一方5図に示す最少エネルギーヒートパターンを適用する場合、燃焼停止時

の時間帯が長く、その時の熱放散を少なくすることが重要となる。特に最近のように省エネルギーが進んでくると、煙突のドラフトに余裕が出来すぎ、燃焼停止時に炉圧調整ダンパーが全閉になっても、ダンパーの隙間からかなりの吸引力が働らく。当社での解析結果では、炉体・カバーからの通過放散熱量に比べ、炉内への冷風引込みによる放散熱量は約2倍になっていた。そこで最少エネルギーヒートパターン¹⁾の適用に先立って、燃焼中の炉圧制御システムに加え燃焼停止時、および空炉時の集合煙道内圧力制御システムを開発適用した。その結果、現在では図6に示す如く、 $25 \times 10^8 \text{Kcal/t}$ の燃料原単位を達成できた。

6. 結 言

本文では、均熱炉における燃焼制御技術の開発にとって重要な技術情報となる燃焼特性・熱伝達特性、および鋼塊内部熱拡散を中心に記述した。またこれらの技術情報を基礎に新しく開発した間欠燃焼法について、その概要を述べ、その適用法についても説明した。現在キャップド鋼における燃料原単位は $25 \times 10^8 \text{Kcal/t}$ 程度まで低減されており、一応の限界点に達したと判断される。一般に均熱炉で加熱・均熱される鋼塊はすでに、高い熱エネルギーを保有しており、投入熱量が少なくても、なお排ガス顕熱は高く、このため当所・2分塊工場では排熱回収ボイラーを設置し、稼動させている。一方、本文の対象とした、1分塊工場均熱炉においても排熱回収ボイラー、および排ガス循環予熱炉の建設を進めており、均熱炉での消費熱エネルギーは近い将来零に近づくものと考えられる。

本文で記述した技術情報は、単に均熱炉のみならず、一般の加熱炉などにも広く応用できるものと思われる。

7. 引用文献

- 1) 鈴木・能勢・広瀬・中野ほか；鉄と鋼（均熱炉伝熱モデルにおける火炎輻射について）65号（1979）
- 2) 田村・国岡・芳賀；鉄と鋼（均熱炉の燃料原単位低減に関する研究）13巻64号（1978）
日本鉄鋼協会編
- 3) 川下；工業熱力学 改訂版（1975）裳華房、PP230～246
- 4) 日本機械学会；伝熱工学資料（日本機械学会、1975）、3版、PP15～19
- 5) 藤本・佐藤；伝熱工学（1957）、共立、初版、PP53～56

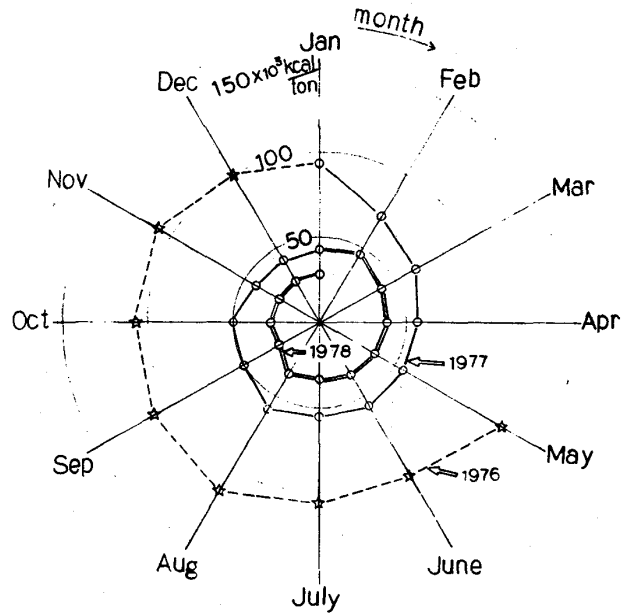


Fig. 6. Fuel Consumption per Ton of Rimmed Steel Ingots.