

討 1

大型高炉における燃料比の理論限界

新日本製鐵(株) 大分製鐵所 ○和栗真次郎 金森 健 白川充社
本 社 若山 昌三

1. 緒 言

戦後我国における高炉技術は、燃料比低減の追求とともに発展してきたといえよう。特に1970年代に入り高炉が3000 m^3 クラスから4000~5000 m^3 へと大型化し、超高压をはじめとする設備技術、原料品質改善など高炉操業条件の研究改善が一層推進された。また高炉の解体調査による炉内状況の把握、特に融着帯の存在確認、装入物分布に関する知見などは、高炉の基礎研究を活発化し実高炉操業の改善に多大なる寄与をしている。このような操業技術・設備技術の総合化による最近の燃料比の低減は著しく、十数年前に比べ約100 $kg/T-P$ の低減を得ており、全国平均でも450 $kg/T-P$ 台で操業されている。

1) 2)

高炉の限界燃料比については、第54回製鉄部会でも討議され、また二・三の報告もあるが、昨今のエネルギー事情のもと更に低減施策を検討するとともに、その理論限界を見極めることは、極めて有意義なテーマである。本稿では、今日までの低燃料比志向技術の考え方と限界燃料比および実高炉での実現性について検討した。

2 今日までの低燃料比志向の考え方

2-1 高压操業 高压操業は、炉内のガススピードの低下をはかり、還元効率、熱効率を向上させ、生産量の増大と燃料比の低減をはかるものであり、最近の減産操業下では低燃料比への効果を実証している。

2-2 高温脱湿送風 熱風炉の大型化、スタッカードパラレル送風技術の採用により、1350℃に達する送風温度が得られている。脱湿送風の採用は、炉下部での吸熱反応の低減、大気湿分変動の抑制による炉熱変動の減少が燃料比の低下に効果をもたらす。しかし、これらは単にエネルギーの代替のみではなく、羽口先温度 T_f の上昇などを通じて、炉内反応構造をより効率的なものに変えられ³⁾る。

2-3 装入物分布制御 分布制御装置を装備した高炉において装入物分布テストと実操業での確認を繰り返しながら、最適使用方法を確立しつつある。その基本的な使用法は、炉内反応構造により適切に変えて、ガス利用率の向上、通気性の改善と炉体熱負荷の低減をはかることである。

2-4 低Si操業 SiO_2 の直接還元反応を少なくし低燃料比を狙うものだが、昨今では製鋼精錬での省エネルギーの立場からも、溶銑の低Si化が要望されている。その方策として、①炉下部での SiO ガス発生^{4) 5)}の抑制 ②滴下帯での反応の抑制と反応時間の短縮が基本的狙いである。具体的には、高压操業、装入 SiO_2 の低減、装入塩基度の上昇⁶⁾などが低Si化に有効である。ここで特徴的なのは、前記の高 T_f 化は一般には SiO ガス発生促進要素と考えられるが、 T_f の上昇とともに $K i t a e v$ の提唱した H を増大させること、すなわち滴下反応域の短縮化により、図1に示めごとく高溶銑温度でも低Si銑の製造を可⁷⁾

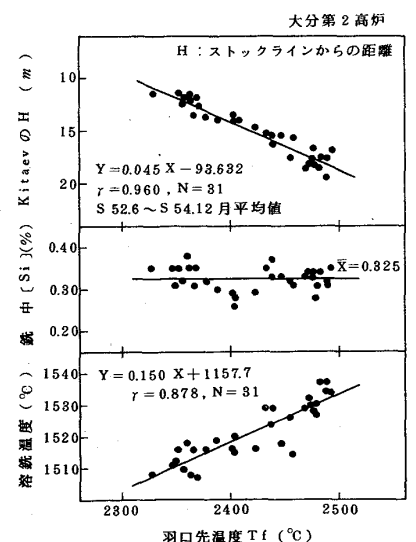


図1 羽口先温度と H 、 $[Si]$
溶銑温度

能ならしめている。

2-5 原料品質改善 焼結鉱の被還元性の改善、整粒強化などは、ガス利用率の向上、操業変動の抑制に大きな効果を発揮している。また従来使用しづらいたとされていたペレットの品質改善、使用方法の開発や還元ペレットの使用が燃料比の低減に効果をもたらしている。

2-6 計装計算機の有効活用 操業管理用計装の開発およびそれを利用したパターンデーター解析、炉内状況推定、アクションガイド策定などは、より適切かつ迅速なアクションを可能ならしめ、安定操業の維持と燃料比の低下に大きく寄与している。

2-7 大型設備の開発・改善と安定化 高炉の大型化にともない、円周バランスを考慮した装入装置の開発、出銑孔の配置、作業性の改善などが、高炉安定化に寄与している効果は大きい。また設備技術力の向上と保守点検整備の強化によるトラブルの激減も、燃料比の低減に大きく寄与している。

以上の操業技術、設備技術の向上により燃料比は大巾に低下し、最近では $420 \sim 430 \text{ kg/T-P}$ の操業が実現されている。

表1 入出熱バランス例

($\times 10^4 \text{ Kcal/T-P}$)

	A	B	C
入 熱			
コークス 燃 焼 熱	49.3	41.4	43.8
オイル 燃 焼 熱	6.0	11.3	8.1
酸化鉄の CO 燃 焼 熱	3.3	3.2	3.1
送風空気の顕熱	47.3	43.2	43.8
送風湿分の顕熱	0.2	0.4	0.5
吹込みオイルの顕熱	0.1	0.3	0.2
スラゲの生成熱	4.6	4.4	4.6
計	110.8	104.2	103.6
出 熱			
酸化鉄の H_2 還元熱	1.4	2.1	2.0
Si の 還 元 熱	2.1	2.0	1.7
Mn の 還 元 熱	0.5	0.6	0.5
P の 還 元 熱	0.6	0.7	0.6
ソリュージョンロス反応熱	34.6	30.4	33.0
溶銑の持ち去り顕熱	32.7	32.1	32.4
スラゲの持ち去り顕熱	15.1	14.0	14.6
送風水分の分解熱	0.4	1.0	1.2
炉頂ガスの顕熱	5.8	5.3	8.1
その他の損失熱	17.6	16.0	9.5
計	110.8	104.2	103.6

3 限界燃料比

表1に代表的高炉の熱バランスを示す。入熱では、燃料燃焼熱と送風顕熱が92～93%を占める。出熱では、ソリュージョンロス反応熱、溶銑顕熱、スラゲ顕熱が約75%を占め、炉頂ガス顕熱とその他の損失熱は高炉によって差がみられる。ここで実際に行ないうる変化巾を考えると、Si還元熱、ソリュージョンロス反応熱、炉頂ガス顕熱プロセス損失熱が検討の対象となる。

ここで燃料比の限界値を主にリストの操業線図と反応伝熱モデルを用いて推定してみる。

3-1 リストの操業線図による検討

まずリストの操業線図を用いて燃料比を推定するが、前提条件は諸事情を考慮して、表2のように決める。推定の結果を図2に示す。シャフト効率 η_s 98～100%が実現すれば、この前提条件のもとで $400 \sim 410 \text{ kg/T-P}$ の燃料比が達成可能であると考えられる。

3-2 反応伝熱モデルによる検討

次に反応伝熱モデルをもちいて、炉内状況の推察を行なう。 T_f 一定すなわち単位風量当りの吹込みオイル量一定の送風条件のもとで、現状の操業と条件をベースに、 ore/coke レベル、すなわち燃料比を段階的に低下させて、炉内状況を推定した(図3)。 ore/coke を現状の操業に相当する4.2から上昇させるにつれ、すなわち燃料比を低下させるにつれ、 1400°C ラインすなわち溶融滴下帯は低下し炉頂温度も低下してくる。

燃料比 410 kg/T-P に相当する $\text{ore/coke} = 4.4$ でも 1400°C ラインはかなり下り、実稼動高炉においては、伝熱効率の向上するものの、溶解律速、装入物の降下不良あるいは還元律速になることが考えられる。

表2 計 算 前 提

項 目	単 位	値	設定の理由	実現の方策
送風温度	$^\circ\text{C}$	1350	実炉最高実績	
送風湿分	g/Nm^3	3	脱 湿	
重油比	kg/T-P	40		
溶銑温度	$^\circ\text{C}$	1500	一部高炉の実績、炉下部の安定性	
銑中 [C]	%	4.5		要検討
[Si]	%	0.2	低溶銑温度、安定操業	
[Mn]	%	0.4	現状、製鋼吹錬歩留	
[P]	%	0.1	現状、原料需給事情	
スラゲ比	kg/T-P	250	低 SiO_2 焼結鉱およびペレット高配合	
ダスト中炭素	kg/T-P	1		
コークス中Ash	%	10	原料需給事情	
焼結鉱中FeO	%	5.0		

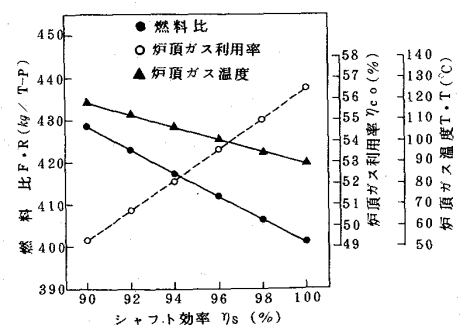


図2 推 定 燃 料 比

上記の検討結果から、メタリックチャージなどの特別装入がない場合の限界燃料比の値は、400 kg/T-Pを大中に下まわることにはないと考えられるが、還元効率、伝熱効率向上と炉体熱負荷低減の同時実現、あるいは融着帯の適正形状位置など、まだまだこれから解明されなければならない。これらについて実稼動高炉で得られている知見を次に述べる。

4 実高炉でみられる限界的問題

実高炉において、操業技術の向上、設備増強などによって燃料比を低減させてくると、限界に近づいていると考えられる種々の現象がみられる。それにつれて二・三の例を述べる。

4-1 シャフト部の還元効率と熱効率の向上

高温脱湿送風は単なるエネルギーの代替のみではなく、 T_f を上昇させて炉内反応構造を効率的なものに変えてきた。すなわち図1にみるように T_f の上昇がHすなわち塊状帯を拡大し、その結果炉頂ガス温度が低下するとともに一般的にはガス利用率が向上し、燃料比の低減を実現出来る(図4)(図5)。しかし炉頂ガス温度を過度に下げすぎた場合には必ずしも還元効率は良くなり(図6)、装入原料との関連性もあるが、総合的には効果的ではなくなるケースも現れている。

また、図7はムーバブルアーマ制御によって融着帯形状を適正に作り炉体熱負荷と同時に炉頂ガス温度も低下させた例である。熱効率が良いと思われる状態だが、ガス利用率は逆に低下している。シャフト部の還元効率、熱効率を同時に改善出来る分布制御技術と原料性状管理技術をあわせて開発する必要性を示す。

4-2 融着帯の低下限界

融着帯の位置形状には装入物の性状なども関係するが、ステープ温度によってこれを推定して操業を行なっている例を図8に示す。融着帯を低くしていると推定される場合には、

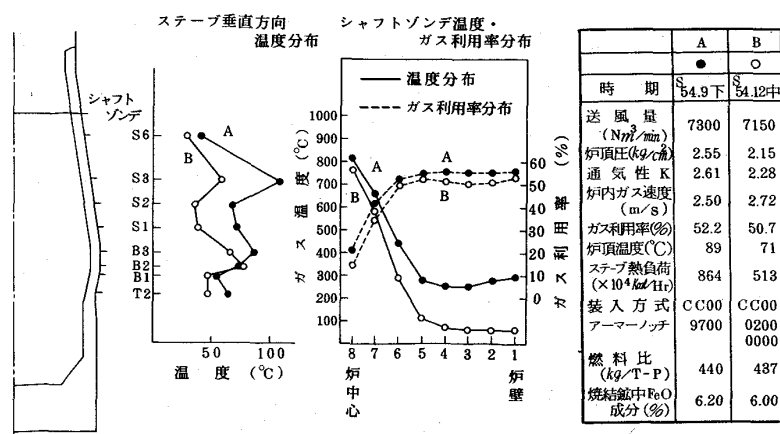


図7 炉内ガス流パターン

大分第2高炉

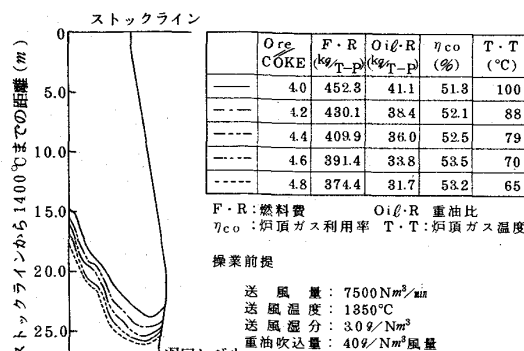


図3 炉内1400°Cラインの推定

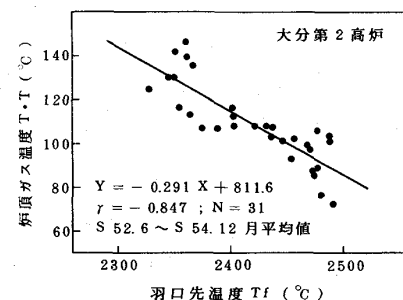


図4 羽口先温度と炉頂ガス温度

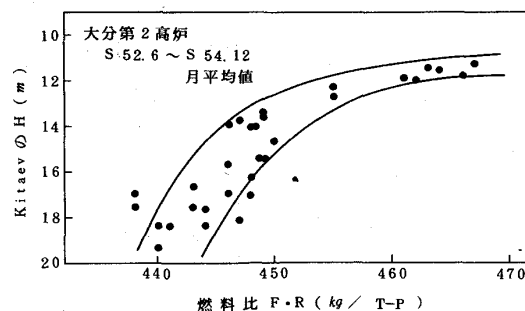


図5 燃料比とKitae's H

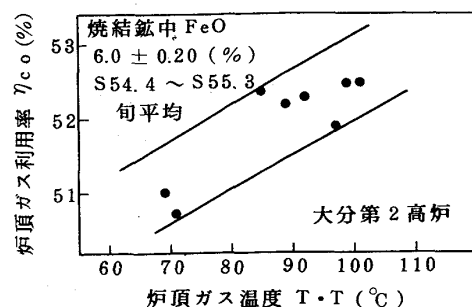


図6 炉頂ガス温度と炉頂ガス利用率

炉頂ガス温度は低く、この状態を継続していると荷下りや通気に異状が現れてくる。この場合には、ボッシュステープ温度が徐々に低下するのがみられるが、これは固液層が低下して部分的な熱不足を生じ、溶解不良にともなう炉下部起因の異状現象と推定される。このような場合、燃料比を上昇させて炉下部を昇熱すると直ちに回復している。

以上の二つの例は、 T_f すなわち送風温度などのエネルギー代替効果や、炉内反応構造を変える効果も上限に近づいていることを示すものであり、一方では炉下部の高効率化によって温度の低下したシャフト部を、他の代替燃料で活性化させる検討、あるいは鉍石の被還元性の開発研究など、今後の限界挑戦が必要であることを示す。

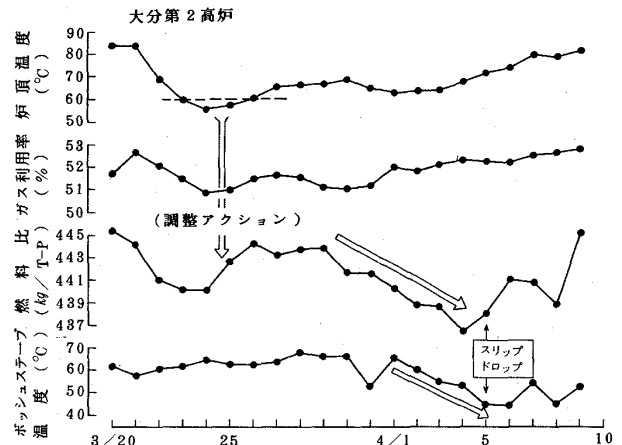


図8 炉下部起因の荷下り異状現象

5 今後の課題

限界燃料比へのステップとして

- (1) マクロ的には、高還元・高熱効率の炉内温度分布を得るための適正融着帯形状の追求と分布制御、原料性状管理などの造り込み技術の追求。
- (2) 更に部分的には、融着層形状とその固層位置下方許容限界およびその装入物予備還元との関係究明、ならびに炉下部活性化技術の探索。
- (3) シャフト固相帯の有効活性化とプロセス障害解消を目指した原料のホットチャージ推進、また一方不活性化の方向にあるシャフトの短縮などによる新低シャフト炉の検討。
- (4) 上記反応に対応する鉍石適正性状（特に高温性状）の追求と低スラグ焼結（ペレット）製造技術の確立。尚低燃料比化の特別手段として還元鉄などメタリックチャージの活用も考えられる。
- (5) 厳しい燃料資源のもとで高温特性に秀れたコークスの安定供給体制と、細粒コークスの高炉における活用。
- (6) 限界挑戦において先ずは長期安定的に遂行される事が最も大切な事であり、それを支えるには前記開発究明に必要な高炉々内解明検出端の一層の開発推進が急がれる。

6 まとめ

主として大型高炉の燃料比の限界とその取組について述べた。原料事情も配慮するとその値は 400 kg/T-P 近傍と推定される。限界に近づきつつある昨今では、高炉、原料、コークスのより一体となった研究推進が、安定省資源操業技術確立に不可欠な体制と考えられ、またこれに平行し全く新たな観点からのプロセス研究が必要となろう。

<参考文献>

- 1) 中谷、向井、中村：鉄と鋼、52(1966)6,P923 2) 研野、須賀田、山口：鉄と鋼、65(1979)10,P1544
- 3) 江崎、和栗、徳永、馬場、北山、中野：鉄と鋼、65(1979)S87 4) 徳田、槌谷、大谷：鉄と鋼、58(1972),P219
- 5) 田村、斧、西田：鉄と鋼、65(1979)S527 6) 江崎、和栗、徳永、馬場、森下、白川：鉄と鋼、65(1979)S88
- 7) B.I.KITAEV,Yu.G.YARASHENKO, and V.D.SUCHKOV:Heat Exchange in Shaft Furnace,(1967)(The Pergamon Press)