

FIMPIT(消耗型光ファイバ温度計)を用いた高炉省エネの追求

New Measuring Method of Hot Smelting Temperature and Application to Blast Furnace

早坂 祥和 福山製鉄所 製鉄部 製鉄工場 班長
 酒井 敦 福山製鉄所 製鉄部 部長
 櫻井 雅昭 福山製鉄所 製鉄部 製鉄工場 工場長
 若井 造 福山製鉄所 製鉄部 企画・調整グループ 統括スタッフ
 森 侯寿 福山製鉄所 製鉄部 製鉄工場 班長
 前原 輝男 福山製鉄所 プロセス制御部 統括スタッフ

Yasukazu Hayasaka
 Astushi Sakai
 Masaaki Sakurai
 Hajime Wakai
 Kimitoshi Mori
 Teruo Maehara

高炉は本来エネルギー効率の高いプロセスであるが、その規模の大きさから莫大なエネルギーを消費する(10000T/D 高炉では 3×10^4 Gcal/D)。したがって高炉の更なる効率向上追及は省エネルギーの観点から極めて有意義である。当社では、従来不可能とされていた高炉の出鉄口(溶鉄の排出口)における溶鉄温度測定技術の開発・実用化(FIMPIT (Fiber In Metallic tube for Pig Iron Temperature))に成功した。この結果、高炉の炉熱レベルを迅速かつ正確に把握することが可能となり、操業アクションの遅れなどによる操業変動要因が排除され、燃料原単位、溶鉄成分の最適化により製鉄・製鋼工程において溶鉄 1 トン当たり 52MJ と大幅な省エネルギーが達成された。

Improving accuracy of blast furnace heat level control is very important to keep stable blast furnace condition as much as possible. So we have developed FIMPIT (Fiber In Metallic tube for Pig Iron Temperature) method to measure hot metal temperature timely at tapping hole. In Fukuyama works, it has been achieved to reduce consumption energy and Si content by installing FIMPIT.

1. はじめに

高炉操業において燃料原単位、溶鉄成分を最適化することは高炉のエネルギー削減だけでなく、製鋼工程のエネルギー削減にもつながる。高炉・転炉一貫製鉄所での製鉄プロセスでは、まず製鉄工程の高炉において鉄鉱石を還元、溶融する。その過程で溶鉄中に溶解した不純物(C, Si, S, Mn, P など)は製鋼工程で酸化除去され鋼が製造される。そのため、高炉操業において、効率良くこれら溶鉄中の不純物を低減することは不純物還元エネルギーの低減につながる。特に溶鉄中シリコン(以下、[Si]と略記する)濃度の低減はその最たるものであり、製鋼工程におけるエネルギーの低減にも極めて有効である。従来、高炉内反応の熱力学的見地から装入物分布制御などによる低シリコン化が鉄鋼各社で推進され大きな成果を上げてきたが、全国平均では約 0.4%をボトムとしほぼ限界に達しており、更なる低シリコン化技術が要望されていた。

2. 高炉操業における省エネの課題

高炉では、原料として鉄鉱石また、燃料としてコークスを上部から層状に装入し、高炉下部の羽口から 1200 の熱風を吹き込みコークスを燃焼させて熱と還元ガスを発生させる。羽口先で生成した 2300 程度の高温の還元ガスは高炉

下部から上部に流れ、原料は下部へ降下する。このようなガスと固体が向流反応することにより、還元反応、および熱交換・溶解が行われ、生成した溶鉄とスラグを出鉄口から出鉄する。この中で、溶鉄中への[Si]移行は、主に SiO ガスを介してのガス-メタル反応(図 1 中、)によって[Si]濃度が決まる。これらの反応を抑制するためには、投入 SiO₂ を低減させることが有効であるが、投入 SiO₂ は、鉄鉱石やコ

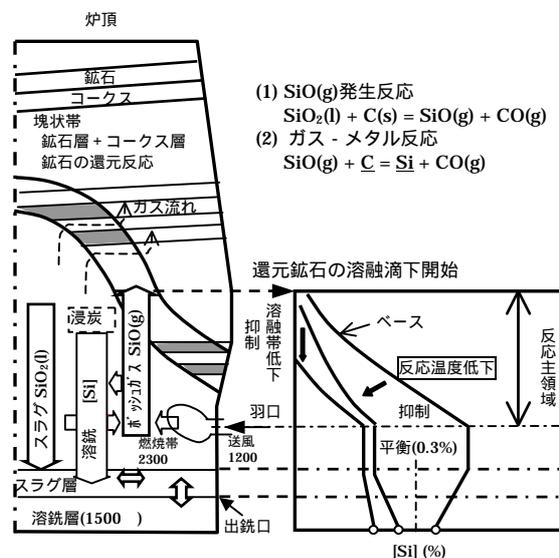


図 1 溶鉄中への[Si]移行反応メカニズム

ークスの灰分中に含まれるため、原燃料性状の影響を大きく受ける。一方で、式(1)、(2)に示す反応は大きな吸熱反応であるため、理論的には操作上可能な限り反応温度、すなわち溶銑温度を低減させることが、より[Si]濃度を低減させる有効な手段となる(表1)。

表1 Si 移行メカニズムと低 Si への方策

基本的な考え方	SiO ₂ ガス発生抑制 SiO ₂ (l)+C(s)= SiO(g)+CO(g)	溶銑中への Si 移行反応抑制 SiO(g)+C=Si+CO(g)
反応温度	・羽口先温度低下 (風熱 湿分)	・溶銑温度低下 風熱 コークス比 湿分
反応時間	-	・溶融帯レベル低下 燃料比 焼結鉱石被還元性 焼結鉱石中 SiO ₂
反応界面積	・コークス粒度	・出銑比 ・コークス粒度
濃度 (活量、分圧)	・投入 SiO ₂ 低減 焼結鉱石中 SiO ₂ コークス灰分	-

実際の高炉操作では、溶銑温度、炉頂ガス成分、炉体温度、炉内圧力、炉内ガス成分、溶銑成分など多種多様な測定データを元に総合的に判断し、必要最小限の燃料使用量で品質の良い溶銑を製造することを目標としている。そのなかでも、溶銑温度は本来高炉内部温度を最も明確に反映しているデータである。従来溶銑温度は測定方法の制約から、出銑口より約 20m 離れた場所でのマニュアル測定を行っており、その測定精度は熱放散や耐火物の抜熱の影響を受け、信頼性の低いものであった。このため、操業アクションの遅れによるある程度の炉熱変動は容認せざるを得なかった。高炉は限界以下に炉熱が下がると溶銑、スラグが炉外に排出できなくなり、大事故につながる。そのため、炉熱変動を考慮し、必要以上に炉熱を上げる傾向があり、このことが、高炉燃料原単位の低減および低[Si]化の妨げとなっていた。しかしながら、低[Si]化による省エネルギーを達成するためには、炉熱測定の迅速化(高精度化)が必要で、約 1500 の比重の大きい溶銑が高速で噴出する出銑口で直接温度を測定する技術の開発が望まれていた。

3. 出銑口溶銑温度測定装置の開発

(1) 溶銑温度測定方法の問題点

先にも述べたように、出銑口からは、溶銑(約 1500、比重約 7 T/m³)が約 20m/sec の高速で噴出する極めて過酷な条件であるため、安全面も含めて、直接測温は不可能であった。したがって従来は出銑口から約 20m離れたスキンマーと呼ばれる部位で測温が行われていた。図2に従来の測定方法を示す。この方法では、樋への抜熱や大気への熱放散の

影響を受けて、出銑初期では低目の値となり、出銑後約 90分は安定した温度を把握することができなかった(図3)。

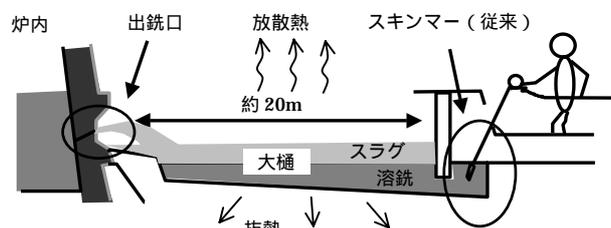


図2 従来の測定方法模式図

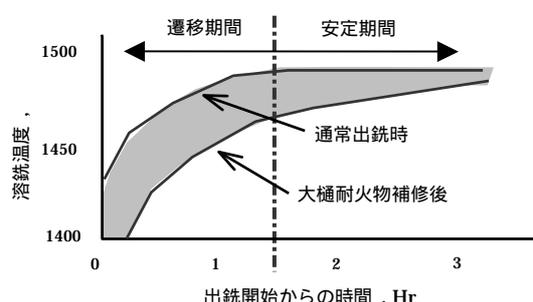


図3 溶銑温度測定推移

(2) 溶銑温度測定方法の検討

出銑口での測定条件は先にも述べた通り、1500 以上の溶銑(比重約 7 T/m³)とスラグが高圧(0.4~0.5MPa)の高炉から 20m/s の高速で直接排出される過酷な条件である。表2に示すように、これらの条件下で測定を行おうとした場合、非接触型放射温度計では測定雰囲気中のダストによる精度の低下、熱電対では比重の重い液体が高速で排出され衝撃により、耐久性の問題があり有効な方法がなかった。

光ファイバ放射温度計は、測定対象物からの放射光を光ファイバを介して、放射温度計へ導き測温する。従来型の光ファイバ放射温度計は、測定対象表面からの放射光を捉えるのに対し、消耗型光ファイバ放射温度計は光ファイバ先端を直接測定対象である溶融金属中に挿入浸漬する接触測定を特徴とし、常に対象を放射率 1 の黒体として扱って正確な温度指示値が得られる特徴がある。そこで、消耗型光ファイバ温度計の特性に着目し、出銑口における溶銑温測定技術の開発を行うこととした。

表2 出銑口での条件検討

	非接触型 放射温度計	浸漬型	
		熱電対	光ファイバ
精度	× (放射率 1)	○	○
応答性	○	× (検出前に溶損)	○

(3) 光ファイバの溶銑流への適応

ファイバを高温の噴出流体に挿入し安定した測定データを得るためには図4に示すようにたわみ(x)を少なくすることが必要である。そのために、溶銑流による力(W)に対して、ガイドパイプと溶銑流の距離(L)、ファイバ送り速度(V)の最適化が重要である。

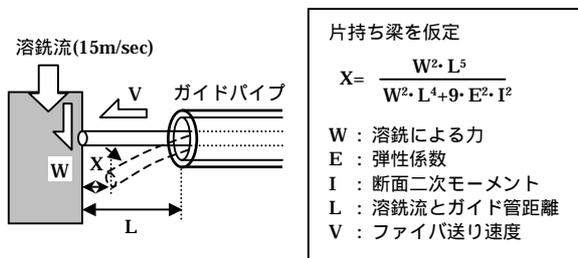


図4 ファイバ構造の考え方

光ファイバを用いて出銑口での直接測温を実施したところ、図5に示すような不安定な波形を示した。

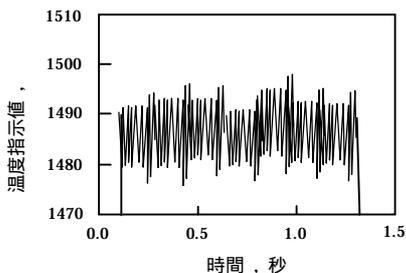


図5 改善前の温度指示値

数多く解析・分析した結果、この波形不安定化は、噴出流体の衝撃エネルギーによる曲損・溶損およびファイバの供給方法に起因していることが判明した。その対策として、図6に示すように、光ファイバを金属管で二重被覆することにより、ファイバを保護補強し、また、ファイバの溶融消耗にあった供給条件とすることで、測定値の安定した再現性が得られた(送り量:200mm以上,送り速度:400mm/sec以上)。

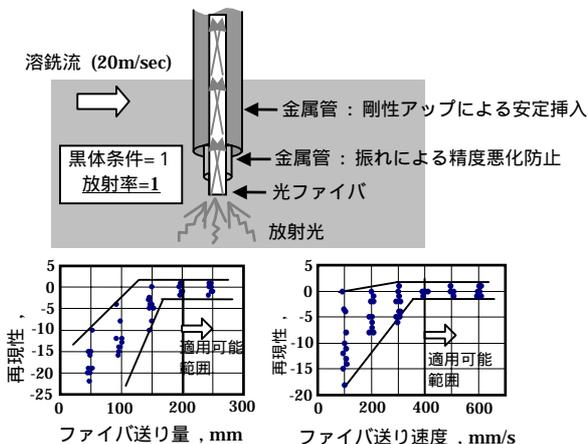


図6 測定安定化対策

装置の設計に当たっては以下の点を考慮し設置した。

- (1) 出銑口近傍の過酷な環境に耐えうる自動測定装置とした。走行部位と計測部位から構成し、遠隔操作とした(図7)。
- (2) 既設移動機器との取り合いを考慮し、出銑口の横から走行して測定する自動測定装置とした(図8)。

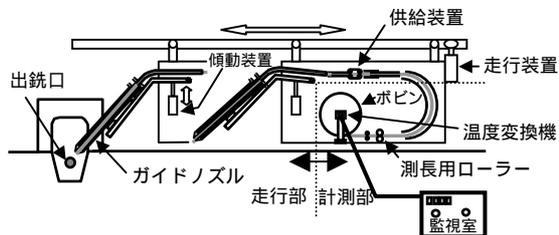


図7 溶銑温度測定装置概要図

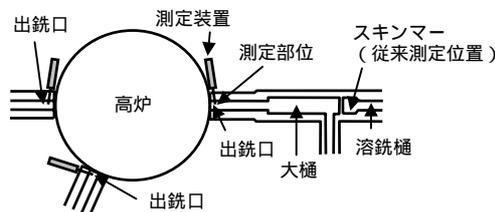


図8 溶銑温度測定装置設置レイアウト

(3) 従来方法と測温結果の比較

図9にFIMPITによる出銑口測温と従来のスキンマーにおける熱電対測温の比較を示す。出銑口部での溶銑温度は連続的に推移していることが示され、樋などへの抜熱による影響が排除されていることが明らかとなった。特に大樋の耐火物補修後の初出銑時はその影響が大きいことがわかった。そのため、従来方法では出銑初期の温度が低いため、炉熱の把握に時間を要していたことが判明した。

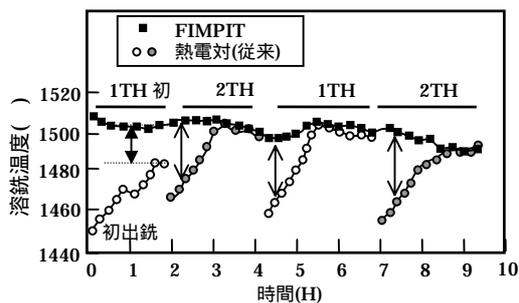


図9 温度推移測定比較

図10に、横軸に出銑口での測定値、縦軸にスキンマーでの測定値をとり比較した図を示す。出銑開始後1時間~1.5時間後の樋での溶銑温度への外乱影響が無視できる時間帯においては、従来の測定方法と今回の測定方法には傾き1の良い一致を示している。これらの結果、FIMPITは真の溶銑温度を示しており、出銑初期の温度も正確に測定することが可能となった。

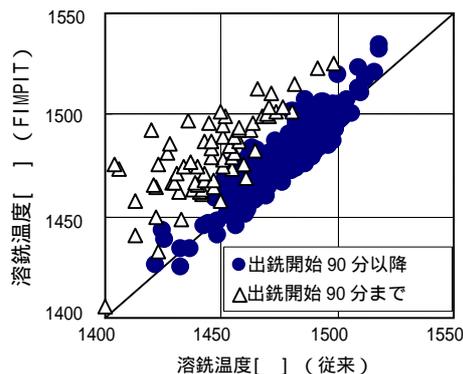


図 10 溶銑温度比較

4. 対策後の効果

(1) 炉熱レベル低減

図 11 に出銑開始 90 分以前の溶銑温度と[Si]の関係を示す。従来のスキンマー部での熱電対による測定方法では溶銑温度と[Si]の関係にはばらつきが多く、大樋での熱放散、抜熱の影響などを受けているため、高炉内部の温度を精度良く反映できていなかったが、FIMPIT で測定した溶銑温度と[Si]には良い相関があることから、出銑口部で測定した温度は高炉内部温度を示していることがわかった。

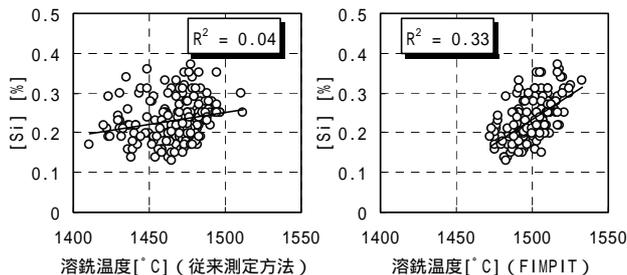


図 11 溶銑温度と[Si]濃度の関係

この結果を受けて、従来より行われてきた操業改善を実施しながら、高炉熱レベルの最適化操業の実施を行った。図 12 に FIMPIT 採用前後の溶銑温度と[Si]の関係を示すが、FIMPIT 導入による熱レベル制御の向上により炉内温度の低減と低[Si]化を行うことが可能となった。

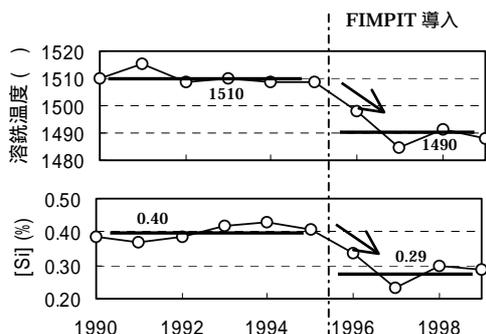


図 12 FIMPIT 導入前後の[Si]の動き

図 13 は、1990 年以降の[Si]推移を示しているが、最近の高 PCR 操業に伴い国内主要高炉平均[Si]は上昇傾向に転じているにもかかわらず、福山製鉄所では FIMPIT の導入により高度炉熱制御の長期継続を可能としたことで、ここ数年間は[Si]レベルでは国内ベストを維持している。

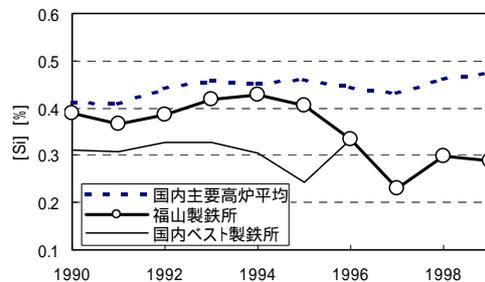


図 13 [Si]濃度推移

(2) 省エネルギー効果

省エネルギー効果は炉熱レベル適正化による溶銑滓顕熱低減および、[Si]低減による還元エネルギー低減として考えることができる。FIMPIT 導入前後実績より、について試算を行う。

[Si]低減による還元エネルギー低下

$$[\text{Si}] \quad 0.40 \quad 0.29 \text{ (wt\%)}$$

溶銑への Si 移行反応は総括反応は式(a)に示す反応式として取り扱うことができる。



図 14 に出銑[Si]と溶銑 1 トン当たりの反応熱の関係を示した。FIMPIT 導入前後で約 34.3MJ/T-pig のエネルギー低減ができた。

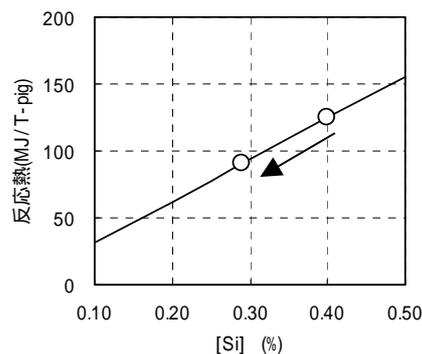


図 14 [Si]と反応熱の関係

溶銑温度低減による溶銑滓顕熱の低下

$$\text{溶銑温度} \quad 1510 \quad 1490 \quad (20)$$

溶銑温度低下による溶銑およびスラグの顕熱は下式より算出される。

$$\text{溶銑顕熱} = 0.44 \times \text{溶銑温度} - 43 \text{ [kJ/mol-fe]} \quad \dots\dots(b)$$

$$\text{溶銑顕熱} = 250 \times \text{スラグ比}(\text{kg/T-pig}) \text{ [kJ/T-pig]} \quad \dots\dots(c)$$

これらの式を用い、溶銑温度と溶銑滓頭熱の関係を図 15 に示した。FIMPIT 導入前後で約 15.7MJ/T-pig のエネルギー低減ができた。

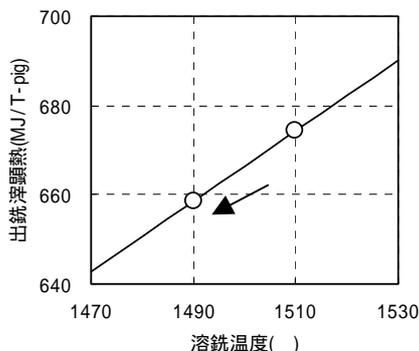


図 15 溶銑温度と出銑滓頭熱の関係

、の効果によりエネルギー削減量は溶銑 1 トン当たり約 50MJ となり当所の昨年の実績では 450×106MJ / 年に相当する。

(3) 低[Si]化による製鋼工程への影響

製鋼工程では高炉で還元された不純物を再び酸化処理(脱 Si, 脱 S, 脱 P, 脱 C) するため、出銑[Si]低減は予備処理工程の一つである脱 Si 過程において酸化剤である酸素原単位の低減により酸素製造分の省エネルギーが可能となる。

図 16 に[Si]と酸素使用量の関係を示す。反応効率を考慮した数値で示してあるが、FIMPIT 導入前後で約 0.4Nm³/T-pig の低減が可能となった。エネルギー換算すると溶銑 1 トン当たり約 2.2MJ/T-pig に相当する。

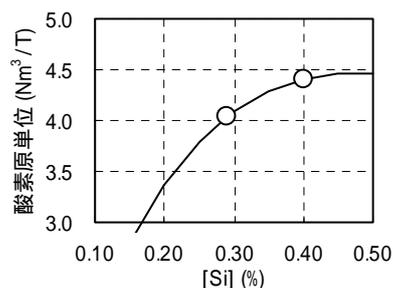


図 16 [Si]と酸素使用量の関係

5. おわりに

FIMPIT の開発・実用化により、世界で初めて高炉出銑口での測温が可能となり、かつ高炉の炉熱レベルを最適化することが可能となった。以上の結果として、製銑・製鋼工程において溶銑トン当たり約 52MJ の省エネルギーとなり、年間で 450×106MJ に達する。

FIMPIT は現在当社の全高炉に採用されており順調に稼働中である。

参考文献

- 1) NKK 技報. No.152(1995).
- 2) NKK 技報. No.164(1998).
- 3) SEAISI 2000 AUSTRALIA CONFERENCE.

<問い合わせ先>

福山製鉄所 製銑部 製銑工場

Tel. 084 (945) 3442 早坂 祥和

E-mail address : Yasukazu_Hayasaka@ntsgw.fukuyama.nkk.co.jp