

(解説)

神戸製鋼における高炉炉内計測技術の進歩と今後の課題

Progress of Blast Furnace Measurement Technology and Subject of Future at Kobe Steel



松井良行^{*}(工博)
Dr. Yoshiyuki MATSUI



柴田耕一郎^{**}(工博)
Dr. Kouichiro SHIBATA



吉田康夫^{**}
Yasuo YOSHIDA



門口維人^{***}
Korehito KADOGUCHI



小野玲児^{***}
Reiji ONO

Kobe Steel took the initiative in the measurement technology under the high pellets ratio operation by introducing gas sampler first in Japan to Kakogawa No.1 blast furnace. This methodology reconstructed the novel philosophy for central gas flow control produced the series of thinking chain reaction of recognition on furnace phenomena and operational philosophy. Especially, cohesive zone shape measurement, falling trajectory measurement and raceway measurement have been developed and strengthened furnace performances under the intensive coal injection, high productivity and long furnace life operation.

まえがき = 当社は、1959年神戸第1高炉の火入れ¹⁾をもって、銑鋼一貫製鉄所として操業を開始した。最後発である当社の高炉炉内計測技術の進歩を振り返りみれば、「高炉炉内反応研究上の今後の問題点²⁾」が思い起こされる。

1977年大谷は、『高炉研究の究極的な目標は、炉内状況を適確に把握し、熱および反応の変化の方向と量を予測、操業因子を適正に制御することによって、燃料比・生産性、あるいは熱負荷等々より構成される総合的目的関数を最適値に維持することにある』と述べている²⁾。

これに対応して当社では、「高炉をきわめつくす」という方針に基づき、計測端の開発と数式モデルによるプロセス解析などから化学的・物理的にも現象の理解の深化³⁾とプロセスの定量化⁴⁾を行い、融着帯形状等が解明され、操業にも反映されてきた⁵⁾。しかしながら、「炉況」という高炉技術関係者にとって、直感的な経験に裏付けられた判断⁶⁾が、今日もなお残っていることも事実である。『残念ながら、理論的解明が先行して高炉操業が向上するという結果にはならず、高炉操業の成果がつねに理論より先行する』¹⁾のが現状であり、その理論的解明を担うのが計測技術と言える。

本稿では、逆V型融着帯の形成操業をさらに発展させたコークス中心装入法による中心流操業を確立していく過程で、当社の高炉炉内計測技術が歴史的・技術的にどのように発展してきたのかを俯瞰し、来るべき高炉操業技術に向けた視座の一助としたい。

1. 当社の高炉操業技術の変遷

図1に、当社の高炉操業技術の歩みを示す。当社製鉄部門の変遷は、以下の6期に分類される⁷⁾。

- 第 期：創業期（炉内容積 600 ~ 1,000m³：1959 ~ 1970年）

- 第 期：成長期（炉内容積拡大期：1970 ~ 1978年）
- 第 期：成熟期（エネルギー危機以降の低成長期：1979 ~ 1982年）
- 第 期：黎明期（微粉炭多量吹込み操業への移行期：1983 ~ 1987年）
- 第 期：革新期（コークス中心装入技術の開始：1988年 ~ 1999年）
- 第 期：環境調和移行期（廃プラ吹込み 2000年 ~ , オールペレット操業：2001年 ~ 現在）

とくに第 期は、神戸3高炉に続いて建設された加古川1, 2, 3高炉が炉内容積を逐次1,000m³ずつ拡大させていった期間である。その先鋒を切った加古川1高炉は、国内初導入とほぼ同時期にムーバブルアーマを導入し、国内初の炉内ガスサンプラを活用し、ペレット多配合操業下での装入物分布制御技術の基礎的な解明を行っている。技術は大型に成長するに従って学問へと昇華する、これは原理的通性であると言われるなかで、炉容拡大ともない高炉操業技術が、総合工学としての体系化へと歩み始めた時期が第 期に相当する。その後、当社は、1970年代までに確立された酸素富化送風と燃料吹込みとの複合吹込みの概念とその理論を受けて、コークス炉能力不足の解消およびエネルギーコストの低減を目標として、1983年から加古川2高炉および神戸3高炉において微粉炭（以下、PC）吹込み操業を導入した。その後、ペレット多配合下において大型化ともなう操業課題を克服することを目的とし、装入物の炉内での運動に関する研究が進められるとともに中心流の直接制御手段に対する強い志向を契機としてコークス中心装入法が萌芽する。

現在、国内において粗鋼生産の伸びが飽和し、鉄源の確保として大型高炉への集約が進むなかで、高出鉄操業における操業安定性が注視されている。高炉の安定操業

^{*}鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター ^{**}鉄鋼部門 加古川製鉄所 製鉄部 ^{***}鉄鋼部門 神戸製鉄所 製鉄部

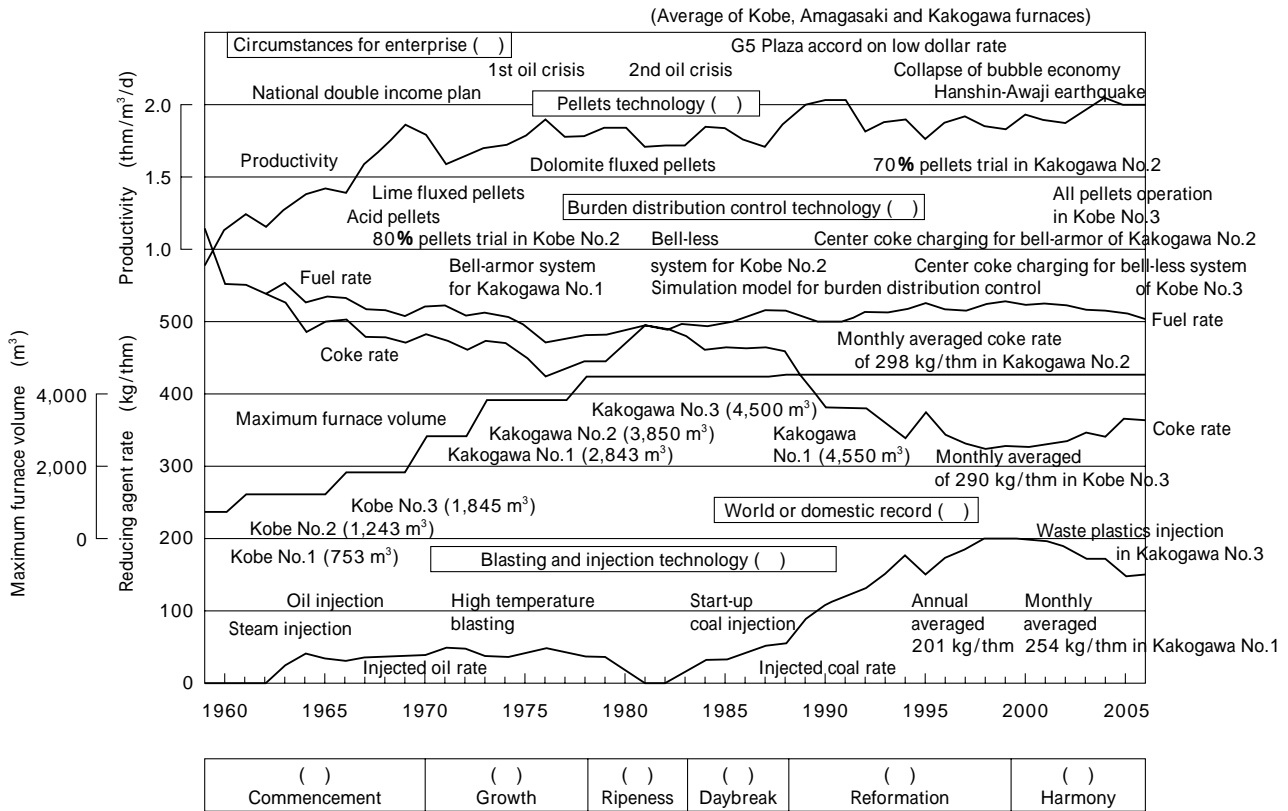


図1 当社における高炉操業技術の歩み
Fig. 1 Progress of blast furnace iron-making technology in Kobe Steel

が生命線であるなかで、高炉集約が進む現在においては、高炉異常炉況は、従来にもまして下工程へ甚大な悪影響を与える。とくに、PC 吹込み操業の方が操業トラブルが多い傾向にあること、また、オールコークスから PC 吹込みへの移行時期においてトラブルが多く発生していること、さらには、近年のトラブル増加の一要因として高炉の大型化と高出銑比操業が指摘されており、とくに注目される。このため、高炉の大型化、高出銑比操業における装入物分布、および荷下がり状況あるいは融着帯、レースウェイの形態とその分布状況などの管理が極めて重要視されてきている。

2. 高炉操業限界に至る高炉全系における炉内変化

表 1 に、動力的観点から高炉操業限界に至る非正常現象を示す。炉況の安定とその結果から還元材比を決定するものは通気性である。高炉の通気性変動をもたらす要因は、装入物の粒度分布の変動にともなう装入物分布の変動、炉内粉化による粒度分布の変化、およびこれらの結果としての融着帯形状の変動などであるが、すべてがガス流れの不安定化を介して通気性変動の要因となる。通気性が悪くなると、荷下がり不順や柵吊りを誘発し、炉熱変動をともなった高炉全系での炉況不調へとつながってゆく。したがって、ガス流れの不安定化を誘発

表 1 高微粉炭吹込み操業下における高炉操業限界に至る非正常現象

Table 1 Unsteady phenomena forcing functional disorder on blast furnace performance of intensive coal injection
(: focused in a series of research by authors)

	Functions	Functional disorder		
		Gas	Solid	Liquid
shaft	Gas distribution by layer structure in height and radius	Losing central gas flow	Hanging & Slip	
	Burden distribution by batch sequence		Unstable layer structure	
Bosh & Belly	Gas distribution from coke slits of cohesive zone	Bypassing & Channeing	Coke slit chocking Fluidizing	
	Liquid distribution		Direct smelting	Flooding
Raceway & Hearth	Gas distribution by blast energy transformation	Poor gas penetration	Backattack on tuyere	Tuyere erosion
	Drainage of liquid		Tap hole chocking	Unbalanced tapping

する炉内現象の明確化がとくに重要である。

図 2 に、装入物分布および荷下がり状況あるいは軟化融着帯、レースウェイの形態とその分布状況の非正常過程に関する模式図⁸⁾を示す。シャフト部における通気抵抗分布を介しての融着帯形状制御を目的とする炉口部での装入物分布は、炉下部機能においては、唯一の充填構造体であるコークスの径方向および周方位での炉下部への流入形態を規定する。その一方で、コークスの径方向および周方位でのコークスのガス化・燃焼は、高炉全系での固体流れを支配するため、その炉内現象の明確化がとくに重要である。

図 3 に、加古川 3 高炉および神戸 3 高炉の主なセンサの設置状況を示す。通常操業や操業条件の変更にともなう炉内状態の変化の指標として、センサ情報からの炉内推定技術が有用である。このため、高さ方向や円周方向

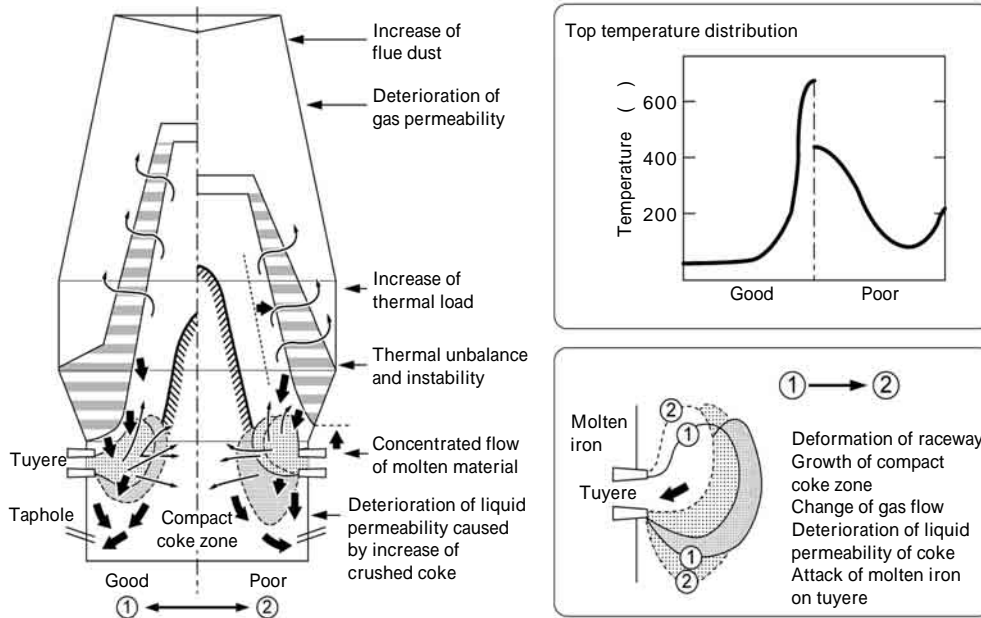


図2 非定常状態におけるガス流れ，融着帯およびレースウェイの変化
 Fig. 2 Changes of gas flow, cohesive zone and raceways under unsteady state

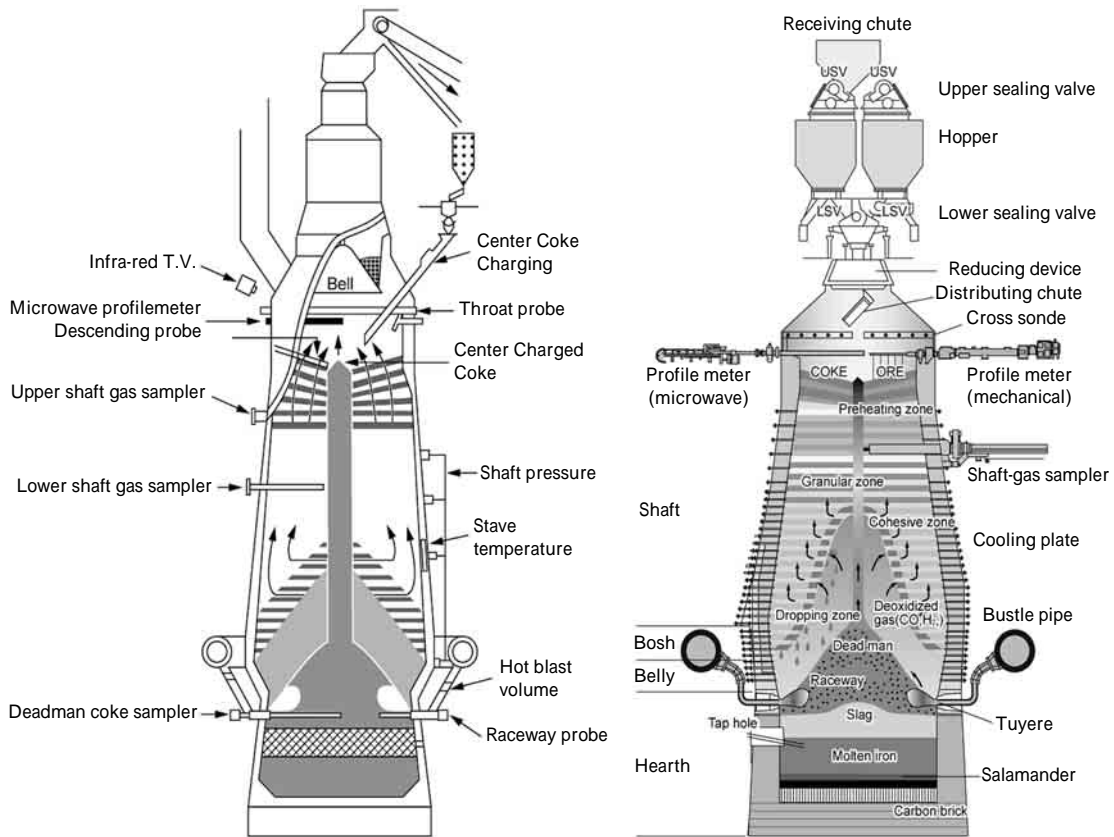


図3 加古川1高炉および神戸3高炉の計測センサ
 Fig. 3 Sensors installed at Kakogawa No.1 and No.3 blast furnace

に多くのセンサが装備されている。

3. 高炉炉口部における固体流れの計測技術と炉内現象

加古川1高炉は，国内初導入とほぼ同時期にムーバブルアーマを導入し，国内初の炉内ガスサンブラを活用し，ペレット多配合操業下での装入物分布制御技術の基礎的な解明を行っている。とくに，第 期（黎明期）に

においては，PC 比の増大に際して，シャフトガスサンブラによって検出できるシャフト上部において炉中心から中間部におけるガス温度が低下し，ソリューションロス・カーボン量が急増する現象が見られた。

図4に，この中心流抑制現象⁹⁾を示す。炉口ガス温度分布は，炉熱の変化に6～10時間先行して現われることが特徴である。これは，PC 比の増大に対応してコークス量に対する鉱石量の比（以下，O/C）が大きく，ペレ

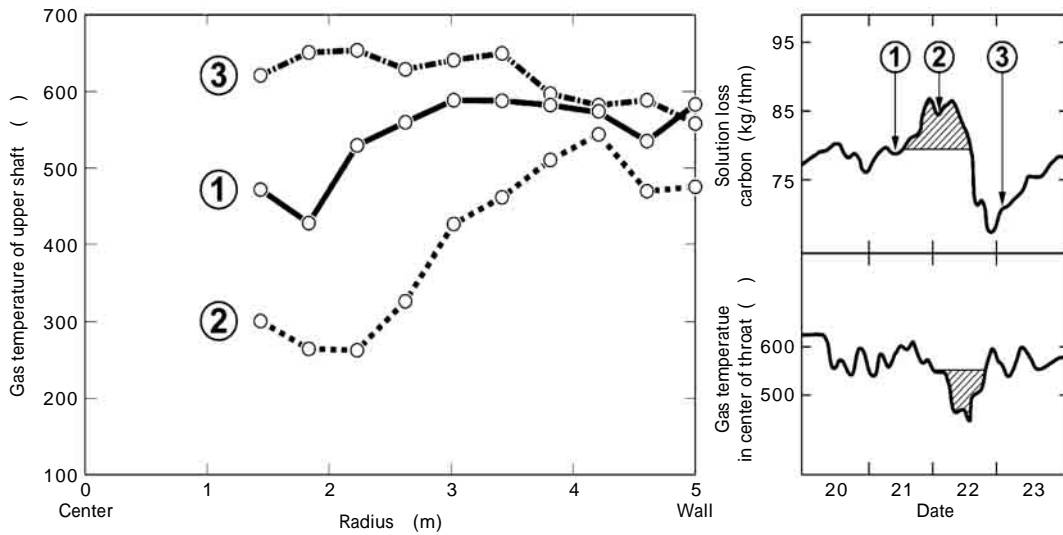


図4 ソリューション・ロス反応が変化する前の中心ガス流の抑制現象
Fig. 4 Losing central gas flow before changing of solution loss reaction

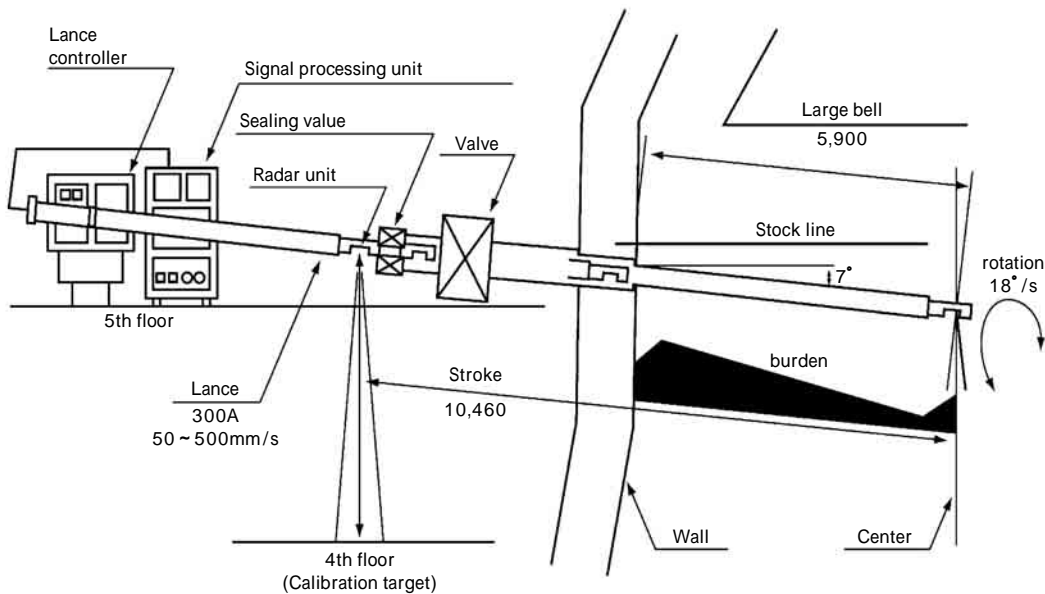


図5 マイクロ波プロフィール・メータ
Fig. 5 Schematic illustration of microwave profile meter

ット配合下における炉中心部への鉱石の流れ込みが助長されるためである。

さらにこの中心流抑制現象は、レースウェイ部でのPC 燃焼にともない炉壁部での降下速度が低下¹⁰⁾することによって助長される。加古川2 高炉においては、コークス中心装入による装入物分布制御とダブルランスによる燃焼技術を活用して1990 年4 月にPC と重油の混合吹込みによって初めて300kg/thm を切る月間コークス比298kg/thm (PC 比123kg/thm , 重油比62kg/thm) が達成されている。

図5 に、径方向でのコークスに対する鉱石の層厚比(以下、LO/LC)を検出するプロフィール・メータの一例を示す。なお、プロフィール・メータは、堆積層表面の形状測定および降下速度測定に限定されるため、堆積層の構造調査には休風時において原料サンブラが用いられる¹¹⁾。

図6 に、高PC 吹込み操業への移行過程における重錘式プロフィール・メータによる炉口部での径方向降下速

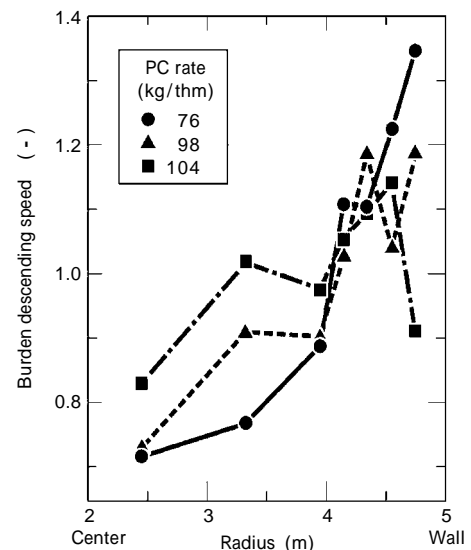


図6 微粉炭吹込む量の増大にともなう炉口部の径方向降下速度分布の変化

Fig. 6 Changes of relative descending speed of burden in radius of furnace top by increasing coal injection into tuyere

度分布の変化を示す。PC 吹込み量の増大にともない、レースウェイ部への流入コークス量が減少するため炉口周辺部の降下速度が低下する。

以上のことから、高 PC 吹込み操作下においては、レースウェイにおける PC 燃烧が装入物分布の制御性にまで影響するという炉内現象認識の深化[]につながった。

4. 高炉シャフト部における軟化融着帯形状推定技術と炉内現象

当社においては、ペレット多配合操作における中心流の直接制御手段に対する強い指向を駆動力とし、高炉内温度分布の直接計測手段として、熱電対を固定したパイプを炉頂堆積表面に設置して装入物とともに降下させるプローブ（以下、垂直水平ゾンデ）を開発している¹²⁾。

図 7 に垂直水平ゾンデの炉内設置状況を示す。シース熱電対は炉壁側で束ねて装入物の降下とともに事前に送り込まれる。本垂直水平ゾンデは炉内の高さ方向と半径方向の温度分布を同時に測定することができ、とくに、半径方向の位置関係が正しく把握できるという特徴を有している。シース熱電対は CA シース熱電対を使用しており、1,200 温度域（軟化融着帯の外部上面形状に相当）に留まっているが、試験としてはシース材を変更することによってより高温域の測定が試みられている¹³⁾。

図 8 に、垂直水平ゾンデによる高温域の測定結果を示

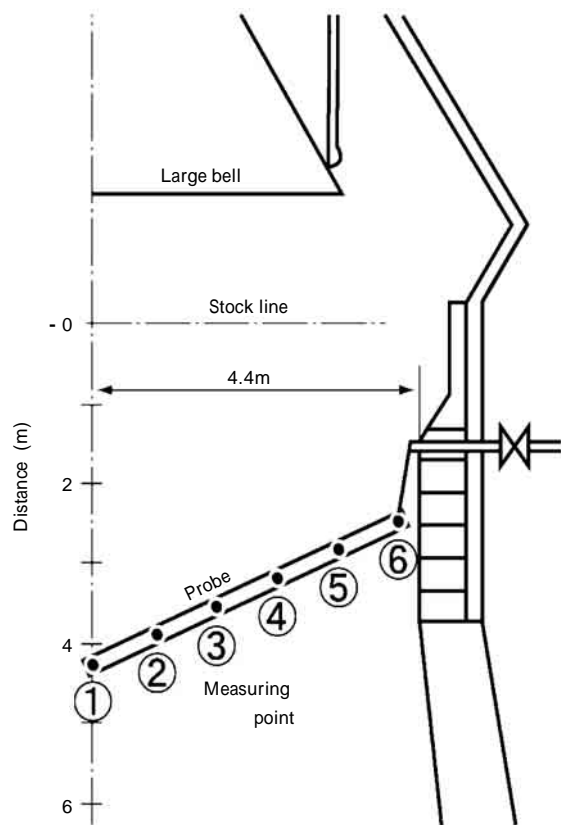


図 7 加古川 1 高炉における垂直水平ゾンデの炉内設置状況
Fig. 7 Installation of descending probe at Kakogawa No.1 blast furnace

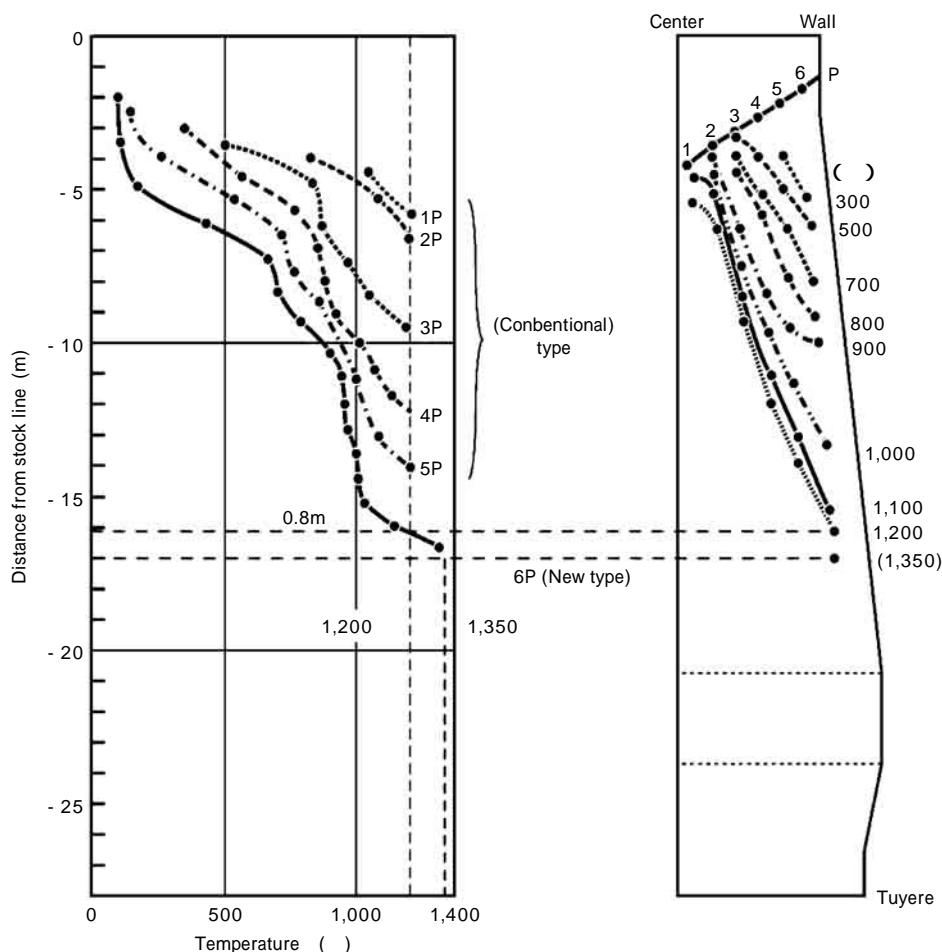


図 8 垂直水平ゾンデを用いた高炉炉内等温度線測定結果
Fig. 8 Results of high temperature measurements on isothermal line

す。実証試験においては、最高 1,345 までの計測が確認されている。この結果から周辺部の融着帯形成状況を推定すると、1,200 と 1,350 の炉高距離はたかだか 0.8m 程度である。

以上のことから、高炉解体調査結果と同様に、逆V型の融着帯形状の場合においては、周辺部では一気にガス分配されるため、融着帯上面と下面との距離は短いという炉内現象認識の深化 [] につながった。

5. 高炉装入物落下軌跡の測定技術と炉内現象

高 PC 吹込み操業下にあった神戸 3 高炉（三次）は、1999 年 5 月末の焼結工場の休止にともない、事前処理鉱を全面外部品に切替えるとともにペレットの使用を開始し、2001 年 9 月末にオールペレット操業（ペレット 73%、塊鉱石 27%）に移行した¹⁴⁾。ペレットはシュート壁面との摩擦係数が小さいために、回転シュート内で上方まで振上げられる¹⁵⁾。円周バランスの観点からは、ペレットの回転シュート内での振上げによって並列二段炉頂ホッパの排出特性による排出偏差が助長されることが懸念されたため、鉱石落下軌跡の監視を強化した。

図 9 に落下軌跡測定システムの概略を示す。センサを組み込んだプローブは、二重管構造とし外筒の上面にプローブが露出するように固定される。プローブはケーブル・ベア走行にて炉内に装入されるため、操業中の測定も可能である。ペレット増配にともない、鉱石の落下軌跡は回転シュート内で振上げられ、炉壁側に偏移した。

図 10 に、ペレット増配にともなう炉内温度分布の変化を示す。ペレット 26% において炉内温度分布の南北バランスが崩れた（図 10 (b)）。これは、図 16 に示す並列二段炉頂ホッパの排出特性において、南北でのコークス・鉱石の排出偏差がペレット増配にともなう回転シュート内での振上げによって助長されたためである。これ

に対して、垂直シュートの内径を 550mm から 500mm に縮小した結果、鉱石落下軌跡は炉内側に矯正され、その結果、炉内温度分布の南北バランスは矯正できた（図 10 (c)）。

以上のことから、高 PC 吹込み操業下においてはコークスに対する鉱石量が増大するため、ペレットの物理特性が円周バランスの偏差を介して融着帯形状に影響するという炉内現象認識の深化 [] につながった。

6. 高炉レースウェイおよび炉芯コークス測定と炉内現象

炉内ガス流れの始点となるレースウェイは、非ポテン

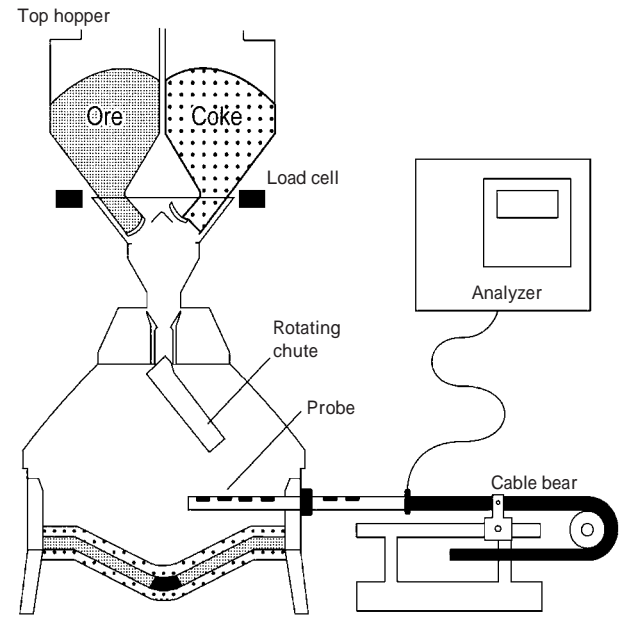


図 9 神戸 3 高炉落下軌跡測定システム
Fig. 9 Diagram of burden trajectory probe at Kobe No.3 blast furnace

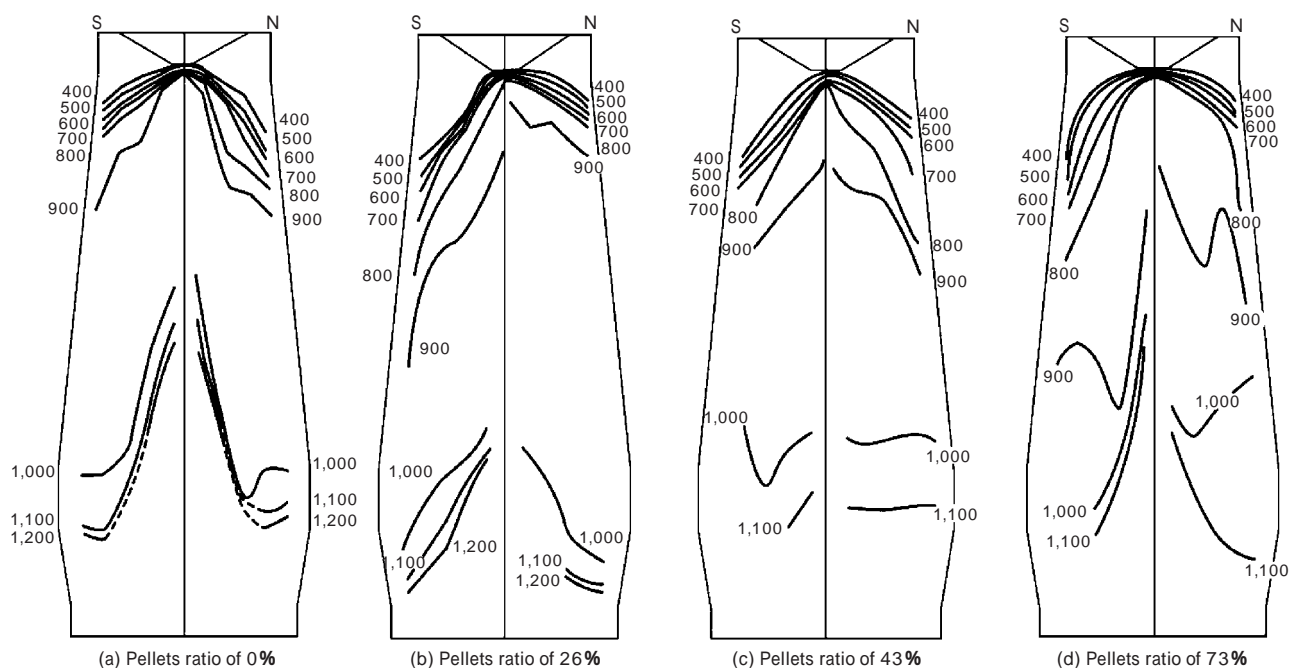


図 10 神戸 3 高炉落下軌跡測定システム
Fig.10 Changes of temperature distribution in furnace by increasing pellets ratio

シャル流れ場であり、操業中の測定も限定されているため炉下部における液分配はもとよりガス分配の観点で未解明の点が多い¹⁶⁾。

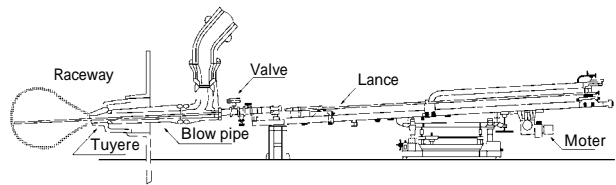
第 期：黎明期(PC 多量吹込み操業への移行期)においては、PC 比の増加にとまない、羽口とレースウェイ内での PC の燃焼量に比例して送風圧力とその変動量が増大してきた。この問題やさらなる PC 比増量時の影響を調査するために、羽口とレースウェイでの PC の燃焼挙動を定量評価するレースウェイ・ゾンデが開発された¹⁷⁾。

図11 に、レースウェイ・ゾンデを示す。本レースウェイ・ゾンデは、ガス、ダスト採取、炉内圧力測定、光ファイバによる炉内観察が可能である。

図12 に、PC 比 130kg/thm および 190kg/thm 吹込み時の加古川1高炉26番羽口レースウェイ内のガス成分変化を示す。羽口先端から酸素の消費が始まり、酸素濃度は羽口先端から450mm までにPC とコークスの燃焼によって低下する。また、PC190kg/thm 時のCO₂濃度の最高点は、PC 比 130kg/thm 時と比較して羽口先端に近づいている。これは、PC 吹込み量の増加によって最高温度域(燃焼焦点)が羽口先端に近づいていると推定された。以上のことから PC 多量吹込み時においては、燃焼焦点が羽口先端に近づくことによって炉体の熱負荷が増加するという炉内現象認識の深化 [] に繋がった。

さらに、高炉炉下部充填構造はレースウェイおよび炉芯コークスから構成され、炉芯コークスの充填構造は炉下部の通気性に大きな影響を与える。

図13 に炉芯コークス・サンブラの一例を示す。当社においては、予定休風時において炉芯コークス・サンブラによって炉芯コークスを採取し、実炉の炉下部状況を管理している¹⁸⁾。



Specifications	
Driving force	800kg (Chain drive)
Coling	20kg/cm ² (Compressed water)
Lane	40A, 8m (to the raceway)

図11 高炉レースウェイ・ゾンデ
Fig.11 Schematic illustration of raceway probe

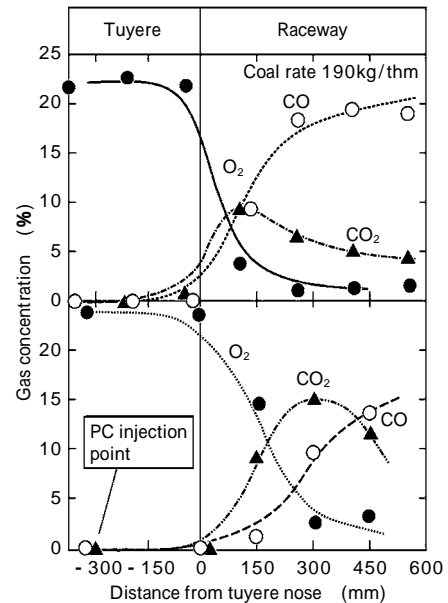
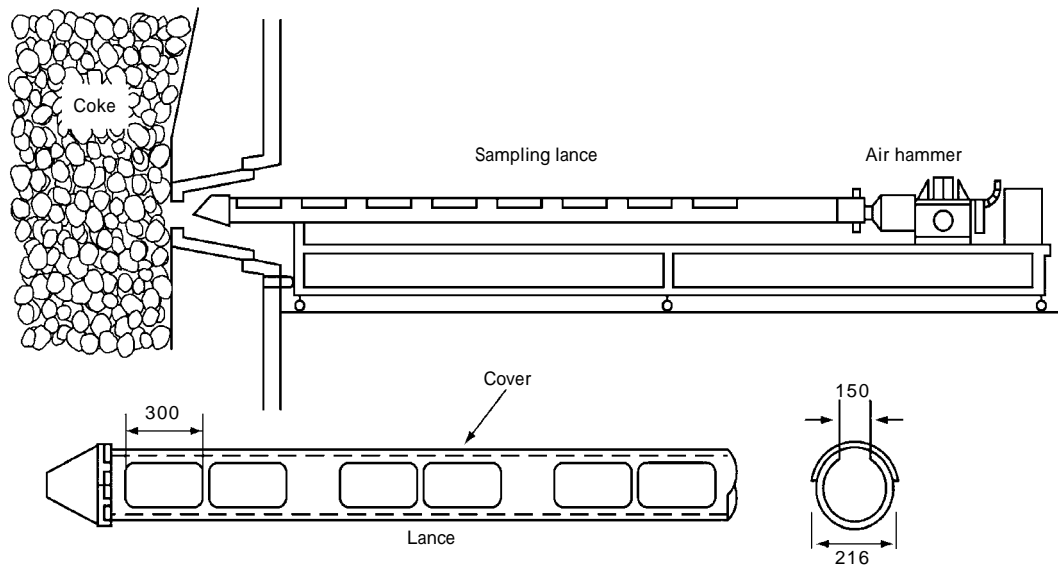


図12 高微粉炭比操業下における高炉レースウェイ・ゾンデ測定結果(加古川1高炉)
Fig.12 Measurement results of raceway probe at high PC rate (Kakogawa No.1 BF)



Specifications	
Tapping force	20t (Air hammer)
Driving force	120kg・m (Chain drive)
Lance	11m (to center of BF)

図13 高炉炉芯コークス・サンブラー
Fig.13 Schematic illustration of deadman coke sampler

図14に、神戸3高炉におけるPC比180kg/thmレベルでの休風時での炉芯コークスサンプリングによる炉芯コークスの径方向での履歴温度分布を示す¹⁹⁾。羽口風速230m/sec時には、高温領域が羽口先2.2mまで達しているが、減産下で羽口風速が210m/secまで低下した場合には、高温領域が羽口先1.0mまで縮小し、炉況は悪化した。とくに、PC吹込み時には、レースウェイへのコークス流入量が減少するためレースウェイ形成の不安定化が懸念された。

これを受けて、レースウェイ形成挙動に関しては、羽口から入射したマイクロ波（以下、 μ 波）の反射強度からレースウェイ深度を解析し、PC吹込みと高炉レースウェイ形状との関連性について検討が進められている²⁰⁾。

図15に高炉羽口部からの μ 波入射方法を示す。 μ 波は、導波管から送信され、導波管の先端に設けられた円柱状のアンテナから羽口覗き窓を通して入射される。アンテナは、マイクロ波である送信波を効率よく前方に発射するために、その内部には円錐状の凹部が形成されており、ブローパイプの基端側の羽口覗き窓に隣接するようにアンテナは配置される

高炉減風過程において羽口部から μ 波を入射し、レースウェイ深度実測値および羽田野らの推定式²¹⁾を用いたレースウェイ深度計算値の送风量に対する変化を図16に示す。減風ともない、レースウェイ深度実測値は推定値と同様に減少するが、実測値は計算値よりも小さい。とくに、PC遮断直後においてレースウェイ深度が一気に伸長していることが注目される。これは、PC遮断による羽口前温度の上昇による衝風エネルギーの急激な回復と考えられる。減風によってレースウェイ深度は低下するが、オールコークスにくらべてPC吹込み時のほうが、その低下の度合いは大きい。このことから、PC吹込み時には、レースウェイの三次元的な形状変化、さらには、流入コークス粒径に対する不安定性が示唆されている。

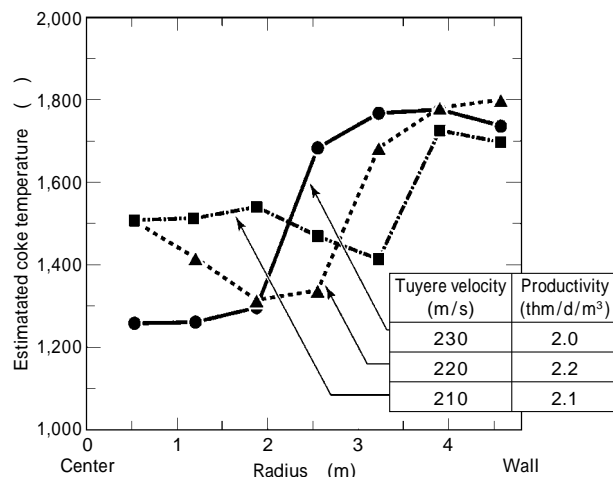


図14 炉芯活性度におよぼす羽口前風速の影響
Fig.14 Effect of tuyere velocity on deadman coke activation

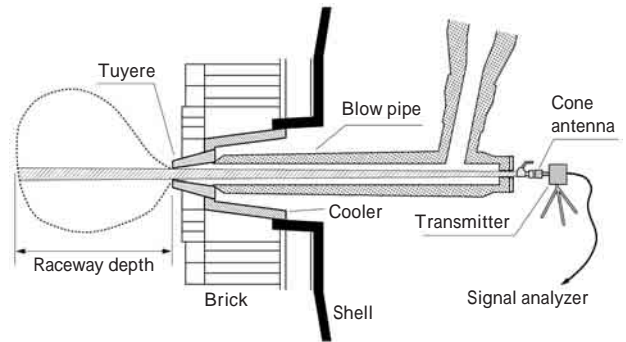


図15 マイクロ波によるレースウェイ深度測定技術
Fig.15 Micro wave technique to determine raceway depth

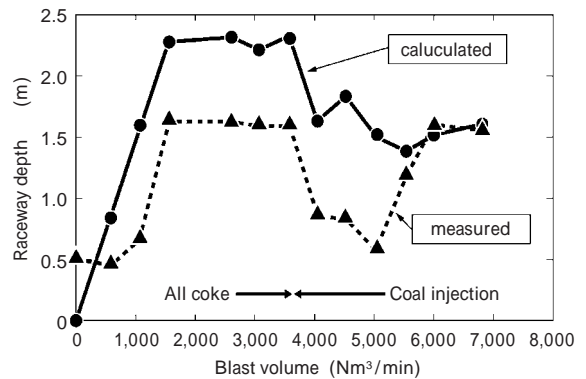


図16 送风量の減少にともなうレースウェイ深度の動的変化
Fig.16 Dynamic changes of raceway depth by decreasing blast volume

7. 高炉炉芯形状推定に向けた計測技術と今後の課題

大型高炉の炉芯は、従来、不活性なものと見なされてきたが、最近ではその熱量保持機能を評価し、活性維持の方法論に議論が展開されるとともに、コークス品質の重要性が再認識されてきている。その一方で、炉芯の粉コークスの排出は、それ自身の溶銑・溶滓の通過能力によることから炉床径を拡大する弊害に注意が払われている。また羽口径と燃料燃焼能力を確保するため最小の炉床径とすべきだとの意見²²⁾もあり、稼働高炉においては、上述のレースウェイ深度の確保に注意が払われている。

炉芯形状については、減尺休風後において炉頂部より μ 波の反射強度から減尺表面形状を測定し、稼働中での炉下部固体流れを解析することによってPC多量吹き込み起因する炉内状況の変化、とくに炉芯形状との関連性について検討が進められている²⁰⁾。

図17に、加古川1高炉（内容積4,550m³）の炉体プロフィールおよび μ 波の入射方法を示す。減尺休風後において導波管を介して炉頂マンホールを通してパラボラアンテナから入射された μ 波は、受信波と合成され、発生したビート波の周波数成分から装入物表面形状が測定できる。

図18に、減尺レベルが異なる場合での装入物表面形状の測定結果を示す。周辺部においてレースウェイへの降下の影響を受けて表面にくぼみが生じ、減尺レベルが低

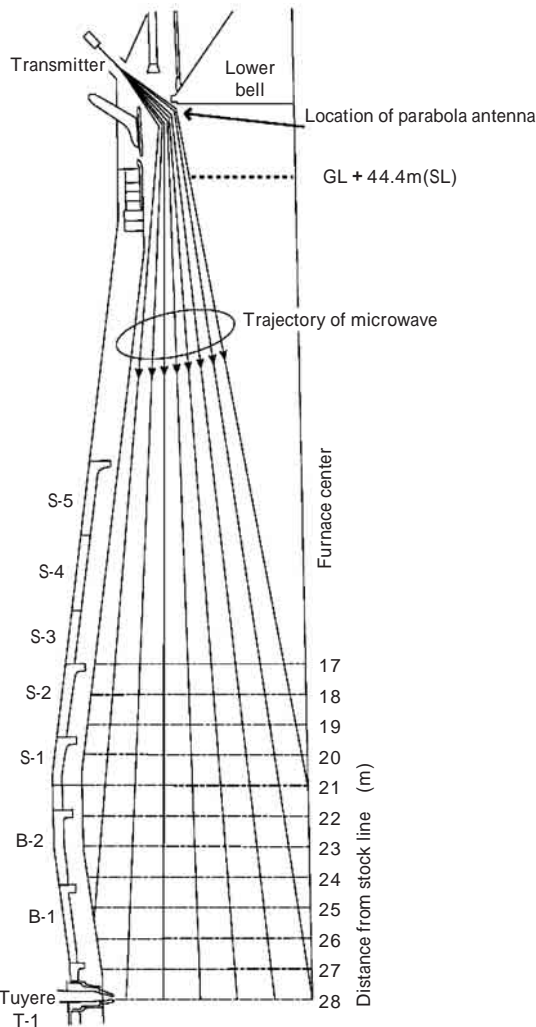


図17 減尺休風後のマイクロ波測定による炉芯形状推定技術
Fig.17 Microwave technique to determine deadman shape after schedule stopping with lowering stock level

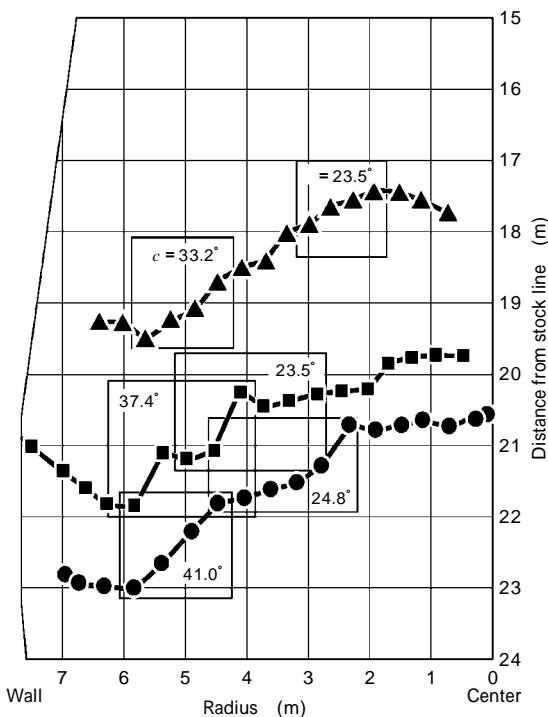


図18 減尺休風後のマイクロ波測定による装入物表面形状
Fig.18 Surface profiles of burden measured by microwave technique after schedule stopping with lowering stock level

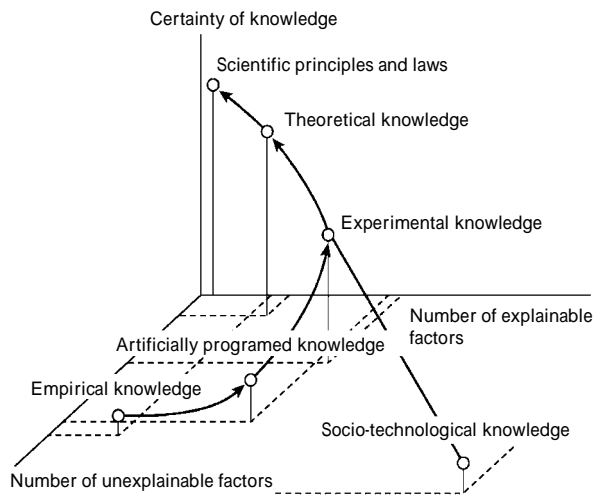


図19 知識の確実性
Fig.19 Certainty of Knowledge

いほどくぼみの傾斜角度 c は増大する。しかしながら、中間部堆積角 はほぼ一定の値を示す。これらの結果から、炉芯は 51.4° の角度で形成されていること、および、レースウェイにはその上部 80.2° の非常に狭い領域からコークスが主に供給されていることが推定された。

高炉朝顔部は、レースウェイへのコークス供給路が狭あい化する部位であるため、炉下部荷下がりやを支配する部位と推定される。

以上のことから、PC 吹込み量の増大にともなうレースウェイ燃焼焦点の羽口への接近とレースウェイ形状の縮小および高出鉄操業移行にともない、軟化融着帯の形成位置が低下する。また、これによって高炉朝顔部におけるレースウェイへのコークス供給路が狭あい化され、炉下部荷下がりやの不安定化が誘発されるという炉内現象認識の深化 [] につながっているといえる。

したがって、高炉操業課題はたんなる炉中心部への鉾石の流れ込みの問題（第3章）のみではなく、より厳格な炉内ガス流れ計測・制御とレースウェイ計測・制御が顕在化、複合化してきていることが、現在の第 期、環境調和移行期の課題と言える。この環境への配慮が強く求められる現在、鉄鋼生産プロセスとして「持続可能な発展」を実現する必要がある。

図19に、経験知識の要素と知識の確実性との関係を示す。富浦は、「成熟産業の経営戦略」において『われわれの活動の極めて多くの部分に対する説明の難しい経験的な知識に頼る必要があるということもまた事実である。技術はさまざまな原理によって定量的、または定性的に説明できる知識、および、これらの原則によって説明できないような知識によって構成されている。説明できない知識の要素が低いほど、知識の確実性は高い』と述べている²³⁾。

したがって、「炉況」の安定化とCO₂排出低減に代表される環境調和に向けた低還元材比操業をさらに発展させるには、高炉炉内計測技術の進歩が必要である。

むすび=高炉内計測技術は、逆V型融着帯を安定して形成するためには炉内状況の把握が不可欠であるとの高炉操業の要請を強く受けながら発展してきた。ここでは、高炉炉内計測により炉況と炉内状況の認識が変わり、操業概念[]-[]を新たに構築するという思考連鎖が、高炉操業機能をダイナミックに、かつ、多面的に強化させてきたことを描出したかった。

これまで、「高炉をきわめつくす」という基本方針に基づき、新たな高炉炉内計測技術を開発してきた集積が、結果として操業概念の新たな構築から操業技術の向上というソフトパワーを生み出してきた。

今後とも、「炉況」という直感的な経験に裏付けられた判断を標準化し、技術継承するためには、高炉炉内計測技術が強化されねばならない。

鉄鋼産業が高付加価値の製品をさらに安価な製造を目指すためには、大量生産の溶銑製造システムとして安定した鉄源の確保、すなわち「炉況」の安定化と、CO₂排出低減に代表される環境調和に向けた低還元材比操業という両極に対して高炉計測技術を進化させなければならないと考える。

参 考 文 献

- 1) 松尾英一：R&D 神戸製鋼技報，Vol.9, No.4 (1959) p.225.
- 2) 大谷正康：日本學術振興會製銑54委員會(1977) p.1422.
- 3) 日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会編：高炉内反応部会高炉内現象とその解析(高炉内反応部会報告書)(1982年7月)
- 4) 日本鉄鋼協会高炉炉下部機能強化研究会編：高炉炉下部における移動現象と機能改善(2000年11月)
- 5) 日本鉄鋼協会高炉炉下部計測制御技術検討会編：「高炉炉下部計測制御技術検討会成果報告書」(2001年2月)
- 6) 鞭巖編著：製煉化学工学演習(1974) 養賢堂.
- 7) 松井良行ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55, No.2 (2005) p.9.
- 8) J. J. Poveromo：I&SM, May (1995) p.64.
- 9) 武田幹治ほか：鉄と鋼，73 (1987) p.2084.
- 10) Y. Matsui et al.：6th IISC (1990) Nagoya, p.468.
- 11) 堀隆一ほか：鉄と鋼，78 (1992) p.1330.
- 12) 小林勲ほか：鉄と鋼，73 (1987) p.2092.
- 13) 森岡耕一ほか：CAMP-ISIJ, 13 (2000) p.139.
- 14) K. Ito et al：METEC Congress 2003, Dusseldorf, 16-20 June, 2003.
- 15) 稲葉晋一ほか：R&D 神戸製鋼技報，34, (1984) p.42.
- 16) 野澤健太郎ほか：鉄と鋼，81 (1995) 882.
- 17) K. Shibata et al.：1st ICSTI (1994) Sendai, p.553.
- 18) R. Ono et al：Ironmaking Conference Proceeding AIME(1993) p.595.
- 19) 吉田康夫：日本鉄鋼協会生産技術部門技術部会第81回製銑部会資料(1992年11月)
- 20) Y. Yamaguchi et al.：ASIA STEE Int. CONFERENCE, 4th(2005) Fukuoka, p.332.
- 21) 羽田野道春ほか：鉄と鋼，62 (1976) p.505.
- 22) 橋岡正毅：鉄と鋼，78 (1992) p.957.
- 23) A. Tomiura：ICSS2000, Osaka, p.11.