

高炉の炉底解析

Analysis of Blast Furnace Hearth

稲田隆信/Takanobu Inada・総合技術研究所 高温プロセス研究部 主任研究員

山本高郁/Takaiku Yamamoto・総合技術研究所 高温プロセス研究部 主任研究員

砂原公平/Kohei Sunahara・総合技術研究所 高温プロセス研究部 副主任研究員

山岡秀行/Hideyuki Yamaoka・総合技術研究所 高温プロセス研究部 部長 工博

高谷幸司/Kouji Takatani・総合技術研究所 基盤技術研究部 次長 工博

宮原光雄/Mitsuo Miyahara・総合技術研究所 基盤技術研究部 主任研究員

波多野康彦/Yasuhiko Hatano・小倉製鉄所 銑鋼部 参事

高田耕三/Kozo Takata・本社 銑鋼技術部 参事

佐藤 康/Yasushi Sato・Sumitomo Metal U.S.A. 参事

要 約

住友金属小倉2高炉の炉底長寿命化の因子を4つの機能の異なる数学モデルを用いて解析した結果、耐火物配材や冷却方法に加えて炉底に対する低熱負荷操業により、深刻な損傷を受けず16年以上の寿命を維持している。

Synopsis

The factors prolonging hearth life of Sumitomo Kokura No.2 B.F. were investigated by use of an estimation system for furnace hearth condition consisting of four mathematical simulation models. Lowered heat load operation together with integrated design of both refractories and cooling enabled the furnace life to be extended to over 16 years without severe damage in the hearth.

1. 緒 言

高炉炉命を律速する主要因は炉底浸食にある。炉底保護のためには、炉底耐火物や冷却条件をはじめとする設備的要因に加え、炉底熱負荷軽減を狙った操業面での配慮も重要である。ここでは、小倉2高炉を対象として高炉炉底浸食評価ツールを用い、炉底延命に関わる因子についての解析結果を述べる。

2. 小倉2高炉の操業履歴

小倉2高炉(第1図):炉容積1850 m³)は1981年3月18日に45日短期改修を経て2次炉代の操業を開始した。その後'83年~'87年に大幅減産期を迎えるも安定操業を維持、'86年以降微粉炭吹き込みを開始し、現在、微粉炭比170 kg/ptで操業を継続中である(第2図)。

この間、同炉の炉底は'94年末に最大熱負荷を記録して以降、現在まで浸食の進展はなく(第3図)、炉底煉瓦温度分

布から推定される炉底煉瓦稼働面状況は、底部、側壁いづれについても十分な煉瓦残存厚が維持されている。

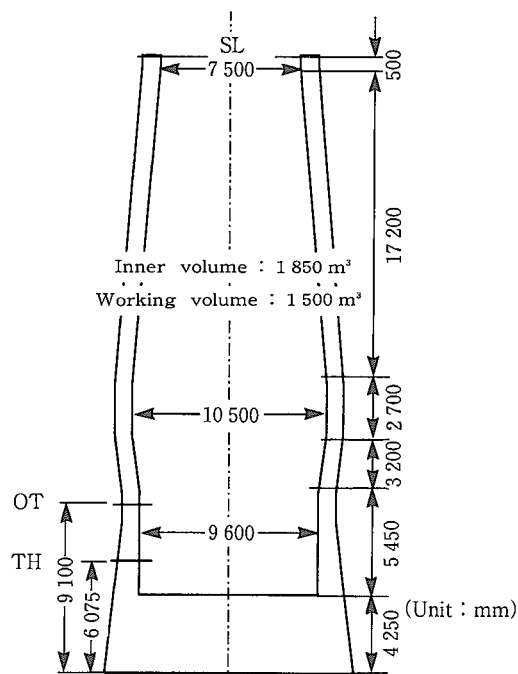
3. 炉底浸食評価のシステム

(1)炉底浸食機構

炉底煉瓦の主な浸食機構は二つある。一つは熱化学的浸食、今一つは熱応力的浸食である。前者は高温の溶銑に晒され溶融あるいは溶銑の浸入を受けることによって浸食を受けるものであり、後者は煉瓦の熱的膨張に起因して、構造体としての炉底耐火物層に発生する熱応力が耐火物の強度を上回って破壊に至る過程であるが、いづれの現象も煉瓦の熱的・機械的物性のみならず、実炉において煉瓦の受ける熱的状況にも強く依存している。

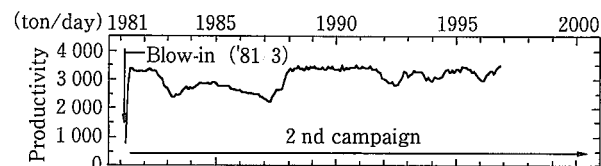
(2)炉底浸食評価のシステム

上述の機構を考慮して炉底浸食を予測あるいは評価するには、浸食機構を考慮するに加えて、炉底煉瓦部の温度分布が精度よく評価されていることが前提となり、炉底湯溜



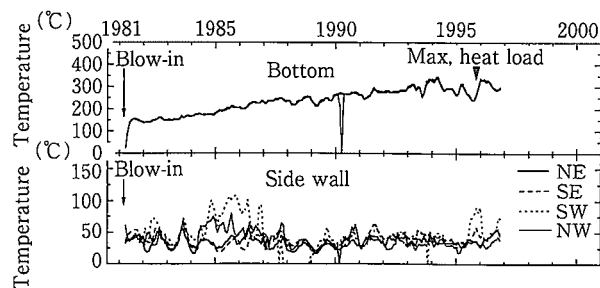
第1図 住友小倉第2高炉(2次)の炉体形状

Fig.1 Schematic view of SMI Kokura 2BF



第2図 小倉第2高炉(2次)の操業推移図

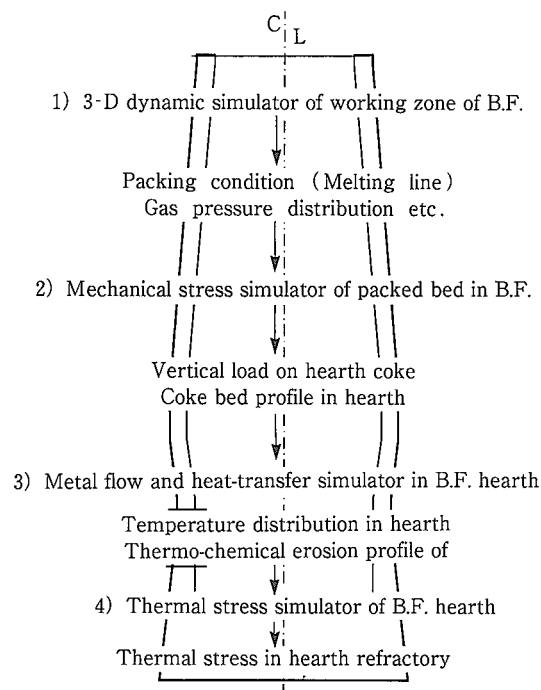
Fig.2 Operational results of Kokura 2BF



第3図 炉底温度推移図

Fig.3 Hearth brick temperatures

まり部状態については炉内部状態を把握する必要がある。本システムはこのような考え方にに基づき、次のような構成とした(第4図)。

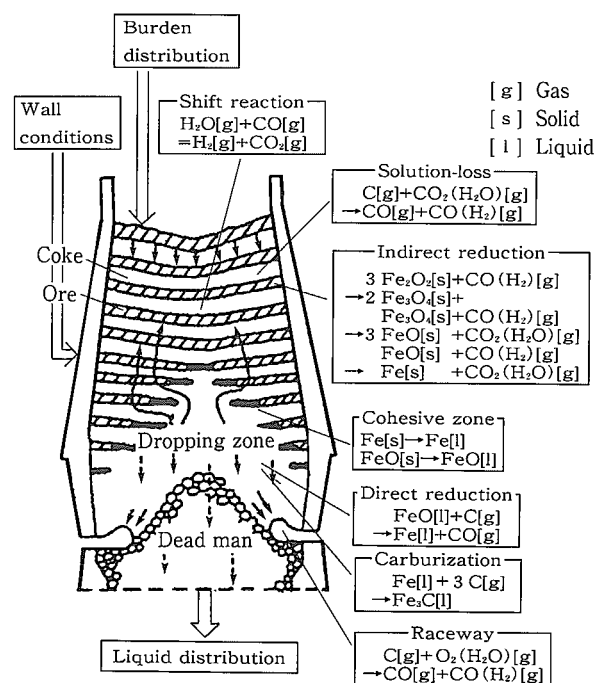


第4図 炉底状態推定のフロー図

Fig.4 Flow-chart of estimation of hearth condition

(a)高炉3次元非定常シミュレータ¹⁾

高炉操業条件に基づき炉内反応・伝熱を解析し、羽口レベルより上方の炉内状態(融着帯形状、静圧分布他)を推定するとともに、炉底への溶鉄の滴下状態を出力する(第5図)。



第5図 高炉3次元非定常数学モデルの概念図

Fig.5 Schematic diagram of 3-dimensional dynamic simulator of working zone of B.F.

(b)高炉充填層内応力場シミュレータ²⁾

弾塑性理論を適用した移動層下での層内応力を解析し、上記モデル(a)で評価された炉内充填状況と炉内静圧分布を基に炉内充填層下面に作用する荷重を算出、炉底湯溜まり部へのコークス沈下状況を推定することにより、湯溜まり部の充填状況を出力する。

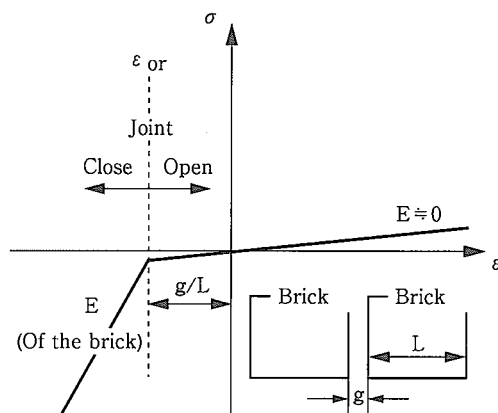
(c)高炉炉底湯流れ伝熱シミュレータ³⁾

炉底湯溜まり部の充填状況を基に同部の溶鉄流動および煉瓦を含む伝熱挙動を非定常的に解析、煉瓦浸食推移を追跡して最終熱平衡浸食プロファイルを出力する。

(d)高炉炉底伝熱・熱応力シミュレータ⁴⁾

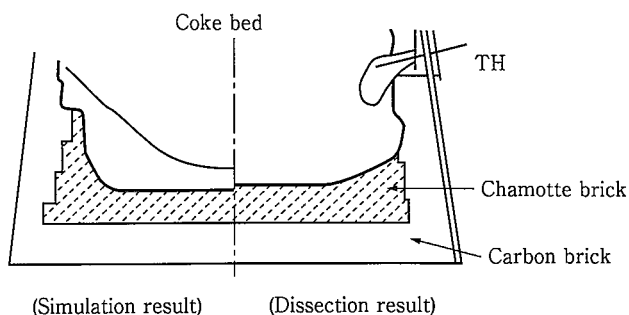
煉瓦積み構造を考慮に入れた炉底煉瓦部の伝熱・熱応力同時解析し得る機能を持ち、特に煉瓦損傷の起点となり得る煉瓦目地部には亜弾性要素モデル(第6図)を導入、同部の力学的特性の忠実な表現を図っている。

1次の小倉2高炉炉底煉瓦の残存プロファイルに関する上記ツールによる評価は、同炉解体時の炉底耐火物の実測結果と良好な一致を得ており、妥当な推定精度を有することが確認された(第7図)。



第6図 亜弾性モデルの概念図

Fig.6 Schematic diagram of hyperelastic model



第7図 炉底侵食状態(小倉第2高炉(1次))

Fig.7 Final erosion profile (Kokura 2BF 1st)

4. 設備面から見た小倉2高炉
炉底浸食状況評価

現状炉の炉底浸食状況を煉瓦測温値に基づいて推定した結果を第8図に示すが、炉底底部、側壁部いずれにおいても十分な残存煉瓦厚が確保されている。2次の小倉2高炉の炉底部耐火物の配材(第9図)の特徴は、底部敷きシャモット煉瓦が厚くカーボン煉瓦が薄いこと、側壁部リングカーボンと底部敷きシャモットとの境界が、下方に向かって鉄皮テーパに沿って外側に広がる形状を呈している。

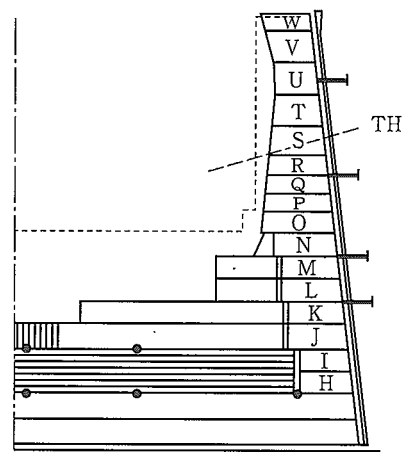
第8図 小倉第2高炉(2次)の推定侵食状態
(煉瓦温度実測値解析)

Fig.8 Estimated worn profile of current Kokura 2BF

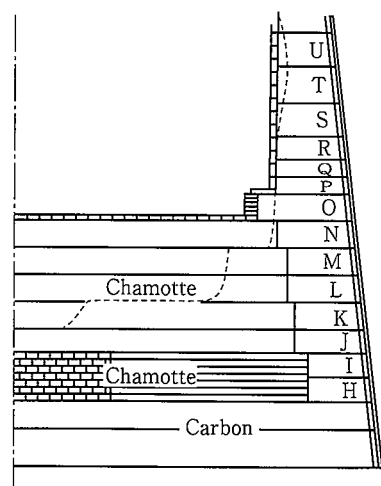
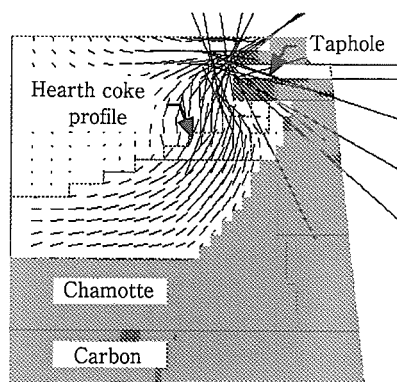
第9図 小倉第2高炉(2次)の推定侵食状態
(炉底湯流れ・伝熱シミュレーション)

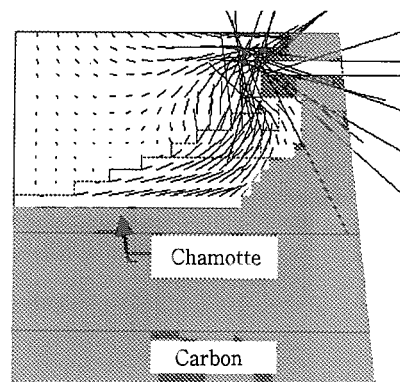
Fig.9 Hearth structure of Kokura 2BF

4-1 熱平衡浸食から見た評価

炉底底部の配材に関し、熱伝導度と溶損温度とが相互に大きく異なるシャモット煉瓦とカーボン煉瓦の敷設厚みの



(a) Current hearth brick layout



(b) Decrease of chamotte brick layer

第 10 図 炉底熱平衡侵食シミュレーション

Fig.10 Simulation results on worn profile of Kokura 2BF hearth

バランスは、炉底耐火物層への最終熱平衡侵食ラインの浸入度合いに影響を与える。小倉 2 高炉の炉底耐火物の配材バランスに関し、炉底カーボン煉瓦厚を薄くすることで、シャモット煉瓦部の冷却が充分行われるために炉底底部侵食ラインの浸入をシャモット煉瓦部で停止させることができています。

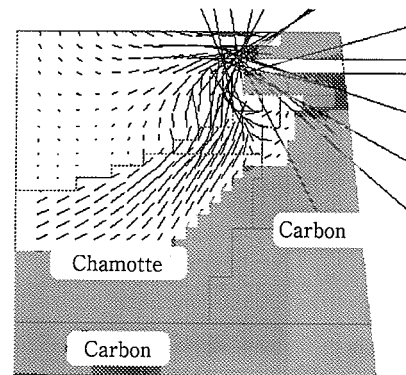
現状の配材バランスに対し相対的にシャモット煉瓦部を薄くした場合を想定した予測結果(第 10 図)によれば、シャモット部を薄くすることによる底部方向伝熱抵抗の減少で、底部侵食量は減少している。この点からすれば、配材バランスに改善の余地があると考えられるが、炉芯コークス通液性悪化に伴う環状流化が発生した場合、側壁部への侵食進展の危険が生じる。

一方、炉底側壁部侵食は、同部の冷却を十分に施すことで抑制することができる。特に炉底コーナー部においては、“象の足”(のらくろ型)侵食の進展を抑止することが重要であり、第 10 図(a)に示す如く、深さ方向で側壁リングカーボン煉瓦厚がほぼ一定に設計された同炉の側壁部は、底部侵食量に比較して大きな侵食は受けていない。この側壁リングカーボン煉瓦の形状設定の効果を評価するため、深さ方向でリングカーボン煉瓦厚を増加させた構造との対比を行ったのが第 11 図である。

これと第 10 図(a)とを比較すると、底部コーナー部の侵食量が減少しており、側壁残存厚確保の観点からすれば望ましい方向のように見える。しかし、炉床コークス層の通液性が極度に悪化し、溶鉄がフリー層をより選択的に流れ出すと様相は変化する。

第 12 図は、第 10 図、第 11 図に対して炉床コークス層の空隙率を 1/2 にしたときの影響をを比較したものであるが、側壁リングカーボン煉瓦厚を下方に向かって広げる構造では、側壁の侵食が顕著に現れている。

すなわち、炉底熱負荷が高くなるとシャモットとカーボ



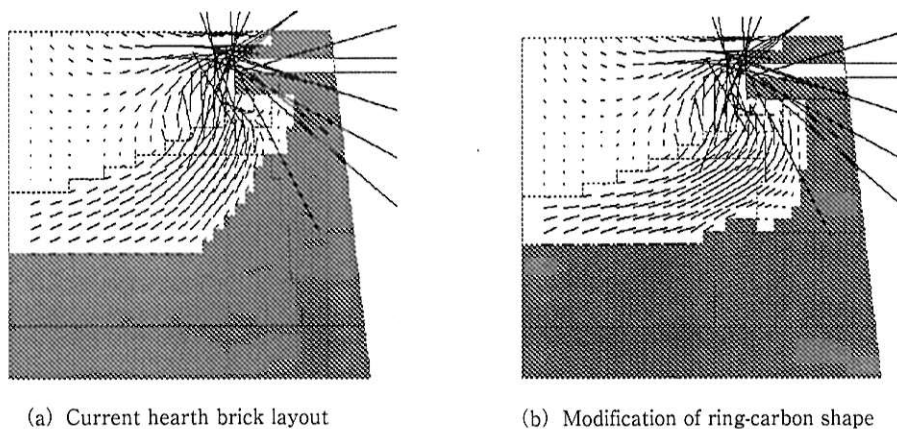
第 11 図 側壁リング・カーボンレンガ形状の影響

Fig.11 Effect of ring-carbon shape on thermal equilibrium profile of hearth

ンとの接続部(炉底コーナー部)において損傷温度レベルがシャモットより低いカーボン部で侵食が進行するために生じた現象と考えられる。一方、現状炉のリングカーボン厚をほぼ一定にとる形状ではほとんど状況に変化がないことから、炉床通液性変化に対してタフな構造と言える。

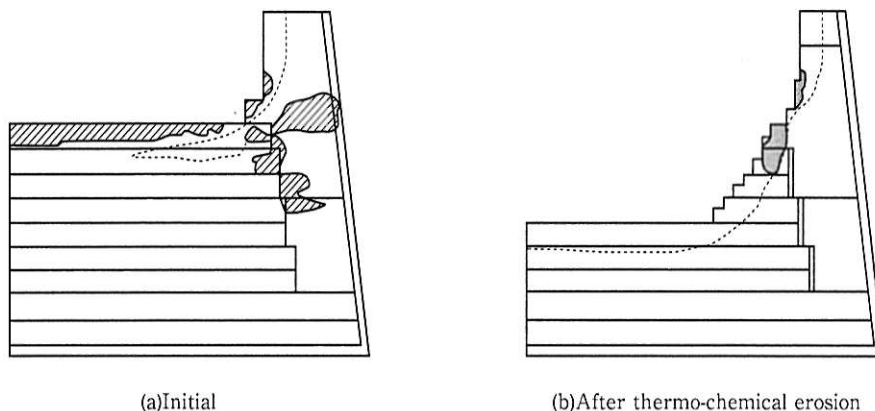
4-2 熱煉瓦熱応力状態から見た評価

湯溜まり内の温度分布推定結果を基に炉底煉瓦内の熱応力状態を推定した結果を第 13 図に示す。火入れ時において、煉瓦の浮上に結びつく引っ張り歪みが上部シャモット煉瓦部に現れているが、この部分は熱的侵食領域に位置しており、侵食が熱平衡侵食ラインに近づく過程で消失する。同様に、側壁カーボン煉瓦部にも引っ張り歪みが現れているが、その原因は中心側シャモット煉瓦の熱膨張にあるため、同煉瓦が侵食されたところで歪みは消失する。一方、圧縮応力が底部のコーナー部分に見られるものの、その値は煉瓦強度には達していない。



第12図 炉底コークス通液性低下時の熱平衡侵食シミュレーション

Fig.12 Thermal equilibrium profile of hearth at low permeability of hearth coke



第13図 炉底レンガ熱応力シミュレーション

Fig.13 Thermal stress field in the hearth

したがって、熱応力によって熱平衡侵食ライン以上に浸食が進行する危険は小さいと推定される。

5. 操業からの炉底保護対策

炉底湯溜まり部への熱供給は上方からの滴下溶銑滓が担っており、その大半は湯溜まり内の溶銑流動によって運ばれる。したがって、炉底耐火物を溶損から保護するには、炉底耐火物稼働面近傍の溶銑流動を極力抑えること、および滴下溶銑温度を過度に高めないことが有効である。

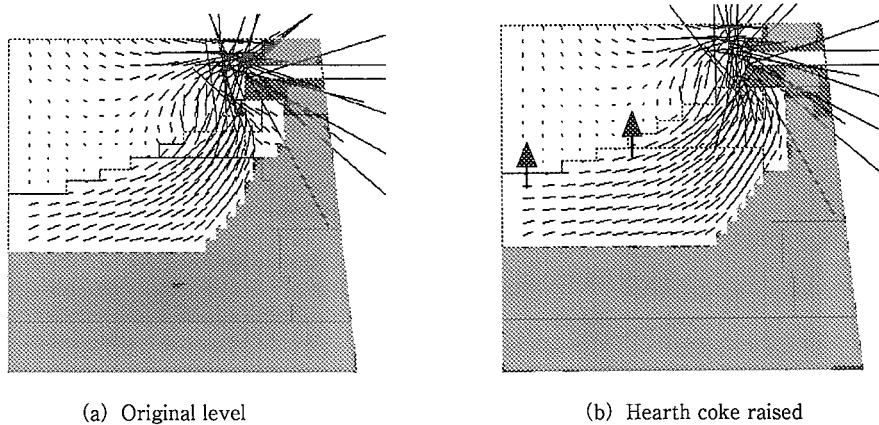
5-1 炉内通気性維持対策

湯溜まり部の溶銑流動は出銑操作によって生じるが、溶

銑の流動分布は湯溜まり部の通液性、換言すれば、コークス層の湯溜まり部への沈下状況に支配される。第14図は炉床コークスレベルの変化に伴う炉床湯流れ状況と温度分布の変化を示したものである。

この図より、コークス層が出銑口レベルまで沈下していなければ、出銑口より流出する溶銑の内湯溜まり下部のフリースペースから供給される比率が増加することになり、結果として、炉底耐火物稼働面近傍の溶銑流動が生じることがわかる。

したがって、炉底浸食を抑制するためには、炉底湯溜まり部にコークス層を充分沈下させることが望ましく、操業としては、炉内充填層に浮上力として作用する炉内圧損を極力軽減することが重要となる。炉内通気性の維持には、



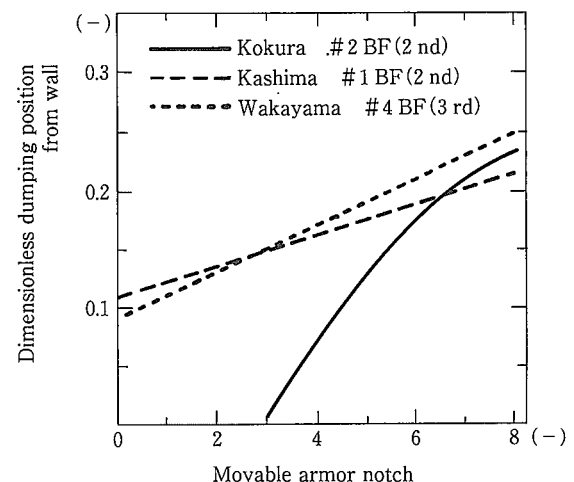
第14図 炉底コークスの沈下度合いの影響

Fig.14 Influence of hearth coke level on flow pattern of hearth pig and heat flux

炉内半径方向のガス流分布の調整が有効である。小倉2高炉の装入物分布制御の改善の推移を第15図に示す。

同炉はペルーアーマ型の装入系を有しているが、構造の面で同型式の当社の他の高炉に比較してムーバブルアーマの部分反発域が大きく(第16図)、アーマ操作に対する原料の炉内落下位置変化が敏感であるという問題があった。そこでアーマノッチを細分化するに加えて、鉱石、コークスそれぞれについて分割装入を採用、更に鉱石については3分割装入を行うとともに、'88年後半からは鉱石の炉内分割装入量を均等から不等量化し、そのバランスを調整する方法を適用した⁵⁾。

第17図は、5バッチ装入シーケンスにおける鉱石不等量装入の半径方向O/Cバランスの制御性をモデル評価したものであるが、鉱石1stバッチ量(O_1)の操作は、MAノッチ操作に比較して、炉壁・中間部を大きく変化させずに炉中心部O/Cを調整する手段として使用できることが明らかとなった。そこで、中心部ガス流量調整は O_1 バッチ量で、周



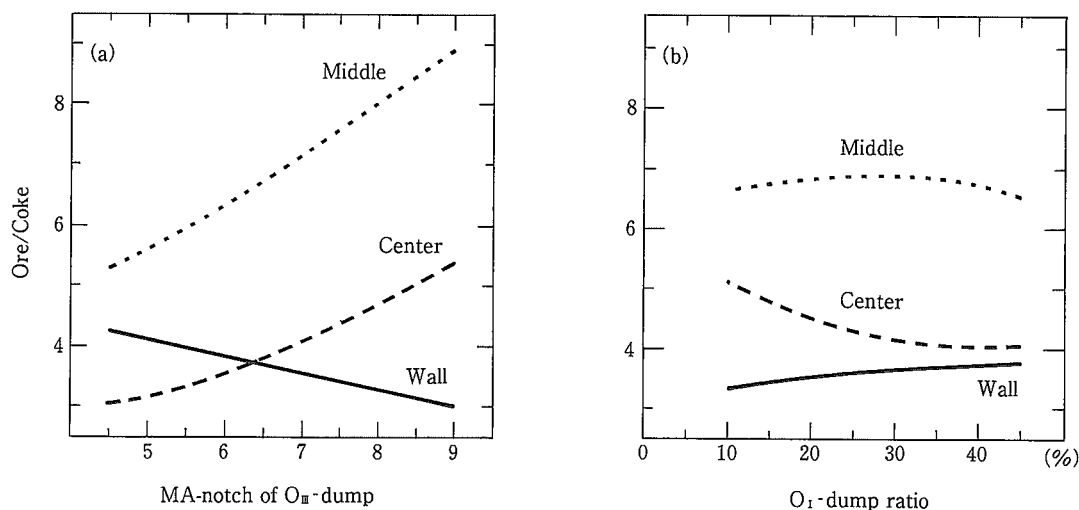
第16図 アーマノッチと原料落下位置との関係 (モデルシミュレーション)

Fig.16 Effect of MA-notch on dumping position (Model simulation)

	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	
Coal rate (kg/THM)						18 →	41 PCI start-up	36	65	79	123	148	139	142	146	
Radial		2-batch				4-batch				5-batch					4-b	
		C ↓	O ↓			C ↓	C ↓	O ↓	O ↓		C ↓	C ↓	O ↓	O ↓	O ↓	
											Devison of movable armor Unequal batches of ore					
												Control of ore layer thickness				
Circumferencial						Decrease in outlet area of rotating chute Improvement of deviation of materials with										

第15図 小倉第2高炉における装入物分布改善の推移図

Fig.15 Evolution of burden distribution control at Kokura 2BF



第17図 アーマノッチと鉱石不等量化の O/C 分布への影響(モデルシミュレーション)

Fig.17 Effect of O_{III} MA-notch and O_I -dump ratio on O/C distribution (Model simulation)

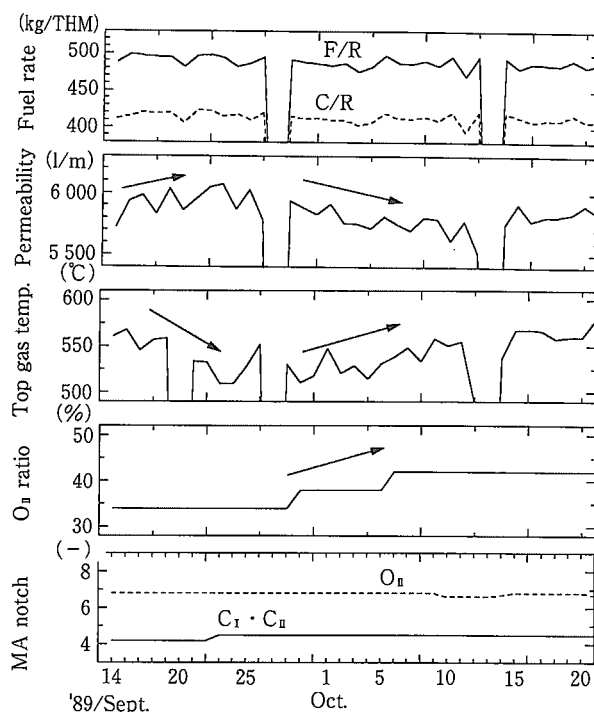
辺ガス流の調整をアーマノッチを操作する方法で半径方向のガス流バランスを調整を行うことにした。

第18図は O_I 操作による炉況改善の事例であるが、'89.9月下旬から炉中心流の衰弱が現れるとともに炉内通気抵抗が悪化した。これに対して、炉中心流を回復させるべく鉱石1バッチ目装入比率を増加させるアクションを実施したが、これに呼応して中心部ガス流は狙い通り回復を始め、炉内通気悪化も解消した。

このように半径方向のガス流分布調整を的確に行うことによって、'90年以降の高 PCI 化操業においても炉内通気性の過度の悪化を引き起こすことはなく操業を続けることができた。第19図は、高 PCI 化前後での炉底煉瓦温度測定値に基づく炉底浸食・溶銑凝固層生成状況と炉内応力から推定される炉床コークス・レベルを示しているが、各時期における炉床コークス・レベルに大きな変化は見られておらず、炉底浸食も進行していないことがわかる。

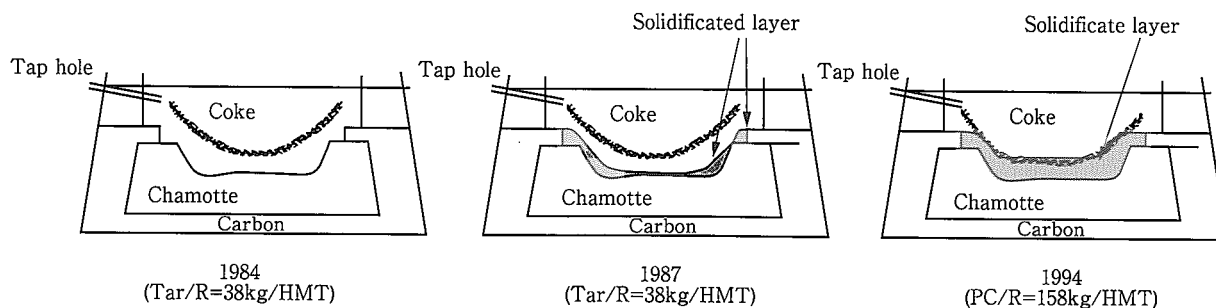
5-2 円周方向偏差抑制対策

炉底煉瓦浸食を引き起こす要因には、前述の炉床溶銑の流れのほか、炉床に供給される溶銑自身の温度の影響も考



第18図 操業結果

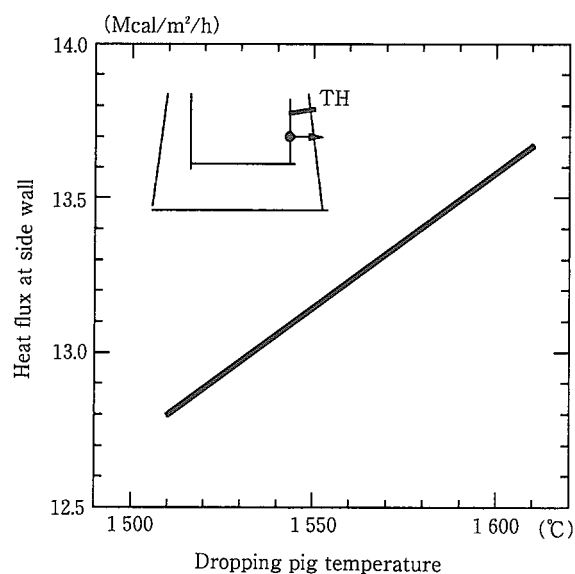
Fig.18 Operational results



第19図 炉底コークスの沈下レベルと推定炉底侵食状態

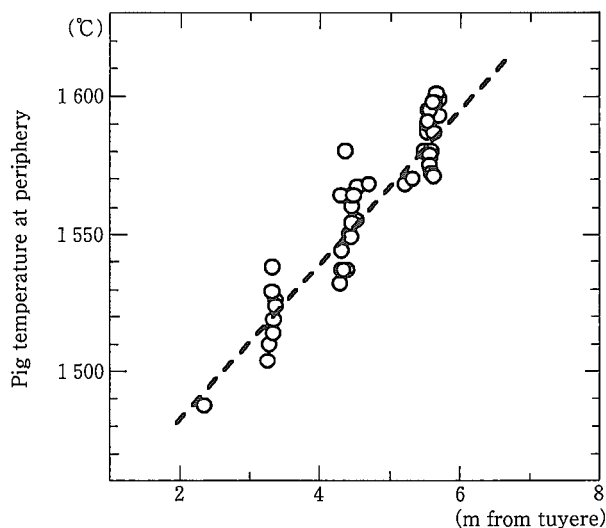
Fig.19 Estimated hearth coke level and erosion line of hearth brick

えなくてはならない。第20図は炉床滴下溶銑温度の炉底熱負荷に及ぼす影響について、高炉炉底湯流れ伝熱シミュレータを用いて評価した結果であるが、無視できない影響を及ぼすことがわかる。特に、炉底湯溜まり部に滴下する溶銑の中で、炉周辺部を滴下するものは側壁部耐火物の近傍を通過して出銑されることから、同部の滴下溶銑温度を過度に高めないことは炉底側壁耐火物の保護に作用すると考えられる。



第20図 滴下溶銑温度と炉底側壁熱負荷との関係
Fig.20 Influence of pig temperature on heat-load of hearth wall

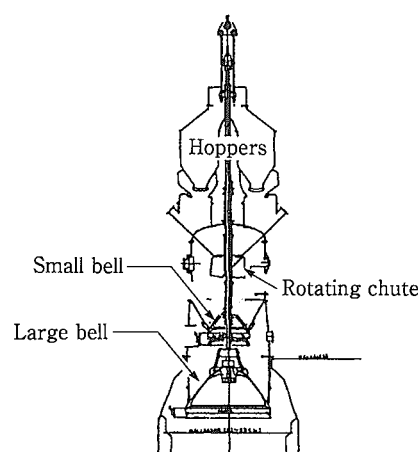
前述の炉内半径方向のガス流分布制御が、炉内通気性の確保をはじめとする操業安定性や操業効率を最適化する手段とすれば、円周方向の装入物分布偏差を抑制することは、これら分布制御の効果を確実にするための前提と考えることができる。



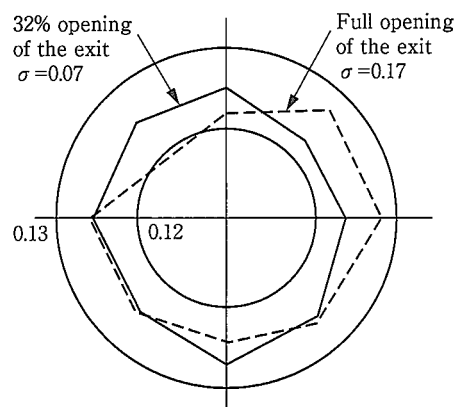
第21図 滴下溶銑温度と溶解帯レベルとの関係
(モデルシミュレーション)
Fig.21 Relation between pig temperature and melting level at periphery (Model simulation)

すなわち、第21図は、炉床滴下溶銑温度と周辺部での鉱石溶解帯レベルとの関係をあらゆるMAポジションの組み合わせについて炉内状態を推定、結果を整理ものであるが、円周方向に溶解帯の分布の不均一を無くすことは、局所的な高温溶銑の生成を回避するうえで重要である。

小倉2高炉は、第22図に示す如く炉頂に2基の原料受け入れ用ホッパを有する2ベル型の装入系であるが、当初、このホッパから旋回シュートを介して小ベルに装入する際に円周方向に堆積偏差を引き起こしていた(第23図)。

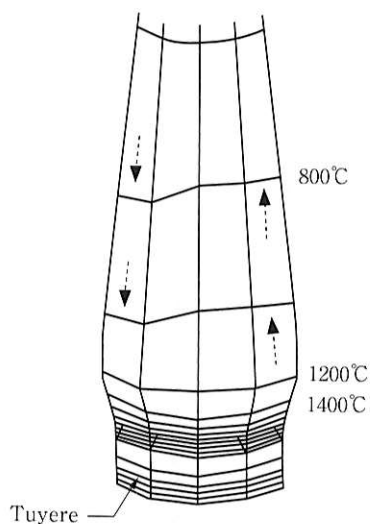


第22図 小倉第2高炉の炉頂装入系
Fig.22 Schematic view of charging system of Kokura 2BF



第23図 小ベル上でのコークスの円周方向堆積量分布
Fig.23 Circumferential distribution of coke charged on the small-bell

これが炉内状態の円周方向分布に与える影響を評価した結果を第24図に示す。装入量が円周方向に差を持つことでO/C、流径分布に偏差が生じて、鉱石溶解帯レベルはもとより、高さ方向の熱レベルに偏差が現れており、熱レベルの高い方位から滴下する溶銑の温度は平均値より15℃以上高くなり、安定操業維持の障害はもとより、炉底偏浸食にも繋がる危険が懸念された。

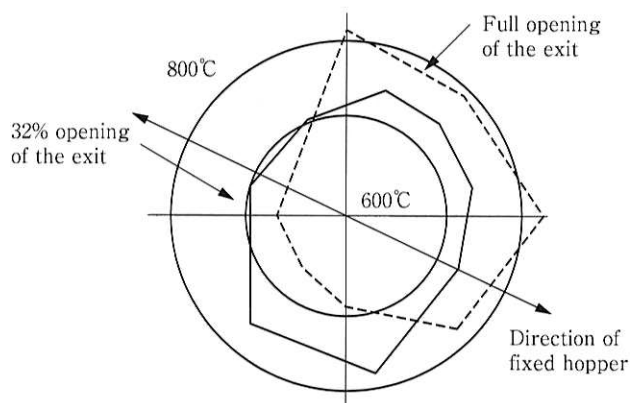


第24図 円周方向分布偏差の影響

Fig.24 Influence of circumferential imbalance of burden distribution

第26図は、原料受け入れ用ホッパーから旋回シュートを紹介して小ペル上へ装入される原料の挙動に対する離散要素法に基づく解析結果⁶⁾であるが、原料供給ホッパー側方位では旋回シュート内で一旦貯留されてから排出されるのに対し、その反対方位では一気に装入されるために、両者で装入量に差が現れている。

そこで、旋回シュートの落ち口部の開口面積の縮小を実施、原料堆積偏差を是正する(第25図)ことに加え、装入シ

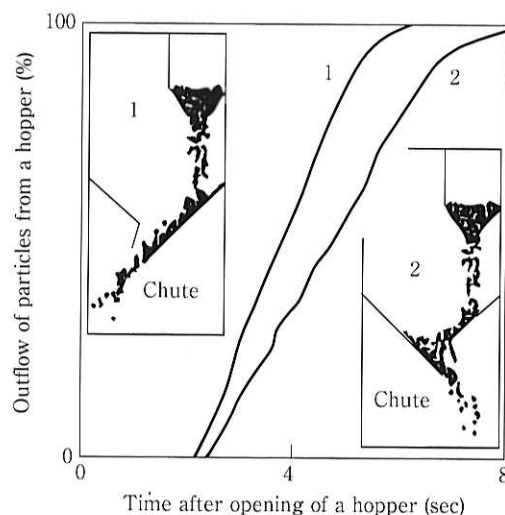


第25図 旋回シュートにおける装入物の挙動シミュレーション

Fig.25 Simulation of charged burden behavior in the rotating chute

ーケンスの改良や装入 BC 落ち口部での原料落下位置の是正等の改善を、'88 年以降順次施すことによって、第26図に示すごとく、円周方向均一化を造り込んだ。

これら種々の対策により、第3図に示すごとく'88 年以降側壁煉瓦温度を低位に維持することができている。



第26図 ガス温度の円周方向分布

Fig.26 Circumferential distribution of peripheral gas temperature

6. 結 言

4種の機能の異なるシミュレータを有機的に結合することにより炉底浸食評価システムを構築し、小倉2高炉炉底の設備面および操業面からの解析に適用した。今後さらなる改良を加え、本炉底浸食評価システムを当社高炉の設計・評価に活用していく予定である。



稲田隆信/Takanobu Inada

総合技術研究所
高温プロセス研究部 主任研究員
(問合せ先: 0479(46)5112)

参考文献

- 1) 高谷, 稲田, 宇治澤: CAMP-ISIJ, 5(1992), p.1144
- 2) 片山, 若林, 稲田, 高谷, 山岡: 鉄と鋼, 83(1997), p.91
- 3) 高谷, 山本, 稲田, 若林, 高田: CAMP-ISIJ, 10(1997), p.886
- 4) 宮原, 高谷, 山本, 稲田, 葛西, 高田: CAMP-ISIJ, 10(1997),

p.888

- 5) 望月, 大西, 小川, 小松, 横井, 稲田: CAMP-ISIJ, 3(1990) -74
- 6) 田中, 梶原, 稲田, 山縣: ISS 47th Ironmaking Conf. Proceedings (1988), p.237