

直近の高炉設備技術について

Recent Plant Engineering of Blast Furnace

志賀 敦*
Atsushi SHIGA宮岡 伸治
Shinji MIYAOKA鈴木 政芳
Masayoshi SUZUKI飯田 洋行
Hiroyuki IIDA万仲 徹
Toru MANCHU

抄 録

現在、日本製鉄(株)の高炉は13基で稼働しており、内7基は5000m³を超える大型高炉である。高炉の設備技術開発としては、1基当たり生産上方弾力性向上、高効率化、操業の安定化、長寿命化、省力化などのトータルコスト削減に加え、安全・環境・防災トラブルの抑制について取り組み、技術検討と実機化を推進してきた。本報では、このような背景のもと高炉の長寿命化についてはシャフトステーブの改善、炉底耐火物の改善、高炉操業の安定化としては朝顔部への冷却棒挿入によるプロフィールの安定化、検出端の高精度、高速化を実施、熱風炉の効率化として炉頂燃焼式の導入、高温送風化を実施、また、安全・環境・防災対策としては鋳床機器への遠隔化、自動化の機器構成の採用や、挟まれ・巻き込まれ防止の本質的な安全対策について導入を進めてきており、これら直近の設備技術内容について述べた。

Abstract

Recently, Nippon Steel Corporation is running 13 blast furnaces, and 7 of those are large furnaces whose internal volume is over 5000 m³. We have been advancing technological development on improving the flexibility of production capacity, efficiency, stability of operation, lifespan, and energy consumption to decrease LCC. In addition, we have been also tackling missions to suppress troubles on safety, environment and disaster. Through these activities, we have been promoting and technical investigation and realization. From these backgrounds, we improved the shaft stave and refractory on the bottom of furnace to expand lifespan. Moreover, in order to stabilize the operation, we inserted cooler panels into bosh to retain bosh profile and upgraded the accuracy and responsiveness of sensor. Besides, we are enhancing the efficiency of hot stand by applying top-combustion system and increasing the temperature of blowing air. Furthermore, we applied automation system and remote system to machine on casting bed, and established safety fences to prevent accidents causing injury. In this article, we explain about these mechanical technologies.

1. 緒 言

日本製鉄(株)の高炉設備において、生産上方弾力性向上、高効率化、操業の安定化、長寿命化、省力化等のトータルコスト削減に加え、安全・環境・防災トラブルの抑制が求められており、それに対応した設備技術開発と実機化を推進してきた。本報では、直近の設備技術への取り組みとして、高炉設備における長寿命化、操業の安定化、熱風炉の効率化、鋳床機器への本質的な機械安全への設備技術取り組み内容について述べる。

2. 直近の高炉設備技術について

2.1 高炉長寿命化技術

(1) シャフトステーブの長寿命化

シャフトステーブ(当初の材質は鋳鉄)を旧ソ連より導入して以来、長寿命化(目標20年超)のため材質的、構造的な改善を図ってきた。君津第3高炉(3次)、室蘭第2高炉(2次)では鋳鉄ステーブ1枚当たりの一般系ステーブ配管面間を製造限界である100mm以下まで短縮して6本から9本とし、強化系の上下コーナー配管に加えて背面蛇管を1本から2本として冷却強化で延命化を図った。更なる長寿命化としてシャフト中部、下部の高熱負荷部の耐久性向

* 設備・保全技術センター プラントエンジニアリング部 高炉原料設備技術室 主幹 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

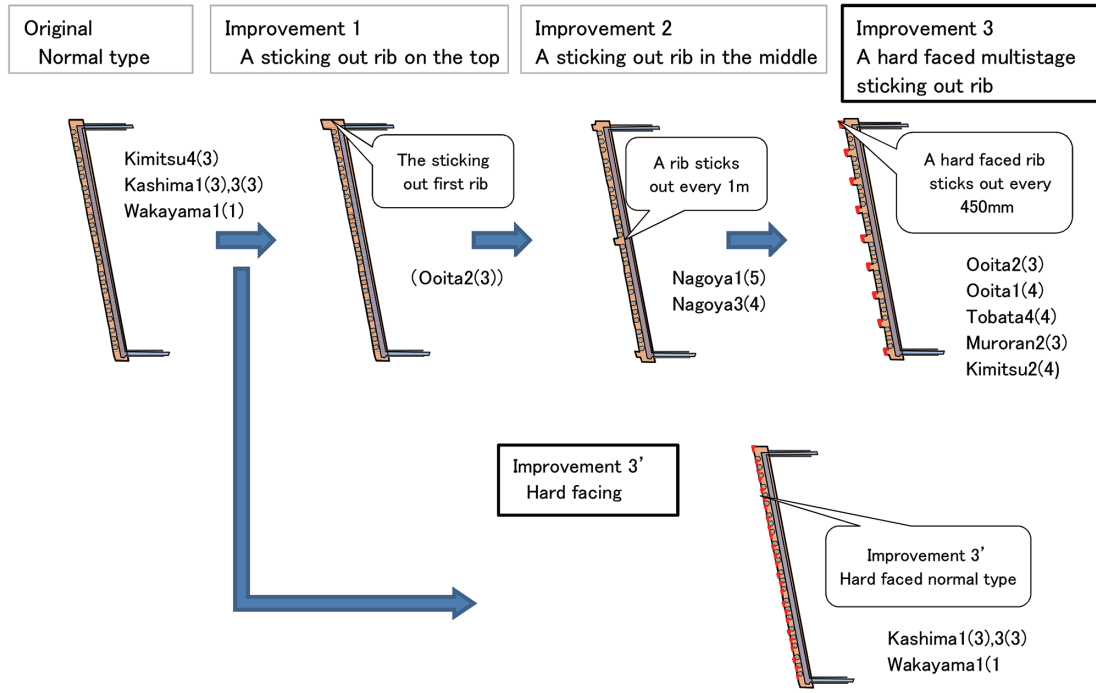


図1 シャフト銅ステーブの変遷
Transition of shaft Cu staves

上、薄壁化と長期稼働下でのプロフィールの安定維持による操業安定化を目的として、2003年5月に君津第4高炉(3次)で日本製鉄初となる銅製ステーブを導入した。続いて2004年の大分第2高炉(3次)には銅ステーブに突出しリブを設置して(1段に1か所)、炉内稼働面に薄い原料停滞層を形成することで摩耗抑制を図った。

その後、更なる銅ステーブの長寿命化を図るため、突出しリブによる停滞層形成効果に期待してリブを増設する方向で耐摩耗対策を行った。耐摩耗対策の効果はオフライン試験で確認し、最適な多段リブピッチや、突出し高さを見出した。また、突出しリブ効果の長期間の持続のため突出しリブ先端に硬化処理を施すことも考案し実機化した。図1にシャフト銅ステーブの長寿命化対策の変遷を示す。

銅ステーブの長寿命化の具体的な設備対策として、シャフト部で経験した損傷のメカニズムを解明し、改善対策を実施する必要がある。そのため損傷した銅ステーブの詳細分析を実施、その結果、稼働面には装入物の流れ方向に摩耗痕があり、電子線マイクロアナライザ(EPMA)の成分分析で摩耗痕に刺さり込んだ焼結鉍が見つかったことで、損耗対策としての突出しリブ先端硬化処理の必要性を再認識した(写真1)。

停滞層形成のための突出しリブ構造は装入物の炉内降下挙動へ及ぼす影響を1/10オフライン摩耗試験と、離散要素法(DEM)解析で推定し、最適な設置ピッチと、突出し高さを究明した。1/10オフライン摩耗試験でリブ先端の装入物降下速度が最小となるリブピッチは40mm付近であり、リブ厚みの影響はあまり顕著には表れなかったため、安定的に停滞層を形成できると考えている。リブ厚さは5mm

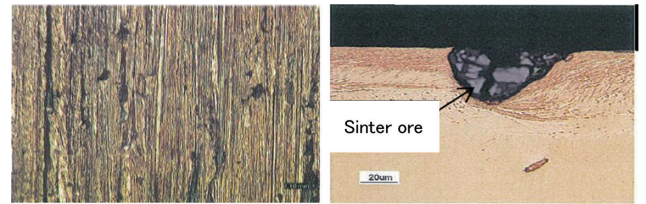


写真1 銅ステーブ稼働面の状況
Surface of Cu staves on working side

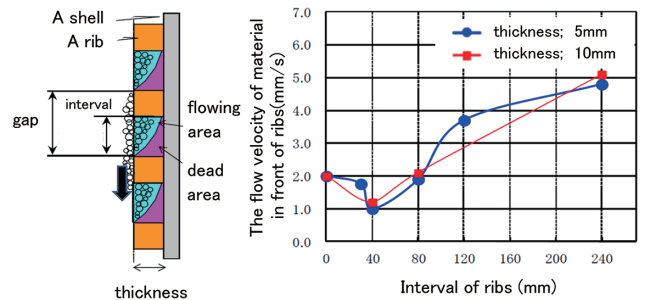


図2 突出しリブの最適ピッチ
Best interval of sticking out ribs

と10mmと比較したが、装入物の降下速度に差異がなかったため、必要なリブ厚さは5mmで十分と考えた(図2)。

また、原料停滞層形成機能を継続させるには突出しリブそのものを摩耗させず保持させることが重要であり、損傷が予想される突出しリブ先端を肉盛によって硬度を増し保護する対策を実施した。硬化肉盛の耐摩耗耐久性評価はオフライン摩耗試験および実炉試験により確認を行った。

オフライン摩耗試験では常温雰囲気下で焼結鉍とコークスを炉内側圧相当の押付荷重を加えて、銅板上を繰り返し

滑らせる試験を実施し、また実炉試験で3か月間、シャフトの摩耗最速部位に硬化肉盛を施したサンプルを挿入して実施した。実炉から回収したサンプルのうち、非冷却品は損耗したが、冷却を実施したサンプルでは摩耗は見られなかった。硬化肉盛は冷却することにより、原料より硬い十分な硬度を維持できると考えた(図3)。

(2) 炉底耐火物の長寿命化技術

近年の炉寿命律速となる主要な部位は炉底耐火物(側壁れんが、底盤れんが)である。これら耐火物の寿命は溶損や劣化、脆化による破壊が主となっており、耐火物の損耗が高炉寿命の律速となっている。この課題に対して種々の改善を行い、大きくは、①炉底耐火物構造(れんが積み)、②カーボンブロック材質改善の2つに集約される。また、直近では炉内計算シミュレーション技術の発展により操業面からも炉底耐火物寿命の延命化を図っている。

炉底構造モデルで高炉操業条件に対する感度解析を実施した結果、特に炉芯コークスのレベルが炉底れんがが浸食に大きな影響を及ぼすことが判明した。炉芯コークスが沈下している場合と、浮上している場合の炉底れんがが浸食の影響を比較すると、炉芯が浮上した場合に炉底側壁部にコークスが無い領域が出現して溶鉄流が集中し、熱負荷が上昇する。この熱負荷が上昇する位置はれんがが浸食が進行するのらくろ現象を起こす部位と合致している(図4)。

また解析モデル上で炉芯コークス層の沈下レベルを計算し、実炉の炉底れんがが温度(実績値)との相関を確認したところ、良好な相関関係が認められた。この知見を基に通常操業設計および、日々の操業管理において炉芯コークスレベルを制御(送風量、酸素量、コークス比等)することで

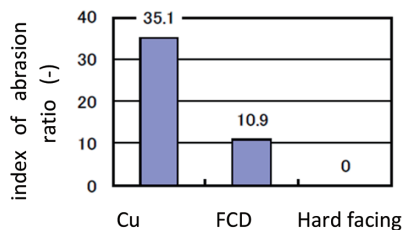


図3 オフライン摩耗試験結果
Result of abrasion examination

炉底熱負荷制御を行う技術を確立したり。

この制御手法を活用することで和歌山第5高炉では、炉底側壁部および、底部で、最大浸食方位の損傷拡大を抑制することに成功し、2019年の吹き止めまで31年間の世界最長稼働記録を残した。

またその後、炉底れんが構造設計は、各種解析モデルを相互に連携して行い、得られた解析結果に基づき炉底れんがが浸食が最小になるように設計されてきた。

2.2 高炉操業安定化技術

(1) 羽口上冷却棒導入によるプロフィールの安定化

朝顔部のプロフィールは従来かられんが面を基準に設計することが一般的な手法であった。一方、朝顔れんがが消失した場合、朝顔プロフィールはれんが健全時と消失時で大きく角度や高さなどが変化することになる。君津第4高炉(3次)の操業解析例などでは火入れから1年程度で炉内通気指数や還元材比の悪化が顕著になる事例が確認されており、その後のボーリング調査で朝顔れんがの消失が確認されている。図5には朝顔プロフィールの変化イメージを示す。

効果検証のため3次元半裁モデルによる朝顔角度と炉内装入物荷下りの関係を比較する。

- ①朝顔角度過大の場合(立った形状): 疑似停滞層が未形成, すなわち融着帯の根部位置が不安定となる
- ②朝顔角度過小の場合(寝た形状): 過度の炉壁停滞層を形成, すなわち荷下りが不安定となる
- ③これらの中点に最適な朝顔角度が存在し, 朝顔高さとは適正な関係がある

朝顔れんがの損傷進行と操業不調には関連があり朝顔部の実際の稼働面プロフィール(特に朝顔角度と朝顔高さ)に原因があると考えられている。理想とした朝顔プロフィールを安定的に維持するため、朝顔ステーブ下部に冷却棒を挿入する対策を実施した(図6)。このことによって、操業不調からの改善効果が確認されており、冷却能に優れた銅ステーブの導入に合わせて朝顔部の構造安定、操業安定をさせることができた。

君津第4高炉(3次)、大分第2高炉(3次)では朝顔冷

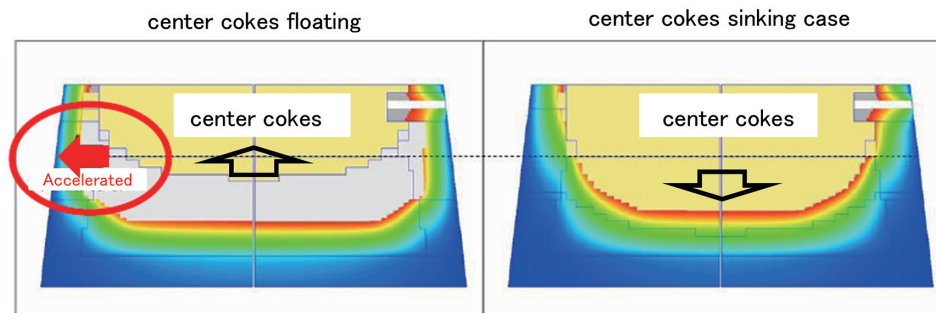


図4 炉底れんがの浸食イメージ
Image of brick erosion on the bottom of furnace

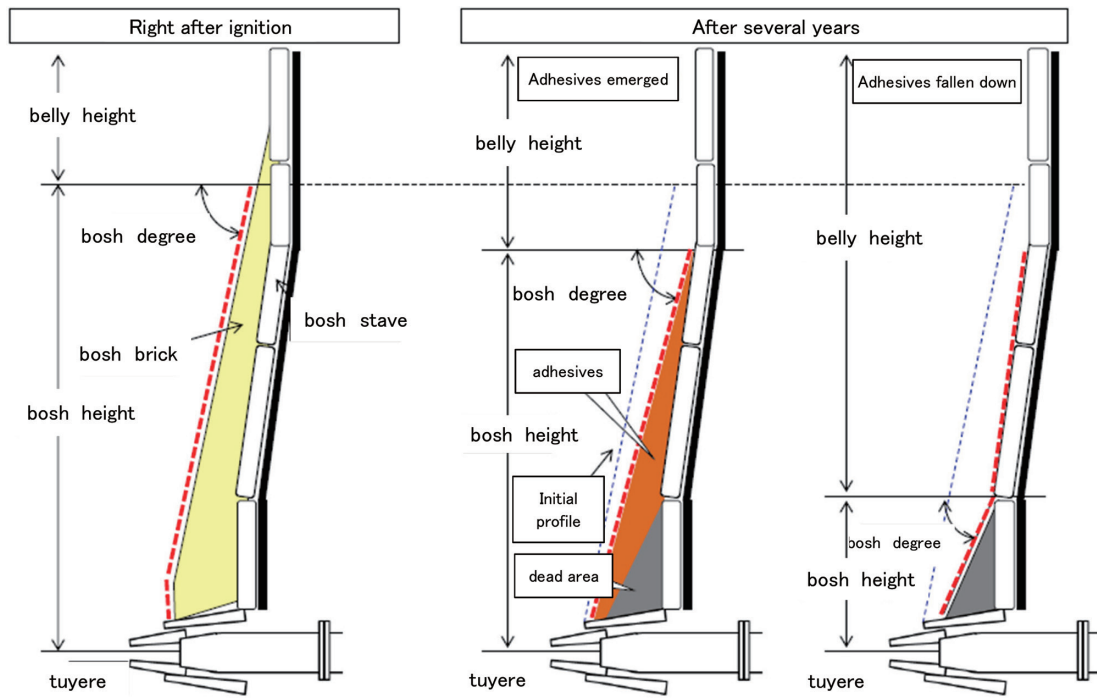


図5 朝顔プロフィールの変化
Transition of bosh profile

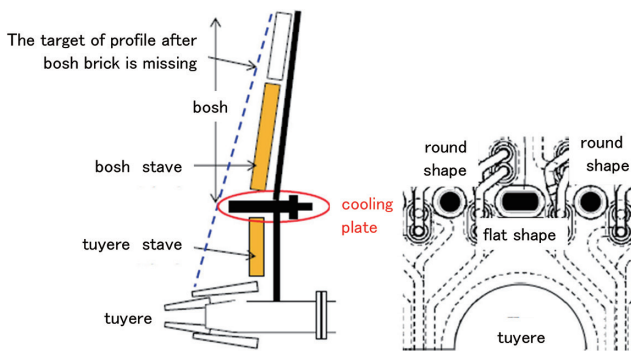


図6 朝顔冷却棒の設置状況
Layout of bosh cooling system

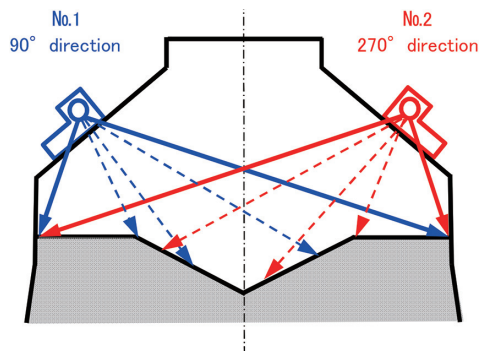


図7 プローブレスプロフィールメーターの設置状況
Layout of profile meter

却棒を設置して脱落した朝顔レンガの代わりに安定した付着物、疑似停滞層を形成し、操業安定化を図った²⁾。

大分第1高炉(3次)での解体調査では実際に朝顔冷却棒先端まで付着物が生成していることを確認した。融着帯根部の安定化および、羽口破損トラブル頻度の低減に効果が認められたため、全社的に他高炉へのトランスファーを逐次、実施している。

今後の高炉改修では、朝顔レンガと朝顔ステーブの稼働面角度を接近させて変化を小さくし、且つ、ステーブ稼働面を理想プロフィール(朝顔角度、朝顔高さ)に近づけた設計を目指す。

(2) 高精度、高速度検出端導入

従来、装入物分布形状はプローブ式のプロフィールメーターで半径分の形状測定と、炉口周辺に複数配置したサウンディングで装入原料表面の位置の測定により形状を測定、推定し操業アクションをとってきた。プローブ式の従来型

プロフィールメーターは、プローブを炉内挿入する時間が長く、装入スケジュールの制約となるため、1シフト/回程度しか測定していなかったが、新たな高速検出端として、プローブレス且つ対角に設置する対のプロフィールメーターを導入した。

プローブレスのプロフィールメーターは炉体鉄皮側からミリ波距離計を原料面に沿って走査させ、炉内シュートと干渉することなく、その反射波から炉内装入物の表面形状を可視化する装置である。図7に示した通り、プロフィールメーターは対面に2台設置し、2方向からミリ波を照射することで死角の無い測定が可能である。最近の機体では、①測定時間を1/3に短縮、②小型化のための指向性向上、③炉内装入物面性状の精度アップ(2倍に)等の更なる改善を図っている。実機の機能確認ではサウンディングポイントの測定結果を比較して、プロフィールメーターのミリ波計とサウンディングの測定値がほぼ一致することを確認し、

全社展開を行った。

(3) 熱風炉の耐火物の安定化

熱風炉は高炉に送る空気を昇温する設備であり、燃焼室および蓄熱室で構成されている。燃焼時には燃焼室に設置されたバーナーで燃料ガスを燃焼し、発生する高温ガスを蓄熱室に充填されたチェッカーレンガに通して蓄熱を行っており、熱風炉内面に設置されている耐火物は、高温条件且つ繰り返しの熱変化を受けている。このため熱風炉内部の耐火物は使用環境において損傷が発生することがあり、損傷が軽微なうちに補修、積み替えなどを行うことが必要になるが、高温のレンガの発光により鮮明な画像を得ることが技術的に難しかった。

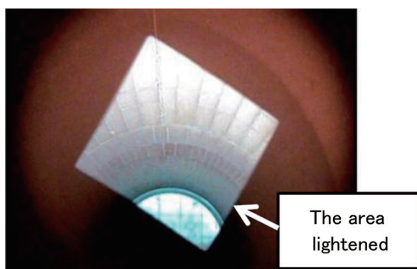
実際の熱風炉耐火物の内部観察技術としては、撮影装置の解像度アップとライト改善が実施され、室蘭第2高炉の熱風本管における内部観察では、高光束のライトを使用することでレンガが目地まで確認できる鮮明な画像の撮影に成功した(写真2)。

2.3 熱風炉の効率化

(1) 炉頂燃焼(メタリックバーナー)式熱風炉の導入

高効率を指向した炉頂燃焼式熱風炉としては、小倉第2高炉の新No.3熱風炉が2014年12月に操業運転を開始した(日鉄エンジニアリング(株)製)。従来式と比較して混合燃焼性に優れており、未燃CO、NO_x発生量の大幅な低減を達成した。炉頂燃焼式熱風炉の主要なコンセプトは図8に示す通りである。

- ①各バーナーダクトからのガス吹き出しにより、理想的な回流を形成し、チェッカーレンガを全面を均一加熱させるためのメタリックバーナー配置を採用している。メタリックバーナーにおける燃料ガスと燃焼空気の混合性は良好で未燃COはほとんど発生しない状態まで低減が可能である。
- ②各バーナーダクトの出口付近でガス、空気がほぼ完全燃焼できるので、ドーム部をより高温に維持することが可能であり、従来式のような燃焼室が不要でコンパクトである。表面積も小さいので(既設対比で約90%)、炉体表面からの放散による熱ロスの低減が図れる。



Picture of Camera with high luminous flux light

写真2 熱風炉内部の撮影画像比較
Picture of hot stove inside

- ③メンテナンス性にも優れ、メタリックバーナー前に水冷式遮断弁を備え熱風炉を休止することなく補修が可能である。現在2号機を名古屋第3高炉に建設中である³⁾。

(2) 高温送風化技術

高炉操業の主な方向性として、還元材比低減(CO₂削減)、高出銑比操業を指向しており、幾つかのアプローチの1つとして熱風炉の高温送風化がある。高温送風化の実現にあたっては、①熱風炉の増設、②ドーム温度のアップ、③燃焼排ガス温度アップによる蓄熱量のアップの手段が考えられるが、それぞれに大きな課題がある。熱風炉の増設は根本的に周辺用地や、費用対効果の面で現実的ではなく、ドーム温度アップも熱風炉鉄皮の応力腐食割れを助長する結果につながるために成案化するのには難しい。同様に燃焼排ガス温度のアップは既設チェッカー受け金物が高温になり強度低下を招くため、耐熱性を向上した材質へ取替が必要であった。この課題に対し、金物支持支柱の材質をFCD400から新開発の耐熱铸铁である“FCD400H”(日鉄エンジニアリング製)にし、支柱追加、補強すれば、高温クリープ強度以内に維持することができ、約100℃の排ガス温度アップが可能である。

チェッカー受け金物の取替は、金物が支えているチェッカーレンガの積み替えを実施しなければならないが、レンガが積み替えを回避しつつ、チェッカー受け金物にかかるレンガの荷重低減を図るため、まずFCD400H製の支柱を増設することを考えた(図9)。更に既設支柱金物には外周をFCD400H製部材で囲うように補強することで必要な強度を確保する。この結果、既存熱風炉を安価且つ短工期で送風温度を向上させることが可能となった。

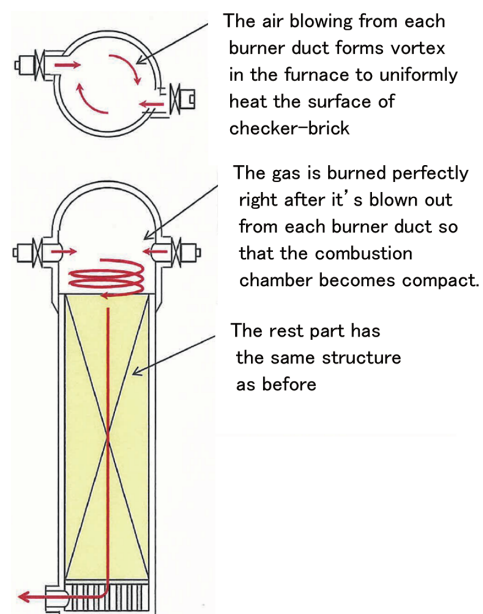


図8 小倉第2高炉の炉頂燃焼式熱風炉のコンセプト
Concept of top-combustion hot-blast furnace for Kokura No.2 blast furnace

2.4 鋳床機器への機械安全対策導入

鋳床作業は高熱且つ重筋作業であり、担い手の確保のためにも、手出し作業を低減、レス化が急務となっている。また、国際規格や安全衛生規定に基づくリスクアセスメントの実施、設備の新設、更新、改造時に設備のライフサイクル(据え付け、試運転、生産、段取り、トラブル処置、その他付帯作業)の各段階における設備と人の関わり方を対象に本質的な安全設計の導入を進めていかなければならない。

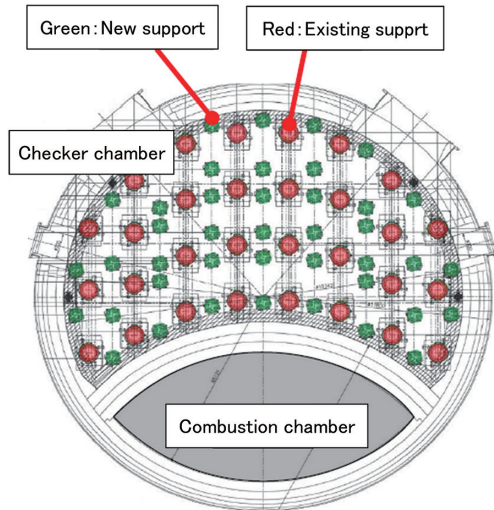


図9 チェッカーレンが受け金物の構造(断面図)
Supporting structure of checker brick (sectional view)

本質的な安全設計は危険源が主に可動設備による挟まれ、巻き込まれに対するものであり、マッドガンや開口機などの既設設備や自動化された設備の潜在リスクを洗い出して具体的な安全対策を考案した上で、日常的な定常作業を前提として作業性を確保しつつ、安全柵や立入監視機器等の設備対策を設け、危険リスクレベルの低減を図ることを検討している(図10)。また、単に稼働機器との隔離をするだけでは作業エリアが縮小し、逆に作業性の悪化につながる考えられる。このため鋳床エリア全域においてフォークリフトを使用し効率的且つ安全に資材運搬ができる等の対策も進めている(図11)。

3. 結 言

日本製鉄の高炉設備において、生産上方弾力性向上、高効率化、操業の安定化、長寿命化、省力化等のトータルコスト削減に加え、安全・環境・防災トラブルの抑制が求められており、それに対応した設備技術開発と実機化を推進してきた。今後も操業技術の一層の高度化を支える設備技術開発を推進し、高炉設備技術水準を高めていく所存である。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会第67回製鉄部会. 1985, 私信
- 2) 松田 ほか: 日本鉄鋼協会第106回製鉄部会. 2016, 私信
- 3) 佐々野 ほか: 日本鉄鋼協会第105回製鉄部会. 2015, 私信

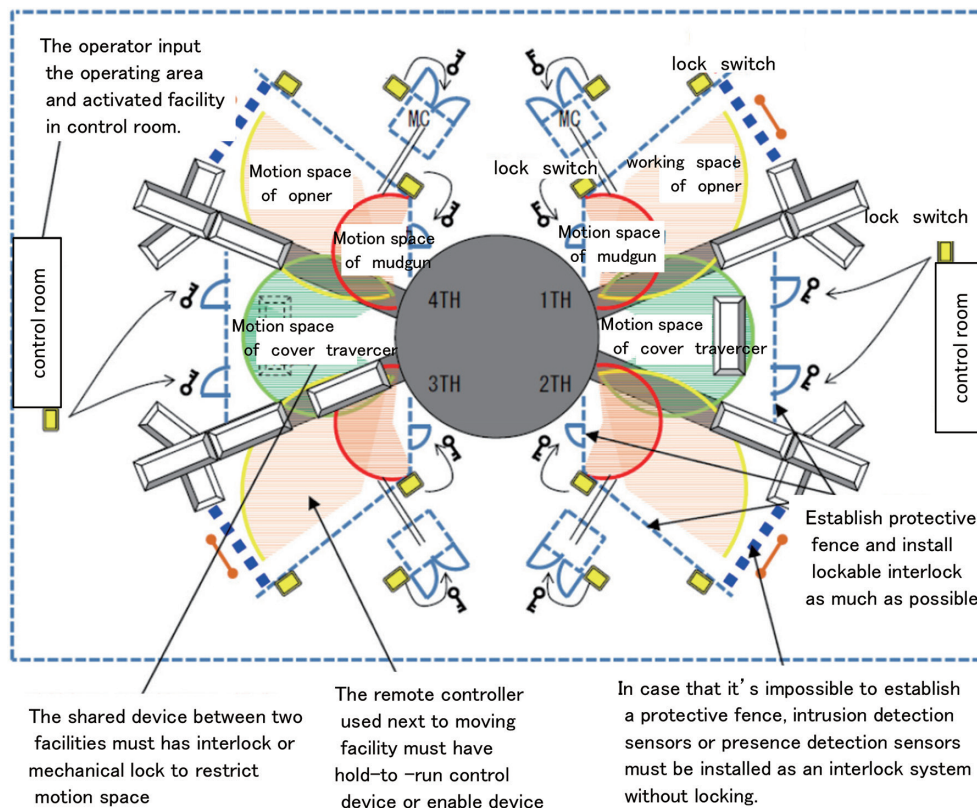


図10 鋳床機器の安全思想
Safety concept of machine in casting bed

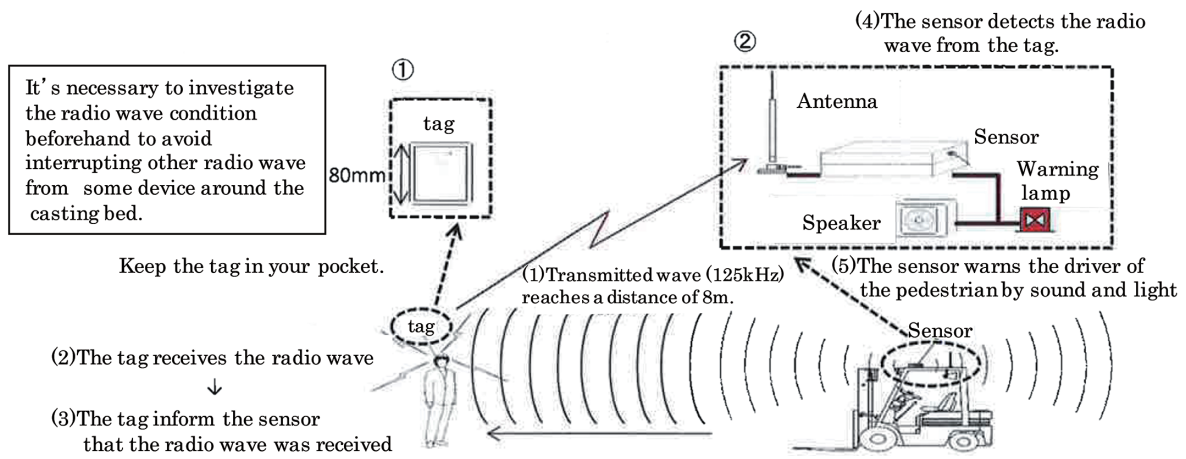


図 11 鋳床人車分離対策設備概要
Concept of pedestrian-vehicle separation system



志賀 敦 Atsushi SHIGA
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部
高炉原料設備技術室 主幹
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



飯田洋行 Hiroyuki IIDA
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 部長(製鉄)



宮岡伸治 Shinji MIYAOKA
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部
高炉原料設備技術室長



万仲 徹 Toru MANCHU
広畑製鉄所 設備部 制御技術室 主査



鈴木政芳 Masayoshi SUZUKI
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部
高炉原料設備技術室