

# 新日鉄住金エンジニアリングの 長寿命・省エネ銅ステーブ

## ～鋼管鑄込み銅ステーブの先進技術～

Long Life Copper Stave for Blast Furnace Developed  
by Nippon Steel & Sumikin Engineering  
～Advanced Technologies of Cast-in steel Pipe Copper Stave～

後藤 誠 Makoto GOTO

製鉄プラント事業部  
製鉄プラントエンジニアリング第一部  
商品技術室 製鉄技術グループ

### 抄 録

ステーブとは、炉内プロフィールの維持及び高炉炉内の高温ガスや溶融物から鉄皮を保護するための設備である。中でも銅ステーブは特に熱負荷が高い高炉下部に設置される。

従来の銅ステーブは、銅板にドリルで穴あけ加工し水路を形成するが、当社は鋼管を鑄込むことで水路を形成する鋼管鑄込み銅ステーブを開発した。

ステーブに求められる機能は、大きく分けて①長寿命、高い信頼性、②冷却性能、③断熱性能の3点であるが、鋼管鑄込み銅ステーブは、独自の製法とそれにより実現した独特な炉内面形状により、各機能について従来の銅ステーブより優れた性能を有する。本稿では、鋼管鑄込み銅ステーブの技術的優位性について述べる。

### Abstract

Stave is the equipment for maintaining the furnace inside profile and protecting the furnace shell from the high temperature gas or molten material. Among them, copper stave is installed to lower part of blast furnace in a high heat region.

The water channel of conventional copper stave is made by drilling to the copper plate. On the other hand, we developed cast-in steel pipe copper stave whose water channel is made by casting the bended steel pipe to the copper.

The functions required for stave is classified in 3 points; ①Long life and high reliability, ②Appropriate cooling performance and ③Heat insulation performance. Cast-in steel pipe copper stave has more excellent performance in these 3 functions than conventional one. In this paper, the advantages in technology of cast-in steel pipe copper stave are described.

## 1 緒言

地球温暖化への関心が世界各国で高まっており、温室効果ガス排出量の削減、特にCO<sub>2</sub>排出量の削減が求められている。世界の全CO<sub>2</sub>排出量のうち鉄鋼業からの排出が占める割合は非常に高く、全体の15%にも上り、その70%以上は製鉄工程で排出されていると言われている。CO<sub>2</sub>排出量は、主に設備のエネルギー効率に依存するため、世界中で「省エネ効率の高い高炉」が求められている。

当社は50年以上に渡り70基以上の高炉新設・改修を行ってきた。各プロジェクトでは、操業諸元の検討から、高炉設備一式についての設計・製作・工事までを実施している。これらの幅広い業務から得た経験に基づき、当社は様々な省エネ設備を開発してきた。

特に日本では省エネ設備の導入が進んでおり、当社が納入した高炉の粗鋼1tあたりのエネルギー消費量は世界で最も低い水準となっている。

また、高炉は製鉄所の最上流設備であり、かつ年中通して稼働する設備であるため、より長寿命かつ信頼性の高い設備が求められるが、この点に関しても長年の経験から様々な設備長寿命化のノウハウを開発・設計に織り込んでいる。

本稿では、当社の開発した省エネ長寿命設備の一つである銅管鑄込み銅ステープについて述べる。

## 2 銅ステープとは？

当社(当時、新日本製鐵(株)エンジニアリング事業本部)は、1969年にソ連より鑄鉄ステープの技術を導入した。以降、実機導入及び操業結果に基づく度重なる改良を行ってきた。結果、導入当初平均5～7年であった炉寿命を15～16年まで長寿命化することに成功した。この鑄鉄ステープは国内外問わず世界の約180基の高炉に納入し炉寿命延長に貢献してきた。

しかし、近年では20年以上という、さらなる大幅な長寿命化が求められているが、鑄鉄ステープは、その材質特性上、高炉下部の高熱負荷部では材質劣化が生じ、安定的に20年の寿命を達成することは困難であった。従って、高熱負荷部の鑄鉄ステープに

置き換わる冷却設備として「圧延銅ステープ」が開発された。圧延銅ステープは、圧延された銅板にドリルで穴開け加工し、給水および排水のパイプを溶接して水路を形成する。圧延銅ステープは1990年代半ばにドイツで使われ始め、現在は多くの高炉で採用されている。

またその他にも、鑄造時に中子により水路を形成する「鑄抜き銅ステープ」や、モネルパイプを水路形状に曲げ加工し銅で鑄込む「モネルパイプ鑄込み銅ステープ」等が開発された。

しかし、これらの銅ステープは後述の課題があったため、当社はそれらを解決すべく、鑄鉄ステープで40年に渡り蓄積した製造・設計ノウハウを活かし、「銅管鑄込み銅ステープ」の開発を行い、2004年以降実機導入している。

## 3 銅管鑄込み銅ステープとは？

現在銅ステープは、上述のドリルで穴あけ加工し、端部を栓溶接する「圧延銅ステープ」が主流となっている。

一方、当社の開発した銅管鑄込み銅ステープは、曲げ加工した銅管を銅で鑄込む製法であり、製造方法が圧延銅ステープとは根本的に異なる。この独自の製造法により圧延銅ステープには出来ない省エネ長寿命対策が可能となった。

## 4 ステープに求められる性能

高炉は1,200℃前後の高温ガスが吹き込まれ、鉄鉱石の還元・溶融を行う設備であるが、ステープとは、その炉内の高温ガスや高温溶融物から鉄皮を保護し、炉内プロフィールを維持するために鉄皮内面に設置される冷却設備である。ステープに求められる性能は大きく分けて以下の3点である。

### (1) 長寿命、信頼性

ステープは、構造上炉外からの根本的な補修が不可能なため、破損時は大掛かりな取替え工事や高炉改修工事が必要となる。ステープの破損は、長期休風や、漏水による炉内冷え込み、プロフィール変化による操業不調など操業に多大な悪影響を及ぼす。したがってステープは特に安定的な長寿命性能が求

められている。

## (2) 冷却性能

鉄皮を1,200℃の高温ガス・溶融物から保護するためには適切な冷却性能が必要となる。特に高熱負荷部である朝顔からシャフト下部は高い冷却性能が求められるため、銅ステーブが採用されることが多い。

## (3) 断熱性能

高炉は高温で酸化鉄の還元反応・溶融を行う設備であるため、炉内の熱エネルギーを外に逃がさない断熱構造が望ましい。一方で、上述の通りステーブは高炉の炉内プロフィール維持や鉄皮保護のため冷却されるので炉内の高温ガスや溶融物から熱エネルギーを奪ってしまう。ステーブによる抜熱はそれに相当する燃料(コークス)が消費されることを意味し、RAR(Reducing Agent Rate：還元材比)の上昇に直結する。RAR上昇は、CO<sub>2</sub>排出量上昇や溶銑単価上昇につながる。したがって、ステーブには冷却性能と同時に極力炉内の熱エネルギーを奪わない断熱(低抜熱)性能も求められる。

従来は、鑄鉄ステーブの前面に熱伝導率の低い煉瓦を埋設することで冷却性能と断熱性能を両立する鑄鉄ステーブが用いられてきた。

一方、銅ステーブは高い冷却性能によりステーブ前面に存在する(半)溶融物が冷却され固着し、それが断熱層として働くことが期待される。

以上の各機能に関して、鋼管鑄込み銅ステーブの圧延銅ステーブとの違い、優位性を以下に述べる。

## 5 鋼管鑄込み銅ステーブの技術的優位性

### 5.1 長寿命、信頼性

圧延銅ステーブのトラブルは以下の様に大きく3つに分類することができる。

#### (1) 変形

ステーブは高温ガスに曝される炉内側と冷却される炉外側とで熱膨張量差が生まれるため、そり変形が生じる。特に、ステーブが長すぎた場合や、ボルト拘束位置が不適切であった場合に、大きな変形が生じる。

この変形により、炉内に突出した部分の摩耗トラブルや、目地や背面に高温ガスが流れることによる

溶接部の破損トラブルを生ずることがある。

#### (2) 溶接部の熱疲労による亀裂発生

操業熱変動等により溶接部に繰り返し熱応力が発生し、亀裂・破損に至る。

#### (3) ずり摩耗

銅より硬度が高い鉄鉱石・焼結鉱やコークスが銅ステーブ前面に接触しながら降下することによって、ずり摩耗を生じる。一般に銅ステーブの摩耗速度は、ステーブ前面原料の接触力・降下速度、銅・原料の硬さや原料の形状に依存すると言われている。

そこで当社は上記課題を解決するため、新たな3つの特徴をもつ新型の銅ステーブを開発した。

### 5.1.1 耐変形性能

変形トラブル防止するためにまず重要なことは、適切にステーブ長さやボルト拘束位置を設計することである。これに加えて、鋼管鑄込み銅ステーブは独自の設計によりさらに変形リスクを低減させることができる。

図1は圧延銅ステーブと鋼管鑄込み銅ステーブの拘束位置を示している。

#### (1) 圧延銅ステーブ

圧延銅ステーブは、ステーブ中央寄りに設置された取付けボルト及びピンにより鉄皮に変位拘束される。立ち上がり配管に関しては、配管付け根の溶接部に応力が発生し破損することを避けるため、伸縮管により鉄皮と接続する。したがって、ステーブの上下端部が自由に変位するため、変形が生じやすい。高炉炉内の操業変動等により銅ステーブに繰り返し高い熱負荷が働くことで、塑性歪が徐々に蓄積し大きな変形に至る。ステーブ長さが長かった場合やボルト位置が不適切であった場合、また設計条件以上の高熱負荷操業が為された場合には、50mm以上端部が変形し、溶接部の破損や摩耗に至った事例が存在する。

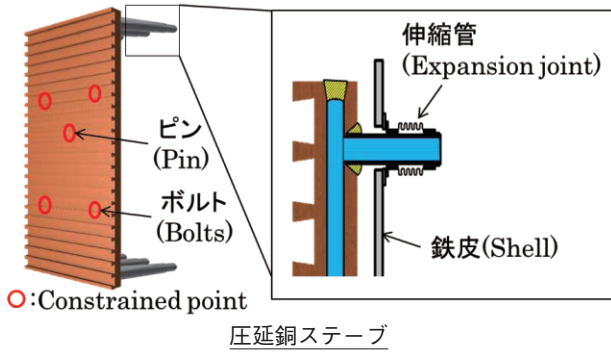
#### (2) 鋼管鑄込み銅ステーブ

鋼管鑄込み銅ステーブは、変形に強い以下の3つの特徴を有する。

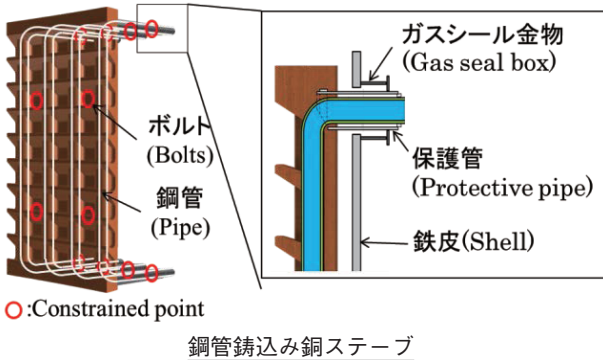
##### 1) 保護管の拘束

図1に示す通り、鋼管鑄込み銅ステーブは取付けボルトに加えて、ステーブ端部に設置する保護管を





圧延銅ステープ



銅管鑄込み銅ステープ

図1 ステープ変位拘束位置の違い  
Fig. 1 Difference of positions of constrained points

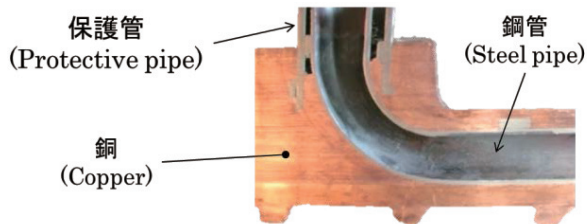


図2 保護管構造  
Fig. 2 Structure of protective pipe

ガスシール金物により固定するため、ステープ上下端部の変位を拘束できる。また、図2の通り、保護管は鑄込みにより銅ステープ本体に設置するため、溶接部は無く破損のリスクがない。

## 2) 鑄込みパイプによる骨組み構造

図1の通り、銅管鑄込み銅ステープは、銅より剛性の高いパイプが骨組みの役割を果たし、より変形に強い構造となる。

## 3) 炉内面凹凸形状による温度低下、応力緩和

銅管鑄込み銅ステープは、凹凸な炉内面形状を採用している。図3は、横断面形状を示している。圧延銅ステープは矩形断面のため、炉内面の水路との距離が離れた箇所で温度が高くなる。一方、銅管鑄込み銅ステープは、凹凸形状の採用により炉内面と

水路の距離がほぼ一定となるため、炉内面を均一に冷却することができる。均一冷却により、炉内外面の温度差が小さくなり、熱応力の発生や変形を抑えられる。

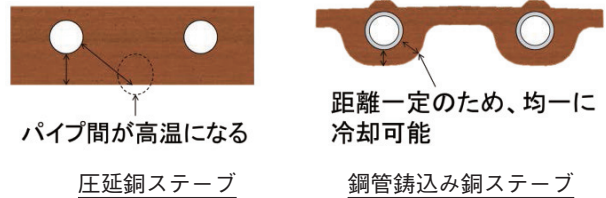


図3 凹凸形状による均一冷却  
Fig. 3 Uniform cooling by bumpy shape

また、図4に示す通り圧延銅ステープは高熱負荷時に炉内外面の温度差により炉内面に圧縮塑性歪が生じ、これが変形の要因となる。一方、銅管鑄込み銅ステープは、凹部で縁切りされるため、圧縮応力が生じにくく、塑性歪の発生を抑えられる。

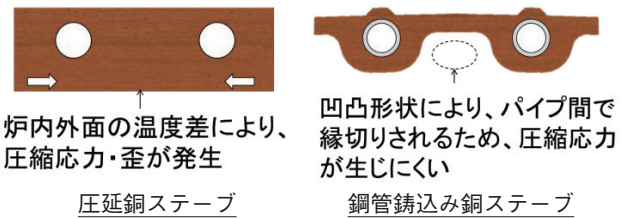


図4 凹凸形状による応力低減  
Fig. 4 Stress reduction by bumpy shape

以上より、凹凸形状により発生応力・歪が軽減され、変形を抑えることができる。

図5の、高熱負荷条件下における銅管鑄込み銅ステープの熱応力解析結果によると、そのそり変形量は約1.2mmとなり、炉内面への突出は十分小さく、

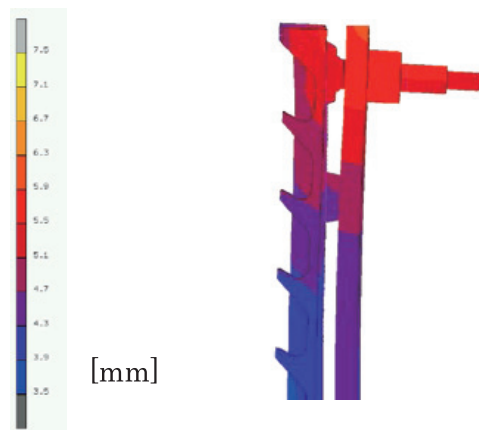


図5 変形量  
Fig. 5 deformation quantity

変形によるトラブルは起きないと考えられる。

### 5.1.2 溶接レス構造による溶接部破損リスクの排除

銅管鑄込み銅ステープは銅管により水路を形成するため、圧延銅ステープでは不可欠な栓溶接や配管溶接が不要である。構造的に弱い溶接部を省略することで、溶接部の破損リスクを完全に排除することができる。(図6)

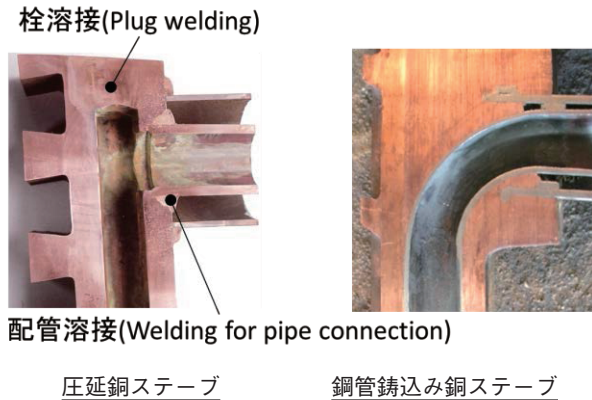


図6 水路形成法の違い  
Fig. 6 Difference of channel forming method

### 5.1.3 耐摩耗性能

銅ステープは高い冷却性能により付着物を炉内面に形成し、前面を降下する原料との接触を避けることで摩耗を防止する。

しかし、付着物は操業変動によりしばしば落下することがある。前面に付着物がない場合、銅ステープの摩耗は、ステープ前面原料の接触力・降下速度、銅・原料の硬さ、原料の形状に依存すると言われている。

従って、設備として可能な摩耗対策には、付着物を安定的に保持することに加えて、付着物がない場合にも原料の接触力・降下速度を低下させること、そして、銅の硬度を低下させないことが求められる。

圧延銅ステープは機械加工で溝を形成するのに対して、銅管鑄込み銅ステープは、鑄込みによりリブを一体で形成するため、自由なリブ形状を形成することができる。この特徴を活かして、当社は耐摩耗性を有する上向きリブ構造を考案した(図7参照)。銅の硬度に関しては、5.2に示す冷却性能に依存する。

#### (1) 付着物によるセルフライニング

銅管鑄込み銅ステープは、上向きかつ大型リブの採用により、高い付着物の保持力を有するため、付

着物が落下しにくく、摩耗を防止することができる。

#### (2) 原料の接触力と降下速度の低減

前面に付着物が無い場合、圧延銅ステープはリブが小型のため、リブに入り込んだ原料はほとんど動かさず、ステープ前面の原料はリブの影響を受けることなく降下する。一方、銅管鑄込み銅ステープのリブは上向きかつ大型のため、一度リブ内に入り込んだ原料が炉内に排出される流れ(荷重伝達)が発生する。この際に、原料は上向きに排出される。この上向き流れにより、ステープ前面の原料が炉内側に押し返され、リブ先端における原料接触力・降下速度を低下させることができる。

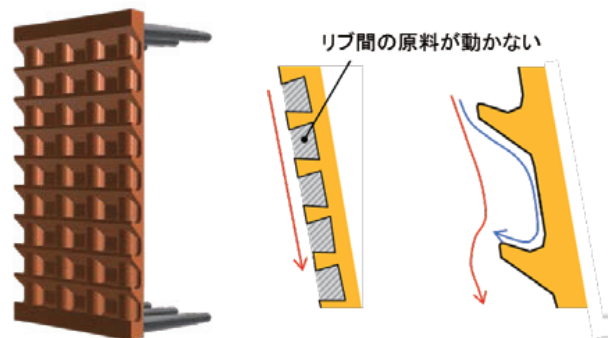


図7 上向きリブ(断面)  
Fig. 7 Upward ribs (Cross section)

図8は原料を粒子としてモデル化し、原料降下挙動をシミュレーションすることのできるDEM(Discrete Element Method、離散要素法)解析の結果を示している。

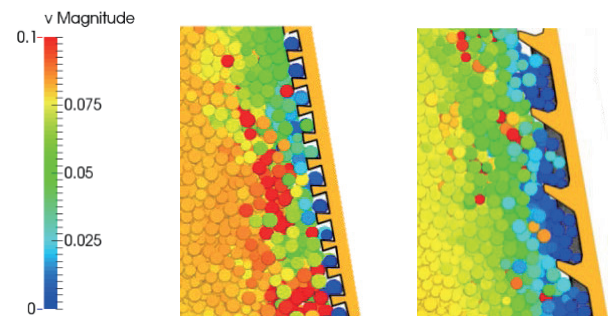


図8 DEM解析による原料降下挙動シミュレーション  
Fig. 8 Simulation for burden descending behavior by DEM analysis

上述の上向きリブの効果により、ステープ前面に降下速度の遅い滞留層が出来ていることがわかる。DEM解析結果より、リブ先端へ動く接触力は約40%、原料の降下速度が60~70%低下することがわかった。

ここで、摩耗速度が接触力×降下速度に比例すると仮定すると、接触力と降下速度の低下により、摩耗速度は約0.25倍となり、約4倍の長寿命化が期待できる。

当社は新設高炉の場合、最適な炉内プロフィールやステープリブ形状を設計することで、銅ステープの長寿命化を可能にした。一方、不適切なプロフィールが要因で接触力や降下速度が大きくなり銅ステープが急速摩耗した高炉や、高出銑操業により原料の降下速度が高くなり急速摩耗した高炉に対しても、圧延銅ステープから当社ステープに取り替えることで、原料の接触力と降下速度を低下させることができる。既存ステープで寿命が5、6年の場合、寿命を4倍、約20年まで長寿命化することが可能であると考えられる。

## 5.2 冷却性能

鉄皮の破損を防止するため、また銅の硬度低下による摩耗を防止するためには、適切な冷却性能を一炉代に渡り維持することが求められる。銅管鑄込み銅ステープは、熱伝導率の低い銅管が熱伝達経路に存在することによる冷却性能不足や、銅と銅管が剥離することによる冷却性能の低下が懸念されるが、以下の技術により、その課題は解決されている。

### (1) 冷却性能

表1に圧延銅ステープ、鑄抜き銅ステープ、銅管鑄込み銅ステープに使用される銅の純度及び熱伝導率を示す。銅管鑄込み銅ステープは、高純度の銅のみで構成される圧延銅ステープと比較すると冷却性能は低下するが、実績が多数ある鑄抜き銅ステープと比較すると、純度99.9%と高純度の銅を使用することで、優れた冷却性能を有している。

表1 各ステープ母材の熱伝導率  
Table 1 Thermal conductivity for each copper staves

Type of copper Stave	Material	Purity of Copper	Thermal Conductivity [kcal/m-h・°C]	
圧延銅ステープ (Rolled & Drilled Type)	Rolled copper	≧99.9%	315	
鑄抜き銅ステープ (Cast Type)	Cast Copper (CAC101)	≧99.5%	173	
銅管鑄込み銅ステープ (Cast-in Steel Pipe Type)	Copper	Cast Copper (CAC103)	≧99.9%	260
	Pipe	Steel Pipe	—	40

図9は各銅ステープの三次元熱伝導解析結果であ

る。銅管鑄込み銅ステープは多数実績のある鑄抜き銅ステープより低い炉内面温度となっていることがわかり、冷却性能に何ら問題がないと言える。

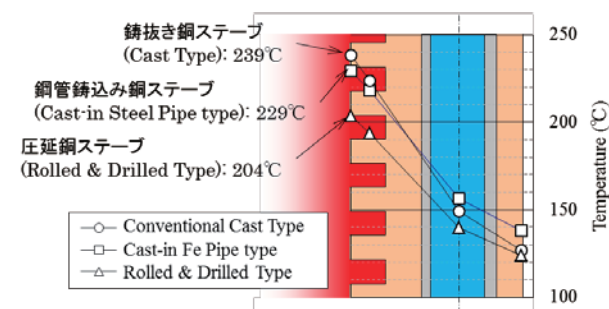


図9 三次元熱伝導解析結果  
Fig. 9 Results of 3D thermal conductivity analysis

### (2) 銅と銅管の密着性

銅管鑄込み銅ステープの冷却性能を維持する条件として、炉内の熱変動により繰り返し応力が発生しても銅母材と銅管の密着面が剥離しないことが求められる。万が一密着面が剥離すると、銅母材と銅管の間の熱伝達性能が低下し、母材が高温となりトラブルに繋がる可能性がある。当社はこのリスクを排除するため、独自の製造技術を開発し、銅と銅管の高い密着性を実現している。

銅と銅管の密着性は以下に示す様々な試験により検証し、信頼性の確認を行った。

### 1) EPMAによる組織観察

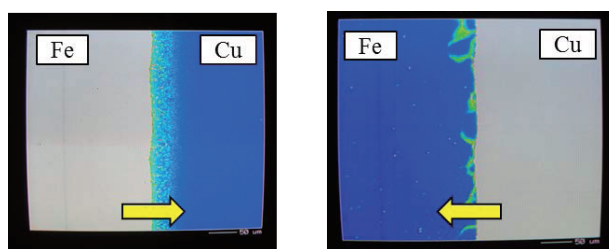


図10 EPMAによる銅管と銅母材の組織観察  
Fig. 10 Observation of metal structure by EPMA

図10は、EPMA (Electron Probe Micro Analyzer、電子線マイクロアナライザ)を用いて銅と銅管の境界の金属組織を観察した結果を表している。左はFeの、右はCuの組織分布を表しているが、接合部において両者が相互拡散しており、強固な密着面が形成されていることがわかる。

### 2) 引張り／せん断強度試験

銅と銅管の機械的密着強度を評価するため、



400℃の高温条件下で引張試験及びせん断強度試験を実施した。図11は引張試験、図13はせん断試験の結果を示す。いずれの試験においても、銅と銅の溶着面では破断は起きず、銅側において破断した。したがって、密着部は銅母材の機械的強度を上回る十分な強度を有していると言える。

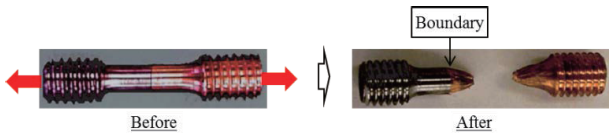


図11 密着面の引張強度試験  
Fig. 11 Tensile strength test of adhesion part

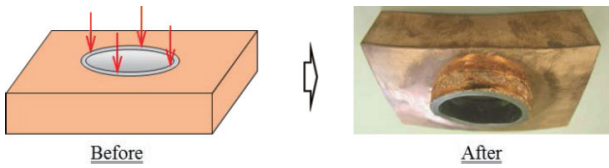


図12 密着面のせん断強度試験  
Fig. 12 Shear strength test of adhesion part

### 3) ヒートショック試験

繰り返し熱負荷を受けた後の銅と銅管の密着性と熱伝導性を確認するため、図13に示すヒートショック試験を行った。本試験では銅管から約10mmの位置の温度が400℃に上昇するまで上面をバーナー加熱し、その後配管内に冷却水を通水して冷却する繰り返し熱衝撃を20回与えた(図14)。銅ステーブは通常、配管から50mm以上離れた表面温度が200～

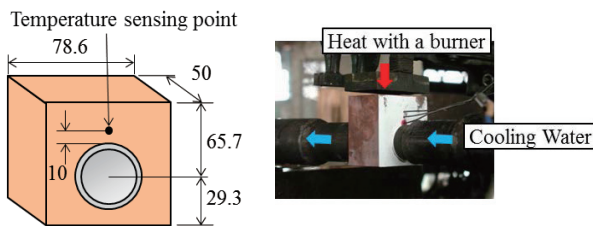


図13 ヒートショック試験  
Fig. 13 Examination of heat shock

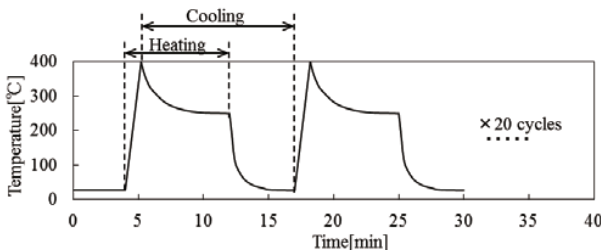


図14 熱負荷条件  
Fig. 14 Condition of heat load

250℃以下にて管理されるため、実炉よりもかなり厳しい熱負荷条件に設定した。

結果、ヒートショック経験後においても、密着面の剥離や熱伝導性の低下は一切見受けられなかった。本試験より実炉稼働条件下においても密着面の剥離や熱伝導性の低下は発生しないと言える。

以上の通り、銅管鑄込み銅ステーブで懸念された冷却性能不足や銅管と銅の剥離トラブルの課題は実用上何ら問題ないことがわかった。

### 5.3 断熱性能

銅管鑄込み銅ステーブの上向きリブにより、前面に摩耗防止や断熱層の役割を果たすセルフライニング層が安定的に形成される。

図15は圧延銅ステーブと銅管鑄込み銅ステーブをシャフトレベルに設置した際の1週間分のリブ先端温度を記録したグラフである。

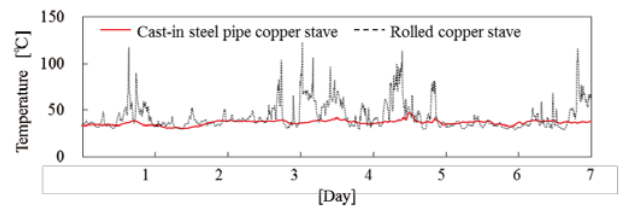


図15 銅ステーブの温度データ  
Fig. 15 Temperature data of copper stove

両者を比較すると、銅管鑄込み銅ステーブは圧延銅ステーブに比べて温度変動が少ないことがわかる。これは、上向きリブにより安定的に付着物や滞留層が形成されているためと推定される。これは図8に示すDEM解析結果からも言える。この滞留層や付着物は銅と比べると熱伝導率が低いため、断熱層として働く。

図16はリブ間に付着物が形成されているとして、炉内面を加熱した場合の熱伝導解析結果である。両者を比較すると、銅管鑄込み銅ステーブは圧延銅ステーブに比べて炉内面の平均温度が約70℃高い結果が得られた。この要因は以下の通りと考察される。

- ・リブピッチが大きい

銅は熱伝導率が高く、リブ先端においても温度が低く保たれる。銅管鑄込み銅ステーブはリブピッチが広いいため、炉内ガスと接触するリブ先端の面積を減らすことができる。

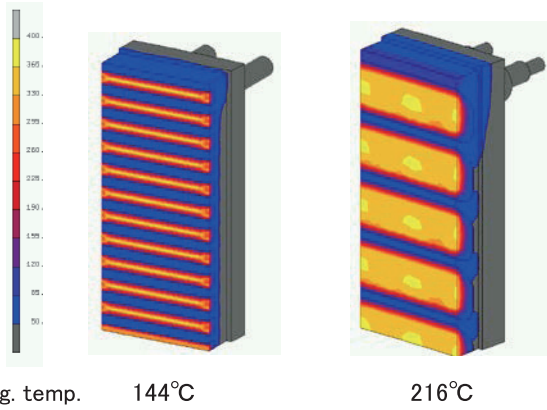


図16 三次元熱伝導解析結果  
Fig. 16 Results of 3D thermal conductivity analysis

・リブが深い

銅管鑄込み銅ステーブは、図7に示す通り炉内面を凹凸形状にすることで、圧延銅ステーブに比べてリブを深くすることができる。したがって、リブ間に堆積する原料厚みは厚くなる。

熱伝達率は、熱伝導率÷厚みで決定するため、原料厚みが厚い程熱伝達率が低下し、付着物の表面温度は上昇する。よって、付着物前面の平均温度は銅管鑄込み銅ステーブの方が高くなる。

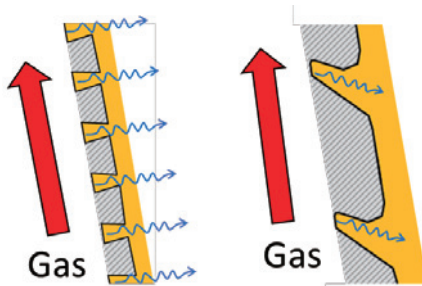


図17 抜熱量の違い  
Fig. 17 Difference of the extraction of heat

表面温度が高くなることで、炉内ガスとの温度差が小さくなるため抜熱量を低減することができる。炉内ガスからの抜熱量は、以下の式で表せる。

$$q = Q/A = h \times \Delta T$$

従って、70℃の温度差によって生じる抜熱量の差は、約0.02MW/m<sup>2</sup>となる。

炉内からの抜熱量を抑えることで、その熱量相当のコークス使用量を削減することができ、例えば5,000m<sup>3</sup>級の 高炉の場合、年間14,000ton 近くのコークス使用量の削減に相当する。

## 6 銅管鑄込み銅ステーブのその他の特徴

銅管鑄込み銅ステーブは長寿命、省エネの技術的優位性に加えて、高い設計自由度も大きな特徴となる。

鑄鉄ステーブや冷却盤を使用している高炉に於いて、それらが破損し寿命延長を行う場合、既設鉄皮開口を流用した銅ステーブへの取替えが求められることがある。

圧延銅ステーブでは、ドリル加工により水路が形成されるため、水路レイアウトには制約があり、既設鉄皮開口に合せた自由な水路形成が難しい。それに対して銅管鑄込み銅ステーブは、銅管を曲げて水路を形成するため、既設鉄皮開口に合わせて自由に水路を形成することができる(図19)。

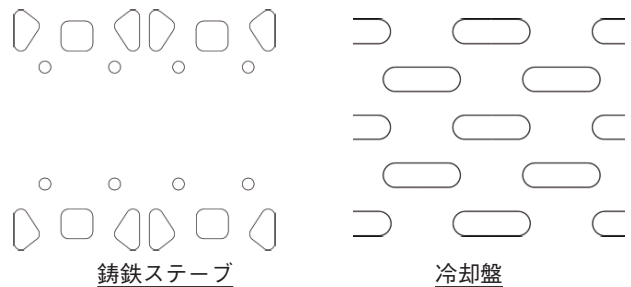


図18 鉄皮開口形状  
Fig. 18 Shell openings for cast iron stave and cooling plate

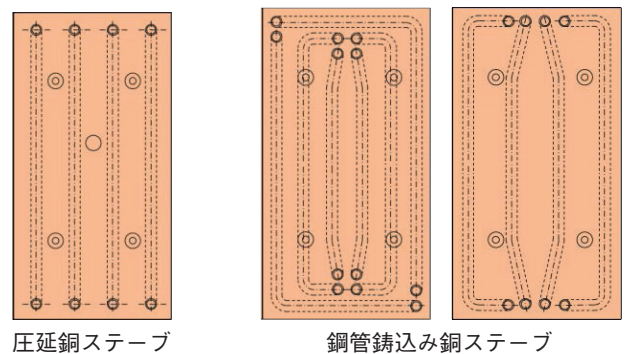


図19 高い水路レイアウトの自由度  
Fig. 19 High flexibility of cooling channel layout

## 7 採用実績

銅管鑄込み銅ステーブは既に複数機実機導入を完了し、安定した操業結果を得ている。その中の一つであるSSAB Raabe 製鉄所(旧 Rautaruukki)No. 2 BFでは、図20の通り、朝顔～シャフト下部に当社



の上向きリブ構造の鋼管鑄込み銅ステープを導入した。

Raahе No. 2BF では、銅ステープの摩耗量は最大で0.3mm/年であり、20年以上の寿命達成が実現可能となった。

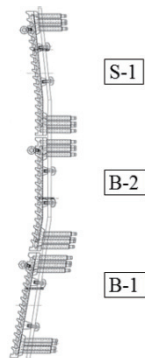


図20 Raahе No. 2BF  
Fig. 20 Raahе No. 2BF

易に取替えることができる。

以上により、当社の鋼管鑄込み銅ステープは高炉の長寿命化、省エネ化に貢献することができる。

## 8 結言

鋼管鑄込み銅ステープは圧延銅ステープに比べて以下に示す技術的優位性を有する。

### (1) 長寿命

銅ステープのトラブルは①変形、②溶接部破損、③摩耗に分類され、鋼管鑄込み銅ステープはそれぞれのトラブルに対する独自の対策により、トラブルリスクをゼロもしくは大幅低減することが可能となる。

### (2) 冷却性能

独自の製造法の開発により、銅と鋼管の強い密着性が実現でき、十分な冷却性能が一炉代に渡り維持される。

### (3) 断熱性能

鋼管鑄込み銅ステープは上向きリブにより安定的にリブ間に付着物が生成される。この付着物は熱伝導率が低く、断熱層として働くため、炉内からの抜熱量は圧延銅ステープに比べて約0.02MW/m<sup>2</sup>低下する。この抜熱量低減による省エネ効果は、例えば5,000m<sup>3</sup>級の高炉の場合、年間14,000ton 近くのコークス使用量の削減に相当する。

### (4) 高い設計自由度

鋼管を鑄込むことで自由度の高い水路設計が可能となり、鑄鉄ステープや冷却盤から銅ステープに容