

加熱炉耐火物技術の変遷と最近の断熱技術

Transition of Refractory Technologies for Furnaces and Recent Insulating Technologies

上原 拓男*
Takuo UEHARA栗原 利光
Toshimitsu KURIHARA

抄 録

鉄鋼製造プロセスの熱間圧延等の圧延加熱炉は、高温操業を可能とするために炉内には耐火物が施工されており、スラブやブルーム等の半製品を所定のヒートパターンで加熱して圧延工程に供給する役割を担っている。加熱炉操業は温度変動が大きく、修繕時には常温まで冷却され耐火物にとっては過酷な環境であり、鋼の高品質・高機能化の要求ニーズの増加に伴い加熱炉の操業負荷が大きく、耐火物には高耐用化とエネルギーコスト低減のため断熱性(省エネルギー性)が要求されている。

Abstract

Heating furnaces, such as hot rolling of steelmaking processes, are consisted with refractories in the furnace structure to enable high-temperature operation. It operated a role of heating semi-finished products such as blooms with a pre-heat pattern and taking them to the rolling process. Heating furnace operation has high temperature but cooled to room temperature when it repair furnace in campaign. Such severe environment caused damages for their refractories. In addition, operating heavier in condition of the heating furnace, and refractories must be more insulated structure (means energy-saving) and longer service life, reduce the energy cost.

1. はじめに

鉄鋼製造プロセスにおいて、溶銑や溶鋼と直接触れる或いは鋼材製品の表面品質等に大きな影響を及ぼすものは、主として水とロールおよび耐火物が挙げられる。熱間圧延等の加熱炉は、スラブやブルーム等の半製品を所定のヒートパターンで加熱して圧延工程に供給する役割を担っている。加熱炉の操業は900℃程度の比較的低温領域から1300℃超の高温領域まで、また修繕時には常温まで冷却され、温度変動が大きく、耐火物にとっては過酷な環境である。耐火物には耐熱性や耐熱衝撃性と共、昨今の地球温暖化防止やエネルギーコスト低減のため断熱性(省エネルギー性)が要求される。以下、鉄鋼用加熱炉耐火物技術の変遷および日本製鉄(株)における最近の断熱技術について述べる。

2. 加熱炉耐火物技術の変遷

日本国内は1960年代から製鉄所や圧延ミルが数多く建設されてきた。日本製鉄の現在まで約60年間の耐火物技術の変遷を表1に示す。各年代を概観すると、1970年ま

では耐火れんが(定形耐火物)が主流であったが、1970年代にプラスチック耐火物や耐火キャストブル(不定形耐火物)などが用いられ、施工方法も流し込み工法が行われるようになった。耐火キャストブルは、アルミナ-シリカ系が多く用いられ、1980年前後からは、省エネルギー化としてスキッドサポート・ビームの断熱を強化する取り組みが行われ、スキッド耐火物の亀裂とキャストブル特性についての研究開発¹⁾やセラミックファイバー(以下CF)をスキッドサポートや天井、側壁などに施工した加熱炉が多くなった²⁾。1986年には東日本製鉄所(君津地区)厚板工場に世界初のオールCFの加熱炉が建設され、TMCP(Thermo Mechanical Control Process)³⁾の一端を担い、低熱慣性および省エネルギー加熱炉として活躍した。

1990~2000年にかけて、世界的な温暖化ガス(CO₂)削減の動向を反映し、リジェネレイティブバーナーの加熱炉新設や改造が多く報告されるようになった。これに伴い加熱炉耐火物もより高い断熱性と耐用性が求められ、不定形耐火物では、アルミナ-シリカ(Al₂O₃-SiO₂)系耐火断熱キャストブルや微細多孔質骨材を用いたCA6(CaO·6Al₂O₃)キャストブルが開発された。また繊維系耐火物では、CFや高

* 東日本製鉄所(君津地区) 製鋼部 炉材室 主幹 千葉県君津市君津1 〒299-1141

表 1 日本製鉄加熱炉各部位における耐火物の変遷
Trends of refractory structure on heating furnace in Nippon Steel Corporation

Part	Age	1st generation		2nd generation	3rd generation		4th generation
		-1970	1970-1980	1980-2000	2000-2005	2005-	
Roof		Refractory brick	Plastic refractories Castable refractories	Ceramic fiber block			CA6 castable+insulation panel+Lightweight insulating castable
Side wall		Refractory brick	Plastic refractories Castable refractories	Ceramic fiber block			CA6 castable+insulation panel+Lightweight insulating castable
Partition wall		Refractory brick	Fire castable	Ceramic fiber	Ceramic fiber block		CA6 castable
Hearth		Refractory brick	Plastic refractories Castable refractories				Refractory aggregate
Skid post		Refractory brick	Plastic refractories Castable refractories	insulating castable Ceramic fiber	Vacuum formed ceramic fiber ring CA6 castable+insulation panel		CA6 castable+insulation panel+Lightweight insulating castable CA6 precast block
Skid beam		Refractory brick	Plastic refractories Castable refractories	insulating castable Ceramic fiber	CA6 castable+insulation panel		CA6 castable+insulation sheet+Lightweight insulating castable CA6 precast block

密度 CF 成型体が開発され採用されている (図 1)。近年、自動車の軽量化に伴い、高強度鋼材の需要が増加し、高生産操業となっている。そのため、整備性およびコストを考慮した高機能の耐火物が要求されている。以下、加熱炉用耐火物技術について各年代における報告例を中心に解説し、今後の加熱炉用耐火物および断熱技術の展開について述べる。

2.1 第 1 世代耐火物技術

1960 年から 1970 年代は連続式加熱炉が多く建設され、加熱炉耐火物技術の創成期とも言えるこの時代の耐火物は、当初耐火レンガが主流であった⁴⁾。その後加熱炉の大型化に伴い、大型の鋼塊を処理するようになるにしたがって、バーナー数が増加し炉圧も高くなった。その結果、レンガが目地からのガス漏れが問題となり目地の少ない耐火物が求められ、レンガに代わりプラスチック耐火物が採用されるようになった^{5,6)}。プラスチック耐火物は、耐火骨材に可塑性に優れた粘土を配合し、水分を添加して練土状に調

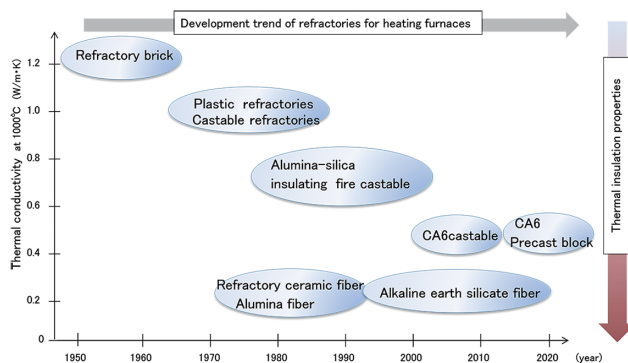


図 1 加熱炉用耐火物の開発動向と断熱性能
Development trend and thermal insulation performance of refractories for heating furnaces

製した耐火物であり、ランマーによる打ち込み工法によって施工される。プラスチック耐火物はレンガと異なり、施工品質が炉寿命に大きく影響を与えることから、施工技術を向上させ、多くの採用実績を残している。

2.2 第2世代耐火物技術

1980年代には、プラスチック耐火物の施工技術開発が進み、施工能率が高い吹付工法が開発された。吹付工法は、型枠なしで施工可能、複雑な形状の炉壁への施工が容易等、利点が多く施工の省力化と工期短縮が図られた。また、CF技術については、国内各社のCFの製造法と供給体制が確立されると共に、断熱性が高く低熱慣性であり、施工が容易であることから多く採用されるようになった。CFは非晶質と結晶質に大別され、非晶質はリフラクトリーセラミックファイバー（以下RCF）で分類温度は1500℃程度までであり、結晶質のアルミナファイバー（以下AF）の分類温度は1600℃である。

1986年7月に東日本製鉄所（君津地区）厚板工場に世界初のオールCF加熱炉（図2）³⁾が稼働した。このオールCF化にあたり、CFの損耗機構や特性、構造など様々な検討を行い、CFブロック構造（図3）を採用し実炉での評価試験⁹⁾を経て建設された。その結果、CFの低熱慣性効果により炉温変更時間の短縮が可能（図4）となり、操業時の炉体放散熱、間欠操業時の炉体蓄熱損失が大幅に低減されている。また、1988年9月に関西製鉄所（和歌山地区）熱間圧延加熱炉においてもオールCF加熱炉⁹⁾を建設し稼働させている。関西製鉄所（和歌山地区）熱間圧延加熱炉では、ファイバーオンファイバー工法を採用した。この工法はCFの劣化による補修範囲を最低限にするため、CFブロック

表面にファイバーモジュールを50mmベニアリング施工した2層構造が特徴である。この構造によって背面ファイバーブロックの高寿命化が得られている。

2.3 第3世代耐火物技術

世界的な温暖化ガス（CO₂）削減の動向を反映し、加熱炉損失熱の多くを占めるスキッドの断熱技術、構造について開発が行われた。これまでもスキッドからの水冷抜熱対策としてCFを適用した報告⁷⁾がされている。これまでの工法は、リング状CFを積層施工（図5）する施工効率の高いスタッドレス構造を採用している。しかし操業の過酷化に伴い、リング状CFの脱落や目地開きなどが発生した。いずれの損傷もスキッドパイプの鉄皮表面を直接外部雰囲気暴露してしまい、熱損失の増大を招くという課題があった。対策として1600℃耐熱型コーティング材を塗布したが目地開きの抑制には十分ではなかった。

そこでバキュームフォーム（以下VF）法（図6）による、200kg/m³以上の高密度CF成型体が開発された¹⁰⁾。VF法は、解繊したCF繊維を有機バインダーと無機バインダーの溶液に懸濁させ、この懸濁液を真空成型に導入し、脱型、乾燥して高密度CF成型体（図7）を製造するものである。この高密度CF成型体を用いた、同一形状の嵌合構造を持つリング形状のスタッドレス構造体VFリング（図8）が開発され、名古屋製鉄所熱間圧延加熱炉に適用された（写真1）。

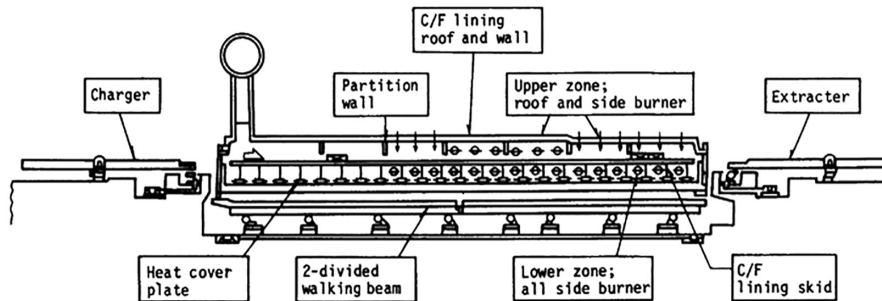


図2 東日本製鉄所（君津地区）厚板4号加熱炉（オールCF炉）
Schematic diagram of East Nippon Works Kimitsu plate No. 4 heating furnace

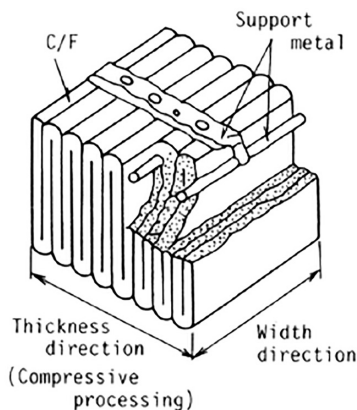


図3 CFブロック（Z-BLOK）
Ceramic fiber block (Z-BLOK)

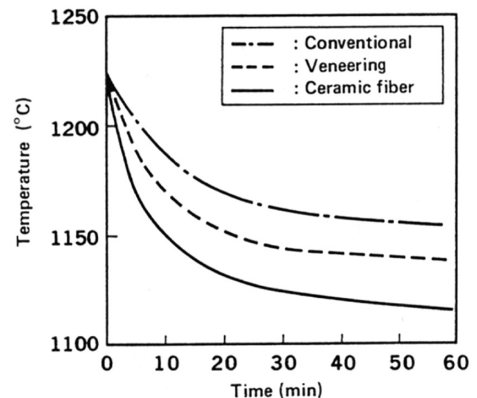


図4 耐火物の熱慣性比較
Comparison of thermal inertia refractories

従来のリング状CFと同様の施工性と高い耐用性を有しており、現在もCFブロック構造として使用されている。

1997年にはEuropean Union (EU)において、CF、RCFが“発がん性に関するカテゴリー分類”MMVFs(Man-Made Vitreous Fibers: 人造非晶質繊維)に追加されるに伴い、Morgan Advanced Materialsと新日化サーマルセラミックス(株)(現新日本サーマルセラミックス(株))が生体性溶解繊維(以下AES: アルカリアースシリケートウール)Superwool(以下SW)を開発した¹⁾。非晶質CFは $Al_2O_3-SiO_2$ 系であるが、SWは $SiO_2-CaO-MgO$ 系となっている。生体溶解性CFの高温グレードSW607HTは、1300℃の加熱においても2%程度の収縮率であり、分類温度1260℃と位置付けされた。

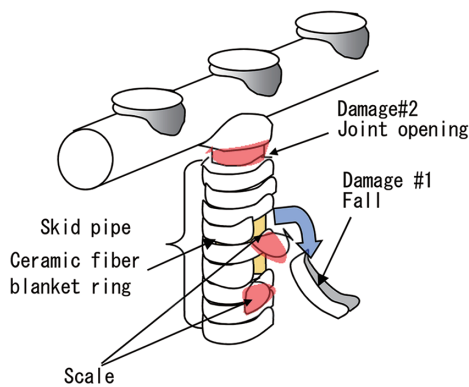


図5 スケールによるCFブランケットリングの損傷
Damage of the ceramic fiber blanket ring caused by scale

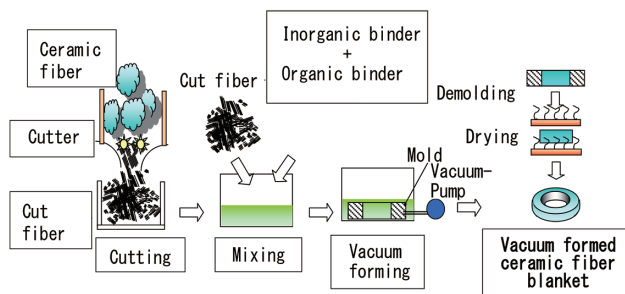


図6 VF法
Making method of Vacuum form

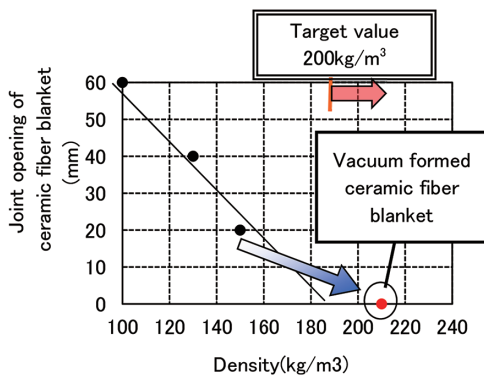


図7 CFブランケットの目地開きとその密度の関係
Relationship between joint opening of ceramic fiber blanket and their density

しかし、他材料と反応して低融点物を形成し異常収縮し易いことと再加熱時の結晶化温度が低く繊維の脆化がある。耐熱性についてもRCFと同等ではないと報告されており使用環境を考慮して採用することが必要である。EUではSWの販売量は非晶質CFの2倍を超え、造船、建材分野で広く採用されている。日本製鉄においては、2005年東日本製鉄所(君津地区)バッチ式焼鈍炉で採用し現在も使用されている。

2000年代に入り、地球環境問題(CO₂などの温暖化ガス削減)の世界的な取り組みが強化されるようになった。鉄鋼業においても一層の省エネルギーが求められるようになり、加熱炉では、燃焼器はコンベンショナルな低NO_xバーナーに代わって熱効率の高いリジェネレイティブバーナーの導入や、より断熱性が高く高温耐久性(耐スケール性等)を有する耐火物の開発、導入が進んだ。これまでスキッド用キャストブルは、粘土質軽量骨材、中空アルミナ、バーミキュライト、パーライト等の断熱骨材やCFが用いられてきたが、アルコア(Alcoa)社が、微細多孔質骨材CaO・6Al₂O₃(以下CA6)を開発した。このCA6骨材は六方晶系の結晶で、微細な気孔を生成させている。耐熱性は約1830℃、嵩比重0.7g/cm³、気孔率75%で高い断熱性を持つことが特徴である。またAl₂O₃・CaOの2成分で構成され、SiO₂を殆ど含有していないためスケール(FeO)との化学的な反応が少なく、加熱炉耐火物として優れた耐火骨材である。CA6骨材の特性を表2に示す。

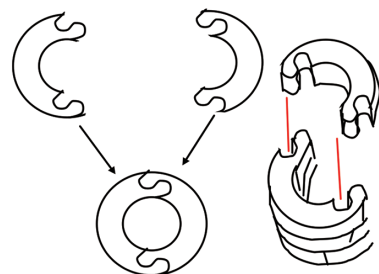


図8 VF材の新結合構造
Schematic figure of new joint combination structure



写真1 VFリング施工状況
Vacuum form ring under construction

また、CA6 骨材を用いた断熱キャストブルの開発も行われた(写真 2)。キャストブル全体に対する骨材の体積比を調整することで、流し込みやポンプ圧送の両立が可能であり、スキッド用への適用が試みられた。従来の CF 含有断熱キャストブルと比較(表 3)して、①収縮が小さく亀裂の発生が少ない、②耐スケール性に優れる(写真 3)と言った利点がある。しかし、長距離圧送時に骨材分離により配

表 2 CA6 骨材の物性値
Properties of CA6 aggregate

Chemical compositions / mass%	Al ₂ O ₃	92.5-93.5
	CaO	6-7
	SiO ₂	0.05-0.07
Bulk density	0.65-0.7	

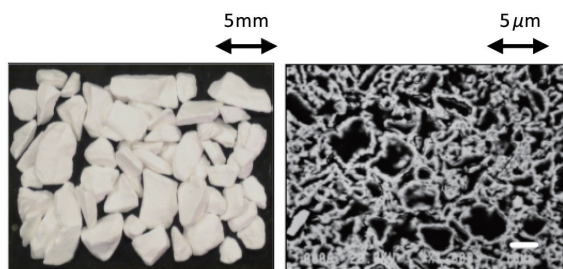
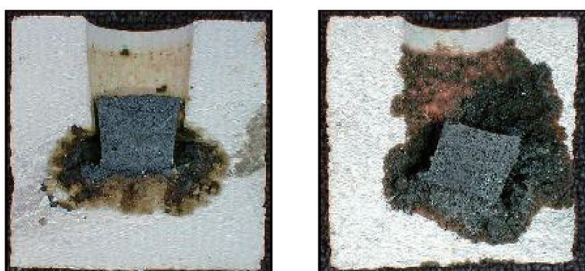


写真 2 CA6 骨材 SEM 画像
Picture shows CA6 grains
Left SEM micrograph is cross-section of the grain.

表 3 CA6 断熱キャストブルと CF 含有断熱キャストブル物性値
Properties of refractories

		CA6 castable	Ceramic fiber castable
Chemical compositions / mass%	Al ₂ O ₃	81	79
	CaO	11	-
	SiO ₂	-	15
Permanent linear change / %	After 1400°C	-0.06	-1.95
Modulus of rupture / MPa	After 1400°C	2.1	0.6
Thermal conductivity / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	After 1400°C	0.47	0.27



CA6 Castable CF Castable

写真 3 CA6 キャスタブルと CF キャスタブル侵食試験結果
Scale corrosion test of CA6 insulating castable and ceramic fiber castable

管閉塞する等圧送性が十分でない問題が発生した。そこで、CA6 骨材分離防止の検討を行い、断熱性とポンプ圧送性を両立させるために、軽量耐火骨材の容積配合比を 0.65 ~ 0.85 にすることでポンプ圧送施工のみならず、工期短縮に有利である吹付施工(図 9)が可能となる CA6 キャスタブルを開発した。名古屋製鉄所熱間圧延加熱炉に適用した約 3 年間の実機適用試験において、亀裂、脱落もなく高耐用を確認した。その後、社内各製鉄所でスキッド耐火物として採用され省エネルギー化を図っている。

2.4 最近の加熱炉断熱技術

加熱炉のエネルギー損失対策として断熱性の高い耐火物を採用し省エネルギー対策を実施してきたが、それでもスキッドサポート・ビームのエネルギー損失は大きな割合を占めている。図 10 に九州製鉄所(大分地区)熱間圧延加熱炉のエネルギー損失を示す。スキッドサポートおよびビームから水冷抜熱損失は 25% を占め、炉体放散熱の約 4 倍と大きく、加熱炉のエネルギー損失対策に大きな影響を及ぼす。前にも述べた通り、スキッド耐火物はスケール(FeO)からの化学的な侵食やバーナー火炎で直接加熱され物理的な摩耗損傷や熱履歴により機械的損傷を受けるため、近年は、断熱性に優れて耐スケール性が高い CA6 キャスタブルが多くの加熱炉で採用されている。

一方で高密度 CF 成型体の VF リングは耐スケール性に劣るため、使用環境を考慮して採用している。

断熱強化に際しては、1 層目に CA6 キャスタブル、2 層

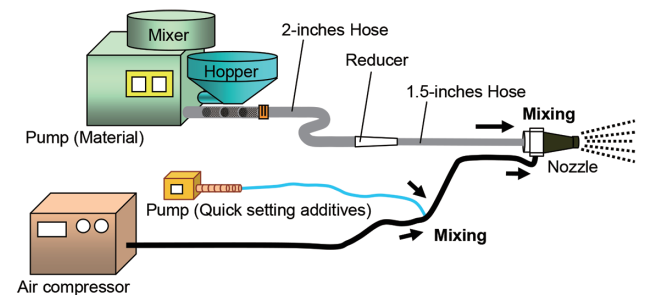


図 9 CA6 断熱キャストブル吹付施工装置概要
Schematic diagram of CA6 insulating castable gunning system

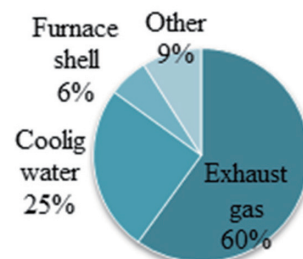


図 10 九州製鉄所(大分地区)熱間圧延加熱炉エネルギー損失
Thermal energy loss ratio of Kyushu Works Oita hot strip continuous furnace

目は断熱性が高く安価な AES, 3 層目には熱伝導率が 0.035 W/m·k (at 500°C) の高断熱シートを施工した 3 重断熱構造が採用されている¹³⁾。各耐火物の熱伝導率 (図 11) および物性値 (表 4) を示す。

スキッド耐火物の厚みは耐久性と断熱性の点で厚いほど好ましいが、スキッド可動範囲や鋼片下面からの加熱効率確保、採用耐火物の耐熱温度などを考慮して厚みを決定する必要がある。そこで、佐藤らは円筒形モデルの定常伝熱計算から総括熱抵抗 ΣR_{th} を求めて、耐火物ライニングの内部温度検討を行い最適ライニングを決定した¹³⁾。1 層目の CA6 キャスタブルは耐久性を考慮し 85mm とし、2 層目の AES は標準仕様厚みの 25mm とした。3 層目の高断熱シートは、5~30mm 厚みにした時のライニング内の温度分布を計算した (図 12)。温度分布はライニングの表面温度を炉内温度 1300°C とし背面温度を冷却水温度 30°C に設定、高断熱シートの使用限界温度を 800°C と設定 (図 13) し、それを超えないように最適厚みは 15mm としてライニング設計を行っている。

ライニング設計に基づいてスキッドサポートおよびビームに耐火物施工を実行した。従来のアルミナ-シリカ (Al₂O₃-SiO₂) キャスタブルと比べて約 60% の省エネルギー効果 (図 14) を得ると共に耐用性も良好な結果を得ている (写真 4)。また 3 重断熱ライニング (CA6+AES+高断熱シ

ト) の他に、軽量断熱キャストブルを用いた 2 重断熱ライニングも採用している。軽量断熱キャストブルは、石炭灰 (フライアッシュバールン) の中空軽量骨材を用いた軽量断熱キャストブルで嵩比重 0.5g/cm³、熱伝導率 0.16W/m·k (at 500°C) と高い断熱性能を持ち、流し込み、こて塗り、吹き

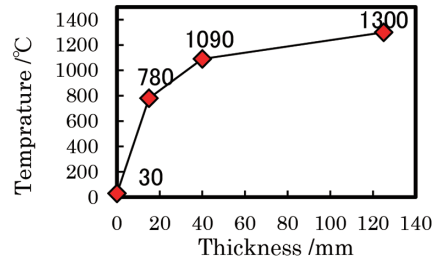


図 12 スキッドサポートライニング温度分布
Inner temperature of the improved lining for a skid-support

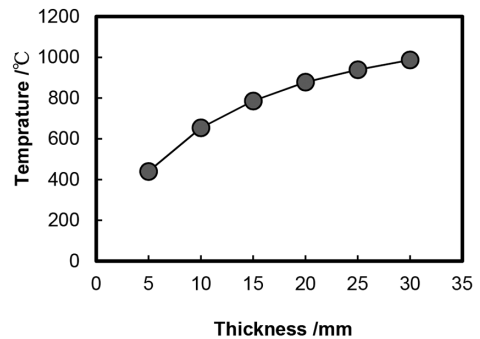


図 13 高断熱シート表面境界温度
Calculation of the relationship between the thickness of the high-insulation panel and the surface temperature

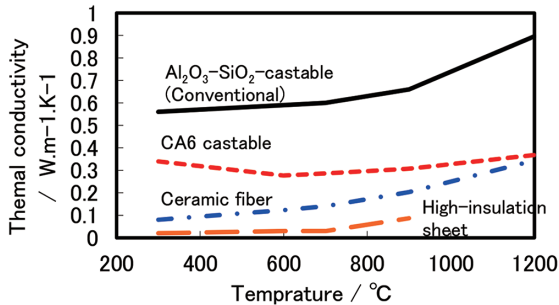


図 11 各耐火物の熱伝導率
Thermal conductivity of refractories

表 4 3 重断熱ライニング耐火物物性表
Properties of refractories

		CA6 castable	Alkaline earth silicate fiber	Insulation panel
Chemical compositions / mass%	CaO	11	-	-
	SiO ₂	-	70-80	80
	CaO+MgO	-	18-25	-
	Other	-	-	20
Permanent linear change / %	After 1400°C	-0.06	-	-
Modulus of rupture / MPa	After 1400°C	2.1	-	-
Thermal conductivity / W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	After 1400°C	0.47	0.27 (at 800°C)	0.035 (at 600°C)

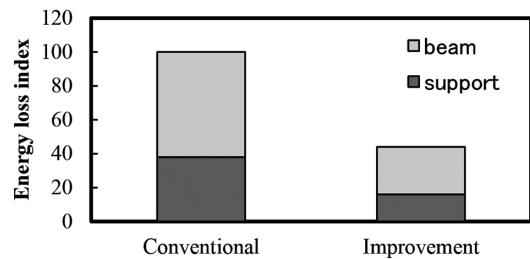


図 14 スキッドビーム・サポート省エネルギー効果
Calculation of energy loss index through skid-beam/support lining



写真 4 スキッドサポート実機施工後写真
Skid-supports after 5 years in the furnace of the hot-strip mill

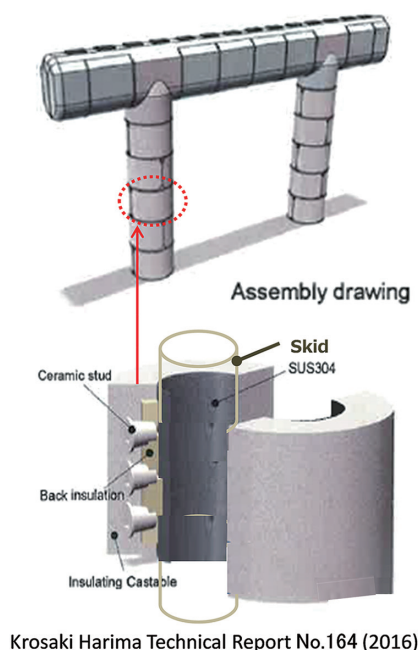


図 15 KSB 工法
KSB construction method

付けでの施工が可能でありスキッドには、こて塗り施工を行っている。

さらに昨今、高強度鋼材などの高機能素材の増加に伴い、加熱炉操作に対する要求は益々大きくなり、耐火物構造体の断熱性と耐用性向上が求められている。その中で、CA6 キャスタブルを用いたプレキャストブロック工法¹⁴⁾での施工も試みている。プレキャストブロック工法は、予め決まった形状に成型したブロックを炉内で施工するため、流し込み工法と比較し枠掛け、養生、脱枠が不要となり施工工期短縮が可能である。また分割構造であり、耐火物の膨張代の設置が容易のため構造体として安定し高耐用性が得られる。図 15 にプレキャストブロック工法を示す。

3. 今後の展開

自動車の軽量化やエコカー（ハイブリッドカー、電気自動車など）に対応した高強度鋼材などの高機能素材の増加に伴い、加熱炉に対する要求は益々大きくなると予想される。スラブ等の被熱材を均一加熱し、例えばスキッドマークをできるだけ低減することで材質や歩留りを向上させる。また地球温暖化対策（CO₂等の温暖化ガス低減）は、今後

も持続的な取り組みが必要で、耐火物の断熱技術による加熱炉の省エネルギー対策は益々重要な位置付けになると思われる。更なる耐火物および耐火物構造体の断熱性と耐用性向上が求められる。先に述べた CA6 キャスタブルの更なる高機能化やスタッドレス構造（プレキャストブロック）の実用化開発が望まれる。図 1 は、今まで述べてきた加熱炉の耐火物の熱伝導率について、年代別に主要なものをプロットしたものである。各年代を概観すると、1960 年以前から 1980 年代は熱伝導率の比較的大きい耐火レンガやプラスチック耐火物が多用されていた。いずれの耐火物の熱伝導率も 1.0W/m·K 前後である。

その後、断熱性の高い（熱伝導率の低い）アルミナ-シリカ系のキャストブルや CF が開発、実機化された。2000 年代初頭には、不定形材の中でも比重が軽い（≒低熱伝導率）の CA6 キャスタブルが登場し、耐スケール性も良好なことから現在まで広く使用されている。このような加熱炉における耐火物の変遷を概観すると、加熱炉の構造部材としての機能を有しつつ、省エネルギー（CO₂削減、燃料コスト低減）の機能が期待され、それを反映したかたちで熱伝導率が低いもの（≒低比重）を追求してきたと言える。この傾向は今後も変わらず、更なる省エネルギー性と高耐用性（耐スケール性等）が要求されると思われる。

参考文献

- 1) 大石泉 ほか：耐火物. 36 (318), 400 (1984)
- 2) 平櫛敬資 ほか：耐火物. 29 (228), 25 (1984)
- 3) 臼井美文 ほか：鉄と鋼. 75 (2), 282 (1989)
- 4) 中沢三知彦 ほか：耐火物. 18 (107), 602 (1966)
- 5) 藤江英雄 ほか：耐火物. 24 (168), 32 (1972)
- 6) 藤江英雄 ほか：耐火物. 21 (143), 561 (1969)
- 7) 高橋忠明 ほか：耐火物. 34 (289), 110 (1982)
- 8) 堀尾竹弘 ほか：耐火物. 38 (347), 858 (1986)
- 9) 永幡勉 ほか：耐火物. 42 (395), 728 (1990)
- 10) 寺島英俊 ほか：耐火物. 57 (574), 562 (2005)
- 11) 新日本サーマルセラミックス(株)：新日鉄技報. (388), 110 (2008)
- 12) 寺島英俊 ほか：耐火物. 59 (589), 88 (2007)
- 13) 佐藤正治 ほか：耐火物. 65 (653), 136 (2013)
- 14) Krosaki Harima Technical Report. (164), (2016)



上原拓男 Takuo UEHARA
東日本製鉄所(君津地区)
製鋼部 炉材室 主幹
千葉県君津市君津1 〒299-1141



栗原利光 Toshimitsu KURIHARA
設備・保全技術センター
無機材料技術部 主査