

製鋼工程の容器における熱損失低減技術

Reduction of Heat Loss in Steelmaking Process

井上 明彦 INOUE Akihiko JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員 (副部長)
細原 聖司 HOSOHARA Seiji JFE スチール スチール研究所 スラグ・耐火物研究部 主任研究員 (課長)
清田 禎公 KIYOTA Yoshisato JFE テクノリサーチ 知的財産事業部 知財調査部長

要旨

製鋼工程は高温の溶銑・溶鋼を多段階のプロセスで扱うため、熱損失が大きい。近年、断熱材と耐火物の進歩により、断熱の設備容量や耐火物寿命への悪影響が軽微となり、熱損失低減が容易となった。今回、製鋼工程における熱損失を評価するとともにその低減方法を検討し、熱損失の大きい溶銑溶鋼輸送容器について断熱による低減を図った。その結果、鉄皮からの熱損失が25~45%低減した。

Abstract:

During steelmaking process, high temperature melt is processed through several facilities and containers, therefore the heat loss through steelmaking process is large. Progress of refractories and insulators have reduced the adverse influences by heat-insulation. The amount of heat loss through steelmaking process was estimated. Heat insulation with optimal design was attempted in molten iron and steel containers, heat loss through the steel shell was reduced by 25-45%.

1. はじめに

地球温暖化に対する関心は全世界的に高く、その主要因とされるCO₂(二酸化炭素)などの温室効果ガスの削減に取り組まれて久しい。日本鉄鋼連盟は、「エコプロセス」、「エコプロダクト」、「エコソリューション」を3つの柱と位置付け温暖化ガス排出量の低減を目指している¹⁾。特に、生産工程でのCO₂削減については、1970年代の石油危機を契機にJFEスチールを含む日本の鉄鋼業は、環境保全や省エネルギーのために多くの設備投資を行ってきた。その結果、日本の鉄鋼業は世界でも最高水準のエネルギー効率を実現している²⁾。JFEグループでも、グループの行動理念の一つに「地球環境との共存」を掲げ、上記3つの柱に沿ったさまざまな省エネルギー、CO₂削減に対する施策を実施している³⁾。しかし、今後の地球温暖化の進行を緩和・阻止するためにはより一層のCO₂削減への取り組みが必要である。

CO₂削減のためには、熱損失を低減して燃料としての炭素の使用量を削減することが有効であるが、製鉄所の中で製鋼工程は高温の溶銑・溶鋼を多段階のプロセスで扱うため、耐火物を介した鉄皮からの放散による熱損失が大きい。本報では製鋼工程における熱損失量を見積もるとともに、その低減手法について述べる。

2. 製鋼工程における熱損失の現状

まず、耐火物を介した鉄皮からの放散による熱損失量を試算した。一般に、鉄皮などの固体から外気への伝熱は対流と輻射による。温度 T (K)の物体から温度 T_0 (K)の外気への単位時間当たりの伝熱量を考える。対流による伝熱量 Q_C (W)は、

$$Q_C = h_C \cdot S \cdot (T - T_0) \dots\dots\dots (1)$$

h_C : 自然対流熱伝達係数 (W/m²・K)
 S : 伝熱面積 (m²)

と表される。一方、輻射による伝熱量 Q_R (W)は

$$Q_R = h_R \cdot S \cdot (T - T_0) \dots\dots\dots (2)$$

h_R : 輻射伝熱係数 (W/m²・K)

と表される。したがって、外気への伝熱量 Q_T (W)はこれらの和であるから、

$$Q_T = Q_C + Q_R = (h_C + h_R) \cdot S \cdot (T - T_0) \dots\dots\dots (3)$$

で表される。なお、自然対流熱伝達率は大気におけるグラスホフ数 Gr 、プラントル数 Pr の積に応じて次式の簡易推定式(4)、(5)式⁴⁾を用い、輻射伝熱係数は(6)式を用いた。

$$h_c = 1.3 (\Delta T/L)^{1/4} (Gr \cdot Pr < 10^9) \dots\dots\dots (4)$$

$$h_c = 1.3 (\Delta T)^{1/4} (Gr \cdot Pr > 10^9) \dots\dots\dots (5)$$

$$h_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_0^4) / (T - T_0) \dots\dots\dots (6)$$

L: 伝熱面高さ (m)

σ : Stefan-Boltzmann constant, $5.67 \times 10^{-8} \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$

ε : 輻射率

この式からわかるように、高温の物体から外気への熱損失量は時間と表面積に比例し、物体の温度が高いほど大きくなる。実際の製鋼プロセスにおいては鉄皮温度が 500 K を超える箇所があり、熱損失量は輻射伝熱に支配される領域 ($Q_c \ll Q_r \propto T^4 - T_0^4$) にあるので鉄皮温度に対して極めて敏感に変化する (図 1)。このような箇所では鉄皮よりも高温熔融物側のライニングの断熱により鉄皮温度が下がると鉄皮と外気間の伝熱係数 ($h_c + h_r$) も大幅に低下するため、断熱の効果が特に大きい。

製鋼工程における高温熔融物容器、すなわち、混鉄車 (Torpedo car)、高炉鍋 (Hot metal ladle)、転炉 (Converter)、取鍋 (Ladle)、真空脱ガス装置 (RH)、連続鑄造のタンディッ

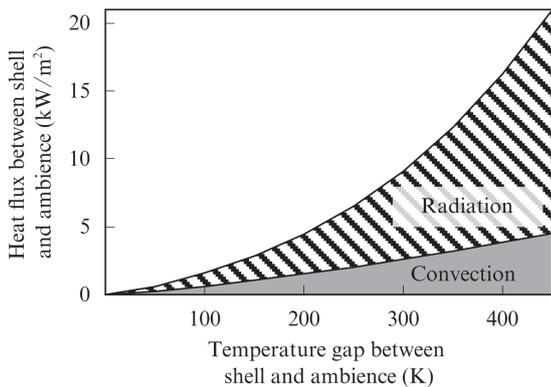


図 1 鉄皮・外気間の温度差と熱流束の関係

Fig. 1 Influence of temperature gap on heat flux between shell and ambience

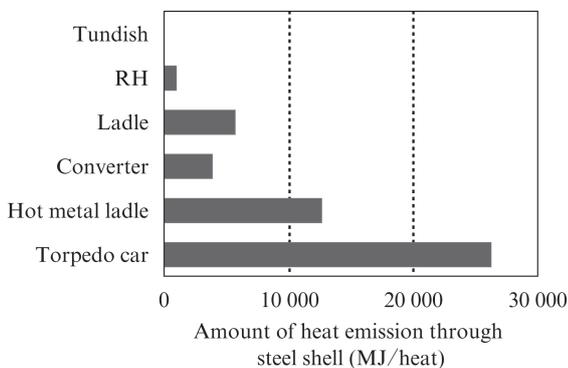


図 2 製鋼工程における鉄皮放熱熱量

Fig. 2 Amount of heat emission through steel shell of steelmaking vessels

シュ (Tundish) について、鉄皮温度を測定し、前述の式を用いて 1 ヒート当たりの放熱量を計算した。

結果を図 2 に示す。鉄皮からの放熱量が大きいのは、輸送容器と精錬容器を兼ねる混鉄車、高炉鍋、取鍋であり、3 者合計で全体の約 90% を占める。また、製鋼プロセス全体の鉄皮からの放熱量は、冷却水や排気への放熱や解放部からの放熱などを含めた非回収の総熱損失量のおよそ 2 分の 1 に相当すると見積もられた。

3 章で、鉄皮からの熱放散量の大きい混鉄車、高炉鍋、取鍋の耐火物ライニングにマイクロポーラス断熱材を使用することで、容器鉄皮からの放熱量の低減を試みた結果について述べる。

3. 製鋼工程における熱損失の低減

3.1 断熱材と低熱伝導耐火物の進歩

容器の耐火物を介した鉄皮からの熱損失低減方法としては耐火物自体の低熱伝導率化と、断熱材の使用の 2 つが考えられる。

低熱伝導耐火物としては耐火断熱れんが (熱伝導率 $0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 程度) やろう石れんが (熱伝導率 $1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 程度) が利用されてきた。これらの材質は熱伝導率が低い一方で、高い気孔率や低い耐食性から、高温熔融物と接しない永久耐火物として施工されることが多い。それでも、構造体としての強度、設備容量、高温熔融物の差し込みを止める能力を確保するために施工厚さは限定され、断熱効果は不十分であった。

高温熔融物と接するウェア耐火物自体の低熱伝導率化に関しては耐火物メーカー各社で開発が進められている。アルミナ系の不定形耐火物においては、中空アルミナを使用した断熱キャストブルを各社が開発している。また、耐熱スポーリング性と耐スラグ耐食性に優れ、現在多用されているマグネシアカーボンれんがに対し、マグネシア骨材とピッチを改良した品川リフラクトリーズ (株) の「GAIREX[®]」シリーズ⁵⁾ や、ナノカーボンファイバー技術を応用した黒崎播磨 (株) の「FANON[®]」シリーズ⁶⁾ など、マグネシアカーボンれんがの長所を生かしつつ、熱伝導率の高い黒鉛を減らすことで低熱伝導化を図った耐火物が開発されている。

近年、ヒュームドシリカなどを使用し、空気分子の平均自由行程より短い空隙を有するマイクロポーラス断熱材が開発された。空隙が非常に小さいため、対流や気体分子の衝突による熱伝達を抑制する他に、球状の粒子同士の接触面積が非常に小さいため固体間の熱伝導が小さく、さらに赤外線透過を抑制する物質を添加することで輻射による熱伝達も抑制している。これらの効果により熱伝導率は約 $0.02 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ と静止空気よりも低く⁷⁾、前述の耐火断熱れんがの 10 分の 1、ろう石れんがの 50 分の 1 程度である。このため、厚さを 10 分の 1 にしても同等以上の断熱性能を得

表 1 断熱材質の代表的特性値

Table 1 Typical properties of insulating materials

	Roseki brick	Insulating fire brick	Insulator with micro pores
Thermal conductivity (W/m · K)	1	0.2	0.02
Porosity (%)	15	80	90
Heatproof temperature (K)	1 773	1 923 ^{*1}	1 273 ^{*1}
Compressive strength (MPa)	30	2	0.5 ^{*2}

^{*1} Dry condition ^{*2} 5% deformation

ることが可能となり、耐用温度は約 1 273 K と低いものの、断熱材の施工にともなう構造体としての強度、設備容量、高温溶融物の差し込みを止める能力の確保が容易となった。ろう石れんが、耐火断熱れんが、マイクロポーラス断熱材の代表的な特性値を表 1 に示す。

3.2 断熱手法

3.2.1 断熱の設計

物質の熱伝導率は温度に依存し、温度の上昇にともない気体は上昇し、固体は上昇するものと低下するものがある。気孔率の高い断熱材の熱伝導率は気体と同様に温度の上昇にともない上昇するので、断熱材を施工する部位が高温であるほど断熱効果が低下する。前述のマイクロポーラス断熱材は気体分子の衝突による熱拡散を阻害する構造のため、高气孔率でも気体の熱伝導の影響を受けにくい、内部輻射の影響を含め、温度上昇にともない熱伝導率の上昇の解消には至っていない。また、マイクロポーラス断熱材のナノサイズの粒子が点接触に近い形で形成している気孔構造は高温で破壊されやすいため、最高使用温度は耐火断熱れんがよりも低い。

構造体としての強度、設備容量、高温溶融物の差し込みを止める能力の観点からマイクロポーラス断熱材は施工厚さを最小限とすべきであるため、前述のマイクロポーラス断熱材の特性をふまえて十分な断熱効果を得るには、断熱材の熱伝導率の上昇と気孔構造の破壊を回避する施工部位の選定が重要である。

断熱材の施工部位について、非定常伝熱計算⁸⁾を用いて検討した。計算の前提は、図 3 に示すように、鍋内側からウェア耐火物、2 層の永久耐火物、鉄皮のライニング構成とし、マイクロポーラス断熱材を (1) ウェア / 永久間、(2) 永久 / 永久間、(3) 永久 / 鉄皮間の 3 通りの配置で計算した。また、断熱材の厚さを 0~10 mm の範囲で変化させてその影響を見た。高炉鍋のライニング構造での計算例を図 4 に示す。図の縦軸は断熱材を設置しない場合を基準とし、断熱材を配置した時の鉄皮からの熱流束の変化であり、負の数値が

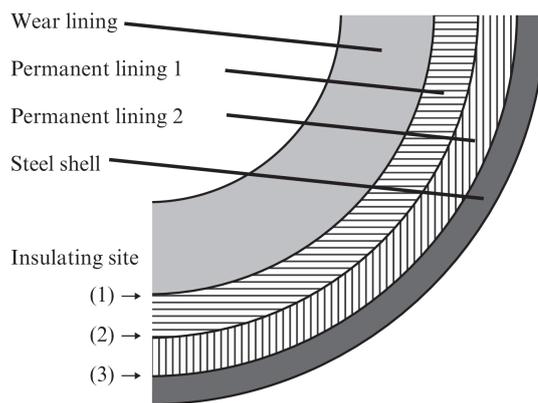


図 3 伝熱計算に用いたライニング構造

Fig. 3 Schematic diagram of lining for heat-transport simulation

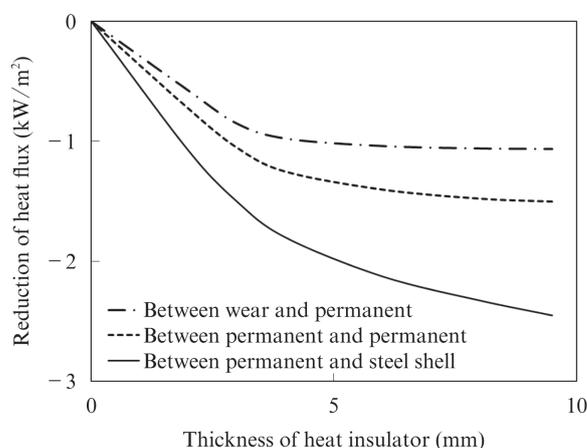


図 4 断熱材の部位と厚さが放熱に及ぼす影響

Fig. 4 Influence of thickness and position of heat insulator on heat flux

大きくなるほど断熱効果が高いことを示している。

計算の結果、断熱材の施工部位は永久 / 鉄皮間が最も有効であり、他の部位の 1.5~2 倍程度の断熱効果を得られること、断熱材の厚みが 5 mm を超えると断熱効果の変化割合が小さくなるのが分かった。さらに、図 4 と同条件での断熱材の内面側温度の変化を図 5 に示す。1 273 K で気孔構造が破壊され収縮や熱伝導率の上昇を示すマイクロポーラス断熱材を使用する場合は、最も断熱効果が高かった永久 / 鉄皮間に設置した場合において、断熱材の厚みは 5 mm 以下とすべきであることが分かった。

以上のように、断熱材はより温度の低い部位に配置する、いわゆる「外断熱」とすることで、より大きな断熱効果を得られるとともに劣化を防止できる。ところが、外断熱はウェア耐火物の内部の温度を上昇させるので、スラグ浸潤が問題となる取鍋耐火物やマグネシア-カーボン反応が問題となる転炉耐火物では耐用が悪化する可能性がある。このような

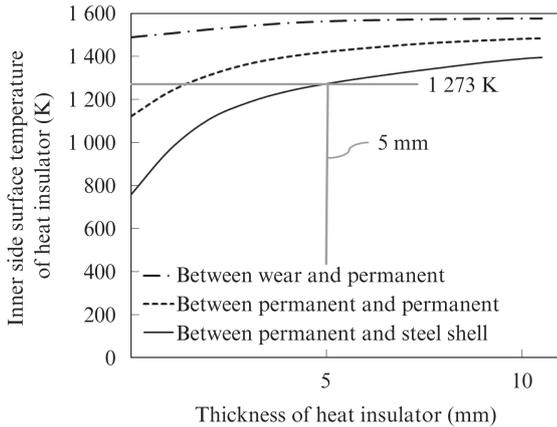


図5 断熱材の部位と厚さが断熱材の温度に及ぼす影響

Fig. 5 Influence of thickness and position of heat insulator on surface temperature of insulator

用途では、耐火物の緻密化によりスラグ浸潤を抑制する、低カーボン化によりマグネシア-カーボン反応を抑制、外断熱に代えて耐火物自体を低熱伝導化する、いわゆる「充填断熱」とするなどの対応が必要である。

また、ナノメートルサイズの粒子の成形体であるマイクロポーラス断熱材は、水と接触すると気孔構造が破壊されるので防水ラミネート加工されたものが流通している。しかし、使用開始後におよそ 500 K 以上の温度に接するとラミネートが劣化し防水性能が失われる。そのため、施工時に水を使用して混練する耐火物を使用する場合は、複数回の耐火物張り替えにわたって断熱材の性能を持続させるためには、水と接触させないよう配置を考慮する必要がある。

3.2.2 混銑車

混銑車は、両端が円錐状の形状で、開口部が小さいため保温性が良いといわれている。しかし、JFE スチールでは、溶銑予備処理を行なうため保持時間が長く、鉄皮面積も大きいことなどから製鋼容器の中で最も鉄皮からの放散熱量が多い。混銑車で放散熱量を低減することは、直接のエネルギーロスを低減するのみならず、溶銑と比べて CO₂ 発生量の少ない鉄スクラップのリサイクル使用量を増大できるなど、地球環境に大きく貢献する。そこで、前述のマイクロポーラス断熱材を、図 6 に示すように混銑車の鉄皮と永久耐火物間に使用し、鉄皮からの放散熱量低減を試みた。断熱材の厚さは施工性も考慮して 3 mm とした。

図 7 に稼働中の鉄皮温度の推移を示す。鉄皮温度は高温溶融物と直接接するウェアレンガの損耗に伴い受銑回数を重ねると上昇する傾向にあるが、断熱材を施工した混銑車の鉄皮温度は、施工していない混銑車の鉄皮温度に比べて低く、放熱量が抑制されていることが分かる。断熱による鉄皮温度の低減量は、断熱材の施工直後は約 60 K であったが受銑鉄回数 200 回以降は約 45 K に縮小した。これは、ライニングの温度が初期に上昇した際の膨張応力により断熱材

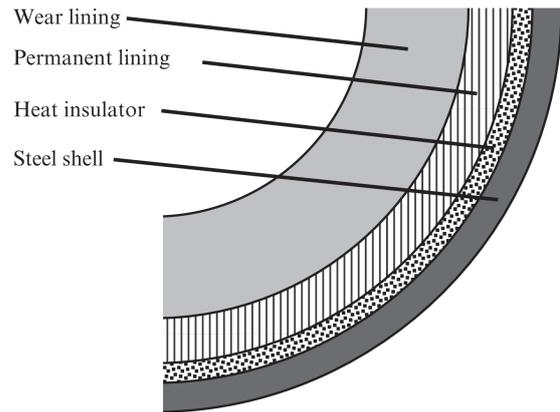


図6 断熱を施したライニング構造

Fig. 6 Schematic diagram of lining with insulation

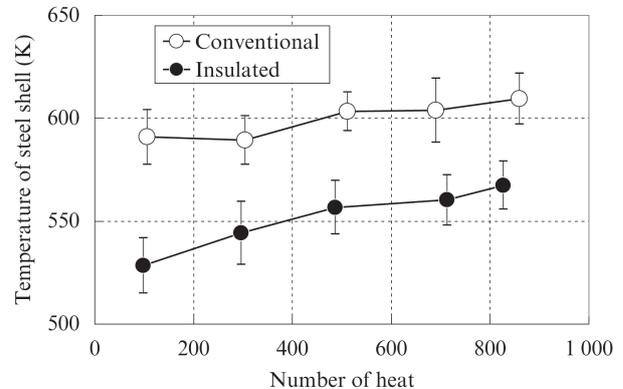


図7 断熱による鉄皮温度の変化

Fig. 7 Effect of insulation on temperature of steel shell

が収縮し熱伝導率が上昇したものと考えられる。断熱材の熱伝導率上昇は断熱材の施工直後以外には観察されず、ウェアレンガの張り替えを経て 2 年経過しても約 45 K の鉄皮温度の低減が持続し、鉄皮からの熱損失量が 25% 低減した。また、断熱材施工による耐火物寿命の低下は見られなかった。

3.2.3 高炉鍋

高炉鍋は混銑車と同様の使用方法であるが、上方が大きく開いた鍋形状のため、開口部からの放熱が混銑車に対して大きく熱損失の約 60% を占めており、蓋掛けなどの対策が執られている。残りは鉄皮からの放熱であり、その内訳は図 8 に示すように、溶銑と接触する敷部、鋼浴部、スラグラインからの放熱が大きい。そのため、これらの部位への断熱材施工を試みた。

実機試験では鉄皮と永久耐火物間にマイクロポーラス断熱材を 5 mm 厚で施工するとともに、ウェアライニングの低熱伝導化を併せて実施することで、より高い断熱効果を目指した。試験の結果、鉄皮温度は 96 K 低下し、鉄皮からの熱損失量が 45% 低減した。断熱材の施工による耐火物の寿

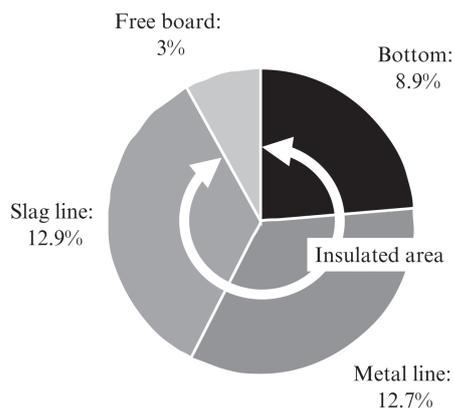


図8 高炉鍋鉄皮からの放熱量

Fig. 8 Heat emission from steel shell of hot-metal ladle

命悪化は見られず、逆に鍋内への地金付着がなく安定した使用が可能となることが分かった。

3.2.4 取鍋

取鍋は高炉鍋と同様に上方が大きく開いた鍋形状のため開口部からの放熱が大きく、蓋掛けなどの対策が重要である。しかし、近年の取鍋精錬処理の強化を背景に、鉄皮からの放熱の低減も重要となった。

取鍋の耐火物は混銑車や高炉鍋と比較すると、内容物であるところの高温溶融物の温度が高く、受湯サイクルが短いことから、より高い耐食性、耐熱衝撃性が求められる。特に、キャストブルと呼ばれる不定形流し込み材が多用される鋼溶部のウェア耐火物では、その気孔率の高さから、稼働面からのスラグ浸潤による変質層と原層との境界部が割れる構造スポーリングによる損耗が大きいとされる⁹⁾。このため、外断熱によりウェア耐火物の内部温度が上昇すると、より深くまでスラグが浸潤し構造スポーリングが助長されるため、過去の断熱の試行においては耐用が悪化した¹⁰⁾。

この問題に対しては、外断熱に替わりウェア耐火物自体を低熱伝導化する充填断熱が提案された¹¹⁾。外断熱に関しても、ウェア耐火物の耐用の向上と外断熱による耐用悪化の低減はアプローチを同じくするため、ウェア耐火物の低水分化などによる耐用向上により外断熱による耐用悪化も軽減した。

3.2.1で述べたように、マイクロポーラス断熱材は水との接触で気孔構造が壊れ断熱性能が著しく低下する。ウェア耐火物に用いるキャストブルは施工時に水を用い、施工後に結晶水と付着水を加熱除去するので、鉄皮側では凝縮水が生じマイクロポーラス断熱材が劣化する危険性がある。

JFE スチールでは、マイクロポーラス断熱材をウェア耐火物の水分と接しない鉄皮と永久耐火物間に3mm厚で施工することで外断熱¹²⁾を試みた。断熱材の施工の様子を写真1に示す。その結果、図9に示すようにウェア耐火物と断熱材の耐用を確保しつつ鉄皮温度を70K低減し、鉄皮からの



写真1 断熱材の鉄皮内面への施工状況

Photo 1 Arrangement of insulators on inside of steel shell

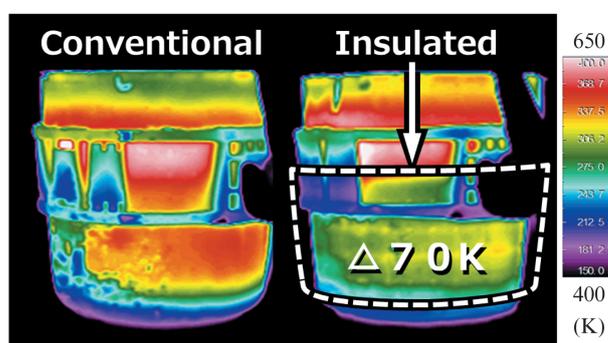


図9 取鍋鉄皮の熱画像

Fig. 9 Thermal image of steel shell

熱損失量が36%低減した。

4. おわりに

JFE スチールでは溶銑・溶鋼容器を介しての熱損失低減を図っている。溶銑容器と取鍋については施工配置などの最適化と高性能断熱材の活用によって諸課題を克服し有効な断熱の目処を得た。

その一方で、大きな放熱源の一つである転炉に関しては、外断熱により助長されるマグネシア-カーボン反応やカーボンの気相酸化による組織劣化の問題が未解決である。近年、マグネシア-カーボン質レンガに関しては低マグネシア-カーボン反応や低熱伝導率といった材質の開発が報告されており、利用方法の改善と組み合わせで熱損失低減を進められると考えている。

耐火物の使用環境については、溶銑予備処理や二次精錬でのプロセス変更や処理負荷の増加など、今後も変化が続くと考えられる。社会環境としてはエネルギー事情は消費削減の基調の中でも大きく変動している。このような環境変化に常に最適な対応をとるべく、熱損失低減と環境・リサイクル・機能付加などを有機的に関連付けて技術開発を進めていく。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟. <http://www.jisf.or.jp/business/ondanka/eco/>.
- 2) 地球環境産業技術研究機構. エネルギー効率の国際比較 (発電・鉄鋼・セメント部門). https://www.rite.or.jp/Japanese/lab/sysken/about-global-warming/download-data/Comparison_EnergyEfficiency.pdf.
- 3) 小倉滋, 手塚宏之, 弓手崇生, 田村望. JFE 技報. 2013, no. 32, p. 1-7.
- 4) 水科篤郎, 荻野文丸. 輸送現象. 産業図書, 1981, p. 163.
- 5) 柿原昌佳, 多田秀徳, 飯田栄司. 品川技報. 2009, no. 52, p. 35-40.
- 6) 田中雅人, 波多江英一郎, 吉田章二, 神尾英俊, 保木井利之. 耐火材料. 2006, no. 154, p. 66-67.
- 7) Microtherm nv. High temperature insulation. <http://www.microthermgroup.com/high/EXEN/site/index.aspx>.
- 8) 水科篤郎, 荻野文丸著. 輸送現象. 産業図書, 1981, p. 109.
- 9) 耐火物技術協会. 耐火物手帳 改定 12 版. 2015, p. 415-418.
- 10) 杉田宏, 前仏忠, 浅見肇. 耐火物. 1981, vol. 33, no. 12, p. 35-41.
- 11) 前田榮造. 耐火物. 2012, vol. 64, no. 9, p. 400-406.
- 12) JFE スチール. 溶融金属容器のライニング構造. 特許第 5494898 号. 2014-03-14.



井上 明彦



細原 聖司



清田 禎公