

解 説

UDC 536.532 : 621.362 : 669.1

鉄鋼業における温度計測について*

鈴木 久 夫**・大 野 二 郎***

Recent Trends of Temperature Measurement in
Iron and Steel Industry

Hisao SUZUKI and Jiro OHNO

1. は じ め に

従来、鉄鋼業においては、高炉、平炉、均熱炉、加熱炉などの送風温度、炉内温度を測定し、定値制御もしくはプログラム制御するいわゆる熱管理を主体とする温度計測が行なわれていた。その後、転炉、連続鋳造など新プロセスが導入されるなど設備の大型化、高速化、連続化が進み、これらの操業安定、品質向上のため従来の熱管理を主体とした計装に加えて、反応状況や製品の温度を直接測定するための努力が続けられてきた。例えば高炉では赤外カメラによる炉頂温度分布測定、ゾンデによる炉内反応測定、転炉ではサブランス、圧延関係では高速走行中の鋼板表面温度測定など数々の新技術が開発・実用化され、大きな成果を上げている。

ここでは、これら温度測定の新技術ならびに特殊測定に関する代表的な例について紹介するとともに、今後急速な発達が予想される赤外線利用の新技術について紹介し参考にするものである。

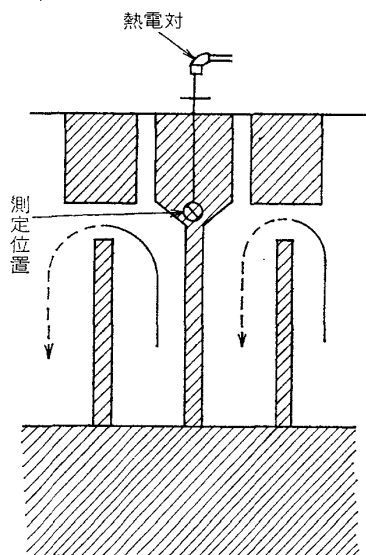
2. 測 温 の 現 状

2.1 製鉄関係

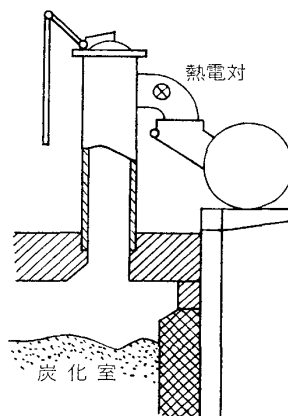
2.1.1 コークス

コークスの品質向上、燃焼管理、省力化を目的としてコークス炉の総合コンピューターコントロールを日本鋼管福山製鉄所において完成したが、このシステムを成功させるために、i) 炉温の連続測定ならびに ii) 火落判定の定量化方式が新規に開発された¹⁾。

従来、炉温測定はフリュー底部の煉瓦表面温度を炉上



(a) コークス炉温の連続測定



(b) 火落判定用熱電対

図 1 コークス炉の温度測定

* 昭和 53 年 1 月 13 日受付 (Received Jan. 13, 1978) (依頼解説)

** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

*** 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

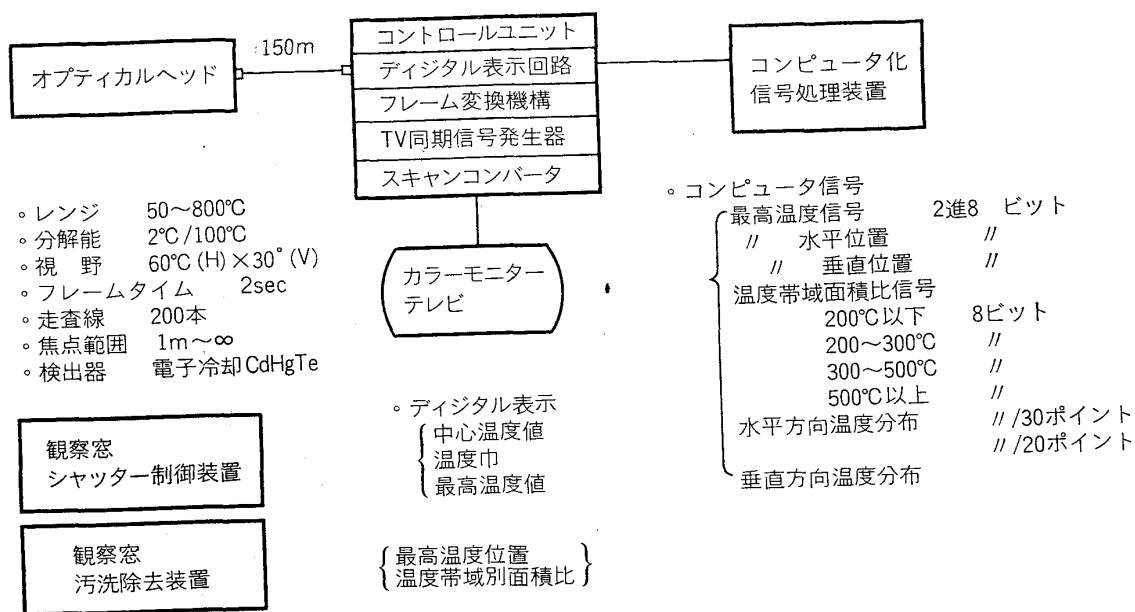


図2 高炉炉頂赤外カメラの構成

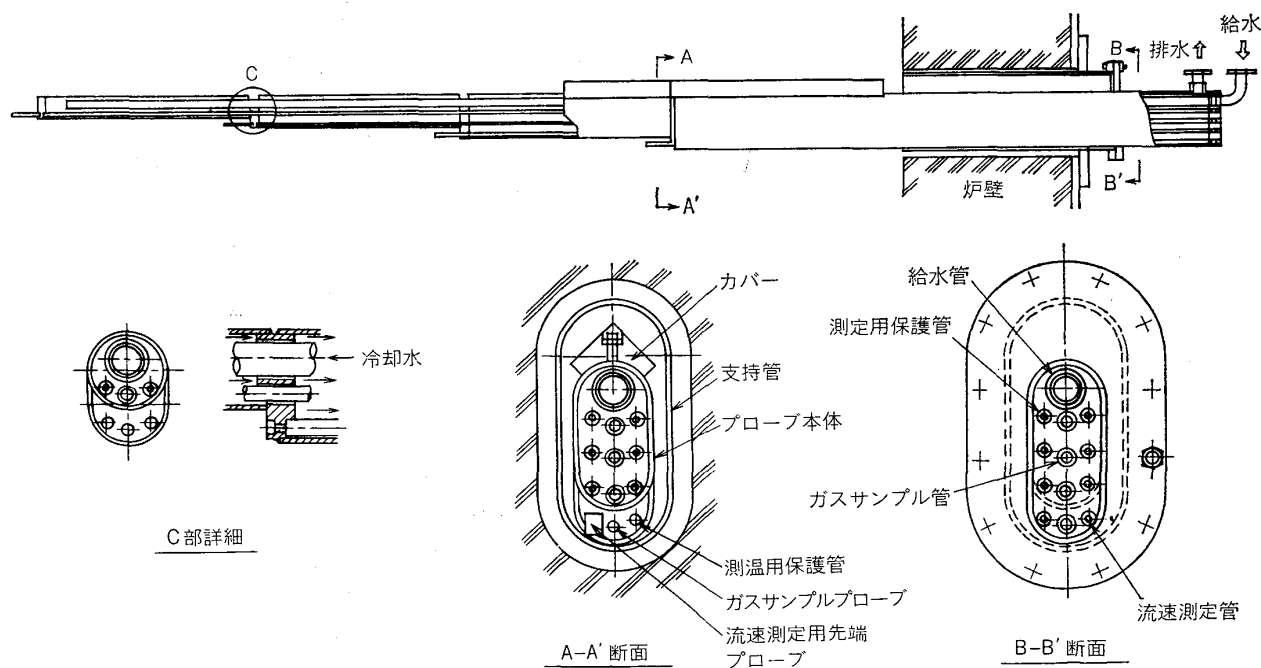


図3 高炉ベル下固定式水冷ゾンの構造

から光高温計にて測定しているが、測温箇所の代表性ならびに時間的要因など問題があるため、種々測温点を選んで実験したところ、ヘアピントップ上部の煉瓦温度と火落時間に高度な相関のあることが確かめられた。このため、ここに熱電対を設置し、保護管の材質ならびに内部を加圧するなど種々検討を加えた結果、2年以上の寿命を得ることができた。また、火落判定の定量化のためには、従来上昇管蓋開放時の発生ガスの着色度を目視によって見ていたが、石炭乾留末期に発生ガスの温度が著しく変化するところから、上昇曲管部に熱電対を設置し

てその温度パターンから、火落点を明確に検出することに成功した。以上の概略図を図1に示している。

2.1.2 高炉

高炉においては、炉内反応を把握するため各種の新しい試みがなされており、炉頂赤外カメラ、ゾンデ、シャフト熱流計、羽口先カラーテレビ、熱風温度測定について説明する。

(i) 炉頂赤外カメラ

高炉が大型化したため、炉頂における装入物の温度パターンは炉内反応の指標として重要な意味を有してい

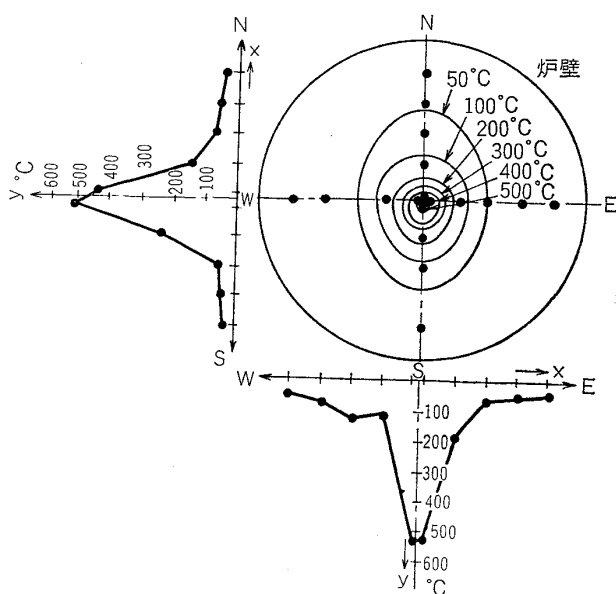


図 4 ベル下水平ゾンデによる炉口部ガス温度分布の 1 例

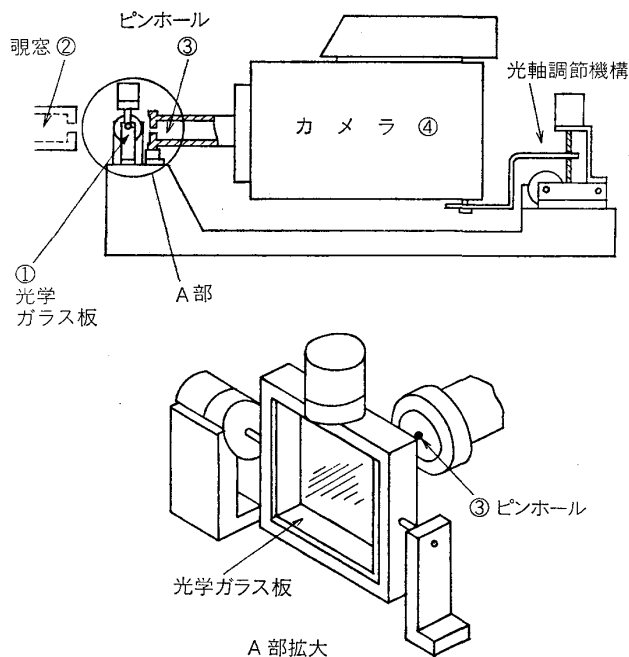


図 5 高炉炉口先カメラ光軸合わせ機構

る。従来、赤外ビジコンが採用された例もあるが、温度が低下した場合測定が不可能になるため、昭和 50 年 1 月、新日鉄君津製鉄所において、検出器として電子冷凍型 HgCdTe を用いた炉頂赤外カメラ（日本電子(株)と共同開発）が開発された²⁾。図 2 にハード構成のブロック図を示している。一方、日本鋼管福山製鉄所においても同種の装置を実用化しており、温度パターン表示のほか、デジタル温度表示（モニター上の交叉点など）、特定点の温度変化のアナログ記録、6 段階別温度パターン

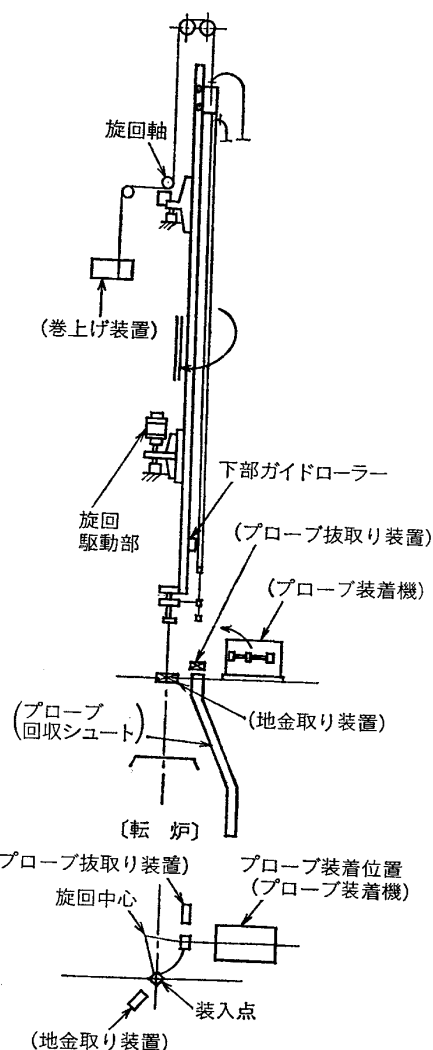


図 6 転炉用サブランス（旋回方式）

面積比デジタル表示など信号処理に工夫をこらしており、炉況解析に威力を発揮している³⁾。

(ii) ゾンデ

高炉炉内反応を把握するため、炉頂水平ゾンデ、シャフト水平ゾンデ、垂直ゾンデ、羽口ゾンデなど各種のゾンデが開発されている⁴⁾。

ここでは、日本鋼管福山製鉄所において開発された固定式水冷ベル下ゾンデについて説明する⁵⁾。このゾンデは、装入物の衝撃と磨耗を防ぐために、測定管と支持管から成る 2 重構造としたほか、材質に工夫をこらした結果、2 年の寿命が得られている。温度測定は密閉保護管の中に長さの異なつたシース熱電対を挿入して行なっており、冷却されたゾンデ本体から 100mm 離すことにより、冷却の影響を除去している。これらのシース熱電対は作業中も交換可能で、3 ヶ月ごとに交換している。ゾンデの構造と測定結果の例をそれぞれ図 3、図 4 に示している。

(iii) シャフト熱流計

高炉シャフトには炉況ならびに煉瓦損耗状態を診断す

るために多数の熱電対が設置されているが、最近、断熱材や炉壁を貫通する熱流密度 ($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$) を直接測定する技術が確立され始めており⁶⁾、住友金属小倉製鉄所では高炉シャフト部に熱流計をとりつけて従来の温度結果と比較している⁷⁾。

それによると、炉内状況の変化は温度より熱流密度の方が数時間早くあらわれており、また熱流密度の変化分は温度にくらべ大きいと判定しやすく、今後センサーの耐久性が確認された暁には威力を発揮すると思われる。

(iv) 高炉羽口先カラーテレビ装置

中央制御室から遠隔で任意の羽口を自由に選択して連続的に炉内レースウェイの状況、明るさ、コークスの動きなどを監視することができる高炉羽口先カラーテレビ装置が日本鋼管福山製鉄所で開発実用化されている⁸⁾⁹⁾。カラーカメラは、各羽口の周囲を懸垂式移動台車で移動可能になっている。羽口先カメラ光軸合せ機構を図5に示している。

(v) 熱風温度の測定

高炉の燃料比低下のため、送風温度の上昇が行なわれ、最近では 1300°C にもなり、さらに高圧操業が実施され送風圧力は $3.0 \sim 3.5 \text{ kg/cm}^2$ にも達している。このため、日本鋼管福山製鉄所では PR-13 熱電対をハイアルミナ保護管、ホワイト金属保護管 (2 重) の三重保護管内に挿入し、端子箱の耐圧気密性などに工夫を加え、熱

電対の平均寿命として 10 週間を得ている¹⁰⁾。さらに、狭視野のシリコン太陽電池を用いた連続光高温計 (COP) で、送風本管内張り煉瓦の表面温度を測定している。本方式は清浄空気パージを行うのみでレンズ掃除などの手入れ周期が 6 ヶ月程度に達し、熱電対劣化の監視にも役立つている。

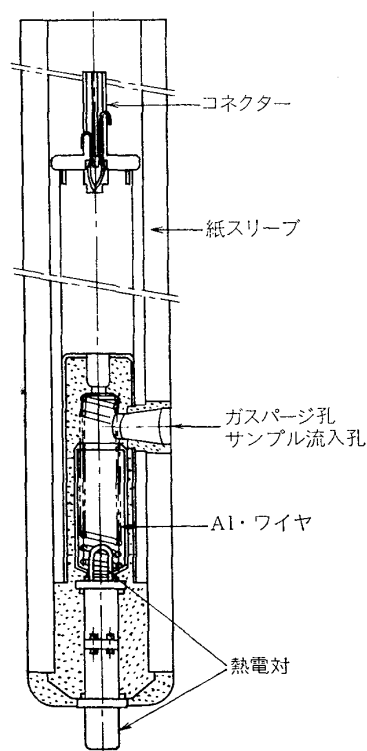
2.2 製鋼関係

2.2.1 転 炉 (精錬関係)

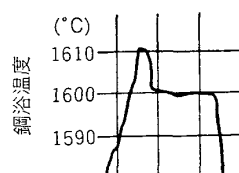
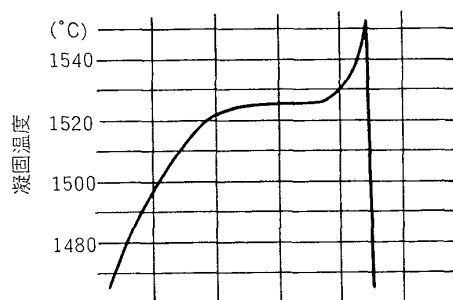
(i) サブランス

吹錬中の転炉は半密閉状態にある上、吹錬時間が短かくまた炉内の鋼浴、スラグが高温で激しく攪拌されているため、測温・サンプリングなど計測条件は極めて苛酷であるが、終点温度ならびにカーボンの適中がコスト・品質の面から重要なため、古くから開発の努力がなされていた。開発当初、鑄鉄製のおもり (シンカー) の先端に消耗型熱電対を装着したものを吹錬中に炉内に投入しケーブルが焼損するまでの間に鋼浴温度を測定する方式が J & L によつて開発された¹¹⁾。しかし、現在では多目的に使用できるためとコスト面よりサブランスが実用化され大きな効果を上げている。

サブランスは始め新日本製鉄戸畑転炉工場において斜め挿入形を設置し、各種解析ならびに設備的な検討を加え垂直形に移行した¹²⁾¹³⁾。その後、各種改良を加え新日本製鉄名古屋第二製鋼工場において旋回方式を実用化している。その概要を図6に示している¹⁴⁾。サブランス利



(a) CONTEC 構造



(b) 温度指示曲線

図 7 サブランス用プローブ CONTEC の構造と温度指示曲線

用によるダイナミック終点制御精度の向上によつて、再吹錬・溶鋼炭素の過剰減少・溶鋼温度の過剰上昇が減少し、新日本製鉄君津第2転炉工場では無倒炉操業率 97~98% にも達し、炉寿命延長に大きな効果をもたらしている¹⁵⁾。

なお、日本鋼管福山製鉄所においても、サブランスを実用化しており、大型炉用のプローブ (CONTEC) の構造と測定結果を図7に示している¹⁶⁾。

(ii) 消耗型熱電対による超高温測定

ステンレス鋼を精錬するさい、精錬過程の研究、添加合金鉄の歩どまり向上、耐火物の保護などの目的から、1750°C 以上の溶鋼温度測定が強く望まれている。通常使用されている PR 熱電対では、最高使用温度が1700°C までであるため、従来超高温測定用に開発された熱電対を消耗形熱電対として用いている。すなわち、住友金属ではデグサ製 PR 18 (Pt 30% Rh-Pt 6% Rh) ならびにリーズアンドノースロップ製 IrRh (Ir 4% Rh-Ir) による測定を¹⁷⁾、太平洋金属では W-Re (W 25% Re-W 3% Re) により溶鋼温度の測定を行なっている¹⁸⁾。一方、大同製鋼においては、W-Mo 熱電対が安価であるため実用化の検討を行ない、その見通しを得ている。すなわち、W-Mo 熱電対を Pd 点ならびに Pt 点のワイヤー法により熱起電力を検定して数種類に分類した上、消耗形熱電対として組み込み実用試験を行なったところ、精度的に充分であることが確認された¹⁹⁾。

2.2.2 連続測定

(i) タンディッシュ溶鋼連続測定

タンディッシュ溶鋼温度は、操業上、品質管理上重要なためその連続測定が強く望まれているが耐火物ならびに測定方法に問題があり、現在まで実用化されていない。

新日本製鉄八幡製鉄所では、保護管としての各種耐火物の溶損ならびに測温試験を行ない良好な結果が得られた²⁰⁾。

(1) 窒化珪素結合アルミナ耐火物 (東京高級炉材社製)

外管にアルミナ粉・窒化珪素粉を混合成形後焼結したものを、内管にアルミナ磁器を使用した二重保護管構造としてタンディッシュ内溶鋼に浸漬したところ、スラグ層、メタル層の境界付近で最も溶損が著しく、8h の浸漬で約 4~5 mm 溶損されたが測温上は問題なかった。また、約 1600°C の溶鋼と常温大気間を交互に出し入れを繰り返したが熱衝撃に非常に強いことを確認している。

(2) 超高純アルミナ磁器 (香蘭社製)

超高純 (99.95%) のアルミナ粉に耐スラグ性、耐熱衝撃性を改善するため金属酸化物を添加して高温 (1950°C) で焼結したもので、挿入時の急昇温を防止するために石英ガラス管で被っている。長時間浸漬を行なう場合には、アルミナ磁器の厚みを増す必要があるが、それに

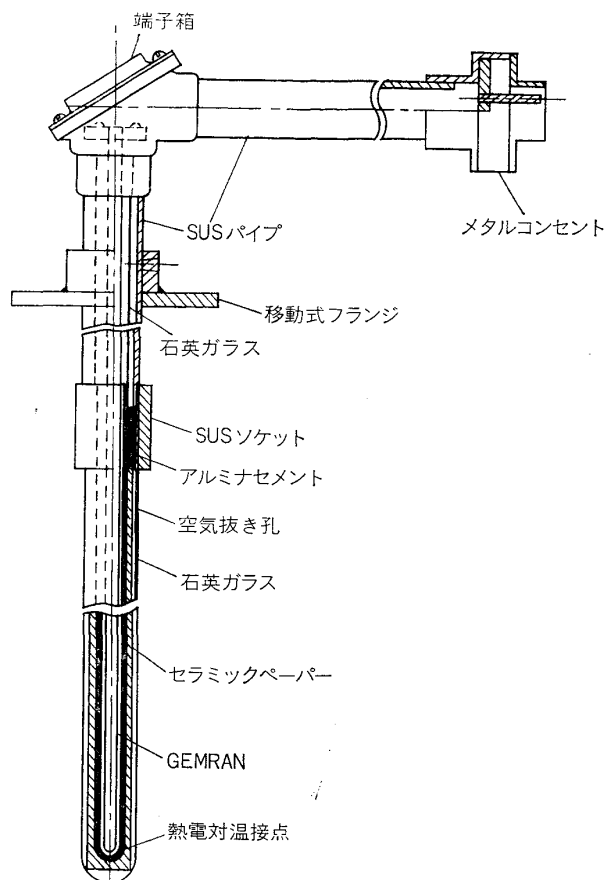


図8 溶鋼連続測温用保護管の構造

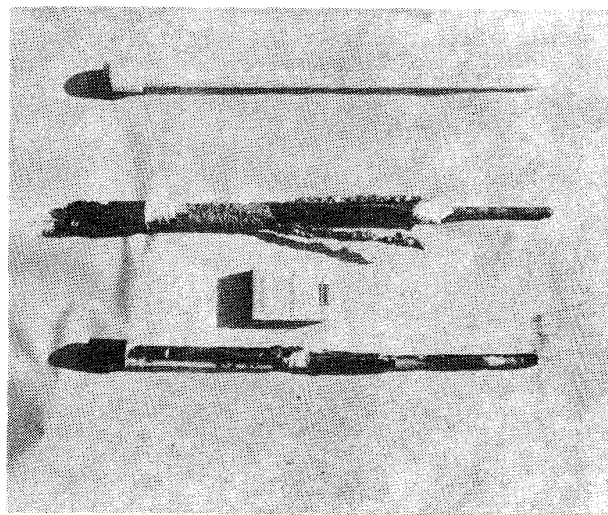


写真1 保護管の損耗状態

伴つて耐熱衝撃性が悪くなるため、アルミナ磁器保護管と石英ガラス管の間にセラミックペーパーを挿入しており、これにより約6hの浸漬に耐え、熱電対の劣化もみられず良好な測定値が得られている。図8に保護管の構造を、写真に損耗状況を示している。

(ii) 鋳片表面温度測定

鋳片の品質管理、引抜速度の高速化を目的として各所で二次冷却水制御が実施されているが²¹⁾²²⁾、この場合鋳

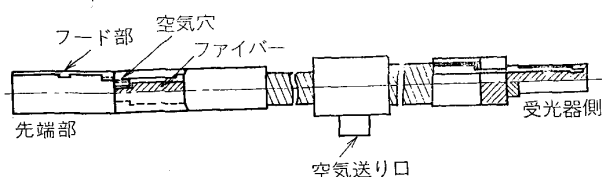


図9 2色温度計用オプティカルファイバーの先端構造

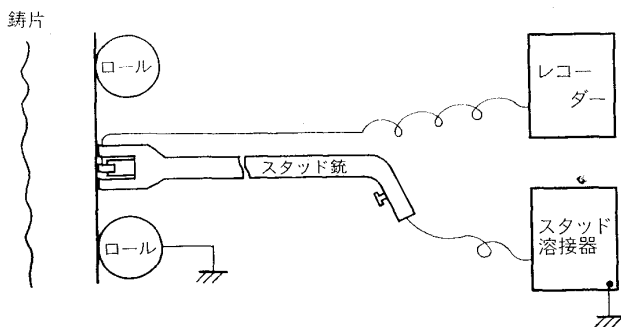


図10 連続铸造鉄片表面温度測定用熱電対のスタッド溶着法

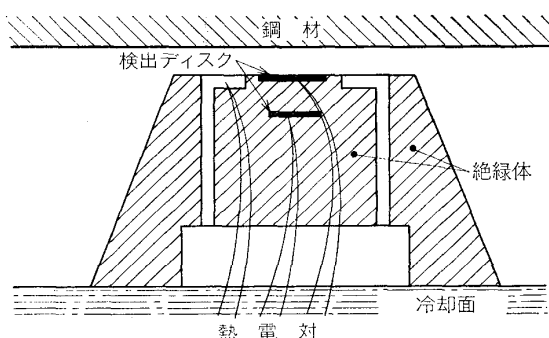


図11 加熱炉中の鋼材表面温度測定用熱流計

片表面温度測定が重要な役割を果たしている。しかしながら、二次冷却帯は水膜・水蒸気に囲まれ高温・多湿で極めて測定条件が悪い。このため、各所でシリコンセルを用いた連続光高温計 (COP) や、水膜の影響を受けにくい2色放射温度計にオプティカルファイバーを装着し、清浄空気によりパージしながら測定する方式があるが、測定精度を維持するためには整備を良く行なう必要がある。一例として、新日本製鉄八幡製鉄所で開発した2色放射温度計 (波長 $0.6\mu\text{m}$ 附近の2波長) 用オプティカルファイバー (長さ 5m 透過率 25%) の先端構造を図9に示している²³⁾。また、同所では鉄片の温度履歴測定ならびに放射温度計の校正用として、CA シース熱電対を取り付けた小銀片を鉄片に瞬時に溶接する熱電対スタッド溶着法を開発しているが、その概要を図10に示している²⁴⁾。

2.3 圧延関係

2.3.1 加熱炉

加熱炉中の鋼材表面温度は従来から開タンマン管を鋼材表面に近接させて放射温度計で測定しているが、管の変形、光路の吸収、火焰の影響、放射率の変化、鋼材面

表1 熱延ラインにおける放射率測定例

測定場所	放射率	変動幅 (温度換算値)
R_1 出側	0.82	4°C ピーク 2.5°C rms
R_4 出側	0.81	2°C ピーク 1°C rms
F_6 出側	0.79	3°C ピーク 1°C rms

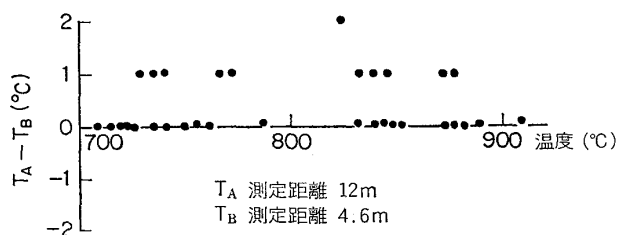


図12 光路長を変えた場合の指示変化

と炉床面の区別が付き難いなどの問題がある。これに対し、図11に示すような熱流計を鋼材表面に近接させて測温する試みも報告されているが²⁵⁾ 実用に至っていない。

2.3.2 厚板、熱延

圧延プロセスは安定操業を問題としていた段階では、相対的な圧延温度が得られるのみで十分な場合もあり、放射測温は精度にあまり注意が払われなかつた。しかし最近では省エネルギー、品質管理の徹底化が課題となってきたために、真温度測定が要求されるようになった。このために放射率および測定条件が精度に及ぼす影響の定量的把握と誤差要因の除去が必要となつた。

圧延中の鋼材は、圧延直後ほとんど瞬時にかなり厚い酸化膜が形成され放射率が安定している。このために精度良い測温が可能である。鉄酸化物は赤外域では半透明なので膜厚がかなり成長しないと放射率は安定しないが、可視域では膜厚が $1\mu\text{m}$ 以内ですでに放射率は $0.7\sim 0.8$ に達する。Si セルを用いた温度計は測定波長域が $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ であり、鋼材の測温に適している²⁶⁾。表1は Si セルを用いた半球型表面温度計と放射温度計を用いて熱延ラインで放射率を測定した例である。注意深い測定を行なつた結果、放射率の変動幅は温度換算で $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内であることを報告している²⁷⁾。

温度計の設置方法や測定環境がもたらす誤差要因は、例えば照明による迷光、水乗り、スケール剝離、光路吸収などがあり、必ずしも単純でない。計器の除塵、除湿、冷却などの他に、2重化 (2台併用) や狭視野、高応答性計器にピーク保持回路を用いるなどによりかなり精度は改善されうる。図12は厚板ラインにおいて光路吸収による指示低下の検討を行なつた例で、測定距離が 10m 以上でもほとんど影響がない。また測定角度も図13

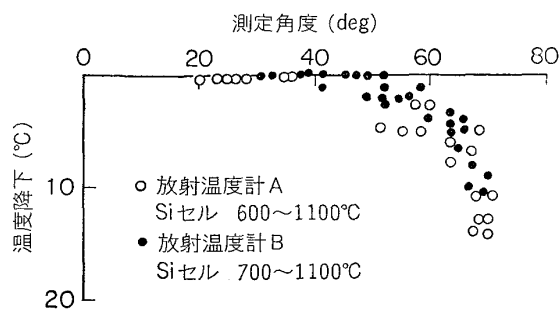
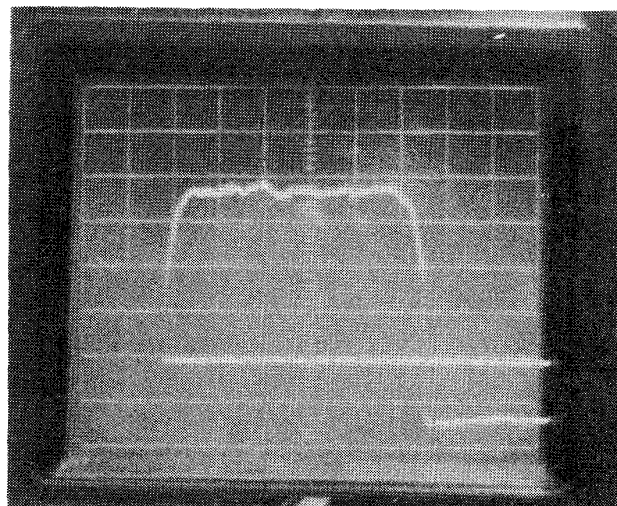


図 13 測定角度を変えた場合の指示変化



縦軸ベースライン 700°C, 同 1 目盛 100°C,
横軸 1 目盛 20cm

写真 2 幅方向温度計の出力例

に示すように垂直軸から 45°C まではほとんど誤差を生じない²⁸⁾。

熱延ラインは圧延材表面の全面にわたり放射率変動が少ないために幅方向の温度も精度良く測定できる。写真 2 は測定例であるが、圧延状況や材質管理に効果的なデータが得られている²⁹⁾。

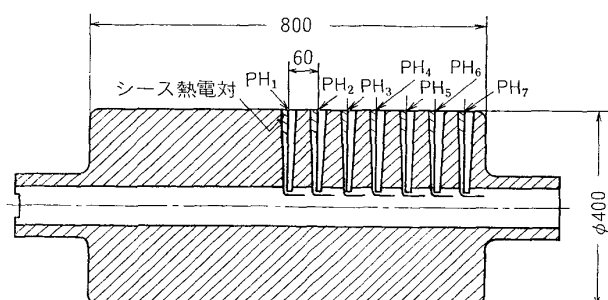
2.3.3 圧延ロール

圧延、冷却過程の鋼材やロールの温度履歴については多くの解析がなされているが、このなかでロール表面温度の測定は表面荒れやクラウンの熱変形などの検討に必要である。ロールにシース熱電対を埋込んで測温するが、ロール表面は温度勾配が急なために測定位置を正確に決めなければならない。このような場合には図 14 に示すように熱電対を取付けたテーパピンをロールに焼ばめる方式が適当である³⁰⁾³¹⁾。

2.3.4 冷延・表面処理

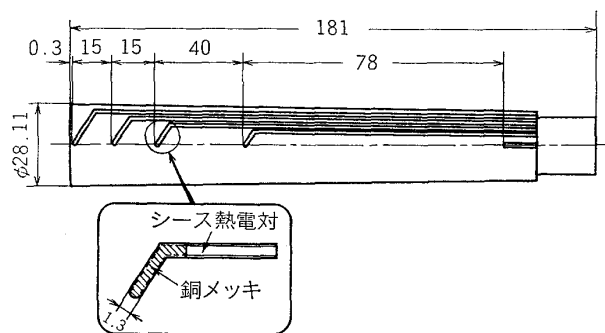
(i) 炉内測温

冷延、メッキプロセスの連続焼鈍炉内鋼板の測定にいくつかの試みがなされている。還元雰囲気中の鋼板表面は放射率が安定しているので炉内の迷光を消去すれば正確な測温が可能である。迷光の消去に遮蔽板を用いる方法と³²⁾³³⁾、迷光を測定して補正する方法³²⁾³⁴⁾がある。図 15 は水冷遮蔽板付放射温度計と校正用接触式温度計を



(注) PH₁~PH₇: テーパピン

(a) テーパピンを取り付けた試験ロール



(b) 熱電対を埋めこんだテーパピン

図 14 テーパピンを用いた圧延ロール温度測定法

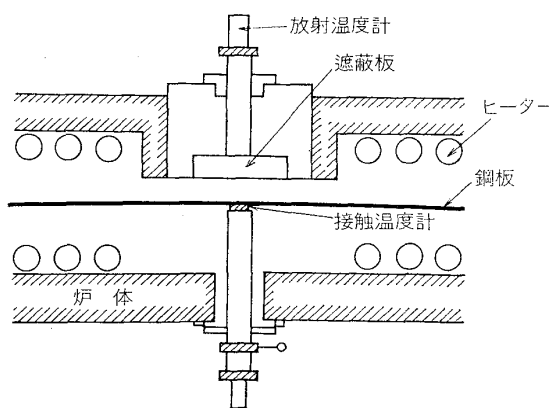


図 15 連続焼鈍炉内鋼板の真温度測定装置

組合わせた測温装置である。冷延鋼板は鏡面反射特性があり、遮蔽板の使用は効果的である。図 16 はこの装置を用いてラインで測定した放射率と、同条件で実験室で測定した放射率を対比させた図である。対応が良いことは測温精度が高いことを示しており、誤差 1% 以内で真温が測定可能としている³³⁾。

(ii) 渦電流温度計³⁵⁾

渦電流法は常温付近でも十分な感度があり、表面性状例えば塗膜の性質や水、油の付着などの影響を受けない。その反面鋼板の材質、成分による補正が必要である。したがってこの方式は比較的低温の塗装ラインや酸化膜厚の変動する熱処理ラインなどに適している。図 17 は渦電流法の構成を示している。鋼板に近接して検出コイル

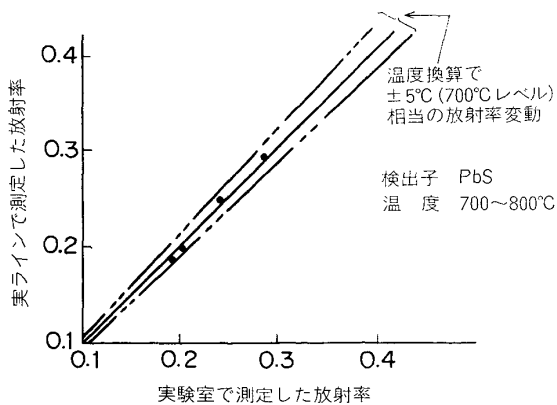


図 16 実ラインおよび実験室で測定した放射率の対比

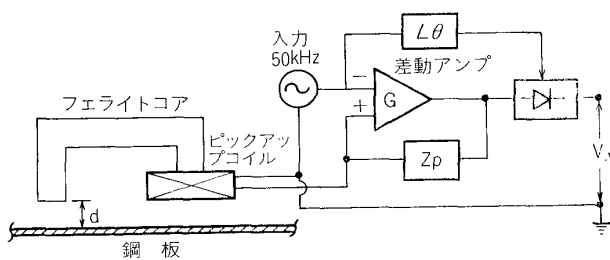


図 17 渦電流温度計の構成

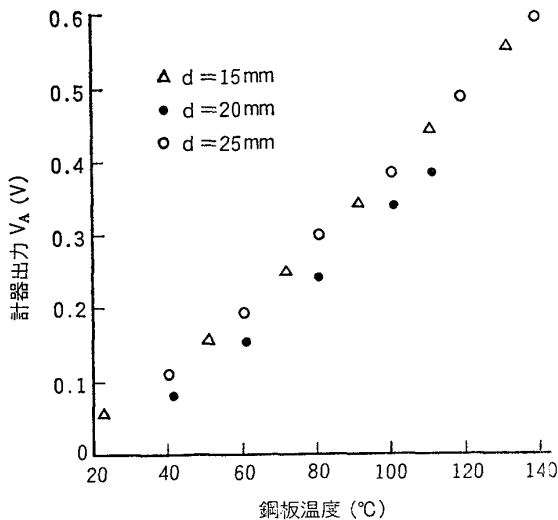
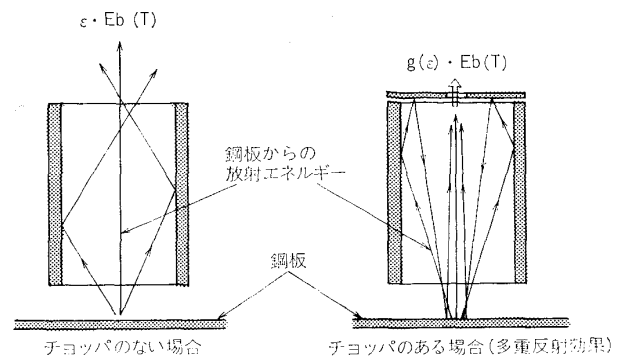


図 18 渦電流温度計による鋼板温度測定例

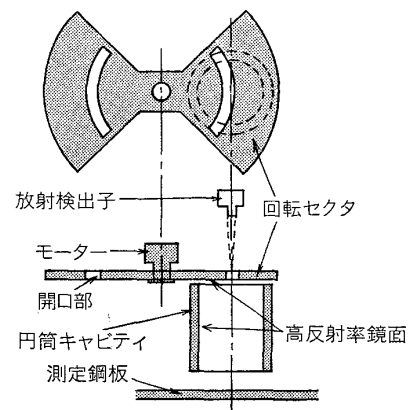
を置き、温度によつて変化する金属の抵抗値をコイルのインピーダンス変化として検出する。同図に示すように帰還回路網に検出コイルを含み、コイルのインピーダンス変化により帰還率が変化する。このためにコイルと鋼板の間隔変動による指示変化の程度を小さく押えることに成功している。図 18 は測温例であり、同一種類の鋼板であれば測定間隔が $20 \pm 5 \text{ mm}$ で $0 \sim 150^\circ\text{C}$ の範囲で $\pm 5^\circ\text{C}$ の誤差で測温可能である。

(iii) キャビティを利用した温度計³⁶⁾

この方式は塗装ラインのように放射率が大きく変る対象の測定に適している。というのは温度のみならず放射

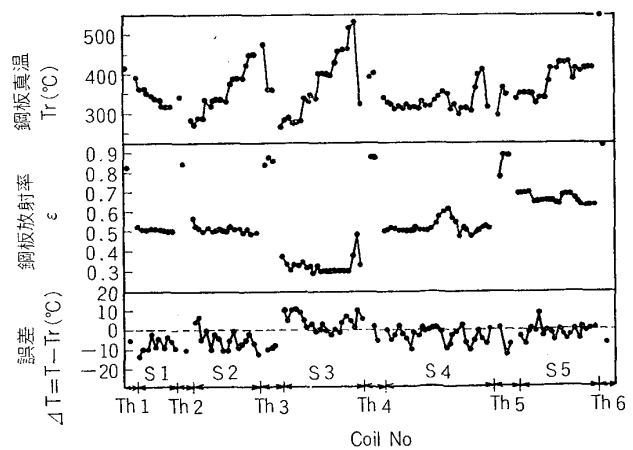


(a) 開端、閉端キャビティに対応した放射強度の変化



(b) 測定装置の概念図

図 19 キャビティを用いた温度、放射率の同時測定法



S1~S5 : 塗装鋼板
Th1~Th5 : テスト鋼板(高放射率)

図 20 キャビティ法による塗装鋼板の測温例

率も同時に測定でき、放射率は表面情報として利用することが可能となる。図 19 は測定原理を示している。高反射率キャビティを鋼板に近接させると鋼板からの放射強度は増加し、その程度は鋼板の放射率の関数となる。このような効果を利用し、図に示すように円筒キャビティ上端のチョッパを回転させると開端、閉端キャビティが交互に構成され、それぞれの出力を測定して放射率と温度が求まる。図 20 は塗装ラインで測定したデータで

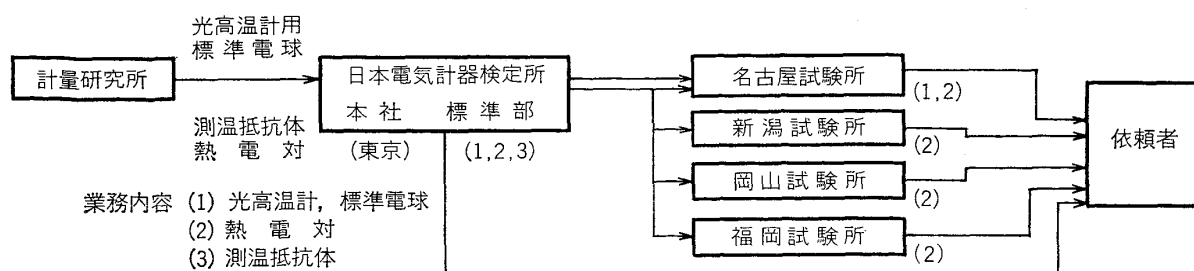


図 21 日本電気計器検定所の温度標準の体系

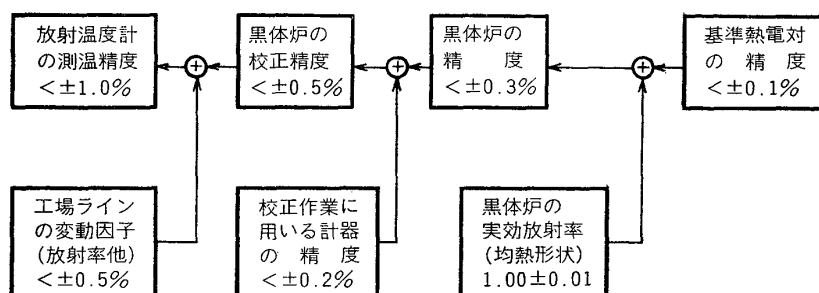


図 22 放射温度計の校正精度図

放射率が 0.3~0.9 と変化し、温度が 250~500°C 変化する際に測温誤差は $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内である。

(iv) その他

中温域 (300~600°C) で 2 色温度計を用い、亜鉛メッキ浴とメッキ鋼板の測温を行ない好結果を得ている³⁷⁾。一般に 2 色温度計は普通の放射温度計と同様に測定対象の熱放射特性を把握してから使用しなければ失敗することがあるから注意を要する。

また冷延鋼板やロールの表面温度を推触式温度計で測定する試みも報告されている³⁸⁾。押付バネ圧の調節と潤滑条件を作ることにより、摩擦熱の発生もなく正確な測温が可能である。

3. 最近の情勢

3.1 トレーサビリティ

熱電対、光高温計の標準体系を図 21 に示す³⁹⁾。放射温度計に関しては JIS の制定を含めていまだ研究段階であるが、定点黒体炉や比較用放射温度計などの開発が計量研を中心に行なわれている。黒体炉による放射温度計の校正は各製鉄所で行なわれているが、図 22 は鉄共研放射温度計小委員会で推奨された精度管理図であり⁴⁰⁾、現在慣用されている校正精度の標準例である。適正に管理された放射温度計は 2~3 年の連続使用でも $\pm 5^\circ\text{C}$ 程度の偏差内に納まる。

3.2 赤外カメラ

赤外カメラを用いた温度パターン計測も鉄鋼業では次第に定着しつつある。現在使用されている赤外カメラはすべて機械走査方式であるが、性能、軽量化などほぼ限

界にきている。今後の開発の方向として電子走査方式の計器が考えられており⁴¹⁾、焦電型撮像管、Si 型 CVD 素子などが試作されている。未だ空間分解能、温度分解能など性能は機械式に及ばないが、今後の発展に注目したい。

3.3 新しい測温方法

放射測温では、遠隔測定で放射率を補正する試みが目を引く。これは熱伝導率測定に用いられているレーザーフラッシュ法に類似で、2 波長のレーザーを試料に照射し僅かに昇温させて、その昇温特性から 2 波長の熱吸収率を求め真温を測定している⁴²⁾。いまだ基礎実験の段階であるが、今後の発展が期待される。また超音波を利用し、鋼材内部温度を推定する試みもある⁴³⁾。最近リモートセンシング技術で進歩の著しい多波長によるパターン測定技術、マイクロ波測温の技術も、疵検出や粉塵の多い場所の測定に応用できよう。

4. む す び

以上、温度測定の新技术ならびに特殊測定について紹介したが、紙数の関係から同種のものについては割愛したものが多かった。又、ここでは説明を省略したが、日本鉄鋼協会共同研究会計測部会では温度計測に関する多くの研究発表が行なわれているほか、国際温度目盛変更対策 (昭和 47 年)⁴⁴⁾、放射温度計 (昭和 48 年)⁴⁰⁾、新温度標準実施 (JIS 変更, 昭和 49 年)⁴⁵⁾ など小委員会活動が行なわれ報告書の形でまとめられている。一方学振製鋼 19 委第 2 分科会 (高温測定) においても古くから温度測定に関する基礎的研究が続けられている。最近で

はシー熱電対の寄生熱起電力，放射率について討議されており，興味ある方は関係者から資料を入手したと考える。

文 献

- 1) 樋口正昭，他：日本鋼管技報，(1977) No. 72, p. 337
- 2) 鉄共研：計 60-1-5 (1975)
- 3) 佐野和夫，他：日本鋼管技報，(1977) No. 73, p. 1
- 4) 鉄と鋼，61 (1975) 5, p. 483
- 5) 大槻 満，他：日本鋼管技報，(1975) No. 68, p. 312
- 6) 炭竈貞夫：計測技術，1 (1973) 6, p. 105
- 7) 石山幹夫，他：第 16 回 SICE 学術講演会，(1977)，p. 157
- 8) 大槻 満，他：日本鋼管技報，No. 68 (1975)，p. 309
- 9) 鉄共研：計 66-1-共-1 (1977)
- 10) 山本倫久ほか：第 16 回 SICE 学術講演会，(1977)，p. 147
- 11) H. W. MEYER, et al: Blast Furn. Steel Pl., 45 (1966) 7, p. 595
- 12) 長野 裕，他：鉄と鋼 56 (1970) 6, p. 147
- 13) 岩尾範人，他：製鉄研究，No. 272 (1971)，p. 127
- 14) 竹村洋三，他：製鉄研究，No. 291 (1977)，p. 12
- 15) 大日方達一，他：製鉄研究，No. 291 (1977)，p. 23
- 16) 田中駿一，他：日本鋼管技報，No. 73 (1977)，p. 11
- 17) 鉄共研：計 46-3-2 (1970)
- 18) 学振製鋼，19 委，第 2-202 (1970)
- 19) 鉄共研：計 46-3-3 (1970)
- 20) 篠原幹三：計測技術，5 (1977)，11, p. 79
- 21) 鉄共研：計 65-2-共 1 (1977)
- 22) 鉄共研：計 65-2-共 2 (1977)
- 23) 草鹿履一郎，他：製鉄研究，(1973)，No. 279 p. 84
- 24) 鉄共研：計 63-2-1 (1976)
- 25) P. E. ENGLISH: Iron and Steel (England), (1973) Apl., p. 125
- 26) 大野二郎，他：鉄と鋼，60 (1974) 11, p. 342
- 27) J. K. MOORE: British Steelmaker, 38 (1972) 9, p. 13
- 28) 飯田永久，他：第 15 回 SICE 学術講演会，(1976)，p. 271
- 29) 鉄共研：計 56-4-1 (1974)
- 30) 岩脇 章，他：石川島播磨技報，17 (1977) 2, p. 95
- 31) 山本鷹司：第 16 回 SICE 学術講演会，(1977)，p. 155
- 32) 大島 真，他：計測と制御，9 (1970) 11, p. 837
- 33) 井内 徹，他：鉄と鋼，61 (1975) 8, p. 2076
- 34) 山田建夫，他：第 11 回 SICE 学術講演会，(1972)，p. 211
- 35) 山田建夫，他：第 16 回 SICE 学術講演会，(1977)，p. 171
- 36) 井内 徹：第 16 回 SICE 学術講演会，(1977)
- 37) 鉄共研：計 60-6-1 (1975)
- 38) 桑原康長，他：塑性と加工，3 (1962)，p. 109
- 39) 日本産業技術振興協会：トレーサブルな温度計測，(1974)，p. 15
- 40) 鉄共研：計 54-1-2 (1973)
- 41) 鈴木久夫：計測技術，4 (1976)，5, p. 77
- 42) D. P. DEWITT, et al: Temperature Its Meas and Cont. in Science and Industry, IV-1 (1972)，p. 599
- 43) L. C. LYNWORTH, Materials Evaluation, (1969)，Mar., p. 60
- 44) 鉄共研：計 50-1-1 (1972)
- 45) 鉄共研：計 58-0-4 (1974)