



入門講座

実験テクニック編(流体計測)
応用とトピックスー2

温度測定

Temperature Measurement

升光法行

Noriyuki Masumitsu

松浦清隆

Kiyotaka Matsuura

新日本製鐵(株) 室蘭製鐵所 製鋼工場長

北海道大学 大学院工学研究科
物質工学専攻 助手

1 はじめに

鉄鋼製造プロセスは純鉄の融点から推定されるように、非鉄金属工業や窯業に比較し、高温領域でのプロセス制御が必要であり、同時にその温度範囲もFig1に示すように広域である。更にその制御範囲を正確に管理する事も要求されており、例えば、製鋼工程でのスーパーヒート(溶鋼温度と凝固温度の差)が、均一組織を得るために±2.5℃に制御される技術¹⁾あるいは圧延工程や熱処理工程では、鋼材の材質制御のために±5℃以下の制御技術が必要となっており²⁾、温度制御に関するニーズは一層高度化する事が予想される。一方、現代のような各種の温度測定装置が無い古代より、鉄の製造は行われており、例えば、4世紀頃に建てられたと推定されるインド・デリーの錆びない鉄柱はその品質レベルも、近代製鉄法で製造された鋼材に比較し、数段優れた耐腐食特性を有している³⁾。温度測定法が感応測定であっても高度な鉄製

品が製造できていた事に、改めて驚かされる。逆に将来ニーズに応えるべく、高機能・高精度の測温装置の出現により、更なる製鉄プロセスの変革あるいは、材料としての“鉄の魅力”が引き出されるのではないかという期待も感じる。

既に、鉄鋼業における温度計測技術に関しては、専門の方々の精緻な報告がなされているので^{4, 5)}ここでは温度測定について、現在までの技術の流れを振り返り、また現場操業技術での“測温”の苦心談等を中心に熔融金属や高温の測定の難しさと今後の測定技術に期待すること等を中心に述べる。

2 鉄鋼プロセスでの測温技術

2.1 測定技能・技術の変遷

人類は恐らく古代文明の発生前後から、農業を行う上で気温は重要である事に気付いていたであろうし、それ以前に狩猟にも気温が影響すると知っていたかもしれない。

一方、工業として人類が温度を重要視するようになったのはいつ頃からの事なのか？ それは恐らく、石器時代の事と推察される。最後の氷河期の頃、モラウィアのマンモス狩猟者たちは、炉を造り粘土製の動物を焼いて固める事を行っていたようだ⁶⁾。この後の時代になり、人類は世界中で土器を焼いている。粘土の結合水を除くためには450℃以上に加熱する必要がある、更に高温で焼くと、気孔が減少し密度が増す。彼らは充分な硬さの土器を得るのに必要な“火”の加減を知っており、自身の記憶や他者への技術継承のために火加減すなわち“温度”を表す表現を用いていたと想像される。

人類が鉱石から金属を取り出す方法を見つけたのを機に、石器時代は終局に向かう。人類は金、銀、鉛、銅、錫等の金属を次々と手に入れ、青銅などの合金も造るようになった。その後、これらの金属に関する素朴な冶金技術を基礎にして、

Melting point(℃),etc.	Temp.(℃)	Remarks (related to steel production process)
3380 W	~	~ ⇨ Fire spot in the converter
1820 Ti 1774 Pt	2000	
1534 Pure iron	1600	⇨ End point of stainless steel making in the converter ⇨ End point of alloy and plain carbon steel in the converter ⇨ Continuous Casting process, Firing of high aluminum brick ⇨ Molten iron
1140 Cast iron 1083 Cu 1000 Automobiles engine	1200	⇨ Soaking process ⇨ Sintering process ⇨ Firing of chamotte brick ⇨ Coaking process ⇨ Hot rolling-Forging (intermediate temp.)
721 A ₁ transformation point 660 Al	800	⇨ Controll rolling ⇨ Annealing process
327 Pb	400	
		⇨ Cold rolling

Fig1 Temperature in the steel industry

いよいよ鉄器時代が始まり、我々現代人も正にその時代にいる事になる。鉄鋼精錬に必要な1,500℃以上の高温の実現には、ふいごの発明が必要であるが、古代人がこれを使用し作業する様子がエジプトの出土品に描かれている。中国では古くから製陶技術が進んでおり、特に河南方面の彩陶では1,400℃以上の高温を制御していたと考えられており⁷⁾、この技術が古代中国における製鉄技術の発展に大きく貢献した事は容易に想像できる。日本での製鉄技術は古代において、中国より800年遅れていたが⁷⁾、独自の方法「鑪(たたら)」による製鉄技術が昭和初期まで連綿と受け継がれてきた。

これら金属工学技術史の中で温度は一体どのように表現されてきたのであろうか？ 白熱、赤熱、青熱などの中国発祥の温度表現がいつから使われ始めたか不明であるが、古来、温度特に高温を色で表すのは洋の東西を問わないようである。

1627年にマテュラン・ジュスなる技術者が金属の冷却中の温度変化を記述して、「始め黄金色で、ついで赤血色、スミレ色、青、最後に水の色になる。望みの色になったらヤットコで素早く取り出すべし……」とし、焼き戻し技術について初めての記録を残した⁸⁾。

英国のボイル(Robert Boyle、1662年ボイルの法則を発見)は「色に関する実験と考察」と題する論文を1664年に著し、溶融した鉛の色を25色に分類した。そこで、例えば銅で斧を作りたい時には、黄色が熱処理温度に適し、青なら柔らかくなる事を記述している⁸⁾。彼の助手のフック(Robert Hooke、1678年フックの法則を発見)も、1665年に色に基づいて銅の焼き入れ効果を著し、塩類硬質粒子による分散強化のような理論を展開した⁸⁾。その内容が大筋では300年以上の後世にも通じる先駆的な考えである事に驚かされる。

日本で古来、温度をどのように表現したかの詳細は不明であるが、日本最後の鑪(たたら)が残っていた島根県営谷の第14代村下(むらげ、鑪の長)である堀江要四郎翁から昭和

初期に聞き取った話が記録されている。その中に「コモリには朝日の昇る色に吹け、中日には太陽の日中の色に吹け、クダリには日が西山に没する色に吹け」と、その父親から教わったとの内容がある⁹⁾。ここでコモリ、中日、クダリとは三日工程のそれぞれの日を指すらしい。それぞれの色が何℃に相当するか興味深い。この表現は堀江翁の父親のオリジナルと考えるよりも、菅谷村下の家に代々受け継がれた温度管理の秘伝と考える方が自然であろう。

以上のように、我々の祖先たちは色を用いて温度を表現して冶金工程を管理し、数千年の間ずっと優れた武器や道具を造ってきた。しかし、このような感応的あるいは定性的評価法では、技術の発展や伝播にとって必ずしも充分ではない。長さや質量のような他の物理量が定量的に評価されるのと同様に、温度も定量評価されるほうが都合が良い。

しかしながら、温度の定量評価は1714年のアルコール温度計の発明(Gabriel D. Fahrenheit、オランダ)まで待たなければならなかった。その後、1821年に熱電流現象が発見され(T. J. Seebeck、ドイツ)、さらには19世紀末には白金抵抗温度計が提案されて(E. W von Siemens、ドイツ)、高温まで精度よく温度測定ができるようになった。そして、1927年に国際温度目盛り(ITS-27)が採用され、その後数回の改定を経て、1990年に採用されたITS-90が、今日では国際温度目盛りの定点として広く使われるに至っている。ITS-90では、ヘリウムの沸点(−268.9279℃)から銅の凝固点(1084.62℃)までの17点が国際温度目盛りの定点として定められている。

2.2 現状プロセスでの測温箇所と測定温度範囲

現在の高炉―製鋼―圧延―加工までの一貫プロセスにおける、主な測温対象と温度範囲をTable1に示す。流体を測定しているのは高炉工程での溶銑、製鋼工程での溶鋼および二次加工での酸洗・ボンデ(素材表面に防食皮膜を作る磷酸塩処理法)での溶液であるが、高温域の流体測温では、高炉―

Table1 Object of measurement and its temperature range in the steel production process (Nippon Steel Corporation)

Process	Object and purpose of measurement * 1 (C: Control/W: Watch/ K: Confirmation)	Range of temperature measurement(℃)
Coaking	Brick (C)	～1300
Sintering	Exhaust gas(C,W), Conveyor(K) Products(K), Ambient temperature in the sintering furnace(C)	～1300
Ironmaking	Gas(W,C), Molten iron(K), Ambient temperature in the blust furnace(C), Brick(W)	～1600
Steelmaking	Molten steel(K,C), Ambient temperature in the reheating and soaking furnace(W,C),Brick(K), Shell(K)	～1800
Rolling	Ambient temperature in the heating furnace(W,C), Billet(W,C), Products(W)	～1300
Secondary working (Heat treatment・Pickling)	Ambient temperature in the furnace(W), Solution(W)	～900

* 1 Cooling water for equipment is excluded, ____ : fluid

製鋼での溶銑・溶鋼が測定の対象物である。溶鋼の融点が炭素飽和の溶鉄より約400℃高い事と溶鋼段階では脱ガス処理等の多様な二次精錬処理の温度補償をするために、製鋼工程で取り扱う温度範囲が他工程よりも高温になる。更に直接温度を測定し、その結果により短時間で対応処置をとる頻度が高いのは製鋼工程である。なお、鉄鋼プロセスの各工程における测温環境やセンサーの種類については、すでに詳細に調査された資料¹⁰⁾が報告されているので参照して頂きたい。

2.3 測定目的の動向

現在の鉄鋼業においては溶解・精錬・凝固・加工・熱処理等の各プロセスにおいて、2.2節で記載したように、直接対象物(原料・溶鉄・溶鋼・半製品・鋼材)を、また対象物を処理する加熱炉・熱処理炉等の雰囲気あるいは対象物を処理する溶液(酸・中和材等)の温度測定が実施されている。その各プロセスにおける温度測定の目的は主として、プロセスの制御と監視と単なる対象物の確認である。ただし、監視や確認の場合でも測定データにより何らかの対応をする事になるので広義には制御目的とも言えるが、設備保全が主たる目的である。やや古いデータではあるが、1985年に集約された結果¹¹⁾によると、新日本製鐵における各工程の各種タイプの温度測定装置が含まれるが、温度計使用目的の約70%は監視用であり、制御用は26%、他はデータの補正用あるいは制御のバックアップ用という事であった。最近では鋼材に求められる機能の高度化と測定機器の発展によりプロセス制御も高度化しており、制御用の比率が増加していると推定される。

例えば、製鋼工程での連続鑄造工程においてタンディシュ(溶鋼の充填された取鍋を順次交換しながら連続的に鑄造を実施するために取鍋とモールドの中間に配置され、バッファーとしての機能を有する)内の溶鋼温度を連続的に測定し、タンディシュに具備されている加熱装置と冷却材(スチール製のショット)添加装置を併用し、鑄造する際の溶鋼温度を凝固温度に近い低温・恒温に維持し、品質バラツキの少ない高品質の鋼材を製造する技術の開発がされた^{12,13)}。また、冷延連続焼鈍設備(CAPL)や連続式亜鉛めっきライン(CGL)における、鋼板表面品質の高級化にともなう炉内鋼板温度測定の新システムや鋼板表面に疵をつけずかつ生産性向上が達成される鋼板表面温度の測定法とシステム等が開発されている^{14,15)}。このように今後は鉄鋼プロセス制御の高効率化と同時に、むしろ商品となる鋼材品質の向上のために测温技術の発展が促進されると予想される。

2.4 测温技術との関わり—得られる教訓—

2.3節で述べたとおり鉄鋼プロセス自体の高効率化と鋼材

機能の更なる高級化・高度化のニーズを背景に益々、温度測定技術とシステムの高度化が進展する。従って、今後の温度測定技術やシステムの開発には多大な時間と労力が必要になると想像される。過去の温度測定の苦労や失敗事例を知る事は、今後の開発の視点や方向性について考える上で意義あるため以下に述べる。

(事例1) 高温测温のむずかしさ¹⁶⁾

現在ではステンレス製造プロセスは電気炉—AOD法が主流ではあるが、昭和40年頃から、新日本製鐵室蘭製鐵所(当時富士製鐵)では転炉をベースにしたステンレス製造法の開発を実施していた。最終的には転炉—RH・OB法¹⁷⁾として開発に成功し、平成元年1月3日の最終出鋼まで当該プロセスで累積153.8万tを生産した。世界的にもユニークな室蘭独自のプロセスであった。当該プロセスの開発中にステンレスの主要成分でしかも高価なCrの歩留りを向上させるために約1,800℃での高温溶解精錬を実施していた。高温であるために、従来の熱電対では素線が切れ度々测温不能となり、そもそもCr溶解期での転炉内での反応熱発生量は、430系ステンレス鋼で約125万KJ/tと普通鋼精錬の約3倍であり、熱バランス上のバラツキも大きくほとんど手さぐり状態での精錬を実施していたようである。転炉内が真白になり、溶鋼も白い光沢を放ち恐らく1,850℃超の高温での精錬であったと推定される。その後、測定プローブの構造や熱電対の材質変更(Pt-Rh系)で1,780℃までは測定できるようになったが、筆者がスタッフとして担当した1979年～1983年頃でも、炉前では测温時のチャート振り切り(1,800℃以上)を目安に操業していた。その後、転炉上底吹き化に伴う転炉内の溶鋼に付与する攪拌力の制御と精錬用の純酸素供給速度の制御を組み合わせた精錬技術の開発¹⁸⁾により1,730℃以下まで低減し、転炉炉寿命やエネルギーコストの改善が可能となった。高温域での测温が正確に実施できていたなら、ステンレス精錬プロセスの技術開発・改善がもっとスピーディーに実施されたのではないかと推定される。

(事例2) 連続测温技術の開発は耐火物・冷却技術の開発に等しい¹⁹⁾

新日本製鐵室蘭製鐵所(当時富士製鐵)の1965年の国産第1号連続鑄造機において、品質・操業改善を目的にタンディシュ内溶鋼の連続測定の開発を実施するに当たり(通常はバッチ式の测温で鑄造中に数回測定を実施)、当時熱電対シーズの保護管はフェーズドシリカ製であり、スポーリングによる割れ発生で失敗していた。そこでタンディシュの予熱時に保護管と一緒に予熱することで成功率が格段に向上し、更に耐熱性や熱ショックでの破損を抑制する目的で高純度アルミ

ナ保護管を適用し、併せて不透明石英管で保護する等の改善を実施し2連々銑まで安定して連続測温可能になった。現在はニューセラミックスの適用により、無予熱型で連続測定できる技術にまで改善されているが、溶鋼温度の測定は熱電対よりも、耐火物技術の開発が極めて重要であることを関連技術者は体験させられた。

連続測温は高炉の樋（高炉から出てくる溶銑が炉下に配置されている運搬容器まで流れを導く通路）を流れる溶銑にも適用された事があるが²⁰⁾、2色高温計で測定しようとしたが溶銑表面に混入して流れるスラグとの分別あるいは測定器本体の冷却（エアージャケット方式；溶銑・溶鋼に接する機器の冷却は漏水時の水蒸気爆発を懸念し、ガス冷却する方式が多い）に苦勞しプロパーにいたらなかった。

最近ではタンディッシュ内の溶鋼温度あるいは樋の溶銑温度の連続測定にも耐火物での保護あるいは冷却に関する課題を解決した、消耗型の光ファイバー放射温度計が実プロセスに適用されている²¹⁾。

（事例3）加熱炉内の鋼材・雰囲気温度測定での付帯作業緩和・測定条件が大事²²⁾

1970年～1980年頃の加熱炉内の鋼材温度の測定は鋼材（スラブ、ビレット）に熱電対の素線を取り付けて行っていた。その際に2本の素線の絶縁を図るために長さ20mmの二つ目（2個の孔があらかじめある）の磁性ピースに素線を通し、全長約30mの熱電対を製作するのに多大な労力と時間を要していた。その後は2本の素線を酸化マグネシムの絶縁体で保護した熱電対が開発され問題は解消した。

加熱炉内の雰囲気測定は炉内壁から保護管付き熱電対を何cm炉内に突出させるかにより、測定値が30～50℃異なる問題があり、加熱炉内の鋼材温度の計算モデル作成時の精度の検証に苦勞していた。炉形状に伴う炉内の流れの問題を含めロカリーティ条件の中でノウハウとして継承され、またシー型熱電対の接地型と非接地型での時定数の違いや隣接するモーター等の電気設備によるノイズで測定値に大きな誤差が発生し、このような外乱要因を一つ一つ丹念に解決しながら、実機に適用できる温度測定技術が確立されてきた。

（事例4）温度計の精度不足で品質トラブル²²⁾

ホットストリップミルの仕上げ温度の誤りは低炭素材での混粒問題を引き起こす。特にドラム材のような低炭素材で、しかも極度の曲げ加工を伴う材料ではオレンジピール（冷間絞りをした時にみかんの皮のようなプツプツした肌になること）が発生し、素材表面がざらざらした模様になったりする。旧式の光温度計は真空管で安定性に欠けており、更にそこへオイルショック時の省エネルギー活動が重なり、ホットスト

リップミルの仕上げ温度をオレンジピールの発生しない、ぎりぎりの操業温度に低下していった結果、温度計が安定しない分仕上げ温度が実際に外れて、素材に混粒が発生し大量のクレームを発生させてしまった。最近では聞かない話だが、Ar₃変態点以下での圧延は再結晶が不十分で混粒を惹き起こし（整粒なら問題なし）、クレームにつながったと推定される。従って、温度計の校正・管理精度維持は非常に大切な業務であり、製鐵所内の特殊計装部門には電気炉を整備・保有し回路維持管理を自前でできるように体制を充実させてきた。

前述した事例は筆者自身あるいは実際に経験された一部の諸先輩の記録あるいは直接ヒヤリングした結果である。その意味では測定技術に関わる極々一部の話題提供にすぎないが、鉄鋼業にて従事されている技術者の方々が同様の経験をされてきた事と推定される。これらの限られた事例からでも温度測定技術に関して重要な教訓が得られる。つまり、(1) その技術の発展が直接的に製造プロセスを改革していく可能性がある。(2) 測定器の開発・改善に耐火物や冷却技術といった付帯技術の発展が必須になる事と測定ノウハウの蓄積が重要である。(3) 測定できたら当然その精度が重要であり、測定が鉄鋼プロセスの付帯技術ではなく、鉄鋼製品の品質に直結する主要技術として、位置づけられることと再認識される。

3 今後の測温技術への期待と背景

現場技術者あるいは鋼材研究者からみた今後の温度測定のニーズは、年代に応じ報告されており^{4,5,10)}、直近の筆者らの体験を含み整理すると下記のとおりである。

(1) 連続測温技術

前述したようにタンディッシュ内あるいは高炉溶銑樋は実用化され始めたが²¹⁾、転炉や二次精錬の処理中の温度測定は監視用あるいは確認用として、プローブに内装した消耗型熱電対によりバッチ方式で測定するのが主流である。今後は溶鋼温度を精度良く適中させる制御用として、製銑・製鋼工程のみならず圧延・熱処理工程において、実機化が期待される。

(2) 温度分布計測

加熱炉内の鋼材の温度を制御するために、鋼材全体あるいは炉内温度分布を測定し、鋼材の温度分布をできるだけ均一にする必要がある。昨今の品質不具合の事例を詳細に調査すると単なるチャージ全体（転炉や電気炉のおよその溶解サイズ）での異常ではなく、ブルームやビレット単位での品質バラツキ、更には同じブルームやビレットでもフロントやテール（素材の両端）とミドル部との極小位置の差に起因する不具合が散見され品質管理メッシュを一段と細かく管理する

必要性も生じている。代表温度で管理するのではなく温度分布から局所的な製品レベルも判定し、当該製品の物流を製品圧延への直行化か手入れルートへの迂回か等をインランインで決定していくシステムへの組み込みが期待される。

また、溶鋼・溶銑での精錬においても、バッチ式の代表温度にて操業管理をしているが取鍋内（レンガが内張りしてある溶鋼・溶銑の運搬容器）でも上下あるいは攪拌による流動が及ばないデッドスペースでは温度が異なり、精錬後に大きな予想温度のずれが発生し再処理を余儀なくされる場合がある。直接測温データとシュミレーションモデルとの組み合わせによる分布予測が現実的な対応技術と推定されるが、反応容器内の熔融金属の温度分布や加熱炉内の雰囲気あるいは直接的に鋼材全体の温度分布が測定あるいは推定される事が望まれる。

(3) 鋼材内温度測定

前述の(2)のニーズにも関係するが、最近の薄板、厚板、棒線製品は製鋼から圧延までまでの一貫プロセス内では加熱・塑性加工・冷却を繰り返し、その材質と品質レベルを造り込む、精緻なTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 処理が適用される鋼材が多い。材料組織学的な原理や考え方の詳細は参考文献²³⁾を参照して頂きたいが、鋼材の組織と析出物の量とサイズを素材の加熱温度、加熱時間、冷却速度、圧延加工温度により制御している。例えば、棒線製品の場合は鋼材全断面の品質保証が必要になる事が多く、ブルーム・ビレット内部の温度分布を検知しプロセス温度制御することが、自動車部材のような重要保安部品の製造に重要になると推定される。内部の直接測定技術は極めて難しいと思われるが、(2)の温度分布と同様に鋼材表面温度の計測データと熱伝導計算との組み合わせによる推定が期待される。最近では電磁超音波法やレーザー超音波法を利用した直接内部測定技術が研究されているようだ⁵⁾。

(4) 測定装置の作業性の改善

現場技術的には、前述の(1)から(3)よりむしろ、自動化や迅速化あるいは作業の省力化の観点よりメンテナンスフリーになる測定設備・装置が期待される。測定する環境は雰囲気温度や粉塵あるいは狭い場所の作業制約があり必ずしも良好ではない。従って、今後の更なる生産性の向上や操業技能の継承課題等からも測温装置の自動化やメンテナンスフリーの設備技術が重要になるとと思われる。

4 むすび

今回は既に本誌ふえらむにシリーズにて報告されている“流体計測”の温度測定分野²⁴⁾での応用とトピックスを担当させて頂いた。現場技術者と材料研究者から見た温度測定に

関する解説であり、計測関連を御専門に研究・開発されている方々には稚拙な内容である事は御容赦願いたい。鉄鋼プロセス制御は正に温度制御との闘いであり、測温技術が極めて重要である事ならびに現場的な将来ニーズについて理解していただければ幸いである。終わりに温度測定の苦心談等のヒヤリングに御協力していただいた方々に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 菅原 健, 田村譲児, 山中 敦, 黒沢 進, 大木光一, 出町 仁: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, S299.
- 2) 鉄鋼プロセスにおける鋼材温度制御, 日本鉄鋼協会熱経済技術部会編, (1995)
- 3) 田口 勇: 鉄の歴史と化学, 裳華房, (1988)
- 4) 鈴木久夫, 大野二郎: 鉄と鋼, 64 (1978) 8, 134.
- 5) 田村洋一: 鉄と鋼, 79 (1993) 7, 12.
- 6) 平田 寛: 技術の歴史, 1 (1982), 292.
- 7) 黒岩俊郎: たたら, 玉川大学出版部, (1976), 45.
- 8) 平田 寛: 技術の歴史, 5 (1982), 31.
- 9) 石塚尊俊: 鑪と鍛冶, 岩崎美術社, (1972), 192.
- 10) 鉄鋼業におけるセンサ技術, 日本鉄鋼協会センサ技術調査研究小委員会, (1988)
- 11) 新日本製鐵(株), 放射測温技術, 私信, (1987.1)
- 12) 島影 肇, 菅原 健, 宮部修一, 橋本康裕, 水野正道, 成田 津: CAMP-ISIJ, 9 (1996), 758.
- 13) 木村秀明, 岡崎照夫, 上原彰夫, 石井孝宣, 後藤 修, 坂本康裕: ふえらむ, 1 (1996) 4.
- 14) 田中富三男, 大平 尚, 増田正宏, 丸山孝一, 大浜光正: 鉄と鋼, 79 (1993) 7, 34.
- 15) 芹生浩之, 増野豈彦, 中島康久, 小川博之: 鉄と鋼, 79 (1993) 7, 27.
- 16) 恵藤文二: 室蘭ステンレス鋼の技術小史, 私信, (1978)
- 17) 神居詮正, 大久保静夫, 恵藤文二: 鉄と鋼, 63 (1977) 13, 122.
- 18) S. Satoh, I. Suzuki, T. Inoue, M. Yoshida, M. Naki and H. Ishii: Proceeding of the 113rd ISIJ Meeting, (1987), S116.
- 19) 新日本製鐵(株), 安澤典男: 私信, (2000.3)
- 20) 新日本製鐵(株), 阿部哲也: 私信, (2000.2)
- 21) 山田善郎, 大角 明, 旗手崇文, 前田浩史, 板倉 孝, 若井 造: NKK技報, (1995) 152, 22.
- 22) 新日本製鐵(株), 上野 隆: 私信, (2000.2)
- 23) 日本鋼管技報, (1981) 89, 111.
- 24) 松浦清隆, 井口 学: ふえらむ, 5 (2000) 12, 876.

(2000年8月8日受付)