

新日鐵君津における 最近の厚板製造技術の進歩

新井 勝*

はじめに

厚板製造技術は、従来の制御圧延をさらに拡大・発展させた「制御冷却（加速冷却）技術」の開発・実用化により、1980年代以降、「圧延での材質造り込み」という点において長足の進歩を遂げて来た^{1)~4)}。

一方、圧延設備面では、加熱炉改造・エッジャー新設・近接γ線設置等国内各厚板ミルにおいて、圧延関連設備の充実・更新が進められてきた⁵⁾。

君津厚板工場においても、加速冷却設備新設(1983)、加熱炉更新(1986)等の設備の充実化を鋭意推進するとともに、厚板製造技術の新たな展開を模索して来たが、今回その一端として、「厚板材質予測制御技術の開発」と「形状制御ミルの導入」について、ご紹介を行うこととしたい。

「厚板材質予測制御技術」⁶⁾は、圧延の諸過程における冶金現象を定量化し、組織・材質の予測制御⁷⁾を可能とすることを目的とする。本技術は、その基礎モデル開発を昭和58年より開始し、昭和63年に一貫材質予測シミュレーターを、さらに平成2年には当技術をベースとした厚板品質設計システムを君津製鐵所に於いて実用化するに至った。

一方、「形状制御ミル」については、平成3年に厚板として世界初のペアクロス(PC)ミルの導入を行い、クラウン制御機能をフルに活用した低クラウン・高能率圧延の実現が可能となった。

本稿では、君津厚板工場の概要を簡単にご紹介した後、上記新技術の概要と実用化状況についてご紹介したい。

君津厚板工場の概要

君津製鐵所厚板工場は、造船をはじめとする厚板需要の増大への対応を主眼として、昭和43年に操業を開始し、昭和49年には年産230万トンに及ぶ生産を達成した。その後、石油危機以降の厚板需要構造の変化に対応し、制御圧延・制御冷却技術を基盤とした高機能鋼の開発を進め、造船・建築・橋梁並びに海構材（海洋構造物用鋼材）、UO鋼管用厚板等の量産高級鋼ミルとしての地歩を固めてきた。

特に近年においては、Ti-oxideによる海構材等の高HAZ靱性鋼、耐サワーラインパイプ用鋼、建築用低YR鋼・耐火鋼等の画期的な新商品の開発により、厚板の高級化と新規需要の開拓に寄与してきた。その実用化例として横浜ランドマークタワーを図1に示す。国内最高の高さを誇る当タワーの建設においては、当工場の厚板製造技術によって開発された板厚90mmの極厚低YR鋼管柱(HT60)が用いられた。

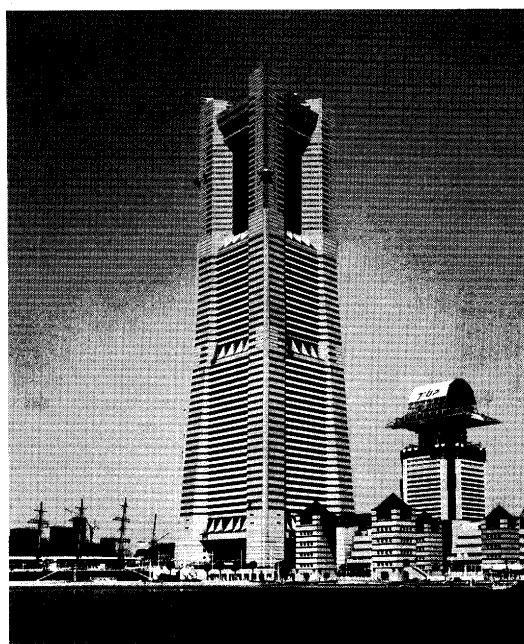


図1 横浜ランドマークタワー

厚板材質予測制御技術の開発

材質予測モデルの開発

厚板は船体、建築、橋梁、压力容器、海構材等、大型の溶接構造物に使用される。このため、材質は最も重要な特性であり、高強度・高靱性が要求されてきた。材質の制御の手段としては、古くから化学成分と熱処理が用いられてきたが、1970年代以降はTMCP (Thermo Mechanical Control Process) とマイクロアロイングが導入された⁸⁾⁹⁾。

TMCP法においては、圧延過程におけるメタラジー現象（図2）を利用するため、スラブ加熱・圧延・冷却のプロセス条件（温度、時間、圧下量）を意識的に制御する。従って、材質に関する影響因子が膨大となったため、多種多様な厚板の製造や新商品の開発において多くの困難を生じた。

このようなTMCP化を背景に、1983年から「厚板材質予測モデル」の開発に取り組み、1990年に君津厚板において実用化した^{10)~12)}。

材質予測モデルの骨格である材質モデルは、結晶粒の成長・再結晶、変態における核生成・成長、析出物の核生成・成長、ミクロ組織と材質との関係等、厚板製造の素過程（加熱・圧延・冷却）におけるミクロ現象を物理冶金的原理に基づいて表現している。

このモデルは理論的であるが、現場への適用を目的とす

* 新日本製鐵(株)君津製鐵所 熱延部長（現：本社技術企画部 担当部長）
（本稿は平成4年11月19日第97回圧延理論部会での特別講演にて発表したものです。）

る事から、成分・製造条件に対する普遍性と高い精度が要求された。このため、研究者による理論構築だけでなく、大量の現場実験を並行して実施し、モデルの妥当性の検証を行った。また、圧延ラインにプラズマ切断機を設置し、圧延途中の鋼板から小片を切断・急冷することにより、現場圧延中のオーステナイト粒径を実測した(図3)⁶⁾¹³⁾。

現場材においては温度や圧延歪が、時刻及び鋼材の各部位により異なっている。このため温度変化と歪を計算するプロセス条件モデルを併せて開発した。

材質予測モデルの概要¹³⁾¹⁴⁾

材質予測モデルは2種類の基本モデルにより構成される。第1は物理冶金的原理による冶金モデルであり、第2はプロセスモデルである。この2つのモデルを結合する事により、厚板製造(加熱・圧延・冷却)途中のメタラジック的变化を逐一計算し、最終結果として材質の予測が可能となる。その全体構成を図4に示す。

冶金モデルは、①初期状態(加熱工程)⁶⁾¹⁵⁾②熱間加工(圧延工程)¹⁶⁾③析出(圧延工程)¹⁷⁾④変態(冷却工程)¹⁸⁾⑤組

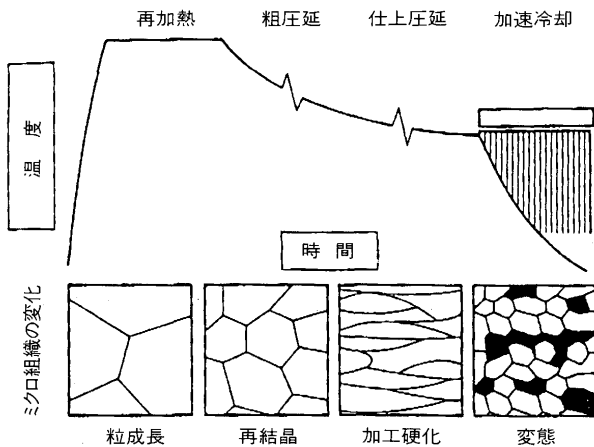


図2 TMCPプロセスにおける組織変化の模式図

織材質¹⁶⁾¹⁹⁾の各モデルにより構成されている。モデルの内容は回帰式でなく、熱力学と転位論に立脚しており、結晶粒(γ , α)の核生成・成長、圧延時の転位密度変化と γ 再結晶、析出物の溶解と析出、破壊力学等マイクロ現象を理論式により表現している。

プロセスモデルは、①スラブ加熱時の温度②圧延中の温度③圧延時の歪④冷却中の温度の各モデルにより構成される。温度・歪は加工中の材料の各部分(厚・幅・長)について時刻毎に計算できる。

鋼材のミクロ的な変化と材質は、プロセスモデルによって計算される温度・圧延歪・歪速度を使用して、冶金モデルにより計算される。

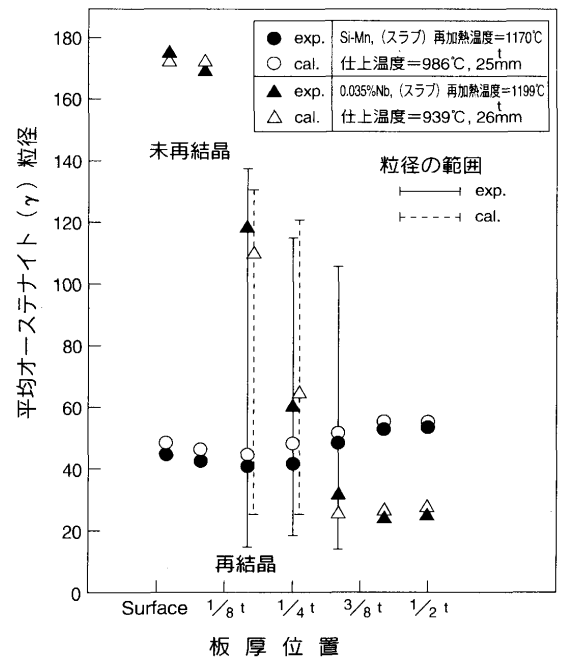


図3 鋼板板厚方向における γ 粒径の変化

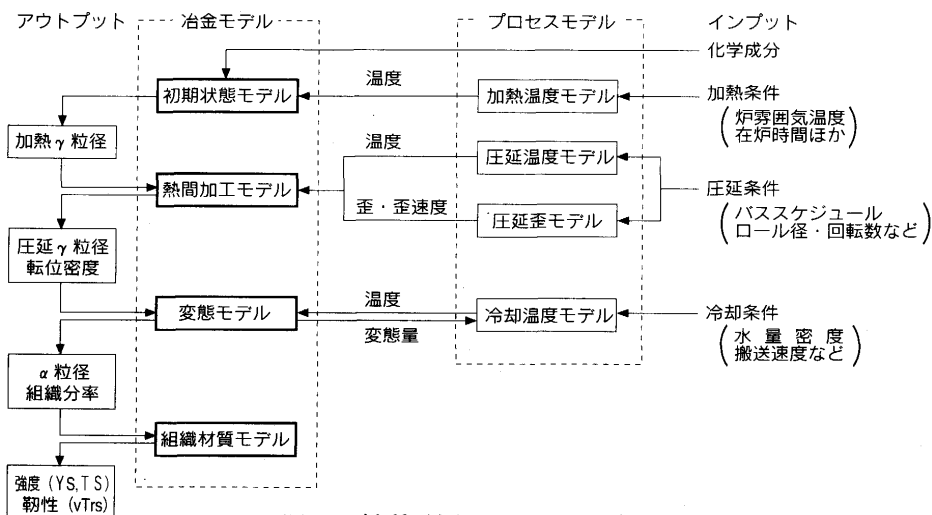


図4 材質予測モデルの全体構成

材質予測モデルの特徴

材質予測モデルは次のような特徴を有している。

- (1) 成分やプロセス条件の広い範囲にわたって適用でき、しかも強度 $\pm 20\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $v\text{Trs} \pm 20^\circ\text{C}$ の高い精度を有している。
- (2) 厚板製造途中の刻々のメタラジ的変化、及び鋼材の任意の部位の材質の計算が可能である。
- (3) 化学成分・プロセス条件の検討が必要な「製造可否検討、品質設計、製造条件改善、新商品開発」が、実験なしにコンピュータ計算により可能となった。
- (4) 製造途中の成分・プロセス条件実績をフィードフォワード制御に利用する事により、材質を狭レンジに制御する事が可能になる。
- (5) 変態進行による発熱を厳密に考慮した鋼板温度計算や、未再結晶域圧延における圧延反力の予測が可能になる。

材質予測モデルの活用

材質予測モデルの活用例

(1) 新商品開発

1987年に君津厚板が開発した建築用TMCP鋼は、従来のTMCP鋼では不可能であった「低YR」を実現する事により生み出された。YR(=YP/TS)低下のためには、水冷によって生じるベイナイトでTSを確保し、水冷前にフェライトを生成させて低YP化すればよいと発想された。実際に製造するためにはすべての特性(YP, TS, 靱性等)の目標値を満足する製造条件(成分、加熱、圧延、冷却条件)を絞りこまなければならない。その際、材質予測モデルを利用して各種の条件における材質を計算し、適正条件を決定した。その結果を使って現場試験を行い、わずか3ヶ月で建築用TMCP鋼の開発を完了した。

(2) 品質設計システム¹²⁾²⁰⁾

新規注文の製造可否検討や品質設計(新規注文に対する成分・プロセス条件決定)は、過去のデータや経験により行われてきたが、材質予測モデルを組み込んだ品質設計システムを実用化した(図5)。

このシステムの第1段階は、過去のデータにより品質設計できる場合で、AI(エキスパートシステム)を利用している。これが不可能の場合、第2段階として材質予測モデルを利用した品質設計を行う。このシステムにより製造可否検討、品質設計の迅速化が可能となった。

材質予測モデルの今後の発展

(1) 他の品種への拡大

材質予測モデルは経験式・回帰式ではないので、製造ミルや品種が異なってもモデルの適用が可能である。すでに他製鉄所厚板や形鋼・薄板においても、そのまま活用されている。

(2) オンライン材質制御

溶接性に優れた高強度鋼、低YR鋼、また狭YP鋼の要求

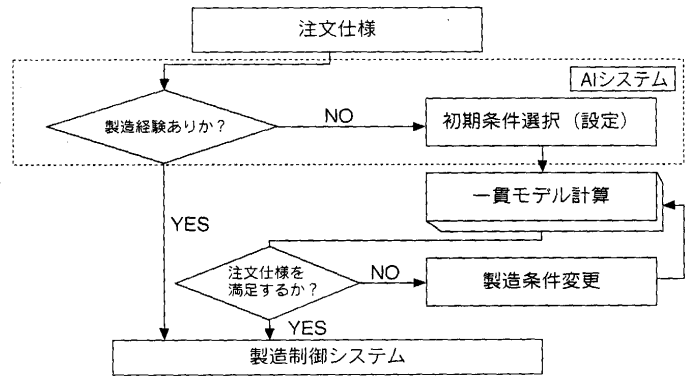


図5 品質設計システムの概要

は今後も強まると思われる。これらを製造するために、より一層きめ細かな製造条件の制御が必要となる。その場合人による製造条件設定では限界があり、コンピュータに組み込んだ材質予測モデルによる制御が有効な手段となるであろう。

(3) 課題

現在のモデルは、生産量で8割を占めるTS600N/ mm^2 級以下の圧延まま及びTMCP鋼が適用可能範囲である。今後、より高強度鋼や熱処理鋼への拡大を図る必要がある。

形状制御ミル(PCミル)の導入

導入の狙い

君津厚板工場では、プレートクラウン低減、圧延形状の改善ならびに、圧延能率向上を目的として厚板として初めての仕上圧延機のベアクロス(PC)化改造を平成3年11月に完了した。

PCミルでは自由にロールクラウンを制御でき、次のような特徴を有している。

(1) 広範囲な形状・クラウン制御範囲

PCミルではワークロール(WR)、バックアップロール(BUR)をベアでクロスしてロールクラウンを制御する原理であるために、シフトミルで問題となるロール端部での面圧上昇がなく、従来の4Hiミルと同等のロール材質を用いることができ、しかも広範囲な形状・クラウン制御範囲を有する。

(2) 高圧下圧延

PCミルは自由にロールカーブを制御できるために、仕上ミル後段パスで圧延荷重を制限する必要がないので高圧下圧延が可能となる。特にリバースミルの厚板圧延では高圧下圧延によりパス回数を減少することができ、圧延能率の大幅な向上が可能となる。

PC圧延機の概要とクラウン制御の考え方

PC仕上圧延機の外観図を図6に示す。厚板のような高圧延荷重・大規模圧延機へのベアクロス機構の導入は初めてであり、また既設ミルからの改造であることから細部にわたる設計検討を行い、実機化が実現した。

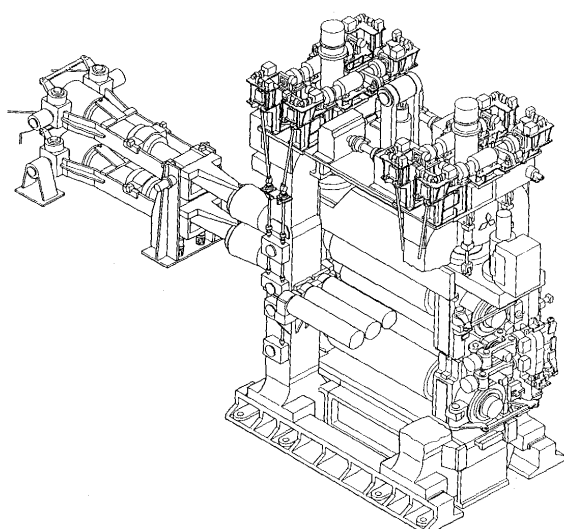


図6 君津厚板仕上PC圧延機

設備主仕様を表1に示す。
ペアクロス圧延機では、上下の圧延ロールを圧延方向に対してペアクロスさせることにより、等価クラウン量を制御するものであり、等価クラウン量は式(1)に示すように板幅bの二乗に比例する。したがって、図7に示すように厚板のように板幅が非常に大きい（ミル有効胴長4724mm）圧延材に対してPCミルを適用すると、クラウン制御範囲が格段に拡大する。

パス毎にクロス角度を適切に設定することにより、圧延荷重とは独立に圧延幅に応じた適正なクラウン・形状の制御が可能となる。さらに、従来の厚板圧延における形状調整パス²²⁾（クラウン・形状を確保するための軽圧下圧延）の撤廃を行うことが可能となった。

また、本圧延機ではバー内での形状・クラウン制御補正を行うために、ワークロールベンダ(WRB)を設置している。

ペアクロスミルの制御システムでは、圧延材料温度、圧延荷重²³⁾、板厚²⁴⁾、クラウン、クラウン比率変化および圧延形状（急峻度）²⁵⁾をプロセスコンピュータ内の各要素モデルにより予測し、各々が最適な値となるように、圧下パターン、クロス角度、WRB圧力等の設定を行う。さらに、各パスにおいて、温度、荷重、板厚クラウンの実績を学習することにより、モデル予測値修正を行い、高精度な形状制御圧延²⁶⁾を実現している。

実用化状況

図8にペアクロス圧延導入による効果として、プレートクラウンの低減例を示す。従来に対して全幅サイズに応じて均一なクラウンの造り込みが可能となった。

次に、圧延パス回数の減少効果例を図9に示す。PCミルによって従来の形状調整のための軽圧下パスを撤廃できており、いずれのサイズにおいてもパス回数の削減効果が得られた。

表1 主要設備仕様

設備主仕様	ミル形式	4段可逆式ペアクロスミル
	圧延荷重	常用最大 7,000tonf
	ロール	(W R) φ1020/ 950×有効胴長4724mm (BUR) φ2020/1850×有効胴長4597mm
	ミル駆動動力	(容 量) 6,500KW×2 (定格トルク) 127 Ton・m×2
	クロス駆動方式	(設定角度) 0°~1.0°/Roll (設定精度) 0.003° (設定速度) 0.092°/秒
ワークロールベンダー装置	TOP	max. 110 Ton/chock φ254mm
	BOT	max. 90 Ton/chock φ200mm

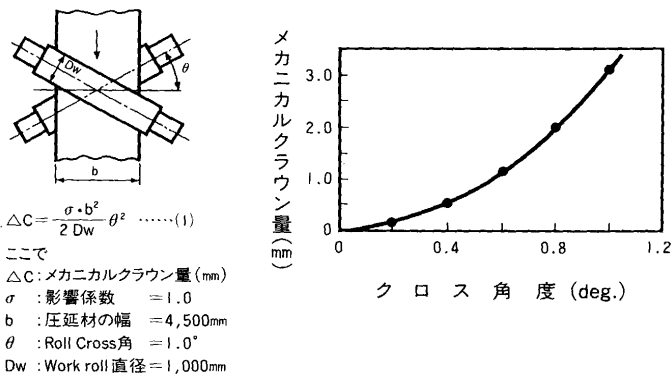


図7 ペアクロスによるクラウン制御の考え方

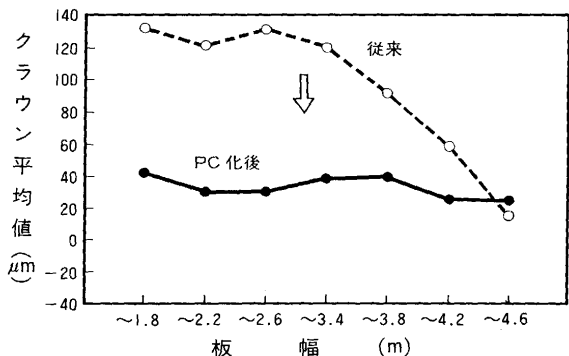


図8 板幅別クラウンの改善状況

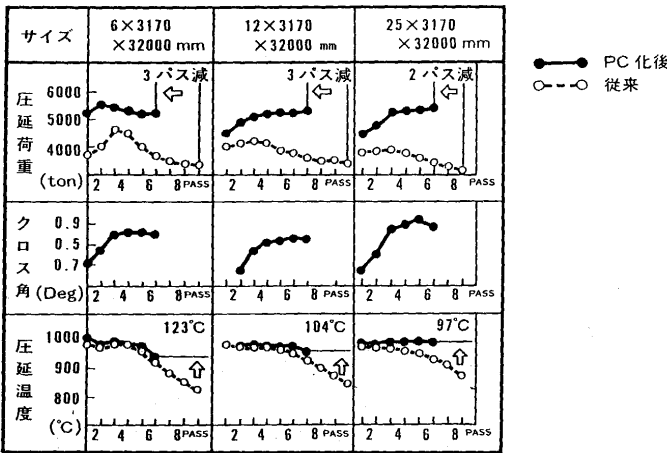


図9 PC化によるパススケジュールの削減例



図10 一般材圧延T/Hの推移

さらに、パス回数削減の結果として一般材の圧延能率の改善推移を図10に示す。仕上圧延時間の短縮は圧延能率の改善に顕著な効果を発揮し、高効率圧延を実現化した。

おわりに

今回、新日鐵君津における厚板製造技術の進歩と題して、「厚板材質予測制御技術」と「形状制御ミル」について、その概要をご紹介した。前者については、今後、適用鋼種の拡大とともに、材質予測から材質制御への展開を図りたい。また、後者については、形状制御ミルを中核とした高精度・高品質造り込み技術の開発を進めたい。これら二つの技術の結合により、新商品の開発はもとより、狙い通りの厚板が狙い通りに造れる究極の厚板製造技術の実現を目指し、今後の厚板製造技術の発展に寄与する所存である。

文 献

- 1) 関根 寛：第86・87回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），（1982），p.123
- 2) Proc. Inc. Symp. on Accelerated Cooling of Steel, ed. by P.D. Southwick, (1986), [AIME, Pittsburgh.]
- 3) Proc. Inc. Symp. on Accelerated Cooling of Rolled Steel, ed.

- by G.D.Ruddle and A.F.Crawly, (1988), [CIM, Winnipeg]
- 4) K.Okamoto, A.Yosihie and H.Nakao: Proc. Int. Symp. on Physical Metallurgy for Direct-Quenched Steels, ed. by K.A. Taylor, (1992), [TMS-ASMI, Chicago.]
- 5) 井上正敏：塑性と加工，32（1991），p.402
- 6) 森川博文，吉江淳彦，藤岡政昭：材質の制御と予測（日本鉄鋼協会熱延プロセス冶金委員会編），（1988），p.165
- 7) 例えば，矢田浩：塑性と加工，28（1987），p.413
- 8) Microalloying 75, ed. by M.Korchynsky, (1977), [Union Carbide Corp.]
- 9) 第104・105回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），（1985）
- 10) 吉江淳彦，藤岡政昭，尾上泰光，渡部義之，西岡潔，下村慎一，船戸和夫，村井芳夫：材料とプロセス4（1991），p.1959
- 11) 渡部義之，為広博，下村慎一，船戸和夫，西岡潔，藤岡政昭，吉江淳彦：材料とプロセス4（1991），p.1960
- 12) 下村慎一，船戸和夫，小松伸行，高井光夫，渡部義之，吉江淳彦，藤岡政昭：材料とプロセス4（1991），p.1961
- 13) Y.Watanabe, S.Shimomura, K.Funato, K.Nishioka, A.Yoshie and M.Fujioka, : ISIJ Int.,32（1992），p.405
- 14) A.Yoshie, M.Fujioka, Y.Watanabe, K.Nishioka and H.Morikawa : ISIJ Int.,32（1992），p.395
- 15) 藤岡政昭，吉江淳彦，森川博文，末広正芳：材料とプロセス2（1989），p.672
- 16) A.Yoshie, Y.Onoe, H.Morikawa and K.Itoh : ISIJ, Int, 27（1986），p.425
- 17) 赤松聡，松村義一，瀬沼武秀，矢田浩，石川信二：鉄と鋼，75（1989），p.933
- 18) 藤岡政昭，吉江淳彦，藤田崇史，尾上泰光，森川博文，土井直己：材料とプロセス3（1990），p.1975
- 19) 西岡潔，寺田好男，今草倍正名：鉄と鋼，72（1986），S1464
- 20) A.Yoshie, M.Fujioka, : Computer Aided Innovation of New Materials II (CAMSE'92), ed. by M.Doyama, J.Kihara, M.Tanabe and R.Yamamoto, (1993), p.1485
- 21) 中野恒夫，大園隆一，荒谷博史，塚本頼彦，森本和夫：三菱重工技報，29（1992）
- 22) 湖海克明，加方幸博，阿高松男，中島浩衛：塑性と加工，25（1984），p.981
- 23) 八田夏夫，小門純一：塑性と加工，21（1980），p.59
- 24) 大力 修，間瀬秀里，出川一郎，中村秀夫：製鉄研究326号，（1987），p.11
- 25) 升田貞和，平沢猛志，市之瀬弘之，平部謙二，小川幸文，鎌田正誠：鉄と鋼，67（1981），p.2433
- 26) 小川 茂，松本結美，浜渦修一，菊間敏夫：塑性と加工，25（1984），p.1034

（平成5年6月1日受付）

無機材料の製造・品質管理における 高速分析システム

望月 正 NKK基盤技術研究所

はじめに

無機材料の製造・品質管理分析においては様々な分析方法が用いられているが、材料の高級化・多様化、更にそれを製造するプロセスの連続化・省力化・省資源化に伴い、分析速度や精度・正確さの向上、定量下限の拡大、更に自動化といった分析性能の向上が強く要請されるようになった。例えば、鉄鋼の製造管理分析においては、秒単位での

迅速性が必要なため真空型直読式スパーク発光分析法（分析所要時間は試料調整を含め数分以内）が活躍しているが、鋼製造プロセスの一層の合理化や自動化を実現したり、清浄鋼などの高級鋼を生産するためには、より速く、より高感度な分析技術が必要となっている。

著者は、これまでに様々な着想に立ってこれらの課題に取り組んできた。例えば、連続的な流れを利用した化学分析の迅速化・自動化（Flow Injection Analysis；FIA法）、