



アラカルト

製鉄技術と基礎学問

—技術者としての心構え—

Steelmaking Technology and Fundamental Study

—Mental Attitude as Engineer—

王寺睦満
Mutsumi Ohji

(社)日本鉄鋼協会 会長
新日本製鐵(株) 代表取締役副社長

1 近年の鉄鋼技術の進展

はじめに、我が国において、鉄鋼業の中心的な技術がどのように新技術を開発してきたかを概観してみたい。

鋼の生産量は、戦後1973年までにかけて飛躍的に伸び、年間1.2億トンの粗鋼生産をするまでに到った。しかし、この伸張期は、新しい能力を追加するための技術導入をやりながら、段階的な単位設備規模の拡大を世界の先端を切って実現するという事が主体であった。例えば、製鉄技術で見れば、高炉の炉内容積は76年には現在の最大でもある5,000m³級に達している。確かに、世界に先駆けて、大型高能率の設備を設置し動かして行くという事自体、大きな技術的挑戦を含んでいるが、この段階の技術は、新しい設備を経験的に稼働させて行くといった色彩が強い。

これに対して、新プロセスや新製品を開発し、提供していくといった本来的な技術開発の観点から見ると、この時期はあまり活発であった様には感じられず、技術の進展開発はむしろ、最初のピークを過ぎ、安定成長の時代に入ってからの方が密度が高い様に感じられる。

製鋼技術について見れば、製鋼能力を大幅に伸長させた1960年代にちょうど開発実用化されたばかりの純酸素上吹き転炉を全面的に採用することが出来たという幸運はあるものの、色々の新しいプロセスは、やはり70年代の半ば以降、密度高く実用化されている。また、この工程で注目すべきは連続鑄造技術の急速な普及で、一貫歩留まりを10%も上げるといった画期的なものであったが、一方で、製鋼屋が品質の制御を初めて手の内に入れたという事にむしろ大きな意味があると考えられる。

圧延技術の進展を大胆に概括すれば、連続化、検出端の開発、操作端の高度化、計算機の適用、自動化による生産性、

品質の高度化ということになる。

これらの結果、現在では、多様な製品、商品技術が開発され、我が国の諸工業は世界最高の性能・品質を持った鉄鋼材料を使う事が出来るようになった。このような、めざましい技術の進展があった直接的な理由としては、鉄鋼マーケットは強い競争環境にあることと、鉄鋼ユーザー各社の技術的、経営的ステイタスが高く、鉄鋼産業各社は、顧客の要求に無条件にこたえる形が出来上がっていることを認識すべきであろう。

2 鉄鋼業におけるコア技術と基礎学術

鉄鋼業は、材料冶金、機械加工、熱流体、表面化学から、電気工学、計算機制御、環境・エネルギー、製造管理、品質管理に至る多くの分野の技術の集大成で成り立っている。鉄鋼製造、製品技術は世界最高レベルにあるが、これらはコア技術としてどういう技術に依存しているか、またそれらのコア技術を進歩させる為にどのような学問を基礎においているかを大胆に整理してみたのが表1である。

技術、製造技術というものは、概ね現象論の世界で勝負している。しかし、この目の前の現象を理論的に解明し、出来るだけ演繹的に説明できるようにするという事が技術者に求められる。次節でいくつかの例をもって説明するが、現実の製造工程で起こっている事は大変な複雑系で進行する。これを理論的に記述し、どうやって正確な予測をするかが、ものの製造に携わる技術者に求められる。そのためには、例えば化学熱力学を代表とする学問を現実の現象の中に実際に応用できる能力が勝負を決する。学問を、理論を、習っただけでは不十分で、その理論を自在に使える能力が求められる。

注) 第24回鉄鋼工学セミナーで行われた教養講座(2000年8月1日)をアラカルト記事におこしたものです。

表1 鉄鋼業でのコア技術とそれを支える学問分野

	コア技術	学問分野
プロセス技術 製鉄、製鋼、 圧延、表面処理	鉱石・石炭事前処理技術、石炭乾留制御、 焼結反応制御、高炉装入分布制御、 高炉反応制御、精錬反応制御、介在物制御、 電磁気利用、凝固制御、塑性加工、 圧延形状制御、冷却制御、加熱制御、スケール制御	化学熱力学、反応工学、流体力学、伝熱工学、 粉体工学、金属組織学、材料力学、制御工学
材料技術 薄板、厚板、 鋼管、形鋼、 棒線、ステンレス、 電磁、めっき	組織制御、析出物制御、材質制御、スケール制御、 オキサイド/メタラジー、遅れ破壊制御、耐食性制御、 磁区制御、界面制御、酸化皮膜制御、 塗装樹脂設計	金属組織学、化学熱力学、材料力学、 磁気物理学、表面化学、高分子化学
利用加工技術 土木、建築、 自動車、家電、 容器	耐震・耐火設計、大型構造設計、継手設計、 塗覆装、溶接冶金反応制御、成形解析、 切削性制御、延性・脆性破壊制御、 疲労破壊制御、環境破壊制御、衝突安全性評価、 非破壊診断技術、制振・防音技術	土木建築学、材料力学、溶接冶金工学 破壊力学、表面化学、数値解析科学
関連技術 環境・エネルギー 要素技術 機械・熱技術、 計測、炉材 共通支援技術 分析、数値計算	水処理、防塵・吸着、触媒還元、石炭熱分解、 排熱回収、通電加熱、流体制御、燃焼制御、 冷却制御、温度計測、傷計測、形状測定、 画像処理、パワーレーザー、耐火物技術、 微量元素分析、表面物性解析、組織構造解析、 構造体解析、熱流体解析	反応工学、流体力学、伝熱工学、材料力学、 計測工学、光工学、無機材料化学、分析化学、 数値解析科学

3 鉄鋼技術開発における理論適用例

3.1 製鋼における計算熱力学の応用例

製鋼反応を研究する場合には二つコア技術が必要となる。一つはすべての場合で共通に必要な熱力学である。熱力学の研究は、単純系では数多く行われているけれども、実際に必要とするのは、多相多成分系の熱力学であり、学術的にもまだまだ十分に解明されているとは言えない分野である。もう一つは、反応速度や移動速度であり、これは非平衡系の場合に特に必要となる。

熱力学について見ると、多くの相を含んだ多元系酸化物での組成制御は、非常に高度な技術を要し、CALPHADつまり計算状態図手法を用いる必要がある。図1に示すように、CALPHAD手法の体系の中で、多元系酸化物融体の熱力学特性を記述する熱力学モデルの開発が行なわれ、SOLGAS-

MIX¹⁾やThermo-Calc²⁾等の平衡計算プログラムと組み合わせて、スラッグの状態図の計算やスラッグ/溶鋼平衡計算および介在物組成計算を行い、製鋼操業の適正化に役立ててきている。ここで、多元系介在物の平衡析出の計算には、セルモデルを用いている³⁾。このモデルは、多元系酸化物液体中の成分活量を計算するモデルであり、陽イオン-陰イオン-陽イオンのセルを酸化物の基本構成単位と考え、陽イオン同志の相互作用の大きさから、陽イオンの会合確率を評価して、エントロピーを計算するものである。このモデルは、多元系酸化物の状態図や、精錬スラッグの精錬能をきわめて精度良く計算できることが確認されている。さらに、このような平衡計算に加えて、精錬反応モデルや鋼凝固モデルを組み合わせ、プロセスのシミュレーションへの拡張にも取り組んでいる。以下で、その適用事例を紹介する。

3.1.1 介在物無害化技術⁴⁾

SUS304の極細線は、連続鋳造プロセスによって鋳造した後、圧延プロセスで5.5mmφの線材を得、その後、二次伸線メーカーによって、最終的には、100μm以下の極細線に線引きされる。このため、鋼中に有害な硬質介在物があれば、線引きの時にそれが起因となって破断してしまうため、介在物を軟質で無害な組成に制御することが厳しく要求される。

鋼中の非金属介在物は、多くの酸化物を含んだ多元系であるため、その組成制御は高度な技術を要する。そこで、計算熱力学を駆使して、ステンレス鋼凝固中の介在物の組成変化を計算し、鋼材中の介在物の最終的な組成をシミュレートした。

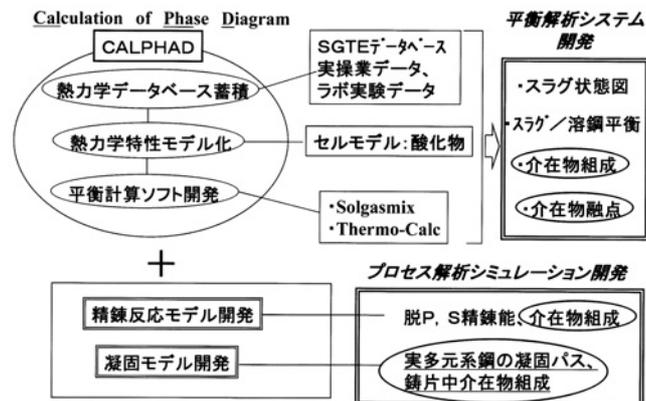


図1 計算熱力学手法によるスラッグ・介在物の解析

図2に、そのシミュレーション計算の概要を示す。これは、まず、デンドライト樹間におけるマイクロ偏析を計算し、次いで、残溶鋼中の介在物の析出反応を平衡を仮定して平衡析出プログラムにより計算し、析出した介在物は、鋼の凝固中に、逐次、鋼固相に取り込まれ、その後は反応を起こさずにそのままの組成で鑄片に残存するとして、介在物組成をシミュレーションする方法である。この計算プログラムにより、鋼成分値と冷却速度の条件を入力することにより、鑄片中の介在物の組成と量が計算できる。

図3は、各酸素濃度の鋼で生成した介在物が、鑄片に取り込まれた後に温度が低下する時に析出する相を計算した結果であるが、以下のことが分かる。

1) 酸素が40ppmの場合は、 Al_2O_3 濃度が高いために、高

融点・硬質で非常に有害な相として知られている、 Al_2O_3 や $MgO \cdot Al_2O_3$ がかなりの量析出する。

2) 酸素が80ppm以上では、液相線温度は大きくは下がらないものの、線材の圧延温度(1520K近傍)では液相率が高く介在物は延性に富むと評価でき、また、硬質相の析出も見られない。

よって、伸線時の断線を防止するためには、低酸素化して強脱酸化するのではなくて、酸素濃度を80ppm程度以上の弱脱酸制御が重要だということになる。

この考え方にに基づき、各酸素濃度に脱酸制御した鋼を、線材圧延した後に介在物の大きさを調べると、低酸素強脱酸の場合には Al_2O_3 等の硬質介在物の存在により大径のものが残存していたが、弱脱酸化することにより介在物の軟質化が達

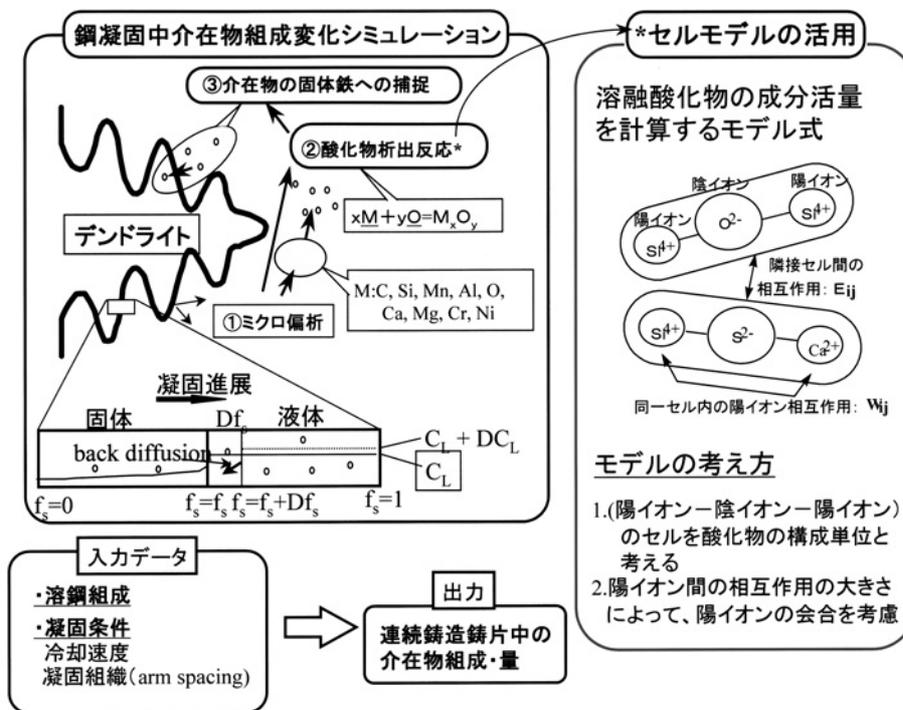


図2 介在物組成変化のシミュレーションモデル

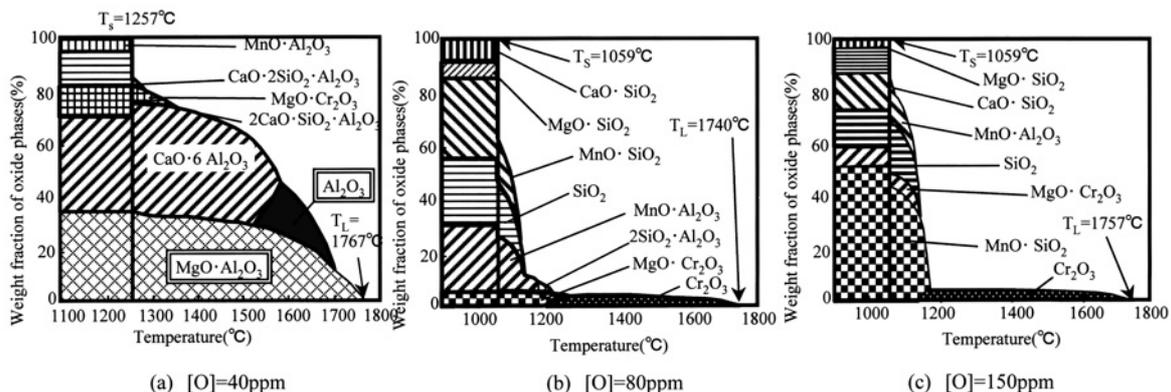


図3 鋼固相に取り込まれた介在物の析出相の計算結果

成され無害化が達成できた。

この例のように、実用鋼において複合脱酸が行われるものでは、非金属介在物組成は必然的に多元系組成となるため、今回用いたような「CALPHAD」あるいは「計算熱力学」的手法は、介在物適正制御のための操業設計に強力な武器となる。

3.1.2 スラグ/メタル反応

脱磷反応を中心とする転炉の精錬反応についての計算状態図を用いた考え方を紹介する。

通常、塩基性製鋼スラグを考える時、必ずCaO-SiO₂-FeOの単純三元系状態図上にプロットを置いて考えるが、これを、転炉精錬スラグが通常持っている成分を含ませて、前記の熱力学モデルを組み込んだSOLGASMIXを使って正確な液相線とその平衡固相を計算し描いてみたのが図4である。一般的には単純塩基度 (CaO/SiO₂) は3以上で操業しており、最近のように熔銑予備処理が一般化すると炉の中に持ち込むSiが圧倒的に少なくなる関係で、塩基度は更にあがる傾向にある。このことは、この図からわかるように、CaO隅の3CaO・SiO₂の山の真っ只中で操業をしている事になる。いわんやMgOが6%程度も入るとMgOの液相線が一番にせり出してくる。

つまり、このように固液共存の不均質な状態のスラグに対して、これまでやってきたように、全体平均組成としての分析しかせず、その値をベースに平衡論を展開してよいのかという問題がある。

熔銑予備処理温度領域においても同様であり、さらに、銑鉄中の炭素による、スラグのFeOの間断ない還元を進行を考えると、このプロセスでは混相による、反応の維持が積極的な働きをしている可能性があるため、混相状態の系の正確な理論的な記述が是非必要であると考えられる。

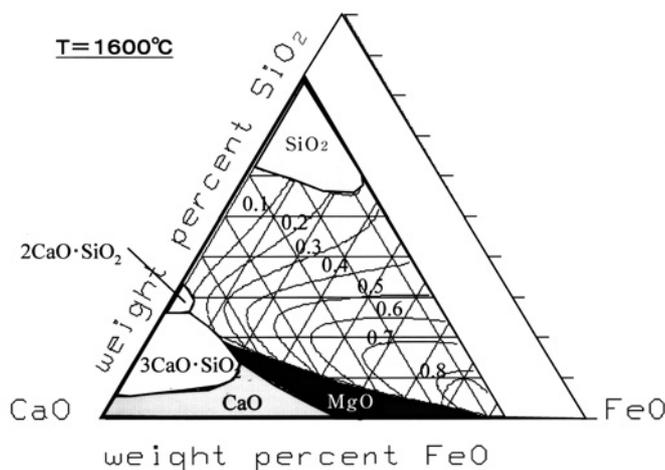


図4 現実精錬スラグ成分における液相線とFeO等量線

3.1.3 脱酸設計

小断面ピレット製造では、浸漬ノズルを用いない、いわゆるオープン製造が用いられることが多い。オープン製造の場合、非常に大きな再酸化があり、そのため、鋳片表面に気泡性欠陥が生じる。

気泡はCOガスが主成分なので、気泡発生限界酸素濃度は炭素濃度に依存する。中炭シリコンキルド鋼の代表として炭素を0.23%とすると、気泡性欠陥を防止するにはモールドで酸素を43ppm以下にする必要がある。一方、Si-Mn脱酸のみでの到達酸素濃度を計算すると、本鋼種のスペック上限までSi、Mn濃度をあげても48ppmまでしか下がらず、気泡性欠陥防止条件をクリアすることはできない。したがってこれを防止するためには、あらかじめタンディッシュ溶鋼の脱酸を強化する必要があるが、Alのような強脱酸元素を用いると、Al₂O₃のような硬質介在物が生成し、径の細いノズル内壁に付着し、閉塞させてしまう。そこで、溶鋼の低酸素化と介在物の低融点化を同時に満たす脱酸方法として、Ti-Ca脱酸を選択した。Ti脱酸したときの脱酸生成物はTi₂O₃でこれもAl₂O₃同様高融点でノズル閉塞の原因となるが、Ti₂O₃はAl₂O₃に比べて少量のCaで低融点化することができる。なお、オープン製造では、タンディッシュからモールドの間の酸素ピックアップは20ppm程度であり、気泡性欠陥防止のためにはタンディッシュでの酸素濃度を23ppm以下にしておかなければならない。

低酸素化とノズル閉塞防止のための適正Ti濃度を計算熱力学手法を用いて計算した結果、図5のように、Ti濃度を上げると酸素が低減するが、上げすぎると高融点のTi₂O₃が晶出するため、適正Ti濃度は80~200ppmであることがわかった。このTi濃度範囲で操業した結果、Ti-Ca脱酸を付加することで酸素濃度を下げ、ピンホールの個数を低減する事ができた上に、溶鋼中介在物も低融点組成になっており、ノズル閉塞も抑制することができた。

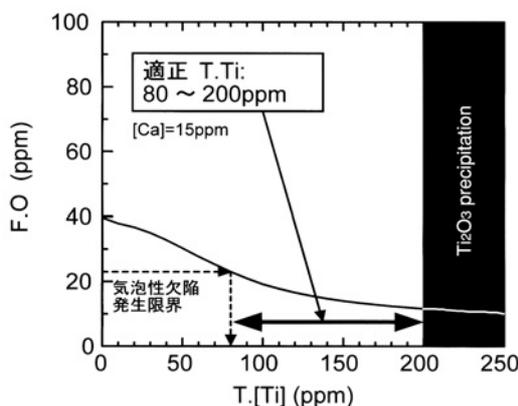


図5 Ti-Ca脱酸による気泡性欠陥とノズル閉塞防止 (F・O：酸素濃度、T・[Ti]：全チタン濃度)

3.2 高炉操業の技術開発

高炉は、炉内の最大直径が約17m、炉内の高さが約40m、内容積が5,000m³もある巨大なものであり、1日あたり10,000t以上の生産をし、炉の稼働率は95%以上、炉の寿命は15年以上という、真に驚異的な反応容器である。コークスは、羽口前のレースウェイ（燃焼帯）にて、熱風中酸素によって燃焼し、この部分の燃焼ガスの温度は2300K以上となる。燃焼ガスは高炉の中を層状の装入物の間を縫って早いスピードで上昇しながら、熱交換を果たし、酸化鉄を還元し、ほぼ8sで炉頂に達する。炉頂に達したガスは温度400K程度で、いかに大量迅速な熱交換が行われているかが分かる。

10,000t/dを生産する高炉では、装入された原料がほぼ8hのうちに還元され熔銑として炉底から出てくる。この間に高炉内では、ガス-ガス反応、Si移行反応、スラゲーマタル反応等、気固反応、気気反応、固液反応、液液反応など、複雑な反応が生じ、また、炉内で還元のプロセスで発生する粉の挙動などの解明も、ガス流れの制御には重要な課題である。

このような複雑な反応過程をコントロールする為に持っている操作手段ははなはだ限られたもので、装入物のコークス、焼結鉱の炉頂におけるばらまき方、羽口から吹き込む熱風及び微粉炭の流量、程度でしかない。しかも、炉内で何が起きているかは直接見る事は出来ないわけで、せいぜい各所に突っ込んだゾンデによるガス温度、成分分布、炉壁の温度などが、検出端として用いられるに過ぎない。

高炉操業技術の安定向上のために、これらの複雑系の反応等を連成した高炉のトータルモデルの開発とシミュレーションによる現場適用が、ここ20年程度継続して推進されてい

る(図6)^{5, 6)}。ここでは熱力学はもちろんのこと、鉱物学的組織論、粉体工学、流体力学、土質力学の幅広い学問体系が応用されており、現時点では、複雑な高炉内現象を、最も精度良く表現できるモデルが作られている。しかし、この分野の研究開発は当分続き、将来は自動制御に近いレベルまで開発する必要がある。

図7は、炉頂の装入物分布、すなわち、鉱石とコークスのばらまき方を変えた場合の高炉内現象を高炉トータルモデルで推定したもので、右が温度で、左が鉱石の還元率を示し、黒で塗りつぶした部分が融着帯である。これは、どちらが良いというのではなく、指向する操業によって操業者が選択するものであるが、一般的には高生産性操業のため、安定した中心流を確保した右側の操業を指向する傾向がある。この場合、周辺部の還元が悪くならないように焼結鉱やコークスの

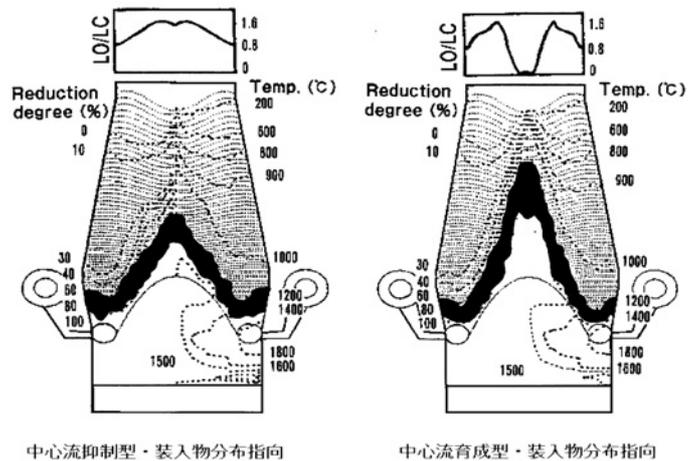


図7 高炉炉内総合シミュレーションモデル (BRIGHT Model)
(LO/LC: 鉱石層厚/コークス層厚)

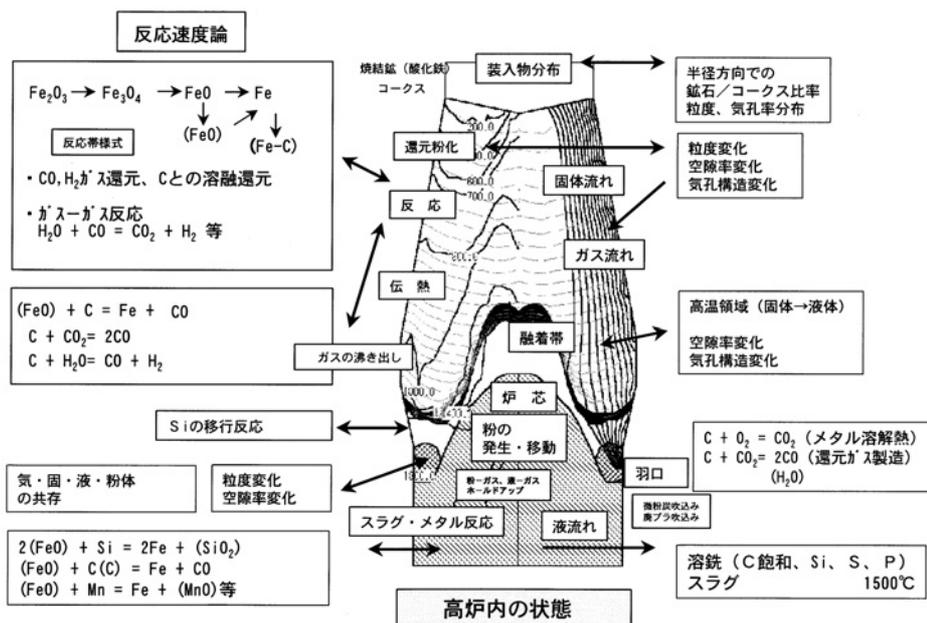


図6 高炉操業の技術

品質に注意を払う必要がある。

ここで示すモデルシミュレーションにあるように、高炉トータルモデルは炉内現象の推定に活用されてはいるが、まだまだ課題は多く、さらなる精度向上が必要である。

3.3 熱延の高精度板厚制御技術の開発

自動車を始め最終製品の軽量化が進行している現在、少しでも薄い鋼板を使用するため、従来以上に板厚精度の良好な鋼板に対するニーズが強まっている。

熱延工場における板厚制御は、圧延材先端部板厚精度を左右するミルセットアップ機能と、先端部を除いた残りの定常部の板厚精度を左右する自動板厚制御機能 (Automatic Gauge Control : AGC) の二つの機能に大別されるが、何れの機能においても数千トンにおよぶ圧延荷重に起因する圧延機変形のオンライン計算精度が板厚高精度化のポイントとなる。

従来は、このような圧延機変形のうち、ロール変形をオンラインで詳細に計算することは不可能と考えられており、圧延機を単純なバネで近似し、圧延によって生ずる負荷に比例して、ほぼ一律にロール変位が決まるという前提条件で圧延機の設定計算を実行していた。このような状況を打破するためには、オンラインで正確にロールたわみおよびロール偏平変形を計算する方法を開発することが必要となっていたが、ロールたわみを計算する際、圧延材～作業ロール間荷重が圧延理論で与えられたとしても、ロールたわみを計算するために必要なロール間荷重分布が未知であるという不静定問題を解かなければならないことが大きな問題であった。

そこで、未知のロール間荷重分布について、力学的に平衡条件を満足する直線分布荷重と仮定した単純たわみ状態を導入し、そして単純たわみ状態におけるロールたわみを材料力学で計算した後、単純たわみ状態と実圧延状態の相違点であるロール間隙の不整合の影響を、力学的考察に基づいて算出し重ね合わせることで各ロールたわみを計算するという、新しい手法が開発された (図8) ⁷⁾。この手法の開発によって、簡易計算式でありながら、マトリクス演算のような数値解析と同等のロールたわみ計算精度を得ることが可能となった。

この計算モデルは、圧延機の変形をオンラインで理論的に計算することができるため、圧延荷重に対するミル変形の非線形性を正確に計算できる上、板厚におよぼすあらゆる要因を考慮することができるので、飛躍的に計算精度が向上した。

その結果、圧延機のロードセル荷重の測定値を基に、圧延機出側の板厚の絶対値を高精度に演算することが可能となり、非常に応答が速く圧延材先端部より極めて高い板厚精度を実現できる絶対値ゲージメータ AGC を開発・実用化した

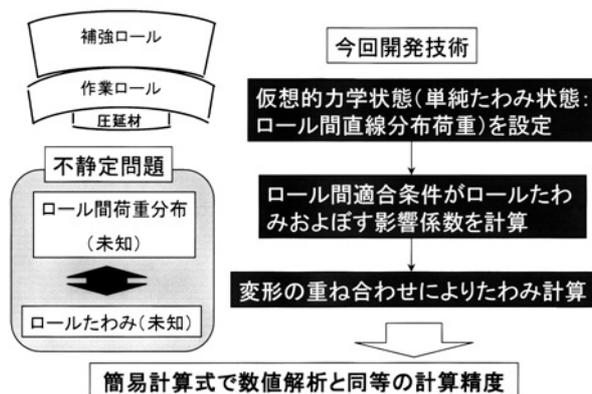


図8 ロールたわみのオンライン計算方法 (ミストレッチ計算モデル)

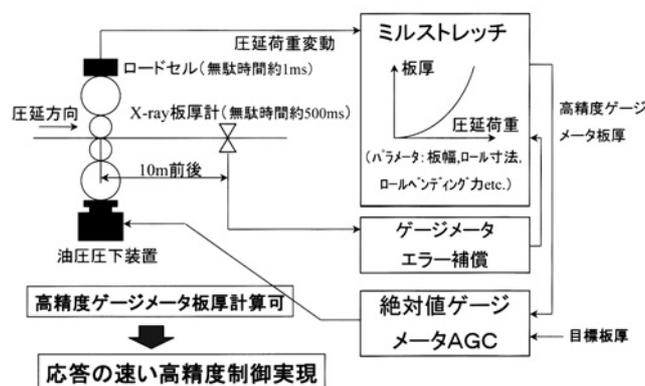


図9 新しい板厚制御 (絶対値ゲージメータ AGC)

(図9)。この技術により目標板厚からの誤差の標準偏差は一気に従来の1/2以下となり⁸⁾、現在もなおスタンド間板厚計の採用によるゲージメータ学習等により板厚精度改善が続けられている。

3.4 電磁鋼板の結晶制御技術の開発

電磁鋼板は、数多くある鉄鋼製品の中でも、強磁性という、鉄がもつ特性をフルに使った材料で、変圧器や回転機等の鉄心材料として用いられる。

鉄の結晶は、いわゆる体心立方構造で、この鉄結晶は、磁気的な異方性を示し、稜線方向である〈100〉方向には非常に良好な磁気特性を示すが、中心を通る対角線方向には磁化されにくいという特徴を持っている。そこで、変圧器や回転機の鉄心材料に用いる場合には、〈100〉方向が励磁される方向に揃うように設計される。例えば、変圧器鉄心用に一般的に用いられる方向性電磁鋼板では、鋼板長手方向に〈100〉軸を揃えるために、鋼板全体が {110} 〈001〉 結晶方位、いわゆる Goss 結晶方位になるように制御している。

現在の結晶方位集積度は、高透磁率方向性電磁鋼板 (Hi-B) では、〈100〉軸からのずれが±3°以内になるように、工業規模で製造しているが、この特性をさらに向上させるために

不断の努力が払われている。

方向性電磁鋼板では、鋼板全面を Goss 結晶粒だけにするために、図10のように、二度に分けて再結晶させる（一次再結晶、二次再結晶）。一次再結晶をした後の組織では、Goss 方位二次再結晶の核となる結晶の存在確率は $1/10^8$ 程度であるが、これがその後の二次再結晶後には実用的には 100% Goss 方位をもつ結晶だけになる。そのためには、通常の薄板製造プロセスとは異なる複雑な製造プロセスをとる。製鋼工程における適切な成分範囲への厳密な造り込み、熱間圧延時の MnS、AlN 等析出物の固溶、分散析出、高冷延圧下率、一次再結晶時の粒成長を抑制すると共に二次再結晶駆動力の確保に影響する析出物や偏析元素（これらを再結晶の時の抑制因子という意味でインヒビターと称する）の造り込みが極めて重要なキーテクノロジーであると考えられている。

二次再結晶核である Goss 方位粒は、冷延時に結晶粒内に形成される変形帯より再結晶すると考えられており、その制御のために、熱延板焼鈍において固溶 C 量や冷延前結晶粒径の最適化を行い、さらに冷延時にパス毎エージングを行って変形帯形成を促進している。

方向性電磁鋼板において、二次再結晶における Goss 方位結晶の出来方が勝負の決め所である。つまり、冷間圧延後の一次再結晶で出来た直径が $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度の方向性雑多の結晶粒から、選択的に Goss 方位を持った大きな結晶粒を最終の熱処理、二次再結晶で鋼板全体を覆ってしまうという曲芸に近いことを実現している。

再結晶による特定方位の結晶生成過程の解釈については、金属組織学、結晶学の概念が、多様に使われているが、残念ながら、現在の所、転位論や、量子力学、結晶学等の理論から、演繹的に加工、熱処理のやり方を導き出すには到っていない。曲芸に近い事は、ラボから現場に到るまでの経験的な実験の積み重ねにより実現されていると言わざるを得ない。

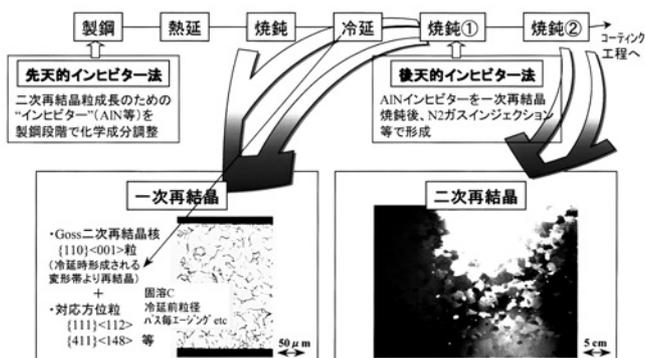


図10 方向性電磁鋼板製造プロセスと結晶方位制御

4 結論

各製鉄プロセスにおける、いくつかの課題に対する、基礎技術、理論の適用例を紹介してきたが、ものの製造に携わる技術者が持つべきスタンスとして、以下の三つの点が重要である。

第一は「現象の理論的解析力のレベルアップ」である。現場として必要なものは現象の理論的解析力であり、そのために必要なものは、広範な基礎学問の修得と専門的学問を自由に使える実力である。

第二は「製鉄技術の世界は判っていない事が沢山」という認識である。百年を越える歴史のある鉄鋼製造技術ではあるが、なお理論的な解析を待つ事象は、はなはだ多い。

そして、第三の最も重要なことは「あらゆる事に好奇心を持ち続けよ」という点である。目前の現象に対して、常に、自分なりの新しい見解を持ち込む努力と、食欲に新しい領域を身につけるスタンスが望まれる。

繰り返しになるが、現実の製造工程で起こっている事は大変な複雑系で進行するが、いかに、これを理論的に記述し、正確な予測をするかが技術者には求められる。そのためには、上記の三つのスタンスを持ち続けることができるか否かが勝負を決するものであると考える。

参考文献

- 1) G. Erriksson : Acta Chemica Scandinavia, 25 (1971), 2651.
- 2) B. Sundman, B. Jansson and J-O. Andersson : CALPHAD, 9 (1985), 153.
- 3) J. Lehmann, H. Gaye, W. Yamada and T. Matsumiya : Proceedings of the 6th International Iron and Steel Congress, 1 (1990), 256.
- 4) W. Yamada, T. Matsumiya, S. Fukumoto, S. Tanaka and H. Takeuchi : Proceedings of 'International Conference on Computer-Assisted Materials Design and Process Simulation', ISIJ, Tokyo, (1993), 123.
- 5) 杉山 喬, 須賀田正泰, 下村泰人, 吉田光男 : 鉄と鋼, 69 (1983), S862.
- 6) M. Naito, K. Yamaguchi, T. Sugiyama and Y. Inoue : Proceedings of the 10th PTD Conference, AIME, (1992), 55.
- 7) 小川 茂, 濱渦修一, 田中 晃, 松本絃美 : 塑性と加工, 304 (1986), 579.
- 8) 辻 勇一, 島津 智, 平石勇一, 福島賢也, 加藤勝弘, 平世和雄 : 鉄と鋼, 74 (1988), 77.

(2000年11月22日受付)