

UDC 621.771 : 662.614

解 説

鉄鋼の圧延工程における省エネルギーに関するノート*

木 原 諄 二**

A Note on Reducing of Energy Consumption in Rolling Process of Steel

Junji KIHARA

1. は じ め に

製鉄所の圧延工程における省エネルギーを考える時、そこには加熱炉における省エネルギーの問題も含めねばならない。しかし、この問題に関しては本特集号においていくつかの技術資料や報文が取扱つているので、ここでは扱わないことにしたい。

また、熱経済の面から見た場合の分塊圧延工場や熱間圧延工場のレイアウトにも、ハードウェアとソフトウェアの両側面に変大大きな問題のあることはよく知られている。しかし、この点については、たとえばホットストリップミルの型式決定における熱管理の要素の検討のレポート¹⁾に見るようなレベルで扱うことは筆者の手に余るので、ごく定性的に書くことにした。

本文はそういう意味で、圧延工程で必要とされるエネルギーを概算する場合の常識のいくつかを断片的に取り上げるノートとして読まれることを期待している。

2. 材料の熱の利用

鋳塊は、溶湯から受け継いだ熱 (t 当り約 2.53×10^8 キロカロリー) を有している。しかし表層と中心部との間に大きな温度分布を有しており、均熱炉において、この温度分布を小さくし次の分塊圧延工程に備えなければならない。

鋳塊の分塊圧延におけるクロップ損失の問題は後述するが、このクロップ損失の減少と関連するのが、鋳塊の保有する熱の利用と均熱炉の燃料原単位の節減をはかることのできる鋳塊の未凝固圧延である²⁾。この場合は、鋳塊の芯に溶湯を残しかつ表層はハンドリングに耐えるだけの構造的強度と、分塊圧延工程で溶湯が流出しないだけの強靱さと延性とを要求されるので、表層の温度の

設定と冷却条件の決定にはかなりのノウハウを必要とするものと思われる。

溶湯から受継いだ熱を更に有効に活用するためには、分塊圧延で製造されたスラブを冷却することなく、熱塊のままホットストリップミルや、プレートミルに送ることであり、この場合にも再加熱炉はスラブやブルームの温度分布を是正するだけに用いられることが期待される。この場合の問題点は、スラブやブルームの表面疵の検出と熱間での疵除去技術の確立ではある。この点に関しては本特集号で報告されている³⁾。また、従来冷塊にして再加熱というプロセスを考えて作られた製鉄所のレイアウトは、スラブヤードが製品の流れの調節の役割を果たしたり、またスラブ直送を行うには分塊工場と他の工場との距離が離れすぎたりという問題がある。これらについては、保熱を目的として搬送路をトンネルにしたりする工夫が考えられている⁴⁾。

再加熱炉に送るスラブの温度を 600°C から 700°C に 100° 上げて再加熱炉に送りつけることができれば、1 万 t 当り 1.3×10^8 kcal のエネルギーが活用できるわけである。

また鋼を A_3 点以上の温度で直送すれば 1 万 t 当り $2.5 \sim 3 \times 10^8$ kcal のエネルギーを活用できる。この場合は加熱炉が不要になるので炉の効率の逆数倍だけのエネルギーが節約できる。

次に、熱間圧延工程での材料の加工度と冷間圧延工程での材料の加工度との割合と材料の熱の利用の問題を考えよう。分塊工程を通ろうが、連铸を通ろうが、いずれ溶湯として保有していた熱を逃がしながら、均熱炉や再加熱炉である程度補われて、熱間加工をうける鋼塊の熱間加工度をどの程度にするのが熱経済の面から見て合理的であるかという問題がある。ホットストリップミルで

* 昭和 53 年 6 月 30 日受付 (Received June 30, 1978)

** 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113)

現在生産される最小板厚は 1 mm である。熱間加工を省エネルギーの面から見ると、圧延動力節減のためにはなるべく高温で大きな加工度を与えるべきであるが、大気中で高温の状態で移動することにより、対流と輻射による熱の逸散が大きくなり、また加工度を増すことにより(表面積)/(単位質量)が上昇し、ロール冷却水による熱の逸散も著しくなり、そのためにスラブの再加熱炉からの抽出温度を上げなければならないという必要も生じ得る。再加熱炉からの抽出温度の上昇は、再加熱炉の操炉温度の上昇を必要とし、そのために雰囲気への熱の逸散が大きくなることは必然であつて、燃料原単位の上昇になる。したがつて、材料が低い変形抵抗のうちに大きな加工度を与えてしまうということにも、一つの最適条件があつて、いつたん加熱したら熱間で全加工を終了させるということは、材料の材質を度外視しても不可能なことである。以上のべたことは次のようにまとめることができる。

例を薄板の圧延にとる。熱間圧延の最小板厚を h から h^* ($h > h^*$) にしたとすると、このための加工エネルギーの減少はスラブの体積を V とすると、 $(k_f^Q Q^Q - k_f^H(Q^H) V \ln(h/h^*))$ であらわせる。ここで k_f^Q , k_f^H は鋼の冷間及び熱間変形抵抗で、 Q^Q と Q^H は冷間圧延および熱間圧延における圧下力関数である。現在の冷間ストリップミルと熱間ストリップミルの状況を考えると、 $k_f^Q Q^Q - k_f^H Q^H$ の値は大体 50 kg/mm^2 のオーダーである。今、ホットコイル板厚を 3.2 mm から 2.0 mm に変更したとすると、冷間と熱間の境をこのように変えたことによるエネルギーの利得は、 $50 (\text{kg/mm}^2) \times V \ln(3.2/2) = 23 \text{ kg/mm}^2 \cdot V$ となり 1 万 t 当り $6 \times 10^7 \text{ kcal}$ と計算される。電力の効率は 70% から 75% であるから、電力消費量で 1 万 t 当り $8 \times 10^4 \text{ kWh}$ の節約となる。この利得に対して、スラブからの加熱原単位がどれだけ上昇するかについて検討しなくてはならない⁵⁾

3. 省エネルギーに対する製品材質からの検討

前項では、エネルギーの出入りからだけ工程について考えたが、ホットストリップミル工程のパススケジュールを変更したりすると、製品材質が大きく影響を受ける。とくに薄板は、冷間圧延加工度が異なると製品の r 値が変化しプレス成形性に大きな影響があらわれるのである。したがつて、製品板厚を 0.8 mm とすると、どうしても 70~80% の冷間加工度が必要であるのでホットコイルの厚さを 3 mm 前後にしなくてはならないという状況がある。

もし熱間圧延加工度を変えられないということから、板の材質を変えることなく冷間加工相当の省エネルギー圧延を行うことの可能性は、低炭素鋼の変形抵抗の温度に対する極少点の温度での温間圧延にある。低炭素鋼はこの温度まで変形温度を上げて圧延しても、加工状態はほとんど冷間圧延と同等であることが期待される。変形抵抗値の減少量としてはおよそ $10 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$ 程度期待することができる。

問題は、圧延材の表面品質である。プレス成形性が高いことを要求される板は、最終製品の外板に使われることが多く、したがつて使用者側は手入れや塗装コストを節減するためにすぐれた表面品質を要求している。したがつて、低い変形抵抗での圧延を生かし、また表面品質を保証するために、まず温間圧延潤滑法を開発する必要がある。現在の冷間圧延機の最終スタンドの圧延速度が 1500 m/min から 2500 m/min であるから、出側の板の温度を 500°C 程度にすることにより、低い変形抵抗を得ることができる。この温度で十分な成果を上げることのできる潤滑法の開発が期待される。

次に、コイルの装入温度をある程度高くすることが必要である。そのためのエネルギー源である。最終段出側温度を 500°C とすると、5 スタンドタンデムの初段での平均圧延温度は、圧延加工度 70~80% として考えると、 $400 \sim 450^\circ\text{C}$ 程度である必要がある。圧延による温度上昇がかりに $100^\circ\text{C}/\text{スタンド}$ とすると、初段への装入温度は 350°C 程度で、途中のスタンドでは加熱よりむしろ熱をとる工夫が必要となる。

初段へのコイルの装入温度は、製鉄所における低温排熱の利用で何とかなりそうである。したがつて問題はスタンド間のコイルの温度制御の手法を開発することにある。そしてこれは圧延潤滑剤の供給方法の開発と密接な関連がある。

4. 圧延過程における歩留まりの向上と省エネルギー

材料が圧延工程に持つてくる顕熱の有効利用、熱間圧延と冷間圧延の加工度の振分けを再検討することによる圧延動力の節減、冷間圧延の代りに温間圧延を導入することによる圧延動力の節減について述べたが、あと、圧延歩留まりの向上と、圧延機の動力効率の向上をはかることが省エネルギーの視点から見て可能性のある事項であらう。

省エネルギーを、単位重量の製品当りの必要エネルギー量の節減であると考えるなら、圧延工程における歩留まりの向上は無視できない課題であらう。圧延工程での歩

留まり向上のきめではやはり分塊圧延におけるクロップ損失の低減にあると考えられる。次いで厚板圧延におけるクロップ損失の低減が重要であろう。

分塊圧延工程や厚板圧延工程で生じたクロップは本来なら製鋼工程で再溶解されて循環する。しかし昨今のように、高炉からの銑鉄を粗鋼生産量を押えながら処理しなければならないような経済情勢では、クロップを製鋼工程で処理することは難しく、差当りの損失として考えねばならない。したがって、状況によつて軽重の差があるものの、少なくとも 1978 年夏の時点ではクロップ損失を低減することは、単位製品重量当りのエネルギー消費を節減するという意味で省エネルギーにつながると言えるであろう。

分塊圧延における歩留の向上のための技術開発は盛に行われており、先に述べた半溶融分塊圧延も、材料の顕熱の活用他、クロップ損失低減の可能性を持つた技術である。分塊圧延におけるクロップ損失は、材料の圧下方向に関する不均一変形に基くものであり、これは材料が完全流体のように圧力だけに対応して変形するのではなく、内部にせん断応力を発生する以上、外力が材料の中心まで伝達しないことに本質的に因つている。そこで、半溶融圧延は流体がせん断抵抗がきわめて小さいことにより、変形を圧下方向に関して比較的均一にすることを可能にするものである。

クロップ損失の低減を目的とした試みとしてオーソドックスなのは、パススケジュールの工夫によるものである。現在は分塊圧延機を建造する場合は、ハイリフト・ユニバーサル型となり、また垂直ロール径も水平ロール径とともに 1000 mm を越える大径ロールとなつている。これらのことは、パススケジュールの自由度を大きくし、圧下方向の不均一変形の度合を低減するのに役立つ。

現在、筆者が手許に有している資料によれば⁶⁾、パススケジュールの工夫により分塊圧延の歩留を 95% まで上昇することが可能である。従来、この分塊歩留は 90% 程度を目途としていたのであるから、この差は意義がある。これは川崎製鉄千葉製鉄所の第三分塊工場（西工場地区）のプロセスコンピュータシステムについての報告に記されている。詳細を紹介する紙数がないので原理的に要点を述べる。

分塊圧延でスラブを製造する場合、厚さ方向の圧下と幅方向の圧下との組合せによりクロップ量が左右されることはよく知られている。重要なのは幅方向圧下の時期であり、また、その時の圧下量とパス回数である。つまり、問題はスラブの厚みがいくつの時その時の幅から一

パス当たりどれ程の圧下量で何パスかけて幅をいくらにするかということである。

これを制約する要因は、水平および垂直ロール径、圧延機の強度、電動機的能力である。そしてもちろんスラブの変形挙動が基本的に問題となる。幅圧下を初期パスで行うと、厚さが大きいので変形は平面ひずみになり、ドッグボーン形状は軽減されると考えられるが、反面ロールとの接触幅が大きいので圧延動力からの制約で圧下量が小さくしかとれないので前後端にあらわれる圧下の不均一によるフィッシュテールは大きくなる。さらに、次の厚さの圧下では比較的幅の狭いスラブを圧延することになるので、幅広がり比が大きくなり、折角の幅圧下が幅広がりでもとにもどるおそれがある。

次に後期に幅圧下をかけると、厚みが小さいのでドッグホーンが大きくなり、幅圧下量は圧延動力の面から見て大きくとれるものの、圧延材の姿勢が不安定になりねじれなどが生じるおそれがある。

以上のような諸条件やその他の条件から、分塊圧延のパススケジュールは分塊歩留りに非常に大きな影響を与えるものである。また、もとのインゴットの幅と厚さとがきまると、歩留まりが最高にできるスラブの幅と厚さとがきまるのである。川崎製鉄千葉製鉄所の第三分塊における実績によれば、インゴットの寸法が 809(厚)×1511(幅) mm² で目標スラブの寸法が 230(厚)×1230(幅)の場合に初期に幅圧下パスを 3 回行うパターンで圧延歩留 94.8%、初期に幅圧下パスを 2 回、中間で転回し幅圧下パスを 2 回行うパターンで 95.7% の歩留を達成している。この場合の鋼種はキャップド鋼である。

クロップ量はスラブ前後端にあらわれるフィッシュテールの形と大きさでさまるが、このフィッシュテールの形と大きさに対してもとのインゴットの前後端面の形も大きな影響を与える。筆者の手許にある資料⁷⁾によると、分塊圧延機を利用して、前後端部近くを本格的圧延に先立つて強圧下しておくフィッシュテールが小さくなり、したがって圧延歩留まりが向上することが報告されている。この場合にはインゴットの前後に長さ 200~400 mm にわたり、60~120 mm の圧下をあらかじめ行つてから通常の分塊圧延を行つている。結果の一例をあげると、鋳型上部で 1222×810(mm²)下部で 1258×910(mm²)の寸法に鋳込んだインゴットから 260×920(mm²)のスラブを製造する場合、トップクロップロスが 2.9% から 1.7% へ、ボトムクロップロスが 3.0% から 2.7% へ減少するとのことである。なおこの処理を行うための時間は 10 数 sec から 1 min 間程度とのことである。

このような圧延歩留まりの向上については厚板圧延に

においても技術開発が盛んに行われている。春・秋の講演大会でも必ず5～6件程度クロップロス又はシアリングロスの減少を圧延の際の変形挙動を基礎的に研究するところから技術にシステムアップして実現して行こうという研究が発表されている。

5. お わ り に

以上、直接現場技術を知る立場にいないが、原理的かつ観念的に製鉄所の圧延工程を考察し、省エネルギーのための技術開発の課題を思いつくままに列举してみた。

その中で最も実現性の薄いのは、潤滑技術の改良による温間圧延ではないだろうかと思う。そして他のものは本特集号にみられるようにそれぞれ完成の域に近づいているといえるのではないだろうか。

文 献

- 1) F. HOLLANDER: 'A model to calculate the complete temperature distribution in steel during hot rolling' in 'Mathematical models in metallurgical process development', Iron and Steel Institute (1969), p. 46
- 2) 白石博章, 仲 正海: 第 27 回塑加連講論, (1976-11), p. 44
- 3) 白岩俊男, 広島龍夫, 松井健一, 久米幸雄, 尾崎孝三郎: 鉄と鋼, 64 (1978) 13, p. 2020
- 4) 一色尚次: 第 39 回西山記念講座, 日本鉄鋼協会 昭和 51 年 5 月, p. 44~45
- 5) 土屋健治: 文献(4), p. 171
- 6) 片岡健二, 峰松隆嗣, 片山宏平, 他 3 名: 川崎製鉄技報, 掲載予定
- 7) 川崎製鉄千葉製鉄所: 私信, 分塊分科会資料 (分-45, 6-1)