



入門講座

鉄鋼プロセス編 -1

鉄鉱石が便利な素材になるまで

江見俊彦

Toshihiko Emi

東北大学素材工学研究所 教授

Transforming Iron Ore into Convenient Materials

1 はじめに

鉄鋼は土木・建築・橋梁・輸送機械・産業機械・エネルギー分野は勿論のこと、日常の家電製品や容器にも大量に使われている。アルミニウム、プラスチックによる挑戦にも耐え、構造材料として相変わらず首位を占めている。これは、強度・靱性、加工性、耐久性、接合性、信頼性などの特性がよくバランスし、リサイクル可能、かつ供給が潤沢で、同一の機械的性質を有する材料を得るための価格（比価格）が低いためである。比価格が低いのは、原料が豊富にあり、安く採掘でき、鉄鋼製品に変換するための所要エネルギーも比較的少なく、変換費も割安なためである。

鉄鋼材料は、(1)鉄鉱石から製品までを溶鉱炉（高炉）一転炉を用い一貫生産する高炉一貫ミル、(2)スクラップを電気炉で溶解・ casting・加熱・圧延して製品とする電炉ミル、(3)スラブ・ブルーム・ビレット（4章に説明あり）などの半製品を高炉ミル、電炉ミルから購入し、加熱・圧延して製品とする単圧ミル、により製造される。天然ガスを産出する地域ではこれを改質し、 H_2 、 CO 、 CH_4 を主成分としたガスにより、鉄鉱石を約1200Kで還元し、固体の鉄を生産する。これを還元鉄という。代表的な還元法にミドレックス法、HYL-III法などがある。この還元鉄とスクラップを主原料とする電炉ミルもある。

これらの鉄鋼製造プロセスは近年著しく進歩したので、資源、エネルギーの消費や環境の汚染が減り、必要量の適時生産が可能となり、材料特性の向上にも大きく寄与している。現在主流である高炉一貫プロセスを図1に示す。左から右に、原料処理→製鉄→製鋼→連続 casting→圧延→表面処理などのプロセスから成っている。以下に各プロセスの設備・操業技術の要点を略述する^{1)~3)}。

2 製鉄

太古、地殻の鉄（Fe）が塩酸を含む雨に溶けて、塩化鉄水溶液となって海に溜り、のちに海中に藍藻が発生した。塩化鉄は藍藻が日中に光合成で作る酸素と反応して、水酸化鉄に変わり海底に層状に沈積した。水酸化鉄はやがて地熱と圧力により脱水され、酸化鉄となり、地殻変動にともない隆起した。これが鉄鉱石の鉱床である。ブラジルの鉄鉱山に行くと、樹々に覆われてはいるが当時の海盆が隆起した地形が見渡せ、時には赤鉄鉱の露頭も望める。ショベルドーザーで削られた鉱床には酸化鉄の層状堆積がはっきりと認められる。このような酸化鉄鉱石は世界に約8千億トン埋蔵されている。ブラジル、オーストラリアに良質なものが多い。ヘマタイト（赤鉄鉱 Fe_2O_3 ）、マグネタイト（磁鉄鉱 Fe_3O_4 ）が代表的で、60%強のFe、数%の SiO_2 、1~3%の Al_2O_3 と若干のリン(P)を含む。鉱石は表層剥土後露天掘りし、破碎、篩分し、整粒塊鉱とする。篩下の粉鉱にはコークスや石灰を混ぜ、焼結機のパレットに入れ、表層に点火、焼結後破碎する（焼結鉱）。一方、Fe分の低い貧鉱は、不純物を除く選鉱時に磨砕し微粉とし、造粒機で球状のペレットにする。いずれも10~25mm径である。日本では塊鉱15%、ペレット10%、焼結鉱75%を混合して鉄源とする。整粒、焼結、ペレット化処理の目的は、高炉の操業と溶鉄の品質を安定させ、エネルギー消費量を下げ生産性を上げることにある。

酸化鉄は通常の高温ではFeとOには分解しない。そこで、Oとの親和力が強い一酸化炭素（CO）、炭素（C）や水素

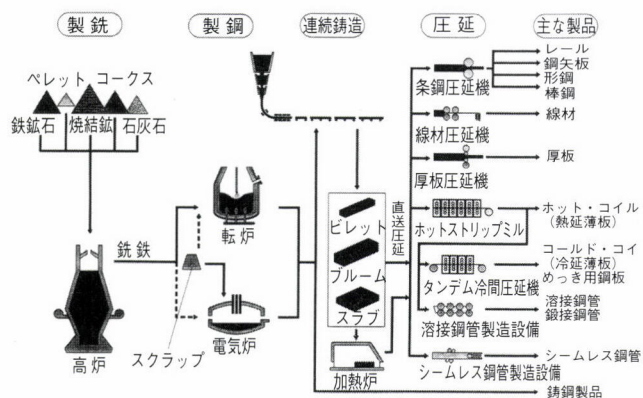
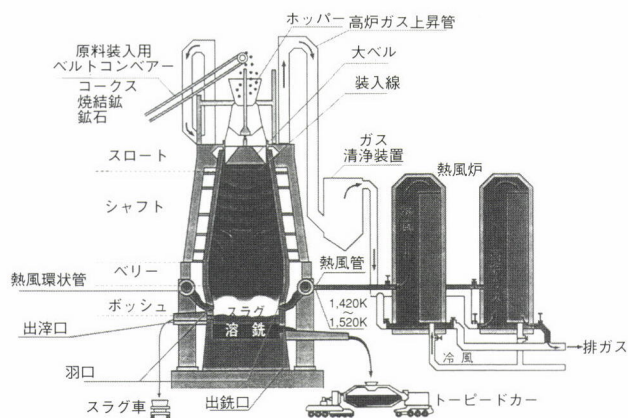


図1 鉄鋼製造プロセス²⁾

ガス (H_2) により高温で還元する。加熱および還元には石炭を用いる。価格が安く埋蔵量 (れき青炭可採量2兆t) が多く、運搬に便利なためである。石炭はCとHが化合した複雑な構造を有し、融点は低い。仮に鉄鉱石と石炭を混ぜて昇温還元したとすると、石炭が融けて鉄鉱石の表面を覆い熱伝達が妨げられ高温に上げ難い。CO、C、 H_2 への転換も遅れ還元反応が進まない。これを防ぐため、石炭を蒸し焼き (乾留) したコークスを使う。コークスも大量の鉄鉱石とともに高炉に投入し高温にすると、衝撃、荷重で粉化しやすい。粉化すると熱風が通り難く熱伝達が悪くなり昇温、COの発生、鉄源の還元が遅れる。そこで高温強度が高く、反応性を高めるよう適当な気孔率を有し、かつ硫黄 (S) や灰分 (Al_2O_3 、 SiO_2 など) の少ないコークスが要る。これをつくるには、れき青炭のうち粘結性がありSや灰分の少ないものを粉砕し、価格を下げるため安い非粘結性の炭種を配合する。配合炭を室炉型のコークス炉に入れ外壁から間接加熱により約1523Kで16hrかけて乾留、冷却、破碎して約50mmの塊とする。代表的な組成はC90%弱、S<0.8%、灰分10%強である。乾留時に発生するコークス炉ガス (H_2 50%、 CH_4 30%、CO10%)、タール、ピッチなどは、燃料や水素ガス原料、化成品原料に利用する。

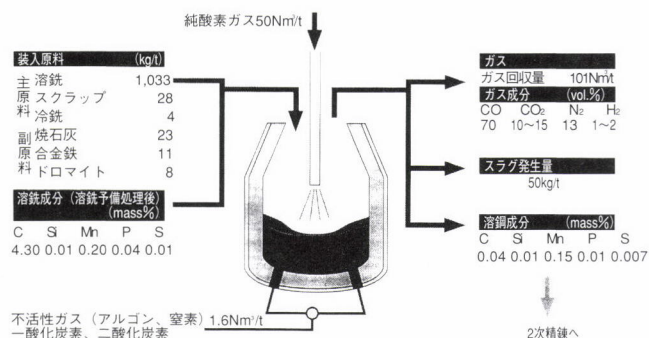
図2 高炉の構成¹⁾

溶鉄炉 (高炉) は溶鉄日産1万トン級のものなら炉体高さ35m、全高80m、鉄皮で覆い耐火物を内張りした炉体の内径約16m、内容積5,200 m^3 である。図2のように、この高炉に鉄源とコークスを交互層状に炉頂から装入し、熱風炉で約1473Kに加熱した空気 (熱風) を炉体下部の数十本の羽口から吹込む。熱風は炉内でコークスと反応し高温のCOと N_2 の混合ガスとなり、炉頂から降下する鉄源を加熱、還元しながら上昇し、炉頂から排出回収される。熱風が炉内を適正な径方向分布をもって通過し、加熱と還元が有利に進むように、炉頂から装入した鉄源とコークスの層厚比と径方向分布を制御するのが高炉操業の要点である。このため、炉頂にはホッパーの下にベル方式あるいは旋回シュート方式などの装入物分布制御装置がある。鉄源は、CO

により還元され、次第に熔融滴下しつつCを吸収し、溶鉄 (4.3%C-0.4%Si-0.3%Mn-0.1%P-0.03%S) となって炉底に溜まる。炉下部高温域では、還元により生じた CO_2 はCとさらに反応してCOとなり、再び還元反応に寄与する。最近ではコークスを節約するため、羽口から熱風とともに安い微粉炭を熱源・還元剤として吹き込む。鉄源やコークス中の脈石分、灰分は焼結鉱に添加した石灰 (CaO) と反応し、溶融スラグ (40% CaO -6%MgO-40% SiO_2 -14% Al_2O_3) となって溶鉄の上に溜まる。これらを一定時間ごとに炉壁の出鉄口、出滓口から抜き出す。炉内容積1 m^3 あたり1日1.7~2.1トンの溶鉄を生産する。これを出鉄比という。1803Kの溶鉄1000kgを得るのに鉄源1630kg、コークス380kg、微粉炭105kg、1473Kの熱風1000 m^3 を使い、溶融スラグ300kgと、CO22%を含む高炉ガス1530 m^3 を副生する。溶鉄1トンをつくるのに使ったコークスと微粉炭の重量の和 (この場合485kg) を燃料比という。溶鉄製造に必要なエネルギーは13GJ、このうち約60%が還元に使われる。高炉は還元を早めるため250KPa位の炉頂圧で操業する。炉頂ガスは除塵後発電機を通して圧力差で発電させ、ガス自体も燃料としてエネルギーを回収する。スラグは冷却後破碎して、路盤材やセメント原料に使う。エネルギー原単位の低減、出鉄量の確保、溶鉄成分・温度の安定、炉寿命延長、が高炉操業の課題である。炉寿命は年々のびて16年をこえるに至っている。

3 製鋼

溶鉄は魚雷型のトービードカーや取鍋に入れ製鋼工場に運ぶ。このさい、溶鉄予備処理として CaO 、 CaF_2 、 Fe_2O_3 などの混合粉末を溶鉄中に吹き込み、まずSiを SiO_2 として、次に不純物のP、Sを $4CaO \cdot P_2O_5$ 、 CaS として除く。さらにSを下げたい時は CaO 、 CaF_2 、Mgなどを吹き込み CaS 、 MgS として除く。

図3 上底吹き転炉による操業例²⁾

(注) 数値は出鋼時の鋼1トン当たりの物質収支

溶鉄を溶鋼に変換する時は予備処理後の溶鉄中の余分のCをO₂によりCOとして脱炭し、P、Sなどの不純物濃度をさらに下げ、合金成分を目標濃度に合わせると同時に、溶鋼を次工程に必要な温度に上げる。この目的には、図3に示す上底吹き**転炉**が主に使われ、1回の吹錬に150-250トンの溶鉄を20分程度で脱炭する。耐火物を内張りした徳利型の炉体上部から水冷した多孔の酸素吹管（ランス）を通して超音速のO₂ガスジェットを溶鉄上に、炉底部羽口からはAr、COなどの攪拌用ガスを溶鉄中に吹き込む。攪拌するのはO₂ガスジェットとの反応面にC濃度の高い炉底部の溶鉄をより早く送りこみ、脱炭を早め、溶鉄の局所的な過酸化を防ぐためである。

操業はまず転炉を傾け、炉内にスクラップ、ついで溶銑を装入したのち炉を直立させる。ここで石灰 (CaO) やミルスケール (銅を熱間圧延するため再加熱するさいに生じた FeO を主体とする酸化鉄) も加える。次に炉口からランスを挿入し O_2 を吹き込む。 O_2 と FeO によりまず溶銑中に残っている Si が酸化され、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ 系の低融点スラグができる。ついで脱炭が進みつつ溶銑は溶銅に変化しながら温度が上がってゆく。このさい、溶銑中の S はスラグ中の CaO と反応し CaS として、 P は FeO と CaO と反応して $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ として、上述のスラグ中に溶けこみ除かれる。炭素濃度が下がってくると C のみでなく Fe の酸化、生成酸化鉄のスラグ中への溶解、による Fe の損失も始まる。これを防ぐには、底吹きガスの吹き込み量を増し攪拌を強める。 C 濃度と温度が所望の値になるのをサブランスに取付けたセンサーで測定予測し、予測した時期に O_2 の吹き込みを中止し、炉体を傾動し出鋼口から取鍋中に出鋼する。出鋼時、スラグが取鍋に流出して溶銅を再汚染するのを防ぐ。発生する CO は回収し燃料とする。吹錬はモデル計算とセンサーによりほぼ自動制御されている。銅浴温度は 1900K をこえ、スラグの侵食性も高いので、転炉を内張りする耐火物にはマグネシアと炭素の複合材料を使う。転炉操業では、吹錬終点の C 濃度と温度の目標の適中率を上げること、 O_2 を脱炭のみに利用し Fe を酸化させないようにして Fe 歩留りを上げること、耐火物の溶損や熱損失を下げることで、重要である。上底吹き転炉操業時の代表的な物質収支例も図3に示す。

電炉ミルではスクラップ、冷銑、直接還元鉄(2.5%C還元率最大95%)を図1のような電気炉(アーク炉)内に炉頂から装入し、炉上部の黒鉛電極から通電し、発生するアークの熱により溶解する。溶解後O₂をランスを介し銅浴中に吹き込み脱炭し、所望の温度、C濃度になると炉体を傾動して出鋼する。電気炉の多くは交流アーク炉であるが、最近直流アーク炉が、黒鉛電極の損耗、電力原単位、騒音、電氣的なフリッカー発生が少ないので、普及しつつある。

アーク炉プロセスはスクラップを主原料とし、溶銑を使わないので鉄鉱石の還元が不要なため、エネルギー消費量が高炉一貫プロセスに比べて格段に低く、スクラップが豊富で電力が安い地域に適している。ただし、スクラップに含まれる不純物元素のCu、Ni、Cr、Snなどの濃度が高くなりやすい。高級鋼用にはこれらの濃度を下げするため、スクラップの選別管理、および銑鉄・直接還元鉄による希釈が必要である。出鋼時のスラグ流出にともなう溶鋼汚染を防ぐには、偏心出鋼孔とスライドゲートを併用する。

このようにして得られた溶鋼には酸素（O）が多量に溶け込んでいる（1873Kで0.1%Cのとき0.21%O、Cが低い程Oが高い）。Oは機械的特性を著しく劣化させるので、取鍋内にAl、Si、Mnなどを加え、Oを Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO あるいはこれらの複合酸化物として浮上分離させる。これを脱酸と呼ぶ。同時に合金成分元素の濃度調整のため合金鉄も加える。極低炭素鋼製造時には図4左端のようなRH装置で真空槽中に脱酸前の溶鋼を吸上げ、 $\text{C}+\text{O}\rightarrow\text{CO}$ 反応を減圧下で進めて脱炭した後に脱酸する。材質要求が厳しい鋼には、溶鋼をさらに脱酸したり、上記の脱酸生成物を徹底的に、例えば数ppm（ $\text{ppm}=10^{-4}\%$ ）に低減する必要がある。このためには脱酸した溶鋼中にRH真空槽内で $\text{CaO}-\text{CaF}_2$ 、 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ などの低融点粉末フラックスを吹込み CaS 、脱酸生成物をフラックスに吸収させて除く。より清浄な鋼が要求される時は、図4左から2番目のLF（ladle furnace）で溶鋼面上にこれらフラックスを加える。ついでアーク加熱によりフラックスを溶解し処理中の溶鋼の温度降下を防ぎ、底部から吹き込んだArで溶鋼を攪拌し溶融フラックスと接触混合させて脱硫と脱酸生成物除去を進める。

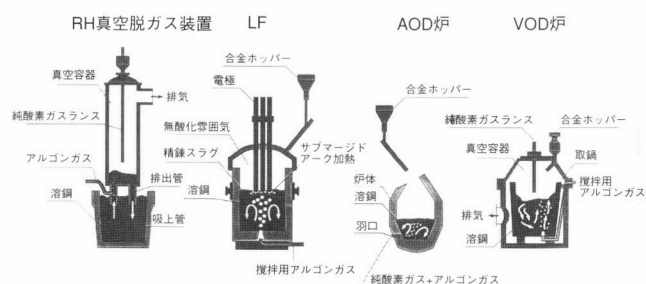


図4 主な2次精錬設備²⁾

ステンレス鋼のようにCr濃度が高く、CrとCの親和力が強い¹⁾ため脱炭し難い鋼にはアルゴンとO₂を吹き込み、溶鋼／ガス界面のO濃度を上げると同時にCO分圧を下げ、上記の脱炭反応を進める。このためには図4右から二番目の**AOD炉** (Argon Oxygen Decarburization) を使う。さらに低濃度に脱炭する必要がある²⁾、図5右端のように底部から吹込んだArで攪拌しつつ真空下で溶鋼にO₂を吹付ける**VOD炉** (Vacuum Oxygen Decarburization) を使う。

4 連続 casting

脱酸・精錬した鋼は、図5の連続 casting 機（連 casting 機）に注入する。連 casting 機は、図のとおり溶鋼分配用中間容器であるタンディッシュ、中空水冷銅鑄型と鑄型振動装置、鑄片支持ロール群、スプレーノズル群、鑄片切断用ガストーチおよび鑄片引き抜き用ダミーバーから成る。線、棒、型、管用の鑄片は、断面が丸や正方形で小型のものをビレット、大型のものをブルームという。薄板、厚板用の鑄片は断面が長方形でスラブと呼ぶ。厚さは100～250mm、幅は1200～2400mmである。厚さが40～80mmの薄スラブ連 casting 機もアーク炉と組合わせて実用に供されている。連 casting 機の型式は、**彎曲型**（垂直に据えた彎曲鑄型と同一半径の円弧上に支持ロール群を並べ、鑄片を完全凝固位置近くで水平に曲げ戻す）と、**垂直逐次曲げ型**（鑄型と上部支持ロール群は垂直に配置し、そののち鑄片を逐次に曲げ、完全凝固位置近くで水平に曲げ戻す）が多い。前者はビレット、ブルームやスラブの量産鋼用に、後者はスラブ用に用いる。鑄片を曲げるのは建屋高さを下げ、建設費を下げ、同時に鑄片支持、搬出を容易にするためである。鑄片を曲げない垂直型は鑄型内で介在物が上浮分離しやすいため、高級鋼のビレット、ブルーム用に使うこともある。

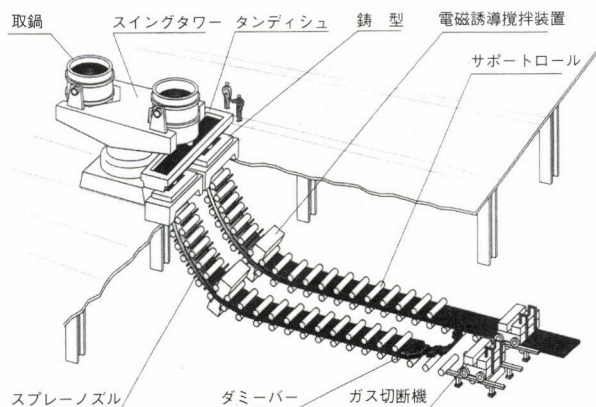


図5 2ストランドスラブ連続 casting 機¹⁾

操業はまず、溶鋼を取鍋からタンディッシュを介しダミーバーで底を塞いだ鑄型内に注入する。このさい、取鍋／タンディッシュ、タンディッシュ／鑄型間には気密な耐火物製浸漬注入管を用い、溶鋼の空気による再酸化を防ぐ。注入過程で生じた非金属介在物が鑄片内に入るのを防ぐため、タンディッシュを深くし、“せき”を設ける。また、タンディッシュから鑄型への溶鋼侵入深さを浅くするため浸漬注入管の先端形状を工夫し、さらに溶鋼流を電磁力で制御することもある。鑄型内で表層が凝固した鋼は下降しつつ中心まで徐々に固まる。鑄片と鑄型との焼付きを防ぐため鑄型は振動させる。鑄型内溶鋼表面は溶融フラックス層で覆って、空気による再酸化と放熱を防ぎ、鑄型／鑄片

間にフラックスの一部を膜状に流入させ潤滑剤とする。鑄片はダミーバーにより鑄型内から下方に引出す。この段階では赤熱した柔らかい表層（凝固殻）の中に溶鋼が残っており、鑄片が下方にゆくにつれて内部の静圧が高まるため凝固殻が膨張変形する。変形すると、鑄片内部に割れを生じたり、成分の偏析が起こったりする。これを防ぐため剛性の高い対向ロールを狭い間隔で配設し、ロールの間に鑄片を支えつつ凝固が終るまで引き抜く。凝固終了直前の位置のロールで鑄片を軽く圧下して、積極的に膨張変形を防ぐ場合も多い。対向ロールと対向ロールの間には鑄片表面を一樣に冷却するよう水や水ミストのスプレーノズルを並べ、鑄片表面割れが生じないように冷却する。凝固終了位置でロールにより鑄片を水平に曲げ戻し、ガストーチで一定長さに切断し、搬出して圧延工程に渡す。

連続 casting は、転炉あるいはアーク炉から次々に供給される溶鋼を、鑄込みを中断せずに連続して casting する連々 casting により、 casting 能力と歩留りが著しく向上する。それは、鑄込みの準備作業が不要となるためと、 casting の始めと終りの、品質が劣るため切捨てねばならない鑄片数が減るためである。連々 casting を推進するため、鑄込みのたびに鑄片幅や鋼種が異なっても連続的に casting が可能な、鑄込中鑄型幅自動変更技術や、鑄込中異鋼種連々 casting 技術が実用化されている。鑄込中に鑄片が破れ、中の溶鋼が洩れることをブレイクアウトというが、これの予知防止技術も実用化された。このような稼働率の改善の他に、 casting 速度の上昇により casting 能力が向上した。現在では2ストランドの大型スラブ連 casting 機では、約3百万トン／年を casting でき、大型転炉の生産能力とよく対応している。鑄片の生産性が向上し、表面欠陥も減少したので、従来行っていた手入れが不要となり、鑄片を熱いまま保熱炉に入れ補助的に若干加熱して圧延するホットチャージローリング（HCR）や、加熱なしに直接圧延するホットダイレクトローリング（HDR）も普及してきた。これらは省エネルギー効果が大きい。

5 熱間圧延

ビレット、ブルーム、スラブなどは、HCR、HDRの場合を除き、加熱炉で加熱したのち図6のような4段ないし6段ロールで圧延する。ロールスタンドは材料と接するワークロール、それを支えるバックアップロール、これらロールを支える枠（ハウジング、図には示していない）およびロールを油圧圧下する装置を有する。**熱延薄板**（ホットストリップ）は図7最上段のプロセスでつくる。連続加熱炉で加熱した厚さ250mm前後のスラブは、スケールブレイカーと高圧水ジェットにより表面のスケール（高温で生じた酸化鉄）を取り除いたのち、粗圧延機および仕上圧延機

から成るホットストリップミルにより熱間圧延する。粗圧延機は2～6スタンドの2段式あるいは4段式圧延機から成り、往復または一方向の圧延を行う。仕上圧延機は、4段式ないし6段式圧延機を5～7スタンドつないだものであり、最終板厚まで連続圧延する。ホットストリップミルで圧延する薄板の板厚は1.6～25.4mm、最大板幅は1.3～2.2mであり、最終スタンドの圧延速度は毎分1.3km程度である。熱間圧延のあと熱延薄板は冷却してコイルに巻き取る。

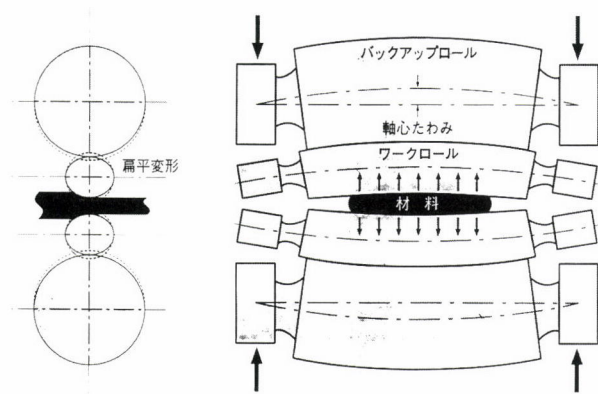


図6 4段式圧延機のロール弾性変形²⁾

厚板は普通、粗圧延機および仕上圧延機それぞれ1スタンドの4段式熱間圧延機による往復繰り返し圧延によって製造する。圧延機は基本的にはホットストリップミル用と同じ構造であるが、より強力であること、ロールの正逆回転が可能であること、ロールの前後にスラブを90°回転させる機構を持ち、スラブの幅より広い幅の製品の圧延ができることなど、が異なっている。

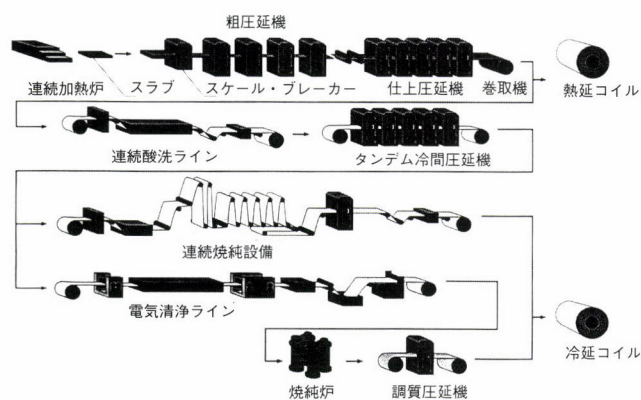


図7 薄板の製造工程¹⁾

線材、棒鋼、型鋼などは、対応する孔型をロールの周に溝状に切ったワークロールを組込んだ4段カリバー圧延機を複数スタンド用い、加熱した材料を孔型に通し圧延成形する。水平のみならず垂直ワークロールを有するユニバーサル圧延機をカリバー圧延機と併用する場合も多い。

熱間圧延で重要なのは圧延中の材料の温度、寸法と形状を目標値の範囲に制御することである。薄板、厚板などの

板圧延を例にとれば次のようである。圧延機にスラブを噛み込ませ圧延荷重をかけると、反力でワークロールとバックアップロールおよびハウジングと圧下装置が垂直方向に弾性変形する。この変形は厚板圧延で反力500～1,000トンあたり1mm位で、これをミル定数という。全変形のうち全2者（ロール）が60～70%、後2者が10～20%を占める。圧延時の板厚は圧延荷重がかかっている時のワークロール間隔に等しい。しかし、材料の温度が不均一なときは、低温部が変形しにくく、反力が大きくなり、ミル定数に比例したロールスタンドの変形がおこり、その部分の板厚が厚くなる。したがって加熱炉での均一加熱が重要であり、このため炉内でスキッド（加熱炉内でスラブを支えるために用いる水冷のレールのようなもの）によるスラブの局部冷却を起こさないウォーキングビーム炉が用いられる。また逆に、圧延荷重が変化すると、その変化分に相当するだけロール間隔を瞬時に変化させ、出側板厚を常に一定に保つ自動板厚制御（Automatic Gauge Control, AGC）を行う。一方、ロールの変形には、図6のように軸心のたわみ変形、ロール自身の扁平変形がある。たわみ変形により圧延材の板厚は中央で厚く端で薄いクラウン状となる。また板幅方向の材料の塑性変形やロールの扁平変形・摩耗などにより、板幅両端では急に板厚が薄くなる。これをエッジドロップという。ロール摩耗もクラウンやエッジドロップに有害である。板クラウンはワークロールを凸型にするロールクラウン、ロールをあらかじめ板クラウンと逆に曲げておくロールベンダーにより改善する。さらに、特殊形状のワークロールを板幅に応じて幅方向にずらすロールシフト方式で板厚の均一化や平坦度の向上をはかる。6段圧延機では中間ロールシフトを行う場合もある。また、ワークロールとバックアップロールと一緒に、圧延材の上と下でロール軸を1.5°までわずかに交差させ、ロール間の間隔を幅方向で調整するペアロールクロス圧延機も板クラウン、エッジドロップ防止に効果的である。ロール摩耗を防ぐには硬度の高いハイスロールが効果をあげつつある。これら板厚や形状の制御は感度・応答性の高いセンサーやアクチュエーターとコンピューターシステムを利用した高度なダイナミックコントロール方式によっている。この結果、熱延薄板の長さ方向の板厚精度は $\pm 50 \mu\text{m}/100\text{m}$ 、幅方向では $30 \mu\text{m}$ 以下/100mmとなっている。ホットストリップミルでは粗圧延後のシートバーを次々に溶接しエンドレスに連続圧延する技術が実用化されつつある。シートバーの両端がなくなり定常圧延ができるため、寸法、形状精度はさらに良くなり、歩留まりも向上する。

最近の熱間圧延では、圧延中に圧下率と温度変化を組合わせ結晶粒、変態、析出などの組織制御を行う制御圧延・加速冷却（加工熱処理）が一般的である。圧延中の材料の

温度を制御するために、板温度のオンライン測定結果にもとづいて冷却制御を行う。ホットストリップミルでは最終スタンド出口温度とコイル巻取温度を設定し、最終スタンドを出てランナウトテーブルを走行中に層流水やミストをコイルの面に噴射して巻取温度に合わせる。厚板の場合も材質要求に応じ制御圧延と組合わせて急速水冷却あるいは焼入れを行う。

6 冷間圧延と熱処理

連続酸洗ラインで表面のスケールを図7上から2段目のように除去したホットストリップを、タンデム冷間圧延機により冷間圧延する。タンデム冷間圧延機（コールドストリップミル）は4段式あるいは6段式圧延機を4～6スタンドつないだもので、最小0.1mm厚までの薄板を、毎分最大2.5kmの速度で圧延する。冷間圧延でも板厚クラウン、エッジドロップの制御は熱間圧延の時と同様である。ストリップのコイル単重を40トンとすると板厚3.2mm、板幅1mの熱延コイルは全長1,600mとなり、板厚0.8mm、板幅1mの冷延コイルでは全長6,400mとなる。現在のホットあるいはコールドストリップミルでは、これを1分から3分程度で圧延する。コールドストリップの厚み精度は長さ方向 $0.8\text{mm} \pm 2.4 \mu\text{m}/10,000\text{m}$ 、幅方向 $\pm 4 \mu\text{m}/1,000\text{mm}$ である。

冷間圧延後のコイルは、加工により硬くなっているため、軟化のための焼鈍を行う。焼鈍とは、鋼を加熱することにより、加工によって導入され硬化の原因となっている転位などの格子欠陥を、鉄原子の拡散によって減少させたり、溶質元素の固溶・析出などを制御するプロセスである。冷延コイルの焼鈍は、従来は、コイルを数個ずつの群（バッチ）にまとめ、箱型炉で行っていた。これをバッチ焼鈍あるいは箱焼鈍という。最近ではコイルを巻き戻し、多数のコイルを次々に溶接しながら加熱炉の中を通過させたのち、ふたたび巻き取る連続焼鈍が主流である。図7の下段

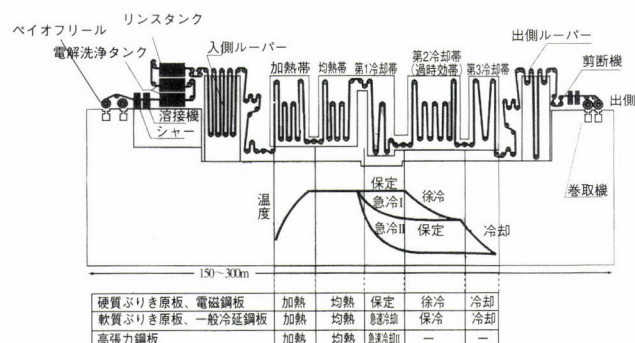


図8 連続焼鈍ラインと焼鈍サイクルの例⁵⁾

と図8は連続焼鈍ラインを示す。

ラインの入側には、ペイオフリール、コイル接続用溶接機、電解清浄装置およびルーバーがある。炉体部は、加熱帯、均熱帯および冷却帯から成る。冷却帯はさらに3つのゾーンに分れており、急冷-加熱保持-急冷などの複雑な冷却パターンがとれるようになっている。出側にはルーバー、剪断機、巻取機があるが、ほかに調質圧延機やめっき設備が設置される場合もある。

連続焼鈍でコールドストリップに加える熱サイクルは、製品によって異なるが、代表的なものは図8に示した3つのパターンである。たとえば、一般冷延鋼板の場合、973Kで約1分間加熱したあと急冷し、673K付近で1分から3分間保持して固溶炭素を析出させ、室温まで冷却する。

設備全長は150～300mであるが、ライン内のストリップの全長は2,000mに及ぶ。ストリップの通過速度は最大200～700m/分であるが、最近では板厚0.15mmの缶用鋼板が最大1,000m/分で通過するラインも実現している。このようなラインの操業には、温度制御、雰囲気制御のほかに、ストリップの速度制御、張力制御、蛇行制御が必須であり、それぞれに高度な自動制御技術が採用されている。

7 表面処理^{2)～4)}

耐食性が必要な薄板は、連続焼鈍後、めっきを行う。代表的なものとして、自動車、建材、家電用の亜鉛めっきと、缶詰、飲料缶、ガロン缶用の錫めっきやクロムめっきがある。これらはいずれも能率の点から、切板ではなくストリップのまま、めっきを行う方式が主流である。

めっきは溶融めっきと電気めっきに大別される。溶融めっきは厚めっき、電気めっきは薄めっきを施すのに有利であり、高価な錫の薄めっきには電気めっき、安価な亜鉛の厚めっきには溶融めっきがよく使われる。図9は溶融亜鉛

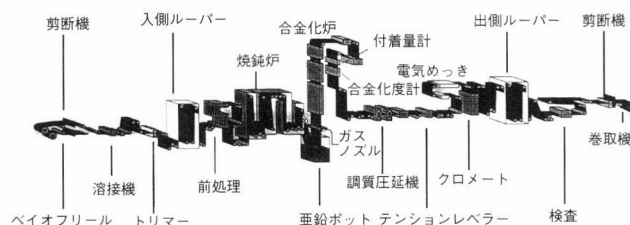


図9 連続溶融亜鉛めっきライン⁶⁾

めっきラインの例である。

コールドストリップは脱脂、洗浄などの前処理槽を通ったあと、焼鈍炉を経て溶融亜鉛の入ったポットを通り、引き上げられる。焼鈍炉は、必要な材質を得るための熱サイクルを与え、表面をガス還元して活性化し、めっきを着けやすくする機能がある。めっき層の厚さの制御はポット上

部にあるノズルからストリップ両面にガスを噴射して、余分の溶融亜鉛を絞ることにより行う。

亜鉛めっき鋼板の断面は、内側から表面にかけて、地鉄層／鉄・亜鉛合金層／亜鉛層となっている。この亜鉛層外面は、塗装の密着性や溶接性が必ずしも良くない。この塗装密着性と溶接性を改善したものに**合金化亜鉛めっき**がある。これは、めっきしたストリップを合金化炉を通して加熱し、めっき層と地鉄との界面に鉄・亜鉛の合金層を発達させ、亜鉛層外面にまで若干の鉄を含ませてつくる。ラインには通常、合金化炉のあと、調質圧延機、テンションレベラーや、クロメートなどの化成処理設備を設置する。

溶融めっきラインによるめっきとしては、建材用の亜鉛めっきや亜鉛・アルミめっき、自動車用の亜鉛めっきや合金亜鉛めっきが代表的である。自動車用薄板では、プレス成形のときの金型との摺動性や電着塗装性の改善のために、亜鉛めっき層の上に薄い鉄系電気めっきを行うことがある。この場合、電気めっき設備をラインに付置する。

連続電気めっきラインの前処理および後処理設備の機能と構造は、溶融めっきラインのそれとほぼ同じである。電気めっき設備は、消費電力の低減のために、ストリップと陽極間の距離を短くする必要がある。また、めっき中にはめっき液から金属イオンが急速に失われる。さらに、一様なめっき厚を得るには、ストリップ全面に供給されるめっき液の組成が均一でなければならない。均一で能率的なめっきのためには、ストリップ全面にわたってめっき液を高速、均一に供給することが必須であり、めっきセルはこれらの条件に合う種々の構造のものが開発・実用化されている。工業的には高能率化のため、多くのセルを直列に配置する。

代表的な電気めっきは、亜鉛系のめっきと、錫およびクロムめっきである。亜鉛系には純亜鉛めっきと、亜鉛・鉄、亜鉛・ニッケルなどの合金亜鉛めっきがあり、自動車、家電製品および建材などに用いられる。錫めっき（ブリキ）は、缶詰、飲料缶などの食缶に主に使われる。この分野では、缶胴部の接合法がハンダから接着・溶接に移り、ハンダに適した錫めっきの有利性は失われ、代わって日本で開発されたティンフリースチールの生産が増加している。ティンフリースチールは、下層が金属クロム、上層がクロム水和酸化物の2層構造を持つ表面処理鋼板である。

この他に表面処理鋼板としては、種々の樹脂をロールコーターなどで被覆したのち加熱重合させたカラー鋼板、プレコート鋼板、潤滑鋼板、耐指紋鋼板など多様な展開が進んでいる。また、ステンレスでは表面を電解酸化し、酸化膜の厚さを変化させることにより種々の干渉色を出したカラーステンレス鋼板なども建材用に使われている。

8 おわりに

鉄鋼材料の特性は著しく向上する余地を残している。現在最強の、ナノメートルスケールで組織制御した極細線でも、その強度は理論値の1/3にも達していない。不純物元素や非金属介在物の極低濃度への精錬、新しい合金組成や化合物の利用、急冷凝固や加工熱処理による結晶の粒度、方位や組織の精密制御、先進的な表面処理など製造プロセスの進歩により強度、靱性、耐摩耗性、耐食性などは日進月歩で改善されつつある。また、ユーザーフレンドリーな方向への発展も目覚ましい。加工時に柔かく、加工後塗装焼付時に硬化する焼付硬化性自動車用鋼板、競合材料を複合化し加工後の塗装が不要なプレコート鋼板や、断熱施工が不要な耐火鋼などはその例である。これらをもっと広汎に、安価に、高い信頼性で、かつ資源消費（リサイクル）・エネルギー消費（炭酸ガス排出）と大気・水などの環境汚染を最小に保ちつつ実現するのが、よりよい鉄のつくり方である。そのために、より多様化劣質化する原料に柔軟に対応でき、不純物元素や介在物をさらに低減できるプロセスステップが必要である。また、ロボットを導入し人工知能制御した自動化システムにより各プロセスステップをより連続化、同期化した統合システムの実現が必要である。このような課題への挑戦は、鉾石の新しい事前処理、コークスの低温乾留、鉄の溶融還元、新製鋼法など、産官学共同で進められている。

引用文献

- 1) より易しくは、日本鉄鋼連盟；“鉄ができるまで”
- 2) やや詳しくは、森田善一郎、江見俊彦；“鉄鋼プロセス工学入門”（川鉄21世紀財団、1994）
- 3) さらに詳しくは、日本鉄鋼協会；“21世紀に向けて鉄鋼技術10年の軌跡”鉄と鋼、81(1995)、No.4
- 4) 江見俊彦；“技術動向・鉄鋼材料”金属64(1994) No.9～65(1995)No.8〔(株)アグネ〕
- 5) 福島丈雄；第88・89回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会、1983）、P.137
- 6) 大和康二；第138・139回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会、1991）、P.1

（1995年10月13日受付）