



鉄の歴史

スウェーデンの製鉄史概論 近代製鋼法 (ベッセマー転炉) 誕生まで

3. 産業革命後の技術開発

Iron in Sweden 3—Classical Processes up to 1900—

矢島忠正
Tadamasa Yajima

元大同特殊鋼(株) 常務取締役
元日本鉄鋼協会共同研究会 特殊鋼部会長

はじめに

Vallon 移民の後、18世紀はスウェーデン国内の諸体制の整備も進み、学術分野も欧州列強に学びながら独自の展開を始める。これにより18世紀後半からの産業革命に伴う新技術の吸収、消化の速度も一段と加速される。そして19世紀後半、近代製鋼法の先駆けとなったベッセマー転炉の工業化の成功を収めるに至る。

自由の時代 1721—1772年

1721年ニイスタット (Nystad) の講和からグスタフ (Gustav) III世のクーデター迄の50年間は自由の時代と呼ばれる。この時代は啓蒙運動 (The Enlightenment) が盛んで、その一つに1739年に創設された王立スウェーデン科学アカデミーがある。創立当初から科学アカデミーは実践を第一とし、それに関連する数学、自然科学、経済学、製造技術等の知識を広めることを目的とした。

初代会長は理論派の著名な植物学者リンネ (Carl Linnaeus von Linné) で、彼は1735年、オランダ、ライデン (Leiden) で植物を系統的に整理した「Systema Naturae」第一巻を発表した。彼は鉱物学も指向したが、1734年1月視察したストーラ コッパーベリ (Stora Kopparberg) 銅鉱山の惨状に驚愕、これをあきらめたといわれている²⁾。

1775 (安永4) 年、リンネの弟子のテュンベリ (Carl Peter Thunberg 1742-1828) は出島オランダ商館の医師として来日、長崎から江戸を訪れ、その詳細な記録や日本植物誌とともに、1300語にも及ぶスウェーデン語—日本語辞典を残している。江戸時代の長崎弁交じりの日本語が略正確にスウェーデン語に訳されている¹⁷⁾ (Fig.1)。

鉄 (jern) は「てつ、しろがに」、鋼 (Stål) は「はがね、ふあがね」、その下 Ståld, Smedståld「金敷き」と示されている。

Jernの下3語目 Ingen (Nobody, No one) は「なか。誰も無い。」と長崎弁で書かれている。その下 Inkomst (income) は「貢き物」。いろいろか？

丁度この頃プロイセン戦争 (1756-63) に従軍したスウェーデン兵士がジャガイモを持ち帰り、国民の貴重な栄養源として今日に至る¹⁸⁾。

製鉄業界でも1747年現在のスウェーデン鉄鋼協会、イエールンコントーレット (Jernkontoret) が設立される。当時スウェーデン国会は四階級制 (貴族、僧侶、市民、農民) であったが、外貨の75%を稼ぎ出す製鉄業を代表するものではなく、長年の議論のあとでようやく Iron Office = Jernkontoretとしてその設置が許可された。製鉄業界のみならずそれを扱う商社も会員とし、当初から鉄の販売額に応じて会費を徴収、また国立銀行からの融資も引出し、巨額の資金を確保していた。

その業務は

- (1) 製鉄技術に関するヨーロッパ諸国の情報収集とその導入試験に関わる資金援助
- (2) 一般市場で棒鉄の買い支えによる価格操作
- (3) 製鉄企業に対する設備投資や運転資金の融資 (無利子) 等であった。特に (1) の部門では1800年代に入ってからベッセマー転炉の工業化の成功に至るの数々の技術導入とその応用分野の貢献は極めて大きかった。

200年以上も前の1700年代に自然界を科学的かつ系統的に整理し事の本質を追求する啓蒙運動と Jernkontoret の製鉄分野に於ける積極的な指導、援助の成果の一つに元素の発見がある。今日特殊鋼のミルシートを埋める合金元素の大半は実はスウェーデン人の発見によるものである (Table1)。

鉄の特性に及ぼす元素の影響も、熱間脆性に及ぼすSの影響は1556年著名な冶金学者アグリコーラ (Georg Agricola) が「De Re Metallica」で発表し、鉄鉱石の焙焼に結びつけ、冷間脆性は1780年代にドイツ人メイヤー (J.C.F.Meyer) が



Fig.1 Thunberg (1743-1828) の日本旅行記¹⁷⁾
表紙と巻末スウェーデン語-日本語辞典
文献 17) By courtesy of Mrs. Cristina Henricsson

Table1 特殊鋼の元素と発見者

	発見者	国	年		発見者	国	年
C	不明	—	古代	V	N.G.Sefström	スウェーデン	1830
Si	J. J. Berzelius	スウェーデン	1824	W	K. W. Scheéle	スウェーデン	1783
Mn	J.G Gahn	スウェーデン	1774	Co	G.Brandt	スウェーデン	1735
P	Brandt	ドイツ	1669	Cu	不明	—	古代
S	不明	—	古代	Al	F. Wöhler	ドイツ	1827
Ni	A.F. Cronstedt	スウェーデン	1751	O	K. W. Scheéle*	スウェーデン	1772
Cr	N.L.Vauguelin	フランス	1798	H	Cabendish	フランス	1766
Mo	K. W. Scheéle	スウェーデン	1778	N	Rutherford	イギリス	1772

*Josef Priestley(イギリス 1774)よりも2年前に発見したが発表が遅れたので発見者の栄光を逃した。

Pの影響である事を明らかにしている¹⁾。

しかし理論面では珍説、奇説が百花繚乱の時代であった。

その一つが燃素（フロギストン Flogiston）説である。

この説は1700年代当初にシュタール（Georg Ernst Stahl）が提唱した新説で、全ての可燃物質はフロギストンを含み、燃焼のときこれが放出されるというものであった。金属もフロギストンとメタルカルク（Metallkalk）の混合物とされた。

博学を以って知られたリンマン（Sven Rinman 1720-92）も脆い鉄はフロギストンを過剰に、韌性のある鉄はこれを適量含有し、鋼は両者の中間に位置すると主張した。

1772年、酸素を初めて発見したシェーレ（K.W.Scheéle）ですら依然としてフロギストン説を信奉していた。

フロギストンは酸素と炭素が交じり合った物質と解されて

いたようであった。

1777年フランス人ラボアジエ（Antoine Laurent Lavoisier）が初めて燃焼は酸素との化合である事を証明したが、彼自身1781年酸素を全ての酸（acid）の根源と考え、誤ってOxy- gene「酸一素」と命名、今日に至る。酸素曰く、「私の本当の名前は何なの??？」

Lavoisierはフロギストン説を葬り去ったが、彼自身も「(フランス) 革命に化学者は要らない」との革命派の一言で1794年断頭台の露と消えた²⁾。

このように1700年代後半、主としてスウェーデンの学者により今日製鉄、製鋼法や鉄鋼材料に関わる殆どの元素が発見されたが、それをプロセスや材料特性に結びつけるには遠く至らなかった。冶金学は未だ「秘術」の世界であった。

しかし「経験」と「勘」に頼っていた採鉱冶金学を一つの学問として確立しようとする試みも始まり、スウェーデンボリ (Emanuel Svedberg Swedenborg 1688-1772) は1734年冶金学の古典「De Ferro 鉄」をラテン語で著している。本著は1922年初めてスウェーデン語に翻訳された。またRinmanは1788-89年にかけて「Bergswerks Lexicon. 採鉱冶金学教則本」を著し、これは現場技術者のバイブルとなった¹⁾。

また1819年にはファルーン (Falun) に採鉱冶金学校、1830年にはフィリップスタット (Filipstad) に採鉱冶金専門学校が設立される。Falunの採鉱冶金学校は1869年ストックホルムに移転、今日の王立工業大学 (Royal Institute of Technology: KTH) の母体となる⁸⁾。

昨今、KTHの一部を再度Falunに戻す動きがある。都会で冶金学を勉強した学生が田舎に就職したがないのがその理由の一つと聞く。

一方鉄の生産も順調に伸び、当時スウェーデンは世界一の製鉄国となる。しかし生産量の90%は輸出であった。1790年代の棒鉄輸出は47,900トン、内シェフィールドを中心とするイギリスが51%と半量を占め、次いでバルト海沿岸諸国23%、ラテン諸国22%で、オランダは僅かに3.5%に低下した。しかし棒鉄に替り更に付加価値をつける加工製品の生産は掛け声倒れに終わった。

イギリスが外貨の40%を得る大市场となった事はナポレオン戦争でスウェーデンをして「大陸封鎖」に反対しイギリス側に立たせた理由の一つとなった。これが当時フランスの同盟国であったロシアに背後を突かれ、1809年、独立以来領有してきたフィンランドを失う因となった。爾来今日まで200年スウェーデンは中立政策を維持続けている。

2 イギリスに於ける新技術の誕生とその導入

イギリス市場の拡大と共に技術面でもスウェーデンの関心は産業革命の発信地イギリスに向けられた。製鉄、製鋼、加工、輸送の分野で数々の新技術がそこから導入され、Jernkontoretを中心とした啓蒙活動がここに実を結ぶ。

1700年代後半、最大の顧客イギリスでスウェーデン製鉄業に大きく影響した三つの大きな発明がなされた。1751年のルツボ製鋼法、1783年の圧延法、1784年のパドル法である。

石炭を産出せず、加熱エネルギーを専ら高価な木炭に依存したスウェーデンにとって安価な石炭、コークスを用いるイギリスの製鉄技術は大きな脅威となった。

2.1 ルツボ製鋼法

ダンネモラ (Dannemora) の低燐、低硫鉄石を原料とする高品質のVallon棒鉄 (鍊鉄: 軟鉄) は浸炭処理された後初めて鋼、浸炭鋼 (Cemented, or blister steel) となり、Sheffield特産の刃物や工具用に加工された。しかし表層だけが浸炭された浸炭鋼はゼンマイのような疲労強度を必要とする用途には不向きであった。

1751年時計職人ハンツマン (Benjamin Huntsman) は10年間の試行錯誤の後Sheffield近郷Handsworthで、真鍮の溶解法を応用し、浸炭鋼を原料とするルツボ製鋼法を完成する。これには1709年ダービー (Abraham Darby) が発明した冶金コークスとStourbrigdeのルツボ用良質耐火粘土が貢献した¹⁾。

ルツボは黒鉛を最大45%迄配合した耐火粘土を混練、成型、乾燥、焼成して製造、これに

- (1) 初期は3kg、後に40-50kgの浸炭鋼、木炭、リターン屑を装入、蓋で密閉後
- (2) コークスを充填した炉室で3-3.5時間かけて溶解
- (3) 表層スカムを除去後
- (4) 5-7cm角のインゴットに鑄型して

炭素工具鋼 (JIS SK 2-3相当) を製造する世界初の熔鋼プロセスであった。

浸炭鋼をルツボ中で溶解する本法はSheffield法と呼ばれ、後にスウェーデン産Vallon棒鉄と相俟ってSheffieldを刃物、工具用特殊鋼生産の世界的中心地とする基盤を形成した。

しかしスウェーデンは本法の発明に先立つ1739年、銑鉄の輸出を全面的に禁止していたので、ルツボ製鋼法の原料は浸炭鋼に依存せざるを得なかった。スウェーデン製棒鉄と木炭を混合した炉室で浸炭鋼を製造するプロセスに時間とコストを要し、ルツボ鋼は極めて高価な鋼となった¹⁾。

この工程は1856年スウェーデンの低燐、低硫鉄の輸出が許可されるまで続いた。

一方ルツボ製鋼法は1767年スウェーデン人アンダション (Bengt Andersson Quist) の知る所となり、彼は1769年Stockholm郊外エシュタ (Ersta) にルツボ製鋼工場を建設する。しかし石炭のない悲しさ、事業は続かなかった。

Fig.2は大正4年の創業から昭和12年まで日本特殊鋼で使用されたルツボ製鋼用 (右は新品、左は使用后) の黒鉛ルツボである。新品は高さ380mm、深さ350mm、胴部外径230mm、重量約11kgでルツボ肉厚は上端で約20mmである。使用後のルツボは重量9.5kgと新品より15%軽量で、上端部肉厚も10mm程度に損耗していた。上端から10cm位まで熔鋼が満たされた部分が白く脱炭され、この部分の内

容積は7リットル、熔鋼換算で約50kgであった。

それにしてもFig.3のように総重量約60kgの白熱した滑りやすい黒鉛ルツボを取り出し、小さな鋳型に直接鋳込むことは大変な重労働であったであろう。ちなみにこの写真は1940年第二次大戦中スウェーデン鋼の輸入が途絶えたSheffieldで高品質高速度鋼の製造用に再開されたルツボ製鋼法である。

2.2 パドル (Puddle) 法

ルツボ製鋼法は高品質スウェーデン製棒鉄の需要を拡大するのに貢献したが、コート (Henry Cort) が発明した圧延法 (1783年) と石炭専焼のパドル法 (1784年) は鍛造と木炭に依存し、輸出の過半を占める一般用スウェーデン棒鉄に対し生産性、コストの両面から大きな脅威となった。

パドル法はFig.4に示すように燃焼室と溶解室を分離し、安価な石炭燃料中の硫黄の影響を最小限にし、かつ燃焼 (温度) を制御する事により製品の炭素含有量をコントロールできる当時としては画期的なプロセスであった。

Fig.4中隔壁 (3) で仕切られた石炭専焼の燃焼室 (2) からの火炎は炉床と側壁が鉄分の高い難溶融性精錬スラグで造られた溶解室 (1) で銑鉄を溶解、脱炭精錬を行うものである。脱炭精錬が進行すると銑鉄浴は名前の通り泥田 (Puddle) 状になり、この半熔融浴を代掻きのように捏ね回し、精錬温度に応じて析出した鉄のルッペをボール状に成型、その後これをハンマーでスラグ搾出と熱間加工によりブルームに加工する。

本法はイギリスで急速に普及し、1805年パドル鉄は年産30万トン、1885年年産700万トンに達しイギリスは世界一の製鉄国となる。しかし石炭を産出しないスウェーデンでは



Fig.2 1937年まで日本特殊鋼で使用された製鋼用黒鉛ルツボ

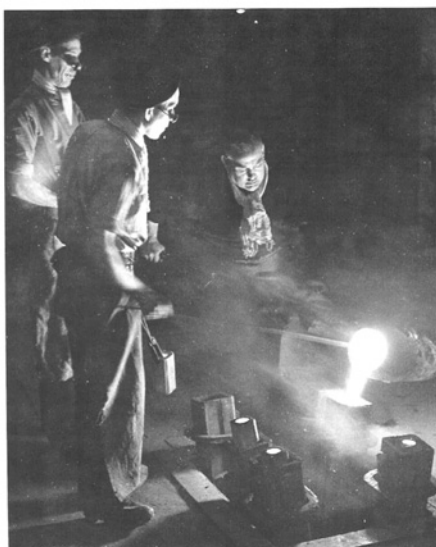


Fig.3 Firth Brown社で第二次大戦中 (1940年) 高速度鋼溶解に再開されたルツボ製鋼法¹⁾フラッシュ無で撮影。

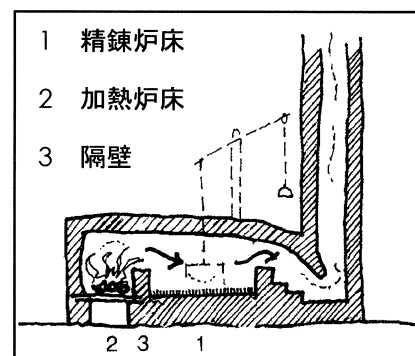


Fig.4 パドル (Puddle) 法¹⁹⁾

このプロセスは成り立たない。涙ぐましい努力により1829年ニービー (Nyby)、1845年シュラハマー (Surahammar) に木材チップ専焼パドル炉が建設、操業されるにとどまった。

2.3 ランカシャー鍛造法と圧延法

パドル法ショックは木炭に依存せざるを得ないスウェーデンをして省エネルギーに目覚めさせた。Jernkontoretは1828年エクマン (Gustaf Ekman 1804-1876) をイギリスに派遣、当時イギリス式Vallon鍛造法と呼ばれていたプロセスを調査させた。彼はマンチェスター北部のランカシャー地方で本法を見出し、ランカシャー法の名でスウェーデンに伝えた。これと同時期にワーレン (Carl Fredrik Waern) はウエールスから二名のランカシャー鍛造職人をベッカフォーシュ (Bäckafors) 製鉄所に招聘、木炭精錬炉床+コークス加熱炉 (Vallon法の原型) の組合によりこのプロセスをテストしている。

ランカシャー鍛造法 (Fig.5) はドイツ鍛造法やVallon鍛造法と異なり、小型の密閉炉を採用、炉内で冷銑の予熱を行い、脱炭精錬時の木炭原単位を半減させた驚異的なプロセスであった。しかし密閉炉であるためドイツ鍛造法のように酸化精錬と鍛伸加熱を共通の炉床で行う事が出来ず、折から導入が始まった圧延法に組み合わせるには、浸炭させずに木炭を熱源として使用する加熱炉の開発が急務となった。1845年、Gustaf Ekmanは10年間を費やして木炭燃焼塔を設け、高炉と同様に熱風炉を利用する加熱炉を開発、これを契機にラ

ンカシャー法は特に中部スウェーデンの大製鉄所でドイツ鍛造法に代わって急速に普及した。

ウッデホルム (Uddeholm) の各工場では32基のドイツ鍛造法炉床を保有していたが、1845年迄に高炭素鋼用に4基を残し、13基のランカシャー炉と5基の鍛伸用再加熱炉、3基の副列型再加熱炉にリプレイスされた。

一方軸流式水車駆動の圧延機は1852年フィンスポング (Finspång)、1853年ガルペンベリ (Garpenberg) で棒鋼圧延機が、1854年にレシェフォーシュ (Lesjöfors) で大型-小型を繋げた太丸から線材迄の圧延機が完成する。この他1850年代にFinspång、ファガスタ (Fagersta)、ヘレフォーシュ (Hellefors)、Lesjöfors、ムンクフォーシュ (Munkfors)、スメーデバックケン (Smedjebacken) 等11工場でランカシャー+圧延法を組み合わせた工場が建設されている。

ランカシャー法と圧延法により木炭原単位と生産性は飛躍的に改善された。Hellefors製鉄所の一例をTable2に示す¹²⁾。

しかしその設備に莫大な投資を必要とする圧延設備は当時中小の製鉄所が多いスウェーデンでは負担が大きすぎ、その普及は遅々として進まず、1859年圧延による棒鉄生産量は3,534トンであった¹⁹⁾。

これとよく似た密閉炉を使用するフランス西部で開発されたフランシェコムテ (Franche-comté) 法 (Fig.6) も1852年アンカースルム (Ankarsrum) に導入以降数箇所で採用された。この方法は酸化精錬炉床と再加熱炉床を共用する事が出来たので、小規模なBergsmanの製鉄所で使用された¹⁹⁾。

1860年代に入ると鉄道網の整備と共に中小製鉄所の淘汰



Fig.5 ランカシャー鍛造法 (Stockholm 工業博物館)

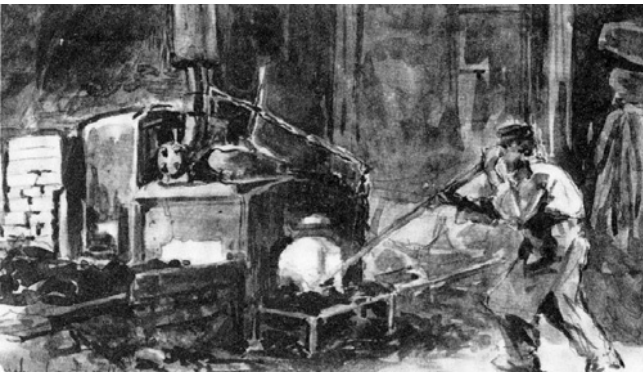


Fig.6 Lœa製鉄所の Franche-comté 炉 (1871年)¹⁹⁾

Table2 ランカシャー鍛造法+圧延法による木炭原単位と生産性の改善 (Hellefors製鉄所)

年	プロセス	木炭原単位(棒鉄 t 当)*	生産性(kg/hr.) **
1832	ドイツ鍛造法+ハンマー鍛伸	3.9t (26m³)	9
1882	ランカシャー鍛造法+圧延	1.0t (6.7m³)***	90

*木炭 150kg/m³ ** 鍛造炉の生産性 ***加熱炉用木炭 2.0m³/t を含む。

が始まる。特に1870-1900年間の50%もの価格低下はこれに拍車をかけ、棒鉄メーカーは1862年440から1887年191と略半減する。一方棒鉄生産量は同128,000トンから221,100トンに略倍増、生産集約の成果を示している。またドイツ鍛造法は1860年代に消滅している。

2.4 高炉 熱風炉と高炉排ガスの利用

鍛造法と共に高炉技術の改善も進んだ²³⁾。

1828年スコットランド人ネイルソン (James B. Neilson) は高炉送風を予熱する技術を開発した。スウェーデンはこれを逸早く導入、1833年ブレーフベンス (Brefväs), 1834年 Ankarsrum、ヘーグフォーシュ (Högfors) で採用される。

1835/36年にはタンスオー (Tanså) 製鉄所で冷風と300℃の熱風の連続比較操業試験が行われ、生産性50%増、木炭原単位27%減の素晴らしい成果を収めた (Table 3) ¹⁹⁾。

1836年には実に69基の熱風炉が稼動した。

この前提として輻に代わる送風機の開発があったことは言うまでもない。

この直後ドイツの化学者ブンゼン (R.W.Bunsen) は1838年、高炉排ガスを分析し、これを燃料として利用できる事を示唆した。これに着目した上級高炉技師 (Övermasmästare) のスタールベック (Nils Starbäck) は高炉排ガスを焙焼炉で利用する技術を開発、1840年ロングスヒュッタン (Långshyttan) 製鉄所で試験を開始、その後ベストマン (E.W.Westman) によって改良され、これも急速に普及した。

一方高炉の構造も従来の木壁式あるいは石造からイギリスの鉄皮式が導入され、炉容の大型化も進んだ。スタファンソン (Hakan Steffanson) は1859-61年、Långshyttan 製鉄所当時としては最新鋭の大型高炉を設計、建造した。この高炉は高さ15.5 m、内容積72 m³でシャフト中間部から引かれた高炉排ガスを利用する熱風炉 (3羽口) と焙焼炉を備え、日産16トン、木炭原単位772 kg (51.5hl) と当時としては驚異的な記録を樹立した。

高炉排ガスの有効利用を更に進める為、1885年には炉頂部の密閉化が採用され、普及した。これと共に冬の風物詩であった高炉炉頂からの火炎が消えた。

スウェーデンの銑鉄生産量は1861年17万トンから1885

年には46.5万トンの急増、高炉の平均生産性は同年間平均752トンから2598トンに増加、一方高炉基数は同226基から179基に減少、大型化と集約が進行した¹⁹⁾。

また省エネルギーの結果、全国平均高炉木炭原単位は1858年1.11トン (7.4 m³)、1868年1.02トン (6.8 m³)、1883年0.95トン (6.3 m³) と15%低下した。

しかし石炭を全量輸入に頼るスウェーデンではコークス高炉は1890年代に始めて試験される。しかしその普及はドムナルベツト (Domnarfvet)、ビョルネボリ (Björneborg) に留まった。

3 ベッセマー転炉の工業化への道 (1840-56)

3.1 規制緩和と撤廃

1800年代は技術革新の時代であった。しかしこれらの新技術を速やかに活用するためには社会の改革を妨げる古くからの法律や規則を見直し、最終的にはこれを廃止する事が要求される。このような改革を推進する社会の指導的人物や集団の積極的な姿勢が無ければ、産業革命は進まず、過激な革命の形を取ったであろう²⁾。

1830年代後期より製鉄、木材そして新興の機械工業や農民、商社等から規制撤廃を求める声が一層強まった。

この結果1846年4月27日、ギルド制、土地売買、採鉱冶金に関する諸法律が廃止され、これにより棒鉄、銑鉄、木炭等の生産に関する総量規制は撤廃、自由化された。更に1856年には銑鉄の輸出も自由化、Sheffieldでは浸炭鋼生産が不要になり、ルツボ法による工具鋼生産コスト低減と新鋼種の開発を促した。

一方自由化により業務が縮小した採鉱冶金省 (Bergskollegium) は1857年に廃止され、残る部局は商務省 (Kommerskollegium) に吸収された。

そして1866年四階級制議会 (貴族、僧侶、市民、農民) が廃止、新に二院制議会が誕生する。

このように時代の流れに沿う自由化の推進がスウェーデン製鉄業の技術改革を大きく加速させた。反面これは中小製鉄所の淘汰という痛みも伴った。

Table3 Tanså製鉄所の冷風、熱風連続比較操業試験

	期間	日産量	比	木炭原単位	比
冷風操業	31 週間	4t (20.8skpd)	100	1.3t(90hl 54.25tunna)	100
熱風操業(300℃)	25 週間	6t (30.2skpd)	150	1.0t(65hl 39.05tunna)	73

木炭：10hl=1M³=150kg、12tunnor=20hl として換算。

3.2 鉄道の登場²¹⁾

鉄道の登場は鉄鉱石、木炭、銑鉄、棒鉄など重量物の輸送問題を一挙に解決した。

1825年9月27日イギリスStockton-Darlington間にGeorge Stephenson指導の下建設された世界初の鉄道も当初は貨物輸送のみで、旅客輸送1831年までは馬車鉄道であった。1830年9月15日には機関車輸送を前提とするLiverpool-Manchester間が開通した。

1829年10月に機関車コンペが行われGeorge StephensonのThe Rocket号が優勝したがスウェーデン人John EricssonもNovelty号で参加している。

スウェーデン最初の鉄道は狭軌として1849年フリークスタークラールエルフ (Fryksta-Klarälv) 間に鉄鉱石、銑鉄、棒鉄を輸送する湖上舁輸送と連絡する鉄道として建設された。3-4トン積の小さな貨車は湖岸から舁に直接載せられ運ばれた。舁と連絡する馬車鉄道も多数建設された⁶⁾。

最初の標準軌鉄道は大陸諸国よりかなり遅れて同様Bergslagen地方の鉄製品輸送のため1856.3月にノーラーエルバラーエーレブロー (Nora-Ervalla-Örebro) 間で私鉄として開通した。

その後幹線は国鉄、支線は私鉄の政策の下に外債により資金を調達、建設を進め、1862年11月8日には東海道線に相当するのStockholm-(イエーテボリ) Göteborg間、1859年開通のイエブレファルーン (Gävle-Falun) 間に続いて1879年12月1日にはBergslagen地方を縦断、Falun-Domvarfvet-Grängesberg-Grythyttan-Göteborgを結ぶ478kmの産業用私鉄、ベリスラッグスバーン (Bergskagsbahn) が開通する。この鉄道は鉄鋼産業の立地に大きな影響を及ぼし、Domnarfvet、ホフォーシュ (Hofors)、サンドビーケン (Sandviken) 等鉄道輸送を前提とした新製鉄所の建設を促す一方、沿線の中小製鉄所の大製鉄所への統合と廃業、所謂工場の死 (Bruksdöden) を促した²²⁾。

一方1879年S.G.Thomasにより開発された塩基性転炉法はスウェーデン北部Lapplandの高燐鉄鉱石の開発を促し、その僅か10年後の1888年にはイエリバラ (Gällivare) とボスニア湾の港ルレオ (Luleå) の間に鉄鉱石輸送鉄道が開通し、その後大西洋に面する不凍港ナルビク (Narvik) まで延伸される。北極圏を跨ぐこの鉄道は現在でも年間2000万トンのキルナ (Kiruna)、マルムベリエット (Malmberget) のペレットを輸送している。

一方鉄道の開通により木材産業も急激に勃興し、1870年代には総輸金額の45%を占める。木材価格の高騰は必然的に製鉄用燃料木炭のコストアップを惹起した。

しかし半面欧州諸国からの石炭輸入の路を開き、新興Sandviken製鉄所でも1868年以降輸入石炭やコークスの使

用が始まり、1887年には13,000トン、1900年46,000トンに急増した²³⁾。

4 ベッセマー法工業化の成功 1856-65年

近代製鋼法の先駆けとなったベッセマー転炉の工業化の成功はスウェーデン製鉄技術の高さとこれを援助したJernkontoretと共に世界に誇示した。

Henry Bessemerは1856年8月11日CheltenhamのBritish Association for the Advancement of Scienceで溶融銑鉄中に空気を吹き込むことによって鋼塊を製造する革命的プロセスを発表した。しかし翌1857年、Bessemerと彼の特許を買った会社によって行われた試験はことごとく失敗に終わった。Bessemer自身も開発資金の中から10,000ポンドを夫人名義にするほど追い詰められる⁸⁾。

スウェーデン、ノルウエーでも特許を取得したBessemerは英国の大商社Hoare, Buxton & CO並びにスウェーデンのGävleのエルフストランド社 (Daniel Elfstrand & CO) と密接な関わりを持つディーラー、クレーマン (Pontus Kleman) と関係を持つようになり、1857年春Klemanにレフラー (Carl Johan Leffler) の指導の下にドロムシェー (Dromsjö) 製鉄所でベッセマー法に基づく試験を行う事を許諾した。しかしこの試験も満足すべき成果を収める事が出来なかった。

1857年5月、Elfstrandと関わりがあり、1857年4月27日にスウェーデンとノルウエー両国に対するベッセマー転炉の特許を取得したロンドンの会社Hoare, Buxton & COをElfstrand社のコンサルタント、イエーランソン (Göran Fredrik Göransson) が訪問、スウェーデンにおけるベッセマー法の特許実施権の5分の1 (2000ポンド) を買収し、彼がエッシュケン (Edsken) の高炉でベッセマー法の試験を実施し、Carl Johan LefflerがBessemerの代理人とする契約を交した。ちなみに当時の2000ポンドは普通棒鉄200トンの価格に相当する¹⁾ (Fig.7)。

1857年11月3日、GöranssonはEdskenで炉容約1トンの固定炉体を使用した試験を開始したが、熔鋼温度が上がらず、製品はスラッグが混在、不均一で失敗に終る²³⁾。

しかしこの失敗の中から、Dannemora、ロングビーク (Långvik) の含マンガン鉄鉱石が良い事が明らかとなった。

その後GöranssonはElfstrand社の倒産という危機に直面する。しかし1858年1月Jernkontoretは50000 rdr rmtの開発資金をGöranssonに支給し、Edskenでの試験は彼の指導の下、Jernkontoretから技術者 (P.D.Malmqvist, C.O.Troilius, A. Grill) の協力を得て継続された¹⁹⁾。

1858年7月18日転機が訪れた。Göranssonは空気供給量

を増すため固定炉体の羽口数を再度倍増させ、その結果吹錬時間は25分から10分に短縮された。これによって溶鋼の温度と流動性はより高くなり、インゴットはスラッグ巻込みの無い高品質のものとなった。ヘーグボー（Högbo）製鉄所でのインゴット鍛造試験も成功裏に終わった²³⁾。

1858年7月18日から9月8日までの50日間に196チャージの試験溶解が行なわれ、95トンのインゴットを生産、インゴット歩留は60%、酸化損失は14.4%であった¹⁹⁾。

1858年秋、Göranssonは英国を訪問、Högboで鍛造したEdskenのインゴット製品の品質を報告、ベッセマー法の将来を誇示した。これを受けHenry BessemerはSheffieldに

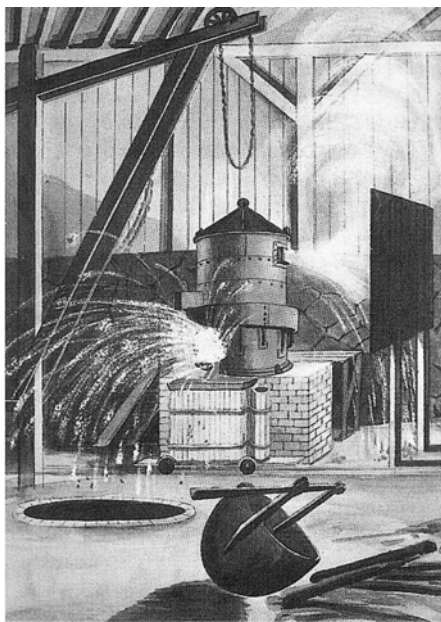


Fig.7 Edskenで試験吹錬中のベッセマー転炉⁸⁾

製鋼会社Henry Bessemer & COを設立、更に彼の特許をトン当たり1ポンドで買ったシェフィールドの会社John Brown & COはその生産工程をベッセマー法に変更した。

Edskenの成功が広く知れ渡ったスウェーデン各地でベッセマー設備の建設が始まった。第一号はベスタンフォーシュ（Västanafors）のThomas Aspelinの設備で1860年末に稼動した。しかし数回の試験吹錬後プロワー能力不足のため休止されねばならなかった。カールスダール（Cahlsdahl）の設備も1860年稼動したが、その生産量は1862年初めてカウントできる量に達した。1861年にはLångshyttanのベッセマー工場が稼動、同年末にはシリヤンフォーシュ（Siljanfors）が加わった。

1862年ロンドンの万国博覧会でシェフィールドのHenry Bessemer & COとJohn Brown & CO、フランスボルドー近傍のSireuilのJames Jackson製鋼会社、スウェーデンのEdsken-Högbo、Carlsdahl、Långshyttan、Siljanfors等からベッセマー鋼が展示され、この後ベッセマー法の世界市場における大躍進が始まった¹⁹⁾。

1862年3月動力源（水力）と輸送手段（鉄道）を前提としてストールシェーン（Storsjön）湖の北端Sandvikenにベッセマー法をベースとする新製鉄所Högbo Stål och Jernverk ABの建設が開始された。水力源を確保するためイェルダオース（Jädraås）より運河が掘削され、輸送ルートはGävle-Dala鉄道によりGävle港と結ばれた。

Fig.8は1865年に建設された世界初のベッセマー転炉をベースとする最新鋭Sandviken製鉄所の工場配置図を示す。電力の無い時代、人力、軸流式水力、蒸気動力による高炉排ガスを利用する熱風炉、焙焼炉を備えた最新式高炉、傾注式ベッセマー転炉2基、蒸気ハンマー3基、タイヤ圧延機一式、

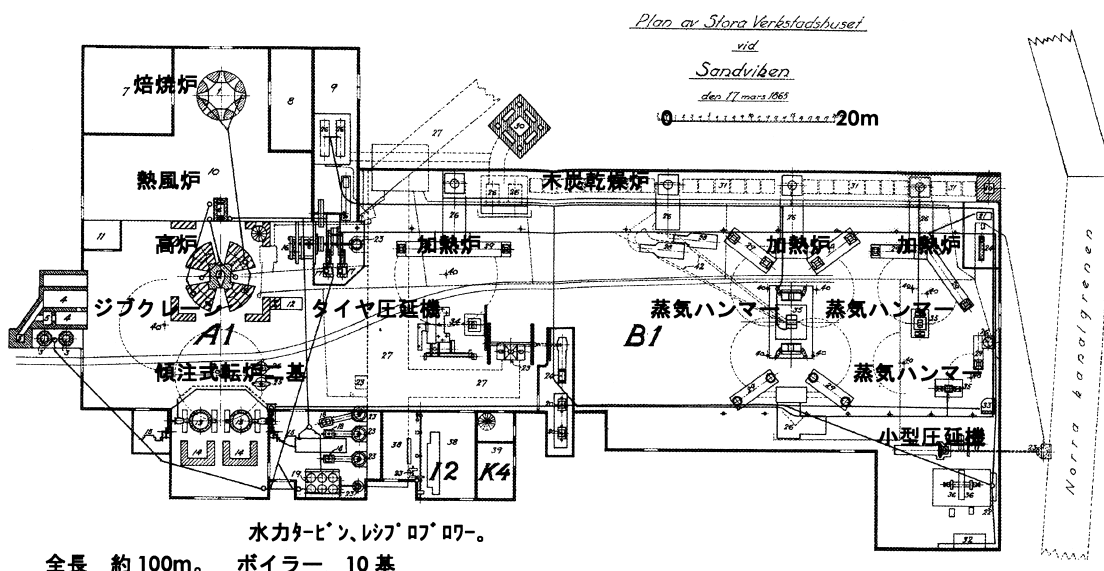


Fig.8 1865年新設Sandviken製鉄所の高炉、転炉、圧延、鍛造工場レイアウト²³⁾

Ekman式加熱炉多数が認められる²³⁾。

高炉、転炉、ハンマー、圧延機の周辺は人力ジブクレーンが多数配置され、高炉―転炉間は二基のジブクレーンで繋がれている。

しかし翌1866年、新鋭Sandviken製鉄所を保有するHögbo Stål och Jernverk ABは多額の建設資金と開発費用の負担に耐えかね倒産、1868年5月Göranssonを社長として新会社Sandvikens Jernwerks ABが誕生する。今日のSandvik ABの母体である。

ベッセマー転炉の華々しい成功にも拘らず1860年中期迄はEdskenとSandvikenだけが相当量のベッセマーインゴットを生産した工場であった。(1865年Sandvikenは最大3,000トン近く、Edskenは約1,300トン) CarlsdalとSiljanforsでの生産量は500トン止り、Långhyttanでは1861-63年は試験段階の域を出なかった。

1860年代の最終年に初めてスウェーデンにおけるベッセマー法の大飛躍が起こった。

Sandvikens Jernwerks ABではベッセマーインゴットは急激に大きな比率を占め、1880年代初頭に9000トンに達した。Västanforsでは1866年二基のベッセマー転炉が設置され、これにより生産量は徐々に増加し、1884年には4000トンを超した。1870年代の初頭からスヴァールトネース(Svartnäs 1871-75)、フォーシュバックカ(Forsbacka)、イエスンド(Iggesund)、ニイハマー(Nyhammar 1872)、Långhyttan、ウルフスヒュッタン(Ulfshyttan 1873)、グスタフスフォーシュ(Gustafsfors 1880にHagforsに移設)、Björneborg、ボングボー(Bångbo 1874)等で大規模な建設が始まった。その後更にニークロッパ(Nykroppa 1876)、Domnarfvet(1874)、ステルンフォーシュ(Stjernfors 1879)、アーベスタ(Avesta 1882)、Hofors(1884)等でベッセマー工場が建設された¹⁹⁾。

一方ルツボ製鋼法の大型化と大量に発生した屑鉄の再利用を目的とする火炎炉による鋼溶解炉、即ち酸性平炉法はベッセマー転炉に遅れる事約6年、1864年4月、フランスでマルチン(P.Martin)により工業化(1.5トン炉)される。彼は石炭を燃料とする発生炉ガスとシーメンス(W.Siemens)の発案による蓄熱炉を利用した。しかし同年9月、スウェーデンでもルンディン(F.Lundin)がムンクフォーシュ(Munkfors)製鉄所で蓄熱炉と彼自身の発明による木材、おが屑を燃料とする発生炉ガスを利用し、加熱炉を転用した試験炉(約200kg)で鋼の溶解に成功している³⁰⁾。

酸性平炉法その後15年間にシラフォーシュ(Kilafors. 0.2トン)、レセフォーシュ(Lesjöfors (1.2トン)、ボフォーシュ(Bofors 1.2トン)、ドムナルベット(4トン)に導入され、1895年にはベッセマー法を凌駕するに至る^{19, 30)}。

尚塩基性炉法1880年フランス、テラノワール(Terra Noire)とクルーゾー(Creusot)で開発され、スウェーデンには1890年、イエーダー(Jäder)で導入されている³⁰⁾。

スウェーデンの国情に合った技術とそれに基づく新プロセスの開発速度も一段と加速されてきた。

因みに低燐、低硫のスウェーデン鉄鉱石を原料とできる酸性平炉鋼はその後100年以上に亘って軸受鋼で代表される高品質スウェーデン鋼を世界市場に供給し、かつてSheffieldを席巻したVallon鍛造棒鉄の再来となった。

5 古典的製鐵法のその後

1858年(安政5年)Edskenにおけるベッセマー法の成功、1864年(元治元年)Munkforsで試験された酸性平炉法にも拘らず数百年の歴史をバックに古典的製鐵法はしぶとく残った。

Table 4に示す如く1887年に至っても棒鉄生産の85%は炉床精錬法に依存し、インゴット法は平炉鋼が急成長した1895年に初めて過半を越えた。

1936年(昭和11年)に至ってもVallon法とLancashire法は粗鋼の2.5%を生産、ルツボ鋼の483トンと共に健在であった。

全体では平炉鋼65%、電気炉鋼20%とトーマス及びベッ

Table4 1887、1936年の棒鉄と粗鋼のプロセス別生産量^{19, 20)}

プロセス	1887		(19)	1936		(20)
	工場	炉	生産量 t	炉	生産量 t	
Vallon	10	30	6,977	?	902	
Franche-comté	67	90	12,210		0	
Lancashire	113	406	201,536	44	23,856	
Puddle	1	3	381		0	
炉床法計	191	529	221,104		24,758	
底吹転炉			19,688	11	110,237	
平炉			14,545	62	*660,417	
電気炉			0	41	206,221	
ルツボ炉			0	2	483	
インゴット法計			34,233	106	977,358	
総計			255,337		**1,002,116	

注1：*内酸性平炉鋼 34.7%。 **内特殊鋼 41.3%

注2：生産量は棒鉄と粗鋼が混在する。

Table5 1936年のプロセス別鉄生産量²⁰⁾

	基数	生産量 t	比率	T/年	注
高炉	41	529,482	90.1	12,914	木炭鉄比率 54.4%
内 木炭高炉	35	277,261	47.2	7,921	転炉向 34.9%
コークス高炉	5	250,658	42.6	50,132	平炉向 44.4%
混合高炉	1	1,563	0.3	1,536	内酸性平炉向 33.9%
電気製鉄炉	10	58,278	9.9	5,828	
総計	51	587,760	100	11,524	

セマー転炉鋼を遥に凌駕している。

Table 5は1936年の銑鉄生産を示すが、依然として木炭銑が過半を占め古くからのスウェーデンの特徴を良く表している。しかし木炭高炉は日産平均僅か21トンと80年前のレベルで、ここにも古い設備がしぶとく生き残っている。

1964年筆者が留学時、Ramnäsで最後のLancashire法を見学する機会を得たが、正直「今ごろ何でこんなプロセスを」という感を禁じえなかった。聞けば船舶用大型チェーン素材に向けるとの事であった。

八幡製鐵洞岡でLD転炉の試験が始まって10年程で平炉が消滅した様に技術革新が驚異的スピードで進んだ戦後の日本では考えられないゆっくりとした時間の流れがそこにあった。

最後にスウェーデンにおける古典的プロセス、それを司った制度の墓銘碑を示す (Fig.9)。

参考

1887年日本の鉄生産量（銑鉄、鍊鋼、銅等の総計）は407万貫、約15,200トンであった。官営八幡製鉄所が稼動した1901年は同1868万貫、約70,000トン、しかし銑鉄が過半の55,000トンで、たたら法によるものであろう鍊鋼は1545トン、平均単価110円/トンと記録されている。この価格は銑鉄価格37円/トンの凡そ3.3倍、銅57円/トンの2倍であった²⁵⁾。

結び

今回報告した19世紀までスウェーデンは良質の鉄鉱石のおかげで、ヨーロッパ諸国から人と技術を導入して製鉄国と

しての地位を築いたが、その製品は殆どが棒鉄形状の原料軟鉄で、輸出先で浸炭処理後初めて鋼となった。

しかしスウェーデンは依然として農業国であった。施政者の努力にも拘らず少量の銑鉄製大砲を除き、棒鉄から製品を製造する産業が無く、棒鉄は殆ど全量輸出されていた。

しかし20世紀に入るとスウェーデンはノーベル賞の審査国となるほどの実力をつけ、更に造船業、自動車工業、軍需産業、電気工業、製紙工業等が相次いで興り、工業国へ脱皮する。製鉄業も量産される普通鋼鋼材は輸入し、特殊鋼への特化が進む。二度の大戦で中立を維持できた背景には製鉄業以外の工業力が大きく影響した。

第二次大戦後、スウェーデン製鉄業は日本を初めとする新興製鉄国の前に普通鋼の国有化、特殊鋼の国際的再編、統合を行い現在に至っている。

1858年世界に先駆けベッセマー法の工業化に成功した現在のSandvik AB.も過去140有余年の間、新製品開発に務め、ニッチを指向し、2002年の売上高7200億円、純利益率7%、輸出比率95%の世界企業への変革を遂げている³¹⁾。

この国家と企業の変貌は現在中国をはじめ新興諸国の追い上げを受けている日本の製鉄業にとっても一つの指針を示していると考えられよう。

本文は2002年8月恩師、故東北大学名誉教授 的場幸雄先生を記念する川渡セミナーでその一部を紹介したスウェーデン製鉄史を訂補して、文化人類学的側面も加えながら纏めたものである。

Jernkontoret刊行の製鉄史に関する多くの文献を中心に、スウェーデンをはじめ欧州各地で蒐集した文献、資料、写真などを参考とした。中でも興味があったのは2002年1月

Bergslagen の鉄鉱山	☆BC ?	† 1992	Dannemora	Uppsala 県
Fire-setting 法	☆BC ?	† 1800 年代末?		
吹鍊炉(Bloomery)	☆BC 500?	† 1870 年代?	Dalarna 地方	
農民高炉	☆1150 ?	Lapphyttan ? † 1907	Löa	Örebro 県(26)
木炭高炉	☆1150 ?	Lapphyttan ? † 1966	Svartå	Örebro 県(26)
ドイツ鍛造法	☆1540 ?	† 1860 年代?		
Vallon 鍛造法	☆1630 ?	Uppland 地方 † 1944	Strömbacka	Gävleborg 県(26)
Lancashire 鍛造法	☆1829	Bäckfors † 1964	Ramnäs	Västmanland 県
銑鉄輸出禁止令	☆1739 (1604 ?)	† 1856		
採鉱冶金省	☆1645	† 1857		
四階級制議會	☆1435 ?	† 1866		

Fig.9 スウェーデンにおける古典的プロセス、制度の墓銘碑

JernkontoretのTechnical Director. Dr. Hans Sandberg氏より贈られたHans Furuhausen著の「Mercurius och Vulcanus : Mercury and Vulcan」(1997. Jernkontorets Bergshistoriska Skriftserie No.32)であった。本著は題字の通り「商業の神と鍛冶の神」の葛藤をどちらかといえば社会的、文化的背景に力点をおいて歴史的に説いた20世紀当初までの「スウェーデン製鉄史」で、技術的側面だけを取り上げた技術史の多い中の異色の作で、本文のスケルトンを構成するのに大変参考となった。

書き終って見ると、特殊鋼に携わって四十有余年、特殊鋼専業国家としてオーストリアと共に異色の存在であるスウェーデンがより身近な存在としてそこにあった。

最後に川渡セミナーでその一部を紹介した吹錬炉(低シャフト炉: broomary)に始まりLancashire鍛造法に至る「古典的酸性製鉄プロセスと技術」、そして避ける事ができない20世紀迄の「戦争と鉄」は本題の性格上総て割愛せざるをえなかった事をお詫びしたい。

参考文献 (3回連載分通し番号で記載します)

- 1) Forsmark och Vallonjärnet, Forsmarks Kraftgrupp AB, (1987), cover, 7, 8, 20, 100, 194, 227.
- 2) Hans Furuhausen : Mercurius och Vulcanus, Jernkontorets Bergshistoriska Skriftserie 32, (1997), 10, 16, 17, 19, 25, 28-30, 38, 41, 44, 57, 69-71, 72, 90, 91, 99, 105, 113, 131, 193.
- 3) G.E.Sandström : History of Tunneling, 31.
- 4) クリステアーヌ・エリュエール: ケルト人, 創元社, (1994), 162.
- 5) Ellen Hoigård Hefseth : Brochure, Historisk Museum. Oslo, (2002), 58, 59.
- 6) Boken om Bergslagen, Förlaget Rubicon, (1988), 50-57, 102-108.
- 7) Brochure, Historisk Museum. Oslo, (2002)
- 8) Iron & Steel. Vol.3, Jernkontoret 250 years Conference Proceedings, (1997), 17, 22, 23, 39, 42, 70, 80, 102.
- 9) レジス・ボワイエ: バイキングの暮らしと文化, 白水社, (2001)
- 10) Grosser Atlas zur Weltgeschichte, Georg Westermann Verlag, (1976), 75, 87.
- 11) Nils Björkenstam : Saxhyttans Nya Masugn, Grythyttan. En antologi Del.2., (1985), 237-249.
- 12) Erik Sköld : Järn vid Helleforsverken under 200 År., (1991), 7, 29.
- 13) National Geographic Atlas of World History, National Geographic Society, (1997), 134, 197.
- 14) Birger Steckzen : Bofors Historia, AB Bofors, (1946), 17.
- 15) Karl-Gustav Hildebrand : Swedish Iron in the 17th & 18th Centuries, Jernkontorets Bergshistoriska Skriftserie 29, (1992), 11-12, 51, 66-67, 97-98, 145.
- 16) Ernst Ture Ström : Hyttebruket i Grythyttan, Grythyttan. En antologi Del.1., (1985), 162-176.
- 17) Carl Peter Thunberg : Resa Ut Europa, Africa, Asia 1770-79, Tredje Delen. Resan til och uti kejsaredomet Japan, 1775-76, Upsala. (1791), 316, 342.
- 18) シルビア・ジョンソン: 世界を変えた野菜読本, 晶文社, (1999)
- 19) Arthur Attman : Svenskt Järn och Stål 1800-1914, Jernkontorets Bergshistoriska Skriftserie 21, (1986), 10, 32, 38, 54, 55, 57, 60, 67.
- 20) Sveriges Jernhantering 1936, Jernkontorets Annaler., 121 (1937), 735-744.
- 21) Sveriges Järnvägar hundra år. 1856-1956, Kungl. Järnvägsstyrelsen, Stockholm, (1956), 47-49.
- 22) Bergslagens Järnvägar 1879-1979, Bergslagens Järnvägssällskap, (1979), 30. 他
- 23) Ett Svenskt Jernverk. Sandviken 1862-1937, Armqvist & Wiksells Boktryckeri AB, Uppsala, (1937), 32-35, 106, 400.
- 24) Transformation. Sandvik 1862-1987, Sandvik AB, (1987)
- 25) Henry Dyer : Dai Nippon, Blackie & Son. London, (1905), 158.
- 26) Bert Olls : Brand Smeder och Gamla Bruk, Ekelids Förlag, (1996), 10. 他
- 27) Lars Paulsson : Gruvan : Lärarhandling, Tekniska Museet, Stockholm, (1999)
- 28) Kulturminnen och Kulturmiljövård, Sveriges Nationalatlas, (1994), 57.
- 29) Personal Information.
- 30) Ivar Bohm : Srenska Sura Martinprocessen 100 År, Jernkontorets Annaler, 154 (1970) 457-477.
- 31) Sandvik. Annual Report 2002, Sandvik AB, (2002)

(2003年1月17日受付)