

戦後の日本鉄鋼業の回想*

中山 龍夫**

はじめに

昭和24年に縁あって川崎製鉄に入社し、日本の製鉄業が戦後の荒廃より立ち直り、昭和48年には粗鋼の生産が1億トンに達して世界の先頭に立つまでの発展の中で働いた思い出より、色々な革新的技術をエピソード的に拾い挙げてみました。

1 戦後の鉄鋼業の復興の経過

世界の粗鋼生産量の戦前戦後の状況を表1に示す。日本の生産量は戦前、戦中は年産約700万トン、最高は800万トン（満州を含む）に達したが、終戦の昭和20年には200万トン、翌21年は56万トン、22年は95万トンと壊滅的な状況であった。GHQは日本の生産能力の上限を200万トンとし、過剰の設備を賠償に当てる計画であったが、対ソ連防共と朝鮮戦争（昭和25年）という情勢変化により、一転して日本の製鉄業を復興させる方針に変わった。GHQの招きで米国より製鉄業の診断と技術指導のチームが来日し、立派な御指導に日本の担当者は感激した。更に昭和25年より日本側の調査団を組ませて米国に派遣する親切さであった。調査団は、日米間の驚くべき技術の大差を報告した。特に製鋼では平炉の酸素吹き込み精錬技術であり、圧延では鋼帯の

連続圧延（ストリップ・ミル）の発達でした。

日本の復興の第一歩は調査団の報告に刺激されて始まった。八幡製鉄と川崎製鉄は直ちに平炉の酸素吹き込み精錬の実験に着手した。川崎製鉄では神戸の葺合工場に昭和25年11月に100m³/hの酸素発生装置を建設し実験を開始した。翌26年12月には2000m³/hの酸素発生装置を建設し、葺合工場の10基の平炉の全部が酸素製鋼の操業に入った。その結果、粗鋼の生産量24万トンが昭和28年には40万トンという大增産となった。

この実験は大変な強行突破の実験であった。熔鋼中の酸素の精密分析法の開発から始めねばならなかった。炉温が極めて高温なため酸化鉄の煙による耐火物の熔損が甚だしく、手探りの実験であった。赤茶色の酸化鉄の煙が猛然と煙突より噴出し「七色の煙」と世間を騒がせ、忽ち工場の屋根は赤茶色になったのである。工場外にも多大のご迷惑をお掛けした事でしょうが、特に問題にならない時代でもあった。公害問題はこれから10余年も過ぎてから起こるのである。誰が悪いと言うのではなく、社会全体の大きな流れの問題であると思われる。

* 第47回京化クラブ例会〔1994.05.07〕講演

** 川崎製鉄株式会社顧問、元常務取締役葺合工場長
(京都大学理学部昭和14年卒・工博)

表 1. 国別粗鋼生産実績 (単位: 万トン)

(暦年)	日本	米国	ドイツ	イギリス	旧ソ連	世界合計
1941	683	7515	2084	1251	1450	15400
45	196	7230	30	1201	1850	11830
46	56	6042	255	1290	1360	11150
47	95	7702	306	1293	1470	13600
48	172	8041	556	1512	1870	15550
49	311	7074	916	1500	2330	16000
50	484	8785	1212	1655	2730	18930
56	1111	10452	2967	2099	4870	28400
60	2214	9007	3789	2470	6529	34650
65	4116	11926	4119	2744	9100	46120
67	6215	11541	4139	2428	10224	49510
69	8217	12815	5050	2685	11032	57500
70	9332	11931	5047	2832	11589	59700
73	11932	13681	5616	2665	13148	70000
79	11175	12369	5306	2147	14909	74990
80	11140	10146	5115	1128	14793	71830
90	11034	8928	4402	1790	15441	77000
91	10965	7974	4217	1634	13267	73300
92	9813	8310	3972	1600	11427	71275(*)

(*) 中国: 8004; 韓国: 2785; 台湾: 1064

調査団の第2の重大事項は鋼帯 (コイル) の連続圧延である。日本では昭和16年に八幡製鉄にやっと1基が設置されていたが、米国では大正15年(1926年) Butler工場に近代式四段連続熱間圧延機が初めて建設され、昭和16年には既に28基が運転されていた。連続圧延機は機械と電気工学の最高の技術の組合せで、戦後の日本の重工業の発展を待って、やっと国

産化ができ、更に鉄鋼技術プラントの輸出に加わるまでになった。日本の鉄鋼業の強引な増産と設備投資が日本の重工業の進歩を刺激し、「鉄が鉄を食う」と評されたように、製鉄所の建設に膨大な鉄鋼の需要消費があったのである。こうした米国の技術や設備との大差を痛感した川崎製鉄の西山社長は、千葉に新しく製鉄所を建設する決意をしている。昭和

25年11月に建設計画が発表された。それは建設費 163 億円、建設は高炉 2 基（能力 500 トン/日×2）、平炉6基（容量 100 トン×6）、分塊圧延機 1 基、熱間圧延機 1 基、冷間圧延機 1 基を主体とした一貫製鉄所であった。建設は昭和 26 年 2 月に、海岸の埋め立て工事より始まり、翌 27 年 2 月に高炉の着工、28 年 6 月 17 日に感激の火入れ式が行われた。ついで平炉と圧延機に着手、昭和 29 年 9 月に第 1 期工事として、高炉 1 基、平炉 3 基、分塊圧延機 1 基が完成、操業運転に入った。戦後初めての新しい技術に基づく一貫製鉄所の操業は日本の近代鉄鋼業の大躍進の第一歩であり、また、重工業の発展の端緒となった。

2 戦後に開発された高炉の進歩

戦争で刺激され急速に進歩した科学技術は鉄鋼業の生産技術に大変な改革をもたらした。例を高炉に見ると、改革された技術の内容は極めて多様で、説明しきれないから、一例として川崎製鉄千葉工場での経過を表2に示す。

第 6 号高炉は昭和 52 年の火入れ以来、

16年間無休で操業され、昨年連続操業期間の世界記録を超過し、現在尚操業を継続中で総出銑量は 4900 万トンに達し、記録を更新中である。こうした内容積 4000m³ 以上の新鋭高炉は世界に 26 基在り、その内の 16 基が日本に在る。これが日本製鉄業の強力な礎であるが、一方次世代の製鉄法として、高炉コークス法を廃止して、鉱石より直接製鉄を目的とした「熔融還元製鉄法」が日本製鉄連盟を中心に昭和 63 年に開始され、平成 5 年 10 月に銑鉄 500 トン/日のパイロットプラントが操業試験に入り、将来が期待されている。こうした高炉の進歩を支えてきた技術の内、重大な点は、高炉内の化学反応が明確になった事であった。従来、操業中の高炉内の状況はブラックボックスで、化学反応の平衡論より推定された条件と、若干の温度やガス分析の測定より推測されていたのであった。高炉内の状況を正確に理解するために操業中の炉を停止し、大量の水を注入して急冷し、冷却後、炉内の堆積物を上部より精密に測定しながら発掘し（考古学の発掘調査のごとく）発掘物の分析より、炉内のどの

表 2. 川崎製鉄千葉工場の高炉の経過

炉号	建設 (昭和)	炉内径 (m)	炉内容積 (m ³)	炉頂圧力 (kg/cm ²)	能力 (トン/日)
1	28.6	6.5	877	0.04	600
2	33.3	7.5	1172	0.04	1000
3	35.4	8.8	1686	0.04	1500
4	36.8	8.8	1689	0.04	1500
5	40.3	10.0	2140	1.1	3600
6	52.6	14.1	4500	1.5	10000

部分でどんな化学反応が起きていたかを調査したのである。大型高炉では、大変な危険と費用が掛かったのであるが、新日本製鉄では昭和43年以來数次にわたりこの調査をされ、また、他の製鉄各社も同様の調査を行い、炉内のどの位置でどのような化学反応が起きているのかを正確に把握できるようになった。その成績の例を図1に示す。

この大変な努力により、従来のような推定ではなく、正確な炉内の状況と化学反応の知見に基づく正しい炉の操業法がコンピューターコントロールで行われることになり、前述の千葉6号高炉の大記録に連った。

高炉のこうした生産性の向上には極めて多様な改良が施され、その集積の上に完全な自動操業が成り立っていることも

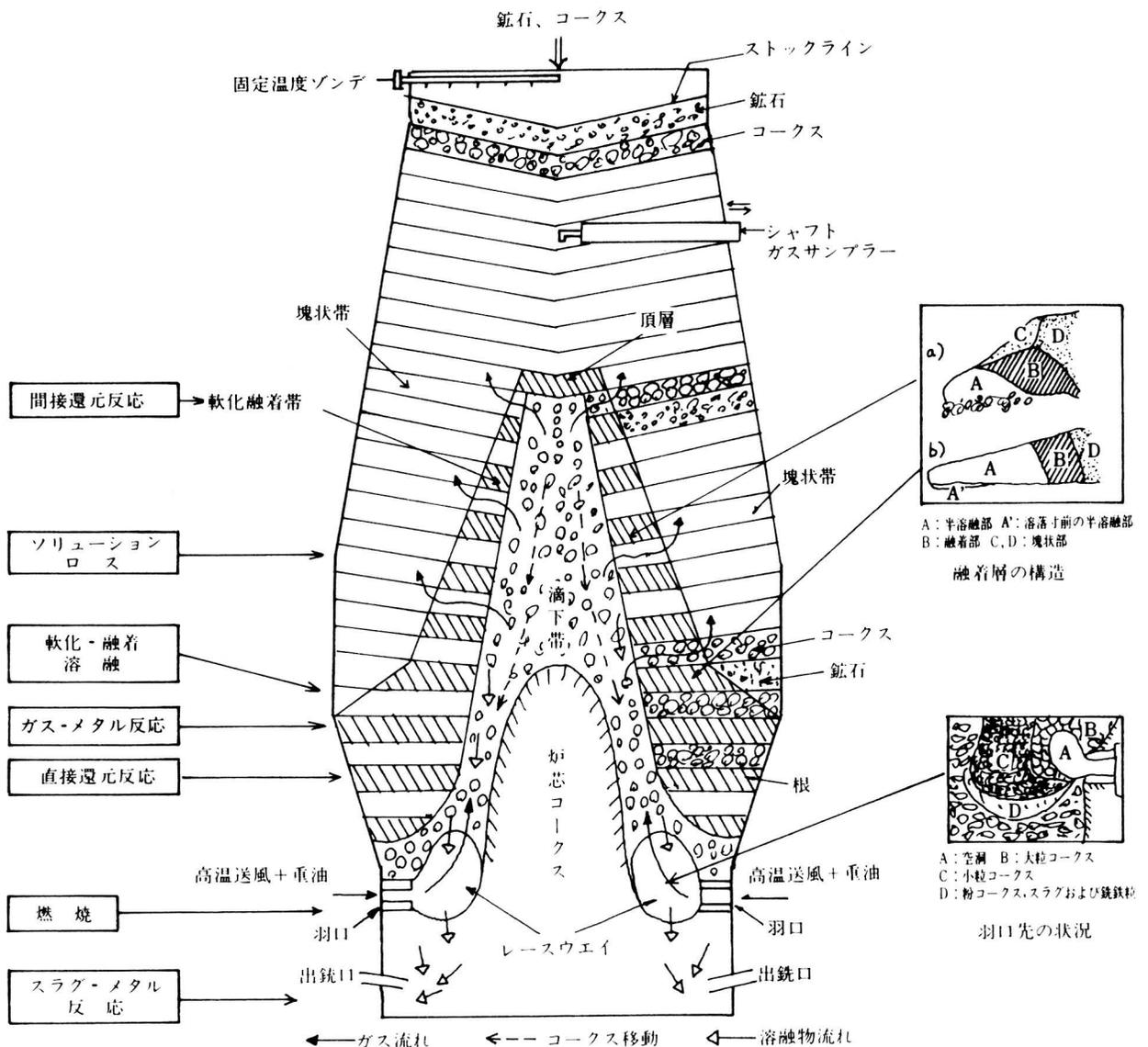


図1 高炉内の化学プロセス

理解せねばならない。例えば、炉頂よりの鉬石やコークス等の装入装置の大改革、炉内のガス圧力を高圧にして鉄鉬石の還元反応を促進する改良、炉頂廃ガスに依るガスタービン発電等、欧米で開発されたものであったが多くは日本でこれを非常に有効に改良した技術であることを知らねばならない。

3 戦後の製鋼技術の進歩

近代製鉄では高炉で鉄鉬石を還元して銑鉄を造る。銑鉄の成分は大体 C: 4.5%, Si: 0.3%, P: 0.13%, S: 0.03% 程度の不純物を含んでいる。銑鉄を平炉にて精錬し、これらの不純物を除去して鋼にするのが二段階精錬法である。CはCOガスに、SiはSiO₂に、Pはリン酸石灰になり、いずれも酸化して除去されるが、Sは石灰の還元反応によりCaSとして除去される。酸化反応と還元反応が平炉では混合して行われるので十分な除去ができず、また、有害な酸素が残留して鋼の材質を悪くし、精錬には限界があった。一方、最近要求される高級鋼は極めて高純度な純鉄である。これは近年の自動車、合成化学装置、電磁気製品の進歩にともなう厳しい高性能鋼の要求に刺激されて開発された高級鋼である。例えば、C < 0.001%, N < 0.0015% にすれば連続焼鈍に依り自動車用の超深絞り鋼板となる。フェライト系ステンレス鋼では C + N < 0.015% の高純度にすれば、耐蝕性、加工性、熔接性が著しく向上する。超低鉄損値・超高電磁誘導値の高級珪素鋼は C < 0.001%, N < 0.0015% の純度が要求される。製鋼操業の戦後の大変革は、平炉の酸素吹き込み精錬に始まり、この精錬の化学反応の解析により、製鋼操業の生産性を高めるためには、化学反応の平衡論でなく、拡散などの速度論で説明せねばならない事が

理解されてきた。そしてこれが、より合理的な上吹き転炉(LD炉: Linzer Dusser Verfahren) に代ってきた。LD炉は、1952年 Linz Donawutz 工場の15ト炉で成功し、1957年(昭和32年)日本の八幡製鉄が50ト炉で技術導入し、忽ちその優秀な性能の故に世界に広がり、容量は300トと巨大になり、大変な改良が進められた。欧米では熔鋼の攪拌を良くするために底吹き技術を開発し、また酸素の他にアルゴン、窒素、石灰粉を吹き込む等の改良が行われた。川崎製鉄に於ける例を図2に示す。熔鉄に溶在する炭素と酸素の平衡(C+O=CO)は、図3に示すごとく、残留炭素を低下させ、特にC < 0.05% になると残留酸素が急激に増加し、鋼の材質を著しく悪化する。当然の事ながらCOガスの圧力を下げれば、残留する有害な酸素を除去することができる。熔鉄にはその他有害なNやHのガス成分も存在するので、真空脱ガス装置がいろいろ開発されたが、この中で現在多用されているRH装置(1957年、熔鋼の真空脱ガス処理を行うためにドイツのRuhrstahl社とHeraus社が大容量の多段式Steam Jet Vacuum Pumpを基にして開発に成功)は、1963年(昭和38年)日本に導入され、1975年には処理容量340トという巨大なRH装置が新日鉄大分工場に建設された。更に日本ではこれに改良を加え、酸素の吹き込みによって極度の脱炭素処理を行いC=0.001%の極低炭素鋼の製造に成功した。また、微量のAl、Ti、Nb等の合金元素を0.001%の精度で制御添加する技術が日本で開発された。RH装置は図4に示すごとく、上部は巨大な真空室で真空ポンプにつながり、下部には2本の吸い上げ管が在り、その1本にはアルゴンガスを吹き込み、熔鋼をバブルリフトし、他方の管より熔鋼は下降して取鍋に戻り循環する。図に

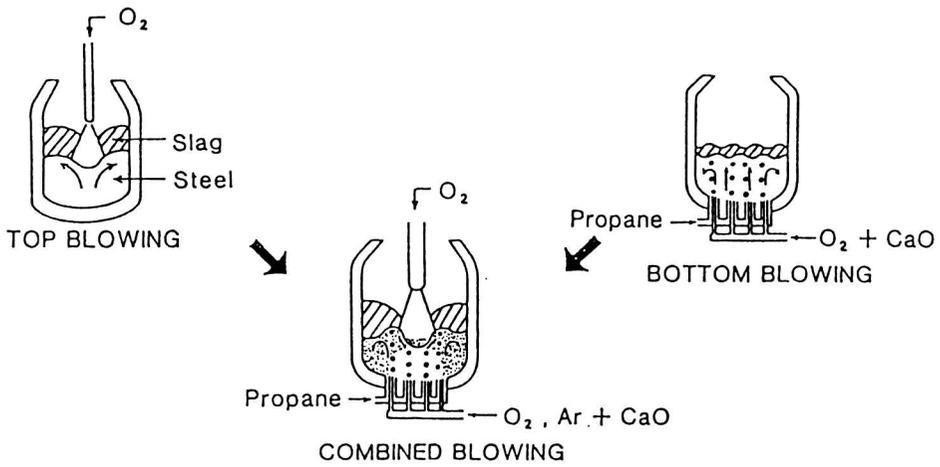


図2 LD炉の進歩と改良

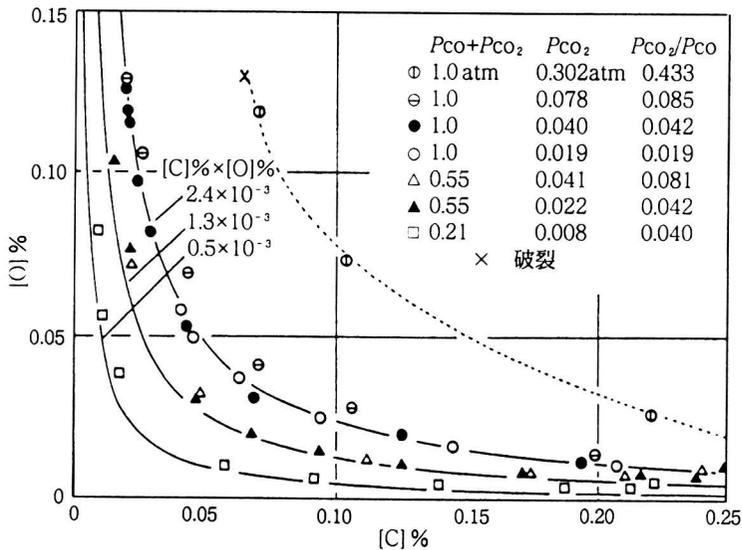


図3 脱炭反応中の酸素と炭素濃度の関係

は日本の各社の改良も併せて示した。前述の高性能の特殊鋼を造るために炭素の量を0.001%まで下げる苦闘の経過を図5に示す。

高炉で造られた熔銑より鋼を精錬する際の主反応となる脱炭素操作は、酸素吹き込み平炉より、LD炉となり、更に後処理として真空処理（RH処理）により高純度鋼にする一連の開発があったが、炭素以外の不純物Si、P、Sの除去の化学反応に対してはなお不合理不十分であった。LD炉処理の前にこれらの不純物を

三段階で各個に除去操作を行うのが合理的であるとして、新しいシステム（図6）が昭和58年ごろより稼働し始めた。図に示すごとく、Si（0.3~6%）は高炉の出銑口でソーダ灰や石灰粉を酸素と共に吹き込み SiO_2 として除去すると、 $Si = 0.1 \sim 3\%$ に低下する。P（0.13%）とS（0.10%）は混銑車にて高炉よりLD炉への輸送途中にて、図7のごとく、個別に除去される。すなわち、Pはソーダ灰で、Sは石灰カーバイド（ CaC_2 ）を使用して、それぞれ仕上がり時には $P < 0.02$

% 及び $S < 0.01\%$ の純度となる。こうして化学反応として合理的に操業され高純度鋼の安定した大量生産が可能となった。

これに呼応して、精錬された高品質の熔鋼を鋳型に鋳込み鋼塊を作るために、戦後、連続鋳造の技術が開発された。この技術は、歩留まりや均一性の向上と大幅なコストダウンを可能にするので、急速に世界に広がった。スイス、西ドイツ、ソ連、米国で戦後いろいろ開発され、昭和30年頃実用化が軌道に乗り、日本にも昭和35年スイスのコンキャスト社より技術導入された。以来多様な改良と進歩により、昭和45年以後急激に普及し、現在では特殊な形状などで連続鋳造に適さない鋼材を除いて、殆んど100%の熔鋼は連続鋳造である。連続鋳造は鋼材造りの上流工程の最後に当たり、鋼の内質や表面性状に重大な影響を与えるため、安定で精密な操業と、かつ外部からの汚染等による品質低下の防止に、大変な苦心と技術が注ぎ込まれている。その例を図8に示す。

今後も連続鋳造は、鋼材製造の下工程の圧延と合理的に結合させるために、なお一層改変されねばならない。こうした改変に日本は大変努力し成果を挙げているが、連続鋳造の基本の開発は欧州、特にスイスのコンキャスト社を中核とした技術であった。昭和30年以前は日本にはまだ連続鋳造開発の余力は無かった。また、LDやRH等の開発は欧米において昭和30年頃より35年にかけて行われ、ちょうど日本が戦後の荒廃より立ち直り、大增産のために新製鉄所の建築を開始する時期であって、日本はこれらの新技術を容易に採用できたのは幸運であった。

4 戦後の珪素鋼（電磁鋼）の開発

珪素鋼とは電気機器の鉄芯材料で銅線のコイルを巻いて電流を通じると電磁石になる特殊鋼で、変圧器や発電機、モーターの性能を左右する重要な材料である。その特性として、強い磁化力（高い電磁誘導値）と低い磁化時のエネルギー損失（低い鉄損値）が要求される。こうした物理学的な電磁気特性と鋼の冶金学

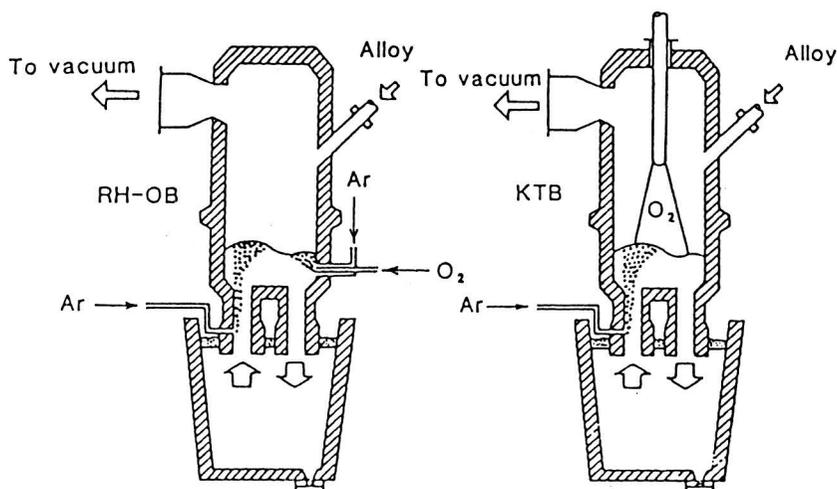


図4 不純物（炭素・酸素）の完全除去のためのRH装置（左：新日鉄式、右：川鉄式）の改良

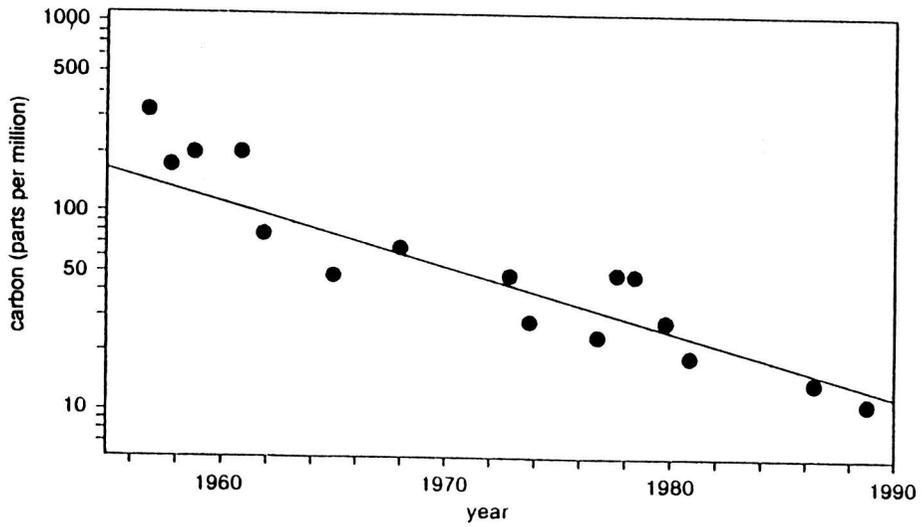


図5 高純度鋼の残留炭素量の減少経過

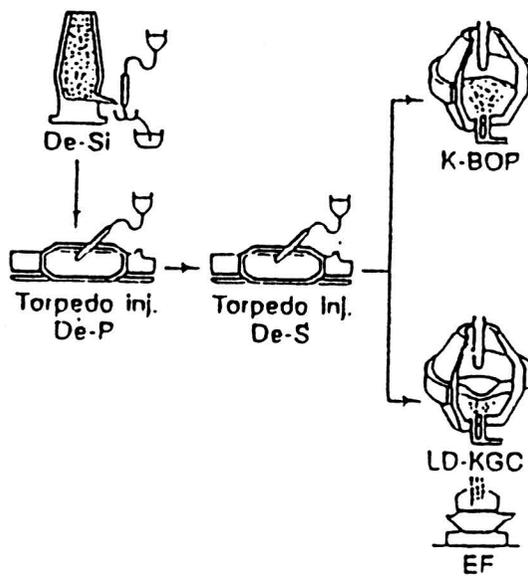


図6 熔銑の前処理 (脱Si、P、S)

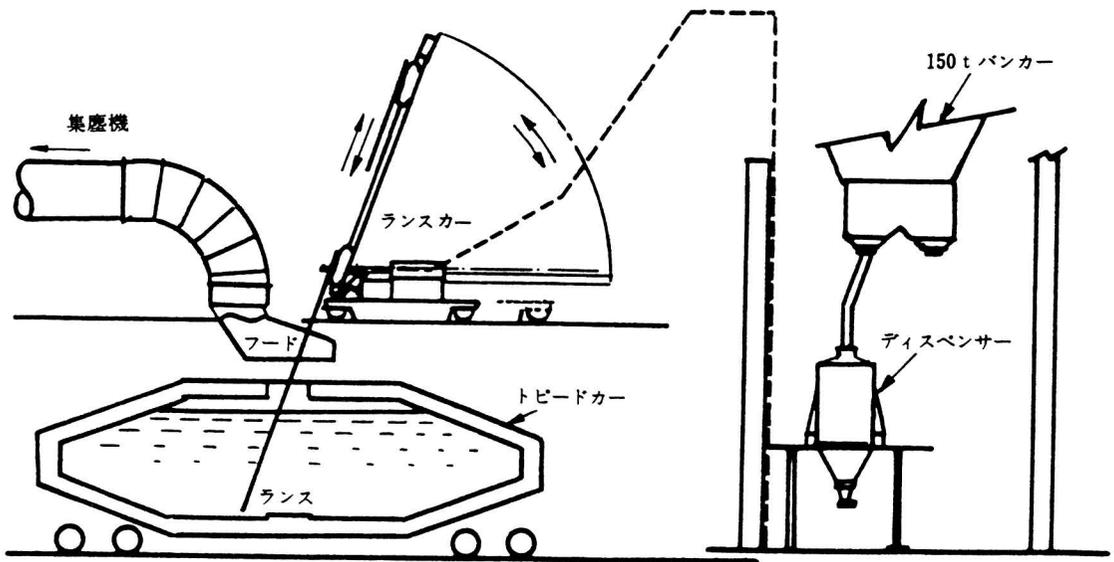


図7 熔銑運搬車での脱S装置

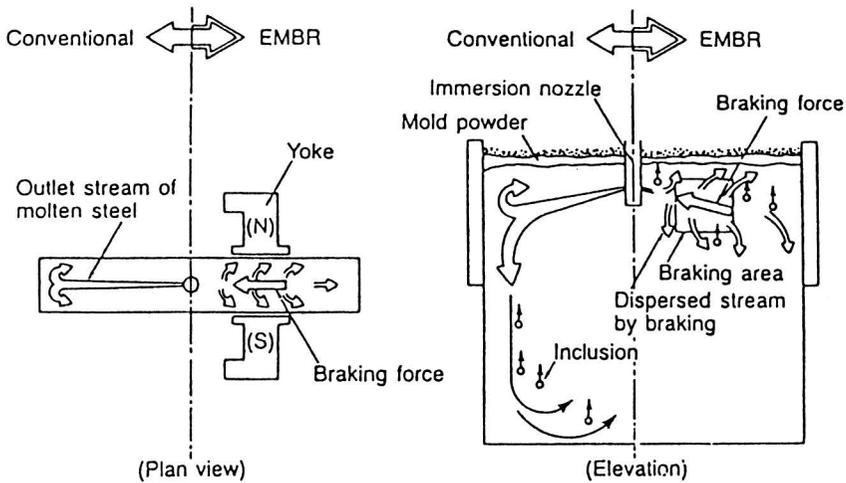


図8 連続鑄造の鑄型の上端で強力な電磁場を掛け、熔鋼の落下する流れを抑止して
介在物を除去する

的特性との間に如何なる関係があるのか、おもしろい、変わった特殊鋼である。珪素鋼は明治22年(1889年)、英国のHadfieldによる鉄-珪素合金の研究に始まり、明治37年ドイツのGumlichによって工業界に導入された。欧米では明治以来製造使用されてきたが、日本での製造は昭和になってからであって、大変遅れていた。珪素鋼は冶金学的にも、製鋼や熱間加工中に珪素が大気の酸素と結合して SiO_2 を形成し、脆化等の困難を起こす。また、相変態も複雑である。一方、電磁特性に及ぼす因子が確認されていなかったため、大変製造が困難な鋼であった。日本では昭和4年に八幡製鉄が2回目の試験製造にドイツよりの指導を受けて成功したのが始まりで、ついで昭和10年に川崎製鉄が製造に成功した。しかし、日米間の珪素鋼の品質の差は、約10年間の技術の遅れがあると評された。昭和10年(1935年)頃の日本で製造された変圧器用の珪素鋼は、T-135級で、鉄損値は $W^{10}_{50} < 1.35 \text{ watt/kg}$ であったが、米国Armco社はT95級で同値が $W^{10}_{50} < 0.95 \text{ watt/kg}$ と大差が在った。戦後八幡製鉄の湯川副社長はその差に追いつくために、昭和27年にArmco社より技術導入をされた。当時Armco社は珪素鋼の製造では世界で最高の飛び抜けた技術を誇り、英、独、仏、伊の一国に一社しか技術を許与せず、世界の珪素鋼の生産を支配していた。翌昭和28年12月にはT-90級の販売を八幡製鉄は開始した。

川崎製鉄は昭和26年に戦災を受けた研究室がやっと再建され、研究が開始されたばかりであった。したがって、川崎製鉄は以後独自で研究開発を行うことになった。八幡製鉄の経営判断は正当であった。鉄の電磁特性に就いて、1932~37年にP. P. Cioffiは、当時の工業用最純鉄であったArmco鉄を水蒸気で飽和した

水素中で 1480°C の高温で18時間焼鈍後、さらに色々の温度で長時間の水素中の焼鈍を繰り返す、最大透磁率 1.82H/m の成績を出した。この値は現在も最高値であるが、これにより、優秀な珪素鋼は高純度でなければならないことが理解された。既に前節に述べたごとく、高炉-平炉システムの精錬では不純物のC、S、P、O、Nが十分除去できないので、熱間圧延や焼鈍で除去しようとしたのがArmco社の技術であった。前述のように、昭和32年にLD炉が導入され、さらにRH真空処理や熔銑の予備処理が昭和40年には始まり、珪素鋼の製造技術、電磁性能は急激に進歩した。昭和26年以来理論的な基礎研究を積んできた新日鉄と川崎製鉄は、この純鉄精錬の技術を基礎に、世界最高の水準の超方向性珪素鋼帯の開発と製造に成功し、現在生産と共にさらなる開発研究が続いている。送電中の莫大な電気エネルギー損失の大きな割合を変圧器は占めており、その鉄芯材の珪素鋼の鉄損値の極度に低いことが要求される。例えば変圧器での鉄損値を1kW低下させると、電力の損失を100万円防止節約することができるといわれている。従って珪素鋼の中で変圧器用は大変な改良研究が行われた。川崎製鉄で筆者が担当した当時の研究経過を図9に示す。

昭和36年に生産を停止した熱間圧延珪素鋼帯は無方向性であって、大型水力発電機のような大型回転機にも使われていたが、T-80級という大変な低鉄損値の記録を残した。代わって冷間圧延方向性珪素鋼帯の生産が開始された。前述のように日本では連続鋼帯圧延機は戦後では川崎製鉄千葉工場に昭和33年建設されたので、方向性珪素鋼帯の開発生産はそれ以後になった(試作プラントによる少量製造はあった)。方向性珪素鋼とは、鉄

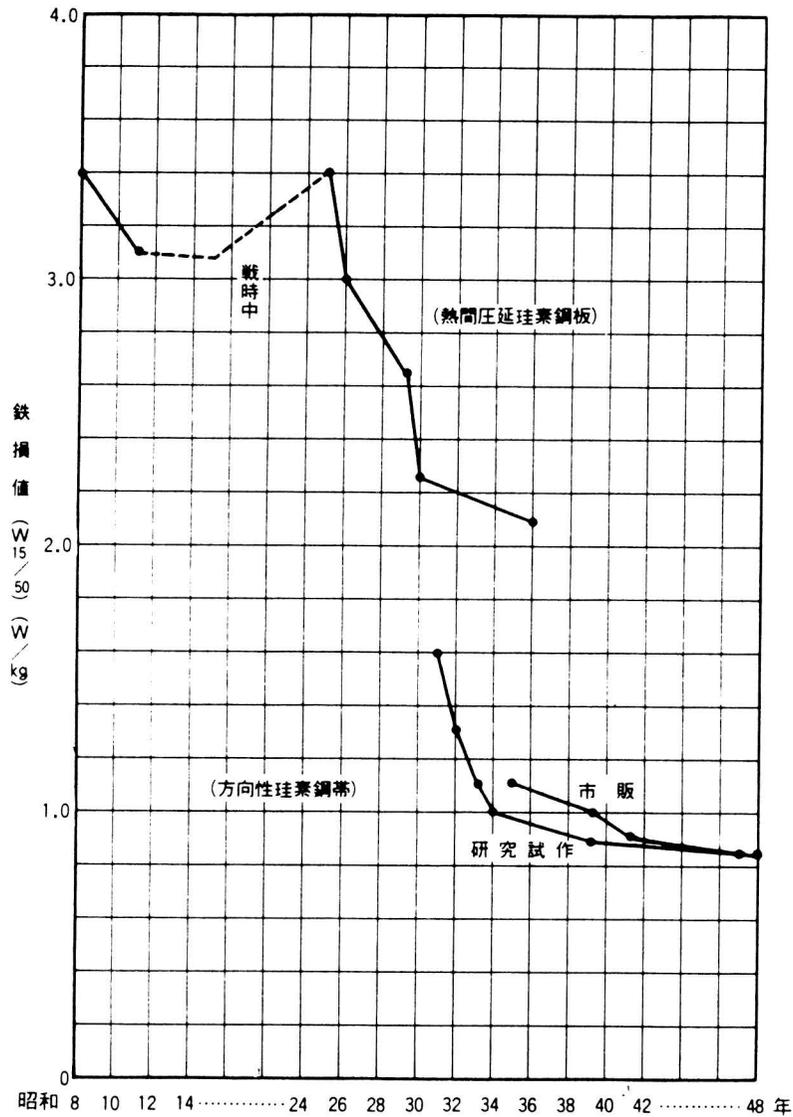


図9 川鉄の変圧器用珪素鋼の鉄損値の向上経過

の結晶の〔001〕軸方向に平行に磁化すると、最高の磁化特性を示すので、この性質を利用するために、図10に示すごとく、圧延方向に総ての結晶の〔001〕軸を平行に揃えた製品である。そのために、結晶軸と圧延方向との平行度の精密

な一致、ずれの少ないことがきわめて重要である。昭和40年に八幡製鉄の田口悟とその親密な協力者板倉昭は従来より特段に優れた結晶軸〔001〕の配列を圧延方向にシャープに揃える方法を発表(特許)した。特定の(110)〔001〕

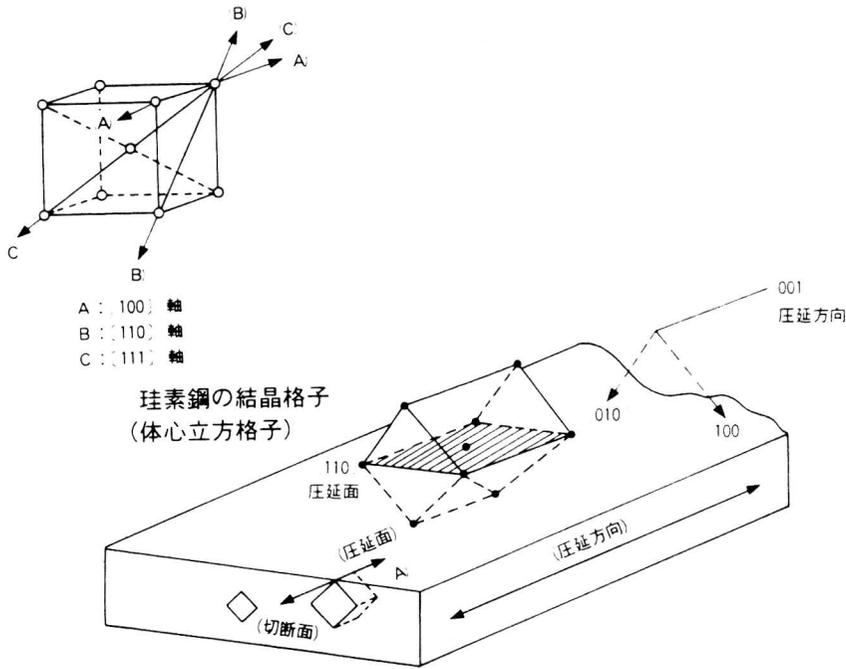


図10 珪素鋼の結晶格子(体心立方格子) [左上] と方向性珪素鋼の結晶方位 [右下]

方位の結晶を発生成長させるには高温長時間の焼鈍で2次再結晶させるのであるが、他の方位の結晶の成長を抑制するのに有効な抑止剤として、硫黄や金属硫化物が米国で発見(昭和30~35年)され、昭和33年には日本でも八幡製鉄は硫黄を、川崎製鉄はセレンを抑止剤とした生産を開始した。従来、鉄の磁性を悪化させるとして極力排除された窒素と、高温水素焼鈍で有害とされていたアルミニウムを、AIN析出物として活用し、それまで不成功であった1回圧延高温水素焼鈍で驚嘆すべき超磁束密度、低鉄損値の方向性珪素鋼 Hi-B を、八幡製鉄の 田口悟 は板倉昭 と共に、昭和26年の研究開始以来17年間の長期の精進の結果、ついに昭和43年工業生産に成功した。以来改良が加えられ、特に昭和53年頃より

日本で開発された、磁区細分化処理や、鋼板厚を0.27mmより極薄の0.18mmにする技術の改良が進み、方向性珪素鋼の生産は世界の先頭(表3)にあり、また、その電磁特性は物理学者の理論より認められる限界の値に近づいている(表4)のは素晴らしい日本の技術が達成した成果である。こうした戦後の全体の経過を図11に示す。図12は、鋼帯の厚さを薄くして、磁区の細分化処理を行った場合の効果を示したものである。磁化特性の向上改善に対して冶金学的方面から研究されてきたが、現在はこうした物理学の磁性理論という別の方向より品質特性の改善が行われてきたのは、日本の物理学会の本多光太郎先生以来の磁気理論の研究の伝統の賜物との想いである。

表3 変圧器用方向性珪素鋼帯の年間生産量
(単位：千トン、1990年)

生産国 (*)	製造元 (社名)	全方向性 珪素鋼帯	高磁束密度 珪素鋼帯
日本	川崎製鉄	120	60
日本	新日本製鉄	210	110
米国	Armco	90	12
ドイツ	Thyssen	55	30
フランス	Ugino	83	40
韓国	Posco	30	15

(*)高磁束密度方向性珪素鋼帯の日本以外の国での生産は、日本よりの技術導入・特許・素材の供与を受けている。

表4 高磁束密度方向性珪素鋼帯 [板厚0.2 mm (*)] の電磁特性 (1993年度)

製造元 (社名)	品 種 (製品名)	磁区細分化 処理の方法	磁束密度 B_8 (T)	鉄損値 $W^{17}/_{50}$ (W/kg)	備 考
川崎製鉄	RGH PJ	プラズマ加工	1.90	0.82	
	RGH PD	機械加工	1.87	0.79	耐熱性
新日本製鉄	ZD KH	レザ-加工	1.92	0.79	
	ZD MH	機械加工	1.90	0.78	耐熱性

(*) 新日本製鉄では板厚 0.18 mm で鉄損値 $W^{17}/_{50} = 0.76$ W/kg の最高性能の品種の市販を開始

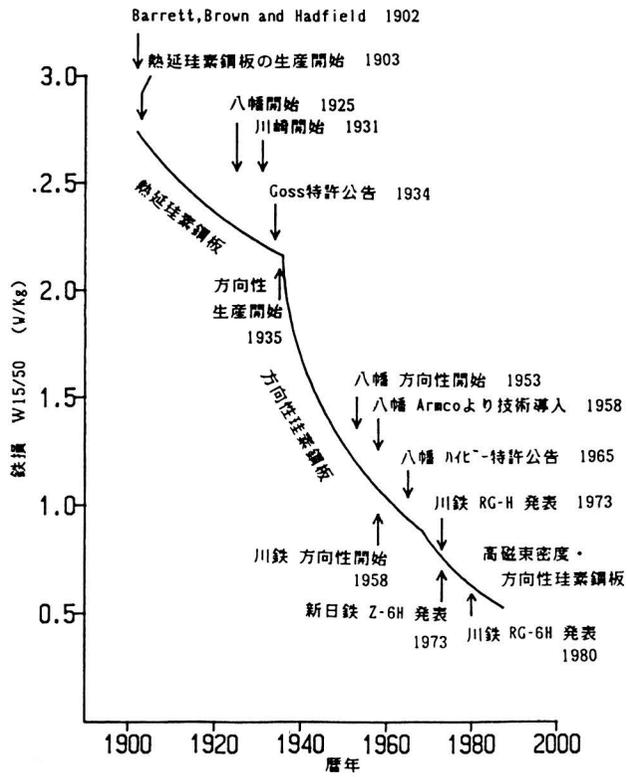


図 1 1 変圧器用珪素鋼 (0.35 mm) の鉄損値 (W15/50) 最良値の推移

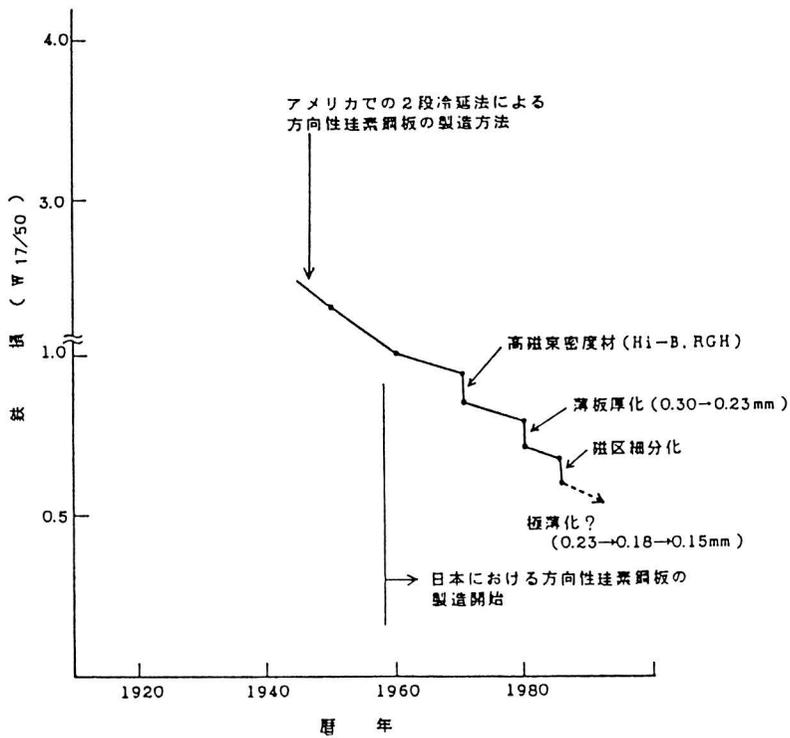


図 1 2 超高磁束密度方向性珪素鋼の鉄損値の低下の経過

おわりに

珪素鋼の製造技術は戦後20余年にして日本は欧米をリードするに到った。思えば昭和26年珪素鋼の研究を開始したとき、最高純度の鋼を造り、0.18~0.50mmの薄い鋼帯を、精密な厚みの精度保持、平坦度で仕上げ、表面には絶縁物を塗装し、水素中での高温長時間の焼鈍等々製鉄操業のあらゆる方面の最高の技術が必要であり、珪素鋼の研究は全製鉄技術の発達につながる事が痛切に理解させられた。川崎製鉄の西山社長は、このこと

を明確に認識されていて、10余年間御指導御激励下さった。また、八幡製鉄の湯川副社長は、田口悟 坂倉昭 両氏の10余年のHi-Bの開発研究を支えられた。戦後の混迷期に日本の鉄鋼業を指導され、今日の繁栄の基を築かれた、両巨人の遺徳を偲ぶ次第である。

本報告に、田口悟 坂倉昭（八幡製鉄）、藤井毅彦（住友金属）、大橋延夫 大井浩（川崎製鉄）、の諸氏の報告を参照させて頂いた。御礼申し上げる次第である。