

日本における DH真空精錬法の進歩

沖森 麻佑巳*

Progress of DH Vacuum Refining Process in Japan

Mayumi OKIMORI

Key words: degassing; decarburization; deoxidation; hydrogen removal; nitrogen removal; Ar gas injection; alloy saving; light treatment; ultra low carbon steel; high purified steel.

1. 緒言

現在、日本の鉄鋼業は二つの国際的課題を持っている。第一に、鉄鋼開発途上国の品質レベルは一部の鋼材について日本に追いついており、より差別化のできる鋼材を製造する技術力を日本は保持しなければならない。第二に、いまや従来の導入から応用のパターンではなく、自らがリーダーシップをとり新しい技術を開発することを日本は国際的に求められている。真空精錬法の中でも特に大量の溶鋼を処理するDH (Dortmund Hördor) 法とRH (Rheinstahl und Heraeus) 法は1960年初頭にドイツからわが国に導入され以後著しい進歩を遂げ、日本の鉄鋼製品のコストダウンや品質向上に大きな役目を果たしてきたが、今や上述の課題が問われているのである。特に超高純度鋼の製造については、絞り加工性の高い自車用鋼板には[C]や[N]は10ppm以下、靱性の高い極低温用厚板には[H]は1ppm以下等が容易に到達できる真空脱ガス技術が求められている。RH法については、「日本におけるRH真空精錬法の進歩」⁹²⁾と題した技術報告があるが、DH法に関しては未だ最近の報告は見られない。そこで本論文は、DH法における導入期から最近までの技術の変遷と現状を述べ、上述の課題への対応策を考察する一助とするものである。

2. DH真空精錬法

2・1 DH法の基本構成

DH法の基本構成を国内で最も新しい新日本製鉄八幡製鉄所の場合を例にとりFig. 1に示す⁸²⁾。真空槽は溶鋼の出入口

となる吸上管をもち、昇降装置により上下方向に移動させられる。槽内は真空排気設備 (スチーム・エジェクター) によって最高1 Torr以下の高真空になっているので、真空槽が下降すると取鍋内の溶鋼が吸い上げられ真空内に飛散し、逆に真空槽が上昇すると槽内の溶鋼が取鍋内に吐き出される。真空槽の周期的な下降と上昇を繰り返すことにより溶鋼が真空中で脱ガスされる。真空槽には合金添加装置や加熱装置が設置されている。脱ガスを促進するために吸上管よりArガスを吹き込むことも実施されている。

2・2 日本でのDH設備基数の推移

日本でのDH設備の設置基数と本論文での引用文献の年次

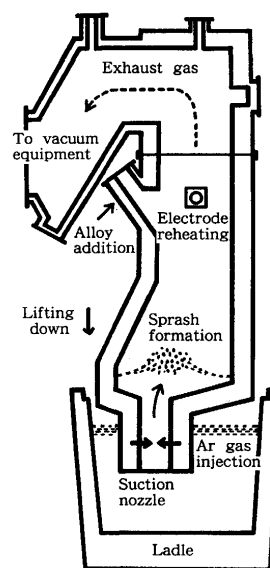


Fig.1.Fundamental constitution of DH.

平成4年5月25日受付 平成4年10月2日受理 (Received on May 25, 1992; Accepted on Oct. 2, 1992)

* 新日本製鉄(株)光製鉄所 製鋼・線材部製鋼技術室長 (Steelmaking Technical Dept., Steelmaking & Wire Rod Div., Hikari Works, Nippon Steel Corp., 3434 Oaza-Shimata Hikari 743)

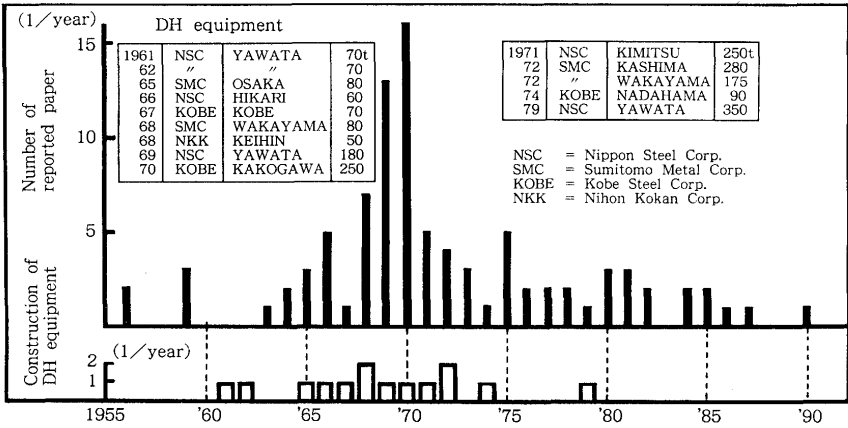


Fig.2. Transition of construction of DH equipment and reported paper.

推移をFig. 2 に示す。この図より明らかなように、DH設備は1970年代後半までは順調に設置されてきたが1980年代には新設は見られず、RH設備は1980年から継続して設置されている。現状はRHの基数の方が多く、例えば新日鉄では1986年にはRH10基、DH 3 基で、RH法43%、DH法9%で合計52%が脱ガス処理された⁹²⁾。この理由として「DH法とRH法が導入後の約20年間の開発を経て機能的に大きな差が無くなり、溶鋼の還流に関して周期的なDH法よりも連続的なRH法の方が冶金操作がやや容易であることから、新設についてはRH法が選択されている」との指摘がある。以下にDH技術の変遷をトレースし、上記指摘の妥当性も技術史的な観点から考察する。

3. DH真空精錬技術の現在までの展開

日本におけるDH真空精錬技術の展開を公開文献をもとにトレースし、導入から現在までの年次を技術史的に分類すると、第0期(1955~59年)=ドイツでの先駆的開発(日本に導入される前のドイツでのDH技術開発)、第I期(1960~67年)=基本機能の把握、第II期(1968~70年)=機能拡大、第III期(1971~78年)=大型化と大量生産、第IV期(1979~現在)=新方式導入と極限追求、となる。付表はこの段階に従ってDH技術の展開をマクロにまとめたものであり、以下の説明を当表を参照にして読んでいただきたい。

3・1 第0期 ドイツにおける先駆的開発(1955~1959年)

(1) 流滴脱ガス法(Bochumer Verein法)

1935年に鋼中の高い[H]含有が鍛造品で白点になることが判明し、真空中で鋼を脱ガスして[H]を除去することが試みられた。真空脱ガスは、第2次大戦後に25kg~1 t 炉で10⁻⁴Torrまでが試みられていたが、150 t クラスの大型炉の脱ガスは簡単ではなかった。1950年にBochumer Verein法と称する流滴脱ガス法が開発された。当方法は鋳型を大きな真空室中に囲み入れ、溶鋼を上から下に注入する時に脱ガスする方式である。1956年にA. Tixは、大気中での溶鋼の飛散が真空中ではさらに大きくなり脱ガスが進むこと、150 t 炉容で脱ガス前の[H]含有量が鋳型への流滴脱ガス

により1/3以下まで減少すること、さらに[O]、[N]と介在物の減少、機械的性質の向上、温度降下は3~4℃/minであること等を報告した¹⁾。このように本法は脱ガスに大きな効果があったが、より簡単に効果的に一つの取鍋の中で脱ガスを実現する方式の追求がなされていた。

(2) DH真空精錬法の先駆的な開発

1956年にDortmund-Hörder Hüttenunion A. G.のF. Harders, H. Knuppel, K. BrotzmannによりDH真空精錬法の開発が報告された²⁾。開発には真空脱ガス槽、真空排気装置、ガスクーラー、電極等を大きな架台上に載せ、全体をクレーンで吊り上下に昇降させ、取鍋内の溶鋼を吸い上げ吐き出して脱ガスが実行された。40~80 t の溶鋼で吸上量約4 t、昇降1サイクル60s、ストローク約60cmであった。溶鋼の吐出状況を水とグリセリンを使ったモデルで調査し、吐出された噴流は鍋底まで到達して方向を反転させ、上昇速度の速い場合は混合が良好であることが示された。必要吸上量は、吸上量/全体量=1/6程度あれば脱ガスが良好であることも明らかにされた。実操業結果としてシーメンス・マルチン炉の取鍋内溶鋼を処理し、真空度は10~1 Torrで[O]と[H]の含有量はそれぞれ約1/3までに減少し、合計約3000 t が処理された。品質向上効果としてDH処理したクランク軸用の鋼は、鍛造の塑性変形中に非金属介在物が分離し、鍛造後は介在物の超音波エコーが減少したことを明らかにした。さらに脱ガスによる効果として、脱酸生成物の減少による表面品質の向上、CO反応を利用した[O]の減少によるAlの狭成分化、極低炭素・酸素鋼の製造、微量合金の歩留安定等が予測され、いずれもその後DH技術によって大きな効果が実現された項目であった。続いて1959年に彼らは、槽形状、吸上管径と吸上量の関係をはじめ、槽の昇降については4本シリンダーと梃子方式を、槽内温度の保持については炭素電極の抵抗発熱(小容量用)とアーク加熱(大容量用)を検討した^{3,4)}。こうしてドイツにおいて、Fig. 3⁴⁾のようなDH設備が先駆的に開発されたのである。なお上記のDH法の開発に少し遅れて、Ruhr Stahl A. G.でRH法の開発が進められ、1959年に報告された⁵⁾。

(3) 日本でのDH真空精錬技術導入の動き

付表 DH真空精錬法の主要技術の発展

年次	経済・技術開発	D H 法 関 連 諸 技 術 * N0)=参考文献			R H法関連諸技術**	
1955	トランスファー開発	第0期	ドイツでの 先駆的開発	'56. Bochumer法工業化 *1)	**= 文献92)に追加	
56	FUJIC 開発			'56. Dortmund H. A. G. D H法報告 2)		
57	L D転炉導入			'58. 八幡製鉄・D H法導入の検討		
58						
1959					'59. Ruhr S. A. G. R H法報告	
1960	O G装置開発	第I期	基本機能確認 ①D H法 基本特性 ②脱ガスと攪拌 の定量化 ③品質向上 効果確認	'61. 八幡製鉄・実機 70t D H稼働	機能把握	
61						
62						
63						'63. CO反応速度定数解析 6)
64						'64. 脱[H], [O], 成分歩留, パラメータ調査 7)
65						'65. RIを活用した混合攪拌調査 9)
66	トランスファー 電卓開発 東海道新幹線開通		'66. 槽昇降, 真空度等の影響評価 13)			
1967			'64. ~'67. 線材, 軸受鋼等の介在物, 地疵, 疲労向上 10, 11)			
1968	日本万国博覧会	第II期	機能充実と拡大 ①脱ガスと 操業 の関係 ②モデルによる 脱ガス機構 究明 ③DH機能拡大	'68. 脱[C] 50~100 ppm 達成 21)	機能把握	
69						" 吸上管のArガス吹込と 槽内部のフラックス添加試験 24)
						'69. 八幡製鉄・180t D Hの稼働
						" 脱[O]へのスラグ, 耐火物影響調査 26)
						" 脱[N] 限界40ppm の調査 36)
						" 数学モデルによる 脱ガス理論解析 37)
1970			'70. SUS でArガスと フラックス 添加試験 40)			
			" 大気水分の脱[H]への影響 44)			
1971	粗鋼 1.2億T/年 第一次石油危機 連铸化の推進 第二次石油危機	第III期	大型化と 大量生産 ①軽処理 ②連铸とのドッキング	'71. 新日鉄・君津大型 250t DH稼働	機能拡大 大量処理 CCと結合	
72						'72. 住金・和歌山大型 250t DH稼働
73						
74						'75. 槽高速昇降により 脱[C] 50ppm 以下 70)
75						" 鍋底部からの Arガス吹込鍋上部空間 のArシールドによる 脱[H] 向上 69)
76						'78. 新日鉄君津・軽処理実施 77)
77			" 新日鉄八幡・C A S稼働			
1978					'78. RH-OB 昇熱	
1979	日本の 国際競争力拡大	第IV期	新方式導入 と極限追求 ①新形状D H ②A r ガス 大量吹込 ③他2次処理 との連続処理	'79. 八幡・新形状 350t DH稼働 80)	多機能化	
80				" 連铸と結合したAl添加 大量軽処理 82)		
81				" 槽昇降における 吸上管Arガス吹込 86)		
82						
83	連続焼鈍材増加			'84. 八幡・C A S - O B稼働 94)		
84				" 八幡 180t D H新形状に改造 88)		
85	G-5 円高構造化			'85. 吸上管と槽内のAr ガス 大量吹込 89)		
86	NIESの鉄鋼進出と 高純高 cleanliness 鋼 の要求強まる			'86. 君津 250t D H新形状に改造 91)		
87				'87. 極低[C] 鋼の大量処理開始 Arガス大量吹込で10~15ppm 達成 93)		
88				'88. 八幡350tDH. Ar ガスの高低圧制御 八幡CAS-OB・PIM と DHの 連続処理 95)		
89				'89. 高圧吹込		

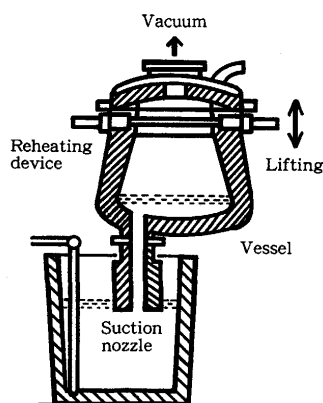


Fig.3.Original DH degassing equipment in 1959.

当時の日本では、トランジスタラジオの開発と市販（1955）、日本初の電子計算機FUJICの開発（1956）と鉄鋼業ではLD転炉の導入開始（1957）があった時期であり、日本が外国で発明された基礎的な科学技術を導入して外国に追いつこうとしていた時期であった。日本でのDH技術の導入もまさしくこうした動きの中で実行され、上記のドイツでのDH開発報告をもとに、八幡製鉄が1957年にDHの建設に入り1959年に25 tの脱ガス試験設備の稼働を開始した。

3・2 第I期 基本機能の確認（1960～1967年）

第I期の基本機能確認期を、八幡製鉄がDH開発の本格的な試験を開始した1960年から、八幡製鉄と住友金属が実機DHの操業結果を報告した1967年までとした。当期は世界初のトランジスタ電卓、東海道新幹線の営業運転開始（1964）や鉄鋼業でのLD転炉の未燃焼ガス回収装置（OG法）（1962）等の日本自らが世界に誇れる技術を生み出し始めた時期であった。DH脱ガス技術の開発もこうした動きに呼応してなされ、日本がドイツでの先駆的开发に追いつき自ら開発する力をつけようとした時期であった。

（1）八幡製鉄における開発

八幡製鉄は1961（昭和36）年に三製鋼平炉工場に日本初の70 t実機DH設備を、1962年には五製鋼（転炉、平炉、電気炉）工場に70 t DH設備の稼働を開始し、日本のDH法の開発リーダーとしての活動を開始した^{6)~8)}。1964年にFig. 4の全体構成を有した八幡三製鋼70 t DH設備の操業結果が報告された⁷⁾。本報告は後述の品質関係も含み、日本におけるDH法の初めての総合的な報告であった。脱ガス基本特性として、脱[H]は5 mmHgの溶解度まで進行し約1 ppmまで到達でき、脱酸は[O]=50ppmまで減少、合金歩留は10～15%向上、成分適中は[C]で±0.02%に調整できることなどが確認された。脱ガスおよび攪拌の定量化も進められた。1963年にCO反応による脱ガスのメカニズムに関する研究がなされた。脱ガスCO発生量は、 $dV_t/dt = K' f a / m ([C][O] - K \cdot P_{co})$ [ここで $f = Fm/a$, $K' = \text{CO反応速度定数}$, $K = \text{CO反応の平衡定数}$, $P_{co} = \text{槽内圧力}$, $F = \text{脱ガス表面積}$, $m = \text{吸上溶鋼量}$, $a = \text{槽内溶鋼界面積}$]で表現され、 $K'f$ と[C]値レベルの関係が調査され、[C]=0.02%の低炭素領域まで脱ガスが促進されることが示された⁶⁾。さらに操業因子（吸い上げ溶鋼量、1 minの昇降回数、槽内での溶鋼残留量、吸い上げ時の速度等）の脱ガス効果への寄与率が定量的に明らかにされた。1965年に処理中の溶鋼の混合と合金の溶解状況がRI (¹⁹⁸Au)を利用して調査された⁹⁾²³⁾。RIは添加されて約1 minで最大となり、2.5 minして均一となることが明らかにされた。同時にC, Mn, Al, Cu等の成分を含む合金鉄は、約2～3 minで十分に均一となることも確認された。品質向上に関しては、1964年の介在物、地疵と超音波不良の減少や絞りの向上等が第一報であった。さらに1965年に軸受鋼をDH処理する前に軽く脱酸することによって、低[O]化され(B+D)系介在物が減少し疲労特性が向上し超音波探傷不良が減少することが報告された¹⁰⁾¹¹⁾¹⁴⁾¹⁵⁾²⁰⁾。1967年にはDH処理で介在物が微細化し、線材の冷間加工性（伸び）

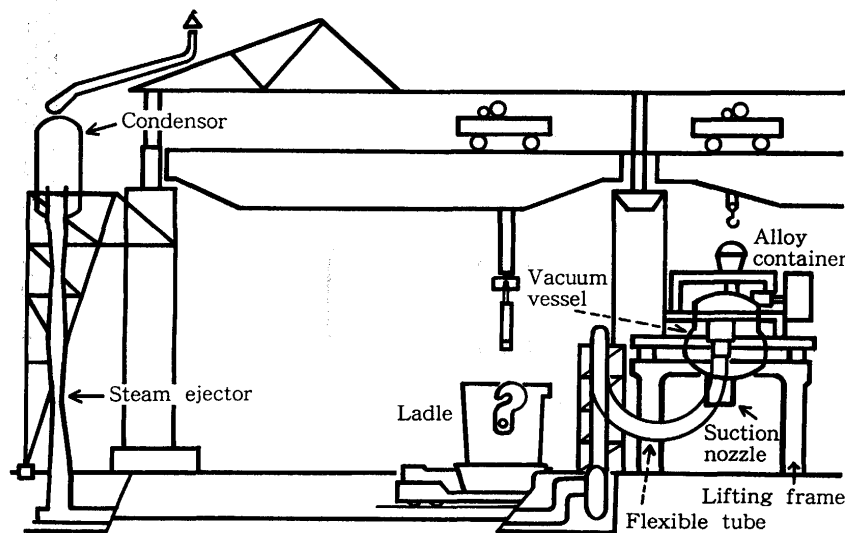


Fig.4.DH unit at Yawata Works in 1964.

Specifications

Vacuum vessel	Suction amount = 10 t/cycle Lining refractory = Magnesite 4 alloy containers Carbon electrode heating
Vacuum pump	5 steam ejectors Pressure = 0.5 mmHg
Lifting	Cylinder type Speed = Max 10 m/min 4 times lifting/min
Ladle	70 ton/heat

が向上することも明らかにされた¹⁷⁾。これらはDH処理中の攪拌により介在物が浮上除去や形態変化をうけることを示すものであり、現在でも品質向上技術として広く活用されている。

(2) 住友金属における開発

このような八幡製鉄の開発に少し遅れたが、1965年には住友金属・大阪の電気炉工場に80 t・槽昇降型DHが稼働開始し1966年にその操業結果が報告された¹²⁾¹³⁾¹⁶⁾。特に、ストローク、昇降速度、槽停止時間、吸上量、真空度等の操業因子と脱ガス性能の関係や脱[N]挙動(脱ガス前溶鋼内[N]=40~80ppm程度では脱[N]効果は見られない)、処理時の真空度測定による処理中の脱ガス量と残留[O]量の推定等が検討された。さらに八幡製鉄と同様な品質向上効果(介在物、地疵と超音波不良の減少)も報告された。

3・3 第II期 機能の拡大(1968~1970年)

Fig. 2の開発報告の年次推移は1968~70年にピークを迎え、この3年間にDH法の研究開発が広く詳細に及んだことを示しており、この時期を第II期とする。当期、日本の製鉄各社の製造現場でDH設備の導入が急速に進んだ²²⁾。1967年神戸製鋼・神戸70 t¹⁸⁾¹⁹⁾の後に、1968年住友金属・和歌山80 t³⁶⁾⁴⁹⁾⁵⁰⁾⁶⁰⁾、日本鋼管・京浜50 t^{28)~31)57)}と小型DHの稼働に続いて、1969年八幡製鉄・戸畑180 t²⁷⁾³⁸⁾³⁹⁾、1970年神戸製鋼・加古川250 tと大型DHも稼働開始した⁵³⁾。処理溶鋼の溶製炉も1967年頃までは平炉、電気炉鋼であったが、1968年頃からは転炉鋼が主体となってきた。

(1) 脱ガスと操業要因の関係究明および操業技術の向上

脱[O]については、スラグ中や耐火物中の(O)の重要性が指摘された。スラグ中(FeO)が溶鋼中[O]と相関を持っており²¹⁾²³⁾、溶鋼中[O]の減少にはスラグ中(FeO)の減少が必要であること、耐火物中の(O)の影響は耐火物溶損量から推定され、スラグよりは影響は少ないことが明らかとなった²⁶⁾⁴²⁾。これらの知見をもとに近年は介在物減少(溶鋼の清浄度向上)の要求からスラグを還元する方法が実行され、耐火物も酸性から塩基性化が試みられ実現している。脱[C]については、前述の式 $d[C]/dt = K'f_a/m([C][O] - KP_o)$ において脱[C]速度に比例する $K'f[C]$ は処理昇降回数が増加するに従って減少し、[C]の低下に伴い脱[C]が困難になることが示された²⁶⁾⁴²⁾。さらにFig. 5に示すように[C]と[O]の平衡曲線の関係から目標とする脱ガス後の[C]と[O]を得るには、処理前のそれらの値を最適な組合せにする必要があることが示された。脱[C]の到達最小値としては50~100ppmが報告された²¹⁾。脱[H]については、脱酸法の違いによる脱[H]は差が小さいこと⁴⁴⁾、スラグ中の(H)と大気中の水分が脱ガス効率に大きな影響を及ぼすことも明らかにされた。溶鋼中[H]と大気中水分の一年間の長期的な変化を調査して、両者がお互いに関係していることが示され⁴⁴⁾⁵⁶⁾、大気中水分がスラグを通して溶鋼中に移動していると考えられた。さらにスラグの塩基度

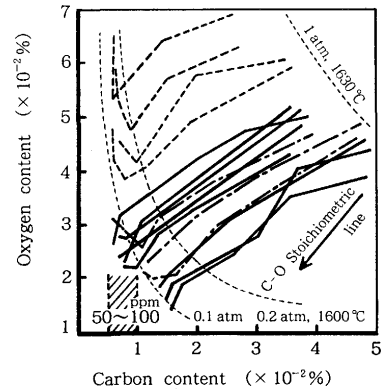


Fig.5.Behavior of carbon and oxygen during degassing.

(CaO/SiO₂)や(FeO)と[H]の関係も究明された⁴³⁾⁴⁴⁾。脱[N]については、第II期も続いて実機で研究が進められた³⁵⁾³⁶⁾⁴³⁾⁴⁹⁾⁵⁰⁾。その結果、処理前[N]=約40ppm以上では脱[N]は進行するが、処理前の[N]がそれ以下では不可能なことが報告された⁴⁹⁾⁵⁰⁾。この現象の理由は完全に解明されず、現在でも脱[N]の詳細機構は技術課題として残っている。さらに操業技術の向上も追求され、合金歩留の向上²⁵⁾として従来転炉でダブルスラグ法で製造していた鋼種については、DHでの加炭歩留向上により転炉の吹止[C]が低減し、結果として脱[P]も容易となり、シングルスラグ法に変更することも実現された³⁵⁾⁴⁵⁾。

(2) 数学モデル、水モデルによる脱ガス機構の究明

当期は、排気ガスと槽および取鍋内の情報を大型計算機にインプットし数値計算によるプロセス解析を実施し、脱ガス機構の理論的究明が進められた。名古屋大学では、[O]、[N]、[H]等の物質移動係数を実測データから検討し、排気速度、吸上速度、吸上量比が脱ガス速度に及ぼす影響、さらに吸上溶鋼量の設備条件への依存性などを数学モデルをもとに解析した³⁷⁾⁵²⁾。日本鋼管では、槽の昇降速度アップにおける溶鋼追従性の遅れに対して、非定常エネルギー方程式を使い溶鋼吸上挙動が理論よりも2~3sほど遅れることを明らかにした^{32)~34)46)~48)}。なお数学モデルによる解析については当時電子計算機の国産大型機FACOM230-60が開発され(1968)、大型計算機による理論検討が大学と産業界で精力的に実施されたことを反映していた。神戸製鋼では水モデルを用い、最適な昇降周期で吐出される溶鋼が取鍋底部に強く当たり攪拌効果が大きいこと等が報告された⁵¹⁾。以上のような脱ガス機構の究明は、次の第III期から第IV期における大型化や新方式導入に活用された。

(3) DH技術の領域拡大への試み

第II期では、DH技術の領域拡大の試みがなされた。八幡製鉄所70 t DHでは吸上管からのArガス吹き込みとNiO₂、MnO₂、Fe₂O₃等の酸化剤を槽内に添加して極低[C]ステンレスを製造し、[C]=0.014~0.020%が得られ粒界腐食に対して良好であったことが報告された⁴⁰⁾⁴¹⁾。こうしてRHの

Arガス吹き込みを基にしたDH吸上管からのArガス吹き込みは脱[C]に大きな効果をあげ、以後広く活用されることになった。さらに同DHで槽内に焼成CaO等を添加して、吸上管から270~320 l/minのArガスを吹き込んで脱[S]の試験を実施した結果30%の脱[S]が得られたが²⁴⁾、未溶解の固体CaOが槽内に残留し槽内での溶解力が不足していたと判断され、以降は発展が見られなかった。

3・4 第三期 大型化と大量生産 (1971~1978年)

自主開発力をつけた日本の産業は高度成長を遂げ1970年には日本万国博を開催するまでに至った。鉄鋼業では設備の大型化が粗鋼生産の増大を支え1973年には1.2億 t/年を達成した。しかし、同年に生じた第一次石油危機に直面して一層のコスト削減が必要となった。そこで1971年の10%に満たなかった連铸化比率は1978年には50%に近づき、造塊法のリムド鋼を連铸法でAlキルド化するに際して、Alのコスト削減と同時に大量処理が可能な技術が求められた。DH技術はこれらの動きに対応して開発が進められ、1971年から1978年までの「大型化と大量生産の時代」を迎えたのであり、これを第三期とする。

(1) 大型化

大型化については、従来の100 t以下のDHに対して1970年に八幡製鉄所・戸畑の175 t⁵⁴⁾、神戸製鋼所・加古川の180 tが建設・稼働した後、1971年に新日鉄・君津製鉄所の250 t、1972年に住友金属・鹿島の250 t^{63)~65)}、住友金属・和歌山の175 tと大型DHが稼働を開始した。こうした大型化におけるDH技術の向上をはかるために、第II期と同様に脱[C]、脱[N]、脱[H]に関する研究が現場と理論の両方で進められた⁵⁸⁾⁶²⁾。住友金属・和歌山の250 t DHでは、脱[C]については、到達[C]は[O]が0.1気圧における平衡値に等しいこと、到達限界として約50ppmまでが可能など⁵⁸⁾が示され、脱[N]については約50ppm以下は脱ガスが進行しないこと、脱[H]については約1.5ppmまでが達成できたこと等が報告された^{55)59)~61)}。さらに、大型化における新技術の開発も行われた。一つは槽の昇降速度の高速化である。吸上量を最大とする最適な昇降サイクルとして、従来の18sを11sに短くして、最大の吸上量を確保し、その結果Fig. 6に示すように到達[C]値が減少して50ppm以下が得られることが報告された⁷⁰⁾⁷²⁾⁷³⁾。脱[H]に関して、従来得られている脱ガス中の[H]は大気から進入してくるという知見をもとに、取鍋溶鋼の表面上部を囲んでその中をArガスでシールする方法と、Arガスを取鍋底部のポーラス煉瓦から吹き込む方式が試みられた。特に前者の効果が大きいことが示された⁶⁸⁾⁶⁹⁾。しかし槽の昇降による操作性に難点があり実際の製造技術にならなかった。

(2) 大量生産

大量生産に関しては、まず君津において連铸化の進展に呼応して新しい処理方式の導入が開始された。従来の約40 min程度の脱[C]、脱[H]、脱[N]などの脱ガスを目的

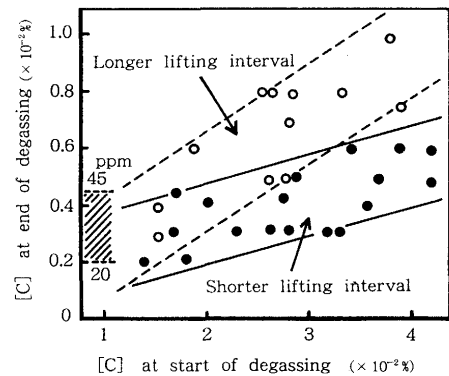


Fig.6.Effect of shorter lifting interval on decarburization in DH.

とした「重処理」に対して、連铸化された冷延薄板鋼板を対象にして約10min程度の脱[O]を主体とした簡単な「軽処理」を実施することによって、約1.1kg/TのAl合金鉄の使用量削減が可能になったことが明らかにされた。特に[Al]成分については、成分バラツキは $\sigma=13.4$ から $6.7 (\times 10^{-3}\%)$ に減少し、Al合金鉄の歩留りが向上して大きな効果が得られた。冷延薄板鋼板の約65%に対して軽処理が実行され、60千 t/月の大量処理となった⁷⁷⁾。こうして軽処理によって転炉~DH~連铸の操業の連結が実現して、従来の高級グレードの特殊鋼を主体とした少量処理から、コマーシャルグレードの一般鋼の大量処理によって、より一層のコスト削減が進められることになった。後述する新日鉄・八幡製鉄所の大型DHは、当初からこの大量処理の実現がおおきな目標であった。さらに住友金属・和歌山170 t DHでは大量生産を可能とする技術として槽の迅速交換を導入し⁷¹⁾、神戸製鋼・灘浜86 t DHでは合金鉄加熱設備を設置して転炉での合金鉄加熱を廃止して大量生産での経済性を追求した⁶⁶⁾⁶⁷⁾。

3・5 第四期 新方式導入と極限追求 (1979~現在)

二度にわたる石油危機を乗り越えた後、日本の製造業が国際競争力をつけると同時に市場の要求が高級化・多様化してきた。鉄鋼業においても、高級化に対処するための品質厳格化によって高純化(不純物成分除去)と高潔浄化(介在物除去)や介在物形態制御等の要求が出されてきた。さらに鋼材の多様化に合わせて、特に薄板材では1972年に初めて稼働した連続焼鈍技術が拡大し、1983年には約25%の連焼化率となり軟質材の要求が強まり極低[C]鋼が大量に生産されるようになった。こうした種々の要求に対して2次精錬技術が飛躍的に進歩し、DH技術はその中心として機能の拡大と到達レベルの向上の大きな課題に取り組み現在に至っている。この時期を第四期とする。

(1). 新方式の導入

1979年以降、従来型DHの設備・操業技術のまとめ^{74)~76)78)83)~85)}がなされ、それらに基づき新しいDH技術が追求された。特に新日鉄・八幡製鉄所では、炉容350 tの新製鋼工場建設での大型真空精錬法として、新しい考え方に

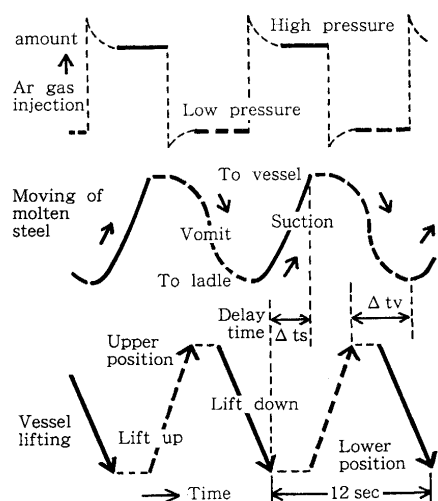


Fig.7. Ar gas injection control in suction nozzle.

基づくDH方式を採用し1979年に稼働開始した⁸⁰⁾⁸¹⁾。当時の八幡製鉄所の既存DH設備は炉容175 tであり、350 tの大型化に対して従来通りの溶鋼循環量(t/min)では循環能力(循環量t/min・溶鋼T)が大幅に減少する⁷⁹⁾。そこで新しい考え方として、Fig. 1のように槽の形状を従来よりも縦長型にして槽の外径を取鍋の内径よりも小さくし槽を取鍋内に挿入可能とし⁸²⁾、槽の昇降ストロークを大きくして、一回の吸上量を増大させた。これに加えて昇降回数も増加させ1 min当たりの循環量(吸上量×1 minあたりの回数)を大きくする方式が採用され、取鍋内溶鋼の攪拌エネルギーも増大し均一混合時間も大幅に短縮された⁷⁹⁾⁹⁰⁾。さらに吸上管からのArガスの吹込量を従来よりも大幅に増大させて脱ガスの進行を一層強化した。しかもArガスの吹き込みをFig. 7のように槽の昇降に合わせて変化させる方法を適用し⁸⁶⁾、槽の上昇時(溶鋼の取鍋への吐出)はArガスを低圧で少量とし溶鋼の吐出にガスが抵抗にならないようにして、槽の下降時(溶鋼の槽への吸上)はArガスを高圧で多量として槽内に入る溶鋼のスプラッシュ発生を増加させ、脱ガスが一層進行するようにした。加えて吸上管以外の槽底部からのArガス吹込も実行された⁹³⁾。さらに、この新しいDH設備と技術を基に、八幡製鉄所175 t・DH⁸⁷⁾⁸⁸⁾(1984)と君津製鉄所250 t・DH⁹¹⁾(1986)の既存DHを改造した。

(2) 極限の追求

これら新設と改造のDHにおいて、到達値の極限が追求された。脱[C]については、Fig. 8のようにArガスのない時に比べて著しく進行し約20minで10~15ppmとなっている⁸²⁾⁸⁶⁾⁸⁹⁾⁹³⁾。脱[N]については、新形状の槽は従来とは違って吸上管と本体部が一体化して接合部がないので大気進入による[N]ピックアップがなく15ppmが達成できた⁸⁹⁾。脱[H]については、槽内部の溶鋼の表面積が槽形状の縦長化により減少しているにもかかわらず脱ガス速度が確保されており、1.0~1.5ppmが得られている⁸⁶⁾。脱[O]につい

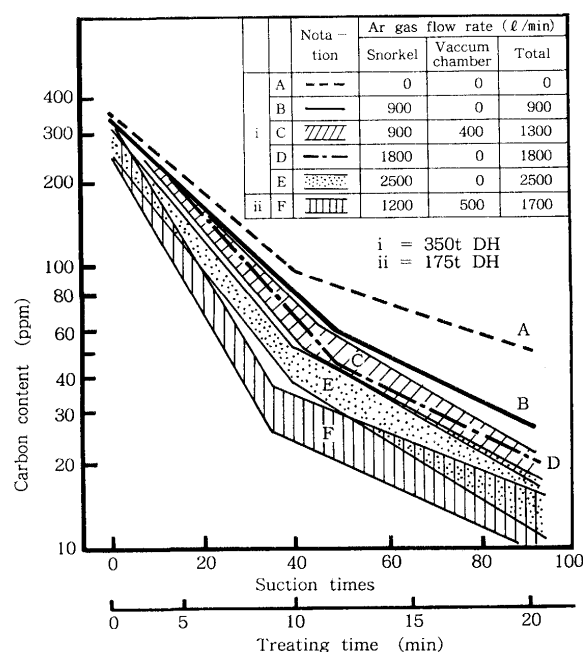


Fig.8. Effect of Ar gas injection on decarburization rate.

ては、軽処理によってAl-Siキルド鋼では処理時間が約10minで20ppmのレベルが達成され、Alキルド鋼ではAlの分布も $\sigma=0.002\%$ と良好で、大量の軽処理が可能となった⁸²⁾⁸⁶⁾。

3・6 DHとRHの開発経過比較

以上のDHの開発経過をRH法と比較してまとめたものが付表である。機能把握を経て拡大期は、DHは1970年に、RHは少し遅れて1975年頃に完了している。軽処理の大量処理方式は、RHが少し早く1977年頃から、DHは1978年頃から実行された。従って1970年代に前後はあるもののDHとRHの技術的な差は常に埋められてきたと言える。続いて1980年代には、DHは新しい槽形状採用や吸上管等からのArガス吹き込み量増大によって、RHもランスインジェクションや浸漬管楕円大型化を採用したArガス大量吹き込みによって、脱ガス能力の極限を追求し現在に至っている。このような技術開発史的な動きをみると、80年代になって機能的な差が無くなってきた段階で、冶金操作の簡易なRHの建設が進行しDHの基数が伸びなかったと推察される。

4. DHの現状の機能と到達極限

現状の諸機能と到達レベルについてDHとRH⁹²⁾を比較すると表1となる。機能に関しては、DHはRHの持っている脱[S](槽内パウダー吹き込み)と昇熱(槽内酸素吹込=RH-OB(Oxygen-Blowing))の機能を持っていない。DHでの脱[S]は、槽内だけでは脱[S]剤と溶鋼の反応が不十分な上に耐火物の溶損が大きいことから実用化されていない。昇熱については、RHではRH-OBの槽内羽口は常に一定の深さの溶鋼に浸漬しているが、DHでは溶鋼が上下す

Table 1. Comparison of capacity and minimum level after treatment between DH and RH.

items		DH		RH*	
Decreasing useless element	[C]	○	ppm10~20	○	ppm~15
	[N]	○	" ~15	○	no description
	[H]	○	" 1~1.5	○	ppm≤1.5
	[O]	○	" ~20	○	" ≤20
	[S]		—	○	" 5~10
	[P]		—		—
Composition adjustment			○		○
Purification of molten steel			○		○
Reheating			—		○
Decreasing alloy consumption			○		○

*=Reference No.(92)

るので溶鋼中に吹酸用の羽口を常に浸漬させることが難しく実現されていない。機能の集約化については、RHは多機能化を進めてきたが⁹²⁾、DHは専門性の高い単独プロセスとの組合せとなっている。例えば脱[S]と脱[H]の要求される鋼種の処理については、RHは処理中の温度降下をRH-OBで補償しながら全処理を実行する。一方DHについては、溶鋼の[S]（ランスによるパウダー・インジェクション法）と昇熱（CAS（Composition Adjustment by Sealed Ar gas Bubbling）-OB）⁹⁴⁾を同一の場所に集約化した設備⁹⁵⁾を活用し、転炉への負荷軽減のために低い吹止温度で出鋼して、CAS-OB昇熱、パウダー・インジェクション脱[S]を経て、最後にDHで脱[H]するプロセスが実行されている。RHとDHの各方式の有効性は一貫した温度損失や耐火物の溶損などの総合的な評価に基づき判断される。到達レベルに関しては、[C]=10~20ppm、[N]=15ppm、[H]=1.0~1.5 ppm、[O]=20ppm、が安定して大量生産として実現出来ており、これらはRHと本質的に差はないと考えられる。しかし[C]<10ppm、[N]<10ppm、[H]<1ppm、[O]<10ppm、を容易に得ることが出来る技術レベルには達していない。

特に到達[C]値は、第Ⅰ～Ⅳ期までの脱[C]に関する報告（Fig. 5, 6, 8）をまとめるとFig.9のようになり、現在まで対数スケールで変遷してきたことがわかるが、今後到達[C]=2~3 ppmを得るには新しい発想が求められている。[N]についても現状到達値15ppmは、脱ガス中に[N]ピックアップを生じてはいないものの積極的な脱[N]は進んでおらず、現在脱[N]のシーズ技術の探索が進められている。

5. DH真空精錬法の今後の展開

今後のDH技術の展開を技術史的な観点から考察する。前述の技術変遷で述べたように、槽形状は開発当初の横広がり型（Fig. 3）から最近の円筒型（Fig. 1）になり真空中への幾何学的反応界面積は減少したが、Arガス吹き込みによるスプラッシュ形成によって実効反応界面積は増大し実際の脱ガス能力は向上した。しかし周期的な槽昇降にArガス吹き込みを併用すると、Fig. 7の Δt_s 、 Δt_v のように吸上管を通過する溶鋼流動に遅れが生じることも明らかとなった。よって脱ガス性能向上のために吸上管や槽内のArガス吹き込み量を現状以上に増加させることははや不可能となっている。また槽昇降法においては、酸素吹き込みでは槽内溶鋼面が変化し、パウダー吹込では鍋内までパウダーが循環しない。これらが多機能化を不可能としてきたことも明らかとなった。このように現在までの開発経過から今やDH法の限界が槽昇降による周期（非連続）的な溶鋼循環に基づいていると考えられ、今後は連続的な溶鋼環流の技術要素を導入することは避けられないであろう。例えば連続的な溶鋼環流法である取鍋底部からのガス吹き込みでは均一混合時間は充分短いことが報告されており⁹⁶⁾、当技術とDH法を組み合わせることによる新しい技術展開の可能性を追求することも必要となろう。

6. 結言

以上のようにDH技術の導入から現在までの開発経過を辿り、現在の置かれている位置を俯瞰した。DH法が今後の新しい脱ガス法として発展した場合、従来と違った技術構成になることもあり得るであろう。しかし新しい強力な脱ガス技術を生み出す基盤が多くの熱意と創意に支えられた30年余の長いDH真空精錬技術の開発の歴史の中にあることを忘れてはならない。本論文が緒言で述べた国際的課題に取り組む多くの研究者、技術者の参考となれば幸甚である。

文 献

1) A. Tix : Stahl und Eisen, **76** (1956) 2, p.61
2) F. Harders, H. Knuppel and K. Brotzmann : Stahl und Eisen, **76** (1956) 26, p.1721
3) F. Harders, H. Knuppel and K. Brotzmann : Stahl und Eisen,

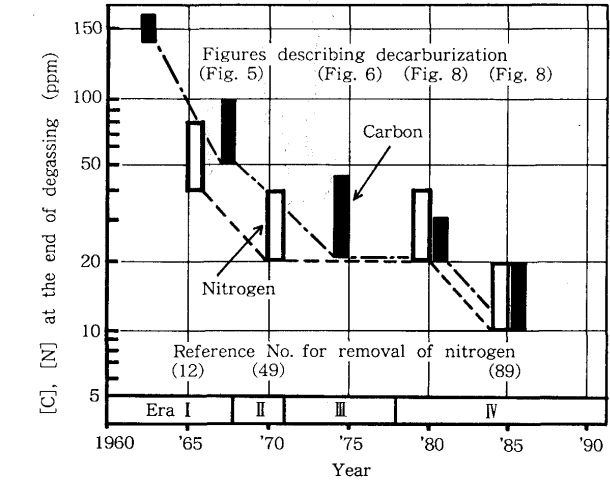


Fig.9. Transition of minimum [C] and [N] level by DH degassing.

- 79 (1959) 5, p.267
- 4) H. Knuppel, K. Brotzmann, K. Ruttiger and A. Diener: Stahl und Eisen, **79** (1959) 5, p.272
- 5) H. Thielmann and H. Maas: Stahl und Eisen, **79** (1959) 5, p.276
- 6) T. Kato and K. Matsuda: Trans. 6th Vacuum Metallurgy Conf., (1963), p.328
- 7) 加藤健, 松田亀松, 伊藤正雄, 佐々木清和, 森田英臣, 榎藤永, 石川憲雄: 鉄と鋼, **50** (1964), p.1775
- 8) 八幡製鉄 (私信) 1964年11月
- 9) 森 久, 谷沢清人, 松田亀松, 田中英夫: 鉄と鋼, **51** (1965), p.1898
- 10) 八幡製鉄 (私信) 1965年11月
- 11) 岡本一生: 鉄と鋼, **52** (1966), p.534
- 12) 松岡英矩, 加藤隆造: 鉄と鋼, **52** (1966), p.446
- 13) 牛島清人, 池田隆果: 鉄と鋼, **52** (1966), p.448
- 14) 松田亀松, 大庭健二, 阿部春夫, 木庭昌輝, 平居正純, 岡本一生: 鉄と鋼, **52** (1966), p.451
- 15) 八幡製鉄 (私信) 1965年7月
- 16) H. Matsuoka: 3rd International DH-Vacuum Conf., (1966), p.166
- 17) 松田亀松, 入江芳弘, 岡本一生, 江口直記, 中島浩衛: 鉄と鋼, **53** (1967), p.444
- 18) 神戸製鋼 (私信) 1968年11月
- 19) 神戸製鋼 (私信) 1968年11月
- 20) 住友金属 (私信) 1968年11月
- 21) T. Tanoue: 4th International DH-Vacuum Conf., (1968), p.117
- 22) F. Tomizawa: 4th International DH-Vacuum Conf., (1968), p.255
- 23) F. Tanaka: 4th International DH-Vacuum Conf., (1968), p.147
- 24) F. Tanaka: 4th International DH-Vacuum Conf., (1968), p.185
- 25) 八幡製鉄 (私信) 1969年7月
- 26) 松田亀松, 田中英夫: 鉄と鋼, **55** (1969), S325
- 27) 八幡製鉄 (私信) 1969年10月
- 28) 日本鋼管 (私信) 1969年7月
- 29) 岸田正夫, 若林専三, 長昭二, 新宮悠: 鉄と鋼, **55** (1969), S120
- 30) 日本鋼管 (私信) 1969年7月
- 31) 日本鋼管 (私信) 1969年10月
- 32) 日本鋼管 (私信) 1969年7月
- 33) 大久保益太, 坂田直紀, 長昭二, 若林専三: 鉄と鋼, **55** (1969), S121
- 34) 大久保益太, 坂田直紀, 長昭二, 若林専三: 鉄と鋼, **55** (1969), S122
- 35) 神戸製鋼 (私信) 1969年7月
- 36) 住友金属 (私信) 1969年10月
- 37) 三沢啓典, 鞭 巖: 鉄と鋼, **55** (1969), S123
- 38) 八幡製鉄 (私信) 1970年12月
- 39) H. Iso and F. Tanaka: 5th International DH-Vacuum Conf., (1970), p.185
- 40) 木庭昌輝, 田中英夫, 池本猛, 橋本浩明, 佐藤宣雄: 鉄と鋼, **56** (1970), S49
- 41) T. Fukuyama and F. Tanaka: 5th International DH-Vacuum Conf., (1970), p.250
- 42) H. Iso and K. Matsuda: 5th International DH-Vacuum Conf., (1970), p.62
- 43) 日本鋼管 (私信) 1970年3月
- 44) 日本鋼管 (私信) 1970年12月
- 45) 大久保益太, 野崎洋彦, 長昭二, 寺田修, 栗林章雄: 鉄と鋼, **56** (1970), S424
- 46) A. Cho and N. Sakata: 5th International DH-Vacuum Conf., (1970), p.82
- 47) 坂田直起, 大久保益太: 鉄と鋼, **56** (1970), S46
- 48) 坂田直起, 大久保益太: 鉄と鋼, **56** (1970), S47
- 49) 栗田満信, 市川浩, 多賀雅之, 酒井一夫: 鉄と鋼, **56** (1970), S55
- 50) M. Kurita, H. Ichikawa and M. Taga: 5th International DH-Vacuum Conf., (1970), p.109
- 51) 成田貴一, 牧野武久: 鉄と鋼, **56** (1970), p.1844
- 52) 三沢啓典, 鞭 巖: 鉄と鋼, **56** (1970), p.1687
- 53) K. Mouri: 5th International DH-Vacuum Conf., (1970), p.144
- 54) 田中英夫, 江村信之, 森玉直徳, 木村弘之: 製鉄研究, (1971) 272, p.97
- 55) 市川浩, 酒井一夫: 鉄と鋼, **57** (1971), S47
- 56) 根本秀太郎, 川和高穂, 坂田直紀, 大久保益太, 栗林章雄: 鉄と鋼, **57** (1971), p.49
- 57) 西尾好光, 長昭二, 大久保益太, 栗林章雄: 鉄と鋼, **57** (1971), S420
- 58) 成田貴一: 鉄と鋼, **57** (1971), S2253
- 59) 住友金属 (私信) 1972年7月
- 60) 梅田洋一, 丸川雄浄, 岸田達: 鉄と鋼, **58** (1972), A83
- 61) 住友金属 (私信) 1972年10月
- 62) 枅井明, 坂田直起, 根本秀太郎, 大久保益太: 鉄と鋼, **58** (1972), A74
- 63) 丸川雄浄, 白石博章, 瀬山吉之助: 鉄と鋼, **59** (1973), S397
- 64) 住友金属 (私信) 1973年7月
- 65) 丸川雄浄, 白石博章, 桑原明夫: 鉄と鋼, **59** (1973), S398
- 66) 神戸製鋼 (私信) 1974年7月
- 67) T. Haraguchi: 7th International DH-Vacuum Conf., (1975), p.86
- 68) R. Kato: 7th International DH-Vacuum Conf., (1975), p.239
- 69) 岡田大, 福井敏, 加藤隆造, 岡島弘明, 井上純, 海野正英: 鉄と鋼, **61** (1975), S133
- 70) K. Wada, T. Ogura and T. Masuda: 7th International DH-Vacuum Conf., (1975), p.18
- 71) K. Kitamura: 7th International DH-Vacuum Conf., (1975), p.124
- 72) 和田要, 小倉卓雄, 小川春久, 内藤俊太: 鉄と鋼, **62** (1976), S511
- 73) 和田要, 小倉卓雄, 小川春久, 内藤俊太: 鉄と鋼, **62** (1976), S512
- 74) 松永久, 王寺睦満, 富永忠男, 田中英夫: 製鉄研究, (1977) 291, p.74
- 75) 松永久, 富永忠男, 王寺睦満, 田中英夫: 鉄と鋼, **63** (1977), p.1945
- 76) 松永久: 第54・55回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1978), p.61
- 77) S. Ariga: 8th International DH-Vacuum Conf., (1978), p.1
- 78) 有馬良士, 王寺睦満: 第3版鉄鋼便覧II (日本鉄鋼協会編), (1979), p.671
- 79) 新日本製鉄 (私信) 1980年3月
- 80) 王寺睦満, 工藤和也, 平野真悟, 沖森真弓, 小菅俊洋, 武田欣明: 鉄と鋼, **66** (1980), S250
- 81) 谷沢清人, 小菅俊洋, 西野靖, 永楽益夫, 百武信弘: 鉄と鋼, **66** (1980), S925
- 82) M. Ohji, K. Tanizawa and T. Kohtani: Stahl und Eisen, **101** (1981) 10, p.39
- 83) 杉山信明: 第72・73回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編), (1981), p.69
- 84) 飯田義治: 鉄と鋼, **67** (1981), p.230
- 85) 甲谷知勝: わが国における酸素製鋼法の歴史 (日本鉄鋼協会編), (1982), p.395
- 86) M. Okimori, A. Murase, Y. Nishino and N. Hyakutake: Proc. 7th ICVM, (1982), p.1421
- 87) 新日本製鉄 (私信) 1984年11月
- 88) 工藤和也, 松島美継, 武田欣明, 川西晴之, 大塚勝三, 藤森寿紀: 鉄と鋼, **70** (1984), S978
- 89) T. Takeuchi, Y. Takeda, H. Kawanishi and N. Moritama: Proc. 8th ICVM, (1985), p.701
- 90) 拜田治: 鉄と鋼, **71** (1985), p.418
- 91) 下地弘剛, 桑島周次, 吉島章, 入江芳弘: 鉄と鋼, **72** (1986), S1111
- 92) 桑原達朗: 鉄と鋼, **73** (1987), p.2157
- 93) 辻野良二, 小島正道, 遠藤公一, 沖森麻佑巳, 小倉順, 中島潤二: 鉄と鋼, **76** (1990), p.1953
- 94) 青木裕幸, 武田欣明, 中島睦生, 迫村良一, 笹川正智, 半澤和文: 鉄と鋼, **71** (1985), S1086
- 95) 稲富実, 山下幸介, 関和己, 半澤和文, 木村晃平: 材料とプロセス, **1** (1988), p.233
- 96) 渡辺吉夫, 赤翼成, 浅井滋生, 鞭 巖: 鉄と鋼, **69** (1983), p.1160