

© 1987 ISIJ

日本における RH 真空精錬法の進歩



桑 原 達 朗*

Progress of RH Refining Process in Japan

Tatsuro KUWABARA

1. 緒 言

現在の製鋼法では、転炉・電炉にて粗精錬された取鍋内溶鋼を、各種装置を用いて再度処理するいわゆる二次精錬が大量に適用されている。一般に二次精錬には熱的・時間的損失を伴うので

- (1) 一次精錬より優れた品質向上機能を有すること
- (2) 一次精錬および凝固(連铸)工程を通じて生産上もしくは原価面での一貫利得があることが必須となる。

RH 真空精錬法は、取鍋内溶鋼を真空中で環流させるという単純な操作であるが

- (1) 各種精錬効率が良いこと
- (2) 大量処理に適合していること
- (3) 設備面負担も少なく操業も容易であること

を特徴としており、数多い二次精錬法の中でその利点を生かして、生産面及び技術面において著しい進展を遂げてきた。その RH 法の歩みは、(1) 機能の充実・拡大、(2) 少量特殊処理から大量処理化の 2 点に集約されよう。

西独において鍛造用鋼の脱水素処理にその端を発した RH 法は、日本に導入されて以来、脱炭・脱酸を始めとして、酸素吹込み・昇熱・成分制御・極低炭溶製・フラックス精錬・脱硫などの機能の充実・拡大が進み、数多くの冶金操作が可能となり、鋼材の多様化・厳格化に伴う品質要請に应运ってきた。RH 法は単なる Degasser でなく、多機能な Reactor へと変貌をとげた。

一方、RH 法のもつ操業性・量産性が活用されて、転炉法急伸時に DH 法とともにその高生産性から RH 設置が相次ぎ、また連铸法への転換に際しても RH 機能が積極的に用いられた。さらに近年は、大型電炉法との組合せが量産特殊鋼溶製の主流を形づくりつつある。当初は品質確保のために Speciality steels を少量処理するプロセスであつたが、今日では Bulk steels も含めた

大量溶鋼処理プロセスに成長した。

この間の日本の RH 法の流れを追うとともに、著者が関与した三つの RH 開発技術を略述した。不十分な論述が多いが諸賢の御批判と御叱声をいただければ幸甚である。

2. R H 法 概 要

2.1 RH 法の原理と基本設備構成

大容量の溶鋼を真空精錬する方法としては、吸上げ式真空精錬法である RH 法および DH 法がその主流である。

DH 法は、真空槽下部に設けた 1 本の吸上げ管により取鍋内溶鋼をほぼ 15~25 s/回のサイクルで真空槽内へ吸い上げ・放出を繰り返すものである。

一方、RH 法は 2 本の浸漬管を使用し、気泡ポンプの原理を用いて溶鋼を環流させる。すなわち真空槽内へ溶鋼を吸い上げた状態で片方の浸漬管に Ar ガスを吹き込むと、吹込み側浸漬管内部の溶鋼は Ar 気泡により見掛け密度が下がり、この比重差によつて 2 本の浸漬管の間で溶鋼が循環し始める。真空槽内に噴流として吸入された溶鋼は、吹込みガスの放出により微粒滴となり、表面積を増して飛散する。この間に各種脱ガス反応が進み溶鋼は下降管を通つて取鍋に戻る。

図 1 に RH 法の原理とあわせ設備の基本構成を示した。RH 設備は一般に①真空槽、②浸漬管(上昇・下降)、③真空排気装置、④合金添加装置、⑤環流用 Ar ガス吹込み装置、⑥取鍋(または真空槽)昇降装置、⑦真空槽予熱装置(ガス・電極)から成り立っている。真空槽はオフラインでの耐火物補修ができるように通常 2 槽設置され、平行移動式または旋回式にて槽交換が行われる。真空排気装置としてはスチームエジェクターを複数基配置して真空槽内を 0.3~10 Torr 程度まで排気している。

昭和 62 年 3 月 18 日受付 (Received Mar. 18, 1987) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)広畑製鉄所製鋼部長 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp., 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji 671-11)

Key words: vacuum degassing; ladle steelmaking; decarburizing; deoxidation degassing; desulfurization; quality control; productivity; continuous casting; electric steelmaking; special steel.

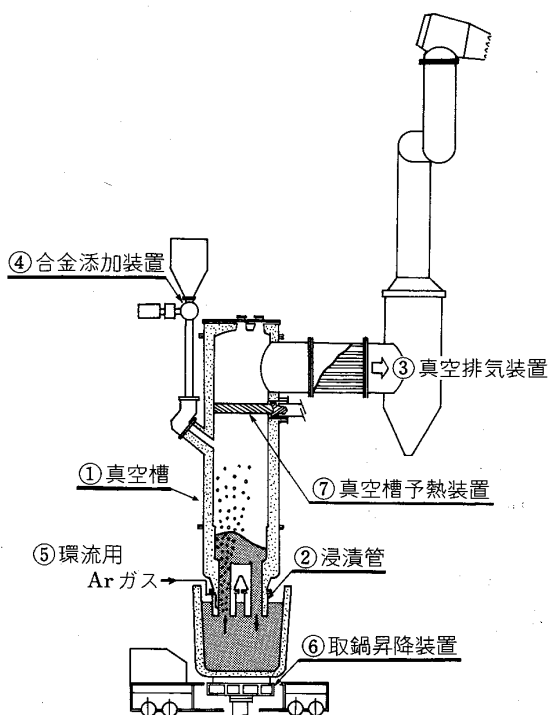


図 1 RH 設備の原理および基本構成

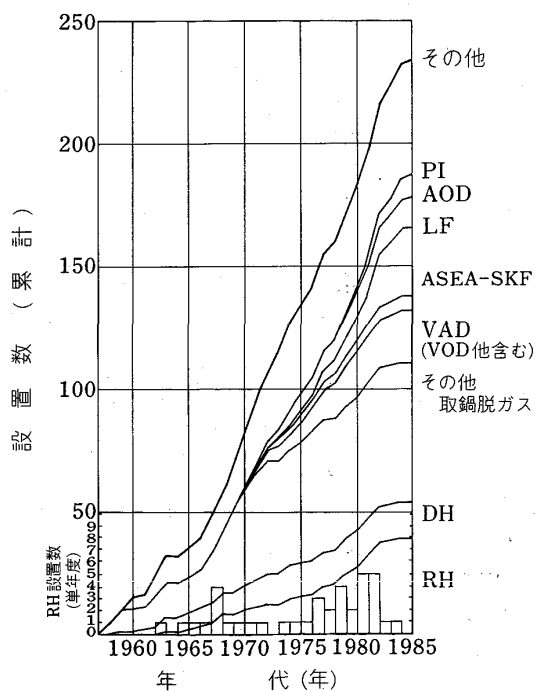


図 2 日本鉄鋼業における二次精錬設備設置状況

DH法およびRH法はともに溶鋼を真空槽内に吸い上げて精錬を行う点においては共通であり、精錬性能はほぼ同等である。しかし吸上げ・放出の繰返し周期運動を行うDH法に対して、RH法では溶鋼が真空槽内を環流している点で異なっている。従つてRH法は定常溶鋼流が得られるため、各種冶金操作の制御が若干やりやす

表 1 日本における RH 設備一覧

No.	会社名	事業所名	年	炉別	ヒート サイズ (t)	備 考
1	新日鉄	広畑 No. 2	1963	OHF	100	1974 年休止
2	大同特殊	知多	1965	EF	70	
3	川崎製鉄	千葉 No. 1	1966	OHF	85	
4	川崎製鉄	水島 No. 1	1967	LD	180	
5	山陽特殊	姫路	1968	EF	36	
6	新日鉄	室蘭	1968	LD	55	1977 年休止
7	新日鉄	名古屋 No. 1	1968	LD	160	
8	新日鉄	広畑 No. 1	1968	LD	120	1979 年休止
9	新日鉄	広畑	1969	EF	70	1979 年釜石へ
10	大同特殊	知多	1970	EF	70	
11	川崎製鉄	千葉 No. 2	1971	LD	150	
12	川崎製鉄	水島 No. 2	1972	LD	250	
13	新日鉄	広畑 No. 2	1974	LD	100	
14	新日鉄	大分 No. 1	1975	LD	340	
15	新日鉄	八幡 No. 1	1976	LD	150	1984 年休止
16	日本鋼管	福山 No. 2	1977	LD	250	
17	川崎製鉄	千葉 No. 3	1977	LD	300	
18	新日鉄	室蘭 No. 2	1977	LD	120	
19	山陽特殊	姫路	1978	EF	90	
20	中山製鋼	船町	1978	LD	105	
21	神戸製鋼	加古川	1979	LD	240	
22	新日鉄	名古屋 No. 2	1979	LD	240	
23	新日鉄	君津 No. 2	1979	LD	300	
24	新日鉄	大分 No. 2	1979	LD	340	
25	日本鋼管	京浜	1980	LD	250	
26	新日鉄	堺	1980	LD	180	
27	住友金属	鹿島 No. 1	1981	LD	270	
28	新日鉄	釜石	1981	LD	90	広畑から
29	住友金属	和歌山 No. 3	1981	LD	160	
30	新日鉄	室蘭 No. 1	1981	LD	270	
31	合同製鉄	大阪	1981	LD	42	
32	愛知製鋼	知多	1982	EF	80	
33	日新製鋼	呉 No. 2	1982	LD	185	
34	山陽特殊	姫路	1982	EF	90	
35	川崎製鉄	水島 No. 1	1982	LD	240	
36	日本鋼管	福山 No. 3	1982	LD	300	
37	住友金属	鹿島 No. 2	1983	LD	270	
38	神戸製鋼	加古川	1984	LD	240	
39	住友金属	鹿島	1986	LD	270	
40	東海特殊	名古屋	1986	LD	80	
41	日本鋼管	福山	1987	LD	250	

い。一方、環流溶鋼による浸漬管および真空槽の耐火物溶損が特に導入初期段階では問題となつた。しかし耐火物材質の改良などにより大幅に改善され、耐火物問題はもはや非常に軽微なものとなつている。

2.2 RH 設備と処理量の推移

日本における RH 設備の一覧を表 1 にまとめた。1963 年以降、休止した設備を含めて計 41 基の RH が設置されている。

二次精錬設備基数の推移を既調査分⁷³⁾に 1985 年までを追加して図 2 に示した。この 20 年間の二次精錬全体の伸びは著しいが、その中で RH 法は 60 年代後半 DH 法とともに導入がすすみ、1980 年前後さらに設備基数を伸ばしている。

一方、各社転炉工場における真空処理溶鋼量の推移を図 3 に示した。RH 法以外の真空処理と分別できないが、

前述の設備基数と合わせ考えると相当量の溶鋼が RH 法によつて処理されているものと推定される。ちなみに新日本製鉄における 1986 年の真空処理実績は、RH 法 42.8%，DH 法 8.6%，その他 1.0%，計 52.4% である。

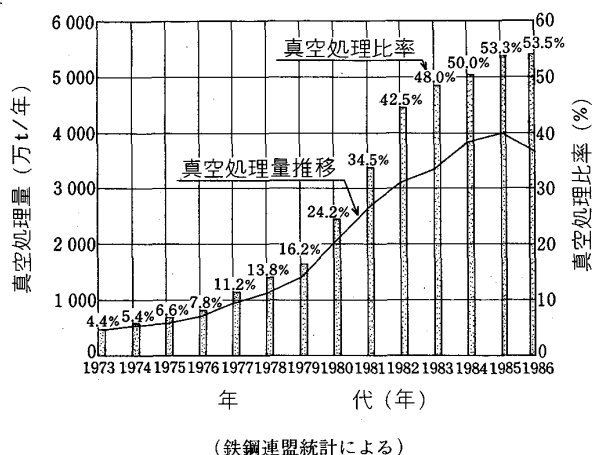


図 3 日本の転炉工場における真空処理量推移

電炉鋼の RH 処理量統計の一例として表 2 に、昭和 58 年の二次精錬各法による処理量を示した¹⁴⁴⁾。RH 処理量は約 250 万 t であり、全電炉鋼に対して、9.1% にすぎないが、特殊鋼の RH 比率は、はるかに高いものと思われる。また同表から、LF-RH 法が主流を占めつつあることが伺われる。

3. RH 技術の展開をたどつて

公開文献にみられた主要な RH 技術の展開を、表 3 に時系列的に整理してみた。設備基数・処理量の増加とあいまって、新技術・新鋼種が開発されてきていることが読みとられよう。

著者らは先に日本の RH 技術の体系化を試みた¹²⁸⁾、ここでは RH 法の近況を踏まえて、RH 技術の展開を次の三つのステージに分別してみた。

第 I 期 (1963 年～1975 年前後) 導入から機能の把握・拡充へ

第 II 期 (1975 年前後～1980 年前後) 連铸との結合そ

表 2 二次精錬各法による電炉鋼処理量¹⁴⁴⁾

(昭和58年 良塊量表示 単位:千t)

精 錬 法	V(LD)	DH	RH	LF-V	LF-RH	LF	ASEA	VAD	VOD	AOD	二次精錬 合計	電 炉 粗 鋼 量	二次精錬 比率 (%)
58 年 年間処理量	417	30	882	487	1 640	2 004	166	143	143	762	6 674	27 629	24.2
						LF 合計 4 131					普通鋼 1 175	20 539	5.7
						RH 合計 2 522					特殊鋼 5 499	7 090	77.5
						V(LD) 合計 904							

表 3 RH 法関連諸技術の発展

年 代	プ ロ セ ス	プ ロ グ ラ ム
第 I 期	1963 ・ RH 法導入 1964 ・ 環流速度・混合状況測定 (富士・広畑) 1965 1966 1967 ・ 環流速度測定 (大同) 1968 ・ 酸素挙動解析 (川鉄・千葉) 1969 ・ 熱損失解析 (山特) ・ 環流ガス 2 段吹込み (富士・広畑) 1970 ・ 環流速度測定 (川鉄) 1971 1972 ・ RH-OB (富士・室蘭) 1973 ・ フラックス精錬 (富士・室蘭) 1974 1975 ・ 3 Legged RH (川鉄・千葉) ・ RH-OB-FD (新日鉄・室蘭, 名古屋) ・ 連铸鋼用大量処理 RH 設備 (新日鉄・大分)	・ 極低炭電磁鋼 (富士・広畑) ・ Cr 系ステンレス鋼 (富士・室蘭) ・ Ni 系ステンレス鋼 (新日鉄・室蘭)
第 II 期	1976 ・ RH 軽処理 (新日鉄・大分) 1977 ・ 成分一点調整 (大同・知多) ・ RH-OB 昇熱 (新日鉄・名古屋) 1978 ・ 連铸鋼用大量処理 RH 設備 (神鋼・加古川) 1979 ・ 成分一点調整 (新日鉄・室蘭) 1980 ・ 合成フラックス精錬 (神鋼・加古川) ・ 全量 RH 処理・吹止め一定操業 (新日鉄・大分) ・ フラックス精錬 (VOF) (新日鉄・名古屋)	・ 軟鋼キルド線材 (中山製鋼所) ・ 連铸用リムド相当鋼 (新日鉄・大分) ・ 自動車用鋼材-ULO 鋼 (大同)
第 III 期	1981 1982 1983 ・ LF-RH (大同・知多) 1984 ・ LF-RH (愛知製鋼) ・ RH-総合制御 (新日鉄・大分) ・ 多機能 RH (神鋼・加古川) ・ フラックス・Ca 添加 1985 ・ RH-Injection (新日鉄・大分) ・ 大容量転炉-RH-OB ステンレス鋼 (新日鉄・室蘭) ・ 槽内インジェクション (住金・和歌山) 1986 ・ [N] コントロール (住金・鹿島) ・ RH-Powder Blowing (新日鉄・名古屋)	・ 極低炭素鋼 (川鉄・千葉, 水島) ・ 低 Al・低 N 鋼 (鋼管・京浜) ・ リムド鋼相当軟質線材 (合鉄・大阪) ・ 極低炭素鋼 (鋼管・京浜, 福山) ・ 極低硫ステンレス鋼 (新日鉄・室蘭) ・ 極低炭素鋼 (新日鉄・広畑) ・ Pb 快削鋼 (愛知製鋼) ・ 極低炭素鋼 (住金・鹿島) ・ 低窒素鋼 (鋼管・京浜) ・ ばね鋼 (大同) ・ Ti-SULC 鋼 (新日鉄・名古屋) ・ 棒線向低 Al・低 N 鋼 (鋼管・京浜)

して大量処理へ

第Ⅲ期 (1980 年前後～) 機能充実と多機能化

3・1 導入から機能の把握・拡充へ (1963 年～1975 年前後)

真空処理技術は 1950 年代、主として大型・高級鋳鍛造品の水素及び非金属介在物減少対策として、取鍋脱ガス法・真空造塊法等のいわゆる Bochmer 法を中心に開発が進んだ。一方において多数鋼塊の大量生産が必要な圧延用鋼材に対する真空処理方式として、50 年代後半に、二つの方法が西独に登場した。それらが Dortmund Hoerder Huettenuion A. G. で開発された DH 法と、Heraeus 社で考案され Rheinstahl 社で実用化された RH 法であり、それぞれ八幡製鉄および富士製鉄によって日本に技術導入された。

DH 法は 25 t の試験設備に引き続き、1961 年 7 月八幡製鉄第三製鋼工場 (平炉) にて 70 t DH が本格稼動し、以後八幡製鉄・住友金属工業・神戸製鋼所に導入されていった。

一方、RH 法に注目した富士製鉄は 1961 年に技術導入契約を結び、1963 年 5 月広畑製鉄所・平炉工場に世界で 2 基目の RH を設置した。RH 法は当時まだ発展段階にあり、Rheinstahl 社においては鍛造用鋼の脱水素の経験しかなかったが、脱ガス操作の連続性と制御性からみて、脱酸・脱炭能力および低炭素未脱酸鋼の処理の可能性が予測されたので、これら技術の自社開発を決意し、他国に先駆けて RH 法の導入に踏み切った⁶⁾⁸⁾¹⁰⁾。

RH 1 号機の設備配置図を図 4²⁾ に、操業状況を写真 1 に示す。200 t 平炉から出鋼される 100 t 溶鋼鍋 2 基をピットにおさめ、低炭素鋼の脱炭を考慮して排気能力を大きくとり (400 kg/h)、メカニカル・ブラスターではなくスチームエジェクターを採用している。

その操業の中で、脱水素能力に加えて真空脱炭反応 (CO 反応) による炭素及び酸素の低下、非金属介在物の浮上除去による溶鋼清浄化等の機能が確認された。厚

板キルド鋼の処理とともに未脱酸鋼・低炭素鋼の溶製法開発に力を注ぎ、電磁鋼を含む極低炭素鋼を安価かつ容易に溶製する技術を確立して、RH 法がその後広く世界に採用される契機をつくった。

1965 年より逐年大同製鋼、川崎製鉄、山陽特殊鋼と RH 法の導入が相つぎ、1968 年までには計 8 基の RH 設備が稼動した。これら設備の立上げ報告に見られた RH 処理鋼種を表 4 に示した。脱水素、脱酸 (清浄化) が要求される鋼種とならんで未脱酸鋼、極低炭素鋼が含

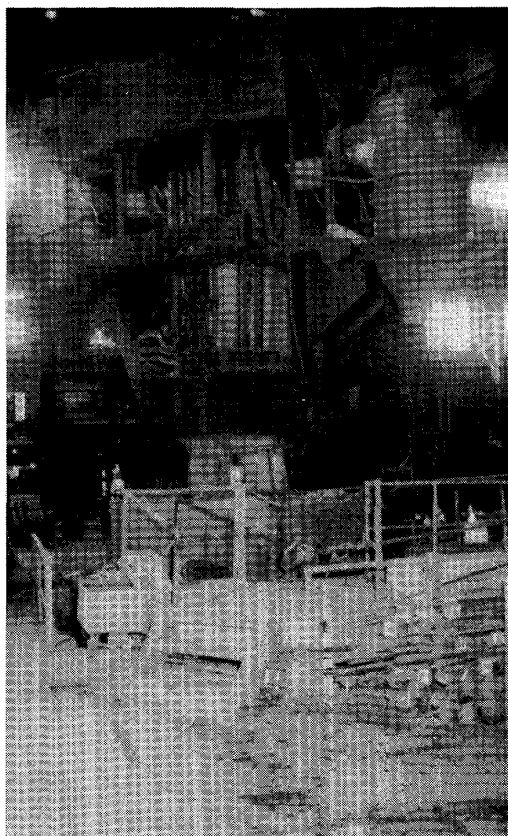


写真 1 RH 1 号機

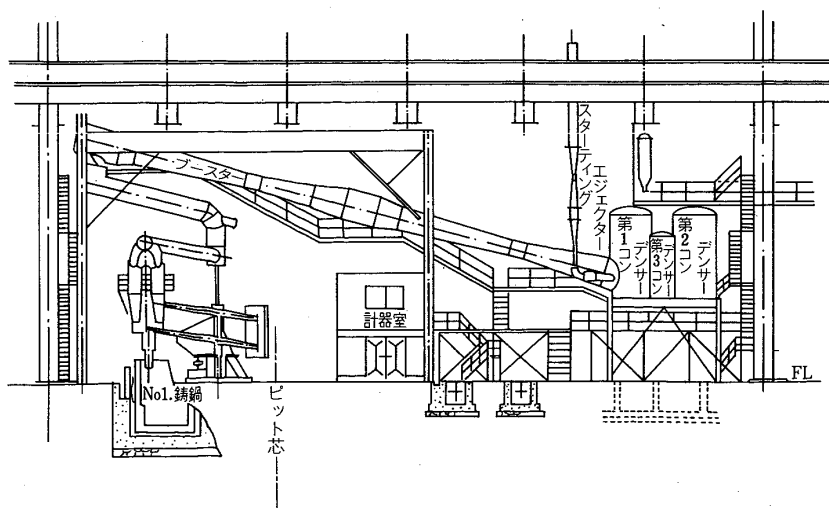


図 4 富士製鉄・広畑環流式脱ガス設備配置図¹⁾

表 4 初期の RH 処理鋼種一覧

(公開資料による)

工 場	鋼 種	出 典
富士・広畑 No. 1 RH	厚板用キルド鋼 (高張力鋼材・造船用鋼材) 低温用鋼・高張力鋼・エナメルシート用鋼・ 深絞り用アルミキルド鋼 電磁鋼・自動車用深絞り鋼 未脱酸鋼	1) 6) 8) 33)
No. 2 RH 富士・名古屋	厚板用 Al-Si キルド鋼	40)
川鉄・千葉	キルド鋼・セミキルド鋼・リムド鋼 高 Mn キルド鋼・調質高抗張力鋼	19) 20) 28)
川鉄・水島	高炭素キルド鋼・高張力鋼・非鎮静鋼 ボイラー用鋼・極低炭素鋼・鍛造用鋼	21) 39)
山陽特殊鋼	高炭素クロム軸受鋼・構造用合金鋼・ 鍛造用大型鋼塊	23) 29)
大同製鋼	中炭素構造用鋼・低炭素肌焼鋼	14)

まれている。

こうした一連の RH 設備導入に併行して、RH における反応機構解明が開始された。表 3 にまとめた技術の流れの中で、1963 年からの約 10 年間には、RH 機能の把握・拡充と適用鋼種拡大への動きが読みとれる。

1964 年に早くも富士製鉄・広畑から、RI を用いた環流速度及び混合状況の測定結果が報告された。溶鋼は平均 19.5 t/min で環流しており少なくとも 5 min に 1 回は真空槽を通過し残溶鋼と均一に混合していることが判明した。同様な RI による溶鋼環流速度測定は、1967 年大同製鋼・知多においても行われ広畑とはほぼ同一の結果が得られている¹⁴⁾。

富士製鉄・広畑は、RH 法に関する理論解析を進め一連の報文を発表した^{12)13)15)~17)25)}。その中で彼らは脱ガス機構モデルを提唱し、そのモデルに基づいて環流とは別に脱炭促進に主体をおいたガス吹込みを行うことを提言している。この二段ガス吹込み技術は 1968 年稼動開始した広畑 No. 2 RH において実機化され、極低炭電磁鋼の量産化を容易にした³⁴⁾。また、ここで提唱された溶鋼環流速度を吹込み Ar ガス流量と浸漬管径より推定する式は、現在に至るまで数多く引用されている。

川崎製鉄も 1968 年から 1975 年にかけて一連の調査・開発を行つている。まず酸素の挙動に注目し、RH 処理における脱酸素機構を本格的に調査解明した²⁰⁾²⁴⁾。引き続き溶鋼環流速度を取り上げ、実機測定²⁸⁾³⁵⁾に加えて、木下ら⁴⁵⁾は水モデル実験を行い、吹込み Ar ガス流量と浸漬管径の影響を把握して、特に大径化による環流速度増大が著しいことを確認した。さらに同社では大径化をもう 1 歩進め、3 本足 RH の開発を試みた^{61)~63)}。上昇管 2 本、下降管 1 本の組合せでおのおの断面積を 2 倍とし、Ar 流量も倍増して環流速度を上げ、脱酸および脱炭反応効率を改善したと報告している。

山陽特殊製鋼では、1967 年に稼動を始めた 35 t RH にて熱損失の解析を行い、60 t の取鋼脱ガス法と比較して、温度降下の点でも有利と結論づけている²⁹⁾³²⁾。

このような RH 機能の把握・拡充と併行して、従来

からの単純脱ガス処理鋼種以外への鋼種拡大が試みられた。その典型例が極低炭電磁鋼であり、またステンレス鋼であろう。

電磁鋼はその性格上公表された報告はほとんど見られないが、当時の八幡製鉄・富士製鉄・川崎製鉄 3 社は、おのおのの DH・RH 法を用いて、低炭素鋼を溶製する技術の確立に取り組んだものと推定される。以来、大量の溶鋼を極低炭素域まで脱炭するプロセスとして RH 法と DH 法はその地歩を固めてきた。

一方、富士製鉄・室蘭では 1968 年に RH 設備を導入したが、たまたま当時転炉による Cr 系ステンレス鋼溶製の研究を進めており、その脱炭工程として RH 法による真空脱炭に着目した。そして真空槽内へ酸素ガスを吹き込む RH-OB 法を開発して、Cr 系ステンレス鋼を大量に溶製し始めた。(詳細後述)

3.2 連铸との結合そして大量処理へ (1975 年前後～1980 年前後)

導入の初期段階より、RH 法には単なる脱ガスだけではなく、

- (1) 真空下での合金添加による合金歩留向上
- (2) 攪拌混合による温度・成分の均一性確保
- (3) 高歩留り・強攪拌による化学成分の狭幅制御性向上

が期待され、また

- (4) RH 法の生産性に着目した転炉溶鋼の全量処理
- (5) 連続铸造法との組合せ

が提起されていたことが諸報文に見られる⁵⁾⁶⁾¹⁰⁾。

ここで予期された RH 法の諸技術は、1975 年以降の連铸化の流れの中で開花し実機化されていった。造塊法から連铸法への転換にあたっては、まずリムド鋼・キャップド鋼といった未脱酸鋼に代わる連铸鋼種が必要となつた。また、連铸法では造塊法に比べ相対的に厚さの薄い铸型内で凝固を行うため介在物浮上は不利であり、溶鋼の清浄化がより要求された。加えて長時間にわたり铸造作業が継続するので、操業の安定性確保のために溶鋼温度・成分の均一性が重要となつた。連铸化に伴うこうした溶鋼諸性状の向上のために、RH 法を持つ諸機能が活用されてきた。

従来の造塊法時代には、軟質で表面性状の良好な薄板材としてリムド鋼あるいはキャップド鋼が、永年にわたり大量に使用されてきたが、凝固過程で CO 発生によるリミング・アクションを必要とするこれら鋼種をそのまま連铸法で製造することは困難であつた。またアルミキルド鋼やシリコンキルド鋼による代替は、亜鉛めつきの密着性・冷延のテンパーカラー等の諸問題があり、連铸法の鋼種拡大のためには、リムド相当鋼の開発が必要であつた。

全連铸法で操業していた新日本製鉄・大分では他に先駆けて、最少限の Al により弱脱酸をするリムド相当鋼

を開発した⁸⁸⁾⁸⁹⁾¹¹¹⁾。その化学成分例を表5に示すが、脱酸剤には Si を用いず Al のみとし、その範囲は 0.005% から 0.012% と極めて狭い幅である。この Al 含有量のコントロールに RH 軽処理⁶⁶⁾⁷⁷⁾(後述)が適用されたが、RH 法のもつ、(1)真空脱炭・脱酸による溶存酸素低減、(2)真空下での Al 添加による歩留安定化および、(3)環流攪拌による成分均一化等の RH 諸機能により、この Al 狭幅制御が可能となつた。転炉・RH・連铸各工程で一連の諸改善を加えて、今日までこのリムド相当鋼は安定して量産されている。

一方、日本鋼管・京浜は 1980 年 11 月の RH 設備稼働を機会に、連铸化拡大のために薄板向け連铸汎用鋼として低 Al 低 N 鋼 (LANS) を開発した^{114)~116)122)126)127)}。成分例を同じく表5に示す。同鋼の製造には成分コントロールが最も重要であり、RH 処理によってこれを満足させている。処理時間を極力短縮した軽処理を行つて [N] の吸収を避け、溶存酸素測定により Al 量を制御している。材質的には加工用熱延鋼板・一般用冷延鋼板・めつき原板として優れた品質を有しており、日本鋼管・福山でも薄板品種拡大に適用されていると報告されている¹²⁰⁾。

線材分野においても、RH 法と連铸法の組合せにより、材質改善・連铸化拡大が図られた。中山製鋼所・船町⁸²⁾ および合同製鉄・大阪¹¹⁸⁾ は、ともに低炭軟質線材の連铸化にあたり RH における脱炭により軟質化が可能となつたと報告している。表5にはこれら低炭キルド線材用鋼の取鍋成分目標が含まれている。RH 処理による [C] 低下によりリムド鋼と同等以上の軟質化が可能となり、軟質線材の連铸拡大に RH 法が大きく寄与した。

日本鋼管でも上述の低 Al・低 N 鋼を棒鋼・線材向の軟鋼素材に発展させた。Sol. Al 含有量 0.003~0.010% の溶製法を確立して種々の用途に合致した鋼種の開発を行っている¹⁷⁴⁾¹⁹⁶⁾。

表5にはその他の連铸用リムド相当鋼の化学成分も集めた。近年铸型内電磁攪拌を併用して RH によらずに Al 量を制御する方式も報告されている¹¹²⁾¹⁴⁶⁾。

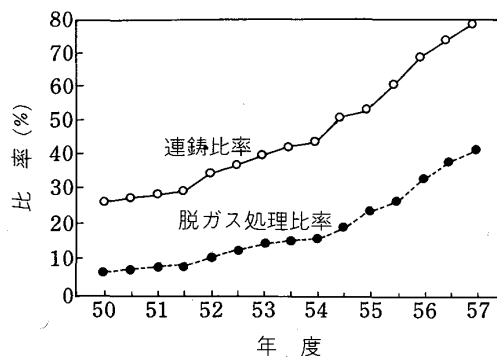
少量の高純鋼溶製手段という従来の RH 法の位置付けを変えて、大量の一般材処理プロセスへと発展させた技術改革の一つが、新日本製鉄・大分で開発された「RH 軽処理法」であろう⁶⁶⁾⁷⁷⁾。約 10 min の RH 処理により、溶鋼の均一化がはかられて連铸操業および品質が安定し、吹止め [C] の上昇により転炉の負荷が軽減し、真空槽内添加によつて脱酸剤合金鉄量が大幅に節減された。転炉および連铸の生産性向上や総合コストの低減の利得は増工程の費用をはるかに上回り、大量 RH 処理へつながつていった。

大分では 1979 年に No. 2 RH 設備を増設し、月間 50~60 万 t の連铸鋼を全量 RH 処理を行う体制に移行した¹⁰³⁾。さらに RH-OB を積極的に活用して中・低炭素鋼種の吹止め [C] は高位集約する「転炉中炭一定吹止め操業法」を開発し、転炉・連铸一貫操業の大幅安定化を可能とした¹⁰⁴⁾¹⁰⁵⁾¹¹⁷⁾。これら一連の技術展開は次章にて詳述する。

設備面でも連铸法との結合への動きは早くから見られていた。水島 No. 1 RH (1967 年稼働開始) は、将来連铸との直結を配慮してそのレイアウトを決めたと報告されている。1974~75 年以降日本で建設された RH 設備には、連铸向溶鋼の迅速・大量処理を意識したレイアウトとデザインが大幅に取り入れられてきている。例えば

表 5 各種連铸用リムド相当鋼

	事業所名	鋼種名	溶製法	化 学 成 分 範 囲 (単位: %)							備考	出典
				[C]	[Si]	[Mn]	[P]	[S]	[Al]	[N]		
薄板	新日鉄・大分	リムド相当鋼	RH	0.04	0.01	0.25	0.015	0.014	0.006	0.0022	化学成分例	88) 89) (1979)
	日本鋼管・京浜 福山	低 Al 低 N 鋼 (LANS)	RH	0.01 ~0.05	≤0.02	0.10 ~0.25	≤0.025	≤0.025	0.010 ~0.030 (Sol.[Al])	≤0.0025		114) 122) (1981)
	新日鉄・広畑	弱脱酸鋼	取鍋インジェクション (スラグ改質) (EMS-M)	0.03 ~0.05	≤0.03	0.20 ~0.25	≤0.025	≤0.022	0.002 ~0.007 (Sol.[Al])	≤0.0025	RH から取鍋 インジェクションへ移行	146) (1984)
条線	中山製鋼・船町	軟鋼キルド線材	RH	<0.02	0.04	0.25	<0.025	<0.025	<0.005		[N] 成分値 不詳	82) (1979)
	神戸製鋼・加古川	リムド相当鋼	取鍋 Ar パブリ シング (TD内[O]測定 による Al 調整) (EMS-M)	0.04 ~0.18	≤0.03	0.15 ~0.65	≤0.020	≤0.020	≤0.010		[N] 成分値 不詳	112) (1981)
	合同製鋼・大阪	低炭素軟鋼線材	RH	≤0.01		0.22 ~0.25					その他成分値 不詳	118) (1982)
	日本鋼管・京浜	低 Al 低 N 鋼 (LANS-BW)	RH						0.002 ~0.009 (Sol.[Al])	≤0.0025	その他成分値 不詳	174) 196) (1985)

図 5 連铸および脱ガス処理比率の推移¹³⁰⁾

富士製鉄・広畑 No. 4 RH (1974 年稼動開始) においては連铸向溶鋼処理を 60～65% と想定し、(1) 巡回式ツイン・ベッセル方式による常時稼動槽の確保、(2) 各種の自動化 (真空系・合金系・测温サンプリグ系) による処理時間短縮等の配慮がなされている⁵⁸⁾。

1979 年に建設された神戸製鋼所加古川の RH は板用連铸向溶鋼を大量処理すべく下記の特徴を有すると報告されている⁸³⁾。

(1) 槽稼動率向上を目的とした槽台車平行稼動方式の採用

(2) 秤量精度向上を目的とした合金秤量機の採用

(3) 操作の簡易化を目的とした排気操作の自動化

(4) 蒸気量の低減を目的としたスチームエジェクターの並列分割化

三枝¹³⁰⁾ が白石記念講座にて提示した連铸及び脱ガス比率の推移図を図 5 に示したが、連铸法と真空処理法の結びつきをマクロに物語るものとして興味深い。

3.3 機能充実と多機能化 (1980 年前後～)

1980 年前後には、電気炉メーカーも含めて各社の RH 設備導入が相ついだ。表 1 に見られるように 1977 年から 82 年の 6 年間に延べ 20 基の RH が新設され、現在稼動中の過半数はこの時期に動き出している。

この背景には上述の連铸用鋼の拡大があるが、加えて薄板材において連続焼鈍への変革や材料特性の向上のために、極低炭素鋼の溶製が必要となつたことも上げられよう。さらに品質の厳格化が加速されて、成分超狭幅化・高純度化 (不純分元素低減)・清浄化 (酸化系介在物減少)・介在物形態制御等も強く要請されてきた。これらのニーズに対応すべく RH 法を始めとする各種の二次精錬プロセスがさらに広く導入されてきた。

1980 年以降の RH 法の流れには次の三つの動きが見られている。

(1) RH 法の機能充実

(2) 二次精錬法の複合適用

(3) RH 多機能化

(1) RH 法の固有機能充実を目指した試みとしては、成分狭幅化・清浄鋼化・極低炭素化等々が上げられる。

成分の狭幅制御は、前述の連铸用弱脱酸鋼に加えて、低合金鋼の焼入性ばらつき減少のためにも必要となつてきた。大同特殊鋼・知多⁷⁵⁾ および新日本製鉄・室蘭⁸⁵⁾ において、RH 法のもつ真空下での混合攪拌機能に合金二段添加等の技術を加え、[C] [Si] [Mn] [Cr] [Mo] 等の成分調整範囲を狭めた、いわゆる「成分一点調整法」が早くから開発された。

冷延用薄板をもつほぼすべての各社・各所において、極低炭素鋼の溶製のために、RH における脱炭速度促進・反応機構解明が進められ、RH 技術に一段の進展をもたらしている。

その中で、溶鋼環流速度増大と反応界面積増加が脱炭反応の促進に顕著に寄与することが知られてきた¹⁴¹⁾¹⁹⁸⁾。浸漬管大径化¹²³⁾¹³¹⁾¹⁵⁵⁾ (含オーバル型)¹⁵⁶⁾、環流アルゴン量増加¹¹³⁾¹²³⁾¹³¹⁾、真空度制御¹³⁸⁾¹⁵⁰⁾¹⁵⁹⁾ RH 槽内への不活性ガスの吹込み¹⁴¹⁾¹⁵⁹⁾ 等がその手段であるが、これらを組み合わせて RH 処理後で [C] ≤ 20 ppm が工業的に安定して溶製されている。

(2) このように、RH 法の機能充実が図られてきたが、品質厳格化の進む中で溶鋼加熱・脱硫・介在物形態制御など RH 法では不十分な機能が顕在化し、それを補うために他の二次精錬法との複合処理が必要となるケースもでてきた。その一つの流れが電気炉特殊鋼各社に導入された取鍋精錬炉 (LF 法) との組合せである。冷間鍛造用鋼の介在物 (酸化物系・硫化物系) 減少、軸受鋼の酸素量低減、低歪み鋼の成分狭幅制御などの要求を満たし、品質面・能率面・コスト面から有利なプロセスとして、LF 法と RH 法の併用プロセスが採用されてきた。すなわち LF では、溶鋼昇熱に加えて強攪拌を利用した還元精錬により脱硫と一次脱酸を行い、RH では脱水素と二次脱酸を行う¹³⁶⁾¹⁵¹⁾¹⁶¹⁾¹⁶²⁾。この方式により成分・温度の調整機能も大幅に向上するが、特に LF 法による溶鋼温度保持機能は、多連铸の円滑化をもたらし、連铸拡大に寄与している。今日では量産特殊鋼用の製鋼法として EF-LF-RH-CC ラインが、その主流を占めるに至つた¹⁴⁴⁾。

一方、転炉鋼においても一部に二次精錬の複合適用が行われた。LF 法との組合せも報告されているが、日本鋼管の導入した NK-AP 法と RH 法の組合せがその代表例であろう。AP 法は取鍋内での溶鋼のアーキ加熱、スラグ精錬およびパウダー・インジェクションの機能を有する高級鋼の量産化プロセスであるが、表 6 に報告されているように、AP 法と RH 法を組み合わせれば、二次精錬機能として期待されるすべてを満足させることができる。

その他にも、脱硫および介在物形態制御のための取鍋溶鋼への粉体吹込みと RH 真空処理との複合二次精錬が採用されている例もある¹⁸⁶⁾。

(3) しかし、二次精錬の複合処理は、単なる熱損失の

増大や精錬費用の増加のみならず、工場内物流の錯綜化や生産性の低下をもたらすので、これらの問題を解消するために、RH 法のさらなる機能拡大による単独二次精錬処理化が試みられている。

RH 法は第Ⅰ期・第Ⅱ期を通じて、①脱水素、②脱炭、③脱酸、④介在物分離、⑤成分狭幅制御、⑥合金鉄削減、⑦溶鋼加熱 (Al 昇熱) と機能拡大が図られてきたが残された二次精錬機能である⑧脱硫、⑨介在物形態制御を RH で行うべく各種の開発が行われてきている。

神戸製鋼所・加古川では、RH への機能集約を狙った一連の開発の中で RH 槽内への合成フラックスの添加により、極低硫鋼 ($[S] \leq 12 \text{ ppm}$) を得ている。さらに Ca 合金を直接 RH 真空槽内へ投入して 10~20 ppm の Ca 添加を可能とし、実操業に適用したと報告している¹⁴⁸⁾¹⁵⁷⁾¹⁵⁸⁾。

また、RH 処理中の取鍋内にインジェクション・ランスを挿入してガスおよび粉体を溶鋼に吹き込む RH-Injection 法¹⁶⁶⁾¹⁹²⁾¹⁹⁹⁾ および RH-OB ノズルから槽内に粉体を吹き込む RH-PB 法¹⁸²⁾¹⁹⁷⁾²⁰⁰⁾ が、それぞれ新日本製鉄・大分および名古屋で開発されている。これらの技術内容は後述する。

一方、住友金属工業・和歌山からは浸漬管羽口からフ

ラックスを吹き込んで脱硫・脱窒の促進を図った試験が報告されている。¹⁷¹⁾

RH 法による単独処理化にむけての今後の展開が注目されるところである。

3・4 総括—RH 諸機能の現状

1963 年より 20 数年間に、営営と積み重ねられてきた開発・改善により RH 法のもつ諸機能が飛躍的に充実拡大されてきた。現在の RH 法で何がどこまで可能かとの設問に答えるべく、諸文献の報告に基づいて諸機能の現状を表 7 に総括してみた。

(1)[H] 早くから RH の脱水素限としては 1.5 ppm 以下が安定溶製されてきているが、溶鋼環流速度増大によつて 0.6~1.0 ppm が確保できるとの報告もある¹⁴²⁾¹⁵⁵⁾。

(2)[C] 極低炭鋼溶製技術に数多くの取組みがなされてきたが、RH 処理後で [C] 20 ppm 以下が安定製造されているが、さらに 15 ppm 以下も可能となつてきている⁷²⁾¹⁵⁶⁾。

(3)T[O] 鋼種によつて到達 T[O] は変わるが、RH 単独 (フラックス精錬) で $\leq 20 \text{ ppm}$ 以下、LF 法と併用で $\leq 10 \text{ ppm}$ となる¹⁶¹⁾。

(4)[N] 一般の RH 処理では脱窒は進みにくい

表 6 二次精錬プロセスの機能¹²⁰⁾ (RH 法および AP 法)

	脱水素	脱炭	低窒素	脱硫	脱りん	成分調整	清浄度向上	昇熱	冷却	合金鉄削減
RH	◎	◎	◎	—	—	◎	○	—	◎	◎
AP	—	—	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
AP+RH	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎: 効果大 ○: 効果あり

表 7 RH 諸機能の現状

元素名	到達レベル	事業所名	技 術 内 容	出 典
不純分 元素 低減	[H] RH final $\leq 1.0 \text{ ppm}$ RH final $\leq 1.0 \text{ ppm}$	川鉄・水島 新日鉄・名古屋	環流速度増加、処理時間確保 大径浸漬管、環流 Ar 流量増による環流速度増加	155) 142)
	[C] RH final $\leq 15 \text{ ppm}$ RH final $\leq 15 \text{ ppm}$	鋼管・福山 新日鉄・広畑	環流 Ar 量増大、早期真空度低減 オーバー RH による環流速度増、真空度確保	156) 72)
	T. [O] Mold T[O] $\leq 20 \text{ ppm}$ 成品 T[O] $\leq 10 \text{ ppm}$	新日鉄・名古屋 大同・知多	RH 単独 (Al-Si キルド鋼)、CaO-CaF ₂ フラックス添加 LF-RH プロセス (軸受鋼)、強還元性スラグおよび耐火物選択	101) 161)
	[S] RH final $\leq 5 \text{ ppm}$ RH final $\leq 10 \text{ ppm}$	新日鉄・大分 新日鉄・名古屋	RH-Injection, CaO-CaF ₂ フラックス RH-PB, CaO-CaF ₂ フラックス	194) 197)
	[N] 脱 [N] 率 20~40%	鋼管・福山	環流 Ar 量増大、強脱酸、高真空確保	139)
添加	[Ca] Mold [Ca] 10~20 ppm (歩留り 16%)	神鋼・加古川	RH 槽内 Ca 合金添加、低真空環流	158)
成分 コント ロール	[C] $\sigma = 0.003\%$ $\pm 0.01\%$	新日鉄・大分 新日鉄・室蘭	RH 総合制御システム (RH-TOP) 合金鉄の 2 段投入、自動サンプリングの採用	154) 85)
	[Mn] $\pm 0.015\%$	新日鉄・室蘭	合金鉄の 2 段投入、自動サンプリングの採用	85)
	[Si] $\pm 0.015\%$	新日鉄・室蘭	合金鉄の 2 段投入、自動サンプリングの採用	85)
	[Al] $\sigma = 4.4\% \times 10^{-3}$ $\sigma = 1.5\% \times 10^{-3}$	新日鉄・大分 鋼管・京浜	Al キルド鋼、RH 軽処理 弱脱酸鋼、フリー酸素測定による Al 調整、無酸化 casting	66) 196)
	[N] $\pm 15 \text{ ppm}$	住金・鹿島	[N]=70 ppm、中炭 Al キルド鋼、環流ガスの Ar N ₂ 切換え	190)
温度	昇 温 昇温速度約 4°C/min	新日鉄・名古屋	RH-OB Al 昇熱	78)

が、一定条件下（強脱酸・大 Ar 流量・真空度確保）では、20～40% 脱窒すると報告されている¹³⁹⁾。

(5)[S] RH 槽内へのフラックス添加では [S] $\leq 12 \sim 15$ ppm の水準であつたが、RH 処理中の取鍋内 (RH-Injection 法) または、槽内 (RH-PB 法) への脱硫用粉体吹込みによつて [S] ≤ 10 ppm が安定して溶製可能となつた¹⁹⁴⁾¹⁹⁷⁾。

(6)[Ca] 添加 RH 槽内への Ca 合金直接添加により歩留り 16% で、Mold[Ca]=約 20 ppm と報告されている¹³⁹⁾。

(7)成分コントロール [C] [Mn] [Si] に関しては低合金鋼の焼入性ばらつき減少を狙つた合金二段投入法等で、おのおの $\pm 0.01\%$ 、 $\pm 0.015\%$ の成分調整技術が確立された⁸⁵⁾。低炭素鋼の [C] 制御に関しても、計算機による RH 総合制御システムにより $\sigma=0.003\%$ を達成した¹⁴⁹⁾。

弱脱酸鋼の [Al] に関しては、弱脱酸鋼において RH における成分微調整技術により $1.5 \times 10^{-3}\%$ が達成されている¹⁹⁶⁾。[N] については、70 ppm レベルの中炭 Al キルド鋼にて、環流ガスを N_2 ガスに切り換えて、 ± 15 ppm の [N] コントロールが知られている¹⁹⁰⁾。

(8)昇温 RH-OB による Al の発熱により $4^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温が可能である⁷⁸⁾。

4. 主要 RH 開発技術の概要

上述の RH 技術の流れの中で節目となつている下記の三つの開発技術に筆者も関与してきたので、開発に至る背景・経緯を含めてそれらの概要を紹介したい。

4.1 RH-OB によるステンレス鋼溶製法の開発

図 6 に 1972 年開発完了した当時の転炉-RH・OB 法の技術構成を図示した。この方法は高炉溶銑を主原料とした転炉による Cr 系ステンレス鋼溶製プロセスであり、RH 法を積極活用している点で当時注目を集めた^{52)～55)60)70)}。同法の特徴は下記である。

(1)転炉二回出鋼法により溶銑りんを事前除去

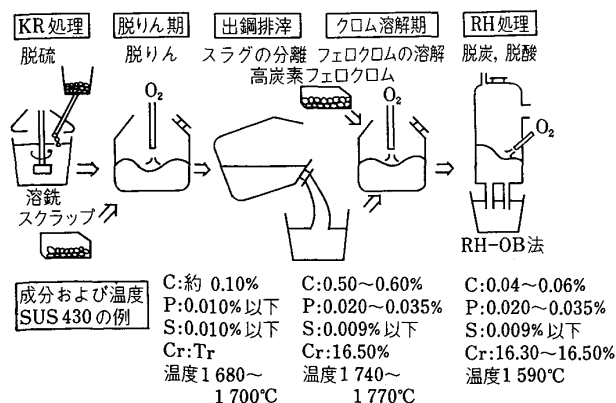


図 6 転炉-RH・OB 法によるステンレス鋼溶製法の技術構成⁷⁰⁾

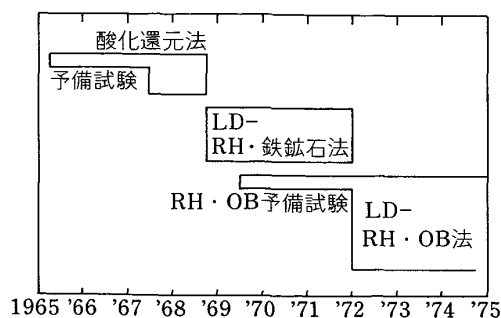


図 7 新日鉄・室蘭における新ステンレス鋼溶製法の開発経緯⁷⁰⁾

(2)安価な高炭素 Fe-Cr 合金を転炉 O_2 ジェットと追加熱源により溶解

(3)高炭素吹止め ($C=0.50 \sim 0.60\%$) による転炉負荷軽減

(4)酸素ガスを RH 槽内へ吹き込み減圧下で強制脱炭

図 7 にその経緯が示されているように、同法の開発開始から工業的な量産化までには約 8 年の年月を要している。当時各社とも転炉溶製鋼種拡大に力を注いでおり、室蘭においても平炉を改造した試験転炉で、電気炉鋼を含む各種鋼種の転炉溶製開発を続けていた。その鋼種拡大の一環として、転炉での Cr 系ステンレス鋼溶製にも取り組み、まず電気炉に近い酸化還元法を試みたが、高温・長時間の転炉負荷に耐えられず、減圧下における優先脱炭に着眼して、RH 法の適用を試みた。始めは脱炭反応酸素源として鉄鉱石を添加していたが、転炉の熱負荷を軽減し Cr 歩留りを向上させるため、RH 真空槽内への酸素ガス吹込み技術 (RH-OB) を開発して、転炉と RH の組合せによるステンレス鋼の新しい溶製プロセスを完成させた。

その後 10 年余、順調な生産を続け 1986 年末までに累計 135 万 t のステンレス鋼が同法により製造されている。その間に幾多の技術改善が積み重ねられ、溶製用転炉・RH も移り変わってきた。現在の転炉-RH・OB 法によるステンレス鋼溶製プロセスは、(1)250 t 混銑車 (溶鋼脱りん・脱硫)、(2)280 t 上底吹転炉、(3)280 t RH-OB であり、各設備とも大容量化され、かつ周辺の開発技術を取り込んでより効率化されている¹⁶⁹⁾。

後年の発展をみると、RH-OB 法の開発は技術史上大きな意義をもっていた。ステンレス鋼の優先脱炭用に開発された RH-OB 技術は、さらに酸素吹込み法の改善を重ねて、一般炭素鋼にも適用されていき RH 機能拡大・処理鋼種増大に寄与した。

初期の OB 法は Ar ガス冷却による上吹き二重管ノズルであつたが、その後、浸漬ノズル法の開発が行われた¹⁰⁸⁾。その例を図 8 に示す。ノズルを溶鋼内に配置した FD (Full Dip) 法により、冷却用 Ar ガス (または

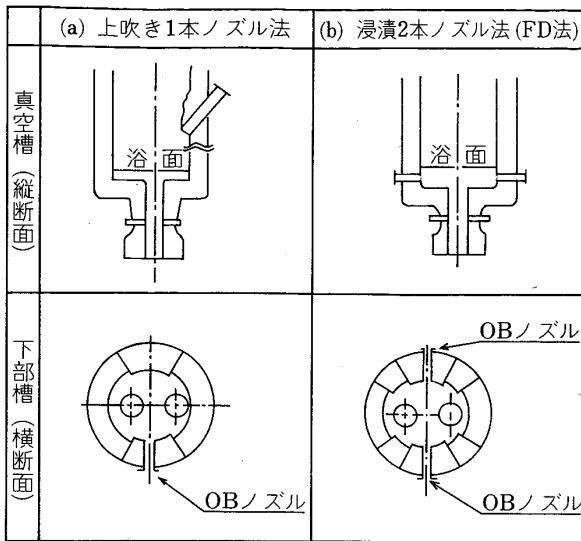
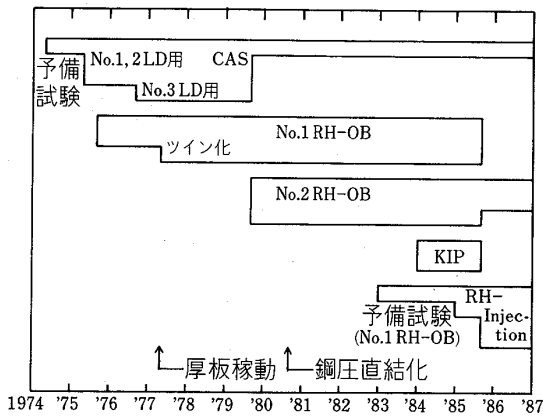
図 8 上吹きノズル・浸漬ノズル法の比較¹⁰⁸⁾

図 9 新日鉄・大分における二次精錬技術の開発経緯

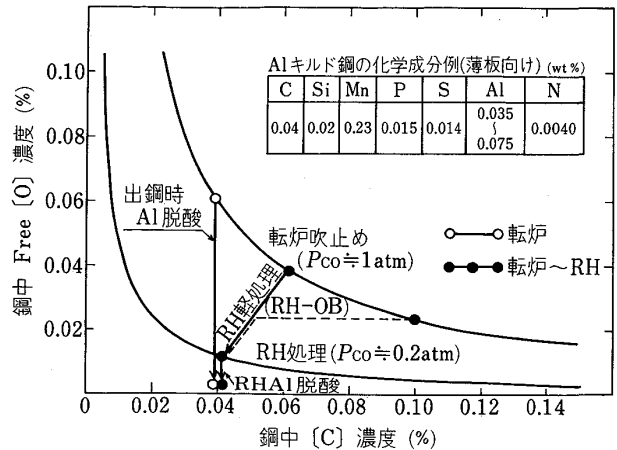
オイル・ミスト)の使用量は増えるが、反応界面積および攪拌力の増大によって反応効率が改善されることが見出されている。

RH-OB 法により強制脱炭機能が付与されたが、さらに吹き込んだ酸素ガスにより、あらかじめ溶鋼に添加した金属 Al を酸化発熱させる Al 昇熱技術が新日本製鉄・名古屋で開発された⁷⁴⁾⁷⁸⁾。Al 添加法および通酸法により溶鋼の [Al] 量を制御して、品質劣化をまねくことなく約 4°C/min の昇温ができ、最高 100°C まで RH による温度補償が可能になった。

また、RH-OB 法は次章で述べる「転炉中炭一定吹止め操業法」にも積極活用されている。

4.2 RH 大量処理法の確立

新日本製鉄・大分における二次精錬法の変遷を図 9 にまとめた。全連鑄法を特徴とする同所においては、当初より RH 法を少量の高純鋼溶製手段としてではなく、

図 10 RH 軽処理法および RH-OB 法における [C] および [O] の挙動¹²⁸⁾

一般材の大量処理法と位置付けて、大型 RH 設備を建設した。連鑄法の拡大・充実の中で一段の操業安定・品質向上が必要とされて、大量処理プロセスとしての RH 法と連鑄法の結合により新しい技術体系が生まれてきた。それを形成する個別技術が、(1)RH 軽処理技術、(2)リムド相当鋼製造技術、(3)全量 RH 処理技術、(4)中炭一定吹止め操業法である。

RH 軽処理技術は、RH の混合攪拌機能・脱炭機能を活用し、未脱酸溶鋼を低真空下短時間処理することにより、連鑄最適条件まで成分・温度を微調整する処理方法であり、転炉負荷軽減・合金節減・品質向上を狙っている⁶⁶⁾⁷⁷⁾。図 10 に軽処理法および RH-OB 法における炭素と酸素の挙動を模式的に図示した¹²⁸⁾。減圧下での [C] ~ [O] 平衡により、同一鋼中 [C] レベルで Free [O] 低下と所要 Al 量の低減が可能となり、また吹止め [C] 上昇は転炉負荷軽減につながり、RH 処理費用増を上まわるメリットを生む。また、前述のリムド相当鋼製造においても [Al] のばらつきの少ない精度の高い脱酸コントロールのために軽処理法が適用されている¹¹¹⁾。

軽処理技術の確立に伴い RH 処理量拡大を意図して、大量軽処理用の No. 2 RH 設備を 1979 年 10 月に稼働させた。この RH は本格的な大量処理用 RH 設備の代表例であり(1)ターンテーブル方式による溶鋼鍋入替え、(2)ロータリーフィーダー方式による合金添加、(3)移動台車方式による迅速真空槽交換、(4)軽処理に必要な真空系(到達真空度 30 Torr)等が採用された⁹⁴⁾¹⁰³⁾。

この全量 RH 処理体制と RH-OB 技術を集大成して、転炉吹止め [C] を一定とした連続同一 [C] 吹止め操業法が確立された⁹⁴⁾¹⁰⁴⁾¹⁰⁵⁾¹¹⁷⁾。その全体構成と効果の概念図が図 11 である⁹⁴⁾。転炉の安定操業のためには外部要因の変動を極力減らし、同一条件下で吹錬を行うことにより炉内反応の再現性を確保すればよいが、RH 法と組み合わせることにより吹止め条件の一定化が可能とな

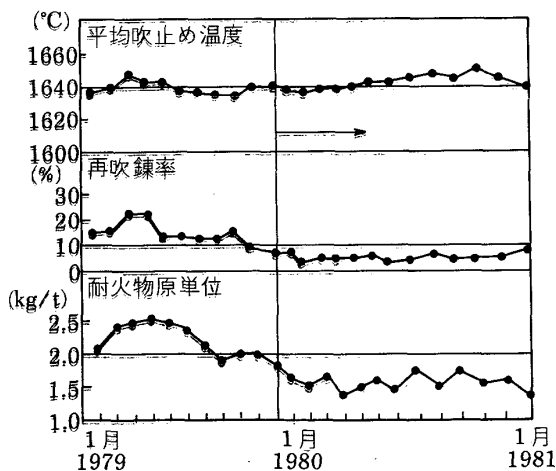
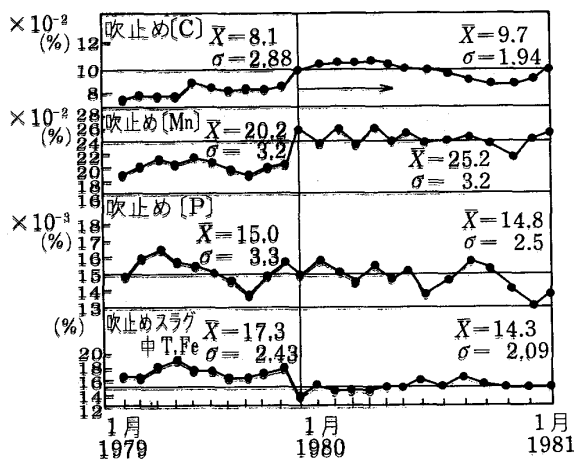
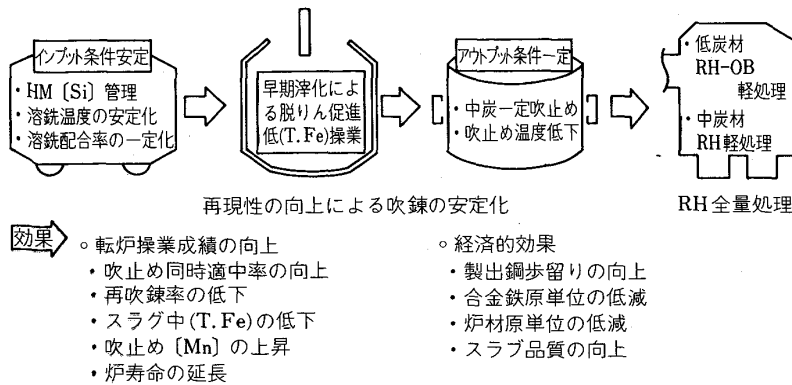


図 12 転炉中炭吹止め操業法導入時の操業諸元推移¹¹⁷⁾

つた。本方式導入前後の操業成績を図 12 に示したが¹¹⁷⁾ 連続一定 [C] 吹止め操業により、滓化状況や炉内反応の再現性が向上して、より安定した脱りんが可能となり、吹止め [P] のばらつきも減少して、低 (T, Fe) 操業が定着した。

この一定化操業思想は、さらに連铸-圧延間の直結プロセスと結合して、転炉-RH-連铸-サイジング・ミル-圧延(熱延・厚板)の各工程が“一定操業化”および“定

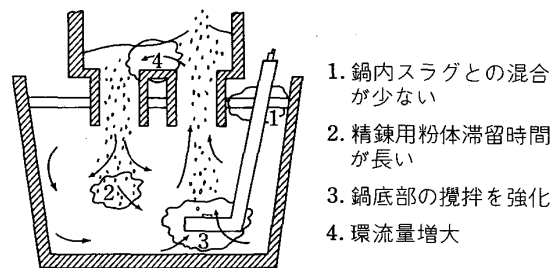


図 13 RH-Injection 法の基本概念図¹⁶⁶⁾

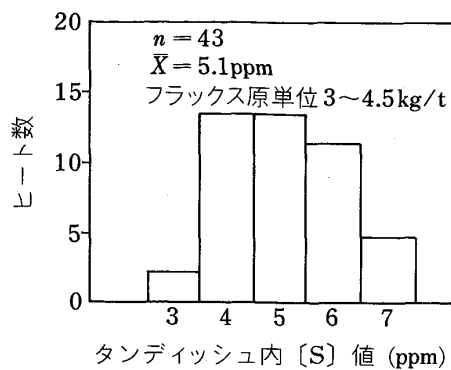
常流化”された形で連動する新しい生産プロセスが確立されている。

4.3 RH-Injection 法の開発

前述のように、RH-OB 法および RH 軽処理法によって、脱水素・脱炭(自然・強制)・脱酸・介在物分離・成分狭幅制御・溶鋼加熱等の冶金操作が可能になったが、強脱硫・介在物形態制御の両機能に欠けるため、品質厳格化が進行していくにつれて、他の二次精錬法との併用を余儀なくされるケースが多くなった。新日本製鉄・大分においても、極低硫化・介在物球状化が必要な素材の溶製のため、1983 年に取鍋粉体吹込み設備を導入して、転炉-取鍋インジェクション-RH-連铸の複合二次精錬で対応していた。(図 9 参照)

新日本製鉄・大分ではこの二つの機能を新たに付与し、あわせて槽内での諸反応を促進することを目的として、RH-Injection 法の開発を進め、予備試験を経て 1985 年 6 月から本格設備の稼動に入った^{166)189)192)~194)}。RH-Injection 法の概念図を図 13 に示す。上昇管下部に挿入されたインジェクション・ランスから Ar ガスおよび粉体を吹き込むことにより①溶鋼の環流量を増大させ、②溶鋼内での粉体の Path を確保し、③取鍋内スラグとの混合が少ない状態での反応を進行させることが、可能になった。

RH-Injection 設備は転炉と連铸の間に位置し、溶鋼鍋ターンテーブル方式を始めとして大量処理用に配慮されている。インジェクション操業は、通常の RH 処理に併行して粉体吹込みを行うだけの簡単な操作である

図 14 タンディッシュ内 [S] 分布¹⁶⁶⁾

が、特に脱硫には顕著な効果を示す。その一例が図 14 であるが、CaO-CaF₂ 系フラックスを 4~5 kg/t 吹き込むことにより、[S]~5 ppm の溶鋼が安定して溶製されている。

RH 槽と取鍋との間隔が狭くインジェクションランスの設備化ができない新日本製鉄・名古屋の 250 t RH では、RH-OB 配管を利用して RH 槽内へ粉体を吹き込む RH-PB 法 (Powder Blowing 法) を開発した¹⁸²⁾¹⁹⁷⁾。吹込み粉体経路は短い RH-Injection 法に近い挙動を示している。

RH-Injection 法および RH-PB 法の開発により残されていた①極低硫化および、②介在物形態制御が可能になり、RH reactor との名にふさわしく現在の二次精錬に必要な機能をほぼすべて具備するに至った。これら多機能化された RH 法の適用により、取鍋精錬の二重処理が回避され、出鋼から鑄造までの大幅な時間短縮と温度負荷軽減が可能となった。また工程の集約によるメリットも大きい。

さらに、Injection ランスからの Ar ガス吹込みにより環流量が増大し、脱水素・脱炭等の槽内反応の高速・高効率化が進み、極低炭素化が容易になり RH 処理時間の短縮も可能となった。

このような多機能化および高速・高効率化によつて、二次精錬プロセスに占める RH 法の位置付けが、さらに強固なものとなったと言えよう。

5. 結 言

1963 年以降の日本における RH 真空精錬法の技術を紐解き次の 3 期に分類してその展開を概観した。

(I) 導入から機能の把握・拡充へ (1963 年~1975 年前後)

(II) 連铸との結合そして大量処理へ (1975 年前後~1980 年前後)

(III) 機能充実と多機能化 (1980 年前後~)

この間に鍛造用鋼の脱水素用プロセスであつた RH 法が真空脱炭・脱酸を始めとして介在物分離・強制脱

炭・成分狭幅制御・溶鋼加熱と次々に機能を強化して、直近では脱硫・介在物形態制御まで可能な多機能プロセスに成長してきた。多機能化に呼応して特殊鋼の少量処理から連铸用一般鋼も含む大量処理プロセスへと変貌を遂げ、二次精錬に堅固たる地歩を占めるに至った。

このような RH 技術の流れの中で節目となつている下記 3 件の開発技術を紹介した。

(1) RH-OB によるステンレス鋼溶製法の開発

(2) RH 大量処理法の確立

(3) RH-Injection 法の開発

今後、RH 法の反応機構の解明にあわせて、さらに効率向上への努力が続けられよう。高純度化・清浄化などの品質要請、ますます強化されるコスト低減、そして今後加速されるであろう小ロット化の激しいせめぎ合いの中で、RH 法のこれからの展開が注目されるところである。

文 献

- 1) 富士製鉄: 第 27 回製鋼部会 (1964 年 3 月) (私信)
- 2) 渡辺省三, 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 松井一美, 中山正時: 鉄と鋼, **50** (1964), p. 456
- 3) 渡辺省三, 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 中山正時, 宮川一男, 野村悦夫: 鉄と鋼, **50** (1964), p. 1773
- 4) 松井一美, 中山正時, 有馬良士, 山崎信行, 浅野鋼一: 富士製鉄技報, **13** (1964), p. 597
- 5) 鉄と鋼, **51** (1965) 3, p. 414
- 6) 田地川健一: 鉄と鋼, **51** (1965), p. 1527
- 7) M. HIRASE: Am. Vac. Soc., 8th Ann. Meeting Vac. Met. (1965)
- 8) M. HIRASE: J. Iron Steel Inst., Special Report 92 (1965), p. 154
- 9) 富士製鉄: 第 28 回特殊鋼部会 (1966 年 3 月) (私信)
- 10) R. HIRATA: J. Met., **18** (1966), p. 617
- 11) 富士製鉄: 第 33 回特殊鋼部会 (1967 年 11 月) (私信)
- 12) 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 佐伯 毅: 鉄と鋼, **53** (1967), p. 297
- 13) 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 佐伯 毅: 鉄と鋼, **53** (1967), p. 300
- 14) 宮川一男, 野村悦男, 野崎善藏, 足立敏夫, 岸田寿夫, 森井 廉: 鉄と鋼, **53** (1967), p. 302
- 15) 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 佐伯 毅: 鉄と鋼, **53** (1967), S 266
- 16) 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 佐伯 毅: 鉄と鋼, **53** (1967), S 267
- 17) 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 佐伯 毅: 富士製鉄技報, **16** (1967), p. 89
- 18) 大槻直樹, 服部正幸: 富士製鉄技報, **16** (1967), p. 224
- 19) 岡部英雄, 庄山善行, 太田豊彦, 飯田義治: 鉄と鋼, **53** (1967), S 265
- 20) 川崎製鉄: 第 39 回製鋼部会 (1968 年 4 月) (私信)
- 21) 川崎製鉄: 第 40 回製鋼部会 (1968 年 7 月) (私信)
- 22) 富士製鉄: 第 35 回特殊鋼部会 (1968 年 11 月) (私信)
- 23) 山陽特殊鋼: 第 36 回特殊鋼部会 (1968 年 11 月) (私信)
- 24) 太田豊彦, 飯田義治, 香月淳一, 岡野 忍: 鉄と鋼, **54** (1968), S 435
- 25) 渡辺秀夫, 浅野鋼一, 佐伯 毅: 鉄と鋼, **54** (1968), p. 1327
- 26) 富士製鉄: 第 43 回製鋼部会 (1969 年 7 月) (私信)

- 27) 富士製鉄: 第 44 回製鋼部会 (1969 年 10 月) (私信)
- 28) 川崎製鉄: 第 44 回製鋼部会 (1969 年 10 月) (私信)
- 29) 山陽特殊鋼: 第 37 回特殊鋼部会 (1969 年 3 月) (私信)
- 30) 富士製鉄: 第 39 回特殊鋼部会 (1969 年 12 月) (私信)
- 31) 藤井徹也, 鞭 巖: 鉄と鋼, **55** (1969), S124
- 32) 森田剛太郎, 山本孝明, 佐藤孝樹: 鉄と鋼, **55** (1969), S125
- 33) 中島長久, 大久保静夫, 有馬良士, 山岸正幸: 鉄と鋼, **55** (1969), S506
- 34) 古垣一成, 山岸正幸, 穴吹 貢: 鉄と鋼, **55** (1969), S507
- 35) 川崎製鉄: 第 47 回製鋼部会 (1970 年 12 月) (私信)
- 36) 坂田直起, 大久保益太: 鉄と鋼, **56** (1970), S47
- 37) 古垣一成, 島袋盛弘, 穴吹 貢: 鉄と鋼, **56** (1970), S51
- 38) 恵藤丈二, 小野澤昌男, 椎野秀一, 大滝義宣: 鉄と鋼, **56** (1970), S52
- 39) 三枝 誠, 蓑 宏之, 小田舜敏: 鉄と鋼, **56** (1970), S53
- 40) 島崎俊治, 早野和成, 野田郁郎: 鉄と鋼, **56** (1970), S54
- 41) 藤井徹也, 鞭 巖: 鉄と鋼, **56** (1970), p. 1165
- 42) 根本秀太郎, 川和高穂, 坂田直起, 大久保益太: 日本鋼管技報, **50** (1970), p. 21
- 43) 川崎製鉄: 第 49 回製鋼部会 (1971 年 7 月) (私信)
- 44) 山陽特殊鋼: 第 43 回特殊鋼部会 (1971 年 6 月) (私信)
- 45) 木下勝雄, 小沢三千晴, 中西恭二, 山田隆康, 大坪俊治: 鉄と鋼, **57** (1971), S419
- 46) 成田貴一: 鉄と鋼, **57** (1971), p. 2253
- 47) 川崎製鉄: 第 51 回製鋼部会 (1972 年 3 月) (私信)
- 48) 富士製鉄: 第 46 回特殊鋼部会 (1972 年 10 月) (私信)
- 49) 有馬良士, 佐伯 毅, 木部昌臣, 中野武人: 鉄と鋼, **58** (1972), A78
- 50) 富士製鉄: 第 55 回製鋼部会 (1973 年 7 月) (私信)
- 51) 富士製鉄: 第 47 回特殊鋼部会 (1973 年 5 月) (私信)
- 52) 大久保静夫, 都築誠毅, 恵藤丈二, 桑原達朗, 小野沢昌男: 鉄と鋼, **59** (1973), S400
- 53) 恵藤丈二, 伊藤幸良, 海保信恵, 吉井良昌, 鈴木功夫: 鉄と鋼, **59** (1973), S401
- 54) 樋口光明, 恵藤丈二, 井上 隆, 塚田 稔, 椎野秀一: 鉄と鋼, **59** (1973), S402
- 55) 堀川 晃, 恵藤丈二, 徳重 勝, 吉井良昌, 子安善郎, 鷲頭志郎: 鉄と鋼, **59** (1973), S403
- 56) K. KUMAI, K. ASANO, R. ARIMA and T. SAEKI: Proc. 4th, ICVM, Tokyo (1973) June
- 57) 恵藤丈二: 第 27・28 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1974), p. 1
- 58) 富士製鉄: 第 59 回製鋼部会 (1974 年 11 月) (私信)
- 59) 新日本製鉄: 第 61 回製鋼部会 (1975 年 7 月) (私信)
- 60) 恵藤丈二, 桑原達朗, 鈴木功夫, 吉田正志: 鉄と鋼, **61** (1975), S530
- 61) 江島彬夫, 小口征男, 藤井徹也, 住田則夫: 鉄と鋼, **61** (1975), S542
- 62) 江島彬夫, 小口征男, 藤井徹也, 住田則夫, 飯田義治, 島崎義尚, 上田典弘: 鉄と鋼, **61** (1975), S543
- 63) 江島彬夫, 小口征男, 藤井徹也, 住田則夫, 飯田義治, 島崎義尚, 上田典弘: 鉄と鋼, **61** (1975), S544
- 64) K. NAKANISHI, J. SZEKELY and C. W. CHANG: Ironmaking Steelmaking (1975), p. 193
- 65) 小口征男, 藤井徹也, 江島彬夫: 学振 19 委-9904 (昭和 51 年 1 月)
- 66) 新日本製鉄: 第 66 回製鋼部会 (1977 年 3 月) (私信)
- 67) 松永 久, 富永忠男, 王寺睦満, 田中英夫: 製鉄研究, (1977) 291, p. 12209
- 68) 神居詮正, 大久保静夫, 恵藤丈二: 鉄と鋼, **63** (1977), A13
- 69) 松永 久, 富永忠男, 王寺睦満, 田中英夫: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 1945
- 70) 神居詮正, 大久保静夫, 恵藤丈二: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 2064
- 71) Y. SUZUKI and T. KUWABARA: Proc. Secondary Steelmaking Conf., London (1977 年 5 月)
- 72) 飯田義治: 第 54・55 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1978), p. 25
- 73) 松永 久: 第 54・55 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1978), p. 59
- 74) 新日本製鉄: 第 71 回製鋼部会 (1978 年 10 月) (私信)
- 75) 大同特殊鋼: 第 58 回特殊鋼部会 (1978 年 11 月) (私信)
- 76) 田中英雄, 榊原路悟, 林 順一: 製鉄研究 (1978) 293, p. 12427
- 77) 中川 一, 島 孝次, 大和田靖憲, 常岡 聡, 桐生幸雄: 鉄と鋼, **64** (1978), S184
- 78) 川合重之, 水上正義, 伊賀一幸, 楠 隆: 鉄と鋼, **64** (1978), S635
- 79) 飯田義治, 山本武美, 難波明彦, 上田 新: 鉄と鋼, **64** (1978), S636
- 80) 碓井 務, 今井寮一郎, 宮下芳雄, 石川 勝, 半明正之, 田口喜代美: 鉄と鋼, **64** (1978), S637
- 81) Y. SUZUKI and T. KUWAHARA: Ironmaking Steelmaking (1978), p. 80
- 82) 中山製鋼所: 第 72 回製鋼部会 (1979 年 3 月) (私信)
- 83) 神戸製鋼所 (私信) 1979 年 11 月
- 84) 山陽特殊鋼: 第 59 回特殊鋼部会 (1979 年 6 月) (私信)
- 85) 新日本製鉄 (私信) 1979 年 11 月
- 86) 朝生一夫, 和中宏樹, 名村貞男, 山本武美, 小沢三千晴, 松野淳一: 鉄と鋼, **65** (1979), S137
- 87) 桑原達朗, 千田裕士, 吉田正志, 奥山 登, 関 孝史: 鉄と鋼, **65** (1979), S661
- 88) 河野拓夫, 椿原 治, 石飛精助, 江坂一彬, 長澤元夫: 鉄と鋼, **65** (1979), S752
- 89) 椿原 治, 早野 成, 細野和典, 石飛精助, 江坂一彬, 豊田和臣, 長澤元夫: 鉄と鋼, **65** (1979), S753
- 90) 加藤時夫, 岡本徹夫: 電気製鋼, **50** (1979), p. 128
- 91) 杉山信明, 滑石直幸, 為広泰造, 鈴木 孝: 耐火物, **31** (1979), p. 89
- 92) 森本忠志, 針田 彬, 古海宏一, 鎌田義行: 耐火物, **31** (1979), p. 597
- 93) 新日本製鉄 (私信) 1980 年 7 月
- 94) 新日本製鉄 (私信) 1980 年 7 月
- 95) 上原紀興: 特殊鋼, **29** (1980), p. 40
- 96) 新日本製鉄 (私信) 1980 年 3 月
- 97) 山陽特殊鋼 (私信) 1980 年 12 月
- 98) 三輪 守, 岡本徹夫, 小野清雄, 柳田 稔, 加藤時夫: 鉄と鋼, **66** (1980), S129
- 99) 住田則夫, 斎藤健志, 小口征男, 駒村宏一, 山本武美: 鉄と鋼, **66** (1980), S130
- 100) 高石昭吾, 小舞忠信, 水上義正, 小林 功, 楠 隆: 鉄と鋼, **66** (1980), S131
- 101) 高石昭吾, 小舞忠信, 岡本健太郎, 水上義正, 富田幸男, 永広和夫, 猪狩繁範: 鉄と鋼, **66** (1980), S132
- 102) 喜多村実, 川崎正蔵, 小山伸二, 伊東修三, 篠崎 薫, 木村雅保: 鉄と鋼, **66** (1980), S788
- 103) 大和田靖憲, 工藤武則, 永島祥男, 松崎孝文: 鉄と鋼, **66** (1980), S817
- 104) 桑原達朗, 原田慎三, 穴吹 貢, 大和田靖憲: 鉄と鋼, **66** (1980), S818
- 105) 吉井正孝, 高本 久, 尾花保雄, 榎尾茂樹: 鉄と鋼, **66** (1980), S819
- 106) 藤原達雄: 第 72・73 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1981), p. 1

- 107) 川崎製鉄 (私信) 1981 年 7 月
- 108) 新日本製鉄 (私信) 1981 年 3 月
- 109) 山陽特殊鋼 (私信) 1981 年 3 月
- 110) 小野清雄, 柳田 稔, 加藤時夫, 三輪 守, 岡本徹夫: 電気製鋼, **52** (1981), p. 149
- 111) 河野拓夫, 長澤元夫, 椿原 治, 細野和典, 江坂一彬, 石飛精助: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 1241
- 112) 喜多村実, 川崎正蔵, 松尾勝良, 松田義弘, 松井秀雄, 柴田隆雄: 鉄と鋼, **67** (1981), S832
- 113) 上田 新, 日名英司, 片桐忠夫, 大森 尚, 山本武美, 永井 潤: 鉄と鋼, **67** (1981), S888
- 114) 楯 昌久, 室賀 脩, 荒木健治, 井上伊佐雄, 渡辺 馨, 高橋正敏: 鉄と鋼, **67** (1981), S1125
- 115) 荒木健治, 高橋正敏, 山名秀夫, 豊田康寛, 須田豊治, 高田芳一: 鉄と鋼, **67** (1981), S1126
- 116) 藪内捷文, 渡辺 馨, 荒木健治, 柴山 裕, 高田芳一, 三辻晴夫: 鉄と鋼, **67** (1981), S1127
- 117) T. KHONO, S. HARADA, T. KUWABARA and S. MIZOGUCHI: Iron Steelmaker, **8** (1981) 6, p. 26
- 118) 合同製鉄 (私信) 1982 年 6 月
- 119) 新日本製鉄 (私信) 1982 年 6 月
- 120) 日本鋼管 (私信) 1982 年 6 月
- 121) 川崎製鉄 (私信) 1982 年 9 月
- 122) 楯 昌久, 室賀 脩, 荒木健治, 井上伊佐雄, 高橋正敏, 渡辺 馨: 日本鋼管技報, **94** (1982), p. 325
- 123) 住田則夫, 藤井徹也, 小口征男, 江見俊彦, 橋 正治, 吉村啓介, 数土文夫: 鉄と鋼, **68** (1982), S186
- 124) 浜上和久, 森下 仁, 吉村啓介, 数土文夫, 高崎順介: 鉄と鋼, **68** (1982), S858
- 125) 藤村俊生, 大岡秀志, 大西正之, 永井 潤: 鉄と鋼, **68** (1982), S857
- 126) 酒匂雅隆, 須田豊治, 荒木健治: 鉄と鋼, **68** (1982), S1425
- 127) 須田豊治, 三辻晴夫, 酒匂雅隆, 荒木健治, 山名秀夫: 鉄と鋼, **68** (1982), S1426
- 128) H. HORIGUCHI, T. KUWABARA, M. YOSHII and M. ANABUKI: Proc. 7th ICVM, Tokyo (1982 年 11 月)
- 129) T. KOMAI and Y. MIZUKAMI: Proc. 7th ICVM, Tokyo (1982 年 11 月)
- 130) 三枝 誠: 第 3・4 回白石記念講座 (日本鉄鋼協会編) (1983), p. 3
- 131) 新日本製鉄 (私信) 1983 年 3 月
- 132) 川崎製鉄 (私信) 1983 年 9 月
- 133) 小舞忠信, 水上義正, 伊賀一幸, 楠 隆, 鈴木 真: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 238
- 134) 星田達男, 遠藤豪士, 海老沢勉, 田口喜代美, 高橋謙治, 菊地良輝: 鉄と鋼, **69** (1983), S179
- 135) 佐藤信吾, 井上 隆, 升光法行, 木下和宏: 鉄と鋼, **69** (1983), S180
- 136) 小沢正俊, 江川 修, 稲葉英明: 鉄と鋼, **69** (1983), S182
- 137) 吉岡敬二, 橋 克彦, 田口喜代美, 高橋謙治: 鉄と鋼, **69** (1983), S879
- 138) 池田正文, 宮脇芳治, 半明正之, 安斎孝儀, 田辺治良, 碓井 務: 鉄と鋼, **69** (1983), S880
- 139) 池田正文, 宮脇芳治, 半明正之, 石川 勝, 田辺治良, 碓井 務: 鉄と鋼, **69** (1983), S881
- 140) 東 陽一, 石橋整治, 松下 昭, 藤本貞久, 阪本克彦, 白畑耕蔵: 鉄と鋼, **69** (1983), S883
- 141) 住田則夫, 藤井徹也, 小口征男, 森下 仁, 吉村啓助, 数土文夫: 川崎製鉄技報, **15** (1983), p. 152
- 142) 永井 潤, 大西正之, 山本武美, 難波明彦, 橋 林三, 小島信司: 川崎製鉄技報, **15** (1983), p. 158
- 143) 川崎正蔵: 第 100・101 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 223
- 144) 湯浅悟郎: 第 100・101 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1984), p. 255
- 145) 新日本製鉄 (私信) 1984 年 7 月
- 146) 新日本製鉄 (私信) 1984 年 7 月
- 147) 合同製鉄 (私信) 1984 年 7 月
- 148) 神戸製鋼所 (私信) 1984 年 11 月
- 149) 新日本製鉄 (私信) 1984 年 7 月
- 150) 山崎 勲, 戸崎泰之, 城田良康, 青木伸秀, 渡辺吉夫: 鉄と鋼, **70** (1984), S239
- 151) 二村直志, 山田忠政: 鉄と鋼, **70** (1984), S972
- 152) 加茂勝秋, 鷹羽茂文, 蟹江忠重, 山田忠政: 鉄と鋼, **70** (1984), S973
- 153) 穴吹 貢, 高浜秀行, 土井勇次, 尾花保雄, 大内俊郎, 浜尾 茂: 鉄と鋼, **70** (1984), S974
- 154) 古崎 宣, 尾花保雄, 目黒清三, 高瀬 勝, 酒井憲一, 浜尾 茂: 鉄と鋼, **70** (1984), S975
- 155) 大西保之, 伊賀一幸, 小林 功, 志俣教之: 鉄と鋼, **70** (1984), S976
- 156) 市村潔一, 古垣一成, 平岡照祥, 延本 明, 赤松雪雄, 三村満俊, 橋本賢治: 鉄と鋼, **70** (1984), S977
- 157) 副島利行, 斎藤 忠, 松本 洋, 篠崎 薫, 源間信行: 鉄と鋼, **70** (1984), S979
- 158) 副島利行, 斎藤 忠, 松本 洋, 篠崎 薫, 前田真一: 鉄と鋼, **70** (1984), S980
- 159) 副島利行, 斎藤 忠, 松本 洋, 篠崎 薫, 三村 毅: 鉄と鋼, **70** (1984), S981
- 160) T. KOMAI, H. SHINO, Y. MIZUKAMI, S. FUJINO and M. INOUE: Nippon Steel Technical Report No. 23, (1984 年 6 月)
- 161) 大同特殊鋼 (私信) 1985 年 7 月
- 162) 愛知製鋼 (私信) 1985 年 7 月
- 163) 日本鋼管 (私信) 1985 年 7 月
- 164) 日本鋼管 (私信) 1985 年 7 月
- 165) 新日本製鉄 (私信) 1985 年 11 月
- 166) 新日本製鉄 (私信) 1985 年 11 月
- 167) 山陽特殊鋼 (私信) 1985 年 3 月
- 168) 山陽特殊鋼 (私信) 1985 年 7 月
- 169) 新日本製鉄 (私信) 1985 年 11 月
- 170) 鉄と鋼, **71** (1985) 3, p. 415
- 171) 森 明義, 佐藤光信, 加藤木健, 市原 清, 松村慎裕, 岡田 剛: 鉄と鋼, **71** (1985), S190
- 172) 寺田 修, 平野 稔, 片山治男, 松村豪夫, 池田正文: 鉄と鋼, **71** (1985), S232
- 173) 永井春哉, 木船 勲, 兼松勤治, 佐藤高芳: 鉄と鋼, **71** (1985), S233
- 174) 角南英八郎, 川和高穂, 田口喜代美, 西川勝彦, 山田正義: 鉄と鋼, **71** (1985), S707
- 175) 田口喜代美, 半明正之, 松尾和彦, 田中 久, 小倉康嗣, 広瀬俊幸: 鉄と鋼, **71** (1985), S1077
- 176) 桑原達朗, 平岡照祥, 武田安夫, 梅沢一誠, 小沢浩作, 齊藤芳夫, 瀬野昭夫, 市村潔一: 鉄と鋼, **71** (1985), S1078
- 177) 森 幸治, 齊藤芳夫, 古川 明, 沢田郁夫, 大橋徹郎: 鉄と鋼, **71** (1985), S1079
- 178) 戸崎泰之, 木村智彦, 三木 隆: 耐火物, **37** (1985), p. 677
- 179) 小沢正俊, 大津賀伝次郎, 山本雅之: 電気製鋼, **56** (1985), p. 77
- 180) T. KUWABARA, H. HIRAKA, Y. TAKEDA, K. UMEZAWA and H. ISHIKAWA: Proc. 8th ICVM (1985 年 10 月)
- 181) H. TAKAMOTO, T. FURUSAKI and H. HORIGUCHI: Symposium on Ladle Refining Equipment-AISI (1985)
- 182) 新日本製鉄 (私信) 1986 年 3 月
- 183) 新日本製鉄 (私信) 1986 年 3 月
- 184) 日本鋼管 (私信) 1986 年 3 月

- 185) 住友金属工業 (私信) 1986 年 3 月
186) 川崎製鉄 (私信) 1986 年 3 月
187) 新日本製鉄 (私信) 1986 年 7 月
188) 飯久保知人, 伊藤幸生, 林 博昭, 斉藤鉄夫, 高木伸雄:
電気製鋼, **57** (1986), p. 23
189) 桐生幸雄, 八百井英雄, 麻生誠二: 鉄と鋼, **72** (1986),
S 156
190) 山崎 勲, 田中雅章, 江草 弘, 黒川伸洋, 城田良康:
鉄と鋼, **72** (1986), S 254
191) 池田正之, 和田 勉, 栗山伸二, 舟之川洋, 洞村信夫:
鉄と鋼, **72** (1986), S 257
192) 古崎 宣, 稲葉東實, 高本 久, 吉井正孝, 矢倉重範:
鉄と鋼, **72** (1986), S 261
193) 加藤秀夫, 中川淳一, 工藤武則, 川合良彦, 和気 誠:
鉄と鋼, **72** (1986), S 262
194) 遠藤公一, 金子敏行, 長田修次, 尾花保雄, 高浜秀行:
鉄と鋼, **72** (1986), S 263
195) 伊賀一幸, 八太好弘, 押田 淳, 志俣教之: 鉄と鋼, **72**
(1986), S 272
196) 田口喜代美, 角南英八郎, 西川勝彦, 手塚勝人, 江口豊明,
玉井 豊, 庄司貞雄: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 1693
197) 東 和彦, 小林 功, 占部教之, 小野山修平, 水上義正:
鉄と鋼, **72** (1986), S 1107
198) 斉藤 忠, 松本 洋, 篠崎 薫, 三村 毅: 神戸製鋼技報,
36 (1986), p. 40
199) T. KUWABARA, H. TAKAMOTO, Y. TAKEMURA and
T. FURUSAKI: 5th IISC (1986 年 4 月)
200) I. HARADA, H. SHIMA, N. SHIDAWARA, K. IGA and
Y. MIZUKAMI: McMaster Symposium (1986 年 5 月)