

技 術 資 料

UDC 669.168 : 669.15-198

フェロアロイ製造法の最近の進歩について*

成 瀬 亘**

Recent Progress in Ferroalloy Production

Wataru NARUSE

1. 緒 言

フェロアロイは製鋼上、脱酸・脱硫剤、または添加剤として不可欠な原料である。(表1参照)したがって、わが国の飛躍的な鉄鋼生産の伸びに応じて、その生産量も鉄鋼と同様に、米国、ソ連に次いで世界第三位となり、その技術も世界のトップレベルに立つに至ったことは、昔時りを顧みて隔世の感がある。

戦後しばらく封鎖経済のなかにあつたわが国は、貿易の自由化に伴い、フェロアロイの輸入の自由化も、昭和37年10月からほとんどの品種に実施された。業界はこれに対処するため、昭和36年1月に自由化対策委員会、昭和38年5月にフェロアロイ工業合理化対策委員会を設置し、通産省の指導支援のもとに、各般にわたって業界のあり方を検討し、その対策を推進した。例をフェロマンガ、フェロクロムにとれば、前者のメーカーは昭和36

年当時 23 社であつたものが現在 10 社、後者のメーカーは 9 社が 5 社に集約された。しかし、フェロシリコンのように 25 社が 20 社になつたにすぎないものもあり、今後問題を残している。この集約化の傾向は今後とも少品種大量生産の経済効果を生かすために続くであろう。

原料事情としては、わが国ではフェロアロイの原料のほとんどを海外資源に依存しているために、重要な課題が多い。

生産設備は、原価低減のために急激に大容量化しつつあり、これに伴って高度な自動化および連続化の技術も発達しつつある。一方、公害問題の完全な解決が重要な問題となつている。

以下、フェロアロイ製造の進歩について、生産、設備、技術の面から紹介し、あわせて最近の技術上の課題について概説する。

表 1 フェロアロイ主要品種およびその用途

品 種	記 号	含 有 成 分 (JIS)	主 要 用 途
高炭素フェロマンガ	FMnH	Mn 73~82%, C 7.5% 以下	脱酸, 脱硫, Mn 添加
中炭素フェロマンガ	FMnM	Mn 75~85%, C 2.0% 以下	
低炭素フェロマンガ	FMnL	Mn 75~85%, C 1.0% 以下	
シリコマンガ	SiMn	Mn 60~70%, Si 14~25%	Mn 添加
フェロシリコン	FSi	Si 14~93%	
高炭素フェロクロム	FCrH	Cr 55~70%, C 8.0% 以下	脱酸, 脱硫, 中炭素フェロマンガ原料 脱酸, Si 添加
中炭素フェロクロム	FCrM	Cr 55~65%, C 4.0% 以下	
低炭素フェロクロム	FCrL	Cr 60~70%, C 0.1% 以下	
シリコクロム	SiCr	Si 40% 以上, Cr 30% 以上	Cr 添加 (ステンレス鋼, 耐熱鋼, 工具鋼) 構造用鋼など
フェロニッケル	FNi	Ni+Co 18~28%	
フェロバナジウム	FV	V 45~85%	低炭素フェロクロム原料, Cr 添加
フェロニオブ	FNb	Nb+Ta 60% 以上	
フェロモリブデン	FMo	Mo 55~70%	Ni 添加 (ステンレス鋼など)
フェロタンダステン	FW	W 75~85%	V 添加 (工具鋼, 構造用鋼など)
フェロチタン	FTi	Ti 24~75%	Nb 添加 (ステンレス鋼, 高張力鋼など)
フェロボロン	FB	B 14~23%	Mo 添加 (工具鋼, 構造用鋼, ステンレス鋼など)
フェロホスホル	FP	P 20~28%	W 添加 (工具鋼など)
金属けい素	MSi	Si 97% 以上	Ti 添加 (脱酸, 脱窒)
			B 添加 (低合金鋼, ステンレス鋼など)
			P 添加 (精密特殊鋳物など)
			Si 添加 (けい素鋼, シルミンなど, シリコン樹脂原料)

* 昭和46年8月7日受付 (依頼技術資料)

** 日本電工(株)

表 2 フェロアロイ品種別生産量の推移

(単位：t)

年 度	FMn		SiMn	FSi	FCr		SiCr
	FMnH	FMnM FMnL			FCrH FCrM	FCrL	
36	167 715	34 834	135 170	98 736	37 532	66 049	10 923
37	116 300	38 152	112 069	71 106	33 254	44 050	7 617
38	154 456	29 538	130 096	104 117	56 021	41 975	15 436
39	178 783	39 856	149 999	116 505	80 020	61 284	15 371
40	177 254	45 129	157 685	128 075	69 948	52 858	13 866
51	206 356	52 054	188 484	142 878	100 281	64 141	25 502
42	270 823	54 580	237 570	149 950	139 425	74 229	31 377
43	295 537	70 894	262 130	181 221	163 463	69 628	38 830
44	338 487	71 823	314 596	243 895	191 419	89 392	50 914
45	420 542	93 853	378 893	319 923	288 911	119 719	37 943

年 度	FNi	Mo		FV	FW	CaSi	そ の 他	合 計
		FMo	MoO ₃ ブリケット					
36	58 388	1 722	3 408	1 283	1 704	9 997	19 085	645 646
37	30 824	532	1 893	603	649	5 785	25 834	488 668
38	58 829	1 247	3 270	1 386	992	8 759	20 166	626 288
39	79 792	1 330	3 474	1 089	991	8 512	21 796	758 802
40	67 957	1 257	3 729	1 095	736	6 181	25 657	751 427
41	82 159	1 833	5 554	1 561	790	8 382	26 735	906 710
42	111 754	2 103	7 388	1 498	1 060	8 700	29 950	1 120 407
43	139 659	2 314	7 718	1 685	772	10 497	35 265	1 279 613
44	202 300	2 654	10 263	2 355	1 337	11 242	36 832	1 567 509
45	292 378	3 012	10 678	2 542	1 152	13 282	49 885	2 032 886

(日本フェロアロイ協会資料による。)

2. 生産と資源

昭和 45 年度におけるわが国の粗鋼生産は 9 240 万トンと過去の最高を記録したが、これに伴い、フェロアロイの生産は約 200 万トンに達した。そのうち、マンガン系フェロアロイは約 90 万トン、クロム系フェロアロイは約 45 万トンである。

昭和 36 年度から昭和 45 年度に至る粗鋼生産量とフェロアロイ総生産量の関係を図 1 に、またフェロアロイ生産量の品種別の推移を表 2 に示す。昭和 42 年度以降の粗鋼生産が年平均約 18% の伸びであるのに対し、フェロアロイが年平均約 21% の伸びを示しているのは、好況時のステンレス鋼の伸びが著しかつたことに強く影響されているものとみられる。表 3 は主要フェロアロイの鋼塊トン当たり消費量の推移を統計的に示したものである。

マンガン系フェロアロイの生産が、年々比例的に増加しているのに対し、フェロシリコンの伸びは必ずしも比例的ではない。これはフェロシリコンの原価に占める電力費が高いため、鉄鋼の好況時には採算のよい他のフェロアロイ生産に電力がより多く使用されるので、フェロシリコンは輸入に頼ることによる。フェロクロム、フェロバナジウム、フェロモリブデン、フェロタングステン

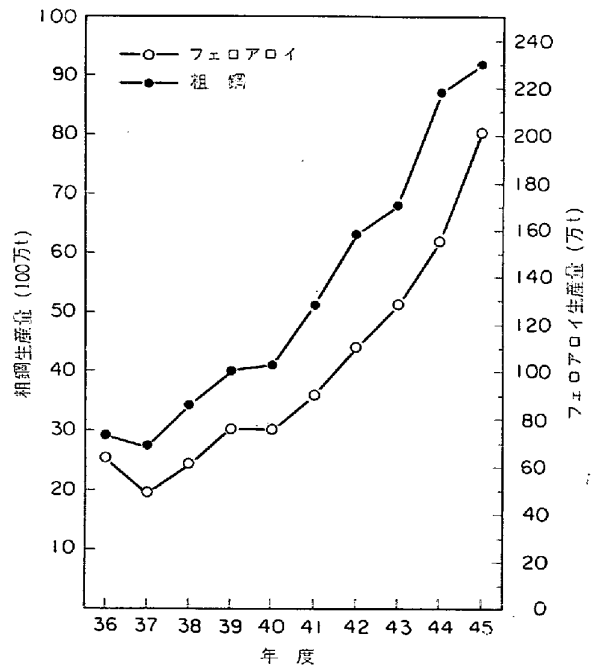


図 1 粗鋼ならびにフェロアロイ生産量の推移 (鉄鋼統計および日本フェロアロイ協会資料に基づく)

表 3 主要フェロアロイの鋼塊トン当たり消費量の推移

(単位: kg)

品 種	年 度	39	40	41	42	43	44	45
FMnH		4.23	4.01	3.89	3.95	4.07	4.01	4.28
FMnM, L		0.39	0.48	0.54	0.60	0.61	0.59	0.68
SiMn		2.72	2.77	2.69	2.73	2.78	2.76	2.96
FSi		2.12	2.15	2.03	2.11	2.18	2.03	2.25
FCrH, M*		14.00	13.75	14.65	15.20	15.09	18.93	22.41
FCrL*		13.89	11.1	9.56	9.43	8.74	8.71	10.05
FNi*		19.93	16.44	14.09	12.57	13.19	16.39	20.77
SiCr*		4.02	4.26	4.26	4.39	4.41	5.05	4.13
FV*		0.17	0.19	0.20	0.23	0.21	0.26	0.29
FMo*		0.46	0.30	0.27	0.25	0.20	0.26	0.34
MoO ₃ プリケット*		0.78	0.83	0.86	0.91	0.80	0.85	0.91

*: 特殊鋼に対する数値 (日本フェロアロイ協会資料による)

表 4 昭和 45 年度主要各種鉱石の需要

(単位: トン)

	マンガン 鉱石	クロム 鉱石	五酸化バ ナジウム	モリブデ ン鉱石
国 産	211 549	0	0	134
輸 入	1 227 504	894 688	2 517	9 949
計	1 439 053	894 688	2 517	10 083
輸入依存度 (%)	85.3	100	100	98.7

(日本フェロアロイ協会資料による)

などは特殊鋼業界の景気変動に支配される。その他、フェロニッケルはフェロクロムと同様にステンレス鋼の伸びに、金属けい素はアルミニウムの伸びに支配される。また、製鋼技術の進歩により、その需要品種にも変化があった。たとえば、ステンレス鋼製造における酸素製鋼法の進歩によつて、低炭素フェロクロムの需要は減退し代わつて高炭素フェロクロム、とくにチャージクロムの需要が増大した。

次に資源の問題について述べるならば、ほとんどの原料鉱石を海外に依存しているのが国フェロアロイ工業としては、それらの低価格入手と、長期的な安定確保の対策が重要である。表 4 に昭和 45 年度主要各種鉱石の需要を示した。マンガン鉱石はオーストラリア、南阿、ソ連、インド、ブラジルなどからの輸入に依存し、クロム鉱石は南阿、インド、フィリッピン、ソ連からの輸入に依存している。原料対策としては、共同買付などの協力が業界において一部実施されているが、長期的確保のために、海外の主要な鉱石資源の調査が十分に行なわれた上で、融資買鉱、鉱山の自主あるいは共同開発、現地製錬所の設立、あるいはそれらへの協力援助などが将来行なわれなければならない。これらの世界の鉱石は地域的に偏在し、質量ともに限られており、資源の開発と活用に迫られている。現実の問題として、粉状鉱石の予備処理は実施されつつあるにしても、なおフェロクロムなどの低品位鉱を活用するためのフェロアロイ製品規格の

検討、未利用資源に対する新製錬法の開発など、技術的にも解決すべき問題が多く、原価低減のための生産技術や新製品の開発とともに、資源対策に関連する技術研究はきわめて重要となつている。さらに海底資源としてのマンガンノジュールの採掘製錬なども将来の問題としてとりあげられている。

3. 生産設備

過去 10 数年間、フェロアロイの価格は、国際競争の影響を強くうけて、かなりの低落を示した。フェロアロイ業者は、競争に耐えるために、各種の手段を講じて原価低減を実現しなければならなかつた。この原価低減は主として効率のよい大容量炉の開発によつてもたらされたものである。

大容量炉の採用は、電気炉そのものの自動化のみならず、その前後の原料、製品処理の一貫した自動連続化を招来して、生産性の著しい向上をきたした。最近では、これに加えて、臨海新工場立地による合理化を図る工場が出現し、昔時の製鉄所なみの規模になるとともに世界の関心を集めるようになり、全くフェロアロイ生産設備の様態と面目を一新した。

また、最近ではきびしい公害問題に対処するため、公害対策設備も著しく進歩しつつある。

3.1 電気炉容量の傾向

この項を記述する前に、一般のフェロアロイ製造用電気炉は還元炉であつて、製鋼用電気炉とは若干その性質を異にすることを述べねばならない。

すなわち、フェロアロイ製造用電気炉は電極が装入物に没入するため、製鋼炉に比して著しく低電圧、高電流である。したがつて、力率を向上するために、大容量炉では変圧器の三次捲線に相当大容量のコンデンサーを挿入している。また、炉容量を KVA で呼称するが、その値のとりかたには各社とも差があり、その KVA をもつてその KW を、あるいは生産能力を正確に示すものとはいえないが、一応の規模の目安として用いることはで

きる。さらに、フェロアロイはその品種が多様にわたり、同一品種でも原料の性状に相違があり、かつ原料の事前処理法も異なるため、電気炉の様式および設計諸元の決定は、各社の機密に属することが多いので詳細を論ずる上で障害になる点がある。

顧みて、戦後わが国のフェロアロイ製造用電気炉の容量の水準は、大別すると三つの段階を経て大きく飛躍的に進歩したと考えることができよう。

約 20 年前には、2 500 KVA またはそれ以下の規模の電気炉を日常ベースで生産していることは、決して珍しいことではなかつた。また、その製造原価も今日感覚からすると、かなり割高なものであつた。当時は世界の最も進んだ国に比して、わが国フェロアロイメーカー相互の格差が大きかつたために一概にはいえないが、わが国は平均すれば 10 年近く遅れていたといつてよいかもしれない。

約 15 年前頃になると、新たに建設される炉は 6 000 KVA 程度の比較的大型の電気炉が普通となり、それ以前から用いられ始めたゼーダーベルグ式電極は当然として、回転炉床の導入もあり、炉設計、たとえば、より深い炉の湯溜り、原料の選択と事前処理、および自動化など操業技術にかなりの改善をもたらされた。以後炉容量は漸次大きくなり、25 000 KVA 程度の炉が建設されるようになった。この頃、わが国と最先進国との開きは平均して 5 年近くに縮まつた。

2 年前、すなわち昭和44年に至つて、世界最大の生産能力を有する 36 400KVA の高炭素フェロマンガン製造用電気炉が建設された。これは当時最大といわれたノルウェーの 39 000KVA 炉を生産能力において凌駕するものであつた。以後、引続いて各社に 40 000KVA 程度の炉が建設されるようになり、現在では新設される炉は 40 000~60 000 KVA 程度にまで大容量化してきている。こうして現在、わが国のフェロアロイの炉容量は世界最大規模に達している。米国においても、現在このような容量の炉を計画中であり、数年後には炉の大容量化に基づく競争が激しくなるものと思われる。図 2 はわが国における炉容量の推移を示したものである。このように過去 20 年間にフェロアロイの炉容量は、10 倍の大きさに増加している。この大容量炉への転換理由は、

(1) 熱効率、換言すれば電力の効率、のみならずフェロアロイ製造過程全体を通じての効率の向上に著しいものがあるほか、炉内に数百トンの湯を貯え、一回の出湯量も昔時の高炉なみに巨大化してきたために、操業は安定し、良好でしかも均一な品質の保持が容易である。

(2) 競争の激しい内外のフェロアロイ市場において競争力を維持するためには、どうしても大容量化のメリットによる原価低減によつて、原料および労務費の高騰を吸収しなければならない。とくにこのような経済上の問題がおもな原因である。

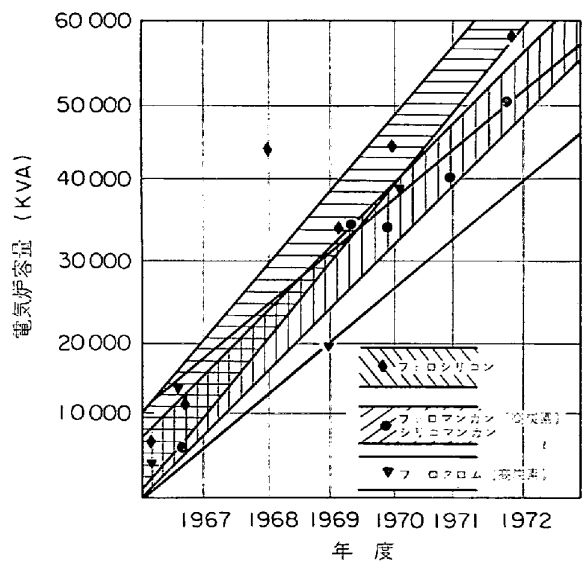


図 2 フェロアロイ製造用電気炉容量の推移

このようにして小型電気炉の廃棄と大型電気炉の新設が続けられてきたため、昭和 35 年に電気炉 284 基、その平均容量 3 029KVA であつたものが、昭和 45 年には 211 基、平均容量 8 387 KVA となつている。この間、関連する附帯設備の進歩も著しく、目下のところ電気炉の大型化はゼーダーベルグ式電極の直径がどこまで大きくできるかがきめ手といえよう。現在 1.9m 程度までのものが実用されている。

3.2 電気炉の型式の推移

炉床回転型電気炉は、炉の有効反応容積を大きく保つことができるため、増加した。たとえば、昭和 32 年には 6 基であつたものが 45 年には 55 基になつた。最近の 40 000KVA 程度の大型電気炉になると熱効率も向上するため、品質によつて固定型を採用するところもあり、この傾向はマンガン系フェロアロイにみられる。しかしながら製錬温度の高い金属けい素、フェロシリコンなどにおいては、回転炉床の利点は無視することができない。

図 3 に示すような完全な炉蓋を有する密閉式電気炉は、従来労働環境管理と、発生ガス有効利用の二様の目的のために発達してきたが、最近では公害防止を目的として密閉化した大型電気炉が続々建設されている。ただ金属けい素およびフェロシリコンにおいては、ダストの性質あるいは操業上の都合から密閉化が遅れており、種々研究されている。電極は以前は固形焼成電極を用いていたが、戦後比較的早くゼーダーベルグ式電極に移行して現在に至つている。

電気炉の大型化に伴い、炉用変圧器、電極設備、自動制御装置、炉内ガス圧制御装置、計量装置なども進歩し、現在の大型電気炉は原料の秤量輸送から装入、電炉操業、ガス管理を含めて集中制御できるようになつている。また出湯に際してはドリリングマシン、マッドガン

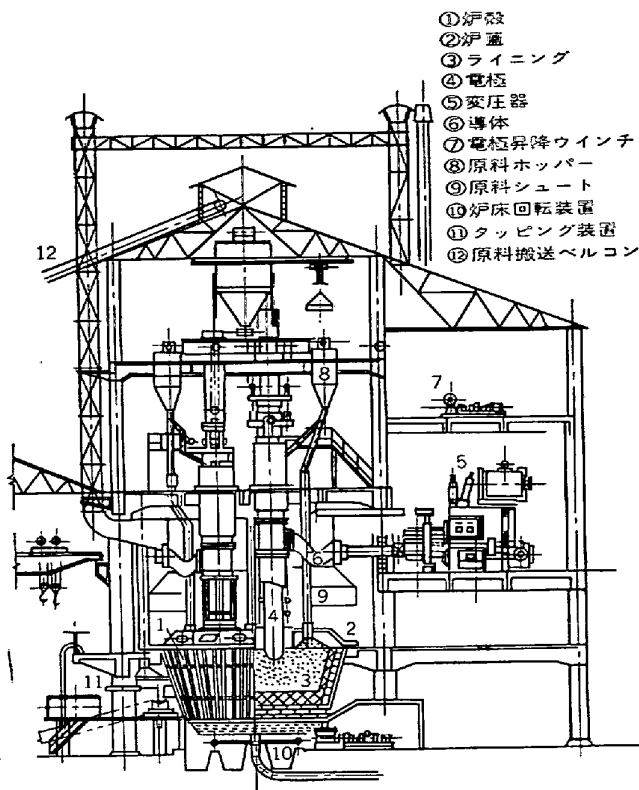


図 3 炉床回転密閉式電気炉

を用いるのが普通になつてきた。今後の課題は、電炉操作に電子計算機を導入する方向に進むことで、一部で研究も行なわれている。

3.3 原料および製品の処理

電気炉の大型化に併行して、廉価な鉱石の安定確保に努める一方、その原料が電気炉内で有効に反応するとともに、粉鉱が反応生成ガスの逸出を妨げて炉内装入物の噴上げを起こさぬよう、原料の整粒が重視されるようになった。さらに約 10 年前に、積極的な事前処理として、ドワイトロイド焼結機を備えて、粉鉱を焼結し、これを主体として電炉操作をする工場が現われ、約 5 年前には、ペレタイザーおよびロータリーキルンを備えて、予熱あるいは若干の予備還元を行なうところも現れた。現在、フェロアロイの事前処理は上述の焼結法、予備還元法のふたつに大別される。

つぎに製品については、製鋼工場が戦後一般のフェロアロイの取鍋添加を行なうようになり、さらに LD 転炉が製鋼の主体となつてきた今日では、この傾向はことに強くなり、現在そのほとんどの量が小粒に整粒することを要求されている。これは LD 転炉が最も発達しているわが国においてことに著しい。フェロアロイの鑄造法には、金床または砂型によるいわゆるピットキャストイングと鑄鉄機によるものがある。わが国においては大量の整粒品を短時間に得るために、小粒品を得るべく考案された鑄鉄機を用い、続いてクラッシャーおよび多段スクリーンを用いて、厳格に規制された粒度の製品として

いるのが現状である。したがって、フェロアロイ工場の設計に当たっては、溶湯から出荷製品に至るまでの製品処理の工程は最もむずかしいものの一つである。製品出荷の形態も、量の拡大に伴つて約 20 年前からのかます詰めからバラ積みとなり、最近の大型製鉄所では陸揚げ後、コンテナによる構内輸送を行なうところも出てきた。

3.4 工場の立地

フェロアロイ工業は、従来、電力と労働力の豊富な北陸、東北地方に発達してきたが、電力が火主水従化するとともに労働力の全国的な逼迫化によつて、その意味も徐々に失われてきた。その後、生産規模の急激な拡大により、原料鉱石はそのほとんどが輸入鉱で占められ、副原料を含めて生産量の約 3 倍の原料と、製品を加えて約 4 倍の物量を取扱わざるを得ないので、増設に当たっては新立地を考えざるを得なくなつた。このような観点から臨海大型工場における集中生産が最も望ましいものと認識された。一例を挙げれば、日本電工は昭和 44 年に、太平洋岸に分布する各製鉄所の中間に当たる徳島県阿南市橋湾に 15.5 万坪を埋立て、30 000 トン級の外航船を接岸できる原料棧橋と、アンローダー、スタッカーを備えさらにドワイトロイド焼結機を設け、現在 36 400 KVA 電気炉で年産 10 万トンのフェロマンガンを、40 500 KVA 電気炉で年産 6.5 万トンのシリコマンガンを生産している。この工場は隣接発電所から 187 KV の超高压で受電するほか、原料受入れから生産、さらに 1 000 トン製品岸壁で出荷するまで、輸送を重視したレイアウトを行なつており、現在世界最高の水準と評価されている。写真 1 はこの全景を示す。

なおこのほかにオンサイト・プラントと称されるもう一つの考え方がある。これは大型製鉄所敷地内にフェロアロイ会社が電気炉を設置して、溶湯のまま製鋼工場に供給しようとするものである。これには、日新製鋼周南における周南電工、および新日本製鉄八幡における日本重化学工業の例があり、いずれもステンレス鋼製造に供給するフェロクロムを生産している。これには、溶湯保持炉を有し、需要と供給との時間的な調整に当たつており、また冷材フェロアロイの製造も行なつている。

さらに将来は、量産的フェロアロイについては、原料産出国に工場を建設することも考えられている。一例を示せば、米国では今後の建設において、フェロクロムは南阿で、フェロシリコン、金属けい素およびフェロマンガンは国内で生産を行なう方針で実施しつつあり、フェロマンガンは将来、南米に有望な鉱山が開発されれば南米にも工場を建設する考えをもつていと聞いている。

4. 公害防止設備

フェロアロイ工業に関する公害は、ほぼ大気汚染に限られる。最近水質汚濁の問題も散見されはじめたが、これはそのほとんどが大気汚染防止のための湿式集塵機に

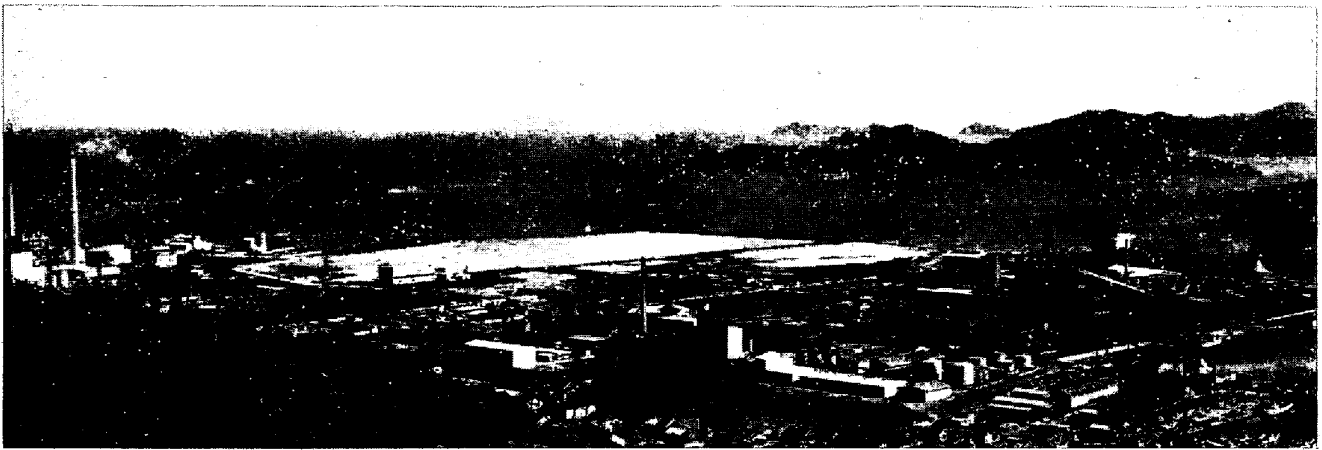


写真 1 日本電工徳島工場全景

よる二次的公害ともいふべきものである。

フェロアロイ工業においては、ばい煙規制法の施行された昭和 36 年頃までは、大気汚染防止の認識は薄く、またその設備を積極的に設置する経済的余裕もなかった。しかし、当時でも昭和 29, 32 年に建設された日本鋼管新潟の 4 000, 5 000 KVA 完全密閉式フェロマンガン炉のように、排ガスを利用するためにガス清浄装置を備えているところもあつた。このほか、矢作製鉄でも電気鉄製造で同様なことを行なつていた。また、フェロモリブデン、フェロタンングステンなどでは密閉のうえ、サイクロン、バッグフィルター、あるいは電気集塵機を用いて発生ダストを回収していた。ただ、これらは CO ガスの有効利用、あるいは収率の向上が主目的であつて、大気汚染の防止は第二の目的であつた。

その後、昭和 41 年 6 月にフェロアロイ協会に公害対策専門委員会が設置され、共同研究および調査が行なわれた。しかし、大気汚染防止技術そのものが未完成であつたうへ、電気炉に適用するには種々解決すべき問題を残していた。また、当時のダスト排出規制は 0.9 g/Nm^3 で、鉬石の事前処理、または操業法の改善などによつて炉況を好ましい状態に維持することができれば、本格的な集塵設備を設けなくても規制値をほぼ満足できる可能性があつたので、こうした対策に努力が向けられていた。もつとも、鉄興社（現日本重化学工業）酒田大浜に昭和 36 年に設けられた 12 000 KVA 半密閉式シリコマンガン炉に見られるように、新設大型電気炉については公害防止を目的とした集塵設備を設ける必要性が認識され始めた。その後、各社とも小容量炉のスクラップダウンと併行して 20 000 KVA 以上の大容量炉の建設のり出したが、これらはすべて本格的集塵装置を備える設計になつており、特に密閉化の容易なマンガン系フェロアロイ炉は、密閉化したうえで集塵装置を設けたため、完全に近い大気汚染防止が実現されている。密閉化の困難なシリコン系フェロアロイ炉は、新設大容量炉であつても、経済的かつ技術的に理想的な集塵装置の開発が完

表 5 フェロアロイ用電気炉ばいじんの排出基準 (昭和 46 年 6 月 22 日制定、大気汚染防止法施行規則)

	排出基準 (g/Nm^3)	特別排出基準 (g/Nm^3)
珪素 40% 以上のもの	0.6	0.3
〃 〃 未満のもの	0.4	0.2

成していないため、種々の問題を残しつつとにかく設備をつけてきた感がある。

その後、昭和 44~45 年に至つて公害防止の必要性はますます高まり、昭和 45 年 12 月のいわゆる公害国会において公害関係法案が急ぎよ成立した。大気汚染関係については、昭和 46 年 6 月 22 日から、表 5 に示すばいじんの排出規制が施行されるに至つたが、これは従来の規制値に比して著しくきびしく、すべての電気炉に集塵設備を設けることが必要になつた。ここで問題となるのは、既存炉の集塵対策で、特に 10 000 KVA 以下の炉は集塵設備が本体に比して著しく割り高なものとなり、またその運転費も高く、製造コストを圧迫するようになり、この意味で既存小型炉のスクラップダウンはますます促進されざるを得ない。なお、集塵したダストの処理については、まだ少なからざる問題を残している。

4.1 開放炉の集塵設備

開放炉の集塵設備として、当初技術面、経済面からサイクロンあるいはマルチクロンが使用されたが²⁾、これらでは現行の規制値を満足することができない。さらに高度な集塵機として、湿式のベンチュリースクラバーあるいはサイクロンスクラバーが使用され、その排水処理には簡単な沈澱池で当面を糊塗してきた。しかし、その後排水汚濁防止の点から乾式法すなわちバッグフィルターの採用が大多数を占めるようになってきた。現在のところ、炉布には、高温の電気炉排ガスに対してテトロンまたはガラス繊維が主として使用されている³⁾。耐熱度は前者で 150°C 、後方で 250°C で、排ガスを適正

温度にするために外気を混入するか、クーラーを設けて冷却する方法が採用されている。一部には特殊クーラーとして水の潜熱を利用したものもある。問題点としては、電気炉の噴上げによる突発的なガスの大量排出への対策であり、これが炉布の寿命を支配するので運転費削減の要点になる。また炉布は、あらかじめダストの物性を品質別にそれぞれ十分把握し、圧力損失を減少し、電力消費を少なくするよう選定されねばならない。これについてはダストを炉布から払い落とすための振動機構と、逆方向の空気流入との相互関係も考慮すべきである。さらに、原料中の水分も集塵機能を劣化させるので、原料管理については十分な配慮を必要とする。電気集塵機については、前述の集塵機に比較し運転費、保守管理費は少ないという長所があり興味がある。欠点としては、対象ダストの電気比抵抗に上限値があり、乾式では $\times 10^{11} \Omega\text{-cm}$ 、湿式では $\times 10^{13} \Omega\text{-cm}$ であるが、フェロシリコンなどの比抵抗は $\times 10^{13} \Omega\text{-cm}$ であるので、捕集効率が低下する。また、建設費もバッグフィルターに比較して高額なので、わが国のフェロアロイ業界では、まだ使用例がない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。次に排ガス量の決定では、発生ガスに対する流入空気量の倍率を考慮する必要がある。フードの構造、取扱いによつて 40~100 倍に変化する。これらの点については、今後細密な設計上の工夫および作業上の努力が必要である。

4.2 密閉炉の集塵設備

密閉炉の集塵設備は電気炉からの発生ガス量の他にはわずかな流入空気量を処理するのみで、その量は開放炉に比して著しく少なく、設備は小型となり建設費、運転費の負担は少ない。なお、排ガスは CO 濃度が高いため化学原料あるいは熱源として活用でき、また大気に放出

表 6 密閉電気炉より排出されるガスの組成例

成 分	CO	CO ₂	H ₂	N ₂
Vol% D.B.	65~80	10~25	5~10	5~10

する場合でもフレースタックで完全燃焼し無害の状態にパージできる。密閉炉から排出されるガスの組成は一例を表 6 に示すように、CO ガスを 65~80% 含有しているので、気密かつ運転容易な湿式集塵機が用いられている。この場合、ガス量の変化および温度の変動に追従し得る機器の組合せが望ましい。集塵の方式は 2 種類に大別される。一つは炉蓋から発生ガスを直接吸引して集塵するもので、一般的に用いられる方法である。他の一つは炉から発生するガスを原料投入シュートを通じシャフト炉、または原料充填槽に導き、そこでダストの約 90% を捕集し残りは外部に設けた集塵設備により除去するもので、概略図を図 4 に示した。これらは前段で捕集されたダストをそのまま炉内に戻すことができ有利である。後段は湿式集塵機を使用することになるが、そこで発生する汚濁排水の処理が必要になつてくる。

排水処理の設備としては図 5 に示した方法で浮遊物質や溶解金属を十分除去することができるが、回収汚泥を処理するのが困難でかつ有効利用に乏しい。この面でも汚泥発生量の少ない前述のシャフト炉、充填槽のような方式に利点があるといえる。表 7 は政令に基づく排水基準を示す。

4.3 その他発生粉塵の集塵

たとえば、製品や鉱石などの破碎、分級、輸送装置の接続部などにおいて発生する粉塵、あるいは出湯時に発生する金属ヒュームおよび随伴粉塵も労働環境上および

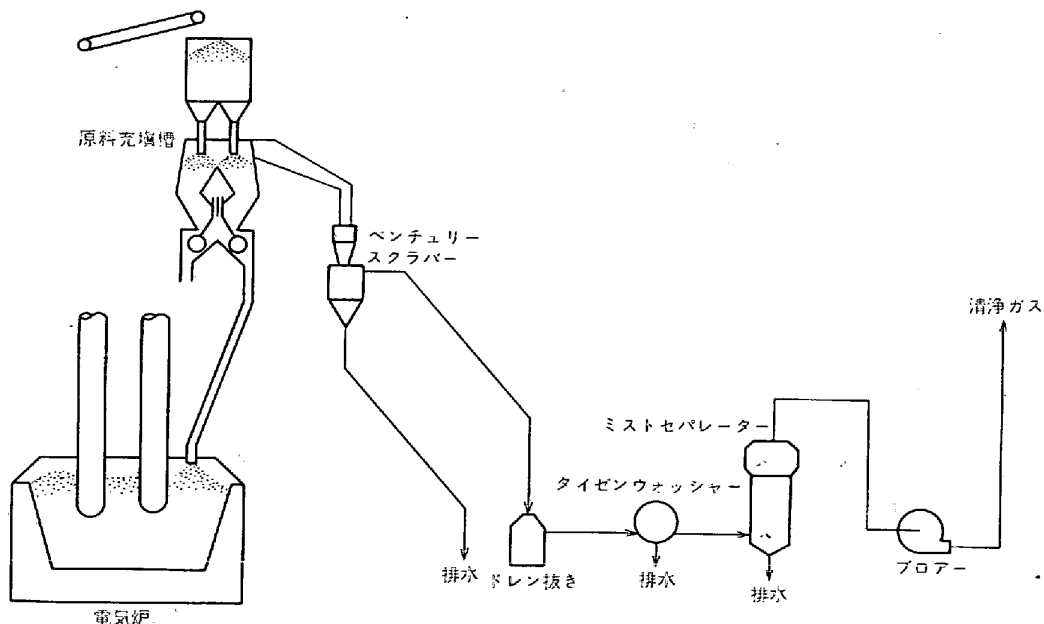


図 4 密閉型電気炉集塵設備の一例

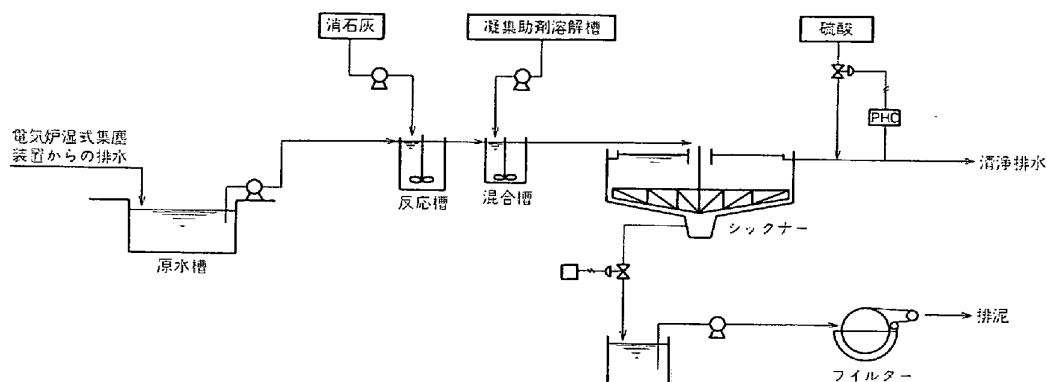


図 5 排水処理設備の一例

表 7 政令に基づく排水基準
(昭和 46 年 6 月 21 日制定, 水質汚濁防止法
施行規則)

有害物質の種類	許容限度 (mg/l)
カドミウムおよびその化合物	0.1
シアン化合物	1
有機りん化合物	1
鉛およびその化合物	1
六価クロム化合物	0.5
砒素およびその化合物	0.5
水銀化合物	検出されないこと

大気汚染上の問題の対象となる。これに対して集塵設備を設置するところも出てきた。これらの集塵設備では随伴外気の侵入量が多いだけに、発生源からの吸引方法および吸引量について、その設計および設定の良否が作業性、効率、経済性に大きな影響を与える。

5. 製造技術の進歩

フェロアロイにおける最近の製造技術の進歩の特徴を略述すれば次の3点が挙げられる。

(1) 原価低減を目的とした電気炉の大容量化は、原料から製品までさらには公害防止設備に至るまで、附帯する各設備の総合的な著しい進歩を招き、あわせて、計測、集中遠隔自動制御、操業管理の技術の進歩を促した。

(2) 原料問題の解決、電力効率の向上を目的とする原料事前処理技術の発達、電気炉設計ならびに製造技術を進歩かつ変革せしめた。以下各論では煩雑を避けるため原料事前処理と電炉操業を分類したが、最近ではこの両者は一体となつて発達し、その区分は明確でなくなつてきた。これもここ数年の著しい変化である。

(3) 公害問題の発展は、フェロアロイにおいても公害防止設備が必須の大きな問題とされ、かつ電気炉自体もこれを前提として設計されるようになった。

5.1 マンガン系フェロアロイ

5.1.1 原料の事前処理

電気炉操業において装入原料中粉鉱の占める割合が多くなると、還元反応により発生する大量のCOガスの逸

表 8 日本電工焼結方式による高炭素フェロマンガンの操業例

(46 年 3 月度)

生産量	9 026 t
電気炉の平均負荷	25 096 kW
製品 1 t 当たりの原料使用量	
マンガン鉱石	800 kg
マンガン焼結鉱	872 〃
コークス	364 〃
石灰石	18 〃
電極用ペースト	4 〃
電力	2 036 kWh

出が妨げられて炉装入物の噴上げを生じやすく、操業は不安定あるいは困難になる。電気炉が大容量化し始めた頃からこの解決が必要となり、クラッシャー、スクリーンにより整粒を行なうところが出てきた。

積極的な事前処理としては、昭和 36 年に日本電工は金沢において、ドワイトロイド焼結機を備えて粉鉱石を焼結し、焼結鉱を主体とする電気炉でのフェロマンガン製造を開始した^{10)・11)}。このときの焼結鉱は使用鉱石の50~70%を占めている。この方法は電気炉操業において、技術的にも経済的にも著しい好結果をもたらした。さらにその後、同社が徳島に建設したフェロマンガン製造用 36 400KVA 電気炉およびシリコマンガン製造用 40 500 KVA 電気炉にも、これを採用して満足すべき結果を得ている。操業結果の一例を表 8 に示す¹²⁾。この方法は操業の安定と電力消費量の減少に貢献し、生産量の増加を招き、コストの低減に大きな役割を果たすことが明らかとなつた。

焼結方式の効果は、次のように説明することができる。

(1) 炉内装入物の通気度の改善により、COガスの噴上げが抑制できる。

(2) 焼結鉱は気孔率が大きで反応性が高いので、装入原料中のコークス比を下げるができる。

(3) コークス比の低下は、装入物の電気抵抗の増加と十分な電極の没入をもたらし、これによつて電力負荷の増大ができる。

(4) 炉内に十分な熱エネルギーが効率よく供給されるので、有効反応容積が拡大し炉内の局部過熱も避けられ、生産量は増加する。

このほか、ダスト排出量の大幅な低下をみており、公害問題の解決にも有効である。

焼結方式は鉍石の粒度ばかりでなく、気孔率と反応性を改善して前述のごとき総合的な効果をあげているが、これとは別に原料を予熱することを主体とした方法がある。特にこの場合、熱経済の面から、製錬反応の結果発生する可燃性ガスを原料予熱の熱源に利用する方法が採られている。その嚆矢となつたのは ELKEM 社開発のシャフト炉方式 (図 6)¹⁰⁾ および ロータリーキルン方式 (図 7) で、ともに密閉炉から発生するガスをいつたん炉外に取り出し、クリーニングした後に原料予熱用のシャフト炉、またはロータリーキルンの熱源に使用し、原料を予熱する方式である。これに対して、栗村金属工業が開発し、水島合金鉄で実施したシャフト炉方式がある。(図 8) これは密閉炉内に必要に応じ二次空気を導入して、直接炉内で燃焼せしめた後原料を充填したシャフト炉を通して、熱交換する方法である¹¹⁾¹²⁾。これは、ガス中のダストの約 90% がシャフト炉で捕集され、そのま

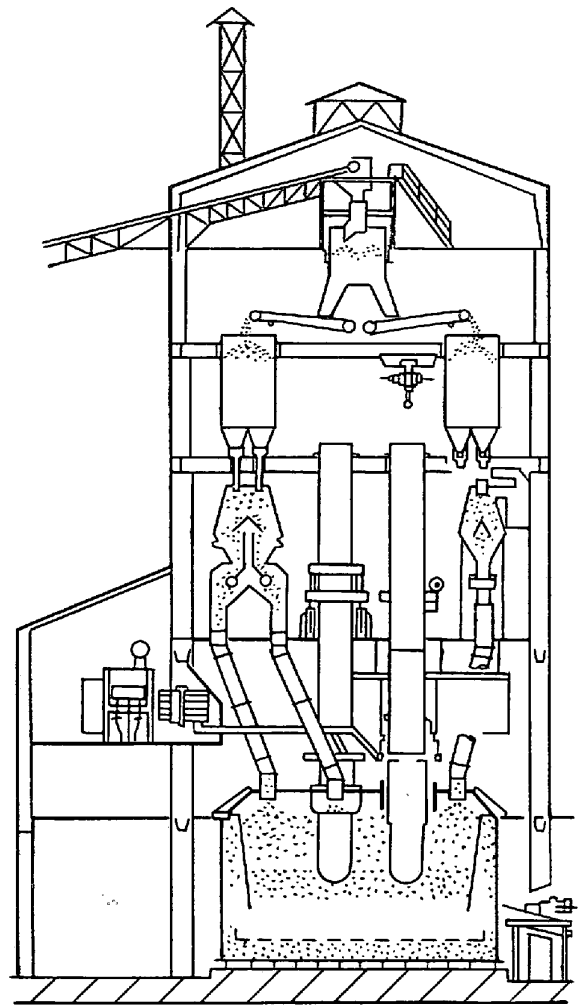


図 8 水島合金鉄シャフト炉方式電気炉

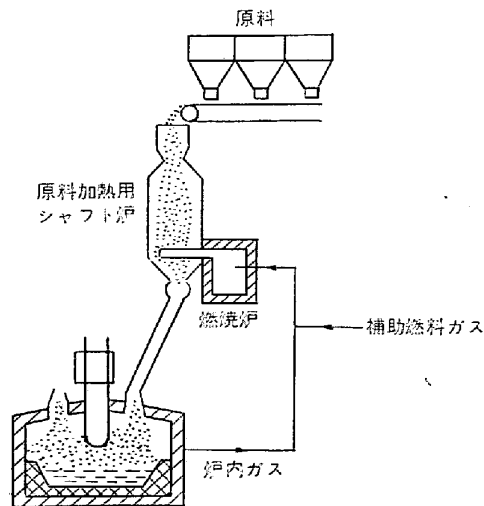


図 6 ELKEM シャフト炉方式電気炉

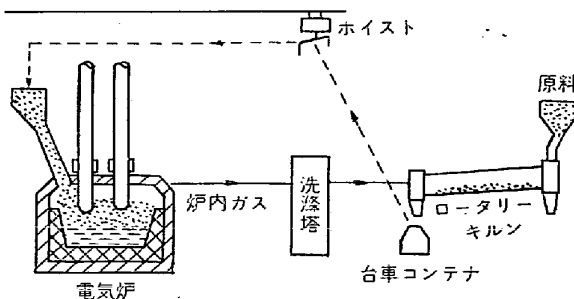


図 7 ELKEM ロータリーキルン方式電気炉

ま炉中に装入される利点がある。この集塵効果を目的として、原料充填槽に発生ガスを通すものに日本電工の方式がある。一方、ロータリーキルン方式に属するものとしては、ELKEM 社のほかに予備還元、ホットチャージを目的とした日本重化学工業、中央電気工業のものがある。

5.1.2 電気炉操業

先に述べたように、フェロアロイ製造用電気炉の進歩は一言にしていえば、大容量化とそれに対応するための自動制御技術の大幅な導入に見られ、操業はこのための組織的計画とその実施管理ということが出来る。管理室において原料秤量から操業の一切を集中制御し、労働力を必要とするものは出湯の際のドリリングマシン、マッドガンの操作とランナーの手入れにとどまり、他は諸設備の点検のみである。大容量炉一基の故障は従来の炉の数基の故障に相当することになるので、労働に代つて作業員の知識と判断力が非常に重要となつてきた。約20年前までの労働力主体のフェロアロイ操業も、今日まつたく装置産業化してしまつたことは今昔の感に堪えない。

約 10 年前までわが国における高炭素フェロマンガ

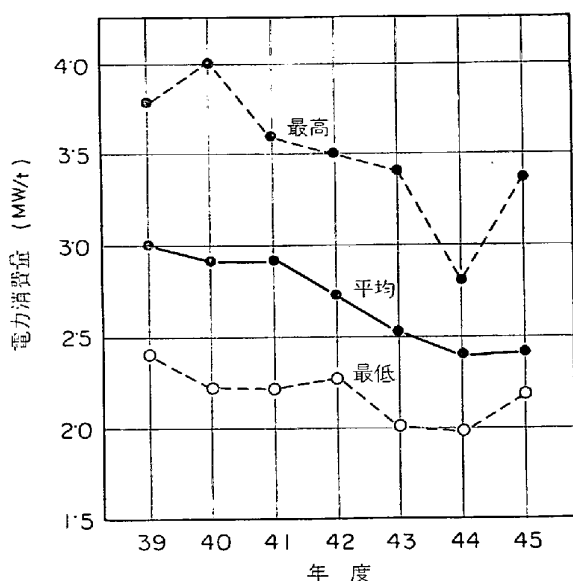


図 9 高炭素フェロマンガンのトン当たり電力消費量の推移 (日本フェロアロイ協会資料に基づく)

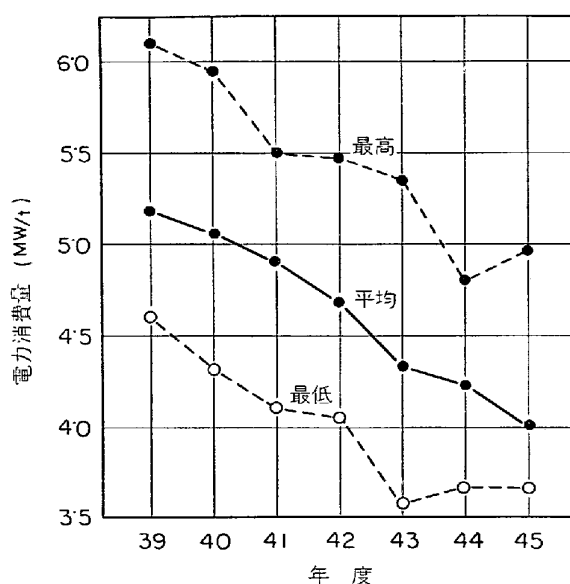


図 10 シリコマンガンのトン当たり電力消費量の推移 (日本フェロアロイ協会資料に基づく)

製造はスラグ塩基度 1.1~1.4 の塩基性操業で行なわれていた。これはスラグ中への Mn 損失を避けるためであった。当時欧州ではすでに酸性操業を行なっていたが¹³⁾わが国でもその後シリコマンガンの需要が増加するに至って、酸性操業が行なわれ始め、現在ではほとんどの工場がこの方法をとっている。すなわち塩基度 0.6~0.8 の操業によつて Mn 20% 前後のスラグを得、これをシリコマンガ原料として用いている。なお酸性操業は揮散損失の減少による Mn 歩留の向上、およびトン当たり電力消費量の低減による生産量の増加等の利益がある。図 9 に高炭素フェロマンガンのトン当たり電力消費量の推移を示す。

シリコマンガについては、生産量の増加に伴い低品位内地鉱にほとんど頼らず、高品位の輸入鉱と前述の Mn スラグを主体とする操業となつてきた。従つて Mn 歩留も向上し、電力消費量も低減した。塩基度も 0.8~0.9 から 0.5~0.6 になつている。図 10 にシリコマンガンのトン当たり電力消費量の推移を示す。

中炭素および低炭素フェロマンガンの製造は、通常この原料用として造られたシリコマンガに、マンガン鉱石と石灰を配合し、電気炉で溶解、脱けい精錬するいわゆる二段法によつて行なわれる。シリコマンガ中の C の溶解度は Si の存在によつて減少することを利用したものである。この改良されたものとしては、電気炉にあらかじめマンガン鉱石、石灰を装入後、シリコマンガ溶湯を装入し、通電溶解することにより、電力消費量と Mn 歩留を改善するものがある¹⁴⁾。さらに、揺動取鍋に溶解シリコマンガを装入して、予熱されたマンガン鉱石および石灰とともに揺動攪拌して精錬する方法が開発実施されている^{15)~18)}。

5.2 クロム系フェロアロイ

5.2.1 原料の事前処理

クロム系フェロアロイの需要は特殊鋼、特にステンレス鋼の著しい伸長により、年々増加の一途をたどり、生産設備の大型化、合理化は急速に推進された。しかし、原料のクロム鉱石は世界的に乏しく、また良質な塊鉱の産出が少ないため、わが国に輸入される鉱石の大半は粉鉱石であり、これがフェロクロム製造における電気炉の操業を阻害する要因となり、特に電気炉が大容量になるにしたがつてその影響は顕著になつている。これを解決するため、生ペレット法、ブリケット法など種々の方法が試みられたが¹⁹⁾²⁰⁾、現在実用化されている方法は次の 2 つに大別することができる。一つはロータリーキルンによる方式で、還元ペレット法と呼ばれ、米国 Union Carbide 社で開発された²¹⁾²²⁾。わが国では周南電工、日本重化学工業が同じくロータリーキルンによる方法を開発し新工場を稼動している。この方法はクロム粉鉱石に粉炭、粉コークスなどを配合してペレットとしてロータリーキルンに装入し、1300°C 前後の温度に加熱、予備還元したのち電気炉に装入する方法で、電力消費量を大幅に低減するのが目的である。他の一つは、焼結方式である。日本電工では、前述のフェロマンガンの焼結方式をクロム鉱石に適用することを試みて、昭和 45 年に初めて独自の焼結法を開発して操業に移している⁹⁾²³⁾。それまでクロム鉱石は鉄鉱石あるいはマンガン鉱石と異なり、難溶性であるために焼結することは困難とされていた。この方法は鉱石とコークスおよびある種の溶剤を用い、ドワイトロイド焼結機によつて焼結するもので、この焼結鉱を主体とする操業方式はフェロマンガンの場合と同様の成果をあげている。この方式による操業と従来

表 9 日本電工チャージクロム製造の同一炉における一般法と焼結方式との比較試験

項 目		焼結鉍無配合	焼結鉍配合	
平均 負 荷 (KW)	$\bar{x}+2\sigma$	9 583	9 523	
	\bar{x}	8 979	9 347	
	$\bar{x}-2\sigma$	8 375	9 171	
原料 使用 量 (Cr ore t/day)	$\bar{x}+2\sigma$	131.6	135.0	
	\bar{x}	112.0	124.8	
	$\bar{x}-2\sigma$	92.4	114.6	
生 産 量 (t/day)	$\bar{x}+2\sigma$	67.920	74.382	
	\bar{x}	59.170	68.082	
	$\bar{x}-2\sigma$	50.430	61.782	
トン当り電力 消 費 量 (KWH/t)	$\bar{x}+2\sigma$	4 104	3 603	
	\bar{x}	3 642	3 295	
	$\bar{x}-2\sigma$	3 190	2 987	
製 品 位 (%)	Cr	$\bar{x}+2\sigma$	58.1	57.3
		\bar{x}	57.1	56.4
		$\bar{x}-2\sigma$	56.1	55.5
C	$\bar{x}+2\sigma$	7.59	7.61	
	\bar{x}	7.25	7.49	
	$\bar{x}-2\sigma$	6.91	7.37	
Si	$\bar{x}+2\sigma$	4.61	4.16	
	\bar{x}	3.65	3.68	
	$\bar{x}-2\sigma$	2.69	3.20	

の操業の結果を比較したものを表 9 に示す。

5.2.2 製造方法と電気炉操業

酸素製鋼の導入, LD 転炉の発展, 真空処理法の進歩等の技術開発を基礎として, 戦後日本の特殊鋼業界は量・質ともに非常な発展を遂げてきた。こうした製鋼技術の進歩に伴って, フェロクロムの品種・特性に対する要求に大きな変遷が見られた。すなわち, わが国ステンレス鋼業界の著しい発展期には, 低炭素フェロクロムの需要が急激に増加した。次いで酸素製鋼法の進歩拡大により, 新品種の高炭素フェロクロムが新しい添加方法のもとで使用されるようになった。具体的には, C, Si の含有率は高いが廉価なチャージクロムと称される高炭素フェロクロム (JIS 規格, 高炭素フェロクロム 5 号) が主流を占めるに至った。この場合, フェロクロム中の Si は酸素吹精時に燃焼し, 昇温材として有効に利用されている。本来このチャージクロムは, 比較的低品位の鉍石が使用できることから, 高炭素フェロクロムの一種として米国における国内クロム鉍石の活用に端を発したものであり²⁴⁾, 従来の高炭素フェロクロムと製造法に大差はない。しかし, チャージクロムは Si 含有量が許容されているので強度の還元製錬ができ, 鉍石からの Cr 収率が従来の高炭素フェロクロムより高いというメリットがあるので, その伸びが著しい。一方従来の高炭素フェロクロムも一時低炭素フェロクロムに奪われた失地を回復しつつある。図 11 に高炭素フェロクロムのトン当たり電

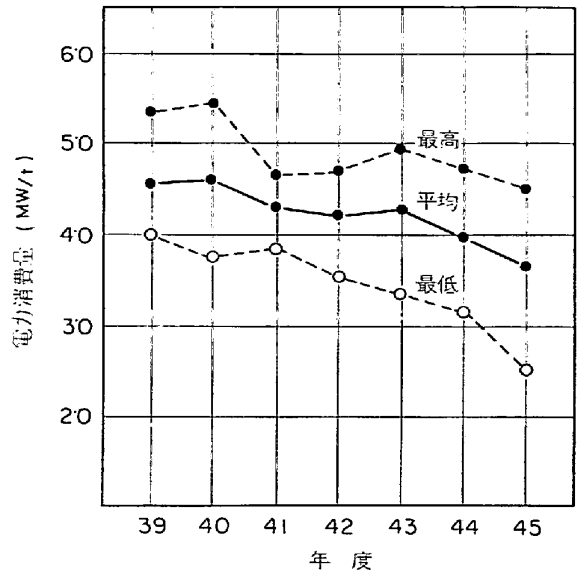


図 11 高炭素フェロクロムのトン当たり電力消費量の推移 (日本フェロアロイ協会資料に基づく)

力消費量の推移を示す。チャージクロムの普及とほぼ時を同じくして現われたリファインドクロムは中炭素フェロクロムの一種というべきもので, 経済上の観点から一部低炭素フェロクロムの代用品として製鋼の精錬末期の成分調整に使用されていたが, 現在ではほとんどその需要をみない。

次に, シリコクロムは大半低炭素フェロクロム製造用の原料として使用されるが, 一部は高 Cr 鋼製鋼時にいつたんスラグ中に移行した Cr の回収のための還元剤として, あるいは Si と Cr の成分添加および脱酸剤としても使用されている。このシリコクロムは高炭素フェロクロムにけい石を配合して再度電気炉で還元する二段法で造られている。海外においては主として原料事情の差から直接クロム鉍石とけい石を同時還元する一段法が発達している²⁵⁾²⁶⁾。わが国では日本鋼管が最近 40 000KVA 電気炉によつてこの方法を始めている。

低炭素フェロクロムはステンレス鋼および低炭素高級 Cr 鋼用クロム添加剤である。その製造法はシリコクロムを溶解し, クロム鉍石によつて脱けいする方法 (スウェーデン法と呼ばれる) が従来行なわれてきたが, その後製造規模が大きくなつて, ペラン法 (図 12 にそのフローシートを示す) が開発され, 大規模かつ迅速精錬に適した方法として広く普及するに至つた²⁷⁾。すなわちこの方法はシリコクロムの溶湯と, 別の電気炉で溶製した高 Cr 溶滓を取鍋中で混合精錬する方法で, そこで副生する溶滓は再使用されるきわめて合理的なプロセスである。これは従来のスウェーデン法が電気炉 3 基による三段精錬法であるのに比して, ペラン法は電気炉 2 基の同時稼働と取鍋操作だけですみ, また最終工程で電極からの加炭がないため, 製品の C% が低く画期的な方法で

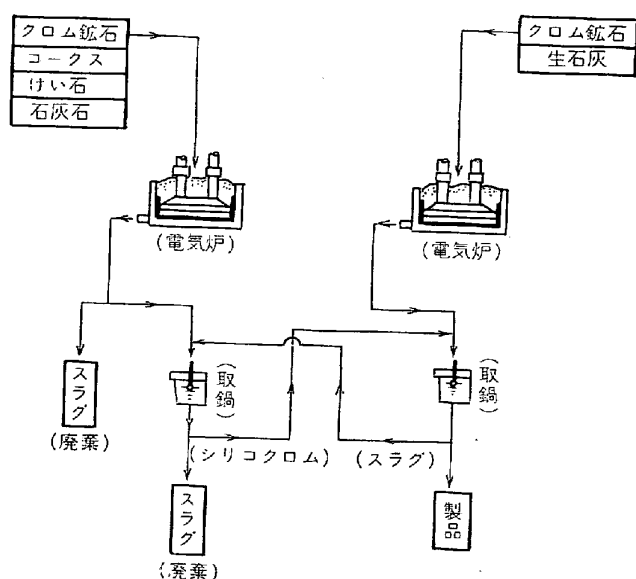


図12 低炭素フェロクロム，ペラン法フローシート

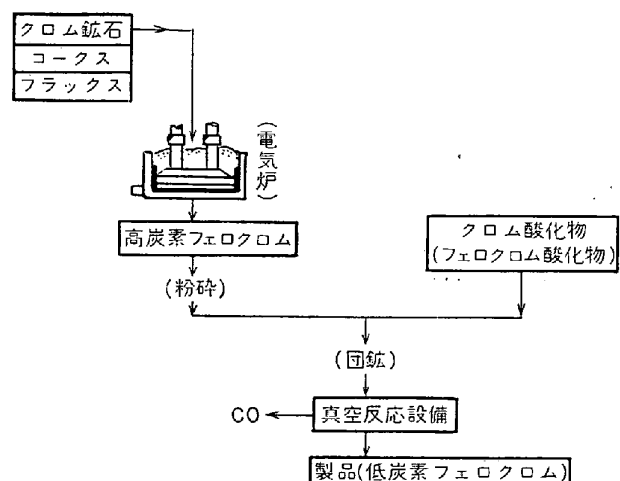


図13 低炭素フェロクロム，真空還元法フローシート

あつた。従つて、現在ではこれに類似した方法あるいは改善した考案が多い。また、前述のごとく低炭素フェロクロムの需要は製鋼法の進歩によつて一部高炭素フェロクロムに置換されたが、一方鋼の高級化に伴い特にCの低い超低炭素品は伸びている。一例をあげれば米国 Union Carbide 社が開発した Simplex 法がある²⁸⁾²⁹⁾。これは高温真空下において、高炭素フェロクロムをクロム鉱石などの金属酸化物で脱炭し極低炭素品を得る方法である。現在わが国でも、これを改良した方法で日本鋼管を主体とした日本重化学工業、日本電工との共同会社である日本特殊アロイによつて製造されている³⁰⁾。その製造工程は図13に示す。また、スウェーデン法の一部を真空中で行なう考案もあり³¹⁾³²⁾、低炭素フェロクロム分野では、従来の電気炉に限定されず、レードル、コンバーター、真空装置などの組み合わせによつて、今後この種の工程開発が行なわれる可能性がある^{33)~35)}。

5-3 フェロシリコンおよび金属けい素

両者とも、電気炉によりけい石を炭素で還元して得ることは同様であるが、そのおもな用途は、フェロシリコンは製鋼用脱酸剤であり、金属けい素は一部は高級けい素鋼板に用いられ、大部分はアルミニウム合金用添加剤であつて、需要先が異なつてゐる。従つて、品質に対する要求も違い、製造法の進歩の目標もまた相違している。

5-3-1 フェロシリコン

フェロアロイ中、原料鉱石を国産でまかない得るものはフェロシリコンのみともいえる。また、フェロシリコンは他のフェロアロイに比較して、製品トン当たりの電力消費量が多いため、需要に対して供給が追いつかない場合には、電力単価の安いノルウェー、カナダ等から輸入されている。また、国内ではすでに需要の減退しているカーバイドからフェロシリコン製造に転換した電気炉も多い。従つて、いずれにしてもフェロアロイ製造用電気炉の大容量化は最近のさう勢であつて、なかでもフェロシリコンはこれに先行してきた観がある。フェロシリコンの操業は、けい石の炭素還元が主体となり、スラグはほとんど発生しない。ただ、後述する金属けい素とは異なり、Fe が加わることによつて、メタル相のSiの活量が低下するため、SiO₂ の分圧が減少して SiO₂ と SiC の反応が進行しやすくなり³⁶⁾、金属けい素に見られるような SiC 生成による操炉の困難性は著しくない。しかし、炉内の温度は他のフェロアロイに比して相当高く、クラストも生成しやすいので、大容量炉はほとんどが開放型炉床回転炉である。フェロシリコン炉の完全密閉化は、そのダストの性状から導管およびバッグフィルターの閉塞を招きやすく、50%フェロシリコン以外には今まで行なわれていない。フェロシリコンのトン当たり電力

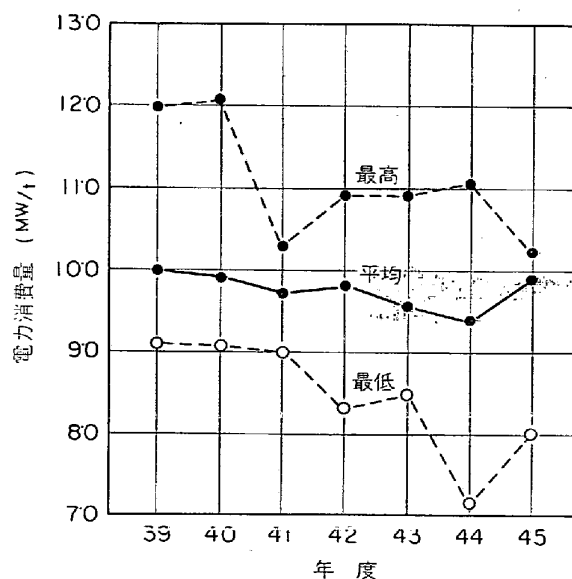


図14 フェロシリコン2号品のトン当たり電力消費量の推移 (日本フェロアロイ協会資料に基づく)

消費量の推移は図 14 に見られるとおり、大容量化および技術の改善により向上してきている。また、フェロシリコンでは、従来の規格と異なつたものや、他の有効成分を添加して特異な効果を狙つたものの開発が行なわれた。前者は矢作製鉄が開発した 50% Si のフェロシリコンで、従来けい石と鉄屑を主原料としていた製造法を鉄鉱石とけい石、あるいはけい酸鉄鉱石を主原料とする製造法にかえて量産化している³⁷⁾。また、フェロシリコンを二次処理して清浄度を高め黒鉛球状化能を与えた強靱鑄鉄用フェロシリコンが開発されている^{38)・40)}。強靱鑄鉄用の添加剤としては、フェロシリコンに Mg を添加したもの、さらに Ca, Ce を添加したものなどがある。

5.3.2 金属けい素

金属けい素の用途別需要構成はアルミニウム用添加剤が約 75%、電磁鋼板用が約 15%、その他約 10% になつている。アルミニウム用添加剤の金属けい素は Fe, Ca, 電磁鋼板用には Al などの不純物の規制が厳しく、不純物の極めて少ない原料けい石、還元剤が要求される。例えば、けい石では SiO_2 99.5% 以上、Fe 0.08% 以下、Al 0.08% 以下程度のものである。前述のように、アルミニウム用の金属けい素は Fe の含有を嫌うが、金属けい素中に入る Fe は原料以外にゼーダーベルグ式電極の鉄板製ケースからも入るので、これを減らすために、欧米ではプリベークドカーボン電極が使用されている。わが国では、このような大口径のプリベークドカーボンは製造されていないので、一部に鉄板ケースの代わりに Al ケースを用い、ケース強度の不足を独特な電極構造で解決した方法が開発されている。なお、海外ではプリベークドカーボン電極によるコスト高を防ぐために、Fe の許容される範囲内で特殊の Söderberg 式電極に置換しているものもある。これにはイタリア、Montecatini Edison 社の Differential Slipping Electrode⁴¹⁾、その他がある。

また、金属けい素中の不純物を減らすために、出湯中あるいは出湯後に塩素、酸素など種々のガスを吹込み、Ca, Al などを除去する処理技術が開発されている^{42)・44)}。

元来、 SiO_2 は還元し難く製錬温度は高い。その上、反応によつて生成するスラグはほとんどなく、電気炉はアーク操業となり、Si はその中間生成物である SiO (気体) の形で揮散しやすい。また、反応性の低い還元剤を使うと、炉内高熱部に難溶性の SiC の形成が進み、炉底や炉壁に蓄積して操業を困難にし、Si の歩留りをますます低下させる。この面から反応性の高い木炭が重用されるが、最近、木炭の価格高騰と品不足が隘路となり、これを補うためオイルコークス、石炭、ウッドチップなどが混用されている。この中で、ウッドチップは炉内原料層を軟弱化し原料の円滑な降下をうながすほか、炉内抵抗値を大きくして溶解帯を拡大する効果があ

る⁴⁵⁾。このような工夫にもかかわらず、金属けい素の電気炉作業における炉内装入物の手入れは不可欠で、電気炉が大容量化してもこれを省くわけにはいかない。このポーキング作業のために特殊な機械が開発されてこの目的を果たしている。

金属けい素製造の大型電気炉では炉床回転式が用いられ、ポーキングマシンが備えられている。またこのため炉の密閉化はまだ実現されていない。わが国では、現在日本電工とチッソの合弁会社である日本珪素工業の 34 000KVA 電気炉が最大容量となつている。

5.5 特殊フェロアロイ

フェロマンガ、フェロシリコン、フェロクロムのように、製鋼上一般に用いられる量的に多いフェロアロイに対して、フェロバナジウム、フェロモリブデンなど特殊鋼用添加剤として用いられる比較的生産量の少ないフェロアロイを便宜上特殊フェロアロイと称している。これには、フェロバナジウム、フェロモリブデン、フェロチタン、フェロボロンのようにおもにアルミノテルミット法で製造されるもの、フェロタンゲステンのように電気炉で製造されるもの、その他特殊の製造法で製造されるものなどがある。

5.5.1 フェロバナジウムおよびフェロニオブ

(1) フェロバナジウム

フェロバナジウムのおもな用途は、以前は工具鋼および軸受鋼であつたが、最近では高張力鋼すなわち引張り強さ 50 kg/mm^2 を超える構造用鋼、圧力容器用鋼などへの用途が増加している。特に、石油、天然ガスなどのパイプライン用大口径鋼管は大量のバナジウムを使用するので、世界のバナジウム市場の景気を左右している。まずおもなバナジウム資源の現状を述べる。

1) Carnotite ($\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{UO}_3 \cdot \text{V}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

ウラン鉱でおもに米国に産し、 V_2O_5 1.5~2.0% を含有している。ウラン生産の副産物として V_2O_5 の形で回収し、約 10 年前までは世界中のフェロバナジウム原料の主要な供給源となつていた。現在では、ウランの生産が中止され、 V_2O_5 だけでは経済性を失ない価値はほとんどなくなつた。

2) 褐鉛鉱 (Vanadinite, $3\text{PbO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{PbCl}_2$)

Descloizite ($4(\text{Pb} \cdot \text{Zn})\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

おもにアフリカ南部に産し、 V_2O_5 1% 前後を含有している。鉛、亜鉛精錬の副産物として V_2O_5 の形で回収される。

3) 含チタン磁鉄鉱 (Titaniferrous magnetite)

南アフリカ、ソ連ほか各国で産出し、 V_2O_5 1~2.5% を含有している。これから V_2O_5 を得る方法としては、鉱石を直接化学処理するものと、この鉱石を用いて電気銑を製造し、その溶銑を酸素吹精することによつて、浴中の V を酸化浮上せしめ、V を 12~13% に濃縮したスラグを得、次にこれを化学処理して V_2O_5 を回収する方

法とがある。現在、この鉍石を用いて後者の製錬を行なうものが量的に最も多い。

4) 重油中には若干のVが含まれており、火力発電所の燃焼灰のうち、V 15% 前後のものを化学処理によりV₂O₅の形で回収している⁴⁰⁾。この方法は、わが国では新興化学が実施している。

その他、米国では燐鉄鉍に含まれるVをV₂O₅として回収しているところがある。

フェロバナジウムは、V₂O₅をAlで還元するアルミノテルミット法で製造されている。製造設備はその需要の伸びに合わせて逐次大規模化されている。わが国では日本電工、栗村金属工業、日本重化学工業、太陽鉍工などによつて製造されている。その他のバナジウム添加剤について述べる。1964年頃から米国 Union Carbide社がバナジウム炭化物を製鋼用添加剤として開発し、カルバンの商品名で市販した。これはVの酸化物と炭素の混合物を真空中で加熱し、固相反応によつて還元したV 82~86%、C 10.5~14.5%のものである⁴⁷⁾。

これより少し遅れて、米国 Foote Mineral社が電気炉法による新型のフェロバナジウムを開発し、ソルバンの商品名で市販した。この製品は、含バナジウムチタン磁鉄鉍を原料とする電気製鉄で副生するV 10% 前後のスラグを電気炉で直接還元して造つた25~30%Vのものである⁴⁸⁾。これとは別に、ノルウェー Christiania Spigerverk社も電気炉法による50%Vのフェロバナジウムを開発し⁴⁹⁾⁵⁰⁾、欧州のバナジウム需要先に輸出している。さらに最近、前述のFoote mineral社はソルバンを改良し、40%Vのフェロバナジウムをフェロバンの名称で市販すべく、新たに3000KVAの電気炉を新設したと伝えられる⁵¹⁾。また、わが国では日本電工が電気炉による独自の直接還元法を行なつて、20~25%Vの高張力鋼用バナジウム添加剤を開発している。

以上のように、バナジウム添加剤に関する新技術は新しいプロセスの導入によつて、より廉価なバナジウム添加剤を得る方向に向けられており、若干の不純物を伴うものであつてもおもに高張力鋼の添加剤として伸びて行くものと思われる。バナジウム添加剤としてはそのほかバナジウム酸化物をブリケットにしたものを太陽鉍工が生産してあり、塩基性電気炉における還元期に添加されている⁵²⁾。しかしながら、依然として製鋼用バナジウム添加剤のおもなものはテルミット法によるフェロバナジウムであり、その量、質、製造法とも高水準に達している。しかし、主原料であるV₂O₅の大部分は輸入に依存しており、不安定な供給と価格変動に悩まされてきたため、V₂O₅を安定的に確保する必要があり、現在含バナジウムスラグ(V 12~13%)の世界最大の生産者である南阿 Highveld社からこれを長期的に安定購入して、国内でV₂O₅を生産すべく、日本電工を中心とする日本重化学工業、栗村金属工業、三井物産との共同製錬会社

の設立が計画されており、需要の安定的増大にあわせて実施される予定である。

(2) フェロニオブ

Nbは高張力鋼用の添加元素として、その性質は若干異なるとはいえVと競合する場合もある。たとえば、パイプライン用鋼管にはNbとVがそれぞれ単味で加えられる場合もあり、併用される場合もある。厚肉の大口径管になるとVが必須となり、あるいは併用される場合もある。

Nbの原料鉍石としては、Columbite または Pyrochlore が使用されている。PyrochloreはColumbiteに比して随伴するTaは低いが、U、Thなどの放射性物質を含有しているため、使用に際しては十分な管理が必要である。

フェロニオブの製造は、アルミノテルミット法による。わが国では主としてColumbiteを原料としているが、欧米ではかなりの量のPyrochloreが使用されている。なお、Columbiteのほとんどはナイジェリアに産しそのなかにはSnの高いものがあり、一部脱Snしたものを輸入していたがわが国でも最近では鉍石の脱Sn技術が開発され、高Sn鉍を輸入して脱Sn製錬を行なつて十分Snの低いフェロニオブを製造しているところもある。

5.5.2 フェロモリブデンおよびフェロタンングステン

(1) フェロモリブデン

Moは製鋼用添加剤として、量的にCr、Niに次いで用いられる。鋼にMoを添加する場合、以前はすべてフェロモリブデンが使用されていたが、MoO₃の形で添加されても溶鋼中で容易に還元されるので、約15年前から平炉用にMoO₃ブリケットの用途が開け、それ以来漸次その需要を増し、現在ではこれがモリブデン添加剤の主流をなすようになり、フェロモリブデンは成分調整用、もしくは特殊高級鋼用としての用途に限られてきた。フェロモリブデンはMoS₂をばい焼したMoO₃をアルミノテルミット法で還元して得られる。この資源もまたわが国にはきわめて少なく、海外からの輸入酸化モリブデンに依存している。最近、わが国のモリブデン生産各社はモリブデン硫化物を長期安定的に輸入して、日本重化学工業を中心とした各社との共同会社で集中的にばい焼する計画を実現しようとしているが、ばい焼工程で副生する亜硫酸ガスの処理が不可欠で、現在これは技術的には十分確立されているものの、公害問題で着工が若干遅れている。

(2) フェロタンングステン

フェロタンングステンは主として工具鋼、耐熱鋼を中心とする比較的限られた鋼種に使用されていて、その分野では不可欠な重要元素であるが、他の製鋼添加剤に比してその使用量は少ない。わが国では電気炉法により栗村金属工業一社で生産されている。

5.5.3 その他

Bは極微量の添加で鋼の特性を改善し、ZrおよびTiは脱酸、脱窒などの効果が顕著である。これらのフェロアロイは、いずれもアルミノテルミット法で造られるが、あらかじめこれら元素の複合効果を狙ってB-Ti、Si-Zr、Al-Tiのように、数種の元素を含有させる各種の添加剤が開発されている。

また、以上のほかに窒素が鋼に及ぼす影響について最近活発に研究され、鋼種により引張り強さ、クリープ強度などの機械的特性を向上させるとともに、耐食性および高温強度を高めることが見い出され、ステンレス鋼、耐熱鋼、高Mn鋼などの高合金鋼をはじめ、IN鋼など窒素を添加した鋼が多く開発されるようになった。これに従い、各種の窒素添加剤の開発が行なわれた。窒素添加剤として、JIS規格にあげられているものにN1.2%前後の高窒素フェロクロムがある。このほかに窒素含有率4~6%の含窒素フェロクロム、含窒素フェロマンガンなどがある。N1.2%前後のものは熔融フェロクロム中に窒素ガスを吹精して造られ、窒素の含有率は比較的低いが難解離性の Cr_2N を形成しているため、鋼中添加に際して窒素の歩留りが高い特徴がある。N4~6%のものはいずれもフェロマンガン、フェロクロムを微粉碎したものを窒素雰囲気中で加熱窒化して造られるもので、製品としてはブリケット状で販売される。

以上のほかに発熱フェロアロイがある⁵³⁾。これは合金添加を取鍋で行なう場合、大量の添加に際して鋼浴の温度低下や成分の偏析を防ぐため、鋼浴中で発熱するように発熱剤を含有させたものである。これは、それぞれのフェロアロイの粉末に硝酸ソーダ、または塩素酸ソーダなどの酸化剤と、C、Al、CaSiまたはFeSiなどの酸化しやすい金属を混合し、必要に応じて若干のフラックスを加えてブリケットにするか、あるいはそれらを粉末のままかん詰にしたもので、溶鋼中でテルミット反応をさせるものである。

6. フェロニッケル

フェロニッケルの需要は、ステンレス鋼の伸びに伴い近年著しく増加し、わが国の生産量もこの5年間で約3.5倍に達し、カナダ、ソ連に次ぐ世界第3位の座を占めるに至った。しかし、ニッケルの資源はすべてを海外に依存し、その約80%は仏領ニューカレドニアから、残りをオーストラリア、カナダなどから輸入している。そのため、フランス政府の政策に大きな影響を受け、かなり不安定な要素をもっており、加えて、世界の需要の急増によりわが国が輸入できるニューカレドニア鉱の品位は著しく低下し、そのため輸送コスト、生産コストの上昇は避けられず、わが国ニッケル業界の負担になっている。したがって、インドネシアにおける現地製錬所の建設など新しい形態による資源確保の計画や、低品位鉱

の開発利用が推進されており、さらに将来の資源としては海底マンガノジュールの利用も期待されている。現在、わが国のニッケル製錬を大別すると、金属ニッケルフェロニッケル、酸化ニッケルの3分野がある。金属ニッケルは、古くは粗ニッケルを陽極とする電解精製法がとられていたが、戦後ニッケルマットを直接陽極とする方法が開発されている。フェロニッケルでは、ドワイトロイド焼結機、ロータリーキルンなどによる原料の事前処理、揺動取鍋、LD転炉による脱硫脱炭処理などの技術が確立され、設備の大型化、合理化に寄与している。酸化ニッケルは比較的新しく、ニッケルマットの流動ばい焼により製造されている。なお、今後、ニッケル需要の増大によりニッケル鉱の品位はますます低下する傾向にあり、わが国では現在利用されていないラテナイト鉱の処理も研究されてきた。これらにはセグリゲーション法、塩化法などがある。

7. 結 言

以上、最近のフェロアロイ製造法の進歩について概説した。

フェロアロイ製造用電気炉の大容量化の傾向は、作業の省力化、自動化を促進しかなり広範囲にわたる自動制御も行なわれるようになったが、次の課題は、これらの総合的なコンピューターライゼーションへの努力であろう。また、電気炉はここ当分40000~60000KVA程度の容量の建設が続くと思われるが、ゼーダーベルグ式電極の径をさらに大きくすることに自信がつけば、これ以上大容量化されるであろう。電気炉の大容量化による1炉当たりの生産量の増大は、鉄鋼の生産へ従来と異なつた面で影響を与えるようになってきた。たとえば、40000KVA電気炉1基は年間10万トンの高炭素フェロマンガンを生産する。粗鋼トン当たり平均4kgを要するので、これは粗鋼2500万トン分に相当し、1炉の故障減産の鉄鋼生産に与える影響は非常に大きいし、もちろんそのフェロアロイ企業に与える打撃も甚大である。かかる観点から、設備ならびに技術の管理の重要性は増大してきており、今後この面での進歩が行なわれよう。

フェロアロイは、製鋼技術の進歩によつて、最近その品種に多様な変化と開発が要求されている。これは、とくにLD転炉、連続鑄造の発達、真空処理技術の進歩によるものであつて、たとえば、脱酸剤としてのSi、Al、Ca、その他レア・アース、および合金添加剤としてのフェロクロム、フェロバナジウム、フェロニオブ、フェロジルコンなどにその傾向が顕著である。従つて、これらの要求に適應したフェロアロイ新製品の開発が行なわれつつある。

原料鉱石の事前処理の進歩は最近の特徴であるが、炉の成績に満足な効果を与え、また、事前処理設備と炉の関連において炉設計および一連のレイアウトに影響を与

えた。さらに、炉の大容量化に伴い、従来規模の炉と異なる概念が必要で、熱容量が大きいために炉設計に当たって諸元決定の公式は修正されるべきであろう。

資源問題については、わが国のフェロアロイ工業は急激に膨張しただけに、資源の確保は他国に遅れをとっているので、とくに努力を要する重要な課題である。資源の共同開発、資源国への開発援助、あるいは工場建設などの考え方が積極化するであろう。技術的には粉鉱石の事前処理の進歩はこの問題の解決に寄与したが、さらに未利用資源の活用のためには製錬法の開発、あるいは低品位鉱を活用できるようなフェロアロイ規格の検討が必要である。海底資源は興味ある将来の問題として期待すべきであろう。

公害問題の進展は、小容量炉のスクラップダウンを促進させた。また、公害防止設備はプラントのシステムに影響を与えるので、フェロアロイ工場は完成された総合体として初めから考慮しなければならない。

工場立地には、フェロアロイ工業に二つの考え方がある。一つは原料、製品をすべて海送するため臨海に数種の大容量炉を総合的に建設する大型量産工場である。他の一つは、需要製鉄所敷地に電気炉を建設するオン・サイト・プラントと称するものである。前者の方が、フェロアロイ工場の管理面で負担が少ないこと、市況により生産品種の転換ができるなどから有利と思われるが、各社の事情により結論は異なるかもしれない。

以上述べたような観点から、今後のフェロアロイ工場は、事前処理、大容量化、公害防止、それらのコンピューター化、および工場立地をまとめ融合した一つのシステムとして企画設計された集約型量産工場でなくては国際競争力を維持できなくなるであろう。

なお、現在わが国のフェロアロイ製造法は、貿易の自由化に伴う内外の激しい競争のゆえに、ここ数年の間に著しい発展をとげて世界の注目のうちにあるが、欧米においても目下大容量化が促進されつつあるので、近い将来には激しい競争が予想される。

文 献

- 1) 東馬: 鉄と鋼, 21(1935)6, p. 413
- 2) 石井, 松岡, 伊藤: フェロアロイ, 16(1967)5・6, p. 271
- 3) 池ヶ谷: ケミカル・エンジニアリング, 16(1971)7, p. 41
- 4) Electric furnace conference proceedings, 27(1969)12, p. 10
- 5) R. FERRARI: J. Metals, (1968)4, p. 95
- 6) 前波: フェロアロイ, 12(1963)5・6, p. 182
- 7) 朴木: フェロアロイ, 13(1964)6, p. 262
- 8) 宮川, 沖川, 成瀬: 鉄と鋼, 51(1965)4, p. 64
- 9) W. NARUSE: Ferroalloys, Metal Bull., (1971), p. 87
- 10) T. パアセン: 特公昭 38-4456
- 11) 那須, 米持: フェロアロイ, 15(1966)5・6, p. 375
- 12) J. NASU: Metal Bull., (1969) Oct. 7, p. 101
- 13) V. P. ELYUTIN, Yu. A. PAVLOV, et al.: Production of Ferroalloys (1957)
- 14) 山崎, 中野, 四戸, 好野: 特公昭 43-8341
- 15) 松浦, 楠瀬, 小西: フェロアロイ, 16(1967)5・6, p. 247
- 16) 成瀬, 前波: 日本金属学会会報, 9(1970)2, p. 81
- 17) 奈古屋, 竹内, 村井, 天野: フェロアロイ, 18(1968)1・2, p. 13
- 18) 進藤, 奈古屋, 竹内, 村井: 特公昭 45-27212
- 19) D. G. KHOKHLOV and I. V. LUGOVYKH: Metallurgical and Chemical industry of Kazakstan' (1961), p. 5
- 20) A. A. MEL'NICHENKO, P. V. AGANICHEV, and V. M. ZHURAVLEW: Stal in Eng., (1968) No1, p. 33
- 21) J. C. ダグラス: 特公昭 36-2153
- 22) J. C. ダグラス: 特公昭 38-1959
- 23) 成瀬: 鉄と鋼, 57(1971)4, p. 26
- 24) F. W. WESSEL and R. T. C. RASMUSSEN: J. Metals, 2(1950), p. 984
- 25) 菊地: 日本金属学会秋季講演会講演 (1955)
- 26) S. V. BEZOBRAZOU: Stal', (1961) H. 10, p. 903
- 27) R. PERRIN and A. DREFFE: Symposium on ferro alloy industry in India, (1962), p. 102
- 28) C. G. チャドウィック: 特公昭 33-903
- 29) C. G. CHACWICK: J. Metals, 13 (1961) 11, p. 806
- 30) 森山, 木村: 特公昭 42-8446
- 31) 清水, 中島: 特公昭 38-2702
- 32) 清水, 中島: 特公昭 38-13504
- 33) O. S. BOBKOVA and A. Ya. BRODSKÜ, et al.: Stal in Eng., (1969)1No 1, p. 49
- 34) 田辺, 進藤: 特公昭 44-3705
- 35) P. A. SAKHARUK and A. S. MUSTOV, et al.: Stal in Eng., (1968) No 2, p. 126
- 36) A. SCHEI: Norwegian Journal of Chemistry Mining and Metallurgy, 27 (1967)
- 37) 多田, 杉浦, 細井: フェロアロイ, 19(1970)1, p. 1
- 38) 丸山: フェロアロイ, 14(1965)2, p. 109
- 39) 音谷, 丸山, 師岡, 松本: 特公昭 42-11141
- 40) 寺戸, 関: 特公昭 43-9984
- 41) Ita. Pat. No 606, 568 (1959)
- 42) Ger. Pat. No 1,039, 752 (1960)
- 43) Ger. Pat. No 1,119, 307 (1961)
- 44) U. S. Pat. No 2,866, 701 (1958)
- 45) W. T. FAIRCHILD: J. Metals, 22(1970), p. 55
- 46) 平, 山口, 山本: 溶融塩, 12(1969)1, p. 90
- 47) U. S. Pat. No 3,334,992 (1967)
- 48) U. S. Pat. No 3,420,659 (1969)
- 49) Jernkon Ann., 152 (1968) p. 13
- 50) H. アース, ほか: 特公昭 46-23813
- 51) Metals Week, (1971) Apr. 21, p. 30
- 52) 神田, 成田: 特公昭 36-14456
- 53) 長沢, 白松, 滝内, 北村, ほか: 日本鋼管技報, No 23 (1962), p. 10