

VI 章 工場近代化計画

2	製鋼工場の近代化	VI-13
2.1	原材料工程と近代化	VI-14
2.2	電弧炉製鋼	VI-27
2.3	取鍋精練炉(LF)	VI-45
2.4	連続铸造法	VI-59
2.5	造塊法	VI-71
2.6	分析装置	VI-76
2.7	生産能力の算定	VI-77
2.8	集塵装置	VI-79
2.9	要員計画	VI-81
2.10	新設備の投資額(概算)	VI-82
2.11	製鋼工場の全体Layout	VI-82

2 製鋼工場の近代化

南京第二鋼鐵廠では現在 1979 年に建設された公称能力 5t (実績: 12t) 電弧炉 2 基と 1988年に建設された公称能力 20t (実績: 25t) 電弧炉 1 基にて設計生産能力 100,000t/年の製鋼工場を有している。

5t 電弧炉 2 基は自家製作であるが、20t 電弧炉は長春電炉廠によって製作されたものである。

現在の生産量は普通鋼、低合金鋼を主体に 36,845t/年 (1989年実績) であり、溶鋼は全て 300kg 鋼塊に鑄込まれ、分塊圧延機にて鋼片に圧延されている。

1989年に於ける炉別、鋼種別の生産量は表-13の如くである。

表-13 炉別、鋼種別生産量 (1989年)

(t/年)

炉番 鋼種	1号炉 (5t)	2号炉 (5t)	3号炉 (20t)	計
普通鋼	10,510	9,448	5,073	25,031
低合金鋼	4,961	4,460	2,393	11,814
計	15,471	13,908	7,466	36,845

南京第二鋼鐵廠では現有の製鋼設備の改造と増強により、生産量の拡大と鋼種の高級化、特殊鋼化を図ろうとしている。

近代化計画の終了時に於ける鋼種別粗鋼生産量は表-14の通りである。

表-14 近代化後の鋼種別粗鋼生産量

	計画粗鋼生産量	
	鋼塊	CC
普通炭素鋼	1,094	29,056
構造用炭素鋼	2,431	42,189
構造用合金鋼	3,737	64,567
軸受鋼	25,060	0
ばね鋼	274	4,710
計	32,596	140,522
合計	173,118	

2.1 原材料工程と近代化

2.1.1 原材料管理

電弧炉工場に隣接する原料棟(2,800㎡)に集積された屑鉄を3台の起重機(内2台はMagnetを有している)を用いて台車上の装入箱へ投入し、装入箱が屑鉄にて満杯になったところで、台車を台貫上に移動し秤量する。

屑鉄の秤量が終了した後、装入箱は起重機にて炉前に吊り上げられ、電弧炉への装入に備えられる。電弧炉への装入は4回に分けて行われる。

現在、普通鋼だけの溶解であるため、原料の管理は極めて簡単なものとなっているが、将来特殊鋼の生産に当っては購入屑鉄、社内発生屑鉄の厳密な区分管理が必要である。

南京第二鋼鉄廠内で発生する屑鉄は、とすれば単なる“屑”として取扱われ、軽視され勝ちであるが、将来特殊鋼の製造が開始された場合、工場内にて発生する屑鉄はNi, Cr, Mo等の有価元素を含有し、原価低減の観点からもこれらの高価な元素は有効に活用しなければならない。

一方、普通鋼、炭素鋼へこれ等の元素が混入した場合、有害元素として作用し、品質の低下をもたらすばかりでなく、場合によっては不良となって廃却される場合がある。

この様な観点から、特殊鋼の製造に先立って屑鉄の分離柵の設置と作業員への事前の教育が重要となる。具体的な対策として、製鋼工場内で発生する屑鉄に対してはは次の方法を採用する必要がある。

〈造塊時の注余り〉

- ① 型抜後、注余り材に鋼種の分類を表示する。
- ② 鋼種の分類に従って、保管箱へ収納する。
- ③ 保管箱を原料棟へ搬送する。
- ④ 鋼種分類別の保管柵内へ入れ在庫する。

〈湯道〉

- ① 鋼塊を型抜後、湯道を処理場へ搬送する。
- ② 湯道煉瓦屑の除去を行う。
(煉瓦屑の付着は電弧炉にて再溶解する場合、送電時に電極折損の原因となることがある。)
- ③ 鋼種分類を表示する。
- ④ 原料棟へ搬送する。
- ⑤ 鋼種分類別に在庫する。

参考までに屑鉄の管理についての中華人民共和国の国家規格を示す。

[中華人民共和国国家規格]
回炉炭素Scrap の分類及び技術条件

規格は普通炭素鋼、優質炭素鋼構造用鋼、炭素工具鋼、炭素ばね鋼等も含む製鋼、鑄鉄製品の製造及び鉄合金の製造時の投入料として使われる炭素Scrap (以下Scrap と称する) について規定する。

1. 分類
Scrap の外径・寸法及び重量について表の通り 6 種類に分れる。
2. 技術要求
 - (1) Scrap は分類によって供給する。その中にSet の機械・設備及び構造品があってはいけない。
 - (2) Scrap のS、Pの含有量は0.08%を越えてはいけない。
 - (3) Scrap の中に灰鉄、合金鋼、合金鋁鉄、及び非鉄金属等を混有してはいけない。
 - (4) Scrap の表面についている物質、Cement、油污れ、Rubber及び鑄造品の表面の砂等を取り除かなければならない。

種類	番号	各種Scrapの例	供給状態	単重 (kg)	外径寸法 (mm)
重型 Scrap	FG1	Ingot, Billet 及びCrop切断、 歪型機械の部品及び鑄鋼品等	球状	500~<1800	≤1200×500×400
中型 Scrap	FG2	各種の鋼材及びCrop切断、機械 廃却品、船用板、各種溶接品、 鑄造削り、歯車、滑車の車、 軸鑄鋼品等	球、板 棒及び 弁形状	30~<500	≤500×400×300
小型 Scrap	FG3	各種の鋼材及びCrop切断、機械 廃却品、鉄道Rail用の釘等	棒、球状	<30	≤500×400×300 板材の厚み≥4
軽 量 S c r a p	一級冷間 Press	FG4.1	機械 Press	比重≥2.0	≤800×500×400
	二級冷間 Press	FG4.2		比重≥1.5	
	三級冷間 Press	FG4.3		比重≥1.0	
	単積み	FG4.4 FG4.5		単	
			(板材の厚み<4mm 直径>8mmのものを軽量材料 とする。)		
鋼 S c r a p	冷間 圧縮鋼	FG5.1	機械 圧縮	比重≥2.5	≤800×500×400 或いは丸型
	一級熱間 Press	FG5.2		比重≥2.0	≤800×500×400
	二級熱間 Press	FG5.3		比重≥1.5	
	鋼Scrap	FG5.4	棒、球状		長さ≤250 (鉄金切屑≤120)
Slag鋼	FG6	取鍋残鋼等	球状	区別種中、小型 Scrapと同じ	

- (5) Scrap の中には両端密閉の管状物、密閉容器、燃焼、爆発しやすい物及び毒物が混入してはならない。
- (6) Scrap の中に若し、廃棄の武器や燃焼爆発しやすい物及び毒物が混入された場合、供給側により、安全処理をしなければならない。
- (7) Slag鋼の鋼含有量は80%以上（体積により計算する）。
- (8) 供需双方が特別な要求のある場合、協議により解決する。

3. 検査方法

- (1) 化学文節はGB223-81「鋼鉄及び合金化学分析方法」に規定の方法或いは規格・規定の制度を保証出来る方法で行う。
- (2) Scrap の清潔程度、外径寸法及び単重は目視検査による。必要な場合、Sampleで検査する。

4. 受入規則

- (1) Scrap は供給方で責任をもって検査し、必ず規格規定の標準を保証しなければならない。そして品質証明書を提供する。
- (2) Scrap は必ずlot 納入で同じ種類のScrap を供給する。
- (3) 使用方がScrap に対してSample検査を行う。

5. 運輸と証明書

- (1) Scrap の運輸の場合、各車両（船）は必ず同じ種類のScrap を装入しなければならない。車両（船）の積み量を補給するため2種類或いは、2種類以上のScrap を装入してもよいが混装はしてはいけない。
- (2) すべてのScrap は運輸・荷卸し詰みの中で爆発、燃焼しやすいもの及び毒物等を混入してはいけない。
- (3) 古い武器は安全処理を経て、管理の部門が責任をもって監督・発送する。
- (4) Scrap 荷渡しの時、必ず品質証明書を付け、供給方・使用方の名称、Scrap の種類・級別及びlot の重量を証明する。供給方からの受入のlot の廃Ingot, Billet 鋼材は必ず廃特証明書を付け、そして炉別、炉の型、鋼材種類の廃出原因を説明する。

2.1.2 設備改造

近代化完了後、電弧炉の生産能力は飛躍的に改善されるであろうし、条件次第では1日15 heatも可能となろう。原料の準備作業（配合作業）は、この様な電弧炉の高生産率に対応出来る様改造しなければならない。

(1) 屑鉄保管枠の設置

現在、電弧炉棟に隣接する原料棟は平地内に屑鉄を無造作に山積しているが、これが保管能力の減少に繋がっている。

原料棟の能力不足は、ともすれば屑鉄の保管量不足による配合待ち時間を延長せしめることとなり、電弧炉の能率低下の一因となる。又、原料棟の能力が大きい場合、屑鉄の荷卸作業が随時可能となり、配合作業へ与える支障も少なくすむ様になる。

保管能力の増強策としては、図-14の如く、保管枠を新たに設ける必要がある。保管枠の設置は只単に屑鉄の保管能力の増加に止まらず、将来特殊鋼の生産に当っては異屑鉄の混入の防止にも繋るものであり、特殊鋼工場の原料管理としては必須の条件でもある。

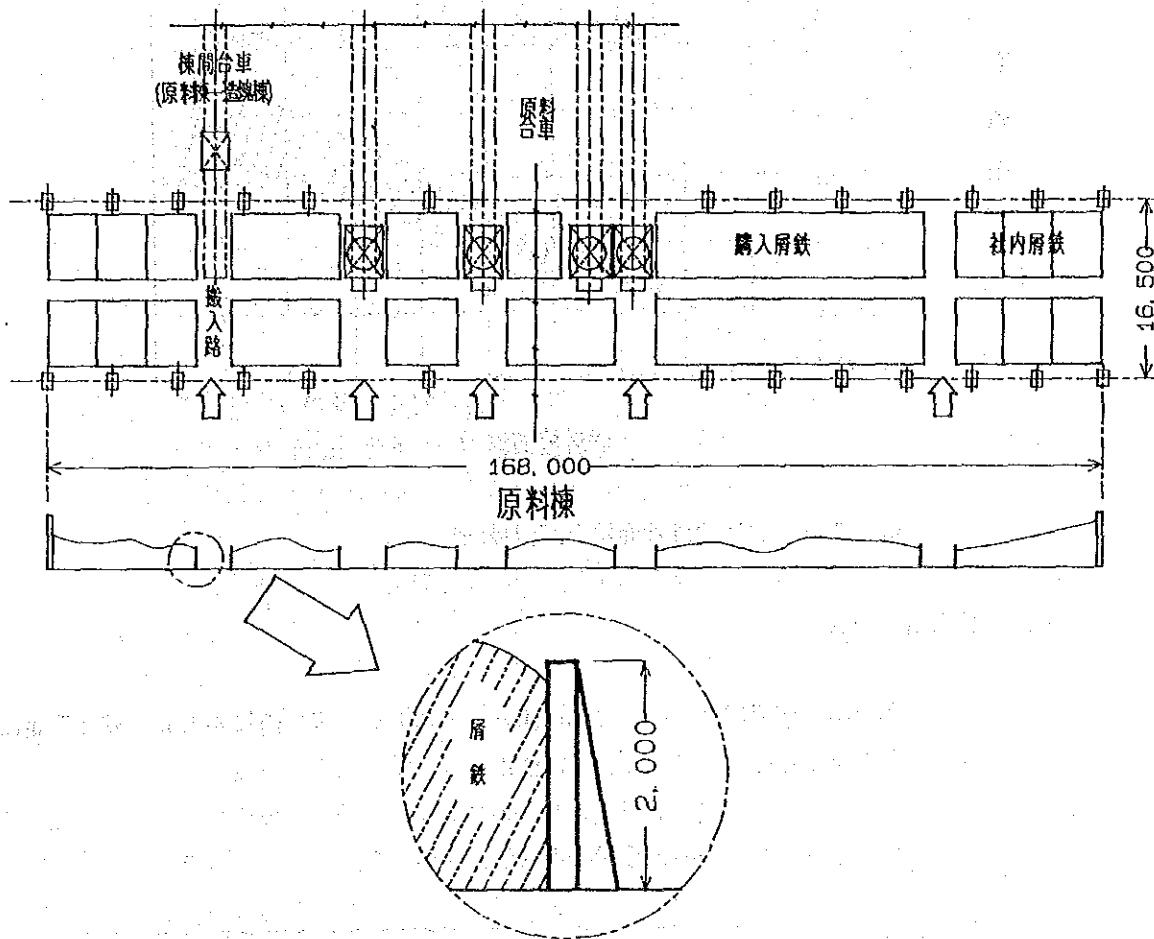


図-14 原料棟のLayoutと肩鉄の保管方法

図-15は保管枠を設けた原料棟の保管能力と敷面積の関係を示したものであるが、
 現有の敷面積約 2,800 m²では約 3,000t の保管が可能であり、この量は近代化計画
 の達成時の製鋼量の約1週間分に相当するものである。日本の約3日分の例に対して
 2倍以上の保管能力となる。

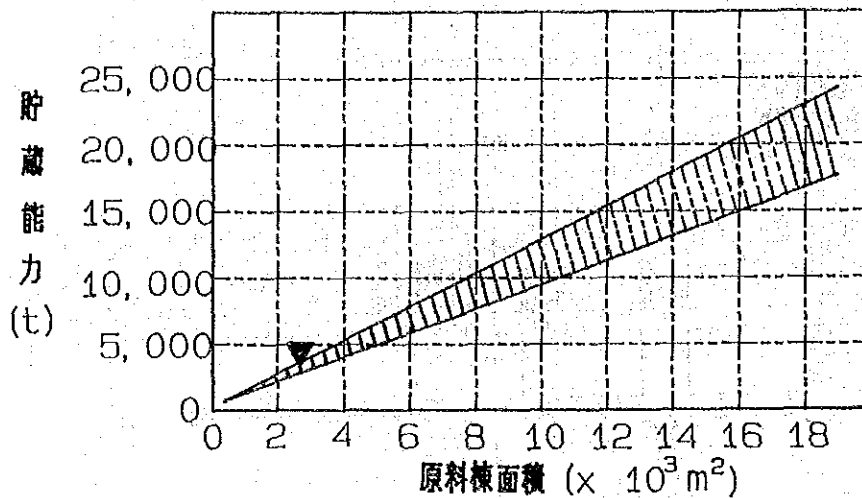


図-15 屑鉄の貯蔵面積と原料棟面積

(2) 装入用起重機

現在、南京第二鋼鐵廠では原料の準備用として電弧炉工場に隣接する原料棟に下表に示す3台の起重機を有しており、主な仕様は表に示す如くである。

表-15 原料棟の起重機の主な仕様

	容量 (t)	走行 (m/min)	巻上 (m/min)	横行 (m/min)	磁石
A	20/5	67	7.1	44.6	有
B	15/3	67	9.8	44.6	有
C	10	91	7.8	44.6	無

例えば、起重機Aについて27 tの配合作業を行った場合の1 Heat当りの作業時間は概略次の如くである。

$$\frac{27,000 \text{ (Kg/heat)}}{* 400 \text{ (Kg/time)}} \times \frac{** 20 \text{ (m)} \times 2 \text{ time}}{67 \text{ (m/min-time)}} \times \frac{1}{70\%} = 58 \text{ (min/heat)}$$

(* : Magnetへの屑鉄の平均付着量)

(** : 平均移動距離)

(但し、屑鉄とCharging bucketの平均距離を20mとし、巻上げ・横行は起重機の走行中に行うものとする。)

しかしながら、上記の58min/heatは1炉当りの屑鉄の配合作業の必要時間であり、

更に原料棟へ搬入された屑鉄の荷卸作業を考慮すると、現有の起重機では能力不足となる。すなわち、将来最短のTap to Tapを80 (min/heat) とすると、屑鉄の荷卸作業と配合作業を合せて80 (min/heat) が必要時間とすると、配合作業だけでも40 (min/heat) かかる。

その為には、現有起重機の能力を

$$\frac{58 \text{ (min/heat)}}{40 \text{ (min/heat)}} = 1.45$$

すなわち、現在の起重機の能力仕様を約50%改善する必要がある。対策としては走行速度の高速化と Magnet の付着力の向上の二点が考えられるが、Cost 的な観点からすれば、Magnet の付着力の増強の方が得策と考えられる。

更に現在Magnetを装着していない起重機-Cについても起重機-Aと同一仕様に改造する必要がある。

(3) 秤量機

原料の物流管理の上で秤量機（台貫）は最も重要な設備の一つである。現在南京第二鋼鉄廠では装入量の把握の為に秤量機を用いているものの装入量を一定化するための調整は行わず、一度秤ったらその儘電弧炉棟へ搬出している。

しかし、装入量の変動が大きい場合、造塊歩留の低下に繋るばかりではなく、特殊鋼の溶製に際しては最も重要な成分調整を難しくするものであり、装入量の変動を最小限に抑える必要がある。その対策として現在の秤量機を原料棟内へ移し、起重機の運転者が実際の屑鉄重量を自分の目で確認しながら行う方法を探るべきである。この方法によって装入量の安定化が図られるばかりでなく、配合作業時間の短縮と省力化が図られる。

秤量機としては Magnet からの屑鉄の落下の衝撃に耐えられる様 “Load Cell” 方式が適しているものとする。

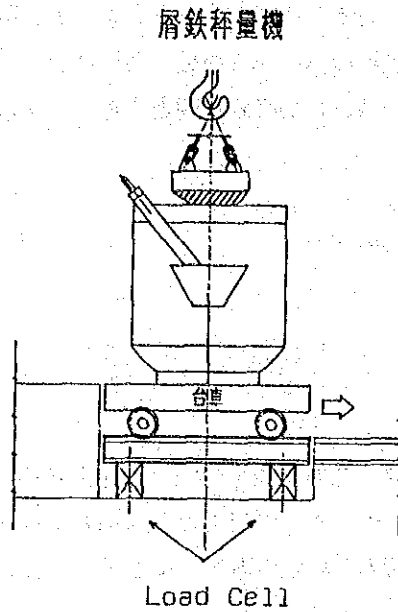


図-16 屑鉄秤量機

(4) 屑鉄処理工場

嵩比重の小さな屑鉄を電弧炉へ装入した場合、装入回数が多くなり、電弧炉の能率を低下せしめるばかりでなく、各種の原単位の悪化の一因ともなる。又、軽薄な屑鉄は時には電弧炉の内壁に付着し、これが容易に酸化されて溶解歩留の低下を招く場合がある。これ等の問題を解決するために屑鉄の前処理が一つの有効な手段となる。

(a) 屑鉄のPress設備

先に述べた様に屑鉄の嵩比重は電弧炉の能率に対し、大きな影響を及ぼすものであり、装入時の嵩比重は下記の如くである。

表-16 屑鉄の嵩比重

銘 柄	嵩比重
新断Press (New Scrap Pressed)	1.8
切削屑 (Turnings)	0.7
Shredder	1.0
甲 山 (Heavy Scrap)	0.8
切断屑 (Crop)	3.0
銑 鉄 (Pig Iron)	4.0

低嵩比重の屑鉄の Press後の嵩比重は Pressの設備や屑鉄の銘柄によって異なるが、通常 1.5~2.0である。

図-17、表-17に屑鉄 Press機とその仕様を示す。

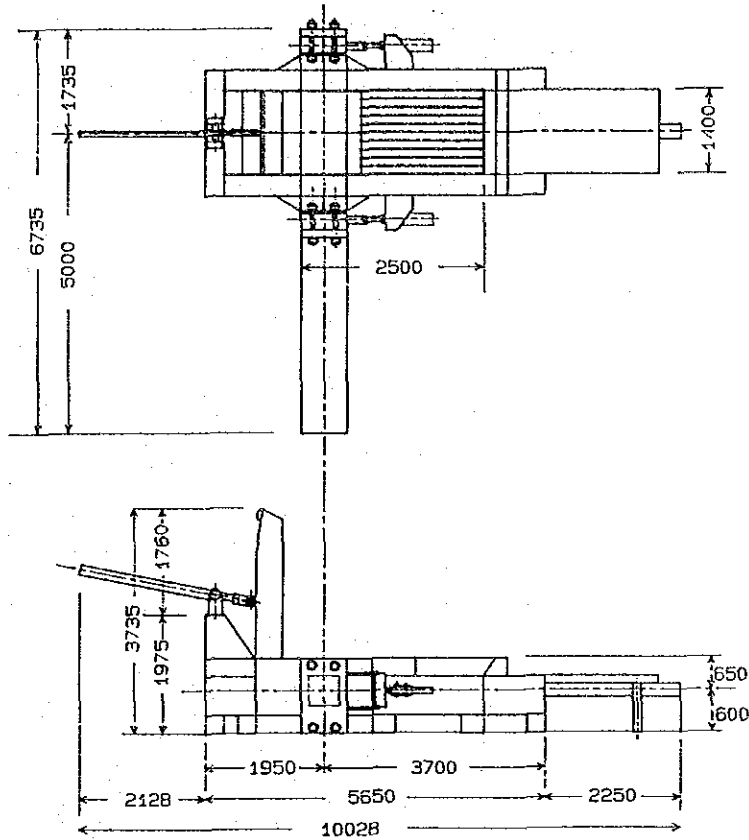


図-17 屑鉄Press機

図-18には現在南京第二鋼鐵廠で計画している原料処理工場と設備の配置(案)を示す。

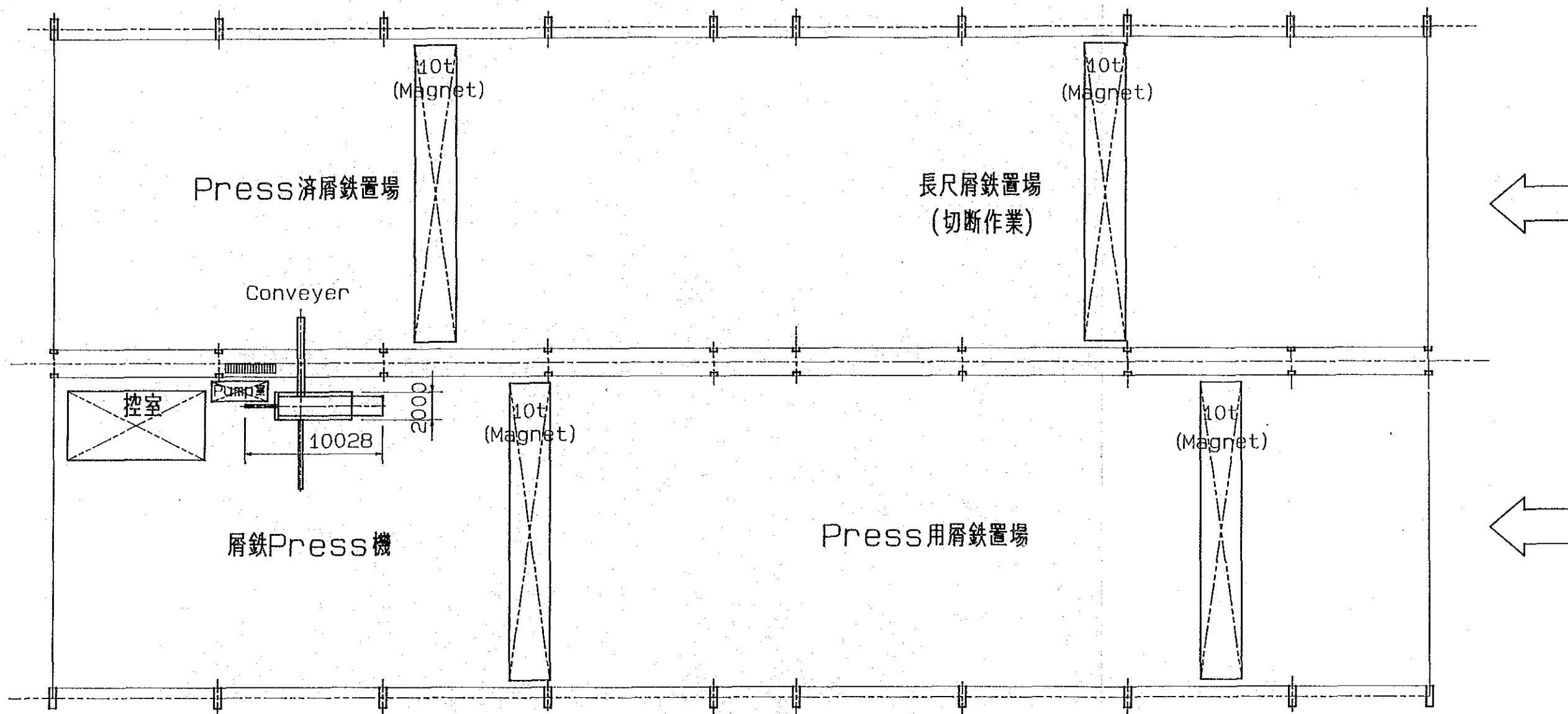


图-18 屑鉄处理工場

主な設備仕様は以下の如くである。

表-17 屑鉄Press機の仕様例

投入Box寸法 (mm)	1400 (W) × 900 (H) × 2500 (L)
成型品寸法 (mm)	500 (W) × 500 (H) × a:任意 (L)
成型品単重 (Kg)	約300Kg
Cycle time	約95秒
主Cylinder	
-能力	200t
-圧力	240Kg/cm ²
-Ram径	φ330 × φ280mm
-Stroke	2500mm
横押Cylinder	
-能力	150t
-圧力	240Kg/cm ²
-Ram径	φ285 × φ220mm
-Stroke	2000mm
上蓋Cylinder	
-能力	65t
-圧力	240Kg/cm ²
-Ram径	φ190 × φ140mm
-Stroke	1900mm
扉Cylinder	
-能力	50t
-圧力	240Kg/cm ²
-Ram径	φ165 × φ110mm
-Stroke	600mm
作動油量	1700 litre

(b) 屑鉄切断機

屑鉄の切断方法としては Gasによる方法と剪断方法が有る。参考までに屑鉄切断設備の主な仕様の一例を示すが、この方法は設備費が高額である上に切断すべき材料を切断機まで運ぶ必要があり、物流上にも難点がある。利点としては Gas での切断の難しい高合金鋼の切断が容易に出来る上に切断減耗が少ないことにある。このためこの方法は高価な高合金鋼の切断に適した方法と云える。

表-18 屑鉄切断機の仕様例

材料投入Box寸法 (mm)	900 (W) × 800 (H) × 6000 (L)
刀巾開口寸法 (mm)	900 (W) × 400 (H)
刀 角	12°
切断Cylinder	
-能力	500t
-圧力	240Kg/cm ²
-Ram径	φ518 × φ464mm
-Stroke	700mm
押えCylinder	
-能力	200t
-圧力	240Kg/cm ²
-Ram径	φ231 × φ198mm
-Stroke	850mm
送り込み能力	500~1,000mm/min
切 断 性 能	3.5t
-丸棒	Max φ125mm
-鉄板	Max 70 (t) × 800 (W)
-角材	Max φ110mm
能 率	1.7t/H

南京第二鋼鐵廠の場合、溶製鋼種、使用屑鉄から考慮すると、Gas 溶断が得策と考えられる。

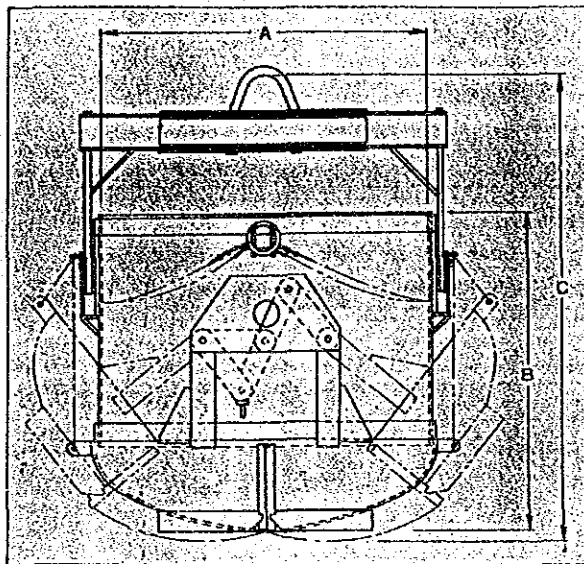
(5) 装入Bucket

現在、南京第二鋼鐵廠では装入 Bucket に Orange Peel 型を用いているが、これでは電弧炉に装入された屑鉄が山盛りとなった場合、これを平にするのに長時間を費やすこととなる。且つ、またこの作業は安全上からも好ましいものではなく作業性と安全性から再検討を要すべきである。

これらの問題を解決するために日本では“Clam Shell 型”の装入 Bucket が広く採用されており、この諸元値は表-19の如くである。

表-19 Clam Shell Bucketの寸法仕様

重量 (t)	容量 (m^3)	寸 法 (mm)		
		A	B	C
12.0	27	3,429	3,296	5,155
13.4	35	3,658	3,678	6,060
16.3	42	3,962	3,795	6,250
18.9	49	4,267	3,760	6,275
21.3	56	4,267	4,260	6,674
30.0	61	4,877	3,683	6,100



2.2 電弧炉製鋼

2.2.1 電弧炉操業技術の基本的考察

鉄鋼工場に於ける製鋼コストの比率は多大なものであり、生産能率の向上とあわせて各種変動費の改善は最も重要な課題である。表-20に現在の南京第二鋼鉄廠の実績と日本での25t電弧炉の実績例の比較を示す。

表-20 電弧炉の原単位と操業時間の比較

	南京第二鋼鐵廠	日本の例
電力 (Kwh/t)	642	419
電極 (Kg/t)	8.76	3.38
酸素 (dl/t)	40	27
Tap to tap (min)	270	98

日本の例の電弧炉仕様

公称能力: 25 t
 実能力: 27 t
 トランス容量: 12500KVA
 炉殻内径: 4115mm
 最大二次電圧: 350V

上記の如く、南京第二鋼鐵廠の電弧炉操業実績は日本の例に比較して低く、設備、操業面の改善が必要である。

(1) 電弧炉特性

電弧炉の熱効率を改善することは電力原単位の改善だけでなく、それに付随して電極、耐火材の原単位の改善に加えて操業時間 (Tap to tap) の短縮にもつながる。

電弧炉の最適送電条件を選択するためには、まずその電弧炉の特性を知る必要があり、図-19に一般的な電弧炉の電気特性図を示す。

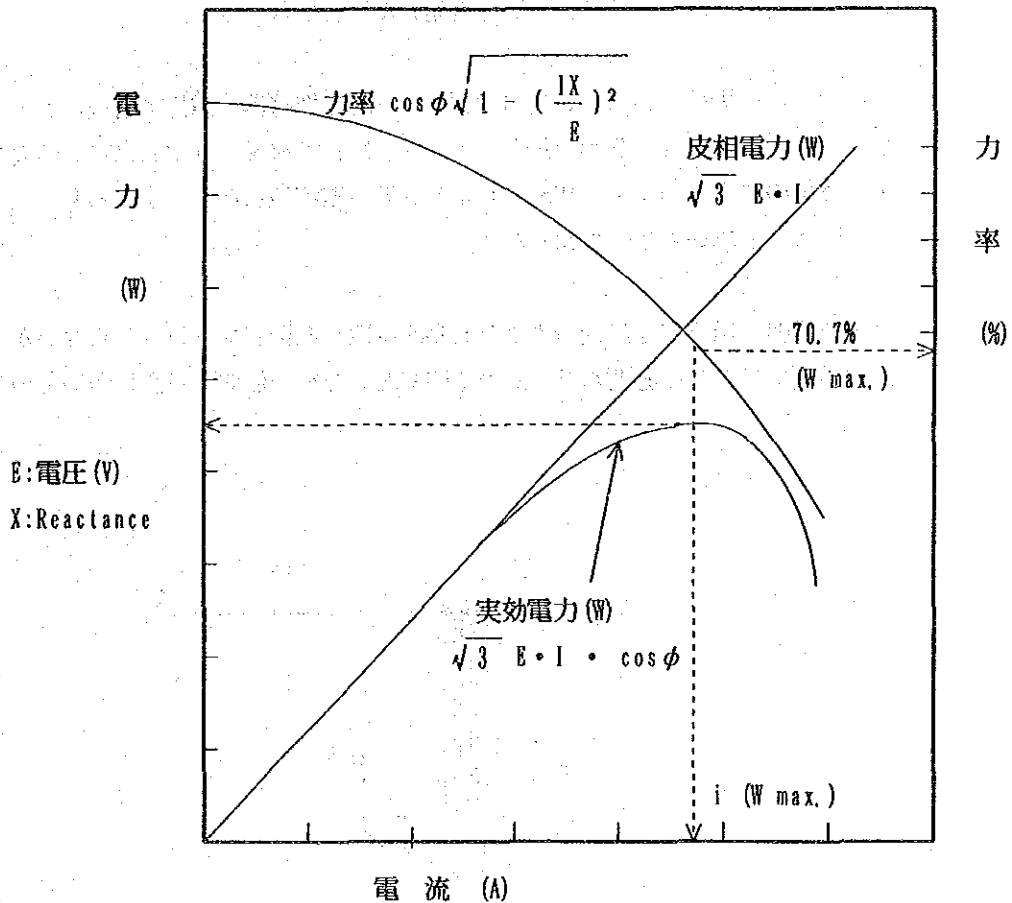


図-19 電弧炉の電気特性図

図-19の中の実効電力は次の式で示される。

$$W = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \cos \phi$$

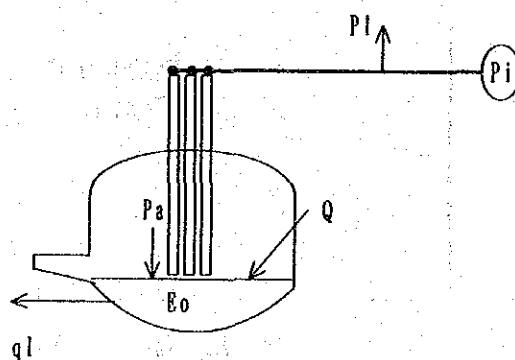
$$\cos \phi = \sqrt{1 - (IX/E)^2}$$

一定電圧E (V)において最大の出力を得るためには力率(Cos φ)は45°、すなわち力率70.7%の場合である。

しかしながら、これらの特性値は変圧器の出力側(二次側)であり、実操業では電極の先端 Arcの Energy 特性について考察しなければならない。

実際のArc 電力は、電弧炉設備の Busbar 支腕-把持器-電極で構成される回路の抵抗(R)と Reactance (X)が付加される。さらに、実操業では Reactanceの変動もあって、実際の最大出力はi (Wmax.)よりも低い電流値になる。すなわち、力率は70.7%よりも高いところで得られる。

実際の電弧炉操業では静的特性よりも動的特性を把握しなければならないが、南京第二鋼鉄廠では計算に必要な Data が不明であるため一般的な概念についてのみ述べる。



- | | | |
|----------------|-------------------|----------|
| Pi: 二次側電力 | Pa: Arc 電力 | Pl: 導体損失 |
| Q: 電力以外のEnergy | qi: 炉体からのEnergy損失 | |
| Eo: 溶鋼顕熱 | Pl: 導体からのEnergy損失 | |

上図における熱の収支には次の関係がある。

$$E_0 = P_i \cdot t + Q - (P_l + q_l) \cdot t$$

ここで理論的な溶解時間(t) および電力原単位(W/t) は次の式で表せられる。

$$t = \frac{E_0 - Q}{P_i - P_l} = \frac{E_0 - Q}{P_a - q_l}$$

$$W = \frac{P_i \cdot t}{M} = \frac{E_0 - Q}{M} \cdot \frac{P_l}{P_a - q_l} \quad M: \text{溶鋼量}$$

$$P_i = P_a + P_l$$

$$P_l = 3I^2 r_0$$

$$P_i = \sqrt{3} I E \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{IX}{E/\sqrt{3}}\right)^2}$$

$$\chi_0 = f(i) \cdot X$$

$$f(i) = \frac{d}{(l/i_0)^2} + (1 - d)$$

χ_0 : 短絡Reactance

X : Reactance

d : Scrap 係数 ($d \approx 0.1$)

r_0 : 短絡抵抗

$$t = \frac{E_0 - Q}{\sqrt{3} \cdot I \cdot E \cdot \sqrt{1 - \frac{f(i) \chi_0^2 \cdot I^2 - 3I^2 r_0 - q_l}{E/\sqrt{3}}}}$$

$$W = \frac{M \cdot \frac{1}{(E_0 - Q)} \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot E \cdot \sqrt{1 - \frac{f(i) \chi_0^2 \cdot I^2 - 3I^2 r_0 - q_l}{E/\sqrt{3}}}}{\sqrt{3} \cdot I \cdot E \cdot \sqrt{1 - \frac{f(i) \chi_0^2 \cdot I^2 - 3I^2 r_0 - q_l}{E/\sqrt{3}}}}$$

図-20 はこの式を概念的に示したものである。

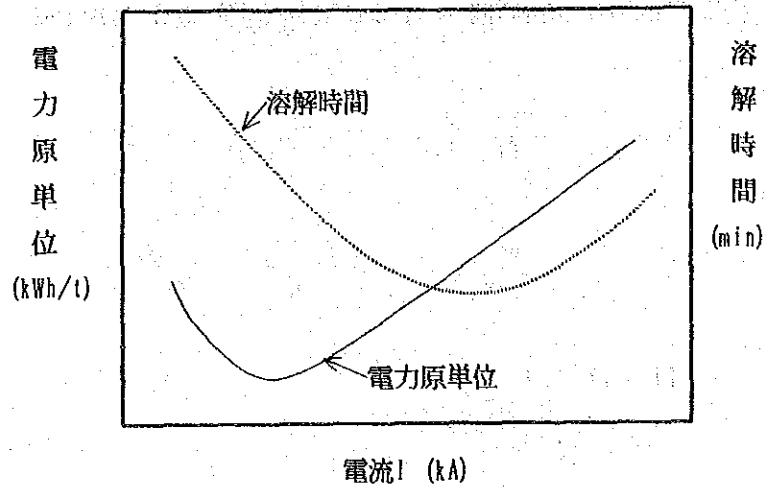


図-20 電力原単位と溶解時間に対する電流の関係

導体からの熱損失はJouleの法則に従って、

$$\Delta H = k \cdot I^2 R$$

で示され、導体からのEnergy損失は電流(I)の二乗に比例し、電流の増大は電力原単位を悪化させ、また、電極では電流の増加に伴って赤熱され表面酸化によって電極原単位も悪化させる。

以上の観点から、電力原単位および電極原単位の低減に主眼をおいた操業方法としては、高電圧・低電流操業が望ましい。

(2) 酸素富加操業

電力原単位の低減と Tap to tap 時間の短縮の手段としては、前述の送電条件の改善のほかに、Qの増大、すなわち、酸素富加操業が有効である。

溶鋼中に酸素を吹込むことによる酸化熱により、溶鋼の昇温を図るものである。図-2.1には酸素の使用量と電力原単位の関係を示した。

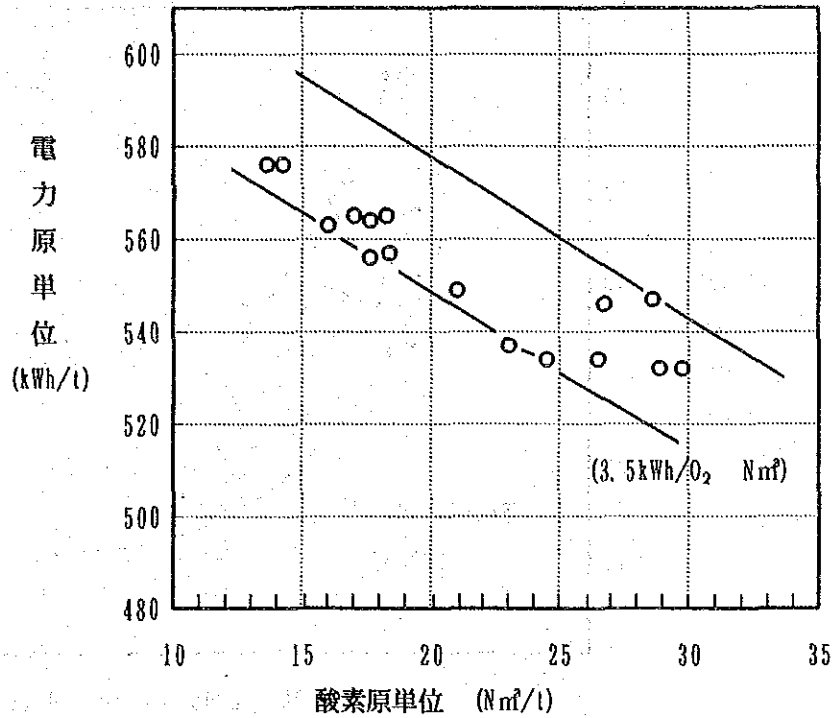


図-21 電力原単位と酸素原単位の関係

溶鋼中に酸素を吹込むことによって、[C] およびFeを酸化燃焼させ、その発熱量により電力原単位の低減を図るものである。

図-21のように1Nm³/lの酸素吹込みによって約3.5kWh/lの電力原単位の低下が達せられる。しかし、吹込み酸素量が過大の場合はSlag中の (FeO) の増加によって溶解歩留が低下する。

図-22にはSlag中の (FeO) と溶鋼中の [C] 量の関係を示した。これによると溶鋼中の [C] 量が0.10% 以下になるとSlag中の (FeO) は極端に増加し、溶解歩留を低下されることが判る。

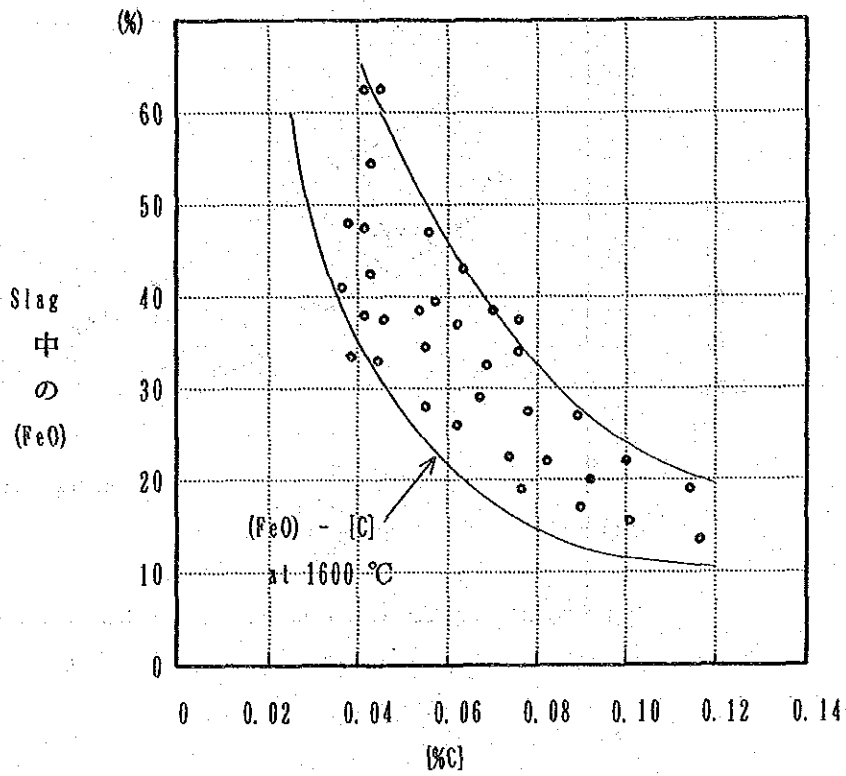


図-22 Slag中の(FeO) と溶鋼中の[C] の関係

このため、酸素吹込み時の [%C] の限界は歩留を悪化させないためには 0.10% 以上にすべきである。

(3) Carbon Injection

先に述べたように、高電圧・低電流送電は導体損失と電極原単位低減の有効な手段であるが、Long Arc 化によって Arc が露出し、輻射熱が炉壁を通して外部に放出されたり、炉壁煉瓦の損傷にもつながる。

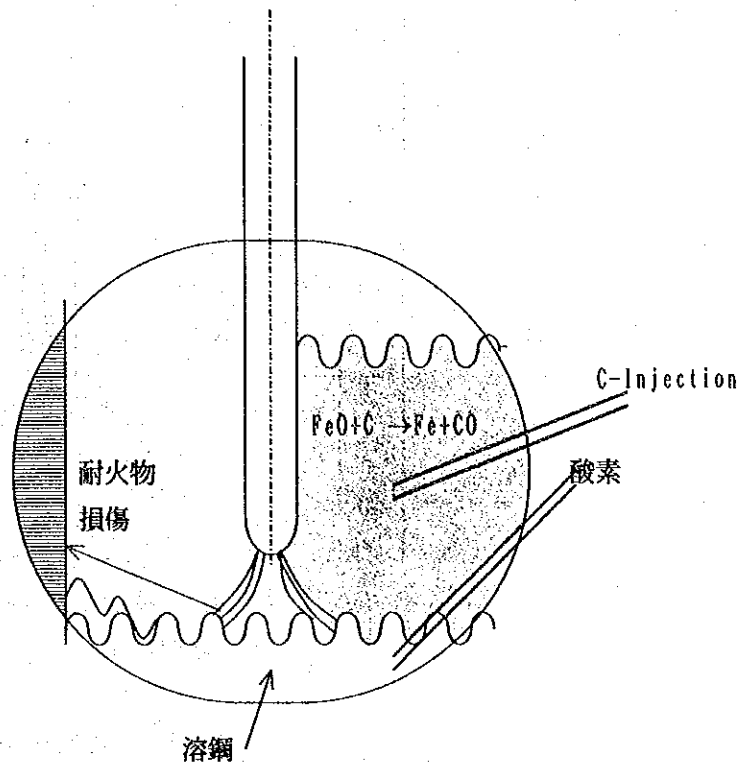


図-23 C-Injection の概念図

このような Long Arc 操業による欠点を補うために、原料の溶解後の湯面平滑期に Slag と溶鋼の界面に C-Powder Injection を行う方法がある。(FeO) と吹き込まれた C-Powder とが反応して CO Gas の気泡が多量に発生する。この泡立った Slag によって Arc は完全に覆われるため Arc 熱は効果的に溶鋼へ伝達される。

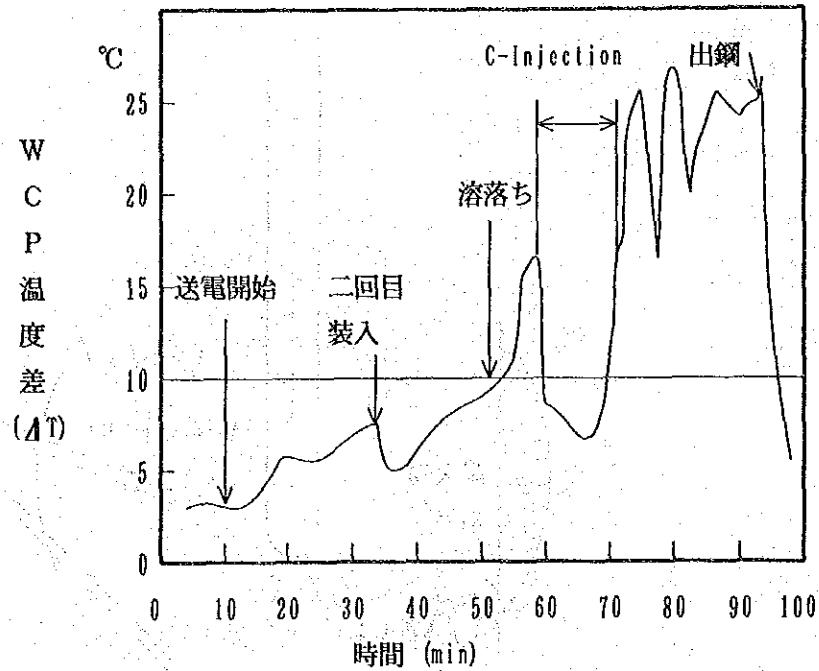


図-24 WCPの水温差の変化

図-24はWCP (Water Cooled Panel) の入口温度と出口温度の差の変化を示しているがC-Injection によって、水温は10°C下がっている。
 これは、先に述べたように湯面平滑期に露出していた Arcから炉壁に放散していた熱は、C-Injectionによって生じた気泡 Slag によって Arcが覆われるため、熱放散が防止されていることを示している。日本の経験では、湯面平滑期の熱効率が42%程度であったものが、C-Injectionを採用することにより72% まで向上した。

C-Injectionは熱効率の改善と炉壁耐火物の溶損防止に役立つだけでなく、酸素富加操業によって増加した Slag 中の (FeO) を減少させる効果もあり、溶鋼歩留の改善の面からも現在の製鋼法の中では最も優れたProcess の一つである。

2.2.2 南京第二鋼鉄廠の電弧炉操業についての考察

南京第二鋼鉄廠の電弧炉設備諸元値は以下の如くである。

表-21 電弧炉の設備及び操業諸元

項 目		製 鋼 工 場		
Arc 炉 No.		1	2	3
Maker		自家製	自家製	長春電炉廠
設置年月		1975年12月	1979年12月	1988年12月
能力 (t/Heat)	公 称	5	5	20
	実 績	12	12	25
変圧器容量 (MVA)		3	3	9
一次電圧 (kV)		6	6	35
二次電圧 (V)		104-220	104-220	140-300
二次電流 (kA)		10	10	17.34
炉設内径 (mm)		3560	3560	4200
電極径 (mm)		300	300	400
変圧器容量/装入 t (MVA/t)		229	229	330

現在3基の電弧炉を有しているが、うち2基は公称 5t (実績:12t) で残りの1基は公称 20t (実績:25t) である。

図-25に現有20t EAFの最近の一般的な操業 Patternと操業条件及び原単位を示す。27tの屑鉄は4回に別けて電弧炉に装入される。屑鉄は約120分かけて溶解され、溶解後 [C], [P] 等は30分間の酸化期に於て酸化除去される。酸化期までに使用されるO₂量は40 μ /tと多量であるにも拘わらず、電力原単位の低減に対する効果は少ない。図-21に示した様に酸素吹込みの電力原単位への影響は3.5 μ /t程度であるがこの値を確保する為には酸素の吹込み圧力は5kg/cm²以上確保する必要がある。もし酸素圧力が低過ぎる様な場合、酸素は電弧炉内の屑鉄の酸化のみ助長され、これに依って溶解歩留の低下をきたし、目的とする電力原単位の改善には繋らない。

酸化期が終了した後、電弧炉内の酸化 Slag は取除かれ、最終成分、温度調整のため還元期へと移行する。

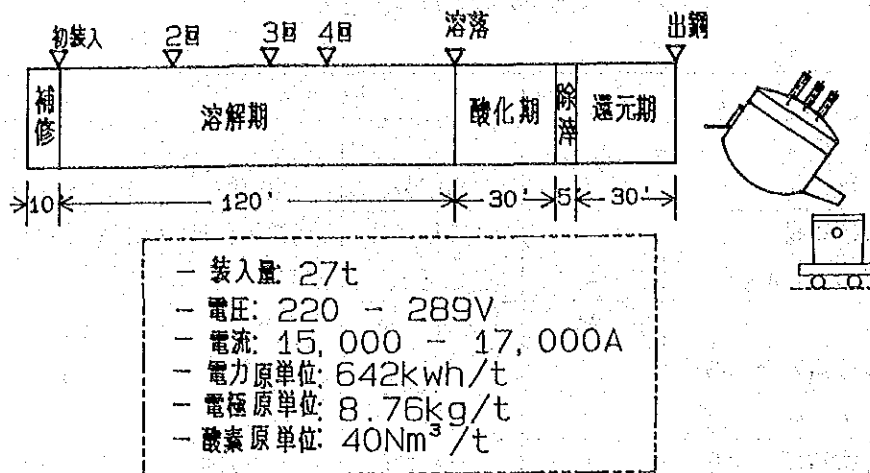


図-25 現状の操業Pattern

2.2.3 電弧炉操業方法の改善

(1) 送電条件の選択

前述の如く、電力と電極の原単位の低減を図るためには高電圧、低電流操業が望ましい。南京第二鋼鐵廠は電気系統についての詳細なDataを保有していないため、ここでは細部に亘っての検討は省略するが現状の変圧器容量と電弧炉設備だけから電圧と電流について考察する。

電弧炉の最大電圧は炉壁の受ける熱負荷によって決定される。熱負荷を示す指標 (Index) として耐火物損耗指数 (Rf) を用いるのが一般的である。

Rfは、

$$Rf = \frac{1/3 \times P \times E/\sqrt{3}}{L^2}$$

$$L = (1/2) \times (D - PDC - 0.8d)$$

ここで、

Rf : 耐火物損耗指数

P : 電力 (KW) (1/3は電極1本を示す。)

- E : 電圧 (V) (1/3は Arc電圧を示す。)
- L : Arc から炉壁までの距離 (cm)
- D : 電弧炉内径 (cm)
- PDC : 電極 Pitch Circle (cm)
- d : 電極径 (cm)

10～30t程度のWCPを持たない電弧炉の適正なRfは50～70であり、上記の式を基に南京第二鋼鉄廠のRfを計算すると以下の如くである。

	5 t電弧炉	20 t電弧炉
P	2,300	6,800
E	210	289
L	72.3	108.0
D	2,586	3,580
P C D	900	1,100
d	300	400

R f	18	32
-----	----	----

上記の計算結果で明らかな様に、現有の5t、20t電気の変圧器容量は炉体の諸元値に對比すると小さ過ぎと判断される。当面、現有変圧器を使用する事を前提にすると、送電中に出来る限り最大Tapを使用すべきである。

なお、将来的には、変圧器は炉体の諸元値に見合った容量に改造すべきであり、参考までに図-26に炉容と変圧器容量の関係を示す。

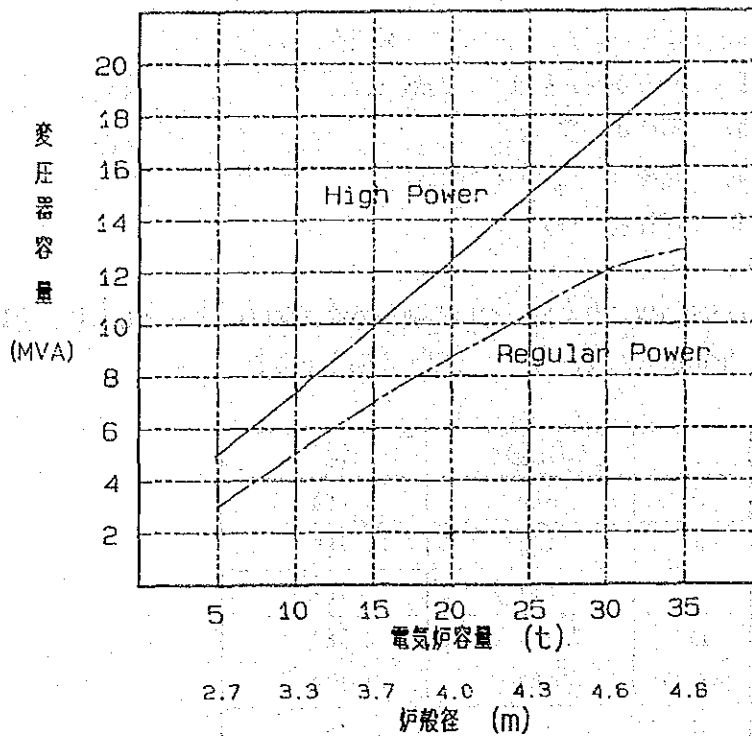


図-26 変圧器容量と電気炉容量の関係

High Power用の変圧器を導入する場合は炉壁へWCP (Water-Cooled Panel) の設置が必須の条件となる。しかし、小型炉に置いては勿ろ効果より水量管理や設備の保守が難しいためC-Injection法の導入を考慮して Semi-High Powerが得策と考える。この場合、変圧器の容量は12MVA程度が望ましい。

(2) 酸素の吹込み

送電の開始5分後、出滓扉の孔より lance Pipe を炉底部に差込み酸素の吹込みを行う。

Lance Pipeは1-inchのものを使用し、吹込み圧力は5kg/cm²以上で行う。所定の屑鉄を全量装入した後、約80%溶落ちた時点で Cuttingを実施し、酸素の吹込みは昇熱期も継続して行う。

(3) C- Injection

炉壁の屑鉄が完全に溶落ちた後C- Injection を開始する。

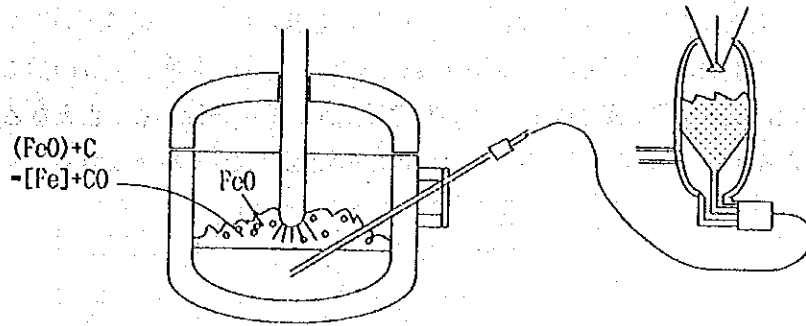


図-27 C-Injection

炭粉の吹込み量は溶解中の $[%C]$ によって制御し、溶解歩留を悪化させないために $[%C]$ が低過ぎない様留意しなければならない。

C-Injectionは成分調整期に於て加炭の目的にも用いられる。

近代化後の南京第二鋼鐵廠に推奨する製鋼 Processは図28の如くである。

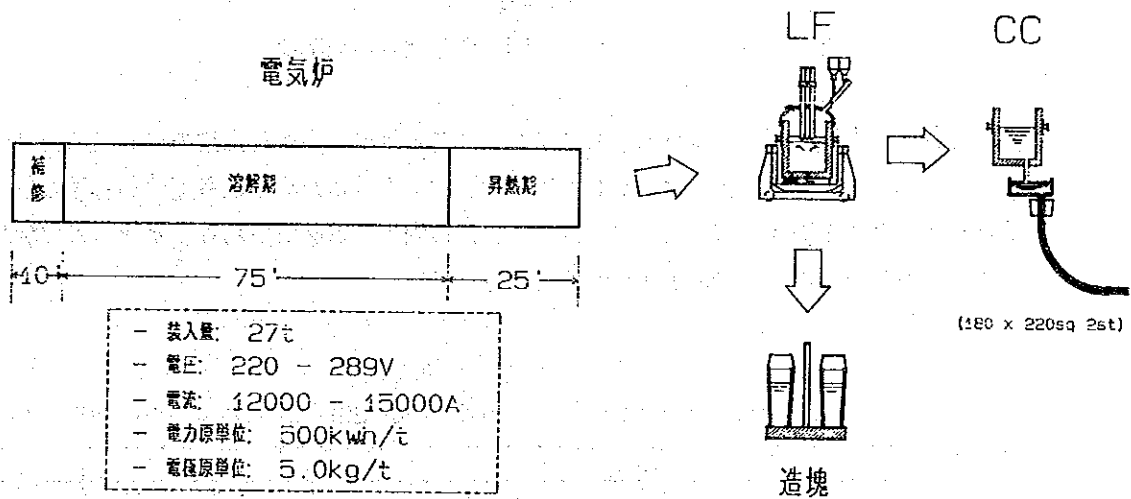


図-28 近代化後の製鋼 Process

電弧炉の主要な設備を現状の儘とし、新にLFを導入し、且つ電弧炉の操業方法を改善する事によって予測される電弧炉の能率 (Tap to tap time) は図-29の如くである。特にLFの導入によって従来約30分掛っていた還元期がLFへ移行することとなるが、設備の近代化以外に操業方法の改善による Tap to tap の短縮が大きく見込まれる。

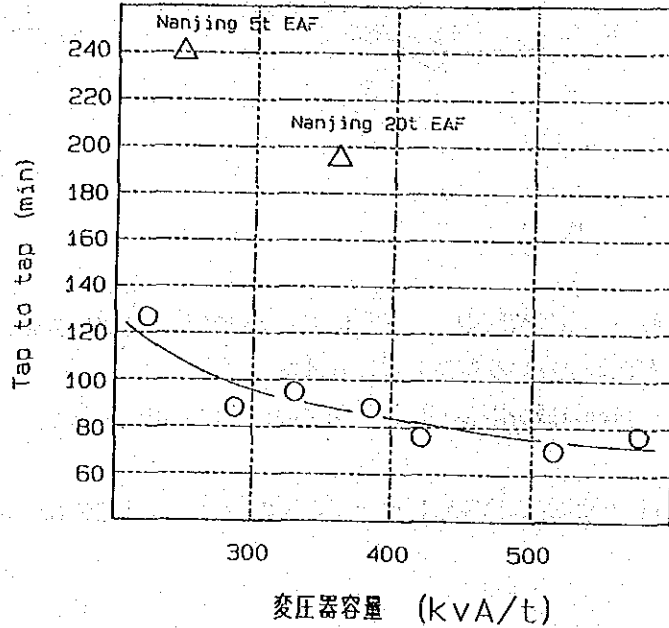


図-29 Tap to tap 時間と変圧器容量の関係

図-30には近代化後、すなはち、LFVおよびCC設備が完成した後のTime-Scheduleを示した。図にて明らかなように、CCの生産性の向上を計るためには多連鋳が必須の条件であり、この場合電弧炉の Tap to Tap は 110min 以内とする必要であり、本報告書で触れたように設備および操業面での改善が必要である。

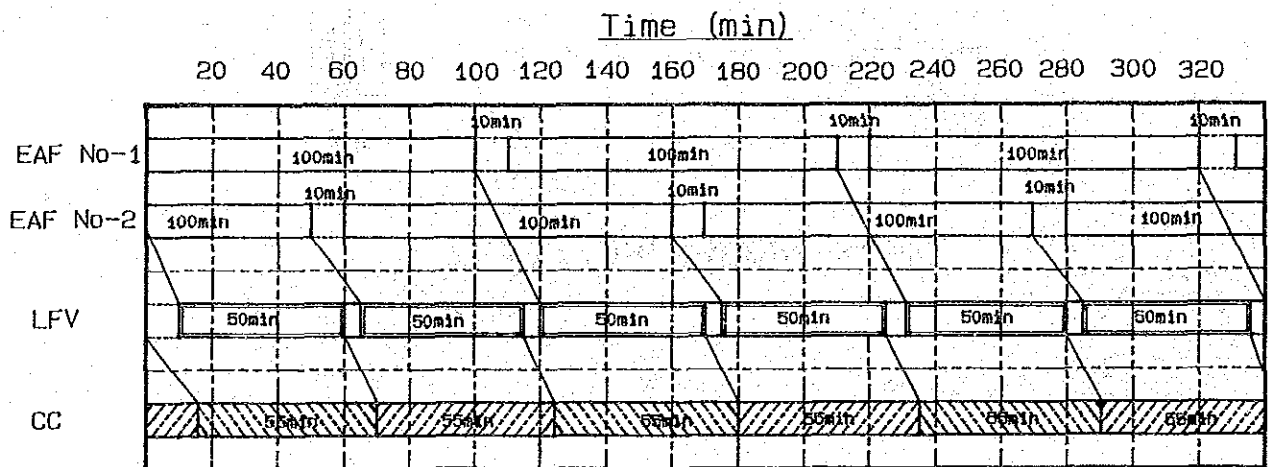


図-30 EAF-LFV-CCのTime Schedule

図-31は電力の原単位と電弧炉の容量の関係を示したものであるが、酸素吹込みの見直しやC-Injection法の採用等によって電力原単位は500Kwh/t程度まで低減可能と推察される。

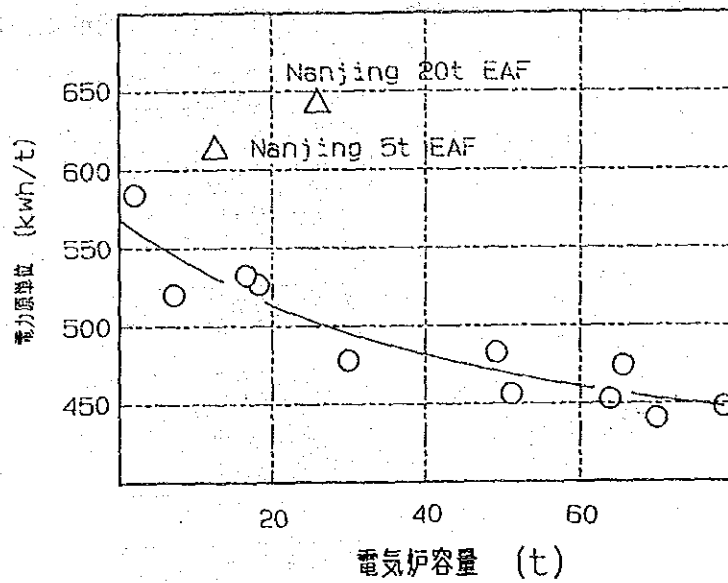


図-31 電力原単位と電弧炉容量の関係

2.2.4 電弧炉操業の自動化

最近、電弧炉作業の省力化、安定化及び省電力を目的に電算機を用いての自動運転が急速に
進歩して来ている。

日本に於いて開発された電弧炉自動操業 System の機能を以下に簡単に説明する。

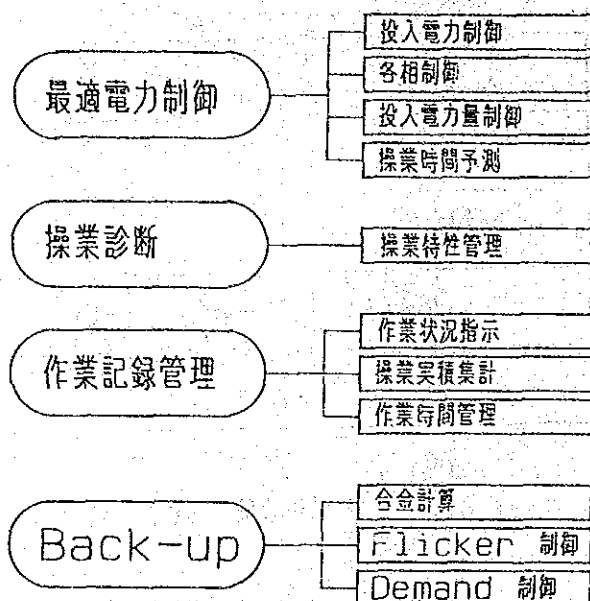


図-32 電弧炉の自動操業の機能

(1) 最適電力制御

電弧炉内の装入屑鉄の溶解の進捗状況をWCPの水温を通して把握し、その情報を電
算機へ送る事によって各電極の最適な送電条件を算出し、投入電力の制御を
Dynamic に行うものである。これ等の機能を通して、溶鋼の温度の予測や Time
Log の推測が行なわれる。

(2) 操業診断

各々の電弧炉の固有な特性値を計測し、得られたDataを基にその電弧炉に最適な
Operation Guidanceをする。これによって電力原単位は3~10%低減する。

(3) 作業記録管理

作業記録、作業時間、主要原料、副資材の集計を行い、原価管理、稼働率/生産性管
理を Timely に行う。

(4) Back-up

電弧炉に投入される合金や溶剤の計算を Cost Minimum の観点より LP 計算を行い、又、Flicker の制御や電力の Demand Control に対しても有効な機能を有している。

2.3 取鍋精練炉 (LF)

炉外精練設備としては、現在 RH、DH、誘導攪拌式の真空 LF 等が広く用いられている。この内、RH および DH については溶鋼の循環に大径の浸漬管を用いるものであり、通常 60t 以下の小型の取鍋には不向きな方式である。一方、誘導攪拌式の LF については電磁力を用いての攪拌であるために溶鋼のみが攪拌され Slag はほとんど攪拌されない。そのため、精練に最も重要な Slag-Metal 反応が不十分となり精練効率が低下する。この点を補ったのが日本にて開発された Gas 攪拌式の LF でありここでは Gas 攪拌式の LF についてのべる。

2.3.1 LF の概念と特徴

(1) 構造と設備の特色

LF は主に取鍋、加熱用炉蓋、Gas 攪拌と真空装置からなり全ての高級鋼の精練の為に欠すことの出来ないものである。更には取鍋の底部に装着される Sliding Gate は長時間の LF 処理後に溶鋼を鑄込むために必須の設備と云える。

取鍋用の Slag を取除くため取鍋の傾動装置は希には起重機を用いて行う場合もあるが、この場合その間起重機が拘束されるので、取鍋台車に傾動機能を持たせるのが一般的である。

真空設備は LF の設置目的によって設けない場合もあるが、特殊鋼や高級鋼の溶製のためには欠せない設備である。

図-33 には LF Process の基本的な機能を記述した。

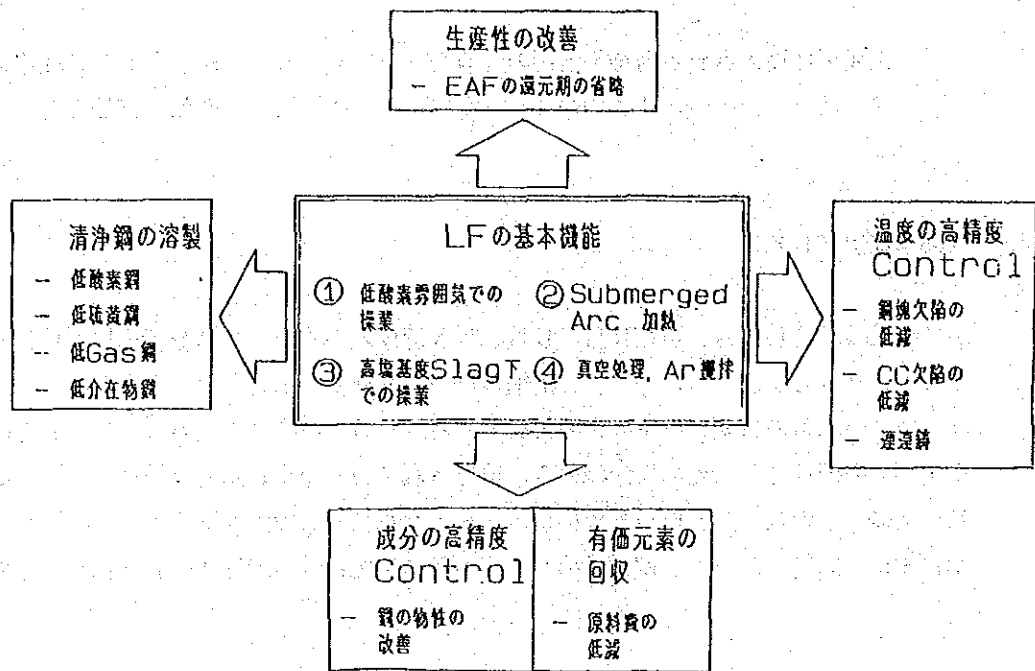


図-33 LFの基本機能

すなわち、LFの基本的な機能である ①低酸素雰囲気での操業 ②Submerged Arc の加熱 ③高塩基度 Slag 下での精練 ④Gas攪拌と真空処理によって

- 生産性の向上
- 成分の正確な Control
- 温度の正確な Control
- 清浄鋼の製造
- 有価元素の回収

が可能となる。

図-34はLF設備の概念図を示す。

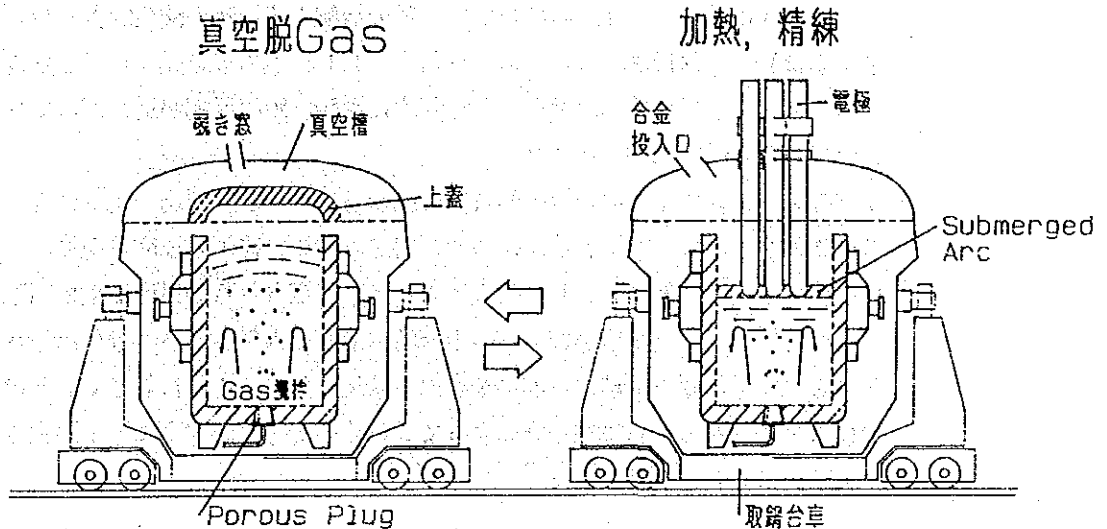


図-34 LF設備の概念図

取鍋中の溶鋼は常に Porous Plug を通して、Ar又はN₂ Gasによって攪拌され、これによって精練反応は迅速に且つ、強力に進行し、又溶鋼の組成、温度が均一化される。

取鍋中の雰囲気は十分に密閉された槽と下部からの不活性 Gasの吹込みによって無酸化状態が保たれ、溶鋼の二次酸化による介在物の生成を防ぐと同時に高合金鋼の精練に於いては高価な有価元素の歩留の向上にも寄与する。

加熱に於いて電圧の選定は Arcが Slag 中に浸漬する様を選択されるので、熱効率の改善と併せて取鍋 Lining が保護される。

(2) 精練

長い間、電弧炉製鋼法は高級鋼の溶製の為には優れた方法として発展して来た。しかしながら、十数年前より、従来の電弧炉の欠点を補い、特殊鋼の精練を効果的に行うために二次精練 Process が急速に発展して来たが、その中で特に LFは多機能を有する Process として着目され多くの鉄鋼工場に採用されて来た。

従来、電弧炉は“溶解期—酸化期—還元期”の工程を持ち、一連の作業を長引かせるばかりでなく、酸化期に於いて与えられた多量の酸素によって汚染された溶鋼中の酸化物を還元期では逆に取除く工程となる。その為、酸化期から還元期に移行する際、除滓作業が必要となるが、酸化 Slag を実際には完全に取除く事は至難である。

LFの導入によって、従来の電弧炉は屑鉄の溶解と不純物の酸化除去だけに限られ、還元期はLFに移行される。先に述べた様にLFは強力な還元 Slag と攪拌作用によって Slag - Metal 反応が進み、短時間内に脱酸、脱硫反応が進むだけでなく、化学成分や溶鋼の温度も均一化される。

化学成分の均質化は製品の機械的特性を高める。又、温度の均一化は鋼塊や鋼片の組織を改善するだけでなく、連続铸造では铸込み開始/終了の温度差を低減し、多連铸化を可能とする。他に、LFの導入によって、特筆される効果は従来の電弧炉法では還元期で精練された溶鋼が取鍋への出鋼時に溶鋼は大気を巻き込み酸化汚染された壺、それらは完全に浮上分離する前に铸型内へ铸込まれる。これに対してLFは強力な攪拌によって、あるいは真空精練によってこれらの酸化物が完全に浮上除去され後、铸型あるいはCCに铸込まれる。

(3) 加熱

加熱は従来の電弧炉と同じ様に3本の黒鉛の電極が用いられる。この方法の特徴は Arc が泡立った Slag に覆われ、次の効果をもたらす。

- 熱効率の改善
- Arc の安定
- Liningへの熱負荷の低減

溶鋼の温度は送電後、最初の6分間で5~10℃低下する。熱効率は送電条件や取鍋の余熱条件、取鍋の耐火材料の材質に影響される。しかしながら、20~30t LFの加熱期での昇熱効率は3~4℃/minであり、熱効率は約40~45%である。電力原単位はLFの処理方法によって異なるが、真空処理のない場合で30~50KWH/tである。電極の原単位は通常電力原単位の約1%である。(LFの電力原単が40KWH/tの場合、電極の原単位は約0.4Kg/t)

(a) 電圧と電流の選定

高電圧送電は高生産性をもたらすが、その電圧は耐火物損耗係数 (RI) によって制限される。50t 以下の比較的小型の L F ではこの値は70程度が適切である。同一の Tap電圧では電流が高い程、Short Arcとなるが、Long Arc では“Open Arc”となり、熱効率の低下と取鍋 Lining への悪影響をもたらす。その為、従来の電弧炉より若干高めの電流を用いるのが普通である。25~30t L F の通常の電圧、電流はそれぞれ 170~185V、10~13KAである。

(b) Gas 攪拌

L F の攪拌は2つの Gas流量比によって行なわれる。

高 Gas流量比；

溶剤や合金の添加後の迅速な溶融あるいは強力な脱硫反応を進めるために行われる。

低Gas 流量比；

通常の Arc加熱中の溶鋼攪拌に用いられる流量である。強すぎる Ar 流量は Arc を不安定にし、あるいは溶鋼中の C の Pick-upの原因となる場合がある。Gas の攪拌力は次式によって得られる。

$$P(W) = Q/22.4 \times RQ_1 (1 - Q_0/Q_1 + \ln \cdot P_1/P_2)$$

ここで、

Q : Gas 流量比 (Nm/s)

R : Gas 定数

Q₁ : 溶鋼温度

Q₀ : Gas 温度

P₁ : Nozzleの Gas圧力 (N/m²)

P₂ : 溶鋼表面の圧力 (N/m²)

攪拌時の Gas攪拌力は 100~150w/tであり、通電時ではこの値は20~40w/tである。

2.3.2 取鍋耐火材

攪拌しながらの長時間のLF精練は取鍋耐火材へ負荷を与える。LF操業 Cost 中、耐火材料費は約70%を占るので耐火材の選択は極めて重要である。

(1) Working Lining

図-35は南京第二鋼鉄廠に対し、推薦するLF用取鍋の煉瓦張りの図である。Slag Lineは長時間の精練によって最も浸蝕され易い部分であり、MgO-黒鉛質の煉瓦が有効である。

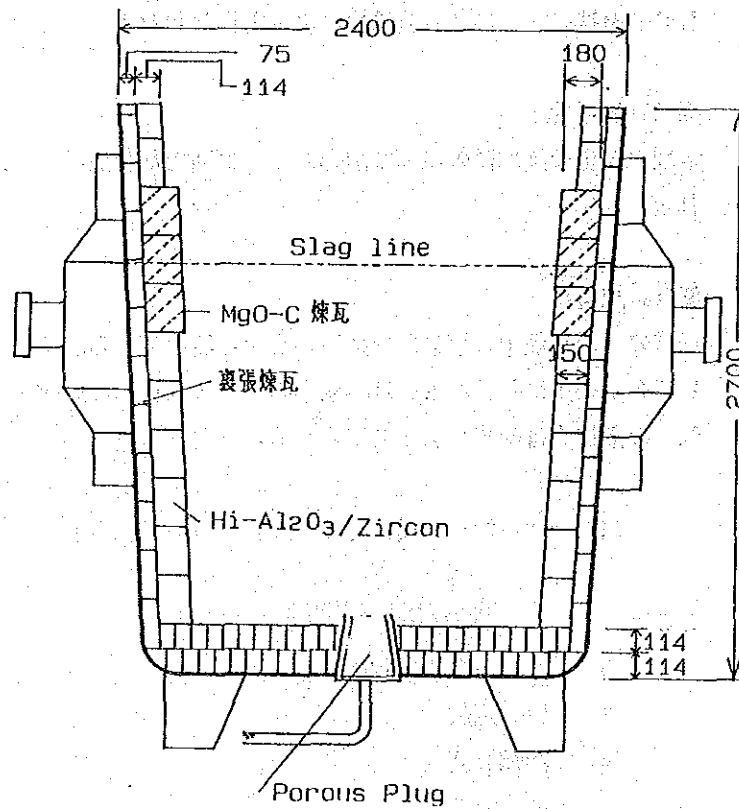


図-35 取鍋煉瓦施工図

湯当り部や鍋底部は出鋼時の溶鋼の衝撃や対流による損耗に耐えられる高高比重のHi-Almina 煉瓦か Zircon 質煉瓦が一般的に使用されている。

(2) Back-up Lining (裏張煉瓦)

Back-up Lining には次の2つの重要な目的を適えるものでなければならない。

(A) 断熱性

Back-up Linig として使用される耐火材の最も重要な点は溶鋼の保温性であり、その為に裏張煉瓦としては高断熱煉瓦が使用される。使用される煉瓦は一般的には Chamotte 系の耐火材である。

(B) 溶鋼の流出防止

裏張煉瓦の次の重要な点は Working lining からの湯洩れの防止である。その為にはある程度の耐火性を有し、また使用される Mortar も十分な耐火性と緻密性がなければならない。又、煉瓦の施行に当っては目地部は Working 煉瓦と裏張煉瓦がずれる様、配慮する必要がある。

LF 用煉瓦とし、用いられている煉瓦材質の一例を下表に示す。

表-22 LF 用取鍋の化学組成

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	黒鉛	Zr ₂ O ₃
Slag line	0.30	0.70	84.30	0.70	0.40	13.60	—
壁	82.70	14.19	0.14	0.19	0.97		
底	14.25	28.90	—	—	0.98	—	54.15
裏張	19.00	80.00	—	—	—	—	—

2.3.3 Pourous Plug

Pourous plug は LF の心臓部に相当し、操業中にこれが閉塞することのない様に配慮することが必要である。溶鋼の適切な攪拌を維持するためには低圧力の攪拌 Gas にて多量の流量が吹込める Pourous Plug を選択する必要がある。更には高温の溶鋼に接しても耐えられる様な高温強度を具備し、且つ、Slag の浸蝕に対しても耐えるものでなければならない。

表-23 には Pourous Plug と Sleeve 煉瓦の化学成分と物性値を示す。

表-23 Pourous plugとSleeve煉瓦の化学成分と物性値

		Pourous plug	Sleeve煉瓦
化学 成分	SiO ₂	2.2	12.0
	Al ₂ O ₃	91.5	87.0
	Fe ₂ O ₃	0.7	0.8
	Cr ₂ O ₃	3.0	
物性 値	嵩比重 (g/cm ³)	3.05	2.95
	見掛気孔率 (%)	22.0	14.2
	圧縮強度 (Kg/cm ²)	500	450

図-36には25~30t L.FのPourous plugの寸法と構造例を示す。

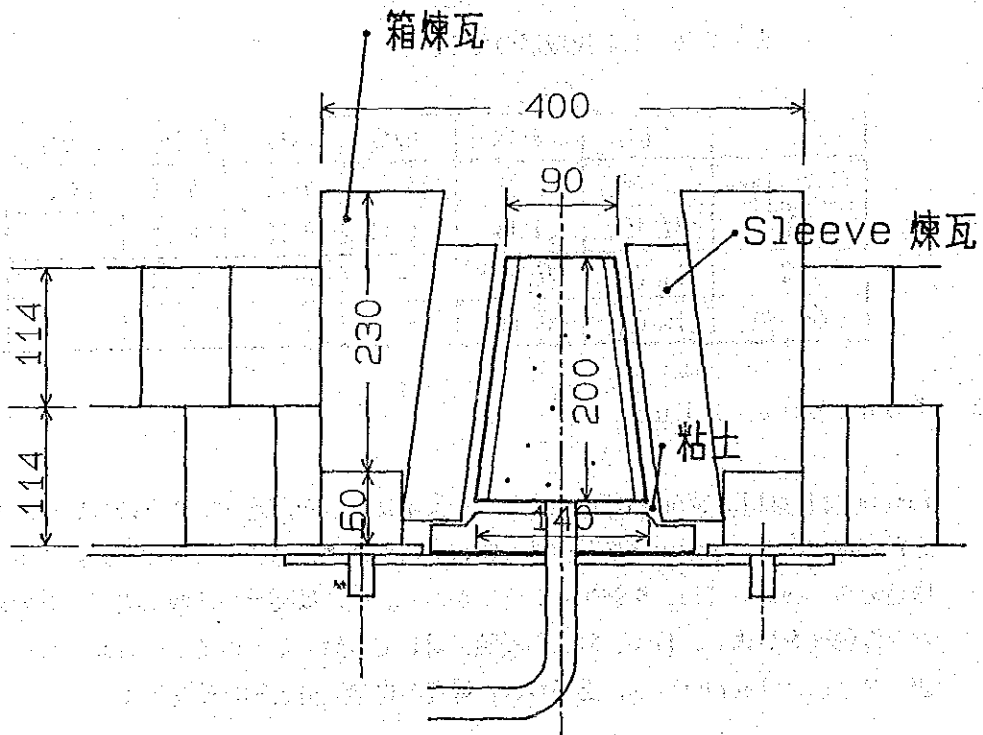


図-36 Pourous plug

2.3.4 鋳込み用Nozzle

LFの開発はSliding gateなくしては語ることが出来ない。Sliding gateには2つの形式があり、その一つは油圧Cylinder形式であり、他方は電動式のRotary形式である。Rotary式はその駆動装置が全て取鍋の底部に取付けられるため過大なものとなり、且つ、熱による故障も多い。一方、油圧Cylinder式のSliding gateは機構が簡素であり故障も少ない為に現在はSliding gateの主流となっている。LFに用いられるSliding gateの次の条件を満たしていなければならない。

- 取鍋底部から熱に耐えられること。
- 機構が単純で取扱いが簡単なこと。
- 耐用が長いこと。

圧着力の弱い、開閉の容易なSliding gateは逆に湯洩れの危険性があり、又、強すぎるとSliding gateは時には開閉不能を起すことがある。図-37に一般的に用いられている油圧Cylinder形式のSliding gateを示すが、通常用いられているSliding gateの圧着力は7000~8000 (Kg-cm) であり、油圧の駆動力は3500~4000Kgである。

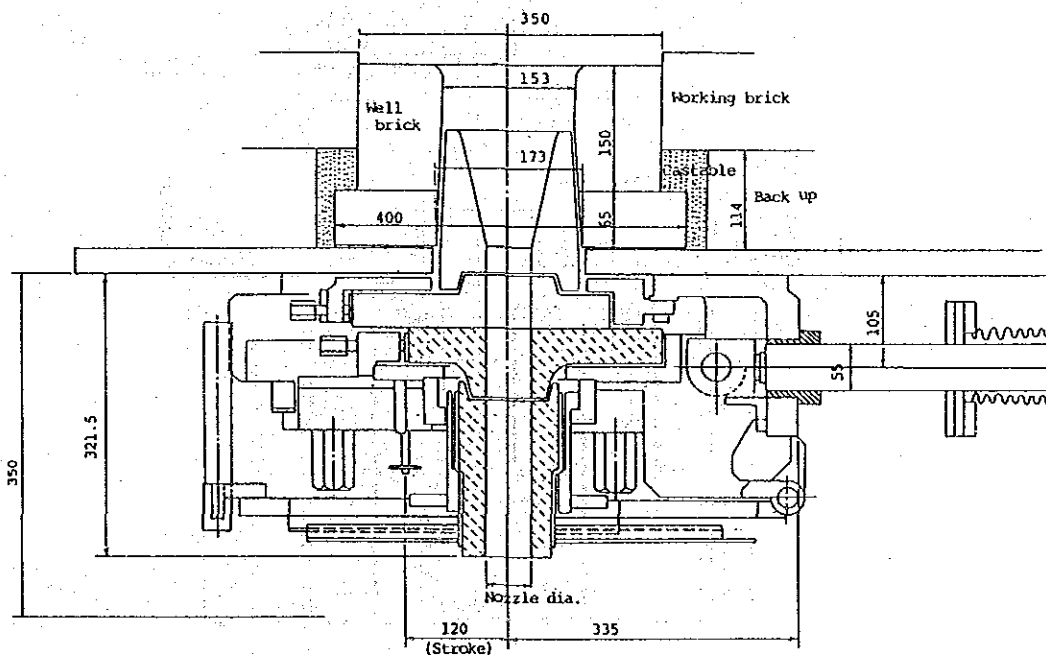


図-37 Sliding gate図

2.3.5 電極PCDと真空槽

電極の PCD (Pitch Circle Diameter) は取鍋耐火材の溶損の観点から考えると小さい方が望ましいが、しかし、この値が小さすぎると電氣的な Trouble の発生原因となる場合があり、充分な検討が必要である。図-38 に 25t LFV の真空槽の一例を示したがこの設備の PCD は 600mm に設計されている。

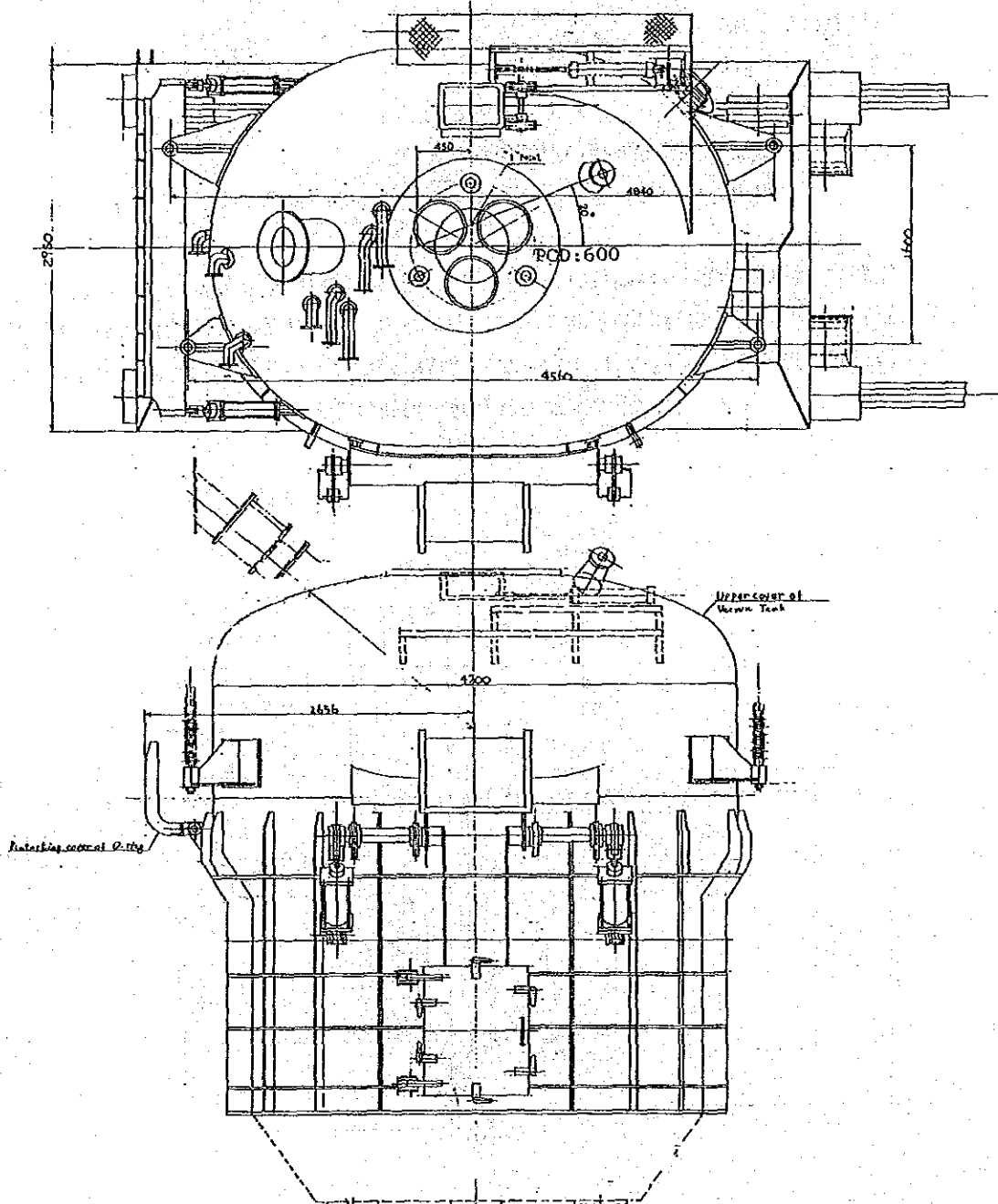


図-38 25t-LFVの真空槽

2.3.6 LFのLayout

LFの操業性を考慮してこの設備は20t 電弧炉2基の中間に設置する。2基のLFはRailで結び、中間に脱Gas station を設ける。操作室は脱Gas station の前面に置き、2基のLFと1基の脱Gas 設備を同一の操作室にて運転が可能な様にする。図-39にはLFのLayoutを示す。

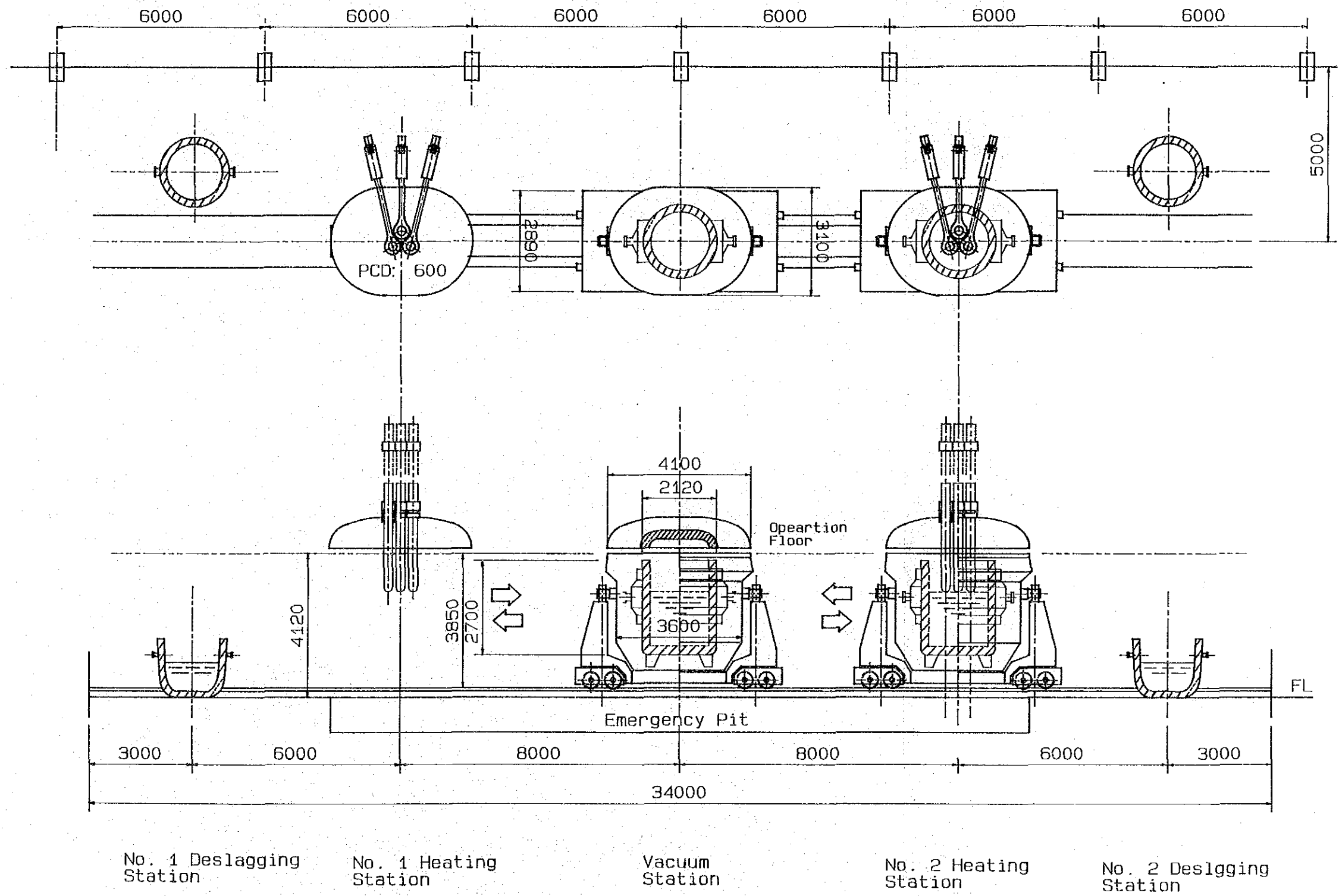


図-39 LF設備

2.3.7 LFVの操業

LFVの操業方法は溶製される鋼種によって異なるが、ここでは最も高品質が要求される軸受鋼に付いて説明する。図-40はその操業 Pattern の一例である。

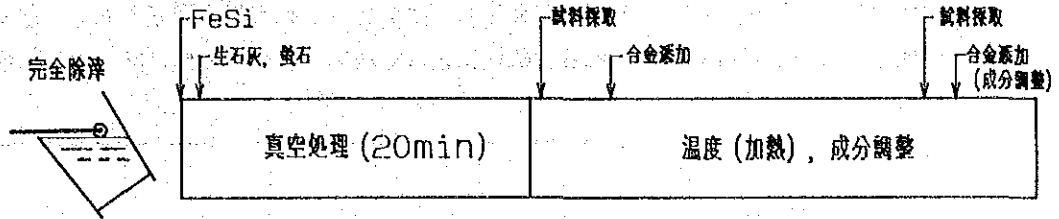


図-40 LFV操業Pattern

LFVの操業前には電弧炉のSlagは完全に取り除かなければならない。不十分な除滓の場合真空処理中に急激なSlag-Metal反応によって突沸が発生し、取鍋中のSlagや溶鋼が真空槽内に流出する危険がある。更に、品質の観点から見ると残存SlagはLFVの精練Slag中の SiO_2 を高めることとなる。

図-41には溶鋼中の酸素濃度とSlag中の SiO_2 の関係を示したが両者には強い相関性があり10PPM以下の酸素量を得るためには SiO_2 を5%程度まで下げなければならない。

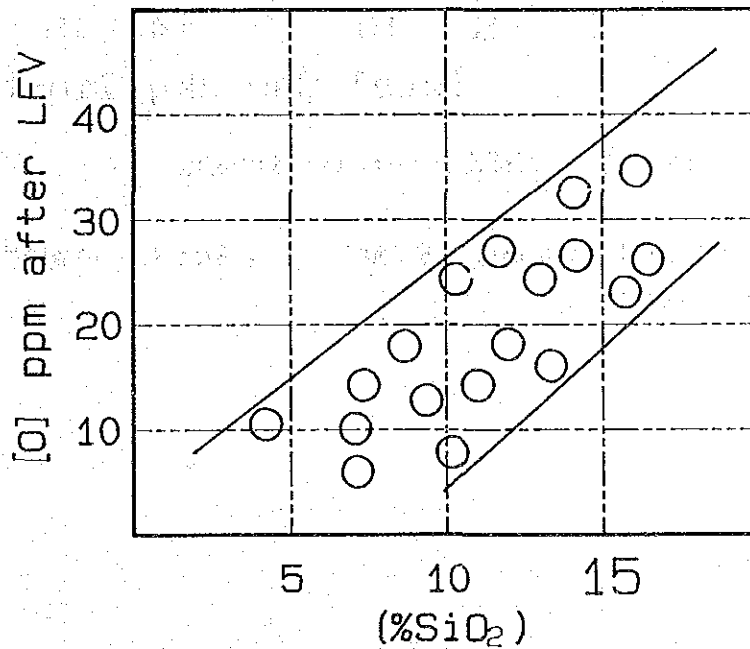


図-41 酸素濃度とSlag中の SiO_2 の関係

操業 Processとしては“真空処理-温度、成分調整”、“温度、成分調整-真空処理”その他、種々の組合わせによって操業されるが使用される石灰中の水分が高い場合は真空処理を初めに行ない真空処理後は出来る限り石灰の使用を避けるべきである。

まず、真空処理前に Si を 0.10 ~ 0.20% 程度添加する。この値が低すぎる場合、真空処理中に急激な CO 反応によって突沸が発生し、高すぎると脱水素・窒素不十分となる。添加される石灰量は必要とされる脱硫比によって決められ、その値は図-42の如くである。

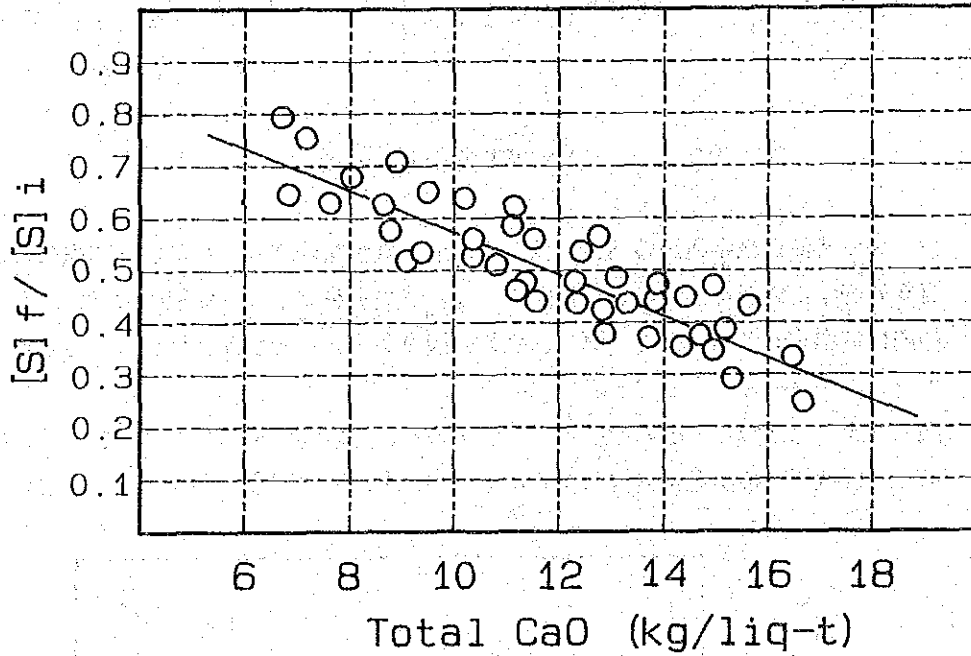


図-42 脱硫比と Total CaO 量の関係

ここで Total CaOは (CaO+CaF₂) を意味し、 CaF₂ 量は Slag の流動性によって決定され通常は約30% 程度である。