

表 2・4・14 各種精錬法の歩留と生産性

| 会 社 名     | プロセス     | メタル歩留 (%) | クロム歩留 (%) | 製鋼時間 (分) | 鋼備種考    |
|-----------|----------|-----------|-----------|----------|---------|
| 川 鉄       | 電 炉      | 99        | 95        | 200      | 304&430 |
|           | V O D    | 99        | 98        | 90       |         |
|           | 全        | 98        | 93        | 290      |         |
| 日新製鋼      | 電 炉      | >99       |           | 180      | 304&430 |
|           | 電 炉      | •         |           | 45       |         |
|           | V O D    | >99       |           | 55       |         |
|           | 全        | 98        | 94        | 280      |         |
| Allegheny | 電 炉      | 93        | 94        | 360      | 304     |
|           | ASEA-SKF | 98        | 98        | 150      |         |
|           | 全        | 91        | 93        | 510      |         |
| 新日鉄空蘭     | 転 炉      | •         | 97        | 50**     | 430&304 |
|           | R H      |           | 99        | 70       |         |
|           | 全        |           | 96        | 120      |         |
| Joslyn    | 電 炉      |           |           | 150      | 304&430 |
|           | A O D    | 98        | 97        | 90       |         |
|           | 全        |           |           | 240      |         |
| Spartan   | 電 炉      |           |           |          | 304&430 |
|           | A O D    | 96        | >98       |          |         |
|           | 全        | 88        |           |          |         |
| UCC 報告    | 電 炉      |           |           | 160      | 304     |
|           | A O D    |           |           | 107      |         |
|           | 全        | 95        | 95.8      | 280      |         |

• 印: 転炉法では, Cおよび Si 含有量の高い高炉溶銑を主原料とするので, 電炉法とのメタル歩留の比較は困難である。

\*\*印: RHOB 法は, 昭和49年1月のデータを使用。

(恵藤, 特殊鋼, 23, (1974), 6, p. 46)

表 2・4・15 VOD, RH-OB, AOD 法処理後の鋼中ガス成分

| process | V O D    | R H - O B | A O D |
|---------|----------|-----------|-------|
| ppm     |          |           |       |
| H       | ≤ 4      | 1 ~ 3     | 1 ~ 4 |
| N       | 80 ~ 120 | 30 ~ 120  | ≈ 186 |
| O       | 30 ~ 60  | 20 ~ 60   | ≈ 85  |

Al 脱酸が制限される場合が多いので表 2・4・15 中の O 濃度をもつて各法を直接比較することはできない。

一方, S 濃度は VOD, AOD 法においては電弧炉工程に加えてこれらの工程で, RH-OB 法では溶銑工程で, 積極的に脱硫を行なうことにより 0.003~0.005%の低水準が安定してえられる。また, 電弧炉法に比べて Sn, Sb, Pb, などの含有量が少ないことも報告されている。これらの不純物含有量の低減は製品において成形性, 切削性, 表面品質などの向上をもたらす。

## 2.5 製鋼技術上のトピックス

### 2.5.1 電気炉における還元鉄の利用

電気炉における還元鉄の利用については, 1967年に開催された第25回 AIME Electric Furnace Conference において, SIBAKIN により Stelco で行なわれた SL/RN 法による還元ペレットの電気炉への連続装入の実績が公表されて以来, 一躍注目を浴びるようになった。わが国でもこれに刺激されて電気炉での還元鉄の使用が試みられ昭和46年3月には, 大同製鋼知多工場においてその公開試験が行なわれた。現在, 海外で行なわれている工業的規模での還元鉄製造プロセスに直結した電気炉での還元鉄の利用状況をまとめて表 2・5・1 に示す。

とくに最近では全世界的な屑鉄の不足と価格の高騰という事態に直面し, 還元鉄への関心はますます高まりつつ

表 2・5・1 電気炉における実操業例

| 製 鋼 会 社    |                      | 還 元 鉄  |          | 電 気 炉    |       | 使 用 方 法      |        |
|------------|----------------------|--------|----------|----------|-------|--------------|--------|
| 社 名        | 所 在 地                | 製造法    | 設備能力     | 炉 容 量    | 変圧器容量 | 装 入 方 法      | 還元鉄装入率 |
| H S W      | Hamburger (W. G)     | Midrex | 40 万 t/年 | 85t × 2基 | 45MVA | 炉頂連装         | 75%    |
| Georgetown | Georgetown (U. S. A) | "      | "        | 65 × 3   | 35    | "            | 50     |
| Sidbec     | Contrecoeur (Canada) | "      | "        | 120 × 2  | 50    | "            | 70     |
| Oregon     | Portland (U. S. A)   | "      | "        | 65 × 1他  | 30    | "            | 不明     |
| Armco      | Houston ( " )        | Armco  | 30       | 160 × 4他 | 50    | 炉頂連装およびバッチ装入 | 25     |
| HyLSA      | Monterrey (Mexico)   | HyL    | 60       | 100 × 3他 | 40    | 炉頂連装およびバッチ装入 | 75     |
| "          | Puebla ( " )         | "      | 20       | 70 × 3   | 30    | バッチ装入        | 60     |
| TAMSA      | Veracruz ( " )       | "      | 17       | 50 × 3   | 不明    | 炉側連装         | 80     |
| USIBA      | Salvador (Brazil)    | "      | 20       | 100 × 1  | 42    | バッチ装入        | 70     |
| Newzealand | Glenbrook (N. Z)     | SL/RN  | 15       | 40 × 2   | 22.5  | 不明           | 不明     |
| Acos Finos | Piratini (Brazil)    | "      | 6        | 40 × 1他  | 15    | 炉頂連装         | 40     |

あるが、海外の還元鉄製造工場のほとんどがそれを自社消費しているため、大量の還元鉄の安定した入手はきわめて困難であるというのが現状である。このところ発展途上国における還元鉄製造プラント建設計画が新聞紙上をにぎわしているが、これらが実現するのはまだかなり先と見なければならぬ。

さて電気炉装入用還元鉄の具備すべき特性について述べてみよう。

(イ) 電気炉内に連続装入された還元鉄は、スラグ・メタル間の界面に存在するのが望ましいので、その effective density (パラフィンまたはプラスチックでコーティングした場合の密度) は、熔融スラグの密度 2.7 g/cc と溶鋼の密度 6.7 g/cc との中間がよいといわれている。

(ロ) 連続装入ということから、還元鉄の大きさは 1 ~ 10 cm が望ましい。

(ハ) 還元鉄の輸送あるいは貯蔵上の問題点は再酸化であつて、密度の大なるものほど再酸化されにくい。近年再酸化防止法として passivation treatment が開発された。

(ニ) 電気炉に連続装入された還元鉄は鋼浴中で活発な CO ボイリングを起こす必要があり、したがって還元鉄中には適量の C と O とが含まねばならない。通常金属化率 (還元鉄中の total Fe と metallic Fe との比) は 90 ~ 95 % であり、また C 含有量は 0.6 % 以上が必要であるといわれている。

(ホ)  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  などの脈石成分が多くなると電力原単位の増大を招くのでこれらはできるだけ低いのが望ましい。

還元鉄を電気炉に装入する場合には通常初装入屑鉄が溶解した後連続装入する方法がとられる。連続装入によるおもなメリットはつぎのとおりで、いずれも生産性の向上をねらっている。

(i) 溶解と精錬との同時進行

(ii) flat bath 中での通電によるアークの安定化

(iii) 溶落 C の調整による連続装入終了時点での精錬完了

連続装入システムとしては、電気炉上に設けられたホッパーから weighing belt feeder および vibrating feeder を経て装入用パイプを通り電気炉内に落下させる方式が広く採用されており、装入用パイプは 3 本または 1 本である。また炉側から投入する方式もある。

還元鉄の配合率についてはまちまちであるが、西ドイツの Hamburger Stahlwerke、メキシコの TAMSA などでは 75 ~ 80 % という高率配合を実施している。

初装入スクラップが溶解した後連続装入を開始するが、その開始時期については、早すぎるとスラグの上に堆積しているいわゆる island あるいは ice berg が形成されやすくなり、また遅すぎると炉壁耐火物の損傷を招くので、その瞬間の決定が重要である。また比較的長い連続装入の時間中炉壁はアークにさらされるので、これを保護するために foamy slag を作つて submerged arc とすることが肝要である。連続装入の速度については、鋼浴温度を一定に保つという観点のもとに投入電力とのバランス関係から決められており、通常 35 kg/min · MW 前後の投入電力当たり装入速度が採用されている。

前にも述べたように還元鉄を連続装入すると、溶解と精錬とが同時に進行する。溶落 C を調整することにより連続装入終了時点で C 含有量が所要の値になるようにすれば、著しい生産性の向上につながるわけであつて。Hamburger Stahlwerke では通常のスクラップ操業に比し 20 % の生産性の向上をみている。

一方、電力原単位については、還元鉄中の脈石成分の溶解エネルギー、これを中和するために添加する石灰の溶解エネルギー、および還元鉄中の酸化鉄が還元する際の吸熱などの悪化要因があり、通常のスクラップ操業よりも悪くなるのが通例である。

電気炉における還元鉄利用の将来については“2.2.3 アーク炉法、(4) 直面する課題と将来”の項を参照されたい。

## 2.5.2 連続製鋼法

### (1) 現在の連続製鋼法

高速反応の連続化のメリットはよく知られているところであり、とくに製鋼反応の連続化にあつてはそのメリットの中でも環境の改善と省力化 (ないしは無人数化) がその大なるものであろう。この考え方から鋼を連続的に製造しようとする努力が古くから続けられており、多くの特許や文献が発表されている。

主要鉄鋼国において技術的に可能であると発表されている連続製鋼法には平炉発展型、転炉発展型、電気炉型がある。平炉発展型は屑鉄などを燃料により連続溶解するもので具体的な発展は見られていないが、純酸素を使用する転炉発展型にはいろいろな実験データが発表されている。この転炉発展型連続製鋼法の反応炉の型式には連続攪拌タンク型反応器に属するフランスの IRSID 方式と、押し出し流れ型反応器 (厳密には混合拡散流反応器) に属する単段式のオーストラリアの WORCRA 方式、アメリカの Bethlehem Steel 方式、多槽多段の日本の金材技研 (NRIM) 方式、一槽多室式のソ連の MISiS 方式、スプレイ塔を用いるイギリスの BISRA 方式がおもなものである。いずれの方式の連続製鋼プロセスにしても解決すべき問題点は共通のものが多く、それぞれの工夫でこれら进行处理している。NRIM プロセスの項でこれらの問題点を述べその他は装置の特徴と現在までの経過を記すに止める。

#### (a) NRIM 式多段連続製鋼法 (日本)

樋型の単位炉を多段に連結した装置で、次のような要件を満たすべきものと考えた。(イ) 炉内の混合特性が可変なること (ロ) 計測部が容易にえられること (ハ) スラグ・メタルの分離が可能なこと (ニ) スラグ・メタルの向流操作が可能なこと (ホ) 造滓剤の滓化時間が短いこと (ヘ) 混合に伴う連続反応装置の反応効率の減小を最小限にとどめること (ト) 指定の反応を指定の場所で行なわしめること (チ) 反応の種類と温度により適材適所の耐火物を選べること、かつ炉の補修の容易なこと (リ) 異種鋼種の切替えが容易なことなどである。NRIM で定められた単位炉の型は (イ) から (ホ) までの理由によるものであり、全体の構成として多段を採用したのは (ヘ) から (リ) までの理由によるものである。装置の概略を図 2.5.1 に示す。基礎研究は昭和 39 年に開始され、

昭和43年に三段式のテストプラントが建設された。製鋼炉においては複数のランスが直列に配置され、酸素造滓剤同時供給法が採用されている。本プロセスは溶銑の供給と酸素および粉体造滓剤の供給の精度の維持に特に考慮が払われている。実験規模は約 8 t/hr で約 90 min の連続操業が数十回行なわれた。実験装置は第一段で脱珪、脱磷が主として行なわれ、第二段では脱炭が主として行なわれ、第三段で成分温度調整を予定する三段構成で、定常状態は非常に安定しており、とくに脱磷能力にすぐれ脱磷率 95%、製品で 0.005% P の値が再現性よくえられている。ダストも少なく、ダスト中への造滓剤成分の移行も極めて少ない。そして造滓剤の滓化がほとんど完全に行なわれることも本プロセスの特徴をなすものといえよう。

本研究の成果の一部を利用して廃車の連続処理プロセスが考案された。その概略を図 2.5.2 に示す。本プロセスは新技術開発事業団に依託され、当初はコンクリートバーを最終製品とする 15 t/hr 規模の開発研究が昭和48年より進行中である。

#### (b) WORCRA 連続製鋼法 (オーストラリア)

Conzinc Riotinto of Australia において WORNER が開発した方法である。製鋼炉は基本的には楕型で成分の均一を図るボウル部分とスラグ中の粒鉄分離を行なうプランチを持つている。その概略を図 2.5.3 に示す。スラグとメタルの向流操作により脱硫率、脱磷率の向上すること、スラグとメタルの分離の良好なることを特徴としている。昭和36年より研究が開始され、昭和40年に製鋼炉

の公表がなされた。オーストラリアの Cockle Creek で、実験規模 4 t/hr のプラントで約 7 hr の連続操業がなされ、脱硫率 60~85%、脱磷率 85~98%、鉄収率 99%、0.5% C の目標に対して  $\pm 0.1\%$  C の製品がえられたと報告している。

昭和45年に入つて電気炉による連続溶解と組み合わせた形の連続製鋼実験プラントの長時間操業を行うために、スウェーデンの Luleå の Metallurgical Research Plant で、銑鉄とウィーベルグ海綿鉄を原料として規模 7 t/hr の 30 hr 操業が10回行なわれた。装置の概略を図 2.5.4 に示す。

#### (c) Bethlehem Steel 式連続製鋼法 (アメリカ)

昭和44年に発表されたもので 5 t/hr の能力を有し、ランスの均分配列により炉内の混合特性に押し出し流れ要素を持たせたものである。将来の連続製鋼法の技術的可能性をチェックするに止どまつた感が強く、これ以上の開発を行なっていないようである。

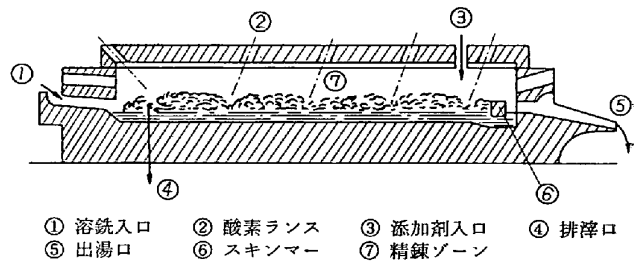


図 2.5.3 WORCRA 連続製鋼装置の概略図

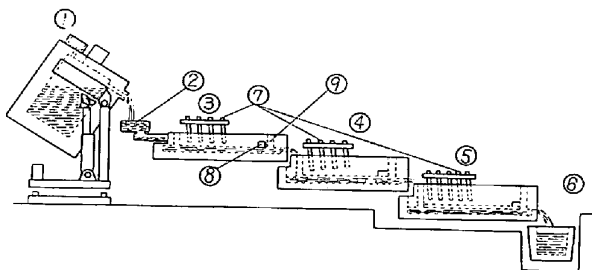


図 2.5.1 金材技術式連続製鋼装置の概略図

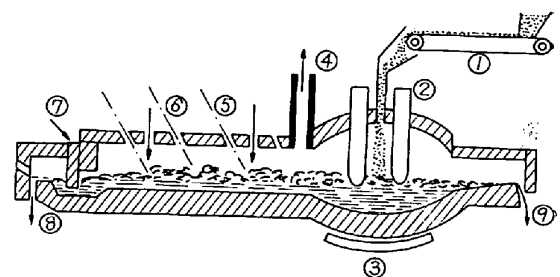


図 2.5.4 WORCRA 連続溶解装置の概略図

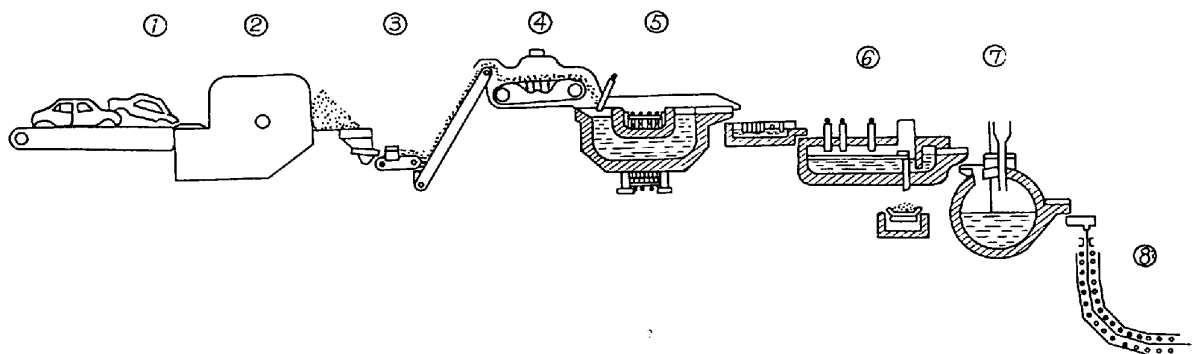


図 2.5.2 廃車連続処理プラントの概略図

## (d) MISiS 式連続製鋼法 (ソ連)

ソ連の方法は一槽多室型の連続製鋼炉で多段式に属するものであるが、各室は完全には分離されていない。規模 100 kg/hr の四室型装置による実験結果が発表されている。定常状態に達するまでに相当に時間を要するようであり 1.5~2 hr の定常状態で出口側の成分温度が安定していると述べている。これは多室効果によるものである。また向流操作による脱磷率は 97%, 脱硫率は 55% であった。最近 10 t/hr の実験設備を建設したと聞くとその詳細は不明である。

## (e) IRSID 式連続製鋼方法 (フランス)

本法は酸素-溶湯-スラグの三相間にエマルジョンを作らせて製鋼反応を効率的に行なうことを特徴にしたもので、酸素・造滓剤同時供給方式を採用したタンク型反応炉で連続製鋼を行なうものである。昭和39年より基礎研究が開始され、昭和40年に Maizières-les-Metz に 10 t/hr の基礎実験装置が設けられ、昭和43年に Hagondange に 20 t/hr の能力を持つ二段炉で最大 20 hr の連続操業が行なわれた。さらに昭和46年に同じ Hagondange で 30 t/hr の設備が建設されて 100 hr 以上の連続操業実験が行なわれ、全処理鋼量は 20,000 t に達したと報告されている。装置の概略を図 2.5.5 に示す。この装置で 1.8% P の高磷鉄を処理して 0.025% P 以下の鋼をえ、比較的安定した出湯成分をえている。しかし反応炉自体の安定性についてはかなり疑問があり、出湯成分の安定化のためには反応炉に比してかなり大容量の沈静槽、温度成分安定槽が大いに寄与しているものと考えられる。なお、本プロセスは、耐火物や計測技術の開発など装置

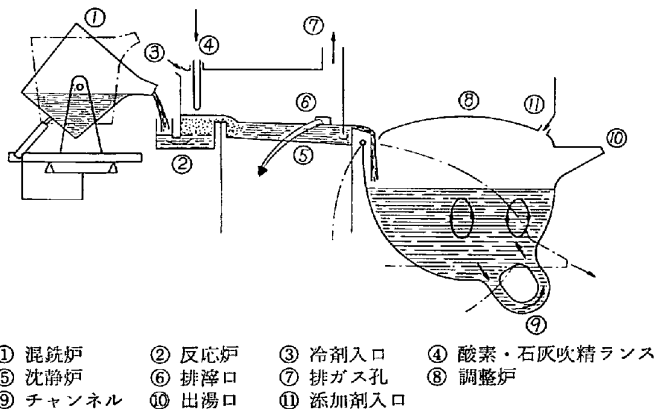


図 2.5.5 IRSID 連続製鋼装置の概略図

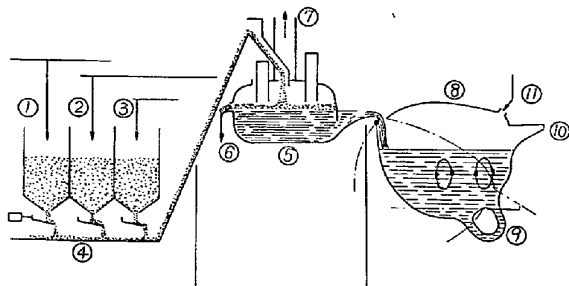


図 2.5.6 IRSID 連続溶解装置の概略図

画についてかなりのデータをえたと発表されている。

さらにアーク炉を用いて SL-RN, PUROFFER, MIDREX 製の予備還元ペレットやスクラップの小片を連続溶解し IRSID 炉で連続精錬するプロセスが考案され、5 t/hr の実験装置が Maizières-les-Metz に建設された。その概略を図 2.5.6 に示す。電極と耐火物の消耗が非常に少ないといわれるが詳しいデータは発表されていない。

## (f) BISRA 式連続製鋼法 (イギリス)

スプレイ塔方式によるもので、溶鉄を酸素ジェットによつて 1~2 mm の小滴にアトマイズし造滓剤を同時添加して瞬時に製鋼反応を終了せしめるものである。高炉よりの溶鉄の予備処理としての脱珪を目的として昭和33年に研究が開始されたが、昭和38年にこの方法を製鋼法として発展せしめるべく Sheffield 研究所で研究が始められた。昭和41年に Millom Hematite Ore and Iron Co. で 30 t/hr の装置で 30 min 操業し、昭和42年に Lancashire Steel Co. で 50~60 t/hr の規模の実験を行なつた。0.6~1.4% の目標炭素量に対して良精度の値をえており、脱磷についても 1% 程度の含有量に対して精錬可能な値として 0.02% 程度をえている。一連の現場実験は成分制御、耐火物、収率などの検討を行なつたものであるが、溶湯の粒径によつて反応速度が規制される点がスケールアップの際に問題を生じているようである。現在、現場実験は中止されている。

## (2) 連続製鋼法の実用化とその将来

連続製鋼法の今後の発展と実用化の予測は現段階では困難であり、これには各国における製鉄産業の動向が微妙に作用してゆくものと思われる。

第一に、高炉を前提にすると、わが国においては転炉技術の発達著しく、建設費、生産コスト、品質、無公害化、制御性、省力化などの点で連続製鋼法が転炉法に對しかなりの優位を示すのでなければ置換は困難と思われる。転炉の欠点を補う目的（たとえば予備脱硫、脱磷）に対しては、連続製鋼法が実用化される可能性はある。また欧州においては平炉の閉鎖後の代替として連続製鋼法を考へる風潮がある。第二に高炉以外のプロセスを前提にする場合、高炉の原料事情による溶鉄生産量の横ばい、鉄鋼の高品質化への要求、還元鉄生産の増大などを考えると、屑鉄、還元鉄を原料として電気炉（アーク炉、高周波炉、低周波炉）と連続製鋼炉とを結んだ型の実用化はかなりの具体性を持つてゐる。IRSID, WORCRA, NRIM の方向がその例である。また、具体的な例はまだ見られないが、高炉以外の溶鉄製造プロセスと連続製鋼法との組み合わせも可能であろう。

連続製鋼法の実用化に際してはそのメリットを十分に生かさなければならず、そのためには溶湯の流量制御、輸送装置、連続测温、連続成分分析などの周辺技術や生産システム開発の発達が切に望まれる。

## 2.5.3 新底吹転炉法

## (1) 概 況

1879年の発明以来トーマス転炉法は欧州における製鋼法の主流となつたが、鋼質については平炉鋼におよばないという悩みがあり、1930年の Maxhütte の実験に始

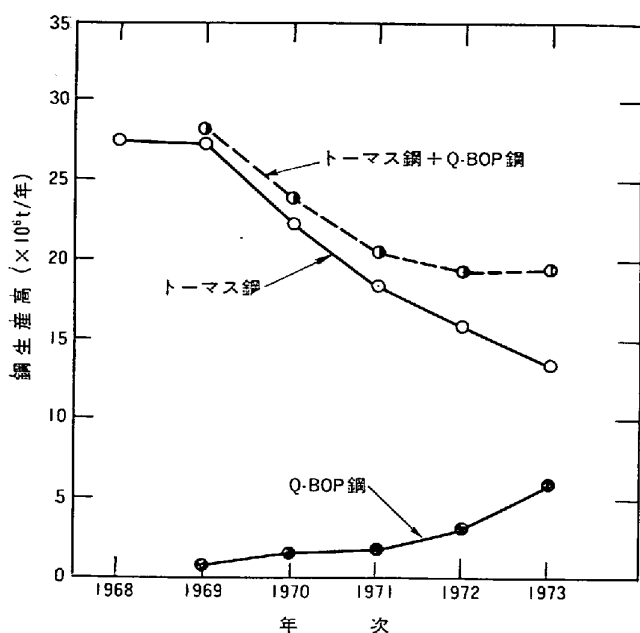


図 2-5-7 トーマス鋼と Q-BOP 鋼の生産高

まり、衝風に酸素を富加することによつて、これを解決しようという試みが30年代、40年代を通じて執拗に続けられた。しかし、いずれも空気に酸素を混合富加したため、羽口前の温度が上がりすぎて羽口の維持が困難であつた。したがつて大幅な酸素富加は不可能であつたし、酸素濃度を増すには炭酸ガス、水蒸気などの吸熱性冷却ガスを併用する必要があつたが、これらも混合使用したため、一部では実用化されたものの、広く採用されるには至らなかつた。50年代に入るとこの困難を回避し、酸素を上吹きすることによつて、製鋼用鉄の吹錬に成功した LD 法、粉末石灰を併用してトーマス鉄を処理する LD-AC 法が出現して、底吹きの特ーマス転炉法は死命を制せられるかに見え、その生産高も減り始めた。この減少傾向は70年代に入つても続いているが、1968年に新しい底吹転炉法 OBM 法(Q-BOP 法)の出現して以来、トーマス鋼に Q-BOP 鋼を加えた底吹転炉鋼の合計は図 2-5-7 のごとく1972年を底として下げ止まり、増加に転ずる気配を見せている。

## (2) 新底吹転炉法

底吹転炉に酸素を使う場合の問題点が吹込羽口の維持にあることは明らかで、この問題に解決の曙光を与えたのは、1965年にカナダのエア・リキッド社で行なわれた実験であつた。これは酸素を混合富加するという従来の考え方を捨て、酸素と冷却ガスとを分離し、吸熱性の冷却ガスによつて酸素を包みこんで吹き込み、酸素と耐火物との直接接触を避けるという方式であつた。この実験に着目した西ドイツの MAXHÜTTE は 1967年、トーマス転炉への適用試験を開始し、翌68年にはその実用化に成功して OBM 法と命名した。さらに1971年にはアメリカの US スチールが製鋼用鉄に対する適用性を試験確認し、Gary 工場に 200 t 転炉 3 基を建設して営業生産に入り、この方法を Q-BOP 法と名命した。これらの方法は図 2-5-8 のような構造の底吹転炉に冷却ガスとして炭化水素ガス(天然ガス、プロパンなど)を使い、炭化水

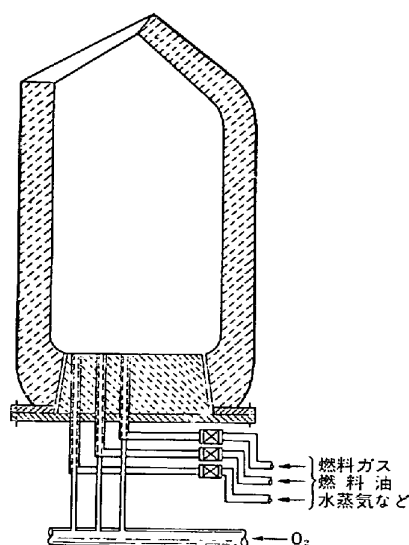


図 2-5-8 Q-BOP 転炉の構造

素ガスが溶湯に接触して、C と H とに分解するさいの多量の吸収熱を冷却に利用している。このほかフランスでは燃料油を使う類似の方法を LWS 法と命名し、実用に供している。

## (3) 上吹転炉法との比較

この新しい底吹転炉法の利点は種々挙げられているが、もつとも強調されているのは、底吹であるため長尺の水冷ランスが不要となり、建屋の高さを2/3にすることができ、従来のトーマス転炉設備、平炉建屋が利用できるといふ点である。また、吹錬が静かでダストが少ないので、燃焼集塵設備が簡略化されるともいわれているが、この点については、冷却ガスの分解による H<sub>2</sub> の混入によつて、難しい問題があるという反論もある。

スラグ中の FeO は C 0.10%までは5%にとどまり、その後も 17%以上にはならないので、上吹法の 8%、25%に比べて、金属分歩留が約2%向上するといわれている。上吹法と違ってホットスポットが下部にあるため、石灰は粉状とし酸素気流中に懸濁して吹きこんでいるが、スラグの同一 FeO レベルに対しては LD 法より脱磷がよいと報告されている。また脱硫も良好で、粉石灰の吹込みにより 2 min 以内で、0.032%を0.018%に下げたという例もある。図 2-5-9 はゲーリー工場の 200 t 炉について、吹止時の鋼中の P, S を示すものである。

屑鉄の配合割合については、当初約20%増量と報告されていたが、最近の報告では LD 法と同等と訂正されている。

冷却ガスを使うために懸念される鋼中の H<sub>2</sub> については、図 2-5-10 の結果から実用上問題なしとされている。また鋼中の N<sub>2</sub> についても問題なしと報告されている。

LD 法に対してもつとも不利と考えられるのは耐火物の寿命で、現在炉底 200~300 回、側壁 500~600 回といわれ、トーマス法よりは数等すぐれているが、LD 法にはおよばない。

## (4) 今後の展望

この新しい底吹転炉法の出現を促したもつとも強力な背景は欧州におけるトーマス転炉設備、米国における平

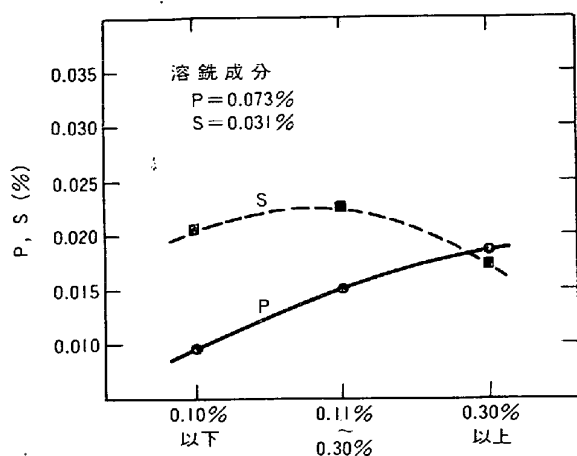
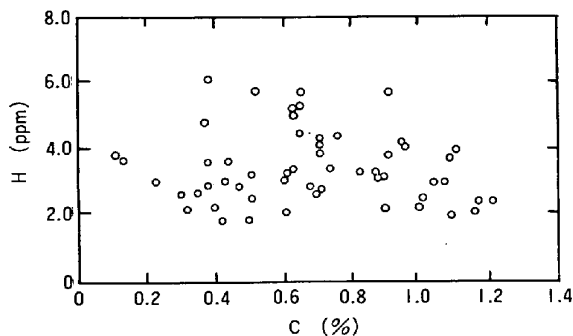


図 2-5-9 吹止時における鋼中の P, S %  
(U.S. Gary の 200 t 炉の例, 2 ヶ月の平均)

a) 吹 止 時



b) 注 入 時

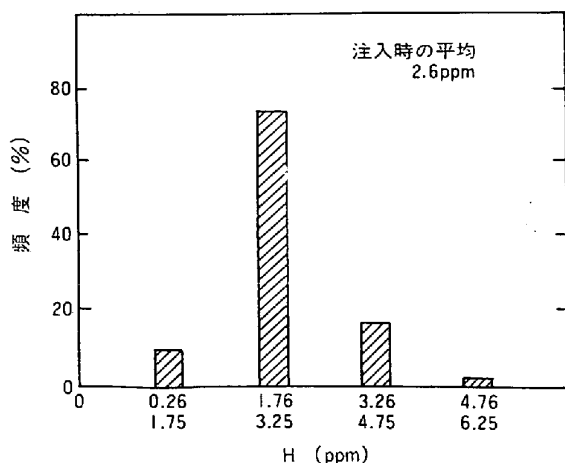


図 2-5-10 鋼中の H %  
(U.S. Gary の 30 t 試験炉の例)

炉建屋の有効利用であると思われる。上吹法が平炉法およびトーマス法に比べてすぐれていることは明らかであるが、わが国のごとく多数の製鋼工場を新設した場合は別として、欧州のトーマス工場、米国の平炉工場のごとく、従来から多数の製鋼設備を保有していた国々では、その有効利用が大きな問題であり、上吹法の急速な導入を阻んでいたものと考えられる。新底吹転炉法はこの要

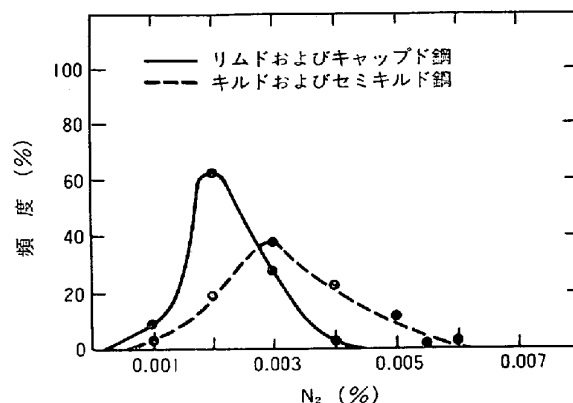


図 2-5-11 注入時における鋼中の  $N_2$  %  
(U.S. Gary の 200 t 炉の例)

請に答えて開発されたもので、今後かなり伸びるものと思われる。開発後間もない方法で、未開発の技術的可能性も多いと思われるし、わが国においても川崎製鉄が採用を決定したと伝えられるので、今後の動向が注目される。なお本稿作成に当たっては、特に U. S. Max Tech 社よりデーターの供与を受けたので、厚く感謝の意を表します。

## 2-5-4 エレクトロスラグ再溶解技術

### (1) エレクトロスラグ再溶解技術発展の歴史

エレクトロスラグ再溶解法（以下 ESR 法と略記）は溶接技術より発展したものと考えてよい。米国の R. K. HOPKINS が1939年にサブマージドアークの原理を利用して合金鋼の製造を始めたのが最初と考えられている。この方法は特許化されて1959年 FIRTH-STERLING 社が実施権を引継ぎ発展していくかにみえたが消耗電極式真空溶解法（以下 VAR 法と略記）の発達が先行したため以後の進歩が米国では中断された。実際に ESR を実用させたのはソ連で、1954年頃パトン電気溶接研究所においてエレクトロスラグ溶接法の技術を基にして開発された。1957年にこの方法に関する研究結果がソ連で発表され翌年にはザポロジスク「ドネプロペチスタリ」電気冶金工場でソ連で初めての ESR 炉が稼働した。以来高級金属材料の新しい溶製法として優秀性が順次証せられ、トン単位の大形炉に急速に発展、Ni 基合金、極低炭素ステンレス鋼、冷間圧延ロール鋼、工具鋼、軸受鋼、タービンまたは発電機部品などの高級材料の改善に役立てられた。ソ連における ESR 法の発展は世界各国にても注目され、英国、オーストリー、ドイツ、フランスなどでも1965年頃より研究実用化が推進された。現在欧州では100 t 以上の大型炉の研究が盛んであり Leybold-Röchling 両社とも同開発による 2,300 mm (160 t) の ESR 炉が1971年に稼働している。VAR の蔭にかくれて中断されていたアメリカでも同じ頃に航空機、宇宙開発産業用の高級金属材料および高級鋼に対する品質ニーズの高まりに対応し再び注目され、研究が進むにつれ析出硬化型強力鋼、Ni 基合金などの材料の溶製が VAR より ESR にしだいに変換されつつあるといわれる。

### (2) ESR の設備と原理

#### (a) 装 置

ESR の装置は図 2-5-12 に概略を示すように、VAR の装置から真空排気系を除去したものに似ている。機能的には電源および制限装置、消耗電極とその昇降装置、水冷鑄型、形式によつて鑄型の昇降装置あるいは鑄塊の引出し装置などによつて構成される。

#### (b) 電 源

電源としては直流、交流、単相あるいは3相いずれも用いられるが、それぞれ特徴(図2-5-13)がある上、精錬効果や鑄塊の品位と密接な関連があり種々検討されて

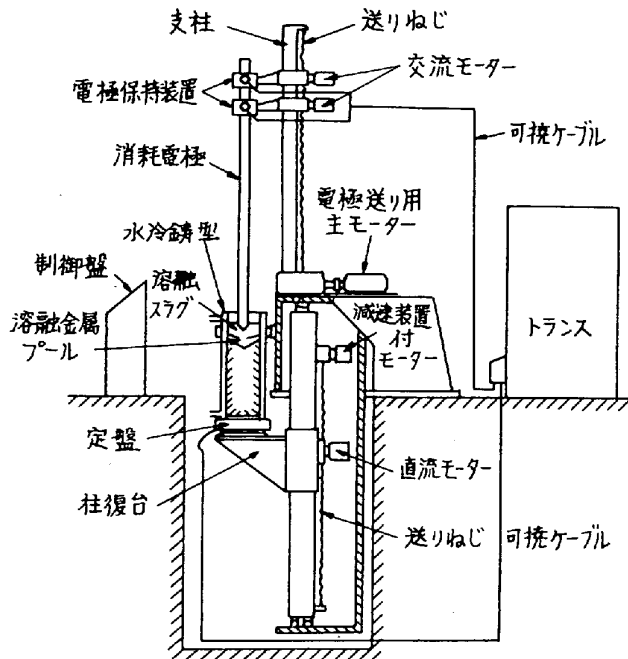


図 2-5-12 エレクトロ・スラグ溶解装置

きたが、現在では工業規模の炉には交流が用いられることが多い。単相単極方式がもつとも簡単な方式であるが同じ単相でも鑄型中に2本の電極を入れ一方の電極から他方の電極に電流を流す Bifilar 方式は回路の誘導電流ロスが減少し力率が 0.93~0.96(通常 0.5~0.7)になるため電力原単位上、非常に有利である。大電流を使用する ESR では電氣的バランスの上から単相より3相交流を用いることが望ましいがその回路の設定には図2-5-13 d~g の種々の方法が考えられる。電力原単位は ESR 操業費の大きな部分を占めるが、電流回路設定およびその附属設備の差異によつてかなりの差が生じる。単相単極式は50 t 程度の炉までは適用されてもそれ以上の炉には複数電極方式が適用されざるをえないと考えられる。また実操業上溶解途中の各時期で電流、電圧の設定を変えるためトランス以外に電圧電流調整器や短絡過電流防止のためリアクターが設置される。

#### (c) 電極昇降装置および鑄型

消耗電極を用いるので溶解が進行するにしたがつて溶解速度に合わせて電極をフィードしていくため、かなり微妙な降下制御が必要である。電極は昇降するだけでなく電極の取付や交換も必要であるからスウィングの機構も同時にとる場合もある。鑄型および炉底は一般には水冷銅鑄型が用いられる。鋼が用いられる場合もあるが高電流による誘導磁場内に置かれることに留意することが必要である。小鑄塊には固定式1体型ルツボを用い電極を下降さすが、大鑄塊の場合には電極の下降が大変なので電極を固定したまま背の低い鑄型を引き上げる方式がとられる。またこの際、電極と鑄塊を同断面積にしてチューリップ型(上拡り)の鑄型を用いる工夫もソ連で行なわれている。

#### (d) ESR の原理

図2-5-12のような装置において消耗電極と炉底定盤の間にスラグを介して電流を通じスラグの抵抗熱によつて電極を順次溶解していく。その時次式に示される関係式で熱が発生していると考えられる。

$$E = I \times \left( \rho \cdot L / \frac{d^2 + D^2}{2} \right)$$

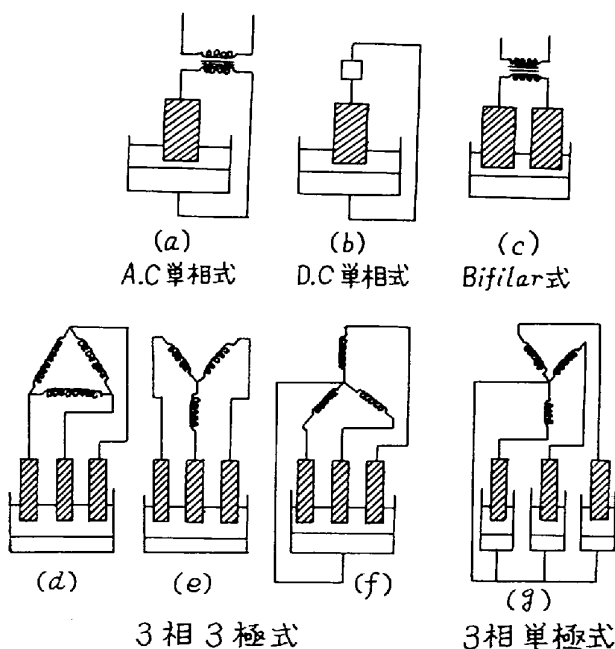


図 2-5-13 ESR における基本的な結線方式

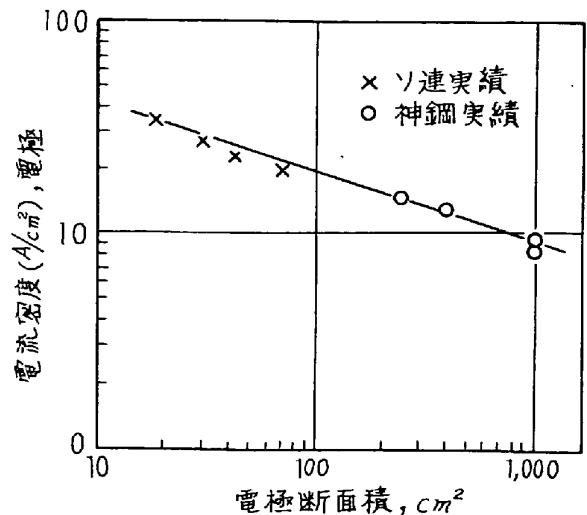


図 2-5-14 電流密度と電極断面積の関係

$E$ ; スラグにかかる電圧,  $L$ ; スラグ層厚み,  $\rho$ ; スラグ比抵抗  $\Omega\text{cm}$ ,  $d$ ; 電極直径,  $D$ ; 鑄塊直径  
電極中を流れる電流密度は  $50\sim 5\text{ A/cm}^2$  程度である。  
図 2.5.14 に示すように電極断面積が大きくなるにしたがつて安定電流密度はしだいに減少する。このことは ESR が VAR に比べて炉の大型化が比較的容易であることを示唆している。スラグの抵抗熱によりスラグに浸漬している電極の先端が溶解され溶鋼粒となつてスラグ層を通つて下部に滴下し鑄型内に集まつて溶鋼プールを形成するが、底部定盤からの強制冷却によつて底部から順次凝固していく。この間スラグに包まれたままで雰囲気とは直接接触することはない。このような状況下で溶解速度を制御しつつ底部から強力に凝固させていくことが ESR の種々な特徴を生み出す。

### (3) ESR の特徴

#### (a) 鑄造組織と溶解条件

ESR 鑄塊内部組織は通常の鋼塊にみられるチル品、柱状晶、分岐樹枝状晶、等軸晶に区分される領域がなく鑄塊内外部ともほとんど柱状晶によつて占められるのが特徴である。しかもこの柱状晶の方向は鑄塊軸と平行に近い方向で下部から上部に向つて成長している。これは溶解凝固時、鑄型と鑄塊間が断熱性に富んだ薄いスラグ層で遮断される上、凝固時のギャップの生成も加わり熱流が水平方向にはほとんどなく、主としてすでに凝固した鑄塊をへて水冷定盤に至る垂直方向に伝達されるためである。鑄塊の外周部および中心部における冷却速度あるいは凝固速度の差が通常の鋼塊の場合に比べて少ないので鑄塊内外部における組織偏析、元素のミクロ、マクロ偏析がきわめて少なくなる。このように溶解しつつ凝固させていく機構により溶湯プール深さが浅く保たれ、凝固速度との関連において溶湯プール中に析出している非金属介在物の浮上除去を容易にして清浄な組織を作り出す。また凝固界面附近の温度勾配を急にして密な組織を作り出す。したがつて ESR においては溶湯プール深さとその形状が鑄塊性状に強い影響をもつ。一般に ESR 時の電極とスラグ浴および金属浴の関係は図 2.5.15 のようなパラメーターにて表わされる。プールの全深さ  $H_B'$  はそれ自体非常に重要であり鑄塊の半径より深くなると好ましくない。また  $H_B''/H_B'$  はプール形状係数  $k_{\phi M}$  として重要であり、プールの円錐部の深さと鑄塊直径  $D$  との比は晶出前線係数  $k_{\phi P}$  として結晶成長方向

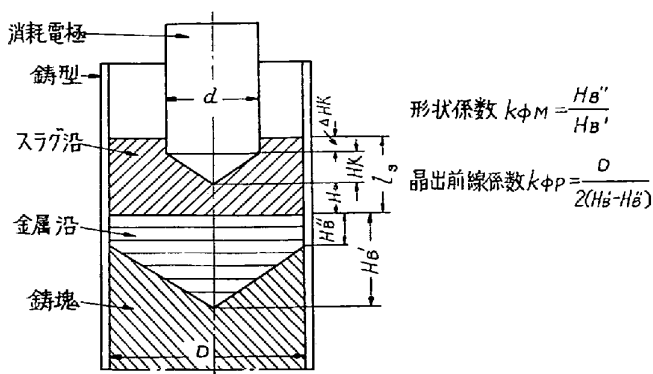


図 2.5.15 電極-金属浴のパラメーター

をきめる。以上のプール形状を表わす特性値は溶解時の諸々の因子、すなわち投入電力、電流と電圧、電極先端とプール面までの距離、電極径、フィルレシヨ（電極径対鑄塊径）、スラグ量と組成、スラグ温度、定盤温度と定盤からの距離、溶解速度および溶融金属成分などと密接な関係を有する。これらの因子が適正に保たれる溶解制御が ESR の良好な鑄塊性状を保つために必要である。したがつてこれらの因子に関する研究は重要である。

#### (b) ス ラ グ

既述のように ESR はスラグ内の電流による発熱効果によつて達成される。したがつてスラグの電気特性はスラグの具備すべき条件中もつとも重要な因子であることは明白であるが同時に被溶解材中の非金属介在物などの有害成分の清浄化作用、外界雰囲気との遮断効果、鑄塊表面美化に対する物理化学的特性も重要である。電気抵抗は低すぎると溶解時の必要温度が保てず、高すぎるとアーク放電を伴うことになり好ましくない。通常は電導率  $1\sim 6\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  のものが使用される。現在もつとも普及しているスラグは  $\text{CaF}_2$  ベースのもので、 $\text{CaF}_2$  の電導率は大きいが  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  などの添加量の増大とともに減少する。 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  系スラグの電導率は比較的低い。また  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  の添加とともに増大する。スラグの粘性も鑄塊の良好な表面肌をうるために重要な因子でありあまり大き過ぎないことが望まれるが、一方溶湯とスラグの間には、十分大きな界面張力が存在しなければならない。十分な界面張力によりスラグの分離が助けられスラグの鋼中への巻込みが防止される。また非金属介在物に対する高い吸着性も要求される。これらの物理特性に関して重要なことは操業時のスラグ温度 ( $1,600\sim 1,800^\circ\text{C}$ ) の範囲で安定していて急激な変化をしないことが必要である。実操業上では、雰囲気の影響、鋼中活性元素の酸化あるいはスラグ殻への  $\text{Al}_2\text{O}_3$  などの優先析出などにより溶解中に組成の変化が起こりうるのをこれをうまく調整する工夫が必要である。スラグの使用量は鑄塊の  $2\sim 6\%$  が普通であるが作業費に占める割合はかなり高いので経済性を考慮したスラグの選択が必要となる。

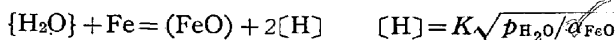
#### (c) 精錬反応（各種元素と介在物の挙動）

ESR 時の反応は脱酸と脱硫が主たるものである。脱磷反応も塩基度が高い適当なスラグを使用すれば原理的には可能であるが、スラグの酸化力が大きくなり溶鋼が酸化される問題が生じるので実用上脱磷を期待することは困難である。ESR 中の反応は化学的反應および電気化学的反應としてとらえられる。後者の立場からすると直流における極性と反応効率の関連が当然問題でありこれに関する研究も多い。一方通常の反応と同様  $(s)/[s]$  の値はスラグ中塩基度の関数となり  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が少ないほど分配係数は大きくなる。合金元素の挙動は酸化反応としてとらえられるのでスラグの化学的安定度、酸素との親和力溶鋼中の絶対含有量、他の共存元素などの影響を受ける。一般的に Si およびより酸素との親和力が大きい元素は溶湯中よりスラグに移動する。ESR における非金属介在物の除去に関してはストークスの法則にしたがつて浮上除去されるとする考え方が有力である。これから計算される介在物浮上速度と凝固速度およびプール深さと対比させ計算すると約  $25\mu$  以上の介在物はほとん

ど浮上除去されることになる。実際の鋳塊中でも25μ以上の介在物はほとんどみられない。

#### (d) 水素の挙動

水素の挙動は ESR の実用化においてもつとも重要であつたにもかかわらず、1970年頃まではあまり問題としてクローズアップされなかつた。これは実験規模による小型鋳塊の場合その影響が明確に現われなかつたことによると考えられる。古くソ連の文献では雰囲気の影響を受けると述べられていたが、あらかじめ溶解したスラグを用いると溶解中で 2 ppm 以下の水素に保ちうるという Choudhury らの報告 (2nd, Intn. ESR Symp. (1969) III) が実用炉でのデータとして認められていた。しかし 1970年頃より研究が進み ESR 中の [H] は熔融スラグ層を仲介として雰囲気中の水蒸気圧と相関を保ち総括的に次式で表わされることがわかつた。



したがつて水素増加の防止には①スラグの前処理、②電極の脱水素、③溶解雰囲気中の水蒸気分圧の制限、④溶解スラグの FeO のコントロールなどが重要である。スラグの塩基度によつて水素吸収の度が増すことも判明しておりスラグ組成の選択も重要である。

#### (e) ESR プロセスによる製品の評価

ESR プロセスによる製品の材料特性に関する研究報告はきわめて多岐にわたり数多く報告されているがその効果をまとめると、①鋼塊の偏析軽減、清浄度の向上、ポソニティの減少、②機械的性質の異方性の改善、③延性、靱性、衝撃遷移温度の向上、④クリープ特性の向上、⑤熱間加工性の向上、⑥歩留向上、⑦非破壊検査不合格率の減少などである。

#### (4) ESR の将来

ESR プロセスは急速に世界中に普及しつつあるように見える。この理由は種々あるが、一つには各産業分野の技術革新があらたな飛躍のために、使用する材料に対する要求をますます厳しくかつ多様化させていることにある。これに対して通常のプロセスは十分満足な対応ができず技術的にも経済的にも限界を感じている。こうした現状の中でこれまでの ESR プロセスで作られた製品の材質研究の結果ではこれらの厳しい品質規格を比較的に容易に満足させる可能性を提供したからと考えられる。元来 ESR が適応されてきたのは多量生産品ではなく、鍛鍛鋼品のような少量多品種の分野であるがこの分野で現在当面している問題は装置のスケールメリットに対応した材料の提供である。したがつて ESR 炉も 100 トン以上の超大型化が必然的に追求されることになる。超大型化の問題はこれまで小型鋼塊で確認してきた結果がそのまま超大型鋼塊にも適用できるかどうか材質研究をはじめ精錬および溶解条件と凝固の問題を含めて今後の研究に待たねばならない。またコンピューターを利用したスケールアップに関するシュミレーション研究が盛んになると考えられるがこうした冶金技術的問題のみならず装置面からも例えば電源の 3 相か単相かの問題、あるいは周波数変換の問題など残されている。また電極製造上の問題から単一電極型でなく複数電極に変わることは明白であり、たとえば 1971 年に稼働している Leybold 製の 2,300 mm φ の炉では単相 4 極で電極交換鋳塊引出方

式が採用されており、一方ソ連でも固定 7 極 Bifilar 方式鋳型上昇式が採用されている。また Rhein-Stahl 社および Arcos 社方式では 3 相 3 電極方式であるが Arcos 方式では電極に炭素鋼ストリップを使用し金属粉末にて合金元素を再溶解中に添加する方式をとっている。この他 Consarc, BISRA にてそれぞれ独自の方法が開発されているが現段階では優劣がつけがたい。最終的には品質および設備費、操業費の経済性を系統的に考えた方式が選別されてくるはずである。このためにも ESR の操業の自動化が計られていくと考えられる。また ESR とエレクトロスラグ溶接の組合せによる ESR 鋼塊の大型化という方向も興味ある問題である。一方大型化とは別に中空鋼塊あるいはパイプ材の製造といったような特殊化の方向にも進んでいきつつある。

### 2.5.5 プラズマ製鋼法

#### (1) 発達の経緯

“プラズマジェット”の開発により、ある程度イオン化した高温 (10,000°K 程度) の気体の噴流を長時間連続して発生させることができるようになった。それを金属の溶解精錬に応用する研究が、1960年頃から世界各国で行なわれてきた。普通、トランスファータイプの直流プラズマトーチに 1 気圧の Ar ガスを流してそれをプラズマジェット化し、それで被熱物、すなわち被溶解金属材料あるいは熔融金属浴を衝撃加熱する方法が用いられた。この場合には被熱物が陽極になつており、加熱効率が比較的良好である。かなり低い電圧によつて、相当長くて、しかも安定な柱状の熱プラズマ (Thermal Plasma) のジェットをうることができ、またトーチの中に存在する陰極の構成物質 (W-ThO<sub>2</sub> など) による被熱物の汚染は少ない。炉体を適切な密閉構造にすれば、いったんプラズマジェットとして炉内に噴出した Ar ガスがその後炉内各部を流動してから炉外の大気中に溢流するので、不活性雰囲気流の下での溶解精錬を行なうことができ、大気中の O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O の影響はしや断される。

#### (2) 真空誘導炉溶解 (VIM) の分野への進出

耐火物内張した密閉式炉にプラズマトーチを装着し、Ar プラズマジェットによつて加熱と不活性雰囲気 (大気圧) の維持とを行なうバッチタイプの溶解精錬法、すなわち PAM, (Plasma Arc Melting) が開発された。これまでもつばら VIM によつて製造されてきた材料、すなわちニッケル基超合金、高級電子材料などの新しい溶製法としてそれが注目されている。以下 VIM と比較しながら PAM の特徴を述べる。

(イ) PAM では上方から金属浴の表面に向かつてプラズマジェットを吹付けるのが普通である。ゆえに添加溶剤の融解および生成スラグの着熱が迅速かつ十分に行なわれ、スラグ-金属反応が促進される。不活性雰囲気下であるので還元性の塩基性スラグ精錬により脱硫、脱酸を行なう場合にとくに好都合である。

(ロ) 不活性雰囲気流によつて気体状の反応生成物が系外に除去されるとは言え、気相の圧力が比較的高いので気体生成反応、 $2H \rightarrow H_2$ ,  $2N \rightarrow N_2$ ,  $C+O \rightarrow CO$ ,  $Mn$  の蒸発などの速度が比較的小さい。このことは、不純物

を気相へ除去しようとする場合には欠点となるが、高濃度の Mn, のN蒸発損失を防止しながらスラグ精錬を行なう場合などには好都合である。

(ハ) PAM の場合には、金属浴の温度、成分の不均一が生じ易いので浴の攪拌は必要とされる。PAM に誘導加熱を組合せた方法がわが国で開発され、それをプラズマ誘導溶解 (Plasma Induction Melting, PIM) と称する。この場合、とくに低周波誘導加熱を組合せた場合には、浴が激しく攪拌されるのでその均一性が向上するだけでなく各種反応の速度が大となる。現在、溶解量 2 t までの PIM が稼働している。

(ニ) 炉内外の圧力差が無いので炉内への外気の侵入の防止は容易であり、したがって設備費は低廉で操業も容易である。一方、炉底電極の安定を維持することが必要であり、また Ar ガスを消費することについて経済的な面からの注意が必要である。

### (3) 再溶解 (Remelting) の分野への進出

水冷金属鋳型内で被溶解材の溶解凝固を漸進的に行なう方法、すなわち PAR (Plasma Arc Remelting) が進出しようとしている。プラズマトーチを非消耗電極として使用するので、入力と溶解速度を独立に設定することができ、また棒状原料だけでなく粒状原料の溶解も行ないうる。この点は電子ビーム溶解 (EBR) と共通な長所である。また揮発性元素と活性金属の合金などの溶解の場合には、真空中で行なう電子ビーム溶解 (EBR) や真空アーク溶解 (VAR) よりも不活性雰囲気を用いる PAR の方が好都合であり、さらに溶解鋼種によつてはフラックスを用いてエレクトロスラグ溶解 (ESR) 的な操業を行なうことも有効であろう。

わが国における PAR の研究はまだ十分でない。しかし、電子の発生段階で低圧ガスプラズマを利用する電子ビーム炉が開発されて真空プラズマ電子ビーム炉と呼ばれ、スポンジチタンから一段階で約 3 t のチタンスラブインゴットを溶製した例が報告されており、関心が持たれる。

### (4) プラズマ溶解法の今後の課題

PAM, PAR を通じて下記の課題が追求されるであろう。

(イ) Ar プラズマジェットの利用だけに止まらず、化学的に活性な気体のプラズマジェットを金属の精錬に応用する。これはプラズマ中に含まれる高エネルギー状態の粒子を反応種として積極的に利用しようとするもので、既に水素プラズマによる脱酸、脱炭あるいは窒素プラズマによる加窒などについて研究が行なわれている。

(ロ) 高圧下におけるプラズマジェットの利用、非平衡プラズマ (Non-equilibrium Plasma) を含めて低圧下におけるプラズマの利用。

(ハ) 直流プラズマトーチの電気容量の増大、交流プラズマトーチ、直流に交流を重ねたもの、三相交流を用いるものなどの開発

さらに、現在のアーク炉製鋼の分野へのプラズマ製鋼法の進出の可能性が検討されるであろう。

## 2.5.6 ステンレス鋼の精錬法

### (1) 概 況

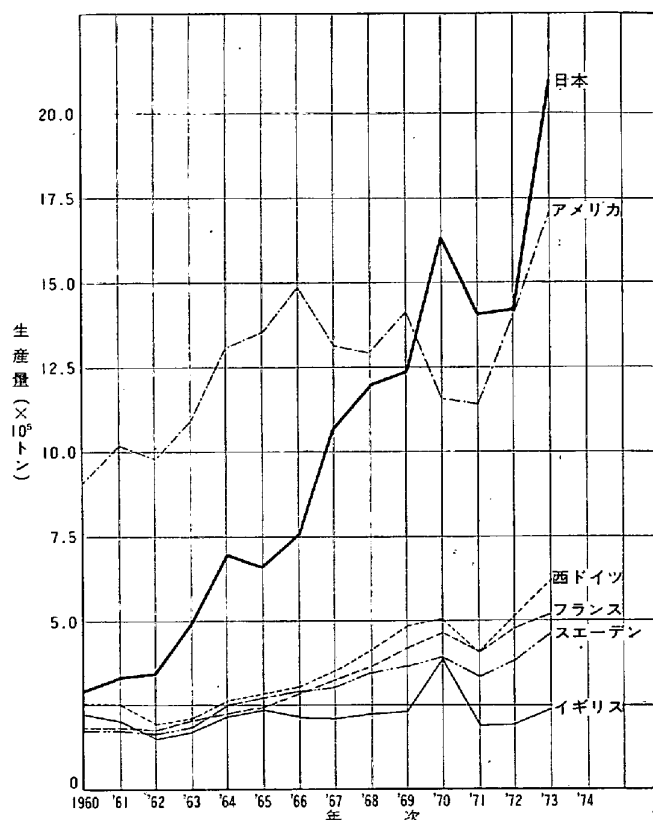


図 2.5.16 世界主要国のステンレス鋼生産高 (粗鋼)

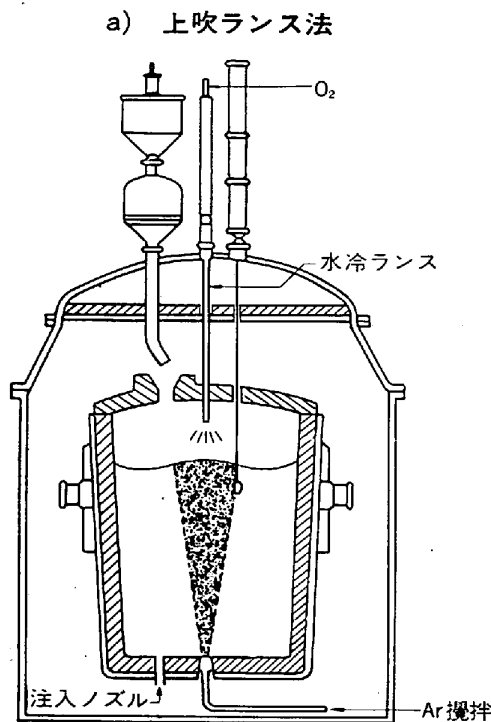
世界のステンレス鋼生産高は逐年増大しているが、過去10年間に於ける日本の伸びはきわめて大きく、先進諸国を抑え、その生産量も1973年には200万tを超え、世界最高の座についている。(図2.5.16) また過去10年間には、(1)生産量の増大、(2)高価な低炭 Fe-Cr より安価な高炭 Fe-Cr への移行による原料費の低減、(3)品質の向上などを目的として、ステンレス鋼の精錬法には数多くの進歩改良があつた。その主眼点は、従来電炉のみで行なつていた精錬の一部を他の精錬炉に移し、上吹酸素炉、底吹酸素転炉、真空脱ガス炉などを、それぞれの特徴を活かして利用し、上述の目的を達成している。また、そのほかにも特殊用途として、コンセルアーク炉、真空誘導炉、電子ビーム炉、プラズマ炉、ESR炉などが使用されている。しかし、これらの特殊炉は生産量が少ないので、ここでは生産の主流となつていいる前者について展望を試みるにとどめる。

### (2) 理論的背景

電炉に安価な高炭 Fe-Cr を多量に装入すれば、脱炭量の増大によつて生産量の低下、炉体耐火物の損傷および Cr 損失の増大を招くので、従来は精錬末期に低炭 Fe-Cr を使うことによつて、この脱炭負荷量を制限するとともに、脱炭にさいしては高温精錬によつて、Cr の酸化損失を軽減する方法が採られてきた。図2.4.2「取鍋精錬法」はこの関係を示すので、温度が高いほど、Cr の酸化損失の少ないことを示している。しかし、耐火物の点から、高温精錬にもおのずから限度があるので、同図 (b) のごとく、温度はある程度に押えて、真

空下あるいは希釈ガスによつて CO の分圧を下げた脱炭を行なうことによつて、Cr 損失を防ぐ必要が起こってくる。したがつて、このような条件を実現するため、また脱炭量増加による負担から電炉を解放して、生産量の増大を計るため、二次精錬炉を設置し、電炉精錬の一部を移すことになる。これを極限まで進めた場合には、日新製鋼のごとく、電炉-上吹酸素転炉-真空脱炭炉のごとく、三次精錬炉まで置き、電炉の役割はほとんど溶解のみにとどまることも起こってくる。

### (3) 最近の精錬設備



### b) 浸漬ランス法

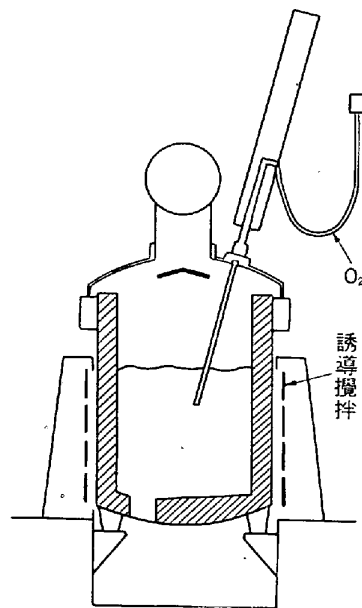


図 2-5-17 真 空 脱 炭 法

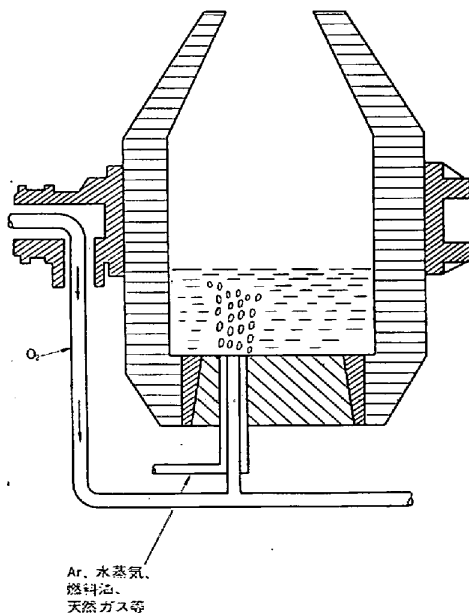


図 2-5-18 希釈ガス脱炭法

最近のステンレス鋼の製鋼設備はいずれもこの原理に沿つたものである。図 2-5-17 は真空槽内に設置した取鍋に上吹ランス（図 2-5-17 (a) VOD 法）あるいは浸漬ランス（図 2-5-17 (b) ASEA-SKF 法, AVR 法）によつて酸素を供給し、真空下で脱炭を行なう方法で、この場合には脱炭反応を促進するため、ポーラスプラグによる Ar 攪拌あるいは電磁誘導攪拌が行なわれるとともに、熱量補償のため、電弧加熱を併用する場合（ASEA-SKF 法）もある。また取鍋に真空容器を浸漬して脱炭を行なう RH 容器中に酸素を吹きこむ方法も実用化されている。

図 2-5-18 は希釈ガスによる方法で、Ar のような不活性ガスを使う方法（AOD 法）、水蒸気、燃料油などを使う方法（CLU 法）がある。酸素とともに吹きこまれる Ar、水蒸気、燃料油などは、CO の分圧を下げるための希釈効果とともに、酸素による羽口の溶損を防ぐための冷却作用をも果たしている。

### (4) 各法の得失と問題点

いずれの方式が有利かは、生産量、原料事情、製品、品質などによつて異なり、いちがいに言い難い。

原料事情から来る処理脱炭量について言えば、真空槽内での脱炭は排気系の能力からあまり大きくすることはできないので、脱炭量という点では、大気中で脱炭が行なわれる上吹、底吹転炉におよばない。したがつて装入屑鉄量が多く、脱炭量の少ない場合には、

VOD 法, AVR 法が使われるが、

装入屑鉄量が減り、装入高炭原料が増えると AOD 法が有利となる。しかし、さらに装入高炭原料が増え、溶湯の C が 2% 以上になると、LD-VOD 法, CLU 法などが有利になつてくる。したがつて、溶銑を原料とする場合にも、新日鉄室蘭製鉄所の LD-RH 法のごとく、真空脱炭処理の前に、脱炭能力の大きい LD で前処理を行なうことになる。

溶銑、装入高炭原料を使う場合には、脱炭のほか、脱磷、脱硫も大きな問題となるが、脱硫については、AOD 法が有利である。

生産能力という点から言えば、電炉 1~2 基で生産量が少ない場合には、AOD 法が有利であるし、日新周南製鋼所のごとく電炉 4 基を有し生産量の多い場合には、LD-VOD 法が有利になるなど、原料、生産量などの前提条件によつて、いずれが有利かはいちがいに言い難い。

製品という点から言えば、C が比較的高く、Cr が低い 13~18% Cr ステンレス鋼では、Cr 損失が少ないので、LD で吹錬後、Fe-Si による Cr 回収のみで出鋼している工場もある。これに反して最近特に多くなつてきた ELC（極低炭 C 0.03% 以下）鋼種では、二次精錬

炉が不可欠であるが、VOD 法に比べ AOD 法はやや不利だという説もある。

品質という点からは、CLU 法のごとく、水蒸気、燃料油を使う方法は鋼中の  $H_2$  レベルの上昇が懸念されるが、従来の電炉単独法に比べれば、必ずしも高くはないという主張もある。

そのほか、操業の点から耐火物の問題、コストの面から Ar の価格の問題など、今後に残された問題も多く、ステンレス製鋼法については、今後さらに多くの進歩変革が行なわれる状況にある。さらに強調しておきたい問題点は、製鋼法自体ではないが、原料 Fe-Cr、連続 casting の 2 点で、これらの帰趨いかんによつては、製鋼法自体にもかなり大きな影響を与えることが予想される。

### 2.5.7 加圧铸造法

#### (1) 概 要

加圧铸造法 (Controlled Pressure Casting Process) は、Amsted Research Laboratories においてスラブ、ビレットの直接铸造法として開発、実用化された画期的な新技術で、近年ステンレス鋼などの高級鋼の分野での直接铸造法として脚光をあびるに至っている。本法は圧力タンク内にセットされた取鍋溶鋼中に注入管を浸漬し、注入管と黒鉛鑄型を連結、溶鋼表面を所定圧力に調整された圧縮空気で加圧することにより注入速度を制御し、また注入時の攪拌を極力抑制しつつ急速に注入する下注ぎ直接铸造法である。本法は下注ぎ法で鑄込み速度が速く、鑄型内面にアルミナコーティングを行ない、かつ Ar 雰囲気下で注入するため、鑄片の表面は欠陥が少なくきわめて美しい鑄肌がえられる。

#### (2) 設 備

ポアリングタンクと鑄型の取り合いは、(イ)ポアリングタンク移動式と、(ロ)鑄型移動式がある。(イ)式ではポアリングタンクは自走式台車につけており、遠隔操作でピット内を走行し各鑄型の直下に停止し、また(ロ)式ではポアリングタンクが固定され鑄型がレールの上を移動しポアリングタンク上に停止する。図 2.5.19 にポアリングタンクおよび鑄型断面図を示す。ポアリングタンクと鑄型が所定の位置に固定されてから鑄型を傾動し、注入管 (セラミックチューブ) と連結させた後、コネクタバルブを開いて溶鋼表面を加圧する。鑄込み速度制御装置により加圧タンク内の内圧を調整することにより、鑄型内の湯面上昇速度を調整しながら取鍋内の溶鋼を注入管を通して鑄型内に注入していく。注入速度は鋼種、形状、寸法などにより適宜選択できる。所定量注入後、鑄型の湯口にある遮断板を油圧により遮断して注入流を遮断し、圧力タンク内を排気し大気圧にもどす。

#### (3) 加圧铸造スラブの品質

##### (a) 表面性状

鑄片の表面はきわめて美しく手入れ量も少ない。操業条件によつては下記の欠陥が発生する。

〔スラグ疵〕  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $CaO$  を主成分とする表面疵で、注入管を取鍋溶鋼中に挿入する際にスラグを巻き込んだ場合、注入管の溶損が激しい場合、受鋼から注入までの時間が長く取鍋レンガがスラグまたは溶鋼に激しく溶損された場合等に注入口からバックトップ側に向け

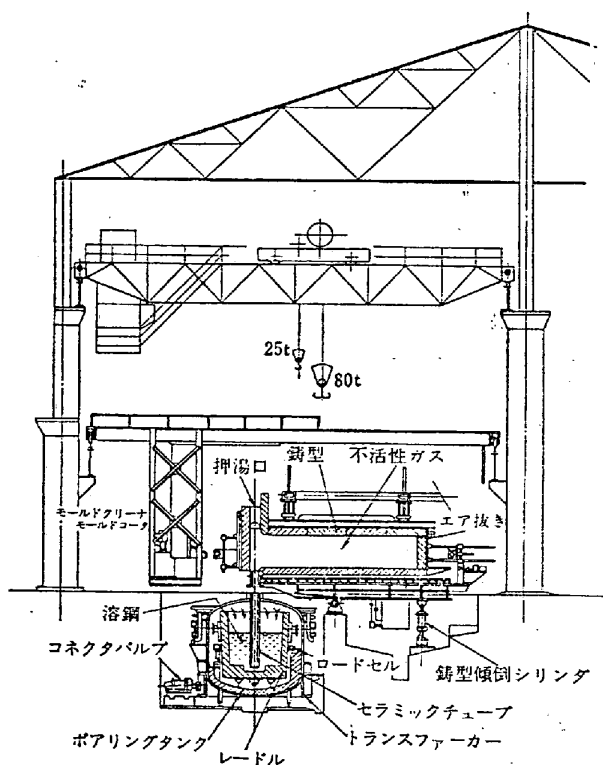


図 2.5.19 加圧铸造設備概略図

対角線上に発生する。

〔ブローホール〕 水素に起因する欠陥で、主として雨季から夏場にかけての高温多湿な時期に発生しやすく、また鑄型黒鉛の水の透過率が小さい場合などにも発生しやすい。脱ガス処理により溶鋼中の水素を 5 ppm 以下とすれば問題はない。

〔割れ〕 鑄張りによるひき割れ、凝固不均一による割れ、鑄型の凹凸により凝固が妨げられた場合の割れ等があるが、鑄型の保守点検を十分に行ない適正な注入を行なえば問題はない。

〔ひけ巣〕 押湯下部での発生率が高いが、押湯部の保温、押湯量の適正化、および保温材投入量と時期を適正に行なえば防止できる。

##### (b) 内部性状

〔内部組織と凝固速度〕 大きな柱状晶が中心に向つて発達しており、中心部にはセンターポロシティが散在するが熱間圧延時に消失する。表層部のデンドライト 2 次アーム間隔は連鑄スラブおよび水冷銅鑄型を用いた加圧铸造スラブに比べ黒鉛鑄型加圧铸造スラブは約 20  $\mu$  大きい。凝固速度定数  $K$  ( $mm/min^{1/2}$ ) は、黒鉛鑄型で 20~22、水冷銅鑄型で 28~30 で、水冷銅鑄型を用いた場合連鑄と変わらない凝固速度がえられる。

〔清浄度、成分偏析〕 圧延スラブに比べ  $O$  率は約 20 ppm 低くばらつきも小さい。非金属介在物は小さくかつこまかく分散しており、また成分偏析も少ない。

〔熱間加工性〕 1,150~1,300°C におけるねじり破断回数は圧延スラブの約 1/2 であるが水冷銅鑄型を用いれば圧延スラブと変わらなくなる。

### 2.5.8 取鍋技術

最近、製鋼用取鍋は大型化と同時に連続铸造ならびに真空処理技術の普及により、より高温の溶鋼を長時間保持する条件に加えて、真空処理炉としての性格も持つようになってきた。このような条件の苛酷化に対して、取鍋寿命の延長対策としての内張りレンガの高級化および改善、吹付け補修技術の開発、取鍋築造工数の節減を目的とした不定形耐火物の採用、更にストッパーノズル方式からスライディング・ノズルへの転換等が積極的に進められてきた。

#### (1) 取鍋耐火物

取鍋レンガの主体は、ろう石を主とする高珪酸質レンガである。これらのレンガは、従来アルカリ含有鉱物の添加により低気孔率化をはかる傾向にあったが、最近では、むしろ低アルカリ化を基調として、粒度調整、高压成形などによりマトリックス部を改善し、溶損を少なくする考え方に変ってきている。

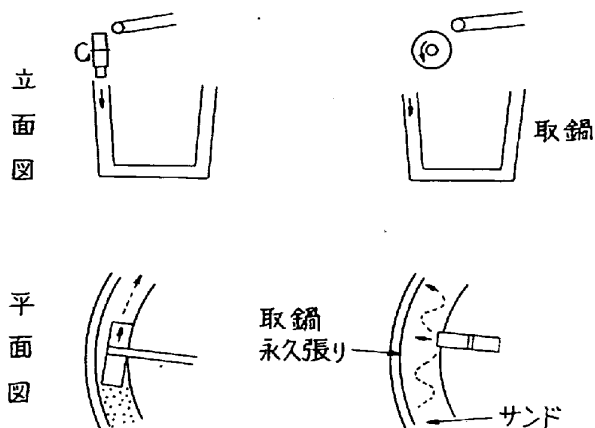
さらに荷酷な条件に対して、ジルコン質レンガが広く採用されるようになった。当初は取鍋の溶損バランスをとるための部分的な張分けに限定して使用されていたが、最近では、40~50%  $ZrO_2$  のジルコン質レンガを全張りし、真空処理、連続铸造を前提とした転炉用取鍋において、150 回を超える耐用回数を示すようになった。

溶鋼の真空処理において、取鍋耐火物は長時間高温の溶鋼を保持することに加えて、溶鋼の攪拌および流れによる摩擦作用ならびにスラグとの反応、さらに減圧にともなう揮発損耗や解離などの条件に耐えることが要求される。

精錬炉として使われる ASEA-SKF 法、LD-Vac 法、ELO-Vac 法では条件はさらに荷酷化する。

ASEA-SKF 法では、真空処理の条件に加えて、アーク加熱により電気炉のホットスポット部と同様の部分的溶損が生ずる。このために当初は高アルミナ質が使われていたが、現在では塩基性マグクロレンガが使われるようになってきた。また脱ガスおよびアーク加熱時に用いられるカバーは、85%程度の高アルミナ質で内張りされている。LD-Vac 法、ELO-Vac 法では、減圧下の取鍋中で酸素吹錬がなされるので、LD 転炉と同様の高温と、溶鋼およびスラグの摩擦侵食に長時間さらされる。そこで取鍋には高温焼成のマグクロ・レンガが、主として用いられている。

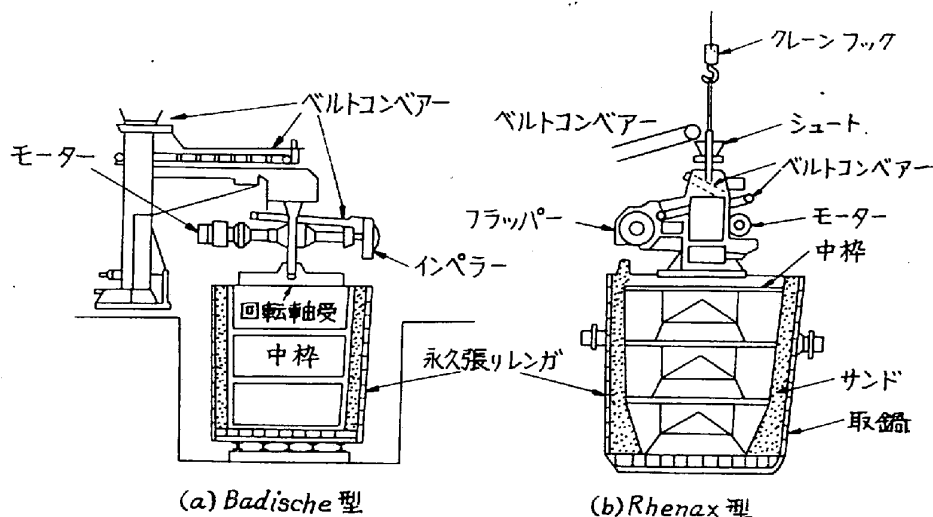
ポーラス・レンガによる不活性ガス吹込みも、広く採用されるようになった。これは取鍋底部、側壁、またはストッパー先端へ取付けられたポーラス・レンガによつて不活性ガスを導入し、バブリングによつて溶鋼を攪拌し温度と成分の均一化、介在物の浮上促進、場合によつては脱ガスを目的として行なわれる。レンガ材質は、耐摩耗性、通気性の点から、高アルミナ質、ムライト質、マグネシア質が使用されている。



(a) Badische 型

(b) Rhenax 型

図 2-5-20 (1) スリンガーの投射機式



(a) Badische 型

(b) Rhenax 型

図 2-5-20 (2) スリンガーマシン概略図

(大庭宏：新しい窯炉とその耐火物(耐火物技術協会編)，(1973)，p. 372)

#### (2) 取鍋築造および中間補修

取鍋築造作業能率の向上と省力を目的に、不定形耐火物による取鍋築造作業の機械化が一般化してきた。方法的には単なるスタンプ施工、スリンガー施工、遠心投射法、自動スタンプ、スリンガー法と自動スタンプの組合せがある。これら不定形耐火物には、ほとんど高珪酸質の耐火物が用いられている。この場合、寿命はレンガ積に比べて必ずしも延長されないが、レンガ積工数がほぼ半減することから、今後省力化を目的として、スリンガー施工を中心とした取鍋耐火物の不定形化が、より一般化するものと考えられる。

中間補修に対する吹付け補修も、取鍋補修時の作業環境の改善ならびに省力を目的として行なわれるようになった。吹付け機には、乾いた耐火粉末を圧送し、ノズルに達する途中で注水混和する乾式法と、最初から水和したスラリー材を吹付ける湿式法とがあり、取鍋に対しては乾式法がより一般的である。

吹付け材は高珪酸質、高珪酸ジルコン質、ジルコン質、高アルミナ質、マグネシア質などが、内張りレンガ材質との組合せにより適宜選択される。吹付け作業は主とし

て熱間、場合によつては冷間で行なわれるが、通常吹付け材の附着率はほぼ90%であり、これによりレンガの差し替え補修なしで寿命延長も可能になりつつある。

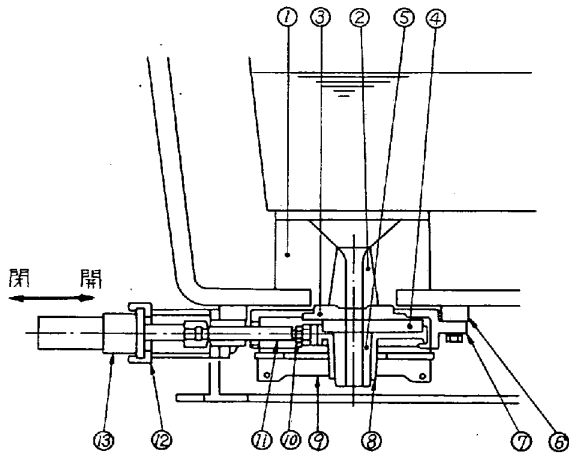
### (3) スライディング・ノズル

従来のロッパー・ノズル方式にかわつて、昭和42年頃から実用化されたスライディング・ノズル方式は、その後、取鍋作業条件の荷酷化にともないロッパー方式でのトラブルを解消するものとして急速に普及し、近く製鉄、製鋼用取鍋(10 t~300 t)の90%以上に採用されるであろうと言われている。

スライディング・ノズルの形式は、

- (イ) 摺動方式
- (ロ) ロータリー方式
- (ハ) 押出方式

の3つに大別されるが、いずれも取鍋底部にとりつけられた2枚の耐火物の摺動板を、油圧または電動により摺動させノズルを開閉するものである。



- ① マスレンガ ② 上ノズル ③ 固定盤 ④ スライド盤
- ⑤ 下ノズル ⑥ ベース ⑦ ハウジング ⑧ スライダー
- ⑨ カバー ⑩ 接手 ⑪ ロッド ⑫ エキステンションピース
- ⑬ 油圧シリンダー

図 2・5・21 スライディング・ノズルの例(Interstop式)  
(丹羽庄平：新しい黒炉とその耐火物(耐火物技術協会編)，(1973)，p. 415)

機構的には省力および作業環境の改善のために、あらかじめ耐火物の組込まれた構造体を取鍋にセットするカセット・タイプ、あるいは耐火物を折りたたみ式ケース

に収納しておくヒンジ・タイプなどが工夫され、大型転炉工場、高能率電気炉工場で実用化されている。耐火物は通常数回の使用に耐えるよう選択されるが、主として高アルミナ質、一部ではジルコン質が使われる。

スライディング・ノズルの現在の課題として次の諸点がある。

- (i) ノズル詰物の自然開孔率の向上
- (ii) 注入中のノズル詰りの防止
- (iii) 注入流束の乱流対策
- (iv) ノズルのスライド時の注入芯の変動対策

スライディング・ノズルにおいては、取鍋受鋼時、ノズル部に溶鋼が侵入凝固するのを防ぐため、取鍋段取時に、あらかじめこの部分に詰物を挿入している。自然開孔率の改善のために、このノズル詰物(珪酸質、クロマイト質、黒鉛質など)の組合せが適宜選択され、酸素による開孔がほぼ必要のないところまで解決されつつある。しかしながらより確実な方法として、スライド板から不活性ガスを導入し、ノズル詰物を吹上げて開孔する方法も採用されはじめています。

注入中のノズル詰り防止については、適宜溶損してノズル孔径が拡大されるような耐火物材質の選択や、ノズル附着物の原因となる溶鋼中のアルミナ系介在物の量、形態をコントロールして解決されつつある。なお最近では、ポーラス・レンガを通して不活性ガスを導入し、ノズル附着物を洗い流す方法も工夫されている。

注入流束の乱流対策としては、通常下ノズルにロングノズルをつけることにより解決されている。

ノズルのスライド時の注入芯の変動については、新たに三層式のスライディング・ノズルが開発された。これは上下固定盤の間にスライド板をはさみ込む方法であり、これにより下ノズル位置は、スライド板の摺動時に全く位置が変わらないので、注入時の取鍋の位置ぎめはロッパー方式と同様となる。しかし、この場合、耐火物原単位が高くなるので、当面は、特に鑄込芯のずれが問題となる場合に限って実用されるであろう。

以上のように、スライディング・ノズルの問題点は、ほぼ解決されつつあり、今後、省力、作業環境の改善および注入作業の標準化を目的とした自動鑄込法の開発のための有力な手段として、さらに発展するものと考えられる。