

銅製錬技術の系統化調査

Development of Copper Smelting and Refining Technologies

1

酒匂 幸男 Yukio sako

■ 要旨

銅は人類が最初に手にした金属でありいずれの時代でも機能材料として重要な役割を果たしてきた。特に電気工学の発達により世界の銅消費量は飛躍的に増大し、現在においても増加傾向は変わらない。銅の需要を支える銅製錬技術について歴史を概観し、日本でどの様に発達したか調査した。終戦後日本の製錬所は壊滅的な打撃を受けたが、戦後10年で戦前を越える水準まで急速な回復を遂げた。日本の高度成長に伴い深刻化してきた公害問題、また浮遊選鉱法の発明による原料の粉状化に対応するため三菱グループを除く各社は自溶炉の技術を導入し近代化を積極的に進めた。現在自溶炉方式は世界の銅生産の40%、日本の銅生産の60%を占めている。三菱マテリアル社は世界に先駆けて連続製銅法を実用化し、現在世界で4基稼動しており今後の発展が期待されている。電解工場は溶錬の規模に合わせて電極の大型化、ハンドリングの自動化、環境改善等を積極的に実施して近代化を図った。

銅製錬の系統化は銅製錬において自溶炉方式の誕生から世界の主流技術となるまでについて、特に研究開発を詳細に調査検討し系統図にまとめた。

■ Abstract

Copper is the first metal that human beings used in their hands. At any time of history, copper has played an important role as a functional material. Ever since the development of Electrical engineering applications, the consumptions of copper have been rapidly increasing all over the world, and it continues to grow.

In a review of the history of copper smelting and refining technology, which led to the rapid growth in copper consumption, the development of copper smelting and refining technologies in Japan was surveyed. During the World War II, Japanese smelters and refineries were critically damaged. After ten years, though, they recovered to their previous level of before the war. However, pollution became a serious problem with the rapid growth of Japanese economy. In the meantime, developments included a floatation method for the disintegration of ore and the introduction of the Flash Smelting Process, which was used by every company except for the Mitsubishi group. Thus, modernization advanced significantly.

The Flash Smelting Process is now used to produce forty percent of world's copper, and sixty percent of Japan's copper. Mitsubishi Materials was the first in the world to develop a continuous smelting process. This process is in use in four countries, and is expected to undergo further developments. Copper Refineries have been aggressively developing larger electrodes and automation systems to handle electrodes and have been making environmental improvements based on the expansion of smelter capacities.

Research on copper smelting in Japan was examined from the birth of the Flash Smelting Process to the mainstream technologies in use throughout the world. In particular, research and development of the flash smelting process was examined in detail, and this was depicted in a systemization diagram.

■ Profile

酒匂 幸男 Yukio sako

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和33年3月	九州大学工学部応用化学科卒業
昭和33年4月	三井金属鉱業株式会社入社 以後、竹原製煉所日比共同玉野製煉所、本社技術 部、フィリピン銅製錬所建設本部等銅製錬関係の 現場指導、技術スタッフを歴任
昭和62年6月	取締役新金属事業部長
平成1年4月	九州大学工学部非常勤講師
平成1年6月	常務取締役電子材料事業本部長
平成7年6月	代表取締役副社長
平成7年10月	九州工業大学非常勤講師
平成9年6月	三井金属取締役退任
平成9年6月	三井金属エンジニアリング代表取締役社長就任
平成9年10月	大阪大学工学部非常勤講師
平成12年6月	三井金属エンジニアリング取締役退任 現在三井金属鉱業名誉顧問 会員他 国立科学博物館産業技術史資料情報センター 主任調査員 資源素材学会会員 資源素材学会渡辺賞受賞（平成9年3月）

■ Contents

1. まえがき	3
2. 古代人と銅	4
3. 江戸時代の銅製錬	6
4. 近世の銅製錬（明治～太平洋戦争まで）	9
5. 戦後の銅製錬（終戦から20年）	18
6. 高度成長から現在迄の銅製錬	28
7. 銅の電解精製	35
8. 銅製錬の系統化	41
9. まとめ	44
10. 銅製錬登録候補一覧	46
11. 謝辞	47
12. 参考資料	48

1 | まえがき

人類が火を使いこなす以前、手にした金属は金と銅で何れも自然金と自然銅であった。何れもやわらかく美しいので、叩いて延ばして色々な器具や装飾品を作り始めたのが金属加工の始まりである。人類が火を使うようになり銅の鉱石を製錬することを学び銅や青銅を作り出すようになり銅、青銅器時代が始まった。銅及び青銅などの銅合金は展延性に富み、加工性が優れていることに加え、美しく耐食性に優れていることから銅は鉄とともに人類の歴史に重要な役割を果たしてきた。さらに近世になり電気動力時代の到来とともに電気伝導性、熱伝導性にすぐれた特性を兼ね備えている銅の需要は飛躍的に増大し、今日でも世界の需要は増加の一途をたどっている。歴史を振り返ると、古代エジプトでは紀元前5000年頃既に銅を日常生活の器具や装飾品、武器などに使用している。硬貨としては、古代ギリシャに始まり現在世界各国で使われている。武器または兵器として銅は古くから使われてきたが、14

世紀にイギリスで黄銅製のキャノン砲が作られ火薬の発明に伴って、軍事産業において飛躍的に重要な戦略物資となり太平洋戦争終結後もしばらく続いた。現在銅及び銅合金は電線をはじめ電信、電子機器、建築物、輸送、精密、光学機器、日常品、抗菌作用を利用した製品等あらゆる分野で利用されている。本調査研究ではこのような銅の利用を可能にしてきた銅の製錬技術について調査し系統化に取り組んだ。調査の範囲は鉱山から産出される製錬原料となる精鉱（または鉱石）を出発点として溶錬工程、製銅工程、精製工程を対象とした。従って銅合金の製造は範囲に含めていない。

調査研究の進め方としては銅製錬のはじめから江戸時代に至るまでの世界の銅製錬の歴史を概観し、明治維新以降の日本の銅製錬が地域による鉱種、環境の違いを乗り越えて発展してきた過程を明治維新から太平洋戦争終結まで、太平洋戦争終結から20年（奇跡の復興）、高度成長から現在までの3時代に分けて行った。

2 | 古代人と銅

銅は人間が利用した最初の実用金属であると言われ6000年以上の歴史を持っている。しかし人間が最初に手にしたのは自然銅であったと考えられる。最初は自然銅を叩いたり延ばしたりすることから始まり、やがて溶かして加工するようになり用途も広がり、自然銅だけでは足らなくなり酸化鉱を使って製錬して金属銅を作る事を知ったと思われる。このようにして銅ならびにその合金である青銅、黄銅は人間が石器時代以来続けてきた努力の歴史そのものであり、スメリア文明および前王朝時代のエジプト文明以来あらゆる文明に貢献し、且つその重要性は現代において更に増大し技術の歴史に特異な位置を占めてきた。

2.1 外国での銅製錬の始まり

銅を初めて使ったのはメソポタミア地域のスメリア人とカルデア人であり、彼らは5000年ないし6000年も昔にスメル、アカド、ウル、アルウバイドその他の繁栄した都市を建設した後、銅を最初の実用金属として使った。この両民族は、著しく銅の加工技術を発達させ、更にエジプトのナイル河流域の住民に普及して行った。なお青銅ははじめは銅の中に自然に錫が入ったものと考えられ錫の品位が低く一定していない。青銅器時代はB.C.3000年ごろからメソポタミア、エジプトで始まっている。中国ではB.C.2000年ごろ夏の時代に出現している。

表2.1に植田晃一氏による世界地域別銅使用開始年を示す。

表2.1 世界地域別銅金属使用開始年 (B.C.) (植田晃一)
(タイルコート著 A History of Metallurgy 191 Page)

考古学時代	銅石器		青銅器初期	青銅器中、後期
地域名	自然銅	製錬銅	初期青銅期	青銅期
アナトツリア		5000	3000	2000
パレスチナ			2900	1900
メソポタミア	7000	4000	3500	2800
エーゲ海		3300	2500	2000
イタリア		3000	2000	1200
イベリア半島		3000	1500	1000
東南ヨーロッパ	5000	4500	3000	1500
北西ヨーロッパ		2200	1800	1200
東ヨーロッパ		2200	1500	700
北米	4000			

1) イスラエル、ヨーロッパ

1964年以来のローデンベルグ博士らの調査によって、紅海のアカバ湾に近いティムナ遺跡でB.C.4000年からローマ時代にかけての一大銅鉱山、製錬の遺跡が明らかになっている。図2.1はローテンベルク博士に

よる銅製錬炉の復元図である。

ヨーロッパではスペインのリオチントで約3000年の昔から銅が採掘されている。

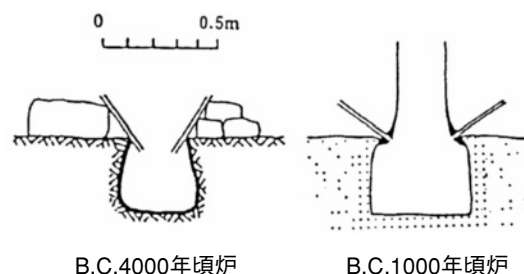


図2.1 ティムナ炉復元図

2) エジプト

エジプトではB.C.3500年ごろから冶金術が発達しB.C.3000年ごろには冶金学の学校があった。古くは破碎した酸化銅鉱を700~800℃で加熱してスポンジ状としたものから銅を得ていたが、その後溶解して品位を上げるようになったといわれている。

3) 中国

中国で発見された最も古い銅器はB.C.3000年~2000年ごろの物で、中近東やエジプトよりやや遅く多くは鍛造品であるが、溶解鑄造品もあるといわれている。製錬方法は高品位の酸化銅が使用され、木炭が燃料兼還元剤として使われている。炉は火吹式から鞴（ふいご）のついたいわゆる鼓風炉に発達した。大冶銅緑山の遺跡から発掘された春秋時代の堅型炉は、高さ1.2m~1.5mで通風口と羽口がついている。合わせて出土したカラミ中のCuは0.7%で、当時の製錬技術がかなり高度なものであったことを示している。

2.2 日本の銅製錬の始まり

これまで我が国の銅の生産が始まったのは、続日本書紀にA.D.698年銅産出との記録があるが、一般にはA.D.708年武蔵国秩父郡で発見された自然銅であるとされている。朝廷ではこれにちなんで年号を慶雲から和銅に改め、我が国最初の貨幣とされる「和同開珎」が出来たといわれている。しかし近年になって、銅はもっと早くから造られたのではと考えられるようになった。飛鳥池遺跡から出土した富本銭は遺構の層位関係や相伴遺物によって鑄造年代が700年以前に遡ることが確認されている。また1972年に古代に遡る銅山遺跡であると確認された山口県美東町の長登遺跡、1986

年に発見された山口県の秋吉台に近い中村遺跡、1991年発見された国秀遺跡などの調査研究の進展によって当時の銅産地の同定、冶金技術の解明が期待されている。奈良平安時代に入り我が国で初めて一箇所に大量の銅が使われたのは、世界最大の金銅仏である東大寺の大仏（奈良大仏）である。その総重量は約380tで使用された銅量は歩留まりを含めると約500tと推察される。これだけの銅を賄うには一鉱山では不可能で全国の鉱山から調達されたものと思われる。

奈良時代から平安中期にかけては、近江、山城、周防、長門など各地に置かれた銅銭司で、和同開珎に続くいわゆる皇朝十二銭が鑄造された。しかし年代と共に銅の生産が進まず、後半の鑄貨は形も小さく品質も低下している。

平安時代には採銅所と称する官営の鉱業所で採鉱や製錬が行われた。鉱山では採掘が進み、地表から地下深く坑道が延びるに従い湧水の排水、通風等の問題も発生したと思われるし更に鉱石自体も自然銅や酸化銅から製錬の難しい硫化銅に変化していったと思われるが、当時の製錬法については具体的に示す資料はない。平安時代も末期になると、国内産銅の不足を補うために宋銭の流入が増加している。1252年に鑄造が始まった鎌倉大仏の材質は鉛が20%程度含まれておりこれは当時流通していた銅銭の成分に近く中国銭が大量に使われたことを示唆していると思われる。この時代日本の国内銅の生産は不振であったと思われる。室町時代の終わりには天下は乱れ群雄割拠した武将は軍資金としての金、銀、銅の需要が増大し鉱山開発が盛んになった。

3 | 江戸時代の銅製錬

天正年間（1573～91年）から文禄年間にかけて我が国の鉱業は豊臣秀吉の積極的な鉱業政策で活気を取り戻しつつあった。また徳川家康は天正元年（1573年）山令五十三ヶ条を制定し大いに鉱業の振興を図った結果、江戸時代に足尾、尾去沢、阿仁、別子などの銅鉱山が開発され1660年頃から生産量が急増した。これに伴い銅の輸出も増大し総生産量の約2/3に達しており、一方国内消費は1/3であった。元禄10年（1697）には銅生産量は年間約6,000t程度と考えられ、この量はおそらく当時世界一の産銅国であったことを示している。しかし銅の生産量はこのころをピークとしてその後は年とともに急速に減少し、18世紀前半の生産量は年産約2,200t、18世紀後半から19世紀の前半の生産量は年産約1,800t、江戸時代末期の30年間は年産約700t程度になっている。

江戸時代の銅製錬技術は一般に鉱石から荒銅（あらかね）までの製錬は、鉱山のある山元で行われ荒銅の精製は大阪で行われた。この時代になり古来の製錬法が改良されると共に、南蛮人から伝えられて改良されたとされる南蛮吹法（なんばんふき）、16世紀のはじめに開発されたとされる日本独自の技術で、現在の精製法のさきがけとなった真吹法（まふき）等を組み合わせて銅製錬と同時に銀の回収が出来る現在の製錬工程の原型が出来た。南蛮吹法により銅と銀の分離回収が出来るようになり、従来評価されなかった銀が製品として評価されその経済効果は大きかった。19世紀の初頭に住友から刊行された鼓銅図録に記載されている工程図を図3.1に、真吹図を図3.2に示す。

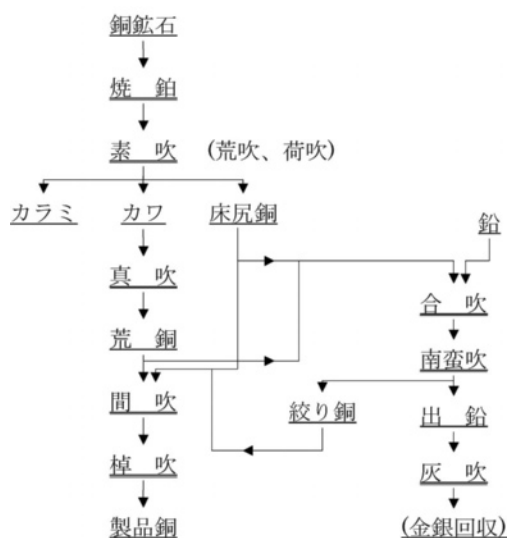


図3.1 江戸後期の銅製錬工程図



図3.2 真吹図（鼓銅図録）

図3.1に示した江戸後期の銅製錬工程略図について工程ごとに説明する。

1) 鉱石

硫化鉱が原料の主体となり、黄銅鉱 (CuFeS_2) 斑銅鉱 (Cu_5FeS_4)、輝銅鉱 (Cu_2S) 硫砒銅鉱 ($\text{Cu}_3\text{AsSbS}_4$) など現代の鉱石と同じ原料であった。

2) 焼鉛（しょうはく、焙焼と同じ）

硫化鉱を焼いて硫黄を分離する焙焼工程、焼釜で約30日焼くが硫黄の分離は不十分であった。

3) 素吹（すふき、荒吹、荷吹ともいう）

焙焼鉱を木炭、溶剤と共に鞆（ふいご）で送風しながら還元雰囲気で溶解し、先ず表面に生成するカラミを流し出して分離し、銅の濃縮したカワを剥ぎ取るようにして分離する。炉底には一部還元された金属銅が生成している。この還元製錬法については寛文10年（1670年）秋田の阿仁鉱山の開発に当たった大阪の北国屋吉右衛門は紀伊国の熊野から金掘師や吹師を雇ったが、彼らは海外から伝習したと思われる還元製錬法を知っていたので、この方法は奥州の各鉱山に普及、更に足尾銅山にも伝えられたようである。炉はいわゆる吹床（ふきとこ）で地表に半円形の凹を造り素灰（木炭粉と粘土を混ぜ合わせたもの）や粘土で内張りをされている。

4) 真吹（まふき）

素吹で得られたカワに木炭を加えて加熱溶解し、羽口から強風を吹き付けながら酸化反応を起こし鉄分はカラミに、硫黄は亜硫酸ガスとして分離、その他の不純物も酸化除去して荒銅を得る。図3.2に真吹図を示したが、真吹法は酸化製錬法で原理的

には現代の転炉法に通じるものであり、世界に先駆けて我が国で発達した製錬法として特記すべきものと思う。

5) 間吹

銀を含まない荒銅の精製工程で、銀を含むものは後述の南蛮吹で銀を分離した後間吹を行った。精製は酸化と還元を繰り返すことで精製したと思われる。

6) 棹吹（さおふき）

間吹で精製された銅を坩堝で溶解し輸出用棹銅、国内向け平銅、丸銅に重量を正確に計って铸造した。

7) 合せ吹（あわせふき）

銀を含んだ荒銅、床尻銅に鉛を20～30%加えて溶解混合し、合銅（あわせがね）と称する銅鉛系合金を作り銀を鉛中に濃縮させる。

8) 南蛮吹（なんばんふき、絞り吹きともいう）

合せ吹で得られた含鉛銅を吹床中で、銅の溶融点（1083℃）以下鉛の溶融点以上に温度をコントロールしながら鉄工具で銅を叩き圧すると、銀を含んだ鉛が絞りだされて炉前から滴下し銅と分離される。温度や雰囲気調整には十分な熟練を要した。

9) 灰吹（はいふき）

分離された鉛を酸化鉛として灰中に吸収し金銀粒を残す。いわゆるキュペレーションである。この日本の南蛮吹の特色は鉛の添加量の少ない事と巧みな炉前操作技術にあった。しかし合銅からの金銀の分離率は60%程度と推測される。しかし現在でも金属銅中の銀を乾式で分離する技術は他になく400年前の先人の技術には敬服すべきものがある。

3.1 江戸時代の鉱業政策

江戸時代の銅生産については、すでに述べたように生産量の変動はかなりあるものの世界の主力銅生産国であり又輸出国であった。住友吉左衛門らが貞享2年（1685年）、幕府に提出した願書によると当時の大阪には銅吹屋（銅製錬）職人が1万人もいた。毎年900万斤（5,400t、1斤＝600g）の銅を製錬し、金に換算して28,300両相当（2.6t）の銀を南蛮吹法により銅から絞り分離した。

同年幕府は貿易貨物銀高を1ヵ年唐船6,000貫目（22.5t、1貫目＝3.75kg）、オランダ船3,000貫目（11.25t）と定めた。銅輸出高は563万斤（3,378t）、代銀（銀換算）5,961貫目である。これは当時の貿易総額の約3分の2に相当し文字どおりの主力輸出商品であった。そ

の後、銅の生産量は増加し元禄8年（1695年）の銅輸出货量は600万斤を超え、2年後の元禄10年には890万斤に達している。産銅量は1,000万斤（6,000t）を上回っていたが、銅銭铸造をはじめ仏像などの神社仏閣、また日用品にも銅は使われていたことを考えると、輸出890万斤には、在庫も充当されていたのではないかと推測される。

当時の主力銅鉱山は奥羽地方に多く阿仁、尾去沢鉱山など、関東の足尾鉱山、中国地方の吉岡鉱山、四国の別子鉱山などであった。

当時まだアメリカやチリなどの南米諸国、更にアフリカの大鉱山はいまだ開発されていない時代で、日本は銅の大生産国であった。

3.2 16～20世紀初頭の欧米の銅製錬

16世紀に入り自然銅、及び高品位の酸化銅鉱が少なくなり硫化鉱の製錬がドイツのマンズフェルト製錬所で始められた。まず硫化鉱を野焼き（Heap roasting）によりSを亜硫酸ガスとして分離、銅は酸化銅とした後、溶鉱炉で木炭により還元して粗銅とした方法である。1556年ドイツで刊行されたG.AgricolaのDe.Re.Metallicaは当時の冶金技術を集大成した大書で、その中に焙焼と還元を繰り返す複雑な銅の製錬法が記され、更に銀を含む原料に大量の鉛を加える方法が述べられている。

この方法はドイツ法と呼ばれ、改善を加えながらヨーロッパで広く行われ、19世紀まで行われたマンズフェルト法は、硫化鉱の焙焼と、溶鉱炉による溶錬を2回繰り返し、得られた高品位カワを更に焙焼して湿式処理し、金、銀を分離した後反射炉で製銅するものであった。

英国では18世紀頃からウエールズのスウォンシーで豊富な石炭を用いる反射炉が開発され、英国法（又はウエールズ法）と呼ばれるようになった。

1770年代に始まったイギリスの産業革命は銅の生産にも大きな変化をもたらした。

スウォンジーは海港としても優れていたもので世界各地からの銅鉱石が集まり、19世紀中頃までは世界最大の銅製錬の中心地であった。

スウォンジー付近のコニッシュ銅山では18世紀には生産が増加し、高い生産を維持できたが、これは坑内で湧き出る坑水を排出する為の蒸気ポンプが導入されたお陰である。銅製錬の繁栄でこの地方は緑の美しい谷間であったが、銅生産の増大に比例して亜硫酸ガスの放出も多くなりひどい汚染となり、当時の語り草

として、もし悪魔がここを通りかかったら我が家に帰ったと、錯覚するだろうと言われたものである。深刻な公害問題の始まりともいえる。

1880年より銅生産の中心は北米に移った。1841年レークスーペリア（Lake Superior）の自然銅床発見、1850年より稼行、1880年モンタナ州のビュート（Butte）鉱山の開発、更にユタ、ネバタ、アリゾナと開発が進み世界第一の銅生産国となった。製錬技術に於いてもこの50年間に著しく進歩した。最初ビュート鉱山に建設されたパロット製錬所では、1885年溶鉱炉

と酸性転炉（パロット炉）で製錬を行うことに成功した。その後同所では溶解炉として大量の鉱石を処理するには反射炉が溶鉱炉より適していることを知り、反射炉排ガスから蒸気を回収することに成功して溶鉱炉から反射炉へ切り替えた。更に1905年頃PS転炉（バガレー、ピアス、スミスによって発明された塩基性転炉）が発明され反射炉－PS転炉の操業が確立された。これによりアメリカでは大量生産方式として反射炉－PS転炉の製錬方式が確立され1930年代には溶鉱炉法は影を潜めた。

4 近世の銅製錬（明治～太平洋戦争まで）

4.1 鉱業政策

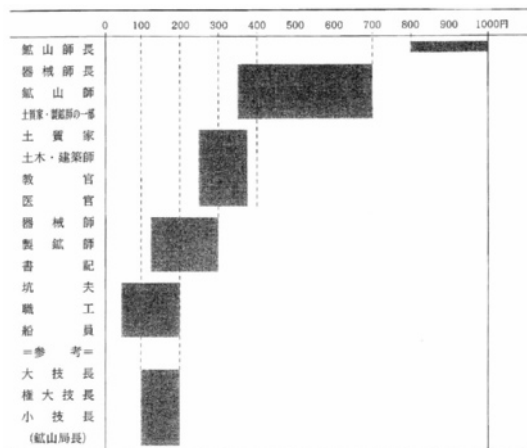
明治政府は日本の近代化の為に銅鉱山を次々と官営とし積極的に資金を投入、外国人技師の招聘、機械購入、作業場建設等を行った。

小坂鉱山の例で見ると小坂鉱山は創業以来維新に至るまで鉱業が不振であったが、官営となると同時に大島高任技師長が採鉱、製錬の業務に従事、溶鉱炉、分析所等を建設し旧来の製錬法を改革している。明治3年6月には日本最初の溶鉱炉が完成している。明治6年当時東京大学の採鉱、冶金科教授であったドイツ人ネッターを主任技師として招聘して製錬法の改良に当たらせている。同じ時期に英国人鉱山兼製錬師フレッシュウィルが大葛金山に、ドイツ人機械師長メッケルが阿仁鉱山に、ドイツ人機械師長バンサ、溶鉱師ロージングが院内銀山にそれぞれ着任して採鉱製錬の改善に当たっている。草深い東北の山中に堂々たる洋式宿舍が建設され、現在でも阿仁鉱業所には異人館としてその英姿を残している。（写真4.1参照）。又当時の外人技師に対する報酬等も当時の国政としてはいささか過大なものであったが、我が国の鉱業関係者が欧米の技術を見聞でき、更に鉱山製錬の知識を啓発されただけでもその目的は達せられたと思う。図4.1に当時の傭外国人の給料を示す。



写真4.1 阿仁鉱山異人館

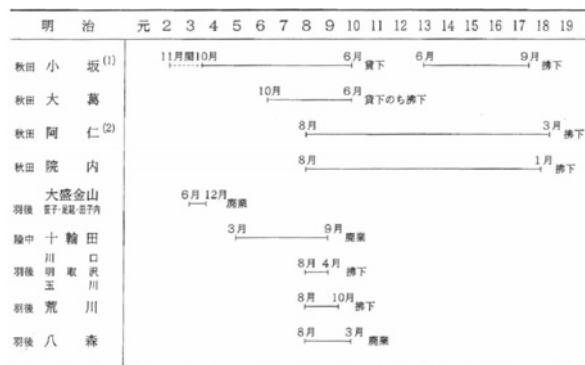
明治政府は官営の鉱山が赤字経営で悩み、明治13年頃から民間に払い下げを計画し、明治17年小坂鉱山を払い下げたのを始めに、明治29年までに逐次払い下げが行われた。これまで巨額の投資により、近代化された我が国の主要な金属鉱山はきわめて安い価格で藤田組、古河市兵衛、三菱合名等の手に渡った。これら近代化された鉱山、或いは大鉱山を中心として三菱、三井、古河、住友、藤田組等の諸資本が財閥形成の基礎を築いた。これと平行して明治23年絶対主義的



注1. 外国人の給料は明治30年度のものを、明治3～17年。
2. 参考の日本人賃金については、明治10年1月26日改定工部省各工部局賃金月給表による。

図4.1 傭外国人の給料月額（佐々木原図）
工部省沿革報告による

色彩の濃い「日本坑法」は廃止され、鉱業を近代産業として発展させることを目的とした「鉱業条例」が制定された。これにより鉱業権が永久の権利として認められ、鉱物の売買は自由化し、鉱山から独立した製錬所も認められた。図4.2に秋田県関係の鉱山の払い下げ状況を示す。



実線は工部省所管による官営を、破線は会計官・民部省・大蔵省・農商務省などの所管による官営を示す。
(1) 十輪田鉱山を含む。明治4年2月開坑
(2) 両山金銀山・矢野鉱山・太良鉱山・加藤山銅鉱山を含む。

図4.2 官営鉱山（秋田県関係分）工部省沿革報告による

明治中期の技術の進歩で重要なことは、鉱山の電化と近代的銅製錬体系が確立されつつあったことである。明治23年我が国最初の水力発電所が足尾銅山で完成したのを初めとして次々に鉱山付属発電所が建設された。各鉱山では電気巻揚機（明治23年足尾鉱山）、空中索道（明治23年足尾鉱山）電気機関車（明治30年足尾鉱山）を採用し電力による運搬の合理化をはかり、今まで未解決の技術的課題であった坑内排水も電気ポンプの使用により根本的に解決された。このように我が国の金属鉱業の近代化に伴い大規模生産に移行した

結果、各地で鉱害の発生を見るに至った。明治23年足尾銅山で鉱毒事件が起こり、明治26年別子銅山で煙害が問題になった。しかし鉱害問題は生産優先の時代で解決されず、昭和の公害基本法の制定までの長い期間住民を苦しめてきた。

明治35年頃、ほぼ基礎を確立した我が国の金属鉱業は、明治37年日露戦争勃発、大正2年第一次世界大戦勃発による国内市場の拡大と、海外市場の好況によって急速にその規模を増大した。特に住友、三井、三菱、古河、藤田に日立鉱山を中核として成長した久原を加えた六大資本は盛んに群小鉱山を買収しつつ、一方では近代的大製錬所の優位性を生かした買鉱製錬によって莫大な資本を蓄積し、財閥資本としての地位を固めていった。しかし大戦終結後の大正9年に発生した世界的な戦後反動恐慌によって金属鉱業は大きな打撃を受けた。特に軍需性の強い銅は恐慌の影響が著しく加重され、他の商品をはるかに上回る低落を示した。このような価格の低落と共に、銅鉱山を苦境に追い込んだのは低価格のアメリカ銅の大量輸入であった。アメリカの低価格銅の攻勢により我が国は従来の海外市場を失ったばかりでなく、国内市場への進出を許す結果となり銅輸入国に転じた。銅輸入量は、大正8年から同11年間に87,000tに達し、国産銅の在庫は30,000tに及んだ。このため国内銅鉱業は存亡の危機に直面し、各地の中小鉱山は相次いで没落した。銅鉱業の労働者数は大正7年～11年の間に四分の一に激減した。こうした情勢下で大正9年久原、住友、藤田、古河の四社は我が国最初の産銅カルテル、日本産銅販売組合を組織し、生産の35%縮小、販売建値の設定を行った。このカルテルは銅加工部門を持つ住友、古河とこれをもたない藤田、久原の利害対立から生産制限は失敗し、産銅組合は解散された。しかし大正10年6月再度古河、藤田、久原、三菱により産銅カルテル水曜会が結成され、銅関税引き上げ運動を行った。運動に対しては色々批判があったが、大正11年3月法令施行の運びとなった。かくして銅関税は従来の銅100斤（60kg）1円20銭から7円に引き上げられ、アメリカ産銅の輸入は減少し、更に同12年の関東大震災後の復興需要、対外為替相場下落等により銅市況はやや回復した。また産銅各社の相次ぐ合理化推進の効果も現れ、危機に直面した銅産業界も危機を脱しつつあった。

昭和6年満州事変が起こり金輸出再禁止による金属価格の高騰、軍需産業の発展により、長らく不況に喘いだ金属鉱業は活況を取り戻し、戦時体制への移行と共に発展を遂げた。

日中戦争以後、政府による資金、資材、労働力の各方

面にわたる強力な助成の下に増産が行われ、生産は各金属とも記録的水準に達している。ちなみに我が国の鉱工業生産は昭和16年ごろから上昇に転じた。昭和16年太平洋戦争の勃発により生産は一挙に騰勢に転じ、同19年には最高となっている。我が国の銅生産量は昭和18年に11万1千t、同19年11万6千tという未曾有の記録に達した。当時の鉱山の経営事情について当時の大規模経営を代表する花岡鉱山と中位の代表吉乃鉱山について述べる。

戦前の花岡鉱山の労働者数は2,000人前後であった。それが昭和19年になると、直轄夫4,500人、請負業者組夫1,500人、朝鮮人4,500人、徴用工900人（挺身隊300人、勤労奉仕隊300人、学徒隊300人）華人徴用工300人、他に米人、華人捕虜数百人、計1万人以上となっている。かくして花岡鉱山の採銅量は年々増加の一途を辿っている。又そのころ選鉱場建設、花岡川付け替え工事、大山第二ダム、滝ノ沢ダム等の大工事が施工された。しかし直轄夫を除く大多数の労働者はいずれも未熟練工であり、種々の問題があった。そのような状況の中で終戦後明るみに出た花岡事件が起こった。

吉乃鉱山の場合、戦前500人前後の労働者を擁していた。それが戦時体制に入るところから労働者数は急増し、70余人の朝鮮人労働者を含め常に1,000人以上が生産に従事している外、勤労報国隊が組織され、鉱山労働に参加しているが、未熟練労働力であったことは言うまでもない。軍部の要請により、ただ強行一途に生産に努力し銅鉱2万t以上を生産した。

しかし終戦直前には乱掘による鉱況の悪化が著しく、設備の消耗、技術者、労働力の不足等加わって衰退に転じた。

4.2 浮遊選鉱法

浮遊選鉱技術を紹介する前に選鉱技術の全般について先ず簡単に述べる。

採鉱では取り出したい金属鉱物（目的金属鉱物）とこれを取り巻く不要な石（脈石）とを出来るだけ効率的に分離する事を選鉱技術という。

選鉱処理する前に鉱山で掘り出した粗鉱（目的金属鉱物と脈石の一緒になったもの）を掘り出し目的金属鉱物と脈石に分離できる大きさに粉碎する。（図4.3参照）

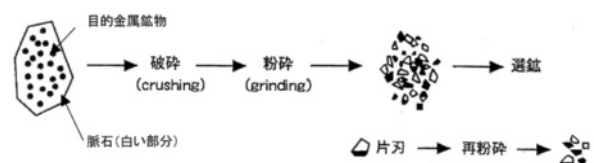


図4.3 粗鉱の粉碎模式図

主な選鉱技術として浮遊選鉱法の他に下記のような方法がある。

① 比重選鉱法

最も簡単な方法で比重差を利用する。例えば砂金の採集。

② 重液選鉱

密度の異なる二種類の物質の混合物を、両者の中間の密度を持つ液体に供給すると一方は浮上し、他方は沈むのでこの原理を用いた分離法である。

③ 磁力選鉱

鉱石の持つ磁性を利用して分離する方法で鉄鉱石などの選鉱に用いられる。

④ 静電選鉱

粒子の導電性、絶縁性を利用した選鉱法、タングステン鉱の選鉱に用いられる。

浮遊選鉱法とは、粉碎された粗鉱を水に入れ、疎水性の面を持つ鉱物のみを気泡と一緒に掻き取って回収する方法である。鉱物の面はそのままではだいたい親水性である。(黒鉛、硫化モリブデンのみは疎水性)従って浮上させようと思う鉱物の面のみを疎水性にする必要がある。

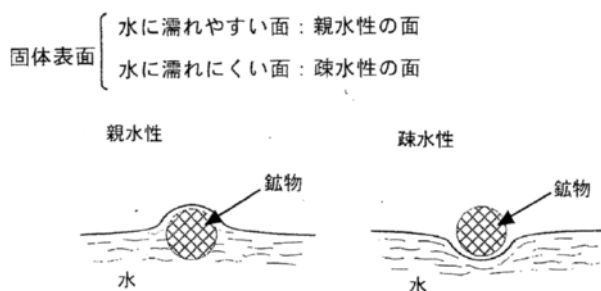


図4.4 鉱石の親水性と疎水性の模式図

鉱物の面を疎水性にするには捕集剤（ザンセート、エロフロートなど）を微量追加して疎水性の被膜をつくればよいが、特定の鉱物の面のみ被膜をつくるには、液のpHを調整したり、捕集剤との結合力が強く、またその鉱物面に被膜を形成する Cu^{2+} などの金属のイオンを活性剤として添加する。また特定鉱物の面に疎水性の被膜ができないようにするには、その鉱物を構成する金属のイオンと不溶性沈殿や安全な媒体をつくる CN^- などの特定イオンを抑制剤として加える。

さらに気泡が液面で消えないようにするには、パイン油のような起泡剤を加える。

浮選器の原理図を図4.5に示したが原料粉を水に混合、pHを調整し、上記試薬を加えて浮選器に送り込む。

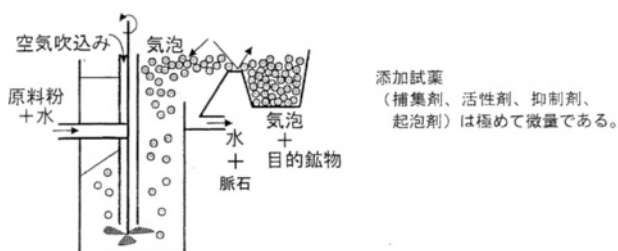


図4.5 浮選器の原理図

浮遊選鉱法の影響

浮遊選鉱法が発明されるまでは鉱山で掘り出された鉱石は手作業で選別されていた。従って、銅鉱山では銅品位が4%程度では鉱山としての価値はなかった。しかし1921年パーキンスが化学的浮遊選鉱法を発明したことにより鉱山開発、製錬法に革命的变化をもたらした。鉱山においてはこれまで無価値と見られていたCu品位は低いが埋蔵量は非常に多いボーフィリー銅鉱山が次々と開発され、銅の供給源は飛躍的に拡大した。浮遊選鉱法の研究が進むにつれて銅、鉄、鉛、亜鉛等の硫化鉱物を選択的に且つ効率的に分離できるようになり、各精鉱の品位は格段に高くなった。銅鉱山では大量の鉱石を採掘し、微粉碎した後選鉱機により銅精鉱と尾鉱（不用岩石）を分離するために大規模な選鉱場が必要となった。更に尾鉱を堆積処理するための広大な堆積場を設けることが必要になった。従って鉱山開発は大規模になり莫大な資金が必要となりアメリカ、チリー、アフリカで開発された大規模鉱山が世界の主流を占めるようになった。銅の溶解炉においてはこれまで塊状の鉱石を処理していたが、浮遊選鉱法により生産される精鉱は銅品位の高い微細な粉状で、粉鉱処理に適した反射炉は盛んになり、アメリカ、チリーでは主流となった。溶鉱炉での処理には粉鉱の前処理工程が必要となり色々の工夫改善がなされた。

浮遊選鉱法が日本で普及したのは1923～1927年である。

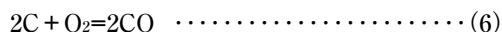
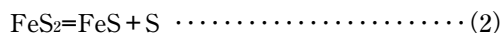
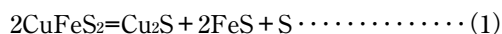
4.3 溶錬

4-3-1 溶鉱炉製錬の原理

明治時代になり海外から導入された溶鉱炉製錬は日本の銅製錬の中心に位置し、多くの改善がなされてきた。ここで先ず溶鉱炉製錬の基礎について簡単に述べる。

銅の硫化鉱（黄銅鉱や班銅鉱など Cu 、 Fe 、 S の化合物）に珪石（ SiO_2 ）等を混合し、加熱溶解すれば銅の濃縮したカワ又はマットと呼ばれる硫化物の層と鉄、珪石、脈石の酸化物が溶融した銅分の殆ど含まれない

カラミ又はスラグと呼ばれる二層に分かれ、比重の軽いカラミが上部に、比重の重いカワが下部になる。鉱石溶解のための熱源としてはコークス、石炭、重油が用いられる外、鉱石中のFeやSの酸化熱も利用される。溶鉱炉の中で起きる主な化学反応を以下に示す。



(1) (2) はそれぞれ黄銅鉱、黄鉄鉱の熱による分解反応を示す。(3) は硫化鉄の酸化を示し、(4) は酸化したFeの造かん反応（カラミが生成するときの反応）を示す。(1)、(2) で生じたSの大部分は(5)により燃焼する。

(1)、(2) の反応は吸熱であるが、(3) 以下の反応はすべて発熱である。特に(3) による発熱を上手に利用すれば補助燃料はわずかですむ。石炭、コークス等の炭素質の燃料を熱源するときは(6)、(7) の式による。

溶鉱炉の構造はこれらの化学反応を最も効果的に行わせることが出来るように設計されなければならない。

溶鉱炉で溶解反応を能率よく進めるには、熱源の激しい酸化、すなわち燃焼を集中的に行わなければならない。そのため羽口を設けて圧縮空気を吹き込む方法がとられる。

溶鉱炉内の燃焼が集中的に行われる部位においては、鉱石は溶解と同時に(4) に示すような造かん反応も行われる。このようにして生じた溶解物は炉底に沈下する。炉底に溜った溶体は、炉内に吹き込まれている圧風に押されて炉外に排出され、前床でマットとスラグの2層に分離する。なお吹き込まれた圧風は燃焼に与った後鉱石の層を縫って上方に押し上げられ、炉頂で排ガスとなり炉外へ排出される。炉内での燃焼反応を円滑に進めるには炉内の通気が重要で、そのため装入鉱石は適当な粒度を持ち、しかも溶解直前まで粒度が保てることが望ましい。粉鉱の予備処理方法について説明する。

●乾燥

鉱石や副資材の付着水分又は混入している水分を除く操作を言う。乾燥設備として回転炉（ロータリーキルン）、トンネル炉等がある。

●焙焼

鉱石を溶融しない程度の温度に加熱して空気、塩素、

化学薬品等と作用させて鉱石に化学変化を起こさせる操作を言う。酸化焙焼は鉱石を空気存在のもとで焼き、金属酸化物又は酸素を含む金属化合物に変える操作を言う。還元焙焼は鉱石または製錬の中間生成物を石炭やコークス又は還元性ガスとともに過熱して酸化物を低級酸化物にするか、金属まで還元する操作を言う。

これまで実用化された焙焼炉は多段焙焼炉（ヘレシヨフ炉、ウエッジ炉）フラッシュ炉、流動焙焼炉がある。特に流動焙焼炉は太平洋戦争後米国より日本に紹介され、非鉄製錬に大きな影響を与えた。流動焙焼炉の原理は下から吹き上げる空気中に鉱石粒子を浮遊懸濁（液体の沸騰に似た状態）させ、焙焼反応を進行させる方法である。

●塊成

粉鉱を固めて塊にする操作を塊成と言い、次のような方法がある。

団鉱法：型を用いて常温で圧縮し塊とする。

焼結法：粉鉱を高温で焼き固めて塊とする。焼結機としてはグリナワルト焼結法とドアイトロイド焼結法が主に使われている。

ペレタイジング：型を使わずドラムやディスクで雪だるま式に球状にする。

4-3-2溶鉱炉

我が国に始めて洋式の溶鉱炉が導入されたのは1870年小坂製錬所である。その後1890年ごろまでに別子、足尾等主要な製錬所が溶鉱炉法を導入、三菱を除いて各社溶鉱炉に切り替えた。始めの溶鉱炉はレンガ積みの小規模な竪型炉で断面は円形、円周に沿って数本の羽口があったが、高温部の水冷化、断面が長方形で両側面に多数の羽口が並ぶ角炉化等により処理量は大幅に増大した。元来溶鉱炉には粉状原料は不向きであるから、溶鉱炉法が主流であった我が国の銅製錬にとって、装入物の塊状化は重要な課題であった。従来から行われていた塊状化の方法は焼結と団鉱であった。

●焼結

粉状硫化鉱に弱風を送りながら焙焼し、部分的な溶融によって塊状とする。20世紀始めには壺焼法と称する小規模な容器による方法が普及したが、やがてこれを扁平、大型化したグリナワルト焼結機に代わり、1950年代全般頃まで使われた。一方火床を移動させることによって操業を連続化したドワイトロイド焼結機も現れたが、これは鉛、亜鉛に多く用いられ、我が国の銅製錬ではほとんど普及しなかった。

● 団鉱

生粉鉱や焙焼した粉鉱、煙灰等を適当な水分と、必要によってはバインダーを加え、凹型ロールで圧縮するか又は搗き固めて塊状とする方法であった。一般に非能率なものが多く1950年代には姿を消し、ペレタイシングが使われるようになった。

1) 生鉱吹、半生鉱吹と羽口操作

生鉱吹（銅精鉱を直接処理する方法）は鉱石性状の変化もあって海外では長続きしなかったが、我が国では1899年小坂の丸型溶鉱炉で始めて実施され、難物であった黒鉱（亜鉛や鉛を多く含んだ銅鉱）の処理にも成功した。この成功の要因は炉内の羽口レベルを灼熱状態に保つため、補助燃料として中塊炭を羽口から装入したことにある。同時に送風を炉芯まで届かせるため、粘土でガイド（羽口鼻）を作成した。小坂においてはこの独創的技術により燃料率は大幅に改善された。その後溶鉱炉は角型になり、また鉱石品位の上昇による鉄や硫黄等の発熱成分の減少や、急速製錬への指向、所定のカワ品位を保持する事等のため生鉱吹は次第に燃料を炉頂からのコークス＋石炭で7～10%程度使用する、いわゆる半生鉱吹に移行した。このよう

な羽口からの燃料の添加や羽口操作に関する諸技術は、我が国独特のものとして国内のすべての溶鉱炉に適用され、改善が重ねられた。

小坂における生鉱吹の成功はその後の日本に於ける銅溶鉱炉製錬法の継続と発展への道を大きく開いたと言える。

2) 日立製錬所における微粉炭吹込操業

羽口からの補助燃料については小坂から日立に移った青山隆太郎らの開発者たちによって、明治の末期から大正の前半（1910～1918年）にかけて原油やガスの吹込みなどが試験されたが、原油価格の急騰や設備上の不備のため、いずれも定着するに至らなかった。しかし日立においてはその後、数年にわたって微粉炭吹込の操業試験を行ってこれに成功し、大正14年（1925）2月には6基の全溶鉱炉をこの方式に切り替えた。微粉炭吹込操業はその後佐賀関、四阪島、足尾の各製錬所でも採用され、終戦後の1951年頃まで継続されている。これにより生産性の向上、省力化が実現し大きな経済効果がもたらされた。この方式は1950年代初め頃まで継続されている。

表4.1に塊炭吹と微粉炭吹の比較を示す。

表4.1 微粉炭吹込成績例（日立）

溶解量	大10年〔自1月 至12月〕	大15年〔自1月 至12月〕	比率
操業爐数	7ヶ月半 6座 4ヶ月半 5座	2ヶ月半 6座 9ヶ月半 5座	
熔錬總元鑛量(吨) 錬鑛錬鉞溶解總量(吨) 同上爐床能率 { 吨/平方米 短噸/平方呎	298,129.275 408,367.811 31.2 3.2	318,359.310 450,478.466 36.3 3.77	117.80%
燃料費	大10年〔自1月 至12月〕	大15年〔自1月 至12月〕	比率
燃料費總計 (円) 熔錬總元鑛量1吨當 (市價其儘比較) (円) 同上10年の燃料を15年市價に換算比較	601,159.12 2.016 1.789	339,532.59 1.067 1.067	52.9% 61.5%
送風動力	大10年〔自1月 至12月〕	大15年〔自1月 至12月〕	比率
錬鑛錬鉞送風動力(kWh) 溶解總量1吨當(kWh) 熔錬元鉞1吨當(kWh) 粉碎炭動力(kWh) 再計(kWh) 溶解總量1吨當(kWh)	4,048,385.000 9.91 13.53 0 4,048,385 9.91	3,374,118 7.49 10.6 871,323 4,245,441 9.42	75.6% 78.0% 95.0%
羽口夫 6爐1晝夜定員	大10年 135人	大15年 45人	比率 33.3%

●羽口操作の重要性

塊炭微粉炭を問わず羽口からの燃料装入技術の成功の鍵は、設備の良否や給炭量の調節ばかりでなく、きめこまかい巧妙な羽口操作によるところが大きい。すなわち粘土による羽口鼻の作製によって送風を炉芯まで届け、炉壁を伝う空気を防ぎ、燃料の燃焼空間を確保して羽口準を灼熱状態に保つ。日立においては微粉炭吹き込み時に、鑄鉄製コーンを羽口に装入して内部まで突出させ、これに羽口の状況に応じて粘土で伸縮自在の鼻を形成した。微粉炭吹き込み操作は、米国のカッパーヒル、セルデパスコ等においても試みられたが、いずれも長期間の成功に至らなかった。その理由の大なるものに羽口操作の巧拙があったといつてよい。

- 錬かん炉による溶鋳炉カラミ中の金、銀、銅の回収
佐賀製錬所においては溶鋳炉カラミ中の金、銀、銅についてかねてから組成分析、顕微鏡観察、浮遊選鉱、電気炉小試験などによって、その回収について基礎的検討を重ねた結果、溶鋳炉カラミを電気炉に導いて、これに硫化鋳を加えて処理し、カラミ中の金、銀、銅を生成したカワ中に回収する錬かん炉を開発した。大正9年、先ず溶鋳炉1炉に対し、350kVAのエルー式電気炉1基を建設して試験を実施、好結果を確認し、大正12年には設備を増強、溶鋳炉2炉に適用して全溶鋳炉からみの80%内外を処理するようになった。錬かん炉は昭和8年には日立にも設置され、その後反射炉法の直島等の他社製錬所にも建設されて、特に戦前のいわゆる産金時代には、金、銀価格の高騰に伴い顕著な経済的効果をあげた。錬かん炉は太平洋戦争後も継続されていたが、まもなく電力事情の悪化等により休止するに至った。

●新団鋳法の開発

元来粉状原料には不向きな溶鋳炉法が主流である我が国の銅製錬にとって、浮遊選鉱法による微粉精鋳の激増は重大な問題であった。すなわち当時の装入物塊状化の常法であった焼結法では、繰返し粉や煙灰の増加、燃料率の増大、カワ品位の上昇によるカラミ中の銅分の増加、粉塵や排煙による作業環境の悪化など多くの問題が生じた。また従来のままの団鋳法では人力を要して生産性が低く、かつ団鋳の強度も不十分であった。

日立においては溶鋳炉装入原料の団鋳法について広範囲な基礎的研究を行ってきた。その結果、粉状鋳石に6~8%の消石灰を加え、水分を10~13%にして混和した後、圧力150~180kg/cm²で成型し、更に蒸

気圧8.5kg/cm²の飽和蒸気下で8時間蒸し煮することによって強固な団鋳となる事がわかった。日立製錬所においてはこのプロセスに基づいて10,000t/月の新団鋳工場を建設し、昭和13年8月にスタート、昭和14年には正常操業に入った。昭和18年には双輪式団鋳機1基が増設され昭和20年後半まで操業された。

4-3-3反射炉

浮遊選鉱の普及による微粉状の銅精鋳の増加は溶鋳炉の処理を難しくしてきた。このような粉精鋳の処理に適した炉として図4.6に示すような構造の反射炉が考案された。

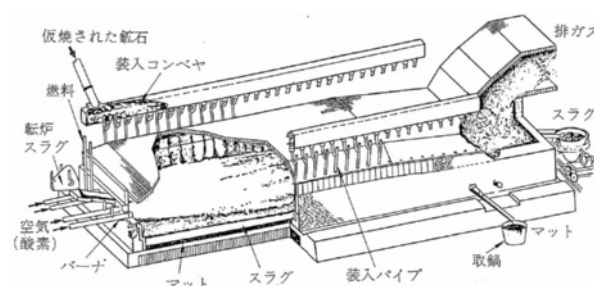


図4.6 反射炉（小名浜製錬（株） 小名浜製錬所）

この反射炉法は英国のスワンジー地方で開発され、米国で研究改良されて炉の大型化と同時に連続操業が可能となり、米国では殆どの製錬所が反射炉を採用するようになった。

日本では1910年（明治44年）小坂製錬所で建設されたのが最初であったが、鋳石の品位が低い事、粉鋳が少なかった事、さらに燃料が高価であったため再び溶鋳炉を使うようになった。三菱金属では1917年（大正6年）直島製錬所に反射炉を建設し改良を重ねながら1991年まで操業を継続した。

しかし、三菱金属が開発した連続製銅が稼動するようになり反射炉は操業を停止した。直島で完成された反射炉技術は小名浜製錬所に導入され、1965年から操業を開始し現在我が国唯一の反射炉として稼動している。小名浜製錬所の現状については、別章を設けないので続けて述べる。小名浜製錬所では反射炉のメリットを以下のように考えて操業している。反射炉は燃料の種類を選ばず粉状精鋳の大量処理に適している事、付属設備の機械化や自動化が容易であること、操業に特段の熟練が必要でないこと等使い勝手の非常に良い炉である。特に電力料金の高い我が国では反射炉排ガスからの廃熱回収蒸気による発電量は大きく、更に燃料や装入物の一部を一般に処理困難なりサイクル品（廃タイヤやシュレッターダスト等）を処理する事に

より反射炉の弱点を克服して、言い換えれば発電所付属反射炉として優れた成績を維持している。反射炉の弱点の1つは排ガスのSO₂濃度が1%強と薄いため直接濃硫酸を作る事が不可能なことである。操業当初は除塵後大気中に放出していたが、公害規制が厳しくなり現在では石膏工場で全量処理されている。

4-3-4製銅炉

① 真吹炉

明治のはじめ頃（1880年代）の記録によると、当時の操業方法は地床で先ず精カワ（硫化銅、硫化鉄）を燃料とともに送風しながら溶解して、表面に浮いてきたカラミを掻き出した後粘土で炉を密閉して、一箇所穴を開け燃料として木炭を補給しながら別の羽口より溶体に風を吹き付けて金属銅を得ていた。この方法は転炉による製銅法が発明される以前に同じ原理でわが国独自に発達した注目すべき製錬法である。

本法の起源は明らかではないが、かなり古い時代からと言われ、既に16～17世紀には西日本を中心とした諸鉱山で実施されていた。既に紹介した住友の鼓銅図録に出ている。

真吹法は20世紀に入ってから、国内の大規模製錬所が次々と転炉法に切り替える中で炉の大型化や石炭、重油の適用など、種々の改良を加えつつ継続された。1928年（昭和3年）のデータを表4.3に示しているが、国内生産量の約30%は真吹出であったが、1935年には真吹法は永松、尾小屋、笹ヶ谷、契島の4ヶ所で行われるのみで全国生産量の数%に過ぎなかった。1962年（昭和37年）尾小屋製錬所が真吹炉の操業を停止して全ての真吹炉は姿を消した。ちなみに真吹の歴史の中で最大の工場は、昭和初年の佐賀関製錬所で炉数40基、生産量は11,000t/年に達した。しかし佐賀関でも昭和5年にはPS型転炉2基になった。

真吹製銅法はなにぶん小規模であり生産性、経済性からみても近代的なプロセスではなかった。現在秋田大学附属鉱山博物館には最後となった尾小屋製錬所の

真吹炉が実物大の原型で築炉保存されていて当時の技術の一端をしのぶ事が出来る。構造は排ガス用のフードをともなった半球形天井の地床である。この天井を甲といい、側方から炉内に空気を送り込む羽口一本が具備されている。燃料に重油を使用する場合はここから同時に吹き込めるようになっていた。図4.7に昭和30年ごろの例を示す。これによれば地床は四方をコンクリートで囲み底面にはカラミ煉瓦を敷き詰め、その上に約400～500mm程度雑鉄を積み重ね、さらに素灰と粘土を突き固めた。なお、これらの材料や厚み等は各製錬所や年代によりある程度異なるが、ここまでは半永久的な基礎であった。

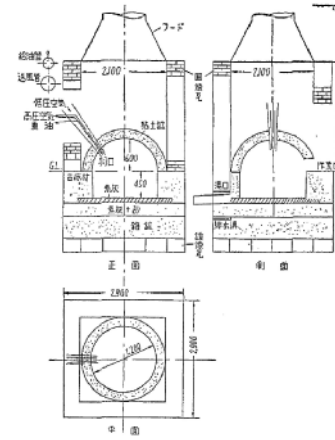


図4.7 真吹炉（尾小屋）

ライニングは基礎の上に300mm程度に耐火粘土をつき固め、その上に素灰をつき固める。次に直径約1,200mmの鉄杵（胴）をおき、周囲を粘土質硅酸鉄、あるいは繰り返しの炉材で充填する。これが炉底と側壁である。

操業方法は地床にカワを入れ溶解して空気で酸化する方法で原理は転炉と同じである。本法では4～5%程度の補助燃料を要する事、空気は低压で溶体表面に吹き付けるだけであること、また相当量の酸化銅も出来る事が転炉と大きく異なっている。

表4.2に真吹諸数値の推移（尾小屋製錬所）を示す。

表4.2 真吹諸数値の推移（尾小屋製錬所）

(A)	1907年1～6月		1910年1～6月		1928年		1935年		1958年	
	月平均	1回当	月平均	1回当	月平均	1回当	月平均	1回当	月平均	1回当
炉数（内常用）	6 (4)		6		5		5 (3)		5 (3)	
1ヶ月操業回数	56		77						67	
装入物										
熔鉱炉カワ	37,011貫	590～735貫	56,711貫	730～740貫		8.25t		7.5t	605t	9.06t
燃料	2,808貫	47～53貫		40～46貫	33 kg/Cu t (oil)		19.4 kg /matte t (コールタール)		23 kg /matte t (oil)	
産出物										
粗銅	15,396貫	260～285貫	20,676貫	260～273貫	140.25 t		150 t		237 t	3.536 t
ドブ	26,891貫	460～735貫	36,484貫	430～515貫						6.78 t
銅 実収率	79.874%		81.015%		81.5%		直接操収率 71.78 %			
製錬総合実収率	92.59%									
操業サイクル										
荒 湯	10 hrs		10 hrs		8.5 hrs		14 hrs		7 hrs	
沸 え	4		4							
かすり No.1	4.5		4.5		16 (oxidizing)		10 (oxidizing)		12	
かすり No.2	1.5		1.5						(ドブかき カワイレ 含)	
うるわし No.1	2.5		2.5		(はい) 4 (造銅)		1.5		1.5 (造銅)	
(龍) 鋳造 No.1	0.5		0.5		1 (造銅)		4.5		0.5 (鋳銅)	
鋳造 No.2	0.5		0.5							
工 数							1.55 t/matte t		1.2 t/matte t	

表4.3に1928年度の転炉、真吹炉別の銅生産量を示す。
図4.8に作業用具を示す。

表4.3 転炉 真吹炉別銅生産量

炉の種類	製錬所名	銅生産量 (Mトン)	比率 (%)
転炉	足尾	13,714	
	四坂	10,632	
	小坂	8,954	
	日立	6,935	
	小島	4,764	
	計	44,999	69.1
真吹	佐賀	9,672	
	尾去	3,406	
	尾小	1,683	
	荒屋	1,629	
	発盛	1,141	
	横川	1,009	
	吉盛	701	
	阿岡	432	
	国富	411	
	その他	1,013	
	小計	20,096	30.9
合	計	65,095	100

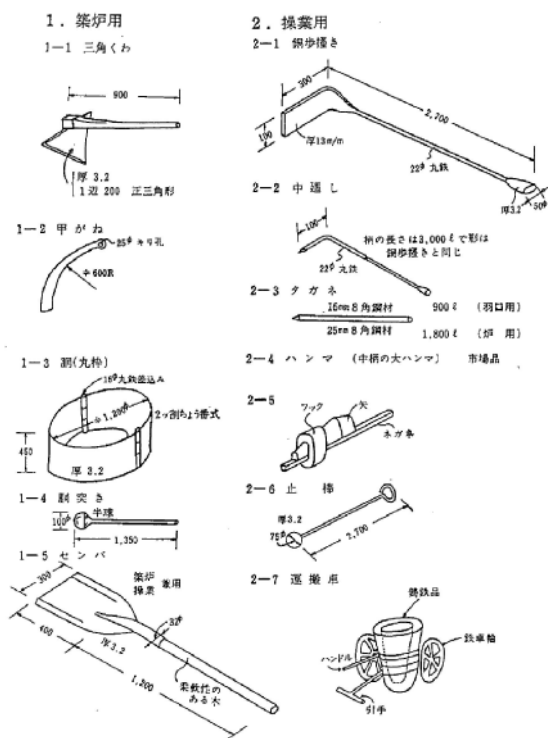


図4.8 作業用具

② 転炉

転炉の起源は1856年英人ベッセマー (H.Bessemer) が鉄製錬に於いて発明した画期的な方法で溶融状態の銑鉄 (鉄製錬の高炉から出る鉄) に空気を吹き込むだけで銑鉄を鋼にする製鋼法である。

その後この方法を銅に適用する研究が進められたがなかなか成功しなかった。1880年、仏人マネ (Mannhes) がはじめてカワから粗銅を得る事に成功した。

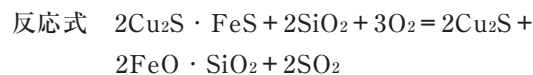
転炉のタイプは垂直型 (GF転炉) と水平型 (PS転

炉) があったが、現在ほとんどPS転炉が使用されている。

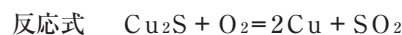
転炉の開発当初はライニングが酸性の珪酸質煉瓦であったから、カラミを造るには自身の炉壁を消費したため、1~2回の操業しか継続できなかった。現在の転炉はライニングをマグネシア等の塩基性煉瓦にすると同時にカラミ成分となる珪酸質溶剤は外部から加えることでライニングの寿命は大幅に長くなり1回の築炉で数百回操業を継続出来るようになった。

転炉の操業では二段階の反応で粗銅を造る。

第一期は造かん期で溶けたカワ中の硫化鉄を高圧の空気で酸化し、添加した珪酸質の溶剤により鉄分をカラミとして流しだすとともに、硫黄分は酸化しSO₂として回収する。炉内には高品質の白カワ (Cu₂S) が残る。



第二期は造銅期である白カワに更に送風して金属銅を得る。



日本では1894年足尾製錬所に酸性炉を導入、1920年小坂製錬所に塩基性炉を導入したのがPS転炉の始まりである。図4.9にPS転炉の概念図を示す。

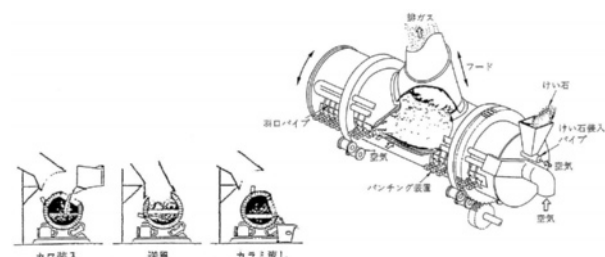


図4.9 転炉 (小名浜製錬 (株) 小名浜製錬所)

4.4 環境問題

銅製錬の工程の中で鉱石中の硫黄は亜硫酸ガス (SO₂) となって気化し、従来はその殆どが大気中に放散された。明治以来銅製錬の歴史は一面この亜硫酸ガスによる煙害との戦いであったと言える。例えば日本鉱業日立鉱山は1905年 (明治38年) 開山されて鉱山、製錬操業が開始されると同時に鉱煙による樹木、農作物への被害が発生し始めた。1908年 (明治41年) 新設された大雄院製錬所では煙害防止法として、鉱煙中の亜硫酸ガス濃度を空気で希釈して低所で放出する希釈拡散法であった為、煙害は益々拡大する結果となった。このため創業者久原氏は「煙突の煙は真直ぐに上昇するものである。従って、一途に上昇した鉱煙は高い煙突から排出し、高層気流に乗せて拡散すれば煙害は激

減する。」と考え、上層気流の観測や風洞による調査研究の結果を基に大煙突の建設を決断した。1915年（大正4年）、日立に156m（海拔481m）の大煙突が完成し、煙害は大幅に軽減されたが、気象条件によっては製錬操業の負荷を下げざるを得ない状況にあった。1916年（大正5年）操業開始した日鉱佐賀関製錬所は建設地選定に際し、長期間の気象調査を基に煙害の少ない佐賀関半島の突出部が選定され、167m（海拔294m）の大煙突が建設された。この大煙突による煙害防止は各製錬所でその後採用された。1935年（昭和10年）佐賀関では硫酸4.5t/日のオサメ塔式パイロットプラントによる薄硫酸の製造試験を開始、1939年（昭和14年）日立製錬所に100t/日のルルギ式硫酸プラントが建設され、本格的な硫酸製造が始まった。

また、住友別子銅山では亜硫酸ガスの煙害問題を解決するために、製錬所を新居浜から四阪島に移し明治38年に操業を開始した。しかしながら亜硫酸ガスの拡散が大きく煙害は拡大した。1929年（昭和4年）には煙害を抜本的に解決するために、ペテルゼン式の硫酸製造設備の導入を行っている。

ペテルゼン式硫酸製造法は硝酸式の中の塔式（他に鉛室式、半鉛室式あり）に当たる方法である。ペテルゼン式はドイツのペテルゼン氏（H.Petersen）が1923年特許出願した方法で鉛室をなくした全塔式の硫酸製造法である。本法の特徴は原料ガスの変化にたいする順応性が大きい事で、変動の多い製錬ガスでも比較的容易に処理する事が期待された。四阪島ではグリナワルド焼結炉の排ガスを対象として試験操業をおこなった。本格設備は第一期1929年、第二期1930年完成し煙害問題は著しく改善された。

1951年住友金属鉱山（株）では新ペテルゼン式硫酸製造法の特許実施権を取得し、四阪島製錬所のペテルゼン式硫酸設備の改善にこれを適用するとともに、日本国内の他社にも技術供与を行った。しかし1987年（昭和62年）四阪島製錬所における銅製錬の終焉とともに、その任務を終えた。

以上日鉱、住友の例を挙げたが、その他の製錬所においても煙害防止について努力を重ねていたが、まだ不十分で煙害問題は残されていた。

5 | 戦後の銅製錬（終戦から20年）

5.1 戦後の復興

戦時中銅は軍需品として大增産の命令が出され、人海戦術で昭和18年には9.5万tの電気銅を生産している。しかし徹底的な破壊の末敗戦を迎えた日本では銅製錬業も再起不能とまで言われる悲惨な状況で、終戦翌年（昭和21年）の電気銅生産量は僅かに2.9万tであった。戦争が終わり平和になれば、特に金属は軍需品に使わないから余り多量にはいらないと考えられていた。しかし戦後十年の電気銅の生産を見ると尻上がりに生産量は増大している。その理由の一つには、昭和25年6月に朝鮮動乱が勃発し、不況からブームに一変し世界的軍拡景気の展開は日本経済の再生に大きく貢献した事、一方制限なしに平和的用途に利用できるようになったこと等で、抑えられていた需要が一層拡大

されていたものと考えられる。表5.1に昭和21年から昭和30年までの10年間の国内電気銅の需給推移を示しているが、この間の生産の回復は主として戦災で発生した銅屑の回収によるものであった。しかし鉱山部門の立ち直り、外国鉱の入荷が増えるに従い故銅処理は漸減している。昭和30年には電気銅11.5万tとなり戦前の生産量を凌駕するまでに至っている。更に次の10年後即ち昭和40年には38万tで、そのうち国内鉱出が10万t余に達しており鉱山の開発も順調に進められているが、供給の大部分は海外鉱に依存するようになった。表5.2に昭和31年～40年までの原料別生産と需給の推移を示す。

終戦後10年を振り返り戦前、戦中においては考えられなかったような進歩と発展を遂げた栄光の10年と賞賛されたが、その後の10年は更に大きな進歩発展を遂げた時代であった。

表5.1 国内電気銅の需給推移（昭和21～30年）

年	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
生産	73,527	49,430	29,879	26,321	25,896	7,689	6,116	8,674	3,589	9,516	(歴年実績 74,410)
国内鉱から	25,246	29,765	29,665	34,101	39,483	41,405	49,889	59,748	60,533	73,046	(" 6,531)
外国鉱から	160	184	1	—	549	1,028	1,185	3,906	3,908	7,587	(" 32,555)
故滓から	3,843	10,906	30,407	39,822	49,658	49,398	39,438	27,411	42,037	34,070	(" 113,316)
計	29,240	40,855	60,073	73,923	86,690	91,831	90,512	91,065	106,478	114,703	
輸入	—	—	—	—	—	—	100	—	7,596	—	
供給合計	102,767	90,285	89,592	100,244	115,586	99,520	96,728	99,739	117,933	124,219	
需要	38,705	43,968	49,363	35,936	60,452	72,122	64,383	69,552	71,000	76,044	
電線	9,437	10,610	11,109	6,331	7,833	20,945	20,156	19,116	20,617	28,147	
伸銅品	3,195	5,828	3,159	2,294	3,246	2,683	5,247	6,583	6,404	6,655	
鋳鉄その他	51,337	60,406	63,631	44,561	71,531	95,750	89,786	95,251	98,021	110,846	
計	2,000	—	—	29,787	36,366	113	43	2,442	8,300	9,796	
地金輸出	53,337	60,406	63,631	74,348	107,897	95,863	89,829	97,693	106,321	120,642	
需要合計	—	—	—	—	—	(-) 2,495	(-) 1,775	(-) 1,813	2,096	—	
過欠補正	49,430	29,879	26,321	25,896	7,689	6,116	8,674	3,589	9,516	3,577	
繰越在庫											

表5.2 原料別生産と需給の推移（昭和30年～40年）

	昭和30年	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
原料	74,012	73,973	65,547	86,166	85,408	92,557	89,137	102,349	113,627	111,763	
国内鉱出	17,653	34,237	36,492	66,333	95,734	107,592	119,852	146,691	163,460	180,001	
国外鉱出	33,676	33,251	20,559	39,130	60,778	74,176	58,302	43,144	59,508	65,477	
スクラップ出	815	762	940	2,343	6,188	2,680	3,139	3,017	5,104	8,441	
その他	126,156	142,223	123,961	193,972	248,108	277,005	270,430	295,201	341,699	365,682	
生産合計	5,806	7,698	25,774	18,297	8,861	12,426	19,144	24,995	16,318	14,596	
繰越在庫	126,156	142,223	123,961	193,972	248,108	277,005	280,430	295,201	341,699	365,682	
受生産	22,117	45,524	9,672	14,411	59,357	104,281	36,713	56,209	117,460	68,760	
輸入	148,272	186,765	133,733	208,383	307,465	381,286	—	—	—	—	
計	154,079	194,463	159,407	226,680	316,326	393,712	326,287	376,405	475,777	449,038	
供給合計	99,579	110,636	95,566	152,656	213,665	257,531	203,442	249,103	318,418	298,248	
電線	38,401	46,071	43,443	56,831	77,366	99,458	84,078	90,671	123,784	114,367	
伸銅	7,582	9,038	6,694	7,528	9,174	11,323	8,350	6,996	9,691	9,034	
銅合金	1,469	1,914	1,329	2,022	3,807	4,608	5,138	5,323	5,627	5,826	
その他	147,031	167,659	147,032	219,037	304,012	372,940	301,008	352,093	457,520	427,525	
計	3,737	1,684	1,356	1,474	1,610	1,357	2,083	1,468	1,566	2,669	
輸出	150,768	169,343	148,388	220,511	305,622	474,297	303,091	353,561	459,086	430,194	
需要合計	7,698	25,774	18,297	8,861	12,426	19,144	24,995	16,318	14,596	18,474	
期末在庫											

終戦後3年を経た時点の記録として、当時の日本の海外技術に対する姿勢を良く伝えている日本科学技術連盟会長石川一郎氏の海外技術調査委員会報告書（2）「最近海外における銅、鉛、亜鉛選鉱製錬―技術の進歩」の序を紹介する。

「終戦後3ヵ年半の時日を経過し、この間、われわれ国民が努力してきたところは、自立経済の達成を目標とする我が国の復興であって、すなわち食糧の増産、国土資源の徹底的、科学的な開発とその利用であるが、これが為には産業全般の技術水準を向上することによってその高度化、合理化を計り、廉価で優秀な製品を作って、我が国農工業製品の国際市場における地歩を獲得しなければならない。しかるにあらゆる技術は世界から隔離された孤立の現状では到底その目的を達成し得べくもない。太平洋戦争開始のころより敗戦後の数年を含む約10ヵ年間の我が国は万事鎖国的の状態にあり、長期の不合理と荒廃と窮迫とのうちに経過し、この間文化各般の発展は停滞し、特に科学技術は研究の停滞と装備の老朽化が著しく、当面最大の国民的目標たる我が国の自立復興を達成せんがためには何よりも先ず、知識と経験を世界に求めたゆまざる勤勉力行によって、世界の進歩に接近すべき方法を明らかにし、関係者全体の協力によって、これを実際に摂取してゆく事にある。」

終戦によって特に非鉄金属業界に大きな影響のあった事件について述べる。

① 財閥解体

三井、三菱、住友などの財閥が企業の力を弱める狙いで細分化された。例えば金属と石炭の分離で、当時は黒いダイヤと言われた石炭は全盛期で分離に際し事務部門、工作部門の人々は競って石炭部門を希望したと言われる。

② 朝鮮戦争（1950年）

戦争特需に金偏景気といわれる時代で業界は生き返った。敗戦の復興から発展への大きな足がかりとなった。

③ 税制

インフレと投資に有利な税制が出来て新工場の建設、増改築がやりやすい環境にあった。

④ 労働組合

春闘という言葉はいまや風化しつつあるが、労働運動の高まりでベースアップの要求は強くなり、企業は労務費抑制のために積極的に合理化投資を行った。

電気銅の生産量で見ると、終戦の翌年（1946年）ドンドンの29,000t/年から5年後には早くも戦前のレベルを

上回る9万t/年に達し、10年後12万t/年、15年後には27万t/年と急速に拡大している。以下にこの時代の特徴的な技術について述べる。

5.2 溶錬

既に述べたように終戦時の銅製錬現場は壊滅的な状態にあった。日本の代表的な銅精錬所の一つである足尾製錬所の終戦後の歩みを、日本鉱業会誌第72巻822号に発表された岡添氏の論文を紹介する。「太平洋戦争中当製錬所は幸にして爆撃などの直接被害は受けなかったが、戦争が終わりに近づくに従い次第に操業は困難の度を加えていった。熟練工の不足は勤報隊、捕虜によって補うべくもなく、鉱員の過労は能率の低下に拍車をかけ、空襲警報による頻繁な溶鉱炉の吹止めは炉況の著しい悪化となって、操業不可能の一步手前まで追い詰められたが、増産のための異常な努力を続けつつ終戦を迎えた。戦争中の無理が終戦後の復興に与えた影響は各製錬所とも、相当なものであったと思われる。終戦直後製錬所の受入鉱石は激減したけれども、当時相当量の貯鉱を持っていたところへ関係者の努力によって大量のークスが入荷したので、選鉱課などから鉱員の応援を得て間もなく溶鉱炉作業を開始した。しかしながら溶鉱炉自体のみならず、その関係の建物、設備など大破してはなはだ危険であったので、年末の2ヶ月間休炉して溶鉱炉は炉長を約70%に縮めるとともに、鉱石庫、装入床等到大修理を加え、昭和21年1月に溶鉱炉を吹き入れた。当時の設備は溶鉱炉1基、焼結炉3基、団鉱機1基および転炉3基であったが、操業上まず苦しんだのは労務者の不足であった。特に終戦直後には陸の孤島といわれるほど食糧事情の極端に悪い足尾を離れるものが多く、一方、職と家を求めて入山するものも少なくなかったが、勤報隊と捕虜によって辛うじて作業を続けていた労務の補いにはならず、ことに熟練工の不足はいかんともし方がなかった。約2年後の昭和23年には労務者の質量ともに回復してきたが次に来たものはークスその他の資材と原料鉱物の不足であった。このような状態で長期にわたる溶鉱炉の吹き止めが幾度もあって溶鉱炉の成績、従って製錬全般の能率は極めて悪かったが、その間各種設備の改修、手入に努力した。」

国内の各製錬所は多少の差はあっても同じような状態にあったと思われるが、驚異的な立ち直り見せた原因のひとつは日本人の勤勉、努力、技術的水準の高さによるものであろう。

5-2-1 溶鋇炉

既に述べたように溶鋇炉製錬法では原料の塊状化が常に大きな問題であった。そのための粉鋇処理工程として戦前は焼結や団鋇を行うのが通常であったが、戦後は浮選精鋇比率の増大、精鋇品位の上昇に伴う硫黄の有効活用の必要性、更には作業環境改善の見地からも、生精鋇のまま溶鋇炉に装入する方向での諸技術が成果を挙げるようになった。

1) 佐賀関製錬所におけるペレタイジング法の確立

●ドラム型造粒機による造粒試験

昭和30年ごろから当時鉄鋼やセメントの原料に用いられつつあったペレタイジング法を適用すべく、先ずドラム型の造粒試験機によって試験を行った。その結果一般の浮選銅精鋇やこれに煙灰等を適量混合した原料は、適当な水分のもとで良好なペレットとなることがわかったので、昭和30年10月、処理能力3,000t/月のドラム型造粒機1基を建設し試験操業を開始した。操業成績は煙灰発生率が減少、溶錬鋇量が増加、炉況が安定するなどの効果があった。

●ディスク型造粒機の導入

昭和31年ディスク型造粒機が国産化されたのを機会に試験機を導入しドラム型との比較試験を行った。その結果総合的に見てドラム型より優れている事が確認できた。昭和32年にパン径2,800mmのディスク型造粒機1基を建設し、本格的なペレットによる溶錬炉操業を開始した。その後相次ぐ増産に対処して造粒機を増設した。ディスク型造粒機によるペレット法はその後、日立製錬所、日比製錬所でも適用された。

2) 尾小屋における精鋇直装操業

尾小屋においては昭和24年以降浮選法の進展に伴い銅精鋇の品位が上昇（17～18%）し、粒度は殆どが200メッシュ以下の泥状鋇と微粉鋇になり、これまで行われていたポット焼結の成績が著しく低下した。このため寧ろ粉鋇処理を全廃して、全原料を直接溶錬炉で処理する事を計画した。昭和24年11月から焼結鋇の比率を段階的に減らし、翌25年3月には粉精鋇の直接装入操業に切り替えた。原料の前処理を一切行わない粉鋇直装操業は、開始以来炉況の不安定や煙灰率の変動など多くの困難に直面したが、逐次これらを克服し溶錬炉の炉体の改造等を行い、昭和26年後半ごろより安定操業となり経済的にも大きな効果を挙げた。

この尾小屋の完全粉鋇直装操業は粘土質の同所産精鋇の特色を生かした小規模のものであったが、後述する百田法に先駆けて、焼結と溶錬を一挙に同一溶錬炉

内で行わせる事に成功した独創的な技術であったと言える。

3) 佐賀関製錬所における熱風重油吹き込み操業法の確立

溶錬炉に熱風を使用する事は、19年ごろから試みられていたが鋇石の炉内酸化率が低下することや、熱効率の良い空気過熱装置がなかったため、生鋇吹きにおいては結局採用されなかった。しかし戦後の半生鋇吹きにおいては、鋇石品位の上昇や、硫黄回収率の向上の必要性、また空気加熱装置の改善もあり、佐賀関製錬所においては試験操業を開始した。試験操業で良好な結果を得たので昭和39年以降300℃の熱風操業に入った。

更に昭和39年から羽口炭を全廃し、重油吹き込みに変更した。この一連の改造によって、燃料率および燃料費の低減、炉床能率（生産能力）の向上、硫黄回収率の向上、カラミ損失の低下、人員の低減と作業環境の改善等多くの成果を挙げた。

熱風重油吹き込み操業法は羽口の水冷差込ジャケットと合わせて日本の特色である、巧みな羽口関連諸技術の到達点を示すものであった。本法は佐賀関の他に日立製錬所、四阪島製錬所、日比製錬所でも実施され、いずれも溶錬炉操業の終焉まで続けられた。

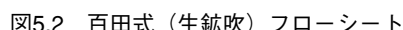
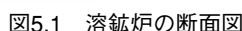
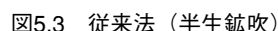
4) 百田式溶鋇炉

四阪島製錬所では、かねてから溶錬炉排ガスを中和して硫酸を製造していたが、昭和28年ごろより溶錬炉サイドテイク方式として団鋇精鋇と焼結塊の両方を用いた半生鋇吹を行い、排ガス中のSO₂をベテルゼン式硫酸工場で硫酸として回収することに成功した。

更に工程簡略のため原料精鋇の固化について種々の基礎的な試験研究を行い、その結果精鋇を適当な水分で十分混練して粒子を密着させ、酸化を防ぎつつ850～900℃に加熱すれば固結し飛散することなく溶解も容易である事がわかった。この方法を採用するため溶錬炉を改造し、炉頂の装入部を鋳鋼板の装入用カーテンで縦に3分して中央部に混練した精鋇やコークスや塊状原料を層状に装入するようにした。本法では先ずバグミルで混練りされた銅精鋇等の練鋇（水分14～15%）が、生鋇のまま炉上を往復するシャトルコンベアからカーテン内に投入され、つぎにこれに見合ったコークス、溶剤、繰り返し物等の塊状原料が炉側から投入される。炉内チャージは常にカーテンの下端を切らぬように保持してフリーエアを防止し、SO₂濃度の高い排ガスを得て硫酸工場に送る。

百田法の特徴は溶錬炉内でその熱により精鋇の焼結を行わせ、団鋇、焼結等の大掛かりな粉鋇処理工程を

図5.1に改造溶鉱炉の断面図を示す。図5.2に百田式のフローシートを、図5.3に従来法（半生鉱吹法）のフローシートを示す。表5.3に各製錬法の操業成績例を示す。



				←百田法→	
	製鍊方法	還元吹	半生鉱吹	生鉱吹	生鉱吹
	期間	～28年7月	28年8月～ 29年11月	29年12月～ 30年3月	30年4月～
	データ	25年4月～ 26年3月	28年10月～ 29年3月	30年1月～ 30年2月	30年7月～ 30年12月
装入割合	生 鉱 塊	5.36	19.96	11.6	5.87
	精 鉱	—	14.78	62.31	64.98
	塊 灰 及 び 団 鉱	2.15	16.29	2.53	5.9
	燒 結 鉱	89.67	38.17	—	—
	銅サイ その他	2.51	1.48	0.25	1.9
	珪 酸 鉱	0.41	9.32	23.3	21.35
	計	100	100	100	100
燃料率	石 灰 石	13.88	10.74	11.87	11
	転 が カ ラ ミ	25.84	44.89	45.15	36.45
	コ ー ク ス	13.57	7.31	6.98	5.12
	石 炭	0.36	1.88	2.39	3.18
	計	14.03	9.19	9.36	8.28
	カ ワ 品 位	30.87	28	29.49	36.87
	ガ ス SO ₂	—	3.7	4.88	5.46
備 考	—	—	—	—	バグミル調製

戦後小坂製錬所では溶鉍炉および転炉からの排ガス中に含まれる亜硫酸ガスによる農作物への煙害、および花崗銅精鉍中の亜鉛分が次第に増加し、平均18%にも達して溶錬操業に悪影響を及ぼすようになった。米国ドル社の流動焙焼法を用いて黒鉍の処理方法として新プロセス（銅、亜鉛の硫酸化焙焼－浸出－銅、亜鉛の採取電解－排ガスからの硫酸回収）を検討する事になり、1951年ドル社における2回の試験を行い予想以上の成績を取めた。さらに、銅、亜鉛、同時製錬法に関する研究、検討を進め工業化試験を経て新製錬所建設に踏み切り、第一期工事は1952年11月完成し、試験操業を開始した。

銅製錬技術の系統化調査

5-2-3 転炉による銅鉛の酸素製錬法とカラミ選鉱

佐賀閼製錬所では1951年に我が国で初めて転炉の排ガスを主原料として濃硫酸を製造する工場を建設、操業を開始した。これを契機に転炉で直接銅精鉛を処理すれば硫黄の回収率も高くなる事から、その検討がなされるようになった。さらに酸素製造設備により送風中の酸素濃度を調節すれば、余剰熱量により銅精鉛をより多く溶解できることになり、溶鉛炉の廃止も可能ではないかとのアイデアから1951年佐賀閼製錬所で試験を開始し、その成果に基づいて1958年日立製錬所で操業が開始された。操業計画では次の通り。

- ① 生産規模は供給鉱量9,500t/月、粗銅生産量1,500t/月。
- ② 転炉に装入する銅精鉛はペレット成型し水分3%に乾燥、送風は酸素濃度30～40%の酸素富化空気として転炉に送風する。
- ③ 転炉カラミは選鉱場を新設し得られた銅精鉛は転炉へ繰り返し、鉄精鉛は販売する。

日立に於ける酸素製錬法は1958年末から15年間続けられた。

1968年度操業成績（月平均値）を表5.4に示す。

表5.4 1968年度操業成績（月平均値）

操業日数	29.1日/月	使用転炉数3炉	操業延回数229回
銅溶鉛炉カワ	4,390t/月	(Cu39.4%)	
銅精	7,380t/月	Cu24.4% S32.6% Fe28.2%	ペレット水分7.5%
放銅、銅滓	2,098t/月		
アノードスラップ	1,320t/月		
粗銅	1,156t/月		
粗鉛	6,813t/月		
転炉ガラミ	7,845t/月	Cu4.1% Fe44.0%	
塵	963t/月		

転炉による銅鉛の酸素製錬法は、比較的短期間で終焉し、より大量生産に適した自溶炉法に転換されたが、銅製錬に積極的に酸素を使用して生産効率を上げることや、乾式製錬の中に湿式の選鉱法を取り入れた事など、当時としては画期的な技術であった。その後日本の多くの銅製錬所ではカラミ選鉱法が採用されるようになった。なお本法は後にチリーに於けるエルテニエンテ法に発展した。

5-2-4自溶製錬法

1) 自溶炉の構造

自溶製錬は鉱石中の硫化鉄の酸化熱を利用して溶錬を行う方法で多くの研究がなされたが、1949年フィンランドのオートクンプ社が工業化に成功したのが始まりである。この自溶炉法はその後改良が重ねられ、今日では世界の産銅量の40%は本法によるまでになり世界の溶錬法の主流となっている。図5.4に自溶炉の概念図を示す。

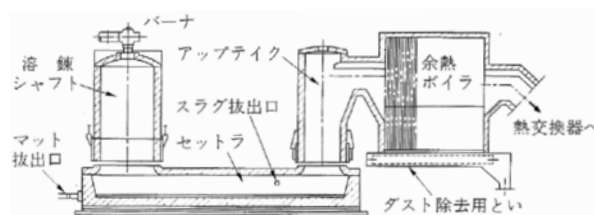


図5.4 自溶炉の概念図

自溶炉は図5.4に示すようにシャフト、セトラ、アップテイクからなる。シャフト部では炉頂から乾燥した粉精鉛を酸素富化空気又は予熱した高温熱風と共に吹き込むと、急激な酸化燃焼により溶融製錬が行われ、カワとカラミが生成する。酸化反応の熱だけでは熱量が不足するので重油をバーナーで補助的に燃焼させる。セトラ部はカワとカラミを分離すると共に、それらを貯めておく場所でもある。排ガスを余熱ボイラに導く部分がアップテイクである。

2) 古河鉛業の自溶炉製錬

既に足尾製錬所における戦後の状況については述べたように設備は著しく老朽化していた。また当時足尾の最大のテーマは長年にわたる煙害問題を解決する事であった。そのために、溶鉛炉の代替炉としては、日光からの安価な自家発電の電力が使えることから電気炉を第一に考えていた。1945年頃から電気炉製錬のテストを行い、電気炉での操業が可能であるとの結果を得ていた。当時の海外における電気炉製錬の実情を調査したところ、銅の電気炉製錬について豊富な経験を持っているフィンランドのオートクンプ社が既に電気炉製錬を中止し、電気炉よりも有利な自溶炉製錬法をスタートさせている事が分った。

早速古河ではオートクンプ社と数次の折衝を重ね、自溶炉と電気炉との優劣を検討した。1952年に古河の岡添氏（足尾鉛業所副所長）と三菱の荒金氏（直島製錬所所長）の二人がハルヤバルタ製錬所を訪問して操業状況を詳細に見学した。その結果古河では粉鉛処理ができてエネルギーコストが安く、さらに排ガスのSO₂濃度が高くて硫酸の製造に適した自溶炉方式が足尾の目的に最適である事を確認し、自溶炉製錬法の採用を決めた。

古河鉛業は1954年オートクンプ社のライセンス1号として技術導入契約を締結し、1956年3月足尾に我が国最初の自溶炉が完成、操業試験を開始した。自溶炉系統はオートクンプ社の意向に従い、自溶炉2基廃熱ボイラ2基を建設した。煉瓦の損傷、修理に備えて1年程度の周期で交互に使用することにした。

●第一期試験（1956年3月～1957年4月2号炉使用）

目的 生産目標（粗銅月産1,000t、硫酸4,200t）の達成

1956年3月1日より昇温を開始、3月17日始めて鉱石装入を開始したが、乾燥能力不足、カワ、カラミ抜き作業の未熟練、ボイラ等の通風抵抗の増加、単体硫黄による排風機の閉塞、その他各所における故障が頻発の為、11月に至るまで目的の生産量に達する事は出来ず、操業は極めて乱脈であった。粗銅生産量は11月990t/月、12月1,025t/月であった。

問題点と対策

- ① 乾燥工程の乾燥能力不足と乾燥粉回収設備の不備。……対策として乾燥能力向上のために大型排風機の設置、サイクロンの後ろに設けられたバグフィルタを撤去し、屋外に電気集塵機を設置して、サイクロンの排気をこれに導入するようにした。これによって乾燥能力を確保でき、更に乾燥粉の回収率も一応満足するレベルに達した。
- ② 通風抵抗の増加によるトラブル……本法の最も大きな盲点であった。即ち、廃熱ボイラの設計が一般の発電用ボイラと同じく熱効率にこだわりすぎた為、操業開始後数日にして抵抗が増加し通風不能になり、その後数回にわたり休炉の上バッフル除去、掃除用孔の増設を行った。自溶炉系は硫酸工場まで約200mにおよぶ煙道で、煙道内の煙灰の抜き出し設備が不完全な為、各所で（特に曲がり部、拡大部）通風抵抗が増加し、掃除孔、マンホール、ホッパー部分よりの漏入空気の防止と、煙灰の抜き出し設備の整備に迫られた。電気鍊かん炉系の煙道は煙道内ガス速度が適正でなかったことにもよるが、堆積ひどく又酸性強く、粘着性が大きであった。シュートよりの抜き出し困難なため煙道を途中で切断短縮し大気に放出することにより操業の中断を避けた。単体硫黄の生成は低品位のカワを生成する場合起こるものであり、当初安全をみて補助燃料を多量に使用し、又調鉱の波打ちも原因して、カワ品位が極度に下がり、このため操業開始後一週間にして排風機入り口よりケーシング内まで単体硫黄が付着し運転不能に陥った。
- ③ タッピング（カワ、カラミ抜き作業）の難渋
タッピングホールの不備もあったが自溶炉からの高品位カワのタッピングは、溶鉱炉での低品位カワに慣れていた作業員にとって初めての経験でタップしたカワをレードルの中で固めたり、樋への居付きの手入れ等々困難な作業の連続であった。

- ④ 転炉操業の不安定……生産量の低下（直接実収率の低下）と半製品の山積みとなる。

溶鉱炉時代の低品位のカワ処理しか経験のない従業員には銅含有量55%以上の自溶炉カワの処理は容易なことではなかった。当所の転炉は超小型のため熱の平衡がくずれがちで大きな問題点として残った。

- ⑤ 調鉱関係作業の不円滑

調鉱関係作業の不円滑は所全体の波打ちの原因であったが完全整備の為には長期休炉を必要とし、又適確な方法が分らなかった。ただ、フラックスと鉱石を別々に乾燥して夫々の乾燥鉱庫に入れた場合、鉱石だけでは粒度が細か過ぎ、又着火するため棚吊の機会が極めて多く、この結果炉にフラックスのみが装入されてカワ品位が極度に上昇するし、又炉温が急に低下するため、乾燥機以前に調鉱する事に変更した。いまだ不十分ではあったが、この種のトラブルは半減した。

以上のような経過を辿り、当初の操業は一応12月以降目標の生産に達する事は出来たが、乾燥用の屋外電気集塵機からの回収粉の処理、これに伴う自溶炉に於けるトラブル、熱風炉における V_2O_5 腐食、電熱空気加熱器よりの熱風漏出等問題は絶えなかった。

乾燥電気集塵機の回収粉はきわめて細かく、又粘着性が強く棚吊りになり易いためその搬出が容易でなく、又搬出されるとすぐ着火するため円滑に運搬する事も出来ず、屋外に堆積せざるを得なかった。従って空気輸送により炉頂に運搬しそのままシャフトの天井より炉内に吹き込む事にした。このため回収粉の屋外堆積は中止する事が出来たが、炉頂の冷却の為シャフト上部の瘤の発達は助長された。熱風炉における V_2O_5 腐食については、1956年9月よりこの抑制策を講じていたが、その後 V_2O_5 及び SO_2 による腐食が進行し電熱加熱器の発熱体貫通部の緩みも手伝って熱風の漏れ割合は20%以上に達した。

●第二期試験（1957年5月～1958年10月1号炉使用）

目的 収率の向上（銅：95.8%、硫黄：89.3%）

第二期は1号炉で第一期の結果を参考にして各工程下記の改善を行った。

- ① 乾燥工程

旧バグフィルターを中止し電気集塵機を新設、サイクロンの排気を屋外の電気集塵機に導き回収率を高め、又ダストチャンバー、サイクロン下のエアロック部分より空気の漏入を防ぐ為、吸気防止用ダンパーを設け、更に電気集塵機の機械整流器をセレン整流器に変えて荷電時間の増加を図った。

② 自溶炉及び電気鍊かん炉

電気鍊かん炉は当初の目的と異なり、半製品を処理する事を目的とした為十分な鍊かんが行われな
いので、新たに鍊かん用の小型電気炉を設置し更
に試験電気炉を設けて脱銅試験を行った。自溶炉
内のカラミの改質に石灰石を使用、又カラミ中の
硅酸分の含有量を増やす等試行錯誤を繰り返しな
がら、鍊かん炉の負荷を軽減すると同時に、カラ
ミ中の銅分を下げるべく努力した。

③ 転炉

超小型転炉では品位の高いカワを処理する場合熱
平衡を取ることが困難である為、断熱煉瓦の保温
につとめ、また羽口のピッチを縮めて羽口数を増
加し、単位時間の発熱を増して溶体温度の低下を
防ぎ半製品の発生を抑制した。

④ 煙道の整備

自溶炉系ならびに鍊かん炉系の煙道を夫々整備
した。

以上の諸改善の実施に伴い銅、硫黄の採集率は初
期の目的を達成できた。

●第三期 粗銅生産量の増加

増産のために下記の改造を行った。

① 調鉍

受入庫を増設、鉍種をA,B,C,Dに分類して、索道の
搬器数により鉍石の配合を行い、更に乾燥給鉍ビ
ンを改造、容量を大きくしベルトフィーダーの幅
を広く、ベルトスピードを極度に落として鉍石途
切れ、及び送り出し量の波打ちを取り、またフラ
ックスについてもゲートの開度を大きくし、量の調節
はベルトスピードを変更することによって行った。

② 乾燥

乾燥能力を支配するのはケージミルの内容積であ
るので周速度を変更しないで、内容積を60%増加
し処理能力を約30%上昇させた。

③ 自溶炉及び鍊かん炉

アップテイク通風抵抗増による操業度の低下を防
止する為、左右にオイルバーナーの中心より重油を
油圧により噴霧吹き込む事にした。電気鍊かん炉に
おいては最も溶解能力のある三本の電極の中心に、
鉍石を大量に装入する為、電極間の距離を広げた。

④ ボイラ及び熱風炉

急速ろ過装置、純水装置、更に連続清缶剤注入装
置を設けて、水処理不十分による管膨出及び漏水
を防ぎ、又炉底の管上の煙灰堆積によるトラブル
をなくする為、炉底管を左右に寄せ過負荷操業に
備えた。

⑤ 転炉及び鑄銅

羽口のピッチを縮めることにより転炉操業もかな
り改善されたが、いまだ十分でない為転炉改造を
行い、長さを長くして羽口数を増加、引続き羽口
径を大きくして単位時間の送風量を増し最初の処
理量5t/回から15t/回に増やした。

生産はほぼ順調に進み粗銅生産量も1,700t/月に達
した。しかし溶鍊操業と転炉操業間の調整が十分
でなかったので生産目標に自溶炉装入鉍量をあわ
せ転炉操業サイクルを作成し、転炉操業を効率化
して粗銅生産量2,000t/月を達成した。尚、鑄造は従
来の堅型鑄造を廃して平型連続鑄銅機を採用した。

以上で粗銅2,000t/月の生産技術はほぼ達成できたが
商業炉としては下記の問題点が残った。

*アップテイクおよびセトラ内の瘤生長による通
風障害

*冷却方法不適正によるシャフト鉄皮の亀裂

*自溶炉セトラ天井煉瓦の吊金具切断による落下

*セトラとシャフトおよびアップテイクとの接続
部水冷管よりの漏水

*冬季受入鉍石の凍結による気流乾燥機能力低下お
よび電気鍊かん炉における爆発事故

*ボイラにおける過負荷による加熱管の乱れ、ホッ
パー内の煙灰の焼結

*熱風炉の空気漏洩

等全般的に設備上の不備な点が多く、1961年硫黄の
改善回収も含めて新設備建設計画の作成に着手した。

●第四期 新設備（粗銅生産能力2,700t/月）の設計、
建設の概要と操業

① 調鉍

調鉍においてカワ品位、カラミ組成に大きく影響
を及ぼすのは、フラックス添加量の変動にあるの
で種々検討の結果、定量停止式コンベヤーバラン
スにより、鉍石とフラックスの調合を行う事にし、
且つ作業の安全および運搬能力向上の為クレーン
を設け、さらに索道による運搬をベルトコンベア
ーとトリッパー付コンベヤーの組み合わせに変更
した。

② 乾燥機

従来の気流式に加え特に水分の多い鉍石の処理に
備えて回転式予備乾燥機をケージミル前に設け
た。又従来のサイクロンの収率は不十分であった
為、新しく設計した。

③ 自溶炉本体に於ける設計上の問題点の矯正

設計上の問題点は、セトラ天井、セトラとシ
ャフトおよびアップテイク下の曲がりの部分、ア

ップテイク等の構造と、カワ、カラミのタッピングホルの位置であった。構造については煉瓦の損傷がないのでセトラ天井を迫構造にし、曲がり部分はこれまでの経験と試験を基にして、水冷銅管により形成し、又アップテイクについては、カラミ抜き口の位置と関連してセトラと直角方向（オートクンプ社原案を90度曲げる）に設け、更にこの部分の煙灰堆積および堆積煙灰の除去作業が容易なように流線型とした。カラミ抜き口については炉内に溶体の動かない箇所ができないよう、炉の最後部に設け、カワ抜き口は瘤の生成場所が分らないので作業をある程度行い、確認の上固定する事にした。

④ 電気鍊かん炉

これまでの電気鍊かん炉の経験から新電気鍊かん炉では装入系統の運転制御、電極設備の簡素化、排煙系統の完備、作業環境の改善等行い極めて簡素な鍊かん炉とした。

⑤ 熱風の製造方法……蒸気による空気加熱方式の採用

これまでの排ガスによる直接熱交換では高温腐食、低温腐食、煙灰による通風阻害、操業の不安定性等の点から新しく蒸気による空気加熱方式に変更した。

これにより煙灰、腐食によるトラブルはなく、熱風炉自体については懸念すべき点はなくなった。蒸気発生源になるボイラの設計についてはこれまでの失敗と資料をもとに周到な準備と計算を繰り返し、数度に亘る変更を経て建設に入った。

⑥ その他の改善

半製品、特にボイラ及びサイクロン回収煙灰の処理は最初の計画では十分な検討をしなかった為、種々のトラブルを余儀なくされた苦い経験があったので、十分な検討を加え万全を期して設計を行った。その結果高収率のサイクロンを設け、排風機は翼車の磨耗や振動を防ぐ為低速のものを採用した。更に煙道等も過去の経験に基づき、種々合理化を行った。

1962年8月新工場の建設が完了し操業を開始した。調査、乾燥、電気鍊かん炉においては特に問題はなかった。しかし自溶炉アップテイク部分の瘤の生長は異常に早く、またその溶解除去に長時間を要するので、酸素ガスバーナー等で種々除去試験を行った。炉内ガス温度を多少上げることで瘤の溶解速度が急激に上がることが判明したので、熱風炉出口より熱風を一部分岐して重油燃焼に使用して温度を上げることで、自溶製鍊発足時よりの難問題を解決する事が出来た。ボイ

ラの煙灰は最初ホッパーから直接排出したが、損失が大きく又作業環境を悪くするので、下部にチェーンコンベヤーを取り付け、そのまま気流輸送にて処理し半製品の処理は軽減された。

● 第五期 場内運搬の簡素化、銅、硫黄の収率の向上

場内には各所に半製品が散在していたが、新自溶炉ではかなりの余裕ができたので、半製品を鉱石と混用し、又転炉においては、計画的に貯蔵半製品の処理を進めた。又自溶炉サイクロン出口ガス中の煙灰濃度はまだ相当高く、排風機およびその前後にトラブルがあった。これの解消と銅の高い煙灰を集中的に回収して、広範囲に分布することによる煙灰の損失を防ぐ目的でサイクロンと排風機の間にホットコットレルを設けた。

ボイラ発生の塊状ダストは従来電気鍊かん炉にて処理していたが作業は複雑で、且つ鍊かん炉カラミ中の銅分を高くする原因であったので、チェーンコンベヤー出口に小型ケージミルを設け、粉碎の上全量空気輸送で運搬、自溶炉にて処理する事に変更した。

以上の試験結果から、主要な改善項目は次の四項目にまとめる事が出来る。

- ① 導入の経緯からオートクンプ社の意向に従い自溶炉2基、廃熱ボイラ2基、で1年程度の周期で交互の運転し、設備の配置は炉とボイラを一直線にした。しかし試験結果から自溶炉は1基で十分と判断し、更にセトラはクレーン通路に平行に、ボイラはセトラに直角に配置した。この配置はその後自溶炉の標準的なレイアウトになった。（図5.5参照）

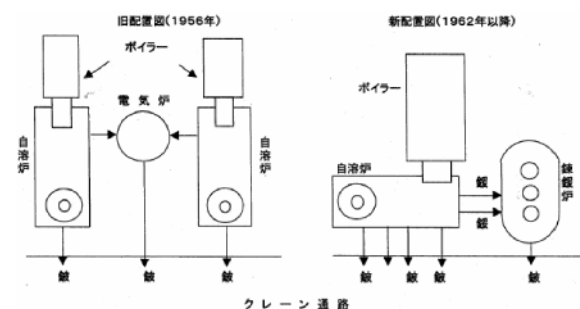


図5.5 新旧配置図

- ② 鉱石の乾燥にケージミルと気流乾燥、気流輸送を組み合わせた方式を開発した。更にケージミルの前にショートロータリーキルンを設けることで、水分の多い鉱石でも着火することなく十分乾燥できることを発見し、その後の自溶炉製鍊のみならず三菱連続製鍊法にも採用されることになった。（図5.6参照）

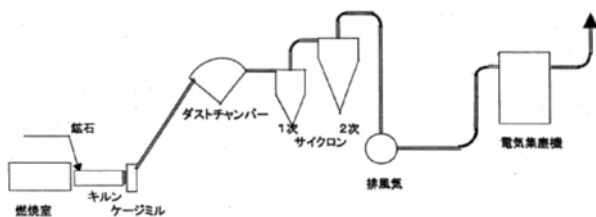


図5.6 鉍石乾燥系統図

- ③ セットラの天井部は特殊冷却H型銅を用いたセットラ天井構造を開発する事で長期間の使用に耐えるものとなった。シャフトにはフィン付冷却銅管と水冷銅ジャケットを組み合わせた立体冷却装置を開発設置した。
- ④ 送風の予熱には重油焚の熱交換器を設置したが、金属チューブの腐食の問題があり、蒸気による空気加熱器を開発した。

試験当事者の述懐

当時本試験に係わりのあった人々の意見を纏めると、次のように要約できる。

今から振り返ると自溶炉には二つの大きな問題があった。

① 自溶炉内のマグネタイトの挙動

自溶炉では溶鉍炉時代より、はるかに多くのマグネタイトが生成することに気づけなかった。毎月の生産会議では溶鉍炉カラミは温度が低く、カラミ中の銅含有量も低かった。したがって溶鉍炉のようなカラミを造るべきではないかと再三意見が出た。しかし、溶鉍炉のカワ品位の低いときに比べれば、自溶炉のカラミ量が多い。ボイラ、ガス処理能力が一定であるので、溶鉍炉と同じようなカラミを造るためには、溶剤を増やす必要があるが、鉍石の装入量は減少することになる。勿論、作業温度が下がれば或る程度装入量は上がるが、温度が下がると生成したマグネタイトの一部がカラミから遊離して炉外に排出されなくなり、これが炉底に沈着しカワ抜きを困難にする。結局自溶炉作業に適したカワ品位、カラミ組成、銅採集率の関係は溶鉍炉作業と異なるという認識が定着して来た。同時期にカラミの組成とカラミ中のマグネタイト含有量の関係が大学でも研究され、カラミ中のマグネタイトとカラミ中の酸化鉄の関係は正相関関係にあることが解明され、現場でもマグネタイトに対する対策が確立されマグネタイトによるトラブルは殆ど解消された。現場作業ではマグネタイトは出来るだけ早くカラミと一緒に炉外に排出するようになった。

② ボイラトラブル、その他機器の故障に伴う作業度の低下

もう1つの問題は毎日数時間のボイラ掃除があり、その間作業を中断し、重油を焚いて保温するが、炉底に近いカラミの温度は低くなり、マグネタイトはカラミより重いので炉底に固着することになり、炉底が上がりカワ抜き作業が困難になる。これを解消するためにボイラ掃除終了後昇温するが、炉底まで温度を上げようとするガス温度はかなり上昇し、炉内の耐火物を溶損させることがしばしば起きた。

このために前述の特殊な天井構造の考案、並びに耐火煉瓦の冷却方法を考案した。

炉とボイラとの配置を直角にしたのも、アップテイク真下のセットラ部分にはアップテイクから滴り落ちるカラミやダストがここに吹き溜まりのように堆積し、これが冷えるとマグネタイトだけが残し、固着して堆積し、ひどいときはガスの通過も困難な状態までなったことがあった。常にこの部分のカラミを動かし、マグネタイトを固着させない為に、炉とボイラの配置を変更し、カラミの抜き出しを容易にした。

以上一連の試験作業を経て今日の大型自溶炉建設の基礎は確立され、産銅各社は古河式自溶炉を導入するようになった。

5-2-5 製銅

終戦後しばらくの間故銅、銅滓等の原料が多く転炉作業は如何に多くの処理を行うかが重要な問題であった。銅生産量の増大に伴って転炉での処理量も増大し、炉型式はPS型に変更するとともに大型化した。大型化に伴いフードの改善、排ガス余熱の回収、羽口の改造、自動傾転装置の設置などにより作業の安定化、能率化が促進された。付帯設備としては煙灰回収装置の改修又は新設、排ガスからの硫酸製造設備の増設又は新設、鋳銅機の機械化、カラミ選鉍設備の増設、または新設、など次々に改善が行われた。

5-2-6 環境問題（硫酸製造）

公害問題としての排ガス処理は製錬の長年の問題で各時代にそれなりの対策は採られたものの不十分であった。終戦後日本製錬では製錬排ガスからの硫酸製造を技術開発の主要テーマとして取り上げ、調査研究が進められたが、濃硫酸を製造する硫酸プラントの建設は厳しい戦後統制下にあつた。しかし1949年（昭和24年）2月来日した米国の化学工業調査団長フレデリッ

ク・ホープ氏は、製錬排ガスからの硫酸製造に関心をもち、GHQ並びに日本政府（通産省）に対し製錬排ガスから硫酸を製造する事は、煙害の防止と同時に当時の硫酸不足の解消にもなると進言した。フレデリック・ホープ氏の進言をきっかけに本格的な濃硫酸製造プラントの建設が各製錬所で始まった。表5.5に銅製錬所の戦前、戦後の硫酸製造設備の状況を示す。

表5.5の硫酸設備を持つ銅製錬所の硫黄回収効率を見てみると、

- ① 四阪島製錬所では生鉱吹の溶鉱炉、転炉のSO₂ガス平均5～7%全量回収。原鉱の硫黄回収効率は以前焙焼を行っていた時は72～73%、生鉱吹以後は90%に向上した。

- ② 直島製錬所は焙焼及び転炉ガスの回収を行って硫黄回収効率80%である。反射炉の排煙はSO₂ 0.2～0.3%でそのまま大気中に放出している。
- ③ 日立製錬所では昭和28年当時排煙硫酸回収のうち60%は焙焼炉から、35%は転炉ガスから回収を行っており硫黄回収効率は50%である。溶鉱炉からの排煙（S 0.21%～0.23%）でそのまま大気中に放出している。
- ④ 佐賀関製錬所は粉銅鉱の焙焼ガスから硫黄回収効率83%、転炉排ガスから硫黄回収効率46%で回収している。
- ⑤ 足尾製錬所では自溶炉排ガスは全量回収している。

表5.5 銅製錬所の硫酸設備

製錬所		戦前出来たもの	戦後出来たもの	現在能力	
銅 関 係	住友四阪島	ベテルゼン Be50° 200t/日×2=400t/日 (昭4)		Be50°	400t/日
	三菱直島	〃 65t/日 (昭9)	180t/日 拡張 (昭30)	Be50°	180t/日
	〃		岡田式 Be50° 150t/日	Be50°	150t/日
	三井日比	モンサント 98% 100t/日 (昭12)	98t/日に改修 (昭31)	98%	98t/日
	日鉱日立	ルルギ式 98% 100t/日 (硫化焙焼用) (昭14)	ルルギ式 98% 100t/日 (昭26)	98%	200t/日
	〃 佐賀関	塔式 Be50° 30t/日 (昭10)	ルルギ式 98% 100t/日 (昭26)	Be50°	30t/日
	古河足尾 同和小坂		新モンサント 98% 160t/日 (昭31)	98%	100t/日
			米国 CCC 98% 100t/日 (昭31)	98%	160t/日
合計		Be50° 換算 915t/日		50°Be 換算	1,810t/日

6 高度成長から現在までの銅製錬

6.1 激動の時代の銅製錬

既に述べたが太平洋戦争の敗戦から奇跡とも言える復活を遂げ、更に導入技術の改善がなされると同時に我が国独特の技術も芽生えてきた時代であった。高度成長時代に入り銅製錬業界も歩調を合わせて小名浜に世界で初めての業界協調の大型臨海製錬所が誕生したのを皮切りに大型化、省力化、無公害化など世界の先端を行く技術を備えた製錬所が次々と誕生した。特に公害防止設備については世界で類を見ないほど充実した設備を備え、長年の懸案であった公害問題は解決した。

しかし非鉄製錬を取り巻く社会情勢はめまぐるしく激動の時代であった。昭和46年8月、円の変動相場制が実施され急激な円高時代に入った。また昭和48年の第4次中東戦争、更にその後のOPECの石油戦略による原油価格の高騰は、高度成長路線を走る我が国産業界に方向転換を余儀なくさせたショッキングな出来事であった。低成長、高エネルギーコスト時代の長いトンネルに入り、バブルのはじけ長い冬の時代が今日まで続いている。

図6.1に我が国の銅製錬設備能力と電気銅の生産量を示す。図6.2に銅、鉛、亜鉛の設備投資額の推移を示す。さらに表6.1に図6.2に示した設備投資のうち公害防止投資の占める割合を示す。

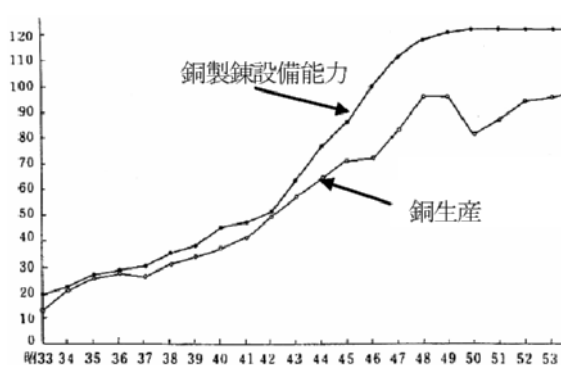


図6.1 銅製錬設備能力と電気銅生産量

表6.1 設備投資のうち公害防止費の占める割合

年次	44	45	46	47	48	49	50	51	52
%	4	11.4	22.3	23.5	25.2	25.2	31.5	38.5	21.1

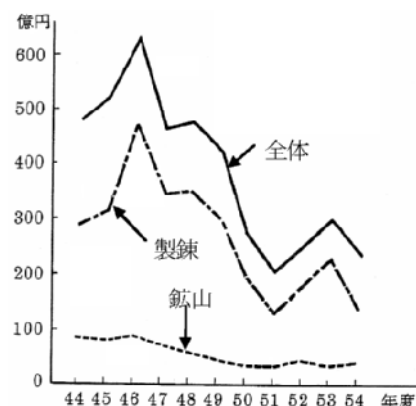


図6.2 銅、鉛、亜鉛の設備投資額の推移

図6.1、図6.2ならびに表6.1に示したように、この時代の激しい公害運動のさなか昭和49年までに、生産設備の増強を終え同時に思い切った公害防止への投資を行っている。

図6.3に我が国に於ける銅建値の推移を示すが、最高価格は83万円（昭和49年4月）最低価格は約30万円（昭和53年6月）と価格の変動が激しい。これは世界景気の変動による影響も大きいが国際間のトラブル（例えば大鉱山の重大事故）に端を発した国際価格（LME）の投機的な変動に左右され易く、銅産業の混乱の大きな原因となっている。

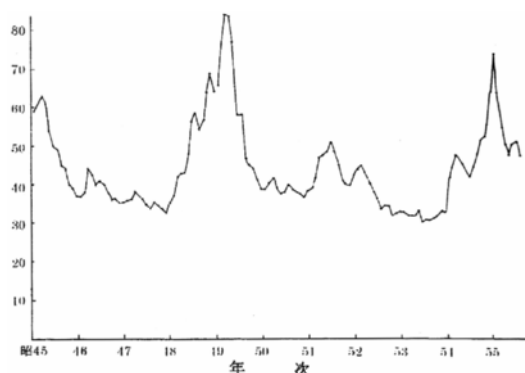


図6.3 我が国に於ける銅建値の推移

昭和46年、円の変動相場制への移行で急激な円高の影響を受けた国内の鉱山は、昭和42年330鉱山であったが、平成5年には24鉱山に激減した（図6.6参照）。

さらに昭和48年10月の第1次オイルショックに始まったエネルギーコストの高騰で国富、発盛、東邦小名浜、四阪島、岡山等の製錬所は銅の製錬を中止した。図6.4にアラビアンライト原油の公式販売価格（ドル/バーレル）の推移を示す。

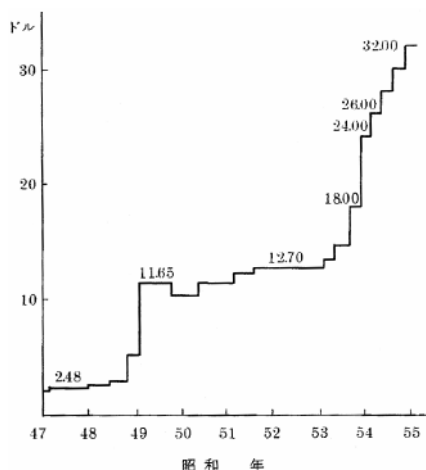


図6.4 アラビアンライト原油の公式販売価格の推移

図6.5に東京電力大口電力単価の推移を示す。図6.6に国内鉱山数の推移を示す。

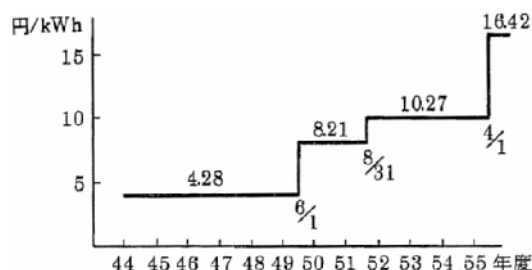


図6.5 東京電力大口電力単価の推移

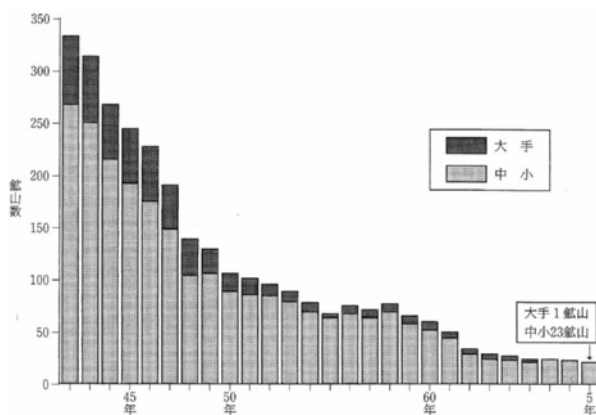


図6.6 国内鉱山数の推移

昭和49年以降は設備の稼働率は伸び悩み、低くなっている。(図6.1参照) 設備投資額を見ても49年以降著しく少なくなっているが、公害防止設備の占める割合はむしろ高くなっている(表6.1参照)。このような生産量の伸び悩み、価格の不安定にも拘らず昭和48年10月の第一次オイルショックを契機としてエネルギー価格の高騰(図6.4、図6.5参照)、労務費、諸資材、副資材等の価格上昇により製錬費は増大する傾向になった。製錬所では省力化時代から省エネルギー時代に入り、それに対応した技術の開発を強力に進めた。更に

重油、電力依存からコークス、石炭への転換、産業廃棄物例えば古タイヤ、廃油などを熱源として利用する等エネルギーコストの低減に努めた。

6.2 溶錬

6-2-1 自溶炉

既に述べたように古河鉱業では自溶炉の改善が進展し商業炉としての技術を確立、その評価は業界の注目するところとなった。昭和40年同和鉱業は小坂製錬所に古河式自溶炉を導入した。その後、日鉱佐賀関製錬所、日立製錬所、住友金属東予製錬所、日比共同製錬玉野製錬所の4社に6基の自溶炉が導入された。各社建設に当たっては、夫々特色のある自溶炉を建設した。更に付属排煙処理設備の充実とあいまって高度の技術として世界に誇りうるものとなった。その主な特徴は、

- 同和小坂製錬所

不純物の多い黒鉱処理でスタート、その後同和独自のダスト処理、排水処理を開発し、現在では唯一の特殊な複雑鉱処理の自溶製錬所となっている。

- 日鉱佐賀関製錬所

自溶炉2基建設。1,000℃という高温熱風および酸素富化操業、現在では自溶炉1基で年間約45万tの生産を行っている。

- 住友東予製錬所

コンピューター、制御システムの採用

- 日比共同玉野製錬所

排ガスの減少と錬かん炉を省く為に自溶炉のセトラ部に電極を備えた所謂自電炉方式の採用

- 日鉱日立製錬所

転炉による酸素製錬法に替えて高温熱風、酸素富化式の自溶炉採用

等である。

昭和48年には日本国内で古河の自溶炉を先頭に7基が稼働始めた。代表的な自溶炉として日鉱グループの自溶炉について以下に述べる。

① 日本鉱業佐賀関製錬所第1号自溶炉

昭和39(1964)年頃、日立、佐賀関両製錬所の合計銅生産量8万t/年を倍増する為の製錬法の検討を始めた。日立で開発した転炉酸素製錬法をはじめ、各種製錬法の生産能力、硫黄回収率、建設費、運転コスト、公害防止等の検討を行い、1炉で40,000t/月程度の鉱石処理が可能であれば自溶炉製錬法が最も優れているとの結論に達した。当時の自溶炉の鉱石処理能力は15,000t/月程度であったので、40,000t/月を達成するには当時最大の課題であったボイラ

ラブルを少なくする事が最大の課題であった。その為には排ガス量を可能な限り少なくする事が望まれた。検討の結果、送風の酸素濃度を高くし、更に送風温度を500℃から1,000℃にまで上昇させ、排ガス量を減少させる事とした。その結果SO₂ガス濃度が上昇し硫酸工場の建設費を大幅に節約できるとともに、SO₂回収率の高いダブルコンタクト方式の採用が極めて容易になった。

熱風炉としては重油専焼に近い特殊なカウパー式熱風炉2系統設置し、燃焼と送風を約1時間ごとに切り替える事により1,000℃の熱風を得る方式とした。精鉱バーナーには高温送風対策を施し、全体を耐熱煉瓦張りとし、先端のノズル部は水冷ジャケット製、鉱石装入パイプの水冷銅パイプを巻き付けた構造とした。精鉱バーナーは3基設備した。

排熱ボイラのダストトラブルは、自溶炉の円滑操業にとって最大の問題点であると認識していた。ボイラは独立した重油燃焼の過熱器を付設した自然循環型ボイラで、入口のダスト低下策として、ボイラ出口のガスの一部をボイラ入口にリサイクルさせる方式を採用した。鉱石乾燥設備、自溶炉本体、鍊かん炉の設計および建設は古河鉱業に依頼し、当時世界最大の自溶炉を完成した。昭和45（1970）年1月に鉱石装入を開始した。

当時の代表的な操業成績（1ヶ月間）を表6.2に示す。佐賀関製錬所の第1自溶炉の稼動により大型化への不安が払拭され、各所の大型自溶炉の建設が促進された。

表6.2 佐賀関第1自溶炉操業成績

項目	単位	実績
銅精鉱処理量	t/月	42,430
転炉鉱処理量	t/月	20,516
硫酸生産量	t/月	31,344
装入量	t/h	60
鉱品位	%	52.8
合計送風量	Nm ³ /min	775
酸素量	Nm ³ /min	15
送風温度	℃	930
炉内燃焼重油量	l/h	1,340
回収蒸気	t/h	37.5

② 佐賀関製錬所第2自溶炉

昭和46（1971）年末、海外鉱石の購入契約が順調に進み、日立製錬所の自溶炉が完成しても鉱石が過剰になるので、佐賀関に自溶炉をもう1基増設することになった。昭和48年5月操業開始という超短期間での建設なので、第1自溶炉とほぼ同じ設計とした。

③ 昭和50年代－自溶炉プロセスの改善

既に述べたように昭和48年の第一次オイルショッ

クに始まり、エネルギーコストの高騰、更に諸物価が上昇し経済は停滞して銅の消費量も減少し、業界全体が苦難の時代に入った。日本鉱業では昭和51年末に日立製錬所の自溶炉を休止し、生産を佐賀関製錬所に集中する事にし、以下のような合理化を実施した。

- 銅生産量30万t/年、生産方法として酸素富化を強化し、カワ品位Cu62%を目標とした。
- 重油価格の高騰により自溶炉ボイラのスーパーヒーターを廃止した。
- 粉コークスを銅精鉱に混合することで自溶炉内での重油燃焼をなくした。
- 岸壁から貯鉱舎までのトラック輸送をコンベア輸送に変更し、鉱石受入能力を600t/hから1,000t/hに増強した。

昭和58年3月の操業実績を表6.3に示す。

表6.3 昭和58年3月の操業成績

項目	単位	実績	
銅精鉱処理量	t/月	91,131	
転炉処理鉱量	t/月	41,535	
硫酸生産量	t/月	82,500	
		第1自溶炉	第2自溶炉
装入量	t/h	71.1	80.3
鉱品位	%	61.7	61.9
合計送風量	Nm ³ /min	769	876
酸素量	Nm ³ /min	44	40
送風酸素濃度	%	24.7	24
送風温度	℃	870	850
粉コークス量	kg/h	1.21	1.37
炉内燃焼重油量	l/h	0	0
回収蒸気	t/h	33	40

④ 昭和60年より平成8（1996）年

60年代前半は為替レートの急騰、銅需要の減少等により低負荷操業で十分力を発揮できない時代であった。1炉での高負荷操業を行う為、以下の改善を実施した結果、第2自溶炉1基で鉱石装入量95t/h操業が可能であることを確認した。

- 鉱石調合精度の向上、精鉱バーナーの改善等によるシャフトでの鉱石の分散性向上
- アップテイクのベコにコークス粒をN₂ガスで吹き付け、高融点のマグネタイトおよびジnkフェライトを分解しベコの生長を抑制する。
- 吹き付けたコークスの未反応物をセトラ溶湯面上に滞留させ、カラミの流動性を改善する。

平成年代になると銅需要は回復し始め、自溶炉2炉操業体制に戻すとともに、銅生産能力を30万tから33万tに引き上げた。平成5年に佐賀関製錬所では自溶炉1炉化を目指して自溶炉本体および排熱ボイラ等主要設備の寸法を変えることなく、1炉で鉱石処理量150t/h処理の方策を検討した。具体的には送風の酸素濃度を高め、鉱石の燃焼熱による熱過剰に

は送風温度を常温とし、炉内の熱バランスは酸素濃度を変えることで調整することとして各種の改造を行った。

- オートクランプ社で開発したセントラルジェット型バーナーを導入し、従来の精鉱バーナー3基を1基にした。
- 鉱石乾燥能力を110t/hから180t/hに増強するために排ガスファンの能力増強を始め、関係する設備の増強ないし大型化をおこなった。
- 給鉱設備を秤量機能付き給鉱設備に変更
- シャフト側壁煉瓦の冷却強化のため冷却用銅ジャケットの段数を4段から7段へ増強
- セトラ側壁の冷却をフィン付き銅チューブ方式から大型の背面銅ジャケット型に変更
- 溶体の炉内滞留時間をこれまでと同程度に保つ為、スラグホールの位置を上げた。
- セトラ内の溶体レベルを常時監視できるように、非接触型連続溶湯レベル検出装置を導入した。
- アップテイクのベコ生長防止用の粗粒炭材吹込装置を開発した。
- 鍊かん炉は炉内径を1m大きくし溶湯レベルも上げ、溶湯容積を50m³から76m³に拡大した。
- 酸素製造設備は投資額電力消費および運転管理の面から22,000Nm³/hの深冷分離式大型酸素プラントを採用した。

平成6年11月から平成8年2月にかけて上記の設備工事を順次実施し、平成8年3月自溶炉1炉体制での操業を開始した。表6.4に平成9年3月の操業成績を示す。

表6.4 平成9年3月の操業成績

項 目	単位	実績
銅 精 鉱 処 理 量	t/月	85,340
転 炉 処 理 鉱 量	t/月	48,440
硫 酸 生 産 量	t/月	73,831
装 入 量	t/h	138
鉱 品 位	%	62.8
合 計 送 風 量	Nm ³ /min	380
酸 素 量	Nm ³ /min	330
送 風 酸 素 濃 度	%	81
送 風 温 度	℃	常温
粉 コ ー ク ス 量	t/h	1.7
炉 内 燃 焼 重 油 量	l/h	0
回 収 蒸 気	t/h	

この改善により自溶炉1炉化は可能となり、生産コストの大幅低減、労働生産性の飛躍的な向上が達成され、目標とした厳しい事業環境や時代の変化に対応し得る企業体質がほぼ達成された。

⑤ 平成9年以降

佐賀関製錬所では自溶炉1炉で粗銅生産量33万t/

年を達成した。

更に粗銅生産量45万t/年の可能性を追求し、平成10年末問題となった転炉工程の負荷低減のために自溶炉のカワ品位を65～66%まで上げることを主体とした下記の改造工事を行った。自溶炉の平均装入量で160t/hが可能となり、平成12年の粗銅生産量は45万t/年を達成した。

- 排熱ボイラの熱負荷増加対策として伝熱面積を増加する為、チューブスクリーンをボイラ内に吊り下げる方式を採用した。これにより伝熱面積は3,934m²から4,424m²に増加した。付着ダスト除去は従来のスートブロワーと機械式追打装置をスプリングハンマ方式に替えた。
- カワ品位を上げたので当初は自溶炉カラミの銅ロスが上昇したが、シャフト内の測定に基づき、バーナー送風速度、分散空気量、コークス添加量をコントロールすることで克服した。
- 転炉の冷材投入時の送風時間を短縮する為の冷材投入機を開発した。これにより転炉1パッチ当りの休風時間は79分から34分に減少し、送風時間は38.9h/日から43.6h/日と約12%多くなった。
- 転炉の羽口ノズル内径を55mmφから50mmφに変更し、羽口本数を46本から56本に増加した。送風量が増加し単位時間当たりの発熱量が増加して造かん期終点時の溶湯温度が上昇し、転炉カラミの銅含有量が0.5%に低下した。
- 転炉造かん期の送風酸素濃度を徐々に高めて行き、平成12年11月には酸素濃度29%で常時操業した。
- 精製炉の増設を行い、精製炉3基体制にして増産に対処した。

以上佐賀関製錬所の自溶炉導入から現在までの改善について述べたが、現在稼動している小坂製錬所、住友東予製錬所、日比共同玉野製錬所の各自溶炉においても、佐賀関製錬所同様の改善を絶え間なく行い、世界のトップレベルの技術で操業を行っている。

振り返って昭和40年代に日本の産銅各社の銅製錬所が世界に先駆けて一斉に大型の自溶炉を稼動させることができたのは、古河鉱業の技術指導に負うところが大きい。15年間に亘って足尾製錬所で蓄積した設備技術、操業技術を惜しみなく開示してもらったおかげで、操業安定化への苦労が大幅に軽減できた。オイルショックによる原油価額の高騰、公害問題などの社会環境の激変に対処できたのは、自溶炉への転換が早かったこと、更にその後の各社技術者の絶え間ない改善努力による技術の蓄積によるものと思う。

6-2-2 三菱法（連続法）

銅製錬は長い歴史の中で鉱石から粗銅を連続して製造する事は究極のプロセスとして多くの学者、技術者により研究されてきた。

1960年代になり注目すべき連続製銅法としてオーストラリアのウォークラ (WORCRA) 法、カナダのノランダ (Noranda) 法、日本の三菱法が挙げられる。

1) ウォークラ法

ワーナー博士がC.R.A（コンジnk・リオチン
ト・オブ・オーストラリア）社と共同で1965年か
ら開発を開始したもので、両者の名前からWOR-
CRA法と命名された。従来法の2炉の機能を単一
の炉で行うものであった。ポート・ケンブラ製錬
所で行われた銅精鉱処理72t/日のテストでは“U”
字型の定置炉を用い、片方の端がコンバーティン
グゾーン、他の端がスラグクリーニングゾーン、
その間にスメルティングゾーンの機能を持たせス
ラグは後処理なしでの排出を目指した。マットは
コンバーティングゾーンに向かいスラグはコンバ
ーティングゾーンからスラグクリーニングゾーン
へと流れるカウンターカレント方式を採用した。
かなり長期にわたるテストを実施したが、結局商
業化されるには至らなかった。単一炉の両端で異
なる酸素ポテンシャルを安定的に維持する為には、
炉の寸法が長大になる事が最大の問題であった。
図6.7に炉の概念図を示す。

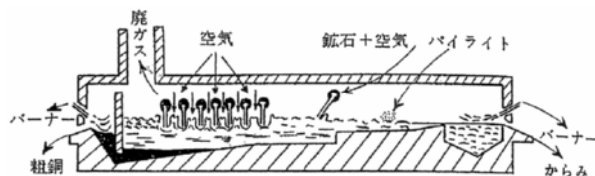


図6.7 WORCRA炉の概念図

2) ノランダ法

カナダのノランダ社が自社のホーン製錬所で1968年から100t/日の試験操業を開始した。2つの炉の機能を単一の炉で行う試みはウォークラ法と同じであったが羽口送風による攪拌で炉内は均一で高い酸素ポテンシャルに保たれる。シリカ系スラグを採用したが、銅含有量は10%以上と高く全量選鉱処理して炉に繰り返された。1973年に銅精鉱処理730t/日で商業規模の操業を開始した。炉は横型の円筒形回転炉で長さは21mである。銅鉱石などの装入はスリンガーベルトで炉の一端から行われる。溶体は羽口からの送風で酸化され炉内にはスラグ、マット、粗銅が共存している。粗銅はタップホールからレードルに抜き出されクレーンで精

製炉に運んでいた。本法はその後、銅の直接生産を断念しCu70%以上の高品位マットを製造するにとどめ、これをPS転炉で処理する従来法の操業形式によっている。ノランダ法が粗銅の直接生産を断念した原因は不純物の除去が十分でなかった事と、著しく低い一次銅回収率であった。これらは単一炉で完全混合が達成されている反応系での直接製銅法の欠点であった。

図6.8に炉の概念図を示す。

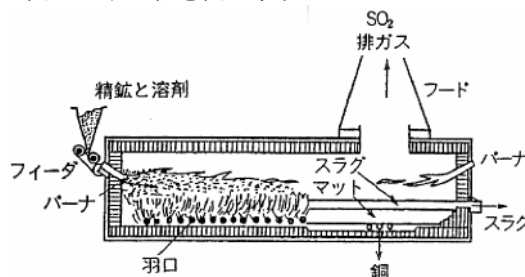


図6.8 Noranda炉の概念図

3) 三菱法

1968年より小名浜製錬所で開始された連続製銅法のテストは溶錬炉と製銅炉は別個の炉としこれらを樋でつなぐ発想であった。製銅炉スラグは溶錬炉に繰返し、溶錬炉スラグは後処理なしで廃棄する。最終的には溶錬炉（S炉）製銅炉（C炉）の間にマットとスラグの分離とスラグのクリーニング機能をもった炉（CL炉）を設置し3炉構成とした。1974年に銅精鉱処理600t/日の3炉方式による商業炉の操業を直島製錬所で開始した。その後大型化と共に多くの改善がなされながら安定した操業を達成し、三法のなかでは唯一連続製銅法の商業化に成功している。現在三菱法は世界の四製錬所で稼動中である。図6.9に最新の三菱法の概念図を示す。

三菱金属が連続製銅法の開発に成功したのは
●基礎試験の段階で大学との共同研究を含めて開
発の基本的な原理を明確にした事●工業化試験に
おいて自社だけでなく異業種の力も借りて開発を

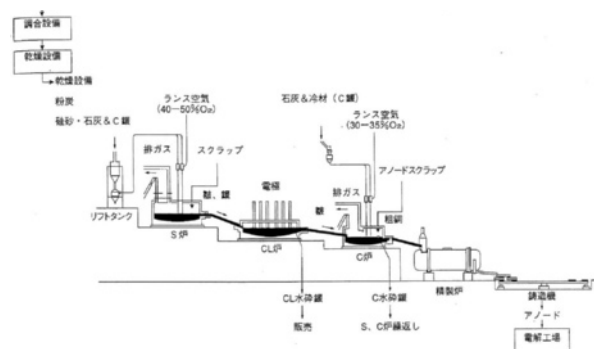


図6.9 三菱法概念図

進めた事●三菱金属に蓄積された技術と豊富な人材があった事●強力なリーダーシップを持った指導者がいた事、等によるものと思われる。

(1) 三菱法の開発

三菱金属直島製錬所では1918年反射炉と転炉の組み合わせで粗銅の生産を行っていた。1950年代後半には鉱石溶解法として鉱石を直接溶体に吹き込み溶解、製錬する方法が発想された。吹き込み溶解に関する基礎的な研究を1961年から65年にかけて、東京大学との共同基礎研究に始まり中央研究所ならびに直島にて小規模な実験が行われた。この一連の研究の結果、固形物を直接溶体内に吹き込む方法には高い溶解速度が得られる事、ダストの発生率が少ない等の利点を確認された。その後の連続製造法の開発に当たってもランスから鉱石を直接吹き込む形で、この試験の成果が引き継がれた。

(2) 原型炉テスト（第一期1969年4月から70年3月）

三菱金属は製銅設備で経験の豊富な石川島播磨重工業と共同で連続製銅法を開発することに合意し、この方法をMI法と命名した。設備は小名浜製錬所内に建設された。

連続製銅実験設備は鉱石を溶解する溶錬炉（S炉）、製銅炉（C炉）、カラミ保持炉（SH炉）の3炉で構成する実験設備を反射炉に隣接して建設した。排ガスは反射炉ガスに合流させた。鉱石処理能力は72t/日であった。試験の初期は鉱石を吹き込むランスの不調で苦しんだが、種々改善した結果、第一期の実験でS炉の有利性が確認された。即ち（ア）炉の面積効率は反射炉が一日当たり0.8t/m²、自溶炉3.0t/m²に対しMIは6t/m²で非常に大きく、溶解炉は小型化が可能、（イ）トップブロー（非浸漬）で高い酸素効率、送風圧力も1.5～2.5kg/m²と比較的低くても良い、（ウ）鉱石の捕集率はトップブローに移行しても高効率である、（エ）S炉で銅65%程度の高品位カワ吹き操業をすれば燃料が大幅に低減できる、等である。

(3) 原型炉テスト（第二期1970年4月から71年6月）

第一期試験で数日単位の試験操業が出来るようになったが、操業の安定化までには至らなかった。第二期の試験では1ヶ月程度の長期継続テストを目標とした。具体的な対策として、以下の処置をした。

（ア）ランス送風は高圧空気によるトップブローイングとする、（イ）容積効率を向上し、燃料率

を低減する為送風を酸素富化する、（ウ）S炉では高品位カワ吹きにし、C炉では直接粗銅を生成する、（エ）S炉カラミは別途処理する、等である。更に設備面ではS炉、C炉、SH炉の各炉は第一期の試験で分った局所的な耐火物の溶損を防ぐ為に、炉型は円形とし、更に溶体出入り口に水冷ジャケットを設置し長期テストに耐える設計とした。高圧送風でランス機能が向上し、10日間以上のテストが可能となった。しかし、この第二期の試験も障害の連続であった。特に当初はC炉での粗銅生成が出来なかった。その原因は、（ア）S炉操業が安定しなかった、（イ）低圧送風によるランストラブルが多発した、（ウ）カラミ粘度の増加等である。特にカラミ粘度の増加によるトラブルはマグネタイト（Fe₃O₄）の生成によるもので、ライムフェライトカラミの開発により解決した。1970年10月C炉から粗銅が流れ出た。試験に入ってから2年近くの悪戦苦闘の結果漸く粗銅生成に成功した。

(4) 実証炉試験（1971年11月から73年12月）

原型炉試験の結果をベースに商業炉設計や操業ノウハウ収集のため月産粗銅1,500tの実証炉を小名浜に建設、71年11月から試験操業を開始した。実証試験の初期はいろいろなトラブルや思わぬ事故があった。実証炉試験を一年間続けた結果、連続製銅法の実用化の基礎が確立された。

(5) 直島製錬所における第一号連続製銅炉の稼動

1972年11月三菱金属は直島製錬所に連続製銅炉を建設することを決定した。小名浜製錬所での一連の操業試験により開発した連続製銅法の技術を実証する為に直島製錬所に生産能力粗銅4,000t/月の商業炉を建設し、国内外に技術輸出するのが狙いであった。

1973年3月工事に着工、1974年3月操業を開始した。操業の初期においては炉の構造ならびに耐火物の損傷に問題点が集中した。例えばS炉-SH炉-C炉をつなぐ樋が熱膨張で変形して溶湯がスムーズに流れない、C炉の炉床から粗銅がリークする事故の頻発、S炉の炉床煉瓦損傷等である。これらのトラブルを一つずつ解決して1977年からは生産量増加を目指した各種のテストを実施した。1982年には新酸素プラントの完成、諸改善の実施により、生産能力は約倍増になった。

(6) 大型連続製銅炉

1989年三菱金属は直島製錬所に新しい大型連続製銅設備の建設を決定、1991年5月操業を開始した。

設備能力は粗銅17,000t/月（銅精鉱85t/h）である。
新設備では下記に示す設備を取り入れている。

- （ア）保温炉を廃止しC炉と精製炉を樋で直結した。これにより全工程が連続化され従来の連続製銅炉に比べ更に省エネ型且つ環境保全型の設備となった。
- （イ）設備ではアノードスクラップ、故銅等のリサイクル二次原料の処理にも対応できる設備とした。
- （ウ）ダストトラブル対策としてアップテイクに自動スクレーパーを設置，ボイラの改善等により稼働率が向上した。
- （エ）S炉、C炉のランスについて材質や仕様の改善を行い、作業の軽減、操業の安定に大きく寄与している。

（オ）大型ボイラ設置によるダストトラブルの解消

（カ）各炉の操業コントロール法の確立

これらの改善により操業は順調に行われている。図6.10に鉱石処理量とアノード生産量の推移を示す。

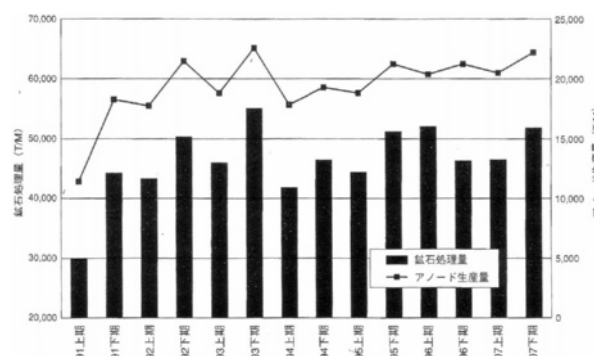


図6.10 直島の新大型連続製銅炉の処理量及びアノード生産量推移

7 銅の電解精製

溶錬工程で銅鉱石から生産される銅は約99%で不純物として金、銀、鉛、セレン、テルル、ヒ素、ニッケル、鉄などが含まれている。銅の電解精製はこれらの不純物を分離して夫々有価物として回収すると同時に純度の高い（99.99%）銅地金を得ることを目的として行われている。電解精製と溶錬工程の決定的な違いは①電解工程の原料は銅純分が約99%の粗銅で不純物含有量が非常に少なく世界中どこにおいても原料の違いが殆どない事、②溶錬工程のような大気汚染等公害問題の心配は殆ど皆無である事、③電解反応は電解槽で行われるが、電槽の大きさに違いはあってもどの電解工場でも同じ方法で行われている、等である。

従って銅電解工場の目的は如何に安く、効率良く、需要家の満足する高品質の製品（電気銅）を安定して製造する事である。電解工程では溶錬工程に於ける複雑な反応、それに伴う各種の溶錬方式に相当するものは無いので、太平洋戦争後如何にして近代化を計ってきたかについて述べる。

7.1 銅電解の原理

18世紀の後半から19世紀にかけて電気工学の研究が進み、特に1833年ファラデー（M.Faraday）はファラデーの法則といわれる電解の根源をなす重要な法則を発表し電解精製の基礎を築いた。銅電解の工業化は1865年ジェームス・エルキンソン（J.Elkington）が英国で銅電解法の特許を得ている。実際の操業は1883年米国のニューアーク（Newark）を皮切りに1887年バルチモア（Baltimore）、1891年アナコンダ（Anaconda）、1892年グレート・ホール（Great.Halls）で稼働している。日本では1906年日光精銅所で生産量54t/月で操業を開始している。図7.1に銅電解の原理を示す。

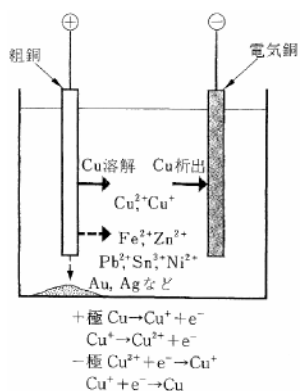


図7.1 銅電解の原理

反応装置（電解槽）には2つの電極（粗銅と電気銅で電子伝導体）と電解浴（硫酸酸性の硫酸銅溶液でイオン伝導体）とから構成されている。両極間に電圧をかけ直流電流を流すと図7.1の陽極では銅と共に銅よりイオン化傾向の大きい不純物も溶け出す（ニッケル、鉄）。銅よりもイオン化傾向の小さい不純物（金、銀など）は溶け出さずに底に沈積する。陰極では銅だけが析出する。図7.2に操業モデルを示す。

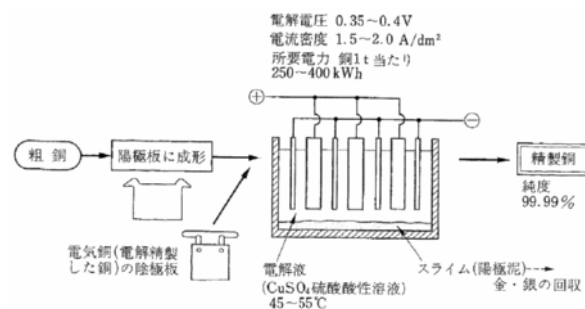


図7.2 銅電解の操業モデル

溶錬工程で粗銅は陽極に成型される。種板（薄い電気銅、陰極）と陽極を図7.2のように電槽に装入し電解液を入れて直流電流を流すと、陽極から溶出した銅イオンは陰極に着着して電気銅製品が得られる。槽底に沈積した泥状の物（澱物又はスライム）は金銀回収工程に送る。

7.2 銅電解のはじまり(明治から太平洋戦争まで)

1906年日光精銅所で粗銅の電解精製がはじまると各製錬所において電解工場の新設及び増設が相次いだ。電解技術は主に米国から導入され日光精銅所の操業開始から30年後の1935年には、6社6工場で電気銅生産能力約10万t/年、生産実績71,200t/年と飛躍的に増加している。電解精製によって高純度の電気銅が安定的に得られる事、金、銀の回収が安く高収率で出来る事から短期間に電解精製が普及したものと考えられる。当時は電極の配列方法として並列法と直列法があり初期の電解では直列法も盛んであったが、作業の安定性、金、銀の回収率等の高いこと、不純物の含有量の高い粗銅でも処理可能なこと等から並列法に全て置き変わった。当時検討された直列法と並列法の比較を表7.1に示す。この表7.1に示すように直列法の最大の利点は電力消費量が少ないことである。当時電力は高価であり電力消費の少ないことが高く評価された。しかし

並列法は電気銅品質が安定して良好な事、金、銀の採集率が高い事、作業がやり易い事等から全て並列法に置き換えられた。

表7.1 並列法と直列法の比較

項目	並列法	直列法
不純物含有量	多い	少ない(制限あり)
アノード製造方法	鑄造	圧延又は鑄造
重量、厚み	重い、厚い	軽い、薄い
種板	必要	不要
スクラップの手入れ	不要	必要
電流量 / 電槽	多 (10000A)	少 (500A)
導体用銅	多い	少ない
電流効率 (%)	90以上	70以下
電槽電圧	大 (0.3V)	少 (0.17V)
銀損失	少 (1%)	大 (2%)
労務費	少ない	大
熟練度	高い	低くて良い
動力費	高い	低い
建設費	高い	安い
動力費	多い	少ない

この当時の電解作業は殆ど機械化がなされておらず、人力で作業していたので電極のサイズも小さく生産性は低かった。又原料のアノードは転炉粗銅（精製炉で精製されていない転炉から直接アノードにしたもの）であったため、電解にとっては電極間隔を広くし低電流密度で操業する状態であった。

1935年から太平洋戦争終結までの10年間は目立った設備の増強はなく横ばいの状態で推移している。表7.2に1933年10月の電解工場の操業成績を示す。

表7.2 電解工場の操業成績（1933年10月）

製錬所	小坂	日立	大阪	佐賀関	新居浜	日光
設備能力 t/m	1,000	1,300	1,000	1,500	1,500	2,050
銅生産量 t/m	760	710	710	950	1,050	1,880
電槽数	410	434	356	504	457	437
板槽	30	35	11	28	19	30
一般槽	360	303	245	310	382	324
電解液						
Cu濃度 (%)	3.5~4	4	4~4.25	3.3	3	3.5
硫酸濃度 (%)	12.3	20	19	15	14	13
電解液温度 (°C)	45	48	45~50	43	45	55
電流効率 (%)	98	—	89~95	96.5	95.5	94
電流密度 / 平方吋	18	18	15~18	18	13.2	18
槽電圧 (V)	0.35~0.7	0.34	0.25~0.5	0.4	0.34	0.4
アノード						
重量 (kg)	106	108	150~180	85	100	190
寿命 (日)	20	17	28	12	29	21
スクラップ率 (%)	15	18.5	18	24	11	17
スライム率 (%)	1.4	1	1~1.5	1.1	1.1	0.6
カソード寿命 (日)	7	5	10~15	6	9	7
カソード重量 (kg)	8.5	28	20	8	6	60
使用電力	710	470	560	630	500	

7.3 戦後の銅電解精製（終戦から20年）

太平洋戦争で壊滅的な破壊を受けたが、復興は急ピッチで進み電気銅の生産量の推移から見ると、終戦時29.4千t/年から5年後には、既に戦前を上回る90.4千t/月に達し10年後には120.4千t/月、15年後には270.4千t/月と飛躍的な発展を遂げている。

この時代の特徴は戦時中不明であった海外の製錬事情が明らかになり、又各種の新技術の紹介が行われ、また積極的に新技術を導入する等、多くの技術者が戦

後の復興に努力した結果で、更なる発展の基盤を築いた段階である。主要な技術の動向について述べる。

① 精製アノードの採用

精製アノードの採用は1950年三菱金属大阪製錬所で試験をはじめ、1954年から本格的な操業を始めた。従来の転炉アノードを精製アノードに変更する事は銅電解にとって極めて大きな影響を持っていた。精製アノードを使用することにより電極間隔を短縮出来ること、電流密度を高める事、等により電気銅の生産能力が向上すると共に精製コストの低減等大幅な改善ができた。国内の各電解工場も順次精製アノードを使用するようになった。表7.3に転炉アノードと精製アノード操業成績の比較を示す。

② 新しい整流器の採用

電解工場では電解用電力の消費量が極めて大きく製品コストに占める割合も大きい。変流装置としては電動発電機、回転変流機が主流であったが変流装置メーカー側からの新しい装置が次々と発表され、30年代は各工場で色々な種類の整流器が採用された。電動発電機を接触変流機に変更した。例として、三井金属竹原製錬所銅電解工場では変換効率が10~15%向上し、電力原単位として70~100 (kWh/電気銅t) 削減したことを報告している。尚、同時期に同和小坂、日鉱日立でも採用されている。

銅電解工場の増産に伴って効率の良い大容量の変流装置が次々と開発されたことは、電解工場の大型化を容易にした。

③ 電解槽の改良

一般に木製鉛張りの電解槽からコンクリート鉛張り、更にコンクリート（プレハブコンクリートを含む）槽に硬質塩化ビニール板の内張り等、新しい非金属材料を使った電解槽が試験使用から実用化され大型電解槽の基礎が確立した。

④ 電解液加熱方式の改良

従来鉛張り槽に硬鉛コイルを敷設し電解液の加熱に使用していたが、不浸透性黒鉛を使った多管式熱交換器が開発され、熱効率の向上と同時に電解液温の上昇が容易になった。その後高品質の金属材料の開発により金属製の多管式熱交換器、プレート式熱交換器が開発された。

⑤ 耐蝕技術の進歩による配管材料、ポンプ材質等の改良

ステンレス材質の耐酸・耐蝕性能は大幅に向上して、銅電解に使用されるポンプはステンレス合金

表7.3 転炉アノードと精製アノードとの操業成績比較

項 目			単 位	転炉アノード電解	精製アノード電解	
				昭和29年3月	昭和30年10月	昭和31年6月
電 気 量 生 産 量			t	1,564,745	1,853,896	2,035,011
1 槽 当 た り 生 産 量			kg	157	209	212
同 上 比 率			%	100	133	135
操 業 日 数				31	30	30
電 解 槽	保 有 槽 数	槽		334	332	332
	稼 働 総 数	＃		322	295	320
	内 脱 銅 槽	＃		4	2	1
	内 包 寸 法	mm		4,790(長)×800(巾) ×1,010(深)	同 左	同 左
	接 続 方 法			ホワイトヘッド式	同 左	同 左
	還 流 方 法			3段カスケード	同 左	同 左
アノード	重 量	kg		138	160	155
	寸 法	mm		750(長)×640(巾) ×40(厚)	780(長)×640(巾) ×35(厚)	同 左
	1 槽 内 枚 数	枚		33	41	41
	アノード間中心距離	mm		135	110	110
	陰陽面間距離	mm		47	37	37
	残基銅生成率	%		22	17	17
	スライム生成率	%		1.6	1.2	1.2
カソード	1 槽 内 枚 数	枚		34	42	42
	仕 上 回 数	回		3	3	3
電 解 浴	組 成	F.A	g/l	175	186	188
		Cu	g/l	40	41	39
	温 度	上 段 入 口	℃	55	55	55
		下 段 入 口	℃	48	50	54
	添 加 剤	膠	g/t	45	85	85
		塩 酸	g/t	4	5	5
平均電解電流			A	6,100	7,670	7,800
電流密度(Dk)			A/dm ²	1.76	1.78	1.82
槽電圧			V	0.29	0.28	0.28
電流効率			%	91	93	94
電解電力量			kWh/t	A.C 354	350	348
			kWh/t	D.C 294(100)	286(97)	277(94)
蒸気			kg/t	866(100)	510(58)	312(35)
工数			工/t	0.96	0.72	0.72

出典：日本鉱業会誌 72巻 822号 昭和31年12月

ポンプになり安定操業に大きく寄与した。非金属材料として塩化ビニール、ポリエチレン等は特に配管材料として耐蝕性に優れ、加工も容易なことから短期間で硬鉛パイプから樹脂パイプへと取り替えられた。

⑥ 電解液の保温

電解液保温と作業環境改善のために、電解槽液面に浮子と称する発砲スチロールやポリエチレン等の有機材料で作った直径7mm位の球を浮かすことにより電解液保温用の蒸気使用量を削減すると共に、高温多湿の作業環境の改善にも寄与した。しかしながら電解作業中に浮子を回収、投入等の作業が煩わしい事、更に浮子が古くなると表面にスライム、又はスケールが付着しショートの原因になったり製品に巻き込まれて品質クレームを起こしたりして最終的にはシートによる電解槽を全面的にカバーする方法が取られている。

⑦ 保安の充実

戦後人命尊重の立場から1949年鉱山保安法が実施され、安全第一の思想が全国的に普及し組織的な保安体制ができ、災害は急速に減少した。電解工場においては設備上の諸改善、保護具（安全靴、保安帽等）着装の奨励、環境改善（通気、排気設備等）等がなされると同時に保安教育も熱心に行われた。特に保安については労働組合運動の重要事項であり現場管理者、監督者にとっては重要な仕事であった。

⑧ 品質管理の推進

日科技連の統計的手法を用いたQC活動教育により管理図を用いた目で見える管理活動が盛んになり、作業者も改善に関心を持つようになり改善活動に大きな役割を果たした。

7.4 高度成長から現在までの銅電解精製

1) 1964年～1975年

1960年代に入り各電解工場は精製アノードを採用して電極間隔の短縮、電流密度の増大、電解条件（添加剤、電解液温循環方法）の改善、マテリアルハンドリング機械の開発、作業環境の改善等によって既存の工

場を改造しながら増産工事を進めた結果、生産能力は大幅に増大した。1965年小名浜製錬所が操業を開始した。電解工場は電解槽、電極の大型化を実現、種板電解と種板製造工程、陽極準備機、カソード整理機、アノードスクラップ洗滌機等マテリアルハンドリング機は自動化された。

図7.3に日比共同玉野製錬所の電解工場の平面図とスナップ写真を示す。

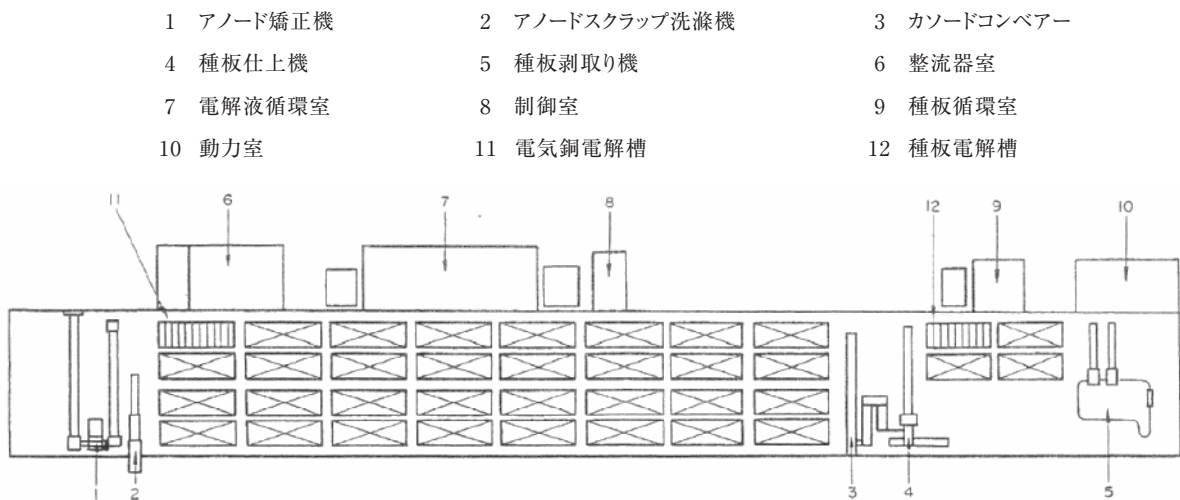


図7.3 電解工場の平面図



写真7.1 電解建屋内部

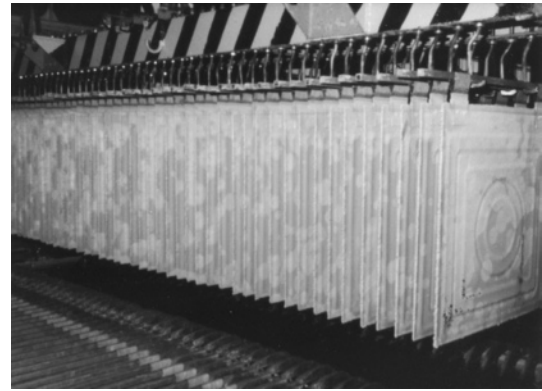


写真7.2 カソード（電気銅）を電解層から引き上げる

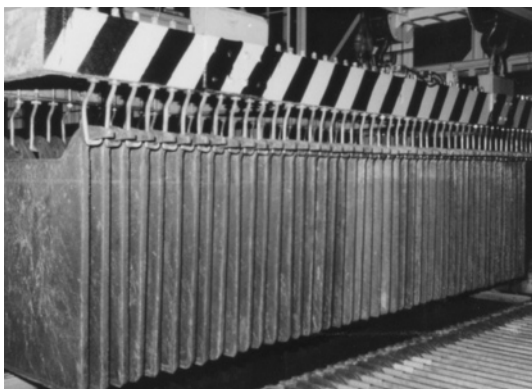


写真7.3 アノード（陽極）を電解層に装入

●高電流密度電解

1972年玉野製錬所は周期的反転電流法（PRC）による高電流電解工場として操業を開始した。大型電解槽に高電流密度電解法を採用することにより生産性の向上、工程滞留量の軽減を計った。特に銅電解においては工程滞留は多く、金利負担が大きい。

高電流密度電解採用に当たっては単槽電圧上昇と偏流増大を防止する為のブスバーの開発、給排液方法の改善、自動短絡検出器の開発により操業の安定を図り、更にマテリアルハンドリング機械のセミオートメ化等により、高能率で良質の電気銅を生産している。

●小名浜第三電解

1973年操業を開始した第三電解工場はヘズレット鑄造機によるアノードの連続鑄造、ジャンボタンク式大型電解槽を採用、従来の電槽の概念を破る新技術である。

2) 1976年～2003年

1973年10月のオイルショックを境に原油価格が急騰し、電力をはじめ重油価格の上昇が著しくなった。省力化の時代から省エネルギーの時代に入り、全員参加のグループ活動等日常の改善活動により、電解槽、循環タンク等の保温、電解槽の全面カバー等により蒸気使用料削減、安価な夜間電力等、製錬コストの削減に努力している。しかし、電解工場は厳しいコスト競争

に打ち勝つためにスクラップアンドビルドが進み、1974年三菱大阪製錬所の電解操業中止、1983年日立第一電解操業中止、2000年三井金属竹原製錬所の電解操業中止により、戦前の電解工場は小坂を除き新しい工場へ集約された。

次に注目すべき技術としてISA電解法について述べる。

ISA電解法の特徴として次の点が挙げられる。

- ① ISA電解法は図7.4に示したように種板を使用しないので種板製造工程が不要である。
- ② 製品をステンレス母板に直接電着させるので電槽作業がシンプルで省力化できる。
- ③ ステンレス母板（約40kg）を使用することで、特に電解初期の電流バラツキが少ないので通常電解で300A/m²以上の高電流密度でも高品質の電気銅の製造が可能になった。
- ④ 高電流密度電解と種板工程省略によるシステムのコンパクト化により銅、金、銀等有価物の工程滞留量が大幅に削減され、陰極ステンレス板の初期投資をカバーできる。

表7.4に銅電解技術指標の推移を示す。表7.5に日本の代表的電解工場とISA電解工場の操業成績を示す。

表7.4 銅電解技術指標の推移

項 目		単 位	2000年	1995年	1977年	1967年	1957年
生 産 量		t/月	17,000	13,500	8,000	4,500	1,500
析 出 槽		槽	727	631	784	750	490
槽 電 流		A	34,000	31,000	13,000	8,000	4,500
カ ソ ー ド	工 数	工/t	0.05	0.07	0.14	0.38	1.37
	総電力	kWh/t	381	313	328	340	470
	蒸 気	kg/t	71	65	288	400	830
	電解液温度	℃	67	65	60	62	54
陽 極	重 量	kg	372	360	340	225	90
	陽極残基率	%	15	16	18	18	10
	厚 さ	mm	43	43	35	37	46
	極間距離	mm	100	100	105	100	130
	在槽日数	日	20	20	21	26	23
電 解 条 件	電流密度(DK)	A/m ²	326	280	225	230	170
	槽 電 圧	V	0.337	0.29	0.32	0.3	0.39
	電流効率	%	96	97	96	92	94
	電解電力(DC)	kWh/t	340	281	286	300	370
	電解電力(AC)	kWh/t	360	300	302	320	420
エ ネ ル ギ ー 指 数		kWh/t	398	329	400	440	678
エネルギー指数＝総電力 + 250kWh/t × 蒸気t / カソードt							
電気銅生産量（日本）		千t/年	1,340	1,180	943	470	113
電気銅生産量（世界）		千t/年	14,100	11,822	9,084	5,995	3,832

表7.5 日本の代表的電解工場と海外ISA法電解工場の成績比較

項 目	単 位	A社	B社	C社	D社	G社	H社	I社
生 産 量	t/月	7,080	14,850	15,610	13,500	15,380	30,420	21,670
電流密度(DK)	A/cm ²	140	228	260	280	303	333	310
電 流 効 率	%	92.5	96	97.7	98.5	96	97	96
電 解 生 産 性	kg/槽/日/槽m	13	122	128	157	157	176	161
工 数	人・h/t	0.65	0.74	0.91	0.56	0.6	0.4	0.4
陽 極 重 量	kg	143	365	335	363	350	402	305
極 間 距 離	mm	80	97	100	100	95	95	100
陽 極 残 基 率	%	26	15	18	16	14	11	13
陽 極 厚 さ	mm	15	45	41	43	44	54	40
陽極在槽日数	日	15	25	21	20	21	22	22
陰極在槽日数	日	15	12+13	10+11	10+10	7+7+7	7+7+8	7+7+8
電解電力(AC)	kWh/t	250	260	270	300	290	300	320
電解電力(DC)	kWh/t	238	239	251	285			
槽 電 圧	V	0.21	0.28	0.27	0.29	0.3	0.33	0.29
温 度	℃	62	62	62	65	63	62	62
銅 濃 度	g/l	45	46	48	48	46	42	40
硫 酸 濃 度	g/l	173	178	198	190	170	175	175

A～D社は日本の平成6年操業データ。但しD社はPRC電解法 G・H・I社は海外のISA電解法

図7.4に通常法とISA法のマテリアルフローを示す。

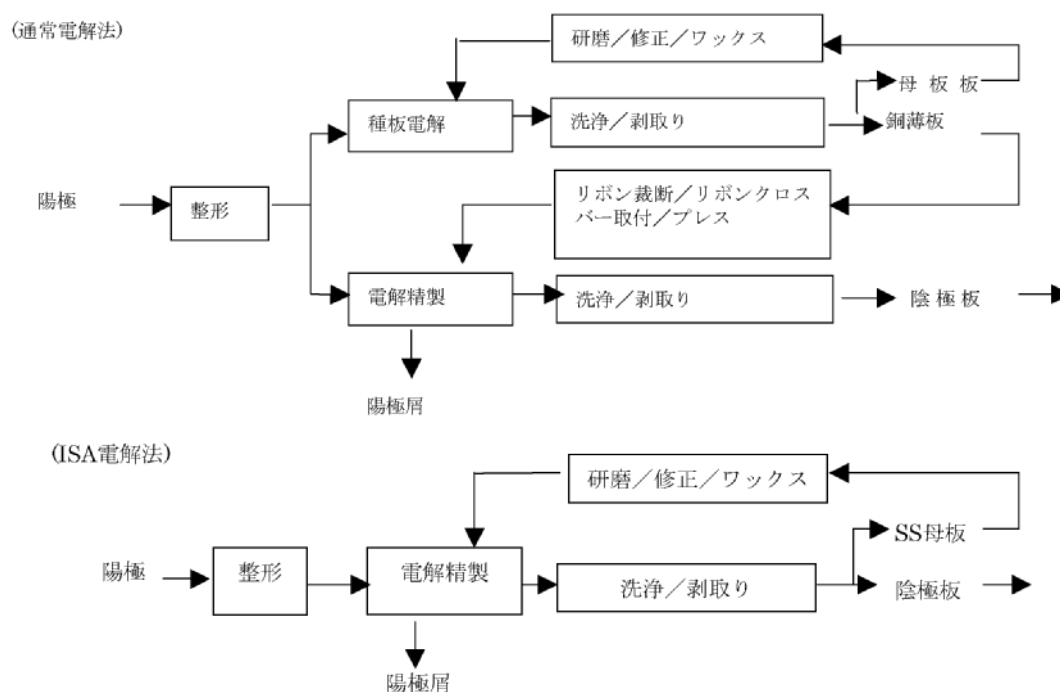


図7.4 銅電解精製のマテリアルフロー（通常法とISA法との比較）

1998年三菱マテリアル社が主体となってインドネシアに建設されたグレシック製錬所では溶錬は三菱連続製銅法であるが、電解はISA電解法が採用され現在順調に操業している。国内では、日鉱金属日立工場にお

いて2002年12月より稼働している。

日本国内の電解工場においてもこれからの増産工事に際してはISA電解法の活用が検討、実施されている。

8 銅製錬の系統化

銅製錬の系統化の対象範囲をどのように絞り込むか検討の結果、銅製錬をとりまく環境の変化によって自溶炉の開発がどのように進められて来たか、を中心に取り上げた。

まず自溶炉の稼働台数を縦軸に年代を横軸にグラフ化したものを図8.1に示す。図8.3に銅製錬の技術史を示す。

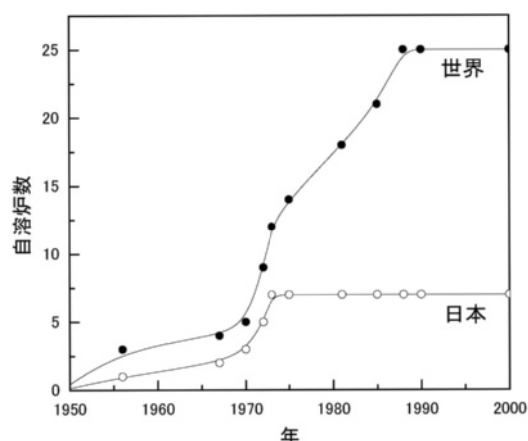


図8.1 自溶炉建設数推移

このグラフから明らかなように、フィンランドのオートクンプ社で実用化された自溶炉は日本で1967年～1973年の短期間に6基建設され、世界の自溶炉建設の引き金となったことを示している。世界の自溶炉建設は1990年まで25基となり、現在世界の銅製錬の主流となっている。このグラフが示すように装置産業において、このようなSカーブ曲線を描くことは、めずらしいことでありその原因を以下の手順で調査系統化した。

まず溶錬を取り巻く環境がどのような状態であったか取り上げた。

1) 銅製錬を取り巻く環境

- ① 銅原料の変化 1921年浮遊選鉱法の発明により、塊鉱から粉鉱へ形態が変わった事、鉱石中の銅品位が高くなったこと、低品位銅鉱山でも鉱量が豊富であれば採掘可能となったこと、等鉱山開発から輸送、製錬方式まで大きな影響を与えた。

- ② 大量消費時代の到来 電気工学の発達で銅の需要は飛躍的に増大し現在でもその傾向は続いている。
- ③ 公害防止運動の高まり特に煙害。
- ④ 日本に於いては貿易の自由化、貨幣の変動相場制による円高、オイルショックをきっかけにオイルの高騰はじめエネルギーコストの大幅上昇等あり製錬コストの削減が必至となった。

以上の環境の変化に対しては銅製錬全般の対応が求められるが、ここでは自溶炉の誕生から世界の主流技術となるまでを対象に、特に古河機械金属の技術導入から研究開発に焦点を当て、下記の手順で実施した。

2) 自溶炉技術の開発

- ① 粉鉱処理法の基礎的研究
- ② 古河機械金属の自溶炉技術導入の背景と古河式自溶炉開発の歴史
- ③ 古河による国内産銅各社への技術供与
- ④ 国内各社での今日までの改善の取り組み

以上4段階においてまず①から③がどの様に行われてきたかをフィッシュボーンダイアグラムを使って纏めた。③から④については日鉱佐賀製錬所をモデルにレーダーチャートを使って纏めた。(図8.2参照)レーダーチャートには自溶炉の特性値として以下の5項目を示した。

- | | |
|-----------|-------------------------------------|
| a 装入量 t/h | : 炉の生産能力を示す。現状を100%とする。 |
| b 公害防止 | : 現状（自溶炉周辺設備の集煙処理完成）100%とする。 |
| c 操業安定性 | : ダストトラブル中心に操業停止時間の合計で建設初期を100%とする。 |
| d 操業コスト | : 自溶炉1炉ベースの粗銅生産コスト。建設初期を100%とする。 |
| e 銅損失 (%) | : カラミ中の銅含有量 (%) 操業当初を100%とする。 |

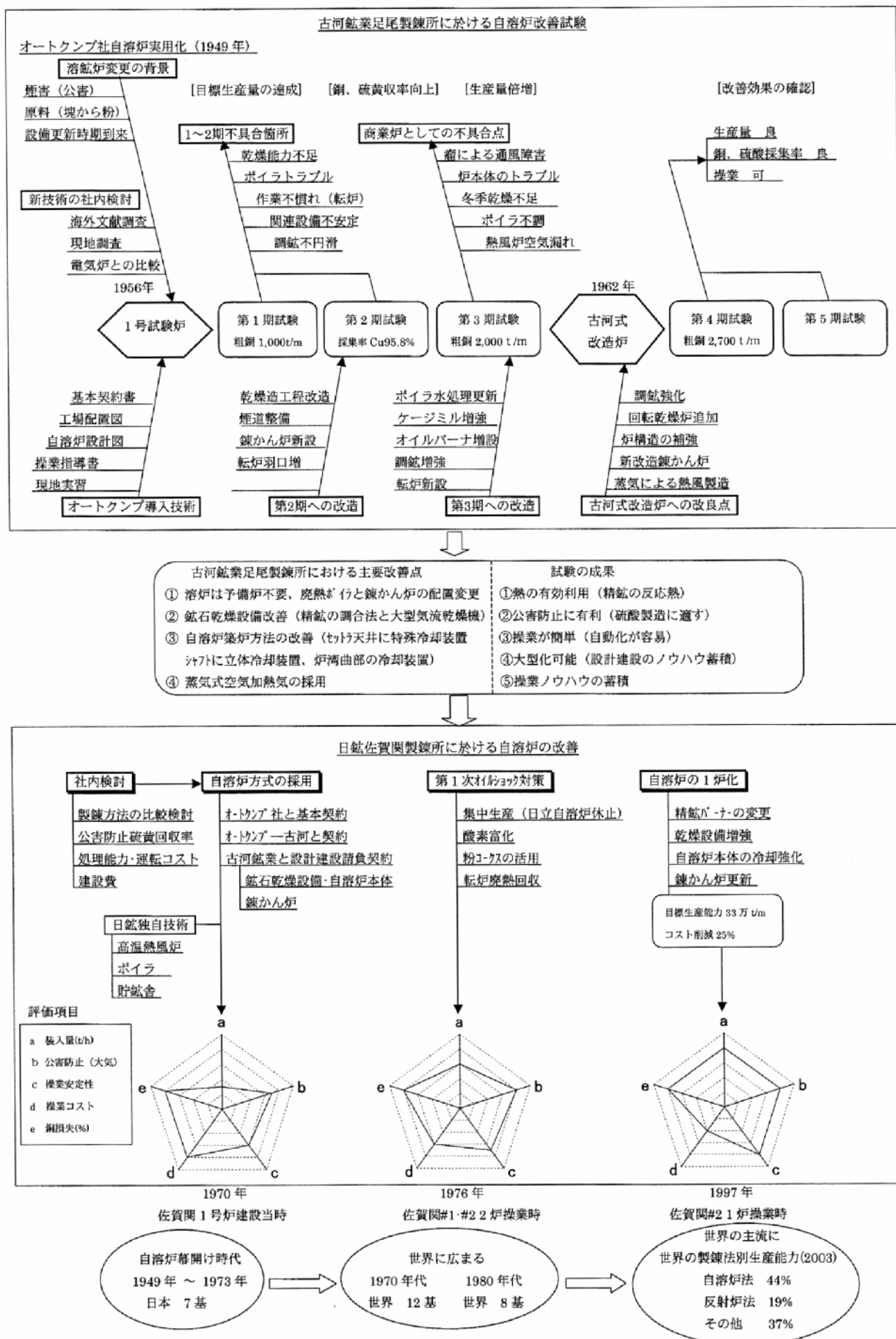


図8.2 自溶炉製錬の系統図

図8.3 銅製錬の技術史

	1945	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
政治	・太平洋戦争(41-45) ・憲法	・朝鮮戦争(50-53) ・国連加盟 ・釜山保安法		・輸入自由化 ・国連加盟	・東京オリビック ・公害対策基本法 ・大気汚染防止法		・第1次石油危機 ・変動相場制 ・大気総量規制	・第2次石油危機	・先進5カ国蔵相会議 ・昭和天皇崩御 ・国鉄民営化			
経済	・戦時経済体制 ・経済再建	・経済安定と特需 ・緊縮政策	・岩戸景気(59-61) ・いざなぎ景気(65-70) ・景気後退不況ムード ・なべ底景気	・岩戸景気(59-61) ・神武景気(55-57)					1ドル=200~120円		円高ピーク 1ドル=79.10円	
反射炉	・三菱マテリアアルス・直島製錬所	・1号反射炉(1918~)	・炉長延長 ・小名浜製錬(株)	・2号反射炉 ・1号反射炉	・石油危機大型不況 ・1号炉稼働中止 ・代替燃料チップタイヤ	・2号反射炉 ・溶鉱炉から自溶炉へ転換	・溶鉱炉ゼロ		・不況の慢性化 ・円高不況 ~ 失われた10年 ~	・バブル景気(86-91) ・平成不況		
溶鉱炉		・佐賀関ベレタイジング ・住友百田式生鉱吹 ・日立酸素製錬	・熱風重油吹込み ・溶鉱炉から自溶炉へ転換									
自溶炉	・浮遊選鉱法発明(1920) ・自溶製錬研究(1936~)	・オートクランプ自溶炉実用化 ・古河オートクランプ技術導入	・改造炉	・シャトル改造	・酸素富化		・酸素富化					
溶解炉	・同和鉱業(株)	・足尾試験炉	→ 小坂製錬所	→ 佐賀関製錬所第1号炉 → 佐賀関製錬所第2号炉 → 日立製錬所	・湿式煙灰処理 ・酸素富化 ・酸素富化第2期 ・酸素富化(80%)化							
連続炉	・三菱マテリアル(株)	・日比共同(株)	→ 東予製錬所	→ 玉野製錬所	→ 酸素富化第1期 → 酸素富化第4期							
電解設備		・各社電解槽増槽増産 → 各社精製アノードへ転換 ・電解生産性大幅向上	・小名浜第1電解 ・小名浜第2電解 ・小名浜第3電解 ・玉野電解 ・東予電解	・小試験 ・原型炉試験・商業炉直島	→ TGキドク(リーク)	・大型炉直島 (・インドネシアダレシック)						

9 | まとめ

銅は人間が最初に手にした最も古い金属であるがその需要は今日まで常に増加している。特に電気工学の発展に伴い銅の使用量は著しく増加し、現在世界の生産量は年間1,500万t、日本の生産量は130万tである。消費の内訳を見ると図9.1に示すように全ての産業分野で使用されており、平成16年度の分野別生産割合は電気機械28%、輸出18%、一般機械18%、金属製品18%となっている。

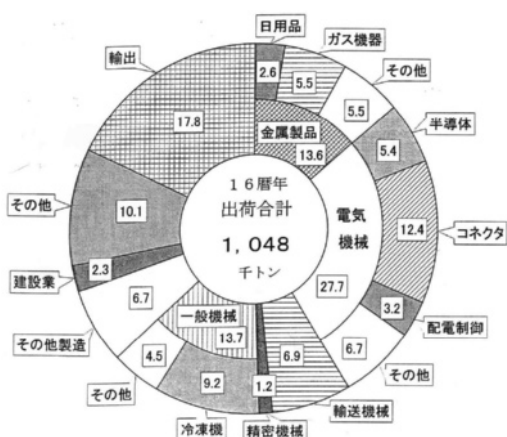


図9.1 銅および銅合金の分野別生産割合 (%)

本報告書で銅製錬がどのような歴史を辿って今日まで発達してきたか述べたが、特に1925年頃浮遊選鉱法が發明され、原料が塊鉱から品位の高い粉鉱に変化した事により製錬技術者の努力は、粉鉱の合理的な処理と公害対策に向けられたがその経緯を下図（図9.2参照）のように示す事が出来る。

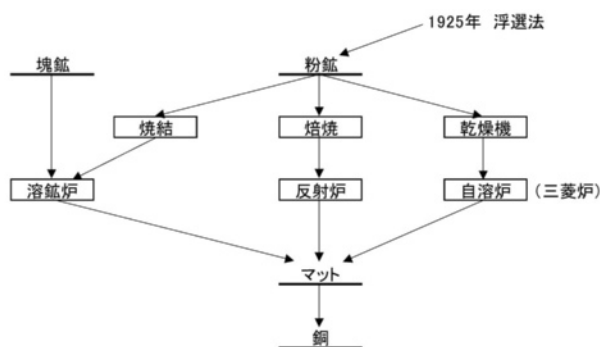


図9.2 塊鉱から粉精鉱に変わったことによる製錬法の変化

製錬業は装置産業であり、その中心は最も建設費の高い溶解炉に合わせる様に努力してきた。明治初期に導入した溶鉱炉は各製錬所で独自の発達をしてきたが、原料の粉鉱化により焙焼、焼結、団鉱、ペレタイジング、練鉱など様々な予備処理が行われた。日本の

銅溶鉱炉の最終的な形となった百田方式は、独立した予備処理工程を省き、溶鉱炉そのものを塊状化と硫酸製造向けに改造した点優秀な技術であり日本の技術レベルの高さを示すものである。米国では粉精鉱の大量処理に反射炉が広く使われ世界的な大規模製錬所の標準と見なされ現在も多く稼動している。我が国でも直島、小名浜で稼動していたが、現在は小名浜の2炉のみである。自溶炉については既に述べたようにタイミングよく日本に導入され日本、並びに世界の溶錬法の主流となっている。現在自溶炉法による銅の生産量は日本で約60%、世界で40%を占めている。特に自溶炉の普及に果たした古河機械金属社の役割は非常に大きい。連続製銅法は三菱マテリアル社が世界に先駆けて実用化し、現在直島製錬所で年産30万tの規模で稼動しており日本が世界に誇れる溶錬法で日本の技術の高さを示すものであろう。

銅電解工場の稼動は20世紀初頭で新しい技術であったが、たちまち世界中に広められ高純度の電気銅を大量に且つ安定して生産出来ると同時に粗銅に含まれる金、銀等の有価金属を効率よく分離精製できるようになり、溶錬工程でのリサイクル原料からの金銀の効率的な濃縮と併せて威力を発揮している。

図9.3に1956年から2003年迄の銅製錬能力と銅地金生産量の推移を示しているが、1956年から1973年までは新工場の建設、旧工場の増設で急激に設備能力を伸ばし生産量も伸びている。しかし1974年以降は旧設備の廃棄、並びに集約等による設備の新設はあったが、設備能力の増大は見られない。生産量も景気の停滞を反映して変化が大きく伸びも鈍い。

2004年現在の製錬能力は溶錬工程で年産178万t、電解工程で153万tである。

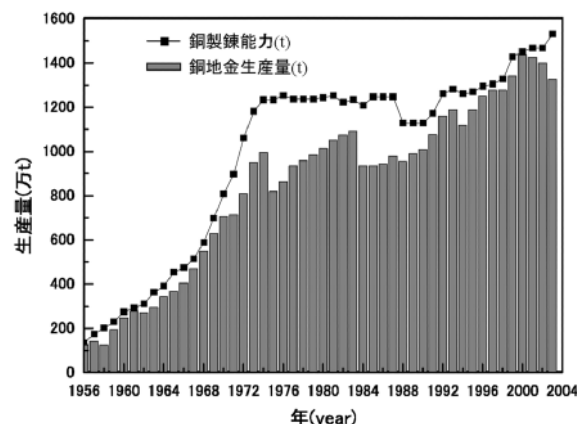


図9.3 銅生産能力と銅地金生産量の推移

今後の銅製錬を考える時

- ① 原料である銅精鉱は100%輸入に依存している。
- ② 日本に於ける硫酸の需要は今後減少しても増加は見込めない。
- ③ 銅製錬事業は初期投資の大きい素材産業であり、新設には莫大な資金を必要とする。
- ④ 工場建設を考えると、海外鉱はじめ運搬を考えると臨海立地が条件になるが、新しい立地を探す事は現在の公害規制、住民の意識等を考えると困難である。

等の理由から新規工場の建設は無いものとする。

今後の需要の増加に対しては溶錬工程では改善による能力の向上、電解工程に於いてはISAプロセスの採用による設備増強で生産量の向上を図る小刻み増産になると思う。特に日本の公害防止技術は世界で抜きん出て高いレベルに達しており、今後は中国をはじめアジア各国の公害防止に積極的に参加していく事が望まれる。

資源は有限であり、現在の生産が続けば60年で資源は枯渇すると言われている。今後の製錬事業は効率的なりサイクルを組み込んだ製錬方式を開発することが必要と思われる。

10 | 銅製鍊登録候補一覧

番号	名称	資料形態	所在地	製作者	製作年
1	STRUCTURE OF THE FURNACE	設計図	千葉県習志野市 津田沼2-17-1	OUTOKUMPUOY	1955
2	HEATH FRAME and TRANSVERSAL SUPPORT BEAM	〃	〃	〃	〃
3	SUPPORTING FRAME FOR REACTION SHAFT	〃	〃	〃	〃
4	CLEANING DOOR IN THE HEARTH AND FLUE	〃	〃	〃	〃
5	OBSERVATION DOOR IN SITTING PART OF FURN	〃	〃	〃	〃
6	REACTIONS SHAFT	〃	〃	〃	〃
7	ASSEMBLY DRAWING OF THE ARMOURING FOR THE SETTING PART OF THE FURNACE	〃	〃	〃	〃
8	CONNECTION BEAM OF THE SUPPORTING FRAME FOR REACTION SHAFT	〃	〃	〃	〃
9	Armouring of front wail and tie rods	〃	〃	〃	〃
10	SUPPORTING FRAME FOR FLUE UPTAKE	〃	〃	〃	〃
11	CONNECTION BEAM OF THE SUPPORTING FRAME FOR REACTION SHAFT	〃	〃	〃	〃
12	Assembly drawing of the armouring for flue uptake	〃	〃	〃	〃
13	Details for the flue uptake	〃	〃	〃	〃
14	DISPOSITION OF SUSPENSION IRONS	〃	〃	〃	〃
15	Suspension irons parts A to H	〃	〃	〃	〃
16	LOWER PART OF THE REACTION SHAFT	〃	〃	〃	〃
17	SUSPENSION IRONS PARTS J to S	〃	〃	〃	〃
18	ARMOURING OF HEARTH FRONT WALL OF REACTION SHAFT SIDE	〃	〃	〃	〃
19	ARMOURING OF HEARTH FRONT WALL OF FLUE UPTAKE SIDE	〃	〃	〃	〃
20	ARMOURING OF HEARTH FRONT WALL OF WITH SLAG HOLE	〃	〃	〃	〃
21	ARMOURING OF HEARTH FRONT WALL OF FLUE WITH SLAG DOOR	〃	〃	〃	〃
22	PLANE ROOF	〃	〃	〃	〃
23	PLAN OF FOUNDATION	〃	〃	〃	〃
24	Ground Plates	〃	〃	〃	〃
25	ROOF ABOVE REACTION SHAFT	〃	〃	〃	〃
26	GRID IRONS AND BALLS FOR SHUTTING OPENINGS IN GFURNACE ROOF	〃	〃	〃	〃
27	ARMOURING OF HEARTH SIDE WALL WITH SLAG HOLE	〃	〃	〃	〃
28	ASSEMBLY DRAWING OF THE ARMOURING FOR THE SETTING PART OF FURNACE	〃	〃	〃	〃

現在世界（日本を含む）の銅溶鍊炉の主流となっている自溶炉は1949年フィンランドのオートクンプ社で初めて工業化された。古河鋳業（現古河機械金属）では、1954年自溶炉ライセンス 第1号として技術導入しオートクンプ社から提供された製作図面に基づき日本国内の第1号炉を建設した。古河鋳業ではこの炉をベースに研究改善を重ね世界の自溶炉発展に大きく寄与した。ここにリストアップした図面はオートクンプ社から供与された現存する製作図面の一部である。

11 | 謝辞

銅製錬技術の系統化の作業に当たっては多くの方々に御指導、御協力頂き、報告書を作成できた事にまず御礼申し上げます。

作業に当たっては「非鉄金属製錬技術の伝承の調査研究成果報告書」（独立行政法人 日本学術振興会 素材プロセッシング第69委員会発行）を中心に纏めた。本報告書の調査研究員であった矢沢、後藤、増子、堀江、寺山、日野、箕浦、藤井、柴田、助川（敬称略）の各氏の論文を参考にさせて頂いた。

資料の収集、並びに編集に関しては千葉工業大学山

下教授、並びに大学院生の各氏、三井金属エンジニアリング森本氏、金属鉱山会宮地氏に御指導、御協力を頂いた。

現地調査、資料の提供、並びに見学案内等に関して日本鉱業協会、日本銅センター、小名浜製錬（株）、古河機械金属（株）足尾事業所、古河メタルリソース（株）、小坂製錬（株）の関係各位にお世話になった。

ここに改めて御協力と御指導を頂いたすべての方々に記して謝意を表します。

12 | 参考資料

池田謙三：銅製錬（上）（下）

文部省：材料製造技術（1）（2）

（社）日本鋳業会：日本鋳業会誌第72巻第822号

（社）日本鋳業会：日本鋳業会誌第84巻第63号

（社）日本鋳業会：日本鋳業会誌第97巻第1122号

（社）金属鋳山会、日本鋳業協会：鋳山第51巻第8号

（独）日本学術振興会 素材プロセッシング第69委員会：非鉄金属製錬技術の伝承の調査研究成果報告書

（財）秋田県鋳山会館：秋田県鋳山誌季刊考古学第62号

渡辺行：技術無限

宮本益夫他：鋳山読本第6巻第30集非鉄金属の冶金1銅（上）

B.W.スミス著 日本銅センター訳：銅の6000年

Outokumpu Oyi S.T.H：A FLASH

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第6集

平成18(2006)年3月31日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト 永田 宇征、エディット 久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク