

主要工業材料の生産性と利用に 関する問題点

——鉄鋼・銅およびアルミニウム——

相原 正*

**Technical Problems about the Productivity and Utilization
of Chief Engineering Materials
——Steel, Copper and Aluminum——**

by Tadashi AIHARA

1. まえがき

本文は、わが国の主要工業材料である鉄鋼・銅とその合金・およびアルミニウム（以下 AI と書く）とその合金などの生産性と利用の現状を簡略に整理し、その上に立って、主として当面する生産性と利用に関する技術的な問題点について論述したものである。

戦後36年を経て、わが国の工業生産力は向上し、量的にも質的にも有史以来のピークの数値を示すものが増えてきた。ここに取りあげた主要工業材料の生産性と利用についてもその例に漏れない。

工業材料の生産は企業ベースで行われ、使用は企業ならびに市中で行われる。そして、高度に成長したわが国の工業材料では、生産と使用の両面で、量的に膨大な数字、質的に緻密な数字がしばしば強張せられる。この域に到達するまでには、先づ産学それぞれの問題意識が発生し、研究課題が生まれ、生産者側・使用者側ともども産学一体となって、問題の解明に研費努力が積み上げられてきたことを見逃してはならない。

工業材料の工学的・技術的な調査研究は、その範囲が広く、階層が厚く、かなり複雑である。資源・原料・処理と生産の工程・生産システム・主製品・副産品・産業廃棄物・環境処理・合金・化合物などに関して、グローバルでマクロ的なものから、物質特性・物性究明に至るミクロ的なしい超ミクロ的な内容のものまでが複雑に組合わされている。そして、成長しかつ安定しきったかに見える現在でも、次から次へと新しい研究課題が生まれている。

工業材料を造る立場と使い立場とは、関心を注ぐ重点が異なることがあるが、窮極は表裡一体のものとなって、国家人類の福祉の向上に寄与することにつながるべきであると考えられる。

上記のような事情を勘案しながら、表題について論述を進めてみた。

* 理工学部機械工学科教授 工業材料

2. 鉄 鋼

2.1 鉄鋼の生産性の現状

2.1.1 鉄鋼生産のあらまし

近年の世界の鉄鋼生産量は粗鋼で年間約7.5億t(1979年)にのぼる。そのうち、わが国の生産量は年間約1.1億tで、ソ連(約1.5億t)・米国(約1.2億t)に次ぎ世界第3位である。

鉄の原料鉱石は酸化鉄鉱が大部分を占め、そのうちのほとんどが赤鉄鉱(Hematite, Fe_2O_3)で、磁鉄鉱(Magnetite, Fe_3O_4)がこれに次ぐ。わが国の製鉄原料用の鉱石は、オーストラリア・ブラジル・インド・チリなどからの輸入に依存しており、鉄の品位は大約63%である。

現在鉄鋼製錬の基幹となっている方式は、鉄鉱石をコークスと共に高炉に装入し還元し鉄鉄を得る製鉄工程と、鉄鉄を酸化精製して鋼を造る製鋼工程の2工程から成り立ついわゆる間接製鋼法である。この方法は全世界を通じての主流となっている。鉄鋼の生産に直結するわが国の製鋼方式は戦後平炉が廃され、純酸素上吹転炉(LD転炉²⁾)で溶鉄を酸化精製して鋼を造る様式が広く行われるようになった。今では普通鋼ばかりでなく、特殊鋼もこの方式で造られるものが増えてきた。しかし、電弧炉で精製して造る鋼もかなりある。

2.1.2 鉄鋼の生産性向上

鉄鋼製錬はエネルギー多消費型の産業である上に、増産を必要としたので、いわゆるスケール・メリットをねらって各工程の単位設備は大型化されて巨大産業となった。全工程を通じて、省エネルギーをはじめとする生産性の向上に各種の工夫がなされてきた。

製錬の主軸となる高炉と転炉が大型化された推移を図2.1³⁾に示す。

高炉数⁴⁾は1980年稼働中の44基のうち内容積4,000 m^3 以上のものが15基を占め、その中には世界最大級5,000 m^3 以上のものが2基含まれている。これらの全高炉による製鉄能力は年間1.3億tに達している。

高炉の生産性を出鉄比で示すと、1965年頃には1.5 $\text{t}/\text{m}^3/\text{d}$ で、1970年頃2.0 $\text{t}/\text{m}^3/\text{d}$ が

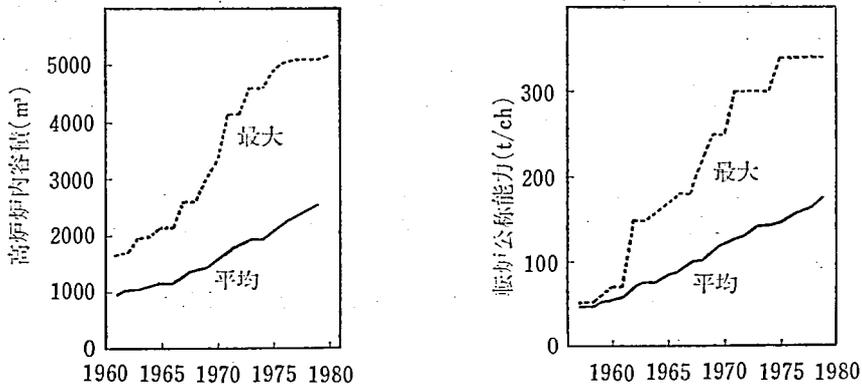


図 2.1 高炉・転炉の大型化推移

最近では $1.9\text{ t/m}^3/\text{d}$ となっている。コークス比は、1965年頃の 500 kg/t-p が逐年減って、1979年には 423 kg/t-p となった。

製鋼炉の能力は年間で転炉1.4億 t、電弧炉2,500万 t でその比率は85対15である。

転炉の生産性は、1回操業当りの製鋼時間が約40分、酸素の原単位は鋼 t 当たり約 51 Nm^3 と安定してきた。

高炉と転炉の生産性を示す最近の成績を表2.1⁵⁾に示す。

表 2.1 高炉・転炉の生産性

5) から作製

		52年度 (1977)	53年度 (1978)	54年度 (1979)
高炉	出鉄比 ($\text{t/m}^3/\text{d}$)	1.83	1.80	1.93
	コークス比 (kg/t-p)	430	429	423
転炉	製鋼時間当り生産量 (t/h)	236.1	250.3	267.1
	1回当り製鋼時間 ($\text{min}/\text{回}$)	40	40	39

製鋼では LD 転炉の他に、最近では上下吹複合転炉⁵⁾ や底吹き転炉^{6,7)} も台頭し、それらの成績が有望視されている。さらに真空脱ガス・取鍋精製^{8,9)}などの炉外精製法が開発され実用化されている。

機械化と連続化の適用例では、溶鋼の連続 casting^{10,11)}の実績として、普通鋼での連铸比率が1970年の10%が1980年には約64%、工場単位では90%にのぼるものも見られるようになった。連続 castingによる生産性の向上の結果として、鋼材の歩留が向上するという副次的成果が得られた。図2.2¹²⁾にその関係を示す。

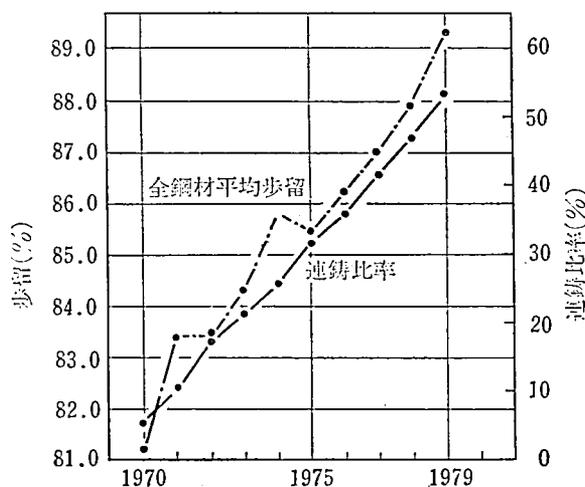


図 2.2 鋼材歩留と連铸比率の推移

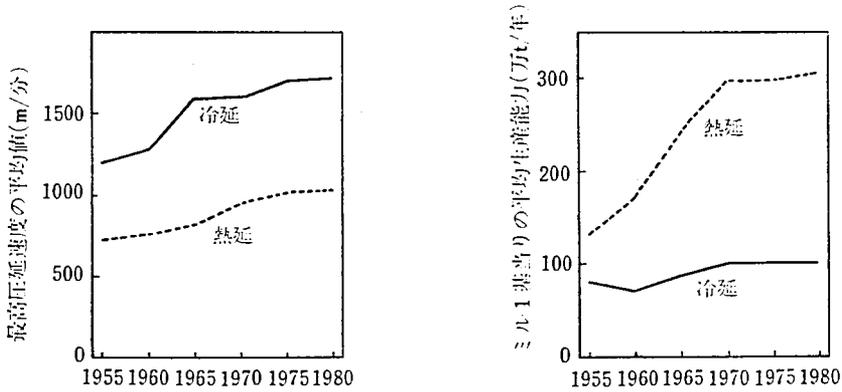


図 2.3 熱延・冷延の大型化高速化推移

表 2.2 部門別自動化例

部 門	自動化, コンピュータ化, システム化 例
港 湾・原 料	原料集中管理システム
製 鉄	コークス炉の燃焼制御, 高炉装入, 送風制御
製 鋼・分 塊	転炉ダイナミックコントロール, 連铸の自動注入
熱 間 圧 延	加熱炉燃焼制御, AGC, スラブヤード・コイルヤード無人化 ロールグラインダーNC化
冷 間 圧 延	冷延オンラインシステム (工程のシステム化), ロールグラインダーNC化
輸送, 成品受払	機関車中央コントロールシステム, 無人クレーン, 自動倉庫, 受払オンラインシステム
試 験・分 析	自動材料試験機・自動分析機
修 理	修理用機器管理のシステム化, 修理計画のコンピュータ化
動 力	エネルギー集中管理システム

鋼材の塑性加工では熱延・冷延とも大型化・高速化されたが、その推移を図 2.3³⁾ に示す。

自動化・システム化の面ではセンサーの開発, 制御技術の進展とコンピューター利用, 品質分析の高速化などを挙げる事ができる。表 2.2³⁾ に工程部門別の自動化例を示す。

2.2 鉄鋼の利用の現状

普通鋼・特殊鋼とも用途は産業部門別も示すとよいが、紙面の都合で割愛し、以下のとおり鋼種別の生産量を主として示した。

2.2.1 普通鋼の用途

わが国の粗鋼生産量¹³⁾は1973年度の1.2億 t を最高として1979年度は約1.1億 t となっている。同年度の普通鋼鋼材の国内消費の実績は 5,520 万 t, 特殊鋼鋼材の国内消費実績は

720万 t でその合計は 6,240万 t, 粗鋼見掛消費は 7,040 万 t でその他に輸出が 3,460 万 t ある。

普通鋼鋼材の鋼種別生産量¹⁴⁾を示すと、1979年で熱間圧延鋼材として棒鋼1,508万 t, 薄板類1,166万 t, 厚・中板1,075万 t が最も多く、型鋼・線材などを加えて5,320万 t 弱, 冷間圧延鋼材が1,350万 t, ぶりき・亜鉛鉄板958万 t, 鋼管960万 t などで、普通鋼圧延鋼材の総合計は 8,739 万 t となっている。普通鋼は結局土建・自動車・産業機械・造船など構造用材料としての消費が圧倒的に多い。

2.2.2 特殊鋼の用途

特殊鋼は全粗鋼生産高の約15%を占め、特殊鋼粗鋼は 1,600 万 t である。特殊鋼は高炉メーカーの他に専門メーカーがあって、電気炉で生産される量がかなりある。それらを合わせて特殊鋼鋼種別生産量を1979年度実績¹⁵⁾で量の多い順に挙げると次のようになる。

機械構造用炭素鋼290万 t, 構造用合金鋼280万 t, 高抗張力鋼220万 t, ステンレス鋼190万 t, 快削鋼78万 t, 軸受鋼64万 t, ばね鋼64万 t, ピアノ線材38万 t, 工具鋼26万 t などの合計は 1,250 万 t となる。ちなみに、快削鋼・軸受鋼・ばね鋼・工具鋼などのいわゆる高級鋼の生産は専門メーカーが過半を占めている。

特殊鋼は自動車関係の消費が多く、直接納入される量は特殊鋼全体の約20%, ばね鋼や軸受鋼のように間接的に納入されるものを含めると約40%に達する。

2.3 鉄鋼の生産性に関する問題点

2.3.1 高炉を取り巻く銑鉄の生産性

この問題は専門的に立入れば、a. 鉄鉱石の開発と鉱種 b. 焼結・ペレタイジングなどを含む鉱石の予備処理 c. 原料炭とコークス品質 d. 高炉の設計内容と各種の操業条件など高炉を取り巻く種々の条件の優劣に大きく支配される。それらを含めて、総合的な生

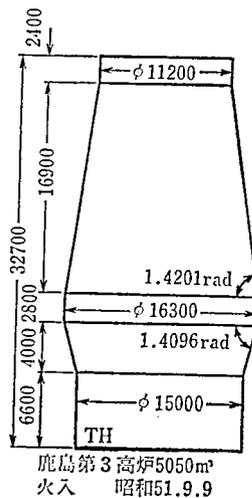


図 2.4 高炉プロフィール (数値は mm)

産性を示す一つのパラメーターとして高炉炉容を挙げるができる。

高炉炉容の大型化は、図 2.1 から判るように最大値はほぼ極限に達している。今後スクラップ・アンド・ビルドによる平均炉容の上昇はあるが、本質的には大型化の技術は一段落したものとみてよい。図 2.4¹⁶⁾に 5,000 m³ 級高炉のプロフィールを示す。

コークス比の低減に寄与した羽口重油の吹込みは、重油価格の急騰により次第に微粉炭の吹込みによって代替されてきた。銑鉄 t 当りの原料炭の消費原単位は、年々減少してきて 1978 年には 697 kg となった。しかし、オイルレス高炉の増加に伴い 1980 年には 742 kg へと大きく上昇してきた。ちなみに、移動高炉 44 基中オイルレス高炉は 6~7 基であったのが、1980 年末には 30 基へと増加した。

高炉で消費される熱量の回収のために行われている高炉炉頂圧発電や熱風炉排ガス利用の燃焼用空気予熱などは、すでに完成された技術として、今後も広く利用されるであろう。

2.3.2 転炉を取り巻く鋼の生産性

この問題は、a. 銑鉄の化学成分 b. 副原料の品質 c. 転炉の設計内容と各種の操業条件などに支配される。その総括的な生産性を転炉の公称能力で表わすことができる。転炉は容量の大小にかかわらず正味の吹錬時間には大差がない。

転炉の大型化は、図 2.1 から判るように公称能力で 1 回操業当り 300 t を越えて限界となったようである。

転炉は以前は、LD 転炉に比べれば小型の空気吹込み式の底吹き炉が使われていた。それが、1957 年から LD 転炉が使われはじめ、その良さが認められて 1970 年以降は粗鋼生産量の 80% を占めるほどに普及した。最近開発された上下吹複合転炉⁵⁾は、炉底羽口から酸素または炭酸ガスを吹込み、酸素上吹と複合させることによって LD 転炉以上の効果をねらうもので、今後の成果が期待される。底吹き転炉^{6,7)}による鋼の量産では、羽口構造の損耗を防ぎ長寿命に耐え得る羽口耐火物の確立が注目される。

高炉から抜きとった溶銑を転炉に装入する前に、炭酸ソーダを添加して製鋼反応の合理化をねらういわゆる“Soda Ash Metallurgy”⁹⁾では、溶銑処理容器と転炉耐火材の長寿命品が開発されるか否かがその工業的成否を支配するように考える。

2.3.3 新しい用途への対応

寒冷地向けの鋼管： アラスカ・カナダ・シベリア北部などの寒冷地の石油・天然ガスの開発、北海地区の海底石油・ガスの採取などに用いる鋼管は軸方向の強さと土圧に耐える圧潰強さが要求される。鋼管の大径化・高張力化・厚肉化・耐冷性の研究が迫られている。

海洋開発用の鋼材： 長大スパン橋梁や波浪・潮流利用の発電などに用いる構造用材料としては、従来の二次元的強さ特性の上に板厚方向にも大荷重がかかるので平行割れ（ラメラ・ティア）のない寒冷下三次元的強靱鋼材が要求される。

圧力容器： 高圧ガス・液化ガス・化学プラントの大型容器などは機械的強さと耐食性が同時に要求される。特に溶接部の応力腐食割れ・熱処理ぜい性などの重畳を克服する鋼材が要求される。

2.3.4 原子力製鉄¹⁷⁾¹⁸⁾の挫折

通産省工業技術院の音頭とにより 1973 年度から取組んできた高温ガス炉からの核熱利用をする「高温還元ガス利用による直接製鉄」の研究は、8 年間に 137 億円を投入した。

しかし、原子力製鉄の実現に必要な不可欠な安全性実証試験を含む第2期計画で挫折した。今後の予算化が何年後になるか、研究の再開は不明の状態となった。

2.4 鉄鋼の利用に関する問題点

鉄鋼材料中で最も大量に生産され消費される普通鋼鋼材は長い歴史の積み重ねの中で、多くの利用上の問題点が発生しかつ処理されてきた。普通鋼のもつ各種の機械的性質・化学的性質などが満足のでない分野での用途を満たすために、特殊鋼が研究され開発され実用化されてきた。そこで本節では、先づ普通鋼と特殊鋼を通じての重要であると考えられる共通的な問題点を挙げ、続いて二・三の特殊鋼に関する問題点に触れることとする。

2.4.1 鋼の凝固組織と製品材質^{10,19)}

近年、連続鋳造による生産性向上は著しくその成果を挙げている。これは稼働率の向上とともに鋳造速度の増大したことが寄与している。連続鋳造は、旧来の造塊方式に比べれば、鋼材の歩留が高く品質が均質化したという利点をもつ。しかし、鋼材の凝固組織のマクロ的・ミクロ的の両方の観点からみて問題が無いとは言えない。逆V偏析・内部割れ・中心偏析・センターポロシティなどは製品鋼材の品質に結びつく。従って、これらの好ましくない現象の発生を防止するために、連鋳時に電磁攪拌を適用するなどの対策が講じられてきた。しかしこの問題はまだ解消してはいない。

2.4.2 薄板に及ぼす介在物の影響^{20,21)}

冷延薄鋼板を大別すると、1. Al-Si 脱酸によるソフト・キルド鋼 2. 深絞り用の Al キルド鋼および 3. ぶりき用として清浄度の厳しさが要求される DI 缶 (Drawn and Ironed Steel Can) の3種類である。これらの薄鋼板用鋼材の連鋳品では、薄板の表面疵によるトラブルが起ることがある。その原因は Al_2O_3 クラスタによることが多く、タンディッシュ周辺の技術的解明が必要とされる。厚鋼板についても近年は造船用・橋梁用鋼として良品質のものが要求され、介在物に起因する内部欠陥が問題となることがある。欠陥は超音波探傷で検知される。

2.4.3 ステンレス鋼

13Cr と 18Cr-8Ni ステンレス鋼が1912年に発明されて70年になる。その後マルテンサイト鋼 (1920年)、2相ステンレス鋼 (1930年)、PH 鋼 (1940年) を経て高純度フェライトステンレス鋼^{22,23)} (1970年代) に至り、ステンレス鋼の製錬技術²⁴⁾ は著しく進歩した。ステンレス鋼のもつ基本的な特性が耐食性であることに変わりはなく、進歩した製造技術のもとでのステンレス鋼が、極低炭素化・極低窒素化あるいは高純度化をすることにより、その耐食性²⁴⁾・靱性が改善されることが明らかになっている。すきま腐食²⁵⁾ はかなり解明されたが、応力腐食はまだ問題が残っている。大切な不動態化皮膜の耐食機能²⁶⁾ については現在まだわからないことが多く、さらに研究が必要とされる。機械的性質の研究では、疲れ関係²⁷⁾ は比較的少い中で高温疲れ^{28,29)} の研究もある。高速増殖炉^{30,31)} での Na 機器・配管部材にはオーステナイト系ステンレス鋼が多く使われており、その材質特性につき多くの研究が行なわれているがなお不明の点が多い。

使用量の面で見ると汎用鋼では、現在 SUS 304 鋼 (18Cr-8Ni) と SUS 430 鋼 (17Cr) が大量を占めているが、用途によっては過剰品質のまま使われている場合もある。耐食性では SUS 430 でよいのにもかかわらず SUS 304 を用いることもある。その因は、フェライト系ステンレス鋼がオーステナイト系ステンレス鋼よりも加工性・溶接性が劣るため

で、要求性能を満たす安価なステンレス鋼の開発が望まれている。ともあれ、ステンレス鋼は工業材料としての重要度が高まり需要量が増し、研究開発の結果はますます鋼種が増えてゆく。ちなみに、ステンレス鋼・耐熱鋼（合わせて 15 規格）と超合金（4 規格）の JIS 規格が 1981 年 3 月に改正³²⁾されて、一段と鋼種が増えたことを付言する。

2.4.4 耐熱鋼

本項では Fe 基の材料について述べる。近來耐熱鋼³³⁾の重要性がますます高まるとともに、利用面での問題も多い。一般的に言えば、耐熱鋼は高級品が次々と開発されて尖端的な特性値を競う傾向がある。それはそれで、過酷な条件下で耐えうる機材を用いるためには是非とも必要なことである。一方、経済性を考慮した安価な汎用耐熱鋼の普及もまた必要である。

耐熱鋼は、古くは 13Cr 鋼にはじまり、SUS 304 で代表されるオーステナイト・ステンレス鋼を基調として発展したと考えられる。一般に、550~600°C 以上の温度で強さを必要とする場合には、オーステナイト鋼がフェライト鋼より安全である。さらに高温で耐熱鋼を使うに当って安全をとるならば、Fe 基よりも Ni 基・Co 基合金がよいが、これは価格の問題を伴う。自動車エンジン・バルブなど Fe 基³⁴⁾の安価な範囲の耐熱材料に限定してみると、Mo を含まないもので、SUH 3 (11Cr-1Mo 鋼) に代って SUH 11 (8.5Cr 鋼) が乗用車用ガソリン・エンジン吸気バルブ用に使われている。米国では SAE 1541 (1.5Mn 鋼) などの低合金鋼が使われている。Cr-Ni を含む高合金鋼では SCS 材 (JIS G 5121)・SCH 材 (JIS G 5122) などが実用される。これらに関する研究は多く、著者³⁵⁾らも Cr-Mo 入り耐熱鋼の高温特性、SCH 18・SCH 22 などの遠心鑄造組織と諸性質の関係を取扱い、Incoloy 800³⁶⁾ の疲れを調べたことがある。耐熱鋼では、特に高温・変動応力下での特性研究が必要で、課題は尽きない。

2.4.5 耐候性鋼

耐候性鋼³⁷⁾は大気中で普通炭素鋼よりも優れた耐食性をもつ鋼の総称で、価格も比較的安い低合金鋼である。効果的な合金成分は Cu で、さらに P・Cr その他の元素を低率に配合する。この種の鋼材は無塗装の使用が本来望ましいが、わが国のような腐食環境下での使用には鍍安定化の化成処理をあらかじめ施しておくことがよいようである。

2.5 二・三の新製品

前節までは問題点を重点として述べたが、本節で最近話題をよぶ新製品に触れる。自動車の軽量化に成果を挙げるとみられている数例に次の材料がある。

機械構造用棒鋼³⁸⁾ (FG 鋼)

JIS などの規格値を基本成分とした範囲の化学組成で、圧延ミルと調整冷却装置によってマイクロ組織を調整し、焼ならし工程を省略できる棒鋼の実用化が成功した。諸性質は SC 材と同等である。

Dual Phase (DP) 鋼板^{39, 40, 41, 42)}

従来の軟鋼板に代って、設計強度を変えないまま板厚を薄くできる高張力鋼板が、1975 年からわが国と米国で登場した。熱延と冷延複合組織鋼板であるところから DP 板とよばれる。軟質なフェライト (α) 相のマトリックス中に、弧立した島状の硬質なマルテンサイト (α') 相粒が等方的に分散した特徴的なマイクロ組織をもつ低合金鋼である。図 2.5⁴⁰⁾に DP 組織材と通常のフェライト・パーライト組織材の応力-ひずみ曲線の比較例を示

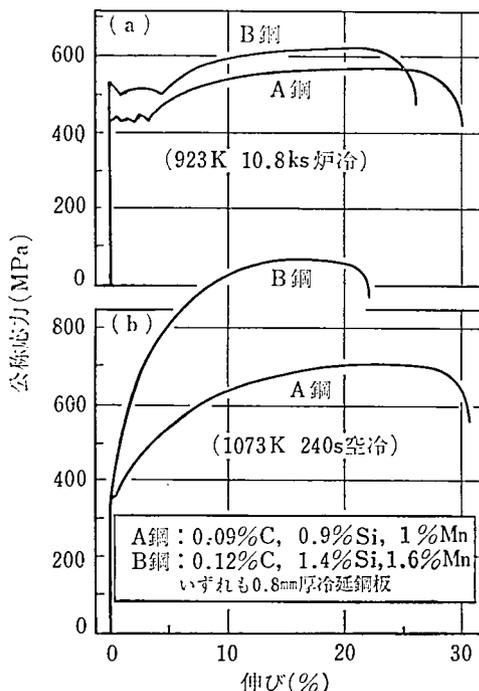


図 2.5 Si-Mn 鋼板の応力-ひずみ曲線
 (a) フェライト・パーライト組織
 (b) dual phase 組織

す。冶金学的な意味での解明，溶接性，溶接部疲れ特性など研究の余地がまだ残されている。さらに熱延まま捲取りその後の徐冷で $\alpha + \alpha'$ を主体とする DP 鋼板も開発途上にある。

ボロン処理鋼^{43,44)}

B は ppm オーダーの微量で焼入性が向上し，軟鋼に添加すると硬さが増大するなどの効果が知られていた。80キロ高張力鋼板に B 処理が適用されるにおよんで，厚板への B 処理が主体になった。靱性改良の見地から Ti や Zr を添加しないで Al のみで N を固定する B 処理鋼として独特の発展をした。

軟窒化鋼^{45,46)}

1%程度の Mn・Cr, 0.2% Al を含む低合金鋼で軟窒化处理⁴⁷⁾をすることにより，対応する SCM 材に比べて好成績を挙げている。切削加工費・熱処理費の低減をねらい歯車への実績をつくった。クランクシャフトなどへの適用が期待されてきた。

2.6 まとめ

鉄鋼の生産性と利用の現状と問題点について述べた。表題の問題点を絞ると次のようになる。

1. 製鉄の生産性では，高炉設備の大型化によるメリットは限界にきたようである。特に高炉操業における重油ばなれが徹底してきた反面，原料炭原単位は増加してきた。

2. 製鋼の生産性では、LD 転炉能力は限界を思わせる。一方、改良転炉法や炉外精製法の新機軸が打ち出されている。

3. 鋼材は過酷な条件下に耐える各種材質の改良と開発が要請され、今後とも尽きない。

4. 鉄鋼利用の面では、連続铸造・圧延関係で冶金的な材質欠陥が若干発生し、その解決に努力がなされている。

5. ステンレン鋼・耐熱鋼などの問題点を述べた。

6. 時代の流れに沿うために開発された新鋼種を紹介した。

普通鋼そのものの防食技術は、多くの研究と実績がありながら、今もって普遍的な重要問題点であるが割愛した。また、低合金鋼の海水腐食⁴⁸⁾、応力腐食⁴⁹⁾、水素ぜい性⁵⁰⁾も問題点であるが割愛した。

铸铁は広義の鉄鋼関係には包含されるが、ここでは省略した。

3. 銅とその合金

3.1 銅地金の生産性の現状

3.1.1 銅地金生産のあらまし

近年の世界の銅地金の生産量¹⁾は年間約934万 t (1979 年) にのぼり、そのうちわが国の生産量は年間約98万 t で、米国 (198万 t)・ソ連 (148万 t) に次ぎ世界第3位である。

銅の原料鉱石は黄銅鉱 (Chalcopyrite, CuFeS_2) を主体とするものが多い。わが国の原料鉱石は、ほとんど海外からの輸入銅精鉱に依存しており、国内鉱から産出する銅量は7.3万 t (1979年) である。精鉱の主要供給国¹⁾はフィリピン・カナダ・パプア・ニューギニア・チリ・ザイルなどである。原鉱石の Cu 品位は1%前後のものが選鉱によって Cu 20~30% の精鉱になる。

銅製錬は銅精鉱を溶錬炉で処理シマツト (Cu 40~60%) を造り、転炉でマツトの中の Fe と S を酸化除去して転炉粗銅 (Cu 98.5~99.0%) とし、精製炉で還元精製の上、精製粗銅 (Cu 約99.5%) として陽極板に铸造する乾式工程と、陽極粗銅を水溶液電解で精製する湿式工程との一貫作業によって電気銅 (Cu 99.99%) を製造する方式が内外を通じて主流となっている。一般に電気銅 (Electrolytic Cathode Copper) をさして銅地金という。

わが国では、溶錬炉は溶鉱炉が古くから使われてきたが、現在は自溶炉 (Flash Smelting Furnace) が広く用いられている。

1960 年頃から企業による海外技術の調査^{2,3)} が盛んとなり、その後銅地金増産の気配となつて、1965年頃から大型製錬所への改造・新設が行われ、わが国の銅製錬は技術的に大きく変貌し旧態を一新した。

わが国の現状⁴⁾ は自溶炉 7 基・反射炉 3 基と連続精銅炉 1 基を中心とする 8 溶錬工場と、新鋭の10電解工場が主力となっている。ちなみに海外の溶錬方式は旧来通り反射炉によるものが多い。自溶炉の1例を図3.1⁵⁾に、転炉の1例を図3.2⁶⁾に示す。

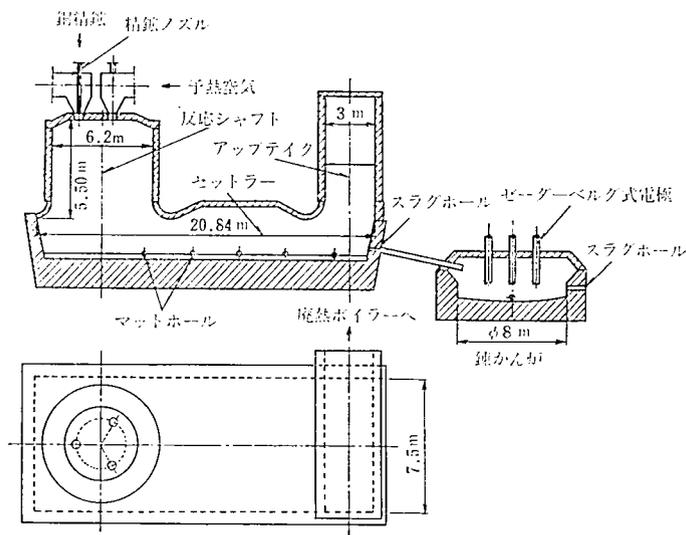


図 3.1 自 溶 炉

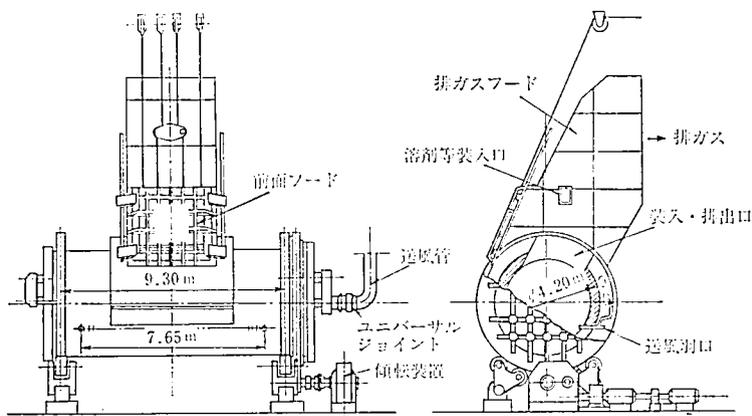


図 3.2 PS 型転炉

3.1.2 銅地金の生産性向上

銅製錬は、前述の新体勢に脱皮する際、各工程の単位設備は改良され大型化され、生産性は著しく向上した。省エネルギーに徹しており、自溶炉本来の趣旨にできるだけ沿った合理的溶錬の遂行を計っている。それは、精鉱が硫化鉄で $\text{Fe} (25\sim 30\%) \cdot \text{S} (25\sim 35\%)$ を多く含み、これらの成分の酸化発熱を活用することにより燃料費の低減に成功していることである。また、電解が可溶性の精製粗銅陽極を用いる水溶液電解であることも有利である。

製錬の主軸となる自溶炉は、1基当りの年間銅生産能力は最大16.8万 t^{A} 、電解工場1工場の年間電気銅生産能力は最大24.0万 t^{A} に及ぶものがある。最近の自溶炉操業は、酸素富化空気を使って熱効率の一層の向上を計るものが増えている。

転炉も大型化⁴⁾され $\phi 4.2\text{m} \times \text{L} 10.0\sim 11.5\text{m}$ のものも使われている。転炉は横型空気吹込式の PS 型で、大型炉では1回当りマット処理量 185 t である。転炉の操業時間は

マットの成分により異なるが、大型炉で1回操業当り6～8時間を要する回分作業である。転炉操業はマット中のFe、Sの酸化熱を使うので、作業時間の長短にかかわらず燃料を用いる必要はない。羽口パンチングは、炉の大型化とともにメカニカル・パンチャーに変わった。

電解は硫酸珪性の硫酸銅溶液を用いる電解精製方式で、主な操業条件⁷⁾は次のようである。工場によってかなり異なるが、極間距離 100～105 mm、陰極電流密度 210～250 A/m²、平均電流 12～32 kA、槽電圧 210～350 mV、電流効果は最高98.0%、電解電力原単位は低いもので 250 kWh/t-Cu (DC) となっている。電気銅の大きさは1辺の長さ約 1 m 前後の正方形または矩形で、重量は 330～380 kg の板状である。

電解工場の近來の傾向は、生産性一辺倒よりも、品質向上を計ったコスト低減志向が伺える。

乾式・湿式の全工程を通じ、設備と操業の両面で、機械化・高速化・高精度化・コンピュータ化が高度に進展している。

銅地金生産の設備能力⁸⁾は、溶錬・電解ともに年間123万 t となっている。

3.1.3 遺利回収

銅精鉱は、粗鉱成分によって異なるが、各種の金属元素を含有する。主成分であるCu・Fe および S の他に、Zn・Ni・Co・Sn・Pb・As・Sb・Bi・Se・Te・Au・Ag・Pt などのうちの幾種類かを若干量含む。

S は自溶炉と転炉の操業で SO₂ となって排ガス中へゆく。排ガスのもつ顕熱は回収して発電などに利用し、SO₂ は硫酸工場に導いて濃硫酸を製造することにより S を回収する。Fe の大部分はシリケートスラグの構成成分となりセメントの原料に利用される。Zn・Pb・As・Sb・Bi などは乾式工程で分離または回収される。As・Sb・Bi など V 族元素が粗銅中に多く残留すると電気銅の純度・品質を低下させる。Se・Te・Ni も電解スライム処理や浄液工程で回収される。

上記のように、各種の金属や造岩成分が、冶金的・化学的に分離回収され有用な工業材料として起用されることは、鉄鋼や Al の製錬に比べて趣を異にする点である。

3.2 銅地金の利用の現状

3.2.1 銅地金の用途のあらまし

わが国の銅地金の国内需要⁹⁾は133万 t (1980年)、部門別では電線87万 t、伸銅43万 t、銅合金鋳物6,100 t、貨幣2,800 t とその他である。用途の中で、最大量が合金でなくて純金属で占められていることは銅の一つの特徴である。

3.2.2 銅地金の品質

わが国の銅地金は精密な管理態勢のもとに製造されるので、製品の品質は安定しており、表3.1にその品位を示す。古くから JIS 値を大きく超えていたが、さらに不純分除去技術の向上の跡がみえる。

3.2.3 電 線

電解工場で生産された電気銅地金は、その工場で反射炉・低周波誘導炉・シャフト炉などで溶解され、さお銅・ケーキ・インゴット・ビレットなどに鑄造される場合と、他工場へ出荷されて前記同様に溶解鑄造される場合とがある。

溶解炉では、反射炉・電気炉は古くから用いられていたが、シャフト炉（アサルコ式堅

表 3.1 電気銅品位 (%)

	Cu	As	Sb	Bi	Pb	S	Fe
電気銅地金 JIS H 2121 (1961)	99.96 以上	0.003 以下	0.005 以下	0.001 以下	0.005 以下	0.010 以下	0.01 以下
電気銅平均値 1970*	99.99	0.0001~ 0.0006	0.0001~ 0.0006	0.0001 以下	0.0001~ 0.0006	0.0003~ 0.0011	0.0001~ 0.0007
電気銅平均値 1979**	99.99	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0001 以下	0.0003~ 0.0011	0.0001~ 0.0002

* 日本鋳業協会編 銅製錬操業成績 (1970) より摘出

** 同上 (1979) より摘出

形連続溶解炉) は1960年代に米国アサルコ社で開発された迅速溶解炉である。著者ら⁹⁾ は開発されて間もない頃カナダ・北米・アフリカなどでこれに接し、巧妙な技術を賞賛したが、その頃から銅溶解の分野で急速に使用が広まった。

溶解炉の種類によって、生産される純銅の種類がいろいろある。反射炉産さお銅はタフピッチ銅、低周波誘導炉は無酸素銅 (OFHC 銅)、シャフト炉は無酸素銅もあるが多くはタフピッチ銅を造るものとみてよい。さお銅 (Wire Bars) の JIS Cu 品位は99.90%以上で、実際に生産されるさお銅分析値は Cu 99.96% 以上、酸素は 0.02~0.03% である。

タフピッチ銅であるさお銅を荒引にかけるのが従来からの電線製造法であるが、さらに進んだ方式も行われる。

新式工場では、シャフト炉溶解のタフピッチ銅を Southwire Continuous Rod Process¹⁰⁾ (SCR) によって荒引線としたり、世界最大級 2,000 kW 低周波誘導炉溶解の無酸素銅を Dip Forming Process¹¹⁾ (DFP) にかけて荒引線を造るなどの新方式を採用するものが出てきた。これらの新鋭設備は連続鋳造圧延で線材をつくる一連の連続化方式である。荒引線は電線・ケーブルの素材となる直径 8 mm 級の長尺線である。さお銅から出発した荒引線コイルのロットは約 110 kg であるが、これに対し新鋭設備に依ったものは最大 10 t と桁違いに大きいロットとなる。従来法でのセット面 (水平鋳造によっておこる Cu-Cu₂O 共晶組織からなる高酸素領域) 不均質層が、新法では解消し、伸線性の改善・製品品質の向上・製造コストの低減に成果を挙げることができている。荒引線は熱間圧延の際、表面に酸化銅被膜が発生しているのので、希硫酸で酸洗して次の伸線加工に供する。

3.2.4 伸銅品

銅とその合金は塑性加工によって板・条・管・棒・線などのいわゆる伸銅品となるものが多い。

a. 伸銅品の種類

伸銅品は純銅と銅合金の双方が引き当てられる。

純銅： 電気銅地金は表 3.1 に示すように化学成分は良くても、電解時に入る H₂S などのため、そのままでは可鍛性が乏しい。そのため溶解鋳造するが、溶解炉については前項で述べた。タフピッチ銅・りん脱酸銅・無酸素銅などの型銅ならびに板・条・棒・線・継目無管については JIS があり、成分・特性・用途例・試験法などが規定されている。

銅合金： 黄銅系 (Cu-Zn) 合金、白銅系 (Cu-Ni) 合金、りん青銅 (Cu-Sn) などが伸銅品として多く製造される。一般的に黄銅は、Cu-Zn 合金を指すが、丹銅 (78~98 Cu-

Zn 合金), 黄銅 (30~40Zn の Cu-Zn 合金), 快削黄銅 (0.6~3.7 Pb 入り黄銅) などがあり, JIS (H 3100 以下) で詳細が規定されている。機械的性質は, 銅分が 70% になるまでは引張り強さ, 硬さが増大すると共に伸びも増す。銅分が 60% になると引張り強さ, 硬さはさらに急増するが, 伸びは小さくなる。白銅 (10~30% Ni-Cu 合金) は貨幣 (25 Ni-Cu) に用いられる。りん青銅 (3~9 Sn, 0.03~0.35 P の Cu-Sn 合金), 洋白 (10~20 Ni, 約 20 Zn の Cu-Zn-Ni 合金) のほか, 特殊 Al 青銅・Al 黄銅などの特殊合金, カドミウム銅・銀入銅・クロム銅・ジルコニウム銅などの高温合金, コルソン合金・ベリリウム合金などの強力合金も製造されている。

伸銅品の特徴として, 高電気伝導性・柔軟性あるいはバネ性などの機械的性質・熱間鍛造性・切削加工性・耐食性・非磁性・美麗色沢・メッキやハンダづけの容易なことなど良い性質が認められて広い用途を確保している。

b. 伸銅品の製造方法

溶解と造塊: 溶解は反射炉・低周波誘導電気炉・高周波誘導電気炉などが使われる。鋳造は, 板・条用には厚い板状のスラブ, 棒・管・線用には円柱形のビレットを造る。堅型連続鋳造で, 水圧式ブランジャなどで鋳塊を下方に引抜き, 長さ 2~3 m, 単重 3 t 程度までの定尺鋳造品を造る方法は半連続鋳造と称して早くから普及した。新式工場では連続鋳造が普及しており, 堅型はもとより水平連鋳も行われている。

圧延その他の塑性加工: 熱間加工は, 加熱炉で素材を 700~900°C に加熱して行う。一般的に言って, 鉄鋼の場合に類似した名称の設備・操業系統をとる。薄物・箔では, 最後の工程では 20 段圧延機を用い, 厚さ 0.1~0.01 mm 程度にまで仕上げる。

管はマンネスマン型穿孔圧延機や熱間押出機を用いる。棒・線の製造では, 熱間押出・熱間圧延・抽伸機または伸線機でダイスを通して引抜き加工をする。

3.2.5 鋳物

鋳物に用いる合金の種類は, 青銅・鉛青銅・りん青銅・アルミ青銅・シルジン青銅のほか黄銅・高力黄銅などがある。これらの成分・用途および一部の材料試験値は JIS (H 5101 以下) に規定されている。

これらの材料の管・棒製造は連続鋳造がよい。特に, 堅型連続品は凝固時のガス放出と方向性凝固にすぐれ機械的性質がよい。連続鋳造に向かない形状のものは砂型, 金型, シェル型鋳物で造られる。

3.3 銅地金の生産性に関する問題点

3.3.1 溶錬方式

自溶炉→転炉→精製炉による溶錬方式は, 操業経験¹²⁾を積みにつれ生産性向上の実績¹³⁾を挙げてきた。海外からも自溶炉の利点が認められ, 米国 1 基・アフリカ 1 基および中国 1 基 (わが国の技術力により建設中) と採用例が増えている。1960 年フィンランドで発祥し, わが国で改良成長した自溶炉の溶錬能力は, 自由世界で年間 130 万 t となり国際的になってきた。

一方, 回分作業の転炉を狭んだ段階的溶錬方式から脱して, 連続方式化への理想的願望も現われてきた。その成功例として, 1974 年からわが国で開発実施されている連続精銅法^{14, 15)}がある。この方式はカナダに技術輸出されて, 1981 年から操業が開始された。

精鋳から粗銅まで 1 炉による連続製錬方式¹⁶⁾としては, 研究は行われたが未だ実現はし

ていない。銅溶錬は溶錬炉も転炉も酸化反応が主であるので、鉄鋼の高炉→転炉の場合とは反応の内容が異なる。銅製錬においては、1炉連続製錬の可能性は理論的に充分あり得ると考える。しかし、無理をしてまで1炉連続製錬にすることもないではないかという考え方もある。わが国では、ここ当分は現状のまま経過するであろう。

3.3.2 電解方式

電解精製の生産性¹⁷⁾向上の考え方として、極間距離の短縮（1槽当りの極板枚数の増加）と高電流密度化などがある。しかし、高電流密度化は量的に生産は上昇しても、電力原単位の上昇・電気銅の質的低下傾向などで問題点がある。現在では既述の如く、比較的低電流密度で製品品質の維持向上を図る実例が多い。

3.4 銅とその合金の利用に関する問題点

銅とその合金は利用の歴史が古いばかりでなく、わが国の銅地金は品質的に優れているので、現在大量に使われる用途面では工業的規模での大問題は少なくなっていると言える。しかし、願ると利用面の問題解決に産学を挙げて多くの研究がなされてきた。そこで本節では、先づ近年に処理された問題点を述べる。次いで、より高度の技術水準をねらう上で必要であると考えられる基礎的・ミクロ的な問題点を、純銅と黄銅について加えることとする。光通信ファイバケーブルの台頭で、銅の領域がどの程度まで圧迫されるかは今後の課題である。

3.4.1 近年処理された問題点

一研究機関の努力では解決が困難なため、専門委員会組織で取り組むことがある。日本銅センターで取りあげて研究活動¹⁸⁾を行った課題の中から、近年処理された主な件名を古い順に列挙する。1. 応力腐食割れ 2. 変色防止 3. 建築 4. 銅粉 5. プレス成形性 6. 銅着色 7. 銅製太陽熱温水器 8. 切削性 9. 複合材料 10. 冷間鍛造 11. 銅管開発 12. 強化銅合金 13. 銅管継手 14. 銅管腐食 などである。

1. は艦船に使った高力黄銅棒の応力腐食事故から出発し、耐応力腐食性の強い銅合金開発を旨としての調査研究 5. は主にタフピッチ銅条を用いての研究 8. は快削黄銅棒を中心とした研究 10. は純銅・黄銅に関するものであった。数年間にわたる研究のすえ成果を挙げた課題が多いが、中にはその後新事態が発生したものも無いとは言えない。

3.4.2 純銅関係

タフピッチ銅： 電気銅を融解して0.02～0.05%の酸素を残した純銅で電気伝導度は100%前後と高い。銅中の有害不純物は固溶の状態ではなく酸化物として存在する。JIS ではCu 99.90%以上の規制があるがO₂の規制はない。線・棒材の引抜時に発生する内部割れ¹⁹⁾や丸棒の1軸引張りで発生するカップ・アンド・コーン型破壊²⁰⁾の原因は、材料中のCu₂Oが関係し、酸素含有量が多いほど欠陥が発生し易い。またこの酸素の存在は水素病や焼なましぜい性の原因となる。

りん脱酸素銅： 溶解中に吸収した酸素をPを添加して除去した純銅で酸素は0.01%以下とする。JIS ではCu 99.90%以上、P 0.004～0.040%の規制があり、O₂は規制がない。Pは電気伝導度を悪くする。水素気流中で800～875°Cで20分間加熱して組織検査で水素ぜい化を試験する。

無酸素銅： 脱酸剤を使わないで造ったCu₂Oを含まない銅を指すが、JIS ではCu 99.96%以上の規制がある。水素ぜい化試験は、形銅の一部を鍛造または熱間圧延後、線

引きして水素気流中で加熱し、繰返し曲げ試験および検鏡をする。酸素を含まないはずの無酸素銅でも、酸化性雰囲気中で焼なまし後に水素雰囲気中で熱処理をすると、粒界割れを生じてぜい化²¹⁾する。低ひずみ速度の引張りでは 400~500°C で中間温度ぜい性^{22, 23, 24)}を示す。この現象は、単結晶では現われないが多結晶体で出現するので、粒界キャビティのない粒界すべりに依るものとされる。

3.4.3 黄銅関係

黄銅のぜい性²⁴⁾： 70/30 (α 単一相) 黄銅多結晶体は単一相でありながら、高温変化は単調ではない。60/40 黄銅の ($\alpha + \beta$) 複相では $\alpha \cdot \beta$ 双方の挙動の重畳が認められ、中間温度領域では α と β の相境界を伝播した粒界割れとなる。

黄銅の置き(時期)割れ： 黄銅を加工して素材中に残留応力のある状態で放置すると割れ (season-cracking) を生ずることは古くから知られている。腐食環境の中では粒界腐食が起こり、応力の平衡を失って応力腐食割れ (stress corrosion cracking) を生ずる。これらの現象を防ぐには、棒・管を成形加工後 200~300°C の低温焼なましをする。板・条の絞り加工後の置き割れ防止には、表面を塗装またはメッキをすることも行われる。

3.5 まとめ

銅とその合金の生産性と利用の現状と問題点について述べた。表題の問題点を絞ると次のようになる。

1. 地金の生産性では、自溶炉に転換した後の大型化溶錬技術は、転炉の大型化と相携えて合理的な実績を挙げることに成功した。今後の問題点として、1 炉連続製錬の夢は残るが、実現の道は遠い。
2. 地金の利用面では、電気銅地金の高品質に支えられ、電線・伸銅加工とも製造技術の高度化が行われたが、それに伴う問題点の発生例はほとんど無いようである。
3. 純銅製品における酸素含有と水素ぜい化の問題は、昔も今も注意を要する問題点である。

合金類の開発・製造・用途の面では、 Al_2O_3 粒子分散強化型合金や形状記憶合金²⁵⁾が現われたほか、各論的には若干問題点もあるが割愛する。

4. アルミニウムとその合金

4.1 Al 地金の生産性の現状

4.1.1 Al 地金生産のあらまし

近年の自由世界の Al 地金生産量は年間約1,300万 t 余、共産圏を加えると1,600万 t 以上と推定される。わが国の生産量は、1973年の年間約 110 万 t を最高とし、1979 年約 104 万 t であった。この生産量は、米国 (約455万 t) ・ソ連 (240万 t) に次いで世界第3位であった。しかし、現在は減産体制に移行中である。

Al の原料鉱石はボーキサイト (Bauxite, $Al_2O_3 \cdot nH_2O$) で、国内での産出は皆無のため、全量をオーストラリア・インドネシア・マレーシアなどからの輸入によっている。ボーキササイトの Al_2O_3 品位は約60%で、数%の SiO_2 , Fe_2O_3 などを含む。

全世界を通じて行われている製錬方式は、ボーキサイトをカ性ソーダ液で処理した後に純アルミナ (Al_2O_3) を造る湿式工程 (Bayer 法) と、氷晶石に Al_2O_3 を加えて電気炉で熔融塩電解をして Al_2O_3 を還元する乾式工程 (Hall-Héroult 法) の組合わせで、電解炉から熔融 Al を採取する。この電解方式の原理は1886年に発明せられて約1世紀を経た。製錬技術の詳細は工場により種々の工夫が施されており、異なる点もあるが大綱は変わらない。バイヤー法はボーキサイトをカ性ソーダ水溶液で高圧抽出し、 Al_2O_3 を NaAlO_2 液に変え、残渣の赤泥をろ別し、核種を加えて $\text{Al}(\text{OH})_3$ を析出させて採取する湿式処理が主体で、最後に $\text{Al}(\text{OH})_3$ をキルンで焼いて Al_2O_3 を造る。ホール・エル法は陰極に熔融した Al を、陽極にカーボンを使用し、電解浴には氷晶石に Al_2O_3 をとがしたものをを用いる。電解温度は約 950°C で、陽極の C が CO になって Al_2O_3 の還元剤となる。採取した熔融 Al の鑄造製品を Al 地金という。

4.1.2 Al 地金の生産性向上^{1,2,3)}

わが国の Al 製錬は1934年に始まり約半世紀を経た。戦後の国情回復とともに生産量は急上昇して世界的な生産・消費国に成長した。そこに至るまでには多くの生産性向上への合理化が行われた。

Al 1t の製造に Al_2O_3 約 1.9t, Al_2O_3 1t の製造にボーキサイト 2.1t を必要とする。全工程を通じ最も重要視されるのが、電極と電力で、関心はホール・エル法に集中する。

電極は自焼成の Söderberg 式 (S 式) と焼成した Prebake 式 (P 式) とが優劣を競いながら、大型で大電流適用へと進歩してきた。電解電流容量は1960年頃約11万 A が、現在は S 式では頭打ちしたが P 式で最大 17.5 万 A となった。操業電圧は約 4.0 V で、表 4.1⁴⁾ にその内容を示す。結局は、問題点が電力原単位に集約されてくるが、S 式で 14,300 kWh/t-Al, P 式で 13,500 kWh/t-Al が必要で、図 4.1³⁾ にその向上の経過を示す。電力原単位の限界は P 式で 12,200 kWh/t-Al といわれている。

電解工場の環境事情は、かつては乾燥粉末アルミナの粉塵と排ガスのため作業環境が良好でない工場もあったが、最近では著しく改善された。特にサンディ・アルミナの製造に

表 4.1 炉電圧分割の例

	現行法代表値 (I)	現行法限界値 (II)
分解電圧 (V)	1.65	1.65
{ 理論分解電圧	{ 1.17	{ 1.17
{ 反応過電圧	{ 0.48	{ 0.48
電解浴電圧降下	1.38	1.38
アノード電圧降下	0.27	0.22
カソード電圧降下	0.36	0.32
導体内電圧降下	0.18	0.13
陽極効果平均	0.10	0.05
全電圧	3.94	3.75
電流効率	0.87	0.91
電力原単位 (kWh/t-Al)	13,500	12,300

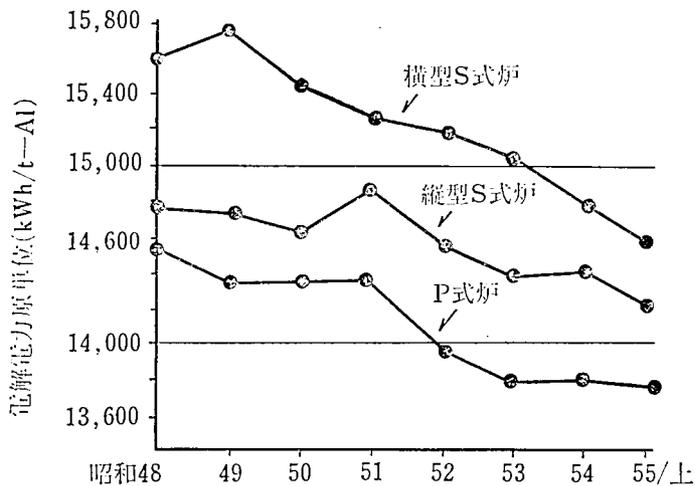
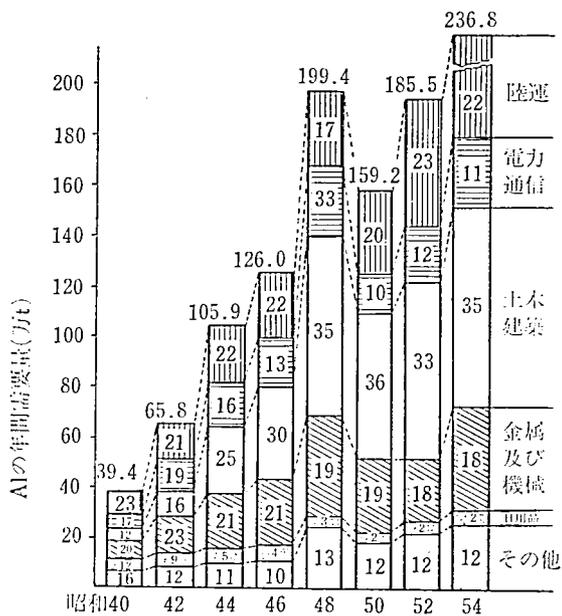


図 4.1 炉型式別電解電力原単位の推移



出典：軽金属工業統計年報

図 4.2 用途別需要の推移

成功し、これを用いる工場では環境保全が容易になった。発生したガスは完全に吸引し中和回収などの処理が徹底して行われている。

4.2 AI 地金の利用の現状

4.2.1 AI 地金の用途のあらまし

AI 地金の1979年の内需は、AI 圧延147万 t, AI 鋳物・ダイカスト11万 t, 電線11万 t, その他で合計185万 t であり、用途別需要の推移を図4.2³⁾に示す。土木建築関係で住宅

サッシの使用が多く、陸運ではコンテナ・自動車での使用が増えている。

4.2.2 Al 地金の品質

普通品の品質は JIS H 2102 (1968) で規定され、Al は特 1 種 99.90% 以上から 3 種の 99.00% 以上まで 5 品種となっている。実際に生産されている地金は Al 99.50~99.70% のものが多く、一般的な純 Al と Al 合金用の用途には問題はない。

4.2.3 精製 Al 地金

精製 Al 地金は普通純度の Al を三層式電解炉で処理をして高純度 Al 地金としたものを指す。JIS H 2111 (1968) で規定され、Al は特 1 種 99.995% 以上から 3 種 99.950% 以上までの 3 品種である。現在わが国では年産 6,000 t、やがて 1 万 t になる見込で、Al 品位は 99.990~99.995% 級である。

高純度 Al は普通品より耐食性が良く、電気的特性が優れているので電気機器関係に多く使われる。箔・電解コンデンサー・装飾品・反射鏡・化学装置・溶射メッキなどの用途がある。

4.2.4 展伸用合金

純 Al を含めて各種の合金が塑性加工によって板・条・管・棒・線など形状の簡単な製品から、断面形状の複雑な製品まで多種類の展伸材に製造される。

a. 展伸材の種類

非熱処理型合金として、純 Al (1,000 系)、Al-Mn 系 (3,000 系)、Al-Si 系 (4,000 系)、Al-Mg 系 (5,000 系)、熱処理型合金として、Al-Cu-Mg 系 (2,000 系)、Al-Mg-Si 系 (6,000 系)、Al-Zn-Mg 系 (7,000 系) がある。これらの形別・成分・特性などは JIS H 4000 以下に詳細に規定されている。ここでは、実用合金のうちの数例⁹⁾を示す。

成形加工用合金：純 Al、Al-Mn 系、Al-Mg 系で、引張強さ 10~40 kgf/mm² の範囲の薄板がある。家庭用器物・缶・箔など用途は多い。自動車車体用板材の品種はまだ定着していない。

押出加工用合金：Al-Mg-Si 系 6003 合金は建築用として多く使われる。Al-Si-Mg 系は耐食性のすぐれた構造用材として注目されている。

高力・靱性合金：Al-Cu-Mg 系 2024 合金、Al-Zn-Mg-Cu 系 7075 合金は超々ジュラルミンとして航空機用に早くから活用されている。

b. 展伸材の製造方法

溶解と造塊：3.2.4 の伸銅品の場合と類似する面が多いので省略する。異なる点は、Al は電解炉から溶融状態で採取されるので、溶解工程が省略できる利点がある。電解工場の隣接箇所に保持炉または合金炉を設け、溶融 Al を運んで炉に蓄え、または合金元素を加えて合金とする。Al は融点が 660°C と低いことから、早くから連続鋳造方式が成功し、広く活用されている。

塑性加工：展伸材は熱間押出、熱間・冷間圧延で造られる。押出では断面形状の複雑な形材の製造が可能で、寸法精度⁶⁾は銅系合金などに較べはるかに高度のものが得られる。押出の方式はほとんどが熱間前方押出を用いる。

圧延での厚さ限度は箔で、連続圧延品で 0.005 mm⁷⁾ となっている。

4.2.5 鋳造用合金

純 Al を含めて Al-Si 系・Al-Mg 系合金は非熱処理型、Al-Cu-Mg-Si 系・Al-Mg-Si 系合金は熱処理型として用いられる。JIS H 5202 に詳細が規定されている。

この他に、ダイキャスト合金があり、JIS H 5302 に成分・使用部品例などが示されている。

4.3 Al 地金の生産性に関する問題点

4.3.1 現行製錬法の苦境

Al 製錬がホール・エルー法で一世紀近くも一貫して行われてきた理由として、次の3項目を挙げたい。1. ボーキサイトの豊富な存在が原理的にホール・エルー法を行きづまらせなかったこと 2. Al_2O_3 は安定化合物で湿式電解法も含めて抽出還元法などの湿式冶金法が成功しなかったこと 3. 炭素還元法などの乾式法の技術も困難であったこと。特に、Al の工業材料としての優位性が文明の高度化とともに一層認識され、内外ともに需要が著しく伸びたという客観的な背景がある。需要の伸びは電力多消費型のホール・エルー法の採算性の支えとなってきた。国内でも先発企業では生産量の増大は起業投資を吸収して利潤を産み、1963年・1971年・1977年と新規企業の参加を招いて生産能力は年間160万tに膨張した。折柄、原油価格の高騰は石油火力依存の電力料金の急上昇を余儀なくされた。図4.3³⁾にAl製錬用電力単価の国際比較を示す。以上の悪条件の上に安価な他国産地金の国内への流入が起り、わが国のAl製錬企業は国際競争力を喪失してしまった。

石油ショック前の国内の生産能力160万tは、現在では110万tまで減り、さらに引下げて昭和60年度を目標に70万t体制への縮小が決定的となった。

4.3.2 新製錬法の開発^{4,8,9)}

海外でも電力消費の少ない新製錬法の開発が研究されてきた。サブクロライド法・炭化物法・窒化物法・塩化Al電解法・溶鋳炉還元法などがある。わが国でも塩化Al電解法が取りあげられ、応用研究が行われた。溶鋳炉還元法の研究は反応工学の研究が進展中と聞く。急場の間には合わないが興味のもたれる課題である。

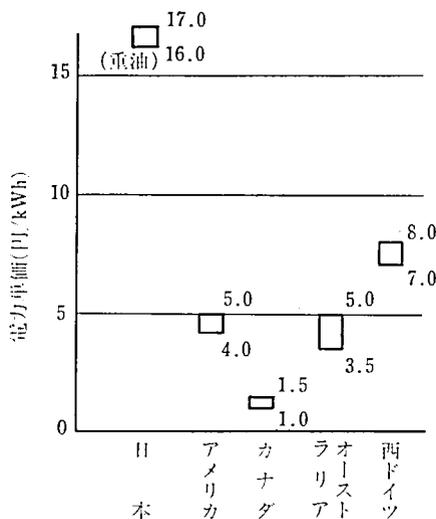


図 4.3 Al 製錬用電力単価の国際比較

4.4 Al とその合金の利用に関する問題点

Al とその合金は、地球上での歴史が比較的新しい材料でありながら、利用面で軽さ・強さ・錆びにくさ・良電導性などの良い性質が買われて、今日の隆盛を見るに至った。しかし、歴史が新しいだけに問題点もかなり多い。

本節では、先づ Al 地金の利用という観点で、Al 展伸材鋳塊製造における問題点を挙げる。次で、新用途開拓のため先発の鉄鋼・銅などとの競合面を述べ、最後に超塑性と再生 Al について触れることとする。

4.4.1 展伸材料

連続鋳造と凝固組織^{10,11)}： Al 関係の連続鋳造は大別すると、a. 堅型半連続（直接水冷）鋳造（direct chill casting, DC 鋳造） b. 可動鋳型を使う連続鋳造圧延 となる。展伸材用の鋳塊は、大部分が半連続鋳造のうちのホット・トップ式鋳造法で造られて、生産性と製品品質の向上に寄与しているが若干の問題点を持つ。

連鋳々塊の凝固組織は、熱間加工性と製品の疲れ・靱性などの機械的性質および表面処理性に大きい影響を及ぼす。実際の操業で、鋳塊の凝固組織が問題となるのは次の諸現象である。1. 逆偏析層の厚さの大小と、内部デンドライト・セルサイズの差異が、角形鋳塊に対しトラブルを与える。2. 粗大デンドライト・セル組織で浮遊晶が存在する場合は、押出材の表面にアルマイト処理後にストリーク状欠陥が発生する。3. 合金材で合金成分以外に添加する性質調整用の Mn, Cr, Zr などと Al との金属間化合物相の発生介在がある場合は、熱間加工性・疲れ・靱性の低下などの一因となる、などである。

それらの現象を合金の種類からみれば、Al-4.5% Mg 合金 (5182) の熱間圧延時の耳割れ、Al-Mg-Si 合金 (6063) の熱間押出性の問題がある。純 Al 系、Al-Mn 系、Al-低 Mg 系 (5005, 5052) などのいわゆる Soft Alloy では以上の現象は起らない。純 Al 製品の大部分のものはアルマイト処理を施して使用するが、アルマイト処理面にとぎとして「筋模様」とよばれる色むらが生ずることがある。防止策に鋳造条件が究明されている。

薄板の成形性： DI 缶（深絞りしごき缶）用¹²⁾ Al-0.1 Mn-0.1 Mg 合金 (3004) は、素材板厚約 0.4 mm で絞り加工したカップ材を使って DI 加工を施すが、加工割れ・深絞り耳割れ・側壁部しわ発生などの不良現象が起る。鋳造後の徐冷時における (Mn, Fe)Al₆ の巨大な金属間化合物の生成や圧延集合組織の異方性が究明されている。

4.4.2 用途上の競合

a. 鉄鋼との競合

自動車車体用板材^{5,13)}： 軽量化のために Al が早くから着目されている。しかし、構造物材料としての強度面をヤング率で見ると高張力鋼の 21,700 kgf/mm² に対し Al 合金は 7,200 kgf/mm²、伸びでは高張力鋼の30%に対し Al 合金は22~27%、それに価格差が一層 Al 進出の足を引張っている。米国では自動車軽量化のため1台当たり約 140 ポンドの Al 材が使われているが、1985年には200ポンドになるといわれている。それに対し、わが国の小型車では 30 kg 程度しか使われていない。軽量化の進む米国では、高級車に Al フードを採用、その材質は Al-Si-Mg 系 6010-T4 あるいは Al-Cu-Mg 系の 2036-T4、さらに 6009-T4, 5182-O が使われている。わが国では 30-30-T4 合金が開発され、0.2% 耐力 16 kgf/mm²、引張強さ 32 kgf/mm²、伸び30%で実用化が期待されている。バンパーは国産車でかなりの実績をもつが、引張強さで 45~50 kgf/mm² 以上、耐力で 40~45 kgf/

mm²以上の強力 Al 合金の開発が望まれている。エンジンプロックでは、1970年以來 GM で一部使われてきたが、わが国は遠いことのようにである。むしろアルミホイールの方が先行し、1980年に約500万個が生産されたと推定される。

DI 缶： 米国で開発された DI 缶は 1977年米国全飲料缶の約 55% を占め、わが国は 1977年 Al 板材の約 8% 4万 t が使われている。これは全飲料缶の 80% で、ビール缶の 95%以上となり、この面では薄鋼板を押えている。DI 缶の胴体は前記した3004、蓋材は 5002、5082、5182合金の超硬質材が使われる。

b. 電線材料としての銅との競合^{14,15)}

Alは導電率が銅の62%で銅に劣るが比重が銅の1/3と軽い。従って同じ電気抵抗の導体を造るには銅の1/2重量ですむ。しかし、同じ電流容量に対して銅よりも太くする必要があり、銅と Al の価格関係も優劣を決める条件に大きく響く。同一抵抗にした時の断面積が銅の約1.6倍、直径が1.3倍になることは、絶縁電線ケーブルでは絶縁物、シース材料が多くなり、巻線では電気機器が大型化して歩が悪い。重量が1/2であることは架空線では布設、運搬が容易となる。上述の如き優劣背景の中で、大容量送電線としては早くから ACSR (鋼心 Al より線) がその地位を確保し、500万 kW 以上の送電容量で TACSR (鋼心耐熱 Al 合金より線) として Al-0.1 Zr 系合金が使われている。一方、屋内電線その他のあらゆる部門となると、一時期に Al が攻勢をかけたが、所詮は銅の分野になかなか割り込めず、銅が安泰を維持している。総括して、Al の導電材料は年間約 11 万 t である。

4.4.3 超塑性

ここに掲げることとは不適當かも知れないが、Al 合金には超塑性をもつものがかなり多く見出されているので簡単に触れる。

Backofen が用いた流動方程式

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m$$

σ : 変動応力, $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度, K : 定数, m : ひずみ速度感受性指数としたとき、超塑性においては $1.0 > m \geq 0.3$ の m 値^{16,17)}をとる。これは普通の金属材料に比べ非常に大きい値である。現象としては大きい均一伸びをする。表4.2¹⁷⁾に超塑性をもつ Al 合金の例を

表 4.2 超塑性 Al 合金の例

名 称	組 成 (wt%)	温 度 (°C)	最高 m 値	最大伸び (%)	備 考
Al-Cu	Al-17Cu	400	—	600	
Al-Cu	Al-33Cu	440~520	0.8	>500	共晶
Al-Cu-Mg	Al-33Cu-7Mg	420~480	0.72	>600	共晶
Al-Cu-Mg	Al-25Cu-11Mg	420~480	0.69	>600	共晶
Al-Cu-Si	Al-25.2Cu-5.2Si	500	0.43	1,310	共晶
Supral 150	Al-6Cu-0.5Zr	350~475	0.5	>1,000	
Al-Mg-Zr	Al-6Mg-0.4Zr	400~520	0.6	890	共晶
Al-Si	Al-11.7Si	450~550	0.28	480	共晶
BA 708	Al-6Zn-3Mg	320~400	0.35	400	
AA 7075	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.3Cr	350~475	0.41	190	
Al-Zn-Mg-Zr	Al-10.7Zn-0.9Mg-0.4Zr	550	0.9	1,550	
Al-Zn-Zr-Sn	Al-5~10Zn-0.5Zr-0.05Sn	500	0.7	800	

示す。超塑性の発現機構の金属学的解明では未だ不明の点もあるが、金属加工技術への応用が考えられる。巧みにこの性質を利用すれば、従来見られなかった深絞り加工とか引抜加工が可能になりそうである。

4.4.4 再生 AI

スクラップを再生した再生 AI (2次地金・再生地金) は、再生エネルギーとして167万 kcal/t-AI¹⁶⁾ を要し、新地金の4,720万 kcal/t-AI に対し3.5%のエネルギー消費で再び地金に成り変る。

鉄鋼でも銅でも、ほとんどの金属はリサイクリングが行なわれている。AI の場合、新地金に対し再生 AI は1965年44%、1975年42%、1976年56%と上昇している。銅の場合は1965年43%、1975年48%である。米国の銅スクラップ使用率などに比較すると、わが国の AI スクラップの回収はさらに一層の徹底化を計る余地があると考えられる。

4.5 まとめ

AI とその合金の生産性と利用の現状と問題点について述べた。表題の問題点を絞ると次のようになる。

1. AI 地金の生産性では、電力単価の高騰の影響を受けて地金の生産費が上昇し、苦境に立たされている。どのような政治力・技術力によってこの苦境から脱出できるかが注目されている。
2. 利用の面では、地金・合金とも溶解・鑄造・加工の技術は優れている。しかし、これらの技術が高度化するにつれ、それに伴う金属学的な問題点が発生し、その解決に努力がなされている面がある。
3. AI は鉄鋼・銅と用途上で競合する面がある。
4. 超塑性と再生 AI に触れた。

AI とその合金の2次加工・表面処理技術に関する記述は割愛する。

5. むすび

金属の王者である鉄鋼、非鉄重金属の代表である銅、および軽金属を代表する AI、これら3種類の量産金属・合金につき、表題に關しての“まとめ”は各章で述べた。

ここでは、3者に関する最重要点と思われる事項を次のように総括した。

1. 資源は、3者とも海外にあり、原料鉱石(精鉱を含む)は多くを輸入に依存している。
2. 金属の生産量は、3者とも世界第3位となった。しかし、AI は産業構造上の影響を蒙り減産体制に入った。
3. 生産設備の能力は、鉄鋼は充分であるが、銅は国内需要量に対して不足している。AI は設備を大幅に撤収の予定段階にある。
4. 現行の製錬方式・設備内容および操業技術は、3者とも世界の最高水準に位するといえる。
5. 素材加工の面では、鉄鋼・AI においては、高度化した連続鑄造・加工関係で若干の金属学的な問題点を残している部面がある。
6. 汎用普通鋼、銅・AI 地金の利用面では、技術的には3者とも大きい問題点はない

ようである。特に、銅では、銅地金の品質は世界市場でも優れ、銅とその合金の製品製造と利用に寄与している。

7. 特殊銅を含む鉄鋼関係の用途面では、使用者側の要請事項が多い。例えば、薄板の高強度化、耐食性の付与、銅管材の低温靱性、高価な合金元素の削減による銅材の低価格化などである。銅材の高級化志向と低価格化志向の二方向展開が新しい世代への技術開発路線であるといえる。

8. 銅とその合金の用途面では、電気・熱の良導性・耐食性などの持前の特性が一層伸ばされるべきである。その点で、太陽熱利用、海水の淡水化と資源化、海洋開発産業などで用途拡大が期待される。

9. Al とその合金の用途面では、土建材・航空機用材・車両材などにおいて比重の小さい強みを大いに活かすべきものとする。特に航空機用材をはじめとしての高力・靱性・耐食性の合金や他素材との複合材料の開発の余地がまだまだあるものと期待する。

10. 合金類の開発では、価格を後まわしにしての極限特性確立の研究が今後とも必要であるとする。それは、従来の材料では満たすことのできない高度な性能を新材料に期待する場合である。添加成分の中には、長期的な供給安定度、価格面などで問題をもつものが出てくるかも知れない。それらの諸点をも勘案の上で、優良かつ安定した新合金が定着するであろう。

最後に、表題から少し逸脱するが、上記各項中の1と2に関し付言をする。

資源と鉍石輸入： 世界資源的には鉄と Al は量的に豊富であるが、銅はかなり限定されている。資源国は発展途上国が多く、資源ナショナリズムが気に懸る。要は、国際的友好裡に資源外交を進め、末永く原料の安定確保を図ることが肝要である。

Al の対策： 折角豊富な資源がありながら、国産 Al の減産体制移行は遺憾である。膨大な輸入量を確保する上で、開発輸入プロジェクトの充実促進が急がれる。これは、日本側資本と海外資本の合弁による低廉な電力を用いる資源地製錬を主とするもので、日本側に引取られるこの種の地金は準国産と見做される。1985年頃でその量は70万 t 程度と見込まれる。特にインドネシア、ブラジルの両ナショナルプロジェクトは、日本側の主体性が発揮できるものとして期待されている。

鉄鋼関係の参考文献

- 1) 鉄鋼統計委員会：鉄鋼統計要覧 (1980)
- 2) たとえば、日本鉄鋼協会編：鉄鋼製造法第1分冊 製鉄・製鋼, p. 513
- 3) 高野 廣：鉄と銅, 67 (1981) 11 p. 1867
- 4) 鉄連まとめ：日刊工業新聞, (1981) 1月29日
- 5) 伊木常世：鉄と銅, 67 (1981) 1 p. 11
- 6) 江島彬夫, 三本木貢治：日本金属学会会報, 17 (1978) 6 p. 486
- 7) 太田豊彦, 三枝 誠他：鉄と銅, 67 (1981) 10 p. 1829
- 8) 飯田義治：同 上 67 (1981) 2 p. 230
- 9) 古茂田敬一, 江見俊彦他：同上 66 (1980) 6 p. 737
- 10) 児玉正範：同 上 67 (1981) 8 p. 1043
- 11) 杉谷泰夫：日本金属学会会報, 18 (1979) 12 p. 834
- 12) 山鹿素雄：同 上 20 (1981) 8 p. 663

- 13) 浜田健二：金属, 51 (1981) 6 p. 10
- 14) 鉄鋼統計委員会：鉄鋼統計要覧, (1980) p. 12
- 15) 同上 p. 26 および百地 勇：金属, 51 (1981) 6 p. 14
- 16) 日本金属学会：鉄鋼製錬, (1979) p. 119
- 17) 藤木俊三：鉄と鋼, 57 (1971) 6 p. 1056
- 18) 松下幸雄, 下川敬治：日本金属学会会報, 17 (1978) 3 p. 229 および p. 231
- 19) 藤井博務, 大橋徹郎：日本金属学会第IV分科会シンポジウム予稿, (1980) 2 p. 9
- 20) 川上公成：鉄と鋼, 67 (1981) 8 p. 1080
- 21) 阿部英夫, 中川吉左衛門他：日本金属学会第IV分科会シンポジウム予稿, (1980) 2 p. 17
- 22) 下平三郎：日本金属学会会報, 16 (1977) 2 p. 89
- 23) 下平三郎：同上 16 (1977) 3 p. 157
- 24) 細井祐三：同上 16 (1977) 7 p. 405
- 25) 鈴木紹夫：防食技術, 28 (1979) 1 p. 38
- 26) 大谷南海男：日本金属学会会報, 18 (1979) 8 p. 547
- 27) 相原 正, 石井友之：明星大学研究紀要, 理工学部, 14 (1978) p. 67
- 28) 桑原和夫, 新田明人：日本材料学会第14回高温強度シンポジウム, (1976) 7 p. 33
- 29) 豊田裕至, 横幕俊典他：同上 p. 37
- 30) 植松邦彦, 野呂謙司：および北川晴也：金属, 47 (1977) 6 p. 13 および p. 18
- 31) 柚原 俊, 厚田栄夫：および薄田 寛, 米沢利夫：日本金属学会第III分科会資料 (1975) 8
- 32) 大屋武夫：防食技術, 30 (1981) 9 p. 535
- 33) 田中良平：同上 25 (1976) 4 p. 233
- 34) 加藤哲男, 阿部山尚三他：鉄と鋼, 67 (1981) 10 p. 1670
- 35) 相原研究室：明星大学卒研資料, (1975) (1976) (1977), 未発表
- 36) 相原 正, 石井友之：明星大学研究紀要, 理工学部, 15 (1979) p. 99
- 37) 渡辺常安：金属, 47 (1977) 5 p. 13
- 38) 佐藤 進, 岡 栄一他：日本金属学会会報, 20 (1981) 5 p. 411
- 39) 高橋政司, 国重和俊他：同上 19 (1980) 1 p. 10
- 40) 古川 敬：同上 19 (1980) 6 p. 439
- 41) 古川 敬, 武智 弘他：同上 19 (1980) 7 p. 541
- 42) 古川 敬：鉄と鋼, 67 (1981) 2 p. 399
- 43) 日本鉄鋼協会：鉄と鋼——鉄鋼技術の進歩, 61 (1975) 702
- 44) 渡辺征一：日本金属学会会報, 19 (1980) 11 p. 804
- 45) 礮川憲二, 渡辺敏幸：同上 18 (1979) 3 p. 214
- 46) 佐合 修, 礮川憲二：金属, 臨時増刊号, (1980) 6 p. 6
- 47) 藤原達雄, 渡辺敏幸：日本金属学会会報, 16 (1977) 8 p. 476
- 48) 門 智, 渡辺常安：防食技術, 25 (1976) 3 p. 173
- 49) 梅村文夫, 川本輝明：同上 30 (1981) 5 p. 276
- 50) 村上賀国, 大西敬三：日本金属学会会報, 20 (1981) 9 p. 784

銅関係の参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：鉄業便覧 (1980)
- 2) たとえば藤井 孝：大阪冶金学会誌 (1962) p. 87
- 3) 相原 正：鉱山, (1966) 12 p. 1
- 4) 日本鉄業協会編：銅製錬操業系統及設備能力 (1979)

- 5) 日本金属学会編：非鉄金属製錬，(1980) p. 93
- 6) 同 上 p. 95
- 7) 日本鋳業協会編：銅製錬操業成績 (1980)
- 8) 渡辺 行：金属，51 (1981) 6 p. 25
- 9) 相原 正，村上 有，神野公三：海外銅製錬所調査報告書 (1966) 8
- 10) J. Cole and H. Moss: Wire and Wire Products, 42 (1967) 1132
- 11) 柳田節郎，池田 博他：日本金属学会会報，18 (1979) 6 p. 419
- 12) 村尾頭三：日本鋳業会誌，90 (1974) 7 p. 473
- 13) 日本鋳業会誌，97 (1981) 8 p. 602
- 14) 永野 健：日本鋳業会誌，93 (1977) 8 p. 555
- 15) 後藤需夫：同 上 97 (1981) 8 p. 651
- 16) 矢沢 彬：日本金属学会会報，15 (1976) 9 p. 543
- 17) 後藤佐吉：日本鋳業会シンポジウム資料，(1973) H 2-1
- 18) 銅，26 (1980) 5 p. 22
- 19) 田中 浩，吉田一也：日本金属学会会誌，43 (1979) 7 p. 618
- 20) 丹羽直毅，大久保忠恒：同 上 39 (1975) 6 p. 635
- 21) 大川 陸：伸銅技術研究会誌，12 (1973) 175
- 22) 大森正信，若狭邦男他：日本金属学会会誌，37 (1973) 11 p. 1188
- 23) 大森正信，橋原安英他：同 上 40 (1976) 8 p. 802
- 24) 和泉 修：日本金属学会会報，18 (1979) 1 p. 15
- 25) 村上陽太郎：金属，50 (1980) 10 p. 25

A1 関係の参考文献

- 1) 北川二郎：日本鋳業会誌，87 (1971) 8 p. 585
- 2) 阿部方朋，平沢一彦他：住友化学，特1975-II
- 3) 袴田準次：日本鋳業会分科研究会資料 [L] (1981) 8 p. 13
- 4) 増子 昇：化学工業，(1976) 7 p. 726
- 5) 馬場義雄：金属，50 (1980) 10 p. 18
- 6) たとえば，軽金属匠延工業会：アルミニウムハンドブック，(1978) p. 59, p. 75
住友軽金属カタログ，No. 1101-4 (1977)
- 7) 福井康司：金属，50 (1980) 12 p. 55
- 8) 渡辺 亨：同上 43 (1973) 7 p. 13
- 9) 土器屋正之：同上 51 (1981) 8 p. 21
- 10) 小菅張弓：日本金属学会会報，19 (1980) 3 p. 178
- 11) 馬場義雄，犬丸 晋他：日本金属学会第IV分科会シンポジウム予稿，(1980) 2月13日 p. 13
- 12) 北尾吉延，碓井栄喜他：同 上 予稿，(1980) 2月5日 p. 21
- 13) 山本雄行，浜中隆夫他：金属，47 (1977) 8 p. 14
- 14) 山路賢吉，三宅保彦他：同上 47 (1977) 8 p. 8
- 15) 銅，28 (1980) 10 p. 9
- 16) 和泉 修：金属材料，16 (1976) 9 p. 97
- 17) 超塑性研究会編：超塑性と金属加工技術，(1979)，日刊工業新聞社
- 18) 産業グラフ，(1978) No. 8 p. 10