

## (2) 日本鉄鋼協会の特色

かつて高温超電導がブームとなった頃、MP 専門委員会の企画により昭和 63 年 6 月 17 日に「高温超電導シンポジウム」(鉄と鋼, 74 (1988), p. N167 に開催案内掲載)を日本鉄鋼協会として開催した。MP 専門委員会のこのような企画を実行するにあたって、前例もないことであり、事務局の方々の折衝も大変なことであったと思う。

当時、ほとんどの学協会が相次いで同様の企画を推進しており、これに対して日本鉄鋼協会としての特色を出すため、このシンポジウムでは超電導材料の製造技術に視点を置いたパネルディスカッションを設定した。閉会にあたり挨拶に立たれた大手非鉄金属メーカーの技師長の方は「日本鉄鋼協会は材料とその製造プロセスに関する高いポテンシャルを持っている。超電導に限らず、非鉄材料も含めて材料を横断的にとりあげ、このようなシンポジウムをこれからも企画して戴きたい」と述べている。多少のお世辞が含まれているにしても、日本鉄鋼協会の特色を端的に表現した言葉といえよう。

## (3) 連携の時代

MP 専門委員会の時代には、関連する他の学協会とは競合する状態が続いていた。これに対して、平成 4 年に発足した境界領域委員会では基本方針が大きく転換され、むしろ他の学協会との連携を基調とした活動が展開されている。

例えば、新規分野として特に安定した活動を展開している「チタン分科会」の場合、平成 5 年春の講演大会から日本金属学会との合同セッションとしてチタン関係の講演を募集しており、「材料とプロセス」の目次には日本金属学会のチタン関係講演プログラムも掲載されている。また、SAMPE 第 3

回国際シンポジウム(平成 5 年 12 月 7, 8 日)には、チタン分科会関係者から 60 件を超える論文が投稿されている。

新しく組織された「自動車用材料分科会」では当初から自動車技術会との連携活動を企画し、平成 5 年秋の講演大会では自動車技術会との合同シンポジウム「高強度化の限界を探る」を開催している。このほか「プラズマプロセッシング分科会」がプラズマ材料科学シンポジウム(平成 5 年 6 月 17, 18 日, 学振 153 委員会主催)に協賛するなど、他の学協会との連携を重視した新しい活動が展開されつつある。

## 9.1.5 これから

MP 専門委員会の発足準備段階から現在の境界領域委員会の積極的活動までの、新規分野 10 年間の経緯を概括してきた。境界領域委員会では日本鉄鋼協会として今後導入すべきさまざまな新規分野、例えば環境科学などの検討を進めている。世の中はまさに STS (Science-Technology-Society) の時代に入ろうとしており、自然科学と社会科学の調和が叫ばれている。このような風潮のなかで、日本鉄鋼協会がとりあげるべき新規分野の課題はますます多様化することであろう。

現在計画中の日本鉄鋼協会リストラ 80 のなかでは、境界領域委員会そのものは発展的解消を遂げ新しい組織が誕生することであろう。ほぼ 10 年間にわたって活動を続け、新規分野として会員諸氏に親しまれてきたこの分野の活動実績を無にすることなく、会員諸氏のメリットを重視しつつ新しい時代への対応を展開し、学界・業界をリードして戴きたいものである。

## 9.2 新素材及び新プロセスの進歩と今後の展開

### 9.2.1 チタン及びチタン合金

1952 年に我が国で初めて企業化された金属チタンは、1960 年代に急成長した石油化学工業にステンレス鋼より優れた耐食性を活かして利用され、さらに合成繊維、肥料、合成ゴム工業などに続き、1970 年代にはソーダ電解用の電極材として黒鉛に代わり使用され、その他の電極材としてもその優れた電極特性を活かして利用されるようになった。さらに海水に対する優れた耐食性と伝熱特性が銅合金よりよいことがわかり、火力・原子力発電所の復水器および海水淡水化装置に多量の薄肉溶接チタン管が使用されるようになり、1982 年にはチタン展伸材全体で約 8,000 t が出荷された。1980 年代に入り鉄鋼各社がチタン分野に参入して新規用途開発が活発になり、従来の化学、電力、航空宇宙に加えて、建築・土木、自動車・船用の輸送機器、眼鏡フレーム・時計・カメラなどの一般民生品用途への需要が高まった。1990 年に 9,000 t のチタン展伸材が出荷され、それ以降一

進一退であるが、これらの一般民需用途への需要開拓が実り大幅なコスト削減が実施されれば、飛躍的な需要拡大が期待される。

#### (1) チタンの製錬

スポンジチタンの製造方法として現在企業化されているのは、 $TiCl_4$  を Mg で還元する Kroll 法と、Na で還元する Hunter 法であるが、Hunter 法で製造していた会社が生産を中止し、Kroll 法が主流を占めてきている。世界のスポンジチタンの生産能力は約 10 万 t であり、製錬法が塩素を使用することや不活性雰囲気または真空中で行うことからスポンジチタンの生産はむずかしく、生産国は日本、米国、旧ソ連、中国と限られている。日本のスポンジチタン生産量は、1990 年に約 2.5 万 t と過去最高を記録した。日本のスポンジチタンメーカーは、いち早く省エネ合理化に着手し、以前はスポンジチタン t 当たり 3 万 kWh 以上の電力消費量が必要であったが、還元反応のバッチ大型化や、還元工程と塩化マグネシウム分離工程の一体化、およびマグネシウム電解装置の

合理化を世界に先がけて考案実施して、現在ではスポンジチタン 1t 当たり電力消費量はおよそ半分に近づいている。これらの合理化の結果、世界で最も安価で品質の良いスポンジチタンが日本で生産されるようになってきた。

現在、スポンジチタンの製造方法として主流を占めている Kroll 法は  $\text{TiCl}_4$  を製造する塩化工程、スポンジチタンを製造する還元分離工程、生成した  $\text{MgCl}_2$  を熔融電解により  $\text{Mg}$  と  $\text{Cl}_2$  に回収する電解工程、スポンジチタンを破砕する破砕工程の 4 工程からなっている。塩化工程は 1970 年頃まで固定床で行われていたが、現在は流動床で行われており、この改革により塩化工程は連続化が可能となり大きな進歩をとげ、生産性は 1960 年代と比較して約 12 倍になった。還元分離工程では反応容器の中で  $\text{TiCl}_4$  と  $\text{Mg}$  を反応させる還元反応工程と生成したスポンジチタン中に含まれる  $\text{MgCl}_2$  を除去する分離工程に分かれるが、以前は還元反応を終えたあと冷却し改めて真空分離を行っていた。この両工程を一体化して同じ炉で冷却なしで行うことによりエネルギー原単位が約半分に向上した。また、反応バッチサイズの大型化により生産性が向上し、1960 年代のバッチは約 1t であったが現在では約 10t である。このような大幅なバッチサイズの大型化により生産性の向上は約 4 倍になった。

電解工程は単極電解槽から多極電解槽を開発して採用した結果、電力原単位は大幅に下がり、生産性は約 10 倍に向上した。

Hunter 法で製造している会社は、近年すべて中止した。Hunter 法は融点の低い  $\text{Na}$  を使用する結果、連続化に可能性があること、低い温度で反応すること、その結果不純物が少ないなど利点はあるが、反応熱が  $\text{Mg}$  法と比べ約 2 倍と多く反応温度制御がむずかしいこと、生成する食塩が多量にでること、スポンジチタンの粒度が細かく食塩を含むため溶解工程で取扱いにくいなどの難点がある。

チタン材料がさらに発展するには今よりも安価に製造することが重要であり、従来の Kroll 法、Hunter 法に代わる新製錬法が提案され、企業化の試みがなされてきた。

Ginatta 法は、1980 年代もっとも注目を浴びた新製錬法で、イタリアの Ginatta 社で開発された電解法である。溶解セルと電解採取セルに分かれており、溶解セルでは電極として  $\text{Pb}$  を使用して原料の  $\text{TiCl}_4$  を  $\text{TiCl}_2$  と  $\text{PbCl}_2$  にし、電解採取セルではこれらの塩化物を電解して、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cl}_2$  に分解する。 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cl}_2$  はリサイクルして使用される。

流動式連続気相製錬法は還元工程を連続化するため  $\text{TiCl}_4$  と  $\text{Mg}$  を気相のまま反応させて  $\text{Ti}$  を流動状態で析出させて取り出す方法で通産省のプロジェクトで行っている。

Albany Titanium 法は、安価なイルメナイト鉱石を  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  と反応させ、さらに  $\text{Al-Zn}$  合金で還元し、 $\text{Zn-Ti}$  合金にした後  $\text{Zn}$  を蒸発させてスポンジチタンを得る方法である。

Dow-Howmet 法は Dow-Howmet 社と Howmet 社が

1970 年代後半に企業化を発表した電解法による製錬プロセスで、浴組成  $\text{LiCl-KCl}$ 、浴温度  $520\sim 600^\circ\text{C}$ 、 $6.2\text{ V}$  の条件で  $\text{TiCl}_4$  を予備還元後析出させる方法である。これらのプロセスのほかに、 $\text{TiI}_4$  を高温のプラズマで反応させる方法や、イルメナイト鉱石に 6 フッ化珪素酸を反応させ  $\text{TiF}_4$  を得て、 $\text{CaCO}_3$  と  $\text{HF}$  により  $\text{CaTiF}_6$  を沈殿させ、その後  $\text{Ca}$  で還元して  $\text{Ti}$  を得る方法などが発表されている。しかしながら、今まで企業化が試みられたプロセスおよび基礎研究中のプロセスを含め、既存の Kroll 法を越える新製錬の開発は、Kroll 法が合理化されているだけに大変な難題であるといえる。Kroll 法の唯一の弱点である還元工程の連続化を解決することが今後の最大の課題である。

## (2) チタンの溶解

スポンジチタンの溶解法は消耗電極式アーク溶解法が主流である。スポンジチタンをブリケットに圧縮し、各ブリケットを接続して 1 本の棒状電極をつくる。これを水冷銅坩堝を用いた真空アーク炉中で大電流アークにより溶解し、溶湯を漸次下部より凝固させ鑄塊とする。チタン合金の溶解の場合、溶解中に合金成分を調整することができないので、ブリケットの中に合金元素を装入する。健全な鑄塊を得るため通常 2 回溶解を行うが、必要に応じて 3 回溶解する場合もある。このように、本溶解法では電極の製造工程と溶解工程からなる。

電解の製作費および溶解費を節減できる神戸法が開発され、工業用純チタンおよび低合金チタン用に利用されている。これは、電極を最終鑄塊重量の約 50% にし、残りは第 1 溶解中に連続的に供給する方法で、スクラップの利用の点でも有利である。

消耗電極式真空アーク溶解炉は、直径  $700\sim 1,250\text{ mm}$ 、重量  $3\sim 15\text{ t}$  のものが使用されているが、今まで報告された最大のもは直径 60 インチ ( $1,542\text{ mm}$ )、重量  $30\text{ t}$  である。我が国では直径  $1,250\text{ mm}$ 、重量  $15\text{ t}$  の大型インゴットが日常生産されるようになった。

チタンの溶解には、消耗電極式アーク溶解のほかに、第 1 次溶解用に非消耗電極式アーク溶解、プラズマアーク溶解、エレクトロンビーム溶解が用いられている。

水冷銅製の回転電極を用いた非消耗電極式アーク溶解は電極製造を必要とせず、スクラップの使用が比較的容易に可能であるが、消費電力が大きく、また回転電極先端の銅チップの消耗が大きく、回転部のシール不良が起きやすいなどの欠点がある。

プラズマアーク溶解は高性能プラズマガンの開発により今後の溶解法として注目を浴びており、直径  $700\text{ mm}$ 、重量  $8\text{ t}$  の鑄塊が溶製できる炉が開発されている。通常 1 気圧の  $\text{Ar}$  または  $\text{He}$  雰囲気中で溶解されるため、チタン合金中の  $\text{Al}$  など蒸発成分のロスが比較的少なく、スクラップなど使用した 1 次溶解に有効である。

エレクトロンビーム溶解は  $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{ mmHg}$  の高真空

下で実施するが、近年の電子ビーム発生装置（ガン）と炉内の真空排気系を分離することによりガンの寿命が長くなり、また工業的に利用できるまで大型合理化された。世界のチタン溶解能力は約 17 万 t で、日本は、2.12 万 t である。

チタン溶解の今後の方向について述べると、消耗電極式アーク溶解法は、今後、さらに合理化された電極製造法、同軸型の電力供給方式、コンピュータコントロールが定着し、本溶解の特長である低い電力消費量や高生産性など経済性に優れているため、今後ともチタンの溶解の主流を占めていくと思われる。

航空機エンジンの回転用部品向けチタン合金は従来以上の厳しい品質が要求され、介在物のない鋳塊が必要となる結果、冷床式溶解 (Cold Hearth Refining) が一次溶解法として一部規格化されている。すなわち、プラズマ炉または電子ビーム炉内にコールドハウスを設置して、その中で溶解することによりヘビー・インクルージョン (W など) や窒化物などのライト・インクルージョンを除去する方法で、通常、1 次溶解にこれを採用し次いで 2 次溶解に消耗電極式アーク溶解を行う、高品質化の溶解法として開発されてきた。

以上のように、チタンの溶解法は二つの方向に分けられる。一つは、航空機エンジン回転部品用に要求されるような高品質化であり、二つ目はあくまで安価に製造できることを狙った低コスト化である。後者の低コスト化溶解法としては、低い消費電力と高生産性で経済性に優れた消耗電極式アーク溶解が主流となるが、本方法の弱点を改善した連続溶解法や、各種形状の鋳塊が可能となる溶解法、供給原料の自由度が大きい溶解法の開発により、全体として経済性の良い溶解法の開発が望まれる。

### (3) チタンの鋳造

通常チタンの鋳物は消耗電極式アーク溶解炉を用いて、水冷銅坩堝の内面にスカム状にはりつけて多量の溶湯をつくり、その坩堝を回転して鋳造するスカム鋳造法が一般に使用されている。チタン鋳物溶解法として電子ビーム溶解やプラズマ溶解も使用されるが、溶湯の過熱がむずかしく鋳物に必要な流動性が得られにくいこと、真空の場合成分変動があるなどの問題がある。チタンの溶湯は活性であり鋳型がポイントになり、黒鉛鋳型に加えてジルコニア、カルシア、またはそれら酸化物をベースにした鋳型が使用され、基本的にはロストワックス法と同様の方法で処理されている。航空機部品などでは、通常遠心鋳造により鋳造された後、内部欠陥を密着するため HIP 処理される。近年非回転航空機部品に伸びてきており今後も着実に増加するであろう。

チタンは生体用材料として注目されているが、中でも歯科用材料としてすでに使用されてきており、金属床、クラウンなどが小型鋳造設備でつくられている。日本を中心に歯科用鋳造設備が多く開発されており、今後この分野での発展が期待される。

今後のチタン鋳物の課題として、鋳造用合金の開発、鋳物品質を高めるための技術開発、低コスト化のための技術開発がある。

### (4) チタンの加工

日本のチタン展伸材の約 80% が純チタン板およびその加工品（条、板、溶接管）である。純チタン板製品は現在では鋼製品と同じように製造することができる。すなわち、通常 5~15 t の丸型鋳塊を鍛造または分塊圧延により、厚み 150 mm 前後のスラブを製造し、製鉄所のホットストリップミルで約 3 mm 厚みまで一気に熱延される。ホットストリップの脱スケールは通常硝酸で行われ、ステンレス鋼用の設備で行ってきたが、近年チタン専用の脱スケール設備が設置された。脱スケールが十分なされていない場合、板表面に酸素高濃度層が存在して、その後の冷間加工で疵や割れの原因となる。冷間圧延はゼンジミア、UC-2 などの小径多段ミルや冷間タンデムミルなどが使用され、板厚 0.3 mm まで圧延可能である。コールドストリップは真空焼鈍されるが、用途により大気中焼鈍され、塩浴・酸洗後脱スケールして製造する技術も確立された。0.4~0.7 mm 肉厚の純チタンストリップは条切りした後、溶接管となり原子力・火力発電所の復水器用管に使用される。純チタンの切板はこれらのストリップから製造することができるが、ストリップにできない厚板は普通鋼の設備で同じように製造することができる。このように、純チタンの場合鉄鋼用の設備を利用して大量生産が可能であり、品質・コスト面で大幅な改善がなされてきた。今後の課題は、各工程の管理を強化して表面疵発生を防止して歩留りを上げることである。

発電所復水器や海水淡水化装置に使用される薄肉溶接チタン管の製造技術が大幅に改善された。溶接技術ロール成形技術、ストリップの脱脂洗浄、非破壊検査技術などの改善により、造管速度および歩留りの向上など生産性を上げるとともに溶接管の信頼性を高めた。

次にチタン合金加工について述べる。一般に高強度チタン合金は Ti-6Al-4V に代表されるように、純チタンと異なり冷間加工性が非常に悪いので熱間加工で最終製品まで製造される。チタン合金板は合金展伸材の約 20% で残りのほとんどが鍛造品である。チタン合金板は、純チタンと異なり内部組織の調整が必要であるためホットストリップでなくシート圧延により約 3 mm 厚みまで製造する。それ以下の薄板は通常重ね圧延などして熱間で作られ、研磨により仕上げる。α 相は稠密六方晶であるため、チタン合金板はその集合組織により機械的性質など諸性質に大きな変化を示すが、加工温度、加工率、焼鈍温度など適切な加工熱処理条件を設定することにより目的に合った合金板を製造できるようになった。最近注目されている Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al などの β チタン合金は冷間加工性がよく、冷間で箔までの圧延が可能となった。

チタン合金の鍛造は、鋳塊からまずピレットなどの素材を

つくり、さらに各種の鍛造品にするためハンマー、プレス、リングミルなどを使用する。加熱は水素吸収をさけるため還元性雰囲気でない電気炉が望ましい。重油炉やガス炉を使用する場合、直接チタンに火災がふれないようにマッフルなどを使用することが好ましい。鍛造温度は、鑄塊の分塊加工で $\alpha$ - $\beta$ 変態点(Ti-6Al-4Vでは約990°C)以上の $\beta$ 域で行い、仕上げ鍛造で $\alpha$ - $\beta$ 域で行われる。

一般にチタン合金の鍛造は、変形抵抗が高く、また鍛造温度、鍛造比、熱処理条件によるマクロおよびミクロ組織の変動、さらにそれに基づく機械的性質の変動などの点で一般にむずかしい工程である。従来では、 $\beta$ 域仕上げ鍛造したものは針状組織を示し延性が劣るため、 $\alpha$ - $\beta$ 域で仕上げ鍛造された。すなわち、 $\alpha$ - $\beta$ 域仕上げ鍛造の $\alpha$ - $\beta$ 合金は、延性や高サイクルおよび低サイクル疲労強度、疲労亀裂発生抵抗力などが $\beta$ 域鍛造材より優れている。しかし、近年、 $\beta$ 域鍛造材が破壊靱性、疲労亀裂伝播抵抗値、クリープ強度などで優れているため使用される場合が増加しつつある。また、加工と熱処理の組み合わせにより再結晶 $\beta$ 粒を細かく生成させ、超音波非破壊検査能力を向上させるとともに機械的性質を安定させるようになってきた。

チタン合金の変形抵抗が大きいため大容量のプレスが必要であるが、変形抵抗の小さい高温域で変形するHot Die Forgingや恒温鍛造(Isothermal Forging)の技術開発が盛んに行われ実用化されてきた。この場合、力量の小さいプレスで大きな型打品をつくれる可能性がある。これらの鍛造法の問題は超合金からつくる型であり、現在ではあまり大きなものできない。また型コストが高くつくので数多く生産する場合に向いている。ニア・ネット(Near-Net)に製造できることから今後の発展が期待される。

航空機チタン合金鍛造品の製造技術が確立されたほかに、チタン合金について深海調査船用耐圧殻の製造技術、蒸気タービンプレード鍛造技術、ジェットエンジンのファンケースなど用のニア・ネットなリング圧延技術、ジェットエンジン・ディスクなどの回転鍛造技術、押出型材・パイプの製造技術などが開発され、利用されてきた。

用途開発に必要な切削などの機械加工技術、曲げや深絞りなどの成形加工技術、溶接やろう付などの接合技術、陽極酸化やコーティングなどの表面処理技術などの分野で大幅な改善がみられた。

##### (5) チタン材料

チタンが注目され始めた1950年代以来、チタン材料の研究開発が多くなされてきたが、我が国ではチタン材料の用途が主として化学工業であったため、実用化されたのは耐食性合金であった。航空宇宙用途を指向した高強度チタン合金も多く研究されたが、ほとんど実用化されず、欧米で開発された合金が実際に使用されてきた。しかし、近年チタン材料の高性能化が取り上げられ、我が国で多くの研究開発がなされてきている。

##### ① 耐食性チタン合金

純チタンは酸化性環境や塩化物に優れた耐食性を示すが塩酸や硫酸のような非酸化性環境での耐食性はよくない。これを改善するため1950年代後半にTi-0.15Pdが日米両国で開発され、アセトアルデヒドプラントなどに実用化された。1960年代半ばになり、濃縮硝酸に優れた耐食性を示すTi-5Taが開発され、アクリル繊維プラントの硝酸回収装置に使用されている。電池に使用される二酸化マンガンの電解用電極は黒鉛から純チタンに代替してきたが、さらに電解性能の良いTi-5Ni合金が近年開発された。

Ti-0.15Pdは純チタンの約2倍と高価格であるため、1980年代に入り安価な耐食性合金が、開発されてきた。Ti-0.5Ni-0.05Ruはすでに苛性ソーダプラントや石油精製装置に実績があり、Ti-0.05Pd-0.3Coはオフショアプラントホーム用熱交換器に実用化された。Ti-0.05Pdが開発され、ASTM規格に適用された。Ti-0.4Ni-0.016Pd-0.025Ru-0.13Crも開発されている。

##### ② 高強度チタン合金

チタンは合金化することにより引張強さ800~1,000MPa以上となり、比重が4.51で比強度が従来の材料より大きいことから、特に当初航空宇宙材料として注目された。

我が国では1950年代から1960年代にかけて米国で開発された合金Ti-5Al-2.5Sn, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-13Cr-11V-3Al, Ti-8Mn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Moやその他多くの合金が研究された。当時我が国で開発されたTi-5Al-2Cr-1FeとTi-5Al-3Mnが、自動車や航空エンジン用に実用化された。Ti-6Al-2Co, Ti-2Cu-1Zrも開発されたが実用化されなかった。 $\beta$ 型チタン合金Ti-15Mo-5ZrおよびTi-15Mo-5Zr-3Alは高耐食性かつ高強度合金として1960年代後半に開発されたが、現在蒸気タービンプレードのエロージョンシールド用や各種スポーツ部品に使用されている。近年開発されたTi-4.5Al-3V-2Fe-2Moは、現在チタン合金の中で約70%使用されているTi-6Al-4Vよりも、冷間加工性、熱処理硬化性、超塑性の面で優れており一部実用化されている。純チタンより高強度にした低合金Ti-0.2O<sub>2</sub>-0.1N-0.5Feが近年開発されている。

チタン材料が機体材料として約26%使用されているF15や全重量の約36%がチタン材料のジェットエンジンF100が1970年代から1980年代にかけて国産化され、航空宇宙用のチタン合金の実用化は飛躍的に発展したが、これらに使用されたチタン合金はTi-6Al-4Vをはじめとした米国で開発された合金であった。しかし、1980年代に入り新素材としてチタンが取り上げられ、鉄鋼各社をはじめ企業、国公立研究所、大学でチタン材料の研究が盛んになった。

チタン合金の高強度化の研究では、多くの $\beta$ 型チタン合金の試験結果から、Fig. 9.4に示すように、約1,700MPaの耐力で絞りが零になるが、 $\beta$ 粒の細粒化および相の均一微細析出により約2,500MPaの強度が得られることを予測した。

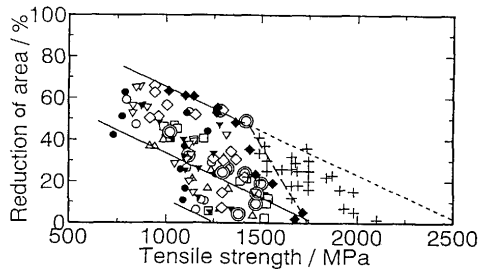


Fig. 9.4. The improvement of strength-ductility balance through applying the thermo-mechanical treatment for various beta titanium alloys.

実際に精緻な加工熱処理により $\beta$ 粒を著しく微細にするとともに、下部組織と調整して $\alpha$ 相を均一微細に析出することにより、予測した延性を持ち引張強さ約 2,000 MPa が得られた。

### ③ 冷間鍛造用 $\beta$ チタン合金

自動車用など一般民需用に冷間鍛造用チタン合金が開発された。V, Mo などの $\beta$ 相安定化元素を添加していくと高温の $\beta$ 相が溶体化処理により常温までもちこされ、歪誘起マルテンサイト、双晶変形、ひき変形により低い変形抵抗で冷間加工される。Ti-22V-4Al 合金は 800 MPa 以下の変形抵抗をもち、冷間鍛造して一般乗用車のバルブリテーナに使用された。さらに低い変形抵抗の合金 Ti-20V-4Al-1Sn および Ti-16V-4Sn-3Al-3Nb が開発されている。

### ④ その他の合金開発

チタン合金中の合金元素の電子状態を分子軌道法を用いて計算し、合金設計に利用する提案がなされ、実際に従来の実用合金より耐クリープ性の優れた Ti-6Al-4Sn-3.5Zr-1Ta-0.5Mo が開発された。また、チタン合金の弱点である切削性を改善するため、S とレアアース金属を添加した合金が開発され、乗用車のコンロッドに実用化された。従来の Ti-6Al-4V 合金に  $W_2C$  または  $Cr_3C_2$  を添加することにより TiC を均一分散させ、耐摩耗性を大幅に改善した。生体用チタン合金として Al, V を含有しない Ti-15Sn-4Nb-2Ta-0.2Pd と Ti-15Zr-4Nb-2Ta-0.2Pd が発表されている。

### (6) 今後の方向

チタン材料発展の鍵はいかに安価に製造できるかにある。この課題を解決するため以下の活動が必要である。

① スポンジチタンを安価にするため、合理化された Kroll 法において、還元工程の連続化の発展が今後の課題である。さらには、Kroll 法を越える新製錬法の開発が期待される。

② 純チタンの溶解はさらに安価に製造するため経済的な連続溶解法の開発が必要である。

③ チタン合金の溶解は二つの方向があり、一つは航空機用エンジン回転体部品などに現在より品質的に高いレベルを要求される溶解法の開発であり、二つ目は非回転部品や民生用途に高品質よりむしろ可能な限り安価な溶解法の開発であ

る。

④ 精密鍛造, 精密鑄造・HIP, 超塑性加工・拡散接合, 粉末冶金・HIP など安価な技術の開発が重要である。

⑤ コストダウンのため量産化が不可欠であり、大量の安定生産が必要である。需要を喚起し用途拡大のための加工技術の発展が必要で、成形加工技術, 表面処理技術, 接合技術, 切削・研磨技術面で使用者側に立った技術開発がチタン材料発展のために必要である。

⑥ 用途拡大のための材料特性の高性能化が必要である。高強度化, 高靱性化, 高耐熱化をはじめ耐摩耗性, 快削性, 特殊環境での耐食性などの面でさらに高性能化の研究開発が重要となる。

## 9.2.2 電磁気冶金の基礎と応用

鉄鋼業は、典型的な設備産業であり、新しい装置の開発・設置そして装置の大型化・連続化により成長・発展を遂げてきた。我が国においては、昭和 40 年代から 50 年代にかけて高炉の大型化, LD 転炉, 連続鑄造および連続圧延の設備導入により鉄鋼業は、隆盛を極めた。しかしながら、それ以後、個々の技術の改良・改善による高能率化により技術の進展が見られたものの、実用化に至る革新的な技術の開発がほとんどなされていない。

鉄鋼プロセスは、高温系であり、特に連続鑄造までの工程は、熔融状態の金属をハンドリングする必要があり、多くの制約が存在する。そのために、目的とする操作を理想的に行えず、革新技術の開発の妨げとなっており、アイデアの実現のための具体的手段が、非現実的なことが多々ある。

このような技術の飽和感の中で、導電性流体である熔融金属に対し、非接触状態で、加熱、攪拌、流動制御などを実現できる電場・磁場の利用技術が、アイデアの実現のための手段として注目されるようになってきた。なお、ここで着目する力は電磁気力であり、磁石が鉄を吸引する磁化力とは異なるため、以下に述べることは強磁性材料の鉄に限らずすべての金属に適用できるものである。

### (1) 電磁気力利用のための基礎

ここでは、電磁気力利用の進展について述べるに当たって、電磁場中の熔融金属の挙動に関する基礎知識について簡単に触れておく。

Fig. 9.5(a) に示すように、電流が導体中を流れると、その周囲に磁場が電流の進行方向に対して右ネジを巻く方向に形成される。このときの電流密度  $J$  と磁場の強度  $B$  との関係は、アンペアの定理と呼ばれている。

一方、強度  $B$  の磁場中を速度  $V$  で運動する電気伝導度  $\sigma$  の導電性流体のオームの法則は次式で表される。

$$J = \sigma(E + V \times B) \dots \dots \dots (9-1)$$

(9-1) 式で右辺第 1 項の  $E$  は電界の強さで、ここまですべて一般によく知られた静止系でのオームの法則である。右辺第 2 項が、磁場中を流体が流れるときに発生する電流を意味す