

Fig. 9.19. Schematic drawing of chlorofluorocarbon decomposition by RF plasma. (Thermal Plasma Processing, ISIJ, Tokyo, (1992), p. 394)

粉体を反応合成の出発原料とするフラッシュ蒸発プロセスが吉田らにより開発され、高温超伝導膜の合成に成功している。成膜後の熱処理なしに超伝導特性がえられる。

(6) 環境問題対応プロセスへの応用

材料プロセッシングへの応用だけでなく、プラズマを環境問題を解決するために利用する研究も進んでいる。放射性廃棄物の熔融固化、都市ごみ焼却灰の熔融減容化処理法が開発されている。有害物質の分解が可能であること、ダイオキシンの発生が抑さえられること、さらに排ガスの量が少なくできることなどがプラズマ法の有利な点である。水プラズマを用いフロンを分解無害化する技術も開発されている。このプロセスの概念図を Fig. 9.19 に示した。

(7) 課題と今後の展望

MW 級プラズマ装置が日本の鉄鋼産業でも実用化され、大出力プラズマアーク利用の基盤技術が確立しつつある。TD 加熱への適用成功を基に、溶鋼加熱、精錬への応用は今後、さらに広がっていくと思われる。実操業での経験と、電極材料に関する基礎研究の知見とを合わせ、さらなるプラズマトーチの長寿命化、大出力化が望まれる。プラズマ中の解離水素、解離窒素など活性ガス種の金属への溶解、あるいは金属からの放出、その他の反応について、その機構が明確にされねばならない。

超微粉生成・成膜分野ではプラズマ応用の急速な進展がみられたが、高機能材料を創成する技術として、新たな展開の可能性を秘めている。環境問題対応プロセスとしてのプラズマの利用も今後発展が予想される。プラズマ中での熱および物質の輸送、極端な非平衡場での反応など明らかになっていないことが多い。プラズマ計測技術を充実させ、現象の理解が深まれば、応用が加速されることになろう。

9.2.4 粉末及び焼結技術

(1) はじめに

過去 10 年間焼結材料は鋳鍛材と比較して伸び率が高く、焼結機械部品に限ってみれば最近の円高不況においても他の素材形ほどの生産の落ち込みはなかったようである。これは

自動車関連を中心とする機械部品が着実に焼結材料で置き換えられている現状を示している。Fig. 9.20 に粉末冶金製品生産量推移を示す。日本の粉末冶金産業は、大雑把に言って、焼結機械部品、工具およびフェライト磁石の 3 分野より成っているが、世界的にみると、焼結機械部品とその原料粉が粉末冶金産業の主要な製品である。この分野における生産量は北米を 100 とするとヨーロッパと日本が 50、中国は 10、台湾および韓国が 5、ブラジルとインドがそれぞれ 4 と 3 という比率になる。この焼結機械部品分野における技術的な展開が最も変化に富んでおり発展のテンポも速い。この数年来とくに顕著なのは、高密度、高強度鉄系焼結部品への取り組みである。これらは内容的に焼結部品の高強度化および高靱性化を狙っており、そのための原料粉の製造、圧縮成形、および焼結固化、さらには熱処理なども含めて多大な努力が払われている。本稿ではまず鉄系焼結機械部品の進展について述べる。ついで将来にわたってその開発が要望されている複合プロセスの現状とその可能性について述べる。

(2) 鉄系焼結材料の進歩

① 材質の変遷

初期のころの鉄系焼結体は、Fe-Cu, Fe-C, Fe-Cu-C などが主であり、一部 Fe-Ni-Cu-C が高強度材として使用されていた。焼結密度は $6.4 \sim 6.8 \text{ Mg/m}^3$ 、引張強さは $200 \sim 700 \text{ MPa}$ であった。その後 Fe-Ni-Mo-Cu-C や Fe-Cr-Mo-V-C、などで焼結密度が $6.8 \sim 7.5 \text{ Mg/m}^3$ 、引張強さが $1,000 \text{ MPa}$ を超えるものが現れた。また、耐摩・耐食材料として、ステンレス鋼も開発された。現在では原料粉品質の改良、高温焼結あるいは焼結鍛造などの採用により焼結密度が $7.4 \sim 7.8 \text{ Mg/m}^3$ 、引張強さが $1,500 \text{ MPa}$ 以上になっている。

② 生産技術の進歩と応用分野の拡大

プレス成形技術は、生産性の向上や複雑な部品の成形焼結体の高密度化、あるいは生産の自動化などの要請により年々進歩している。薄肉、多段、スプライン、長尺品、ヘリカルギヤ成形などの技術が実用化された。焼結炉も高温焼結に対応してセラミックメッシュベルト式焼結炉が開発されたり、焼結操業の全自動化が実現された。焼結鍛造が広く実用に供されるようになり、また焼結接合による複雑部品の成形技術も確立された。応用分野は輸送機械、産業機械、電気機械、その他となっており、これらの分野はずっと変わっていないが、製造工程の簡略化や部品の軽量化、さらには高性能化の要請に応じて、適用部品の種類は年々増加している。

③ 原料粉の進歩

焼結材料の高密度化および高強度化における原料粉の果たす役割は極めて大きい。生産性の向上、作業環境の改善、コストダウンなど生産のすべての面で原料粉の特性が利いてくる。国産の粉末は品質的に世界のトップレベルにあるが、現状ではアトマイズ粉が主流であり、圧縮性と均質合金化の両方を満たすため部分合金化粉も開発された。また、偏折防止粉のような複合粉の利用も新しい傾向である。Fig. 9.21 に

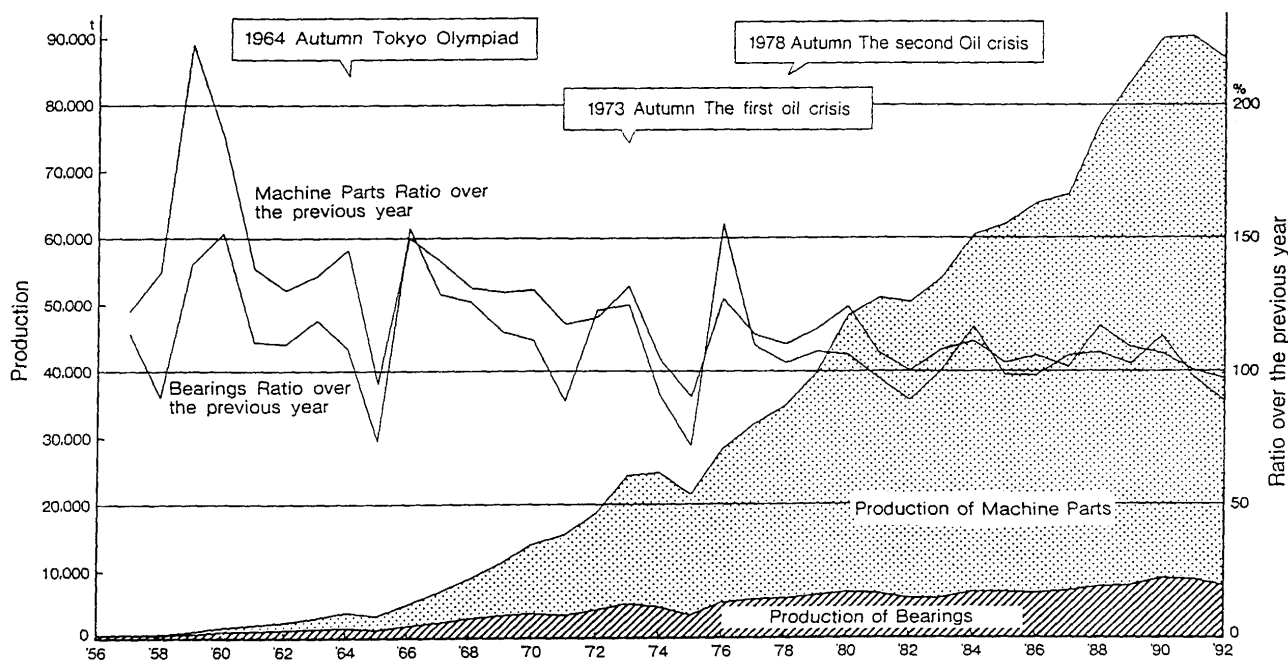


Fig. 9.20. Annual production of P/M machine parts in Japan. (after Japan Powder Metallurgy Association, 1993 report)

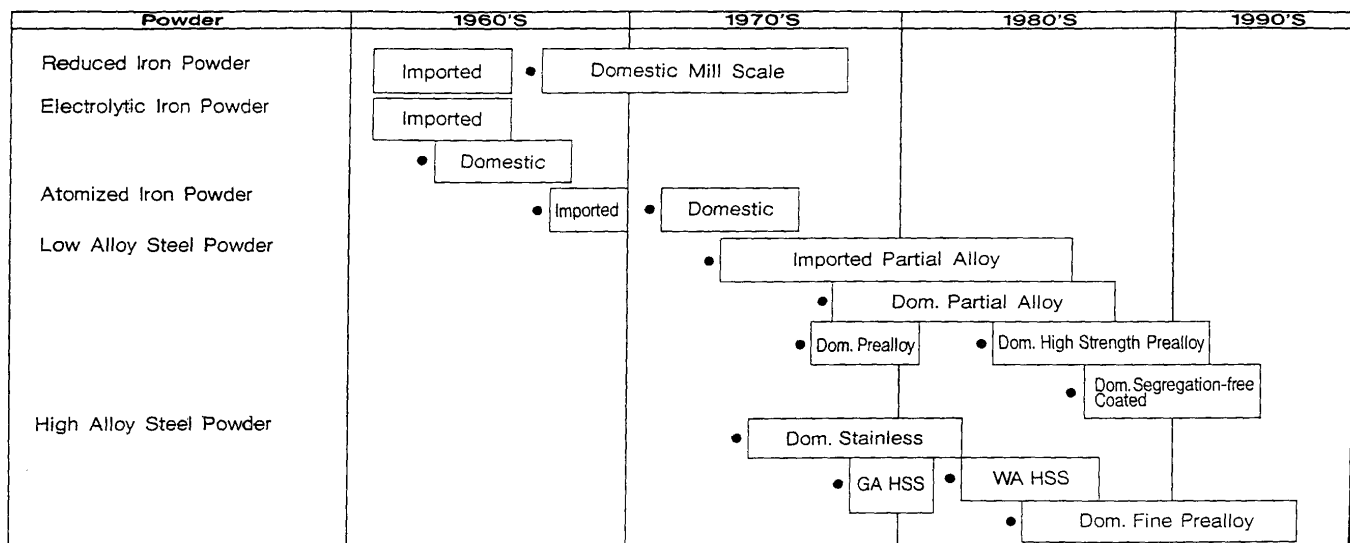


Fig. 9.21. Development of iron and iron alloy powders in Japanese powder metallurgy. (after Japan Powder Metallurgy Association, 1993 report)

1960年代から現在までの原料粉の開発状況を示す。

(3) 将来展望

① 要望されている将来技術

現在、粉末冶金業界で期待されている将来技術を列挙すると、CNCプレス、大型プレス、全生産ライン完全自動化、無欠陥成形、連続アイソスタティックプレス、射出成形、ニアネットシェイプ成形、超塑性鍛造、複合プロセス、複合部品のユニット化、宇宙産業用超耐熱合金、傾斜機能材料などである。

(4) 複合加工プロセス

粉体加工の最も基本的なプロセスは、粉体原料を金型などに充填し圧縮成形したのち焼結する方法である。この基本プ

ロセスとは原理的に異なる加工法を組み合わせる場合、これを複合プロセスあるいは複合加工プロセスと呼ぶ。すなわち、鋳造や塑性加工、溶接・接合、電解などを含む表面処理など、粉体加工とは原理的に異なる加工法を組み合わせたプロセスである。現行の粉末冶金技術の中にもすでにいくつかの複合プロセスが実用化され実操業に供されている。粉末押出し、焼結鍛造、疑似HIP法、焼結接合、射出成形、粉末圧延、あるいはスプレーフォーミングなどがそれである。成形・焼結によりいったん形状をつくり、そのあと適当な塑性加工により最終形状に成形する技術も開発されているが、これも一種の複合プロセスであろう。また、WC-Co系超硬合金へのTiCコーティングなども複合プロセスに入る。これら

の複合プロセスはそれぞれ技術的に複数の加工分野にまたがっているため、一種の学際的な技術協力が必要であることは言うまでもない。

粉末押出し、焼結鍛造、疑似 HIP および粉末圧延は塑性加工技術との複合であり、プロセス開発には塑性加工の専門家との協力が必要である。焼結接合は一般に複数の部材を接合により一つの部品に仕上げる技術であり、原則的には溶接・接合の専門知識が要求される。射出成形は、プラスチック成形技術と焼結技術の合体したものであり、さらにこの加工法においては、バイダー技術が成形の成否を握っており、技術開発にはバインダー化学の専門家の参画が必須である。スプレージョーミングは、半溶融の粒子を基板に衝突堆積させて材料化する技術であるが、これは鑄造凝固と粉体加工の両方の要素が入っている。技術的に成熟させるためには両加工分野の協力が必要である。

粉体加工をベースにした複合プロセスの特長は、成形体の大サイズ化および長尺化あるいは逆にミニチュア化、真密度化、強度や機能性の向上、新規機能の発現、複数機能化、形状付与の自由度の拡大、さらには工程の簡略化などをも包含しているところにあり、それぞれの材料加工分野の枠にとらわれない自由な発想がみられる。

現行技術に見られる複合プロセスに対する上記の考察から、粉体加工と他の複数の加工技術を組み合わせた新しい複合プロセスには、大きな可能性があるように思われる。この可能性を引き出すためには専門分野間の協力は取り敢えず必要であるが、もっと突っ込んで材料加工分野の再編成あるいは新しい専門分野の構築にまで立ち入る必要がある。

9.2.5 複合材料

(1) 十年間の進歩

種々の複合材料は従来材料に不足している特性を持ち得るという夢のもとに数多くの研究・開発が行われてきた。特に金属系複合材料（以後、MMC: Metal Matrix Composites とする）のここ十年間の複合材料の研究開発自体は従来の研究・開発を基礎とした延長上にあるものであり、新しい強化素材の出現とその素材の可能性の検証から複合材料系とプロセス技術の淘汰と工業化へのチャレンジの時代であったといえる。

このように、可能性のある材料の選択と何に重点を置いてプロセス開発を進めるべきかの決定が行われたことは 20~10 年前に MMC のプロセス技術の基本思想が確立されていたために成し遂げ得られたことは言うまでもない。以下、MMC について複合材料系と開発状況、プロセス技術の変遷、国内での応用、MMC の将来性について概略を述べる。

(2) 複合材料の進歩

MMC として過去十年の間に繊維強化系としては Al_2O_3 繊維 ($Al_2O_3-SiO_2$ 系を含む)、SiC 系繊維 (直径が 10~20 μm のもので無機ポリマーから作られるもの)、PAN 系あるいは

ピッチ系炭素繊維で強化したアルミニウムやマグネシウム系合金などの軽金属をマトリックスとする複合材料の開発が進められた。その結果、炭素繊維強化アルミニウムの低熱膨張特性を利用したチューブなどが宇宙用などの特殊な構造体として実用化されるに至った。また、エンジン用耐熱材料として SiC 繊維 (直径が 80~140 μm で CVD 法により作製されるもの) 強化チタン系複合材料などの研究開発が行われ、現在でもその研究が続くとともにさらなる耐熱性を求めて Ti_3Al や $TiAl$ などの金属間化合物系複合材料へと研究が展開されつつある。

粒子強化型では直径が 0.5~200 μm 程度の SiC 粒子、TiC 粒子、 B_4C 粒子強化アルミニウム系の材料が注目された。これらの材料は粉末冶金的手法あるいは溶融金属への攪拌混合法を利用して実用的な素材を提供できるようになっている。また、1970 年代の終わりに靱殻から SiC ウィスカーが得られることから安価な強化素材として注目された SiC ウィスカー強化型のアルミニウムも引き続き開発が行われた。しかし、材料の持つ最高性能がほぼ明らかになったことや 1980 年の後半にウィスカーの発癌性が指摘されたために開発のテンポは遅くなっている。粒子やウィスカー強化金属系では弾性率、熱膨張特性、減衰特性、強度、耐摩耗特性などが期待されている材料特性であり、後で述べるように種々の応用が試みられた。

(3) プロセスの進歩

複合材料の種類により、プロセス技術の選択が行われ、多くのプロセス技術が工業的なレベルまで高められた。工業的なプロセスとして用いられたものは (i) 粉末冶金、箔冶金的手法のようにマトリックス金属の拡散接合を利用するもの、(ii) 鑄造技術を利用するもの、(iii) 反応を利用した *in situ* 生成を利用する方法に大別される。

(i) のマトリックスの拡散接合を利用する方法ではアルミニウム系合金と SiC 粒子を混合してホットプレス (あるいは HIP が用いられる) で複合化し、押出し、圧延加工を経て棒材やチューブ材料を得る方法が粒子強化型複合材料の工業的な製造方法として開発され、大型の複合材料の製造に貢献している。また、連続繊維強化金属系では連続繊維とマトリックスのプリフォーム (予備成形体) をロールを通して拡散接合するような方法で大型の板材料を作り出すことに成功している。この際用いるプリフォームの製造方法として繊維束を連続して金属と複合化するプリフォームワイヤを製造する技術も開発された。このようにして得られたプリフォームワイヤは大型板状の複合材料を得るためのプリフォーム体として成型技術の進歩に貢献した。

プロセス技術の中で最も著しい進歩を遂げたものは (ii) の溶融状態の金属を利用したプロセスである。Fig. 9.22 は溶融状態の金属を利用した MMC の複合化プロセスを分類して示したものである。溶融金属を用いた MMC の製造方法は大きく分けて Fig. 9.22 中に示した A, B (B-1, B-2) の方法に分類