

© 1982 ISIJ



プラズマアーク溶解プロセスの現状と将来性

大澤 秀雄*・小野 清雄*²

The Status and Prospects of Plasma Arc Melting

Hideo OSAWA and Kiyoo ONO

1. 緒 言

プラズマに関する研究は、核融合炉実現を目指し、ここ 20 年間に急激な発展をとげた。核融合炉の実用化の道はまだ険しいものがあるが、その研究の発展過程において、プラズマ科学技術の多方面への適用が、派生的に種々考えられてきた。その中の 1 つが、プラズマを高温の熱源として利用する試みである。

通常の放電アークを、強制的に拘束し、いわゆる Thermal pinch 効果によつて得られる、より高温のアーク、すなわちプラズマアークもしくはプラズマジェットは、ほとんどすべてのガス体を作動ガスとして利用できる特徴を有している。それ故に、その高温を利用して化学反応を促進できることなどの理由により、特に化学工業の分野に広く利用されており、現在、プラズマ放電現象を利用した化学合成・分解・蒸着・エッチングなどを総括するプラズマ化学という体系が確立されつつある。

金属の溶断・溶接・溶解にプラズマアークの高温特性を単純に利用しようという考えは、比較的早くから存在したと思われるが、この分野における工業化は、1950 年代から、まず溶断、溶接の領域で発展した。

金属の溶解の熱源にプラズマアークを利用しようという試みがなされたのは、1960 年代になつてからであり、その工業化の歴史はまだ浅い。金属の溶解の場合は、溶接に比して大電力のプラズマアークを必要とするため、プラズマアーク発生装置の大型化特に大電流アーク発生に耐えうるプラズマトーチの開発に問題があつた。世界各国において、各種のプラズマアーク溶解プロセスの開発研究が試みられたが、現在実用化に成功しているのは、ソ連、東独を除けば、自由経済圏では日本にすぎない。

ソ連、東独においては、量産特殊鋼溶製にも利用されているが、日本においては、経済的な観点から、高品質特殊鋼、超合金、高融点金属など高級金属材料の溶解を対象とする特殊溶解プロセスの熱源として、プラズマアーク

を利用することで開発が進められてきた。しかし最近、スウェーデン、ベルギー、英国、西独など自由経済圏諸国においても、製鉄、製鋼の大量生産プロセスへのプラズマアークの適用が試みられるなど新しい芽ばえが起こつている。

本稿では、このような現状を含めて、プラズマアークを熱源とした金属の溶解プロセスの概要と開発の動向並びに将来性について簡単に述べることにする。なお、プラズマアーク溶解精錬造塊プロセスの詳細については、先に、本誌に技術資料として取りまとめて報告してある¹⁾。各国で開発が試みられた各プロセスの発展の経緯等については、既稿を参考にさせていただきたい。

2. プラズマアーク溶解プロセスの現状

プラズマアークが高温のアークであり、その作動ガスに各種のガス体を利用できることを考えれば、プラズマアークを金属の溶解精錬に適用することによつて、次のような可能性が生ずる。第 1 に、圧力と組成とを制御した調整雰囲気下における金属の高温溶解が可能となる。第 2 に、ガス、スラグを利用した金属の溶解精錬処理が可能になる。それ故に、高融点を有する金属・合金の溶解への利用、真空溶解しがたい蒸気圧の高い金属の溶解あるいは蒸気圧の高い元素を含有する金属・合金の溶解への利用、酸素、窒素、水素、炭素などと反応しやすい金属・合金の溶解への利用などが考えられた。更には、プラズマ放電によつて加熱されたガス体自身による金属の還元溶解への利用も試みられた。

現在、実用化されるか実用化が試みられているプラズマアーク溶解プロセスを大別すれば次のようになろう。

(1) マグネシアなどの耐火物ライニング溶解容器を用いる、製鋼用アーク炉プロセスと類似したプラズマアーク溶解プロセス [Plasma arc melting (=PAM) process]。

(2) プラズマアーク加熱と誘導加熱攪拌とを組み合わせたプラズマ誘導溶解プロセス [Plasma induction

昭和 57 年 3 月 8 日受付 (Received Mar. 8, 1982) (依頼展望)

* 大同特殊鋼(株) 工博 (Daido Steel Co., Ltd.)

*² 大同特殊鋼(株)中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho Minami-ku Nagoya 457)

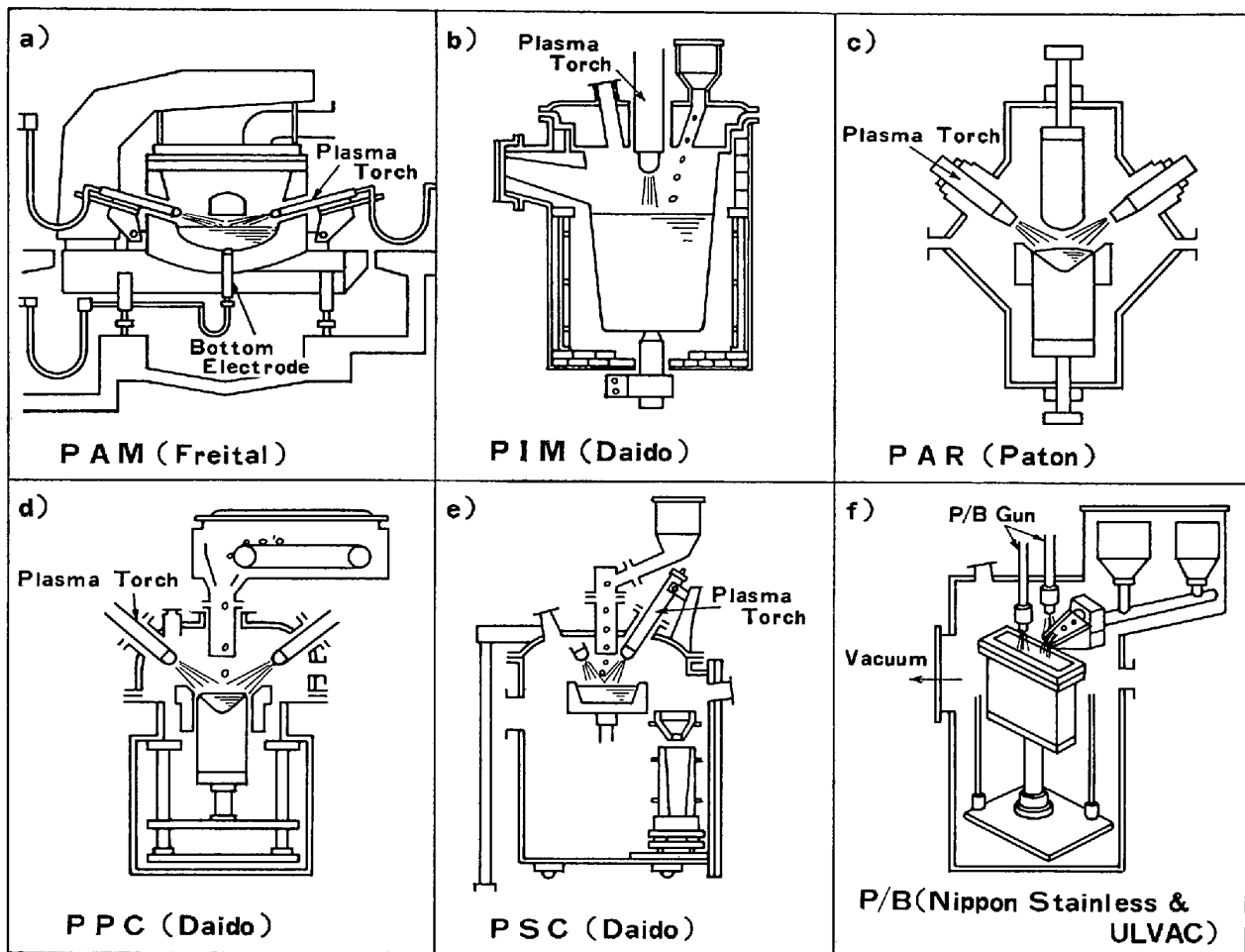


Fig. 1. Schemata of several plasma arc melting processes.

melting (=PIM) process].

(3) 水冷モールドによる積層凝固方式のプラズマアークの再溶解プロセス [Plasma arc remelting (=PAR) process].

(4) 水冷溶解容器を用いる高融点金属、活性金属などの特殊金属・合金の特殊な溶解精錬鑄造プロセス。

[ex. ・Plasma progressive casting (=PPC) process
 ・Vacuum plasma electron beam melting (=P/B) process
 ・Plasma skull casting (=PSC) process]

(5) 製鉄に関連するプラズマ還元溶解プロセス [Plasmasmelting process].

Fig. 1 に形式(1)~(4)のプラズマアーク溶解プロセスの概略図を示した。以下に個々のプロセスの現状について略述する。

2.1 PAM プロセス

このプロセスは、一般には、通常の製鋼用アーク炉の炉体に、黒鉛電極の代わりに非消耗のプラズマトーチを付け、アルゴン・プラズマアークを熱源として金属を溶解する。このプロセスの最初の工業化は、米国の Union Carbide Corp. の Linde 研究所で試みられ、その結果

が報告されたのは 1962 年であつた。その後、英国の British Oxygen Co. や English Steel Corp. の開発研究も行われたが、しかし、いずれも進展せず終わっている。その理由は明らかでないが、当時としては非常に高価なアルゴンの使用と長寿命大型トーチの開発が十分でなく、スケールアップによる経済的なメリットが望めなかつたためと推定される。

ソ連においては、鋼換算容量 20 kg の溶解装置により溶解容器の形状などの検討が行われ、その結果は 1971 年に報告された¹⁾。また、大型化の研究も実施され、1972 年には 5t 容量装置の設置も行われたようであるが²⁾³⁾、それらの詳細は明確にされていない。

東独においては、1960 年代から PAM プロセスの開発研究が開始され、20 kg、250 kg、3t 容量の溶解装置の開発を経て、VEB/Edelstahlwerk の Freital に 1971 年と 1977 年にそれぞれ、公称容量 10t、30t の大型 PAM 炉が各一基設置された。この両大型炉は、設置後に設備・操業の両面から改善が加えられ、現在では、公称容量をそれぞれ 15t、35t に増大して、構造用低合金鋼、ステンレス鋼、工具鋼などの量産特殊鋼を溶解対象として三交代制で操業されているようである³⁾。

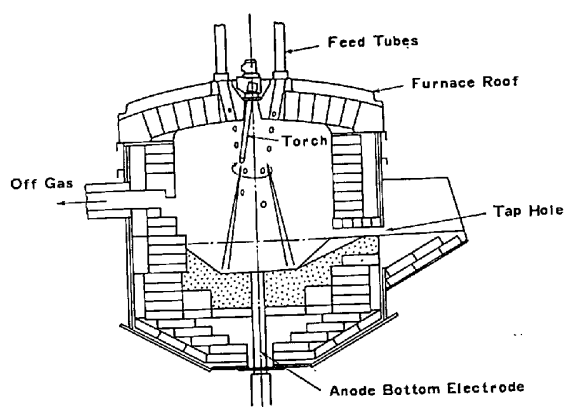


Fig. 2. The plasma arc melting furnace (Foster Wheeler Energy Ltd⁵⁾).

東独 Freital の公称 35 t PAM 炉は、Fig. 1 a) に示した構造を有し、側壁に 4 本の移送式直流プラズマトーチと炉底に銅製の水冷陽極を有している。マグネシアライニングの耐用回数は 150 溶解である。プラズマトーチの総出力は 20 MW であり、常時 3 本が利用されている³⁾⁴⁾。年間の生産量は 80 000 t 程度である³⁾。

最近、英国においても、再び PAM 炉の開発に挑戦する動きがみられる。英国の Reading にある Foster Wheeler Energy Ltd. は、英国 Faringdon の Tetro-nics R & D Ltd. の開発した移送式直流プラズマトーチを用いて、Fig. 2 に概略の構造を示した PAM 炉の実用化に取り組んでいる⁵⁾。現在の試験炉は、1.4 MW の直流プラズマトーチ 1 本が、炉頂中心に巡回構造で配備されている。溶解原料は、トーチ周囲からスクリーフイーダーで供給され、プラズマアークの囲りにカーテン状に落下し、炉の壁や天井のライニングをアークの輻射損失から保護する設計である。アークの作動ガスはアルゴンである。原料は、24 mm 径以下の小片にして供給される。アークからの溶湯への熱の移行は良好で、トーチの冷却熱や炉殻への移行熱によるエネルギー損失は約 8% にすぎず、切削油を含むドライ原料の場合、鋳鋼の再生が、鋼 t 当たり 500 kWh 程度の電力消費で可能という。この規模の炉としては非常に良好な電力原単位である。更に、15 MW の出力までのスケールアップを現在検討しているようであるが、果たして、このプロセスが、10~30 t 程度の大型炉まで開発が進行するかどうか興味もたれる。

また、最近、西独において、移送式交流プラズマトーチ 3 本を炉蓋に有する 3 t 容量の PAM 炉 (最大電圧 570 V, 最大出力 1.8 MVA) が Fried. Krupp GmbH, Krupp Forschungsinstitute によつて開発設置され、更に、同時に 10 t 容量の三相交流 PAM 炉 (出力 9 MV A) の開発計画も進行しているようであるが、それらの詳細は明らかにされていない。

2.2 PIM プロセス

PIM プロセスは、Fig. 1 b) に示すように移送式直流プラズマトーチによる Top heating に誘導加熱攪拌を付加して、効果的なスラグ精錬をねらつたプロセスであり、1960 年頃から日本で開発が進められた¹⁾。既に基礎的研究はほぼ完了し、1975 年 10 月以降 400 kW のプラズマトーチと 600 kW の誘導加熱攪拌 (周波数 150 Hz, 正転・逆転攪拌可能) 機能を有する容量 2 t の炉が稼動中である。2 t 炉は、現在、高品質を要求されるステンレス鋼, Ni 基・Co 基・Fe 基の各種超合金, Cu 合金, Mn 合金, パーマロイなどの電磁材料などの溶解に広範に活用されている。同炉によるステンレス鋼 2 000 kg 溶解時の諸原単位は、溶解時間 150~180 min, 精錬時間 60~90 min, 電力原単位 900~1 300 kWh/t, 熱効率約 30~45%, アルゴン原単位~10 Nm³/t 程度である。

ソ連においても、高周波誘導加熱とプラズマトーチ加熱とを併用した容器 30 kg の装置による基礎研究がなされており、1971 年に報告されているが¹⁾、その後の進展を示す報告はない。

2.3 PAR プロセス

プラズマアークを熱源とした水冷モールドを用いた連続鑄造方式による金属の再溶解プロセスの研究も、1960 年代から、チェコ、ソ連、日本などで実施された¹⁾。

Fig. 1 c) に、ソ連の Paton 研究所で開発した P A R 方式を示したが、ソ連には、この方式の装置として、交流移送式プラズマトーチ 6 本 (総出力 360 kW) を有する最大モールド径 250 mm で最大 450 kg の鋼を再溶解できる装置が設置されている。また、総出力 500 kW の直流移送式と総出力 1 800 kW の交流移送式の P A R 装置が、それぞれ、Paton 研究所によつて設計製作されているようである²⁾⁶⁾⁷⁾。ソ連においては、耐熱鋼, ステンレス鋼, 窒化鋼の再溶解が対象とされており²⁾、特に 4 気圧という高圧下での高 Ni-Cr 窒化鋼の製造研究が盛んである⁸⁾。しかし、操業データの報告はほとんどなされていない。

日本では、出力 150 kW の直流移送式 PAR 装置によつて軸受鋼, 工具鋼, Ni 基および Fe 基の超合金を溶製し、PAR プロセスの特徴を明らかにした⁹⁾。

その他、米国、西独、ベルギーなどでも PAR プロセスの開発研究が行われたが²⁾⁹⁾、その後の進展は報告されていない。

2.4 特殊なプラズマアーク溶解精錬鑄造プロセス

Ti のように酸素, 窒素, 水素, 炭素との反応性に富む活性金属は、酸化物系, カーボン系, 窒化物系いずれの耐火物とも反応するため、水冷銅モールドを用いて真空下でアーク溶解して、熱間加工に供しうる金属チタンインゴットを得るのが通常の製造法である。しかし、この方法は、スポンジ原料をブロック状にプレス成型し、

ブロック同志を溶接組み立てて自溶性電極とする必要があり、この電極の製造コストが大きく問題点となっている。

プラズマアークの特徴を活用して Ti などの活性金属を安価に製造するプロセスの開発が日本で進められている。Fig. 1d) に、大同特殊鋼(株)が開発した PPC プロセスの概略を示したが、このプロセスは、スポンジ原料もしくはスクラップ原料を連続的に水冷モールド内に装入し、プラズマアーク加熱によつて溶解しつつ生成するメタルプールの上面をモールド内の所定の高さに保持しながら、モールド内に生成した鋳塊を順次下方に引き下げ、再溶解用電極もしくは直接熱間加工に供しうるインゴットを製造する方法である¹⁰⁾。

大同特殊鋼は、更に、Fig. 1e) に示したプラズマアークを熱源とする傾注可能な水冷モールドを用いるスカル炉形式の PSC プロセスを開発し、Ti, Cr, Mn などの金属・合金が溶解できることを示した^{11)~13)}。

また、真空下の熱陰極放電を利用した Ti の溶解プロセスが、日本ステンレス(株)と日本真空技術(株)との共同で開発されている¹⁴⁾。これは、中空熱陰極放電によるプラズマ電子ビームにより溶解を行うものであり、Fig. 1f) に示したごとく Gun を多数配置した溢流溶解方式である¹⁾。現在、総出力 2400 kW (6 gun) の装置により、スポンジチタンから直接 3 t のスラグインゴットが製造されている。このプロセスは、電力消費が大きいいため、Ti の溶解に限つて用いられているようであり、プラズマ電子ビームを特殊鋼などの溶解に適用した結果は発表されていない。

2.5 製鉄分野におけるプラズマアークの利用

鉄鉱石の還元でプラズマアークを熱源として利用しようという試みは、1960年代中頃から行われている。しかし、実際に鉄鉱石から溶鉄を製造するプロセスにプラズマアークを熱源として利用した開発研究が、米国の Bethlehem Steel Corp. で実施されたのは 1970年代になつてからである。Bethlehem Steel Corp. は、出力 100 kW の試験装置による研究結果を踏まえて、総出力 1 MW の直流プラズマアーク加熱装置に、鉱石、天然ガス、水素を供給して直接溶鉄を得る開発研究を行った。その結果として、プラズマ作動ガスとして 67% 水素-33% 天然ガスの混合ガスを用いることにより、低硫黄、低燐のヘマタイト鉱石から、0.006%C の溶鉄を 1 h 当たり 320 kg の速度で製造することができて、その場合の電力消費量は溶鉄 1 kg 当たり 2.65 kWh であり、熱効率は 84% 程度であると報告している¹⁵⁾。しかし、その後の進展はないようである。

最近、スウェーデンの SKF Steel Engineering AB は、米国 Westinghouse Electric Corp. の開発した非移送式プラズマトーチを用いて、従来の製鉄プロセスへのプラズマアーク加熱の利用を試みている。この製鉄プ

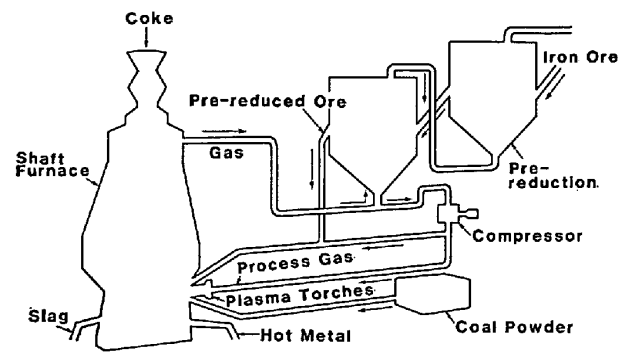


Fig. 3. The scheme of plasmasmelt process (SKF).

ロセスは、Plasmasmelt process と呼ばれている^{16)~18)}。このプロセスは、概略を Fig. 3 に示すごとく、シャフト炉内をコークスで満たし、予備還元した鉱石精鉱を、造滓材と主として石炭からなる還元材と共に、シャフト炉内へ吹き込み還元溶融して溶鉄を得るプロセスである。

このプロセスに要する熱エネルギーは、プラズマトーチ内でアーク加熱された還元ガスによつて供給される。プラズマトーチ内の還元ガス温度は 3000~5000°C である。シャフト炉内に吹き込まれた還元ガスは、鉱石の還元溶融に供され吸熱反応により急激に 1700~2000°C に低下する。更に、シャフト炉を上昇して行く過程で上昇ガス中の CO₂ と H₂O は、シャフト炉内のコークスカーボンで還元される。主として CO と H₂ とからなる炉頂ガスは、1000~1200°C でシャフト炉から流出し、鉱石の予備還元に供するために 800°C まで冷却される。そのガスの一部が圧縮され、プラズマアーク作動ガスと造滓材や還元材の搬送吹き込みガスとして利用される。本プロセスにおける予備還元率は 50~60% と想定されている。

SKF の Hofors の 0.4 MW, 1.5 MW のパイロットプラントによる試験では、最終工程であるシャフト炉内の還元試験のみの結果であるが、還元度 50% のスポンジ状酸化鉄を炉内に供給し、プラズマアーク加熱したガスにより溶鉄が得られることを報告している¹⁷⁾。

更に、パイロットプラントにおける試験結果に基づいて Plasmasmelt process による溶鉄製造コストの試算を行い、Table 1 に示すごとく、年産 250000t のプラントによる溶鉄製造が年産 2000000t の溶鉄炉プロセスよりも有利であると主張している¹⁸⁾。

また、ベルギーの Seraing の Cockerill Steel Corp. においては、日産 500t の溶鉄炉に 3500 kW のプラズマトーチを Fig. 4 に示すごとく羽根部にとりつけ、600~800 Nm³/h の天然ガスを過熱して吹き込み溶鉄炉の生産性向上を試みているようであるが、その詳細は明らかでない¹⁸⁾。

Table 1. The economic comparison between plasmasmelt and blast furnace processes for ironmaking [after ref. 18].

	Plasmasmelt process 250,000 ton /year			Blast furnace process 2,000,000 ton /year		
	Amount	Price (US\$)	US\$/ton	Amount	Price (US\$)	US\$/ton
Ore concentrated/sintered ton	1.55	24	37.2	1.60	34.8	55.6
Coal ton	0.20	72	14.4	—	—	—
Coke ton	0.05	150	7.4	0.51	150	76.5
Electricity kWh	1120	0.035	38.8	75	0.035	2.6
Slag formers			2.4			2.4
Wages			7.2			3.4
Maintenance			8.4			6.0
Miscellaneous			4.8			2.9
Desulfurization			—			3.6
Capital cost	(15% of US\$ 153)		23.0	(15% of US\$ 168)		25.2
Total			143.6			178.2

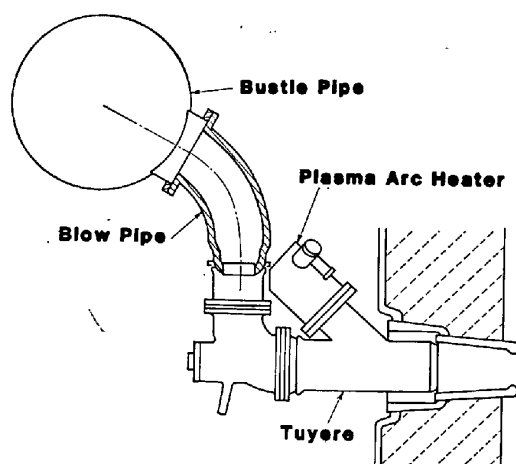


Fig. 4. The modified tuyere for plasma arc heating (Cockerill¹⁸⁾).

3. プラズマアーク溶解プロセスの将来性

第2章に示したごとく、東欧圏だけでなく、自由経済圏でも、プラズマアーク加熱を特殊溶解の分野だけでなく大量生産の象徴ともいべき溶鉄製造の分野にまで利用しようとする動向がみられる。

電力価格の高い日本においては考え難い溶鉄製造への適用が試みられている背景をみると、プラズマアークを熱源とする利点として、環境汚染が少なく初期設備投資が小さいこと、小容量プラントでも操業コストが小さいこと、既存の溶鉄炉に適用できることなどを上げてはいるが、その根底には将来の資源・エネルギー問題が存在している。

第1に資源的には、製鉄用コークスの入手が将来困難になることが上げられている。例えば、米国の場合、1985年には約11百万tもの不足が見込まれている¹⁹⁾。Plasmasmelt プロセスによれば、Table 1に示されているように、石炭で供給される炭素分を考慮しても、コークス比が溶鉄炉プロセスの半分以下になると推定されている。

第2にエネルギー的には、石油、天然ガス、石炭などのいわゆる化石燃料は枯渇の一途をたどり、それらの価格は上昇を続けると予想されている。それに対して、プラズマアークのエネルギーである電気の価格がどのように変化するか予想は非常に難しいが、原子力、地熱発電、その他の開発途上技術による発電により、その上昇の度合は化石系燃料に比較して緩やかであるという考えもある。例えば、米国では、Fig. 5に示すごとく電気価格の化石系燃料価格に対する比率は2倍程度に将来になると予想されている¹⁸⁾。

確かに、日本においても、Fig. 6に示すごとく、1973年の第1次オイルショック以降の原油価格(CIF)並びに大口電力料金(電力9社の平均料金)は、1973年対比で1980年において石油価格が8倍になったのに対して電力料金は4倍と緩やかな傾向を示している²⁰⁾²¹⁾。

電気をを用いるプラズマアークプロセスは、確かに、通常の燃焼プロセスに比較して、システム制御が容易であり、熱エネルギーへの変換効率も優れてはいる。しかし、将来のエネルギー問題は、周知のごとく国際情勢や国のエネルギー政策の変化に伴って大きく変化する要素を秘めており、いずれの予想が正鵠を得るかはわからない。

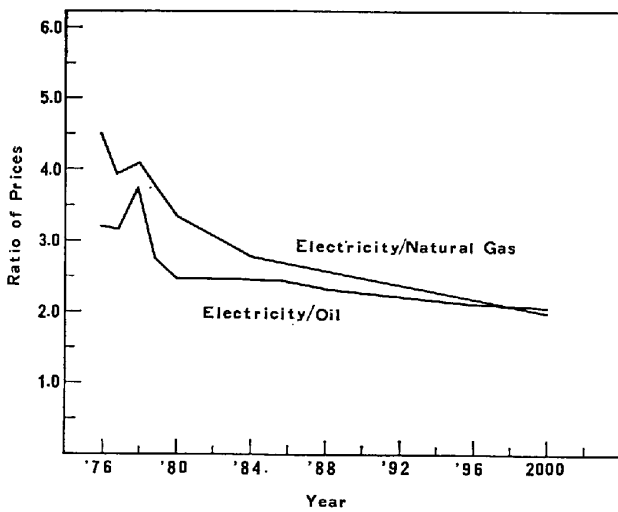


Fig. 5. The trend in energy costs for production (U.S.A.).

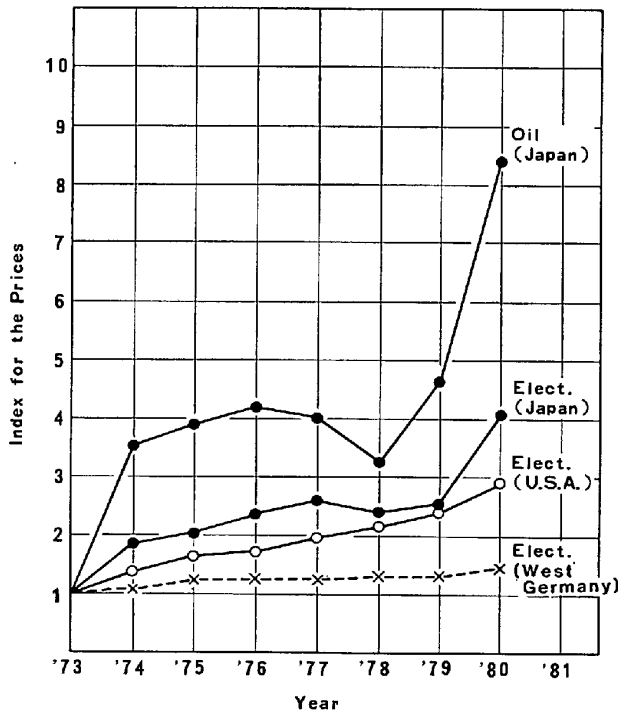


Fig. 6. Changes of electricity and oil prices for production.

また、スウェーデンのように、発電比率がオイルショック前 1972 年で水力 75%、原子力 2%、火力 23%、1978 年では水力 62%、原子力 26%、火力 12% と化石系燃料発電の比率が極端に低い国と²²⁾、日本のようにいまだ 70% が火力発電に依存している国とでは、おのずから立場が異なる。化石系燃料の価格上昇が急であるからといって、プラズマアーク加熱主体の製鉄プロセスが北欧、西欧と同様に有利になるとはいえない。日本の溶鉱炉製鉄にとっては、ベルギーの Cockerill Steel Corp. で実施されている助燃操業の形が一つのヒントであろう。

溶鉄プロセスにかぎらずプラズマアークを熱源とする金属の溶解プロセスは、いずれも上述した将来のエネルギー問題と関連しており、その将来性を経済の観点から定量的に論ずることは非常に困難である。

以下に、実用化されているプラズマアーク溶解プロセスについて、プラズマアークによらない他の溶解プロセスと比較しながら、主として技術面から定性的に将来性を簡単に述べてみたい。

3.1 PAM プロセス

東独の PAM 炉の利点として、通常の製鋼用アーク炉に比して、スクラップ中の有価金属の回収歩留りが良好なこと、プラズマアークが安定であり、更に密閉型の炉であるため大気汚染と騒音とが少なく、特に炉周辺の騒音が 80 dB と小さいこと、非消耗電極であるために極低炭素鋼の溶製に好都合であることが上げられている²³⁾。しかし、操業データ並びに経済指標データの公表が少なく、現在の黒鉛電極の製鋼用アーク炉との比較評価は非常に難しい。

Table 2 に、東独の 35 t PAM 炉とそれに対応する容量の国内アーク炉の操業データの対比を示す。

公表されている東独 35 t PAM 炉の生産性ならびに電力原単位は非常に良好であり²³⁾、国内の High power クラスのアーク炉のそれらに匹敵するようにみえる。しかし、42CrMo4 (JIS-SCM 440 相当) の溶解例では、出鋼量 36.3 t、溶け落ちまでの所要時間 115 min、全溶解時間 195 min、電力原単位 540 kWh/t、アルゴン原単位 4 Nm³/t 程度が実際のものである²³⁾。35 t PAM 炉の出鋼から再送電までの平均所要時間が不明であり、Tap to tap 時間基準の正確な比較ができないが、Table 2 に示したアーク炉の Tap to tap 時間は 140 min、出鋼から再送電までの平均所要時間 10 min 程度であることを考慮して、送電から出鋼までの全溶解時間基準で比較すると生産性は PAM 炉 11.2 t/h、アーク炉 16.0 t/h となる。ここに示したアーク炉のデータは、取鍋精錬などの炉外精錬プロセスと連続操業しないアーク炉のみで構造用低合金鋼を溶製した場合の平均的値を示したものである。この生産性の比較からみれば、日本における PAM 炉の設置は、現状では考えにくい。

しかし、日本のアーク炉製鋼の将来を考えた場合、PAM 炉の非消耗電極の魅力は留意しておく必要がある。現在、日本の 70~80 t 容量クラスの大型 Ultra high power 炉では、電力原単位 400 kWh/t を切りつつあり、既に極限に近い状態にある。このような状態で、黒鉛電極の 4.0~4.5 kg/t 程度の消耗は無視し難い。Fig. 7 に日本および米国の黒鉛電極のオイルショック以降の価格の変化を示したが、1973 年に比較して電極価格も電力料金と同様に 3.5 倍と値上がりしている。現在、アーク炉製鋼コストに占める電極費は、溶解電力費の約 1/3 程度と大きい。

Table 2. Contrast between PAM and EF processes.

	P A M	E F
Actual melting capacity ton	35~36	36
Electric input (Max.)	20,000kW (D.C.)	19,000kVA (A.C.)
Secondary voltage V	150~700	106~330
Secondary current (Max.) A	10,000/torch	33,200 (3 phase)
Operating current A	9,000/torch	27,700 (3 phase)
Number of electrodes	3(4 equipped)	3
Productivity t/h	20 (from power on to meltdown)	15 (from tap to tap)
Electric power consumption kWh/t	500 (from power on to meltdown)	480~500 (from tap to tap)
Argon consumption Nm ³ /h	45	—
Graphite electrode consumption kg/t	—	4.5
Torch life h	30	—

[Figures for PAM are after ref.3]

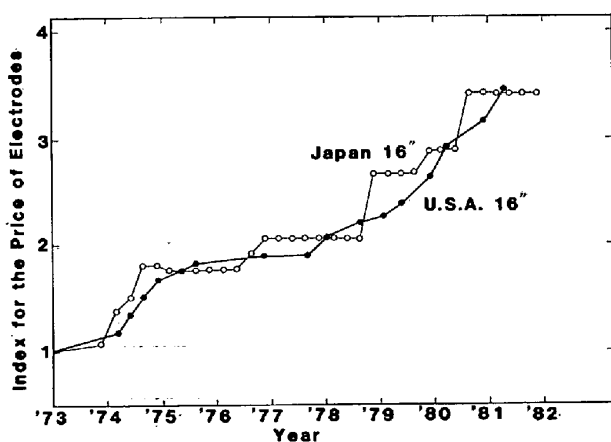


Fig. 7. Drifts of electrode prices in Japan and U.S.A.

一方PAMプロセスで大量に使用するアルゴンの価格は、酸素転炉の普及に伴う酸素副産アルゴン量の増大もあり、過去10年間ほとんど変動していない。PAMプロセスの鋼t当たりのアルゴン費は、日本のアルゴン価格では、アーク炉における黒鉛電極費の約1/2にすぎない。

今後のアルゴン価格の推移については予断を許さないものがあるが、日本のステンレス鋼の現在の主要な溶製技術であるAODプロセスの稼動状況からみて、アルゴンを大量に使用する溶解法はもはや特殊なプロセスとはいえない時代になりつつある。このような観点に立てば、技術改善により、PAMプロセスの生産性が電力原

単位、炉用耐火物原単位と共にアーク炉プロセス程度に向上し、日本の量産特殊鋼製造において一般に行われているアーク炉と炉外精錬との複合操業によつて得られている材質が、PAMプロセスのみで得られるようになれば、PAMプロセスが有利になる状況も考えられる。

しかし、なによりも、プラズマトーチの寿命延長が当面重要である。現在の東独炉に使用されている大出力トーチの寿命は30hと公表されているが、陰極が完全に溶損することを避け、補修、交換を容易にするためと思うが、それにしても短寿命である。少なくとも1週間程度の連続使用に耐えるトーチの開発が、能率的な操業を行う上で必要であろう。

3.2 PIM プロセス

PIMプロセスは、真空誘導炉(VIM)プロセスに対応する溶解法として開発された。Table 3に、鋼換算で2t程度の容量炉を想定した場合の両プロセスの定性的比較を示した。

PIMプロセスは、大気圧下の調整雰囲気溶解が特徴である。従つて、原料の装入が容易であり、测温、サンプリング、造滓材の添加などの作業が簡易で、操業面で有利である。また、溶湯表面のアーク加熱も本プロセスの特徴で、誘導加熱攪拌とあいまつて、スラグ精錬が迅速かつ十分に実施できる。従つて、熔融金属の脱酸・脱硫が容易で、低酸素低硫黄の金属が、より安価な原料から溶製できる。

これに対して、VIMプロセスは、スラグ精錬やガス精錬を行わないのが通例であり、高炭素鋼でも脱硫は余

Table 3. Merits and demerits of VIM process and PIM process.

	V I M	Judg- ment	P I M
Heat source	High-or commercial frequency induction		Combination of plasma arc and induction
Operating pressure	10^{-3} ~760mmHg	>	760mmHg
Crucible	MgO etc.	=	MgO etc.
Raw material	Scraps graded and shaped	<	Various materials
Control of chemical comp.	Possible	<	Easy and effective
Control of bath temp.	Possible	<	Easy and effective
Slag refining	Possible but difficult	<	Easy and effective
Power consumption	~0.8-1.5 kWh/kg	=	~0.9-1.3 kWh/kg
Surface quality of ingot	Good	=	Good
Yield in billeting	Low due to cropping top of ingot	<	High with less cropping
Mn recovery	Low due to evaporation loss	<	High up to 98-100%
Al, Ti recovery	Excellent	>	Good
Desulphurization	Difficult	<	Ready to reduce S below 0.005%
Capital cost	High	<	Low

Table 4. Comparison of various remelting processes.

	V A R	E S R	E B R	P A R
Heat source	Arc	Mainly resistance	Electron beam	Plasma arc
Imposed current	D.C.	A.C. (D.C.)	D.C.	D.C. (A.C.)
Power consumption	1 kWh/kg	1.5 kWh/kg	1 to 2 kWh/kg	1 to 2 kWh/kg
Capital cost	Lower than EBR	Lowest	Highest	Lower than VAR
Addition of alloying elements	Impossible	Possible	Impossible	Possible
Melting rate control	Difficult	Difficult	Easy	Easy
Bath temp. control	Difficult	Possible but difficult	Easy	Easy
Operating pressure	10^{-2} - 10^{-3} mmHg	760~10mmHg	10^{-4} - 10^{-5} mmHg	760~ 10^{-2} mmHg
Slag refining	Impossible	Most effective	Impossible	Possible
Melting of high Mn or N alloys	Difficult	Possible	Impossible	Possible
Melting of Al, Ti bearing alloys	Possible	Difficult	Difficult	Possible
Yield	Good	Better than VAR	Less than VAR	Better than VAR
Ingot surface quality	Not good	Excellent	Good	Good
Solidification process	Progressive	Progressive	Progressive	Progressive
Reduction of oxygen	Very effective	Effective	Very effective	Effective
"nitrogen and hydrogen	Some	None	Some	A little
"oxide inclusions	Some	Some	Some	Some
"sulphide inclusions	No	Considerable	Considerable	A little

り期待できない。また、通常インゴットの押湯部がより大きく、押湯部切り捨てによる歩留り減少が大である。しかし、熔融金属を直接減圧下で長時間処理できるので、脱水素、脱窒素の面では有利である。

PIM プロセスの今後を考えると、プラズマアークの熱効率向上、アルゴン使用量の低減などの改善努力は今後共続ける必要はあるが、スラグ精錬とガス精錬が容易で安価なスクラップを多量に利用できる、高級金属材料の有利な製造プロセスとして活用されることが期待され

る。また、VIM+VAR (真空アーク再溶解) のごとき複合プロセスにおいては、VIM プロセスにとつて代わることができると考えられる。

しかし、特殊鋼溶解における炉外精錬技術とりわけ交流アーク加熱・ガス攪拌方式の取鍋精錬技術の著しい発展に伴い、量産特殊鋼生産分野における PIM プロセスの必要性は少なくなっている。従つて、PIM プロセスの規模は、高級高品質材料を溶製するに適当な数 t 容量に留まると予想される。

3.3 PAR プロセス

超合金や高級高品質鋼の再溶解に用いられている PAR プロセスは、従来からある真空アーク再溶解 (VAR), エレクトロスラグ再溶解 (ESR) に対応するプロセスである。また、東独で盛んに大型化が試みられているエレクトロンビーム再溶解 (EBR) プロセス¹⁾ にも対応すると考えられる。

VAR, ESR は、自溶性電極による加熱方式であるのに対して、PAR と EBR は、非消耗のトーチもしくは電子銃による加熱方式である。

これらのプロセスの定性的な比較を、各再溶解プロセスにおいて共通の設備諸元の1つと考えられる水冷モールド径が 300 mm 程度の装置を想定して Table 4 に示した。PAR は高圧雰囲気下の再溶解が可能な装置もあるが、この場合は、常圧以下で操業する装置を比較の対象とした。

PAR プロセスは、第1に、ガス雰囲気下もしくは減圧下での操業が可能である。従つて、溶解雰囲気組成と圧力とを調整することにより、VAR, ESR, EBR の各プロセスでは変動しやすい Mn, Cu, N, Al, Ti などの元素を多く含む金属材料の再溶解に適している。第2に、プラズマアーク出力と再溶解速度とをそれぞれ独立に制御できるため、インゴットの凝固コントロールを幅広く行うことができる。従つて、偏析のない熱間加工の良好なしかも皮削量や頭部切り捨て量の少ないインゴットが得られる。第3に、設備費が EBR, VAR プロセスより少なくすみ大型化が容易である。

それ故に、VAR や ESR プロセスよりも凝固組織の優れた大型インゴットが安価に得られる。将来、難熱間加工材の量産化に適したプロセスとしての発展が期待できる。

3.4 その他のプロセス

プラズマアークは、既述のように各種の形式の溶解精錬装置に広く適用できる。従つて、溶解対象である金属材料の原料形態、物理化学的性質、要求される成品の形態と品質特性などに応じて、溶解精錬装置の形式を適切に選定すれば、従来の溶解技術では製造が困難であるため、工業的に利用されないでいる特殊な性質を有する金属材料の溶製プロセスが開発される可能性がある。その例として、2.4 節で触れた PSC プロセスによる Cr, Mn などの溶解がある。

また、プラズマアークにより、スポンジ状、塊状、チップ状の原料の溶解が可能であり、Ti, Ti 合金と同様に、現在、スクラップの再生が問題になりつつある Zr, Nb などの特殊な金属材料の溶解への適用が、将来大いに期待される。

もちろん、溶融金属の温度制御のための熱源としての利用、例えば、取鍋や連続鑄造用タンデッシュにおける溶鋼の温度コントロールへの適用²⁴⁾などは当然考慮され

よう。

更に、プラズマアークは、金属のみならずセメントや耐火物などの溶解にも利用できるもので、特殊な利用として、導電性のないセメントなどの夾雑物を含有する産業廃棄物の溶解減容積処理にも適用されよう²⁵⁾。

このように、プラズマアークは、単に金属にかぎらず広範囲の物質を Closed system で溶解処理する制御しやすいプロセスとして幅広く利用できる可能性がある。

4. プラズマアーク溶解プロセスの問題点

上述のごとく金属の溶解精錬へのプラズマアークの適用は、多くの特徴あるプロセスあるいは金属材料を生み出す可能性を有し、その将来が期待される。しかし、それらを現実とするためには、解決を要する問題点もまた多い。その主な点について以下に簡単に述べる。

第1の問題点として大出力で寿命の長いプラズマトーチの開発がある。プラズマトーチは、アークの発生方式から移送式と非移送式に大別されているが、金属の溶解には、熱効率の観点から溶解する金属を対極とする移送式トーチが用いられる場合が多い¹⁾。

現在日本でも、アルゴン拘束直流移送式プラズマトーチとして出力 1 MW 程度の長寿命大型トーチが既に開発されている²⁶⁾。また、米国の Westinghouse Corp. においては、ガス加熱のための非移送式の 3 MW 程度の直流もしくは交流の管状プラズマトーチが開発されている¹⁶⁾¹⁸⁾。しかし、3.1 節でも触れたように、大型 PAM 炉の安定操業には、1 週間程度の連続使用に耐える 5 MW 以上の超大出力トーチの開発が必要である。これは、今後のプラズマアーク溶解の発展のために解決すべき最も難しい問題である。

第2の問題として、プラズマアークの高温を効果的に被加熱体に伝達し溶解精錬を行うために、溶解装置の設計とトーチ操作技術を含めた溶解精錬操業技術の最適化の問題がある。移送式直流プラズマトーチは、アークの安定が良いためトーチ内に陰極を有する正極性方式が通常採用されており、その場合のアーク特性として最高温度はトーチ側にある。また、プラズマアークの熱効率は、トーチの構造、作動ガスの種類や量、アークの長さ、被加熱物の種類や形状、トーチの配置と溶解装置の構造とによつて大きく左右される¹⁾。従つて効率的な溶解を行うには、装置の構造設計と溶解時のトーチ操作によるアークの形状コントロールに留意する必要がある。これらに関する基礎研究並びに試験装置における経験の蓄積は今後の課題であろう。

5. 結 言

以上、プラズマアーク溶解の現状と将来性について概略の展望を述べた。プラズマアーク溶解は、現在、高品質鋼、超合金、電磁材料、特殊金属合金材料などの生産

に現実利用されている。しかし、その工業的応用は、世界的にみてもまだ緒についたばかりであり、今後ますます開発研究を進める必要がある。熱源としてのプラズマアークの利用分野は、単に金属材料の溶解のみならず各種のセラミックスの合成と溶解、あるいはそれらの超微粉末の製造など限りなく広い。これらの製造技術の発展のためにも各種のプラズマアーク発生装置の開発と改善とが切に望まれる。

本稿の執筆に当たり、大同特殊鋼(株)高蔵製作所稲垣悦郎、平竹進の両氏ならびに同中央研究所杉浦三郎、山田博之の両氏に協力を得た。ここに感謝の意を表するものである。

文 献

- 1) 梶山太郎, 小野清雄: 鉄と鋼, 63 (1977) 13, p. 2010
- 2) N. N. RIKALIN: Proceedings of 9th International Congress of UIE, VB 3, Oct. (1980), Cannes
- 3) G. SCHARF, K. SKUIN, W. SCHLAGER, and W. LUGSCHEIDER: Proceedings of 9th International Congress of UIE, II B4, Oct. (1980), Cannes
- 4) G. SCHARF and H. JAHN: Neue Hütte, 25 (1980) 12, S 479
- 5) J. R. MONK: Proceedings of 5th International Symposium on Plasma Chemistry, Aug. (1981), Edinburgh, Scotland, 1, p. 162
- 6) E. O. PATON: Welding Institute, USSR, Academy of Science: Plasma arc remelting (in USSR), (1976)
- 7) Licensintorg Moskva-SSSR: Plasma-Arc Remelting of Metals & Alloys in Water-Cooled Copper Crystallizer, (1973)
- 8) G. F. YORKHOV, Yu. V. LATASH, R. R. FESSLER, A. H. CLAER, E. E. FLETCHER, and A. L. HOFFMANN: J. of Metals, Dec. (1978), p. 20
- 9) 藤原達雄, 加藤剛志, 小野清雄, 山田博之: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 2224
- 10) T. FUJIWARA, K. KATO, K. ONO, and H. YAMADA: Proceedings of 6th International Vacuum Metallurgy Conference on Special Melting & Metallurgical Coatings, Apr. 23~27, (1979), San Diego, California, p. 473
- 11) 藤原達雄, 小野清雄, 山田博之, 清水孝純: 日本金属学会一般講演概要集, Apr. (1981) 481, p. 270
- 12) 小野清雄, 山田博之: 日本特許第 1077059 号 (1981), 12, 25
- 14) 小野清雄, 山田博之: 日本公開特許公報, 特開昭 55-21510 C22C (1980), 2, 15
- 14) Y. KOTANI, K. MURASE, F. SHIMIZU, T. SUZUKI, and T. YAMAMOTO: Extended Abstracts of 4th International Conference on Titanium, May 19~22, (1980), Kyoto, Section X-A, No. 4
- 15) R. G. GOLD, W. R. SANDALL, P. G. CHEPLICK, and D. R. MACRAE: Ironmaking and Steelmaking, (1977) 1, p. 10
- 16) Industrial Heating, Oct. (1980), p. 29
- 17) Metals and Materials, Mar. (1981), p. 27
- 18) M. G. FEY, W. J. MELILL, and T. M. MEYER: Preprint for the 5th International Industrial Seminar on Pilot Plant Experience-Melting and Processing Technology, Sept. (1981), Amelia Island, Florida
- 19) W. T. HOGAN: "Analysis of the U. S. Metallurgical Coke Industry" Industrial Economics Research Institute, Fordham University. Oct. (1979)
- 20) 電気事業連合会統計委員会: 電気事業便覧 [日本電気協会]
- 21) 日本石油連盟: 石油資料月報
- 22) 海外電力調査会: 海外電気事業統計
- 23) 私信
- 24) 江口 勇, 平竹 進: 日本公開特許公報, 昭 53-83932, B 22D (1978) 7, 24
- 25) 足立敏夫, 熊田 賦, 平竹 進, 尾崎 誠: 日本公開特許公報, 昭 56-64699, G 21 F (1981) 6, 1
- 26) C. ASADA, I. EGUCHI, and T. ADACHI: Proceedings of 7th International Electro-Heat Congress, Warschau (1972), N. 123