技術資料

UDC 669.187.26:533.9:669.15'295

積層凝固式プラズマチタン溶解炉(PPC-F)

平竹 進*, 中西洋一*, 山田博之**, 吉田浩二**

Plasma Progressive Casting Furnace (PPC-F) for Titanium Melting

Susumu Hiratake, Youichi Nakanishi,
Hiroyuki Yamada and Kouji Yoshida

Synopsis

An industrial scale new melting process, named Plasma Progressive Casting Furnace (PPC-F) was designed and constructed by Daido Steel Co., in Daido's Hoshizaki Plant. This process is suitable for making a titanium primary ingot (VAR electrode) directly from grain sponge and/or various shapes of scraps without requirement for compaction and electrode fabrication. The furnace has six plasma torches circling around the water cooled crucible. Plasma arcs are controlled by magnetic field which also makes molten pool rotate. Materials are fed and melted continuously and solidified ingot is withdrawn progressively.

This process has a distinctive advantage of efficient utilization of small sized scraps which is difficult to remelt in usual VAR process and a high reduction of the melting cost is accordingly expected.

1. ま え が き

チタンおよびその合金は比強度が高く、また耐食性に優れているため航空機をはじめ、化学装置、原子力や火力の発電設備の構造物に大幅に使用されるようになった。

一方チタンは融点が高く、酸素や窒素などとの親和力が強く、また耐火物とも反応しやすいためその鋳塊製造には、真空あるいは不活性ガス雰囲気下における水冷るつば内での溶解鋳造が不可欠である。従来その工業的溶解法は、消耗電極式真

空アーク溶解(VA溶解)による多重溶解が代表であった。棒状原料を一方の電極として真空アーク溶解し、水冷鋳型内に積層凝固鋳塊を得るこの方法は、原料を棒状電極に成形するためのスポンジチタンのプレスとその溶接積み重ねという複雑かつ大掛りな工程が必要で、しかも各種製品の加工工程で発生するスクラップの利用がわずかしかなできないという欠点があった。

大同特殊鋼㈱(以下当社という)では、昭和36年以来高温の熱源としてプラズマアークの利用を研究し、昭和41年には、高合金鋼を溶解するプラズマ誘導炉¹⁾を開発して溶解への応用を果たした。次いで、このプラズマアークをチタン溶解に用いる研究を重ね、従来のチタン溶解の欠点を解消するプラズマ積層凝固式溶解(PPC溶解)を開発し、

昭和58年8月30日 受付

*大同特殊鋼㈱機械事業部

**大同特殊鋼㈱中央研究所

昨年8月には直径435mm(2t)のチタン鑄塊を製造できる本格的な大型PPC炉を当社星崎工場に設置した。以下にPPC溶解の特徴と大型PPC炉の概要を述べる。

2. プラズマアーク溶解

2.1 プラズマアーク

プラズマアークは、電極間に生じるアークをガス流でその周囲を覆い、熱ピンチと磁気ピンチの作用で収縮させ温度を高めたものである。実際には、その発生は水冷タングステン棒を陰極とし、これを絶縁された水冷銅ノズルで囲み、その隙間に作動ガスを流してノズルの穴から噴出させるようにしたプラズマトーチを用いる。

溶解用トーチは、この原理をもとに給電、給気、給排水を工夫し、炉内の厳しい環境に耐え安定でパワフルなプラズマアークを発生するように設計されるもので、次の特徴をもつ。

- (1) 12000℃の超高温を発生。
- (2) 指向性よく被熱物に向い、アーク長や雰囲気気圧の変化に対し安定。
- (3) 不活性のアルゴンガスで作動。
- (4) 出力の微調整が容易。
- (5) ソフトなプラズマアークが発生され、被熱物の飛散や騒音が少ない。
- (6) 大電流で所望の出力を発生し熱伝達が良い。

2.2 PPC溶解の特徴

PPC溶解は、特にチタンなどの活性金属やその合金の溶解用に開発された技術で、水冷るつぼに連続的に装入される原料をプラズマアークにより溶解し、同時にるつぼの底を引下げることにより、積層凝固した鑄塊を得るようにした連続溶解鑄造プロセスである。Fig. 1にその断面図を示す。

非消耗のプラズマトーチ、水冷金属容器、アルゴン大気圧雰囲気とのユニークな組み合わせにより、PPC溶解では、次の特徴が発揮される。

- (1) 原料を汚染なく溶解鑄造できる。
- (2) 原料や合金成分の蒸発による損失や変動がない。
- (3) Tiをはじめ、Zr, Cr, Nbなど高融点材料の溶解が可能。
- (4) 多種形状の原料がそのまま利用でき、また精錬用スラグの添加も可能。

Fig. 1. Schematic cross section of industrial scale PPC-F.

- (5) パワーの調整が自由で、溶解条件や凝固条件の設定が任意に可能。
- (6) 均一な加熱が得られ、溶湯を浅く保持でき、良好な積層凝固が可能。

3. PPC炉開発経緯

PPC炉の研究は、昭和47年の直径110mm、重さ25kgの鑄塊を溶製する1本トーチのPPC炉試作に始まる。次いで昭和54年には直径200mm、重さ50kgの鑄塊を溶製する3本トーチの炉を試作し、これらを用い純チタンやTi-6Al-4Vなどの合金鑄塊製造試験を行った。パージン原料(スポンジチタン、添加合金など)をはじめ、線材、板切れ、ダライなどの各種スクラップを原料として溶解し、得られた鑄塊やさらにVA再溶解した鑄塊について詳細な調査を行った²⁾。その結果、

- (1) PPC溶解は、100%スクラップでも溶解可能。
- (2) 不純物の増加はない。

(3) PPC 溶解では低速溶解，高速溶解が自由で，十分緻密な VA 用電極が得られる。

(4) PPC 溶解ではスポンジに含まれる塩化マグネシウムが除去され，VA 溶解が通常より安定かつ容易。

(5) その二次鑄塊は，VA 2 回以上溶解材と同等の外観，組成，清浄度，偏析度，機械的性質を示す。

などのことが分かり，PPC 一次溶解+VA 再溶解というプロセスが，優れた品質の鑄塊をより経済的に製造するとの結論を得た。Table 1 に，鑄塊品質の代表例を示す。

4. 大型 PPC 炉

Photo. 1 に，昭和57年 8 月に設置した大型 PPC 炉の外観と溶解状況を示す。本炉は，PPC+VA 溶解法における一次鑄塊生産用の本格的実用炉である。

4.1 設計上の留意点

設計にあたっては，前述の PPC 溶解の特徴が最大限に生かされることはもちろん，生産性，安全性，操作性，保守性の面も十分留意し次の特徴をもたせた。

(a)

(1) 原料添加，溶解，鑄造いずれも真空容器と同じ気密構造の中で行われる。

(2) 真空排気により雰囲気気を完全にアルゴンガスに置換できる。

(3) 2 台のフィーダにより外部からバージン材やスクラップを連続的に円滑に供給できる。

(4) 原料通路は広く，しかも原料をるつぼ中心にソフトに添加できる。

(5) プラズマアークはるつぼ上のまわりを自動旋回し，攪拌コイルの効果も加わり一層広範囲に加熱する。

(6) アークの発生・停止にトーチ昇降操作は不用。

(7) るつぼは交換式で，鑄塊サイズの変更が可能。

(8) 多段シリンダ式鑄塊引下げで鑄塊室が小さい。

(9) 炉内の異常昇圧に対し，レリーフ弁，防爆口，るつぼ自動分離，防爆壁の 4 重の安全策をもつ。

(10) 運転操作や炉内状況の監視は，全て遠隔方式がとられ，操作単位ごとに自動化されている。

4.2 構成および仕様

本炉は，炉本体(原料貯留槽，溶解室，るつぼ，

(b)

Photo. 1. Constructed PPC-2000T (a) and its sponge Ti melting states (b).

Table 1. Quality of the PPC-VAR double melted C.P. titanium and Ti-6Al-4V alloy ingot.

Kind of ingot	Used raw material	Melting process	Chemical composition (wt %)									Mechanical properties					
			H	O	N	C	Fe	Mg	Cl	Al	V	Condi- tion	0.2%YS (KSI)	TS (KSI)	EL (%)	RA (%)	
C. P. Ti	Raw material sponge	PPC	0.0030	0.07	0.006	0.01	0.05	0.04	0.08	—	—	—	—	—	—	—	
			0.0026	0.07	0.007	0.003	0.05	<0.003	<0.005	—	—	—	—	—	—	—	
	Sponge	PPC+VAR	0.0026	0.07	0.007	0.003	0.05	<0.003	<0.005	—	—	Ann	50	61	37.2	64.8	
Ti-6Al-4V Alloy	Virgin	PPC+VAR	0.0055	0.14	0.01	0.02	0.14	<0.003	<0.005	6.19	3.93	Ann	138	146	17.2	44.0	
	Cut wire Scrap	PPC+VAR	0.0066	0.18	0.02	0.02	0.18	<0.003	<0.005	6.21	4.17	STA	158	170	15.1	49.5	
			0.0066	0.18	0.02	0.02	0.18	<0.003	<0.005	6.21	4.17	Ann	143	153	15.8	45.0	
	Turning scrap + Virgin (30%)	PPC+VAR	0.0028	0.17	0.02	0.06	0.22	<0.003	<0.005	6.17	4.15	STA	157	170	15.9	41.2	
	AMS 4928 AMS 4965(•)	PPC+VAR	≤0.0125	≤0.20	≤0.05	≤0.10 ≤0.080*	≤0.30	—	5.50 / 6.75	3.50 / 4.50	Ann	≥120	≥130	≥10	≥25		
AMS 4965(•)	≤0.0125		≤0.20	≤0.05	≤0.10 ≤0.080*	≤0.30	—	5.50 / 6.75	3.50 / 4.50	STA*	≥145	≥155	≥10	≥20			

Test specimen : 32mm dia. forged bars

Heat treatment : C.P.Ti

 Annealing 750℃ × 1 h AC

 Ti-6Al-4V

 Annealing 790℃ × 1 h AC

 SAT 950℃ × 1 h WQ

 560℃ × 5 h AC

Fig. 2. Layout and side view of PPC-2 000T.

铸塊室), 原料供給設備(秤量機, ベルトおよびバケットコンベヤ, 移動ホッパ, ドラムフィーダ, シュート), 真空排気設備(油回転ポンプ, メカニカルブースタポンプ), 給油装置, 給気設備(アルゴンおよび空気), 給排水設備および電気設備(プラズマ用直流電源装置, 動力盤, リレー盤, プラズマ制御盤, 炉体操作盤)で構成される。Fig. 2にその配置を示す。

また, 本炉の基本的仕様は次のとおりである。

(1) 用途	消耗電極用チタン铸塊の製造
(2) 型式	PPC-2000T
(3) 溶解原料	スポンジチタン, 母合金, チタンまたは合金屑(最大80mm角)
(4) 铸塊寸法	直径355および435mm
最大長さ3000mm(円柱状)

- (5) 鋳塊重量 最大 2 000kg
 - (6) プラズマ出力 540kW
 - (7) 溶解雰囲気 アルゴンガス (大気圧)
 - (8) 原料フィーダ 回転ドラム (260kg/台×2
台, 切出速度 1~8kg/min)
 - (9) 到達真空度 1.3Pa
 - (10) ユーティリティーズ
- 主電源: 三相, 60Hz, 3 300V, 1 220kVA
 冷却水: 1.2m³/min
 圧縮空気: 5m³/チャージ (最大 1.5m³/min)
 アルゴンガス: 溶解中 0.3~0.7m³/min
 ガス置換時 最大 1m³/min×8min

4.3 原料供給

原料は、まず精度±0.05%の自動秤量機に入れられる。秤量機はチタンおよび2種類の合金母材を、それぞれの貯蔵ホッパより電磁フィーダで切出し、ロードセルにて所定の配合率になるよう1回20kg単位で秤量する。秤量を終った原料は、3銘柄が混合してベルトコンベヤ上に切出され、フロア面を搬送されてバケットコンベヤに導かれる。このコンベヤは、炉体上方に設けたドラムフィーダへ原料を運ぶもので、13個のバケットからなり、それぞれに20kgずつ原料を受けとる。ここまでの操作をバケット装入と称し、自動的に行われる。これが終わるとドラムフィーダの装入側扉が開き、移動ホッパがその開口部へ移動して、バケット内の原料をドラムフィーダ内に送り込む。ドラムフィーダは、内径1100mm、長さ3800mmの円筒気密容器に、ほぼ内接する大きさの回転ドラムを入れたものである。回転ドラムの内面には螺旋の仕切りがあり、ドラム装入の操作により合計13の仕切りに20kgずつ原料が自動装入される。ドラム装入が終了とホッパが退避し、装入側扉が閉じて内部が6.5Paに真空排気され、その後アルゴンが大気圧まで導入される。溶解が始まり原料供給時期になるとドラムフィーダの切出側シール弁が開き、ドラムの回転により仕切り内の原料が混合されながら出口に移動して切出しが開始する。切出された原料はシュートを通り溶解室内の原料貯留槽へ向う。原料はここで制動を受けて速度をゆるめ、そのままつぼの中央に落下する。回転ドラムは0~0.4rpmの範囲を微細に速度調

整でき、つぼへ至る原料通路も140mm以上が確保されているので、多種形状の原料が定量かつ円滑に供給できる。ドラムフィーダは2台あり、一方が切出し中に他方に原料が装入され、260kg切出しごとに切り替えられる。この繰返しの操作は、原料供給と称し、ガス置換を含めて自動化されている。また各バケットやドラム内での原料の装入状態は、操作室にグラフィックで表示され、一目で残量が確認できる。

4.4 溶解鑄造

溶解室の炉殻は内径1700mm、高さ1200mm、内面がステンレス、外面が軟鋼の水冷ジャケット構造で、上下に分割されている。上部の中央開口部に原料貯留槽が挿入され、その回りには6本のプラズマトーチがるつぼ内部に向けて対称に取付けられている。下部には、プラズマアークを発生させるための点弧棒が、トーチ直下まで出し入れ可能に取付けてある。下部はフロアに固定されて溶解室全体を支え、上部はローラで支えられ原料貯留槽のまわりに回転できるようになっており、6本のトーチを最大±60度、最高1rpmの速度で旋回できる。この旋回には油圧シリンダが用いられ、旋回が円滑で気密が確保されるよう接続部は特別に工夫されている。

るつぼは、内面が銅、外面がステンレスのジャケット式水冷構造である。内部には、ソレノイドコイルをもち、直流および低周波の交流磁界を発生する。

鋳塊室は、内径900mm、内高5500mmで、内部に鋳塊引下げ装置をもち、4本の油圧ジャッキにより台車に支持されている。鋳塊室の上にはるつぼが載り、油圧ジャッキの上昇とそれに続くバネの力でるつぼが溶解室に連結される。鋳塊引下げ装置は、多段式油圧シリンダとその上に取付けたスタブクランプよりなる。溶解に先立ち、VA溶解で残されるスタブをクランプし、多段シリンダを伸ばしてるつぼの内部に置く。

溶解を始めるには、炉内をまず真空中に排気する。7500ℓ/minの油回転ポンプと1500m³/hのメカニカルブースタポンプが用いられ、13minで6.5Paに排気する。その後アルゴンを導入し大気圧に保持する。これらの操作は、炉体アルゴン置換の操作で自動的に行われる。

次に給水、受電を行って溶解体制を整え、プラ

(a)

(b)

Photo. 2. Cross sections of PPC melted Ti ingot (a) and PPC + VAR melted Ti ingot (b).

ズマーク点弧に移る。トーチ点弧の操作により、自動的に点弧棒挿入、パイロットアーク点弧、メインアーク発生、点弧棒退避が行われ、プラズマアークがらつば内に向いスタブ端面の溶解が始まる。溶解状況は、2台のカラーITVにより操作室で詳細に知ることができる。6本のトーチへの給電には、高圧受電盤、力率改善コンデンサ盤、高圧変圧器が各1台と6台の点弧回路付サイリスタ盤からなる専用直流電源が用いられる。これは、定電流とソフトスタートに優れ、単独6回路と並列3回路のいずれも出力でき、複数のトーチの電流を一つの設定器で広範囲に調整できる。

スタブ端面の溶解が進み溶湯が形成されると、前述の原料供給の操作で原料が溶湯中央に添加され、引続いて銑塊引下げの操作により多段シリンダが低速下降を始める。その進行と共に溶湯下部がらつばで冷やされ、次第に生長した積層凝固塊が銑塊室内に引出されてくる。この間、プラズマアークは、磁界発生コイルによってアークの方向を制御されながらトーチの自動旋回によって旋回し、らつば内全体を照射して添加される原料を急速に溶解する。また溶湯も磁界による攪拌力を受け、加熱が均一に行きわたる。

銑塊引下げ量は、銑塊室に設けたストローク計の信号を受信し、操作盤に図で表示される。溶解速度は、ドラムの回転速度の調整で決まり、これに合せて銑塊引下げ速度を設定するが、運転者は一度設定した後はほとんど操作の必要がない。ま

たトーチの操作についても、湯温のコントロールのための初期のパワー調整の外は、ほとんど操作が不要である。このため本炉は一人の作業で運転できる。

チタンの消耗電極用銑塊製造では、真比重の90%の比重の銑塊を得るような高速度でも原料を供給できる。そのため直径435mmの銑塊製造では300kg/h以上の速度で溶解でき、電力原単位も1800kWh/t以下が可能である。

溶解中は常時露点計で炉内雰囲気監視され、また何らかの原因で炉内が異常に昇圧した場合、レリーフ弁が開き、さらに圧力が高くなるとらつばが自動的に溶解室から分離し、溶解室に取付けた防爆口が破壊して炉内圧を逃がす。作業者は、運転中炉体回りの防爆壁内に入る必要がないため、危害が及ぶことがない。

4.5 銑塊取出し

溶解が所定量終了すると、アーク停止の操作で自動的に冷却プロセスに入り、アルゴン雰囲気を維持して銑塊が冷やされ、その後空気に置換される。冷却後は、銑塊室昇降ジャッキを操作してらつばと銑塊室を台車に載せ、油圧駆動で水平に移動して銑塊取出し位置に移す。らつばをクレーンで除き、スタブクランプを解除して銑塊をクレーンで吊り出す。取出された銑塊は、そのまま上下逆にしてスタブ部分をVA炉にクランプし、消耗電極として再溶解される。Photo. 2にPPC溶解した銑塊とさらにVA溶解した銑塊を示す。

4.6 溶解サイクルタイム

PPC 溶解における一連の作業時間を次に示す。

- ・ 铸塊取出しおよび溶解準備 ; 72min
- ・ 原料のバケット装入 ; 12min
- ・ 原料のドラム装入 ; 10min
- ・ 溶解炉本体アルゴン置換 ; 14min
- ・ 溶解鑄造 ; 300~400min
- ・ 冷却および空気置換 ; 265min

すなわち、溶解の1サイクルは11~13hとなり、3直稼動では月産75t以上が可能である。

5. あ と が き

本稿では、新設された世界的にも例のない大型のチタン溶解用プラズマアーク炉について紹介した。PPC 溶解はまだ実用の途に着いたばかりで、今後ここにあげた以上の有効な利用が見出される可能性がある。本炉はもちろんニオブやジルコニウムなどの他の活性金属にも適用でき、また各種機能材料(水素吸蔵合金、形状記憶合金、超伝導合金など)の溶解炉としても有効であろう。また、現在の構造を基に、生産性向上のための二铸

塊室のものや、工具片で汚染されたスクラップの除去を可能にするスカル溶解を追加したハース付 PPC 炉も将来期待されよう。当社では、既に明らかにした独特の効果を生む耐熱鋼の再溶解への利用⁹⁾も含み、さらに技術の拡大を図っている。既に6tのPPC炉の設計も完了しており、広く需要家の御要望に沿いたいと考えている。本稿が、読者各位の今後の溶解プロセスを検討する上で参考になれば幸いである。

(文 献)

- 1) 野田, 浅田, 江口, 足立, 林: “プラズマアーク溶解について” 電気製鋼, 41(1970)4, 13
- 2) T. Fujiwara, T. Kato, H. Ono, H. Yamada: “Primary melting of titanium with plasma arc” Titanium' 80, Science and Technology
- 3) 藤原, 加藤, 小野, 山田: “プラズマアークによる鋼および超合金の再溶解” 鉄と鋼, 63(1977)13, 2224