

技術紹介 2

誘導加熱・溶解装置の進歩と 生産プロセスへの貢献



富士電機サーモシステムズ
株式会社
技術部技術グループ
サブマネージャ
倉田 巖

1. はじめに

誘導加熱とは導電性の加熱対象物に交番磁界を貫通させることで、渦電流を誘起させて加熱対象物を自己発熱させる加熱方法である。誘導加熱は

- (1) 急速加熱および局部加熱が可能であり、製品品質が向上する。
- (2) 温度制御性に優れ、製品品質のばらつきを抑えることができる。
- (3) 被加熱物のみが加熱するので作業環境が改善する（熱、ガスおよび塵埃等の低減）。
- (4) 炎やガスによる加熱に対し、エネルギー効率が低い（CO₂排出量の削減）。

といった特長を持ち、産業界及び一般家庭において広く利用されている。

交番磁界を発生させる手段としては被加熱物の近傍に加熱コイルを設置し、交流電源により加熱コイルに交流電流を流す方法が一般的である。交流電源として過去には交流発電機、真空管発振器等が用いられていたが、現在ではこれらの電源よりも高効率でメンテナンスが容易な半導体式インバータに置き換わっている。誘導加熱では加熱対象物の形状、材質や溶解・加熱条件に応じて、さまざまな周波数や電力が要求されるが、弊社では誘導加熱用電源として、これまで各種のインバータを製品化し各種溶解および加熱プロセスに適用してきた。

本稿では、誘導加熱の応用例として、誘導炉と電縫管溶接機及び浮揚溶解装置について、その特長などを紹介し、従来技術との比較を行なう。

2. 誘導炉用電源

2.1 特長

誘導炉とは電磁誘導現象を利用して各種金属（主に鋳鉄）を溶解するための電気炉である。鋳

鉄の溶解方法としてはコークスを熱源としたキューポラも用いられているが、下記に示した特長を有することや、近年、コークスの価格が高騰していることもあり誘導炉への転換が進んでいる。

- (1) CO₂排出量が1/3以下。
- (2) 一次エネルギーの消費量が約20%少ない。
- (3) 金属材種の変更や成分調整が容易であり、多品種生産に向く。
- (4) 塵埃の発生量が少ない。
- (5) 操作に熟練を必要とせず、短時間で操作方法の習得が可能。

誘導炉用電源としては、半導体を用いない低周波炉（周波数：50/60Hz）と変換器に半導体を用いた中周波炉（周波数：500Hz以下）に大別できる。昭和40年代までは低周波炉が主流であったが、その後、半導体素子の大容量化が進み、作業上の自由度が比較的高い中周波炉が主流となっている。中周波炉用の電源としては、サイリスタ素子を用いた電流型インバータが多く採用されてきたが、多様化する顧客殿の操業形態に対応するため、より柔軟な構成が可能なIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）素子を用いた新型電源（製品名：MELT PLUS）を製品化した（図1）。MELT PLUSは、従来のサイリスタ式電源に対し、以下の特長を有している。



図1 MELT PLUS外観写真

(1) 複数の誘導炉への柔軟な電力配分

溶解した金属を途切れることなく後工程に供給するためには、複数炉を同時運転し、かつ各炉への電力を自由に配分できることが望ましい。従来の電流型サイリスタインバータでは、単一の電源装置での各炉への柔軟な電力の分配が難しい。このため誘導炉の数だけ電源装置（順変換部+逆変

換部)が必要となり、初期費用が増大してしまうといった問題があった。

MELT PLUSは電圧型インバータを採用することで、一つの順変換部に複数の逆変換部を並列接続することが可能である。このような構成とすることで、従来の構成に比べ低コストで、かつ各炉体への電力配分を柔軟に行なうことが可能となった。

(2) 高い入力力率と変換効率

従来のサイリスタ電源装置ではサイリスタ整流器を位相制御することで電力制御を行っているため、低電力運転時に入力力率が低下してしまう。このため複数の誘導炉を同時運転する場合、合計の入力容量が定格時よりも大きくなる状態があるため、結果として主変圧器の容量を大きくする必要があった。MELT PLUSでは順変換部をダイオード整流器と低容量平滑コンデンサで構成しており、広い出力電力範囲において、入力力率は0.98以上を維持する(多パルス整流を適用した場合)。このため従来に比べ、主変圧器の容量を低減できる。また入力電力に対する炉体への出力電力の割合を表す変換効率は97%と高い。

(3) 広範囲な負荷変動への対応

定格電力の約1.5~2.0倍の容量を持つ逆変換部を有しており、誘導炉のように溶解初期と溶解終了時で負荷インピーダンスが大きく変動するような条件においても、負荷に対して定格電力を入力することが可能である。このため溶解初期から定格電力が入力可能となり、溶解時間の短縮や電力原単位の向上を図ることができる。

(4) 入力高調波の低減

新開発の多パルス整流回路(オプション)を採用することにより、受電部に高調波フィルタを設置しなくても、高調波の発生量をガイドライン以下に抑えることができる。また高調波フィルタによる電圧変動や進み力率の問題も発生しない。

(5) 容易な操作

ユーザインターフェイスとしてグラフィックパネルを標準で採用しており、シンター(耐火物の形成)や溶解、保温など、操業状況に応じた設定や運転ガイダンス及び運転データ等を表示することが可能である。また故障発生時には対処方法や故障履歴を表示することもできる。さらに、顧客殿のご要求に応じカスタマイズすることも可能である。

2.2 標準系列と仕様

表1にMELT PLUSの仕様と標準系列を示す。出力750kW~6000kWまで対応可能である。

表1. MELT PLUSの標準系列と仕様

項目	仕様	
	電力 [kW]	炉容量 [t]
出力	750	0.5 ~ 1.0
	1500	1.5 ~ 3.0
	1800	3.0
	2250	
	3000	5.0
	3750	
	4500	6.0
	5250	8.0
	6000	10.0
出力周波数	50 ~ 500Hz	
出力調整範囲	5 ~ 100 %	
制御対象	入力電力(出力電流及び炉体電圧制限付き)	
冷却方式	水冷式(純水循環) 冷却水温: 5 ~ 38℃	

3. 電縫管溶接機用電源

3.1 特長

電縫管とは帯状の金属板を溶接して作られるパイプであり、その溶接には数百kHz以上の高周波電源が必要である。従来は真空管を用いた高周波発振器が用いられていたが、弊社では約10年前にMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)素子を用いた誘導式の電縫管溶接機を製品化し、その後さまざまな改良を加え現在に至っている。半導体式溶接機は以下の特長を有している。

(1) 高効率

真空管を用いた発振器の効率(入力電力に対する出力電力の割合)は70%前後である。一方、半導体式インバータの効率は約95%であり、1.3倍程度効率高い。また真空管式の場合、整合回路に効率の低い空心CT(Current Trans)を用いているため入力電力に対する溶接電力の割合(溶接効率)はおおよそ50%~60%であるが、半導体式溶接機の場合、トランスレス又は鉄心入りトランスを用いるため溶接効率は80%前後と高い。

(2) 長寿命

真空管の寿命は約1万時間であり、定期的な交換を必要とする。一方MOSFETの寿命は約10万時間と長寿命である。このためメンテナンスコストを抑えることができる。

(3) 操作性の向上

オペレーターとのインターフェイスにはグラフィックパネルを採用しており、運転データ、運転記

表2. 真空管式溶接機と半導体式溶接機の溶接能力比較

パイプサイズ		真空管式			半導体式			能力差 (1-k _(SS) /k _(VT)) × 100 (%)
管径 (mm)	板厚 (mm)	ライン速度 (m/min)	入力電力 (kW)	溶接能力 k _(VT)	ライン速度 (m/min)	入力電力 (kW)	溶接能力 k _(SS)	
48.6	2.4	117	266	0.95	117	194	0.69	27
76.3	2.3	63	231	1.59	63	157	1.08	32
114.3	2.8	35	212	2.16	35	163	1.66	23
126	2.3	45	218	2.11	45	166	1.60	24
	3.2	37	225	1.90	37	181	1.53	20

録、故障内容、故障履歴などを表示し、運転状況の確認を容易に行なうことができる。また自動負荷マッチング機能により、常に最適な負荷条件での運転が可能である。

3.2 溶接能力の比較

電縫管溶接では溶接能力を評価する指標として次式で示されるヒート係数kを用いる。k値が低いほど溶接能力が高いことを表している。

$$k = \frac{P_{in}}{L_s t} \dots \dots \dots (1)$$

Pin: 溶接機への入力電力 (kW)

Ls: ライン速度 (m/min)

t: パイプの板厚 (mm)

実際の作業データからk値を求めたものを表2に示す。パイプの種類によってばらつきはあるが、半導体式溶接機は真空管発振式溶接機に対して、溶接能力が概ね20~30% 高いという結果となっている。

3.3 標準系列と仕様

出力周波数は200k~450 kHz、入力電力は50k~1000 kW を標準化している。

4. 浮揚溶解・鑄造装置(ユニバーサルキャスタ)

4.1 特長

浮揚溶解 (CCLM: Cold Crucible Levitation Melting) は金属を電磁力により坩堝から浮かしたまま、誘導加熱により溶解するものである。CCLMは従来の坩堝を用いた溶解方法に対し、以下に示す特長を有している。

- (1) 坩堝からの汚染がないため、高純度な合金を得ることが出来る。
- (2) 活性金属や高融点金属でも坩堝を溶損しない。
- (3) 攪拌力が強いいため、比重が極端に異なる金属同士でも均質な合金化が可能。

弊社では約10年前にCCLMの技術を確立し、最大50kgまでの溶解装置を製作してきたが、一部の研究機関への納入に留まっていた。そこで、より手軽にCCLMを利用していただけるよう、溶解量を10g程度とし、かつ精密鑄造機能を付加したコンパ

クトで取り扱いが容易な溶解装置 (製品名: ユニバーサルキャスタ以下FCC-50) を開発した。

4.2 製品仕様と溶解例

図2にFCC-50の外観写真と鑄造方法を示す。坩堝の上部に鑄型をセットし、金属を溶解後、坩堝と鑄型を一体で反転し、坩堝側から加圧すると同時に鑄型側から減圧することで精密な鑄造を可能としている。図3にFCC-50による鑄造例を示す。このように薄く、先鋭な形状であっても鑄巣などが発生していないことがわかる。

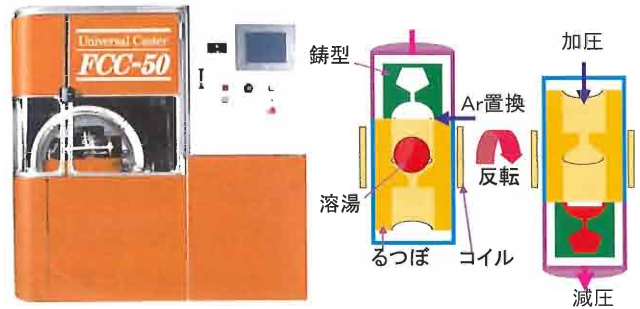


図2 外観写真と鑄造方法

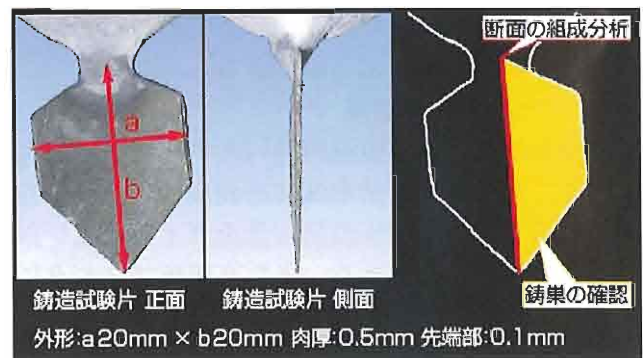


図3 FCC-50による鑄造例

5. おわりに

今後も、お客様に安全で安心かつ安定して、ご使用いただける誘導加熱・溶解装置を製品化していく所存であり、関係各位のご指導、ご鞭撻をお願いする次第である。