誘導加熱用高周波インバータ

倉田　巌（くらた　いわお）　亀田　昇（かめだ　のぼる）　三浦　敏栄（みうら　としえ）

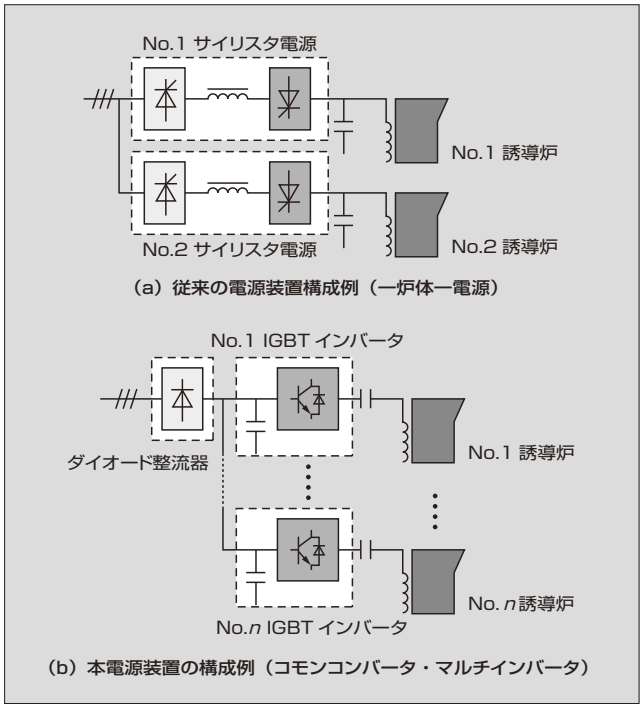
1　まえがき

誘導加熱とは，導電性の加熱対象物に交番磁界を印加し，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。誘導加熱は加熱効率が高い，自動化や省力化が可能，急速加熱が可能，温度制御が容易，作業環境が改善できる，といった利点を持ち産業界で広く利用されている。

誘導加熱では加熱対象物の形状や材質，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。富士電機では誘導加熱用電源装置として，これまで各種のインバータを製品化してきた。

本稿では，最近製品化した溶解用電源装置および電縫管溶接機の特長・仕様などについて述べる。また，大口径の電縫管溶接機用に開発した大容量高周波電源装置について，その概要を述べる。

図1　複数の誘導炉への電力供給

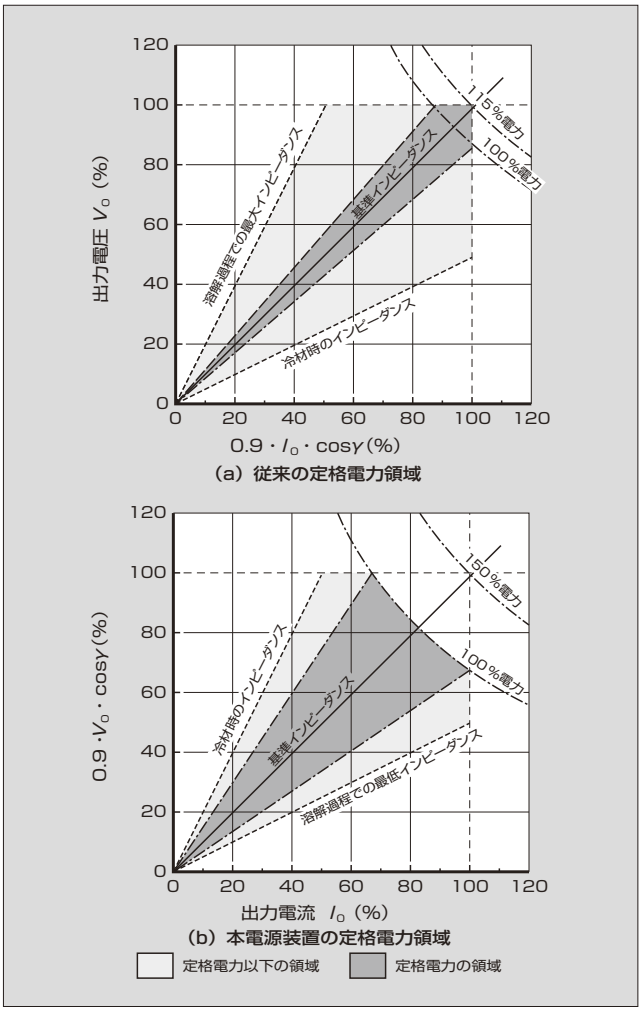


2　誘導炉用 IGBT 電源装置

2.1　特　長

誘導炉とは電磁誘導現象を利用して各種金属を溶解するための電気炉である。従来は電源部にサイリスタ素子を使用した電流型インバータを用いていたが，今回，誘導炉用の中周波（500 Hz 以下）電源として，IGBT（Insulated

図2　負荷インピーダンスと定格電力



倉田　巌

誘導加熱用インバータおよびその応用製品の開発・設計に従事。現在，富士電機サーモシステムズ株式会社事業推進室プラント合理化推進部。電気学会会員。

亀田　昇

誘導加熱装置のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機サーモシステムズ株式会社技術部。

三浦　敏栄

誘導加熱用高周波インバータの開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

Gate Bipolar Transistor）素子を使用した誘導炉用 IGBT 電源装置（以下，本電源装置という）を製品化した。すでに 1 号機を納入し，順調に稼動している。本電源装置は以下に示す特長を有している。

(1)　複数の誘導炉への柔軟な電力配分

誘導炉の操業において，2 台以上の誘導炉を一つの電源装置で運転し，かつ各誘導炉への電力配分を柔軟に行うことができれば，電源部の稼動率（ここでは一日あたりの運転時間の比率と定義）や利用率（ここでは電源装置の定格電力に対する平均運転電力の比率と定義）を向上させることができる。

従来の電流型サイリスタインバータで上記の構成とした場合，単一の電源装置では各誘導炉への柔軟な電力の分配が難しいため，**図 1** (a)のように，一つの誘導炉に一つの電源装置（順変換部 + 逆変換部）が必要となり，イニシャルコストが増大してしまうといった問題があった。

この問題を解決するため，**図 1** (b)に示すように本電源装置では IGBT 素子を用いた電圧型インバータを採用した。電圧型インバータであれば，一つの順変換部に複数の逆変換部を接続でき（コモンコンバータ・マルチインバータ），かつ各炉体への電力配分を柔軟に行うことができる。

(2)　大きな出力容量

電源装置から見た誘導炉の負荷インピーダンスは，定格状態（溶湯 100 %）に対し 1/2 ～ 2 倍程度変動する。電源装置の出力容量（出力電流×出力電圧）が小さいと，**図 2** (a)に示すように負荷インピーダンスが大きく変動した場合，定格電力を負荷に投入できる領域が狭くなる。従来は整合コンデンサを負荷の状態に応じて増減するといった方法でインピーダンス調整を行っていたが，スイッチなどの機構部品を使用するため，定期的なメンテナンスが必要であった。

図 3　入力力率の比較

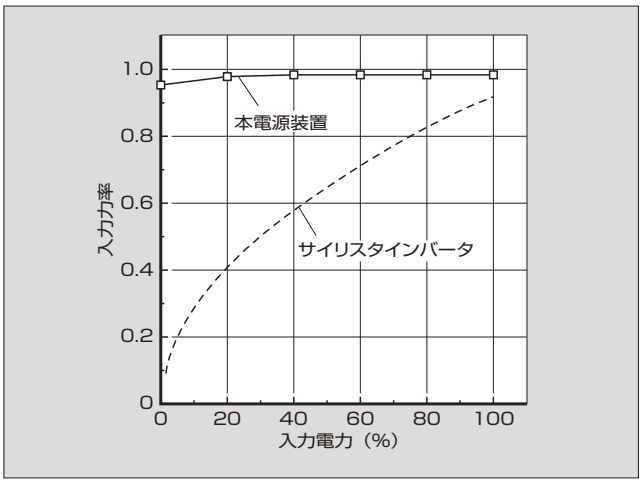
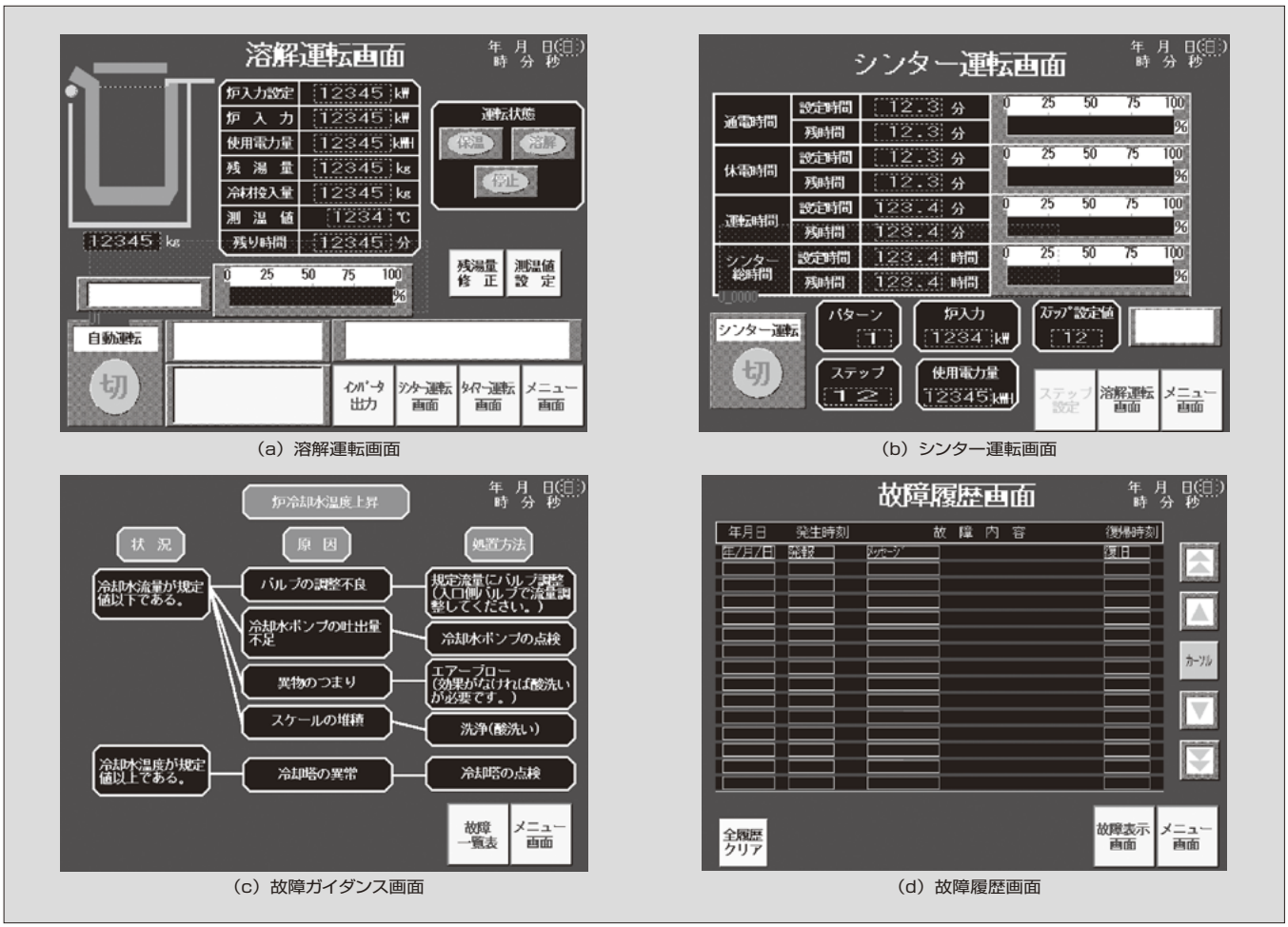


図 4　グラフィックパネルの画面例



（a）溶解運転画面　（b）シンター運転画面

（c）故障ガイダンス画面　（d）故障履歴画面

本電源装置では定格電力の 1.5 倍の容量を持つ逆変換部を有し，**図 2**(b)に示すように，負荷インピーダンスが広い範囲で変動しても，機構部品を用いたインピーダンス調整を行うことなく，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。

(3)　高い入力力率

従来のサイリスタ電源装置ではサイリスタ整流器の位相制御により電力制御を行っているため，特に低電力運転時の入力力率が**図 3** の破線で示すように低下していた。このため，特に複数の誘導炉を同時運転する場合，入力容量が増加していた。

本電源装置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（20 ～ 100 %）において，入力力率は 0.98 以上を維持する。このため従来のサイリスタインバータに対して，主変圧器や入力フィルタの容量を低減できる。

(4)　入力高調波の低減

順変換部は標準で 12 パルス整流を採用している。また，オプションの 24 パルス整流を選択することで，入力部の高調波をさらに低減させることが可能である。

(5)　容易な操作体系

ユーザーインタフェースとしてグラフィックパネルを標準で採用しており，**図 4** に示すようにシンター（耐火物の形成）運転画面や溶解など，操業状況に応じた設定や運転ガイダンス，運転データなど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。

図 5　本電源装置の回路構成例

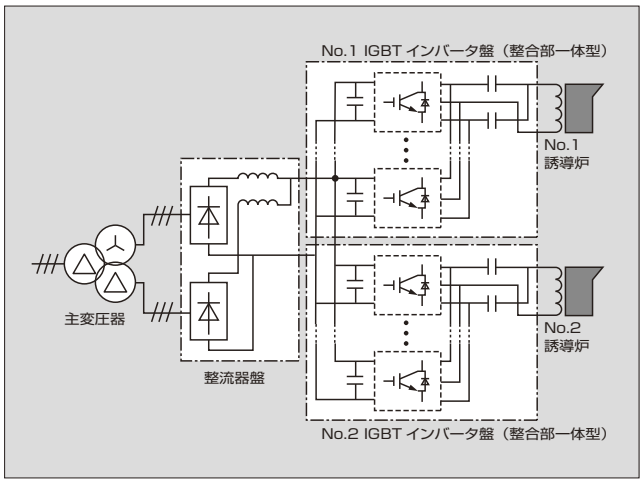


表 1　IGBTスタックの仕様

項　目	仕　様
型　　式	シングルエンドプッシュプル（SEPP）
使用素子	IGBT
出力電圧	200～300 V（方形波）
出力電流	4,500 A（正弦波）
出力電力	750 kW
出力周波数	50～500 Hz
冷却水量	30 L/min
質　　量	60 kg

2. 2　回路構成と制御方式

図 5 に本電源装置の回路構成例を示す。順変換部は 6 相ダイオード整流器を 2 台並列接続し，12 相整流とすることで入力側の高調波を低減している。逆変換部は IGBT モジュールを使用したシングルエンドプッシュプル形式で構成されている。これは誘導炉の負荷インピーダンスに合わせ低電圧・大電流を出力するためである。IGBT スタックの仕様を**表 1** に，外観を**図 6** に示す。大電流出力が可能な逆変換部を採用することにより，整合部は整合コンデンサのみで構成可能となり，マッチングトランスなどがなくとも，負荷とのマッチングが可能となっている。また大容量機の場合，IGBT スタックを複数台並列接続することで対応が可能である。**図 7** に 2,250 kW 電源盤の外観を示す。

制御方式は出力電流が出力電圧に対して常に遅れ位相で

図 6　IGBT スタックの外観

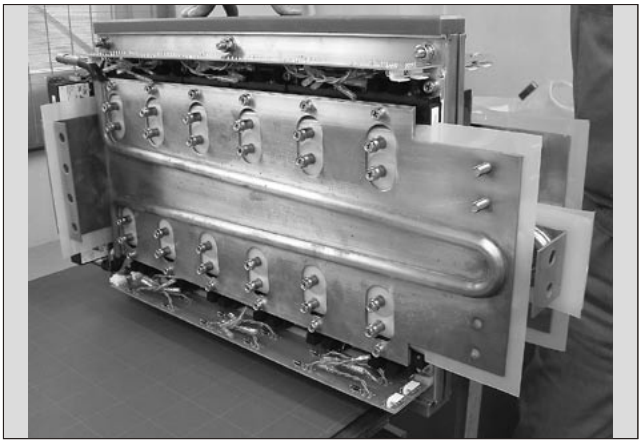
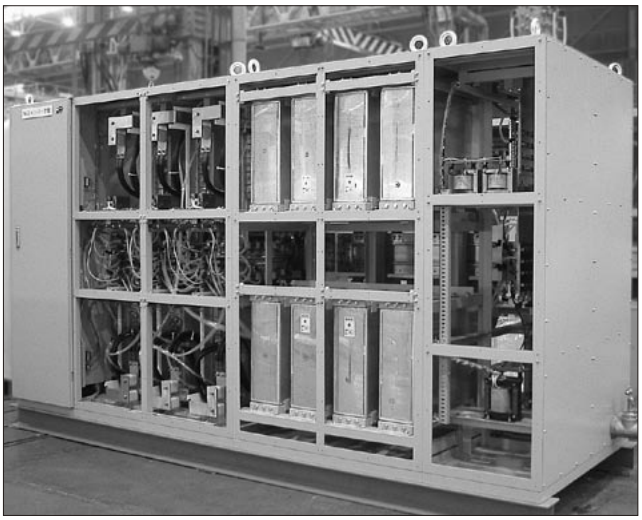


図 7　2,250 kW 500 Hz 電源盤の外観（制御部 + インバータ部 + 整合部）



運転されるγ角制御（位相差制御）方式を採用している。この制御方式はインバータ部のみで電力制御ができるため，直流中間部での電圧コントロールが不要となり，負荷急変に対する応答速度が向上するといった特長を有している。制御対象は入力電力（出力電流制限付き）または出力電流である。また，炉体保護のため炉体電圧に対する制限回路を設けており，炉内のあらゆる負荷条件においても誘導炉を安定かつ安全に運転することが可能となっている。

2.3　標準系列と仕様

標準系列と仕様を**表 2** に示す。出力周波数は 50 ～ 500 Hz，出力電力は 750 ～ 6,000 kW を標準化している。

2.4　IGBT 電源装置の今後

今後はスイッチング周波数の高周波化を進め，アニーラなどの各種加熱用電源装置としても適用していく予定である。また，入力高調波をさらに低減した電源装置についても開発を行っていく予定である。

3　電縫管溶接機用電源装置

3.1　特　長

電縫管とは帯状の金属板から製造されたパイプであり，その製造には高周波（数百 kHz）の電源が必要である（**図 8**）。富士電機では約 10 年前に半導体（MOSFET：Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を用いた誘導式の電縫管溶接機を製品化したが，今回，新しい整合装置を組み合わせた溶接機を製品化した。すでに 20 台が稼動中である。新しい溶接機は従来の半導体式溶接機の持つ特長に加え，以下の特長を有している。

表 2　標準系列と仕様

項　目	仕　様	
入　　力	三相　300～440 V　±5％ 周波数：50/60 Hz	
出　　力	電力（kW）	電流（A）
	750	4,500
	1,100	6,750
	1,500	9,000
	1,800	11,250
	2,250	13,500
	3,000	18,000
	3,750	22,500
	4,500	27,000
	5,250	31,500
	6,000	36,000
出力周波数	50～500 Hz	
出力調整範囲	5～100％	
制御対象	入力電力（出力電流および炉体電圧制限付き）または出力電流（炉体電圧制限付き）	
主回路形式	シングルエンドプッシュプル	
変換効率	97％（整合部含む）	
冷却方式	水冷式（純水循環）冷却水温：5～38℃	

(1)　自動マッチング機能

電縫管の製造ラインでは，通常，1 台の溶接機でさまざまな直径や板厚のパイプを製造している。しかしながらパイプの種類が異なると溶接機から見た負荷インピーダンスが変化するため，場合によっては必要な電力をパイプに入力できない状態になる。これを避けるためには，負荷とのマッチング状態を調整して，常に最適なマッチング状態で溶接を行う必要がある。従来は整合部のマッチングトランスのタップ調節や整合コンデンサの増減によりマッチングの調整を行っていたが，このような方法は段階的な調整しかできず，最適なマッチング状態に調整できない場合があった。

この問題を解決するため，後述する直列共振と並列共振を組み合わせた独自の整合回路と，連続でマッチング調整を行う調整機構を開発した。また，溶接中のマッチング状態を常に監視して最適状態に保つ自動マッチング機能も開発し，オペレーターの負担を軽減している。

(2)　小型・高効率

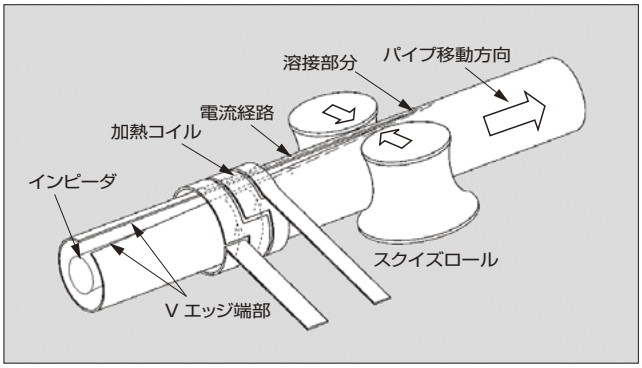
従来の電縫管溶接機用電源装置には，真空管発振器が使用されてきたが，近年では設備の老朽化が進み，半導体式に置き換えられてきている。その際，問題となるのが設置スペースの確保である。溶接部近傍はさまざまな機器（ビートカッタやセンサ類）が配置されているため，置き換えられる整合部も，従来使用されていた空心のカレントトランス（空心 CT）並みの小型化が要求される。

今回製品化した溶接機では整合コンデンサ盤を空心 CT とほぼ同一容積まで小型化しており，リプレイスを容易に行える。また，効率を低下させる空心 CT を用いないため整合部の効率も向上している。溶接機の入力電力に対するパイプへの入力電力（ワークコイル以降の電力）の割合（効率）は約 83％を達成している。

(3)　操作性の向上

オペレーターとのインタフェー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うことができる。また自動負荷調整機能により，常に最適な負荷条件での運転が可能である。さらにはあらかじめ各パイプ

図 8　電縫管の溶接原理



サイズにおけるライン速度および電力の運転データをグラフィックパネルで記録し，造管における板の中継ぎ時などのライン速度が傾斜的に変化する際に，ライン速度の変化に応じて溶接電力を制御する速度追従制御機能を開発した。実際のラインで現在良好に稼動中である。実際の速度追従制御画面を**図 9** に示す。

3. 2　回路構成

新型電縫管溶接機の回路構成を**図10**に示す。整合回路は負荷調整器（リアクトル）を直列，整合コンデンサとワークコイルを並列に接続し，直列・並列共振回路を構成している。ワークコイルのインダクタンスをL_2，負荷調整器のインダクタンスをL_1とおくと，ワークコイルの電流I_cは式(1)で示される。式(1)からI_cは，ほぼL_1とL_2の比にインバータの出力電流I_oを乗じた値となる。

$$I_c = L_1/L_2 \times I_o \text{（ただし，} L_1 > L_2\text{）} \cdots\cdots (1)$$

図 9　速度追従制御画面

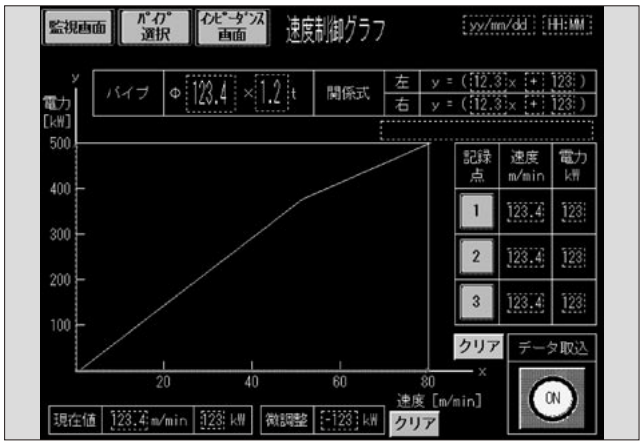
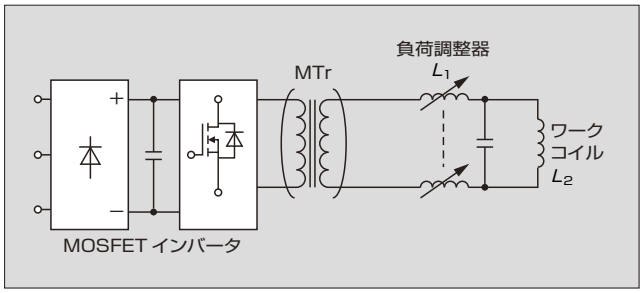


図 10　新型電縫管溶接機の回路構成



よって負荷調整器のインダクタンスL_1を変化させることでワークコイルの電流が変化するため，結果として負荷に対してマッチング調整を行うことができる。新型電縫管溶接機の外観を**図11**に示す。

3. 3　溶接能力の比較

電縫管溶接では溶接能力を比較する指標として次式で示される係数k（ヒート係数）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。

$$k = P_{in}/(L_s \times t)$$

P_{in}：溶接機への入力電力

L_s：ライン速度（m/min）

t：パイプの板厚（mm）

実際の操業データからk値を求めたものを**表 3** に示す。パイプの種類によってばらつきはあるが，新型半導体式溶接機は真空管発振式溶接機に対して，溶接能力が約 20 ～ 30 % 高いという結果となっている。

3. 4　標準系列と仕様

表 4 に電縫管溶接機の標準仕様を示す。出力周波数は 200 ～ 450 kHz，入力電力は 50 ～ 500 kW を標準化している。また，標準外の仕様についても，柔軟に対応することが可能である。

3. 5　電縫管溶接機の今後

これまでは，誘導方式で 500 kW までの溶接機を提供してきたが，顧客からは大口径管の溶接にも対応可能な，より大容量の溶接機を求められている。また，板材に高周波

図 11　新型電縫管溶接機（400 kW 400 kHz）の外観

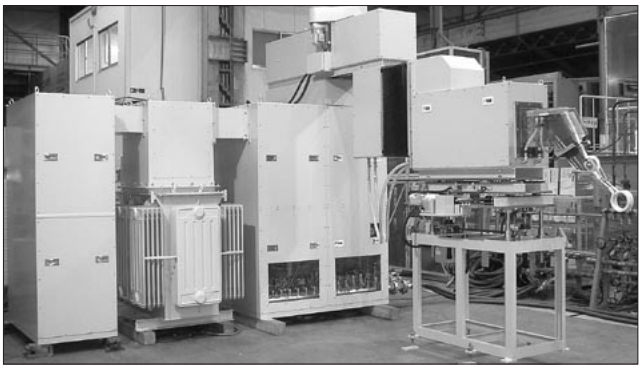


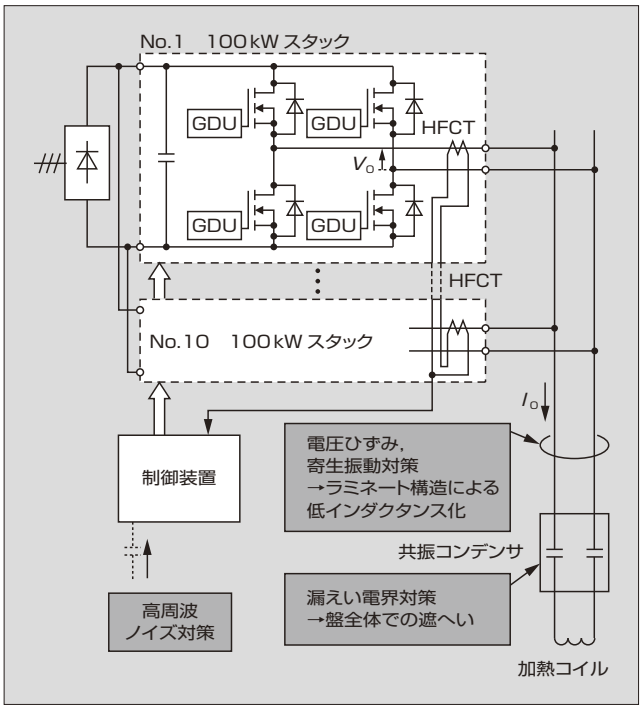
表 3　真空管発振式溶接機と富士電機の新型半導体式溶接機の溶接能力比較

パイプサイズ		真空管発振式溶接機			新型半導体式溶接機			能力差 $(1-K_{(SS)}/K_{(VT)})\times 100$ (%)
管径 (mm)	板厚 (mm)	ライン速度 L_s (m/min)	入力電力 P_{in} (kW)	溶接能力 $k_{(VT)}$	ライン速度 L_s (m/min)	入力電力 P_{in} (kW)	溶接能力 $k_{(SS)}$	
48.6	2.4	117	266	0.95	117.3	194	0.69	27
76.3	2.3	63	231	1.59	63.2	157	1.08	32
114.3	2.8	35	212	2.16	32.4	151	1.66	23
126	2.3	45	218	2.11	50	184	1.60	24
	3.2	37	225	1.90	40.3	197	1.53	20

表 4　電縫管溶接機の標準仕様

項　目		仕　様
入　力（非接地電源）	電　　圧	6パルス整流：三相　210V　±5% 12パルス整流（オプション）： 三相　105V×2　±5%
	周 波 数	50/60Hz　±2%
	電　　力	50，100，200，300，400，500（kW）
出　力	周 波 数	200～450kHz
制　御	制御対象	入力電力（出力電流制限付き）または出力電流
	制御範囲	入力電力制御：定格の10～100% 出力電流制御：定格の10～100%
冷　却	冷却方式	水冷式
	冷 却 水	純水（水温：5～38℃）
塗装色		マンセル5Y7/1

図 12　1,000kW 500kHz 高周波電源装置の構成



電流を直接供給して溶接を行うコンタクト方式の溶接機についても対応を求められている。以下にこれらの用途向けに開発した大容量 1,000kW 500kHz 高周波電源について，その概要を述べる

(1)　スタック並列化

図 12 に 1,000kW 500kHz 高周波電源装置の構成を，**図 13** に出力電圧・電流波形例を示す。今回，100kW スタックの 10 並列化が可能な電流検出器を兼ねる電流バランサ（HFCT：High Frequency Current Transformer）の水冷強化などにより，小型・大容量化を行った。これにより，富士電機の実績のある 100kW スタックおよび並列技術を用いて，1,000kW 出力を得ることができる。

(2)　電圧ひずみ，寄生振動対策

高周波・大電流では，数 nH のインダクタンスでもその電圧降下が大きく，電圧ひずみが無視できなくなり，機器へ悪影響を及ぼす場合がある。このひずみの低減や浮遊静電容量との寄生振動の抑制のため，往復導体をラミネートし，出力導体の低インダクタンス化などを行っている。

(3)　高周波ノイズ対策

盤全体を遮へいすることにより，大電流によって生じる外部への漏えい電界抑制や浮遊静電容量などを介して入り込む制御装置への高周波ノイズ対策を行っている。

表 5 に加熱用大容量高周波電源装置の仕様を示す。

図 13　1,000kW 500kHz 高周波電源装置の出力電圧・電流波形例

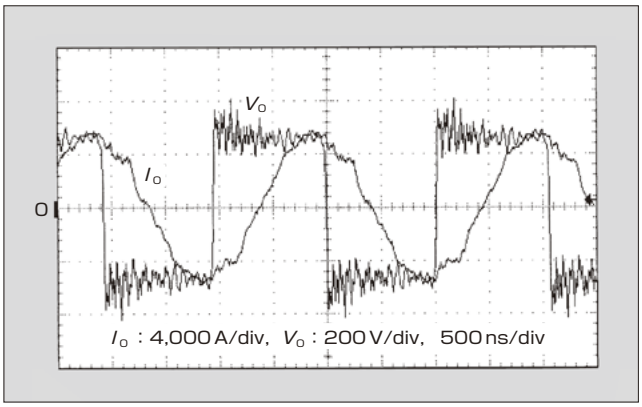


表 5　加熱用大容量高周波電源装置の仕様

項　目	仕　様	
入　　力	三相　210V　±5%　周波数：50/60Hz	
出　　力	電力（kW）	出力電流（A）
	1,000	4,600
出力周波数	200～500kHz	
出力調整範囲	10～100%	
制 御 対 象	入力電力（出力電流制限付き）または出力電流	
主回路形式	フルブリッジ	
冷 却 方 式	水冷式（純水循環）　冷却水温：5～38℃	

4　あとがき

誘導炉用の溶解電源装置と電縫管溶接機用電源装置について，その特長，仕様，回路構成などを紹介した。今後も顧客のニーズに合った加熱用電源装置の製品化を進めていく所存である。

参考文献

(1)　倉田巌，中村清和．誘導加熱用サイリスタインバータと最近の適用事例．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.306–310.

(2)　倉田巌，中村清和．最近の電縫管溶接装置．富士時報．vol.71, no.5, 1998, p.285–287.

(3)　倉田巌，中村清和．電縫管と溶接装置．配管技術．1999–2.

(4)　三浦敏栄，中村清和．MOSFET インバータ型高周波電源．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.311–315.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。