

過熱蒸気発生装置と誘導加熱の新技术

New Induction Heating Technology and the Induction Heating Super Steamer

藤田 満 Michiru Fujita

倉田 巖 Iwao Kurata

誘導加熱 (IH) は、非接触加熱、高効率、高い制御性およびクリーンで安全な作業環境などの特徴を持ち、金属の溶解やピレット・板の加熱など主に素形材分野で使われてきた。富士電機は IH 応用として、水からワンスルーで 450℃、0.3 MPa の過熱蒸気を発生効率 95% で発生できる装置 (IHSS) を製品化し、素形材以外の食品加熱や殺菌、脱脂などの分野にも適用拡大を図っている。また、従来の MOSFET 電源よりも小型 (体積を約 60% に低減) で、高効率化 (変換効率 97%) を図った 5 ~ 50 kHz、100 ~ 2,000 kW 高周波 IGBT 電源を製品化した。

Induction heating (IH) is non-contact method of heating that is highly efficient, highly controllable and provides a clean and safe working environment, and has been used in processes for forming and fabricating materials, such as melting metal and heating billets and plates. As an application of IH, Fuji Electric has also commercialized a once-through induction heating super steamer (IHSS) capable of generating 450°C and 0.3 MPa superheated steam from water with a generating efficiency of 95%. The range of applications for this product is expanding beyond use for forming and fabricating materials to the fields of food heating and sterilization and the removal of fat, and so on. Fuji Electric has commercialized 5 kHz-50 kHz and 100 kW-2,000 kW high frequency IGBT power supplies for IH. These are smaller than conventional power MOSFET power supplies (reducing the volume to about 60%) and have higher efficiency (conversion efficiency of 97%).

1 まえがき

地球温暖化問題に対して各方面で対策が行われ、CO₂ 排出量が製品性能評価の一つとなっている。そのため化石燃料から電気への熱源転換も加速している。誘導加熱 (IH) 技術は必要な部分のみ加熱が可能であり、コイルと加熱体の間に断熱施工できるため熱ロスが抑制できる。また、温度制御性が高く、急速加熱が可能である。

本稿では誘導加熱の新技术について、応用の面からのトピックとして、食品加熱、殺菌、脱脂などの分野に適用でき、業界最高の発生効率 95% の過熱蒸気発生装置 (IHSS: Induction Heating Super Steamer) と、従来の MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) 電源に代わり約 60% のコンパクト化と最大出力 2,000 kW を達成した 5 ~ 50 kHz 高周波 IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) 電源について紹介する。

2 過熱蒸気発生装置 (IHSS)

2.1 過熱蒸気の特徴と用途

過熱蒸気は飽和蒸気をさらに加熱したものであるため、ほとんど酸素を含まない気体である。食品加熱、殺菌、脱脂、廃プラスチックリサイクルなど多くの分野で使われ始めている。

(1) 過熱蒸気の特徴

過熱蒸気の特徴は次のとおりである。

(a) 極めて高い伝熱性

伝熱作用は熱伝導、放射、凝縮伝達の複合なので、熱伝導が主体の熱風に比べ、伝熱性が高い。

(b) 大きな熱容量

比熱が熱風の約 2 倍あり、加熱媒体として優れる。

(c) 高い乾燥力

約 170℃ 以上では蒸発速度が空気よりも速く、熱風よりも短時間で乾燥できる。

(d) 低酸素雰囲気

雰囲気の酸素濃度を 1% 以下にすることも可能なため、材料の酸化が防止できる。

(e) 有機物の低分子化

過熱蒸気の水分と熱による加水分解で有機物を低分子化してガス化できる。

(2) 過熱蒸気の使用

(a) 食品加熱

強い乾燥力と凝縮伝熱時の凝縮水が食材に侵入することで、外はカリカリ、中はジューシーと理想的な調理が可能となる。さらに加熱中の酸化が抑制できるのでビタミン破壊がなくうまみも保持できる。焙煎 (ばいせん) にも使われる。

(b) 殺菌

熱による殺菌と比べ、凝縮伝熱により菌の内部まで加熱できるので低温で殺菌でき、食の安全、食材の長期保存の面で期待は大きい。

(c) 脱脂

部品や切り子に付着する機械油や膜を分解し、ガスとして飛散できる。清浄化、リサイクルの高度化が図れる。

(d) 廃プラスチックリサイクル

ポリエチレン樹脂や、ポリプロピレン樹脂などのプラスチック材料を低分子化したものを板材化装置などの原料として供給するマテリアルリサイクルや油として取り出すケミカルリサイクルが可能となる。

(e) その他

乾燥や炭化も可能である。

これらの用途での蒸気温度を表 1 に示す。殺菌、焼成、

乾燥は 150℃ くらいで可能であるが、脱脂、炭化は 400℃ くらいが必要である。

2.2 過熱蒸気発生装置 (IHSS) の特徴

図 1(a) に示すようにこれまでは過熱蒸気を作るには、ボイラから飽和蒸気を供給し、蒸気配管の途中で誘導加熱 (IH) などにより蒸気を昇温する方法が一般的であった。ボイラは過熱蒸気を利用する場所から数百 m 離れたボイラ室に置く場合もある。途中配管やドレイントラップなど

の熱ロスなどで起動に 1 時間近くかかり、熱効率は 60% 程度である。IH 加熱の効率も 60% 程度でトータル効率 40% 弱である。

図 1(b) に示す IH を使った装置の市場要求は次のとおりである。

- (a) 省エネ化・熱源転換の要請から高効率で短時間起動でき、温度制御に優れ、コンパクトである。
- (b) 過熱蒸気を利用する機器に隣接もしくは内蔵でき、ボイラ免許不要で誰でも使用可能で、水から一気に過熱蒸気を生成するためボイラが不要な電気式である。
- (c) 部品の脱脂などでは 400℃ の蒸気空間が必要で、そ

表 1 過熱蒸気の利用別処理温度

温度	殺菌	焼成・焙煎	乾燥	脱脂・分解	炭化
400℃	○	○	○	○	○
300℃	○	○	○	×	×
150℃	○	○	○	×	×
120℃	○	○	△	×	×

表 2 技術課題

技術課題	解決策
高効率	誘導加熱現象が生じている熱をすべて回収
短時間起動	伝熱面積大の加熱体
コンパクト	磁界閉じ込め構造
ボイラ免許不要	簡易貫流ボイラ適合品

図 1 過熱蒸気発生方法

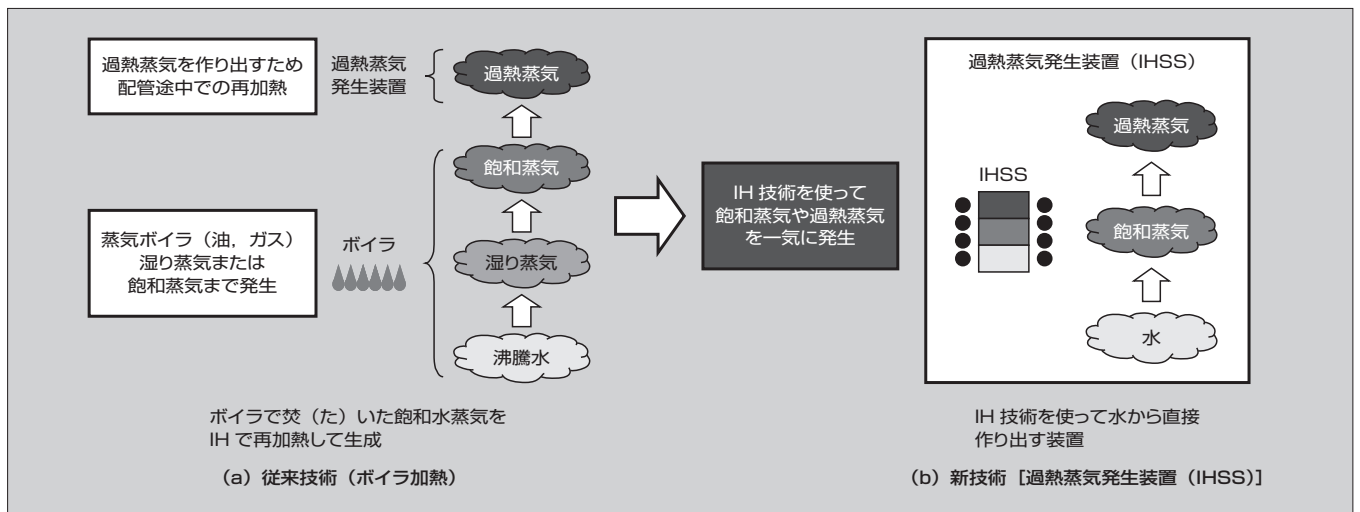
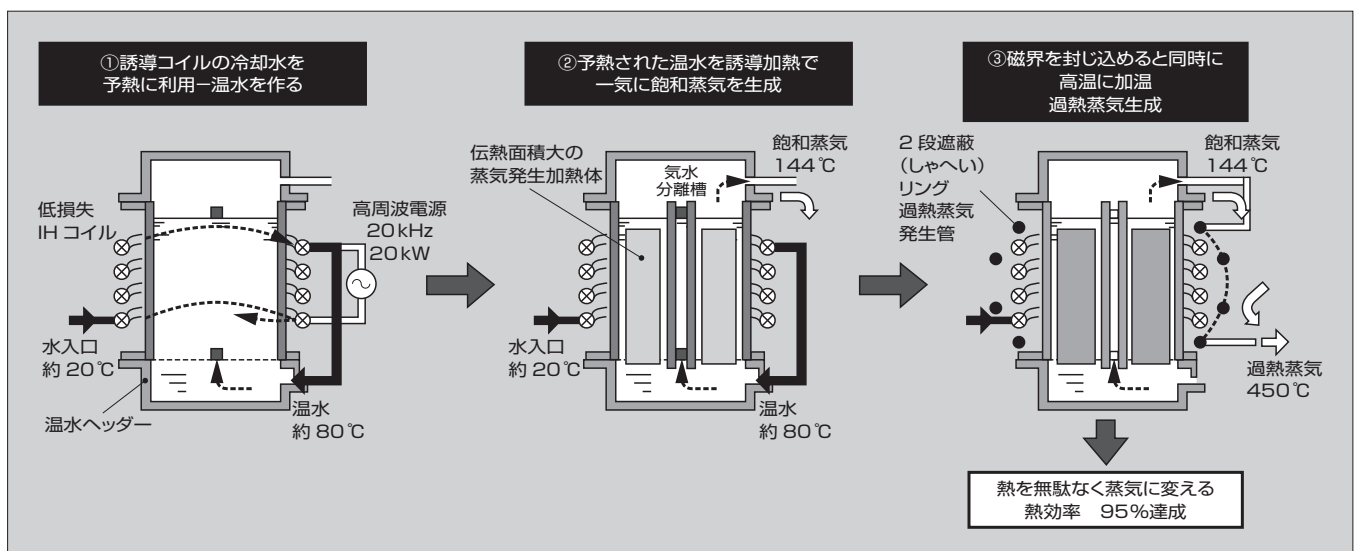


図 2 過熱蒸気発生装置 (IHSS) の過熱蒸気発生メカニズム



のため 450℃ 以上の高温の過熱蒸気を生成できる装置である。

IH は非接触加熱のため広い加熱エリアが確保でき、短時間加熱が可能である。この技術をベースに IH 式過熱蒸気発生装置を開発した。前述した市場要求を満たすため、表 2 の技術課題を独創的なアイデアで解決した。

IHSS の本体は、高周波電源に接続している IH コイル、IH コイル内側の蒸気発生加熱体、外側の磁界遮蔽（しゃへい）リング、蒸気発生加熱体下側の温水ヘッダー、上側の気水分離槽で構成される。蒸気発生メカニズムを図 2 に示す。

本体に供給された水は IH コイルのパイプ中を通りコイルを冷却する。そのため水温は入口で 20℃ ならば出口で 80℃ くらいになる。80℃ の温水は温水ヘッダーに導かれ、蒸気発生加熱体で加熱沸騰し、飽和蒸気になる。飽和蒸気の温度はゲージ圧 0.3 MPa では 144℃ である。この飽和蒸気は気水分離槽で乾いた蒸気となる。次に蒸気は磁界遮蔽リングを構成するパイプ内を通る。磁界を遮蔽するための誘導電流による加熱により、出口で 450℃ に昇温される。このように誘導加熱現象が生じているすべての熱を有効に活用しているため電源も含めた熱効率 95% を実現している。

磁界遮蔽コイルの内側に磁界が閉じ込められているから温水ヘッダー、気水分離槽や周辺部材に局部加熱が生じず、磁界漏れがないため環境性に優れ、かつ全体をコンパクトにできた。高周波電源には富士電機製の汎用インバータを使用した。

2.3 製品仕様

IHSS は、過熱蒸気を利用する機器に隣接して配置、もしくは内蔵できるように水から一気に過熱蒸気を発生する構成で、さらに短時間起動、高効率の特徴をもつ。操作者のボイラ免許は不要で、誰でも運転できる。制御も出口温度一定（±1℃）、圧力一定（±0.01 MPa）、電力一定（±0.1 kW）の各モードが用意され、正面のタッチパネルで設

定する。それぞれのモードで間欠運転も可能である。据付けもキャスト付きのため手押しで搬入できる。製品外観を図 3 に、製品仕様を表 3 にそれぞれ示す。なお本製品は東京電力株式会社との共同開発品である。

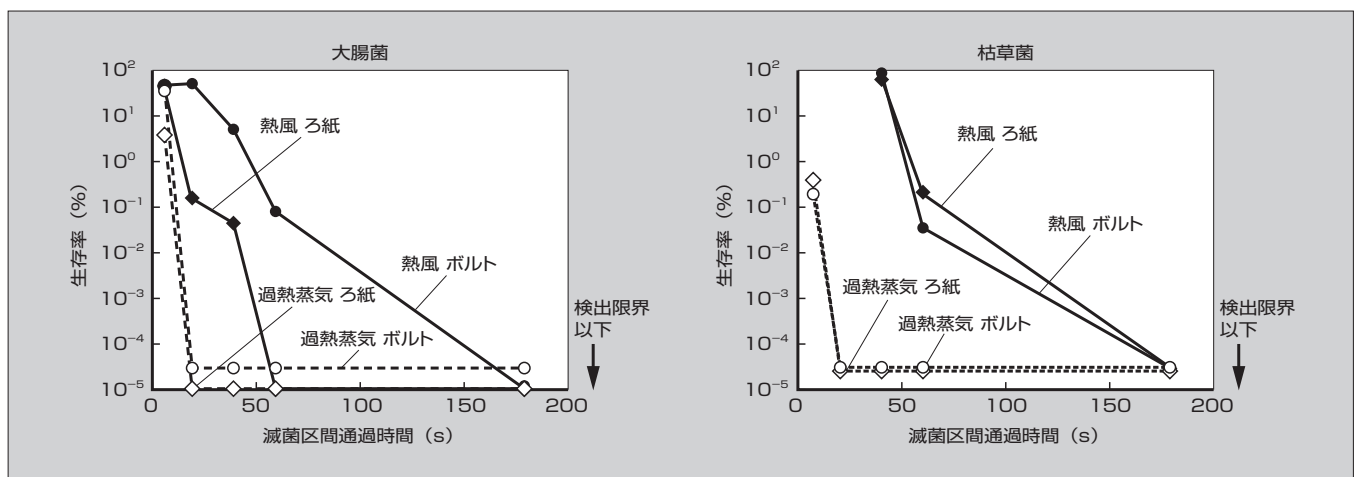
図 3 過熱蒸気発生装置（IHSS）製品外観



表 3 過熱蒸気発生装置（IHSS）製品仕様

形式	IHSS-20
蒸気発生量	20 kg/h
電源容量	20 kW
	20 kHz
蒸気最高温度	450℃
蒸気圧力	0.3 MPa
入力電圧	三相 AC200V
効率	95%
起動時間	15分（冷時）
水処理	逆浸透膜（オプション）
制御方式（運転方式）	蒸気温度一定運転 圧力一定運転、電力一定運転
構造規格	簡易ボイラ等構造規格
寸法	W700×D950×H1,000（mm）
質量	約 300 kg（キャスト付き）

図 4 コンベヤ殺菌評価



2.4 過熱蒸気発生装置 (IHSS) の適用

(1) コンベヤ殺菌実験

パン搬送コンベヤの過熱蒸気殺菌について試験を行った。パン工場はコンビニエンスストアに4~5回/日の頻度でパンを納入するため24時間操業となっており、連続式で安定した殺菌法の確立が急務である。過熱蒸気空間の場合と熱風空間の場合について、それぞれ雰囲気温度を300℃一定とし、コンベヤバー上のろ紙もしくはポルトに大腸菌、枯草菌を付着した実験結果を図4に示す。これから過熱蒸気の場合は熱風に比べ滅菌区間通過時間が1/10、すなわち10倍の搬送速度でも殺菌可能であることが判明した。

また、表4に示すようにサンプルと一緒に移動した熱電対で測定した温度も過熱蒸気の方が高かった。

(2) 試処理実験設備

IHSSの有効活用には過熱蒸気との反応容器が必要である。富士電機では顧客が目的に合った反応容器の設計ができるよう次の試処理実験設備を用意している。過熱蒸気による所望の処理を行う上での注意点は次のとおりである。

(a) 過熱蒸気であっても蒸気であるから100℃以下で

は凝縮水となる。そのためIHSSと処理装置間の配管、処理装置を100℃以上に予熱する必要がある。

(b) 処理装置内に外気の混入がないようにする必要がある。混入があると空間温度が一気に低下する。蒸気は空気よりも軽いため、上方にたまりやすい。そのため処理装置内に蒸気の流れを作る。

(c) 排気も露点以下では凝縮水となる。ドレイン抜きなどの対策が必要となる場合もある。

これらを顧客に体感していただくことと、実対象物の処理での条件出し、経済的検討を行うための試処理実験設備を顧客に開放している。

設備としては図5に示すようにベルトコンベヤタイプ、キルンタイプ、バッチタイプの3設備を用意している。ベルトコンベヤタイプはコンベヤ上に食材や板をのせ、蒸気空間滞在中に加熱処理できる連続処理系で、蒸気が屋内に漏れない構造となっている。キルンタイプも連続処理系で小型部品や切り子などの金属小片が羽根で攪拌(かくはん)されつつ蒸気空間を搬送されながら加熱処理される。バッチタイプはスパイラル蒸気流を作り蒸気の大空間を実現している。大型部品の加熱処理や廃プラスチックリサイクルなどに使用できる。

表4 サンプルと一緒に移動した熱電対で測定した際の到達最高温度

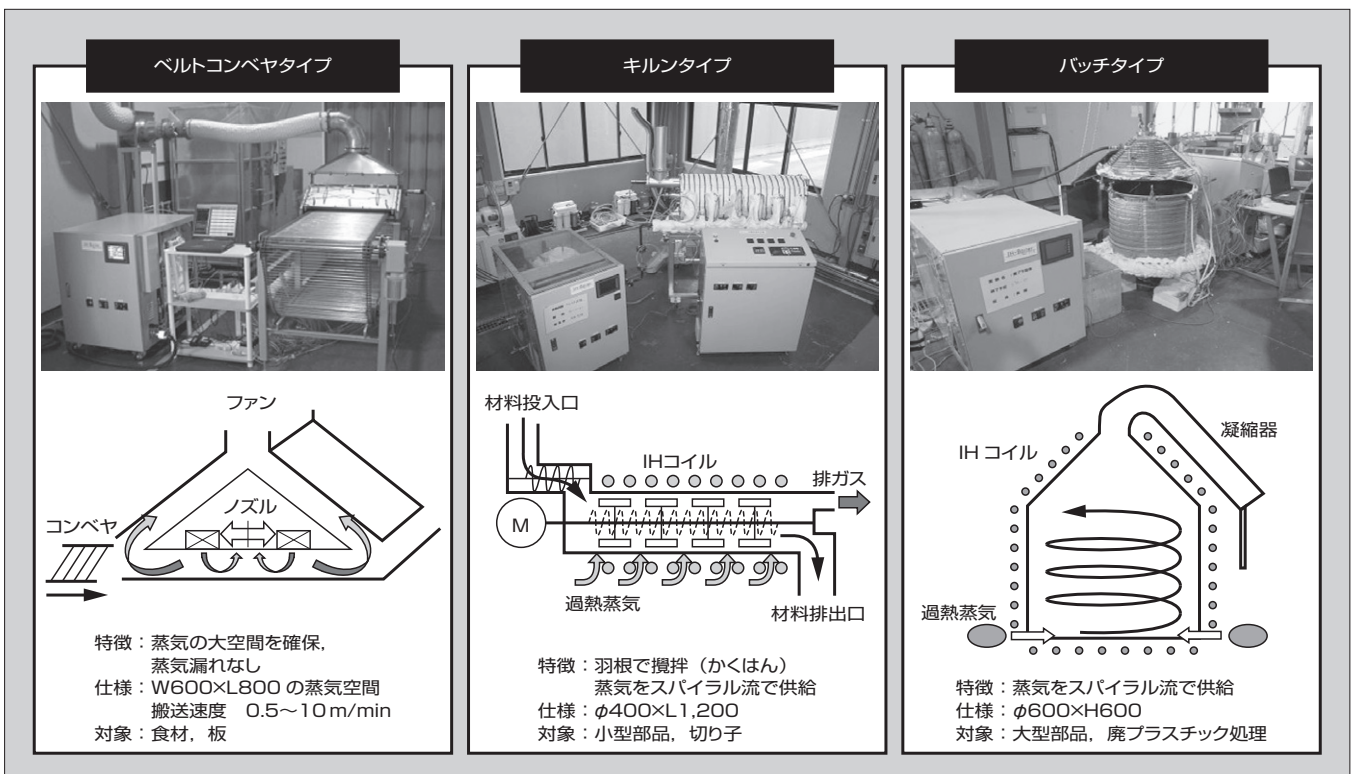
通過時間 (s)		6.7	20	40	60	180
搬送速度 (m/min)		6.2	2.1	1.1	滞留 1 min	滞留 3 min
最高到達 温度 (℃)	過熱蒸気	73	113	142	171	280
	熱風	64	101	99	159	224

3 高周波 IGBT 電源

3.1 開発の背景

熱処理などの燃焼炉を使用している顧客からは省エネルギー(省エネ)、CO₂削減や作業性改善などに対する要求が増加している。このため誘導加熱への熱源転換が進んで

図5 試処理実験設備



いる。

このような需要に応えるためには周波数が数 kHz から数十 kHz、出力電力が 1,000 kW 以上の大容量の高周波電源が必要である。図 6 に示すように従来の誘導加熱用電源のラインアップでは 5 kHz 以上の領域については 1,000 kW までの対応であった。また 10 kHz 以上の高周波電源は、電力密度の低い MOSFET を用いているため、電源盤の体積が大きくなる問題があった。近年は、電力密度の高い IGBT 素子のスイッチング速度が向上し、50 kHz までの周波数領域であれば IGBT 素子が適用可能になってきている。このような背景から周波数が 5 ~ 50 kHz の範囲で MOSFET 電源よりも小型で、最大 2,000 kW まで対応可能な高周波 IGBT 電源を製品化した。

なお、2 章で紹介した IHSS は、電源に IGBT インバータユニットを使用している。

3.2 高周波 IGBT 電源の特徴

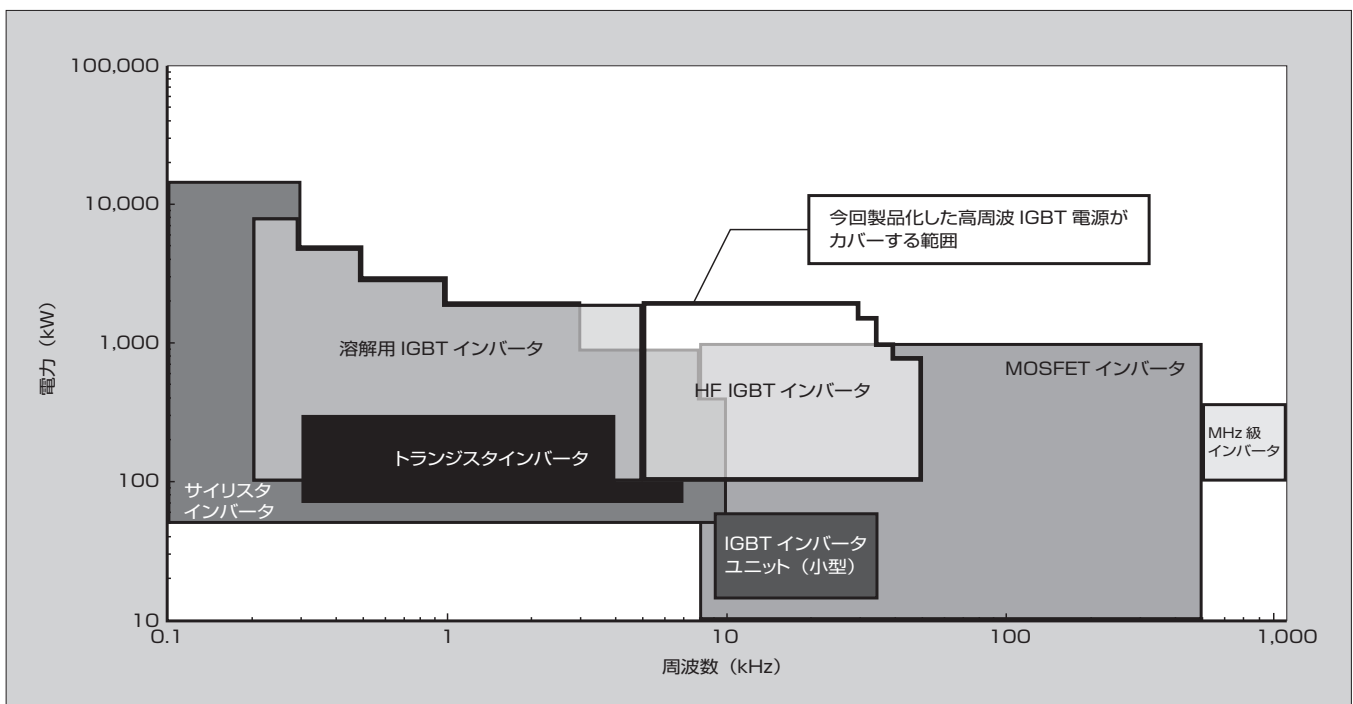
(1) 小型・高効率

IGBT モジュールを多並列接続したインバータスタックを新たに開発した。5 ~ 30 kHz の周波数において、1 スタックでこれまでの MOSFET インバータスタックに対し 2 倍の電力が出力できる。高周波 IGBT 電源盤の体積は、1,000 kW 機で比較すると MOSFET 式高周波電源盤の約 60% まで低減している。また、高周波電源部の変換効率は 97% 以上の高効率化を達成している。高周波 IGBT 電源盤の外観を図 7 に示す。

(2) 充実した保護機能

保護機能として、出力電流の過電流、整合回路部の接地検出、直流中間電圧の過不足検出、負荷回路の短絡検出がある。さまざまな事故に対して電源を確実に保護できるよ

図 6 高周波電源と適用デバイス



うになっている。

(3) 高入力力率と高調波の低減

ダイオード整流器と小容量の平滑コンデンサを組み合わせたことにより、入力力率は常に 0.95 以上を維持している。また、オプションで 12 パルス以上の多パルス整流にも対応していて、入力高調波の低減と 0.98 以上の入力力率にすることができる。

(4) 定電力制御と高速応答

負荷インピーダンスが出力電流制限範囲以内では電力が一定になるよう出力電流を制御し、制限値に達すると定電力制御から電流制限を優先する電流制限付定電力制御方式を採用している。インバータ出力側の電圧と電流の位相差を制御することで、出力電流の高速な制御応答を実現している。また、常に負荷回路の共振周波数の変化に追従して

図 7 高周波 IGBT 電源盤の外観 (500 kW, 30 kHz)



図8 主回路構成例

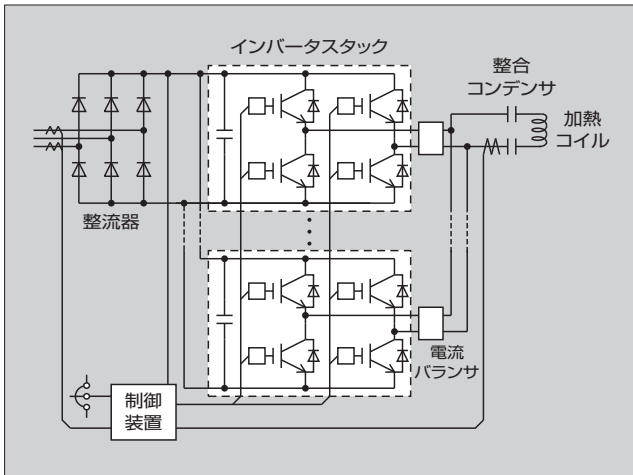
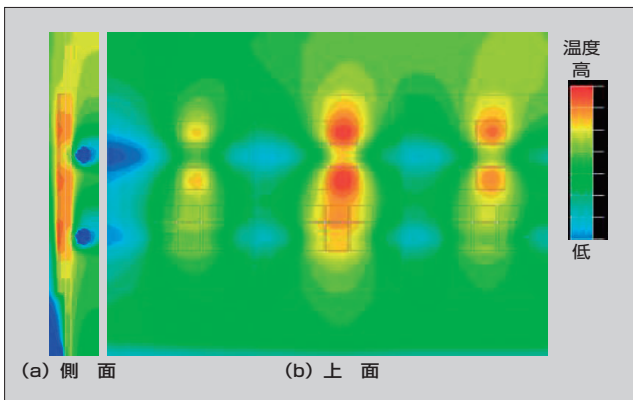


図9 三次元熱解析によるIGBTモジュールの温度分布



動作するため、被加熱物の温度や形状の変化による共振周波数やインピーダンスの変動に対して高速で安定した動作が可能である⁽³⁾。

(5) 操作性の向上

オペレータ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いる。運転データ、運転記録、故障内容、故障履歴などを表示し、運転状況が容易に確認できる。

3.3 主回路構成

図8に主回路構成例を示す。整流器はダイオードの三相順ブリッジ結線とし、インバータ部は2 in 1タイプのIGBTモジュールを多並列接続したフルブリッジ構成である。スタック内のIGBTモジュール接続導体はターンオフ時のサージ電圧を防止するためすべてラミネート構造で、インダクタンスが最小となるようにしている。また、低インダクタンス型の直流中間コンデンサを採用し、かつ中間コンデンサとIGBTモジュールの接続についても低インダクタンス構造を採用することで、スナバコンデンサを不要としている。さらに、IGBTモジュールを実装する冷却体についても図9に示すように、IGBTモジュール内部の半導体チップの位置に合わせ、三次元の熱解析により冷却パイプの配置を最適化している。

表5 標準系列と仕様

項目	仕様			
入力	3φ440 VAC±5% 周波数：50/60 Hz			
周波数	5 ~ 30 kHz		31 ~ 50 kHz	
出力電圧	954 V			
出力	電力 (kW)	出力電流 (A)	電力 (kW)	出力電流 (A)
	250	500	100	200
	500	1,000	200	400
	750	1,500	300	600
	1,000	2,000	400	800
	1,250	2,500	500	1,000
	1,500	3,000	600	1,200
	1,750	3,500	700	1,400
2,000	4,000	800	1,600	
制御範囲	5 ~ 100%			
制御対象	電力制御 (出力電流制限付き)			
インバータ形式	フルブリッジ			
効率	97%			
冷却方式	水冷式 (純水) 水温 5 ~ 38℃ (結露なきこと)			

3.4 標準系列の仕様と主な用途

本高周波電源の標準系列と仕様を表5に示す。用途例は以下のとおりである。

(1) 電縫管のアニール処理

電縫管溶接部分およびパイプ全体のアニール処理やストレッチ・レデュース前の加熱などがある。

(2) 水溶性塗料の乾燥

「大気汚染防止法」の改正に伴い、VOC (揮発性有機化合物) の排出規制が始まっている。この対応のため各種コーティング材や塗料を水溶性のものに切り換えると、有機溶剤に比べ乾燥に時間がかかるため、生産性が低下する。本電源を用いて対象物を誘導加熱することにより乾燥が早くなり、生産性が向上できる。

(3) 半導体製造

シリコンインゴットの製造用の溶解電源やエピタキシャル工程における加熱用電源に用いる。

(4) 焼き入れ・熱処理

高速応答を生かした、各種焼き入れ装置への適用や熱処理用燃焼炉からの置き換えなどがある。

4 あとがき

誘導加熱 (IH) 式の過熱蒸気発生装置 (IHSS) と IH の新技術として高周波 IGBT 電源について述べた。工場の電化推進などを通じ誘導加熱技術の高度化、応用分野の拡大により CO₂ 排出削減に寄与し、作業環境の改善を図るなど社会に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 鈴木寛一. “過熱水蒸気の食品分野への適用”. 第3回エレクトロヒートシンポジウム. 日本エレクトロヒートセンター. 2008.
- (2) 中山浩伸ほか. “過熱蒸気を用いた滅菌法の確立”. 第35回日本防菌防黴学会. 2008, no.11Pp-38.
- (3) 倉田巖ほか. 誘導加熱用高周波インバータ. 富士時報. 2007, vol.80, no.2, p.135-140.



藤田 満

電磁応用機器の開発業務に従事。現在、富士電機サーモシステムズ株式会社経営管理室技術企画部長。工学博士。電気学会会員。



倉田 巖

誘導加熱用インバータおよび応用製品の開発，設計に従事。現在、富士電機サーモシステムズ株式会社技術部グループマネージャー。電気学会会員。





*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。