

高周波、マイクロ波による誘電加熱の応用例と 応用装置について

山本 泰司 (やまもと やすじ) 山本ビニター株式会社 代表取締役社長

要約 高周波やマイクロ波を使った誘電加熱が工業加熱分野に利用されて既に 80 年以上が経過している。熱伝導率が悪く、容量や厚みの大きい被加熱物を急速に加熱できる熱源としては、誘電加熱に勝る熱源はないといえる。主な利用分野は、プラスチック、木材、食品、ゴム、セラミックスなどの加熱や乾燥が中心であるが、医療用としても古くから利用されている。周波数の違いにより加熱効果や加熱分布が異なり、被加熱物の種類や形状、また加熱目的などにより、周波数が選択されている。ここでは誘電加熱の最近の応用例と応用装置について紹介する。

1. はじめに

高周波やマイクロ波を使った誘電加熱が工業加熱分野に利用され始めたのは古く、1930 年代よりといわれている。当初は高周波 (3MHz ~ 300MHz) が使われ、第 2 次世界大戦後にマイクロ波 (300MHz ~ 30GHz) も利用されるようになった。当時の主な利用分野は、プラスチック、木材、繊維、紙、食品、セラミックスなどの加熱や乾燥が中心であった。身体を加熱する医療用としても古くから利用されている¹⁾²⁾。それ以降、誘電加熱は新しい加熱手段として、また従来使われてきた蒸気、熱風、抵抗加熱などの代替として、広範な分野において実用化、普及が進み現在に至っている。誘電加熱には様々な周波数が使われている。周波数の違いにより加熱効果や加熱分布が異なり、被加熱物の種類や形状、また加熱目的などにより、周波数 (主に ISM バンド) が適宜選択されている。ここでは誘電加熱の最近の応用例と応用装置について紹介する。

2. 連続式のマイクロ波減圧乾燥装置

マイクロ波加熱による食品の乾燥処理は、内部の水分の蒸発が急速におこなわれるため、発泡や膨化状態で乾燥させることができる。特に沸点を下げた減圧下にて乾燥処理をおこなうと、40℃ ~ 50℃ の低温で、迅速で高品質な乾燥が可能となる。例えば、即席麺に入れる卵食品などは、減圧下でのマイクロ波乾燥により、より均一な膨化が得られ、複水性 (湯戻り) の早

いふっくらとした製品仕上がりとなる。また、高温による変色や品質劣化を抑制できるため果物や野菜類なども高品位の乾燥が可能である。

表 1 に連続式のマイクロ波減圧乾燥装置の概略仕様、図 1 に概観を示す。本装置は、減圧缶体とその前後にダブルシャッターのついた投入・取出予備室、真空ポンプや凝縮機、トレイ搬送装置、減圧缶体にマイクロ波発振機と導波管類を取り付けた加熱乾燥室から構成されている。

食品は誘電損失の少ない樹脂製トレイに定量が投入され、搬入装置により 1 トレイごとにプッシャーで装置に押し込まれる。投入予備室にトレイが入るとシャッターが閉まり予備室を減圧し、同圧になると加熱乾燥室のシャッターが開き、加熱乾燥室へトレイが送りこまれる。一定時間加熱乾燥室を通過したトレイは、減圧された取出予備室に送り出される。加熱乾燥室のシャッターを閉じると、取出予備室を大気解放して、予備室のシャッターを開いて、トレイを搬送装置へ取り出す。このようにサイクリックにダブルシャッターを開閉し、減圧と大気解放を繰り返すことで、加熱乾燥室の減圧度を一定として連続した乾燥処理を可能としている。

マイクロ波加熱室は、減圧缶体の上部にマイクロ波照射口を持つマルチモードオープンとなっている。内部に設けた遮蔽板によりオープン内の空間を 2 - 3 室に分けている。加熱室ごとにマイクロ波電力を変える (PV 値: オープン空間体積当たりの投入マイクロ波電力) ことで、乾燥状態に応じた最適な電力密度 (PD 値: ワーク重量当たりの投入マイクロ波電力) を作りだしている。

本装置は、様々な食品の初期水分量や仕上げ含水率、最適な乾燥温度に合わせて、減圧度やマイクロ波出力などを細やかに条件設定できるようになっている。また、缶体内に放射温度計やサーモカメラを取り付け、食品の表面温度を監視しながらより安定した品質での乾燥を可能としている。

表1 連続式のマイクロ波減圧乾燥装置の概略仕様

周波数	2450MHz
マイクロ波出力	48kW (6kW×8台)
乾燥能力	40~50 kg/時間
真空度	5.33kPa (40mmHg、水の沸点 35°C)

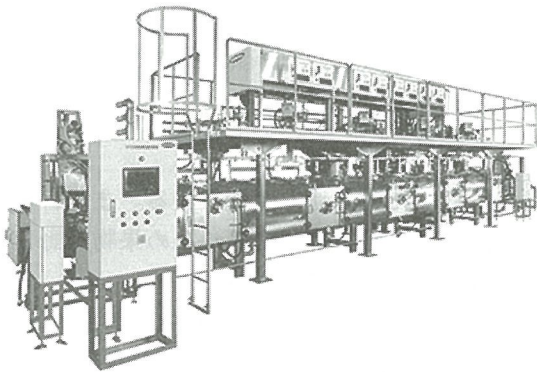


図1 連続式のマイクロ波減圧乾燥装置

3. マイクロ波による液体の濃縮装置

化学処理装置などから排出される懸濁液から固体成分を回収するために、懸濁液中の水分を沸騰蒸発させ、濃度の高いスラリーを得る工程がある。このような蒸発濃縮は、一般的には蒸気を熱源とした蒸発缶にておこなわれるが、これをマイクロ波の直接加熱により効率的におこなうことができる。

本装置は、マイクロ波加熱オープン、マイクロ波発振器・導波管類、排気・凝縮装置、搬入搬出装置などで構成されている。表2にマイクロ波濃縮装置の概略仕様、図2に概観を示す。懸濁液は、耐熱性があり、誘電損の少ない樹脂製ドラムに入れて濃縮される。マイクロ波発振器は、915MHzの100kWを2台使用している。大電力が必要なことと(245GHzでは6kW×34台となる)、電力半減深度が大きい915MHzが大径のドラムの加熱に適していることから915MHzを選定している。マイクロ波発振器は、それぞれシールドボックス内に収納することで、無線設備規則の漏洩基準を満たしている。

加熱室は、円筒状の大型マルチモードオープンとなっており、100kWの発振器より2分岐し計4本の導

表2 マイクロ波濃縮装置の概略仕様

周波数	915MHz
マイクロ波出力	200kW (100kW×2台)
蒸発能力	200~250 kg/時間
容器	樹脂製 200L ドラム φ576×H900mm

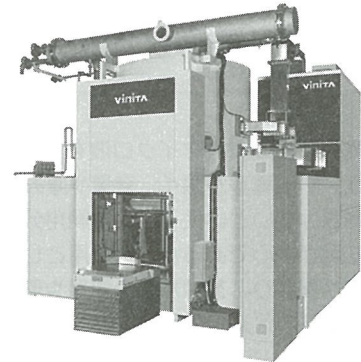


図2 マイクロ波濃縮装置

波管から200kWをドラムに向けて照射している。ドラムを乗せる昇降式のテーブルの下には、マイクロ波の影響を受けないように電子天秤が取り付けられており、加熱中は連続的にドラム重量を測定することができる。

一連の濃縮の操作は、次のようにおこなわれる。懸濁液の入ったドラムを加熱オープン内に投入し、加熱テーブルに置き加熱オープンを密閉し、マイクロ波加熱を開始する。懸濁液の沸騰蒸発により発生した多量の蒸気は、サーフェスコンデンサで凝縮して取り出す。水蒸気がサーフェスコンデンサ内で熱交換され凝縮するとオープン内が負圧となり、効率的な蒸気回収ができる。ドラム内の重量が減少すると、送水ポンプにより懸濁液を追加投入する。これを繰り返すことで濃度の濃いスラリーとして取り出すことができる。電子天秤の重量により、マイクロ波出力条件、また懸濁液の追加投入の条件などを細かく制御している。また、懸濁液が濃縮されてくると温度差、蒸気圧差ができ突沸が発生しやすい。本装置では、溶液内に攪拌翼を入れ攪拌することで、突沸を抑制している。

本装置では、もともと回収に使われていた樹脂ドラムをそのまま利用して濃縮ができ、そのまま次工程に移動させることができる。容器の入れ替えとそれに伴う洗浄、蒸発缶などの濃縮装置そのものの洗浄が不要になるなど利便性を向上させている。

4. 木材接着用の大型高周波プレス

木材接着は、接着剤を塗布した木材どうしを密着さ

せ、接着剤が硬化するまで圧縮する必要があり、圧縮にはプレスが使われる。高周波接着プレスは、プレス定盤に高周波電極板を組み合わせたもので、圧縮しながら高周波誘電加熱することができるため、効率のよい接着をおこなうことができる。

CLT (Cross Laminated Timber) とは、ラミナと呼ばれる木材の挽き板を繊維方向が直交するように積層接着した厚板パネルである。厚み 270 mm、幅 3 m、長さ 12 m という巨大なパネルも製造されている。断熱性、遮音性、耐火性や強度に優れ、近年欧米では構造躯体として中・大規模の集合住宅や商業施設などに広く利用され、日本においても普及が進みつつある。

通常の CLT は、ラミナを幅はぎ接着することはないが、高周波加熱を利用するとラミナ同士が幅はぎ接着された強度性能や意匠性の高い CLT を効率的に生産することができる。ラミナの側面と上面にレゾルシノール樹脂系などの接着剤を塗布し、その後に強軸と弱軸を直行して積層する。高周波プレス内にて全体を 2 枚の対向する電極板で挟んだ後、前後、左右方向の側圧と上下圧を 3 方向から加圧して高周波加熱する。高周波発振器は、周波数 13.56 MHz、出力は 100 kW ~ 300 kW と大出力なものが使用されている。表 3 に木材接着用の高周波プレスの概略仕様、図 3 に概観を示す。ラミナの幅はぎ部は、接着剤層と電極が垂直となり選択加熱され、積層部は平行となり全体加熱され、10 分から 15 分という短時間で全ての接着層が同時に高周波加熱され接着硬化する。

5. 半導体式の小型高周波接着機

電子管を使った高周波発振器の大出力化が進む一方で、ハンディな半導体式の高周波発振器の普及も進んでいる。周波数は、ISM バンドの 13.56/27.12/40.68 MHz が使われており、出力は 100 W ~ 5 kW 程度である。発振器と整合器が一体となり電極部を分離したもの、発振器と整合器、整合器と電極部を同軸ケーブルで分離したタイプなどがある。電子管式と比べて、コンパクトで軽量である。また、商用の 100 V 電源が利用できる (500 W 以下)、電子管のような寿命がない、予熱なく直ぐに加熱できるなどの利点もある。

半導体式の発振器は、PVC シートの溶着加工や食品解凍などにも利用されているが、ここでは木材加工としてのスポット接着について紹介する。表 4 に半導体式高周波接着機の概略仕様、図 4 に概観を示す。本装置は、本体内に電源部、発振部、整合部、制御部がオールインワンで内蔵されており、接着する電極部

表 3 木材接着用の高周波プレスの概略仕様

周波数	13.56MHz
高周波出力	150kW
プレス圧力	上下圧 780ton、前後側圧 10ton、左右側圧 60ton
電極サイズ	幅 2.3m×長さ 8.2m

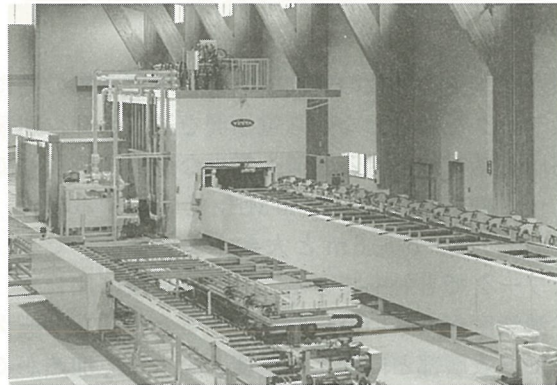


図 3 木材接着用の高周波プレス

表 4 半導体式高周波接着機の概略仕様

周波数	40.68MHz
高周波出力	400W
電源	AC100V 1KVA
装置サイズ	335 mm×330 mm×H685 mm

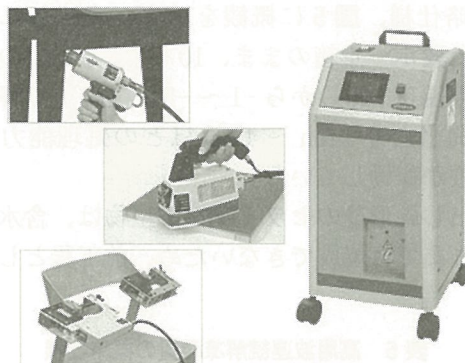


図 4 半導体式高周波接着機

とは同軸ケーブルで接続されている。作業者は、電極部を接着剤が塗布された材料表面に押し当て、電極部の手元スイッチを ON する。所定の出力で所定の時間、高周波電力が供給され、接着加工が終了する。

電極部は、一对のプラスとマイナスの電極で構成されるが、接着物や加工方法に応じて、様々なタイプを利用することができる。例えば、椅子やテーブルなどの家具部材の接続部分の加熱には、手動の締め付け部をもつクランプタイプの電極を使う。化粧板などの表面接着用のアイロンタイプの電極では、洋服などに使うアイロンと同じ感覚で材料に電極を押し当て滑らすことで加熱接着ができる。ピンポイント接着用には、先端に電極がついたガンタイプがある。加熱したい所

に先端部分を接触させて起動させるだけで、電極先端周辺が集中的に加熱接着される。多種多様な加工を装置一台で電極部を交換するだけで対応する事ができ、色々な加工ニーズに応えることができる。

6. 連続式の高周波解凍装置、乾燥装置

搬送ベルトを2枚の対向する平行平板電極の間に入れ、ワークを搬送しながら電極間を通過させ、連続的に高周波誘電加熱する装置も様々な分野で普及している。一对の電極板は、13.56MHzを使用する場合、幅2～3m、長さ5～6mと大きくすることができ、大きなワークでも対応できる。マイクロ波に比して、電力半減深度が大きい厚みのある立体的なワークに対しても表層部と内部との温度差を少なく加熱ができる。また、搬送ベルトの上にワークを多列で流しても均一な加熱ができるなどのメリットがある。発振器の1台当りの最大出力は、マイクロ波2450MHzの場合は6kW、915MHz場合は100kWとなるが、高周波の場合、100kW～300kWと大出力化ができ有利である。

畜肉や魚肉などの冷凍原料の解凍には、高周波連続解凍装置が普及している。表5に高周波連続乾燥装置の概略仕様、図5に概観を示す。凍結された原料の入った段ボール箱のまま、10～30分程度の通過時間で初期温度-20℃から-1～-3℃程度まで解凍できる。時間当たり1ton～4tonほどの処理能力を持つ大型装置が稼働している。

押し出し成形後のセラミック成型物は、含水率が高くそのままでは焼成できないため、前工程として全乾

表5 高周波連続解凍装置の概略仕様

周波数	13.56MHz 又は 27.12MHz
高周波出力	50kW×3台 計150kW
解凍能力	3ton～4ton/時間
解凍温度	-20℃ → -2℃～-5℃

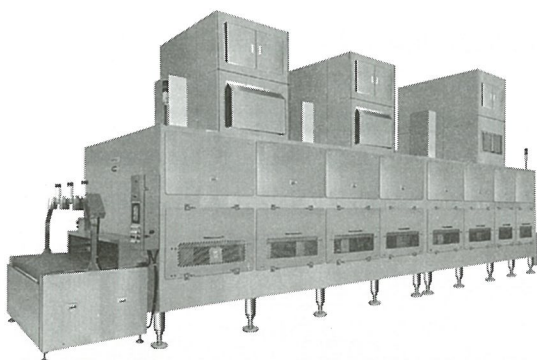


図5 高周波連続解凍装置

に近い状態にまで高周波加熱と熱風による乾燥がおこなわれている。上下の電極間に、60～120℃の熱風を出口部から入口部へと循環させることで、ワークから出る大量の蒸気を加熱室外へ排出させ、高率的な乾燥を実現している。表6に熱風併用式の高周波連続乾燥装置の概略仕様、図6に概観を示す。高周波発振器を1台として乾燥室が1室の場合もあるが、通常は高周波発振器を2台、3台とし乾燥室を複数持つ装置が多い。乾燥の進行とともに、高周波出力や整合状態、温湿度条件を変えることで効率的な乾燥を実現している。

表6 熱風併用式の高周波連続乾燥装置の概略仕様

周波数	13.56MHz
高周波出力	150kW×3台 計450kW
乾燥能力	蒸発水分量 400～500kg/時間

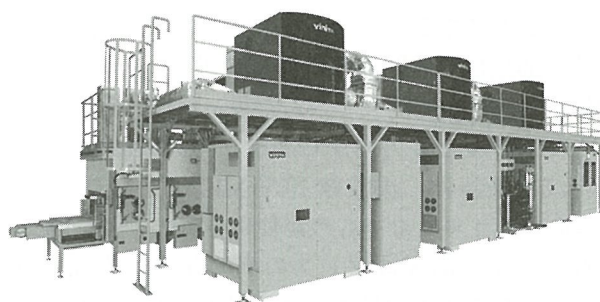


図6 熱風併用式の高周波連続乾燥装置

7. おわりに

プラスチック、木材、食品、ゴム、セラミックスなどの製造や加工において、「加熱」は欠くことができない重要な工程である。その熱源としては、古くより蒸気、熱風、熱盤など様々な手段が用いられているが、熱伝導率が悪く、容量や厚みの大きい被加熱物を急速に加熱できる熱源としては、マイクロ波や高周波による誘電加熱に勝る熱源はないといえる。従来の加熱手段よりも省スペース、省人化だけでなく、省エネを実現することができる。今後も誘電加熱技術の研究開発、応用分野の開拓に努力していきたい。

参考文献

- 1) 熊谷三郎、藤本三治：高周波加熱装置、日刊工業新聞社、1966、p.121-143
- 2) 柴田長吉郎：工業用マイクロ波応用技術、(株)電気書院、1986、p.1-19