

特集記事

幅広い分野で実用化が進む MW 加熱装置

The practical application of MW heating systems is progressing
in a wide range of fields



山本ビニター株式会社 山本 泰司
Yamamoto Vinita co., Ltd., Yasuji Yamamoto

〒543-0002 大阪府大阪市天王寺区上汐 6-3-12
e-mail: yamamoto@vinita.co.jp

1. はじめに

先の COP28 において、2030 年までに世界全体の再生可能エネルギーの発電容量を 3 倍、エネルギー効率改善率の世界平均を 2 倍とすることが合意された。エネルギー消費の大きな産業部門、特に製造プロセスのエネルギー効率の改善には、誘電加熱の利用拡大は欠かせないものである。

この加速されるカーボンニュートラル、電化の流れの中で、省エネ技術として製造プロセスにおける従来の加熱を誘電加熱に置き換える検討が急速に高まり、新しい利用システムの実用化が進みつつある。ここでは、加熱対象物の様々な形態に合わせシステム化されたマイクロ波加熱装置、特に大電力による量産システムについて紹介する。

2. 個体、立体成形物加熱システム

2-1 熱風併用連続式乾燥

セラミック、食品、木質材などからなる立体成形物は、様々なサイズや形状が存在している。これらの多種多様な成形物に対応するため、2.45GHz、900MHz 帯のマイクロ波や 13.56MHz、27.12MHz、40.68MHz の高周波から最適な周波数が選択されている。それは立体成形物の形状・大きさ及び、誘電率・導電率などの電気特性の違いによる周波数に依存する加熱分布への影響が大きいためである。またコンベアに多列で並べる連続処理において、個々のワークの加熱均一性からも使用できる

周波数が選択される。ここでは 2.45GHz、900MHz 帯のマイクロ波を使用した乾燥装置と 40.68MHz の高周波を使用した乾燥装置について紹介する。

マイクロ波乾燥機の特長は、マイクロ波の内部加熱と熱風や蒸気の外部加熱を併用することで被加熱物の内外温度を均一に保ちながら高速に加熱乾燥できることである。オープン内に温度と湿度を制御した熱風を投入し、雰囲気を一定条件に保つと共に発生蒸気を機外排出している。連続式のマイクロ波乾燥機においては、電波漏洩防止対策が必要となる。一般的には、オープンの前後に $\lambda/4$ チョーク構造と電波吸収体を組み合わせたトラップゾーンを設ける。立体成形物のワーク高さが高い場合は、出入口部分にダブルシャッター構造と電波吸収体による対策がなされる。立体成形物が通るたびに金属シャッターが高速開閉する構造であり、金属シャッターを 2 回通過してマイクロ波加熱部に入りすることで常に一方のシャッターが閉まり、マイクロ波の外部への漏洩を遮断する仕組みとなっている。

Fig.1 は、2.45GHz のダブルシャッター式の熱風併用連続乾燥装置である。周波数は、2.45GHz、出力 264kW (6kW×44 台)、水分蒸発能力は、250-280 kg/hr である。幾つかにゾーンニングされたマルチモードマイクロ波乾燥室に残存水分に合わせて最適な PD 値 (ワーク重量当たりの投入電力、kW/kg) となるように 44 本の導波管を振り分けて接続している。

Fig. 2 は、900MHz 帯のダブルシャッター式の熱風併用連続乾燥装置である。周波数は900MHz 帯、出力100kW (1台)、水分蒸発能力100~120 kg/hr である。900MHz 帯を使用することで大型の立体成形物の均一加熱を可能としている。900MHz 帯は日本ではISM 周波数ではないため携帯電話など通信機器と干渉がない状態としなければ使用することができない。厳重な電波漏洩対策が必要でありそのコストが発生するが、発振器が1台で100kW を出力できるため乾燥炉体に接続される導波管経路は単純化され、発振器制御も1台分となることから、2.45GHz と比較して設備コスト低減の効果がある。



周波数	2.45GHz
出力	264kW (6kW×44台)
水分蒸発能力	250~280kg/時間

Fig. 1 2.45GHz、熱風併用連続式乾燥装置



周波数	900MHz 帯
出力	100kW (100kW×1台)
水分蒸発能力	100~120kg/時間

Fig. 2 900MHz 帯、熱風併用連続式乾燥装置

Fig. 3 は、高周波帯を利用した熱風併用連続乾燥装置である。周波数は40.68MHz、出力600kW(100kW×6台)、

水分蒸発能力600~700kg/hr である。ISM 周波数の高周波帯で大出力発振器を利用することで、マイクロ波帯と比較して設備コストを低減できる。複数ライン導入するメガワット級のプラントで導入実績がある。また、同じ高周波帯の13.56MHz では最大で300kW の発振器も開発されている。



周波数	40.68MHz
出力	600kW (100kW×6台)
水分蒸発能力	600~700kg/時間

Fig. 3 40.68MHz、熱風併用連続式乾燥装置

2-2 減圧下連続式乾燥

常圧下におけるマイクロ波乾燥の場合、ワーク温度は100℃前後に加熱されるが、減圧下として沸点を下げることで低温での乾燥が可能である。例えば、食品などにおいて、熱による品質劣化を防ぐことを目的としてマイクロ波減圧乾燥が利用されている。

Fig. 4 は、食品の低温乾燥に使われている連続式マイクロ波減圧乾燥装置である。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、真空ポンプや凝縮器、トレイ搬送装置、減圧缶体にマイクロ波発振器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。周波数は2.45GHz、出力48kW (6kW×8台)、減圧度5.33kPa (水の沸点35℃)、水分蒸発能力は50~60 kg/hr である。

食品はPP製の食品運搬用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込まれる。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だされる。このようにサイクリックにダブルシャッターを開閉し、減圧と大気開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複数に分け、加熱室ごとにマイクロ波電力を変え、乾燥状態に応じた最適なPV値（オープン空間体積当たりの投入電力、kW/L）を作りだしている。



周波数	2.45GHz
出力	48kW (6kW×8台)
水分蒸発能力	50~60kg/時間
真空度	5.33kPa

Fig. 4 2.45GHz、減圧連続式乾燥装置

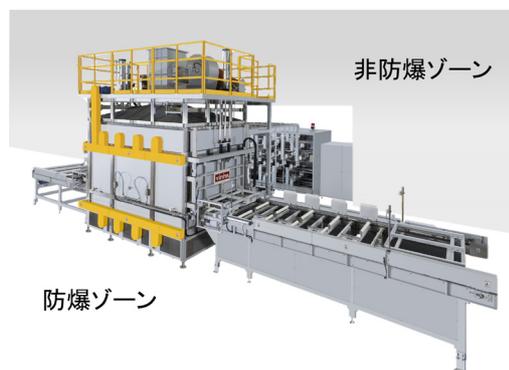
3. 液体、スラリー加熱システム

3-1 防爆対応のバッチ式加熱反応

マイクロ波加熱により、可燃性ガスや可燃性液体の蒸気が空気中に放出される可能性がある場合は、システムを防爆仕様とする必要がある。Fig. 5は、防爆環境下に対応したバッチ式のマイクロ波加熱装置である。混合された反応液に対してマイクロ波加熱をおこなうことで、プラスチック発泡体を成型する。反応液が大容量であっても、攪拌せずに均一に加熱することができ、短時間処理が可能である。本装置は、前後にシャッター扉をもつ通過型の反応炉本体部、プッシャー式のワーク揺動部、排気用大型ファン部、前後搬送装置部、非防爆エリアに配置したマイクロ波発振器部、熱交換器部、操作制御盤部から構成されている。周波数は2.45GHz、

出力150kW (6kW×25台)、通気流量300 m³/min。

反応液は、PP製ボードで構成された大型ケースに充填され、蓋をした状態で投入装置により反応炉本体に投入される。ケースが投入されると前後のシャッターが閉まりプッシャー式の揺動装置により、ケースが揺動を繰り返しながら上下多方面からスターラファンで攪拌したマイクロ波により反応液を加熱する。反応炉本体の底面、天面はそれぞれパンチング加工され、ガス検知センサにより制御された強制ファンにより、常に反応炉内が安全なガス濃度に保たれるように通気される。防爆ゾーンである反応炉体周辺に配置するファン、モーター類、制御機器、センサ類すべては、防爆対応の機器を使用している。防爆対応が難しいマイクロ波発振器、電源器部は非防爆ゾーンに設置し、マイクロ波は反応炉体に導波管を通じて伝送される。



周波数	2.45GHz
出力	150kW (6kW×25台)
通気流量	300 m ³ /min

Fig. 5 2.45GHz、防爆対応加熱反応装置

3-2 連続式濃縮処理

液体の連続加熱としては、シングルモード内にPTFEやアルミナ製の管を挿入し、この管の中に薬液や食品などの液体やスラリーを連続的に還流させマイクロ波加熱する方式がよく知られている。これに対してFig. 6は、大型のマルチモードオープンによる液体の連続加熱装置である。本装置は、化学処理装置などから排出される懸濁液から個体成分を回収することを目的として、懸濁液中の水分をマイクロ波加熱により蒸発させて、濃度の高いスラリーを得る。一般的には蒸気を熱源とした蒸発缶にておこなわれているが、これをマイクロ

波加熱により効率的におこなうことができる。

本装置は、マイクロ波加熱炉、マイクロ波発振器・導波管類、排気・濃縮装置、搬入搬出装置などで構成されている。周波数は900MHz帯、出力は200kW（100kW×2台）、水分蒸発能力は200-240 kg/hrである。懸濁液は耐熱性があり誘電損失の低い樹脂製ドラムに入れて加熱濃縮される。処理量から大電力が必要なことと、2.45GHzと比較して電力半減深度が深く大径ドラムの加熱に適していることから900MHz帯を選定している。加熱炉は密閉系とし、発振器をシールド筐体内に設置することで装置全体のシールド性能を向上させている。



周波数	900MHz帯
出力	200kW（100kW×2台）
水分蒸発能力	200～240kg/時間

Fig.6 900MHz帯、連続式濃縮装置

加熱炉は、円筒状のマルチモードで構成しており、1台の発振器に対して導波管を2分岐して、計4ヶ所の照射口から200kWの電力をドラムに向けて照射している。ドラムを乗せるテーブルには、マイクロ波の影響を受けないようにシールドした電子天秤が取り付けられており、ドラム内の重量が減少すると、供給ポンプで懸濁液をドラムに追加投入する。これを繰り返すことで濃度の高いスラリーとして取り出すことができる。懸濁液が濃縮されると温度差や蒸気圧差が生じ、突沸が発生しやすくなるので、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るため容器の入れ替えや洗浄などが不要となり利便性が高い。

4. フィルム・シート加熱システム

4-1 Roll to Roll 式加熱

フィルムやシートの加熱、またはフィルムやシートに塗布されたペーストや塗料をマイクロ波加熱する場合、表面積が大きい平面的な均一加熱が難しく、また放熱が多いため加熱効率が低くなってしまいます。このようなフィルムやシートを連続的に効率よく加熱する方法として、シングルモードを利用したRoll to Roll式マイクロ波加熱装置が使われている。

Fig.7はシングルモードアプリータを使いRoll to Roll方式によりフィルムやシート、またはそこに塗布されたペーストや塗料を連続で加熱、乾燥する装置である。周波数は2.45GHz 或いは900MHz帯が使用でき、出力は能力に合わせて大電力化が可能である。アプリータは、厚板AL製ブロックをNC加工で「U」の字状にリターンさせた溝加工を施したものを導波管とした「折り曲げ導波管」を使い、導波管内の最も発生電界強度が高い部位にフィルムやシートが通過する。アプリータを複数のユニットに分けて構成することにより、定在波の位置をずらして平面的な加熱ムラを抑制している。また、発生した水分がアプリータ内で結露しないように強制給排気用の抜き穴があり、熱風を併用している。本装置の特長は、発生電界強度が高いことであり、乾燥だけでなく発泡や膨化処理にも向いている。2.45GHzを利用すると、被加熱物の厚みは最大10mm程度までの対応となるが、900MHz帯を利用するとより厚いものへの対応が可能となる。

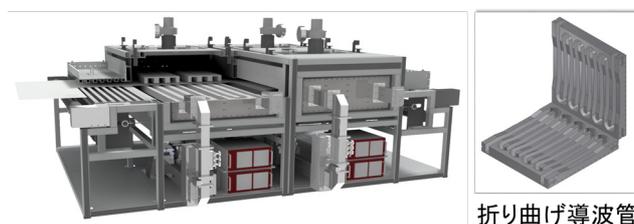


Fig.7 Roll to Roll式連続装置

5. 粉粒体加熱システム

5-1 粉粒体混合併用のバッチ式加熱

粉粒体を効率的に均一に加熱するには、粉粒体を攪拌、流動させる必要がある。粉粒体を攪拌加熱できる円錐型リボン混合・攪拌乾燥機（株式会社大川原製作所製）

にマイクロ波加熱を組み合わせたマイクロ波加熱リボコーン (Fig. 8) が実用化されている。周波数は、2.45GHz、または900MHz帯が使用でき、出力は処理量に合わせて、大電力化が可能である。

リボコーンは、逆円錐型容器内でリボン形状の回転翼が回転することで Fig. 8 右図のように粉粒体を上下に混合・攪拌させる構造である。逆円錐型容器はジャケット構造であり、循環する熱媒 (温水、蒸気、熱媒油など) の伝導伝熱により被乾燥物を加熱し、その乾燥時に発生した蒸気は真空引きの流れによりバグフィルター、凝縮器を通りドレンタンクに回収される。減圧下で攪拌・混合が速く粉粒体を均質に加熱乾燥できることが特長である。このリボコーンの真空伝導伝熱に加えて、真空減圧下でも大気圧下と変わらずエネルギーを効率的に与えられるマイクロ波の特長を組み合わせることで、粉粒体乾燥の乾燥時間が大幅に短縮されると共に凝集物の形成を抑制する効果が確認されている。今後は従来リボコーンで難しかった伝熱係数が小さく加熱しにくい粉粒体及び、凝集しやすい粉粒体の乾燥などへの適用が期待されている。

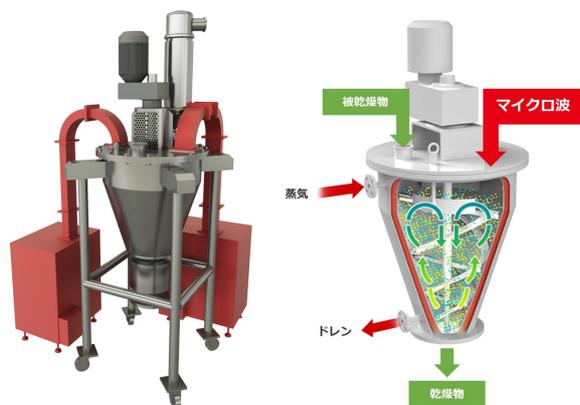


Fig. 8 粉粒体用マイクロ波加熱リボコーン

6. 終わりに

山本ビニターは、今年で創業 70 年となる誘電加熱装置の専門メーカーである。一貫して木材・プラスチック・食品・ゴム・セラミック・医療など様々な分野における加熱・乾燥・接着・溶着・解凍などの加熱目的に利用される高周波・マイクロ波装置の製造販売をおこなってきた。

これまでは対象となる産業や加熱対象物は限られ、誘電加熱装置の市場は限定的であった。そこで「電波加

熱研究所」というウェブサイトを開設し、誘電加熱に関する豊富な技術情報を公開すると共に、工場内に様々な周波数・出力・加熱方式の誘電加熱装置によるトライアル試験ができるテストラボを設けるなど、誘電加熱の利用拡大に取り組んできた。さらに 70 周年を契機に「あらゆる加熱に関する困りごと」に対して、誘電加熱でソリューションを提供することをビジョンとし、「Creating Tomorrow with e-Wave (電波加熱で明日を創造する)」のスローガンを制定した。

加熱に関する困りごとを解決する誘電加熱ソリューションの提供には、単に高度な誘電加熱技術だけでなく、様々な加熱対象物・加工用途に応じたエンジニアリングやシステム設計などの総合的なものづくり技術が求められる。当社は、コア技術を誘電加熱一本に絞り込み、これらの総合ものづくり技術を高めることで、社会的要請であるカーボンニュートラル、省エネ化に貢献していきたい。