

ELECTRO-HEAT

エレクトロ

ヒート

2017 NO.215

平成29年9月発行

特集

マイクロ波加熱・高周波誘電加熱
の最新動向

特別
寄稿

歴史からみたヒートポンプ技術と産業応用

特別
寄稿

ヒートポンプの冷媒の動向と課題

特別
寄稿

低炭素社会の実現に向けた水素エネルギー



一般社団法人

日本エレクトロヒートセンター

JAPAN ELECTRO-HEAT CENTER

実験検証を踏まえた生産装置の開発・導入

～新型マイクロ波実験装置の紹介～

花井 辰矩 (はない たつのり) ミクロ電子株式会社 営業部 営業技術 G

要約 マイクロ波は、ゴム、セラミックス、食品、医薬品等、様々な分野で利用が広がっており、弊社にも多数の引き合いがある。ただ、興味を持ち新規でマイクロ波加熱装置を検討する企業の中には、マイクロ波の有効性や問題点、コストといった疑問によって導入を躊躇されるケースが多々ある。そこで、弊社では所有しているマイクロ波実験装置を使用して実際にマイクロ波実験を実施し、マイクロ波を導入したい案件について有効か検証しつつ、どのような装置にすべきかスケールアップを含めて提案している。本稿では現在弊社で使用可能なマイクロ波実験装置の他、実験から生産装置にスケールアップした事例や、新しく開発中の装置についても紹介する。

1. はじめに

ミクロ電子株式会社は1973年に設立し、来年2018年には45周年を迎える工業用マイクロ波加熱装置専門メーカーで、自動車部品用のマイクロ波ゴム連続加硫装置(図1:以下UHFとする)をきっかけとして設立した。UHFは自動車の窓やドア周りに付けるウェザーストリップ製造装置として欠かせないものとなり、現在では国内外の自動車部品メーカーに広く納入実績がある。また、自動車用だけでなくOAロールといったゴム製品、セラミックスフィルタの乾燥、もやし豆殺菌や茶葉の火入れ、医薬品原料粉末乾燥、等々の多様な用途、業界に向けて工業用マイクロ波加熱及び乾燥装置を要望に応じて製作している。

弊社では、商談のベースとなる装置は存在するが、基本的にお客様の要望に応じた装置をオーダーメイドで製作している。お客様の設備仕様に合わせる他、加

熱対象物(以下ワークとする)に対してマイクロ波が有効に作用するよう装置を構成する。このとき、ワークのマイクロ波吸収特性が設計に大きく影響するため、事前にマイクロ波加熱実験を行って挙動を検証してから装置化することが多い。また、実験を行うことで、マイクロ波加熱装置の導入を考えている案件に対する有効性や問題点、バッチ式か連続式かと言ったマイクロ波の適した使用方法も見ることができる。そのため、実験からスケールアップしたマイクロ波加熱装置を導入することで、生産を開始した際の混乱を少なくすることが可能である。

ここ最近では弊社のマイクロ波実験機が以前にも増して充実しており、これまで困難であった案件に関しても実験が可能になったケースもある。本稿では新開発の実験装置と使用可能な実験装置、及び実験から装置導入に至った事例を紹介する。

マイクロ波の加熱原理に関しては詳細を割愛するが、簡単にマイクロ波の特長を説明すると、マイクロ波がワークに浸透し、吸収されて内部から加熱される「内部加熱」であることと、ワークがマイクロ波エネルギーによって「直接加熱」されることである。また、加熱する材質によってマイクロ波吸収特性が大きく異なり、これを「選択加熱」と呼ぶ。

もし、マイクロ波加熱の原理についてもっと詳しく知りたいという方は、弊社HPにある「マイクロ波加熱の基礎知識¹⁾」という項目で説明しているため見ていただきたい。



川越ものづくりブランド
KOEDO E-PRO 認定品

図1 マイクロ波ゴム連続加硫装置 (UHF)

2. 工業用マイクロ波加熱装置について

まず、実験装置等の紹介に移る前に工業用マイクロ波加熱装置について説明しておく。使用周波数は家庭用電子レンジと同じ2.45GHzであり周波数の変更は出来ない。マイクロ波出力に関してはマイクロ波発振器を増やすことで増加が可能で、発振器は空冷の1.5kW発振器、水冷の3.0kW、5.0kW、6.0kWの発振器があり、これらを組み合わせて装置を構成する。弊社の実績としてはマイクロ波出力6.0kWの発振器を48台搭載した288kWの装置を製作した。日本国内でも100kWクラスの装置は何台も納入している。

家庭用電子レンジは1回あたり長くても数十分程度しか稼働できないが、工業用マイクロ波加熱装置は24時間連続稼働が可能である。また、マイクロ電子製の工業用マイクロ波加熱装置は、消耗品の交換をすれば30年以上稼働している装置もあり、お客様からの信頼を得ている。

工業用マイクロ波加熱装置を新たに導入する、もしくはボイラや熱風といった既存の加熱方式から置き換える場合は、マイクロ波ならではの利点が必要になるケースが多い。例としては、

2.1 高付加価値の製品

従来の加熱方法では不可能なマイクロ波でしか生産できない製品を作ること。外部加熱では不可能な内部加熱でしか作れない製品や、選択加熱を利用して加熱が必要な部分だけ加熱した製品等。

2.2 生産量、生産時間の改善

肉厚の製品等で外部加熱では時間がかかっていた工程に、内部加熱のマイクロ波を導入することで大幅な時間短縮が図れる場合、時間が短縮されれば生産ラインの短縮や、同スペースで生産量を増やすことも可能である。

2.3 作業環境の改善

大型のヒータやボイラを工場内で使用しており作業スペースの気温が高い場合に、それらをマイクロ波加熱に置き換えることで作業環境の改善が可能である。蒸気配管が減ることで熱のロスも軽減され、省エネにも繋がる。

と言ったことがある。工業用マイクロ波加熱装置の導入にはそれなりの投資が必要な場合が多く、マイクロ波を使用する優位性を明確にした方が良い。そして、

それらの優位性を検証する意味でも、マイクロ波加熱実験は重要である。

3. マイクロ波実験装置

マイクロ波実験装置について紹介するが、本稿の題目にもなっている新型の実験装置から、使用頻度が高く装置化に繋がっている実験装置まで紹介していく。

3.1 真空マイクロ波加熱装置

真空マイクロ波加熱装置は「平成26年度補正のものづくり・商業・サービス革新補助金」所謂、ものづくり補助金を利用して新開発した装置である。装置の概略図を図2に、実際の写真を図3に示す。なお、真空とは言っても高真空ではなく、4kPa程度で使用

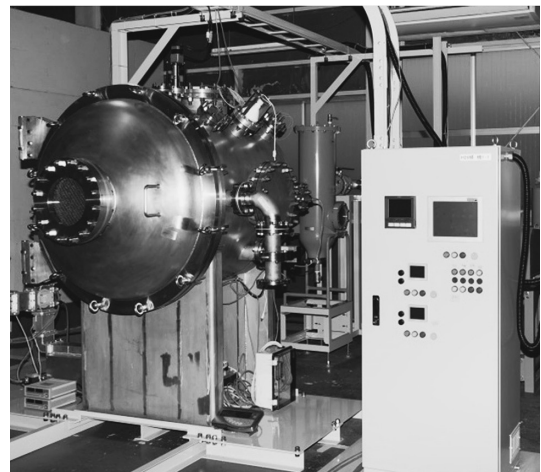
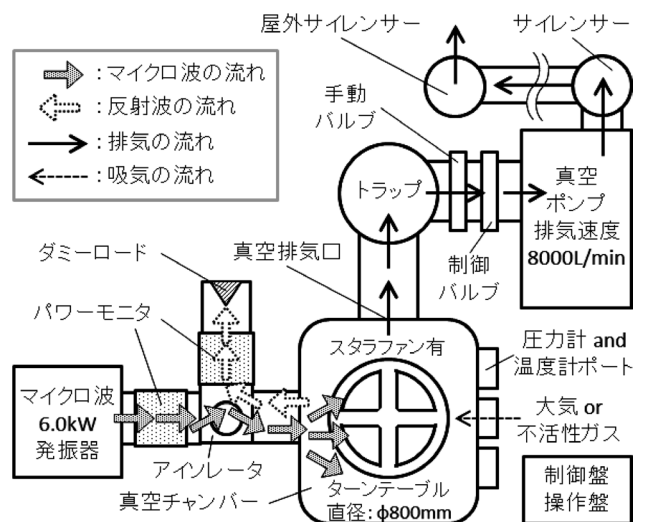


図3 真空マイクロ波乾燥装置外観

することを想定しており、減圧という表現の方がわかりやすいかもしれない。

減圧マイクロ波乾燥について説明すると、まず減圧下であるため水の沸点が下がり低温での乾燥が可能である。想定使用圧力である4kPaまで減圧すれば水の沸点は約30℃となる。減圧下では空気が無いため熱風を使うことはできず、外部加熱方式だとワークの入った容器をヒータで加熱するか、赤外線を使用する等、何れにしてもワーク表面から加熱されて熱伝導で内部が加熱されることになる。乾燥速度を速めようとヒータ温度を上げてしまうと内部の水は残っているにも関わらず表面温度は沸点を大きく超えてしまうことも起こり得る。そこで、内部加熱のマイクロ波を使用することでワーク内部からの乾燥が可能となり、表面だけが高温になるようなことは無い。マイクロ波は空気中も真空中も関係なく進むことができる。

以前弊社には旧式の真空マイクロ波オーブンがあったが、炉内を一定圧力で制御することが困難であり、また、減圧下で高出力のマイクロ波を投入すると給電口で放電が発生するといった問題点があった。新開発の装置では旧装置の問題点を改善しただけでなく、新機能も盛り込んである。改善点と新機能について紹介する。

(1) 高出力化

旧装置では減圧下だと炉内の条件によってはマイクロ波出力0.7kW程度で給電口に放電が発生していた。新装置では給電口も新しく開発したため、マイクロ波出力6.0kWを投入しても給電口で異常が発生することは無く、高出力化に成功した。また、図2の概略図に示したが、マイクロ波発振器からチャンパーに進むマイクロ波と、チャンパー内で消費されずに戻る反射波を、アイソレータで分離したところにパワーモニタを組み込んで測定しているため、波同士の干渉が無く安定して出力と反射を見ることができる。なお、マイクロ波出力は0.1～6.0kWまで自由に設定できる。

(2) 圧力制御

図2の概略図に示してあるが、真空ポンプの手前にある制御バルブの開閉度とチャンパーへの吸気量をコントロールすることで圧力を一定に制御できる。吸気量やワークから出る水蒸気量でチャンパー内の圧力が変動するため、それを圧力計で検知しバルブを制御する。なお、バルブ開閉度を固定してチャンパー圧力を成り行きに任せることも可能である。圧力を下げていくと高真空手前ではマイクロ波を投入した際にチャンパー内での放電が発生しやすくなるため、必要以上

に圧力を下げないことも重要である。

(3) 温度測定

新装置にはファイバー温度計4本による温度測定が可能であり、測定された温度は常時記録される。ファイバー温度計を使用する際はターンテーブルを回転させることができないため、1周ごとに反転する。ターンテーブル回転モータの制御も可能で、速度や反転のタイミングも任意で設定できる。

(4) 無酸素下での加熱

想定使用圧力4kPa程度だが、装置としては0.2kPaまで真空度を高めることができる。一旦チャンパー内を真空引きした後に吸気口から窒素やアルゴンといった不活性ガスを入れることでほぼ無酸素下でマイクロ波加熱をすることができる。不活性ガスの消費量は増えるが、同時に圧力制御も可能であり、任意の圧力かつ不活性ガス下での実験も可能である。

他にも、現在開発中の機能として減圧マイクロ波乾燥途中での重量測定がある。なるべくターンテーブルを使用して加熱ムラを低減しつつ重量測定も行える機構を用意する予定である。

余談だが、高出力化に成功したマイクロ波給電口の開発には東京工業大学のスパコンTSUBAME2.5を使用したシミュレーションも活用させていただいた。

3.2 斜めドラム式マイクロ波加熱装置

斜めドラム式マイクロ波加熱装置は、ワークをドラム内で攪拌しつつマイクロ波加熱できる装置で加熱ムラが非常に少ないことが特長である。ワークは樹脂のペレットや、豆等の食品といった粒状、粉状のものを想定しており、加熱と乾燥どちらでも問題ない。図4



図4 斜めドラム式マイクロ波加熱装置外観

に外観図を示す。

マイクロ波出力0.1～6.0kW、熱風max250℃を併用して加熱することができる。マイクロ波給電口と熱風吸排気口が付いた蓋は固定でドラムのみ回転し、ドラム回転速度は5～40r/minで可変できる。蓋とドラムは接触していないため摩耗する部品は無く、非接触でもマイクロ波が漏洩しないようにフィルタが構成されている。図5にドラム開の状態を示す。



図5 ドラム開（手前に引きだした）

ドラムの内側にはワークの加熱ムラを極力少なくするための攪拌構造がある（特許出願中）。

マイクロ波のみでワークの乾燥を行うと、蒸発した水蒸気が常温の大气や炉壁に触れて冷やされ結露してしまう。炉壁で結露するとワークが張り付いてドラムを回転させても攪拌効果が無い場合がある。そのため、熱風を併用して水蒸気の排気を行うことで結露を防止し、効率の良い乾燥とワーク攪拌による加熱ムラ軽減効果を最大限得ている。

3.3 幅広マイクロ波連続加熱装置

幅広マイクロ波連続加熱装置は装置構成としては古くから生産装置として利用されているが、実験装置として本格的に用意したのは2015年である。装置の外観を図6に示す。基本スペックはマイクロ波出力12kW、熱風220℃、ベルト幅600mm、開口高さ40mm、炉長1800mmとなっている。マイクロ波出力は3.0kWの発振器を4台組み合わせて12kWとなっているが、発振器を増設すれば出力増強も可能である。

古くから利用されている構成だけあって使用頻度も多く、食品やセラミックス、樹脂と言ったようにワークの種類を選ばず実験している。ワークの形状によ



図6 幅広マイクロ波連続加熱装置外観

ではベルトもメッシュタイプと平織りを選択できる。

また、4つあるマイクロ波給電口の位置を変更することでマイクロ波加熱しやすい位置をある程度コントロールでき、①ベルト面全体を加熱 ②中央を集中して加熱 ③中央を空けて2列加熱するといった程度ならば対応可能である。ただ、マイクロ波吸収はワークの特性に大きく影響されるため、1回の実験でうまくいくとは限らず条件を見つけるために複数回実験が必要なものも多い。

3.4 マイクロ波ゴム連続加硫装置（UHF）

1.はじめにで紹介したUHFとほぼ同型の装置も実験用の装置として用意がある。図7に装置外観を示す。



図7 実験用マイクロ波ゴム連続加硫装置（UHF）

写真ではわかりにくいかもしれないが、ワークの投入側から見た図であり、手前にあるのはゴム押し出し機である。弊社にはゴム押し出し機、UHF、熱風炉（HAV）が一直線に並んだ実験ラインが用意してあり、

ゴムワークをリボン状で用意していただければ押し出し機から実験できる。

マイクロ波ゴム連続加硫装置という名称であるが、ゴム以外のワークを実験しても何ら問題なく、ライン全体を使用せず UHF 部分だけ使用することも多い。マイクロ波加熱装置のスペックとしては出力 12kW、熱風 250℃、ベルト幅 130mm、開口高さ 100mm、炉長 4100mm、装置全長 8000mm である。こちらもベルトはメッシュと平織りを選択できる。

工業用マイクロ波加熱装置の導入を検討され、かつ連続炉を想定される場合は先の 3.3 で説明した幅広装置や UHF を使用して実験を行い、生産装置のスペックについて見通しを付ける。

3.5 バッチ式マイクロ波加熱装置

バッチ式マイクロ波加熱装置は言ってしまうと大型電子レンジである。電子レンジと言っても家庭用とは異なりマイクロ波出力の細かい制御が可能であり、投入している出力も正しく測定できる。弊社には現状で 3 つバッチ式の装置を所有しているためそれぞれ紹介する。

(1) MOH-12000

弊社でマイクロ波加熱実験を行う際に、使用頻度が最も高い装置である。図 8 に外観を示す。



図 8 MOH-12000 外観

大型のバッチ式マイクロ波加熱装置は汎用性が高く、当たり実験から生産装置のスペック決定まで幅広くこなすオールラウンダーである。実際、つい最近でもこの装置で実験し、必要なスペックを求め、48kW の生産装置にスケールアップして納めた実績もある。

実験するワークの種類も問わず、どのようなワークでも炉内に入れることさえできればマイクロ波加熱実験が可能となる。また、バッチ式とはいえ炉体寸法が

一辺約 1m の立方体で炉の容積は 1m³ あり、ターンテーブルの直径も 800mm がある。そのため、炉の中に入れられるワーク量が多く、生産に近い実験が可能である。使い方にもよるが、ターンテーブルは外すことも可能である。

マイクロ波出力も先に説明した連続炉と同じく 12kW である。また、MOH-12000 に搭載された発振器は最新型の 6.0kW インバータ発振器 2 台であり、従来のトランス式発振器と比較して発振の立ち上がりが速く、低出力時のふらつきも少ない。6.0kW インバータ発振器は市場にほぼ出回っていないが、今後切り替えていく予定であり、MOH-12000 を使用すれば一足先に最新の発振器（2017 年 7 月時点）が使用できる。

加えて、熱風 120℃ も併用が可能であり、案件が乾燥の場合はドラムと同じく結露を防止できるため効率よく乾燥が可能である。もし、ヒータを付けられない、あまり炉内に風を入れたくないケースがあった場合は排気専用のブロワも備えているため排気のみを行う。

(2) MOH-5000

MOH-12000 と比較して小型の装置で、炉体寸法は一辺 470mm の立方体で炉容積は 0.1m³ である。図 9 に外観を示す。



図 9 MOH-5000 外観

小型のバッチ式マイクロ波加熱装置は主に当たり実験に使用される。小型であるがマイクロ波出力は 5kW あり、家庭用の電子レンジとは比較にならないパワーがある。また、装置上部から放射温度計で炉内の温度を測定できるようになっており、ターンテーブルを回転させた状態でも表面温度は調べることができる。

MOH-5000 は装置構成を比較的簡単かつ自由に組み

替えることができるためマイクロ波給電口の位置を変えることや、炉体の密閉度を高くしてガスを封入すること、ターンテーブルに変えて小型の回転ドラムを付けることも可能である。さらに、マイクロ波出力は1.5kWまで下がるが、発振器を空冷の1.5kW発振器にすることで置き場所も自由になる。つまり、200V電源さえあればレンタルして実験が可能である。

現在、マイクロ波加熱中の温度分布が見られるように、サーモカメラを取り付けられる視野角の広いマイクロ波漏えい防止フィルタを製作している。組み替えの簡易さから小型装置用に設計し、熱動画の撮影もある程度出来ているため、近日中にお客様を呼んだマイクロ波加熱実験でも使用可能になるであろう。

(3) MOH-3000

MOH-3000はMOH-12000とMOH-5000の中間の装置サイズをしており、炉体は一辺800mmの立方体で炉容積は約0.5m³、ターンテーブルは直径600mmである。図10に外観を示す。



図10 MOH-3000 外観

マイクロ波出力は1.5kW空冷式発振器2台の3.0kWで、熱風120℃併用と、小型ボイラを接続すれば蒸気

導入も可能である。MOH-12000と同じく汎用性の高い装置であり、かつ、空冷の発振器を使用しているため設置場所を選びやすくレンタルに適している。むしろ最近ではレンタル以外の出番はほぼなくなっている。

装置をレンタル出来ることで、持ち運ぶことが困難なワークをマイクロ波加熱実験したい場合に、ワーク製造機のすぐ隣にマイクロ波実験装置を置いて実験することが可能である。なお、3.3と3.4で紹介した連続装置に関しても設置スペース、冷却水、電源が用意できればレンタルは可能である。

表1にここまで説明した装置のまとめを示す。

4. まとめ

マイクロ波加熱実験装置について新開発と既存の装置を説明し、生産装置にスケールアップする上での実験の重要性を説明した。マイクロ波加熱は確かに外部加熱では作れない製品を製造することや、加熱時間を短縮し省エネ化が可能なのもある。また、従来の加熱方法からマイクロ波加熱に切り替えたことで製品の品質が良くも悪くも変化することがあり、それが重要視されるケースもある。マイクロ波加熱装置を導入する目的を達成させるためには装置導入前にお客様とメーカーで十分な検証を行い、ステップアップした装置を製作することも必要である。

本稿を参考として、新しく興味を持ちマイクロ波加熱装置の導入を考えていただけたのであれば幸いです。

参考文献

- 1) <http://www.microdenshi.co.jp/microwave/>

表1 現在使用可能なマイクロ波実験装置

名称	方式	マイクロ波出力	炉体寸法等	備考
真空乾燥装置	バッチ減圧式	6kW (6.0kW×1)	φ1.1m×直胴部1m	常用4kPa(0.2kPaまで減圧可)
斜め回転ドラム	バッチドラム式	6kW (6.0kW×1)	φ0.5m×深さ0.4m	熱風250℃併用可
幅広連続装置	連続式	12kW (3.0kW×4)	炉長1.8m、ベルト幅0.6m	開口高40mm、熱風220℃併用可
12kW UHF	連続式	12kW (3.0kW×4)	炉長4.1m、ベルト幅0.13m	開口高100mm、熱風250℃併用可
MOH-12000	バッチ式	12kW (6.0kW×2)	1m×1m×1m	熱風120℃併用可
MOH-5000	バッチ式	5kW (5.0kW×1)	0.47m×0.47m×0.47m	送風や不活性ガス注入可
MOH-3000	バッチ式	3kW (1.5kW×2)	0.8m×0.8m×0.8m	空冷、熱風120℃併用可