

産業用マイクロ波加熱装置

Industrial Microwave Heating System

エレクトロニクス事業部 森本雅之*¹ 大沼均*²
技術本部 新屋謙治*³

マイクロ波加熱装置は急速加熱、均一加熱などの特徴を持っているが、マグネトロンを用いたマイクロ波加熱装置は出力、寿命などの点で産業用途には余り広く応用されていない。当社では産業用向けに電子管としてクライストロンを用いた大出力マイクロ波発振器を開発した。開発した発振器は産業機械にふさわしい低コスト、長寿命、省スペースの仕様となっている。このマイクロ波発振器を加熱装置として応用するためには対象物の誘電損失、電力半減深度、電磁波分布、対象物の比熱などの物理的な検討を行う必要がある。このような考察を行うことによりマイクロ波加熱を広い分野へ応用することが可能となる。その結果、30 kW、80 kW という大出力の産業用マイクロ波加熱装置を実用することが可能になった。

Microwave heating is widely used for household applications, in which a magnetron is used as the microwave source. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. has developed a high-power Klystron customized for industrial heating. By the use of the Klystron, a long life and high power industrial microwave heating system has been realized. In this paper, the actual design of the microwave heating system is described.

1. ま え が き

マイクロ波加熱は工業加熱の一手法として古くから位置づけられており⁽¹⁾、電子レンジとして家庭などでも広く使われている。マイクロ波加熱の特徴は短時間加熱、均一加熱などであり、電子レンジではその特徴を生かして食品の加熱、調理などに利用されている。ところが、マイクロ波加熱は産業界では食品工業分野などを除いてはあまり活発に利用されているとは言えない。これは次のような理由によるものと考えられる。

- (1) マイクロ波発生に用いる電子管（マグネトロン）の寿命が短いので保守、交換などの点で生産設備として扱いにくい。
- (2) マグネトロンの単管容量が小さく（通常 5 kW 以下）大容量の装置が容易に得られない。
- (3) マグネトロンのマイクロ波出力が使用時間とともに減少し、加熱装置として長時間同一条件で運転できない。

これらの問題はマイクロ波加熱の本質的な問題というより、産業用に応用する上でのマイクロ波発振器の問題点であると考えられる。当社ではこれらの問題点を解消した産業用マイクロ波発振器を開発し、各種加熱装置への応用を開始した。本報では当社の開発したクライストロン方式のマイクロ波発振器について報告し、さらに、加熱装置として応用する上での物理学的な検討に基づく設計法について述べる。

2. 産業用マイクロ波発振器

2.1 クライストロンの採用

産業用のマイクロ波加熱装置として備えるべき特質として次のような点が考えられる。

- (1) 長寿命であること。
- (2) 電力効率の良いこと。
- (3) 安定した出力が得られること。

従来のマグネトロンを利用したマイクロ波発振器ではマグネトロンの原理的な理由から、上記の要求を満たすことは難しい。その解決のため当社ではマグネトロンに代えて、マイクロ波発生用

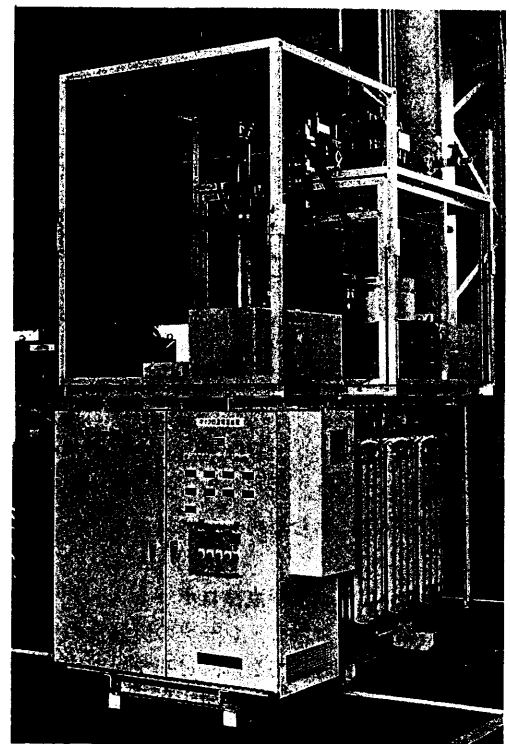


図1 80 kW マイクロ波発振器の外観 電源装置の上部にクライストロン及び冷却系が配置されている。サーキュレータは最上部に配置している。
General view of microwave generator

の電子管としてクライストロンを用いることにした。クライストロンは主に衛星通信やTV放送の送信用に使われている電子管である。このようなクライストロンでは周波数帯域特性や出力安定性の要求は厳しい反面、電力効率などについてはそれほど厳しく考えていなかった。そこで特に電力効率の向上を考慮して新たにマイクロ波加熱専用のクライストロンを開発した〔日本電気(株)、三菱重工業(株)共同開発〕⁽²⁾。

開発したクライストロンは2450 MHz帯で使用するもので、出力30 kW、80 kWという大出力でかつ70%という高い電力効

*1 技術部エレクトロニクス技術センター主務 工博

*2 開発・製造部電子機器センター

*3 広島研究所機械プラント研究推進室

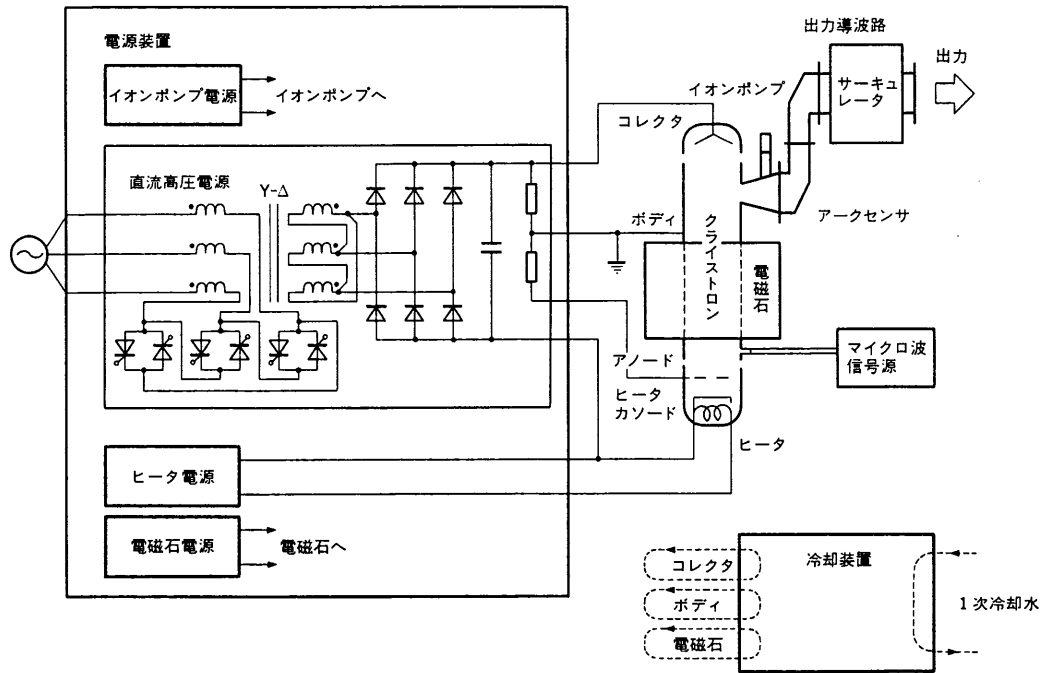


図2 マイクロ波発振器のブロック図 電源部分、クライストロン、冷却装置、立体回路から構成されている。
Block diagram of microwave generator system

率を特長としている。クライストロンの採用によりマイクロ波加熱装置は前述の特質を備えることが可能になった。

図1に、開発したマイクロ波発振器の外観を示す。また、図2に発振器全体のブロック図を示す。以下に本発振器の特徴的な技術について述べる。

2.2 電源装置の開発⁽³⁾

クライストロンを駆動するための電源装置も、産業用としての要求すなわち低コスト、省スペースなどの要求を満たす必要がある。

クライストロンを駆動するための電源は図2に示すように次の4種類が必要である。

- (1) 電子ビーム加速用直流高圧電源
- (2) 電子ビーム集束用電磁石電源
- (3) 電子銃ヒータ加熱用電源
- (4) 真空度監視用イオンポンプ電源

これらについて従来の安定性重視の送信用電源とは発想を転換させて、産業機械にふさわしいものを新たに開発した。

クライストロンはカソード・コレクタ間の電子ビームのエネルギーを利用するため電源には高電圧回路が必要となる。本装置では絶縁トランスにより高電圧回路を絶縁し、低電圧側でサイリスタ制御を行うことにより電圧調整及び安定化を行っている。このような産業機械向けのパワーエレクトロニクス技術を応用することによりこれら各種の電源を小型でかつ低コストなものにした。

クライストロンは増幅管であり、小電力のマイクロ波信号を増幅してマイクロ波を出力する。カソード・コレクタ間の電子ビーム電圧を一定にしたときのクライストロンの増幅特性を図3に示す。図において励振信号が1W以下の領域では励振信号に応じてマイクロ波電力が変化する。放送などの送信に使用する場合にはこの領域で用いることにより励振信号の変化に応じてマイクロ波出力が制御できることになる。一方、励振信号が1.1W以上の領域では励振信号の変化に対して出力電力は飽和を示している。このような飽和領域で使用すれば励振信号が変化しても出力は変

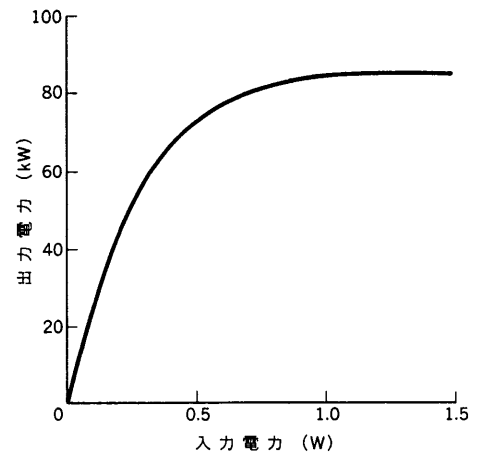


図3 クライストロンの増幅特性 出力電力は85kWで飽和している。
Amplification characteristics

化せず、出力が安定して得られることになる。今回開発したクライストロンはこの特性を利用して発振器としての安定性を得ている。そのため、出力マイクロ波電力を変化させる場合には電子ビーム電圧を変化させることにより出力電力の制御を行っている。

2.3 サーキュレータの開発

マイクロ波は電磁波であり、対象物とのインピーダンスの整合が不完全であると対象物に吸収されるほかに反射波が発生することがある。このとき、電子管に反射したマイクロ波が戻り、自己の発生したマイクロ波で電子管自身を破壊してしまうおそれがある。負荷からの反射の度合を表す際には電圧定在波比 (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) を用いることが多い。VSWRは次のように表され、VSWRの値が大きいくほど反射波が大きいくことを示す。

$$VSWR = (1 + \Gamma_v) / (1 - \Gamma_v) \tag{1}$$

ただし、 Γ_v は電圧反射係数であり

$$\Gamma_v = (\text{反射電圧}) / (\text{入射電圧})$$

一般的にマグネトロンでは $VSWR=4$ 程度までは破壊しないといわれている。これは 36% の電力が反射したことに相当する。一方、クライストロンは比較的低い $VSWR$ までしか耐えることができない。

加熱装置、特に乾燥装置などでは乾燥による対象物からの水分の蒸発に伴い、対象物とのインピーダンスの整合が悪くなり、対象物から反射する電力が増加する。このため、反射電力に弱いクライストロンはマイクロ波加熱には向いていないと言われてきた。反射電力を電子管に戻さないためには、入射電力は無損失で透過させ、反射電力をすべて吸収する機能を持つサーキュレータが必要となる。

小電力のサーキュレータは市販品で入手可能であるが大電力のものはこれまでのところ見当たらない。そこで今回、80 kW 連続波で使用可能なサーキュレータを新たに開発した。このサーキュレータを用いれば、 $VSWR=\infty$ (対象物でマイクロ波電力が

100% 反射する状態)でもクライストロンは使用可能である。

以上、今回開発した産業用マイクロ波発振器の技術の一端を紹介した。表 1 に開発したマイクロ波発振器の仕様を示す。当社ではこの発振器を用いて各種加熱装置を開発している。以下に加熱装置の設計について述べる。

3. マイクロ波加熱装置の設計

3.1 損失係数

通常の熱風、赤外線などにより物質を加熱する場合、熱源で発生した熱はふく射又は対流により対象物の表面を加熱する。対象物内部へは熱伝導により熱が伝わり内部が温度上昇するというメカニズムになっている。これは外部加熱と呼ばれている。これに対し、マイクロ波加熱は対象物自身が発熱体になる内部加熱である。対象物(誘電体)がマイクロ波電界中におかれると内部分子がマイクロ波周波数で変化する電界に追従して振動する。このとき各分子間で振動による摩擦熱を生ずるため対象物が発熱するものと考えられている。したがって、マイクロ波加熱での発生熱量は対象物の物性値と大きく関係し、次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$P = 2\pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \tag{2}$$

ここで、

P : 加熱電力密度 (W/m³)

f : マイクロ波周波数 (Hz)

E : マイクロ波の電界強度 (V/m)

ϵ_0 : 真空中の誘電率 (8.85×10^{-12} F/m)

ϵ_r : 誘電体の比誘電率

$\tan \delta$: 誘電体の誘電正接

である。式(2)中の ϵ_r と $\tan \delta$ の積は損失係数と呼ばれ、この値が大きいほどマイクロ波により加熱されやすいことを示している。図 4 に主な物質の比誘電率 ϵ_r と誘電正接 $\tan \delta$ を示す⁽⁵⁾。図から分かるように水は損失係数が大きい代表的な物質である。電子レンジで食品を加熱する際には食品中の水分がマイクロ波を吸収して発熱することを利用している。水分を含まない対象物を加熱する場合、対象物の損失係数が大きければ加熱可能である。一般に加熱対象物は単一の物質ではなく混合物であることが多いので対象物の損失係数を実測するのが望ましい。

表 1 80 kW マイクロ波発振器の仕様
Specification of 80 kW microwave generator

マイクロ波出力	電力	定格 80 kW (連続)
	周波数	2 450 ± 5 MHz
入力電源	3 相 200 又は 220 V ± 10 % 50 又は 60 Hz 125 KVA	
総合効率 (出力/入力)	65%*	
一次冷却水	種類	市水又は工業用水
	温度	0~40 °C
	流量	120 l/min
	圧力損失	2.5 kgf/cm ²
	耐水圧	5 kgf/cm ²
導波管加圧ガス	種類	乾燥空気又は窒素
	圧力	0.4~0.7 kgf/cm ²
	流量	微量
重量	8 000 kg (推定)	
寸法	W 2 000 × D 3 200 × H 3 800 mm	
使用環境	設置場所	屋内
	温度	0~40 °C
	相対湿度	95%以下

* (クライストロン単体効率は 70%)

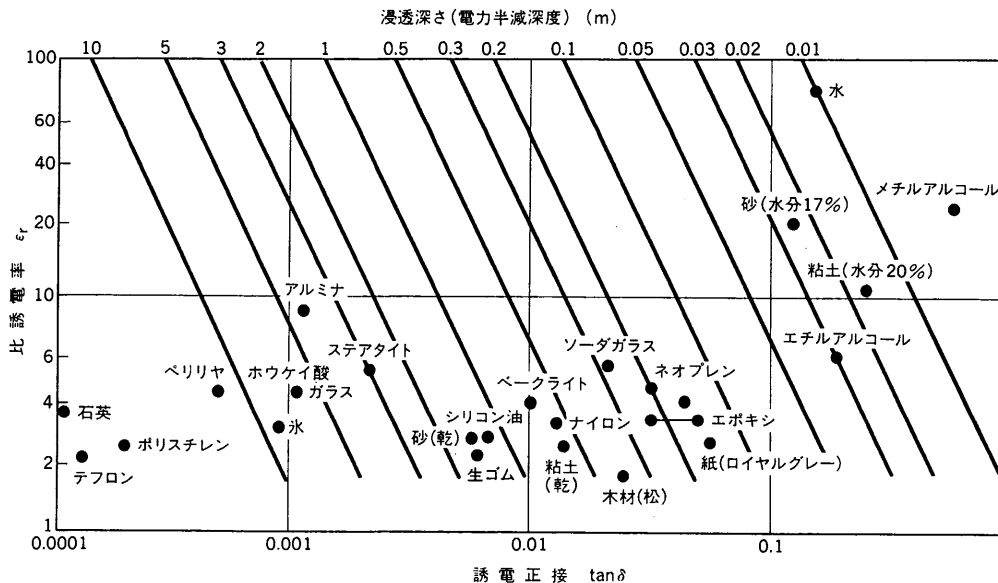


図 4 各種物質の誘電率と電力半減深度 $f=2.45 \text{ MHz}$
Dielectric characteristics of various materials

3.2 電力半減深度

マイクロ波加熱の検討を行うためには対象物内部へのマイクロ波の浸透も考慮する必要がある。マイクロ波が物質に吸収されて熱に変換されると、それに伴ってマイクロ波が減衰し、強度が弱くなっていく。このときのマイクロ波電力密度が1/2になる深さを電力半減深度 D と言い、次の式で求められる。

$$D = 3.32 \times 10^7 / (f \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta) \quad (\text{m}) \quad (3)$$

電力半減深度により表面部から中心部までどの程度均一に発熱するかが検討できる。図4には電力半減深度も示してある。例えば水の場合、約1 cmの深さでマイクロ波電力が半減してしまうので対象物の含水率により対象物の厚みを決定する必要があることが分かる。

3.3 電磁波解析

前節までの検討で対象物が物性的にマイクロ波加熱が可能であることが明らかになった。

次に加熱炉の内部での対象物へのマイクロ波の照射法について検討する。すなわち、加熱炉中で、対象物に均一に電磁波を照射する必要がある。そのため当社では加熱炉内部のマイクロ波の分布、対象物表面での反射などの状態をシミュレーションにて事前に確認している。当社では空間の電磁波分布の解析のためにFD-TD法⁽⁶⁾を利用しているが、マイクロ波の電界分布もこれを用いて解析している。

解析結果の一例を図5に示す。この例は円筒形の加熱チャンバ内に円形断面を持つ対象物をおいたとき、4箇所からマイクロ波を照射したときの対象物内部のマイクロ波の電界強度分布を示している。対象物内部のマイクロ波の分布はほぼ均一であるが対象物の表面近くでは電界分布が一様になっていない。したがって、このような場合には電磁波の反射板を置いたり、照射方向を変更するなどの検討を行う必要がある。

3.4 必要電力の検討

対象物の処理に必要なマイクロ波電力を求めるには、マイクロ波による発熱量が対象物の物性値により異なるため、対象物ごとに算定する必要がある。

いま、粉体スラリーの乾燥を例にする。ここで、対象物の粉体はマイクロ波を吸収しないものとし、スラリー中の水分のみがマイクロ波を吸収するものとする。このときスラリーを乾燥するために対象物に与えるべき熱量 P_d は次の式で求めることができる。

$$P_d = F_s [(C_s + C_w W_1) (t_b - t_1) + \gamma (W_1 - W_2)] \quad (4)$$

ここで

- P_d : 必要熱量 (J)
- F_s : 粉体重量 (kg)
- W_1 : 初期含水比 (%DB)
- W_2 : 目標含水比 (%DB)
- C_s : 粉体の比熱 [J/(kg·K)]
- C_w : 水の比熱 [J/(kg·K)]
- t_b : 乾燥温度 (K)
- t_1 : 初期温度 (K)
- γ : 水の蒸発潜熱 (J/kg)

である。いま、初期温度 293 K、初期水分 30%、粉体比熱 670 J/(kg·K) のスラリーを常圧下で3%まで乾燥しようとする。これらの数値を上式に代入すれば必要熱量が求められる。このとき、マイクロ波の電力がすべて熱に変換されたと仮定すると、80 kW

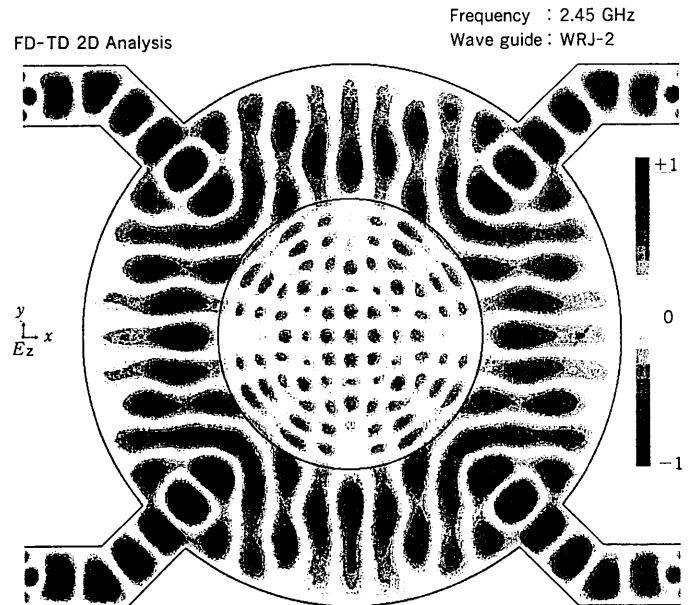


図5 電磁波解析の結果 水分の多い物質にマイクロ波を4箇所から照射したときの電磁波強度の分布を示す。
Electro-magnetic analysis of heating chamber

のマイクロ波電力で475 kg/hのスラリーを処理することができる⁽⁷⁾。

4. 実機への応用

以上述べたような検討を行い、各種の加熱装置を開発している。当社のマイクロ波加熱装置ではマイクロ波発振器は共通のものをを用いるが、加熱炉は顧客の用途に応じてそれぞれ開発している。開発に当たっては先に述べたような検討を行い、必要なマイクロ波電力が供給できかつ、均一に加熱できるような加熱炉を実現している。

5. おわりに

本報では当社が開発した産業用のマイクロ波加熱装置の特徴及び加熱装置として応用する際の検討項目について述べた。今回開発したマイクロ波加熱装置は産業機械として必要な仕様を備えており、工業加熱装置として広く活用できるものと考えている。

マイクロ波加熱は他の加熱法にない特徴を有しているため従来、不可能であったものの加熱や特殊な分野への応用なども期待できると考える。

参考文献

- (1) 日本電熱協会, エレクトロヒート応用ハンドブック, オーム社 (1990)
- (2) 新井ほか, 効率70%の大電力クライストロン, 日本電気技報 Vol. 45 No.9 (1992) p.137
- (3) 大沼ほか, マイクロ波加熱用大出力電源の開発, 電気学会産業応用部門全国大会講演論文集 (1993) p.711
- (4) 山口ほか, マイクロ波による染色糸連続真空乾燥装置の開発, 三菱重工技報 Vol.30 No.2 (1993) p.145
- (5) 大森豊明, 電磁波と食品, 光琳 (1993)
- (6) 山下英吉編, 電磁波問題の基礎解析法, 電子情報通信学会 (1987)
- (7) 大沼ほか, 大容量マイクロ波加熱装置, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集 (III) (1994) p.508