

マイクロ波加熱の原理

工業プロセスに応用されるマイクロ波加熱の原理について概要説明を行うとともに、材料処理用途における基本的な設計の考え方について説明します。工業用途には食品の調製からゴムの加硫処理、さらに真空乾燥、セラミック焼結等と広範に及びます。本稿では従来確立された用途について要約しました。

By A.C. Metaxas

マイクロ波加熱は誘導、無線周波数、直接抵抗ないし赤外線加熱等の電熱技術に含まれる工程で、これらは全て電磁スペクトルのうち特定の帯域を用います。これらのプロセスは従来産業で使用されてきた加熱・乾燥システムを補完するほか、特別な場合には従来技術に代わる新たな手法となります。その理由は、従来のシステムは極めて大型であり、操業方法も難しく、有害な排出物により環境を汚染するほか、効率が極めて低いことがあるためです。

マイクロ波を工業処理に用いると、主として、熱の高速移転、体積加熱と選択的加熱、コンパクトな設備、運転の開始・停止が素早いこと、環境を汚染しないこと、燃焼産物が発生しない等の有利な点があります。マイクロ波の漏出は政府規制水準より遥かに低く抑えることも可能です。

1. マイクロ波加熱の基本

1-1. 誘電損失

誘電材料は高周波数の電磁波という形をとるエネルギーで処理できることは周知の事実です。表1に示すように、設備を容易に購入できる周波数帯 896MHz (米国では 915MHz)と 2450MHz を中心とする基本周波数を用いる工業・科学・医療(ISM)用途には多くの周波数帯域区分が割り当てられています。

この周波数範囲では、エネルギーが非金属材料に移転されることを可能にする二つの物理的メカニズムがあります。低いマイクロ波周波数では、例えば塩のようにイオン構成要素の運動により材料内部に流れる伝導電流はマイクロ波電界から材料へとエネルギーを移転できます。この損失メカニズムは、対応する誘電伝導率 σ を用いて表すことができ、誘電損失変数 $\sigma / \omega \epsilon_0$ を効果的に得ることができます。

マイクロ波加熱スペクトルの高周波領域 3000MHz 前後では、エネルギー吸収は主として図1右上の円内に示すようなマイクロ波電界の影響下で配向性を変えようとする永久双極子分子の存在により行われます。この再配向による損失メカニズムは分極が極めて速く逆転する電場に追いつかないことから発生します。従ってこのような高周波数では、結果として生起する分極ベクトルは課される電場に遅れます。この結果生じる電流密度は電場と相が一致する部分を含むので、マイクロ波電力が誘電材料の内部で分散します。

表1 433.92MHz から 40GHz までの工業・科学・医療(ISM)用途周波数帯域の配分

周波数 Mhz	周波数誤差許容範囲 +/-	使用が許可される地域
433.92	0% - 2%	オーストリア、オランダ、ポルトガル、ドイツ、スイス
896	10 MHz	イギリス連邦(UK)
915	13 MHz	北米および南米
2375	50 MHz	アルバニア、ブルガリア、ハンガリー、ルーマニア、チェコ、スロバキア、ロシア
2450	50 MHz	2375 Mhz を使用する地域以外の全世界
3390	0% - 6%	オランダ
5800	75 MHz	全世界
6780	0% - 6%	オランダ
24150	125 MHz	全世界
40680		UK

誘電損失のメカニズムは複素相対誘電率の一部である相対損失率 ϵ'' を特徴とする一方、絶対誘電率は $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon^*$ で与えられます。図1では周波数の関数として複素相対誘電率の2つの部分を双極性液体と湿らせた誘電体についてプロットしてあります。ここではマイクロ波周波数の損失は再配向分極に起因します。明るい青色の応答で示すイオン種の伝導効果は無線周波数で高いのに対して、赤の応答は合併された損失を示します。

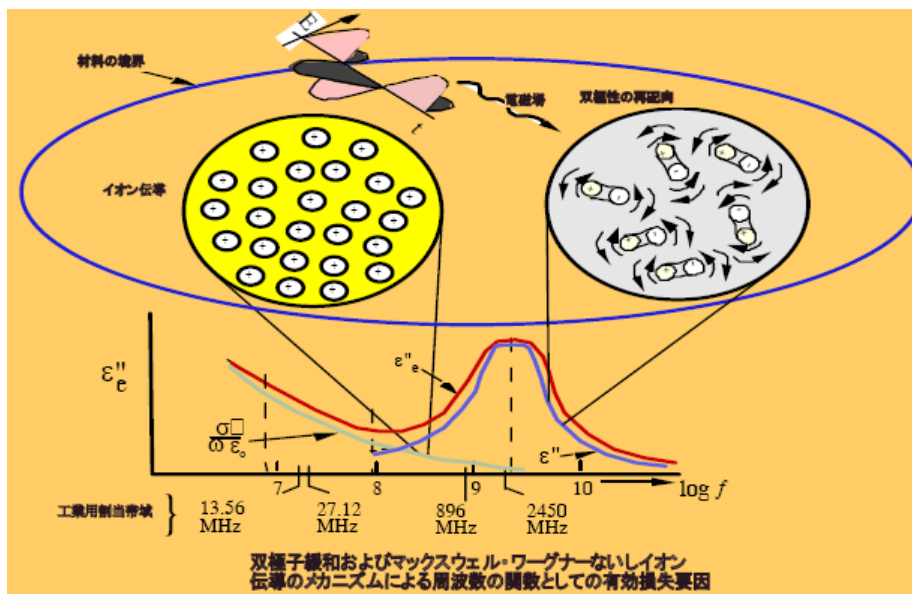


図 1 周波数の関数として表した有効損失率。各円内は双極性の再配向と伝導損失のメカニズム

1-2. 波動方程式

各種の基本的なパラメーターを導くためのマイクロ波加熱の基本方程式は、誘電体内での全電流密度と修正波動方程式です。¹ 全電流密度は伝導電流密度と変位電流密度の寄与度を含み、磁場ベクトルの屈曲度 H によって与えられます。

$$\nabla \times H = \sigma E + \partial D / \partial t \quad [1]$$

方程式[1]の右辺の最初の項はイオン成分に起因する伝導寄与度であり、第2項は変位電流密度による寄与度を示します。この際 $D = \epsilon E$ であり、 E は電界ベクトルを指します。この方程式と次のファラデー方程式を用いて分析を進め E または H での微分方程式を導出します。

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad [2]$$

$E = \text{Re} E e^{j\omega t}$ と仮定して E , $\partial E / \partial t$ および $\partial^2 E / \partial t^2$ の相互関係を用い、次の修正波方程式が誘電スラブについて導出されますが、この際、誘導電界は Z 方向では優勢的に一定であり、磁場は X 方向にあります。すなわち、

$$\partial^2 E_z / \partial y^2 = -\mu \epsilon_0 K \omega^2 E_z = \gamma^2 E_z \quad [3]$$

伝播定数 γ は次式で与えられ、ここに、 α と β はそれぞれ減衰と位相定数であり、変数 K は、 $K = \epsilon' - j(\epsilon'' + \sigma / \omega \epsilon_0) = (\epsilon' - j\epsilon_e'')$ によって与えられ、 ϵ_e'' は図1の赤線で示す有効損失率です。

$$\gamma = j\omega \sqrt{K \epsilon_0 \mu} = \alpha + j\beta \quad [4]$$

半無限スラブ分析: ここでは単純化ケースとして、図2 a に示す誘電損失率の高い比較的薄い半無限誘電スラブにマイクロ波を照射するホルンアプリケーション(加熱部)を考察します。誘電体内の電界は X 方向ではほとんど一定で、図2 b に示すように誘電体を通ずるに従い Y 方向には減衰します。時間変動を含み、さらに $y \rightarrow \infty$ であれば E_z は有限となるものと仮定すると、方程式[3]の解は次式[5]を導出します。

$$E_z = \text{Re} E_0 e^{-\gamma y} e^{j\omega t} = E_0 e^{-\alpha y} \cos(\omega t - \beta y) \quad [5]$$

E_0 は誘電材料と空気の接触面における電界強度の最大値です。指数的な減衰となるこうした単純化されたケースを想定すると、マイクロ波による食品の処理に似るので実際の状況にある程度までは関連づけることができます。

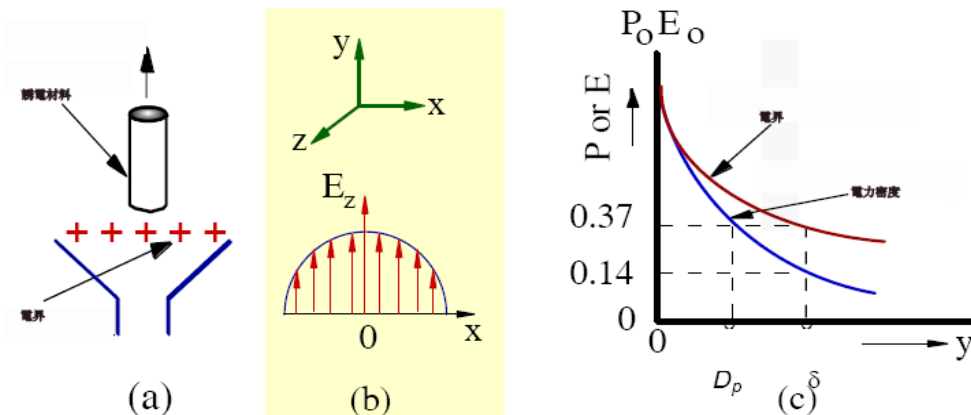


図2 (a) 半無限スラブ分析、(b) 導波管表面に沿う電界の方向、(c) 電界と電力密度の分布

これは大部分の食品が比較的高い有効損失率 ϵ_e'' をもつため、有効損失率が高いと電界は急速に減衰して、方程式[5]の導出の際に、内在的な上記の前提条件を正当化できます。有限スラブでも半無限スラブでも電界は空気と誘電体の接触面で極めて短い距離で急速に減衰しました。

有限スラブ: 処理する材料の誘電特性が極めて高くなければ、上記の前提条件は有限スラブでは保持されず、電界は方程式[3]の一般解によって与えられます。

$$E_z = \text{Re} \{ [Ae^{-\gamma y} + Be^{+\gamma y}] e^{j\omega t} \} \quad [6]$$

ここで A と B は適切な境界条件に適合する定数です。スラブはここでは損失率が低い媒体を持ち、第2項は方程式[6]の第1項と同じ階数でありうるので、この場合 $B = 0$ とすることはできません。この場合の電界は指数的には減衰せず、 y がスラブの幅に等しく設定される際、より熟慮された解を見つける必要があります。

定在波電界での加熱: マルチモードオープン・アプリケーションータ(加熱部)内に置かれた誘電材料に半無限スラブ分析を適用して、電界およびその他の変数の近似値を計算しました。この分析は食品には大部分いえるように誘電損失が極めて高く電界の減衰が速い場合だけに有効です。誘電損失が低い媒体では、電界は指数的には減衰せず、複雑な計算方法を用いる必要があります。

1-3. 誘電体内部での電力伝播

有効損失率が既知であると仮定すると誘電体内で安全に伝播できるマイクロ波電力量を推計することが必要な場合が頻繁に発生します。この電力量は Poynting ベクトル $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ を考察することで得られ、次式で単位体積当たりに伝播する電力を計算できます。²

$$P_v = (1/2)[\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_e''] |E_z|^2 = (1/2) \sigma_e |E_z|^2 \quad [7]$$

$\omega = 2\pi f$ であり、 f は Hz で示す周波数、 σ_e は有効誘電伝導度、 E_z は上記の各式によって与えられます。体積 V 内で伝播される電力合計値 P は積分[8]式を用いて得られます。

$$P = \int_V p_v dV \quad [8]$$

エネルギー源とモード攪拌器が分散配置されたマルチモード共振器アプリケーションータ(加熱部)の中では、電界はおよそ一定値まで無作為に化されたものと仮定できます。その結果、体積電力密度 $p_v = \sigma_e E_{RMS}^2$ となります。 E_{RMS} は処理範囲内に存在する電界の二乗平均平方根(RMS, root mean square)です。例えば、電力伝播 10^7 W/m^3 で $\epsilon_e'' = 0.1$ の場合、2450MHz で必要な電界は 27 kV/m です。

有効損失率は水分と温度の関数として変化します。 図3に示されるような典型的なデータは乾燥その他の加熱用途のためにマイクロ波のアプリケーションータ(加熱部)の種類と運転周波数を評価する際に役立ちます。例えば、周波数 27.12MHz での応答は 2450MHz で

の応答より水分の水準測量に適します。その一方、典型的には高温のセラミック材料の T 応答に対する ϵ_e'' は、臨海温度 T_c を超えると熱散逸が発生する確率が高いことを示します。

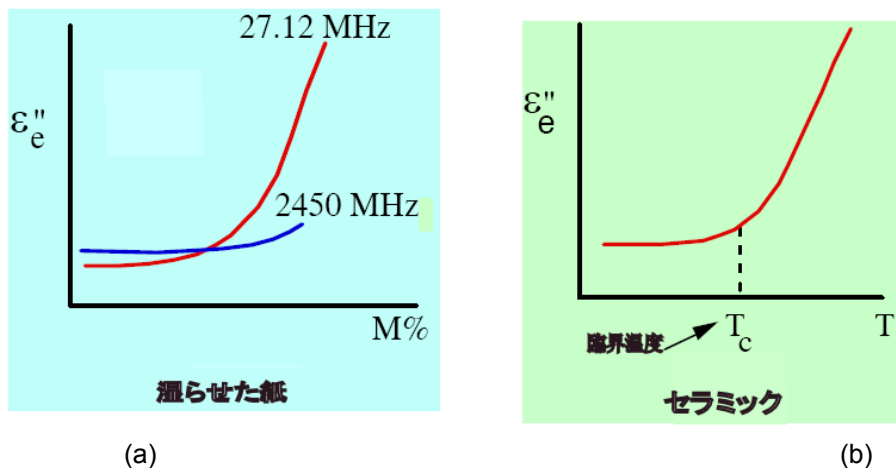


図3 (a) 水分 $M\%$ と (b)温度 T の関数としての損失率

1.4. 表皮(スキン)と電力浸透の深さ

半無限スラブ系の単純化手法に戻ると、電磁エネルギーが材料内部に浸透するにつれて、材料の有効損失率 ϵ_e'' に依存して一定の水準まで弱まります。減衰定数の逆数を表皮の深さ(スキンの深さ)として定義し、 $\delta = 1/\alpha$ で表します。この深さは、電界の強さが表面での値の $1/e$ まで減少する位置までの距離を意味します。図2cは電界とマイクロ波電力の減衰を示す概念図です。 p_v は $|Ez|^2$ に比例し、単位体積当たりに伝播するマイクロ波電力はエネルギーが半無限誘電スラブを通過するにつれて減衰します。

$$p_v(y) = P_0 e^{-2y/\delta} = P_0 e^{-y/D_p} \quad [9]$$

ここで P_0 は放射電力密度、 D_p はマイクロ波電力が表面での値の $1/e$ まで落ちる位置までの電力の浸透深度です。 $y = \delta$ とすると方程式[9]は $p_v(\delta) = 0.14P_0$ であり、散逸度 86%を与えます(図2cを参照ください。 $D_p = 1/2\alpha = \delta/2$ となります)。工業用に割り当てられたマイクロ波の周波数帯域では、浸透深度は極めて浅いものと考えられ、処理を行う誘電体のサイズは特に誘電体の損失率が高いほど、 D_p の何倍にも及びます。このため温度の不均一な分布が発生する場合があります。 D_p のおよその推計値は誘電特性に関する文献を参照すると決定できます。

1.5 温度分布

マイクロ波加熱は電力エネルギーを熱に変換させますが、周知の好例を挙げれば材料温度を臨海まで上昇させるか、材料の乾燥または材料の溶融まで上昇させます。一般化された熱流式を公式化して、これらのプロセスについて温度ないし水分の分布を記述できます。この際次の各項を含みます。温度上昇率 $\rho c \partial T / \partial t$ 、フーリエの法則 $q = -ke \nabla T$ による温度分布 $\nabla \cdot q$ 、体積電力密度の発生 p_v 、感知できる量の周辺ガス/固体間のエネルギー交換による追加的な対流熱流項、水分が拡散した系の構成要素による蒸発項のエンタルピーの各項です。ここで ρ と c は密度と比熱であり、 ke は材料の有効熱伝導率です。単位操作を行う場合には、結合された材料の相対質量移動式も用います。この際 ke はテンソル、 c は有効比熱です。この両パラメータとも不均一な混合物の中の各種の構成要素の寄与度を含みます。

具体的に簡単な例をとりあげれば、安定状態に達した加熱後に乾燥した誘電材料の内部の温度分布または平らな誘電体内部の水分水準測量のための解を得ることができます。この際、例えばマイクロ波のエネルギーは $\partial T / \partial t = 0$ で照射されるとして、フーリエ変換項の寄与効果は無視することになります。

1.6 数値モデリング

近年マイクロ波処理中の理論的な温度分布と水分の分布を定量する試みが共同して行われてきました。4 電力密度項 p は材料内部の電界を含み、狭義には波動方程式を解いて電界分布を決定することが必要です。5 精確な解析解は最も単純化された場合だけでしか得ることはできません。この際でも ϵ_e'' 、 σ_e 、 ke 、 ρ 、 c の各変数を一定と仮定することが必要です。6 階差、有限要素法、モーメント法、伝送線路行列法等に基づく数値法はそれぞれ成功の度合いが異なります。マイクロ波照射できる食品パッケージによく使わ

れる金属シートとシールドでは有限要素法を用いて日常的なモデリングが可能になりました。⁷

1.6.1 工業用システム

図4に典型的な工業用マイクロ波加熱・乾燥設備を示します。基本的には3つの主要コンポーネントから構成されます。最初のコンポーネントは必要な周波数帯域でマイクロ波を発生する電源ユニットです。第2のコンポーネントは、アプリケーション(加熱部)で、ここで材料がマイクロ波の電界の作用を受け、このコンポーネントには適度な真空状態、蒸気や高温空気での運転に用いるポンプ等の追加装置を接続します。従来型の処理設備ではアプリケーション(加熱部)までしかありませんでした。第3のコンポーネントは、マイクロ波加熱炉(ヒーター)の全体的性能を最適化し調節するための制御回路です。主としてマグネトロン管を用いてマイクロ波電力を発生させます。マグネトロンとアプリケーション(加熱部)の間にフェライト製のサーキュレータを統合するのが賢明であり普通に行われるようになりました。

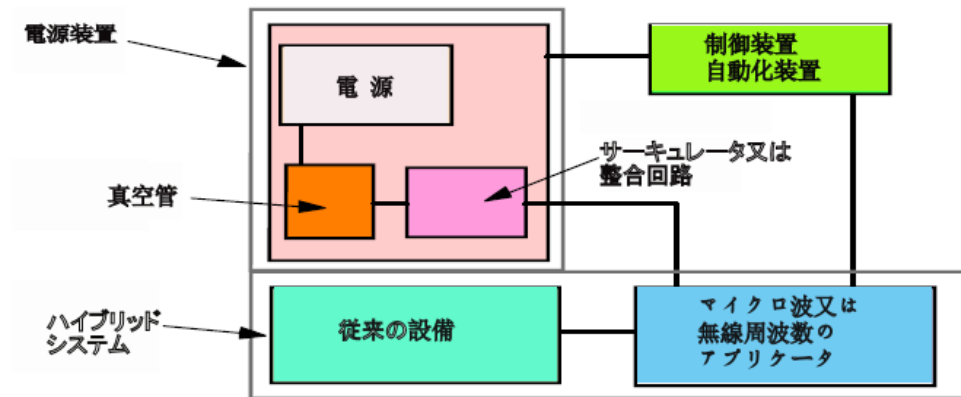


図4 典型的なマイクロ波加熱設備の構成

1.6.2 マイクロ波のアプリケーション

産業用マイクロ波システムの50%を遥かに上回る比率で用いられる一般的なマイクロ波アプリケーション(加熱部)の形態は、マルチモードタイプです。家庭用電子レンジを工業用材料の処理のために大規模化したものです。実際には他のタイプのマイクロ波アプリケーションも多く用いられますが、次に最も普及しているタイプを各種ご紹介します。²

1.6.2.1 マルチモードアプリケーション

基本的な用途：マルチモードの共鳴アプリケーションは、図5aに示すように、マイクロ波がスロットを通じて伝送され、さらに多重反射される金属製の筐体から構成されます。マイクロ波の入射の重畳(重ね合わせ)と反射波は定在波パターンないし定在波モードを発生させます。所与の周波数帯域ではこのようなアプリケーションは各種の共鳴モードをサポートできます。

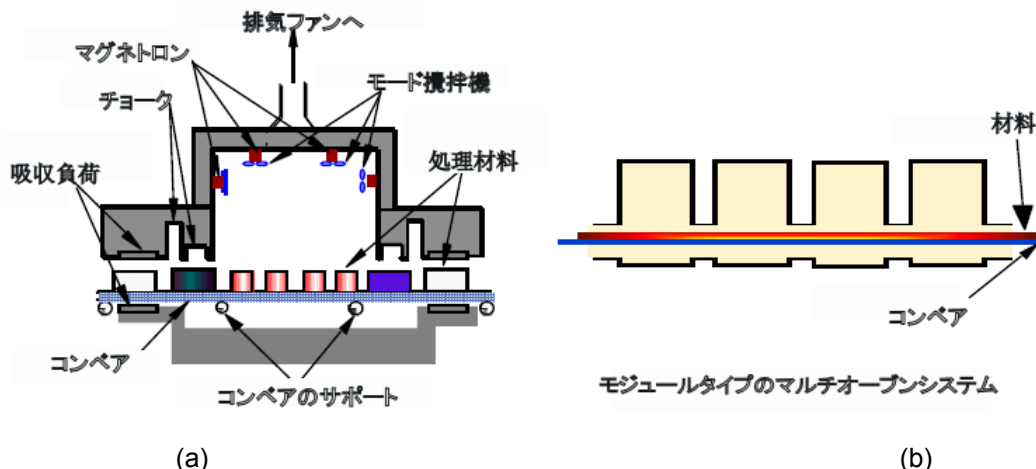


図5 マルチモードオープンアプリケーション (a) マグネトロンを4個搭載した基本的なマルチモードアプリケーション (b) モジュールタイプ

アプリケーションが空であれば常に、これらのモード毎に鮮明な共鳴応答を示します。しかしマイクロ波の電磁場に適度に置かれた誘電

材料で部分的に占有されているアプリケーションでは、各モードの共振応答は周波数が重複して誘電負荷と連続的に結合されます。このアプリケーションは異なる有効損失率とサイズをもつ広範囲の材料負荷を許容できる点で極めて多用途に対応できます。

結合システム: マイクロ波のエネルギーはスロット、共振スロットの配列、放射状ホルン、その他の方法によりアプリケーション内へ結合されます。マルチモードアプリケーション内部での加熱の均一性を改善するために、モード攪拌機等様々な方法が用いられます。多重発生器を用いると、単一の供給で達成できるよりも良好なモードの励起と加熱の均一性を得るようにマイクロ波電力を分布させることができます。この際オープンの壁周囲に供給点を配置して異なる両極性で供給できます。マグネトロンは直接搭載できるほかマイクロ波を照射する導波管を通して搭載できます。

振動子全てに共通するように、出力側に接続された負荷のインピーダンスは発生された電力でも出力周波数でもマグネトロンの性能に影響します。負荷インピーダンスの無効分は出力周波数を僅かに変化させ、この際抵抗成分は出力電力に影響します。

これらの特性は図6のリーケ(Rieke)線図で典型的に表され、ここでは周波数とマイクロ波電力出力の輪郭がインピーダンス円グラフ上にプロットされています。一般的には、マグネトロン、周波数とマイクロ波電力の許容負荷インピーダンス範囲内であれば、各変動は公称周波数の $\pm 0.2\%$ 、公称出力電力の $\pm 15\%$ を超えません。

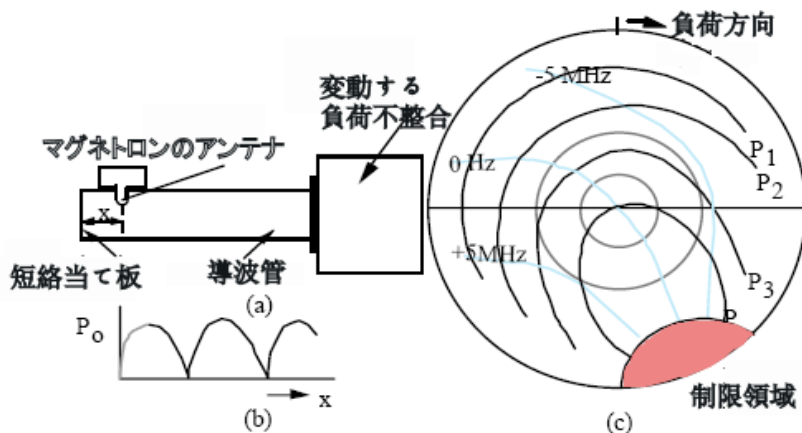


図6 (a) 導波管発射管(ランチャー) (b) マイクロ波電力分布 (c) リーケ線図

導波管のバックプレート(図中では短絡当て板の部分)の位置は参考資料が整っているガイドラインに従って実験を行うえば決められますが、この際マグネトロンをプローブに置き換え、図6aに示すように導波管の終点に変動する不整合負荷を用いて行います。図6bにはマイクロ波電力の分布を示します。

マグネトロンが導波管を解してオープンアプリケーションに接続されている場合は、マグネトロンを適切なプローブで置き換えてネットワーク解析装置を用いてインピーダンスの測定を行うことで負荷がかかっているアプリケーションにマグネトロンを精密に調整できます。図6cのリーケ線図中の制限領域で示されているメーカーが推奨する領域の範囲内で運転を行うことができよう、微調整を行います。

周波数の輪郭が収斂する領域(sink、シンク)は避ける必要があります。その理由は、反射の尺度であるVSWR(電圧定在波比)がシンクにおける仕様最大値を超えるとモーディングや周波数のジャンプ等不安定な運転となるおそれがあるためです。しかしシンク外部での収斂周波数領域内の運転はマルチモードアプリケーションでモードのシフトを得るためには必要です。

マルチモード処理システム: 図5aには不均一な負荷の工業処理用の典型的なオンライン・マルチモードオープン・アプリケーションを示しました。電磁力の漏出は吸収負荷や反射装置等の保護装置を用いて最小限に食い止めます。図5aではマグネトロン4個が見えていますが、これらでアプリケーションへのマイクロ波電力供給を行います。しかし、アプリケーション共振器1機にマグネトロンを供給するために数十個のマグネトロンを搭載した工業用システムも設計されました。

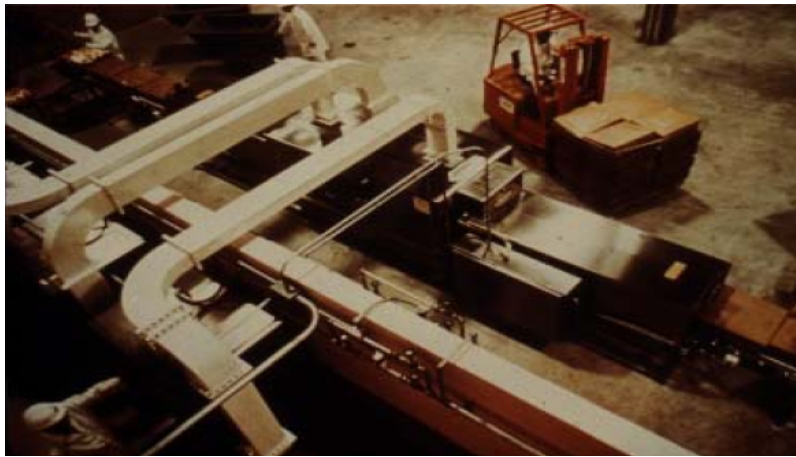


図7 食肉の連続調製用マイクロ波システム (Selo-Bollans Ltd.のご厚意により掲載します)

図7は896Mhzでの食肉調製に用いるマルチフィード・マイクロ波処理設備で、図8ではスナックフードに用いるパフイングないし高速乾燥用試作機を示します。後者のシステムでは、比較的容積の小さいアプリータを用いて、アークの発生無く大量の電力を処理できます。



図8 スナックフード用マイクロ波パフイングシステム (APV Baker Ltd.のご厚意により掲載します)

従って、アプリータ内に発生した高密度な電力がペレット等スナックフードの乾燥フライに用いることができます。ペレットを急速に100℃まで加熱することにより、水分を沸騰蒸発させ、10秒以内に材料を展開します。マイクロ波処理レシピの最適化を行うため、後で多少の食品油を官能刺激のために追加する場合もあれば、油浴を用いるよりもマイクロ波処理された製品は健康的です。

モジュールタイプのマイクロ波システムは大型のマイクロ波処理設備を図5bに示す数台のユニットを直列に設置して構成して、材料を全装置を通るコンベヤにおいて処理できる点で定評を確立しました。図9は、高温空気トンネル内で加硫を行う前に金属針を含めてゴムコンポジットの押出成形品の予備加熱に用いる2機のモジュールから構成されるマイクロ波システムです。各モジュールは処理能力とゴムの種類に応じる仕様に従い2450MHzでのマイクロ波電力を2kWステップで12kWまで接続する設備となります。



図9 ゴム加硫用のモジュールタイプ・マイクロ波予備加熱機 (Microwave Heating Ltd.のご厚意により掲載します)

1.6.2.2 ホルンアプリケーション

処理を行う食品を搬送するコンベヤトンネル内にマイクロ波電力を発射するにはホルンが効果的です。具体的な用途例では、マグネトロンからのマイクロ波は図 10a に示すように 4 等分されて、図 10b に示すように肉、バター等の調製用に食品のブロックに向けて 4 側面から順次照射されます。このようなプロセスでは冷凍食品は冷蔵温度からマイナス 2 度から 3 度くらいまで加温されます。このため製品の解凍を防ぐことができます。解凍されると、氷に比べて水の ϵ_e のほうが高いため熱散逸を発生するおそれがあります。

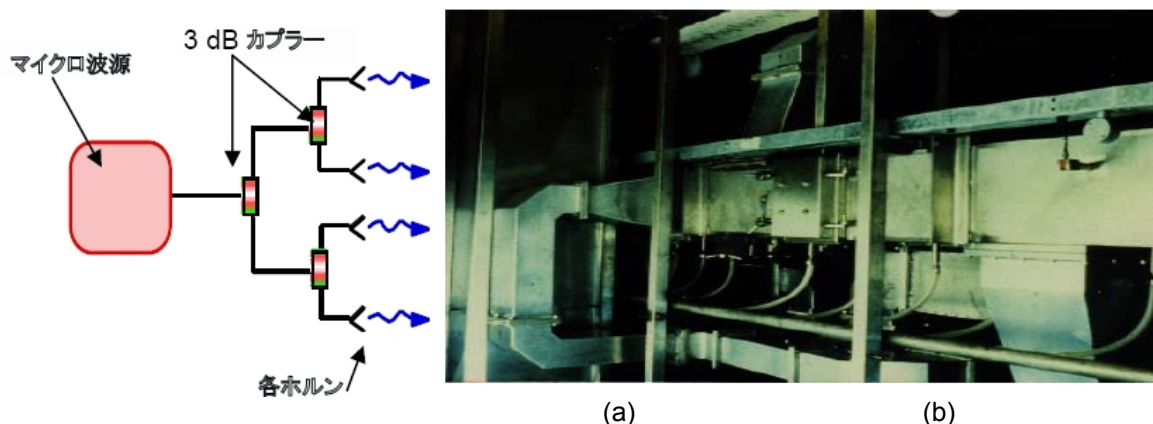


図 10 (a) 3dB のカプラーを用いるマイクロ波スプリッターと(b)マイクロ波バター連続調節ライン (Anchor Foods Ltd.のご厚意により掲載します)

図 10b に示す具体的な用途では 896MHz で運転する 3 本のラインを用いて、25kg のバターブロックを -14°C から -2°C まで調製します。この処理により、250g 小売パックの配合や分割等の次工程での機会処理がし易くなります。

1.6.2.3 シングルモード共鳴アプリケーション

シングルモード共鳴共振器ではマイクロ波の入射の重畳(重ね合わせ)と反射波は空間で明瞭に定義される定在波パターンを発生させます。このため誘電材料が電界が最大となる位置に置かれることが可能となり、電磁エネルギーの移転は最適に行われます。

図 11 には最も多用途に用いることができ、 TE_{10n} モードで運転するシングルモード共鳴アプリケーションを示します。これは n 半波長の余弦電場分布を発生する長方形導波管が、一端では結合絞りでフランジに、一端では非接触短絡プランジャーに接続される構成となっています。

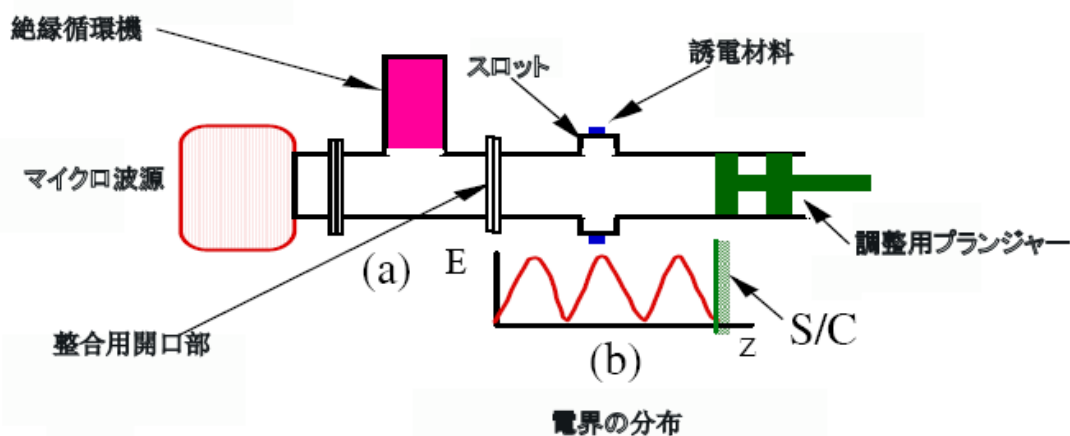


図 11 TE_{10n} シングルモード共鳴アプリケーション

処理を行う誘電材料は導波管の幅に沿ってあるスロットを通してアプリケーション内に挿入されます。誘電体はアプリケーション内部に発生する定在波の最大電界に曝されます。その範囲は例えば数 kW の弱い出力電力で $1 < E < 2 \text{ kV/cm}$ にあります。例えば 10 kV/cm 程度までの強い電界も発生させることができ、この場合は 30°C/s を超える程高速の加熱となります。

このようなアプリケーションの最適性能のためには、運転周波数を決定するプランジャーの位置と、アプリケーションに実際に移転されるエネルギー量を定める絞りのサイズは当該材料の誘電特性に依存します。弱いエネルギーで特に反射係数、体積定在波比と共振器の

インピーダンスを測定するネットワーク解析装置を用いて、最適化を実施する必要があります。

調節可能なプランジャーと開口部のおかげで正しい寸法を選択するだけで異なる有効損失率をもつ広範囲な誘電体を処理することができるので、シングルモード共鳴アプリケーションを多目的に使用できます。図 11 のシステムは調節可能な開口部がある共振器を絶縁循環機を介して電源に接続したものを示します。赤外高温測定により導波管共振器の横にある小さな穴を通して加熱された試料の表面温度を測定します。

シングルモード共鳴アプリケーションには限界があります。それは、896/915MHz 周波数帯域を用いても常に比較的少ない処理量しか扱うことができず、その結果、工業用途には限界があることです。さらに、誘電損失が低い材料を処理する場合には、自動フィードバック制御システムを用いて必要な共鳴周波数帯域で運転して高加熱率を維持することが必要になります。このため、上の例とは異なる、例えば、TM₀₁₀ないし高めの TM₀₂₀と TM_{11n} の共振器を用いた、若干多目的度は落ちる共鳴共振器が液状食品の工業処理に用いられました。²

1.6.2.4 特別なアプリケーション

マイクロ波周波数を用いてあらゆる要求と材料構成に適合できるアプリケーションの設計が可能になりました。その種類には波型から周期型アプリケーション、蛇行アプリケーションから緩やかな波型またはラジエータアプリケーションまであります。さらに、出力の低いマグネトロンを用いて設計者は処理域の特定領域にマイクロ波電力を集中させることができます。²

2. 工業用マイクロ波加熱用途の概観

マイクロ波加熱はいくつかの主要工業で確立しました。次に図 13 を適宜参照しながら今日までの最も重要な用途に焦点を当てて要約します。^{1,2} ここでは特に有機合成では目覚ましい進歩があった化学業界の用途は含みません。⁸

2.1 食品の調製

食肉、魚、果物、バターその他の食品類は、肉ならバーガーの生産、バターパックの配合と分割等次工程の処理をし易くするため約-3°Cまでの冷蔵温度へ調製できます。工業部門のマイクロ波ユーザーは例えば食肉供給量が多すぎれば無駄肉となり、少なすぎれば買い物客を失うという長期的需要予測の誤差による無駄を根絶できません。図 7 は典型的なベルトコンベヤタイプのマイクロ波システムです。

2.2 ゴム加硫前の予備加熱

ゴム押出加工の温度は架橋結合が始まるために必要な程度までマイクロ波エネルギーを用いて高めることができます。図 13 の経路 1 に示すように架橋結合工程は高温空気または赤外線熱を用いて引き続き行われます。

図 9 に示すようなモジュールタイプのマイクロ波システムを用いる連続加硫処理とは異なり、マイクロ波は重量数百 kg のゴムブロックを加熱するために小規模または多重マグネトロンシステムを用いるバッチシステムで用いられてきました。

2.3 乾燥処理

大気圧: 繊維からセラミック、コーティングされた紙から皮革まで広範囲の材料が、図 13 の経路 2 に示すように一般的には従来のシステムと組み合わせてマイクロ波を用いて乾燥されてきました。パスタの乾燥は、マイクロ波と高温空気を各種組み合わせて用いる三段階の処理からなるマイクロ波の用途として確立したほか、品質以外にも衛生と製品管理が向上しました。その他の例には、玉葱、パースニップ、スナックフード(既述のペレットのパuffingとして用途が拡大しました)、繊維、皮革、セラミックのコアや型、陶器等の乾燥が挙げられます。

真空乾燥: 材料の中には熱に弱く、大気圧下で乾燥できないものがあります。この際沸点を下げるために減圧して低温で乾燥を行うことが必要になります。100-200mm Hg の低真空度でもマイクロ波プラズマまたはアークの形成を回避することができるので、低圧は必要です。この代表例には、フルーツジュース、飲料、薬品および薬剤ペレットの乾燥があります。

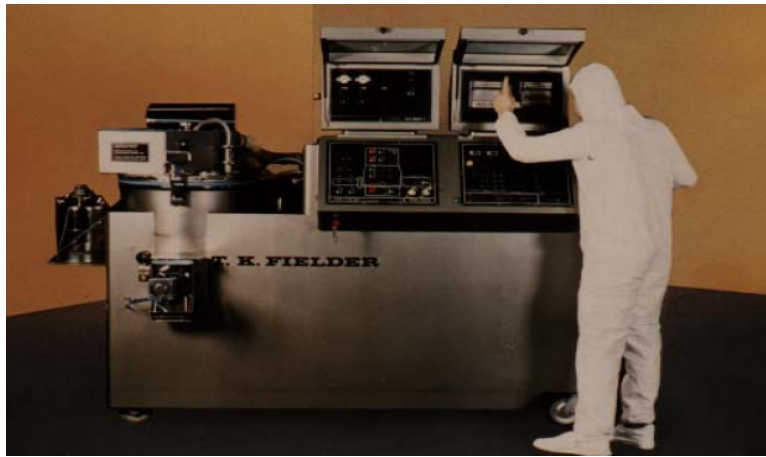


図 12 混合、顆粒化、真空乾燥を組み合わせたシステム
(Niro T.K. Fielder Ltd.のご厚意により掲載します)

図 12 は、27kW で 2450MHz マイクロ波装置を用いる広範囲の薬剤製品を真空下で混合、顆粒化、乾燥を行う一体型処理装置を示します。このハイブリッド処理装置は図 13 の経路 4 として強調してあります。

2.4 加熱と調理

多くの食品が加工処理の異なる段階でマイクロ波により調理されてきました。例えば、コンビ型システムではベーコンの調理、不要部分の肉をアップグレードするための食肉の凝固やドーナツを揚げる調理工程などがあります。

2.5 滅菌・殺菌処理

食パン、調製食品、家畜の餌等の食品製品は滅菌や殺菌のため、または単に消化性を改善するためにマイクロ波を用いて処理されてきました。具体例としては、骨粉の滅菌やオオムギを処理してデンプン(スターチ)からゼラチンへの転換を行う等があります。高圧下での密封食品パックの滅菌はマイクロ波のエネルギーを用いて行うことができますが、大部分の滅菌工程では、図 13 の経路 3 に示すように、マイクロ波による処理後の製品は細菌の侵入を防ぐために急冷が必要です。

2.6 マイクロ波の用途が今後拡大できると思われる分野

今後の経済条件が改善されてマイクロ波の応用が再開されたり開発が進むことが考えられる用途分野がまだ多くあります。その例としては、食品加工、アスファルトの凹みのパッチ材料、核廃棄物のガラス固化、極めて有毒な物質の処理、樹脂廃棄物の回収、熱分解、樹脂の加熱、重合反応、オイルサンドの加熱、鉱物の処理等があります。

乾燥以外では、マイクロ波を用いるセラミック処理で興味深い応用領域として、スリップキャスト法、広範囲のセラミックとコンポジットの焼結、超伝導材料または電子セラミックの結合と焼成を挙げることができます。マイクロ波のエネルギーは熱核融合反応炉に用いられるプラズマへの追加熱供給と半導体製品のエッチングにも用いられます。¹

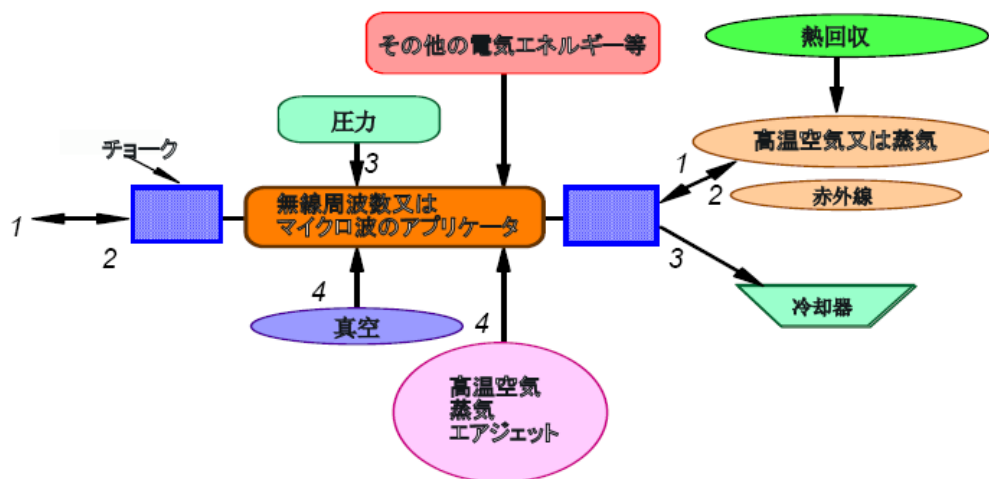


図 13 ハイブリッドマイクロ波システム

2.7 マイクロ波の経済性

工業用マイクロ波設備の資本コストは設置後で1kW 当たり2000 ユーロから5000 ユーロの範囲と概算されます。このコスト幅はある程度の真空を生成するために要する背圧/拡散テストセット、高温空気又は蒸気の注入、マイクロプロセッサの制御と自動化等の必要な補助設備の高度化の度合いにより異なります。マイクロ波発生源から製品内でマイクロ波が拡散するまでの全体効率は50%から70%の範囲です。究極的には各種の利用可能なエネルギー源を微妙に混合する他、図13に示すように従来の高温空気装置上に熱回収装置を付設するとシステム全体の性能を高められるでしょう。

3. 結語

マイクロ波加熱は従来いくつもの産業分野で確立してきました。明らかに、温度調節、漂白、滅菌処理、調理、パuffingや真空乾燥等の各種の操作を要する食品工業はマイクロ波処理の最も有望な市場であるといえます。しかし、その他の競合技術も優勢となっていることは真剣に受け止め対応することが必要です。最近のセラミック産業での展開を見ると、近い将来には大規模なマイクロ波電力を用いる主要な用途分野が成立するものと見られます。

参考資料

- 1 METAXAS, A. C.: Foundations of electroheat: a unified approach, John Wiley and Sons 1996
- 2 METAXAS, A. C. and MEREDITH, R. J.: Industrial microwave heating (IEE, 1983, reprinted 1988 and 1993)
- 3 FULFORD, G. D.: 'A survey of recent Soviet research on drying of solids', Can. J. Chem. Eng., 1969, 47, pp. 378-391
- 4 LORENSON, C.: 'The why's and how's of mathematical modelling for microwave heating', Microwave World, 1990, 2, (1) pp. 14-22
- 5 Dibben D.C and Metaxas A C., 'Finite Element Time Domain Analysis of Multimode Applicators Using Edge Elements', Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 29(4), pp.242-251, 1994
- 6 HILL, J. M.: 'Simple exact solutions applicable to microwave heating', J. Appl. Math., 1989, 40, pp. 872-882
- 7 Ehlers.R. and Metaxas A.C., '3D FE Discontinuous Sheet for Microwave Heating', IEEE Transactions of Microwave Heating and Techniques, Vol 51, No.3, 718-726, March 2003,
- 8 Strauss, C.R., Microwave technology and its emerging role in organic synthesis, AMPERE Newsletter, ISSN 1361-8598, Issue number 45 June 2005

本稿は1991年9月にIEE Power Engineering Journal 5(5)で最初に掲載された内容に基づいています。

著者 Dr. A.C. (Ricky) Metaxas 氏は英国ケンブリッジのセント・ジョンズ大学フェローであり講師も勤めます。1995年から2005年まで同氏は商工業におけるマイクロ波と無線周波数エネルギーの利用を推進する欧州機関である AMPERE の会長でした。IEEフェローでもあります。