

<APMC 2010 基礎講座>

6. 新時代を切り開くマイクロ波 エネルギー応用技術

国士舘大学
二川佳央氏

12月10日(金) 11:00~12:30

新時代を切り開くマイクロ波エネルギー応用技術

二川佳央

国土舘大学大学院工学研究科

〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1

nikawa@kokushikan.ac.jp

あらまし - マイクロ波は、近年クリーンで高効率なエネルギー源として大きな注目を浴びている。マイクロ波をエネルギー源とすることにより、設定温度までの到達時間を短縮し、均一加熱を実現することが可能となる。これによりセラミックスの高速焼結をはじめ、新材料の合成、化学反応の高速化から製鉄に至るまで、工業・医療・科学分野で新しい応用が進められている。本講座では、これまで通信分野で広く用いられてきたマイクロ波を、エネルギー・環境問題を解決する可能性を秘めた、新たなエネルギーソースとして利用する考え方についてまとめる。

キーワード - マイクロ波エネルギー、マイクロ工業応用、誘電加熱、アプリケーション、複素誘電率温度特性。

I. はじめに

マイクロ波エネルギー応用技術を中心とした最新の技術分野を図1に示す[1]-[4]。技術分野として誘電加熱、ジュール加熱、磁損による加熱等の発熱を利用した技術、マイクロ波エネルギーによる化学反応促進技術、イオン化現象を利用したプラズマ応用技術に分類することができる。ここではマイクロ波エネルギー応用に必要な基礎的な考え方から具体的な応用技術を概説する。また、マイクロ波エネルギー応用技術を実現するための材料のマイクロ波温度特性評価法の具体例を挙げ、マイクロ波最新応用技術等についても紹介し、マイクロ波エネルギー応用技術の展望について述べる。

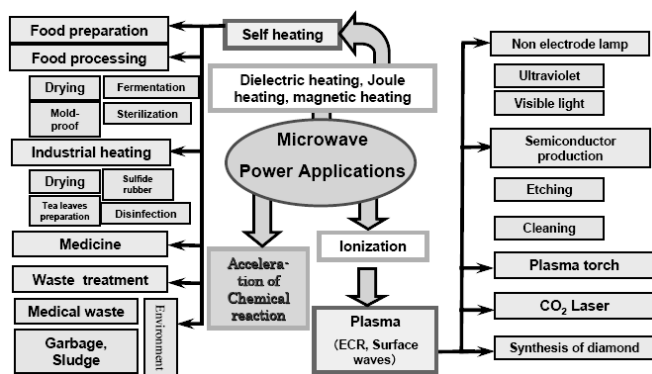


図1 マイクロ波エネルギー応用分野

II. マイクロ波エネルギー応用の基礎

マイクロ波エネルギーを応用する際に必要となるエネルギー吸収に関する考え方については、マイクロ波工学を扱う多くの書籍で述べられているが[5]-[7]、ここではマイクロ波エネルギー吸収に関係するいくつかの基礎的な考え方を示す。

A. 電磁界の基礎

マイクロ波エネルギーの応用を材料の電気的特性について、「誘電率」で示される誘電的特性と、「導電率」および「誘電損率」で示される導電的特性がある。また、磁気的特性に関しては、「透磁率」で示される磁気的特性と、「磁損」で示される磁気的損失特性がある。また、マイクロ波のように周波数が高く、波長が短い電界と磁界の振動現象としての電気現象を扱うときには、電界と磁界の相互作用について考慮する必要がある。

損失性の材料に対するマイクロ波における特性を示すために、特性は単位体積当りの抵抗率 ρ 、誘電率 ϵ や透磁率 μ を用いて表現する。特に非磁性の材料に対する電気的特性は、導電率 σ と誘電率 ϵ を用い電気特性を示す。尚、磁気的な特性については、誘電的特性と対に考えることが可能であることから、ここでは主として誘電的特性と導電的特性について触れる。

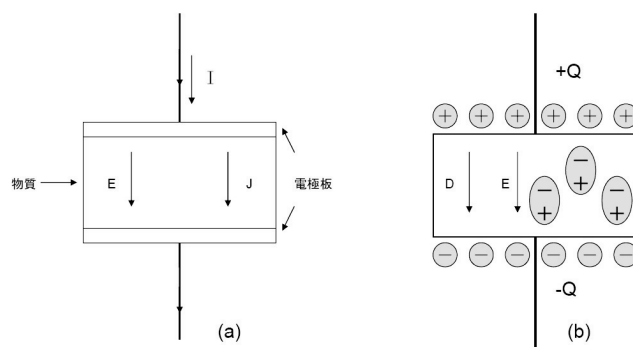


図2 導電性と誘電性

回路に加わる E (波高値 E_0) による単位体積当りの発熱は、以下ようになる。

$$W = \frac{\sigma}{2} |E_0|^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (1)$$

また、回路に流れる電流 J (波高値 J_0) により単位体積当りの発熱は、以下ようになる。

$$W = \frac{\rho}{2} |J_0|^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (2)$$

図 2(a)には導電性の物質に流れる電流密度と電界の関係を示す。図 2(b)のように両極板に $+Q$ 、 $-Q$ の電荷を与えると、極板間に絶縁体がある場合にはその電位差 V は極板間が真空状態に比べて小さくなる。これは次のように説明される。極板上の真空上の真電荷 ($+Q$ と $-Q$) により作られた電界によって物質内部の移動できない正負の電荷が局所的な偏り、すなわち分極を起し、電気的雙極子が発生する。絶縁体内部の電気的雙極子の電荷は近接したほかの雙極子と打ち消し合っただけで中性になるが、両極板近くの両端の雙極子の電荷は打ち消し合うものがないため、分極電荷として働き、逆方向の電界が生じる。このため、分極電荷による逆方向電界によって、もともと加えられた電界が打ち消され、物質内部の電界が弱くなり電位差 V は小さくなる。物質のこのような性質が誘電性である。図 2(b)に示した特性を示すコンデンサでは、極板間の物質は絶縁体であるから、極板の間を電子が実際に移動することはない。しかし、極板間に高周波電界をかけると、絶縁体内部での電気的雙極子も変動し、その変化を電流とみなすことができる。それらの様子を図 3 に示すが、極板間には含まれた絶縁体の分子の分極が変動している時、分子の中で各々の電気的雙極子の動きを分極電流とみなし、電流を電束電流又は変位電流と呼ぶ。磁気において磁束力線の密度を磁束密度 B [Wb/m^2] と定義したのと同様に、真電荷から出る電束力線の密度を電束密度と呼び、 D [C/m^2] で表す。電束密度 D は前述の電流密度と同様に電界 E と比例し、その比例定数が誘電率 ϵ [F/m] である。誘電率の真空の誘電率 ϵ_0 との比を比誘電率 ϵ_s と呼ぶ。電束密度 D [C/m^2] は誘電率 ϵ [F/m] と電界 E [V/m] との積であり、以下ようになる。

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_s E \quad [\text{C/m}^2] \quad (3)$$

ただし、 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$ となる。この D の時間的变化 dD/dt [A/m^2] が電束電流密度である。すなわち、電磁誘導の誘導電圧

$$\frac{d\phi}{dt} [V] = L[H] \cdot \frac{dI}{dt} [A/s] \quad (4)$$

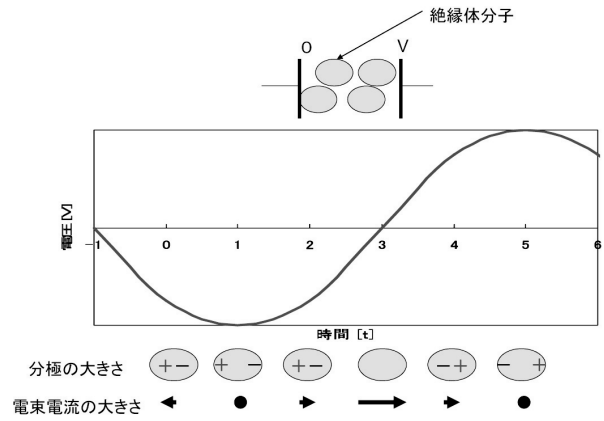


図3 絶縁体中の分極と電束電流

を用いると電流は以下のように示される

$$\frac{dQ}{dt} [A] = C[F] \cdot \frac{dV}{dt} [V/s] \quad (5)$$

また、同様に、電束電流密度は

$$\frac{dD}{dt} [A/m^2] = \epsilon [F/m] \cdot \frac{dE}{dt} [V/m \cdot s] \quad (6)$$

となる。これからわかるように、電束電流密度とは、物質の外側に与えた電界が振動した場合に物質内部における電界の時間的变化 dE/dt に比例した量である。また誘電率とは、上記の比例定数であり、物質中の電界が分極によりどれだけ小さくなるかを表したものである。

実際の物質は導電性と誘電性の両方の性質を持ち合わせている。そこで両者を同次元の量で扱うために導電率も複素数で考える。この場合の複素導電率 σ^* は、

$$\sigma^* = \sigma + j\omega\epsilon = \sigma' + j\sigma'' \quad [\text{S/m}] \quad (7)$$

となる。ただし、 $\sigma' = \sigma$ 、 $\sigma'' = \omega\epsilon$ となり、その大きさは

$$|\sigma^*| = \sqrt{\sigma^2 + (\omega\epsilon)^2} \quad [\text{S/m}] \quad (8)$$

となる。なお、 ω は角周波数 ($\omega = 2\pi f$: f は周波数) である。単一物質では電界強度の波高値 E_0 [V/m] を用いてジュール熱 W は式(9)によって表される。

$$W = \text{Re}(\sigma^*) \cdot \frac{|E_0|^2}{\sqrt{2}} = \frac{\sigma}{2} |E_0|^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (9)$$

また全電流密度 J_0 [A/m^2] を用いてジュール熱を表現すれば、 $J_0 = \sigma^* E_0$ より、

$$W = \frac{\sigma}{2(\sigma^2 + \omega^2 \epsilon^2)} |J_0|^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (10)$$

となる。ここで $|\sigma^*|$ は、複素導電率の大きさを示している。複素誘電率 ϵ^* は

$$\sigma^* = j\omega\varepsilon^* \quad (11)$$

と考えれば、以下のように示される。

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (12)$$

ただし、 $\varepsilon' = \varepsilon$ 、 $\varepsilon'' = \sigma/\omega$ と定義できる。一般に複素誘電率の虚数部 ε'' は誘電損と呼ばれ、電磁波を照射した際の吸収電力密度の目安になるが、 $\sigma = \omega\varepsilon''$ であるから、誘電損を用いてジュール熱を表現することができる。

以上、導電性と誘電性についてごく基本的な概念を述べたが、いかなる物質でも電界がかけられた時に移動できる電荷と何らかの拘束により移動が制限される電荷を持つことから、導電性と誘電性の両者の特性を合わせ持っていることになる。

なお、これまでは簡単のために導電率、誘電率ともに一定の値として論じてきたが、実際には周波数によって大きく変化する（これを分散と呼ぶ）。その理由として、分極が生じるのにかかる時間がかかることが原因する誘電緩和現象や不均質な構造により生じる構造分散がある。

B. 電磁界の性質

電界および磁界に関する波動方程式を以下に示す。

$$\nabla^2 E + k^{*2} E = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 H + k^{*2} H = 0 \quad (14)$$

尚 k^* は伝搬定数で

$$k^* = \omega\sqrt{\varepsilon^* \mu^*} \quad (15)$$

によって表される。電磁波の伝搬において最も単純な伝搬モードは平面波(Transverse Electro-Magnetic Wave; TEM波)である。電界のみが横振動で伝搬するモードである TE 波(Transverse Electric Field)、磁界のみが横振動で伝搬するモードである TM 波(Transverse Magnetic Field)という。

電磁界を波動として取り扱う必要がでてくるのは、対象とするもの大きさが波長に比べて大きいとき（高周波のとき）である。物体内部におけるマイクロ波の伝搬および減衰は、物体を構成する複素誘電率と複素透磁率 μ によって異なる。ここで、透磁率 μ が、真空中と同じ非磁性体（ $\mu = \mu_0$ ）について考慮する。式(15)で示した伝搬定数は実数部と虚数部に分かれ、以下のようになる。

$$k^* = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0}} = \beta - j\alpha \quad (16)$$

ただし、 α と β はそれぞれ減衰定数と位相定数と呼ばれる定数である。二つの定数はそれぞれ、

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 (\sqrt{\varepsilon_r'^2 + \varepsilon_r''^2} - \varepsilon_r')} \quad [\text{Neper/m}] \quad (17)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2}\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 (\sqrt{\varepsilon_r'^2 + \varepsilon_r''^2} + \varepsilon_r')} \quad [\text{rad/m}] \quad (18)$$

となる。物質内部でのマイクロ波の透過の様子を検討することは重要であるが、このときにマイクロ波エネルギーが $1/e$ (e は自然対数の底) すなわち約 37%となる浸透深度(penetration depth) d が目安となる。マイクロ波が平面波として減衰するときには

$$d = \frac{1}{2\alpha} \quad [\text{m}] \quad (19)$$

となる。尚、表皮深度(skin depth) δ は電界強度が $1/e$ となる深さであり、

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad [\text{m}] \quad (20)$$

となる。従って $\delta = 2d$ となる。

物体内部での電波の波長は位相定数を用いて

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad [\text{m}] \quad (21)$$

となる。また導電率が非常に大きく $\sigma \gg \omega\varepsilon$ の場合には

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{1}{2}\omega\mu\sigma} = \sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (22)$$

となるため、媒質がより導電的であるか、より誘電的であるかを大まかに知っておくことは必要である。この場合は、式(11)に示した複素導電率の実数部 σ と虚数部 $\omega\varepsilon$ の大小関係を各々の物体について考えればよいことになる。 $\sigma = \omega\varepsilon$ の場合は、 $\omega = \sigma/\varepsilon$ となり、 $\omega = 2\pi f$ より両者が等しくなる周波数を f_c とすると、

$$f_c = \frac{\sigma}{(2\pi\varepsilon)} = \frac{\sigma}{(2\pi\varepsilon_0\varepsilon_s)} \quad [\text{Hz}] \quad (23)$$

となる。この f_c のことを誘電緩和周波数を呼び、印加された電界の周波数 f との関係において $f \ll f_c$ の帯域では導電性が、 $f \gg f_c$ では誘電性がより支配的になると考えることができる。

III. マイクロ波材料の特性評価

マイクロ波エネルギーを応用する際に、対象となる物質、媒質のマイクロ波物性およびその温度特性が重要となる。ここでは材料のマイクロ波特性およびその温度依存特性の測定例およびいくつかの代表的な材料の特性例について述べる。

A. 理論

マイクロ波材料の特性評価に関して、空洞共振器を使用した測定例について述べる。試料が十分小さいため、空洞内への試料挿入前後の無負荷時の Q と結合孔による外部 Q の変化はないと仮定する。これにより、試料挿入前後における Q 値の変化量及び共振周波数を測定し、式(24)、(25)に示す摂動公式を用いて、材料の複素比誘電率 ($\epsilon_r' - j\epsilon_r''$) が求められる[6]。

$$\epsilon_r' = 1 - \frac{1}{\alpha_\epsilon} \frac{f_L - f_0}{f_0} \frac{V}{\Delta V}, \quad (24)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{1}{\alpha_\epsilon} \left(\frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{\Delta V}, \quad (25)$$

但し、ここで f_L, f_0 はそれぞれ試料挿入前後の共振周波数であり、 V と ΔV は共振器及び試料の体積である。 α_ϵ は共振モード、試料形状で決まる定数である。

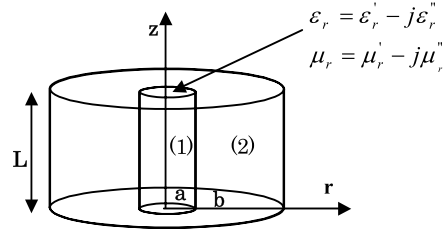


図5 TM₀₁₀モード円筒空洞共振器

TM₀₁₀モード円筒空洞共振器内の電磁界の厳密解について[8]-[10]、図5に示すように非磁性体($\mu_r=1$)の丸棒を円筒空洞共振器の中心軸に挿入し、電磁界に対する境界の連続条件により、特性方程式は式(26)に表される。そして、空洞の共振周波数を測定すれば、式(26)を満足する材料の比誘電率が求められる。

$$\epsilon_r = \frac{k_{c1} J_0(k_{c1}a) J_0(k_{c2}b) N_1(k_{c2}a) - J_1(k_{c2}a) N_0(k_{c2}b)}{k_{c2} J_1(k_{c1}a) J_0(k_{c2}b) N_0(k_{c2}a) - J_0(k_{c2}a) N_0(k_{c2}b)} \quad (26)$$

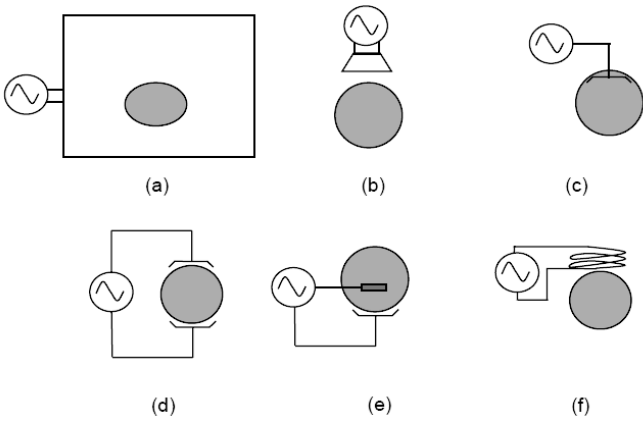


図4 電磁波エネルギー応用のためのアプリケーション

物体に対してマイクロ波エネルギーを利用する際には上記の特性を十分考慮して、ターゲットに対してエネルギーを送り込むことを考える必要がある。物体の複素誘電率、複素透磁率、サイズが大きなファクターであり、一方照射するエネルギーの周波数も加熱特性を決める要因となる。

加熱方法として使用するアプリケーションの種類に分類した例を図4に示す。(a)、(b)、(c)は電磁界照射による利用例である。(d)、(e)、(f)は高周波電流の利用例である。(a)は広く用いられる空洞を使った方法である。空洞にはシングルモード、マルチモード等が使用される。この方法が電磁界が外部に漏洩しない点からも有効な方法である。(b)は単一あるいは複数のアプリケーションにより非接触でエネルギーを送る方法である。フェーズドアレイの技術を用いて物体中にエネルギーを局所化させる試みも行われている。(c)は単一あるいは複数のアプリケーションを接触させてエネルギーを送る方法である。液体などに対してはアプリケーションを物質内部に挿入して利用することも可能である。(d)、(e)、(f)は高周波電流を物体内部に流してエネルギーを送る方法である。(d)では物体に電極(エレクトロード)を接触させて均一に電流を流すことができる。(e)では内部電極に対して外部電極が近接した部位にエネルギーを集中させることが可能である。また、(f)では磁界結合による渦電流を利用したエネルギー応用が期待できる。

特に(a)、(b)、(c)については、電磁界による発熱のため、電磁界が一定と仮定すると、発熱は導電率の大きな所に対して期待できる。これに対して、(d)、(e)、(f)の場合には高周波電流による発熱のために、電流が一定と仮定すると、発熱は抵抗率の大きな場所に集中する。マイクロ波のエネルギー利用に関してはこのように、対象物の特性とエネルギー伝達方法の両者について考慮して対象物にエネルギーを伝達させる必要がある。

ここで、 $J_m(*)$ は第1種の m 次ベッセル関数であり、 $N_m(*)$ は第2種の m 次ベッセル関数である。 k_{c1} は誘電体中で r 方向の伝搬定数であり、空間で r 方向の伝搬定数が k_{c2} である。 ω は誘電体丸棒を含む共振器の共振角周波数である。 a と b は試料と共振器の半径である。

挿入試料の誘電正接($\tan\delta$)には、空洞内蓄積エネルギーと消費電力の関係から[10]、式(27)より求めることができる。

$$\tan \delta = \frac{W^e}{W_d} \frac{1}{Q_u} - \frac{P_c}{\omega W_d} \quad (27)$$

ここで、 W^e は空洞内に蓄えられたエネルギーであり、挿入試料に蓄えられたエネルギーは W_d である。 P_c は空洞の壁で消費した電力である。 Q_u は試料挿入後の空洞の負荷 Q である。従って、式(26)、(27)を用いることで式(24)、(25)で示される摂動法により得られた結果の誤差を評価することができる。

B. 実験

TM₀₁₀モード円筒空洞共振器を用い、材料をマイクロ波により加熱しながら同時に複素誘電率の測定を行う方法について述べる。マイクロ波照射による試料加熱法は、試料の内部から発熱するので加熱ムラが少なく、丸棒の試料に対してほぼ均一に加熱が可能である。

マイクロ波による試料加熱時には、複素誘電率およびその温度依存性を測定するための実験用測定系を図6に示し、装置の写真を図7に示す。測定では、高周波電力増幅器を用い、VNAの出力を増幅し、増幅した電力は結合磁界ループにより円筒空洞共振器に結合する。空洞共振器に挿入した結合ループから測定した透過電力は減衰器により減衰させ、VNAにより共振特性を測定する。また、共振器内の試料を加熱しながら赤外線温度計で試料の表面温度を測定する。試料の温度上昇を制御するため、VNAの出力および周波数帯域幅を変化させ、空洞共振器に投入したマイクロ波電力を変化させる。また、空洞共振器の熱膨張を防ぐために、冷却システムを設け、空洞共振器の温度を一定とした。これにより、温度依存特性測定の際には室温で測定した無負荷 Q を基準とすることができる。

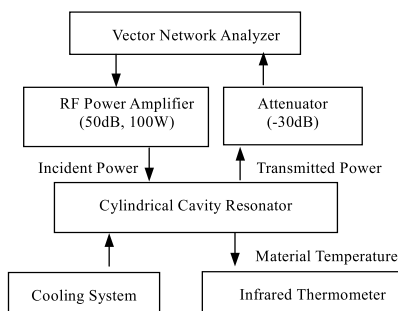


図6 測定システム

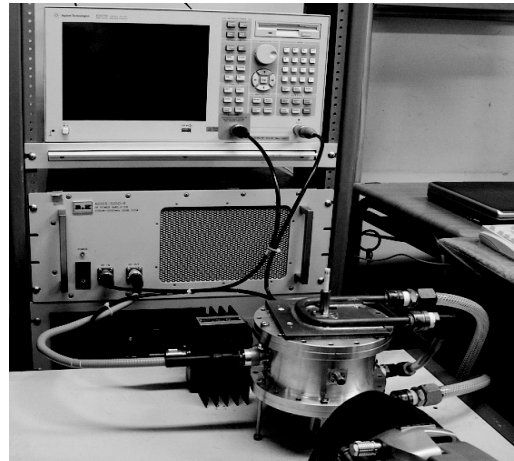


図7 測定システム写真

C. 実験結果

実験によって得られた酸化物系のアルミナ(Al_2O_3)と非酸化物系の窒化珪素(Si_3N_4)等のセラミックスに対して、アルミナ純度が 99.5% および 99.9% の試料の温度特性を比較した結果を図 8, 9 に示し、窒化珪素の複素誘電率温度特性を図 10 に示す。尚、アルミナのガラス転移温度は 800°C である。また、高分子有機材料として、Poly phenylene sulfide (PPS), Polyamide imide (PAI) の複素誘電率温度特性を図 11 および 12 に、複合材としてガラスエポキシの特性を図 13 に示す[11]。

図 8~9 に示す結果より、セラミックス材料に対し、誘電率の実数部は温度上昇により僅かに線形上昇するのに対し、誘電損率は純度低い場合には、ほぼ線形的に上昇する。これに対して、純度が高い場合には、ガラス転移温度を境にして誘電損率は急激に増加することが分かる。一方窒化珪素については 80°C を超えると、温度上昇と共に、誘電損率が下がる傾向があることがわかる。樹脂材料については、結晶系の樹脂材料でガラス転移温度が 88°C の PPS については、ガラス転移温度を境にして誘電損率は急激に増加することが分かる。また、図 12、13 に示されるように、熱可塑性樹脂中の非結晶樹脂(PAI)や、熱硬化性樹脂(Epoxy)は温度によって誘電率と誘電正接が共に大きく上昇することがわかる。このように、材料による温度特性が異なるため、マイクロ波加熱においては、それぞれの材料温度特性を踏まえたうえで、マイクロ波エネルギー応用の対象となる材料に対して効率良くエネルギーが加わるようにシステムを設計する必要がある。

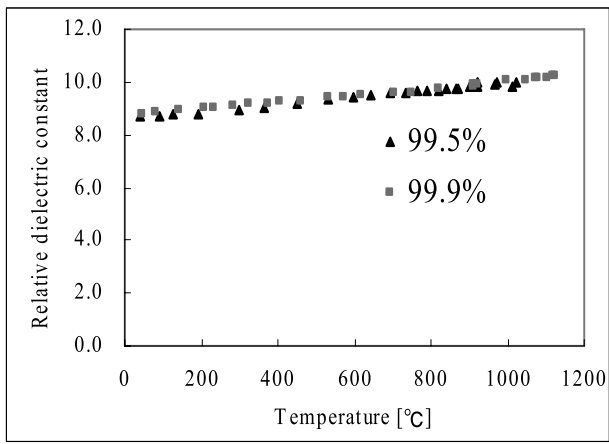


図8 純度の異なるアルミナの比誘電率温度依存特性 (純度：99.5%, 99.9%)

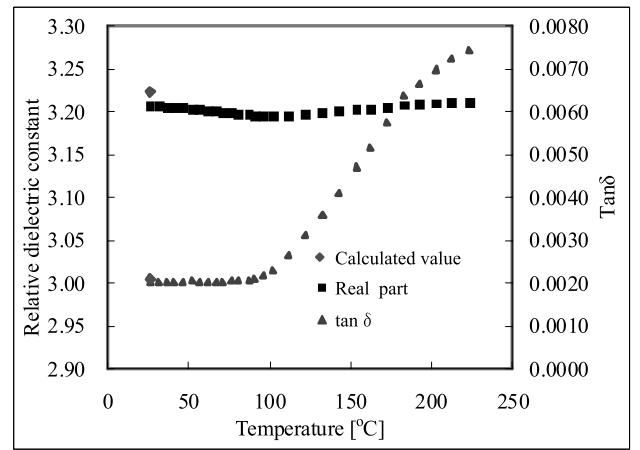


図11 PPSの複素誘電率温度依存特性

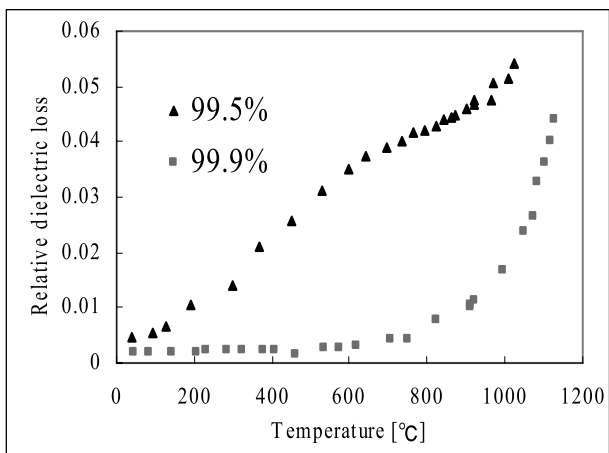


図9 純度の異なるアルミナの比誘電損率温度依存特性 (純度：99.5%, 99.9%)

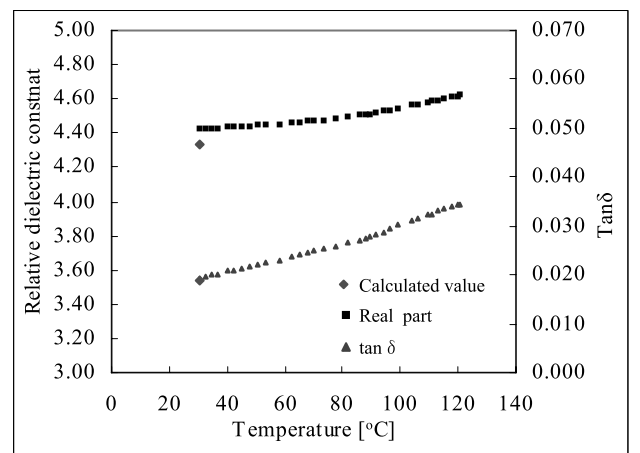


図12 PAIの複素誘電率温度依存特性

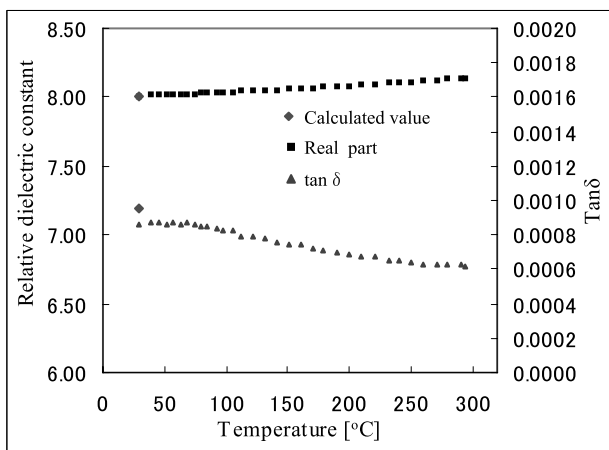


図10 窒化珪素の複素誘電率温度依存特性 (純度：90%)

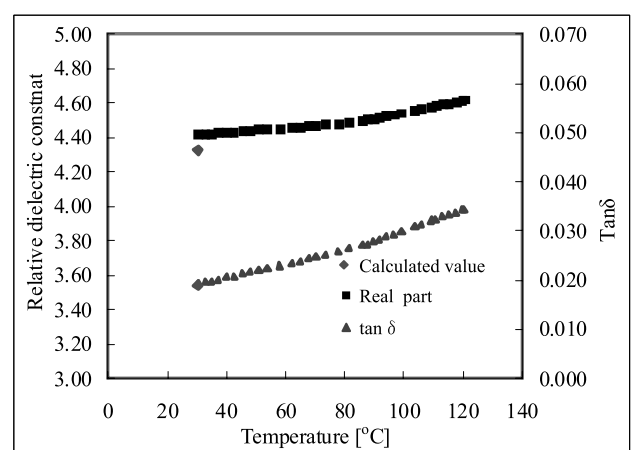


図13 ガラスエポキシの複素誘電率温度依存特性

IV. マイクロ波エネルギー応用装置

マイクロ波エネルギー工業的に応用する上で実用化されている装置を示す。また連続処理に必要な工業炉の概要についても示す。

A. マイクロ波炉の概要

マイクロ波加熱連続炉の概要を図 14 に示す。被加熱対象を誘電損失の小さいベルト上に設置し一定速度で搬送中にマイクロ波電力を照射する。また、被加熱対象の厚さを制御する目的で、対象物を搬送するローラ

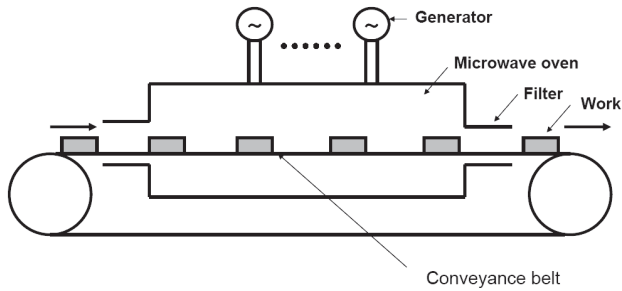


図 14 マイクロ波連続加熱炉の概要

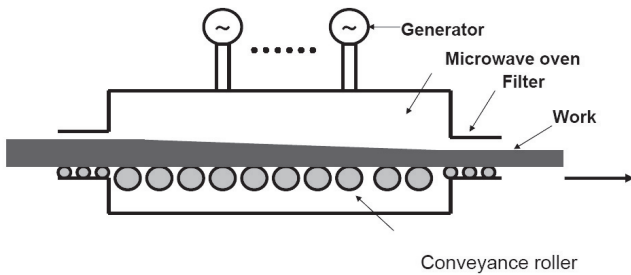


図 15 試料厚制御マイクロ波連続加熱炉の概要

B. マイクロ波炉の実際

マイクロ波エネルギーを利用した加熱の中で、ゴムの加硫反応をマイクロ波照射により促進するための装置を図 16 に示す。一機あたり 2.45 GHz の 12kW のマイクロ波電力を照射して加硫を促進する。

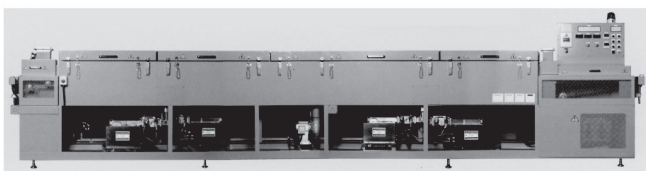


図 16 加硫を促進するマイクロ波連続加熱炉

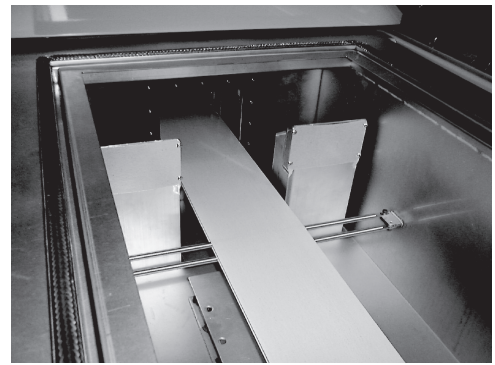


図 17 マイクロ波連続加熱炉内部のマイクロ波給電

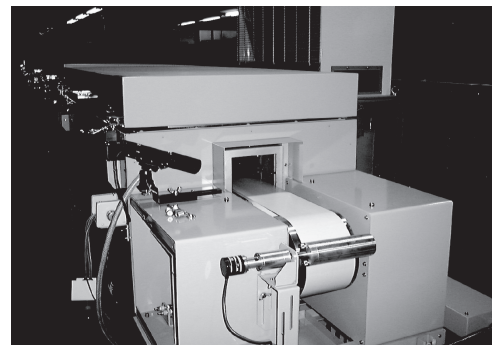


図 18 マイクロ波加熱炉出力口のフィルタ部

図 17 にはマイクロ波加熱炉内部の低損失ベルトおよびマイクロ波給電部分を示す。また、マイクロ波加熱炉の入出口にはフィルタを設置し、不要放射を抑制する構造としている。

食品分野においても、マイクロ波エネルギーは広く利用されている。加熱、乾燥、滅菌等の用途が主体である。図 19 にはマイクロ波を利用した緑茶の乾燥装置の概要を示す。マイクロ波を利用することによる乾燥

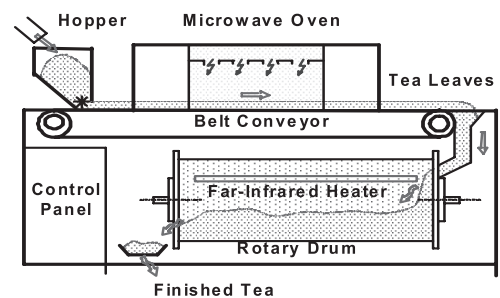


図 19 マイクロ波を利用した緑茶の乾燥装置概要



図 20 マイクロ波を乾燥用ドラム内部

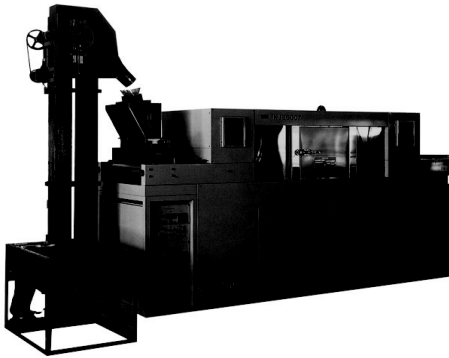


図 21 マイクロ波を利用した緑茶の乾燥装置

時間の短縮化で、通常の煎茶のビタミンCの濃度 171 mg/100g であるのに対して、マイクロ波乾燥により 400 mg/100g を超える量が含まれるという報告もあり、マイクロ波利用の有効性が注目されている[1]。

C. セラミックスの焼成

マイクロ波エネルギーを利用したセラミックスの焼成について、マイクロ波電力 40kW, 最大温度 1600°C の高温焼成可能な炉が実用化されている[2]。

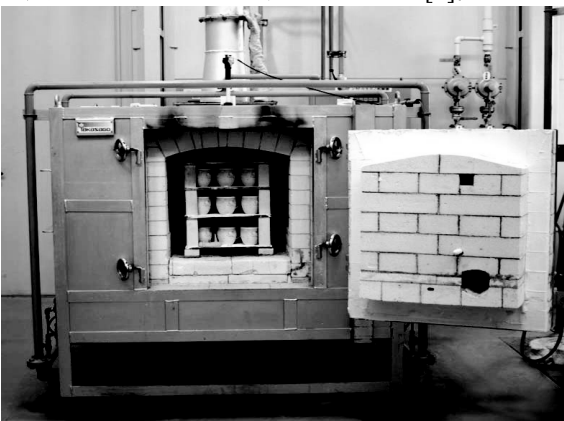


図 22 マイクロ波を利用したバッチ処理炉

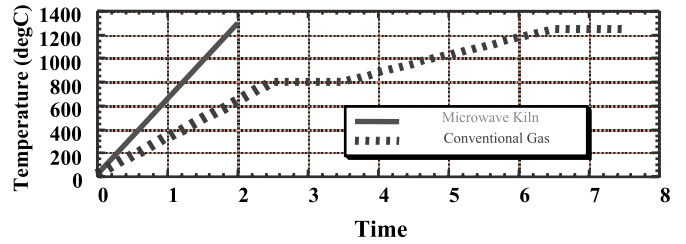


図 23 マイクロ波炉の温度上昇特性

セラミックス焼成用バッチ処理タイプのマイクロ波炉を図 22 に示し、炉の温度上昇特性を図 23 に示す。通常の電気炉では焼成温度に至るまで 335kWh を消費し 7.5 時間要するのに対して、マイクロ波炉では 63kWh で 2 時間と短縮化される。低損失アルミナのマイクロ波焼成についても、図 24 に示されるような形状のものから、直径が 350mm を超えるような比較的大型のものまで実現している[2]。

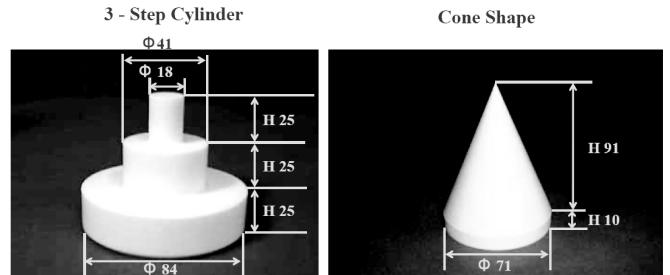
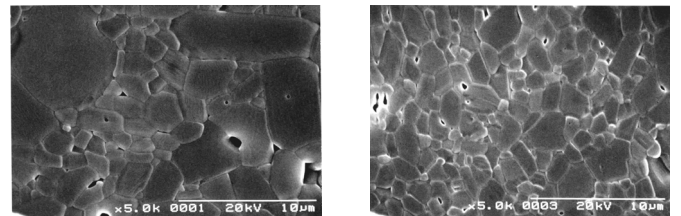


図 24 マイクロ波によるアルミナ焼成

マイクロ波を利用したセラミックス焼成の利点として、高緻密化による高強度化が挙げられる。図 25(a) には 2.45 GHz で焼成した 99.7% のアルミナの電子顕微鏡写真を示す。従来型の電気炉による焼成材料の電子顕微鏡写真 (図 25(b)) と共に示す。マイクロ波による曲げ強度は 500 MPa であり、従来型の電気炉による曲げ



(a) 2.45 GHz マイクロ波炉焼成 (b) 従来炉焼成
図 25 99.7% アルミナ電子顕微鏡写真



図 26 マイクロ波連続焼成炉

強度 370 MPa に比べて 35% 増加していることが報告されている[2]。2.45 GHz のマイクロ波を用いた連続焼成炉を図 26 に示す。アルミナ、ジルコニア、フェライトが対象である。マイクロ波電力 54kW、1 時間当たり 20kg の焼成が可能であり、焼成時間は 2 時間と報告されている。

D. 新しいマイクロ波エネルギー応用

マイクロ波エネルギー応用技術では用いられる電力が高出力化している。200kW のセラミックス焼成用マイクロ波電源および食品加工用電源を図 27 に示す。また、マイクロ波エネルギーの新たな分野における応用が進んでいる。従来からのプラズマ応用に加えて、特にマイクロ波励起により、場を非平衡反応場と考え、新しい材料プロセッシングに利用する考え方を含め、化学反応や製鉄分野に対するマイクロ波応用技術の開発がめざましい[12]-[16]。図 28 にはマイクロ波表面プラズマ処理装置概要図を示し、図 29 には液相化学反応促進用マイクロ波加熱システムの概要図を示す。図 30 に示されるように、ダイオキシン処理の反応促進にもマイクロ波エネルギーが使われている。

V. まとめ

マイクロ波エネルギー応用技術を中心とした最新の技術分野に対して、マイクロ波エネルギーの応用に必要な基礎知識を基に、技術動向の紹介を行った。これまでのマイクロ波加熱に対して、化学反応を含めた新しい応用では、マイクロ波照射場を非平衡反応場と考え、マイクロ波を新しい化学反応や材料プロセッシングに利用する考え方が進んでいる。これらマイクロ波エネルギーの更なる応用が、広く低酸素化社会に向けた新技術の開発につながることを期待されている。

謝辞 本稿作成にあたり、ミクロ電子(株)、核融合科学研究所 佐藤元泰教授、大阪大学 柳田祥三教授より装置写真の供与を頂きましたことを深謝いたします。

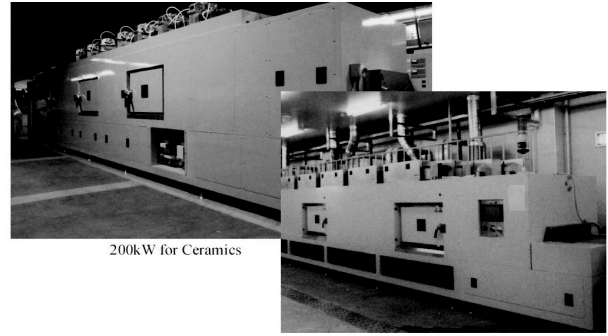


図 27 200 kW マイクロ波エネルギー応用装置

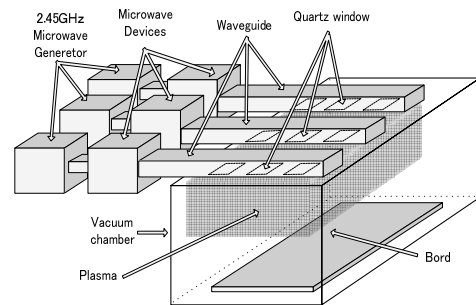


図 28 マイクロ波表面プラズマ処理装置概要図

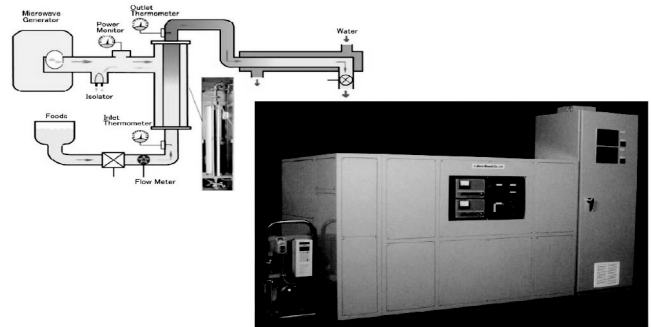


図 29 液相化学反応促進用マイクロ波加熱装置

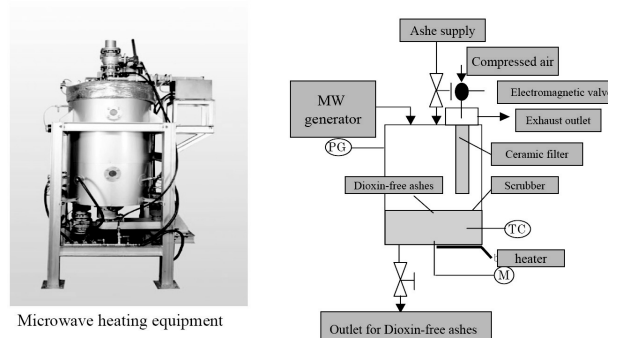


図 30 ダイオキシン処理用マイクロ波照射装置

参考文献

- [1] 日本電磁波エネルギー応用学会, “第 1 回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム講演要旨集,” September 2007.
- [2] Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, “Proceedings of Global Congress on Microwave Energy Applications,” August 2008.
- [3] 日本電磁波エネルギー応用学会, “第 3 回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム講演要旨集,” November 2009.
- [4] 日本電磁波エネルギー応用学会, “第 4 回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム講演要旨集,” November 2010.
- [5] 岡田文明, “マイクロ波工学 基礎と応用,” 山海堂, April 2004.
- [6] 橋本 修, “高周波領域における材料定数測定法”, 森北出版株式会社, 2003.
- [7] 中島将光, “マイクロ波工学—基礎と原理”, 森北出版株式会社, 2004.
- [8] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “Analysis and experiments of TM_{010} mode cylindrical cavity to measure Accurate complex permittivity of liquid,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.5, pp.694-699, May.2004.
- [9] H. Kawabata, H. Tanpo, and Y. Kobayashi, “An improvement of the perturbation method using a TM_{010} mode cylindrical cavity,” IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, no.12, pp.2371-2378, Dec.2003.
- [10] Roger F. Harrington, “Time-Harmonic Electromagnetic Fields”, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1961.
- [11] 関勇、二川佳央, “円筒空洞共振器を用いた材料の複素誘電率のマイクロ波照射による温度依存特性測定,” 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J89-C, No. 12, pp. 1032-1038, Dec. 2006.
- [12] 滝澤博胤, “マイクロ波励起の非平衡反応場における革新的無機材料プロセッシング”, MWE 2009, Microwave Workshop Digest, November 2009.
- [13] 松村竹子, “グリーン・サステナブル産業とマイクロ波エネルギー化学”, MWE 2009, Microwave Workshop Digest, November 2009.
- [14] 和田雄二, “マイクロ波照射下で観察される化学反応の特異挙動—新しい物質製造技術への展開”, MWE 2009, Microwave Workshop Digest, November 2009.
- [15] 永田和宏, “マイクロ波加熱による革新的製鉄技術”, MWE 2009, Microwave Workshop Digest, November 2009.
- [16] 河野巧, “新日鐵化学におけるマイクロ波技術の展開”, 第 4 回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム講演要旨集,” pp. 32-33, November 2010.