

Fig III-4-5 制御フローチャート：血液回路+ガス+水(水入り)

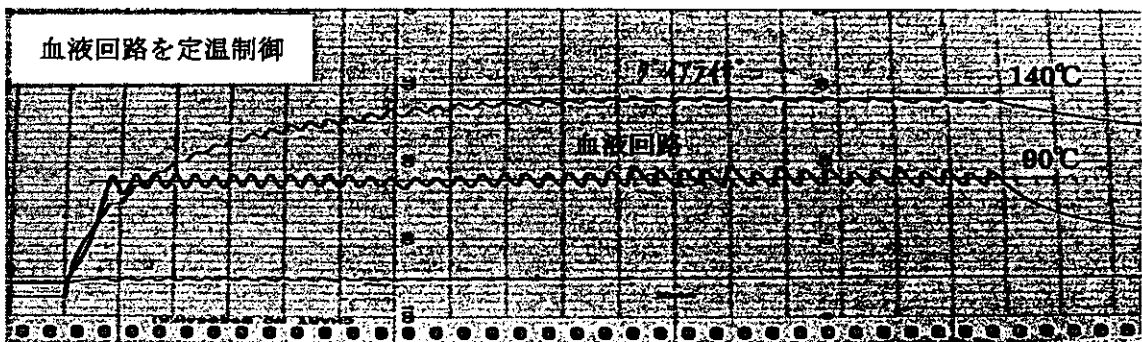


Fig III-4-6 制御フローチャート：血液回路+ガス(水無し)

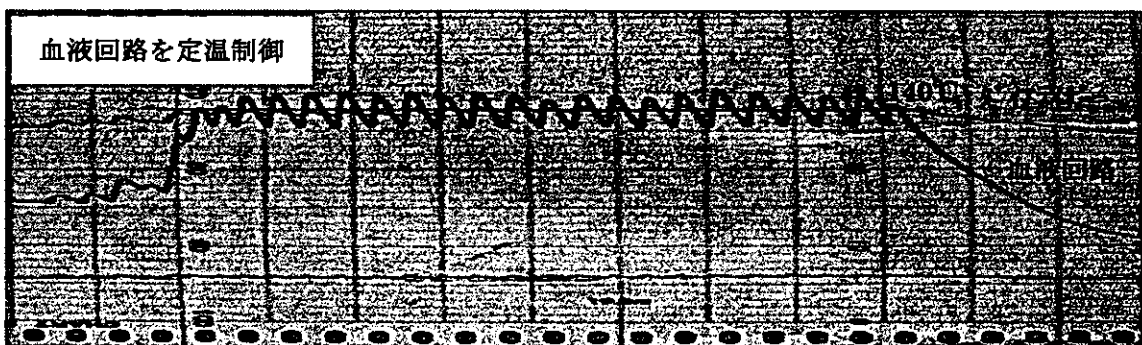


Fig III-4-7 制御フローチャート：血液回路+ガス(水無し)

5. マイクロ波炉内電磁界解析のための廃棄物材料 複素誘電率の温度依存性特性

1 はじめに

材料の複素誘電率は周波数、温度、材料の組成によって大きく変化することが知られている。従って、医療性廃棄物等の主として高分子材料に対してマイクロ波誘電加熱を行う際の加熱装置の設計に際して、対象となる材料の複素誘電率の温度依存性を知ることが要求される。また、材料の複素誘電率を含めた物理的特性の温度依存性を知ることによって、高温に至るまでの分子構造を解析する上できわめて重要である。

材料の複素誘電率温度特性測定用の装置としては、これまで円筒空洞共振器を使い4探針法によって誘電率を測定する方法が報告されてきたが[1]、試料の温度上昇に伴って共振周波数が変化するので、機械的な同調によって共振状態を保つ必要があった。

本報告では、フェライトを装荷した矩形空洞共振器を使用し、そのフェライトに外部から直流磁界を加えることによって共振周波数を変化させることにより、機械的な同調をすることなく共振状態を維持する方法について検討し、これを利用した複素比誘電率の測定法について考察、本装置を用いた廃棄物材料の複素誘電率を測定する。またこれらの結果を基に、医療性廃棄物等のマイクロ波加熱焼却用マイクロ波炉内の電磁界解析を行う。

2 理論[2]

本研究では矩形空洞共振器に挿入された試料に対してマイクロ波を照射し、材料の温度上昇を測定する共に、空洞共振器の特性変化による試料の複素誘電率測定を行う。

一般的に試料の体積が共振器の体積と比較して十分に小さいときには摂動法が使えることが知られている。本測定では、試料の体積が共振器の0.52%と十分に小さいことから摂動法によって比誘電率を求めた。以下の式(1)に摂動式を示す。

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} = - \frac{\int_{\Delta V} \{ \epsilon_0 (\epsilon'_r - 1) |E|^2 + \mu_0 (\mu'_r - 1) |H|^2 \} dV}{\int_V \{ \epsilon_0 |E|^2 + \mu_0 |H|^2 \} dV} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ'_r は比誘電率、 μ_0 は真空の透磁率、 μ'_r は比透磁率、 ΔV 、 V はそれぞれ試料、共振器の体積である。

空洞が共振したときの複素共振角周波数として

$$\omega = \omega_r + j\omega_i \quad (2)$$

のように複素数を考えると、

$$\frac{2\omega_i}{\omega_r} = \frac{1}{Q_L} \quad (3)$$

となる。

次に共振状態にある空洞の内部に試料を挿入すると複素共振周波数が変化し、以下のように示される。

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} \approx \frac{\omega_{r2} - \omega_{r1}}{\omega_{r1}} + \frac{j}{2} \left(\frac{1}{Q_{L2}} - \frac{1}{Q_{L1}} \right) \quad (4)$$

ここで添字の1は試料の基準温度（常温）、2は試料の温度変化後の値である。

なお、試料は円筒形のものを、空洞共振器は矩形のものを使用したが、試料が微小であることと、境界条件を満足させるために試料も直方体として近似した。以下に摂動式に適用した電磁界の各成分式を示す。

$$\left. \begin{aligned} E_y &= -C \frac{\omega \mu_0 a}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{2\pi}{L}Z\right) \\ H_x &= C \frac{j2a}{L} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{2\pi}{L}Z\right) \\ H_z &= -jC \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{2\pi}{L}Z\right) \end{aligned} \right\} (5)$$

3 測定系および空洞共振器

図1には測定系を示し、図2には開発した測定装置の写真を示す。マグネトロンから発振した誘電加熱用マイクロ波電力は、アイソレータ、電力分割器、サーキュレータ、方向性結合器を通して測定用矩形空洞共振器に結合する。電源は安定化電源を用いて、マグネトロンにはCW最大5kW出力の発振装置を使用した。電力分割器ではマグネトロン発振器から得られた電力を加熱用電力に調整する働きを持つ。方向性結合器にはパワーメーターを接続し、それによって入射したマイクロ波電力と空洞共振器に挿入した結合ループから磁界励振により得られた透過電力を

測定した。図3には使用した空洞共振器の概要をシステム概要と共に示す。また図4には作成した空洞共振器とサンプルの写真を示す。今回設計した空洞共振器の寸法は110mm×27mmで、測定にはTE₁₀₂モードを使用したので、結合窓からショートプランジャまでの長さを137.24mmとした。テスト試料は直径9.5mm高さ27mmの円筒形で、結合窓から3/4波長の電界最大点に挿入した。ショートプランジャーには直径30mm厚さ1.5mmのフェライトを装荷し、直流マグネットをフェライトの上下から挟み込む位置に設置して、測定時にはフェライトに直流磁界をかけた。赤外線サーモメーターでテスト試料の表面温度を測定した。パワーメーターで誘電加熱用マグネトロンから発振したマイクロ波入射電力と、空洞共振器に挿入した測定結合用ループで励振された透過電力を測定した。

4 フェライト透磁率の測定[3]

本研究では、摂動法による誘電率の測定において、算出にはフェライトの比透磁率の値を摂動式に代入して誘電率を算出する。従って、まずフェライトの特性測定を行う必要がある。フェライトの特性測定では印加する直流磁界の大きさによってフェライトの比透磁率が大きく変化するので、目的に応じた試料形状、寸法を選ぶ必要がある。今回使用したフェライトは、日立金属株式会社製YIGタイプ、寸法は直径30mm、厚さ1.5mm、 $4\pi M_s = 925$ 、 $\Delta H = 30$ [Oe]特性のものを使用し、図2のようにショートプランジャーの中心に装荷した。フェライトに印加した直流磁界の電圧の変化に対する共振周波数の変化とQの変化を測定し、式(6)(7)を用いて、電圧-比透磁率特性を求めた。

$$\frac{f_2 - f_1}{f_1} = -\frac{6(\mu' - 1)}{\mu' + 2} \left(\frac{\lambda_0}{L} \right)^2 \frac{\Delta V}{V} \quad (6)$$

$$\frac{1}{Q_{L2}} - \frac{1}{Q_{L1}} = \frac{36\mu''}{(\mu' + 2)^2} \left(\frac{\lambda_0}{L} \right)^2 \frac{\Delta V}{V} \quad (7)$$

ここで、 f_1, f_2, Q_{L1}, Q_{L2} は電圧印加前後の共振周波数 f およびQ、 λ_0 は共振波長、 L は空洞の長さであり、 $\Delta V, V$ はそれぞれフェライト、共振器の体積である。図5

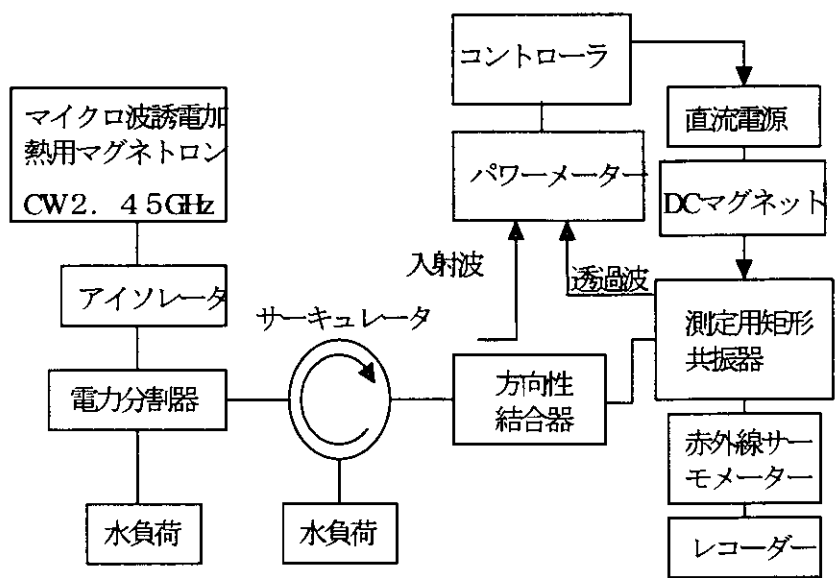


図1 測定系

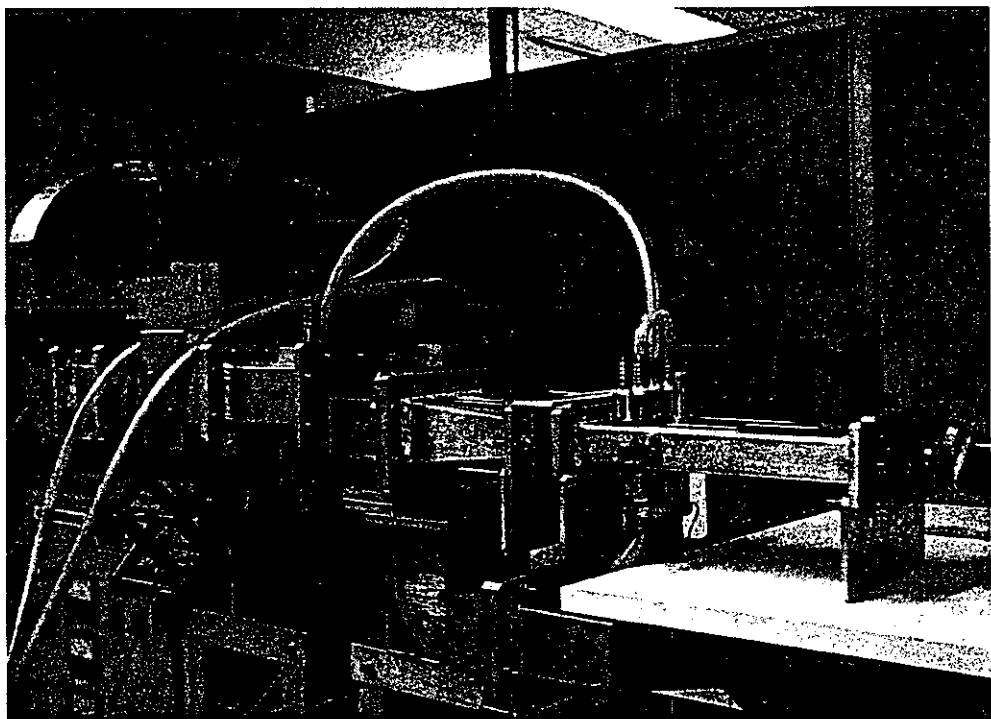


図2 測定装置写真

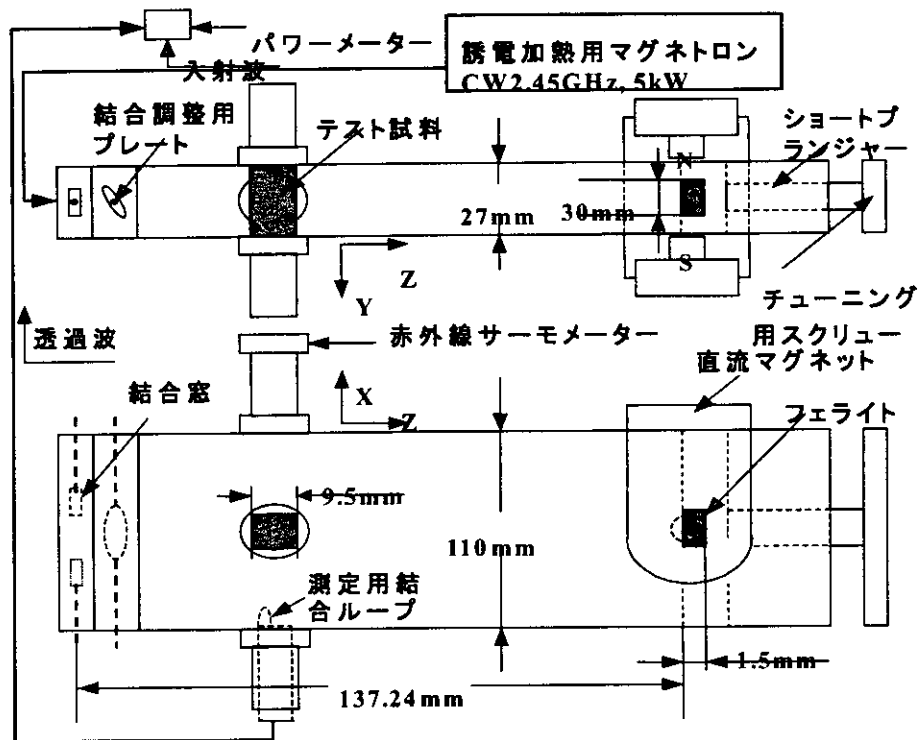


図 3 TE₁₀₂モード 矩形空洞共振器



図 4 測定用矩形空洞共振器写真

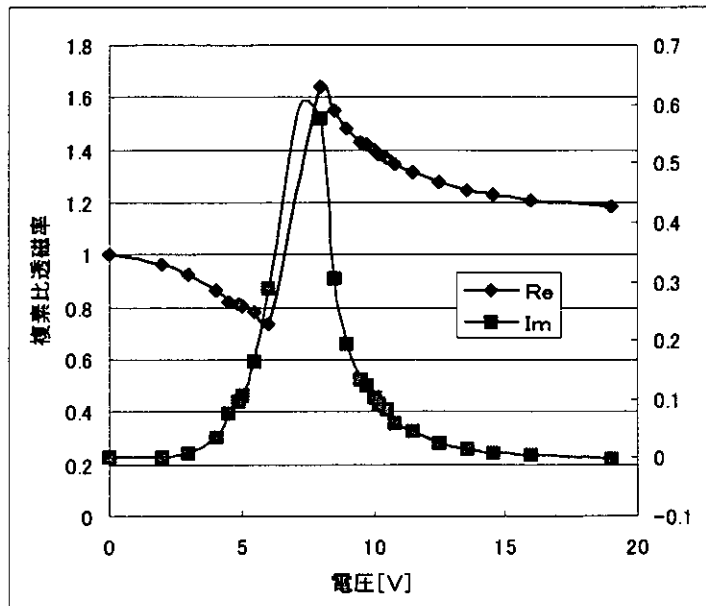


図5 電圧－比等磁率特性

に使用したフェライトの電圧－比透磁率特性を示す。

フェライトの実部について、直流マグネットに印加した電圧が6 [V]の時 μ' が最低となり、8 [V]で最大となった。また、虚数部については7.2 [V]で最大となった。従って、測定では初期設定を9 [V]とし、試料の温度上昇に伴って印加電圧を大きくし、共振状態を維持した。

5 測定用試料

測定用試料として、ポリ塩化ビニル (PVC)、ジュラコン、ナイロン (PA)、ポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリカーボネート (PC)、ポリプロピレン (PP)、ABSの7種類のテスト試料を準備した。

試料の寸法を直径5.0 mmに成型し、図4に示すとおり空洞共振器の試料挿入口上部より挿入した。

6 測定方法

図1の測定系を使用し測定を行った。マグネトロンを安定させるために、マグネトロンの発振出力を4.5 [kW]に維持し、電力分割器で加熱開始に必要な電力に調整した。

方向性結合器にはパワーメーターを接続し、空洞共振器への入射電力を測定した。また、空洞共振器には透過電力を測定するための測定用ループを挿入し、磁界を励振させて透過電力を測定した。赤外線サーモグラフで試料の表面温度を測定した。

測定では、あらかじめ常温での共振周波数、 Q を測定しておく。次にDCマグネットに印加する電圧を9[V]に設定し、試料を挿入した空洞共振器に電力を入射する。試料の温度上昇とともに共振状態が変化するので、DCマグネットに印加する電圧を調整する。透過電力が最大になるように印加電力の調整を行い、その時点の入射電力、透過電力、印加電圧、試料の温度を測定した。上記について試料を替えて、それぞれ試料の温度特性を測定した。

7 測定結果

比誘電率の算出には、(1)(4)(5)式を使用しMathematicaを用いて行った。試料をマイクロ波加熱し、試料温度を赤外線温度計で測定しながら複素誘電率の変化を測定した。得られた複素誘電率の測定結果について、図6にポリ塩化ビニル、図7にポリカーボネート、図8にジュラコン、図9にナイロン、図10にポリエチレンテレフタレート(PET)、図11にポリプロピレン、図12にABSの特性をそれぞれ示す。いずれも温度上昇と共に複素誘電率の虚数部が大きく上昇することが分かった。また、複素誘電率の実数部の変化は、虚数部の変化に対して小さく、いずれも材料により若干の特性の差異があるものの、材料の温度が100℃前後から複素誘電率の虚数部が上昇し、これによりマイクロ波吸収が急激に増加することが分かる。

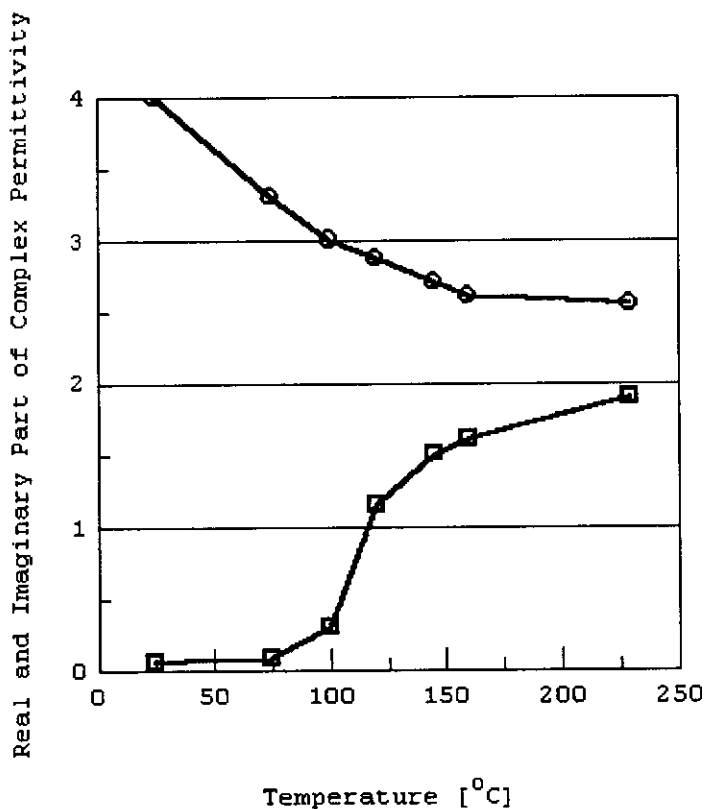


図6 ポリ塩化ビニルの複素比誘電率温度変化特性

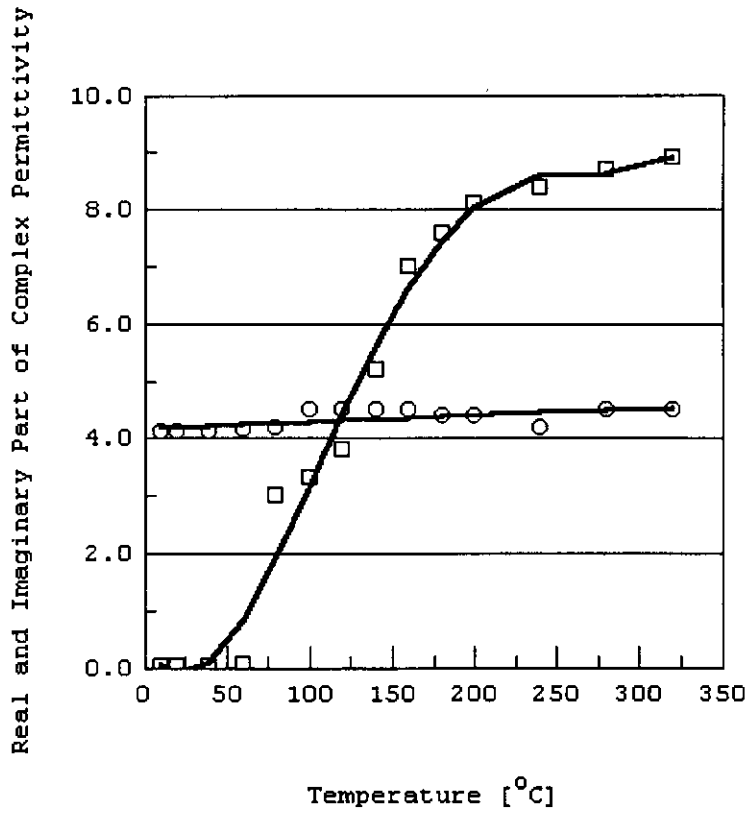


図7 ポリカーボネートの複素比誘電率温度変化特性

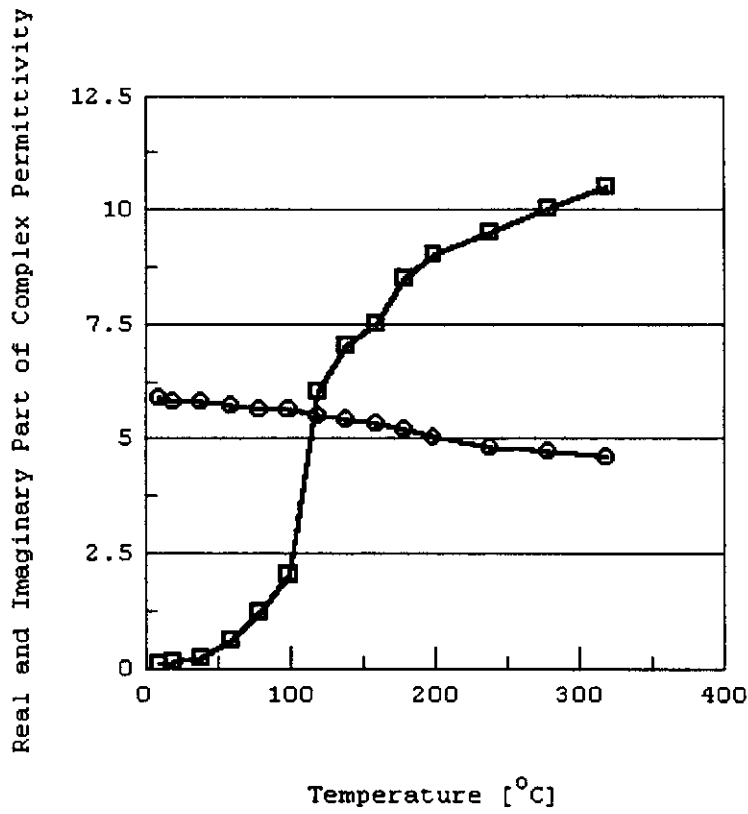


図8 ジュラコンの複素比誘電率温度変化特性

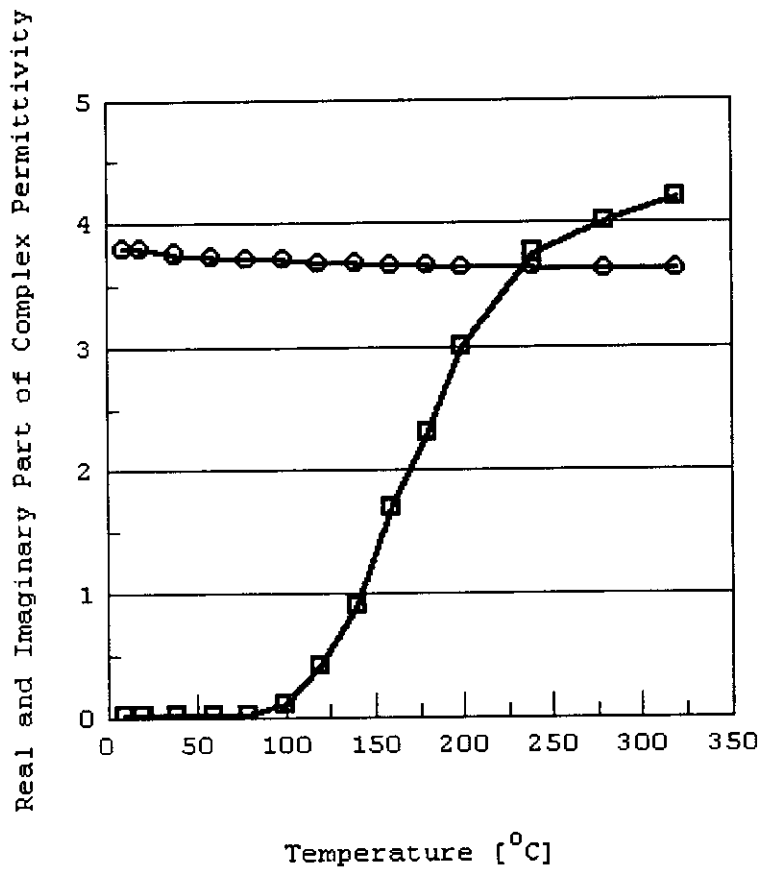


図9 ナイロンの複素比誘電率温度変化特性

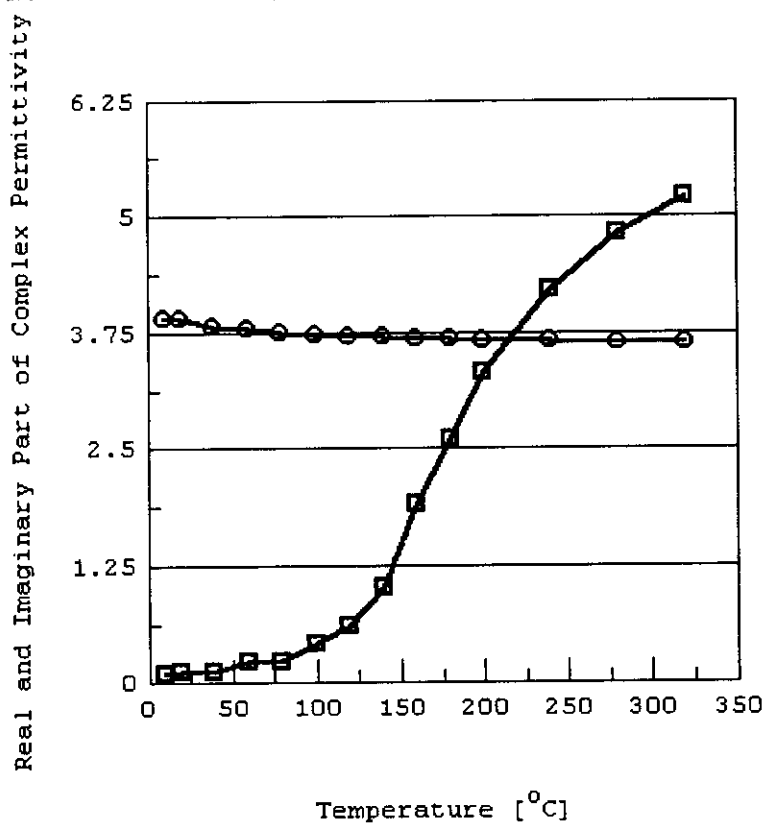


図10 ポリエチレンテレフタレート (PET) の複素比誘電率温度変化特性

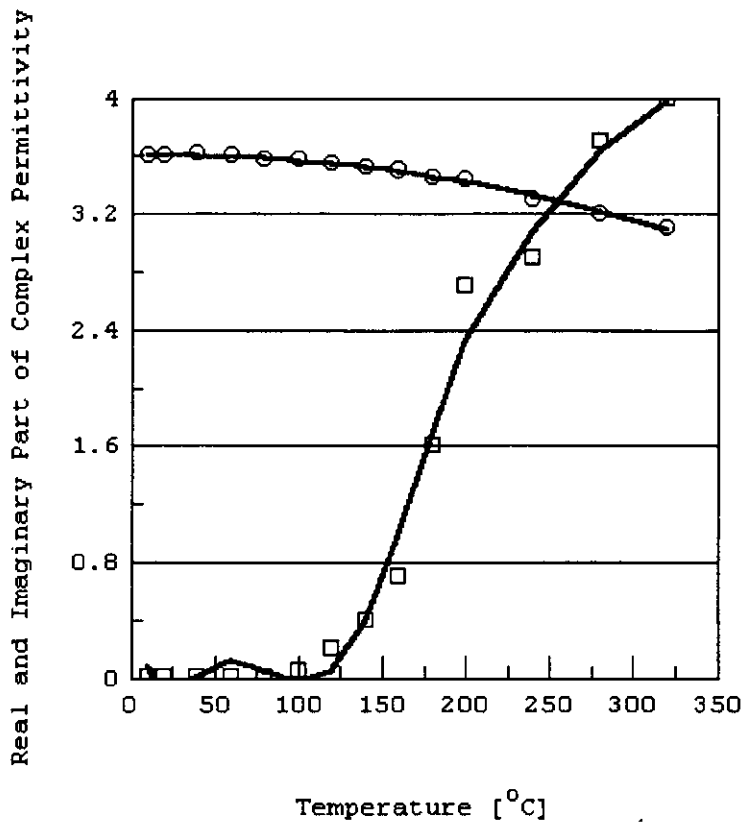


図 1.1 ポリプロピレンの複素比誘電率温度変化特性

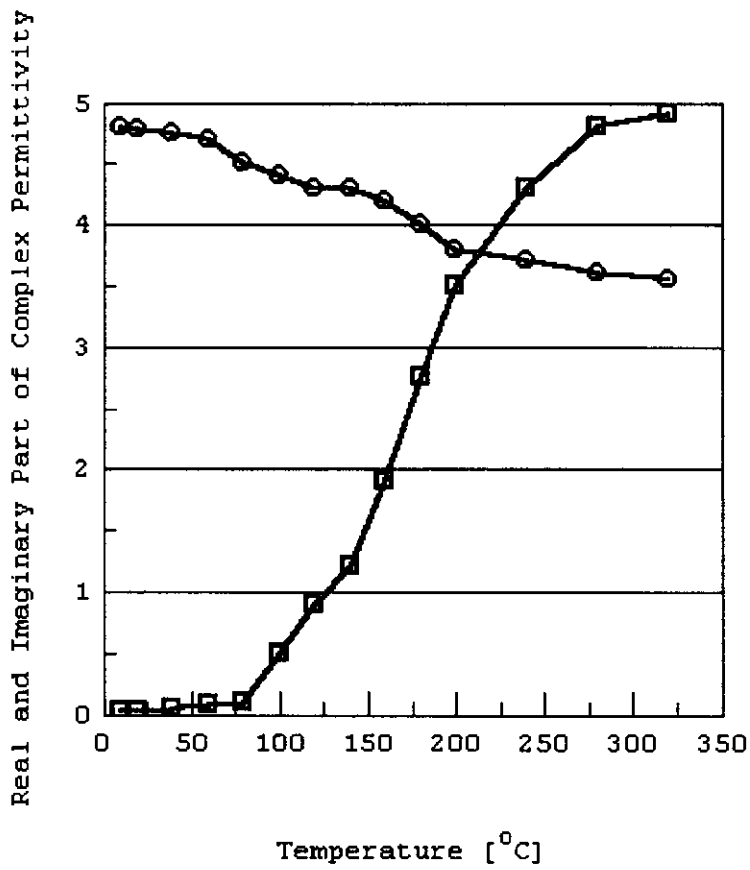


図 1.2 ABS の複素比誘電率温度変化特性

8 マイクロ波炉内の発熱分布シミュレーション

前節で得られた複素誘電率の温度特性結果を用いて、マイクロ波炉内における廃棄物の発熱分布について検討する。図13には常温時における水平面における発熱分布を、図14、15には高温時に於ける発熱分布を示す。ここで図14は150℃、図15は200℃における炉内の廃棄物のマイクロ波による発熱分布である。前節で求めた複素誘電率の測定結果から、前節の材料が廃棄物として平均的に分布していると考え、図13では炉内の廃棄物の常温における平均複素比誘電率を $4.3 - j0.01$ とし、図14では炉内の150℃における廃棄物の複素比誘電率を $4.0 - j2.4$ とし、図15では炉内の200℃における廃棄物の複素比誘電率を $3.7 - j3.6$ とし、いずれも50%の体積比で炉内に廃棄物が分布しているとした。このときに図13と図14、15との比較から、高温時における発熱量は常温時に対して2倍以上あることがわかる。また、発熱は中心部分が周辺よりも大きく、中心部分から高温に昇温してゆくことがわかる。

以上よりマイクロ波加熱時の発熱は温度が上昇するほどより大きくなり、中心部分から加熱が広がって行くことが分かる。昇温が進むほど、加熱がより強くなることにより、廃棄物の温度上昇はマイクロ波照射によってより高温に昇温されることがわかる。

9 まとめ

本報告で、フェライトを装荷した空洞共振器を使用して、マイクロ波誘電加熱ができることを示した。これまで試料の温度変化に対して機械的な同調をすることによって共振周波数を調整していたが、本報告によって機械的な同調をすることなく共振状態を保つことができるという点が利点である。

廃棄物処理に使用される誘電体材料について、複素比誘電率の温度依存性について測定を行った。

加熱をする際の入力電力を試料の温度上昇に伴い細かく制御することにより、さらに詳細な試料の温度特性を得ることができる。

得られた、複素誘電率の温度依存性結果により、マイクロ波炉内部に置かれた廃棄物の材料を含めた内部電磁界解析を行い、炉内に分布する廃棄物のほぼ中央に電磁界が集中し、これにより廃棄物の高温分解が促進することが明らかとなった。

参考文献

- [1] H. Tanaka, T. Nakamura, F. Okada, "Dynamic High-Temperature Measurements of Microwave Permittivity", Abstract book of the First World Congress on Microwave Processing 1995, 145-147, 1995.
- [2] 岡田文明, マイクロ波工学—基礎と応用—, 学研社, 1993
- [3] 小口文一, 太田正光, "マイクロ波・ミリ波測定" コロナ社, 1975

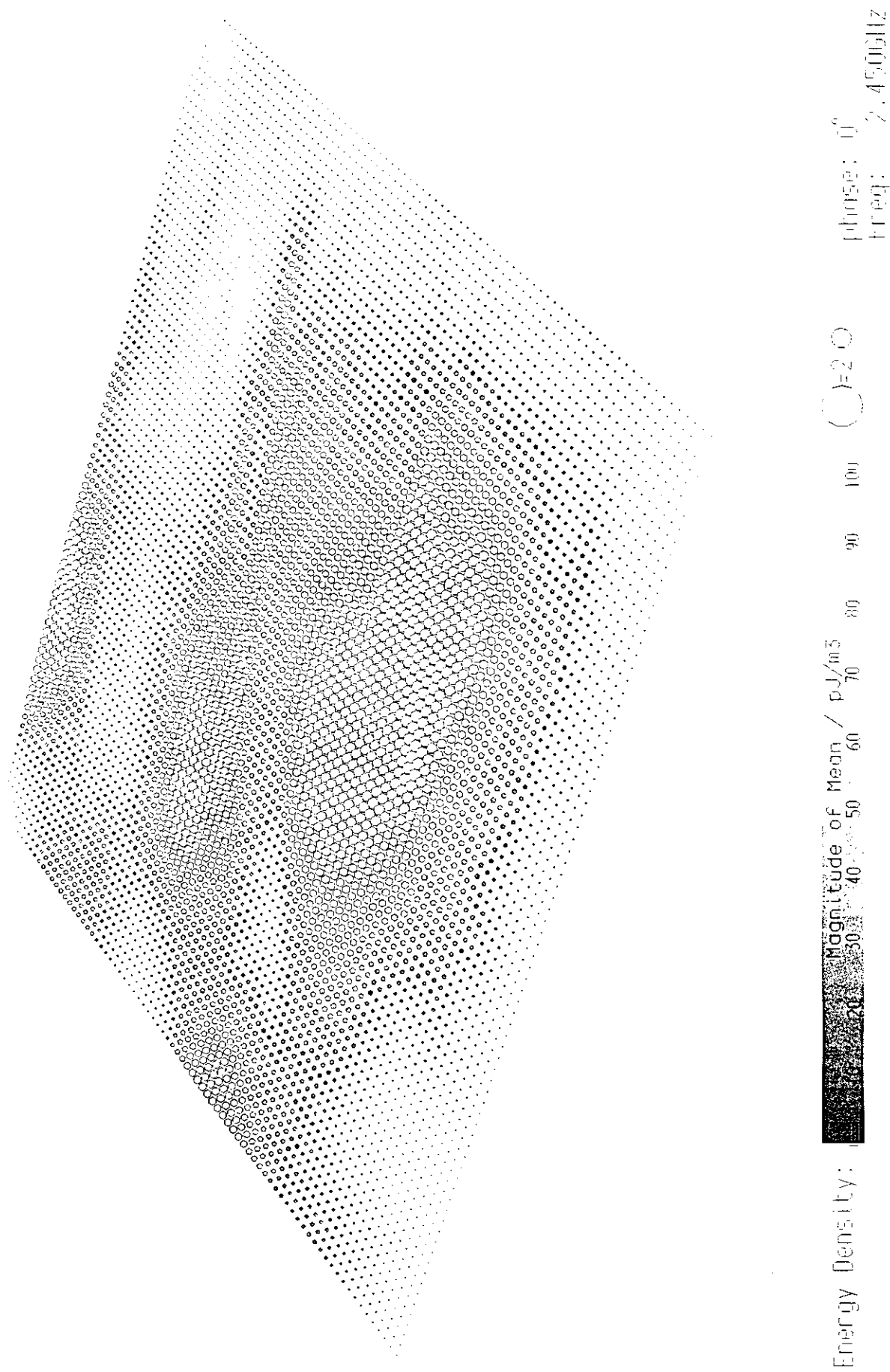


図 1 3 常温時におけるマイクロ波炉の水平面における発熱分布

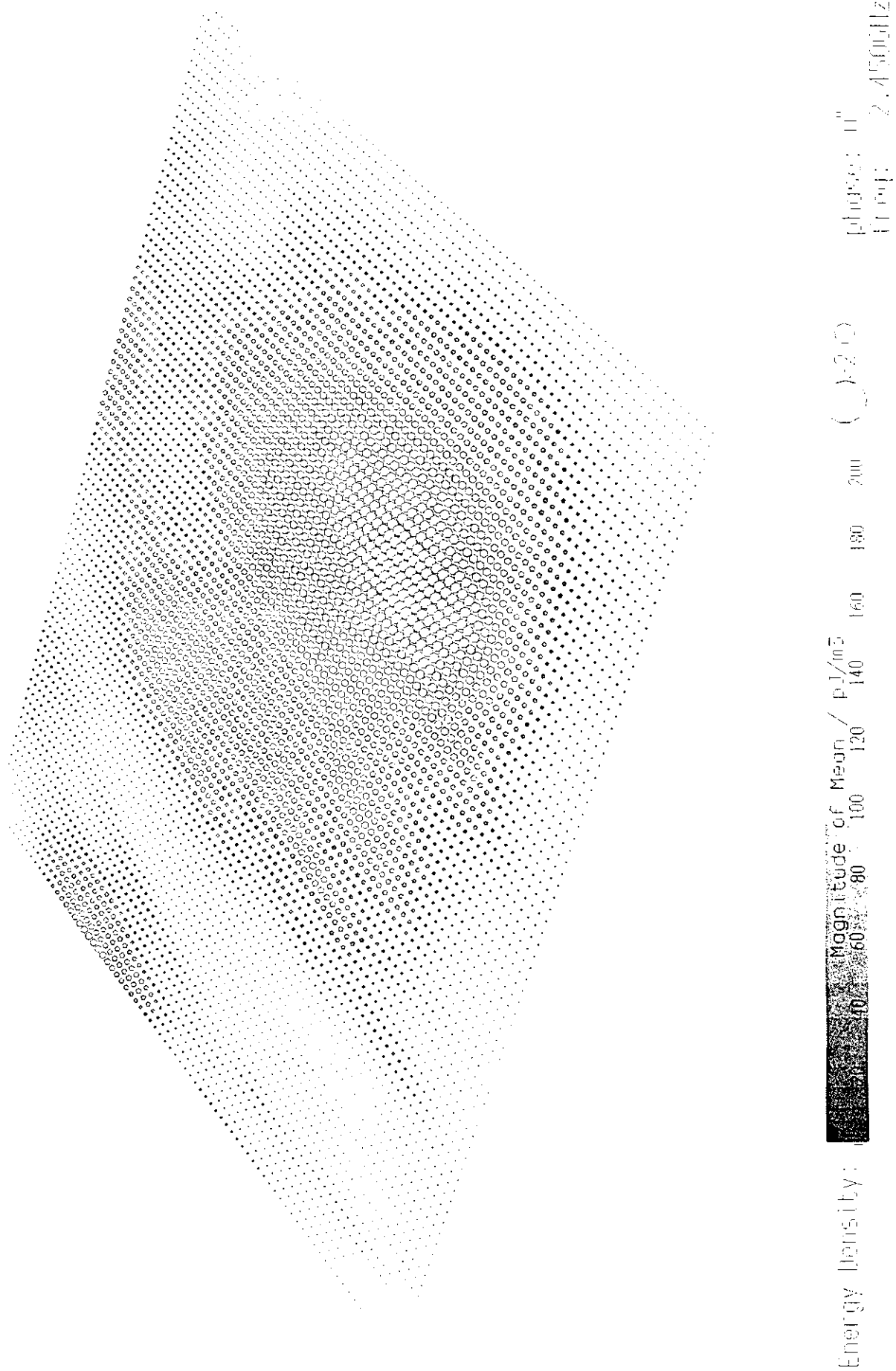


図14 高温時 (150°C) におけるマイクロ波の炉水平面における発熱分布

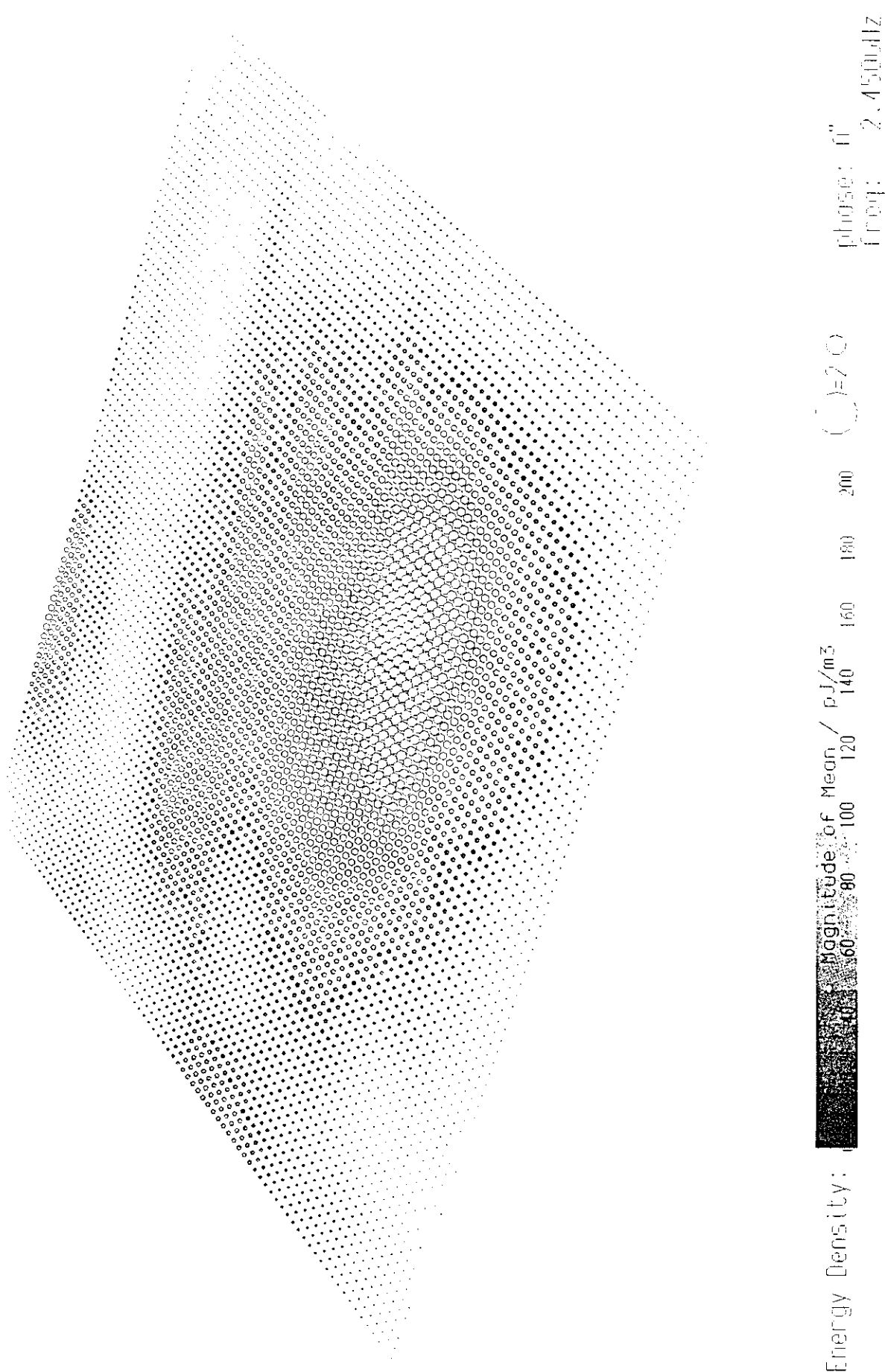


図 15 高温時 (200°C) におけるマイクロ波炉水平面における発熱分布

IV 総 括

1. 実燃焼テスト及び滅菌利用

- ・今回の燃焼テストでは、マイクロ波利用処理装置（SMCI-60）と、比較処理装置（マイクロ波無し、強制着火自然燃焼方式）での差異は見られず、両処理装置とも良好であった。これは、小容量処理での比較の為、内部燃焼状態差が生じなかった為と考える。（含水物が 20% 以上と多い場合には、自然燃焼消火等の発生が想定される。）

ダイオキシン類の抑制については、二次燃焼室容量と発生ガスの燃焼排ガスによる設計滞留時間 2 秒に対し、0.7~0.8 秒程度となり、2.2~4.4 ng/m³N と、低ダイオキシン濃度 1 ng/m³N とはならなかった。また、残渣中のダイオキシン類濃度は、0.16~2.7 ng/m³N と低濃度を確認できた。

ダイオキシン類の発生抑制は、二次燃焼室の温度制御及び滞留時間の確保であり、マイクロ波の利用により、発生ガスのコントロールと安定ガス化燃焼が可能である。また、マイクロ波の有効活用として、滅菌処理利用については、処理物の選択により可能である。

今回の研究により、上記のようにマイクロ波の焼却処理及び滅菌処理への利用は、クリーンなエネルギー及び環境ホルモン問題を解決する手段として、活用できる基本的な確認が出来、医療系廃棄物の処理装置として、実用化には十分期待できる。

今後、利用するマイクロ波の制御を状況に合わせた条件設定で行う為に、センサー類の研究開発が課題と考える。

2. マイクロ波の加熱効率測定

2-1. 省エネルギー

マイクロ波導入口の形状と位置を最適化することによって、300リットル一次燃室のマイクロ波加熱効率 86.9% の結果を得た。

従来型 SMC I - 60 型医療廃棄物焼却装置のマイクロ波加熱効率は約 60% であるので 26% 強の効率を上昇させる結果を得た。

SMC I - 60 型医療廃棄物焼却装置では、約 10kg の人工透析機器を焼却するのに 25kWh の電力が必要であったので、人工透析器を焼却処理するのに 1kg あたり 2.5kWh 必要であったが、最適化したマイクロ波照射口を備えた 300リットル医療廃棄物焼却装置ならば 1kg の人工透析器を焼却処理するのに 1.88kWh で済み、25% のエネルギーコストの削減が可能となった。

2-2. 設備費のコストダウン

来型の SMC I - 60 型医療廃棄物焼却装置のまま燃焼室容量を 300リットルにスケールアップすると 12kW のマイクロ波出力が必要である。

この方法では、1.2kW マイクロ波発振器及びマイクロ波を送電する導波管など 10セットを 300リットル一次燃焼室に針鼠のごとくに配置して接続する事になる。

本研究の成果で、マイクロ波出力は 9kW で同じ能力を出せることになり、一台のマイクロ波出力が 1.5kW 出力のマイクロ波発振器を採用した場合には導波管、アイソレーター、マイクロ波発振器等マイクロ波機器の台数を 6セットにすることで、30% 程度コストダウンが可能となった。

2-3. 今後の課題

医療系廃棄物は様々な物質の集合体であり、加熱滅菌する際に示す反射電力の挙動はいつも同じではないので、長期にわたるデータ収集とデータの解析から最適なマイクロ波の制御プログラムの作成が課題と考える。

3. 処理物材料の複素誘電率の温度依存性特性

- ・複素誘電率の温度依存性特性

全ての材料は、温度上昇（特に 100℃ 前後より）と共に複素誘電率の虚数部が大きく上昇し、実数部

の変化は虚数部に比べ、小さい結果を得た。

・マイクロ波炉内での材料の発熱分布

高温時（150℃及び 200℃）での発熱量は常温時に対して2倍以上であり、発熱は中心部分が周辺より大きい事が判明。

マイクロ波加熱時の発熱は、温度が上昇するほど大きくなり中心部分から加熱が広がって行き、昇温が進むほど加熱が強くなり、処理物の温度上昇はマイクロ波照射により高温に昇温される。

今後は、これらの発熱分布を考慮した処理釜（一次燃焼室）の最適設計が課題と考えられる。

平成11年度厚生科学研究費補助金(生活安全総合研究事業)

研究開発業務 成果報告書

「廃棄物処理におけるダイオキシン類の

抑制及び分解技術に関する研究」

(資料編)

平成12年3月

世界保健機関 (WHO) 健康開発総合研究センター

1. 60L一次燃焼室のマイクロ波加熱効率測定

測定データ 1

測定データ 2

測定データ 3

まとめ

2. 300L一次燃焼室のマイクロ波加熱効率測定

測定データ 4

測定データ 5

測定データ 6

測定データ 7

測定データ 8

測定データ 9

測定データ 10

まとめ

3. 小型マイクロ波処理装置の実燃焼テスト

ダイオキシン類測定結果

サンプリング記録

クロマトグラムチャート

熱精算測定結果及び燃焼計算

4. 製図

焼却炉部品表兼出図明細表

製図本体

1. 60L一次燃焼室のマイクロ波加熱効率測定