

Development of a 300 GHz material processing system

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2007-12-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 光藤, 誠太郎, 坂井, 和喜, 小林, 一生, 中野, 智彰, 出原, 敏孝, 斉藤, 輝雄, MITSUDO, S, SAKAI, K, KOBAYASHI, I, NAKANO, T, IDEHARA, T, SAITO, T メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/1242

研究報告16

300 GHz 材料プロセッシング装置の開発

Development of a 300 GHz material processing system

光藤誠太郎, 坂井和喜, 小林一生, 中野智彰, 出原敏孝, 斉藤輝雄

S. Mitsudo, K. Sakai, I. Kobayashi, T. Nakano, T. Idehara and T. Saito

福井大学遠赤外領域開発研究センター
Research Center for Development of Far-Infrared Region
University of Fukui, Fukui 910-8507, Japan

Abstract

High power THz-frequency material processing has great potential for the applications. The gyrotron is a microwave tube capable of delivering very high microwave power in the pulse and CW operation at the THz frequencies. The frequency of gyrotron is proportional to the intensity of magnetic field, because the operation results from the mechanism of "cyclotron resonance maser". Therefore, in order to achieve high frequency operation, we need a high magnetic field which superconducting magnets or pulsed magnets produce. We developed the material heating system by using a 300 GHz gyrotron. This system consists of a 300 GHz, 3.5 kW, CW gyrotron (Gyrotron FU CW I) with a cryogen-free 12 T superconducting magnet, a corrugated circular waveguide and an applicator. The distribution of the electromagnetic power in an applicator was measured by IR-camera. Thermal insulators, which were desired small absorption of electromagnetic wave, were tested by using this system. A focused electromagnetic wave was applied to the melting of the powder of the quartz.

1. はじめに

高出力ミリ波を用いたセラミック焼結法は、ジャイロトロン光源を用いた新技術の一つであり、従来法より短時間で高密度・高強度・緻密な構造をもつセラミックを焼結することができる画期的な方法として注目されている。この焼結法は、従来の抵抗炉のように外部加熱による焼結法と比較し、自己発熱を特徴とする。電磁波加熱の主な利点として、1) 急速・内部加熱が可能、2) 選択加熱が可能、3) 低温で、かつ短時間で緻密な焼結が可能であるという点が挙げられる。3) については「非熱的効果」と呼ばれ、むしろ電磁波の周波数および出力に依存する効果である。我々は、非熱的効果を利用することにより、通常の加熱では高密度化しない難焼結性セラミックスの炭化硼素を、無加圧無添加で相対密度90%以上に緻密化することに成功しており、電磁波過熱の「非熱的効果」により、通常過熱では得られない新素材の開発等が期待される[1,2]。

電磁波加熱周波数の増大にともない、顕著に現われてきた「非熱的効果」による新素材開発とそのメカニズムの解明を行うことを目的とし、サブミリ波領域の材料加熱を可能とする、高周波高出力ジャイロトロン (Gyrotron FU CW I)を用いた材料プロセッシング装置の開発を行っている。

2. 装置の概要

本研究では、福井大学で開発されたサブミリ波ジャイロトロン光源技術をメッキ技術、

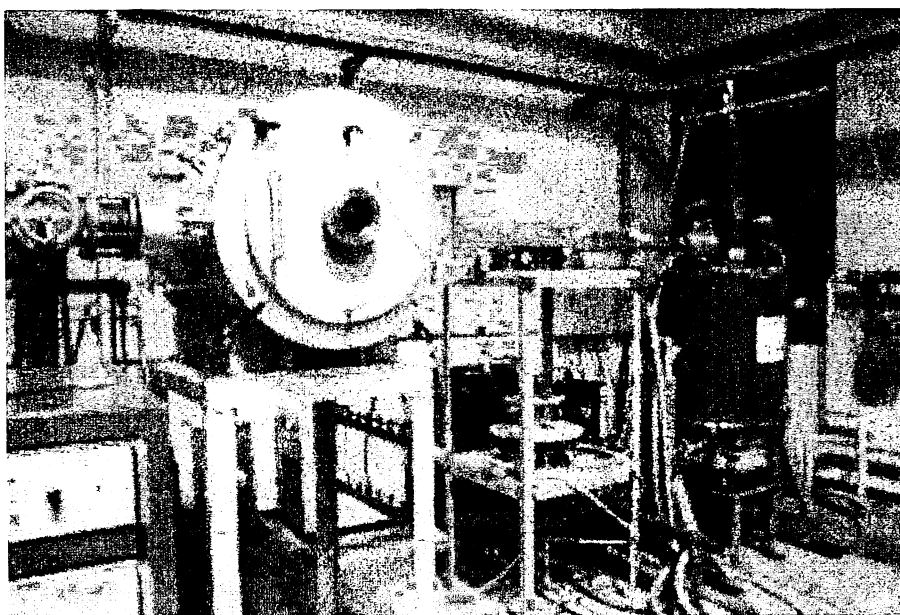


図 1 300 GHz (サブミリ波)材料プロセッシング装置

精密加工技術と組み合わせることにより、世界初の試みである、300 GHz (サブミリ波)材料プロセッシング装置の開発を行った[3]。試作装置の写真を図 1 に示す。本装置は大きく三つの部分からなり、図 1 左は電磁波による加熱を行うアプリーケーター部、図 1 右は高出力サブミリ波を発生するジャイロトロン発振器部、アプリーケーター部とジャイロトロン発振器部をつないでいるのがコルゲート導波管部である。

ジャイロトロン発振器部については、発振周波数 300 GHz、最大出力 3.5 kW で連続発振可能なジャイロトロン光源をロシア・GYCOM 社に依頼し共同開発を行った。サブミリ波帯の連続発振光源としては世界最高出力の発振が可能となっている。このジャイロトロンを福井大学遠赤外領域開発研究センターの 12 T 液体ヘリウムフリー超伝導マグネットに設置した。設置に当たってはジャイロトロンの最適発振条件の調整を可能にするため、ジャイロトロンと磁場の相対位置が調整可能な位置調整機構を開発し設置した。また、本ジャイロトロンは世界初の試みであり、詳細な動作状況をモニターする必要がある。そこで、ジャイロトロンの動作時に大きな熱負荷の加わる、コレクター、ボディー、ウィンドーの水冷系は、水冷系の入口と出口に水温のモニターを設置した。正常運転時の発熱等を見積もることができる仕組みになっている。また、磁場系のミラー比を変化することにより、ジャイロトロンの動作条件の最適化が行えるように超伝導磁石の下に、補助磁場発生用の水冷式のソレノイドコイルが設置されている。

ジャイロトロンからアプリーケーターに電磁波を伝送する、超低損失コルゲート導波管部については、その製作および特性試験を行った。導波管内面の微細構造の加工は切削加工に優れた黄銅を用い、福伸工業が機械加工により加工に成功した。また黄銅は切削製には優れているが、電気伝導性が低く電磁波伝送路の素材としてはロスが大きく適していない。この特性を改善するため、清川メッキ工業の微細部分の洗浄及びメッキ技術を用い、微細構造を持つ黄銅表面にニッケルと金を二重にメッキし、導電性と耐久性を両立した超低損失コルゲート導波管が達成された。導波管は、つなぎ合わすことにより、延長可能な構造になっている。また、プロトタイプとして作成した小半径ながら、まったく同じサイズのコルゲート構造とメッキを施した導波管について、スクリー溝型、単溝型、溝なしのものについて、テラヘルツベクトルネットワークアナライザーにより伝送試験を行った。200, 300, 400 GHz の電磁波の伝送実験を行った結果、い

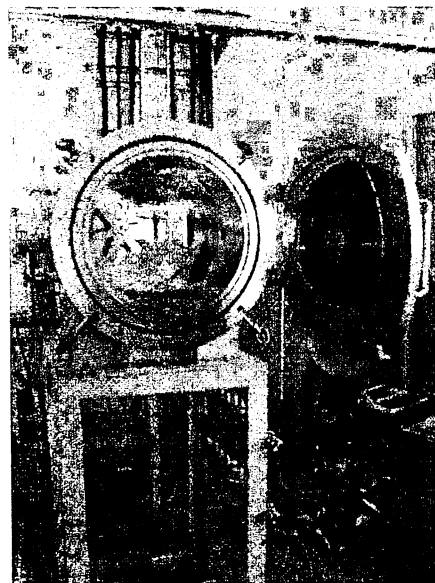


図 2 300 GHz 用アプリーケーター

ずれの場合も、溝なしに比べ、溝あり(コルゲート)の導波管の方が良好な伝播特性を示した。また、設計上の最適値であり、実際に利用する 300 GHz に於いて、最も顕著な差が観測された。

3. アプリケーター内の電界強度分布

アプリケーター(図 2)はミリ波(24 GHz)のアプリケーターと同様に電磁波のマルチモードを利用した体積加熱による材料処理が行える。マルチモード時のアプリケーター内の電磁波の強度分布を調べるために、図 3 に示すアプリケーター上の各位置に塩化ビニールの板(厚さ 1mm)を設置し、電磁波を 30 秒照射後の塩化ビニール板の発熱の様子をサーモグラフに取り込んだ。図 4(上)に 52 cm の位置の電磁波強度の分布を示す。入射口付近では温度が高く電磁波強度が均一ではないことが分かる。図 4(下)は図 3 に示した 18 cm の位置の分布を示しており、加熱する試料はおおよそこの位置に設置する。中央付近に 8 の字型に電界の集中が見られる。電磁波の波長が短くなりアプリケーターの内面が鏡となり焦点位置に電界が集中したと考えられる。

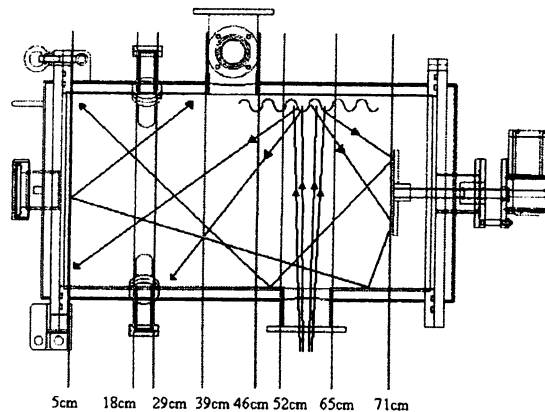


図 3 アプリケーター内の電磁波強度測定位置。

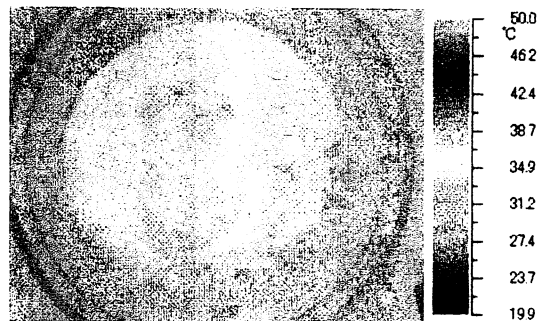
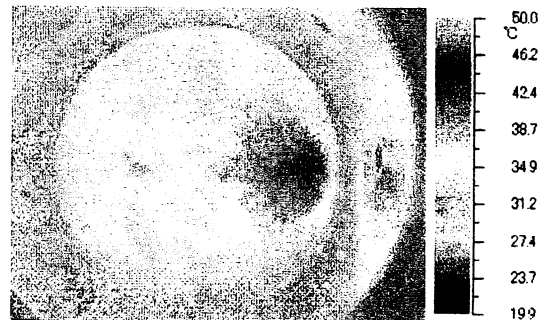


図 4 塩化ビニール板の発熱の様子

次に、保温材について検討した結果について図 5 に示す。保温材は FIBER MAX ボード(ITM)と ALCEN ボード(デンカ)についてサブミリ波による加熱の様子をサーモグラフに撮影した。FIBER MAX ボードの方が ALCEN ボードに比べサブミリ波で加熱されやすく、サセプター的な性格が現われることがわかった。24 GHz で同程度のミリ波出力ではどちらの保温材もほとんど発熱しない。図 6 は図 5 に示した点線の断面における温度分布を示している。ここで、横軸の単位 pixel は赤外線カメラ画像の長さの情報に対応している。FIBER

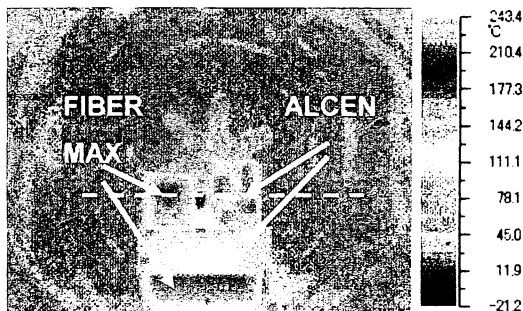


図 5 保温材の加熱の様子

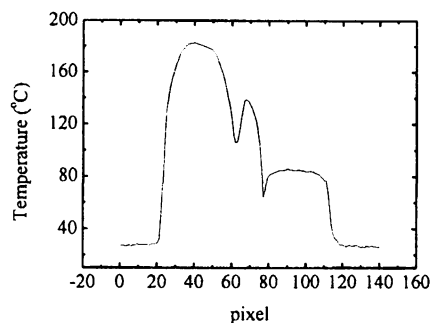


図 6 図 5 の点線部分の温度
プロフィール

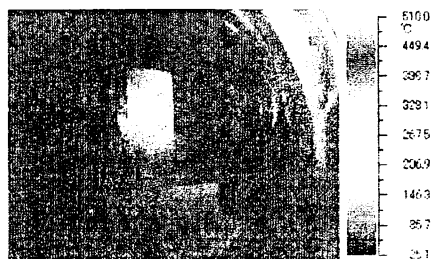


図 7 導波管からの出力パターン

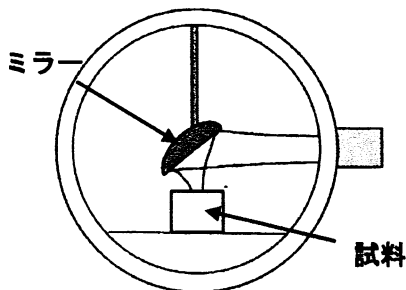


図 8 ミラーを用いたスポット加熱

MAXのある40 pixel付近はALCENボードのある90 pixel付近に比べ約三倍温度が上がっている。なお70 pixel付近のピークはアプリケーションターに反射したFIBER MAXボードの影である。

4. スポット加熱

300 GHzの電磁波は波長が1 mmと短く、電磁波集光時のスポットも1 mm程度と小さなものが得られる。この特徴は微小域のスポット加熱といった表面処理に威力を発揮するとともに、強電界中で顕著に現れる、非熱的効果の利用及び研究にも効果的である。そこで、内部にミラーを設置することで、小スポットの表面処理が行える構造とした。また、電磁波の漏洩対策についてもさまざまな点で考慮されている。スポット過熱を行うための集光ミラーを取り付ける前に、コルゲート導波管からの放射パターンを、レンガを加熱することで調べた。レンガの加熱の様子を図7に示す。ほぼ円形に加熱されていることが確かめられた。これは、コルゲート導波管がうまく機能し、ガウシャンモードの伝播が実現されていると考えられる。次に図8に示すようにアプリケーションター中央にミラーを取り付けてサブミリ

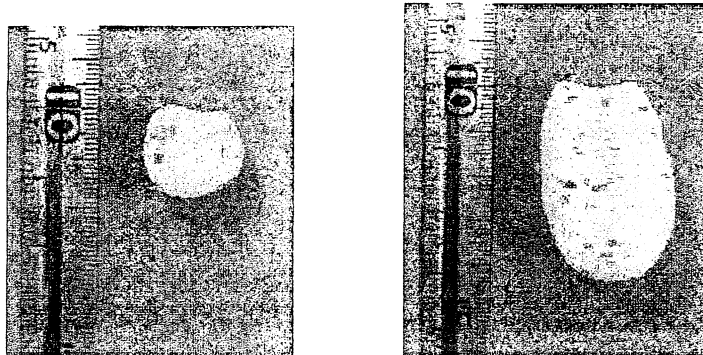


図 9 スポット加熱により熔融した石英粉末。(左)粉末上部表面付近にスポット位置を合わせて加熱した試料。(右)粉末内部にスポット位置を合わせて加熱した試料。

波の集光を行った。電磁波は図の右側から放射され、図の中央のミラーによって集光され、試料に照射される。試料にレンガを用い、試料の高さを変えながら加熱により熔融した部分のサイズの測定を行い、最小スポットの大きさを見積もった。見積もられた最小の熔融部の直径は 9 mm であった。これは、波長が 1 センチの 30 GHz ミリ波では原理的にも実現できないスポットのサイズであり、サブミリ波を利用した特長が良く現れている。このスポットを利用して合成石英粉末の熔融を行った。石英は、誘電ロスが少なく電磁波加熱の難しい材料であるとともに、融点も 1650 °C と高温である。電磁波出力 1.7 kW を 10 分間照射し加熱を行った。図 9 に熔融した石英粉の塊を示す。図 9(左)はミラーの焦点を石英粉末の表面付近に合わせて過熱を行った結果であり、図 9(右)は焦点位置を石英粉末の内部に移動して過熱を行った結果である。いずれも写真の上から下に電磁波は照射されている。このような形に熔融するのは、まず焦点部の石英粉が熔融し、温度が上がると電磁波吸収効率は大きくなるので、その部分で集中的に電磁波が吸収され、それより深部には強い電磁波が到達しなくなったためと考えられる。

5 まとめ

300 GHz の連続動作可能な Gyrotron FU CW I を光源としたサブミリ波帯で、世界初の電磁波プロセッシングを開始した。マルチモードの加熱実験では周波数の増加にともない、アプリケーション内の電磁波はもはや幾何光学的な様相を示し、2.45 GHz のような定在波による不均一はみられないものの、アプリケーション内壁がミラーと同様に働きその焦点に集光することがわかった。300 GHz の電磁波加熱に用いる保温材について FIBER MAX とアルセンの発熱について調べた。24 GHz 2.5 kW 照射時には、ほとんど発熱しなかった FIBER MAX に顕著な発熱が見られた。アルセンボードにも発熱は見られるものの、1/3 程度の発熱であり、300 GHz の電磁波加熱にはアルセンボードを使う必要があるといえる。マルチモードの加熱は光学的性質により改良が必要であるが、ミラーを使った集光モードの

加熱には、面白い結果が得られた。集光されたスポットは直径 9 mm 程度まで絞られ、誘電ロスが小さく、かつ融点が 1650°C とその熔融には超高温が必要な石英粉末は、わずか 10 分程度で熔融可能であることを確かめた。また、試料内の焦点位置を移動することにより熔融する部位をある程度変化することができることもわかった。集光度の違うミラーを用いれば、応用対象にあわせて試料内部の局所の加熱状態を制御できると考えられ。

参考文献

- [1] S. Mitsudo, T. Saji, K. Matsuura, T. Idehara, M. Glyavin, A. Ereemeev, T. Honda, Y. Iwai, H. Nishi, A. Kitano and J. Ishibashi, H High Temperature Thermal Insulation System for Millimeter Wave Sintering of B₄C, H. Hoshizuki, Int. J. Infrared and Millimeter Waves 26, 11, pp.1531- 1541(2005.11).
- [2] S. Mitsudo, H. Hoshizuki, K. Matsuura, T. Saji, T. Idehara, M. Glyavin, A. Ereemeev, T. Honda, I. Iwai, H. Nishi, A. Kitano and J. Ishibashi, Boron carbide ceramics sintering by using 24 GHz compact gyrotron, Proc. Int. Symp. on Novel Materials Processing by Advanced Electromagnetic Energy Sources, March 19-22, 2004, Osaka, Japan, pp. 155-158 (2005.12).
- [3] S Mitsudo, H Hoshizuki, T Idehara and T Saito, Development of material processing system by using a 300 GHz CW gyrotron, Journal of Physics: Conference Series, 51, (2006) 549-552.