

マイクロ波発振器の漏洩電磁波の精密測定

†佐藤元泰、††籠橋章、†††榎村京一郎、†††三谷友彦、†††篠原正毅

†中部大学工学部 愛知県春日井市松本町1200

††高砂工業株式会社 岐阜県土岐市駄知町

†††京都大学生存圏研究所〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: satomoto@isc.chubu.ac.jp

あらまし 30kWのマイクロ波をロータリーキルンに入射して、スレート瓦礫の無害化実証試験を行う。発振器には、工業用マグネトロンCK169(CW, 単管出力10kW)を使用している。この中国製の発振管は、安価であるが、スプリアスモードが大きいという問題がある。そこで、電波暗室を使って、漏洩電磁波のスペクトラムとその強度を測定し、そのデータに基づいて、カソードヒーター電流にカットバックを施し⁽¹⁾⁽²⁾、漏洩電磁波を規定値以下に押さえられた。

キーワード マイクロ波電力伝送, マグネトロンのスプリアスモードの減少対策

Measurements of Spurious Modes in an Industrial 10 kW Magnetron Oscillator

Motoyasu SATO, Akira KAGOHASHI, Kyouchirou KASHIMURA, Tomohiko MITANI and

Naoki SHINOHARA

Faculty of Engineering Chubu University, 1200 Matsumotocho Kasugai, Japan

Takasago Industry Ltd., Dachi, Toki-city, Gifu,

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: {takuya_ichihara, mitani, shino, huang_yong}@rsh.kyoto-u.ac.jp

Abstract Three sets of 10kW magnetron generators provide 30 kW 2.45GHz microwaves into a Rotary kiln for detoxification of asbestos contained in the debris washed away by the tsunami on March 11 2011. The generators consisted of Chinese made CW magnetron (CK169) that is less expensive in comparison to the other tubes but it radiates many numbers of high spurious modes. The frequency spectrum and the intensities of radiated waves were measured in 100db shield room in RISH Kyoto University. On the bases of measurements, the current of filament were cut back for decreasing the intensity of the spurious modes.

Keyword Microwave Power Transmission, Decreasing of purious mode

1. 研究背景・目的

この発振器は、高砂工業が中国のメーカーと開発した製品である。平成22年10月、高砂工業でマイクロ波加熱炉に取り付けて試験運転したところ、直近のUHF地上アナログ放送を受信中のテレビ画面にノイズが出た。広帯域アンテナとスペクトラムアナライザで測定したところ、機器周辺にUHF体の漏洩電磁波をみとめた。この問題を解決し、アスベスト処理装置に適用するために、京大生存圏の協力の下に調査を進めた。

2. 発振器設備の電波暗室への設置

①京都大学マイクロ波エネルギー伝送実験設備(METLAB)の電波暗室に発振部、暗室の外に電源部を設置した。

②マイクロ波出力導波管WRJ-2をアイソレータ・方向性結合器・スタブチューナー・水冷無反射終端の順に接続、基本波は電波暗室に放射させない。

③電波暗室内に設置した広帯域アンテナを使用して、発振部筐体から電波暗室に漏洩放射される電波のスペクトラムを計測した。

3. スプリアスモード発振の機構の一般論

第1図は、マグネトロンからのスプリアスモード放射の発生機構を模式的に示すものである。

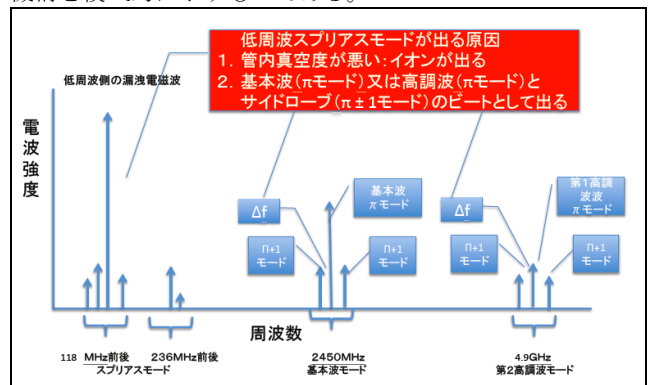


図1 スプリアスモードの発生機構

低周波のスプリアスモードが発生する原因は、

- ① 管内の真空度が悪い(イオンの発生)
- ② 基本波(πモード)又は高調波(πモード)とそれぞれのサ

イドローブ($\pi \pm 1$ モード)との間に生じるビート、と考えられている。

4. 漏洩電波スペクトラムの測定結果

118GHz

低周波漏洩電波

最大 82db μ V

基本波

2.45 GHz

第1 高調波

f_{π} モード 4.900GHz

$f_{\pi+1}$ モード 5.018GHz

$\Delta f=118$ MHz

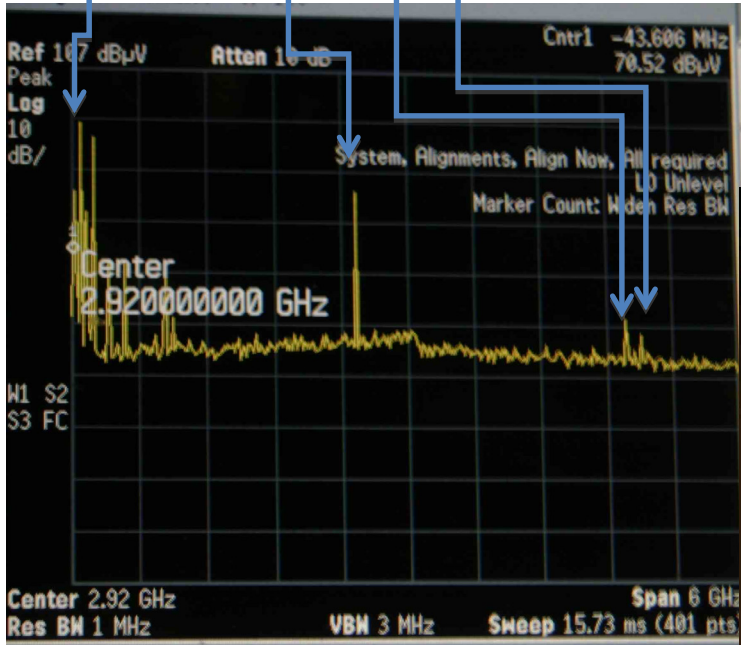


図2 広帯域周波数スペクトラム実測 (30MHz~6.03GHz)

は、カソードの電圧のリプル、あるいは、発振に伴うマイクロ波のフィラメントへの還流によって生じるカソードの過温度によると考えられる。これらに対する対策を取ることで、100MHz 帯の電磁波漏洩 を低減出来る可能性がある。

スプリアスを伴わない

基本波 π モード

周波数 2.4495GHz

スプリアスを伴うもう一つの

基本波 π モード周波数 2.451GHz

スプリアスは $\pi+1$ が 2.462GHz,

$\pi-1$ が 2.326GHz

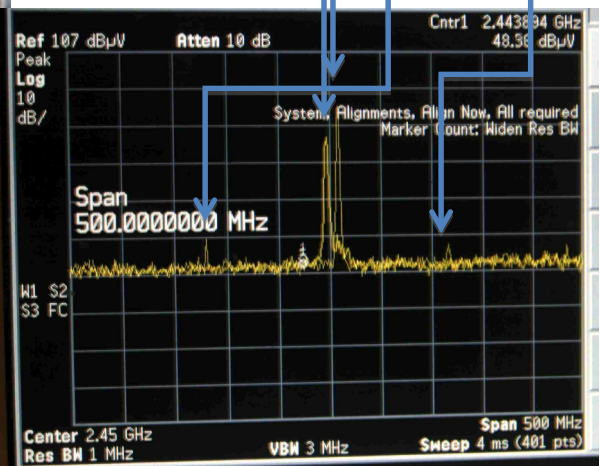


図3 基本モード2.45GHz±25MHz 狭帯域スペクトラム測定

① 同定された漏洩電波の発生起源- 1次高調波のスプリアス発振

最も強い低周波漏洩電波は周波数 118GHz と同定された。その最大受信電力は、82db μ V である。その周波数は 118GHz で、第1 高調波 4.9 GHz における π モードとそのスプリアスである $\pi+1$ モードとの差に等しい。これは、低周波側の最大漏洩が、マグネトロン of 1次高調波のスプリアス発振を原因としていることを示している。

このような高次モードにおけるスプリアスの発生は、マグネトロン管の設計によって殆ど決まっているものである。通常的设计では、キャビティの形状、アンテナとの結合その他のノウハウによって、この高調波が発振しないように工夫している。従って、この問題はマグネトロンの設計を変更しないと抜本的には解決できないので、フィラメント・カソード回路にローパスフィルターを挿入して、この高周波が漏洩しないように対症療法的な対策を試みた。

② 漏洩電波の発止原因- 2:基本波のスプリアス発振

図2では、基本モードに於いては、スプリアスを伴わない綺麗な π モードが発振しているように見える。通常は基本波とそのスプリアスの発生が低周波漏洩の原因となることが多いと言われている。そこで、基本波である 2.45 GHz の周りで、詳細に発振スペクトラムを測定したところ、図3に示す様に、不安定なモードが、不規則に発現していることが明らかになった。

この不規則な発振は、周波数が約 2.5MHz 高い方向にずれており、スプリアスを伴っている。このため、約 110MHz および 125MHz の低周波発振を誘起する。この不安定なモード

5フィラメント・カソードへのハイカットフィルター挿入ハイカットフィルター回路を製作し、フィラメントトランス2次巻線のセンタータップと高圧入力の間には挿入した。図4に、回路構成と周波数特性を示す。この回路は、図に示すように 38 kHz 以上の高周波を遮断する特性を持っている。このハイカットフィルターを取り付け、発振器筐体から 1m に於ける低調波モードの強度を測定した。フィルターの効果によって、低調波ノイズは-3~-6db 低下した。しかし、この低調波ノイズは強度が高いので、低調波ノイズの発生を抑える必要があることが明確になった。

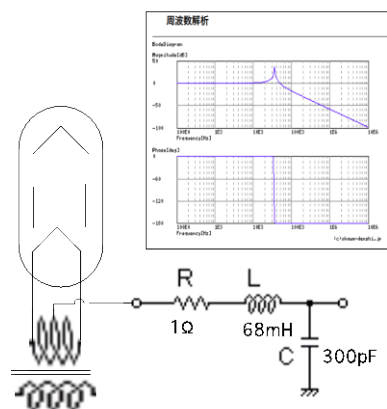


図5 フィラメント・カソード回路挿入ローパスフィルター

6. フィラメント電流カットバック

マグネトロン発振が開始されると、マイクロ波の一部がカソード側に漏洩する。このマイクロ波エネルギーによって、カソードの温度が上昇し、ビーム電流が不安定になる。

これを防ぐために、マグネトロンの発振開始後に、フィラメント電流を下がる方法をカットバックという。

フィラメントトランス1次側にスライダックを挿入し、発振開始後にフィラメント電圧を、発振開始前の電圧に対して、0～100%の間で変化させる実験を行った。

高電圧の平滑が不十分で、電圧にリップルが多いと、フィラメントをカットバックしたときに、発進停止が起こることがある。ビーム電圧のリップルを低減するために、高電圧の3相全波整流の出口に、RC平滑回路を挿入し、リップル率を20%まで低下させた。

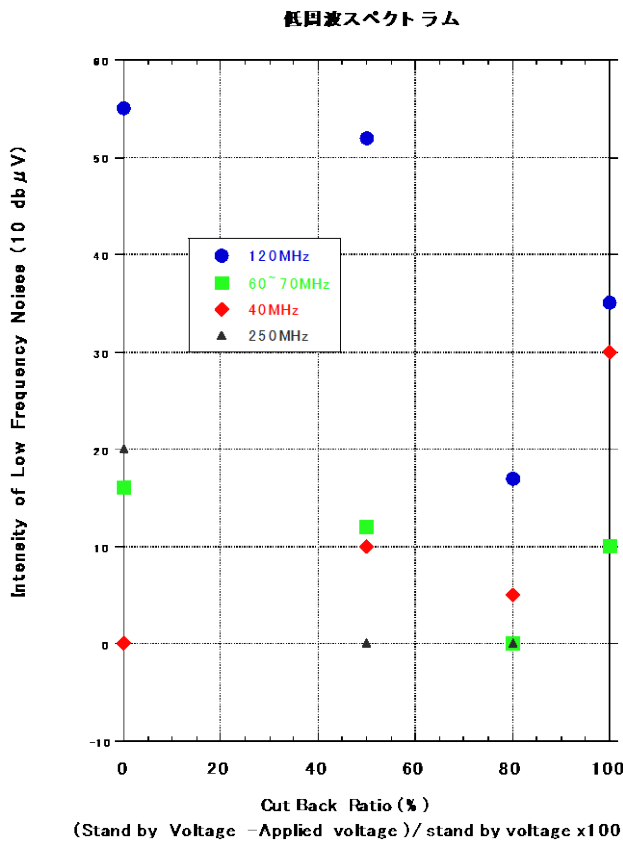


図6 フィラメント電圧のカットバックに対する低周波スプリアス漏洩電波強度

フィラメントを発振開始前の20%まで絞ったときに、100～200MHzの低周波ノイズの漏洩は約20～30db低下した。この結果、ヒーターカットバック80%で、問題がないレベルまでの低周波ノイズを押さえることが可能と考えられる。この電源は、フィラメント電圧をインバーターで死魚する方式であり、ソフトウェアの書き換えで対応できる。

7. 実負荷における発振特性

以上の試験は、無反射終端に接続して行った。実際にロータリーキルンに接続して使用する。キルンは、直径0.8m長さ2.8mの金属容器であり、この内部に負荷となるコンクリート破片80kgが投入されて、マイクロ波で加熱処理される。マイクロ波は、導波管の解放端から炉内に直接に直接放射する。

3-スタブチューナーで整合をとるが、負荷の変動その他の

ため、発振器から見たVSWRは1.6～2.4程度である。

この理想的とは云えない負荷に対し、発振器のスペクトラムを方向性結合器の進行波側のポートで計測した。

図6に示すとおり、中心周波数に対し、-30db程度のサイドローブが多数現れている。120MHzに同調した棒状アンテナを使って、低周波ノイズを測定したが、第1図に比較して特に大きな変化は認められなかった。

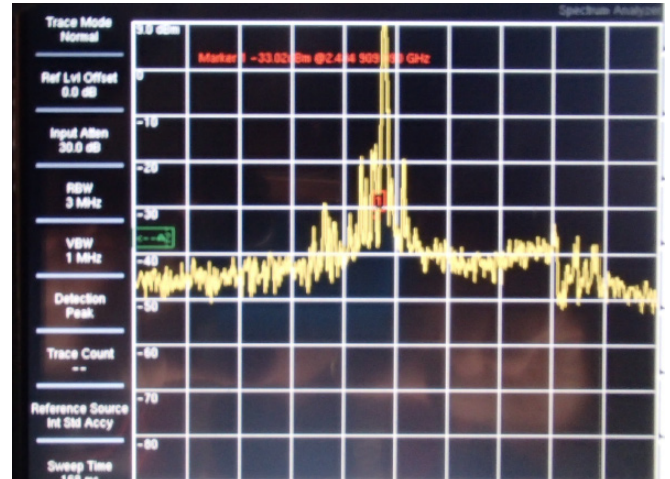


図7 ロータリーキルン(実負荷)接続時の発振スペクトラム(周波数スパン2GHz～3GHz)

参考文献

1. 三谷 友彦, 篠原 真毅, 松本 紘, 橋本 弘藏, "フィラメント電流遮断後のマグネトロンの発振特性に関する実験的研究"電子情報通信学会論文誌・和文(C), vol.J85-C no.11, pp.983-990, Nov. 2002
2. 三谷 友彦, 篠原 真毅, 松本 紘, 相賀 正幸, 桑原 なぎさ, 半田 貴典 "電子レンジ用マグネトロンから発生するノイズの時間解析", 電子情報通信学会論文誌・和文(C), vol. J87-C no. 12, pp. 1146-1154, Dec. 2004