

# ISM バンド用 ターンキーソリッドステートアンプと マイクロ波エネルギー

## RF/マイクロ波エネルギーが生み出す新しい市場

従来、RF/マイクロ波は無線通信やナビゲーションとしての応用に焦点を当ててきましたが、昨今のデバイス技術の進歩により、RF/マイクロ波電力を無線通信やナビゲーション以外の分野で使用する非常に興味深い応用例が示されてきております。その中でも特に RF/マイクロ波加熱プロセスを使用した誘導加熱が有力な応用例となります。誘電加熱は電子加熱、無線加熱、高周波加熱とも呼ばれ、交番電界により誘電体材料を加熱する方式です。伝導や対流などの従来の加熱方法は、材料の表面から内部へ熱を伝達するのに対し、RF/マイクロ波加熱は、分子構造それ自体から物質全体を一度に加熱します。

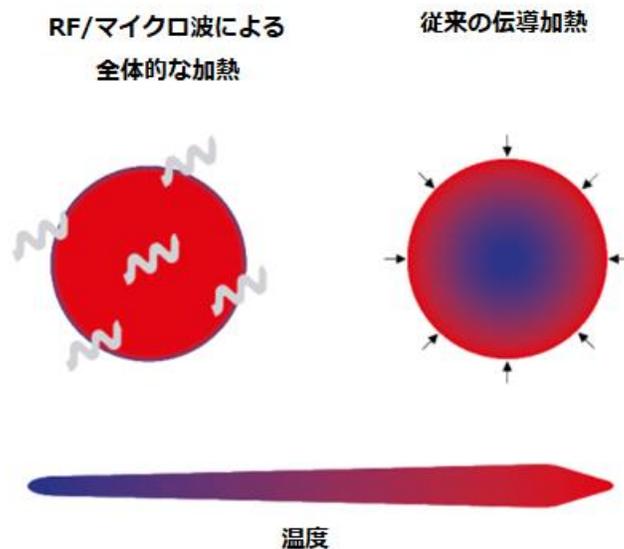


図1: RF/マイクロ波による全体的加熱と従来の伝導または対流による加熱

家庭用の電子レンジが最もわかりやすい例である様に RF/マイクロ波電力を利用し材料にエネルギーを伝えることは新しい概念ではありません。

しかし、電子レンジで高出力の RF/マイクロ波信号を発生するために使用されるマグネトロン管には特有の制約があり、その有用性は単純に大まかなパワーを伝達する応用例に限定されま

す。ソリッドステート技術により RF/マイクロ波エネルギーの制御が実現できるようになったことで、周波数と電力がこれまでにない制御できるため、繊細なアプリケーションにも使用できるようになりました。この精密な制御により、ユーザが求めるスマートな方法でシステム負荷条件のリアルタイムな変化にも対応することができます。

現在、RF/マイクロ波エネルギーの用途としては、主に表 1 に示す産業、科学、医療用の周波数帯（ISM）に焦点が当てられています。

周波数	波長
27.1MHz ± 0.2%	11.06m
433.9 MHz ± 0.2%	69.14 cm
915 MHz ± 13 MHz	32.75 cm
2450 MHz ± 50 MHz	12.24 cm
5800 MHz ± 75 MHz	5.17 cm

表 1: ISM 周波数帯の定義

ISM 周波数は多くの非通信システムに開放されている為、RF/マイクロ波エネルギーの多様なアプリケーションがサポートされており、その中にはすでにソリッドステートソリューションを採用して材料を加熱しているものも少なくありません。図 2 にその一部を示します。

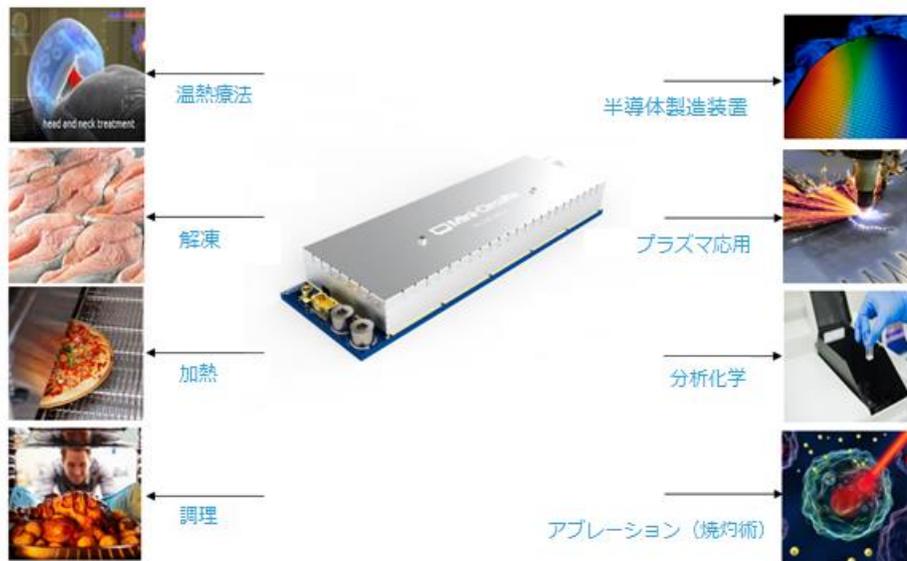


図 2: RF/マイクロ波エネルギーの代表的な応用例

その他の新しいアプリケーションとしては:

- 低温殺菌やその他の食品加工

- 溶接や材料加工
- マイクロ波を利用した化学：タンパク質分析、細胞の加温など
- 半導体製造用プラズマ生成、RF 励振レーザ、プラズマ照明、表面処理など
- 粒子加速器: 電子、 X-線
- 医療: MRI、ジヤテルミ（電気透熱療法）
- 殺菌、滅菌のための様々な用途

これらは RF/マイクロ波エネルギーが採用されている分野のほんの一部ですが、他にも多くの分野があり、この技術の究極の可能性については模索されているところです。

## RF/マイクロ波エネルギーの現在の技術:

### マグネトロンとソリッドステートの比較

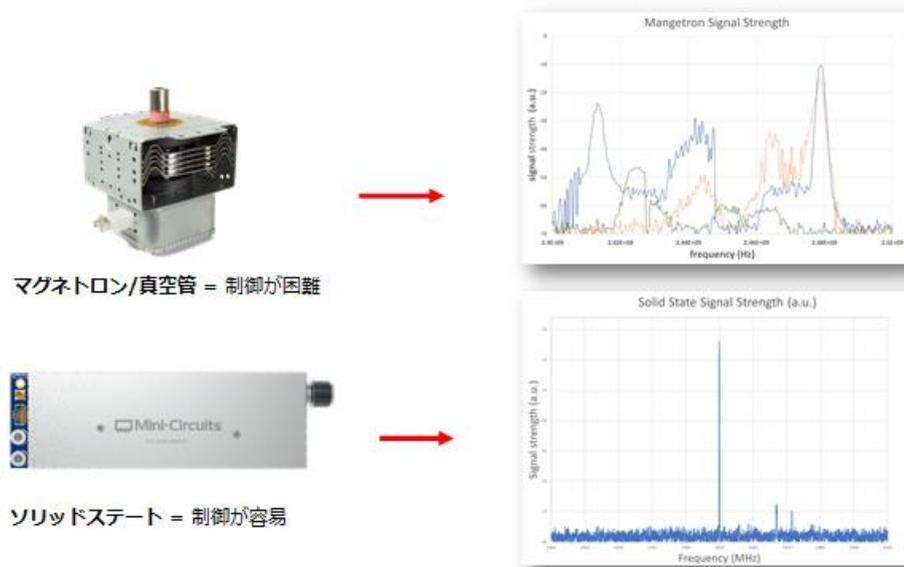


図 3: 3 種類のマグネトロン (上) とソリッドステートアンプ (下) の周波数応答比較

最近まで RF/マイクロ波エネルギーの応用例では、主にマグネトロンによる発振用真空管が使われていました。これらのソリューションは、RF/マイクロ波電力を使用して誘電体材料を加熱しますが、制御が制限され制御が難しいソリューションです。マグネトロンは一部のアプリケーションにおいては実用的ですが、多くの好ましくない特徴があります。図 3 では、3 台の異なるマグネトロンの RF 電力を示しており、比較的ノイズの多い周波数スペクトルが見られます。また RF 電力を増加させると出力周波数が本質的に変化することを示しています。マグネトロンの動

作には KV オーダのバイアス電圧が必要なため、電源も大掛かりなものになります。さらにマグネトロンの制御機構が限られているため、簡単には停止・再起動ができません。

これに対し、ソリッドステートパワーアンプのソリューションでは、安定して固定した周波数に制御・調整でき、出力電力も調整できるため、必要な部分に集中して RF/マイクロ波のエネルギーを供給することができます。その他の利点としては、システムが常にリアルタイムで周波数を調整しているため、より効率的に負荷に電力を供給することができます。また、ソリッドステートアンプは物理的な寸法等が小さく、モジュール化されているためカスケード接続することでより高い出力を得ることができます。最後に、マグネトロンが制御機構に制限があるのに対し、ソリッドステートアンプは後述するフィードバック制御により、容易にパワーダウンすることができます。

表2: マグネトロンとソリッドステートによる RF/マイクロ波エネルギー技術の機能別比較

機能	マグネトロン	ソリッドステート
周波数制御	不可	可
出力電力制御	限定的	可, 0 - 100%
自動終了	不可	可
電源	kV	30-35V
システムサイズ	大きくて重い	小さくて軽い
運用寿命	1-1.5 年	10-15 年
位相制御	複雑	容易

## 運用寿命とトータルコストについて:

ソリッドステート技術はマグネトロンを含む他の技術と比較して本質的に長い平均故障時間 (MTTF) を持っています。図 4 に示すように、産業用マグネトロンの寿命は 1 年程度であり、マグネトロンを頻繁に交換する必要がありますが、一方、ソリッドステートアンプの寿命は 15 年

程度あります。このように、従来のマグネトロンをソリッドステートアンプに置き換えることは、信頼性の面だけでなくコスト面でもメリットがあります。



図4: マグネトロンとソリッドステートアンプの平均故障時間(MTTF)比較

## フィードバックと制御

先述の通りマグネトロンではパワーレベルと周波数スペクトルは制御できませんが、ソリッドステートアンプの場合、周知の RF 技術を利用して両パラメータを正確に制御することができます。この機能は、ソリッドステートアンプによって発生させた RF/マイクロ波エネルギーの最も優れた利点と言えます。図5は一般的な RF/マイクロ波エネルギーアプリケーションで 사용되는ソリッドステートパワーアンプの制御ループの簡単なブロック図です。

ソリッドステートパワーアンプはキャビティの両側面から高周波電力を入力しており、アンプの出力から RF シンセサイザ間にはフィードバックループが構成されています。キャビティへの順方向信号と反射信号を測定し、その測定結果から周波数と出力を自動的に調整することで、ターゲットへのエネルギー供給を最適化することができます。この技術は、CW およびパルス出力に対応しており、アンプは誘電体の変化に合わせてリアルタイムに出力を調整することができるため、危険な状況に対応して迅速に自動シャットダウンが可能です。

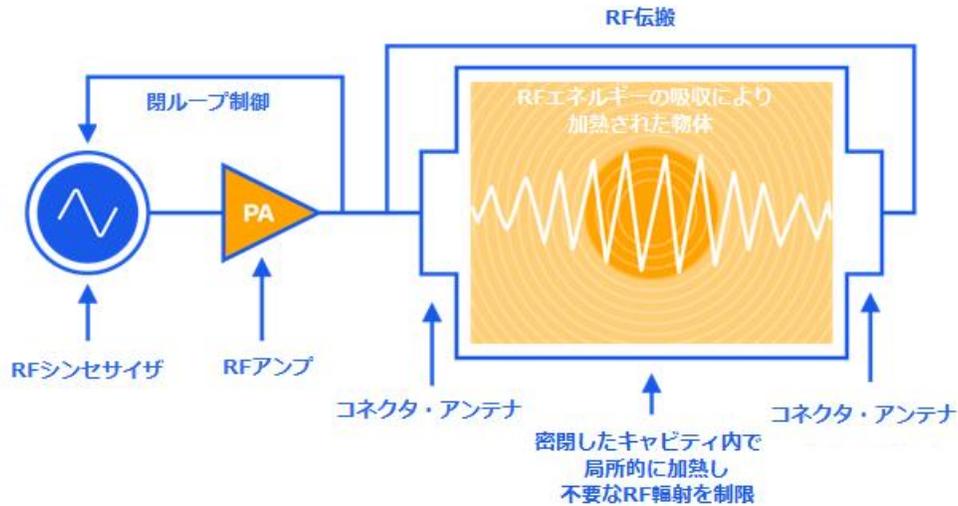


図5: ソリッドステートアンプのフィードバック制御ループ

## ターンキーソリッドステートパワーアンプソリューションのギャップを埋める

現時点では、マグネトロンに対するソリッドステートソリューションの優位性は明らかであり、多くのお客様がすでに移行を進めています。より広範囲にわたる商品化のためにはいくつかの課題が残っています。一部のお客様は、自社でソリッドステートアンプモジュールの設計・製造を行っていますが、これには膨大な設計ノウハウと開発期間、投資が必要になります。自社開発が可能だとしても、この方法では最終システムまでにリソースが多く取られてしまい、プロジェクトコストの増大や市場投入時間の遅れにつながりかねません。

予算や技術者が限られている小規模なお客様にとって、ソリッドステートパワーアンプの自社開発は現実的ではありません。ソリッドステートアンプの開発を外部委託する場合、この製品の歴史がまだ浅く、供給ベースも比較的限られているため、いくつかの課題が生じる可能性があります。製品の品質やサプライチェーンの安定性は、知名度の低い小規模なサプライヤを利用する場合に危惧されます。一方で、ソリッドステートパワーアンプの中には複雑な組み込みが必要な製品もあり、RFの専門知識を持たないお客様に対して、サプライヤが知識豊富なエンジニアリングサポートを提供してくれるとは限りません。

Mini-Circuits社の新しいソリッドステートパワーアンプ製品群は、ISM RF/マイクロ波エネルギーアプリケーション向けのコスト効率の高いターンキーソリューションで、市場のこれらの欠点を補います。すべてのモデルには、システム全体で簡単に利用できるフィードバック用のオ

ンチップセンサが搭載されています。これらの製品は、業界をリードする使いやすさを提供し、Mini-Circuits 社の品質、サプライチェーンの安定性、エンジニア同士のアプリケーションサポートも充実しています。複雑なソリッドステートアンプの設計は、経験豊富なソリッドステートパワーアンプの設計チームによってサポートされるのがベストです。Mini-Circuits 社は、業界で最も経験豊富なパワーアンプ設計エンジニアからなるチームを作り、製品ラインの開発だけでなく、お客様と協力して問題を解決しています。

## Mini-Circuits で新規開発された RF/マイクロ波エネルギー用 SSPA: ZHL-2425-250X+

### 設計概要

Mini-Circuits 社は、RF/マイクロ波エネルギーアプリケーション用のソリッドステートパワーアンプ ZHL-2425-250X+ を発表しました。このモデルはコネクタ付きで、入出力ポートは  $50\Omega$  でマッチングされており、2.4~2.5GHz の ISM バンドで最大 300W の CW パワーを供給する能力があります。図 6 に簡略化した機能ブロック図とアンプの筐体を示します。このブロック図には、順方向の出力電力を測定する RF 検波器と、反射電力を測定する第 2 の RF 検波器が含まれています。サーキュレータは、出力端子で発生する不要な反射電力からアンプモジュールを保護するために利用されます。制御・監視回路には、アナログ・デジタル・コンバータ (ADC) とデジタル・アナログ・コンバータ (DAC) が搭載されており、測定された RF 検波器アナログ電圧を、アナログとデジタルの両方の領域で読み取ることができます。また、I<sup>2</sup>C 接続により、数十マイクロ秒オーダーの応答時間でコントローラにフィードバックします。

アナログ出力バッファは、ブロック図の右側に、ユーザが利用可能なアナログ情報が表示されています。通常これらは、アプリケーションへの高速なフィードバックが必要な場合に使用できます。

アナログ出力電圧または ADC 出力デジタルビットは、ユーザが独自のアプリケーションコントローラへの全体的なフィードバック制御ループを通じてインテリジェンスを追加するために利用できます。また、Mini-Circuits 社では、図 7 に示すように、ZHL-2425-250X+ と連動してフィードバックループを閉じるための、インテリジェントで使いやすいコントローラと信号源のソリューション (ISC-2425-27+) を提供しています。外部コントローラから受信した制御信号は、図 6 の制御・監視回路ブロックの左側に示されており、ユーザ固有のアプリケーション制御は、I<sup>2</sup>C バスを通じて通信されます。また、モニタするパワーアンプ内の DC 信号として、電源電

圧、電源電流、温度センサを示しています。アナログの温度センサ信号は、アナログ信号またはデジタルビットとして外部コントローラに送り出すことができます。

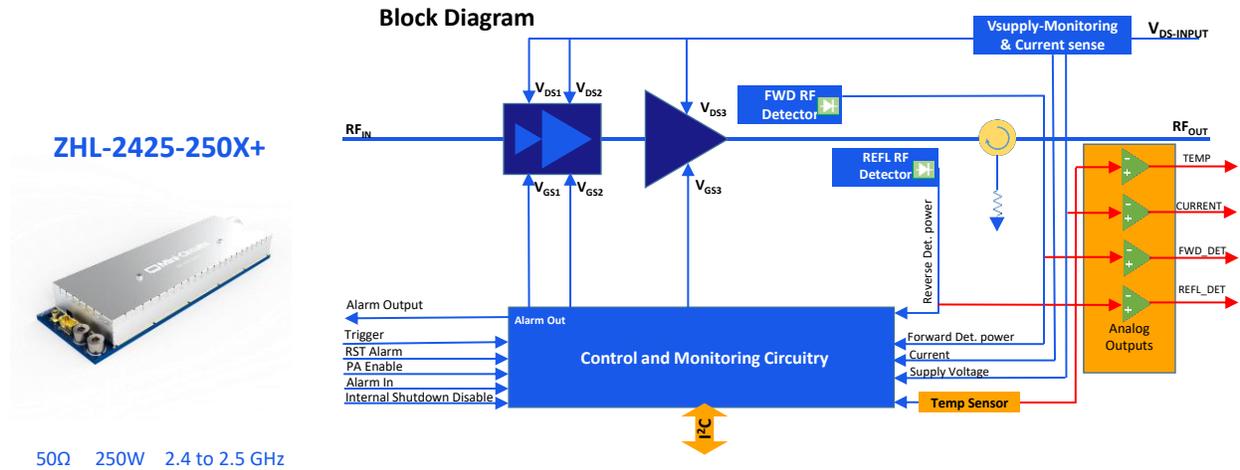


図6: ZHL-2425-250X+ 筐体とブロック図



図7: Mini-Circuits 社システムコントローラ (ISM-2425-25+) と アンプモジュール (ZHL-2425-250X+)

### 主な性能機能

ZHL-2425-250X+は、1W から 300W までの CW 電力を P3dB で正確に調整することができます。高効率 LDMOS 技術を採用したこのアンプは、32V の単一電源で動作し、+14dBm の入力信号で 41dB のゲインと、ほとんどのアプリケーションで 60%の電力付加効率 (PAE) を実現していま

す。このモデルは、温度、電流、順方向および逆方向の電力に対する広範な監視および保護機能を内蔵しており、危険な状況下での自動シャットダウン機能も備えています。また、空冷または水冷用の取り付けネジ穴を備え、小型・軽量の筐体（55.9×171.5×15mm、0.29kg）を採用しているため、1台または複数台を混載してシステムに組み込むことが可能です。

詳細な電氣的仕様については、データシートをご覧ください。(LINK PLACEHOLDER)

ZHL-2425-250X+は、ミニサーキットの SSPA 製品群の中で、現在3つあるアンプのうちの1つで、13 MHz から 5.8 GHz までの周波数と 25 kW 以上の出力レベルを持つ複数のアンプを現在開発中です。ZHL-2425-250X+およびその他のモデルについては、当社ウェブサイト (<https://lp.minicircuits.com/en-us/ism-rf-energy-solutions>) をご覧ください。また、その他のモデルについては、次回以降の記事でご紹介します。

## 結論

Mini-Circuits 社は ZHL-2425-250X+を導入する事により、RF/マイクロ波エネルギー市場向けに堅牢で競争力のあるターンキーソリッドステートアンプソリューションを開発しました。

Mini-Circuits 社では 50 年以上にわたる RF コンポーネントとインテグレートモジュールの供給経験からユーザーにて安心して使用できる製品といえます。

Mini-Circuits 社は、ZHL-2425-250X+の成功を受けて、より高い出力と他の ISM バンドアプリケーションの両方をサポートする新製品のリリースを続けてまいります。現在および将来のお客様のニーズに基づいて、製品開発のロードマップが計画されていますので、ソリッドステートの RF/マイクロ波エネルギーに関する特定の要件をお持ちのお客様は、ぜひ当社チームにご連絡ください。Mini-Circuits 社は、RF エネルギー製品ファミリの拡大に伴い、よりエキサイティングな製品のリリースを予定しています。