

# 島田理化技報

No.26(2018)

SPC Technical Report

## 特集

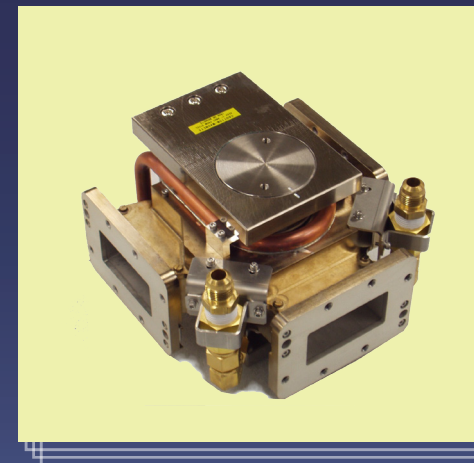
- 社会を支えるマイクロ波・ミリ波技術
- 省エネと環境に貢献する誘導加熱(IH)新技術

## 特集

●社会を支えるマイクロ波・ミリ波技術

●省エネと環境に貢献する誘導加熱(IH)新技術

第二十六号(二〇一八年)



## 目 次

## ■巻頭言

社会に貢献する 魅力あるものづくりと技術開発 .....	1
松本 操一	

## ■寄稿

最新の電波技術開発と島田理化への期待 .....	2
三菱電機株式会社 情報技術総合研究所 所長 中川路 哲男	

## ■特集論文 社会を支えるマイクロ波・ミリ波技術

ミリ波・高電力 RF 事業への取組み .....	10
越水 昭行	

当社におけるミリ波・準ミリ波技術への取組み .....	13
日下 洋 鈴江 秀規 森 智之	

加速器用 S バンド大電力ダミーロード .....	21
三神 幸治 湊 大樹 萩原 栄治 浅利 哲	

## ■特集論文 省エネと環境に貢献する誘導加熱 (IH) 新技術

省エネルギー社会に向けた IH 製品の標準化取組み .....	27
谷口 直純	

業務用 IH 調理器 [WAVE COOKER] .....	30
巽 敏之 北村 優典 松原 佑輔 田内 良男 石間 勉	

次世代半導体 SiC を用いた IH インバータの開発の取組み .....	35
田内 良男	

## ■製品紹介

Dual band Ka-PLL LNB .....	40
----------------------------	----

コルゲートホーンアンテナ .....	41
--------------------	----

高電力サーキュレータ .....	42
------------------	----

ハンディー CT 小型高周波電源 .....	43
------------------------	----

鋼線加熱用高周波電源 .....	44
------------------	----

薄板鋼板用高周波誘導加熱装置 .....	45
----------------------	----

## ■特許紹介

絶縁導波管 特許第 5992945 号 .....	46
---------------------------	----

高周波誘導加熱ヘッドと高周波誘導加熱装置 特許第 6253610 号 .....	47
--	----

塗膜剥離方法 特許第 6294202 号 .....	48
----------------------------	----

## ■巻頭言

## 社会に貢献する 魅力あるものづくりと技術開発

代表取締役社長

松本 操一

Soichi MATSUMOTO



1946年創業以来、当社は「WAVE」すなわちマイクロ波・ミリ波技術、高周波誘導加熱 (IH) 技術を軸として、電子・通信機器分野や産業機器分野において、社会に貢献できるよう、コンポーネントからシステムまでさまざまな製品・サービスをお客様に提供してまいりました。

私自身、学生時代を含めて35年以上にわたり、「WAVE」に携わってきましたが、その中で社会人1年目の駆け出しの技術者だった頃、「電波が見えるようになれ」と技術を表面的ではなく常に本質を追求し続けるように指導されました。

当社のコア技術である高周波技術「WAVE」はアナログ技術であり、基礎的な理論はマクスウェルの方程式を始めとして19世紀に確立されましたが、その技術的な本質を追求しつつ、小型化・高性能化のためのマイクロ波・ミリ波回路実装技術、高電力RFコンポーネント技術、先進デバイスであるSiC素子を用いた高効率・高性能化技術等、日々の技術の蓄積とともに飛躍的な技術進歩を取り入れて、さまざまな新しい技術開発に挑戦し、先進的な製品開発に取り組んでまいりました。

今回の技報では、マイクロ波・ミリ波の電波を用いたセンシングと通信の最新動向ならび関連する最新の電波技術開発について寄稿を頂くとともに、特集として「社会を支えるマイクロ波・ミリ波技術」そして、「省エネと環境に貢献する誘導加熱 (IH) 新技術」と題して、紹介させていただきました。いずれも、冒頭申し上げたように、「WAVE」を軸として当社が創業以来培ってきた技術分野であり、これらの分野において技術の蓄積とともに、新しい技術開発の成果を取り入れた最新の技術・製品を紹介しています。

電子・通信機器の分野においては、無線通信やレーダなどの通信・インフラ機器のみならず、ミリ波を活用した第5世代携帯電話 (5G) 関連機器や各種高速・大容量伝送を実現する通信機器、あるいは高電力マイクロ波コンポーネント等、当社が培ってきた技術を駆使して新たな価値創造創出を進めています。

高周波誘導加熱の分野においては、「環境への配慮」「コスト削減」「省エネ」をテーマに、各種加熱温度の高精度化・均一化技術、SiC素子等を使った高効率化技術、ならびに新たな材料への拡大等、さまざまな新しい技術開発に挑戦し、今ではその用途も拡大し、自動車、機械、電機、半導体から食品まで、あらゆる産業分野の加熱処理に活用いただいています。

私たち社員全員が冒頭申し上げた「電波が見える」よう、常に技術や製品を本質から向き合い、「お客様や社会から信頼をいただける対応とものづくりを行い、それにより社会に貢献する魅力あるシステム・製品を送り出していく」との事業の原点に立脚し、全ての製品一つひとつに魂を込めて、お客様に提供し、社会に送り出し、貢献できるよう取り組んでまいります。

今後とも、新たな価値の創造と日々の継続的な改善により、社会やお客様のニーズに的確に応えるよう、品質の高い魅力ある製品の開発に取り組んでまいりますので、引き続き変わらぬご愛顧を賜りますようよろしくお願い申し上げます。

■ 寄稿

# 最新の電波技術開発と島田理化への期待

三菱電機株式会社  
情報技術総合研究所  
所長

中川路 哲男

Tetsuo NAKAKAWAJI



## 1. まえがき

島田理化工業は日本のマイクロ波産業の黎明期とも言える戦後間もなく創業され、以来70余年の長きにわたり電波の技術を利用した製品を提供し、この産業分野の一翼を担う企業として社会貢献してきた実績と歴史を有している。マイクロ波・ミリ波と呼ばれる高い周波数の電波は最近様々な分野で利用され今後も一層の利用拡大が見込まれる。それに係わる技術も重要で、まさに“社会を支える技術”となり、この分野の技術を積上げてきた島田理化の一層の発展が期待される。

当社三菱電機もマイクロ波・ミリ波の技術開発や製品開発を行ってきたが、事業部門に加え当研究所（情報技術総合研究所）においても島田理化と協力して開発したものも多い。

本稿では島田理化に支援頂いたものも含め、主に三菱電機における開発<sup>(1)</sup>を例に挙げながら、マイクロ波・ミリ波の電波を用いたセンシングと通信の動向さらにハードウェアの要素技術としてのアンテナとマイクロ波回路に関する技術を概観する。

## 2. 電波によるセンシング

レーダは電波によるセンシング応用の主たるものである。最近、天気予報でレーダ観測の雨量分布図を見ることが多く、レーダが身近な生活にも役立っていることを実感できる。日本では1950年代半ばから雨観測気象レーダが設置され、1964年の富士山頂レーダなど、多くの開発がなされてきた<sup>(2),(3)</sup>。従来は主にC帯（5GHz）のマイクロ波が使われていたが、最近では空間分解能を高めるためにX帯（9GHz）のレーダも併用されている。空港設置の航空機監視レーダも主にマイクロ波を用いている。

一方、最近では衛星や航空機さらにはドローンなどに搭載されて地上を観測・測定するレーダも発展

してきた。当然のことながら、これら移動体搭載のレーダでは地上に設けられる場合よりもアンテナの大きさが制限される。それを補うために合成開口レーダ（SAR: Synthetic Aperture Radar）技術が開発されてきた<sup>(4)</sup>。この技術は、複数地点での観測データを合成することで非常に大きな開口を有するアンテナで観測したことに等価にする信号処理技術で、むしろ移動体搭載であることを積極的に利用する。日本の衛星ではL帯（1.2GHz）衛星搭載SARが実用化されており、災害状況把握や地形変動や植生把握などで利用されている<sup>(5)</sup>。さらに高性能化に向けてデジタルビームフォーミング技術導入の開発も行われている<sup>(6)</sup>。

レーダ性能を向上するためには、アンテナを大きくすることや送信電力を大きくすることが根本的な方法であるが、このようなハードウェアでの性能向上は物理的にもコスト的にも限界がある。したがってソフトウェア技術、すなわちハードウェアで検出された信号を処理して目標物を確実に検出・測定するレーダ信号処理技術の役割は大きい。

レーダ電波の反射が弱い対象物の場合は、長時間観測を行うことで信号を積分して検出するが、その間にも対象物は移動するため、それを見越して信号積分と対象物検出を行わなければならない。そこで対象物の移動を予測して追尾しながら信号を積分する長時間積分技術が研究されている<sup>(7),(8)</sup>。

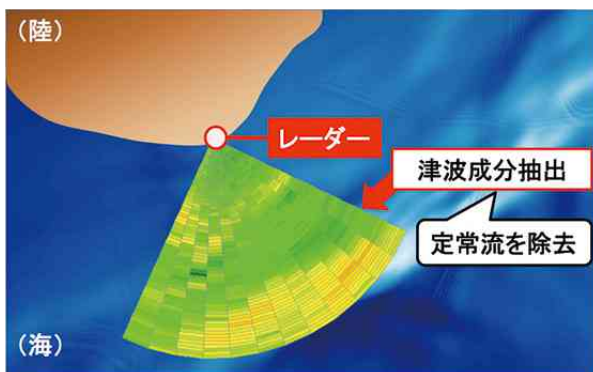
さらに上記の信号処理技術は、レーダで津波を高精度に検出する技術に発展している（津波検出レーダ）。この津波検出レーダは短波帯の海流観測レーダを改良したもので、津波特有の海水の動きを考慮し、観測された海面表層流から通常の流れや干満の流れなどの定常流を除去し、津波成分を精度良く抽出する信号処理を行う（図1）。これにより津波到達時間と高さを正確に予測することが可能となる<sup>(9)</sup>。

一方、ハードウェアの高機能化に伴い、膨大な量



となるデータを、どう処理するかも課題の一つである。圧縮センシング技術は、この課題に対する開発の一例である。この技術は、観測対象データが疎（スパース）であることを前提として、サンプリング定理よりも少ない観測データから対象物を推測する手法である。医療の核磁気共鳴画像検査や天文学の電波干渉計データ処理にも用いられているが、衛星や航空機搭載SARではSAR特有の性質を利用した信号処理アルゴリズムが開発されている。航空機搭載SAR実験において、軌道上の観測点数（観測データ）を半分にしても同等程度の綺麗さのSAR画像が得られる例が報告された<sup>(10)</sup>。換言すれば、従来と同じ観測データ量で2倍の範囲を観測・測定可能になるとも言える。この技術は衛星からの観測データのダウンリンク回線容量逼迫を避ける点でも有効である。

また、膨大なデータを、どう高速処理するかも重要な技術課題である。GPU(Graphics Processing Unit)を用いた並列データ処理によって高速な処理を行うための技術開発も行われている<sup>(11)</sup>。



海流レーダの観測データから津波成分を抽出

図1 津波検出レーダ

レーダ以外で電波を用いたセンシングとして電波の伝播時間差を利用した位置測定を取り上げる。GPS (Global Positioning System) が一例であるが、同様なことは地上に位置する発信源（送信点）と受信点でも行うことができる。一例として高速道路などの法面（のりめん）の地すべり予兆検知への応用を目指した開発<sup>(12)</sup>を紹介する。法面に設けた電波発信源からの電波を道路脇に設けた複数受信点で受信し、電波位相差から法面上の発信源位置を決定する。この手法は電波の送受信が逆になるがGPS測位と同じ原理である。近距離地上間であるため、GPSで問題となる電離層変動の影響は無く、高精度測位

が可能となる。法面の地すべり管理に必要な数mmの変位が観測できることが報告されている。

### 3. 電波による通信

電波による通信（無線通信）は携帯電話をはじめとして無線LANや無線タグなど身近なところでも広く使われ現代社会の基盤をなす。以下では、今後さらなる発展が見込まれる3つの応用分野に関連する技術について取り上げる。第5世代移動体通信システム（5G）技術、衛星通信の大容量化高速化技術、IoTセンサ用通信インフラとして期待されるLPWA（Low Power Wide Area）に触れる。

第5世代移動体通信は従来の第4世代移動体通信に比べて伝送速度が10倍になると言われている。大容量化高速化のためミリ波などの新たな周波数帯の割り当てが想定される。加えて単位通信エリア（セル）を小さくすることや、基地局から各端末に向けて独立した電波ビームを向けるマルチビーム空間多重などによって、割り当てられた電波帯域を有効利用するための標準化や開発が行われている。

従来の移動体通信が使っているマイクロ波に比べて、ミリ波は波長が短いためにアンテナ小型化が可能でマルチビームも実現しやすいが、一方で空間減衰が大きいため電波が遠くまで届かない。このような特徴を考慮して、ミリ波帯での5G移動体通信基地局は図2に示すような多素子アレーアンテナによるマルチビーム空間多重の実現が考えられる。

複数種のハードウェア構成が提案されているが、ミリ波帯で有力視されるハイブリッド方式と呼ばれる構成では、アレーアンテナのハードウェアは一部のレーダや衛星通信などで実用化されたフェイズドアレーアンテナ技術を応用したものとなる。5G移動体通信基地局への適用を目指して、高周波ICやそれを用いた大規模な多素子アレーアンテナが開発されている<sup>(13)</sup>。また、端末が多くマルチビームの間隔が狭くなると、隣接するビーム間での信号干渉による通信速度低下が発生する。そこでデジタル空間多重信号処理において隣接ビーム間に干渉キャンセル成分を付加し干渉を低減するマルチビーム空間多重プリコーディング<sup>(14)</sup>など、通信の大容量化高速化に寄与する技術が開発されている。

5G移動体通信の特徴としては大容量化高速化に加え、自動運転や遠方の機器制御を想定した低遅延

高信頼伝送, IoT 通信を想定した多数同時接続機能も挙げられ, それに向けた標準化と開発もおこなわれている。単に従来の携帯電話・スマートフォン通信の大容量化高速化だけでは無い, 各種アプリケーションの通信インフラ基盤として期待されている。

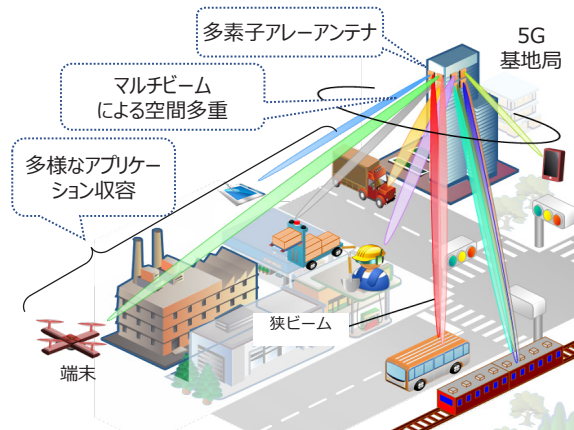


図2 第5世代移動体通信基地局のイメージ

地球温暖化対策の視点からも衛星による地球環境観測監視の重要性は一段と高まっている。気象衛星ひまわり8号9号では以前の気象衛星に比べて高解像度でかつ高頻度に雲画像が観測できるようになったことは記憶に新しい。これに代表されるように最近の観測衛星では高解像度・高頻度な観測が行われ, これに伴い地上に送るべき観測データも膨大で, そのための通信も大容量化高速化が必須となる。

また衛星を使ったインターネットサービス拡大のためにも衛星と地上間の通信高速化の要求が強い。例えば航空機内における衛星インターネットサービスの広がりも多くの方が実感されているところであろうが, いまだ残念ながら地上回線に比べれば通信速度は低い。また多数の衛星を用いて地球上にあまねくインターネットサービスを提供しようとする試みも数多く提案されている。このように衛星通信の大容量化高速化の重要性は増すばかりである。

従来は衛星-地上間の回線としてX帯やKu帯などの周波数帯が使われてきたが, より広帯域のチャンネルを確保できるKa帯やQ帯など高い周波数帯の装置開発が行われている。また通信回線を有効かつ最大限に利用するために, 衛星と地上との回線状態, すなわち天候や衛星仰角で変動する伝搬減衰に応じて, 適応的な伝送方式や通信経路を制御する方法などが検討されている。回線状態が良好な場合に

は大容量通信可能な多値変調を用い, 回線状態が悪い場合には伝送劣化に強い変調を用いる。加えて, 衛星との回線状態が良い複数の地球局を利用し, そのために衛星側のアンテナビーム形状を変更するなどの提案がなされている<sup>(15)</sup>。この適応的な制御は, 災害発生時に地上系通信回線が損傷した特定地域向けに衛星通信容量を増加させることにも応用可能で, 災害時の耐性（レジリエンス）向上にも役立つ。

通信機器や各センサが安価になったことで, いわゆるIoT (Internet of Things) が広がりつつあるが, その象徴と言える通信方式がLPWA (Low Power Wide Area) と呼ばれる範疇のものである。明確な定義は無いが, ①携帯電話より低速な通信, ②低コスト（低価格）通信, ③数km程度の長距離伝送, ④端末は低消費電力で数年程度は電池交換不要, などの特徴を有する通信方式やシステムを示すことが多い。

道路や橋梁などのインフラ監視, 土砂崩れ監視や気象データ収集の防災分野, 農業漁業の圃場養殖場での情報収集などで実証実験が進んでいる。国内でも既に一部の通信方式（規格）でスマートメータのデータ収集経路の一つとして実用化された。

現状は, SIGFOX, LoRa, Wi-SUN, NB-IoTなどと多くの規格が提唱され実用化に向けて競っている。使用する周波数帯も様々で, 携帯電話網の一部としてその帯域を利用するものもあれば, 無線LANで利用されているアンライセンズバンドを使う規格も有る。また通信速度や通信頻度さらに通信距離（送信電力）などの指標と, 端末消費電力（電池寿命）はトレードオフになっている。加えてネットワーク構築の容易さ, 通信費用なども規格間で差がある。つまりどのようなアプリケーションで用いるのかで各規格に得手不得手が有り, 今後, 具体的なアプリケーションへの浸透（実用化）に応じて幾つかの規格に収斂と住み分けが進むと考えられる。

各規格によって異なるが, チャープ拡散変調, 周波数ホッピング, 間欠送受信, マルチホップなどの, 耐干渉や省電力に寄与する通信技術が使われている。センサや通信デバイスなどハードウェアについては, 低コスト化はもちろんのこと, さらなる低消費電力化あるいは環境からのエネルギー収集による電池交換不要化などが技術課題として挙げられる。

またLPWAに限ったことでは無いが, アンライセンズバンドをIoT通信に用いる場合には耐干渉



性向上など高信頼技術が特に重要であり、例えば周波数ホッピングや他からの干渉波の影響を低減する復調などの技術<sup>(16)</sup>が注目される。

#### 4. アンテナ技術

電波を送受信する機器において、アンテナは空間と機器の間の電波の出入り口として必ず必要となるものであるが、その形態は様々である。以下では、開口面アンテナ、アレーアンテナ、小形アンテナと分類し、それぞれの最近の技術開発例を述べる。またアンテナと無線装置を接続する給電回路についても触れる。

衛星放送受信用として馴染みがあるパラボラアンテナは開口面アンテナの一例である。この分類のアンテナは、用いる電波の波長に対して十分に大きなサイズである場合が多く、アンテナ解析設計に際し電波を“幾何光学的”に扱うことが可能である。さらにアンテナ構造物による電波の回折の効果も考慮した“幾何光学的回折理論”を用いることで、より高精度な設計技術が築かれてきた。衛星通信や惑星探査機との通信、電波天文などに使われる大型パラボラアンテナ設計にもこの技術が使われている。

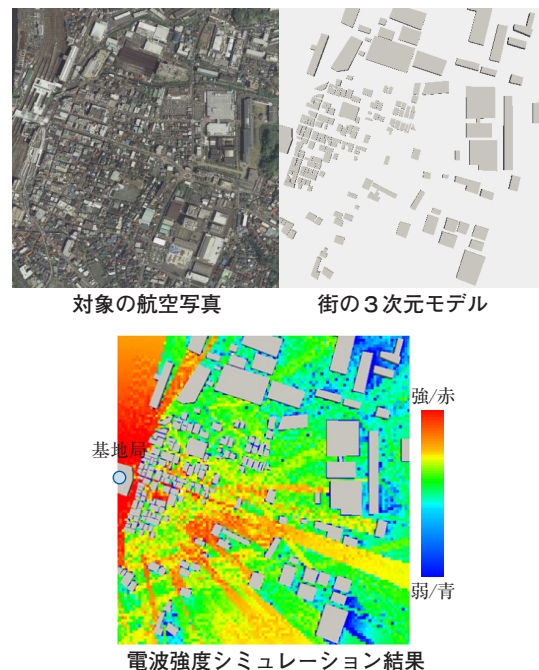
この技術は開口面アンテナ設計に限らず、屋内外における電波伝搬解析技術としても応用され発展している。電波伝搬に影響を与える物体のサイズが電波の波長に対して十分大きな場合には、良い精度でシミュレーションができるからである。具体的な例として、市街地における移動体通信基地局からの電波強度予測に応用されている。ビルなどの構造物の位置や高さ情報を含む電子地図情報を使って電波伝搬解析を行い、基地局からの電波が市街地の各通りに、どのように伝わり、どのような強度で分布するかを予測する（図3）。数km程度の範囲において10dB以内の精度で計算することが可能となっている。同様な計算は屋内でも可能であり数分程度の計算時間で4dB程度の精度で計算可能と報告されている<sup>(17)</sup>。この開発例では計算の高速化ために、典型的な領域での電波強度実測値から、電波源からの距離と電波強度の関係を示す複数の統計モデルを作成し、それと幾何光学的手法を併用する工夫がなされている。

基地局や無線LAN親機からの電波の強度分布は、従来は実地で測定が行われることも多かったが、こ

の技術によって基地局や親機設置位置の事前検討を迅速に低コストで実施することが可能となる。

アレーアンテナは複数の素子アンテナをアレー状（行列状）に並べたアンテナ群全体を称して言う。従来は一部のレーダなど特殊な分野で用いられることが多かったが、前章（電波による通信）でも触れたように5G移動体通信基地局のような身近な領域でもアレーアンテナの実用化が予想されている。

アレーアンテナの大きな特徴は、各素子アンテナに可変移相器を設けることで電波の送受信方向（ビーム）を変化させることができる点である。電気的な移相器が高速可変なことを積極的に利用し、時間変調アレーあるいは指向性変調アレーと呼ばれる高速にビームを変化させる技術が発展した。レーダ応用としては、目標方向以外からの不要波を抑圧する低サイドローブ特性を実現するために提案された。高速可変のビーム形状を時間平均すると目標方向以外の信号はキャンセルされて等価的に低サイドローブが得られる<sup>(18)</sup>。通信応用では通信変調波と同様な時間スケールで可変することで、目標方向のみで解読可能な通信変調波を送信する“秘匿通信アレー”が提案されている<sup>(19)</sup>。



国土院の航空写真を利用して、街の3次元モデルを作成。そのデータを使って電波強度をシミュレーション。

図3 電波伝搬シミュレーション

携帯電話や無線LAN子機、無線タグなどに用いられるアンテナはサイズが電波の波長以下である

ことが多く、小形アンテナと分類される。小形アンテナは単にそのサイズが小さいというだけでは無く、装置の筐体を含むアンテナ周囲の構造物や周辺電気回路の影響を考慮した設計が必要で、そのための技術開発が行われてきた。例えば携帯電話のアンテナを思い浮かべて頂くと良い。携帯電話が一般にも普及し始めたころの端末では、いかにもアンテナと判る線状・棒状の構造が現れていることが多かった。ところが最近の携帯電話やスマートフォンは、どこがアンテナなのか明確ではない。さらに最近では家電製品などでも無線を使っているにも関わらず、いわゆる目に見えるアンテナが現れている（突き出ている）ことはほとんど無い。これはアンテナ周囲の影響を正確に考慮してアンテナを筐体に内蔵可能になったことに加え、本来はアンテナではない筐体や構造物も含めてアンテナとして動作させる小形アンテナ設計技術の賜物である。結果、独立したアンテナを設ける場合と比較し、装置全体の小型化や低コスト化に寄与してきた。

このように本来はアンテナとして使われないものをアンテナとして使う顕著な例として、海水を用いるアンテナを挙げる。海水は金属には及ばないものの、ある程度の導電性を有する。そのことを利用し、噴水状に吹き上げた海水に高周波電流を流すことによってアンテナとして利用するものである。“シーエアリアル”と名付けられその実証が行われた（図4）<sup>(20)</sup>。噴水状の海水へ高周波電流を給電する噴水ノズル部の工夫や、海水の導電性を考慮した噴水流の太さ最適化などの技術検討が行われた。災害時の緊急の通信アンテナや、船舶などで必要時のみに展開するアンテナとしての応用が提案されている。



海水アンテナと、それを用いて受信したテレビ放送

図4 海水アンテナ（シーエアリアル）

無線装置とアンテナを接続する部品や回路を、電波の分野では給電回路と呼ぶ。初期のマイクロ波装置では給電回路に導波管と呼ばれる構造が使われることが多かった。導波管は金属の立体構造で精度良く作る必要があり、通常はコストが高く民生品で広く使われることは少ない。だが伝送損失が小さいことや大電力が取り扱えるなどの利点があり衛星などの分野では現在も使われている。多くの場合、大量生産では無く個産で、金属の機械切削で製作される。このような背景から3Dプリンタによる導波管回路の製作が発想された<sup>(21)</sup>。この開発では金属3Dプリンタでの製造に適した形状にするため、通常は矩形である導波管を一部は六角形にするなどの工夫がなされている。

## 5. マイクロ波回路技術

マイクロ波回路は、レーダ装置や無線通信装置においてアンテナと各種信号処理を行うベースバンド回路部分の間に位置する。送信機を例にすると、マイクロ波を発生させ（発振回路）、ベースバンド信号をマイクロ波に変換し（周波数変換回路）、マイクロ波を増幅（増幅回路）してアンテナに供給する機能を有する。これら機能回路について、高出力化、高効率化（低消費電力化）、小型化（集積化）、低コスト化などの課題に向けて開発が行われている。

1960年代にガリウム砒素（GaAs）電界効果トランジスタが現れてから、マイクロ波回路ではこの半導体素子が広く使われてきた。能動素子（トランジスタ）と受動回路を同一チップに集積回路状に構成するMMIC（Monolithic Microwave Integrated Circuit）技術もあり大きく発展した。その後、高出力化や低コスト化の要求を受けて、20年ほど前から、窒化ガリウム（GaN）やシリコン系（Si, SiGe）のトランジスタ素子開発が進み、現在では多くのマイクロ波回路がこれらの素子で開発されている。

GaNは高電圧動作が可能なことから送信用電力増幅器の高出力化、高効率化に大きく寄与した。従来のGaAsの動作電圧では、高出力増幅時にあまりに大きな電流を流す必要があり、その出力電力は限界に達していたからである。GaNは高出力・高効率求められるレーダ送信機から、低歪み特性が要求される移動体通信基地局送信機まで使われつつある。シリコン系デバイスは、プロセス微細化によってマイクロ波帯でも十分な性能を有するこ



とになったこと、また GaAs では難しいアナログ・デジタル含めた各種制御回路が構成可能で、様々な機能を 1 チップに集積して小型化・低コスト化を実現できることから、特に高出力や低雑音な特性が要求される場合を除き、適用が広がっている。以下では三菱電機におけるマイクロ波回路開発の幾つかの例を述べる。

通信大容量化に伴い移動体通信基地局の送信増幅器では、より広帯域の電波を増幅する必要がある。変調波そのものの周波数幅が広がると共に、システムに割り当てられるマイクロ波帯域も広がるため、それぞれにおける広帯域化が課題となる。

基地局送信増幅器の高効率化手法としてドハティ増幅器と呼ばれる回路が有るが、この回路では  $1/4$  波長のマイクロ波伝送線路が必須で、その周波数特性のために広帯域化が難しいという課題があった。これを解決する開発が行われた<sup>(22)</sup>。図 5 に当社製の GaN トランジスタを用いた回路試作写真を示す。マイクロ波の 3GHz から 3.6GHz までの広帯域で高効率特性を有する増幅器が実現した。これは発表時点で世界トップの広帯域特性であった。

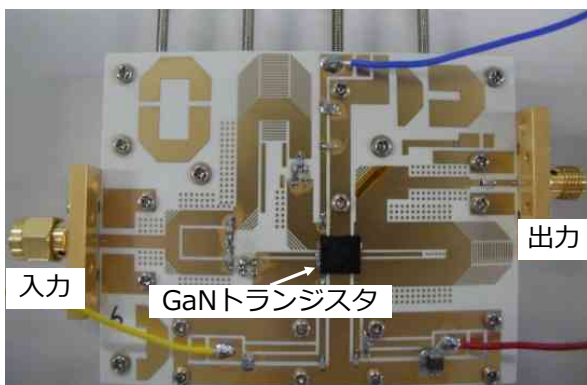


図5 GaN 広帯域ドハティ増幅器

基地局送信増幅器の別な高効率化法として、エンベロープトラッキングと呼ばれる手法がある。これは通信変調波の瞬時振幅（エンベロープ）に応じて、マイクロ波増幅トランジスタの電源電圧を高速に可変し無駄な損失電力を減らす方法である。この手法ではマイクロ波回路の広帯域化は比較的容易であるが、変調波帯域に応じた高速可変なスイッチング電源回路が難しい。そこで電源回路のスイッチング素子にも GaN トランジスタを用いて高速化を図った増幅器が開発された<sup>(23)</sup>。変調波帯域 80MHz まで高効率動作可能である。これは LTE (Long Term Evolution) の最大チャンネルバンド幅の 4 倍

に相当する。ちなみにマイクロ波帯域は 0.7GHz から 2.1GHz で広帯域である。さらにマイクロ波増幅回路そのものを超高速でスイッチング動作させて高効率化と汎用性向上を狙う増幅回路の開発も行われた<sup>(24)</sup>。

シリコン系デバイスを用いた回路では、5G 移動体通信基地局のフェイズドアレービーム制御用のマイクロ波 IC の開発が行われた<sup>(25)</sup>。ビーム方向を可変するための可変移相器と利得可変増幅器、合成分配器などのマイクロ波の基本機能回路に加え、外部のデジタル信号（ビット信号）を受けてマイクロ波回路を制御する制御回路も同一チップに集積化された。またアレーアンテナ 4 素子分を、この IC で駆動するため、4 チャンネル分の回路が単一チップに集積化され装置小型化に寄与する。

シリコン系デバイスは集積化や低コスト化の点で有利であるが、高周波動作を実現するために素子構造が非常に微細で、そのため動作電圧が下がり、結果として高出力動作が難しくなる。そこで GaN とシリコンの利点を取り入れて小型化するための工夫として両者のマルチチップモジュールも開発されている<sup>(26)</sup>。単に異種チップを並べるだけではなく、親基板の表面と裏面から 2 種のチップを 3 次元的に実装することで小型化と高周波特性の両立を図る工夫がなされている。

## 6. むすび

本稿では、マイクロ波・ミリ波を用いたセンシングと通信、アンテナ、マイクロ波回路に関して注目する技術について、主に三菱電機における開発を例にあげて概観した。

本稿で開発例として挙げたものも含め当所技術の一部は島田理化の各種開発にも応用されている。例えばレーダ信号処理技術は島田理化のレーダ信号試験装置、アレーアンテナ設計技術はミリ波通信用パッチアレーアンテナ開発で応用された。また島田理化はミリ波関連の技術を保有し<sup>(27)</sup> 製品化の実績も多い。当社開発の 5G 移動体通信基地局ミリ波アレーアンテナの性能を評価するために必要となる、ミリ波対向試験装置も製造頂いた。これは一例であるが各種開発に関わる装置試作などで当社開発への支援を頂いている。今後もマイクロ波・ミリ波関連開発を通じて島田理化の事業発展に貢献していきたい。

# 参考文献

- (1) 大塚, 小崎, 平, “光電波・通信技術の現状と展望”, 三菱電機技報, Vol.92, No.5, pp.2-7, May. 2018.
- (2) 立平, 石原, “気象庁レーダー 60 年のあゆみ”, 気象学会 2015 年度春季大会後援予稿集, D101, pp.78, May 2015.
- (3) 浜津, “レーダー製作の歴史”, 気象学会 2015 年度春季大会後援予稿集, D104, pp.81, May 2015.
- (4) 若山, “合成開口レーダの技術動向”, 電子情報通信学会会誌, Vol.95, No.2, pp.142-144, Feb. 2012.
- (5) 小宮山, 麻生, “陸域観測技術衛星 ALOS-2 の利用状況”, 三菱電機技報, Vol.91, No.2, pp.18-22, Feb. 2017.
- (6) 岡田, 白坂, 笠間, 横田, 楠田, “広範囲かつ高分解能な地球観測を実現する先進レーダ衛星 ALOS-4”, 三菱電機技報, Vol.92, No.2, pp.27-30, Feb. 2018.
- (7) 亀田, 森, 原, “パルスドップラレーダにおける加速度目標の積分方式”, 電子情報通信学会 信学技報, SANE2012-157, pp.49-54, Feb. 2013.
- (8) 山田, 高林, 小幡, 亀田, “高雑音環境下における高機動目標に対する長時間周波数解析と畳み込み積分による高速信号検出法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J99-B, No.12, pp.1076-1086, Dec. 2016.
- (9) 山田, 石川, 有岡, 小柳, 中西, 小幡, 亀田, “海洋レーダの流速観測値を用いたカルマンフィルタによる津波追尾方式”, 電子情報通信学会論文誌 Vol. J101-B, No.10, pp.867-877, Oct. 2018.
- (10) 星野, Liu, 原, 岡田, “合成開口レーダ向け圧縮センシング技術”, 三菱電機技報, Vol.92, No.5, pp.12-15, May. 2018.
- (11) 後町, 土田, 尾崎, “SAR 画像再生処理における GPU ベース並列 Fast Factorized Back Projection の検討”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 ,B-2-9, Sep. 2016.
- (12) 大島, 寺田, 網嶋, 鈴木, “電波位相差を用いた法面変位センシング技術”, 三菱電機技報, Vol.92, No.5, pp.280-283, May. 2018.
- (13) H. Nakamizo et al., “A Compact RF Frontend Module of Active Phased Array Antenna for High SHF Wideband Massive MIMO in 5G,” IEICE Trans. Electron., Vol.E100-C, No.10, pp.818-824, Oct. 2017.
- (14) H. Nishimoto et al., “NL-BMD: Nonlinear Block Multi-Diagonalization Precoding for High SHF Wide-Band Massive MIMO in 5G,” IEICE Trans. Commun., Vol.E100-B, No.8, pp.1215-1227, Aug. 2017.
- (15) S. Tani et al., “An Adaptive Beam Control Technique for Q Band Satellite to Maximize Diversity Gain and Mitigate Interference to Terrestrial Networks,” IEEE Trans. on Emerging Topics in Computing, DOI:10.1109/TETC.2016.2606107, 2016.
- (16) 青山, 鈴木, 梅田, 木下, 武, “高信頼・低遅延な無線通信技術”, 三菱電機技報, Vol.90, No.7, pp.25-29, Jul. 2016.
- (17) 橋本, 西岡, 稲沢, 宮下, “幾何光学的な空間分類を用いた屋内電波伝搬損失の統計モデル” 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J99-B, No.9, pp.684-692, Sep.2016.
- (18) 中西, 紀平, 高橋, 宮下, 小西, “共役関係を利用した位相制御型時間変調アレーアンテナ” 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J97-B, No.7, pp.546-555, Jul. 2014.
- (19) 栗山, 後藤, 紀平, “秘匿通信アレーアンテナ”, 三菱電機技報, Vol.92, No.5, pp.28-31, May. 2018.
- (20) S.Akimoto et al., “Demonstration of a Highly Efficient Seawater Antenna,” 2016 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Comm. , pp55-58, Sep. 2016.
- (21) 湯川, 安部, 牛嶋, “金属 3D プリンターを利用した導波管コンポーネント”, 三菱電機技報, Vol.92, No.5, pp.45-48, May. 2018.
- (22) Y. Komatsuzaki et al., “3.0-3.6 GHz Wideband, over 46% Average Efficiency GaN Doherty Power Amplifier with Frequency Dependency Compensating Circuits,” 2017 IEEE PAWR, pp.22 - 24, Jan. 2017.
- (23) S.Sakata et al., “An 80MHz modulation

bandwidth high efficiency multi-band envelope-tracking power amplifier using GaN single-phase buck-converter,” 2017 IEEE IMS, pp. 1854- 1857, Jun. 2017.

- (24) 新庄, Ma, 小松崎, 坂田, 中溝, “高効率 GaN スイッチング増幅器を適用した複数周波数対応 デジタル送信機技術”, 三菱電機技報, Vol.92, No.5, pp.41-44, May. 2018.
- (25) K. Tsutsumi et al., “A 15GHz-Band 4-Channel Transmit/Receive RF Core-Chip for High SHF Wide-Band Massive MIMO in 5G,” IEICE Trans. Electron., Vol.E100-C, No.10, pp.825-831, Oct. 2017.
- (26) 川崎, 桑田, 石橋, 他 “銅ピラー接続 Si/GaN チップ内蔵 3 次元実相 S 帯送信モジュール”, 電子情報通信学会 信学技報, MW2018-5, pp.19-23, Apr. 2018.
- (27) 高橋, 鈴江, 森, 山口 “当社におけるミリ波技術の取組み”, 島田理化技報, No.21, pp.49-59, Dec. 2011.

〈特集論文〉

# ミリ波・高電力 RF 事業への取組み

## Millimeter Wave・High Power RF Business

越水 昭行  
Teruyuki KOSHIMIZU

### 1. まえがき

日本の景気は2018年度に入っても緩やかな回復をしており、また、2020年の東京オリンピック・パラリンピックに向けインフラ整備などの需要の盛り上がりによって設備投資の増加が当面続くため、景気回復の動きは維持されると予想されている。

当社の電子ビジネスユニット（BU）事業は1951年にマイクロ波機器の販売を開始し、同軸・導波管コンポーネント（図1）、通信機器（図2）、電子機器（図3）の開発・製造をしてきた。特に近年は20GHz以上の準ミリ波・ミリ波関連製品や加速器に使用される高電力RF製品の需要が高まっている。



図1 同軸・導波管コンポーネント



図2 通信機器



図3 電子機器

### 2. ミリ波事業への取組み

当社におけるミリ波事業は1960年代の固定電話基地局間を結ぶ大容量中継用向けとしてミリ波帯の立体回路等の開発・製造からスタートした。1990年代においては北米市場向けに38GHz帯デジタル無線伝送装置を量産、納入した<sup>1)</sup>。2000年代は、無線局免許が不要な60GHz帯に着目し平面回路フロントエンドモジュールの製品化を行い、2010年代に入り、25GHz帯、26GHz帯無線伝送装置に用いられるフロントエンドモジュールを量産してきており、当社ミリ波事業は半世紀以上の歴史を持っている。

一方、2020年のサービス開始を目指している第五世代移動通信システム（5G）は「超高速」だけでなく「多数同時接続」や「超低遅延」といった新たな特徴を持つ次世代の移動通信システムであり、ICT時代のIoT基盤として早期実現が期待されている（図4）。グローバルの携帯電話事業者業界団体GSM Association (GSMA)によれば、2020年以降グローバルの5G回線数は、約5年で全世界11億回線、全モバイル回線に占める割合は約3割に達すると予測している。総務省は2020年の5G実現に向けて、研究開発・総合実証試験の推進、国際連携の強化、5G用周波数の確保といった取組を進めており、2017年度からは、5Gの実現による新たな市場





図4 5Gの主要要求条件

出典：総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課

の創出に向けて、様々な利活用分野の関係者が参加する実証プロジェクトを開始している<sup>[2]</sup>。

当社はこれまでの経験を活用し、短い波長（1mm～10mm）と強い直進性、大きな情報量を伝送することができるミリ波の特長を活かした送受信ユニット（28GHz帯）を開発した。本送受信ユニットは5Gを始め衛星通信など様々な用途に使用されることが期待されている。

### 3. 高電力 RF 事業への取り組み

当社は約30年前より線形加速器やシンクロトロンなどに使用される高電力RFコンポーネントとして、クライストロン用高出力RFパルス信号発生器（RFドライバ）、ロータリージョイント、サーキュレータ、ダミーロードおよび接続導波管類の開発・製造を行っており、現在も海外市場へ年間で各々数百台を販売している。また、これらの製品の技術は高エネルギー加速器研究機構（KEK）など研究機関の大型加速器にも利用されており、宇宙発生の起源誕生の解明や、物質科学・地球科学・生命科学・環境科学・産業利用などの様々な分野で優れた研究

成果にも役立っている<sup>[3]</sup>。一例をあげるとKEKでは、1998年から電子・陽電子や素粒子をRFにより光速近くまで加速し衝突させ、宇宙誕生の状態を作りだすKEKBが運用開始され、これまでに大きな成果をあげている。更に2018年3月からは性能が40倍となったスーパーKEKBが稼働しており、さらなる成果が期待されている。これらの装置にも当社の高電力（1MW）サーキュレータ等が数十台採用されている。

また、加速器市場では2030年代、東北地方に巨大加速器「国際リニアコライダー（International Linear Collider: ILC）」（図5）を建設する計画が進められている。ILCは、日米欧などの科学者が国際協力による建設を目指す直線型の巨大加速器である。文部科学省の試算では、ILC建設に伴う経済効果は、建設期間と10年間の運用期間の計20年間で2.5兆円を超え、15万人以上の雇用創出が見込まれている<sup>[4]</sup>。ILCにおいても素粒子を加速するエネルギー源はマイクロ波であり、非常に多くの導波管コンポーネントを使用することとなる。当社もこれまでの開発・製造実績を活かしILCへの参画を目指してゆく。



図5 ILC 構成模式図

出典：Rey.Hori/ 高エネルギー加速器研究機構

以上述べてきたように、当社はこれまで大型、小型加速器に組み込まれる製品を市場に多数送り出しているが、2018年度には小型加速器用としてドライロード（図6）を開発し、試作機を装置メーカーへ納入した。これまで加速器など大電力用として用いられてきた従来のウォーターロード方式では、誘電体（セラミックスや樹脂）で仕切られた水槽内の循環水にマイクロ波を吸収させているが、誘電体が破損した場合、導波管回路内に水が侵入する問題があり、高額なクライストロンや加速器を破壊する恐れがあった。この問題を解決するため、導波管内に冷却水を入れないドライロード方式のダミーロードを開発した。マイクロ波の吸収にはSiC（炭化ケイ素）を採用、冷却機構を導波管の外部とすることで、導波管回路内への水の浸入防止が可能となった。本ドライロード（試作機）の評価が完了し、今後信頼性試験へ移行していくと共に他の加速器への応用展開も活路が開けてくると確信している。



図6 ドライロード外観

#### 4. むすび

本稿では、電子BU事業の強みである通信機器におけるミリ波事業と同軸導波管コンポーネントを

中心としたメガワットクラスの高電力RF事業について述べたが、5GやILCに代表されるプロジェクトは社会への貢献は勿論のこと、ビジネスとしても将来が期待されている。当社はこれまで培ってきた技術を活かし、ミリ波事業や高電力RF事業へ更に取組んで行く。

#### 5. 参考文献

- [1] 高橋 勲, 鈴江秀規, 森 智之, 山口 浩, “当社におけるミリ波技術の取組み”, 島田理化技報, No.21 pp49-59
- [2] 平成 29 年版情報通信白書, 総務省, 第一部, 第三章, 第三節, IoT 化する情報通信産業 pp126-127
- [3] 萩原栄治, 森 智之, 浅利 哲, 四分一浩二, “社会に貢献する電子・通信機器”, 島田理化技報, No.25 pp14-20
- [4] 中本哲也, “加速器が開く日本の未来”, 産経ニュース

#### 筆者紹介

事業本部  
電子営業部

越水 昭行



〈特集論文〉

# 当社におけるミリ波・準ミリ波技術への取り組み

## Our Approach to Quasi-Millimeter Wave and Millimeter Wave Technology.

日下 洋  
Hiroshi KUSAKA

鈴江 秀規  
Hidenori SUZUE

森 智之  
Tomoyuki MORI

本稿では、当社におけるミリ波、及び準ミリ波技術への取り組みとして、近年開発した製品を、主だった周波数帯毎にピックアップして紹介する。また、その製品への適用技術の一例として、フロントエンド集積化技術や、アンテナ設計技術等を紹介する。

### 1. まえがき

当社ではこれまで準ミリ波帯や、ミリ波帯の平面回路フロントエンドモジュール等を製品化してきた<sup>[1][2][3][4]</sup>。

近年ではミリ波帯を利用した技術は、近距離大容量無線通信、衝突防止レーダ、地球環境観測等、様々な用途に応用されており、今後も普及が加速していくことが期待されている。

本稿では、当社における準ミリ波帯、及びミリ波帯技術への取り組みとして近年開発した製品を、主だった周波数帯毎にピックアップして紹介する。また、その製品への適用技術の一例として、低損失パッシブ回路技術や、アンテナ設計技術等を紹介する。

まず2章では、準ミリ波帯への取り組みとして、衛星通信システムや、次世代移動通信システム等が利用される周波数帯である28GHz帯に着目し、高性能な送受信モジュールを開発したので紹介する。これに付随する周辺技術として、電磁界解析によるパターンの最適化設計技術や、開発した28GHz帯の平面パッチアンテナを紹介する。

次に3章では、ミリ波帯への取り組みとして、47GHz広帯域送受信装置を紹介する。40GHz帯は当社において、特に製品実績の多い周波数帯である。また、関連する製品として40GHz帯カセグレンアンテナも紹介する。

最後に4章では、60GHz帯無線信用周波数変換装置を紹介する。これは国際標準規格である、IEEE802.15.3c/11adに準拠しており、当社のミリ波製品の中で、最も周波数の高い製品のひとつである。

また、試作したIEEE802.15.3c/11ad準拠の導波管ミクサも併せて紹介する。

### 2. 28GHz 帯送受信モジュールの開発

#### 2.1 開発概要

当社では、25GHz帯RFユニットや、28GHz帯衛星通信用アップコンバータ、及びダウンコンバータ等をはじめ、準ミリ波帯に対応する様々な装置を開発してきた<sup>[5][6][7]</sup>。これまでの経験を活用し、衛星通信システムや、次世代移動通信システム等が利用される周波数帯である28GHz帯に応用可能な、送受信モジュール（以下本モジュール）を開発したので紹介する。

図1に本モジュールの外観、図2にブロック図、及び表1に主要性能を示す。外形寸法は、45mm×35mm×215mm以下となっており、モジュール端部にアンテナを搭載する。また、送信系、及び受信系のRF増幅回路が一体化しており、26.5～29.5GHz（比帯域10.7%）に対応している。さらに、高速の送受切り替えRFスイッチと、バイアス制御方式によりTDD（Time Division Duplex）動作が可能である。また、2段のステップアッテネータにより、送信及び受信利得を約30dB可変させる機能がある。

次に図3にステップアッテネータを変化させた時の送信利得を示す。26.5～29.5GHzにおいて送信利得は、30dB以上（typ.Gain設定時）となり、ステップアッテネータにより約30dBの可変幅が得られている。

次に図4に受信利得を示す。受信利得は26.5～29.5GHzにおいて10dB以上（typ.Gain設定時）となり、ステップアッテネータにより約30dBの可変幅を実現している。また、本モジュールは26.5～29.5GHz（比帯域10.7%）の広帯域な周波数特性を有するが、これを実現するにあたり、帯域内振幅偏差を最小化することが一つの課題となる。そこで、今回これらを実現するために適用した設計技術



の一例として、部品実装パターンの最適化設計技術を2.2項にて紹介する。また、本モジュールを実現するために必須となる低損失パッシブ回路の一例として、平面パッチアンテナや、導波管マイクロストリップ変換技術等も紹介する。

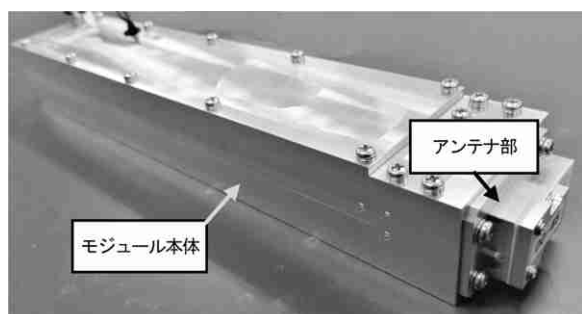


図1 28GHz 帯送受信モジュール外観

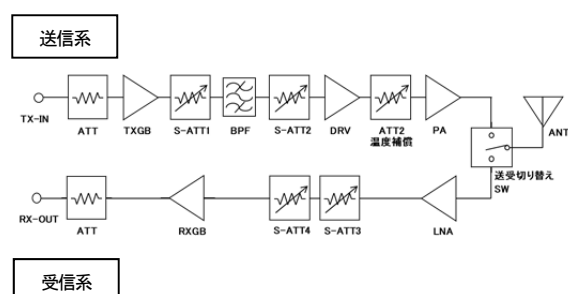


図2 28GHz 帯送受信モジュールブロック図

表1 28GHz 帯送受信モジュール主要性能

項目	主要性能
送受信周波数	28GHz 帯
送受切り替え速度	10usec 以下
送信系	送信利得
	飽和出力レベル
受信系	受信利得
	受信 NF
外形寸法 W × H × D	45 × 35 × 215mm 以下

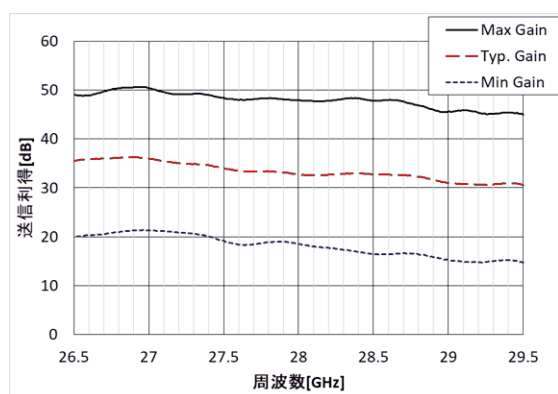


図3 28GHz 帯送受信モジュール送信利得

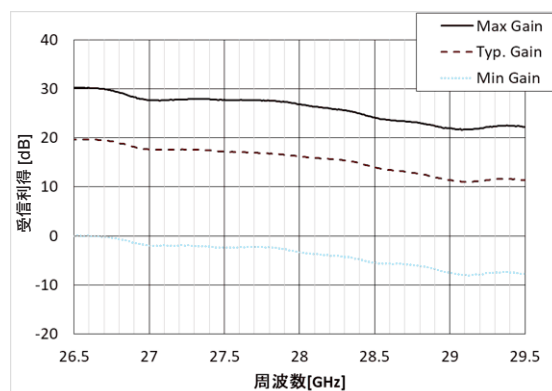


図4 28GHz 帯送受信モジュール受信利得

## 2.2 部品実装パターンの最適化設計技術

図3の送信利得では、周波数が高くなるにつれて、利得が5dB程単調に減少しているが、これは半導体デバイスの性能によるものである。図4の受信利得でも同様に、約8dB程単調に減少している。一方で、送受共にリップル成分が小さく、フラットな周波数特性となっている。この特性は、実装パターンの最適化設計によるものである。

近年では、半導体デバイスの表面実装型パッケージは高周波数化が進み、準ミリ波帯においても、入出力インピーダンスが50Ωに整合されているため扱いやすい。しかしながら、利得の帯域内振幅偏差等の、RF性能を悪化させる要因となるリップル成分を抑制するには十分ではなく、各部品間のインピーダンス不整合によって生じる反射波を、最小化する設計が必要である。

今回実施した最適化設計の例を紹介する。図5にこの時の解析モデルを示す。同図(a)は、解析モデルの全系を示している。この解析モデルは、製品のRF回路全体から、送信系における特定の部分のみを切り取ったものである。今回は一例として、送信系の2つのステップアッテネータの実装パターンと、その間に配置されたバンドパスフィルタの回路について説明する。また、同図(b)は、ステップアッテネータの実装パターンの拡大図であり、形状を最適化する前の解析モデルである。これに対し、同図(c)は最適化後の実装パターンである。

最適化は、まず図5(b)の最適化前の解析モデルを作成し、特性を確認した。ここから、パッケージのRF入出力端子と、50Ωマイクロストリップラインへの変換部に、テーパ状のインピーダンス変換部を設けた。寸法の細部はパラメータスタディにより決



定し、反射減衰量を最適化した。さらに、グランド端子先端部のスルーホールの数と位置についても、パラメータスタディを実施し、インピーダンス変換部における反射減衰量を最適化した。なお、この最適化はパターン寸法の製造誤差も考慮している。また、2つのステップアッテネータの実装パターンに対し、適用している。

図6は、最適化前後の反射減衰量の解析結果を比較したものである。本結果は、わずかなパターン形状の違いが、このような特性の大きな変化となって現れていることがわかる一例である。今回紹介した手法の最適化設計は、コストの問題もあるため、全ての製品、全ての回路への適用はできないが、この回路の様にフィルタの前後など、反射減衰量が劣化しやすい場所については、有効であるといえる。

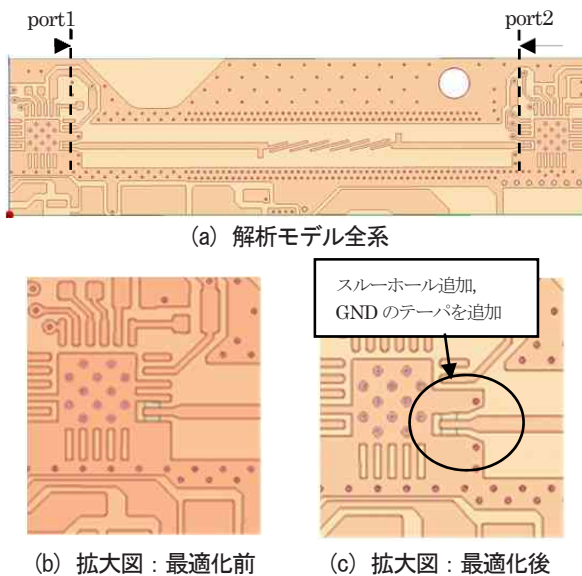
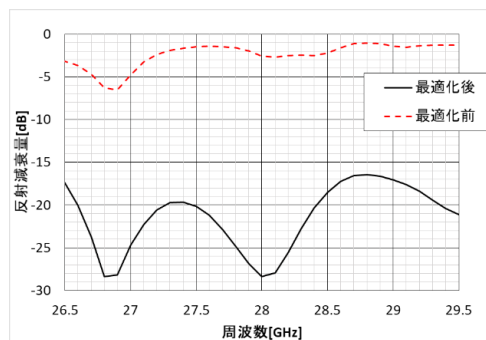


図5 最適化設計の解析モデルの一例



## 2.3 28GHz 帯平面パッチアンテナ

平面パッチアンテナは、平面アンテナとしてはビーム幅が狭く、利得が高いという利点がある。また、放射素子と給電系が同一平面上に形成することが可能なため、モジュール端部に搭載した際、突起が最小限となる利点がある。

図7に今回開発したアンテナの外観を示す。モジュールとのインターフェースを導波管 (WR28) とすることで、挿入損失を低減し、RF 性能を改善している。さらに、導波管接続であるため、アンテナを取り外すことが可能で、偏波を 90 度回転させたアンテナに交換することも可能となっている。

アンテナの主要性能を表2に示す。ビーム幅は約  $100^\circ$  で 5.0dBi の利得を達成しており、外形寸法は、 $45\text{mm} \times 25\text{mm} \times 10\text{mm}$  以下となっている。

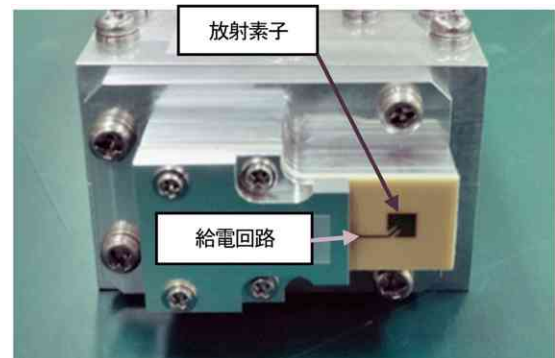


図7 28GHz 帯平面パッチアンテナ外観

表2 28GHz 帯平面パッチアンテナ主要性能

項目	主要性能
方式	平面パッチアンテナ
アンテナ利得	5.0dBi 以上 (給電損失込み)
ビーム幅	$100^\circ$ 以上
外形寸法 W × H × D	$45 \times 25 \times 10\text{mm}$ 以下

## 2.4 導波管・マイクロストリップ変換技術

当社ではミリ波帯、準ミリ波帯において、伝送線路として導波管を適時採用している。これらの周波数帯では導波管の口径が小さいため、装置の極端な大型化を招くことなく、導波管の低損失という利点を活かせるためである。一方で FET や MMIC 等の半導体デバイスはマイクロストリップ線路（以下 MSL）での実装を前提としているため、伝送モードが異なる MSL と導波管のモード変換回路が必要となる。また、MSL の特性インピーダンスは一般的に  $50\ \Omega$  であるが、矩形導波管は数百  $\Omega$  となるため、インピーダンス変換機能も有することが必要である。

図 8 は 28GHz 帯で設計した導波管・MSL 変換回路である。この変換方式は、矩形導波管の断面に対し、MSL 基板が直交して配置され、断面直行型導波管・マイクロストリップ変換器と呼んでいる。また、これ以外にも断面平行型と呼ばれる方式もあり、モジュールの構造や接続相手のインターフェースに合わせて選択される。表 3 にこの変換器の主要性能（計算値）を示す。26 ～ 30GHz で反射減衰量 18dB 以上、挿入損失 0.5dB 以下の性能が得られている。

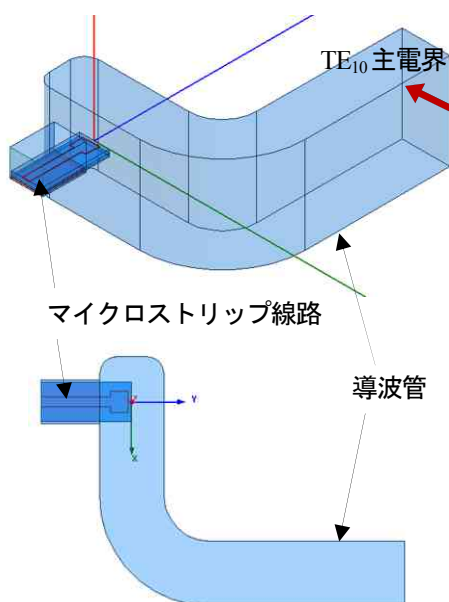


図 8 28GHz 帯導波管・マイクロストリップ変換器

表 3 28GHz 帯導波管・マイクロストリップ変換器の主要性能（計算値）

項目	主要性能
周波数	26 ～ 30GHz
反射減衰量	18dB 以上
挿入損失	0.5dB 以下

## 3. 47GHz 帯広帯域送受信装置の開発

### 3.1 開発概要

ここからは、当社のミリ波帯製品の中でも、特に製品化実績の多い 40GHz 帯の製品の一つである、47GHz 帯広帯域送受信装置（以下本装置）を紹介する。

本装置は、大容量屋外データ通信システムに使用され、地上局と移動局とで、電波を送受信する装置である。また、FDD（周波数分割複信）方式に対応している。本装置の外観を図 9 に示す。装置筐体前面にアンテナを搭載し、装置背面には、IF 入出力コネクタ、表示系、電源コネクタ、スイッチ類が配置されている。

図 10 にブロック図を示す。送信系は、装置外部から入力された 2GHz 帯の IF 信号を、装置内部で生成された LO 信号と混合し、アップコンバートすることで、47GHz 帯の RF 信号として出力する。受信系では、47GHz 帯の RF 信号をダウンコンバートし、2GHz 帯の IF 信号として出力する。また、FDD 方式対応のため、装置内部の送受信モジュール入出力端（アンテナ端）に、デュプレクサを接続し、周波数の異なる送受信信号を分離している。このデュプレクサは導波管で構成され、マイクロストリップラインで構成されたフィルタと比べ、低損失かつ急峻な減衰特性を有する。

表 4 に主要性能を示す。送信出力電力は、屋外試験での伝搬距離を確保するため、P1dB で +24dBm 以上を出力可能としている。また受信利得は 30dB を有し、NF 9dB 以下の性能が得られている。

また本装置は、アンテナ利得 32dBi、ビーム幅  $3.3^\circ$  とミリ波帯ならではの高利得かつ鋭いビーム幅が要求されている。これらの要求を 47GHz 帯カセグレンアンテナにて実現したので、3.2 項にて紹介する。

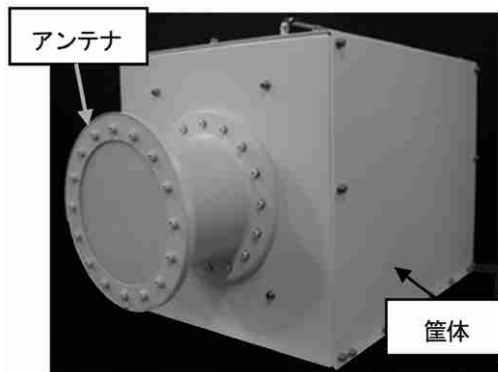


図9 47GHz 帯広帯域送受信装置外観

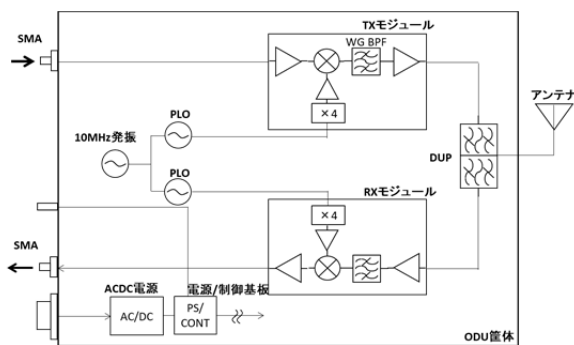


図10 47GHz 帯広帯域送受信装置ブロック図

表4 47GHz 帯広帯域送受信装置主要性能

項目	主要性能
RF 入出力周波数	47GHz 帯
IF 入出力周波数	2GHz 帯
帯域幅	± 500MHz
送信出力電力	+24dBm 以上 (P1dB)
スプリアス	-40dBm 以下
受信利得	30dB typ.
受信 NF	9dB 以下
電源電圧	AC100V
外形寸法 W × H × D	270 × 280 × 456mm

### 3.2 47GHz 帯複反射鏡型アンテナ

複反射鏡型アンテナは、一次放射器と主反射鏡、副反射鏡で構成され、高い開口能率と低サイドローブ特性を有する。このため衛星通信等でよく用いられるが、近年では地上用の通信システムにおける技術の高度化に合わせて、こちらにも応用される。

47GHz 帯広帯域送受信装置は、高利得かつ、鋭い

ビームが要求される。そこで、当社では 47GHz 帯に対応した、カセグレンアンテナを開発した。図 11 に 47GHz 帯カセグレンアンテナの外観と構造を示す。主反射鏡は回転放物面鏡、副反射鏡は回転双曲面鏡、一次放射器は円錐ホーンアンテナで構成されている。

表5にアンテナの主要性能を示す。偏波は直線偏波としているが、一次放射器に円錐ホーンを採用しているため、これ以降に円偏波発生器を取り付けることで、円偏波にも対応可能である。また、利得は 32dBi, ビーム幅 3.3° と、高利得かつ鋭いビーム幅を実現している。

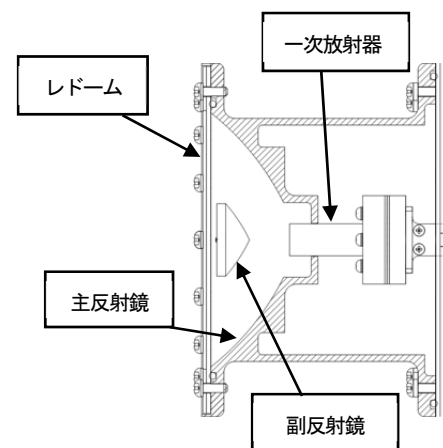


図11 47GHz 帯カセグレンアンテナの構造

表5 47GHz 帯カセグレンアンテナの主要性能

項目		主要性能
周波数		47GHz 帯
偏波		直線偏波
利得		32.3dBi typ.
ビーム幅	AZ	3.3 ° typ.
	EL	3.3 ° typ.
軸比		1.1 d B 以下
V S W R		1.3 以下

## 4. 60GHz 帯無線通信用周波数変換装置の開発

### 4.1 開発概要

近年では、モバイル機器を利用したインターネットから提供されるデジタルコンテンツの大容量化が進んでおり、1Gbps を超える高速無線通信システムの普及が望まれている<sup>[8][9]</sup>。このような背景の中、60GHz 帯ミリ波通信標準規格 (IEEE802.15.3c/11ad) 準拠の物理層評価に用いる、周波数変換装置 (以下 60GHz コンバータ) を開発したので紹介する。なお、60GHz コンバータは図 12 に示すように IF コンバータ、RF コンバータから構成されるが、本報告では RF コンバータに特化して説明する。

この装置は、IF コンバータから入力された変調信号を IEEE802.15.3c/11ad が規定する 60GHz 帯の周波数にアップ/ダウンコンバートする装置である。実機検証用に試作した RF 部のアップ/ダウンコンバータの外観図を図 13 に、ブロックダイアグラムを図 14 に示す。また、主要性能を表 6、7 に示す。

RF コンバータの主な特徴としては、導波管型ミキサを採用し、ミリ波部のパワーアンプ、ローノイズアンプはベアチップデバイスをパッケージングし実装した。また局発用信号発生器を内蔵することで、コンバータを動作させるために必要な外部信号源を不要とし、60GHz コンバータのシステム全体の構成を簡素化した。また IF コンバータから制御信号を受信することで、IEEE802.15.3c/11ad で規定される周波数 (チャネル) を切り替える構成とした。

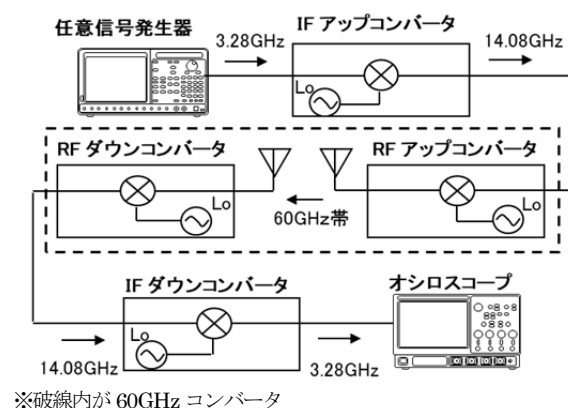


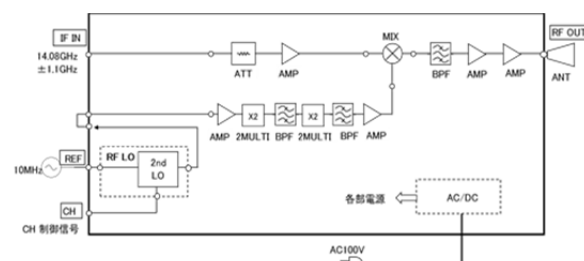
図 12 60GHz コンバータのシステム構成



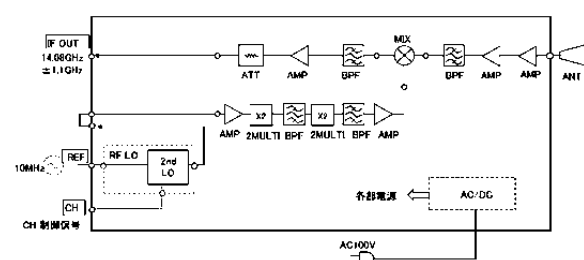
図 13 RF アップ/ダウンコンバータ外観 (写真はアップコンバータ)

図 15 に RF コンバータのアップダウン折返しでの EVM 測定結果を示す。本来 RF コンバータの EVM 性能はアップダウンそれぞれ単体で評価すべきだが、IEEE802.15.3c/11ad 規格の広帯域変調信号を、評価可能な測定器を用意することは一般に困難であるため、60GHz 帯での EVM を直接測定することは難しい。このためアップダウンコンバータのセットで EVM 性能を評価している。

結果としては、EVM は 4.1% ~ 7.4% であった。これは実験により、60GHz コンバータの評価対象となるシステム、もしくはデバイスが EVM20% 程度でも通信可能であったため、デバイスシミュレータとして十分運用可能な値が得られたといえる。



(a) RF アップコンバータ



(b) RF ダウンコンバータ

図 14 RF コンバータのブロックダイアグラム



表6 RF アップコンバータの主要性能

項目	主要性能
入力周波数および帯域幅	14.08GHz ± 1.08GHz
出力周波数	CH1 : 58.32GHz ± 1.08GHz
	CH2 : 60.48GHz ± 1.08GHz
	CH3 : 62.64GHz ± 1.08GHz
	CH4 : 64.80GHz ± 1.08GHz
P1dB	+7dBm 以上
スプリアスレベル	-30dBc 以下
EVM	15% 以下
電源	AC100V ± 10% 50/60Hz
消費電力	30VA 以下
アンテナ利得	15dBi 以上
外形寸法 W × H × D	210 × 88 × 280mm

表7 RF ダウンコンバータの主要性能

項目	主要性能
入力周波数および帯域幅	CH1 : 58.32GHz ± 1.08GHz
	CH2 : 60.48GHz ± 1.08GHz
	CH3 : 62.64GHz ± 1.08GHz
	CH4 : 64.80GHz ± 1.08GHz
出力周波数	14.08GHz ± 1.08GHz
小信号利得	20dB 以上
スプリアスレベル	-30dBc 以下
EVM	15% 以下
電源	AC100V ± 10% 50/60Hz
消費電力	30VA 以下
アンテナ利得	15dBi 以上
外形寸法 W × H × D	210 × 88 × 280mm

## 4.2 60GHz 広帯域導波管ミキサ

前述の 60GHz コンバータは、導波管型ミキサを採用していることは既に述べた。しかしながら、これらは高価な部品であり、今後本装置を普及させるには、低コスト化が必須となる。そこで低コスト化実現への取組みとして、60GHz 帯広帯域導波管ミキサを製作した。

図16に試作品の外観を示す。外形寸法は、26.4mm × 30mm × 38.2mm となり、RF ポートは WR15、LO ポートは WR19 の導波管とした。IF ポートは同軸 (SMA) とした。ミキサの方式は、発生するスプリアスを考慮し、基本波ミキサを採用した。回路方式は、不要波の抑圧効果を考慮し、シングルバランス型とした。この時の主要性能は表8に示す通りとなっている。課題としては、組み立て性の改善や、信頼性評価等が挙げられる。

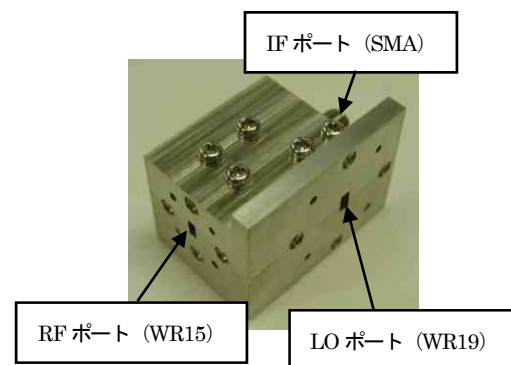


図16 60GHz 帯広帯域導波管型ミキサ (試作品)

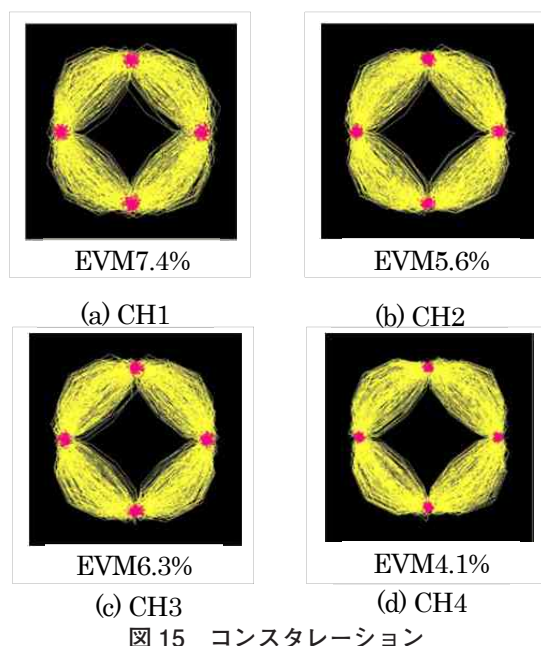


表8 60GHz 帯広帯域導波管型ミキサの主要性能

項目	主要性能
周波数	RF : 57.22 ~ 65.9GHz
	LO : 44.24 ~ 50.72GHz
	IF : 12.98 ~ 15.18GHz
変換損失	14dB 以下
チャンネル内振幅偏差	4dB 以下
LO 入力電力	+10dBm 以上
RF インターフェース	WR15
LO インターフェース	WR19
IF インターフェース	SMA ( f )

## 5. むすび

本稿では、当社におけるミリ波帯、及び準ミリ波帯技術への取組みとして、近年開発した製品を周波数帯毎に紹介した。また、その製品への適用技術の一部である、低損失立体回路技術や、アンテナ設計技術等を紹介した。

ミリ波帯は現在、近距離大容量無線通信の分野で特に注目されており、さらに普及が加速されていく。今後は、これまで培ってきた基盤技術を活用し(又は拡張させ)、より高性能かつ低コストのミリ波帯製品の普及に貢献していきたい。

## 6. 参考文献

- [1] 横敏夫, “創立 60 周年記念特集 当社における無線通信技術の変遷”, 島田理化技報, No.18, pp.11-19(2006)
- [2] 高橋勲, 小杉正則, 若菱忠高, 森智之, 市川就啓, “通信用ミリ波フロントエンドモジュール”, 島田理化技報, No.16, pp.22-27(2005)
- [3] 内山文彦, 高橋勲, 鈴江秀規, 市川就啓 “準ミリ波・ミリ波モジュール”, 島田理化技報, No.13, pp.11-14(2003)
- [4] 四分一浩二, 鈴木哲也, 田中稔博, 森智之 “50GHz デジタル無線伝送装置”, 島田理化技報, No.16, pp.32-36(2005)
- [5] 黒沢肇, “FWA 用 25GHz 帯 RF フロントエンドモジュール”, 島田理化技報, No.17, pp.9-15(2006)
- [6] 笠原康司, 秋元昭, 若菱忠高, 吉野浩輔, “Ka バンド VSAT トランスミッター”, 島田理化技報, No.14(2002)
- [7] 拮石真一郎, 生駒俊治, 田添晃, 松永和之, “Ka 帯衛星通信地球局アップコンバーター, ダウンコンバーター”, 島田理化技報, No.18, pp.54-58 (2006)
- [8] 柴垣信彦, “IEEE802.15.3c 対応を目指した 60GHz 帯ミリ波 RF 回路及びモジュール技術—60GHz 帯広帯域無線システム—”, 信学会技報, (2009)
- [9] 柴垣信彦, “IEEE802.15.3c 対応ハードウェアの設計 — RF-CMOS 設計とモジュール評価技術 —”, MWE2009

## 筆者紹介

生産本部  
電子システム  
技術部



日下 洋

生産本部  
電子システム  
技術部



鈴江 秀規

生産本部  
電子システム  
技術部



森 智之

〈特集論文〉

# 加速器用 S バンド大電力ダミーロード

## S-band High Power Dummy Load for Accelerator

三神 幸治  
Koji MIKAMI

湊 大樹  
Daiju MINATO

萩原 栄治  
Eiji HAGIHARA

浅利 哲  
Satoshi ASARI

当社は創業以来 70 年間、基幹事業として取り組んできたマイクロ波帯、ミリ波帯における導波路、能動素子、受動素子のノウハウを活かし、研究用・高エネルギー X 線発生用加速器や人工衛星、そして通信機器に組み込まれる各種コンポーネントの事業化を図ってきた。

なかでも加速器などに組み込まれる高電力コンポーネント<sup>[1][2]</sup>は、市場から高い評価を得ており、さらなる要求に応えるべく新製品開発を行ったので報告する。

### 1. ダミーロードの開発目的

加速器に使用される定在波型加速管は、高い Q 値をもった共振器であり、大きな時定数をもっている。したがって高電力が印加された最初の数マイクロ秒間は大きな反射波が発生する。ダミーロードはこの反射波を熱に変換することで、電力源であるクライストロンを保護する目的で用いられている。

ウォーターロードと呼ばれる誘電体（セラミックスまたは樹脂製）で仕切られた水槽内に循環させた水にマイクロ波を吸収させる方式では、誘電体が破損した場合、導波管回路内に水が侵入し高額な加速管やクライストロンを破壊する問題があった。

今回、導波管回路内に水が浸入しないよう冷却系を導波管の外側に設けた間接冷却型のダミーロード（以下、ドライロード）の開発を行った。

今回開発を行ったドライロードの主要性能を表 1 に、外観図を図 1 に示す。なお、本ドライロードには負荷側からの反射電力を測定することができるモニタ機能を有している。+90dBm 以上の高電力で使用されるため結合度は、60dB と十分な疎結合の設定とした。



図 1 ドライロード外観

### 2. ドライロードの設計

#### 2.1 吸収体素材の選定

マイクロ波における電力の吸収方法は抵抗体によるジュール熱を用いる方法と、セラミックスなどによる誘電損失を利用するものがある。

当社で誘電損失を利用した高電力ダミーロードの実績が多数あるため、こちらを採用した。

電波吸収体は、幅広く使用されている炭化ケイ素（以下、SiC）を採用した。

SiC は高温域（1,000℃ 以上）での機械的強度の低下が少なく、常温での熱伝導率がセラミックスであるアルミナよりも良く、金属であるアルミニウムに準ずる値を有し、400℃ においてもステンレス鋼（SUS）と同等の熱伝導率を有する素材である。

誘電正接の数値に関しては、他セラミックス材が  $\times 10^{-4} \sim 10^{-3}$  であるのに対し、SiC は  $\times 10^{-1}$  であるためマイクロ波をよく吸収する性質といえる。

表 1 ドライロード主要性能

項目	主要性能
質量	4.5kg 以下
導波管サイズ	WR284
周波数	2,851 ~ 3,008MHz
平均電力	5kW
ピーク電力	8MW
パルス幅	5 $\mu$ s
反射減衰量	30dB 以上 2,851 ~ 3,008MHz 15dB 以上 5,712.5MHz
外形寸法	320 × 83 × 54mm
SF6 加圧量	最大 0.32MPa
冷却水流量	11.4 $\ell$ /min
モニタ結合量	60dB $\pm$ 1dB



また結晶構造の違いにより  $\alpha$  型と  $\beta$  型が存在し、 $\alpha$  型は粒径が粗く数  $\mu\text{m}$  であるのに対し、 $\beta$  型は  $0.1\ \mu\text{m}$  以下の微粉末である。原材料価格に関しては  $\alpha$  型が安く、 $\beta$  型に比べ  $1/10 \sim 1/100$  である。本開発では量産性が優れていること、運用条件に  $\text{SF}_6$  ガス雰囲気中での使用があることから  $\alpha$  型の SiC を用いることとした。

ドライロードでは電力を吸収体に効率よく吸収させることが重要となる。誘電損失による単位体積当たりの損失電力  $P\ [\text{W}]$  は、式 (1) に表される。

$$P = \frac{1}{2} \omega \varepsilon \tan \delta E_0^2 \quad (1)$$

ここに  $\omega$  : 角周波数       $\varepsilon$  : 比誘電率  
 $\tan \delta$  : 誘電正接       $E_0$  : 電界強度

上式からドライロード電気特性は、吸収体として用いる SiC の比誘電率と誘電正接に大きく依存することがわかる。したがって使用する周波数帯におけるそれらの数値を温度特性も含め正確に把握することがドライロードの設計において重要である。

## 2.2 吸収体の選定

今回採用した  $\alpha$  型 SiC は、必ずしも電波吸収体を目的とした製品ではないためその比誘電率は公表されていない。そのため SiC のサンプルを 5 社から調達し、測定を行った。

比誘電率、誘電正接の値は、ネットワークアナライザを使用し、同軸管を用いた S パラメータ透過法にて測定した。同軸管法による測定には、以下の利点がある。

- ①  $\tan \delta > 0.01$  以上の材質の測定に適している。
- ② 測定周波数が広帯域に測定可能。
- ③ 測定用サンプルが小型。

他方、ドーナツ状に加工した測定用サンプルと同軸管とに隙間があると、測定誤差が大きくなる欠点がある。表 2 に各メーカーサンプルの 3GHz における比誘電率と誘電正接の値を示す。サンプル数は各メーカー 2pc とした。

事前の検討では、比誘電率  $10 \sim 16$ 、誘電正接  $0.2 \sim 0.4$  を想定していたこと、加えて入手性とコストを考慮し B 社の SiC を採用した。

表 2 各メーカーの比誘電率、誘電正接測定結果

メーカー	比誘電率	誘電正接
	3GHz	3GHz
A 社	10.8	0.18
B 社	12.8	0.42
C 社	10.5	0.23
D 社	29.0	0.64
E 社	15.1	0.17

## 2.3 発熱分布・電界強度を考慮した最適化設計

高電力機器の設計で重要なポイントは温度上昇と放電であり、放電は温度に相関を持っている。ドライロードの詳細設計を進めるうえで重要な点は以下となる。

- ① 局所的な高電界を発生させないこと。
- ② 吸収体の局所発熱を防ぐ（均一発熱させる）ため単位体積当たりの発熱量の最大値を抑えること。
- ③ 反射減衰量が良好なこと。  
(30dB 以上目標)
- ④ 量産性を考慮し、吸収体はシンプルな形状であること。
- ⑤ 量産性を考慮し、吸収体の固定は接着剤を用いること。

誘電損失を利用した吸収体の場合、厚みを持たせることで、反射減衰量が良好となる。一方、厚みを持たせると、単位体積当たりの発熱量の最大値が増え局所発熱につながる傾向となる。そのため厚みを抑えた吸収体で良好な反射減衰量を確保するために、矩形導波管口径の  $b$  寸法（高さ寸法）を短くすることで良好な特性を実現した。

最終的な吸収体形状は、反射減衰量と単位体積当たりの発熱量の最大値とを電磁界シミュレータにて確認し決定した。

図 2 に反射減衰量、図 3 に RF モニタ結合度の電磁界シミュレーション結果を示す。

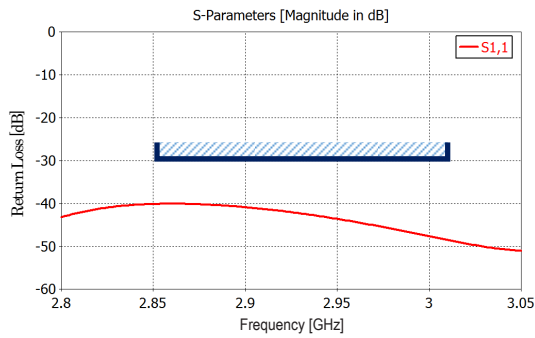


図 2 反射減衰量計算結果

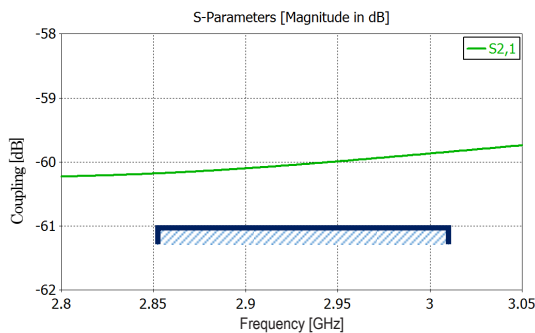


図 3 RF モニタ結合度計算結果

図 4 に示す平均電力 5kW 入力時の発熱分布より、平均電力 5kW (2,856MHz) 入力時の単位体積当たりの発熱量は、 $0.285\text{W}/\text{mm}^3$  であった。

図 4 に示す単位体積の発熱量の計算結果から吸収体および製品形状の発熱温度を計算した。温度計算は熱流体解析用シミュレータを用い、条件を冷却水温度  $42^\circ\text{C}$ 、流量  $11.4\text{ l/min}$  とし計算を実施した。発熱温度分布の計算結果を図 5 に、図 6 にドライロードの断面図を示す。

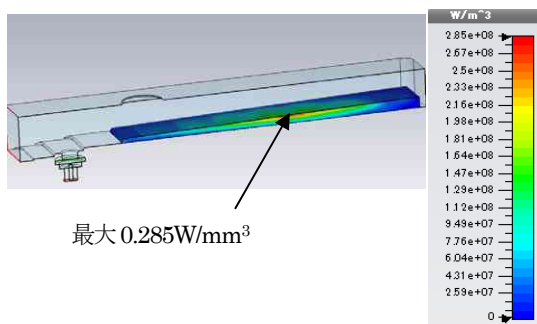


図 4 発熱分布 (2,856MHz 平均電力 5kW)

計算の結果、吸収体が  $154^\circ\text{C}$ 、接着部が  $144^\circ\text{C}$ 、導波管表面の最高温度は  $78^\circ\text{C}$ 、N 型コネクタ周辺温度は  $60^\circ\text{C}$  以下となった。

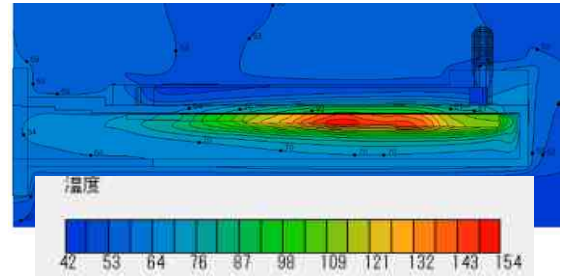


図 5 ドライロード発熱温度分布断面図 (2,856MHz 平均電力 5kW)

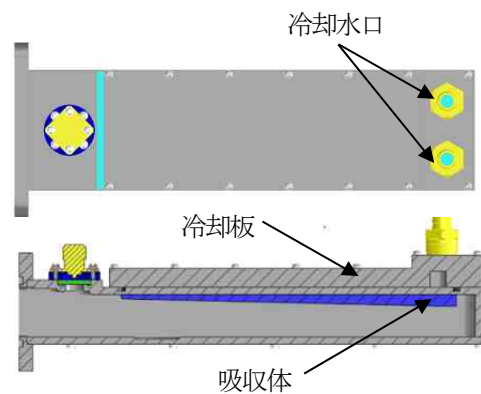


図 6 ドライロード断面図

### 3. 開発器での評価

#### 3.1 RF 性能測定結果

今回採用した SiC 製吸収体は量産性を考慮し、焼成後の表面研磨を行わないものを使用した。

図 7 に開発器 3 台の反射減衰量の測定値を示す。測定値はバラツキの少ない結果となった。

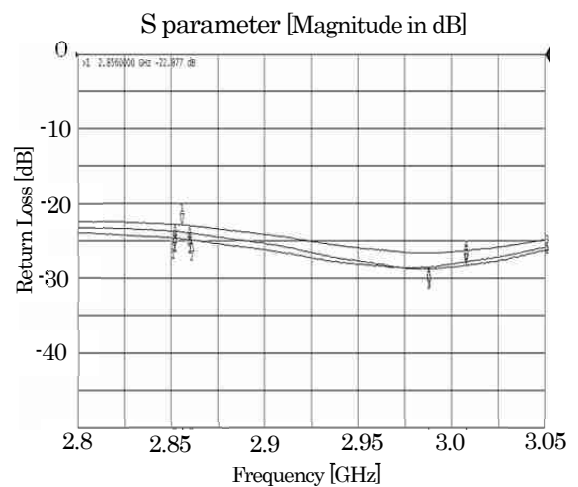


図 7 反射減衰量測定値

表3に反射減衰量とRF モニタ結合度の測定値を示す。

表3 初期RF性能測定値 (3台)

項目	主要性能	測定値 [dB]
反射減衰量	30dB 以上 2,851 ~ 3,008MHz	24.6
		23.7
		22.8
RF モニタ 結合度	60dB $\pm$ 1dB 2,851 ~ 2,861MHz	59.8
		59.4
		59.8

反射減衰量は設計値 40dB に対し、測定値 22 ~ 28dB 程度となり電磁界解析と異なる結果となった。反射減衰量の劣化の要因としては以下のばらつきが考えられる。

- ①吸収体形状
- ②吸収体表面の体積抵抗率
- ③比誘電率、誘電正接の測定誤差

①に対しては吸収体形状が反るなどして、本体ケースと吸収体間に隙間が生じRF性能を劣化させる。本試作器に用いた吸収体の平坦度を測定した結果、焼成後研磨なしにもかかわらず、0.17mm とRF性能には影響しない良好な結果であった。

②に対しては吸収体表面の研磨条件によって体積抵抗率に差が生じることが分かっている。体積抵抗率の変化でRF性能の変化が考えられるため、本試作器に用いたSiCの表面を研磨なしからブラスト処理に変更し、体積抵抗率を測定したところ、処理前後で $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  から  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  に変化した。しかし、ブラスト処理を施した吸収体を用いても反射減衰量に変化がないことが確認できた。

以上から、本試作器の反射減衰量の劣化は③の吸収体の比誘電率、誘電正接が設計時の値と異なっていたことが原因と考えられる。本試作器では吸収体の厚みを変更し電気調整用の整合素子を追加することで所望の特性を満足した。結果を表4に示す。

比誘電率、誘電正接の値が安定した吸収体の調達が今後の課題である。

表4 RF最終性能測定値 (3台)

項目	主要性能	測定値 [dB]
反射減衰量	30dB 以上 2,851 ~ 3,008MHz	33.6
		32.7
		33.9
RF モニタ 結合度	60dB $\pm$ 1dB 2,851 ~ 2,861MHz	59.8
		59.5
		59.7

### 3.2 平均電力試験による熱設計検証

平均電力 5kW をドライロードで吸収させた時の各部位の発熱温度の測定を行った。試験設備の制約から、信号源の発振周波数は帯域外である 2,450MHz にて行い、導波管内は常圧の空気、冷却水温は 25℃、流量は 10.5  $\ell$  /min の条件にて試験を実施した。

電力試験の系統図を図8に示す。双方向結合器を用いて入力電力と反射電力とをモニタして吸収電力を算出した。

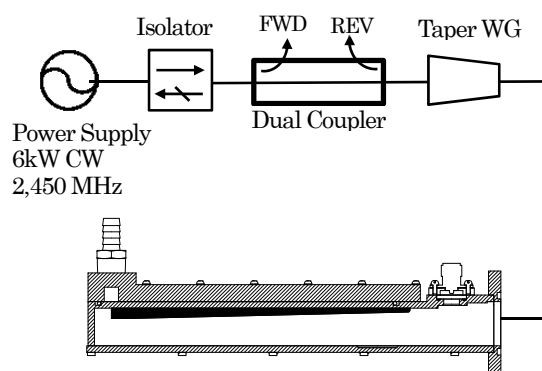


図8 電力試験系統図

温度測定箇所は導波管側面、モニタ用N型コネクタ付近、導波管下面の3点とした。

平均5kWの電力を吸収させた結果、ケース温度の最高部は66.8℃となった。その他の測定箇所の温度は60℃以下であった。

表5に各測定部位吸収電力ごとの発熱温度を示す。



表 5 吸収電力ごとの発熱温度

吸収電力 [kW]	温度 [°C]		
	ケース側面	ケース底面	コネクタ近傍
1.0	34.8	35.4	36.5
2.0	44.7	39.6	42.6
2.8	51.5	46.6	46.3
3.3	55.9	49.8	49.6
4.3	61.7	53.7	53.7
5.0	66.8	57.2	57.4

本電力試験は、入力信号の周波数が 2,450MHz であることから図 5 の計算結果と単純に比較はできないものの、5kW の RF 信号を吸収させた時のケースの大まかな発熱温度を知ることができ、内部目視においても SiC を固定する接着剤に異常は見られなかった。

ただし本試験の冷却水温度は 25℃ であるのに対し実運用状態では 40℃ であるので、表 5 における各種温度が 15℃ 程度上昇するものと考えられるが、それを考慮しても電力印加時のドライロード表面温度は、問題ない結果となった。

### 3.3 ピーク電力試験結果

ピーク電力試験を行うにあたり、ドライロードへの入力位相を全位相可変させても問題ないことを確認すべく図 9 に示す試験構成とした。

SF6 ガスによる加圧量は 0.25MPa、冷却水の温度は 25℃、流量は 11.4 ℓ /min の条件にて試験を行った。

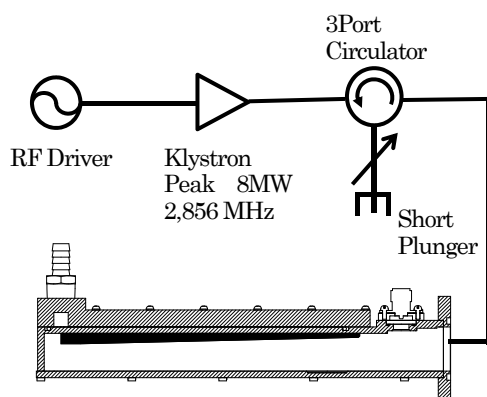


図 9 ピーク電力試験系統図

ピーク電力 8MW、平均電力 5.5kW 印加し、ショートプランジャで位相を 360° 変化させても放電は起こらなかった。

試験後、ドライロード内部を目視で確認した結果、放電痕や SiC の溶融等の異常は見られなかった。

## 4. むすび

今回冷却系を導波管の外側に設けた間接冷却型の S 帯ドライロードの開発を行い、RF 性能の確認、ピーク電力試験、製品の発熱温度の測定を行い、5kW 印加時に問題ない結果を得た。

他方、本試作器において最終的に反射減衰量 30dB 以上確保ができたが、使用した SiC の比誘電率と誘電正接は参考文献 [3] に見られるように単一ロットでのばらつきと製造ロット毎のばらつきが原因とみられる反射減衰量の劣化が認められた。

これら吸収体の比誘電率と誘電正接のばらつきは、ドライロードにおける RF 性能の劣化に直結するため、

- ① SiC 物性値のばらつきを抑えること。
- ② SiC 物性値がばらついても、安定した RF 性能が確保できる吸収体形状の最適化。

を実施し、安定した RF 性能を実現することが今後の課題である。

## 5. 参考文献

- [1] 萩原 栄治, 森 智之, 浅利 哲, 四分一 浩二 “社会に貢献する電子・通信機器”, 島田理化技報 No.25, pp14-20, 2016
- [2] 森 智之, 細田 裕一, 島貫 昌喜, 伊藤 久人 “当社のマイクロ波ロータリージョイント”, 島田理化技報 No.18, pp35-43, 2006
- [3] H. Matsumoto et al., “Experience on the High-Power SiC Microwave Dummy load Using SiC Absorber”, Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, PAC99, New York, 1999

## 筆者紹介

生産本部  
電子システム  
技術部

**三神 幸治**



生産本部  
電子システム  
技術部

**湊 大樹**



生産本部  
電子システム  
技術部

**萩原 栄治**



生産本部  
電子システム  
技術部

**浅利 哲**



〈特集論文〉

# 省エネルギー社会に向けた IH 製品の標準化取組み

Standardization for IH Products for Energy Saving Society

谷口 直純  
Naozumi TANIGUCHI

## 1. まえがき

バブル崩壊以後、設備投資に対して慎重な状況が続いてきたが、2年後に控えた東京オリンピック・パラリンピックに向けて、インフラ整備の中心を担う建設業を筆頭に、2017年度からは好況感が続いている。

また、輸出関連が好調で、製造業の設備投資は堅調に上昇している。自動車や半導体などの電子部品の生産能力増強や、人手不足を背景に、工場の自動化システム向けに、生産機械関連などの省力化投資も拡大している。2017年度の設備投資に関する企業の意識調査では、60%以上の企業が設備投資を計画していると答えていたが、この好況感は2018年度も続いている。

このような市況のなかで、誘導加熱（IH：Induction Heating）を取巻く環境は、上向き傾向への期待感もあり、当社では、今まで培ってきた技術を活かし、クリーンな作業環境の実現に向けて、新たな技術開発に取り組んでいる。

## 2. 省エネルギー社会への取組み

1973年と1979年のオイルショックを契機に省エネ法が施行され、国全体での取組みは世界でもトップクラスと言われているが、さらなる省エネ対策として、法改正などの整備も進んでいる。

工場や事業所でのエネルギーの使用状況をみると、ユーティリティー関連の設備が全体の35%で、残りの65%が製造設備となっており、その内訳としては、燃烧炉や電気炉などの工業炉関連の占める割合が多くなっている。

そのようななかで、IHは、金属を自己発熱させる加熱方式で、最近では家庭用の電磁調理器や炊飯器など、身近なところで使われるようになった。図1に示すように、被加熱物の周りに加熱コイルを巻き、この加熱コイルに交流電流を流すと、被加熱物

の表面から加熱される。これは、高周波電流によってできる高周波磁束が被加熱物を貫通して密度の高いうず電流を誘導し、ジュール熱（導体の電気抵抗による発熱）によって、被加熱物の表面が加熱される。このようにIHは、一般的な周辺の空気や媒体を発熱させ、その熱で間接的に加熱する方式とは違い、エネルギー効率が良く、環境にもやさしい熱源となっている。

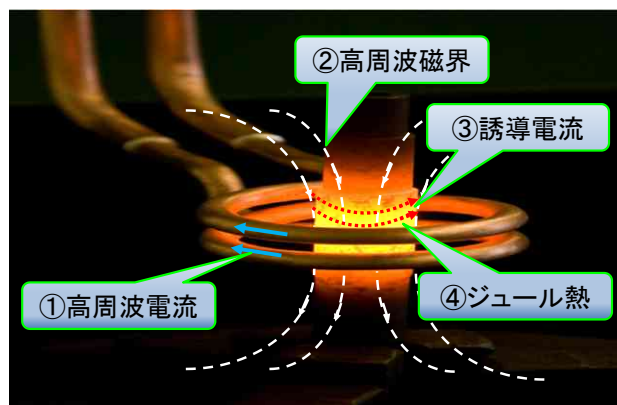


図1 IHの原理

当社のIH製品は、家庭用のIHと原理は全く同じであるが、工業用の設備として大型化しており、主に産業用設備として多く使われている。製品ラインナップとしては、電源出力で数kWからMWクラス、周波数で1kHzから400kHzと、出力と周波数ともに幅広い製品を取り揃えている。

熱処理技術としては、焼入れ、焼戻し、ろう付け、焼嵌め、焼鈍、溶解、鍛造、シールなど従来から一般的に使われている用途の他に、炉からIHへ熱源変更することによる省エネ・省力化や、急速加熱を得意とするIHと、均一加熱を得意とする炉を併用するハイブリッド方式など、IH以外の熱源との組み合わせによる高効率化も実現している。



工場の省エネで低炭素化を図ります

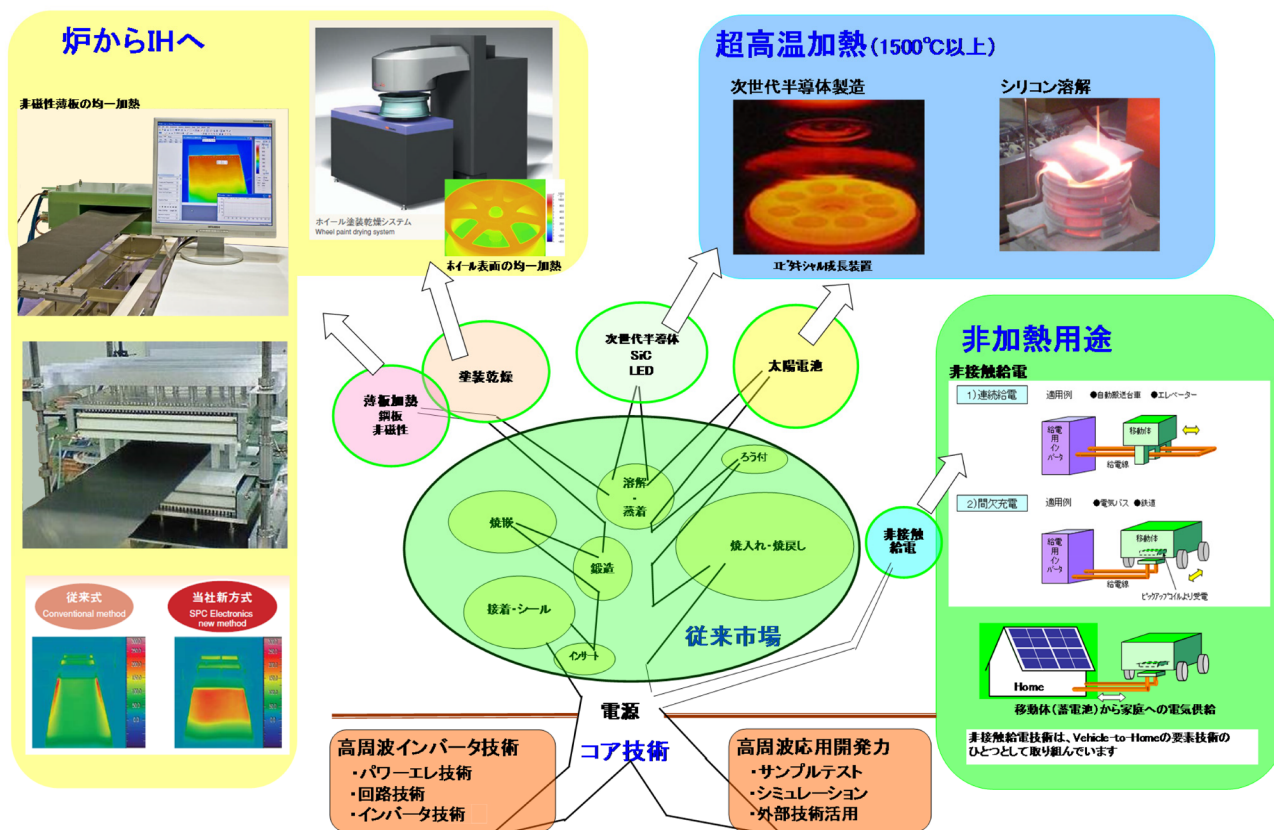


図2 省エネ・低炭素社会への取り組み

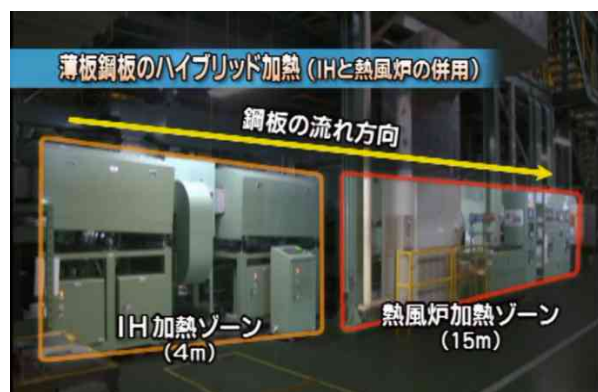


図3 炉とIHのハイブリッド加熱

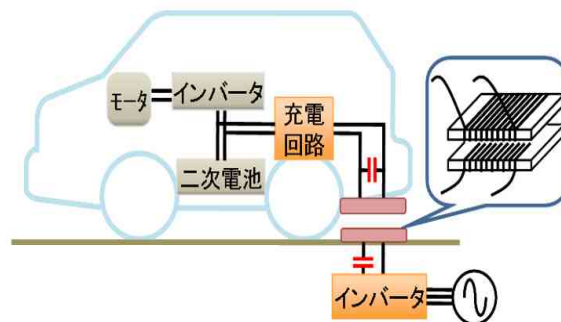


図4 自動車の非接触給電方式

特に薄板加熱用途では、磁性・非磁性の材料に関わらず、トランスバース型加熱コイルや、その応用である当社開発のMV型加熱コイルなどにより、均一加熱が難しいと言われていた、加熱分野でも使われるようになった。(図3)

また、次世代半導体製造用や溶解用に1550℃以上で使われる超高温加熱(図2)や、非加熱用途として、電気自動車へ非接触で給電する(図4)という、将来に向けた新しい用途開発へも積極的に取り組んでいる。

### 3. 製品の標準化への取り組み

お客様のご要望にお答えするため、当社は多くの機種を製品として作り続けてきた。真空管式に始まり、現在のIGBTやFETをインバータ素子とした最新のトランジスタ式に到るまで、16種類のIH電源を、国内はもとより東南アジアを中心に、広く海外へも販売してきた。また、インバータ素子に、低損失半導体として期待が高まっているSiCを使った、最新モデルの開発が2018年3月に完了し、省エネルギー化を促進した、加熱効率が良くエネル

ギーロスの少ない電源として、市場へ送り出した。

この特集では、多くの機種を手がけてきた経験と技術を活かした新たな取り組みとして、並列共振方式と直列共振方式の IH 電源共通化や、加熱コイル一体型 IH 電源 WAVE COOKER(商標登録申請中)(図 5)を紹介する。



図 5 新製品 WAVE COOKER

まず、共通化への取り組みとして、2017 年度に開発が完了した並列共振方式電源と、従来技術の直列共振方式電源を、SiC/IGBT 直列・並列共振インバータとして、新しい制御技術で融合させ、低出力から高出力、低周波から高周波まで、さまざまな用途に対応でき、使い勝手の良さにもこだわった製品となっている。また、環境へのさらなる取り組みも行っており、高効率、省エネルギー、省スペース化を推進し、インバータ効率 98% 以上、当社比で、冷却水量 50% 削減、容積 25% 削減を実現し、CO<sub>2</sub> の排出量を抑えている。

次に、加熱コイル一体型 IH 電源に関しては、IH 電源と加熱コイルの接続ケーブルを不要にすることで配線が簡略化され、コンパクトな構造となっている。用途としては、平面加熱に適しており、CFRP など板材の加熱から、食品加工用鍋の加熱など、幅広い分野での使用が見込まれる。

#### 4. むすび

地球温暖化により、過去 100 年間で約 0.74℃ も平均気温が上昇したと言われている。最近のニュース番組では、『命を守る行動を』というコメントをよく耳にするようになったが、異常気象による災害なども頻繁に発生するようになった。

環境というキーワードで考えると、工場で行われている加熱設備の省エネ対策は喫緊の課題である。

そのようななかで IH 製品は、必要な部分だけを局所加熱することができ、自己発熱により効率が良く、エネルギーロスの少ない、無駄な電気を使わない熱源と言え、工業加熱分野で期待できるものである。当社は、1946 年の創業以来、70 年以上の歴史に裏付けられた技術力を活かし、さらなる高効率な製品の開発に取り組み、これからも省エネルギー社会に貢献していく。

#### 5. 参考文献

- [1] 経済産業省，資源エネルギー庁，時代に合わせて変わっていく「省エネ法」，2018.8.6
- [2] フリー百科事典ウィキペディア，地球温暖化，2018.10
- [3] 省エネルギーセンター，産業分野における今後の省エネルギー推進の方向性，2014.7
- [4] 帝国データバンク，2018 年度の設備投資に関する企業の意識調査，2018.5

#### 筆者紹介

事業本部  
産業 IH 営業部

谷口 直純



〈特集論文〉

# 業務用 IH 調理器 [WAVE COOKER]

## Induction Cooker for Business Use [WAVE COOKER]

巽 敏之      北村 優典      松原 佑輔      田内 良男      石間 勉  
 Toshiyuki TATSUMI    Masanori KITAMURA    Yusuke MATSUBARA    Yoshio TANAI    Tsutomu ISHIMA

IH 調理器は、家庭では既に普及しているが、食品製造工場の量産ラインへの導入が検討されている。その主な理由は、作業員（調理人）をガス火から開放することにより、クリーンで快適な作業環境を目指すものである。量産ラインでは、生産性の向上から、食品鍋を連続搬送しながら加熱調理する要求があるが、従来の IH 調理器は、食品鍋を連続搬送して加熱調理した場合、食品鍋の均一な加熱温度分布が得られない問題があった。本稿では、当社が開発した連続搬送による均一加熱が可能な業務用 IH 調理器について紹介する。

### 1. まえがき

IH 調理器は、従来より工業加熱用として利用されてきた誘導加熱 (IH: Induction Heating) を応用したものである。誘導加熱とは、加熱コイル近くに置かれた金属体に誘起された渦電流、およびヒステリシス損を利用して被加熱物を直接発熱させる加熱方法である。IH 調理器は、ガス火のような間接加熱と比較し、①火を使用しないため安全かつクリーン、②加熱面がトッププレート（耐熱強化ガラス）のため清掃が容易、③輻射熱が少ない、④食品鍋の加熱温度調整が容易、などの特長があり、厨房環境の改善策として、期待されている。

業務用 IH 調理器は、家庭用の出力クラスでは火力が弱く、高出力のものが要求される。食品製造工場での生産性の向上から、食品鍋を連続搬送しながら加熱調理する要求があるが、従来の IH 調理器は連続搬送しても均一な加熱温度分布が得られないという大きな課題があった。

本稿では、従来の IH 調理器では実現できなかった連続搬送可能な業務用 IH 調理器を開発、製品化したので紹介する。

### 2. 構成

図 1 に開発した業務用 IH 調理器（以下 WAVE COOKER [商標登録申請中]）の外観（意匠登録第 1620440 号）を示す。構成は大きく分類すると上側の加熱コイル部と下側の高周波電源部からなる。外観寸法は、上側の加熱コイル部が W900 × H70 × D640mm と広く、下側の高周波電源部が W600 × H180 × D400mm とコンパクトになっている。筐体は、ステンレス材を使用している。

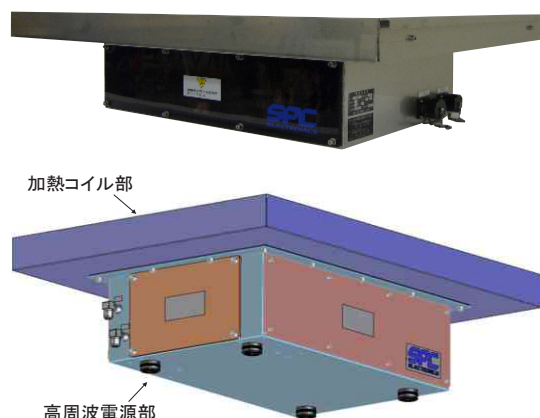


図 1 WAVE COOKER 外観図

図 2 に食品鍋の搬送概略図を示す。WAVE COOKER の加熱コイル部上に、食品鍋を 5mm から 10mm 浮かせて連続搬送させることにより、均一加熱が可能となる。

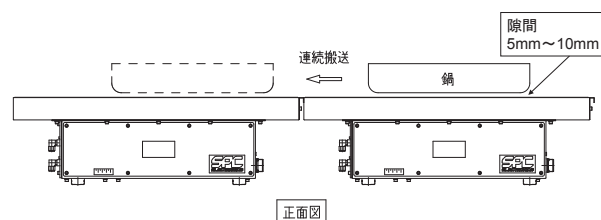


図 2 食品鍋の搬送概略図



図3に食品製造工場の量産ラインへ導入した例を示す。生産ラインに合わせて複数台のWAVE COOKERを搬送方向に並べて設置することが可能である。



図3 食品製造工場の量産ライン導入例

図4にWAVE COOKERの機能ブロック図を示す。電源電圧3φ200Vが主回路に入力される。

主回路は、保護回路の速断ヒューズを経て、AC/DCコンバータにてダイオード整流後、DC/ACインバータで高周波出力に変換される。インバータはフルブリッチ回路で、スイッチング素子は、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を使用している。インバータ出力は出力トランスに接続され、食品鍋の負荷条件に合わせた整合調整をしている。

制御回路は、電源入力より制御用の保護ヒューズを経て、電源トランスにて制御電圧に降圧し、制御基板にてインバータを制御している。

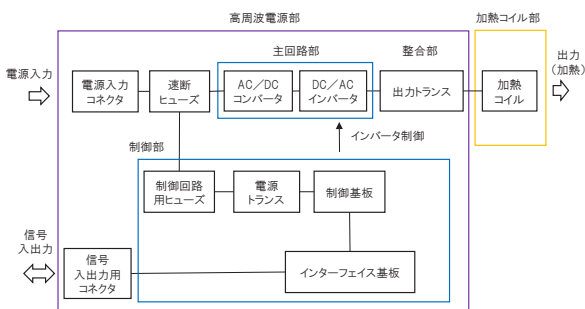


図4 機能ブロック図

図5に出力電力とコイル電流の関係(P-I特性)を示す。P-I特性は、式(1)より求められる。rは、食品鍋負荷の高周波抵抗値であり、定格出力9kWで出力される負荷を定格負荷と呼ぶ。

$$P = I^2 r \quad \cdots (1)$$

図5の点A-B間の負荷特性では、定格出力の9kWで電力リミッタが作動するため、食品鍋とトッププレートとの隙間が変動しても、9kWが出力される。また、定格負荷以上の負荷(過負荷)の場合、過負荷リミッタにより、最大電力は制限される。逆に、定格負荷より抵抗値の小さい負荷を軽負荷と呼び、軽負荷時はコイル電流リミッタにより制限される。

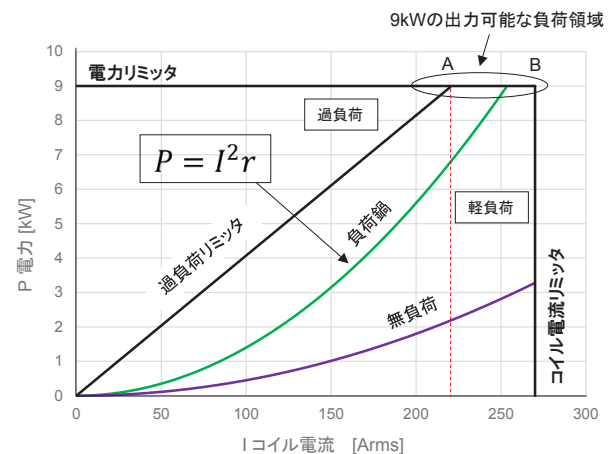


図5 P-I特性

図6に主回路外観図を示す。主回路部をワンボード化することにより、一体化構造が可能となり、小型・省スペースを実現した。また、加熱コイル内部はシールド板を設置し、誘導加熱による筐体の不要な発熱を抑えた。



図6 主回路外観図

### 3. 仕様

表1にWAVE COOKERの主要性能を示す。定格出力は9kWと従来の業務用IH調理器に比べて、大出力である。冷却方式は、水冷方式を採用して密閉構造としている。加熱コイル部上面からの防水性

は、保護等級 5 相当で、トッププレート面の水洗いが可能である。また、電源入力と信号入出力には、防水コネクタを使用した。

表 1 主要性能

項目	主要性能
電源電圧	3 相 200V $\pm$ 10% ,50/60Hz
電源入力	最大 10kVA,30A
定格出力	9kW
出力制御	位相制御方式
発振周波数	約 25kHz
冷却方式	水冷
筐体寸法 W $\times$ H $\times$ D	加熱コイル部 900 $\times$ 70 $\times$ 640mm 高周波電源部 600 $\times$ 180 $\times$ 400mm
防水	保護等級 5 相当
使用環境	温度 15℃ $\sim$ 35℃, 湿度 85%以下
外部信号	加熱 ON/OFF, 電力モニタ出力, ステータス出力等
質量	約 65kg

#### 4. 特長

従来型の IH 調理器は、一般的にパンケーキ型の加熱コイルが採用されている。図 7 に従来型のパンケーキ型加熱コイルの外観と静止加熱時の加熱温度分布を示す。パンケーキ型加熱コイルは、うず巻き型の加熱コイル形状で、加熱温度分布がドーナツ形状となるため、連続搬送で加熱すると、食品鍋が加熱コイルからずれた際に食品鍋の端が過加熱され、均一な加熱温度分布が得られないという問題があった。これを解決するため WAVE COOKER で、以下に示すように、連続搬送が可能な新型 8 の字 (当社呼称) 加熱コイルを採用した。

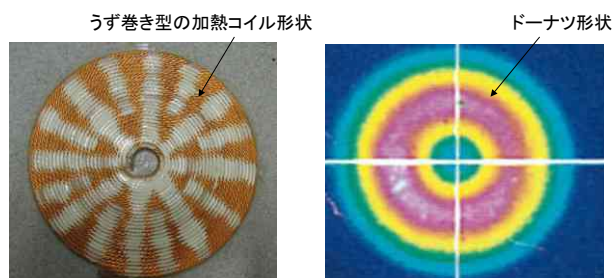


図 7 従来パンケーキ型加熱コイル外観図と加熱温度分布

#### 4.1 新型 8 の字加熱コイル

図 8 に新型 8 の字加熱コイルの外観を示す。数字の 8 の字のような電流経路となることから、当社では、8 の字加熱コイルと呼んでいる。

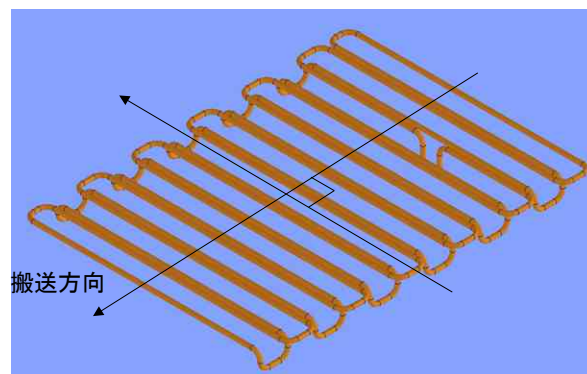


図 8 新型 8 の字加熱コイルの外観図

図 9 に電流経路の概略図を示す。細長い楕円形の加熱コイルが複数並んだ構造となっている。近接する箇所では、電流方向が同じ向きとなり、磁束が強まるため加熱効率が上がる。8 の字加熱コイルは、搬送方向と直交するラインで均一な加熱温度分布が得られるため、食品鍋の連続搬送時に均一な加熱温度分布となる。(特許申請中)<sup>[1]</sup>

近接する箇所で同じ方向に電流が流れる。

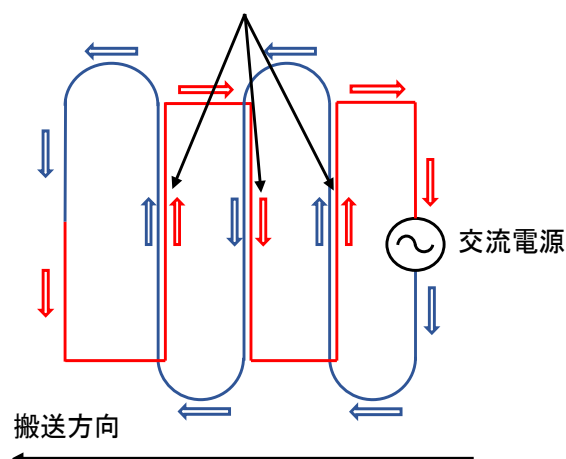


図 9 電流経路概略図

#### 4.2 フェライトコアによる加熱効率の向上

加熱効率向上のため加熱コイル下にフェライトコアを設置している。図 10 にフェライトコアと加熱コイル位置の概略図を示す。フェライトコアを加熱コイル下に設置することにより、磁束の漏れを防ぎ加熱効率を上げることができる。

さらに、フェライトコアの高さを調節することで、加熱温度分布を調整することができる。たとえば、鍋底が変形した鍋を使用する場合、中央部のフェライトコア高さを予め下げしておくことで、食品鍋底中央部の過加熱を防ぐことが可能となる。

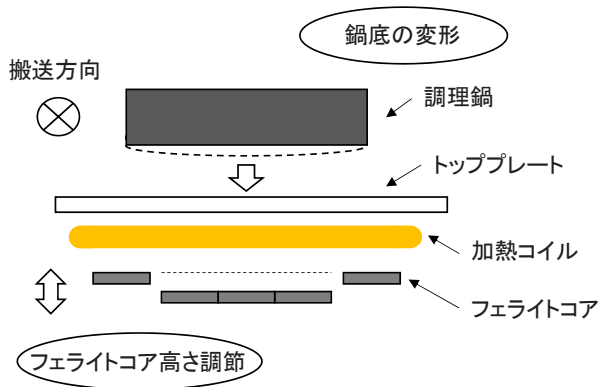


図10 フェライトコアと加熱コイル位置の概略図

4.3 加熱温度分布

新型8の字加熱コイルにて、静止時の加熱温度分布を測定した。加熱した食品鍋底の寸法がφ550mm、材質はステンレス材 (SUS430) である。空の食品鍋を加熱コイル上に静止させた状態で270℃程度に加熱、放射温度計で測定した結果を図11に示す。搬送方向と直角な点A-B間に均一な加熱温度分布が得られていることが分かる。

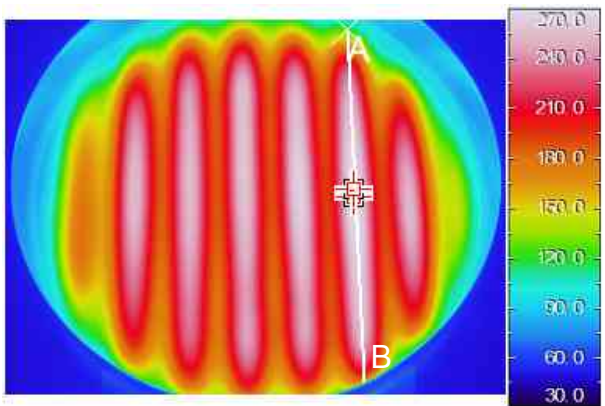


図11 静止時の加熱温度分布

次に、図11の静止鍋を右から左の方向に搬送した場合の加熱温度分布を図12に示す。目標温度は、150℃とした。搬送により、食品鍋底の加熱温度分布は均一化されている。図12内の点A-B間の温度データを図13に、温度測定値を表2に示す。食品鍋の両端は、食品鍋の曲げがあり、加熱コイルとの

距離が離れるため、少し温度が下がるが、最大温度152.0℃に対して、平均温度が147.5℃で、ほぼ均一加熱されている。

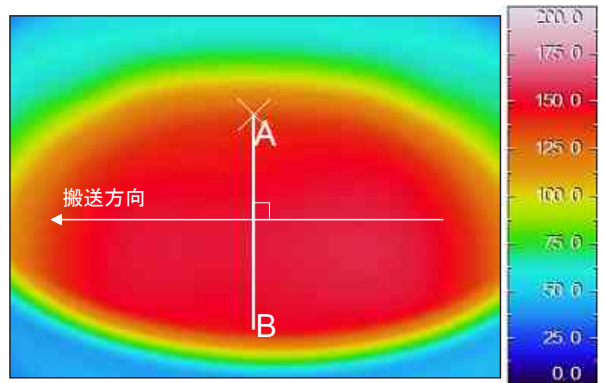


図12 連続搬送時の加熱温度分布

表2 温度測定値

項目	温度 [℃]
最小 (Tmin)	132.9
最大 (Tmax)	152.0
温度差 (ΔT)	19.1
平均	147.5

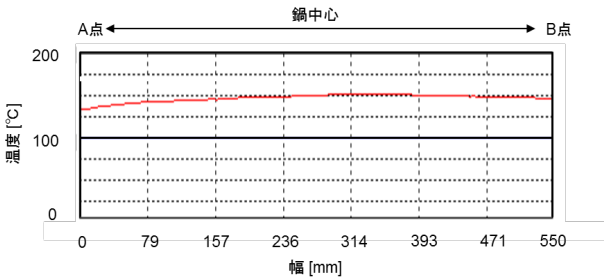


図13 温度データ

5. むすび

本稿では、連続搬送用に開発した業務用IH調理器 (WAVE COOKER) の概要および特長を紹介した。従来のIH調理器では実現できなかった食品鍋の連続搬送による均一加熱を可能とした。業務用の加熱調理に連続搬送が可能なIH調理器を適用することで、食品製造工場の省電力化、効率化、環境改善、調理温度管理など、従来のガス火による調理と比較して格段の改善が期待できる。

また、今後は8の字加熱コイルをIH調理器の用途に限らず、CFRPシート等の薄板加熱などの別の工業加熱分野への展開を検討していく所存である。



## 6. 参考文献

- [1] 特開 2017-174579(P2017-174579) 電磁調理器
- [2] 石間勉, 網倉弘和, 田内良男, 吉田隆司:  
業務用電磁調理器ユニット,  
島田理化技報, NO.8, pp9-17, 1996

## 筆者紹介

生産本部  
産業 IH システム  
技術部

巽 敏之



生産本部  
産業 IH システム  
技術部

北村 優典



生産本部  
産業 IH システム  
技術部

松原 佑輔



生産本部  
産業 IH システム  
技術部

田内 良男



生産本部

石間 勉



〈特集論文〉

# 次世代半導体 SiC を用いた IH インバータの開発の取組み

## IH Inverter Development Using Next Generation Semiconductor SiC

田内 良男  
Yoshio TANAI

次世代パワー半導体と呼ばれる SiC（シリコンカーバイド）を使用した IH（Induction Heating）インバータを製品化したため、当社開発の取組みと新型製品の概要を紹介する。

### 1. まえがき

SiC や GaN（ガリウムナイトライド）など、次世代半導体と呼ばれている素子を応用した製品の開発が世の中を賑わせている。新しい半導体の特長を活かし、次世代の暮らしに貢献する技術が定着し始めている。当社産業 IH 事業においても、主力となる標準電源に SiC を使用した新型インバータを製品化したため、その特長と新たな市場への取組みを紹介する。

### 2. IH インバータの製品化ロードマップ

#### 2.1 インバータ素子について

当社は 1946 年の創業以来、IH 用の高周波電源に対し、真空管に始まり、初期トランジスタの採用を業界に先駆けて取り組むなど積極的に新

技術へ挑戦してきた。その後、サイリスタや SiT（Static Induction Transistor）を経て、現在では IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）や MOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor）を周波数帯に合わせて採用している。<sup>[1]</sup>  
<sup>[2][3]</sup> 表 1 に当社 IH インバータの製品化ロードマップを示す。

今回新たに SiC を使用した新型インバータを製品化し、シリーズ名を SCT シリーズとした。

#### 2.2 出力制御方式について

表 1 に出力制御方式製品化の流れを示す。出力制御方式は大きく 3 つの変遷がある。初期は、直流電圧可変方式であり、直流電圧をスイッチングで可変するチョップ方式もしくは AC 入力電圧を直接整流可変するサイリスタコンバータ方式である。現行機は、インバータ出力電流と電圧の位相を可変する方式で当社にて ECO 型と称し長い間シリーズ化して販売しており、幅広い用途に実績がある。そして今回ラインナップした新型は、インバータ部にて出

電源シリーズ	インバータ (変換)素子	周波数帯	出力制御方式	販売開始 年	年代						備考
					1970 ~1978年	1980	1990	2000	2010	2020	
H	真空管				~1978年						
S	サイリスタ	1~3kHz	直流電圧可変 (サイリスタコンバータ)	1965年	~1980年						
T	バイポーラ	20~30kHz	直流電圧可変 (チョップ式コンバータ)	1977年							
A	FET	200~300kHz	直流電圧可変 (チョップ式コンバータ)	1982年							
SST	SiT	3~200kHz	直流電圧可変 (サイリスタコンバータ)	1986年							
SBT	IGBT	3~30kHz	直流電圧可変 (サイリスタコンバータ)	1992年							
SBT-E	IGBT	3~30kHz	インバータ 位相制御	2000年							
SBT-ES	IGBT	3~30kHz	インバータ 位相制御	2013年							現行機種
SFT	FET	70~300kHz	直流電圧可変 (サイリスタコンバータ)	2000年							現行機種
SFT-E	FET	20~300kHz	インバータ 位相制御	2005年							現行機種
SBT-PW (並列) SBT-SW (直列)	IGBT	3~30kHz	インバータ PWM制御	2018年							★ 新型機種
SCT-PW (並列) SCT-SW (直列)	SiC	30~300kHz	インバータ PWM制御	2019年							★ 新型機種

表 1 IH インバータの製品化ロードマップ

表 2 出力制御方式の比較

出力制御方式	メリット	デメリット
1) 直流電圧 可変方式	①出力周波数が増減しない (共振周波数に追従)	①出力応答速度が遅い ②電源効率が高い (サイリスタコンバータの場合) ③部品点数が多い ④平滑化に電解コンデンサを使用するため定期的な交換が必要
2) インバータ 位相制御方式	①出力応答速度が速い ②電源効率が高い ③部品点数が少ない	①特に低出力指令時、出力可変で周波数が増減する
3) インバータ PWM制御方式	①出力周波数が増減しない (共振周波数に追従) ②出力応答速度が速い ③電源効率が高い ④部品点数が少ない	①SiCを使用する場合、部品が高価 → 30kHz以下はIGBTを使用

力電圧のパルス幅を可変する、いわゆる PWM 制御 (Pulse Width Modulation) 方式を採用した。それぞれの特長を表 2 に示す。新型 PWM 制御方式は、周波数を変化させず、出力応答速度が速いといった、従来の 2 方式のメリットを兼ね備えた方式である。

### 2.3 共振回路方式

IH インバータの出力側は、加熱コイルをインダクタンスとした共振回路を形成しているが、当社は旧来より主に、直列共振回路を採用してきた。今回新たに並列共振回路に接続可能な回路方式を標準電源のラインナップに追加した。その特長を表 3 に示す。

並列共振方式は大電力用途に適している他、IH インバータと加熱コイル間の出力ケーブルを数 10 m 以上に延長できるメリットがある。特に伝送ロスが抑制できる点や、固定フィードを使用しないため

にレイアウト設計が簡易化できる点などユーザーに対しても大いにメリットを提供できる。

なお、直列共振回路方式も今回新たに PWM 制御方式を採用し、特に 100kHz 以上の高周波帯域について対応可能となるラインナップ構成とした。直列共振と並列共振の識別は型名 SCT シリーズの後に並列型は P、直列型は S、PWM 制御の W を付加して区別した。今回、両方式を標準化したことにより、今まで以上に幅広いニーズに対応することが可能となった。

表 3 共振回路方式の比較

共振回路	メリット	デメリット
1) 直列共振方式	①大型のDCリアクトルが不要で、インバータが小型化できる ②電流が正弦波のため高い周波数のインバータに適する	①IHインバータと加熱コイルの距離を離すと、高周波電流による伝送ロスが増加する ②負荷短絡時の過電流保護回路が必要
2) 並列共振方式	①共振コンデンサを加熱コイル近傍に配置することで、IHインバータと加熱コイルの距離を離しても、電流による伝送ロスが小さい ②加熱コイルまでの電力伝送を出力ケーブルを使って簡易化できる	①通常、大型のDCリアクトルが必要で、IHインバータ電源が大型化する →当社方式では大型DCリアクトルは使用しない ②通常、負荷開放時の過電圧抑制回路が必要 →当社方式では負荷開放、短絡時インバータにサージ過電圧は発生しない。



### 3. 新型 IH インバータの概要

前項のロードマップに示すとおり、新型 IH インバータに新たに採用した要素技術は、① SiC 素子の採用 ② PWM 制御方式 ③ 並列共振方式 である。並列共振回路に適用した新型標準電源の概略回路図を図 1 に、今回製作した初号機の外観を図 2 に示す。コンバータ部はダイオード整流、インバータ部は 30kHz までを IGBT、それ以上を SiC で使い分ける。形状の同じモジュールを使用するため、共通のインバータ冷却板が使用でき標準化が図れている。

並列共振回路の場合は出力電圧，直列共振回路の場合は出力電流をフィードバックし、それぞれ定電圧制御と定電流制御を実現している。また、従来型標準電源と新型並列共振電源の比較を表 4 に示す。列盤の組合せで、出力は 1000kW、SiC を使用して周波数は 100 kHz への拡張を計画している。

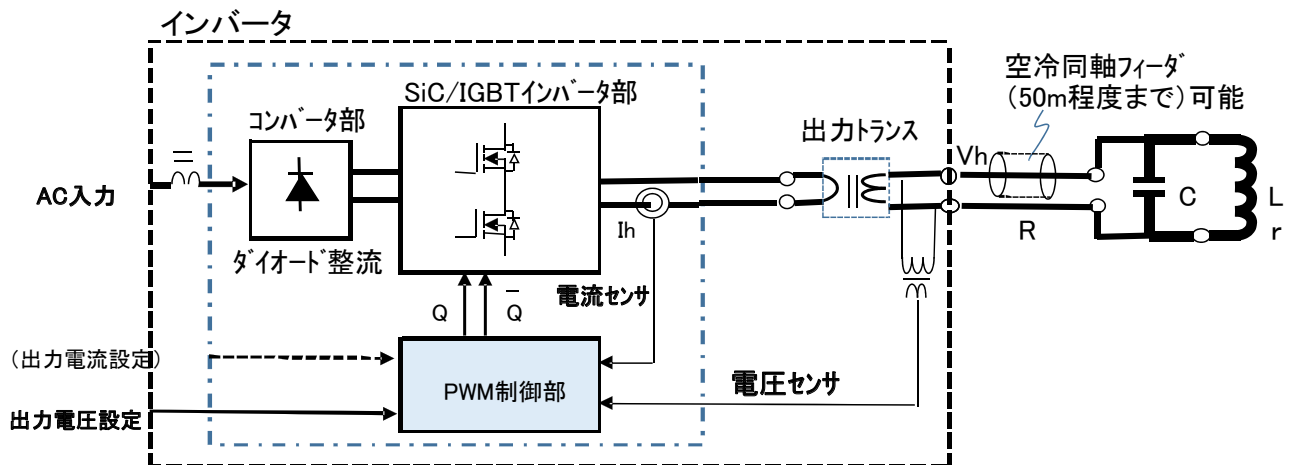


図 1 新型標準電源の概略回路図（並列共振回路）



図 2 新型標準電源の外観  
(並列共振型 アナログパネル版)  
(W750 × H1450 × D650mm)

表 4 従来型標準電源と新型標準電源の比較

項目	従来型 標準電源	新型 並列共振方式電源
	SBT-EH/L、 SBT-ESH/L	SBT-PWシリーズ(IGBT) SCT-PWシリーズ(SiC)
出力	20～1000kW	20～1000kW(予定)
周波数	0.5～30kHz	0.5～100kHz(予定)
CNV	ダイオード	ダイオード
INV	素子:IGBT	素子:IGBT又はSiC
共振部	直列共振方式 大電流伝送 (10m以下)	並列共振方式 小電流伝送
制御系	位相制御方式	PWM制御方式
表示系	押釦スイッチ、 アラームLED	GOT対応可
外形寸法 W×H×D	800×1500×700mm @100kW	830×1825×700mm @100kW

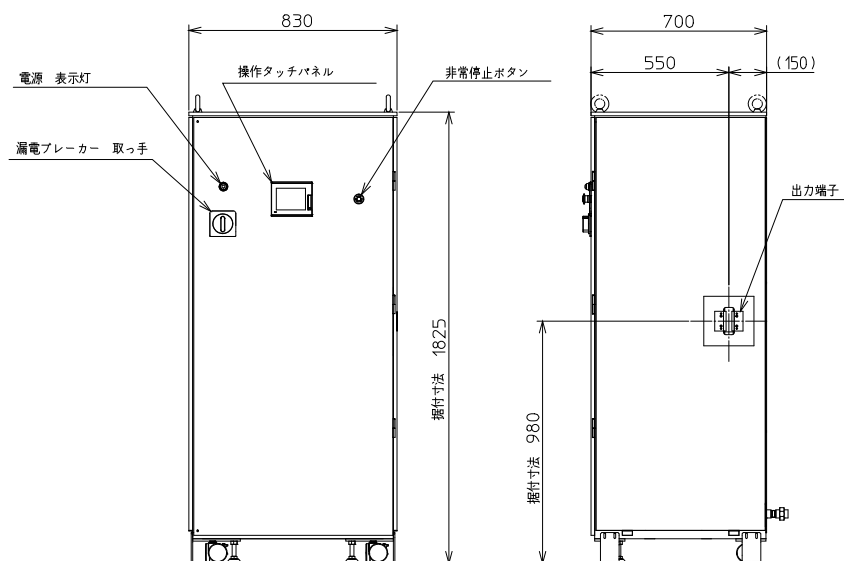


図3 新型標準電源の外形図 (GOT 版)

#### 4. 新型 IH インバータの特長

新型 IH インバータの特長を以下に示す。

- ① PWM 制御を使用しているため高速出力応答が可能 (出力立ち上がり時間 50ms 以下)
- ② 大型の DC リアクトルを使用していないため小型, 軽量
- ③ コンバータにダイオードを使用しているため高力率化が可能
- ④ バランサ回路を標準搭載し, インバータ素子の電流バランスが良好
- ⑤ 出力の短絡, 開放の両方について過電流, 過電圧ともに発生を防止
- ⑥ 操作パネルに GOT (Graphic Operation Terminal) を採用  
(図3に GOT 版の外形図を参照)

#### 5. 今後の取り組み

今回製品化した新型電源について, 今後もさらなる製品開発を計画している。

- ① 大電力化に向けた標準ユニットの確立  
200kW ユニットの標準化し, 接続台数をアップして大電力化が図れる構造とする。
- ② 並列共振型の高周波化  
並列共振型は SiC モジュールを使用して 30kHz から 100 kHz までシリーズ化する。
- ③ 直列共振型の高周波化  
直列共振型は SiC モジュールを使用して PWM

制御方式により 100 kHz から 300 kHz までシリーズ化する。

いずれも当社従来技術から発展した製品ラインナップ化に寄与する要素技術であるため, 今後の市場動向にあわせて計画的に投入できるよう開発を進めている。

#### 6. むすび

本稿では, 当社標準の IH インバータについて, 過去からの製品化ロードマップを説明し, 今回新たに製品開発した新型電源を紹介した。特に, 並列共振方式の特長を活かした出力フィードを延長させる装置構成に対しては, 高周波電源を加熱コイル直近に配置する必要がないため, レイアウトがきわめて容易になり, かつ高効率化による省エネなど新型電源の特長を活かした提案をすることでさらなる顧客満足を得られるよう改善を継続していきたい。

#### 7. 参考文献

- [1] 石間 “誘導加熱用 SIT インバータ”, 島田理化技報, No1, 1991.
- [2] 田内, 塚本, 木村, 寺川 “ECO 型真空溶解用 600kW インバータ”, 島田理化技報, No13, 2002.
- [3] 守上, 阿部, 田内 “省電力型 IH インバータ”, 島田理化技報, No21, 2011.

## 筆者紹介

生産本部  
産業 IH システム  
技術部

田内 良男



## Dual band Ka-PLL LNB

### ■概 要

本機は、従来の北米向け政府系通信 (Wideband Global SATCOM system : 以下 WGS) に加え、民間の海上衛星ネットワークを中心とした商用高速通信サービスである Inmarsat 社の Global Xpress (以下 GX) の 2 つのネットワーク通信を 1 台で受信することができる VSAT 用の製品です。

### ■構 成

GX/WGS の両システムの周波数帯に対応した小型導波管アイソレータ、広帯域低雑音増幅器 (LNA), ミクサ, IF アンプ, PLO から構成されます。

### ■特 長

- ① GX/WGS に対応した動作周波数帯は、外部から供給される電源電圧により切り替えることができます。
- ② 電源部に DCDC コンバータを採用することで発熱を抑え、小型、軽量化を実現しています。
- ③ LNA 部は広帯域にわたって、低 NF 特性を有しています。

### ■主要性能

Model : SPCR741IGN

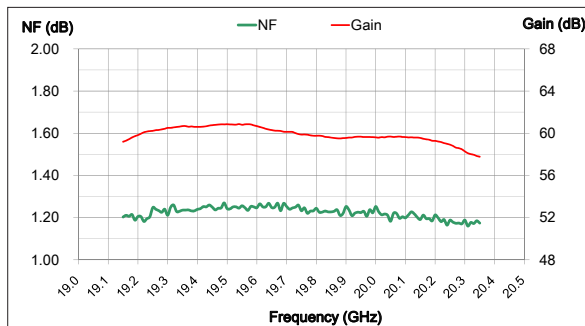
Item	Specification	
	GX	WGS
RF Input Frequency	19.2 ~ 20.2 GHz	20.2 ~ 21.2 GHz
IF Output Frequency	950 ~ 1950 MHz	1000 ~ 2000MHz
Local Frequency	18.25 GHz	19.2 GHz
Local Frequency Stability	Phase locked to external 10MHz reference	
Local Phase Noise	-62dBc/Hz max. @100Hz	-65dBc/Hz max. @100Hz
	-72dBc/Hz max. @1KHz	-75dBc/Hz max. @1KHz
	-82dBc/Hz max. @10KHz	-85dBc/Hz max. @10KHz
	-92dBc/Hz max. @100KHz	-95dBc/Hz max. @100KHz
	-102dBc/Hzmax. @1MHz	-105dBc/Hz max. @1MHz
Noise Figure	1.55dB max. @+23°C	1.5dB max. @+23°C
Gain	60dB ± 3.0dB	58dB ± 3.0dB
Input VSWR	1.3:1 max.	1.25:1 max.
P1dB	+10dBm min.	
Input DC Power	+15 to +24 VDC, 5.0 W max.	
Size	(L) 145mm x (W) 44mm x (H) 44mm (with isolator)	
Weight	500g max.	
Operating Temperature	-40°C to +60°C	

### ■製品外観

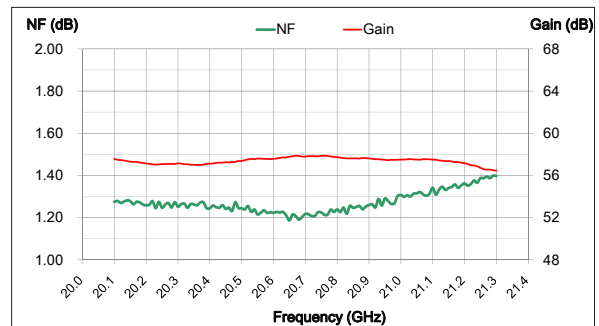


フランジ面に小型導波管アイソレータを配置

### ■代表特性例



NF, Gain (GX Band)



NF, Gain (WGS Band)

問い合わせ先  
事業管理部  
TEL 042-481-8573



## コルゲートホーンアンテナ

### ■概 要

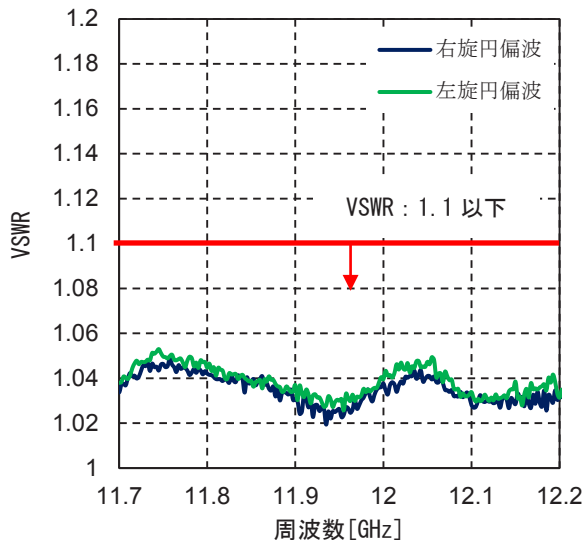
本製品は衛星通信用 12GHz 帯コルゲートホーンアンテナです。コルゲートホーンアンテナの特徴である高い交差偏波識別度特性を実現しました。

### ■特 長

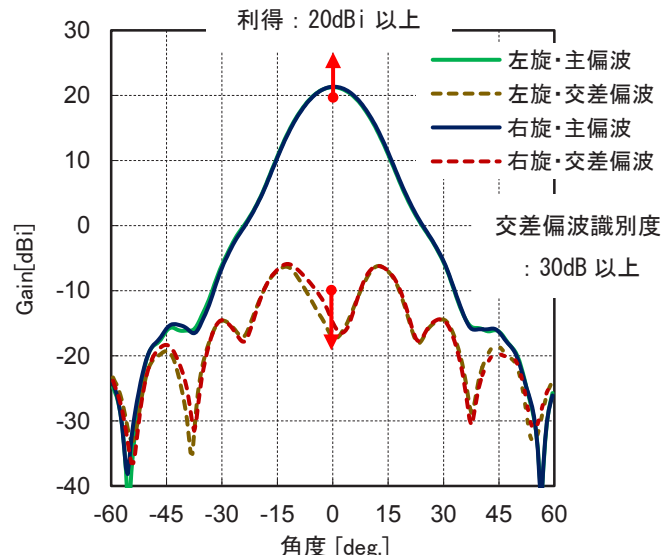
- ①高い交差偏波識別度特性
- ②右旋、左旋円偏波共用
- ③低 VSWR 特性
- ④ホーンアンテナ部分を 4 分割構造とすることで製造コストの低減
- ⑤セプトムポライザの構造最適化による製造コストの低減

### ■主要性能

項目	性能
周波数	12GHz 帯
V S W R	1.1 以下
利得	20dBi 以上
交差偏波識別度	30dB 以上
入出力導波管	WR75
外形寸法	W322 × D190 × H160mm



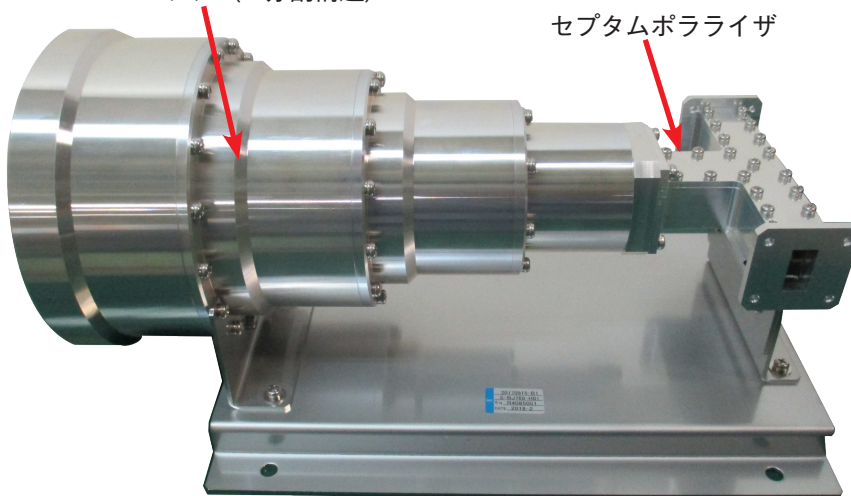
VSWR 特性



放射パターンならびに交差偏波識別度  
水平方向

ホーンアンテナ（4 分割構造）

セプトムポライザ



外観写真

問い合わせ先  
事業管理部  
TEL 042-481-8573

## 高電力サーキュレータ

### ■概 要

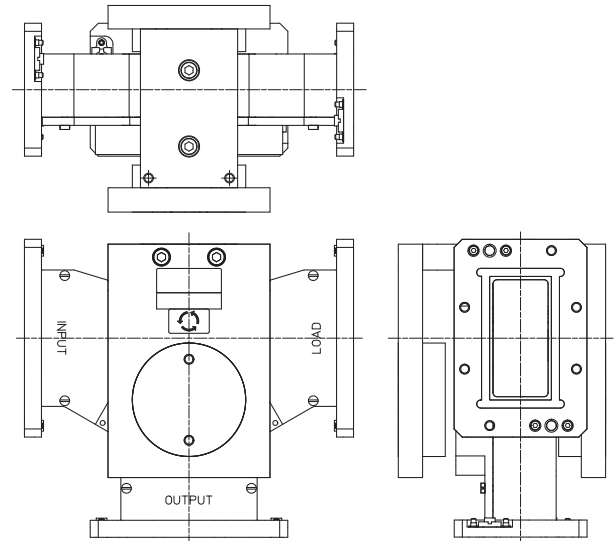
導波管型の3ポートサーキュレータです。主に高電力導波管機器で使用されるRF電源の保護回路として使用されます。

### ■特 長

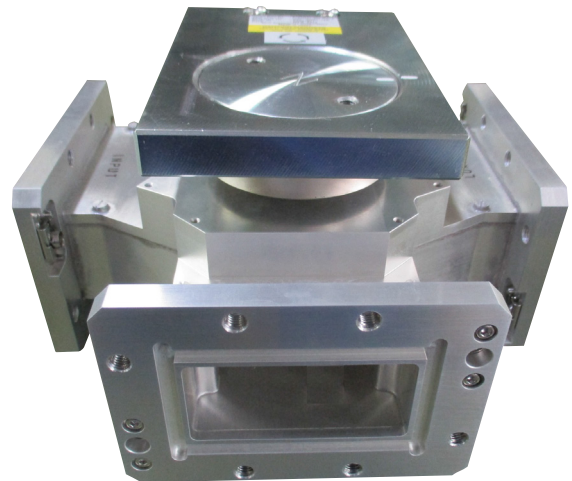
- ①電磁界解析による電界強度の最適化により高い耐電力性能を実現。
- ②低損失化と広帯域特性化により内部発熱を抑制。それにより自然空冷方式を実現。(従来品は、水冷方式)

### ■主要性能

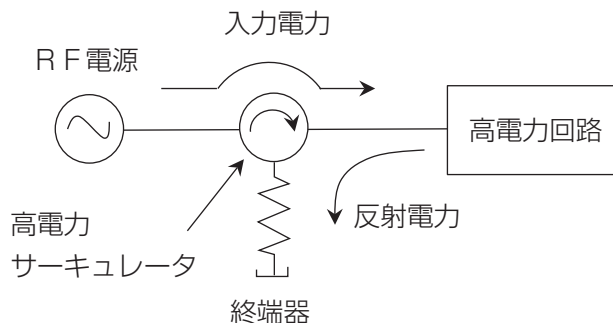
項目		性能
中心周波数		2,998MHz
耐電力	ピーク	3.0MW
	平均	4.0kW
	条件	負荷：完全反射、全位相 加圧：SF6 ガス、28PSIG (Min)
V S W R		1.08 以下
アイソレーション		25dB 以上
挿入損失		0.15dB 以下
冷却方法		自然空冷
導波管サイズ		WRJ-3
外形寸法		W 204 × D 194 × H 170mm
質量		8.0kg



外形図



外観写真



サーキュレータの使用例

問い合わせ先  
事業管理部  
TEL 042-481-8573

# ハンディー CT 小型高周波電源

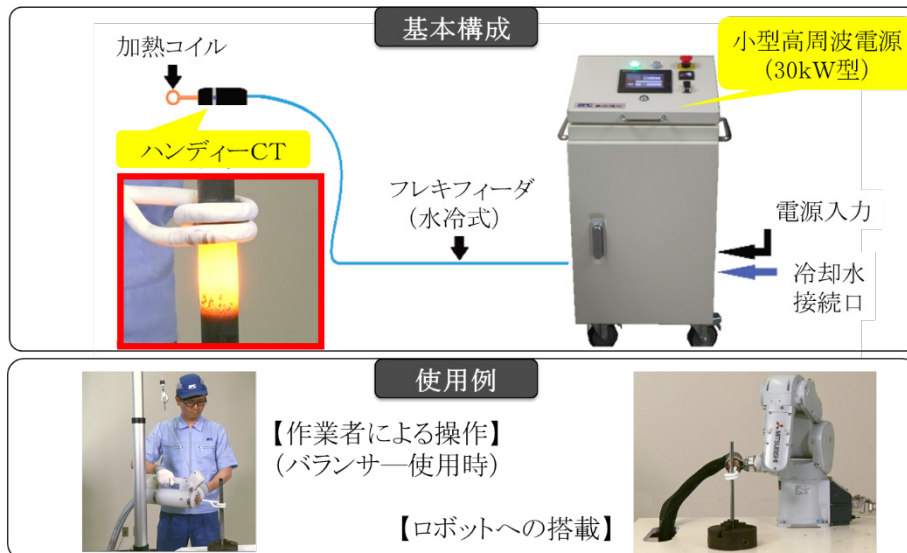
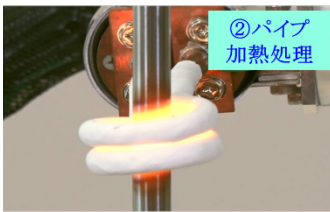
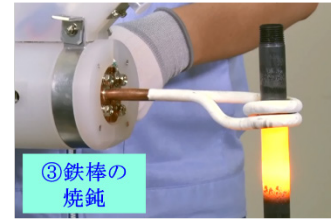
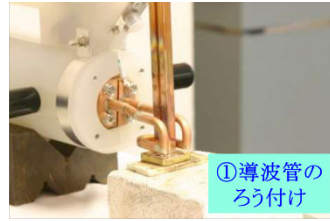
## ■概 要

IH（誘導加熱）技術を応用したハンディー CT 小型高周波電源です。作業者が、加熱コイルを装着したハンディー CT を手に持って、容易にろう付け（はんだ付）などの加熱作業を行うことができます。塗膜剥離の用途にも使用できます。

## ■特 長

- ①コンパクトで安全
- ②クリーンな作業環境を実現
- ③加熱条件の設定が可能であり、熟練者でなくとも作業可能
- ④フレキフィーダにより装置本体から10m以内の移動作業が可能（最大50mまで延長可能）
- ⑤フレキフィーダは100万回の屈曲試験をクリア
- ⑥タッチパネルにより加熱条件の設定が可能

## ■加熱対象例



## ■主要性能

装置型式	出力 [kW]	構成	電源入力	冷却水 [L/min]	外形 寸法	W × H × D [mm]	質量 [kg]
						φ × L [mm]	
D-B5	5	小型高周波電源	3 φ, 200V, 7kVA	10		431 × 264 × 525	25
CT-10CA		ハンディー CT	—			φ 58 × 210	2.0
D-B10	10	小型高周波電源	3 φ, 200V, 14kVA	10		431 × 264 × 525	25
CT-10CA		ハンディー CT	—			φ 58 × 210	2.0
D-B20	20	小型高周波電源	3 φ, 200V, 24kVA	20		440 × 890 × 400	85
CT-30CA		ハンディー CT	—			φ 88 × 230	6.5
D-B30	30	小型高周波電源	3 φ, 200V, 36kVA	20		440 × 890 × 400	85
CT-30CA		ハンディー CT	—			φ 88 × 230	6.5

問い合わせ先  
事業管理部  
TEL 042-481-8573

# 鋼線加熱用高周波電源

## ■概 要

誘導加熱（IH）を利用して複数本の鋼線を同時に加熱し、脱脂／焼鈍処理を行う装置です。

焼鈍処理は誘導加熱にてキュリー点まで昇温後、加熱炉にて温度保持を行うハイブリッド構成（2012 年実績）です。

## ■特 長

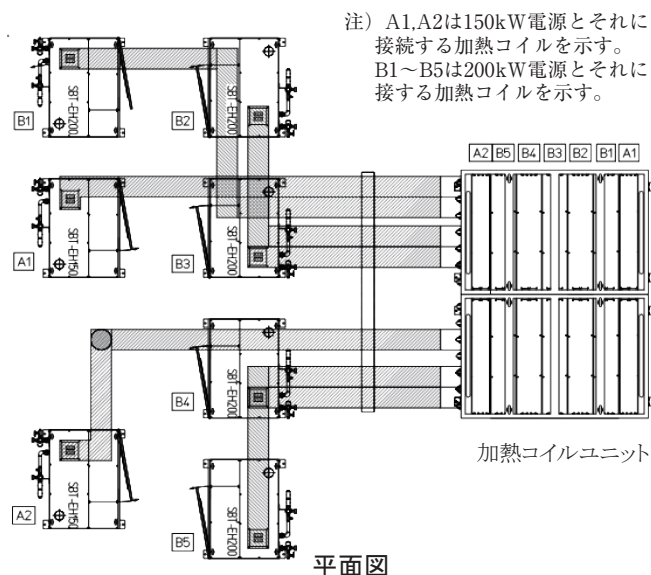
- ①最大 24 本を同時処理可能
- ②加熱コイル 2 セットを上下段に配置し、接続を切り換えることにより、脱脂／焼鈍の 2 用途で使用可能
- ③特殊コイル形状により通電電流によるスパークを抑制
- ④被加熱物（鋼線）の本数増減による出力調整を自動コントロール

## ■全体構成

150kW 高周波電源：SBT-EH150 2 台（A1, A2）

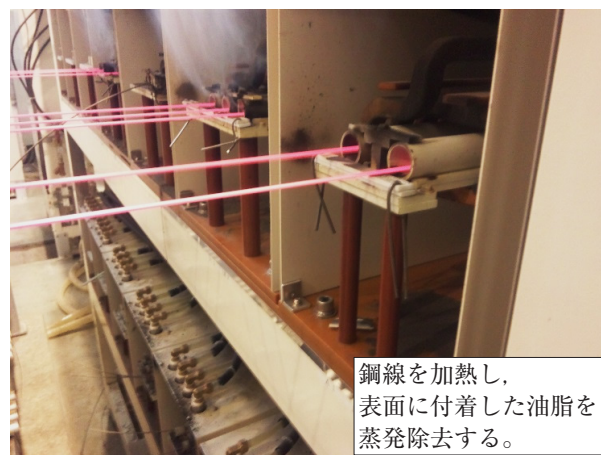
200kW 高周波電源：SBT-EH200 5 台（B1 ～ B5）

加熱コイルユニット



## ■用途例

- ・脱脂処理



## ■主要性能

### ● SBT-EH150

定格出力	150 kW
発振周波数	20 ～ 30 kHz
外形寸法	W1200 × H1850 × D850 mm
発振方式	直列共振方式
制御方式	高周波定電流制御
冷却方式	水冷
電源容量	180 kVA

### ● SBT-EH200

定格出力	200 kW
発振周波数	20 ～ 30 kHz
外形寸法	W1200 × H1850 × D850 mm
発振方式	直列共振方式
制御方式	高周波定電流制御
冷却方式	水冷
電源容量	240 kVA

問い合わせ先  
事業管理部  
TEL 042-481-8573



## 薄板鋼板用高周波誘導加熱装置

### ■概 要

高周波誘導加熱にて、薄板鋼板試料の高速均一加熱ができる誘導加熱装置です。

本誘導加熱装置は、高周波電源とフィーダ部、加熱コイル部から構成されます。

### ■特 長

- ① 2段階加熱：被加熱対象物（以下、ワーク）温度は、キュリー点前加熱（800℃前後）とキュリー点以上（1300℃まで）の加熱が可能。（自動タップ切換器による）
- ② 高速加熱：約15秒にてワーク温度約950℃まで高速加熱が可能。

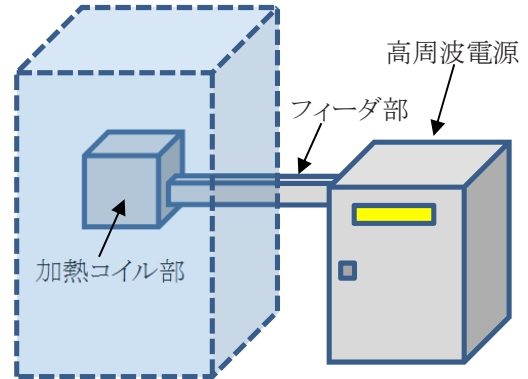
ワーク寸法例

（幅 150mm × 長さ 250mm × 厚さ 1.2mm）

### ■主要性能（高周波電源）

型式	SFT-100N200
出力電力 [kW]	100
周波数 [kHz]	250
外形寸法 [mm]	W 950 × H 1700 × D 2200
質量 [kg]	約 650

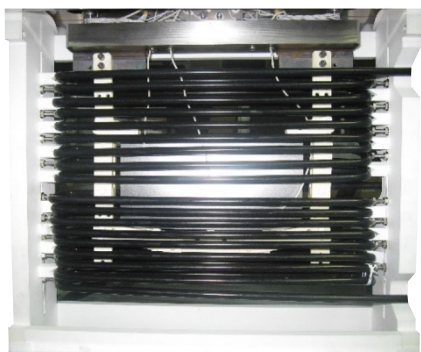
### ■全体構成



装置組込例



高周波電源 外観



加熱コイル部 外観



加熱（キュリー点以上）時

問い合わせ先  
事業管理部  
TEL 042-481-8573

## 絶縁導波管 特許第 5992945 号

出願 2016 年 8 月 発明者 根本 淳一

### ■ 概要

安価でかつ作業性を向上させ、安定した締結力を長期間保持できる構造の絶縁導波管を提供する。

### ■ 従来技術の課題

従来は、導波管同士の絶縁を図るため金属製締結部品は使用できなかった。また、サージ電流により放電が発生し電気機器の破損および作業者の感電などを招く恐れもあったため、高価で締結力の弱い樹脂性の締結部品を使用し製作していた。

### ■ 発明の手段と効果

本発明は図 1 に示す構造をしており、3つの導波管で構成されている。隣り合う導波管は絶縁部材を介し金属製締結部品、金属製ナットプレート、十分な耐電圧を有する厚みのある樹脂製サポートカバーを使用し固定され、放電対策と締結力の維持を図っている。図 2 は絶縁導波管の断面を示す。安価で汎用性の高い金属製締結部品を使用できるように金属が剥き出しとなるねじ部や金属製のナットプレート接触面に絶縁効果の有る樹脂製のサポートカバーを用いた。さらに絶縁しながら導波管同士の締結自体は金属製ナットプレートを使用することで耐久性が増し、かつナットやワシシャの部品点数を削減した。併せて、締結部品を取り付ける際の工具のアクセスが一方向からとなり組立性が大幅に向上した。

本発明の効果は次の4点となる。金属製締結部品を使用したことで「安価」、「耐久性の向上」、「締結力の安定」、さらに金属製ナットプレートと樹脂製サポートカバーを使用することで「組立作業性の向上」を図ることができる。

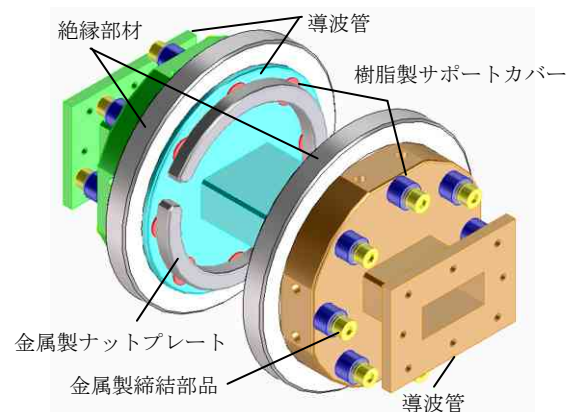


図 1 絶縁導波管の構造

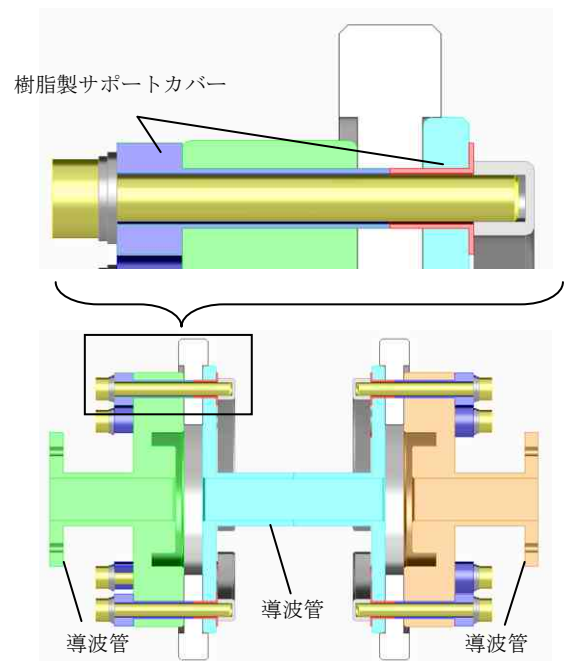


図 2 絶縁導波管の断面

## 高周波誘導加熱ヘッドと高周波誘導加熱装置 特許第 6253610 号

出願 2015 年 3 月 発明者 片岡 辰雄, 篠塚 保志 (株式会社横河ブリッジ殿と共同出願)

### ■概要

橋梁, ビル等をはじめとする鋼構造物の表面から突出しているボルト軸, ボルト軸に嵌合されているワッシャ, ボルト軸に締め付けされているナット等を高周波誘導加熱により加熱して, 突出部表面の塗膜を軟化および伸展させて剥離し易くするのに使用される高周波誘導加熱ヘッドと, 高周波誘導加熱装置を提供する。

### ■従来技術の課題

従来の塗膜の剥離方法としては, ブラストや剥離剤を用いる方法がある。前者は飛散した有害物質を含む粉塵が作業者の人体に悪影響を与える可能性があった。また, 後者は火災の可能性や作業効率が悪いなどの問題があった。

### ■発明の手段と効果

本発明は, 鋼構造物の表面に突出している金属の外周に配置する加熱コイルを有した高周波誘導加熱ヘッドに変流器 (CT) と高周波電源を接続している。ボルト軸, それに嵌合したワッシャ, 螺合したナットのように径の異なる突出金属を同時に, 短時間 (数秒程度) でほぼ均一に加熱することにより, 加熱によるボルトの軸力低下, 緊締具の弛緩発生, 塗膜からの有害物質の発生等が生じにくくすることが可能となる。

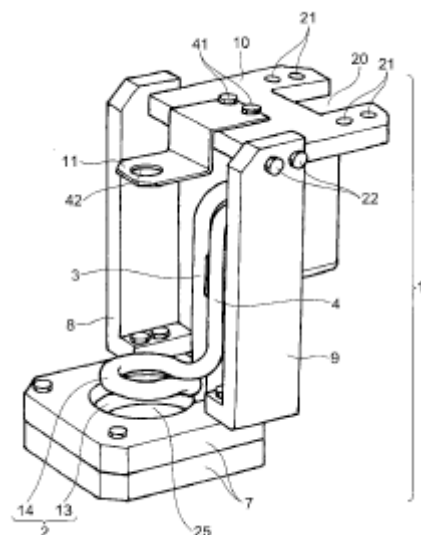


図 1 高周波誘導加熱ヘッド

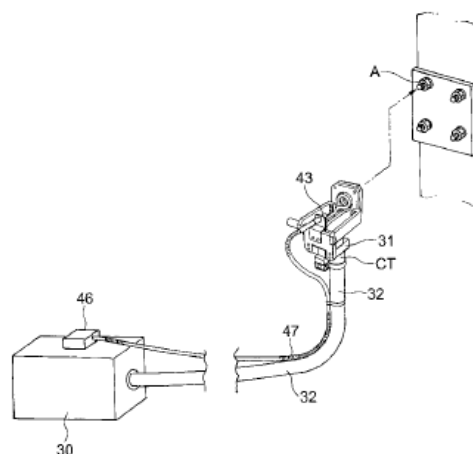


図 2 高周波誘導加熱装置

## 塗膜剥離方法 特許第 6294202 号

出願 2014 年 9 月 発明者 島田理化工業株式会社（株式会社横河ブリッジ殿と共同出願）

### ■概要

電磁誘導加熱機によって鋼構造物を加熱して鋼構造物表面に塗布された塗膜から有害物質が発生しないように安全に塗膜を剥離する方法を提供する。

### ■従来技術の課題

従来の塗膜の剥離方法としては、ブラストや剥離剤を用いる方法がある。前者は飛散した有害物質を含む粉塵が作業者の人体に悪影響を与える可能性があった。また、後者は火災の可能性や作業効率が悪いなどの問題があった。

### ■発明の手段と効果

本発明は、鋼構造物から剥離対象である塗膜の一部を採取して試料とし、試料を加熱して有害物質発生温度を確認し、鋼構造物を有害物質発生温度未満の温度で加熱して、当該鋼構造物の表面の塗膜を加熱して軟化させ、軟化した塗膜を鋼構造物からシート状に剥離するようにした。鋼構造物に緊締具がある場合は、有害物質発生温度未満であって、かつ、鋼構造物の加熱により前記緊締具が弛緩しない温度未満の温度で、鋼構造物を加熱する。また、電磁誘導加熱機の最高加熱温度を有害物質発生温度未満に設定して、鋼構造物を加熱する。

上記により、有害物質を発生させることなく、鋼構造物の表面の塗膜剥離が可能となる。

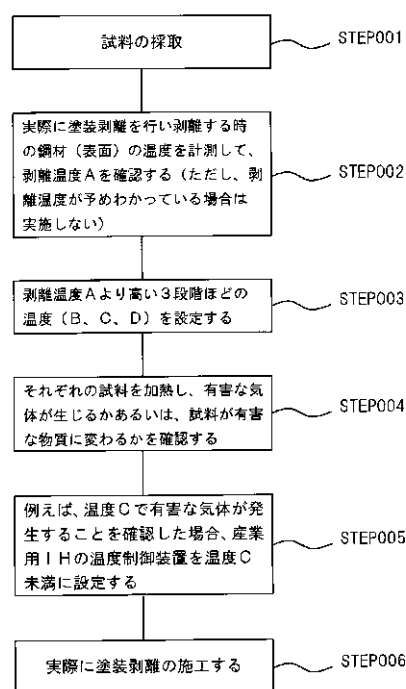


図 1 フロー図



## 営業分野及び主要製品

### 【電子機器】

同軸・導波管コンポーネント

- ・通信・給電コンポーネント
- ・電波応用製品
- ・衛星搭載製品
- ・エネルギー関連製品

通信機器

- ・衛星通信コンポーネント
- ・準ミリ波・ミリ波送受信製品

電子機器

- ・高出力マイクロ波発振器
- ・高周波線形増幅器
- ・試験装置
- ・マイクロ波・ミリ波アクティブコンポーネント

### 【産業機器】

産業 IH 機器

- ・溶解・蒸着製品
- ・熱処理製品
- ・予熱・加熱製品
- ・接合製品
- ・高周波電源
- ・薄板加熱製品
- ・塗装乾燥製品
- ・高温加熱製品
- ・非接触給電製品

島田理化技報編集委員会

委員長 江馬 浩一

副委員長 野田幹一郎  
四分一浩二  
天野 敏行

委員 浅利 哲  
石間 勉

事務局 吉岡 善信  
堀米 義嗣  
大和田達郎

島田理化技報 No.26（無断転載を禁ず）

2018 年 12 月 8 日 発行

発行所 東京都調布市柴崎 2 丁目 1 番地 3  
島田理化工業株式会社  
TEL (042) 481-8510（代表）  
FAX (042) 481-8596（代表）  
ホームページ <http://www.spc.co.jp/>

編集兼発行人 島田理化技報編集委員会

印刷所 東京都立川市上砂町 5-1-1  
株式会社 弘久社  
TEL 042-536-3511