

## ジャイロトロンを使用した電力変換型ビーム推進基礎実験

### Fundamental experiment of beam promotion by electric power conversion using Gyrotron

○溝尻 征・鈴木 雅敏・皆川 俊介・松倉 真帆・嶋村 耕平・横田 茂(筑波大学)  
 假屋 強・南 龍太郎(筑波大学プラズマ研究センター)  
 斉藤 輝雄・立松 芳典・山口 裕資・福成 雅史(福井大学遠赤外領域開発研究センター)

○Sei Mizojiri・Masatoshi Suzuki・Shunsuke Minakawa・Maho Matsukura・Kohei Shimamura・Shigeru Yokota(University of Tsukuba)・Tsuyoshi Kariya・Ryutaro Minami(Plasma Reserch Center, University of Tsukuba)  
 Teruo Saito・Yoshinori Tatematsu・Yuusuke Yamaguchi・Masafumi Fukunari(Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui)

#### Abstract (概要)

We propose power conversion type propulsion using antenna and rectifier as the third beam propulsion system different from discharge type and heat exchange type. In this research, basic experiments using a gyrotron which is a millimeter wave high power oscillation source were carried out, and the problems in power transmission efficiency and power receiving system were quantitatively evaluated. As a result, wireless power transmission using gyrotron can be performed theoretically. Recorded the maximum rectenna power density of 4.87 kW/m<sup>2</sup> and the rectification efficiency of 2.17 % at 303 GHz.

#### 1. はじめに

近年、レクテナ(Rectifier + Antenna の造語)を用いた成層圏飛行機や人工衛星への無線給電が提案されている[1,2]. これは、レクテナ電力密度(面積に対して得られる DC 電力)が宇宙空間での太陽光発電により得られる電力密度より高くすることが可能であり、従来の熱交換型、放電型の GW, MW 級の電力密度と比べるとレクテナは kW 級と劣るが、取り付けが柔軟かつ容易に行えるため、様々なアプリケーションに対しての応用が可能であるといったメリットが挙げられるためである。先行研究では 5.8GHz においてマグネトロンを用いた 10kW の送電実験を行い 500m 離れた地点で LED の点灯に成功させている[3]. また、より高い周波数の 94GHz においてはレクテナの小型化により低電力作動のエネルギーハーベスティング用途の研究が盛んに行われている[4,5]. 実際にアプリケーションとしてドローンや人工衛星などといった限られた面積に十分な電力を無線給電するためには、レクテナ電力密度の向上と大電力発振源による長距離無線給電を組み合わせる必要がある。周波数をより高くすることでレクテナ電力密度を高くすることができるが、その一方で図2から発振源の出力電力は低下する傾向があると分かり[6], ミリ波帯では現在ジャイロトロンのみが

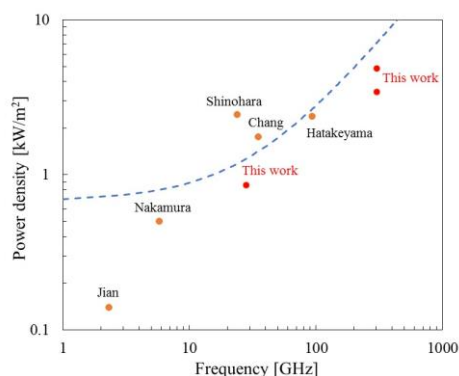


図1 先行研究 レクテナ電力密度[11-15]

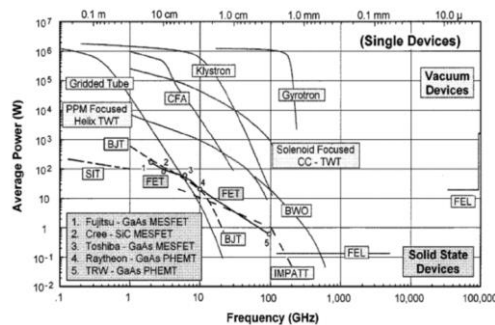


図2 周波数 vs 発振器出力[6]

大電力の発振源である。ジャイロトロンは主にプラズマ核融合の分野などで用いられているが、無線電力伝送の発振源として用いられた前例はない。

したがって、本研究では 28GHz ジャイロトロンを用いて長距離無線電力伝送の実用化に向けた検討を行い、加えて 303GHz ジャイロトロンを用いた高電力密度レクテナの開発を行った。28GHz ではレクテナを 25 個アレイ化し最大出力電力 1.05W、送電効率 2.30% を達成した。303GHz ではマイクロストリップラインとコプレーナ導波路の 2 つの高周波線路でのレクテナを作製し、最大出力電力およびレクテナ電力密度 17.1mW、3.43kW/m<sup>2</sup> (MSL)、14.5mW、4.87kW/m<sup>2</sup> (CPW) を達成した。また、整流効率は入力電力 342mW、負荷抵抗 130Ω の時に 2.17% を記録した。どちらもジャイロトロンを用いた無線電力伝送試験の実現に成功し、既存研究と比較して最高周波数 303GHz かつ最大レクテナ電力密度を達成した。

## 2. レクテナ設計

### 2.1 28GHz レクテナ

28GHz のレクテナの構成は伝送線路として MSL を用い、ダイオードに MA4E1317 (MACOM) を用い、誘電体基板 Diclad880 (ROGERS) に基板加工機を用いて回路パターンを作製した。図 3 に実際に作製したアンテナと整流回路を示す。アンテナには直線偏波矩形パッチアンテナを用い、4 素子アレイにすることで高利得化を図った。その結果、アンテナの反射係数は -12.9dB、利得 9.0dBi を得た。整流回路はダイオードを並列に挿入した Single shunt 型で作製し、F 級負荷 [7] を用いて基本波及び高調波をダイオードに再印加しつつ負荷への流出を低減させ整流効率を高くする構造にした。その結果、最大整流効率 47.7% (入力 295mW、負荷抵抗 130Ω)、最大出力電力 171.4mW (入力 389mW、負荷抵抗 130Ω)、最大レクテナ電力密度 0.86kW/m<sup>2</sup> を得た。図 4 に整流回路のモデルを、図 5 に測定結果をそれぞれ示す。このアンテナと整流回路を背面給電構造により一体化させレクテナを作製し、25 個アレイ化したものを使用した。図 6 に背面給電の説明を、図 7 に作製した 25 個レクテナアレイをそれぞれ示す。

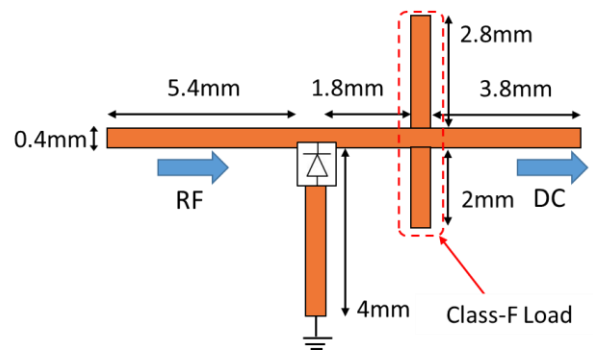


図 4 28GHz 整流回路モデル

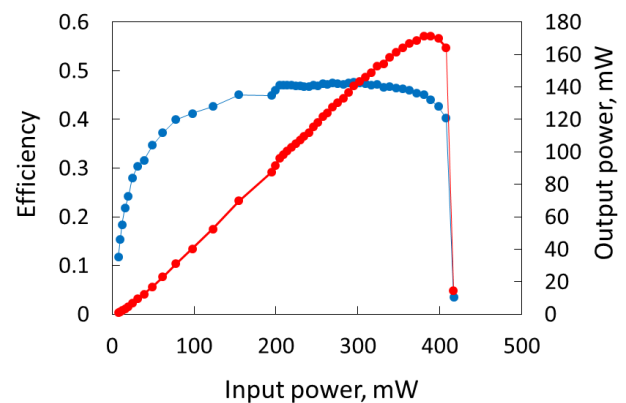


図 5 整流回路：出力電力と整流効率

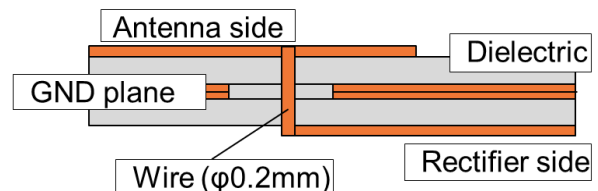


図 6 背面給電構造

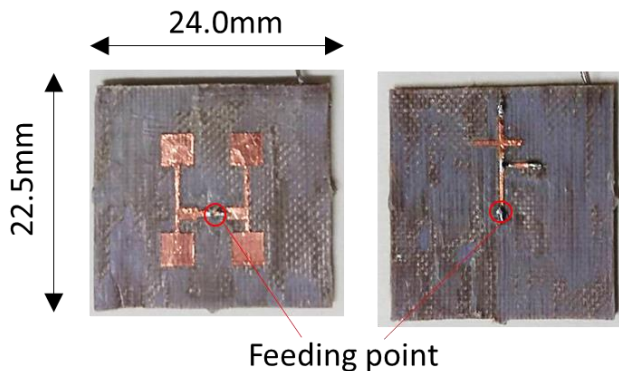


図 3 アンテナ(左)と整流回路(右)

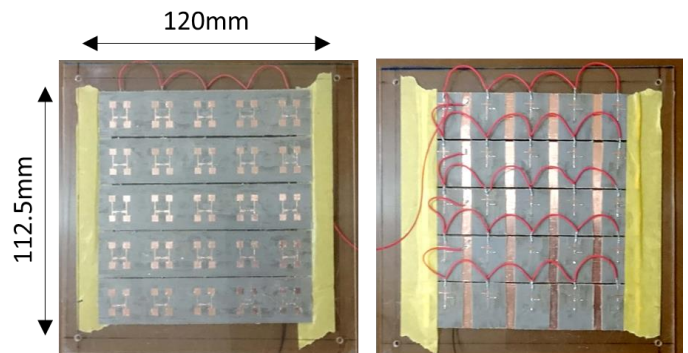


図 7 25 個レクテナアレイ

## 2.2 303GHz レクテナ

303GHz レクテナの構成は高周波伝送路であるマイクロストリップライン(MSL)とコプレーナ導波路(CPW)をそれぞれ 2 パターンで作製した.MSL レクテナはアンテナにパッチアンテナ,整流回路はダイオードを直列に取り付けたシングルシリーズ構成を用い,フィルタとしてノッチフィルタ,ローパスフィルタを用いた 2 パターンの Rectenna A, Rectenna B を作製した.図 8 に作製した Rectenna A の構成を,図 9 に作製した Rectenna B の構成をそれぞれ示す.アンテナ単体の計測には,MSL と導波管の変換回路であるフィンライン[8]を MSL の回路パターン上に構成することで,アンテナの反射特性,アンテナ利得の評価を行った.図 10 に作製したフィンラインアンテナを示す.その結果 303GHz において反射係数-18.7dB, 利得 8.32dBi を得た.得られた利得とジャイロトロンビームプロファイルからレクテナ設置位置での受電電力を求めることができる.一方,CPW レクテナはアンテナにスロットダイポールアンテナ,整流回路はダイオードを直列に 1 つ用いたシングルシリーズ型,1 つずつ並直列に用いたシングルシャントシングルシリーズ型のそれぞれをフォトリソグラフィにより Au の導体パターンを Si 基板上に作製した.図 11 に作製した Single series 型の CPW レクテナを,図 12 に作製した Single shunt single series 型の CPW レクテナをそれぞれ示す.

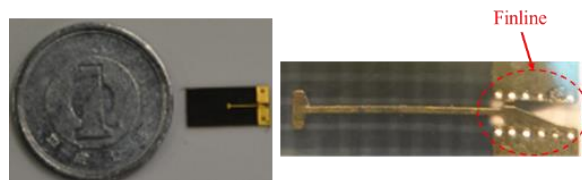


図 10 フィンラインアンテナの構成

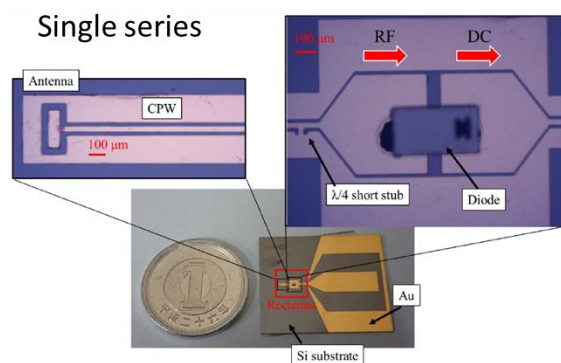
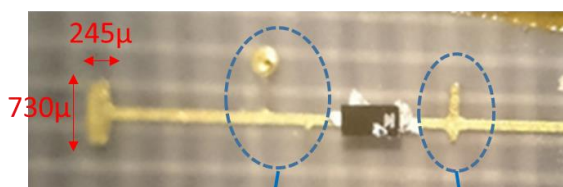


図 11 CPW Single series レクテナ

### Rectenna A



整合&DCループ ノッチフィルタ

図 8 Rectenna A 構成

### Rectenna B



整合&DCループ ローパスフィルタ

図 9 Rectenna B 構成

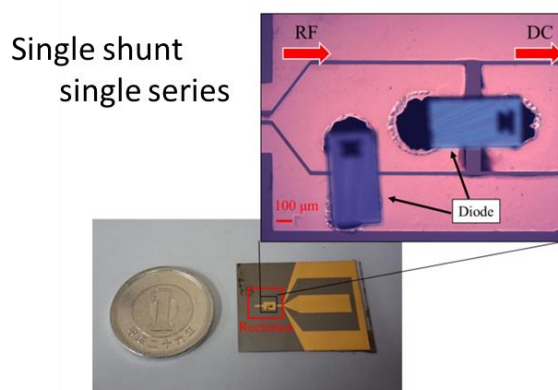


図 12 CPW Single shunt single series レクテナ

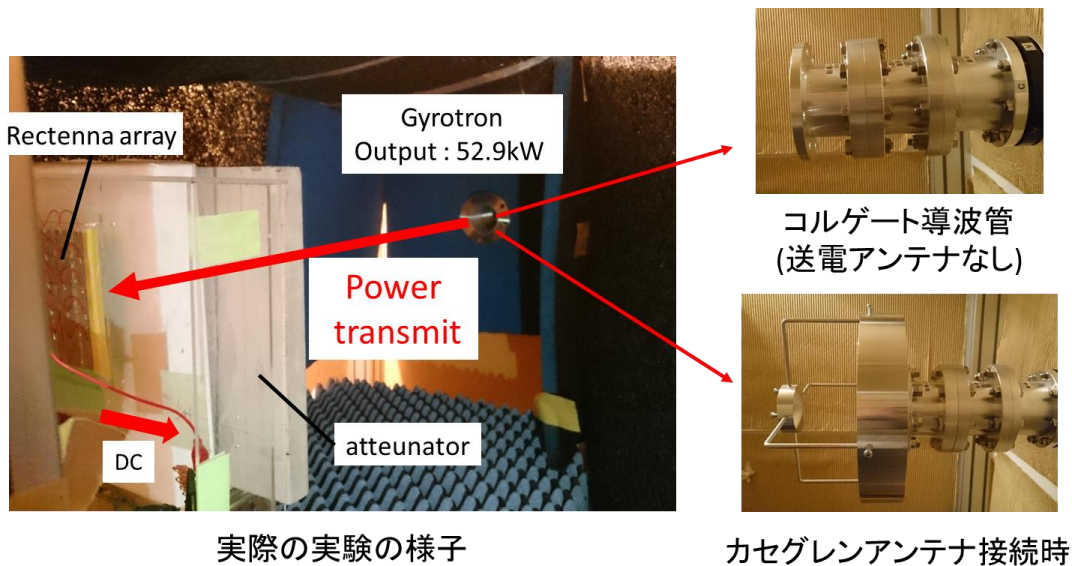


図 13 28GHz ジャイロトロンによる無線電力伝送実験 実験系

表 1 28GHz ジャイロトロン諸特性[9]

周波数	28GHz
出力電力	~ 250kW
パルス時間	0.1ms ~ 3s
出力モード	直線偏波ガウシアンビーム
ビームウエスト	20.3mm

### 3. 28GHz ジャイロトロン実験

ジャイロトロンは筑波大学プラズマ研究センターが所持する 28GHz ジャイロトロンを使用した[9].ジャイロトロンの諸特性を表 1 に,実験系を図 13 に示す.ジャイロトロンの出力を 52.9kW に固定し,距離 0.9m, 1.35m の 2 点で測定を行った.また減衰剤を用いることでレクテナへの入力電力を変更し,送電アンテナにカセグレンアンテナを用いることでビームの拡散を抑え,距離の変化に対して送電アンテナの優位性が見られるかどうかの検証を行った.その結果を図 14 及び表 2 に示す.レクテナの最大出力電力と最大送電効率はいずれもカセグレンアンテナ未着用時のコルゲート導波管のみで 900mm 離れた地点で 1.05W, 2.30% を記録した.送電効率の算出には,ガウシアンビームの広がりにより発生するレクテナが受ける電力割合,アンテナの開口効率,整流回路単体の整流効率が考えられ,これらの要因を考慮した理論的な最大送電効率は 2.35% であり,実験値と良く一致した.ゆえにジャイロトロンを用いた無線電力伝送の実験は理論通りに行えることが本実験を通して証明できると言える.しかし,本来であればカセグレンアンテナを用いることにより,より大きな出力電力,送電効率を距離に大きく依存せず得られることを期待していた.今後はこの原因を探すと共に,送電アンテナの長距離無線電力伝送への有用性を実験的に証明したい.

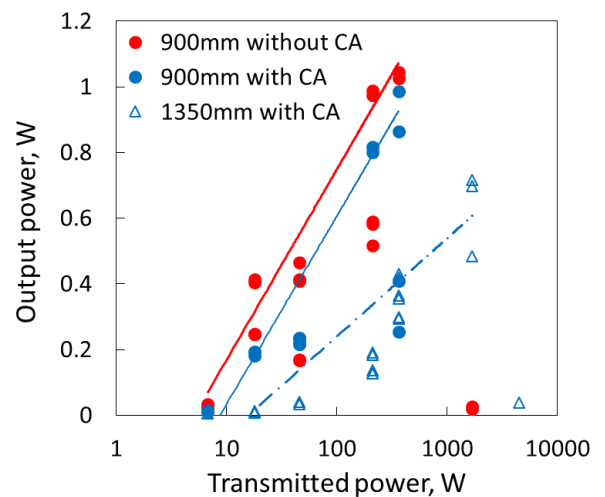


図 14 28GHz レクテナ出力電力

表 2 28GHz ジャイロトロン実験 実験結果

Rectenna	Distance	CA	Max output	Max $\eta$ total	Theoretical
● Sample1	900 mm	×	1.05 W	2.30%	2.35%
● Sample2	900 mm	○	0.99 W	1.07%	3.49%
△ Sample3	1350 mm	○	0.72 W	0.12%	3.25%



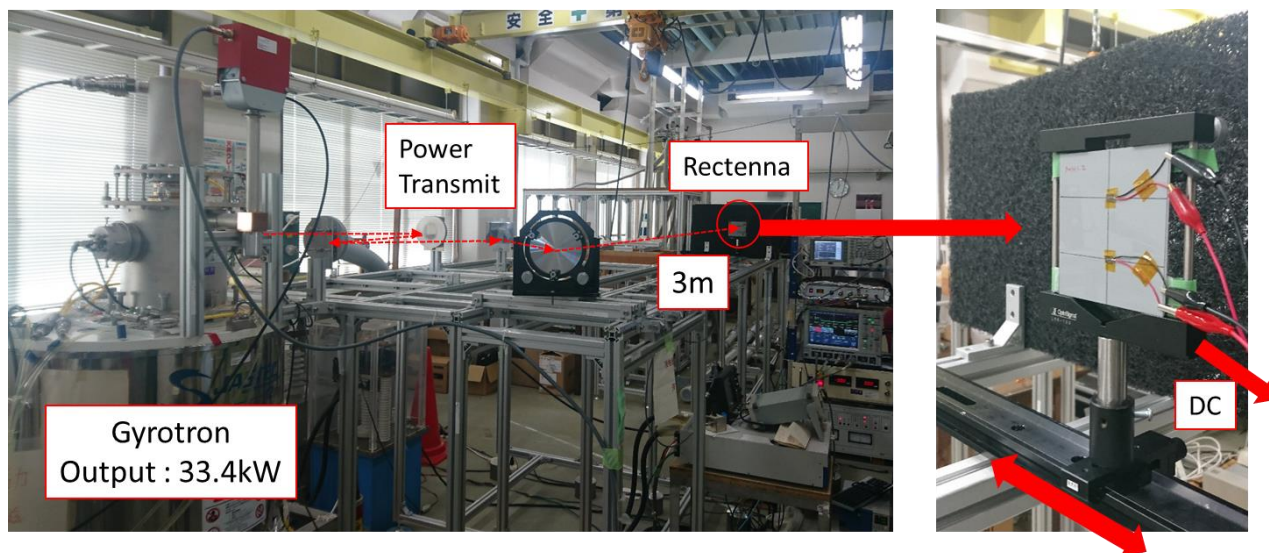


図 15 303GHz ジャイロトロンによる無線電力伝送実験 実験系

表 3 303GHz ジャイロトロン諸特性[10]

周波数	303.3GHz	
出力電力	~ 300kW	
パルス時間	~ 80 $\mu$ s	
出力モード	直線偏波ガウシアンビーム	
ビームウエスト	水平方向	23.5mm
	鉛直方向	24.4mm

### 3. 303GHz ジャイロトロン実験

ジャイロトロンは福井大学遠赤外線開発研究センターが所持する 303GHz ジャイロトロンを使用した[10].ジャイロトロンの特性を表 3 に、実験系を図 15 に示す。ビーム出力を 33.4kW に固定し、3m 離れた地点に設置されたレクテナにビームが照射される。レクテナは導線を介して負荷抵抗とオシロスコープに接続されており、DC 出力電力の評価を行った。また、IR カメラを用いて 3m 地点でのビームプロファイルを得ることで、レクテナを水平方向にビームの外側から中心に近づけた際のレクテナの受電電力の変化を推定し、この時の DC 出力の変化からレクテナの整流効率を評価した。図 16 は得られた整流効率の結果を示しており、Rectenna A が入力電力 342mW、負荷抵抗 130 $\Omega$  の時に最大整流効率 2.17% を記録した。図 17 は得られた出力電力の結果を示しており、出力のピークからさらに入力電力を上げると、ダイオードがブレイクし出力が大きく下がることを確認できる。最大出力電力地点はダイオードのブレイク直前の地点に相当するため、ピークの直後において負荷抵抗を大きくすることで順方向電流値を抑制し出力電力の境界を見つけることに成功した。その結果 Rectenna B が 200 $\Omega$  の時に最大出力電力 17.1mW、レクテナ電力密度 3.43kW/m<sup>2</sup> を記録した。また、CPW レクテナでは最大出力電力 14.5mW、レクテナ電力密度 4.87kW/m<sup>2</sup> をそれぞれ記録した。この実験により、最高周波数での無線電力伝送に成功し、かつレクテナ電力密度の最高値を記録した。

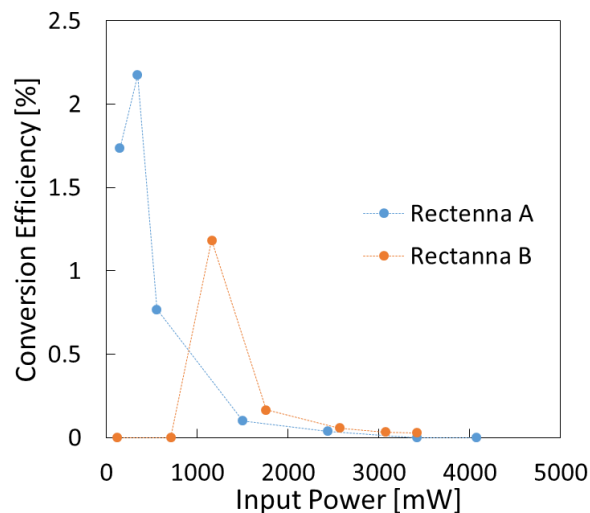


図 16 303GHz レクテナ整流効率

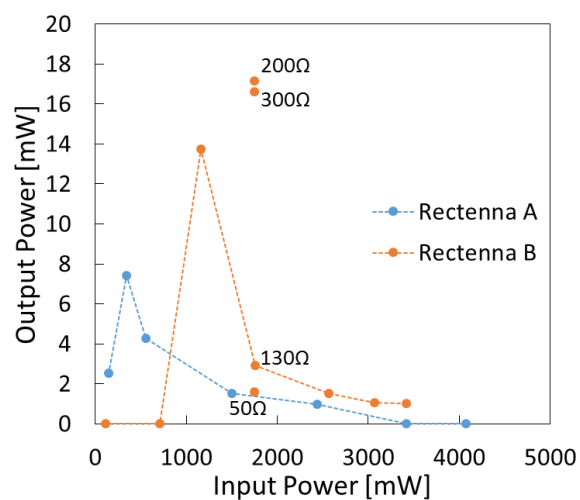


図 17 303GHz レクテナ出力電力

#### 4. 結言

28GHz のレクテナを作製し送電アンテナを用いてジャイロトロンを用いた無線電力伝送実験の検討を行った。

- 0.9m 以上離れた地点への無線電力伝送に成功した。
- レクテナを 25 個アレイ化し最大出力電力 1.05W, 送電効率 2.30% を達成。送電効率は理論値とほぼ一致しているためジャイロトロンによる無線電力伝送が理論通り行えることを実証した。
- 送電アンテナを用いることでレクテナ電力密度のさらなる向上が見込める。

303GHz のレクテナを MSL と CPW の 2 種類の伝送線路を用いて作製し高電力密度レクテナをジャイロトロンを用いて開発した。

- 3m 離れた地点への無線電力伝送に成功。
- 最大出力電力とレクテナ電力密度は 17.1mW, 3.43kW/m<sup>2</sup> (MSL), 14.5mW, 4.87kW/m<sup>2</sup> (CPW) を達成した。これは既存研究と比較して最高周波数かつ最高レクテナ電力密度を記録した。
- アンテナ単体の評価とビームプロファイルにより、レクテナ設置位置における入力電力を見積もった。その結果、整流効率 2.17% を達成した。

#### 6. 参考文献リスト

- 1) Power in the sky (2013), Richard M. Dickinson.
- 2) A space-to-space microwave wireless power transmission experiential mission using small satellites (2014) University of North Dakota.
- 3) Kenichi ANMA, Shuji NAKAMURA, Kenji SASAKI, Masao SATO "Ground Experiment on Wireless Power Transmission Technology- Spin-off Applications of Space Solar Power System Key Technology -", SSPS Vol.1 (2016), pp. 27-30.
- 4) S. Hemour, C. H. P. Lorenz, and K. Wu, "Small-footprint wideband 94GHz rectifier for swarm micro-robotics," 2015 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. IMS 2015, no. I, pp. 5-8, 2015.
- 5) Hwann-Kaeo Chiou, I-Shan Chen, "High-Efficiency Dual-Band On-Chip Rectenna for 35- and 94-GHz Wireless Power Transmission in 0.13- $\mu$ m CMOS Technology", IEEE Trans. Microw. Theory Tech, vol.58, no.12, 2010.
- 6) R. J. TREW, "SiC and GaN Transistors - Is There One Winner for Microwave Power Applications? 2002.
- 7) K. Hatano, N. Shinohara, T. Seki, and M. Kawashima: Development of Improved 24GHz-Band Class-F Load Rectennas, Proc. IMWS-IWPT2012, FRI-F-14, pp.163-166, 2012.
- 8) K. Fujiwara and T. Kobayashi, "Low-cost Wband frequency converter with broad-band waveguide-to-microstrip transducer," 2016 Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) & ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications, Espoo, 2016, pp. 1-4.
- 9) T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Tsumura, Y. Ebashi, M. Okada, Y. Nakahima, H. Idei, K. Hanada, T. Shimozuka, S. Kubo, Y. Oda, R. Ikeda, K. Sakamoto, and M. Ono: Development of High Power Gyrotron for Nuclear Fusion Reactor, J. Plasma Fusion Res. Vol.93, No.3, pp146-149, 2017.
- 10) Y. Yamaguchi, J. Kasa, T. Saito, Y. Tatematsu, M. Kotera, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka and M. Nishiura, "High power 303 GHz gyrotron for CTS in LHD" 2015 IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab srl.
- 11) Jian Ye, Chun Yang, Yixia Zhang, "Design and experiment of a rectenna array base on GaAs transistor for microwave power transmission" 2016 IEEE.
- 12) M.Nakamura, Y.Yamaguchi, M.Tsuru, Y.Aihara, A.Yamamoto, Y.Homma, E.Taniguchi "Prototype of 5.8GHz-band high efficiency rectifier with a high breakdown voltage GaAs SBD" IEICE Technical Report WPT2015-5,MW2015-5(2015-04).
- 13) K. Hatano, N. Shinohara, T.Mitani, T.Seki, M.Kawashima"Development of 24GHz-Band MMIC Rectenna," Radio and Wireless Symposium (RWS). IEEE 2013, vol. 50, pp. 199-201, 2013.
- 14) T. W. Yoo and K. Chang, "Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 40, no. 6, pp. 1259-1266, 1992.
- 15) Kohei Shimamura, Waku Hatakeyama, Kosumo Matsui, Yuki Okamoto, Ayako Mizushima, Kohei Fujiwara, Hidehiko Okamoto, Masatoshi Suzuki, Shunsuke Minakawa, Kimiya Komurasaki "Development of 94 GHz millimeter wave rectifier", 36th ISAS Space Energy Symposium, 2017.