

# 303 GHz ジャイロトロンを用いたレクテナの評価

高木 健吾, 皆川 俊介, 溝尻 征, 嶋村 耕平, 横田 茂 (筑波大学大学院システム情報工学研究科)  
斎藤 輝雄, 立松 芳典, 山口 裕資, 福成 雅史 (福井大学赤外領域開発研究センター)

## Evaluation of Rectenna using 303 GHz Gyrotron.

Kengo Takagi, Shunsuke Minakawa, Sei Mizojiri, Kohei Shimamura, Shigeru Yokota  
(Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba)

Teruo Saito, Yoshinori Tatematsu, Hiroshi Yamaguti, Masafumi, Fukunari  
(Research Center for Development of Far-Infrared Region)

**Abstract** We designed a rectenna of 303 GHz. About MSL type, input power 342 mW, load resistance 130  $\Omega$ , maximum rectification efficiency 2.17 % was obtained. About CPW type, load resistance 500  $\Omega$ , maximum rectenna power density of 4.87 kW / m<sup>2</sup> is achieved. This result is higher than existing experiment. From the above it can be said that the present highest frequency rectenna succeeded.

### 1. はじめに

近年、宇宙太陽光発電や小型移動体への応用を想定した研究が盛んに行われている。例として、ドローンなどの移動体のミッションはバッテリーの問題で制約されているのが現状である。そこで無人飛行体に対して非接触及び長距離に電力を送るために、マイクロ波による電力の無線伝送技術の研究が盛んに行われている<sup>(1)</sup>。本報告では、マイクロ波野中でも周波数の高いミリ波での伝送に着目した。ミリ波はマイクロ波と比べ、ビーム収集効率が高いため受電面積の削減が可能になり、重量の制限がある小型移動体には有効であると考えられる。

Hemour らは 94 GHz 帯でレクテナの製作を行っている<sup>(2)</sup>。しかし、これはエネルギーハーベスト向けであり、出力電力が 0.65 mW と低い。過去の研究ではミリ波帯における大電力のレクテナはまだ無い。小型移動体に対してレクテナで駆動することを考えると、より高い電力密度を有する必要があると考えられる。

したがって、本研究グループではこれまでに 94 GHz 帯の高電力密度な整流回路を開発してきた<sup>(3)</sup>。本報告では、より高い電力密度を目指すために、さらに周波数の高い 303 GHz 帯レクテナの開発を目的とする。レクテナは MSL (Micro Strip Line) 型と CPW (Coplanar Waveguide) 型を製作した。CPW 型は半導体プロセスで用いられるフォトリソグラフィで Si 基板上に製作した (筑波大学微細加工プラットフォーム利用)。高出力 303 GHz の発信源としてプ

ラズマ分野で用いられるジャイロトロン (福井大学所有) を利用した。製作したレクテナに対して DC 出力電力をレクテナ面積で割ることでレクテナ電力密度を算出し、既存研究と比較し、評価を行った。

### 2. 実験装置及び実験条件

実験条件及び実験概要図をそれぞれ表 1, 図 1 に示す。ジャイロトロンから発信された RF が 3 m 離れたレクテナに照射される。レクテナは塩化ビニル板につけられており、フレーム上に設置された光学系に挟み込む形で固定した。また、ビーム中心とのアライメントはレーザーアライメント装置を用いて、光学系を水平方向及び垂直方向に動かすことで行った。レクテナにはんだづけされた銅線を負荷抵抗につなぎ、その DC 出力電圧をオシロスコープのプロープを用いて計測した。オシロスコープのプロープ計測のトリガーとしてジャイロトロンの発信源からパルス信号を入力している。データの保存は USB メモリに CSV ファイルで出力される。DC 電圧ノイズの軽減のために負荷抵抗、銅線プロープにはミリ波吸収体を被せ、レクテナ後方にもミリ波吸収体を設置した。レクテナのアンテナ部分に入る RF のみ評価したいため、アンテナ以外の部分をアルミテープで覆った。評価したレクテナは CPW 型及び MSL 型であり、それぞれに対してビーム半径内を動かすことで入力電力のスweepを行った。ビーム半径内の電力密度強度分布を図 2 に示す。また、負荷抵抗を 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500  $\Omega$  と変化させ、適正負荷の調査を行った。

表 1 実験条件

(a) Gyrotron

Frequency	303 GHz
Power	30 -300 kW
Beam pulse	5 $\mu$ s
Beam radius	41.8 mm

(b) Rectenna

	CPW	MSL
Frequency	303 GHz	
Load	20, 50, 100, 200, 300, 400, 500 $\Omega$	
Distance from beam center	0 - 5 cm (Horizontal)	2 cm (Vertical) 0 - 5 cm (Horizontal)

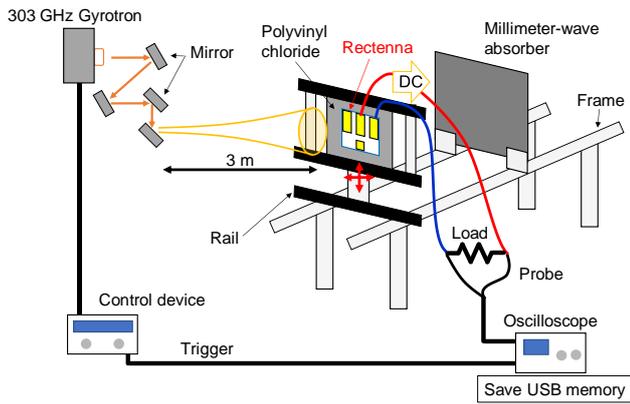


図 1 実験概要図

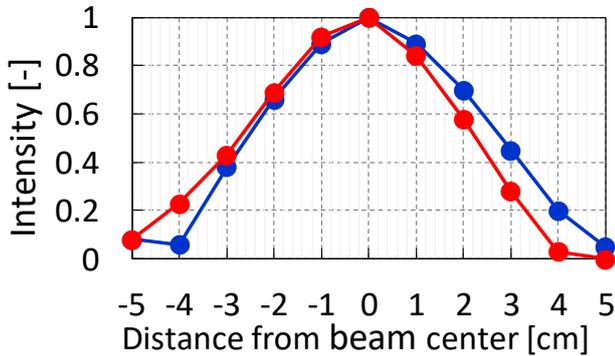


図 2 ビーム内電力密度強度分布

### 3. CPW 型 Si 基板上レクテナ

CPW 型のレクテナの製作には半導体プロセスを用いた。製作プロセスを図 3 に示す。基板には半導体プロセスで一般的に用いられる Si を、導体にはダイオードをはんだづけできるように Au を用いた。まず、厚さ 200  $\mu$ m、抵抗値 1000  $\Omega$  の Si 基板に Au を 500 nm スパッタレジストを塗布する。次に、フォトリソグラフィによりパターンを露光し、現象する。露光した Au を AURUM-302 (関東化学株式会社) でエッチングした。製作した回路を横 20 mm、縦 20 mm のチップ状にウェハーダイシングマシンで切り出した。次に、エキシダイボンダを用いてクリームはんだ (MECHNIC 社) を CPW の線路上垂らし、ダイオード (MACOM 社, MA4E1310) を配置した。その後、ホットプレートで 150 度に熱し、はんだづけした。

製作したレクテナ、その等価回路をそれぞれ図 4、図 5 に示す。灰色が Si 基板であり、金色が Au である。赤枠の部分がレクテナの部分であり、右のテーパ状に広がっている部分は銅線を接続するための接続パッドである。Single series 型はダイオードを直列に接続し、DC ループを形成するために  $\lambda/4$  ショートスタブを挿入している。Single series single shunt 型ではダイオード 2 つ直列と並列に接続している。アンテナはすべてのレクテナのタイプで共通である。アンテナ部分及びダイオードの接続部分を顕微鏡で撮影した。ダイオード接続部分の CPW の線幅が広がっているのはダイオードの寸法より、50  $\Omega$  の CPW の線幅が細く配置できなかったためである。線幅を変える際には  $\lambda$  長のテーパを用いてインピーダンスの変換を行っている。

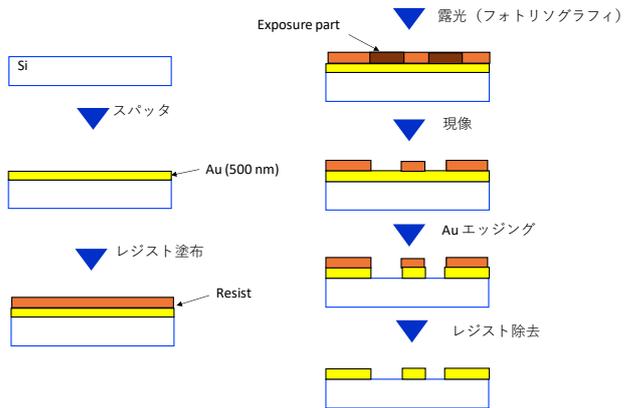
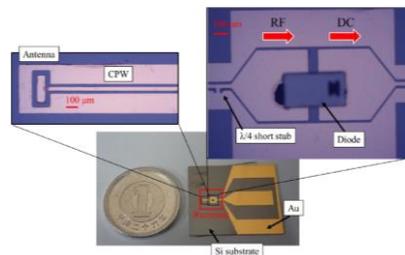
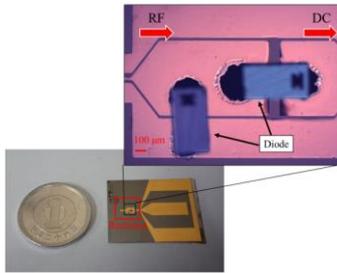


図 3 Si 基板上回路製作フロー



(a) Single series



(b) Single series single shunt  
図4 CPW型レクテナ

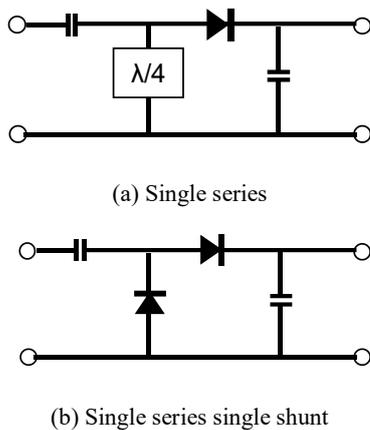


図5 CPW型レクテナの等価回路

#### 4. MSL 型レクテナ

MSL 型レクテナの製作は関西電子工業に委託した。用いた誘電体基板は日本ピラー工業の NPC-F220 で、厚さ 127  $\mu\text{m}$ 、誘電率 2.19 である。導体はダイオードをはんだで配置するために Au を用いた。

##### 〈4・1〉 アンテナ

アンテナにはパッチアンテナを用い、導波管-MSL 変換回路としてフィンラインをアンテナに搭載したフィンラインアンテナを用いることによって、反射係数 ( $S_{11}$ ) と利得 (Gain) の測定を行った。実際に製作したフィンラインアンテナを図 6 に、 $S_{11}$  の測定結果を図 7 に示す。303 GHz におけるアンテナの  $S_{11}$  は平均で -18.7 dB (sim -12.3 dB) が得られた。この結果から、3 アンテナ法を用いてアンテナの Gain を測定し、3 つのアンテナの Gain を平均してフィンラインアンテナの Gain が得られ、フィンライン単体の計測により求めたフィンライン透過効率 4.35 dB を補正することにより、最終的なアンテナ利得を 8.32 dBi とした。

##### 〈4・2〉 レクテナ

MSL 型で製作したレクテナを図 8 に示す。Rectenna A は、入力側のオープンスタブとショートスタブにより、DC ループと整合をとっている。また、出力側には基本波が負荷に流

れ込まないようにするための十字のノッチフィルタが入っている。Rectenna B は入力側をショートスタブのみとして DC ループと整合をとり、出力側に基本波及び高次の高調波が流れ込まないようにする T 字のローパスフィルタを入れた構造で設計を行った。

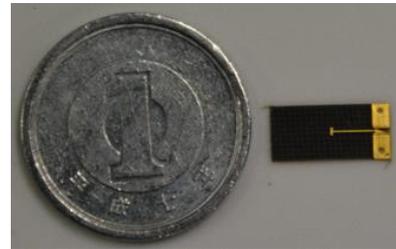


図6 フィンラインアンテナ

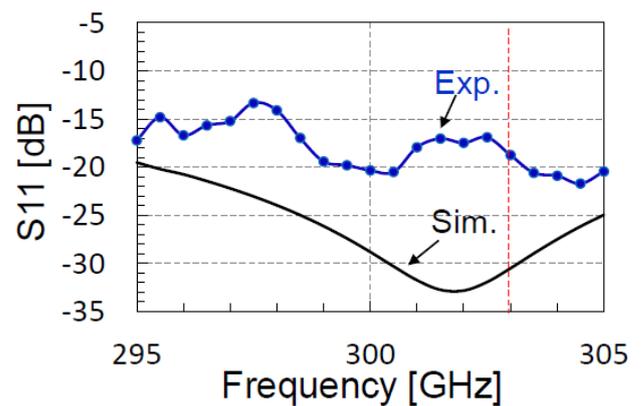
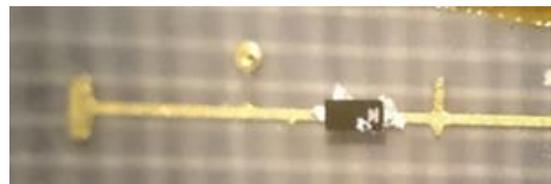
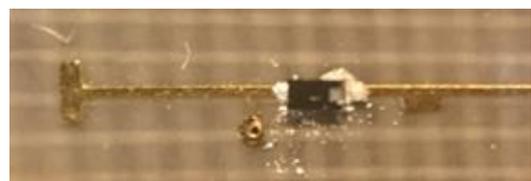


図7 フィンラインアンテナの反射特性



(a) Rectenna A



(b) Rectenna B

図8 MSL 型レクテナ

## 5. 実験結果

CPW 型について、図 9、図 10 に負荷を  $500 \Omega$  に固定し、ビーム半径内でレクテナの位置を動かしたことによる DC 出力電圧及びビーム半径位置を固定した場合の負荷抵抗値依存性をそれぞれ示す。図 9 では、ビーム中心に動かすと DC の出力電力は上昇していく。Single series single shunt 型では  $3 \text{ cm}$  の位置でブレイクダウンが確認できた。その地点で最大 DC 出力電力  $12.9 \text{ mW}$  である。図 10 では、Single series 型の適正負荷は確認できなかった。これはダイオードを 2 つつけたことによりブレイクダウン電圧が高くなったことが考えられる。

MSL 型について、図 11 に入力電力に対する DC 出力電力を示す。入力電力はプリスの公式より、計測した地点のビーム半径内電力密度とアンテナの有効面積との積で求めた。Rectenna A は入力電力  $342 \text{ mW}$ 、負荷抵抗  $130 \Omega$  の時に最大整流率  $2.17 \%$  を得ることができた。Rectenna B は  $200 \Omega$  を境にしてダイオードのブレイクダウンが確認された。これは、ダイオードの順方向電流が大きくなったためダイオードがブレイクして著しく電圧値が減少したことが原因だと考えられる。負荷抵抗値上げること順方向電流を抑え、ブレイクダウンの境を見つけることができたと考えられる。この抵抗値を変化させる実験において Rectenna B が  $200 \Omega$  の時に最大出力電力  $17.1 \text{ mW}$  を得ることができた。

また、CPW 型で最大のレクテナ電力密度をとれたのは Single series 型で、面積が  $2.89 \times 0.23 \text{ mm}$  で  $4.87 \text{ kW/m}^2$  である。MSL 型で最大のレクテナ電力密度を得られたのは Rectenna B で、面積が  $1 \times 5 \text{ mm}$  で  $3.43 \text{ kW/m}^2$  を得ることができた。この値を既存研究と比較したものを図 12 に示す。本報告でのレクテナは既存研究注で最高の周波数で動作しており、レクテナ電力密度も既存研究より高い値を得た。

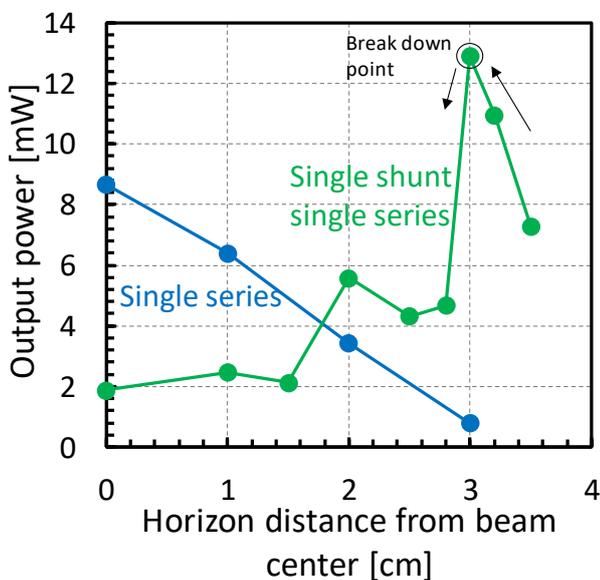


図 9 ビーム内半径位置での DC 出力電力

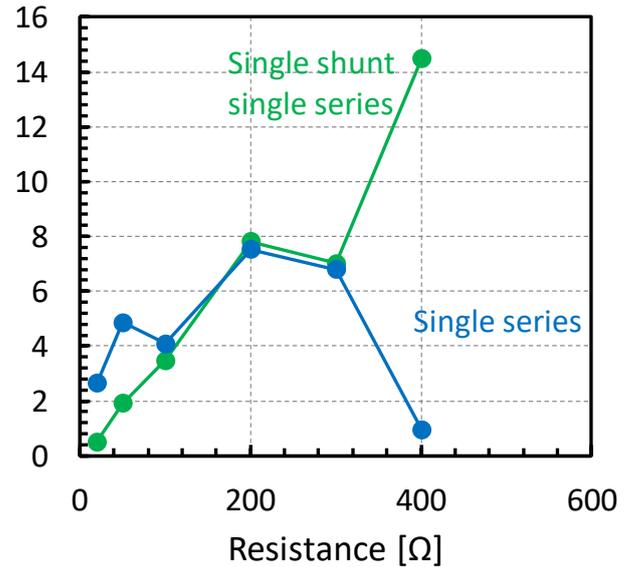


図 10 DC 出力電力の負荷抵抗値依存性

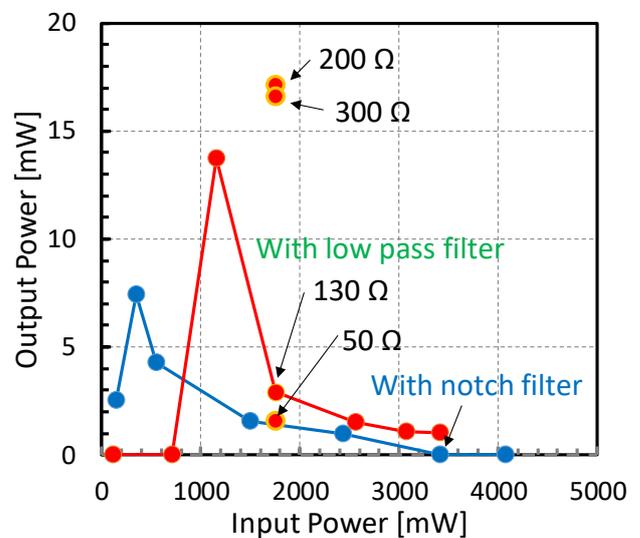


図 11 入力電力に対する出力電力

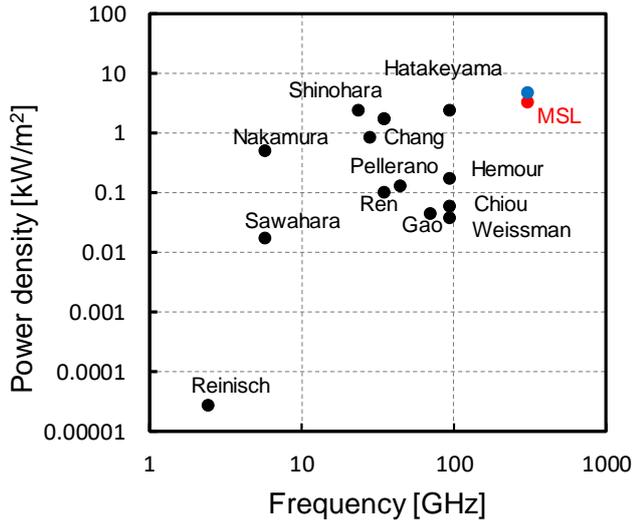


図 12 既存研究の電力密度との比較<sup>(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)</sup>

## 6. まとめ

高電力密度を有するレクテナの開発を目的とし、303 GHz 帯のレクテナを製作し、ジャイロトロンを用いて無線電力伝送を行い、以下の知見を得た。

- (1) フォトリソグラフィによる 303 GHz レクテナの製作方法を確立した。
- (2) ジャイロトロンによるレクテナ評価方法を確立した。
- (3) CPW 型のレクテナは Single series single shunt 型で負荷抵抗 500 Ω の時に最大 DC 出力 12.9 mW を達成した。レクテナ電力密度は Single series 型で最大で 4.87 kW/m<sup>2</sup> を得た。
- (4) MSL 型のレクテナは Rectenna A で入力電力 342 mW、負荷抵抗 130 Ω の時に最大整流効率 2.17 % を得た。Rectenna B で 200 Ω の時に最大出力電力 17.1 mW を達成した。最大レクテナ電力密度は Rectenna B で 3.43 kW/m<sup>2</sup> を得た。
- (5) 本研究で製作したレクテナのレクテナ電力密度は既存研究と比べて大きい値を得ることができた。よって、現在最高周波数のレクテナの開発の成功及び高レクテナ電力密度レクテナの開発という目的を達成できたといえる。

## 7. 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B) No.16K18306 の補助を受けた。

- (1) Y. Fujino, M. Fujita, T. Ito, H. Matsumoto, N. Kaya, T. Fujiwara and T. Sato, “Driving Test of a small DC Motor with a Rectenna Array and MILAX Flight Experiment Review of the Communications Research Laboratory”, Vol. 44, No. 3, pp. 113 – 120, 1998.9.
- (2) S. Hemour, C. H. P. Lorenz and K. Wu, “Small-footprint wideband 94 GHz rectifier for swarm micro-robotics”, 2015 IEEE MTT-S Int. Micro. Symp. IMS 2015, No. 1, pp. 5-8, 2015.
- (3) Waku Hatakeyama, Yuki Okamoto, Ayako Mizushima (The Univ. of Tokyo), Kohei Shimamura (Univ. of Tsukuba), Kosmo Matsui (The Univ. of Tokyo), Kohei Fujiwara · Hidehiko Yamaoka (Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute), Kimiya Komurasaki (The Univ. of Tokyo), “94 GHz rectifier fabricated by MEMS techniques for high power wireless powerwith finline”, B-1-136, (3 月 22 日発表 共通講義棟北 N322)
- (4) N. Weissman, S. Jameson and E. Socher, “W-Band CMOS on-chip energy harvester and rectenna”, IEEE MTT-S Int. Micro. Symp. Dig., pp. 1-3, 2014.
- (5) K. Hatano, “Development of 24 GHz-Band MMIC Rectenna”, Radio and Wireless Symposium (RWS). IEEE 2013, vol. 50, pp. 199-201, 2013.
- (6) H. Gao, M. K. Matters-Kamrnerer, P. Harpe, D. Milosevic, U. Johannsen, A. Van Roermund and P. Baltus, “A 71 GHz RF energy harvesting tag with 8 % efficiency for wireless temperature sensors in 65 nm CMOS”, Dig. Pap. IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp., pp. 403-406, 2013.
- (7) Stefano Pellerano, Javier Alvarado, Jr and Yorgos Palaskas, “A mm-Wave Power-Harvesting RFID Tag in CIRCUITS, VOL. 45, NO. 8, AUGUST 2010.
- (8) Akinori Oda, Hironori Sawahara, Mai Ishiba, Kimiya Komurasaki and Yoshihiro Arakawa, “Integration of MAV Wireless Power Transmission Systems”, 8<sup>th</sup> Annual International Energy Conversion Engineering Conference 25-28 July 2010, Nashville, TN.
- (9) Masatoshi SUZUKI, Maho MATSUKURA, Kohei SHIMAMURA, Sigeru YOKOTA, Tsuyoshi KARIYA, Ryutaro MINAMI, Shunsuke MINAKAWA, Satoru SUGANUMA and Sei MIZOJIRI, “High Power and Long Distance Microwave WPT using 300 kW gyrotron 28 GHz”, 2017 Asian Wireless Power Transfer Workshop, D2-S5-01.