

# WiCoPT 実現に向けた変調信号入力時の DC 変換効率に関する検討 — FSK/BPSK/QPSK/16QAM 入力時の検討—

榎 裕翔<sup>†</sup> 吉田 賢史<sup>‡</sup> 西川 健二郎<sup>†,‡</sup> 川崎 繁男<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 鹿児島大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40

<sup>‡</sup> 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒229-8510 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

E-mail: hiroto.sakaki@ieee.org

**あらまし** 近年,無線を用いて情報と電力を同時に伝送する無線情報電力伝送が注目を集めている. 情報, 電力同時無線伝送実現の主要課題は変調信号入力時の整流回路の変換効率の向上である. 本報告では,変調信号入力時の RF-DC 変換整流回路の動作について,測定・解析を行った.FSK,BPSK,QPSK,16QAM デジタル変調信号をブリッジ型整流回路に入力し,CW 入力時の変換効率,動作と比較して,その変換効率,動作を評価した.いずれの変調信号においても CW と比較して変換効率は低くなり,かつシンボルレートが高いほど変換効率が低いことを示した.

**キーワード** 無線情報電力伝送(WiCoPT), デジタル変調信号, 電力変換効率(PCE)

## Measured Evaluation of DC Conversion Efficiency with Modulated Signal for WiCoPT Systems

### — Conversion Efficiency With FSK, BPSK, QPSK and 16QAM —

Hiroto SAKAKI<sup>†</sup> Satoshi YOSHIDA<sup>‡</sup> Kenjiro NISHIKAWA<sup>†,‡</sup> Shigeo KAWASAKI<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Kagoshima University,

1-21-40 Korimoto Kagoshima, Kagoshima, 890-0065 Japan

<sup>‡</sup> Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency,

3-1-1Yoshinodai-chuoku Sagamihara, Kanagawa, 229-8510 Japan

E-mail: hiroto.sakaki@ieee.org

**Abstract** Recently, the wireless system, which can transfer data and power simultaneously, called “Wireless communication and power transmission (WiCoPT), has been widely noticed. The major problem of this technic is improvement of the power conversion efficiency (PCE) with modulated input signals. In this report, we measured and analyzed the rectifier operation with modulated signal. As compared with CW, we evaluated the PCE and the rectifier operation with it. The PCE with any modulated signal is lower than the efficiency with CW and we clarified that the higher symbol-rate is, the lower PCE is with modulated signals.

**Keyword** Wireless Communication and Power Transmission(WiCoPT), Digital Modulated Signal, Power Conversion Efficiency(PCE)

#### 1. はじめに

近年,次世代の電力伝送システムとして伝送線が不要である無線電力伝送(WPT: Wireless Power Transmission)が注目を集めている. 更に,環境発電と呼ばれるエネルギーハーベスティング技術を含め,機器のバッテリーレス・コードレス化実現の基盤技術として期待されている.

さらに,電力と情報を同時に伝送する無線情報電力

伝送(WiCoPT: Wireless Communication and Power Transmission)[1]技術の研究開発も活発に進められている.WiCoPTはバッテリーレス無線センサーネットワーク[2]やインプラントシステム[3]等の医療システムへの応用が期待されている.WiCoPTの原理図を図1に示す.マイクロ波帯を用いるWiCoPTは,通常の変調波での情報通信に加え,受信した信号を受信部の整流器により周波数変換して得られる直流電力を電子機器の

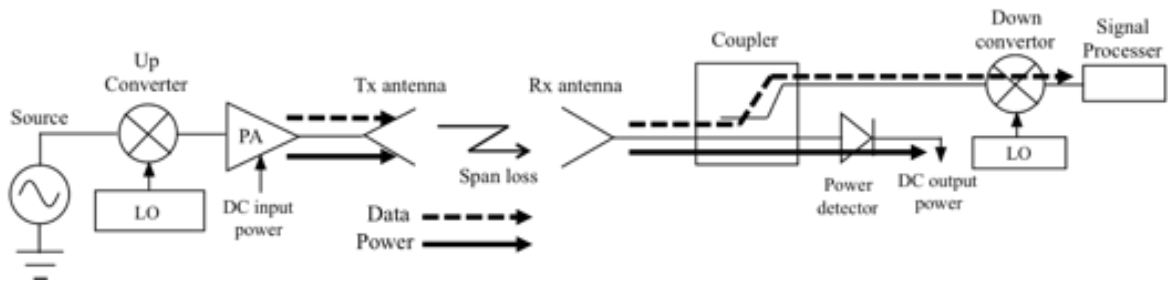


図 1. 無線情報電力伝送の原理図

電源(駆動電力)に再利用しようとするものである.WiCoPTにおいては同一周波数で電力と情報を同時もしくは時分割で伝送するシステムや異なる周波数帯を用いて電力と情報を伝送するシステムなどが検討されている.このようなシステムを実現するためには整流器に入力された信号の直流電力変換の高効率化が極めて重要である.しかし,著者らが報告しているように変調信号の整流器入力時には,CW信号入力時と比較して電力変換効率(PCE; Power Conversion Efficiency)が低下する課題がある[4].本報告では種々の変調信号(FSK,BPSK,QPSK,16QAM)を整流器に入力したときのPCEを測定評価し,CW入力時のPCEと比較して解析をしたので報告する.

本報告ではキャリア周波数 2.45GHz,全波整流回路であるダイオードブリッジ整流回路を用いて検討を進めた.第 2 章で測定に用いた整流器について説明を行い,第 3 章で測定結果について述べる.第 4 章において,CW入力時の整流器動作と比較しながら測定結果を考察する.

## 2. ブリッジ型整流回路

### 2.1 回路構成

図 2 に本検討で使用するダイオードブリッジ型全波整流回路の回路図を示す.

この回路ではショットキーバリアダイオードを 4 つ使用し,この回路には入力信号の位相が  $180^\circ$  異なった差動信号を入力しなければならないため整流部分の前端に  $180^\circ$  電力分配器を接続した.

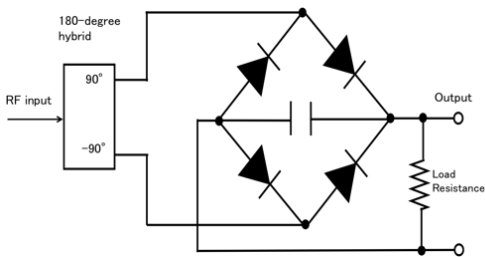
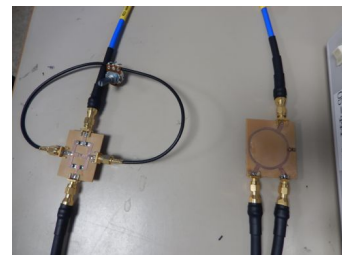


図 2. 本検討で使用する整流回路



(右側が  $180^\circ$ 電力分配器,左側が整流部分)

図 3. 実装した整流器

差動信号を生成する  $180^\circ$ 電力分配器と差動入力された信号を実際に整流する整流部分は別個基板で試作し,お互いを特性インピーダンス  $50\Omega$  の同軸ケーブルで接続してブリッジ型全波整流回路を構成した.図 3 は設計・試作した整流回路である.

本報告では Avago 社のショットキーバリアダイオード HSMS-285 を使用している.また出力抵抗は  $0\Omega$  から  $500\Omega$  まで可変できる負荷抵抗を接続している.

### 2.2 シミュレーション結果

今回は Agilent 社の回路シミュレーター ADS (Advanced Design Systems)の解析エンジンであるハーモニックバランス法を使用して設計シミュレーションを行った.今回使用したダイオード及び基板のパラメータをそれぞれ表 1,表 2 に示す.

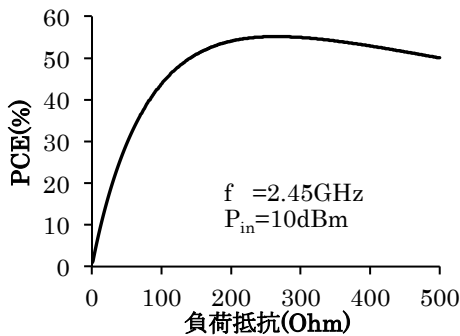
図 4 は RF-DC 変換効率と負荷抵抗,入力周波数,入力電力の関係を示した図である.図 4 (a)は負荷抵抗を  $0\Omega$  から  $500\Omega$  まで変化させた際の負荷抵抗対 DC 変換効率を示している.入力電力  $10\text{dBm}$  時に負荷抵抗  $264\Omega$  において,最高変換効率  $55\%$  を実現している.また図 4(b)は負荷抵抗を  $264\Omega$  に固定したときの入力周波数対変換効率の関係を示している. $700\text{MHz}$  以上の帯域幅 ( $2\text{GHz}\sim 2.7\text{GHz}$ )において変換効率  $50\%$  以上を実現している.また,図 4(c)は入力周波数  $2.45\text{GHz}$ ,出力負荷抵抗  $264\Omega$  に固定した時の入力電力対変換効率をプロットした図である.入力電力を増加させると変換効率が単調に増加するものの入力電力が  $22\text{dBm}$  を超えると変

表 1. ダイオードのパラメータ

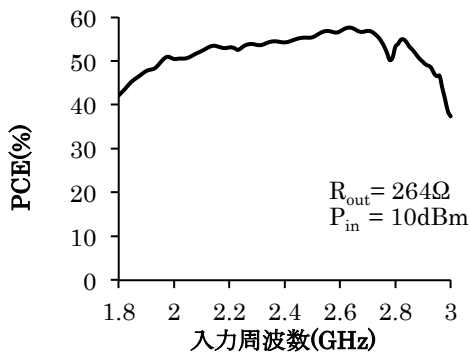
Parameter	Unit	Value
$B_V$	V	3.8
$C_{j0}$	pF	0.18
$E_G$	eV	0.69
$I_{BV}$	A	3E-4
$I_S$	A	3E-6
$N$		1.06
$R_S$	$\Omega$	25
$V_J$	V	0.35
XTI		2
M		0.5

表 2. 基板のパラメータ

Parameter	Unit	Value
基板厚 H	mm	1.6
誘電率 $\epsilon_r$		3.4
導電率 $\rho$		5.8E7
金属配線厚 T	um	38
誘電正接 Tan $\delta$		0.003



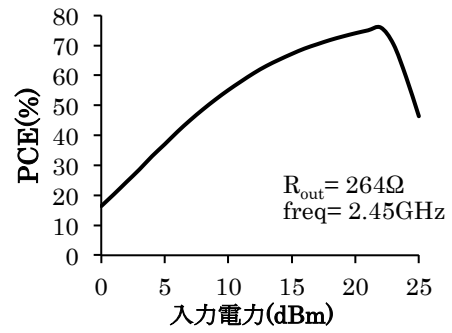
(a) 負荷抵抗対変換効率



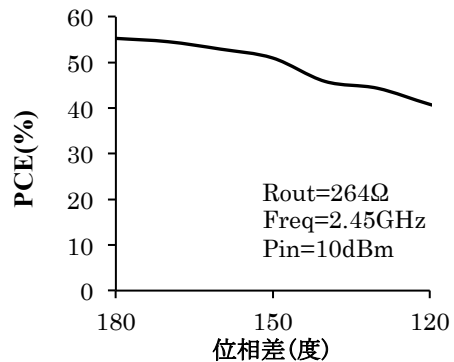
(b) 入力周波数対変換効率

図 4 整流回路のシミュレーション値

換効率が低下する. 図 4(d)は整流部分に差動信号の位相差を  $180^\circ$  から  $0^\circ$  まで変化させた時の入力信号の位相



(c) 入力電力対変換効率



(d) 差動信号の位相差対変換効率

図 4 整流回路のシミュレーション値

差対変換効率の関係を示している.

入力信号の位相差が  $180^\circ$  の時が最高変換効率(55%)を達成しており  $180^\circ$  からの位相差  $30^\circ$  以内であれば, 変換効率の低下は最高効率から 10% 以内に抑えることができる.

### 2.3 CW 入力実測結果

試作回路の測定を行った結果, 入力電力 10dBm 時の最適負荷抵抗は  $70\Omega$  となり, シミュレーション時の最適負荷抵抗  $264\Omega$  と比較して非常に小さな値となった. 負荷抵抗  $70\Omega$  に固定して入力電力を 0dBm から 25dBm

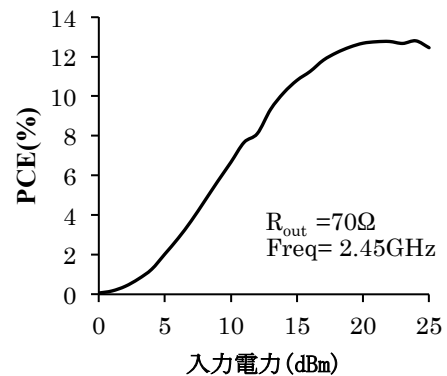


図 5 実装した整流器の入力電力対変換効率

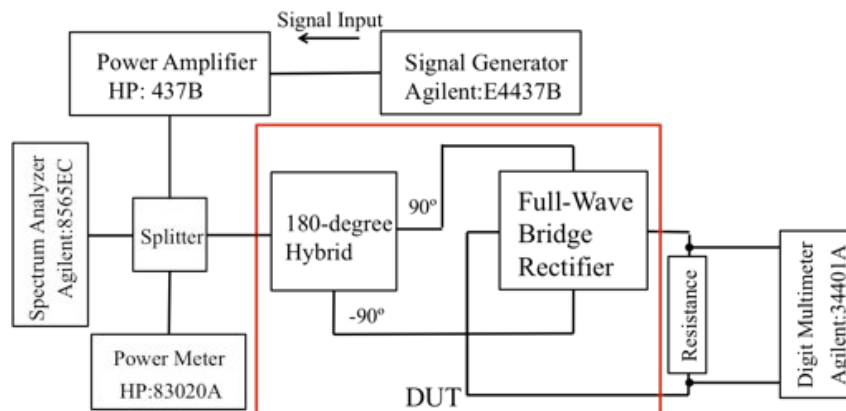


図 7 無線電力伝送の原理図

まで変化させた時の入力電力対変換効率のグラフを図 5 に示す。グラフより最高変換効率は入力電力 24dBm 時の 12.8%(10dBm 入力時は 7%)となり、シミュレーション値の最高変換効率 75.9%(21dBm 時)と比較して大きく効率が低下している。

この原因として、180°電力分配器で発生する差動信号の位相差やダイオードのモデルがずれていることだけではなく、今回の試作では 180°電力分配器と整流部分を別個に作成し、それぞれ同軸ケーブルで接続していたため、それぞれの回路のグラウンドが共通にならず電位が安定していない事が考えられる。

### 3. 変調信号入力時の効率

#### 3.1 実験方法

図 7 に実験系の概略図を示す。Agilent 社のデジタル信号発生器 (E4437B) を使用してデジタル変調信号を生成している。変調信号の種類、周波数帯域、入力電力の制御はこの機器で行っている。入力信号を確認するために、Agilent 社のスペクトラムアナライザ (8565EC) を用いて確認している。また信号発生器のみでは所望の入力電力を実現することが困難であったため Hewlett-Packard 社の電力増幅器 (437B) を使用して所望の入力電力まで増幅を行った。入力電力の確認は Hewlett-Packard 社のパワーメータ (83020A) を使用している。出力電圧を Agilent 社のデジタルマルチメータ (34401A) を使用して測定した。

#### 3.2 入力信号条件

入力変調信号は、FSK(変調指数：0.7)、BPSK、QPSK、16QAM を使用した。使用したシンボルレートはそれぞれの変調信号で 5Msps、2Msps、1Msps としている。表 4(a)から(d)に入力電力 10dBm における各変調信号のシンボルレートを変化させた時の全電力の 99%を占めている、占有帯域幅およびその時のピーク電力について示す。

表 4.シンボルレートにおける占有帯域幅及びピーク電力

(a) FSK 信号

シンボルレート	占有帯域幅 (MHz)	ピーク電力 (dBm)
5Msps	34	4.201
2Msps	14	4.201
1Msps	8	4.201

(b)BPSK 信号

シンボルレート	占有帯域幅 (MHz)	ピーク電力 (dBm)
5Msps	6.7	-11.25
2Msps	2.7	-11.25
1Msps	1.4	-11.25

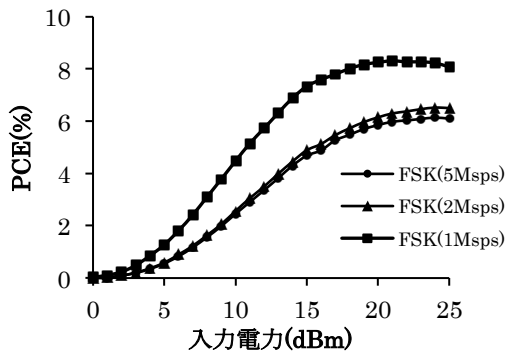
(c)QPSK 信号

シンボルレート	占有帯域幅 (MHz)	ピーク電力 (dBm)
5Msps	6.7	-12.0
2Msps	2.7	-12.0
1Msps	1.3	-12.0

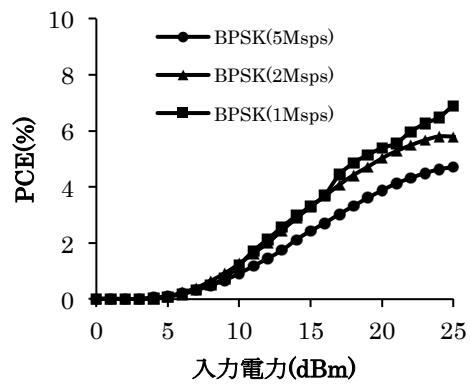
(d)16QAM

シンボルレート	占有帯域幅 (MHz)	ピーク電力 (dBm)
5Msps	6.7	-4.8
2Msps	2.4	-4.8
1Msps	1.3	-4.8

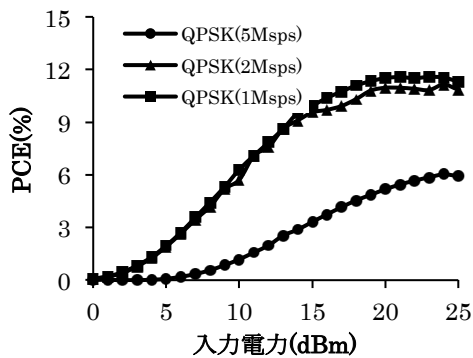
入力電力の定義は各変調信号から出力されている全ての周波数成分の積分値でありパワーメータで測定した値を採用している。



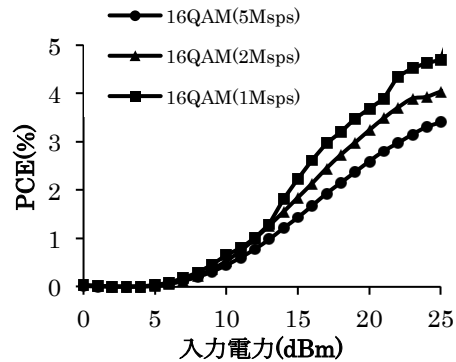
(a) FSK 信号入力時の変換効率



(b) BPSK 信号入力時の変換効率



(c) QPSK 信号入力時の変換効率



(d) 16QAM 信号入力時の変換効率

図 8. 各種変調信号入力時の入力電力対変換効率

### 3.3 測定結果

図 8 に表 4 に示した入力信号時の測定結果を示す. 図(a)は FSK 信号入力時の変換効率,図(b)は BPSK 入信号時の変換効率,図(c)は QPSK 信号入力時の変換効率, 図(d)は 16QAM 信号入力時の変換効率である.

また,CW 入力時及び各変調信号入力時の最大変換効率及びそのときの入力電力の比較を表 5 に示す.

図 8 の各グラフより変調信号のシンボルレートが小さい信号ほど変換効率が大きいことが分かり,また表 5 よりいずれの変調信号も CW の変換効率と比較して変換効率が低いことが分かる.

### 4. 考察

3 章で変調信号入力時においてシンボルレートが小さいほど変換効率が高いことが示した. この結果について各シンボルレートにおけるスペクトラムに着目した.例として QPSK 信号について示す.図 9 よりシンボルレートが小さい値ほど周波数帯域幅が狭いことが分かる.

つまり,同入力電力でシンボルレートが小さい場合,

表 5. 各入力信号の最高変換効率

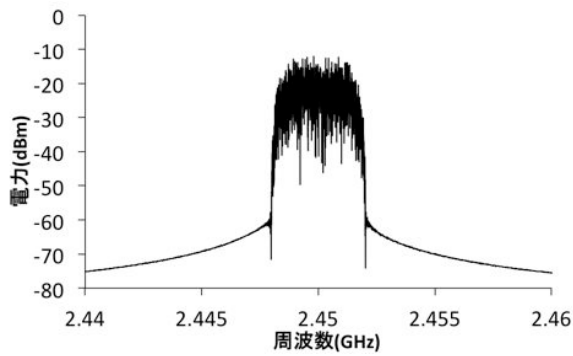
信号	最高効率	入力電力
CW	12.8%	24dBm
FSK(1Mpsps)	8.31%	21dBm
BPSK(1Mpsps)	6.87%	25dBm
QPSK(1Mpsps)	11.58%	21dBm
16QAM(1Mpsps)	4.69%	25dBm

電力密度が高くなり,それが原因で DC 変換効率が高くなったと考えられる.しかし,変調信号により変換効率に違いが生じている理由や今回使用した FSK 信号変調指数(0.7)以外の 変調指数の変換効率について解析は今後の課題である.

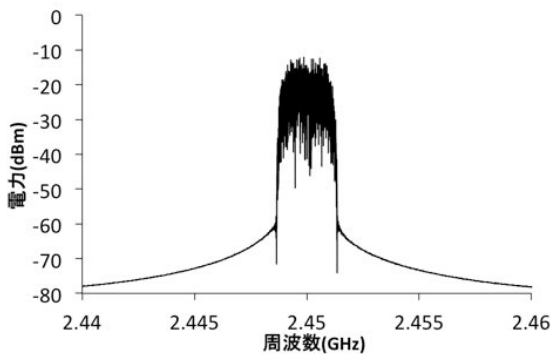
今後の予定としては、FSK 信号の変調指数を変化させた時の変換効率を検討し、更に各種変調信号で変換効率が異なる原因について詳細に解析を行う予定である。

## 文 献

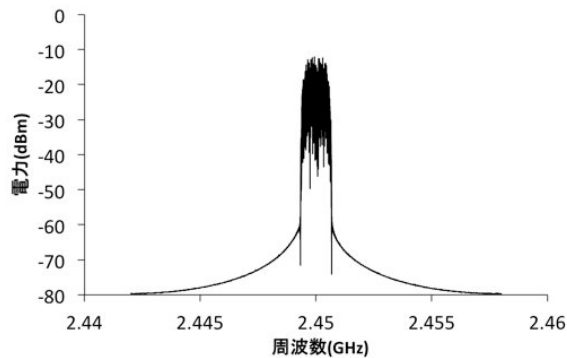
- [1] 川崎 繁男, “無線情報エネルギー伝送と RF ハーベスティング,” 電子情報通信学会誌, Vol.95, No.9, pp.815-822, Sep.2012.
- [2] S. Kawasaki, S. Kawai, T. Yamamoto, K. Takei, H. Seita, “A 5.8 GHz- band active integrated phase array antenna with wireless communication and power transmission functions for space and satellite use,” in 2008 China-Japan Joint Microwave Conf., Shanghai, China, Sep. 2008, pp. 435-438.
- [3] J.Ho, S.Kim, and A. Poon, “Midfield Wireless Powering for Implantable Systems,” Proceedings of IEEE, Vol.101, No.6, pp. 1369-1378, June 2013,
- [4] H.Sakaki, S.Yoshida, K.Nishikawa, S.Kawasaki, ”Analysis of Rectifier Operation with FSK modulated Input Signal,” 1<sup>st</sup> Wireless Power Transfer Conf., Perugia, Italy, May 2013, pp.187-190.
- [5] Yu-Lin Yang, Chi-Lin Tsai, and Chin-Lung Yang, “Using pulse Width and Waveform Modulation to Enhance Power Conversion Efficiency under Constraint of Low Input power,” Proc. of 2012 Asia-Pacific Microwave Conf., no.3A3-04, pp.400-402, Kaohsiung, Taiwan, Dec.2012.



(a)シンボルレート 5Msps の QPSK



(b)シンボルレート 2Msps の QPSK



(c)シンボルレート 1Msps

図 9.各シンボルレートのスペクトラム

## 5. まとめ

本報告では WiCoPT 実現の為に各種変調信号を入力した際の DC 変換効率について報告を行った。設計した整流器は効率が良かったものの、実装した結果はシミュレーション値と比較して大きく低下してしまった。この原因としては作成した 180°電力分配器が所望の特性を得られなかった事が考えられる。

後半では FSK, BPSK, QPSK, 16QAM の各種変調信号を入力した時の変換効率について検討を行った。CW と比較するとこれらの変調信号全ての変換効率は低いものであった。また、シンボルレートの低い信号ほど電力変換効率が高いことを明らかにした。