

Improvement Study on Rectenna Efficiency

Teruo FUJIWARA[†], Kazuo HASEGAWA[†], Minoru FURUKAWA^{††},
Yutaro KOBAYASHI^{†††}, Shoichiro MIHARA^{†††} and Takashi SAITO^{†††}

[†] Technologies Development Department, IHI Aerospace Co., Ltd. 900 Fujiki, Tomioka, Gunma, 370-2398 Japan

^{††} Nihon Dengyo Kosaku Co., Ltd 2-2-7 Asahimachi Nerima-ku, Tokyo, 179-0071 Japan

^{†††} Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer 2-12 Kanda-ogawamachi, Chiyodaku, Tokyo, 101-0052 Japan

E-mail [†] qfuji@js5.so-net.ne.jp, hase-kazu@iac.ihi.co.jp, ^{††} m-furukawa@ndk-k.co.jp,
^{†††} y.kobayashi@usef.or.jp, mihara@usef.or.jp, saito@usef.or.jp

A highly efficient rectenna in microwave power transmission is considered as a technical matter of the greatest importance solved toward Space Solar Power System in future. In NASA reference system, a RF-to-dc conversion efficiency of 89% was used for microwave power receiving system in the feasibility study for Space Solar Power System, which number of RF-to-dc conversion efficiency might be presumed to be a guide for improvement of rectenna efficiency hereafter.

It is reported that a RF-to-dc conversion efficiency is 70% or so in most of rectenna developed at a 5.8 GHz input microwave power and most of the power loss might be caused by the efficiency of a diode in a rectenna. The paper describes a discussion on the input microwave power to rectenna at 5.8 GHz, a review on the performance of diodes used previously for rectenna and a diode performance required for rectenna with the target RF-to-dc conversion efficiency of at the 5.8 GHz input microwave power.

レクテナ高効率化に関する一考察

藤原 暉雄[†] 長谷川 和男[†] 古川 実^{††}
小林 裕太郎^{†††} 三原 荘一郎^{†††} 齋藤 孝^{†††}

[†] (株) IHI エアロスペース 〒370-2398 群馬県富岡市藤木 900

^{††} 日本電業工作 (株) 〒102-0074 東京都千代田区九段南 4-7-15

^{†††} (財) 無人宇宙実験システム研究開発機構 〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 2-12

1. はしがき

宇宙太陽光発電システム (SPS) の実現に向けて、克服すべき重要な技術課題の1つとして電力伝達能力の高効率化がある。NASA の SPS Reference System では、受電システムに 89%の変換効率を用いてシステムのフェージビリティスタディが行われているが、将来の受電システムに関してこの値が指針となると思われる。

現在、開発されているレクテナのレクテナ素子レベルの変換効率は、概ね 70%程度止まりであるが、この変換効率の支配的要因は、整流回路に使用されている整流ダイオードにあると考えられている。本稿では現状のレクテナの変換効率の改善を目的として実施した整流ダイオードのあるべき特性に関して検討概要を報告する。

2. 受電システムの概要

宇宙太陽光発電システム (SPS) に於けるマイクロ波送電のための受電システムでは、マイクロ波電力を直流電力に変換するレクテナ素子 (図 1) を用いて、これ等を平面的にアレイ状に配置し、個々のレクテナ素子の直流出力を直並列接続して集電する構成となっている。

レクテナ素子は、図 1 に示すように、アンテナと整流回路から構成される極めて簡単な構造である。整流回路には、一般的に、自己バイアス整流方式が採用されており、入力フィルター、アノードが接地側にカソードが伝送線路側に接続される整流ダイオード及び出力フィルターから構成されている。入力フィルターはアンテナから入力される基本波を整流回路側に通過させ、整流ダイオードの非線形特性で発生する高調波の再放射を阻止する機能を、又、出力フィルターは負荷抵抗に直流だけを出し、マイクロ波を反射する機能を有している。

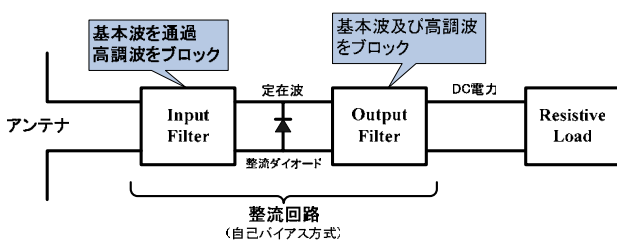


図 1 レクテナ素子

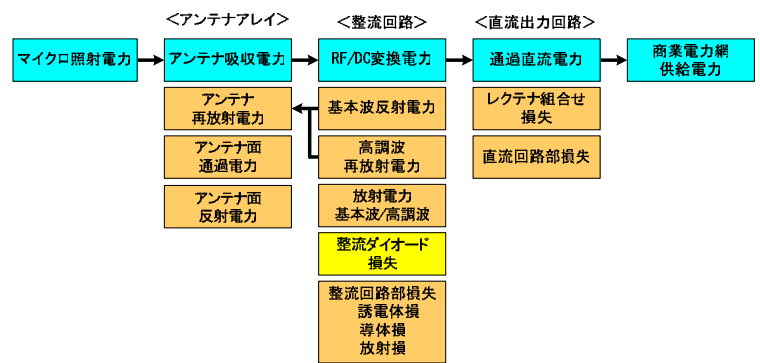


図 2 受電システムに於ける電力損失要因

上記のレクテナ素子によって構成される受電システムの受電効率 (RF/DC 変換効率) は、受電システムを照射する RF 電力に対する商業電力網への直流供給電力の比として定義される。この受電効率を左右する要因、即ち、受電電力の損失には種々の要因が推定される。これ等の要因を図 2 に示す。ここでは、これ等の種々の電力損失要因のうち、整流ダイオードに絞って電力損失の低減、即ち、整流効率の向上のための整流ダイオードに対する特性について検討を行う。

3. 整流ダイオードに対する電力面からの要求

取り扱う RF 電力の大きさによって整流ダイオードの高効率化に関して要求される特性が異なることから、先ず整流ダイオードに対する入力電力について検討を行う。

レクテナの整流回路に対する入力電力は、レクテナのアンテナ素子あるいはサブアレイアンテナの実効開口面積とレク

テナ面を照射するマイクロ波の電力密度の積として求められる。

マイクロ波の電力密度については、NASAのReference Systemの例が1つの指針となる。図3にNASA Reference Systemに於ける受電サイトでの電力密度が許容値として示される。直径約10kmの受電システムの中心部での電力密度は23mW/cm²、端部では約1mW/cm²、又、0.1mW/cm²以上の地域は、人間に対する防護のための立ち入り禁止区域である。この23mW/cm²は、電離層のプラズマへの影響を勘案して決定されたものであるが、最近では、生体への影響として100mW/cm²以下あるいは50mW/cm²以下等が議論に上っており、将来は受電システムの中心部にこれ等の値が最大電力密度に適用される可能性もある。

レクテナに対する最小電力密度は、マイクロ波の空間電力伝送に伴う電力収集効率に依存している。NASA Reference Systemでは、送電アンテナ面に10dBのガウシアン電力分布を施してサイドローブ特性の改善を行い、電力をメインローブに集中させると共にレクテナ端部で1mW/cm² (-13.6dB) レベル迄の電力を収集することで高い電力収集効率(88%)を達成している。筆者等は、周波数5.8GHz、送電電力10kWの小規模な送受電システムについて、送電距離1000mの条件で、送電アンテナ面の電力分布に10dBのガウシアン分布と一様分布のケースについて電力収集効率を試算した。10dBのガウシアン分布では、半径11mの受電面積で88%の電力収集効率が達成されるが、このときのレクテナ端部での電力密度は中心部の電力密度に対して-13.9dBであり、NASA Reference Systemと同様である。一方、一様分布の場合、半径11mの受電面積では、75%の電力収集しか達成できなく、この際のレクテナ端部での電力密度は、中心部の-22.5dBであり、10dBのガウシアン分布に比べて8.6dB低いレベルである。受電システムの中心部に23mW/cm²を適用すれば、レクテナ端部の電力密度は、10dBのガウシアン分布では23mW/cm²、一様分布では0.13mW/cm²なる。

次にアンテナの実効開口面積である。受電システムに於けるレクテナの数量を考慮すると、レクテナの実効開口面積は大きい方が望ましいが、半面、アンテナの指向性が鋭くなり、マイクロ波の照射ビームに対するアンテナの指向誤差によってアンテナ利得が低下し、引いては受電効率の低下を招くことになる。

図4に周波数5.8GHzについて、実開口面積をパラメータとしてアンテナ相対利得と指向性誤差の関係を表す。アンテナ相対利得は受電効率の低下率を意味している。例えば、アンテナでの受電効率低下を3%以内、アンテナ指向性角度誤差を3deg以下と仮定するとアンテナの絶対利得12dBi、即ち、実効開口面積は33.7c m²以下となる。ここでアンテナの実効開口面積に関して、アンテナでの受電効率低下、アンテナ指向性誤差角度に最上記の値を許容値と仮定して単一レクテナへの入力電力を纏めると表1のとおりである。

表1 レクテナ(単体)への入力電力

レクテナアンテナ構成	利得 dBi	有効面積 cm ²	電力密度(mW/cm ²)			
			100	23	1	0.13
ダイポールアンテナ(反射板付)	6.5	9.5	950	219	9.5	1.2
マイクロストリップアンテナ	9.0	16.9	1691	389	16.9	2.2
アンテナのサブアレイ化	12.0	33.7	3374	776	33.7	4.4

回路の簡素化の観点からレクテナの整流回路を単一の整流ダイオードで構成することを前提とすると、表1は整流ダイオードに対する電力要求である。なお、33.7cm²の実効開口面積は、ここではサブアレイ化で達成することを前提としている。

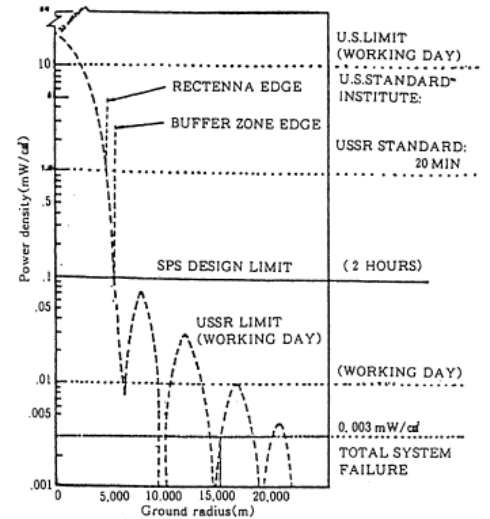


図3 NASA Reference System/受電サイトに於ける電力分布

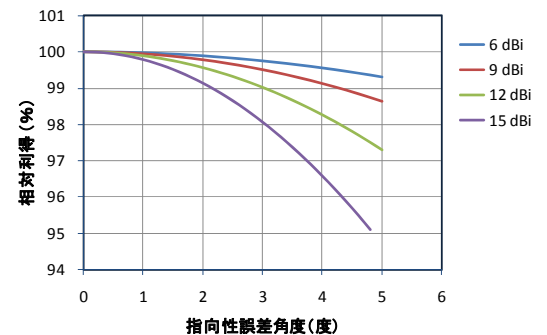
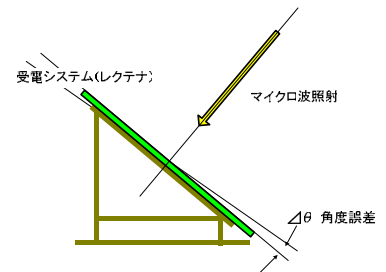


図4 指向性誤差に伴う受電効率低下

4. 整流ダイオードの現状と特性改善の検討

4.1 自己バイアス整流回路に関するRF/DC変換効率の解析方法

レクテナの整流回路については、一般に、高効率が期待でき、簡単な構造のために自己バイアス方式が広く用いられている。この自己バイアス方式の整流回路のRF/DC変換効率に関して、幾つかの文献で解析が行われているが、ここではJ.O.McSpadden, Lu.Fan 及び Kai Chang 等によって開発されたRF/DC変換効率の解析方法 [1] を用いて整流ダイオードの特性改善の検討を行う。

この解析手法では、整流回路に整流ダイオードのシリーズ抵抗 R_s 、非線形抵抗 R_j 及び非線形のジャンクション容量 C_j を用いて図5に示す等価回路を設定し、更に以下の仮定が設けられている。

- 1) 基本波成分と直流成分だけからなる電圧が図5の等価回路のAとCに印加される。
- 2) ダイオードが順方向にバイアスとき、ジャンクション容量に流れる電流は無視される。
- 3) ダイオードが順方向にバイアスとき、ジャンクションを通しての電圧降下は一定に保持される。

以上の仮定の下で整流回路に印加される電圧波形 V 及びダイオードジャンクション電圧波形 V_d は、自己バイアスされた状態で図6に示すとおりである。

ダイオードがOFF状態でシリーズ抵抗 R_s を通じてジャンクション容量 C_j に電流が流れ、又、ON状態では、非線形抵抗 R_j とシリーズ抵抗 R_s を通じて電流が流れると共にジャンクション容量 C_j に蓄積されていた電荷がシリーズ抵抗 R_s を通じて放電する。これ等の動作を通じて非線形抵抗 R_j 及びシリーズ抵抗 R_s で電力消費するが、これ等の電力損失より、下式のRF/DC変換効率(整流効率)の算出式が導かれている。なお、非線形抵抗 R_j は立上り電圧 V_{bi} に相当する。

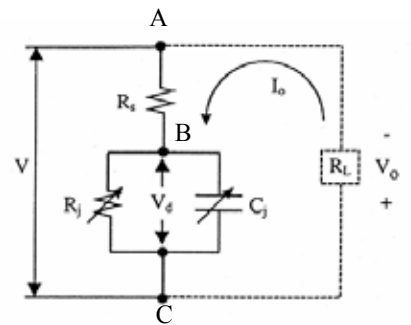


図5 整流回路の等価回路

RF/DC変換効率

$$\eta_d = \frac{P_{dc}}{P_{dc} + P_{loss}} = \frac{1}{1 + P_{loss}/P_{dc}} \quad \dots\dots\dots ①$$

出力電力

$$P_{dc} = \frac{V_o^2}{R_L} \quad \dots\dots\dots ②$$

ダイオード消費電力

$$P_{loss} = LOSS_{on,R_s} + LOSS_{off,R_s} + LOSS_{on,diode} = A + B + C \quad \dots\dots ③$$

$$A = \left(\frac{LOSS_{on,R_s}}{P_{dc}} \right) = \frac{R_L}{\pi R_s} \left(1 + \frac{V_{bi}}{V_o} \right)^2 \left[\theta_{on} \left(1 + \frac{1}{2 \cos^2 \theta_{on}} \right) - \frac{3}{2} \tan \theta_{on} \right] \quad \dots\dots ④$$

$$B = \left(\frac{LOSS_{off,R_s}}{P_{dc}} \right) = \frac{R_s R_L C_j^2 \omega^2}{2\pi} \left(1 + \frac{V_{bi}}{V_o} \right) \left(\frac{\pi - \theta_{on}}{\cos^2 \theta_{on}} + \tan \theta_{on} \right) \quad \dots\dots ⑤$$

$$C = \left(\frac{LOSS_{on,diode}}{P_{dc}} \right) = \frac{R_L}{\pi R_s} \left(1 + \frac{V_{bi}}{V_o} \right) \frac{V_{bi}}{V_o} (\tan \theta_{on} - \theta_{on}) \quad \dots\dots ⑥$$

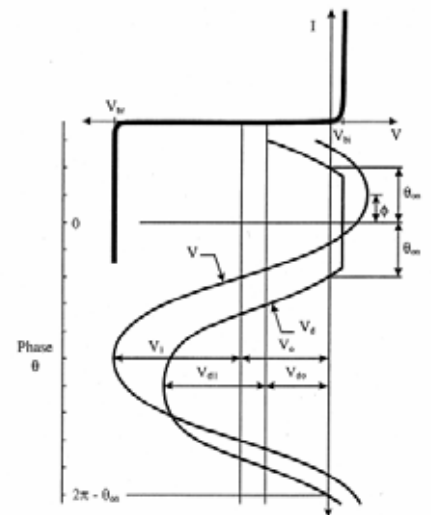


図6 整流ダイオードに印加される基本波とジャンクションの両端に掛かる電圧波形

ジャンクション・バイアス容量

$$C_j = C_{j0} \sqrt{\frac{V_{bi}}{V_{bi} + |V_o|}} \quad \dots\dots\dots ⑦$$

ダイオードON時の位相角

$$\tan \theta_{on} - \theta_{on} = \pi R_s / P_L (1 + V_{bi}/V_o) \quad \dots\dots\dots ⑧$$

4.2 レクテナ用整流ダイオードの現状

これまでに報告されたレクテナ用整流ダイオードについて、ダイオード定数の詳細が記載されている素子を取り上げ、定数とRF/DC変換効率を表2に示す。

過去、最高のRF/DC変換効率はRXCVCによって、91.3%が達成されているが、他のダイオードは概ね80%止まりである。RXCVCは小さいシリーズ抵抗 R_s と高い逆耐電圧で高効率を達成している。但し、これは10Wの入力電力、2.45GHzの周波数についてである。表2中の定数を用い、3.1項で述べた解析手法により、当該ダイオードに関して2.45GHzと5.8GHzについて求めたRF/DC変換効率を図7に示す。2.45GHzでは、出力電圧30Vで0.5W~10Wの入力電力に対して90%の効率が達成できるが、5.8GHzでは低い入力電力領域では90%の効率は得られていない。特に500mWの入力電力では最高効率は約80%である。

なお、このダイオードは現在はフェーズアウト品であるが、このダイオードを含めても5.8GHzの周波数では90%を凌駕する整流ダイオードは過去、現在共に見当たらない。

表2 過去に報告されたレクテナ用整流ダイオード

周波数 (GHz)	ダイオード型番	R_s (Ω)	C_j (pF)	V_{br} (V)	V_{bi} (V)	変換効率 (%)	最適入力電力	
							(dBm)	(mW)
2.45	RXCVC	0.60	3.70	64.0	0.90	91.3	40.0	10000
	MA46135-32	0.65	2.30	60.0	0.70	87.0	36.0	4000
	YHP5082-2824	8.50	1.00	15.0	0.86	60.0	20.1	102
5.8	HP5082-2835	5.00	0.70	9.0	0.34	70.0	25.4	350
	HSMS286B	6.70	0.15	9.2	0.30	74.0	17.8	60
	MA4E1317	4.00	0.02	7.0	0.40	80.0	21.1	130
	MA46135-32	0.65	2.30	60.0	0.70	76.0	34.8	3000
	MA40150-119	8.00	0.12	8.8	0.40	80.0	17.0	50
	MA4E2054-1141	11.00	0.10	5.0	0.40	75.0	10.0	10

○ 整流回路のみ
入手可能品

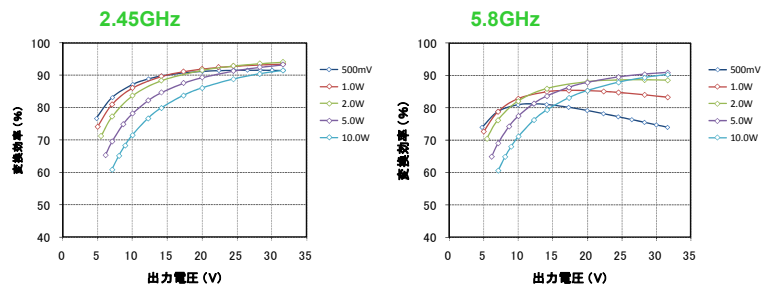


図7 RXCVのRF/DC変換効率 (解析値)

4.3 整流ダイオードに対する高効率化のための特性要求

入手可能な整流ダイオード HP5082-2835 を例にとって高効率化に伴う特性改善の検討を行う。HP5082-2835 を用いた整流回路についてRF/DC変換効率の実験値と4.1項の方法による解析値との比較を図8に示す。周波数は5.8GHz、入力電力は300mWである。整流回路は入力電力300mW、出力電圧約8Vで最大効率が得られるように調整されている。解析値は、出力電圧8Vで約83%の効率、実測値は約70%の効率であり、約13%が整流ダイオードに伴う損失であり、約13%が整流ダイオード以外の要因による損失と考えられる。

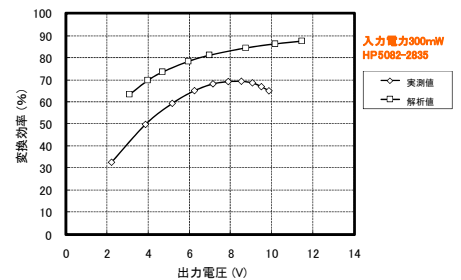


図8 HP5082-2835のRF/DC変換効率

受電システムに89%以上のRF/DC変換効率を期待するためには、整流ダイオード以外の要因による損失を考慮すると、整流ダイオードに伴う損失は数%以内に抑えることが必要となる。即ち、RF/DC変換効率は95%以上が必要となる。

整流ダイオードHP5082-2835について、シリーズ抵抗 R_s 、立上り電圧 V_{bi} 及び逆耐電圧 V_{br} を改善することでRF/DC変換効率の改善が期待できる。図9は、5mW、50mW、500mW、5Wの入力電力について、シリーズ抵抗 R_s 、立上り電圧 V_{bi} をそれぞれ現状の値の1/5倍に低減するときの変換効率の改善状況を示している。

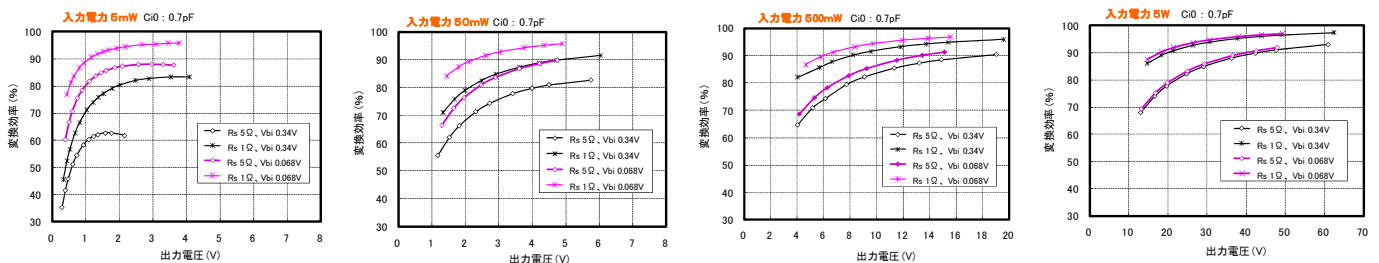


図9 HP5082-2835のRF/DC変換効率の改善

入力電力5mWでは、シリーズ抵抗 R_s と立上り電圧 V_{bi} の両特性の改善が必要となる。入力電力50mWでもシリーズ抵抗 R_s と立上り電圧 V_{bi} の両特性の改善が必要であるが、加えて逆耐電圧も幾分改善することが必要である。なお、逆耐電圧 V_{br} は、図6で明らかのように出力電圧の2倍以上が要求される。入力電力500mWの場合は、立上り電圧 V_{bi} の

改善は効果が少なく、シリーズ抵抗 R_s と逆耐電圧の改善が必要となる。逆耐電圧は 28V~30V 程度に改善されることが必要である。入力電力 5W では、立上り電圧 V_{bi} の改善は殆ど効果がなく、シリーズ抵抗 R_s と逆耐電圧の改善が必要となる。逆耐電圧は 80V~90V に改善されることが必要である。ここではジャンクション容量 C_j について触れなかったが、HP5082-2385 の場合、ジャンクション容量 C_j が十分に小さいためである。

5. レクテナ並列動作に伴う制約条件

受電システムに於いてレクテナの出力電力は直列・並列接続によって適切な電力形態に集電されるが、レクテナの並列接続動作では、レクテナの単体動作時に比べて破損し易い状況となることが報告 [2] されている。これによるとレクテナの故障は、整流ダイオードの逆耐電圧の劣化に起因しており、信頼性の観点からは、バイアス電圧は、極力、低い状態で動作させることが必要であると報告されている。自己バイアス整流回路では、バイアス電圧（出力電圧）を高く設定し、電流を減らすことで高い変換効率を達成しており、高効率動作の観点からは、極力、高いバイアス電圧で動作させることが要求される。

整流ダイオード HP5082-2835 及び HSMS282Y の逆方向の電圧-電流特性の実測値を図 10 に示す。これ等の整流ダイオードのメーカー保証の逆耐電圧は、それぞれ、9V、9.2V であり、信頼性の観点からは、これ等の電圧の 1/2 以下にバイアス電圧を設定することが必要である。逆耐電圧保証値以上のバイアス電圧を長時間に亘って印加した状態で、漏れ電流が徐々に増加することを筆者達も確認している。逆耐電圧以下ではこの現象は生じない。

これ等を考慮すると図 8 に示す HP5082-2835 は、最高の RF/DC 変換効率 70% で動作させることは難しく、最高効率より 10% 低い 60% の RF/DC 変換効率しか期待できないことになる。この場合、解析値からすると整流ダイオードでの損失は 25% と推定される。

以上、信頼性の観点からも整流ダイオードには高い逆耐電圧が要求されることになる。これ等の点を考慮して 4.3 項での逆耐電圧の要求値は、メーカー保証値に相当する値を意味している。

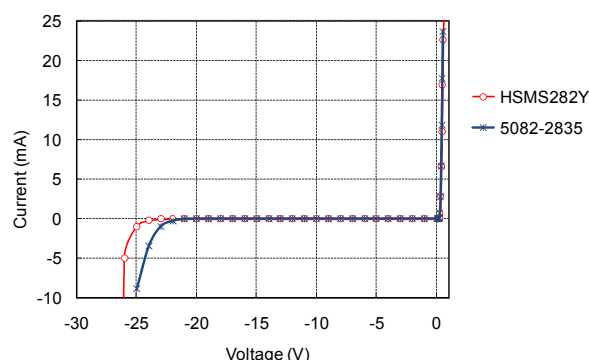


図 10 逆方向V-I特性の実測値

6. まとめ

- (1) 受電サイトに於ける受電システム上のマイクロ波電力密度及び受電システムの指向性誤差を考慮してレクテナに対する入力電力として 5mW~5W を考慮することが必要である。
- (2) 過去に報告されているレクテナ用整流ダイオードをレビューした結果、90%の変換効率を達成しているダイオードが、周波数 2.45GHz、入力電力 10W の条件で唯一存在する。但し、上記の周波数 5.8GHz、上記の入力電力条件では、90%の変換効率を達成した例は過去にはない。
- (3) 整流ダイオード HP5082-2835 を用いた整流回路について、J.O. McSpadden 等によって開発された RF/DC 変換効率の解析方法により評価を行った。最大効率 70% の実測値に対して、整流ダイオードの損失だけを考慮した解析値は 83% であり、実測値の 30% の損失のうち、17% が整流ダイオードによる損失、13% がその他の要因による損失であるとの結果が得られた。
- (4) 整流ダイオード HP5082-2835 を例にとり、整流ダイオードによる損失の低減検討を行った。低い入力電力領域では、シリーズ抵抗 R_s と立上り電圧 V_{bi} の改善、高い入力電力領域ではシリーズ抵抗 R_s と逆耐電圧 V_{br} の改善が必要である。
- (5) 上記の逆耐電圧の改善には、レクテナの並列動作の信頼性の観点からの考慮が必要である。

文 献

- [1] J. O. McSpadden, Lu. Fan and Kai Chang, "A high conversion efficiency 5.8GHz rectenna", in 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Denver, CO, June 1997, pp.547-550
- [2] 長谷川和雄、長野賢司、藤原暉雄、古川実、小林裕太郎、三原荘一郎、齋藤孝, "並列接続状態でのレクテナの動作について" 信学技報, SPS2008-06 (2008-07)