

マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗

布施 嘉春¹ 斉藤 孝¹ 三原 莊一郎¹ 伊地智 幸一¹ 苗村 康次²
本間 幸洋² 佐々木 拓郎² 小澤 雄一郎³ 藤原 栄一郎³ 藤原 暉雄³

1 財団法人 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

2 三菱電機株式会社 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

3 株式会社 IHI エアロスペース 〒370-2398 群馬県富岡市藤木 900

1 E-mail: {fuse, saito, mihara, ijichi}@usef.or.jp

2 E-mail: Namura.Koji@da.MitsubishiElectric.co.jp, Homma.Yukihiro@df.MitsubishiElectric.co.jp,

Takuro.Sasaki@dn.MitsubishiElectric.co.jp

3 E-mail: {yuichiro-ozawa, e-fujiwara}@iac.ihico.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp

あらまし 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)では、将来の電力代替エネルギー源としての宇宙太陽発電システム(SSPS)に関する調査研究を1990年代から実施してきた。2009年からは経済産業省(METI)からの委託を受けて「太陽光発電無線送電技術の研究開発事業」を推進中であり、ここでは次なる宇宙実証フェーズへの前段階として、GaN HEMTを用いた薄型・高効率のフェーズドアレイ送電アンテナや、高効率整流用ダイオード素子の実現に向けた技術検討、及び地上エネルギー伝送実験に向けて取り組んでいる。本報告では、過去の研究成果について簡単に触れた後、現在取り組んでいるプロジェクトの概要を進捗状況とともに説明する。

キーワード 宇宙太陽光発電、マイクロ波地上エネルギー伝送、送電部、受電部、デモンストレーション試験

Outline and Progress of Microwave Ground Power Transmission Experiment

Yoshiharu FUSE¹ Takashi SAITO¹ Shoichiro MIHARA¹ Koichi IJICHI¹ Koji NAMURA²

Yukihiro HONMA² Takuro SASAKI² Yuichiro OZAWA³ Eiichiro FUJIWARA³

and Teruo FUJIWARA³

1 Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer 2-12 Kanda-Ogawamachi, Chiyodaku, Tokyo, 101-0052 Japan

2 Mitsubishi Electric Corporation 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasakicity, Hyogo, 661-8661 Japan

3 IHI Aerospace Co., Ltd. 900 Fujiki Tomiokacity, Gunma, 370-2398 Japan

1 E-mail: {fuse, saito, mihara, ijichi}@usef.or.jp

2 E-mail: Namura.Koji@da.MitsubishiElectric.co.jp, Homma.Yukihiro@df.MitsubishiElectric.co.jp,

Takuro.Sasaki@dn.MitsubishiElectric.co.jp

3 E-mail: {yuichiro-ozawa, e-fujiwara}@iac.ihico.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp

Abstract Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer, USEF, has been studying Space Solar Power System, SSPS, as future electricity alternative energy source since 1990s. From 2009, USEF started new research and development project of the Photovoltaic Power Ground Wireless Power Transmission under a support of Ministry of Economy, Trade and Industry, METI. This project includes the study for high efficient and thin structured phased array antenna, and the study to realize high efficient rectenna element. Also this project plans to test ground wireless power transmission as a previous stage to the next space proof of SSPS. In this paper, outline and progress of this project are introduced.

Keyword SSPS, Microwave Power Transmission, Transmitting Section, Receiving Section, Demonstration Test

1. はじめに

財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF)では、経済産業省(METI)及び同省関連団体からの委託を受けて、宇宙太陽発電システム (SSPS)に関する調査研究を1990年代から継続的に進めてきた。この内容には、SSPSシステム検討の他、マイクロ波送電技術に関する技術実証確認も含まれている。2009年からはMETIからの委託を受けて「太陽光発電無線送電技術の研究開発事業」に取り組み、これまでの成果を生かしながら、キロワットオーダーでのマイクロ波エネルギー伝送実験の実施を検討しているところである。

本報告では、過去の研究の成果と、今回のプロジェクトへの取り組み内容などについて述べる。

2. SSPS 活動

2.1. SSPS 全体計画と USEF の取り組み

SSPS については、図1のMETIの技術ロードマップ[1]にも示される通り、2030年代に1GWクラスの商用SSPSを実現することを目標において各関連機関が活動を進められている。これまでに原理や基本技術の確認及び要素レベルでの実証を進め、次ステップとなる宇宙軌道上実証に進む一歩手前のフェーズにある。USEFでは、図2に示す通りのシステム検討、要素試作検討などを継続的に実施してきた[2]。

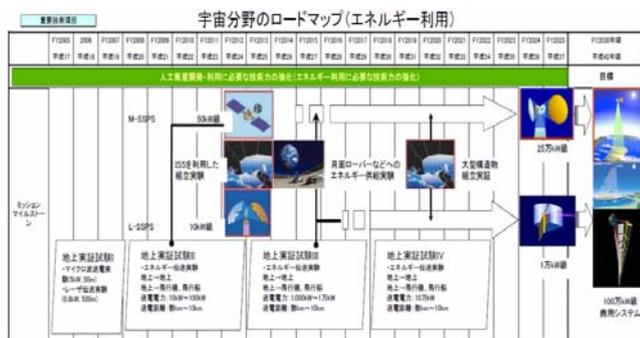


図1 経済産業省 技術戦略マップより抜粋

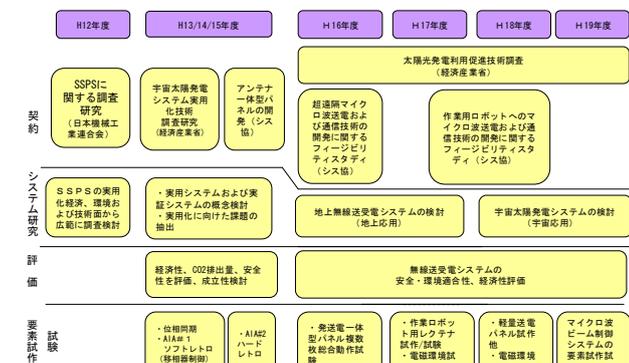


図2 USEFのSSPS活動状況

2.2. SSPS システム検討成果

図3に示すシングルバス型モデルは、平面状の発電電一体型パネルと上方のバス部を複数のテザーによって結合し重力傾斜により姿勢安定を図るロバストな方式である。発電電一体型パネルは上面が太陽電池セル、下面が送電用のフェーズドアレイアンテナと太陽電池セルから構成される。集光パネルや、その駆動機構を持たないシンプルなシステムが特徴である。図4はシングルバス型モデルをベースに、段階的發展というコンセプトを付加したマルチバス型モデルである[2]。

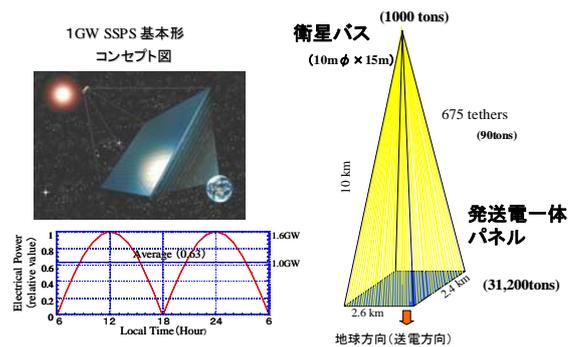


図3 シングルバス型モデル

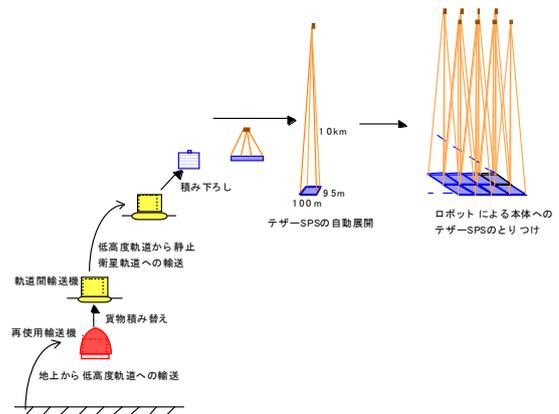


図4 マルチバス型モデル及び構築シナリオ

2.3. 要素試作検討成果

(1) マイクロ波送電用アクティブ集積アンテナの試作

SSPSの基本構成要素である発電電一体型パネルの送電用フェーズドアレイパネル(積層型の高効率アクティブ集積アンテナ(AIA))の試作試験を2002年から実施した。この試作においては、パイロット信号到来方向へマイクロ波を放射させるレトロディレクティブ機能を持たせ、AIA#1はソフトウェア的に、AIA#2はハードウェア的にレトロディレクティブ機能を実現させた。さらにはこれらを組み合わせて、複数(2枚)の送電パネルの相互協調動作試験を図5のとおり実施し a. ビーム合成において主局・従局の距離を変えても影響がないこと、b. ビーム制御において10度、20度方向

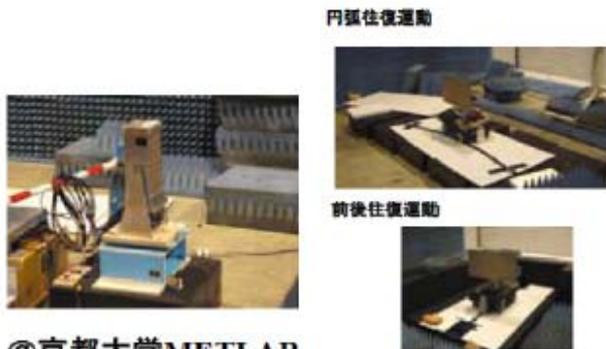
でのビーム合成、c.パネル面補正機能において 2 枚の
 パネルに角度誤差が生じたときの補正機能、などを確
 認した[3]。



図 5 AIA#1 及び AIA#2 の組み合わせ試験風景

(2)ローバへのマイクロ波送電実験

移動体への無線送受電技術適用例として、電動移動
 台(ローバ)に対する無線送電を行った[3] [4]。この実験
 においては、実際にローバに搭載する受電パネル及び
 将来の宇宙での応用に向けて軽量化を考慮した送電パ
 ネルを試作した。図 6 はこの時の実験の様子である。
 使用した周波数は 5.8GHz である。



@京都大学METLAB

図 6 作業用ロボットへの無線送受電試験風景

(3)その他

これら以外にも要素技術試作検討として、巨大なシ
 ステムとなった場合の複数枚の送電パネルの位相同期
 をとるための源振統制技術要素試験、クローズドルー
 プを組んでビーム方向をより高精度に制御するための
 ビーム制御要素試験、レクテナからの高調波輻射エネ
 ルギーや基本波反射エネルギーの影響を確認する電磁
 環境試験などを実施した。

3. 宇宙基本法・宇宙基本計画での転機

SSPS は発電時の CO2 の排出がないクリーンエネ
 ルギーで、かつ資源枯渇の心配のない環境にやさしい自
 然エネルギーであると同時に、昼夜や天候に左右され
 ることなく発電が可能であることから、将来の新エネ
 ルギーシステムの一つとしてその実現が期待されてい
 る。但し、実用化に至るまでは長期の研究開発と段階
 的な技術実証が必要であるため、これまでのエネルギ

ー基本計画、環境エネルギー技術革新計画、新・国家
 エネルギー戦略などの国の各種施策においては、長期
 的な視野に立ち必要な取り組みや検討を進めるとされ
 てきた。そんな中、2008 年に施行された宇宙基本法及
 び 2009 年に決定された宇宙基本計画において、国民生
 活の向上と国際貢献を目指して今後具体的に取り組む
 べき 9 つのプロジェクトの一つとして SSPS は位置づ
 けられた。図 7 に示す。

宇宙基本法から宇宙基本計画へ(2009年6月)
 目指すべき方向性～国民生活の向上と国際貢献を目指して～
 これらを実現するための具体的なシステム・プログラム
【5つの利用システムの構築】
 A. アジア等に貢献する陸域・海域観測衛星システム
 B. 地球環境観測・気象衛星システム
 C. 高度情報通信衛星システム
 D. 測位衛星システム
 E. 安全保障を目的とした衛星システム
【4つの研究開発プログラムの推進】
 F. 宇宙科学プログラム
 G. 有人宇宙活動プログラム
H. 宇宙太陽光発電研究開発プログラム
 I. 小型実証衛星プログラム

図 7 宇宙基本計画 9つの選定プログラム

4. 地上無線電力伝送実験の概要

4.1. 宇宙太陽光発電研究開発の位置づけと目的

宇宙基本計画の決定を受けて経済産業省は、2009 年
 から太陽光発電無線送受電技術の研究開発事業を開始
 した。SSPS プログラムに関して、宇宙基本計画では「関
 連機関が連携し、総合的な観点からシステム検討を実
 施するとともに、エネルギー伝送技術については地上
 技術実証を進める」とされており、将来の商用 SSPS
 までを含めての指針が示されたわけではないが、地上
 での実験を今後 5 年程度で実施し、その成果を踏まえ
 て宇宙実証へつなげていくことという方針が示された。
 このプロジェクトを進めるにあたっては、将来のシス
 テムを念頭に置き、次なる宇宙実証フェーズに向けて
 技術のさらなる進展を行い、マイクロ波による電力伝
 送を地上で実証して見せることを目的としている。

4.2. プロジェクトの目標

2 項にも述べたとおり、このプロジェクトが始まる
 までの検討の中で我々はすでに取り組むべき課題を明
 らかにしてきている。これまでに得た成果を生かしつ
 つ技術をさらに一歩高め、実際にエネルギー伝送試験
 を行うことにより実証してゆく。今回は地上での実証
 であるが、次の宇宙実証に移行する際にはさらに何が
 課題であるかなども整理しつつ進めている。

マイクロ波を送信する送電部としては、大電力・高
 効率・高精度・軽量／薄型・低価格という 5 拍子のそ
 ろったフェーズドアレイアンテナが SSPS の成功に必
 要である[5]。このため、GaN HEMT、F 級増幅器を適

用した高効率 HPA (High Power Amplifier) を使用し、厚さ数センチメートルの薄型フェーズドアレイアンテナの実現を目標とした。また、ビーム方向制御技術実証の観点からも、アンテナは 4 枚の送電モジュールから構成し、これらの送電モジュールのマイクロ波の位相を合わせるために源振統制の機能を持たせる。また、各送電モジュールは 4 アンテナ素子から構成される多数のサブアレイから構成される。送電出力の合計は 1kW 以上とする計画である。

また、送電されたマイクロ波エネルギーを受ける受電部では、安定動作と高効率な電気変換を研究開発の目標とする。受電パネルは複数枚の受電モジュールを組み合わせた構成とし、受電モジュール毎に集電したエネルギーを直並列に組み合わせて、安定した電力を取り出すことを目標とする。また、将来の高効率化につなげるため、高効率レクテナ素子(単体で 80% 以上の効率)の開発を並行して進める。

宇宙 36,000km からのマイクロ波伝送を考える場合、マイクロ波の精密なビーム方向制御も重要な課題である。これについては、本プロジェクトを連携して実施している独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)の担当として進めるが、受電部位から発信されるパイロット信号を受け、その方向にマイクロ波ビームを送信するソフトウェアレトロディレクティブ方式を用い、素子電界ベクトル回転法 (REV 法) により受電部での電力を最大にする研究及び実証を目標としている。ビーム制御としては伝送距離 10m 以上において角度精度 0.5 度の達成を目標とする。

以上の研究成果は本プロジェクトの最終フェーズで組み合わせ、屋外での電力伝送実証実験をデモンストレーション的に行う計画である。

4.3. 実施体制

本プロジェクトの実施体制図を図 8 に示す。USEF は METI からの委託を受け、JAXA と連携して無線電力伝送技術の研究開発を行う。USEF の下では、送電部を三菱電機株式会社(MELCO)が、受電部を株式会社 IHI エアロスペース(IA)が担当する。また、METI からは USEF のほかに、株式会社三菱総合研究所 (MRI) が海外の技術動向調査や屋外試験実施場所候補地の調査について委託を受け、三菱重工業株式会社 (MHI) が精密ビーム方向制御技術方式についての個別の有効性検討について委託を受けている。また、USEF は本事業に係る開発計画・設計の妥当性、進捗状況、成果等について助言及び評価を受けるために、マイクロ波無線送受電技術委員会 (委員長は京都大学篠原教授) を運営している。

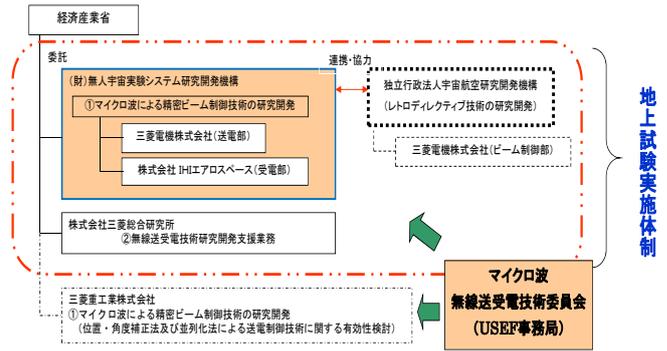


図 8 プロジェクト実施体制

5. 地上無線電力伝送検討進捗状況

2009 年度は予備設計を進めてシステム全体のアーキテクチャを定め、システムを構成するサブシステムの機能・性能を定めた。2010 年度からは基本設計と要素検討作業を進めているところでありその概要を以下に示す。

5.1. 送電部

送電部は、GaN HEMT, F 級動作の増幅器の採用を決めた。予備設計当初は、GaAs を用いた増幅器を念頭に置いていたが、GaN HEMT は GaAs に比べて出力インピーダンスが高いので、高調波整合による高効率化の成果が高く、高効率増幅器に適している。具体的には送電部を担当する MELCO が開発した素子を利用する。図 9 に試作 GaN HEMT の外観を示す。これまでに、気密封止可能なメタルパッケージに入るように基本波及び高調波 (2,3 倍波) 整合回路の設計を行い試作評価を行った結果、5.8GHz で電力付加効率 (PAE) 70%、出力電力 7.1w の良好な性能が得られた。[6]

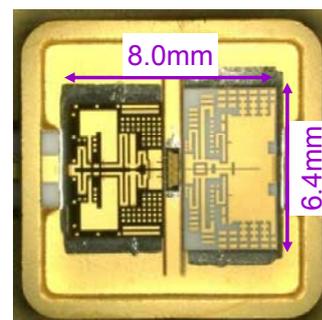


図 9 試作 GaN HEMT 外観写真

HPA の出力は、フィルタや分配器を介して 4 素子サブアレイ構造を持つアンテナ素子に給電され、このサブアレイアンテナが 60cm x 60cm の送電モジュールを形成する。送電アンテナは送電モジュール 4 枚から構成され、アンテナ開口面は 120cm x 120cm になる計画である。

また、宇宙への輸送、宇宙空間での展開を想定した時に課題となる薄型化については、図 10 に示すような構造案を検討している。マイクロ波回路基板からアンテナレイ基板に伝送する回路を垂直に行うことで薄型化を図る。これまでの検討では 44.4mm の厚さの実現の見通しを得ているが、低損失を維持したまま更に薄型化を図る計画である。また、これらの他にも、試験時の温度ムラを排除するための排熱構造などについての要素検討作業を実施中である。[7]

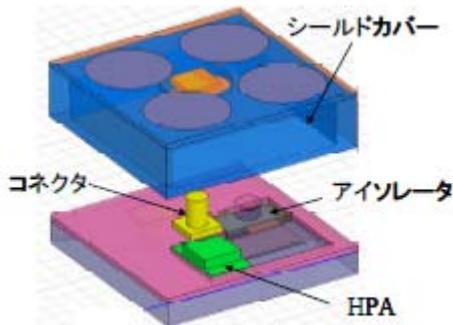


図 10 サブアレイ放射部構造のイメージ図

5.2. 受電部

受電部では、空間を伝達するマイクロ波のエネルギーを再度電力として取り出す機能を持つ。送電から受電までの総合効率は、送電されるマイクロ波のビーム形状や受電するパネルの物理的大きさに依存する部分が多いが、受電部の技術としては、受電面における電力束密度分布を予測し、適切なアンテナ配置で収集したエネルギーを直列・並列接続して、安定した高変換効率の電力エネルギーとして取り出すことにある。レクテナの構成を図 11 に示す。SSPS の場合は 1 周波 (5.8GHz) による送電を前提としていることから、受電アンテナには広帯域な特性は不要であり、線形アンテナよりも小型化が可能なパッチアンテナが適していると考え、円偏波パッチアンテナを用いる。[8]

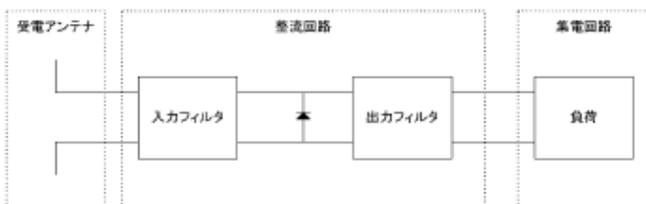


図 11 レクテナ構成

整流回路には、図 11 にも示した通り、単一伝送線路上に整流ダイオードと入出力フィルタを構成した自己バイアス整流方式を採用した。この整流回路の高効率化のためには、構成要素である整流ダイオードとフィルタの両方の低損失化が求められるが、個々について

検討すべきパラメータの検討を行って評価を進めているところである。[8]

アンテナの実効開口面積の重なりや影響を考慮し最適なアンテナ間隔を検討して整流回路への入力電力を検討した一例を図 12 に示す。このほかにもアンテナをサブアレイ化して大面積からコスト効率よく電力を回収する構成などについても検討を進めている。

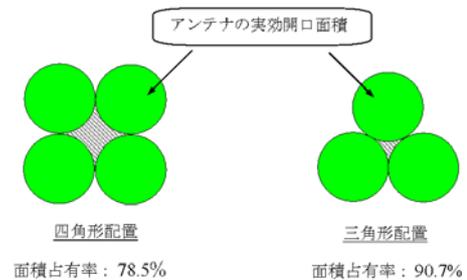


図 12 素子配置方法例

屋外試験にも使用することを想定した受電パネルとしては、方形形状の受電モジュールを組み合わせた直径約 2.5m 相当の受電パネルを準備し、受電モジュール毎に集電したエネルギーを直並列に組み合わせて、エネルギーを電力として取り出すことを計画している。

また、今回の研究開発では上記受電パネル用とは別に、逆耐電圧や高温特性に優れた特性を持つ GaN を用いて、高効率な RF-DC 変換効率を持つショットキーバリアダイオードそのものの開発も実施する。この開発では、製造プロセス、製造条件の検討、試作評価を行う。[8]

5.3. 屋外デモンストレーション試験

5.1 項に示した通り、送電部のマイクロ波フェーズドアレイアンテナの開口面が 120cm x 120cm で、その出力を仮に 1.3kW とすると、受電位置中心部におけるエネルギー電力束密度は、図 13 のように定まる。距離とエネルギーの相関関係から、現在は伝送距離を 50m 程度とすることで検討を進めている。50m 地点での平面的なエネルギー分布は図 14 のように解析される。図中の黒枠は現在想定している受電パネルの形状であり、電力照射率(送電された総エネルギーを 1 としたときに、物理的に受電パネルに当たるエネルギー)は 58% 程度にとどまる。その後、アンテナ形状及び配列に依存したアンテナ実効開口面積占有率を加味したエネルギーが受電モジュールの中に入り、これを電力として取り出すが、現在の検討では数百ワット程度の電力が取り出せる見込みである。

文 献

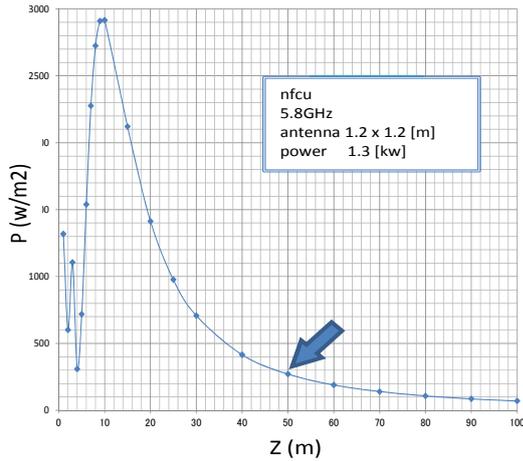


図 13 エネルギーの伝達距離による減衰

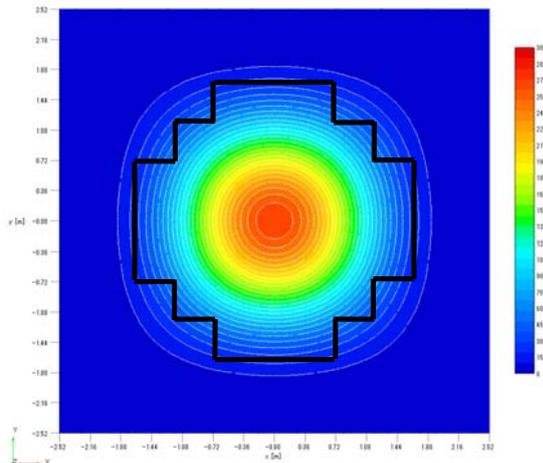


図 14 50 m 地点における電力密度分布

過去において、海外及び国内においても様々なマイクロ波無線エネルギー伝送実験が実施されている。しかしそれらは、マグネトロンとパラボラアンテナを用いており宇宙への転用を考える場合には重量が重いものであったり、比較的軽量なフェーズドアレイアンテナを用いた実験であっても、マイクロ波の角度制御や送電電力を絞ったりしたものであった。今回設定している仕様についても、過去の実験と同様、技術面以外にもプロジェクト遂行上の諸制約を加味して判断する必要があるが、次の宇宙実証を意識して取り組んでいるところである。

6. まとめ

2009 年 11 月から開始した本プロジェクトは約 1 年半を経過し、基本的な設計と技術の研究開発を進めているところである。将来の SSPS の実現に向けて技術的な前進が図れるようプロジェクトを推進している。

- [1] 経済産業省,技術戦略マップ 2007,宇宙分野のロードマップ (エネルギー利用)
- [2] 齊藤孝, 布施嘉春, 三原莊一郎, 伊地智幸一, “USEF における SSPS 検討活動と今後の展望 2”, 平成 21 年第 12 回宇宙太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム講演要旨集, p96-101
- [3] 齊藤孝, 布施嘉春, 三原莊一郎, 伊地智幸一, “USEF における無線送受電技術実証への取り組み”, 平成 22 年第 54 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1S09
- [4] 三原莊一郎, 布施嘉春, 齊藤孝, 伊地智幸一, “USEF における SSPS への取り組み”, 平成 22 年第 13 回宇宙太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム講演要旨集, p34-39
- [5] 篠原直毅, “Recent SPS Research and Development Activity in Japan”, 平成 22 年 IAA50th 記念シンポジウム講演集, 2-4
- [6] 山中宏治, 津山祥紀, 鮫島文典, 本間幸洋, 佐々木拓郎, 苗村康次, 茶木伸, “5.8GHz 高調波整合型内部整合 GaN 高効率増幅器”, 平成 22 年第 13 回宇宙太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム講演要旨集, p88-92
- [7] 苗村康次, 本間幸洋, 佐々木拓郎, 鮫島文典, 石川幹, 布施嘉春, 齊藤孝, 三原莊一郎, “マイクロ波無線送受電技術研究開発用送電部の開発”, 平成 22 年第 54 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1S12
- [8] 小澤雄一郎, 藤原栄一郎, 藤原暉雄, “受電部技術実証モデルの検討”, 平成 22 年第 54 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1S14