宇宙太陽光発電SPS の
日本と世界の研究開発と現状
SPS : Solar Power Satellite
SBSP: Space Based Solar Power

2022/5/11

京都大学・教授
篠原真毅

篠原真毅 (京都大学・教授, 53歳)

- 平3 京都大・工・電子卒
- 平5 京都大大学院工学研究科修士課程修了
- 平8 同大大学院工学研究科博士課程修了
- 同年・同大超高層電波研究センター助手，同所属を経て、
- 平22生存圏研究所教授となり現在に至る.

現在の主な役職

- IEEE MTTS AdCom Member (2022 – 2024)
- IEEE TCFDC (Technical Coordinating and Future Direction Committee) Vice Chair
- IEEE MTTS MGA (Member Geographic Activities) R10 regional coordinator
- IEEE MTTS Past Distinguish Microwave Lecture (DML-E) [DML : 2016-2018]
- IEEE MTTS TC-25 前Chair, 現TC member
- IEEE WPT Initiative Member
- IEEE Wireless Power Week Founder and Steering Committee member
- Union of Radio Science International (URSI) Commission D Chair
- International Journal of Wireless Power Transfer (Hindawi) Executive Editor
- Emrod Group, Limited Advisory Board Member
- 電子情報通信学会WPT研初代委員長
- 宇宙太陽発電学会理事長
- (独)日本学術振興会第24-25期URSI分科会特任連携会員
- 内閣府 宇宙政策委員会 基本政策部会 委員
- 経産省無線送受電技術委員会(SPS) 委員長
- 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学運営協議会 運営協議員
- ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム代表
- (株) Space Power Technologies 顧問 他

[SPSパラメータ]

太陽光発電所 > 1GW

太陽電池面積 > 2kmϕ

マイクロ波送電アンテナ径 > 2kmϕ

衛星重量 < 10,000 t

発電所としてのSPS

	設備稼働率	CO2排出量	判定
SPS	> 90%	11-31 g-CO2/kWh	◎
地上太陽光	< 15%	53-76 g-CO2/kWh	○
LNG火力	> 90%	631 g-CO2/kWh	×
原子力	> 90%	22 g-CO2/kWh	△

CO2排出量：吉岡他, 宇宙太陽発電衛星のある地球と将来, 2009

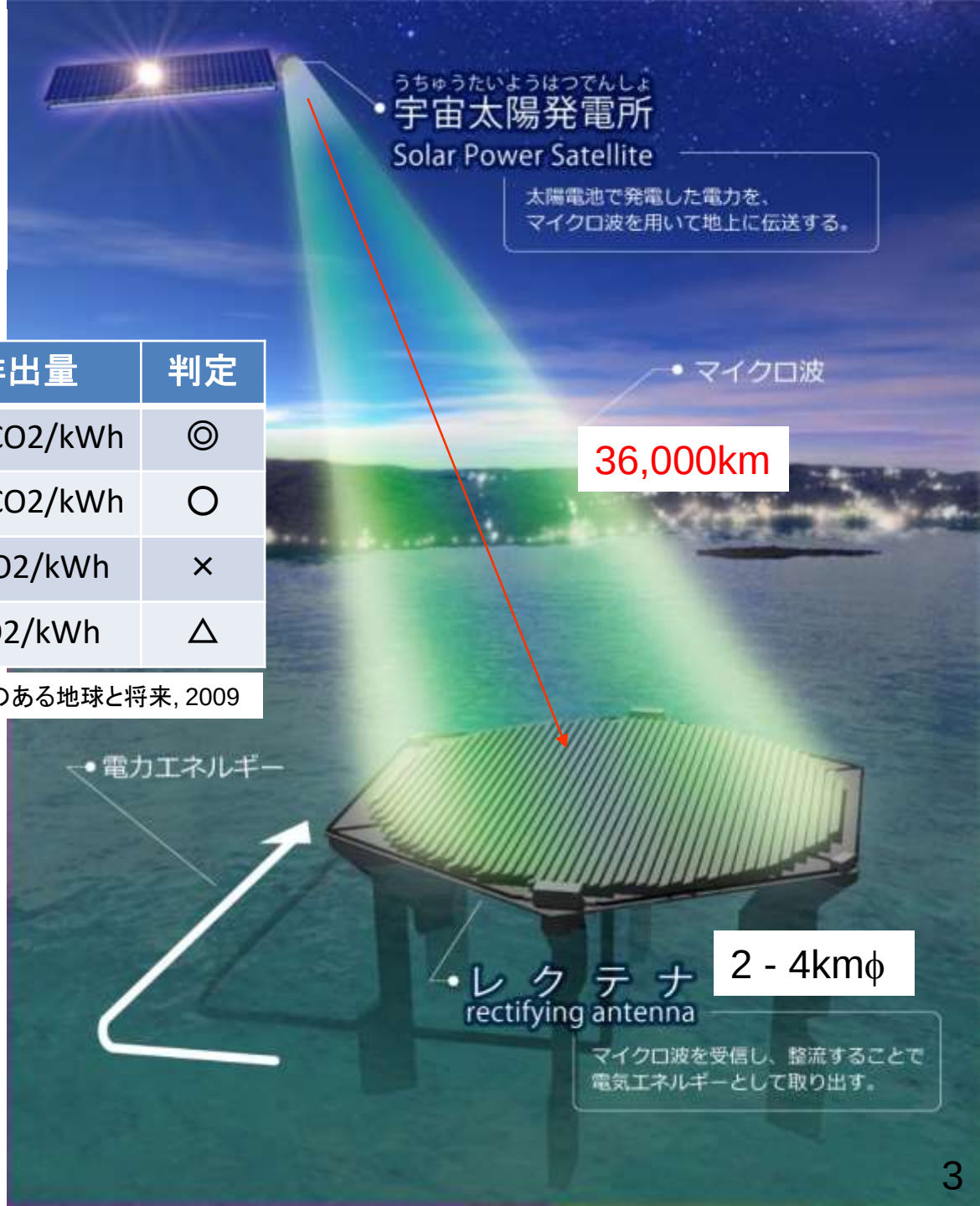
[SPSとSDGs]

SDGs7. エネルギーをみんなに そしてクリーンに

SDGs9. 産業と技術革新の基盤をつくろう

宇宙太陽光発電

日本では1980年代以降細々と
しかし脈々と研究開発を実施。



日本のSPSに関する政策の偏移(1/2)

宇宙基本計画 ＃1	宇宙基本計画 ＃2	宇宙基本計画 ＃3	宇宙基本計画 ＃4
平成21年6月 宇宙開発戦略本部決定	平成25年1月 宇宙開発戦略本部決定	平成27年1月 宇宙開発戦略本部決定	令和2年6月 閣議決定
実現に必要な技術の研究開発を進め、地上における再生可能エネルギー開発の進捗とも比較しつつ、10年程度を目途に実用化に向けた見通しをつけることを目標	「将来の宇宙開発利用の可能性を追求する3つのプログラム」の一つとして、「宇宙太陽光発電研究開発プログラム」を位置づけ	（2）具体的取組 ② 個別プロジェクトを支える産業基盤・科学技術基盤の強化策 ⅲ）将来の宇宙利用の拡大を見据えた取組	(5) 産業・科学技術基盤を始めとする宇宙活動を支える総合的な基盤の強化 エネルギー問題、気候変動問題、環境問題等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘め、宇宙構造物等の給電システムへの応用も期待できる宇宙太陽光発電システムの実用化に向け、宇宙太陽光発電システム研究開発ロードマップ等に基づき、宇宙実証実験フェーズへの移行の検討も含め、着実に取組を進める。その際、宇宙太陽光発電の研究開発は、IoTセンサやドローン、ロボット等へのワイヤレス給電等、地上の技術への派生も期待できることに留意する。（文部科学省、経済産業省）
関係機関が連携し、総合的な観点からシステム検討を実施する。並行して、エネルギー伝送技術について地上技術実証を進める。	宇宙太陽光発電システムについては、我が国のエネルギー需給見通しや将来の新エネルギー開発の必要性に鑑み、無線による送受電技術等を中心に研究を着実に進める。	エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、・・・・（中略）・・・・ に関する研究を推進する。	
その結果を踏まえ、十分な検討を行い、3年程度を目途に、大気圏での影響やシステム的な確認を行うため、「きぼう」や小型衛星を活用した軌道上実証に着手する。	宇宙空間での実証に関しては、その費用対効果も含めて実施に向けて検討する。	※宇宙実証に関する記述なし	

日本のSPSに関する政策の偏移(2/2)

エネルギー基本計画＃1	エネルギー基本計画＃2	エネルギー基本計画＃3	エネルギー基本計画＃4	エネルギー基本計画＃5
平成15年10月閣議決定	平成19年3月閣議決定	平成22年6月閣議決定	平成26年4月閣議決定	平成30年7月閣議決定
宇宙太陽光利用等、実用化に至るまでに長期的な開発努力と技術の段階的実証を要するものの、将来のエネルギー供給源の選択肢となる可能性を有している研究開発課題については、技術の成熟度やエネルギー技術上の重要政策との関係等を総合的に考慮しつつ、長期的視野に立ち必要な取組や検討を進める。	宇宙太陽光利用など実用化に至るまでに長期的な開発努力と技術の段階的実証を要するものの、将来のエネルギー供給源の選択肢となる可能性を有している研究開発課題については、技術の成熟度やエネルギー技術上の重要政策との関係等を総合的に考慮しつつ、長期的視野に立ち必要な取組や検討を進める。	宇宙太陽光等、将来のエネルギー供給源の選択肢となる可能性を有するより長期的な研究開発課題については技術開発の状況やエネルギー政策上の位置づけ等を総合的に考慮しつつ、必要な取組や検討を進める。	無線送受電技術により宇宙空間から地上に電力を供給する宇宙太陽光発電システム（SSPS）の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。	無線送受電技術により宇宙空間から地上に電力を供給する宇宙太陽光発電システム（SSPS）の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。

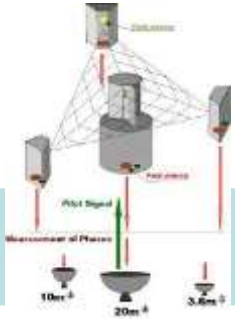
日本の研究優位性を保つためにより研究強化を!!
30年という開発期間と適切なプログラム資金があれば、
日本は開発可能なエンジニアリングステージにある

Advantage of Japanese Technology for SPS

1) MPT Experiments in Space

1983 MINIX Rocket Exp.
(World 1st Space MW Exp.)
2.45GHz from Magnetron,
Space to Space Exp.
by Kyoto Univ.
and Kobe Univ.

1993 ISY-METS Rocket Exp.
(World 2nd Space MW Exp.)
2.45GHz from Phased Array,
Space to Space Exp.
by Kyoto Univ.
and Kobe Univ.

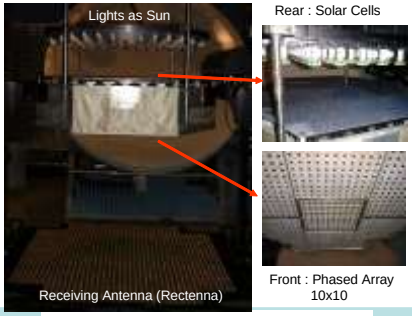


2000 3rd Rocket Exp.
2.45GHz,
Space to Ground Exp.
by Kobe Univ.
And ISAS

2025 - Satellite MPT Experiment? or MPT on Moon?

2) Phased Array and Semiconductor Tech.

1992 MILAX
(World 1st Phased Array)
2.45GHz, MW Power >1.2kW
96 array module,
HPA PAE >40% (GaAs)
by Kyoto Univ. and Kobe Univ.



2000 SPTITZ (for SPS)
5.8GHz,
Total Power >25W
100 array module
with Solar Cell,
System Eff. >15% (GaAs)
by JAXA and Kyoto Univ.

2010 5.8GHz,
MW Power >1.9kW
256 array module
HPA PAE >70% (GaN)
thickness <30cm
at Kyoto Univ.

2015 5.8GHz,
MW Power >1.6kW
304 array module
4in1 sub-array
HPA PAE >70% (GaN)
thickness <2.5cm
by METI & JSS

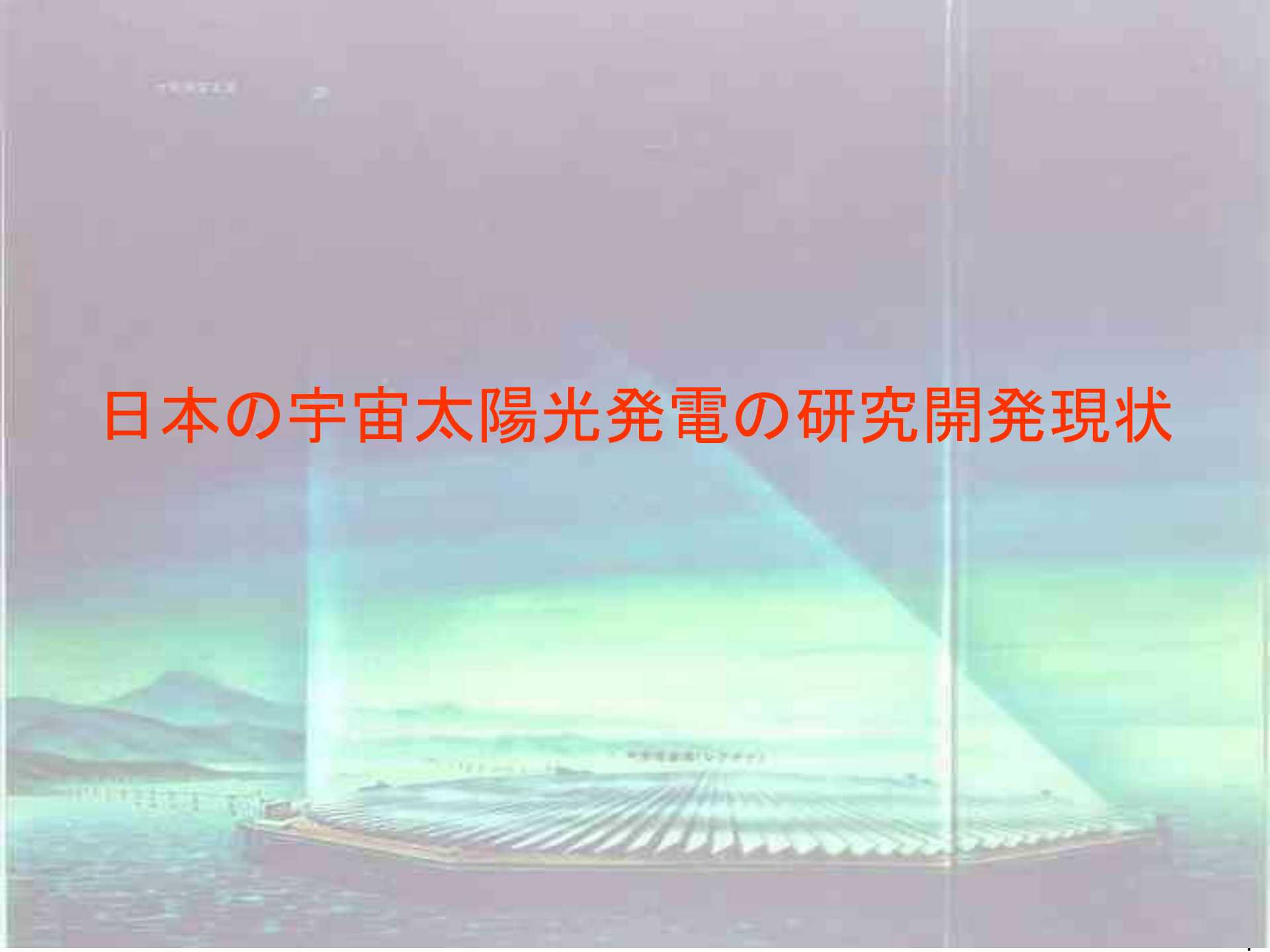
- 2023 5.8GHz,
HPA PAE
>70% (GaN)
Total DC-RF Eff.
> 68%
Sandwich Module
by METI & JSS

3) SPS System Designs

* 1992 by NEDO
* 1992 Mid-SPS by ISAS
* 2004 Formation Flight SPS by JAXA
* 2006 Tether SPS by JSS/METI

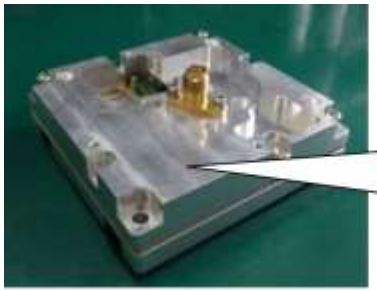
1980 1990 2000 2010 2020

日本の宇宙太陽光発電の研究開発現状



経産省SPS PJの成果 (2009-)

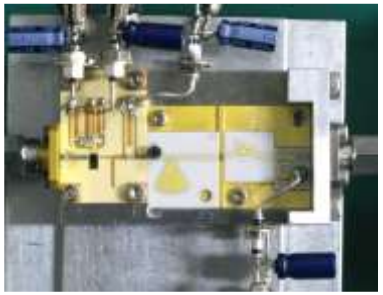
フェーズ1 : FY2009-2014
薄型高効率マイクロ波送電装置の開発
50m水平方向送電実験の成功



GaN MMIC
増幅器モジュール

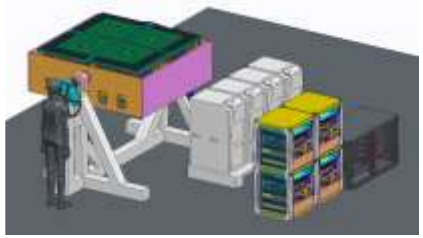
フェーズ2 : FY2016-2018
ドローンへの垂直方向
送電実験(30m)の成功

フェーズ3 : FY2019-2023頃
発送電モジュールの開発
長距離送電実験(予定)



高効率マイクロ波
増幅器(2021)

放射線試験(2021)



長距離送電実験
システムイメージ

[問題点]

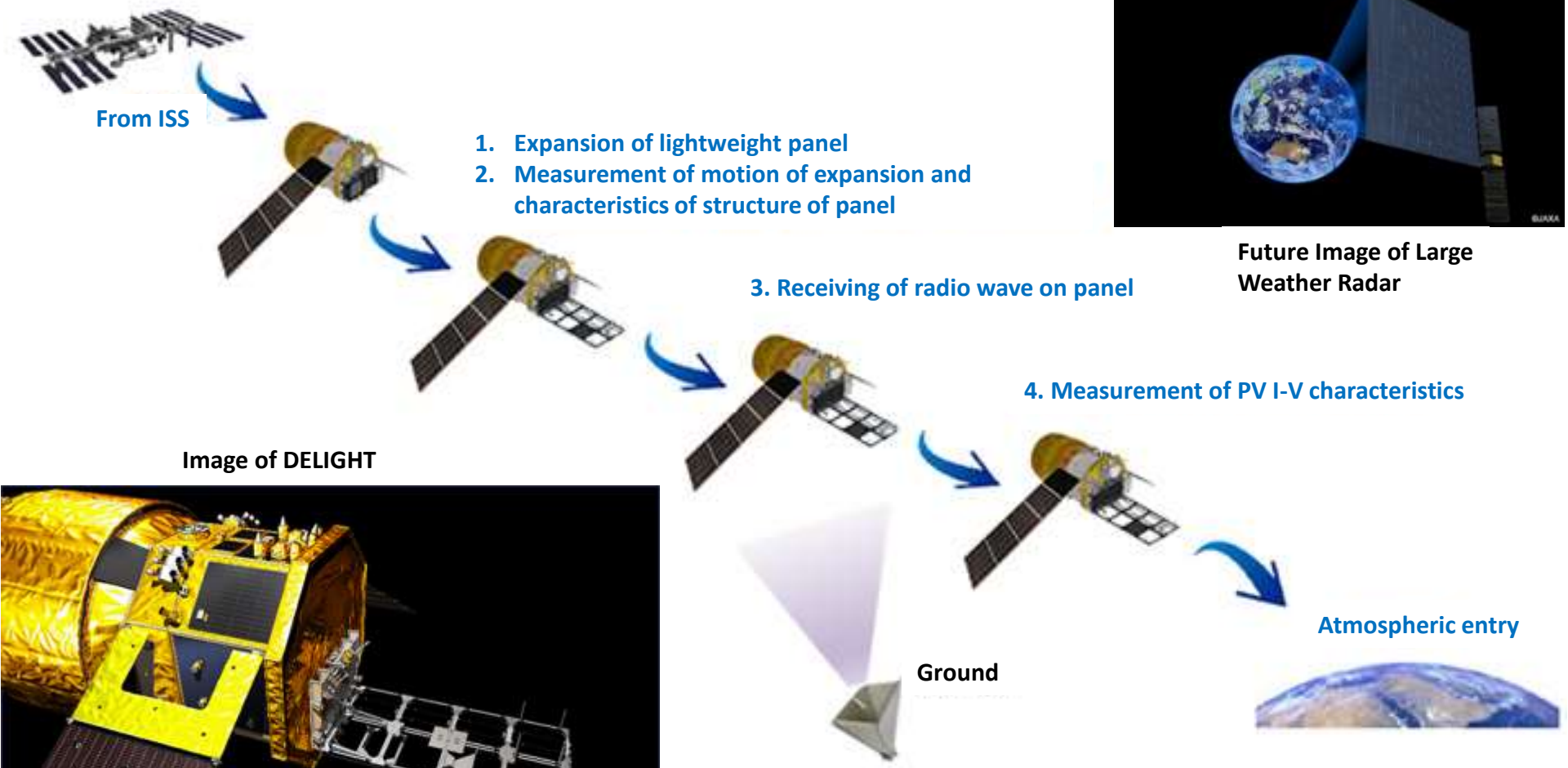
フェーズ3
予算不足
による
遅延可能性

フェーズ4
宇宙実証
未定

全体
システム
設計
未着手

Satellite Experiment DELIGHT by JAXA (2023)

JAXA has been researching and developing the panel deployment and connection mechanisms and the light planar antenna for a 30-m-class large planar antenna toward the realization of large space structures required for SPS. JAXA plans the Deployable Lightweight planar antenna technology demonstration (DELIGHT) using HTV-X1 as an on-orbit platform in 2023.

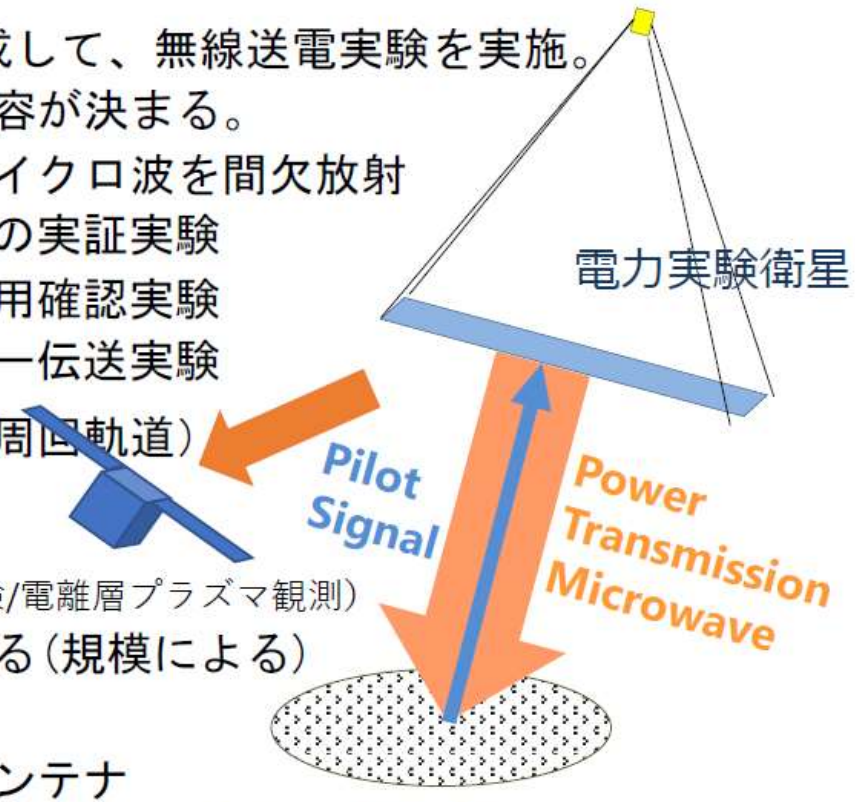


Future Image of Large Weather Radar

Image of DELIGHT

低高度地球軌道(LEO)での宇宙実験提案 (2025)

- 目的: SPS実現における技術課題である、宇宙から及び宇宙間の電力伝送及び実用時に課題となる電離層との相互作用の検証
- 実験内容:
  - ✓ 2-20m程度の送電パネルを衛星軌道上に形成して、無線送電実験を実施。
  - ✓ アンテナ規模と形態で実験の規模、実証内容が決まる。
  - ✓ 低軌道において、1kW-百kW程度の範囲でマイクロ波を間欠放射
    - →地上に向けて宇宙空間からの無線送電の実証実験
    - →副衛星との間にて宇宙環境との相互作用確認実験
    - →副衛星との間にて衛星間無線エネルギー伝送実験
- 実験軌道：準回帰軌道（低高度極軌道又は他の周回軌道）
- 実験場所：日本、協力国
- 実験の必要な設備や衛星の規模:
  - 輸送機　小型から大型ロケット一機による(規模による)
  - 衛星　電力実験衛星及び副衛星
  - 地上装置　受電設備(レクテナ/パラボラアンテナ
    パイロット信号送信及び関連の
    試験評価設備



地上観測評価装置群
/臼田大型パラボラアンテナの活用
/新規レクテナ設備の設置、等々

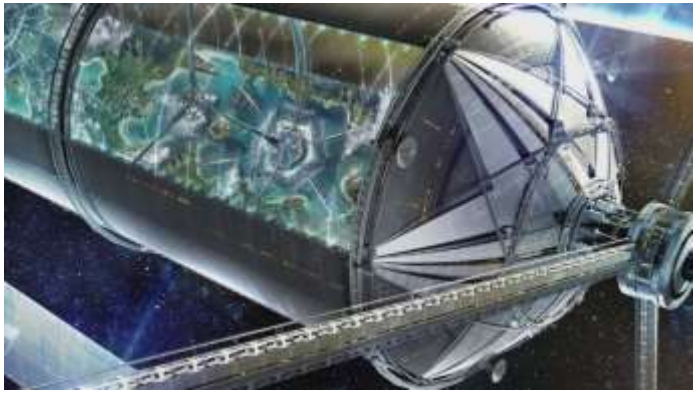
ISAS/JAXA田中先生資料

SPSの意義

将来の宇宙開発へのマイルストーンの一つ
(巨大宇宙構造物 (ロケット, 宇宙構造, etc.))

近い将来の安定でCO2フリーな発電所
(宇宙での太陽光発電)

今の経済活動を活性化する様々なスピンオフ技術
(ワイヤレス給電、宇宙ビジネス等)



現在 → 未来

空間伝送型ワイヤレス給電の法制化

空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの導入に係る電波法施行規則等の一部を改正する省令案等について、電波監理審議会で答申された(3/7)

→総務省は速やかに関係規定の整備を行う予定(6月中の省令改正)

・パナソニック、オムロン、WiPoT等が参画し業界関係者が、運用調整を行う

・ワイヤレス電力伝送運用調整協議会の立ち上げ (3/14)

総務省 MIC Ministry of Internal Affairs and Communications

ご意見・ご提案 ENGLISH(TOP) MIC ICT Policy (English / Français / Español / Русский / 中文 / عربي)

アクセシビリティ閲覧支援ツール Google 提供

総務省の紹介 | 広報・報道 | 政策 | 組織案内 | 所管法令 | 予算・決算 | 申請・手続 | 政策評価

総務省トップ > 広報・報道 > 報道資料一覧 > 電波法施行規則等の一部を改正する省令案等に対する意見募集の結果及び電波監理審議会からの答申

報道資料

令和4年3月7日

電波法施行規則等の一部を改正する省令案等に対する意見募集の結果及び電波監理審議会からの答申

－空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの導入のための制度整備－

総務省は、空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの導入に係る電波法施行規則等の一部を改正する省令案等について、令和04年1月15日(土)から同年2月14日(月)までの間、意見の募集を行いました。

その結果、40件の意見の提出がありましたので、提出された意見及びそれらの意見に対する総務省の考え方を公表します。

また、意見募集の結果を踏まえた上で、当該省令案等のうち電波法(昭和25年法律第131号)に基づく諮問事項について、電波監理審議会(会長:日比野 隆司 (株)大和証券グループ本社取締役会長兼執行役、大和証券(株)取締役会長)に諮問し、本日、原案のとおりとすることが適当である旨の答申を受けました。

総務省は、今後、意見募集の結果及び電波監理審議会からの答申を踏まえ、速やかに関係規定の整備を行う予定です。

1 概要

空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムは、電波の送受信により5～10メートルの距離を有線で接続することなく小電力を伝送するものであり、工場内で利用されるセンサ機器への給電等に利用が見込まれています。電源ケーブルの接続や電池の交換を行うことなく、給電が可能となることから、利便性の向上とともに、IoT化社会の推進も期待されています。

総務省ではその技術的条件のうち、一定の要件を満たす屋内での利用について、情報通信審議会から一部答申を受けました。これを受け、当該システムを導入するために必要な制度整備を行うため、電波法施行規則等の一部を改正する省令案等について意見募集を行いました。

2 意見募集の結果

提出された意見及び当該意見に対する総務省の考え方は、別紙のとおりです。

https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban16_02000278.html

電波での給電 利用可に

まず無人工場 将来はオフィス・店舗も

ケーブルを使わず離れた場所にある機器に電波で電気を供給する「無線給電」が、国内で使えるようになる。無人の工場など屋内でセンサーなどへの給電に限って始め、将来はオフィスや店舗、屋外の設備などでも使えるようにする。電波監理審議会が7日、総務省による制度整備を認める答申を出した。数メートル～10メートル程度離れた場所にある機器へ電波を使って電気を送る「ワイヤレス電力伝送」を電波法に基づき制度化する。

送受信した電波のエネルギーを電力に変える仕組みで、電機や通信各社が開発を競っている。複数の電子機器に同時に給電でき、電源ケーブルや電池交換が不要となる。設置場所の自由度が高まり、保守の負担が減るなど利点が多い。

新制度は省令改正を経て数カ月内に導入され、920メガヘルツ、2・4ギガヘルツ、5・7ギガヘルツの三つの周波数帯が使える。携帯電話など他の電波への干渉を避けるため屋内に限り、電波が強い2・4ギガと5・7ギガヘルツ帯は、人体への影響を避ける観点から無人環境での運用に限る。

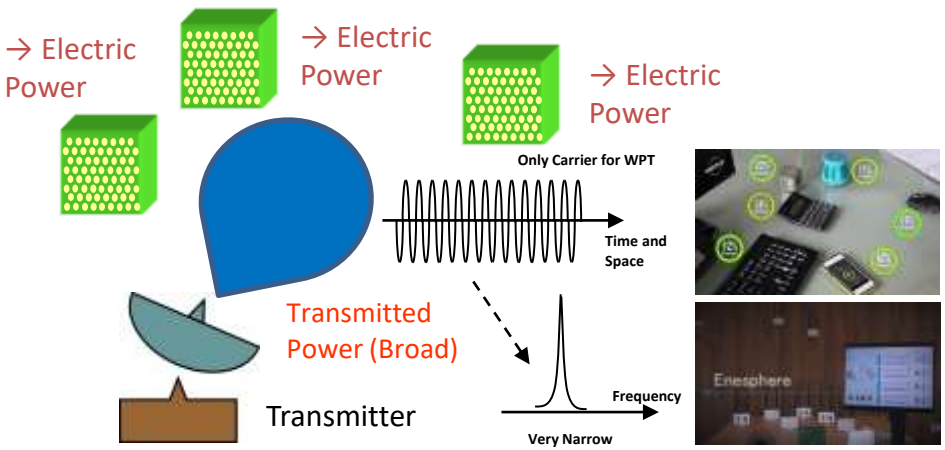
総務省は運用開始後、現場の状況を検証し、範囲の拡大をめざす。屋外のインフラへのセンサー組み込みや店舗の電子値札への給電、オフィス内に複数設けた温度センサーを活用した空調最適化などを例に挙げている。

（江口悟）

朝日新聞 2022/3/8朝刊

Wide Beam Type WPT – Low Power Rectennas -

(a) Wide Beam Type including Energy Harvesting for Multi-Users, Low Power, in Fraunhofer Region



$$\eta = \frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t A_r}{4\pi d^2}$$

(+ Diffraction)

- Low Power Rectenna is important.

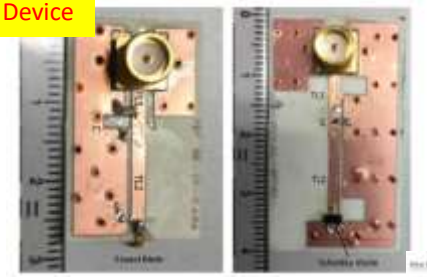
Antenna

Octave Bandwidth RF Harvesting Tee-Shirt by J. A. Estrada et al., Colorado Univ., WPW2019

Antenna + Circuit

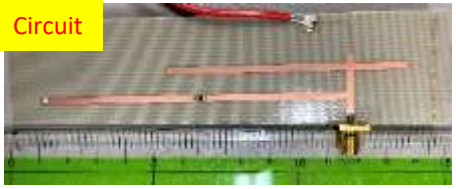
Broadband and High Impedance Rectenna by C Song et al. Univ. Of Liverpool, IEEE TIE, 2017

Device



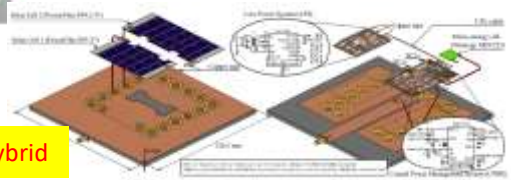
Rectenna with Tunnel Diode by V. Manev et al., Eindhoven Univ. of Tech., WPW2019

Circuit



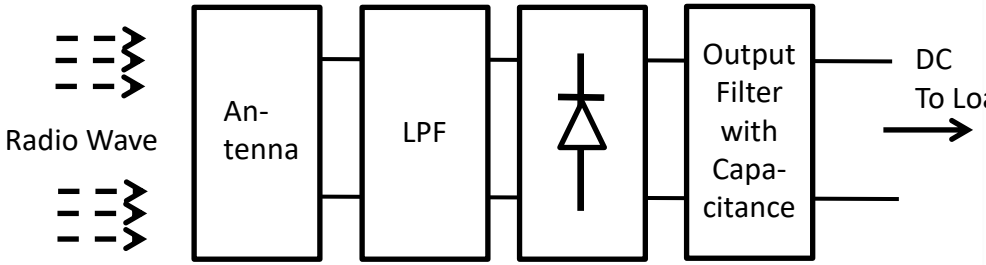
100μW Rectenna by K. Kawai et al., Kyoto Univ., AWPT2021

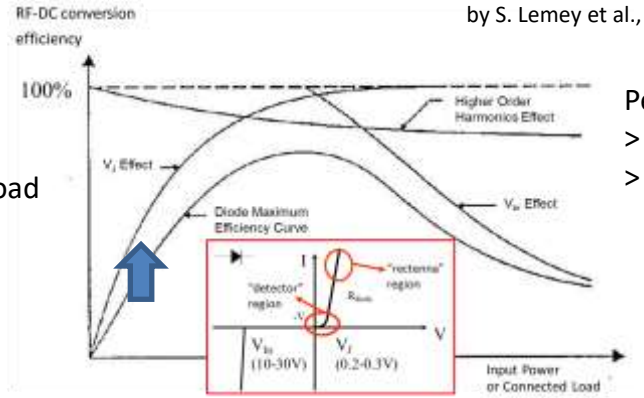
Hybrid



SIW solar cavity-backed slot antenna by S. Lemey et al., Ghent Univ, EuMW2015

[Rectenna – Rectifying Antenna –]



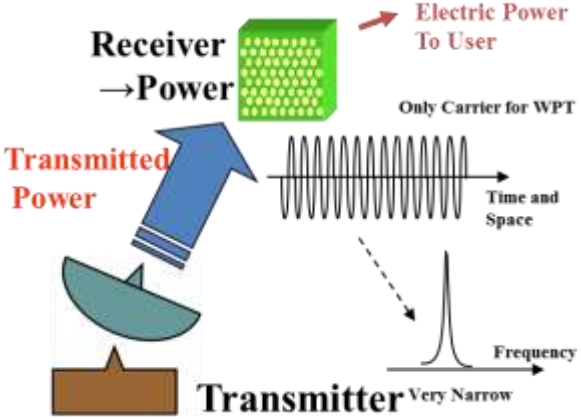


Peak RF-DC Efficiency
> 90% @ 2.4GHz
> 85% @ 5.7GHz

Various Commercial WPT Products in Japan (2021)

Narrow Beam Type WPT – Beam Forming with Higher Frequency-

(b) Narrow Beam Type
for Single User, High Power, in Fresnel Region



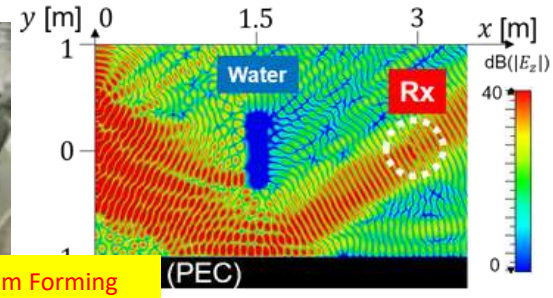
$$\eta = 1 - e^{-\tau^2}$$

$$\tau^2 = \frac{G_t A_r}{4\pi d^2} = \frac{P_r}{P_t}$$

- Theoretically 100%
- Target detecting and beam forming is important.
- Higher Frequency is better.

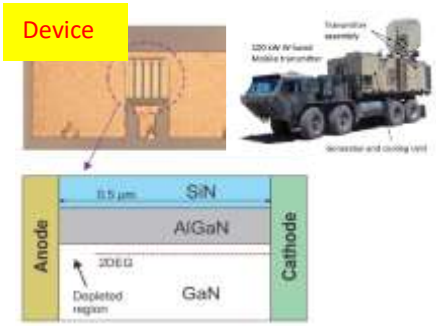
Beam Forming

"Cota" system by Ossia corp.
Retrodirective in Multi Path



EM Simulation in 2.4GHz by T. Sasaki
et al., Kyoto Univ., IEEE WPW2019

Device

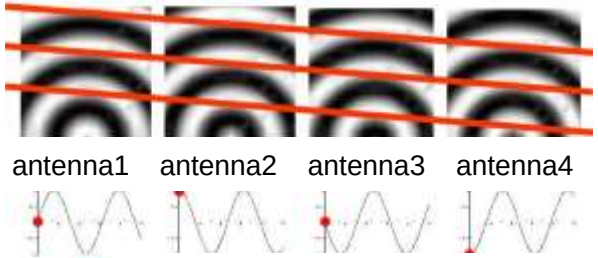


Rectenna at 95GHz with New
Developed GaN Diode,
by H. Kazemi, Raytheon, TMTT, 2022

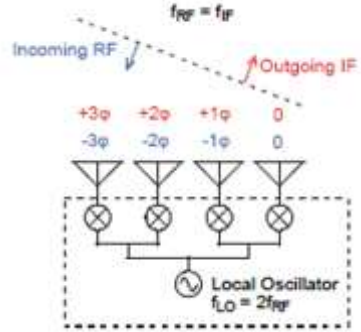
Field Experiment

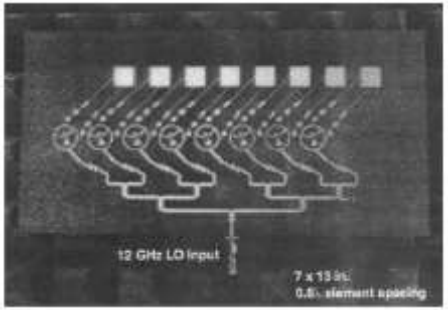
Field Experiment with 91.2kW-TxMW
to 1.6kW-RxDC in > 1km in X-Band,
by C. Rodenbeck, NRL, J. of Microwaves, 2022

[Beam Forming by Phased Array Antenna]



[Target Detecting by Retrodirective]





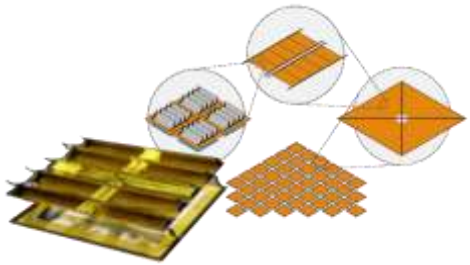
世界の宇宙太陽光発電の研究開発現状

最近の米国のSPS / Beam WPT PJ

- Naval Research Laboratoryによるレーザー送電実験成功(400W, 325m)(2019.5.23)
- Air Force Research LaboratoryがNorthrop Grumman社とともにSPS用ビーム送電の開発に1億ドルを投資 (2019.10) -> SSPIDR (Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research) Projectで2025年の衛星実証実験予定
- Pentagon‘s X-37Bを用いた発送電パネル(PRAM)の宇宙展開実験に成功 (NRL他, 2020.5)
- NASAが”Big Idea Challenge”プロジェクトを公募し、3大学でレーザー送電の研究開発が採択 (2020)
- Department of Energyがビーム送電に関する研究開発を募集中。(2021.4) 1kW-1MW級、1km送電が例示。フロリダ大が京大と共同で提案予定

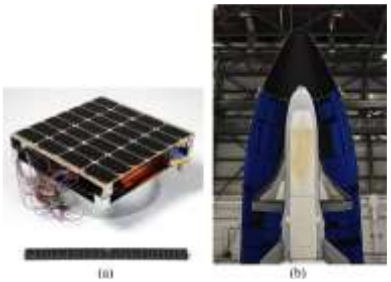
Space Solar Power Incremental Demonstrations and Research (SSPIDR) by AFRL

- 2015-2018 CALTEC Research supported by Northrop Grumman ($17.5 million / 3 years)

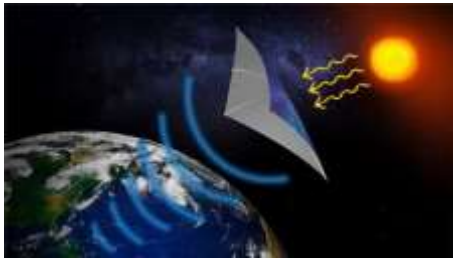


NRL Group

- 2020.5.17 The Photovoltaic Radiofrequency Antenna Module Flight Experiment (PRAM-FX) was carried out in LEO on X-37B

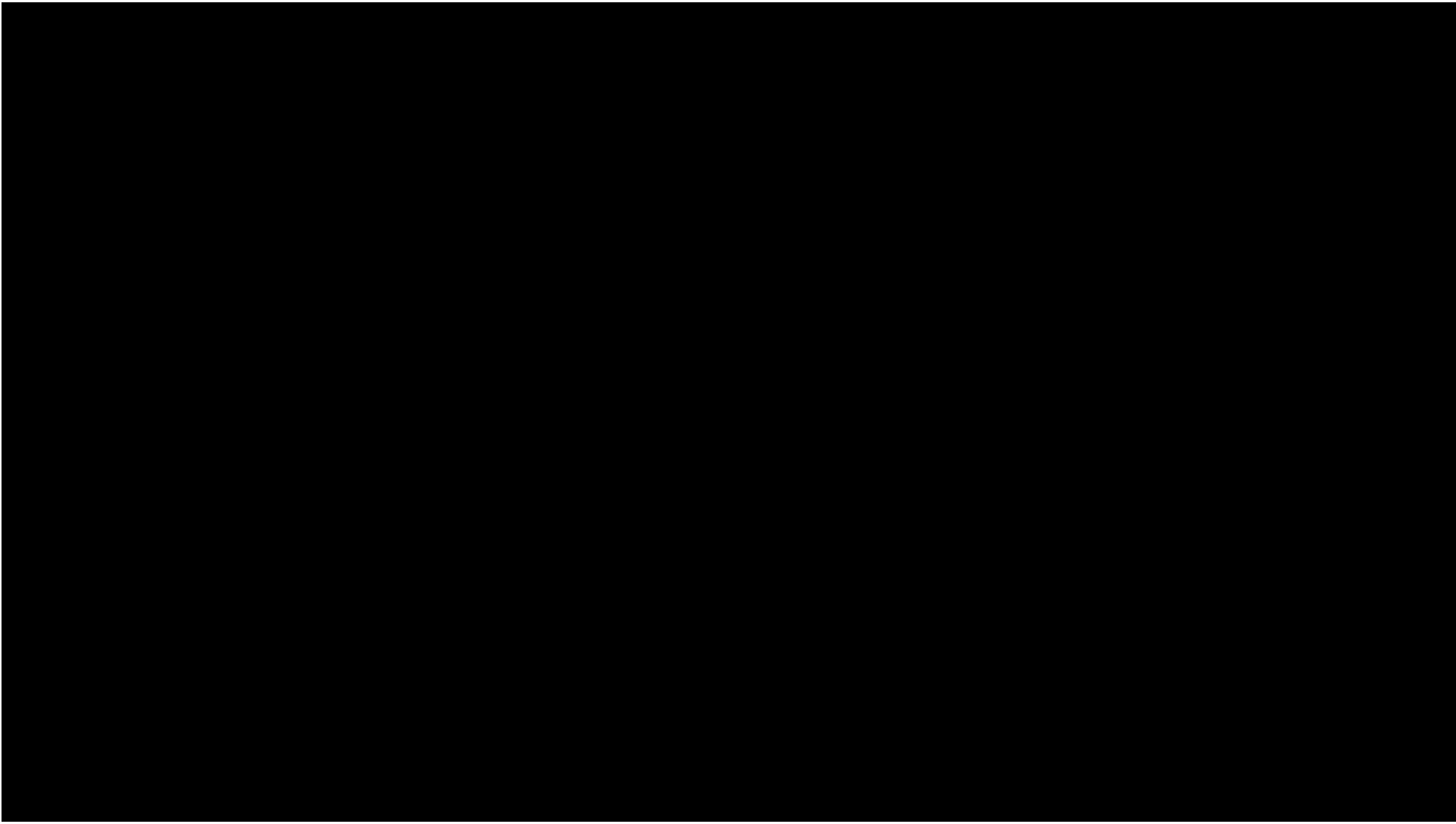


- SSPIDR (> $100 million) include 3 demonstrations : (1) Arachne, (2) SPINDLE, and (3) SPIRRAL.
  - "Arache", which will be the world's first space-to-ground power beaming demonstration of a solar-to-RF modular panel", is scheduled to fly in 2023. AFRL received the first flight hardware component of the Arachne spacecraft from Northrop Grumman December, 2020.



Motorola Air Charging unveiled, almost ready for market (2021/9/8)

Supported by GuRu (US startup)

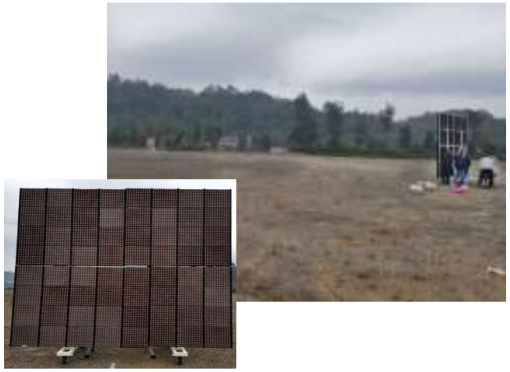


https://www.gizmochina.com/2021/09/08/motorola-air-charging-unveiled-almost-ready-for-market/

中国のSPS/WPT研究開発状況

中国が急速にSPS/WPT研究に予算を付け始めている

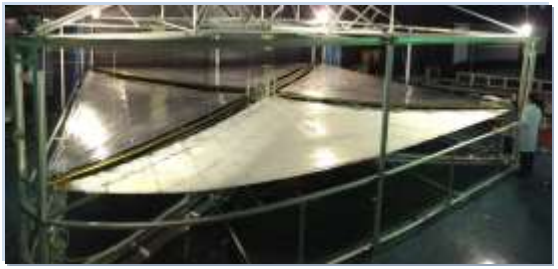
Chongqing Univ..によるSPS研究サイト建設
(2021以降?)(2019に2,000万中国元の予算)



5.8GHz Beam WPT Experiment
at 60m @ Chongqing (2020)

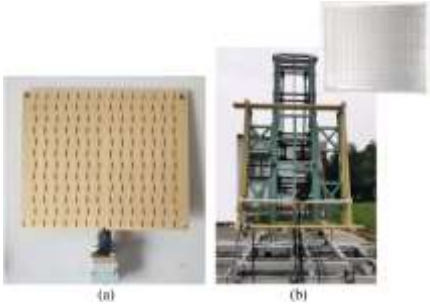
Xaiomiによるミリ波ビーム
携帯充電器(2021.1.29)

Xidian Univ.による SPS Omega実証実験



8×8m solar sail prototype by CAST

Establishment of Committee of Space Solar Power of CSA(Chinese Society of Astronautics) (2021.3)

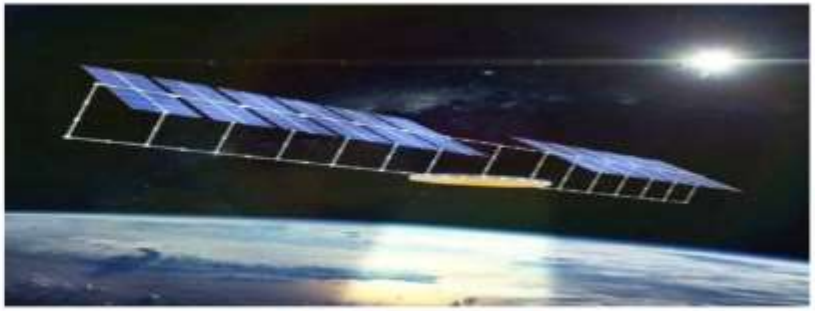


35 GHz Beam WPT Experiment with GaN diodes at > 300-m distance by 701 Institute @ Wuhan (2020)

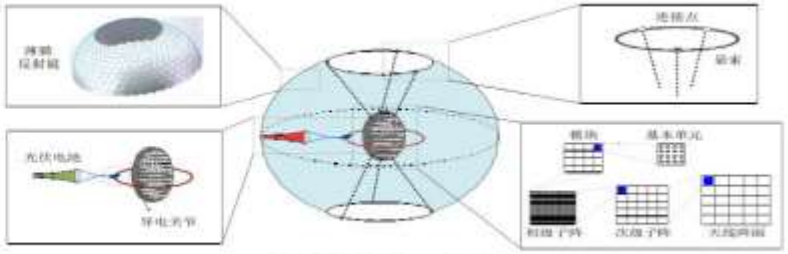
中国のSPSロードマップ (宇宙実証提案中)

中国のSPSとロードマップ

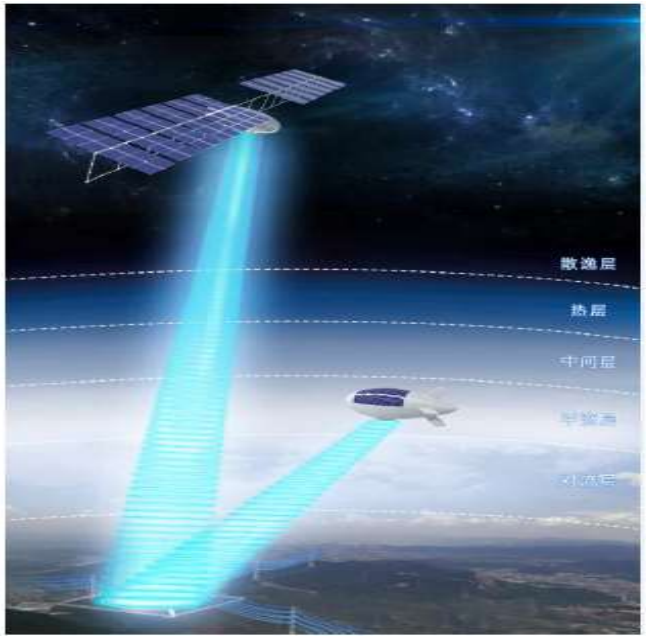
two big stages and three small steps



Multi-rotating Station



OMEGA Scheme



~2019 → 2020~2021 → 2022~2025

floating platform	airship	experimental satellite
H: 50~300m	H: 20km	H: 36000km
P: 20kW	P: 100kW	P: 100kW

Roadmap by Chongqing Univ. (新型コロナで遅れ気味)

中国重慶のSPS研究所建設(-2021)

2018.6

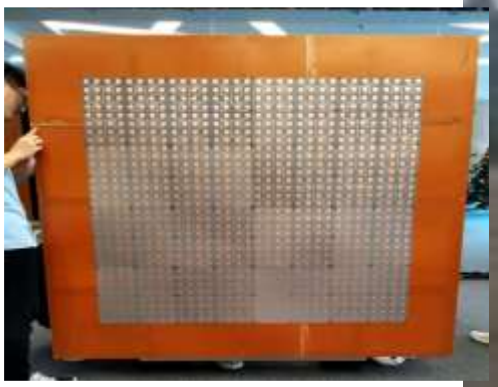
2018

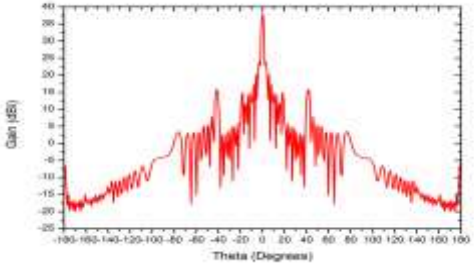
2020.5

2020.9

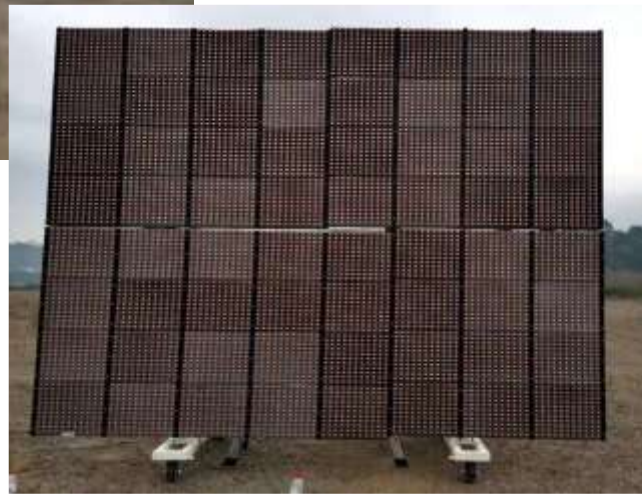
中国重慶大のWPT実験(2020)

1.26m x 1.26m
Tx Antenna, 5.8GHz
64 sub-array, 37.6 dBi





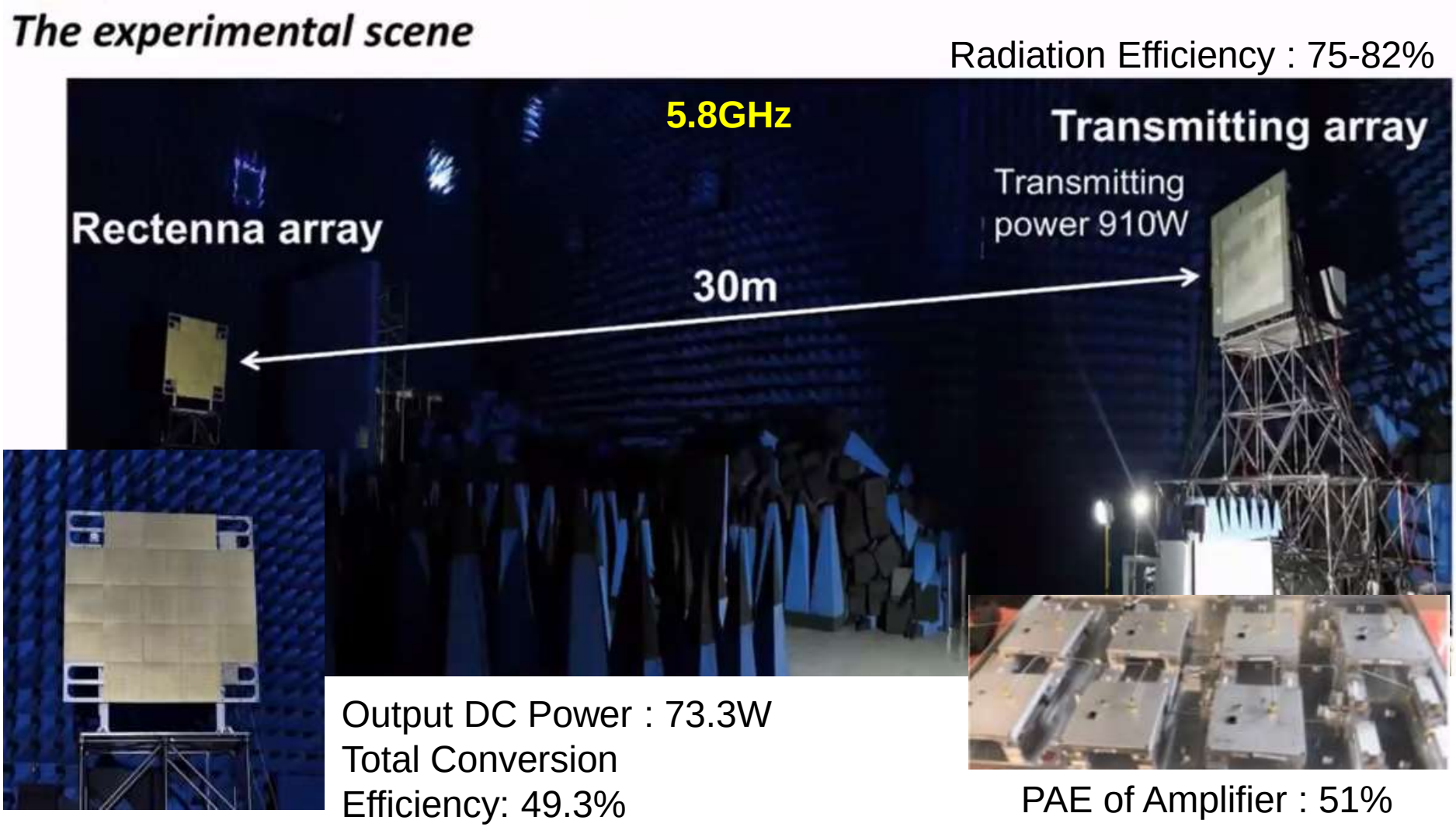
3m x 3m
Rectenna



The transmission power was 448W, the test distance was 60m, and the conversion efficiency of MW-DC is 6.4%.
(MW-DC eff. by focused beam was 11.3% at 30m in anechoic chamber)

64 x 10W Transmitter

中国CASTによるWPT実験(2021)



Radiation Efficiency : 75-82%

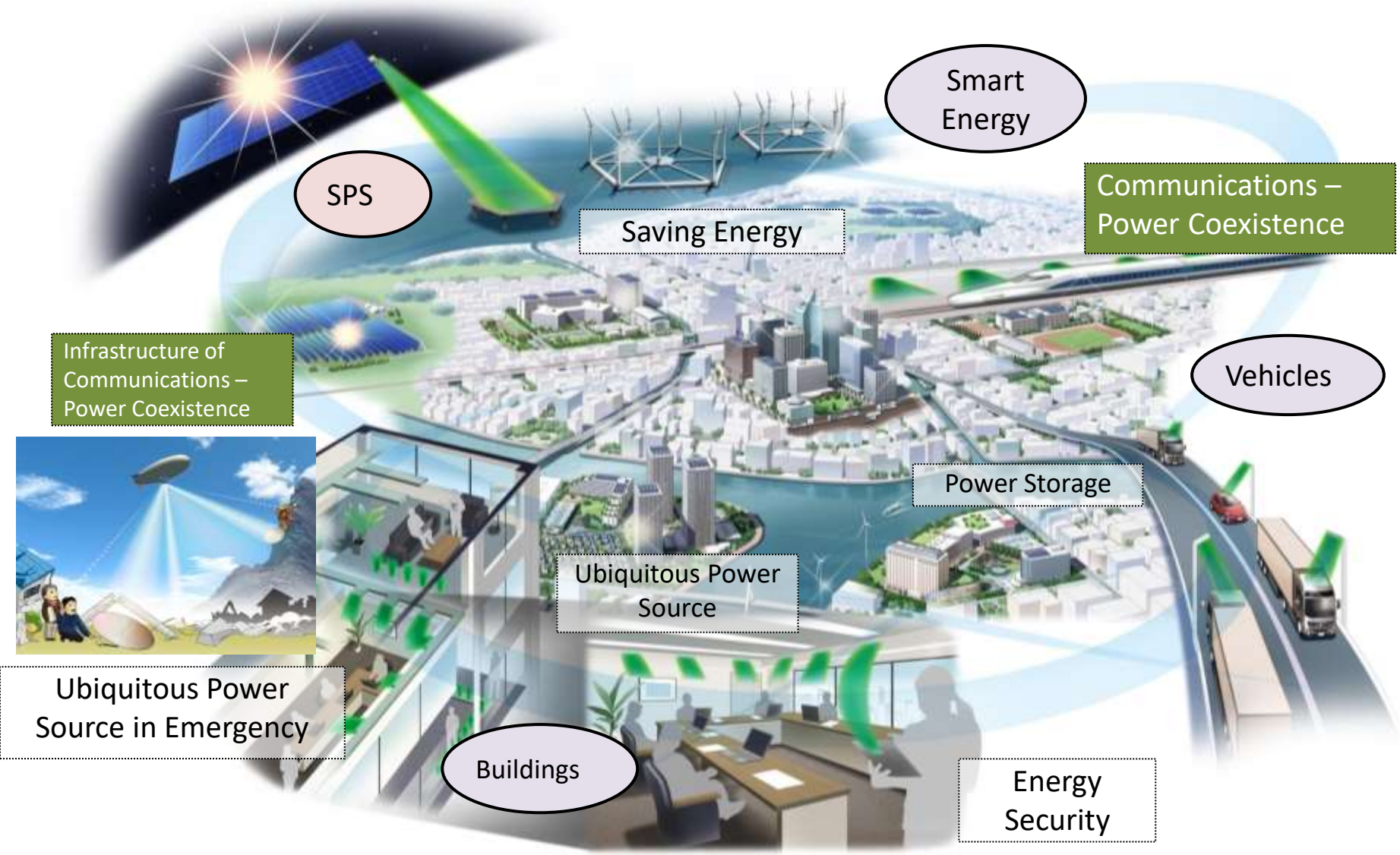
Output DC Power : 73.3W
Total Conversion
Efficiency: 49.3%

PAE of Amplifier : 51%

Y. Dong, et al., “Experimental Results and Analysis of Microwave Power Transmission Demonstration System for SSPS”, IEEE WiSEE2021

Millimeter wave WPT by Xiaomi (2021/1)

https://www.youtube.com/watch?v=jxRc0GFnCUo

おわりに

Future Sustainable Humanosphere with WPT
(on the Earth and on the Moon)