

# 宇宙太陽発電のための ビーム型マイクロ波送電研究の現状

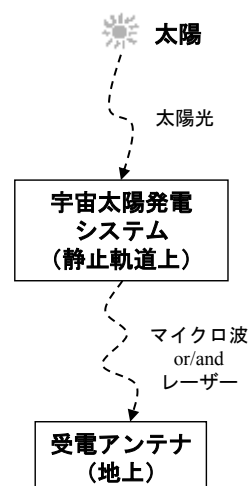
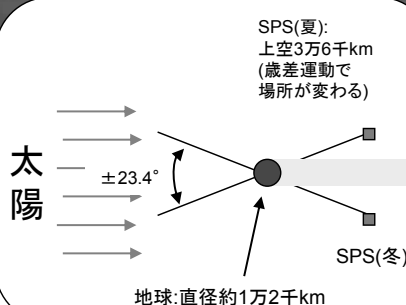
京都大学 生存圏研究所 教授  
篠原真毅

© RISH, Kyoto Univ. 1

## 宇宙太陽発電所(SPS)とは

- 宇宙空間で得られる太陽光を静止軌道上(高度36,000km)で収集し、マイクロ波やレーザーの形で地上へ送り届けるエネルギー供給施設。
- 当面の目標として100万kW級(原子力発電所1基分に相当)のエネルギーを伝送し、地上で電力や水素に変換し利用。
- 他のエネルギー源と比肩する低コストで、電力や水素を安定供給することを目指す。(開発期間20~30年)

SPS : Solar Power Satellite/Station

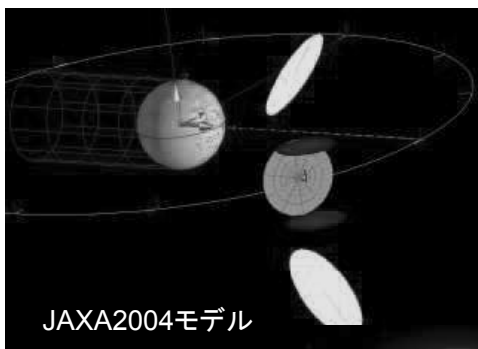


### <Dimensional Data>

- Primary mirror : 2.5km × 3.5km
- Solar Panels : φ 1.25km  
(Concentration ratio = 4)
- Microwave Power Transmitter :  
φ 1.8km (TBD)
- Total Weight : < 10,000ton

# 宇宙太陽発電所SPS

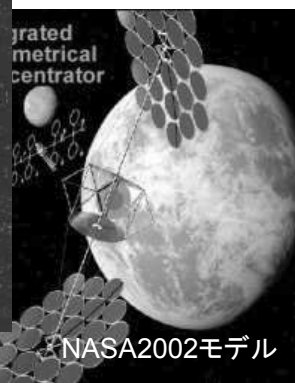
宇宙空間で発電し、地上でその電力を利用する発電所



JAXA2004モデル



USEF2002モデル



NASA2002モデル



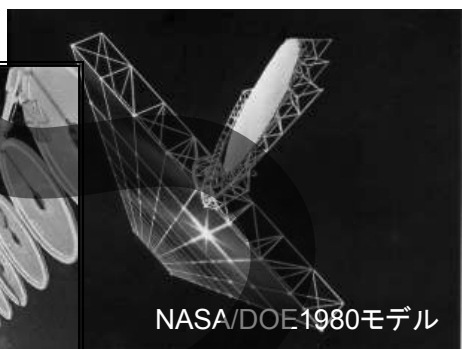
JAXAモデル(レーザー送電)



ESAモデル



NASA1997モデル



NASA/DOE1980モデル

© RISH, Kyoto Univ. 3

## SPSの技術/波及効果

(短期目標)スピノフ技術



関連する新エネルギー技術・環境技術産業分野

© RISH, Kyoto Univ. 4

# マイクロ波を用いてワイヤレスに電気を送る

研究ポイント:  
高精度・高速

ビーム発散による損失

大気や雨による  
減衰はほぼ0  
(マイクロ波で  
あれば)

研究ポイント:  
高効率

RF-DC変換損失

研究ポイント:  
高効率・軽量・高精度

送受電サイズ、距離に  
依存する為、規模の問題  
(理論でほぼ決まる)

技術的課題

DC-RF変換損失

技術的課題



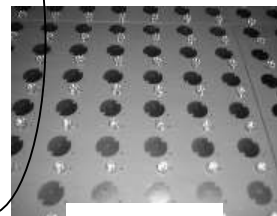
マグネトロン  
半導体アンプ etc.

マイクロ波  
電力(有線)



マイクロ波  
電力(無線)

マイクロ波  
受電素子  
(レクテナ)



直流電力

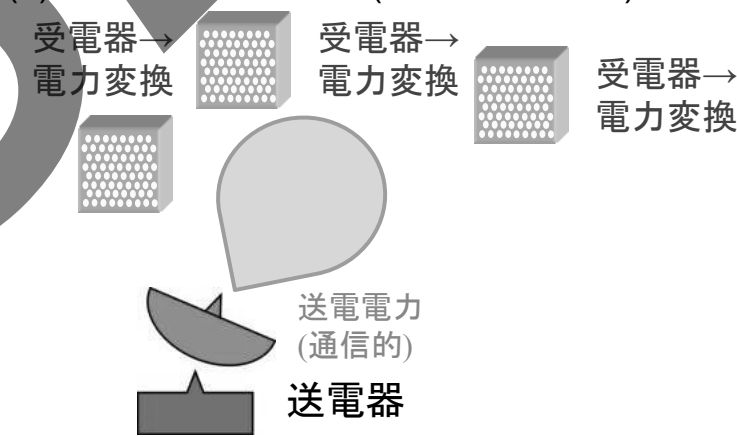
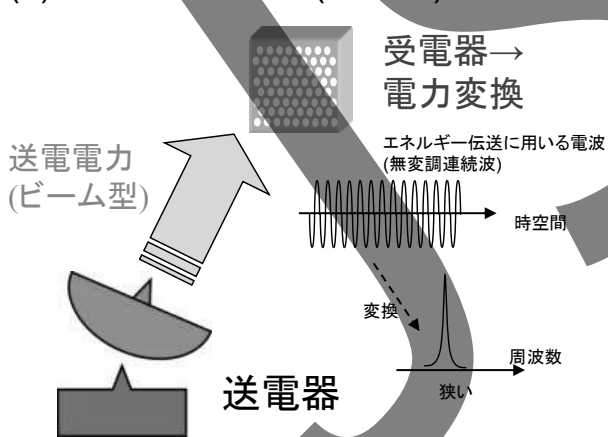
直流  
電力

DC-RF変換効率 80%以上目標 (技術的)  
電力伝送効率 90%以上目標 (理論的)  
RF-DC変換効率 90%以上目標 (技術的)

## マイクロ波ワイヤレス電力伝送

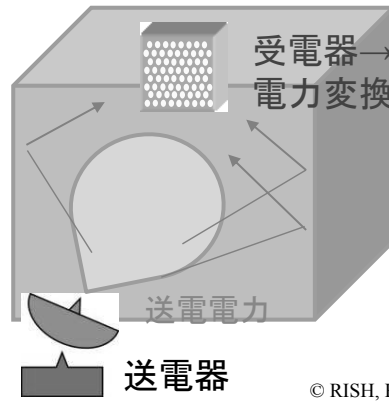
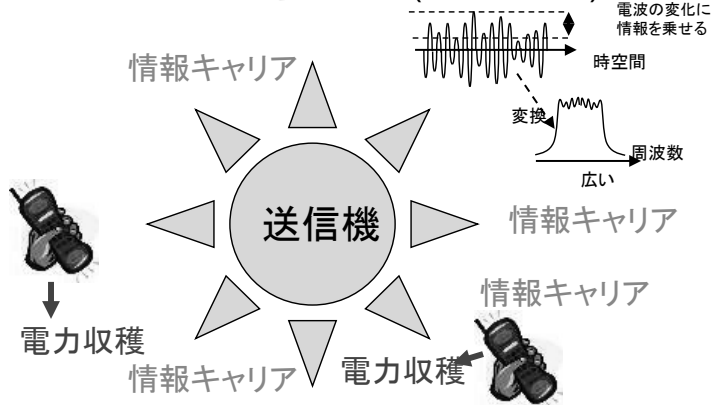
(a) 電磁波ビーム型 (高効率)

(b) 電磁波 ユビキタス型 (ゆるい位置決め)



(c) 電磁波ハーベスティング型 (送電器なし)

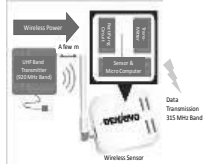
(d) 閉鎖空間型 (高効率)



# マイクロ波送電の商品(ユビキタス型)

- 電池いりません by 日本電業工作(900MHz-Band)

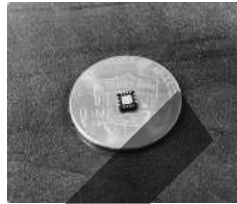
[http://www.den-gyo.com/solution/solution10\\_b.html](http://www.den-gyo.com/solution/solution10_b.html)



技術力はあるのに政策・標準化で敗北しかねない

RFIDという電子バーコードの規格内で運用し、ユーザー要求にこたえきれず。総務省は「マイクロ波送電は時期尚早」と見解

- Venture Companies of Wireless Charger of Smart Phone 'Cota' by Ossia inc. (WiFi-Band) <http://www.ossiainc.com/>



KDDIとリクルートが約30億円を投資  
現在日本に売り込みをかけている  
FCC-15という米規格内で十分な性能を実現

- 'Wattup' by Energous corp. (2.45GHz and 5.8GHz Band) <http://www.energous.com/>



前述のPMAグループ  
(標準化視野?)

© RISH, Kyoto Univ. 7

## ワイヤレス電力伝送実用化 コンソーシアム

### Wireless Power Transfer Consortium for Practical Application (WiPoT)

<http://www.wipot.jp/>

代表 / 京都大学

日本主導の  
標準化・産業化を!!

篠原 真毅



WiPoT

#### [設立趣旨]

マイクロ波送電を中心としたワイヤレス給電のシーズとニーズをマッチングし、マイクロ波送電やワイヤレス電力伝送の実用化を加速する。そのために技術だけでなく、標準化や安全性、ユーザーニーズに関する情報共有を行う。また、マイクロ波送電を中心としたワイヤレス給電のPR活動を行う。

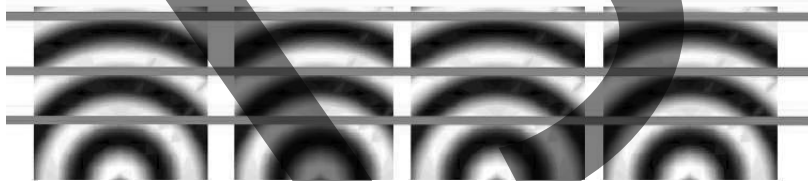
・2015/11現在の参加 30社、学識会員 39名、研究機関会員 3組織

・会費: 25万円/年 (法人会員) 無料 (学識会員)

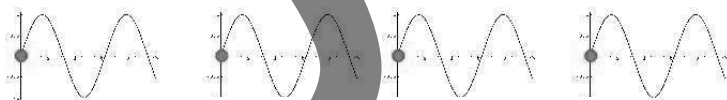
# Phased Array Developments in Japan

## Phase Array for Beamforming

(a) Same phases of radio waves from different antennas



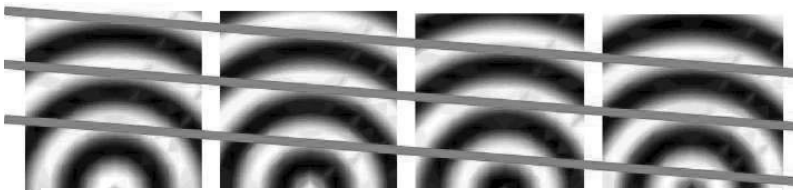
antenna1 antenna2 antenna3 antenna4



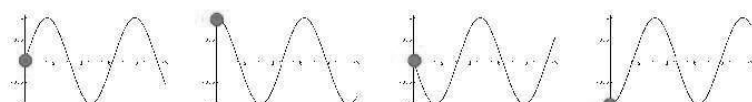
●: antenna, X-axis: distance from antenna

→ Equivalent phase plane is front  
=Beam direction is to front

(b) Different phases of radio waves from different antennas

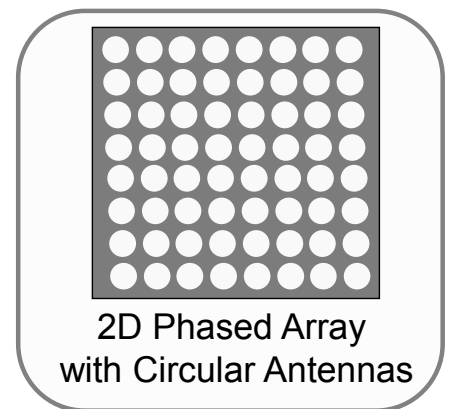


antenna1 antenna2 antenna3 antenna4



●: antenna, X-axis: distance from antenna

→ Equivalent phase plane is oblique  
=Beam direction is to oblique

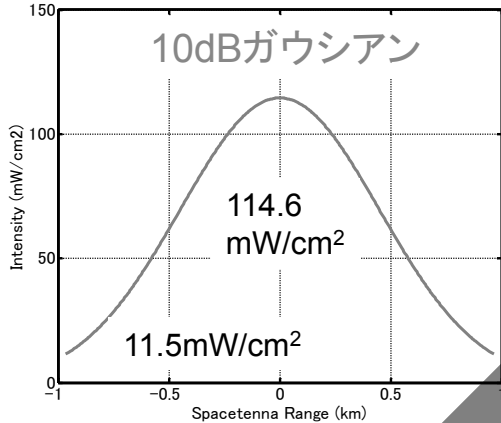


# SPS送電システムパラメータ (JAXA2004)

送電アンテナ直径 : 1.93km  
 送電テーパ : 10dBガウシアン  
 DC-RF変換効率 : 76%  
 送電マイクロ波電力 : 1.31GW  
 周波数 : 5.8GHz CW NON  
 送電距離 : 36,000km

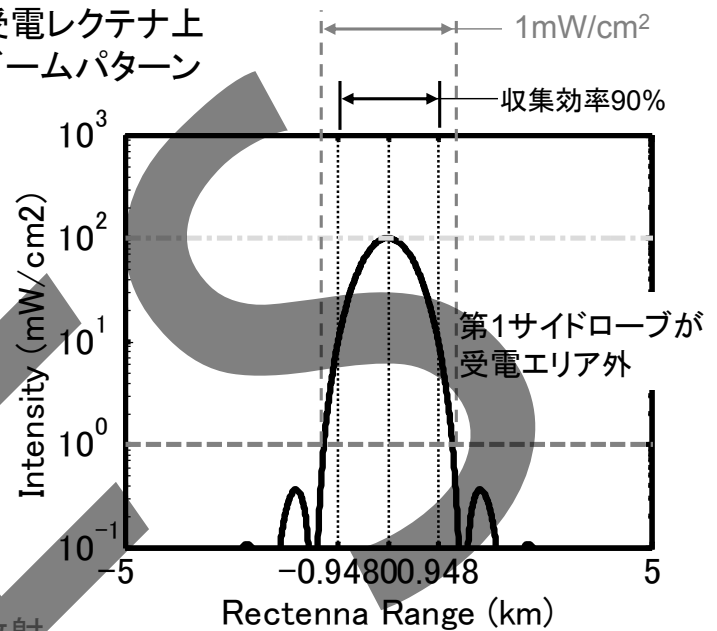
受電アンテナ直径 : 2.45km  
 レクテナ中心電力密度 : <math><100\text{mW}/\text{cm}^2</math>  
 レクテナ端電力密度 : <math><1\text{mW}/\text{cm}^2</math>  
 収集効率 : 96.2%  
 RF-DC変換効率(仮定) : 85%  
 出力DC電力 : >1GW

## 送電アンテナ強度分布



素子間隔0.77λの場合の  
 1アンテナ面積 ≒ 16cm<sup>2</sup> (4cm角)  
 10dBガウシアン中心1アンテナから1.83W,  
 端1アンテナから0.18W放射

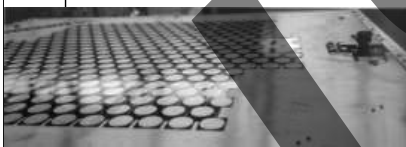
## 受電レクテナ上 ビームパターン



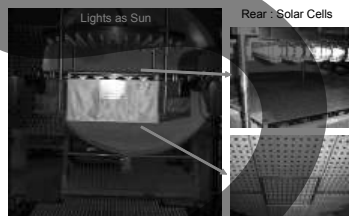
© RISH, Kyoto Univ. 11

# Phased Array Developments in Japan

## Semi-Conductors



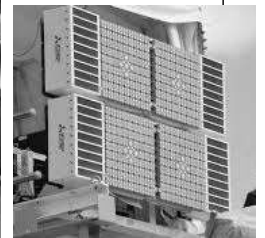
1992 (for Airplane Experiment)  
 2.45GHz, Total Power >1.2kW  
 96 array module, 3in1 sub-array  
 HPA PAE >40% (GaAs)  
 By Kyoto Univ. and Kobe Univ.



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,  
 Total Power >1.9kW  
 256 array module  
 HPA PAE >70% (GaN)  
 thickness <30cm  
 in Kyoto Univ.



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

## Magnetrons



2000 SPORTS2.45  
 2.45GHz,  
 Total Power >4kW  
 12 magnetron array  
 Eff. >70%  
 in Kyoto Univ.



2001 SPORTS5.8  
 5.8GHz,  
 Total Power >2.7kW  
 9 magnetron array  
 Eff. >65%  
 in Kyoto Univ.

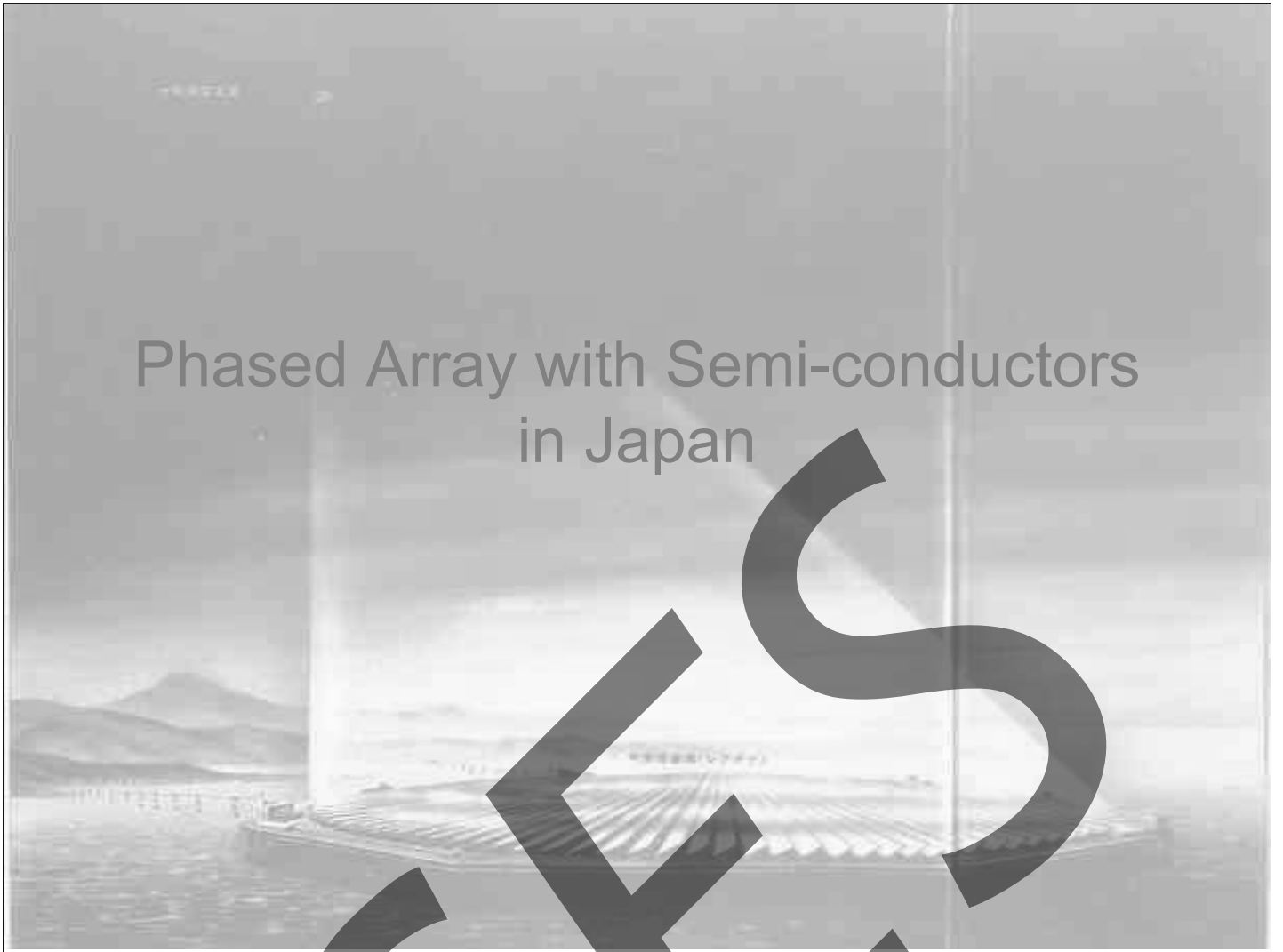


2009 for Airship Exp.  
 2.45GHz,  
 Total Power >440W  
 2 magnetron array  
 (light weight)  
 by Kyoto Univ.



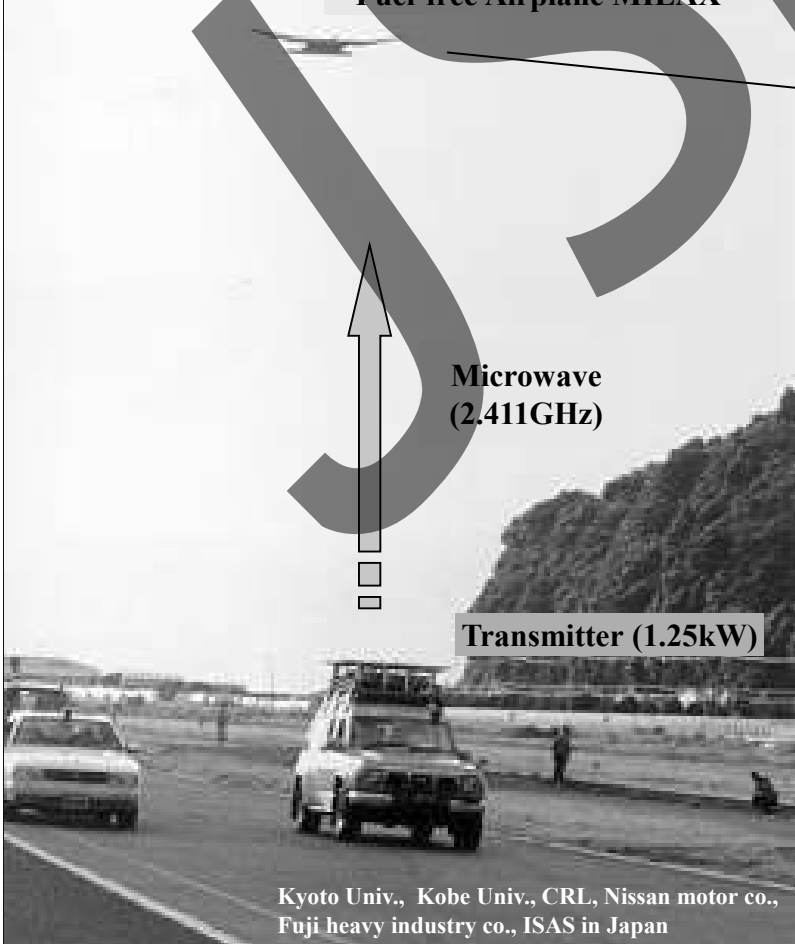
2015 2.45GHz  
 Total Power >10kW  
 500m Field Exp.  
 by METI & JSS

# Phased Array with Semi-conductors in Japan



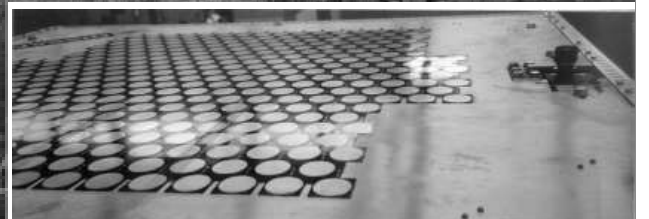
## MILAX Airplane Experiment (1992.8)

Fuel-free Airplane MILAX



Microwave  
(2.411GHz)

Transmitter (1.25kW)

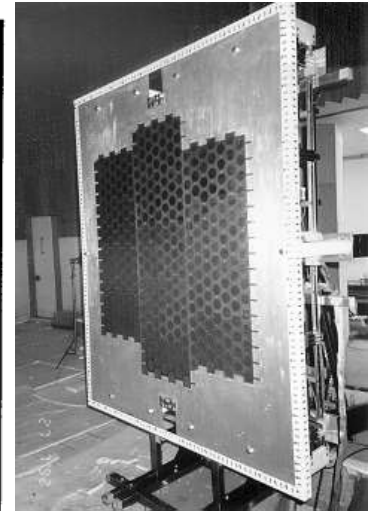
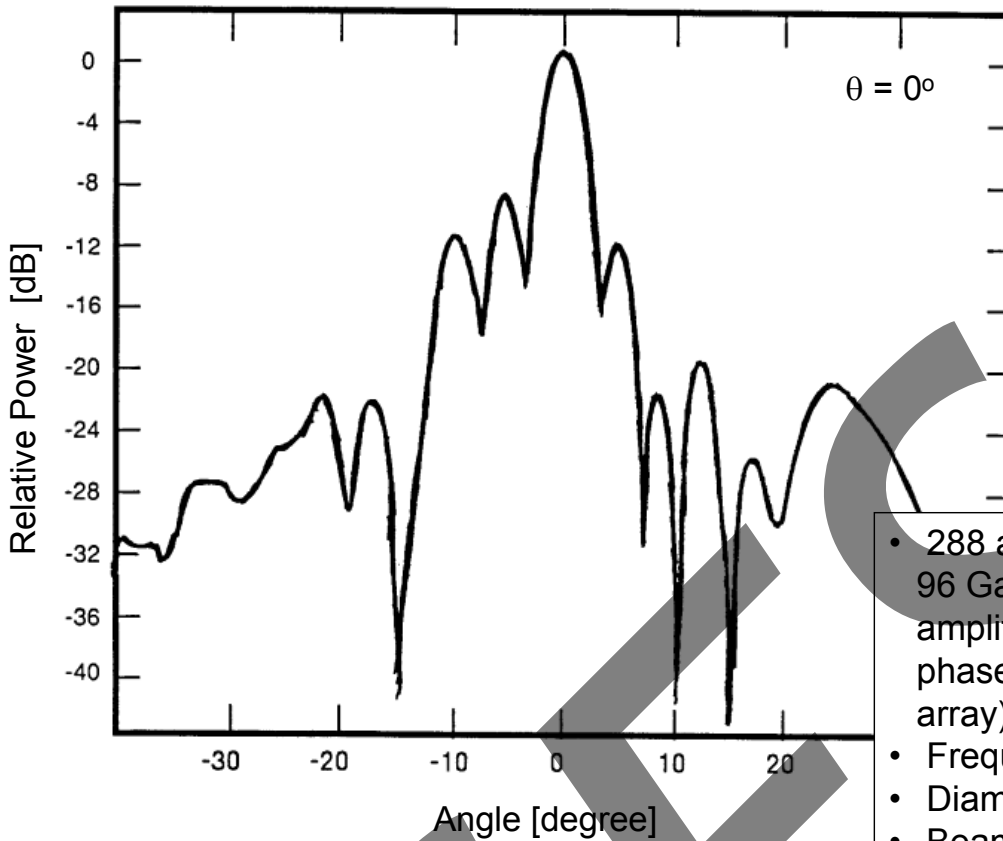


1992 (for Airplane Experiment)  
2.45GHz, Total Power >1.2kW  
96 array module, 3in1 sub-array  
HPA PAE >40% (GaAs)

Kyoto Univ., Kobe Univ., CRL, Nissan motor co.,  
Fuji heavy industry co., ISAS in Japan

Developed by IHI Aerospace (former Nissan Motor Co.)14

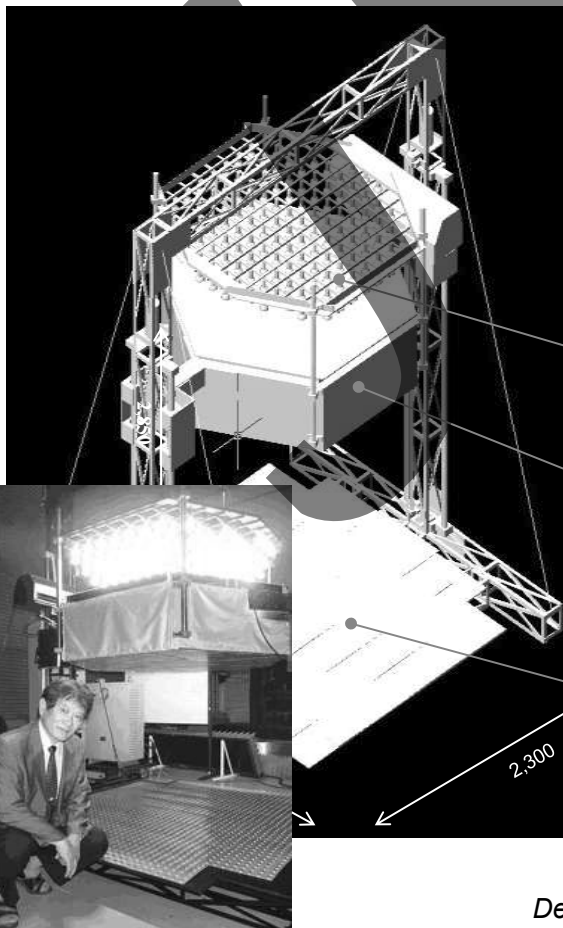
# Beam Pattern of the MILAX Phased Array



- 288 antennas connected to 96 GaAs semiconductor amplifiers and 4-bit digital phase shifters (3in1 sub-array)
- Frequency 2.411 GHz
- Diameter : 1.3 m
- Beam Width : 6 degrees

Developed by IHI Aerospace (former Nissan Motor Co.)15

# SPRITZ (Solar Power Radio Integrated Transmitter '00)



## Specifications

### ■ Sizes (in mm)

- 2,000<sup>D</sup> x 2,300<sup>W</sup> x 2,850<sup>H</sup>

### –Solar Simulator

- 133 x 75W Halogen Lamps

### –SPRITZ

#### •Solar cells

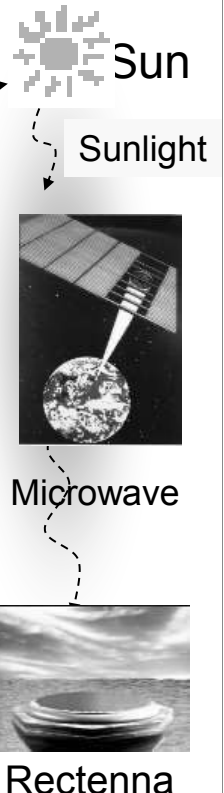
- Output > 166W
- Efficiency: about 5%

#### •Microwave Transmitter

- Frequency 5.77 GHz
- Output 25W
- Active Phased Array Antenna
- Phase Control 3bits

### –Rectenna

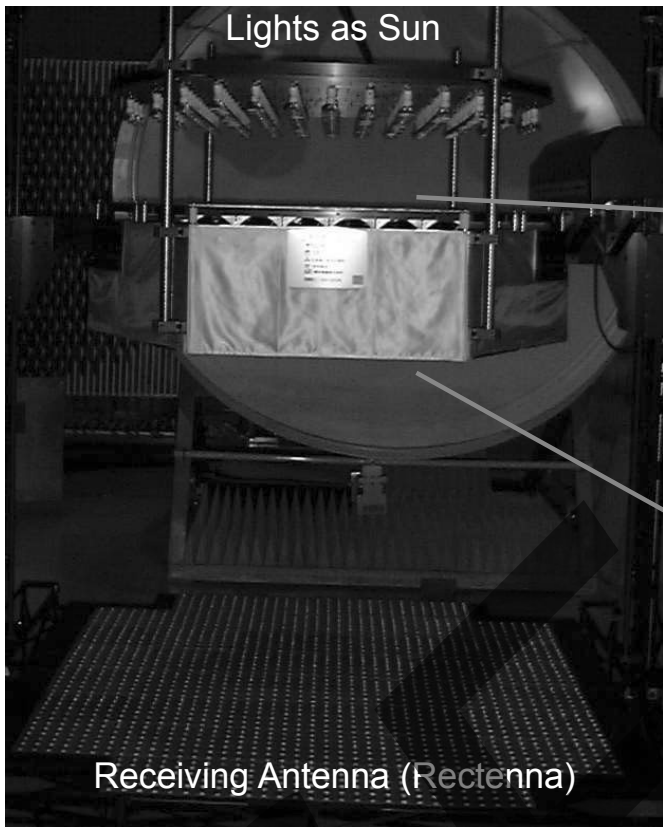
- 1,848 rectennas and LED's



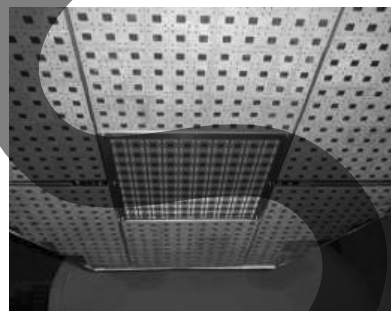
Developed by Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.



# SPRITZ (2001.3)



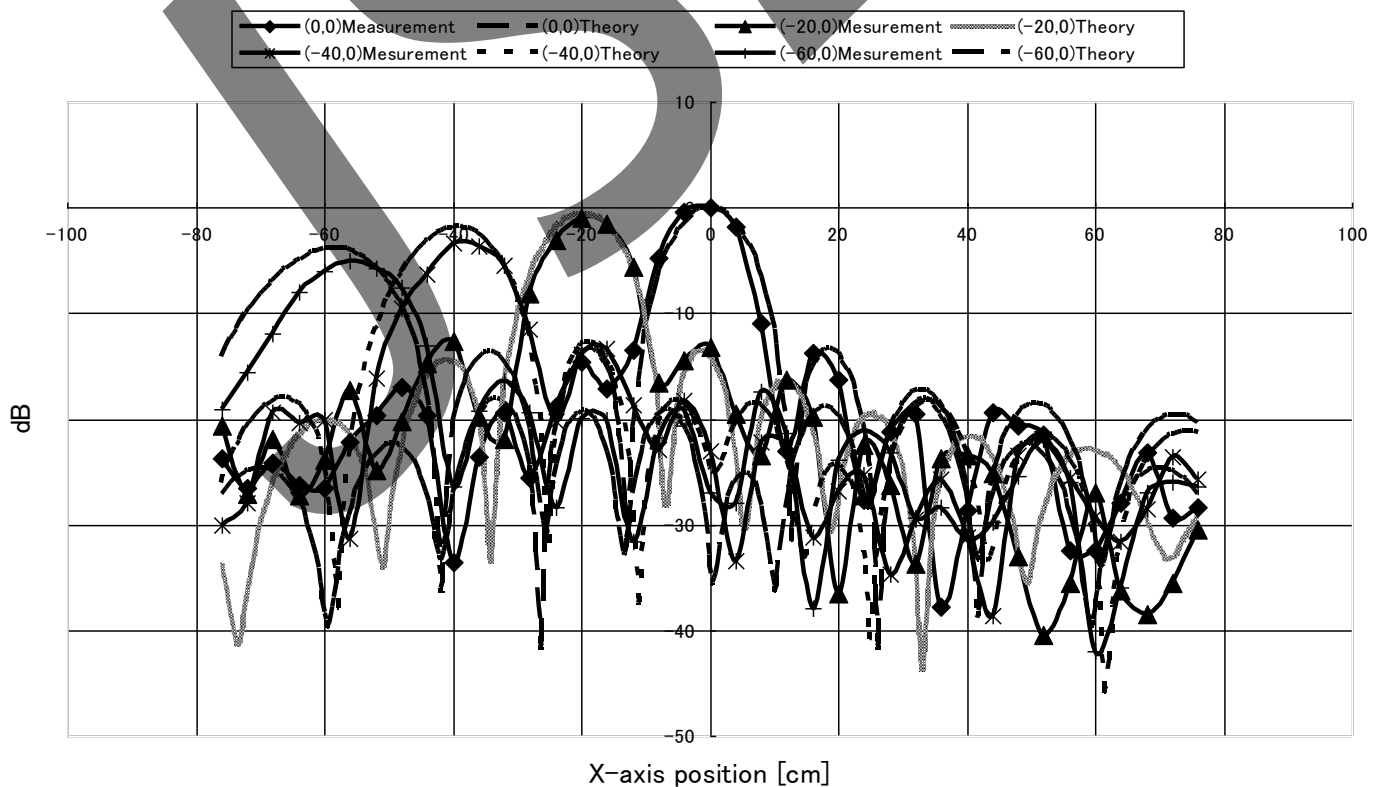
Rear : Solar Cells



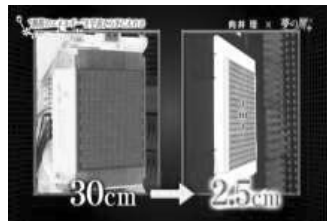
Front : Phased Array  
10x10

Developed by Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

## Beam Pattern of SPRITZ



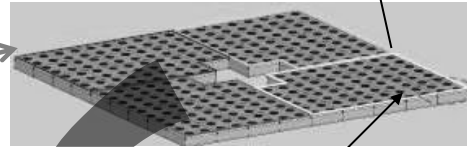
# Developed Thin Phased Array Antenna (FY2009-2014) by Japanese SPS Committee



(120cm x 120cm),  
5.8GHz,  
1.8kW CW

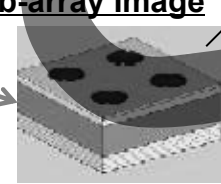
**Thin Phased Array**

**Power Transmitting Module Image**



60cm x 60cm,  $\geq 450W$ ,  $\leq 1.9kg$

**Sub-array Image**



**Transmitting ANT**  
(76 Sub-array ANT)

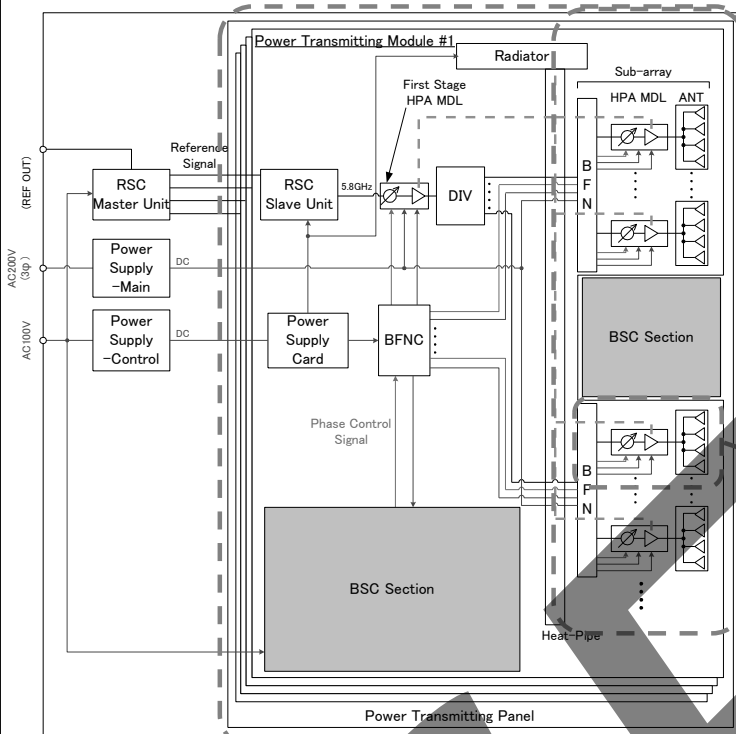
**Sub-array ANT**  
(4 elements)

**HPA MDL (PAE >70%)**  
(High Power amplifier Module)

**BFN (Beam Forming Network)**  
(66mm x 66mm x 25mm (Thickness))

— : RF/IF Signal      — : Control Signal  
— : Power Line        — : Thermal Path

RSC: Reference Signal Control      DIV: Divider  
BSC: Beam Steering Control        HPA MDL: High Power Amplifier Module  
BFN: Beam Forming Network        ANT: Antenna  
BFNC: BFN for Control Signal

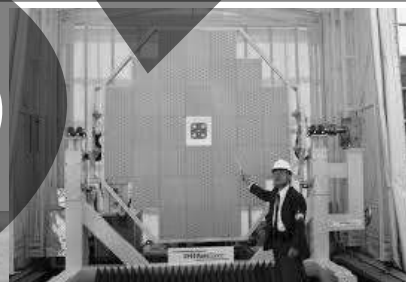


Developed by Mitsubishi Electric Corp., Supported by METI

© RISH, Kyoto Univ. 19

## MPT Experiment in 2015 (1) Small-High Efficiency Phased Array with GaN MMIC

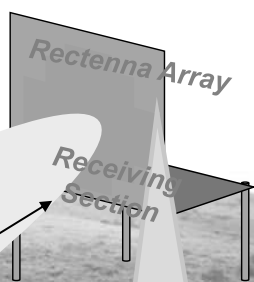
2.5cm thickness phased array  
GaN MMIC Amplifiers  
5.8GHz, 1.8kW



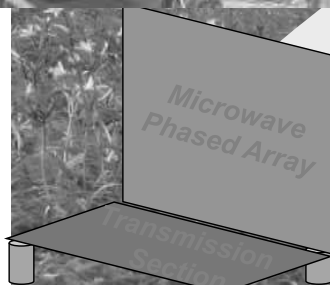
**WPT Ground Test**

**Microwave Beam**

55m



Power Density  
 $\sim 350W/m^2$   
at rectenna center  
 $\sim 10W/m^2$   
at rectenna edge



# Phased Array with Magnetrons in Japan

## マグネトロン (磁電管)

### マグネトロンとは...

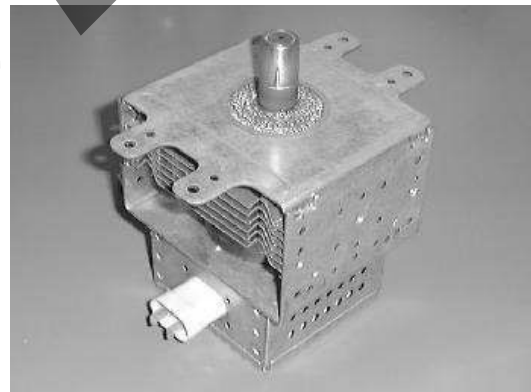
- 磁界により電子制御を行う円筒型電子管
- 直流→マイクロ波変換
- 1921年アメリカ ハルが発明、1927年岡部金治郎が分割陽極マグネトロンを創作

### マグネトロンの特徴

- 高効率 (70%~)
- 高出力 (500W~)
- 安価 (約¥1,000/kW)
- 優れた質量対出力比 (20g/W)

### マグネトロンの主な用途

- 加熱 (家庭用・工業用)
- レーダーパルス生成
- 無線電力伝送 (e.g. SPS)



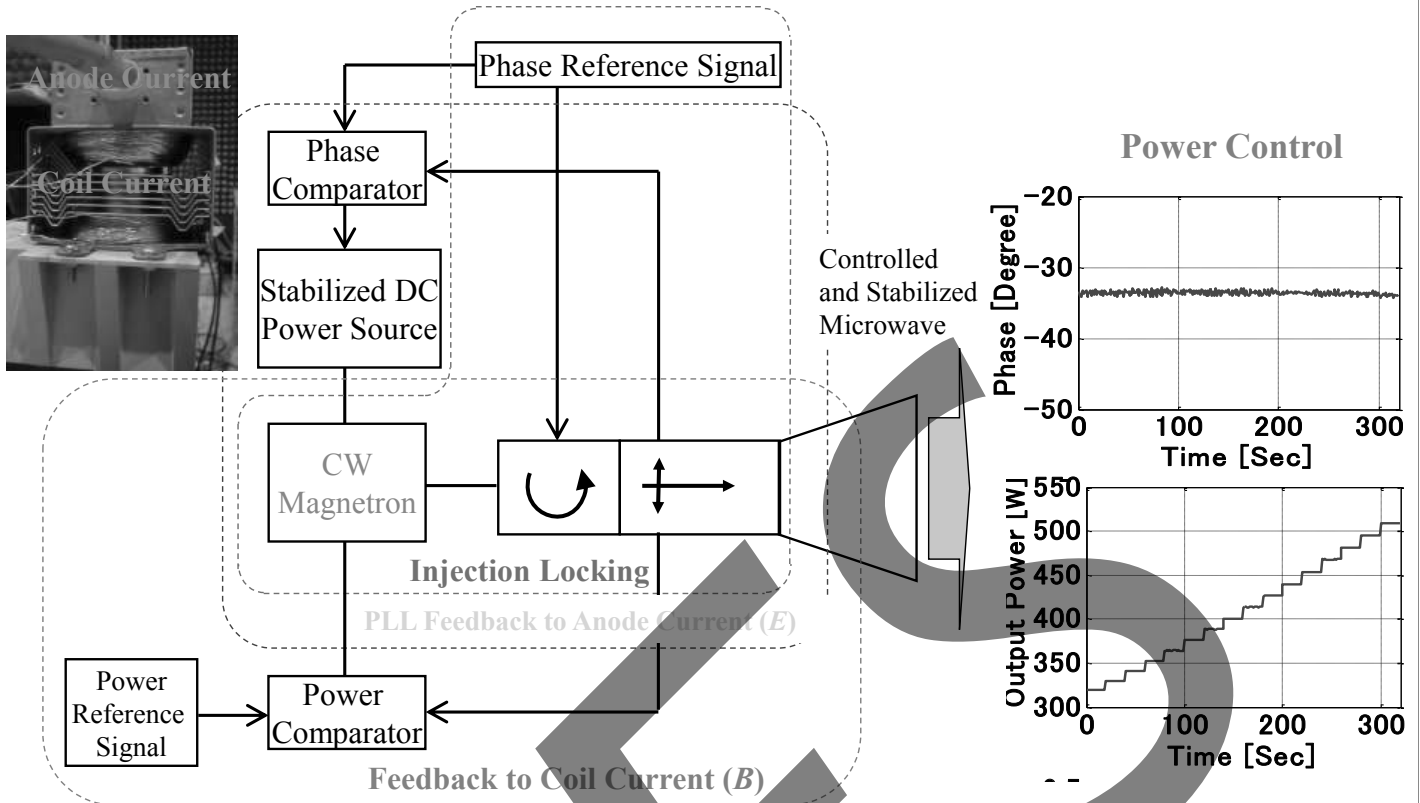
[マグネトロン外観]



[マグネトロン本体]

# Phase and Amplitude Controlled Magnetron (2004)

RISH of Kyoto Univ.



PACM for phased array system

23

## MPT Experiment on Feb. 2015 (2) High Power-Low Cost Phased Array with Magnetrons

Magnetron phased array  
2.45GHz, 10kW  
Height 13m



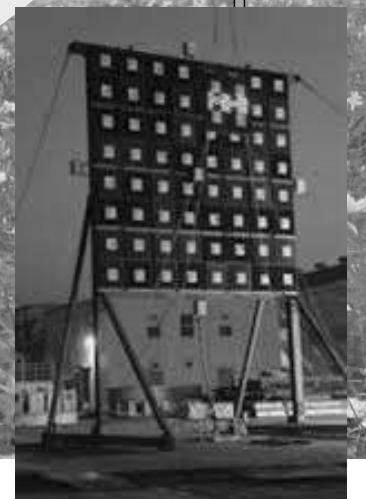
Microwave Beam

500m

Rectenna Array Receiving Section



Magnetron Phased Array Transmission Section



## 目標追尾方式 - レトロディレクティブ -

通信・レーダー用基本システム  
非対称2周波利用システム  
1/3周波利用システム

## 目標自動追尾方式

### SPSビーム型無線電力伝送の課題

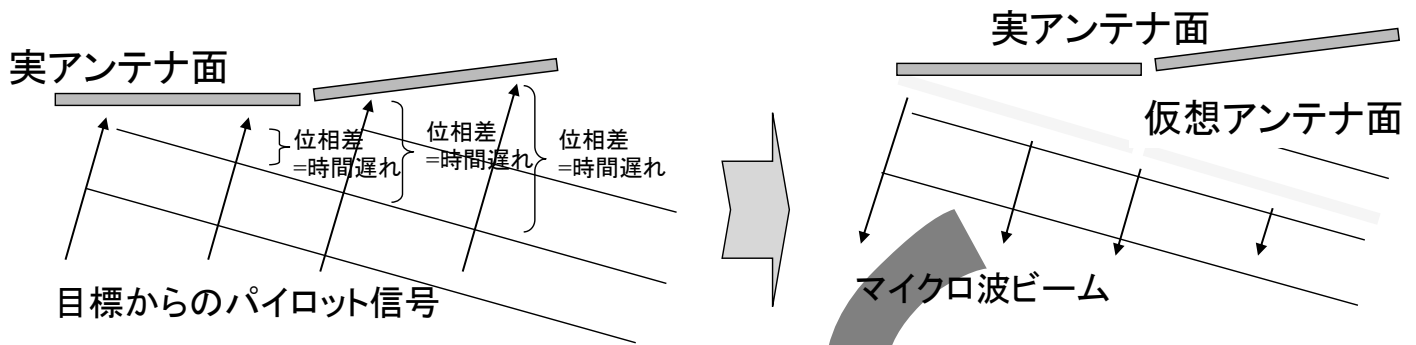
- 36,000km先のkm以下の受電点の場所をどう計測するか
- SPSのkmサイズのアンテナは、宇宙空間では形状を保てない (常に振動している)

### 目標自動追尾方式の必要性

- 電波(パイロット信号)利用
  - アナログ位相共役回路 = レトロディレクティブ
  - 方向推定+ビームフォーミング  
= ソフトウェア・レトロディレクティブ (高度なアルゴリズム)
- 光学利用
- 超音波利用
- クローズド・ループ (電波で情報をやり取り)

# レトロディレクティブ方式

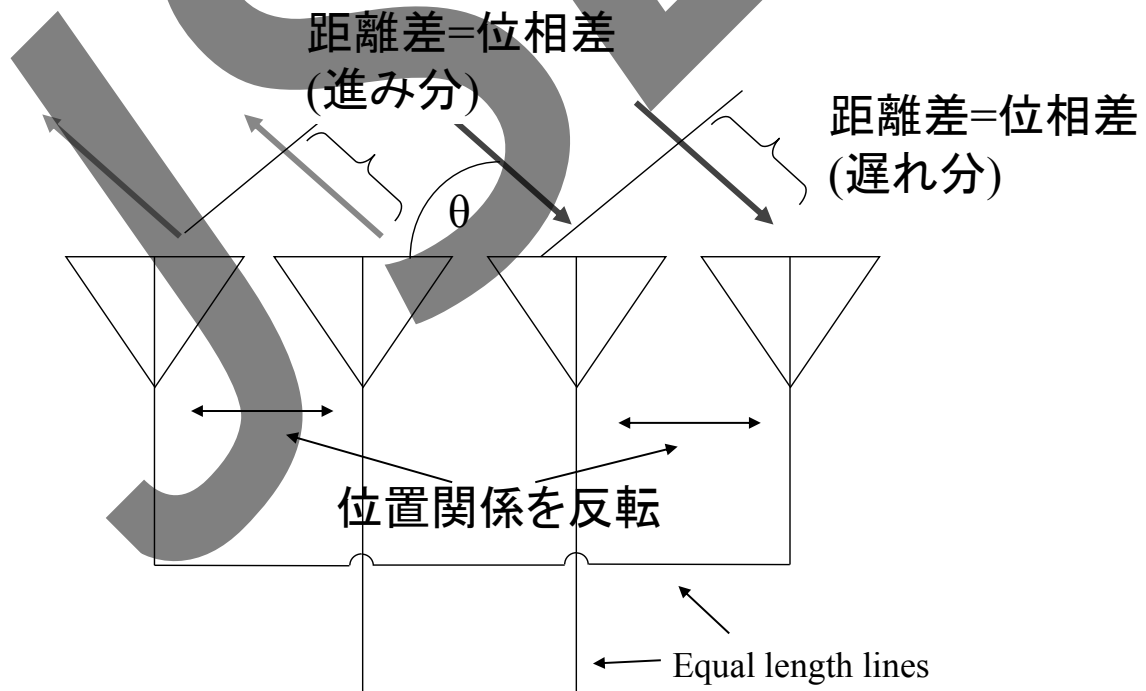
## 電波(パイロット信号)を用いた位置認識



- アンテナの形の歪みを信号の到達時間差として認識し、その情報を用いて、送電目標を多数のアンテナ1つ1つの「位相情報」として理解させる方式

© RISH, Kyoto Univ. 27

## 最も簡単なレトロディレクティブアレイ (Van Atta Array)



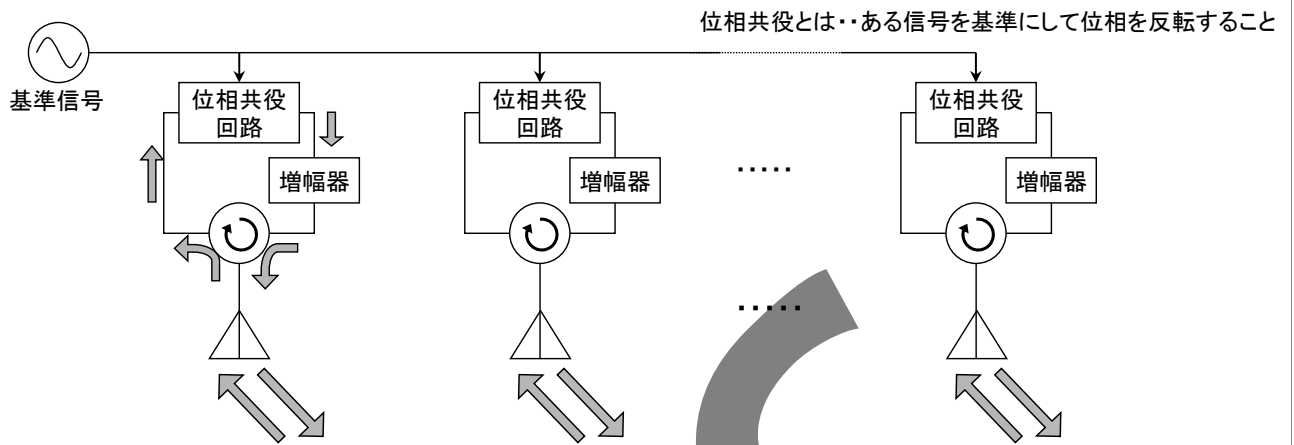
アンテナで受信した信号を同じ長さの線路を伝えて送り返す

(発展形)⇒場所を反転させることで実現した位相反転を、場所を反転させることなく回路で行う =レトロディレクティブ方式

© RISH, Kyoto Univ. 28

# レトロディレクティブ方式の原理

アレーアンテナで受信された電波をそのまま到来方向へ送り返すための方式



〔 SPSにおいては、 $\rightarrow$ がパイロット信号、 $\rightarrow$ が送電のためのマイクロ波 となる 〕

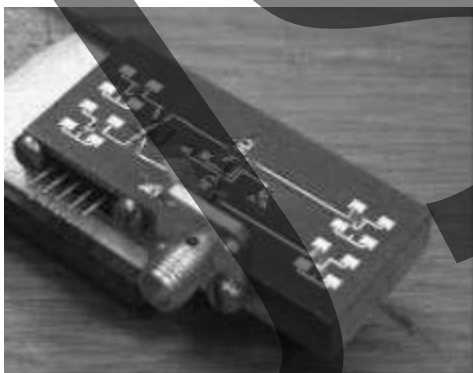
## レトロディレクティブ方式の特徴

送受信を共通のアンテナで行うため、アンテナ素子の配置にかかわらず自動的に受信された電波の到来方向へ送り返すことができる。

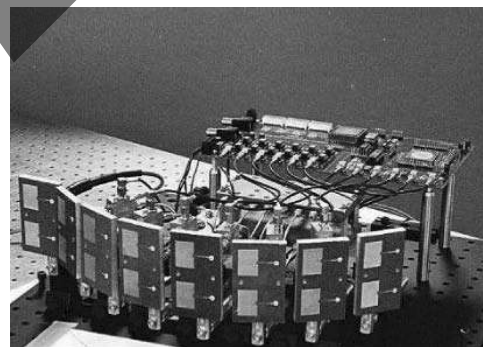
- ・位相共役回路を用いる  $\Rightarrow$  ハードウェア・レトロディレクティブ (移相器なし)
- ・角度情報を検出する  $\Rightarrow$  ソフトウェア・レトロディレクティブ (移相器必要)

© RISH, Kyoto Univ. 29

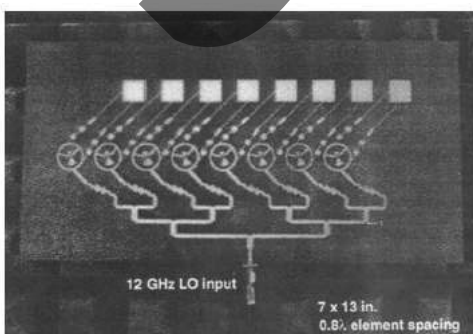
## レトロディレクティブ開発状況(通信・レーダー用基本システム)



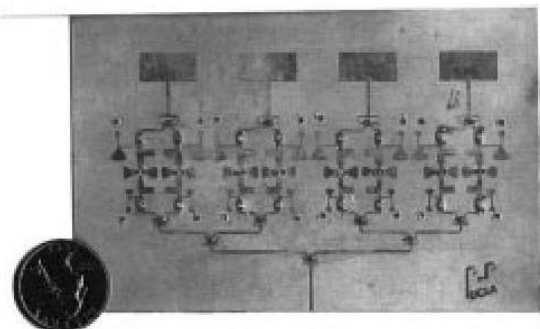
Queen's University (62-66GHz)



Jet Propulsion Laboratory and University of Michigan (2001) (5.9GHz)

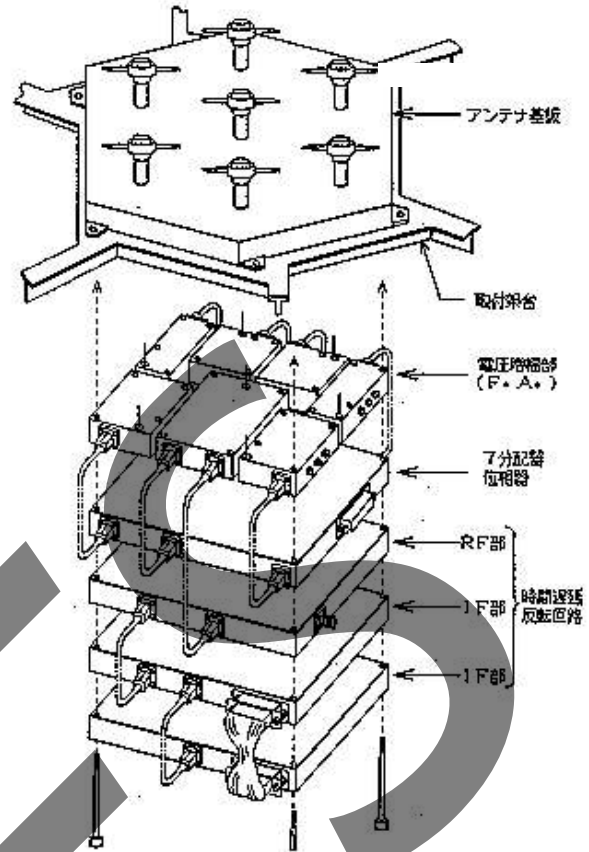


UCLA (1995) (6GHz)



UCLA (2000) (6GHz)

© RISH, Kyoto Univ. 30

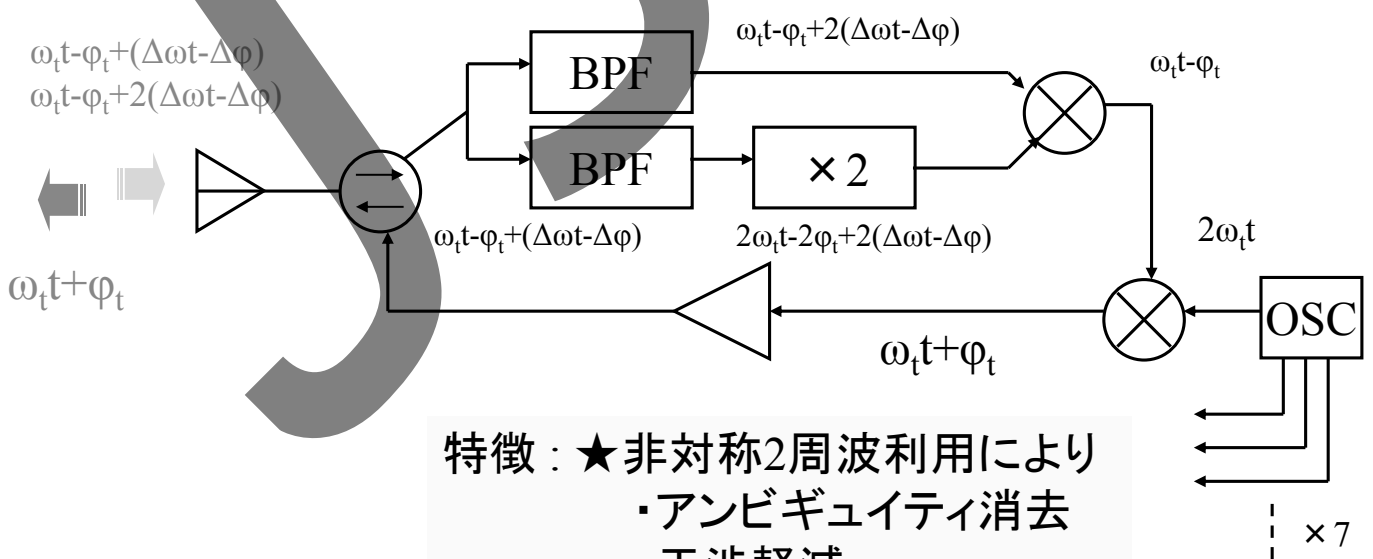


松本他, "京都大学におけるSPS研究への取り組み", 信学技報 SPS2002-07 (2002-11) pp.9-14, 2002

京都大学・神戸大学・三菱電機

## 位相共役回路

- $+\Delta\omega, +2\Delta\omega$  2周波利用

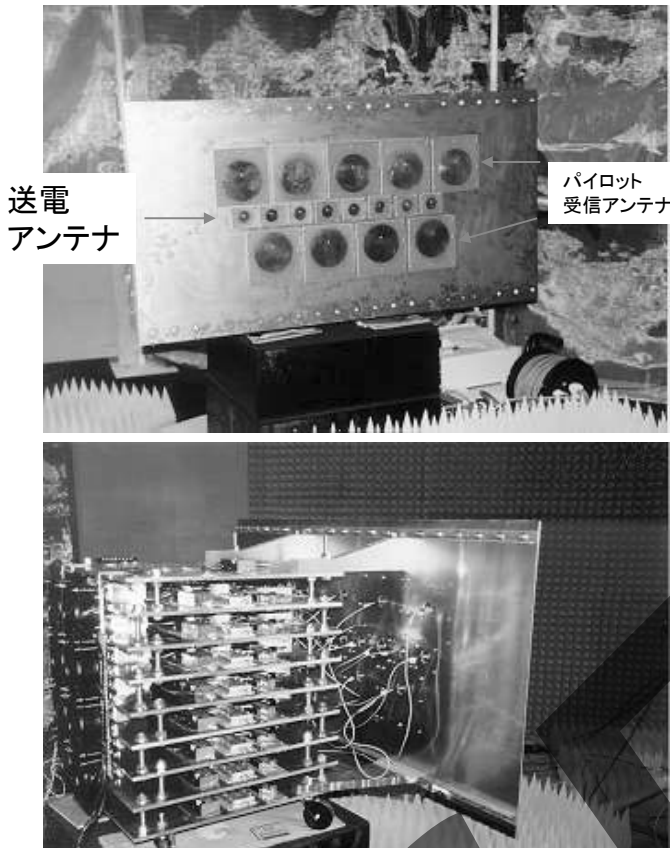


- 特徴: ★非対称2周波利用により
- ・アンビギュイティ消去
  - ・干渉軽減
  - ・送受共用アンテナ
- ★2次元レトロディレクティブ  
★局部発振器(4.9GHz)

松本他, "京都大学におけるSPS研究への取り組み", 信学技報 SPS2002-07 (2002-11) pp.9-14, 2002

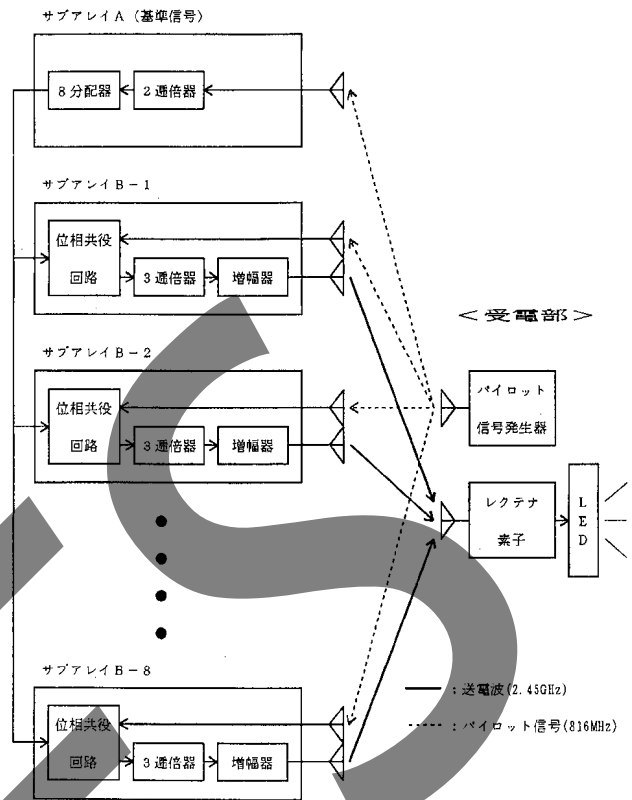


# 1/3周波利用レトロディレクティブ方式マイクロ波送電器 (1996)



松本他, "京都大学におけるSPS研究への取り組み", 信学技報 SPS2002-07 (2002-11) pp.9-14, 2002

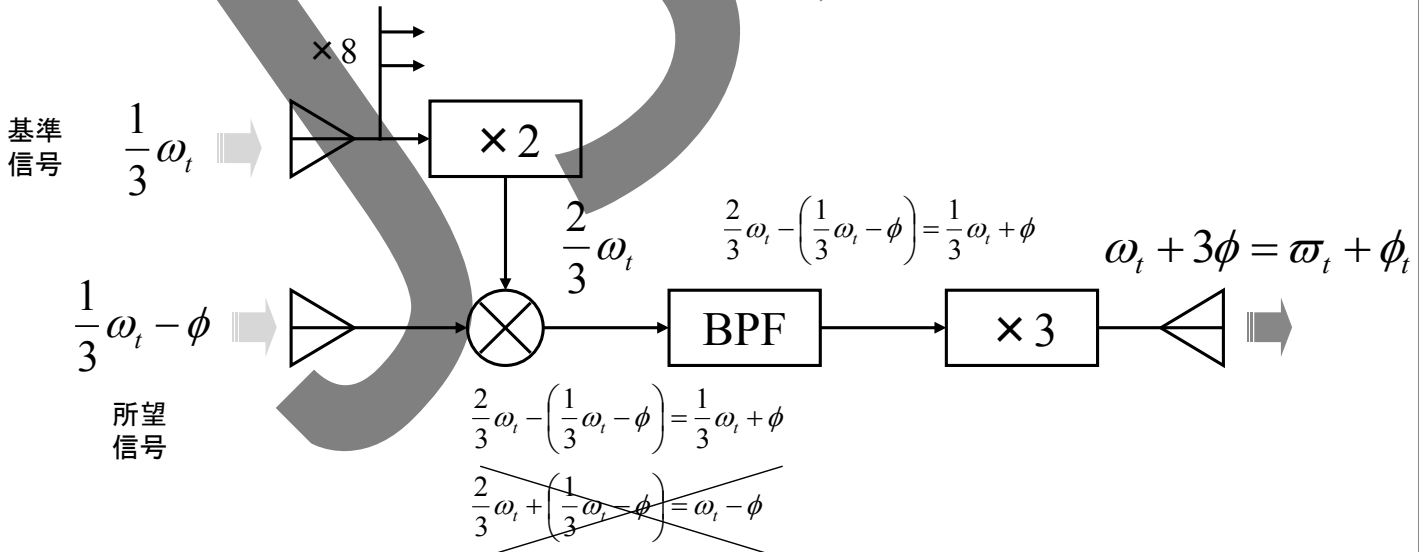
## < 送電部 >



京都大学・日産自動車(現IHI Aerospace)

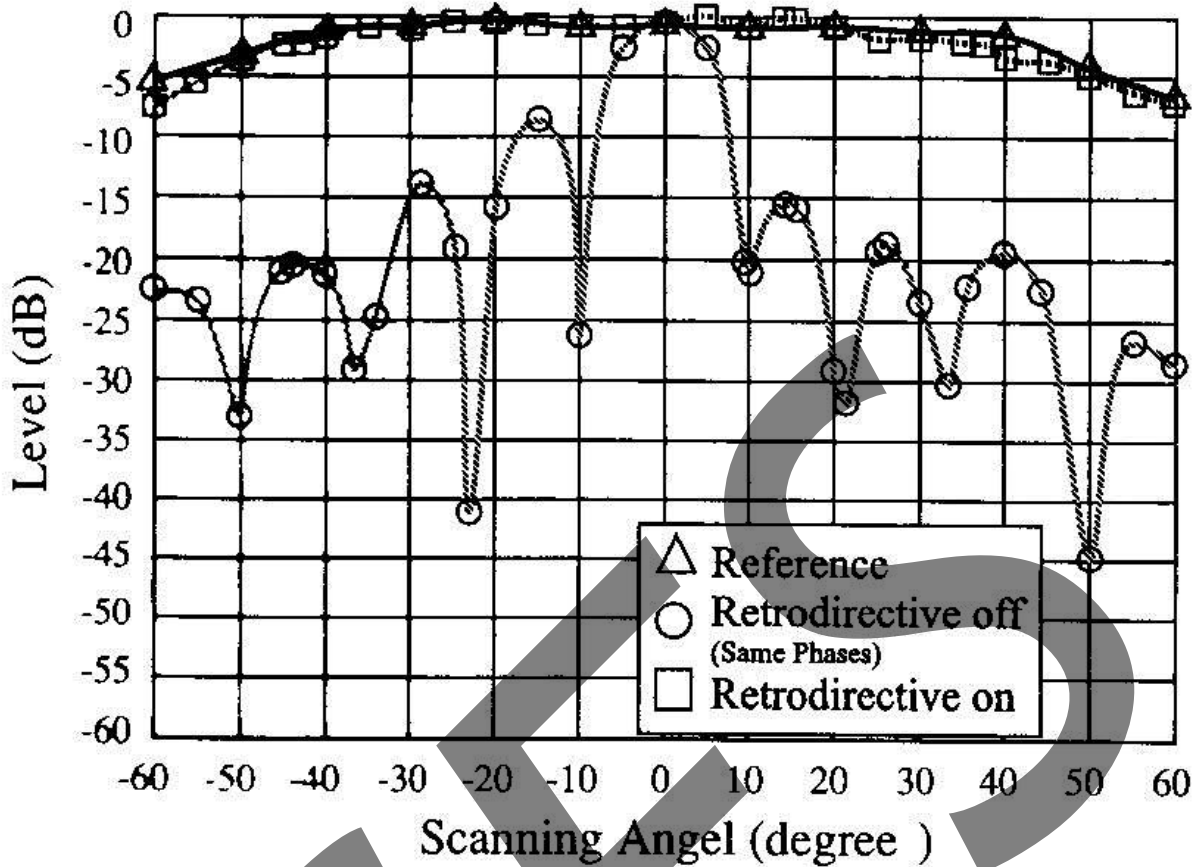
## 位相共役回路

### • 1/3周波数利用



- 特徴: ★ 局部発振器なし
- ★ 1次元レトロディレクティブ

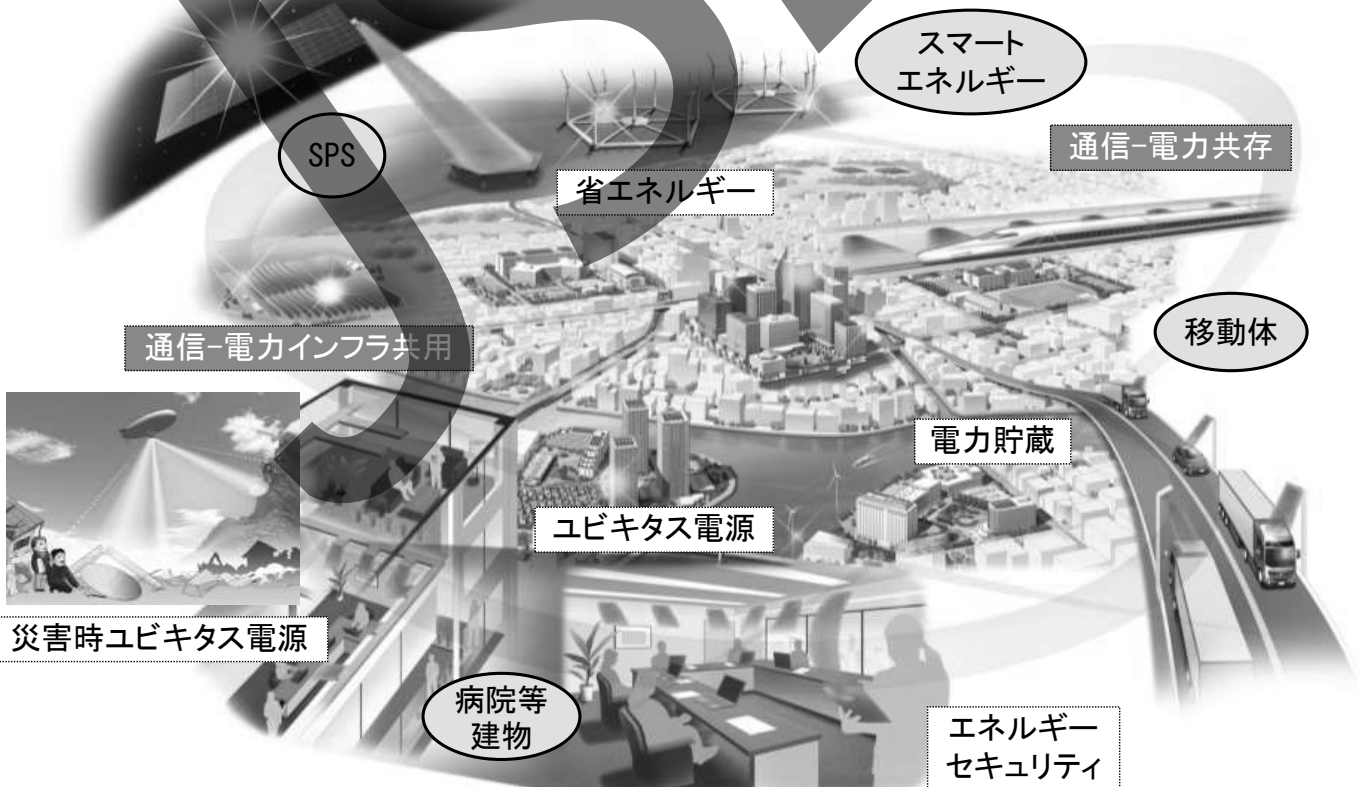
# 実験結果



松本他, "京都大学におけるSPS研究への取り組み", 信学技報 SPS2002-07 (2002-11) pp.9-14, 2002

© RISH, Kyoto Univ. 35

# SPSがある夢のコードレス社会



しなやかほっこり社会の実現

無意識化→依存からの解放

© RISH, Kyoto Univ.