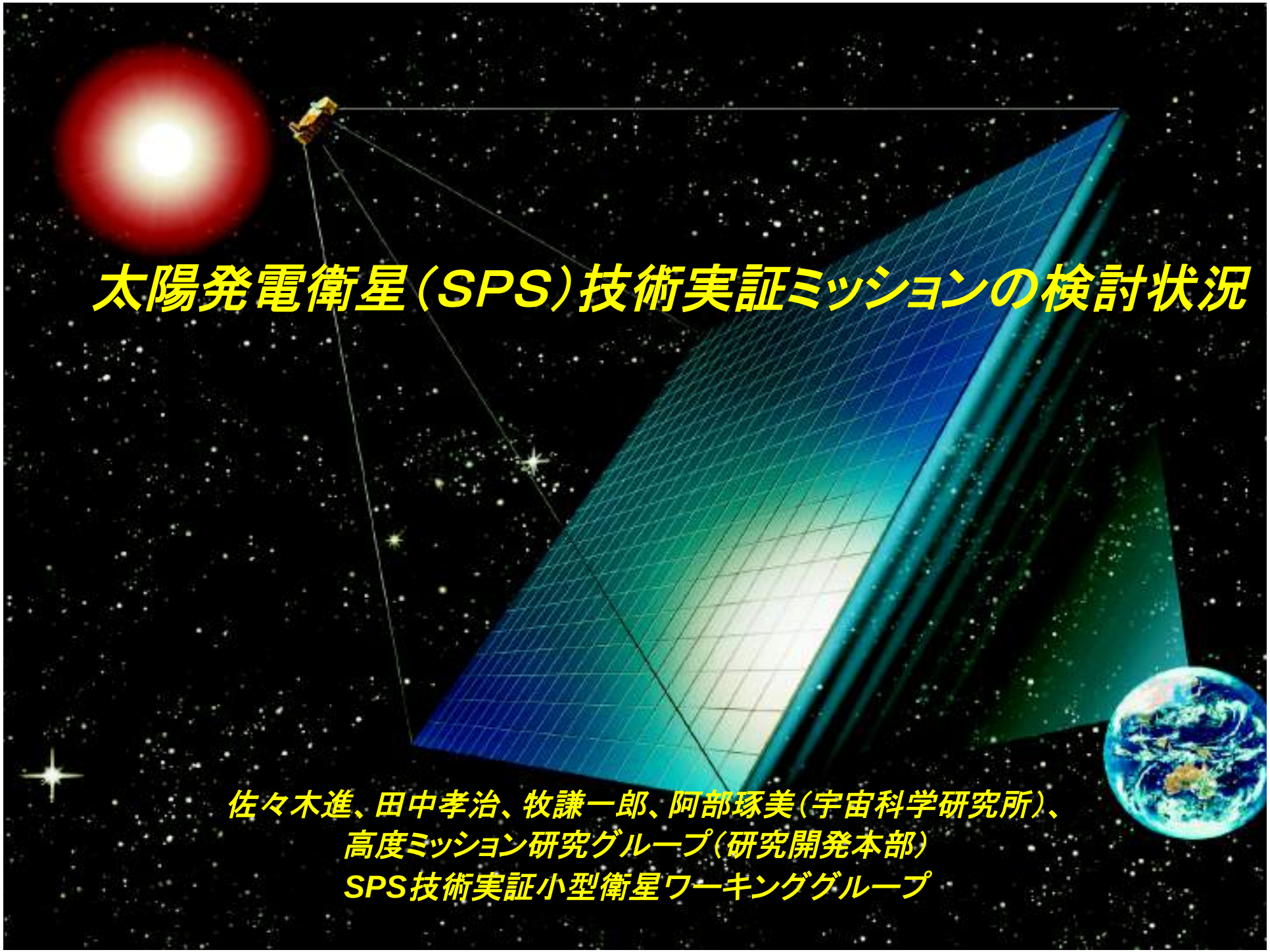
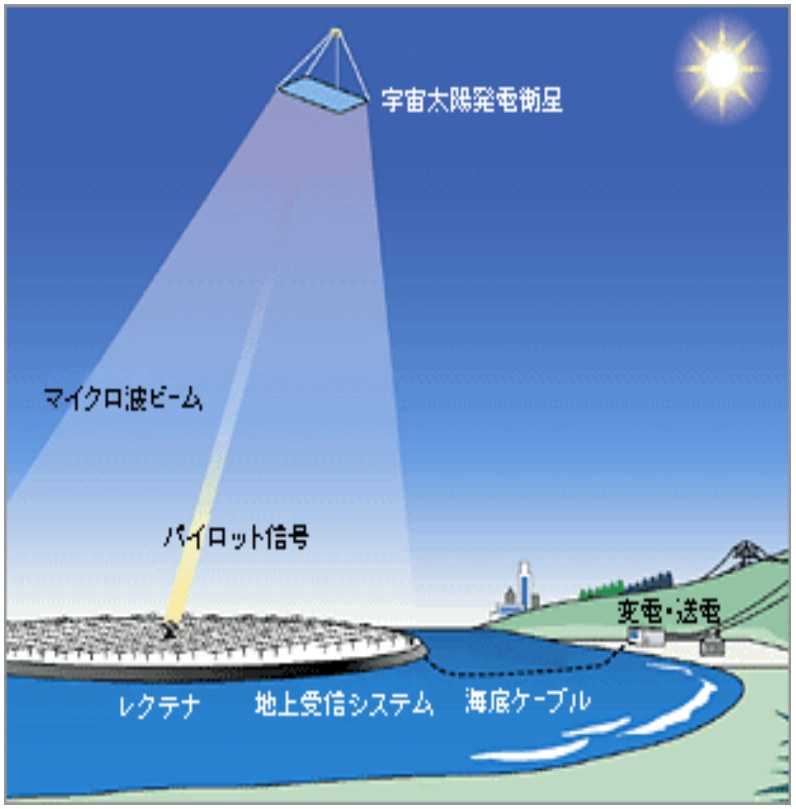


太陽発電衛星（SPS）技術実証ミッションの検討状況

佐々木進、田中孝治、牧謙一郎、阿部琢美（宇宙科学研究所）、
高度ミッション研究グループ（研究開発本部）
SPS技術実証小型衛星ワーキンググループ

はじめに：SPSの概念とエネルギーシステムとしての特徴

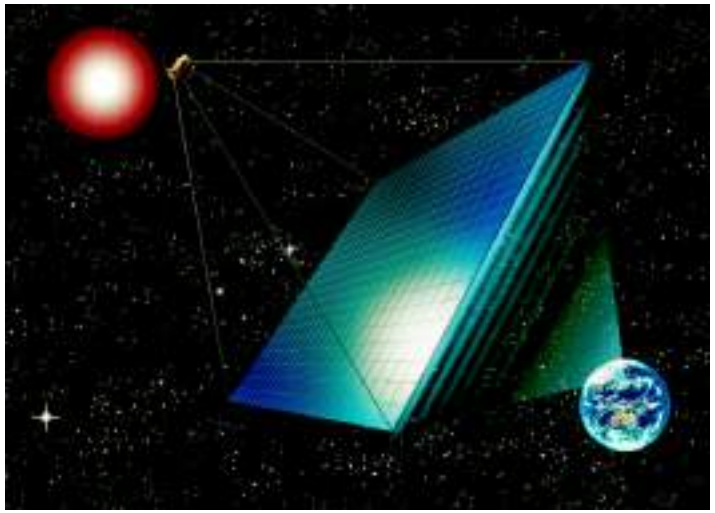


クリーンで大規模なエネルギーシステムの可能性

- 取得可能エネルギー：実質的に無制約
- 安定性：高い（天候、昼夜の影響なし）
- EPT(Energy Payback Time)：数年以下
- コスト：10～30円／kwH
- CO_2負荷：化石燃料火力発電の数十分の一以下

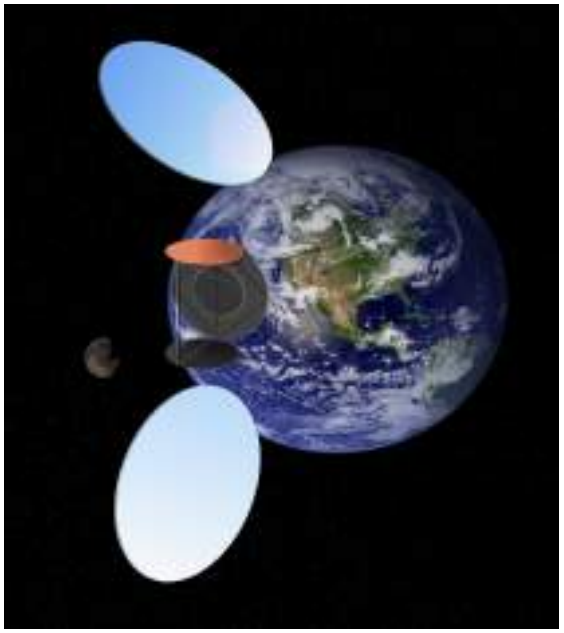
1970年代から机上検討・地上実験が行われて要素技術も成熟してきた。SPSの技術の中でも最も中枢的な無線送電の軌道上実証を行うことにより、SPSの技術的可能性を本格的に検証するという新しいフェーズに入るべき時期が来た。

日本のマイクロ波型SPSシステム代表的設計例(1GW級)



Basic Model

太陽非追尾マイクロ波型
発送電一体型パネル2kmx1.9kmx(2-10)cm^{t}
テザー(5-10km)による重力安定
100mx100mパネルのユニット構成
マルチバス方式
総重量2万トン
単純、低い電力効率(64%)



Advanced Model

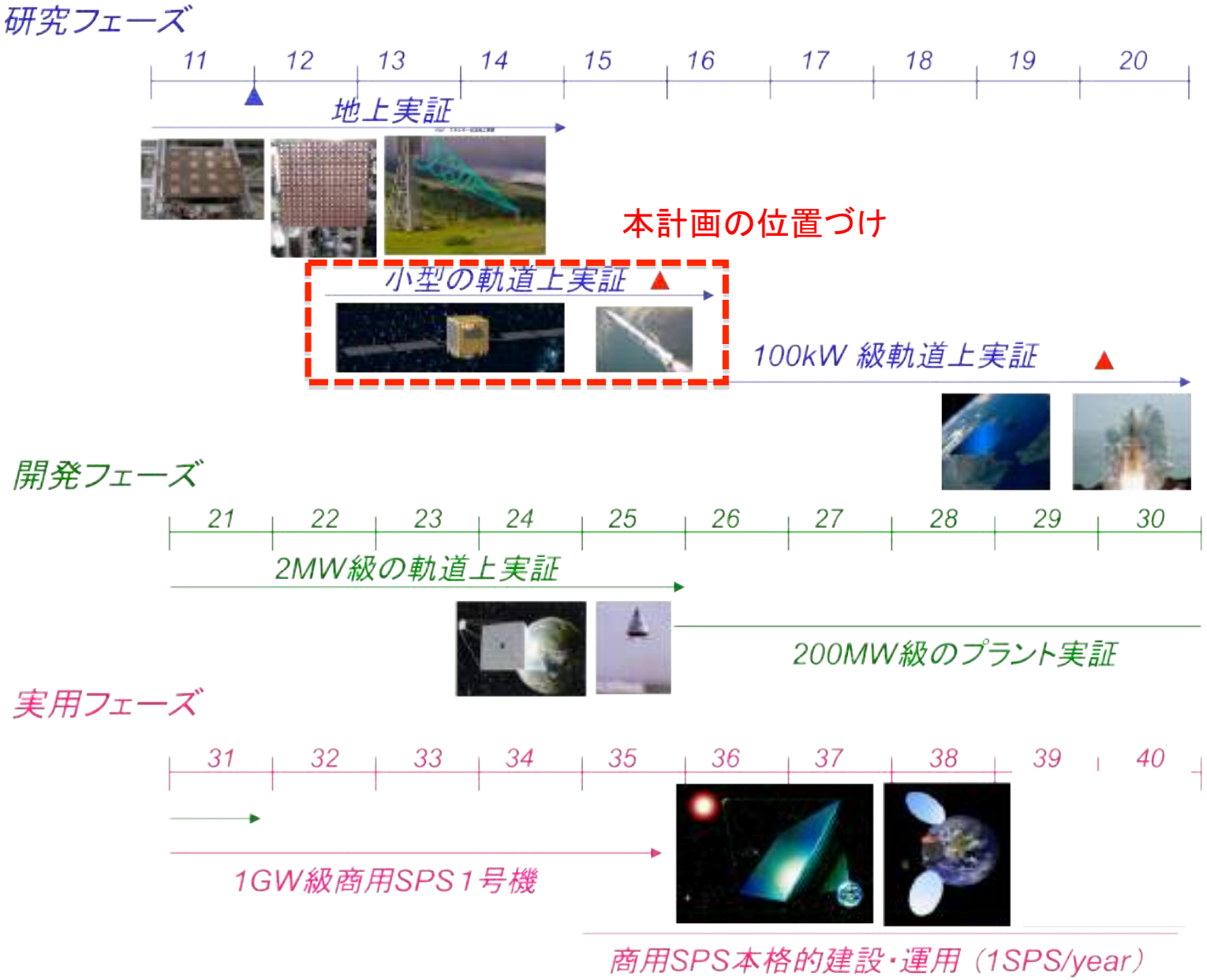
太陽追尾マイクロ波型
ミラー(反射鏡):2.5 km x 3.5 km
1000トンx2式、100~300g/m^2
ミラーはフリーフライヤー
発電部:直径1.25km
集光倍率:4倍
送電部:直径1.8km
総重量:10,000トン以下(目標)
複雑、高い電力取得効率

現時点におけるＳＰＳ研究の主要課題

区分	分野	項目	具体的な目標
中枢技術の地上実証	マイクロ波送電技術	マイクロ波ビーム制御技術	制御精度　0.5度以内
	大型構造物技術	厚みのあるパネル展開	100mサイズの展開の部分実証
		薄膜反射鏡の展開	100mサイズの展開の部分実証 反射鏡光学性能評価
	耐宇宙環境性	高電圧・高出力マイクロ波のプラズマ干渉	電圧15KV、 電力密度1500W/m^2
中枢技術の軌道上実証の準備	無線送電技術	マイクロ波送電技術実証	kWクラス、小型衛星での実験計画策定
システム検討	宇宙輸送	SPS構築に必要な宇宙輸送機の検討	宇宙輸送の専門家との協働によるロードマップの策定
	開発計画	SPS実現に至るロードマップの検討	各分野の専門家との協働による技術ロードマップの策定

本計画の部分

実用への研究・開発シナリオ(案)



SPS小型実証計画の前提

１．目的

マイクロ波無線送電技術がSPSに適用可能であることを実用条件に近いコンフィギュレーションで実証（マイクロ波ビームを軌道上から地上の規定点に正確に指向させる技術の実証、及び、高電力密度マイクロ波の電離層通過実証）。

２．規模

実験プラットホームは小型衛星（ミッション重量200kg）を前提。

３．時期

地上実証実験の次のステップの研究としてできるだけ早期に実施（次年度内にプリプロジェクトスタート、その後4年程度で実証完了）

４．適用技術

地上実験等で確立（実証）された技術を用いて軌道上実証実験を実施。

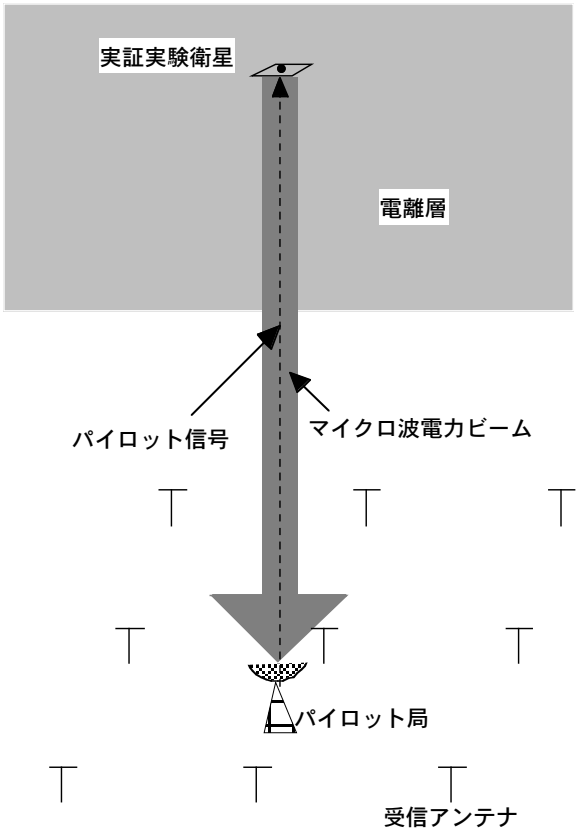
５．体制

JAXAが主導的な役割を果たすが、All Japanの体制で実施することを前提。

SPS軌道上実験の目的

主目的
（1）マイクロ波ビーム制御能力実証（軌道上のアンテナからのマイクロ波ビームが地上からのパイロット信号に追随する能力の実証）
（2）マイクロ波の電離層通過実証（電離層との非線形相互作用の解明）

副目的
（3）マイクロ波送受電の電力効率評価（実験と解析）
（4）不要波の抑圧レベル評価（既存の通信インフラに対する電磁適合性の実証）

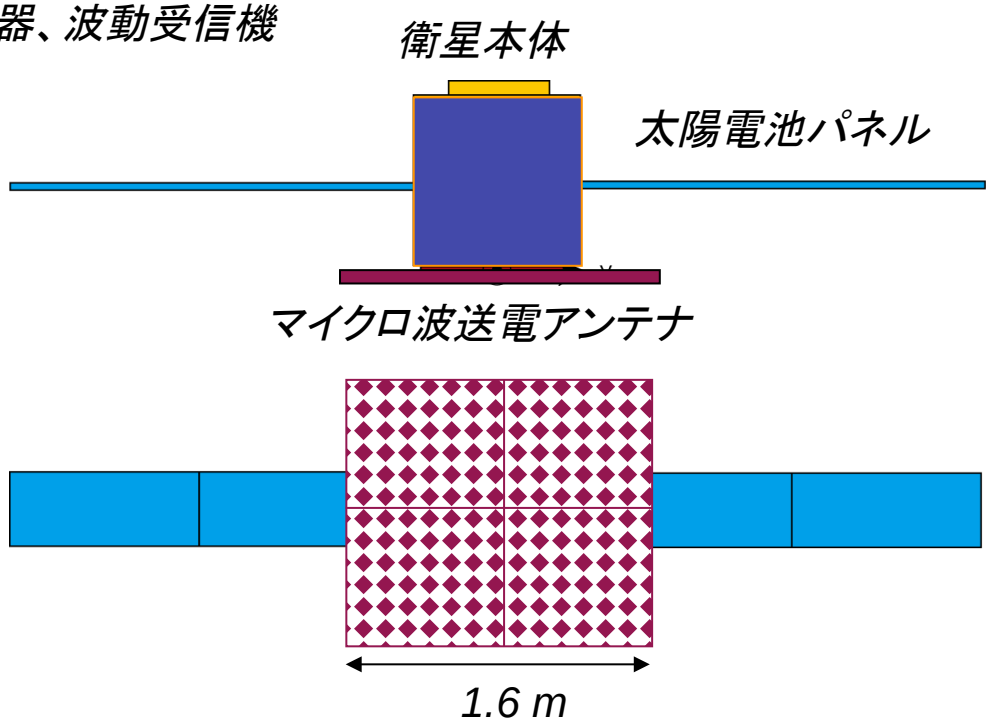


SPS小型実証実験の構想

ミッション期間	1年程度で実証目的を達成する
実験プラットホーム	小型衛星
軌道	370kmの準回帰軌道
想定ミッション重量	200kg
構成	送電パネル(0.8mx0.8mx(0.02 ～ 0.1)m)、1-4 枚 制御・電源部、観測機器
送電電力規模	1kW ～ 4kW(1枚パネル～ 4枚パネル)
姿勢制御	衛星本体の3軸制御。
姿勢制御精度	±1° 以内
軌道維持	スラスター(3N)による維持(共通バスとして準備)
送電周波数	5 GHz帯(周波数認可による)
マイクロ波回路	半導体構成(地上での実証済み技術の使用)
マイクロ波ビーム制御	搭載CPU制御及び地上からのパイロット信号によるレトロ方式
観測器	プラズマ計測器、電子エネルギー分析器、波動受信機
実験場所(送電場所)	日本でのS帯アップリンク局のある場所 国際的なキャンペーンとしての実施も考慮(候補国:米、欧、ロシア、中国、インド、赤道諸国等)。
地上電力密度	50μW/m^2(最大)(4枚パネル、4kW出力の場合)
ビームサイズ	直径 約30km

小型衛星を用いたマイクロ波送電実験の案

軌道：低高度周回軌道 (370 km)
衛星重量：400 kg
実験機器重量: 200 kg
姿勢制御：3-軸制御
送電電力：3.8 kW
観測器：プラズマ計測器、電子エネルギー分析器、波動受信機



小型衛星搭載用マイクロ波送電装置の開発状況(1/2)

1. 大規模フェーズドアレイアンテナの開発と特性評価

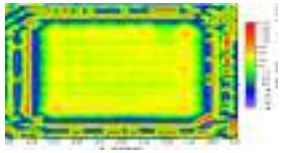
・送電アンテナの大面積化
　→ 受信アンテナへの
　　マイクロ波集中度の向上
・フェーズドアレー方式の採用
　→ 受信アンテナへの
　　電気的ビーム方向制御
・マイクロストリップアンテナ
　→ モデルの薄型、軽量化

アンテナ配列数:256
サブアレー数:64
全体寸法:　高さ0.63m
　×幅0.63m×厚さ0.8mm
周波数:5.7GHz

256配列送信アンテナ

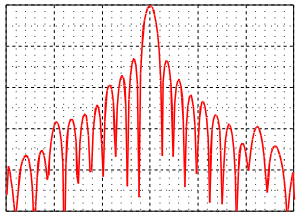
近傍界走査測定装置(京都大学)
による放射パターン測定実験

測定結果一例:



近傍界強度分布

換算



遠方界放射パターン

電力伝送試験用のマイクロ波(C帯)送電装置としては世界最大級のアレイアンテナを試作し、大型のSPS送電アンテナでは不可避である複数アレイアンテナの相対位置変化(相対角度、間隔、前後のずれ)がビームパターンに及ぼす影響を定量的に評価した。

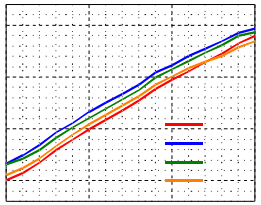
2. 多素子電力増幅・位相制御ユニットの開発

・小型マイクロ波部品の採用、及び
　同一平面回路に実装
　→ システムの薄型化

・4出力を有する単位ユニット回路を
　16枚配列。

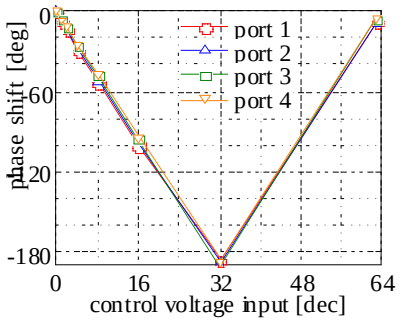
・試作ユニット最大出力:10.5W
　→ モデル総出力160W(予定)
　　電力密度:約400W/m^2

単位ユニット回路外観
(最終形態はこの16倍)



単位ユニット
(最終形態はこの16倍)

増幅利得:32.9dB
最大出力:10.5W



電圧調整による
マイクロ波位相制御量

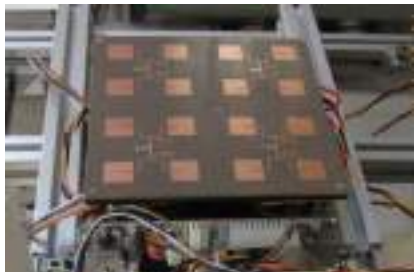
マイクロ波回路について、現段階の技術でほぼ極限までの小型化を図った上で、所望の利得と位相制御性能を実現した。熱真空試験に供することにより軌道上実証実験での定量的な熱的評価が可能となった(試験は次年度予定)。

小型衛星搭載用マイクロ波送電装置の開発状況(1/2)

3. 積層構造による送電システムの薄型パネル化

・開発した増幅・制御回路の上方に
送電アンテナを組み合わせ
→ モデルの積層薄型化
(厚さ50mm以下(放熱部を除く))

・アンテナ背面に電波吸収材を貼付
→ 回路への干渉を低減



第1層:送電アンテナアレー
第2層:増幅・位相制御回路
第3層:放熱機構

送電アンテナとマイクロ波回路についてインターフェイス性能を確保しつつ積層し、現段階の技術でほぼ極限までの薄型化を図った。内部干渉が許容範囲であることを実測により確認した。

4. マイクロ波ビーム制御実験、及びビーム自動追尾実験

・増幅・制御回路の分枝間の相対位相を調整し、
特定の方向へビームを走査

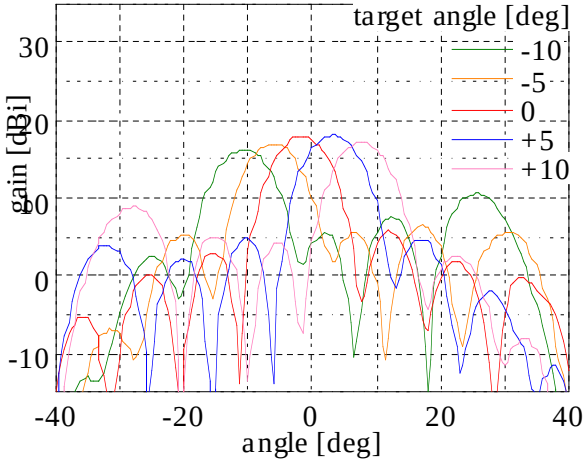
ビーム幅に対する指向誤差が許容値以下であること
を確認

・レトロディレクティブ制御実験

① 受電側から無線でパイロット信号を送信
② 送電モデル側がパイロット信号の到来方向を検知
③ 到来方向に送電ビームを指向
④ 受電アンテナの動きに応じて、指向を自動制御
→ 受電量の安定化

追尾誤差、受電量安定度とも設計どおりであ
ることを実験的に確認

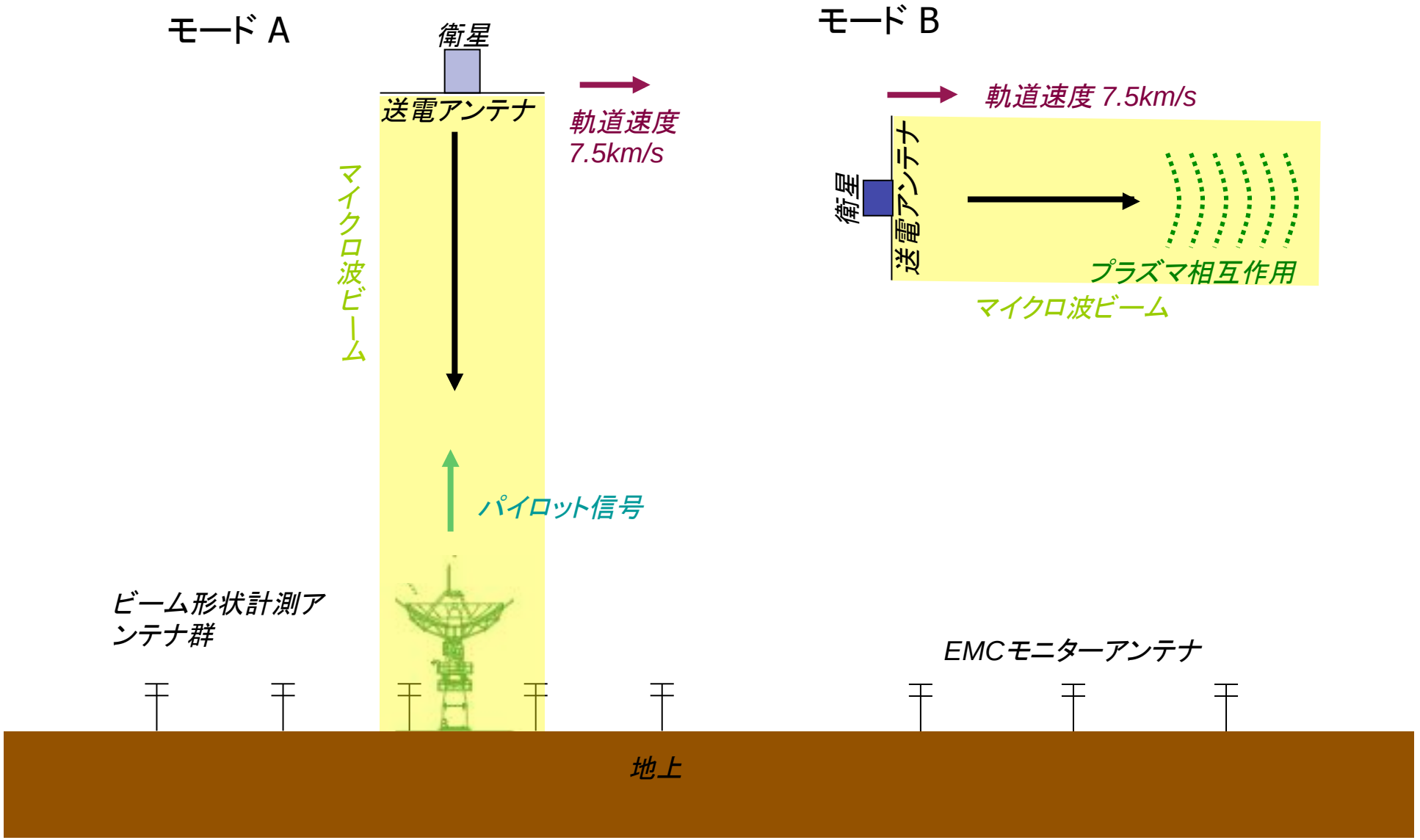
・太陽発電衛星の複数パネル配列構造を想定した、
パネル間同期送電実験の実施



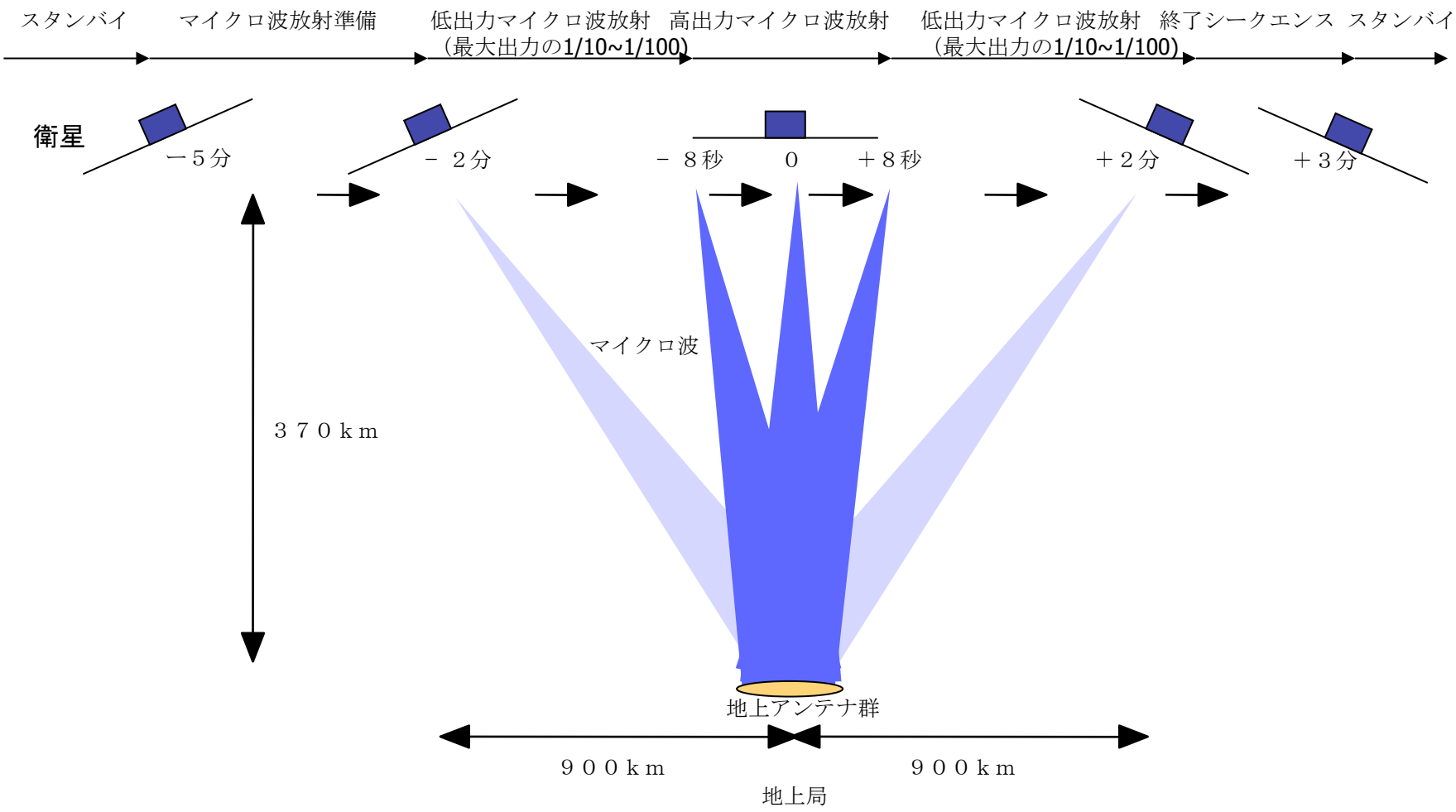
ビーム方向制御による
マイクロ波放射パターンの変化

アレイアンテナについてビーム方向制御のためのレトロディレクティブ制御が可能であることを確認し、2枚のアレイアンテナパネルでの相対位相制御によるマイクロ波ビームの形成を確認し、軌道上実証実験に適用可能な制御方式・回路構成をほぼ確定した。

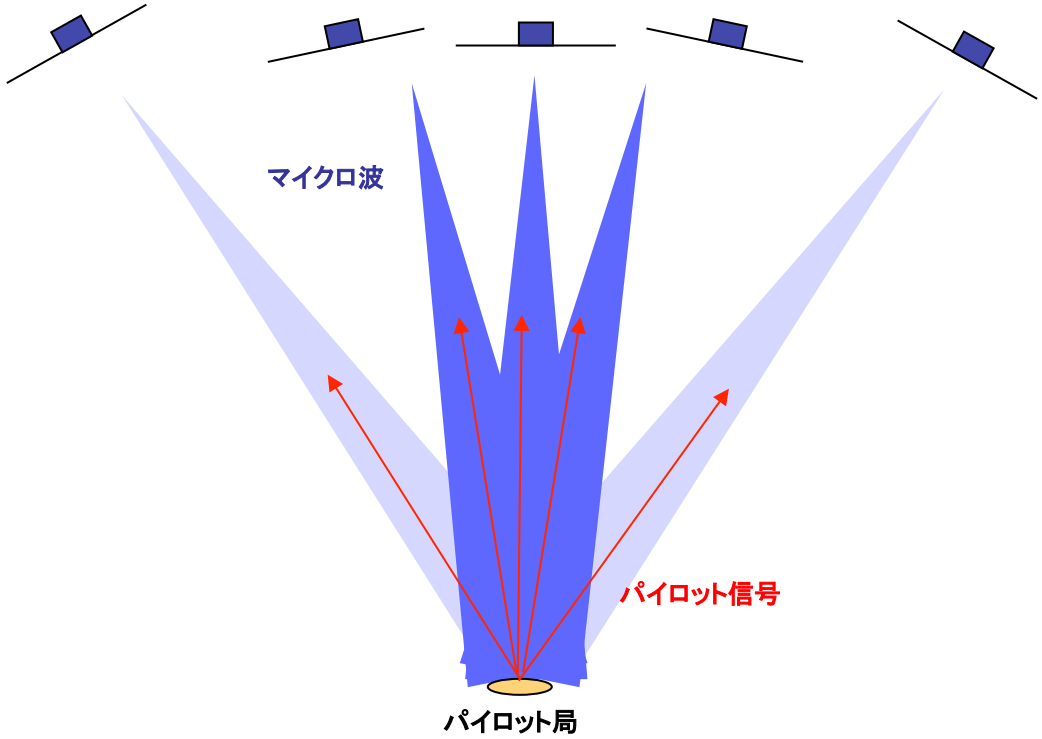
小型衛星実験コンフィギュレーション



実験運用シークエンス（地上局への放射実験）

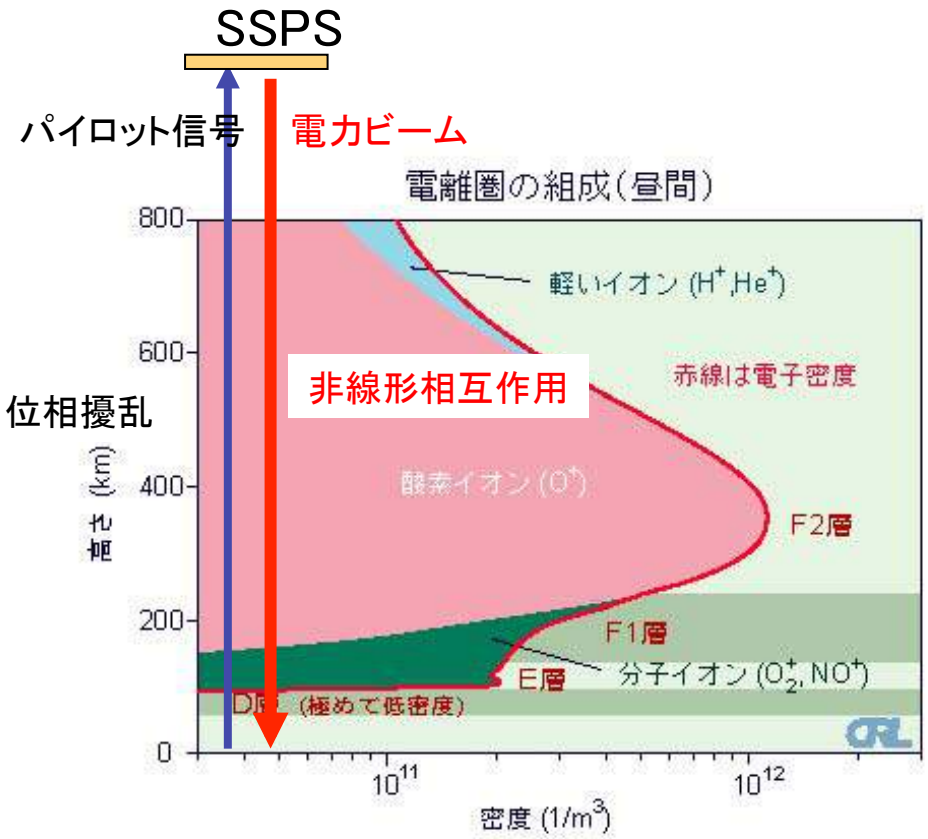


期待される成果（1）
マイクロ波ビームの軌道上から地上局への制御実証



アレイアンテナ理論に沿ったビームが形成されることを実証（回折限界まで絞られたガウス型ビームの形成、ヌル点幅3度）。
レトロディレクティブ理論に沿ってビームが制御されることを実証（制御精度0.5度（TBD））。
これらが実証されれば、静止衛星軌道から地上レクテナへのマイクロ波電力伝送のビーム形状、制御精度の定量的な評価が可能となる。

期待される成果（2）
マイクロ波の電離層通過実証

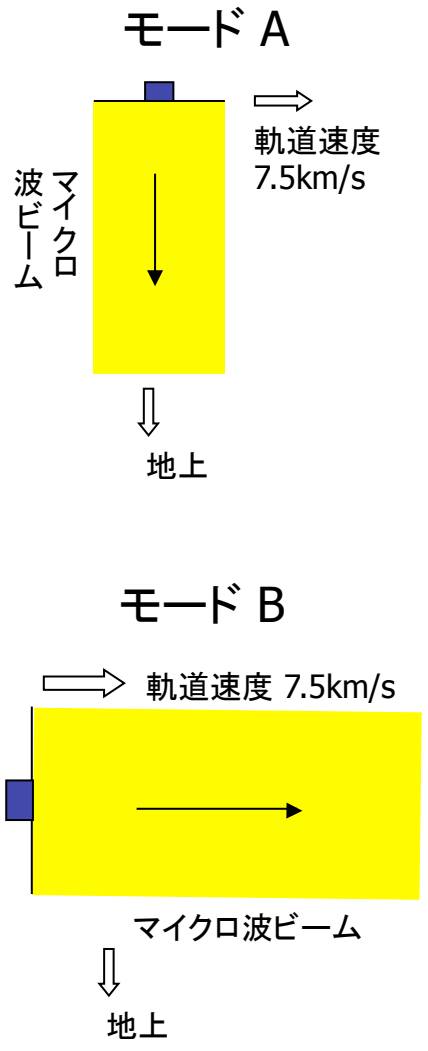


実用レベルの強度のマイクロ波（100ー1000W/m^2）を電離層で放射した場合、どのような相互作用がどの程度の強さで発生するか（マイクロ波が受ける影響、電離層に与える影響）を評価する。電離層通過時に実用上問題になるような電力損失が無いこと（損失1%以下）、電離層に強い影響がないこと（密度変動数十%以下（暫定値））を実証する。

電離層通過実証で計測すべき物理量

現象	メカニズム	影響の評価	時間スケール	観測方法
熱的自己収縮現象（不安定性）	電子加熱による屈折率変化（自己収縮）	プラズマ密度の大きい電離層で発生。数百W/m^2−数十kW/m^2まで議論あり。	電子イオン衝突周波数（kHz）	受電局側、進行方向側にビーム放射、電子密度・温度計測
マイクロ波密度勾配自己収縮現象（不安定性）	電力密度勾配による屈折率変化（自己収縮）	プラズマ密度が小さくてもプラズマが存在すれば発生。閾値は高いとの議論あり。	電子プラズマ周波数（MHz）	受電局側にビーム放射、電子密度・温度計測 地上でビーム強度、密度分布計測
3波共鳴現象（不安定性）	イオン音波が励起される場合 電子音波が励起される場合	影響は小さいと予想	イオンプラズマ周波数（kHz） 電子プラズマ周波数（MHz）	受電局側及び地上局側ビーム放射、プラズマ波計測 地上でビーム強度、密度分布計測
電離層による熱的吸収（線形）	電子加熱	電力損失は2×10^{-5}程度（2.45GHz）なので問題にならない。電子密度は増減、温度は上昇の予測	電子イオン衝突周波数（kHz）	受電局側及び進行方向側にビーム放射、電子密度・温度計測

本計画の小型実証実験で観測が期待される現象

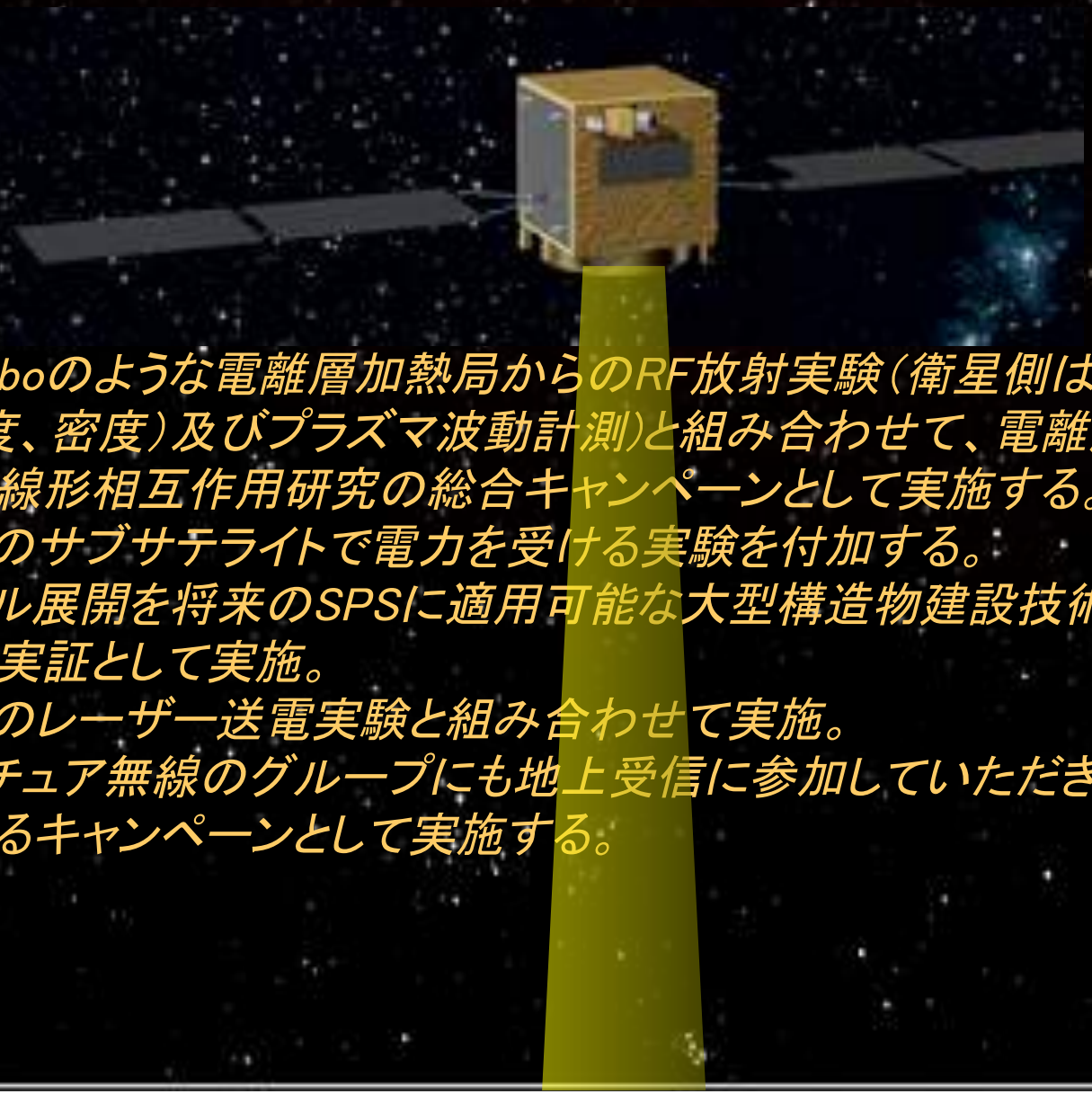


			モードA	モードB
マイクロ波照射方向			地上方向	軌道速度方向
同一プラズマセグメントへの照射時間			0.2ms	10ms
研究課題			観測・実験の可能性	
電離層通過実証	電離層電子加熱	F層電子加熱	△	○
		F層プラズマ密度減少	×	○
		下部電離層電子加熱・プラズマ密度増加	×	×
	熱的自己収縮現象（不安定性）	電子加熱	△	○
		プラズマ密度減少	×	○
	マイクロ波密度勾配自己収縮現象（不安定性）	加熱・電子密減少	○	○
		プラズマ密度減少	×	○
	3波共鳴現象（不安定性）	後方散乱波、プラズマ波、電子温度上昇	○	○
マイクロ波ビーム制御実証	地上局へのビーム制御実験		○	×

本計画の参加組織(検討中)

	組織	役割分担
システム	宇宙研　宇宙機応用工学研究系	システム検討
	研開本部　高度ミッション研究グループ	システム検討
工学系	宇宙研　宇宙飛翔工学研究系	構造
	京大　生存圏研究所	マイクロ波送電
	通信総研	マイクロ波送電
	東大　航空宇宙工学	マイクロ波送電
	東工大　工学部	展開構造
	静岡大　工学部	展開構造
	九州工大	アンテナRF放電
理学系	宇宙研　太陽系科学研究系	プラズマ計測器
	京大　生存圏研究所	電離層・プラズマ相互作用 計算機シミュレーション
他	麻布大	国際協力

SPSを目指した実験としてさらに意義ある実験として実施するための付加案



1. Areciboのような電離層加熱局からのRF放射実験（衛星側はプラズマ（温度、密度）及びプラズマ波動計測)と組み合わせて、電離層と電波の非線形相互作用研究の総合キャンペーンとして実施する。
2. 近傍のサブサテライトで電力を受ける実験を付加する。
3. パネル展開を将来のSPSに適用可能な大型構造物建設技術の要素技術実証として実施。
4. 小型のレーザー送電実験と組み合わせて実施。
5. アマチュア無線のグループにも地上受信に参加していただき、社会性のあるキャンペーンとして実施する。