



第40回宇宙エネルギーシンポジウム

40th ISAS SPACE ENERGY SYMPOSIUM



低損失性と安全性を考慮した洋上を水平伝播するマイクロ波ビーム技術

Microwave beam technology propagating horizontally over the ocean in consideration of low loss and safety

(2GW)

石川容平
京都大学 生存圏研究所

令和3年3月30日(火曜日) 場所: on line(zoom)



もくじ



低損失性と安全性を考慮した洋上を水平伝播するマイクロ波ビーム技術

1. 背景
2. 地上応用と宇宙と宇宙応用の違いと共通性
3. 洋上の長距離マイクロ波電力伝送の必要性と課題
4. 両側「レトロ方式」はなぜ自ら最適ビームを作り出すのか。
5. 両側「レトロ方式」ビームはなぜ吸収体を回避するのか。
6. まとめ

p2



背景



1. SSPSの地上局は必ず電力会社の系統への接続が必要である
2. 電力市場は時間変動、季節変動、突発事故があり、調整電源が必須
3. 原子力はわが国で、石炭火力、LNGなど火力は世界中で評判が悪い
4. 水素社会と騒がれるが一次エネルギーではなくキャリアである。
5. 菅政権は再エネの主力電源を洋上風力と位置付けるが輸入品である
6. 沿岸部の洋上風力は観光産業、漁業、浚渫、海上交通等と摩擦を生じる
7. 遠洋の大深度洋上風力からMW級マイクロ波伝送が環境アセスも容易である
8. SSPSのマイクロ波電力伝送システムの要素技術が再エネで磨きがかかる

p3



もくじ



低損失性と安全性を考慮した洋上を水平伝播するマイクロ波ビーム技術

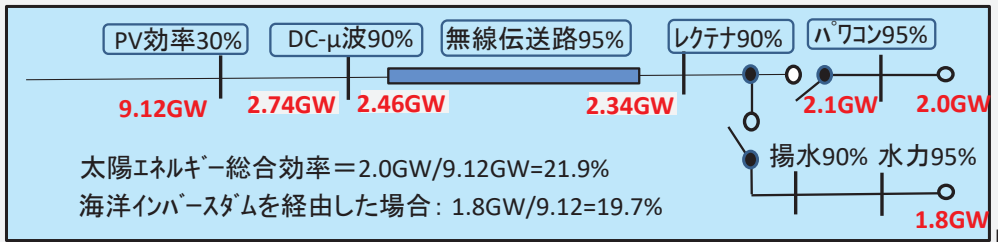
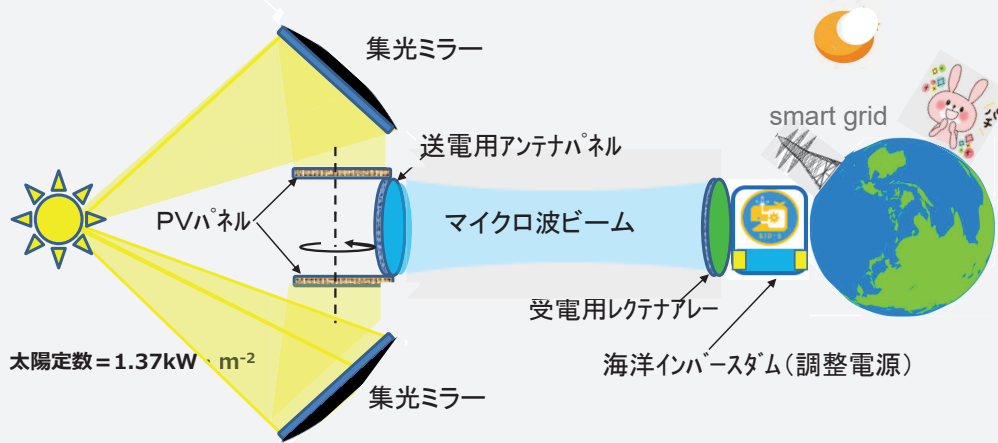
1. 背景
2. 地上応用と宇宙と宇宙応用の違いと共通性
3. 洋上の長距離マイクロ波電力伝送の必要性と課題
4. 両側「レトロ方式」はなぜ自ら最適ビームを作り出すのか。
5. 両側「レトロ方式」ビームはなぜ吸収体を回避するのか。
6. まとめ



クリーンエネルギー輸送システムの[宇宙vs地上]比較



	宇宙システム	宇宙-地上システム	地上システム
代表的システム	太陽光・水素燃料電池	SSPS (宇宙太陽発電システム)	風力・太陽光システム
1次エネルギー	宇宙太陽光	宇宙太陽光	地上宇宙太陽光(風)
エネルギー変換	solar battery (III-V族化合物半導体)	solar battery (III-V族化合物半導体)	solar battery (シリコン系)
備蓄システム	水素(燃料電池) Li電池	なし(基本) 海洋インバースダム	Li電池 水素系Gas 海洋インバースダム 山岳揚水発電所
エネルギー輸送	レーザー光・ミリ波空間伝送	レーザー光空間伝送 マイクロ波空間伝送 (全天候性)(高緯度国)	架線・地下ケーブル マイクロ波空間伝送 水素系ガス・液体
技術的課題	Corona 放電 Joule損失 PAmpの冷却・放射	衛星軽量化技術 輸送系方策とコスト 発射場の確保と物流	マルチパス問題 空間電力密度の向上 係留作業・メンテ作業
社会実装課題	なし(基本) 国家安全保障問題	成層圏完全燃焼 軌道割付(ITU) 周波数割付(ITU) 需給調整機能(変動再エネ)	通信システムへの干渉 誤侵入時の生体安全性 景観・海上交通・漁業・浚渫 需給調整機能(変動再エネ)



低損失性と安全性を考慮した洋上を水平伝播するマイクロ波ビーム技術

1. 背景
2. 地上応用と宇宙と宇宙応用の違いと共通性
3. 洋上の長距離マイクロ波電力伝送の必要性と課題
4. 両側「レトロ方式」はなぜ自ら最適ビームを作り出すのか。
5. 両側「レトロ方式」ビームはなぜ吸収体を回避するのか。
6. まとめ



洋上の長距離マイクロ波電力伝送の必要性と課題



● 2050年脱炭素社会に向けた大規模洋上再エネプラントの導入メリット

- (1) 我が国の主たる再生可能エネルギーは遠洋の大深度海域に存在する (EEZ 内)
景観、漁業、海上交通、浚渫 & 津波、地震、高潮などの問題発生が少ない
- (2) 遠洋の洋上風力は移動式で設備利用率が高く「海洋インバースダム」で品質改善が可能
- (3) 数百km遠洋のエネルギーは洋上の革新的無線電力伝送技術を用いて陸地へ運搬
- (4) 侵入障害物を自動回避・停止する高効率無線電力ビーム技術による生体安全の確保
- (5) 環境アセスや国際調整にかかる時間短縮ができる。

● 研究を進める革新的新技術課題への挑戦と戦略

- (1) 完全浮体式で抗力係数(Cd)を低減化した海洋構造物の省エネ型定点停止技術の確立
- (2) 空気と海水の密度差を最大限利用した風圧で流されない省エネ型定点停止技術の確立
- (3) 閉鎖型淡水上下移動を利用した環境調和型長寿命「海洋インバースダム」の技術の確立
- (4) パッシブ制御自己収束型ビーム技術を用いた超低漏洩で高速追尾システム技術の確立
- (5) ビームからの漏洩電力が常時最小値に制御され、既存通信システムとの干渉回避が容易



洋上風力のエネルギーを極低漏洩マイクロ波で日本列島へ

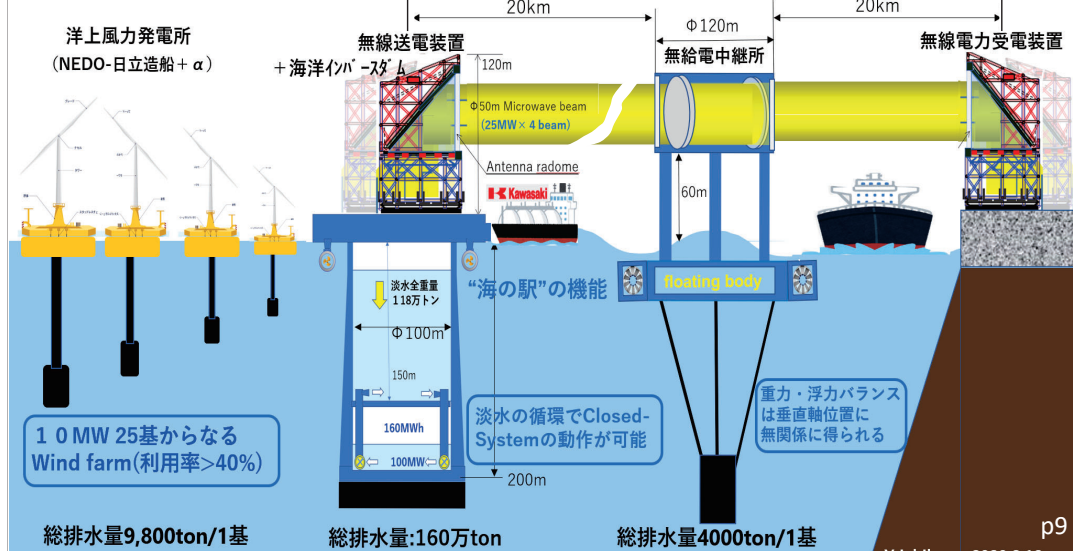


洋上の中継器により再エネの採取・配送の自由度を向上



完全浮体式洋上風力と完全浮体式海洋インバースダムの組み合わせ利用 (10万kW再エネ洋上発電所)

Confidential





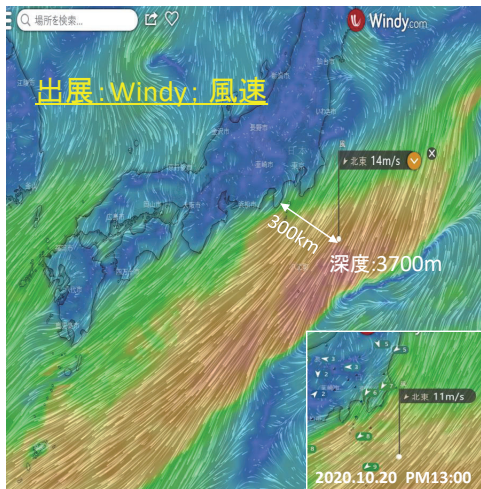
黒潮を超えた太平洋に豊富に存在する広大な再エネ海域



100tonの風圧(10Mw)を受け0.5ktの海流中で静止する
必要な最小電力は $P=F \cdot v=100000 \times 9.8 \times 0.25\text{m/s}=2.5\text{Mw}$
従って、できるだけ流速の少ない海域利用が望ましい。

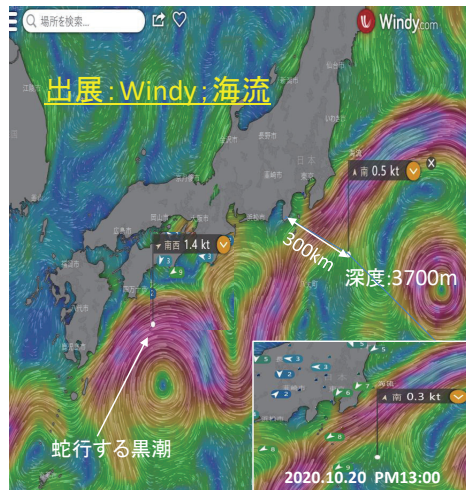
EEZ内で風況が良く、波が静かで、遅い海流
が存在する領域は漁業・交通との摩擦が少ない
理想的wind farm が構築可能である

風速 2020.10.19 PM19:00



日本ではおおよそ北緯 30° よりも北であれば偏西風が吹き
それよりも南であれば貿易風が吹きます。

海流 2020.10.19 PM19:00

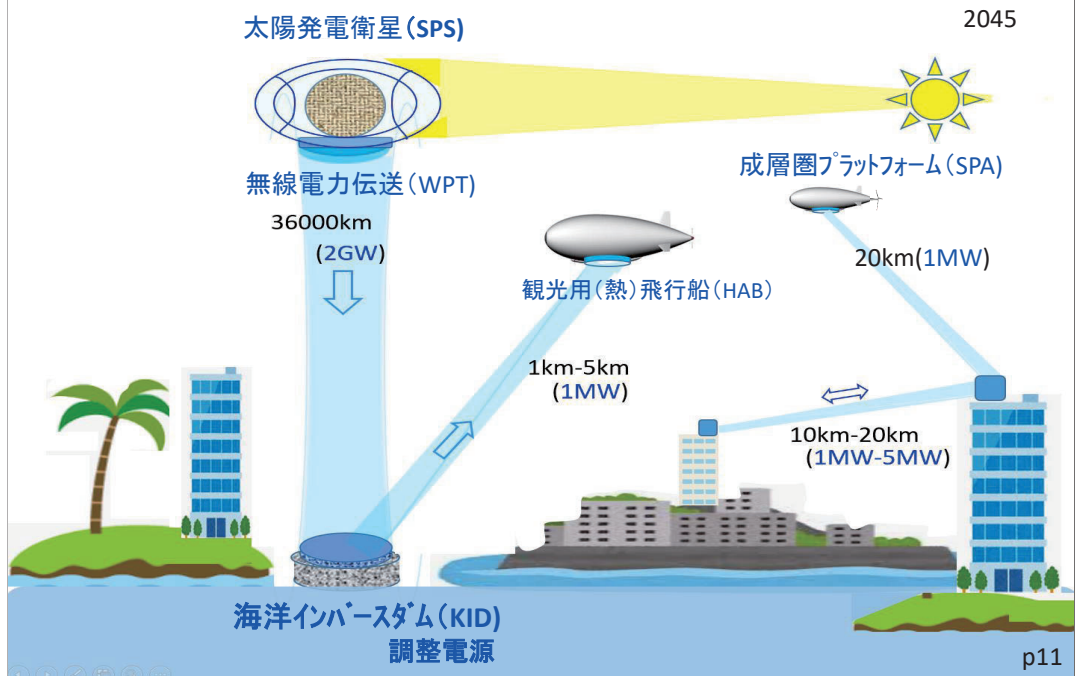


0.3kt=0.15m/sec 1.42kt=2.59km/h=0.72m/sec
p10



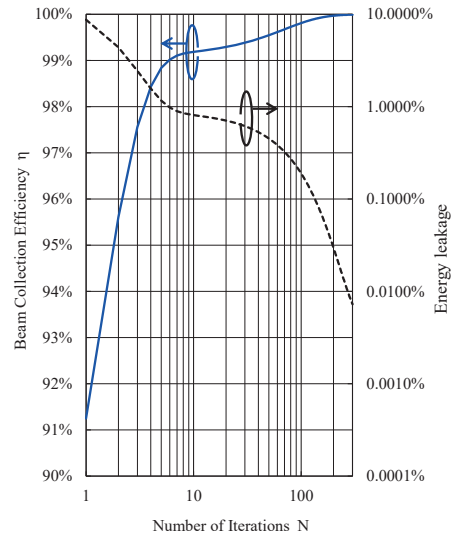
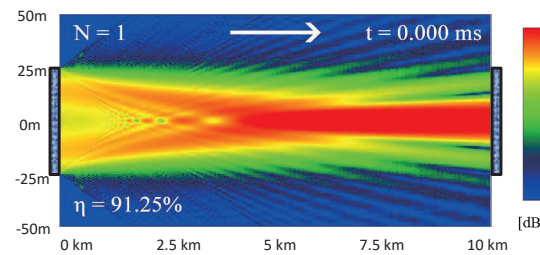
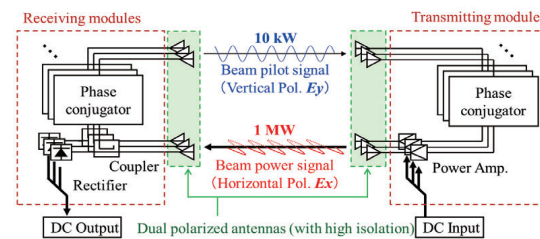
SPS-WPT-KID によるスマートシティー

電力と通信を同時に運ぶ



低損失性と安全性を考慮した洋上を水平伝播するマイクロ波ビーム技術

1. 背景
2. 地上応用と宇宙と宇宙応用の違いと共通性
3. 洋上の長距離マイクロ波電力伝送の必要性と課題
4. 両側「レトロ方式」はなぜ自ら最適ビームを作り出すのか。
5. 両側「レトロ方式」ビームはなぜ吸収体を回避するのか。
6. まとめ

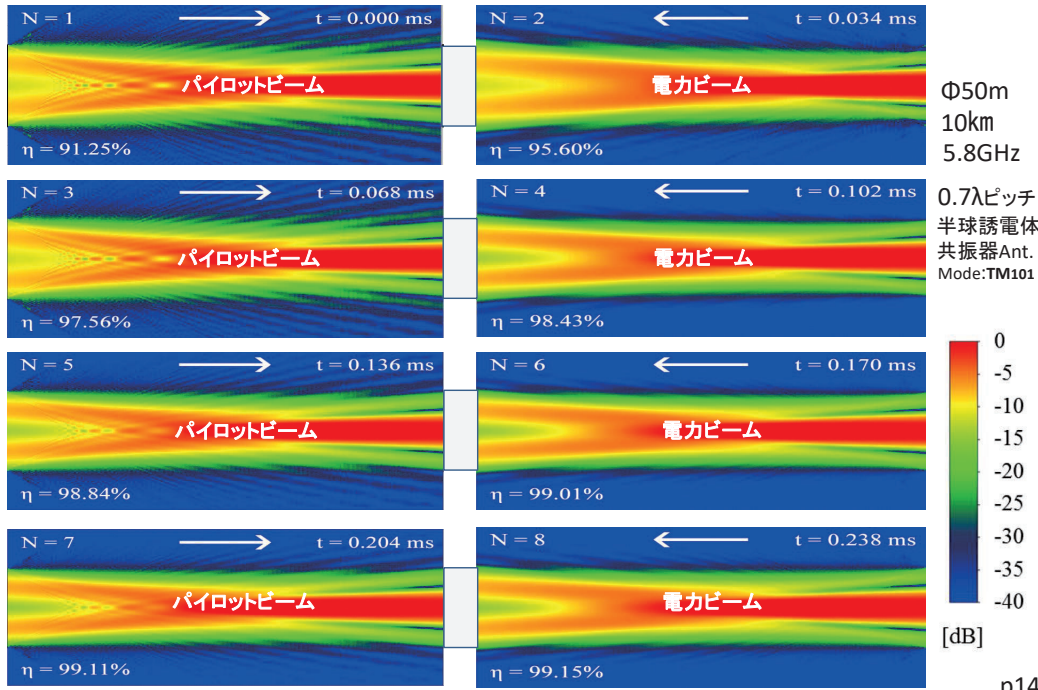


T. Matsumuro, Y. Ishikawa, N. Shinohara, *Asia Pacific Microwave Conference 2018*, Nov. 2018.

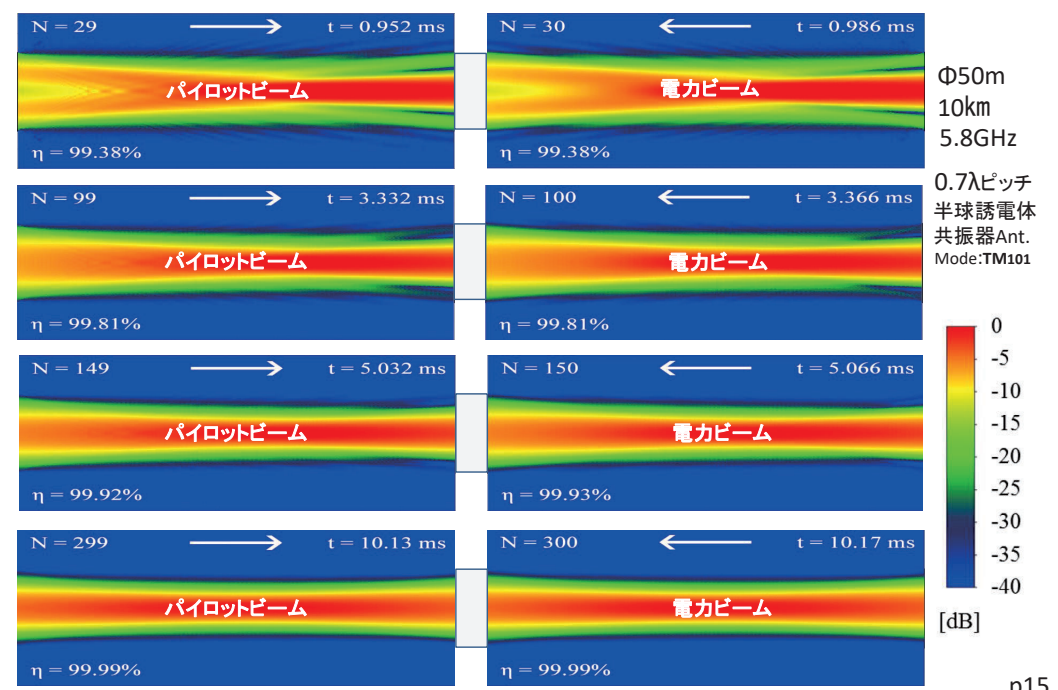
伝搬の繰り返しにより漏洩が最小となる状態に「自己収束」する



Power・Pilot両サイドレトロビームの自己収束(1)



Power・Pilot両サイドレトロビームの自己収束(2)



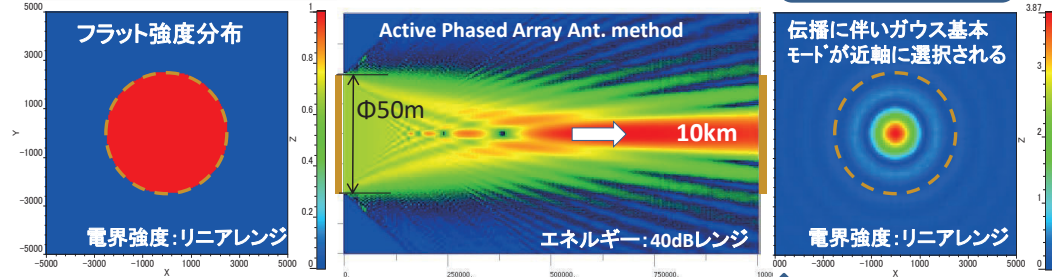


フェーストアレイアンテナ方式と最小ビーム導波路方式の比較 (理論限界)



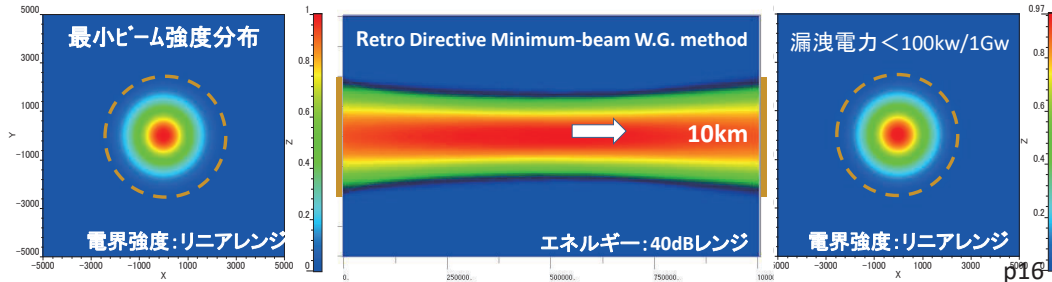
フェーストアレイアンテナ方式 : 伝搬効率(補足率) 91.25%

周波数 : 5.8GHz
アンテナ径 : 50m
伝搬距離 : 10km



最小ビーム導波路方式 : 伝搬効率(補足率) 99.996%

実用化については通信業界との両立性が困難



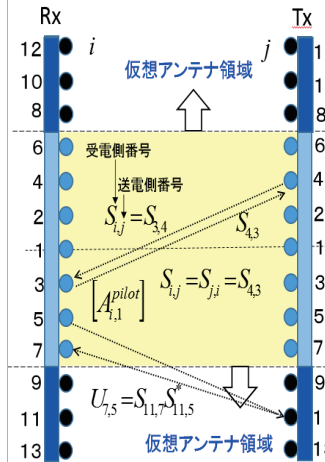
無限大のアンテナと仮想アンテナの組み合わせ解析



N+1番目のパイロット信号

$$A_{m,N+1}^{pilot} = G_m^{Rx} \sum_i A_{i,N}^{pilot} \sum_j G_j^{Tx} (S_{m,j}^* S_{j,i})$$

無限大アンテナモデルで有限アンテナを表現する



有限のアンテナからの放射波を無限大アンテナからの時間反転界の放射と仮想アンテナ領域からの逆相逆位相共役波を組み合わせて現実的アンテナを表現

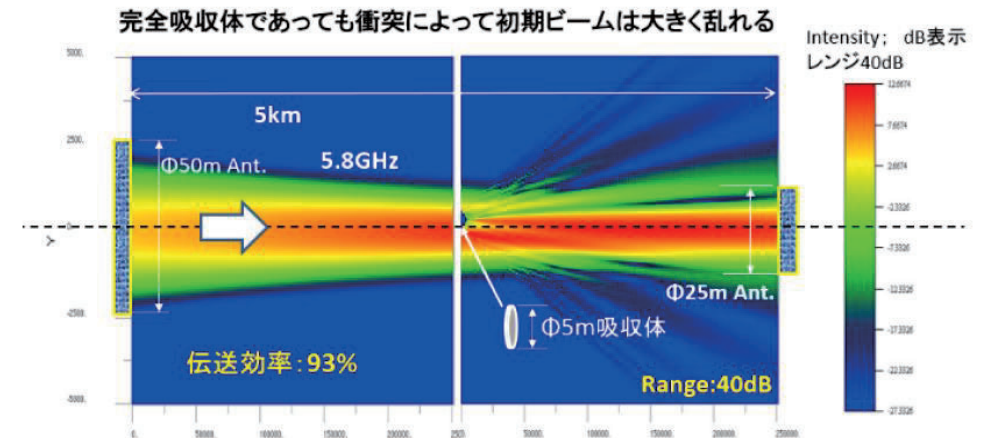
無限大Tx-Antからの戻り 仮想Tx-Antからの逆相戻り

$$\begin{aligned} A_{m,2}^{pilot} &= G_m^{Rx} G_{const}^{Tx} \left[\sum_i A_{i,1}^{pilot} \left[\sum_{j=1}^{\infty} (S_{m,j} S_{ji}^*) - \sum_{j=M+1}^{\infty} (S_{m,j} S_{ji}^*) \right] \right] \\ &= G_m^{Rx} G_{const}^{Tx} \left[\sum_i A_{i,1}^{pilot} \left[\delta_{m,i} - \sum_{j=M+1}^{\infty} (S_{m,j} S_{ji}^*) \right] \right] \\ &= G_m^{Rx} G_{const}^{Tx} \left[A_{m,1}^{pilot} - \sum_i A_{i,1}^{pilot} \sum_{j=M+1}^{\infty} (S_{m,j} S_{ji}^*) \right] \end{aligned}$$

仮想領域からの戻り波成分を消すように自己修復

低損失性と安全性を考慮した洋上を水平伝播するマイクロ波ビーム技術

1. 背景
2. 地上応用と宇宙と宇宙応用の違いと共通性
3. 洋上の長距離マイクロ波電力伝送の必要性と課題
4. 両側「レトロ方式」はなぜ自ら最適ビームを作り出すのか。
5. 両側「レトロ方式」ビームはなぜ吸収体を回避するのか。
6. まとめ



1. 送電ビームの電磁界エネルギーは前方散乱、吸収、透過波に分かれる
2. 透過波の伝送効率は93%である。(吸収体との断面積比より損失大)
3. 前方散乱波が発生する理由是对消滅波が吸収されるからである。

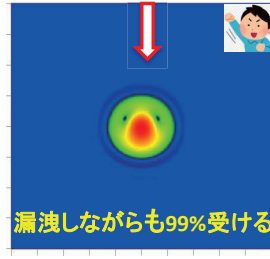
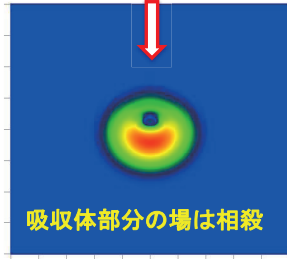
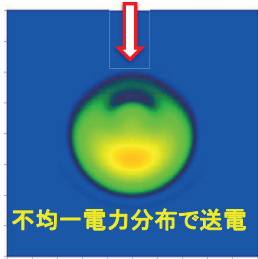
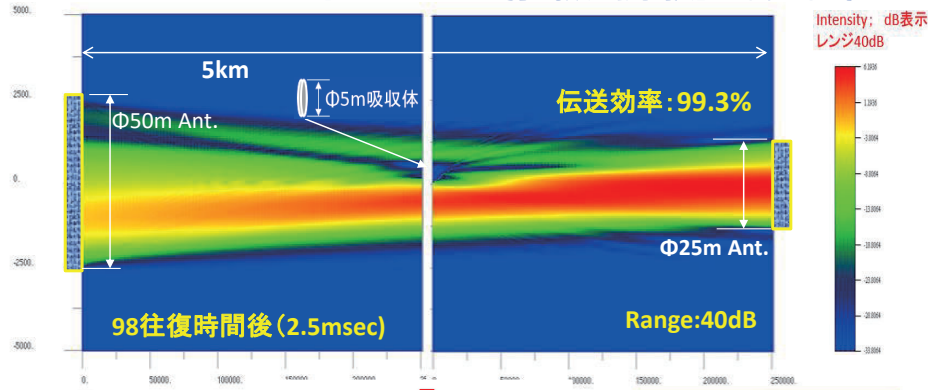


吸収体を避けるように電磁波が伝搬の様子1

数10回の往復時間内で電磁波が消滅する



「両サイドRev技術」が損失最小状態を学習的に作り出す

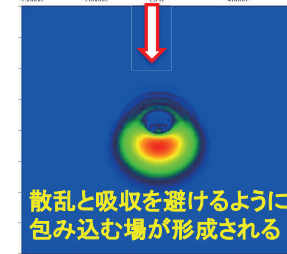
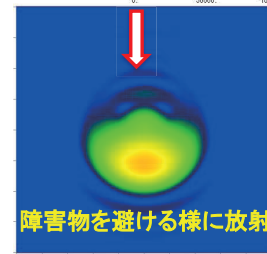
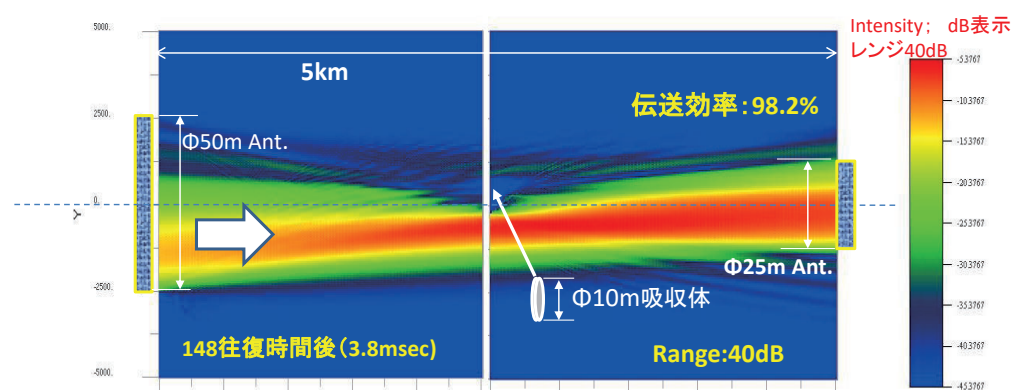


両サイドレトロビームは自己学習的に最適状態を作り出す

百数十回の往復時間内で吸収体近傍電磁界が消滅

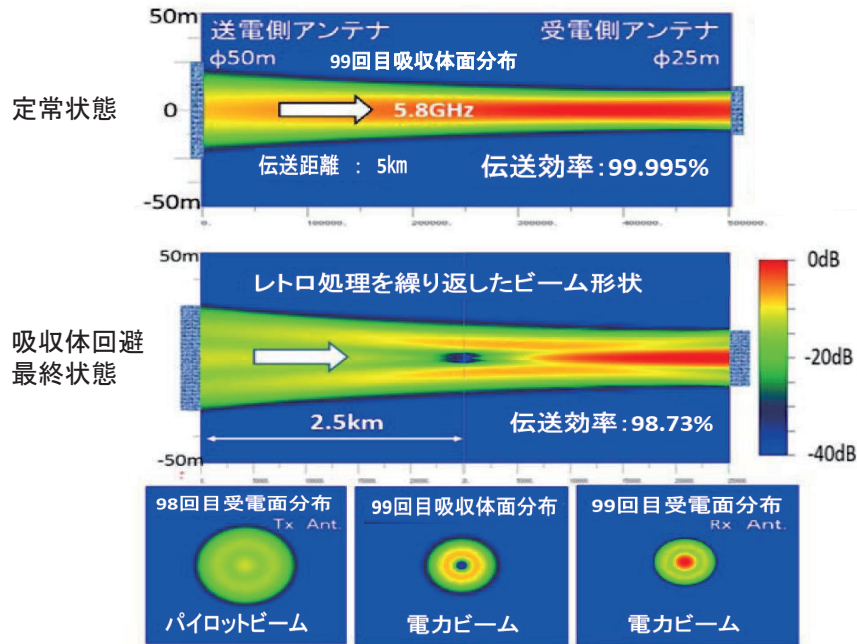


吸収体の面積を4倍にした場合にもビーム内に0電磁界空間出現





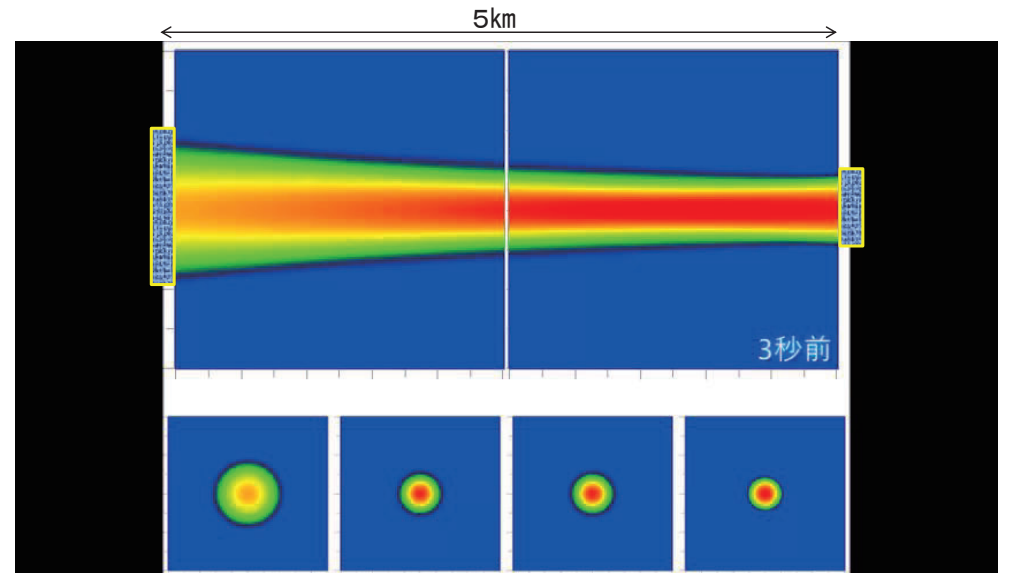
両サイトレトビームは自己学習的に最適状態を作り出す
百数十回の往復時間内で吸収体近傍電磁界が消滅



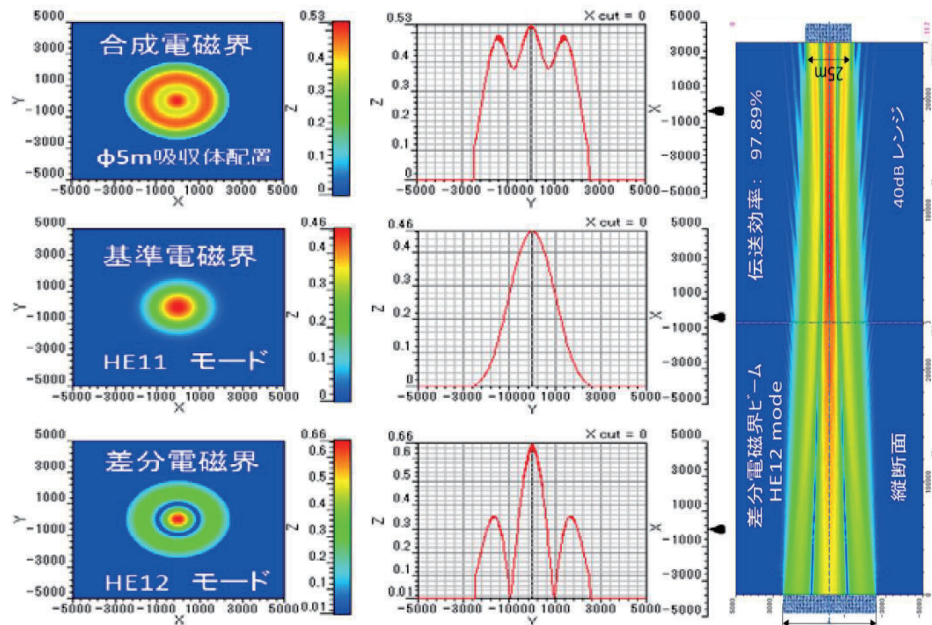
p22



吸収体を徐々に避けるように電磁波が伝搬する
数10回の往復時間内で電磁波が消滅する



p23



石川、松室、篠原、無線電力伝送路における電波吸収体を回避する自動的ビームフォーミング、宇宙太陽発電 Vol.5 (2020), pp. 29-34

低損失性と安全性を考慮した洋上を水平伝播するマイクロ波ビーム技術

1. 背景
2. 地上応用と宇宙と宇宙応用の違いと共通性
3. 洋上の長距離マイクロ波電力伝送の必要性と課題
4. 両側「レトロ方式」はなぜ自ら最適ビームを作り出すのか。
5. 両側「レトロ方式」ビームはなぜ吸収体を回避するのか。
6. まとめ

1. SSPSのコア技術であるWPTは地上・洋上再エネ利用に有効である。
2. 地上応用はマルチパス環境であるためパイロット信号もビーム状が望ましい。
3. 再エネは他産業との摩擦を引き起こす。遠洋大深度洋上風力が望ましい
4. 洋上再エネ発電所は海上輸送・備蓄機能(海の駅)を備えることが可能である
5. 両側「レトロ方式」ビームは受電方向へ再輻射を繰り返すため高効率ビームとなる
6. 高効率ビームとなるためには外部への漏洩同様、吸収体を避ける現象が生じる



長距離、大電力、備蓄、等、SSPSと共通点が多い
主力再エネの洋上風力で要素技術は洗練される