

地上再生可能エネルギーから宇宙太陽エネルギーへの拡大

石川 容平^{1*}, 松室 堯之², 篠原 真毅³

The Expansion from Terrestrial Renewable Energy to Space Solar Energy

Yohei Ishikawa^{1*}, Takayuki Matsumuro², and Naoki Shinohara³

概要

第5次エネルギー基本計画が審議され、平成30年7月3日閣議決定された。パリ合意の影響を強く反映した方針が示され、世界の潮流を見据え、再生可能エネルギーを主力電源とする明確な方向性が打ち出された。2050年の温室効果ガスの削減目標は80%である。本稿では、その具体的達成手法のひとつとして、洋上再エネの最適組み合わせをエネルギー源とする海洋インバースダムと、水素貯蔵システムが協調した200万kWクラスの洋上エネルギーセンター構想を述べる。バックアップ電源が不要で高速需給調整機能を持つ洋上発電所建設は再エネ拡大を牽引する。このような洋上発電所の世界展開には地政学的制限を伴うが、一方でこのシステムは最小規模（20MW）の宇宙太陽発電衛星の地上局を構成するため、地政学的条件に殆ど影響されない究極の宇宙再エネシステム発展の足掛かりとなる。ここでは小型発電衛星の建設可能性と発展性について論じる。宇宙太陽エネルギーは世界の共有資源であり、その賦存量も地上より遥かに大きい。エネルギー利用の冗長性と国際紛争軽減が期待される。

1. はじめに

我が国のエネルギー基盤は自給率が低く、安全保障上極めて脆弱である。加えて純国産と言われた原子力の再稼働が進まず、火力に頼らざるを得ない現状が継続している。パリ協定により温暖化ガス排出削減の義務を果たすため、早急な対策が求められている。原子力は政治的に軍事的にまた環境保護の立場からも極めて複雑な情勢を示し、海外でも意見が二分され各国の方針策定が揺らいでいるのが現状である。比べて再生可能エネルギー（以下再エネ）は殆ど全世界で受け入れられる方向で進んでいる。我が国では原子力と再生可能エネルギーが屢々結合して論じられ、民間の再エネ研究投資、設備投資がなかなか進まない特殊な状態にあり、世界から取り残されているようにさえ見える。温室効果ガス削減にはどちらも効果的である事が返って議論を複雑にしている。

平成30年7月3日に閣議決定された第5次エネルギー基本計画¹⁾においても、CO₂を可能な限り低減するという以外には現状抱える基本的課題には触れられていない。このことが再エネ政策の中核を不確実なものにしている。再エネについて我が国のような資源のない島嶼国が抱える特殊事情が記述されているが、実際は世界の多くの国が固有のエネルギー問題を抱えている。大陸との連携線を持たない我が国は再エネ利用に当たって平準化が困難であることは確かであるが、一方で太平洋に大きな排他的経済水域（EEZ）を持ち、日本海側に流れ込む対馬海流の恵みをもたらす。さらに大陸からの季節風が日本海の水分を上空で吸って豊かな水資源をもたらしている。水資源は生存基盤を構成する最も重要な要素であることは言うまでもない。我が国の排他的経済水域に存在する豊富で様々な再エネは欧州とは一味違った海洋国家独自の再エネ開発を可能にする。ここではエネルギー基本計画の趣旨に沿ったわが国に有効な再エネの具体的利用方策を提案する。

2018年7月27日受理。

^{1,3}〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏電波応用分野。

²〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷1番5 龍谷大学 電子情報学科。

* E-mail: ishikawa@rish.kyoto-u.ac.jp

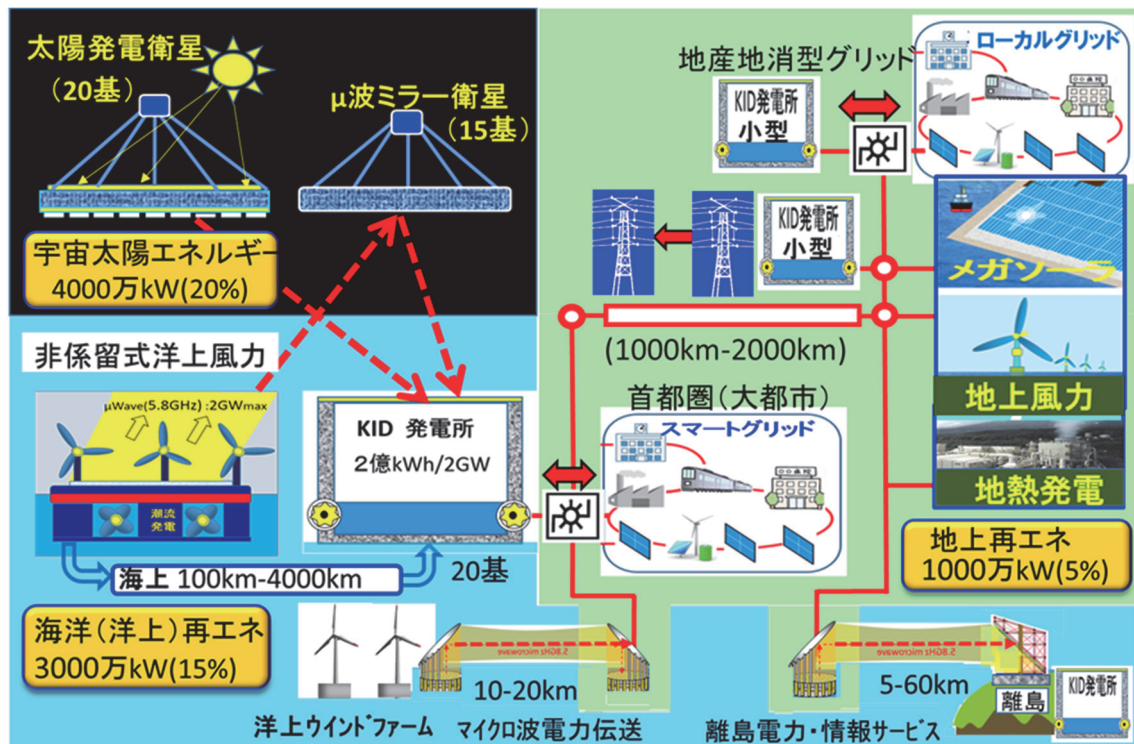


図1 生存圏全域の再エネをグリッドに運ぶ (2050年)

2. 再生可能エネルギーの超長期戦略

エネルギーの問題は安全保障や国家の経済に直接的に大きな影響を及ぼすため、比較的直近の戦略が議論される場合が多い。一方で、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や我が国の環境省、民間団体の世界自然保護基金である WWF（World Wide Fund for Nature）等は 2100 年を推定して現在の生活スタイルの改善方向性を打ち出している。国連の人口動態推計によれば 2100 年の世界の人口は約 112 億人で最大値を示し、その後緩やかなカーブを描いて減少する。比較的信頼性の高いマクロパラメタである世界の総人口が推定できれば、関連する水資源、食料資源（カロリー）、エネルギー需要の把握は比較的容易である。したがって、世界が多くの政治的、社会的問題を解決するという前提をすれば、生活スタイルや科学技術で複数のシナリオを作ることができる。2100 年の地球では人々は豊かで平和に暮らしていないとすれば、戦争や疫病で人類は既に滅び、推定の意味を失う。もちろんそこには途上国はなく、全ての国家が成熟した先進国であり、地球は飽和状態で地球生存圏の全てが有効利用されている。そこでは信頼性の高いインフラが整っている。このように、2100 年のビジョンは部分的に作ることが可能である。いわゆる意志のある未来像である。一方で、中間状態は自由度が多く積み上げ式に世界のビジョンを描くことは極めて難しい。しかし、2100 年を設計基準として複数のシナリオを内挿法的に中間年に適用することは可能である。エネルギーは水や大気と同様に最も重要な資源であるがゆえに、石油発見以来これまで長期にわたって紛争の対象になってきた。21 世紀の再エネを巡る争いはかなり異質なものになるであろう。それは科学技術であり、知的財産（資源）になる可能性が高い。国際競争の先頭に立つすべての国に覚悟が要るのではないかと思う。また、そのような状況であってもエネルギー安全保障は最も優先されるべき課題である。

我が国の第 5 次エネルギー基本計画では具体的な民間の発想力や科学技術力に強く期待した記述がなされている。そこでは 2030 年と 2050 年に向けた我が国の基本方針が記述されており、2050 年には 80% の CO₂ 削減が数値目標として掲げられている。再エネの社会実装には環境などを配慮した多くの視点が求められる。図 1 に 2050 年の我が国の再エネ導入の一例を示す。我が国は海洋国家であり

広大な EEZ を持つため、海洋エネルギーに着目することは極めて自然なことである。宇宙はフロンティアであり、太陽エネルギーが 24 時間豊富な空間である。両者を地上の再エネに加えてわが国の再エネ電力システムの全体像を示した。合計 8000 万 kW は電力の国内総需要が伸びないと仮定したときの 40% に相当する。これはエネルギー自給率も同率に改善されることを示す。目標の 80% には及ばない数字であるが、原子力を 20%、地産地消型再エネ（小水力、バイオマス火力等）20% を加えて、我が国のエネルギー自給率は 80% を達成できるシナリオである。残りの 20% は高効率ガス火力（LNG、IGCC）で全電力をまかなう一つの計画構想が立案できる。その後は大幅に海洋エネルギー、宇宙エネルギーが発展するであろう。原子力、核融合は第 5 次エネルギー基本計画にもある通り小型炉等特殊な用途を残して終息の方向を示す。筆者は小型原子炉や小型核融合炉が時空間スケールの大きい宇宙や他の惑星で活路を見出すことを期待している。

3. 地球温暖化問題に寄与する再エネベストミックス

図 2 に地球温暖化の主要因を表した。温室効果ガスだけが気候変動の直接的要因でないことが図から読み取れるが、温室効果がなければ地球表面の平均温度は絶対温度の 4 乗に比例する黒体輻射の法則（Stefan-Boltzmann law）よりマイナス 18 度と計算される。地表の平均気温（約 15 度）との差 33 度が大气による温室効果である。ごく単純に赤外線を吸収する CO₂ ガスのみで温室効果が起きているとすれば、300 PPM の CO₂ で 33 度の効果を持つ。この数字は過去 100 年間の濃度上昇 100 PPM で 3.3 度の気温上昇に対応する事になる。気象庁のホームページによればこの数字は 0.73 度である²⁾。海水の熱容量や水蒸気による赤外吸収、対流の影響など多くの要因が複雑に関係して単純でないことは明らかである。しかし CO₂ 濃度増大が温暖化の負の特性要因になることはない。全世界が CO₂ 排出削減に取り組む合理性は高い。もちろん CO₂ 濃度の上昇防止には海洋植物や陸地の熱帯雨林が、光

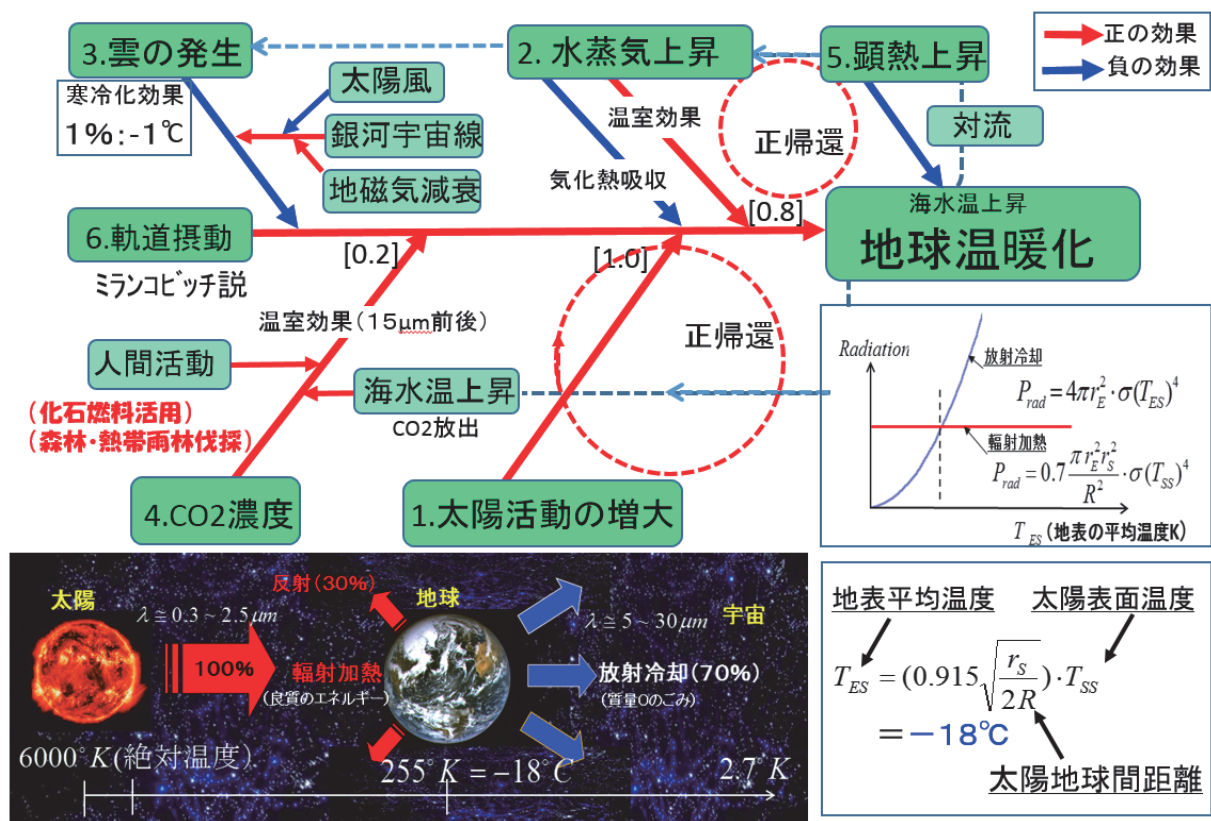


図 2 バランス点から見た地球温暖化の特性要因

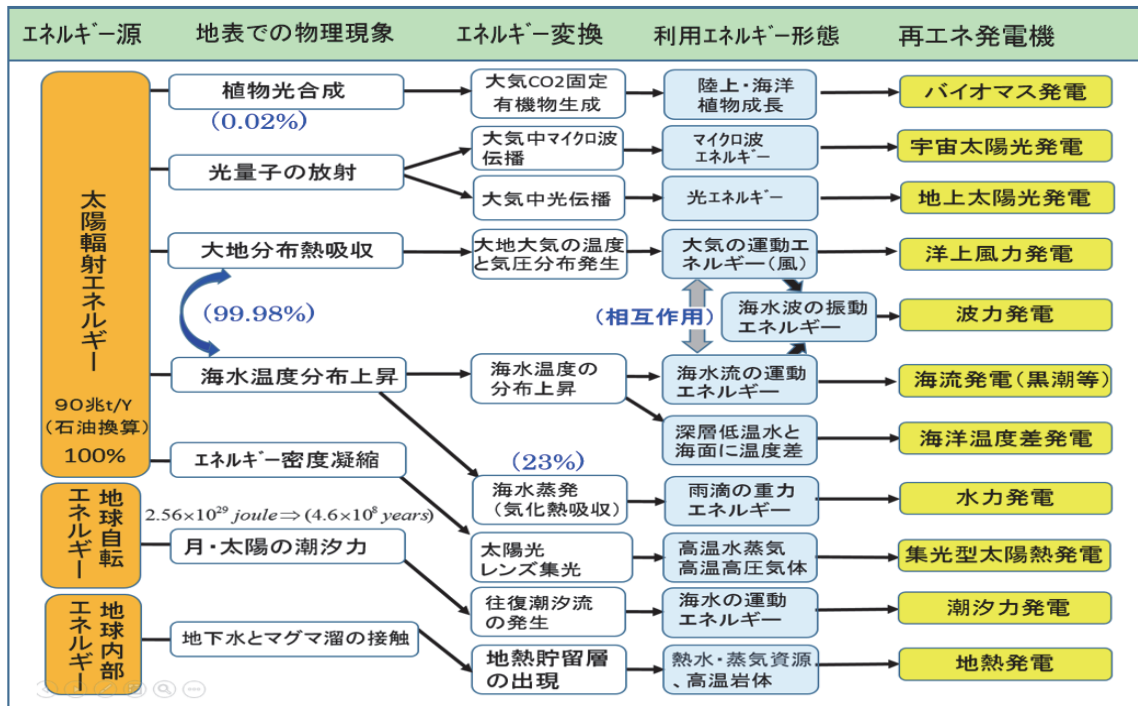


図3 再エネ発電機とエネルギー源との相関及びエネルギー形態の変換プロセス

合成により大きな役割を果たしていることを忘れてはならない。海洋汚染、森林伐採等に対する対策も重要な方策である。従って近年の気候変動による自然災害の激化を減じるためにはCO₂の削減と同時に環境の保全という両方の方策が求められている。

図3に主な再生可能エネルギーのエネルギー起源と利用できる形態への変換プロセスを示した。環境を変化させず、また多様性生物のバランスを崩さない範囲で再エネは利用する事が許される。飽和成熟地球は豊かであるがルールは厳しいはずである。生存圏の持続性を保つために再エネのルーツを辿り、適切な利用方法を開発することが重要である。最終利用形態にある再エネの腑存量はNEDO再生可能エネルギー技術白書³⁾に調査結果が記述されているが全量が利用可能ではない。環境が許す範囲の把握が重要である。逆に数千年から数万年の範囲では実質無限といってもいい再生可能エネルギーも多く存在する。技術開発の可能性を見据え、方向性を決めるときこれらの判断は重要である。さらに重要なことは地球温暖化要因をCO₂濃度だけではなく他の重要な要因の寄与率をより正確に把握することである。有効な技術開発を進めるために効果的に資金が使われるためである。即ち2100年110億人の豊かな飽和地球がゴールでありそのビジョンに整合し実現する技術開発でなくてはならない。我が国は省エネ技術では世界の先端を行き、2100年においても電力使用のお手本になる技術を持つと考える。このことは世界の総電力算出に当たって、わが国の現在の使用量を基準値とする合理性を示している。現在の日本人の平均消費電力は約1kwである。人口を掛け算して我が国の総電力平均は120GW（1億2000万kW）である。この値を基準にすれば、途上国がすでに存在しない2100年の世界の総電力使用量は、省エネ技術が拡散し、かつ季節変動や昼夜の電力需要が地球全体で相互に融通・平均化できる技術が可能であると仮定すれば、一人平均1kWの数字をそのまま用いることが可能である。即ち世界の総電力需要は単純に、1kW/人×110億人=110億kWである。一方、地球が太陽から受けるエネルギーは反射分を差し引いて 1.2×10^{14} kW（120兆kW）と計算されている。従って太陽エネルギーの恵みは世界の総電力需要の約1万倍であることがわかる。これは、世界の総電力需要を全て再エネで賄った場合、バランスモデルによると地球の平均温度が一時的に0.03度低下する程度に太陽活動が弱まった状態に対応する。尤も利用された後、最終的には熱エネルギーに変換されるため実際には平均気温は変化しない。植物の光合成などがわずかに影響を受けることになるが、マクロに見れば十分許容できる範囲であると考えられる。言い換えれば再生可能エネルギーを地球が平均化

(相互融通)して使うことができれば、環境に殆ど影響なく安全に利用できる範囲であると結論付けることが可能である。

しかし、再エネは空間に不均一に拡散し、その密度は一様では無い。太陽エネルギーは利用形態として風力、太陽光、波力、海流、水力等多様なエネルギーに変換され利用される。図3はエネルギー源と再エネ電源の関係を表したものである。拡散したエネルギーを収集する技術が再エネ利用の本質の一つである。太陽光以外にも、地球の角運動量エネルギーは莫大な量を示し、数万年の単位では実質的に再生可能エネルギーの位置づけが可能である。地球の慣性モーメントは、均一密度を仮定すれば簡単に求められ、その運動エネルギーは慣性モーメントに $1/2 \times (\text{角速度})^2$ を乗じて得られる。その値は、 $2.56 \times 10^{29} \text{ J}$ であり kWh への換算値は $7.1 \times 10^{22} \text{ kWh}$ である。人類が使用する電力の約 4.6 億年分に相当する。このエネルギーは多様性生物がそのバランスに影響を受けない範囲で非常に期待が持てるエネルギー起源である。図3に示すとおりこの種のエネルギーの利用形態の典型例は潮流エネルギーである。NEDO の白書³⁾によれば我が国における潮流エネルギーは瀬戸内海に集中しており、潮流そのもののポテンシャルが小さく有効地域は限定的である。しかし、四季を通じて安定したエネルギーが得られることは優れた性質である。用途により目的により単独または最適な再エネと組み合わせることができる。時空間で短周期的、長周期的な変動を持つものや逆相関を持つエネルギーを持つ組み合わせが再エネ利用には有効である。各再エネの特徴の調査研究が必要であることは言うまでもない。ここでも前提条件として生命としての人類生存の基盤を成す生物多様性に悪影響を与えない再エネ電源の組み合わせであることを忘れてはならない。

4. バックアップ電源の不要な再エネ電源発電所

再エネが CO₂ 削減に良いことは自明であり、各国固有のエネルギー資源であり安全保障上重要な電源であることも理解されている。それでも各国の電力会社はパリ合意までは少なくとも乗り気ではなかった。販売する電力と購入電力との間に事業を進めるには難しすぎる壁があった。価格面、品質面、物流面(納期)は商品の3要素と言われるが、再エネについてはどれも難しく、現状の火力、原子力を置き換え、主力電源にすることには技術的、経済的に無理があった。①価格の面では政府が FIT (feed in tariff: 固定価格買い取り制度) を義務付け、再エネ事業者が利益を出せる構図にした。半面、国民の電力料金は上昇の一途をたどった。②品質面については不安定で不確実な再エネを使いこなすためには再エネの設備容量と同量の調整用の火力が不可欠として二重投資の不合理性を訴え、電力会社は難色を示している。EU 圏は国際連携線が機能するため、再エネは国際間で2次元空間的な平均化効果が強く、再エネ導入の許容比率は比較的大きい。半面各国の電力会社の経営が独立できないところに問題を抱える。③さらに物流面では再エネ発電所の分布や立地条件が従来電源と全く異なるため、これまでの物流を担った電力線の電流分布が変わり新たな変電設備や電力線増設工事が求められている。④これらの費用負担面で折り合いが付かず、再エネ導入は思うようにいかないのが現状である。我が国は電力グリッドの規模や形状のため、どの要素においても欧州より不利な立場であり、この分野で世界から遅れつつある。これら4つの問題は再エネ電源の開発とは別の問題であり、新しい事業モデルの創出や中間製品的性格を持つ再エネを従来の系統に導入する技術的課題を解決する必要性がある。再エネ電源の開発は政府が研究開発費を手当てし実証的成果が上がりつつあるが、システム技術については電池の開発を除いて十分とは言えないのが現状である。この問題の本質は電力(商品)を完成品ではなく中間製品で納入するために発生するといっても過言ではない。品質や納期、数量の取り決めがなく発電事業者と電力事業者があたかも事業意志に無関係に取引をしているように見える。即ち再エネ電力は一般商品の物流システムを前提にした事業者間の取引ルールを考えることは不可能と言える。この中間品を完成品にまで高め、取り引きする技術開発やシステム検討が求められている。筆者は英国等でスタートしたコネクト&マネージはあくまで発展段階での苦肉の技術であり、再エネが主電源となった時には事故が多発する電力システムにならざるを得ないことを危惧している。①バックアップ電源が不要で、②需給調整ができる再エネ電源開発が求められている。③しかも取引は基

本的に系統線に接続されている既存発電所サイドである。この3条件が揃えば再エネという電力商品は既存の電力系統線での物流と配信サービスが可能であり、自然な形で化石燃料から再エネへの転換が進む。上記の3条件を満足する再エネ電源の一例を図4に示す。いくつかの再エネが組み合わせられて海洋インバースダム^{4,5,6)}という

プラットフォームに固定され、それぞれ特徴のあるエネルギーを供給している。海洋インバースダムとは揚水発電の原理を利用して海中に大きな空間を作り、海水の重力ポテンシャルとしてエネルギーを蓄える海洋構造物である。図5に構造と機能を示す。海中に空間を作る方策は大きく分けて4種類(ケーソン型、沈埋型、海底トンネル型、築堤型)が存在するがここではケーソン型についてのみ説明する。図5はわが国の領海内の100m前後の水深を持つ海域に最適なケーソン型を示している。容量は数十MWh程度が適当であり、MWクラスの海洋再エネ発電所の出力平準化に最適である。自然災害に強く最悪事故の場合にも海洋汚染や人災に繋がらないことが特徴である。海洋での最適な再エネ電源の組合せは風力と太陽光発電である。前者は沖合にプラットフォームを作れば風況は一般的に良く(NEDO 白書: 設備利用率=31%)、また太陽光パネルは景観を悪化させることなく日陰のない場所で最高の設備利用率が期待できる(15%)。さらに風力に相関の高い波力エネルギーが10kW/mでプラットフォームに周囲全体から波力エネルギーを吸収することが可能である。波力は風力によって引き起こされるが

遠方の風力も波として伝わり時間差を持ってエネルギーを供給する。このことは再エネの平均化に効果的である。装置の固定は海洋インバースダム側壁海水面に潮の干満差の数mの鉛直移動距離を吸収するように固定すれば効果的である。また上述の潮流エネルギー装置を同様に深度10-30m近辺に固定する。これにより大型スクューの抗力を容易に吸収し、年間を通して信頼度の高い往復流体のエネルギーを得ることが可能である。このようにいくつかの洋上再エネ発電機のプラットフォームとして海洋インバースダムが機能することは、空間を多重に使うことになり拡散する再エネを一か所で収

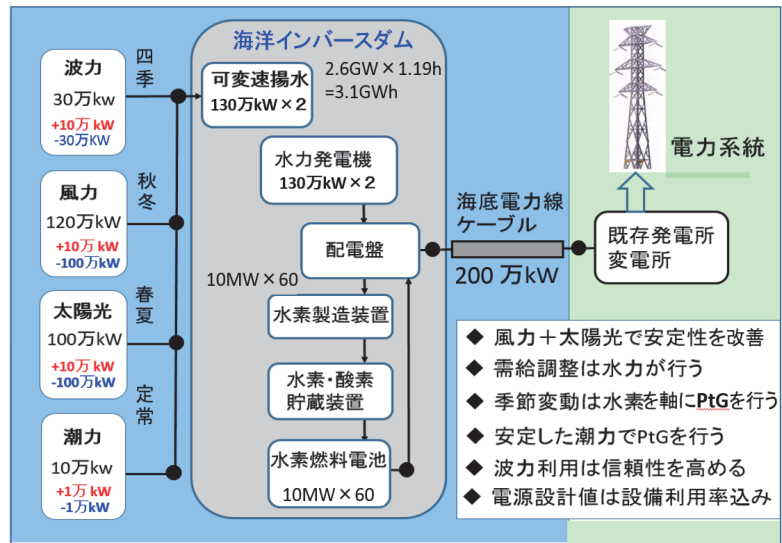


図4 バックアップ電源不要の洋上200万kW再エネファーム

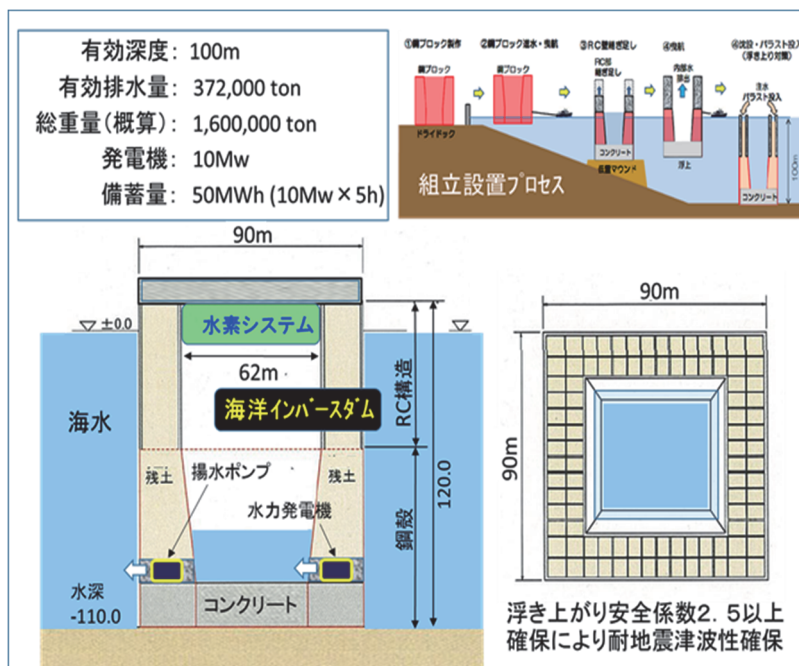


図5 ケーソン型海洋インバースダムの構造例と組立設置プロセス

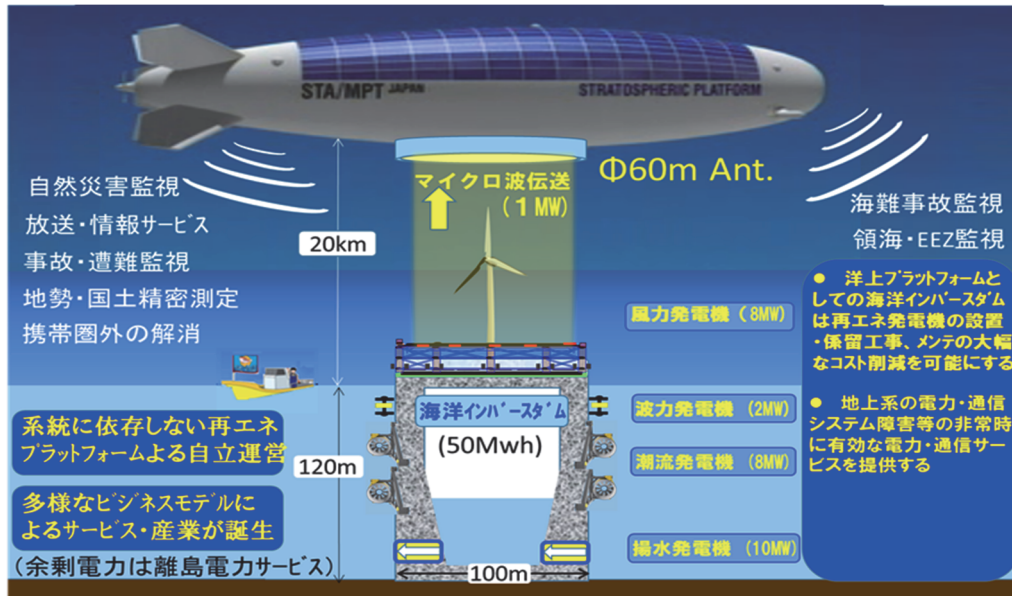


図6 成層圏プラットフォームによる（国境）離島観測システム

集できるというメリットを持ち、再エネの欠点を緩和する。

図6は海洋インバースダムがいくつかの再エネのプラットフォームとして機能する洋上再エネ発電所構想の一例である。ここで作られた安定した電力は、成層圏プラットフォームにマイクロ波を用いて無線でエネルギーを供給する。高度は成層圏下部の20kmであり伝送電力は約1MWである⁷⁾。海洋インバースダムの蓄積容量は50MWhであり約2日間の再エネ投入がなくても成層圏にエネルギーを送ることが出来る。再エネベストミックスとは、時空間的な平均化に近い組み合わせを持つ異なるエネルギー形態の集団であると言える。しかし、海水の重力ポテンシャルはエネルギー密度が低く数時間から数日の時間的平均化効果を持たせること、大電力で速い需給調整機能を持たせることには有効であるが、週単位、月単位、季節単位の変化に対してベストミックスだけで安定電力を供給することは、経済合理性の観点から合理性があるとは言えない。あまりにも大型の蓄積装置（海洋インバースダム）が必要だからである。

長期変動の吸収にはH₂-PtG（パワーツーガス）との組み合わせが効果的である。水素ガスはトヨタのミライで既に燃料電池と組み合わせて商用車として実用化されている⁸⁾。第5次エネルギー基本計画でも「水素社会の実現」として位置付けられ、一層技術開発の進展が期待される。従って水素システムの貯蔵能力と海洋インバースダムの強靱なプラットフォーム性、大電力高速需給調整能力との機能融合は長期変動を吸収する有力な補完技術として期待される。海洋インバースダムの巨大空間の上部は水圧が低くエネルギー蓄積への寄与率は極めて低い（1%未満）。この上部空間（20-30m）に水素エネルギーシステムを収納することは蓄積密度の観点から効果的である（図4）。一方、水素社会の実現には、製造や運搬、安全面に課題を残すが、洋上のプラットフォームの内部空間、即ち頑丈に閉じた系（圧力弁は持つ）で運用する限りこれらの本質的課題は消滅すると考えられる。再エネ電力による水の分解の高効率化は一般的には期待できず、改善には大型化・複雑化によりコスト高になる。しかし、海洋インバースダムの蓄積エネルギーで作った安定電力を使えば電気化学的条件が安定するため水素製造の効率向上が将来にわたって期待できる。大型高压タンク（>70Mpa）により数か月分のエネルギーの蓄積が可能である。この巨大な水素の蓄積エネルギーを水素燃料電池で電気に戻して揚水発電の電力と合成して系統に送り届ける。また、海洋インバースダムの蓄積量が少ない時には水素燃料電池を用いて揚水発電の蓄積量を緩やかに補充することは効果的である。大きな蓄積量に特徴を持つ水素ガスの発電効率は60%が報告されている⁸⁾。あくまで安定供給が目的であるため電力の一部を水素変換して蓄積量の一部を電気に再変換する方式を取る。海洋インバースダムと水素PtGとの融合技術の本質は、以下に述べる。再エネの高効率変換による品質改善と大電力需給調整供給力が海洋

インバースダムの役割であり、水素 PtG 技術は再エネの季節変動という長周期変動を平準化できる大量のエネルギー備蓄と 100 万 kw クラスの水力発電装置のパフォーマンスを常に最高に保つ役割を持つ。図 7 に KID (海洋インバースダム) と H2-PtG の発電システムにおける位置づけを示した。同一空間に両者が存在し、機能融合することによる信頼性のある再エネ発電所実現の可能性を示した。この技術の社会実装により電力事業から再エネバックアップ用の火力発電機は姿を消すことが期待できる。

	設置場所	エネルギー変換	備蓄方式	発電方式	搬送方式	システム	BU電源
KID	海洋 (海中、海底) (海底トンネル)	揚水発電 (再エネ+海水) 効率高い(90%) 高揚水速度	海水の重力 ポテンシャル (海中ダム) 密度が低い	水車+ 発電機 高効率 (90%)	送電線 WPT	備蓄 装置 再エネ PF 需給調 整機能	火力
再エネ PtG (H2)	陸地 (地上、地下)	再エネ+H2O 高温電気分解 効率高い(90%) 低吐出速度	化学結合 エネルギー (高压タンク) 密度が高い	燃料電池 効率 (60%-65%)	水素船 トラック 列車 パイプ	備蓄 装置 備蓄機能	火力
融合型	海洋 (海洋構造物)	揚水発電 +PtG 安定電力+H2O で電気分解	高压H2ガス: 一月分蓄積 KIDは常に満 タンで動作可 最悪事故対応	長周期変動 に対応可能 KIDの水力 で需給調整 (信頼性・高効率) (80%-90%)	送電線 WPT 水素船	発電所 需給調 整機能 安定動作	なし

BU: back up, PF: Platform, WPT: Wireless Power Transmission, KID: Kaiyo Inverse Dam

図 7 「海洋インバースダム」と「PtG (H2) 装置」の融合がバックアップ電源不要の再エネ発電所を構築

5. 洋上再エネ発電所の具体的構成

バックアップ電源不要の再エネ発電所は洋上のエネルギーセンターと考えられる。しかし、主力電源として位置付けられるためには、その規模は少なくとも 100 万 kW クラスでなければならない。洋上風力だけでエネルギーセンターを実現するときの専有面積とその構成を図 8 に示す。NEDO 白書の 1 平方 km 当り 10 MW の最大設備容量を前提にし、設備利用率を年平均 31% として、100 万 kW 発電所を設計すると直系 22 km の円形の海上面積が必要であることがわかる。この時ウインドファームの面積は 380 平方 km、10 MW の洋上風力発電機は概略 343 機必要である。洋上風力の電力は 49 機ごとに 6 角形のサブファームを作り 50 MWh の蓄積容量を持つ 7 基の海洋インバースダムがエネルギーを蓄える。さらに 7 組のサブファームで一つの巨大なウインドファームを構成する。個別の海洋インバースダムの構造は図 5 と同じである。上部空間には循環型の水素—電力変換システムと貯蔵タンクが収納されている。31 機の海洋インバースダムの強固な建造物に分散して水素を貯蔵することは最悪の事故の場合でも洋上発電所が機能を停止しないという高い信頼性を担保できる。自然災害、人災、点検・故障、事故等あらゆるリスクに強い耐性がありサービスを継続できる事は再エネ発電所の大きなメリットである。再エネベストミックスのメリットを生かすために太陽光パネルが風力発電と洋上で海域を共有している。風力発電機のピッチは大きく太陽光は殆ど影になることなく発電することができる。季節変動にこの種の組み合わせは有効である。現状洋上で動作する太陽電池パネルは既にキャビンクルーザーなどに採用されている。22 km の直径を持つ洋上エネルギーセンターの周囲は約 69 km である。NEDO 技術白書³⁾によれば、波力発電の設備容量は 10 MW/m² として最大で 690 MW まで

可能である。沖合で柔軟な動きをする整合型の波力発電機の研究開発が期待される。潮流発電は上述したように信頼性が高い発電機である。海洋インバースダムへの再エネ発電装置の固定方法は比較的容易である。再エネの複数ハイブリッド型の発電所は平均化操作が期待でき、エネルギーセンターの信頼性が高くなることは言うまでもない。

図9は実施場所の一例として国境離島である対馬近辺の海域に再エネエネルギーセンターを構築した場合のイメージ図である。深度が100-110mぐらいで比較的分平な海底を持つ海域でかつ風況にも優れている。即ち波力も期待できる海域である。対馬海流のエネルギーも非常時には使うことが出来る優れた場所として候補地例とした。何よりもこの海域は国境離島にエネルギーを届ける重要な意味を持つ。このような海域が日本列島の周辺にどれくらいあるかは未調査である。図10は再エネエネルギーセンターを事業の視点で見たときの機能構成図でありセンターと事業の関係を示した。淡水プラント事業とのシナジー効果が中東や北アフリカ等、降雨量の少ない海外では大いに市場性が期待できる。

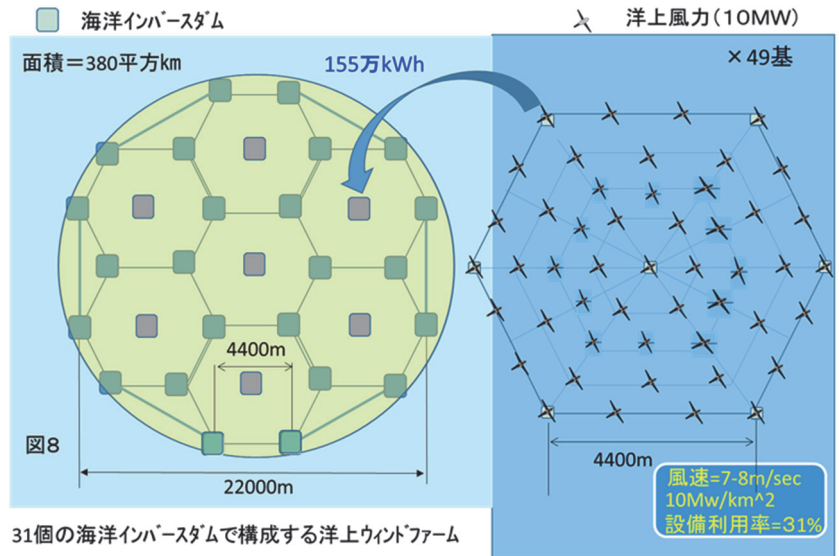


図8 120万Kwの洋上ウインドファーム例 (342基×10MW)

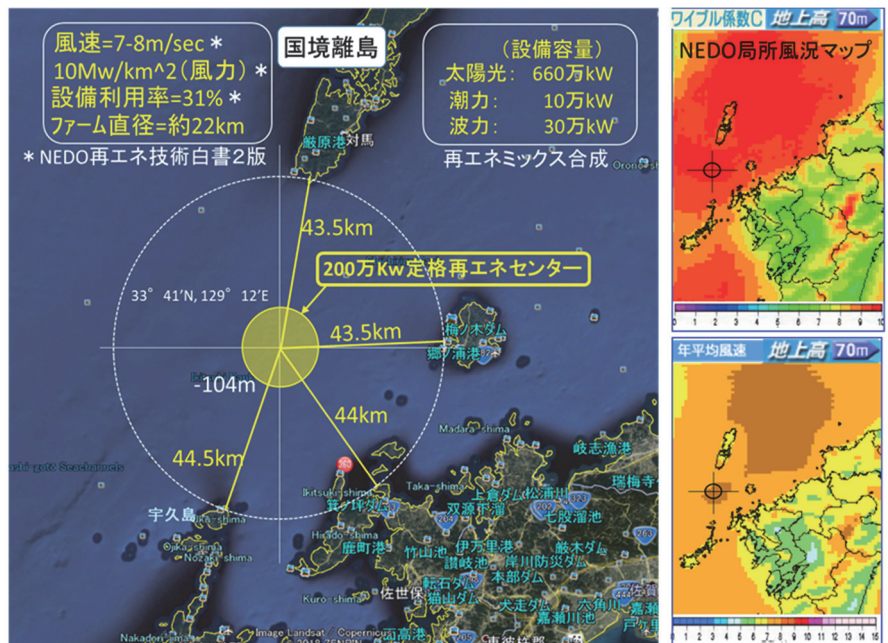


図9 離島サービス面から見たGW級洋上ウインドファームの適地例

6. 地上再エネの限界と宇宙太陽光発電

これまで地上の再エネの収集ばかりに目を向けてきた。品質の優れた電力供給と需給調整能力、大電力供給能力などについて述べ、バックアップ電源をなくすために水素貯蔵技術との融合が必須であることに触れた。しかし、再エネの収集と平準化技術のみに着目し、再エネの状態が2100年の飽和時代を超えて概略同じという仮定の確からしさの検証は必要である。また、今までの議論においては地球上の地政学的な検討は省略した。さらに気候変動の影響などは全く考慮しなかった。100万kwの洋

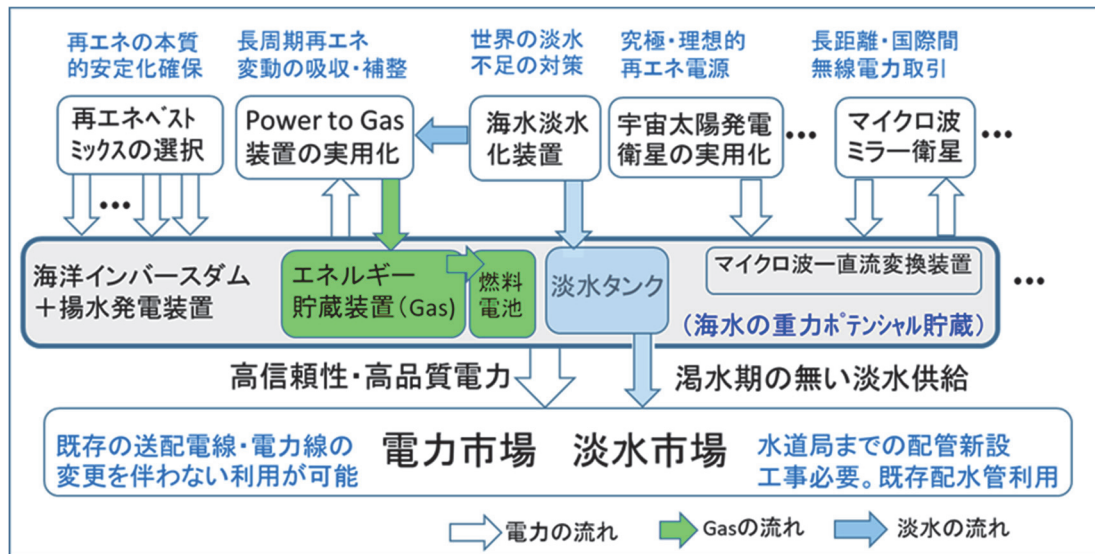


図10 海洋インバースダムを21世紀後半のクリーンエネルギー・淡水センターとして位置づける

上エネルギーセンターを再生エネルギーの核とすれば、110億人の電力である110億kwの発電所は1万個の発電所に相当する。面積にすれば380平方kmでハイブリッド再生エネルギーにより発電能力は2倍まで増加するという期待値を入れてみる。この時5000個あれば世界の電力は物流問題を除けば解決することになる。総面積は $380 \times 5000 = 190$ 万平方kmの土地が必要である。メキシコかインドネシアまたはサウジアラビア一国位の面積である。再生エネルギーは性質上1箇所に集めて取れるわけではない。地球上に薄く分布して収集できる、またそうでなくてはエネルギー自立の意味を失う。振り返って地政学的な影響を強く受ける。大陸国、島嶼国、半島国、緯度の大きさ、海洋性、草原性、山岳性など気候条件によって、また人口密度、都市型国家等社会形態によっても有効な再生エネルギーは互いに異なると言わざるを得ない。当然再生エネルギー収集・利用形態も異なり、利用可能な絶対量とコストに差が出るのはやむを得ない。再生エネルギーは拡散しているが、全ての国がひとりあたり換算で公平に利用できるかというやはり地域偏在感は拭えないであろう。これは再生エネルギーの一つの限界と言うべきであり、人間も他の生命と同じルールで生きる証でもある。化石燃料の利用は人間が他の生物からエネルギー的に決別して独自の文明を築いたことを示している。そこに持たざる国と持つ国の決定的格差が生まれ紛争原因が生じた。

各国が安全保障のために自立するためには、再生エネルギーが更に均一で、その国にとって都合の良い拡散分布をしていることが望ましい。恐らくそれは願望の域を出ない。地上の再生エネルギーの限界を乗り越える手段として、究極の再生エネルギーと言っても過言ではない宇宙太陽発電か、地球が内部に大量に持つ熱エネルギーの利用がある。エネルギーネットワーク（電力グリッド）の構築と運用の柔軟性、研究実績、技術成熟度を考えれば前者が遥かに有力な候補であることは言うまでもない。宇宙は太陽エネルギーで満たされている。また太陽光発電パネルの実績もある。あとは宇宙と地上の任意な点をワイヤレスに接続できれば人類は大量の再生エネルギーを手に入れることができる。無線電力伝送の周波数候補は2.45GHz、5.8GHz、24GHz帯等のISMバンド（産業用周波数）でのビーム型電力伝送技術が盛んに研究されて来た^{9,10)}。システムの天才発案者はピーターグレーサー（1968年）である¹¹⁾。その後、多くの人達によって原理的検証が実験的にまたシミュレーションを使って行われてきた^{12,13,14,15)}。36,000km上空の静止軌道に置かれた太陽発電衛星からおよそ2-3kmの太さを持つ密度の薄い安全なマイクロ波ビームを作って質の高いエネルギーを昼夜休みなく伝送する。太陽発電パネルで発生した熱エネルギーはそのまま宇宙へ放射するため、エントロピーをほとんど持たない高品質のエネルギーを地上の任意の点に届けることができる。風袋（質量物質）なしで配達時間（遅延時間）は0.1秒の高速である。理想的な再生エネルギーの物流システムと言えるであろう。石油や天然ガスだと燃料を使う運搬船に積み込み数日から数週間をかけて温室効果ガスの衣を着て配達される。一方、原子力や核融合発電はCO₂を原理的に発生しない。しかし、利用エネルギー以上の熱発生は避けられず地表の空気や海水を必要

以上に温めることになる。また廃棄物を伴うことは避けられない。

宇宙太陽発電という理想的なエネルギーシステム実現の現状における最大の阻害要因は巨大な発電衛星を宇宙まで運ぶことである。打ち上げの技術は日進月歩であるが現状の我が国の大型衛星打ち上げを担う H2A204 ロケットを例えば、この目的に使用するためには、価格（約 90 億）を 2 桁下げる設計・運営技術が要求されるという試算が出来る。海外ベンチャー企業（スペース X 社等）の再使用技術や、量産化技術、更に再使用準備期間の短縮などで輸送能力を高め輸送コストを大幅に下げようとしている。確かに設備寿命が長く稼働率が高ければ運賃は確実に下げることができる。燃料費は打ち上げ費用の 5%前後と言われているため、ロケットによる輸送費用はひとえに設備寿命と稼働率に依存すると考えて差し支えない。米国の場合、火星探査、火星移住という巨大な国家目標を持っている。これが民間企業の開発投資（1200 億円）を生み出している。わが国の宇宙太陽発電衛星の重量は概算で 2 万 5000 トン/200 万 kw である、単純に打ち上げ能力を 5 トンとすれば 5000 回の打ち上げが必要である。毎日 1 回打ち上げても 13.6 年の仕事である。我が国の総電力を賄うには 120GW の発電衛星が必要である。2100 年には 60 機の太陽発電衛星が運営体制にあるという計画をたてるとする。2040 年から打ち上げを初めて 60 年間かけて毎年 1 機の宇宙発電所が営業運転を始める事になる。5 トンの打ち上げ能力のロケットに頼ると毎日 14 回、年間 5000 回のロケット打ち上げが必要である。ロケットの打ち上げ費用を 1/50 にすると、1 年間の輸送費用は 9000 億円となり発電衛星 1 機分の費用を 1 兆円とすれば総費用で 1 兆 9000 億円/年となる。地上局のアンテナ費用は含まないが、2 GW の原子力発電所の最近の価格と比べて同等である。しかも絶対安全が確保でき、クリーンでかつ稼働率が高い。可動部分を持たず、修復は部分的にできるからである。宇宙発電所内では全てのエネルギーが集まる点がないためメンテナンスは薄い電力密度の空間で AI ロボットが作業可能な範囲であると考えられる。費用をどう見るかは議論が必要であるが燃料棒の交換や高温で動作するタービンの点検等は必要でなく、ユニット化された通常部品の交換で発電所の維持管理は可能であり、非常に高い稼働率が期待できる。これらは全て実質的電力コストの低減につながる。

一方で、打ち上げコストが 2%になるには全く新しい発想が求められる。マイクロ波ロケットの研究もそのひとつである¹⁶⁾。前提にしているのは人を運ばない貨物ロケットである。すなわち急な加速が許されるということである。化学ロケットは打ち上げ時の速度ゼロの時のエネルギー効率は 0%であることはよく知られている。スピードが上がればエネルギー効率は速度に応じて大きくなる。最大効率は燃料噴射速度が上昇速度に等しいときに得られる。従って打ち上げ時に初速度を外部から与えることができれば燃料のエネルギー効率は大きく改善される。筆者は貨物だけを運ぶ場合にはレールガンのような電磁力を打ち上げの際に併用できないかと考えている¹⁷⁾。燃料噴射速度（約 2.5 km/sec）に近くなるまでローレンツ力で加速した直後に化学ロケットのエンジンが動作するのが現実的である。この時燃料噴射の運動エネルギーは全てロケット本体の上昇エネルギー（位置エネルギーの増加）に使われる。もちろん軌道に載せるプロセスではエネルギー整合よりも方向制御、速度制御が重要である。しかし、費用の大部分を占める初段エンジンのエネルギー整合は燃料タンクの大きさや燃費に対して圧倒的に有効であると考えられる。電磁的加速により初段エンジンの負荷はかなり小さくなる。余裕分は「再使用」という新たな機能（垂直着陸等）を付加することに使われる。これによってコストと寿命は大きく改善されるであろう。「再使用」を可能にする技術は 100 万にも及ぶ部品点数の革新的な高速測定・AI 診断技術に加え、我が国の得意分野である高信頼性材料の開発が 100 回を越す再使用機体の実現を可能にすることを期待したい。「再使用」技術と「初速度投入」技術の確立は衛星の高速輸送システムに二けたのコストダウンをもたらすであろうと筆者は確信する。レールガンの技術は軍用としては多くの問題を残すが、民生用途のロケットについては、発射装置は重量制限がなく固定であり、発電所確保もスペース確保も有利である。一つの機能に特化した発射装置が作れるからである。日米の先行研究などにより、有効な要素技術は揃いつつあると考える。21 世紀は宇宙科学、宇

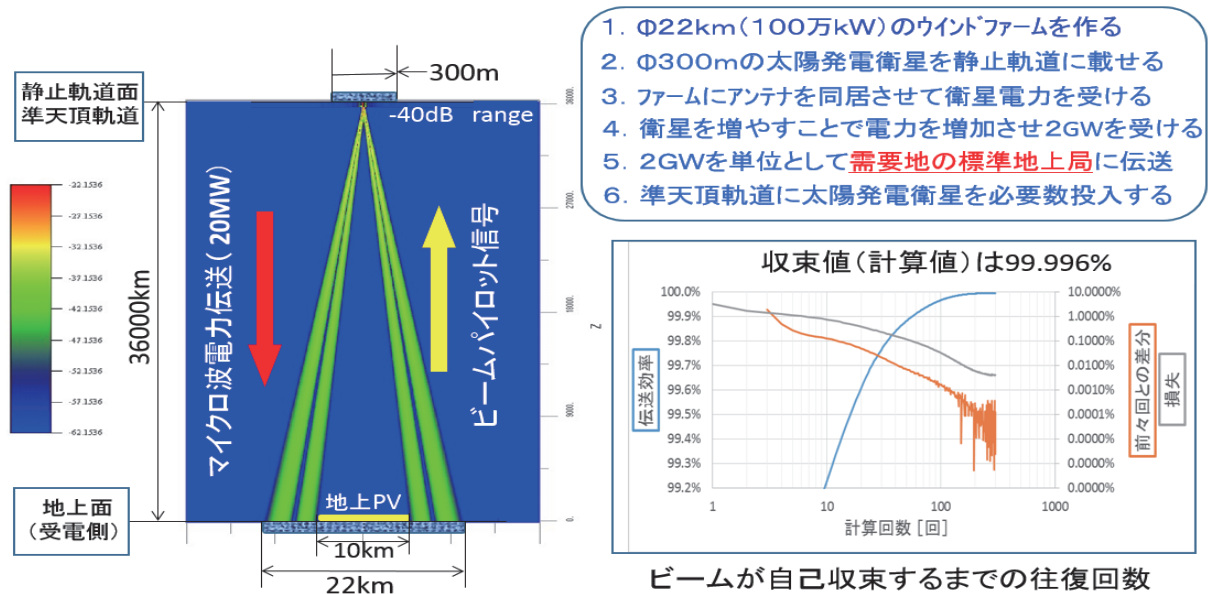


図 11 小型静止衛星から低漏洩ビームで地表へ届ける

宙産業を抜きには考えられない。早い時点からの多くの人のアイデアを集結した低コストロケットの研究開発を始めることが、成功の必須条件であると筆者は考えている。

多くの太陽発電衛星が地上の電力グリッドに電力を供給する地上局の確保が必要である。実証実験も小規模から始めるのが望ましい。第5章で述べた洋上再エネ発電所は太陽光パネルが風力と季節変動を考慮したバランスで面積を専有している。風力と宇宙太陽発電所からのマイクロ波は空間を共有できるが、地上の太陽光パネルは中央に半径10kmの円内に敷き詰め年間での発電量を風力と合わせる。この時外側の面積にはレクテナアレーを配置する。静止軌道に置いた発電衛星からのマイクロ波電力ビームはドーナツ状の領域に送電する。この場合、静止軌道の発電衛星のアレーアンテナのサイズはわずか直径300mで十分な機能を果たす。地上局（洋上エネルギーセンター）のアンテナエリアが大きく（22km）取れるためである。図11は静止軌道上の小型発電衛星から洋上のエネルギーセンターにマイクロ波電力伝送の様子を、電磁界シミュレーターを用いて計算したものである。伝送電力は発電衛星の面積に比例するから10-20MWである。この電力は奇しくも2001年に長友信氏が宇宙科学研究所報告第43号に発表されたSPS2000のシステムコンセプトと一致する¹⁸⁾。最初の最小の実用化発電衛星の規模を合理的に算出されたものである。この衛星の重量は300-400トンで設計可能であり、早い時点でユビキタス衛星として途上国や人口密度の低い地域へのサービスが可能である^{19,20)}。現在運営中の国際宇宙ステーション（ISS）の重量は約420トンである。低軌道衛星ではあるが同じ程度の重さを持つ衛星の打ち上げと組み立て実績があることは非常に有益であると言える。さらに20年に亘る有人による宇宙実験・調査は貴重な見識とデータを発電衛星に提供するものと確信する。

一方、地上における洋上のエネルギーセンターの構築は最小規模の打ち上げ可能な太陽発電衛星の実用化を可能にする。小型の太陽発電衛星は軌道上で組立てることが可能であり、複数の小型衛星を宇宙で一体化して一つの完全な発電衛星(2GW)として機能することもできる。図12は複数の小型発電衛星が同期して地上のエネルギーセンターに送電しているイメージ図である。一つ増やすごとに電力が20MW単位で増大することは興味深い。全体の位相の同期を取る事によって地上で電力が合成できる。この技術は電力伝送の新技术として2017年に開発された両サイドレトロ技術をマルチビーム

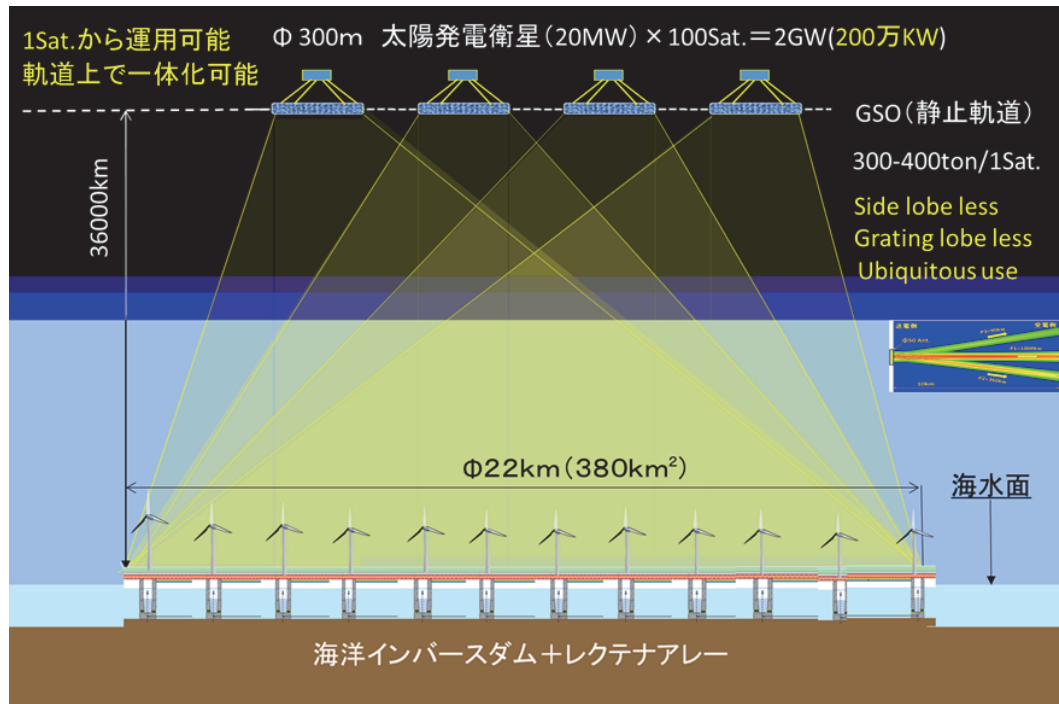


図 12 小型宇宙太陽発電衛星と洋上ウインドファーム (1.8 GW) の連携

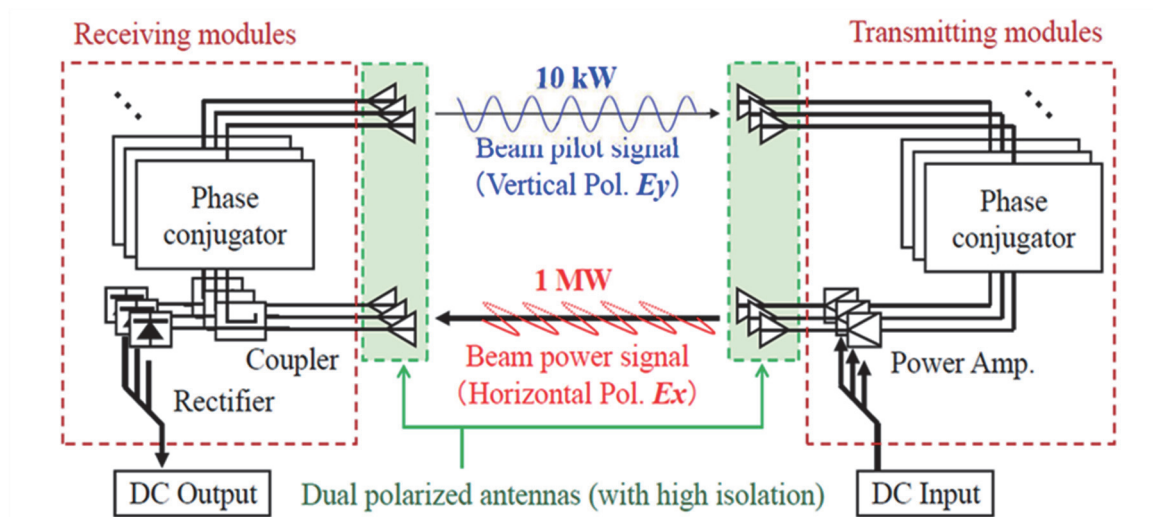


図 13 両サイドレトロ技術のブロックダイアグラム

に適用したものである²¹⁾。図 13 に両サイドレトロ技術のブロックダイアグラムを示す。パイロット信号と電力伝送のマイクロ波ビームは、互いに時間反転された関係にありマルチビームで送り出した信号がそのままの位相で帰ってくるため、電力の完全合成が可能になるという原理を利用したものである。グレーティングローブやサイドローブを殆ど持たない 36000 km のマルチビーム伝送が特長である。この技術は漏洩電力が最小になる状態を自ら作り出す自己収束ビーム技術である。漏洩した方向からは電力の戻りがないため、再び時間反転界は作り出さないからである。この技術により従来のフェイズドアレーアンテナではできなかった低漏洩の伝送路を図 14 のように作り出すことができる。大電力伝送の社会実装には極めて重要な技術ということが出来る。100 個の衛星が打ち上がり、相互距離を縮めてマイクロ波の一体型動作を行えばテーパ型のビームが直線的になり、地上局の大きさも直径 2-3 km のアレーアンテナで受電することが可能になる。即ち 100 個を超えて一体化した太陽発電衛星から複数の地上局へ同時に電力伝送が可能になる。もちろん小型衛星 100 個を一つの単位として軌道上の別の場所に距離を置いて並べることも可能である。このように宇宙と地上がマイクロ波電

力伝送システムを用いて連鎖的にエネルギー接続することができる。軌道も静止軌道だけでなく準天頂衛星に使われている 8 の字型軌道を使うことも可能であり、電力の国際性、サービス性、効率性を大いに高めることが出来る。特に高緯度の国の人たちにとっての恩恵が大きいことは電力のグローバル化や効率化に大いに貢献できる。即ち地球規模の電力グリッドと位置づけることができる。再エネによる強固な洋上エネルギーセンターが宇宙エネルギーをも扱えるセンターとして発展することは喜ばしい。宇宙発電所と地上発電所とでバランスが取れることは人類にとってのリスク軽減に貢献できるであろう。2050 年までの再エネの発展ステップを図 15 にまとめた。2100 年飽和人口を持つ地球が持続発展可能であるために早急な判断と行動が必要ながこの図 15 より読み取ることができる。

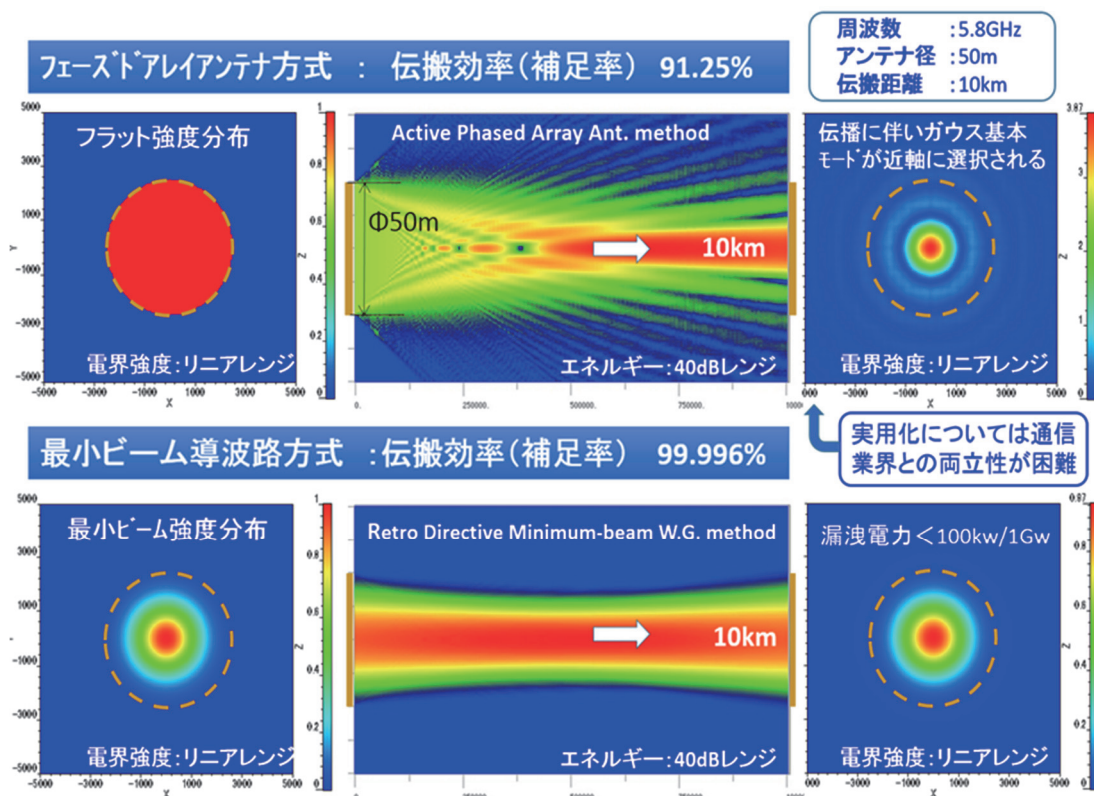


図 14 最小ビーム導波路方式による低漏洩ビームの形成

7. おわりに

第 5 次エネルギー基本計画が閣議決定された時期でもあり、政府のエネルギー政策とパリ協定を現状の産業界が抱えている問題と照らし合わせて現実的な解決策を探してみた。人口 110 億の地球はとてつもなく大きな問題を抱えることを改めて認識した。エネルギー問題は人類社会にとっても、多様性生物にとっても水や空気と同様に最も基本的なインフラの代表格である。化石燃料は人類を別物に見える演出をしたが争いを激化させ、さらに気候変動による自然災害という 2 重の苦しみを反作用として生み出した。この傾向は人口増加とともに増大することは容易に想定できる。110 億の静止人口を持つ地球の成熟社会のルールと設計図を作る時期に来ていることは明白である。大気汚染、海洋汚染、土壌汚染対策は待ったなしである。しかし過剰なエネルギーが作り出したものはクリーンなエネルギーがなければ処理できない。再エネは万能ではないことも多くの人々が感じ始めているが、これ以上の汚染を、また温暖化を食い止める大きな手段であることには違いない。これは IPCC 第 5 次報告書に記載された結論である。我々は知恵を結集しなければならない時期に突入している。対症療法で

は間に合わない不都合な自然現象、社会現象が頻繁に発生していることも多くの人達が感じている。110 億人への最大の恵みは太陽である。宇宙にはエネルギーが満ち溢れ、この質量を持たない流れのエネルギーの利用が最も自然である。地上に偏在する化石燃料の奪い合いとはわけが違う。太陽からはいくら奪っても紛争の原因にはならず、温暖化の原因にもならず汚染の原因にもならない。これは世界の紛争の半分を消滅させる力があると考えている。宇宙太陽発電システムの構築や地上のエネルギーセンターの構築は社会面、技術面から見て実現には多くの困難が伴う。しかし実現を完全否定する材料はない。我が国の産業という次元の話ではなく、ホモサピエンスが22世紀に幸せな暮らしができていないか、絶滅種になっているかという判断が今、私たちに求められている。

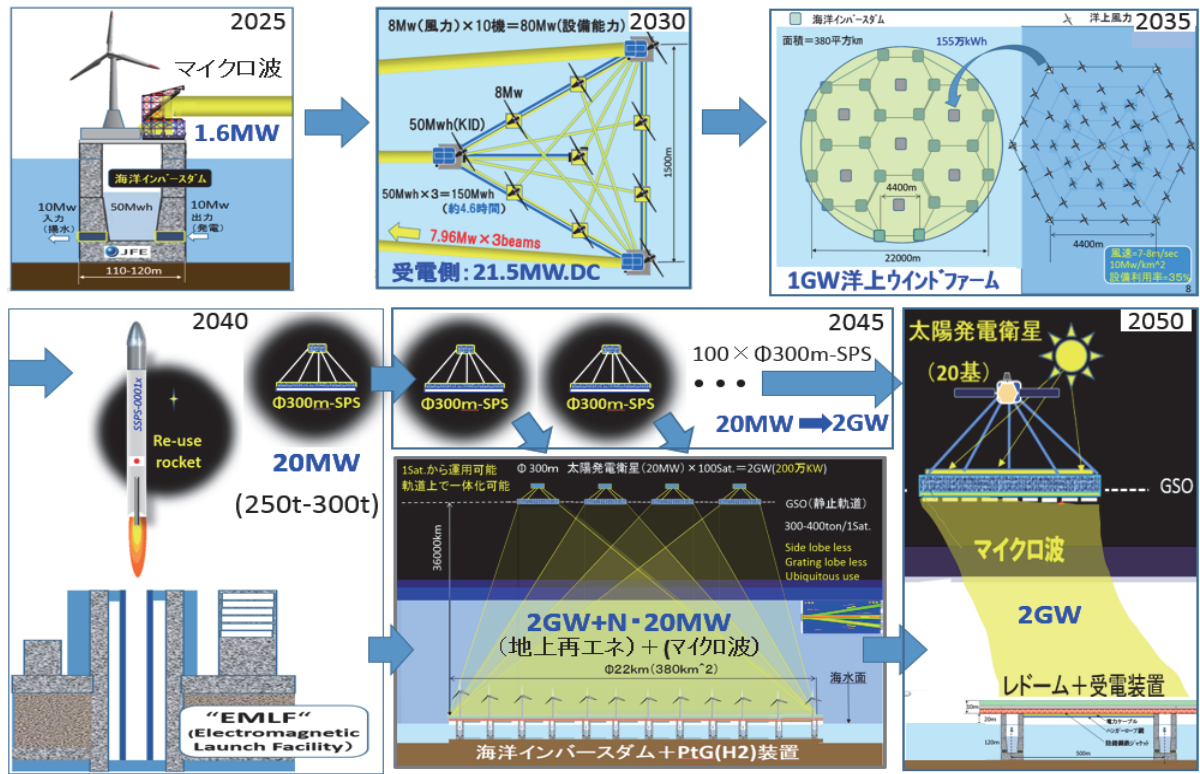


図 15 再生可能エネルギーの進化と拡大（海洋から宇宙まで）

謝辞

本稿を纏めるにあたり、宇宙太陽発電学会、JAXA、京都大学生存圏研究所、海洋インバースダム協会、経済産業省、国交省、水産庁、NEDO、IEEJ、OEAJ、AIST、JAMSTEC、RITE、電力中央研究所、中部電力、九州電力、関西電力など各電力会社より多くのご意見をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 第5次エネルギー基本計画, http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf, 2018/07/03.
- 2) 世界の年平均気温（気象庁）, http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html, 2018/06/14 更新.
- 3) NEDO再生可能エネルギー技術白書, http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html, 2013/12/12.
- 4) 石川容平, “マイクロ波ミラー衛星と海洋インバースダムを中核としたグローバルスマートグリッド構想,” マイクロウェーブ展MWE2014 基調講演, 2014/12/10.
- 5) 石川容平, “大規模再エネを導入拡大する巨大エネルギー備蓄装置（海洋インバースダム）の実用化,” 月刊基

- 礎工, 第498号, pp.88-90, 2015/01.
- 6) 石川容平, “再生可能エネルギーの大規模導入に向けた「次世代電力グリッド網構想」,” エンジニアリングシンポジウム2016, 2016/10/21.
 - 7) 牧野克省, “成層圏滞空型無人機へのマイクロ波無線電力伝送の技術実証に向けた検討,” マイクロウェーブ展MWE2017 ワークショップ, FR4B-4, 2017/12/01.
 - 8) 柴田善朗, “我が国におけるPower-to-Gasの可能性,” エネルギー経済, 第42巻, 第1号, pp.32-49, 2016/03.
 - 9) H. Matsumoto, “Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan,” IEEE Microwave Magazine, vol.3, no.4, pp.36-45, 2002.
 - 10) N. Shinohara, “Power without wires,” IEEE Microwave Magazine, vol.12, no.7, pp.S64-S73, 2011.
 - 11) P.E. Glaser, “Power from the sun: its future,” Science (New York, N.Y.), vol.162, no.3856, pp.857-861, 1968.
 - 12) W. Brown, “Experiments in the transportation of energy by microwave beam,” IRE International Convention Record, vol.12, pp.8-17, 1964.
 - 13) K. Hashimoto, S. Nijima, M. Eguchi, and H. Matsumoto, “Optimization of uniformly excited phased array for microwave power transmission,” IEICE Technical Report, SPS2005-09, pp.23-30, 2005.
 - 14) 齊藤孝, 前川和彦, 佐藤正雄, 中村修治, 佐々木謙治, 三原莊一郎, “宇宙太陽光発電システムのためのマイクロ波電力伝送地上試験,” WPT研究会, WPT2014-109, 2015/03/25.
 - 15) T. Matsumuro, Y. Ishikawa, T. Mitani, and N. Shinohara, “An Effective Design Method of Low-leakage Microwave Beam for Long-distance Wireless Power Transmission,” IEICE Transactions on Electronics, vol. J99-C, No.12, pp. 634-645, 2016/12.
 - 16) 小紫公也, 福成雅史, “マイクロ波ロケットの現状と展望,” J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.5, 2016.
 - 17) 矢守章, “電磁飛翔体加速装置開発の歩み,” 宇宙科学研究所報告, 第117号, 2012/02.
 - 18) 長友信人, “SPS2000のシステムコンセプトとあるべき展開,” 宇宙科学研究所報告, 第43号, 2001/03.
 - 19) Y. Ishikawa, “The Pacific Rim Nations Family in Asia and Space Solar Power System,” 2012 IEICE Thailand-Japan Microwave (TJMW2012) Proc., Keynote talk2, Bangkok, 2012/08.
 - 20) T. Matsumuro, “Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission,” Ph. D thesis, Kyoto University, 2017/03/23.
 - 21) 松室堯之, 石川容平, 柳ヶ瀬雅司, 篠原真毅, “両側レトロディレクティブシステムによる自己収束ビーム形成の基礎検討,” WPT研究会, WPT2017-38, 2017/10.

著者 プロフィール



石川 容平 (Yohei Ishikawa)

＜略歴＞1972 年名古屋大学大学院理学研究科修士課程修了/1994 東北大学工学研究科博士終了、博士（工学）/2003(株)村田製作所取締役執行役員・先端技術開発センター長/2005 同社シニアフェロー・次世代技術研究所所長/2009 京大生存圏研究所客員教授/2011 京大生存圏研究所特任教授/2014(一社)海洋インバースダム協会会長, 現在に至る。

＜研究テーマ抱負＞2050 年マイクロ波電力伝送で宇宙から世界に究極の再エネを届け, 海域には海洋インバースダムを核にしたエネルギー・淡水センターを構築すること。＜趣味＞大麦パン・洋菓子作り、ピアノ