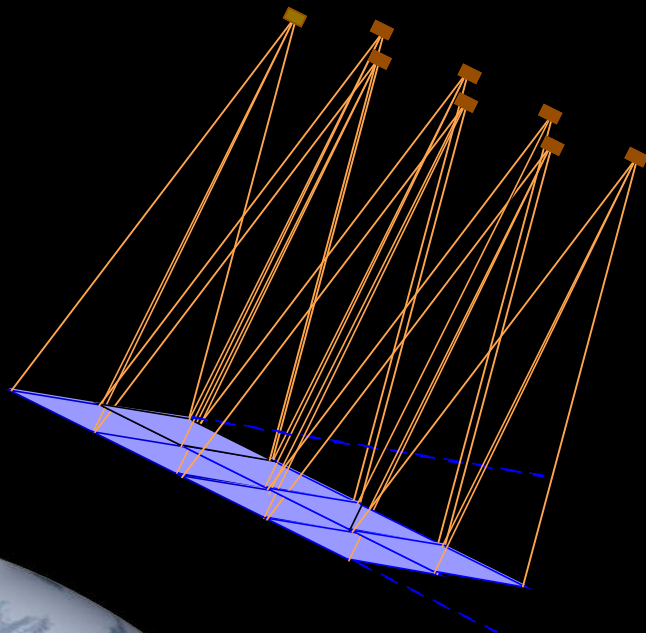
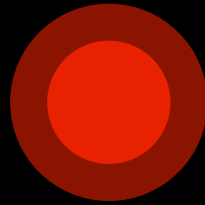


宇宙発電所の23の質問

—授業でよく出る質問—



2020年4月改定
2015年8月

宇宙発電所

宇宙発電所の23の質問(1/2)

—授業でよく出る質問—

1. 宇宙発電所とはどのようなものですか？
2. 太陽のエネルギーを使った発電所には、どのような良い点があるのですか？
3. 宇宙の太陽光発電所は、地上の太陽光発電所と比べて、どのような良い点があるのですか？
4. 宇宙発電所は、宇宙のどこに作るのですか？
5. 宇宙発電所を作るには、どのような技術が必要ですか？
6. 送電する方法として、マイクロ波とレーザーでは、どちらが良いのですか？
7. レーザーは拡がらないと思いますが、マイクロ波は拡がってしまうので、狙った受電所に電力を送れないのではないのですか？
8. 宇宙発電所はどうやって建設するのですか？
9. どのようなロケットで資材を宇宙に運ぶのですか？
10. 宇宙発電所を、今でも混雑している静止衛星軌道につくることができるのですか？
11. 宇宙発電所を作るにはたくさんのお金がかかり、電力の値段が高くなりませんか？

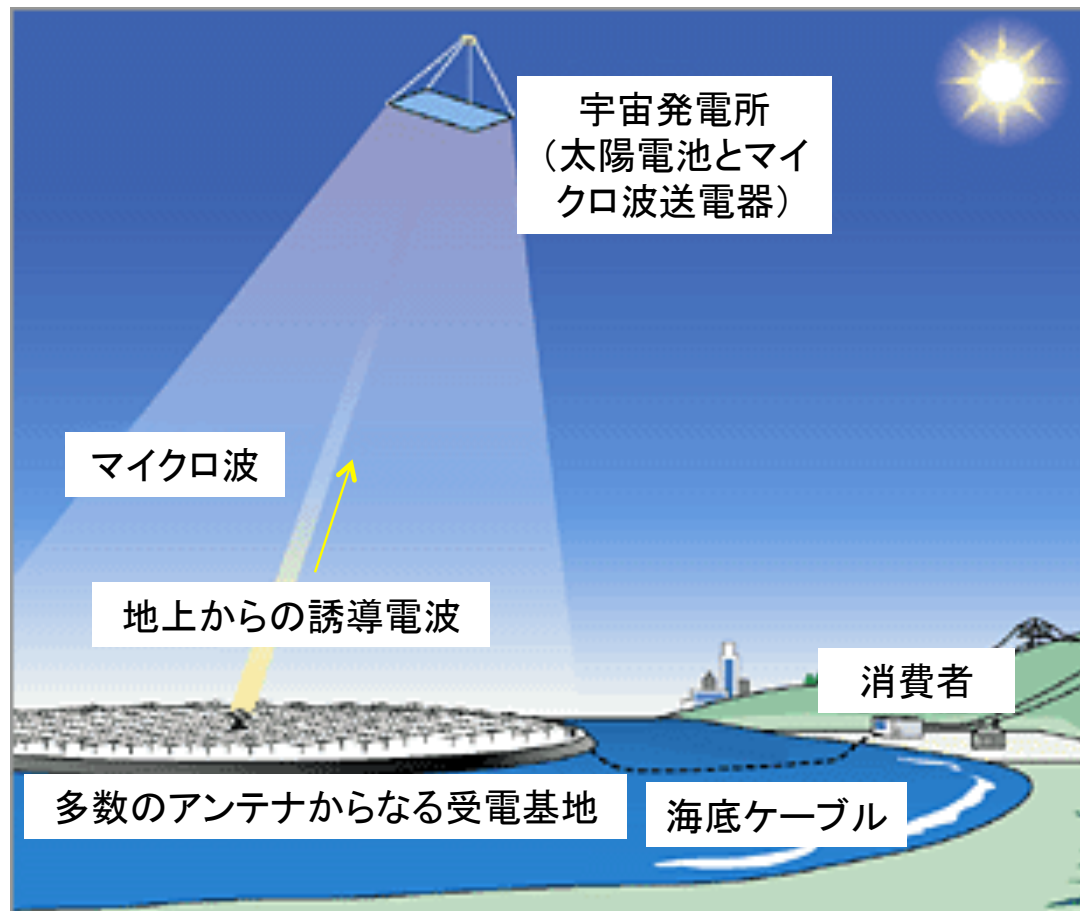
宇宙発電所の23の質問(2/2)

—授業でよく出る質問—

12. デブリが衝突して発電所が壊れませんか？
13. 寿命はどれだけあるのですか？
14. 寿命がきたらどうするのですか？宇宙のゴミとなるのですか？
15. 宇宙発電所は安全ですか？
16. マイクロ波により、電離層が加熱されたり、穴があいたりしませんか？
17. 宇宙から電力を送ると、より多くのエネルギーが地球に入るので地球の温度が上がりますか？
18. 宇宙発電所はいつできるのですか？
19. 宇宙発電所は日本でも研究されているのですか？
20. 日本では、どこで、どのような研究が行われているのですか？
21. 世界ではどのような研究が行われているのですか？
22. 日本だけで開発するのですか、あるいは国際協力で開発するのですか？
23. 宇宙発電所ができると社会は変わりますか？

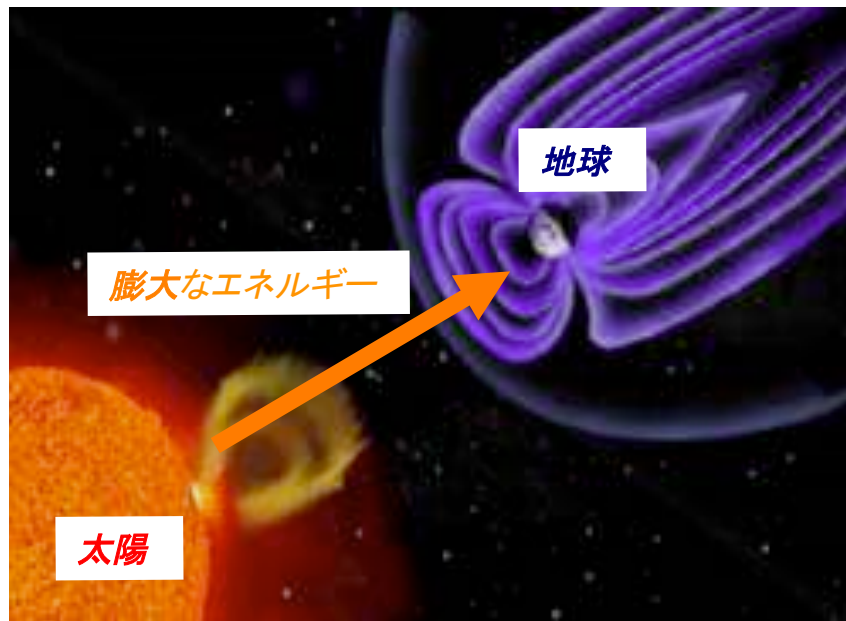
1. 宇宙発電所とはどのようなものですか？

ふんだんな太陽エネルギーのある**宇宙空間で、太陽電池を使って発電する発電所**です。発電した電力は、マイクロ波やレーザーを使って地上に送ります。



2. 太陽のエネルギーを使った発電所には、どのような良い点があるのですか？

太陽から地球へは、私たち人類が使用している全てのエネルギーの1万倍ものエネルギーがとどいています。この太陽エネルギーを使って太陽電池で発電すれば、**地球環境に悪い影響を与えることなく(二酸化炭素などを出すことなく)、ほぼ永久的にエネルギーを得ることができます。**



石炭や石油、天然ガス、ウランは、50～150年以内に資源が無くなると考えられます。

石炭や石油、天然ガスによる発電は地球環境に影響のあるCO₂を出します。

原子力発電は安全性と廃棄物の処理に心配があります。

3. 宇宙の太陽光発電所は、地上の太陽光発電所と比べて、どのような良い点があるのですか？

地上の太陽光発電所



雨や曇の日がある。



夜がある

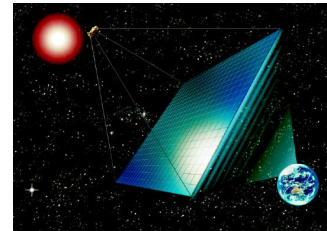


広い土地を探すのが大変

宇宙の太陽光発電所



雨が降ったり曇ったりしない。



夜がない



宇宙は広い

比較

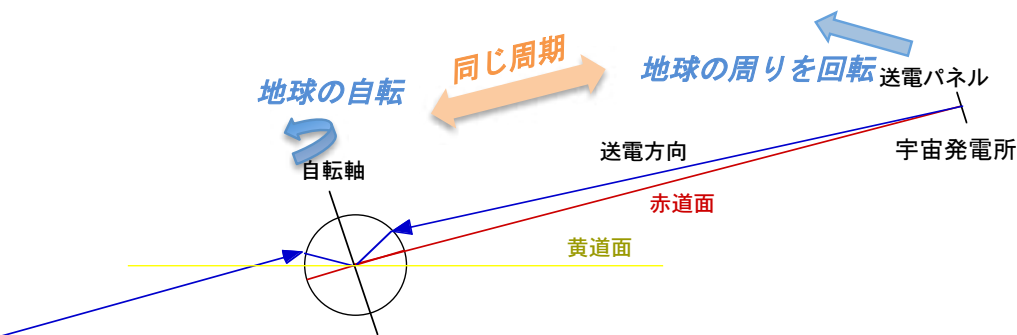


太陽からのエネルギーが多くとれる、安定している！

4. 宇宙発電所は、宇宙のどこに作るのですか？

実用フェーズでは、静止衛星軌道に作るという考え方が一般的です。

静止衛星軌道上（高度約36,000km）に作れば、地上のある場所（例えば日本）から見ていつも同じ方向に静止して見えるので、同じ発電所からいつも電力を受け取ることができます。それ以外の軌道では、宇宙発電所の位置が時間とともに動いてゆき、見えなくなる時間帯ができてしまいます。その場合でも沢山の宇宙発電所があれば次々に切り替えて、地上の同一地点にいつも電力を送ることが可能ですが、やはり、静止衛星軌道が便利です。ただし、実用前の試験的な運用では、到達しやすいもっと低い軌道も使用されるでしょう。



静止衛星軌道での地球周りの回転の周期と、地球の自転の周期は同じ(1日)なので、地球からみれば宇宙発電所はいつも同じ方向に見えます。

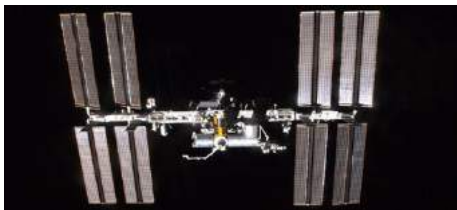
軌道	これまで検討された軌道例	軌道の特性	受電頻度	送電アンテナのサイズ	輸送コスト
静止衛星軌道	36,000km	常時可視	常時	大(低軌道の数十倍)	高
太陽同期軌道	軌道傾斜角 100度程度 LEO	常時日照	1回/1日(軌跡が交差する場合は2回/日)	中	中
位相同期低高度軌道	軌道傾斜角 90度以下 高度370km	日陰あり	1回/数日	小	低
低高度赤道軌道	1,100km	最大日陰率1/3	約2時間の間隔	小	低

宇宙発電所の軌道の候補

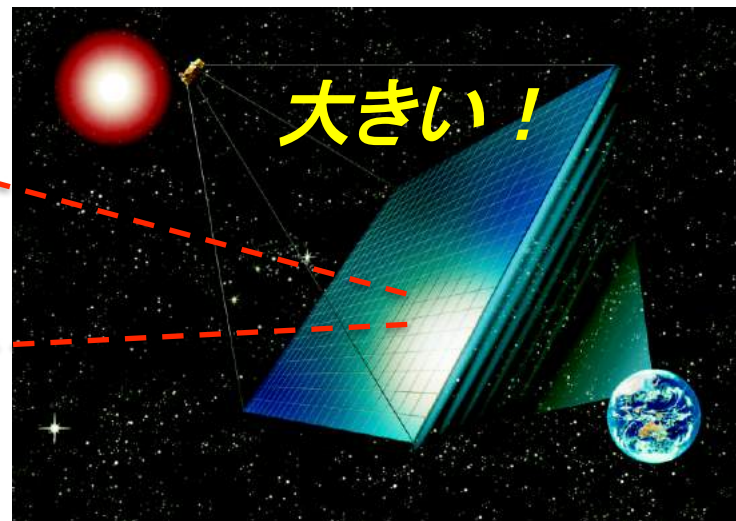
5. 宇宙発電所を作るには、どのような技術が必要ですか？

ふつうの地上の発電所の出力は、大きいもので100万kWです。この規模の宇宙発電所の大きさは、1辺の長さがキロメートル一位になります。重さも1万トンをこえます。ですから、宇宙発電所を作るには、宇宙に大きな構造物を作る技術と、その材料を地上から運ぶための安いロケットの技術が必要です。また宇宙から地上の受電所に、正確に高い効率でマイクロ波またはレーザーで電力を送る技術も必要です。

今私たちが持っている
最大の宇宙の構造物



国際宇宙ステーション 100m サイズ



太陽発電衛星 1-2 km サイズ

6. 送電する方法として、マイクロ波とレーザーでは、どちらが良いのですか？

現在はマイクロ波の方が有利と考えられています。

一般に、マイクロ波は電波、レーザーは光と呼ばれますが、どちらも電磁波の一種で、波長が違うだけです。波長の長いマイクロ波は雲があっても通過できますが、波長の短いレーザーは雲があるとさえぎられます。ですから雲があっても少々の雨が降っても伝わることのできるマイクロ波の方が、雲があるとさえぎられるレーザーよりも、効率や信頼性の上で有利です。

ただし電波を送ったり受けたりする装置の大きさは波長に比例するので、装置の大きさの点から言えば、装置を小さくできるレーザーが有利です。現在は天候に影響されないマイクロ波の方式が主流ですが、小型化の可能なレーザーについても研究が進められています。最終的には安全性と電力の値段から、選択が行われます。電力の使用方法や状況に応じて、両者が使い分けられる場合もあるかも知れません。

無線送電方法	マイクロ波	レーザー
周波数／波長	～数 GHz	～1 μm
電力変換	太陽光-DC-マイクロ波…DC	太陽光-DC-レーザー…DC 又は太陽光-レーザー…DC
電力変換効率	高	低
システムの大きさ	大	小
ビームのエネルギー密度	小(安全側)	大
既存インフラとの電磁適合性	低	高
送電の天候依存性	小	大
技術の成熟性	大	小
適用	宇宙-地上	宇宙-宇宙、宇宙-地上

優位な点

7. レーザーは拡がらないと思いますが、マイクロ波は拡がってしまうので、狙った受電所に電力を送れないのではないですか？

いいえ、技術的には狙った受電所に正確にマイクロ波を送ることができます。

電磁波の拡がり角は右のような式で表すことができるので、マイクロ波でも、大きな送電アンテナを使えばレーザーと同じような拡がり角の小さなビームを作ることができます。マイクロ波の場合、直径1kmのアンテナを使えば、直径1cmの大きさのレンズから出て行くレーザーと同じ位の拡がり角のビームを作ることができます。

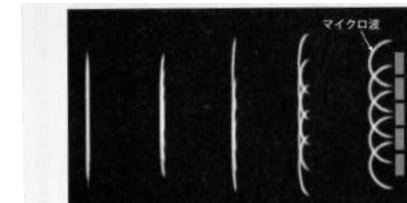
レーザーの場合、光学レンズが小さいので、光学部を機械的に動かすことによりねらった方向にレーザービームを向けることができますが、マイクロ波の場合kmもの大きさのアンテナは、大きすぎて正確にねらった方向に向けることはとても難しいです。マイクロ波の場合kmの大きさの1つの大きなアンテナを使うのではなく、右の図のように、沢山の小さなアンテナを並べて、それぞれのアンテナからの電波の位相を制御することにより、アンテナそのものを動かさなくても、マイクロ波の出て行く方向を制御することができます。このようなアンテナをアレイアンテナと呼びます。

電磁波の拡がり角～

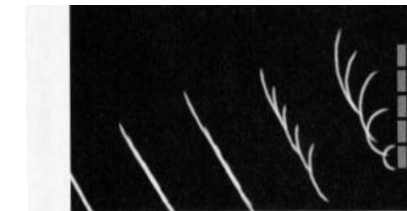
$$\frac{\text{電磁波の波長}(\lambda)}{\text{アンテナ(レンズ)の大きさ}(D)}$$



一つの小アンテナから出て行く電波



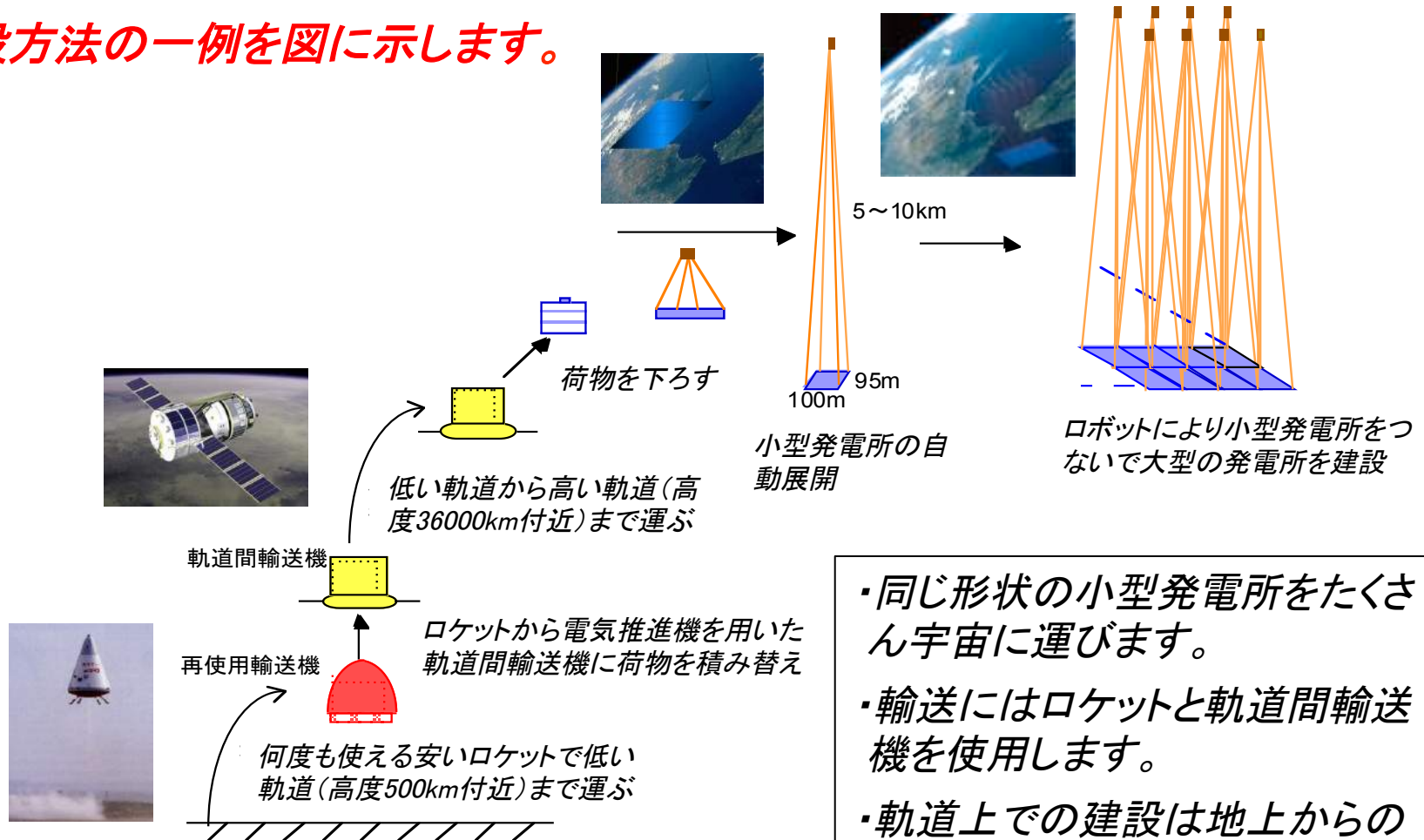
多数の小アンテナから出て行く電波(同じ位相の場合)



多数の小アンテナから出て行く電波。アンテナ間の位相を規則正しく制御することにより、電波の出て行く方向を変えることができる。

8. 宇宙発電所はどうやって建設するのですか？

建設方法の一例を図に示します。



- ・同じ形状の小型発電所をたくさん宇宙に運びます。
- ・輸送にはロケットと軌道間輸送機を使用します。
- ・軌道上での建設は地上からの指令で動くロボットで行います。

9. どのようなロケットで資材を宇宙に運ぶのですか？

地上から低軌道(高度500km程度)までは、何度も使用できる再使用ロケットを使います。何度も使用できるため、従来の使い捨てロケットよりも安く、高い頻度で打ち上げることができます。

低軌道から、静止衛星軌道までは電気推進機を利用した軌道間輸送機を用います。小惑星探査機「はやぶさ」でも使用された電気推進機は、そのエネルギーを太陽から取得するため、運転するための作動ガスは必要ですが、ロケットのような燃やすための燃料は不要です。



JAXAで試験されている垂直離着陸型の再使用型観測ロケット



イギリスで検討されている水平離着陸型の再使用ロケットSkylon



国際宇宙探査協働グループのパンフレットで紹介されている大型軌道間輸送機のイラスト

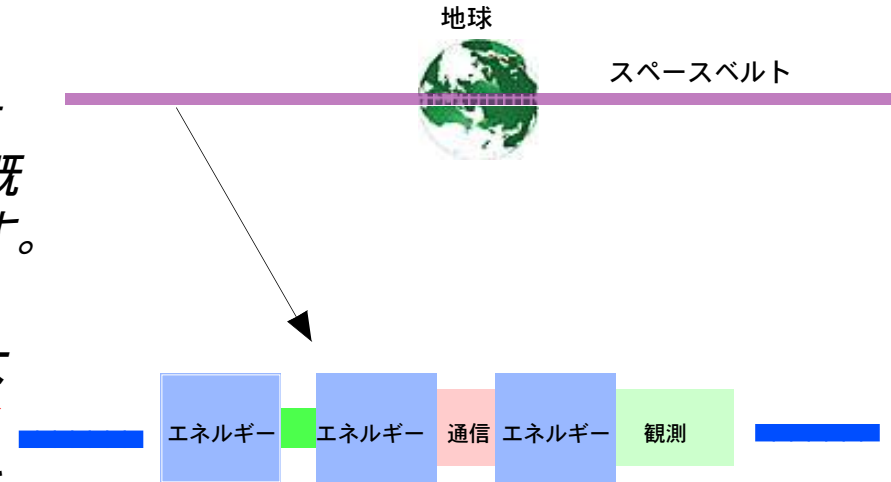
10. 宇宙発電所を、今でも混雑している静止衛星軌道につくることができるのですか？

はい、できます。

静止衛星軌道の衛星は、地上から見ると静止しているように見えるので、通信や放送を行うのに便利な軌道です。そのため既に多くの衛星がこの軌道を使用しています。

これらの衛星の隙間をぬって太陽発電衛星を多数配置することは難しいですが、太陽発電衛星は大きいので**これらの衛星機能を太陽発電衛星の一部に組み込むことが可能です。**

また右の図のように、静止衛星上の複合施設として**発電所や通信、放送、観測などの施設を次々とつなげる**こと(スペースベルトと呼びます)により、宇宙発電所と他の静止衛星の共存をはかることができます。将来はホテルなどの滞在施設や宇宙工場もつなげていくことができるでしょう。



静止衛星軌道をまわるスペースベルト全周の14%の領域に、数kmの幅の宇宙発電所を建設すれば、地球上の全ての一次エネルギー(13,000 GW)をまかなうことができる。

11. 宇宙発電所を作るにはたくさんのお金がかかり、電力の値段が高くなりませんか？

いいえ、新しい技術開発により、現在使っている電力のコストと同じ位にできると考えられます。

これまでの研究で、宇宙へ運ぶ輸送費や無線送電に必要な半導体のコストが大きく下がれば、宇宙発電所からの電力の値段は、現在売られている電力の値段に近いものとなることが分かっています。

宇宙への輸送費は現在の1/50以下程度、半導体等の部品コストは現在の数分の1から10分の1位まで下げる必要があります。このためにはこれから多くの研究開発が必要ですが、技術的には到達可能な目標と考えられています。



航空機のように何度でも使用できる低コストのロケットの想像図。

12. デブリが衝突して発電所がこわれませんか？

はい、デブリが当たると、当たったところはこわれますが、発電所全体としての機能には、ほとんど影響がないように設計ができます。

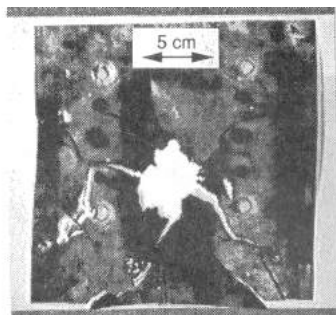
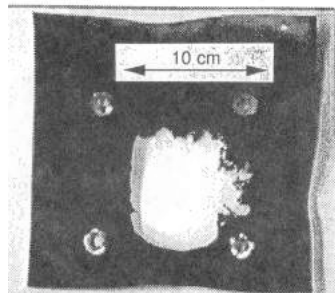
静止衛星軌道でのパネル型構造物への衝突頻度は、
km²あたり、

10 cmサイズ 70年に1回

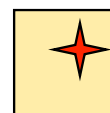
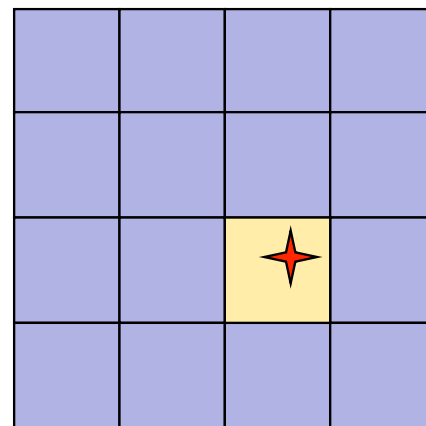
1 cmサイズ 3年に1回

1 mmサイズ 2400回/年

太陽電池のモジュールの大きさを0.5m×0.5mとし、モジュールは1mm以上のサイズの高速体が衝突した時機能が失われるとした場合、破壊が1モジュール内にとどまるように設計すれば、40年間の宇宙塵や宇宙ゴミの衝突による電力ロスが4.8%程度となります。



太陽電池を模擬した薄膜への超高速衝突による破壊の例。宇宙ゴミの衝突速度が大きいので、小さなゴミでもその10倍くらいの大きさに激しくこわれることがあります。



超高速衝突で破壊されたモジュール



健全なモジュール

一部が壊れても他に悪い影響が伝わらないよう設計すれば良い。

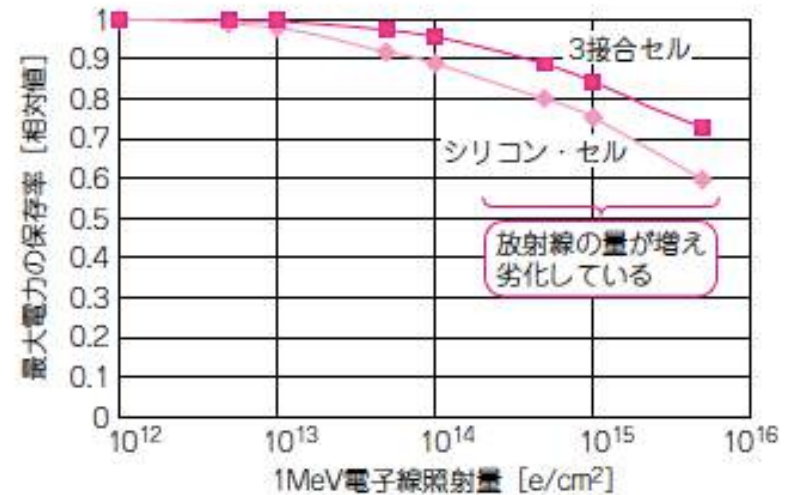
13. 寿命はどれだけあるのですか？

40年程度を目標に設計します。

宇宙発電所の発電能力は、主に、太陽電池の宇宙放射線劣化と第12項で述べたデブリ等による衝突破損で年々低下していきます。宇宙発電所の設計上の**目標は、40年で10%以下の発電性能の劣化**です。

太陽電池の放射線劣化については、現在使用されている宇宙用太陽電池(高効率の化合物半導体タイプ、高価格)では、右図のように、静止衛星軌道上10年間で10-15%程度の劣化があります。今後の研究開発で**40年程度で5%以下の劣化のもの(低価格でかつ軽量)**を目指して研究開発していく必要があります。新しいタイプの薄膜太陽電池では、20年程度で5%以下の劣化に相当するものも報告されるようになっていきます。

デブリについては第12項で述べたようなモジュール化設計の対策で、電力減少量を**40年間で5%以下**にできます。



現在の宇宙用太陽電池の放射線耐性。図中10¹⁵のフルエンスが概ね静止衛星軌道での10年分に相当する。

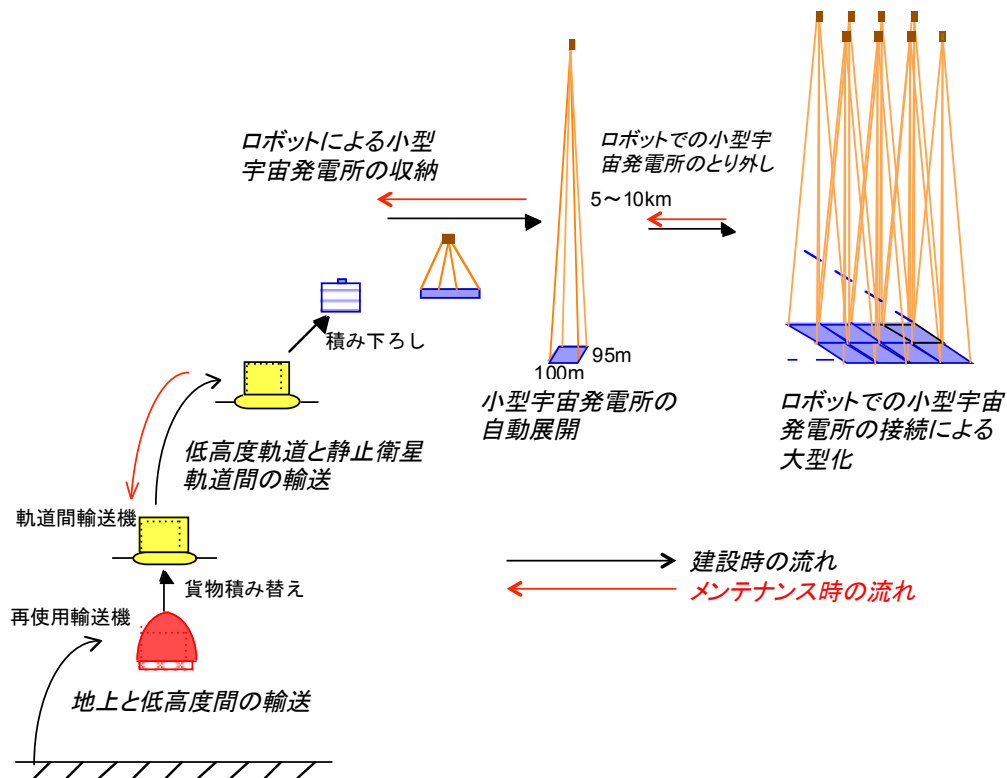
(引用)トランジスタ技術、太陽光発電システム③…人工衛星、野崎幸重、p.137、2010年3月号

14. 寿命がきたらどうするのですか？宇宙のゴミとなるのですか？

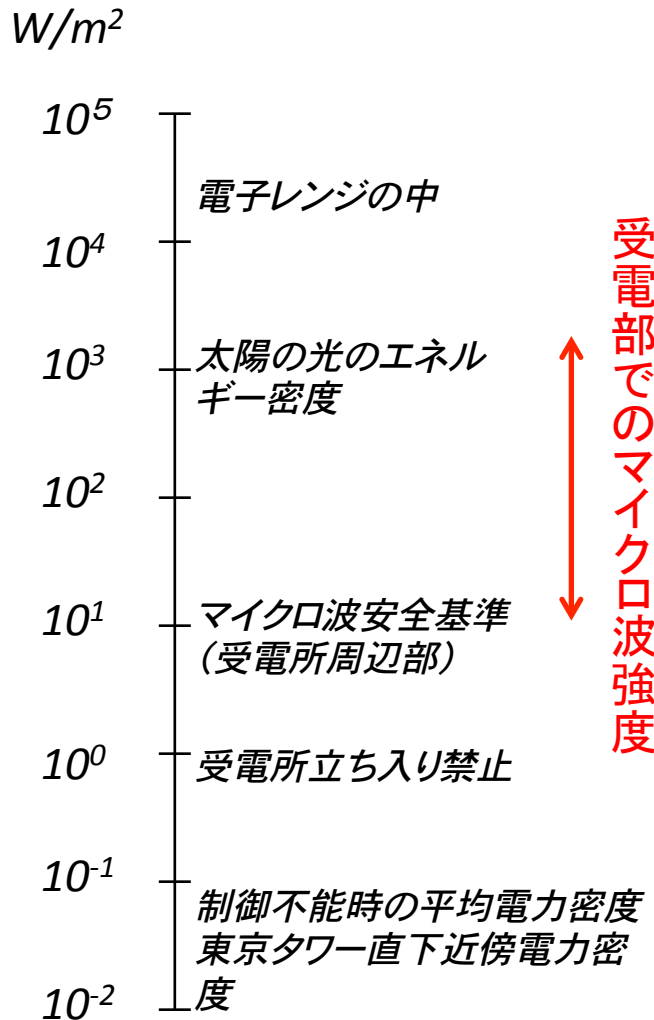
宇宙空間に不要物(ごみ)を一切残さない運用を考えています。

宇宙発電所は、寿命がきて100%使用できなくなるものではなく、13項で述べたように、40年で10%程度の出力低下となります。この時期に概ね1年程度かけて、古い宇宙発電所を新しいものに置き換えます(メンテナンス)。下の図のように、8項に示した建設手順の逆の手順で、古い小型発電所毎に新しい小型発電所に置き換えます。

古い小型発電所は、新しい小型発電所を運んできた輸送機にのせて地上に持ち帰ります。地上では持ち帰った小型発電所の部品を再生したり交換したりして、新しい小型発電所に生まれかわらせ、再使用します。このようにすれば、宇宙空間に廃棄されるものは一切ありません。このようなりサイクル運用を行うためには、宇宙と地上の間で活発な物資の流れを可能とする低コストの宇宙輸送システムの整備が必要です。



15. 宇宙発電所は安全ですか？



はい、安全な宇宙発電所を実現することが技術的に可能です。

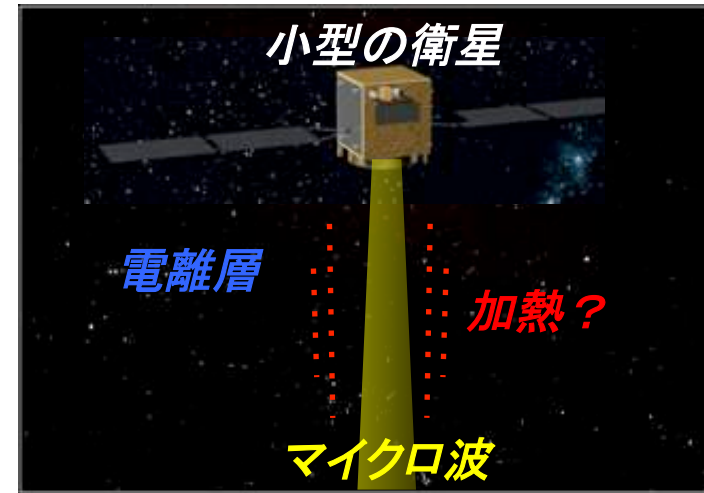
宇宙発電所で多くの人々が心配するのは、マイクロ波の人体への影響です。実際には、左の図にあるように、宇宙から地上に送るマイクロ波の強度は、**中心の最も強いところでも太陽と同じ程度、周辺の強度の弱いところは、人が浴びても問題ないとされる強さ(太陽光の1/100のエネルギー密度)**です。さらにその1/10の強度程度までを、人の立ち入り禁止領域とすることが考えられています。

中心の最も強度の強い場所でも太陽の光程度の強度ですから、**鳥や昆虫や飛行機が送電中のマイクロ波の中を一時的に通過しても、問題はありません。**

16. マイクロ波により、電離層が加熱されたり、穴があいたりしませんか？

はい、理論上は、電離層への大きな影響はないと考えられています。ただし宇宙空間で実験を行い、確認することが必要です。

通常、マイクロ波は、電離層に何の影響も与えず通過します。しかし電力密度の高いマイクロ波の場合は、電離層を加熱する可能性があります。これは専門用語で「非線形相互作用」と呼ばれています。現在の理論では、宇宙発電所からのマイクロ波の電力密度(太陽光と同じくらいの強度)では、強い非線形相互作用は発生せず、電離層に強い影響は与えないと考えられています。ただしこのことは、小さな衛星でも調べることが可能なので、早い段階で確認しておくことが必要です。



小型の衛星を用いた宇宙実験の計画。太陽光程度の強度を持ったマイクロ波が、電離層をどのくらい加熱するか実験して調べる。この計画はまだ認められていない。

17. 宇宙から電力を送ると、より多くのエネルギーが地球に入るので地球の温度が上がりにませんか？

実際には、ほとんど上がりません。

太陽から地球の大気圏にエネルギーは、人類の使用する全てのエネルギーの10,000倍近くあります。入ったエネルギーとほぼ同じ量のエネルギーが地球から宇宙へ出ていきますから(右下図)、地球から出ていくエネルギーも人類の使用する全てのエネルギーの10,000倍近くあります。

仮に、人類の使用するエネルギーの全てが宇宙から余分に地球に入ってきたとしても、全体のエネルギーの出入りの1/10,000の影響しかありません。従って地球の温度への影響は殆どありません(計算すると0.007°C程度となります)。

また実際には、太陽光そのものに0.2%程度の自然の変動があります。人類が使用している全てのエネルギーは、その1/20程度にしかありません。即ち、**自然の太陽光の変動の方が、人類が使用している全てのエネルギーよりはるかに大きい**のです。

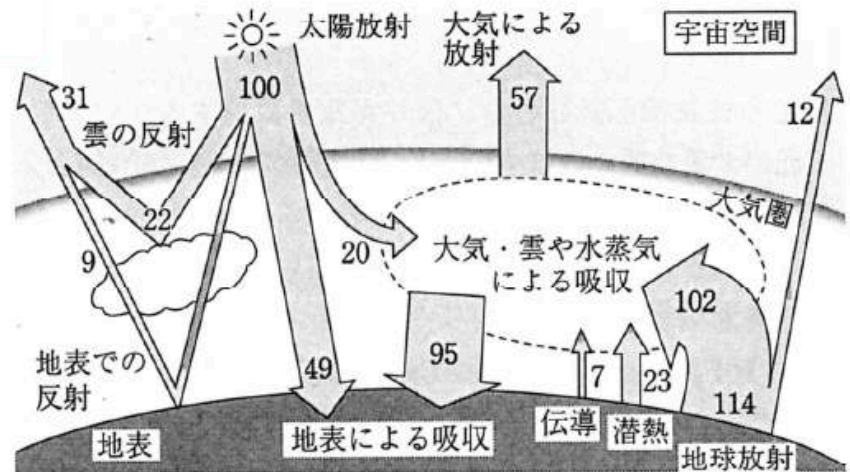


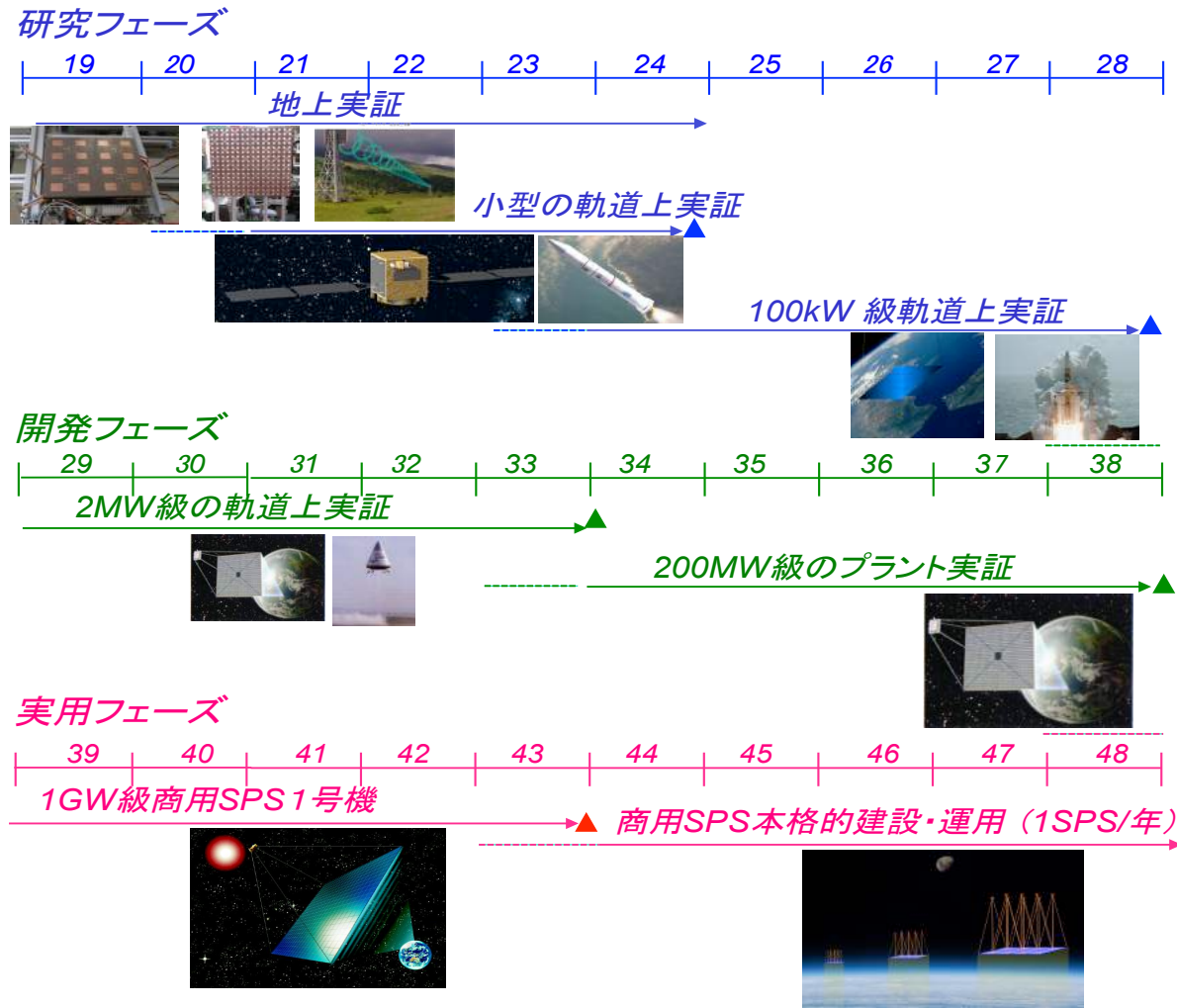
図6-7 地球の熱収支 (大気上端に到達する太陽放射エネルギー量を100とする)

「新しい高校地学の教科書」より

地球へ入る太陽のエネルギーを100とすれば、31が雲や地表の反射、57が大気による熱の放射、12が地球表面からの熱の放射で、宇宙空間へ放出される。即ち、地球大気圏へ入った太陽エネルギーと同じ量のエネルギーが地球から宇宙へ放射される。

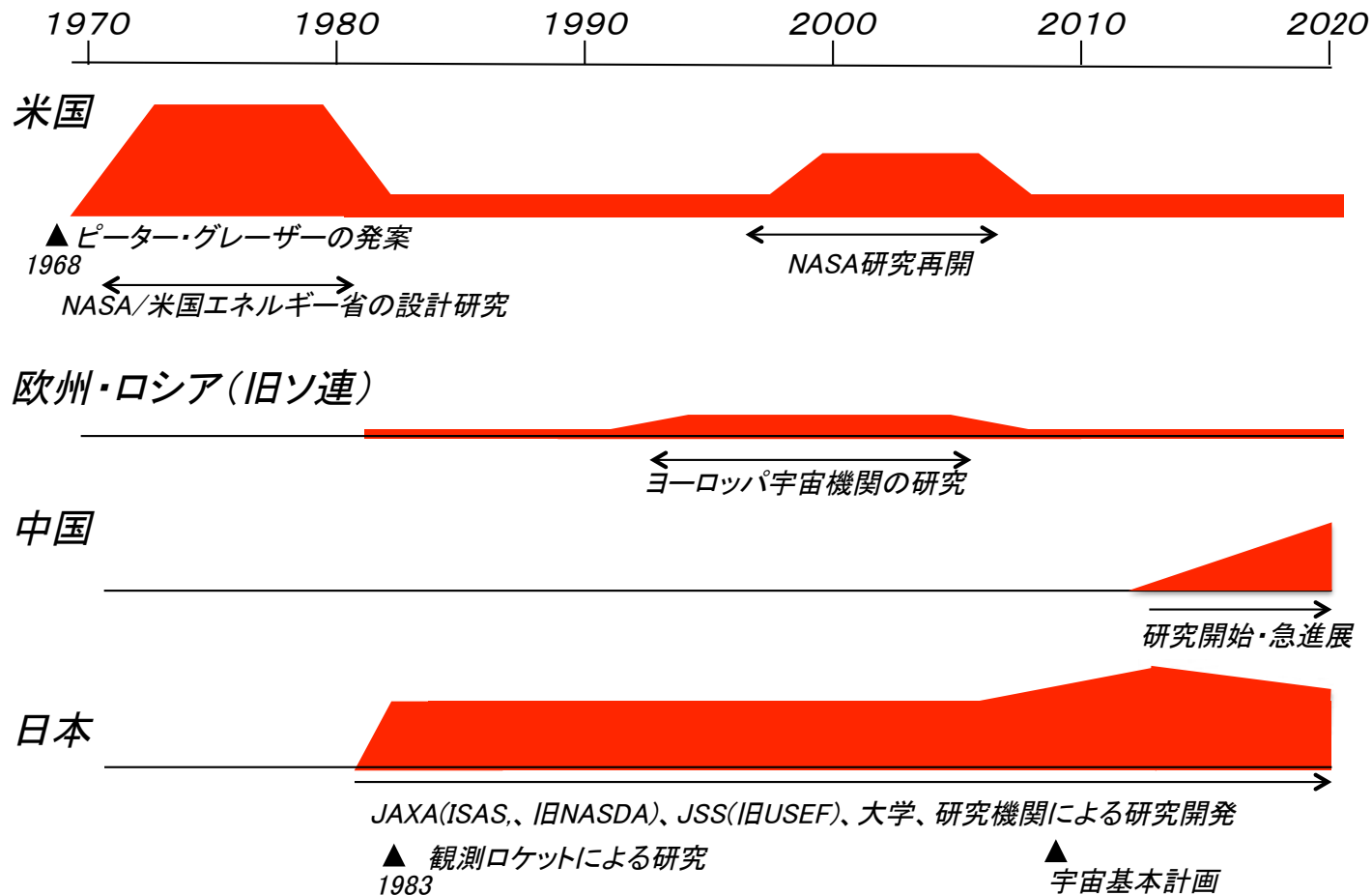
18. 宇宙発電所はいつできるのですか？

下の図のようなスケジュールで研究開発を行えば、**2040年代には実用型の100万KW級の宇宙発電所を実現**することができます。2040年代から次々と宇宙発電所の数を増やしていけば、宇宙発電所は、将来予測されるエネルギー問題、地球環境問題の解決に大きな役割を果たすことでしょう。



19. 宇宙発電所は日本でも研究されているの ですか？

はい、盛んに行われています。下の図は赤い山が高い程、研究開発が盛んなことを示しています。宇宙発電所の研究は、今から50年も前に米国で始まりましたが、現在では、日本が世界で最も活発に宇宙発電所の研究開発を行っています。



20. 日本では、どこで、どのような研究が行われているのですか？

以下が、現在行われている研究の主なものです(宇宙発電所本体)。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)(研究開発部門、宇宙科学研究所):

システム検討、マイクロ波送電、レーザー送電、発電技術、大型構造物、ロボット技術、宇宙での実証実験の検討、開発シナリオの検討

宇宙システム開発利用推進機構(JSS):

システム検討、マイクロ波送電、宇宙発電所技術の民生技術への応用、開発シナリオの検討

大学、研究機関:

マイクロ波送電、レーザー送電、大型構造物、ロボット技術、発電技術、宇宙発電所技術の民生技術への応用

民間会社:

マイクロ波送電、レーザー送電、大型構造物、宇宙発電所技術の民生技術への応用

宇宙発電所を構築するための将来の宇宙輸送系の研究は、主にJAXA, 大学で行われています。

21. 世界ではどのような研究が行われているのですか？

以下のような状況です。

米国: 以前はNASAが組織的な研究を行っていましたが、現在では一部の大学や民間のシンクタンクや軍の研究所が、検討や研究開発を行っています。

ヨーロッパ: 欧州宇宙機関(ESA)の一部の部門や宇宙関連の民間会社が検討や研究開発を行っています。

ロシア: 以前は大学や研究機関が研究を行っていましたが、最近では研究者個人レベルの研究にとどまっているようです。

中国: 10年程度前から研究を開始し、最近では独自の研究成果も国際学会等で報告されるようになりました。

サブオービター(周回軌道に達しない一時的な弾道飛行)を含む再使用型宇宙輸送系の検討や研究開発は、主に米国、ヨーロッパ、日本で行われています。

22. 日本だけで開発するのですか、あるいは国際協力で開発するのですか？

ある時期からは、国際協力で開発することが前提です。

人類共有の宇宙空間を利用することから、**宇宙条約等国際法に基づき、全ての国の利益になるような国際協力の枠組みのもとで、開発を行うこと**になります。18項で示した大型衛星による実証レベルまでは、**単独の国あるいは興味を持つ複数の国の共同で行われると予想されますが、その後の開発フェーズ以降の本格的な開発は、国際協力の枠組みで、開発、運用、評価が行われることになるでしょう。**

实用段階では**商用システムとしての側面を持ちながらも、管理、開発及び配分は、国際制度により国際社会全体により行われるものと考えられます。**



23. 宇宙発電所ができると社会は変わりますか？



はい、変わります。宇宙発電所が実現したら…

地球環境に優しいエネルギーがふんだんに得られます。
傷ついた地球環境が修復され、自然そのままに維持されます。
エネルギー資源をめぐる国際間の争いが終わります。
豊富なエネルギー資源がもたらす穏やかで創造的な社会
が実現します。

…そして、新しい社会の活力による宇宙への発展が生み出す
新しい文明と文化が現れるでしょう。