

宇宙

宇宙空間で電気をつくる

— 宇宙太陽光発電と地球のエネルギー問題 —

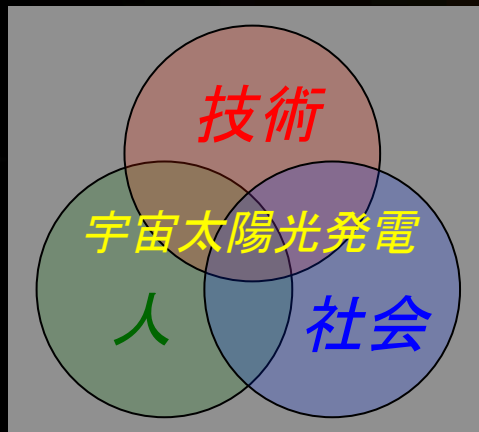
2015年10月




本日の講座の内容

1. 宇宙太陽光発電とは、どのようなもの？
その背景、技術、実現の見通し
2. どんな人たちが研究している？
係わる研究者や学会設立の動き
3. 実現したらどんな未来社会が実現する？
社会的受容とリスクは？
社会の持続的発展と人類の宇宙進出への寄与


この講座では、宇宙太陽光発電をめぐる、技術、人、社会のお話をします。





1.宇宙太陽光発電とは、どの ようなもの？

- その背景、技術、実現の見通し -

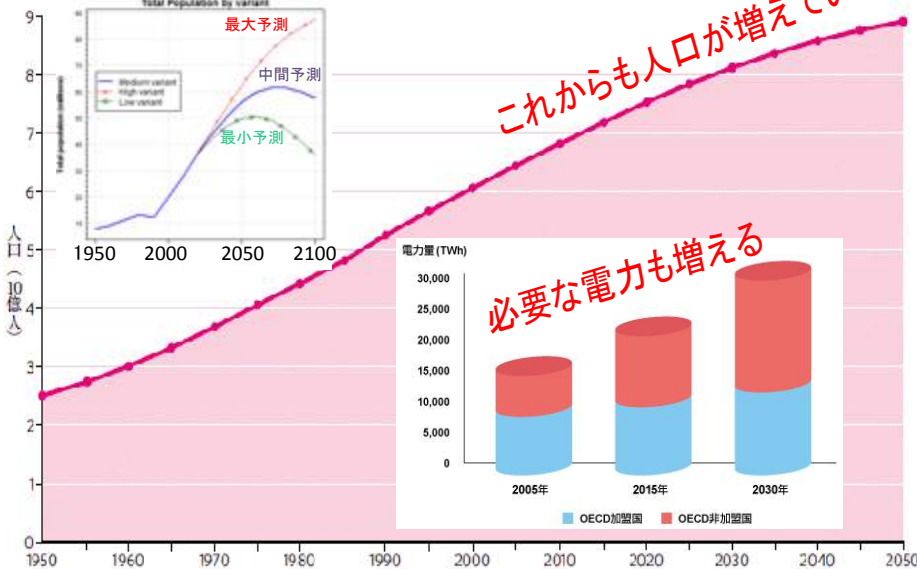
A bright star with a lens flare effect is positioned in the upper left corner of the image. The background is a dark, starry space. On the right side, the curved horizon of the Earth is visible, showing blue oceans, white clouds, and brownish-green landmasses. The text is overlaid on the left side of the image.

**私たちが直面している
エネルギー問題と
地球環境問題**

人口問題とエネルギー問題

人口は増大し続け、必要なエネルギーは増え続ける

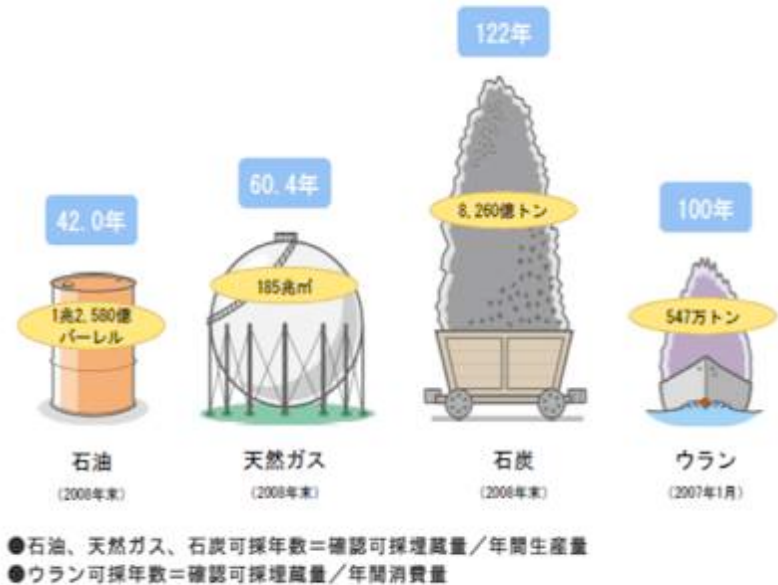
国連人口推計 (1950~2050年)



化石燃料の現状

地球が太陽エネルギーを生物遺骸の形で数億年かけて蓄積。人類はこれをわずか100~150年で使い切ろうとしている。

一方、人類の使用している全てのエネルギーの約80%は化石燃料から。化石燃料などからのエネルギー資源には限りがある。



出典：資源エネルギー庁「原子力2010」



地球が1日かけてためた化石燃料のエネルギーを、人類は1日の最期のわずか1秒で使い尽くそうとしている！

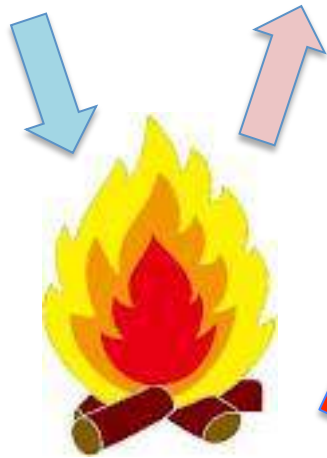
でも、まだ100年もつのなら、まあ、自分は大丈夫か…… ところが、そうではありません！

化石燃料を使うと二酸化炭素が発生

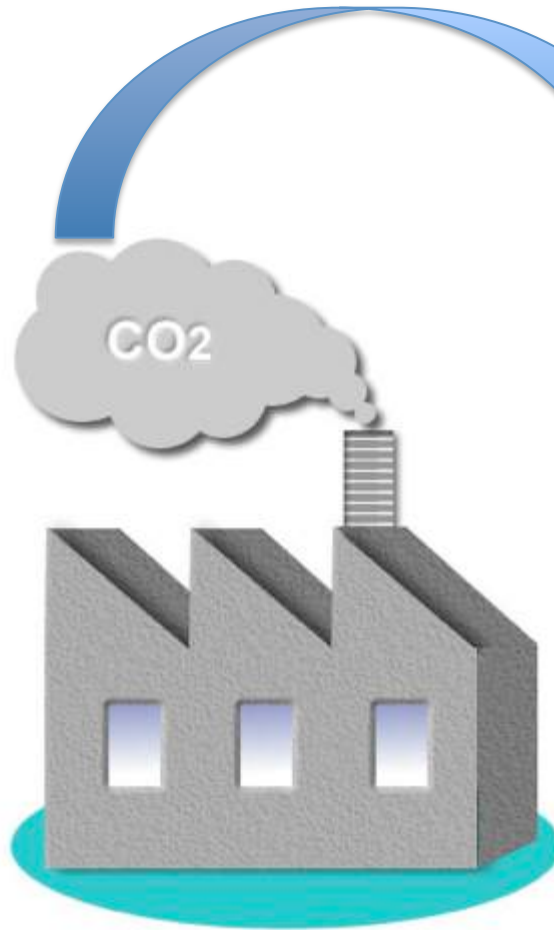
空気中の二酸化炭素は植物で酸素にかえられる

燃やすということは酸素を使って、エネルギーを取り出すこと。その時二酸化炭素が発生する。

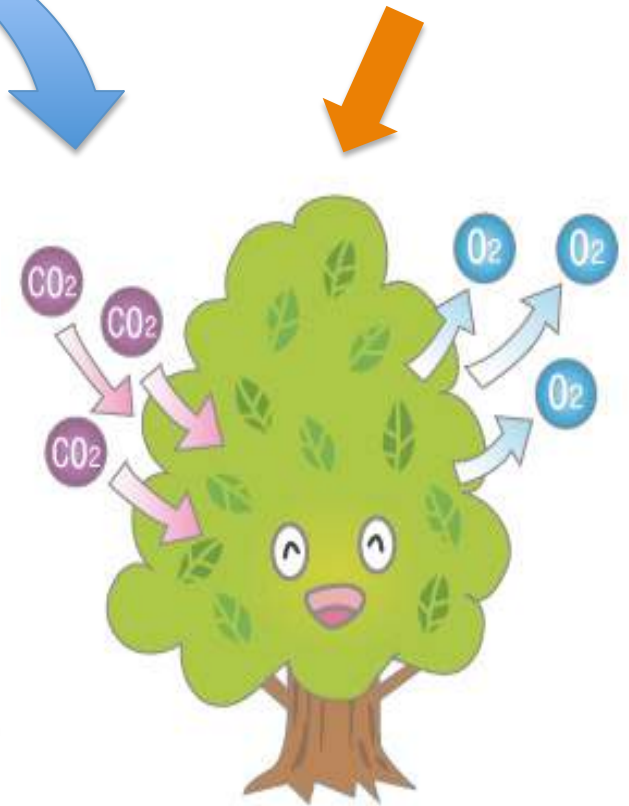
酸素 二酸化炭素



熱(エネルギー)

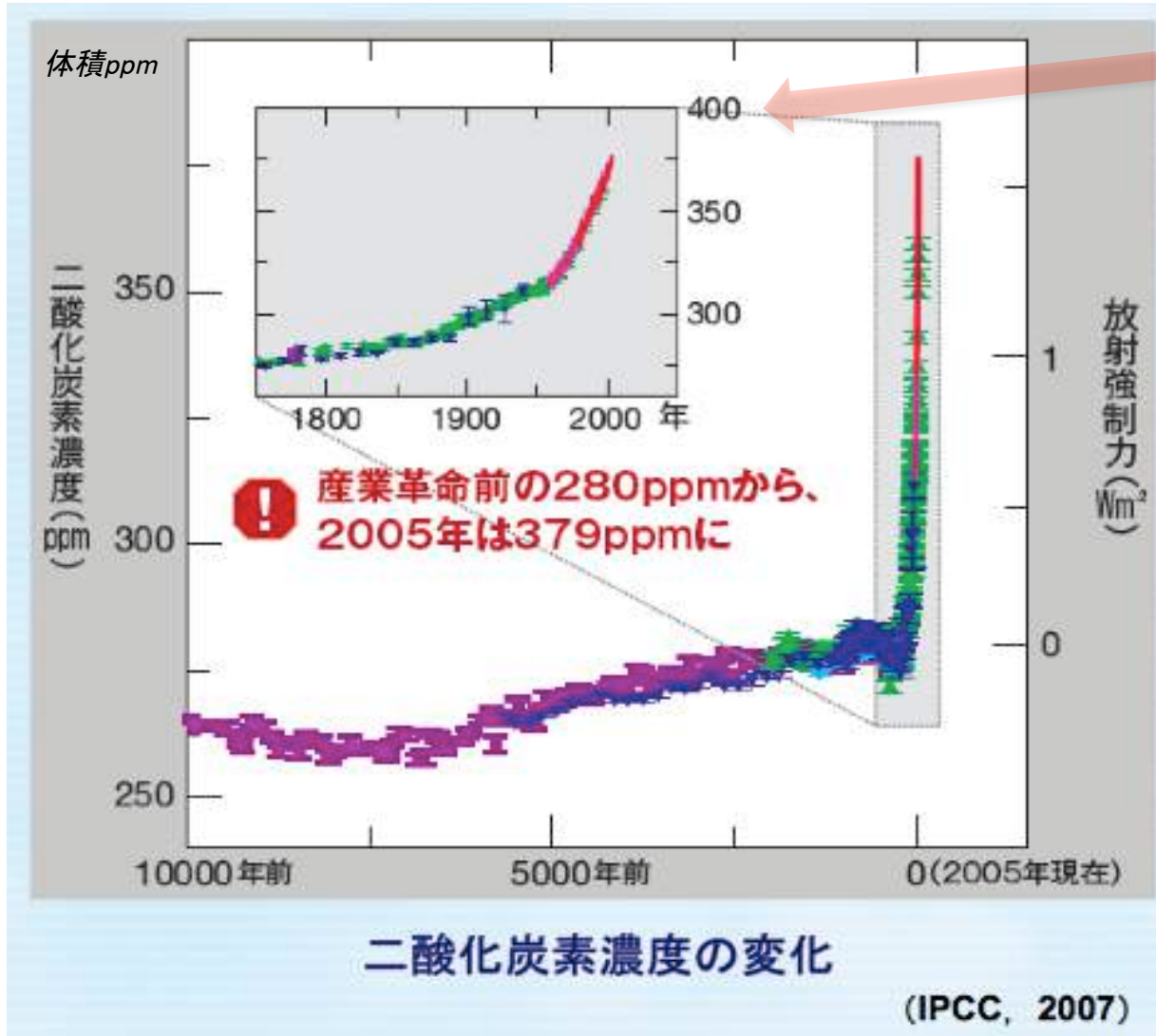


太陽光

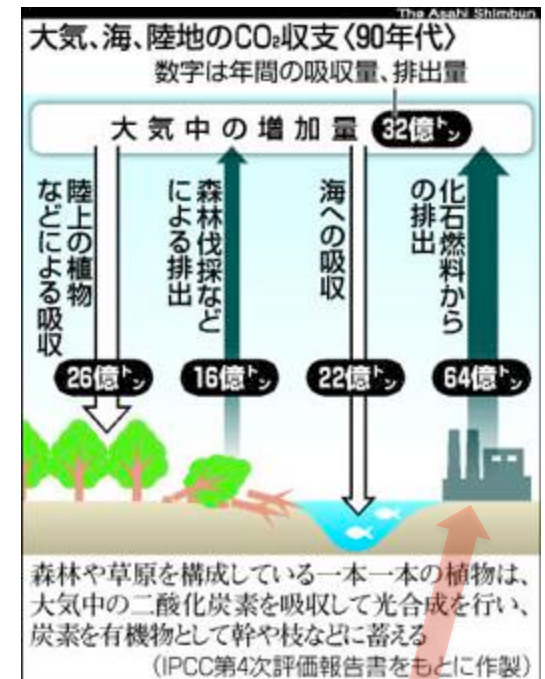


二酸化炭素を出し過ぎると、空気中の二酸化炭素の濃度が増える。

空気中のCO₂濃度の問題



ハワイでは、2013年に、400 ppmを越えた！



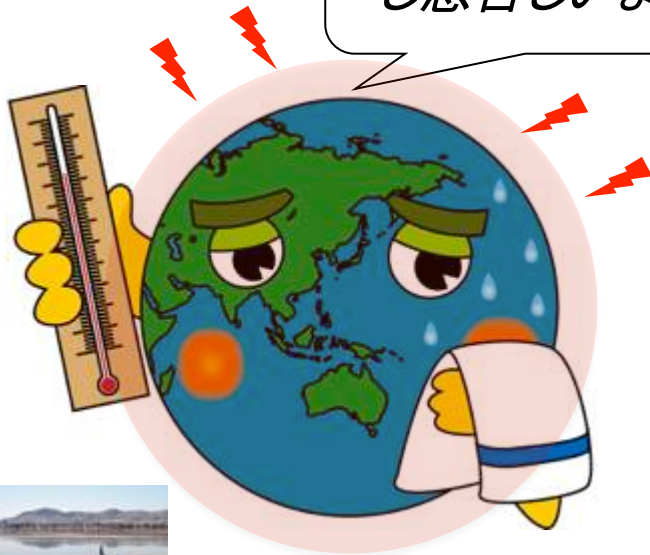
CO₂増加の主原因は化石燃料の使用

地球環境問題：人類は地球にとってウイルス？



氷河融解

まいったな。熱いし息苦しいよ。



地球



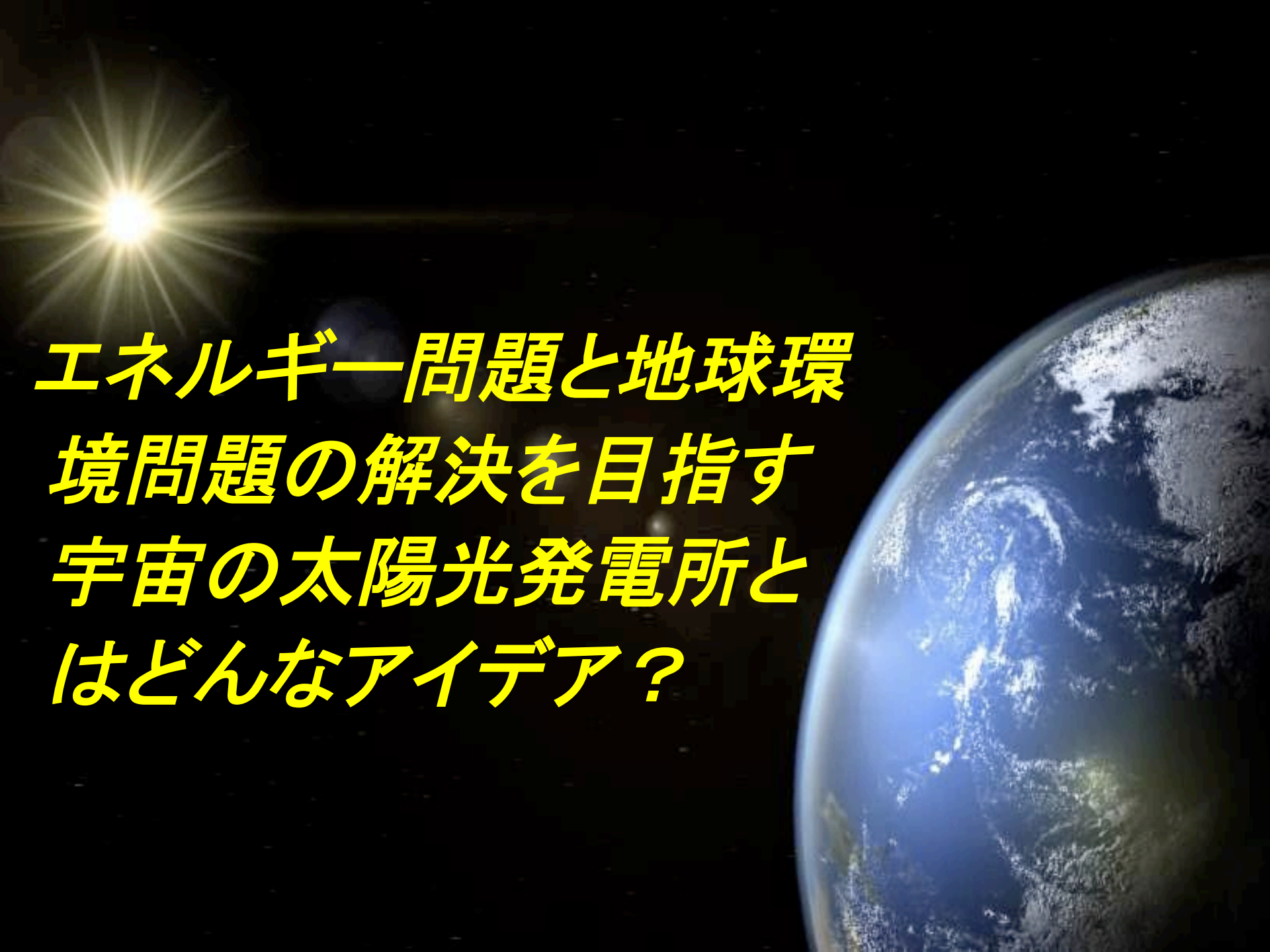
砂漠化

大丈夫。もっと熱が出ればウイルス(人類)はいなくなるさ。



他の惑星

注意：国連の「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」では、地球の温暖化を予測しているが、今後寒冷化すると考えている研究者も多い。いずれにしても、大気中の人為的な(不自然な)CO₂濃度の増大は地球環境にとって望ましくない。

A bright sun in space with the Earth visible on the right side. The sun is a bright yellow-white star with a lens flare effect, positioned in the upper left. The Earth is a blue and white planet with visible clouds and landmasses, occupying the right half of the frame. The background is a dark, starry space.

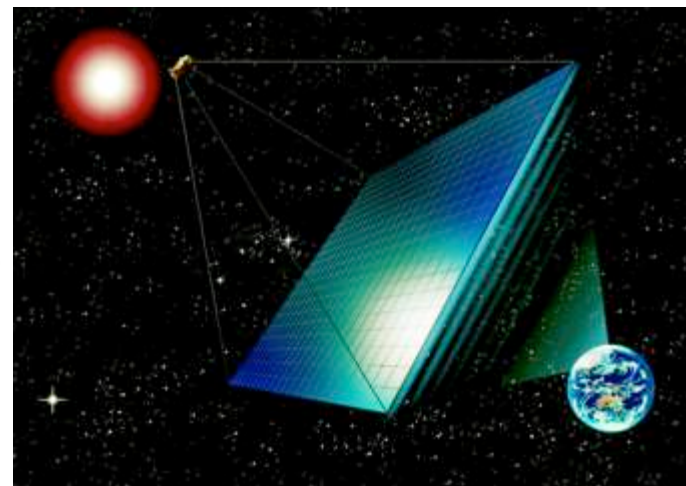
**エネルギー問題と地球環境問題の解決を目指す
宇宙の太陽光発電所とはどんなアイデア？**

宇宙の太陽光発電所とはどのようなアイデアか？

小分けして何度も使用できるロケットで宇宙に運ぶ。



太陽光発電所を宇宙で組み立てる。



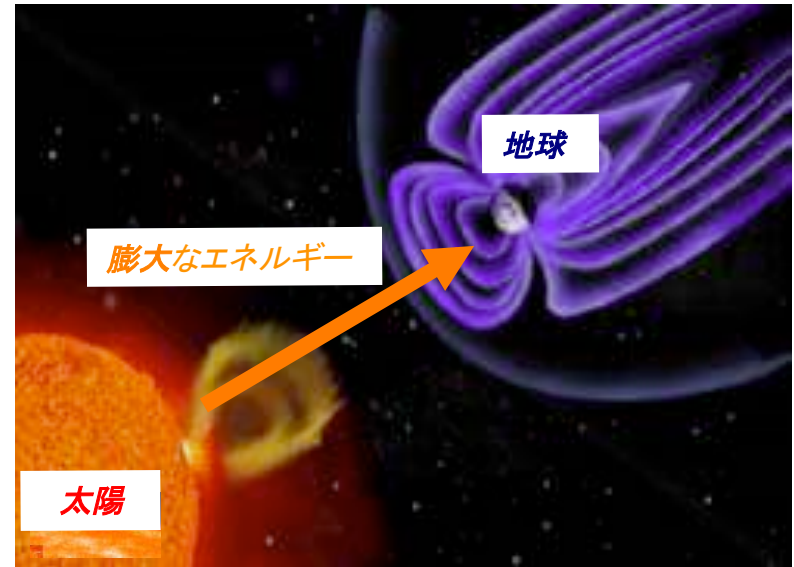
地上の太陽光発電所

小さく折りたたんで宇宙に運ぶ。
宇宙で組み立てる。
発生した電気は電波で地上に送る。

なぜ、宇宙の太陽光発電所を考えるのか？

何故太陽か？

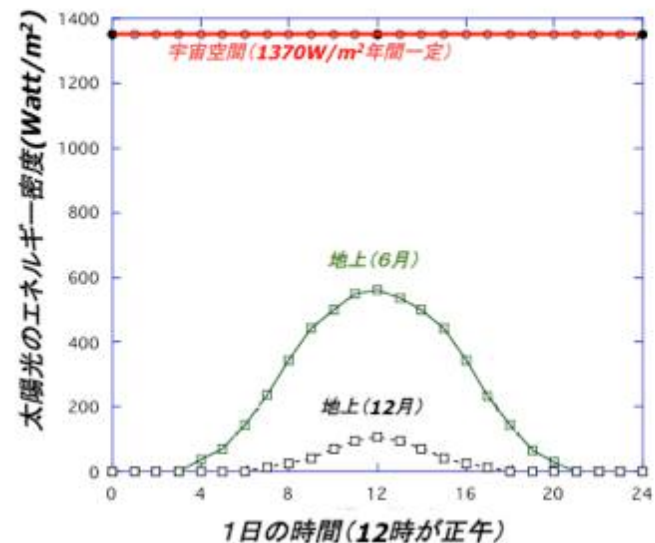
太陽からの地球へのエネルギーは
 1.77×10^{17} Watt
現在の人類のエネルギーの消費量の1万倍
➡太陽エネルギーは人類のエネルギー源として大きな可能性を持っている(お天道様)。



何故宇宙か？

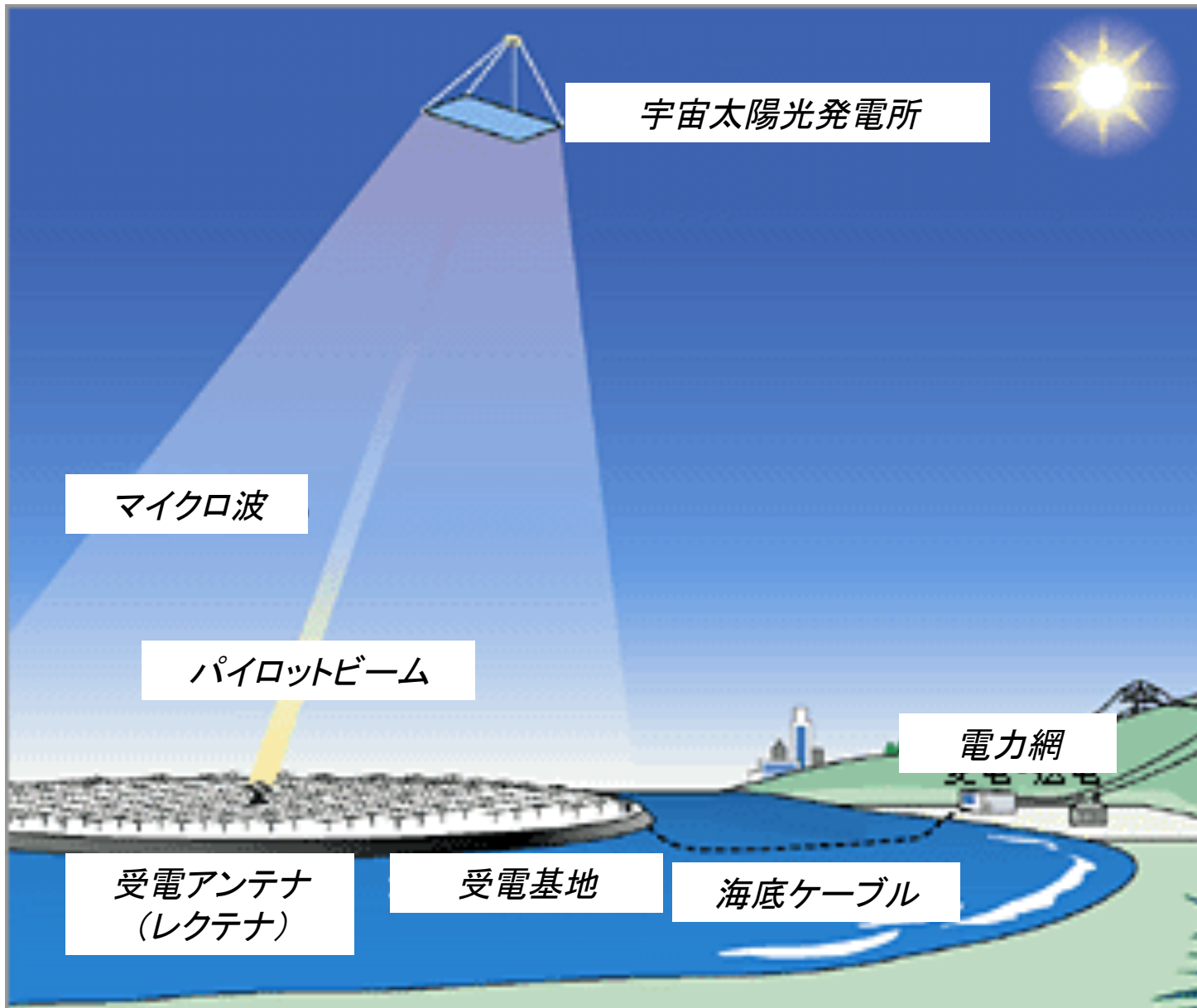
地球周辺の宇宙空間での太陽光のエネルギー密度は $1,370 \text{ W/m}^2$
地上での太陽光の年間平均エネルギー密度は $100 \sim 200 \text{ W/m}^2$
理由: 夜の存在、曇天・雨天の存在、大気による減衰
➡宇宙空間から地上への効率の良い電力伝送が可能であれば宇宙空間を太陽エネルギー取得の場として利用することが有利。

毎秒6億トンの水素が燃焼(核融合)



宇宙と地上の太陽光強度

宇宙の太陽光発電所の構想



JAXAのビデオ



宇宙の太陽光発電所の利点

地上の太陽光発電所



雨や曇りの日がある。



夜がある

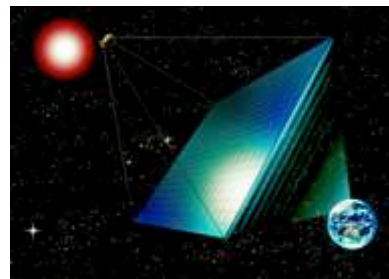


広い土地を探
すのが大変

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(軌道による)



宇宙は広い

比較





**宇宙の太陽光発電所を
実現するために必要な
技術とその現状**

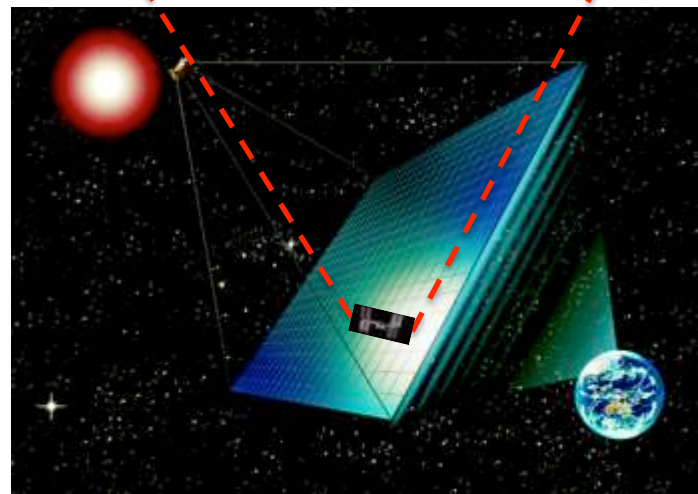
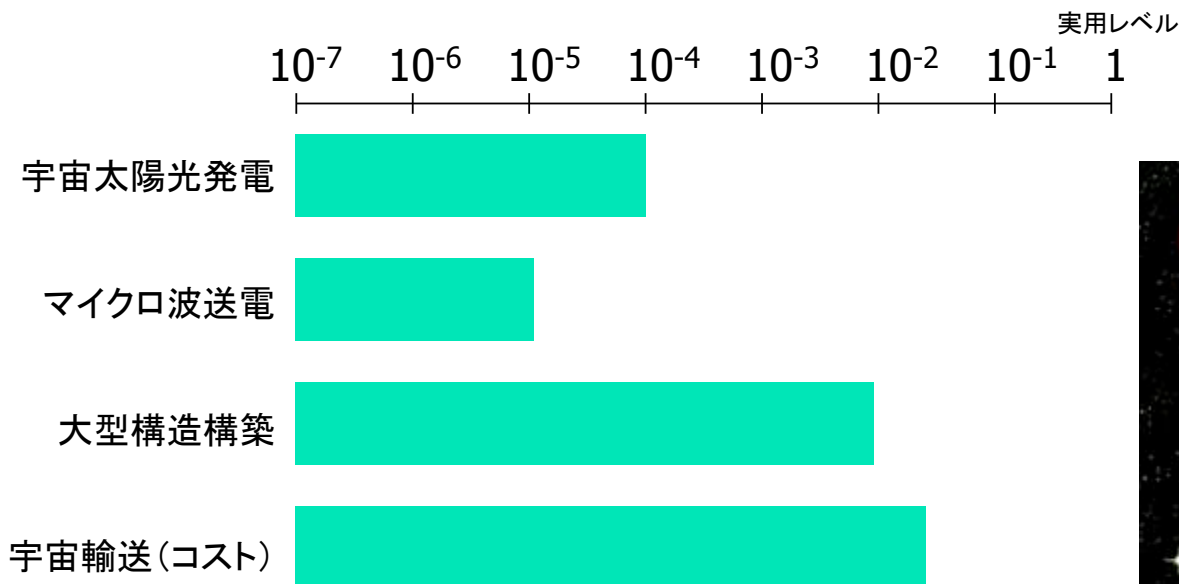
宇宙の太陽光発電所実現のために必要な主な技術 (目標と現在の實力)

1GW=30~50万世帯分

主要な技術	現状の到達レベル	目標レベル	比率
宇宙太陽光発電	数十kW (国際宇宙ステーションで100kW)	1 GW	10,000
マイクロ波送電	数十kW (地上)、1kW (宇宙)	1 GW	100,000
大型構造物	100mクラス (国際宇宙ステーション)	数 km	10
宇宙輸送のコスト	50~100万円/kg	1万円/kg	1/50~1/100

国際宇宙ステーション 100m サイズ

実用レベルを1とした時の現在の到達度(規模の比較)



100万kW級太陽発電衛星 1-2 km サイズ

宇宙の太陽光発電所実現のための 5つの主要技術

1. 太陽電池による発電技術
2. マイクロ波による送電技術
3. 大型の構造物を宇宙に構築する技術
4. 全体システム設計と運用のための技術
5. 宇宙に低コストで物資を輸送する技術

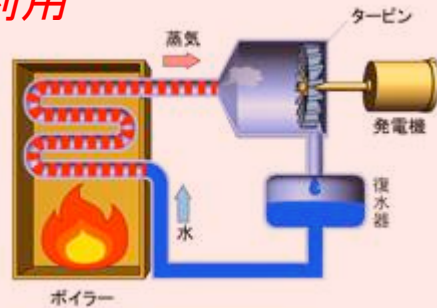
一般に発電方法には2種類ある

手回し発電デモ

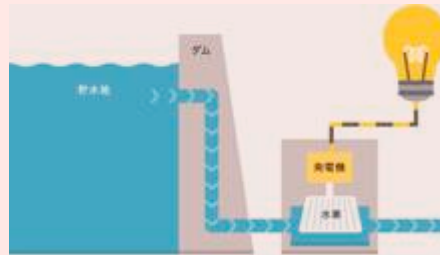
力が生むエネルギー利用



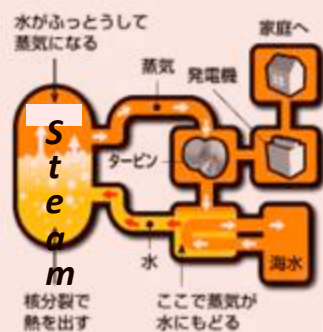
火力発電



水力発電



原子力発電



その他の発電方法
(自然エネルギー)

風力発電
波力発電
地熱発電

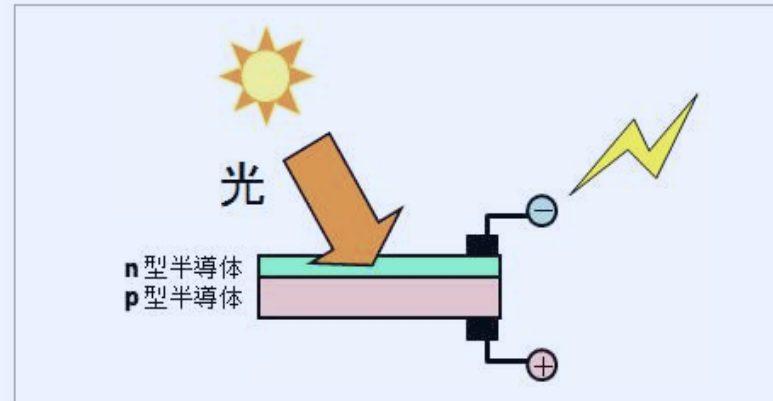
風力、波力、地熱蒸気の力

発電機を回転



光のエネルギーを利用

太陽電池



↑図1 太陽電池は、薄いn型とp型の半導体を積み重ねた構造をしている

宇宙での発電に都合が良い

- ・軽い(Watt 当たり)
- ・折り畳める
- ・動く部分が無い(故障が少ない、メンテナンスがほとんど不要)

宇宙太陽光発電所の技術は、現在どこまで達している？

初段階

中間段階

ゴール

発電技術

送電技術

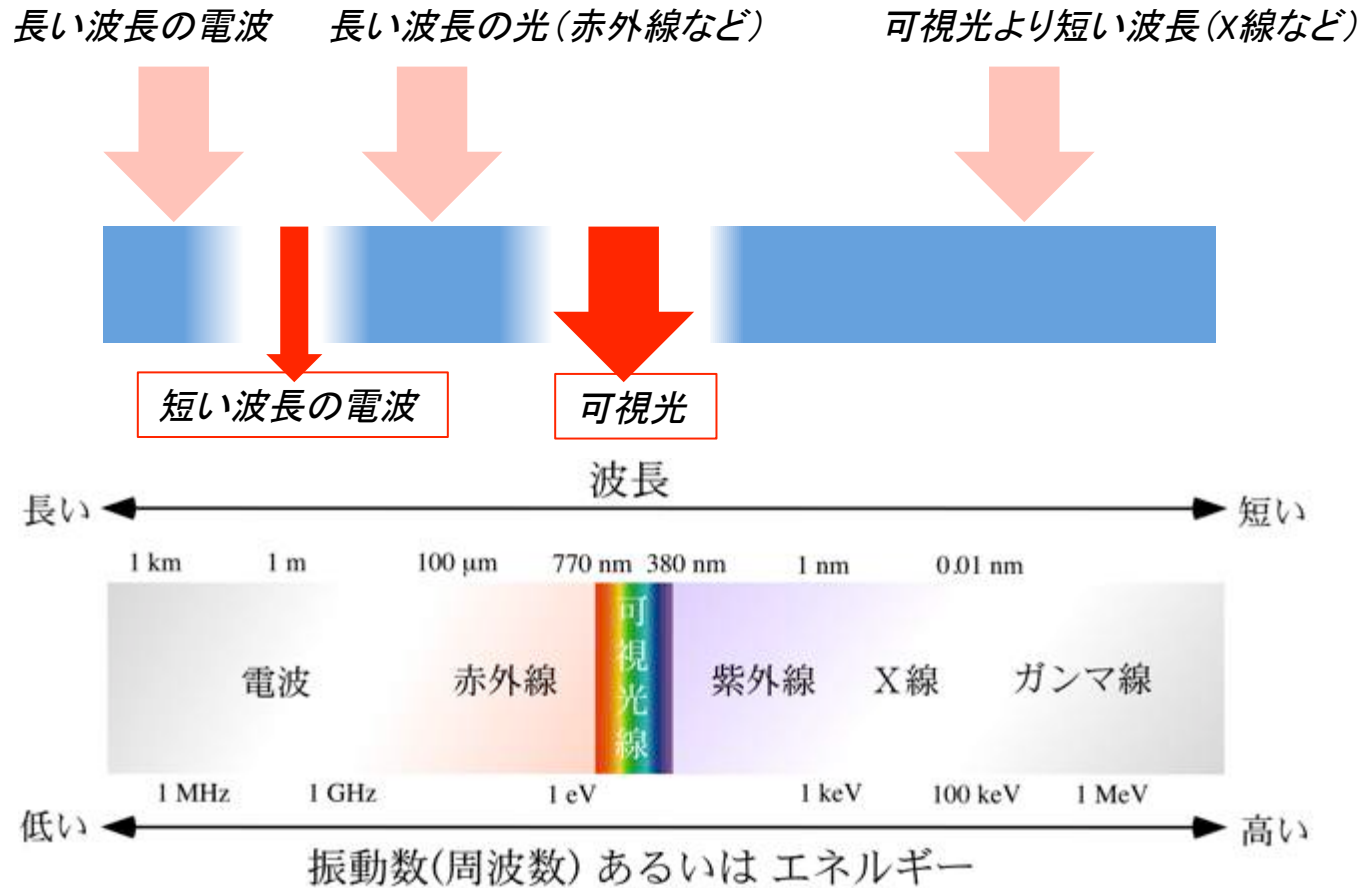
構築技術

システム技術

革新的輸送技術

宇宙から地上への電力伝送：大気の窓

どの波長の光や電波が、宇宙から地上へ到達できるか？



無線送電の候補

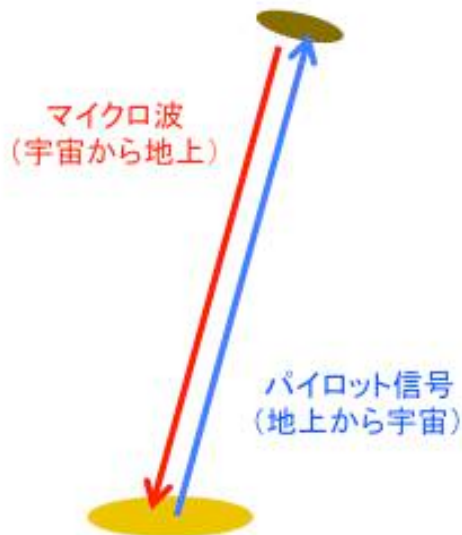
マイクロ波 (周波数1-10GHz付近)

レーザー (波長1 μ m) 付近

マイクロ波送電技術

宇宙太陽光発電の技術の中で最も高度な技術の一つ。地上局の誘導電波を用い、数万km離れた直径数kmの地上アンテナに正確に送電する必要がある(1km離れて10cmの的に1cmの精度で指向する必要)。レトロディレクティブ制御と呼ばれる。

軌道上のマイクロ波送電アンテナ

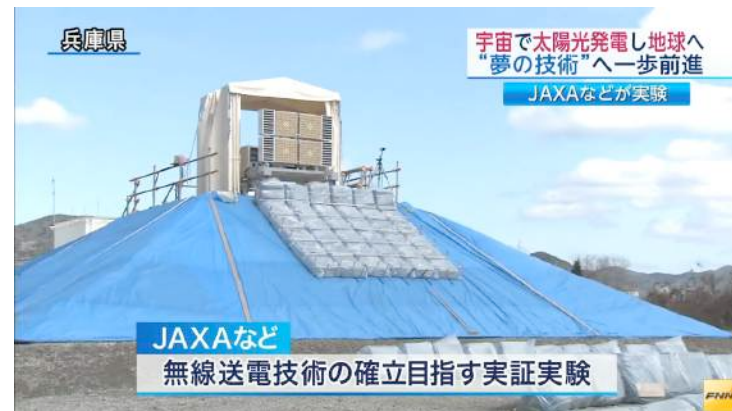


地上のマイクロ波受電アンテナ

宇宙からのマイクロ波の制御方法



NASA JPLでのマイクロ波電力伝送実験(1.5km, 450kW送電、34kW受電、1975年)



日本での地上でのマイクロ波送電実験
(2015年3月に実施)

宇宙太陽光発電所の技術は、現在どこまで達している？

初段階

中間段階

ゴール

発電技術



送電技術



構築技術



システム技術

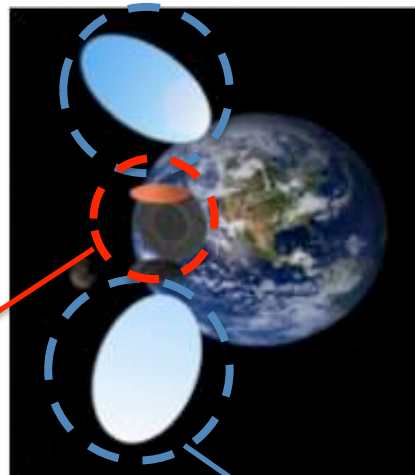
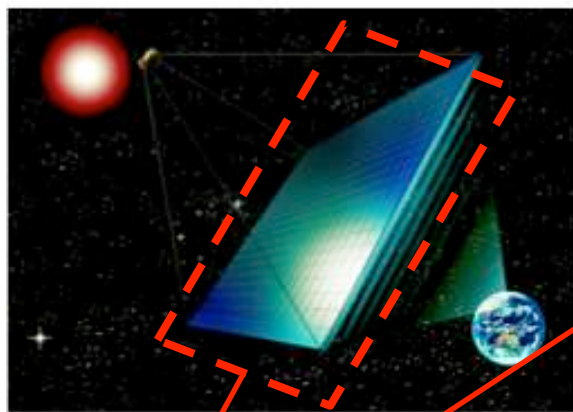


革新的輸送技術



宇宙に大型の構造物を構築する技術

100万kW級の宇宙の発電所には、km級の大きさの構造物が必要。



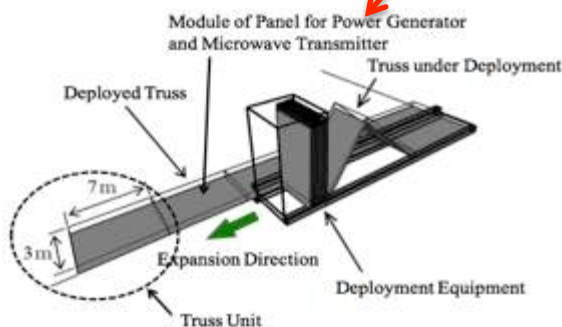
実験室実験



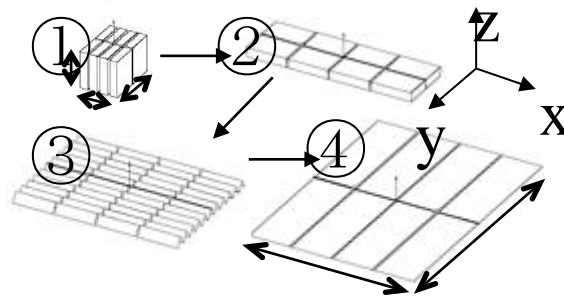
CG©NYAISAS
(宮崎氏製作)

数百m～数kmサイズの厚みのあるパネル構造

数百～数kmサイズの軽量薄膜ミラー



パネルを組み立てながら
展出する展開方式



自動で自己展開する展開
方式



風船のように膨らんだ後硬
化する薄膜構造物

宇宙太陽光発電所の技術は、現在どこまで達している？

初段階

中間段階

ゴール

発電技術

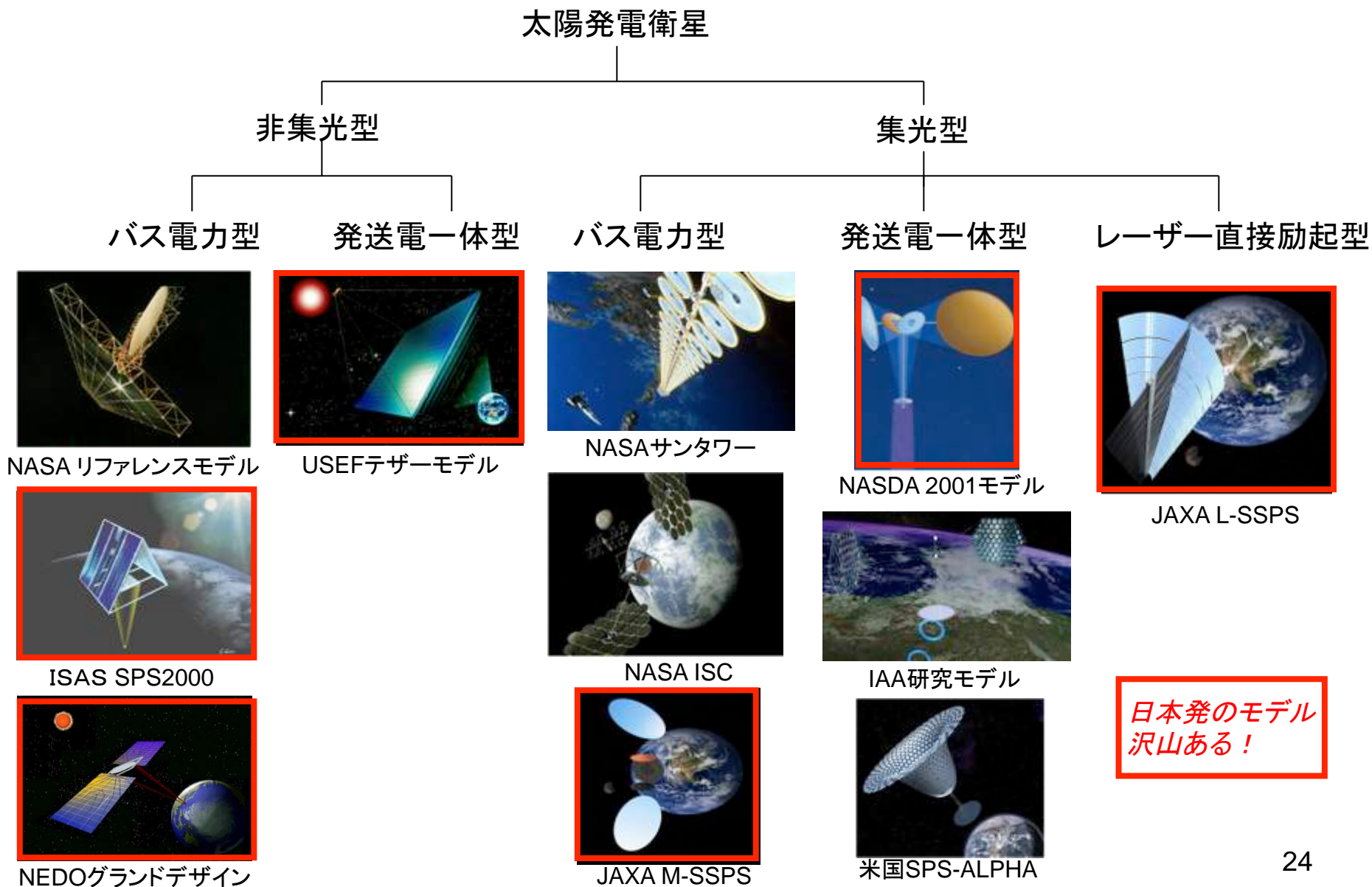
送電技術

構築技術

システム技術

革新的輸送技術

宇宙発電所の全体システムの設計



宇宙太陽光発電所の技術は、現在どこまで達している？

初段階

中間段階

ゴール

発電技術

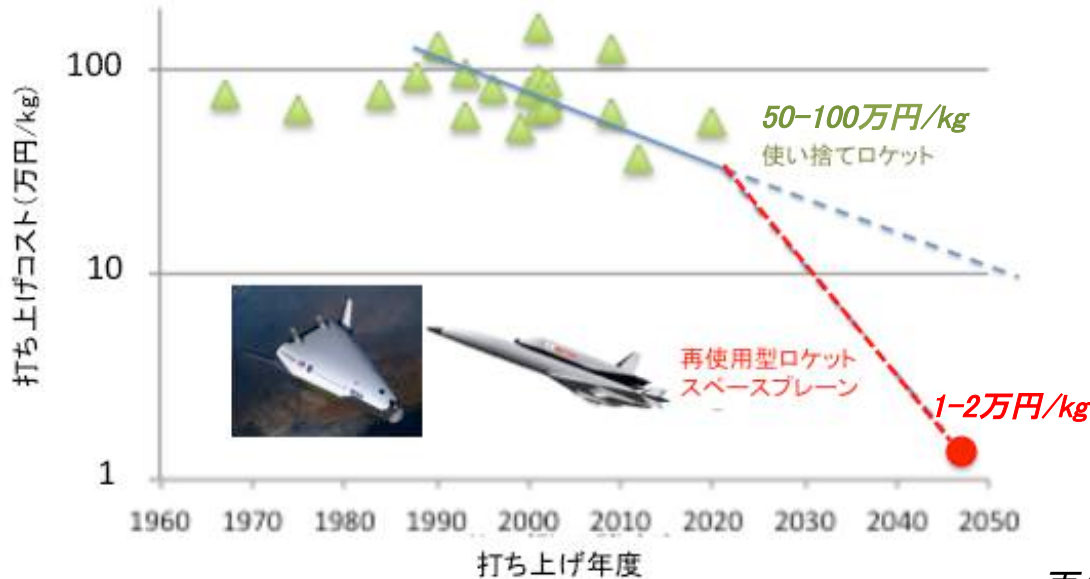
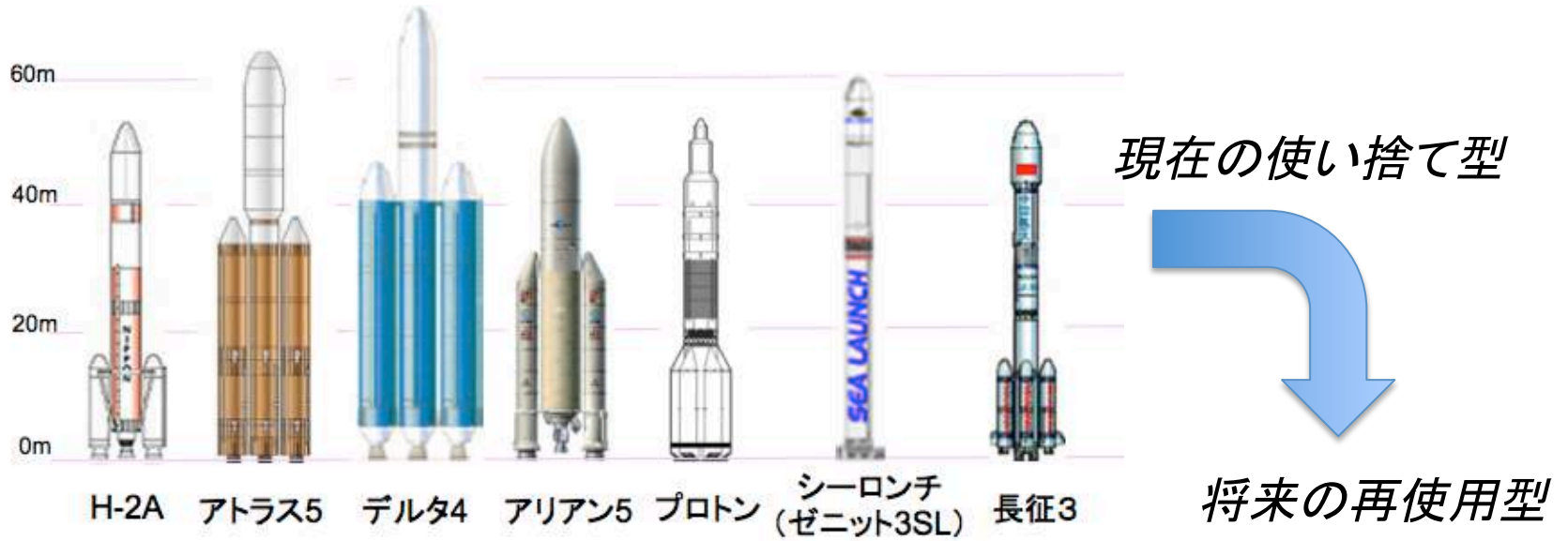
送電技術

構築技術

システム技術

革新的輸送技術

宇宙発電所を建設する為に必要なロケット



再使用ロケット実験機 重量:500kg、全長3.65m

宇宙太陽光発電所の技術は、現在どこまで達している？

初段階

中間段階

ゴール

発電技術

送電技術

構築技術

システム技術

新しいロケット技術

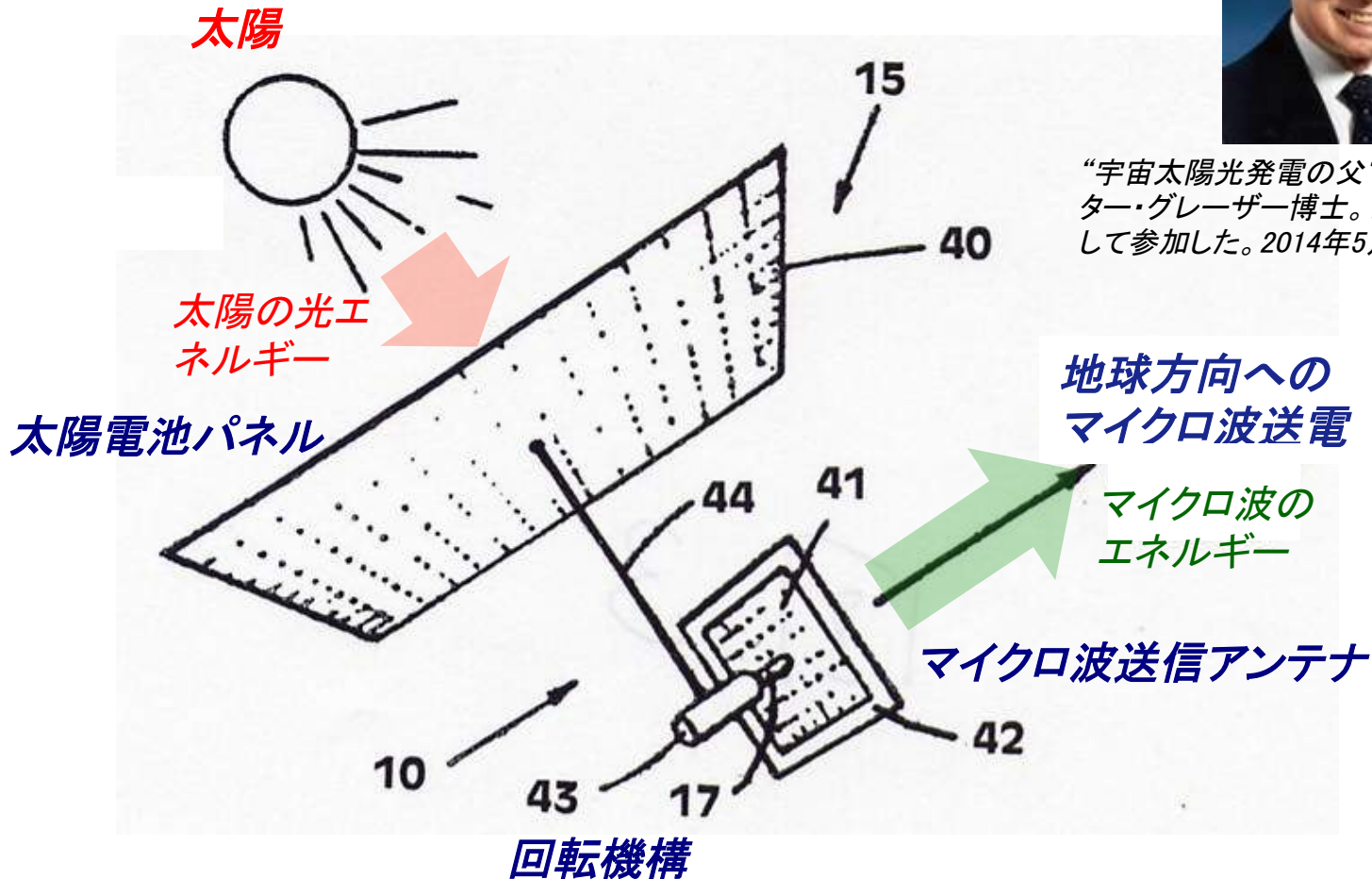
2. どんな人たちが研究している？

-係わる研究者や学会設立の動き-

3つの側面



宇宙の太陽光発電所の発案者



“宇宙太陽光発電の父”と呼ばれた発案者ピーター・グレーザー博士。アポロ計画にも科学者として参加した。2014年5月末91歳で亡くなった。

発案者ピーター・グレーザーの特許公告(1973年)

宇宙発電所の研究開発 世界の状況は？

1970

1980

1990

2000

2010

米国



John Mankins

▲ ピーターグ・レーザーの発案
1968

← NASA/米国エネルギー省の設計研究 →

← NASA研究再開 →

中国・インド

研究開始

欧州・ロシア(旧ソ連)

← ヨーロッパ宇宙機関の研究 →

日本

▲ 観測ロケットによる研究
1983

▲ 2009 宇宙基本計画

← 調査・試作研究 (大学、JAXAなどの研機関究、民間会社) →

宇宙発電所の研究開発 日本の状況は？

1970

1980

1990

2000

2010

米国

▲ピーター・グレーザーの発案

1968

←→ NASA/米国エネルギー省の設計研究

新しいエネルギーシステム
のコンセプトに触れた！



長友信人先生(宇宙科学研究所(当時))

NASAに留学や関係
機関を訪問した日本
の宇宙分野研究者



松本紘先生(京都大学(当時))

宇宙機関での研究開発体制(宇宙発電所に係わる研究部門を創設)

▲宇宙科学研究所に研究部門創設

▲宇宙開発事業団が研究開始

▲無人宇宙実験システム研究開発機構が研究開始

大学、メーカー等での研究

太陽発電衛星研究会

2014

宇宙太陽発電学会発足

▲宇宙基本計画で研究開発を明記

なんとかせねば！

エネルギー資源小国であるという意識、地球環境は大切という思い(国民、政府)

私自身の宇宙発電所への関わり

1980

1990

2000

2010

スペースシャトルによる
人工オーロラ生成の実験



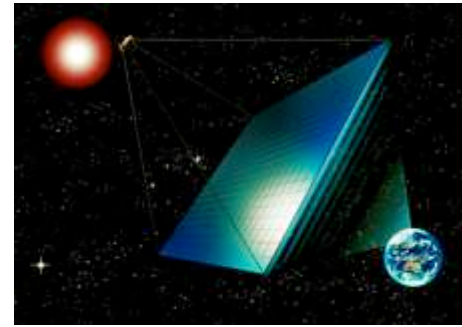
オーロラはどのようにできる？

衛星周辺の環境の研究



宇宙植民地の周りの環境は？

宇宙の太陽光発電所の研究



地球エネルギー・環境問題の解決

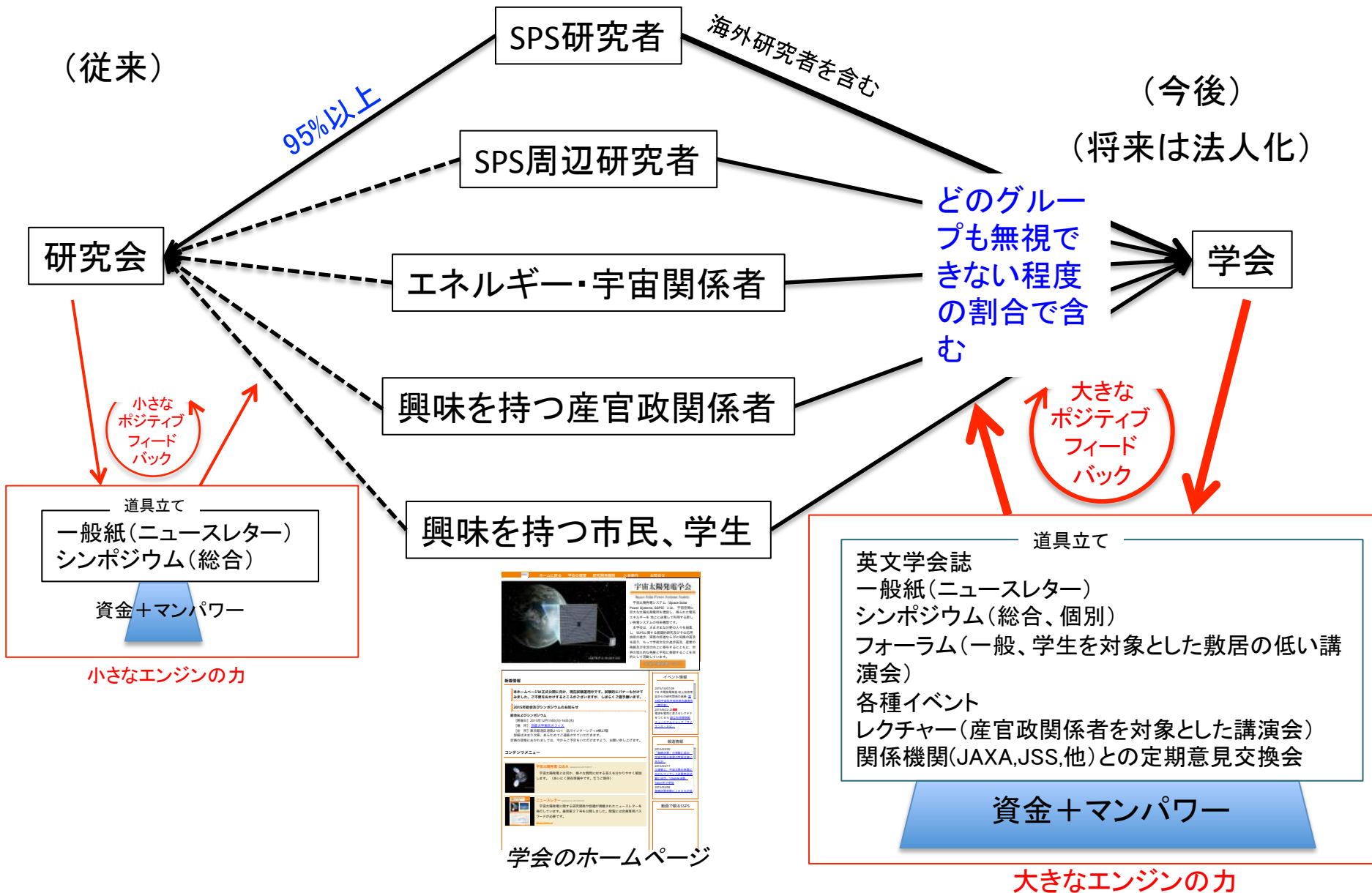
月探査計画(かぐや)



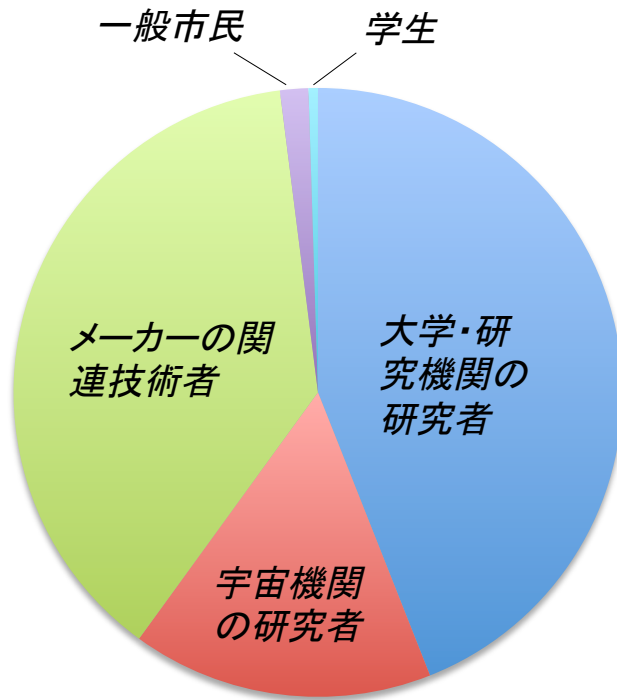
人類の宇宙への進出

太陽発電衛星研究会から宇宙太陽発電学会への発展(2014年10月)

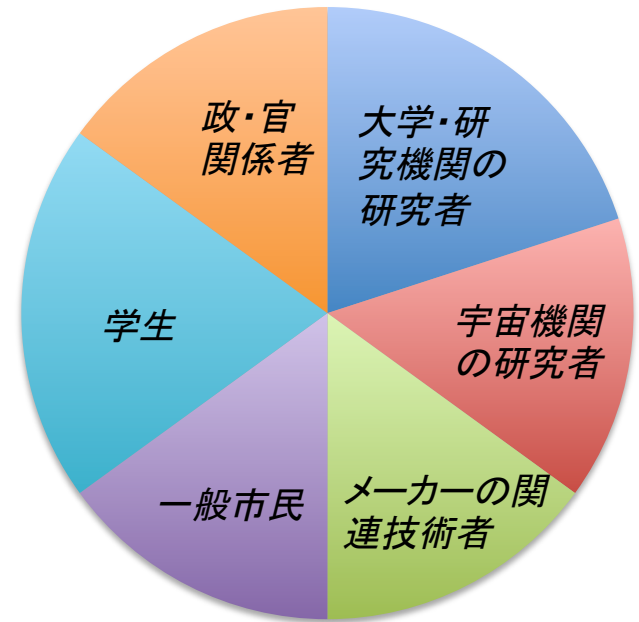
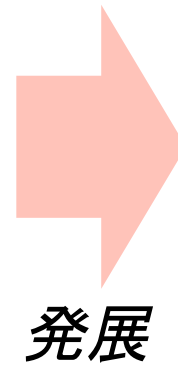
—宇宙発電所実現を目指して—



同好会的組織から社会的使命を果たす学会組織へ



研究会時代の会員構成



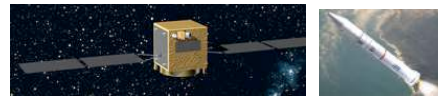
学会の会員構成目標

研究者達が提案している今後の研究開発

研究フェーズ



小型の軌道上実証

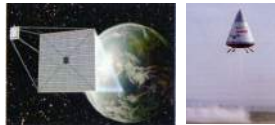


100kW 級軌道上実証

開発フェーズ



2MW級の軌道上実証

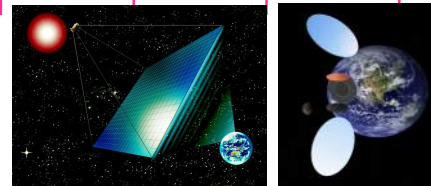


200MW級のプラント実証

実用フェーズ



1GW級商用SPS1号機

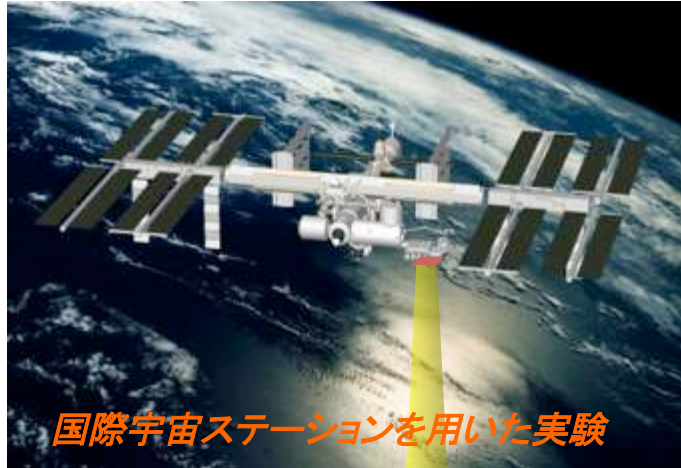
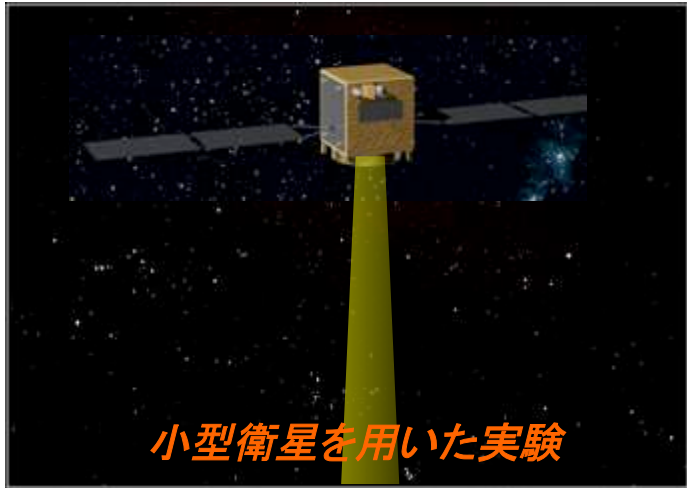


商用SPS本格的建設・運用 (1SPS/year)

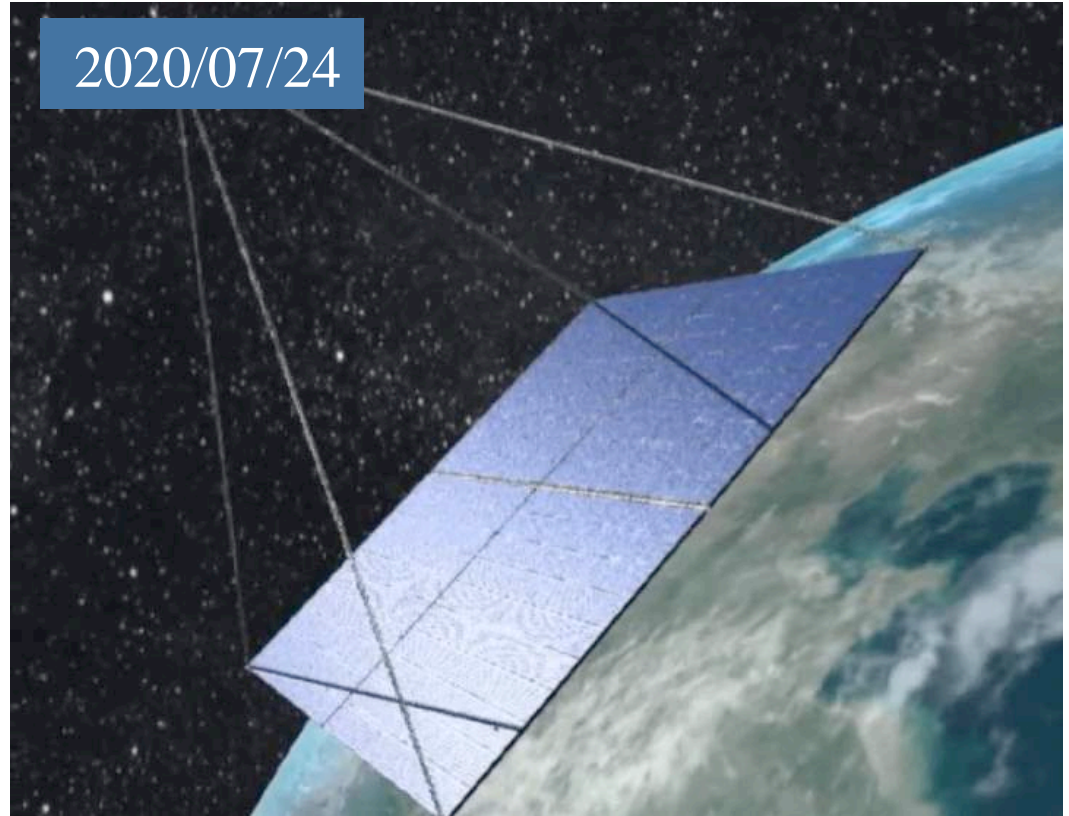
無線送電技術実証のための宇宙実験

(提案中)

(研究者の夢)



高度:400km程度、電力レベル:1-5kW程度
送電ビーム(マイクロ波またはレーザー)の精密方向制御技術の実証
電離層(マイクロ波の場合)及び大気(レーザーの場合)の通過実証



高度:400km程度、電力レベル:100-400kW程度
送電ビーム(マイクロ波)の電力送電の実証。
2020年東京オリンピックに合わせて実施できたら世界の人にクリーエネルギーシステムを知ってもらうために効果的!

3. 実現したらどんな未来社会が実現する？

-社会受容とリスクは？-

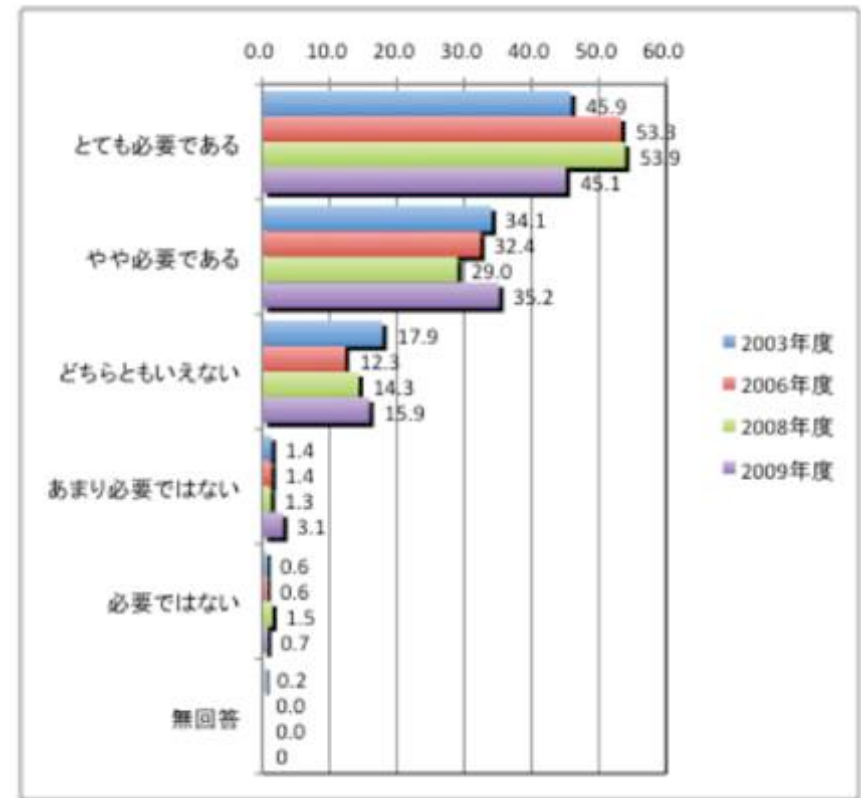
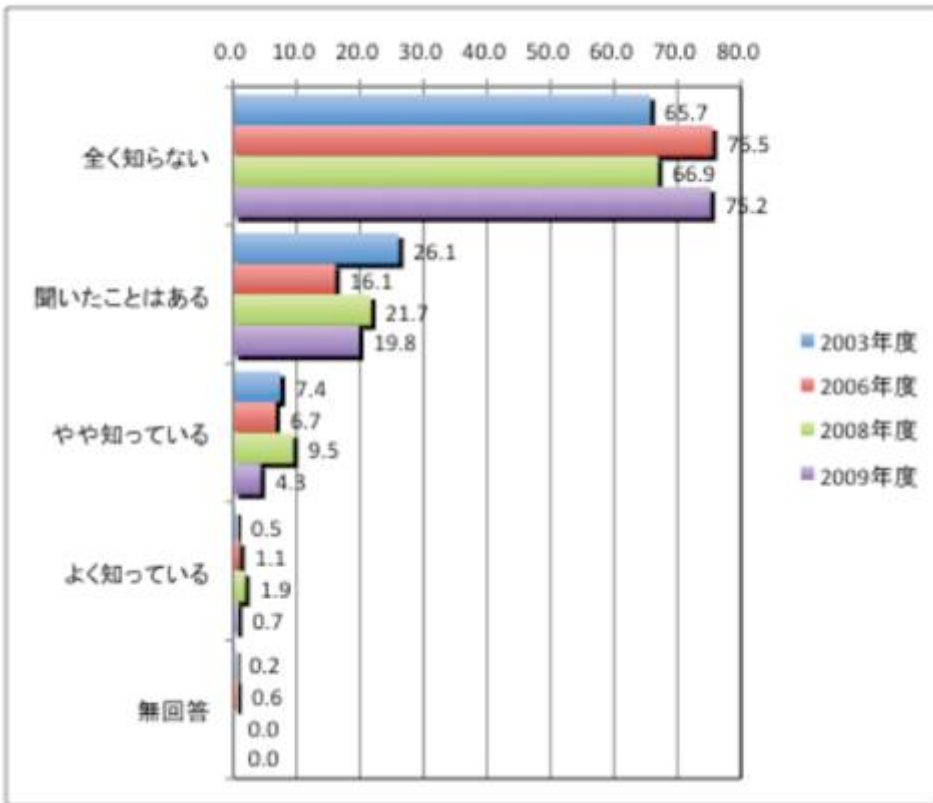
-社会の持続的発展と人類の宇宙進出への寄与-

3つの側面



宇宙太陽光発電は一般国民にどの程度知られているか？

三菱総研によるアンケート結果



2009年11月SPSシンポ

➡ほとんど知られていないが、内容を説明すれば、一般には好意的な意見が多い。

しかし、問題点やリスクとその回避について社会に十分理解されているとは言いがたい

例えば、文科省科学技術政策研究所の科学技術関係者アンケート調査では、科学技術関係者の意見は一部厳しいものがある。

- ・実現しないあるいは非常に時間がかかるとの回答比率が、他の将来インフラに比べて高い。
- ・調査で寄せられたコメントでは、安全性とコストについて疑問が投げかけられている。

主な懸念事項、問題点(リスク)	問題点・リスクの回避
マイクロ波やレーザービームの生体、生態への悪影響(環境リスク)	ビーム形成・制御技術によりビーム電力密度を安全規格以下に制御(技術で保証)
マイクロ波の既存システム(マイクロ波通信、LAN、交通システム、各種レーダー)への干渉(他の社会システムへのリスク)	ビーム形成・制御技術によりビーム電力密度を干渉レベル以下に制御(技術で保証)
レーザーの兵器への転用への懸念(政治的リスク)	国際協定と国際監視(国際協力の確立で実現)、ビーム制御の高度な暗号化
宇宙の大型構造物の廃棄とゴミ問題(宇宙環境リスク)	寿命品は全て地上への持ち帰り原則によるリサイクル運用(技術で保証)
長年にわたる大規模な開発投資(開発リスク)	開発途上における関連技術の商用化(スピン・オフ)
実際に開発してみると高コスト(投資リスク)	小型モデル(プラント)でのコスト実証後に実用システム開発着手(健全な開発戦略で保証)

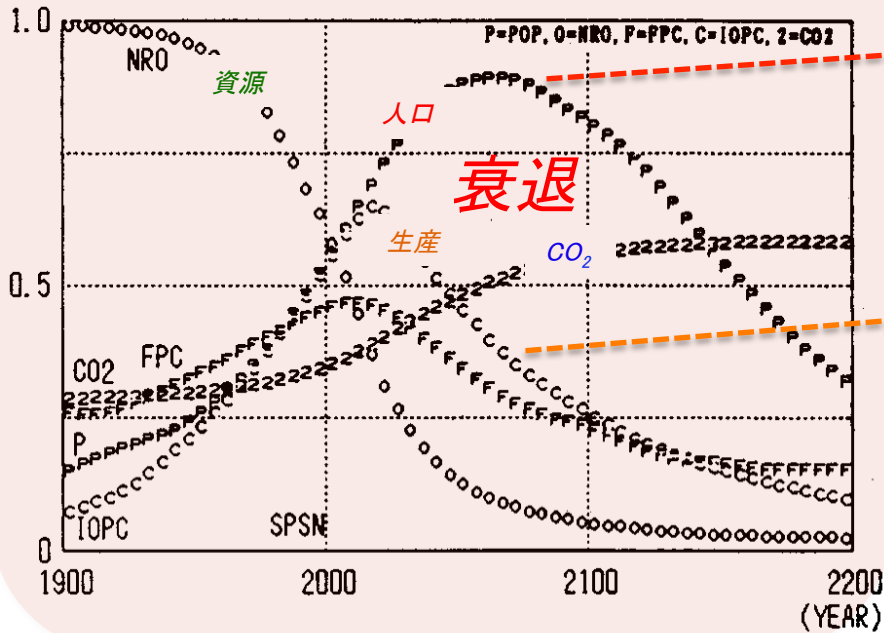
このため、現実には、将来のエネルギーシステムの候補と考えられている核融合とくらべ、はるかに小さな研究開発予算がついているのみ。

➡データに基づいた安全性と社会システムとしての実現可能性を、誰にでも(一般の方にも、専門の方にも)分かる形で示す必要がある(これまでは不十分)。

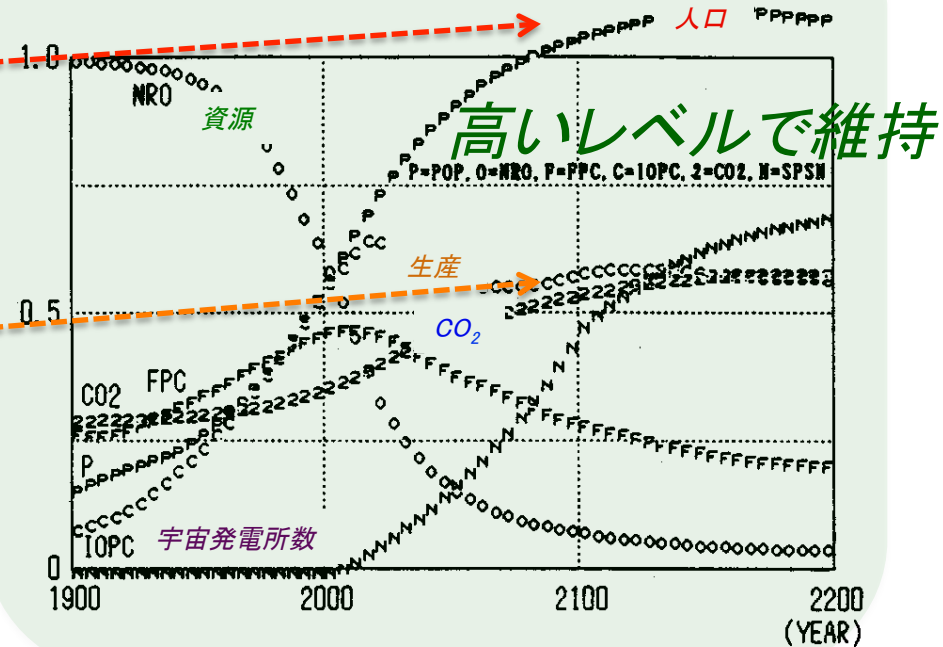
最後に、もう少し長い目で、人類の将来と宇宙太陽発電の関わりを見てみよう。

宇宙太陽光発電所を建設したら、地球社会はようになる？

地球エネルギー資源のみの場合



宇宙太陽光発電所を建設する場合



World-3という、将来予測モデル(資源、人口、食料、CO₂量)を用いた山極芳樹氏(静岡大学)のシミュレーション結果(1993年)。適度な宇宙太陽光発電所への投資により、人口、経済の高いレベルの維持が可能であることが示されている。

宇宙の太陽光発電所が実現したら・・・



環境に優しいエネルギーがふんだんに得られる
地球環境が修復され自然そのままに維持される
偏在するエネルギー資源をめぐる争いの終焉
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
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……



Dr. Gerard O'Neill



宇宙植民地構想(1970頃)

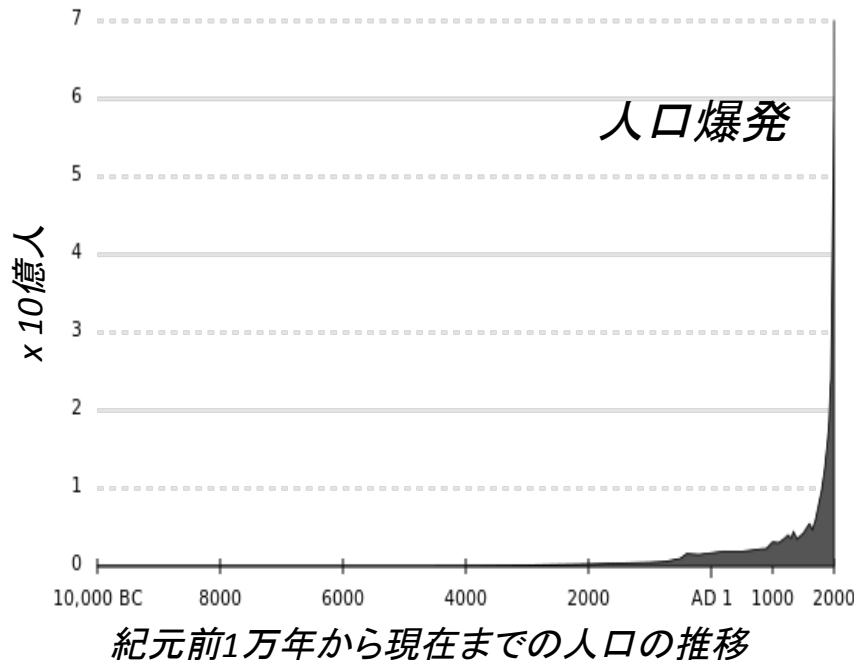
宇宙への生存圏の拡大



大林辰蔵先生

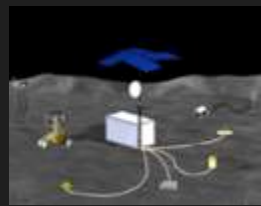
大林辰蔵先生(宇宙に夢中、昭和60年)

人口爆発: 人類は、物理的に生存可能な場があれば、危険を顧みること無く、生存圏を拡大し、人口を伸ばし続けるという宿命を持った生命体(これは人間の遺伝子に書いてある)。実際、人類の歴史を見ると、アフリカに発生してアジア、ヨーロッパ、アメリカ大陸へと命をかけて生存圏を広げ続けた。長い目で見れば、生存圏拡大の停滞あるいは縮小の時代はこれまではなかった。



宇宙空間への拡大: まずは月、その後、軌道上植民地、火星など他惑星

第一ステップは月での生存圏構築



無人探査サービスステーション



短期滞在型有人拠点



常時滞在型有人拠点



月面都市



探査・調査



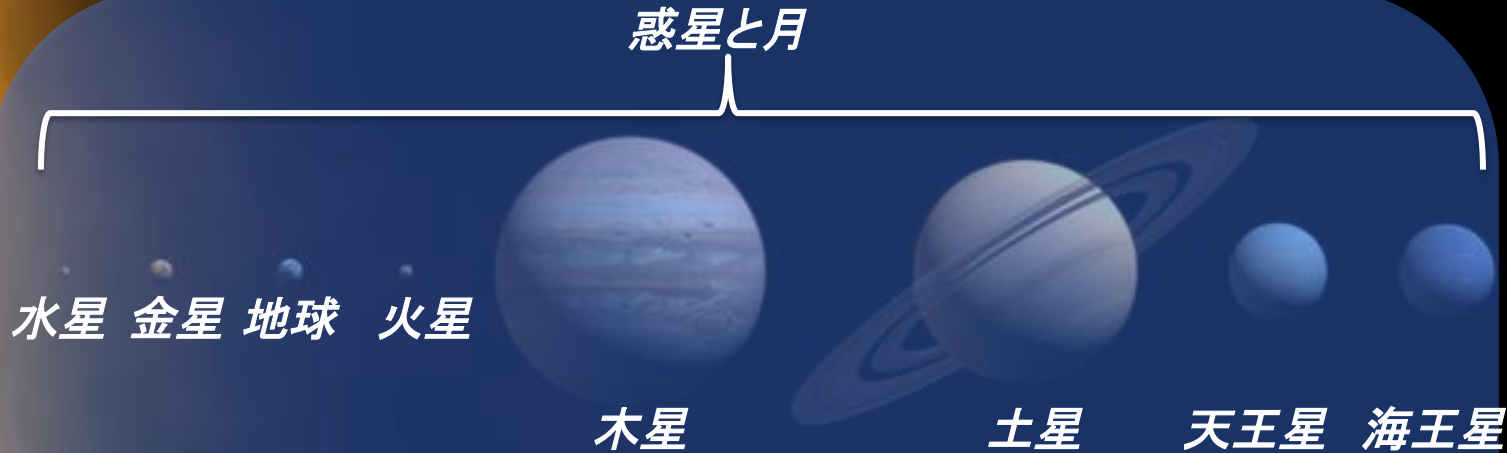
開発



移住

地球文明から太陽系文明へ (地球閉鎖空間から宇宙空間への進出)

太陽



太陽系文明



宇宙太陽光発電所は、このような人類の
宇宙空間への進出への第一歩！