

A Suspicion of Solar Power Satellites*

Makoto Nagatomo

GIAS

Postal address: 521-1, 227-0033 Japan

Abstract

Since Glaser proposed solar power satellite (SPS)s for a future energy system there have been many talks and discussions on their technical feasibility and influence on the earth environment as well as the societal acceptability. It is generally agreed that solar power satellites are feasible but require more research on technology and economy beforehand. Therefore, Japanese researchers continue to research various issues of SPS found in their individual fields of technologies, although the government makes no commitment to develop SPSs. I wonder if people have a suspicion of SPSs and require more research beforehand,

The researchers seem to believe the bright future of SPS will come with exhaustion of oil wells. I was surprised to learn that the future is near. According to Prof. Yoshinori Ishii, an authority of energy and environment, the world oil production reached the peak probably in 2000. In his discussion on alternative energy, Prof. Ishii kindly included SPS as a candidate of alternative, but concluded that space solar energy was not considered as energy resource because the energy cannot be produced within reach of economy. Implications of this statement include not only cost reduction but also more general human activities. An example of place of energy production 'within economical reach' is shown by the oil production in the North Sea where the seafarers seeking economic benefit successfully overcame the difficulty of remote distance and severe natural environment with technology. Space solar energy surely exists in the near earth space and on the surface of the moon. If spacefarers seek economic benefit and challenge the difficulty of remote distance and space environment, the scenario of space energy development is similar to the history of the North Sea oil production. The question is where such spacefarers are.

One of few studies on SPS from the standpoint of energy resource was conducted by Prof. Yoshiki Yamagiwa who added an extra-terrestrial energy and mass system to the World Model of Meadows' and others to evaluate the effectiveness of SPS to the future of the earth life. A result of simulation shows that only if the investment in the extraterrestrial system added is large enough, it effectively improve the quality of life on the earth. It is important to note that the productivity of the extraterrestrial system was assumed to be similar to that of the present major industries of Japan, which is at least two orders of magnitude higher than the existing space industry.

In the twentieth century, governments of some nations developed fundamental space technology. In this century, true spacefaring nations are going to use the technology for their own way. China and U.S.A. have already announced their new policies. Russia supports International Space Station perhaps aiming at a new target. Europe did not declare a new policy. Japan is too busy with failed launch vehicles to talk about a new direction. The author thinks space energy development is the nearest goal of Japan that owns almost no energy and mineral resources on the earth. Of course, the new infrastructure must be built on the basis of productivity of the advanced industrialized countries. Then Japan will become a true spacefaring nation.

* Presented at the 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

宇宙太陽発電に対する不信感^{注1}

長友信人（ながともまこと）

GIAS

227-0033 横浜市青葉区鴨志田町 521-1

序

1968年にグレーザーが発表した宇宙太陽発電（SPS）（1）は宇宙で太陽発電をして地上に電波でエネルギーを送る原理で、その原理は核融合反応エネルギーとは違って実証されている。この点を強調し過ぎたためであろうか、SPSはいつでもできると世間では思っているらしく、核融合にくらべると研究費が全くない。

アメリカは1970年代後半に大々的な概念設計と評価研究を行なった後は研究費がない。むしろ欧州と日本の方が興味を持ったがその主役は研究者であった。特にわが国では研究者の裁量の範囲で、人工衛星ミッションスタディの対象として、また電子電気技術や組立技術に関する要素技術と見なされて研究されてきた。要素技術の考え方はわが国の技術開発戦略に根幹である。旧通産省の部局は外郭団体を通じてすでに行なわれた研究と地球温暖化対策の効果を調べるようなことを何回か繰り返した。

しかし、政府はエネルギー計画としても宇宙計画としてもSPSを検討したことはなく、文部省の科研費でも要素技術はともかく、多数の熱心な研究者が参加して何度も申請したSPS研究は一件も通らなかった。学術分野では「SPSはだめ」という権威筋が存在していることを窺わせる。問題はエネルギー分野であるが、これについては石井吉徳名誉教授の記事（2）から啓発を受けたのでそれを本論の主題としたい。

21世紀のエネルギー事情

研究者各位にはこのようなSPS研究の現状を、むしろ「実現」への道を着実に歩んでいるという認識を持つ向きも多いかと思う。要するに、「エネルギー問題は先が長い。いずれ太陽エネルギーしか選択の余地はなくなる。その時は研究費も出るだろう。」ということであろう。しかし、すでに21世紀に入って4年目、国内でSPS研究が話題になりはじめてから20年以上は経っている。エネルギー問題に変化の兆しがあっても良い時期である。

そして実際にそれは現われていた。巨大な現象は目前で起っていても分からないことがある。その大問題は世界の原油生産がピークを過ぎて減少に転じたという事実である。それは国内の改革騒ぎや不安定な世界情勢の背景であってニュースになるようなネタではない。私はそれを上品な科学雑誌イリュウムに出ていた石井教授の記事で知ったのである。その中にはハバート・カーブによる石油生産予測（C.J. Campbell）が出ていたが、山形の曲線の半分が過去を表す実線だったのが印象的である。私は大分前から石油は有限の資源だからいつかなくなるとは聞いていたが、まだまだ新しい油田が発見されているから中国経済の成長くらいは増産できるものと思っていた。ついでに手許にある統計（3）を調べてみると、中国を含む産油国は軒並み生産が21世紀に入って鈍化し、多くは減少しはじめていることがはっきり数字になっている。例外はロシアだけである。ついでに天然ガスの統計もグラフにしてみると、こちらは各生産地とも生産量は増加している。しかし、最近はその増加のカーブが鈍化してきているように感じられる。

^{注1} 第7回SPSシンポジウム、九州工業大学にて2004年9月16、17日開催

石井教授によれば、昔は、原油の発見量は消費量を上回っていたが、最近は、発見量は消費量の1/4程度であり、石油以外の天然ガスでも同様なことが起っていて、これは減りはじめるとなくなるのは石油より早いとのことである。周知の通りわが国のエネルギーと資源の自給率はゼロに近く、世界的なエネルギー争奪が本格化すれば日本は特別苦しい立場に置かれるであろう。わが国は石油に不自由しない時にこそ SPS を開発する余力があると思ひ、第4回 SPS シンポジウムでは高橋宏当時東大教授からまだ石油はなくなると言う話を聞いて安心していたのだが、すでに3年が過ぎたので安心ばかりもしてられないということであろう。

ついでに最近の東京電力の資料(4)によると「2013年にはウランの需給が逼迫する可能性がある」という。原子力は炭酸ガスがでないからと宣伝していたのに、ウラン燃料が不足すれば、運転が止まる原子力発電所も出てくるであろう。炭酸ガスのみならず電力も出なくなるのは寝耳に水であった。かくて、ここまで判明した21世紀前半のエネルギー供給の変化は次の通り、

- ・原油生産の減少 2000以降
- ・ウラン燃料の需給逼迫 2012以降
- ・天然ガス生産の減少 2030以降？

3つの主要エネルギー源で発生する。これに対してエネルギー量だけの対応策は思いつくままに；

- ・オイルシェールの開発
- ・石炭の復活増産
- ・自然エネルギー開発

などであろうか。オイルシェールは石油路線の延長で、埋蔵量が多いがコストが高く採算がとれる資源量は大分少ない。石炭は発電所には良いが、石油の最大の消費者である車と飛行機はそのままでは使えない。自然エネルギーというのは主として太陽電池と風力で、これも直接的には電力の補充である。これで天然ガスとウランの減少分は石炭と自然エネルギーで何とかなるとすれば、車や飛行機は電気か電気で作った水素等を使う方法がある。いずれにしても、これらのエネルギー供給の変化に伴って、電力関係の産業や陸海空の運輸手段は技術的に大きな変革が必要である。

宇宙太陽エネルギーの位置付け

問題は宇宙太陽エネルギー開発である。われわれは、当然、これは自然エネルギー開発と並んで主要エネルギー供給の不足を補うものと考えていた。有り難いことに、石井教授は新エネルギーを査定するにあたって宇宙太陽エネルギーを取り上げている。こういう人は極めて少数である。ただ、評価は「宇宙の太陽エネルギーは『経済的に取りだせる位置にない』ので資源ではない」と一刀両断である。石井教授によると資源である条件は、1) 濃縮されている、2) 大量にある、そして3) 経済的に取り出せる位置にある、の3つなので、3) の条件がみたせないとのことである。

昔、石油等のエネルギーコストが高くなれば、宇宙太陽発電が出番であろうと研究者は期待したが、どのくらい高くなればいいのかは知らない。21世紀になって USEF が事務局となって作成した宇宙発電のロードマップ(5)は2040年頃をターゲットにした呑気な計画で、これでは政府も国民も期待が持てない。ただ、私個人としてはそのようなビジョンは当事者の無力感を反映しており、その背後には宇宙太陽発電に対する世間の強い不信感があるためであろうと同情する。

この SPS への不信感を研究者は昔から問われてきた質問、例えば「実現性はあるのか」「経済性の見通しはどうか」「信頼性がないのではないか」等々に対する正しい答えが出ていないためだと考え、自分のできる範囲でこれらの質問に前向きに答える努力をしてきた。

ところが、資源の条件である「位置」という用語には非常に深い意味が含まれていることを私は全く

別の読み物（6）において発見した。それは、すでに SPS ニュースレターにも投稿した北海油田の採掘の様子である。北海はノルウェーとイギリスにはさまれた水深 100-200 m の大陸棚であるが、冬期の荒海は有名である。掘削を始めた時、メキシコ湾で作業していたチームがやってきたが、冬の作業は中止して南で待機したというから、これだけでコストは2倍に上がることになる。その後技術開発を重ねて生産は安定し原油はパイプで陸に送られている。この油田はすでに採掘できる油量があと 35 年と確定しているので、巨大な備蓄タンクのようなものである。現在は少しずつ生産を減らしている。その後はより深い海底に挑む必要がある。

例えば、現在はブラジルがコボス沖の大陸棚の外、水深 1800m の油井で生産操業している（3）。これが「経済的に取り出せる位置」の実情である。宇宙太陽発電の「位置」は宇宙空間や月表面である。状況は似ているが、海が荒れるとか深いとかいうような説明の出来ないし、「経済的に」を動機に難しい場所に挑む人々を見つけるのが大変だろう。

ワールドモデルによるシミュレーション

このレベルでわれわれを勇気づける研究がある。それはここ 10 年間の石油の生産曲線と密接な関係がある。SPS がある場合とない場合の世界の動向である。この計算は山極芳樹氏が行なったもの（7）で、有名な「成長の限界」の根拠となったワールドモデルに SPS で代表される地球外資源とエネルギーのシステムを付加することによって、現に起りつつある地球の環境問題をいかに改善できるかをシミュレーションしたものである。筆者もその一部に貢献したことを誇りに思っている勝れた研究である。計算結果によると、まず、SPS への投資が少ない場合、その効果が小さくほとんどない場合と変わらないことが示された。一方、これをある程度以上に増やすと、その効果が炭酸ガスの増加の抑制や人口増加に顕著に現われている。このような研究は極めて少ないが、宇宙発電が原理的に優れていることを証明するもので、その計算の前提を保証するような技術開発の指針を与えている。

現在の宇宙開発が作った「宇宙」のうさん臭さ

山極モデルはコストをエネルギーの単位で与えていて、具体的な経費としての金額ではない。山極モデルでは SPS に投資するエネルギーの生産性を化学、船舶、自動車産業を基にして算出したので、現在の航空宇宙産業のエネルギー効率の悪さを考えると、同じエネルギーを今すぐ投資してもこのシミュレーションのような成果が得られると考える人は皆無であろう。身近な例をあげる。

その 1：SPS2000 は電力 1 万 kW を赤道地帯に供給するものとして仮定して検討した。その概念図が作成された時に、宇宙開発の企業の営業マンに「これはざっと幾らで作りますか」と言ってみた。答えは「2 兆円位でしょうか」であったが、その頃、原子力発電所は全ての経費を入れても 1 万 kW 当り 50 億円以下と新聞に出ていた。

その 2：ある宇宙企業がある自動車企業からある品物を買ったそうである。請求書を見た宇宙屋さんはあまりに安いので数字が 1 桁違っていると思い「値段は間違っていないですか」と問い合わせたところ、ややあって「失礼しました。間違っていました」という返事とともに 1 桁少ない金額の請求書が来て、宇宙屋さんは言葉を失ったそうである。

その 3：今年 6 月、Scaled Composite 社は乗客 4 名を乗せて高度 100 km まで上昇できる「スペースシップワン」をパイロットのみの試験飛行を行ない成功した。資金はマイクロソフトのオーナーの一人が出した 2000 万ドル。設計者は世界一周無着陸飛行の Voyager の設計者 Rutan で、彼によると「この金は NASA のペーパーワークの値段だ」（8）

要するに、現在の宇宙屋の生産コストは少なくとも世間の常識の 100 倍以上だということである。そ

これは一人でできることを 100 人以上の手間をかけたり、一日でできる仕事を 100 日以上かけたりすることである。沢山の会議やハンコはそれを端的に表しているし、実質の伴わない形式ばかり真似した審査やレビューがくり返されると簡単に 100 倍以上のコスト高になる。宇宙開発は失業対策ではないが、その様相を呈している。これでは桁違いのエネルギー投資を必要とする宇宙エネルギーの開発はできない。世間の宇宙太陽発電への不信感はその辺にあるのではない。

宇宙太陽エネルギー資源は経済的に引き合わない場所にあると考えられているが、これが現在の宇宙開発のコストを適用するからであって、主要産業のコストに近付けば地球外資源として有効であることが、ワールドモデルのシミュレーションで示されている。エネルギー資源が皆無に近い日本は宇宙開発計画の非学術分野の技術開発の目標を宇宙エネルギー開発に絞って国家プログラムとして実施することができる。

21 世紀の国家宇宙開発計画

米ソの宇宙競争は 20 世紀の世界の宇宙開発体制を形作っていたが、アポロ計画の成功やソ連の崩壊でこの体制も崩れ、スペースラブや宇宙ステーション等、国際協力それ自体が目的の一つになったようなプロジェクトが流行した。この間に主要なロケットと衛星技術は開発された。

21 世紀には、衛星とその打上技術は国家計画から外れて民間の事業となり、国の国際事業は宇宙ステーションの建造が主となるであろう。また、学術分野の宇宙探査や宇宙利用は関係組織が引き継ぐことになるであろう。そして各国政府は新たな方針を打ち出しはじめている

- ・ 最もはっきりしているのは中国で、昨年有人宇宙船の打上に続いて、将来は宇宙ステーションの保有や火星の探査を実現する方針を表明している。
- ・ アメリカは今年初めに、月と火星と太陽系の探検を国の宇宙計画の中心にし、他の主な非軍事的な宇宙活動は極力民間の仕事する方針を大統領が表明した。
- ・ ロシアは現在国際宇宙ステーションの建造に多大な貢献をしていて、まだ今後の計画は明かにされていないが、いずれ国家体制が安定すればその方針も打ち出されると思われる。
- ・ 欧州は ESA とアリアンスペース社が中心であるが、EU の体制確立後は何か新しい方針が出てくるかも分からない。
- ・ 日本は今の所、20 世紀に完成したはずの打上ロケットの後始末と名誉挽回に努力を集中していて、新しい方針はあまり議論も出来ない。

日本の宇宙開発は基本的にロケットと衛星の技術開発で、客観的に見て十分な成果を上げているので、政府やその代行機関の仕事ではなくなりつつある。私は政府のミッションとして月の資源開発と宇宙太陽エネルギー開発の二つを思いつくが、月は学術的なミッションが無難であろう。これに対してエネルギー開発はわが国が最もその必要性がある国であり、国際的に受け入れられ易いのではないだろうか。需要が明確だと言う意味で太陽エネルギーは月資源より分かりやすい。もちろんエネルギー開発であるから生産性の維持が基本になる。新たなエネルギー源を求めて、より深い海底を目指すか、宇宙を目指すかの競争としてのコスト目標があらたな技術開発の目標でなければならない。これは前述のワールドモデルに出てきた SPS 導入の投資額と等しくなれば理論と実際が一致することになる。

宇宙エネルギー開発はプログラムレベルの目標は国家が設定するが、そのためのプロジェクトは実施機関がきめるべきであろう。従来は開発するロケットの性能から機数、試験飛行時期などなど細部まで宇宙開発計画として策定していたが、計画実施の自由度がなくなってしまう。もしそれが必要で有利ならば、有人活動を採用したり外国の輸送サービスを購入するくらいのことをしなければ、この大事業は出来ない。ただ、日本のトップレベルの意思決定の手順を噂で聞く限り、国家的な事業経営能力は驚く

ほど低く、スペースシャトルや宇宙ステーションの計画を通じて学んだ実施機関の経験（9）は全く活かされていない。

まとめ

世界の原油生産量は最近ピークを過ぎ、未開発のエネルギー資源は地理的にも技術的にもコスト高に向かい、宇宙太陽発電（SPS）の出番が近付いている感じがするが、「宇宙の太陽エネルギーは経済的に入手できる場所がないからエネルギー資源ではない」とその道の専門家は考えている。

北海油田はエネルギー資源として成功した例である。そこでは、やる気のある事業者が相当な資金と適切な技術を使って採算がとれるエネルギーを得た。宇宙太陽発電の導入効果をワールドモデルによるシミュレーションで予測した結果、宇宙太陽発電を地上産業並みの生産性で実現することが必要である。これは現在は不可能なので上記専門家の見解は正しいが、これを実現すれば宇宙太陽エネルギーはエネルギー資源となる。

21世紀の各国の宇宙開発は独自の目標を持っている。日本は中国に対抗して有人宇宙計画を持つべきだと説く向きもあるが、独自性がない。資源小国、日本は宇宙エネルギー開発を国の宇宙開発計画の中心課題とすべきである。宇宙輸送、月資源とエネルギー技術そして有人宇宙技術はこの大方針の中で経済重視で開発されれば、21世紀の産業の一翼を担うであろう。

謝辞

本研究の発表は、平成16年度科研費（課題番号16360426、研究代表者 趙 孟佑）の補助を得て行なわれました。関係各位に感謝いたします。

文献

1. P. E. Glaser, Power from the Sun: its Future, Science vol. 162, pp857-886, Nov. 1968
2. 石井吉徳、エネルギーと地球環境の調和 —— 石油ピークが過ぎた 21 世紀に考えるべきこと、ILLUME; A TEPCO Semiannual Scientific Journal, Vol. 16 No.1, 2004, pp. 41 - 56.
(バックナンバー等の情報は、東京電力のトップページ URL <http://www.tepco.co.jp> にある)
3. 世界国勢図会 2003/2004、(財) 矢野恒太記念会 編集発行, PP 191-195
4. TEPCO レポート (H16年8月、107号)
5. 宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究、宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術検討委員会報告書、平成15年3月、財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構、p. 291
6. J. Cresswell, Drilling the North Sea, Maritime Life and Tradition, No. 23, 2004 Summer, pp. 2-15
7. Yoshiki Yamagiwa & Makoto Nagatomo, A Model of Solar Power Satellite for World Dynamics Simulation, Proc. of ISES Solar World Congress, August 17-24, 1991 (和文は、第10回宇宙エネルギーシンポジウム、1991年2月14, 15日で発表)
8. Elaine Camhi, Editorial: A summer to remember, Aerospace America, August 2004, AIAA (スペースシップワンについては<http://www.scaled.com/index.htm>)
9. 例えば、長友信人、SEPAC プロジェクトのエンジニアリングとマネジメント、宇宙科学研究所報告第107号、2000年2月