

# CO2 Emission from Tether Satellite System\*

Keiichiro Asakura

Faculty of Economics , Ryutsu Keizai University  
120 , Ryugasaki City, Ibaraki 301-8555, Japan  
E-mail:asakura@rku.ac.jp

Satoshi Nakano

Keio Economic Observatory (KEO) , Keio University  
2-15-45 Mita, Minatoku, Tokyo 108-8345, Japan

Kanji Yoshioka

Keio Economic Observatory (KEO) , Keio University  
2-15-45 Mita, Minatoku, Tokyo 108-8345, Japan

## Abstract

In most countries, the activity that produces the greatest CO<sub>2</sub> emission is electricity generation. Furthermore, the use of Life Cycle Analysis (LCA) shows that various industrial systems that directly release only small amounts of CO<sub>2</sub> depend largely on electricity. For example, electric cars do not release CO<sub>2</sub> during operation, but they will release large amounts of CO<sub>2</sub> in production process if the electricity is generated from coal-fired energy system mainly. So an electricity generation system that has a low dependence on fossil fuels, releases small quantities of CO<sub>2</sub> and causes only a small environmental burden is highly desirable.

From this viewpoint, we have focused on Solar Power Satellite (SPS) as a new power generation system and calculated CO<sub>2</sub> emissions of several types of SPS. For this paper, we calculate the CO<sub>2</sub> emission on a new concept of Tether-Type SPS presented by S.Sasaki(JAXA), using 2000 Japanese Environmental Input-Output Table. The result indicates that the CO<sub>2</sub> emission from the Tether-Type SPS per unit of energy generated is a little more than from nuclear power system, however, much less than LNG-fired power system and coal-fired energy system, so the new SPS is one of the most effective alternative technology for further CO<sub>2</sub> reduction in electric power generation .

---

\* Presented at 10th SPS Symposium, 2-3 August, 2007

# テザー型 SPS の CO2 負荷(暫定版)<sup>●</sup>

朝倉啓一郎<sup>1</sup> 中野諭<sup>2</sup> 吉岡完治<sup>3</sup>

## 1.はじめに

われわれは、これまで、環境保全技術の CO2 負荷計算の一環として、化石燃料を使用しない大規模発電システムである「宇宙太陽発電衛星(Solar Power Satellite ; SPS)」に着目してきた。宇宙太陽発電衛星は遠未来技術だが、現在の産業技術によっても、開発・導入の可能性が高い大規模な発電システムである。しかし、システムの建設には膨大なエネルギーを必要とすることが予想されることから、本研究では、SPS システムの CO2 負荷計算を試みることによって、CO2 負荷の観点から SPS システムの有効性を吟味する。

本報告では、佐々木(2007)が提案するテザー型 SPS に着目し、はじめに、その基本構成を示し、つぎに、環境負荷の評価手法として、環境分析用産業連関計算を説明し、最後に、テザー型 SPS の CO2 負荷を明らかにする。

註：現在、佐々木(2007)により接近するために、衛星構造を修正中であること、および宇宙輸送機の再推計を行っていることから、本報告は、暫定値として公表させて頂く。引用等には注意されたい。なお、確定版は、『仮題：宇宙太陽発電衛星の研究』（慶應義塾大学出版会）にて公表予定である。

## 2.SPS の基本構成

はじめに、太陽発電衛星 (SPS) の基本構想を確認する。

地上の太陽光発電は、火力発電所のように CO2、NOx および SOx を排出しないこと、原子力発電のように放射性廃棄物が出ないことから、クリーンなエネルギーとして注目されている。しかし、太陽電池パネルを地上に設置した場合には、晴天時と比較して、曇りや雨の日には発電量が低下することや、夜間には発電ができないことから、安定的な電力供給が難しい。そこで、太陽電池パネルを並べた衛星、すなわち太陽発電衛星 (SPS) を静止軌道上に打ち上げて発電を行い、地上で受電し、各産業・家計に送電するシステムが注目された。

SPSの構想は、1968年にアメリカのグレイザー (P.E.Glaser) が提案し、1978年にアメリカのエネルギー省 (Department of Energy:DOE) と航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration:NASA)が、通称リファレンスシステムと呼ばれるSPSを発表した (以下では、DOE/NASAリファレンスシステムと呼称する)。DOE/NASAリファレンスシステム自体は、現在から約30年前のプランではあるが、近年まで同システムより詳細な検討が行われた宇宙発電システムは発表されていなかった。したがって、今日的なSPSシステムと比較するためにも、基本型として、DOE/NASAリファレンスシステムのCO2 負荷を明らかにした<sup>4</sup>。その後、NASAをはじめとして、宇宙科学研究所(現：JAXA)、宇宙開発事業団(現：JAXA)や無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)等から、新しいタイプのSPSシステムが提案され、それに対応して、われわれもCO2 負荷計算を進めてきた。

図表1は、本報告で着目する佐々木(2007)と無人宇宙実験システム研究開発機構(2007)が提案するザータイプの SPS である。

---

●本報告は、慶應義塾大学産業研究所の SPS 研究グループにおいて、CO2 負荷計算チームによる暫定的な研究成果である。テザー型 SPS の CO2 負荷推計においては、JAXA の佐々木進教授に多数の情報提供とアドバイスを頂いたことに心より感謝申し上げる。また、無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)の小林裕太郎氏にも、折にふれてご相談に乗って頂いていることに感謝する。

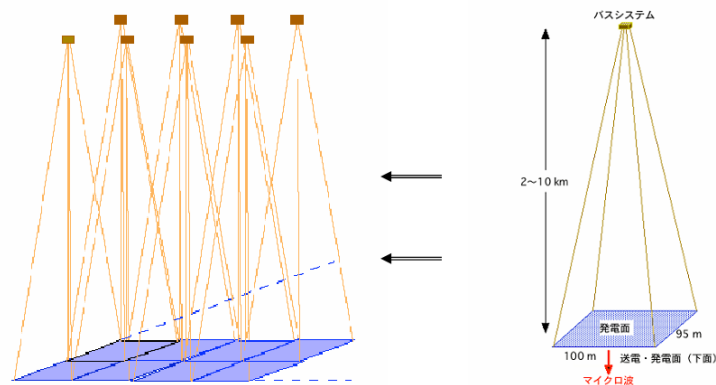
<sup>1</sup> 流通経済大学 経済学部

<sup>2</sup> 慶應義塾大学 産業研究所

<sup>3</sup> 慶應義塾大学 産業研究所

<sup>4</sup>DOE/NASA リファレンスシステムの CO2 負荷計算については、吉岡他(1998a,b)および朝倉他 (2001) の第5章を参照せよ。そこでは、ソーラーブリーダーによる CO2 負荷計算も行っている。

図表 1 テザー型 SPS の基本構成

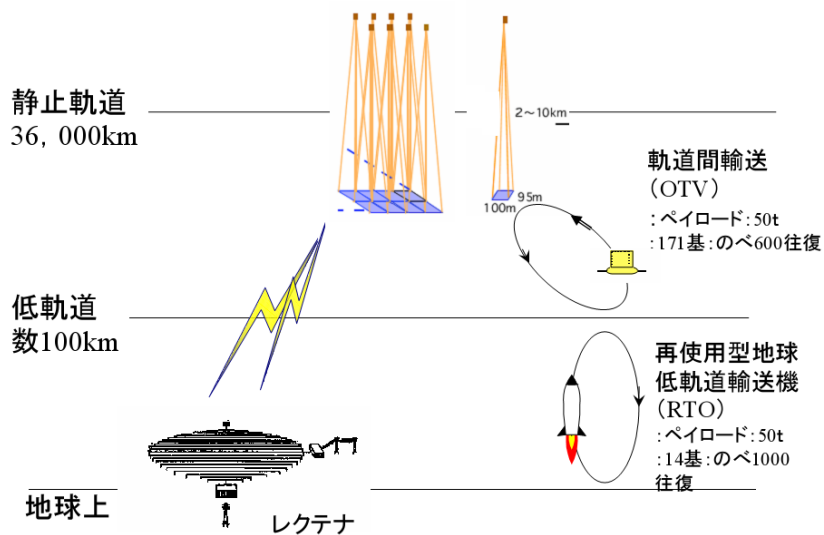


- ・発電効率:35%
- ・2.8GW(上面)、2.5GW(下面)→地上:1GW

\*佐々木(2007)「SPSのデザインとシステム技術」  
 \*USEF(2007)「太陽光発電利用促進調査成果報告書」

テザー型 SPS の特徴の 1 つは、図中の右の 1 つのユニットが複数連結されて衛星全体を構成するだけでなく、1 つのユニットそのものが発電衛星として機能し、送発電可能なシステムとなっている。発電電力は、625 ユニットを連結すると地上で 1Gw となる。

図表 2 テザー型 SPS の建設過程



図表 2 は、テザー型 SPS システムの構築についての概念図である。地上から低軌道までは、ペイロード 50 t の再使用輸送機 (RLV) を使用し、低軌道からは、電気推進方式 (イオンエンジン) の軌道間輸送機 (OTV) で輸送することを想定している。

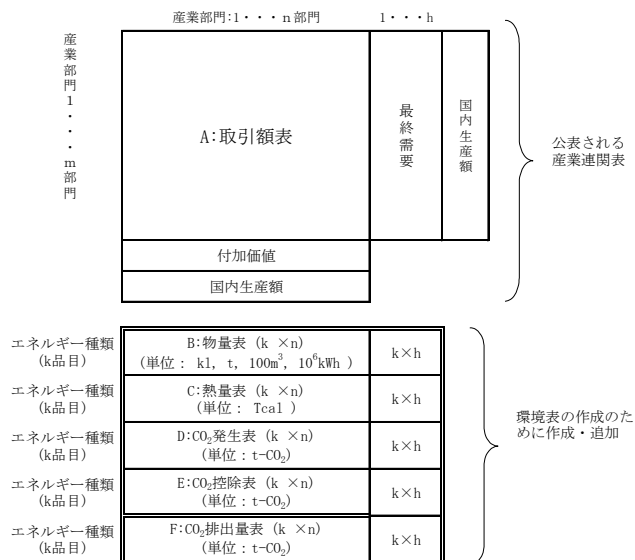
### 3.CO2 負荷の計算方法-環境分析用産業連関計算

今日、産業技術の環境負荷にアプローチするする手法として、「積み上げ法」と「産業連関法」がある。本報告では、慶應義塾大学が公表した 2000 年環境分析用産業連関表(中野(2005))を利用して、SPS の CO2 負荷計算を行う。

図表 3 は、環境産業連関表の基本構成を示している。図中のAは、部門間の取引関係を生産者

価格で表示した表であり、金額表と呼び、総務庁から公表される産業連関表そのものから作成される（総務省（2004））。図中のBからFは、各部門が経済活動のために投入・消費した複数のエネルギー財を物量と熱量に変換し、部門別のCO<sub>2</sub>排出量（図中のF）を計測するために、作成・付加した表である<sup>5</sup>。

図表 3 環境産業連関表の基本構成



注：産業研究所環境問題分析グループ(1996), 朝倉他(2001), 中野(2005)より作成。

環境産業連関表を利用した CO<sub>2</sub> 負荷計算のモデルは、オープン型産業連関モデルをもちいる式(1)。

$$CO_2^k = C(I - A)^{-1} f^k \dots (1)$$

ただし、 $C$  : CO<sub>2</sub> 排出係数行列(対角化),

$(I - A)^{-1}$  : レオンチェフ逆行列

$f^k$  : SPS の第  $k$  番目の構成物の最終需要ベクトル (例えば,  $k=1$  は衛星本体,  $k=2$  は OTV...)

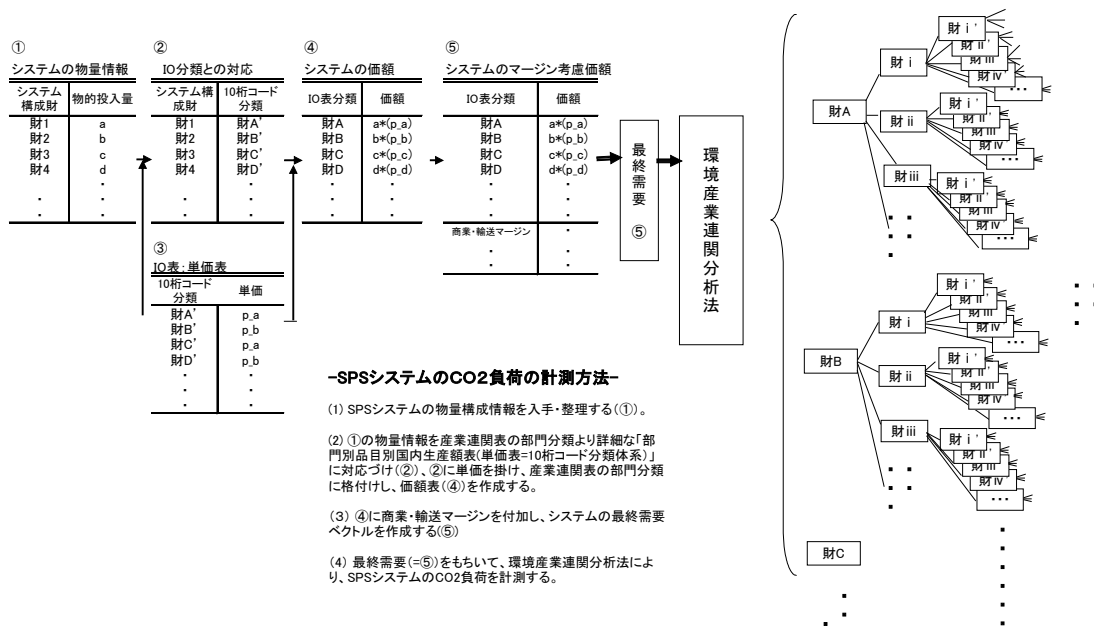
$CO_2^k$  : SPS の第  $k$  番目の構成物の CO<sub>2</sub> 負荷ベクトル

式(1)の右辺の  $C$  は図表 3 の部門別 CO<sub>2</sub> 排出量(図中の F)を産業連関表の国内生産額で割った値であり、 $(I - A)^{-1}$  は公表される産業連関表そのものから計測される。したがって、テザー型 SPS の CO<sub>2</sub> 負荷計算を行うためには、式(1)の最終需要  $f^k$  を作成することが必要であり、それについては、図表 2 で示したテザー型 SPS の建設に関連するシステム全体の基本構成にもとづいて、衛星本体、ETO、OTV、レクテナ、推進燃料および衛星本体と OTV に搭載する太陽電池ごとに作成している。作成の手順の概略は、図表 4 のとおりである<sup>6</sup>。

図表 4 環境分析用産業連関計算の基本フロー

<sup>5</sup> 2000 年環境分析用産業連関表の詳細な作成方法は、中野 (2005) を参照せよ。

<sup>6</sup> 物量情報をから最終需要を作成する方法や使用データについては、紙面の都合により省略し、別の機会に述べる。



#### 4.SPS の CO2 排出量

図表 5 は、テザー型 SPS システムの CO2 負荷計算の結果を示しており、トータルで約 1 千万トンの CO2 が排出される。その内訳を見ると、RLV の推進燃料（液体酸素・液体水素）の製造過程で排出される CO2 が全体の約 6 割を占める。つぎに、図表 6 は、テザー型 SPS を建設する時に排出される CO2 負荷を産業部門別に示しており、電力部門からの CO2 排出量が全体の半分以上を占めていることがわかる。最後に、図表 7 は、テザー型 SPS の耐用年数を 40 年と想定し、電力生産 1 単位あたり CO2 負荷にかんして、SPS と既存の発電システムを比較している。CO2 負荷の観点からテザー型 SPS を評価すると、原子力発電や DOE/NASA リファレンスシステムの SPS よりは、やや高いとはいえ、化石燃料を使用する発電システムと比較して、非常に低いレベルあることが明らかになった。

図表 5 テザー型 SPS の CO2 負荷(暫定版)

		万トン
衛星本体	構造体	70.9
	太陽電池	266.3
OTV	構造体	8.9
	アルゴン	6.1
	太陽電池	18.5
RLV	構造体	5.1
	液酸液水	640.9
レクテナ		69.8
合計		1086.4

注；テザー型SPS（地上で1Gw）を1基建設するときのCO2負荷。

図表 6 テザー型 SPS の産業部門別 CO2 負荷(暫定版)

	万トン	シェア (%)
1 事業用発電	577.0	53.1
2 自家発電	68.5	6.3
3 道路貨物輸送	56.7	5.2
4 石炭製品	44.3	4.1
5 銑鉄	44.2	4.1
その他計	295.7	27.2
合計	1086.4	100.0

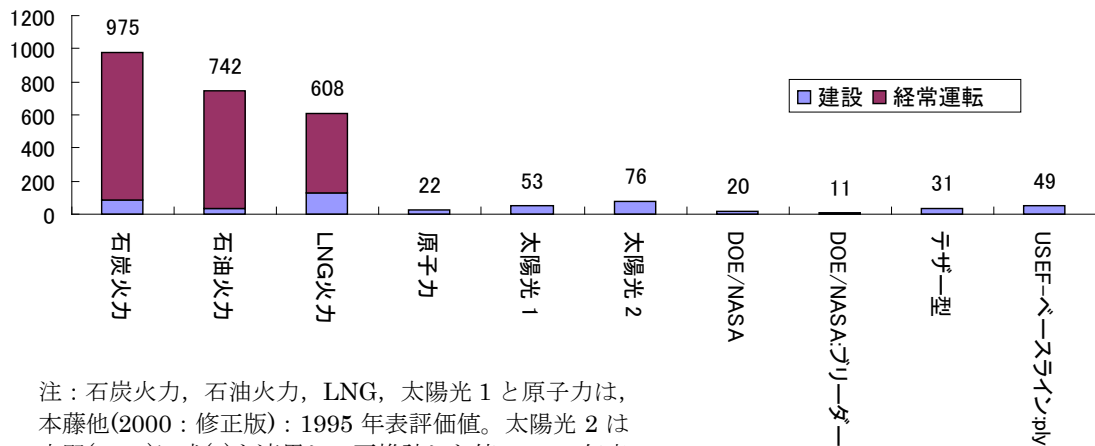
注：SPSの建設に関連する全ての最終需要ベクトルを足し合わせて、式(1)で計算した結果。

#### 5.小括

本報告の結果から、SPS システムは、建設時に大量の CO2 を排出するとはいえ、単位あたり CO2 排出量で見ると、化石燃料を使用する既存の発電システムより非常に CO2 負荷が低いことが明らかになった。今後に向けた課題として、SPS の建設時には、既存の発電部門から CO2 が最も排出されることから、ユニット構造を持つテザー型 SPS の特長を生かして、ソーラーブリーダーによる SPS 建設を想定することや、液体燃料の製造に必要な電力を SPS から供給するシミュレーション分析を行うこと等も考えられるだろう。いずれにせよ、今回の推計結果は暫定値

であり，確定版を公表した後，改めて再考させて頂きたい。

図表 7 電力生産 1 単位あたり CO2 負荷: 暫定値 (g-CO2/kWh)



注：石炭火力，石油火力，LNG，太陽光 1 と原子力は，本藤他(2000：修正版)：1995 年表評価値。太陽光 2 は中野(2006)に式(1)を適用して再推計した値：2000 年表評価値。DOE/NASA とそのブリーダーは，吉岡他(1998a,b):1990 年表評価値。USEF は，USEF(2003)：1995 年表評価値

## 参考文献

- ・ Asakura,K.,Collins,P.,Nomura,K.,Hayami,H. and Yoshioka,K.(2002)“CO2 Emission from Solar Power Satellite,"*KEO Discussion Paper*, no.G-145.
- ・ Department of Energy(DOE) and National Aeronautics and Space Administration(NASA), U.S.(1979) *Satellite Power System*, DOE/ER-0023,
- ・ Department of Energy(DOE) and National Aeronautics and Space Administration(NASA), U.S.(1980) *Preliminary Material Assessment for the Satellite Power System(SPS)*, DOE/ER-0038.
- ・ USEF:無人宇宙実験システム研究開発機構(2003)『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』.
- ・ USEF：無人宇宙実験システム研究開発機構(2007)『平成 18 年度：太陽光発電利用促進技術調査成果報告書別冊』.
- ・ 朝倉啓一郎・早見均・溝下雅子・中村政男・中野諭・篠崎美貴・鷲津明由・吉岡完治 (2001)『環境分析用産業連関表』慶應義塾大学出版会.
- ・ 慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ(1996)『環境分析用産業連関表』KEO モノグラフシリーズ no.7 慶應義塾大学産業研究所.
- ・ 佐々木進(2007)「SPS のデザインとシステム技術」『仮題：宇宙太陽発電衛星の研究』慶應義塾大学出版会 (近刊)
- ・ 総務省(2004)『平成 12 年産業連関表』全国統計協会連合会.
- ・ 中野諭(2005)「平成 12 年環境分析用産業連関表」*KEO Discussion Paper* no.098.
- ・ 中野諭 (2006)「住宅用太陽光発電装置の CO2 削減効果とユーザーコストの計測」*KEO Discussion Paper* no.102.
- ・ 本藤祐樹・内山洋司・森泉由恵(2000)「ライフサイクル CO2 排出量による発電技術の評価」『電力中央研究所報告』no.Y99009.
- ・ 吉岡完治・菅幹雄・野村浩二・朝倉啓一郎(1998a)「宇宙太陽発電衛星の CO2 負荷」『KEO Discussion Paper』 no.G-2.
- ・ 吉岡完治・菅幹雄・野村浩二・朝倉啓一郎(1998b)「宇宙太陽発電衛星の CO2 負荷-若干のシミュレーション」『KEO Discussion Paper』 no.G-14.
- ・ Working Group II (2002)『アジアの経済発展と環境保全：未来技術の CO2 負荷』第 2 巻上・下 慶應義塾大学産業研究所.