

Title	宇宙太陽発電衛星のCO2負荷とエネルギー収支： 宇宙太陽発電衛星の環境、エネルギー、および経済評価にむけて
Sub Title	
Author	朝倉, 啓一郎(Asakura, Keiichiro) 中野, 諭(Nakano, Satoshi)
Publisher	Keio Economic Observatory Sangyo Kenkyujo
Publication year	2012
Jtitle	KEO discussion paper No.130 (2012. 12)
JaLC DOI	10.14991/004.00000130-0001
Abstract	われわれは、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未来型の大規模発電システムである「宇宙太陽発電衛星(Solar Power Satellite ; SPS)」のCO2負荷を計算してきた。しかし、新しいSPSシステムが提案されるたびにCO2負荷計算を行ってきたことから、CO2の評価手法や評価データベース、および想定等が厳密には統一されていなかった。また、SPSの評価基準も、1990年代後半から本研究が開始されたこともあり、CO2負荷計算が中心であった。したがって、われわれは、経済統計のなかでも工学技術と親和性の高い産業連関表を利用する方針を維持しつつ、未来技術であるSPSシステムのCO2負荷とエネルギー・経済評価を総合的に整理することを試みる。本稿は、その前段として、CO2負荷とエネルギー評価に焦点を絞り、SPSシステムの特性を吟味した。その結果、構造タイプの異なるSPSシステムが提案されているとはいえ、「宇宙で発電した電力を地上に送り、利用する」という発想にもとづかならば、その発電システムの単位あたりCO2負荷は、ほぼ2桁 (g-CO2/kwh) であることを再確認し、また、エネルギー評価の結果も、エネルギー収支と回収期間の計算結果を見る限り、良好といえることも確認された。
Notes	
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA10715861-00000130-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

宇宙太陽発電衛星の CO₂ 負荷とエネルギー収支
—宇宙太陽発電衛星の環境、エネルギー、および経済評価にむけて—

朝倉 啓一郎*

Keiichiro ASAKURA

中野 諭**

Satoshi NAKANO

2012 年 12 月

KEO Discussion Paper No. 130

概要

われわれは、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未来型の大規模発電システムである「宇宙太陽発電衛星(Solar Power Satellite ; SPS)」の CO₂ 負荷を計算してきた。しかし、新しい SPS システムが提案されるたびに CO₂ 負荷計算を行ってきたことから、CO₂ の評価手法や評価データベース、および想定等が厳密には統一されていなかった。また、SPS の評価基準も、1990 年代後半から本研究が開始されたこともあり、CO₂ 負荷計算が中心であった。したがって、われわれは、経済統計のなかでも工学技術と親和性の高い産業連関表を利用する方針を維持しつつ、未来技術である SPS システムの CO₂ 負荷とエネルギー・経済評価を総合的統一的に整理することを試みる。本稿は、その前段として、CO₂ 負荷とエネルギー評価に焦点を絞り、SPS システムの特性を吟味した。その結果、構造タイプの異なる SPS システムが提案されているとはいえ、「宇宙で発電した電力を地上に送り、利用する」という発想にもとづかならば、その発電システムの単位あたり CO₂ 負荷は、ほぼ 2 桁 (g-CO₂/kwh) であることを再確認し、また、エネルギー評価の結果も、エネルギー収支と回収期間の計算結果を見る限り、良好といえることも確認された。

キーワード

宇宙太陽発電衛星 (SPS)、CO₂ 排出量、エネルギー収支、産業連関分析、環境分析用産業連関表

* 流通経済大学 経済学部 Ryutsu Keizai University, Faculty of Economics

** 独立行政法人 労働政策研究・研修機構 The Japan Institute for Labour Policy and Training

宇宙太陽発電衛星の CO₂ 負荷とエネルギー収支[♦]
—宇宙太陽発電衛星の環境、エネルギー、および経済評価にむけて—

朝倉 啓一郎*

Keiichiro ASAKURA

中野 諭**

Satoshi NAKANO

1. はじめに

われわれは、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未来型の大規模発電システムである「宇宙太陽発電衛星(Solar Power Satellite ; SPS)」の CO₂ 負荷を計算してきた。SPS の基本構想は、1968 年にアメリカのグレイザー (P.E.Glaser) によって提案され、その後、1978 年にアメリカのエネルギー省 (Department of Energy; DOE) と航空宇宙局(NASA)によって、通称リファレンスシステムと呼ばれる SPS システムが発表された (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が公表されて以降、より詳細に検討された SPS システムは発表されていなかったが、1990 年代に入り、NASA をはじめとして、宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science; ISAS、現: 宇宙航空研究開発機構: Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA)、宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan; NASDA、現: JAXA)、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization; NEDO) や無人宇宙実験システム研究開発機構 (Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer; USEF、現: 宇宙システム開発利用推進機構: Japan Space Systems; JSS) 等から、新しいタイプの SPS システムが提案されてきた。

したがって、われわれも基本型である DOE/NASA リファレンスシステムを基点として、今日的な SPS システムの情報を入手・整理しながら、CO₂ 負荷計算を進めてきた。そして、朝倉・中野 (2009) において、SPS システムごとに構造設計が異なったとしても、発電単位あたり CO₂ 負荷は、ほぼ 2 桁 (g-CO₂/kWh) であろう、との結論を明らかにしている。その一方、われわれの研究経過を振り返ってみると、新しい SPS システムが提案されるたびに CO₂ 負荷計算を行ってきたことから、CO₂ の評価手法や評価データベース、および想定等が厳密には統一されていなかった。また、SPS の評価基準も、1990 年代後半から本研究が開始されたこともあり、CO₂ 負荷計算が中心であった。したがって、本稿

[♦] 本稿の作成過程において、2011 年 11 月の環太平洋産業連関分析学会にて本稿の関連報告を行った際、コメントータの筑波大学 内山洋司氏およびフロアの諸先生から貴重な意見を頂戴した。2012 年 10 月の慶應義塾大学産業研究所の KEO セミナーでの報告の際、中島隆信所長をはじめとする所員・参加者の先生方から重要なコメントを頂戴した。とくに、宇宙科学研究所の佐々木進氏と成尾芳博氏より、長期にわたりご指導を頂いてきた。また、USEF (当時、現 JSS) の小林裕太郎氏と斉藤孝氏には貴重な情報を提供して頂いた。そして、松岡秀雄氏におかれては、同氏が東京大学在職中より、いろいろな研究会でアドバイスを頂いてきた。諸先生のご好意により、社会科学系の研究者ではあるが、「SPS シンポジウム」と「宇宙エネルギーシンポジウム」における報告と貴重な意見交換の機会を頂いている。諸先生方に心から感謝する次第である。最後に、本研究の開始時より、慶應義塾大学の産業研究所の吉岡完治名誉教授と商学部の早見均先生にアドバイスを頂いていることに感謝申し上げる。もちろん、本稿における誤りは、われわれの責任である。

* 流通経済大学 経済学部 Ryutsu Keizai University, Faculty of Economics

** 独立行政法人 労働政策研究・研修機構 The Japan Institute for Labour Policy and Training

は、経済統計のなかでも工学技術と親和性の高い産業連関表を利用する方針を維持しつつ、未来技術である SPS システムの CO₂ 負荷とエネルギー・経済評価を総合的に整理することを試みる。そして、本稿は、その前段として、CO₂ 負荷とエネルギー評価に焦点を絞り、SPS システムの特性を吟味する。

2.3 つの SPS システムと計算対象

太陽電池パネルを搭載した衛星によって発電し、その電力をマイクロ波で地上に送電し利用するという基本発想は、グレイザー (Glaser (1968)) によって発表される。そして、オイルショックをきっかけに注目され、DOE/NASA (1978) において、DOE/NASA リファレンスシステムとして整理されるが、その後、総合的に考案され評価された SPS システムは提案されてこなかった¹。しかし、1990 年代に入り、より実現可能なシステムとしての構造設計が模索され、日本において ISAS の「SPS2000」(宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループ(1993))、NEDO の「グランドデザイン」(NEDO(1994))、USEF の「テザー型」² (USEF (2003))、そして ISAS の佐々木氏による「マルチバステザー型」(佐々木 (2009)) が発表される一方、NASA によるフレッシュルックスタディー (SAIC, Futron Corporation and NASA (1997)) において³、複数の SPS システムが提案・評価されることとなった⁴。そういった SPS の構造設計の提案に対応して、われわれの CO₂ 負荷計算と、われわれと協力体制のもとで CO₂ 負荷計算をおこなった研究グループが対象とした SPS システムは、DOE/NASA リファレンスシステム、SPS2000、NEDO グランドデザイン、USEF テザー型、およびマルチバステザー型の SPS システムである。

CO₂ 負荷計算の観点から、これまでの研究動向を振り返ると、DOE/NASA リファレンスシステムについては、1997 年 2 月に開催された第 16 回宇宙エネルギーシンポジウムにおける特別セッション:「太陽発電衛星と地球環境」において報告され、パネルディスカッションも行われた⁵。その後、慶應義塾大学産業研究所において、通称: 未来開拓プロジェクト⁶が開始され、DOE/NASA リファレンスシステムが、吉岡他 (1998a,b) において整理される⁷。また、SPS2000 と NEDO グランドデザインについて、大橋他 (2000, 2001) は、われわれと情報交換しつつ、未来開拓プロジェクトの一環として計測作業を行った。さらに、USEF テザー型 SPS については、USEF の主催する委員会 (平成 13 年度・14 年度) において、吉岡が宇宙太陽発電システム (SSPS) 実用化技術検討委員会委員として、そして朝倉が宇

¹SPS 研究が 1980 年代に影を潜める理由は、レーガン政権下での緊縮財政や、DOE/NASA リファレンスシステムが物理的にも費用的にも巨大であったことなどが指摘される (長友 (1996)、SAIC, Futron Corporation and NASA (1997))。

²「はじめに」にて述べたように、USEF は現在の JSS であるが、USEF 時に提案した SPS システムであるため、「USEF テザー型」と呼称する。また、USEF は、SSPS (Space Solar Power System) の略称をもちいていたが、本稿では、統一的な呼称として、「SPS」をもちいることを許されたい。

³ NASA のフレッシュルックスタディーでは、Space Solar Power ;SSP の呼称がもちいられているが、本稿では、SPS で統一する。

⁴ SPS システムの研究動向については、佐々木 (2011) や松本 (2011) 等を参照せよ。

⁵柴田・松岡 (1997a,b)、松岡 (1997)、野村 (1997)、朝倉 (1997)、および菅 (1997) が報告した。また、パネルディスカッションも行われた。

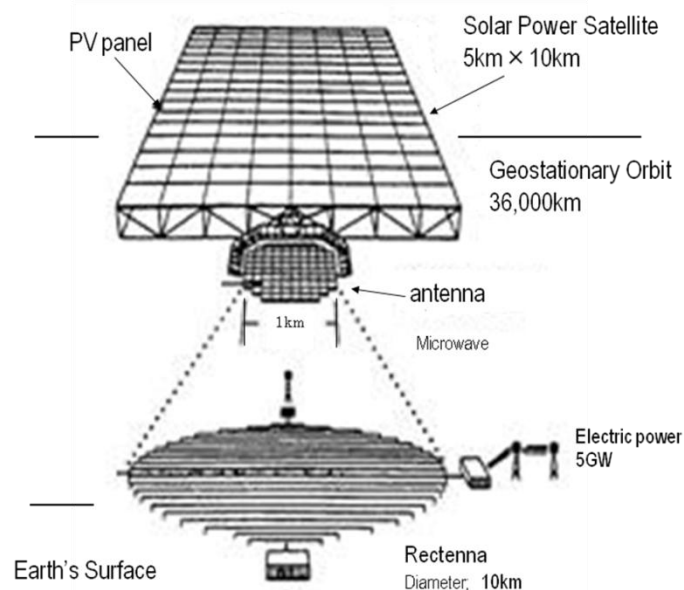
⁶日本学術振興会・未来開拓プロジェクト (複合領域):「アジア地域の環境保全: アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究」((代表: 慶應義塾大学・産業研究所・吉岡完治 (期間: 1997 年 8 月~2002 年 3 月))

⁷ その基本ケースを取りまとめた論文として、吉岡他 (1998c)、ソーラーブリーダー等のシミュレーションも含めて取りまとめた論文として、1995 年環境分析用産業連関表の作成と利用を取りまとめた『環境分析用産業連関表』(朝倉他 (2001)) の第 5 章と Asakura et.al.(2002)がある。

宙太陽発電システム（SSPS）専門委員会委員として参加し、その過程において、USEF 事務局と共同して CO₂ 負荷計算（および一部エネルギー指標の計測）を行い、USEF（2003）および朝倉他（2003）を公表している。その後、ISAS の Sasaki(2006a)の提案したマルチバステザーについては、朝倉・中野（2008）において報告書を作成の後、朝倉・中野（2009）において公表された⁸。それらのシステムのうち、本稿において、筆者らが統一的な評価手法によって CO₂ 負荷とエネルギー評価を行うシステムは、DOE/NASA リファレンスシステム、USEF テザー型、およびマルチバステザー型の 3 タイプとし、つぎに、CO₂ 負荷計算とエネルギー評価の観点から、それぞれの構造設計を説明する⁹。

図表 1 は、DOE/NASA リファレンスシステムの基本構成を示しており、図の上部の構造物が太陽電池を搭載した太陽発電衛星であり、大きさは 5km×10km である。太陽発電衛星で発電した電力は高周波マイクロ波に変換され、地上へ送られる。図の下部の構造物がレクテナであり、電力マイクロ波を受電し、各産業・家計に送電する機能を持つ。大きさは 10km×13km である。また、1 基の太陽発電衛星は、5GW の発電能力を持ち、それを 60 基打ちあげて発電を行うことを想定しており、それは、1970 年代当時、21 世紀に予想される全米の電力需要を SPS が全て供給するという発想にもとづいていた。

図表 1 DOE/NASA リファレンスシステムの基本構造



DOE/NASA(1980) 'SPS-FY79 Program Summary'

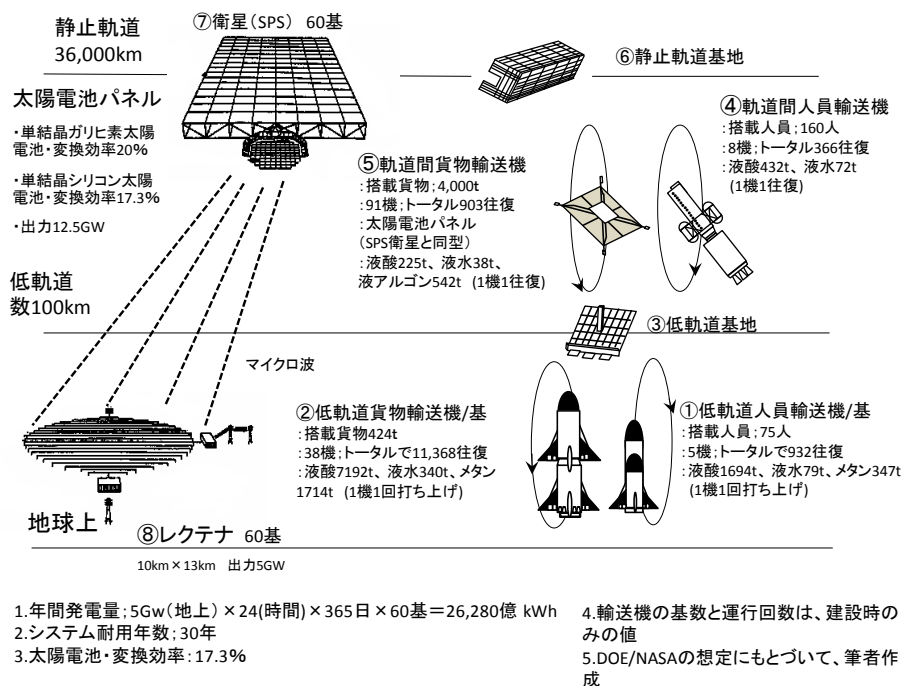
図表 1 で示される巨大な構造物を建設するためには、低軌道貨物輸送機、低軌道人員輸送機、低軌道上の基地、静止軌道上の基地、軌道間貨物輸送機、軌道間人員輸送機、宇宙輸送機の推進燃料(水素、酸素、アルゴン、LNG)も製造することが必要であるが、統一的に整理されて提示されていないことが

⁸ 朝倉・中野（2008）では、「マルチテザー型 SPS」の呼称をもちいていたが、朝倉・中野（2009）以降は、「マルチバステザー型 SPS」に統一した。

⁹ 詳細な構造設計は、DOE/NASA リファレンスは DOE/NASA（1978）、USEF テザー型は USEF（2003）、そして、マルチバステザー型は佐々木（2009）を参照されたい。

ら、図表 2 で示すように、DOE/NASA リファレンスシステム全体の物量構成を整理した¹⁰。

図表 2 DOE/NASA リファレンスシステムの建設



システムの建設は、はじめに、地上から、低軌道貨物輸送機と低軌道人員輸送機によって、低軌道上に資材と人員を移送し、基地を建設し、軌道間輸送機を組み立てる。つぎに、軌道間輸送機によって、低軌道から静止軌道まで資材と人員を輸送する。静止軌道上においても、基地を建設し、発電衛星本体を組み立てる。それと平行して、地上では、レクテナを建設する。なお、本稿は、SPS システム間の統一的な比較を目指すため、輸送機の数や輸送回数および輸送機そのものの補修情報も可能な限り再整理した。したがって、DOE/NASA リファレンスシステムの CO₂ 負荷を最初に計測した吉岡他 (1998a) とは値が異なり、本稿の推計方法については、第 4.1a 節で述べる。

つぎに、図表 3 は、USEF テザー型 SPS システムの衛星部分の基本構成である。そこでは、衛星とバス (鍾) がテザー (合成繊維のヒモ) で結合された構造をとっており、地上で 1GW の発電能力を持つ 3 つのタイプの衛星構造が提案されていた。ベースライン型と派生 (1G-1) 型の相違点は、太陽電池の変換効率であり、派生 (1G-1) 型の方が高効率太陽電池を搭載し、それに伴って、パネルの大きさ、重量およびテザーの重量も異なっている。また、派生 1G-2 型は、発電パターンを平滑化するために、反射鏡を搭載している。

今回の推計においては、図中の左に掲載されているベースライン型を比較対象とし、その建設に必

¹⁰ 吉岡他 (1998a) を公表して以降、DOE/NASA リファレンスシステムの輸送系の呼称として、地上から低軌道までの貨物輸送機: Heavy Lift Launch Vehicles (HLLV) を「大量打ち上げロケット」、同じく地上から低軌道までの人員輸送機: Personnel Launch Vehicles (PLV) を「人員打ち上げロケット」と呼称してきた。しかし、その他の SPS システムの建設においても、地上から低軌道までの輸送と、低軌道から静止軌道までの輸送を区分し、それぞれに関連する輸送機の名称として、「低軌道輸送機」と「軌道間輸送機」を利用していることから、本稿における DOE/NASA リファレンスシステムについても混乱を避けるため、「低軌道」と「軌道間」の名称区分を明示化し、HLLV を低軌道貨物輸送機、PLV を低軌道人員輸送機と呼称する。なお、Cargo Orbit Transfer Vehicle (COTV) と Personnel Orbit Transfer Vehicle (POTV) は、これまでどおり、「軌道間貨物輸送機」と軌道間人員輸送機」の名称をもちいる。

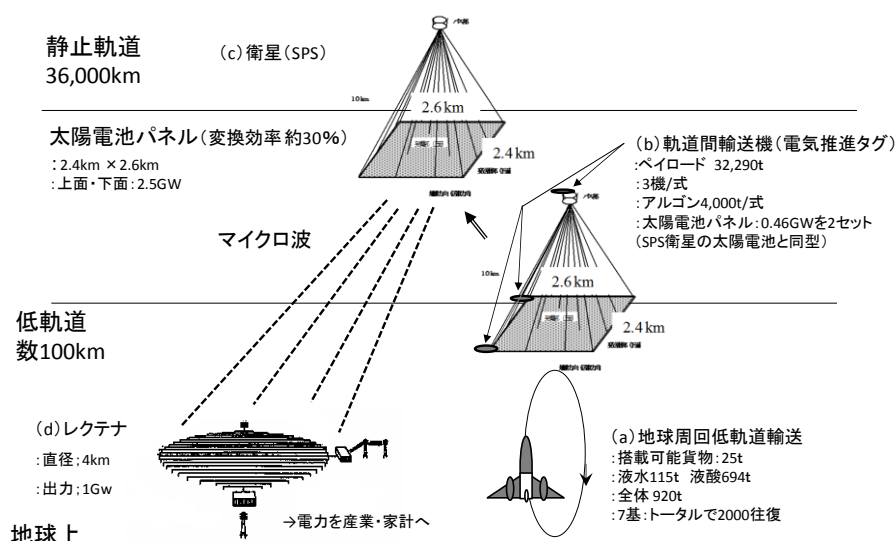
要な構造物を図表 4 で示している。CO₂ 負荷計算とエネルギー収支計算の前提とする建設過程は、磁気浮揚カタパルト方式の低軌道輸送機により、衛星関連の資材が低軌道に運ばれ、そこで組み立て作業が行われること、また、軌道間輸送機として機能する電気推進タグが装着され、静止軌道まで運搬されること、そして、地上にレクテナが建設されること、である。したがって、UESF テザー型 SPS の「再使用型の輸送機で物資を低軌道に運び、それを、軌道間輸送機で静止軌道まで運ぶ」という基本設計は、DOE/NASA リファレンスシステムと同一であることが確認できる。図表 4 の図中には、機体質量、推進剤質量、打上回数、レクテナ等の技術情報もあわせて整理しており、それについては、第 4.1b 節で述べる。

図表 3 USEF テザー型 SPS の衛星構造

	ベースライン型	派生(1G-1)型	派生(1G-2)型
軌道	静止軌道	静止軌道	静止軌道
衛星概要図			
特徴	・太陽電池電力:400w/m ² ・発電面:上下両面	・太陽電池電力:600w/m ² ・発電面:上下両面	・太陽電池電力:600w/m ² ・発電面:上面 ・反射鏡型
発電規模(地上平均)	1GW	1GW	1GW

図注：USEF がとりまとめた宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究(2003)・宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術検討委員会(2003)『報告書』より。

図表 4 USEF テザー型 SPS (ベースライン) の建設

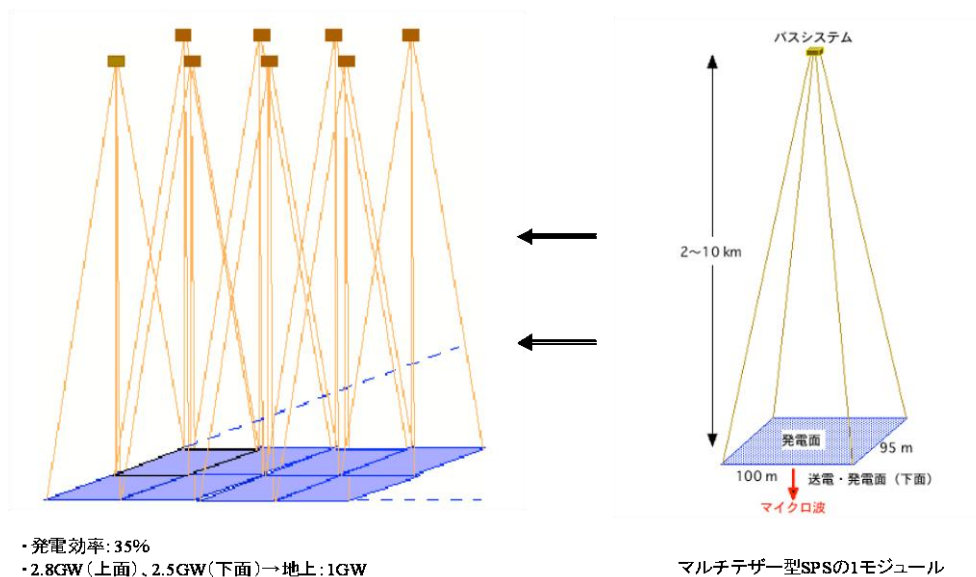


1. 年間発電量: 1Gw (地上) × 24 (時間) × 365 日 = 8,760GW
2. システム耐用年数: 40年
3. 太陽電池・変換効率: 30%

4. 輸送機の基数と運行回数は、建設時のみの値
5. USEF型SPSの想定にもとづいて、筆者作成

最後に、図表 5 は、マルチバステザー型 SPS の衛星部分の基本構成であり、その第 1 の特徴は、衛星がモジュール構造を持ち、1 モジュールごとにバスシステム(鍾)と太陽電池パネルがテザーによって結ばれていることである。モジュールの個数は 625 個である。第 2 の特徴は、1 モジュールの発電衛星自体が発電機能を持つことである。そして、第 3 の特徴は、衛星本体に蓄電池を搭載し、地上での発電パターンを平滑化したことである。

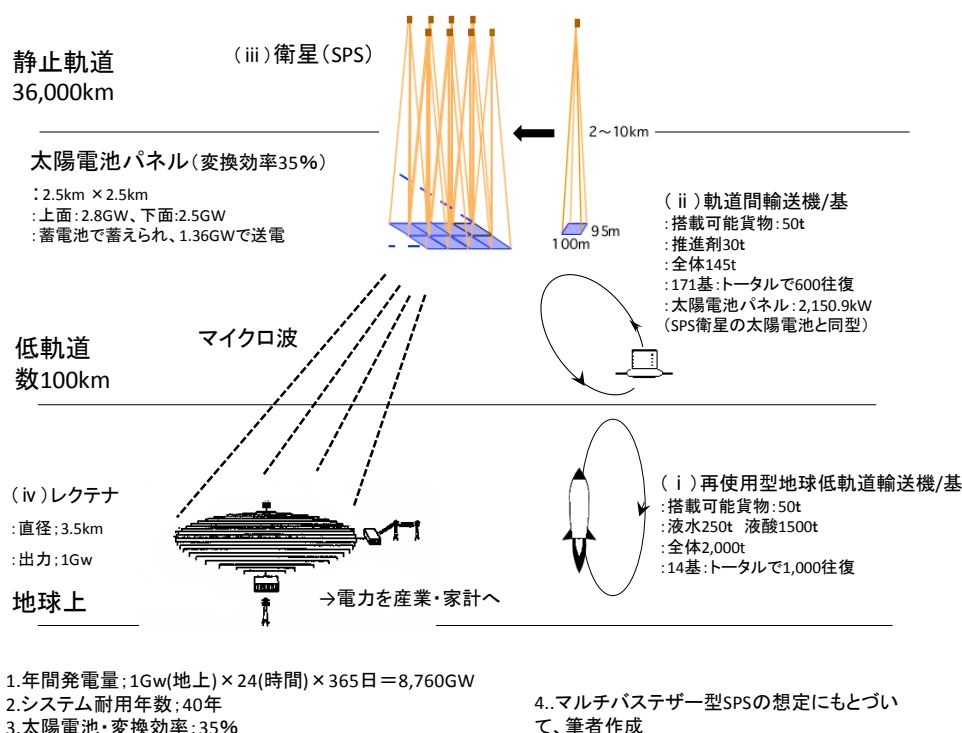
図表 5 マルチバステザー型 SPS の基本構成



図注；佐々木（2009）より許可を得て作成。

マルチバステザー型 SPS の建設過程は図表 6 であり、再使用型低軌道輸送機が軌道間輸送機と衛星ユニットを低軌道まで運び、つぎに、軌道間輸送機が衛星ユニットを静止軌道まで運ぶ。そして衛星が自動展開した後、625 個のモジュールが組み合わされ、SPS システムが完成する。もちろん、その過程と平行して、地上のレクテナ建設も進められる。したがって、「再使用型の輸送機で物資を低軌道に運び、それを、軌道間輸送機で静止軌道まで運ぶ」という基本設計は、DOE/NASA リファレンスシステムおよび USEF テザー型と同様であり、衛星構造体、輸送機、輸送回数、およびレクテナ等の情報を整理してアプローチする（第 4.1c 節）。

図表 6 マルチバスター型 SPS の建設



最後に、それぞれの報告書から、発電についての基本想定と発電パターンを抽出すると、図表 7 と図表 8 となり、図表 7 の「発電能力 (1)」をベースにすると、DOE/NASA リファレンスシステムは、常時 5GW の発電能力を持ち、USEF テザー型 SPS は、地上平均で 1GW、マルチバスターは、蓄電池を搭載することによって、常時 1GW 発電可能なシステムとなっている。

ただし、本稿の CO₂ 負荷とエネルギー収支の計測においては、これまでの計測方法を再吟味し、つぎのように SPS と既存の発電技術の発電能力を整理する。

DOE/NASA リファレンスシステムは、マイクロ波を直流変換 (RF-DC) した後の発電能力を 5GW とし、その他のシステムも直流変換後の値として計測される¹¹。ただし、地上の太陽光発電等を含む既存の発電技術との比較においては、SPS システムもコンバータ・インバータによって交流電流に変換可能な設備を保有することと、変換後の発電量で比較すること必要である。したがって、図表 7 で示す直流電流での「発電能力 (1)」ではなく、「発電能力 (2)」にもとづいた値で評価し、そのポイントをいわゆる送電端とみなす。そのためには、インバータ等の変換効率が必要であるが、その値は、USEF (2007) におけるコスト計算において整理された「商用電源網への接続効率」の 95%を援用する。

なお、これまでの SPS の CO₂ 負荷計算においても CO₂ 排出量にインバータの製造過程を含めていたが、発電量を「発電能力 (1)」にもとづいて計測していた。したがって、今回、発電量を「発電能力 (2)」にもとづいて再計算することにより、第 6 章の発電単位あたり CO₂ 排出量の値がこれまでより増加することに留意されたい。また、本稿においては、既存の発電技術についての CO₂ 排出量やエネ

¹¹ DOE/NASA リファレンスシステムの紹介文献のなかには、マイクロ波が直流電流に変換され、さらに交流電流に変換された後の発電能力を 5GW として紹介する文献もあるが、本稿は、DOE/NASA(1978)の記述をそのままちいる。

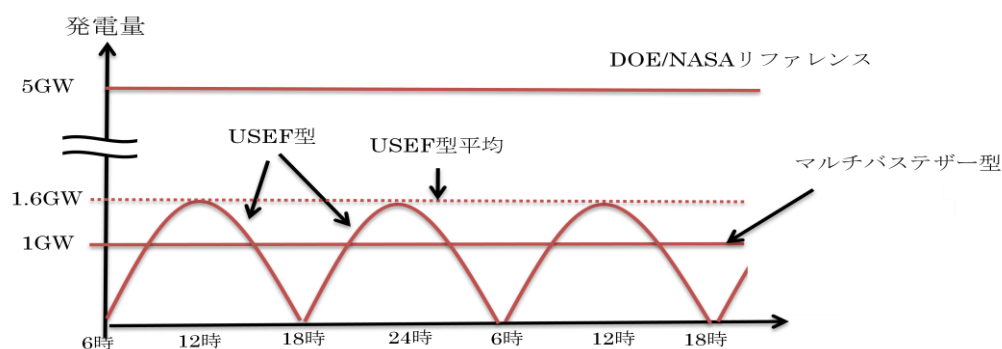
ルギー収支の計算についても、送配電ロスを検討した受電端ではなく、SPS の出力ベースに近い送電端ベースで計測計算を行うことにも留意されたい。

図表 7 SPS システムの発電についての基本性能（一部想定を含む）

	太陽電池 効率	発電能力 (静止軌道上)	発電能力 (1) レクテナ：マイクロ波 を直流変換後)	発電能力 (2) レクテナ： 交流変換後)	寿命
DOE/NASA リファレンス	17.3%	12.5GW	5GW	4.75GW	30 年
USEF テザー型 (ベースライン)	30%	2.5GW (上面・下面)	1GW	0.95GW	40 年
マルチバステザー型	35%	2.8GW (上面) 2.5GW (下面)	1GW	0.95GW	40 年

図表注：DOE/NASA（1978）、USEF（2003）および佐々木（2009）より筆者ら作成。なお、DOE/NASA リファレンスでは、使用する太陽電池としてガリウムヒ素とシリコンの 2 つのタイプを掲載しているが、本稿は、シリコンタイプを想定する。なお、本稿の CO₂ 負荷とエネルギー計算にもちいる発電量は、発電能力（2）をベースにしており、発電能力（1）から発電能力（2）への変換は、USEF（2007）の値を援用した。

図表 8 SPS システムの発電量と発電パターン



図表注：DOE/NASA(1978)、USEF(2003)および佐々木（2009）より、発電パターンのイメージ図を筆者ら作成。DOE/NASA リファレンスは常時 5GW、マルチバステザーは常時 1GW 発電。USEF テザー型は平均で 1GW 発電。なお、春分と秋分時は発電できないが（例えば、マルチバステザー型は約 60 時間）、計測する原単位には影響を与えない。

3.SPS の CO₂ 負荷計算の方法

本節は、環境分析用産業連関表をもちいた SPS システムの CO₂ 負荷計算について述べる。

図表 9 は、環境分析用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、取引額表(金額表)と呼び、総務省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、燃焼された量を抽出し、部門別の CO₂ 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。なお、現在、最新版の 2005 年環境分析用産業連関表がすでに作成・公表されているが(中野(2009b))、これまで環境分析用産業連関表の作成のために使用していたエネルギー統計の 1 つである「石油等消費構造統計」が中止され、「エネルギー消費統計」が新設されるという過渡期の状況下であったため、今回の推計には 2000 年環境分析用産業連関表をもちいる(中野他(2008))¹²。

図表 9 環境分析用産業連関表の基本構成

産業部門:1・・・n部門		1・・・h		公表される産業連関表
産業部門 1 ・ ・ ・ m部門	A:取引額表		最終需要	
			国内生産額	
	付加価値			
	国内生産額			
エネルギー種類 (k品目)	B:物量表 (k×n) (単位: kl, t, 100m ³ , 10 ⁶ kWh)		k×h	環境表の作成のために作成・追加
エネルギー種類 (k品目)	C:熱量表 (k×n) (単位: Tcal)		k×h	
エネルギー種類 (k品目)	D:CO ₂ 発生表 (k×n) (単位: t-CO ₂)		k×h	
エネルギー種類 (k品目)	E:CO ₂ 控除表 (k×n) (単位: t-CO ₂)		k×h	
エネルギー種類 (k品目)	F:CO ₂ 排出量表 (k×n) (単位: t-CO ₂)		k×h	

注: 産業研究所環境問題分析グループ(1996), 朝倉他(2001), 中野(2005), 中野他(2008)より作成。

¹² 2000 年環境分析用産業連関表の詳細な作成方法は、中野他(2008)を参照せよ。

環境分析用産業連関表を利用した CO₂ 負荷計算のモデルは¹³、オープン型産業連関モデルをもちいる(式(1))。

$$\mathbf{CO2}^{k,l} = \mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f}^{k,l} + \mathbf{CO2}^i \cdots (1)$$

ただし、**C** : CO₂ 排出係数行列 (対角化),

$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$: レオンチェフ逆行列

$\mathbf{f}^{k,l}$: SPS の第 k 番目の構造物で、第 l 番目の想定にもとづく最終需要ベクトル (例えば、 $k=1$ は衛星本体、 $k=2$ はレクテナ、 $\cdots$ 、 $l=1$ は「想定 A-想定 a」、 $l=2$ は「想定 A 想定 b」、 $\cdots$ (第 4.2.2 節の図表 18 でまとめている))

$\mathbf{CO2}^{k,l}$: SPS の第 k 番目の構造物で、第 l 番目の想定にもとづく最終需要ベクトルからの直接間接 CO₂ 排出量ベクトル

$\mathbf{CO2}^i$: 今回の推計における LNG の燃焼のように、最終財として燃焼する際の CO₂ 負荷

式(1)の右辺の **C** は図表 9 の部門別 CO₂ 排出量(図中の F 表をエネルギー品目について合計したもの)を産業連関表の国内生産額で割った値であり、また、 $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ は公表される産業連関表そのものから計測される。

今回の計測作業においては、オープンモデルにおけるレオンチェフ逆行列として、非競争輸入型モデル： $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ を採用しており、輸入製品の海外における生産過程で発生する CO₂ は、日本国内の同一商品が製造される過程で発生する CO₂ として計測され、算入される。そこでは、海外の製造過程と日本の製造過程が同一という想定をおくことになる。ただし、本稿の計算においては、DOE/NASA リファレンスシステムにおける「低軌道人員輸送機」と「低軌道貨物輸送機」の推進剤として使用される LNG (液化メタン) は、日本では採掘・製造されず、もっぱら海外からの輸入に依存している。そういった輸入財について、『日本貿易月表』より計算される単価によって必要物量を価額化し、日本の産業連関表でモデル計算しても、海外での採掘・液化過程に関連する CO₂ を計測することは言い難い。ただし、今回の推計計算は産業連関計算の枠組みを前提としており、また、産業環境管理協会 (2002) において、液化の過程からの CO₂ 排出量が大いことが示されていることから¹⁴、液化に関連する値を産業連関モデルの計測値に組み込むこととした。具体的には、第一に、採掘については、LNG の必要量を『日本貿易月表』で価額化し、「IO コード : 072101 : 天然ガス」で評価すること、第二に、液化については、産業環境管理協会 (2002) の値を付加すること、第三に、海外からの輸送に起因する CO₂ 排出量は付加しないこと、第四に、日本国内の輸送については、第一の計測と対応して、平均的な商業・輸送マージンで評価すること、そして、第五に、燃焼過程からの CO₂ 排出量については、中野他 (2008) にもとづいて、LNG の必要量から計測している。なお、第 6 節と第 7 節で既存の発電技術として LNG 火力の値を提示しているが、同様の計測方針で行っており、エネルギー計算においても、産業環境管理協会 (2003) をもちいて、同様の方針で進めている。

つぎに、SPS システムの CO₂ 負荷計算を行うために必要な式(1)の最終需要 $\mathbf{f}^{k,l}$ の作成について述べる。

¹⁴ 採掘、液化および日本への輸送において、CO₂ 負荷の割合は、採掘が 7%、液化が 76%、輸送が 17%である。

4.各 SPS システムの最終需要ベクトルの作成

本節は、式(1)の最終需要ベクトル $\mathbf{f}^{k,l}$ を説明するにあたり、説明の複雑化を避けるため、はじめに想定にかんする l を捨象し、作業方針の全体像を確認する。

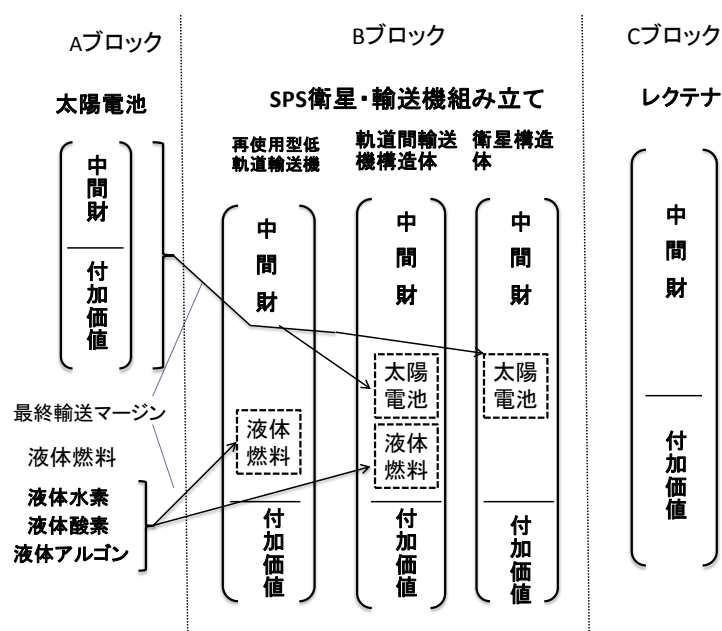
図表 10 は、マルチバステザー型 SPS を例として、SPS 構造物を環境・エネルギー・経済評価のために整理したデータ構成と対応させた図である。最終需要ベクトルは図中の中間財の投入ベクトルとして示されている。

A ブロックは、太陽電池と液体燃料（液体水素、液体酸素、液体アルゴン）を製造する。B ブロックは、再使用型低軌道輸送機、軌道間輸送機、および衛星構造物を製造し、A ブロックの太陽電池と液体燃料を組み込む。C ブロックは、レクテナの建設である。図より、SPS 構造物が対応する中間投入ベクトル（と付加価値ベクトル）は、大きく2つに区分されることがわかる。第1は、A ブロックの太陽電池、B ブロック、および C ブロックであり、中間財の投入ベクトルとして設定される構造物である。第2は、A ブロックの液体燃料であり、最終製品の形で設定される。原則として、前者は、現行産業連関表の産業部門分類が存在しない場合であり、後者は、産業分類に存在する場合であるが、情報の制約やシミュレーションの観点からも、操作的に扱っている。

例えば、A ブロックの太陽電池は、「その他の電気機械器具（コード：3421-09）」のなかに埋没している。しかし、これまでの研究より、太陽電池は CO₂ 評価を左右する重要な構造物であることが示されており、また、今日の変換効率を超える太陽電池を搭載することが予定されているものの、その投入構造を詳細に把握することが出来ないことから、「太陽電池」を「その他の電気機械器具（コード：3421-09）」の最終製品として評価せず、想定をおきながら計測するために別掲し、ベクトルの形で計測している。また、A ブロックの液体燃料は、「圧縮ガス・液化ガス（コード：2029-01）」に含まれるが、物量ベースの単価が入手可能なことから、今回は、ベクトルの形で明示的には計測していない¹⁵。

¹⁵ 図表 10 の B ブロックと C ブロックに示される付加価値ベクトルは、SPS の経済性評価において利用する。

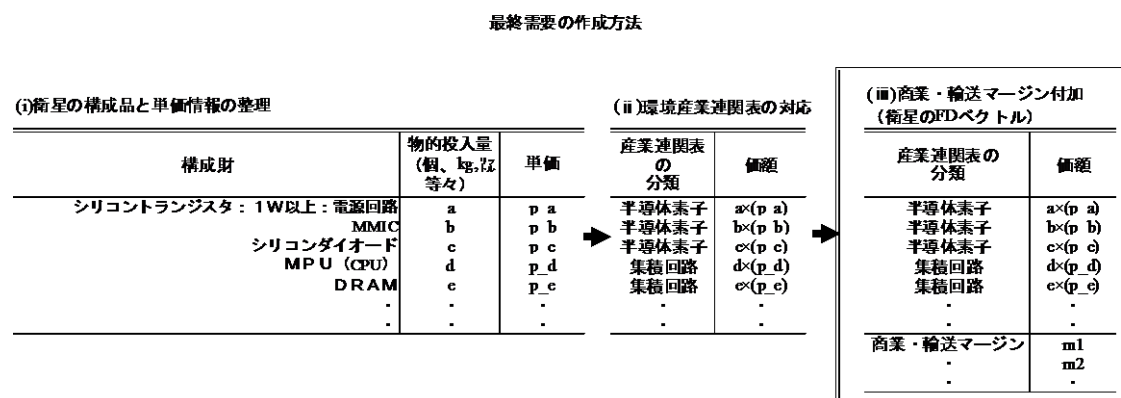
図表 10 評価のための中間投入ベクトルと付加価値ベクトル



図表注：図注の「中間財」は「中間財投入ベクトル」を、「付加価値」は「付加価値ベクトル」を示す。また、図中には SPS 建設のみのベクトルを示し、補修活動等のベクトルは捨象している。

そして、図表 2、図表 4 および図表 6 で示した SPS システムごとに、図表 10 の枠組みで最終需要ベクトルを作成しており、作成の基本手順の概略は、図表 11 のとおりである。

図表 11 最終需要ベクトルの作成手順



図表 11 は、例として、マルチバステザー型 SPS の衛星構造体の最終需要ベクトルの作成方法を示しており、はじめに(i)衛星を構成する素材(シリコントランジスタ、電界効果型トランジスタ、シリコンダイオード等)とその物的投入量および単価情報を整理する。つぎに、(ii)(i)を産業連関表の部門に格付け、価額化し、最後に(iii)商業・輸送マージンを付加することによって、衛星の最終需要ベクトルが完成する。また、液体燃料は対応する物量に対応する単価をかけ、商業・輸送マージンを付加して最終需要ベクトルとする。

図表 11 は、最終需要ベクトルを作成するための基本的な手順であるが、他の加工作業も必要である。それについては、4.1a 節から 4.1c 節において、3 つの SPS システムごとに、最終需要ベクトルの作成の概略を示す。なお、今回の最終需要ベクトルの作成過程においては、第 1 に、2000 年価格であること、第 2 に、システムの建設と経常・補修活動を区別すること、第 3 に、最終需要ベクトルだけを作成するのではなく、最終的な組み立てや完成品としての財の供給をイメージして、付加価値やマージンを考慮すること、を念頭においている。

4.1a DOE/NASA リファレンスシステムの最終需要ベクトル

- ・衛星本体の物量情報は DOE/NASA (1978) を利用し、単価は『機械統計年報』(経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。また、USEF テザー型 SPS とマルチバステザー型 SPS のように電子部品関係の情報が得られないことから、最終的には、産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している(補章参照)¹⁶。

- ・軌道間人員輸送機と軌道間貨物輸送機の物量情報は DOE/NASA (1978) を利用し、単価は『機械統計年報』(経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。そして、掲載情報が限られていることから、産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している(補章参照)。また、運行 1 回あたりの燃料は、軌道間貨物輸送が液体酸素：225 トン、液体水素 38 トン、液体アルゴン：542 トン、軌道間人員輸送が液体酸素：432 トン、液体水素 72 トン必要とし(Frantz and Cambel(1981))、液体アルゴンの単価は『月刊積算資料』の年平均値、液体水素の単価は成尾他(1996)の値にもとづいて 2000 年値を推計し、液体酸素の単価は『機械統計年報』を利用している。

- ・低軌道基地と静止軌道基地の物量情報は、DOE/NASA (1978) を利用し、単価は『機械統計年報』(経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。そして、掲載情報が限られていることから、産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している(補章参照)。

- ・低軌道人員輸送機と低軌道貨物輸送機の物量情報は、DOE/NASA (1978) を利用し、単価は『機械統計年報』(経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。そして、掲載情報が限られていることから、産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している(補章参照)。また、運行 1 回あたりの燃料は、低軌道人員輸送が液体酸素：1694 トン、液体水素 79 トン、および LNG：347 トン、低軌道貨物輸送が液体酸素：7192 トン、液体水素 340 トン、および LNG：1714 トン必要としている(Frantz and Cambel(1981))。そこで、液体水素の単価は成尾他(1996)の値にもとづいて 2000 年値を推計し、液体酸素の単価は『機械統計年報』を利用しているが、本稿第 3 節で述べたように、LNG は、生産、液化、輸送および燃焼を区別して計測している。

- ・レクテナ(約 100km²)は、DOE/NASA(1978)の鋼材、コンクリート、アルミ関連製品の物量と地上の大規模太陽光発電の鋼材量(化学工学会第 1 種研究会(1995))等の比率から建設費用を推計した。マイクロ波の整流のためのダイオードは、JAXA・ISAS 成尾氏よりご教示頂いた(100 億個)。また、インバータ・制御装置は、化学工学第 1 種研究会(1995)から推計している。単価は『機械統計年報』(経済産業

¹⁶ 軌道間輸送機と低軌道輸送機については、補章：「軌道間輸送機と再使用型低軌道輸送機の見積り」の最終需要ベクトルの作成について」を参照されたい。

省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。なお、レクテナを最終需要ベクトル化する際に、電力施設建設部門の投入構成も利用している。

・太陽電池は、4.2.2 節において、想定 a,b,c,および d として述べる。なお、太陽電池は最終的に宇宙輸送機・衛星組み立て部門に送られ、取り付け加工されると想定したため、そのための商業・輸送マージンを「最終輸送」として作成した。

・輸送機の機体数と運行回数

はじめに、Frantz and Cambel(1981)より、システムの建設のための運行回数と補修のための運行回数を区別した(図表 12 の(c)と(d))。そして、DOE/NASA(1980c)に掲載される耐用年数(図表 13 の(f))とシステムの立ち上げ時に最初に必要な基数(図表 13 の(g))を利用して、機体数を計測した。

図表 12 DOE/NASA:運行回数に関する基礎情報

単位：回

	SPS 建設の 基地建設 (a)	衛星 2 基建設 (b)	運行回数 (衛星 60 基) (c)=(a)+(b)×30	補修活動の み (d)	運行回数 (衛星 60 基+補修活動) (e)=(c)+(d)
軌道間貨物輸送機	3	30	903	232	1,135
軌道間人員輸送機	6	12	366	358	724
低軌道貨物輸送機	118	375	11,368	1,826	13,194
低軌道人員輸送機	32	30	932	598	1,530

図注：(a)、(b)および(d)は、Frantz and Cambel(1981)。(c)と(e)は筆者ら計算。なお、(e)の値は、SPS システムの補修活動であり、輸送機の摩耗による輸送機自体の補修を含んでいないが、それについては、図表 21 で示し、最終需要として挿入することに留意されたい。

図表 13 DOE/NASA：輸送機の機数にかんする基礎情報

単位：機

	耐用回数 (f)	初期必要基数 (g)	必要基数 (衛星 60 基) (h)=(c)/(f)	必要基数 (衛星 60 基+補修) (i)=(e)/(f)	追加機体数 (j)=(i)-(h)
軌道間貨物輸送機	10	23	91	114	23
軌道間人員輸送機	50	2	8	15	7
低軌道貨物輸送機	300	6	38	44	6
低軌道人員輸送機	200	2	5	8	3

図表注：(i)を計算するための(e)は図表 12、(f)と(g)は DOE/NASA(1980c)。(h)と(i)は筆者らの計算値。(h)と(i)は単純に運行回数を耐用回数で割った値であるが、往復に要する日数と SPS の建設の期間を考慮しても、この機数で想定上の運行をカバーできる。なお、(i)の値は、SPS システムの補修活動であり、輸送機の摩耗による輸送機自体の補修を含んでいないが、それについては、図表 21 で示し、最終需要として挿入することに留意されたい。

4.1b USEF テザー型 SPS の最終需要ベクトル

・衛星本体は、1m²あたりの値として、トランジスタ(1231 個)、ダイオード(445 個)、集積回路(MPU・RAN 等 12 個)、抵抗・コンデンサ等(1210 個)、基盤 (1kg) とし、また、衛星の基本構造として、16,600t、テザーを 90 トンとした(USEF(2003))。単価は『機械統計年報』(経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。

・軌道間輸送機の推進剤(液体アルゴン 4,000t (3 基 1 セットあたり))の単価は、『月刊積算資料』の年平均値を利用している。また、軌道間輸送機の構造は、USEF(2003)、DOE/NASA(1978)の低軌道から静止軌道までの貨物輸送機の物量構成比、産業連関表の単価表、および産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している(補章参照)。

・再使用型低軌道輸送機の推進剤(液体水素 125 トン/回、液体酸素 690 トン/回)の単価は、液体水素は成尾他(1996)の値にもとづいて 2000 年値を推計し、液体酸素は『機械統計年報』の値である。なお、構造重量 86 トンは、USEF (2003)、DOE/NASA(1978)の地上から低軌道までの貨物輸送機の物量構成比、産業連関表の単価表、および産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している。

・レクテナ(13km²)は、リファレンスシステム(DOE/NASA(1978))のレクテナとの面積比によって鋼材、コンクリート、アルミ関連製品の物量をもとめ、その値と地上の大規模太陽光発電の鋼材量(化学工学第 1 種研究会(1995))等の比率から建設費用を推計した。単価は『機械統計年報』(経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。また、インバータ・制御装置は、化学工学第 1 種研究会(1995)から推計している。なお、レクテナを最終需要ベクトル化する際に、電力施設建設部門の投入構成も利用している。

・太陽電池は、4.2.2 節において、想定 a,b,c,および d として述べる。なお、太陽電池は最終的に宇宙輸送機・衛星組み立て部門に送られ、取り付け加工されると想定したため、そのための商業・輸送マージンを「最終輸送」として作成した。

・輸送機の機体数と運行回数

USEF (2003) より、搭載貨物量を考慮して、図表 14 のように、SPS システム建設と補修の運行を区分した。そして、輸送機の運用サイクルと建設期間の関係から、図表 15 の値を計測した。

図表 14 USEF テザー型 SPS の運行回数に関する基礎情報

単位：回

	低軌道上への軌道 間輸送機の配備 (+軌道間輸送機 の燃料の輸送) (a)	衛星の配 備 (b)	運行回数全体 (衛星 1 基) (c)=(a)+(b)	衛星の 補修 (d)	衛星の補修に必 要な軌道間貨物 輸送機の燃料の 輸送 (e)=(c)+(d)	補修のための 運行の合計 (f)=(d)+(e)	合計
軌道間輸 送機	—	1	1	1*	—	1*	2
低軌道輸 送機	400 (+200)	1,400	2,000	1,000	200	1,200	3,200

図表注：USEF（2003）より搭載貨物量を考慮して筆者ら作成。軌道間輸送機は、図表 4 の図中に電気推進タグとして示され、3 基で 1 式を構成しており、本図表中の値は、3 基（1 式）で換算した値。補修に関する米印(*)は、1 基が 3 回運行することから、合計 3 基（1 式）で 1 回運行することを意味する。

図表 15 USEF テザー型：輸送機の機数にかんする基礎情報

	システムの建設に必要な基数 (a)	システムの建設と補修に必要な基数 (b)
軌道間輸送機	3 機 1 式	6 機 2 式 (3 機 1 式)
低軌道輸送機	7 機	7 機

図表注：USEF（2003）より作成。低軌道輸送機の(a)の値は、衛星、軌道間輸送機とその燃料の全てを運ぶ機体を含む。なお、システムの建設時の打ち上げ回数と補修時の打ち上げ回数を区分可能なため、低軌道輸送機については(a)と(b)で異なる値をとるとも考えられる。しかし、低軌道輸送機の運用サイクルが 2.45 日で 2 年間で 2000 回打ち上げてシステムを建設するために、当初より少なくとも 7 機必要である。また、軌道間貨物輸送機は、3 機（1 式）で衛星を低軌道から静止軌道に運んだ後は、1 機（1/3 式）が 25 年に 1 回ずつ補修のために運行する。したがって、のべ 2 式必要である。ただし、3 基 1 式を再利用するならば、(b)のカッコ内の値で示すように、補修を含めて 3 機 1 式であり、それについては、図表 24 の「USEF テザー型（ii）」で述べる。

4.1c マルチバステザー型 SPS の最終需要

・衛星本体は、1m² あたりの値として、トランジスタ(シリコントランジスタ：1W 以上：電源回路 4 個、電界効果型トランジスタ：MMIC68 個)、ダイオード(シリコンダイオード 4 個)、集積回路(MPU(CPU)4 個、DRAM 4 個)、抵抗・コンデンサ(チップ抵抗器 8 個、タンタル電解コンデンサ(チップコンデンサ)8 個)、基盤(多層プリント配線板(4 層)1m²)、バッテリー(リチウム電池 4 個)とした。また、衛星の基本構造として、アルミ圧延製品を 4,400t、テザーを 45t とした。単価は『機械統計年報』(経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001))と『部門別品目別国内生産額表』(総務省(2004))を利用した。

・軌道間輸送機の推進剤(液体アルゴン 30t)の単価は、『月刊積算資料』の年平均値を利用している。ま

た、軌道間輸送機の構造は、佐々木氏らによるシミュレーション解析の値、DOE/NASA(1978)の低軌道から静止軌道までの貨物輸送機：「軌道間貨物輸送機」の物量構成比、産業連関表の単価表、および産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している¹⁷。

- ・再使用型低軌道輸送機の推進剤(液体水素 250 トン、液体酸素 1,500 トン)の単価は、液体水素は成尾他(1996)の値にもとづいて 2000 年値を推計し、液体酸素は『機械統計年報』の値である。なお、構造重量 200 トンは、DOE/NASA(1978)の地上から低軌道までの貨物輸送機：「低軌道貨物輸送機」の物量構成比、産業連関表の単価表、および産業連関表の航空機ベクトルと航空機ベクトルの波及効果を利用して推計している。

- ・レクテナ(9.6km²)は、リファレンスシステム(DOE/NASA(1978))のレクテナとの面積比によって鋼材、コンクリート、アルミ関連製品の物量をもとめ、その値と地上の大規模太陽光発電の鋼材量(化学工学第 1 種研究会(1995))等の比率から建設費用を推計した。また、インバータ・制御装置は、化学工学第 1 種研究会(1995)から推計している。なお、レクテナを最終需要ベクトル化する際に、電力施設建設部門の投入構成も利用している。

- ・太陽電池は、4.2.2 節において、想定 a,b,c,および d として述べる。なお、太陽電池は最終的に宇宙輸送機・衛星組み立て部門に送られ、取り付け加工されると想定したため、そのための商業・輸送マージンを「最終輸送」として作成した。

- ・輸送機の機体数と運行回数

SPS 建設のための打ち上げ回数と必要基数は、図表 16 の通りである。なお、マルチバステザー型 SPS では、補修のための活動を明示的には取り扱ってこなかったため、CO₂ 負荷やエネルギー評価においては、後に示す DOE/NASA リファレンスシステムと USEF の情報にもとづいて、補修活動を挿入する。なお、朝倉・中野(2009)は、補修活動を考慮しているかのような記述があるが、誤りである(正誤表にて明記済)。

図表 16 マルチバステザー型：宇宙輸送にかんする基礎情報

	SPS システムに必要な基数	のべ運行回数
軌道間輸送機	171 機	600 回
低軌道輸送機	14 機	1,000 回

図表注：ISAS・JAXA の佐々木氏と成尾氏からの情報提供にもとづいて作成。

4.2 最終需要ベクトルの想定

さらに、これまでの研究により、液体燃料(液体水素)および太陽電池の製造過程が CO₂ 排出量の多寡を決定する「カギ」を握っていることが明らかになっていることから、4.2.1 節において液体燃料について、4.2.2 節において、太陽電池について、それぞれ想定をおきながら、細かく最終需要ベクトルを作成していく。なお、経常・補修活動も CO₂ 排出量とエネルギー指標の計測に大きな影響を与えるが、それについては、4.3 節で説明する。

¹⁷ 軌道間輸送機と再使用型低軌道輸送機については、補章：「軌道間輸送機と再使用型低軌道輸送機の最終需要ベクトルの作成について」を参照されたい。

4.2.1 液体燃料の想定（想定 A と想定 B）

液体水素は、成尾他（1996）を利用し、購入者価格の半額を生産者価格とし、2000 年価格評価を行い、再び図表 11 の商業・輸送マージンを付加する手順をとっている。ただし、マージンを付加する際、想定 A と想定 B をおいた。

想定 A は、産業連関表の圧縮ガス・液化ガス部門（IO コード：202902）における生産者価格と購入者価格の比率およびマージン構成比を利用するケース（結果として、液体水素の購入者価格は、生産者価格の 1.2 倍）であり、文中の関連箇所において、「IO マージン」と表記する。想定 B は、成尾他（1996）の液体水素全体の価格に占める輸送コスト（シェア）をそのまま利用する。したがって、想定 B は、生産者価格と同じ金額だけの商業・輸送マージン額を設定し、産業連関表の圧縮ガス・液化ガス（IO コード：202902）のマージン構成比を利用するケース（結果として、液体水素の購入者価格は、生産者価格の 2 倍）であり、文中の関連箇所において、「報告書マージン」と表記する。

4.2.2 太陽電池の想定（想定 a、想定 b、想定 c、想定 d）¹⁸

太陽電池は、図表 2、図表 4、図表 6 において、衛星本体と軌道間輸送機（DOE/NASA リファレンスシステムでは、さらに宇宙基地）に搭載される。直近に公表されたマルチバステザー型 SPS では、カバーガラスなしでも使用可能で放射線に強い太陽電池（現在では、CIGS のようなタイプの薄膜太陽電池）を想定しているが、その物量構成の情報がない。

これまでのわれわれの推計において、現時点で達成されていない高い変換効率の太陽電池の取り扱い方法が統一されていなかったことから、本稿では、われわれが化学工学会（1995）と山田・小宮山（2002）から作成した「10MW：変換効率 15%の多結晶シリコン太陽電池」と「10MW：変換効率 8%のアモルファスシリコン太陽電池」にもとづいて、つぎのように統一的に整理し、1 つの SPS システムについて、4 つの想定（想定 a、想定 b、想定 c、想定 d）をおいた太陽電池ベクトルを作成した。

はじめに、多結晶シリコン太陽電池については、

- ・想定 a. 変換効率 15%の 10MW の多結晶シリコン太陽電池の原材料構成が、変換効率 x%の SPS 太陽電池と同一であるとみなす。
- ・想定 b. 変換効率 15%の 10MW の多結晶シリコン太陽電池をそのまま SPS システムに利用する。

という想定をおいた。なお、変換効率 x%の x の値は、図表 7 の太陽電池の効率である。

つぎに、アモルファスシリコン太陽電池については、

- ・想定 c. 変換効率 8%の 10MW のアモルファスシリコン太陽電池の原材料構成が、変換効率 x%の SPS 太陽電池の原料構成と同一であるとみなす。
- ・想定 d. 変換効率 8%の 10MW のアモルファスシリコン太陽電池をそのまま SPS システムに利用する。

¹⁸ 本稿では、多結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池を高効率宇宙用太陽電池に想定して CO₂ 負荷計算とエネルギー収支を計測する。それは、宇宙用太陽電池の詳細な情報を入手できなかったからであり、2 つのタイプの太陽電池によって評価することに異論はあろうが、CO₂ 原単位とエネルギー収支の「幅」を確認する作業として、ご理解頂きたい。

という想定を置いた。なお、変換効率 $x\%$ の x の値は、図表 7 の太陽電池の効率である。

想定 a から想定 d について、変換効率 35% の太陽電池を搭載するマルチバステザー型 SPS を例にとって説明する。想定 a では、変換効率 15% (10MW) の多結晶シリコン太陽電池の原材料投入量を 15/35 倍した後、衛星本体に 5.3GW、軌道間輸送機に 2,150.9kW の太陽電池に膨らませて搭載する。想定 b では、変換効率 15% (10MW) の多結晶シリコン太陽電池を衛星本体に 5.3GW、軌道間輸送機に 2,150.9kW の太陽電池に膨らませて搭載する。また、想定 c では、変換効率 8% (10MW) のアモルファスシリコン太陽電池の原材料投入量を 8/35 倍した後、衛星本体に 5.3GW、軌道間輸送機に 2,150.9kW の太陽電池に膨らませて搭載する。想定 d では、変換効率 8% (10MW) のアモルファスシリコン太陽電池を衛星本体に 5.3GW、軌道間輸送機に 2,150.9kW の太陽電池に膨らませて搭載する。なお、今回の推計においては、カバーガラスをはずし、また、太陽電池の大量生産による 0.8 乗則等は適用していない。

なお、これまでのわれわれの SPS 研究で採用した想定を整理すると、図表 17 となる。

図表 17 これまでに採用した太陽電池の想定

SPS の構造	太陽電池の種類	想定	主要出展
DOE/NASA	多結晶シリコン	想定 b	吉岡他 (1998a)
リファレンスシステム	アモルファスシリコン	想定 d	吉岡他 (1998b)
USEF テザー型	多結晶シリコン	想定 a	朝倉他 (2003)、USEF (2003)
	アモルファスシリコン	想定 c	
マルチバステザー型	多結晶シリコン	想定 a	朝倉・中野 (2009)

図表注：これまでの研究について、太陽電池についての想定 (想定 a, 想定 b, 想定 c, 想定 d) にもとづいて整理した図表。なお、出展については、本稿 3 頁も合わせて参照されたい。

図表 17 で示すように、これまでの計測研究においては太陽電池の種類と想定も異なることから、本稿では、3 つの SPS システムにたいして、想定 a から想定 d をそれぞれ適用して計算する。

4.2 節の最後に、これまで示した想定と最終需要の対応をまとめておく。

本節で示した想定は、4.2.1 節の液体水素についての想定 A と想定 B (合計 2 個) と、4.2.2 節の太陽電池についての想定 a, 想定 b, 想定 c, および想定 d (合計 4 個) であり、それぞれの組み合わせにより、合計 8 個の想定が生成される。

図表 18 は、最終需要と 8 個の想定の関係をまとめており、タテは構造物のリスト、ヨコは想定を示している。表側の 1, 2, 3, … の値が、式 (1) の $f^{k/l}$ の k (構造物の番号) に対応し、表頭の 1, 2, 3, …, 8 の値が、 $f^{k/l}$ の l (想定番号) に対応している。それぞれの k をヨコにみていくと、液体燃料の商業・輸送マージンに関する 2 個の想定 A と想定 B、および太陽電池に関する 4 個の想定 a から想定 d を設定することにより、合計で 8 個 ($l=1, \dots, 8$) の最終需要のパターンが形成されていることがわかる。

図表 18 最終需要ベクトルと想定の関係リスト

DOE/NASAリファレンスシステム

想定 / (式(1)) SPS構造物 k (式(1))			想定1	想定2	想定3	想定4	想定5	想定6	想定7	想定8
			想定A:液水輸送 (IOベース)				想定B:液水輸送 (報告書ベース)			
			想定a 多結晶17.3%	想定b 多結晶15%	想定c アモ17.3%	想定d アモ8%	想定a 多結晶17.3%	想定b 多結晶15%	想定c アモ17.3%	想定d アモ8%
発電衛星	1	構造体	発電衛星構造体							
	2	太陽電池	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%
基地 (静止軌道)	3	構造体	基地 (静止軌道) ・ 共通							
	4	太陽電池	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%
軌道間貨物輸送	5	構造体	軌道間貨物輸送機・構造体							
	6	液アルゴン・液酸・液水	想定A：液水輸送 (IOベース)				想定B：液水輸送 (報告書ベース)			
	7	太陽電池	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%
	8	構造体	軌道間人員輸送機・構造体							
軌道間人員輸送	9	液酸液水	想定A：液水輸送 (IOベース)				想定B：液水輸送 (報告書ベース)			
	10	構造体	基地 (低軌道) ・ 共通							
基地 (低軌道)	11	太陽電池	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%
	12	構造体	貨物打ち上げロケット・構造体							
低軌道貨物輸送機	13	液メタン液酸液水	想定A：液水輸送 (IOベース)				想定B：液水輸送 (報告書ベース)			
	14	構造体	人員打ち上げロケット・構造体							
低軌道人員輸送機	15	液メタン液酸液水	想定A：液水輸送 (IOベース)				想定B：液水輸送 (報告書ベース)			
	16		レクテナ・共通							
レクテナ	16		レクテナ・共通							
最終輸送	17		多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%	多結晶17.3%	多結晶15%	アモ17.3%	アモ8%

USEFテザー型

想定 / (式(1)) SPS構造物 k (式(1))			想定1	想定2	想定3	想定4	想定5	想定6	想定7	想定8
			想定A: 液水輸送 (IOベース)				想定B: 液水輸送 (報告書ベース)			
			想定a 多結晶30%	想定b 多結晶15%	想定c アモ30%	想定d アモ8%	想定a 多結晶30%	想定b 多結晶15%	想定c アモ30%	想定d アモ8%
発電衛星	1	構造体	発電衛星構造体							
	2	太陽電池	多結晶30%	多結晶15%	アモ30%	アモ8%	多結晶30%	多結晶15%	アモ30%	アモ8%
軌道間輸送機	3	構造体	軌道間貨物輸送機・構造体							
	4	アルゴン	軌道間貨物輸送機・推進剤							
	5	太陽電池	多結晶30%	多結晶15%	アモ30%	アモ8%	多結晶30%	多結晶15%	アモ30%	アモ8%
再使用型低軌道輸送機	6	構造体	再使用型低軌道輸送機・構造体							
	7	液酸・液水	想定A：液水輸送（IOベース）				想定B：液水輸送（報告書ベース）			
	8	電力	再使用型低軌道輸送機・推進電力							
レクテナ	9		レクテナ							
最終輸送	10		多結晶30%	多結晶15%	アモ30%	アモ8%	多結晶30%	多結晶15%	アモ30%	アモ8%

図表 18 (続) 最終需要ベクトルと想定の関係リスト

マルチバステザー型			想定1	想定2	想定3	想定4	想定5	想定6	想定7	想定8
想定 / 式(1))			想定A: 液水輸送 (IOベース)				想定B: 液水輸送 (報告書ベース)			
			想定a 多結晶35%	想定b 多結晶15%	想定c アモ35%	想定d アモ8%	想定a 多結晶35%	想定b 多結晶15%	想定c アモ35%	想定d アモ8%
SPS構造物 k 式(1))										
発電衛星	1	構造体	発電衛星構造体							
	2	太陽電池	多結晶35%	多結晶15%	アモ35%	アモ8%	多結晶35%	多結晶15%	アモ35%	アモ8%
軌道間輸 送機	3	構造体	軌道間貨物輸送機・構造体							
	4	アルゴン	軌道間貨物輸送機・推進剤							
	5	太陽電池	多結晶35%	多結晶15%	アモ35%	アモ8%	多結晶35%	多結晶15%	アモ35%	アモ8%
再使用型 低軌道輸 送機	6	構造体	再使用型低軌道輸送機・構造体							
	7	液酸液水	想定A：液水輸送（IOベース）				想定B：液水輸送（報告書ベース）			
レクテナ	8		レクテナ							
最終輸送	9		多結晶35%	多結晶15%	アモ35%	アモ8%	多結晶35%	多結晶15%	アモ35%	アモ8%

図注：タテはSPS構造物のリスト、ヨコは想定を示している。表側の1,2,3,...の値が、式(1)の $f^{k,l}$ の k （構造物の番号）に対応し、表頭の1,2,3,...,8の値が、 $f^{k,l}$ の l （想定の番号）に対応している。それぞれの k をヨコにみていくと、液体燃料の輸送マージンに関する想定AとB、および太陽電池に関する想定aから想定dを設定することにより、8個（ $l=1,\dots,8$ ）の最終需要のパターンが形成されていることがわかる。

4.3 経常活動・補修活動

SPSシステムの補修活動については、未来技術ゆえの不確定要素もあり、これまでは明示的には扱わなかった。図表19は、われわれのCO₂負荷計算の過程で挿入した経常・補修活動の想定であり、3つのシステムそれぞれが、補修活動を個別に取り扱っていることを示している。

図表 19 これまでの研究経過における補修活動の設定

	衛星等	輸送機本体	補修のための宇宙空間での輸送活動	レクテナ	主要出展
DOE/NASA リファレンスシステム	未考慮	未考慮	考慮	未考慮	吉岡他（1998a,b）
USEF テザー型	考慮	未考慮	考慮	考慮	朝倉他（2003）、USEF（2003）
マルチバステザー型	未考慮	未考慮	未考慮	未考慮	朝倉・中野（2009）

図表注：これまでの研究について、補修活動の挿入についてとりまとめた表である。なお、出展については、本稿3頁も合わせて参照されたい。また、朝倉・中野（2009）は、補修活動を考慮しているかのような記述があるが、誤りである（正誤表にて明記済）。

本稿では、統一的な枠組みでSPSシステムを評価するとはいえ、補修活動を構造物全体にたいする比率として外生的に与えると、原単位に大きな影響があることも事実である。したがって、本稿では、これまでの公表されてきた補修活動の情報を整理し、それにもとづいて補修活動「率」を計算する。

そして、DOE/NASA リファレンスシステムと USEF テザー型 SPS システムの補修活動を整理し、その値を、デブリ等の事故確率と比較して妥当ならば、補修活動が明示されていないマルチバステザー型と第7節で計算するエネルギー評価に使用する。

図表 20 から図表 23 は、補修にかんする考え方を取りまとめており、今回は、定率法の考え方は援用せず、比例的な定額（量）法にもとづいて計測した。もちろん、定率法で計算した方が最終的な補修量は増えるが、1 年あたりに換算された補修率に差はない。そして、定率法で計算すると、補修部分の CO₂ 排出原単位が年ごとに変化し、これまでの排出原単位の考え方と異なり、1 年あたりで「均等化・平均化」する操作等が必要になる。なお、定率法については、SPS の発電単価の計測において利用する予定である。

図表 20 DOE/NASA リファレンスシステムの補修活動

DOE/NASA		補修倍率 (建設時=1)	出展・推計の論拠等
発電衛星	構造体	1.30	年 1%。柴田・松岡（1997a）と吉岡他（1998a）より。
	太陽電池	1.30	柴田・松岡（1997a）では、太陽電池の摩耗を考慮していないが、他と同様に 1%としておく。
基地（静止軌道）	構造体	1.30	年 1%。柴田・松岡（1997a）と吉岡他（1998a）より。
	太陽電池	1.30	年 1%。柴田・松岡（1997a）と吉岡他（1998a）より。
軌道間貨物輸送	構造体	1.25	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の必要基数を計測。図表 13 の(i)/(h)
	太陽電池	1.63	補修用に追加する 23 機に 1%考慮。
	液アル・液酸・液水	1.26	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の運行回数を計測。図表 13 の(e)/(c)
軌道間人員輸送	構造体	1.88	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の必要基数を計測。図表 13 の(i)/(h)
	液酸液水	1.98	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の運行回数を計測。図表 13 の(e)/(c)
基地（低軌道）	構造体	1.30	年 1%。柴田・松岡（1997a）と吉岡他（1998a）より。
	太陽電池	1.30	年 1%。柴田・松岡（1997a）と吉岡他（1998a）より。
低軌道貨物輸送機	構造体	1.16	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の必要基数を計測。図表 13 の(i)/(h)
	液メタン液酸液水	1.16	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の運行回数を計測。図表 13 の(e)/(c)
	液メタン液酸液水	1.16	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の運行回数を計測。図表 13 の(e)/(c)
低軌道人員輸送機	構造体	1.60	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の必要基数を計測。図表 13 の(i)/(h)
	液メタン液酸液水	1.64	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の運行回数を計測。図表 13 の(e)/(c)
	液メタン液酸液水	1.64	DOE/NASA（1980c）と Frantz and Cambel(1981)より補修活動の運行回数を計測。図表 13 の(e)/(c)
レクテナ		1.30	年 1%。柴田・松岡（1997）と吉岡他（1998a）より。

なお、地上の太陽光発電のインバータ・制御装置の耐用年数（10 年）と補修率 1%を考慮した値も参考のために計測する（図表 24b）。

注：柴田・松岡（1997）の「1 年あたり建設に必要な資材の量の 1%」との記述があるが、当時の議論より、建設時のトータルの 1%とした。

図表 21 DOE/NASA の輸送機本体の補修

DOE/NASA：輸送機の摩耗		出展・推計の論拠等
軌道間貨物輸送	2.50	柴田・松岡（1997a）より、補修率を 1/打ち上げ耐用回数とする。（左記値は補修活動を含む）。耐用回数=10 回（DOE/NASA(1980c)）
軌道間人員輸送	3.69	柴田・松岡（1997a）より、補修率を 1/打ち上げ耐用回数とする。（左記値は補修活動を含む）。耐用回数=50 回（DOE/NASA(1980c)）
低軌道貨物輸送機	2.32	柴田・松岡（1997a）より、補修率を 1/打ち上げ耐用回数とする。（左記値は補修活動を含む）。耐用回数=300 回（DOE/NASA(1980c)）
低軌道人員輸送機	3.13	柴田・松岡（1997a）より、補修率を 1/打ち上げ耐用回数とする。（左記値は補修活動を含む）。耐用回数=200 回（DOE/NASA(1980c)）

注：図表 20 で計測された値に摩耗を考慮している。

図表 22 USEF テザー型の補修活動

USEF		補修倍率 (建設時=1)	出展・推計の論拠等（すべて USEF(2003)）
衛星	構造体	1.75	10 年ごとに 25%
	太陽電池	1.75	10 年ごとに 25%
軌道間輸送機	構造体	2.00	2 式（ペア）必要
	太陽電池	2.00	2 式（ペア）必要
	液体アルゴン	2.00	2 式（ペア）必要
再使用型低軌道輸送機	構造体	1.00	建設時に必要な 7 基で補修活動もまかなう
	電力	1.60	建設時に必要な 2000 回に補修用の 1200 回追加 (3200/2000=1.6)
	液酸液水	1.60	建設時に必要な 2000 回に補修用の 1200 回追加 (3200/2000=1.6)
レクテナ		1.40	1%想定。なお、地上の太陽光発電のインバータ・制御装置の耐用年数（10 年）と補修率 1%を考慮した値も参考のために計測する（図表 24b）。

図表 23 USEF テザー型の輸送機本体の補修

USEF テザー型輸送機の摩耗		出展・推計の論拠等
軌道間輸送	2.0	新しく建設する（再利用する場合は 1.0）
再使用型低軌道輸送機	1.91	柴田・松岡（1997a）より、補修率を 1/打ち上げ耐用回数とする。なお、USEF テザー型では耐用回数は明示されていないが、7 基で 3200 回の輸送を行うことが可能なので、1 機あたりの耐用回数を 500 回とする。

図表注：図表 22 で計測された値に摩耗を考慮している。

図表 20 から図表 23 にもとづいて、経常運転・補修活動を考慮した最終需要を作成し、それを想定ごとに集計し、建設時の最終需要と比較すると、図表 24a のようになる。なお、図中の右列の「USEF テザー型（ii）」は、軌道間輸送機を再利用するケースである。

図表 24a DOE/NASA リファレンスと USEF テザー型の経常運転・補修比率

想定番号 (=I)	（太陽電池と液体燃料の輸送の対応）	DOE/NASA リファ レンスシステム	USEF テザー型（i）	USEF テザー型（ii）
想定 1	想定 A-想定 a	1.30	1.65	1.60
想定 2	想定 A-想定 b	1.30	1.67	1.60
想定 3	想定 A-想定 c	1.29	1.62	1.59
想定 4	想定 A-想定 d	1.30	1.65	1.60
想定 5	想定 B-想定 a	1.30	1.64	1.60
想定 6	想定 B-想定 b	1.30	1.66	1.60
想定 7	想定 B-想定 c	1.28	1.61	1.59
想定 8	想定 B-想定 d	1.29	1.64	1.60
平均		1.30	1.64	1.60

図注；経常運転・補修を考慮しない最終需要を基準（＝1）とし、経常運転・補修活動を考慮した最終需要と比較した値。たとえば、本図表の 1 行 1 列目の「1.30」は、図表 18 の DOE/NASA リファレンスシステムの想定 1（想定 A-想定 a）において、経常活動・補修活動を考慮しない最終需要ベクトルの合計値を基準（＝1）とし、経常運転・補修活動を考慮した最終需要ベクトルの合計値と比較した値。また、USEF テザー型（i）は軌道間輸送機を再利用しないケース、USEF テザー型（ii）は軌道間輸送機を再利用するケース。

図表 20 から図表 23 で見たように、DOE/NASA リファレンスシステムにおいても、USEF テザー型においても、各パーツの補修比率は異なるが、それを集計して金額比にした図表 24 でみると、補修を含めた必要物量は、それぞれ建設時の約 1.3 倍と 1.6 倍程度となることがわかる。したがって、平均比例的に補修を考えるならば、DOE/NASA リファレンスシステムは、トータルの寿命が 30 年なので、年率 1%の補修となる。また、USEF テザー型については、軌道間輸送機を再利用する「USEF テザー型（ii）」を基準にすると、トータルの寿命が 40 年なので、年率 1.5%の補修と考えられる。

これらの値を、宇宙空間でのデブリの衝突とその影響、放射線による太陽電池や電子機器の影響等と比較してみよう。ISAS/JAXA における調査・ヒアリングによれば¹⁹、放射線等による発電ロスは、現在の宇宙用太陽電池については、静止衛星軌道上で 10 年で 5%から 10%、新しいタイプの太陽電池 (CIGS) では静止衛星軌道 10 年で数%程度である。また、デブリは、静止衛星軌道においては、そもそも地球に近い軌道より少ないとはいえ、さらにデブリの衝突の影響が広がらないようにパネルの構造を考案する（モジュール化、ユニット化して衝突したモジュールあるいはユニット以上に衝突の影響が伝播しないようにする）ことにより、40 年間で失われる電力は計算上は 0.1%以下、設計上の目標は 40 年間で 5%以下である。したがって、補修にかんする今回の積み上げ値によっても、現時点でのロスをカバーできる無理のない値と考えて、年率 1%と年率 1.5%の値を利用して計測を進める。

また、参考値として、図表 24b を示す。同図表は、レクテナに使用されるインバータ制御装置を地上の太陽光発電と同様の耐用年数（10 年）と補修率（1%）を想定したうえで、全体の補修率を計算した図表である。もちろん、レクテナの発電パターンと地上の太陽光発電の発電パターンは大きく異なることから、同一の耐用年数で評価することに問題はあろうが、耐用年数が短くなることにより、全体としての補修率も上昇しており、DOE/NASA リファレンスシステムのケースでは、建設時の 1.4 倍程度であり、年率 1.4%、USEF については USEF テザー型（ii）でみると、建設時の 1.7 倍程度であり、年率 1.7%と、それぞれ上昇する。この参考値については、第 6 節の発電単位あたり CO₂ 負荷計算のときに再吟味する。

図表 24b（参考）DOE/NASA リファレンスと USEF テザー型の経常運転・補修比率

想定番号 (=I)	（太陽電池と液体燃料の輸送の対応）	DOE/NASA リファレンスシステム	USEF テザー型（i）	USEF テザー型（ii）
想定 1	想定 A-想定 a	1.40	1.73	1.68
想定 2	想定 A-想定 b	1.40	1.74	1.67
想定 3	想定 A-想定 c	1.47	1.72	1.69
想定 4	想定 A-想定 d	1.43	1.73	1.68
想定 5	想定 B-想定 a	1.39	1.71	1.67
想定 6	想定 B-想定 b	1.39	1.72	1.66
想定 7	想定 B-想定 c	1.45	1.69	1.67
想定 8	想定 B-想定 d	1.42	1.71	1.67
平均		1.41	1.72	1.67

図注；図表 24a と計測方法は同一であるが、レクテナに使用するインバータ・制御装置を地上の太陽光発電のインバータ・制御装置で評価して集計した値。

本節の最後に、最終需要ベクトルの作成時点での留保すべき論点を整理しておく。
はじめに、宇宙輸送技術の可能性については、いわゆるスペースシャトルの運用状況と、SPS システムの低軌道輸送機の運用状況を比較検討してみたが、後者は非常に短期間で高頻度に再使用することを予定しており、それを可能にする技術が存在していることを前提している。また、CO₂ 負荷・エネ

¹⁹ ISAS 佐々木進氏よりご教示頂いた（2011 年 10 月）。

ルギー収支計算では、補修活動を考慮することにより、製品の寿命期間において、一定の発電量があることを前提としているが、宇宙空間における太陽電池の放射線劣化が全般的平均的に起こる場合、その具体的な補填・修理方法と補修率の対応関係を明確にしているわけではない。そして、SPS システムは、化石燃料の燃焼を伴う地上の既存の発電設備と異なり、経常的に必要な経費等が現時点では不明であることから、本稿においては、補修活動費用は経常活動費用を含む値としている。さらに 4.2.2 節の太陽電池の想定により、宇宙空間に運ぶ太陽電池の重量等が大きく変化することになるが、今回の推計では、運行計画を変更していないことにも留意して頂きたい。

5.CO₂ 負荷計算の結果²⁰

本節は、SPS システムの建設過程から発生する CO₂ 負荷の計測結果をまとめる。なお、CO₂ 排出量には、インバータ・制御装置まで含んだ値である。

図表 25 は、作成された最終需要ベクトルを式 (1) に適用し、前節の想定ごとに CO₂ 排出量を計測した結果である。はじめに、図表の左の想定 1（想定 A-想定 a）によって、全体を概観しよう。各システムの CO₂ 負荷は、DOE/NASA リファレンスが建設時に 11 億トン、USEF テザー型は 1 千万トンそして、マルチバステザー型は 1 千万トンである。DOE/NASA リファレンスシステムの非常に高い値は、5GW の発電衛星を 60 基打ち上げるといふ壮大な想定にもとづくことに起因している。

また、同様に想定 1（想定 A-想定 a）で CO₂ 排出量の構成を見ると、DOE/NASA リファレンスシステム、USEF テザー型およびマルチバステザーでは大きく異なる。DOE/NASA は太陽電池のシェアが建設時：6 割であり、レクテナが 2 割、そして、液体燃料が 1.5 割程度であって、太陽電池の排出シェアが最も高い。その一方、USEF テザー型とマルチバステザー型の第 1 位は液体燃料であり、CO₂ 排出シェアの 5 割以上を占め、次が太陽電池であり、全体の 4 分の 1 程度、それに衛星構造とレクテナが続く。また、アモルファスシリコン太陽電池によって評価する想定 3（想定 A-想定 c）や想定 4（想定 A-想定 d）では、DOE/NASA リファレンスシステムにおいても、太陽電池の排出シェアが低下し、レクテナや液体燃料のシェアが太陽電池を超えるケースも出ているが、その場合、USEF テザー型やマルチバステザーでは、さらに液体燃料の排出シェアが高くなっている。

この相違について、DOE/NASA リファレンスシステムとマルチバステザー型の輸送機に着目すると、マルチバステザー型の再使用型低軌道輸送機は、(a)搭載貨物量：50t、(b)液体燃料 1,750t、(c)全質量：2,000t であり、全質量に占める搭載貨物量：(a)/(c)が 2.5%、全質量に占める液体燃料の割合：(b)/(c)が 87.5%である。また、DOE/NASA リファレンスシステムにおいて、低軌道まで輸送する「低軌道貨物輸送機」は、(a)搭載貨物量：424t、(b)液体燃料 9,246t、(c)全質量：11,040t であり、全質量に占める搭載貨物量：(a)/(c)=3.8%、全質量に占める液体燃料の割合：(b)/(c)=83.8%である²¹。したがって、DOE/NASA の輸送システムは、相対的に少ない燃料で大量の物資を運ぶことが可能であり、結果として、輸送燃料からの CO₂ 負荷の割合が低くなり、太陽電池からの CO₂ 負荷の割合が高くなる。その一方、マルチバステザー型 SPS システムは、大量の液体燃料を必要とすることから、その CO₂ 負荷の割合が高く、太陽電池からの CO₂ 排出量の割合が低くなっていると類推される。そして、結果として、次節で示す

²⁰ CO₂ 排出量の重量単位（トン（t）、グラム（g））は、すべて CO₂ 換算値として表記している。

²¹ DOE/NASA（1979）より。ただし、DOE/NASA リファレンスの低軌道貨物輸送機は、有翼 2 段式であり、推進剤として、液体酸素と液体水素のほかに LNG も使用しており、今回想定した再使用型低軌道輸送機とは単純に比較できないことに留意していただきたい。

発電単位あたり CO₂ 負荷の大きな違いの原因ともなっていることが伺える。

つぎに、液体燃料の商業・輸送マージンに関連する想定 A と想定 B を概観すると、DOE/NASA リファレンスでは、若干程度、想定 B が高く、USEF テザー型とマルチバステザー型では、想定 B が 1 割程度高い。それは、DOE/NASA リファレンスでは、液体燃料の相対的なウェイトが低く、逆に、USEF テザー型とマルチバステザー型は高いことから、想定 B では、USEF テザー型とマルチバステザー型 CO₂ 負荷への影響が大きいことがわかる。

さらに、多結晶シリコン太陽電池にかんする想定 a と想定 b では想定 b の方が、そして、アモルファスシリコン太陽電池にかんする想定 c と想定 d では想定 d の方が、それぞれ排出量が多くなることは、想定から直接的に導かれる帰結である。なお、多結晶シリコン太陽電池に関連する想定 a と b よりも、アモルファスシリコン太陽電池に関連する想定 c と d の方が変動率が大きいため、太陽電池を大量に使用する DOE/NASA リファレンスでは、想定 a と b の変動量より、想定 c と d の変動量の方が大きい。しかし、USEF テザー型とマルチバステザー型は、太陽電池の使用量が相対的に少なく、また、アモルファス太陽電池を使用することで、CO₂ 負荷の割合も小さくなることによって、DOE/NASA リファレンスとは逆に、想定 a と b の変動量の方が大きくなっている²²。

そして、USEF テザー型とマルチバステザー型の排出量は、ほぼ同じではあるが、想定ごとに比較してみると、想定 A における想定 1 と想定 2 では、USEF テザー型の方が大きく、想定 3 と想定 4 では、マルチバステザーの方が大きい。想定 B における想定 5 から想定 8 も同じ関係である。その理由について、想定 A について考察してみる。

想定 1 から想定 4 で変動する値は、太陽電池（含む最終輸送）の CO₂ 排出量のみであり、いずれの想定においても、その CO₂ 排出量は、USEF テザー型の方が大きい。その一方、太陽電池以外の CO₂ 排出量は、いずれの想定においてもマルチバステザー型の方が若干大きい。したがって、想定 1 と想定 2 のように、太陽電池の CO₂ 排出量も変動するとはいえ、太陽電池の排出量そのものが大きい場合には、USEF テザー型の総 CO₂ 排出量が大きくなる。しかし、想定 3 や想定 4 のように、太陽電池の CO₂ 排出量そのものが小さくなると、太陽電池以外の CO₂ 負荷が大きいマルチバステザー型の総 CO₂ 負荷が大きくなる。それが、想定 1 と想定 2、および想定 3 と想定 4 で、総 CO₂ 排出量の大小関係が入れ替わる理由である。想定 B の大小関係の変動も同じ原因である。

図表 26 は、SPS システムごとに、部門別 CO₂ 排出量の上位 5 部門を示している。それによれば、いずれの SPS システムにおいても、また、いずれの想定においても、直接・間接的には電力部門からの CO₂ 排出量が多いが、DOE/NASA より液体燃料多消費型の USEF テザー型やマルチバステザー型の方が、電力の依存度が高いことがわかる。

図表 27 と図表 28 は、DOE/NASA リファレンスシステムの想定 1（想定 A-想定 a）と、マルチバステザー型の想定 1（想定 A-想定 a）をパーツごとに見た表である。SPS を構成する物的な構造は異なっているが、直接間接的には、やはり電力生成部門からの CO₂ 排出量が多いことが確認できる。

²² もちろん、変動率で見ると、多結晶シリコン太陽電池の a と b より、アモルファスシリコン太陽電池の c と d の方が大きい。

図表 25 SPS システムの CO₂ 負荷（単位：万トン）

		想定1	想定2	想定3	想定4	想定5	想定6	想定7	想定8
DOE/NASAリファレンス		想定A 液水輸送（10ベース）				想定B 液水輸送（報告書ベース）			
		想定a 多結晶 17.3%	想定b 多結晶 15%	想定c アモ 17.3%	想定d アモ 8%	想定a 多結晶 17.3%	想定b 多結晶 15%	想定c アモ 17.3%	想定d アモ 8%
発電衛星	構造体	2,297.5	2,297.5	2,297.5	2,297.5	2,297.5	2,297.5	2,297.5	2,297.5
	太陽電池	62,434.5	72,007.8	11,037.7	23,869.1	62,434.5	72,007.8	11,037.7	23,869.1
基地 （静止軌道）	構造体	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
	太陽電池	1.7	2.0	0.3	0.7	1.7	2.0	0.3	0.7
軌道間 貨物輸送	構造体	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9	80.9
	液アルゴン・ 液酸・液水	240.3	240.3	240.3	240.3	253.3	253.3	253.3	253.3
	太陽電池	3,067.3	3,537.7	542.3	1,172.7	3,067.3	3,537.7	542.3	1,172.7
軌道間 人員輸送	構造体	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	液酸液水	57.2	57.2	57.2	57.2	67.3	67.3	67.3	67.3
基地（低軌）	構造体	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
	太陽電池	1.2	1.4	0.2	0.5	1.2	1.4	0.2	0.5
低軌道 貨物輸送機	構造体	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6	74.6
	液メタン・液 酸・液水	14,693.8	14,693.8	14,693.8	14,693.8	16,166.3	16,166.3	16,166.3	16,166.3
低軌道 人員輸送機	構造体	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
	液メタン・液 酸・液水	264.5	264.5	264.5	264.5	292.5	292.5	292.5	292.5
レクテナ		22,909.4	22,909.4	22,909.4	22,909.4	22,909.4	22,909.4	22,909.4	22,909.4
最終輸送		2,028.2	2,339.1	589.2	1,274.2	2,028.2	2,339.1	589.2	1,274.2
合計		108,164.7	118,520.7	52,803.5	66,951.8	109,692.4	120,048.4	54,331.2	68,479.5

		想定1	想定2	想定3	想定4	想定5	想定6	想定7	想定8
USEFテザー型		想定A 液水輸送（10ベース）				想定B 液水輸送（報告書ベース）			
		想定a 多結晶 30%	想定b 多結晶 15%	想定c アモ 30%	想定d アモ 8%	想定a 多結晶 30%	想定b 多結晶 15%	想定c アモ 30%	想定d アモ 8%
発電衛星	構造体	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6
	太陽電池	249.1	483.1	44.0	160.2	249.1	483.1	44.0	160.2
軌道間輸送機	構造体	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
	液アルゴン	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
	太陽電池	45.8	88.9	8.1	29.5	45.8	88.9	8.1	29.5
再使用型 低軌道輸送機	構造体	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	液酸・液水	543.1	543.1	543.1	543.1	638.3	638.3	638.3	638.3
	電力	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
レクテナ		92.7	92.7	92.7	92.7	92.7	92.7	92.7	92.7
最終輸送		9.1	17.7	2.7	9.6	9.1	17.7	2.7	9.6
合計		1,028.6	1,314.3	779.4	923.8	1,123.9	1,409.6	874.6	1,019.1

		想定1	想定2	想定3	想定4	想定5	想定6	想定7	想定8
マルチバステザー型		想定A 液水輸送（10ベース）				想定B 液水輸送（報告書ベース）			
		想定a 多結晶 35%	想定b 多結晶 15%	想定c アモ 35%	想定d アモ 8%	想定a 多結晶 35%	想定b 多結晶 15%	想定c アモ 35%	想定d アモ 8%
発電衛星	構造体	111.7	111.7	111.7	111.7	111.7	111.7	111.7	111.7
	太陽電池	219.5	512.1	38.8	169.8	219.5	512.1	38.8	169.8
軌道間輸送機	構造体	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
	液アルゴン	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
	太陽電池	15.2	35.5	2.7	11.8	15.2	35.5	2.7	11.8
再使用型 低軌道輸送機	構造体	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
	液酸液水	545.1	545.1	545.1	545.1	640.7	640.7	640.7	640.7
レクテナ		69.2	69.2	69.2	69.2	69.2	69.2	69.2	69.2
最終輸送		7.3	17.0	2.1	9.2	7.3	17.0	2.1	9.2
合計		986.4	1,309.0	788.0	935.1	1,082.0	1,404.6	883.6	1,030.8

図表注；3つのSPSシステムについて、建設時のCO₂排出量を計測した図表。想定との対応は、図表18を参照のこと。

図表 26 産業部門別 CO₂排出量(上位 5 部門)

DOE/NASAリファレンス							単位：％
想定1(想定A想定a)		想定2 (想定A想定b)		想定3(想定A想定c)		想定4 (想定A想定d)	
1 事業用電力	38.6	事業用電力	39.3	事業用電力	24.2	事業用電力	23.6
2 鉄鉄	11.1	鉄鉄	10.5	鉄鉄	18.2	鉄鉄	15.6
3 自家発電	9.2	自家発電	9.3	LNG燃焼	10.1	自家発電	10.0
4 石炭製品	7.1	石炭製品	7.1	自家発電	8.7	LNG燃焼	8.0
5 LNG燃焼	4.9	LNG燃焼	4.5	石炭製品	7.4	石炭製品	7.8
その他	29.0	その他	29.2	その他	31.4	その他	35.0
合計	100.0		100.0		100.0		100.0
参考：合計（億トン）	10.8		11.9		5.3		6.7

想定5(想定B想定a)		想定6 (想定B想定b)		想定7(想定B想定c)		想定8 (想定B想定d)	
1 事業用電力	38.2	事業用電力	39.0	事業用電力	23.9	事業用電力	23.3
2 鉄鉄	11.0	鉄鉄	10.4	鉄鉄	17.8	鉄鉄	15.3
3 自家発電	9.1	自家発電	9.2	LNG燃焼	9.8	自家発電	9.8
4 石炭製品	7.0	石炭製品	7.0	自家発電	8.5	LNG燃焼	7.8
5 LNG燃焼	4.9	LNG燃焼	4.5	石炭製品	7.2	石炭製品	7.7
その他	29.8	その他	29.9	その他	32.8	その他	36.1
	100.0		100.0		100.0		100.0
参考：合計（億トン）	11.0		12.0		5.4		6.8

USEFテザー型							
想定1(想定A想定a)		想定2 (想定A想定b)		想定3(想定A想定c)		想定4 (想定A想定d)	
1 事業用電力	57.8	事業用電力	55.4	事業用電力	59.5	事業用電力	53.5
2 自家発電	6.8	自家発電	7.6	自家発電	5.8	自家発電	7.2
3 鉄鉄	4.6	石炭製品	5.2	圧縮ガス・液化ガス	5.5	鉄鉄	4.9
4 石炭製品	4.6	鉄鉄	4.6	鉄鉄	4.7	石炭製品	4.7
5 圧縮ガス・液化ガス	4.2	圧縮ガス・液化ガス	3.3	石炭製品	3.9	圧縮ガス・液化ガス	4.7
その他	22.0	その他	23.9	その他	20.5	その他	24.9
	100.0		100.0		100.0		100.0
参考：合計（万トン）	1,029		1,314		779		924

想定5(想定B想定a)		想定6 (想定B想定b)		想定7(想定B想定c)		想定8 (想定B想定d)	
1 事業用電力	53.8	事業用電力	52.4	事業用電力	54.3	事業用電力	49.6
2 自家発電	6.5	自家発電	7.3	道路貨物輸送	6.2	自家発電	6.9
3 道路貨物輸送	5.1	石炭製品	4.9	自家発電	5.5	道路貨物輸送	5.6
4 鉄鉄	4.4	鉄鉄	4.4	圧縮ガス・液化ガス	4.9	鉄鉄	4.6
5 石炭製品	4.3	道路貨物輸送	4.4	鉄鉄	4.4	石炭製品	4.4
その他	26.0	その他	26.6	その他	24.7	その他	29.0
	100.0		100.0		100.0		100.0
参考：合計（万トン）	1,124		1,410		875		1,019

マルチバステザー型							
想定1(想定A想定a)		想定2 (想定A想定b)		想定3(想定A想定c)		想定4 (想定A想定d)	
1 事業用電力	58.4	事業用電力	55.5	事業用電力	59.9	事業用電力	53.8
2 自家発電	6.6	自家発電	7.6	自家発電	5.8	自家発電	7.2
3 圧縮ガス・液化ガス	4.4	石炭製品	5.0	圧縮ガス・液化ガス	5.5	圧縮ガス・液化ガス	4.7
4 鉄鉄	4.3	鉄鉄	4.4	鉄鉄	4.3	石炭製品	4.5
5 石炭製品	4.3	圧縮ガス・液化ガス	3.4	石炭製品	3.6	鉄鉄	4.5
その他	22.1	その他	24.2	その他	20.9	その他	25.3
合計	100.0		100.0		100.0		100.0
参考：合計（万トン）	986.4		1309.0		788		935

想定5(想定B想定a)		想定6 (想定B想定b)		想定7(想定B想定c)		想定8 (想定B想定d)	
1 事業用電力	54.2	事業用電力	52.5	事業用電力	54.6	事業用電力	49.8
2 自家発電	6.3	自家発電	7.3	道路貨物輸送	6.1	自家発電	6.9
3 道路貨物輸送	5.3	石炭製品	4.7	自家発電	5.6	道路貨物輸送	5.6
4 圧縮ガス・液化ガス	4.0	道路貨物輸送	4.4	圧縮ガス・液化ガス	4.9	圧縮ガス・液化ガス	4.2
5 鉄鉄	4.0	鉄鉄	4.1	鉄鉄	3.9	鉄鉄	4.2
その他	26.2	その他	26.9	その他	24.8	その他	29.2
合計	100.0		100.0		100.0		100.0
参考：合計（万トン）	1,082		1,405		884		1,031

図表注；SPS システム別・想定別に、部門別 CO₂排出量の上位 5 部門を抽出。

図表 27 SPS 構造別・産業部門別 CO₂排出量（上位 5 部門）
（DOE/NASA リファレンスシステム、上位 5 部門）

想定1（想定A（I0マージン）想定a（多結晶17.3%））のケース		単位：％	
発電衛星構造体		基地（静止軌道）・構造体	
1 事業用電力	30.5	事業用電力	28.9
2 自家発電	12.4	自家発電	14.4
3 銑鉄	7.3	石炭製品	9.5
4 板ガラス・安全ガラス	6.2	銑鉄	8.0
5 石炭製品	6.2	アルミニウム（含再生）	5.0
その他	37.4	その他	34.1
合計	100.0	合計	100.0
参考値：合計(万トン)	2,297.5	参考値：合計(万トン)	7.6
軌道間貨物輸送機・構造体		軌道間人員輸送機・構造体	
1 事業用電力	31.1	事業用電力	27.5
2 自家発電	11.7	自家発電	14.6
3 板ガラス・安全ガラス	8.5	石炭製品	10.7
4 銑鉄	5.8	銑鉄	10.4
5 石炭製品	5.7	アルミニウム（含再生）	6.1
その他	37.3	その他	30.7
合計	100.0	合計	100.0
参考値：合計(万トン)	80.9	参考値：合計(万トン)	0.8
基地（低軌道）・構造体		低軌道貨物輸送機・構造体	
1 事業用電力	28.7	事業用電力	30.9
2 自家発電	14.5	自家発電	15.1
3 石炭製品	9.8	銑鉄	7.8
4 銑鉄	8.1	石炭製品	7.7
5 アルミニウム（含再生）	5.3	宇宙輸送機関連	3.0
その他	33.6	その他	35.4
合計	100.0	合計	100.0
参考値：合計(万トン)	2.2	参考値：合計(万トン)	74.6
低軌道人員輸送機・構造体		レクテナ	
1 事業用電力	30.9	銑鉄	37.6
2 自家発電	15.1	事業用電力	12.8
3 銑鉄	7.8	石炭製品	10.4
4 石炭製品	7.7	自家発電	9.2
5 宇宙輸送機関連	3.0	粗鋼（転炉）	3.3
その他	35.4	その他	26.7
合計	100.0	合計	100.0
参考値：合計(万トン)	2.2	参考値：合計(万トン)	22,909.4
液体燃料合計		太陽電池合計	
1 事業用電力	42.8	事業用電力	47.6
2 LNG燃焼計	35.0	自家発電	10.7
3 LNG液化計	5.8	石炭製品	7.5
4 圧縮ガス・液化ガス	4.6	銑鉄	4.7
5 自家発電	2.4	アルミニウム（含再生）	3.5
その他	9.4	その他	26.0
合計	100.0	合計	100.0
参考値：合計(万トン)	15,255.8	参考値：合計(万トン)	65,504.7
最終輸送			
1 事業用電力	18.8		
2 自家輸送（旅客自動車）	15.6		
3 道路貨物輸送	10.6		
4 自家輸送（貨物自動車）	10.2		
5 卸売	7.9		
その他	36.9		
合計	100.0		
参考値：合計(万トン)	2,028.2		

図表注 ; DOE/NASA リファレンスシステムの想定 1 (想定 A 想定 a) について、CO₂排出量を部門別に示した図表。「低軌道貨物輸送機・構造体」と「低軌道人員輸送機・構造体」に「宇宙輸送機関連」部門が出現しているが、それは、補章で述べるように、航空機部門を利用して宇宙輸送機部門を作成したためである。

図表 28 パーツ別・産業部門別 CO₂ 排出量
(マルチバステザー型、上位 5 部門)

想定 1 (想定 A (10 マージン) 想定 a (多結晶 35%)) のケース		単位 : %	
衛星構造体		軌道間輸送機	
1 事業用電力	35.4	事業用電力	32.7
2 自家発電	10.4	自家発電	12.9
3 銑鉄	6.2	銑鉄	6.5
4 石炭製品	5.5	石炭製品	5.7
5 その他の電子部品	3.6	宇宙輸送機関連	3.4
その他	38.9	その他	38.9
合計	100.0	合計	100.0
参考値 : 合計(万トン)	111.7	参考値 : 合計(万トン)	7.5
液体アルゴン		再使用型低軌道輸送機	
1 事業用電力	73.1	事業用電力	30.9
2 圧縮ガス・液化ガス	7.9	自家発電	15.1
3 自家発電	3.7	銑鉄	7.8
4 石炭製品	2.2	石炭製品	7.7
5 道路貨物輸送	2.1	宇宙輸送機関連	3.0
その他	11.1	その他	35.4
合計	100.0	合計	100.0
参考値 : 合計(万トン)	6.1	参考値 : 合計(万トン)	4.7
レクテナ		液酸液水素	
1 銑鉄	23.4	事業用電力	73.1
2 事業用電力	23.3	圧縮ガス・液化ガス	7.9
3 自家発電	8.9	自家発電	3.7
4 石炭製品	7.8	石炭製品	2.2
5 半導体素子	4.0	道路貨物輸送	2.1
その他	32.6	その他	11.1
合計	100.0	合計	100.0
参考値 : 合計(万トン)	69.2	参考値 : 合計(万トン)	545.1
太陽電池 (衛星本体搭載 + 軌道間輸送機搭載)		太陽電池の輸送	
1 事業用電力	47.6	事業用電力	18.8
2 自家発電	10.7	自家輸送 (旅客自動車)	15.6
3 石炭製品	7.5	道路貨物輸送	10.6
4 銑鉄	4.7	自家輸送 (貨物自動車)	10.2
5 アルミニウム (含再生)	3.5	卸売	7.9
その他	26.0	その他	36.9
全体	100.0	合計	100.0
参考値 : 合計(万トン)	234.7	参考値 : 合計(万トン)	7.3

図表注 ; マルチバステザー型 SPS の想定 1 (想定 A 想定 a) について、CO₂排出量を部門別に示した図表。「軌道間輸送機」と「再使用型低軌道輸送機」に「宇宙輸送機関連」部門が出現しているが、それは、補章で述べるように、航空機部門を利用して宇宙輸送機部門を作成したためである。

6. 発電単位あたりの CO₂ 排出量の比較

本節は、発電単位あたりの CO₂ 負荷の比較検討を行う。計算は、一般的な CO₂ 原単位の計測にそくして、つぎのように行う。

$$\begin{aligned} & \text{発電単位あたり CO}_2 \text{ 排出量 (1 年あたり : g-CO}_2\text{/kWh)} \\ &= \text{建設時 CO}_2 \text{ 排出量 (1 年あたり : g-CO}_2\text{/kWh)} \\ &+ \text{経常・補修活動 (1 年あたり : g-CO}_2\text{/kWh)} \quad \dots (2) \end{aligned}$$

式 (2) の右辺第 1 項は、図表 25 の SPS システムの建設時の CO₂ 総排出量をシステムの耐用年数 (図表 7) を考慮した総発電量で割った値である。また、右辺第 2 項は、図表 24a をもとに計測した経常運転・補修活動率 (全体建設にたいする年率) として、DOE/NASA リファレンスシステムは 1%、USEF テザー型は 1.5%、そしてマルチバステザー型は、USEF テザー型を利用して 1.5% の値を外生的に与え、それぞれの耐用年数を考慮した総発電量で割った値である。なお、ここで使用する発電量は、図表 7 の「発電能力 (2)」にもとづく値であること、CO₂ 負荷にはインバータ制御装置が入っていることに留意されたい。

計測結果を見てみる。図表 29 は想定 A (液体水素に IO 表のマージン使用) の発電単位あたり CO₂ 負荷 (g-CO₂/kWh) であり、図表 30 は想定 B (液体水素に報告書のマージン使用) の発電単位あたり CO₂ 負荷 (g-CO₂/kWh) である。なお、それぞれの図表においては、左側に多結晶シリコン太陽電池を搭載するケースを整理し、右側にアモルファスシリコン太陽電池を搭載するケースを整理している。

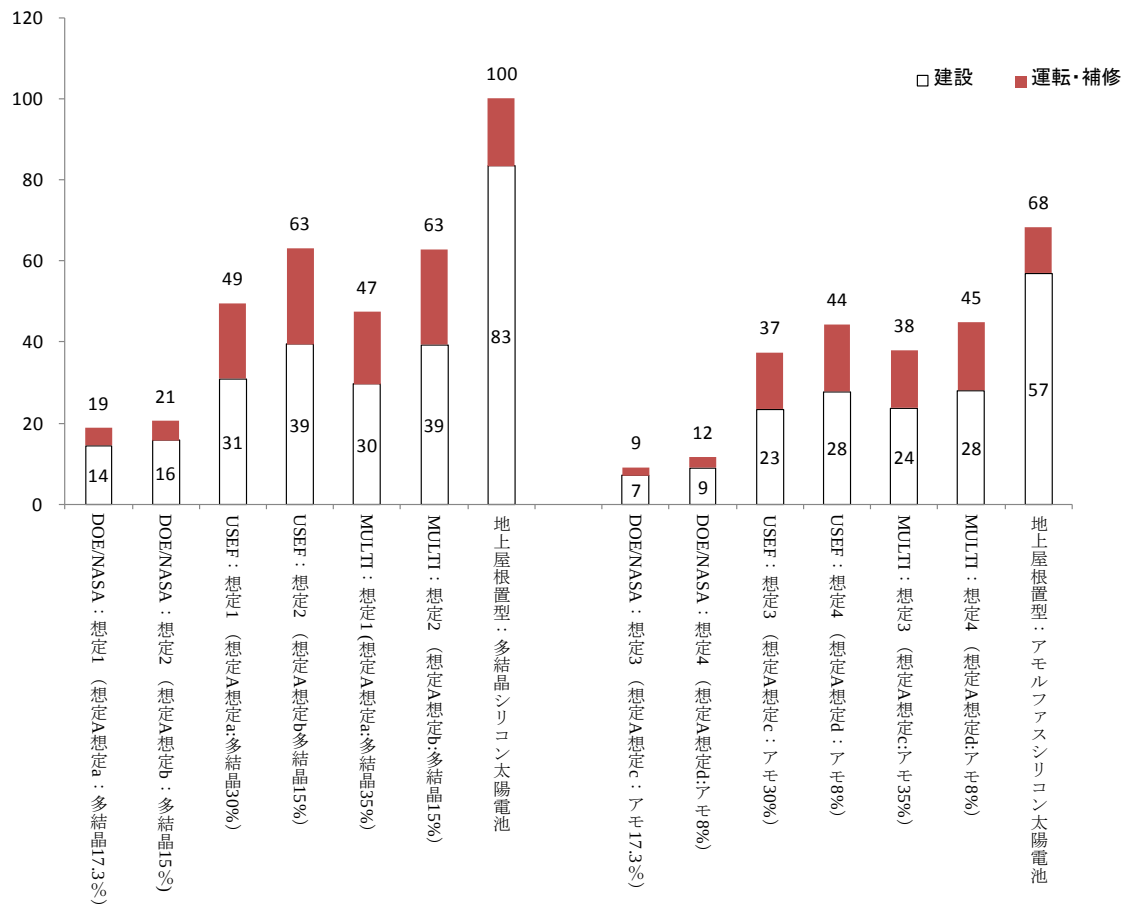
図表 29 では、DOE/NASA リファレンスシステムの単位あたり CO₂ 負荷が非常に低く、地上の太陽光発電の 2 割弱であり、また、USEF テザー型とマルチバステザー型は、地上の太陽光発電の 4 割から 6 割程度となっていることがわかる。また、図表 30 の液体水素の輸送マージンが大きい場合も同様であるが、相対的に液体燃料の使用が少ない DOE/NASA リファレンスシステムを除き、一つ一つの SPS システムは、図表 29 より 1 割程度高い値を示していることがわかる。

そして、USEF テザー型とマルチバステザー型の単位当たり CO₂ 排出量は、ほぼ同じと考えてもよいが、想定 1 で比較すると USEF テザー型の方が高く、想定 2 は同じ、そして、想定 3 と想定 4 で比較すると、マルチバステザー型の方が若干高いというように、単位当たりの値の大小関係が入れ替わるが、その理由については、第 5 節で述べたとおりである。

つぎに、図表 29 と図表 30 を基準として、参考値として、2 つのケースについて、単位あたり CO₂ 排出量 (増減値) を見てみる。

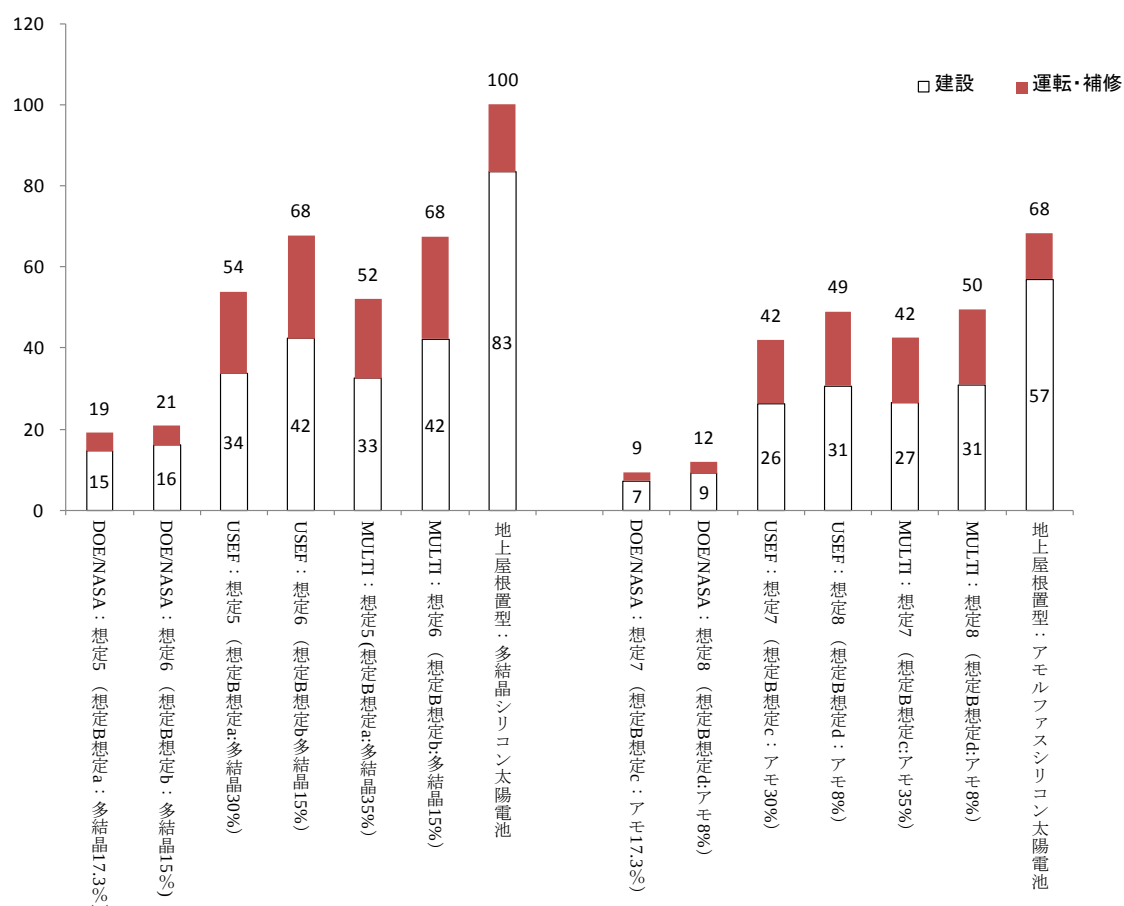
図表 31 は、図表 24b の経常運転・補修活動率をもちいて計測された単位あたり CO₂ 排出量 (増減値) である。図表 29 と図表 30 と同様に、発電量は、図表 7 の「発電能力 (2)」にもとづく値であり、CO₂ 負荷にはインバータ・制御装置が入っている。図表 31 より、補修率が上がれば、当然 CO₂ 排出量も増加するが、その値としては、1g から 3g (g-CO₂/kWh) と読み取れることがわかる。また、図表 32 は、図表 7 の発電能力 (1) をベースにして、インバータを除いて計測した単位あたり CO₂ 排出量である。発電電力量が増え、インバータの製造・設置からの CO₂ 負荷が低下することにより、単位あたり CO₂ 負荷は 1g から 4g (g-CO₂/kWh) 程度低下している。

図表 29 発電単位あたり CO₂ 排出量 (g-CO₂/kWh) : 想定 A (IO マージン)



図表注：SPS の建設および補修活動の CO₂ 排出量から計測される発電単位あたり CO₂ 排出量。棒グラフの上の数値は、建設時と運転・補修を全て含めた総 CO₂ 排出量。棒グラフの中の値は、建設時の CO₂ 排出量。これまでの SPS の CO₂ 負荷計算においては、CO₂ 排出量にインバータの製造過程を含めていたが、発電量を図表 7 の「発電能力 (1)」にもとづいて計測していた。本稿の再計算においてもインバータの製造過程の CO₂ 排出量を含むが、発電量は図表 7 の「発電能力 (2)」にもとづく値で再計算したため、発電単位あたり CO₂ 排出量の値がこれまでより増加することに留意されたい (本稿第 2 節)。なお、地上の太陽光発電は、屋根置き型でインバータ等の電気設備も含んで値であり、中野 (2008) を式 (1) で再評価した値。パワーコンディショナ (製品寿命 10 年) を除いて、耐用年数は 20 年である。

図表 30 発電単位あたり CO₂ 排出量 (g-CO₂/kWh) : 想定 B (報告書マージン)



図表注: SPS の建設および補修活動の CO₂ 排出量から計測される発電単位あたり CO₂ 排出量。棒グラフの上の数値は、建設時と運転・補修を全て含めた総 CO₂ 排出量。棒グラフの中の値は、建設時の CO₂ 排出量。これまでの SPS の CO₂ 負荷計算においては、CO₂ 排出量にインバータの製造過程を含めていたが、発電量を図表 7 の「発電能力 (1)」にもとづいて計測していた。本稿の再計算においてもインバータの製造過程の CO₂ 排出量を含むが、発電量は図表 7 の「発電能力 (2)」にもとづく値で再計算したため、発電単位あたり CO₂ 排出量の値がこれまでより増加することに留意されたい (本稿第 2 節)。なお、地上の太陽光発電は、屋根置き型でインバータ等の電気設備も含んで値であり、中野 (2008) を式 (1) で再評価した値。パワーコンディショナ (製品寿命 10 年) を除いて、耐用年数は 20 年である。

最後に、図表 33 によって、SPS システムの単位あたり CO₂ 排出量を既存の発電設備の値と比較してみると、化石燃料を燃焼させる発電方法とに比べると非常に小さい値であることがわかるが、原子力発電と比較すると、DOE/NASA リファレンスは同程度あり、USEF テザー型とマルチバステザー型は、原子力発電よりやや高いことが見てとれる。

図表 31 経常運転・補修率を変更した場合の発電単位あたり CO₂ 排出量

g-CO ₂ /kWh			
液水：想定A (I0マージン)	増減値	液水：想定B (報告書マージン)	増減値
DOE/NASA：想定1 (想定A_a：多結晶17.3%)	2	DOE/NASA：想定5 (想定B_a：多結晶17.3%)	2
DOE/NASA：想定2 (想定A_b：多結晶15%)	2	DOE/NASA：想定6 (想定B_b：多結晶15%)	2
USEF：想定1 (想定A_a：多結晶30%)	2	USEF：想定5 (想定B_a：多結晶30%)	3
USEF：想定2 (想定A_b：多結晶15%)	3	USEF：想定6 (想定B_b：多結晶15%)	3
MULTI：想定1 (想定A_a：多結晶35%)	2	MULTI：想定5 (想定B_a：多結晶35%)	3
MULTI：想定2 (想定A_b：多結晶15%)	3	MULTI：想定6 (想定B_b：多結晶15%)	3
DOE/NASA：想定3 (想定A_c：アモ17.3%)	1	DOE/NASA：想定7 (想定B_c：アモ17.3%)	1
DOE/NASA：想定4 (想定A_d：アモ8%)	1	DOE/NASA：想定8 (想定B_d：アモ8%)	1
USEF：想定3 (想定A_c：アモ30%)	2	USEF：想定7 (想定B_c：アモ30%)	2
USEF：想定4 (想定A_d：アモ8%)	2	USEF：想定8 (想定B_d：アモ8%)	2
MULTI：想定3 (想定A_c：アモ35%)	2	MULTI：想定7 (想定B_c：アモ35%)	2
MULTI：想定4 (想定A_d：アモ8%)	2	MULTI：想定8 (想定B_d：アモ8%)	2

図表注：図表 24b にもとづいて計測した CO₂ 排出量（図表 29 と図表 30 を基準にした増減値）。レクテナのインバータ・制御装置の耐用年数を地上の太陽光発電の耐用年数で評価し、経常運転・補修率を計測したケースである。本図表左は図表 29 の総排出量、本図表右は図表 30 の総排出量をそれぞれ基準にして、発電単位あたり CO₂ 排出の増減値である。

図表 32 発電ポイントを変更した場合の発電単位あたり CO₂ 排出量

g-CO ₂ /kWh			
液水：想定A (I0マージン)	増減値	液水：想定B (報告書マージン)	増減値
DOE/NASA：想定1 (想定A_a：多結晶17.3%)	-1	DOE/NASA：想定5 (想定B_a：多結晶17.3%)	-1
DOE/NASA：想定2 (想定A_b：多結晶15%)	-1	DOE/NASA：想定6 (想定B_b：多結晶15%)	-1
USEF：想定1 (想定A_a：多結晶30%)	-3	USEF：想定5 (想定B_a：多結晶30%)	-3
USEF：想定2 (想定A_b：多結晶15%)	-4	USEF：想定6 (想定B_b：多結晶15%)	-4
MULTI：想定1 (想定A_a：多結晶35%)	-3	MULTI：想定5 (想定B_a：多結晶35%)	-3
MULTI：想定2 (想定A_b：多結晶15%)	-4	MULTI：想定6 (想定B_b：多結晶15%)	-4
DOE/NASA：想定3 (想定A_c：アモ17.3%)	-1	DOE/NASA：想定7 (想定B_c：アモ17.3%)	-1
DOE/NASA：想定4 (想定A_d：アモ8%)	-1	DOE/NASA：想定8 (想定B_d：アモ8%)	-1
USEF：想定3 (想定A_c：アモ30%)	-2	USEF：想定7 (想定B_c：アモ30%)	-3
USEF：想定4 (想定A_d：アモ8%)	-3	USEF：想定8 (想定B_d：アモ8%)	-3
MULTI：想定3 (想定A_c：アモ35%)	-2	MULTI：想定7 (想定B_c：アモ35%)	-2
MULTI：想定4 (想定A_d：アモ8%)	-3	MULTI：想定8 (想定B_d：アモ8%)	-3

図表注：マイクロ波を直流変換した時点（図表 7 の発電能力（1））にもとづいて計測した CO₂ 排出量（増減値）。CO₂ 排出量には、インバータ制御装置からの CO₂ 排出量は含まない。本図表左は図表 29 の総排出量、本図表右は図表 30 の総排出量をそれぞれ基準にして、発電単位あたり CO₂ 排出の増減値である。

図表 33 既存の発電システムの発電単位あたり CO₂ 負荷

	送電端			受電端 (参考)		
	経常時	建設時	合計	経常時	建設時	合計
LNG	492.4	1.8	494.2	523.8	1.9	525.7
石炭	1004.4	3.1	1007.4	1068.5	3.3	1071.8
石油	722.9	1.8	724.7	769.0	1.9	771.0
原子力	12.4	2.9	15.2	13.1	3.1	16.2

図表注：慶應義塾大学産業研究所環境問題分析グループ（1996）をもとに、式（1）で推計。2000 年価格の最終需要ベクトル作成方法は、中野（2009a）を参照のこと。なお、原子力発電は加圧水型である。また、全ての発電方法において、最終処分、廃棄、再利用等のプロセスは含めていない。そして、SPS システムと比較するために、送電端ベースの値を示している。送配電のロスを考慮した受電端ベースの値も参考値として示す。なお、LNG の液化過程から発生する CO₂ 負荷は、産業環境管理協会（2002）をもちいて別途付加している（本稿第 3 節参照）。

7. エネルギー評価

1970 年代以降、財・サービスの生産活動をエネルギー消費の観点から評価する研究が行われ、産業部門や家計消費のエネルギー投入量が計測され、その指標化が試みられてきた。わが国においても、とくに発電設備にかんして、茅（1980）、科学技術庁（1982）、および内山・山本（1991）等に見られるように、エネルギーの投入量と産出量の観点から、エネルギー収支比（Energy Profit Ratio, Energy Payback Ratio : EPR）、正味エネルギー収支、およびエネルギー回収年数（Energy Payback Time: EPT）等が計測され、発電システムの評価に利用されてきた。そこでは、発電設備が生産するエネルギー＝エネルギー収入と、エネルギーを生産するために必要な投入エネルギー＝エネルギー支出が計測され、エネルギーの収入と支出を比較することによって、発電システムが評価されている。本節では、代表的なエネルギー評価指標として、EPT と EPR に着目する²³。

EPR と EPT の計算においては、第 1 に、発電燃料を含めて計測するかどうか、そして第 2 に、投入・産出するエネルギーを 1 次エネルギーとして評価するか、2 次エネルギーとして評価するかを定めねばならない。

第 1 の論点については、そもそも発電燃料を含めて計測する場合と含めずに計測する場合があり、燃料を含めずに計算するならば²⁴、EPR>1、正味エネルギー収支>0 であることが発電プラントの成立条件であり、EPR が高いシステムや EPT が短いシステムが一般的に優れたシステムとして評価される。SPS は、発電燃料を明示的に必要としないが、化石燃料を使用する既存の発電技術については発電燃料を含めた値と含めない値も計算し、比較検討する。

²³ SPS システム自体も発電技術であることから、最初の SPS システムである DOE/NASA リファレンスシステムについては、DOE/NASA(1980b)、Frantz and Cambel(1981)、Herendeen and Rebitzer(1979)、および Weingartner and Blumenberg(1995)等によって議論されているが、本稿は複数の SPS システムを産業連関計算の枠組みにもとづいて統一的に評価することから、それらの研究については、手法等も含めて別稿にて論じる。

²⁴ ここでは、プラントの建設・運用にかかわる労働者が消費するエネルギーも除いている（内山・山本(1991)）。

第2の論点については、茅（1980）は、いくつかの計測式を示しつつ、基準として、産出エネルギー＝電力は、2次エネルギーで評価し、投入エネルギーは、電力を含めて全て1次エネルギーとして評価しており、また、内山・山本（1991）は、全て1次エネルギーに換算して、比較研究を行う。本稿におけるエネルギー換算値の採用基準は、計算手法として産業連関計算をもちいることに即して判断せねばならない。それは、積み上げ法と比較した産業連関法の特徴は、ある製品の生産過程に必要な財・サービスをモデルの計算過程として追跡していくことであることから、エネルギー指標の計算において全て1次エネルギーの換算値をもちいると、2次エネルギーを投入する部門と1次エネルギーから2次エネルギーに転換する部門において、エネルギー量を二重計算することになるため、2次エネルギーは1次エネルギーに換算せずに計算する。したがって、2次エネルギーを生産するための直接的なエネルギー量は、2次エネルギーを投入する部門ではなく、エネルギー転換部門に計上される。なお、電力の2次エネルギーとしての発熱量は、1kWh=3600kJとしている。

つぎに具体的な計算式を述べる。EPRとEPTにおいて、発電燃料を含まない場合は、

$$\bullet \text{エネルギー収支比 (EPR)} = (E_{\text{out}} \times n) / (E_{\text{in}_1} + E_{\text{in}_2} \times n) \quad (3)$$

$$\bullet \text{エネルギー回収年数 (EPT)} = E_{\text{in}_1} / (E_{\text{out}} - E_{\text{in}_2}) \quad (4)$$

ただし、

E_{out} : 発電設備の年間発電量 (エネルギー収入/year)

E_{in_1} : 発電システムの建設時の投入エネルギー (エネルギー支出)

E_{in_2} : 発電設備の運用・修繕補修時の投入エネルギー(エネルギー支出/year)

n : 発電システムの耐用年数

である²⁵。

つぎに、式(3)と式(4)のエネルギー指標の計算方法に産業連関計算を適用して具体化する。はじめに、図表9の環境分析用産業連関表を推計する過程において、データベース化されているエネルギー統計より、各産業部門の生産額1単位あたりのエネルギー消費係数(式(5)と式(6)の e)を作成し、つぎに、式(3)と式(4)における E_{in_1} と E_{in_2} をつぎのように計算する。

$$E_{\text{in}_1}' = e(I - A)^{-1}F', \quad (5)$$

$$E_{\text{in}_2}' = e(I - A)^{-1}F' \quad (6)$$

²⁵計算式自体にバリエーションがあり、それについては、茅（1980）を参照されたい。今回の計算式は、内山・山本（1991）を参照しているが、本文中に述べたように、産業連関計算をベースに計測するため、投入エネルギーを全て1次エネルギーに換算しているわけではない。また、エネルギー収支比と回収年において発電燃料を含める場合は、つぎのとおりである。

$$\bullet \text{エネルギー収支比 (EPR)} = (E_{\text{out}} \times n) / (E_{\text{in}_1} + E_{\text{in}_2} \times n + E_{\text{in}_3} \times n) \quad (3)'$$

$$\bullet \text{エネルギー回収年数 (EPT)} = (E_{\text{in}_1} + E_{\text{in}_3} \times n) / (E_{\text{out}} - E_{\text{in}_2}) \quad (4)'$$

ただし、

E_{in_3} : 発電用燃料のエネルギー(エネルギー支出 / year)

なお、エネルギーについての他の指標としては、正味エネルギー収支 = $(E_{\text{out}} \times n) - (E_{\text{in}} + E_{\text{in}_2} \times n)$ 等がある。

ただし、

e : 国内生産1 単位あたりのエネルギー消費量（エネルギー消費係数）行ベクトル

$E_in_1^l$: 想定 l の建設時の直接間接のエネルギー投入量

$E_in_2^l$: 想定 l の運転・補修の直接間接のエネルギー投入量（1.0%と1.5%）

F^l : 想定 l の最終需要ベクトル（式(1)の $f^{k,l}$ を構造物 k について集計したベクトル $\sum_k f^{k,l}$ ）,

なお、エネルギー収支の計算における経常運転・補修活動については、DOE/NASA リファレンスは 1.0%、USEF テザー型は 1.5%、およびマルチバステザー型は 1.5%の補修率を外生的に挿入している。また、発電量は、図表 7 の「発電能力（2）」にもとづいて評価している。

計測の結果は、図表 34 であり、左側が想定 A（液体水素に IO 表のマージン利用）、右が想定 B（液体水素の報告書のマージン額を利用）であり、さらに太陽電池に関する想定 a から d に区別している。なお、地上の太陽光発電の計測値は、式（5）と（6）に地上の太陽光発電の最終需要ベクトルを設定し、式（3）と（4）で評価した値である。

図表 34 より、DOE/NASA リファレンスシステムは、EPR は非常に高く、そして、EPT は非常に短く、優れたエネルギー生産システムとして計算されている。その一方、USEF テザー型とマルチバステザー型は、EPR は地上の太陽光発電と同等かやや良好であるが、EPT がより長い値を示している。それは、SPS システムが建設時に大量のエネルギーを必要とすることから、投入エネルギーの回収に時間がかかることを示しているが、その一方、SPS システムの耐用年数（USEF テザー型とマルチバステザー型は 40 年）から考えると、耐用年数の半分以下でエネルギーを回収していることもまた示されている。

最後に、太陽光発電以外の既存の発電システムについても、EPT と EPR を参考値として計測する。なお、今回の計算では、経常発電に必要な化石燃料を含めたケースも参考のために示しておく。

図表 35 より、経常運転時の燃料を含めないならば、EPT は非常に短く、短期間で投入エネルギーを回収しており、また、EPR は DOE/NASA より低い、他の SPS システムより優位性がある。ただし、発電効率からもわかるように、経常運転時の燃料を含めて計算すると、指標が悪化することも明らかであって、多くの論者がエネルギー分析を行う際に述べていることではあるが、自然エネルギーと比較する場合には、注意が必要であろう。

図表 34 EPR と EPT 比較：SPS システムと地上の太陽光発電

多結晶シリコンタイプ	想定 A	EPR	EPT	想定 B:	EPR	EPT
	液水 IO マージン			液水報告書マージン		
DOE/NASA リファレンス	想定 1 (想定 a: 多結晶 17.3%)	9.2	2.6	想定 5 (想定 a: 多結晶 17.3%)	9.1	2.6
DOE/NASA リファレンス	想定 2 (想定 b: 多結晶 15%)	8.4	2.8	想定 6 (想定 b: 多結晶 15%)	8.3	2.9
USEF テザー型	想定 1 (想定 a: 多結晶 30%)	2.7	10.6	想定 5 (想定 a: 多結晶 30%)	2.6	11.4
USEF テザー型	想定 2 (想定 b: 多結晶 15%)	2.2	13.5	想定 6 (想定 b: 多結晶 15%)	2.1	14.3
マルチバステザー型	想定 1 (想定 a: 多結晶 35%)	2.8	10.3	想定 5 (想定 a: 多結晶 35%)	2.6	11.0
マルチバステザー型	想定 2 (想定 b: 多結晶 15%)	2.2	13.5	想定 6 (想定 b: 多結晶 15%)	2.1	14.3
地上屋根置	多結晶	1.8	10.4			
アモルファスシリコンタイプ						
DOE/NASA リファレンス	想定 3 (想定 c: アモ 17.3%)	19.7	1.2	想定 7 (想定 c: アモ 17.3%)	19.3	1.2
DOE/NASA リファレンス	想定 4 (想定 d: アモ 8%)	15.6	1.5	想定 8 (想定 d: アモ 8%)	15.3	1.5
USEF テザー型	想定 3 (想定 c: アモ 30%)	3.4	8.3	想定 7 (想定 c: アモ 30%)	3.2	9.0
USEF テザー型	想定 4 (想定 d: アモ 8%)	3.0	9.5	想定 8 (想定 d: アモ 8%)	2.8	10.2
マルチバステザー型	想定 3 (想定 c: アモ 35%)	3.3	8.4	想定 7 (想定 c: アモ 35%)	3.1	9.1
マルチバステザー型	想定 4 (想定 d: アモ 8%)	3.0	9.7	想定 8 (想定 d: アモ 8%)	2.8	10.4
地上屋根置	アモルファス	2.9	6.0			

図表注：式 (3) と (4) に式 (5) と (6) の産業連関計算を適用し、計測。左が想定 A、右が想定 B。上が多結晶シリコンタイプ、下がアモルファスシリコンタイプ。発電量は、図表 7 の「発電能力 (2)」にもとづいて計測。なお、屋根置太陽光発電は、図表 29 と図表 30 と同様に、屋根置き型でインバータ等の電気設備も含んだ値であり、補修率は年 1% である。

図表 35 既存発電の EPR と EPT

	経常燃料なし		経常燃料込み	
	EPR	EPT	EPR	EPT
LNG	9.7	0.3	0.2	137.7
石炭	7.2	0.5	0.2	164.8
石油	7.4	0.3	0.2	150.8
原子力	12.2	0.3	0.3	100.5

図表注：図表 33 と同じ最終需要ベクトルを使用し、式(3)と(4)に、式(5)と(6)を利用して計測。既存発電の経常エネルギーは、電力ベクトル及び電力の排出係数から発電燃料分を控除して誘発計算を行い、その値を経常エネルギー分とし、同様の操作を行わずに誘発計算した値から経常エネルギーを差し引いた値を燃料分とした。なお、経常燃料込みの計算は、脚注 25 の式(3)' と(4)' に産業連関計算を適用した結果である。そして、SPS システムと比較するために、すべての値は送電端ベースの値である。また、LNG の液化過程に必要なエネルギーは、産業環境管理協会 (2003) をもちいて別途付加している (本稿第 3 節参照)。

8.小括

本研究は、われわれが行ってきた SPS 研究を可能な限り統一的な枠組みに再整理し、また、CO₂ 負荷計算だけでなくエネルギー計算の結果も整理した。SPS システムは、建設時に大量の CO₂ を排出するとはいえ、発電単位あたり CO₂ 排出量でみると、化石燃料を使用する既存の発電システムより CO₂ 負荷が低いこと、そして、構造タイプの異なる SPS システムが提案されているとはいえ、「宇宙で発電した電力を地上に送り、利用する」という発想にもとづくならば、その発電システムの単位あたり CO₂ 負荷は、ほぼ 2 桁 (g-CO₂/kwh) であることを再確認した。また、エネルギー評価の結果も、EPT と EPR の計算結果を見る限り、良好といえることも確認した。その一方、社会的な「常識」から類推するならば、新技術や未来技術の高い技術特性は、それを実現するために高いコストを必要とするかと思われる。すでに SPS の発電コストの計測を進めているが、その値は、既存の発電設備より高いことが明らかになりつつあり、本稿における CO₂ 負荷の計算とエネルギー指標の計測とあわせて、SPS の経済的な側面も考察することが必要であろう。そして、その過程において、われわれの評価基準としてきた経済統計等についても、新たに価格と技術情報を整理していくことも必要であろう。

われわれは社会科学系研究者であるため、短期間に高頻度で再利用することが可能な輸送システムの開発可能性や、巨大システムそのものの実現可能性、また、マイクロ波に関連する人的影響等について議論することには困難がある。したがって、われわれの SPS システムについての評価結果は、限られた一側面であることを認めざるを得ないが、たとえそれが全体像の一部であるとしても、補完的な意義があるとするならば、幸いである。

補章：軌道間輸送機と再使用型低軌道輸送機の最終需要ベクトルの作成について

宇宙輸送機の製造過程からの CO₂ 負荷を計算するためには、それぞれの最終需要ベクトルを作成しなければならない。しかし、詳細な製造データがないため、1.DOE/NASA リファレンスシステム (DOE/NASA(1978)) に掲載される宇宙輸送機の情報と 2.産業連関表の航空機部門 (IO コード：362201) の中間投入ベクトルを利用して、最終需要ベクトルを作成する。

以下の説明においては、マルチバステザー型 SPS で使用する宇宙輸送機の最終需要ベクトルの作成方法を例とする²⁶。再使用型低軌道輸送機と軌道間輸送機の製造過程の推計方法は同一であることから、ここでは、再使用型低軌道輸送機を例として、その作成手順をまとめる。

手順 1: DOE/NASA リファレンスシステムには、地上から低軌道に貨物と人員を輸送する「低軌道貨物輸送機」と「低軌道人員輸送機」、低軌道から静止軌道に貨物と人員を輸送する「軌道間貨物輸送機」と「軌道間人員輸送機」の素材情報が掲載されている。今回のマルチバステザー型 SPS の建設には、作業人員を宇宙に送ることを考えていないため、DOE/NASA リファレンスシステムの「低軌道貨物輸送機」と「軌道間貨物輸送機」に着目する。そして、そこに掲載される投入素材：「セラミック」、「ステンレス」、「銅」、「アルミ」、「チタン」、「強化プラスチック」を「宇宙輸送機素材部門」とよぶことにする²⁷。

²⁶ 推計のベースとして利用する DOE/NASA リファレンスシステムの輸送機については、手順 2 の $\mathbf{r}^{\text{宇宙輸送機}}$ そのものが、DOE/NASA リファレンスシステムに掲載される輸送機情報である（ただし、単価を利用した金額評価済み）。

²⁷ DOE/NASA(1980), p.11-13. また、リファレンスシステムでは「ガラス」も使用されるが、今回のマルチバステ

手順 2: 「再使用型低軌道輸送機(マルチバステザー)」を「低軌道貨物輸送機(DOE/NASA)」に対応づけ、DOE/NASA の物量構成比に「再使用型低軌道輸送機(マルチバステザー)」の総重量(200t)をかけ、物量構成を計測し、単価をかける²⁸。それを $\mathbf{r}^{\text{宇宙輸送機}}$ とよぶことにす。

手順 3: 「再使用型低軌道輸送機(マルチバステザー)」の製造過程が産業連関表の航空機の製造過程に類似しているとみなし、航空機の間接投入ベクトルを $\mathbf{f}^{\text{航空機}}$ とし、 $(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}^{\text{航空機}}=\mathbf{x}^{\text{航空機}}$ を計算する²⁹。

手順 4:

$(\mathbf{f}^{\text{航空機}}$ の「宇宙輸送機素材部門」の合計値)/($\mathbf{x}^{\text{航空機}}$ の「宇宙輸送機素材部門」の合計値) = 係数1
を計算する

手順 5:

$(\mathbf{f}^{\text{航空機}}$ の「宇宙輸送機素材部門」以外の合計値)/($\mathbf{f}^{\text{航空機}}$ の「宇宙輸送機素材部門」の合計値)
= 係数2
を計算する。

手順 6: $\mathbf{r}^{\text{宇宙輸送機}} \times \text{係数 1}$ を計算し、 $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機宇宙輸送機素材部}}$ とする。

手順 7: $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機宇宙輸送機素材部}}$ の合計値 $\times$ 係数 2 を計算し、 $\mathbf{f}^{\text{航空機}}$ の宇宙輸送機素材部門以外の投入構成比にかけ、 $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機宇宙輸送機素材部}}$ とする。

手順 8: $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機宇宙輸送機素材部}}$ と $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機宇宙輸送機素材部}}$ をたし、 $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機}}$ とする。この $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機}}$ が、「再使用型低軌道輸送機(マルチバステザー)」の最終需要ベクトルである。

この推計方法の概要は、 $\mathbf{x}^{\text{航空機}}$ の「宇宙輸送機素材部門」の合計値と $\mathbf{f}^{\text{航空機}}$ の「宇宙輸送機素材部門」の

合計値の比率にもとづいて、 $\mathbf{r}^{\text{宇宙輸送機}}$ を最終需要ベクトルに割戻して $\mathbf{f}^{\text{宇宙輸送機宇宙輸送機素材部}}$ とし

ザーでは使用しないため、「宇宙輸送機素材部門」から除外した。なお、DOE/NASA リファレンスシステムにおいて、ガラスを使用する輸送機は、ガラスを入れたままにしている。

²⁸ 構造体だけの重量であり、推進剤や貨物を含まない重量である。

²⁹ $\mathbf{f}^{\text{航空機}}$ において、マルチバステザー型の宇宙輸送機に直接的には使用しない「ガラス」と「ジェット燃料」、そしてマイナス投入される「鉄くず」を除いている。

(手順 6)、 $f_{\text{航空機}}$ の「宇宙輸送素材部門」とそれ以外の比率によって、 $f_{\text{宇宙輸送機}}$ $f_{\text{宇宙輸送機素材部門}}$ を作成したことになる。

DOE/NASA は、宇宙輸送機の製造に直接的間接的に必要な素材情報を収集しようとしていたが、結果として公表された情報に制約があることを認めている。しかし、DOE/NASA 以外から宇宙輸送機を建設するための情報を入手することが出来なかったことから、一方では、直接間接的な情報として、他方では、直接的な投入情報として、DOE/NASA の情報を操作的にもちいた。

また、今回のマルチバステザー型 SPS の輸送機の構造体の重量は、想定値として明示されている(再使用型低軌道輸送機は 200t。軌道間輸送機は 43t)。したがって、輸送機の推計過程において、その情報を崩すことになるが、 $f_{\text{宇宙輸送機}}$ を今回のような推計に依存せずに計測することは、今後の課題としたい。

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.(1978) *Satellite Power System*, DOE/ER-0023.
- ・ DOE and NASA, U.S.(1980a) *Preliminary Material Assessment for the Satellite Power System (SPS)*, DOE/ER-0038.
- ・ DOE and NASA, U.S. (1980b) *Comparative Analysis of Net Energy Balance of Satellite Power Systems (SPS) and Other Energy Systems*, DOE/ER-0056.
- ・ DOE and NASA, U.S.(1980c) *Satellite Power Systems (SPS) Space Transportation Cost Analysis and Evaluation*, DOE/ER-0086.
- ・ Frantz,C.C. and Cambel,A.B.(1981) “Net Energy Analysis of Space Power Satellites,” *Energy*, vol.6, pp.485-501.
- ・ Glaser,P.E.(1968) “Power from the sun,” *Science*, vol.162, pp.857-861.
- ・ Herendeen and Rebitzer(1979)’Energy Analysis of the Solar Power Satellite,’ *Science*, vol.205 No.4405, pp.451-454.
- ・ Sasaki,S., Tanaka,K. Higuchi,K., Okuizumi,N., Kawasaki,S., Shinohara,M. and Ishimura, K. (2006a) “Engineering Research for New Tethered Solar Power Satellite” *Proceedings of 25th ISTS*, pp.780-785.
- ・ Sasaki, S., Tanaka, K., Higuchi, K., Okuizumi, N., Kawasaki, S. Shinohara, N. Senda, K. and Ishimura, K.(2006b) “A new concept of solar power satellite:Tetherd-SPS” , *Acta Astronautica*, no.60, pp.153-165.
- ・ Science Applications International Corporation (SAIC), Futron Corporation and NASA (1997) *Space Solar Power : A Fresh Look at the Feasibility of Generating Solar Power in Space for Use on Earth*, Report Number SAIC-97/1005, Contract NAS3-26565, Task Order 9.
- ・ Weingartner and Blumenberg(1995) “Solar power satellite life-cycle energy recovery consideration,” *Acta Astronautica* vol.35 no.9-11, pp.591-599.
- ・ NEDO(1994) 『太陽光発電システム実用化技術開発・太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発・宇宙発電システムに関する調査研究(平成 5 年度度委託業務成果報告書)』三菱総合研究所。

- ・ 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 (1997)「太陽発電衛星の CO₂ 負荷 (3) レクテナ」『第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム』宇宙科学研究所 pp.122-125。
- ・ 朝倉啓一郎・早見均・溝下雅子・中村政男・中野諭・篠崎美貴・鷺津明由・吉岡完治(2001)『環境分析用産業連関表』慶應義塾大学出版会。
- ・ 朝倉啓一郎・小林裕太郎・吉岡完治(2003)「USEF 型 SSPS の CO₂ 負荷」『第 6 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム 講演要旨集』 pp.117-122。
- ・ 朝倉啓一郎・中野諭 (2008)「マルチテザー型 SPS の CO₂ 負荷計算」吉岡完治・松岡秀雄・編著『宇宙太陽発電衛星のある地球と将来』 pp.89-148、慶應義塾大学産業研究所。
- ・ 朝倉啓一郎・中野諭 (2009)「マルチバステザー型 SPS の CO₂ 負荷計算」吉岡完治・松岡秀雄・早見均編著『宇宙太陽発電衛星のある地球と将来』 pp.89-148、慶應義塾大学出版会。
- ・ 内山洋司・山本博巳 (1991)「発電プラントのエネルギー収支分析」電力中央研究所『研究報告』Y90015。
- ・ 宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループ (1993)『SPS2000 概念計画書』。
- ・ 大橋永樹・松橋隆治・石谷久・吉田好邦・疋田 浩一(2000)「SPS2000 のライフサイクルアセスメント」*KEO Discussion Paper*, no.G-114。
- ・ 大橋永樹・松橋隆治・石谷久・吉田好邦・疋田浩一・吉岡完治(2001)「宇宙太陽発電衛星の CO₂ 負荷－レファレンスシステムとニューコンセプト－」*KEO Discussion Paper*, no.G-127。
- ・ 化学工学会第 1 種研究会(1995) 『太陽光発電技術の評価Ⅱ』。
- ・ 茅陽一編著 (1980)『エネルギー・アナリシス』電力新報社。
- ・ 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。
- ・ 経済産業省経済産業政策局調査統計部(2001) 『機械統計年報』経済産業調査会。
- ・ 経済調査会『積算資料』経済調査会。
- ・ 佐々木進 (2009)「SPS のデザインとシステム技術」吉岡完治・松岡秀雄・早見均編著『宇宙太陽発電衛星のある地球と将来』 pp.45-59、慶應義塾大学出版会。
- ・ 佐々木進 (2011)『宇宙太陽光発電に挑む』NHK 出版。
- ・ 産業環境管理協会 (2002)『製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発 成果報告書』平成 13 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託。
- ・ 産業環境管理協会 (2003)『製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発 成果報告書』平成 14 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託。
- ・ 柴田徹志・松岡秀雄 (1997a)「太陽発電衛星の CO₂ 負荷 (1) 輸送機など」『第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム』宇宙科学研究所 pp.112-116。
- ・ 柴田徹志・松岡秀雄 (1997b)「太陽発電衛星の CO₂ 負荷 (5) シミュレーション」『第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム』宇宙科学研究所 pp.131-135。
- ・ 総務省(2004) 『平成 12 年産業連関表』全国統計協会連合会。
- ・ 菅幹雄 (1997)「太陽発電衛星の CO₂ 負荷 (4) 総合効果」『第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム』

宇宙科学研究所 pp.126-130。

・塚本忠嗣・小出文隆・内山洋司「時系列産業連関表による各種電源のライフサイクル分析」『エネルギー・資源』 vol.29 no. 3。

・中野諭(2005)「平成 12 年環境分析用産業連関表」*KEO Discussion Paper*, no.98。

・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。

・中野諭(2007)「補助金制度による温暖化対策の評価」『産業連関』 vol.15, no.1, pp.24-34。

・中野諭・早見均・中村政男・鈴木将之(2008)『環境分析用産業連関表とその応用』慶應義塾大学出版会。

・中野諭 (2009a)「マルチバステザー型 SPS の雇用へ与える影響評価」吉岡完治・松岡秀雄・早見均編著『宇宙太陽発電衛星のある地球と将来』 pp.149-170、慶應義塾大学出版会。

・中野諭 (2009b)「平成 17 年環境分析用産業連関表」*KEO Discussion Paper*, no.117。

・長友信人 (1996)「太陽発電衛星によるクリーン・エネルギーの実現」松岡秀雄編著『地球環境の哲人』ミオシン出版、pp.243-278。

・成尾芳博・稲谷芳文・太田豊彦(1996)「高頻度の運行を行う完全再使用型ロケットの燃料補給システムについて」『宇宙輸送シンポジウム』 pp.82-85。

・野村浩二 (1997)「太陽発電衛星の CO₂ 負荷 (2) 太陽電池」『第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム』宇宙科学研究所 pp.117-121。

・橋本博 (1980)「宇宙衛星発電 (SPS) 方式の展望」『電力中央研究所報告』調査報告：180021。

・橋本博 (1983)「宇宙衛星発電方式 (SPS) の受電設備洋上立地と発電可能電力の検討」『電力中央研究所報告』調査報告：183005。

・本藤祐樹・内山洋司(1993)「火力発電プラントの環境対策コスト分析」『電力中央研究所報告』Y92009。

・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。

・松岡秀雄 (1997)「地球環境問題と太陽発電衛星」『第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム』宇宙科学研究所 pp.107-111。

・松本紘 (2011)『宇宙太陽光発電所』ディスカバー・トゥエンティワン。

・山田興一・小宮山宏 (2002)『太陽光発電工学』日経 BP 社。

・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。

・吉岡完治・菅幹雄・野村浩二・朝倉啓一郎(1998c)「環境分析用産業連関表の応用 (9) 宇宙太陽発電衛星の CO₂ 負荷」『産業連関』 vol.8 no.2 pp.28-44。

・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。

CO₂ Emission and Energy Analysis on Solar Power Satellite

Keiichiro Asakura

Faculty of Economics , Ryutsu Keizai University

Satoshi Nakano

The Japan Institute for Labour Policy and Training

Abstract

The authors are focusing on the solar power satellite (SPS) as an alternative power generation technology for the future. SPS technology is based on satellites with photovoltaic (PV) panels in geostationary orbit (GEO). The SPS continuously generates electricity regardless of the weather or time of day and transmits this power to the Earth's surface. The SPS does not use fossil fuel for electricity production and can supply large amounts of electric energy.

Therefore, the authors elucidate the multiple aspects of the SPS system through common evaluation methods and an I-O database. In this paper, CO₂ emission and the energy payback time (EPT) and energy profit ratio (EPR) of the SPS system are calculated as environmental-energy indicators. Then the SPS system is compared with various types of power generation from the various viewpoints

The results show that the SPS system is superior in terms of CO₂ emission and energy, then we are conducting the further calculation to confirm the economic aspect of SPS.

Keywords

Solar Power Satellite (SPS) , CO₂ Emission, Energy Payback Time (EPT),
Energy Profit Ratio or Energy Payback Ratio (EPR), Input-Output Analysis,
Input-Output Table for Environmental Analysis